



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ



Владан Д. Боровић

**НАПРЕДНИ СИСТЕМ ЗА ПРАЋЕЊЕ ПОКРЕТНИХ
ОБЈЕКТА У СПОРТУ**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2021



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



Vladan D. Borović

**ADVANCED TRACKING SYSTEM FOR MOVING
OBJECTS IN SPORTS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2021

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:

Проф. др Дејан Д. Ранчић, редовни професор
Универзитет у Нишу, Електронски факултет

Наслов:

Напредни систем за праћење покретних објеката у спорту

Резиме:

У овој дисертацији детаљно је описан пројектовани напредни систем за праћење покретних објеката у спорту. Описане су и уведене нове методе, нови алгоритми за детекцију позиције и кретања објеката у простору и створен нови приступ употребе технологија, нових алгоритама и апликација у повећању тачности и поузданости система за праћење чак и коришћењем опреме са нижим техничким карактеристикама. По први пут је изведено експериментално тестирање и упоредна анализа експерименталних резултата два различита програмска оквира са алгоритмима, употребом различитих видео-камера, као и различитих израђених софтверских апликација за детекцију и 3D симулацију и графичко приказивање резултата праћења објеката. Идеја за примену техничко-технолошких система за праћење покретних објеката у спорту јесте да се прати и детектује положај и путања покретног објекта у реалном времену. Ти прикупљени подаци се обрађују прецизно постављеним методама да би се на крају, као резултат целог процеса, произвела фотореалистична 3D визуелизација, симулација која показује предвиђену путању кретања посматраног објекта у простору, у циљу доношења прецизне и објективне судијске одлуке. Фокус истраживања је примена нових алгоритама за прикупљање, детекцију и графичку симулацију положаја објеката у простору са развојем нових оригиналних метода за побољшање 3D графичког приказа без треперења тзв. *flickeringa* објеката на екрану, повећање прецизности 3D графичке анимације до десетог дела милиметра, што доводи до одређивања прецизнијег положаја покретног објекта, са оптимизацијом детекције покрета за хардвер мањег квалитета. Акцент је на практичном тестирању система на већем броју различитих типова видео-камера и већем броју софтверских апликација у различитим програмским језицима са великим бројем *open-source* алгоритама за детекцију покрета. Иновативност предложеног система огледа се у томе да се једноставним новим техникама побољша процес одређивања

позиције посматраних објеката у простору и унапреди графички приказ уз мање коришћење ресурса рачунара. Увођење нових алгоритама и нових метода резултат је математичких прорачуна и новог инжењерског приступа пројектовању оваквих система.

Научна област:

Електротехничко и рачунарско инжењерство
(Рачунарство и информатика)

Научна
дисциплина:

Рачунарска техника – трансформације тродимензионалне
визуелизације; спорт – игре са лоптом

Кључне речи:

праћење покретних објеката, детекција положаја, софтвер, 3D
визуелизација, видео-камере, прикупљање сигнала

УДК:

621.3:004.922]:796.3(043.3)

CERIF
класификација:

T120: Системски инжењеринг, рачунарска технологија

Тип лиценце
Креативне
заједнице:

CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral
Supervisor:

PhD Dejan D. Rančić, full professor
University of Niš, Faculty of Electronic Engineering

Title:

Advanced system for tracking moving objects in sports

Abstract:

This dissertation describes in detail the designed advanced tracking system for moving objects in sports. New methods, new algorithms for detecting the position and movement of objects in space are described and introduced, and a new approach to the use of technologies is created, new algorithms and applications are developed to increase the accuracy and reliability of tracking systems even when using equipment with lower technical characteristics. For the first time, experimental testing and comparative analysis of the experimental results of two different software frameworks with algorithms, using different video cameras, as well as different developed software applications for detection and 3D simulation and graphical representation of object tracking results were performed. The idea for the implementation of technical-technological systems for tracking movable objects in sports is to monitor and detect the position and trajectory of the moving object in real time. These collected data are processed with precisely set methods, and in the end, as a result of the whole process, to produce photorealistic 3D visualization, a simulation that shows the predicted motion path of the observed object in space in order to make a precise and objective judge's decision. The focus of the research is the application of new algorithms for the collection, detection and graphical simulation of the position of objects in space with the development of new original methods for improving the 3D graphical representation without the flickering of objects on the screen, increasing the accuracy of 3D graphic animation up to 10 parts of a millimeter, which leads to a more precise positioning of the moving object, with optimization of motion detection for lower quality hardware. Emphasis is placed on practical system testing on a number of different types of video cameras and a number of software applications in different programming languages with a large number of open-source motion detection algorithms. The innovativeness of the proposed system is to

improve the process of determining the position of the observed objects in space with simple new techniques and improve the graphical representation with less use of computer resources. The introduction of new algorithms and new methods is the result of mathematical calculations and a new engineering approach to designing such systems.

Scientific Field:

Electrotechnical and Computer Engineering (Computer Science)

Scientific
Discipline:

Computer techniques – transformations of 3Dvisualisation;
sport – games with a ball

Key Words:

moving objects tracking, position detection, software, 3D
visualisation, video cameras, signal acquisition

UDC:

621.3:004.922]:796.3(043.3)

CERIF
classification:

T120: Systems engineering, computer technology

Creative
Commons
License Type:

CC BY-NC-ND

Захвалница

Ова дисертација резултат је више од десет година истраживања и развоја идеје увођења модерних технологија у спорт којим се у земљи сви дичимо. Имам част и велико задовољство да се захвалим ментору проф. др Дејану Ранчићу, редовном професору Електронског факултета у Нишу, на несебичној помоћи и бројним корисним саветима који су значајно допринели повећању квалитета ове дисертације. Хвала члановима комисије за оцену и одбрану дисертације на корисним предлозима и мишљењима.

Такође, велику захвалност дугујем свом пријатељу и колеги дипл. инж. ел. Игору Думанчићу на помоћи у пројектовању и изради софтверских апликација и пројеката током низа година.

Захваљујем се својој породици: оцу Душану и мајци Живки, супрузи Валентини, брату Саши и његовој породици на вери, подршци, разумевању, љубави и великој помоћи.

Ову дисертацију посвећујем мојој ћерки, мом дијаманту,

Магдалени.

Садржај

1.	Увод.....	10
1.1.	Историјат	10
1.2.	Предмет научног истраживања.....	13
1.3.	Циљ научног истраживања	16
1.4.	Примењене научне методе	18
1.5.	Очекивани резултати истраживања.....	18
1.6.	Организација дисертације	19
2.	Системи за праћење покретних објеката у простору.....	22
2.1.	Опис проблема	22
2.2.	Праћење објеката помоћу ГПС система	26
2.3.	Праћење објеката помоћу камера.....	30
2.4.	Анализа и преглед стања постојећих система.....	32
2.5.	Прецизност постојећих система	49
3.	Алгоритми за детекцију покретних објеката.....	55
3.1.	Опис проблема	55
3.2.	Алгоритам Circle Hough Transform	59
3.3.	Алгоритам R-CNN	61
3.4.	Алгоритам Fast R-CNN.....	63
3.5.	Алгоритам Faster R-CNN.....	65
3.6.	Алгоритам YOLO.....	68
3.7.	Нови алгоритам за детекцију покретних објеката	70
3.8.	Упоредна анализа алгоритама за детекцију покретних објеката.....	72
4.	Алгоритми за предикцију путање покретних објеката.....	75
4.1.	Опис проблема	75
4.2.	Алгоритам разлика у две слике	77
4.3.	Алгоритам позадинског моделовања	78
4.4.	Произвољни алгоритам разлика у сликама	80
4.5.	Упоредна анализа алгоритама за предикцију путање покретних објеката.....	81
5.	Напредни систем за праћење покретних објеката у спорту.....	88
5.1.	Хардверска архитектура система	94
5.1.1.	Систем видео-камера	94

5.1.2.	Калибрација видео-камера	99
5.2.	Архитектура система	101
5.2.1.	Хардверска архитектура система	101
5.2.2.	Софтверска архитектура система	105
5.2.3.	Систем за 3D симулацију, анимацију и графичко приказивање резултата	117
6.	Тестирање и експериментални резултати	124
6.1.	Симулација рада система	125
6.2.	Тестирање система у лабораторијским условима	134
6.3.	Тестирање система у реалним условима	136
6.4.	Експериментални резултати	140
6.5.	Компаративна анализа резултата	141
6.5.1.	Тестирање новог алгоритма за детекцију покретних објеката	144
6.5.2.	Тестирање AForge.NET алгоритама за детекцију	148
7.	Закључак	156
7.1.	Предлози и правци будућег унапређења система	157
8.	Литература	159
	Списак коришћених скраћеница	165
	Списак слика	167
	Списак табела	171
	Биографија аутора	172

1. Увод

1.1. Историјат

У двадесет првом веку популарност спортова расте из дана у дан, привлачећи све већи број људи који знатижељно посматрају омиљене играче у свим дисциплинама и на свим континентима. Са повећањем удела спорта у глобалној економској расподели, расте и интересовање за унапређењем игре како у вештини тако и у увођењу нових технологија. Управо нове технологије доносе нови, дуго очекивани талас атрактивности и нових могућности за маркетингом и пословањем.

Спој технологије, која повећава објективност судијских одлука у спорту и значајно повећава квалитет и атрактивност спортских дисциплина, и саме игре показао се као добитна комбинација. Једна спортска манифестација је од једноставне „голе“ борбе постала атракција у виду најбољих фестивала забаве и игре. Помоћу напредних технологија, спортски догађај прераста у глобални, обавезни вид друштвених активности. Овај вид модернизације убрзано уводи нове спонзоре, повећава премије и наградне фондове спортским клубовима и играчима, чиме употреба модерних техничких система постаје апсолутно незаобилазна и ниједан озбиљан спортски догађај не може се замислити без постојања таквих система.

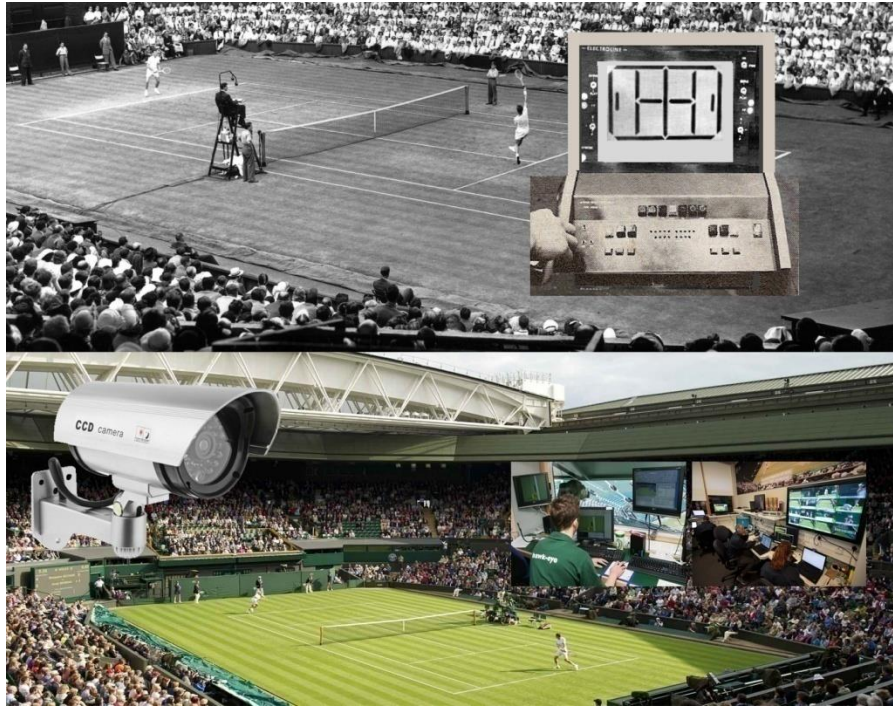
Главна одлика постојећих система је изузетно висока цена коришћења као и вео тајне којим је коришћена технологија покривена. Самим тим, већина догађаја није ни могла да буде покривена овим системима дужи низ година. Шанса потенцијалних нових система повећава се могућом вишенаменском употребом. У свету модерног спорта, где се улог повећава сваким протеклим минутом и где једна погрешна одлука за лопту у ауту може да значи промену спортске среће, све више се ослања на коришћење технологије која осигурава да судијске одлуке буду непристрасне. Компонента људске грешке у доношењу важних одлука често је и одлучујућа. Постоји велика потреба да се уведе технологија која би умањила шансе за људском грешком у тако важним одлукама. Такође, технолошка достигнућа омогућавају анализу и унапређење игре. Системи засновани на таквој

технологији користе се за прикупљање разноврсних података и њиховог коришћења у разним наменама и поред спорта. Данас су најчешће примене оваквих система у тенису, фудбалу и крикету, затим у полицијске и војне сврхе као и у производним, индустријским гранама друштва каква је аутомобилска индустрија.

Приступ, квалитет и прецизност аутоматских одлука значајно се повећала од када се ове технологије примењују, посебно у последњих десетак година. У спортој технологији сви су добитници – и активни играчи, и тренери, и навијачи, и посматрачи игре. Они прецизно знају колико технологија има велик утицај на индустрију спорта. На пример, видео-технологија и видео-асистент судије (VAR) заувек су променили изглед фудбалске игре. Често се новине тешко прихватају, постоје контроверзе око њих, али то никако не умањује утицај и значај који имају.

Употреба модерне технологије у спорту доноси унапређења у свим областима. Поред свих активности око игре, анализира се и унапређује учешће и улога посматрача пре свега кроз повећање атрактивности мечева. Могућности за иновације немају граница.

Од почетка примене ових технологија у спорту до данас пређен је веома дугачак пут. На слици 1.1. јасно се види огромна разлика у организацији примене технологија у самој тениској игри некад и сад.



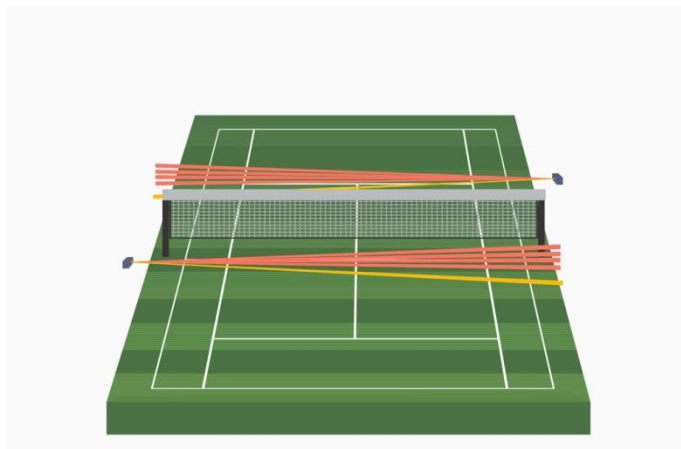
Слика 1.1. Историјат примене модерних технологија у тенису

Овај пример симболично осликава развој и напредак како примењених техничких система тако и самог тениса. На црно-белом делу слике може да се види први компјутеризовани уређај под називом *TheElectroline*, контролни компјутер демонстриран успешно на професионалном тениском турниру још давне 1974. године. То је уједно и година почетка примене технологије у аутоматизованим судијским линијским одлукама. Овај уређај измислили су тенисер GeoffreyGrant и инжењер електронике RobertNicks у Сједињеним Америчким Државама. Уређај је базиран на систему сензора, са великим, танким и проводним пластичним сензорима притиска испод површине терена за тенис. Уређај је, поред судијских одлука да ли је лопта у ауту, сигнализирало преступ играча као и контакт лопте са мрежом приликом сервиса тзв. нец (енгл. let). Иако је систем патентиран и добио бројне позитивне критике у штампи, производ никад није добио комерцијални значај [1].

После овог система, 1977. године јавно је демонстриран и патентирани систем за електронско линијско судијско одлучивање у Единбургу, Шкотска, Велика Британија, проналазача Lyle-a David-a са електро-проводним лоптицама, микрокомпјутером и мрежом

каблова на границама простора предвиђеног за тениску игру. Као ни претходно описан систем, ни шкотски систем није имао комерцијалну примену и није био поуздан.

Најуспешнији систем у раној фази експерименталног електронског аутоматског судијског одлучивања био је *Cyclops*. У питању је уређај, приказан на слици 1.2, који је коришћен само за одлуке приликом сервиса тенисера. Био је поуздан и у употреби дуги низ година све до увођења нове видео-технологије. Пронашли су га Bill Carlton из Велике Британије и Margaret Parnis England са Малте [2]. Коришћен је широм света и састојао се од низа инфрацрвених ласерских зрака (пет) емитованих на центиметар висине од терена, паралелно са линијом од трасмитера до рисивера. Радио је само на главним сервисним линијама.



Слика 1.2. Приказ функционисања Cyclops система

Почев од 21. века, у спорт су успешно ушли технички системи базирани на технологији видео-камера.

1.2. Предмет научног истраживања

У свету модерног спорта, где се улог повећава сваким минутом који протекне и где једна погрешна одлука за лопту у ауту може да значи промену спортске среће, све више се

ослања на коришћење технологије која осигурава да судијске одлуке буду непристрасне. Компонента људске грешке у доношењу важних одлука често је и одлучујућа. Постоји велика потреба да се уведе технологија која би умањила шансе да судија погрешно у тако важним одлукама. Такође, технолошка достигнућа омогућавају анализу и унапређење игре. Системи засновани на таквој технологији користе се за аквизицију разноврсних података и њиховог коришћења у разним наменама и поред спорта.

Идеја која је била основа за примену техничко-технолошких система за праћење покретних објеката у свим спортовима јесте да се прати и детектује положај и путања покретног објекта у реалном времену. По завршетку, ти прикупљени подаци се обрађују прецизно постављеним методама да би се на крају, као резултат целог процеса, произвела фотореалистична визуелизација, симулација која показује путању кретања посматраног објекта у 3D простору у циљу доношења прецизне и објективне судијске одлуке. Углавном, покретни објекти који се прате и чији се положај и путања детектује јесу лопте у игри. Потпуно нова димензија увођења технологије у процес одлучивања у спорту је да се подаци користе и за популаризацију саме игре, затим за маркетинг, статистику и друге сврхе као што су разумевање игре и судијских одлука, често уносећи нови талас узбуђења међу бројне посматраче и обожаваоце тениса, фудбала, крикета, кошарке.

База ових система је принцип триангулације у геометрији, који као улазне податке користи визуелне слике и временске податке добијене прикупљањем сигнала са најмање четири видео-камере које имају велике перформансе у погледу броја слика у секунди, такозваних брзих видео-камера, лоцираних на различитим локацијама и угловима око подручја надзора, тј. терена за игру. Како постоји брзи видео-процесор, видео-снимци се у систему врло брзо обрађују. Предефинисани модел надзорног подручја, који се проверава у процесу калибрације видео-камера, већ постоји у систему и може да буде произвољног облика. Он садржи и просторна правила. У свакој слици послатој са сваке видео-камере, систем идентификује групу пиксела која одговара слици објекта који је посматран, тј. над којим се врши надзор. Затим се прорачунава 3D позиција покретног објекта за сваку слику у секунди која је забележена прикупљањем са постављених видео-камера, поређењем тренутне позиције на најмање две физички одвојене видео-камере у истом временском тренутку. Запис путање којом се објекат кретао ствара се од низа слика. Важно је да је,

помоћу тих прорачунатих података, могуће предвидети будућу путању објекта и, што је најважније, где се путања сече са предвиђеним подручјем надзора. Задатак система је да затим упореди положај контакта објекта са подлогом користећи предефинисане димензије надзираног подручја, нпр. тениског терена. На крају целог процеса систем ствара фотореалистичну графичку слику путање објекта и надзираног подручја. Могућа је репродукција у скоро реалном времену.

Нова технологија и нови приступ описани у овом раду представљају модерно средство за судијске одлуке које је у употреби у спорту. Стручно, триангулација је процес одређивања локације тачке мерењем углова ка њој из познатих тачака на супротним странама фиксиране основне линије. Како су експериментални резултати потврдили, резултати су прецизни, поуздани и практично применљиви. Према мишљењу како публике тако и активних учесника, незамисливо је и застарело гледање спортских сусрета без оваквих система.

Од самих почетака развоја и увођења оваквих система изграђена је велика популарност пре свега захваљујући њиховим иновативним карактеристикама. Нова технологија, због софистицираности, није тешка за прихватање и примену. Поузданост и иновативност уводе ове системе и у сферу полицијских и војних области, а у индустријским прозводним гранама друштва највише се примењују у аутомобилској индустрији [3].

Како свако техничко решење има добре и лоше стране, вредно је поменути најизраженије лоше и слабе карактеристике постојећих решења која су примењена у свим поменутих областима:

- Могућност милиметарских грешака у 3D приказу
- Недовољна прецизност 3D анимације
- Врло висока цена целог система, неприступачна већини заинтересованих страна
- Недовољно брзи математички алгоритми за детекцију положаја
- Недовољно поверење јавности у прецизност система и кредибилитет
- Недовољно атрактиван 3D приказ са анимацијом и графиком.

У протеклој деценији сведоци смо великих успеха наших спортиста у свим дисциплинама, нарочито у тенису, и у тимској и индивидуалној конкуренцији. Ти спортски успеси праћени су и научним идејама, употребом модерних технологија, пројектовањем и израдом напредног система који је описан у предложеној докторској дисертацији. Иначе, технологија коју користи овај систем сматра се врхунском у спорту.

Предмет научног истраживања у предложеној дисертацији је унапређење постојећих система и израда новог оптимизованог система за хардвер мањих перформанси и квалитета. Фокус истраживања је примена новог алгорита за прикупљање, детекцију и графичку симулацију положаја објеката у простору, са новом ефикасном *flicker-free* методом за побољшање 3D графичког приказа, побољшаном прецизношћу 3D графичке анимације и оптимизацијом коришћења и приступа библиотекама за детекцију покрета. Такође, у дисертацији су дати и бројни резултати практичног тестирања.

1.3. Циљ научног истраживања

Истраживања која су обављена у оквиру докторске дисертације обухватају анализу 3D графичког приказа са анимацијом и библиотека за детекцију покрета и препознавање објеката коришћењем MS Visual Studio развојног окружења 98, 2010, 2019 и MS Visual Studio C / C++ и C# програмских језика. Анализирани су постојећи системи и методе, колико је то могуће због доступности материјала и „вела” тајни, којим се скрива од јавности детаљно функционисање постојећих система, и приказане су њихове предности и мане.

Фокус истраживања у овој докторској дисертацији био је на примени новог алгорита за прикупљање, детекцију и графичку симулацију положаја објеката у простору и развоју нових оригиналних метода за побољшање 3D графичког приказа без треперења тзв. *flickeringa* објеката на екрану, посебно линија, мрежа и граничних подручја, примећен тада код постојећих система, повећање прецизности 3D графичке анимације до десетог дела милиметра, што доводи до одређивања прецизнијег положаја покретног објекта, са оптимизацијом детекције покрета за хардвер слабијих перформанси.

Акцентат је био на практичном тестирању система на већем броју различитих типова видео-камера и већем броју апликација у различитим програмским језицима са великим бројем *open-source* алгоритама за детекцију покрета. Коришћена су различита подручја надзора – од кућних, лабораторијских до реалних, професионалних спољних и унутрашњих терена. Резултати практичних тестирања су проверени и дат је упоредни преглед са познатим решењима. На бази резултата тестирања извршена је оптимизација делова система за употребу на техничкој опреми слабијих перформанси.

Иновативност предложеног система огледа се у томе да се новим техникама побољша процес одређивања позиције посматраних објеката у простору и унапреди графички приказ уз мање коришћење ресурса рачунара, пре свега процесора и меморије, и самим тим створе услови за исправан рад на слабијим техничким компонентама као и да се иновативним програмерским приступом побољша детекција покрета. Увођење новог алгорита и нових метода резултат је како математичких прорачуна тако и новог инжењерског приступа пројектовању оваквих система.

По фазама, истраживање обухвата следеће сегменте:

- Систем за детекцију покрета објеката
- Прецизност 3D приказа
- Изглед 3D графичког приказа.

Примењене иновативне методе које су и циљ истраживања довешће до повећања прецизности и смањења грешке у детекцији положаја код брзих објеката, где је и могућност грешке већа, као и до појефтињења и лакшег развоја сличних система за праћење.

1.4. Примењене научне методе

У изради предложене докторске дисертације коришћене су различите истраживачке методе које треба да омогуће испуњавање задатих циљева. Метод анализе је примењен на постојећу оскудну литературу и интернет видео-записе резултата праћења и визуелизације постојећих система. Пре свега су коришћени математички методи, Вајерштрасова теорема за апроксимацију у циљу предвиђања путање објеката у простору[4], прорачуни брзине рендеринга, метод симулације на разним алгоритмима за детекцију покрета и разним апликацијама у више програмских језика и њихова оптимизација.

Највише времена је посвећено експерименталној методи при истраживању свих перформанси система за праћење, посебно графичког дела. Експерименти су изведени у разним просторима и условима прикупљања сигнала са видео-камера.

Компаративном методом извршено је поређење експерименталних резултата са доступним јавним техничким подацима у циљу процене унапређења делова система и побољшања алгоритма за детекцију и графичку симулацију резултата прорачуна.

Збирно, сви резултати се спајају у циљу изградње потпуно новог система за праћење објеката.

1.5. Очекивани резултати истраживања

Основни резултати истраживања која су спроведена у изради ове докторске дисертације су:

- Анализа и преглед постојећих система и метода за праћење објеката помоћу видео-камера
- Тестирање нових алгоритама за праћење објеката
 - Развој нове методе за 3D графички приказ

- Побољшање графичког приказа елиминацијом треперења објеката на слици
- Повећање прецизности 3D анимације, посебно у граничним линијским подручјима
- Повећање брзине рендеринга сцена на слабијој графичкој опреми
- Оптимизација дела система за детекцију покрета објеката
- Имплементација наведених метода и оптимизација, уз пропратне формуле и алгоритме
- Експериментална потврда исправности нових алгоритама за праћење покретних објеката као научног доприноса
- Дискусија и анализа развоја новог система за праћење у спорту заснованог на новим предложеним методама.

1.6. Организација дисертације

Дисертација је организована у осам поглавља. У уводном поглављу наведен је историјат развоја и примене сличних технологија, дата је идеја за истраживање, описан је предмет и циљ истраживања са примењеним методама и наведени су резултати истраживања.

У другом поглављу дат је опис проблема и наведена примена постојећих система за детекцију положаја објеката у простору у разним областима у свету. Такође, упоредо су наведене добре и лоше стране.

Поглавље три садржи детаљан опис алгоритама за детекцију покретних објеката. Дата је и упоредна анализа постојећих алгоритама за детекцију.

У четвртом поглављу описани су алгоритми за предикцију путање покретних објеката и, као и у претходном поглављу, дата је упоредна анализа, сада алгоритма за предикцију путање.

Пето поглавље садржи нови концепт, напредни систем за праћење покретних објеката у спорту, са предлозима за побољшање постојећих система у свету, и обухвата следеће целине:

- Хардверска архитектура система која обухвата систем видео-камера са њиховом калибрацијом;
- Софтверска архитектура система састоји се од:
 - подсистема за напредну детекцију и праћење положаја објеката у тродимензионалном простору игре. То је једна целина напредног система за праћење. Подсистем за детекцију положаја на основу слике са камера (on-line) или на основу снимка (off-line) одређује позицију и путању објекта у тродимензионалном простору;
 - подсистема за прикупљање сигнала са досадашњим практичним искуствима у вези са техничким резултатима затворених, малих и независних рачунарских мрежа и карактеристике камера са опремом и врстом преносног пута сигнала, са акцентом на хардвер и софтвер мањих техничких перформанси;
 - система за тродимензионалну симулацију, анимацију и атрактивно графичко приказивање резултата. На основу добијених резултата детекције и прорачуна врши графичку симулацију путање кретања посматраног објекта и простора;

Исто поглавље, на крају, садржи и предлог нове архитектуре система за праћење покретних објеката у спорту.

У шестом поглављу описано је тестирање и дати су експериментални резултати новог система, примене метода, компаративна анализа резултата, почев од кућних

варијанти до верзија припремљених за професионалне спортске терене. Како се почетна идеја развијала, тако се развијала и важност и применљивост самог система за праћење.

У поглављу седам дат је закључак са предлозима и правцима будућег унапређења система.

Поглавље осам резервисано је за коришћену литературу.

2. Системи за праћење покретних објеката у простору

2.1. Опис проблема

Идеја пројектовања оваквог система од самог старта подразумевала је многоведеног времена у проучавању функционисања сваког дела система, почев од математичких проблема до техничких финеса. Аутор дисертације је од почетка израде система за праћење објеката у спорту био суочен са великим бројем захтева, проблема и непознаница. Све је указивало на то да су досадашњи, слични системи држани „под кључем“ као велика тајна. Најважнији постојећи системи биће описани у овом поглављу.

Главни проблеми у развоју и изради били су, осим мањка јавно доступних техничких прорачуна, карактеристика и објашњења и већ поменута врло висока цена сваког појединачног уређаја, висока цена радних часова програмера у развоју софтвера као и делова опреме који су неопходни за прецизно праћење покретних објеката и прикупљање и обраду сигнала. Резултати експерименталних испитивања постојећих система нису били јавно доступни ни у једној форми, а нису ни у данашње време.

Стога је лако закључити да је било изузетно тешко доћи до било каквих прецизних техничких података. Ипак, аутор ове дисертације је, пре свега сопственим залагањем, трудом, надахнутошћу и идејама, успео да направи потпуно нови систем који може да буде укључен у озбиљне примене и поднесе озбиљна тестирања у разним условима и наменама. Од почетног система до данашњег, у фази за професионално тестирање, развијан је скоро десет година.

На временској линији најважнији проблеми су били:

- Прецизност детектовања положаја покретног објекта
- Прецизност симулираног 3D графичког простора за игру
- Брзина прорачуна положаја објеката у простору
- Цена видео-камера, одређеног квалитета и високих техничких карактеристика

- Цена активне и пасивне мрежне опреме система
- Велики број неопходних рачунара за прорачуне и обраду сигнала са видео-камера
- Висока цена професионалног тестирања, посебно на тениским теренима.

Како је аутор развијао потпуно нови систем, заснован на новом алгоритму праћења, једини делотворни и ефикасни начин за прикупљање неопходних података био је директни контакт како са произвођачима видео-камера и опреме тако и са низом инжењера и математичара. Непобитан је добијени податак да само опрема са изузетно високом ценом задовољава постављене техничке критеријуме и има најбоље техничке карактеристике. У бројним разговорима аутор је развијао и идеју и идејни пројекат новог система, сагледавајући и мане и предности замишљеног концепта.

Како је данас добро познато, минимални број модерних видео-камера за основно тестирање је шест, док је за детаљније прорачуне неопходно десет[5]. У сваком случају, потребан је већи број квалитетних видео-камера.

Рачунарску мрежу система за праћење покретних објеката чине сви уређаји у процесу праћења, и активна и пасивна мрежна опрема. Видео-камере су преко својих мрежних LAN прикључака спојене на рачунарску мрежу. Иначе, цена мрежне опреме није претерано висока, али су неопходне пројектоване перформансе система, нпр. брзина преноса сигнала до бројних рачунара за прорачуне.

Опште је познато да је неопходан велики број рачунара за прорачуне и прикупљање и обраду сигнала. Принцип рада је:

Једна видео-камера -> Један рачунар за обраду прикупљеног сигнала

што практично значи да је, за професионално тестирање, потребно минимум десет рачунара, понекад чак и дванаест, за постављање система. Сви ови детаљи потребне опреме и рачунара са скупим видео, графичким процесорима доводе до врло високих износа новчаних средстава неопходних за набавку.

Наравно, поред материјалних, техничких средстава, неопходан је и велики број људи за рад на систему и почетних активности око поставке, калибрације, подешавања делова и

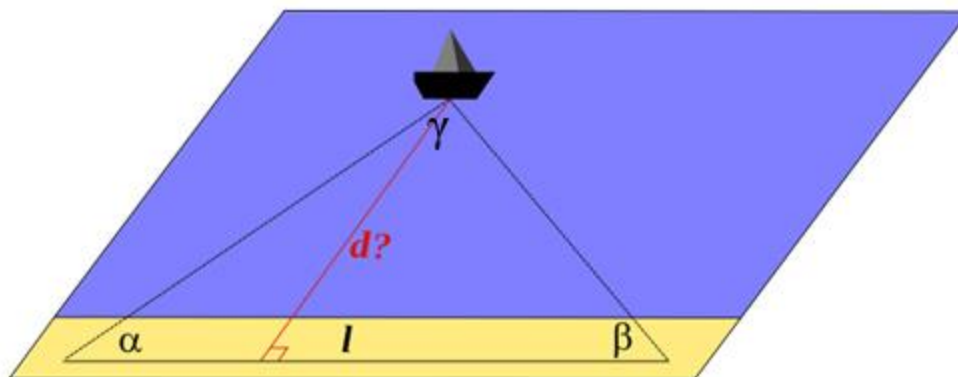
коришћења система за време тестирања. У атрактивним спортовима, закуп професионалних терена за тенис спада у највише како у висини цене тако и у заузетости термина коришћења терена.

Поменути издаци су неопходни за несметано коришћење и тестирање система. Већину ових проблема аутор је успешно решио. Решења представљају и основу за израду новог, напредног система који је и предмет ове дисертације.

Основни математички принцип за одређивање положаја објеката је општепознати принцип триангулације у геометрији. Најчешће је јавност упозната са овим термином у области телекомуникација, код проналажења и лоцирања мобилних телефона и њихових корисника. Овај принцип сачињава низ испитаних и оптимизованих математичких функција које су своју исправност доказале у практичном тестирању на терену. Триангулација је процес одређивања локације тачке мерењем углова ка њој из познатих тачака на супротним странама фиксиране основне линије. Тако та тачка може да постане трећа фиксна тачка троугла са једном познатом страном и два позната угла. Та метода се највише користи у тригонометрији и геометрији. Триангулација такође може да се односи на прецизан надзор система са великим троугловима, који се називају триангулационим мрежама. То је наставак рада холандског математичара Willebrord-a Snell-a из 1615. и 1617. године, који је показао како је могуће лоцирање тачке помоћу углова које формирају три познате тачке, проблем који се зове ресекционисање. Такви методи триангулације за надзор и преглед великих површина на Земљи, великих географских подручја, користили су се до пуштања у употребу првих Глобалних навигационих сателитских система почетком осамдесетих година прошлог века. [6]

Ако математичке ставове дефинишемо прецизније, триангулација је метода за одређивање координата и удаљености од тражене тачке прорачунавањем дужине једне стране троугла, са познатим вредностима углова и страна троугла који формирају та тачка и друге две познате тачке, тзв. референтне тачке, и помоћу синуса угла.

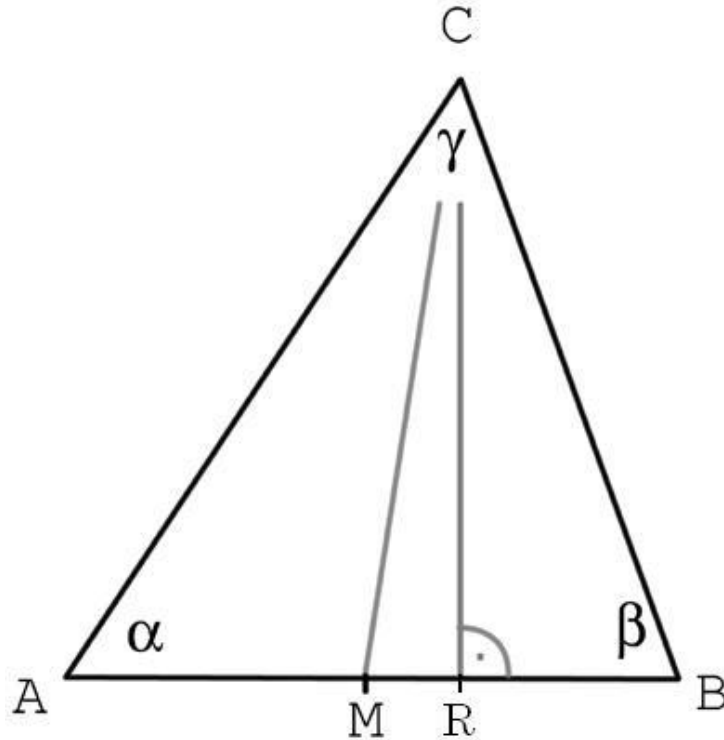
Оптички 3D системи за мерење такође користе овај принцип да би одредили просторне димензије и геометрију посматраног објекта.



Слика 2.1. Примена методе триангулације за одређивање позиције брода

На сликама 2.1. и 2.2. приказана су решења једног примера одређивања положаја и наведене математичке функције из описаног принципа триангулације за одређивање позиције брода у односу на обалу.

На слици 2.1. l представља растојање између две познате референтне тачке, а α , β и γ су углови између страна троугла који је формиран од три тачке, практично α и β су углови између обале и брода у две различите референтне тачке. Наравно да је непозната величина удаљеност d брода од обале, коју можемо да одредимо, ако су познате горе поменуте величине, применом синуса угла. Поред удаљености, могу да се одреде и тачне координате тачке у којој се налази брод, што је нама од изузетне важности.



Слика 2.2. Метода триангулације

Где су: А, В – референтне тачке

М, R – контролне, мерне тачке, С – тражена тачка у којој се налази брод

2.2. Праћење објеката помоћу ГПС система

Према UNOOSA (*United Nations Office for Outer Space Affairs*), досада је, у историји, у свемир лансирано 8 378 објеката. Тренутно су 4 994 још у орбити – мада је њих 7 у орбити око небеских тела која нису Земља – што значи да постоји 4 987 сателита који се свакодневно крећу изнад наших глава. [7]

Ти сателити сачињавају функционалну мрежу ГПС сателита. Иницијално, у почетку, била су потребна 24 сателита да би систем био постављен. Они, наравно, пружају и основне информације о времену, статусу мреже и орбиталним позицијама.

Сваки од сателита непрестано емитује сигнале у којима су смештене три основне врсте информација:

- Алманах

Скуп података који указују ГПС пријемнику где на небу сваки од сателита треба да буде током 24 часа. Сви сателити емитују тај сигнал, тако да ГПС пријемник има информацију о свим орбитама у систему ако може да лоцира, тј. ухвати само један сателит.

