

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного
зондирования и неразрушающего контроля
Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 004.93'11
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-38-48>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Трекер объектов на спортивных мероприятиях

М.А. Волкова[@],
М.П. Романов,
А.М. Бычков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: volkova_m@mirea.ru

Резюме

Цели. На сегодняшний день спорт является одной из наиболее перспективных областей для применения систем слежения за объектами. Большинство методов, на базе которых реализованы эти системы, ориентированы на отслеживание движущихся объектов в двумерной плоскости, например, для локализации игроков на поле, а также на их идентификацию по различным признакам. С развитием дрон-рейсинга актуальной стала задача определения положения в трехмерной системе координат. Целями работы являются разработка программно-алгоритмического обеспечения метода, позволяющего отслеживать траекторию движущихся объектов в трехмерном пространстве, абстрагированного от способа сегментации данных, и тестирование предложенного решения для оценки качества работы трекера.

Методы. На основе проведенного обзора и анализа современных методов отслеживания траекторий движения был выбран метод сопоставления информации о скорости и положении объектов.

Результаты. Предложена структура программно-алгоритмического обеспечения трекера движущихся объектов на спортивных мероприятиях и представлены результаты экспериментальных исследований на общедоступном датасете APIDIS, который включает в себя фрагменты видеозаписи баскетбольной игры, где по критерию качества отслеживания MOTA был получен показатель 0.858. Также были проведены эксперименты с использованием предложенного авторами датасета с пролетом FPV квадрокоптера по трассе. В результате по полученным с трекера данным была восстановлена траектория полета дрона в трехмерном пространстве.

Выводы. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что предложенное решение позволяет отслеживать траекторию полета квадрокоптера в трехмерной (мировой) системе координат, а также подходит для слежения за объектами на спортивных мероприятиях.

Ключевые слова: трекер, слежение за движущимися объектами, FPV квадрокоптер, определение положения, система слежения

• Поступила: 02.06.2022 • Доработана: 19.07.2022 • Принята к опубликованию: 26.08.2022

Для цитирования: Волкова М.А., Романов М.П., Бычков А.М. Трекер объектов на спортивных мероприятиях. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):38–48. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-38-48>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

3D object tracker for sports events

Maria A. Volkova @,
Mikhail P. Romanov,
Alexander M. Bychkov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: volkova_m@mirea.ru

Abstract

Objectives. Sports events are currently among the most promising areas for the application of tracking systems. In most cases, such systems are designed to track moving objects in a two-dimensional plane, e.g., players on the field, as well as to identify them by various features. However, as new sports such as drone racing are developed, the problem of determining the position of an object in a three-dimensional coordinate system becomes relevant. The aim of the present work was to develop algorithms and software for a method to perform 3D tracking of moving objects, regardless of the data segmentation technique, and to test this method to estimate the tracking quality.

Methods. A method for matching information on the speed and position of objects was selected based on a review and analysis of contemporary tracking methods.

Results. The structure of a set of algorithms comprising software for a moving-object tracker for sports events is proposed. Experimental studies were performed on the publicly available *APIDIS* dataset, where a MOTA metric of 0.858 was obtained. The flight of an FPV quadcopter along a track was also tracked according to the proposed dataset; the 3D path of the drone flight was reconstructed using the tracker data.

Conclusions. The results of the experimental studies, which demonstrated the feasibility of using the proposed method to track a quadcopter flight trajectory in a three-dimensional world coordinate system, is also showed that the method is suitable for tracking objects at sports events.

Keywords: tracker, moving object tracking, FPV quadcopter, localization, tracking system

• Submitted: 02.06.2022 • Revised: 19.07.2022 • Accepted: 26.08.2022

For citation: Volkova M.A., Romanov M.P., Bychkov A.M. 3D object tracker for sports events. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):38–48. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-38-48>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день системы слежения за движущимися объектами широко используются в разных социальных и производственных сферах деятельности человека, например, при создании автономного транспорта [1], фиксации нарушений при движении автомобилей [2], обеспечении безопасности мероприятий [3], определении местоположения сотрудников предприятия [4]. Одной из самых перспективных областей применения таких систем является спорт, в особенности командные игры: футбол, баскетбол и др. Отслеживание участников спортивных мероприятий позволяет оценивать групповые тактические действия, прогнозировать результаты матчей и т.д. Например, во время

трансляции футбола мониторинг движения используется для просмотра персональных повторов или получения расширенной статистики игроков [5].

Для отслеживания перемещения спортсменов во время соревнований необходимо решить две основные задачи:

- 1) обнаружение движущихся объектов с помощью сенсоров и их идентификация;
- 2) определение параметров (например, положения и скорости) объектов, на базе которых можно восстановить траекторию движения.

Сложность состоит в том, что спортсмены внешне часто похожи (из-за одинаковой спортивной формы), что затрудняет их идентификацию. Кроме того, траектория движения игроков в командных видах спорта может резко меняться, что приводит

к окклюзии и необходимости повторной идентификации. Таким образом, главной проблемой, которая влияет на показатели точности отслеживания, является частое переключение идентификаторов объектов [6].

Отметим, что в англоязычной литературе, посвященной методам и алгоритмам слежения за движущимися объектами, отдельно выделяется направление multi-athlete tracking (MAT), т.е. отслеживание спортсменов, поскольку оно имеет свои особенности. Как правило, в качестве сенсоров используется система видеонаблюдения, включающая несколько камер, поэтому многие работы сфокусированы именно на обработке видеоданных. Их можно разделить на две группы. Первая группа [6, 7] ориентирована в большей степени на поиск характерных признаков и решение задачи идентификации объекта, что зачастую приводит к длительным задержкам вывода информации, вторая [8, 9] – на определение параметров. Однако для корректной работы алгоритмов требуется детерминированная в пространстве плоскость, по которой движутся объекты, что затрудняет отслеживание в воздухе или на сложном рельефе.

