

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-42>

УДК 004

ІВАСЕЧКО Андрій

Західноукраїнський національний університет

ОСОЛІНСЬКИЙ Олександр

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0136-395X>

## СИСТЕМА "ЕЛЕКТРОННИЙ СУДДЯ ДЛЯ ПІНГ-ПОНГУ" НА БАЗІ МІКРОКОМП'ЮТЕРА RASPBERRY PI

*В даній роботі представлено дослідження застосування систем комп'ютерного зору для спортивних подій, а саме «електронних суддів». Було проведено аналіз відомих систем для суддівства. Виходячи з аналізу аналогів запропоновано архітектуру системи "електронний суддя для пінг понгу", описано апаратну складову, розроблено алгоритм роботи системи та програмне забезпечення та проведено тестування системи.*

*Ключові слова: комп'ютерний зір, електронний суддя, Raspberry Pi, пін-понг, теніс, OpenCV*

IVASECHKO Andrii, OSOLINSKY Oleksandr

West Ukrainian National University

## SYSTEM "ELECTRONIC REFEREE FOR PING-PONG" BASED ON MICROCOMPUTER RASPERI P.I.

*In today's world, the development of artificial intelligence software and technologies is gaining more and more importance in various spheres of life. Sports games are no exception, as they are an important part of our leisure time, physical development and healthy lifestyle. Ping-pong, a popular sports game that requires precision, speed and reaction, did not escape this. However, during the game, situations arise when it is necessary to objectively determine the correctness of the shot, take into account the rules of the game and ensure the fairness of the results. This is traditionally done by judges, but their presence is not always possible or effective. The software module "Electronic Referee for Ping-Pong" should, if not replace the referee, help him, it can be used in gyms, tournaments and ping-pong training for automatic scorekeeping, which ensures a more objective game and avoids conflicts between players. In addition, the developed module can be used as a basis for the further development and implementation of similar systems in other sports games, contributing to the automation and improvement of refereeing processes.*

*This work presents a study of the use of computer vision systems for sports events, namely "electronic referees". An analysis of known refereeing systems was carried out. Based on the analysis of analogs, the architecture of the "electronic referee for ping pong" system is proposed, the hardware component is described, the system's work algorithm and software are developed, and the system is tested.*

*Keywords: computer vision, electronic referee, Raspberry Pi, ping-pong, tennis, OpenCV*

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

В сучасному світі розвиток програмного забезпечення та технологій штучного інтелекту набуває все більшого значення в різних галузях життя. Спортивні ігри не є винятком, адже вони є важливою частиною нашого дозвілля, фізичного розвитку та здорового способу життя. Не оминуло це і пінг-понгу - популярної спортивної гри, яка вимагає точності, швидкості та реакції. Однак, під час гри виникають ситуації, коли необхідно об'єктивно визначити правильність удару, врахувати правила гри та забезпечити чесність результатів. Традиційно це роблять судді, проте їх наявність не завжди можлива або ефективна. Програмний модуль "Електронний суддя для пінг-понгу" повинен якщо не замінити суддю то допомогти йому, він може використовуватись у спортивних залах, на турнірах та тренуваннях з пінг-понгу для автоматичного ведення підрахунку результатів, що забезпечує більш об'єктивну гру та уникнення конфліктів між гравцями. Крім того, розроблений модуль може бути використаний як основа для подальшого розвитку та впровадження подібних систем у інші спортивні ігри, сприяючи автоматизації та покращенню суддівських процесів[1].

### АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ НА БАЗІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ СПОРТУ

На сьогоднішній день алгоритми комп'ютерного зору (CV) широко використовуються для відстеження гравців, транспортних засобів і/або м'яча в різних видах спорту. Це зазвичай використовується для підтримки рішень суддів і задоволення запитів команд або гравців щодо перегляду і зміни прийнятих рішень суддів або арбітрів. При огляді літератури щодо резюме та спортивних технологій, необхідно коротко оцінити також системи, призначені для комерційного використання. Хоча деталі використовуваних алгоритмів часто є конфіденційними з питань інтелектуальної власності, наявність таких систем надає деякі вказівки щодо використовуваного обладнання та програмного забезпечення, що можуть бути корисними в

цій галузі досліджень. Вимоги до таких систем також вказують на очікування щодо рішень, заснованих на CV, що застосовуються у спорті[2][3].

