



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Ivan Kaštelan

**Prilog rešenju problema automatske funkcionalne
provere uređaja potrošačke elektronike zasnovanih
na ekranu osetljivom na dodir**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2014



UNIVERZITET U NOVOM SADU • FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, RBR :		
Identifikacioni broj, IBR :		
Tip dokumentacije, TD :	monografska dokumentacija	
Tip zapisa, TZ :	tekstualni štampani materijal	
Vrsta rada, VR :	doktorska disertacija	
Autor, AU :	Ivan Kaštelan	
Mentor, MN :	prof. dr Nikola Teslić	
Naslov rada, NR :	Prilog rešenju problema automatske funkcionalne provere uređaja potrošačke elektronike zasnovanih na ekranu osetljivom na dodir	
Jezik publikacije, JP :	srpski	
Jezik izvoda, JL :	srpski	
Zemlja publikovanja, ZP :	Srbija	
Uže geografsko područje, UGP :	Vojvodina	
Godina, GO :	2013	
Izdavač, IZ :	Fakultet tehničkih nauka	
Mesto i adresa, MA :	21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6	
Fizički opis rada, FO : <small>(poglavlja/strana/citata/tabela/slika/grafika/priloga)</small>	10/153/101/18/62/0/0	
Naučna oblast, NO :	elektrotehničko i računarsko inženjerstvo	
Naučna disciplina, ND :	računarska tehnika i računarske komunikacije	
Predmetna odrednica / Ključne reči, PO :	ekrani osetljivi na dodir, električna stimulacija ekrana, funkcionalna verifikacija uređaja, izdvajanje slike, otkrivanje funkcionalnih grešaka	
UDK		
Čuva se, ČU :	Biblioteka Fakulteta tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad	
Važna napomena, VN :		
Izvod, IZ :	Predmet istraživanja ove doktorske disertacije je pronalaženje rešenja problema automatske funkcionalne provere uređaja potrošačke elektronike koji su zasnovani na ekranu osetljivom na dodir. Osnovni izazov je pronaći efikasan i pouzdan način električne stimulacije ekrana, bez mehaničke pobude. Drugi izazov je definisati algoritam za proveru sadržaja na ekranu posmatrajući ga sa stanovišta percepcije korisnika, pomoću kamere. Rezultat istraživanja je integrisani sistem sa stimulationsom pločom koja kontrolisano pobuđuje ekran električnim stimulusom, bez mehaničkih pokreta. Provera uređaja se vrši po principu crne kutije. Cilj sistema je proveriti da li se uređaj i njegova programska podrška ponašaju očekivano.	
Datum prihvatanja teme, DP :	15.07.2013	
Datum odbrane, DO :		
Članovi komisije, KO :	Predsednik: prof. dr Vladimir Kovačević	
	Član: prof. dr Miodrag Temerinac	
	Član: prof. dr Miroslav Popović	
	Član: prof. dr Jovan Đorđević	
	Član, mentor: prof. dr Nikola Teslić	



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	monograph documentation
Type of record, TR :	textual printed material
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Ivan Kaštelan
Mentor, MN :	prof. Nikola Teslić, PhD
Title, TI :	A Contribution to Solving the Problem of Automated Functional Verification of Consumer Electronic Devices with Touchscreens
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2013
Publisher, PB :	Faculty of Technical Sciences
Publication place, PP :	21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendices)	10/153/101/18/62/0/0
Scientific field, SF :	electrical and computer engineering
Scientific discipline, SD :	computer engineering and communications
Subject/Key words, S/KW :	touchscreens, electric stimulation of touchscreens, functional verification, image extraction, functional failure detection
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	Topic of research of this PhD thesis is finding the solution for the mentioned problem of automated functional verification of consumer electronics devices with touchscreens. The main challenge is to find a reliable and efficient way of electric stimulation of touchscreens, without mechanical movements. The second challenge is to design an algorithm for analysis of content on the touchscreen, observing it from the user's perception, with the help of a camera. Result of the research is the integrated system with the stimulation board for controllable electrical stimulation of touchscreens, without mechanical movements. The integrated system verifies whether the device and its software behave as expected.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	15 July 2013
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: prof. Vladimir Kovačević, PhD
	Member: prof. Miodrag Temerinac, PhD
	Member: prof. Miroslav Popović, PhD
	Member: prof. Jovan Djordjević, PhD
	Member, Mentor: prof. Nikola Teslić, PhD
	Mentor's sign

Sažetak

Kapacitivni ekrani osetljivi na dodir su postali standard u industriji pametnih mobilnih telefona, tableta itd. Oni otkrivaju dodir korisnika skenirajući površinu ekrana i tražeći distorzije u električnom polju koje nastaju usled dodira ekrana. Kada se takva distorzija otkrije, senzori otkrivaju koordinate promenjenog električnog polja. Ova informacija se šalje kontroleru koji je obrađuje i računa koordinate dodira. Električno polje se menja uvođenjem prsta, koji je provodna površina, unutar električnog polja formiranog od strane elektronike ekrana osetljivog na dodir. Provodna površina vrši distorziju električnog polja što dovodi do promene kapacitivnosti koju mere senzori na ekranu osetljivom na dodir. Promena kapacitivnosti se detektuje od strane senzora i prevodi u koordinate dodira.

Sve veći zahtevi korisnika za uređajima zasnovanim na ekranu osetljivom na dodir dovodi do sve veće potrebe za efikasnim, brzim i pouzdanim sistemima za njihovu funkcionalnu proveru u fabrici, nakon što su napravljeni. Da bi postigao veliki nivo efikasnosti, brzine i pouzdanosti, ovaj sistem treba biti što više automatizovan, čime se, sem gore navedenih prednosti, smanjuje i cena održavanja sistema.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije je pronalaženje rešenja navedenog problema automatske funkcionalne provere uređaja potrošačke elektronike koji su zasnovani na ekranu osetljivom na dodir. Osnovni izazov je pronaći efikasan i pouzdan način električne stimulacije ekrana, bez mehaničke pobude. Drugi izazov je definisati algoritam za proveru sadržaja na ekranu posmatrajući ga sa stanovišta percepcije korisnika, pomoću kamere.

U uvodnom poglavlju je dat pregled zadatka istraživanja. Poglavlje 2 daje pregled dosadašnjih dostignuća u istraživanju u ovoj oblasti i metrika kojim će se proveriti kvalitet predloženog rešenja. U poglavljima 3 i 4 izveden je i opisan predloženi princip stimulacije ekrana osetljivih na dodir i stimulative ploče. Poglavlje 5 daje definiciju algoritma za proveru ispravnosti sadržaja na ekranu uređaja, sa stanovišta percepcije korisnika. U poglavlju 6 su dva doprinosa disertacije integrisana u finalni proizvod – sistem za proveru rada uređaja sa ekranima osetljivim na dodir. Poglavlje 7 definiše predlog metodologije provere ovih uređaja. U poglavljima 8 i 9 dati su eksperimentalni rezultati, a poglavlje 10 daje zaključke i pravce daljeg istraživanja.

Rezultat istraživanja je integrisani sistem sa stimulative pločom koja kontrolisano pobuđuje ekran električnim stimulusom, bez mehaničkih pokreta. Provera uređaja se vrši po principu crne kutije – uređaj se posmatra kao zatvoren i koristi na isti način na koji bi ga koristili i krajnji korisnici. Cilj sistema je proveriti da li se uređaj i njegova programska podrška ponašaju očekivano.

Abstract

Capacitive touchscreens have become a standard in the industry of smartphones, tablets, etc. They detect the user's touch by continuously scanning the screen surface and looking for distortions in the electric field which appear during the touch. When such a distortion is detected, sensors detect the coordinates of the altered electric field. This information is sent to the controller which calculates the touch coordinates. Electric field changes by the introduction of the user's finger, which is conductive, within the electric field formed by device's electronics. Conductive finger distorts the electric field which leads to the capacitance change measured by screen's sensors. Capacitance change is detected by sensors and transformed into touch coordinates.

Increasing demand for consumer electronics devices with touchscreens has led to the increasing demand for fast, reliable and efficient systems for their verification on the final production line, after they are built. In order to achieve the high level of efficiency, speed and reliability, this system needs to be fully automatized, which in turn brings its lower price.

Topic of research of this PhD thesis is finding the solution for the mentioned problem of automated functional verification of consumer electronics devices with touchscreens. The main challenge is to find a reliable and efficient way of electric stimulation of touchscreens, without mechanical movements. The second challenge is to design an algorithm for analysis of content on the touchscreen, observing it from the user's perception, with the help of a camera.

Introductory chapter gives the definition of the thesis assignment. Chapter 2 summarizes the related work in this area and metrics which will be used to evaluate the proposed solution. Chapters 3 and 4 theoretically derive models of electrical stimulation of touchscreens and describe the stimulation board. Chapter 5 gives the design of an algorithm for analysis of content on touchscreen from user's perception. In chapter 6, two outcomes of this thesis are integrated into a system. Chapter 7 suggests the methodology for verification of touchscreen-based devices. Experimental results are summarized in chapters 8 and 9, while the chapter 10 gives the conclusions and paths for future research.

Result of the research is the integrated system with the stimulation board for controllable electrical stimulation of touchscreens, without mechanical movements. Verification of devices is performed by black-box methodology – the device is finalized and used just as the end-users would use it. The integrated system verifies whether the device and its software behave as expected.

Sadržaj

1. Uvod	3
2. Pregled literature i metrika	9
3. Ekрани osetljivi na dodir	24
3.1. Rezistivni ekрани osetljivi na dodir	26
3.2 Kapacitivni ekрани osetljivi na dodir	27
3.3 Model jednostrukog dodira kapacitivnog ekrana	29
3.4 Model višestrukog dodira kapacitivnog ekrana	36
3.5 Osetljivost kapacitivnih ekrana osetljivih na dodir	37
4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir	40
4.1 Stimulacija ekrana ortogonalnim provodnim linijama	40
4.2 Stimulacija ekrana uvođenjem uzemljenog provodnika	42
4.3 Stimulaciona ploča	46
4.4 Kontrola stimulacione ploče	48
4.5 Sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir	50
5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika analizom sadržaja ekrana pomoću kamere	52
5.1 Algoritam	55
5.1.1 Otkrivanje dugačkih horizontalnih i vertikalnih linija na slici	57
5.1.2 Otkrivanje pravougaone ivice ekrana	59
5.1.3 Transformacija sadržaja na ekranu na dimenzije referentne slike	61
5.1.4 Poređenje stvarnog i očekivanog sadržaja na ekranu	66
5.1.5 Donošenje odluke o ispravnosti sadržaja na ekranu	71
5.2 Implementacija na namenskoj DSP platformi	72
5.3 Primena predloženog BBT sistema sa kamerom – RT-AV400	73
6. Integrirani sistem za automatsku funkcionalnu proveru uređaja sa ekranom osetljivim na dodir	77
6.1 Fizička arhitektura integrisanog sistema sa proverom pomoću grebera	77
6.2. Fizička arhitektura sistema sa proverom pomoću percepcije korisnika, posmatrajući sliku na monitoru kamerom	79
6.3. Fizička arhitektura sistema sa proverom pomoću percepcije korisnika, posmatrajući sadržaj na ekranu kamerom	82
6.4 Programaska podrška sistema	85
6.4.1 Rukovaoci uređaja unutar BBT sistema za proveru uređaja sa ekranom osetljivim na dodir	86

6.4.2 Izvršavanje testnih slučajeva	91
6.4.3 Prikaz rezultata izvršavanja testnih slučajeva	96
6.4.4 Okruženje za razvoj testnih slučajeva	96
7. Metodologija provere rada uređaja potrošačke elektronike	101
7.1 Metodologija provere principom crne kutije	101
7.2 Metodologija provere rada TV prijemnika	102
7.3 Metodologija provere rada uređaja sa ekranima osetljivim na dodir	106
8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir	109
8.1 Eksperimenti sa različitim dodirnim površinama	109
8.2 Eksperimenti sa različitim prekidačkim elementima	110
8.3 Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče	112
8.4 Primena stimulacione ploče u proveru rada uređaja – primer testa iz sistema za automatsku proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir	114
8.5 Poređenje predloženog rešenja stimulacije ekrana sa komercijalno dostupnim rešenjima	119
9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu sa stanovišta percepcije korisnika	123
9.1 Eksperimentalni rezultati metoda za poređenje slika	123
9.1.1 Uslov konstantne osvetljenosti na ekranu	123
9.1.2 Uslov promenljive osvetljenosti na ekranu	126
9.1.3 Eksperimenti sa šablonima, proizvoljnim slikama i menijima	127
9.1.4 Eksperimentalni rezultati blokovske normalizovane kros-korelacije	130
9.1.5 Poređenje blokovske NCC metode sa ostalim metodama	134
9.2 Analiza brzine rada testnog sistema sa kamerom	137
9.2.1 Analiza brzine rada sistema sa optimizovanom obradom na DSP kameri	138
10. Zaključak	141
Literatura	144

1. Uvod

Svakodnevna aktivnost tipičnog radnika na proizvodnoj liniji za televizore i druge uređaje potrošačke elektronike nije za zavideti. Njihovo osmočasovno radno vreme se uglavnom sastoji od beskonačnog ponavljanja istih aktivnosti – bilo da je u pitanju finalna proizvodnja komponenti, sklapanje uređaja ili njihova provera. Radna aktivnost zavisi od mesta na kome radnik radi u proizvodnoj liniji, a veoma često nije zanimljivija od zavrtnja šrafova, spajanja dve komponente, uključivanja uređaja, pokretanja jednostavnih naredbi na uređaju ili, u najzanimljivijem slučaju, analize korektnosti odziva uređaja. Da bi uspešno obavio svoj posao, radniku je neophodna maksimalna koncentracija i posvećenost datoj aktivnosti koju radi, a tokom svog radnog vremena najčešće ne dobija puno mogućnosti za odmor i regeneraciju. Ovako monotona i naporna radna aktivnost veoma često dovodi do visokog stepena nezadovoljstva radnika, čija je neminovna posledica smanjenje obima i kvaliteta urađenog posla. Priroda posla radnika na proizvodnoj liniji time uzrokuje smanjenje kvaliteta istog posla, te je takav posao, iako veoma prisutan u današnjoj industriji, neminovno lošijeg kvaliteta nego što se očekuje.

Verovatno najveću odgovornost na proizvodnoj liniji uređaja imaju radnici koji se nalaze na samom kraju proizvodne linije – oni koji proveravaju da li uređaj koji je završen radi na način na koji se od njega očekuje. Njihova velika odgovornost se ogleda u tome što su oni ti koji treba da uoče da li je uređaj spreman za prodaju krajnjim korisnicima. Ukoliko se desi greška u bilo kom stepenu proizvodne linije pre njih, ta greška će biti uočena u nekom od narednih stepeni. Međutim, ukoliko grešku napravi radnik koji proverava uređaj, i pogrešno uoči da uređaj radi ispravno, neispravan uređaj može da završi na policama prodavnica i kod krajnjeg korisnika, što donosi veliki udarac i na ugled i na profit proizvođača.

Kao primer, analiziraćemo radni zadatak radnika na poslednjem stepenu proizvodne linije za digitalne televizijske prijemnike. Njihov zadatak je da, nakon što im proizvodna traka prinese televizijski prijemnik, istog povežu sa svim potrebnim izvorima i uređajima – potrebno je prikopčati prijemnik na strujni izvor i povezati ga sa generatorom signala koji će definisati šta prijemnik treba da prikaže na ekranu. Današnji prijemnici imaju veliki broj ulaznih sprega preko kojih mogu da dobiju signal – analogni (VGA, CVBS, SCART, S-

1. Uvod

Video) i digitalni (DVI, HDMI), tako da je neophodno povezati sve ulaze u televizijski prijemnik sa odgovarajućim generatorima signala. Nakon što je televizor povezan, pokreće se veliki broj testova koji proveravaju sve navedene ulazne sprege, kao i rad programske podrške na televizijskom prijemniku. Dok se testovi izvršavaju, radnik posmatra ekran televizijskog prijemnika i za svaki testni slučaj, proverava da li je televizor na ekranu prikazao ono što se od njega očekuje za dati testni slučaj. Nakon nekoliko hiljada ovakvih testova, prijemnik je proveren i ukoliko radnik nije primetio grešku, biva proglašen za ispravnog. U suprotnom, ukoliko je greška primećena, radnik zapisuje u kojim testnim slučajevima je greška uočena. I tako više hiljada puta, za više hiljada televizijskih prijemnika koje radnik proverava tokom svog radnog iskustva.

Nije teško zaključiti da ovakav posao, vrlo monoton i nezanimljiv, a istovremeno naporan i zahtevan, vrlo brzo dovodi do umora i nezainteresovanosti radnika, što može da ima negativne posledice na kvalitet i pouzdanost konačne ocene da li je televizijski prijemnik ispravan. U poslednjim časovima radnog vremena, radnik je umoran i povećava se verovatnoća da će napraviti nesvesnu grešku koja je nedopustiva, s obzirom na mesto u proizvodnoj liniji.

Sve ovo dovodi do zaključka da dosadašnji principi provere uređaja trebaju da se menjaju i da princip ručne provere uređaja postaje neodrživ – sve veća potreba za uređajima masovno povećava proizvodnju, što povećava obim i odgovornost radnika. Posao ne biva interesantniji i raznovrsniji, čime je neminovan umor i nezadovoljstvo, a samim tim smanjenje kvaliteta i obima urađenog posla. Bez promene u principima i metodama provere uređaja, industrija će vrlo brzo doći u zasićenje i neće moći da isprati potrebe koje čovečanstvo sve više ima za uređajima potrošačke elektronike.

U industriji uređaja sa ekranima osetljivim na dodir, kao što su tableti ili mobilni telefoni, automatska provera rada uređaja na finalnoj proizvodnoj liniji je malo prisutna i provera se uglavnom vrši manuelnim ili polu-automatskim mehaničkim načinom. Pošto se ova industrija naglo razvija, neophodno je unaprediti način provere kako bi propusna moć finalne proizvodne linije ovih uređaja pratila potrebe njihovih korisnika.

Iz gore navedene analize, izveden je zadatak ove disertacije: inovativno rešenje za proveru rada uređaja sa ekranima osetljivim na dodir, zasnovano na električnoj stimulaciji ekrana promenom električnog polja i algoritmima za izdvajanje i poređenje sadržaja na ekranu. Predloženo rešenje je efikasnije od postojećih mehaničkih pristupa stimulaciji.

1. Uvod

Osnovne celine istraživanja opisanog u ovoj disertaciji su:

- definisanje principa stimulacije ekrana osetljivog na dodir, korišćenjem matrice provodnih površina čijom aktivacijom se kontroliše električno polje ekrana i izmerena kapacitivnost na njemu,
- definisanje algoritma izdvajanja i poređenja slika preuzetih kamerom sa ekrana uređaja potrošačke elektronike, sa ciljem utvrđivanja ispravnosti rada uređaja,
- definisanje sistema za proveru rada uređaja potrošačke elektronike sa ekranima osetljivim na dodir, koristeći princip električne stimulacije ekrana i algoritam poređenja slika, kao i metodologije provere ovih uređaja.

U problemu provere uređaja osetljivih na dodir, osnovni izazov istraživanja je pronaći efikasan i pouzdan način električne stimulacije ekrana, bez mehaničke pobude. Rezultat istraživanja je stimulaciona ploča koja kontrolisano pobuđuje ekran električnim stimulusom, bez pokreta. Provera uređaja se vrši po principu crne kutije – uređaj se posmatra kao zatvoren i koristi na isti način na koji bi ga koristili i krajnji korisnici. Cilj sistema je proveriti da li se uređaj i njegova programska podrška ponašaju očekivano.

Dva dela istraživanja u sklopu ove disertacije, proizvodnja stimulacione ploče i algoritam za izdvajanje i poređenje slika preuzetih pomoću kamere koriste se kao kompletan sistem za proveru uređaja osetljivih na dodir, koji ima mogućnost da stimuliše ekran, prikaže odgovor uređaja i pomoću kamere analizira da li je uređaj ispravno odgovorio na zahteve korisnika.

Funkcionalna verifikacija uređaja potrošačke elektronike u današnjoj industriji uglavnom nije potpuno automatska. Automatski sistem smanjuje broj potrebnih radnika što pojeftinjuje održavanje, elimiše mogućnost subjektivne ocene i povećava efikasnost, brzinu proveravanja i pouzdanost. Da bi se automatski sistem primenio na uređaje čiji korisnički ulaz dolazi sa ekrana osetljivog na dodir, neophodno je proizvesti efikasan pobudni deo sistema koji će električnim principom pobuđivati ekran osetljiv na dodir, što pokazuje potrebu za istraživanjem u ovom smeru.

Cilj istraživanja je stabilan i pouzdan sistem za električnu pobudu ekrana osetljivih na dodir. Stimulaciona ploča je kontrolisana od strane aplikacije na računaru, koja komunicira sa stimulacionom pločom čiji je zadatak da definiše pobudne signale uređaju. Ova ploča je kontrolabilna, odn. aplikacijom se definišu koordinata i vreme dodira. Sistem se ponaša

1. Uvod

identično kao i korisnik prilikom korišćenja uređaja. Pobudna ploča omogućuje pokrete koje koristi i korisnik prilikom korišćenja uređaja – dodiri, linije, višestruke linije.

Istraživanje se sastoji iz sledećih faza:

(1) Pronalaženje pouzdanog rešenja stimulacije ekrana osetljivog na dodir pomoću stimulative ploče, tako da se reši problem lažnih pozitivnih stimulusa u slučaju kada se ne želi stimulacija ekrana,

(2) Otkrivanje optimalne veličine dodirne površine tako da se dobije željena rezolucija stimulative ploče, tako da veličina odgovara dodirnoj površini prsta,

(3) Proizvodnja pouzdane stimulative ploče i razvoj kontrolne elektronike za nju,

(4) Eksperimentalna verifikacija rada stimulative ploče,

(5) Razvoj programske podrške za kontrolisanje stimulative ploče pomoću računara komunikacijom sa integrisanim kolom na stimulative ploči,

(6) Definisavanje testnih slučajeva za testiranje ekrana osetljivih na dodir,

(7) Integracija stimulative ploče u postojeći sistem za automatsku proveru uređaja,

(8) Razvoj algoritma za proveru stanja na ekranu pomoću kamere,

(9) Integracija kompletnog sistema za proveru uređaja sa ekranom osetljivim na dodir,

(10) Opis testova za sistem za automatsku proveru uređaja,

(11) Verifikacija sistema proverom nekoliko uređaja sa ekranima osetljivim na dodir,

(12) Upoređivanje predloženog rešenja sa postojećim mehaničkim rešenjima.

Prvi korak je eksperiment sa ciljem pronalaženja efikasnog i pouzdanog načina električne stimulacije ekrana osetljivog na dodir. Stimulaciona ploča se pravi metodama projektovanja štampanih ploča. Nakon toga se verifikuje funkcionalnom simulacijom, pre verifikacije rada u realnom vremenu. Nakon toga stimulaciona ploča se integriše u BBT sistem čiji rad se verifikuje proverom uređaja sa ekranom osetljivim na dodir od različitih proizvođača, različitog tipa (telefon, tablet) i sa različitom programskom podrškom, zbog univerzalnosti sistema. Konačno, rad uređaja se poredi sa uređajima slične primene radi utvrđivanja poboljšanja koje dovodi predloženi princip stimulacije ekrana.

Uzorak za verifikovanje funkcionalnosti i primenjivosti stimulative ploče za uređaje osetljive na dodir je skup mobilnih telefona i tableta, takav da su proizvedeni od različitih

1. Uvod

proizvođača, sa različitom programskom podrškom. Ovim načinom izbora se proverava univerzalnost u primenjivosti predloženog sistema za pobudu, a time i univerzalnost primenjivosti sistema za proveru uređaja.

Ekperimentalna provera rada stimulative ploče i celokupnog sistema za automatsku proveru uređaja potrošačke elektronike sa ekranom osetljivim na dodir je izvršena u okviru BBT (*Black Box Testing*) projekta istraživačko-razvojnog instituta „RT-RK“ i zajedno sa tim projektom biće primenjena u industrijskim pogonima za proizvodnju uređaja. Istraživanje je deo šireg istraživačkog projekta sa ciljem pravljenja sistema za automatsku funkcionalnu proveru uređaja potrošačke elektronike. Ovaj sistem već uspešno vrši proveru digitalnih televizora, a istraživanje u okviru ove doktorske disertacije će proširiti primenjivost ovog sistema i na uređaje sa ekranom osetljivim na dodir.

Rezultati disertacije biće direktno primenjeni u industriji uređaja sa ekranima osetljivim na dodir, prilikom njihove funkcionalne provere nakon završetka proizvodnje, a pre puštanja u prodaju. Provera uređaja će biti potpuno automatizovana i zasnovana na električnim principima, a time i pouzdanija i efikasnija od dosadašnjih rešenja.

Ostatak doktorske disertacije je organizovan u sledeće celine:

- (1) U poglavlju 2 dat je pregled literature i dosadašnjih dostignuća u rešavanju problema automatske provere rada uređaja, razvoja algoritama za izdvajanje slike i poređenje, kao i pregled metrika koje će biti korištene za ocenu rešenja ove disertacije,
- (2) U poglavljima 3-6 dat je opis rešenja:
 - a. Model ekrana osetljivog na dodir, uz pregled istorijskog razvoja ovih uređaja (poglavljje 3),
 - b. Predloženi princip električne stimulacije ekrana osetljivih na dodir, kao i opis stimulative ploče (poglavljje 4),
 - c. Predloženi algoritam za automatsku proveru ispravnosti sadržaja na ekranu uređaja preuzimanjem slike pomoću kamere i njenim poređenjem sa referentnim sadržajem (poglavljje 5),
 - d. Integrisani sistem za automatsku proveru rada uređaja potrošačke elektronike sa ekranima osetljivim na dodir (poglavljje 6).
- (3) U poglavlju 7 je opisana metodologija automatske provere rada uređaja sa ekranima osetljivim na dodir,
- (4) U poglavljima 8-10 su dati eksperimentalni rezultati realizovanog sistema:

1. Uvod

- a. Rezultati stimulacione ploče i sistema za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir (poglavlje 8),
 - b. Rezultati algoritma za proveru sadržaja na ekranu uređaja pomoću kamere (poglavlje 9),
- (5) U poglavlju 10 je dat zaključak i analizirane su mogućnosti nastavka istraživanja.

2. Pregled literature i metrika

U poslednjim godinama, naglim razvojem industrije uređaja potrošačke elektronike, primećeno je da će manuelni pristup proveriti rada ovih uređaja dovesti do zasićenja proizvodnih kapaciteta [1]. Složenost uređaja koji se proizvode eksponencijalno raste, a s druge strane, osnovni cilj provere uređaja je imati što je moguće manju grešku u proveravanju, idealno verovatnoću greške jednaku nuli.

Kao što je spomenuto u uvodu ove disertacije, trenutni način provere uređaja potrošačke elektronike nije potpuno automatski. Provera se uglavnom vrši ručno, a vrši je radnik koji koristi uređaj kao što bi to korisnik činio. U industriji digitalnih TV prijemnika i prijemnika TV signala, radnik povezuje uređaj sa izvorima napajanja i signala, pušta testove, posmatra ponašanje uređaja i sam otkriva da li se u ponašanju uređaja javlja neočekivano ili pogrešno ponašanje.

TV prijemnici prolaze na proizvodnoj liniji kroz nekoliko testnih stanica na kojima se proveravaju razni protokoli i tipovi korištenja i rada uređaja. Svaka testna stanica proverava određeni deo uređaja, kao što je povezanost delova uređaja, HDMI komunikacija, SCART priključak, itd. Svaka testna stanica ima zaduženog radnika za nju, čiji posao je da bira odgovarajuće testne sekvence i ocenjuje rad TV prijemnika, odnosno otkriva greške u njegovom radu posmatrajući ono što TV prijemnik prikazuje na ekranu, ili prijemnik TV signala na njemu povezanom panelu.

Ako kao primer uzmemo proizvodnu liniju sa 10 testnih stanica na kojima se proveravaju različite sprege i načini rada TV prijemnika, ceo testni sistem zahteva da na njemu radi minimalno 10 radnika po smeni. Ako pretpostavimo da proizvodna linija radi 24h, u tri smene, ukupan broj radnika potreban za ovakav sistem je najmanje 30.

Manuelna provera rada uređaja je podložna subjektivnim greškama od strane radnika koji proverava rad uređaja. Retko će se desiti da radnik uoči neko ispravno ponašanje TV prijemnika kao pogrešno, ali se lako može desiti da radnik ne primeti neko pogrešno ponašanje uređaja, npr. mrtav piksel na ekranu, loša boja na malom regionu slike ili pogrešno ispisan tekst na meniju. Ukoliko radnik ne primeti neku manju grešku, neispravan uređaj

2. Pregled literature i metrika

može završiti na policama prodavnica i u stanu korisnika, što može da ima veliki negativni efekat na finansijski i tehnološki status proizvođača, kao i na njegov ugled.

Pretpostavljajući da su radnici na proizvodnoj liniji puno radno vreme, verovatnoća greške u otkrivanju pogrešnog rada uređaja se povećava pred kraj radnog vremena, zbog zamora čula i smanjenja koncentracije do kojih ovakav rad može dovesti.

Manuelna provera je takođe i spora, zbog toga što radnik mora da obavlja većinu poslova – povezuje uređaj na izvore napajanja i signala, pušta testove, posmatra ponašanje uređaja, pravi zapisnik testa, donosi odluku da li je uređaj ispravan ili ne, upisuje rezultate testa u bazu podataka, itd. Svaki testni stepen proizvodne linije dodatno zahteva određeno vreme puštanja testova, a vreme potrebno radniku da obavi pripremne i ocenjivačke radnje se povećava u kasnijim satima njegove smene, zbog zamora.

Usko grlo ovih sistema je vreme transporta između testnih stanica. Iskustvo u industriji TV prijelnika je pokazalo da je potrebno vreme testiranja za svaku testnu stanicu oko 20 sec, što za naš primer testiranja u 10 testnih stanica znači da je za pokretanje testova potrebno „svega“ 200 sec, odn. nešto manje od 3.5 minuta. Vreme potrebno od početka do kraja provere jednog TV prijelnika je oko 10 min, što znači da se u transportu između testnih stanica izgubi više od 6.5 minuta, odn. više od 65% ukupnog vremena testiranja.

Kao odgovor na ovaj sveprisutniji problem, u literaturi je predloženo nekoliko sistema koji umesto manuelne vrše automatsku proveru uređaja potrošačke elektronike. Cilj ovih sistema je da, automatizirajući pojedine delove proizvodne linije koji služe za proveru uređaja, optimizuju brzinu, pouzdanost i preciznost testova na proizvodnoj liniji. U referenci [2] je predložen sistem za automatsku proveru digitalnih TV prijelnika zasnovan na proveru kvaliteta slike na TV prijelniku. U referenci [3] je prikazan fleksibilan sistem za proveru rada digitalnih TV prijelnika koji proverava da li su simboli na televizijskim porukama pravilno ispisani. Prema autorima rada, ovaj sistem je veoma robustan na translacije, rotacije, promenu veličine i osvetljenja grafičkih karaktera na slici. Sistem je dovoljno brz da proveri rad digitalnih TV prijelnika u realnom vremenu. Sistem se sastoji iz brzih i preciznih procesorskih modula koji normalizuju karaktere na ekranu i vrše njihovu proveru sa očekivanim sadržajem. Uspešnost sistema je procenjena na 99.8%.

Ovi i ostali sistemi za automatsku proveru digitalnih TV prijelnika kao najveći izazov imaju dostizanje zadovoljavajućeg nivoa pouzdanosti – sistem mora da efikasno, brzo i precizno detektuje greške u radu digitalnih TV prijelnika i to: situacije u kojima TV

2. Pregled literature i metrika

prijemnik ne prikazuje sliku, situacije u kojima TV prijemnik prikaže neispravnu sliku i, najteže za otkriti, situacije u kojima TV prijemnik prikaže neispravno samo mali deo slike. Pouzdan sistem mora da otkrije sve ove greške, a istovremeno ne sme sam da pravi greške u otkrivanju, odn. da ne otkrije neku grešku ili da kao grešku progłosi ispravno ponašanje TV prijemnika. Pouzdan automatski sistem takođe mora da donese velika poboljšanja u brzini i ceni testiranja uređaja, kako bi bio prihvatljiv kao zamena za manuelni sistem testiranja danas prisutan kod većine proizvođača digitalnih TV prijemnika i uređaja potrošačke elektronike uopšte.

Prilikom provere rada digitalnih TV prijemnika, najčešće korištena metrika je provera kvaliteta slike na ekranu. U literaturi se spominje više pristupa ovom problemu. Sheikh i Bovik [4] su predložili metriku koja kvantifikuje informaciju prisutnu na originalnoj, referentnoj, slici i algoritam koji pretražuje te kvantifikovane informacije na slici koja se proverava. Vektorski pristup proveri kvaliteta slike je dat u [5]. U ovom radu autori pronalaze preciznu karakterizaciju ponašanja filtera za redukciju šuma na slici računajući vektorsku grešku čije komponente uzimaju u obzir bitne karakteristike kao što su redukcija šuma i očuvanje detalja na slici. Wang, Bovik, Sheikh i Simoncelli [6] su problemu provere kvaliteta slike pristupili koristeći pretpostavku da je ljudska percepcija vida visoko prilagođena za izdvajanje strukturnih informacija iz scene koju posmatra. Iz tog razloga, njihov pristup oceni kvalitete slike je zasnovan na degradaciji strukturnih informacija na slici.

Na Odseku za računarsku tehniku i računarske komunikacije, u saradnji sa istraživačko-razvojnim institutom „RT-RK“ za sisteme zasnovane na računaru, razvijen je sistem za automatsku proveru digitalnih TV prijemnika koji je zasnovan na metodologiji provere uređaja principom crne kutije. Otuda i naziv sistema *Black-Box Testing* (BBT) sistem [7]-[11]. Ovaj sistem sadrži komponente fizičke arhitekture i programske podrške koji omogućavaju proveru digitalnih TV prijemnika, digitalnih satelitskih i zemaljskih prijemnika TV signala (*Set-Top-Box - STB*), DVD i Blu-Ray uređaja. Provera rada uređaja je zasnovana na proveri kvaliteta slike i zvuka, merenjima električnih vrednosti audio-video signala, automatskoj navigaciji kroz menije i složenoj bazi podataka sa testovima i rezultatima testova koja se analizira kako bi se otkrile najčešće prouzrokovane greške i na osnovu njih definisali naredni testovi.

BBT sistem ima za cilj da što više ukloni čoveka sa proizvodne linije tokom provere rada uređaja i testove, kao i njihovo ocenjivanje, obavlja automatski. Time se smanjuje mogućnost greške sistema, povećavaju njegova pouzdanost i brzina, a istovremeno smanjuje

2. Pregled literature i metrika

cena sistema zbog manjeg broja radnika na proizvodnoj liniji. Eliminišući potrebu za napornim i monotonim radom na proizvodnoj liniji, čovek se usmerava na interesantnije i korisnije delatnosti, a posao puštanja testova, posmatranja odgovora uređaja, ocenjivanja njegovog rada i pamćenja rezultata testova ostavlja automatskom sistemu.

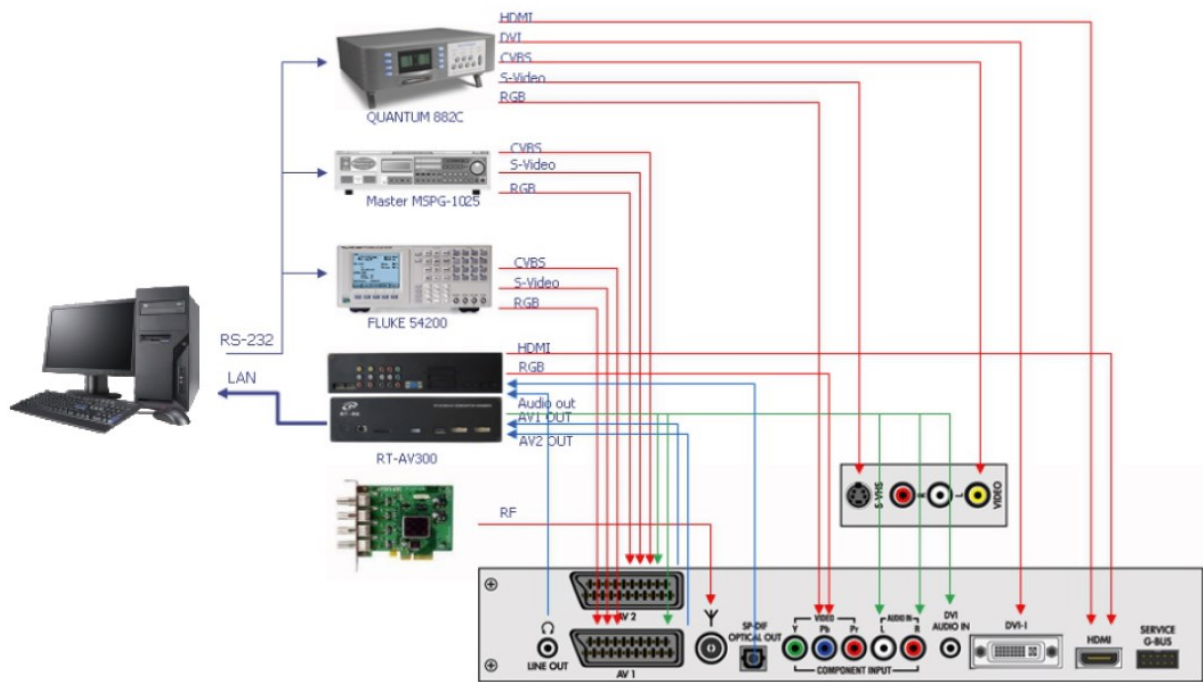
BBT sistem za automatsku proveru rada digitalnih TV prijemnika i prijemnika TV signala (slika 2.1) se idejno sastoji iz sledećih komponenti:

- PC računar sa aplikacijom koja kontroliše tok testiranja, pušta testove, prikuplja odgovor uređaja, analizira taj odgovor i pamti rezultate testova u bazu podataka,
- signal generatori koji šalju signal prema uređaju koji se proverava,
- emulator daljinskog upravljača koji zadaje komande uređaju,
- uređaj koji se proverava (TV prijemnik, prijemnik TV signala),
- greber uređaj koji preuzima sliku iz elektronike TV prijemnika, koja predstavlja odgovor uređaja na komande i signal koji mu stiže na ulazima,
- baza podataka sa svim podacima o testovima i njihovim rezultatima.

BBT sistem prilikom provere rada digitalnih TV prijemnika vrši testiranje prema sledećim koracima:

- nakon što se digitalni TV prijemnik uveže u sistem, programska podrška BBT sistema pokreće izvršenje skupa testova za taj uređaj,
- izvršava se testni slučaj
 - signal generator definiše i šalje signal TV prijemniku putem izabrane sprege,
 - emulator daljinskog upravljača šalje komande TV prijemniku kako bi izabrao odgovarajuću ulaznu spregu (analogni ili digitalni),
 - TV prijemnik odgovara na ulazne komande i prikazuje odgovor,
 - greber (eng. *grabber*) uređaj preuzima sliku koja se trenutno prikazuje na ekranu, uzimajući je iz elektronike TV prijemnika,
 - BBT aplikacija poredi preuzetu sliku sa očekivanom,
 - na osnovu rezultata poređenja donosi se odluka o ispravnosti rada uređaja za dati testni slučaj,
- rezultat testa se smešta u bazu podataka i prelazi se na naredni testni slučaj.

2. Pregled literature i metrika



Slika 2.1. Testno okruženje BBT sistema za proveru rada digitalnih TV prijemnika i prijemnika TV signala

Ovim pristupom je potpuno automatizovana provera TV prijemnika na poslednjem stepenu proizvodne linije. Radnik je potreban samo da bi povezoa TV prijemnik na izvore napona i signala, dok se pokretanje testova i analiza rezultata obavljaju automatski unutar BBT sistema. Ocena ispravnosti TV prijemnika je u potpuno objektivna, u odgovornosti sistema, čime je potpuno uklonjen ljudski faktor u odlučivanju, a samim tim je i povećana pouzdanost ocene. Posao radnika je mnogo manje naporan, a u toku radnog vremena jedan radnik može da spremi mnogo više TV prijemnika za proveru nego što je to bilo kod manuelne verifikacije, kada je radnik morao i da ocenjuje ispravnost. Broj potrebnih radnika na proizvodnoj liniji se ovim pristupom značajno umanjuje, što umanjuje cenu proveravanja rada uređaja.

Rezultat BBT istraživanja su uređaji za preuzimanje signala slike i zvuka sa uređaja koji se proverava (greber uređaji) kao i kompletna programska podrška koja se izvršava na PC računaru koja kontroliše izvršavanje testova, kao i algoritmi za analizu kvaliteta slike i zvuka i njihovo poređenje sa očekivanim vrednostima signala. U nastavku je dat kratak pregled uređaja koji su preteča radu ove doktorske disertacije.

2. Pregled literature i metrika

Prvo, najjednostavnije, rešenje greber uređaja je RT-AV030, greber koji putem LVDS sprega i analognog stereo audio ulaza preuzima sliku i zvuk sa uređaja koji se proverava. Ovaj greber omogućava pregled slike sa uređaja na PC aplikaciji, snimanje rezultata ranijih testova, uključujući i preuzete slike i zvuk, automatsko otkrivanje videa na ulazu, kao i preuzimanje i analizu zvuka u realnom vremenu.

Današnji TV prijemnici i prijemnici TV signala imaju široki dijapazon ulaznih i izlaznih sprega koje su delom nezavisne i svaka treba biti proverena posebnim testovima. Iako je RT-AV030 dovoljan za preuzimanje slike koju TV prijemnik prikazuje na svom ekranu, javlja se potreba za proverom ostalih sprega koje su izlazne kod prijemnika TV signala. Zbog toga je istraživanje krenulo u smeru proizvodnje uređaja koji ima mogućnost preuzimanja slike i zvuka sa više različitih sprega. Rezultat istraživanja je greber uređaj RT-AV100 (slika 2.2).



Slika 2.2. Greber uređaj RT-AV100

RT-AV100 omogućuje preuzimanje slike sa analognih sprega (kompozitni, S-Video, SCART) i digitalnih sprega (HDMI, SDI). Podržava rezolucije do 1080p. Zvuk preuzima u analognom formatu (ADC, I2S) i digitalnom (S/PDIF, HDMI). Ovaj greber podržava i povezivanje na lokalnu mrežu (LAN). Modifikacija ovog greber uređaja, RT-AV101, podržava dva ulazna kanala.

Greber uređaj RT-AV100 je unapređivan u kasnijim godinama u što kompletniji sistem. Dodatkom procesorske jedinice koja je preuzela ulogu PC računara, ovaj uređaj je proširen u verziju RT-AV110 koja predstavlja kompletnu samostalnu testnu stanicu za proveru prijemnika TV signala, DVD i Blu-Ray uređaja i TV prijemnika.

2. Pregled literature i metrika

Uređaj RT-AV140 je doveo dalja unapređenja, pre svega u algoritmima za analizu kvaliteta slike koju preuzima. Ovaj uređaj je specijalizovan za otkrivanje artefakata koji se mogu javiti prilikom neispravnog rada prijemnika TV signala, a to su: Blocking, Packet Loss, Ringing, Blurring i Black Screen artefakti.

Svi gore navedeni greber uređaji imaju mogućnost jedino da preuzimaju sliku, a RT-AV110 i RT-AV140 imaju mogućnost i da istu analiziraju algoritmima za procenu kvaliteta slike. U nastavku istraživanja, ukazala se potreba proširivanja mogućnosti ovih uređaja i na domen generacije signala. Kao rezultat istraživanja pokrenutog ovom potrebom, pojavio se uređaj RT-AV300 koji ne predstavlja samo greber, već i signal generator (slika 2.3).



Slika 2.3. Greber i signal generator RT-AV300

Ovaj uređaj radi u tri modaliteta:

- kao greber uređaj, podržavajući analogne video sprege (CVBS), digitalne video sprege (HDMI, LVDS), analogne audio sprege (TV RC, LineIn, SCART, Subwoofer) i digitalne audio sprege (HDMI, S/PDIF).
- kao signal generator, generišući analogni video (YPbPr, RGB, S-Video, CVBS, VGA), digitalni video (HDMI), analogni audio (LineOut, TVOut) i digitalni audio (HDMI).
- u dual modu, kao greber uređaj i signal generator.

Koristeći RT-AV300 u sistemu za automatsku proveru, ukida se potreba za velikim brojem signal generatora i ovaj uređaj preuzima ulogu generatora signala i preuzimača signala sa uređaja koji se testira. PC računar i dalje služi za kontrolu testova i analizu slike, kao i smeštanje u bazu podataka. Emulator daljinskog upravljača je i dalje neizbežni deo sistema. Ovime je eliminisana potreba za velikim brojem testnih stanica, višestruko smanjeno vreme provere uređaja (usled eliminacije vremena transporta između stanica koje smo ranije

2. Pregled literature i metrika

pokazali da je usko grlo sistema), smanjena potreba za velikim brojem radnika koji rade neinteresantan i monoton posao na proizvodnoj liniji i čitav sistem postao pouzdaniji, kvalitetniji, efikasniji, brži i jeftiniji.

Masovna proizvodnja uređaja potrošačke elektronike koja danas postaje sve veća, zahteva što efikasnije sisteme za njihovu proveru. Zbog toga se pojavila potreba za paralelizacijom provere više uređaja odjednom. BBT projekat je ispratio i ovu potrebu i razvijen je sistem koji je u mogućnosti da proverava više prijemnika TV signala odjednom. Ovaj sistem ima za cilj da dodatno smanji vreme potrebno za proveru uređaja i cenu testiranja.

Sistem, prikazan na slici 2.4, se sastoji od dva 19-inčna reka koji mogu da proveravaju do 24 uređaja. Izlazni prijemnika TV signala koji se proveravaju su povezani na ulaze kontrolabilnih switcher-a, dok su njihovi izlazi povezani direktno na RT-AV100 greber. Svaki prijemnik TV signala je kontrolisan svojim emulatorom daljinskog upravljača koji je povezan sa PC računarom USB spregom. [12]-[15]

Scenario provere pomoću ovog uređaja izgleda ovako:

- sistem šalje komande svim prijemnicima TV signala koji se proveravaju (njih 24) putem emulatora daljinskih upravljača,
- nakon što su svi prijemnici u željenom stanju, switcher-i biraju jedan po jedan uređaj po kružnom sistemu,
- za svaki izabrani uređaj, RT-AV100 preuzima stanje na njegovim izlazima (video i audio),
- RT-AV100 šalje preuzeti signal ka PC računaru na analizu,
- PC računar analizira pristigli signal sa svakog uređaja, otkriva greške i čuva rezultate testiranja u bazi podataka.

Analiza kvaliteta na PC računaru se vrši poređenjem preuzete slike sa referentnom ili korišćenjem referentnog uređaja (tzv. zlatni uzorak) i poređenjem izlaza ostalih prijemnika sa njegovim izlazom.



