



DOI: 10.22363/2312-8143-2024-25-4-441-459

УДК 796/799

EDN: CCNDAS

Научная статья / Research article

Модель управления соревновательной деятельностью команд топ-уровня на основе компьютерного зрения в онлайн

С.Л. Гольдштейн, А.А. Полозов^{ID✉}, Н.В. Папуловская^{ID},
Н.А. Мальцева^{ID}, М.В. Краев^{ID}

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

✉ a.a.polozov@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 10 марта 2024 г.

Доработана: 10 июля 2024 г.

Принята к публикации: 12 августа 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство

Аннотация. Использование технологии PIRS в работе с мужской сборной России по мини-футболу (гл. тренер С.Л. Скорovich) в период с 2010 по 2018 г. позволило ей переместиться с пятого места в мировом рейтинге на первое. Проблема управления спортивной командой высокого уровня состоит в том, чтобы подобрать индикаторы управления и их значения с целью получения наилучшего результата ближайшего матча. Обычно такими параметрами являются оптимизация состава, направленность игры, расстановка своих игроков, рекомендуемые им задания. Цель исследования — структурирование деятельности по переходу от технологии PIRS в работе с командами топ-уровня к созданию системы PIRSONline. Описание системы PIRSONline для разработки ее технической части потребовало получения ряда схем с их описанием, которые регламентировали разработку проекта. Это состав документации, подсистемы, функциональная схема, компонентная схема, матрица «функция — компонент». Сформированная в итоге последовательность действий по разработке PIRSONline включает получение изображения, блок инициализации параметров игры, детекция мяча, определение 3D-координат мяча, детекция игроков, трекинг, классификация игроков и судей, определение позы игрока. Это позволило осуществить комплексный подход к онлайн-управлению соревновательной деятельностью команд топ-уровня. Использование современных методов компьютерного зрения и машинного обучения дало возможность создать интерактивную визуализацию данных.

Ключевые слова: компьютерное зрение, онлайн-управление, система принятия решений, визуализация, спортивная команда, трекинг, тактика, рейтинг

Для цитирования

Гольдштейн С.Л., Полозов А.А., Папуловская Н.В., Мальцева Н.А., Краев М.В. Модель управления соревновательной деятельностью команд топ-уровня на основе компьютерного зрения в онлайн // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 4. С. 441–459. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-441-459>



A model for Managing the Competitive Activities of Top-Level Teams Based on Computer Vision Online

Sergei L. Goldstein, Andrey A. Polozov[✉], Natalia V. Papulovskaya^{ID},
Natalya A. Maltseva^{ID}, Maxim V. Kraev^{ID}

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

✉ a.a.polozov@mail.ru

Article history

Received: March 10, 2024

Revised: July 10, 2024

Accepted: August 12, 2024

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution

Undivided co-authorship.

Abstract. The use of PIRS (Polozov Information Rating System) technology in working with the Russian men's national futsal team (head coach S.L. Skorovich) in the period from 2010 to 2018 allowed it to move from 5th place in the world ranking to first. The problem of managing a high-level sports team is to select the control indicators and their values in order to get the best result of the next match. Usually such parameters are: optimization of the composition, the direction of the game, the placement of their players, the tasks recommended to them. The aim of the study was to structure the activities for the transition from PIRS technology in working with top-level teams to the creation of the PIRSONline system. The description of the PIRSONline system for the development of its technical part required obtaining a number of schemes with their description, which regulated the development of the project. This is the composition of documentation, subsystems, functional diagram, component diagram, function-component matrix. The resulting sequence of actions for the development of PIRSONline includes image acquisition, a block for initializing game parameters, ball detection, determining the 3D coordinates of the ball, detecting players, tracking, classifying players and referees, determining the player's pose. This made it possible to implement an integrated approach to online management of competitive activities of top-level teams. The use of modern computer vision and machine learning methods has made it possible to create interactive data visualization.

Keywords: computer vision, online management, decision-making system, visualization, sports team, tracking, tactics, rating

For citation

Goldstein SL, Polozov AA, Papulovskaya NV, Maltseva NA, Kraev MV. A model for managing the competitive activities of top-level teams based on computer vision online. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2024;25(4):441–459. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2024-25-4-441-459>

Введение

Технология PIRS (Polozov Information Rating System) была сформирована в период с 2010 по 2018 г. в ответ на просьбу тренера сборной России по мини-футболу С.Л. Скорович. Он начал руководить командой в 2010 г. С 2010 по 2018 г. технология PIRS активно использовалась тренером для анализа результатов игр. В этот период мужская сборная России всегда выходила в финал (ЧЕ, ЧМ). Как результат — изменение рейтинга сборной с пятого места на первое.

Тогда нашей команде сложнее всего давались игры со сборной Испании. С 1995 по 2010 г. выиграть не удалось ни разу. Поэтому основной акцент был сделан на моделировании матча со сборной Испании.

Актуальность. Современный профессиональный спорт предъявляет все более высокие требования к эффективности подготовки и управления командами. Традиционные методы, основанные на экспертной оценке тренеров, уже не всегда позволяют добиваться желаемого результата. В этой связи все более актуальным

становится использование научных методов и технологий, в том числе основанных на современных методах компьютерного зрения.

Цель исследования — обеспечение в режиме online управления спортивной игрой команды топ-уровня по мини-футболу.

1. Обзор состояния проблемы

Игровые виды спорта самые консервативные. В них до настоящего времени, несмотря на все достижения спортивной науки, уровень тренерской экспертной оценки остается выше уровня научных индикаторов. Однако информационный массив спортивной игры является огромным и не позволяет возможностям одного человека обрабатывать и управлять им. Речь идет о большом числе участников видов игровых единоборств.

Самым распространенным спортивным термином уже много лет являются технико-тактические действия (далее — ТТД). Множество ученых не смогли дать ему адекватную трактовку ни по определению понятия ТТД, ни по их численности. Оценка индивидуальных ТТД по методике Ю.А. Морозова состоит из 8 аспектов [1], Г.А. Голденко — из 9 ТТД [2]. В работах В.В. Костюкова, а также М.М. Шестакова (1991) их уже 12; С.Ю. Тюленьков (1997) — 9; Е. Федотов (2004) дают нам 7 видов ТТД [3]. М.А. Годик [4] предлагал, например, введение передач на ход партнеру на чужой половине поля до момента получения, в момент получения и после. М.А. Годик считал в играх сборной процент брака ТТД и объем движения игрока с субмаксимальной и максимальной мощностью. В.Н. Платонов приводит ряд диаграмм с очень большим множеством индикаторов [5]. Примерно с 2015 г. начинают появляться данные об автоматизации процесса подсчета ТТД в ходе игры. А.Г. Поливаев сделал это на примере мини-футбола [6]. Известны аналоги в Германии [7]. Однако резкое увеличение числа ТТД (с 10 до 100) привело к обвалу коэффициента корреляции суммы ТТД с результатом игр [8]. В целом дискуссия продолжается [9; 10].

Сегодняшние лидеры IT-рынка спортивной аналитики, такие как InStat, Wyscout, Iceberg, Stats, предоставляют тренеру лишь статистическую справку о ранее сыгранном матче его команды. Преобразование этой информации в последовательность шагов по управлению в следующем матче с другим соперником тренер должен делать самостоятельно. Компании спортивной аналитики не располагают алгоритмом такого решения, а лишь пытаются дать удобный интерфейс сложившейся практики работы в топ-клубах.

Необходимо отметить, что поставщиком новостей стали именно IT-компании, а не научные журналы в IT-отрасли. В [11] обсуждались различные приложения компьютерного зрения в спорте, такие как отслеживание игроков и мячей, оценка поз и системы поддержки принятия решений для судей. Особое внимание уделено будущим направлениям исследований, в частности принятию решений в реальном времени в командных видах спорта, таких как футбол и баскетбол. В [12] приведены факты того, как компьютерное зрение помогает в распознавании действий в реальном времени, прогнозировании траектории мяча и анализе производительности команды. Рассмотрены приложения в таких видах спорта, как хоккей и футбол, с упором на оптимизацию тренировок и тактических решений. В [13] рассмотрено использование искусственного интеллекта (ИИ) для отслеживания игроков, предотвращения травм и тактического анализа в спорте, продемонстрированы такие системы, как SportVU и Prozone, которые были приняты ведущими футбольными и баскетбольными командами для повышения эффективности игры. В [14] обсуждается роль ИИ в спортивном судействе, например Hawk-Eye в теннисе и крикете, также рассмотрено отслеживание мяча, мониторинг толпы и поддержка принятия решений в реальном времени для судей в футболе и других командных видах спорта. Исследование [15] фокусируется на отслеживании мяча и идентификации событий в настольном теннисе и баскетболе с использованием компьютерного зрения. Применяемые ме-

тоды помогают улучшить анализ производительности игроков в реальном времени. В [16] демонстрируется применение интеллектуальных систем отслеживания для углубленного анализа движений игроков в футболе и баскетболе. Модели ИИ фокусируются на оптимизации игровых стратегий и снижении рисков травм. В [17], посвященной футболу, рассматривается, как оптические системы отслеживания в реальном времени помогают управлять тактикой игроков и анализировать стратегии команд. Такие системы, как SportsVu, получили широкое распространение в профессиональных лигах по всему миру. В [18] рассматривается сотрудничество AWS с ведущими футбольными командами по использованию ИИ для прогнозирования результатов матчей, оптимизации построения игроков и анализа стратегий игры в реальном времени.