- Псеудорандом код

Представља тзв. „име и презиме” сателита, односно ознаку сателита који шаље сигнал и може да се прочита на ГПС пријемнику и величине је 1023 бита, емитован сваке милисекунде.

- Ефемерис

Ефемерис подаци садрже:

- информације о статусу сателита („healthy” или „unhealthy”) што значи да ли може, у датом тренутку, да се користи за навигацију или не може,
- датум и врло прецизно време слања сигнала који представља најбитнији податак за одређивање позиције.

На сваком сателиту налазе се до четири цезијум и рубидијум атомска часовника, врло прецизна и скупа, који се периодично коригују и подешавају са земаљске станице у Колораду.

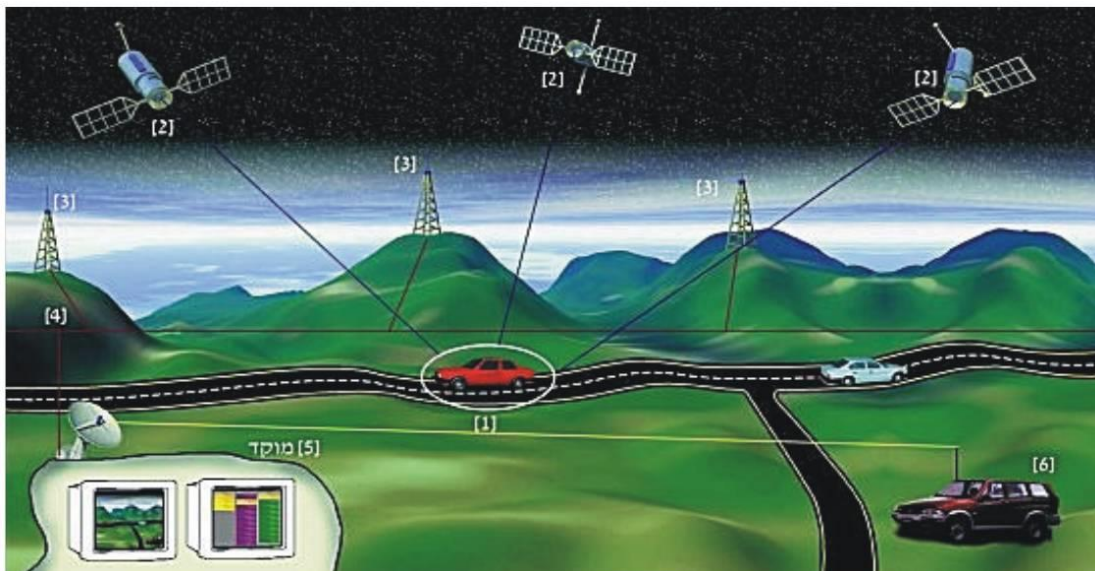
Иначе, ГПС пријемник је уређај који прорачунава своју позицију на основу мерења удаљености од три или више ГПС сателита. Сваки сателит емитује микроталасну секвенцу радио сигнала која је позната пријемнику. Док пријемник прима тај сигнал, у стању је да одреди време које протекне од емитовања радио сигнала са сателита до пријема на својој позицији. Удаљеност пријемника од сателита прорачунава се на основу тог времена, будући да радио сигнал путује познатом брзином. Сигнал такође носи информацију о тренутном положају сателита са ког се емитује. Ако се зна удаљеност пријемника од сателита и позиција сателита, познато је да се пријемник налази негде на сфери одређене димензије у

чијем је центру сателит као на слици 2.4. Пошто су познате позиције три сателита и удаљеност пријемника од сваког од њих, поступком трилатерације тј. триангулације може се одредити позиција пријемника. Трилатерација се базира на чињеници да се три сфере секу у највише две тачке (од којих једна обично нема смисла).

Овај принцип рада подразумева да су часовници на свим сателитима као и на пријемнику потпуно синхронизовани да би се временски размак између познате секвенце сигнала са сателита и на пријемнику тачно измерио. На сателитима се налазе атомски часовници. Међутим, пријемник има далеко мање прецизан часовник, кристални осцилатор. Недостатак прецизности решава се увођењем мерења удаљености од још једног сателита. Сат на пријемнику уводи исту временску и просторну грешку када прорачунава удаљеност од сва четири сателита. Може се израчунати за колико треба кориговати сат да би се четири сфере секле у једној истој тачки. На тај начин се сат на пријемнику непрекидно коригује. Једна од примена ГПС-а је веома прецизно рачунање времена и синхронизација часовника. [8]

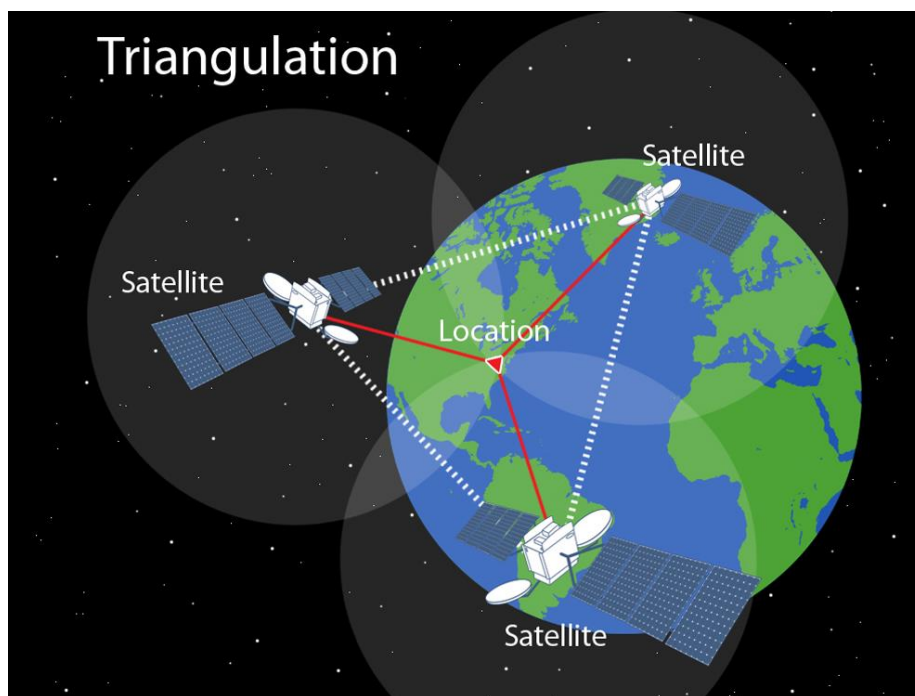
Када ГПС пријемник добије сигнал, он упоређује разлику између момента слања сигнала са сателита и тренутног времена. На основу те разлике, која је у ствари време путовања сигнала од сателита до пријемника, одређује се удаљеност сателита. Обрадом сигнала са најмање три сателита, методом триангулације могуће је прецизно утврдити позицију пријемника на Земљиној кугли. Прецизно, три сателита су довољна за одређивање дводимензионалних координата, тј. географске ширине и дужине. Да би се одредила и трећа димензија у простору, надморска висина на којој се објекат налази, потребни су нам сигнали са најмање четири сателита, у сваком тренутку одређивања позиције објеката у простору. Прецизност одређивања положаја објеката у простору је велика, чак и до неколико центиметара. [9]

Када су сви временски добијени подаци познати, могу да се израчунају и брзина кретања објеката, пређени пут, брзина пењања и спуштања, време до одређеног циља који имају вишенаменско значење у многобројним областима јавне, комерцијалне, цивилне и војно-полицијске примене.



Слика 2.3. Одређивање ГПС позиције објекта методом триангулације

На сликама 2.3. и 2.4. приказане су методе одређивања позиције објеката у простору помоћу сателитских сигнала из ГПС система и земаљских станица. Јасно се види да се у пресеку три сфере које формирају сателити у процесу триангулације налази тражени објекат на Земљи.



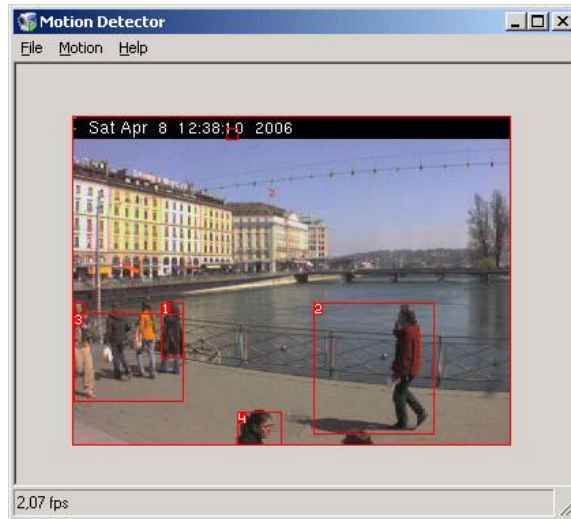
Слика 2.4. Метода ГПС триангулације – тражени објекат је у пресеку сфера

2.3. Праћење објеката помоћу камера

У јавности је у данашње време најпознатија употреба система заснованих на видео-камерама у детекцији и праћењу људи и предмета, сумњивих ствари и догађаја као и бележење свих путања кретања посматраног субјекта над којим се врши надзор и подручја надзора. Те примене су најчешће у полицији. Такође, услед повећаног ризика од глобалних пандемија, системи видео-камера се користе и у даљинском мерењу температуре људи.

Како је приказано на слици 2.5. и слици 2.6, могућност технички задовољавајућег праћења покретних објеката коришћењем јавно доступних алгоритама за препознавање облика, детекцију положаја и покрета реално је остварива у комерцијалним системима и са мањим финансијским улагањима и инвестицијама[10].

Како се на слици 2.5. јасно види, црвеним правоугаоницима око детектованих покретних објеката обележена је детекција покрета на видео снимку, прецизније лагано покретање људи, док је на слици 2.6. лако уочити детекцију положаја и кретања возила на путу са видео-записа помоћу софтверске апликације. На први поглед јасно је да су, као што је на сликама приказано, главне мане ових система мала и недовољна брзина детекција положаја, спора обрада видео-записа, недовољна прецизност прорачуна, пре свега мали број слика у секунди што је техничка карактеристика ове видео-опреме. Поменуте мане подстичу пре свега цео алгоритам за праћење покретних објеката, чије је унапређење новим приступом и оптимизацијом, кроз брзину и прецизност праћења покретних објеката у простору, извршио аутор ове дисертације у свом новом напредном систему за праћење у спорту.



Слика 2.5. Једноставна софтверска апликација за праћење



Слика 2.6. Детекција и праћење кретања возила на путу

На сликама 2.5. и 2.6. приказана је, при оптималним дневним условима, примена алгоритама за препознавање облика, детекцију положаја и покрета објеката, са врло ниском оптимизацијом видео-снимака, ниске брзине и прецизности детекције положаја у простору. Иначе, на поменутих сликама се види да је број слика у секунди само 2.07 fps што је изузетно ниско, апсолутно недовољно за прецизније прорачуне брзих покретних објеката, и недовољно прецизни детектовани облици појединих објеката праћења.

2.4. Анализа и преглед стања постојећих система

Први систем, који је уједно био основа за пројектовање и изградњу напредног, модерног система који је и тема овог рада, описан је у научном раду [11]. Тај систем је обухватао и применио тадашње методе и пре свега софтвере са библиотекама за детекцију објеката и њихове позиције у простору.

Пре пет година доступне софтверске апликације за препознавање облика и детекцију положаја објеката на видео-камерама биле су значајно различите у односу на данашње, са лошијим карактеристикама и лошијим перформансама у раду. Такође, аутор је тада применио свој, различит алгоритам, који је у међувремену промењен и унапређен.

Технологија која је описана у овој дисертацији примењена је у многим областима, са великом могућношћу проширења примене. Многобројне сфере интересовања дужи низ година користе сличне системе у ланцу доношења судијских и аутоматских производних одлука прорачуном неопходних и тешко израчунљивих информација. Полако узимају веома важну улогу у одлучивању. Битно је навести поједине од најважнијих примена по областима рада:

- Системи примењени у спорту,
- Системи примењени у аутомобилској индустрији,
- Системи примењени у полицијске и војне сврхе.

Што се тиче полицијске и војне употребе, један од најпознатијих система за детекцију положаја у простору уз помоћ ГПС система и видео-камера је *Northrop Grumman E-2D Advanced Hawkeye (AHE)*, амерички ваздухоплов за све временске услове намењен за рано јављање и узбуњивање, приказан на слици 2.7. Развијен је у касним 1950. и раним 1960. годинама у Сједињеним Америчким Државама. Последња, четврта главна модерна верзија, носи ознаку E-2D, и датира из 2010. године. [12]

Иначе, почев од 60-их година прошлог века уводи се нова технологија и техника ваздушног осматрања која је данас заступљена у многим државама у свету.



Слика 2.7. Изглед E-2D Advanced Hawkeye (AHE) летелице

Софистицирани систем радара, камера и разних сензора даљински открива људе, техничка средства и механизацију и одређује њихову позицију у простору. У исто време, прецизно се одређује и прорачунава модел терена у три димензије. Како је систем функционалан на врло великим висинама, могућ је скоро неприметан оперативни рад и са поприличних удаљености. Такође, постоји већи број ових летелица у употреби, више од педесет, стога су резултати прорачуна још прецизнији.

Како је данас веома распрострањено и популарно коришћење дрона и других беспилотних летелица, тако се ови системи уграђују и користе на летелицама опште и широке употребе, каква је на пример *Ehang GHOSTDRONE 2.0 Aerial Plus (Android Version)* беспилотна летелица која је у форми тзв. дрона, малог хеликоптера који је опремљен 4КHD спортским камерама са техничким карактеристикама 1080p@120fps (пиксела и слика у секунди), приказана на слици 2.8. Летелицом се управља даљинским командама преко мобилног телефона или другог смартфона. Апликације на телефону садрже прецизну мапу терена и показују тачке које летелица прелеће [13]. Наравно, иако је

главна намена даљински надзор са висине, може да се опреми брзим спортским камерама за одређивање положаја објеката у простору применом триангулације.



Слика 2.8. Надзорна мини-летелица опремљена спортском камером

Даљински систем за управљање и надзор видео-подручја приказан је на слици 2.9. на којој се јасно види да је могуће поуздано наводити летелицу да надзире и задато подручје забавних дешавања, нпр. спортски терен, где се употребом више летелица долази до прецизнијих прорачуна употребљивих у детекцији положаја објеката у простору. Сlike са видео-камера могу да се приказују на Андроид уређају, као и резултати прорачуна. Графичка симулација путање може да се прикаже на екрану већег броја мобилних телефона симултано.



Слика 2.9. Андроид софтвер за даљинско управљање летелицом

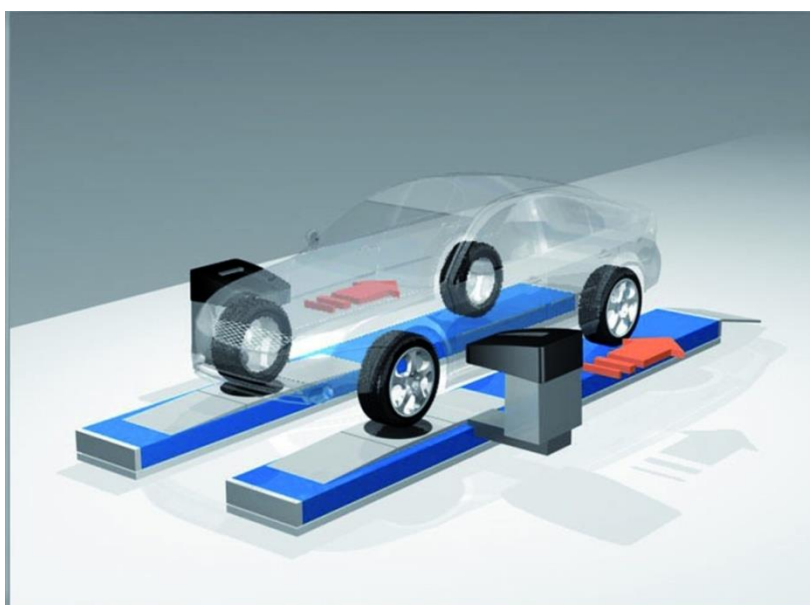
Данас се, са великим успехом, користе системи у аутомобилској индустрији, пре свега компјутеризовани системи за регулажу трапа и подешавање усмерености тачкова код аутомобила и других возила. Ови системи засновани су на принципу триангулације, отуд је често и наведен тај технички принцип у називу. У систему углавном постоје две камере. Унапред је позната њихова удаљеност и углови под којима се налазе па је могуће применити принцип триангулације и одређене математичке прорачуне и затим израчунати углове и удаљености у целом систему. Сваки сензор има референтни систем који се састоји од две CCD камере. Употребљавају се стерео камера да би се одредила позиција осе ротације тачкова. На следећим сликама приказани су неки примери практично примењених компјутерских система [14]:



Слика 2.10. Систем за 3D триангулацију и регулажу трапа аутомобила



Слика 2.11. Сензори и референтне тачке



Слика 2.12. Надзорне камере у систему за 3D триангулацију

Ова технологија мерења заснована је на техници за познату козметичку хирургију лица, назива се оптичка триангулација и постиже се помоћу квалитетних камера и модерног софтвера за обраду слика. [3]



Слика 2.13. Компјутерски систем за регулажу трапа са четири камере високе резолуције



Слика 2.14. Camere високе резолуције у процесу мерења

Наведени су системи са практичном применом у, пре свега, процесној индустрији. Општепозната популаризација технологије која је тема овог рада је у системима примењеним у спорту, нарочито у тенису и фудбалу. Приказане су људске активности у

разним ситуацијама, на потпуно нови начин симулацијом у атрактивном 3D компјутерском графичком приказу.

Систем који је досад привукао највише пажње и добио највећу популарност је познати *Hawk-Eye* систем, заступљен у скоро свакој земљи света. У исто време, тако је названа и прва технологија коришћена за детекцију положаја објеката у простору, пре свега у спорту. Ради се о комплексном компјутерском систему који се официјелно користи у доношењу судијских одлука у спортовима као што су: тенис, фудбал, крикет, галски фудбал, боћање, кошарка. Тај систем графичком симулацијом приказује визуелно праћење путање покретног објекта и показује прорачунати запис статистички највероватније путање у форми покретне слике, тј. анимације. [15]

Сагледавањем развоја оваквих система кроз историју долази се до неких веома интересантних чињеница. Пре свега важи:

Развитак технологије -> Рационална примена теорије у пракси.

Када је степен развијености, пре свега рачунарске опреме и мрежне опреме, заједно са развитком видео-камера, достигао квалитативни ниво рационалног прорачунавања непознатих података у систему, било је могуће применити скоро све теоретске поставке праћења покретних објеката у простору и надзора са прикупљањем сигнала. Наравно, рачунарске и софтверске апликације и технике пратиле су убрзани развој техничке подлоге.

Hawk-Eye систем развио је у Великој Британији др Пол Хокинс (*Dr Paul Hawkins*) почетком 21. века, тачније 2001. године. Почетком 1999. године, почиње истраживање у британској компанији *Roke Manor Research Ltd*, основаној 1956.године, која је већ тада имала више од 30 година стручног искуства у пољима обраде слике. Пројекат је водио др Пол Хокинс а финансирала га је телевизијска корпорација.[16]

Актуелни власник *Hawk-Eye* система је компанија *Hawk-Eye Innovations Ltd*. из Велике Британије која је од марта 2011. године део јапанске корпорације Sony.

По први пут систем је имплементиран за праћење крикет мечева и потребе телевизијског преноса. У систему се налази шест, а могуће је и седам видео-камера високих перформанси које се обично постављају испод самог крова стадиона или терена за игру,

чија је намена да прате лопту из различитих углова, а то је уједно и основа теорије за детекцију положаја и праћење покретних објеката. Резултат рада видео-камера је видео-запис, који се добија прикупљањем сигнала са тих шест-седам камера, који се уз помоћ принципа триангулације, математичких прорачуна и комбиновањем свих записа, претвара симулацијом у тродимензионални приказ путање лопте у простору.

Наравно да овакви системи, као и сви технички системи, нису безгрешни. Обично, величина грешке која се толерише и која је често добијена у практичним тестирањима је око 5 милиметара. И поред тога је усвојено да су резултати које производе овакви системи - непристрасно мишљење, тзв. друго, објективно мишљење у, као што је напоменуто, скоро свим спортовима. Наравно, прво мишљење (и процена) је људско.

У процесу тестирања, у тенису, фудбалу и крикету, надлежна тела су прихватила чињеницу да овај технолошки вид одлучивања у спорним ситуацијама када су велике брзине кретања објеката и отежани услови праћења, нпр. смањена видљивост, често даје сумњиве и нејасне одлуке.

Почев од 2006. године овакви системи се користе у тенису а од 2009. године и у крикету. У фудбал су ушли 2014. године.

Пример који је дат на слици 2.15. представља коришћење *Hawk-Eye* система са камерама на тениском турниру *Кремлин куп* 20. октобра 2012. године у Москви, где се не виде остатак система, рачунари и мрежна опрема.



Слика 2.15. Систем видео-камера на тениском турниру у Москви



Слика 2.16. Hawk-Eye систем на тениском турниру

Теоретска основа *Hawk-Eye* система (слика 2.16.) јесте принцип триангулације помоћу визуелних слика и временских података прикупљених са великог броја брзих видео-камера које се постављају на различитим, унапред прописаним местима и угловима око посматраног терена. Тако да, ако причамо о тенису, постоји десет постављених камера. У систему се брзо обрађују сигнали са видео-камера. Предефинисани модел подручја за надзор са прецизним димензијама задат је у систему, пре почетка прикупљања сигнала, и укључује важне податке о основним правилима посматране игре.

Прецизно, на свакој појединачној слици са видео-камере, систем идентификује групу пиксела која одговара слици и изгледу лопте. Потом, употребом модерне рачунарске опреме, пре свега брзих персоналних рачунара, прорачунава се 3D позиција лопте на свакој појединачној слици уз истовремено поређење слика са две физички одвојене видео-камере у истом временском тренутку.

Тако је могуће да се, у великом низу слика и математичких прорачуна, направи прецизан запис о тачној путањи лопте у простору. Такође, важно је напоменути да систем може да предвиди будућу путању лопте помоћу математичких апроксимација и статистичких прорачуна. На крају се прорачунава, на основу записаних података у базама података предефинисаног подручја игре и систему видео-камера, тачно место где лопта додирује посматрани терен, на висини 0. То је уједно и коначни експертски циљ свих прорачуна.

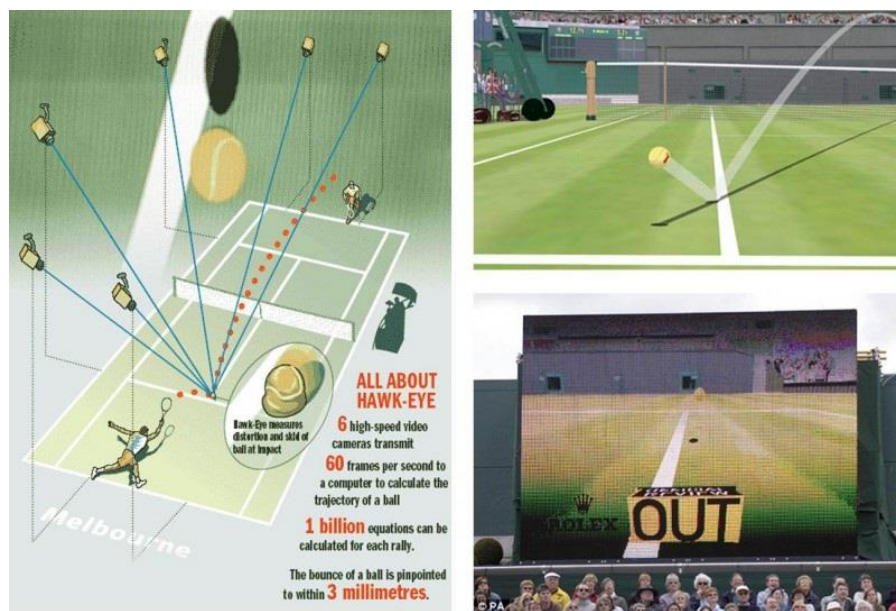
Симулацијом систем генерише графичку 3D анимацију да би на атрактиван, визуелан начин информације из прорачуна могле да се пренесу на играче, судије, публику, телевизијске гледаоце и тренере у скоро реалном времену. Велики број пропратних анализа и статистичких прегледа и играча и саме игре је у исто време могуће извршити на основу истих прорачунатих података.



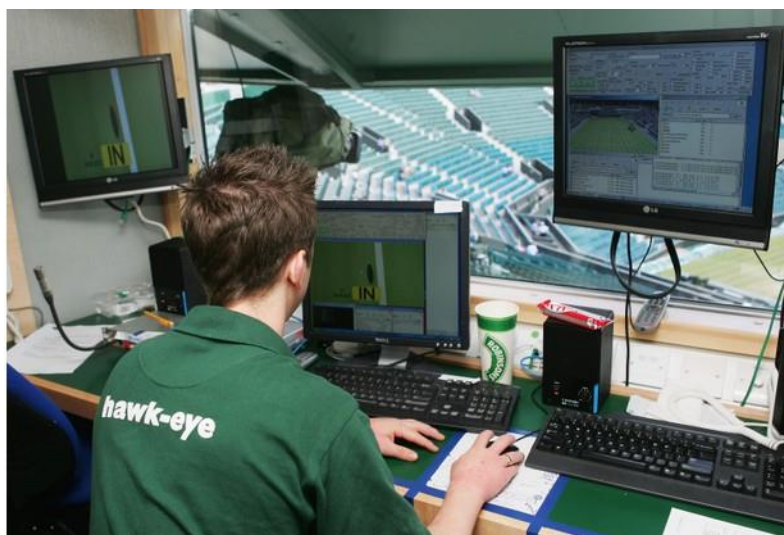
Слика 2.17. Камере око фудбалског терена као део Hawk-Eye система

Овај систем за праћење лопте са апликацијама за видео-емитовање у реалном времену примењен је у више од двадесет водећих спортова. На слици 2.17. приказан је систем за доношење судијских одлука у фудбалу. Власник овог система је квалификован за давање лиценци за технологије гол-линије (goal-line technology) фудбалским асоцијацијама широм света.

На следећим сликама, 2.18. и 2.19, приказане су реалне ситуације из описаног **Hawk-Eye** система.



Слика 2.18. Опис и изглед **Hawk-Eye** система у практичној употреби



Слика 2.19. Део рачунарског система **Hawk-Eye**, оператер и 2 од 10 рачунара

Велики задатак који је стајао пред аутором дисертације био је да постоје исти или слични технички захтеви и предуслови за техничку опрему која се користи у систему и има прецизне техничке карактеристике у сваком систему за детекцију положаја и праћење објеката у простору. Исто важи и за описани **Hawk-Eye** систем где се детектују објекти са

великим брзинама од преко 200 км/час. Дата је следећа опрема која мора да испуни одређене захтеве и услове:

- Видео-камере
- Рачунари са хардверским компонентама
- Мрежна опрема.

Према јавно доступним подацима из 2013. и 2014. године, уз незаобилазни „вео тајни“, постојећи системи за праћење објеката су садржали видео-камере са следећим обавезним техничким карактеристикама[17]:

- Брзина од 500 слика у секунди (fps)
- Видео резолуција 1080 Px (пиксела, снимак видео-камере)
- Прикључак за рачунарску (Ethernet) мрежу
- Фиксиране
- Физички заштићене
- Веома брз видео-процесор на камери.

Мрежна опрема морала је имати следећу техничку карактеристику:

- Брзина активне мрежне опреме (свичеви, рутери) минимум 1 Gbit у секунди.

За рачунаре су, према интернет форумима, важили следећи основни технички услови:

- Брзина процесора минимум 2 GHz (модерни 64-битни у гигахерцима)
- Мрежне картице са брзином минимум 1 Gbit у секунди
- Графичке картице са брзим графичким акцелераторима и GDDR5 меморијом од минимум 2 GB.

Почетни системи у области праћења покретних објеката у простору користили су видео-камере у потпуном колор режиму, који има видео-сигнал и видео-запис у боји. То је подразумевало изузетно велике количине података које је било неопходно брзо прикупити, затим путем мреже пренети до рачунара, извршити математичке прорачуне и детектовати положај објекта у простору. На крају, симулацијом се визуелно приказују резултати у захтевном 3D графичком режиму фотореалистичном анимацијом. Зато је од највећег значаја била:

- Брзина система и његових подсистема.

Као што је поменуто у поглављу 2.3, прегледом и анализом познатих система за праћење објеката у простору, помоћу система видео камера и система за прикупљање сигнала, утврђено је да постоје прилично сличне лоше и слабе стране. Таква је ситуација и код поменутих технологија, а нарочито код описаног *Hawk-Eye* система. Тако је и настала идеја аутора за пројектовање и израду напредног система за праћење који је тема ове дисертације.

Најизраженије лоше и слабе стране постојећих примењених решења у свету су:

- Висока цена целог система, неприступачна већини корисника, турнира и наменских институција;
- Могућност милимитарских грешака у 3D приказу;
- Недовољна прецизност 3D симулације са графичком анимацијом;
- Неефикасан алгоритам за праћење покретних објеката;
- Недовољна вера посматрача у прецизност система;
- Неквалитетан 3D приказ са графиком и анимацијом.

Усвојена прецизност описаног система је око 3.6 милиметара. Како она, тада када је први *Hawk-Eye* систем био пројектован, није могла да се побољша ни теоретски, створена је могућност за повећање тачности и унапређење система. Новим приступом, употребом

различитих алгоритама за детекцију објеката, пројектовањем новог алгорита за праћење кретања у простору, долазило се, потенцијално, до бољих резултата.

Пројектовање и израда система који је тема ове дисертације, дошло је после иницијалног, првог система за који је било потребно неколико година рада. Иначе, пример иницијалних трошкова је да само једна видео-камера, са добрим техничким карактеристикама и која задовољава постављене технолошке предуслове за праћење објеката у простору, са мегапикселном резолуцијом, брзим мрежним прикључком за пренос података и брзим процесором, одговарајућом оптиком, од познатог произвођача из Немачке, у директним разговорима, тада је могла да се испоручи само унапред и износила је неколико хиљада евра. Рачуница је једноставна: било је потребно десетине хиљада евра за систем видео-камера одговарајућих техничких карактеристика, уз које је неопходно набавити велики број квалитетних рачунара и мрежних уређаја, са месецима чекања на испоруку опреме.

Како је уведена технологија била нова на тржишту, недовољно распрострањена, са минимумом јавно доступних техничких информација и спецификација, поузданост и предност модерне технологије није одмах уочена и прихваћена „оберучке” од стране гледалаца и опште јавности. Пре првог система аутора, у употреби је таква технологија била само годину и по дана. Кратко речено, велики део гледалаца и спортске јавности је био скептичан у погледу прецизности коју даје систем видео-камера, софтвери и рачунарски систем са технологијама препознавања облика и детекцији кретања објеката у простору. Томе доприносе и тада недовољно прецизни системи за идентификацију и препознавање људског лица, отисака прстију и облика људских очију са зеницама, брзог кретања. Технологија система за праћење објеката има исту, велики број рачунар – видео-камера – софтвер, основу као поменути идентификациони системи.

Аутор ове дисертације, као посебну љубав и хоби, има 3D OpenGL графику и анимацију. Како посебан део код постојећих решења представља систем за 3D приказ резултата прорачуна путање, са анимацијом и графиком, логично је да аутор посебну пажњу усмери на многобројне недостатке у постојећим графичким системима. Као што се јасно види на слици 2.20, узетој са HD TV снимка високе резолуције, софтверске апликације нису

довољно иновативно урађене, а до 2018. године визуелно очигледне мане су, на основу TV видео-снимака и преноса уживо, следеће:

- Недовољна прецизност важних графичких граничних подручја за игру
- Неквалитетно текстурно мапирање (OpenGL)
- Недовољно квалитетно урађене текстуре терена за игру.

Недовољна прецизност линија терена, графичка подручја која су на граници, доводе до могућих милиметарских грешака приликом приказа судијских одлука. Иначе су линије које означавају подручје игре, у свим спортовима, најважнија подручја која се овим системима надзиру у простору. Симулација резултата прорачуна путем визуелне 3D графичке презентације потенцијално приказује публици и стручној јавности нетачне резултате судијског одлучивања јер су могуће грешке у детекцији положаја и кретања објеката у простору иако су сви математички прорачуни тачни. Другим речима – графичка симулација погрешно приказује тачне резултате. Лопта у спорту, на пример, која није била у ауту, тј. није се налазила ван линија у посматраном, предефинисаном подручју у тренутку самог додира са тереном, као што је описано код **Hawk-Eye** система, 3D анимацијом се графички погрешно репродукује, као да је био аут, тј. ван посматране линије у терену.



Слика 2.20. Лоша 3D анимација и графика код постојећег система

Како је приказано на слици 2.20, јасно се виде недостаци у графичком систему за 3D приказ резултата прорачуна путање објеката у простору код старијег *Hawk-Eye* система, из 2011. године, који је већ тада био у употреби неколико година. Јасно се уочава нејасна и потенцијално нетачна путања лопте или било ког другог посматраног објекта у подручју надзора. Најјасније се види нетачна 3D сенка која се рендерује у реалном времену и тзв. *flickering*, тј. треперење у пределу мреже као и текстуре мале резолуције и квалитета, лоше мапирање текстурама у OpenGL-у и посебно недовољно јасна гранична подручја, линија на тениском терену у простору који се надзире овим системом. Тако је у скоро сваком коришћењу система у доношењу судијских одлука додатно било могуће да дође до грешке у одлукама.

Све видео-камере које се користе у систему имају дводимензионалну слику, а као што је приказано на сликама 2.5. и 2.6, постоје реални технички недостаци у детекцији положаја и препознавању облика на видео-слици. Очигледне мане су недовољно брзо детектовање објекта на дводимензионалној слици са видео-камере, недовољно брз прорачун позиција у путањи кретања покретних објеката, непрецизна рачуница путање и сам облик објеката, спора обрада видео-слика, мала прецизност, веома мали број слика у секунди [10]. На поменуте мане утичу директно математички алгоритми за детекцију покрета заједно са библиотекама за обраду видео слика и записа.

Постојао је велики простор за унапређење алгоритма за праћење у простору као и програмског окружења за математичке алгоритме са библиотекама за обраду видео-сигнала што доводи и до повећања детекције положаја објеката. То су биле аутору овог рада смернице за развој система.

Основа за пројектовање и изградњу напредног система за праћење покретних објеката у спорту, као што је поменуто, био је ауторов први систем изграђен применом тадашњих технолошких метода.

У скорије време, дошло је до значајних промена како у власничком тако и у организационом и техничком смислу у вези са поменути *Hawk-Eye* системом, посебно од тренутка аквизиције енглеске компаније од стране јапанске корпорације уско повезане са

видео и филмском индустријом са гранама у развоју популарних компјутерских игара и опреме [18].

2.5. Прецизност постојећих система

Ако се постави једноставно питање: Да ли су постојећи системи непогрешиви?, одговор на ово питање је прецизан: – Не!

На основу бројних јавно објављених чланака, стручних дебата, наменских студија и изјава бројних актера, пре свега у свету тениса, фудбала и крикета, аутор овог рада са сигурношћу може да тврди да сви постојећи системи у свету имају одређену, прилично велику маргину грешке и потенцијално доношење погрешне електронске судијске одлуке [19].

Како аутор, пре свега, познаје процес функционисања ове технологије до најситнијих детаља, техничког приступа и процедура откривања и праћења покретних објеката у простору, што ће у наредним поглављима бити детаљно објашњено, јасно је да потенцијално и често долази до грешки у детекцији, пре свега позиције објеката и графичке симулације путања њиховог кретања.

Можда ове тврдње најбоље демонстрира јавни, записани коментар једног учесника форума на једној од официјелних интернет страница компаније прозвођача и власника *Hawk-Eye* система [20]:

„Али ниједно од понављања *Hawk-Eye*-а не показује такав ниво контакта са тереном. Да ли је ово карактеристика дизајна или систем није способан да покаже стварни ниво контакта са тереном? Десет центиметара је прилична удаљеност и варираће у зависности од врсте тениског ударца и врсте површине за играње. Дефиниција у Википедији такође наводи пројектоване (и предвиђене), а нетачне нивое контакта.”

Коментар је дат на прецизан видео-снимак функционисања и објашњења начина функционисања поменутог система за детекцију позиције и праћење покретних објеката и

које су честе ситуације у тешком откривању тачног контакта и позиције посматраног објекта са подлогом методом пројекције и предвиђања, а не потпуно на основу слика са видео-записа.

Како је јасно наведено у чланку из 2013. године у реномираном часопису [21], поменути систем није непогрешив као што посматрачи спортских догађаја мисле. Питање је колико је стварно тачан *Hawk-Eye* систем. Још 2008. године објављен је научни рад под називом „Јавно схватање науке” [22] који наводи да начин на који поменути систем презентује своје прорачуне и анализе у спорту лако може да наведе људе да **погрешно** донесу закључак да су графички, анимациони прикази резултата стварна слика оног што се заправо десило. Тај систем представља одличну прилику за дискусију о несигурности, интервалима поузданости процеса детекције и математичко-статистичког визуелног усхићења.

Напомиње се такође да јавно схватање науке, иако прилази стручном знању само у ретким приликама, може да се унапреди у погледу процеса у вези са науком и технологијом. Како јавност разуме и прихвата **грешке у мерењу**, и интервал поверења може да се побољша ако би електронски системи за судијске одлуке представили резултате својих прорачуна другачије.

Постоји велика шанса и опасност да овај систем, на начин како се користи, ненамерно наведе технички недовољно информисане гледаоце да прецене способност техничких уређаја да реше неспоразуме међу људима јер грешке у мерењу нису јавно истакнуте.

Тако се, на пример, виртуелне 3D симулације и фотореалистичне анимације могу, као реконструкције догађаја, лако употребити да покажу „шта се тачно догодило”. И то управо под наводницима.