Относительно молодым видом спорта, который сейчас активно развивается, является гонка first person view (FPV) квадрокоптеров или дрон-рейсинг, т.е. соревнование на скорость и качество прохождения заранее определенной трассы с трансляцией видео в режиме реального времени с камеры дрона на монитор, очки или шлем пилота. Отслеживание трассы движения объектов в 3D-пространстве в данном случае актуально ввиду необходимости проведения оценки траектории полета для справедливого судейства. Например, из-за высоких скоростей часто невозможно визуально определить, какой из квадрокоптеров первым прошел финишные ворота. Большинство работ в данной области посвящено повышению автономности квадрокоптеров и разработке алгоритмов поиска оптимального маршрута, а также их тестированию [10–12].

Целями данной работы являются разработка программно-алгоритмического обеспечения метода, позволяющего отслеживать движущиеся объекты в трехмерной системе координат и не требующего идентификации на этапе обнаружения, и тестирование для оценки качества его работы.

Вклад авторов заключается в следующем:

- предложен способ реализации трекера объектов на спортивных мероприятиях на базе метода сопоставления информации о скорости и положении объектов, предложенного в [13];
- представлены результаты экспериментальных исследований как на общедоступном датасете *APIDIS*, где по критерию качества отслеживания multiple object tracking accuracy (MOTA) был

получен показатель 0.858, так и на предложенном авторами датасете с пролетом квадрокоптера по трассе;

- построена траектория полета в 3D-пространстве.

1. ОБЗОР РАБОТ ПО ТЕМАТИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Большинство научных работ, посвященных проблеме отслеживания движущихся объектов, применимо для разработки систем слежения за движением спортсменов. В основном, в этих работах предложены методы, включающие в себя предварительный этап – обнаружение, т.е. сегментацию данных с сенсоров различными способами. Многие исследования предполагают идентификацию объектов на данном этапе и нацелены на повышение ее точности путем модернизации существующих методов поиска особых точек и дескрипторов [14]. В работе [15] приведено описание наиболее часто используемых дескрипторов и способов обнаружения объектов, а также проведено исследование по улучшению отдельных элементов алгоритмов. Результаты экспериментов показывают более высокую точность отслеживания, чем при использовании базовых методов. В [16] автор решает задачу локализации объектов на базе цветowych моделей RGB путем проведения обучения дескриптора на двух уровнях – непосредственно на полученном изображении и на его инфракрасном представлении, что существенно улучшает работу системы. Подобные методы не подходят для реализации в режиме реального времени, ввиду необходимости обучения дескрипторов, что ведет к задержке вывода информации.

Методы отслеживания на базе обнаружения можно разделить на три группы по способу представления формы объекта: точки, геометрические фигуры и контуры (силуэты). Последняя группа методов чаще используется для отслеживания людей (пешеходов, спортсменов и др.) [17]. Две первые группы больше подходят для других объектов (автомобилей, мобильных роботов и др.), и их реализация является менее ресурсоемкой. В [13] предлагается метод сопоставления информации о скорости и положении объектов, позволяющий отслеживать объекты в трехмерном пространстве. Идентификация проводится на базе полученных данных о скорости и положении объектов, которые могут быть представлены в виде точек, что подходит для отслеживания FPV квадрокоптеров, имеющих небольшие размеры.

В работе [18] предлагается система слежения за пешеходами в режиме online. Сегментированные данные оптимизируются при помощи указания статуса окклюзии. Положение обнаруженных на первом этапе объектов прогнозируется с помощью фильтра Калмана, который, стоит отметить, часто применяется

в алгоритмах слеживания. Также авторы проводят сравнение с пятью наиболее распространенными на сегодняшний день трекерами (WVMF, SMOT-admm, SFCT, TLDiDP + NMS). По итогам экспериментальных исследований представленная система показывает лучшие результаты. В работе [19] выполнено сравнение двух систем слежения в футболе – «Gen4» и «Gen5». Главное отличие данных систем состоит в том, что «Gen4» состоит из двух мультикамерных систем, а «Gen5» объединяет две стереопары с каждой стороны поля и две монокулярные системы за воротами. Был сделан вывод о том, что при большем количестве камер увеличивается точность слежения за объектом. В [20] представлен сравнительный анализ систем трекинга в командном спорте на базе данных GPS и мультикамерных систем, и сделан вывод о том, что алгоритмы, которые используют данные с камер, позволяют достичь более высоких показателей точности отслеживания.

Многие алгоритмы, предназначенные для решения задачи МАТ, требуют для реализации высокопроизводительные вычислительные устройства, что приводит к большим финансовым затратам [19], поэтому ведутся исследования по созданию более дешевых систем. В работе [21] предлагается система слежения на базе алгоритма поиска k -кратчайших путей. Результаты исследований доказали эффективность предложенного решения при использовании сравнительно недорогих камер. В [22] авторы представляют исследование по отслеживанию траектории движения спортивных объектов на основе алгоритма Mean Shift. На основе проведенных экспериментальных исследований сделан вывод о том, что данный подход позволяет сократить требуемые вычислительные мощности.

Кроме методов на базе обнаружения и идентификации для решения задачи МАТ часто применяются алгоритмы, основанные на построении карт занятости. В работах [23, 24] представлен способ отслеживания на базе фильтра частиц, где не требуется априорная информация о количестве объектов. В [25, 26] применяется гибридный метод, сочетающий построение карты занятости и выделение основных признаков игроков. Такой подход обеспечивает высокий показатель МОТА, но подобные методы для реализации требуют наличия детерминированной в пространстве плоскости, поэтому не подходят для отслеживания квадрокоптеров.