Описываются приложения компьютерного зрения в фитнесе, от мониторинга качества упражнений до отслеживания движений игроков¹. Системы анализируют данные в режиме реального времени, предоставляя обратную связь по форме и профилактике травм во время спортивных тренировок. Обсуждается, как ИИ используется для прогнозирования футбольных голов путем анализа позиции игрока, траектории мяча и других данных игры в режиме реального времени². Эта предиктивная технология помогает тренерам принимать более обоснованные тактические решения во время матчей.

В игровых видах спорта до сих пор уровень тренерской экспертной оценки остается выше уровня научных индикаторов. Огромный объем информации, генерируемый во время игры, делает невозможным ее эффективную обработку человеком. Алгоритмы для онлайн-управления командами в реальном времени на основе компьютерного зрения находятся в процессе разработки. Ни в анализе патентов, ни в анализе научных статей мы не видим разработанных моделей игры.

Предлагаемое решение — система PIRSonline, основанная на технологии PIRS, разработанной авторами, позволит:

- в режиме онлайн отслеживать и анализировать действия игроков и команды в целом;
- оценивать эффективность технико-тактических действий (ТТД);
- прогнозировать развитие игровых ситуаций;
- вырабатывать рекомендации для тренеров по управлению командой.

Преимущества системы PIRSonline:

- повышение эффективности подготовки и управления командами;
- объективность оценки ТТД;
- возможность прогнозирования развития игровых ситуаций;
- оперативность принятия решений тренерами.

2. Материалы и методы. Технология PIRS

Прежде всего, авторы посчитали необходимым разделить ТТД и технико-тактические единоборства (далее — ТТЕ) [10]. Передачи, которые составляют большую часть ТТД, можно набирать при отсутствии соперника на поле. ТТЕ считает именно выигранные единоборства. Сюда относятся обыгрывание, пас за спину и т.д. Каждое такое выигранное ТТЕ дает перемещение мяча с точки меньшей вероятности забить гол в точку более высокой вероятности. Этот прирост далее будем называть *стоимостью* ТТЕ. Сумма приростов стоимости всех выигранных ТТЕ с учетом фактора реализации воплощается в число забитых голов. Баланс З (забитых) и П (пропущенных) голов является основой для определения рейтинга команды в целом среди других команд. Для расчета вероятности выиграть ТТЕ необходимо рассчитать R_{til} и R_{tjl} — рейтинги игроков соперничающих команд в предстоящем матче по компонентам ТТЕ, которые, в свою очередь, должны быть получены из

¹ Computer Vision in Fitness and Athletics // Voxel51. URL: <https://voxel51.com/> (accessed: 21.02.2024).

² Predicting Soccer Goals with AI and Computer Vision. Sportradar // SportsData 2024. URL: <https://sportradar.com/> (accessed: 21.02.2024).

рейтингов команд. Сервис ga-first.com создан для определения рейтингов команд на основе решения системы линейных уравнений (СЛУ) методом Гаусса из результатов команд (uefa.com, flashscore.com и др.). Запишем результат матча в спортивных играх (1):

$$B_i = Z_i - \Pi_i = Z_{i1} - \Pi_{i1} + \dots + Z_{in} - \Pi_{in}, \quad (1)$$

где Z_i , Π_i — забитые и пропущенные голы i -команды в турнире; B — баланс команды в турнире (по условиям игры команды борются за $B > 0$); n — число игр.

$$\begin{aligned} \frac{(Z_i - \Pi_i)}{(Z_i + \Pi_i)} &= \frac{(Z_{i1} - \Pi_{i1})}{(Z_i + \Pi_i)} + \dots + \frac{(Z_{in} - \Pi_{in})}{(Z_i + \Pi_i)}, \\ \Delta i &= \frac{(Z - \Pi)}{(Z + \Pi)} = \frac{(Z_1 + \Pi_1)}{(Z + \Pi)} \times \frac{(Z_1 - \Pi_1)}{(Z_1 + \Pi_1)} + \dots + \\ &+ \frac{(Z_n + \Pi_n)}{(Z + \Pi)} \times \frac{(Z_n - \Pi_n)}{(Z_n + \Pi_n)}, \end{aligned}$$

где $\Delta i = (Z - \Pi) / (Z + \Pi)$ — баланс голов Z и Π по интервалу игр i -команды (формула 2):

$$\delta i = (Z_{ij} + \Pi_{ij}) / (\sum Z_i + \sum \Pi_i), \quad (2)$$

$$\Delta i = (Z_i - \Pi_i) / (Z_i + \Pi_i), \quad (3)$$

$$Rt_i = Rt_{cp} + 1000 \times \Delta i_j,$$

где Rt_i — рейтинг одной i -команды за N игр из ее рейтингов в каждой игре

$$Rt_{cp} + \Delta i = \delta_1 \times (Rt_{cp} + \Delta_{i1}) + \dots + \delta \times (Rt_{cp} + \Delta).$$

Считаем средним значением участников турнира 2200:

$$\begin{aligned} Rt_i &= \delta_{i1} \times Rt_{i1} + \delta_{i2} \times Rt_{i2} + \dots + \delta_{in} \times Rt_{in}; \\ Rt_i &= Rt_j + \Delta i_j; \\ Rt_i &= \sum_{j=1}^N \delta_j \times Rt_j + \Delta i; \\ Rt_{cp} &= \left(\frac{1}{n} \right) \times \sum_{l=1}^n Rt_l = 2200, \end{aligned} \quad (4)$$

где $Rt_{cp} = 2200$ — среднее значение рейтинга турнира, при котором значение рейтинга самого слабого участника — число положительное (формулы 3 и 4).

В рейтинге непринято выражать уровень участников отрицательными и дробными числами. Отсюда среднее значение рейтинга всех участников — 2200.

Теперь нам необходимо разделить задачи выигрыша (и реализации голевых моментов. Суть игры сводится к доставке мяча (шайбы и т.п.) через последовательность ТТЕ в точку наибольшей вероятности забить гол и реализации голевого момента. Нам придется собрать данные по технико-тактическим единоборствам (ТТЕ) и реализации голевых моментов. Из анализа видео получаем v/v_{cp} — скорость полета мяча в сравнении со средней скорости полета мяча на основе покадровой оценки движения мяча по траектории либо на основе экспертной оценки (рис. 1).

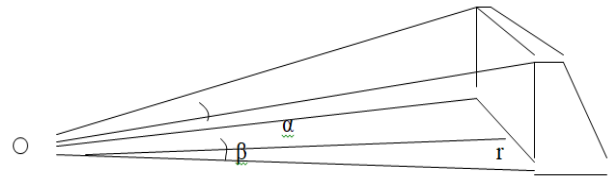


Рис. 1. Определение индекса
Источник: выполнено А.А. Полозовым

Figure 1. Definition of the index
Source: made by A.A. Polozov

$$\varphi = \frac{\alpha \times \beta}{\tau} = \frac{\alpha \times \beta}{r} \times v = \varphi_0 \times v, \quad (5)$$

где α , β — горизонтальный и вертикальные углы, под которыми видны ворота из данной точки поля; τ — время полета мяча до ворот; r — расстояние от мяча до ворот; v — скорость полета мяча до ворот; v_{cp} — средняя скорость полета мяча в турнире при ударах по воротам; φ — значение индекса точки поля, скорректированное на v/v_{cp} ; φ_0 — значение индекса точки поля в зависимости от α , β , τ (формула 5) [8; 10].

Далее выделяли определенные интервалы значений индекса и обобщали внутри них ста-

тистику успешности ударов по воротам. Отдельно выделяли удары по воротам головой, правой и левой ногой, выполняемые с сопротивлением, в падении, при высокой скорости передачи и т.д. В этом случае дисперсия значений успешности ударов по данной методике была минимальной. Если мяч при ударе по воротам летит быстрее в несколько раз, то это равносильно приближению точки удара к воротам за счет времени полета мяча. Поэтому значение φ масштабируется коэффициентом $v/v_{\text{ср}}$, что показано в [10]. Обозначим p — вероятность реализовать момент (забить мяч, шайбу и т.д.) с точки φ , при скорости полета мяча v , одним из четырех типов удара ($A(N)$):

$$p(x, y) = 1 - \exp\left(\frac{-\varphi(x, y)}{A}\right), \quad (6)$$

где A — коэффициент успешности реализации голевого момента (формула 6). Их 4 вида — для ударов головой, обеими ногами и в безопорном положении. A рассчитывается как минимальная дисперсия D с реализацией (сумма забитых и сумма p) в играх (формула 7):

$$D(A) = \min(\Sigma 3(A) - \Sigma p(A)). \quad (7)$$

Учитываем только те ТТЕ, в результате которых растет (формула 8) вероятность забить гол с новой точки пребывания мяча ($P_1 - P_2 > 0$):

$$Ct(x, y) = P_i(x_0, y_0) - P_i(x_1, y_1), \quad (8)$$

где Ct — стоимость выигранного матча; ТТЕ — ожидаемое изменение счета матча в случае успешности ТТЕ; $P_i(x, y)$ — вероятность забить гол с точки поля с координатами (x, y) .