Slika 2.4. Sistem za automatsku proveru 24 prijemnika TV signala odjednom

BBT sistem je dalje proširivan i u svojim algoritmima, tako da podržava procenu kvaliteta slike na blokovskom nivou procenom nivoa šuma, računanjem razlike između sve slike, računanjem korelacije dve slike, otkrivanjem teksta na slici i proverom na nivou karaktera (što se koristi za proveru rada programske podrške na prijemniku – menija, teleteksta, itd.), procenu kvaliteta zvuka Fourier-ovom transformacijom, itd.

Pristup provere rada TV prijemnika i STB-a koristeći greber kao uređaj koji prihvata sadržaj na ekranu i šalje ga kontrolnoj aplikaciji na proveru ima svoje mane. Slika koja se tada proverava je ona koja se nalazi u elektronici TV prijemnika. Iako ta slika predstavlja konačni izlaz TV prijemnika, tj. rezultat rada programske podrške TV prijemnika, ona ne mora biti identična slici koja se pojavljuje na samom TV ekranu. Između mesta na kome je greber je preuzeo sliku i samog TV ekrana mogu da se dese greške u radu dela TV prijemnika čiji je

2. Pregled literature i metrika

zadatak da sliku koju je programska podrška proizvela zaista i prikaže na ekranu. Neke od mogućih grešaka su: greške u komunikaciji do panela, kao i greške u samom panelu.

Takođe, do sada navedeni uređaji proveravaju rad TV prijemnika, prijemnika TV signala, DVD i Blu-Ray uređaja, koji su popularni i široko rasprostranjeni uređaji potrošačke elektronike, ali ne i jedini koji se danas masovno koriste. Danas veliku ekspanziju doživljavaju uređaji kao što su mobilni telefoni i tableti čija provera je takođe potrebna na proizvodnoj liniji, a i dalje je većinom manuelna. Ovi uređaji kao ulaz koriste ekran osjetljiv na dodir i sistem koji bi ih automatski proveravao mora da ima način za automatsku stimulaciju ovih ekrana.

Kako bi provera rada TV prijemnika bila kompletna sa stanovišta percepcije korisnika, neophodno je proveriti da li je slika na ekranu, tj. slika koju vidi korisnik zaista identična očekivanoj. U tu svrhu je potrebno na neki način dobiti informaciju o slici koja se zaista nalazi na ekranu, a ne samo u elektronici TV prijemnika. Ovo do sada nije bilo podržano u BBT sistemu, a jedan od pripremljenih zadataka u sklopu istraživanja vezanog za ovu doktorsku disertaciju je bio da se sistem proširi sa mogućnošću ovakve, kompletnije, provere rada TV prijemnika. Da bi se ovo ostvarilo, umesto grebera je iskorišćena digitalna kamera kao uređaj koji preuzima sliku sa TV ekrana, slikajući trenutno stanje na ekranu. Ovime je dobijena informacija o slici na TV ekranu identična onoj koju korisnik dobija prilikom gledanja TV ekrana.

Ovo istraživanje je rađeno jer se algoritam izdvajanja i poređenja slike preuzete sa kamere može iskoristiti i za proveru uređaja sa ekranima osjetljivim na dodir, preuzimanjem slika sa njihovih ekrana. Jedan od doprinosa ove doktorske disertacije je u razvoju algoritma za procenu ispravnosti uređaja analiziranjem slike sa ekrana koju je preuzela digitalna kamera. Ovaj algoritam je razvijan za primenu kod provere rada TV uređaja, a bez većih izmena koristi se i za proveru rada uređaja sa ekranima osjetljivim na dodir.

Da bi se sa slike koja je dobijena sa digitalne kamere utvrdio sadržaj na ekranu, neophodno je tu sliku obraditi i izdvojiti sadržaj sa ekrana. Pre nego što detaljnije prikažemo zadatak ovog dela istraživanja, potrebno je analizirati dosadašnja dostignuća u literaturi u algoritmima potrebnim za ovu obradu. Analiziraćemo dostignuća u sledećim algoritmima:

- detekcija linija na slici,
- detekcija pravouganih struktura na slici,
- transformacija slike,

2. Pregled literature i metrika

- poređenje dve slike.

Detekcija linija je predmet mnogih istraživanja. Lagunovsky i Ablameyko [16] su predložili detekciju linija i pravougaonika na slici pomoću klasterovanja i grupisanja linearnih primitiva. Njihov algoritam izdvaja primitive u obliku linija posmatrajući sliku nakon što je prošla kroz filter koji izdvaja ivice na slici. Nakon izdvajanja linearnih primitiva na slici, oni ih grupišu i spajaju u geometrijske oblike, otkrivajući pravougaonike. Marot i Bourennane [17] su predložili formalizam koji pretvara problem obrade slike u problem obrade nizova. Koristeći detekciju linija u topološkim međuprostorima, oni su vršili karakterizaciju pravih linija na slici.

Jedna od najpopularnijih metoda za otkrivanje linija na slici je metoda zasnovana na Hough transformaciji [18]. Hough transformacija se zasniva na obradi slike u posebnom, Hough prostoru. Originalna slika se analizira i otkrivaju se željene karakteristike tako što se svaki region slike, odn. svaka karakteristika primećena na slici, transformiše u tačku u Hough prostoru. Na primer, ukoliko želimo da otkrijemo linije, originalnu sliku ćemo analizirati na nivou gradijenata – svakoj tački slike ćemo računati gradijent i njega „markirati“ u Hough prostoru gradijenata. Nakon analize celokupne slike, traže se lokalni maksimumi u Hough prostoru – odn. karakteristike (u našem primeru, gradijenti), koje su najzastupljenije na originalnoj slici. Svaki lokalni maksimum predstavlja kandidata za otkrivenu karakteristiku na originalnoj slici. Na primer, lokalni maksimum oko nekog gradijenta predstavlja otkrivenu liniju sa tim gradijentom.

Hough transformacija je korištena kao metoda otkrivanja linija u više radova u literaturi. Duan, Xie, Mo, Han i Wan [19] su koristili modifikovanu Hough transformaciju u kombinaciji sa tehnikom prozorskog usrednjavanja (*Windowed Random Hough Transform*). Oni su modifikovali Hough transformaciju da bi otkrili linije na slici korišćenjem mapiranja i pomerajućeg prozora (*sliding window*). Aggarwal i Karl [20] su iskoristili inverzni Radon operator, pošto je Hough transformacija specijalni slučaj Radon transformacije [21]. Još neki pristupi detekciji linija na slici su dati u referencama [22]-[23].

Kao što je ranije naglašeno, Hough transformacija se sem za otkrivanje linija, masovno koristi i za otkrivanje pravougaonika na slici, pošto je to složeniji problem čiji je sastavni deo otkrivanje linija takvih da su međusobno normalne. Jung i Schramm [24] su predložili pristup otkrivanju pravougaonika zasnovan na prozorskoj Hough transformaciji (*Windowed Hough Transform*). Njihov algoritam pretražuje Hough prostor, nakon što su markirani svi gradijenti

2. Pregled literature i metrika

sa originalne slike, tražeći četiri lokalna maksimuma takva da predstavljaju dva para paralelnih linija koji su međusobno normalni i koji se seku – takve četiri linije čine pravougaonik. Ostali pristupi otkrivanju pravougaonika na slici su dati u referencama [25]-[27].

Transformacija slike u raznim oblicima je veoma pristupna tehnika u algoritmima koji se koriste unutar digitalnih TV prijemnika. Primeri transformacija slike su: uvećanje slike, umanjeње slike, interpolacija, rotiranje slike, itd. Referenca [28] prezentuje jednu arhitekturu proširivača slike koja podržava devet nivoa skaliranja slike – od 1x1 do 2x2. Hutchison, Ohara i Takeda [29] su prikazali primenu multimedijalnog procesora za prikazivanje i obradu slike koja omogućuje fleksibilnu i cenovno pristupačnu platformu za mnoge algoritme obrade slike, uključujući i transformacije slike. Pošto su prilikom transformacije slike veoma prisutni problemi zamućivanja slike i neravnih linija nakon transformacije, kako bi umanjili ove efekte, Liang, Chen i Liu [30] su predložili strategiju koju su nazvali koordinatna rotacija i jezgarsko istežanje, koristeći bilinearne i bikubne algoritme.

Jedan od prisutnijih problema transformacije slike je digitalizacija dokumenata, spisa i knjiga. On se sastoji u slikanju stranice teksta kamerom, otkrivanju lokacija na slici gde se nalaze slova i „čitanju“ sta piše na stranici analizirajući otkrivena slova. Jedan pristup digitalizaciji dokumenata su dali Stamatopoulos, Gatos, Pratikakis i Perantonis [31], koristeći ciljno orijentisanu rektifikacionu metodologiju kako bi kompenzovali nepoželjne distorzije na slici dokumenta. Sistemi koji „čitaju“ sadržaj na slici se nazivaju *Optical Character Recognition* (OCR) i u literaturi su veoma puno istraživani [32]-[37].

Primer implementacije problema transformacije slike u integrisanim kolima visokog stepena integracije (VLSI) je dat u referenci [38]. Neki drugi pristupi problemu transformacije slike su dati u referencama [39]-[41].

Nakon što se otkrije sadržaj na ekranu, potrebno ga je uporediti sa očekivanim sadržajem, čime se otvara i poslednji navedeni problem – problem poređenja dve slike, takođe veoma često istraživani u literaturi. Sun i Hoogs [42] su problemu poređenja dve slike pristupili koristeći informacije o različitostima između regiona slike. Svoj pristup su iskoristili u problemima poravnanja dve slike i pretraživanju videa. Osadchy, Jacobs i Lindenbaum [43] su analizirali površinske reprezentacije neosetljive na promenu u osvetljenju na slici. Koristili su Whitening metod [44] i metode zasnovane na gradijentima na slici. Matungka, Zheng i Ewing [45] su prikazali zanimljiv pristup poređenju dve slike koristeći adaptivnu polarnu

2. Pregled literature i metrika

transformaciju, koju su izveli iz log-polarne transformacije. Adaptivna polarna transformacija odabira sliku u Descartes-ovom koordinatnom sistemu. Još neki pristupi problemu poređenja dve slike u dati u referencama [46]-[48].

BBT sistem za automatsku proveru uređaja potrošačke elektronike za sada podržava proveru digitalnih TV prijemnika, satelitskih i zemaljskih prijemnika TV signala, DVD i Blu-Ray uređaja. U poslednjim godinama uočava se velika potreba za drugim uređajima potrošačke elektronike, te je neophodno proširiti BBT sistem kako bi bio u koraku sa industrijom.

Ekрани osetljivi na dodir su prvi put pomenuti 1965. godine u radu E.A. Johnson-a u kome su postavljeni prvi principi kapacitivnog pristupa funkcionisanja ekrana osetljivih na dodir. Prvi ekran osetljiv na dodir je proizveden i pušten u upotrebu 1973. godine. Tek nekoliko decenija kasnije, ovi ekрани su od eksperimenta i istraživačke upotrebe postali obavezna komponenta uređaja potrošačke elektronike koje svi posedujemo. Danas je potreba za ekranima osetljivim na dodir sve veća, zato što su mobilni telefoni i tableti postali standardan deo ličnog inventara koji svakodnevno nosimo sa sobom [49].

Velikom ekspanzijom uređaja sa ekranom osetljivim na dodir, mobilnih telefona i tableta, neodrživost manuelnih sistema za proveru se prenela i na industriju ovih uređaja, te se pojavila potreba za automatizacijom sistema za njihovu proveru na proizvodnoj liniji. Ova potreba je primećena i kao potreba za proširivanjem BBT sistema na širi opseg uređaja potrošačke elektronike, tj. uređaja koji sadrže ekran osetljiv na dodir.

Do sada je u literaturi napisano malo radova koji se bave stimulacijom ekrana osetljivih na dodir. Pretragom literature nije pronađen rad koji se bavi električnom stimulacijom ekrana. Većina radova se bavi poboljšanjima u detekciji dodira i osetljivosti ekrana. Takođe se vrše istraživanja sa ciljem poboljšanja interakcije ekrana sa korisnikom i povećanja inteligencije kontrolera ekrana osetljivih na dodir, kao i povećanja preciznosti detekcije dodira. Altinsoy i Merchel [50] su prikazali elektro-taktilni ekran kao dodatak na uređaje sa ekranom osetljivim na dodir, takav da prenosi korisniku povratnu taktilnu informaciju ka prstu. Kyung, Lee i Park [51] su predložili i osmislili kompaktni modul za ekran osetljiv na dodir i verifikovali njegove performanse u haptičkoj interakciji sa korisnikom. Referenca [52] analizira dodirne interakcije sa korisnikom kao komunikacioni modalitet za komplementiranje ostalih kanala kao što su vizuelna i čujna čula. Hafiz i Sawada [53] su razvili taktilni aktuator koji koristi mikro vibracije generisane iz memorijske žice.

2. Pregled literature i metrika

Jedan pristup virtualizaciji korisničke pobude je prikazan u [54]. Ovde je prikazana virtuelna aktivna sprega korisničkog dodira ekrana, koji se kontroliše ulaznim uređajem tipa pokazivača, koji sadrži taktilnu povratnu spregu. Ova tehnologija je nazvana „virtualni aktivni dodir“, ali ona zahteva mehanički uređaj – pokazivač, čime nije rešen problem električne stimulacije.

Današnji sistemi za automatsku proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir su uglavnom zasnovani na mehaničkom pomeranju veštačkog prsta koji se prinosi ekranu kako bi ga stimulisao. On se dovodi do željenih koordinata dodira i spušta na ekran simulirajući dodir korisnikovog prsta. Zbog ograničenosti ovog mehaničkog pristupa, što u brzini rada, što u veličini sistema, zadatak ove disertacije je istraživanje u smeru proizvodnje stimulative ploče za električnu stimulaciju ekrana koja zamenjuje mehanički veštački prst. Ova ploča pokušava da izvrši distorziju električnog polja ekrana uvodeći dugačak uzemljeni provodnik koji igra ulogu prsta. Koristeći električnu stimulaciju, umesto mehaničke, kao deo sistema za automatsku proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir, doprinosi se na povećanju upravljivosti, smanjenju veličine, povećanju brzine i pouzdanosti automatske stimulacije ekrana i čitavog sistema za automatsku proveru uređaja.

Kvalitet rešenja izvedenog u ovoj doktorskoj disertaciji biće izmeren i poređen sa trenutno dostupnim rešenjima koji su uglavnom zasnovani na mehaničkom pristupu, kao što su [55]-[57]. Algoritam za izdvajanje sadržaja na ekranu i njegovo poređenje sa očekivanim sadržajem je rešenje čiji ekvivalent nije pronađen u literaturi, kako bi se mogao porediti sa ranijim rešenjima. Metrike koje će se koristiti za pojedine komponente rešenja su:

(1) za stimulaciju ekrana

- a. frekvencija pobude (broj dodira u sekundi),
- b. procenat uspešnih pobuda (broj uspešnih pobuda u odnosu na broj očekivanih),
- c. rezolucija (tačaka po cm),
- d. minimalna dodirna površina (mm^2),
- e. maksimalan broj istovremenih tačaka koje možemo pobuditi.

(2) za algoritam analize slike sa ekrana preuzete kamerom:

- a. vreme izvršavanja (ms)
- b. relativna razlika rezultata ispravne i neispravne slike za:
 - i. različite osvetljenosti
 - ii. različite veličine grešaka na ekranu
 - iii. različite parametre algoritma (korak pomeranja bloka, pragovi).

2. Pregled literature i metrika

U nastavku biće dat opis svih komponenata sistema, počev sa modelom električne stimulacije ekrana osetljivih na dodir.

3. Ekрани osetljivi na dodir

Prvi ekran osetljiv na dodir je osmislio E.A. Johnson u Royal Radar Establishment-u u Velikoj Britaniji, 1965. godine [58]-[59]. Ovaj ekran je radio na kapacitivnom principu, istom na kojem rade današnji ekрани na mobilnim telefonima i tabletima. Johnson-ov dizajn ekrana je korišten dugo, a najkasnija zabeležena primena ovog ekrana je bila 1995. godine u britanskoj kontroli leta [60]. Ovaj ekran nije mogao da oseti istovremeni dodir više tačaka.

Nakon E.A. Johnson-a, razvoj ekrana osetljivih na dodir se preselio preko okeana i krajem 60-tih godina XX veka započela su masovnija istraživanja u IBM-u i Univerzitetu Illinois. Univerzitet Illinois je 1972. godine proizveo PLATO IV, prvi terminal za računar zasnovan na ekranu osetljivom na dodir. Korišten je za ispitivanje studenata koji su pomoću ovog ekrana odgovarali na pitanja, dodirujući jedan od ponuđenih odgovora. Ovaj ekran je imao matricu od 16 x 16 dodirnih tačaka.

Prvi rezistivni ekran osetljiv na dodir osmišljen je i patentiran od strane G. Samuel Hurst-a 1975. godine, a proizveden 7 godina kasnije. Danas ovaj pristup nije u širokoj upotrebi, zbog dominacije kapacitivnih ekrana, ali su bili u široj upotrebi prilikom početaka uvođenja ekrana osetljivih na dodir u uređaje potrošačke elektronike.

Herot i Weinzapfel su 1978. godine napravili ekran koji bi i danas bio velika atrakcija bilo gde da je prikazan [61]. Njihov ekran ne samo da je osetljiv na poziciju pritiska (koordinate x i y), već je osetljiv i na još 6 komponenata – silu smicanja u x i y smeru, pritisak u z smeru, kao i moment sile u sve tri dimenzije (x , y , z). Ovaj ekran je odličan pokazatelj da i današnji ekрани osetljivi na dodir imaju puno prostora za unapređenje jer većina nema ove mogućnosti.

Nimish Mehta iz Univerziteta Toronto je 1982. godine prvi publikovao opis uređaja osetljivog na dodir koji ima mogućnost osećaja više od jedne tačke istovremeno [62]. Ovaj uređaj se sastojao od smrznutog stakla čije su optičke karakteristike bile takve da kada se posmatra kamerom sa druge strane, pojavljuje se crna tačka na mestu na kome se staklo dodirne. Obradom slike sa kamere lako se otkriva koliko tačaka je pritisnuto i gde se nalaze.

3. Ekрани osetljivi na dodir

Dve godine kasnije, 1984. godine, proizveden je prvi ekran sa mogućnošću otkrivanja više dodirnutih tačaka istovremeno. Ovaj ekran doduše nije radio prema Mehta-inom principu, već je koristio transparentni kapacitivni niz senzora na CRT ekranu, razvijen od strane Bob Boie u Bell Labs-u. Prvi tablet koji je koristio ekran osetljiv na istovremeni dodir više tačaka proizveden je godinu dana kasnije, 1985. godine, na Univerzitetu Toronto [63].

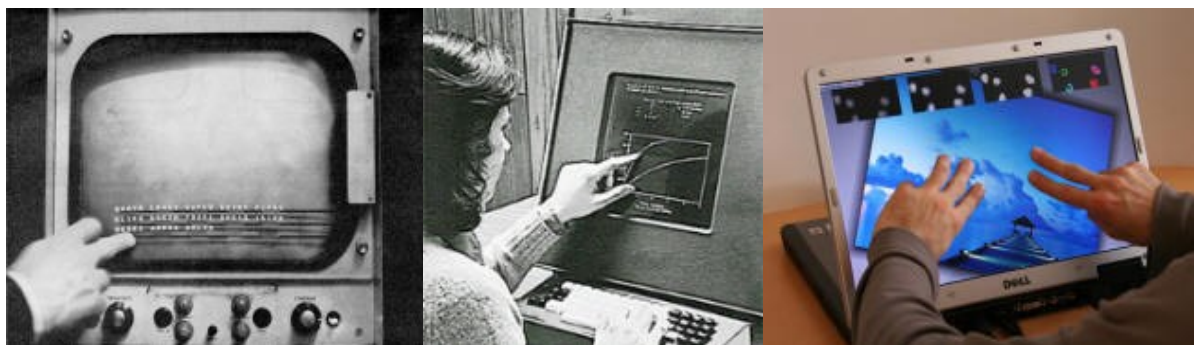
Prvi bidirekcionni LCD ekрани su počeli da se razvijaju 1991. godine, da bi se tokom poslednje decenije XX veka pojavila velika ekspanzija u istraživanju uređaja sa ekranima osetljivim na dodir. Iako još nisu ušli u masovnu upotrebu, tokom te decenije veliki broj kompanija i Univerziteta je imalo istraživanja u smeru ekspanzije primene ekrana osetljivih na dodir – ideje su bile razne: digitalni sto, haptička sočiva, paneli osetljivi na dodir za crtanje na računaru, pa čak i portfolio zid osetljiv na dodir.

U prvoj deceniji XXI veka ekрани osetljivi na dodir su počeli masovno da se koriste u uređajima potrošačke elektronike – mobilnim telefonima i tabletima, čime je ova tehnologija stara svega 48 godina postala svakodnevni deo naših života. Danas se ekрани osetljivi na dodir nalaze svuda oko nas – na telefonima, tabletima, prenosivim računarima, bankomatima i automatima za kupovinu. Istraživanje se razvija u smeru pravljenja što većih ekrana osetljivih na dodir, čime se dolazi do tzv. površinskog računarstva, kako ga je Microsoft nazvao (*Microsoft Surface Computing*) [64].

Ekran osetljiv na dodir omogućuje korisnicima mnogo više interaktivnosti i veću povezanost sa uređajem, pošto se interakcija sa uređajem vrši dodirujući ono što vidimo [65]-[72]. Ovakva interakcija je ljudima lakša i komotnija od klasične interakcije tastaturom i mišem, kada se ono što vidimo na monitoru (što je za naš organizam ulazni podatak) prostorno ne sreće sa našom reakcijom na tastaturi ili mišu (što je izlazni podatak našeg organizma) i obrnuto. Čoveku je prirodniija interakcija kod koje se uzrok i posledica nalaze na istom mestu, zbog čega se očekuje da će ekрани osetljivi na dodir doprineti lakšem korišćenju uređaja i postati dominantni kao sprega sa korisnikom.

U nastavku će biti opisana dva principa rada ekrana osetljivih na dodir – rezistivni, čija primena danas jenjava, i kapacitivni koji dominiraju tržištem.

3. Ekрани osetljivi na dodir



Slika 3.1. Prvi ekran osetljiv na dodir (E.A. Johnson, 1965. god., levo), PLATO IV (u sredini) i današnji ekрани osetljivi na dodir (desno)

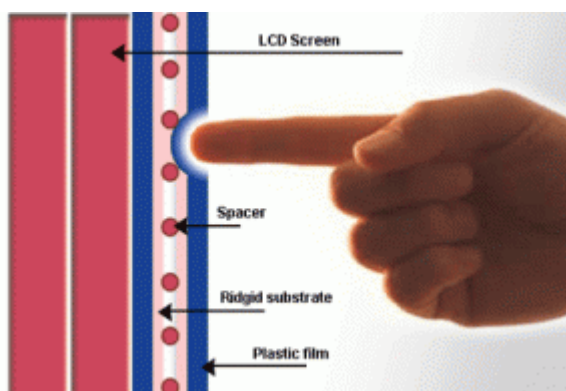
3.1. Rezistivni ekрани osetljivi na dodir

Iako osmišljeni kasnije, rezistivni ekрани osetljivi na dodir danas spadaju u lošiju klasu ekrana i sve više bivaju zamenjeni kapacitivnim ekranima. Ovi ekрани su bili u masovnijoj upotrebi tokom prve decenije XXI veka, kao ulazno/izlazna komponenta mobilnih telefona, da bi se danas uglavnom zadržali na uređajima na javnim mestima – bankomatima, automatima, itd. Njihova primena u ličnim uređajima potrošačke elektronije jenjava zbog manje osetljivosti i teže primenljivosti od kapacitivnih ekrana.

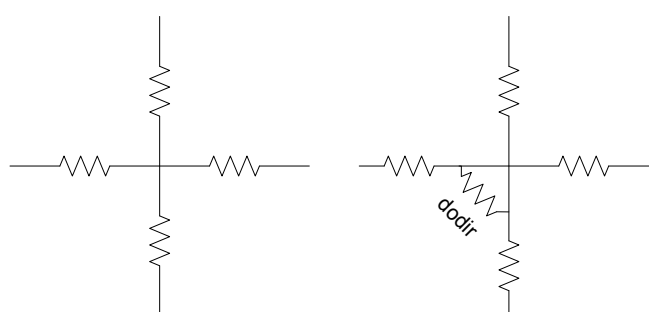
Princip rada rezistivnih ekrana osetljivih na dodir se zasniva na spajanju dve površine koje su premazane tankim provodnim slojem, a odvojene tankim neprovodnim vazдушnim slojem. Kada korisnik dodirne ekran, on pritiska jedan provodni sloj i približava ga drugom, dodirujući ga. Dodir dve površine biva registrovan od strane senzora na ekranu, promenom otpornosti koja se javlja u regiji dodira. Kontroler ekrana, na osnovu informacije sa senzora, otkriva koordinatu dodira.

Slika 3.2 shematski prikazuje rezistivni ekran osetljiv na dodir, dok slika 3.3 prikazuje električni model promene koja se dešava prilikom dodira ekrana.

3. Ekran osetljivi na dodir



Slika 3.2. Pritisak na rezistivni ekran osetljiv na dodir



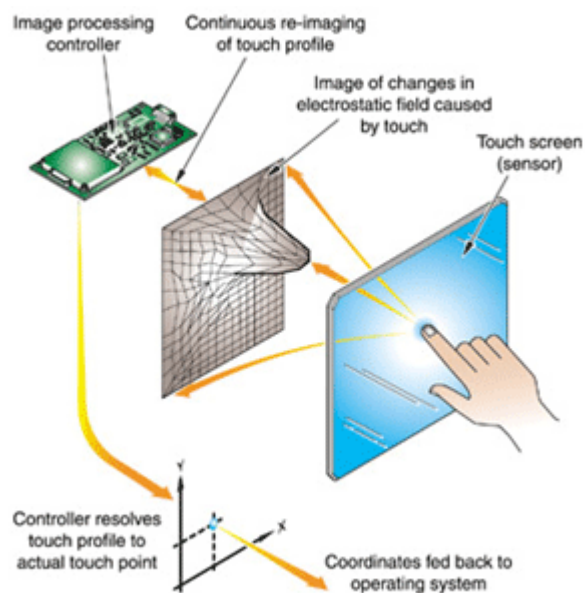
Slika 3.3. Model rezistivnog ekrana bez dodira (levo) i sa dodirirom (desno). Dodir menja otpornost regije, što biva primećeno od strane senzora

3.2 Kapacitivni ekran osetljivi na dodir

Za razliku od rezistivnih ekrana osetljivih na dodir, koji dodir otkrivaju primećujući razliku u otpornosti regije, kapacitivni ekran osetljivi na dodir isti otkrivaju primećujući razliku u izmerenoj kapacitivnosti regije ekrana.

Kapacitivni ekran se sastoji od izolatora, stakla, koji je premazan tankim slojem provodnog materijala, najčešće legure 90% indijum-III-oksida (In_2O_3) i 10% kalaj-IV-oksida (SnO_2) po masi. Pošto je čovek takođe provodan, dodirirom ekrana menja se interna struktura električnog polja, čime se i menja izmerena kapacitivnost od starne kapacitivnih senzora na ekranu. Nakon što se detektuje ova promena, kontroler ekrana otkriva koordinate dodira na osnovu informacije sa senzora (Slika 3.4).

3. Ekрани osetljivi na dodir



Slika 3.4. Princip rada kapacitivnog ekrana osetljivog na dodir. Čovek dodiruje ekran provodnom šakom nakon čega se menja interna struktura električnog polja. Kontroler na osnovu informacija sa senzora otkriva koordinatu dodira.

Pošto je potreban dodir provodnim materijalom, kapacitivne ekrane nije moguće stimulisati drugačijim materijalima, kao što su neprovodne olovke, pokazivači ili tkaninom prevučena ljudska koža (npr. preko rukavica). Pomagala za dodirivanje ekrana moraju biti provodna, da bi uspešno promenila kapacitivnost koju senzor detektuje.

Kapacitivni ekрани osetljivi na dodir se proizvode koristeći nekoliko tehnologija otkrivanja promene u kapacitivnosti kod regije dodira:

- **Površinska kapacitivnost** – osnovni pristup kod koga je izolator premazan provodnom površinom na koju je doveden mali napon. Pritiskom ekrana, ljudska ruka formira kondenzator koji menja izmerenu kapacitivnost od strane senzora, čime se otkriva koordinata dodira.
- **Projektovana kapacitivnost** – napredniji pristup kod koga se ekran sastoji od matrice redova i kolona provodnog materijala, nasloženog na izolatorske površine od stakla. Na matrice provodnog materijala je doveden mali napon, a dodirrom se menja struktura električnog polja. Ova promena se može otkriti merenjem kapacitivnosti od strane senzora koji se najčešće nalaze u uglovima ekrana i mere kapacitivnost do svakog preseka redova i kolona provodnog materijala u matrici. Prave se dva tipa ekrana koji rade ovim principom:

3. Ekрани osetljivi na dodir

- ekрани koji mere međusobnu kapacitivnost – najčešći pristup kod koga se meri kapacitivnost između reda i kolone provodnog materijala,
- ekрани koji mere samo-kapacitivnost – ređe korišten pristup kod koga se meri kapacitivnost unutar samog reda ili same kolone provodnog materijala.

Kapacitivni ekрани osetljivi na dodir se sastoje iz četiri sloja:

1. Gornji sloj poliestera, premazan providnim metalnim provodnikom sa donje strane
2. Razdvojni sloj
3. Sloj stakla kao izolatora, premazan providnim metalnim provodnikom sa gornje strane
4. Adhezivni sloj ispod stakla za spajanje sa uređajem.

Osim rezistivnog i kapacitivnog pristupa, ekрани osetljivi na dodir se proizvode i koristeći sledeće pristupe za otkrivanje koordinate dodira ekrana:

- površinski akustički talas,
- infra-crvene zrake,
- optičke slike,
- disperzivne signale,
- akustičke pulseve, itd.

Ove metode neće biti analizirane u ovom radu, kao što se neće šire razmatrati ni rezistivni pristup. Nastavak rada će se fokusirati na kapacitivne ekrane osetljive na dodir, zbog njihove dominacije na tržištu uređaja potrošačke elektronike.

Iako prvi kapacitivni ekran osetljiv na dodir E.A. Johnson-a radi na sličnom principu kao današnji ekрани, on nije mogao da otkrije više od jednog istovremenog dodira. Današnji ekрани otkrivaju i višestruki dodir, najčešće do 5 tačaka za mobilne telefone, a do 10 tačaka za tablete. U nastavku će biti definisani modeli jednostrukog i višestrukog dodira kapacitivnog ekrana, na osnovu kojih će kasnije biti definisan metod stimulacije ovih ekrana.

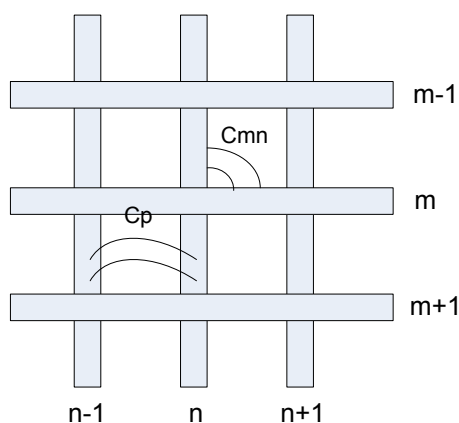
3.3 Model jednostrukog dodira kapacitivnog ekrana

Najčešće korišten kapacitivni ekran osetljiv na dodir u uređajima potrošačke elektronike je ekran koji meri međusobnu kapacitivnost između reda i kolone provodnog materijala kojim je ekran prekriven. U nastavku će biti objašnjeni modeli dodira ovakvog tipa ekrana, a slični

3. Ekрани osetljivi na dodir

modeli se mogu iskoristiti i za analizu ekrana koji mere samo-kapacitivnost, kao i površinsku kapacitivnost. Način stimulacije ekrana, koji će biti izveden u narednom poglavlju na osnovu ovde opisanog modela, neće se razlikovati kod svih navedenih vrsta kapacitivnih ekrana.

Pojednostavljeni model regiona kapacitivnog ekrana osetljivog na dodir je dat na slici 3.5. Ekran je prekriven matricom providnog provodnog materijala. Na mestima preseka redova i kolona te matrice, formira se međusobna kapacitivnost između provodnog reda i provodne kolone. Dodatno se javlja i parazitna kapacitivnost između redova i između kolona, ali će ta kapacitivnost, iako prisutna i neizbežna, biti zanemarena u nastavku diskusije modela.

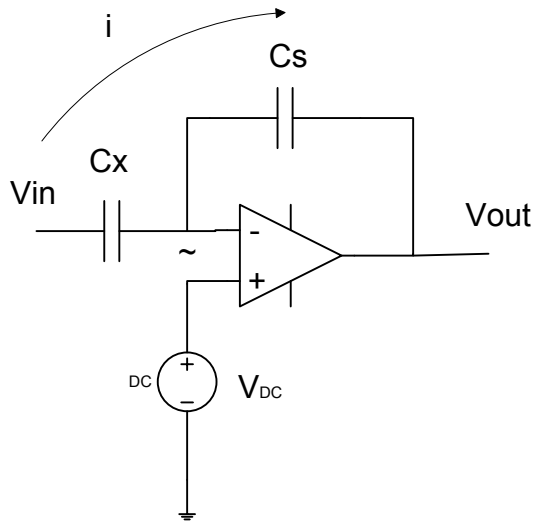


Slika 3.5. Međusobna kapacitivnost između provodnog reda m i kolone n (C_{mn}) i parazitna kapacitivnost između dva reda (C_p)

Međusobna kapacitivnost između reda i kolone se stalno meri od strane senzora koji se najčešće nalaze u uglovima ekrana. Kapacitivnost se meri do svakog preseka reda i kolone, a promena kapacitivnosti registruje se na datom preseku, čime je jednoznačno određena i koordinata dodira.

Pretpostavimo da želimo da izmerimo kapacitivnost između provodnog reda m i provodne kolone n na ekranu. Nazovimo tu kapacitivnost C_x . Na slici 3.6 je dat model integratora koji se može iskoristiti za otkrivanje promena u kapacitivnosti C_x .

3. Ekran osetljivi na dodir



Slika 3.6. Model merenja promene kapacitivnosti integratorom

Integrator sadrži sopstvenu kapacitivnost C_s i konstantni napon koji se dovodi na pozitivni ulaz operacionog pojačavača V_{DC} . Koristeći aproksimirani model operacionog pojačavača, kod kojeg je potencijal na oba ulaza jednak i nema ulazne struje u pojačavač, za ulazni stepen važi sledeće:

$$i(t) = C_x * \frac{d(v_{in}(t) - V_{DC})}{dt} = C_x * \frac{dv_{in}(t)}{dt}$$

Za povratni stepen:

$$i(t) = C_s * \frac{d(V_{DC} - v_{out}(t))}{dt} = -C_s * \frac{dv_{out}}{dt}$$

Potencijal na izlazu integratora je, prema tome, jednak:

$$v_{out}(t) = -\frac{1}{C_s} * \int i(t) dt$$

Iz jednačine ulaznog stepena sledi:

$$v_{in}(t) = \frac{1}{C_x} * \int i(t) dt$$

3. Ekрани osetljivi na dodir

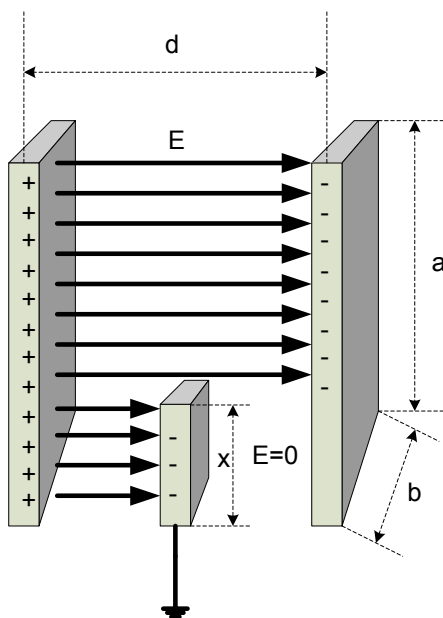
odnosno:

$$\int i(t)dt = C_x * v_{in}(t)$$

Ovakav integrator može da otkrije promenu u kapacitivnosti C_x time što će ova promena izazvati promenu u integralu struje, što će se odraziti kao promena u izlaznom naponu:

$$v_{out}(t) = -\frac{C_x}{C_s} * v_{in}(t)$$

Šta se dešava kada korisnik dodirne tačku na ekranu? Prst kojim korisnik dodirne ekran, uvodi pometnju u električno polje između provodnog reda i kolone, koja se može modelovati „ubacivanjem“ korisnikovog prsta unutar električnog polja kondenzatora između odgovarajućeg provodnog reda i kolone. Pošto je prst provodan, i preko korisnikovog tela spojen sa zemljom, odn. tačkom nultog potencijala, ova situacija se može modelovati promenom unutar kondenzatora C_x kao na slici 3.7.

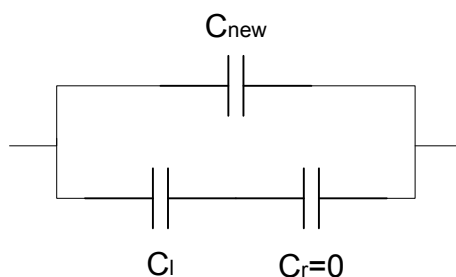


Slika 3.7. Model uvođenja prsta u električno polje kondenzatora između provodnog reda i kolone na ekranu osetljivom na dodir

3. Ekрани osetljivi na dodir

Na modelu na slici 3.7, u kondenzator dužine a , širine b i rastojanja između krajeva kondenzatora d , uveden je uzemljeni provodnik dužine x . Ovaj provodnik „odvodi“ deo naelektrisanja i ne indukuje pozitivno naelektrisanje sa desne strane, pošto je uzemljen (bez gubitka opštosti smatraćemo da pozitivno naelektrisanje na levom kraju kondenzatora C_x indukuje negativno na desnom kraju samo u delu koji nije poremećen provodnikom, a u delu gde se nalazi provodnik indukuje ga na samom provodniku). Kao rezultat, javlja se regija unutar kondenzatora sa desne strane uzemljenog provodnika na kojoj nema električnog polja.

Model sa slike 7 predstavlja vezu kondenzatora kao na slici 3.8.



Slika 3.8. Ekvivalentna kapacitivnost kondenzatora nakon uvođenja prsta

Region kondenzatora iznad uvedenog provodnika ćemo označiti sa C_{new} , region levo od uvedenog provodnika sa C_l , a region desno sa C_r . Pošto desno od uzemljenog provodnika nema električnog polja, kapacitivnost kondenzatora C_r je jednaka nuli, iz čega sledi:

$$C = C_{new} + \frac{C_l * 0}{C_l + 0} = C_{new}$$

odnosno, nova kapacitivnost je jednaka samo delu stare kapacitivnosti, i to onom koji se nalazi iznad uvedenog uzemljenog provodnika. Ako pretpostavimo da je dužina provodnika x i označimo novu površinu kondenzatora sa A_{new} (a staru sa A), za vrednost nove kapacitivnosti dobijamo:

$$C_{new} = \varepsilon \frac{A_{new}}{d} = \varepsilon \frac{(a-x)b}{d}$$

Razlika nove i stare kapacitivnosti je:

$$\Delta C = C_{new} - C_{old} = \varepsilon \frac{A_{new}}{d} - \varepsilon \frac{A_{old}}{d}$$

iz čega sledi:

3. Ekрани osetljivi na dodir

$$\Delta C = \varepsilon \frac{(a-x)b}{d} - \varepsilon \frac{ab}{d}$$

odnosno:

$$\Delta C = -\varepsilon \frac{bx}{d}$$

što je uvek negativno. Dakle, kapacitet kondenzatora C_x se smanjuje uvođenjem uzemljenog provodnika u njegovo električno polje, odn. dodirom ekrana prstom koji je provodan i uzemljen preko korisnikovog tela. Preciznije rečeno, korisnikovo telo nije uzemljeno direktno, pošto odeća koju korisnik nosi nije provodna, ali jeste preko vazduha i same odeće „kapacitno“, odn. veza između korisnika i zemlje, kao i zemlje i uređaja se može modelovati kondenzatorom (izolator između 2 provodna elementa) čime se zatvara krug između uređaja, korisnika i zemlje.

Ovaj model je uprošćen, ali uspešno objašnjava princip rada kapacitivnih ekrana osetljivih na dodir – način otkrivanja dodira i efekat koji se dešava prilikom unošenja prsta.

Zbog čega kapacitivni ekran ne reaguje na dodir izolatorom, kao što je olovka ili ruka sa rukavicom? Odgovor na ovo pitanje se može izvesti iz prethodnog modela. Kada izolator dodirne ekran, on nije uzemljen, pa se ovaj efekat može modelovati na sličan način kao na slici 3.7, s tim da unešeni predmet u kondenzator nije uzemljen. Slika 3.9 prikazuje raspodelu električnog polja u tom slučaju. Pretpostavićemo da je kapacitet unešenog izolatora zanemarljiv (što možemo modelovati zanemarljivo malom debljinom izolatora).

U ovom slučaju, električno polje postoji i sa desne strane uvedenog predmeta, pa se ukupna kapacitivnost može dobiti iz modela sa slike 3.8, s tim da je ovog puta $C_r \neq 0$.

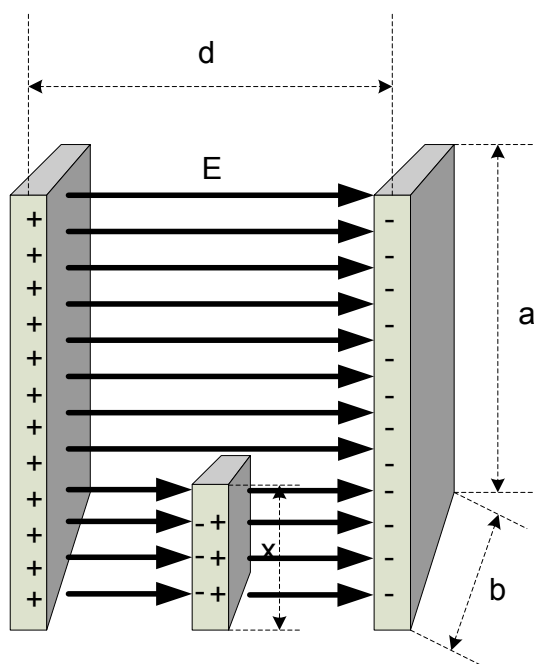
Ekvivalentna kapacitivnost je:

$$C = C_{new} + \frac{C_l * C_r}{C_l + C_r}$$

Koristeći:

$$C = \varepsilon * \frac{A}{d}$$

3. Ekranu osetljivi na dodir



Slika 3.9. Model uvođenja izolatora u električno polje kondenzatora između provodnog reda i kolone na ekranu osetljivom na dodir

i ako označimo rastojanje levog kraja kondenzatora i unešenog predmeta sa d_l , a rastojanje predmeta i desnog kraja kondenzatora sa $d_r = d - d_l$ dobijamo:

$$C_{new} = \varepsilon * \frac{A_{new}}{d} = \varepsilon * \frac{(a-x)b}{d}$$

$$C_l = \varepsilon * \frac{A_l}{d_l} = \varepsilon * \frac{xb}{d_l}$$

$$C_r = \varepsilon * \frac{A_r}{d_r} = \varepsilon * \frac{xb}{d - d_l}$$

Iz ovoga sledi:

$$C = \varepsilon * \frac{(a-x)b}{d} + \frac{\varepsilon * \frac{xb}{d_l} * \varepsilon * \frac{xb}{d - d_l}}{\varepsilon * \frac{xb}{d_l} + \varepsilon * \frac{xb}{d - d_l}}$$

$$C = \varepsilon * \frac{(a-x)b}{d} + \frac{\frac{\varepsilon^2 x^2 b^2}{d_l(d - d_l)}}{\frac{\varepsilon x b (d - d_l) + \varepsilon x b d_l}{d_l(d - d_l)}}$$

3. Ekрани osetljivi na dodir

Uprošćavanje ove jednačine dovodi do:

$$C = \varepsilon * \frac{(a-x)b}{d} + \frac{\varepsilon xb}{d} = \varepsilon * \frac{ab - xb + xb}{d}$$
$$C = \varepsilon * \frac{ab}{d} = \varepsilon * \frac{A}{d}$$

što je jednako kapacitivnosti C_x , pre uvođenja predmeta u kondenzator.

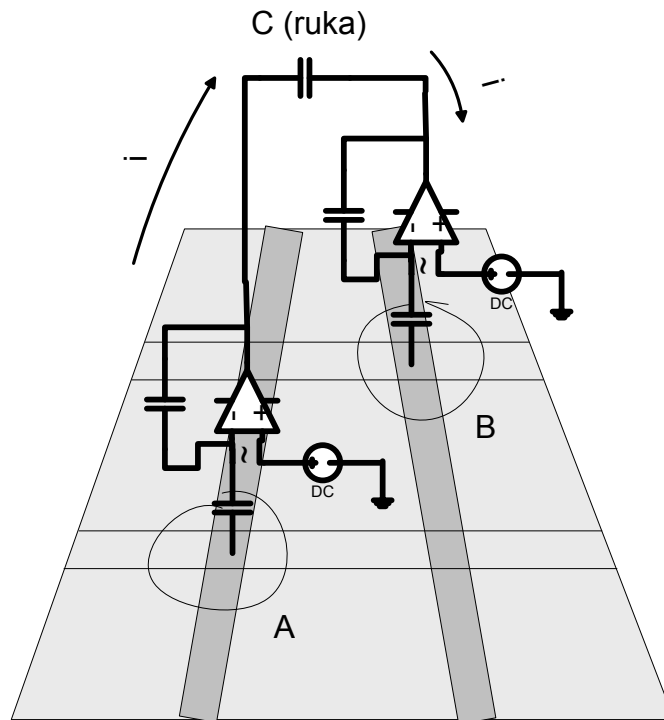
Iz ovoga možemo zaključiti da se kapacitivnost neće promeniti uvođenjem izolatora, a takođe i uvođenjem neuzemljenog provodnika. Kapacitivnost će se smanjiti jedino uvođenjem uzemljenog provodnika, zbog čega ovi ekрани osetljivi na dodir reaguju samo na provodni kontakt tipa ljudskog prsta ili provodnog pokazivača, a ne reaguju na izolatorski kontakt sa neprovodnom olovkom, rukavicom, papirom, itd.