Во многих публикациях, посвященных оценке полета квадрокоптера по трассе, основное внимание уделяется вопросам повышения автономности полета, а также поиска оптимального маршрута [10–12], т.е. именно техническому зрению и навигации. Кроме того, идет активная разработка датасетов со сложными траекториями, содержащими большое количество

резких поворотов, где квадрокоптер проходит трассу на высокой скорости [27], что существенно усложняет задачу слежения за спортивными дронами.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что для достижения поставленной цели наиболее подходящим методом отслеживания траектории движения спортивного объекта является подход, основанный на сопоставлении информации о скорости и положении объектов, представленный в работе [13].

2. СТРУКТУРА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕКЕРА

Структура программно-алгоритмического обеспечения трекера представлена на рис. 1. Отметим, что в данной работе было принято решение использовать только основные параметры, такие как скорость и пространственное положение (без использования дополнительных признаков), для уменьшения задержки вывода информации об объектах.

Обязательным условием для работы трекера является предварительная калибровка всех сенсоров перед началом работы, которая предполагает определение относительных линейных и угловых смещений систем координат сенсоров, а также выбор начала мировой системы координат. Предполагается, что положение сенсоров друг относительно друга не изменяется в течение всего времени работы трекера.

На вход трекера подаются данные, полученные на этапе детектирования объектов. Результатом работы трекера является вектор состояния объекта x_i на момент времени t . Вектор состоит из основных геометрических параметров (L – положение, V – скорость, a – ускорение, T – символ транспонирования) в мировой (трехмерной) системе координат, а также, при необходимости, идентификационного номера:

$$x_i = (L, V, a)^T.$$

Рассмотрим блоки, входящие в структуру трекера. Сопоставление операций выбранного метода и блоков программно-алгоритмического обеспечения представлено в табл. 1.

Алгоритм работы трекера состоит из 6 блоков.

1. На вход блока «Формирование набора данных о положении объектов» подаются все сегментированные данные о положении объектов O и O' – совокупность проецированных векторов координат объектов, прогнозируемых с помощью фильтра Калмана в системе координат, выбранной для локализации. Таким образом, выходом блока является набор векторов $O_t = \{O O'\}$.
2. На вход блока «Расчет общей функции правдоподобия» поступает набор данных O_t . Кластеризация в данном случае выполняется

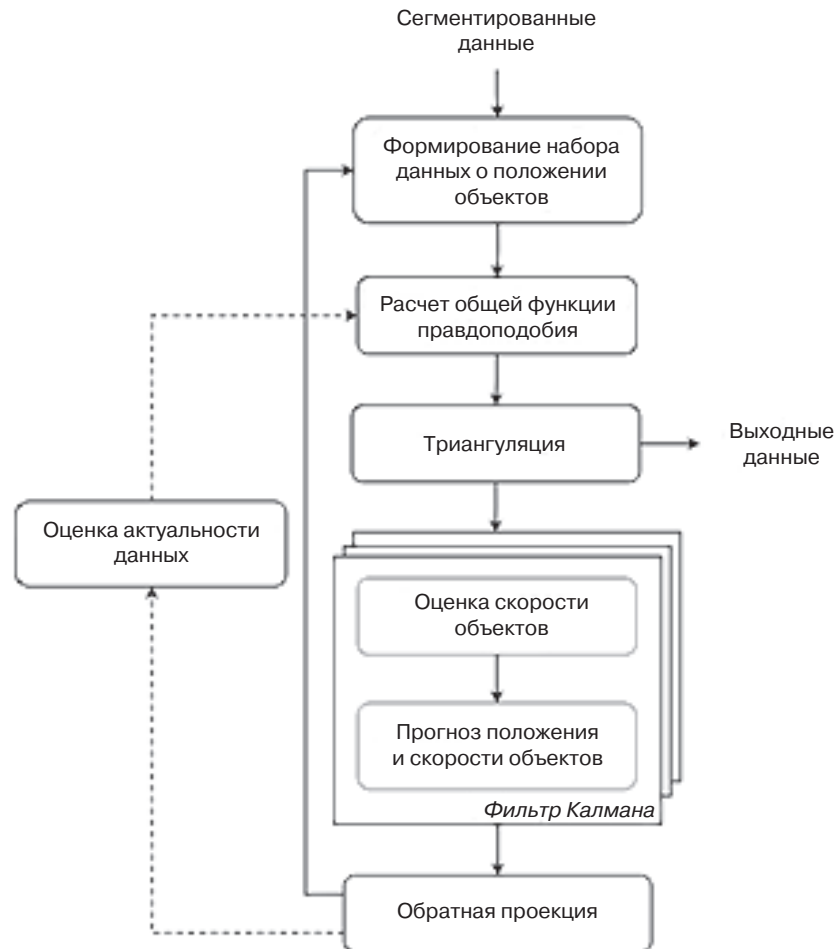


Рис. 1. Структура программно-алгоритмического обеспечения трекера

Таблица 1. Сопоставление операций метода и блоков программно-алгоритмического обеспечения трекера

Название блока	Операция
Формирование набора данных о положении объектов	Формирование выборки наблюдений O_t
Расчет общей функции правдоподобия	Расчет общей функции правдоподобия $p(O_t \mathbf{x}_t)$
Триангуляция	Получение векторов $\mathbf{x}_t(L)$
Оценка скорости объектов	Получение векторов $\mathbf{x}_t(V)$
Прогноз положения и скорости объектов	Расчет векторов $\hat{\mathbf{x}}_t$
Обратная проекция	Формирование выборки наблюдений O'
Оценка актуальности данных	Расчет параметра, отражающего степень достоверности полученной информации A_M

методом Mean Shift [24], в результате работы которого появляется набор кластеров, количество которых соответствует количеству объектов. Сегментированным данным с сенсоров присваиваются идентификационные номера объектов, которые находятся в одном кластере.