$Ct(x, y) = P\{(x, y), (\text{stats})\}$. В итоге — формулы 9 и 10:

$$\Delta = \left(\frac{(\Sigma Ct_i \times Ni(+)) - (\Sigma Ct_i \times Ni(-))}{\Sigma Ct_i \times Ni(+) + \Sigma Ct_i \times Ni(-)} \right) \times 1000; \quad (9-10)$$

$$\delta = \Sigma (Ctat \times Nat + Ctob \times Nob) / (3 + \Pi),$$

где Cta , Cto — стоимость выигранного ТТЕ в атаке (Nat) и обороне (Nob).

Оценка реализации голевого момента PIRS с нанесенными на нее значениями индекса для футбола. Из [14] известно

$$Rti = Rtoi \times \exp(-C \times Ntte):$$

$$3_{\max} = \Sigma_{i,j,l,k} \times Ct, \quad (11)$$

где ΣTTE — число успешных ТТЕ в матче (формула 11).

Из стоимости ТТЕ получаем δ и Δ каждого игрока в матче по каждому компоненту игры. Rti и Rtj получаем с сервиса first.com по формуле (12) (рис. 2).

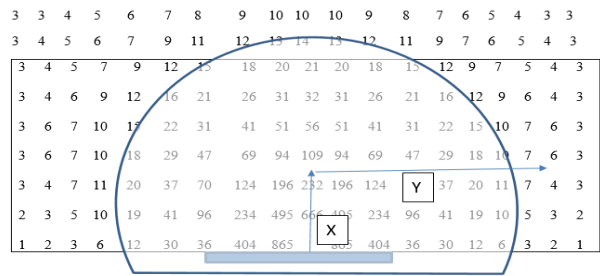


Рис. 2. Распределение индекса по штрафной площадке в футболе
Источники: выполнено А.А. Полозовым
Figure 2. Distribution of the index in the penalty area in football
Source: made by A.A. Polozov

$$\begin{cases} Rtil = \sum_{i=1}^n \delta_{ijl} \times Rtjl + \Delta il; \\ Rtil = \sum_{i=1}^k \delta_{jil} \times Rtil + \Delta il; \\ (\Sigma Rtil + \Sigma Rtjl) / (n + k) = Rt(ij \text{ First.com}), \end{cases} \quad (12)$$

где δ_{ij} — доля результата j игры в общей совокупности результатов i -й команды; n — кол-во игроков нашей команды; k — кол-во игроков команды соперника.

Распределение δ_i по игре в обороне берем с предыдущего матча предстоящего соперника. По каждому ТТЕ (46 видов) есть отдельное решение СЛУ (12). Состояние системы в зависимости от управляющих воздействий в момент времени t может быть записано следующим образом (формула 13):

$$S = Si(t, PIRS) =$$

$$= \left\{ (x, y) \frac{0}{i}, (x, y) \frac{k}{i}, T(TTE), (N1, N2); ti \right\}. \quad (13)$$