3.4 Model višestrukog dodira kapacitivnog ekrana

Prvi kapacitivni ekрани osetljivi na dodir nisu imali mogućnost otkrivanja više od jednog uzastopnog dodira. Prilikom višestrukog dodira ovakvih ekrana, njihovo ponašanje je nedefinisano, a često se višestruki dodir otkrije ili kao više uzastopnih dodira ili kao pomeraj sa jedne na drugu tačku višestrukog dodira. Tek 19 godina nakon prvog kapacitivnog ekrana E.A. Johnson-a, osmišljen je prvi ekran koji ima mogućnost prihvatnja višestrukog dodira.

Razmotrimo slučaj višestrukog dodira ekrana u dve tačke. Slika 3.10 prikazuje model ovakvog dodira. Za razliku od jednostrukog dodira, u kome se na mestu dodira javlja proticanje struje u jednom smeru, kod višestrukog dodira se proticanje struje javlja u različitim smerovima na različitim tačkama dodira. Naime, posmatrajući sa stanovišta dodira na tački A, struja i „izlazi“ iz ekrana u prst, ali se ista ta struja posle vraća u ekran na tački B, čime tačka B dobija suprotan efekat od tačke A – izmereni integral struje u tački B je suprotan izmerenom integralu struje u tački A. Ovo dovodi do tzv. efekta „anti-dodira“ u tački B.

Kontroler ekrana osetljivog na višestruki dodir zna da interpretira ovakve dodire i anti-dodire, otkrivajući višestruki dodir upravo otkrivajući razne kombinacije dodira i anti-dodira. Prilikom merenja kapacitivnosti u tački A, otkriva se dodir u tački A, a anti-dodir u tački B. Slično, prilikom merenja kapacitivnosti u tački B, otkriva se dodir u tački B i anti-dodir u tački A. Ova kombinacija govori kontroleru da postoji istovremeni dvostruki dodir u tačkama A i B.



Slika 3.10. Model merenja višestrukog dodira kapacitivnog ekrana posmatran iz perspektive tačke A – struja i izlazi iz tačke A, a ulazi u tačku B, što dovodi do otkrivanja dodira u tački A i anti-dodira u tački B

Pošto se kombinacije usložnjavaju kod višestrukih dodira u više tačaka, ekрани obično podržavaju dodir u samo nekoliko tačaka istovremeno – najčešće do 5 tačaka kod mobilnih telefona, a do 10 tačaka kod većih tableta. Potreba za istovremenim dodiranjem više od 10 tačaka još uvek ne postoji, zbog istog broja prstiju na čovekovim rukama.

3.5 Osetljivost kapacitivnih ekrana osetljivih na dodir

Kapacitivni ekрани osetljivi na dodir su veoma osetljivi uređaji, zbog toga što su promene u vrednostima napona (odn. integrala struje) koje se dešavaju prilikom dodira veoma male i odgovaraju promenama kapacitivnosti u ranije predstavljenom modelu od svega nekoliko pF. Rad uređaja i njegova osetljivost zavise od sledećih faktora:

- **Veličina površine dodira** – veći dodir dovodi do preklapanja dodira na više preseka provodnih redova i kolona čime se pojačava efekat dodira, ali istovremeno i dovodi do efekta anti-dodira u komšijskim tačkama preseka. Ovi efekti se međusobno potiru do neke granice, a ukoliko je površina dodira suviše velika, kontroler odbija da prihvati ove efekte kao dodir i ekran ne reaguje na njih. Slično, suviše mala površina dodira ne

3. Ekрани osetljivi na dodir

biva otkrivena jer ne uspeva da dovoljno poremeti strukturu električnog polja i time promeni kapacitivnost između reda i kolone.

- **Rastojanje između redova i kolona elektroda** – u zavisnosti od rastojanja između redova, odn. kolona, menja se rezolucija senzora koji otkriva dodir ekrana. Veće rastojanje može da smanji neželjene efekte anti-dodira, ali smanjuje rezoluciju senzora.
- **Veličina uređaja** – u maloj meri, veličina uređaja može da utiče na osetljivost senzora za otkrivanje dodira, zbog toga što uređaj i Zemlja formiraju kondenzator kroz vazduh koji je sastavni deo putanje struje prilikom dodira (uređaj – ruka – telo – Zemlja – uređaj). Veći uređaj znači i veća površina kondenzatora čime se povećava parazitna kapacitivnost povratne putanje kroz Zemlju.
- **Povezanost uređaja sa drugim izvorima napajanja** – ukoliko je uređaj povezan na svoj punjač ili bilo kojim drugim kablom za neki drugi uređaj, osetljivost senzora se povećava zbog uvođenja dodatnih kapacitivnosti u putanju struje tokom dodira. Proizvođači ekrana osetljivih na dodir deklarišu da se osetljivost njihovih ekrana može povećati 10 – 20 % ukoliko je uređaj povezan kablom za neki drugi uređaj.
- **Fizička lokacija uređaja** – mesto gde se uređaj nalazi može da utiče na osetljivost senzora zbog toga što udaljenost od Zemlje utiče na kapacitivnost povratne putanje kroz Zemlju, jer ta udaljenost predstavlja rastojanje ravni kondenzatora te putanje. Manje rastojanje od Zemlje povećava kapacitivnost povratne putanje.
- **Držanje uređaja od strane korisnika** – na osetljivost senzora utiče i podatak da li korisnik drži uređaj u ruci ili ne. Ukoliko korisnik drži uređaj u ruci (eng. *handheld device*), što je uglavnom slučaj kod uređaja kao što su mobilni telefoni i tableti, povratna putanja kroz Zemlju se usložnjava jer se javljaju dodatne putanje između uređaja i korisnika kroz ruku kojom se uređaj drži, a ne dodiruje. Te dodatne kapacitivnosti se paralelno vezuju sa kapacitivnosti u putanji dodira, čime se povećava ukupna kapacitivnost povratne putanje. Proizvođači ekrana osetljivih na dodir deklarišu da se osetljivost njihovih ekrana može povećati 10 – 20 % ukoliko je uređaj držan u ruci, zbog ovih dodatnih paralelnih kapacitivnosti.

Prilikom projektovanja stimulative ploče za ekrane osetljive na dodir, što je tema narednog poglavlja, moraće se uzeti u obzir i gore navedeni uticaji na osetljivost ekrana. Osetljivost senzora se može promeniti i do 40% u zavisnosti od prisutnosti ili neprisutnosti ranije navedenih faktora. Verifikacija stimulative ploče će biti izvršena pokrivajući razne

3. Ekрани osetljivi na dodir

slučajeve prisutnosti ovih faktora, kako bi se stimulacija dovela do potrebnog nivoa pouzdanosti.

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir

Problem automatske provere rada uređaja sa ekranima osetljivim na dodir koji je otvoren u uvodu ove disertacije, zahteva da se osmisli način kontrolisane stimulacije ekrana osetljivih na dodir. Kao što je pokazano u prethodnom poglavlju, kapacitivni ekrani osetljivi na dodir otkrivaju promenu međusobne kapacitivnosti između provodnih elektroda u redovima i kolonama, a čovek dodiranjem unosi prst u električno polje remeteći njegovu strukturu i time menjajući kapacitivnost. Stimulaciona ploča bi trebala da oponaša ovaj efekat na kontrolisan način.

Pre nego što detaljnije analiziramo mogućnosti kontrolisane stimulacije i na osnovu modela iz prethodnog poglavlja osmislimo način stimulacije ekrana, prikazaćemo pokušaj uvođenja promene u lokalno električno polje ekrana pomoću provodnih linija, koji je nastao iz ideje da se imitiraju provodni redovi i kolone koje ima ekran i u njihovim preseccima dovede do remećenja električnog polja dovođenjem napona na odgovarajuću horizontalnu i vertikalnu stimulacionu liniju.

4.1 Stimulacija ekrana ortogonalnim provodnim linijama

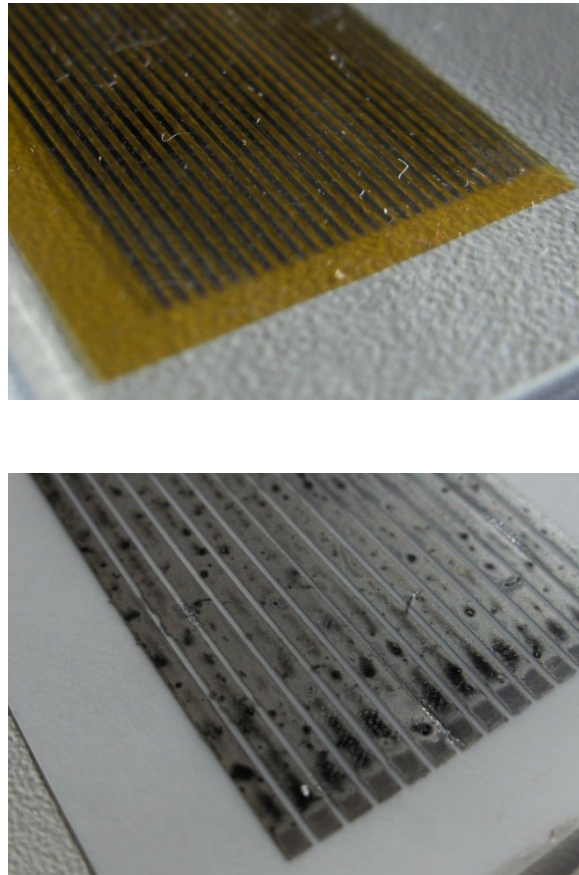
Prvi koncept kontrolisane stimulacije ekrana je bio baziran na korišćenju dva nivoa ortogonalnih provodnika [73]. Stimulaciona dodirna površina se nalazi na preklapanju ovih dveju linija. Odgovarajuća dodirna tačka se dobija aktiviranjem jedne linije reda i jedne linije kolone.

Ipak, postoji mnogo pratkičnih problema u ovom konceptu. Provodne linije se rastežu preko čitavog ekrana i, iako su veoma tanke (testiranje je izvršeno koristeći linije debljine 300 μm), predstavljaju nekontrolisanu liniju koja dodiruje ekran na čitavoj svojoj površini. Kada senzor pretražuje ekran za detekciju dodira, on u tom slučaju primeti promenu u električnom polju tokom cele linije i detektovana koordinata dodira se šeta po provodnoj liniji. Ovo se može izbeći korištenjem veoma kratkih linija, no to ograničava aplikaciju provodnih linija na male površine.

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir

Dva primera provodnih linija su testirana za proveru ovog koncepta. Prvi su bile provodne srebrne linije širine 300 μm , koje su bile odštampane na Kapton foliji ($\epsilon_r = 3$) sa debljinom od 25 μm . Drugi primer je odštampan na PET supstratu debljine 50 μm i sadržao je srebrne provodne linije debljine 800 μm (slika 4.1).

Zbog veoma male debljine supstratnog materijala, dve ravni paralelnih linija mogu biti složene jedna na drugu kako bi se napravila matrica programabilnih redova i linija. Potrebno je dodatno istraživanje kako bi se pronašle prave dimenzije provodnih linija koje su dovoljne da bi ekran bio kontrolabilno stimulisan, ali se od ovog istraživanja odustalo i prešlo na drugačiji pristup stimulaciji ekrana čiji opis sledi.



Slika 4.1. 300 μm provodne linije na 25 μm Kapton substratu (iznad) i 800 μm provodne linije na 50 μm PET substratu (ispod)

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir

4.2 Stimulacija ekrana uvođenjem uzemljenog provodnika

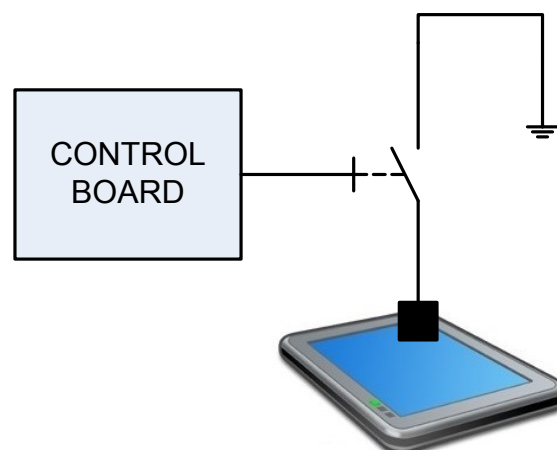
Analizirajući model kapacitivnog ekrana osetljivog na dodir iz prethodnog poglavlja, možemo zaključiti sledeće:

- ekran **neće** biti stimulisan ukoliko mu se prinese izolator ili neuzemljeni kratki provodnik (dugačak provodnik će stimulisati ekran čak i ako nije uzemljen jer će uvesti svoju parazitnu kapacitivnost i moći da „odvuče“ deo naelektrisanja na svoj dalji kraj – ovo će biti ekperimentalno pokazano kasnije)
- ekran **će** biti stimulisan ukoliko mu se prinese uzemljeni provodnik (kao što je, na primer, prst prilikom dodira od strane korisnika).

Iz ove analize možemo zaključiti da kontrolisana stimulacija ekrana osetljivog na dodir može biti zasnovana na dovođenju ili odvođenju uzemljenog provodnika. Kako bi stimulacija bila bez mehaničkih pokreta, ne želimo da fizički dovodimo i odvodimo uzemljeni provodnik. Suprotno, želimo da stimulaciona ploča stalno dodiruje ekran.

Rešenje je u činjenici da neuzemljeni kratki provodnik **ne stimuliše** ekran čak i kada ga dodiruje. Dakle, kontrolisanu stimulaciju možemo ostvariti time što ćemo uzemljenje provodnika prekidati prekidačkim elementom. Ukoliko je prekidač otvoren, provodnik nije uzemljen i ekran ga ne detektuje. Ukoliko je prekidač zatvoren, provodnik je uzemljen i stimuliše ekran.

Shema ovog pristupa za stimulaciju ekrana sa provodnikom je data na slici 4.2.



Slika 4.2. Koncept kontrolisane stimulacije kapacitivnog ekrana osetljivog na dodir

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir

Koncept prikazan na slici 4.2 je eksperimentalno potvrđen „ručnom“ proverom, odn. postavljanjem male provodne dodirne površine na ekran i dodirivanjem te površine dugačkim uzemljenim provodnikom – sama površina nije pobuđivala ekran, dok je dodirnuta površina isti pobuđivala.

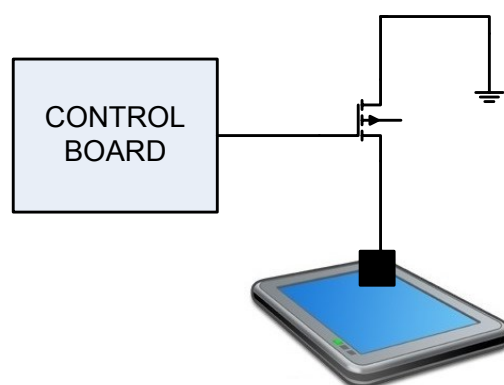
Osnovni problem u projektovanju pouzdane stimulacione ploče je postao problem pronalazjenja prekidačkog elementa koji će efikasno prekidati vezu provodne dodirne površine koja dodiruje ekran i Zemlje. Prekidački element mora da zadovoljava sledeće karakteristike:

- zanemarljivo mala otpornost u uključenom stanju ($R_{ON} \rightarrow 0$),
- velika otpornost u isključenom stanju ($R_{OFF} \rightarrow \infty$),
- velika otpornost između kontrolnog i provodnog priključka,
- zanemarljivo mala parazitna kapacitivnost u oba stanja ($C \rightarrow 0$).

U nastavku će biti data analiza raznih prekidačkih elemenata koji su probani da se iskoriste u ovom sistemu. Eksperimenti su izvršeni sa sledećim prekidačkim elementima:

- MOSFET
- bipolarni NPN tranzistor
- elektromehanički relej.

Prvi kandidat za prekidački element je bio MOSFET, zbog svojih dobrih prekidačkih sposobnosti, odn. otpornosti u oba stanja, i lake iskoristljivosti u projektovanju štampane ploče za stimulaciju. Struktura stimulacionog sistema sa MOSFET-om kao prekidačkim elementom je data na slici 4.3.



Slika 4.3. Koncept kontrolisane stimulacije kapacitivnog ekrana sa MOSFET-om kao prekidačkim elementom

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir

Karakteristike tipičnog MOSFET-a su:

$$R_{ON} < 5\Omega$$

$$R_{OFF} > 1M\Omega$$

$$C \approx 20 pF$$

Dok su otpornosti zadovoljavajuće, parazitina kapacitivnost MOSFET-a nije zadovoljavajuća za naše potrebe. Eksperimentom je potvrđeno da koncept sa slike 13 ne funkcioniše pouzdano – ekran biva pobuđen kada to želimo, ali često biva pobuđen i kada ne želimo, odn. kada je kontrola takva da je MOSFET isključen. Razlog ovih „lažnih pozitivnih“ pobuda je velika parazitna kapacitivnost, zbog čega moramo prekidački element tražiti na nekom drugom mestu.

Sledeći kandidat je bipolarni tranzistor, zbog svoje manje parazitne kapacitivnosti u isključenom stanju. Slika 4.4 prikazuje strukturu sistema sa NPN tranzistorom kao prekidačkim elementom.

Karakteristike tipičnog NPN tranzistora su:

$$R_{ON} < 5\Omega$$

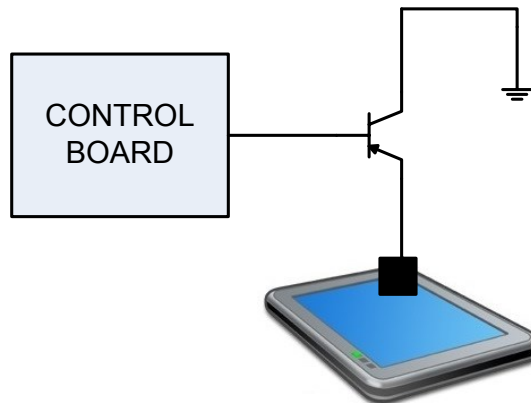
$$R_{OFF} > 1M\Omega$$

$$C \approx 8 pF$$

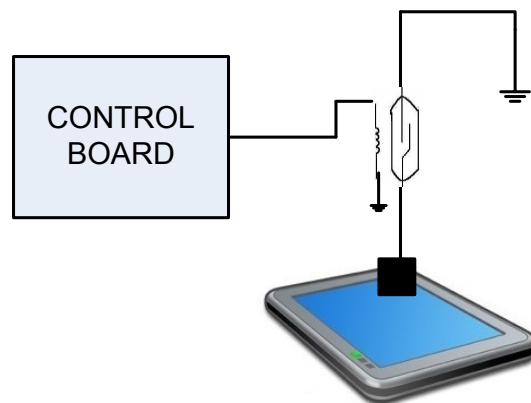
Eksperimentom je potvrđeno da se NPN tranzistor ponaša bolje od MOSFET-a, odn. smanjio se broj lažnih pozitivnih pobuda, ali i dalje funkcionalnost nije potpuno pouzdana, zbog nezanemarljive parazitne kapacitivnosti.

Zaključak prethodne analize je da se kao prekidački element ne mogu koristiti poluprovodničke komponente, zbog velike parazitne kapacitivnosti za ovu primenu, pošto ekrani osetljivi na dodir reaguju na svega nekoliko pF, koliko iznosi promena kapacitivnosti prilikom dodira prstom. Zbog toga je, kao sledeći kandidat za prekidački element, izabran elektro-mehanički Reed relej. Struktura stimulacionog sistema sa relejem kao prekidačkim elementom je data na slici 4.5.

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir



Slika 4.4. Koncept kontrolisane stimulacije kapacitivnog ekrana sa bipolarnim NPN tranzistorom kao prekidačkim elementom



Slika 4.5. Koncept kontrolisane stimulacije kapacitivnog ekrana sa elektromehaničkim Reed relejem kao prekidačkim elementom

Karakteristike tipičnog Reed releja su:

$$R_{ON} \approx 0$$

$$R_{OFF} > 1G\Omega$$

$$C \approx 1 pF$$

Ekperimentom je potvrđeno da Reed relay zadovoljava potrebe sistema i on je izabran kao prekidački element u daljem projektovanju stimulacione ploče. Iako su poluprovodničke

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir

komponente lakše iskoristljive prilikom projektovanja štampane ploče, njihove električne karakteristike nisu zadovoljile primenu u ovom slučaju.

4.3 Stimulaciona ploča

Na osnovu prethodne analize, odlučeno je da stimulaciona ploča koristi elektromehaničke Reed releje kao prekidačke elemente. Ploča treba da pokriva površinu najvećeg uređaja koji se želi testirati. Odlučeno je da to bude površina tableta dijagonale 10 inča. [74]

Tokom projektovanja stimulacione ploče bilo je potrebno odrediti minimalnu površinu provodnika koja aktivira ekran osetljiv na dodir. U slučaju dodira prstom, dodirna površina je oko 50 mm^2 . U svrhu određivanja minimalne površine, napravljena je matrica provodnih površina različitih dimenzija, od 1 mm do 5 mm. Testiranje je pokazalo da je minimalna površina koja aktivira ekran jednaka $4 \times 4 \text{ mm}^2$. Ekran je takođe reagovao na veće provodne površine, ali kako bi se povećala rezolucija testiranja, korisno je minimizovati dodirne površine.

Utvrđeno je da je dužina provodničke linije od ekrana do releja veoma bitna, pošto provodne površine sa dugačkim provodnikom do releja same po sebi aktiviraju ekran zbog velike parazitne kapacitivnosti koja se redno vezuje na kapacitivnost ekrana, bez obzira na to da li je relej uključen ili isključen. Dakle, kritično je da provodnici koji vezuju provodne površine sa relejima budu kratki, zbog čega je provodna površina direktno povezivana na Reed relej.

Kako bi dodirne površine precizno legale na površinu ekrana, a istovremeno ga i ne oštetile, odlučeno je da se za njih iskoristi provodni sunđer. Eksperimentalnom proverom je utvrđeno da dodirna površina provodnog sunđera mora biti veća od ranije utvrđenih $4 \times 4 \text{ mm}^2$ zbog manje gustine sunđera u odnosu na metalni provodnik. Proverom nekoliko različitih površina, utvrđeno je da je optimalna površina za iskoristljivost na stimulacionoj ploči $7 \times 7 \text{ mm}^2$.

Stimulaciona ploča koja pokriva tablet od 10 inča se sastoji od 464 dodirne površine, svake sa površinom od $7 \times 7 \text{ mm}^2$, međusobno udaljene 1 mm. Površine su raspoređene u matricu sa 16 redova i 29 kolona. Time je rezolucija dodira pojedinačnih dodirnih površina takva da je njihovo rastojanje 0.8 cm, što odgovara debljini prsta prilikom dodira, čime je ova rezolucija zadovoljavajuća za proveru rada uređaja na način na koji bi ga koristio korisnik.

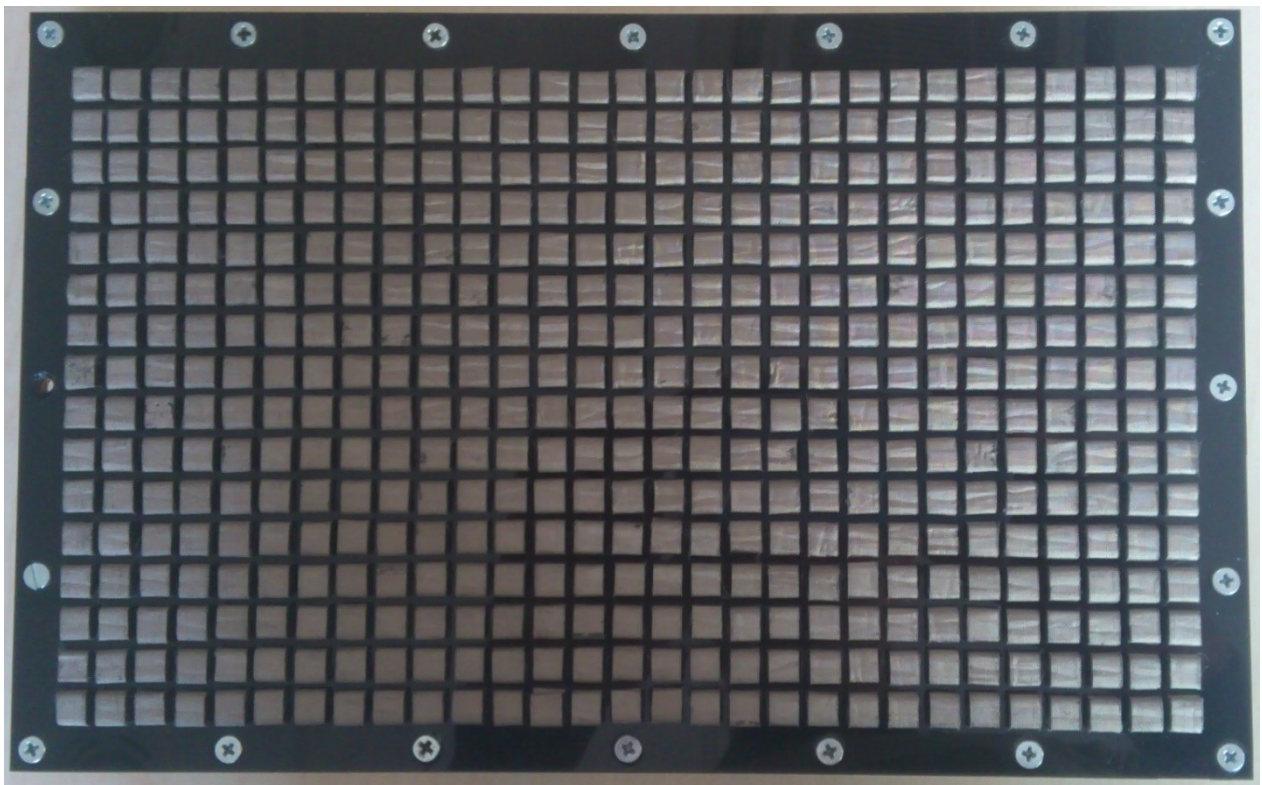
Dodatno, eksperimentalno je utvrđeno da se aktivacijom dve susedne dodirne površine koje su udaljene 0.8 cm, dobija pobuda ekrana u jednoj tački između tih površina. Ovo se

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir

dešava zato što kontroler ekrana osetljivog na dodir, prilikom skeniranja ekrana za promene kapacitivnosti, ne uočava susedne promene kapacitivnosti kao višestruki dodir, već usrednjava čitav otkriveni region promena kapacitivnosti u jednu tačku. Razlog ovom usrednjavanju je taj što i pri redovnom korištenju, dodir prsta promeni kapacitivnost u više susednih preseka redova i kolona provodnog materijala na ekranu, što treba da se detektuje kao jednostruki dodir. Višestruki dodir se javlja samo ukoliko postoji jasno rastojanje između dva regiona preseka sa promenom kapacitivnosti.

Iskoristivši ovu činjenicu u radu ekrana osetljivog na dodir, sa dodirnim površinama udaljenim 0.8 cm možemo dobiti rezoluciju dodirnih tačaka od 0.4 cm, tako što ćemo aktivirati dve susedne površine da bi dodir bio između njih.

Slika 4.6 prikazuje raspored dodirnih površina na stimulationskoj ploči.



Slika 4.6. Raspored dodirnih površina na stimulationskoj površini. Ova površ direktno dodiruje ekran prilikom stimulacije

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir

4.4 Kontrola stimulacione ploče

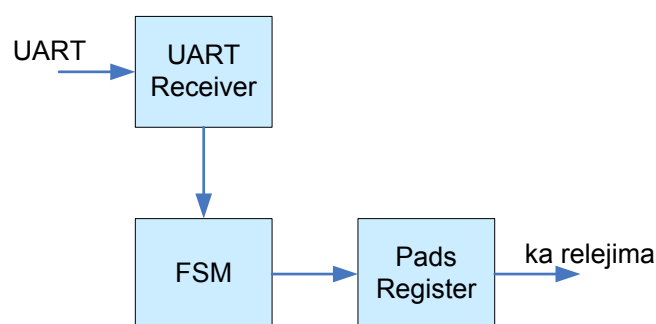
Kontrola stimulacione ploče je na posebnoj kontrolnoj ploči koja je konektorom povezana sa stimulacionom pločom. Kontrola stimulacione ploče je rešena na 2 načina:

- pomoću FPGA integrisanog kola,
- pomoću FTDI integrisanog kola, CPLD-a i pomeračkih registara.

Prvo rešenje kontrolne ploče je bilo pomoću FPGA integrisanog kola. PC računar putem UART protokola komunicira sa FPGA integrisanim kolom u kome se nalazi arhitektura sa sledećim komponentama:

- primalac UART signala koji prihvata komandu sa podacima o tipu dodira, koordinatama dodira i vremenu trajanja dodira,
- automat koji kontroliše izvršavanje različitih tipova dodira – pritisak, puštanje, višestruki pritisak, višestruko puštanje, linija, višestruka linija,
- registar koji pamti stanja svakog od releja.

Nakon što primi komandu od strane PC-a, FPGA menja stanja registara na osnovu kojih stanja menjaju i releji, čime se dobija stimulacija ekrana na željenim tačkama. Ovo rešenje je limitirano brojem slobodnih pinova FPGA, koje zadovoljava stimulacionu ploču opisanu u prethodnom poglavlju (tipičan broj slobodnih pinova na FPGA je 300 do 400), ali nije lako proširljivo, zbog čega je napravljen drugi tip kontrolne ploče, zasnovan na pomeračkim registrima. Slika 4.7 prikazuje arhitekturu FPGA integrisanog kola kod ovog rešenja.



Slika 4.7. FPGA arhitektura kontrolne ploče

Drugo rešenje kontrolne ploče, koje rešava problem skalabilnosti prvog rešenja, je zasnovano na pomeračkim registrima, umesto FPGA integrisanog kola. Iako FPGA integrisano kolo uvodi veliku fleksibilnost u dizajnu sistema za kontrolu stimulacione ploče,

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir

njegov problem je ograničen broj pinova, kao i visoka cena. Zbog toga je napravljen drugi tip kontrolne ploče, sa sledećim komponentama:

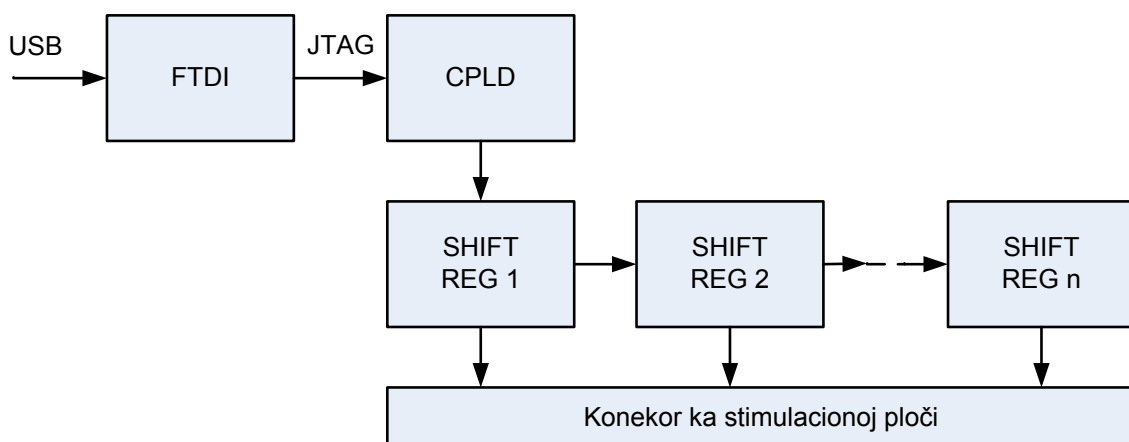
- FTDI integrisano kolo za serijsku komunikaciju,
- CPLD integrisano kolo za prateću logiku,
- serijski vezani pomerački registri koji direktno kontrolišu releje.

FTDI integrisano kolo je iskorišteno za serijsku komunikaciju sa pomeračkim registrima. Ono je povezano sa PC računarom USB komunikacijom i od njega prima podatke koje treba da pošalje pomeračkim registrima. Na svom izlazu on te podatke „izbacuje“ JTAG protokolom. CPLD integrisano kolo služi kao spona između FTDI integrisanog kola i pomeračkih registara, kao jednostavni parser JTAG protokola.

Pomerački registri su vezani u serijski lanac, tako da primaju podatke sa CPLD-a bit po bit, sve dok ne prime podatke o željenim stanjima svih releja na stimulacionoj ploči. U trenutnoj realizaciji, u pitanju su stanja 464 releja. Pomerački registri iskorišteni na kontrolnoj ploči su 8-bitni i svaki par njih kontroliše stanja jednog reda od 16 releja. Ukupno se kontroliše 29 redova releja, što znači da je iskorišteno 29 parova 8-bitnih pomeračkih registara. Tek nakon što prime podatke za svih 464 releja, pomerački registri puštaju svoje vrednosti na izlaz i pale odgovarajuće releje.

Proširivanje ovakve kontrolne ploče je jednostavno, dodavanjem parova pomeračkih registara na već postojeće. Iako je izgubljeno na fleksibilnosti prateće logike, pošto je CPLD jednostavniji i manji od FPGA, dobijeno je na proširivosti broja dodirnih površina, što je zbog jednostavnosti prateće logike važniji dobitak.

Na slici 4.8 je prikazana shema ovog rešenja kontrolne ploče.

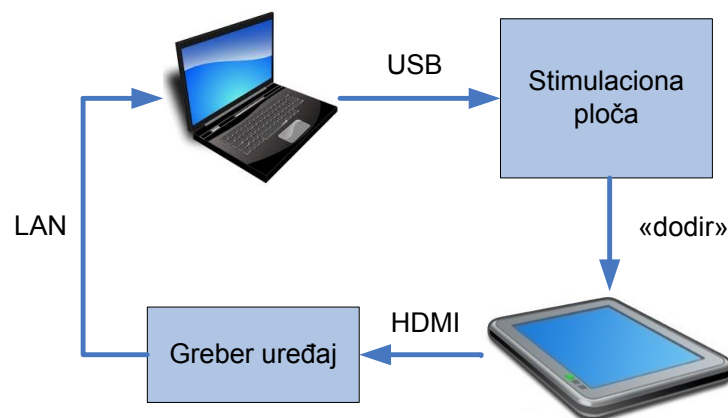


Slika 4.8. Arhitektura kontrolne ploče zasnovane na pomeračkim registrima

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir

4.5 Sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

Nakon što je prikazana stimulaciona ploča za nemehaničku stimulaciju ekrana osetljivih na dodir, prikazaćemo pregled ideje kako se ta stimulaciona ploča može iskoristiti u sistemu za automatsku funkcionalnu proveru uređaja potrošačke elektronike sa ekranima osetljivim na dodir. Stimulaciona ploča se u takvom sistemu koristi kao uređaj koji automatizovano generiše ulaz uređaja i simulira korisnika dok koristi uređaj.



Slika 4.9. Pregled sistema za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

Sistem, prikazan na slici 4.9, se sastoji iz sledećih komponenti:

- PC računar koji kontroliše izvršavanje testova za dati uređaj koji se proverava, šalje podatke kontrolnoj ploči USB komunikacijom i prikuplja rezultate testiranja, analizira ih i pamti u bazi podataka,
- stimulaciona ploča,
- greber uređaj koji preuzima sliku sa testiranog uređaja putem HDMI protokola i šalje je PC računaru na analizu korektnosti putem LAN komunikacije, uređaj koji se proverava (mobilni telefon, tablet, ...).

Nakon što smo prikazali stimulacionu ploču za stimulisanje ekrana osetljivih na dodir električnim metodama, istu ćemo integrisati u postojeći BBT sistem za automatsku proveru uređaja potrošačke elektronike, koji je do sada podržavao proveru digitalnih TV prijemnika i prijemnika TV signala, a pomoću ove stimulacione ploče njegova primenljivost će se proširiti i na uređaje sa ekranima osetljivim na dodir. Pre nego što se okrenemo problemu ove integracije, pokazaćemo još jedan rezultat rada ove doktorske disertacije, algoritam za

4. Stimulaciona ploča za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir

proveru ispravnosti sadržaja na ekranu uređaja koji je neophodan deo sistema za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir, sa stanovišta percepcije korisnika. Algoritam je razvijen za potrebe provere digitalnih TV prijemnika sa stanovišta percepcije korisnika, a bez velikih izmena koristi se i kao deo sistema koji je tema ove disertacije.

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika analizom sadržaja ekrana pomoću kamere

BBT sistem je uveo automatizaciju u proces provere uređaja potrošačke elektronike koji vrše obradu slike i zvuka – digitalnih TV prijemnika, prijemnika TV signala, DVD i BluRay uređaja. U ovom poglavlju prikazaćemo jedan doprinos ove disertacije unapređenju funkcionalnosti BBT sistema, a to je provera navedenih uređaja sa stanovišta percepcije korisnika. Naime, umesto pristupa koji sliku preuzima iz elektronike uređaja koji se proverava, kao što to rade uređaji RT-AV030, RT-AV1xx i RT-AV300 prikazani u ranijem poglavlju, koristiće se pristup koji sliku preuzima sa ekrana, posmatrajući ga kamerom, simulirajući način na koji uređaj posmatra krajnji korisnik.

Predloženi sistem, ilustrovan na slici 5.1, se sastoji od sledećih komponenti:

- uređaj koji se proverava (TV prijemnik, mobilni telefon, tablet),
- PC računar koji kontroliše izvršavanje testova i analizira odziv uređaja, vrši poređenje sa očekivanim odzivom, odlučuje o ispravnosti rada uređaja i rezultate provere pamti u bazi podataka,
- signal generator koji definiše sliku koju uređaj treba da prikaže (RT-AV300) i šalje je nekim od standardnih sprega (HDMI, SCART, CVBS, VGA), povezan sa PC računarom u lokalnu mrežu (LAN),
- digitalna kamera koja posmatra ekran, slika ga i šalje sliku trenutnog sadržaja ekrana ka PC računaru putem USB sprege na analizu.

PC računar izvršava aplikaciju koja kontroliše izvršavanje testova, ali istovremeno i vrši analizu kvaliteta slike koja mu pristiže sa kamere i predstavlja trenutni sadržaj na ekranu uređaja koji se proverava. Preuzeta slika sa kamere se poredi sa referentnim slikama očekivanog sadržaja na ekranu. Ovaj algoritam će biti detaljnije prikazan nešto kasnije, a najveći izazov prilikom njegovog dizajna je bilo pronaći efikasan i pouzdan način otkrivanja ivica ekrana na slici koja pristiže sa kamere, jer je bitan deo slike, tj. sadržaj ekrana, sadržan samo unutar ivica ekrana.

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika



Slika 5.1. Pregled sistema za automatsku proveru rada digitalnih TV prijemnika sa stanovišta percepcije korisnika

Drugi izazov je bila transformacija slike iz potpuno nepravilne geometrije ivica ekrana, izobličene zbog iskrivljenosti sočiva kamere, u pravougaoni format u kome se nalaze referentne slike. Ova transformacija je bitan deo algoritma, zbog toga što se sadržaj sa ekrana na slici koju preuzima kamera pojavljuje kao iskrivljeni neravni četvorougao, sa izobljenim stranicama, što je posledica izobličivosti koju uvodi optika kamere prilikom slikanja. Ovakvu nepravilnu geometrijsku figuru je potrebno transformisati u pravougaonik kako bi poređenje sa referentnim sadržajem bilo moguće. Izlaz algoritma je brojna vrednost sličnosti između referentne i preuzete slike, kao i odluka da li je preuzeta slika ispravna, odn. jednaka referentnoj ili ne.

Integralni deo sistema je „crna komora“, prikazana na slici 5.2, u kojoj se obavlja provera rada uređaja. Ova komora se koristi da bi obezbedila konstantno svetlosno okruženje i eliminisala moguće probleme koje promenljivo osvetljenje u prostoriji uvodi na sliku koju kamera vidi sa ekrana. TV koji se proverava se na proizvodnoj liniji unosi u „crnu komoru“, kamera unutar komore slika stanje na ekranu nakon što se pokrene odgovarajući testni slučaj i na kraju TV napušta komoru prepuštajući mesto narednom uređaju na proizvodnoj liniji.

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika



Slika 5.2. „Crna komora“ za automatsku proveru TV prijemnika sa stanovišta percepcije korisnika omogućava konstantno svetlosno okruženje tokom provere

Manuelni rad tokom provere rada uređaja sa predloženim sistemom je smanjen na priključivanje TV prijemnika na napajanje i signal generator. Sistem koristi isti emulator daljinskog upravljača kao i sistem zasnovan na RT-AV100 ili RT-AV300 generaciji greber uređaja. Sve prednosti automatske provere uređaja koje su navedene u prethodnom poglavlju kao motivacija za istraživanje BBT sistema se prenose i važe za sistem predložen u ovom poglavlju, a kao najveća ušteda u vremenu proveravanja se prenosi eliminacija vremena transporta između pojedinih testnih stanica, jer se čitavo testiranje vrši unutar „crne komore“. Sistem je takođe pouzdaniji, brži, efikasniji i jeftiniji od manualnog rešenja. Provera se vrši sa stanovišta percepcije korisnika, čime je rešen taj nedostatak koji su imali sistemi bazirali na greber uređajima koji nisu „videli“ šta se zaista nalazi na ekranu.

BBT sistem sa kamerom je razvijan u tri iteracije:

- U prvoj iteraciji, PC računar je korišten i za kontrolu izvršavanja testova i za analizu pristigle slike sa kamere; na PC računaru je pokretan algoritam za poređenje preuzete slike sa kamere i referentne slike,
- U drugoj iteraciji, kamera je unapređena i zamenjena DSP kamerom za brži prijem slike i prenos ka PC računaru,

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

- Konačno, u trećoj iteraciji, obrada slike, odn. poređenje preuzete i referentne slike je prebačeno na DSP na kameri, zbog bržeg izvršavanja; PC računar se koristi isključivo za kontrolu izvršavanja testova i ne pokreće algoritam analize slike.

Za BBT sistem sa kamerom je u okviru ove disertacije dizajniran i implementiran algoritam za procenu ispravnosti sadržaja na ekranu na slici preuzetoj sa kamere. U nastavku će biti dat njegov opis. Ovaj algoritam je razvijen na primeru provere TV uređaja, pa će opis algoritma biti dat na tom primeru. Bez većih izmena, algoritam se koristi i kao deo sistema za proveru uređaja osetljivih na dodir, slikajući sadržaj na ekranu tih uređaja.

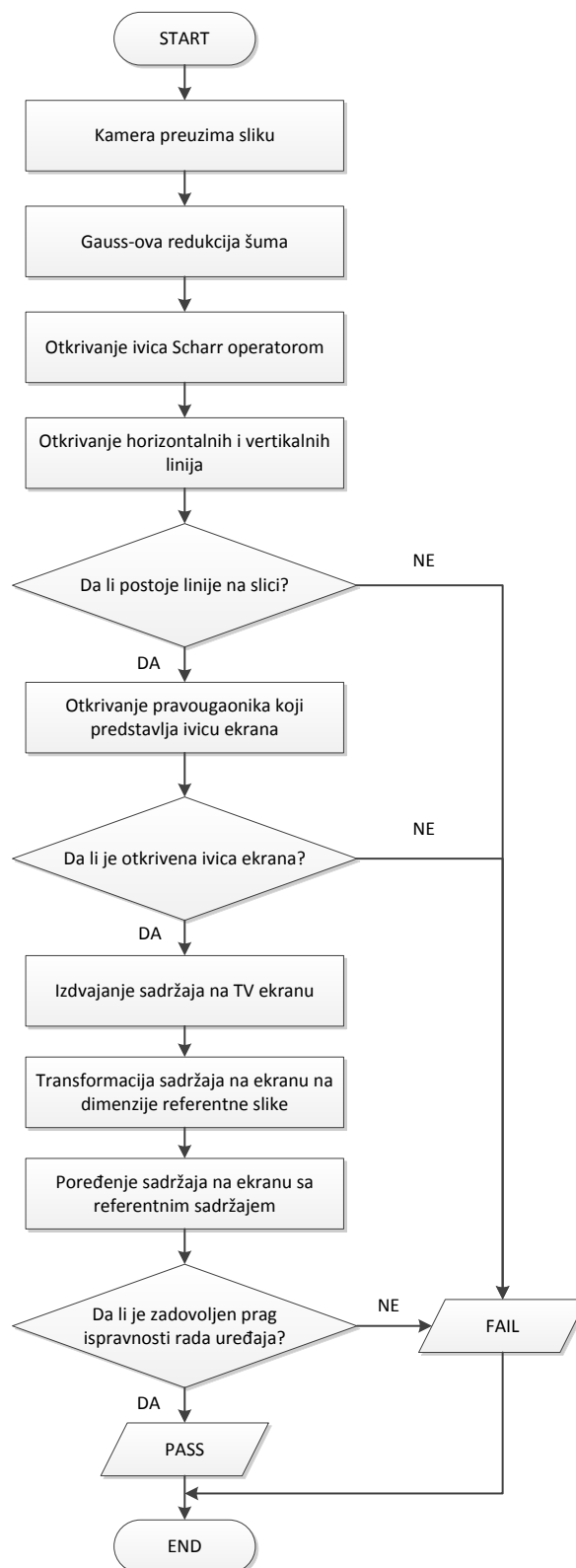
5.1 Algoritam

Nakon što uslika stanje na ekranu uređaja koji se proverava u „crnoj komori“, kamera šalje sliku ka procesorskoj jedinici (PC računar ili DSP) kojoj je zadatak da izračuna sličnost sadržaja na ekranu na slici koja stiže od kamere sa očekivanim sadržajem koji je prikazan na referentnoj slici. Sličnost dva sadržaja služi kao ocena ispravnosti rada uređaja, odn. ocena da li je uređaj odgovorio na ulazne komande i signal na očekivan način. Algoritam koji se izvršava na glavnoj procesorskoj jedinici za obradu slike sistema, PC računaru ili DSP procesoru, u zavisnosti od implementacije, opisan je u nastavku.

Algoritam za procenu ispravnosti sadržaja na ekranu [75]-[79] (slika 5.3) se izvršava u sledećih nekoliko koraka:

- redukcija šuma Gauss-ovom metodom,
- otkrivanje ivica na slici Scharr-ovim operatorom,
- otkrivanje dugačkih horizontalnih i vertikalnih linija na slici koje su kandidati da budu ivice ekrana,
- otkrivanje onog pravougaonika sastavljenog od dugačkih horizontalnih i vertikalnih linija koji predstavlja ivice ekrana,
- transformacija slike iz ekrana na dimenzije referentne slike,
- poređenje uslikanog sadržaja i referentnog sadržaja jednom od sledećih metoda:
 - najmanja apsolutna greška (Least Absolute Error, LAE)
 - normalizovana kros-korelacija (Normalized Cross-Correlation, NCC)
 - blokovska normalizovana kros-korelacija (Block Based Normalized Cross-Correlation, NCC-BB).
- donošenje odluke o ispravnosti sadržaja na ekranu pomoću praga za odlučivanje.

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika



Slika 5.3. Algoritam za otkrivanje sadržaja na ekranu na slici uslikanoj kamerom i njegovo poređenje sa referentnim sadržajem kako bi se otkrila ispravnost rada TV prijemnika

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

U nastavku je dat opis svakog od navedenih koraka u izvršavanju algoritma. Izvršavanje algoritma ćemo prikazati na primeru slike 5.4, koja je poslata od strane kamere PC računaru na analizu.