Більшість комерційних систем CV для спорту зосереджені на підтримці рішень суддів, аналізі ефективності або анотаціях для трансляцій. Це програми не просто виявляють м'яч, але також генерують форму об'єкта, його розмір, розташування та достатню кількість даних для аналізу руху. Це важливі аспекти для застосувань у сфері аналізу ефективності, автоматичного анотування, коучингу та підтримки рішень. Нижче наведено загальний опис основних комерційних рішень щодо резюме, які стосуються даної роботи[4].

#### Технологія «Hawk-Eye»

«Hawk-Eye» [5] - це система на основі комп'ютерного зору (CV), яка була розроблена з 1999 року (Hawk-Eye Innovations Ltd, 2013) і пізніше придбана компанією Sony у 2011 році. Спочатку вона була розроблена для крикету як система суддівства, але зараз вона використовується в різних видах спорт у, включаючи теніс, футбол, снукер і недавно легку атлетику. У всіх цих видах спорту «Hawk-Eye» вимагає високошвидкісні камери, які будуть правильно налаштовані (наприклад, шість камер у крикеті, сім у футболі), розміщені навколо арени, поля або корта.

У випадку з тенісом, який по свої суті дуже близький до настільного, обробка вхідних даних в системі «Hawk-Eye» складається з чотирьох етапів:

- 1) 2D-інформація з кожної камери використовується для обробки CV з метою виявлення центру м'яча,
- 2) 3D-дані обчислюються за допомогою триангуляції з усіх доступних камер,
- 3) ці 3D-дані обробляються для отримання точної трекінгової інформації про рух м'яча[5].

#### Технологія «SportVU»

Система розроблена компанією Stats LLC [6] у Чикаго і призначена для відстеження гравців та прогнозування 3D-відеоданих. Це рішення для аналізу, відоме як SportVU (2012), зосереджується на відстеженні гравців і створенні статистики гри. Його застосовують для вимірювання відстані, швидкості та відношення (відстань) до м'яча в різних видах спорту, включаючи футбол, баскетбол і американський футбол. Серед його клієнтів є ЗМІ, трансляційні компанії та організації з коучингу.

Існують два варіанти впровадження системи: базовий і розширений. У базовому варіанті встановлюють три невеликі високошвидкісні камери в одному місці, розташовані на декілька сантиметрів одна від одної. Програмне забезпечення ідентифікує об'єкти в полі зору та отримує дані про їх 3D-позиціонування, створюючи потік рухів кожного об'єкта в реальному часі і карту активності матчів. Розширене рішення передбачає використання шести високошвидкісних камер, розташованих у двох місцях у залі, як триплети. Камери можуть бути стаціонарними або портативними, кожна з них фіксує третину поля, і всі шість камер об'єднуються для створення панорамного огляду. Відстеження м'яча здійснюється з частотою 25 кадрів на секунду (FPS), а відстеження гравців - з частотою 15 FPS. Четвертий датчик використовується для виявлення нових об'єктів, таких як заміни гравців. Оператор системи повинен початково ідентифікувати гравців, судді та інших учасників.

Наразі SportVU не застосовується у виді спорту, такому як настільний теніс, оскільки швидкість гри та розміри поля в цих видів спорту значно відрізняються.

#### «Sport Vision»

Спортивна компанія SportVision (SportVision Inc., 2012) [7] розробила низку інструментів і методів для відстеження об'єктів у різних видах спорту, включаючи бейсбол, американський футбол, автоспорт NASCAR і конні перегони. Вони надають реально-часові показники та покращені графічні зображення для подій у прямому ефірі. Спочатку їхніми клієнтами були переважно медіа-компанії, але востаннє споживачі також отримують доступ до цих технологій через портативні пристрої.

Один з продуктів SportVision, відомий як PITCH/fx, використовується у бейсболі для вимірювання швидкості кидка, обертання м'яча, швидкості та висоти руху м'яча в 60 точках під час його польоту. Для цього використовуються три високошвидкісні камери, розташовані на кожному стадіоні. Ця технологія застосовується для трансляційної накладної графіки та для тренувань, дозволяючи виміряти середню швидкість м'яча з точністю до 2,5 см, що дорівнює приблизно 149.749 км/год. Хоча швидкість та обертання м'яча в бейсболі мають деякі схожі характеристики з настільним тенісом, ця технологія не використовується в настільному тенісі.