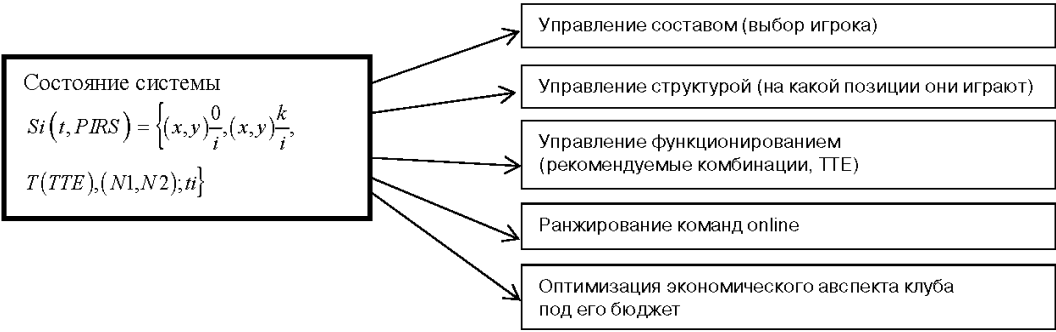


Рис. 3. Вектор управления
И с т о ч н и к: выполнено А.А. Полозовым

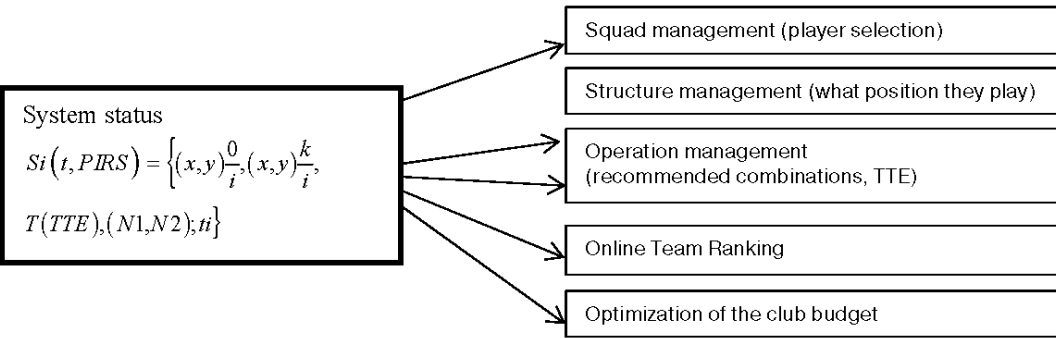


Figure 3. Control vector
S o u r c e: made by A.A. Polozov

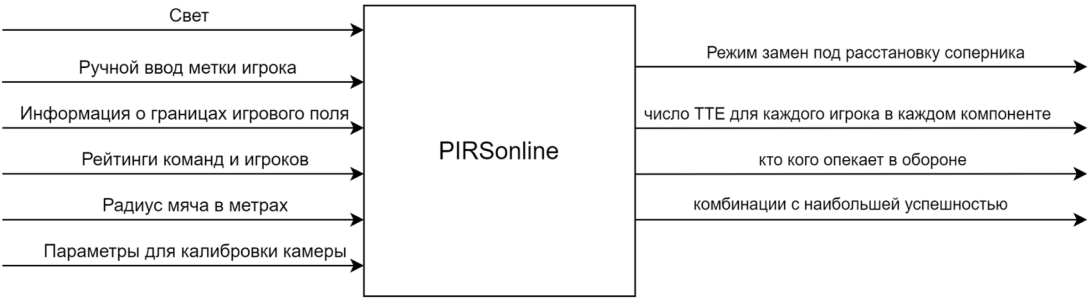


Рис. 4. «Черный ящик» модели PIRS
И с т о ч н и к: выполнено Н.А. Мальцевой

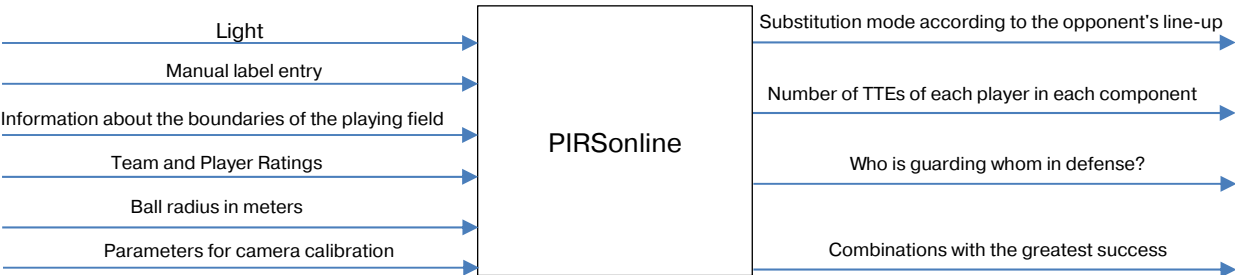


Figure 4. The PIRS model “black box”
S o u r c e: made by N.A. Maltseva

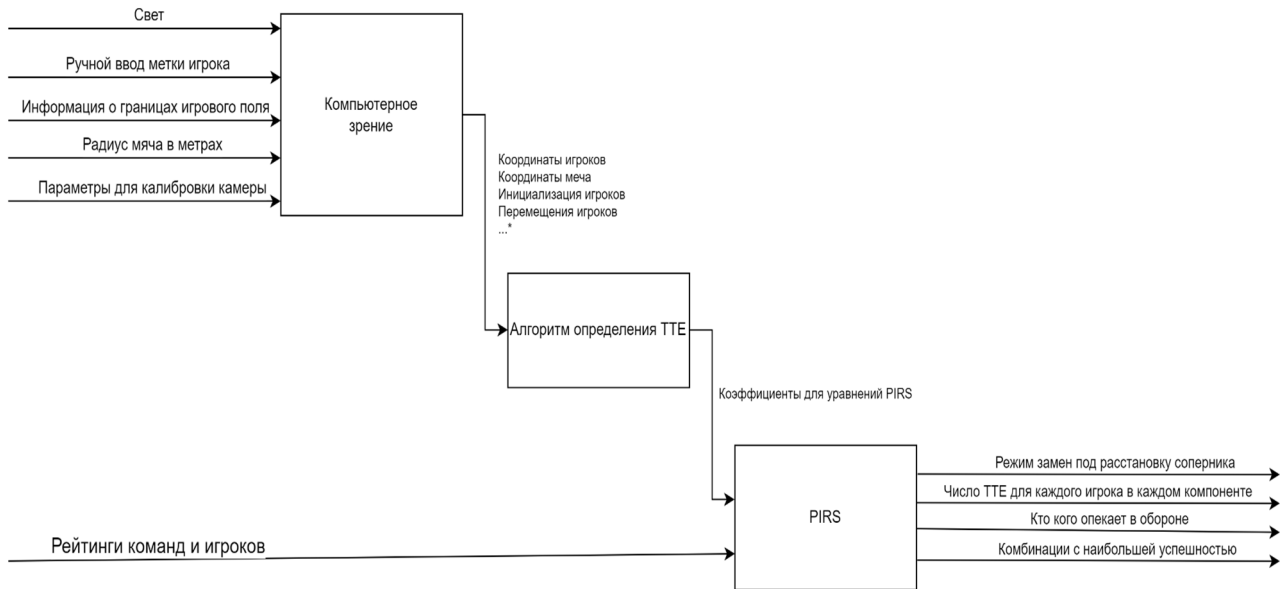


Рис. 5. Подсистемы модели PIRS
Источник: выполнено Н.А. Мальцевой

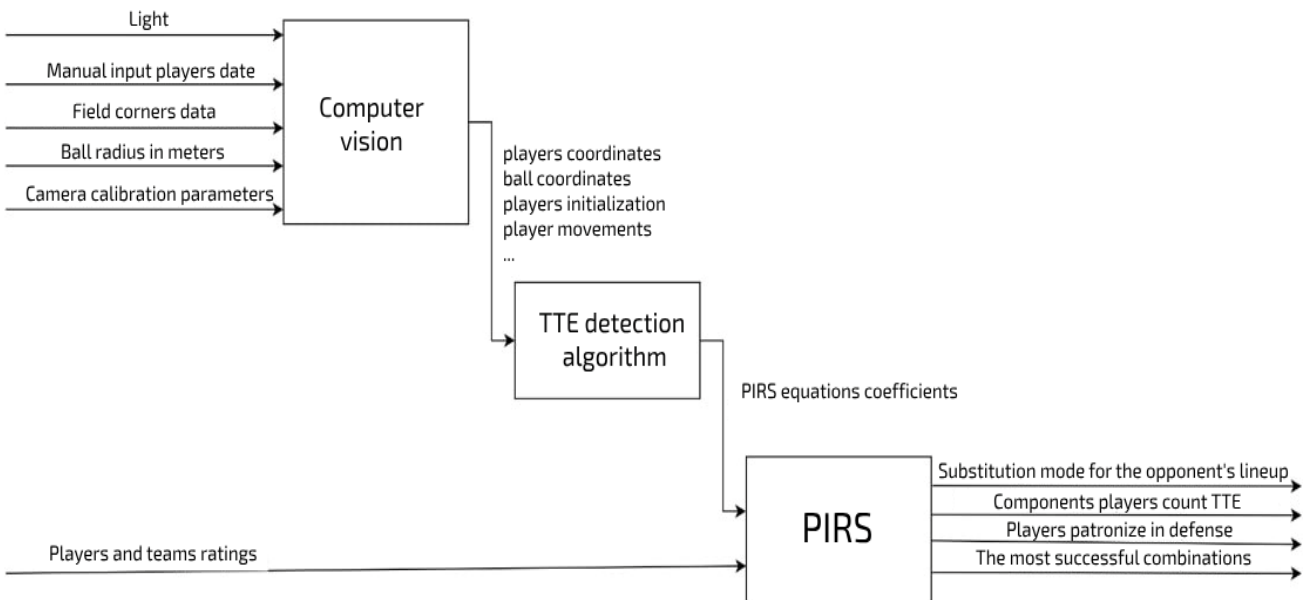


Figure 5. Subsystems of the PIRS model
Source: made by N.A. Maltseva

Цель проекта:

Структурирование работы по переходу от технологии PIRS в работе с командами топ-уровня к созданию системы PIRSONline.

Основные задачи проекта (рис. 3):

– определение границ системы, ее входов и выходов (рис. 4);

– разбиение системы на ее подсистемы (рис. 5);

– определение функций системы (рис. 6);

– определение компонентов системы (рис. 7);

– трассировка компонентов к реализуемым функциям.

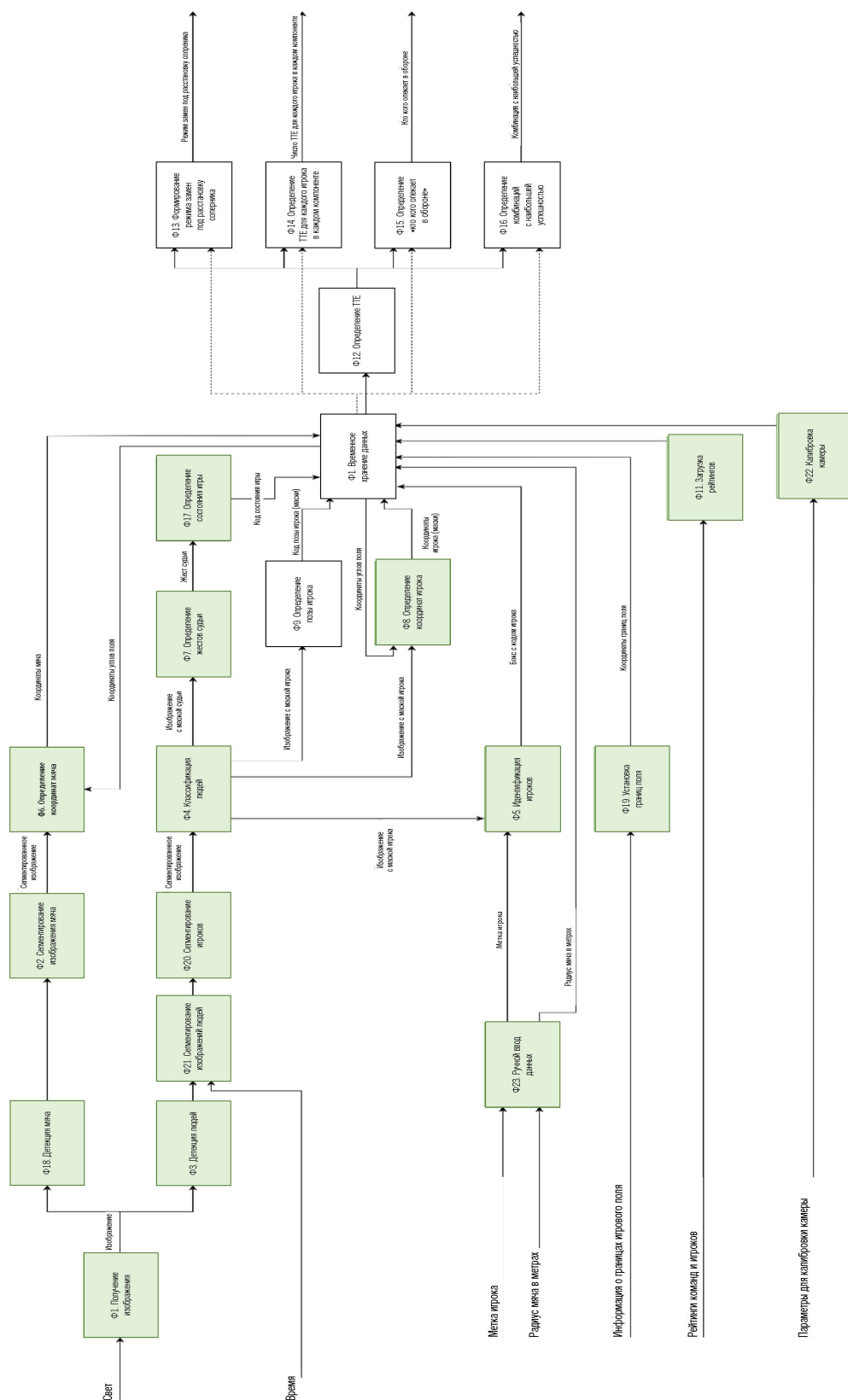


Рис. 6. Функциональная схема системы через ее декомпозицию.
Данные из элемента в виде изображений передаются, если меняется кадр
И с т о ч н и к : выполнено Н.А. Мальцевой