У поменутом научном раду [22] наведено је и неколико реалних документованих примера спорних ситуација употребе овог система и резултата прорачуна, са потенцијалним грешкама, на међународним тениским турнирима. Неколико пута се напомиње да начин на који се данас користе и презентују резултати овог система може да наведе јавност на погрешан закључак о степену сигурности научних мерења. И то је одавно примећено, још

од почетка примене у спорту. Аутори тог рада сматрају да би неразумевање могућности и поузданости овог система могло да се смањи укључивањем информација о потенцијалној грешци мерења и рачунања који се презентују графички.

Људи и технички уређаји праве две врсте грешака:

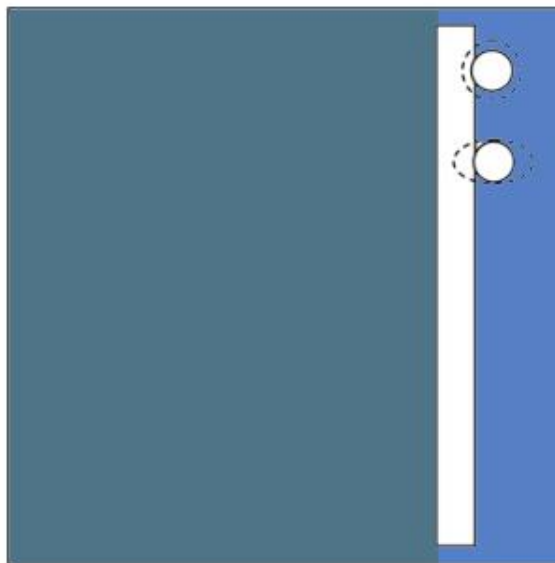
- Систематске грешке,
- Случајне грешке.

Прве су грешке које се понављају и имају сличан ефекат сваки пут. Узроци таквих грешака често се могу технички разумети и њихов негативан утицај на прорачуне може се предвидети и компензовати.

Друга врста грешака не може се предвидети осим што се може проценити њихова типична величина и математички, употребом вероватноће и статистике, облик случајне расподеле. Оне не могу бити компензоване, али могу се узети у обзир при додељивању степена нивоа поверења процесу мерења и детекције.

Зато се предлаже увођење принципа за аутоматско одлучивање који одређује како би требало користити рачунаре, софтвере и електронске системе за одлучивање у спорту са обавезно укљученим поменути врстама грешака.

У поменутој математичкој дисциплини, вероватноћи и статистици, тачније дескриптивној статистици, дисперзије грешака обично постоје као стандардне девијације, тј. одступања. Пратећи те принципе, може се претпоставити да у 5% предвиђања путање и резултата *Hawk-Eye* система, а то је 1 у сваких 20, грешка у прорачуну би могла да буде већа од 9 милиметра, док у 1% грешка може да буде већа чак и од 11.7 милиметара.



Слика 2.21. Грешка при мерењу и детекцији

На слици 2.21. јасно се види да је несигурност детекције приказана испрекиданим линијама тако да потенцијални контакт лопте са тереном, тј. подлогом може да буде било где у оквиру испрекиданог круга. Горња, спорија лопта пада на терен од скоро 90° . Детекција трага може да буде са великом грешком у случају друге, доње лопте на слици због брзог кретања и грешке у правцу кретања. Грешка тада може да буде у оквиру испрекидане елипсе, произвољног, врло зависног облика. Такође, питање је колика је граница грешке у случају брзог кретања лоптице.

У директним контактима са стручним особама *Hawk-Eye* тима и *ITF-a* (Интернационална тениска федерација) добијене су прилично нејасне и непотпуне толерисане границе грешке и процентуални прорачуни могућности појаве грешака у мерењу и прорачуну, наведене у научном раду [22].

У низу јавно доступних чланака на интернету изнесене су бројне недоумице и контроверзе око тачности и поузданости *Hawk-Eye* система, са бројним грешкама у мерењу, детекцији и 3D графичком приказивању резултата прорачуна. Неке процене кажу да је тај систем тачан у само 60% случајева мерења и употребе у тенису[23][24][25].

Чак и сама компанија *Hawk-Eye* у свом техничком реферату [26] објашњава и прецизно наводи следеће детаље са освртом на грешке приликом детекције позиције објеката у простору:

„Како је показано 2005. године за време ИТФ тестирања, *Hawk-Eye* је био први систем који је прошао низ строгих тестирања и услова, значи да је био први електронски систем који је званично акредитован. Практични резултати показали су да је систем имао средњу грешку од 3,6 мм у поређењу са брзом камером која се налази на површини за игру.”

Тврди се даље да, са напретком технологије и софтвера и њиховом применом, заједно са деценијом искуства на великим спортским догађајима, њихова технологија за електронско судијско одлучивање има средњу грешку од 2,6 мм.

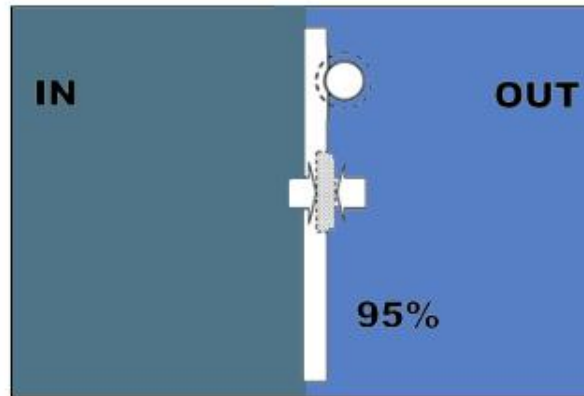
Наводе се и фактори, који у условима када су терени напољу, највише утичу на грешке у мерењима и прорачунима:

- Јака сунчева светлост у различито доба дана
- Ветар и подрхтавање видео-камера
- Сенке које покривају део терена или цео терен
- Вештачко осветљење (рефлектори)
- Мрак и облачно време.

У раду [22] се такође предлаже да треба објавити више информација о неизвесној поузданости и тачности мерења и прорачуна, пре свега телевизијској публици и гледаоцима, да би се искреније показале варијације у могућим истинским путањама лопте. Они предлажу, на пример, да се прикаже предвиђена локација контакта лопте са тереном и интервали поузданости који је окружују, како локацију тако и електронску судијску одлуку (ако је 95% то значи да постоји само 5% шансе за грешку, тј. да је лопта заиста пала изван овог већег подручја предвиђања).

Као закључак, аутор ове дисертације, без субјективног погледа, због потенцијално велике вероватноће грешака у праћењу покретних објеката у већ постојећим системима у

свету, може реално да се сложи са неопходношћу приказивања графичких резултата прорачуна и предвиђених путања **заједно** са нивоом поузданости, сигурности, тј. могуће грешке као што се види на слици 2.22. То би било сасвим коректно према јавности.



Слика 2.22. Назначени ниво поверења при електронском суђењу

Ово би не само тачније одражавало ограничења ове технологије већ би потенцијално могло подучити сложеним математичким концептима и принципима статистике и вероватноће велики број људи. И даље би *Hawk-Eye* могао да пружи одговор са „добра лопта” или „аут” на захтев судија у игри, али вероватноћа да је то тачан, прави одговор такође би била јасна свима, посебно гледаоцима телевизијског преноса и гледаоцима око терена док прате меч уживо, који и формирају јавно мишљење.

3. Алгоритми за детекцију покретних објеката

3.1. Опис проблема

У научној и стручној јавности често се наглашава да је детекција објеката основни проблем у рачунарској графици и обради слика.

Рачунарски вид ('+'+), графика са обрадом слика је интердисциплинарно поље које последњих година привлачи веома велику пажњу и добија екстензију и снагу, а централно место заузима примена у аутономним возилима. Још један саставни део области рачунарске графике је детекција објеката. Откривање разних предмета користи се у процени облика и локација особа или предмета, детекцији возила, надзору и слично. Разлика између алгоритама за детекцију објеката и алгоритама класификације је у томе што у алгоритмима за откривање покушавамо да нацртамо оквир око предмета који нас занима како бисмо га лоцирали на слици. Такође је могуће цртање не само једног ограничавајућег оквира у случају откривања предмета већ може бити много ограничавајућих, ивичних оквира који представљају различите објекте од интереса на видео-слици. Унапред се не зна колико је таквих објеката.

Под класификацијом слика подразумевамо додељивање ознаке класе слици, док локализација објеката укључује цртање оквира око једног или више објеката на слици. Детекција објеката је изазовнија и комплекснија, она комбинује ова два задатка, цртајући оквир око сваког објекта који нас занима на слици и додељује им ознаку класе. Сви ови проблеми се заједно називају препознавање објеката. У следећим поглављима биће описани модерни модели дубоког учења који су дизајнирани да препознају објекат на слици. Дубоко учење (енгл. *Deep Learning* – *DL*) релативно је нова област машинског учења са великом експанзијом последњих година.

Конволуционе неуронске мреже (енгл. *Convolutional Neural Networks – CNN*) засноване на регионима или R-CNN престављају низ техника за локализацију и препознавања објеката, дизајнираних да имају добре перформансе. „Гледаш само једном“, или YOLO (енгл. *You Only Look Once*) друга је група техника за препознавање објеката дизајнираних за велику брзину и употребу у реалном времену.

Конволуционе неуронске мреже у ствари представљају проширење модела вишеслојних неуронских мрежа додавањем нове врсте слоја, то јест додавањем математичке операције у заједничку једначину која представља неуронску мрежу. Оне данас репрезентују актуелну и веома атрактивну област у оквиру вештачке интелигенције.

Са аспекта конволуционих мрежа, најважнија је примена алгоритама за детектовање ивица објеката на сликама, помоћу којих се детектују разни објекти.

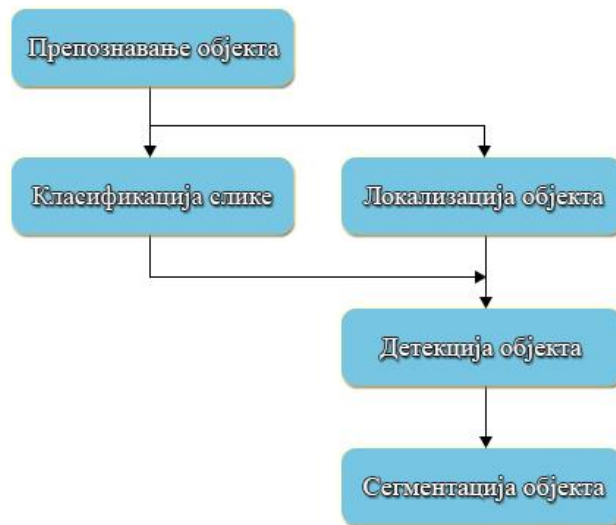
Препознавање објеката односи се на скуп повезаних задатака за идентификовање објеката на посматраним дигиталним фотографијама. Можемо разликовати три задатка рачунарског вида:

- **Класификација слике:** Предвиђање типа или класе објекта на слици.
 - Улаз: Слика са једним објектом, као што је фотографија.
 - Излаз: Ознака класе (нпр. један или више целих бројева који су мапирани у ознаке класе).
- **Локализација објеката:** Пронађите присуство објеката на слици и означите њихово место граничним оквиром.
 - Улаз: Слика са једним или више објеката, као што је фотографија.
 - Излаз: Један или више граничних оквира (нпр. дефинисани тачком, ширином и висином).
- **Детекција објеката:** Налажење присуства објеката с граничним оквиром и типовима или класама лоцираних објеката на слици.

- Улаз: Слика са једним или више објеката, као што је фотографија.
- Излаз: Једно или више граничних поља (нпр. дефинисани тачком, ширином и висином) и ознака класе за сваки гранични оквир.

Још једно проширење овог рашчлањивања задатака рачунарског вида и графике је сегментација објеката, која се назива и „сегментација инстанце објекта“ или „семантичка сегментација“, где се инстанце препознатих објеката означавају истицањем одређених пиксела објекта уместо грубог, нефлексибилног оквира за ограничавање.

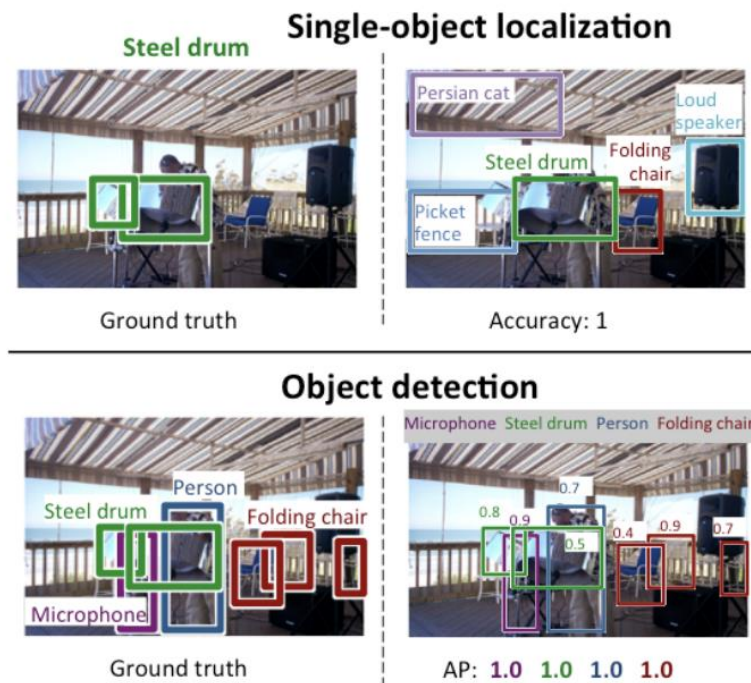
Из ове анализе можемо видети да се препознавање објеката односи на низ изазовних задатака рачунарског вида, као што се види на слици 3.1.



Слика 3.1. Скуп задатака у процесу препознавања објекта

У наставку следи пример поређења локализације појединачног објекта и детекције објеката, преузетог из [27]. Примећује се разлика у основним очекивањима (енгл. *Ground*

truth – референтна вредност) у сваком појединачном случају, као што је приказано на слици 3.2.



Слика 3.2. Поређење између локализације појединачног објекта и детекције објеката

Перформансе модела за класификацију слика процењују се користећи средњу грешку класификације на предвиђеним ознакама класе. Перформансе модела за локализацију појединачног објекта процењују се помоћу растојања између очекиваног и предвиђеног граничног оквира за очекивану класу. Перформансе модела за препознавање објеката процењују се помоћу прецизности и опозива у сваком од најбоље подударачућих граничних оквира за познате објекте на датој слици.

После ових детаља, јасан је проблем локализације и откривања објеката, па можемо да опишемо неке модерне, актуелне моделе дубоког учења са најбољим перформансама.

Први, основни корак у овом систему је проналажење и идентификовање објекта у простору. Често је потребна велика умешност да би идентификација била прецизна. Објекат посматрања у тест-систему је било који објекат у 3D простору, а одатле следи да препознајемо пикселе који припадају одређеном објекту који је предмет праћења, на свакој слици прикупљеној са сваке појединачне видео-камере. Обавезно користимо алгоритме за

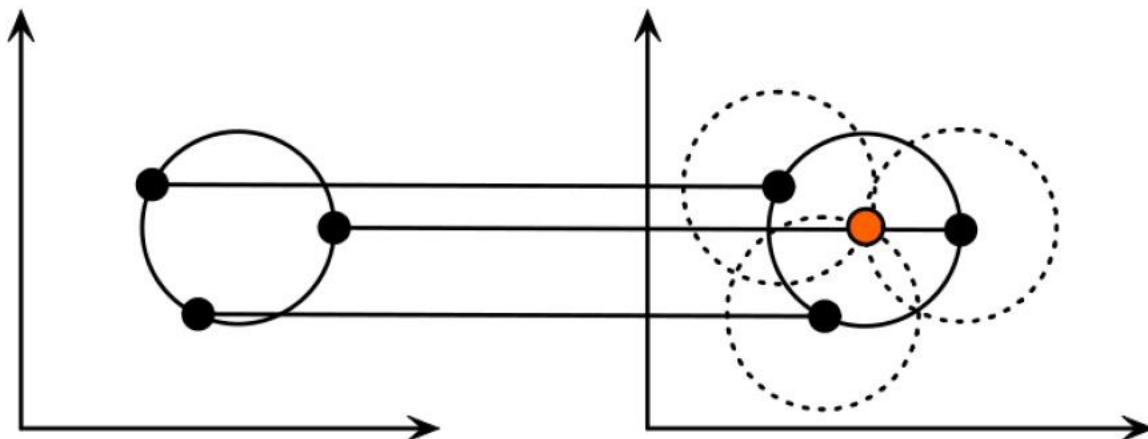
препознавање објеката који су реализовани у MS Visual C++ програмском језику, са комерцијалним, јавно доступним библиотекама, које је аутор овог рада математички оптимизовао и тестирао на многобројним примерима. Практично је испитано неколико различитих алгоритама и верзија.

Приликом овог процеса, информације које су од значаја су и улазне променљиве подсистема за детекцију објеката и позиције у простору, које су неопходне за прецизно одређивање положаја, редом:

- Величина посматраног објекта
- Облик
- Промена положаја у простору (праћење претходне позиције)

3.2. Алгоритам Circle Hough Transform

Како у првим тестирањама, пре десетак година, тако и у напредном систему, основни алгоритам који се користи за идентификовање објеката у простору је *Pattern Recognition* алгоритам. У систему је примењен *Circle Hough Transform* алгоритам, како је приказано на слици 3.3, који је садржан у AForge.NET програмском оквиру [28].



Слика 3.3. Поступак детектовања лопте на основу облика са црно беле дводимензионалне слике са видео-камере

Примећујемо да се у систему као информација не користи боја објекта. Разлог за то је што се боја објекта мења у току процеса прикупљања сигнала велики број пута. На боју утичу временске прилике (дневно светло, сунце, ноћ, рефлектори, сенке, дим, инсекти) и брзина кретања, а све то се мења чак и неколико пута у минути; посебно осветљење у различитим деловима простора који се посматра. На пример, постоји шема у алгоритму за препознавање округлих облика на слици. Ако је објекат који пратимо округлог облика, знајући унапред дефинисану величину објекта, можемо да елиминишемо друге мање округле објекте попут малих рекета у спорту, разних качкета или чаша и флаша. Често се дешава да систем од сенке препозна објекат који пратимо, али се то лако регулише праћењем позиције Сунца и претходне позиције тог објекта на претходној слици са видео-камере и одбацивањем претходног прорачуна, врши се корекција у детекцији.

Hough Transform се користи за одређивање параметара круга са великим бројем тачака смештених на контури круга. Ако слика садржи много тачака, које такође падају на контуре кругова, онда је посао претраге проналажење центра лопте за сваки круг са фиксним радијусом. Идеја *Circle Hough Transform* јесте да се на откривеним ивичним пикселима нацрта круг радијуса претраживане кружнице. Ти нацртани кругови се стављају у матрицу *Hough* акумулаторски низ, а затим им се вредности подижу за 1. Вредности матрице упоређују се са унапред подешеним прагом, при чему су вредности веће од датог прага центри кругова са фиксним радијусом.

На ивичној тачки је нацртан круг са центром у тачки наведеног радијуса. Овај круг је нацртан у параметарском простору. Затим повећавамо вредност у матрици акумулатора у тачкама које припадају периметру нацртаног круга који има исту величину као претходно поменути параметарски простор. Повећавамо вредности у акумулатору. Када користимо сваку ивичну тачку са свим жељеним радијусима, акумулатор тад садржи бројеве који одговарају броју кругова који пролазе кроз појединачне координате тачке. Затим се акумулатор поставља на задати број прага и са сваком већом координатом од прага откривамо могући круг (лопту).

Права централна тачка, коју тражимо, биће заједничка свим параметарским круговима и може се израчунати и пронаћи у максималним вредностима *Hough* акумулаторског низа.

На тај начин, уз пуно контроле и пажње, могуће је прецизно и недвосмислено одредити одређени објекат у дводимензионалном приказу као једини посматрани и праћени објекат на сликама.

После овог процеса, наравно, јасно је да можемо да одредимо x и y координату објекта на свакој слици снимљеној видео-камером као дела подсистема за прикупљање сигнала. Наравно да постоје случајеви када систем не може да детектује положај објекта у дводимензионалном простору на слици. Обично се таква ситуација сматра изузетком и враћа повратну информацију да објекат није пронађен. Како користимо систем са минимум од шест камера, а по јавно општепознатој теорији за детекцију положаја у 3D простору, као и код система описаних за сателитско праћење, довољне су само четири камере за прецизне прорачуне детекције позиције објекта у простору, за одређивање његовог положаја, тако преостале камере могу да буду резервне (редундантне) у случају да један прорачун са једне камере затаји. На тај начин се опет добија тачна детекција положаја објекта у дводимензионалној слици са видео-камере, која је део подсистема за прикупљање сигнала.

3.3. Алгоритам R-CNN

Једним именом, група метода R-CNN односи се на регионе са CNN особинама или конволуционе неуронске мреже засноване на регионима (енгл. *Region-Based Convolutional Neural Network*). Развио их је Ross Girshick и група аутора са Универзитета Калифорнија у Берклију.

Постоје три познате технике: R-CNN, Fast R-CNN и Faster R-CNN које су дизајниране и демонстриране за локализацију објекта и њихово препознавање.

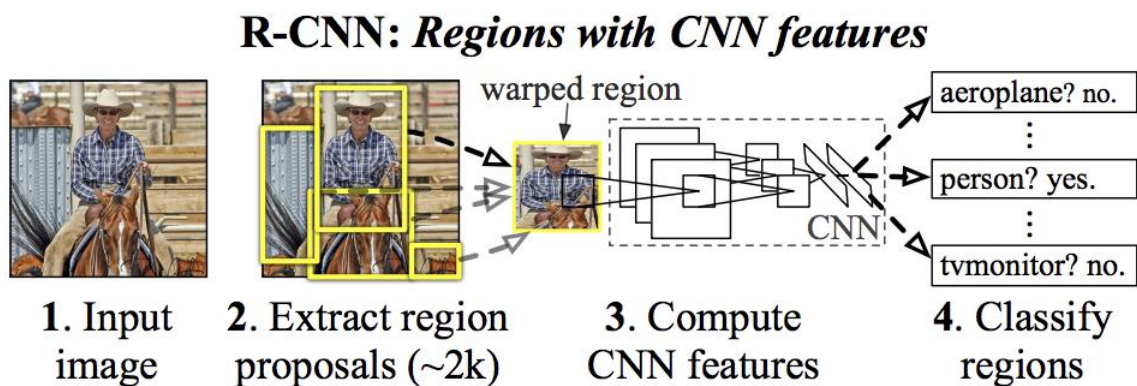
R-CNN је описао Ross Girshick са групом аутора [29] у раду из 2014. године који се односио на актуелну област прецизног откривања објекта и семантичку сегментацију.

Можда је то била једна од првих великих и успешних примена конволуционих неуронских мрежа на проблем локализације објеката, детекције и сегментације. Приступ је демонстриран на референтним скуповима података, постижући тада најсавременије резултате на скупу података радионице VOC-2012 (енгл. *Visual Object Classes Challenge*) [30] и скупу података за детекцију објеката радионице ILSVRC-2013 (енгл. *Large Scale Visual Recognition Challenge*) [31] класе 200. Иначе, поменуте две радионице су компјутерска такмичења у препознавању објеката и размени научних информација и искустава у области детекције објеката.

Предложени R-CNN модел састоји се од три модула:

- Модул 1: Предлог региона. Генерисање и издвајање предлога за регионе независне од категорија, нпр. кутије за оивичавање кандидата.
- Модул 2: Извлачење карактеристика. Издвојити особину из сваког региона кандидата, нпр. користећи дубоку конволуциону неуронску мрежу.
- Модул 3: Класификатор. Класификовати обележја као једну од познатих класа, нпр. модел линеарног SVM класификатора (енгл. *Support-vector machine* модели учења са алгоритмима за анализу података у машинском учењу).

Предложена архитектура модела резимирана је на следећој слици преузетој из [29].



Слика 3.4. Архитектура модела R-CNN

Техника рачунарског вида користи се за предлагање региона кандидата или граничних оквира потенцијалних објеката на слици који се назива „селективно претраживање“, иако флексибилност дизајна омогућава употребу других алгоритама за предлог региона.

Модел који је победио на такмичењу за класификацију слика ILSVRC-2012 користио је одређивач карактеристика AlexNet, конволуциону неуронску мрежу CNN [32]. Излаз CNN-а био је 4.096 елементни вектор који описује садржај слике која се доводи у линеарни SVM ради класификације; конкретно по један SVM се обучава за сваку познату класу.

То је релативно једноставна и директна примена CNN-а на проблем локализације и препознавања објеката. Лоша страна приступа је што је спор, што захтева CNN-базиран пролаз за издвајање карактеристика за сваки од региона кандидата генерисаних алгоритмом предлога региона. То може да буде проблем јер поменути рад описује модел који ради на приближно 2000 предложених региона по слици током процеса тестирања.

Иначе, Python и MatLab изворни код за R-CNN, као што је описано у раду, јавно су доступни на интернету.

3.4. Алгоритам Fast R-CNN

Као што је познато, алгоритам R-CNN постигао је велики успех и популарност у свету, и зато је Ross Girshick, који је тада био запослен у познатој компанији Microsoft Research, предложио проширење алгоритма да би решио проблем брзине R-CNN у раду [33] под називом „Брзи R-CNN“ који је објављен 2015. године.

Поменути рад почиње прегледом недостатака и ограничења R-CNN-а, који се могу поделити на следеће целине:

- Обука је вишестепена линеарна секвенца. Укључује припрему и рад три засебна модела.

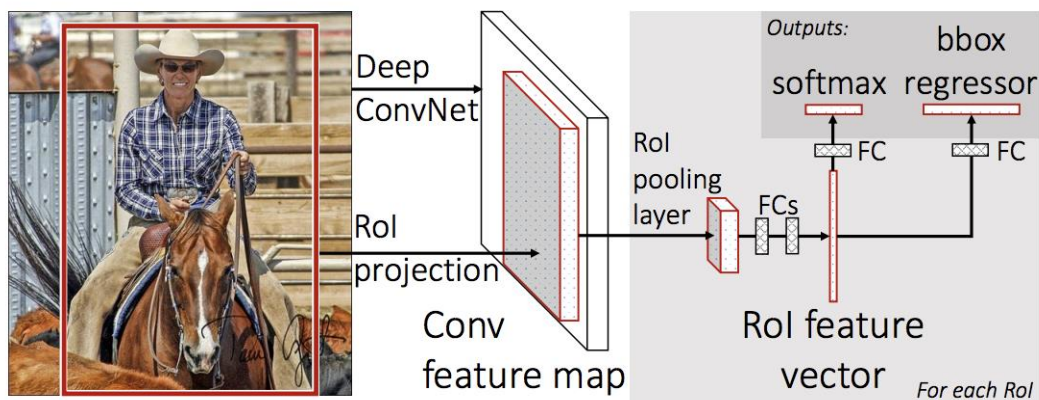
- Обука је скупа у простору и времену. Обучавање дубоког CNN-а на великом броју предлога региона по свакој слици је веома споро.
- Детекција објеката је спора. Користећи дубоки CNN, поново на великом броју предлога региона, предвиђање је споро.

Такође, постојала су претходна истраживања која убрзавају технику названу просторним мрежама са пирамидалним удруживањем (енгл. *SPPnets*), објављена у раду [34] 2014. године. Ово је убрзало издвајање карактеристика, али је у основи користило тип алгоритма за пролаз са предкеширањем (енгл. *forward pass caching*).

Важно је напоменути да се брзи R-CNN уводи као један модел уместо као секвенце за директно учење и региона и класификација.

Архитектура модела је заснована на узимању фотографије као скупа предлога за регионе, као улазне променљиве, који се пропуштају кроз дубоку конволуциону неуронску мрежу. За извлачење карактеристика користи се унапред обучени CNN, попут VGG -16. Крај дубоког CNN-а је прилагођени слој назван Слој удруживања региона од интереса (енгл. *Region of Interest Pooling Layer, RoI Pooling*) који издваја карактеристике специфичне за датог улазног кандидата за регион.

Излаз CNN-а затим се представља потпуно повезаним слојем, а потом се модел раздваја на два излаза, прецизније на два излазна вектора – једног за предвиђање класе преко *softmax* слоја, а другог са линеарним излазом за гранични оквир као што је приказано на слици 3.5. Коначно, овај поступак се понавља више пута за свако подручје, регион од интереса (енгл. *RoI*) на датој слици.



Слика 3.5. Архитектура модела *Fast R-CNN*

Модел је знатно бржи за самообучавање и предвиђање, али ипак захтева да се предложи скуп кандидата за регионе заједно са сваком улазном сликом.

Као и у случају претходног алгорита, изворни кодови за Python и C++ јавно су доступни на интернету.

3.5. Алгоритам *Faster R-CNN*

Наредних година, даљим истраживањима, архитектура предложених модела значајно је унапређена. Побољшања су била како у погледу брзине обучавања тако и у погледу детекције. У раду [35] из 2016. године објављени су најважнији подаци и достигнућа новог Бржег R-CNN (енгл. *Faster R-CNN*).

Нови модел је освојио бројне награде и признања на такмичењима са задацима препознавања објеката и детекције.

Прецизно речено, модел R-CNN дизајниран је да истовремено предлаже и редефинише предлоге за регионе као део процеса обуке, који се назива Мрежа предлога региона (енгл. *Region Proposal Network – RPN*). Затим се ови региони користе заједно са *Fast R-CNN* моделом, у дизајну једног модела. Ова побољшања истовремено смањују број

предлога за регионе и убрзавају оперативно радно време модела у скоро реално време са врхунским перформансама.

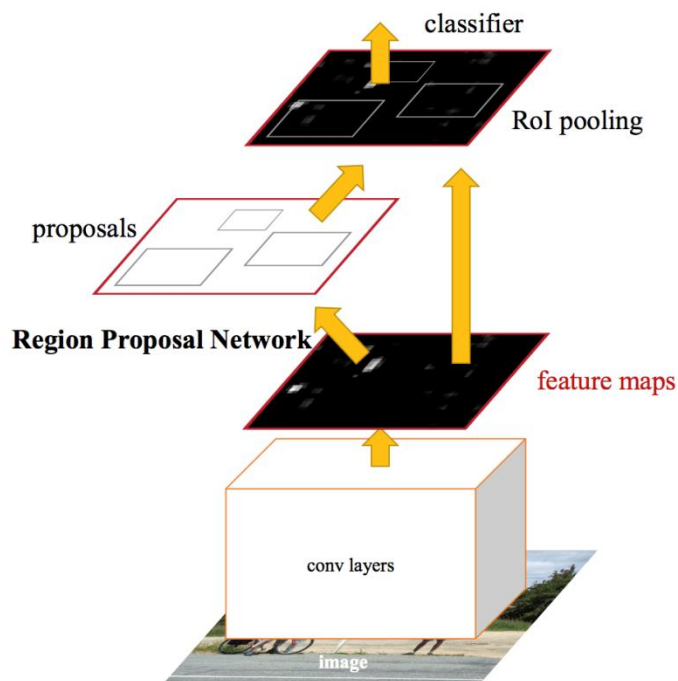
Као је наведено у поменутом научном раду, нови систем детекције у свим корацима има брзину од пет слика у секунди и у исто време постиже одличне резултате у погледу прецизности детекције објеката на такмичарским скуповима података – са само 300 предлога за регионе по слици.

Иако се ради о јединственом, обједињеном моделу, архитектура се састоји од два модула:

- Модул 1: Мрежа предлога региона. Конволуциона неуронска мрежа за предлагање региона и типа објекта који треба посматрати у региону.
- Модул 2: Брзи R-CNN. Конволуциона неуронска мрежа за издвајање карактеристика из предложених региона и прорачун граничног оквира и тражених ознака класа.

Оба модула раде на истом излазу дубоког CNN-а. Мрежа регионалних предлога делује као „механизам пажње тј. упозорења“ за мрежу Fast R-CNN, обавештавајући другу мрежу где треба да тражи или обрати пажњу.

На слици 3.6, преузетој из [35], приказана је архитектура R-CNN модела.



Слика 3.6. Архитектура модела Faster R-CNN

Мрежа предлога региона RPN ради тако што узима излаз унапред обученог дубоког CNN-а, као што је VGG-16, и пропушта малу мрежу преко мапе карактеристика и даје више предлога региона и предвиђање класе за сваку. Предлози региона су гранични оквири, засновани на такозваним усидреним оквирима или унапред дефинисаним облицима дизајнираним да убрзају и побољшају предлог региона.

Предвиђање класе је бинарно, што указује на присуство или одсуство објекта. Једноставно, за предложени регион каже се да је „објектан“, тј. да поседује објекат. Поступак наизменичног обучавања користи се тамо где се обе подмреже обучавају истовремено, иако су испреплетене. Ово омогућава параметрима у CNN детектору карактеристика да буду истовремено прилагођени или прецизно подешени за оба задатка.

Наравно, напредовањем науке дошло је и до даљих проширења алгоритма који додаје подршку за сегментацију слика. Поменута техника је описана у [36] из 2017. године. Изворни код, пре свега за C++ и Python, доступан је на интернету.

3.6. Алгоритам YOLO

У последње време је веома популарна нова група модела и техника за препознавање објеката названа YOLO (енгл. *You Only Look Once* – *Гледаш само једном*). Главни пројектант који стоји иза развоја поменутих модела је пре свих Joseph Redmon. Иако су досад описани модели R-CNN веома прецизни, тачнији чак и од YOLO групе, овај нови скуп метода је знатно бржи. Он успешно детектује објекте у реалном времену.

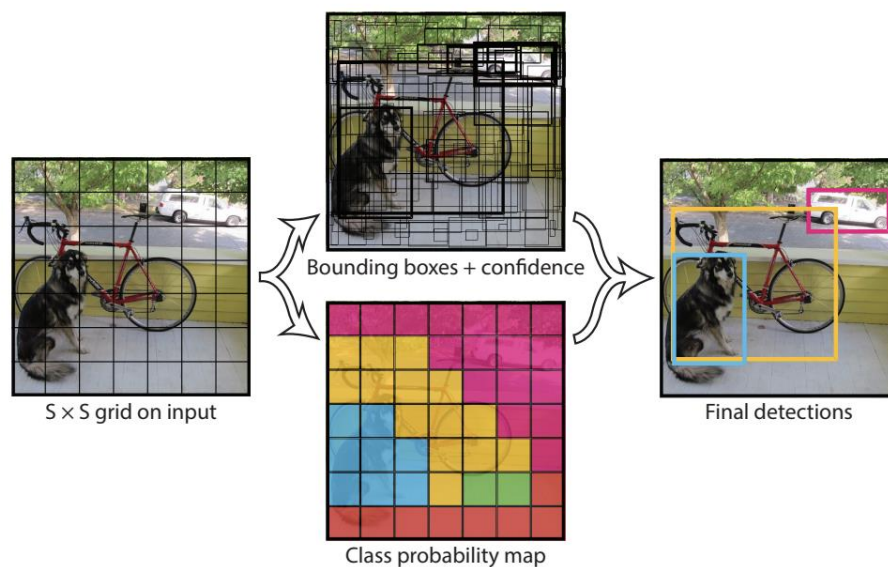
YOLO модел први пут је описан у раду [37] из 2015. године. Важно је напоменути да је велики допринос стварању овог модела дао већ поменути Ross Girshick, који је развио досад описане R-CNN моделе.

Нови приступ укључује једну неуронску мрежу обучену од једног до другог краја која узима фотографију као улаз и предвиђа граничне оквире и ознаке класа за сваки гранични оквир директно. Као што је напоменуто, ова техника нуди нижу тачност предвиђања (нпр. више грешака у локализацији), мада ради великом брзином – чак и до 155 слика у секунди за оптимизовану верзију модела.

Како се тврди у поменутом научном раду, њихова обједињена архитектура је изузетно брза. Основни YOLO модел обрађује слике у реалном времену брзином од 45 слика у секунди док брзи YOLO има перформансе од невероватних 155 обрађених слика у секунди.

YOLO модел функционише тако што прво подели улазну слику на координатну, решеткасту мрежу ћелија, где је свака ћелија одговорна за предвиђање граничног оквира ако се центар граничног оквира налази унутар ње. Свака ћелија мреже предвиђа гранични оквир који укључује координате x и y као и ширину, висину и поузданост. Предвиђање класе се такође заснива на свакој ћелији.

На пример, слика може бити подељена на мрежу димензија 7×7 и свака ћелија у мрежи може предвидети два гранична оквира, што на крају даје 94 предложена предвиђања граничног оквира. Мапа вероватноћа класа и гранични оквири са поузданошћу се затим комбинују у коначни скуп граничних оквира и ознака класа. Наредни пример на слици 3.7, преузет из [37], приказује два излаза предложеног модела.



Слика 3.7. Преглед модела YOLO са предвиђањима

Описани модел YOLO су Joseph Redmon и Ali Farhadi у наредним годинама и истраживањима унапредели, како је описано у раду [38] из 2016. године. Иако се ова верзија модела назива YOLO v2, инстанца модела је описана како се обучава на два скупа података за препознавање објеката паралелно, и у стању је да предвиди 9000 класа објеката, па се стога моделу даје назив „YOLO 9000“.

Извршене су бројне архитектурне промене на моделу, нпр. употреба серијске нормализације (енгл. *batch normalization*) и улазних слика високе резолуције. Као и услучају модела Faster R-CNN и YOLO v2 користи усидрене оквире, унапред дефинисане граничне оквире са употребљивим облицима и величинама које су скројене током процеса обуке. Избор граничних оквира за слику унапред се обрађује помоћу анализе к-средина (енгл. *k-means*) на скупу података за обуку.

Оно што је најважније јесте да се предвиђени приказ граничних оквира мења како би се омогућило да мале промене имају мање драматичан ефекат на предвиђања, што резултује добијањем стабилнијег модела. Уместо да директно предвиђају положај и

величину, помаци, пригушени логистичком функцијом, предвиђају се за померање и преобликовање унапред дефинисаних усидрених оквира у односу на мрежну ћелију.

Предложена су побољшања и ове верзије модела у научном раду [39] из 2018. године, названим YOLO v3. Ипак, побољшања су била релативно мала, укључујући дубљу мрежу одређивача карактеристика и мање репрезентативне промене.