- В блоке «Триангуляция» выполняется триангуляция данных с одинаковыми идентификационными номерами со всех сенсоров [28]. На выходе блока – положение объектов в трехмерной (мировой) системе координат $\mathbf{x}_t(L)$.

- Данные, полученные на предыдущем этапе, поступают в блок фильтра Калмана третьего порядка, состоящего, в свою очередь, из двух блоков, расчеты для которых выполняются последовательно: «Оценка скорости объектов» и «Прогноз скорости и положения объектов» [29]. Для оценки параметров в трехмерной системе координат необходимо три фильтра Калмана. При расчете прогнозируемых параметров по координате X используются выражения (для Y, Z выражения аналогичны):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0],$$

$$\mathbf{x}_t = (L_X \ V_X \ a_X)^T,$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{T^4}{4\sigma^2} & \frac{T^3}{2\sigma^2} & 0 \\ \frac{T^3}{2\sigma^2} & \frac{T^2}{\sigma^2} & T\sigma^2 \\ 0 & T\sigma^2 & \sigma^2 \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}_t,$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q},$$

$$K_{t+1} = \hat{\mathbf{P}}_{t+1|1...3,1}(\hat{\mathbf{P}}_{t+1|1,1} + \mathbf{R})^{-1},$$

$$\mathbf{x}_{t+1} = \hat{\mathbf{x}} + K_{n+1}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}_{1,1}),$$

где \mathbf{Q} – матрица ковариации шумов процессов; \mathbf{R} – матрица шума датчиков; \mathbf{P} – матрица ковариации шумов; K – матричный коэффициент коррекции; \mathbf{H} – матрица, определяющая выходные данные; \mathbf{A} – матрица состояний; T – период измерений, σ – параметр фильтра, который зависит от динамических характеристик наблюдаемого объекта.

На выходе блока формируются данные о прогнозируемом положении и скорости объектов в трехмерной системе координат.

5. Блок «Обратная проекция» осуществляет репроецирование полученных в п. 4 данных из мировой системы координат в систему координат каждого сенсора O' .
6. Блок «Оценка актуальности данных» позволяет рассчитывать параметр, отражающий степень достоверности полученной информации A_M . Он рассчитывается следующим образом:

$$A_M = \exp\left(-\frac{t_m}{d\Delta Ts}\right),$$

где t_m – время, которое прошло с последнего определения признака; ΔTs – период измерений сенсора; d – коэффициент снижения актуальности данных.

Если на момент времени t для объекта не пришли данные ни одного измерения (или только одного, что недопустимо для выполнения триангуляции), в блоке «Формирование набора данных о положении объектов» в качестве данных, полученных с сенсоров,

будут указаны прогнозируемые репроецированные положение и скорость. Параметр A_M в данном случае необходим для корректировки длительности слежения по прогнозируемым данным, т.е. для того, чтобы вовремя прекратить слежение за объектом.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В первом эксперименте для верификации предложенного программно-алгоритмического обеспечения был выбран датасет *APIDIS*¹, который включает в себя 7 фрагментов видеозаписи баскетбольной игры, снятых с разных камер, расположенных вокруг игрового поля. Были выбраны две камеры (первая и седьмая), нацеленные на один угол игрового поля, с разным фокусным расстоянием. Сегментированные данные объектов были получены методом, предложенным в [30]. В процессе эксперимента в течение одной минуты (последовательность из 1500 кадров) оценивались параметры положения и скорости четырех заранее выбранных объектов, которые наиболее часто пересекались между собой и с другими объектами.

На рис. 2 представлены эталонные траектории для всех объектов в пространстве на плоскости XY (в данном эксперименте перемещение по оси $Z = 0$), отмеченные черным цветом; цветными линиями отмечены выбранные цели. Эталонные траектории были получены методом интерполяции координат объектов, которые были представлены на ресурсе, предоставляющем датасет, с интервалом в 1 с.

На рис. 3 показаны эталонные траектории выбранных целей и траектории, восстановленные на базе полученных сегментированных данных с камер. Результаты расчета показателя точности отслеживания MOTA в сравнении с другими современными методами представлены в табл. 2.

Таблица 2. Показатели MOTA разных трекеров

Трекер	MOTA
[6]	0.752
[31]	0.796
[32]	0.811
Трекер, предложенный в данной статье	0.858

На основе анализа табл. 2 можно сделать вывод, что предложенное программно-алгоритмическое обеспечение трекера обеспечивает высокий показатель точности отслеживания и превосходит известные аналоги.

¹ <https://sites.uclouvain.be/ispgroup/index.php/Softwares/APIDIS>, дата обращения 01.01.2022. [<https://sites.uclouvain.be/ispgroup/index.php/Softwares/APIDIS>. Accessed January 1, 2022.]