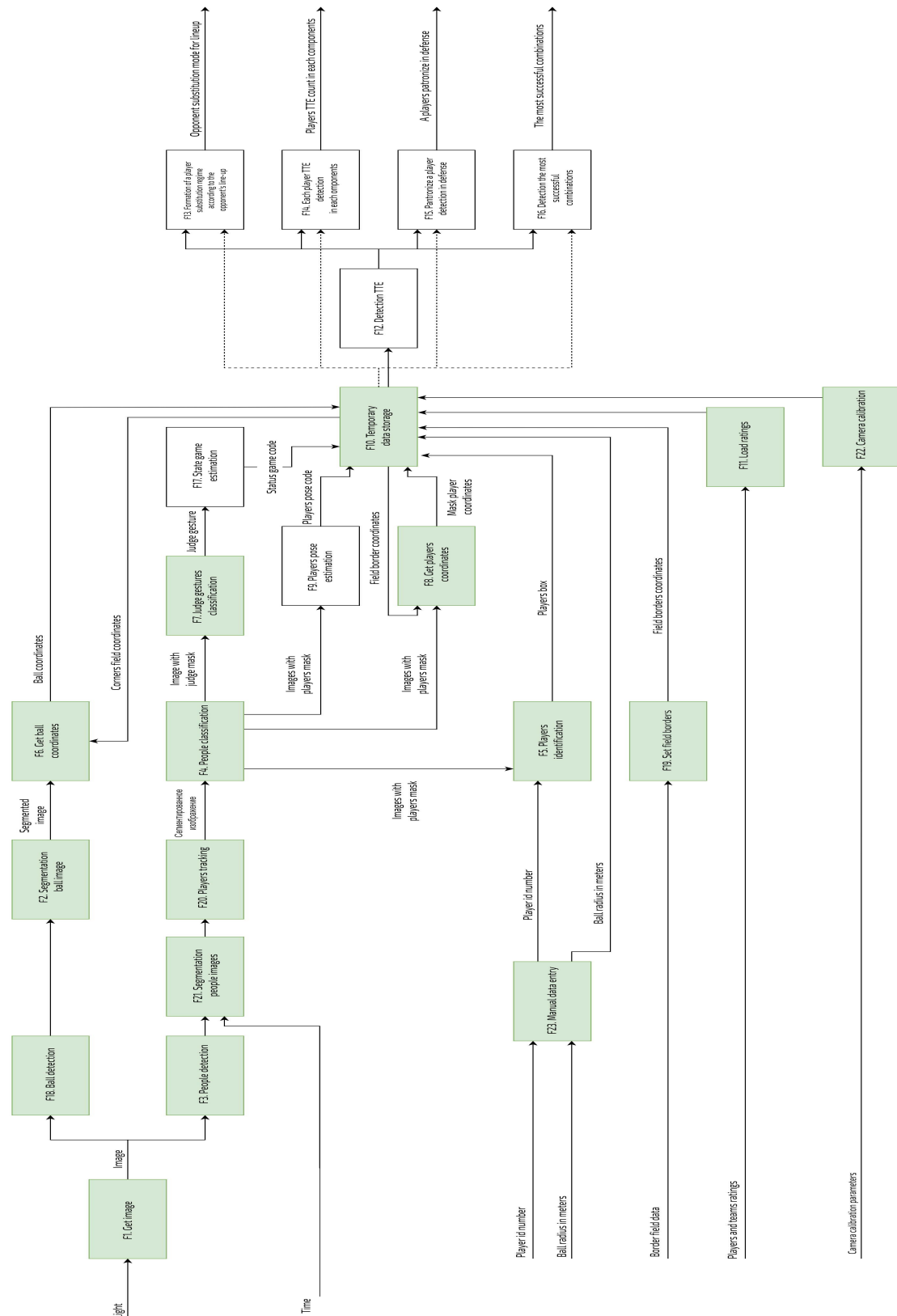


Figure 6. Functional diagram of the system through its decomposition.
Data from element to element in the form of images is transmitted if the frame changes
Source: made by N.A. Maltseva

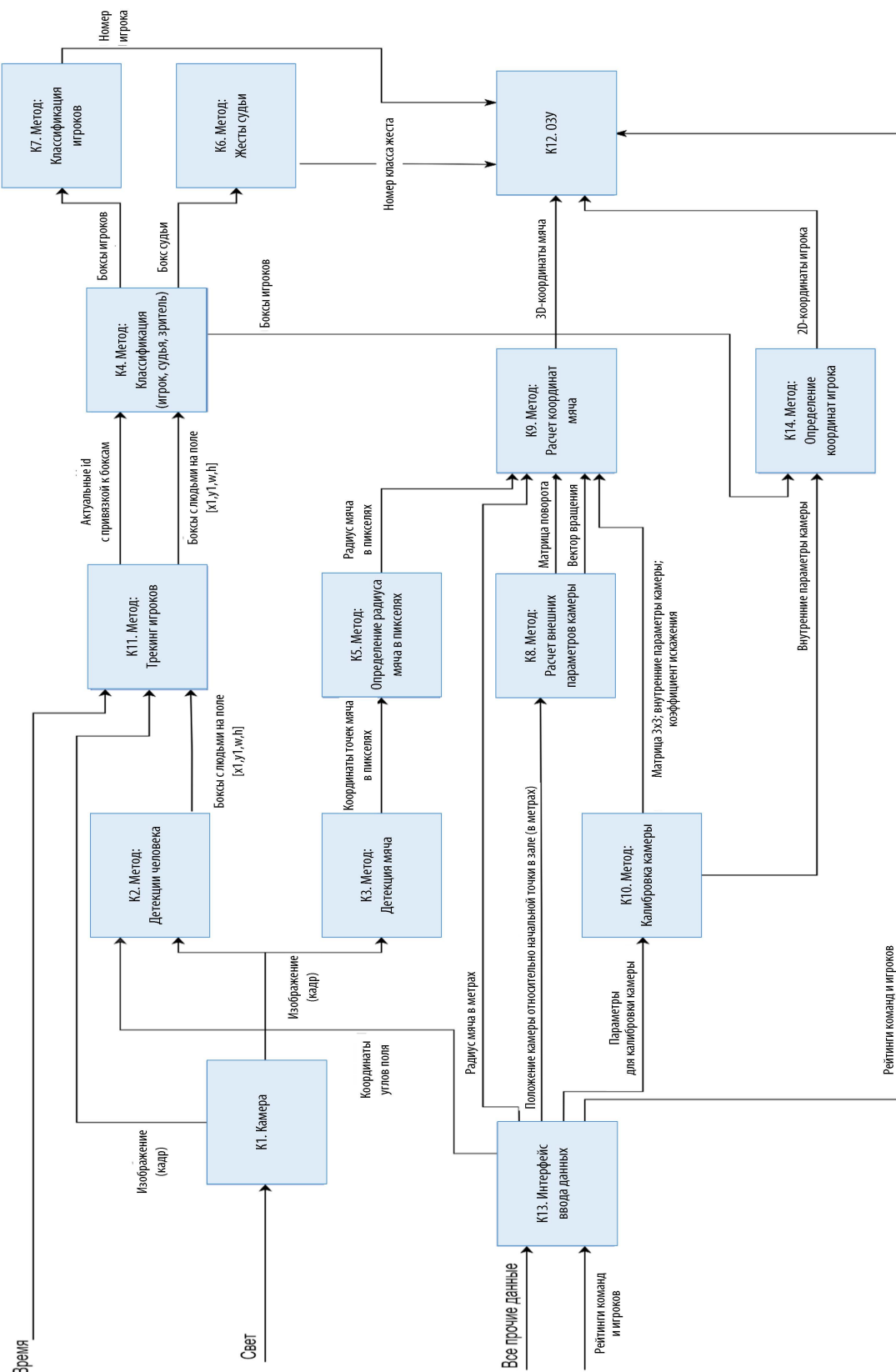


Рис. 7. Компонентная схема для приближения описания системы к более реальному прототипу
Источник: выполнено Н.А. Мальцевой