Slika 5.4. Slika uslikana kamerom, spremna za analizu sadržaja ekrana

5.1.1 Otkrivanje dugačkih horizontalnih i vertikalnih linija na slici

Problem otkrivanja ivica ekrana se može posmatrati kao modifikovani problem otkrivanja pravougaonika na slici, bez obzira na činjenicu da ivice ekrana na slici koja stiže sa kamere ne predstavljaju pravilan pravougaonik, nego zaobljeni. Ivce ekrana nisu prave linije, već su zaobljene zbog iskrivljenosti koju sočiva kamere uvode na svojoj slici. Iskrivljenost ivica ekrana je vidljiva na slici 29. Kao što ćemo kasnije pokazati, iskrivljenost linija se kompenzuje korišćenjem bafera prilikom otkrivanja linija na slici, koji dozvoljava male devijacije u linijama.

Dodatno, uvedeno je još nekoliko uprošćenja kako bi algoritam otkrivanja TV ekrana bio jednostavniji, ali precizan. Ivce ekrana se smatraju uvek horizontalne i vertikalne, i smatra se da će uvek da se nalaze na krajevima slike, što je i slučaj prilikom kontrolisanog testiranja TV uređaja unutar „crne komore“. Ova uprošćenja algoritma dovode do toga da nisu iskorišteni standardni algoritmi otkrivanja pravougaonika od kojih su neki navedeni u uvodu

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

ove disertacije, nego je dizajniran algoritam specijalno za ovu primenu – algoritam koji otkriva dugačke horizontalne i vertikalne linije na slici, koje mogu biti malo zakrivljene.

Prvi korak u algoritmu je redukcija šuma na slici upotrebom Gauss-ovog operatora [80]. Na slici A, šum se redukuje koristeći konvoluciju:

$$A' = \frac{A}{159} * \begin{pmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{pmatrix}$$

Drugi korak u algoritmu je otkrivanje ivica na slici. U ovu svrhu iskorišten je standardan metod otkrivanja ivica Scharr operatorom [81]. Ovaj operator uvodi poboljšavanja u odnosu na poznatiji Sobel-ov operator. Komponente gradijenta u obe dimenzije, intenzitet gradijenta G i smer θ se računaju sledećim jednačinama:

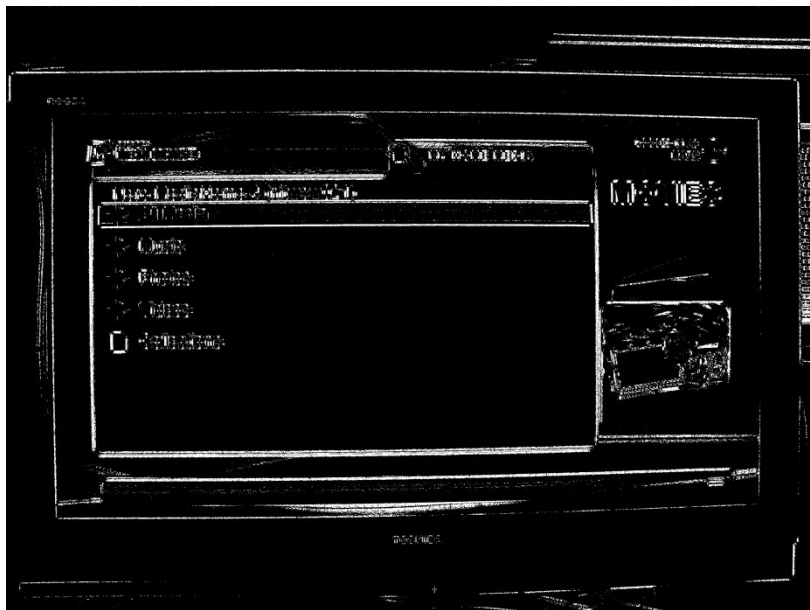
$$G_x = A * \begin{pmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{pmatrix}$$

$$G_y = A * \begin{pmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{pmatrix}$$

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

$$\theta = \arctan \frac{G_y}{G_x}$$

Nakon otkrivanja svih ivica na slici, za svaku tačku otkrivene ivice se računa intenzitet i smer njenog gradijenta i primenjuje prag. Ostavljaju se samo ivice koje su dovoljno velikog intenziteta, i one čiji smer je u susedstvu vrednosti 0 i $\pi/2$, tj. one koje su približno horizontalne i vertikalne. Slika 5.5 prikazuje rezultat izvršavanja ovog dela algoritma na našem primeru.



Slika 5.5. Otkrivene horizontalne i vertikalne ivice na slici sa kamere

Treći korak je otkrivanje koje od horizontalnih i vertikalnih ivica sa slike 5.5 možemo proglasiti dugačkim horizontalnim i vertikalnim linijama. Problemu se može pristupiti nekim od postupaka otkrivanja oblika na slici [82]-[84]. Međutim, zbog neidealne pozicije kamere i zakrivljenja koje uvodi sočivo kamere, linije nisu potpuno pravilno horizontalne i vertikalne, nego malo zaobljene. Iz tog razloga, linije se analiziraju unutar bafera koji dozvoljava odstupanje od prave linije i dozvoljava posmatranje tačaka u susedstvu mesta gde se predviđa da bi bio nastavak linije kada bi ona bila prava. Korišćenje bafera dozvoljava male zakrivljenosti i prekide u pravoj liniji.

Rezultat ovog dela algoritma je niz indeksa koordinata na kojima je otkriveno da postoji dugačka (bar duža od polovine ekrana) horizontalna ili vertikalna linija. Ove linije su kandidati za ivice ekrana.

5.1.2 Otkrivanje pravougaone ivice ekrana

Rezultat prethodnog koraka algoritma, niz horizontalnih i vertikalnih linija koje su kandidati za ivice ekrana, ulazi u ovaj korak na analizu koja četvorka (dve horizontalne i dve vertikalne linije) predstavlja ivice ekrana. Pošto svaki ekran ima bar 2 ivice, spoljašnju i ivicu ekrana, uvedena je aproksimacija da se posmatraju samo linije najbliže ivici slike. Ova aproksimacija je uvedena zbog toga što u „crnoj komori“ neće biti otkrivenih ivica izvan samog uređaja koji se proverava. U zavisnosti od samog ekrana, tačan broj linija koji se proverava se može podesiti kao parametar algoritma i prilagoditi datom proizvođaču uređaja

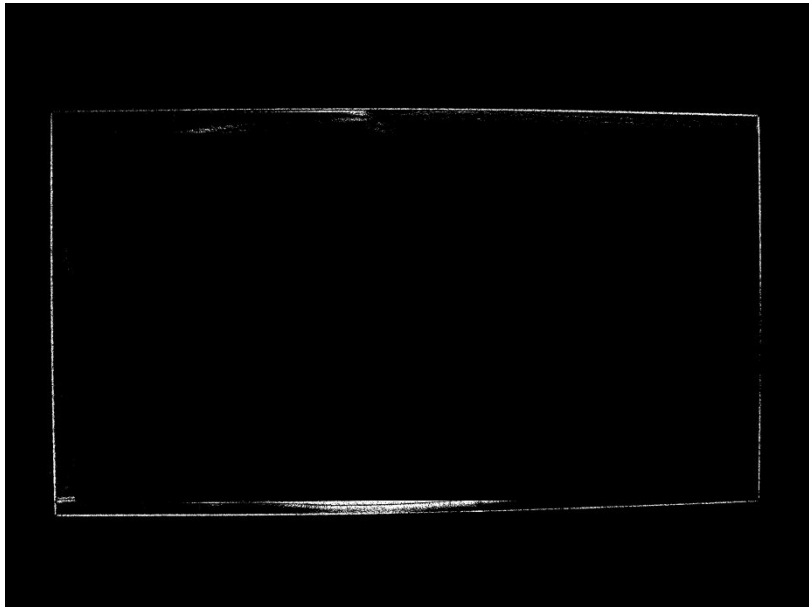
5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

vrlo jednostavno. Ograničenje u broju linija koje se proveravaju je uvedeno kao aproksimacija zbog toga što postoji značajna verovatnoća da će se na samoj slici na ekranu pojaviti dugačke linije koje mogu da liče na ekran, i koje bi algoritam mogao da proglaši ivicama ekrana iako to nisu. Ovim ograničenjem se ovo lako može izbeći, a parametrizovanje ograničenja omogućava da se algoritam prilagodi datom proizvođaču koji koristi sistem.

Svi kandidati za ivice ekrana se analiziraju tražeći preseke horizontalnih i vertikalnih linija kako bi se otkrile četvorke koje čine pravougaonik. Samo pravougaonici čije dimenzije spadaju u susedstvo željenog odnosa (najčešće 16:9 ali se parametrom može prilagoditi ostalim odnosima, kao što su 4:3 ili 16:10) ostaju kao kandidati za ivice ekrana. Očekivano je da se otkrije dva takva pravougaonika – spoljašnja ivica uređaja i ivica ekrana. U tom slučaju se unutrašnji proglašava ivicom ekrana. Ukoliko se otkrije samo jedan pravougaonik, podrazumeva se da je on ivica ekrana, a ovo se može desiti ukoliko spoljašnja ivica uređaja koji se proverava ne zadovoljava željeni odnos širine i visine, zbog dizajna uređaja. Ukoliko se otkrije više pravougaonika ili nijedan, algoritam javlja grešku, no ovo se u kontrolisanim uslovima „crne komore“ ne očekuje, pod uslovom da su parametri algoritma dobro podešeni za dati dizajn uređaja.

Otkrivena ivica se kompletira zadržajem nultog reda i njena debljina se smanjuje na širinu od jednog piksela. Zadržaj se vrši zbog toga što otkrivena ivica ekrana nikada nije kompletna zbog nesavršenosti otkrivenih ivica na slici, a kompletna ivica je neophodna kao ulaz u naredni korak algoritma.

Rezultat izvršavanja ovog dela algoritma na našem primeru je prikazan na slici 5.6. Ovaj prikaz ne predstavlja ivicu širine 1 piksela, nego nešto vidljiviji raniji korak, kada je ivica otkrivena ali još nije redukovana i kompletirana.



Slika 5.6. Otkrivena ivica TV ekrana

5.1.3 Transformacija sadržaja na ekranu na dimenzije referentne slike

Referentne slike se čuvaju u predefinisanoj rezoluciji, istoj kojoj signal generator šalje sliku uređaju, istoj kojoj uređaj obrađuje tu sliku i prikazuje na ekranu, istoj kojoj bi greber uređaj preuzeo tu sliku iz elektronike uređaja. Ta rezolucija je u HDTV standardu 1920 x 1080. Kako bi se preuzeta slika sadržaja na ekranu uporedila sa referentnom slikom, neophodno je transformisati tu sliku na dimenzije referentne slike. Međutim, ovaj proces nije jednostavan, a komplikacije nastaju ne samo u činjenici da je sadržaj sa ekrana na slici sa kamere prikazan u prilično „iskrivljenom“ izdanju – unutar zaobljenog pravougaonika, već i u činjenici da taj iskrivljeni geometrijski oblik ni ne predstavlja iskrivljeni pravougaonik, već u najboljem slučaju romboid, a najčešće potpuno nepravilan četvorougao. Transformacija ne sme da pretpostavi kakav je geometrijski oblik kamera uslikala, već se isti mora posmatrati u opštem slučaju kao četvorougao kome su stranice zaobljene.

Na sreću, transformisana slika ne mora biti idealno interpolirana da bi se poređenje sa referentnom slikom moglo izvršiti, pošto ćemo koristiti metode poređenja koje su zasnovane na blokovima, a ne na poređenju svakog piksela. Bit-precizno poređenje nije ni moguće u ovakvoj konfiguraciji sistema zbog ipak neizbežne nepreciznosti kamere. Zbog ovoga će se uvesti još neke matematičke aproksimacije koje ćemo u nastavku pokazati.

Kako bi bolje razumeli postupak transformacije u ovom algoritmu, u nastavku će biti matematički izvedeno rešenje inverznog problema, naime transformacije pravougaonika

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

dimenzija 1920 x 1080 piksela u proizvoljan zaobljeni četvorougao. Algoritam izvršava inverznu transformaciju od ovde navedene, ali je smer od pravougaonika ka četvorouglu mnogo lakši za razumevanje i izvođenje.

Dakle, posmatrajmo problem transformacije slike iz pravougaonika u proizvoljan zaobljeni četvorougao. Za početak ćemo zanemariti zaobljene ivice četvorougla i posmatraćemo problem transformacije slike iz pravougaonika u proizvoljan četvorougao. Nakon toga ćemo preuzeti potrebne korake da bi se slika transformisala i unutar zaobljenih ivica.

Posmatrajmo problem prikazan na slici 5.7. Pravougaonik $ABCD$ je potrebno transformisati u četvorougao $A'B'C'D'$. Problem ove transformacije može da se posmatra kao problem pronalaženja koordinata tačke G' u četvorouglu $A'B'C'D'$ koja odgovara tački G u pravougaoniku $ABCD$. Tačka G je na duži EF koja se transformiše u duž $E'F'$, pod pretpostavkom da su prave linije sačuvane tokom ove transformacije. Možemo primetiti da je vrednost nagiba prave $E'F'$ između vrednosti nagiba pravih $A'B'$ i $C'D'$.

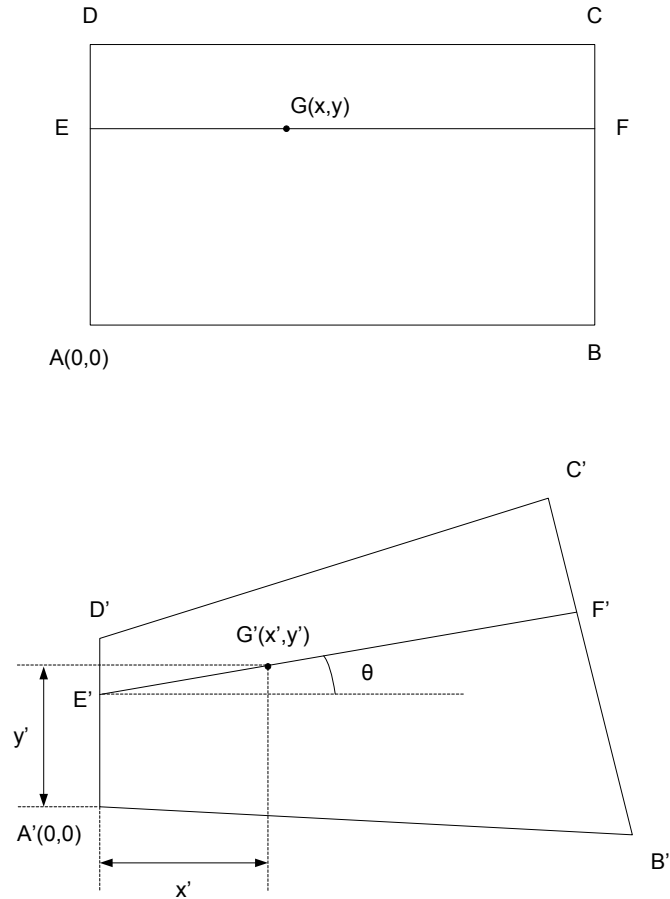
Bez gubitka opštosti, pretpostavićemo da su tačke A i A' koordinatni počeci svojih koordinatnih sistema. Takođe, bez gubitka opštosti, smatraćemo da je jedna od strana četvorougla $A'B'C'D'$ na osi svog koordinatnog sistema. Izabraćemo stranu $A'D'$ kao vertikalnu, odn. na y' -osi svog koordinatnog sistema.

Pretpostavićemo da nagib transformisane linije raste linearno prema krajnjim tačkama, od linije $A'B'$ ka liniji $C'D'$, pošto su nepravilnosti zanemarljivo male. Tačnije, ako pretpostavimo da liniju EF pomeramo od donje ivice pravougaonika (AB) ka gornjoj ivici (CD), odgovarajuće linije u četvorouglu $A'B'C'D'$ menjaju svoj nagib linearno, na način da krajnje tačke E' i F' ravnomerno klize ka tačkama D' i C' respektivno.

Iz pretpostavke linearnosti pomeraja kod transformacije, lokacija tačke E' je data sledećom jednačinom ($x_E' = 0$):

$$y_E' = y_E * \frac{\overline{A'D'}}{\overline{AD}}$$

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika



Slika 5.7. Problem transformacije pravougaonika $ABCD$ u četvorougao $A'B'C'D'$

Nagib duži $E'F'$ dat sledećom jednačinom:

$$\theta = \angle E'F' = \angle A'B' + \frac{y'_E}{A'D'} * (\angle C'D' - \angle A'B')$$

Nagib duži $A'B'$ se može pronaći iz sledeće jednačine:

$$\angle A'B' = \arctan \frac{y'_B - y'_A}{x'_B - x'_A}$$

a nagib duži $C'D'$ iz:

$$\angle C'D' = \arctan \frac{y'_D - y'_C}{x'_D - x'_C}$$

iz čega se može izračunati nagib θ :

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

$$\theta = \arctan \frac{y'_B - y'_A}{x'_B - x'_A} + \frac{y_E * \overline{A'D'}}{\overline{AD}} * \left(\arctan \frac{y'_D - y'_C}{x'_D - x'_C} - \arctan \frac{y'_B - y'_A}{x'_B - x'_A} \right)$$

Koordinate svih temena obe figure su poznate, što znači da je iz prethodne jednačine direktno određen nagib θ .

Lokacija tačke G' na duži $E'F'$ se nakon toga može pronaći iz sledeće proporcije:

$$\overline{EG} : \overline{E'G'} = \overline{EF} : \overline{E'F'}$$

odnosno:

$$\overline{E'G'} = \frac{\overline{EG} * \overline{E'F'}}{\overline{EF}}$$

Nakon što znamo dužinu duži $E'G'$ i nagib θ iz prethodnih jednačina, koordinate tačke G' nalazimo iz sledećih trigonometrijskih identiteta:

$$x' = \overline{E'G'} * \cos \theta$$

$$y' = y'_E + \overline{E'G'} * \sin \theta$$

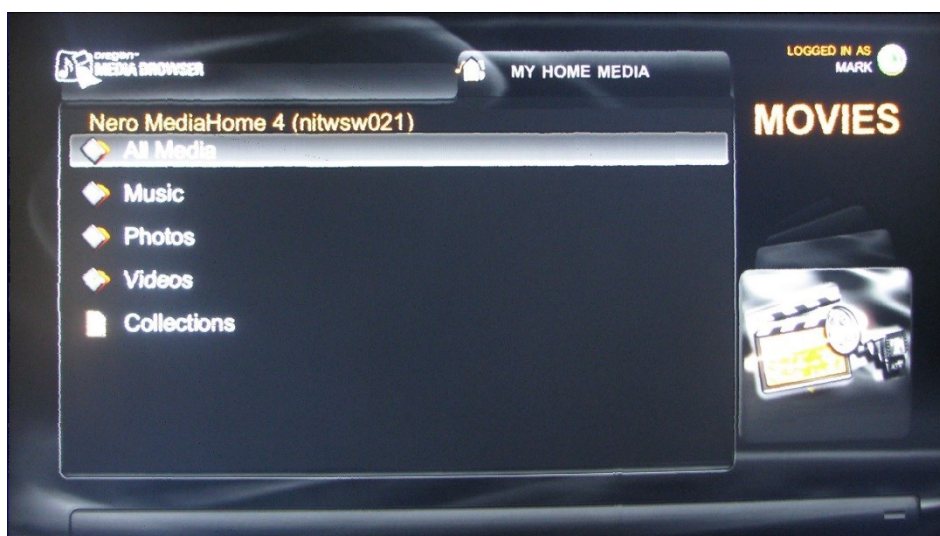
Nakon transformacije pravougaonika u četvorougao sa pravim linijama, potrebno je isti „iskriviti“, odn. prilagoditi zakrivljenim linijama kakve su ivice ekrana na slici sa kamere. Ovo prilagođavanje se u algoritmu izvršava prvo u jednoj dimenziji, a onda u drugoj liniju po liniju. Pod linijama se ovde podrazumevaju duži kao što je $E'F'$. Svaka linija se skalira, odn. širi tako da zauzima prostor između stvarnih krajeva te linije koji su definisani ivicama ekrana sa slike 31. Promene koje se ovde vrše su minimalne, ali neophodne da bi se popunili crni regioni između ivica pravilnog četvorougla i stvarne ivice ekrana. Zbog geometrije sistema i optike kamere, stvarne ivice ekrana su uvek ispupčene u odnosu na pravilni četvorougao, tako da ovo skaliranje uvek ide u smeru širenja linija.

Time smo završili prikaz transformacije pravougaonika u zakrivljeni četvorougao kakav predstavlja ivica ekrana na slici sa kamere. Algoritam u BBT sistemu sa kamerom izvršava inverzni postupak od prethodno navedenog, tj. transformaciju iz zakrivljenog četvorougla u pravougaonik. Ranije navedeni smer je lakši za razumevanje i izvođenje, a algoritam koristi

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

inverzne jednačine ranije navedenih – prvo transformiše zakrivljeni četvorougao u pravilni skupljanjem linija, a zatim inverznim jednačinama od ranije navedenih računa koordinatu tačke G poznajući koordinate tačke G' .

Rezultat ovog dela algoritma je transformisan sadržaj na ekranu na dimenzije referentne slike. Transformisan sadržaj ne zahteva dodatne interpolacije, zbog toga što će poređenje sa referentnom slikom biti izvršavano na blokovskom nivou, a ne na nivou pojedinačnih piksela. Rezultat izvršavanja ovog dela algoritma na našem primeru je prikazan na slici 5.8.



Slika 5.8. Slika sa kamere (iznad) i odgovarajući sadržaj na ekranu transformisan na dimenzije referentne slike (ispod)

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

Izlaz ovog dela algoritma, sadržaj na ekranu transformisan na dimenzije referentne slike, spreman je za poređenje sa referentom slikom, na šta se okrećemo u nastavku.

5.1.4 Poređenje stvarnog i očekivanog sadržaja na ekranu

Poređenje slike koja predstavlja sadržaj na ekranu sa referentnom slikom koja predstavlja očekivani sadržaj se vrši u dimenzijama referentne slike. U HDTV standardu ove dimenzije su 1920 x 1080 piksela. U nastavku su opisane tri metode za poređenje slika koje su sve blokovski orijentisane, zato što poređenje ne možemo vršiti na nivou piksela, zbog nesavršenosti kamere i transformacione metode. Korištene su sledeće metode za poređenje:

- metoda najmanje apsolutne greške (Least Absolute Error, LAE), standardna metoda koja je prilagođena blokovskom poređenju,
- normalizovana kros-korelacija (Normalized Cross Correlation, NCC), takođe standardna metoda koja je prilagođena blokovskom poređenju,
- blokovska normalizovana kros-korelacija (Block-based Normalized Cross-Correlation, NCC-BB), modifikovana blokovska NCC metoda za naše potrebe.

5.1.4.1 Metoda najmanje apsolutne greške

Prva metoda koju ćemo pokazati je metoda najmanje apsolutne greške (*Least Absolute Error*), skraćeno LAE metoda. U našoj primeni, standardna LAE metoda je izmenjena, tako da je zasnovana na poređenju regiona na slici, a ne pojedinačnih piksela. Svaki region u transformisanoj slici sa kamere se poredi sa odgovarajućim regionom na referentnoj slici.

Svetlosno okruženje u „crnoj komori“ dovodi do lažne razlike između slike sa kamere i referentne slike, zbog toga što slika sa kamere biva svetlija nego što stvarno jeste na ekranu. „Crna komora“ osigurava da će ova razlika u osvetljenju biti konstantna na čitavom ekranu, ali ne može da je ukloni. Zbog toga je, pre poređenja, potrebno na neki način eliminisati ovu razliku. U tu svrhu se obe slike, i ona sa kamere i referentna, normalizuju standardnom statističkom metodom.

Neka je data slika A . Ako srednju vrednost za čitavu sliku označimo sa μ_A , a standardnu devijaciju na čitavoj slici označimo sa σ_A , normalizovana slika A' slika se dobija sledećom formulom, primenjenom na svaki piksel slike:

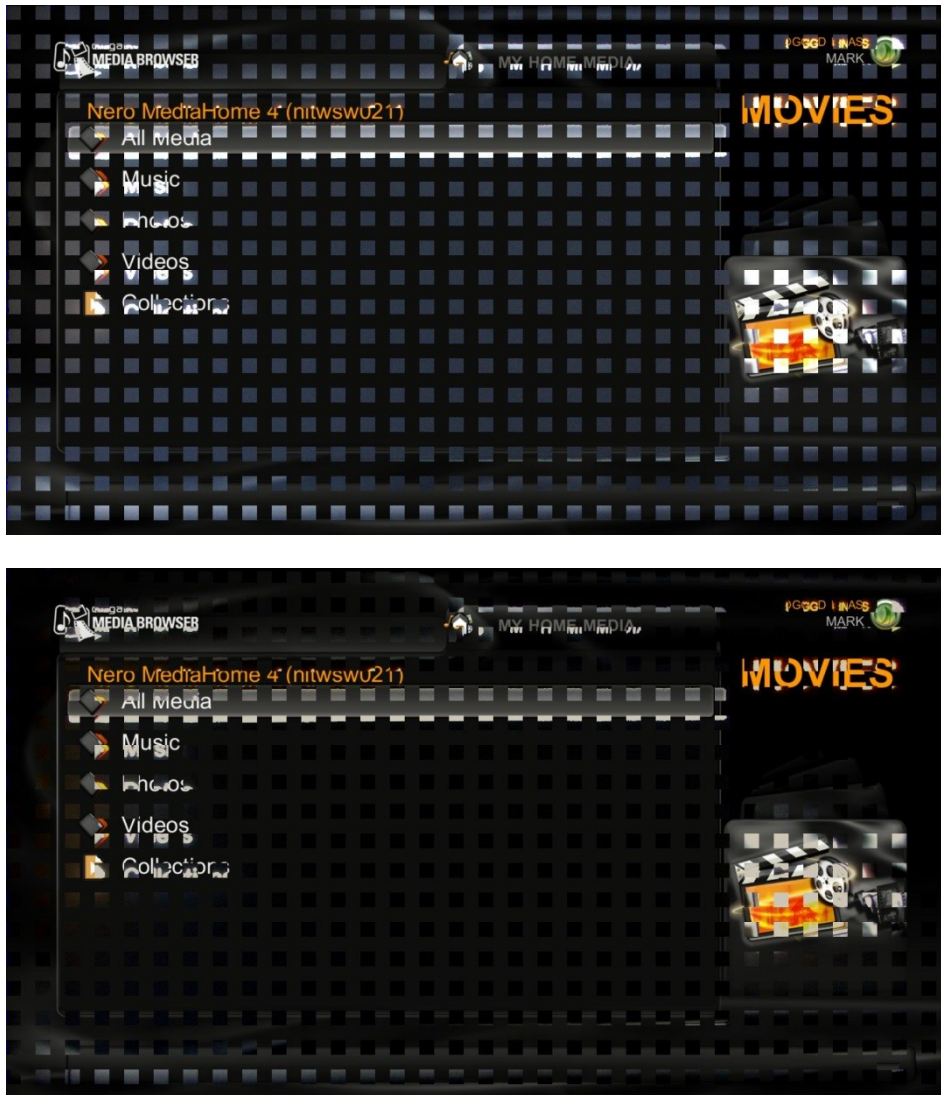
$$A' = \frac{A - \mu_A}{\sigma_A}$$

Srednja vrednost svake od tri komponente boje (crvena, zelena, plava) se računa za svaki region slike. Razlike između vrednosti svake od komponenata boje između dve slike se

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

sumiraju kroz sve regione. Ukupna mera različitosti dve slike A i B je, konačno, data sledećom jednačinom, s tim da su x i y koordinate regiona, a ne piksela:

$$D = \sum_{x,y} \sum_{c=R,G,B} \left| \frac{A(x,y) - \mu_A}{\sigma_A} - \frac{B(x,y) - \mu_B}{\sigma_B} \right|$$



Slika 5.9. Referentna slika sa regionima poređenja sa transformisanom slikom sa kamere – bez normalizacije (iznad) i sa normalizacijom (ispod)

Na slici 5.9 su prikazani regioni poređenja dve slike. Referentna slika je u pozadini, a regioni transformisane slike sa kamere su prikazani u regionima koji se porede. Gornja slika predstavlja primer u kome normalizacija nije učinjena, dok je donja slika primer sa

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

normalizacijom. Može se primetiti da normalizacija značajno poboljšava merenje različitosti dve slike. Zbog jasnijeg prikaza ovde su prikazani samo neki regioni slika.

5.1.4.2 Metoda normalizovane kros-korelacije

Druga metoda poređenja slika je metoda normalizovane kros-korelacije (*Normalized Cross-Correlation, NCC*). Ova metoda koristi kros-korelaciju kao meru sličnosti dve slike. Kros-korelacija je normalizovana kako bi se smanjio uticaj promenjenog osvetljenja na slici sa kamere, u odnosu na referentnu sliku, kao što je objašnjeno ranije (slika 5.9).

Sličnost dva regiona slika R_A i R_B u normalizovanim slikama A_n i B_n se računa pomoću kros-korelacije regiona. Kros-korelacija za kontinualne signale je data sledećom jednačinom, pretpostavljajući da je N ukupan broj tačaka (piksela) u regiji:

$$S = \frac{1}{N} \iint_{R_A, R_B} A_n(x, y) * B_n(x, y) dx dy$$

Normalizovana slika A_n se iz originalne slike A dobija koristeći sledeću jednačinu normalizacije:

$$A_n(x, y) = \frac{A(x, y) - \mu_A}{\sqrt{\frac{1}{N} \iint_{R_A} (A(x, y) - \mu_A)^2 dx dy}}$$

Kombinovanjem prethodne dve jednačine, sličnost između slika A i B se može izračunati na sledeći način:

$$S = \frac{\iint_{(x,y) \in R_A, R_B} (A(x, y) - \mu_A)(B(x, y) - \mu_B) dx dy}{\sqrt{\iint_{(x,y) \in R_A} (A(x, y) - \mu_A)^2 dx dy} \sqrt{\iint_{(x,y) \in R_B} (B(x, y) - \mu_B)^2 dx dy}}$$

Pošto je slika diskretni signal, integrali su u ovoj primeni sume. Svaka regija se obrađuje nezavisno, a izračunate sličnosti svih regija se akumuliraju u ukupnu sličnost slika. Sličnost se računa za svaku komponentu boje (crvena, zelena, plava) i sumira u ukupnu meru sličnosti referentne slike i slike sa kamere.

5.1.4.3 Blokovska normalizovana kros-korelacija

Prethodne dve metode su već poznate metode otkrivanja sličnosti između dve slike. Problem kod normalizovane kros-korelacije (NCC metode) je nemogućnost definisanja apsolutnog praga u izmerenoj sličnosti slika. Naime, brojna vrednost sličnosti slike zavisi od sadržaja slike, odn. brojna vrednost se može koristiti samo za relativno poređenje, tj. koja od

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

N slika je najbližnja datoj referentnoj slici. Definisanje apsolutnog praga koji bi govorio da li je slika slična referentnoj ili ne je prilično teško.

Kako bi se premostila ova prepreka u definisanju apsolutne mere sličnosti dve slike, ova disertacija predlaže unapređenje NCC metode, takvo da se, umesto apsolutne vrednosti kros-korelacije za čitave slike, računa relativna vrednost po blokovima, u odnosu na tzv. „zlatni uzorak“, odn. ispravnu sliku na TV ekranu.

Predložena metoda, nazvana Blokovska normalizovana kros-korelacija (*Block Based NCC*, NCC-BB), izvršava NCC poređenje u blokovima slike. Ovde nazvani „blokovi“ slike nisu isto što i „regioni“ slike ranije spomenuti i korišteni u prethodnim metodama. Regioni slike su pravougaoni delovi slike koje smo smatrali nedeljivim, osnovnim elementima slike, i kojima smo udruživali jednu (R,G,B) vrednost. Blokovi su veće regije slike i za njih se računa NCC sličnost, a sadrže ranije spomenute regione. NCC metoda se može posmatrati kao specijalan slučaj NCC-BB metode, u kome se slika sastoji od jednog bloka. U NCC-BB metodi, sliku delimo na više blokova i NCC sličnost se računa za svaki blok slike posebno.

Kako bi brojna vrednost sličnosti imala apsolutnu vrednost, odn. bila primenljiva kao apsolutna mera sličnosti dve slike, NCC-BB metoda koristi „zlatni uzorak“, odn. kao prvi korak se ispravna slika prikazuje na ispravnom uređaju, a taj ispravni sadržaj na ekranu se slika kamerom i šalje na poređenje NCC metodom sa referentnom slikom. Rezultat NCC poređenja se pamti kao sličnost „zlatnog uzorka“. Ovo se može posmatrati kao korak „učenja“ algoritma, a ovaj dodatni korak ne smanjuje nivo automatizacije čitavog sistema zbog toga što se mora izvršiti samo jednom na početku rada sistema, npr. tokom instalacije sistema. „Zlatni uzorak“ se takođe mora manuelno izabrati, ali i on se bira samo jednom, prilikom instalacije sistema. Nakon ovog inicijalnog pokretanja sistema da bi se pronašla sličnost „zlatnog uzorka“, ostali uređaji se proveravaju automatski, a njihove sličnosti se analiziraju poredeći ih sa sličnosti „zlatnog uzorka“.

Neka je $S_{A,B}$ rezultat NCC poređenja između slika A i B u jednom bloku. Neka je S_G rezultat NCC poređenja „zlatnog uzorka“. Tada je sličnost za čitavu sliku NCC-BB metodom definisana sledećom jednačinom:

$$S = \max_{svi\ blokovi} |S_{A,B} - S_G|$$

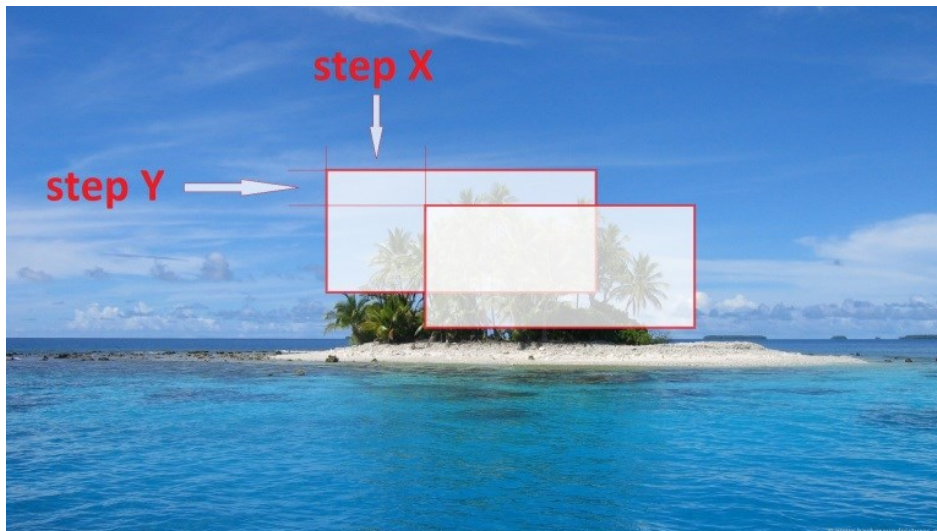
5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

Dakle, za ukupnu procenu sličnosti dve slike ne predlažemo neki vid akumulacije sličnosti po blokovima, nego rezultat onog bloka koji se najviše razlikuje od odgovarajućeg bloka „zlatnog uzorka“. S je u ovoj metodi procena različitosti dve slike, odn. manji S označava sličnije slike.

Koristeći NCC metod na manjim blokovima nam omogućava otkrivanje manjih razlika između dve slike, jer će tada manje razlike da budu prikazane većim rezultatom. Takođe, korišćenje „zlatnog uzorka“ dovodi do mogućnosti definisanja apsolutnog praga sličnosti, jer su vrednosti dobijene NCC-BB metodom vezane za „zlatni uzorak“ koji se smatra tačnim. Ova unapređenja dovode do veće primenljivosti u automatskom sistemu za proveru rada uređaja, pošto je moguće lakše definisati kriterijum pod kojim se neka slika sa kamere proglašava ispravnom, odn. odgovarajućom referentnoj slici, ili neispravnom.

Bloкови slike za ovu metodu su birani tako da su međusobno udaljeni konstantan broj tačaka na slici, a ta udaljenost ne zavisi od veličine bloka, odn. može da bude jednaka ili manja od veličine bloka. Nije praktično da udaljenost između blokova bude veća od veličine bloka, jer tada preskačemo delove slike na kojima se može pojaviti različitost. Kao što je prikazano na slici 5.10, NCC sličnost se računa za jedan po jedan blok, a blok koji se trenutno računa se, nakon završenog računanja, pomera prvo duž x koordinate, s leva na desno, a nakon što dostigne desnu ivicu slike, pomera se duž y koordinate od gore ka dole. Iteracija se završava kada blok dostigne donji-desni ugao slike.

Eksperimentalno je odlučeno da je optimalna veličina bloka za HD referentne slike (1920 x 1080) jednaka 512 x 512 tačaka, sa korakom pomeranja 80% veličine bloka u obe dimenzije.



Slika 5.10. Blokovi na kojima se vrši računanje NCC sličnosti tokom poređenja NCC-BB metodom. Nakon što se izračuna NCC sličnost jednog bloka, isti se pomera nekoliko tačaka u x i nekoliko tačaka u y koordinati, nakon čega se računa NCC sličnost za novi blok, itd.

5.1.5 Donošenje odluke o ispravnosti sadržaja na ekranu

Nakon završetka poređenja transformisanje slike sadržaja ekrana sa kamere i referentne slike očekivanog sadržaja, rezultat algoritma je sledeći:

- mera apsolutne razlike svih komponenti boja, kod LAE metode,
- mera normalizovane kros-korelacije dve slike, kod NCC metode,
- relativna vrednost normalizovane kros-korelacije najrazličitijih blokova dve slike u odnosu na „zlatni uzorak“, kod NCC-BB metode.

Bilo kojom metodom da se došlo do vrednosti poređenja, konačna odluka o ispravnosti sadržaja na ekranu se donosi pomoću apsolutnog praga. Ovaj prag je teško definisati za LAE i NCC metode u opštem slučaju, dok predložena NCC-BB metoda znatno olakšava odabir apsolutnog praga. Više o definisanju ovog praga će biti reči u poglavlju 8, gde su dati ekperimentalni rezultati rada predloženog sistema.

5.2 Implementacija na namenskoj DSP platformi

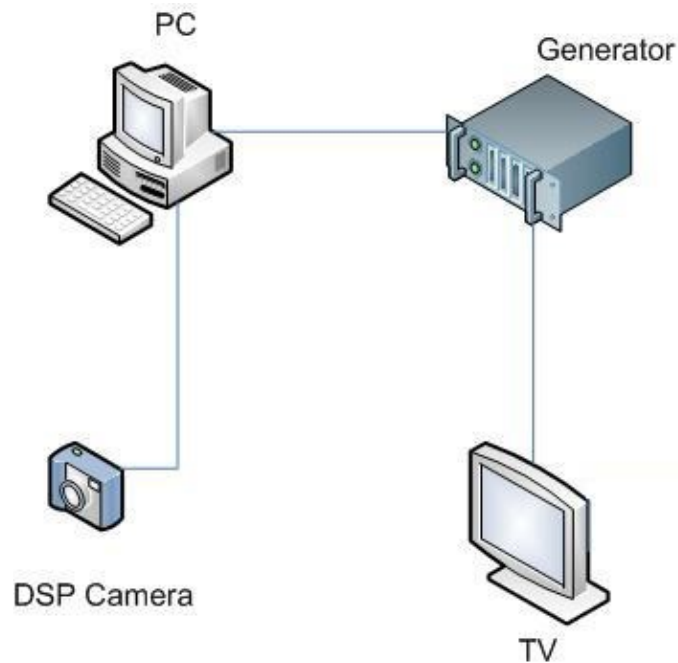
Predloženi sistem za automatsku proveru rada uređaja pomoću kamere je realizovan na 3 načina:

- slika ekrana je preuzimana pomoću obične digitalne kamere i algoritam provere kvaliteta sadržaja je pokretan na PC računaru,
- slika ekrana je preuzimana kamerom sa DSP procesorom Texas Instruments (TI) IPNC DM368, a algoritam provere izvršavan na PC računaru,
- konačno, i preuzimanje slike i izvršavanje algoritma je rađeno na DSP kameri TI IPNC DM368.

U prvoj implementaciji, digitalna kamera je korištena za preuzimanje slike i njeno slanje ka PC računaru na kome se izvršavao ranije opisan algoritam provere kvaliteta sadržaja na ekranu. Komunikacija između kamere i PC računara je išla preko USB sprege. Ovaj način implementacije je bilo prvo rešenje, vrlo prijateljsko prema razvoju algoritma, bez nepotrebnih implementacionih ograničenja koji bi odvlačili pažnju i zahtevali njihovo rešavanje koje nije vezano za razvoj samog algoritma. Ovo rešenje je kasnije korišteno kao referentno rešenje, ali sa sporijim izvršavanjem.

U drugoj implementaciji, obična digitalna kamera je zamenjena kamerom sa DSP procesorom (TI IPNC DM368). Komunikacija između kamere i PC računara je ovog puta zasnovana na LAN sprezi. Na slici 5.11 je dat pregled sistema u ovoj implementaciji. Ovo rešenje je donelo unapređenje u brzini preuzimanja slike i slanja ka PC računaru, ali neznatno. Rešenje je više služilo kao priprema za sledeći korak, a to je implementacija samog algoritma na DSP procesoru na kameri.

U konačnoj verziji, algoritam je implementiran na TI IPNC DM368 kameri sa DSP procesorom. Ova implementacija je značajno unapredila brzinu izvršavanja algoritma, a i izvršavanja čitavog testnog slučaja, pošto ne zahteva da se slika sa kamere prenosi ka PC računaru. PC računar se ovde koristi samo za kontrolu izvršavanja testova, prikazivanje i čuvanje rezultata. Broj procesorskih ciklusa je u ovoj implementaciji smanjen na 24% od broja ciklusa u verziji u kojoj se algoritam izvršava na PC računaru.



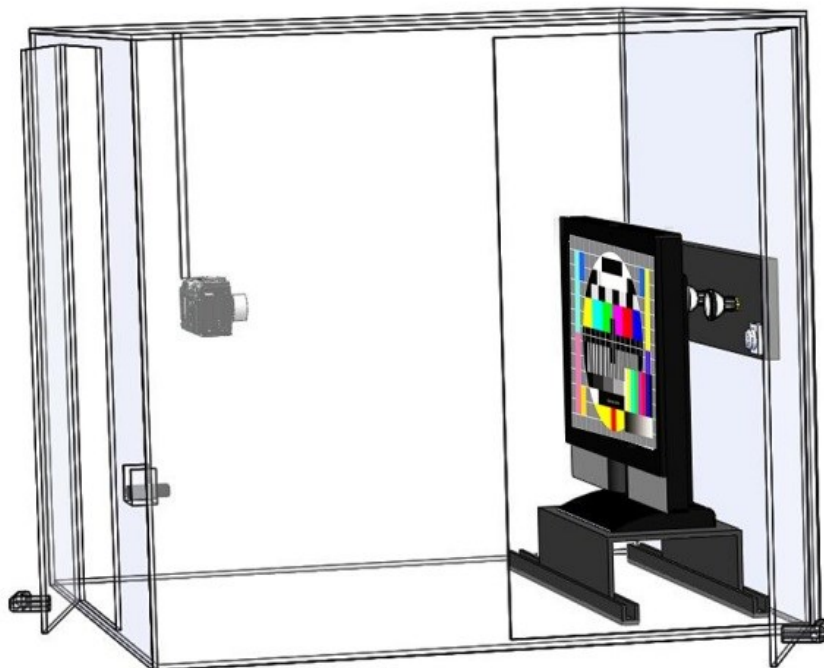
Slika 5.11. Pregled sistema sa DSP kamerom

5.3 Primena predloženog BBT sistema sa kamerom – RT-AV400

Proširenje BBT sistema za proveru TV prijemnika sa stanovišta percepcije korisnika, predstavljeno u ovoj disertaciji, industrijalizovano je kao uređaj nazvan RT-AV400 i predstavlja nastavak serije uređaja za automatsku proveru uređaja, nakon RT-AV100 generacije grebera i RT-AV300 generacije generatora i grebera. RT-AV400 je integrisano rešenje za potpuno automatizovanu proveru rada TV prijemnika koristeći optičku inspekciju TV ekrana, zasnovan na kameri i ranije opisanom algoritmu koji je jedan rezultat istraživanja ove disertacije. RT-AV400 je konstruisan kao „crna komora“ (slika 5.12), lako se konfigurise (ima svega nekoliko parametara), a može se koristiti za proveru TV prijemnika, prijemnika TV signala, igračkih konzola i svih uređaja koji kao izlaz imaju sliku na ekranu.

RT-AV400 je sistem koji direktno primenjuje jedan rezultat istraživanja ove doktorske disertacije i ima sledeće karakteristike:

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika



Slika 5.12. Unutrašnjost „crne komore“ sistema RT-AV400

- zasnovan je na PC računaru kao kontrolnoj tački sistema,
- vrši funkcionalnu proveru rada TV prijemnika sa stanovišta percepcije korisnika i proveru rada TV ekrana (što je unapređenje u odnosu na prethodne RT-AV sisteme),
- podržava sledeće sprege za prenos signala slike:
 - analogne: RF, CVBS, RGB, VGA
 - digitalne: HDMI, MPEG2TS, DVB-T, DVB-C, DVB-S
- koristi emulator daljinskog upravljača za kontrolu uređaja,
- koristi digitalnu kameru za preuzimanje slike sa TV ekrana,
- vrši sledeća proveravanja u kvalitetu slike:
 - otkriva defekte na nivou regiona slike,
 - verifikuje boje na slici,
 - verifikuje ispravnost šablona na slici,
 - vrši analizu kvaliteta slike,
 - otkriva prisustvo ili odsustvo objekata na slici,
 - vrši optičku proveru teksta na slici.

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

Programska podrška za RT-AV400 je napravljena kao deo BBT programske podrške, a sadrži rukovalac uređaja i aplikaciju za formiranje testnih slučajeva. Provera rada uređaja ovim sistemom je nezavisna od tehnologije izrade TV ekrana (LCD, Plasma, LED), nezavisna od veličine ekrana (19 do 52 inča) i nezavisna od odnosa horizontale i vertikale (16:9, 16:10, 4:3).