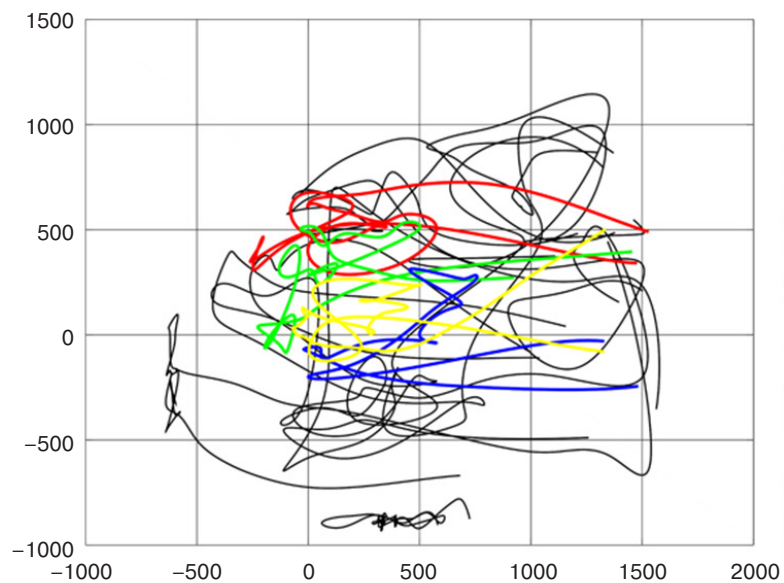


Рис. 2. Эталонные траектории движения игроков (слева) и кадры с первой и седьмой камер (справа)

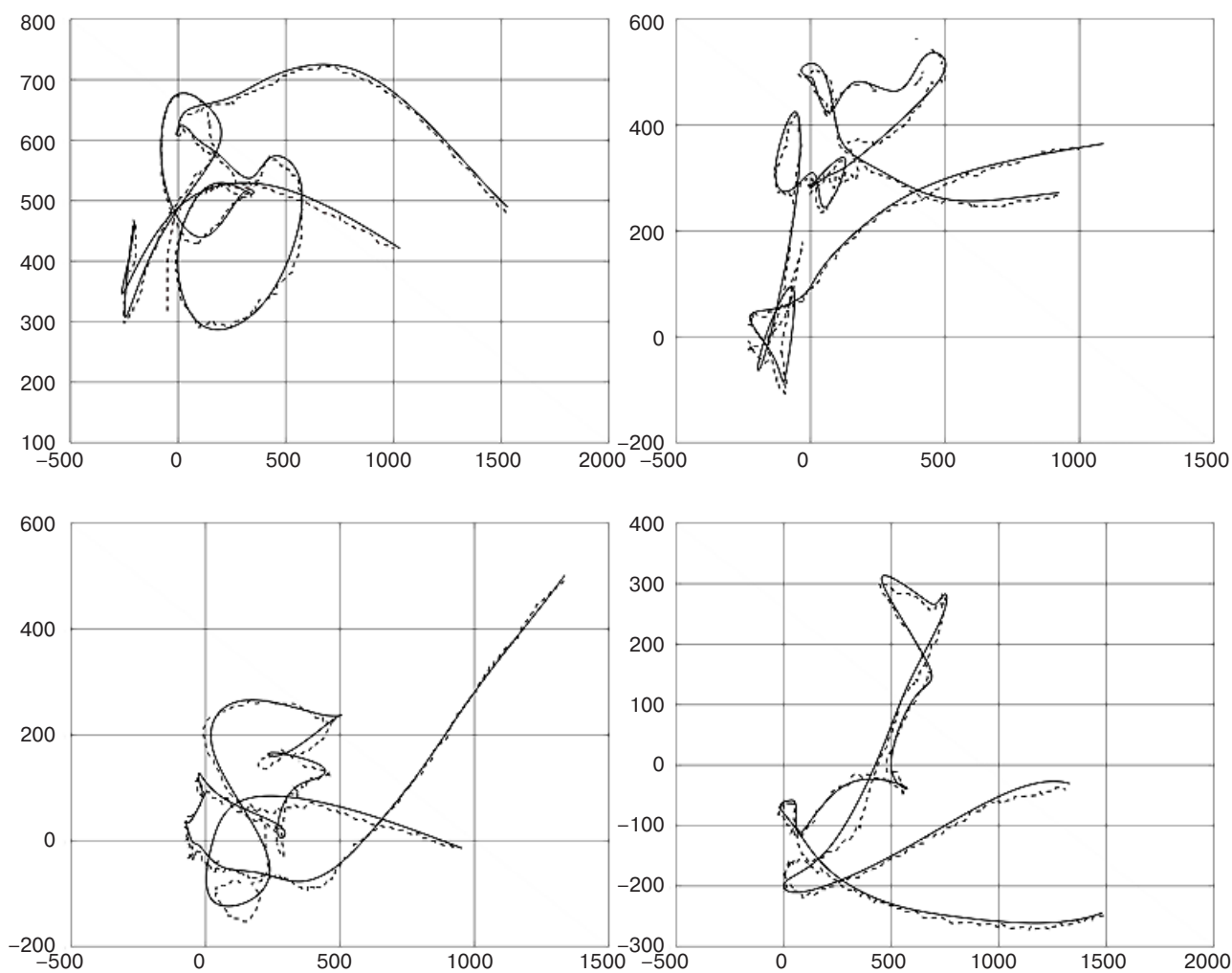


Рис. 3. Эталонные траектории целей (сплошные линии) и траектории, восстановленные по сегментированным данным (пунктирные линии)

Для проведения второго эксперимента в лаборатории был создан стенд, схема которого представлена на рис. 4.