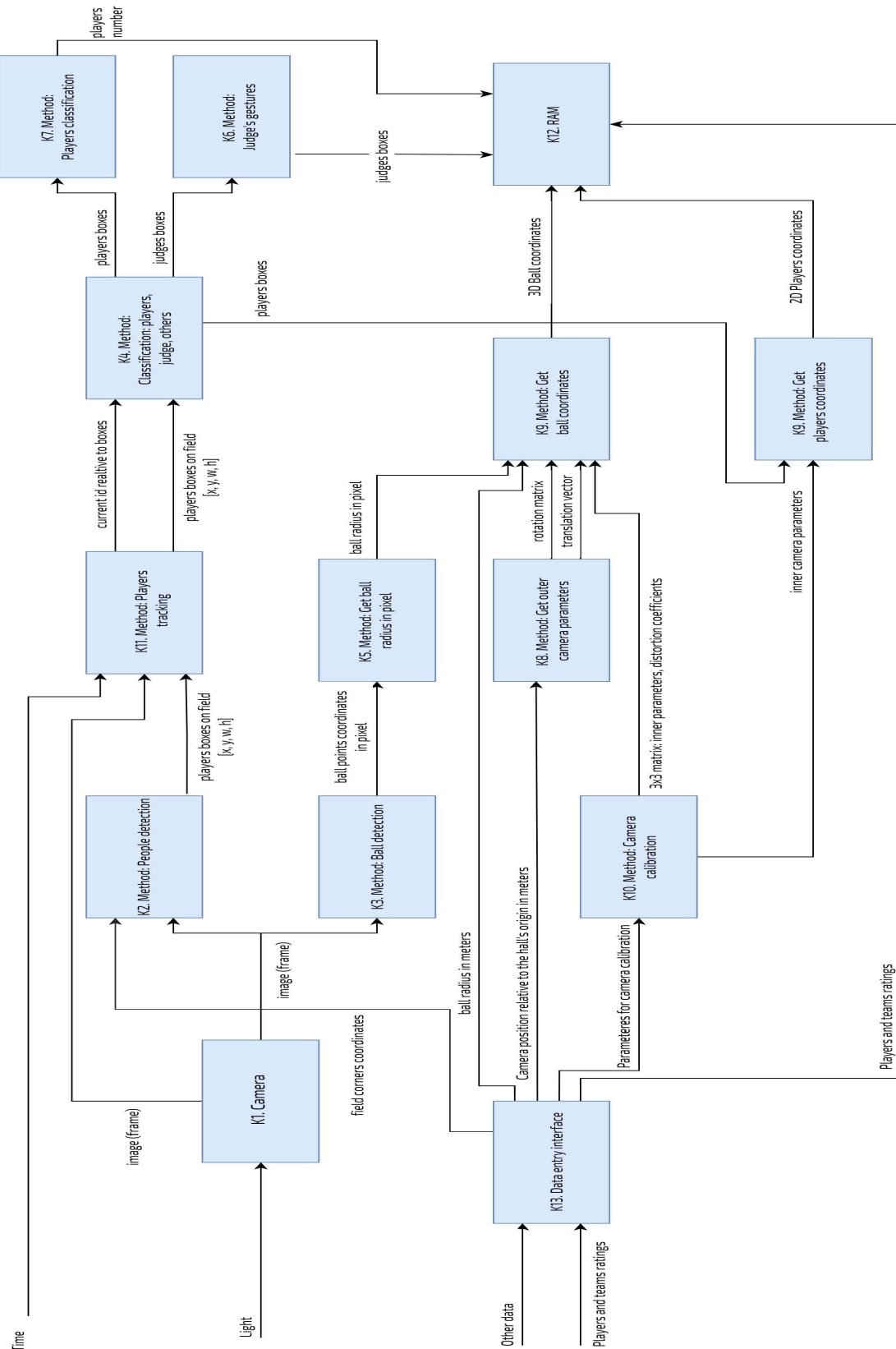


Figure 7. Component diagram to bring the system description closer to a more realistic prototype
 Source: made by N.A. Maltseva

3. Результаты

Представление системы как простой функции преобразования $f(x)$, ее входы и выходы.

Экспериментальная часть работы выполнялась в следующей последовательности.

1. *Получение изображения.* В систему управления спортивной командой данные об игре поступают с сетевой камеры HikvisionDS-2CD2087G2-LU (рис. 8), установленной в зале во время проведения соревнования. Полученные данные итеративно поступают и обрабатываются в последующих блоках с заданным интервалом.



Рис. 8. Камера HikvisionDS-2CD2087G2-LU
Источник: выполнено Н.А. Мальцевой

Figure 8. Hikvision DS-2CD2087G2-LU camera
Source: made by N.A. Maltseva

2. *Блок инициализации параметров игры.* Этот блок выполняется один раз в начале матча для задания постоянных значений, таких как параметры камеры, параметры поля, размер мяча. Эти значения хранятся в файле конфигураций в течение всего матча. К параметрам камеры относятся внутренние и внешние значения. Они необходимы для вычисления координат положения игроков и мяча на поле. К внутренним параметрам камеры, необходимым для пересчета 2D-координаты в 3D-координаты в системе координат камеры, относят матрицу камеры K , включающую f — фокусное расстояние в мм, установленное в настройках камеры как постоянное значение в рамках игры; d — плотность пикселей; w, h — размер сенсора:

$$K = \begin{bmatrix} d * f & 0 & \frac{w}{2} \\ 0 & d * f & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Также к внутренним параметрам относятся коэффициенты дисторсии, вычисленные на этапе калибровки камеры. Они позволяют корректировать значение координаты, устраняя искажение линзы. Внешние параметры камеры относятся к соотношению системы координат камеры к мировой системе координат, которая в системе управления рассматривается в рамках спортивного зала и содержат матрицу вращения и вектор трансляции, т. е. сдвиг камеры относительно начальной точки отсчета координат. В данном случае это нижний левый угол поля.

3. *Детекция мяча.* К параметрам поля относятся 8 опорных точек (рис. 9) с заранее известными координатами относительно начальной точки отсчета и границы поля для игнорирования всех детекций мяча и игроков вне этой области. После того как кадр поступил на вход в информационную модель, он обрабатывается в блоке детектора мяча. На первом шаге изображение проходит процесс предобработки, состоящий из изменения размера изображения (1024, 1024) и нормализации значений пикселей в диапазоне $[0,1]$ по трем каналам.

После предпроцессинга данные подаются на вход в сегментационную нейронную сеть с заранее обученными параметрами для детекции мяча. Последний слой в данной сети заменен на полносвязанный, что позволяет классифицировать каждый пиксель по принадлежности к объекту детекции, создавая тем самым маску выделения границ объекта.

4. *Определение 3D-координат мяча.* Для вычисления координат достаточно одной перспективы вида части мяча¹. Объект задается 2D-координатами точек в плоскости кадра. Чтобы вычислить положение мяча в 3D-пространстве,

¹ Computer Vision in Fitness and Athletics. Voxel51. URL: <https://voxel51.com> (accessed: 21.02.2024).

достаточно минимум 5 таких точек, расположенных на границе объекта. Затем по уравнению эллипса

$$C_1 \times X^2 + C_2 \times X \times Y + C_3 \times Y^2 + C_4 \times X + C_5 \times Y + C_6 = 0 \quad (15)$$

вычисляются координаты, описывающие овальную фигуру вокруг заданных точек объекта методом минимизации отклонения от заданного уравнения. В нашем случае 2D-координаты объекта в плоскости кадра были получены на

выходе сегментационной сети на предыдущем шаге. Затем с помощью уравнения (15) проводится оптимизация точек для более точного описания эллипса, и эти координаты пересчитываются в систему координат камеры согласно внутренним параметрам камеры. За начало системы координат (далее — СК) спортивного зала, в которой считаются 3D-координаты игры, была принята точка поля в левом нижнем углу, относительно которой зафиксировали положение камеры по трем осям (рис. 9, 10).

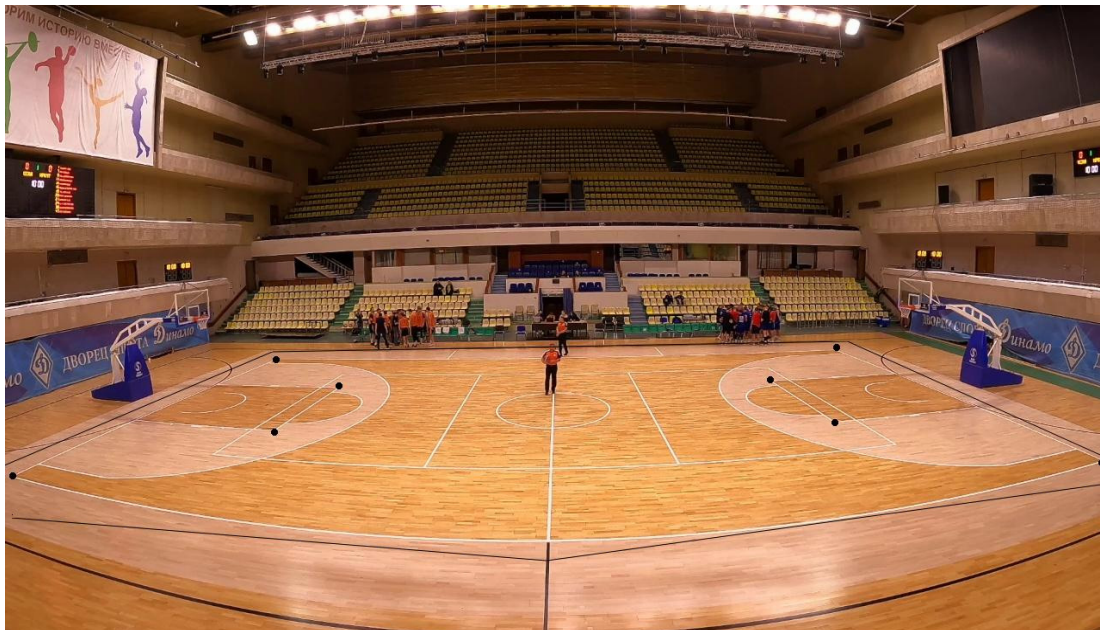


Рис. 9. Опорные точки и границы
Источник: выполнено Н.А. Мальцевой
Figure 9. Anchor points and boundaries
Source: made by N.A. Maltseva

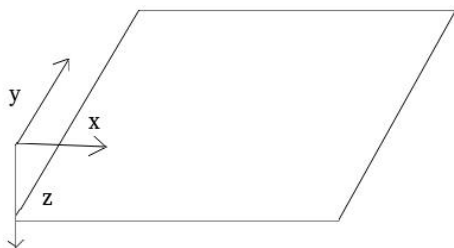


Рис. 10. СК зала, относительно которой фиксируется камера
Источник: выполнено Н.А. Мальцевой
Figure 10. SC of the hall relative to which the camera is fixed
Source: made by N.A. Maltseva

Зная координаты точки поля и камеры, была вычислена матрица вращения и вектор трансляции. Внешние параметры камеры необходимы для пересчета полученных координат из СК камеры в СК зала.

5. Детекция игроков. Детекция людей в выделенной области выполняется с помощью сегментационной модели нейронной сети YOLOv7, где человек описывается координатами маски по контуру фигуры. Эти данные поступают на вход в блок определения координат игроков на поле и в блок классификации «игрок и судья».