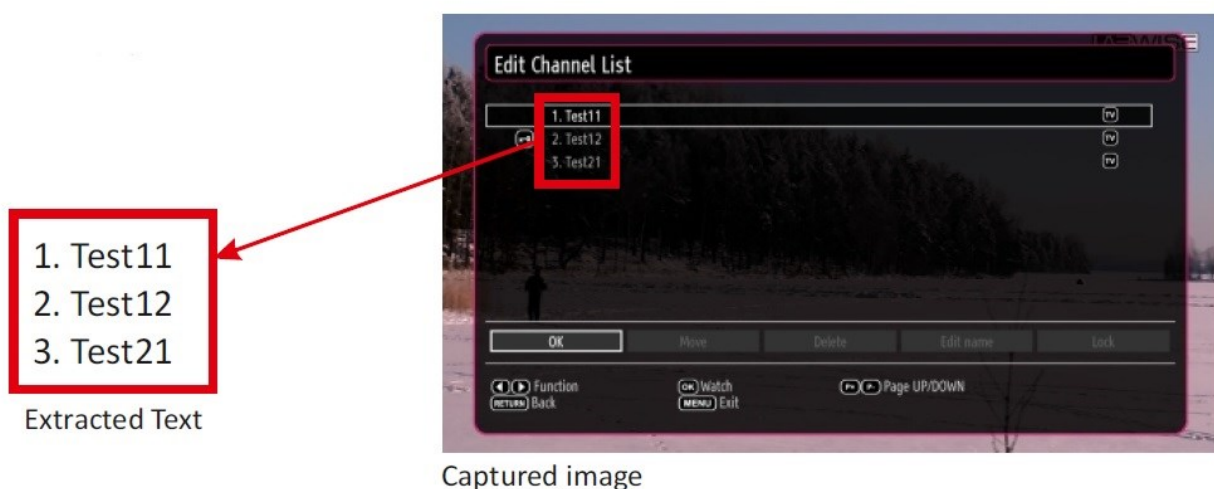
RT-AV400 se može koristiti:

- za proveru rada uređaja na finalnoj proizvodnoj liniji,
- za funkcionalnu proveru rada uređaja,
- za testove u velikim količinama i za regresione testove.

RT-AV400 podržava i otkrivanje teksta na slici uslikanoj sa kamere. Ovo proširenje nije bilo deo istraživanja u sklopu ove disertacije, pa o ovom algoritmu neće biti puno reči. Nakon što se slika sa kamere transformiše u dimenzije referentne slike, algoritam otkriva tekst na slici korišćenjem OCR (*Optical Character Recognition*) metoda [85]-[86]. Algoritam podržava:

- izbor regiona od interesa,
- adaptivnost na nove fontove,
- izbor boje fonta,
- izbor boje pozadine.

Primer rada OCR algoritma u RT-AV400 je dat na slici 5.13.



Slika 5.13. Primer primene OCR algoritma u RT-AV400

5. Automatska provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika

Nakon što smo prikazali rešenje proširenja funkcionalnosti BBT sistema na proveru uređaja sa stanovišta percepcije korisnika, vreme je da se okrenemo integraciji do sada prikazanih rešenja problema postavljenih pri izradi ove disertacije – stimulaciji ekrana osetljivih na dodir i proveru ispravnosti sadržaja na ekranu uređaja pomoću kamere. Rezultat integracije je sistem za automatsku proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir koji proveru vrši sa stanovišta percepcije korisnika.

6. Integrirani sistem za automatsku funkcionalnu proveru uređaja sa ekranom osetljivim na dodir

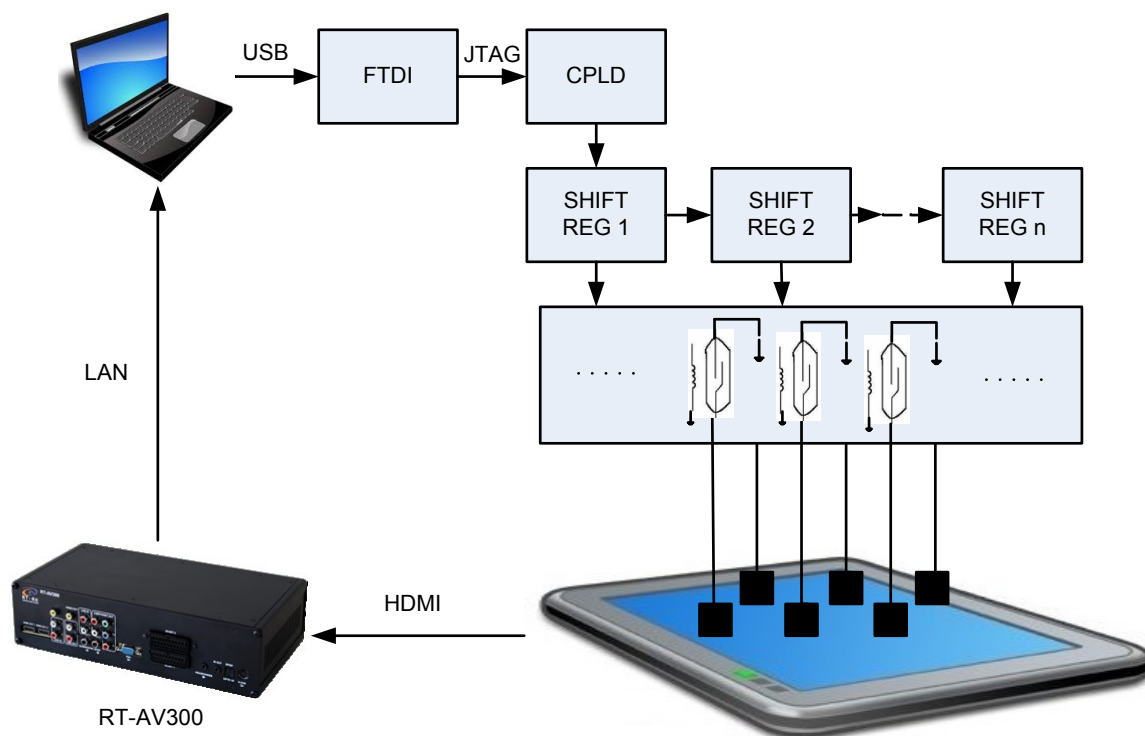
U prethodnim poglavljima smo opisali stimulacionu ploču za kontrolisanu stimulaciju ekrana osetljivog na dodir, koristeći električne principe bez mehanike pomeranja dodirne površine. Datu ploču ćemo u ovom poglavlju integrisati u BBT sistem sa kamerom i iskoristiti za automatsku funkcionalnu proveru uređaja koji kao ulazno/izlazni uređaj koriste ekrane osetljive na dodir. U nastavku biće opisana fizička arhitektura i programska podrška nekoliko verzija ovog sistema – bez i sa proverom sa stanovišta percepcije korisnika, tj. korišćenjem grebera i kamere respektivno.

6.1 Fizička arhitektura integrisanog sistema sa proverom pomoću grebera

Fizička arhitektura BBT sistema za automatsku funkcionalnu proveru uređaja sa ekranom osetljivim na dodir [87], shematski prikazana na slici 6.1, sastoji se iz sledećih komponenti:

- PC računar, koji ima sledeće funkcije unutar sistema:
 - kontroliše izvršavanje testnih slučajeva,
 - šalje komande stimulacionoj ploči putem USB sprege,
 - prima sliku sadržaja na ekranu uređaja putem LAN sprege,
 - pokreće algoritam provere ispravnosti sadržaja na ekranu uređaja koji se proverava i donosi odluku o ispravnosti istog,
 - čuva rezultate provere u bazi podataka,
- stimulaciona ploča, koja se sastoji iz sledećih komponenti:
 - kontrolna ploča sa FTDI integrisanim kolom, CPLD integrisanim kolom i pomeračkim registrima (opisana u prethodnom poglavlju),
 - dodirna ploča sa Reed relejima kao prekidačkim elementima i dodirnim površinama napravljenim od provodnog materijala, koja dodiruje ekran uređaja koji se proverava,

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir



Slika 6.1. Shematski pregled fizičke arhitekture BBT sistema za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

- uređaj koji se proverava (tablet, mobilni telefon),
- RT-AV300 ili RT-AV100 iskorišten kao greber uređaj za preuzimanje sadržaja sa ekrana uređaja koji se proverava, putem HDMI sprege, koji šalje isti ka PC računaru.

Nakon što uređaj dođe na testnu stanicu i bude spojen sa ostatkom sistema (HDMI spregom sa RT-AV300), uređaj se uključuje i postavlja u početno stanje, a dodirne površine se prinose na ekran uređaja. Proveravanje se vrši pokretanjem skupa testnih slučajeva o kojima će više reči biti u narednom poglavlju o metodologiji testiranja. Izvršavanje testnog slučaja se obavlja u nekoliko faza:

- PC računar, odn. BBT aplikacija na PC računaru, pokreće izvršavanje testnog slučaja,
- Za svaki testni slučaj definisan je stimulus kojim je potrebno stimulisati ekran uređaja, a odgovara pokretima korisnika koje bi on izvršio za dati testni slučaj,
- PC računar komunicira sa stimulationsom pločom, šaljući kombinaciju koordinata dodirnih površina koje treba da budu pritisnute, odn. otpuštene; komunikacija traje tokom testnog slučaja istim tempom kojim bi i korisnik pritiskao, odn. otpuštao određene delove ekrana,

6. Integrisani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

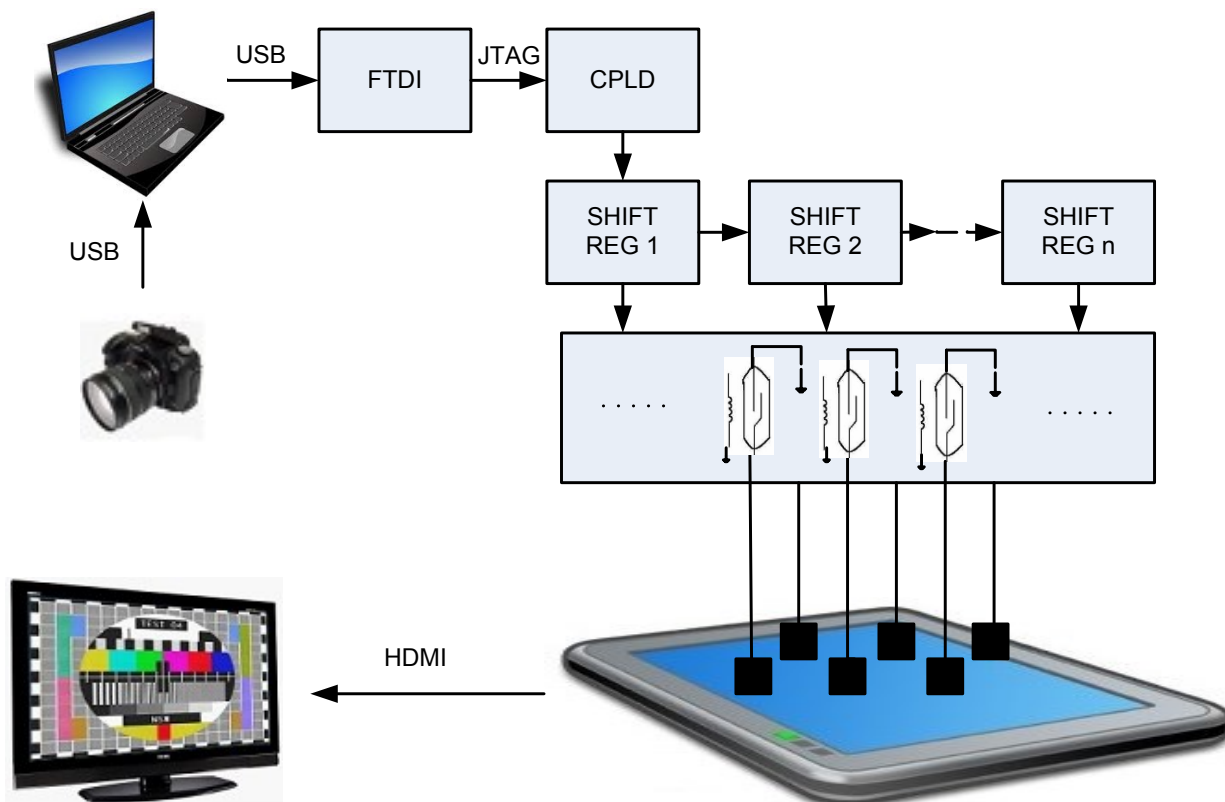
- dodirne površine stumulišu ekran uređaja koji se proverava, a uređaj odgovara na ulazni stimulus,
- RT-AV300 preuzima konačno stanje na ekranu uređaja koji se proverava, a koje predstavlja krajnji odgovor uređaja na ulazni stimulus,
- PC računar putem LAN sprege preuzima sliku stanja na ekranu uređaja koji se proverava,
- PC računar pokreće algoritam provere kvaliteta preuzete slike, poredeći je sa referentnom slikom koja predstavlja očekivani sadržaj za dati testni slučaj,
- Na osnovu rezultata algoritma provere kvaliteta, donosi se odluka o ispravnosti rada uređaja za dati testni slučaj,
- PC računar prikazuje rezultat testnog slučaja i isti pamti u bazi podataka, pre nego što krene u izvršavanje narednog testnog slučaja.

CPLD integrisano kolo parsira JTAG podatke koji mu pristižu od FTDI integrisanog kola na način opisan u prethodnom poglavlju. Arhitektura unutar CPLD integrisanog kola se sastoji od brojača koji služi za brojanje bita koji pristižu preko JTAG-a, kako bi se pravilno kontrolisali pomerački registri. Nakon što pristigne prvi bit sa JTAG-a, biti se redom šalju pomeračkim registrima, a nakon što brojač izbroji sve potrebne bite, šalje se signal dozvole izlaza ka pomeračkim registrima, kako bi se „ubačeni“ biti pojavili na izlazu i definisala stanja svih releja. Ovaj pristup osigurava da se nikada neće pojaviti nedefinisano ili nekontrolisano (privremeno) stanje na relejima, jer istovremeno paljenje velikog broja releja može da dovede do oštećenja sistema usled velike potrošnje koja bi se tada pojavila u sistemu. Slika 6.2 na narednoj strani daje shematski pregled CPLD arhitekture sintetisan od strane Xilinx ISE programskog alata za opis fizičke arhitekture.

6.2. Fizička arhitektura sistema sa proverom pomoću percepcije korisnika, posmatrajući sliku na monitoru kamerom

Druga verzija predloženog sistema koristi kameru kao „oči“ sistema, a posmatra se monitor kome se putem HDMI sprege šalje signal sa uređaja koji se proverava, naravno podrazumevajući da je monitor ispravan (što se prethodno može proveriti sistemom RT-AV400).

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir



Slika 6.3. Verzija sistema za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir koristeći monitor i kameru umesto greber uređaja

Praktično, ova verzija zamenjuje greber uređaj monitorom, i koristi kameru koja posmatra monitor u „crnoj komori“ za preuzimanje sadržaja na ekranu. Slika 6.3 prikazuje shematski prikaz ove verzije sistema.

Provera pomoću ovog sistema se za nijansu razlikuje od provere prethodno opisanom varijantom sistema:

- nakon što se izvrši stimulacija ekrana i uređaj odgovori na ulazni stimulus, sadržaj na ekranu se HDMI spregom šalje monitoru koji se nalazi unutar „crne komore“,
- kamera uslika sadržaj na ekranu monitora i isti šalje PC računaru na analizu,
- PC računar pokreće algoritam izdvajanja sadržaja na ekranu i poredi izdvojen sadržaj sa referentnim sadržajem, te donosi odluku o ispravnosti rada uređaja za dati testni slučaj.

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

Ova verzija ne donosi bitnije prednosti u odnosu na osnovnu verziju sistema, tako da se ne planira njena primena u industriji. Korišćenje monitora kao prikazivača sadržaja na ekranu uređaja koji se proverava je zgodno tokom definisanja testnih slučajeva, kako bi inženjer koji ih definiše imao uvid u stanje na ekranu čak i kada je stimulaciona ploča postavljena na uređaj. Međutim, tokom same provere ova verzija ne donosi prednosti jer je svejedno da li se poređenje sadržaja vrši nad slikom sa grebera ili slikom sa kamere – u oba slučaja ona je preuzeta sa istog mesta na uređaju koji se proverava. Bez obzira na to, ova modifikacija je navedena kao primer teorijski moguće kombinacije dva sistema opisana u ovoj disertaciji.

6.3. Fizička arhitektura sistema sa proverom pomoću percepcije korisnika, posmatrajući sadržaj na ekranu kamerom

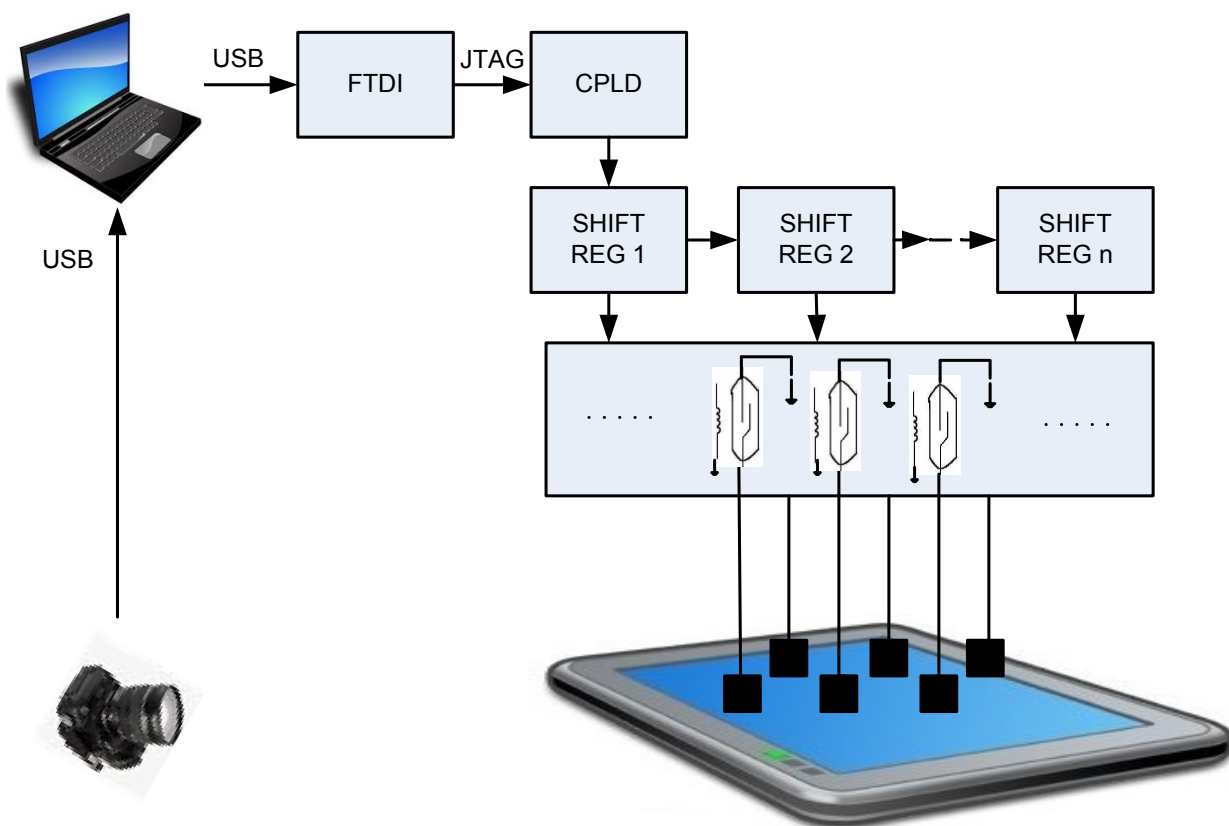
Prva verzija integrisanog sistema za proveru rada uređaja sa ekranima osetljivim na dodir koja koristi greber uređaj za preuzimanje sadržaja na ekranu, preuzela je jedan nedostatak koji se javlja u sistemima generacije RT-AV1xx i RT-AV300, a to je preuzimanje slike na ekranu iz elektronike uređaja, a ne sa samog ekrana. Kao što je ranije pomenuto, ovaj način preuzimanja slike uvodi nekompletnost u sistem za proveru jer se ne proverava rad sistema od tačke sa koje je preuzeta slika do ekrana, kao ni rad samog ekrana uređaja.

Korišćenjem pristupa koji je uveo uređaj RT-AV400 moguće je prebroditi ovaj nedostatak i u sistemu za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir. Predložena treća verzija sistema koristi kameru za preuzimanje slike sa samog ekrana uređaja koji se proverava, a čitava provera se vrši unutar „crne komore“.

Sistem, čija je shema prikazana na slici 6.4, sastoji se iz:

- PC računara kao kontrolne tačke sistema i procesorske jedinice koja pokreće algoritam izdvajanja sadržaja na ekranu i poređenja sa referentnim sadržajem,
- stimulacione ploče za kontrolisanu električnu stimulaciju ekrana osetljivog na dodir,
- uređaja koji se proverava (mobilni telefon ili tablet),
- kamere koja slika stanje na ekranu nakon izvršenja stimulacije i šalje sliku ka PC računaru.

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir



Slika 6.4. Treća verzija sistema za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir, sa stanovišta percepcije korisnika

Provera uređaja se odvija u dve faze:

1. Faza stimulacije – u kojoj:

- stimulaciona ploča biva postavljena na uređaj koji se proverava, pokrivajući čitavu površinu njegovog ekrana,
- PC računar, odn. BBT aplikacija na PC računaru, pokreće izvršavanje testnog slučaja,
- za svaki testni slučaj definisan je stimulus kojim je potrebno stimulisati ekran uređaja, a odgovara pokretima korisnika koje bi on izvršio za dati testni slučaj,
- PC računar komunicira sa stimulacionom pločom, šaljući kombinaciju koordinata dodirnih površina koje treba da budu pritisnute, odn. otpuštene;

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

komunikacija traje tokom testnog slučaja istim tempom kojim bi i korisnik pritiskao, odn. otpuštao određene delove ekrana,

- e. dodirne površine stumulišu ekran uređaja koji se proverava, a uređaj odgovara na ulazni stimulus,

2. Faza analize – u kojoj:

- a. stimulaciona ploča biva odvojena od uređaja koji se proverava,
- b. kamera slika stanje na ekranu uređaja nakon što je on odgovorio na ulazni stimulus,
- c. PC računar putem USB sprege preuzima sliku stanja na ekranu uređaja koji se proverava,
- d. PC računar pokreće algoritam provere kvaliteta preuzete slike, isti kao kod uređaja RT-AV400, koji izdvaja i transformiše sadržaj na ekranu i poredi ga sa referentnom slikom koja predstavlja očekivani sadržaj za dati testni slučaj,
- e. Na osnovu rezultata algoritma provere kvaliteta, donosi se odluka o ispravnosti rada uređaja za dati testni slučaj.

Čitava provera se dešava unutar „crne komore“ zbog osiguravanja okruženja sa konstantnim osvetljenjem na ekranu prilikom slikanja kamerom.

Poslednja predložena verzija sistema predstavlja konačni rezultat istraživanja prikazanog u ovoj disertaciji – sistem koji automatski proverava rad uređaja koji koristi ekran osetljiv na dodir kao ulazno/izlaznu periferiju, a proveru vrši sa stanovišta percepcije korisnika, dakle u potpunosti metodologijom crne kutije, posmatrajući uređaj na isti način na koji bi ga posmatrao i korisnik. Sistem kombinuje oba rezultata ove disertacije – stimulacionu ploču za kontrolisanu električnu stimulaciju ekrana osetljivih na dodir i algoritam za analizu slike sa sadržajem ekrana preuzete kamerom. Prednosti koje je uveo sistem RT-AV400 u odnosu na prethodne sisteme u okviru BBT projekta su ovde prenešene, kao i metodologija provere rada uređaja.

Poslednji predloženi sistem u trenutku pisanja ove disertacije nije još industrijalizovan, ali sve komponente postoje – stimulaciona ploča, algoritam za analizu sadržaja na ekranu i kontrolna aplikacija na PC računaru. Algoritam ne zahteva veće izmene u odnosu na algoritam iz RT-AV400 koji izdvaja sadržaj sa TV ekrana, pošto ekran mobilnog telefona ili tableta ima istu geometriju – potrebno je samo podesiti parametre algoritma tako da

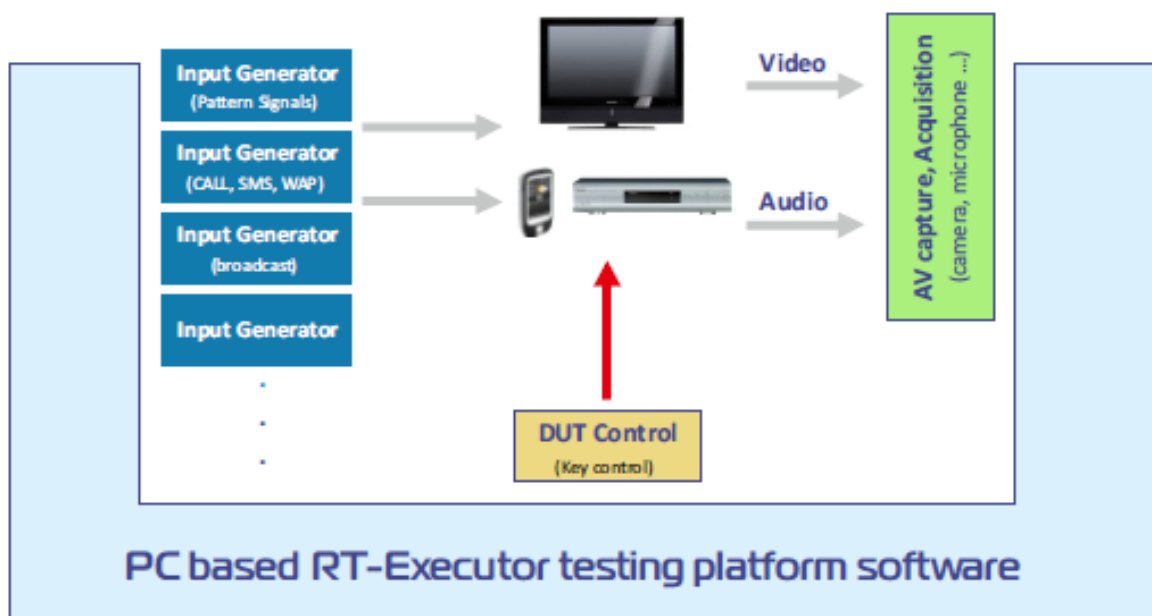
6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

zadovoljavaju potreban odnos širine i visine i ukupan broj ivica kojih zbog dizajna tableta može biti više od 2. Industrijalizacija ovog sistema se očekuje u bližoj budućnosti.

6.4 Programska podrška sistema

Programska podrška BBT sistema je zasnovana na kontrolnoj aplikaciji RT-Executor čiji je zadatak da kontroliše izvršavanje testnih slučajeva unutar BBT sistema. Ova aplikacija je u potpunosti razvijena u Istraživačko-razvojnom institutu RT-RK i predstavlja srce programske podrške sistema za automatsku proveru uređaja potrošačke elektronike. Osnovne karakteristike aplikacije su da omogućava: integraciju sa uređajima, analizu podataka, multiplatformski pristup, prikaz rezultata testova i snimanje rezultata u bazu podataka.

Slika 6.5 prikazuje shematski prikaz primene RT-Executor aplikacije.



Slika 6.5. RT-Executor kao srce programske podrške BBT sistema

RT-Executor (slika 6.6) omogućuje primenu raznih uređaja unutar BBT sistema, kao što su signal generatori i uređaji za preuzimanje slike i zvuka sa uređaja koji se testira (npr. greber uređaji samog BBT sistema), principom korišćenja rukovaoca uređaja. Za svaki uređaj koji se želi iskoristiti unutar BBT sistema je potrebno napisati njegov rukovalac koji predstavlja spregu između RT-Executora kao kontrolne aplikacije testnog sistema i samog

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

uređaja koji se koristi. Ovde ne govorimo o rukovaocima uređaja koji se testira, naprotiv u pitanju su rukovaoci uređaja koji se koriste kao pomoćni uređaji prilikom testiranja.

Tokom ranijeg istraživanja BBT sistem je obogaćen sa preko 50 rukovaoca za razne uređaje – signal generatore koji se najčešće koriste prilikom provere rada digitalnih TV prijemnika i prijemnika TV signala u industriji, greber uređaje RT-AV100 i RT-AV300 familije, mikrofonske uređaje za preuzimanje zvučnog izlaza uređaja koji se proverava, emulatora daljinskog upravljača za slanje komandi uređaju koji se proverava itd.

Jedan rezultat ove disertacije je bio i rukovalac RT-AV400 sistema koji je opisan ranije, kako bi se algoritam provere rada TV prijemnika pomoću kamere prilagodio RT-Executor aplikaciji. O ovom rukovaocu nije bilo reči u ovoj disertaciji, zato što je u pitanju obično prilagođenje opisanog algoritma datoj aplikaciji.

6.4.1 Rukovaoci uređaja unutar BBT sistema za proveru uređaja sa ekranom osetljivim na dodir

Za potrebe sistema za proveru uređaja osetljivih na dodir napravljeni su sledeći rukovaoci:

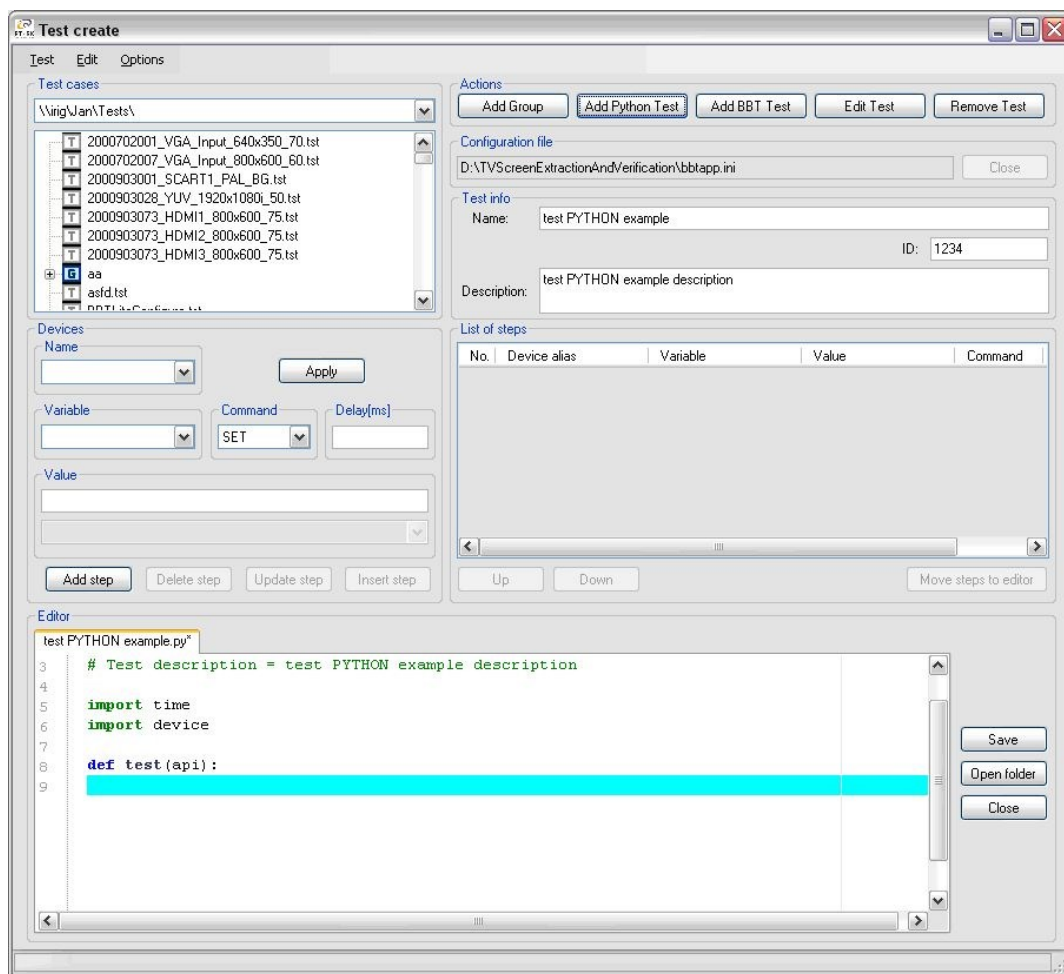
- rukovalac kontrolne stimulacione ploče,
- rukovalac provere ispravnosti preuzete slike (odn. rukovalac za poređenje sa referentnim sadržajem),

a iskorišten je već postojeći rukovalac uređaja RT-AV300 za preuzimanje stanja sa ekrana uređaja koji se proverava.

Rukovalac kontrolne stimulacione ploče ima dva sloja apstrakcije kojima vrši kontrolu stimulacione ploče:

- sloj apstrakcije pokreta,
- sloj apstrakcije pobude.

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir



Slika 6.6. Izgled aplikacije RT-Executor

U nižem sloju, sloju apstrakcije pobude, rukovalac razgovara sa FTDI integriranim kolom i šalje mu informaciju o tome koji niz bita treba da pošalje ka CPLD-u pomoću JTAG sprege. Svaka dodirna površina na stimulationskoj ploči, odn. svaki relej, je predstavljen jednim bitom podatka, a stanja releja se šalju od strane FTDI integriranog kola serijski ka pomeračkim registrima. Stanje 0 odgovara isključenom releju, odn. dodirnoj površini koja ne treba da dodiruje ekran, a stanje 1 odgovara uključenom releju, odn. dodirnoj površini koja treba da dodiruje ekran.

Na primer, ukoliko želimo da dodirne površine 0 i 1 dodiruju ekran, a ostale ne, niz bitova koje je potrebno poslati ka pomeračkim registrima je:

000000000000.....00000011 gde je ukupan broj nula 462.

Vremensku komponentu u stimulaciju ekrana uvodimo slanjem nizova od 464 bita odvojenih nekim vremenskim intervalmo. Npr., ukoliko želimo da izvršimo dvostruki klik na

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

neku tačku na ekranu, npr. dodirnu površinu sa indeksom 2, potrebno je poslati sledeću sekvencu nizova od 464 bita:

000000000000.....00000100 (da bi se pritisnula dodirna površina 2)

000000000000.....00000000 (da bi se otpustila dodirna površina 2)

000000000000.....00000100 (da bi se ponovo pritisnula dodirna površina 2)

000000000000.....00000000 (da bi se ponovo otpustila dodirna površina 2)

Ovi događaju treba da budu međusobno udaljeni neki vremenski period, npr. 100 ms.

Zbog električnih karakteristika sistema, ukupan broj jedinica u jednom nizu od 464 bita ne sme biti veliki, jer istovremeno uključivanje velikog broja releja povećava potrošnju i može da dovede do prekida USB komunikacije sa računarem usled velike potrošnje, pošto se kontrolna ploča napaja sa USB konektora kojim prima i podatke sa računara. Potreba sa velikim brojem istovremeno uključenih releja ne postoji, pošto je maksimalan višestruki dodir koji današnji ekrani podržavaju 10 tačaka, što odgovara broju prstiju na ljudskim rukama.

U sloju apstrakcije pokreta, rukovalac odlučuje koje pobude su potrebne da bi se izvršio neki pokret na ekranu. Svaki pokret biva razložen u niz „pritisaka“ i „otpuštanja“ određenih dodirnih površina, i biva poslat pomeračkim registrima na način sličan dvostrukom pritisku iz prethodnog primera.

U nastavku je dat opis svih pokreta koje rukovalac podržava, kao i niz pobuda iz nižeg sloja apstrakcije kojima je realizovan dati pokret.



Jednostruki dodir (**press**)

realizuje se postavljanjem jedinice na jednom bitu i to onom koji predstavlja dodirnu površinu koja se želi pritisnuti

00000000.....00001000 (primer pritiska dodirne površine 3)



Jednostruko otpuštanje dodira (**release**)

realizuje se postavljanjem nule na bitu dodirne površine

jedinice na ostalim bitima, ukoliko ih ima, se ne menjaju

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir



Višestruki dodir (**multipress**)

realizuje se postavljanjem jedinica na više bita

00000000.....0000101 (primer pritiska površina 1 i 3)



Višestruko otpuštanje (**multirelease**)

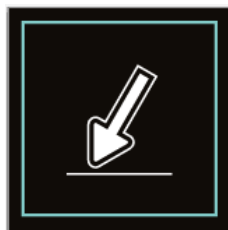
realizuje se postavljanjem nula na više bita dodirnih površina

jedinice na ostalim bitima, ukoliko ih ima, se ne menjaju



Potpuno otpuštanje (**release all**)

realizuje se postavljanjem nula na sve bite



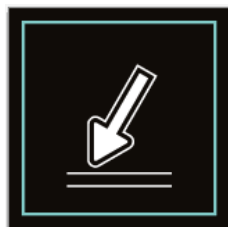
Linija (**line**)

realizuje se naizmeničnim pritiskom i otpuštanjem tačaka od

početne koordinate (x1, y1) do krajnje koordinate (x2, y2)

tako da između pritisaka dve susedne tačke protekne

određeno vreme



Višestruka linija (**multiline**)

realizuje se istovremenom stimulacijom dve linije

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

Primer iscrtavanja linije od koordinate (0,0) do koordinate (0,3) u ukupnom trajanju od 400 ms je sledeći:

- prvo se pritisne dodirna površina (0,0)
- nakon 100 ms se otpusti dodirna površina (0,0), a pritisne dodirna površina (0,1),
- nakon još 100 ms se otpusti dodirna površina (0,1), a pritisne dodirna površina (0,2),
- nakon još 100 ms se otpusti dodirna površina (0,2), a pritisne dodirna površina (0,3),
- nakon poslednjih 100 ms se otpusti dodirna površina (0,3).

Na sličan način se iscrtavaju i složenije linije, tj. one kod kojih se obe dimenzije menjaju, s tim da se usput vrši zaokruživanje prilikom odabira tačaka između krajnjih koje će se pobuditi u datom trenutku.

Iscrtavanje linije na ekranu služi za simulaciju *swipe* pokreta korisnika, odn. pokreta koji se najčešće koristi prilikom prelistavanja (*scroll*) slike. Iscrtavanje višestruke linije je korisno za simulaciju *pinch* pokreta koji se koristi prilikom uvećavanja i umanjivanja slike na ekranu (*zoom*).

Drugi realizovan rukovalac uređaja za ovaj sistem je rukovalac koji rukuje „uređajem“ za poređenje preuzete slike sa uređaja koji se testira i referentne slike. Ovaj rukovalac ne rukuje nikakvim fizičkim uređajem, već jednostavno pokreće algoritam poređenja dve slike. Realizovan je kao rukovalac uređaja kako bi se ispoštovao princip rada RT-Executora. Za poređenje slika korišteni su isti algoritmi kao i u RT-AV400 sistemu sa kamerom, naime metodi najmanje apsolutne greške i normalizovane kros-korelacije dve slike, objašnjeni ranije u poglavlju 3.

Treći korišteni rukovalac uređaja u ovom sistemu je rukovalac uređajem RT-AV300 koji služi za preuzimanje slike sa ekrana uređaja koji se proverava, putem HDMI sprege. Slika se preuzima sa mobilnog telefona ili tableta i prosleđuje PC računaru putem LAN sprege. Ovaj rukovalac nije rezultat ove disertacije, već je pozajmljen iz ranijeg istraživanja BBT sistema.

6.4.2 Izvršavanje testnih slučajeva

Sada možemo da sumiramo kako izgleda primer izvršavanja jednog testnog slučaja od strane RT-Executor aplikacije, u primeru sistema za proveru uređaja sa ekranom osetljivim na dodir:

- rukovalac stimulative ploče se koristi da bi se izvršila stimulacija ekrana, odn. definisao korisnički ulaz – u našem sistemu ovaj uređaj je nazvan *ScreenTouch*,
- rukovalac uređaja RT-AV300 se koristi da bi se preuzeo sadržaj sa ekrana uređaja koji se proverava, nakon što uređaj odgovori na korisnički ulaz,
- rukovalac „uređaja“ za poređenje dve slike se koristi da bi se dobio rezultat poređenja stvarnog i očekivanog sadržaja na ekranu i time dobila informacija o ispravnosti rada uređaja koji se proverava.

RT-Executor aplikacija, za definisanje testnih slučajeva, koristi skripte napisane u programskom jeziku *Python*. Svaka skripta predstavlja jedan testni slučaj i, nakon definisanja konstanti koje će se koristiti i uvezivanja potrebnih biblioteka, unutar funkcije *runTest()* definiše se niz komandi rukovalaca uređaja koje opisuju izvršavanje datog testnog slučaja. Nakon dobijanja brojne vrednosti ispravnosti rada uređaja, npr. kao rezultat „uređaja“ za poređenje slika, *Python* skripta primenjuje prag odlučivanja o ispravnosti uređaja koji je proveravan – ukoliko je rezultat dobijen poređenjem sa referentnim sadržajem veći (ili, kod nekih metoda poređenja, manji) od definisanog praga, uređaj se proglašava ispravnim za dati testni slučaj, u suprotnom proglašava se neispravnim.

RT-Executor aplikacija sa rukovaocima uređaja komunicira putem spoljnih promenljivih uređaja. Rukovalac stimulative ploče (*ScreenTouch*) definiše sledeće promenljive:

- *stimulus_type* – tip stimulusa,
- *N* – broj tačaka višestrukog stimulusa,
- *x1, y1, x2, y2, ..., x10, y10* – koordinate do 10 tačaka stimulusa,
- *duration* – vreme trajanja stimulusa (za neke),
- *result* – promenljiva čijim se pozivom pokreće uređaj, a na kraju sadrži povratnu vrednost uređaja (u primeru uređaja *ScreenTouch* ne sadrži nikakvu vrednost, dok na primer kod „uređaja“ za poređenje slika sadrži rezultat poređenja).

U nastavku sledi opis komandi rukovalaca stimulative ploče koje je potrebno izvršiti da bi se simulirao određeni pokret na ekranu:

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

- Jednostruki dodir (**press**)
 - potrebno je postaviti promenljivu *stimulus_type* na vrednost konstante PRESS
 - potrebno je definisati koordinate dodira $x1$ i $y1$
- Jednostruko otpuštanje (**release**)
 - potrebno je postaviti promenljivu *stimulus_type* na vrednost konstante RELEASE
 - potrebno je definisati koordinate dodira $x1$ i $y1$
- Višestruki dodir (**multipress**)
 - potrebno je postaviti promenljivu *stimulus_type* na vrednost konstante MULTIPRESS
 - potrebno je definisati broj tačaka koje treba da se dodirnu N
 - potrebno je definisati koordinate dodira $x1, y1, x2, y2, \dots, xN, yN$
- Višestuko otpuštanje (**multirelease**)
 - potrebno je postaviti promenljivu *stimulus_type* na vrednost konstante MULTIRELEASE
 - potrebno je definisati broj tačaka koje treba da se otpuste N
 - potrebno je definisati koordinate dodira $x1, y1, x2, y2, \dots, xN, yN$
- Potpuno otpuštanje (**release all**)
 - potrebno je postaviti promenljivu *stimulus_type* na vrednost konstante RELEASE_ALL
- Linija (**line**)
 - potrebno je postaviti promenljivu *stimulus_type* na vrednost konstante LINE
 - potrebno je definisati koordinate krajnjih tačaka linije $x1, y1$ i $x2, y2$
 - potrebno je definisati ukupno vreme iscrtavanja linije *duration*
- Višestruka linija (**multiline**)
 - potrebno je postaviti promenljivu *stimulus_type* na vrednost konstante MULTILINE
 - potrebno je definisati koordinate krajnjih tačaka prve linije $x1, y1$ i $x2, y2$, kao i druge linije $x3, y3$ i $x4, y4$
 - potrebno je definisati ukupno vreme iscrtavanja linija *duration*.

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

Osim navedenih 7 stimulusa koji su direktno podržani fizičkom arhitekturom, rukovalac stimulative ploče definiše i složene stimuluse koji su realizovani jednostavnim kombinacijama osnovnih stimulusa:

- **Klik (click)**
 - realizovan kombinacijom stimulusa **press** i **release**, između kojih je određeni vremenski interval
 - potrebno je postaviti promenljivu *stimulus_type* na vrednost konstante CLICK
 - potrebno je definisati koordinate dodira $x1$ i $y1$
 - potrebno je definisati vreme trajanja pritiska *duration*.

- **Višestruki klik (multiclick)**
 - realizovan kombinacijom stimulusa **multiress** i **multirelease**, između kojih je određeni vremenski interval
 - potrebno je postaviti promenljivu *stimulus_type* na vrednost konstante MULTICLICK
 - potrebno je definisati broj tačaka koje treba da se dodirnu N
 - potrebno je definisati koordinate dodira $x1, y1, x2, y2, \dots, xN, yN$
 - potrebno je definisati vreme trajanja pritiska *duration*.

- **Dvostruki klik (double click)**
 - realizovan kombinacijom stimulusa **click** i **click**, između kojih je određeni vremenski interval
 - potrebno je postaviti promenljivu *stimulus_type* na vrednost konstante DOUBLE_CLICK
 - potrebno je definisati koordinate dodira $x1$ i $y1$
 - potrebno je definisati vreme trajanja pritiska *duration*.
 - potrebno je definisati vreme trajanja pauze između pritiska *pause*.

Ova lista podržanih složenih stimulusa nije iscrpna, i sistem se lako može proširiti sa još nekim pokretima, kombinacijom 7 osnovnih koji su ranije navedeni. Iako su linija i višestruka linija takođe tip složenih stimulusa, jer se realizuju pomoću dodira i otpuštanja, ovi stimulusi su stavljeni u grupu osnovnih zbog toga što njihova realizacija nije jednostavna kombinacija drugih stimulusa, već zahteva složeniju matematiku računanja kada će se koja dodirna površina stimulisati da bi se iscrtala željena linija.

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

Primer *Python* skripte jednog testnog slučaja je dat na slici 6.7. Ovaj primer prikazuje:

- iscrtavanje linije takve da proveravani tablet izvrši *scroll* slike ulevo,
- nakon toga se preuzima sadržaj sa ekrana (u ovom primeru se koristi uređaj RT-AV101, koji spada u RT-AV100 familiju greber uređaja), i
- izvršava poređenje preuzetog sadržaja sa referentnom slikom koristeći normalizovanu kros-korelaciju (uređaj *NCC*)
- konačno, dobijeni rezultat *NCC* metodom se poredi sa određenim pragom i test proglašava uspešnim (*pass*) ili neuspešnim (*fail*).

Korišćenje *Python* skripti nije bilo aktuelno od početka rada na BBT sistemu. Prethodno, sistem je koristio svoje skripte koje nisu imale fleksibilnost kakvu ima *Python* programski jezik i bile su zasnovane isključivo na komunikaciji sa rukovaocima. Kod tog rešenja bilo je potrebno napraviti i „uređaj“ za proveru praga ispravnosti i nije bilo moguće koristiti petlje ili uslovno izvršavanje tokom testnog slučaja. *Python* skripte kod RT-Executora su omogućile da se iskombinuje BBT pristup rukovalaca uređaja sa velikim mogućnostima koje daje *Python* programski jezik, čime je opis testnih slučajeva doveden na viši programerski nivo.