3.7. Нови алгоритам за детекцију покретних објеката

Аутор ове дисертације је пројектовао нов алгоритам за брзу детекцију покретних објеката и практично тестирао његову ефикасност. Циљ израде новог алгоритма као дела система за праћење био је покушај унапређења резултата детекције објеката где је неопходно брзо препознавање када се користе камере слабијих перформанси или се посматрана лоптица брзо креће.

Основа за нов алгоритам била је идеја оптимизованог, знатно краћег задатка препознавања базираног само на детекцији лоптица за тенис. Тиме се скраћује и поједностављује посао процесорског рачунања усмерен само на један, прецизно дефинисан објекат. Ако имамо следеће прописане константе:

- боја лоптице
- димензије, облик
- селективни, посебни услови (на видео запису је само лоптица зелене боје)
- изглед
- тежину
- перформансе кретања

било је могуће унапред дефинисати који објекат алгоритам треба да тражи. Самим тим, изводљиво је убрзати детекцију објекта и повећати прецизност праћења и прорачуна тачне путање.

Нови алгоритам за детекцију израђен је у С# програмском језику и назван *Селективни*, јер је игра постављена тако да је само лоптица на терену у видео записима зелене боје. Сви остали предмети су значајно различите боје. То су посебно постављени услови за које је пројектован нов начин детектовања лоптице како би се убрзао процес откривања покретног објекта у игри.

Бржа детекција - > више обрађених слика - > могућност тачније предикције кретања.

Идеја аутора ове дисертације при изради новог приступа детекцији је била да нови алгоритам за детекцију филтрира специфичну боју лоптице, на улазним фрејмовима са регуларним RGB компонентама, у видео запису игре. Тако добијена нова обрађена слика са детектованом лоптицом се затим шаље алгоритмима за предикцију путање који су саставни део AForge.NET програмског оквира. Нови селективни алгоритам даје позиције и обрађене, знатно једноставније и јасне слике, за даљу предикцију путање. На слици 6.15 приказан је модел новог алгоритма.

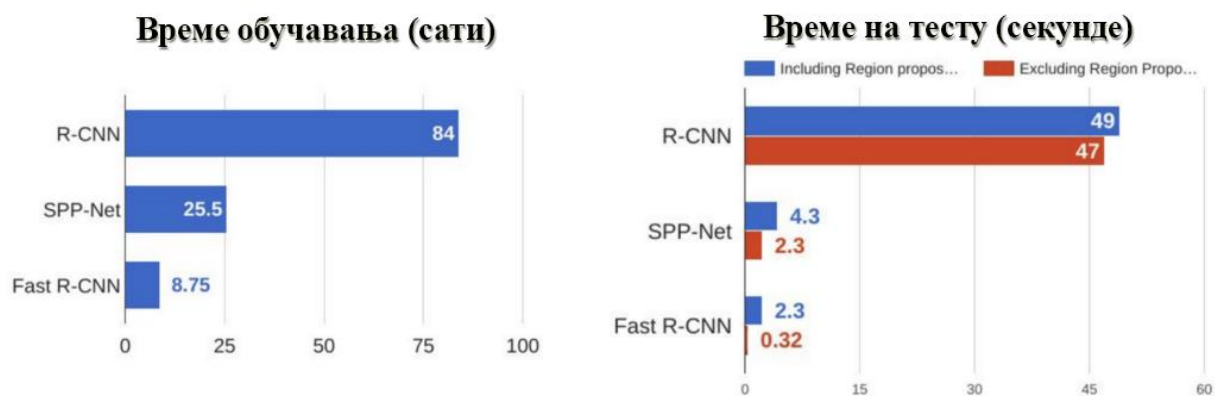
Улазни фрејм са видео записа се уз помоћ С# кода прво конвертује у HSV (Hue, Saturation, Value) формат, постављају се доња и горња граница за зелену боју лоптице и прави се маска и инверзна маска за зелену боју тј. облик лоптице на сликама. Филтерује се само зелена боја на фрејму. Затим се прави црно-бела копија оригиналног фрејма. Инверзна маска филтерује само регионе који не садрже зелену боју лоптице. Предња слика се додаје на позадину. На крају, прорачунавају се, у програмском коду, x и y координате детектоване лоптице на новој, обрађеној слици са записа видео камере једноставним бројањем пиксела до средине објекта. Координате и нова слика се шаљу алгоритмима за предикцију путање AForge.NET.

3.8. Упоредна анализа алгоритама за детекцију покретних објеката

Описани модерни алгоритми, пре свега R-CNN, испољавају следеће мане или, према речима научне заједнице наведеним у [40], следеће проблеме:

- Потребно је веома велико време за обучавање мреже јер је неопходно класификовати 2000 предлога за регионе по једној слици;
- Није могућа примена у реалном времену јер је потребно око 47 секунди за сваку тест-слику;
- Поменути селективни алгоритам претраживања је фиксни алгоритам. Стога се у тој фази не дешава учење. То може да доведе до генерисања лоших предлога за кандидате региона.

Главни разлог зашто је Брзи, тј. Fast R-CNN бржи од основног R-CNN-а јесте тај што није потребно да се сваки пут ставља 2000 предлога за регионе у конволуциону неуронску мрежу. Уместо тога, операција конволуције се врши само једном по слици и мапа карактеристика се генерише из ње.

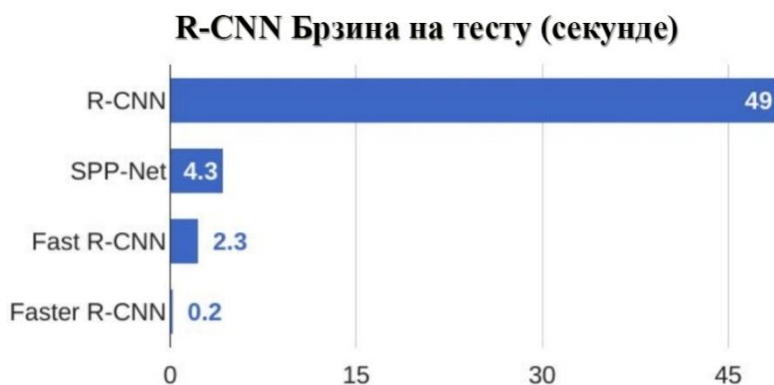


Слика 3.8. Поређење алгоритама за детекцију објеката

Као што је приказано на горњем графику, може се закључити да је Fast R-CNN знатно бржи у процесима обучавања и тестирања него R-CNN. Ако упоредимо перформансе Fast R-CNN током времена тестирања, укључивање предлога за регионе успорава алгоритам значајно у поређењу са некоришћењем предлога за регион. Стога предлози региона постају уска грла у алгоритму Fast R-CNN који значајно утичу на његове перформансе.

Ако причамо о брзини, као што имамо код Fast R-CNN-а, код Faster R-CNN-а улаз у конволуциону мрежу је слика која даје конволуциону мапу карактеристика. Међутим, уместо да се користи селективни алгоритам претраживања на мапи карактеристика за идентификовање предлога региона, посебна мрежа се користи за предвиђање предлога региона. Предлози региона који су предвиђени затим се преобликују помоћу слоја за удруживање RoI који се затим користи за класификацију слике у предложеном региону и да предвиди вредности одступања за граничне оквире.

На слици 3.9. приказано је да је Faster R-CNN алгоритам знатно бржи него његови претходници и могуће га је користити у детекцији објеката у скоро реалном времену.

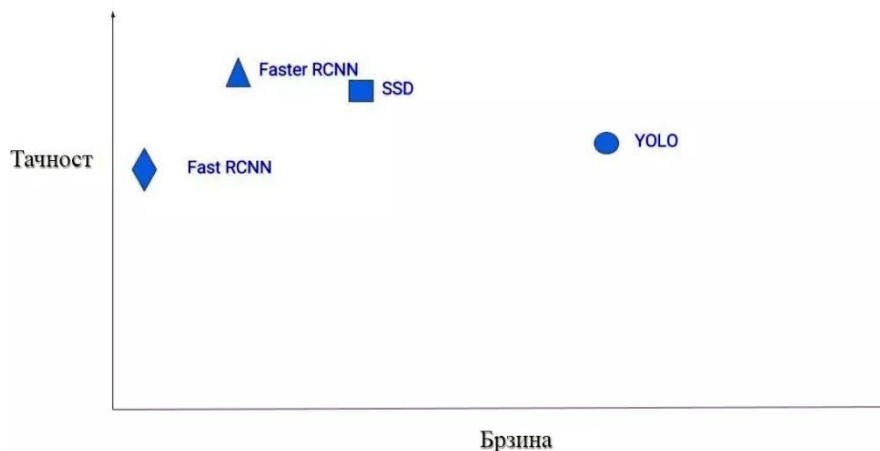


Слика 3.9. Поређење брзине на тесту алгоритма за детекцију објеката

Детекција објеката у реалном времену карактеристика је YOLO и Fast YOLO модела и техника.

Иначе, алгоритам за детекцију објеката под називом „детектор појединачног снимка“ (енгл. *Single Shot Detector* – SSD) постиже добру равнотежу између брзине и тачности. Он примењује конволуциону мрежу на улазној слици само једном и израчунава мапу карактеристика. Затим се на ту мапу карактеристика примени мало конволуционо језгро величине 3×3 да бисмо предвидели граничне оквире и вероватноћу класификације. SSD такође користи усидрене оквире у различитим односима ширине и висине сличне Faster R-CNN-у и обучава одступања уместо да обучава оквир. Да би се изборио са величином, SSD предвиђа граничне оквире након више конволуционих слојева. Будући да сваки конволуциони слој делује у различитој размери, он је у стању да детектује објекте различитих величина.

Описано је неколико најважнијих алгоритама. Питање је који изабрати? Тренутно је Faster R-CNN одличан избор ако је најбитнија тачност и прецизност и ако се користи десктоп рачунар или лаптоп. Ако се за прорачуне користи паметан телефон, требало би изабрати SSD алгоритам. Међутим, ако прецизност није најважнија, а желите да имате веома брзу детекцију и софтвер, прави избор би био YOLO. На слици 3.10. графички је приказано разумевање односа брзине и тачности:



Слика 3.10. Однос брзине и тачности код алгоритама за детекцију објеката

4. Алгоритми за предикцију путање покретних објеката

4.1. Опис проблема

Наравно, основа система су алгоритми за детекцију покрета тзв. *motion detection* алгоритми. У практичној реализацији, основа система за детекцију положаја је AForge.NET framework програмско окружење које је развио у периоду од 2006. до 2013. године Andrew Kirillov, софтверски инжењер сада запослен у IBM-у. У питању је програмски оквир реализован у програмском језику C# који је дизајниран и пружа основу истраживачима и развојним инжењерима у областима компјутерских видео система и вештачке интелигенције – обраде слика, неуронских мрежа, рачунарске графике и анимације, генетских алгоритама, машинског учења, аутоматике, роботике и другим. [41]

Овај програмски оквир садржи низ класа које имплементирају разне алгоритме за детекцију покрета и обраду покрета у сликама. Алгоритми за детекцију покрета имају за циљ да детектују покрет у континуалним видео сликама пружајући ниво детектованог покрета и покретну слику – бинарну слику, која показује све регионе где је покрет детектован. Алгоритми за обраду покрета служе за обраду детектованог покрета, видно истичу регионе где је детектован покрет, у разним бојама, броје покретне објекте, прате их и имају додатне ситне опције и детаље.

Различите класе за детекцију покрета могу да користе различите алгоритме за детекцију покрета, што је и примењено у практичном тестирању. Ипак, они су слични у погледу једне ствари – како узимају видео слике за анализу и како пријављују детектован покрет. Ниво покрета је величина коју све поменуте класе дају као обавезан резултат. Он се креће у опсегу $[0,1]$. Једна од практичних примена је, на пример, ако величина пређе 0.5, што значи да је детекциона класа детектовала 50% нивоа покрета, тада је могуће активирати аларм ако ту величину упоредимо са предефинисаном величином у систему и покаже се да је она већа од нпр. 49% сигурног, предефинисаног стања.

Приликом практичне реализације система који је тема ове дисертације, аутор је применио пет врста алгоритама за детекцију покрета и неколико различитих верзија:

- алгоритам разлика у две слике,
- алгоритам позадинског моделовања,
- произвољни алгоритам разлика у сликама,
- комбиновани алгоритми.

Најједноставнији и најбржи је први алгоритам. Цела идеја је у проналажењу разлика између две континуалне видео слике, једна за другом у низу, што је опште и најлогичније. Веома је добар за брзо детектовање покрета, али не толико и за детекцију тачне позиције објекта у простору.

За разлику од првог, други алгоритам проналази разлику између тренутне видео слике и позадине. Користи једноставне технике моделовања позадине и обнавља их током времена да би дошао до промена у сцени. Прецизније детектује положаје објеката који се крећу, него први.

Трећи алгоритам је комбинација, на средини је поменута два алгоритма. Базиран је на разлици тренутне видео-слике и предефинисане слике позадине. Корисник сам задаје слику позадине или ће алгоритам да изабере прву слику као слику позадине. Алгоритам никад неће да проба да промени слику позадине, што значи да се сцена не мења.

Даље, алгоритми који су коришћени за обраду покрета и који у себи имају опцију за визуелно приказивање су:

- Обележавање подручја покрета;
- Обележавање граничних области покрета;

- Мрежно обележавање подручја;
- Обележавање више покретних објеката у сликама.

Иначе, најпрецизнији је последњи алгоритам јер се користи заједно са алгоритмима за детекцију покрета који тачно детектују положај објекта. У исто време, он је и најзахтевнији. Како визуелно обележавање нема велики значај у тачној детекцији положаја објеката у простору, нису значајно ни коришћени у овом надзорном систему и дисертацији, сем за потребе тестирања исправности видео-камера и прецизности позиција видео-камера. [42]

4.2. Алгоритам разлика у две слике

Дајемо следеће теоретско објашњење главног алгоритма за детекцију покрета, алгоритма разлика у сликама: Да би се упоредиле две слике и пронашле разлике на њима ради детектовања покрета, поредимо сваки пиксел са његовим просечним RGB компонентама. Следеће три једначине се користе у кораку калибрације [43]:

$$g_0(x, y) = \frac{g_R(x, y) + g_G(x, y) + g_B(x, y)}{3} \quad (4.1)$$

$$f_0(x, y) = \frac{f_R(x, y) + f_G(x, y) + f_B(x, y)}{3} \quad (4.2)$$

$$(g_0(x, y) - T) \leq f_0(x, y) \leq (g_0(x, y) + T) \quad (4.3)$$

Где су редом:

g_R, g_G, g_B компоненте RGB слика снимљених у временском тренутку t

f_R, f_G, f_B RGB компоненте референтне слике

f_0, g_0 средња вредност суме RGB компоненти боје

T је праг RGB вредности.

Следећи корак је рачунање процента у пикселима објекта који се посматра, тј. прати. Детекција се врши помоћу следеће једначине:

$$D = \frac{\sum f_i^R(x,y) + \sum f_i^G(x,y) + \sum f_i^B(x,y)}{\sum f_R + \sum f_G + \sum f_B} * (100\%) \quad (4.4)$$

Где је:

D – укупни проценат разлика које су детектоване

$\sum f_i^R(x,y), \sum f_i^G(x,y), \sum f_i^B(x,y)$ број пиксела који су детектовани од различитих RGB компоненти боје

$\sum f_R + \sum f_G + \sum f_B$ укупни број пиксела које слика заузима у 3 RGB компоненти.

Иначе, ова техника упоређивања слика поређењем свих пиксела на сликама назива се *метод разлике у сликама*.

Према јавно доступним подацима са интернета и датих референци, тачност описаних алгоритама за детекцију покрета објеката је 95.5%.

4.3. Алгоритам позадинског моделовања

Што се тиче друге врсте алгоритама, у техникама званим *динамичко и адаптивно слагање са шаблонима*, на пример, слика позадине као шаблон, пореде се само велике промене амбијента, тј. позадинске слике.

Процес и механизам детекције покрета креће са одређивањем референтне слике. Под појмом референтна слика може да се сматра нормално, уобичајено стање посматраног простора – подручја праћења. Након тога, наредне слике се пореде са постављеном референтном сликом. Снимање слика за поређење узима се периодично, у тачно одређеним интервалима.

Ако упоредимо овај метод са претходним алгоритмом, овај детектор покрета заснован је на проналажењу разлике између тренутне видео-слике и слике која представља позадину. Овај метод такође представља класу за детекцију покрета и покушава да користи једноставне технике моделовања позадинске сцене и њено ажурирање кроз време како би узео у обзир промене сцене. Карактеристика моделовања позадине овог детектора покрета даје могућност прецизнијег истицања области кретања, која је приказана на слици 4.1.



Слика 4.1. Кретање код алгоритма моделовања позадине

Ова класа примењује алгоритам детекције покрета који се заснива на разлици тренутне посматране видео-слике са моделованом сликом позадинске слике. Узима се нова слика „различитости“ и израчунава се количина пиксела у којима се слике разликују. Да би се смањио број независних пиксела шума, може се применити морфолошки оператор. Он је садржан у својству *Suppress Noise* који враћа Булову вредност, 0 или 1, да ли треба извршити

додатно филтрирање за сузбијање самосталних пиксела шума применом филтера за обраду слике, типа ерозија 3 x 3.

Једноставније речено, тражи се разлика између тренутне слике са видео-камере и слике позадине. Као прва апроксимација позадинске слике узима се први кадар видео-низа. Током даље видео-обrade позадинска слика се непрекидно ажурира тако да се она мења у смеру како би се смањила разлика са тренутним видео-оквиром. Брзина ажурирања позадине може једноставно да се подеси у одговарајућим својствима класе.

За разлику од алгоритма разлике у сликама за прецизно откривање покрета, овај алгоритам омогућава сасвим јасно идентификовање свих објеката који нису део позадине, тзв. сцене и највероватније се ти објекти крећу. Такође, за разлику од следећег алгоритма за откривање покрета, овај алгоритам укључује функцију прилагођавања позадине, која му омогућава да ажурира своју моделовану слику позадине како би узео у обзир промене сцене.

4.4. Произвољни алгоритам разлика у сликама

Следећи алгоритам откривања покрета, који се заснива на разлици тренутне видео-слике са унапред дефинисаном позадином, практично представља средину између две раније наведене класе. На основу тога, постоји чињеница да је овај детектор покрета заснован на једноставном тражењу разлика као и детектор покрета разлике у две слике, што га наравно чини брзим. С друге стране, врши разлику између тренутне видео-слике и позадинске слике, што може омогућити проналажење покретних објеката, али тешко и подручја промена као што смо имали случај код алгоритма једноставног позадинског моделовања.

У овој техници корисник мора сам да наведе позадинску слику или ће алгоритам узети прву видео-слику као позадину и алгоритам неће покушати да ажурира ту позадинску слику, што значи да не постоји прилагођавање разним променама у видео-сцени.

Слика „различитости“ се анализира и поставља праг, граница, па се прорачунава број различитих пиксела. Прецизна дефиниција те слике која садржи разлике је: црно-бела слика

која показује подручја детектованог покрета. Црни пиксели означавају подручја где није откривен покрет. С друге стране, белим пикселима означена су подручја детектованог покрета.

Важно је напоменути да се поменути алгоритам често примењује, као и претходни, у ситуацијама када се посматрани покретни објекат углавном стално налази у погледу камере, као у случају видео-камере која посматра терен и лоптицу на терену. Дакле, уколико се фиксном камером посматра статичка сцена на којој се покретни објекти повремено појављују (тениски терен, пут, улица) примењују се последња описана два алгоритма, често комбиновано.

4.5. Упоредна анализа алгоритама за предикцију путање покретних објеката

У последњих десет година у свету је присутно неколико општепознатих програмских библиотека за обраду слика, препознавање објеката и праћење кретања, које су, са свим својим додацима, у потпуности функционалне. Најважнији примери су Open CV, Emgu CV и AForge.NET.

Како је у овој дисертацији већ детаљно описано, AForge.NET је програмски оквир са библиотекама из, пре свега, области рачунарске графике, обраде слике и вештачке интелигенције развијен за .NET програмско окружење.

Open CV (Open Source Computer Vision Library) јесте библиотека програмских функција углавном за рачунарску графику у реалном времену, коју је развио Intel 1999. године. Emgu CV је .NET програмски омотач за више развојних платформи који омогућава да се Open CV функције позивају из .NET компатибилних језика.

У [44] је наведено поређење горе поменутих библиотека. У табели 4.1. је дато поређење библиотека по једноставности коришћења и доступној документацији и литератури.

Табела 4.1. Поређење библиотека за обраду слика

Библиотека	Једноставност коришћења	Књига	Документација	Примери програмског кода
Open CV	Лоша	Много	Вишејезична	Пуно
Emgu CV	Добра	Мало	Енглески	Мало
AForge.NET	Одлична	Мало	Енглески	Пуно

Иначе, већина функција у Open CV-у израђене су у C стилу, али има неколико њих и у C++ класи. После верзије 2.0, више функција је уграђено у C++ класе. Emgu CV је .NET омотач за Open CV, који је енкапсулирао већину функција Open CV-а. Aforge.NET је чиста .NET библиотека, што значи да је много једноставнији и елегантнији за употребу.

Како се у стручном коментару [45] напомиње, AForge.NET плус његова тзв. „Лабораторија за обраду слика“ имају много смисла за опције филтрирања (откривање ивица, прагова детекције, праћење итд.) и олакшане функционалности за преглед и визуелизацију. Open CV пружа све остало попут одређених метода за детаље и друге софистициране рутине за обраду слика.

Због тога би требало користити .NET – једноставно спојити све потребне компоненте у једну апликацију, што је и главна предност .NET окружења.

У раду [46] наведени су експериментални резултати тестирања система са две камере уз употребу OpenCV библиотеке и софтверских апликација израђених у Visual C++ програмском језику са OpenGL графичком подршком. Број слика у секунди на видео-записима био је између 30 и 40. Показано је, кроз експеримент, да системи са већим бројем камера намењених праћењу покретних објеката дају значајно боље, „робустније“ резултате

него системи са монокамером. Такође, уколико је на једној камери објекат праћења заклоњен, остале камере преузимају прецизно и тачно праћење позиције у простору.

Значајне предности ове дисертације у односу на [47] су експерименти изведени и у реалним условима као и на тест, лабораторијским подручјима за разлику од само тест сцена и поставки у поменутом раду. Такође, недостаје и компаративна анализа свих резултата, и тест и реалног система.

Такође, у [48] раду тестиран је систем развијен на OpenGL и OpenCV платформи у C/C++ програмским језицима. Коришћена резолуција видео снимака била је 320 x 240 пиксела. У експерименту су коришћена три различита објекта и покретни робот, који се препознају и прати се њихова позиција уз избегавање контакта робота са предметима (тзв. препрекама), постављени на три унапред дефинисане висине од тла и позицијама у простору.

Кроз четири различите пробе, дошло се до експерименталних резултата који дају сличне закључке и смернице као и у претходном примеру, уз недостатке у погледу веома ниске резолуције видео-записа за детекцију и праћење објеката као и недостатком упоредне анализе разних библиотека, алгоритама за препознавање и више видео-резулција које доводе до значајно лошијих експерименталних и мање употребљивих резултата тестирања.

За препознавање објеката у реалном времену и њихово праћење у простору уз помоћ 2D и 3D слика, како је описано у [48], углавном су коришћене 2D слике високе резолуције, камере, ласерски даљиномер, светлосни извори и сензори. У првом од два експеримента, при пристојној брзини видеа од 50 слика у секунди и доброј видео-резулцији, извршено је тестирање препознавања знакова помоћу прстију на шасти у разним типским покретима дланова и прстију, као код знаковног, показног (гестовног) језика за комуникацију међу глувим особама.

У поменутом раду акценат при одређивању позиције објеката јесу технике за мерење 3D удаљености, главне предности и мане сваке су дате у табели 4.2.

Табела 4.2. Технике за мерење 3D удаљености

	Предности	Мане
Стереo визија (две камере)	Висока резолуција са колор информацијом (без напајања)	Осетљивост на светлост, сенке, временске услове, немогућност мерења при недостатку текстура, неопходна калибрација, доста времена
Светлосни извор	Висока резолуција (јефтина)	Спора, осетљивост на осветљење, само за статичке сцене
Ласерски даљиномер	Висока прецизност Велика удаљеност Неосетљивост на временске услове	Спора због скенирања, механичке компоненте, скупа

Као што се види из табеле 4.2, сваки сензор за мерење даљине има и предности и мане. Стога, велики број данашњих система за одређивање позиције објеката, као и њихово праћење, комбинује разне методе и сензоре за прорачун даљине. Посебно би требало обратити пажњу на то да комбиновање и повезивање сензора (камера, даљиномера, брзиномера) у систему, као што су досад поменути, не повећају комплексност целог система или његову цену као ни изводљивост ни његову практичну применљивост. Такође, неопходно је укључити предвиђање путање и математичке методе за оптимизацију количине података у систему. Оптимизација је кључ за пројектовање квалитетног система за детекцију и праћење.

Како ни у радовима [46][47][48] нису извршени експерименти у различитим видео-резулцијама камера као ни коришћењем различитих алгоритама за детекцију објеката и покрета, експериментални резултати су у великој мери непрецизни и недовољно дескриптивни у погледу прецизне детекције положаја објеката и њиховог кретања у простору, посебно при кретању већим брзинама, нпр. у тенису, где поменути радови немају довољно меродавних резултата тестова при различитим условима и поставкама система за праћење, иако је у њиховим тестовима коришћена модерна, висококвалитетна опрема.

Сваким даном системи који су тема ове дисертације, укључујући и напредни систем који је аутор дисертације пројектовао и израдио, налазе све шире примене у разним областима друштва, а пре свега су незаобилазни у спортским судијским одлукама и рекламним пројектима.

Долазимо до важних питања: које су предности и мане научног приступа проблему детекције и праћења објеката у простору у овој дисертацији у односу на сличне радове у свету? Какви су експериментални приступи и резултати, посебно у делу праћења лоптица у спорту?

Упоредном анализом са [49][50][46] у најважнијим областима и аспектима науке у вези са овим системима, долазимо до следећих, значајних опажања која су дата у табелама 4.3. и 4.4:

Табела 4.3. Упоредна анализа параметара експерименталних метода из научних радова

Научни рад	Библио тека	Број слика у секунди (fps)	Број камера	Резолуција (пиксела)	Број алгоритама за детекцију
Advanced Tracking Systems for Moving Objects in Sports	AForge	240/120/60	4	UltraHD/Full HD/HD 4096 × 2160	5
Tracking a Table Tennis Ball for Umpiring Purposes [49]	OpenCV	30/300	2	512×384	2
Table Tennis Ball Tracking and Bounce Calculation using OpenCV [50]	OpenCV	60	1	1024x576	1
Fast 3D Object Detection and Pose Estimation for Augmented Reality Systems [46]	OpenCV	30-40	2	320x240	1

Табела 4.4. Упоредна анализа додатних параметара експеримената из научних радова

Научни рад	Број/ Софтверска апликација	Edge detection, threshold филтери брзина/прецизност	Компаративна анализа	Ниво позитивне детекције
Advanced Tracking Systems for Moving Objects in Sports	2/C# C++	Одлична/ Одлична	Да	98%
Tracking a Table Tennis Ball for Umpiring Purposes [49]	1/C++	Просечна/Просечна	Не	91%
Table Tennis Ball Tracking and Bounce Calculation using OpenCV [50]	1/Python	Просечна/Просечна	Не	78.03%
Fast 3D Object Detection and Pose Estimation for Augmented Reality Systems [46]	1/C++	Просечна/Просечна	Не	97%

Јасно се види, на основу анализе приказане у горњим табелама, које су предности предложеног, пројектованог система који је тема ове дисертације и његових извршених, оригиналних експерименталних метода:

- Већа видео-резулација (прецизнија и бржа детекција објеката);
- Већи број камера у систему (већа поузданост и тачност, нема заклањања објекта);
- Углавном већи број слика у секунди (боља детекција при већим брзинама);
- Већи број развијених апликација и коришћених алгоритама (компарација и оптимизација оригиналних брзих метода за праћење – бољи резултати);
- Позитивни ниво детекције је већи, са мање лажних објеката и бржим филтерима због употребе AForge.NET библиотека на супрот Open CV-у.

На основу наведених података и анализа, логички закључак је да је у овом раду предложени систем уз компаративне анализе разних варијанти и техничких поставки има потенцијал да пружи прецизније, поузданије и брже прорачуне детекције позиције и кретања објеката у простору.

5. Напредни систем за праћење покретних објеката у спорту

У протеклих пет година дошло је до значајног напретка и развоја софтверских апликација за препознавање облика и детекцију положаја објеката на видео-камерама које, уз примену нових алгоритама за праћење покретних објеката у спорту, многоструко повећавају прецизност и квалитет целог процеса. Употреба новог програмског оквира и библиотека за детекцију позиције и препознавање објеката примењених у новом концепту и поставци новог алгорита доводи до значајног напретка и побољшања перформанси система за праћење.

Напредни систем за праћење има следеће целине, независне подсистеме од којих сваки има одређене улоге:

- Подсистем за прикупљање сигнала,
- Подсистем за напредну детекцију објеката и позиције у тродимензионалном простору,
- Систем за 3D симулацију, анимацију и графичко приказивање резултата прорачуна.

Први подсистем, независну целину, чини обавезни систем видео-камера и техничке опреме којим се прати и снима спортски меч или тренинг. Могуће је снимати и друга подручја са различитим задацима. Тим системом се, у исто време, у реалном времену врши прикупљање сигнала на одређеном, већем броју рачунара по следећем моделу:

1 камера = 1 припадајући рачунар.

Другу целину чини подсистем који на основу слике са камера (on-line) или на основу снимка (off-line) одређује позицију и симулира путању посматраног објекта у простору, нпр. лопте у спорту. Систем чини софтвер који је развијен у Microsoft програмском

окружењу при чему је програмски код написан у MS Visual Studio C++ и C# 98, 2010, 2013 програмским језицима. Тестирање и практична имплементација урађена је за систем детекције и праћења објеката на основу снимка. Он ће бити и описан. Иначе, основу система за детекцију и праћење покретних објеката у простору чине нови, актуелни и унапређени јавно доступни математички алгоритми са применом математичких принципа.

Трећу целину чини систем који на основу прорачуна путање објекта у простору врши графичку симулацију 3D анимације на атрактиван и визуелно привлачан начин. Софтверска апликација за прецизан, фотореалистични 3D визуелни приказ основа је ове независне целине.

У току пројектовања новог, напредног система за праћење покретних објеката у спорту, са свим његовим подсистемима и целинама, вршене су многобројне техничке консултације са реномираним стручњацима из области електротехнике и математике и примењеног програмирања. Такође, приликом практичног тестирања, велики допринос својим саветима и мишљењима дали су радници запослени на спортским теренима, пре свега у области тениске игре.

У свакој слици послатој са сваке камере систем идентификује групу пиксела која одговара слици објекта који је посматран, тј. чије се кретање прати. После препознавања облика објекта, 3D позиција објекта за сваку слику у секунди која је забележена прикупљањем сигнала са видео-камера прорачунава се поређењем позиције на најмање две физички одвојене видео-камере у истом временском тренутку. Низ слика, уз предвиђање, ствара запис путање којом се објекат кретао. Затим, помоћу тих прорачунатих података и предвиђеном путањом објекта прорачунава где се путања сече са осматраним тереном. Систем упоређује положај контакта са подлогом са предефинисаним димензијама спортског терена. [51]

Као финални резултат, овај систем ствара графичку симулацију, фотореалистичну 3D анимацију и графичку слику путање објекта и посматраног подручја. Њена намена може да буде у великом броју области са разноврсном тематиком. Репродукција је у скоро реалном времену. [52]

Код постојећих система, који су описани у другом поглављу, пролазак кроз бројне циклусе у процесу одређивања положаја објеката и његова мултидисциплинарна употреба нису детаљно проучавани, што је и логично јер није било преседана система пре њих. Углавном су били у питању оригинални системи, без узора у пређашњем систему сличне организације и карактеристика, који служе као основ за наредне.

Предност аутора ове дисертације је у томе да је било пуно могућности за поређење и компаративну анализу разних алгоритама за детекцију и делова већ постојећег система, иако је врло мало доступних информација о функционисању описаних система, заједно са основном организацијом и варијантама. На основу, пре свега, интернет видео-снимака са тениских мечева и фудбалских утакмица, постављен је модел урађеног система у службеној употреби у свету, са резултатима, као компаративна основа за напредну организацију и употребу алгоритама са графичком 3D симулацијом.

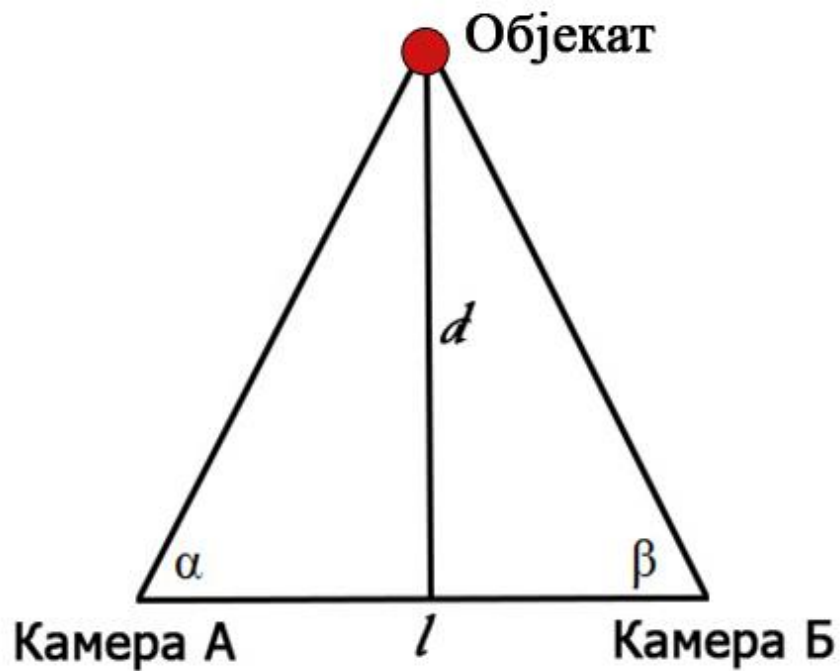
На основу десетина снимака, онлајн стручних чланака и коментара, као и директних контаката са произвођачима видео-опреме, извршено је тестирање и поређење практичних резултата предложеног напредног система који је предмет ове дисертације, са очигледним унапређењима у неколико делова система. Финално, и крајњи резултат прорачуна даје већу субјективну сигурност у процени електронских судијских одлука. Употребом већег броја алгоритама долази се до важних резултата у унапређењу постојећих система за детекцију, што и објективно повећава степен поверења публике и посматрача у графички симулиране резултате.

На слици 5.1. приказан је, у форми алгоритма, цео процес рада Напредног система за праћење покретних објеката у спорту. Као у простору стања, цео систем пролази кроз разне етапе – од прикупљања неопходних података до финалног производа, решења, тј. предвиђене путање посматраног објекта. Експериментално правилно одабране поставке етапа, од подешавања видео-камера до избора алгоритама за препознавање објеката на слици и детекцију покрета, са математичким прорачунима и оптимизацијама доводе до тачних, поузданих и кредибилних резултата праћења.



Слика 5.1. Процес рада Напредног система

Описане методе одређивања позиције објеката у простору помоћу сателитских сигнала, доказане у бројним практичним апликацијама, математички су преликване на примену методе триангулације у одређивању позиције објеката у напредном систему који је предмет ове дисертације, а прецизно је приказана на слици 5.2. где се у две референтне тачке фиксно налазе две видео-камере које су техничка основа система за праћење покретних објеката у спорту.



Слика 5.2. Одређивање позиције објекта методом триангулације

Где је:

l – растојање између референтних тачака,

Камера А – прва референтна тачка,

Камера В – друга референтна тачка,

d – удаљеност посматраног објекта од референтне стране троугла,

α и β – углови између објекта и референтних тачака.

На основу тих поставки следи једначина:

$$l = \frac{d}{\tan \alpha} + \frac{d}{\tan \beta} \quad (5.1)$$

Где је:

l – удаљеност између референтних тачака тј. камера,

d – удаљеност објекта,

α и β – углови између објекта и референтних тачака.

Из једначине (5.1.) даље имамо:

$$d = l / \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right) \quad (5.2)$$

где је d тражена удаљеност објекта.

Како је раније објашњено, према методи триангулације, координате и удаљеност од тачке могу да се прорачунају израчунавањем дужине једне стране троугла, са познатим задатим вредностима углова и страна троугла који формирају та тачка и друге две познате референтне тачке. Важно је напоменути да се формуле могу применити у равни или у еуклидском простору.