2.4 Opta Sports[8] - це одна з провідних компаній у галузі спортивної аналітики та статистики. Вони спеціалізуються на зборі, аналізі та наданні деталізованої статистики для різних видів спорту. Opta надає важливі дані для команд, тренерів, аналітиків, ЗМІ та спортивних фанатів з метою розуміння та аналізу спортивних подій.

Основні характеристики Opta Sports включають:

1. Збір статистики в реальному часі: Opta використовує високоточні технології, такі як оптичне відстеження та системи GPS, щоб відстежувати рух гравців та рух м'яча під час спортивних подій в реальному часі. Це дозволяє надавати докладну статистику та аналіз навіть під час гри.

2. Різні види спорту: Opta працює в різних видів спорту, включаючи футбол (соккер), регбі, крикет, баскетбол, хокей, американський футбол та інші. Вони надають адаптовану статистику для кожного виду спорту.

3. Деталізована статистика: Opta збирає широкий спектр статистичних даних, включаючи інформацію про голи, передачі, штрафи, кидки, різноманітні показники професіоналізму гравців, володіння м'ячем, атаки, оборону та багато іншого.

4. Використання в спортивному аналізі та бізнесі: Інформація, надана Opta, корисна для тренувального процесу команд, стратегічного аналізу, а також для створення спортивних програм, ставок і багатьох інших галузей.

5. Статистика в реальному часі та передача даних: Opta надає послуги статистики в реальному часі для ЗМІ та онлайн-платформ, а також надає API для інтеграції своїх даних в різні додатки та веб-сайти.

Opta Sports є ключовим гравцем у сфері спортивної аналітики і важливим джерелом даних для багатьох фахівців і фанатів спорту, що вивчають і аналізують виступи команд і гравців.

2.5 Zebra MotionWorks[9] - це технологічна платформа для відстеження руху гравців та обладнання в спортивних іграх, зокрема в американському футболі, американському футболі для відкритого повітря, регбі, хокеї на траві, гандболі, лакросі та інших колективних видів спорту. За допомогою системи Zebra MotionWorks можна отримувати високоточну інформацію про рух гравців і м'яча на полі, що дозволяє командам, тренерам і аналітикам отримувати цінні дані для стратегічного аналізу та покращення виступів.

Основні характеристики та можливості Zebra MotionWorks включають:

1. Висока точність вимірювань: Система використовує високоточні сенсори та технології відстеження для вимірювання руху гравців та обладнання з великою точністю. Це дозволяє збирати докладні дані про рух, швидкість, прискорення та інші параметри.

2. Система в реальному часі: Zebra MotionWorks надає дані в режимі реального часу, що дозволяє тренерам та аналітикам слідкувати за подіями на полі під час гри і приймати швидкі стратегічні рішення.

3. Аналіз даних: Платформа включає в себе інструменти для аналізу зібраних даних. Це дозволяє тренерам і аналітикам вивчати рух гравців, визначати стратегії та надавати оцінку ефективності команди.

4. Інтеграція з іншими системами: Zebra MotionWorks може інтегруватися з іншими системами аналізу та відеоспостереження для отримання комплексної інформації про гру.

5. Використання в тренуваннях і підготовці: Дані, зібрані системою, можуть бути використані для покращення тренувального процесу, збільшення фізичної підготовки гравців та розробки стратегії.

6. Оптимізація стратегії: Збирати дані з реального полі гри дозволяє тренерам розробляти більш ефективні гравчині тактики та стратегії.

Zebra MotionWorks допомагає командам і спортивним організаціям покращити виступи гравців і підвищити рівень конкурентоспроможності в різних видах спорту.

2.6 Kinexon[10] - це компанія, яка розробляє інноваційні системи відстеження руху та аналітики для спортивних команд, тренерів та аналітиків. Вони спеціалізуються на використанні сучасних технологій для збору даних про рух гравців та обладнання на полі, що дозволяє зрозуміти і поліпшити спортивні виступи.

Основні характеристики та можливості Kinexon включають:

1. Висока точність вимірювань: Системи Kinexon використовують високоточні сенсори та технології відстеження, такі як радіочастотна ідентифікація (RFID) та ультразвук, для вимірювання руху гравців, м'ячів та іншого обладнання з великою точністю.