6. *Трекинг*. Каждый игрок на поле фиксируется не только своими координатами на поле, но и номером трека, который привязывается к нему в начале соревнования и сохраняется на протяжении всей игры. Если трек теряется, реидентифицировать игрока помогает номер на майке, его распознавание помогает привязать номер трека к конкретному игроку. В этом блоке в качестве входных данных выступают координаты игрока и его изображение, в качестве выходных данных — номер игрока. Игрок считается новым, если он ранее не был идентифицирован, использованный ранее, если это тот же игрок.

7. Классификация игроков, зрителей и судей (рис. 11).

8. *Определение позы игрока.* Для того чтобы распознать ТТЕ на видео в момент времени i , недостаточно знать положение игра на поле. Необходима комбинация положения его рук и ног на кадре $i - 1$ и i . Модель OpenPose позволяет

определить координаты 5 точек человека в кадре (пик). Эти данные сохраняются в течение нескольких кадров и подаются в блок определения ТТЕ.



Рис. 11. Пример трех классов: судья, игрок, болельщик
И с т о ч н и к: выполнено Н.А.Мальцевой

Figure 11. Example of three classes: judge, player, fan
Source: made by N.A. Maltseva.

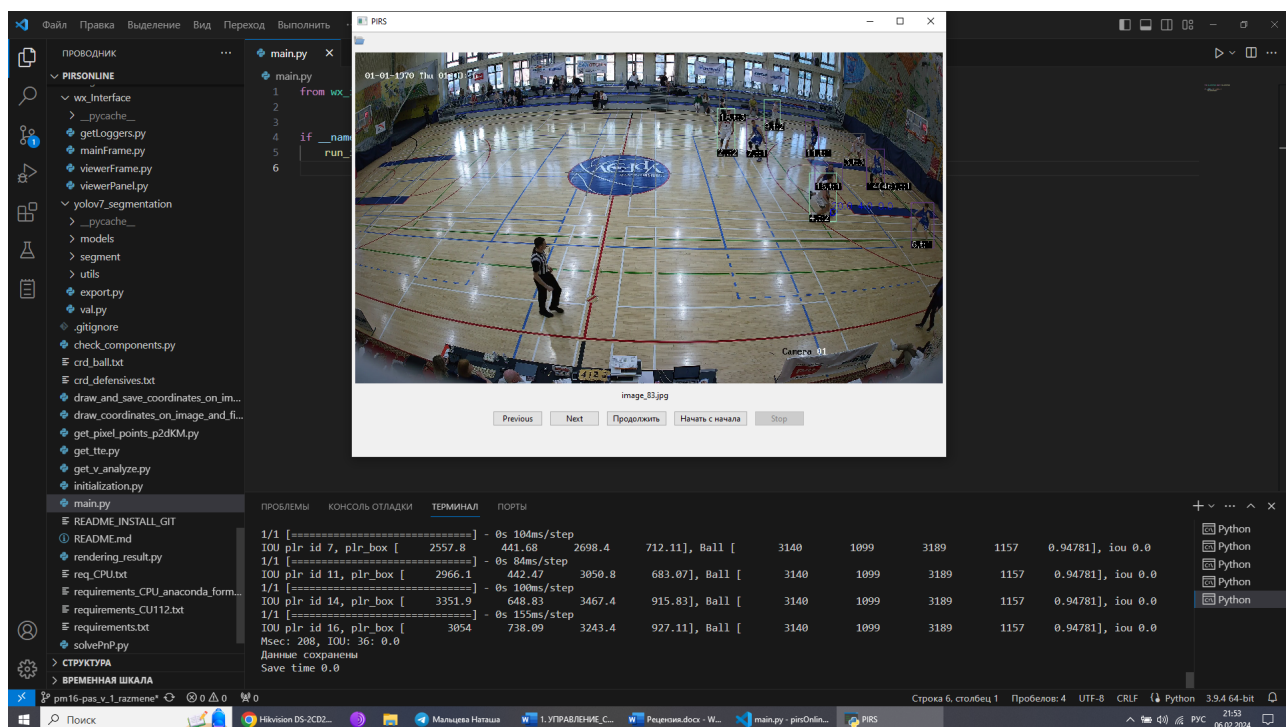


Рис. 12. Итоговый результат компьютерного зрения для PIRSONline
И с т о ч н и к: выполнено Н.А. Мальцевой

Figure 12. Final computer vision result for PIRSONline
Source: made by N.A. Maltseva

9. В итоге предыдущих шагов мы получили координаты игроков и мяча в игровом пространстве. Это позволило нам определить все индикаторы, необходимые для подключения технологии PIRS:

- индекс мяча и игроков;
- владение мячом;
- реализация голевого момента (мяч в корзине);
- скорость перемещения игроков и мяча;
- размен игроков (кто кого опекает);
- расстановку по позициям на поле;
- отличие простого технического действия от единоборства;
- ведение счета матча, время матча;
- определение по жестам судьи фолла, остановки игры, замены;
- определение технико-тактических единоборств;
- определение обоих участников единоборства;
- определение рейтингов игроков в матче;
- определение утомляемости игроков по динамике рейтингов;
- определение потери мяча;
- выявление эффективности различных комбинаций.

В результате получено решение с детекцией всех участников матча, мяча и др. (рис. 12).

Заключение

Полученная нами система отличается комплексным подходом. В ней организованы подсистемы выполняющие функции детекции объектов, перевода найденного объекта в систему координат зала, распознавания ТТД, анализа рейтинга и подсказки тренеру в онлайн-режиме.

Технология PIRS использовалась в работе со сборной России по мини-футболу с 2010 по 2018 г., что позволило команде перейти с пятого места в мировом рейтинге на первое. В этой технологии задача управления командой топ-уровня состоит в том, чтобы подобрать параметры управления и их значения, позволяющие добиться максимального счета предстоящего матча. Однако дальнейшее развитие технологии

PIRS требует ее трансформации в онлайн-режим. Полученная нами комплексная система состоит из нескольких подсистем, каждая из которых была адаптирована под технологию PIRS с учетом работы в онлайн-режиме. В результате было сформировано несколько подсистем.

1. *Детекция и трекинг игроков и мяча.* В этой части система применяет методы компьютерного зрения для детектирования и трекинга игроков и мяча на поле. Используется сегментационная нейронная сеть, а также алгоритмы трекинга, основанные на Kalman-фильтре.

2. *Определение 3D-координат.* Система использует методы реконструкции для определения 3D-координат мяча и игроков. Это позволяет более точно отслеживать их положение на поле и анализировать движения.

3. *Классификация игроков, зрителей и судей.* Система использует алгоритмы машинного обучения для классификации объектов на поле, таких как игроки, зрители и судьи. Это позволяет системе игнорировать ненужные объекты и фокусироваться на игроках.

4. *Определение позы игрока.* Система использует модель OpenPose для определения позы игрока на видео. Благодаря этой модели система распознает различные типы ТТД игроков.

5. *Оценка ТТЕ.* Система использует алгоритмы машинного обучения для оценки ТТЕ игроков. Это позволяет системе количественно оценивать эффективность действий игроков и команды в целом.

6. *Визуализация данных.* Система представляет результаты анализа в виде интерактивных визуализаций. Это дает возможность тренерам и другим заинтересованным лицам легко и удобно просматривать и анализировать данные.

Сформированная в итоге трассировки компонентов к реализуемым функциям последовательность задач по разработке информационной системы PIRSonline состоит из получения изображения, блока инициализации параметров игры, детекции мяча, определения 3D-координат мяча, детекции игроков, трекинга, классификации игроков и судей, определения позы игрока.

Разработанная информационная система PIRSonline:

– обеспечивает комплексный подход к онлайн-управлению соревновательной деятельностью команд топ-уровня;

– использует передовые методы компьютерного зрения и машинного обучения для выполнения своих функций;

– представляет результаты анализа в виде интерактивных визуализаций, что облегчает обработку.

Система PIRSONline представляет собой перспективный инструмент для онлайн-управления соревновательной деятельностью команд топ-уровня.

Список литературы

1. Морозов Ю.А., Бесков К.И. Анализ технико-тактической деятельности футболистов на 10 чемпионате мира // Подготовка футболистов. Москва : Физкультура и спорт, 1977. С. 134–155.

2. Голденко Г.А. Индивидуальные программы технико-тактической подготовки футболистов высокой квалификации с учетом особенностей соревновательной деятельности: автореф. дис. ... канд. пед. наук. Москва, 1984. 21 с.

3. Федотова Е.В., Сарсания С.К., Скотникова А.В. Оценка соревновательной нагрузки и разработка средств специальной подготовки спортсменов в хоккее на траве с использованием мониторов сердечного ритма // Теория и практика физической культуры. 2006. № 3. С. 23–26.

4. Годик М.А. Контроль в процессе спортивной тренировки / Подготовка футболистов. Москва : Физкультура и спорт, 1978. 114 с.

5. Платонов В.Н. Система подготовки спортсменов в олимпийском спорте: общая теория и ее практические приложения. Киев : Олимпийская литература, 2004. 808 с.