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

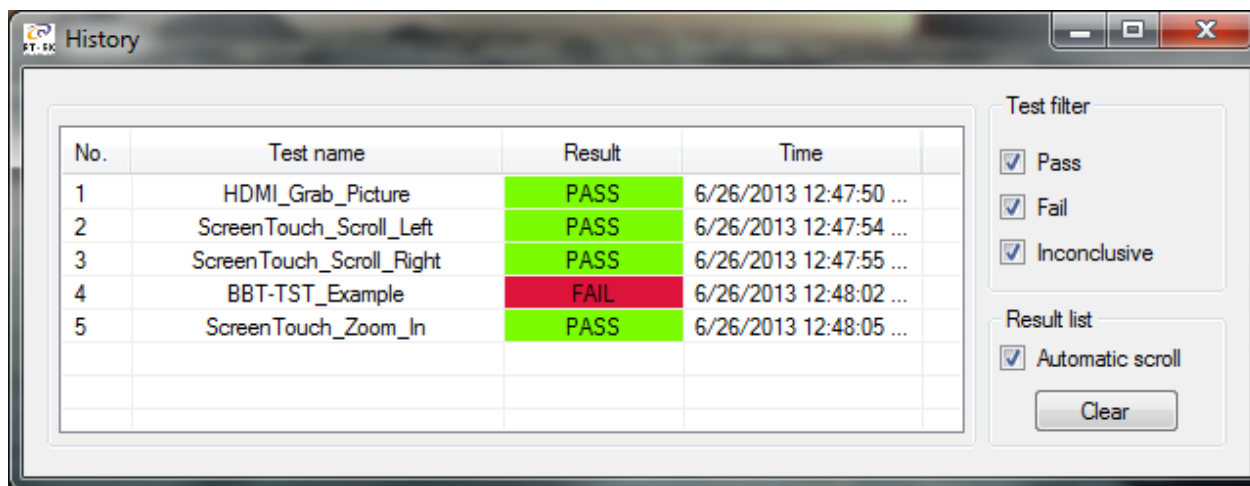
```
1  import time
2  import device
3
4  PRESS = "0"
5  RELEASE = "1"
6  RELEASE_ALL = "2"
7  CLICK = "3"
8  MULTICLICK = "4"
9  REPEATED_CLICK = "5"
10 LINE = "6"
11 MULTILINE = "7"
12
13 def runTest():
14
15     # line scroll left
16     device.handler("ScreenTouch", "SET", "stimulus_type", LINE)
17     device.handler("ScreenTouch", "SET", "x1", "12")
18     device.handler("ScreenTouch", "SET", "y1", "0")
19     device.handler("ScreenTouch", "SET", "x2", "0")
20     device.handler("ScreenTouch", "SET", "y2", "0")
21     device.handler("ScreenTouch", "SET", "duration", "300")
22     device.handler("ScreenTouch", "SET", "DD", "1")
23     ret = device.handler("ScreenTouch", "GET", "result", "")
24
25     # grab the image
26     device.handler("RT-AV101", "SET", "[INIT_RTAV]", "")
27     device.handler("RT-AV101", "SET", "[PLAY_DEVICE_HDMI]", "")
28     device.handler("RT-AV101", "SET", "[CAPTURE]", "")
29     device.handler("RT-AV101", "SET", "[STOP_DUTS]", "")
30     device.handler("RT-AV101", "SET", "[DEINIT_RTAV]", "")
31
32     # compare with the referent picture
33     device.handler("NCC", "SET", "testpicture", "DUT_0_0.bmp")
34     device.handler("NCC", "SET", "refpicture", "DUT_0_0_p1.bmp")
35     ret = float(device.handler("NCC", "GET", "result", ""))
36
37     # test result decision
38     if ret > 900.0:
39         device.updateTestResult("PASS");
40     else:
41         device.updateTestResult("FAIL");
42
```

Slika 6.7. Primer Python skripte opisa testnog slučaja

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

6.4.3 Prikaz rezultata izvršavanja testnih slučajeva

Aplikacija RT-Executor pamti rezultat izvršavanja svih testnih slučajeva i to može po potrebi pregledno da prikaže. U osnovnoj primeni, svi rezultati izvršenih testnih slučajeva se prikazuju od početka pokretanja aplikacije. Dodatno, aplikacija podržava rad sa bazom podataka iz koje se mogu dobiti pregledniji izveštaji, grupisani prema datumu, tipu testa, uređaju koji se proverava, itd. Slika 6.8 prikazuje primer izveštaja o rezultatima testova.



The screenshot shows a window titled 'History' with a table of test results. The table has four columns: 'No.', 'Test name', 'Result', and 'Time'. The results are as follows:

No.	Test name	Result	Time
1	HDMI_Grab_Picture	PASS	6/26/2013 12:47:50 ...
2	ScreenTouch_Scroll_Left	PASS	6/26/2013 12:47:54 ...
3	ScreenTouch_Scroll_Right	PASS	6/26/2013 12:47:55 ...
4	BBT-TST_Example	FAIL	6/26/2013 12:48:02 ...
5	ScreenTouch_Zoom_In	PASS	6/26/2013 12:48:05 ...

To the right of the table is a 'Test filter' section with three checked checkboxes: 'Pass', 'Fail', and 'Inconclusive'. Below that is a 'Result list' section with one checked checkbox: 'Automatic scroll'. A 'Clear' button is located at the bottom right of the window.

Slika 6.8. Izveštaj o izvršenim testnim slučajevima od strane aplikacije RT-Executor

6.4.4 Okruženje za razvoj testnih slučajeva

Stimulaciona ploča kao uređaj za stimulaciju ekrana osetljivih na dodir je zanimljiva za korišćenje i izvan potreba sistema za proveru uređaja, kada god korisnik želi da automatski izvršava neki niz pobuda. U svrhu prilagođavanja mogućnosti korišćenja testnog sistema i stimulacione ploče i od strane korisnika koji nemaju prethodno programersko znanje, predloženo je okruženje za razvoj testnih slučajeva. Ovo okruženje ima sledeće funkcije:

- omogućava korisnicima formiranje novih testnih slučajeva,
- omogućava korisnicima da u realnom vremenu stimulišu ekran osetljiv na dodir,
- omogućava korisnicima da pokreću ranije napravljene testne slučajeve na ekranu osetljivom na dodir,
- omogućava korisnicima da u realnom vremenu posmatraju stanje na ekranu, korisno kada je stimulaciona ploča prekrila ekran koji više nije vidljiv od strane korisnika.

Predloženo okruženje prima ulazne podatke iz tri izvora:

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

- korisnički ulaz – grafička korisnička sprega koja omogućava korisnicima da formiraju stimulus ka ekranu osetljivom na dodir i definišu testne slučajeve,
- programski ulaz – *Python* skripta sa ranije definisanim testnim slučajem može biti ulaz ovog okruženja,
- mrežni ulaz – LAN ulaz iz greber uređaja (npr. RT-AV100) sa trenutnim sadržajem na ekranu, za pregled u realnom vremenu.

Okruženje proizvodi dva izlaza:

- USB izlaz ka stimulationskoj ploči – kroz koji okruženje komunicira sa stimulationskom pločom i šalje joj komande proizvodnje odgovarajućih pokreta, koristi se kada korisnik želi da stimuliše ekran u realnom vremenu pomoću ovog okruženja,
- programski izlaz – okruženje može da usnimi napravljen testni slučaj kao *Python* skriptu, za kasnije automatsko korišćenje.

Korisnik ovog okruženja može da pravi testne slučajeve, ali i da pokreće ranije napravljene testne slučajeve. Pokretanje ranijih testnih slučajeva nije glavna namena ovog okruženja i ono je omogućeno samo za primere stimulacije ekrana osetljivih na dodir, pošto ovo okruženje nije predviđeno za komunikaciju sa ostalim uređajima. Za potrebe pokretanja testnih slučajeva u kojima se ne koristi samo stimulationska ploča, potrebno je koristiti aplikaciju RT-Executor.

Ovo okruženje korisniku nudi mogućnost da u realnom vremenu posmatra stanje na ekranu, što je veoma korisno prilikom pravljenja testnih slučajeva. Naime, da bi korisnik definisao ulazni stimulus tokom provere rada uređaja sa ekranom osetljivim na dodir, neophodno je da istovremeno posmatra šta se nalazi na ekranu. Pošto stimulationska ploča u potpunosti prekriva ekran, ovaj pregled u realnom vremenu je neophodan da bi se testni slučaj napravio bez većih poteškoća. Korisnik može da definiše stimulus unutar okruženja i u realnom vremenu posmatra kako ekran reaguje na taj njegov stimulus.

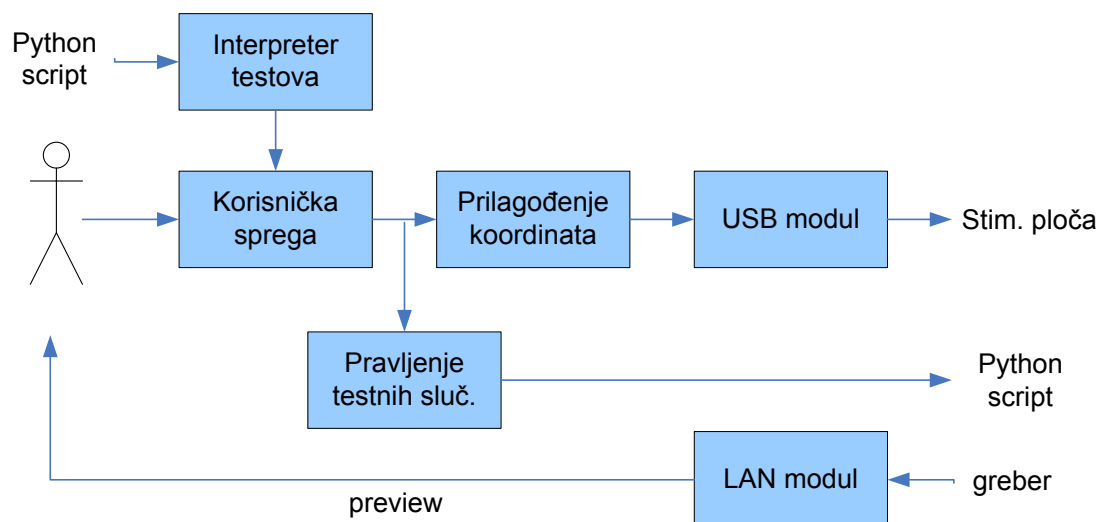
Ovakva stimulacija u realnom vremenu je od velike pomoći prilikom dizajniranja testnih slučajeva na tzv. „zlatnom uzorku“, a to je primerak uređaja koji radi, odn. kojeg pre testiranja ostalih uređaja prograšavamo da je ispravan (ovo je opravdano zbog toga što, da bi nešto proglasili ispravnim, mora postojati primerak koji smo proglasili ispravnim, jer ispravnost je relativna ocena). Teško je napraviti testni slučaj bez posmatranja u realnom vremenu šta se dešava na ekranu jer je ekran osetljiv na dodir specifična periferija – istovremeno predstavlja i ulaz i izlaz uređaja.

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

Dakle, možemo sumirati tri slučajeve korišćenja predloženog okruženja za razvoj testnih slučajeva:

1. Razvoj testnog slučaja korišćenjem „zlatnog uzorka“ – korisnik ubacuje „zlatno uzorak“ uređaja u sistem, npr. prethodno manuelno proveren uređaj koji se proglašava ispravnim, i koristi ga da bi razvio testne slučajeve za ostale uređaje. Korisnik definiše stimulaciju za dati testni slučaj koristeći prikaz stanja na ekranu u realnom vremenu kao pomoć, preuzima odziv uređaja putem greber uređaja. Okruženje pravi *Python* skriptu datog testnog slučaja, odn. deo te skripte vezan za stimulaciju ekrana. Okruženje dovršava *Python* skriptu standardnim koracima – preuzimanje slike sa greber uređaja, poređenje sa datom referentnom slikom i odluka o ispravnosti.
2. Pokretanje testnog slučaja – korisnik ubacuje uređaj u sistem, a okruženje pokreće ranije napravljen testni slučaj snimljen kao *Python* skripta. Ovaj slučaj korišćenja podržava samo rad sa stimulationsom pločom, odn. stimulaciju uređaja. Vrlo je koristan ukoliko korisnik želi da određeni stimulus automatski izvrši više puta, ali zbog neprimenjivosti na ostale uređaje RT-Executor aplikacija je neophodna za pokretanje složenijih testnih slučajeva.
3. Interakcija sa uređajem u realnom vremenu – korisnik može da upravlja uređajem sa ekranom osetljivim na dodir u realnom vremenu, definišući stimulus ka stimulationsoj ploči i u realnom vremenu posmatrajući odziv uređaja, odn. sadržaj na ekranu. Ovaj slučaj korišćenja je koristan prilikom pripreme testnih slučajeva bez njihovog konačnog pravljenja.

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir



Slika 6.9. Osnovne komponente okruženja za razvoj testnih slučajeva

Kako bi podržalo razne uređaje sa ekranom osetljivim na dodir, sa različitim rezolucijama, širinom, visinom i dijagonalom, okruženje prilagođava koordinate korisničkog ulaza sa grafičke sprege u stvarne koordinate sistema, odn. stimulacione ploče. Ovo se vrši unutar modula koji je na slici 6.9 odgovarajuće označen, pre nego što se šalje komanda stimulacionoj ploči. Slika 6.9 dodatno prikazuje kako su osnovne komponente okruženja povezane i kako interaguju sa korisnikom i uređajima.

Kao primer izgleda okruženja, slika 6.10 na narednoj strani prikazuje izgled korisničke sprege prilikom definisanja stimulusa. Sa leve strane korisnik može da izabere jedan od 7 osnovnih tipova stimulusa, a na prostoru pored, unutar nactanog tableta, može da definiše parametre datog stimulusa – koordinate početnih i krajnjih tačaka, kao i vreme (pomerajući miša u realnom vremenu računa se i vreme). Ukoliko poseduje programersko znanje, korisnik može da modifikuje svoj stimulus u donjem prozoru, ručno menjajući generisani *Python* skript izlaz. Sa desne strane se nalaze pomoćne informacije za korisnika.

6. Integrirani sistem za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir



Slika 6.10. Izgled grafičke korisničke sprege prilikom definisanja stimulusa

Nakon što smo prikazali osnovne komponente sistema za automatsku proveru uređaja potrošačke elektronike sa ekranima osetljivim na dodir, tj. fizičku arhitekturu i programsku podršku sistema, vreme je da se okrenemo metodologiji testiranja samih uređaja. Kojim postupkom, odn. kojom metodologijom se vrši testiranje uređaja? Kako znamo i kako smemo da pretpostavimo da li je neki uređaj ispravan ili ne? Kako grupišemo testne slučajeve da bi testiranje bilo sistematično u moru testnih slučajeva kojih zna da bude preko 1,000 prilikom provere jednog uređaja? Naredno poglavlje će dati odgovor na ova pitanja.

7. Metodologija provere rada uređaja potrošačke elektronike

Inženjeri su od početaka svoje profesije prepoznali potrebu za proverom rada sistema koje projektuju. Nepisano je pravilo da nijedan sistem koji se projektuje nije u potpunosti ispravan kada se napravi i tek nakon temeljne provere rada sistema uočavaju se i ispravljaju njegove greške. Zbog toga je od izuzetne važnosti razviti metodologiju kojom će se vršiti provera rada sistema, odnosno uređaja koji se proizvodi i izdvojiti dovoljno vremena i ljudskih resursa za taj posao.

Potreba za sistematičnom i obimnom proverom rada sistema koji se projektuje je primećena i u literaturi, te se predlažu razne metodologije kojim bi sistemi trebali da se testiraju. Sve metodologije se mogu klasifikovati u tri grupe:

- metodologije crne kutije (*Black Box Testing*) – kod kojih se sistem ispituje nepoznajući njegovu internu strukturu, a posmatra se isključivo preko svojih ulaza i izlaza,
- metodologije bele (odn. staklene) kutije (*White (Glass) Box Testing*) – kod kojih se sistem ispituje poznajući njegovu internu strukturu,
- metodologije sive kutije (*Gray Box Testing*) – koje predstavljaju kombinaciju prethodne dve metodologije.

U literaturi se predlaže širok spektar metodologija testiranja sistema, u zavisnosti od toga kod tipa je sistem koji se testira [88]-[90], ali se sve one mogu klasifikovati u neku od prethodnih kategorija. Potreba za sistematičnim pristupom prilikom provere rada sistema je dovela i do sve veće potrebe za edukacijom u oblasti testiranja sistema [91].

Sistem za automatsku funkcionalnu proveru rada uređaja potrošačke elektronike, BBT, kotisti metodologiju crne kutije prilikom svog rada. U nastavku će biti više reči o ovoj metodologiji.

7.1 Metodologija provere principom crne kutije

Metodologija crne kutije (slika 7.1) proverava rad sistema posmatrajući isključivo njegove ulaze i izlaze, ne ulazeći u internu strukturu sistema koji se testira. Testni slučajevi se

7. Metodologija provere rada uređaja potrošačke elektronike

izvode definišući ulaz u sistem i posmatrajući izlaze sistema. Ova metoda je nastala pre svega za potrebe testiranja programske podrške, ali je korisna za testiranje bilo kog sistema.

Testni slučajevi ne treba da poznaju internu strukturu sistema, odn. ne treba na znaju *kako* sistem funkcioniše. Za testiranje ovom metodom jedino neophodno znanje je *šta* sistem treba da radi, odn. poznavanje specifikacije sistema. Zbog toga se ovaj princip testiranja često naziva testiranje sistema prema njegovoj specifikaciji.

BBT sistem je preuzeo metodologiju crne kutije zbog toga što je to način provere najpribližniji stvarnom korišćenju sistema od strane korisnika. Kada koristi neki uređaj, korisnik definiše komande i pobude tom uređaju putem njegovih izlaza, a dobija povratnu informaciju putem njegovih izlaza. Mali broj korisnika poznaje internu strukturu uređaja, a prateći principe modularnosti i skrivanja informacija koji su osnovni principi inženjerstva složenih sistema, poznavanje interne strukture ni ne sme biti uslov za korišćenje datog sistema.

Iz tog razloga je primećeno da je najbolji pristup proveriti rada uređaja na finalnoj proizvodnoj liniji, odn. kada je on već napravljen, pre nego što će završiti na policama prodavnica, pristup najbližniji stvarnom korišćenju od strane korisnika, a to je princip crne kutije. BBT sistem, čije ime je skraćenica za metodologiju kojom radi, uvodi ovu metodologiju u procese testiranja uređaja potrošačke elektronike čime njihovu proveru pokušava da približi stvarnoj korisničkoj primeni sistema.



Slika 7.1. Prilikom testiranja metodologijom crne kutije definišu se ulazi u sistem i posmatraju izlazi, ne ulazeći u internu strukturu sistema

7.2 Metodologija provere rada TV prijemnika

U nastavku će biti opisana metodologija provere rada TV prijemnika sistemom RT-AV400. Na finalnoj proizvodnoj liniji, bilo da je u pitanju manuelni ili automatski postupak, provera rada digitalnih TV prijemnika i prijemnika TV signala je organizovana u tri faze:

7. Metodologija provere rada uređaja potrošačke elektronike

1. Faza pripreme za proces testiranja
2. Faza izvršenja testnih slučajeva
3. Faza izveštavanja o rezultatima testnih slučajeva

Tokom faze pripreme za proces testiranja, uređaj koji se proverava se donosi na testnu stanicu, povezuje na signal generatore, napajanje i pokreće se njegov rad.

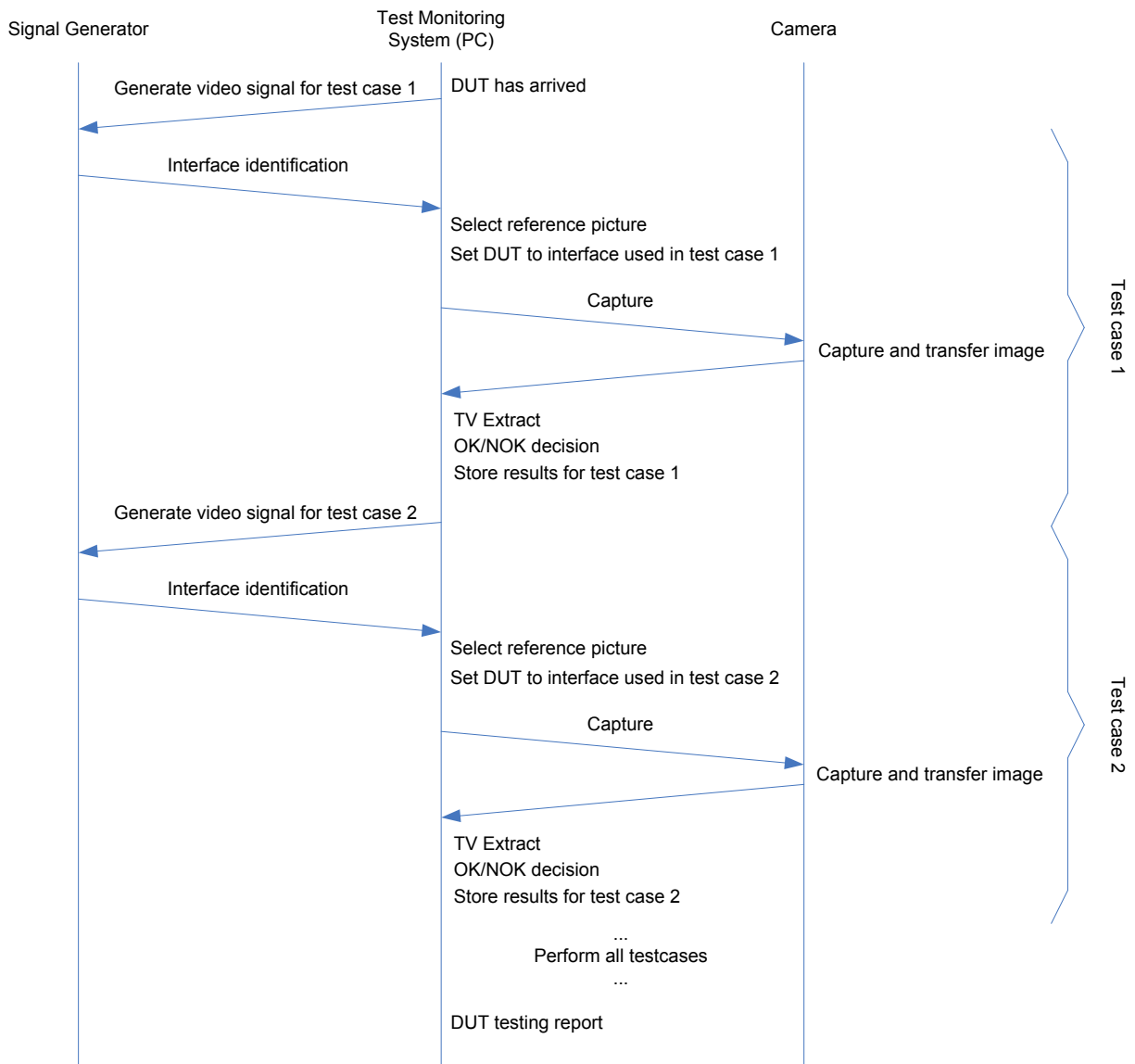
Tokom faze izvršenja testnih slučajeva, čiji postupak je ilustrovan na slici 7.2, izvršavaju se testni slučajevi, a njihovo izvršavanje je kontrolisano od strane procesorske jedinice u sistemu – PC računara ili druge procesorske jedinice, u zavisnosti od okruženja koji vrši testiranje. Testni slučajevi pokrivaju širok opseg sprega sa kojima uređaj koji se proverava komunicira sa okruženjem. Najčešće sprega koje se proveravaju su:

- GV-698 – ulazna RF sprega,
- CVBS – ulazna analogna video sprega,
- HDMI – ulazna digitalna video/audio sprega,
- YpbPr – ulazna komponentna video sprega,
- VGA – ulazna analogna video sprega,
- S-VIDEO – ulazna analogna video sprega,
- USB – ulazno/izlazna opšta sprega,
- S/PDIF – ulazno/izlazna digitalna audio sprega.

Izvršavanje jednog testnog slučaja prolazi kroz sledeće korake:

- kontrolna programska podrška na PC računaru ili drugoj procesorskoj jedinici pokreće izvršavanje testnog slučaja,
- signal generator biva kontrolisan kako bi na svom izlazu prikazao odgovarajući testni šablon koji, putem svoje izlazne sprega, isti šalje prema uređaju koji se proverava,
- testni šablon se pojavljuje na ekranu TV prijemnika, tako što isti dobija putem neke od ulaznih sprega koja se proverava,
- digitalna kamera uslika stanje na TV ekranu i šalje sliku ka PC računaru ili drugoj procesorskoj jedinici putem LAN sprega,
- PC računar ili druga procesorska jedinica pokreće algoritam za analizu sadržaja na TV ekranu, ranije opisan u okviru ove disertacije,
- algoritam donosi odluku o ispravnosti rada TV prijemnika za dati testni slučaj u zavisnosti od brojnog rezultata sličnosti sadržaja na TV ekranu i referentnog sadržaja.

7. Metodologija provere rada uređaja potrošačke elektronike



Slika 7.2. Redosled provere rada digitalnog TV prijemnika (ulazni video)

Testni slučajevi, kojih veoma često ima i više hiljada za proveru jednog uređaja, se u predloženom automatskom BBT sistemu izvršavaju jedan za drugim, bez potrebe za premeštanjem uređaja na različite testne stanice. U ovome se vidi velika prednost predloženog sistema, zbog toga što je u manuelnim sistemima potrebno uređaj koji se testira premeštati između testnih stanica na kojima radnici vrše manuelnu proveru pojedinačnih segmenata rada uređaja. Veliki procenat vremena kojeg uređaj provede na verifikacionom koraku finalne proizvodne linije zauzima upravo premeštanje između stanica, tako da automatski pristup bez

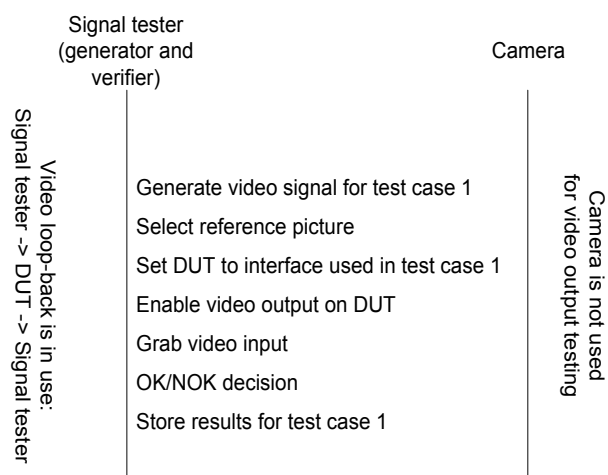
7. Metodologija provere rada uređaja potrošačke elektronike

premeštanja koji uvodi BBT sistem u velikoj meri ubrzava verifikaciju, a samim tim i proizvodnju TV prijemnika.

Nakon što je izvršen testni slučaj, rezultat se prikazuje na monitoru i usnimava u bazu podataka. Baza podataka čuva rezultate svih testnih slučajeva za sve uređaje koji se proveravaju, a sem kao pregled rezultata testiranja, može da posluži i za odlučivanje o narednim testnim slučajevima za isti uređaj ili uređaje istog tipa. Odlučivanje o tome koji testni slučajevi treba da se pokrenu u zavisnosti od rezultata prethodnih testnih slučajeva nije još uvek sastavni deo BBT sistema, ali je jedno moguće proširenje u budućnosti.

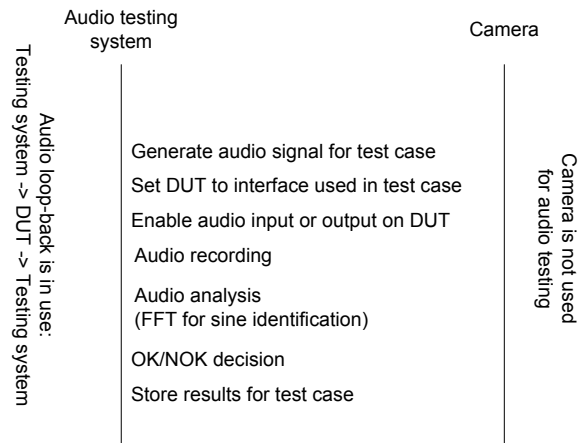
Nakon izvršenja svih testnih slučajeva, sumarni rezultati testiranja se prikazuju u fazi izveštavanja o rezultatima testiranja, a uređaj koji je proveravan (digitalni TV prijemnik) se isključuje sa signal generatora i napajanja, te napušta dato testno mesto na proizvodnoj liniji.

Upravo opisana metodologija provere rada digitalnih TV prijemnika je zasnovana na proveru ulaznih video sprega na TV prijemniku, a samim tim i rad prijemnika od ulazne sprege do ekrana. Slična metodologija se primenjuje i za proveru rada izlaznih video sprega i audio sprega, s tim da se za preuzimanje slike u tom slučaju koristi greber uređaj, kao što je RT-AV100, za preuzimanje zvuka sa izlazne sprege koristi takođe greber, dok se za preuzimanje zvuka koji dolazi na ulaznu spregu koristi mikروفon na kameri. Na slikama 7.3 i 7.4 su prikazani postupci za proveru izlaznog videa, odn. zvuka respektivno.



Slika 7.3. Redosled provere rada digitalnog TV prijemnika (izlazni video)

7. Metodologija provere rada uređaja potrošačke elektronike



Slika 7.4. Redosled provere rada digitalnog TV prijemnika (ulazni i izlazni audio)

Provera ulazne audio sprege na digitalnom TV prijemniku se izvršava u sledećim koracima:

- funkcijski generator na svom izlazu šalje sinusni signal na oba kanala, npr. frekvencije 1 kHz na levi kanal, a frekvencije 3 kHz na desni kanal,
- mikrofoni na digitalnoj kameri snima zvuk koji proizvodi digitalni TV prijemnik na svom zvučnom izlazu,
- algoritam zasnovan na FFT vrši analizu zvučnog signala,
- algoritam donosi odluku o ispravnosti rada digitalnog TV prijemnika sa stanovišta zvuka u zavisnosti od frekvencija koje dominiraju u spektru usnimljenog zvučnog signala sa mikrofona.

7.3 Metodologija provere rada uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

Provera rada uređaja sa ekranima osetljivim na dodir (slika 7.5) se izvršava koristeći istu metodologiju kao prilikom provere rada digitalnih TV prijemnika – metodologiju crne kutije (BBT) i kao takva je potpuno integrisana u BBT sistem.

Izvršavanje jednog testnog slučaja prolazi kroz sledeće korake:

- kontrolna programska podrška na PC računaru pokreće izvršavanje testnog slučaja,
- stimulaciona ploča dobija komande od strane PC računara o tipu stimulusa koji treba da izvrši na ekranu uređaja koji se proverava,
- potrebni stimulus se izvršava i ekran na njemu reaguje na isti način na koji bi reagovao za isti stimulus od strane korisnika,

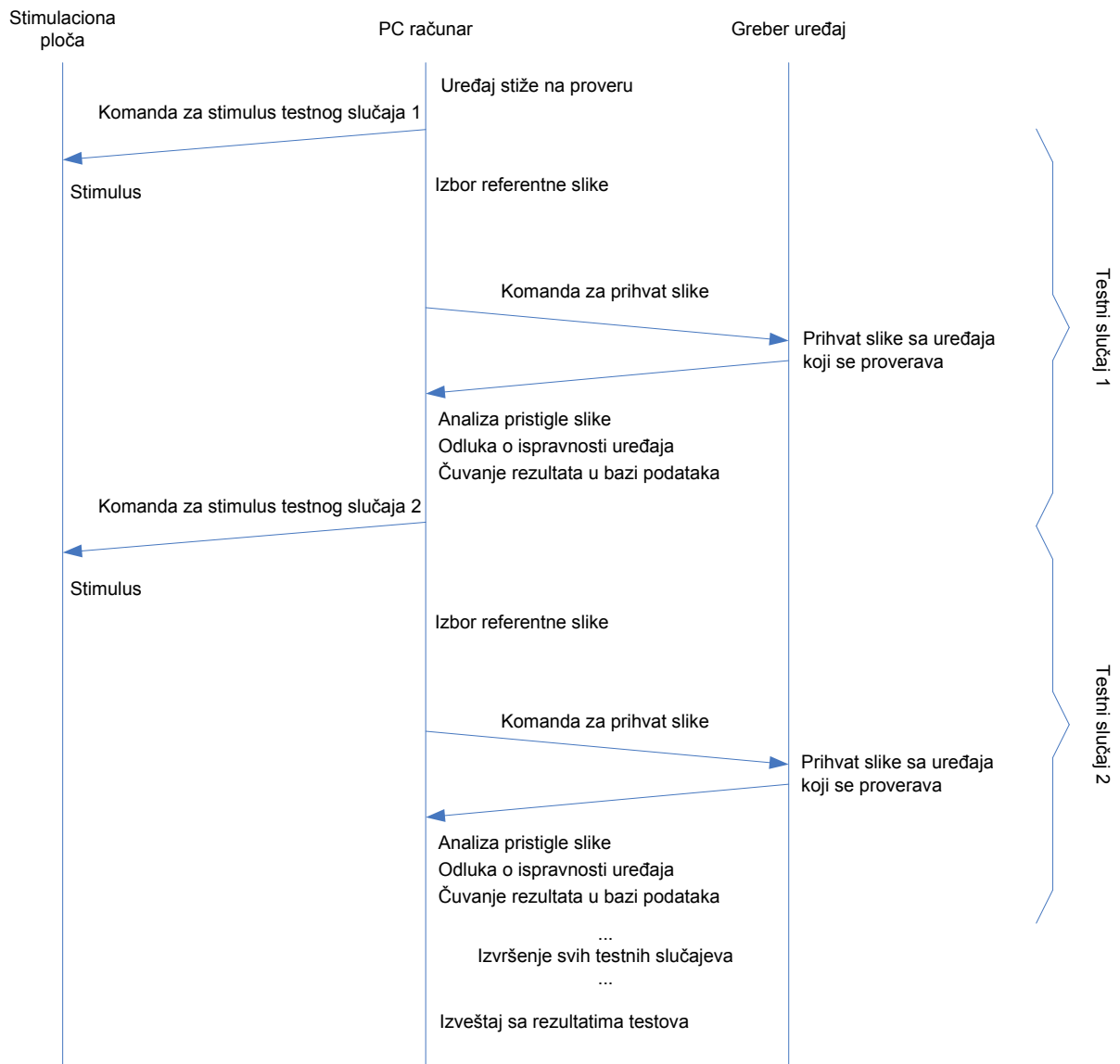
7. Metodologija provere rada uređaja potrošačke elektronike

- uređaj koji se proverava šalje sliku o sadržaju ekrana na svoj HDMI izlaz,
- greber uređaj preuzima sliku o sadržaju ekrana sa svog HDMI ulaza i isti nakon kratke obrade šalje ka PC računaru putem LAN sprege,
- PC računar ili druga procesorska jedinica pokreće algoritam za analizu sadržaja na ekranu, koji se zasniva na poređenju preuzete i referentne slike,
- algoritam donosi odluku o ispravnosti rada uređaja za dati testni slučaj u zavisnosti od brojnog rezultata sličnosti sadržaja na ekranu uređaja koji se proverava i referentnog sadržaja.

Testni slučajevi su unutar BBT sistema organizovani u testne planove. Svaki testni plan pokriva proveravanje jednog tipa uređaja i sadrži se od velikog broja testnih slučajeva, veoma često preko 1,000. Svi testni slučajevi, odn. kompletan testni plan, se pokreće na jednom uređaju na istoj testnoj stanici koja vrši kompletnu proveru rada datog uređaja.

U nastavku disertacije biće dati eksperimentalni rezultati rada sistema koji su proizašli kao njen rezultat. Za početak ćemo se vratiti na sistem koji proverava digitalne TV prijemnike pomoću kamere, sa stanovišta percepcije korisnika, i prikazati rezultate njegovog rada.

7. Metodologija provere rada uređaja potrošačke elektronike



Slika 7.5. Redosled provere rada uređaja sa ekranom osetljivim na dodir

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osjetljive na dodir

Nakon što je utvrđeno da se prekidanjem dugačkog provodnika može kontrolisano stimulisati ekran osjetljiv na dodir, prvi koraci u proveravanju funkcionalnosti ideje o stimulaciji ekrana osjetljivih na dodir prikazane u ovoj disertaciji su učinjeni proverom veličine dodirne površine koja je potrebna da bi se ekran stimulisao i proverom kako se ponaša svaki od predloženih prekidačkih elemenata. Provera je izvršena na tabletu dijagonale 10.1“ koristeći aplikaciju koja prikazuje tačke u kojima je ekran dodirnut, kao i frekvenciju dodira.

U nastavku će biti prikazani rezultati početnih eksperimenata sa različitim dodirnim površinama i prekidačkim elementima, na osnovu kojih je doneta odluka o optimalnoj veličini dodirne površine, kao i optimalnom prekidačkom elementu za primenu u sistemu. Nakon toga biće prikazani rezultati rada stimulacione ploče sa matricom od 29 x 16 dodirnih površina i rezultati primene te stimulacione ploče kao dela sistema za proveru uređaja sa ekranima osjetljivim na dodir. Rezolucija ove ploče je 57 x 31 tačaka na ekranu od 10.1“ pošto je stimulacijom dve susedne površine moguće dobiti efekat stimuliranja tačke između te dve površine.

8.1 Eksperimenti sa različitim dodirnim površinama

Eksperimentalno je potvrđeno da dodirna površina koja naleže na ekran osjetljiv na dodir treba da ima određenu minimalnu površinu, treba da bude ravna tako da potpuno naleže na ekran, kako bi se maksimizovala površina dodira, i treba da bude dovoljno fleksibilna da se prilagodi eventualnoj nepravilnoj površini ekrana, mikroneravninama i sl.

U slučaju dodira prstom, dodirna površina je oko 50 mm². U svrhu određivanja minimalne površine, napravljena je matrica provodnih površina različitih dimenzija, od 1 mm do 5 mm. Testiranje je pokazalo da je minimalna površina koja aktivira ekran jednaka 4x4 mm². Ekran je takođe reagovao na veće provodne površine, ali kako bi se povećala rezolucija testiranja, korisno je minimizovati dodirne površine.

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir

Materijal od kojeg treba biti napravljena dodirna površina mora biti provodan, sa malom otpornosti i parazitnim kapacitetom, kako bi mogao da stimuliše ekran, a istovremeno ne smetao kada stimulacija nije potrebna. Probano je sa nekoliko materijala:

- tanke metalne površine,
- provodni sundjeri,
- provodne gume.

Tanke metalne površine su se pokazale najstabilnije, no one uvode problem zbog manje fleksibilnosti u odnosu na ostale materijale. Bez obzira na to, prvi uspešan prototip stimulacione ploče napravljen je sa ovim materijalom kao dodirnim površinama, no ne odustaje se od pokušaja primene i ostalih materijala u kasnijim verzijama.

8.2 Eksperimenti sa različitim prekidačkim elementima

Kao što je opisano ranije u okviru ove disertacije, vršeni su eksperimenti sa različitim prekidačkim elementima. Za prekidački element je jako važno da ima malu parazitnu kapacitivnost, zbog toga što u isključenom stanju parazitna kapacitivnost može da stimuliše ekran. Sa druge strane, prekidački element mora da ima jako malu otpornost u uključenom stanju kako bi se stimulacija desila. Ova dva problema možemo nazvati kao:

- lažni pozitivni stimulus – kada je prekidački element u isključenom stanju, a ekran biva stimulisan (usled parazitne kapacitivnosti prekidačkog elementa),
- lažni negativni stimulus – kada je prekidački element u uključenom stanju, a ekran ne biva stimulisan (usled velike otpornosti prekidačkog elementa).

Kako bi proverili frekvenciju lažnih pozitivnih, odn. negativnih stimulusa, korištena je aplikacija koja meri frekvenciju dodira na ekranu. Kada se dodiruje prstom, ova aplikacija prikazuje frekvenciju dodira reda veličine 60 Hz. Aplikacija ne reaguje na statični dodir, već na pokret, tako da smo dodirnu površinu pomerali tokom stimulacije ekrana.

TABELA 8.1. FREKVENCIJA DODIRA PRILIKOM STIMULACIJE EKRANA OSETLJIVOG NA DODIR KORISTEĆI MOSFET KAO PREKIDAČKI ELEMENT

Test	Srednja frekvencija dodira	
	Test	Frekvencija [Hz]
1	OFF	8
2	ON stalno	55
3	ON/OFF oscilatorno $f = 100$ Hz	18

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir

Tabela 8.1 sumira rezultate dodira kada je MOSFET korišten kao prekidački element. Iz tabele se može videti da postoji pouzdana razlika između ON i OFF stanja MOSFET-a. Uključeno stanje MOSFET-a uspešno stimuliše ekran sa frekvencijom bliskom onoj kojom ga stimuliše prst, a nešto manja frekvencija je rezultat neidealnog prijanjanja površine ekranu. Ipak ova frekvencija je dovoljna da bi se dodir registrovao, tako da lažni negativni stimulusi ne predstavljaju problem kod ovog rešenja.

S druge strane, isključeno stanje MOSFET-a se ne ponaša idealno, jer je frekvencija lažnih pozitivnih stimulusa prilično velika, zbog čega MOSFET ne zadovoljava zahteve sistema. Lažni pozitivni stimulusi ne smeju da se dešavaju uopšte, jer i kratki dodir koji biva registraovan kada mu nije vreme ne omogućava kontrolisanu stimulaciju ekrana od strane sistema.

Tokom ovog eksperimenta probano je i kako ekran reaguje na oscilatornu pobudu na dodirnoj površini, odn. brzo uključivanje i isključivanje MOSFET-a, a samim tim i veze dodirne površine sa dugačkim provodnikom i nultim potencijalom. Eksperiment je pokazao da oscilatorna pobuda ne donosi dobre rezultate i od daljeg eksperimentisanja sa ovim načinom pobude ekrana se odustalo.

Nakon MOSFET-a pokušalo se sa drugim prekidačkim elementom – bipolarnim tranzistorom, od kojeg su se očekivali bolji rezultati u domenu uklanjanja lažnih pozitivnih stimulusa, zbog manje parazitne kapacitivnosti. Tabela 8.2 prikazuje rezultate dobijene korišćenjem bipolarnog tranzistora kao prekidačkog elementa.

TABELA 8.2. FREKVENCIJA DODIRA PRILIKOM STIMULACIJE EKRANA OSETLJIVOG NA DODIR KORISTEĆI BIPOLARNI TRANZISTOR KAO PREKIDAČKI ELEMENT

Test	Srednja frekvencija dodira	
	Test	Frekvencija [Hz]
1	OFF	2
2	ON	57

Iz tabele se vidi da se smanjila frekvencija lažnih pozitivnih i lažnih negativnih stimulusa, ali je i dalje frekvencija lažnih pozitivnih stimulusa dovoljno velika da i bipolarni tranzistor ne zadovoljava potrebe sistema kao prekidački element.

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir

Nakon prethodnih eksperimenata, odustalo se od poluprovodničkih prekidačkih elemenata i pokušano je sa elektromehaničkim relejem. Tabela 8.3 prikazuje rezultate sa relejem kao prekidačkim elementom.

TABELA 8.3. FREKVENCIJA DODIRA PRILIKOM STIMULACIJE EKRANA OSETLJIVOG NA DODIR KORISTEĆI ELEKTROMEHANIČKI RELEJ KAO PREKIDAČKI ELEMENT

Test	Srednja frekvencija dodira	
	Test	Frekvencija [Hz]
1	OFF	0
2	ON	57

Elektromehanički relej je u potpunosti eliminisao lažne pozitivne stimulse, čime je zadovoljio potrebe sistema i izabran je za prekidački element. Lažni negativni stimulusi se i dalje dešavaju manjom frekvencijom, ali njihova frekvencija ne predstavlja problem za primenu unutar verifikacionog sistema. Uspešnost dodirne površine ne zavisi samo od prekidačkog elementa već i od geometrije same površine, načina na koji prijanja ekranu i preciznosti njene izrade. Od najveće važnosti je bilo ukloniti lažne pozitivne stimulse, što je relejem i učinjeno, tako da je otvorena mogućnost za potpuno kontrolisanu stimulaciju ekrana.

8.3 Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče

Nakon što je eksperimentom utvrđena optimalna površina dodira i materijal dodirne površine, pristupilo se proizvodnji stimulacione ploče sa matricom od 29 x 16 dodirnih površina koja pokriva tablet dijagonale 10.1“. Raspored dodirnih površina je dat u poglavlju 5, na slici 5.6. Ovde je, na slici 8.1, prikazano kako stimulaciona ploča izgleda kao uređaj i deo sistema za proveru uređaja sa ekranima oselrljivim na dodir.

Rad stimulacione ploče je proveren aplikacijom za crtanje koja ima mogućnost da prikaže tačku dodira, kao i linije ukoliko se takav stimulus otkrije senzorom i aplikacijom napravljenom za potrebe provere stimulacione ploče, kao primer aplikacije koja podržava klik, pomeraj, zum [92]. Provera rada stimulacione ploče je ovom aplikacijom vrlo jednostavna – sve dodirne površine se aktiviraju jedna za drugom. Nakon izvršene provere, na ekranu tableta se dobija slika kao na slici 8.2 (ovde je preuzeta sa monitora na koji je HDMI spregom signal sa tableta poslat ka monitoru, na sličan način na koji se šalje greber uređaju). Tačke koje su se pojavile predstavljaju uspešan dodir, a tačke koje fale predstavljaju neuspešan dodir. Razlozi neuspešnog dodira mogu biti: loše prijanjanje površine za ekran, loš relej ili privremen problem osetljivosti ekrana.