2. Реальний час: Дані, зібрані системою Kinexon, доступні в режимі реального часу, що дозволяє тренерам та аналітикам відстежувати гру в реальному часі та реагувати на події на полі.

3. Аналіз даних: Компанія надає інструменти для аналізу зібраних даних, включаючи інформацію про рух, швидкість, прискорення та інші параметри. Це дозволяє тренерам і аналітикам розробляти стратегії та оптимізувати тренувальний процес.

4. Інтеграція з іншими системами: Системи Kinexon можуть легко інтегруватися з іншими системами аналізу даних та відеоспостереження для отримання комплексної інформації про гру.

5. Використання в різних видах спорту: Kinexon використовується в різних видів спорту, включаючи футбол, баскетбол, хокей, американський футбол, регбі, бейсбол та інші. Вони працюють з командами і спортивними організаціями по всьому світу.

6. Оптимізація тренувань і підготовки: Дані, зібрані системою Kinexon, можуть бути використані для покращення фізичної підготовки гравців та розробки ефективних тренувальних програм.

Дана система допомагає спортивним командам і організаціям отримати докладні дані про гру та гравців, що дозволяє покращити стратегії, виступи та знизити ризик травм.

3. Пропонована система "електронний суддя для пінг понгу"

На рисунку 1 ви можете бачити схему архітектури системи.

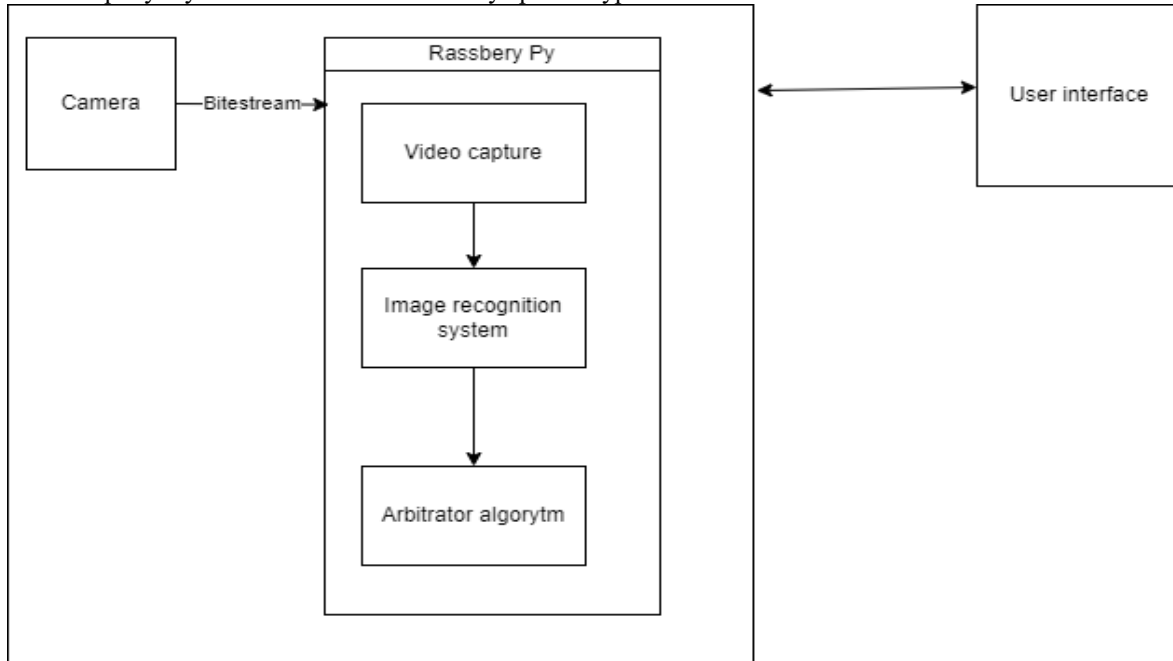


Рис. 1. Узагальнена архітектура системи

Система реалізується на базі мікрокомп'ютері Raspberry Pi 4[11] з камерою(рисунок 3.2). Він має наступні характеристики: основа системи на кристалі (SoC) BCM2711 з чотирма ядрами процесора ARM Cortex-A72, тактова частота 1,5 ГГц, і виготовлена за технологічним процесом 28 нм. Додатково, пристрій підтримує стандартний ARM GIC (Generic Interrupt Controller), що сприяє швидкій роботі систем віртуалізації. ОЗУ становить 4 Гб стандарту LPDDR4.