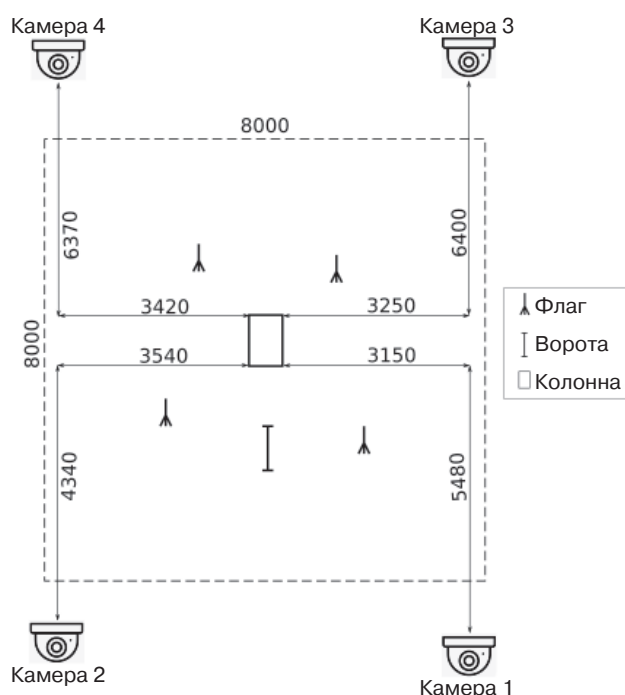


Рис. 4. Схема испытательного стенда

Стенд состоит из системы видеонаблюдения, включающей четыре купольных камеры BD133 (производитель Beward, Россия), а также трассы для квадрокоптера, которая состоит из 5 элементов: 4 флага (представляют собой геологические вешки) и ворота. Габаритные размеры рабочей зоны составляют $8 \times 8 \times 3$ м. При калибровке камер были установлены следующие частоты кадров: для первой камеры – 13 fps², для остальных – 25 fps. В ходе эксперимента одновременно с четырех камер был снят датасет с пролетом квадрокоптера Photon (производитель РТУ МИРЭА, Россия) по трассе длительностью 30 с. Сегментация подвижного объекта (квадрокоптера) выполнена методом бинаризации кадров с заранее заданным порогом. Траектория полета квадрокоптера была восстановлена в мировой системе координат (рис. 5). Затем для верификации данная траектория обратно проецировалась на изображения, полученные с камер. Результат представлен на рис. 6.

Траектория полета квадрокоптера была успешно восстановлена. Также в ходе эксперимента определено, что задержка вывода информации для одного объекта после подачи на трекер сегментированных данных составляет 32 мс.

² fps – от англ. frames per second (количество кадров в секунду).