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir

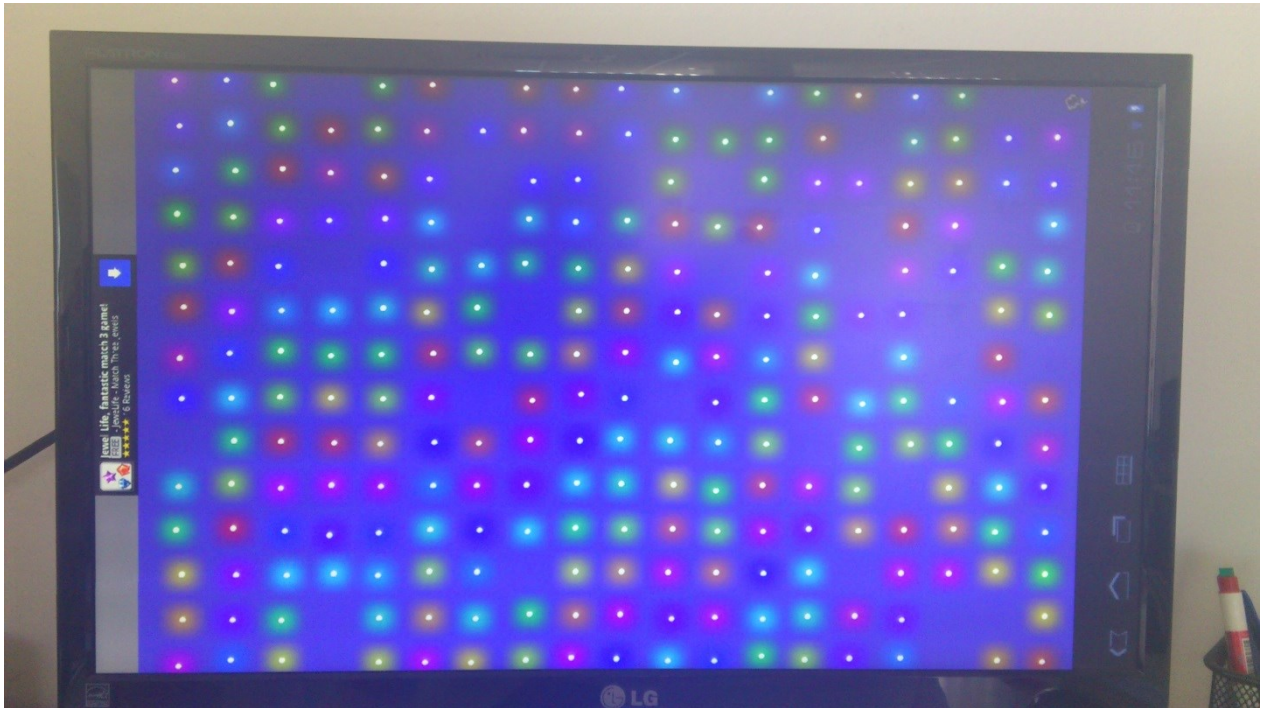


Slika 8.1. Uređaj sa stimulacionom pločom kao deo BBT sistema za proveru rada uređaja sa ekranom osetljivim na dodir

Rad ploče je inkrementalno poboljšavan i frekvencija neuspelih dodira se smanjila na tolerantni minimum koji zahteva testni sistem. U trenutku pisanja ove disertacije, procenat uspešnih pobuda je prešao 99%. Maksimalan broj pobuda koji stimulaciona ploča podržava je 16.

Nakon što je aplikacija za crtanje pokazala da stimulaciona ploča zadovoljava potrebe testnog sistema, ploča je primenjena prilikom pravljenja prvih probnih testova za proveru rada tableta. U nastavku je dat primer jednog testnog slučaja i njegovo izvršavanje BBT RT-Executor aplikacijom.

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir



Slika 8.2. Dodiri ekrana stimulacionom pločom. U ovom primeru je oko 90% površina uspešno dodirnulo ekran, dok ostatak nije uspeo

8.4 Primena stimulacione ploče u proveru rada uređaja – primer testa iz sistema za automatsku proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir

Kao primer testnog slučaja koji koristi stimulacionu ploču, pogledajmo testni slučaj za tablet opisan *Python* programskim jezikom sa slike 8.3. U ovom testnom slučaju odigrava se sledeće:

- otključava se ekran iscrtavanjem linije na mestu koji tablet očekuje za ovu primenu,
- pokreće se aplikacija za crtanje, klikom na odgovarajuću ikonu,
- pokreće se nov crtež, klikom na odgovarajuće dugme unutar aplikacije,
- iscrtava se linija od tačke (1, 1) do tačke (10, 10) u koordinatnom sistemu dodirnih površina,
- greber uređaj preuzima sadržaj na ekranu tableta,
- PC računar poredi preuzeti sadržaj sa referentnim sadržajem,
- donosi se odluka o ispravnosti rada tableta za dati testni slučaj.

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir

Navedeni testni slučaj je primer provere nekoliko različitih aspekata rada tableta:

- proverava se da li ispravno radi otključavanje tableta
- proverava se da li se otvara željena aplikacija klikom na njenu ikonu
- proverava se rad same aplikacije – da li se unutar nje dešavaju očekivane operacije klikom na stavku njenog menija,
- proverava se da li tablet ispravno prihvata dodire i iscrtavanje linije.

Detaljnije, navedeni testni slučaj radi sledeće:

- na početku se resetuje stanje svih releja slanjem *release_all* komande; ovaj korak je preporučljiv na početku svakog testnog slučaja kako bi eliminisao eventualne ostatke uključenih releja iz prethodnih testnih slučajeva,
- nakon toga se iscrtava linija koja predstavlja pokret kojim se otključava tablet; linija se iscrtava od tačke na kojoj tablet očekuje početni dodir prilikom otključavanja do tačke na kojoj tablet očekuje da se linija završi; linija se iscrtava slanjem *line* komande i postavljanjem vrednosti odgovarajućih promenljivih – $(x1, y1)$ koordinate početne tačke linije, $(x2, y2)$ koordinate početne tačke i *duration*, vreme trajanja stimulusa,
- nakon toga se pritiska ikona željene aplikacije, u ovom slučaju to je aplikacija *Paint Joy* koja služi za iscrtavanje linija po ekranu; pritisak (klik) se vrši slanjem *click* komande i odgovarajućih koordinata dodira $(x1, y1)$,
- nakon 2 sekunde pauze, koja se ovde stavlja kako bi se dalo vremena aplikaciji da se učita, sledi još jedan klik, ovog puta na stavku *New* menija aplikacije, kako bi se otvorio novi prozor sa crtanjem,

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir

```
13 def runTest():
14
15     # initialize
16     device.handler("ScreenTouch", "SET", "stimulus_type", RELEASE_ALL)
17     ret = device.handler("ScreenTouch", "GET", "result", "")
18
19     # unlock screen
20     device.handler("ScreenTouch", "SET", "stimulus_type", LINE)
21     device.handler("ScreenTouch", "SET", "x1", "15")
22     device.handler("ScreenTouch", "SET", "y1", "6")
23     device.handler("ScreenTouch", "SET", "x2", "18")
24     device.handler("ScreenTouch", "SET", "y2", "6")
25     device.handler("ScreenTouch", "SET", "duration", "200")
26     ret = device.handler("ScreenTouch", "GET", "result", "")
27
28     # open Paint Joy application
29     device.handler("ScreenTouch", "SET", "stimulus_type", CLICK)
30     device.handler("ScreenTouch", "SET", "x1", "3")
31     device.handler("ScreenTouch", "SET", "y1", "8")
32     ret = device.handler("ScreenTouch", "GET", "result", "")
33
34     time.sleep(2);
35
36     # open New painting
37     device.handler("ScreenTouch", "SET", "stimulus_type", CLICK)
38     device.handler("ScreenTouch", "SET", "x1", "10")
39     device.handler("ScreenTouch", "SET", "y1", "7")
40     ret = device.handler("ScreenTouch", "GET", "result", "")
41
42     time.sleep(2);
43
44     # draw line
45     device.handler("ScreenTouch", "SET", "stimulus_type", LINE)
46     device.handler("ScreenTouch", "SET", "x1", "1")
47     device.handler("ScreenTouch", "SET", "y1", "1")
48     device.handler("ScreenTouch", "SET", "x2", "10")
49     device.handler("ScreenTouch", "SET", "y2", "10")
50     device.handler("ScreenTouch", "SET", "duration", "300")
51     ret = device.handler("ScreenTouch", "GET", "result", "")
52
53     # finalize
54     device.handler("ScreenTouch", "SET", "stimulus_type", RELEASE_ALL)
55     ret = device.handler("ScreenTouch", "GET", "result", "")
56
57     # grab the image
58     device.handler("RT-AV101", "SET", "[INIT_RTAV]", "")
59     device.handler("RT-AV101", "SET", "[PLAY_DEVICE_HDMI]", "")
60     device.handler("RT-AV101", "SET", "[CAPTURE]", "")
61     device.handler("RT-AV101", "SET", "[STOP_DUTS]", "")
62     device.handler("RT-AV101", "SET", "[DEINIT_RTAV]", "")
63
64     # compare with the referent picture
65     device.handler("NCC", "SET", "testpicture", "DUT_0_0.bmp")
66     device.handler("NCC", "SET", "refpicture", "DUT_0_0_p1.bmp")
67     ret = float(device.handler("NCC", "GET", "result", ""))
68
69     # test result decision
70     if ret > 900.0:
71         device.updateTestResult("PASS");
72     else:
73         device.updateTestResult("FAIL");
```

Slika 8.3. Primer testnog slučaja za proveru rada tableta

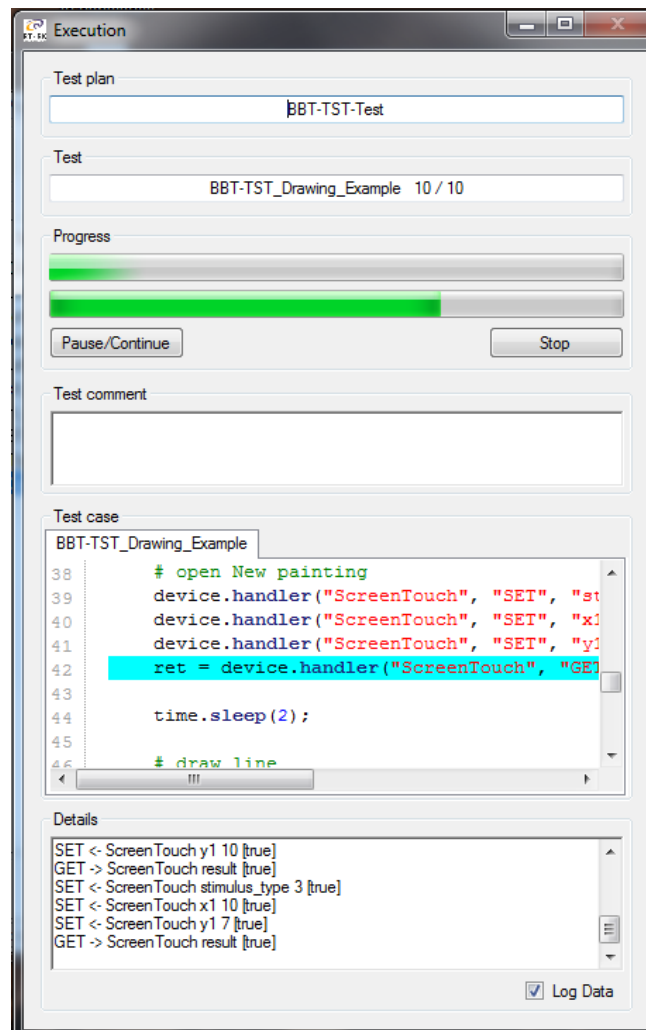
8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir

- nakon još 2 sekunde pauze, iscrtava se linija od tačke (1, 1) do tačke (10, 10) u koordinatnom sistemu dodirnih površina (kojih ima 29 horizontalno i 16 vertikalno) trajanja 300 ms,
- na kraju komunikacije sa stimulationsom pločom resetuje se stanje svih releja slanjem *release_all* komande; ovaj korak je takođe preporučljiv kako bi eliminisao sve eventualne ostale uključene releje i time osigurao da naredni testni slučaj krene iz isključenog početnog stanja,
- sledi komunikacija sa greber uređajem i slanje komande za preuzimanje slika putem HDMI sprege sa tableta,
- poređenje preuzete slike od strane grebera sa referentnom slikom se izvršava korištenjem normalizovane kros-korelacije, metode koju smo ranije opisali u okviru ove disertacije,
- konačna odluka o ispravnosti rada tableta za dati testni slučaj dobija se nakon poređenja stanja na ekranu sa referentnim sadržajem – ukoliko normalizovana kros-korelacija za dati testni slučaj proizvede rezultat veći od 900.0 sadržaj se proglašava ispravnim, u suprotnom se proglašava neispravnim.

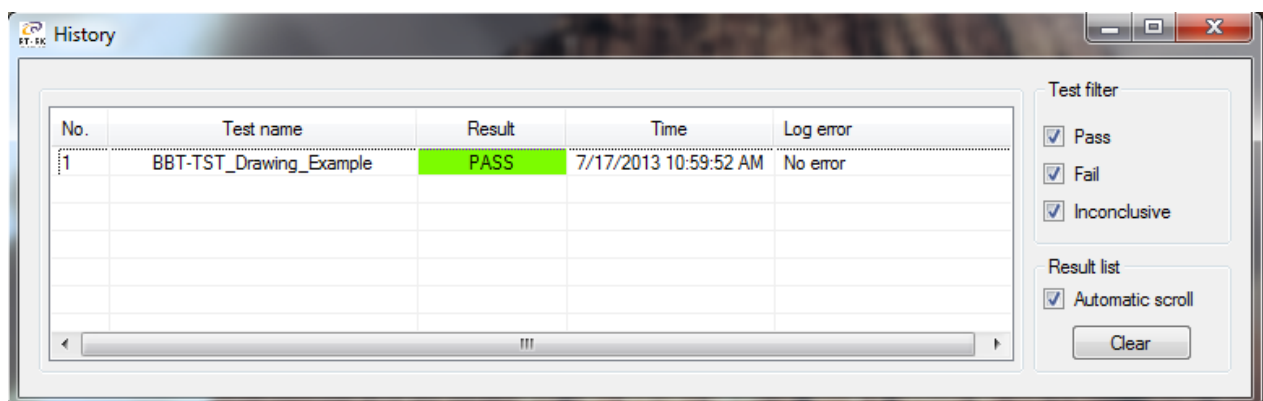
Na slici 8.4 prikazan je jedan trenutak izvršavanja ovog testnog slučaja u okviru RT-Executor aplikacije.

Slika 8.5 prikazuje izveštaj koji aplikacija RT-Executor prikazuje nakon izvršenog testnog slučaja. Unutar foldera testnog slučaja mogu se naći referentna slika, preuzeta slika i detaljniji izveštaj algoritma za poređenje slika.

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir



Slika 8.4. Izvršavanje testnog slučaja BBT RT-Executor aplikacijom



Slika 8.5. Izveštaj o uspešnom radu uređaja za dati testni slučaj

8.5 Poređenje predloženog rešenja stimulacije ekrana sa komercijalno dostupnim rešenjima

Dosadašnji metod stimulacije, koji se primenjuje u komercijalno dostupnim rešenjima, zahteva upotrebu mehaničkih komponenti i stimuliše ekran mehaničkim pokretima, približavanjem stimulusa ekranu i pomeranjem stimulusa na različite lokacije. Uređaj je velikih dimenzija, a zbog svojih mehaničkih komponenti nosi i veliku cenu. Ovakvi tipovi uređaja su uspešno rešili potrebu za automatizacijom verifikacionog procesa na proizvodnoj liniji uređaja sa ekranima osjetljivim na dodir dok njihova proizvodnja nije bila toliko široka kao danas. Sada industrija zahteva jeftinije, masovnije, pouzdanije i preciznije rešenje kako bi verifikacija ispratila propusnost proizvodnje.

Predloženo rešenje je doprinelo potpuno novim načinom stimulacije ekrana osjetljivog na dodir. Umesto dosadašnjih mehaničkih rešenja, predloženo rešenje koristi inovativni električni pristup stimulaciji ekrana bez pokretnih mehaničkih delova tokom stimulacije. Zbog odsustva potrebe za glomaznom mehanikom, rad sa predloženim uređajem je jednostavniji, pouzdaniji, a i cena uređaja je značajno niža što omogućava njegovu masovniju upotrebu u industriji mobilnih telefona, tableta i drugih uređaja sa ekranima osjetljivim na dodir.

Rešenje opisano u ovoj disertaciji uklanja potrebu za mehanikom, stimulusi su stalno prislonjeni na ekran, a pobuđuju se kontrolisano električnim putem. Ovakav način stimulacije zahteva jednostavniji i jeftiniji sistem koji je lakše kontrolisan od ranijeg mehaničkog pristupa.

Tabela 8.4 prikazuje sumirane rezultate sistema za proveru uređaja sa ekranima osjetljivim na dodir zasnovanog na električnoj stimulaciji ekrana i poredi ih sa nekim komercijalno dostupnim rešenjima zasnovanim na mehaničkom pristupu. Pošto su detalji realizacije ovih uređaja uglavnom nedostupni, ovde su sumirane samo bitne metrike koje su javno dostupne u brošurama uređaja.

Uređaj OptoFidelity postoji u nekoliko varijanti. Ovde su prikazane dve karakteristične varijante – jedna koja dodiruje samo jednu tačku na ekranu (One-Finger) i varijanta koja dodiruje do dve tačke na ekranu (Two-Finger). Svaka tačka je modelovana jednim veštačkim „prstom“, odn. mehaničkom dodirnom tačkom koja se pomera i fizički dodiruje ekran spuštanjem na njega. Svaka dodirna tačka zahteva jedan veštački „prst“ sa pokretima potpuno nezavisnim od drugih „prstiju“.

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir

TABELA 8.4. UPOREDNI REZULTATI PREDLOŽENOG SISTEMA ZA PROVERU UREĐAJA SA EKCRANIMA OSETLJIVIM NA DODIR I NEKIH KOMERCIJALNO DOSTUPNIH REŠENJA

	Predloženo rešenje	Ostala rešenja		
		<i>OptoFidelity Two-Finger</i>	<i>OptoFidelity One-Finger</i>	<i>CTTN Constance</i>
Cena uređaja	10,000 EUR	104,100 EUR	55,550 EUR	35,000 EUR
Procenat uspešnih pobuda	100%	100%	100%	100%
Princip pobude	električni	mehanički	mehanički	mehanički
Rezolucija	diskretna 4 mm između susednih tačaka (6 dpi)	kontinualna	kontinualna	kontinualna
Maksimalan broj tačaka koje se odjednom pobuđuju	16	2	1	2

Uređaj CTTN Constance takođe podržava do 2 uzastopne tačke, odn. koristi dva pokretna veštačka „prsta“.

Iz prethodne tabele se vidi da predloženo rešenje daje značajan doprinos rešenju problema kontrolisane stimulacije ekrana osetljivih na dodir. Ukupan broj tačaka koje predložena stimulaciona ploča može da stimuliše je za red veličine veći od ostalih rešenja (16 je trenutni maksimum usled potrošnje releja, ali se malom izmenom električnog dizajna taj broj može povećati ukoliko se ukaže potreba; takva potreba danas ne postoji jer većina ekrana osetljivih na dodir ne detektuje više od 10 istovremenih dodira). Predloženo rešenje ima nedostatak jedino u rezoluciji - zbog diskretnih površina koje se pobuđuju ta rezolucija je manja od mehaničkih rešenja gde se dodirna površina kontinualno pomera po ekranu. Novi pristup stimulaciji je značajno smanjio dimenziju i cenu testnog sistema zbog nedostatka potrebe za skupim i glomaznim mehaničkim delovima.

Sumarno, osnovne prednosti predloženog rešenja u odnosu na trenutno dostupne uređaje slične primene su:

- niža cena,
- inovativni električni pristup stimulaciji ekrana u odnosu na dosadašnje mehaničke pristupe,
- podrška većem broju istovremenih tačaka koje se pobuđuju,

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osetljive na dodir

- raznovrsnost položaja koordinata tačaka koje se pobuđuju je znatno veći kod predloženog rešenja nego kod mehaničkih rešenja,
- pisanje testnih slučajeva je jednostavnije nego kod ranijih rešenja,
- razvijena programska podrška za BBT sistem, potpuno iskoristljiva i sa predloženim rešenjem, daje svoje prednosti u odnosu na postojeća rešenja, i to u:
 - metodologiji provere uređaja,
 - već razvijenom velikom skupu testnih slučajeva za uređaje potrošačke elektronike,
 - lakom dodavanju testnih slučajeva od strane korisnika zbog intuitivnog korisničkog interfejsa prateće programske podrške,
 - prikazivanju rezultata testiranja na sistematičan i pregledan način,
 - postojanju baze podataka za rezultate.
- dijapazon uređaja koji se mogu proveravati je mnogo širi zbog jednostavnije skalabilnosti predloženog rešenja – lako je prilagodljiv za mobilne telefone, tablete, a i druge uređaje sa ekranima osetljivim na dodir.

Zbog karakterističnog i prilično drugačijeg načina stimacije ekrana, predloženo rešenje ima i neke nedostatke u odnosu na postojeća rešenja. Neki od njih su:

- diskretna rezolucija pobude, u odnosu na kontinualnu, zbog nepostojanja pokretnih delova na uređaju – ovo je negativna strana statičke provere koju je nemoguće izbeći bez pokretnih delova,
 - međutim, zbog visoke rezolucije koja je veća od dimenzija prsta, ovaj nedostatak ne ostavlja velike praktične posledice,
- nemogućnost provere rada kontrolera ekrana osetljivog na dodir, odn. njegovog kašnjenja u odnosu na pojavljivanje pobude, što neki uređaji podržavaju
 - ovakav način provere odudara od filozofije BBT sistema i predloženo rešenje i nije predviđeno za ovakav način provere, jer ne predstavlja proveru sa stanovišta percepcije korisnika, niti proveru principom crne kutije (koja podrazumeva da se ne zalazi u internu strukturu uređaja koji se proverava); naprotiv, cilj predloženog rešenja je da proveriti funkcionalnost uređaja sa stanovišta korisnika, dakle da li ekran prikazuje ono što treba i da li uređaj ispravno odgovara na ulaznu pobudu od strane korisnika,

8. Eksperimentalni rezultati stimulacione ploče za ekrane osjetljive na dodir

- nemogućnost provere preciznosti kontrolera u odnosu na stvarnu lokaciju pobude za svaku lokaciju na ekranu
 - ponovo, nije u domenu željene primere uređaja, ali ukoliko se potreba ukaže uređaj se može koristiti za proveru u diskretnim tačkama koje stimulaciona ploča pobuđuje, ali ne i u svakoj tački zbog odsustva kontinualne rezolucije,
- nepostojanje merenja jitter-a i šuma u kontroleru
 - takođe van domena željene primene jer zahteva potrebu za zalaženjem u internu strukturu uređaja.

Kao što se može primetiti iz prethodne analize, nedostaci su uglavnom vezani za merenja koja su van domena primene uređaja, ali su sigurno moguća tema budućeg istraživanja, ukoliko se želi proširiti domen primene predloženog rešenja i BBT sistema. Jedini pravi nedostatak unutar domena primene je rezolucija pobude, koja nije kontinualna, ali zadati cilj električne pobude bez pokretnih delova je i onemogućio krajnje rešenje da mu rezolucija ne bude diskretna.

U narednom poglavlju okrenućemo se rezultatima algoritma za analizu ispravnosti sadržaja na ekranu uređaja. Ovaj algoritam je prvobitno razvijan za potrebe provere TV prijemnika, pa će rezultati biti prikazani na primeru provere rada TV prijemnika. Algoritam se bez većih izmena, kao što je već navedeno, može koristiti i za analizu sadržaja na ekranu osjetljivom na dodir, sa stanovišta percepcije korisnika.

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu sa stanovišta percepcije korisnika

Algoritam za analizu sadržaja na ekranu sa stanovišta percepcije korisnika razvijan je kao proširenje BBT sistema, tzv. BBT sistem sa kamerom i proveren je pre svega eksperimentalnom verifikacijom rada na primeru analize slike sa TV prijemnika. Algoritam je najsloženiji deo sistema i time zahteva najširu proveru, dok su ostali delovi sistema, da li kamera uspešno uslika stanje na TV prijemniku, da li kamera pošalje sliku ka PC računaru i da li se testovi korektno pokreću, lako provereni posmatranjem rada sistema.

Za proveru rada algoritma koji analizira sliku pristiglu sa kamere, a koji je prikazan u poglavlju 3, izvršeni su eksperimenti pokretanjem datog algoritma za razne ulazne slike, u raznim uslovima [93]-[94]. U ovom poglavlju disertacije biće opisano kako se pristupilo proveru rada ovog algoritma i kakvi su njegovi rezultati u različitim uslovima okruženja u kojem se nalazi TV prijemnik, nakon čega će biti jasnije zbog čega je za pouzdan rad sistema bilo potrebno uvesti „crnu komoru“ o kojoj je ranije bilo reči.

9.1 Eksperimentalni rezultati metoda za poređenje slika

Metode za poređenje transformisanog sadržaja sa TV ekrana i referentnog sadržaja su prvo proverene u normalnim uslovima, kada je TV prijemnik bio u uslovima konstantne osvetljenosti. Nakon toga metode su proverene u uslovima promenljive osvetljenosti na ekranu. Slede rezultati predloženih metoda za poređenje u oba uslova.

9.1.1 Uslov konstantne osvetljenosti na ekranu

Prvi skup eksperimenata sa metodama za poređenje je napravljen u uslovima konstantne osvetljenosti na ekranu. Slika 9.1 prikazuje primer slike preuzete kamerom u ovim uslovima i identičan je primeru iz poglavlja 3. Uslov konstantne osvetljenosti ne podrazumeva da slika na kameri ima identičnu osvetljenost kao i referentna slika, što je nemoguće postići ni u najkontrolisanim okruženjima. Naprotiv, ova identičnost osvetljenja se ni ne zahteva, zbog primenjene normalizacije o kojoj je takođe bilo reči u poglavlju 3, ali uslov konstantne

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

osvetljenosti zahteva da je osvetljenost približno ista na svim delovima iste slike. Nakon izdvajanja sadržaja ekrana i njegove transformacije na dimenzije referentne slike dobija se slika 9.2. Ovu sliku ćemo u nastavku zvati „testna slika“.

Testna slika je poređena sa tri različite referentne slike. Jedna referentna slika je sadržajem identična testnoj slici, druga slika je imala manju razliku (u konkretnom slučaju, bila je izabrana druga stavka menija, *Music* umesto *All Media*), a treća slika je bila potpuno različita.



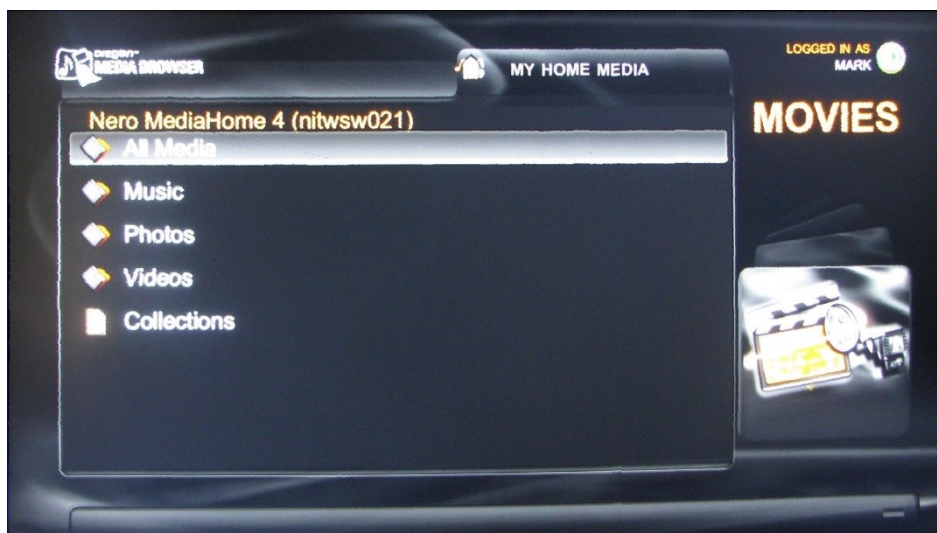
Slika 9.1. Slika uslikana kamerom u uslovima konstantne osvetljenosti na ekranu

Prvo ćemo uporediti dve već postojeće standardne metode poređenja slika. Tabela 9.1 prikazuje jedan primer rezultata poređenja slika koristeći 2 metode opisane ranije:

- Metodu najmanje apsolutne greške (*Least Absolute Error, LAE*)
- Metodu normalizovane kros-korelacije (*Normalized Cross-Correlation, NCC*).

Treba napomenuti da LAE metoda meri „različitosť“ dve slike, dok metoda NCC meri „sličnosť“ dve slike. Naime, dve sličnije slike će imati *manji* rezultat kod LAE metode, a *veći* rezultat kod NCC metode.

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu



Slika 9.2. Transformisan sadržaj ekrana na dimenzije referentne slike za primer konstantne osvetljenosti na ekranu

TABELA 9.1. REZULTATI POREĐENJA ZA DVE PREDLOŽENE METODE U USLOVIMA KONSTANTNE OSVETLJENOSTI NA EKRANU

Test	Uslov konstantne osvetljenosti		
	Testni slučaj	LAE metoda (različnost)	NCC metoda (sličnost)
1	Identični sadržaj	203.43	335.94
2	Sadržaj sa malom razlikom	247.00 (+21.4%)	261.14 (-22.3%)
3	Sadržaj sa velikom razlikom	446.51 (+119.5%)	94.85 (-71.8%)

Iz tabele se može primetiti da su obe metode uspešno otkrile koja slika najverovatnije predstavlja sadržaj, odn. imale su najbolji rezultat za slučaj slike sa identičnim sadržajem. NCC metoda je pokazala blagu prednost u odnosu na LAE metodu za slučaj slike sa malom razlikom (22.3% u poređenju sa 21.4%), dok se LAE metoda pokazala bolja za otkrivanje velikih razlika (119.5% u poređenju sa 71.8%). Činjenica da su obe metode pokazale razliku veću od 20% čak i za male razlike kao što je drugačija selekcija unutar menija pokazuju da su obe metode dobre za primenu u uslovima konstantne osvetljenosti na ekranu. Širi skup slika je pokazao da se NCC metoda ponaša za nijansu bolje od LAE metode, zbog normalizacije koja je sastavni deo metode.

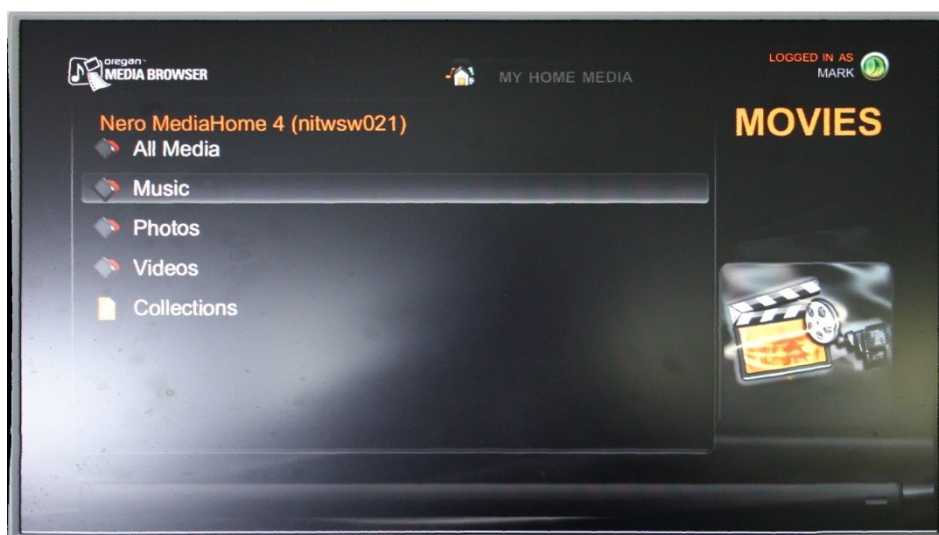
9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

Nažalost, iz razloga opisanih ranije u poglavlju 3, obe metode imaju manu teškog definisanja praga odlučivanja, zbog čega je, bez obzira na dobre rezultate kod ovog eksperimenta, u okviru ove disertacije razvijena metoda blokovske normalizovane kros-korelacije čiji će rezultati biti izloženi nešto kasnije.

9.1.2 Uslov promenljive osvetljenosti na ekranu

Kako bi se proverila robustnost navedene dve metode za slučaj promenljive osvetljenosti na ekranu, isti eksperiment je pokrenut u uslovima veštačke promenljive osvetljenosti na ekranu – dodatni izvor svetlosti je usmeren ka ekranu samo na jednom njegovom kraju. Ovaj eksperiment je izvršen kako bi se utvrdilo da li metode mogu da reše problem različite osvetljenosti ili testni sistem mora omogućiti uslove konstantne osvetljenosti prilikom izvršenja testnih slučajeva.

Testna slika, ovog puta dobijena slikanjem TV ekrana u uslovima promenljive osvetljenosti, ponovo je poređena sa 3 referentne slike – jedne sa identičnim sadržajem, jedne sa sadržajem sa malom razlikom (različita stavka menija) i jedne sa potpuno drugačijim sadržajem. Rezultati su dati u tabeli 9.2 za testnu sliku 9.3 kod koje je dodatni izvor svetlosti usmeren na levi kraj ekrana.



Slika 9.3. Transformisan sadržaj ekrana na dimenzije referentne slike za primer promenljive osvetljenosti na ekranu, za slučaj kada je dodatni izvor svetlosti usmeren na levi deo ekrana

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

TABELA 9.2. REZULTATI POREĐENJA ZA DVE PREDLOŽENE METODE U USLOVIMA KONSTANTNE OSVETLJENOSTI NA EKRANU

Test	Uslov promenljive osvetljenosti		
	Testni slučaj	LAE metoda (različitost)	NCC metoda (sličnost)
1	Identični sadržaj	401.37	104.60
2	Sadržaj sa malom razlikom	429.72 (+7.1%)	104.22 (-0.4%)
3	Sadržaj sa velikom razlikom	540.12 (+34.6%)	49.46 (-52.7%)

Iz tabele 2 se može primetiti da je u ovom primeru LAE metoda bila uspešna i u ovom slučaju, ali manje uspešna nego u slučaju konstantne osvetljenosti, pošto je razlika sa slikom koja se malo razlikuje ispod 10%. NCC metoda nije bila uspešna jer se dobijena razlika od 0.4% može nazvati statističkom greškom. Obe metode su uspešno primetile razliku sa slikom sa potpuno drugačijim sadržajem, ali slučaj sa malom razlikom pokazuje da ove metode ipak nisu dovoljno pouzdane za slučajeve promenljive osvetljenosti na ekranu.

Eksperiment sa promenljivim osvetljenjem je napravljen sa skupom od 16 slika i nije pokazao da su metode pouzdane u ovim uslovima, zbog čega je zaključeno da je neophodno omogućiti uslove konstantne osvetljenosti prilikom provere rada TV prijemnika, zbog čega je u sistem uvedena ranije pomenuta „crna komora“.

9.1.3 Eksperimenti sa šablonima, proizvoljnim slikama i menijima

Naredni skup eksperimenata je imao za cilj da pokaže kako se metode za poređenje slika ponašaju u slučajevima kada se poređenje vrši nad slikama sledećeg tipa:

- slike karakteristične za primenu za proveru rada TV prijemnika (šabloni)
- slike karakteristične za rad TV prijemnika (meniji)
- proizvoljne slike koje mogu biti deo TV programa.

Ovi eksperimentni su rađeni u uslovima konstantne osvetljenosti, jer se nakon ranije opisanih eksperimenata odustalo od ostvarivanja robustnosti na promenljivo osvetljenje.

Tabela 9.3 prikazuje rezultate jednog primera poređenja slika kojima je sadržaj jedan od karakterističnih šablona koji se koriste za proveru rada TV prijemnika. Kompletan skup šablona sa kojima su vršeni eksperimentni je prikazan na slici 9.4, a u tabeli 1 su navedeni rezultati za prvi od navedenih. Testna slika se poredila sa 9 referentnih slika – jednom sa identičnim sadržajem, 5 sa drugačijim sadržajem (drugačiji šablon) i 3 konstantne slike – bela,

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

crvena i crna. Korištena je NCC metoda, a rezultati su zadovoljavajući jer je rezultat dobijen za sliku sa identičnim sadržajem daleko iznad ostalih slučajeva.

TABELA 9.3. PRIMER EKSPERIMENTA POREĐENJA SLIKE SA ŠABLONOM ZA PROVERU RADA TV PRIJEMNIKA

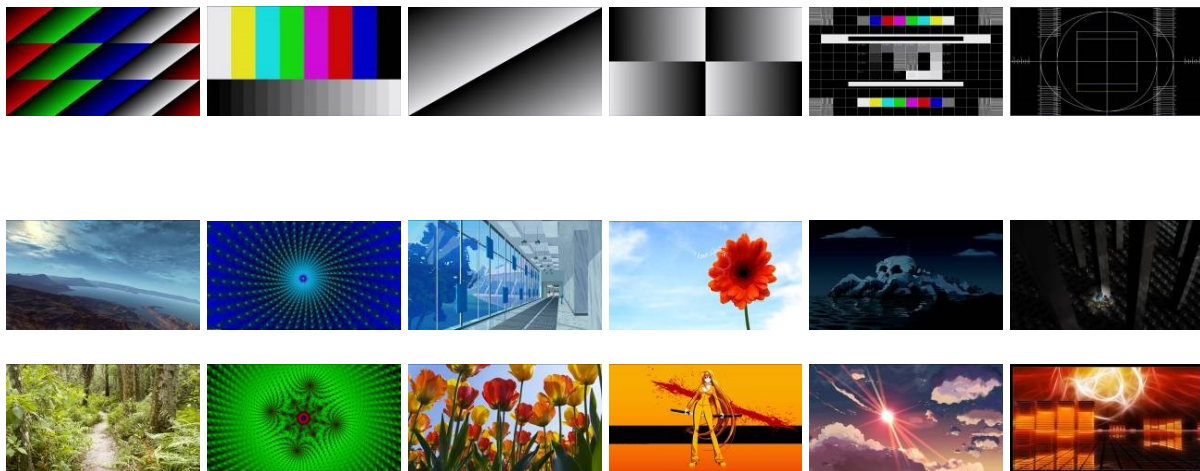
Test	Eksperimenti sa šablonima		
	<i>Referentni šablon</i>	<i>NCC sličnost</i>	<i>Relativna razlika</i>
1	Identični šablon	1875.31	-
2	Različit šablon 1	213.03	88.64%
3	Različit šablon 2	112.93	93.98%
4	Različit šablon 3	111.85	94.04%
5	Različit šablon 4	82.18	95.62%
6	Različit šablon 5	43.80	97.66%
7	Bela slika	5.19	99.72%
8	Crvena slika	-2.03	100.11%
9	Crna slika	-5.19	100.28%

Eksperiment je izvršen sa svih 6 šablona sa slike 9.4, a najmanje relativne razlike uočene u eksperimentima su sumirane u tabeli 9.4. Iz ove tabele se vidi da je algoritam veoma robustan za slučaj korišćenja standardnih šablona za proveru rada TV prijemnika, jer je najmanja relativna razlika između dva različita šablona bila približno 76%, što je pouzdan rezultat.

TABELA 9.4. NAJMANJE RELATIVNE RAZLIKE U EKSPERIMENTIMA SA ŠABLONIMA

Test	Eksperimenti sa šablonima	
	<i>Testni slučaj</i>	<i>Relativna razlika</i>
1	Šablon mešanih boja	88.64%
2	Obojeni stubovi	89.47%
3	Dijagonalni sivi gradijent	91.69%
4	Pravougaoni sivi gradijent	89.56%
5	TV šablon 1	76.02%
6	TV šablon 2	81.44%

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu



Slika 9.4. Testni skup šablona (gornji red) i proizvoljnih slika (donja dva reda)

Slika 9.4 prikazuje skup od 6 šablona koji su korišteni u ovim eksperimentima. Na istoj slici se nalazi i 12 slika sa kojima su vršeni eksperimenti sa proizvoljnim slikama.

Testni skup proizvoljnih slika je pokazao različite relativne razlike između slike sa identičnim i slika sa različitim sadržajem, u zavisnosti od tipa slike. Relativne razlike su u ovom slučaju mnogo manje nego u testnom setu sa šablonima, što je i očekivano zbog veće pravilnosti kod šablona u odnosu na proizvoljne slike. Testni skup je sadržao 12 slika prikazanih na slici 9.4. Svaki testni slučaj je predstavljao slanje jedne od 12 slika ka TV ekranu, a preuzeta slika sa kamere je poređena sa svih 12 referentnih slika. Svaki testni slučaj je bio uspješan u ovom eksperimentu, odn. referentna slika sa identičnim sadržajem je dobila najveći rezultat. Tabela 9.5 prikazuje najmanje relativne razlike u svakom testnom slučaju. Može se primetiti da je eksperiment uspeo, pošto je najmanja relativna razlika oko 40%, što je manje nego u primeru sa šablonima, ali i dalje dovoljno pouzdano.

Eksperiment sa menijima je već ranije prikazan i primećeno je da on donosi najmanju relativnu razliku između različitih slika, zbog toga što su ispravna i neispravna slika najpribližnije – najčešća razlika je u različitoj stavki menija. Relativna razlika u sličaju istog menija, a različite selekcije donosi relativnu razliku od oko 20%, što je i dalje pouzdano za otkrivanje, ali mnogo manje od ostalih eksperimenata.

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

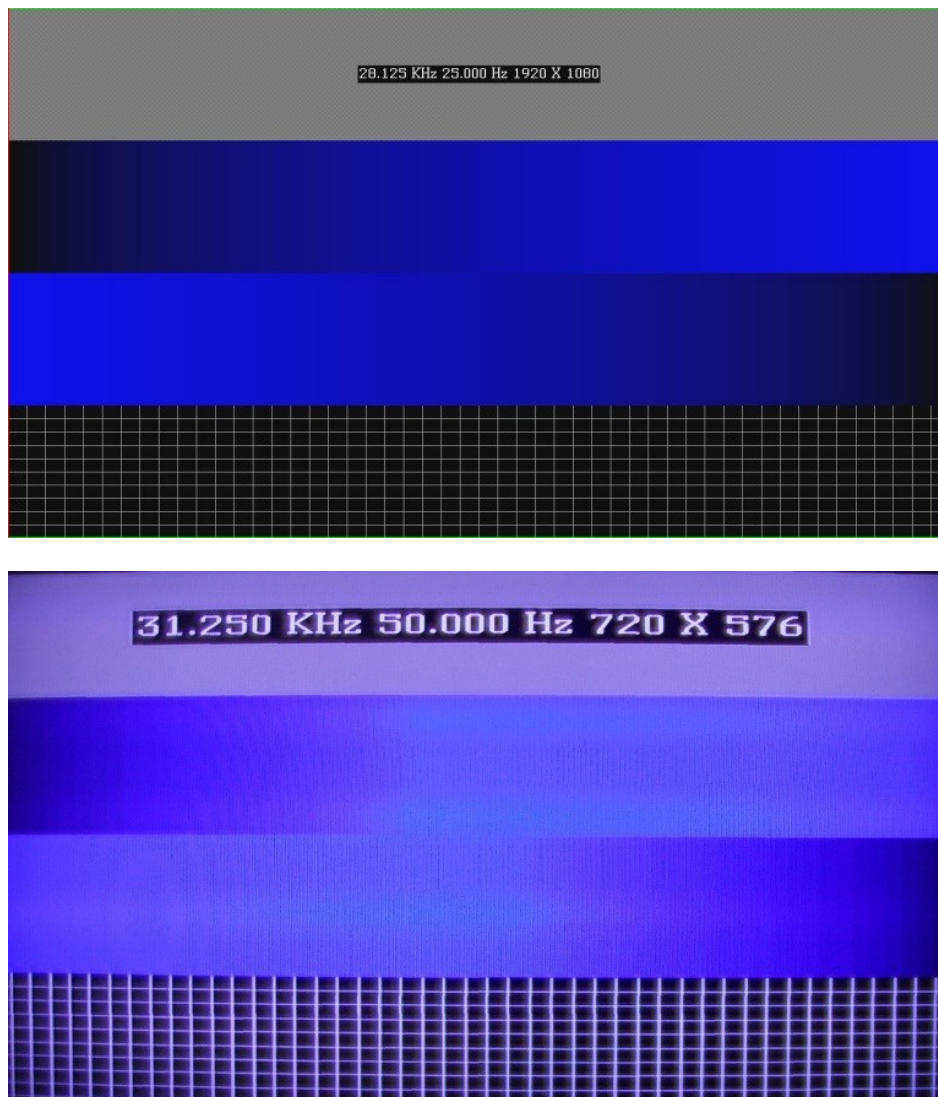
TABELA 9.5. NAJMANJE RELATIVNE RAZLIKE U TESTNOM SKUPU SA PROIZVOLJNIM SLIKAMA

Test	Eksperimenti sa proizvoljnim slikama	
	Testni slučaj	Relativna razlika
1	Blue-dominant image 1	41.66%
2	Blue-dominant image 2	65.85%
3	Bright image 1	55.34%
4	Bright image 2	59.01%
5	Dark image 1	76.20%
6	Dark image 2	40.03%
7	Green-dominant image 1	84.81%
8	Green-dominant image 2	41.47%
9	Mixed color image	78.17%
10	Red-dominant image 1	66.72%
11	Red-dominant image 2	69.89%
12	Red-dominant image 3	55.63%

9.1.4 Eksperimentalni rezultati blokovske normalizovane kros-korelacije

U ovoj sekciji biće prikazani eksperimentalni rezultati metode za poređenje slika predložene u ovoj disertaciji – blokovske normalizovane kros-korelacije. Kako bi se utvrdila tačnost i pouzdanost ove metode za poređenje, izvršeni su eksperimenti sa testnim skupom šablona i proizvoljnih slika, kao i različitim parametrima algoritma. Parametri algoritma koji se mogu menjati su: visina bloka, širina bloka i korak pomeraja bloka, izražen u procentima dimenzija blika. Poređenje slika se i u ovim eksperimentima vršilo u dimenzijama referentne slike (1920 x 1080 u HDTV).

Prvi eksperiment je predstavljao jednostavni šablon prikazan na slici 9.5, a cilj eksperimenta je da se prikaže ispravnost rada ove metode za poređenje. Kao što je ranije objašnjeno, rezultat blokovske NCC metode je relativan u odnosu na rezultat „zlatnog uzorka“ čime se značajno olakšava definisanje praga odlučivanja o ispravnosti rada uređaja. U ovim eksperimentima, rezultat je skaliran na interval $[-1, 1]$, a kao prag ispravnosti uzeta je vrednost 0.8. Rezultat 1.0 predstavlja nepostojanje razlike između referentne slike i testne slike i on se dobija samo kod „zlatnog uzorka“. U testnom slučaju prikazanom na slici 9.5, testna slika se razlikuje od referentne u rezoluciji šablona, pa se očekuje da test padne, odn. da rezultat bude ispod praga.



Slika 9.5. Testni slučaj provere rada blokovske NCC metode – referentna slika (gore) i transformisana testna slika (dole)

Iz tabele 9.6 u kojoj su prikazani rezultati ovog eksperimenta za slučajeve različitih dimenzija blokova i koraka pomeranja, svi rezultati su daleko ispod praga od 0.8, što znači da je eksperiment uspeo i metoda je pouzdano izvršila poređenje.

Ovaj eksperiment se može uskoristiti i za poređenje između klasične NCC metode i blokovske varijante predložene ovom disertacijom. Blokovska NCC metoda, za slučaj dimenzije bloka jednake kompletnoj slici, je identična klasičnoj NCC metodi. Iz tabele 9.6 vidimo da je relativna razlika kod blokovske NCC metode manja od relativne razlike klasične NCC metode, jer je rezultat manji, odn. dalji od praga za slučaj blokova manjih od čitave

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

slike. Ovo pokazuje da je blokovska NCC metoda pouzdanija za potrebe BBT sistema od klasične NCC metode.