Камера з мікрокомп'ютером закріплені зверху над столом, поряд з лампою, яка повинна нівелювати змінне освітлення, збоку є телевизор на який виводиться отримане зображення.



Рис. 2. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4 з камерою

Програмний модуль створюється на мові Python та має наступний вигляд:

Пакет Argparse надає інструменти для обробки командного рядка і аргументів, що передаються програмі під час її виклику. Необхідний для надання програмі доступу до камери.

Для відстеження м'ячика використовується метод пошуку кольорової плями за допомогою OpenCV (cv2) в Python. Він має такі пункти:

- Завантаження відеопотоку

- Перетворення кольорового простору з палітри Read Green Blue(RGB) в Hue Saturation Value(HSV), яку ви можете побачити на рисунку 3.3 для кращого виділення кольорових областей:

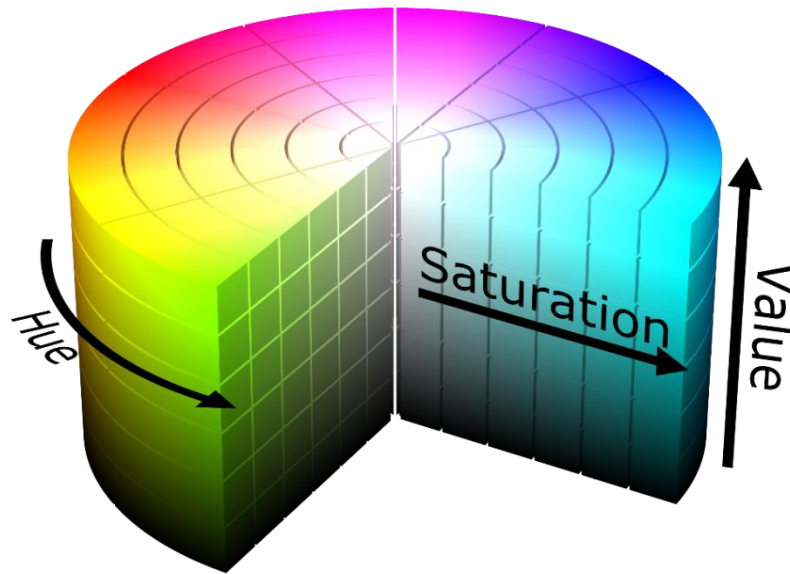


Рис. 3. Палітра HSV

- Визначення діапазону кольорів шляхом задавання максимального(upper) та мінімального(lower) значень. Для виконання даного завдання було обрано діапазон характерний для віддітків оранжевого м'ячика.

- Створення бінарного зображення. Яке створюється за допомогою функції «cv2.inRange()», для того щоб відобразити тільки області, які відповідають діапазону кольорів:

- Застосування операцій морфології. Для покращення якості знаходження контурів та об'єктів можна застосовувати операції морфології, такі як згладжування, розширення, або звуження.

- Знаходження контурів в бінарному зображенні за допомогою функції «cv2.findContours()».

- Виділення об'єкта. В даному випадку він виділяється колом, а його центр червоною точкою.

- Відображення результату в вигляді виводу на екран отриманого зображення з виділеними об'єктами, приклад якого ви можете побачити на рисунку 4.



Рис. 4. Відображення результату

- Фінальним етапом є завершення циклу та звільнення ресурсів.

Алгоритм ведення рахунку ще в процесі реалізації. Але його принцип роботи є таким: якщо м'ячик рухається вздовж столу, тобто по осі x справа на ліво та пересікає певну лінію по осі y то правому гравцю зараховується очко, при русі з ліва на право, тобто коли цей гравець виконує подачу гол йому

зараховуватись не буде, аналогічно і правий гравець. При наборі гравця 11 очок, або 7 очок, при умові, що його суперник не набрав жодного йому зараховуватиметься перемога.

Інтерфейс на даний момент має примітивну реалізацію в вигляді табла зробленого за допомогою пакету Turtle, яке виводить кількість очок та екрану з зображенням. В кінцевому результаті він повинен відображатись в одному вікні та мати такі кнопки як “Start game”, “Stop” та “Exit”.