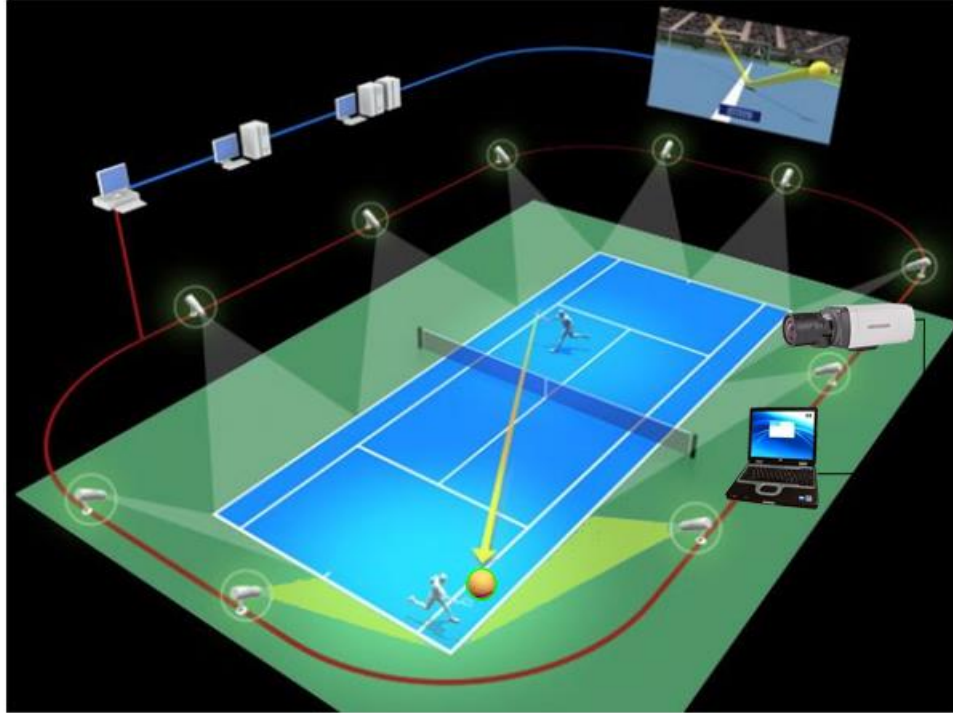
5.1. Хардверска архитектура система

5.1.1. Систем видео-камера

Приликом преноса тениских и фудбалских мечева, публика је имала прилике да и сама уочи главне делове система за електронско одлучивање у спорту, пре свега пуно видео-камера. Основу система чине видео-камере са одговарајућим техничким карактеристикама, постављене на тачно одређеним, предефинисаним местима. На локацијама где је вршено испитивање и тестирање коришћено је до шест видео-камера постављених око простора за надзор. Како се види на следећем примеру, на слици 5.3. имамо 10 видео-камера постављених око надзираног простора за игру заједно са засебним целинама:

- Подсистем за прикупљање сигнала (видео-камере, рачунари и рачунарска мрежа),
- Подсистем за детекцију објеката и њихове позиције,
- Систем за 3D анимацију и графичко приказивање резултата прорачуна.

Јасно се види да је са оваквим распоредом камера које снимају терен за игру мала шанса за појављивање препрека приликом „погледа” камере а самим тим је спречено онемогућавање детекције позиције објеката у надзираном подручју. Све три поменуте целине су међусобно повезане, од почетног прикупљања сигнала са видео-камера и додатних сензора до финалног приказивања резултата на великом дисплеју.

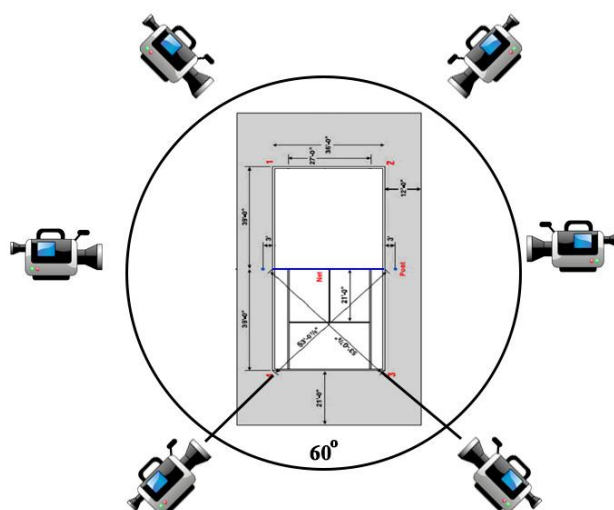


Слика 5.3. Видео-камере постављене око простора за игру

Систем видео-камера има два повезана улаза:

- Видео-сигнал и
- Брзину објекта у простору (која се мери и бележи уређајем за мерење брзине објеката, нпр. доплеровом методом) [53].

Веома је важно прецизно постављање видео-камера пре прикупљања сигнала, као и њихова калибрација, ради добијања што прецизнијих прорачуна и резултата. То су основне поставке и подешавања система видео-камера пре било какве аквизиције сигнала и прорачуна. Видео-камере се постављају високо на трибинама око спортског терена како би се смањила шанса да им се поглед закљони објектима на посматраном подручју. Неке од камера усмерене су у основне линије директно, под одређеним углом, јер су то посебно важна места у простору за прикупљање сигнала. Као што се види на слици 5.4, шест видео-камера које се користе окренуте су под 60° једна у односу на другу.



Слика 5.4. Шест камера распоређених на 60° око терена

Следећа слика 5.5. приказује тип видео-камере који се користи у првом тест систему при тестирању на одређеном подручју. Даљим унапређењем система уведени су и нови типови видео-камера са опремом. [54]



Слика 5.5. Тип камере који је коришћен за тестирање система

У току 2010. године шест видео-камера је тестирано на пробном професионалном тениском терену. Те видео-камере имале следеће техничке карактеристике:

Табела 5.1. Техничке карактеристике видео-камера у систему за праћење

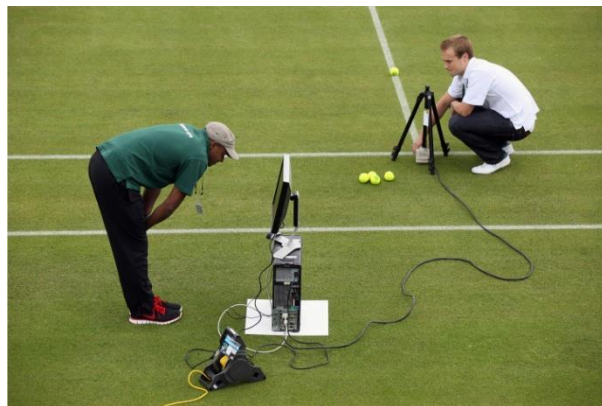
Камера	Оптички сензор:	1/2" Progressive Scan CMOS
	Телевизијски видео-систем:	PAL/NTSC
	Мин. осветљење:	Color: 0.002 Lux @ (F1.2, AGC ON) B/W: 0.0002 Lux @ (F1.2, AGC ON)
	Брзина ел. затварача:	1/1 s to 1/100,000 s
	Навој оптике:	C/CS mount
	Аутоматско подешавање бленде:	DC drive
	Дан и ноћ:	IR cut filter with auto switch
	Широки динамички опсег:	120 dB
	Дигитална редукација шума:	3D DNR
	Фокус:	ABF (-A model)
Стандард компресије	Видео-компресија:	H.264 / MPEG4 / MJPEG
	Брзина протока у bit-има:	32 Kbps ~ 16 Mbps
	Аудио-компресија:	G.711/G.726/MP2L2
	Троструки низ битова:	Yes
Слика	Максимална резолуција	1920 x 1080
	Број слика у секунди (fps):	WDROFF: 50Hz:50fps(1920×1080), 50fps(1280×960), 50fps(1280×720) 60Hz: 60fps(1920×1080), 60fps(1280×960), 60fps(1280×720) WDRON: 50Hz:25fps(1920×1080), 25fps(1280×960), 25fps(1280×720) 60Hz:30fps(1920×1080), 30fps(1280×960), 30fps(1280×720)

	Трећи низ:	Independent with Main Stream and Sub Stream, up to 50Hz: 25fps (1920 × 1080) 60Hz: 30fps (1920 × 1080)
	Подешавање слике:	Saturation, brightness, contrast adjustable with client software or web browser
	BLC:	Support
	Интелигентно уклањање магле:	Support
	EIS:	Support
	ROI:	Up to 4 configurable areas
	Лого у позадини:	LOGO picture can be overlaid on video with 128x128 24bit bmp format
Мрежа	Мрежни диск за складиштење података:	NAS
	Окидач за аларм:	Motion detection, tampering alarm, network disconnect , IP address conflict, storage exception
	Подржани протоколи:	TCP/IP, ICMP, HTTP, HTTPS, FTP, DHCP, DNS, DDNS, RTP, RTSP, RTCP, PPPoE, NTP, UPnP, SMTP, SNMP, IGMP, 802.1X, QoS, IPv6, Bonjour
	Безбедност (аутентиф. и IP заштита видео-камера и података):	User Authentication, Watermark, IP address filtering, anonymous access
	Системска компатибилност:	ONVIF, PSIA, CGI, ISAPI
Интерфејс	Аудио-улаз:	1-ch 3.5 mm audio interface, Mic in/Line in. 1 built-in Microphone
	Аудио-излаз:	1-ch 3.5mm audio interface (line level, 600 Ω)
	Комуникациони интерфејси:	1 RJ45 10M/100M Ethernet port, 1 RS-485 interface and 1 RS-232 interface
	Улаз за аларм:	1
	Излаз за аларм:	1
	Видео-излаз:	1 Vp-p Composite Output (75 Ω, BNC)

	Смештај података на камери:	Built-in Micro SD/SDHC/SDXC card slot, up to 64 GB
	Ресет дугме:	Yes
Опште	Услови на којима видео-камера ради:	-30 °C ~ 60 °C (-22 °F ~ 140 °F) Humidity 95% or less (non-condensing)
	Напајање:	24V AC, ±10% / 12V DC, ±10% , PoE (Power Over Ethernet)
	Потрошња ел. енергије:	Max. 6 W (Max. 9W with IR cut filter on)
	Димензије / Тежина:	69.8×58×145 mm (2.68" × 2.56" × 5.70") / 830 g (1.83 lbs)

5.1.2. Калибрација видео-камера

Поменуте видео-камере око спортског терена калибришу се, тј. подешавају у односу на то колико су удаљене од одређених референтних тачака. Углавном се пре почетка постављања система стављају јасно уочиве беле тачке пречника тениске или фудбалске лопте, или саме тениске лопте, на сваку референтну, то јест на тачку од значаја по терену за игру. Оне олакшавају иницијално подешавање видео-камера и повећавају прецизност основних поставки система. Пример процеса калибрације камера дат је на слици 5.6. [55]



Слика 5.6. Подешавање камера према линијама терена

Калибрација камера или усмеравање, ресекција, јесте процес проналажења правих параметара видео-камера које су произвеле дату фотографију или видео-запис на основу предефинсаног модела посматране сцене, тј. простора за игру. Калибрација чини систем робусним у погледу различитих могућих локација постављања и рада камера око терена. Као резултат, систем нема ограничење локације и оријентације камере, под условом да поглед линије није ометан неком препреком. [56]

Пошто се подешавање камера углавном ради према линијама терена за игру, свако поновно обележавање и фарбање избледелих линија захтева и поновну калибрацију свих видео-камера у систему.

Како би се добили прецизни прорачуни, видео-камере би требало да покривају мања подручја, такозване регионе за надзор. То значи да ће свака видео-камера да сними јаснију слику региона за надзор а самим тим ће и објекат који се детектује бити лакше уочљив и прецизније детектован у милиметрима. Како год, требало би да имамо у виду да је помоћу само шест видео-камера потребно покрити цело посматрано подручје надзора, што не даје велики простор за смањење региона по камери. Ипак, ако се користи минимум шест видео-камера, могу да се добију резултати који су задовољавајући по данашњим стандардима електронског одлучивања, пре свега у фудбалским утакмицама.

Наравно, када се ради почетно подешавање видео-камера, пре сваког прикупљања сигнала и детекције положаја, требало би да се обрати пажња на величину подручја које се посматра. Од тога највише зависи калибрација камера.

Калибрација видео-камера обично се ради постављањем 70 и више истих објеката (лоптица) на тачно одређена места у надзорном простору, како би свака од шест или десет видео-камера могла да се калибрише у односу на референтне тачке. Процес је веома захтеван и траје неколико сати. Неопходно је извршити калибрацију видео-камера за правилну детекцију положаја објеката у простору, нпр. као на слици 5.7.



Слика 5.7. Тениски терен припремљен за калибрацију камера

5.2. Архитектура система

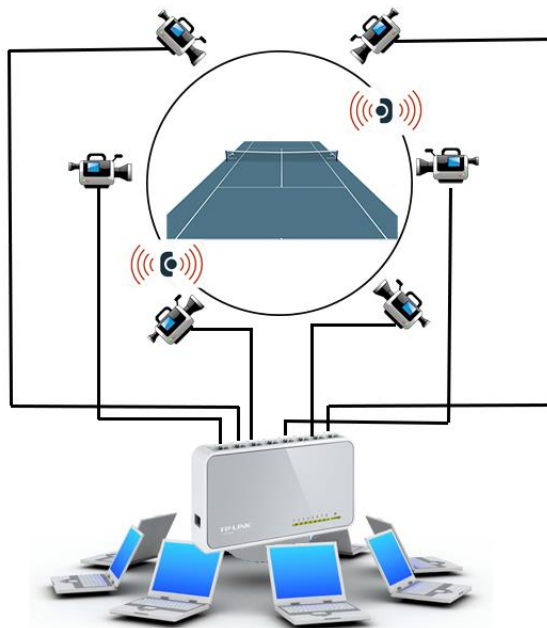
5.2.1. Хардверска архитектура система

Видео-камере имају обавезан мрежни прикључак који служи за пренос података и остваривање везе са другим деловима система. Свака видео-камера је помоћу мрежних каблова категорије UTP 5е повезана са једним рачунаром који врши снимање сигнала и каснију брзу обраду. У пракси се показало да је то најбржи и најпоуздани вид преноса сигнала. Од активне мрежне опреме користи се мрежни свич карактеристика 10/100 Mbit у секунди. Све камере и рачунари спојени су директно на свич. Он, поред осталог, служи и за пренос, преко мрежних каблова, података који су добијени у процесу детекције положаја на рачунар из система за 3D анимацију и графичко приказивање резултата сложених прорачуна. На следећим страницама, на слици 5.8. и слици 5.9. приказано је идејно решење рачунарске мреже система за прикупљање сигнала као и UTP 5е веза између рачунара, мрежне видео-камере и наменских сензора (пре свега за брзину лопте).



Слика 5.8. Веза тест рачунара и мрежне видео-камере UTP 5e каблом

Мрежни кабл категорије 5 је неоклопљени кабл са укрштеним паром за пренос сигнала. Ова врста каблова користи се за структурно каблирање рачунарских мрежа као што је етернет. Стандард ових каблова обезбеђује перформансе до 100 MHz и брзине до гигабитног етернета. Могуће је савијање каблова до угла четири пута величине пречника и растојање на које је могућ пренос сигнала из једног сегмента кабла је око 100 метара. Ова категорија се такође користи за преношење сигнала телефоније и видеа. Наследник категорије 5 је категорија 5е, где е представља *enhanced*, енг. реч за унапређен, и у последње време категорија 6.



Слика 5.9. Основно идејно решење рачуарске мреже видео-камера и сензора

Како је на слици 5.9. јасно приказано, свака мрежна видео-камера има припадајући рачунар као и сензоре брзине кретања, са којима су повезане УТР 5е рачунарском мрежом и једним активним неуправљивим свич уређајем са 16 портова. То основно решење представља хардверску архитектуру подсистема за прикупљање сигнала.

Већ је напоменуто да је, у циљу добијања прецизних резултата детекције положаја објекта у простору, потребно користити мрежне видео-камере са великим бројем слика у секунди (енгл. *high speed frames per second*), такозване брзе камере. Минимум броја слика у секунди је 60 а иду и до вредности од 100. Свака слика записује се у тачно одређеном временском интервалу, који је изузетно важна компонента у математичким прорачунима. Сигнал са видео-камера записује се на сваком појединачном рачунару у AVI видео-формату без додатне компресије. Приликом прикупљања сигнала обавезно је коришћење црно-белог режима видео-записа, тзв. црно-белог мода. Та врста записа многоструко смањује величину записа при аквизицији података и сигнала и време потребно за обављање великог броја операција при детекцији објеката и њихових позиција коришћењем сложених математичких прорачуна који су део геометријских алгоритама.

Као што је већ речено, у процесу подешавања видео-камера, пре саме детекције објеката и позиције, уз примену алгоритама за детекцију, неопходно је и посебно подешавање сваке камере понаособ. Свака камера мора да буде фиксирана, тј. везана за неку референтну тачку, на пример основну линију терена са супротним тачкама почетка. То је посебно значајно уколико желимо да користимо аутоматски програм за спајање слика из различитих видео-камера да бисмо формирали једну 3D слику.

Ако имамо у виду да надзор одређеног простора траје дужи временски интервал, подсистем за прикупљање сигнала може да ради у активном или пасивном моду. То смањује непотребне прорачуне рачунара и самим тим повећава ефикасност. У систему описаном у овој дисертацији користи се искључиво мануелни начин избора мода функционисања. То, поред осталог, повећава будност дежурног оператера на систему и смањује могућност грешке. Све видео-камере у систему за прикупљање сигнала су синхронизоване тако да симултано на даљинску команду почињу са активном аквизицијом или улазе у пасивни надзор задржавајући функционалност и потпуну управљивост. Тај процес одвија се током целог трајања спортске утакмице, тј. догађаја.

Како се види на слици 5.10, описана су прва два корака у процесу рада напредног система, који обухватају подсистем за прикупљање сигнала. На слици 5.10. приказан је реалан пример система употребом две камере у реалном простору на терену прецизних димензија. Приказан је само основни поглед две камере са почетним екранима, без коришћења софтверских апликација подсистема за прикупљање сигнала, док ће софтверска решења са комплетним изгледом бити дата у делу дисертације где се описује тестирање целог напредног система у реалним условима теста на одређеном простору за надзор, тестираном по деловима. Као што може да се види на слици 5.10, прецизне резултате детекције објеката и позиције у простору могуће је добити само по дану, тј. при дневном светлу. У ноћним условима била би потребна велика припрема са великим бројем рефлектора, тачно постављеним на одређеним местима, и коришћење видео-камера са другим техничким карактеристикама, са већом прецизношћу у смањеним условима видљивости и осветљења.

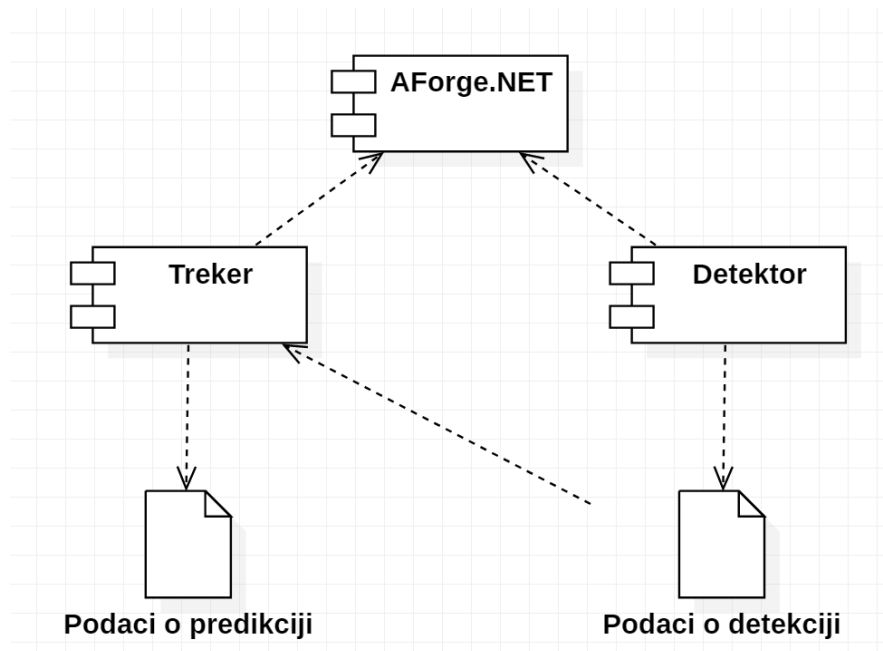


Слика 5.10. Основно идејно решење рачунарске мреже видео-камера и сензора

На претходној слици јасно се види да се прикупљање сигнала врши само са две видео-камере око терена за игру, и да су две видео-камере које дају видео сигнал, рачунарском мрежом повезане са главним рачунаром који се налази у позадини. Камере су постављене према описаном принципу под углом од 60° и део су од шест камера које чине пун круг.

5.2.2. Софтверска архитектура система

На слици 5.11. представљена је софтверска архитектура новог система за детекцију покретних објеката у спорту.



Слика 5.11. Софтверска архитектура система

AForge.NET је програмски оквир који садржи низ класа за имплементирање разних алгоритама за детекцију покрета и обраду покрета у сликама. Развио га је Andrew Kirillov, софтверски инжењер. Ради се о оквиру реализованом у програмском језику C# који пружа основу истраживачима и инжењерима у областима обраде слика, неуронских мрежа, рачунарске графике и анимације, генетских алгоритама, машинског учења, аутоматике, роботике.

Детектор је софтверски програм реализован у C# програмском језику пројектован од стране аутора ове дисертације и врши детектовање покретног објекта на сликама са видео камере и податке са резултатима детекције чува у XML датотеци на хард диску.

Трекер је софтверски програм за предикцију путање кретања покретног објекта, израђен у C# програмском језику, који комуницира са AForge.NET библиотекама и податке о предикцији чува у XML датотеци.

Коришћени развојни програмски оквир је сачињен од низа библиотека и софтверских апликација које су дате као пример употребе функционалности. Како је у питању бесплатни, јавно доступни програмски оквир, он се стално усавршава и унапређује, уз сарадњу и допринос милиона инжењера и програмера широм света. Дошло је до значајног техничког напретка у последњој деценији, пре свега у прецизности прорачуна. Неке од најважнијих делова програмског оквира су:

- **AForge.Imaging** – библиотека са рутинама за обраду слике и филтерима [57]
- **AForge.Fuzzy** – фази логика библиотека за прорачуне
- **AForge.Vision** – библиотека са функцијама за компјутерске видео-системе
- **AForge.Neuro** – библиотека за прорачун неуронских мрежа [58]
- **AForge.Genetic** – еволутивна библиотека за програмирање
- **AForge.Robotics** – библиотека за подршку неким роботским склоповима
- **AForge.MachineLearning** – библиотека за машинско учење [59]
- **AForge.Video** – низ библиотека за видео-обработку тј. обработку видео сигнала [60].

Првенствено је неопходно уочити и дефинисати које су то промене које могу значајно да утичу на прецизност детекције, пре свега од стране техничке видео-опреме. Од правилног урачунавања тих фактора зависи и поузданост каснијих прорачуна у процесу детекције објеката. У велике промене првенствено спадају:

- промена осветљења посматраног објекта (светла у посматраном простору су се упалила или угасила, Сунце је обасјало задати праћени објекат),
- блокирање погледа видео-камере, тзв. препреке,
- ненамерна промена погледа видео-камере малом променом позиције видео-камере,
- појава објеката у простору који нису предмет праћења (птице, балони, инсекти),

- објекти посматрања одједном стану у месту после брзог кретања.

Пример програмског кода иницијализације у програмском оквиру AForge.NET је:

```
// направи детектор покрета

MotionDetector detector = new MotionDetector(

    new SimpleBackgroundModelingDetector( ),

    new MotionAreaHighlighting( ) );

// континуално убацуј видео-слике у детектор покрета

while ( ... )

{

    // обради нову видео-слику и пронађи ниво покрета

    if ( detector.ProcessFrame( videoFrame ) > 0.02 )

    {

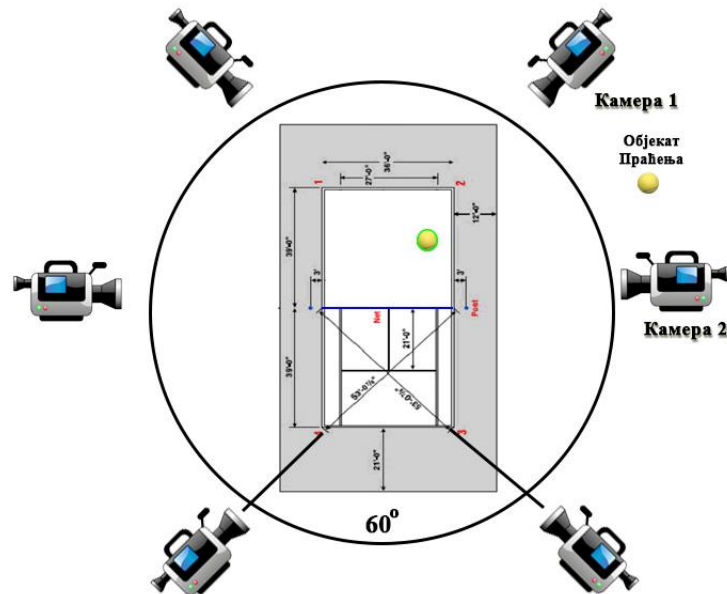
        // огласи аларм или нешто друго

    }

}
```

Након фазе препознавања објекта долазимо до примене геометријског алгоритма. Тај алгоритам је изузетно важан за детекцију позиције објекта у простору. На свакој слици од сваке видео-камере у подсистему за прикупљање сигнала одређује се x и y координата посматраног објекта. Како су у питању дводимензионалне слике, недостаје трећа просторна координата z . Пошто познајемо тачне позиције видео-камера у простору, и њихов положај у односу на терен, и x и y координате објекта на великом броју слика са видео-камера, можемо да одредимо прецизан положај посматраног објекта у 3D простору.

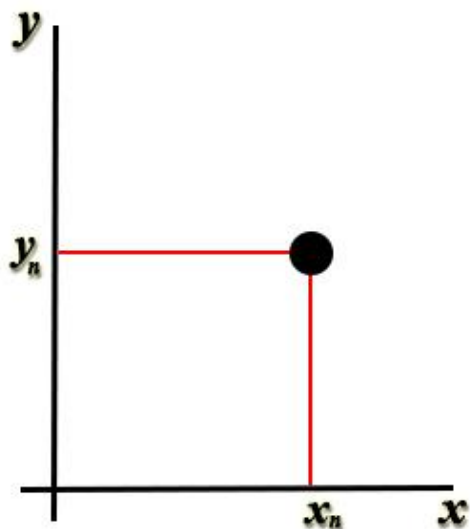
Важно је напоменути да се у сваком оваквом детектовању положаја примењује сличан алгоритам заснован на просторним математичким методама. У нашем примеру, поставићемо на почетку све видео-камере у једну раван у нивоу терена, тако да посматрају једну раван паралелну са тереном. Ако имамо познате (x_1, y_1) и (x_2, y_2) позиције прорачунате из препознавања праћеног објекта на дводимензионалним сликама са Камере 1 и Камере 2 на слици 5.12, можемо да прорачунамо и 3D позицију објекта у простору. На слици 5.12. објекат је приказан зеленим и жутим кругом на простору подручја надзора, на одређеној висини изнад тла. Нека у овом примеру праћени објекат буде мала компактна лопта, са унапред тачно одређеним димензијама и карактеристикама.



Слика 5.12. Одређивање позиције објекта у 3D простору

Како је показано на претходној слици, дата је основна поставка система, а посебно је важно уочити да су видео-камере окренуте под углом од 60° једна у односу на другу, тако да у овом примеру укупно обухватају пун круг, тј. 360° за шест видео-камера. Тиме се са мањим бројем видео-камера повећава могућност тачне детекције положаја праћеног објекта у простору кроз детекцију покрета несметану од других објеката у надзорном подручју.

Затим, поглед Камере 2 са слике 5.12. у дводимензионалном простору изгледа као на слици 5.13, у наставку:



Слика 5.13. Поглед Камере 2

У овом примеру, висину праћеног објекта у простору директно представља у координата, тј. на сликама са Камере 1 и Камере 2 то су координате y_1 и y_2 . Уколико те две вредности нису идентичне, онда узимамо средњу вредност. Сада одређујемо дубину објекта у простору, коју види Камера 2. Када прорачунамо ту вредност, имаћемо све променљиве које су нам потребне да бисмо одредили положај објекта у 3D простору. Наравно, позиције видео-камера у односу на терен су унапред задате и познате.

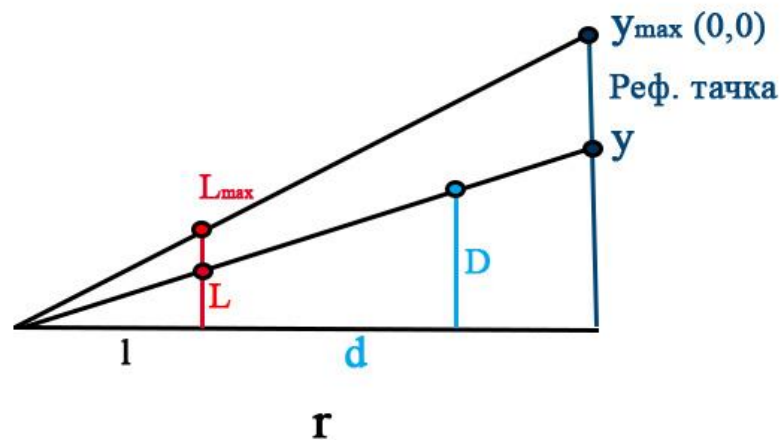
Ако претпоставимо да је радијални угао, уколико га посматрамо из средишње линије терена који је надзирано подручје, тј. мреже која је на средини подручја, између Камере 1 и Камере 2 је угао θ и полупречник подручја надзора као на слици 5.14. је r , x_1 је координата објекта на видео-камери у 2D. Дубина објекта у простору како види Камера 2 могла би да се прорачуна помоћу следеће једначине:

$$\text{Дубина} = r - (r \cos(\theta) + |x_1| \sin(\theta)) \quad (5.3)$$

Где је

r – полупречник подручја надзора, круга на коме су постављене видео-камере.

Детаљном применом математичког модела који је саставни део подсистема за детекцију објеката и позиције у тродимензионалном простору, можемо прецизно да прорачунамо све просторне променљиве положаја праћеног објекта. На слици 5.14. приказан је графички начин одређивања преосталих непознатих у систему.



Слика 5.14. Одређивање висине на којој је праћени објекат у простору

Као што се види на слици 5.14. познате величине су:

L – која представља удаљеност објекта од тла како се види на видео-камерама 1 – 6

L_{\max} – која представља максималну висину од тла коју видео-камера може да региструје

U_{\max} – која представља максималну висину са видео-камере у важној референтној тачки у координатном почетку $(0,0)$ који се налази на средини мреже, тј. терена који је подручје надзора

r – која је унапред позната величина удаљености сваке видео-камере од координатног почетка, полупречник круга на коме су постављене видео-камере.

На основу тога долазимо до пропорција на следећој страници:

$$\frac{l}{L} = \frac{d}{D} \quad (5.4)$$

и

$$\frac{y}{r} = \frac{D}{d} = \frac{L}{l} \quad (5.5)$$

Даље из пропорција имамо:

$$\frac{l}{L_{max}} = \frac{r}{y_{max}} \quad (5.6)$$

Одакле прорачунавамо:

$$l = \frac{r * L_{max}}{y_{max}} \quad (5.7)$$

Где су у горњим једначинама:

L – удаљеност објекта од тла како се види на видео-камерама 1 – 6

L_{max} – максимална висина од тла коју видео-камера може да региструје

U_{\max} – максимална висина са видео-камере у важној референтној тачки у координатном почетку $(0,0)$ који се налази на средини мреже, тј. терена који је подручје надзора

r – која је унапред позната величина удаљености сваке видео-камере од координатног почетка, полупречник круга на коме су постављене видео-камере

d – дубина објекта у простору

D – стварна висина праћеног објекта у простору који је надзиран.

Непозната d се прорачунава применом методе већ поменуте триангулације, променљива названа **дубина**. Сада је јасно да познајући променљиве d , l , L можемо једноставно да прорачунамо и тражено D , које представља стварну висину на којој се објекат налази у простору у односу на тло.

Овај процес се понавља на сваком рачунару и за сваку видео-камеру из подсистема за прикупљање сигнала.

Од велике је важности подешавање свих видео-камера у простору пре самог процеса прикупљања сигнала и детекције положаја објеката у простору јер то директно утиче на математичке прорачуне и једнозначно одређује неопходне променљиве у систему. Зато се и највише времена посвећује правилном и прецизном постављању система, који обухвата не само калибрацију и постављање видео-камера него и оба ова процеса и за саме рачунаре који чине део и основу сва три независна система.

На приказани начин, ако израчунамо координате лопте у две камере, можемо да прорачунамо позицију објекта у 3D простору у односу на једну видео-камеру и, наравно, у односу на референтну линију на терену.

Један пример подручја надзора приказан је уз основну поставку видео-камера. У реалном примеру видео-камере су, наравно, постављене високо изнад терена и под одређеним углом, тако да прорачунавање висине лопте у простору није тако једноставно. Потребно је прецизно ротирање осе ради тачних прорачуна. У овом примеру имали смо

само планарну геометрију. Ипак, у основи свих прорачуна, поштујући начин који је остварен у овом систему, јесте стандардна просторна математика.

Сада кад имамо одређену 3D позицију праћеног објекта у простору у тачно одређеном временском тренутку у односу на референтне тачке које смо постављали када је систем припреман за употребу, да би било могуће приказати путању објекта у простору, сви подаци и прорачуни о детекцији положаја у разним временским тренуцима морају да се сакупе на једно место, то јест у једну математичку путању. Овај процес се може поделити на два логичка дела за прорачунавање:

- Праћење објекта у различитим временским тренуцима, рачунање n тачака (x_i, y_i, z_i) , за $0 \leq i \leq n$
- Предвиђање путање објекта у простору.

Ако сагледамо први део имамо следећу ситуацију: слике са видео-камера у систему се узимају у временским тренуцима t_0, t_1, \dots, t_n за време једног надзорног интервала, у нашем примеру време једног играња лоптом. Ако извршимо прорачуне као што смо раније описали у сваком временском тренутку t_i , $0 \leq i \leq n$, израчунаћемо n тачака, рецимо (x_i, y_i, z_i) за $0 \leq i \leq n$. Тада, на основу 3D модела који је предефинисан и прецизно урађен и описан у поглављу 5.2.3, вршимо исцртавање свих n тачака. Поштује се низ од одређеног броја тачака и, оптимизовано, перформансе графичких процесора рачунара за 3D приказ.

Наредна фаза је уједно и финална фаза – предвиђање путање објекта у 3D простору. Пошто имамо n тачака у простору које представљају позицију објекта у простору у тачно одређеном временском тренутку, можемо да применимо стандардну технику. Она се користи у пољу **комјутерски подржаном геометријском дизајну**, а може се применити и у овом примеру. Омогућује цртање добре апроксимације оригиналне криве путање пролазећи кроз задате тачке.

То је последица *Weierstrass*-ове теореме апроксимације која тврди да за задату континуалну функцију $f()$ и ζ који представља ниво толеранције који може да се приушти, можемо да пронађемо полиномну апроксимацију $g()$ такву да је $|f(x) - g(x)| < \zeta$ за свако x . Ова техника за резултат има криву која је континуална и диференцијабилна, што у ствари

значи да је правилна у целисти, у целом интервалу од наших n тачака [61]. Та крива је апроксимација оригиналне криве коју је покретни објекат следио. Што више тачака прорачунамо, тачнија је и апроксимација оригиналне криве. То захтева процесорску снагу и снагу и време рачунара за компликоване прорачуне, па се мора узети у обзир оптимизација поменутог процеса.

Мало време рачунања \rightarrow прихватљива тачност.

Вајерштрасова теорема тврди да се свака непрекидна функција на затвореном интервалу може равномерно апроксимирати полиномима. За ову теорему постоји више доказа и различитих уопштења. Један од доказа те теореме је Бернштајнов пробалистички доказ. Овај доказ даје експлицитно полиноме којима се врши апроксимација непрекидних функција а такође и оцена брзине конвергенције. [61]

Теорема (Вајерштрас): Нека је f реална непрекидна функција дефинисана на одсечку $[a, b]$. Тада за свако $\zeta > 0$ постоји такав полином $P(x)$, да важи:

$$|f(x) - P(x)| < \epsilon \quad (5.8)$$

за свако $x \in [a, b]$. [62]

Доказ Вајерштрасове теореме (Бернштајн): Довољно је доказати теорему за случај када је f дефинисана на одсечку $[0, 1]$. Заиста, линеарном сменом аргумента прелази се са функције f дефинисане на одсечку $[a, b]$ на функцију $g(x) = f(a + x(b - a))$ дефинисану на $[0, 1]$ и обратно.

Нека је f непрекидна функција дефинисана на интервалу $[0, 1]$. Полином

$$B_n(f, p) = \sum_{k=0}^n f\left(\frac{k}{n}\right) \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}, 0 \leq p \leq 1 \quad (5.9)$$

зове се Бернштајнов полином функције f , а B_n се зове Бернштајнов оператор.

Показаћемо да важи:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \max_{0 \leq p \leq 1} |f(p) - B_n(f, p)| = 0 \quad (5.10)$$

Означимо са X случајну променљиву са биномном расподелом $B(n, p)$, то јест

$$P\{X = k\} = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}, k = 0, 1, \dots, n \quad (5.11).$$

Њено очекивање и дисперзија су $EX = np$, $DX = np(1-p)$. Имамо да је

$$B_n(f, p) = E\left(f\left(\frac{X}{n}\right)\right) \quad (5.12)$$

Ако са S_n означимо суму $S_n = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n$, где случајне променљиве $Y_j, j = 0, 1, \dots, n$, имају Бернулијеву расподелу, $P\{Y_j = 0\} = 1 - p$; $P\{Y_j = 1\} = p$, тада њихова сума S_n има биномну расподелу $B(n; p)$.

Пошто важи Бернулијев закон великих бројева, имамо да је

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left\{\left|\frac{S_n}{n} - p\right| > \epsilon\right\} = 0 \quad (5.13)$$

а пошто је f непрекидна функција, онда ће и $f(S_n/n)$ бити блиско $f(p)$ за довољно велико n .

Функција f је непрекидна на затвореном интервалу $[0, 1]$, па је она на њему равномерно непрекидна тј. важи да за свако $\epsilon > 0$ постоји $\delta > 0$ такво да је $|f(x) - f(y)| \leq \epsilon$ за $|x - y| \leq \delta$, $x, y \in [0, 1]$. Осим тога функција f је и ограничена, тј. постоји константа M таква да је $|f(x)| \leq M$ за $0 \leq x \leq 1$. Користећи те чињенице, добијемо следеће оцене:

$$\begin{aligned} |f(p) - B_n(f, p)| &= \left| \sum_{k=0}^n \left(f(p) - f\left(\frac{k}{n}\right) \right) \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \right| \\ &\leq \sum_{\left\{k: \left|\frac{k}{n} - p\right| \leq \delta\right\}} \left| f(p) - f\left(\frac{k}{n}\right) \right| \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{\{k: |\frac{k}{n} - p| > \delta\}} \left| f(p) - f\left(\frac{k}{n}\right) \right| \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \leq \\
& \leq \epsilon + 2MP \left\{ \left| \frac{S_n}{n} - p \right| > \delta \right\} \quad (5.14)
\end{aligned}$$

(користимо Чебишевљевоу неједнакост)

$$\leq \epsilon + 2Mp(1-p)n^{-1}\delta^{-2} \quad (5.15)$$

(користимо да је $p(1-p) \leq \frac{1}{4}$ за $0 \leq p \leq 1$)

$$\leq \epsilon + M2^{-1}n^{-1}\delta^{-2} \quad (5.16)$$

Дакле, доказано је да

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \max_{0 \leq p \leq 1} |f(p) - B_n(f, p)| = 0 \quad (5.17).$$

Овај доказ даје експлицитно полиноме којима се врши апроксимација непрекидних функција а такође и оцену брзине конвергенције.