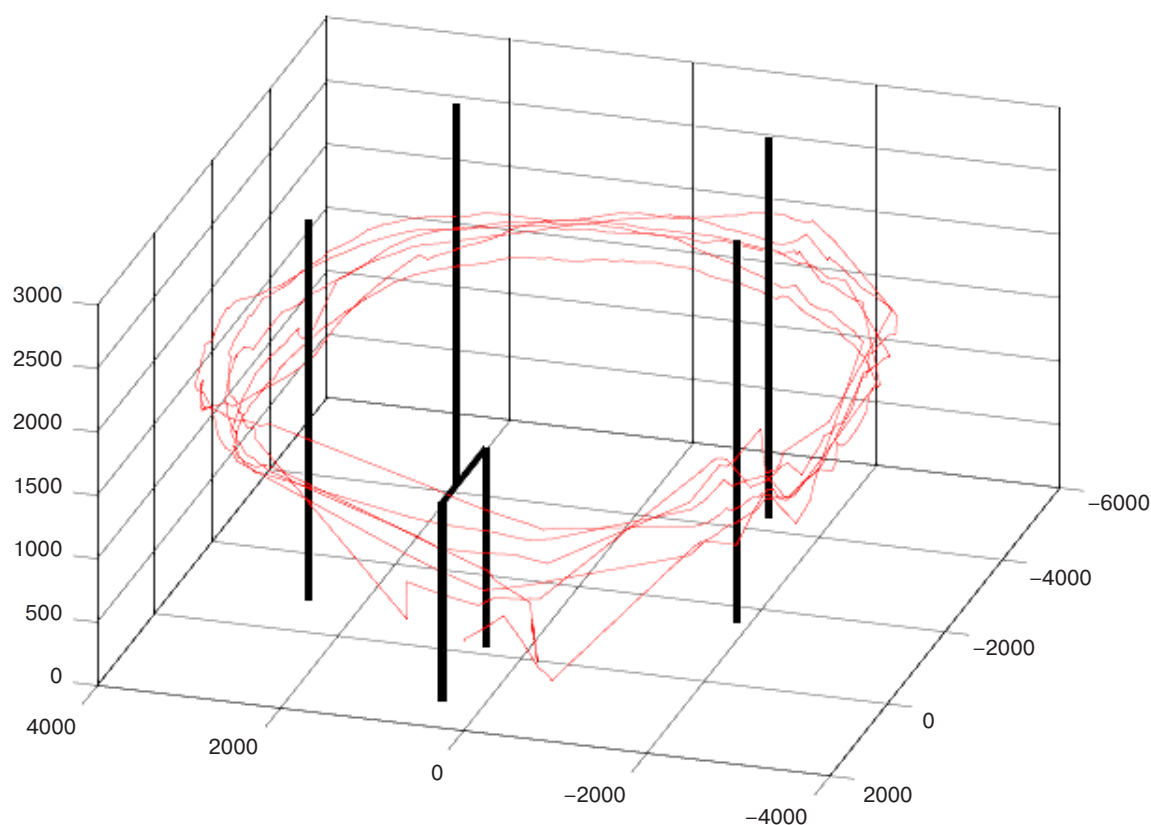


Рис. 5. Восстановленная в 3D траектория полета квадрокоптера

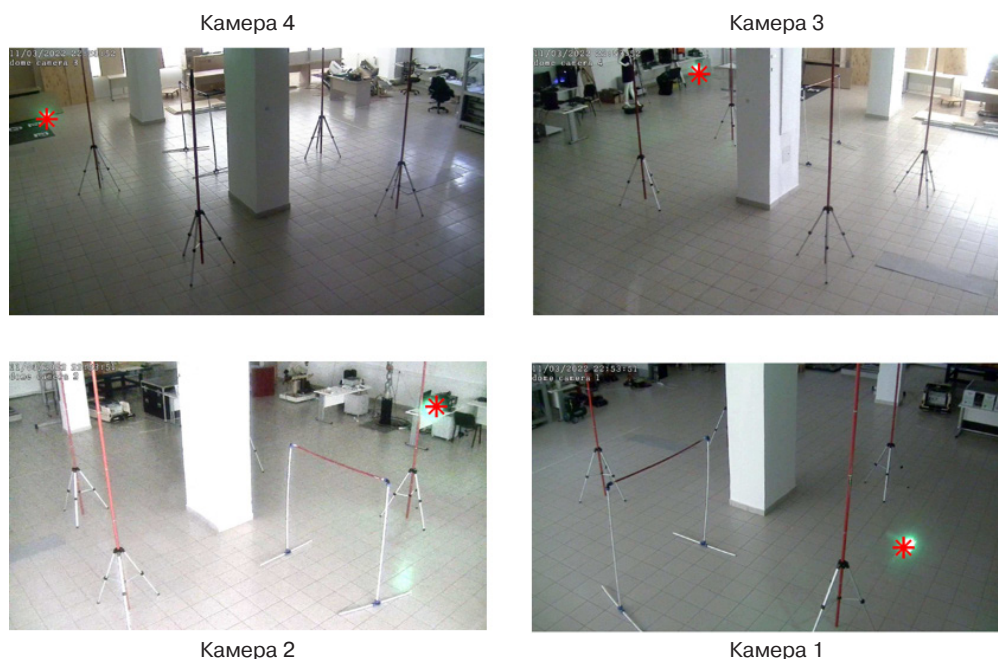


Рис. 6. Кадры, полученные с камер, и отслеживаемый квадрокоптер (отмечен красным маркером)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были проведены обзор и анализ современных способов отслеживания движущихся объектов, при этом особое внимание уделялось методам МАТ. Была предложена структура программно-алгоритмического обеспечения трекера движущихся объектов на базе метода сопоставления информации о положении и скорости объектов. Результаты экспериментальных исследований показали, что предложенное решение позволяет отслеживать траекторию полета квадрокоптера в трехмерной (мировой) системе координат, а также подходит для слежения за объектами на спортивных мероприятиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РТУ МИРЭА в рамках гранта «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий» (НИЧ 28/24).

ACKNOWLEDGMENTS

This research is supported by the RTU MIREA grant “Innovations in the implementation of priority areas for the science and technology development,” project No. 28/24.

Вклад авторов

М.А. Волкова – предложение способа реализации трекера объектов на спортивных мероприятиях; представление результатов экспериментальных исследований на датасете APIDIS; представление стенда для проведения экспериментальных исследований, проведение эксперимента с пролетом квадрокоптера по трассе, написание текста статьи.

М.П. Романов – предложение способа реализации трекера объектов на спортивных мероприятиях.

А.М. Бычков – представление стенда для проведения экспериментальных исследований, проведение эксперимента с пролетом квадрокоптера по трассе.

Authors' contributions

M.A. Volkova has proposed the solution for implementing the object tracker for sports events, presented the results of experimental studies on the APIDIS dataset and a test stand, conducted an experiment with a quadcopter flying along the track, and written the text of the article.

M.P. Romanov has proposed the solution for implementing the object tracker for sports events.

A.M. Bychkov has presented a test stand and conducted an experiment with a quadcopter flying along the track.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Zein Y., Darwiche M., Mokhiamar O. GPS tracking system for autonomous vehicles. *Alexandria Eng. J.* 2018;57(4): 3127–3137. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.12.002>
2. Yu K., et al. Deep learning-based traffic safety solution for a mixture of autonomous and manual vehicles in a 5G-enabled intelligent transportation system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* 2020;22(7): 4337–4347. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3042504>
3. Ryan B.J., et al. COVID-19 contact tracing solutions for mass gatherings. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness.* 2021;15(3):e1–e7. <https://doi.org/10.1017/dmp.2020.241>
4. Khan S., et al. Implementing traceability systems in specific supply chain management (SCM) through critical success factors (CSFs). *Sustainability.* 2018;10(1):204. <https://doi.org/10.3390/su10010204>