### 3.1 Алгоритм роботи системи

Спочатку задаються зінні з рахунком «Player1», «Player2» (див. рис.2блок 1) для першого та другого гравців, відповідно., далі за допомогою пакету Tkinter створюється вікно програми(див. рис.2, блок 2), до якого додаються віджети для виводу обробленого відеопотоку та рахунку(див. рис.2 блок 3), виводиться рахунок(див рис.2 блок 4), за замовчуванням, «0:0».

```

construct the argument parser
parse the arguments

Reading the time in the beginning of the video.
While True:
    grab the current frame
    reading the current time

    if we are viewing a video and we did not grab a frame:
        break

    resize the frame, blur it, and convert it to the HSV

    construct a mask for the color diapason
    then perform a series of dilations and erosions to remove any small
    blobs left in the mask

    finding contours and center
    if contours was founded:
        finding the largest countoure in the mask
        set the minimum size of object
        find a center

        if radius < 100 and radius > 50 :
            circle contour

    update the points queue
    for i in range(1, len(tracked points)):
        if tracker points was founded:
            continue
        draw a line for tracked points

    if press "q":
        brake
    
```

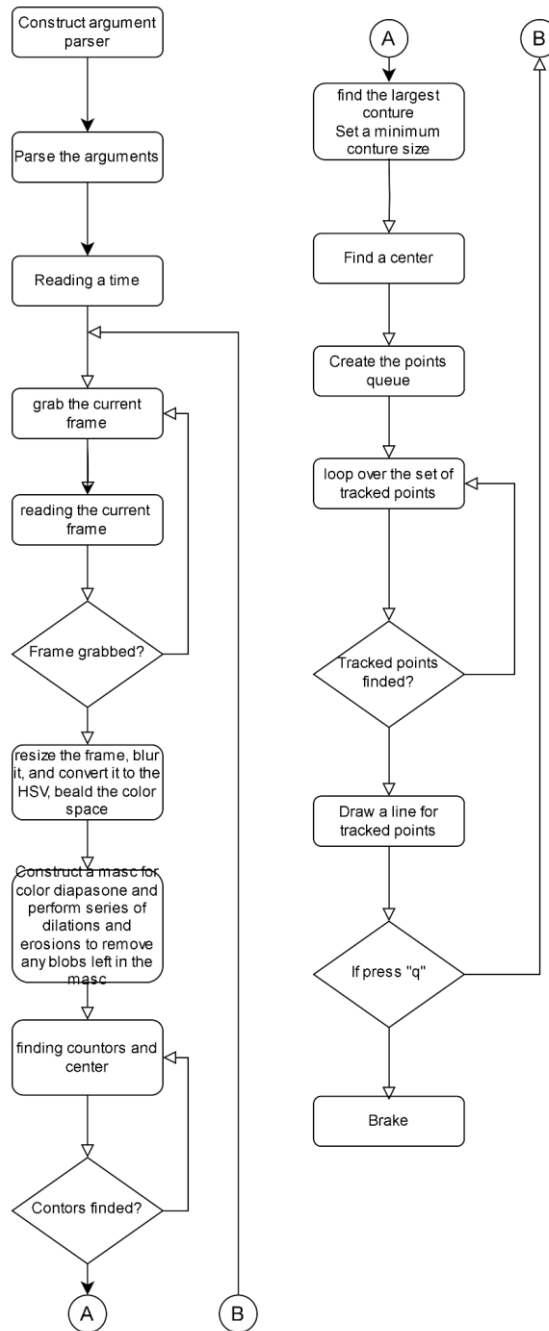


Рис. 5. Алгоритм роботи програми

Тепер оголошується функція «process\_video()»(див. рис.2 блок 5), яка відповідає за трекінг та арбітражні процеси. За допомогою пакету argparse створюється парсер аргументів(див. рис.2 блок 6), програма яка захоплює відео в якості аргументу для функції. Здійснюється парсинг аргументів(див. рис.2 блок 7) в якості яких буде виступати захоплене відео отримане за допомогою функції “VideoCapture”пакету CV2.

За допомогою функції “time” здійснюється читання коректного часу(див. рис.2 блок 8).

Далі відбувається оголошується цикл While(див. рис.2 блок 9), захоплення фрейму з прочитаного камерою зображення(див. рис.2 блок 10), починається відлік часу(див. рис.2 блок 11). Виконується перевірка, чи вдалось захопити кадр(див. рис.2 блок 12), якщо ні то спроба захопити фрейм повторюється. (див. рис.2 блок 13), якщо все ж зображення захоплюється то здійснюється перетворення його розміру, розмиття та перевід в палітру HSV та створюється простір кольорів(див. рис.2 блок 13) за допомогою функцій. “resize”, “GaussianBlur” та “cvtColor”, відповідно.