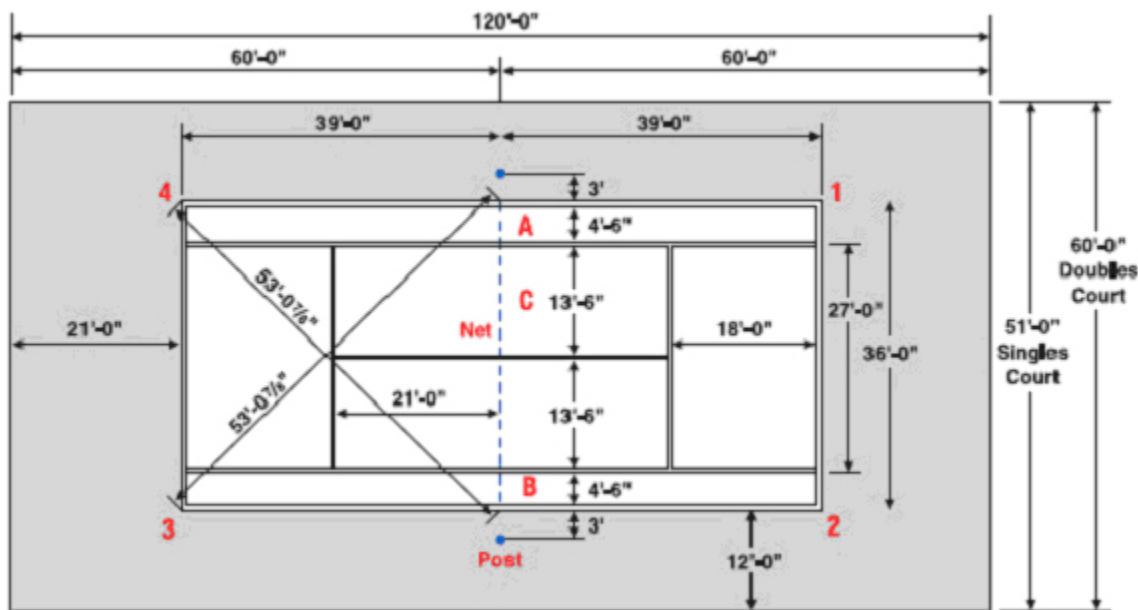
5.2.3. Систем за 3D симулацију, анимацију и графичко приказивање резултата

Визуелни доживљај и утисак сваког посматрача на телевизији, гледаоца уживо или активног учесника спортског догађаја достиже нову димензију, нови степен узбуђења, поверења у електронске судијске одлуке, а и забаву увођењем система за проверу судијских одлука. Основа система који је развијен у оквиру дисертације чине рачунари, камере и сензори, као и софтверске апликације које су реализоване у MS Visual C++ програмском језику уз употребу OpenGL графичке библиотеке. Сви резултати и математички прорачуни из претходних подсистема за прикупљање сигнала и детекцију објеката и њихове позиције

у простору јесу улазне променљиве за овај систем. Он фотореалистично приказује путању у 3D простору заједно са фотореалистичним окружењем и целим 3D простором, многобројним статистичким подацима, апроксимацијама и разним врстама погледа како терена за игру и околине тако и самих играча.

Овај напредни систем одликује изузетна прецизност која иде до друге децимале милиметра доказане у практичном тестирању. То значи да је овај систем пројектован и израђен тако да прецизност тродимензионалног простора иде чак до стотог дела милиметра.

Прецизну метричку основу за овај визуелни систем представљају тачне димензије подручја за надзор, тј. простора за игру, у овом случају терена за тенис. Те димензије су приказане на слици 5.15. и користе се у ранијим подешавањима и прорачунима, у претходна два система. Све димензије су исказане у инчима, јер се официјелно тело које испитује тачност оваквог система ИТФ – *Интернационална тениска федерација* – налази на територији Сједињених Америчких Држава. Тако је димензиони модел:



Слика 5.15. Тачне димензије надзираног терена за тенис

Иначе, предлог побољшања постојећих система у свету обухвата две главне области у два претходно описана система:

1. Побољшање система за 3D симулацију, анимацију и графичко приказивање резултата
 - Смањење треперења графичке слике у 3D приказу код система до 2016. године
 - Повећање брзине рендеровања 3D графике
 - Повећање графичке прецизности у 3D.

Техника која је коришћена за добијање велике прецизности и смањење *flickeringa*, тј. треперења слике и објеката у 3D графичком приказу, примећеног код јавног *Hawk Eye* система до 2016. године, јесте оригинална идеја аутора дисертације и реализована је у целом напредном систему. Линија која се налази у надзорном простору електронски се прави тако да има изузетно велику резолуцију и величину, пре свега визуелну ширину, која се касније у програмском коду сабија, односно компресује до прецизности од стотог дела милиметра.

Тако се, поред изузетно велике прецизности и тачности елиминише и *flickering*, односно треперење слике и треперење свих објеката у 3D простору на графичком приказу, што је унапређење и саме OpenGL графичке библиотеке и значајно убрзање фотореалистичног 3D приказа. Дакле, све линије у 3D фотореалистичном приказу се исцртавају на поменути начин, са програмерским и графичким техникама и текстурама веома високе резолуције (минимум 4096 x 4096 пиксела) и визуелном ширином од преко пола метра.

Исти принцип се користи и код 3D графичког цртања мреже као централне референтне линије и средине целог надзорног простора, тј. подручја.

Дуге линије и мрежа у 3D приказу исцртавају се тако што су подељене на хиљаде визуелно компресованих *tga* текстура високе резолуције.

и:

2. Побољшање подсистема за детекцију положаја објеката у простору

- У практичној реализацији, основа подсистема за детекцију објеката и њихове позиције је AForge.NET framework програмско окружење. У питању је модеран и брз програмски оквир реализован у програмском језику C# који је дизајниран и пружа основу истраживачима и развојним инжењерима у областима компјутерских видео-система и вештачке интелигенције – обраде слика, неуронских мрежа, генетичких алгоритама, самосталног учења рачунара, аутоматике, роботике и другим. Коришћени су различити алгоритми и верзије у софтверским апликацијама израђеним у различитим програмским језицима.
- Оптимизација у самом C++ и C# програмском коду избором типа променљивих и рационалним коришћењем функција, којом је добијено брже коришћење математичких алгоритама за детекцију позиције и покрета.
- Све библиотеке са математичким алгоритмима за детекцију положаја и покрета као и библиотеке за прикупљање видео-сигнала биле су у оквиру једног Visual Studio 2010 и 2013 пројекта што значајно убрзава рад и смањује грешке у односу на досадашња решења и системе.

Аутор ове дисертације, по први пут и за разлику од постојећих решења у спорту, предлаже нову архитектуру система која је базирана на следећим техничким иновацијама:

- Примена новог програмског оквира у оквиру којег су и нове библиотеке за детекцију позиције и путање објеката *AForge.NET*
- Употреба нових камера, увођењем видео-резолюције као веома битне карике у детекцији објеката, типа акциона спортска камера 4K, 240/120/60, високих перформанси пре свега високе видео-резолюције *Ultra HD* и мањег финансијског улагања.

Као што је потврђено и наведено у наставку дисертације у поглављу са тестирањима, експериментима и компаративној анализи резулата, видео-резолюција значајно утиче на

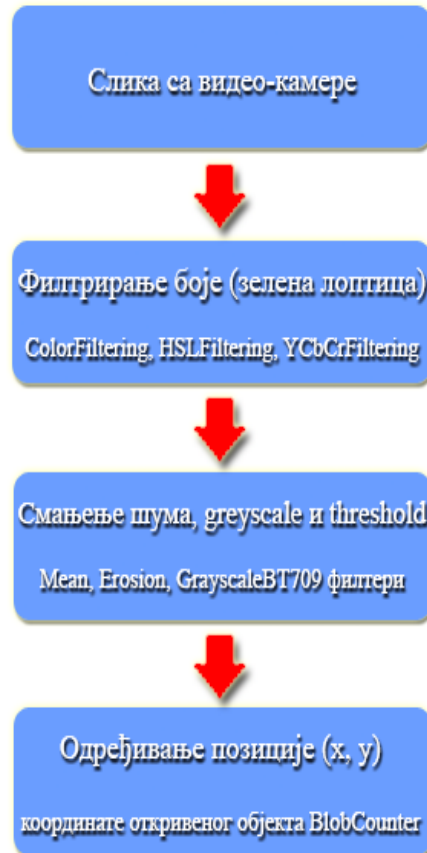
прецизну и поуздану детекцију објекта на видео-сликама. Најважнији задатак система представља да се пронађе објекат на слици.

Досад је видео-резулација била споредна, другоразредена карактеристика приликом пројектовања система за праћење објеката у спорту. Пресудна је била брзина камера у сликама у секунди са теоријом: што више слика, више шансе за детекцију објекта.

Предлог аутора ове дисертације је: што боља слика, са вишом видео-резулацијом, то је већа шанса за детекцију објекта. Већим бројем приступачнијих, наведених камера у предлогу нове архитектуре осигурава се поуздано праћење детектованог објекта у простору. Уводи се нова софтверска архитектура, програмски оквир са новим алгоритмима који нису употребљавани у постојећим професионалним системима у спорту.

Истовремено, први пут се употребљава поменути програмски оквир за ове намене у спорту. Он доноси нове, описане алгоритме за детекцију и праћење објеката.

Сумирано, предлог новог алгоритма система за детекцију објеката и позиције изгледа као на слици 5.16:



Слика 5.16. Color tracking процес за детекцију објеката и позиције

Примењени процес са претходне слике у предложеној архитектури софтверског система назива се *color tracking* (праћење боја). Аутор ове дисертације изабрао је и тестирао ове кораке у процесу праћења објеката применом *AForge.NET* програмског оквира.

Пошто у систему имамо само један објекат од интереса који се прати – тениска лоптица, излаз алгоритма са прорачунатим координатама откривеног објекта задовољава прецизно праћење. На улазну слику са видео-камере прво се примењују колор филтри *Color Filtering*, *HSL Filtering*, *YcbCr Filtering* да би се детектовао и лоцирао објекат зелене боје. Прецизно се наводи распон компоненти боје за детектовање. Затим се примењују *Mean* и *Erosion* филтри за смањење шума и задају прагови и параметри функција за детекцију. Одређивање позиције објекта и његових димензија врши се применом *Blob Counter* процедуре, која проналази засебне објекте. Пошто класа за одређивање позиције помоћу

функција *Process Image* и *Get Object Rectangles* ради са црно-белим сликама, примењујемо *Grayscale BT709* филтер да би добили *Grayscale* слику. Резултат процеса су величина и позиција (x, y координате) откривеног објекта.

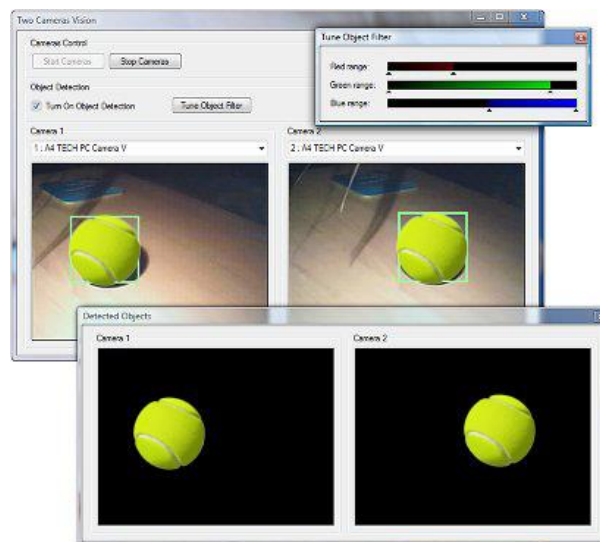
На овај начин процес одлично функционише и без примене Калмановог или алфа-бета филтра. Исто важи и ако имамо више предмета различите боје који се крећу и детектују (играч, рекет и лоптица).

Калманов филтер требало би применити уколико имамо више покретних објеката исте боје. Пример теста апликације са подешавањем параметара примењеног колор-филтра са програмским кодом дат је у наставку и на слици 5.17: [42]

```
// направи колор филтер
ColorFilteringcolorFilter = new ColorFiltering( );

// конфигуриши филтер за зелену тениску лоптицу
colorFilter.Red   = new IntRange( 180, 215 );
colorFilter.Green = new IntRange( 175, 220 );
colorFilter.Blue  = new IntRange( 0, 0 );

// примени филтер
Bitmap objectImage = colorFilter.Apply( image );
```



Слика 5.17. Подешавање колор- филтра

6. Тестирање и експериментални резултати

У току 2010, 2015. и 2019. године извршено је детаљно тестирање основног и напредног система за праћење покретних објеката у спорту. Оно је обављено у неколико секвенцијалних фаза. Редослед је био:

- Симулација рада целог система;
- Тестирање система у лабораторијским условима;
- Тестирање система у реалним условима;
- Припрема документације за званично испитивање система за добијање сертификата.

Свака од ових фаза одликовала се следећим карактеристикама:

- Потребно време за тестирање и добијање резултата
- Потребни ресурси (људски и материјални – технички)
- Потребна финансијска средства.

Прве две фазе изведене су у потпуности, пре свега на тест систему са акцентом на визуелној презентацији и комерцијалној остварљивости пројекта.

Трећа фаза је захтевала изузетно велика улагања у погледу броја ангажованих људи као и материјална улагања. Извршена је само у делу припреме целог система, без конкретних практичних резултата. У припрему спадају конкретни договори са власницима подручја на којима би се изводило тестирање и испитивање. Постигнути су прецизни договори и темини тестирања. Поред аутора дисертације био је неопходан и велики број

техничког особља и особља на просторима за праћење игре, као и адекватна технички веома захтевна опрема.

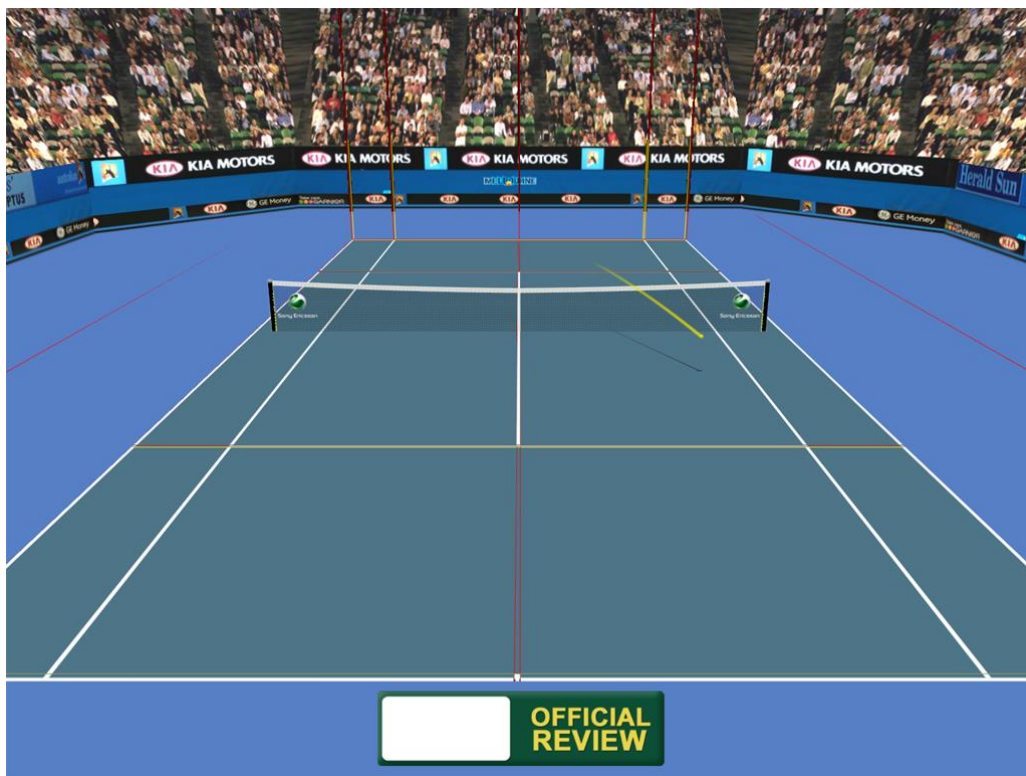
Симулација целог система извршена је у следећим независним деловима:

- Систем за 3D анимацију и графичко приказивање резултата прорачуна
- Подсистем за прикупљање сигнала.

6.1. Симулација рада система

Што се тиче система за 3D анимацију и графику, тестиране су све функционалности у тродимензионалном простору са посебним акцентом на прецизност визуелног приказа. Као што је већ поменуто, прецизност простора у тродимензионалном графичком приказу користећи Visual C++ и OpenGL графичке библиотеке иде чак до стотог дела милиметра.

Све ове тезе, и симулација и тестирање, приказане су на сликама у наставку са којих се јасно види да систем за 3D анимацију и графику нема и не може технички да има негативан утицај на резултате прорачуна и детекције позиције објеката у простору и прикупљања сигнала у погледу тачности и прецизности резултата док, насупротив томе, има велики позитиван утицај својом прецизношћу, брзином и атрактивношћу, што су му и предности у односу на друге постојеће системе.



Слика 6.1. 3D анимација и графичко приказивање резултата прорачуна

На слици 6.1. јасно су црвеним и жутим линијама означена битна подручја за систем за детектовање позиције објеката у простору са њиховом провером у погледу прецизности до стотог дела милиметра, за растојања у простору надзора од преко 10 метара. Додате графичке линије су уједно и контролне линије током експерименталног тестирања прикупљањем сигнала са видео-камера.

На слици 6.2. могуће је видети изглед једне текстуре за линију подручја за праћење – тениског терена. Она има изузетно велику резолуцију и величину, пре свега визуелну ширину, која се касније у програмском коду сабија односно компресује до прецизности од стотог дела милиметра.



Слика 6.2. Изглед текстуре за линију терена

Тако се, поред изузетно велике прецизности и тачности елиминише и *flickering*, односно треперење слике и треперење свих објеката у 3D простору на графичком приказу, што је унапређење графичког приказа и значајно убрзање фотореалистичног 3D приказа. Дакле, све линије у 3D фотореалистичном приказу се исцртавају на споменути начин, са програмерским и графичким техникама и текстурама веома високе резолуције.

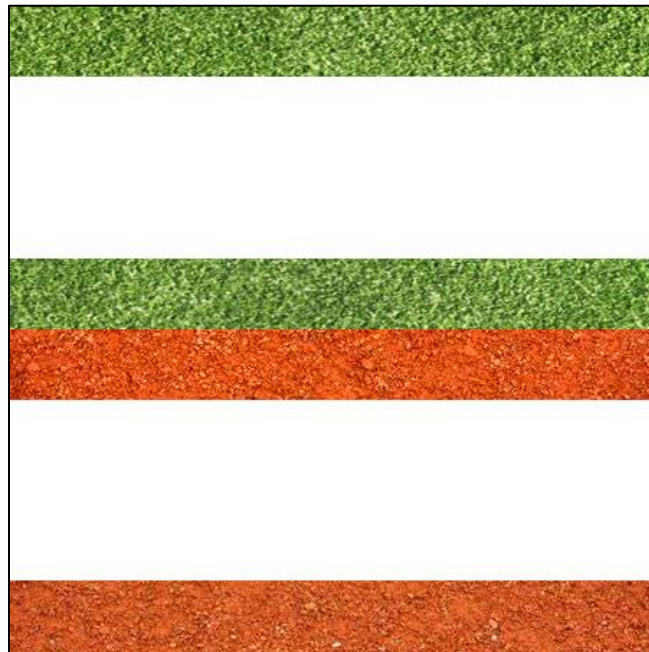
Текстура коју је аутор направио да представи све линије у подручју праћеног спортског терена је у *tga*, *тарга* графичком формату, са 32 бита по пикселу. Од велике је важности да све прецизне текстуре буду у том формату јер *тарга* формат са 32 бита има и *alphachannel*, такозвани алфа канал за провидност слика и текстура. У алфа каналу се налазе подаци који су делови текстуре провидни, а који нису. Такође, све текстуре су у веома високој резолуцији, са визуелном ширином од преко пола метра, док у 3D графичком приказу имају само пет до шест центиметара. Као што је напоменуто, користи се техника компресије и брзог исцртавања у три димензије, имплементирана и реализована у програмском коду чији су неки делови наведени у наставку.

Тиме је постигнута не само веома висока тачност симулације и тродимензионалног приказа и исцртавања него и висока визуелна атрактивност графичког приказа и анимације као и елиминација поменутог *flickeringa*, тј. треперења слике и објеката на слици.

Како *tga* графички формат није захтеван у погледу електронске величине слика, у многоме се штеди на процесорским и меморијским капацитетима графичких 3D картица

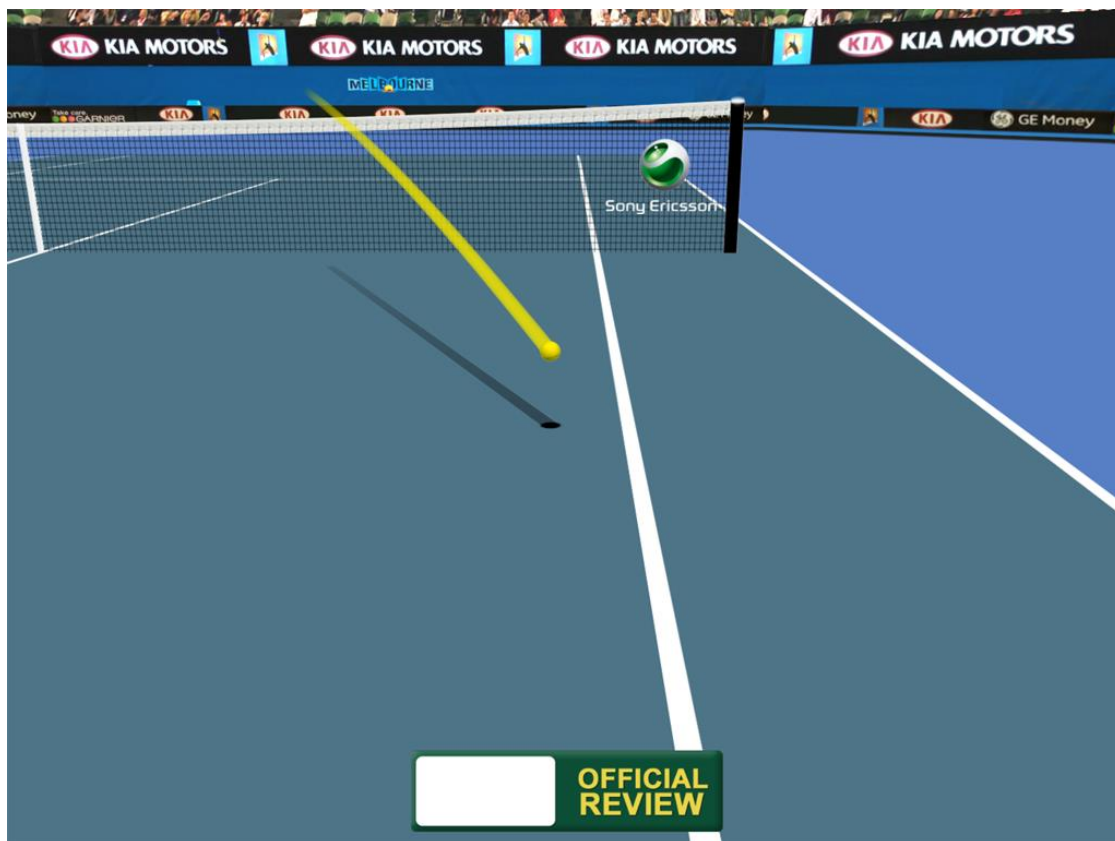
коришћених рачунара у овом систему за 3D симулацију, анимацију и графичко приказивање резултата.

Дуге линије у 3D приказу исцртавају се у програмском коду подељене на хиљаде визуелно компресованих *tga* текстура високе резолуције. На сличан начин, исцртава се у програмском коду и централна мрежа, тј. референтна линија надзираног подручја. Подељена је на хиљаде малих текстура са високом резолуцијом и алфа каналом у *tga* текстурама. Тиме је значајно смањен *flickering*, односно треперење које је примећено скоро код свих других постојећих система до 2016. године. Тиме је атрактивност тродимензионалне анимације и графике овог система значајно већа у односу на друге системе и то почев од 2009. године, када постојећи системи још нису били на том визуелно-графичком нивоу [15] па су, због мање захтевних графичких компоненти система и рачунара, и материјална средства потребна за изградњу, коришћење и изнајмљивање овог система значајно мања.



Слика 6.3. Изглед фотореалистичних текстура за линију терена

Слика 6.3. приказује изглед текстура линије за остале подлоге тениских терена, поред бетона, траве и шљаке, реализованих у овом систему. Као и остали графички делови, и ова текстура је фотореалистична.

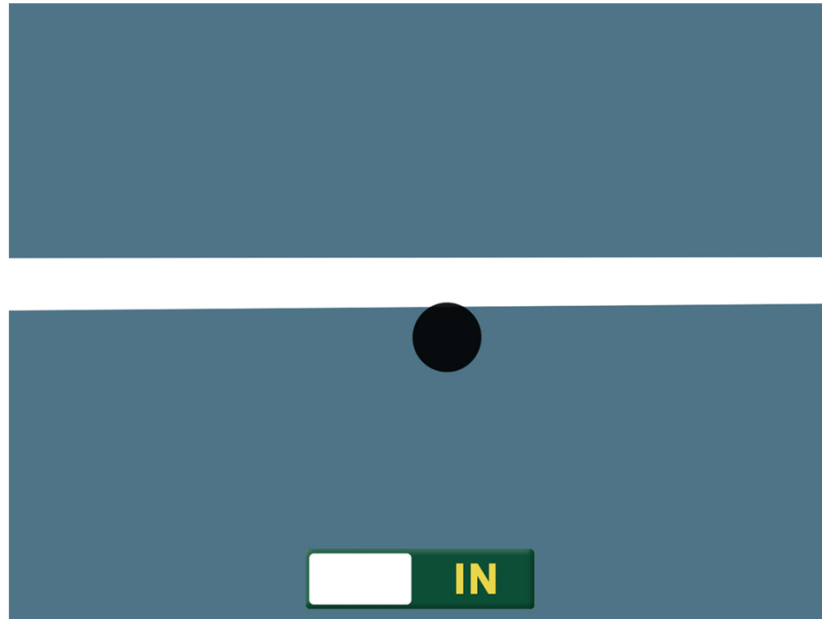


Слика 6.4. Реални изглед 3D симулације и фотореалистичне анимације

Као што се на види на слици 6.4, све линије су кристално јасне и праве, док се на мрежи не може приметити ни делић *flickeringa*, тј. треперења које је често у постојећим системима (приказан је снимак екрана у реалном времену OpenGL анимације). Овде је уочљив објекат праћења, тј. тениска лопта како одређеном путањом прелази мрежу и иде ка подлози терена. У исто време, за разлику од система на слици 2.20, имамо одговарајући, потпуно исправан траг сенке. Јасне су велике графичке квалитативне разлике у системима аутора и постојећих система у свету приказаних на сликама 6.4. и 2.20.

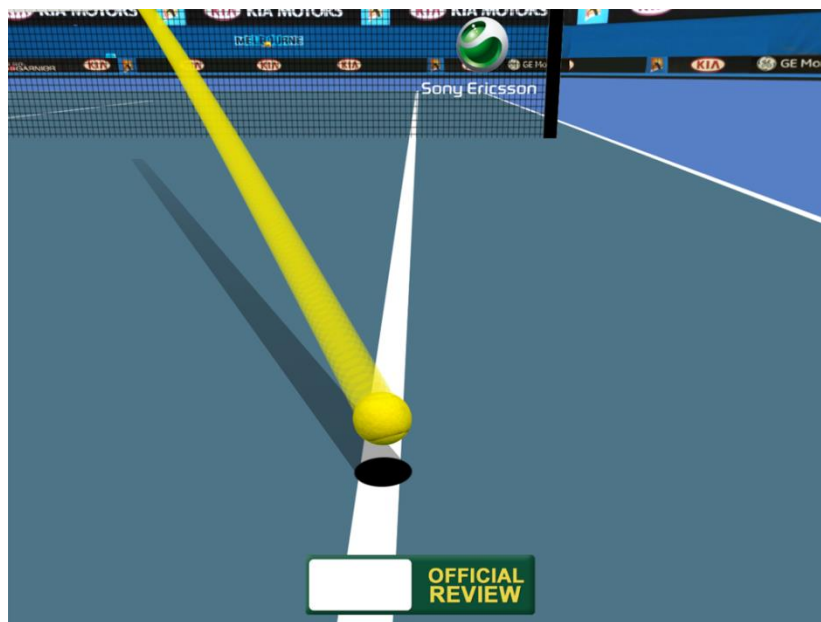
Крајњи резултат рада система за праћење покретних објеката у спорту приказан је на слици 6.5. Иначе, у програмирању рачунарске 3D графике траг лопте на подлози могуће је исцртати на два начина:

- Употребом *multitexturinga*, OpenGL технологије за стављање више текстура на исту површину екрана, тј. меморијског простора графичке картице или додељене графичке меморије, практично једна текстура преко друге;
- Употребом једне текстура за траг која се налази на висини од десетог дела милиметра од подлоге, тј. терена за игру.



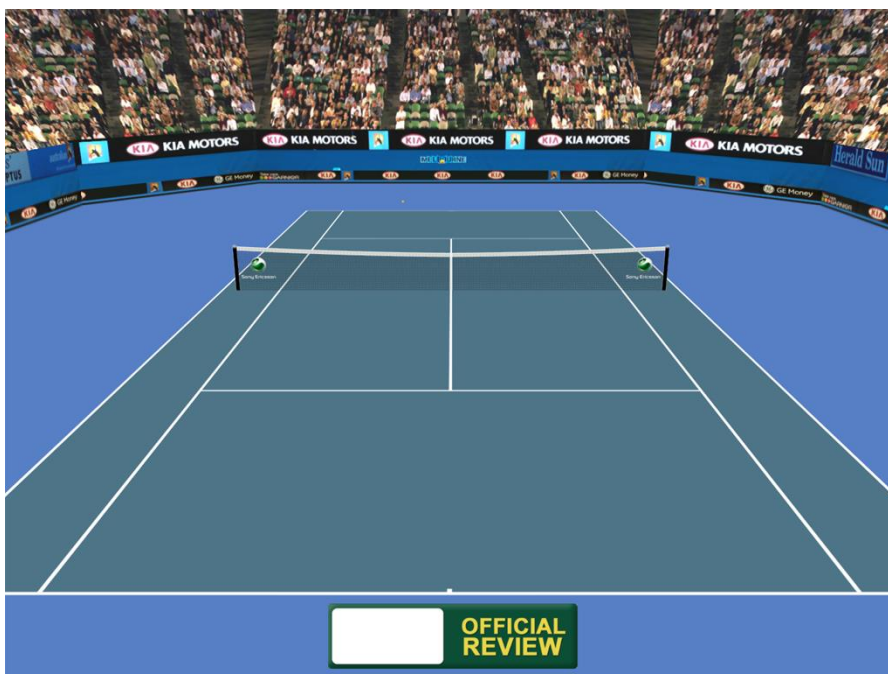
Слика 6.5. Финални резултат рада система за праћење

Аутор система је користио други метод, као и у целом систему за 3D симулацију, анимацију и графичко приказивање резултата, пре свега због добијања на брзини графике и оптимизације коришћења процесора, меморије и графичке картице. Ово омогућује исправан рад система и на рачунарској опреми мањих перформанси, мање квалитетних техничких карактеристика.



Слика 6.6. Путања лопте и позиција у временским тренуцима

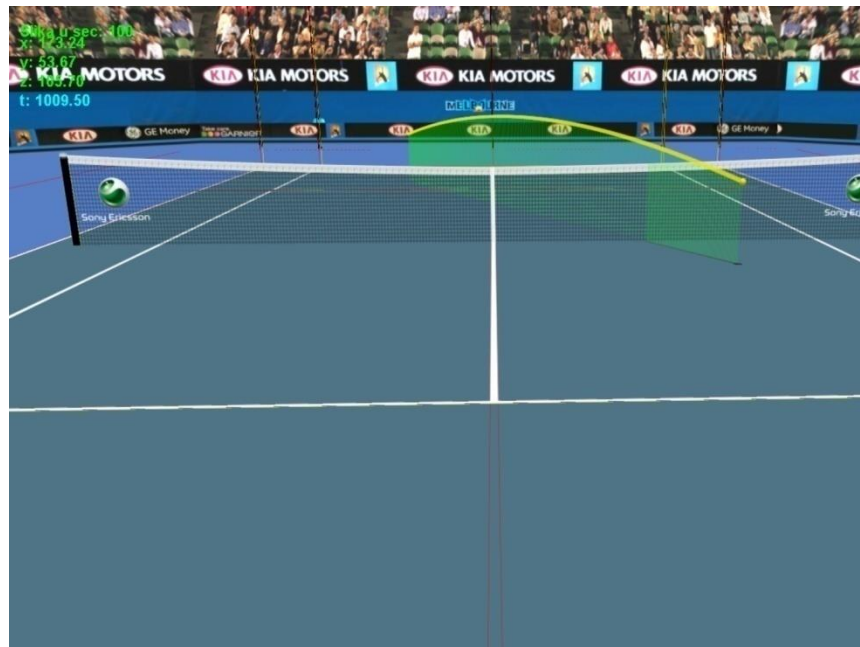
На претходној слици виде се попречни пресеци посматраног објекта, тј. тениске лопте у свакој јединици времена за коју је прорачуната позиција у простору.



Слика 6.7. Почетна позиција система

Слика 6.7. показује почетни екран система за 3D симулацију, анимацију и графичко приказивање резултата, његову иницијалну позицију са почетним предефинисаним вредностима променљивих у прорачунима. Дакле, свака репродукција и приказивање резултата почиње са овим почетним екраном. Овај поглед је основна слика позадине простора за игру, тзв. шаблон у процесу детекције објеката и покрета кроз математичке алгоритме за детекцију положаја и детекцију покрета од прикупљених улазних сигнала, тј. променљивих.

Тако су све видео-камере подешене да иницијалну вредност имају у овом погледу, што значи да рачунање креће из ове позиције, тј. практично са ове висине од подлоге простора за надзор. Уколико је део подручја надзора где је праћен контакт лопте са подлогом, тереном, у неком другом делу погледа, 3D камера брзо мења позицију, аутоматски долазећи до подручја контакта лопте са тениским простором, зумирајући резултујући поглед на позицију лопте, углавном ниже од почетног екрана.



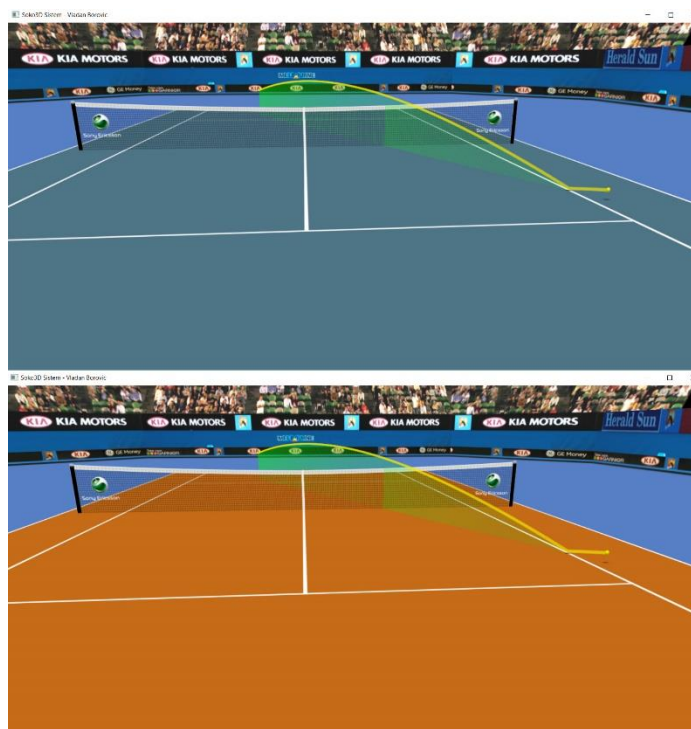
Слика 6.8. Основни параметри система

На слици 6.8. у левом горњем делу екрана приказани су, у 3D графичкој симулацији и анимацији, детектовани и прорачунати основни параметри система, редом:

- *Slikausec* – (frames per second, fps) софтверски ограничен број OpenGL исцртавања 3D сцене у секунди. Као што се види, број слика у секунди је 100, што је знатно брже од телевизијског емитовања кад је обично 24–30 слика у секунди;
- x , y , z – координате позиције исцртавања лоптице у 3D простору (прецизност до стотог дела милиметра);
- t – један од параметара нагиба путање праћеног објекта, тј. лоптице.

Број слика у секунди је основни и најважнији параметар који утиче на прецизну детекцију објеката и њихове позиције у простору. Повећањем броја прикупљених слика са видео-камера као и броја слика у фотореалистичном 3D приказу резултата прорачуна и путање покретног објекта значајно се повећава прецизност детекције и рачунања целог система и свих делова процеса за праћење објеката.

Приказ две врсте подлога терена са сталним приказивањем, у реалном времену, висине и предвиђене путање детектоване лоптице дат је на слици 6.9.