TABELA 9.6. REZULTATI BLOKOVSKE NCC METODE U EKSPERIMENTU SA ŠABLONOM

Test	Blokovska NCC metoda		
	Dimenzije bloka	Korak pomeranja [%]	Rezultat
1	1920 x 1080	-	0.37
2	512 x 512	20	0.28
3	512 x 512	80	0.30
4	256 x 256	80	0.25

Drugi eksperiment je imao za cilj da pokaže kako rezultat blokovske NCC metode zavisi od ulaznih parametara. Referentna slika, prikazana na slici 9.6, veštački je promenjena u jednom njenom delu, dodavanjem crnog kvadrata dimenzije 128 x 128 tačaka. Test je takođe trebao da padne, odn. rezultat je trebao biti ispod praga od 0.8.

Rezultat ovog eksperimenta je sumiran u tabeli 9.7. Može se primetiti da je neophodna veličina bloka za otkrivanje ove razlike sa nivoom praga od 0.8 veličina od najviše 512 x 512 tačaka. Veći blokovi ne otkrivaju ovu razliku sa pragom od 0.8. Povećavanje praga bi omogućilo korišćenje većih blokova, ali bi smanjilo primenjivost za ostale testne slučajeve. U ovom slučaju, kao što je i čest slučaj u inženjerstvu, mora se pronaći kompromis između veličine bloka i praga odlučivanja. Taj kompromis je nakon brojnih eksperimenata sa ovom metodom postavljen na veličinu bloka od 512 x 512 tačaka i prag odlučivanja od 0.8.

Ovaj eksperiment pokazuje i još jednu prednost blokovske NCC metode u odnosu na klasičnu, a to je veća mogućnost podešavanja ulaznih parametara kako bi metoda bila najbolje iskorištena za dato testno okruženje, a samim tim i mnogo lakše definisan prag odlučivanja. Klasična NCC metoda (koja je identična blokovskoj za veličinu bloka 1920 x 1080) je u ovom eksperimentu dovela do rezultata od 0.97 koji je jako blizu idealnoj jedinici, što pokazuje da klasična NCC metoda nije dovoljno pouzdana. Blokovska metoda, sa dobro izabranim parametrima, je za razliku od klasične pouzdana i može da otkrije razliku u ovom eksperimentu.

Korišćenje manjih blokova povećava vreme poređenja, pa je zbog toga neophodno naći i kompromis između veličine bloka (samim tim i pouzdanosti otkrivanja malih razlika) i brzine izvršavanja. Manji korak pomeranja takođe usporava izvršavanje algoritma, ali

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

povećava pouzdanost. Veličina bloka i korak pomeranja trebaju biti izabrani u zavisnosti od željene najmanje razlike koja se želi otkriti – da li je to velika razlika tipa promenjene boje na čitavoj slici ili manja razlika kao što je različita stavka menija, drugačije slovo u meniju ili fizički problemi na ekranu, kao što su „mrlje“ u nekim njegovim delovima. Ovaj metod nije namenjen proveriti samog ekrana, pa ne otkriva razlike na nivou jedne tačke, ali je dovoljno pouzdan za otkrivanje grešaka u programskoj podršci i krupnijih grešaka samog ekrana. Kompromis je izabran sa veličinom koraka od 80% dimenzije bloka.



Slika 9.6. Eksperiment sa veštačkom greškom na proizvoljnoj slici – referentna slika (gore) i transformisana testna slika (dole)

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

TABELA 9.7. REZULTATI BLOKOVSKE NCC METODE U EKSPERIMENTU SA PROIZVOLJNOM SLIKOM

Test	Blokovska NCC metoda		
	<i>Dimenzije bloka</i>	<i>Korak pomeranja [%]</i>	<i>Rezultat</i>
1	1920 x 1080	-	0.97
2	512 x 512	80	0.78
3	256 x 256	80	0.29
4	128 x 128	80	-0.75
5	128 x 128	1	-0.99

9.1.5 Poređenje blokovske NCC metode sa ostalim metodama

Kako bi dodatno utvrdili prednost blokovske NCC metode u primeni u sistemu za proveru rada TV prijemnika, ova metoda upoređena je sa preostale dve koje su pominjane u ovoj disertaciji – LAE i NCC metodom. Eksperiment poređenja blokovske NCC metode sa ostalim metodama izvršen je na testnom skupu sa slike 9.4, za primere šablona, proizvoljnih slika i menija.

Rezultati su prikazani u tabelama 9.8 – 9.11. U svakom testnom slučaju, slika sa kamere, nakon transformacije na dimenzije referentne slike, poređena je sa referentnom slikom koja ima identičan sadržaj, a nakon toga sa slikama sa različitim sadržajem. U skupu slika sa različitim sadržajem nalazile su se tri slike iz iste eksperimentalne grupe (šablona, proizvoljne slike, meniji) i dve konstantne slike – konstantna crna i konstantna bela.

Tabela 9.8 prikazuje rezultate unutar eksperimentalnog skupa slika sa šablonima. Iz tabele se može primetiti da su sve tri metode uspešno „izabrale“ referentnu sliku sa identičnim sadržajem kao najbližnju. Ovde je potrebno napomenuti da LAE metoda meri različitost između dve slike, dok klasična i blokovska NCC metoda mere sličnost, tako da je najbližnja slika ona sa najmanjim rezultatom kod LAE metode, ona sa najvećim rezultatom kod NCC metode, a ona sa rezultatom najbližim 0 kod blokovske NCC metode (zbog toga što blokovska metoda prikazuje relativnu sličnost u odnosu na „zlatni uzorak“).

Tabela 9.9 prikazuje rezultate eksperimentalnog skupa sa menijima. Može se primetiti da su takođe sve tri metode uspešno otkrile tačnu referentnu sliku.

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

Zatim, tabela 9.10 prikazuje rezultate eksperimentalnog skupa sa proizvoljnim slikama u uslovima konstantne osvetljenosti na ekranu. Ponovo su sve tri metode uspešno otkrile tačnu referentnu sliku.

TABELA 9.8. UPOREDNI REZULTATI SVE TRI METODE ZA POREĐENJE NA EKSPERIMENTALNOM SKUPU SLIKA SA ŠABLONIMA

Test	Eksperimentalni skup sa šablonima			
	<i>Opis testa</i>	<i>LAE</i>	<i>NCC</i>	<i>B. NCC</i>
1	Identični sadržaj	517.95	2119.78	3.07
2	Različit šablon 1	1689.48	-60.56	117.60
3	Različit šablon 2	1121.15	769.23	74.67
4	Različit šablon 3	2330.17	-123.44	156.90
5	Konstantna crna	1242.31	0.86	77.23
6	Konstantna bela	1240.67	-0.86	77.93

TABELA 9.9. UPOREDNI REZULTATI SVE TRI METODE ZA POREĐENJE NA EKSPERIMENTALNOM SKUPU SA MENIJIMA

Test	Eksperimentalni skup sa menijima			
	<i>Opis testa</i>	<i>LAE</i>	<i>NCC</i>	<i>B. NCC</i>
1	Identični meni, isti izbor	660.60	1890.65	19.61
2	Identični meni, različit izbor 1	870.11	1565.30	58.02
3	Identični meni, različit izbor 2	864.26	1574.24	58.02
4	Različit meni	1812.21	450.80	109.75
5	Konstantna crna	1424.51	7.79	77.86
6	Konstantna bela	1423.85	-7.64	77.33

TABELA 9.10. UPOREDNI REZULTATI SVE TRI METODE ZA POREĐENJE NA EKSPERIMENTALNOM SKUPU SA PROIZVOLJNIM SLIKAMA U USLOVIMA KONSTANTNE OSVETLJENOSTI

Test	Eksperimentalni skup sa proizvoljnim slikama			
	<i>Opis testa</i>	<i>LAE</i>	<i>NCC</i>	<i>B. NCC</i>
1	Identični sadržaj	653.41	1800.98	39.15
2	Različita slika 1	2191.53	82.46	125.77
3	Različita slika 2	2058.87	-20.20	76.71
4	Različita slika 3	2572.08	16.07	133.30
5	Konstantna crna	1772.28	-6.23	78.13
6	Konstantna bela	1770.22	6.20	77.06

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

Konačno, tabela 9.11 prikazuje rezultate eksperimentalnog skupa proizvoljnih slika u uslovima promenljive osvetljenosti na ekranu. Iako je u ranijim eksperimentima pokazano da ni LAE ni NCC metoda ne zadovoljavaju potrebe sistema u ovim uslovima, ovaj eksperiment je izvršen kao provera da li blokovska NCC metoda unosi neko poboljšanje pri ovim nekontrolisanih uslovima.

Iako testni sistemi mogu da se naprave tako da osvetljenje bude konstantno i kontrolisano (na primer, unutar „crne komore“ kao kod sistema RT-AV400), robustnost na primenljivo osvetljenje je neophodna ukoliko se algoritam želi iskoristiti kao deo nekog sistema koji bi bio u upotrebi u kućnim uslovima, kao deo pametne kuće. Zbog toga i postoji želja da se pronade metod koji bi mogao da poredi sadržaj koji vidi kamera i očekivani, referentni sadržaj.

Međutim, rezultati iz tabele 9.11 pokazuju da blokovska NCC metoda još lošije radi u uslovima promenljive osvetljenosti nego što je to slučaj sa LAE i NCC metodama. Razlog je velika osetljivost blokovske NCC metode na male razlike na slici koje se javljaju upravo usled promenljive osvetljenosti.

TABELA 9.11. UPOREDNI REZULTATI SVE TRI METODE ZA POREĐENJE NA EKSPERIMENTALNOM SKUPU SA PROIZVOLJNIM SLIKAMA U USLOVIMA PROMENLJIVE OSVETLJENOSTI

Test	Eksperimentalni skup sa proizvoljnim slikama			
	Opis testa	LAE	NCC	B. NCC
1	Identični sadržaj	1657.58	473.74	84.16
2	Sličan sadržaj 1	1722.57	348.17	84.04
3	Sličan sadržaj 2	1724.35	348.17	84.04
4	Potpuno različit sadržaj	1972.48	272.48	108.86
5	Konstantna crna	1691.07	2.53	77.93
6	Konstantna bela	1696.50	-2.50	77.26

Zaključak je da testni sistem mora omogućiti uslov konstantne osvetljenosti, zbog čega je i ostala primena „crne kutije“ u okviru sistema RT-AV400. Algoritam je u stanju da izdvoji sadržaj ekrana i u uslovima promenljive osvetljenosti, na osnovu čega možemo zaključiti da je sistem primenjiv za „gledanje“ sadržaja na ekranu kamerom, ali nije u stanju da pouzdano poredi sa referentnim sadržajem, odn. da donosi odluku o ispravnosti sadržaja na ekranu, jer ga „zbunjuje“ promenljiva osvetljenost na slici koju uslika kamera.

Prava prednost blokovske NCC metode je u mogućnosti definisanja pouzdanog praga odlučivanja o ispravnosti datog testnog slučaja. Iz prethodnih tabela se vidi da se rezultati

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

LAE i NCC metoda prilično razlikuju u različitim testnim slučajevima, dok relativno ocenjivanje blokovske NCC metode uvodi mogućnost lakšeg definisanja praga. Takođe, blokovska NCC metoda je osetljivija na male razlike u odnosu na ostale dve metode. Sistem RT-AV400 omogućava korišćenje svih navedenih metoda za poređenje, s tim da je preporučena blokovska NCC metoda zbog navedenih prednosti.

9.2 Analiza brzine rada testnog sistema sa kamerom

Prednosti korišćenja kamere na finalnoj proizvodnoj liniji su raznolike: verovatnoća greške je drastično smanjena, broj radnika na liniji je smanjen na 1 po smeni i verifikacija se izvršava mnogo brže prilikom automatizovane verifikacije u odnosu na manuelnu.

Kako bi se napravio pouzdani sistem, najteži zadatak je napraviti robustan algoritam koji ima dobru toleranciju na promene u okruženju, kao što su relativna pozicija TV prijemnika i kamere i male razlike u kvalitetu slike i boja na slici koje različiti TV prijemnici proizvode.

Tabela 9.12 pokazuje prednost koju automatska verifikacija na finalnoj proizvodnoj liniji digitalnih TV prijemnika ima u odnosu na manuelnu. Tabela prikazuje srednja vremena potrebna da se izvrše testovi na svakoj testnoj stanici u primeru od 10 testnih stanica. Vreme za manuelnu verifikaciju je prikazano bez transportnog kašnjenja i procenjeno je na 20 sekundi po stanici. Vreme automatske verifikacije je izmereno na sistemu RT-AV400 sa neoptimizovanom implementacijom algoritma na DSP kameri.

Iz tabele 9.12 možemo primetiti da automatska provera na finalnoj proizvodnoj liniji povećava brzinu rada svake testne stanice, većinom zato što je algoritam poređenja brži od manuelne provere od strane radnika. Ostatak vremena se troši u generisanju signala, slanju signala ka TV prijemniku i izveštavanju rezultata, a ovo vreme je isto kod obe metode.

Testni slučajevi na svakoj stanici prilikom manuelne verifikacije zahtevaju oko 20 sekundi za izvršavanje po testnoj stanici, što znači da u našem primeru sa 10 testnih stanica, ukupna verifikacija traje $20 * 10 = 200$ sekundi, bez transportnog kašnjenja. Vreme potrebno za povezivanje TV prijemnika na napajanje i potrebne periferne uređaje, razdvajanje od istih i transport od stanice do stanice je mnogo veće, a može se proceniti na ukupno 10 minuta za proveru jednog TV prijemnika.

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

TABELA 9.12. ANALIZA VREMENA AUTOMATSKE I MANUELNE VERIFIKACIJE DIGITALNIH TV PRIJEMNIKA NA FINALNOJ PROIZVODNOJ LINIJI

Test	Vreme (u sekundama) potrebno za proveru na automatskoj i manualnoj finalnoj proizvodnoj liniji (bez transportnog kašnjenja)		
	Testna stanica	Manuelna	Automatska
1	GV-698 (TV TV)	20	14.282
2	CVBS1 (TV EXT1)	20	11.000
3	CVBS2 (TV SideAv)	20	13.906
4	HDMI1 (TV HDMI1)	20	11.234
5	HDMI2 (TV HDMI2)	20	13.047
6	YpbPr (TV YpbPr)	20	10.281
7	VGA (TV VGA)	20	11.610
8	CVBS3 (TV EXT2)	20	10.312
9	SVIDEO (TV EXT2-S)	20	14.063
10	USB	20	10.047
	TOTAL	200	119.782

Sa druge strane, automatska verifikacija zahteva oko 120 sekundi za izvršavanje testova sa svih testnih stanica i 0 sekundi transportnog kašnjenja, jer se svi testni slučajevi izvršavaju na jednoj testnoj stanici. Dodatno vreme je samo potrebno za spajanje sa napajanjem i perifernim uređajima, kao i razdvajanje od istih, ali to se izvršava samo jednom tokom provere jednog TV prijemnika.

Zaključak je da automatska verifikacija ubrzava proveru TV prijemnika na finalnoj proizvodnoj liniji i do 5 puta u odnosu na manuelnu.

9.2.1 Analiza brzine rada sistema sa optimizovanom obradom na DSP kameri

Premeštanje obrade sa PC računara na DSP kameru je izvršeno za željom da se dodatno ubrza provera TV prijemnika na finalnoj proizvodnoj liniji, jer se u skupu od više od 1,000 testnih slučajeva mala ubrzanja u jednom testnom slučaju multipliciraju i postaju primetna za čitavo testiranje. Tabela 9.13 pokazuje da optimizovana implementacija na DSP kameri ubrzava rad u odnosu na neoptimizovanu implementaciju algoritma na DSP kameri, a naročito u odnosu na implementaciju algoritma na PC računaru.

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

TABELA 9.13. VREMENA IZVRŠAVANJA TESTNIH SLUČAJEVA ZA SISTEM SA ALGORITMOM IMPLEMENTIRANIM NA PC RAČUNARU I ZA SISTEM SA ALGORITMOM IMPLEMENTIRANIM NA DSP KAMERI

Test	Vremena izvršavanja testnih slučajeva (sekunde)			
	Test	PC	DSP neoptimizovan	DSP optimizovan
1	GV-698 (TV TV)	11.688	14.282	7.735
2	CVBS1 (TV EXT1)	20.549	11.000	8.703
3	CVBS2 (TV SideAv)	21.203	13.906	8.703
4	HDMI1 (TV HDMI1)	22.094	11.234	14.656
5	HDMI2 (TV HDMI2)	20.172	13.047	11.672
6	YpbPr (TV YpbPr)	30.110	10.281	10.328
7	VGA (TV VGA)	19.719	11.610	9.469
8	CVBS3 (TV EXT2)	22.547	10.312	8.703
9	SVIDEO (TV EXT2-S)	20.688	14.063	8.703
10	USB	25.734	10.047	12.828
	TOTAL	234.504	119.782	101.500

Ovde treba napomenuti da, iako iz tabele 9.12 liči da je implementacija na PC računaru sporija od manuelne (iz tabele 9.11), to nije slučaj jer ovde opisani sistem sa kamerom nema transportnih kašnjenja između testnih stanica i kašnjenja usled višestrukog povezivanja kablova. Ukupno vreme provere je u ovom slučaju manje od 5 minuta, što je više od 2 puta brže od manuelnog sistema. Razlog sporijeg izvršavanja pojedinih testnih slučajeva u odnosu na manuelnu verifikaciju je složenija komunikacija sa kamerom koja je sporija od radnika koji trenutno vidi sliku na ekranu i kreće da je analizira.

Tabela 9.14 detaljnije prikazuje vremena pojedinih koraka tokom izvršavanja jednog testnog slučaja, konkretno slučaja provere HDMI2 ulaza, za sve tri verzije sistema – manuelna, automatska sa implementacijom algoritma na PC računaru i automatska sa implementacijom algoritma na DSP platformi. Usko grlo sistema je izdvajanje sadržaja TV ekrana, čije je izvršavanje značajno ubrzano optimizovanom verzijom algoritma za DSP platformu. Vreme preuzimanja slike kamerom je takođe značajno smanjeno, jer se obrada slike vrši na istom mestu gde se ista preuzima i ne zahteva se transfer slike sa kamere na PC.

Primećuje se da je najznačajnije ubrzanje koje je implementacija algoritma na DSP kameri uvela upravo u bržem slikanju sadržaja ekrana i nepostojanju transfera slike ka PC računaru, dok je optimizovana verzija algoritma ubrzanje donela u smanjenju vremena izvršavanja algoritma koji izdvaja sadržaj na ekranu iz slike koju je uslikala kamera.

9. Eksperimentalni rezultati algoritma za analizu sadržaja na ekranu

Poređenje transformisane slike sa kamere i referentne slike je najmanje zahtevan deo algoritma, zbog čega vreme njegovog izvršavanja nije šire analizirano u ovoj disertaciji – odluka o metodi je doneta samo na osnovu lakoće definisanja praga odlučivanja i tačnosti dobijene ocene.

TABELA 9.14. VREMENA IZVRŠAVANJA POJEDINIH KORAKA ALGORITMA ZA SVA TRI NAČINA IMPLEMENTACIJE ALGORITMA, ZA PRIMER HDMI2 TESTNE STANICE

Korak	Vremena izvršavanja koraka algoritma (sekunde)			
	Korak	PC	DSP neoptimizovan	DSP optimizovan
1	Priprema testa	4.794	4.227	5.402
2	Preuzimanje slike kamerom	8.593	2.035	1.997
3	Izdvajanje sadržaja ekrana	6.271	6.271	3.940
4	Poređenje slika	0.514	0.514	0.333
	TOTAL	20.172	13.047	11.672

U nastavku disertacije okrećemo se sumarnim rezultatima sistema za automatsku proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir. Sistem ćemo uporediti sa trenutno dostupnim rešenjima koristeći metriku predstavljenu u poglavlju 2.

10. Zaključak

Istraživanje u okviru ove disertacije je dovelo do sledećih unapređenja sistema za automatsku proveru uređaja potrošačke elektronike metodologijom crne kutije:

- proizvedena je stimulaciona ploča za ekrane osetljive na dodir koja ih stimuliše električnim principom, bez mehaničkih pomeraja,
- osmišljen je i realizovan efikasan algoritam za analizu sadržaja na ekranu uređaja sa stanovišta percepcije korisnika, tj. za proveru posmatranjem ekrana pomoću kamere, koji se u početku koristio za proveru TV prijemnika, ali iskorišten je i kao deo kompletnog sistema za proveru uređaja osetljivih na dodir,
- unapređen je sistem za automatsku proveru uređaja potrošačke elektronike (BBT) sa gore navedenim komponentama, što doprinosi da sistem može da:
 - pouzdanije proverava rad TV uređaja sa stanovišta korisnika,
 - proverava rad uređaja koji koriste ekran osetljiv na dodir.

Provera uređaja sa stanovišta percepcije korisnika omogućuje da se otkriju greške u radu čitavog uređaja, iste koje može da primeti i korisnik tokom korišćenja uređaja. Svako rešenje koje preuzima sliku iz elektronike uređaja, što je slučaj u BBT sistemima RT-AV100 i RT-AV300 [95] ne zadovoljava u potpunosti metodologiju crne kutije jer ne posmatra stvarni izlaz sistema (sliku na ekranu) nego pretpostavljeni izlaz. Uvođenje kamere u sistem je metodološki kompletiralo rad sistema.

Jedna direktna primena rezultata ove disertacije je uređaj RT-AV400 koji proverava TV prijemnike sa stanovišta percepcije korisnika. Rad algoritma i čitavog uređaja RT-AV400 proveren je na testnom skupu šablona, menija i proizvoljnih slika, koristeći TV prijemnike različitih proizvođača. Algoritam je zadovoljio industrijske zahteve i, kao deo sistema RT-AV400, primenjen je na finalnoj proizvodnoj liniji digitalnih TV prijemnika.

Stimulaciona ploča za ekrane osetljive na dodir, takođe razvijena u okviru ove disertacije, omogućila je primenu sistema za automatsku funkcionalnu proveru uređaja potrošačke elektronike i na uređaje koji koriste ekran osetljiv na dodir kao ulazno/izlaznu periferiju. Stimulaciona ploča omogućila je simulaciju dodira korisnika u potpunosti

10. Zaključak

električnim principima, bez komplikovanih i sporih mehaničkih pomeraja. U kombinaciji sa već postojećom infrastrukturom BBT sistema, iskorištena je kao deo novog sistema za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir.

Rad stimulative ploče verifikovan je koristeći mobilne telefone i tablete različitih proizvođača. Nakon što je dostignuta željena pouzdanost, ploča je integrisana u BBT sistem. Sistem je na kraju metodološki kompletiran uvođenjem istog principa kao kod uređaja RT-AV400, tj. uvođenjem kamere za preuzimanje stvarnog sadržaja na ekranu. Algoritam za analizu preuzetog sadržaja prilagođen je iz RT-AV400 sistema.

U budućnosti se očekuje dalje unapređivanje sistema za proveru TV prijemnika sa stanovišta korisnika, RT-AV400, kako bi se još povećala robustnost sistema i pojednostavio čitav proces testiranja. Razvoj tehnologije TV prijemnika i prijemnika TV signala zahteva stalni rad na razvoju novih testnih slučajeva, kao i testnih slučajeva za nove uređaje. [96]-[97]

Očekuje se i industrijalizacija rešenja za proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir. U početku će se industrijalizovati rešenje sa greber uređajem jer je jednostavnije za realizaciju. Nakon ovog prvog koraka, vršiće se i industrijalizacija rešenja sa kamerom, kao kompletnog metodološki ispravnog sistema za proveru ovih uređaja.

Cilj istraživanja u okviru ove disertacije je ispunjen – dobijena je provera rada uređaja bliža korisniku, proširen je skup uređaja koje sistem može da proverava i po prvi put je dat predlog kompletnog sistema za potpuno automatsku proveru uređaja sa ekranima osetljivim na dodir električnim pristupom, za razliku od ranije korištenog mehaničkog pristupa. Sistem za proveru ovih uređaja ovime postaje pouzdaniji, brži, jeftiniji, bez subjektivnog ocenjivanja i bez potrebe za velikim brojem radnika na proizvodnoj liniji. Sve ovo su neophodni koraci kojim se sistemi za proveru moraju razvijati da bi zadovoljili potrebe sve masovnije i zahtevnije industrije uređaja potrošačke elektronike.

Od svog nastanka, ekrani osetljivi na dodir su se razvijali sa ciljem poboljšanja osetljivosti, širenja mogućnost detekcije dodira i razvijanja haptičke sprege sa korisnikom [98]. U novije vreme inženjeri su se prihvatili izazova da ekrane osetljive na dodir približe i osobama sa invaliditetom, a jedan od najtežih izazova je prilagoditi njihovo korišćenje slepim osobama [99]. Aktuelna istraživanja u ovoj oblasti pokušavaju da u potpunosti promene način na koji komandujemo uređajima kao što su mobilni telefoni i tableti – umesto fizičkog dodira kao kod ekrana osetljivih na dodir, istražuje se mogućnost korišćenja pogleda na ekran, odn. otkrivanja smera pogleda korisnika posmatrajući njihove oči. Ideja je pokrenuta u

10. Zaključak

kontrolisanju vozila [100], ali vrlo brzo je primećena kao potencijalni novi način definisanja ulaza u uređaje potrošačke elektronike. Prve analize su već objavljene [101], a ukoliko ova ideja zaživi, naš sistem za proveru ovih uređaja moraće da u potpunosti promeni način stimulacije ekrana uređaja, što je potpuno novi izazov za budućnost.

Literatura

- [1] D. Marijan, N. Teslić, M. Temerinac, V. Peković: "On the effectiveness of the system validation based on the black box testing", IEEE Circuits and Systems International Conference on Testing and Diagnosis, 2009, pp. 1-4
- [2] A. Rau: "Automated test system for digital TV receivers", 2000 Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics (ICCE), pp. 228–229
- [3] A. Rama, R. Alujas, F. Tarres: "Fast and robust graphic character verification system for TV sets", Eighth International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services, 2007, pp. 19
- [4] H. Sheikh, A. Bovik: "Image information and visual quality", IEEE Transactions on Image Processing, 2006, Vol. 15, pp. 430–444
- [5] F. Russo, A. de Angelis, P. Carbone: "A vector approach to quality assessment of color images", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC) Proceedings, 2008, pp. 814–818
- [6] Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh, E. Simoncelli: "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity", IEEE Transactions on Image Processing, 2004, Vol. 13, pp. 600–612
- [7] D. Marijan, V. Zlokolica, N. Teslic, V. Pekovic, T. Tekcan: "Automatic functional TV set failure detection system", IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, Vol. 56, pp. 125–133
- [8] D. Marijan, N. Teslic, V. Pekovic, T. Tekcan: "An Approach to Achieving the Reliability in TV Embedded System", Fourth International Conference on Secure Software Integration and Reliability Improvement Companion, 2010, pp. 13-17
- [9] V. Pekovic, N. Teslic, I. Resetar, T. Tekcan: "Test management and test execution system for automated verification of digital television systems", IEEE 14th International Symposium on Consumer Electronics (ISCE), 2010, pp. 1-6

- [10] V. Pekovic, V. Zlokolica, J. Zloh, M. Katona, N. Teslic: “Automated system for testing and verification of control access kernel functionality in set-top boxes”, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2012, pp. 25-26
- [11] D. Marijan, V. Zlokolica, N. Teslic, V. Pekovic: “Quality assessment of digital television picture based on local feature matching“, 16th International Conference on Digital Signal Processing, 2009, pp. 1–6
- [12] I. Kastelan, V. Pekovic, V. Zlokolica, J. Zloh, D. Trifunovic: “Simultaneous Automated Verification of Conditional Access System on Multiple TV Sets”, 2nd IEEE International Conference on Consumer Electronics – Berlin (ICCE-Berlin), 2012, pp. 269-270
- [13] V. Marinkovic, I. Kastelan, N. Vranic, Z. Marceta, V. Pekovic: „Protocol Independent Remote Controller Emulator for Automated Testing of Multiple DTV/STB”, 20th Telecommunications Forum (TELFOR), 2012, pp. 1064-1067
- [14] V. Pekovic, N. Lukic, I. Kastelan, N. Teslic: “Platform for STB Video Output Integrity Verification Based on Full Reference Picture Comparison”, IEEE International Conference on Consumer Electronics – Berlin (ICCE-Berlin), 2011, pp. 255-258
- [15] M. Stanojević, V. Marinković, M. Popović, V. Peković, I. Kaštelan: “Integrirano okruženje za razvoj test slučajeva zasnovanih na aktivnostima”, 20th Telecommunications Forum (TELFOR), 2012, pp. 1689-1692
- [16] D. Lagunovsky, S. Ablameyko: “Fast Line and Rectangle Detection by Clustering and Grouping”, Computer Analysis of Images and Patterns, Springer Berlin / Heidelberg, 1997, pp. 503-510
- [17] J. Marot, S. Bourennane: “Array processing and fast optimization algorithms for distorted circular contour retrieval“, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2007:057354
- [18] L. Shapiro, G. Stockman: “Computer Vision”, Prentice-Hall, Inc., 2001
- [19] D. Duan, M. Xie, Q. Mo, Z. Han, Y. Wan: “An improved Hough transform for line detection“, International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCA SM), 2010, pp. 354–357

- [20] N. Aggarwal, W. Karl: "Line detection in images through regularized Hough transform", IEEE Transactions on Image Processing, 2006, Vol. 15, pp. 582–591
- [21] J. Radon: "Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten", Reports on the proceedings of the Royal Saxonian Academy of Sciences at Leipzig, mathematical and physical section, 1917, pp. 262-277; Translation: J. Radon, P.C. Parks: "On the determination of functions from their integral values along certain manifolds"
- [22] R. Al-Eidan, L. Al-Braheem, A. El-Zaart: "Line detection based on the basic masks and image rotation", 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, 2010, pp. 465–469
- [23] D. Kudelski, J.L. Mari, S. Viseur: "3D feature line detection based on vertex labeling and 2D skeletonization", Shape Modeling International Conference (SMI), 2010, pp. 246–250
- [24] C. Jung, R. Schramm: "Rectangle detection based on a windowed Hough transform", 17th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, 2004, pp. 113-120
- [25] Z. Li: "Generalized Hough transform: fast detection for hybrid multi-circle and multi-rectangle", The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006, pp. 10130–10134
- [26] Y. He, Z. Li: "An effective approach for multi-rectangle detection", The 9th International Conference for Young Computer Scientists (ICYCS), 2008, pp. 862–867
- [27] F. Han, S.C. Zhu: "Bottom-up/top-down image parsing by attribute graph grammar", Tenth IEEE International Conference on Computer Vision, 2005, pp. 1778–1785
- [28] E. Leelarasmee: "A TV sign image expander with built-in closed caption decoder", IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, Vol. 51, pp. 682–687
- [29] D. Hutchison, K. Okara, A. Takeda: "Application of second generation advanced multi-media display processor (AMDP2) in a digital micro-mirror array based HDTV", IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2001, Vol. 47, pp. 585–592

- [30] S.F. Liang, H.M. Chen, Y.C. Liu: “Image enlargement by applying coordinate rotation and kernel stretching to interpolation kernels“, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010:576831
- [31] N. Stamatopoulos, B. Gatos, I. Pratikakis, S. Perantonis: “Goal-oriented rectification of camera-based document images“, IEEE Transactions on Image Processing, 2011, Vol. 20, Issue 4, pp. 910–920
- [32] H. F. Schantz: “The history of OCR, optical character recognition”, Recognition Technologies Users Association, 1982
- [33] S. Kukolj, I. Kaštelan, S. Drča, B. Ivetić: “Detekcija teksta i njegova segmentacija sa TV ekrana”, 20th Telecommunications Forum (TELFOR), 2012, pp. 1617-1620
- [34] I. Kastelan, S. Kukolj, V. Pekovic, V. Marinkovic, Z. Marceta: “Extraction of Text on TV Screen using Optical Character Recognition”, IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY), 2012, pp. 153-156
- [35] I. Kastelan, S. Kukolj, V. Pekovic: "Functional Verification of Digital TV Receivers using Text Region Extraction", IEEE EUROCON, 2013, in press
- [36] J. Xie: “Optical Character Recognition Based on Least Square Support Vector Machine”, Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application (IITA), 2009, pp. 626-629
- [37] H.I. Avi-Itzhak, T.A. Diep, H. Garland: “High accuracy optical character recognition using neural networks with centroid dithering“, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, Vol. 17, Issue 2, pp. 218-224
- [38] P.Y. Chen, C.Y. Lien, C.P. Lu: “VLSI implementation of an edge-oriented image scaling processor“, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2009, Vol. 17, pp. 1275–1284
- [39] J. Wunschmann, S. Zanker, T. Muller, T. Eireiner, S. Gauss, A. Rothemel: “New adaptive hybrid decision algorithm for video scaling“, Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2010, pp. 23–24
- [40] S. Schiemenz, C. Hentschel: “Scalable high quality nonlinear up-scaler with guaranteed real time performance“, IEEE 14th International Symposium on Consumer Electronics (ISCE), 2010, pp. 1–6

- [41] D. Doermann, J. Liang, H. Li: “Progress in Camera-Based Document Image Analysis“, Proceedings of the Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), 2003, pp. 606–616
- [42] Z. Sun, A. Hoogs: “Image Comparison by Compound Disjoint Information“, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 1 (CVPR), 2006, pp. 857-862
- [43] M. Osadchy, D.W. Jacobs, M. Lindenbaum: “Surface Dependent Representations for Illumination Insensitive Image Comparison“, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, Vol. 29, Issue 1, pp. 98-111
- [44] E.R. Davies: “Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities“, Third Edition, Morgan Kaufmann, 2005
- [45] R. Matungka, Y. Zheng, R. Ewing: “Image registration using adaptive polar transform“, IEEE Transactions on Image Processing, 2009, Vol. 18, pp. 2340–2354
- [46] F. Zhao, Q. Huang, H. Wang, W. Gao: “MOCC: a fast and robust correlationbased method for interest point matching under large scale changes“, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010:410628
- [47] Y. Guoshen, J.M. Morel: “A fully affine invariant image comparison method“, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009, pp. 1597–1600
- [48] A. Vedaldi, S. Soatto: “Relaxed matching kernels for robust image comparison“, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008, pp. 1–8
- [49] D. Lee: “The State of the Touch-Screen Panel Market in 2011“, Society for Information Display - Information Display Magazine, March 2011, Vol. 14, No. 3, pp. 12-16
- [50] M.E. Altinsoy, S. Merchel: “Electrotactile Feedback for Handheld Devices with Touch Screen and Simulation of Roughness“, IEEE Transactions on Haptics, 2012, Vol. 5, Issue 1, pp. 6-13
- [51] K.U. Kyung, J.Y. Lee, J.S. Park: “Pen-like Haptic Interface and Its Application on Touch Screen“, The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 2007, pp. 9-13

- [52] H. Nishino, R. Goto, T. Kagawa, K. Yoshida, K. Utsumiya, J. Hirooka, T. Osada, N. Nagatomo, E. Aoki: “A Touch-Screen Interface Design with Tactile Feedback”, International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS), 2011, pp. 53-60
- [53] M. Hafiz, H. Sawada: “Presentation of button repulsive sensations on touch screen using SMA wires”, International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2011, pp. 1-6
- [54] S. Tsuchiya, M. Konyo, H. Yamada, T. Yamauchi, S. Okamoto, S. Tadokoro: “Vib-Touch: Virtual Active Touch interface for handheld devices”, The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2009, pp. 12-17
- [55] OptoFidelity, <http://www.optofidelity.com/>
- [56] Robot Touch Screen analysis, <http://vimeo.com/10367683>
- [57] John V. “Automated touchscreen test device shows off the accuracy of smartphones”, Phone Arena, 2010, http://www.phonearena.com/news/Automated-touchscreen-test-device-shows-off-the-accuracy-of-smartphones_id10418
- [58] E.A. Johnson: “Touch Display – A novel input/output device for computers“, Electronics Letters, 1965, Vol. 1(8), pp. 219-220
- [59] E.A. Johnson: “Touch Displays: A Programmed Man-Machine Interface“, Ergonomics, 1967, Vol. 10(2), pp. 271-277
- [60] B. Buxton: “Multi-Touch Systems that I Have Known and Loved“, Microsoft Research, 2007, <http://billbuxton.com/multitouchOverview.html>
- [61] C. Herot, G. Weinzapfel: “One-Point Touch Input of Vector Information from Computer Displays“, Computer Graphics, 1978, Vol. 12(3), pp. 210-216
- [62] N. Mehta: “A Flexible Machine Interface“, M.A.Sc. Thesis, Department of Electrical Engineering, University of Toronto supervised by Professor K.C. Smith, 1982
- [63] S.K. Lee, W. Buxton, K.C. Smith: “A Multi-Touch Three Dimensional Touch-Sensitive Tablet“, Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI), 1985, pp. 21-25
- [64] Microsoft Surface, <http://www.microsoft.com/surface/>

- [65] Y. Park, J. Bae, T. Park: "Maximizing responsiveness of touch sensing via charge multiplexing in touchscreen devices", IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, Vol. 56, Issue 3, pp. 1905-1910
- [66] S.P. Parikh, J.M. Esposito: "Negative Feedback for Small Capacitive Touchscreen Interfaces: A Usability Study for Data Entry Tasks", IEEE Transactions on Haptics, 2012, Vol. 5, Issue 1, pp. 39-47
- [67] E. Dieulesaint, D. Royer, O. Legras, A. Chaabi: "Acoustic plate mode touch screen", Electronics Letters, 1991, Vol. 27, Issue 1, pp. 49-51
- [68] C.A. Pickering: "Gesture recognition driver controls", Computing & Control Engineering Journal, 2005, Vol. 16, Issue 1, pp. 26-27
- [69] K. Mei, S. Feng, G. Li, W. Chou, L. Zhang: "A virtual touch event method using scene recognition for digital television", IEEE Transaction on Consumer Electronics, 2013, Vol. 59, Issue 1, pp. 214-219
- [70] A. Sears, B. Shneiderman: "High precision touchscreens: design strategies and comparisons with a mouse", International Journal of Man-Machine Studies, 1991, Vol. 34, Issue 4, pp. 593-613
- [71] F. Balagtas-Fernandez, J. Forrai, H. Hussmann: "Evaluation of user interface design and input methods for applications on mobile touch screen devices", Proceedings of the 12th IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT), 2009, pp. 243-246
- [72] T.H. Hwang, W.H. Cui, I.S. Yang, O.K. Kwon: "A highly area-efficient controller for capacitive touch screen panel systems", IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, Vol. 56, Issue 2, pp. 1115-1122
- [73] I. Kastelan, N. Bednar, M. Katona, D. Zivkov: "Touch-screen Stimulation for Automated Verification of Touchscreen-based Devices", 19th IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer Based Systems (ECBS), 2012, pp. 52-55
- [74] I. Kastelan, V. Marinkovic, R. Dzakula, N. Vranic, V. Pekovic: "Stimulation Board for Automated Verification of Touchscreen-based Devices", 22nd IEEE International Conference on Field Programmable Logic and Application (FPL), 2012, pp. 483-484

- [75] I. Kastelan, M. Katona, D. Marijan, J. Zloh: “Automated Optical Inspection System for Digital TV Sets”, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011:140
- [76] I. Kastelan, N. Teslic, V. Pekovic, T. Tekcan: “TV Screen Content Extraction and Recognition Algorithm for the Verification of Digital Television Systems”, *17th IEEE International Conference and Workshops on Engineering of Computer Based Systems (ECBS)*, 2010, pp. 226-231
- [77] I. Kastelan, M. Katona, V. Pekovic, V. Mihic: “Automated Functional Verification of Digital Television Systems using Camera”, *52nd International Symposium ELMAR*, 2010, pp. 69-72
- [78] U. Strohbeck, I. Kaštelan, V. Peković, V. Mihić: “Automatska funkcionalna provera digitalnih TV sistema pomoću kamere“, *54th Conference ETRAN*, 2010, pp. 1-4
- [79] I. Kaštelan, N. Teslić, Z. Krajačević, S. Očovaj: “Prepoznavanje trenutnog sadržaja na ekranu metodama otkrivanja ivica i poređenja regiona”, *17th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 2009, pp. 632-635
- [80] A.V. Oppenheim, A.S. Willsky: “*Signals and Systems*”, Second Edition, Prentice Hall, 1996, pp. 65.
- [81] H. Scharr: “*Optimal Operators in Image Processing*”, Doctoral Dissertation at Rupertus Carola University, Heidelberg, Germany, 2000, pp. 120.
- [82] D.G. Lowe: “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints”, *International Journal of Computer Vision*, 2004, Vol. 60, Issue 2, pp. 91-110
- [83] Y. Ke, R. Sukthankar, L. Huston: “Efficient Nearduplicate Detection and Subimage Retrieval”, *ACM Multimedia*, 2004, pp. 869-876
- [84] S. Takano, K. Nijjima: “Robust Lifting Wavelet Transform for Subimage Extraction”, *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, 2000, Vol. 4119, pp. 902-910
- [85] S. Kukolj, I. Kastelan, N. Vranic, D. Klickovic, V. Pekovic: “Text Detection and Extraction from TV Screen”, *1st International Conference on Applied Internet and Information Technologies (AIIT)*, 2012, pp. 115-118

- [86] J. Gllavata, R. Ewerth and B. Freisleben, “A Robust algorithm for Text detection in images”, Proceedings of the 3rd international symposium on Image and Signal Processing and Analysis, 2003, pp.
- [87] V. Pekovic, N. Teslic, I. Kastelan, M. Katona: “System and Method for Automatically Testing Touchscreen Devices”, Patent P-2011/0402, Serbia
- [88] J. Collofelo, T. Fischer, M. Rees: “A testing methodology framework“, 14th Annual International Computer Software and Applications Conference COMPSAC, 1990, pp. 577-586
- [89] C.M. Chung, M.C. Lee: “Object-oriented programming testing methodology“, 4th International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, 1992, pp. 378-385
- [90] H.Y. Yang, C.M. Chang, M.C. Chao, R.F. Huang, S.C. Lin: “Testing Methodology of Embedded DRAMs“, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol. 20, Issue 9, 2012, pp. 1715-1728
- [91] H. Liu, F.C. Kuo, T.Y. Chen: “Teaching an End-User Testing Methodology“, 23rd IEEE Conference on Software Engineering Education and Training CSEE&T, 2010, pp. 81-88
- [92] D. Zivkov, I. Kastelan, E. Neborovski, G. Miljkovic, M. Katona: “Touch Screen Mobile Application as Part of Testing and Verification System”, 35th International Convention MIPRO – CTS Computers in Technical Systems, 2012, pp. 892-895
- [93] M. Katona, I. Kastelan, V. Pekovic, N. Teslic, T. Tekcan: “Automatic Black Box Testing of Television Systems on the Final Production Line”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 57 Issue 1, pp. 224-231
- [94] I. Kastelan, V. Pekovic, N. Teslic, T. Tekcan, D. Marijan: “Automatic Black Box Testing of Television Systems on the Final Production Line”, 29th IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2011, pp. 896-897
- [95] I. Resetar, I. Kastelan, M. Katona, I. Papp, D. Vujovic, D. Banika, Z. Radonjic, N. Vranic: “System for Automated STB Testing – Starter Kit”, technical solution as part of the project TR32014, Serbia, 2011-2014
- [96] I. Kastelan, M. Katona, I. Papp, M. Davidovic, I. Resetar: “An Integrated Audio and Video Communication System for Digital Television Sets”, 2nd Eastern European

Regional Conference on Engineering of Computer Based Systems (ECBS-EERC), 2011, pp. 78-84

- [97] I. Kastelan, M. Katona, I. Papp, M. Davidovic, I. Resetar: “A Full-Duplex Hands-free Videophone Add-on Device for Digital Television Sets”, IEEE International Conference on Consumer Electronics – Berlin (ICCE-Berlin), 2011, pp. 382-385
- [98] B. Schneiderman: “Touch screens now offer compelling uses”, IEEE Software, 1991, Vol. 8, Issue 2, pp. 93-94
- [99] T. Guerreiro, P. Lagoa, H. Nicolau, D. Goncalves, J.A. Jorge: “From Tapping to Touching: Making Touch Screens Accessible to Blind Users”, IEEE MultiMedia, 2008, Vol. 15, Issue 4, pp. 48-50
- [100] Y. Yang, M. McDonald, P. Zheng: “Can drivers' eye movements be used to monitor their performance? a case study”, Intelligent Transport Systems (IET), 2012, Vol. 6, Issue 4, pp. 444-452
- [101] A. Bleicher: “Rise of the Eye Phones”, IEEE Spectrum, 2013, Vol. 50, Issue 5, pp. 9-10

Biografija



Ivan Kaštelan, rođen 12.06.1985 u Beogradu, završio je osnovno i srednje obrazovanje u Šidu kao nosilac Vukove diplome, gde je kao učenik šidske gimnazije učestvovao na nacionalnim takmičenjima iz fizike i matematike, osvojivši prvo mesto na Saveznom takmičenju iz fizike 2003. godine. Osnovne akademske studije na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Odsek za računarsku tehniku i računarske komunikacije, završio je 2008. godine sa prosekom 10.00. U 2009. godini završio je master akademske studije na istom Odseku sa prosekom 10.00. Zbog postignutih rezultata tokom studiranja proglašen je za najboljeg diplomiranog studenta Fakulteta tehničkih nauka za 2008. godinu.

Tokom akademskih master studija, radio je stručnu praksu u kompaniji Micronas GmbH u München-u gde je učestvovao u istraživanju sintetizabilnih načina provere rada digitalnih sistema.

Trenutno je student doktorskih studija na Fakultetu tehničkih nauka, Departman za računarstvo i automatiku, i radi kao asistent na predmetu Logičko projektovanje računarskih sistema 1. Tokom doktorskih studija bio je stipendista Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj radeći na dva nacionalna projekta iz oblasti elektronike, telekomunikacija i informacionih tehnologija. Tokom prve godine doktorskih studija boravio je na Univerzitetu Freiburg, gde je radio u domenu modeliranja kanala prenosa signala mobilnih telefona u ruševinama.

Trenutni domen interesovanja u istraživanju su mu dizajn i verifikacija digitalnih sistema i razvoj algoritama za obradu signala. Učesnik je na EU FP7 projektu „Embedded Engineering Learning Platform“ (E2LP) kao pomoćnik koordinatora i vođa radnog paketa. Tokom doktorskih studija radio je i na razvoju fizičke arhitekture i algoritama za sisteme za proveru rada uređaja potrošačke elektronike – televizijskih prijemnika i uređaja sa ekranima osetljivim na dodir, na čemu je i zasnovao svoju disertaciju.

Autor je 2 rada u istaknutim međunarodnim časopisima, 30 radova na međunarodnim konferencijama i 9 radova na nacionalnim konferencijama. Održao je jedno pozivno predavanje na Univerzitetu Zagreb, iz oblasti provere rada uređaja potrošačke elektronike. Koautor je 6 tehničkih rešenja, kao i 2 patenta.