6. Поливаев А.Г. Автоматизированная система оценки коэффициента полезности игрока в мини-футболе // Омский научный вестник. 2015. № 4 (141). С. 219–224. EDN: UKTYCT

7. Beetz M., Hoynigen-Huene N.V., Kirchlechner B., Gedikli S., Siles F., Durus M., Lames M. ASPOGAMO: Automated Sports Games Analysis Models // International Journal of Computer Science in Sport. 2009. Vol. 8. No. 1. P. 1–21.

8. Полозов А.А., Краев М.В., Ролис А.В. Целесообразность статистики технико-тактических действий в футболе на примере компании Wyscout // Теория и практика физической культуры. 2021. № 1. С. 82–84. EDN: PXLEBP

9. Шурманов Е.Г., Полозов А.А., Михряков С.В., Божко Е.М. Оценка реализации голевых моментов в игровом виде спорта // Теория и практика физической культуры. 2018. № 1. С. 66–68. EDN: ZXMHXJ

10. Полозов А.А., Краев М.В., Газимова З.Ф. Информационная модель футбола на примере участия сборной России на ЧМ 2018 // Человек. Спорт. Медицина. 2018. Т. 18. № 1. С. 138–148.

11. Naik B.T., Hashmi M.F., Bokde N.D. A Comprehensive Review of Computer Vision in Sports: Open Issues, Future Trends and Research Directions // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 9. P. 4429. <https://doi.org/10.3390/app12094429>

12. Blond A. Computer Vision in Sports: Revolutionizing Performance Analysis // Blog Requestum. 11.2020. URL: <https://requestum.com/blog/computer-vision-in-sports> (accessed: 21.02.2024).

13. Korol S. Computer Vision in Sports: People Train and Compete — Machines Watch and Help // OpenCV Blog 2024. URL: <https://www.opencv.ai/blog/computer-vision-in-sports> (accessed: 21.02.2024).

14. Boesch G. Automatic Refereeing and AI in Sports // Viso.ai Blog. 2024. URL: <https://viso.ai/applications/visual-ai-in-sports/> (accessed: 21.02.2024).

15. Oldham K.M., Chung P.W.H., Edirisinghe E.A., Halkon B.J. Experiments in the Application of Computer Vision for Ball and Event Identification in Indoor Sports // Computational Intelligence in Information Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing / ed. by S. hon-Amnuaisuk, T. Au Springer Publ.; 2015. Vol. 331. P. 275–284. http://doi.org/10.1007/978-3-319-13153-5_27

16. Akyildiz Z., Nobari H., González-Fernández F., Praça G.M., Sarmiento H., Guler A.H., Saka E.K., Clemente F.M., Figueiredo A.J. Variations in the physical demands and technical performance of professional soccer teams over three consecutive seasons // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 2412. <http://doi.org/10.1038/s41598-022-06365-7>

17. Kovalchik S.A. Player Tracking Data in Sports // Annual Review of Statistics and Its Application. 2023. Vol. 10. P. 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-033021-110117>

18. AWS “AI-Powered Sports Analytics: Enhancing Team Performance” // AWS Sports Journal. 2024. URL: <https://aws.amazon.com/ru/sports/performance-analytics/> (accessed: 21.02.2024).

References

1. Morozov YuA, Beskov KI. Analysis of technical and tactical activities of football players at the 10th World Championship. *Training of football players*. Moscow: Fizkul'tura i sport Publ.; 1977. P. 134–155. (In Russ.)

2. Goldenko GA. *Individual programs of technical and tactical training of highly qualified football players taking into account the peculiarities of competitive activity: Abstract of Cand. Sci. (Pedagogical Sciences) Dissertation*. Moscow; 1984. (In Russ.)
3. Fedotov E.V. et al. Evaluation of competitive load and development of means of special training of female athletes in field hockey using heart rate monitors. *Theory and Practice of Physical Education*. 2006;(3):23–26. (In Russ.)
4. Godik M.A. *Control during sports training. Training of football players*. Moscow: Fizkul'tura i sport Publ.; 1978. (In Russ.)
5. Platonov VN. *The system of training athletes in Olympic sports: General theory and its practical applications*. Kyiv: Olympic Literature Publ.; 2004. (In Russ.)
6. Polivaev AG. Automated system for assessing the utility coefficient of a player in mini-football. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015;4(141):219–224. (In Russ.) EDN: UKTYCT
7. Beetz M, Hoyningen-Huene NV, Kirchlechner B, Gedikli S, Siles F, Durus M, Lames M. ASPOGAMO: Automated Sports Games Analysis Models. *International Journal of Computer Science in Sport*. 2009;8(1):1–21.
8. Polozov AA, Kraev MV, Rolis AV. Feasibility of statistics of technical and tactical actions in football on the example of the Wyscout company. *Theory and practice of physical education*. 2021;(1):82–84. (In Russ.) EDN: PXLEBP
9. Shurmanov EG, Polozov AA, Mehryakov SV, Bozhko EM. Evaluation of the implementation of goal chances in a game sport. *Theory and practice of physical education*. 2018;(1):66–68. (In Russ.)
10. Polozov AA, Kraev MV, Gazimova ZF. Information model of football on the example of participation of the Russian national team at the 2018 World Cup. *Human. Sport. Medicine*. 2018;18(1):138–148. (In Russ.)
11. Naik BT, Hashmi MF, Bokde ND. A Comprehensive Review of Computer Vision in Sports: Open Issues, Future Trends and Research Directions. *Applied Sciences*. 2022; 12(9):4429. <https://doi.org/10.3390/app12094429>
12. Blond A. Computer Vision in Sports: Revolutionizing Performance Analysis. *Blog Requestum*. 11.2020. Available from: <https://requestum.com/blog/computer-vision-in-sports> (accessed: 21.02.2024).
13. Korol S. Computer Vision in Sports: People Train and Compete — Machines Watch and Help. *OpenCV Blog*. 2024. Available from: <https://www.opencv.ai/blog/computer-vision-in-sports> (accessed: 21.02.2024).
14. Boesch G. Automatic Refereeing and AI in Sports. *Viso.ai Blog*. 2024. Available from: <https://viso.ai/applications/visual-ai-in-sports/> (accessed: 21.02.2024).
15. Oldham KM, Chung PWH, Edirisinghe EA, Hal-kon BJ. Experiments in the Application of Computer Vision for Ball and Event Identification in Indoor Sports. In: BS Phon-Amnuaisuk, TW Au (eds.). *Computational Intelligence in Information Systems SE – 27. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Publ.; 2015. P. 275–284. http://doi.org/10.1007/978-3-319-13153-5_27
16. Akyildiz Z, Nobari H, González-Fernández F, Praça GM, Sarmento H, Guler AH, Saka EK, Clemente FM, Figueiredo AJ. Variations in the physical demands and technical performance of professional soccer teams over three consecutive seasons. *Scientific Reports*. 2022;12:2412. <http://doi.org/10.1038/s41598-022-06365-7>
17. Kovalchik SA. Player Tracking Data in Sports. *Annual Review of Statistics and Its Application*. 2023;10: 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-033021-110117>
18. AWS “AI-Powered Sports Analytics: Enhancing Team Performance”. *AWS Sports Journal 2024*. Available from: <https://aws.amazon.com/ru/sports/performance-analytics/> (accessed: 21.02.2024).

Сведения об авторах

Гольдштейн Сергей Львович, доктор технических наук, профессор кафедры технической физики, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 5951–7411, e-mail: s.l.goldshtein@urfu.ru

Полозов Андрей Анатольевич, доктор педагогических наук, профессор кафедры физической культуры, Институт физической культуры, социального сервиса и туризма, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 5234-6875, ORCID: 0000-0003-1729-3340; e-mail: a.a.polofov@mail.ru

Пануловская Наталья Владимировна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем управления, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 1087-5428, ORCID: 0000-0001-7407-1491; e-mail: n.v.panulovskaia@urfu.ru

Мальцева Наталья Анатольевна, аспирант, преподаватель кафедры информационных технологий и систем управления, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 2647-1891, ORCID: 0009-0002-5270-0247; e-mail: natalia.maltseva.susu@gmail.com

Краев Максим Викторович, преподаватель кафедры физической культуры, Институт физической культуры, социального сервиса и туризма, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия; ORCID: 0000-0002-3724-8929; e-mail: kraev.antooz@yandex.ru

About the authors

Sergei L. Goldstein, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Physics, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 5951-7411, e-mail: s.l.goldshtein@urfu.ru

Andrey A. Polozov, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor of the Department of Physical Education, Institute of Physical Culture, Sports and Youth Policy, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 5234-6875, ORCID: 0000-0003-1729-3340; e-mail: a.a.polofov@mail.ru

Natalia V. Papulovskaya, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technology and Management Systems, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 1087-5428, ORCID: 0000-0001-7407-1491; e-mail: n.v.papulovskaia@urfu.ru

Natalya A. Maltseva, Postgraduate student, Lecturer at the Department of Information Technology and Management Systems, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 2647-1891, ORCID: 0009-0002-5270-0247; e-mail: natalia.maltseva.susu@gmail.com

Maxim V. Kraev, Teacher of the Department of Physical Education, Institute of Physical Culture, Sports and Youth Policy, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russia; ORCID: 0000-0002-3724-8929; e-mail: kraev.antooz@yandex.ru