Слика 6.9. Приказ 3D симулације

6.2. Тестирање система у лабораторијским условима

Почетно тестирање система у лабораторијским условима, са експерименталним резултатима, обухватало је:

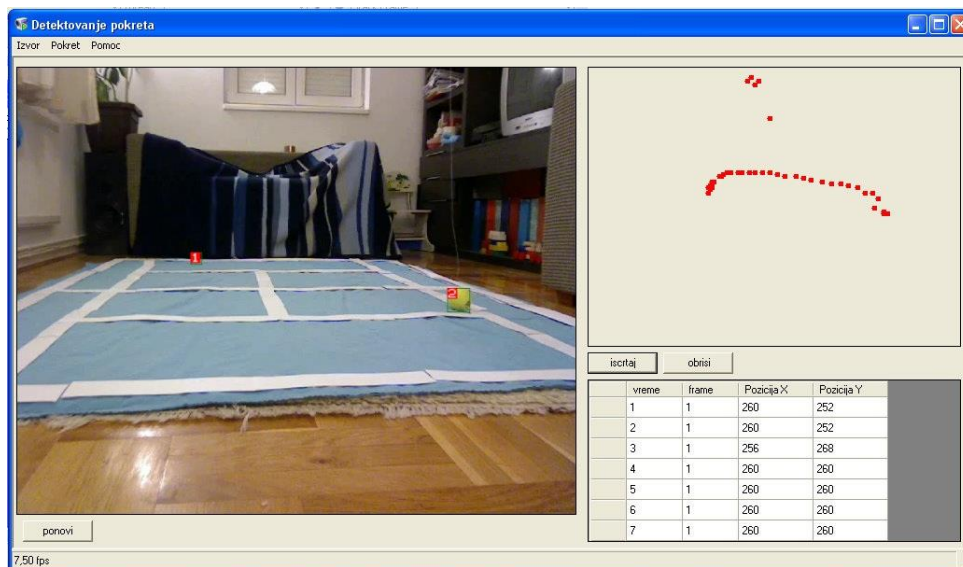
- тестирање система са различитим видео-камерама;
- тестирање система за детекцију и препознавање објеката и њихове позиције.

Кућни услови су подразумевали:

- импровизовани простор за надзор (терен) у пропорцији 1 : 20, дужине око 2 метра на две локације у затвореном простору;
- оптимално осветљење под рефлекторима.

Пошто су у тестирању коришћене дигиталне видео-камере чије перформансе при неадекватном, слабијем осветљењу не дају задовољавајуће резултате ни приликом детекције и препознавања објеката нити при детекцији позиције, било је неопходно обезбедити оптимално рефлекторско осветљење посматраног подручја. Праћење објеката рађено је више од хиљаду пута.

На слици 6.10. приказана је комбинована софтверска апликација за прикупљање видео-сигнала са једне видео-камере и за детекцију позиције објеката у простору, тј. тениске лоптице.



Слика 6.10. Пример прве тест софтверске апликације

На слици 6.10. приказана је тест софтверска апликација система за детекцију објеката и позиције и подсистема за прикупљање сигнала са само једном видео-камером која је прикључена преко мрежног прикључка и ради у *fullcolor* режиму рада. Отуда и прилично спора аквизиција видео-слика од само 7.50 слика у секунди (*fps*). У питању је прва, почетна тест апликација која је убрзо унапређена.

На десној страни могу се видети два прозора. На првом прозору су следећи подаци:

- x и y координате објекта који се прати (Позиција X и Позиција Y тениске лоптице),
- временски тренутак аквизиције слике и детектовања објекта и покрета,
- број обрађених видео-слика.

На другом прозору црвеним тачкицама је исцртана прорачуната путања посматраног објекта у две димензије.

Сви подаци приказани у првом прозору на десној страни записују се, од почетног тренутка прикупљања видео-сигнала до краја праћења, у један текстуални фајл на хард диску рачунара за обраду. То је аналогно великим професионалним системима који већ постоје. Затим се тај текстуални фајл користи као улазни фајл за позиције праћеног објекта

у простору које исцртава систем за 3D симулацију, анимацију и графичко приказивање резултата, у овом кућном примеру софтверска апликација на том истом рачунару.

Приликом првог тестирања система у поменутим лабораторијским условима дошло се до изненађујуће позитивних резултата и утисака. Употребом врло оскудне техничке видео-опреме и рачунара, било је могуће доћи до прецизних детекција објеката и њихове позиције, што је аутору дало додатну мотивацију да настави са изградом, тестирањем и развојем почетног тест система.

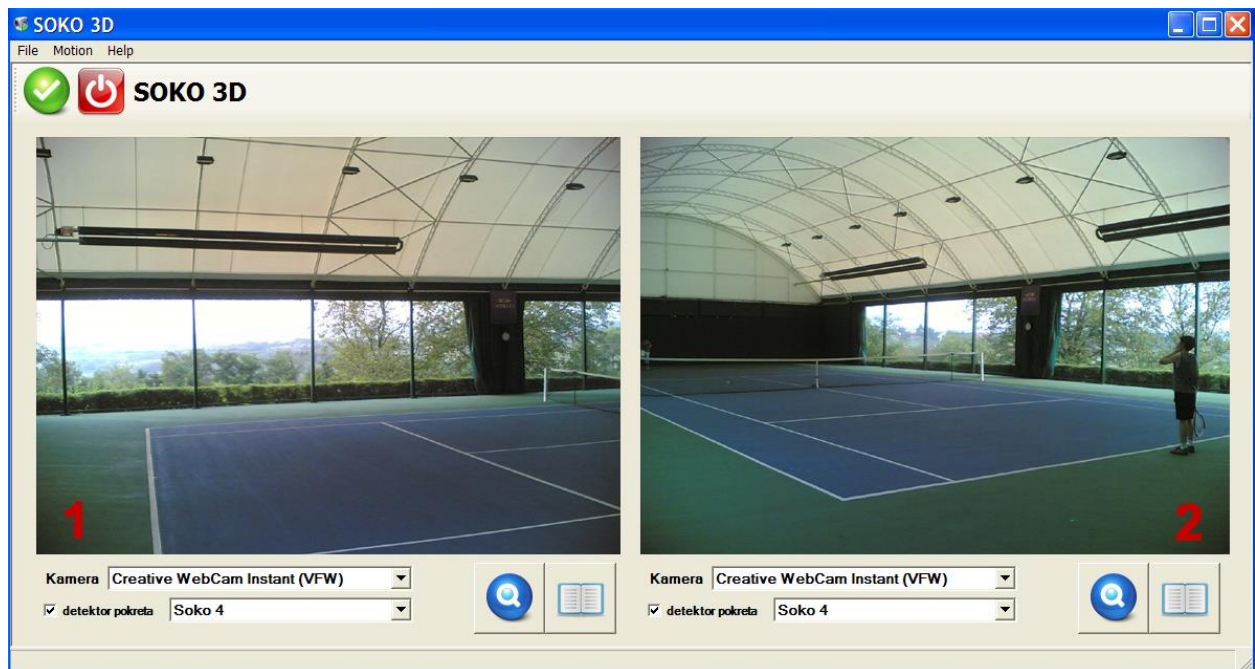
6.3. Тестирање система у реалним условима

Што се тиче тестирања система у реалним условима, пре свега је обухваћена припрема система за праћење, затим захтевна инсталација свих делова система на договореним подручјима, просторима за тениску игру. Урађени су основни, унапред договорени тестови. После пуно преговора, договорене су две физичке локације у Београду за потребе тестирања система у реалним условима. То су следећа два спортска терена:

- професионални тениски терени у Јајинцима, тениска школа Ђоковић, и
- тениски терени компаније Гемакс у Београду, *Challenger* тениски турнир.

На почетку тестирања, видео-камере су распоређене око тениског терена. Простор за надзор и праћење објеката покривен је прво са две камере, чији се погледи могу видети на слици 5.6. Након тога је сигнал са тих камера укључен и прикупљен у ауторске софтверске апликације за детекцију објеката и кретања. Од тог тренутка кренуло је праћење како кретања лоптица тако и покрета самих играча.

Како се јасно види на слици 6.11, приказан је поглед две видео-камере одговарајућих техничких карактеристика приликом постављања подсистема за прикупљање сигнала, рачунара и рачунарске мреже, као и рачунара за детекцију објеката и позиције праћених објеката у простору за надзор употребом нових софтверских апликација реализованих у C# и C++ програмским језицима, применом различитих алгоритама за детекцију.



Слика 6.11. Тестирање система на тениском терену у Јајинцима (C++)

У овој верзији софтверске апликације је могуће бирати различите

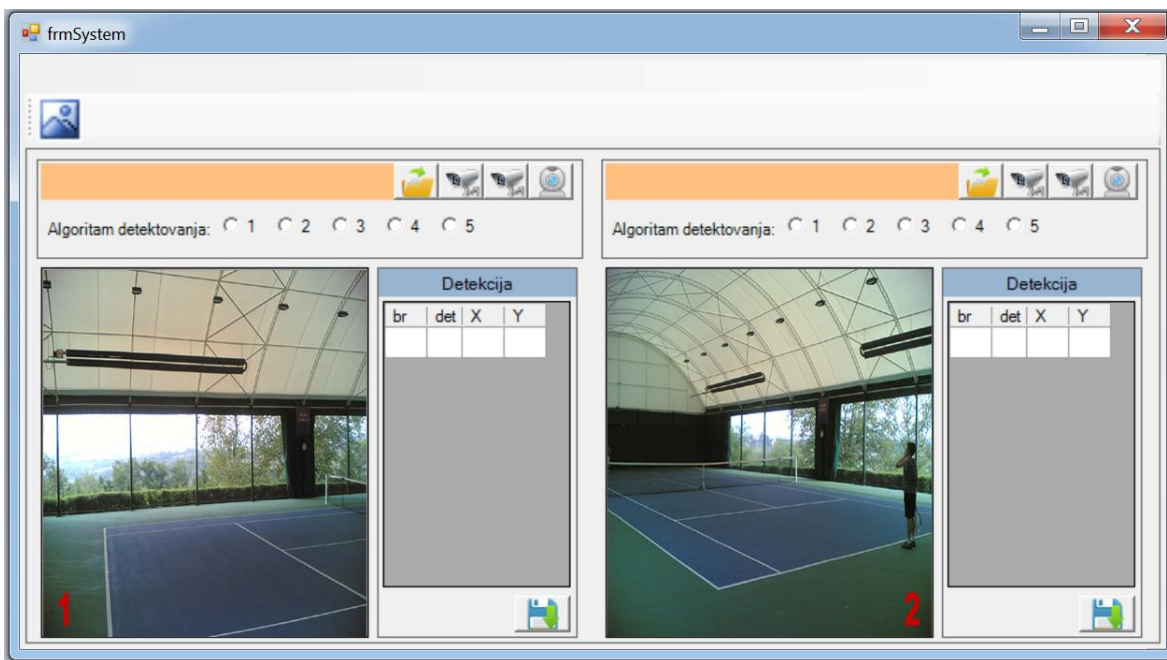
- видео-камере (различитих врста и техничких карактеристика) и
- алгоритме детекције (програмски код Соко – назив дао аутор ове дисертације).

У тестирању првог система, током 2010. године, коришћене су видео-камере које су замењене камерама *Hikvision* са мрежним UTP прикључцима, чије су техничке карактеристике дате раније у табели 5.1.

На видео-снимцима и такође *realtime* видео-сигналу са ове две камере урађена је детекција покрета у софтверским апликацијама са AForge.NET framework програмским оквиром, алгоритмима за детекцију објеката и покрета у простору, детекцију позиције у простору и обраду покрета на јасно уочљив визуелан начин.

Новија верзија софтверске апликације реализована је у програмском језику C# и приказана је на слици 6.12. Коришћењем истих снимака погледа видео-камера на тест терену, приказан је софтвер са најбржим и најмодернијим јавно доступним алгоритмима

поменутог програмског оквира за детекцију објеката, позиције и покрета. Ова нова детаљна тестирања обављена су 2015. и 2019. године.



Слика 6.12. Примена новије софтверске апликације (C#)

И у новој верзији софтвера за праћење постоји могућност избора од чак пет различитих алгоритама за детекцију позиције, односно за детекцију покрета. Када се детектује објекат на слици са камере, детектоване координате X и Y праћених објеката у простору надзора исписују се уз редни број обрађене видео-слике и број детектованог положаја. Могуће је изабрати видео-камеру, од мрежне до *web* видео-камере, различите врсте и резолуције слике, прикључене преко мрежних прикључака или преко USB порта.

Прецизно детектоване координате положаја, тј. покрета праћених објеката могуће је снимити на хард диск рачунара и у датотеци са *xml* типом података. У практичним тестовима тај тип записа показао се и ефикасан и поуздан јер је уз кратак запис погодан за софтверске апликације.

Битно је рећи да је интегрални део ове софтверске апликације и могућност додавања нових видео-камера. Могуће је додати преко чак 20 видео-камера, при чему се на рачунару са брзим процесором и брзом графичком картом потенцијално долази и до прорачуна детекције положаја и покрета на свих 20 камера, што је било скоро немогуће пре 2010. године. У тестовима било је укључено до 6 видео-камера. Чак и видео-камере слабијих техничких карактеристика са одговарајућом софтверском апликацијом и оптимизованим програмским кодом могу да дају неке задовољавајуће резултате у оваквим примерима простора за надзор у спорту и у другим наменама, у полицијским и војним областима.

Могућа је детекција положаја праћених објеката и анализа видео-сигнала у *real-time* режиму као и у режиму видео-снимка, снимљеног у претходном тренутку на хард диску рачунара за прорачуне.

Током симулације рада и тестирања подсистема за прикупљање сигнала и детекцију објеката и њихове позиције у простору записано је преко хиљаду датотека у форми *.txt* и *.xml* на хард диску. Урађено је преко хиљаду детектовања положаја, детектовања покрета и обраде покрета помоћу свих расположивих математичких алгоритама из програмског оквира AForge.NET. Направљено је више од сто видео-записа у разним условима тестирања. Испробано је више од десет видео-камера. Обављени су основни тестови на два договорена пробна простора у Београду.

Ипак, описани систем са модерним технологијама данас даје и знатно прецизније и економичније резултате.

Могућност разноврсне примене оваквих система данас је велика. Пре свега, све више их је могуће применити у полицијским и војним областима, са видео-камерама и рачунарима нижих техничких карактеристика на блиска растојања, а на већу физичку удаљеност са видео-камерама и рачунарима високих техничких карактеристика.

Ова тема и идеје аутора ове дисертације имају много већу практичну улогу и вредност него теоретску. Комерцијална применљивост, значај и потенцијал отварају нове видике у примени рачунарске технике.

6.4. Експериментални резултати

У научном раду [63] аутора ове дисертације дати су експериментални резултати првог, једноставног тест система. Једноставност се огледала у коришћењу хардвера мањих перформанси, нижег квалитета и цене, примарно у вези са видео-камерама.

Табела 6.1. приказује тачне прорачуне детекције објеката и кретања на надгледаном тест подручју (сцени) са тестном опремом и софтверском апликацијом, употребом јавно доступних алгоритама, отвореног програмског кода, за откривање покрета:

Табела 6.1. Прорачунате позиције кретања праћеног објекта. Преузето из [63].

Time	Frame	Position X	Position Y
1. 0.00	2. 1	3. 261	4. 112
5. 0.02	6. 2	7. 262	8. 112
9. 0.04	10. 3	11. 263	12. 113
13. 0.06	14. 4	15. 264	16. 113
17. 0.08	18. 5	19. 265	20. 114

Ова табела показује прецизно прорачунату позицију лоптице на једној камери приликом лабораторијског тестирања.

Израз, за сваку камеру, као резултат процеса израчунавања детекције покрета за објекат бр. 2 на слици 6.10, састоји се од података који су организовани у четири колоне:

- временски тренутак (редни број и стотинке),
- фрејм слике узет у временском интервалу,
- израчуната позиција X (у милиметрима),
- израчуната позиција Y (у милиметрима).

Након многих поновљених тестова, поређења стварне путање на терену и израчунатих података детекције кретања приказаних у 3D графичкој апликацији, пример једноставног тест система показао је задовољавајуће резултате на хардверу нижег квалитета, са мање од 9% грешке у односу на пречник лопте при њеним малим брзинама.

6.5. Компаративна анализа резултата

Низ додатних експерименталних мерења и провера тачности и поузданости система за праћење покретних објеката у реалним, професионалним условима обављен је током 2019. године. Компаративном анализом експерименталних резултата различитих алгоритама за детекцију и различитих видео-камера, са различитим бројем слика у секунди, кроз тестирање на новој софтверској апликацији аутора рада за праћење покретних објеката, утврђена је поузданост резултата детекције и прорачуна и исправност идеја и тврђења аутора ове дисертације за пројектовани напредни систем праћења и на техничкој опреми са мањим перформансама.

Тестирање је, као и 2010. и 2015. године, обављено на тениским теренима у Јајинцима, са том разликом што су тестови овај пут изведени на две врсте подлога и по дневним и ноћним условима – уз јаку сунчеву светлост преко дана на отвореном терену, док је ноћу тестирано под бројним рефлекторима у затвореном простору, као што се види на слици 6.13. Врсте терена су:

- Australian Open – спорија подлога (мека, аустралијска гума) и
- US Open – брза подлога (тврда, асфалт).



Слика 6.13. Експеримент на два терена

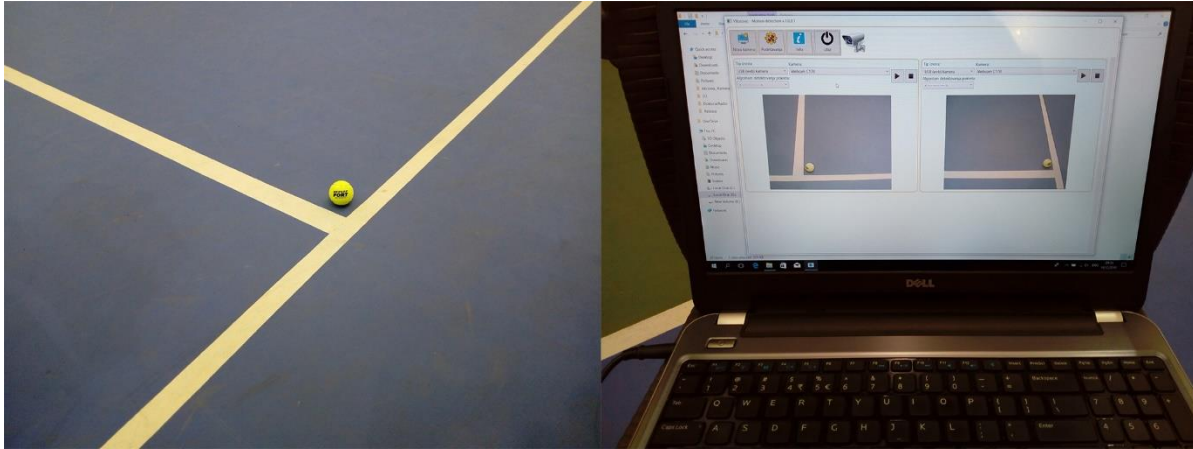
Према јавно доступним информацијама и претпоставкама аутора ове дисертације, ово је прво и једино експериментално тестирање AForge.NET-а и система за праћење покретних објеката у спорту на овај начин.

Експериментално су тестиране детекције објеката и кретања са две врсте камера

- стандардна веб камера, графичке резолуције од 1 мегапиксел, са 30 слика у секунди (мањег квалитета и перформанси) и
- акциона спортска камера 4K, *Ultra HD* 240/120/60 слика у секунди (високог квалитета).

Приликом тестова коришћено је пет алгоритама за детекцију покретних објеката и њихове позиције, прва верзија из марта 2007. године AForge.NET v1.2.0, и нова, напредна верзија алгоритама, из јула 2013. године, AForge.NET Framework v2.2.5. програмски оквир, који је уједно и последњи развијен и јавно доступан, описан у поглављу 5.2. на новој

софтверској апликацији аутора, заједно са новим алгоритмом за детекцију који је пројектовао аутор ове дисертације. На слици 6.14, као поређење, види се фотографија положаја лоптице и упоредо поглед на лоптицу из нове софтверске апликације са две тест видео-камере.

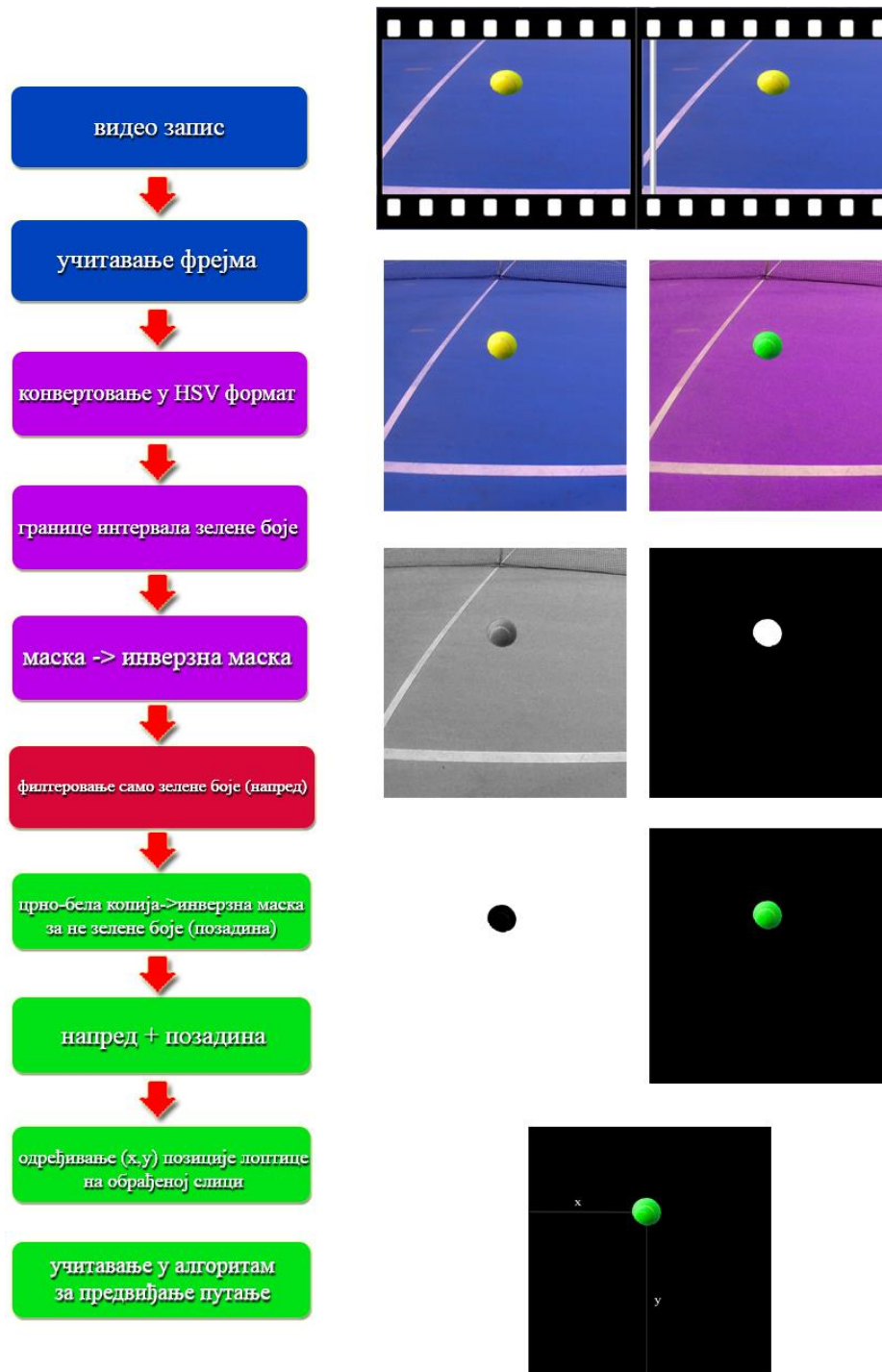


Слика 6.14. Поглед на лоптицу, тест камере и нова апликација

Кроз тестирање две софтверске апликације, пет различитих алгоритама за детекцију и две врсте видео-камера, утврђено је која је комбинација софтверских и техничких поставки најбољи избор за примену у напредним системима за праћење објеката.

У различитим, тачно одређеним временским тренуцима, испитана је детекција посматраног објекта, тј. тениске лопте и њених позиција. Такође, испитан је и приказан број детектованих објеката на свакој слици.

6.5.1. Тестирање новог алгоритма за детекцију покретних објеката



Слика 6.15. Кораци новог алгоритма за детекцију лоптице и реалан пример на сликама

Главна предност и разлика у односу на алгоритме за детекцију у AForge.NET, као што је показано и у практичном тестирању, је то што нови селективни алгоритам даје позиције и обрађене, знатно једноставније и јасне слике, за даљи прорачун путање. Уместо да тражи објекте по целој слици са камере, са великим бројем боја, одмах уочава једини зелени објекат на црној позадини. Следећи корак, предикција, је зато бржа, једноставнија и захтева мање меморијског и процесорског ресурса.

У табели 6.2. приказани су експериментални резултати тестирања, израчуната позиција X и израчуната позиција Y (у пикселима), детекције кретања лоптице и додира са линијом терена, на сликама са видео-камере у равни те линије. У 18. фрејму дошло је до контакта лоптице са тереном, што је документовано на слици са видео камере како је приказано на слици 6.17.

Табела 6.2. Компаративна анализа два алгоритма

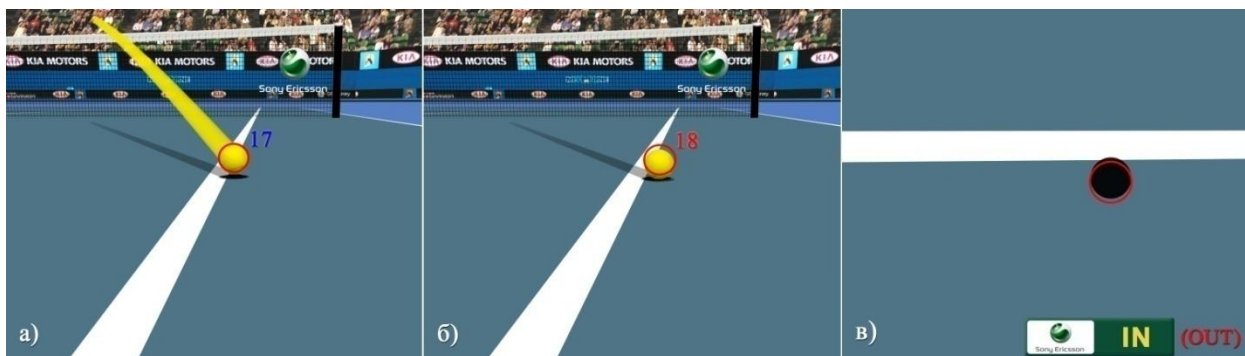
Фрејм (s)	Објекат (No.)	AForge.NET v2.2.5 (2013.)		Нови селективни алгоритам	
		Позиција X (пиксел)	Позиција Y (пиксел)	Позиција X (пиксел)	Позиција Y (пиксел)
11. 0.03	1	16	80	16	79
12. 0.06	1	48	72	49	72
13. 0.09	1	92	67	93	67
14. 0.12	1	136	64	136	63
15. 0.15	1	180	52	180	50
16. 0.18	1	216	34	217	34
17. 0.21	1	254	16	254	16
18. 0.24	1	288	2	288	0
19. 0.27	1	300	29	299	27

Тестирање је извршено на видео-записима са веб камера резолуције 1 мегапиксел и брзине 30 *fps*.

Добијени експериментални резултати показују следеће:

- Црвеном бојом, фрејм 18, обележен је тренутак додира лоптице са подлогом, висина 0. Нови алгоритам даје прецизније и поузданије резултате. Верзија алгоритама из AForge.NET погрешно детектује висину лоптице;
- Могућност грешке у детекцији старије верзије алгоритма је знатно већа од новог;
- Обе коришћене ауторове софтверске апликације за праћење лоптице показују приближне резултате, са разликом у брзини рада и одзива који је на позитивној страни верзије из 2019. године.

Резултати експеримента из табеле 6.2. приказују се на крају као коначни резултат система за праћење и електронско доношење судијских одлука у систему за 3D симулацију, анимацију и графичко приказивање резултата на слици 6.16.



Слика 6.16. Резултати анализе приказани у 3D симулацији: а) Фрејм 17 исти код оба алгоритма, б) Фрејм 18 црвеном бојом грешка у детекцији позиције код старог алгоритма и в) Резултат електронског суђења – црно исправно IN код новог алгоритма, црвено погрешно OUT

Јасно се види на слици 6.16, из *OpenGL* 3D анимације, у 17. фрејму су детектоване координате идентичне али већ у следећем је због погрешног прорачуна позиције употребом верзије алгоритама из *AForge.NET* године дошло до померања у 18. фрејму што на крају доводи до погрешне одлуке да је лоптица у ауту (црвеном бојом). Исправне резултате даје нови алгоритам аутора ове дисертације (црна боја), што је потврђено поређењем стварног снимка са видео-камере и тренутка контакта лоптице са тереном на слици 6.17.



Слика 6.17. Реална слика са видео камере – јасно уочљив контакт лоптице са линијом

На основу добијених резултата може се закључити да

- нови алгоритам за детекцију лоптице даје боље резултате у праћењу покретних објеката у тенису и
- могућност грешке у електронским одлукама старије верзије алгоритама је знатно већа него у новом.

6.5.2. Тестирање AForge.NET алгоритама за детекцију

Друго експериментално тестирање на професионалним тениским теренима са две подлоге обављено је на акционим спортским видео-камерама 4К, које раде на брзинама 240/120/60 слика у секунди употребом две софтверске апликације система за праћење. У табели 6.3. дати су експериментални резултати тестирања са компаративном анализом режима рада видео-камера у *Ultra HD* резолуцији, брзином од 60 слика у секунди и алгоритмима из две верзије програмског оквира AForge.NET v1.2.0. и AForge.NET v2.2.5 на две софтверске апликације.

Табела 6.3. Компаративна анализа две верзије алгоритама при UHD резолуцији

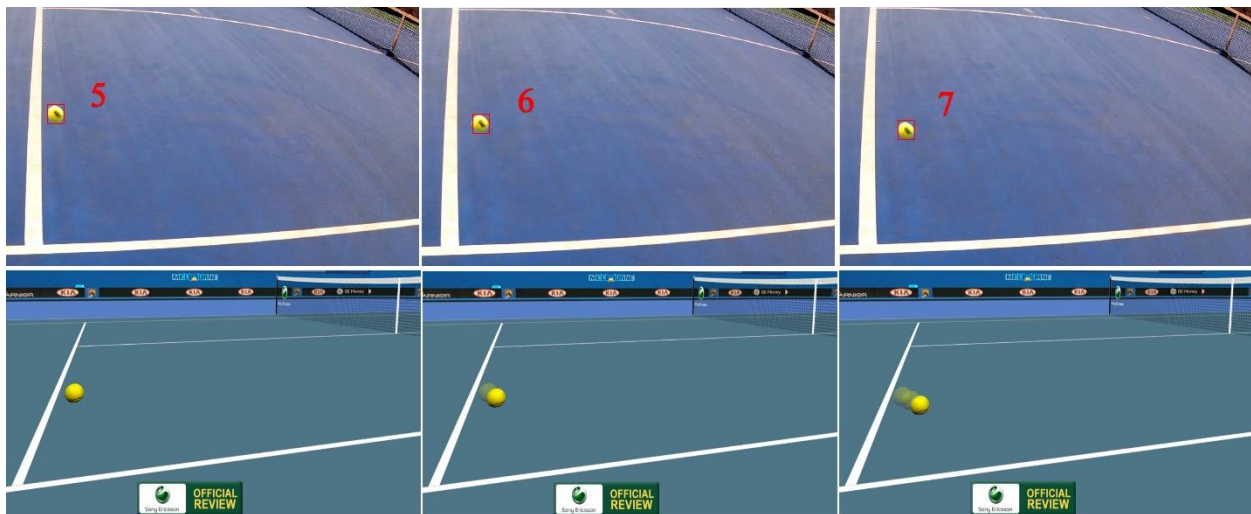
Фрејм (s)	Објекат (No.)	AForge.NET v1.2.0 (2007.)		AForge.NET v2.2.5 (2013.)	
		Позиција X (пиксел)	Позиција Y (пиксел)	Позиција X (пиксел)	Позиција Y (пиксел)
1. 0.016	5	1548	1364	1548	1364
2. 0.032	6	1636	1323	1636	1323
3. 0.048	7	1785	1282	1785	1281
4. 0.064	7	1837	1239	1836	1241
5. 0.080	8	1891	1195	1889	1194
6. 0.096	8	1950	1152	1951	1150
7. 0.112	8	2011	1107	2008	1105
8. 0.128	10	2011	1062	2071	1061
9. 0.144	10	2009	1061	2140	1016
10. 0.160	10	2215	972	2213	971
11. 0.176	10	2296	933	2294	934

Тестирање је урађено на видео-записима са *Ultra HD* акционих камера брзине 60 *fps*, на две верзије алгоритама за детекцију и две софтверске апликације. Израчунате позиције *X* и *Y* су приказане у пикселима.

На основу добијених експерименталних резултата може се закључити следеће:

- У две слике, фрејмовима 8. и 9, обележеним црвеном бојом, у AForge.NET v1.2.0, дошло је до грешке у детекцији позиције лоптице на видео-сликама. Прва координата је поновљена иако се објекат и даље кретао док су у наредном фрејму и прва и друга координата, аналогно претходним, сигурно нетачне. То се дешава прилично често, на више видео-камера у систему. Такве детекције, тј. координате обавезно се одбацују у систему као „нелогичне”. Зато и постоји минимум шест камера у систему за праћење и у тим случајевима узима се резултат са друге камере поређењем.

На сликама 6.18. и 6.19. приказани су резултати компаративне анализе из табеле 6.3. упоредо на реалном снимку са коришћене видео-камере и графичком приказу 3D симулације. Показани су фрејмови у низу од петог до десетог.



Слика 6.18. Резултати компаративне анализе приказани упоредо на видео-снимку и у 3D графичкој симулацији (5-7 фрејм)



Слика 6.19. Резултати компаративне анализе приказани упоредо на видео-снимку и у 3D графичкој симулацији (8-10 фрејм)

На претходне две слике у горњем делу приказане су слике са видео-камере са детектованим објектом праћења, тј. лоптицом, софтверски означеним црвеним оквиром. У осмом и деветом фрејму, жути оквиром, означени су погрешно детектовани положаји објекта употребом старије верзије алгоритама. Упоредо, у доњем делу слике показан је изглед 3D симулације као коначни резултат праћења тениске лоптице у простору. Такође, црвеном бојом је означена грешка у детекцији на супрот исправним прорачунима новијих алгоритама, аналогно горњем делу слике.

Као и у претходном експерименту, AForge.NET v2.2.5 програмско окружење са алгоритмима даје боље, поузданије резултате приликом детекције покретних објеката.

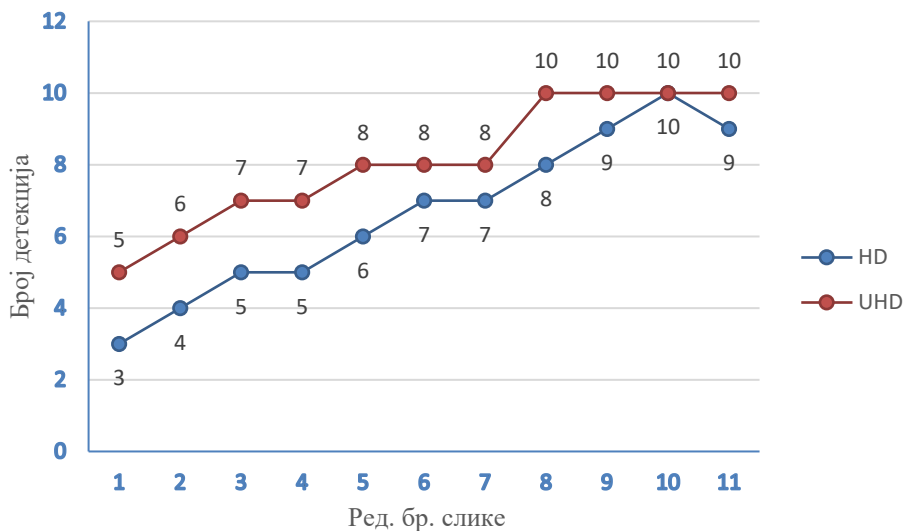
У исто време урађено је треће тестирање, као додатак претходном тестирању чији су резултати дати у табели 6.3, направљен је и анализиран видео-запис на другој видео-камери, у HD резолуцији, брзине 60 fps, са идентичним подешавањима камера.

Табела 6.4. Зависност броја детектованих објеката од резолуције

	<i>Ultra HD</i>	<i>HD</i>
Фрејм (s)	Објекат (No.)	Објекат (No.)
1. 0.016	5	3
2. 0.032	6	4
3. 0.048	7	5
4. 0.064	7	5
5. 0.080	8	6
6. 0.096	8	7
7. 0.112	8	7
8. 0.128	10	8
9. 0.144	10	9
10. 0.160	10	10
11. 0.176	10	9

Добијени експериментални резултати показују већи број детектованих објеката на сликама када се користи видео-режим *Ultra HD* у односу на *HD* на видео-камерама. Велики број детектованих објеката може да збуни, али то је последица веома високе резолуције прављених видео-записа или у реалном времену за коришћене видео-камере.

Графикон на слици 6.20. на основу података из табеле 6.4. показује однос две тестиране видео-резолуције камера, *Ultra HD* и *HD*, и зависност броја детектованих објеката на слици од видео-резолуције камере на идентичном видео-запису.