Наступний крок - конструювання маски(див. рис.2 блок 14) для заданого діапазону кольорів за допомогою функції “inRange” з такими значеннями lower = (25,25,125), upper = (50,50,255). Виконується серія ерозій і розширень, за допомогою відповідних функцій “erode” та “dilate” з ціллю прибрати будь які плями, які залишились на масці.

Далі здійснюється пошук кольорової плями(див. рис.2 блок 15) та перевірка(див. рис.2 блок 16), якщо вони не знаходяться то м'ячика немає на столі і функція повторюється доти поки він не повернеться в гру, коли це відбувається здійснюється пошук найбільшої плями в масці(див. рис.2 блок 17), знаходяться контури м'яча, та центр, виконується підсвітка червоним кольором(див. рис.2 блок 18).

Задається функція для набору “tracked points”(див. рис.2 блок 19). Здійснюється відстеження точок знаходження центру м'ячика(див. рис.2 блок 20), тоді відбувається перевірка, якщо вони не знаходяться то м'ячик не на столі і функція повторюється доти поки він не повернеться(див. рис.2 блок 21) в гру, коли це стається то між точкою положення м'яча на даному фреймі та аналогічною точкою попереднього фрейму малюється червона лінія, що дозволяє краще розуміти його траєкторію(див. рис.2 блок 22).

На рисунку 5 представлено алгоритм роботи системи.

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В даній роботі було представлено систему "Електронний суддя для пінг-понгу" який дозволяє більш точно та об'єктивно судити спортивні змагання з настільного тенісу, яка б допомагала суддям у винесенні більш точних висновків. В даній роботі було проаналізовано існуючі аналоги “електронних судей” для різних видів спорту, а також засобів та методів обробки зображень, які вони використовують для відслідковування траєкторії руху м'яча. Проведений аналіз показав, що наявні системи використовують складні та дорогі системи, які недосяжні для змагань в любительських лігах, і взагалі дуже мало уваги зосереджено до настільного тенісу. Так як більшість спортивних змагань в Україні по пінг-понгу проводяться в любительському дивізіоні (школи, університети, міжрегіональні змагання) було запропоновано дешеву та продуктивну архітектуру систем ведення рахунку. Удосконалено метод детекції тенісного м'яча та поведінки системи при веденні рахунку по очках та по іграх.

В даній момент система перебуває в режимі тестування, налагодження та оптимізації методів розпізнавання тенісного м'яча під час руху по певній траєкторії. Пілотна версія здатна вести підрахунок голів, які зараховуються при пересіченні м'ячика уявної смуги поперек осі x, за умови, що воно зростає, або спадає. В подальших дослідженнях автори планують розширити список правил “детекції голів”, можливості оптимізації методу розпізнавання м'яча з урахуванням апаратної складності системи, підвищення швидкодії та реакції на події при яких зараховуються очки.

### Література

1. James E. Dobson (2023). The Birth of Computer Vision. University of Minnesota Press. ISBN 978-1-5179-1421-9.
2. Thomas, G., Gade, R., Moeslund, T. B., Carr, P., & Hilton, A. (2017). Computer vision for sports: Current applications and research topics. *Computer Vision and Image Understanding*.
3. O.Yu. Sergiyenko, V.V. Tyrsa. 3D optical machine vision sensors with intelligent data management for robotic swarm navigation improvement, *IEEE Sensors Journal* 2021.
4. Інтернет ресурс - <https://www.superannotate.com>
5. Hawk-Eye Innovations Ltd. Hawk-Eye. Available at: <http://www.hawkeyeinnovations.co.uk/>
6. SportVU, SportVU. Stats LLC. Available at: <https://www.statsperform.com/>
7. SportVision Inc.. Available at: <http://www.sportvision.com/>
8. Opta Sports, Opta data from Stats Perform/ Available at: <https://www.statsperform.com/opta/>
9. Zebra MotionWorks, Zebra Technologies/ Available at: <https://www.zebra.com/>
10. Kinexon. Available at: <https://kinexon.com/>
11. Rassberi py. Available at: <https://www.raspberrypi.com/>