5. Cioppa A., Deliege A., Magera F., Giancola S., Barnich O., Ghanem B., Van Droogenbroeck M. Camera calibration and player localization in soccerNet-v2 and investigation of their representations for action spotting. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. 2021. P. 4537–4546. <https://doi.org/10.1109/CVPRW53098.2021.00511>
6. Kong L., Zhu M., Ran N., Liu Q., He R. Online multiple athlete tracking with pose-based long-term temporal dependencies. *Sensors*. 2020;21(1):197. <https://doi.org/10.3390/s21010197>
7. Liu J., Tong X., Li W., Wang T., Zhang Y., Wang H. Automatic player detection, labeling and tracking in broadcast soccer video. *Pattern Recognition Lett.* 2009;30(2):103–113. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2008.02.011>
8. Possegger H., Sternig S., Mauthner T., Roth P.M., Bischof H. Robust real-time tracking of multiple objects by volumetric mass densities. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2013. P. 2395–2402. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2013.310>
9. Bialkowski A., Lucey P., Carr P., Denman S., Matthews I., Sridharan S. Recognising team activities from noisy data. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2013. P. 984–990. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2013.143>
10. Foehn P., Brescianini D., Kaufmann E., et al. AlphaPilot: Autonomous drone racing. *Auton. Robot.* 2022;46(1): 307–320. <https://doi.org/10.1007/s10514-021-10011-y>
11. Spica R., Cristofalo E., Wang Z., Montijano E., Schwager M. A real-time game theoretic planner for autonomous two-player drone racing. *IEEE Transactions on Robotics*. 2020;36(5):1389–1403. <https://doi.org/10.1109/TRO.2020.2994881>
12. Kaufmann E., et al. Beauty and the beast: Optimal methods meet learning for drone racing. In: *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE; 2019. P. 690–696. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793631>
13. Волкова М.А., Романов А.М., Романов М.П. Распределенная система локализации объектов в рабочей зоне модульного реконфигурируемого мобильного робота. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021;22(12):634–643. <https://doi.org/10.17587/mau.22.634-643>
[Volkova M.A., Romanov A.M., Romanov M.P. Distributed system for objects localization in the working area of a modular reconfigurable mobile robot. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021;22(12):634–643 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.22.634-643>]
14. Dai-Hong J., Lei D., Dan L., San-You Z. Moving-object tracking algorithm based on PCA-SIFT and optimization for underground coal mines. *IEEE Access*. 2019;7: 35556–35563. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2899362>
15. Матвеев И.А., Чигринский В.В. Оптимизация работы системы слежения, основанной на сети камер. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2020;4:110–124. <https://doi.org/10.31857/S0002338820040125>
[Chigrinskii V.V., Matveev I.A. Optimization of a tracking system based on a network of cameras. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(4):583–597. <https://doi.org/10.1134/S1064230720040127>]
16. Lan X., Ye M., Shao R., Zhong B., Yuen P.C., Zhou H. Learning modality-consistency feature templates: A robust RGB-infrared tracking system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;66(12):9887–9897. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2898618>
17. Bao Q., Liu W., Cheng Y., Zhou B., Mei T. Pose-guided tracking-by-detection: Robust multi-person pose tracking. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2020;23:161–175. <https://doi.org/10.1109/TMM.2020.2980194>
18. Wang Z., Li M., Lu Y., Bao Y., Li Z., Zhao J. Effective multiple pedestrian tracking system in video surveillance with monocular stationary camera. *Expert Systems with Applications*. 2021;178:114992. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114992>
19. Linke D., Link D., Lames M. Football-specific validity of TRACAB's optical video tracking systems. *PLoS ONE*. 2020;15(3):e0230179. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230179>
20. Pons E., García-Calvo T., Resta R., Blanco H., López del Campo R., Díaz García J., Pulido J.J. A comparison of a GPS device and a multi-camera video technology during official soccer matches: Agreement between systems. *PLoS ONE*. 2019;14(8):e0220729. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220729>
21. Nishikawa Y., Sato H., Ozawa J. Multiple sports player tracking system based on graph optimization using low-cost cameras. In: *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. IEEE; 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2018.8326126>
22. Hui Q. Motion video tracking technology in sports training based on Mean-Shift algorithm. *J. Supercomput.* 2019;75(9):6021–6037. <https://doi.org/10.1007/s11227-019-02898-3>
23. Taj M., Cavallaro A. Distributed and decentralized multicamera tracking. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2011;28(3):46–58. <https://doi.org/10.1109/MSP.2011.940281>
24. Taj M., Cavallaro A. Simultaneous detection and tracking with multiple cameras. In: Cipolla R., Battiatto S., Farinella G. (Eds.). *Machine Learning for Computer Vision. Studies in Computational Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013. V. 411. P. 197–214. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28661-2_8
25. Liang Q., Wu W., Yang Y., Zhang R., Peng Y., Xu M. Multi-player tracking for multi-view sports videos with improved k-shortest path algorithm. *Appl. Sci.* 2020;10(3):864. <https://doi.org/10.3390/app10030864>
26. Yang Y., Xu M., Wu W., Zhang R., Peng Y. 3D multiview basketball players detection and localization based on probabilistic occupancy. In: *2018 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*. IEEE; 2018. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/DICTA.2018.8615798>
27. Delmerico J., Cieslewski T., Rebecq H., Faessler M., Scaramuzza D. Are we ready for autonomous drone racing? The UZH-FPV drone racing dataset. In: *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE; 2019. P. 6713–6719. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793887>

28. Chen J., Wu D., Song P., Deng F., He Y., Pang S. Multi-view triangulation: Systematic comparison and an improved method. *IEEE Access*. 2020;8:21017–21027. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969082>
29. Romanov A.M., et al. Modular reconfigurable robot distributed computing system for tracking multiple objects. *IEEE Systems J.* 2021;15(1):802–813. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2990921>
30. Delannay D., Danhier N., De Vleeschouwer C. Detection and recognition of sports(wo)men from multiple views. In: *2009 Third ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC)*. IEEE; 2009. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICDSC.2009.5289407>
31. Byeon M., et al. Variational inference for 3-D localization and tracking of multiple targets using multiple cameras. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2019;30(11):3260–3274. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2018.2890526>
32. Zhang R., et al. Multi-camera multi-player tracking with deep player identification in sports video. *Pattern Recognition*. 2020;102:107260. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2020.107260>

Об авторах

Волкова Мария Александровна, старший преподаватель, кафедра проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: volkova_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57194215422, SPIN-код РИНЦ 5939-6811, <https://orcid.org/0000-0002-1219-5090>

Романов Михаил Петрович, д.т.н., профессор, директор Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: m_romanov@mirea.ru. Scopus Author ID 14046079000, SPIN-код РИНЦ 5823-8795, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>

Бычков Александр Михайлович, ассистент, кафедра проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bychkov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0701-7529>

About the authors

Maria A. Volkova, Senior Lecturer, Control Problems Department, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: volkova_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57194215422, RSCI SPIN-code 5939-6811, <https://orcid.org/0000-0002-1219-5090>

Mikhail P. Romanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: m_romanov@mirea.ru. Scopus Author ID 14046079000, RSCI SPIN-code 5823-8795, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>

Alexander M. Bychkov, Assistant, Control Problems Department, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bychkov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-0701-7529>