Слика 6.20. Зависност броја детектованих објеката од резолуције

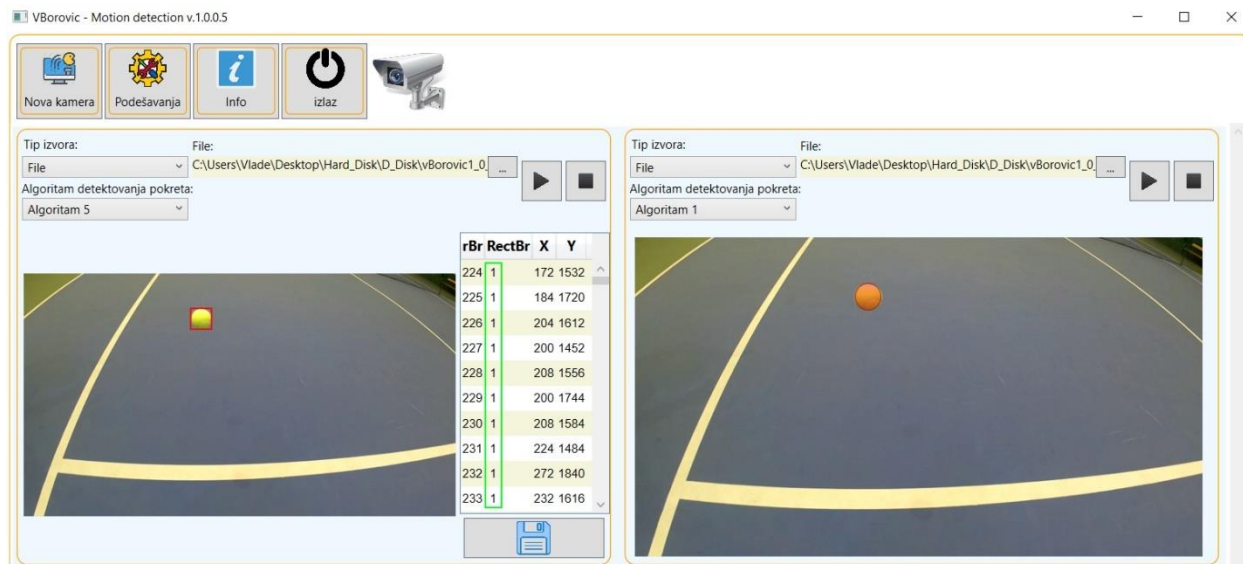
На основу нумеричких података, који су добијени експерименталним испитивањем, може се закључити да је

- позитивно: У *Ultra HD* видео-режиму камера могуће је детектовати већи број објеката од *HD* режима на свакој слици преузетој са видео-камере, чиме се повећава тачност и поузданост детекције покретних објеката у систему за праћење;
- негативно: У исто време, режим *Ultra HD* детекције је знатно осетљивији и подложнији спољним утицајима, факторима грешке као што су промена интензитета и нијансе светла, ситни инсекти и споре сенке тако да су потребне додатне оптимизације и филтри приликом детекције и праћења лоптица.

То значи да се бољи резултатати постижу у *Ultra HD*, вишој и квалитетнијој резолуцији видео-камера, али је неопходно пажљивије подешавање алгоритама и детаљније обрађивање сваке прикупљене слике са камера.

Четврти експеримент: као засебно тестирање направљен је и анализиран видео-запис на видео-камери, у *Full HD* резолуцији, брзине 30 *fps*, са истим подешавањима камере као у претходним тестовима. Упоредо су анализирани резултати детекције лоптице у

комплексним условима, при окружењу посматраног терена за тенис са сличном бојом као и лоптица за игру – светла нијанса зелене, покривени терен. Резултати су приказани на сликама 6.21, 6.22. и 6.23.



Слика 6.21. Детекција лоптице у софтверској апликацији подсистема за напредну детекцију при комплексним условима

На слици 6.21. зеленом бојом означен је број детектованих објеката по једном фрејму, како се види – по једна лоптица. Правилним одабиром и подешавањем колор филтра и функција допринело је да лоптици слично зелено окружење терена није негативно утицало на откривање објекта на сликама. Алгоритми 5 и 1 приказани су реално на делу упоредо (координате су извучене као пример из снимљеног фајла са диска). На слици лево Алгоритам 5 означава детектовану лоптицу црвеним граничним правоугаоником, док је десно код Алгоритма 1 детекција лоптице приказана благо провидним црвеним кругом преко самог објекта праћења.

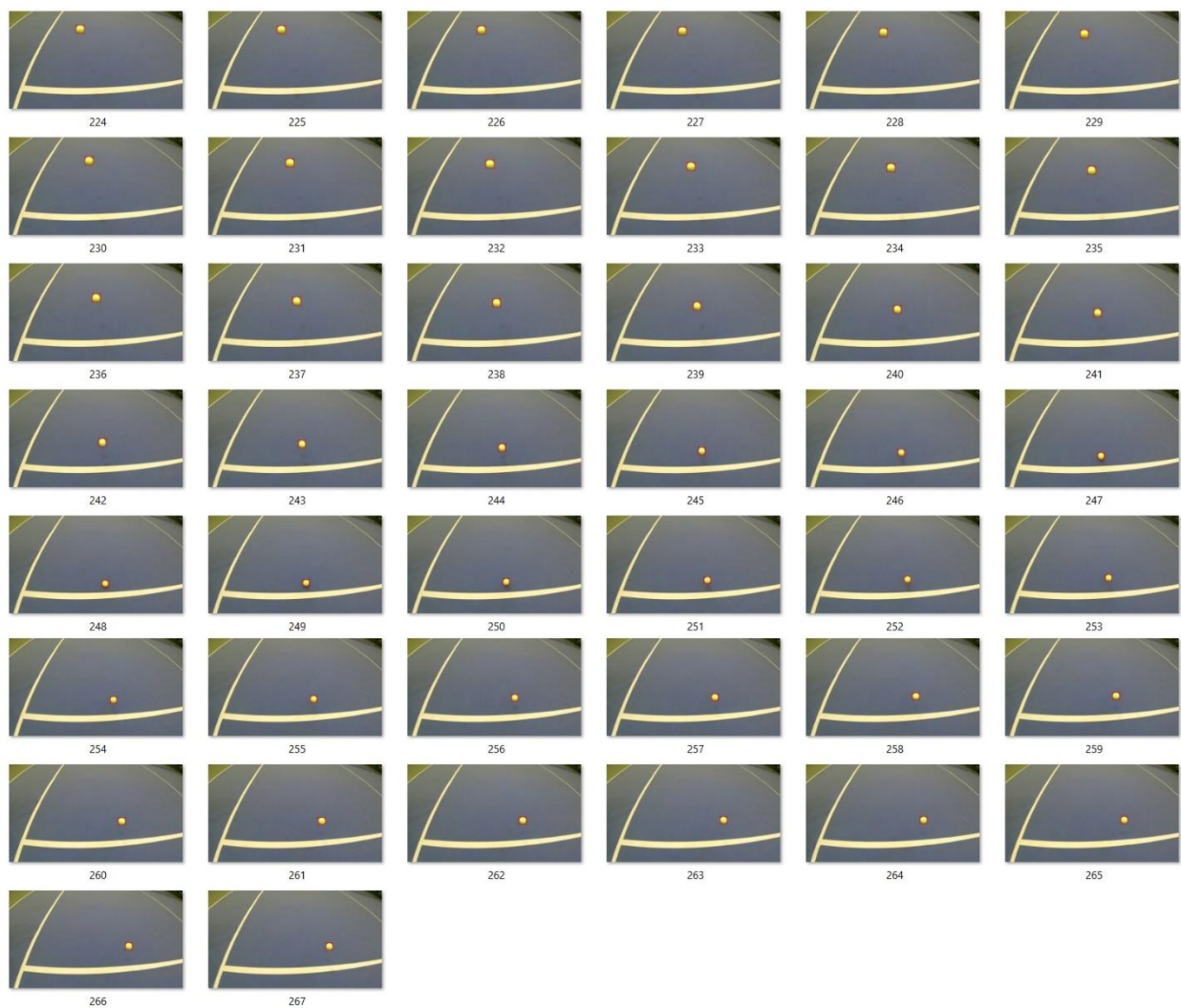
Затим су упоредо приказани резултати у систему за 3D симулацију, анимацију и графичко приказивање резултата на слици 6.22.



Слика 6.22. Резултати детекције приказани у 3D графичкој симулацији

Претходна слика показује 3D графичку симулацију, са проређеним визуелним траговима позиција ради јаснијег приказа.

Компаративно, на крају, снимци са видео-камере у реалном времену приказани су на следећој слици. Црвени оквир детекције око објекта извршила је описана софтверска апликација. На више од четрдесет фрејмова видео-снимка у високој резолуцији јасно се види детектована лоптица која се због потреба тестирања није брзо кретала у простору.



Слика 6.23. Детектована лоптица на снимку са видео-камере по фрејмовима 224-267.

На основу визуелно-графичких резултата, који су добијени овим екпериментом детектовања у отежаним условима, када имамо околни простор сличне боје као објекат који се прати, може се закључити:

Избором предложеног програмског оквира, видео-камера и резолуције долази се до исправних резултата детекције објекта уз правилну употребу и подешавање уграђених просторних функција, адекватних филтра и коришћење ауторове прецизне 3D графичке симулације.

7. Закључак

У овој докторској дисертацији детаљно је описан напредни систем за праћење покретних објеката у спорту. Систем је пројектован као логичан наставак и наследник првог система израђеног 2010. године. Описане су и уведене нове методе, нови алгоритми за детекцију позиције и кретања објеката у простору и створен нови приступ употребе технологија, нових алгоритама и апликација у повећању тачности и поузданости система за праћење, чак и у случајевима када се користи опрема са нижим техничким карактеристикама.

По први пут је изведено експериментално тестирање и упоредна анализа два различита програмска оквира са алгоритмима као и различите софтверске апликације за детекцију и 3D симулацију и графичко приказивање резултата праћења објеката.

Резултати дисертације, добијени у току истраживања и развоја новог система, могу се сврстати у две категорије.

- Прва категорија садржи предлог нових метода и техника, увођење и тестирање нових алгоритама за детекцију позиције покретних објеката, пројектовање и израду нове софтверске апликације за детекцију и праћење позиције објеката, увођење и тестирање нових видео-камера 4К резолуције са 240 *fps*, развој нове методе за 3D графички приказ, побољшање софтверске апликације за 3D симулацију и графички приказ и анимацију елиминацијом треперења објеката на слици, повећање прецизности 3D анимације, посебно у граничним линијским подручјима.
- Друга категорија представља експерименталне, научне информације упућене јавности, пре свега публици која посматра спортске догађаје о поузданости и тачности електронских судијских одлука и могућим, потенцијалним грешкама, нивоима поузданости и грешака електронских одлука, „рачунарскај непристрасности“ у одлучивању и презентовању резултата прорачуна система за праћење објеката и судијско одлучивање у спорту.

Достигнућа ове дисертације огледају се у следећим научним доприносима:

- анализа и преглед стања постојећих система,
- увођење нових алгоритама и техничке опреме,
- израда нових софтверских апликација, метода и техника,
- упоредна анализа алгоритама и режима рада видео-опреме,
- верификација ефикасности уведених софтверских апликација и алгоритама,
- препоруке и смернице правилног избора ефикасног софтвера и хардвера при изради нових система.

7.1. Предлози и правци будућег унапређења система

У току 2019. године дошао је и „ветар у леђа”. Аутор рада имао је неколико озбиљних разговора са руководством Фудбалског клуба „Црвена Звезда”. Иницијално је договорена почетна сарадња у процесу уградње *VAR* система на теренима тог клуба у Београду. Ексклузивна информација је да Фудбалски савез Србије разматра и планира скоро увођење *VAR* технологије у Суперлигу Србије, али се, због висине инвестиције, употреба технологије у наредној сезони још испитује.

Аутор рада је, уз несебичну помоћ службеника клуба „Црвена Звезда” директно контактирао са компанијом *Hawk-Eye Innovations Ltd.* преко званичника и судија Уефе (*UEFA*).

Даљи наставак истраживања у овој области сигурно ће бити настављен у правцу употребе и развоја видео-система у фудбалу. Следећи задатак биће инсталација тест система на фудбалском терену у Београду, чему ће од велике помоћи бити искуства и резултати ове дисертације и досадашњих истраживања.

Будући правци развоја описаног напредног система, софтверских апликација, алгоритама и метода пре свега се односе на подешавање алгоритама и испитивање сметњи приликом детекције покретних објеката и њихове позиције због промене осветљења и сенки, смањивање њиховог негативног утицаја и могућу елиминацију.

У циљу пројектовања и ефикасног дизајнирања нових алгоритама за детекцију покретних објеката и њихове позиције и анализе постојећих, могу да се употребе резултати, закључци и смернице ове дисертације.

Ова технологија представља иновацију која је нашла примену у свету спорта – у тенису, крикету, фудбалу, кошарци, у свету медицине као и у аутомобилској индустрији и војним и полицијским областима, где такође има пуно простора за даљи развој, имплементацију и унапређење.

8. Литература

- [1] *Electronic line judge* https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_line_judge (2019, март)
- [2] Jonathan, *Cyclops in Tennis: Assisted Line Judging Before Hawkeye*. <https://www.perfect-tennis.com/cyclops-in-tennis/> UK (2019, 18. септембар)
- [3] Hunter Engineering Company. *HawkEye Elite Alignment Machine*. (2017, мај) <https://www.hunter.com/alignment-systems/hawkeye-elite>
- [4] Pinkus, A. *Weierstrass and Approximation Theory*, Journal of Approximation Theory, Elsevier, Volume 107, Issue 1, pp: 1-66. <https://doi.org/10.1006/jath.2000.3508>. (2000, новембар)
- [5] Owens, N. Harris, C. Stennett C. *Hawk-eye tennis system*, International Conference on Visual Information Engineering VIE 2003, pp. 182–185, IET, Guilford, UK DOI: 10.1049/cp:20030517. (2003, август)
- [6] *Triangulation_(surveying)* [https://en.wikipedia.org/wiki/Triangulation_\(surveying\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Triangulation_(surveying)) (2018, децембар)
- [7] Pixalytics consultancy company. *How many satellites orbiting the Earth in 2019?* <https://www.pixalytics.com/satellites-orbiting-earth-2019/> (2019, 16. јануар)
- [8] Боровић, В. *GPS/GPRS систем за даљинско праћење - телематика*, (2006). Савез инжењера Србије, Стручни пројекат за лиценцу, Београд, пп. 52 стране
- [9] Вајај, Р. , Ранавеера, S.L. ; Агравал, D.P., *GPS: Location-tracking technology*, IEEE Computer Society; France Telecom R&D, San Francisco, CA, USA (2002).
- [10] Kirillov, A. *Motion Detection Algorithms*. (2007, март) <http://www.codeproject.com/Articles/10248/Motion-Detection-Algorithms>
- [11] Боровић, В. (2015) *Надзорни систем за аквизицију сигнала и детекцију положаја објеката у простору*, ФТН, Нови Сад, Србија
- [12] *Northrop Grumman E-2D Advanced Hawkeye летелица* (2017, август). https://en.wikipedia.org/wiki/Northrop_Grumman_E2_Hawkeye#E2D_Advanced_Hawkeye
- [13] *Ehang GHOSTDRONE 2.0 AerialPlus*. (2019, август) <http://www.bestdroneswithcameras.com/ehang-ghost-aerial-plus-drone-android-version/>

- [14] NUSSBAUM group. *Colour Coded Triangulation*. (2017, maj) <http://www.nussbaum-group.de/italian/business-units/attrezzatura-perofficina/assetti/roboligner/funzioni/wheel-alignment-function.html>
- [15] Hawk Eye Innovations System, <https://www.hawkeyeinnovations.com/index.html>(2017, абрыст)
- [16] Roke Manor Research Limited (2019, март) https://en.wikipedia.org/wiki/Roke_Manor_Research
- [17] Cross, R. *Measurement of the speed and bounce of tennis courts*. Sports Technology Volume 3, 2010 - Issue 2, pp. 112-120, DOI: 10.1080/19346182.2010.540468. (2010, Maj)
- [18] BBC News, *Hawk-Eye ball-tracking firm bought by Sony*, <https://www.bbc.com/news/business-12670063> (2011, 7. март)
- [19] Phys. Science X, *We can be serious: Researchers dispute Hawk-eye's Wimbledon line call*. <https://phys.org/news/2008-06-dispute-hawk-eye-wimbledon-line.html> (2008, 12. јун)
- [20] pscaife3. *ELC -Understanding the tennis ball bounce*(2016). <https://vimeo.com/135357489>
- [21] *Hawk-Eye at Wimbledon: it's not as infallible as you think* (2013, јул) The Guardian, England, UK, <https://www.theguardian.com/science/sifting-the-evidence/2013/jul/08/hawk-eye-wimbledon>
- [22] Collins H, Evans R. *You cannot be serious! Public understanding of technology with special reference to "Hawk-Eye"*. (2008, јул) SAGE PUBLICATIONS, Cardiff University, Public Understanding of Science Vol. 17. Issue 3. (2008) pp. 283–308. USA, ISSN 0963-6625 DOI:<https://doi.org/10.1177/0963662508093370>
- [23] Thomas S. *A-League invests A\$150,000 in controversial Hawkeye technology* <https://www.soccerscene.com.au/industry-4-0/a-league-invests-a150000-in-controversial-hawkeye-technology/> (2019, 10. октобар)
- [24] PughW. *HAWKEYES CLOSED England fans convinced Hawkeye is broken after Nicholls survives LBW review in Cricket World Cup final* <https://www.thesun.co.uk/sport/9503845/england-fans-hawkeye-broken-nicholls-lbw-cricket-world-cup-final/> The Sun,UK (2019, 14. јул)
- [25] Braun R. *A Hawk-Eye for detail: how accurate is electronic judging in sport?* <https://theconversation.com/a-hawk-eye-for-detail-how-accurate-is-electronic-judging-in-sport-8136>. UK (2012, 17. јул)

- [26] Hawk-Eye Innovations *Hawk-Eye's Accuracy & Reliability Electronic Line Calling* http://pulse-static-files.s3.amazonaws.com/HawkEye/document/2016/01/18/caa1c8ce-9a27-47f1-bf5e-777d2a9f5d13/ELC_Accuracy_%26_Reliability.pdf (2016, 18. январь)
- [27] Russakovsky, O. Deng, J. Su, H. Krause, J. Satheesh, S. Ma, S. Huang, Z. Karpathy, A. Khosla, A. Bernstein, M. Berg, A.C. Fei-Fei, L. *ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge*, Computer Vision and Pattern Recognition, Cornell University <https://arxiv.org/abs/1409.0575v3>. USA (2015, январь)
- [28] R. Woering, *Design of a video processing algorithm for detection of a soccer ball with arbitrary color pattern*, Technische Universiteit Eindhoven Department Mechanical Engineering Dynamics and Control Technology Group Eindhoven, (2009, март) pp. 29 страна
- [29] Girshick, R. Donahue, J. Darrell, T. Malik, J. *Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation*, Computer Vision and Pattern Recognition, 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), UC Berkeley <https://arxiv.org/abs/1311.2524v5>. USA (2014, октябрь)
- [30] PASCAL2, *Visual Object Classes Challenge 2012 (VOC2012)*, Pattern Analysis, Statistical modelling and Computational Learning, UC Berkeley <http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/voc2012/> USA (2012)
- [31] ImageNet, *Large Scale Visual Recognition Challenge 2013 (ILSVRC2013)*, Stanford Vision Lab, Stanford University, Princeton University <http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/voc2012/> USA (2012)
- [32] Krizhevsky, A. Sutskever, I. Hinton, G. *AlexNet - convolutional neural network (CNN)* <https://en.wikipedia.org/wiki/AlexNet> USA (2012)
- [33] Ross Girshick. *Fast R-CNN*, Computer Vision and Pattern Recognition, Microsoft Research, 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) <https://arxiv.org/abs/1311.2524v5> USA (2014, октябрь)
- [34] He K. Zhang, X. Ren, S. Sun, J. *Spatial Pyramid Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition*, Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI) 2015, DOI: 10.1007/978-3-319-10578-9_23. USA (2015, апрель)
- [35] Ren, S. He, K. Girshick, R. Sun, J. *Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks*, Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume 39, Issue 6. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2577031. USA (2016, январь)

- [36] He K.Gkioxari, G.Dollár, P.Girshick, R. *Mask R-CNN*, Computer Vision and Pattern Recognition, 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), DOI: 10.1109/ICCV.2017.322 USA (2018, январь)
- [37] Redmon, J. Divvala, S.Girshick, R. Farhadi, A. *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*, Computer Vision and Pattern Recognition, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), DOI: 10.1109/CVPR.2016.91 USA (2016, май)
- [38] Redmon, J. Farhadi, A. *YOLO9000: Better, Faster, Stronger*, Computer Vision and Pattern Recognition, 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), DOI: 10.1109/CVPR.2017.690 USA (2016, декабрь)
- [39] Redmon, J. Farhadi, A. *YOLOv3: An Incremental Improvement*, Computer Vision and Pattern Recognition, University of Washington, <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1> USA (2018, апрель)
- [40] Rohith Gandhi. *R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO - Object Detection Algorithms* <https://towardsdatascience.com/r-cnn-fast-r-cnn-faster-r-cnn-yolo-object-detection-algorithms-36d53571365e> (2018, июль)
- [41] *AForge.NET Framework*, <https://code.google.com/p/aforge/> (2019, март)
- [42] *AForge.NET Framework, Motion Detection*, http://www.aforge.net/framework/features/motion_detection_2.0.html (2019, май)
- [43] Widyawan, Muhammad Ihsan Zul, Nugroho, L. *Adaptive Motion Detection Algorithm using Frame Differences and Dynamic Template Matching Method* (2012, 26-28. November). The 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI2012) http://www.academia.edu/3245918/Adaptive_Motion_Detection_Algorithm_using_Frame_Differences_and_Dynamic_Template_Matching_Method, pp. 1-8. Korea
- [44] Shin, S. (2013) *Comparing image-processing libraries*, Emgu CV Essentials, Packt Publishing, November 2013, ISBN: 978-1-78355-952-7 Chapter 1, pp:6-10
- [45] *Differences between AForge and OpenCV*, (2011, январь)
<https://stackoverflow.com/questions/749241/differences-between-aforge-and-opencv>
- [46] Najafi Shoushtari, Seyed Hesameddin. (2006) *Fast 3D Object Detection and Pose Estimation for Augmented Reality Systems*, PhD Dissertation, Fakultät für Informatik der Technischen Universität München, 21 September 2006, Corpus ID: 45481663, pp:1-167

- [47] Ma, J. (2010) *Real-Time Applications of 3D Object Detection and Tracking*, PhD Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena. 19. October 2009, doi:10.7907/4N1K-GK74, pp:1-120
- [48] Ghobadi, Seyed Eghbal (2010) *Real Time Object Recognition and Tracking Using 2D/3D Images*, PhD Dissertation, Universität Siegen, Deutschland. 16. September 2010. Corpus ID: 19992654, pp: 1-141
- [49] Myint, Hnin; Wong, Patrick; Dooley, Laurence and Hopgood, Adrian (2015). *Tracking a table tennis ball for umpiring purposes*. In: Fourteenth IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA2015), Tokyo, Japan, May 2015, DOI: 10.1109/MVA.2015.7153160, pp: 18-22
- [50] José Soler, Christian. (2017) *Table tennis ball tracking and bounce calculation using OpenCV*. Double Degree in Mathematics and Computer Science, Facultat de Matemàtiques i Informàtica Universitat de Barcelona. 22. June 2017. DOI: 10.1109/MVA.2015.7153160, pp: 1-35
- [51] T'Orazio, Guaragnella C., Leo M., *Pattern Recognition, A new algorithm for ball recognition using circle Hough transform and neural classifier*. Institute_of_Intelligent_Systems_for_Automation_ISSIA, Rome Italy, 2004.
- [52] Vladan Borović, Master's Thesis, Diplomski rad *3D visualisation of Electro-Energetic System of Novi Sad*, FTN Novi Sad, Serbia, (2002). pp: 0-60. 2002.
- [53] Uday Hiwarale, *Radar Gun: Use of electrical /electronic aspect of radar to measure speed of incoming or outgoing objects like vehicles using the Doppler effect*, Indian Institute of Technology Indore, (2010).
- [54] Hikvision, *Intelligent Network Camera*, (2015, February). http://www.hikvision.com/europe/Products_show.asp?id=9656
- [55] Potts, M. RadioTimes, *Wimbledon 2019: How does Hawk-Eye work? Is Hawk-Eye accurate?* (2019, 14. July). <https://www.radiotimes.com/news/sport/2019-07-14/wimbledon-2019-hawk-eye/>
- [56] Labayen, M. Olaizola, I. Aginako, N.Florez, J.*Accurate Ball Trajectory Tracking and 3DVisualization for Computer-Assisted SportsBroadcast*(2013, 24. August).Volume 73, Issue 3. pp. 1819-1842

- [57] *AForge.Vision.Motion Namespace*, (2019, март).
<http://www.aforgenet.com/framework/docs/html/40a6b51f-9f55-0569-ce0b3c1efeeec056.htm>
- [58] Pao, Yohhan., *Adaptive pattern recognition and neural networks*, Reading, MA (USA); Addison-Wesley Publishing Co., Inc. (1989).
- [59] T.M. Strat, M.A. Fischler, *Context-Based Vision: Recognizing Objects Using Information from Both 2D and 3D Imagery*, IEEE Computer Society, (1991).
- [60] *HANDBOOK OF Pattern Recognition & Computer Vision* World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore, (1993).
- [61] Weierstrass, K., *Über die analytische Darstellbarkeit willkürlicher Funktionen einer reellen Veränderlichen*, Sitzungsberichte der Akademie zu Berlin (1885), pp. 633–639, 789–805. Страна
- [62] Др Слободанка Јанковић, *О Бернштајновом пробалистичком доказу Вајерштрасове теореме и неким уопштењима*, Настава математике на факултетима, 5 страна
- [63] Borović, V. Spalević, P. Čisar, P. Rančić, D. Jović, S. (2019) *Supervisory system for physical objects spatial location detection*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Elsevier, 1 May 2019, DOI: 10.1016/j.physa.2019.01.023 Volume 521, pp:781-795

Списак коришћених скраћеница

VAR – Video Assistant Referee – видео асистент судија

Видео асистент судија је помоћни судија у фудбалу који проверава одлуке главног судије помоћу прегледа снимака са видео-камера постављених око терена за игру. Од 2018. године VAR је званично уписан у правила фудбала.

UTPcat.5e (Unshielded Twisted Pair) (category 5 enhanced)

Модерни рачунарски мрежни кабл; неоклопљени увијени пар (парица). Спречава електромагнетну интерференцију из спољних извора. Категорија 5 унапређена. Последња верзија кабла је категорија 6.

OpenGL (Open Graphics Library)

3D софтверски API (*Application Programming Interface*) и графички акцелератор. Најпознатија и најраспрострањенија 3D графичка библиотека са применом у рачунарским играма, моделима терена и свим прецизним и захтевним графичким апликацијама.

MS

Microsoft, рачунарска компанија у Сједињеним Америчким Државама.

XML

Extensible Markup Language, стандардни скуп правила за дефинисање формата података у електронској форми. Следећи правила XML стандарда, корисници дефинишу сопствене (XML) формате података, које могу користити за њихово складиштење, обраду и размену.

Прошириви (мета)језик за означавање (енгл. *markup*) текстуалних докумената.

Flickering

Треперење текстура и објеката у *OpenGL* графичком приказу, 2D и 3D.

Motiondetection

Детекција покрета објеката на слици.

CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor

CMOS је чип, односно сензор у професионалним дигиталним фотоапаратима или дигиталним видео-камерама који је осетљив на светлост. Оно што је код класичних фотоапарата и видео-камера филм, то је код дигиталних CCD или CMOS чип, односно сензор.

GPS - Global Positioning System

Сателитски систем за глобално позиционирање.

fps – frames per second

Број слика у секунди. Представља брзину смењивања слика, тј. меру фреквентности промене слика на анимацијама, односно колико се слика приказује у секунди. Термин се односи на филмове, видео-камере и компјутерску графику.

UNOOSA –The United Nations Office for Outer Space Affairs

Канцеларија Уједињених нација за свемирска питања део је Секретаријата Уједињених нација, смештена у канцеларији Уједињених нација у Бечу, Аустрија. Задатак јој је да спроводи одлуке Генералне скупштине Уједињених нација и Комитета Уједињених нација за мирну употребу свемира.

ITF – International Tennis Federation

Интернационална тениска федерација са седиштем у Лондону, Велика Британија.

Ultra HD 4K - Ultra-High-Definition 4K

Ултра висока дефиниција, 4К резолуција тј. 4К, односи се на дисплеј уређаје и садржаје који имају хоризонталну резолуцију већу од 4000 пиксела, тачније 4096 × 2160 или 3840 x 2160, око 8.5 мегапиксела.

Full HD FHD - Full-High-Definition FHD

Пуна висока резолуција. Стандард је 1920 × 1080 пиксела, широки филмски формат 16 : 9.

HD – High-Definition Standard HD ready

Висока резолуција, 1280 × 720 пиксела.

IBM – International Business Machines Corporation

IBM је америчка мултинационална компанија са седиштем у Армонку, САД, која се бави рачунарским технологијама. Основана је 1888. године Бави се производњом рачунарског хардвера, софтвера, услугама, хостингом и консалтингом. IBM је највећа компанија на свету која се бави информационим технологијама и држи највећи број патената у ИТ.

UEFA - Union of European Football Associations

Унија европских фудбалских асоцијација је организација која представља административни и контролни орган европског фудбала и заступа европске националне фудбалске савезе. УЕФА је једна од шест контролних јединица светске фудбалске организације.

Списак слика

Слика 1.1. Историјат примене модерних технологија у тенису

Слика 1.2. Приказ функционисања Cyclops система

Слика 2.1. Примена методе триангулације за одређивање позиције брода

Слика 2.2. Метода триангулације

Слика 2.3. Одређивање ГПС позиције објекта методом триангулације

Слика 2.4. Метода ГПС триангулације – праћени објекат је у пресеку сфера

Слика 2.5. Једноставна софтверска апликација за праћење

Слика 2.6. Детекција и праћење кретања возила на путу

Слика 2.7. Изглед E-2D Advanced Hawkeye (АНЕ) летелице

Слика 2.8. Надзорна мини-летелица опремљена спортском камером

Слика 2.9. Андроид софтвер за даљинско управљање летелицом

Слика 2.10. Систем за 3D триангулацију и регулажу трапа аутомобила

Слика 2.11. Сензори и референтне тачке

Слика 2.12. Надзорне камере у систему за 3D триангулацију

Слика 2.13. Компјутерски систем за регулажу трапа са четири камере високе резолуције

Слика 2.14. Камере високе резолуције у процесу мерења

Слика 2.15. Систем видео-камера на тениском турниру у Москви

Слика 2.16. **Hawk-Eye** систем на тениском турниру

Слика 2.17. Камере око фудбалског терена као део Hawk-Eye система

Слика 2.18. Опис и изглед **Hawk-Eye** система у практичној употреби

Слика 2.19. Део рачунарског система **Hawk-Eye**, оператер и 2 од 10 рачунара

Слика 2.20. Лоша 3D анимација и графика код постојећег система

Слика 2.21. Грешка при мерењу и детекцији

Слика 2.22. Назначени ниво поверења при електронском суђењу

Слика 3.1. Скуп задатака у процесу препознавања објекта

Слика 3.2. Поређење између локализације појединачног објекта и детекције објеката

Слика 3.3. Поступак детектовања лопте на основу облика са црно-беле дводимензионалне слике са видео-камере

Слика 3.4. Архитектура модела R-CNN

Слика 3.5. Архитектура модела Fast R-CNN

Слика 3.6. Архитектура модела Faster R-CNN

Слика 3.7. Преглед модела YOLO са предвиђањима

Слика 3.8. Поређење алгоритама за детекцију објеката

Слика 3.9. Поређење брзине на тесту алгоритама за детекцију објеката

Слика 3.10. Однос брзине и тачности код алгоритама за детекцију објеката

Слика 4.1. Кретање код алгоритма моделовања позадине

Слика 5.1. Процес рада Напредног система

Слика 5.2. Одређивање позиције објекта методом триангулације

Слика 5.3. Видео-камере постављене око простора за игру

Слика 5.4. Шест камера распоређених на 60° око терена

Слика 5.5. Тип камере који је коришћен за тестирање система

Слика 5.6. Подешавање камера према линијама терена

Слика 5.7. Тениски терен припремљен за калибрацију камера

Слика 5.8. Веза тест рачунара и мрежне видео-камере UTP 5е каблом

Слика 5.9. Основно идејно решење рачунарске мреже видео-камера и сензора

Слика 5.10. Основно идејно решење рачунарске мреже видео-камера и сензора

Слика 5.11. Софтверска архитектура система

Слика 5.12. Одређивање позиције објекта у 3D простору

Слика 5.13. Поглед камере 2

Слика 5.14. Одређивање висине на којој је праћени објекат у простору

Слика 5.15. Тачне димензије надзираног терена за тенис

Слика 5.16. *Color tracking* процес за детекцију објеката и позиције

Слика 5.17. Подешавање колор филтера

Слика 6.1. 3D анимација и графичко приказивање резултата прорачуна

Слика 6.2. Изглед текстуре за линију терена

Слика 6.3. Изглед фотореалистичних текстура за линију терена

Слика 6.4. Реални изглед 3D симулације и фотореалистичне анимације

Слика 6.5. Финални резултат рада система за праћење

Слика 6.6. Путања лопте и позиција у временским тренуцима

Слика 6.7. Почетна позиција система

Слика 6.8. Основни параметри система

Слика 6.9. Приказ 3D симулације

Слика 6.10. Пример прве тест софтверске апликације

Слика 6.11. Тестирање система на тениском терену у Јајинцима (C++)

Слика 6.12. Примена новије софтверске апликације (C#)

Слика 6.13. Експеримент на два терена

Слика 6.14. Поглед на лоптицу, тест камере и нова апликација

Слика 6.15. Кораци новог алгоритма за детекцију лоптице и реалан пример на сликама

Слика 6.16. Резултати анализе приказани у 3D симулацији: а) Фрејм 17 исти код оба алгоритма, б) Фрејм 18 црвеном бојом грешка у детекцији позиције код старог алгоритма и в) Резултат електронског суђења – црно исправно IN код новог алгоритма, црвено погрешно OUT

Слика 6.17. Реална слика са видео камере – јасно уочљив контакт лоптице са линијом

Слика 6.18. Резултати компаративне анализе приказани упоредо на видео-снимку и у 3D графичкој симулацији (5-7. фрејм)

Слика 6.19. Резултати компаративне анализе приказани упоредо на видео-снимку и у 3D графичкој симулацији (8-10. фрејм)

Слика 6.20. Зависност броја детектованих објеката од резолуције

Слика 6.21. Детекција лоптице у софтверској апликацији подсистема за напредну детекцију при комплексним условима

Слика 6.20. Резултати детекције приказани у 3D графичкој симулацији

Слика 6.21. Детектована лоптица на снимку са видео-камере по фрејмовима 224-267.

Списак табела

Табела 4.1. Поређење библиотека за обраду слика

Табела 4.2. Технике за мерење 3D удаљености

Табела 4.3. Упоредна анализа параметара експерименталних метода из научних радова

Табела 4.4. Упоредна анализа додатних параметара експеримената из научних радова

Табела 5.1. Техничке карактеристике видео-камера у систему за праћење

Табела 6.1. Прорачунате позиције кретања праћеног објекта. Преузето из [37]

Табела 6.2. Компаративна анализа две верзије алгоритама

Табела 6.3. Компаративна анализа две верзије алгоритама при UHD резолуцији

Табела 6.4. Зависност броја детектованих објеката од резолуције

Биографија аутора

Владан Боровић рођен је у Београду, 14.08.1973. године. Основну и средњу школу завршио је у Јагодини. Дипломирао је на Факултету Техничких Наука, Електротехнички одсек, смер Рачунарска техника и Управљање системима, са дипломским радом оцењеном оценом 10. Магистрирао је у Новом Саду на истом факултету са просеком из свих редовних испита 10.0.

Уписао је Докторске студије у Нишу, на Електронском Факултету 2016. године.

Аутор има велико међународно искуство у области Информационо-Комуникационих технологија из Брисела, Белгија, Амстердама, Холандија, Минхена, Немачка, Инсбрука, Аустрија, Тел Авива, Израел, Загреба, Хрватска, Беча, Аустрија и Хјустона, Тексас, Сједињене Америчке Државе.

Одговорни пројектант телекомуникационих мрежа и система, лиценца бр. 353.

Енглески језик, напредни курс, завршен на St. Clare's College, Oxford, England., говори и немачки и француски језик, почетни ниво.

Харвард, Бостон, Сједињене Америчке Државе, диплома о завршеном програму из економског предузетништва.

Аутор је учествовао, са практичним делом Система за праћење покретних објеката у спорту, на такмичењу Најбоља технолошка иновација Србије 2010. године у Београду.

Запослен је у Министарству Унутрашњих Послова, Одељење за радио комуникације, Сектор за аналитику, телекомуникационе и информационе технологије, где се бави планирањем Телекомуникационих и ИТ система, и на Криминалистичко-Полицијском универзитету као наставник информатике.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација под насловом

НАПРЕДНИ СИСТЕМ ЗА ПРАЋЕЊЕ ПОКРЕТНИХ ОБЈЕКТА У СПОРТУ

која је одбрањена на Електронском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини ни у деловима, нисам пријављивао на другим факултетима нити универзитетима;
- да нисам повредио ауторска права нити злоупотребио интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 07.07.2024.

Аутор дисертације: Владан Боровић

Потпис аутора дисертације:



Владан Боровић

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНОГ И ЕЛЕКТРОНСКОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Име и презиме аутора: Владан Боровић

Наслов дисертације:

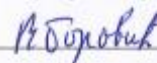
**НАПРЕДНИ СИСТЕМ ЗА ПРАЋЕЊЕ ПОКРЕТНИХ
ОБЈЕКТА У СПОРТУ**

Ментор: проф. др Дејан Д. Ранчић

Изјављујем да је штампани облик моје докторске дисертације истоветан електронском облику, који сам предао за уношење у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу.

У Нишу, 07.07.2021.

Потпис аутора дисертације:



Владан Боровић

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију под насловом:

НАПРЕДНИ СИСТЕМ ЗА ПРАЋЕЊЕ ПОКРЕТНИХ ОБЈЕКТА У СПОРТУ

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

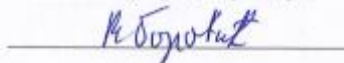
Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 07.07.2021.

Аутор дисертације: Владан Боровић

Потпис аутора дисертације:



Владан Боровић