

17. *Gradetskiy V.G., Ermolov I.L., Knyaz'kov M.M., Semenov E.A., Sobol'nikov S.A., Sukhanov A.N.* O nauchnykh zadachakh vypolneniya transportnykh operatsiy gruppy mobil'nykh robotov [Scientific tasks of implementing transportation tasks by groups of UGVs], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2016, 3, pp. 57-62.
18. *Gradetskiy Valery, Ermolov Ivan, Knyazkov Maxim, Semenov Eugeny, Sobolnikov Sergey and Sukhanov Artem.* Implementation of a Joint Transport Task by a Group of Robots. Smart Electromechanical Systems, *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, pp. 203-214.
19. *Gradetskiy V.G., Ermolov I.L., Knyaz'kov M.M., Sobol'nikov S.A.* Postroenie podviznykh kommunikatsionnykh setey na baze nazemnykh avtonomnykh mobil'nykh robotov [Design of moving communication network on the base of ground autonomous mobile robots], *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie* [Mechatronics. Automation. Control], 2011, No. 11, pp. 27-32.
20. *Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Sobolnikov S.A., Sukhanov A.N., Usov V.M.* Position Control of Ugv Group for Covid (Virus Sars-Cov-2covid) Localization and Primary Treatment Within Indoor Environment, *Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, Vol. 352, pp. 113-125.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.Л. Ермолов.

Баричев Юрий Сергеевич – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; e-mail: ybarichev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79191396529; техник научно-исследовательской лаборатории.

Гойдин Олег Петрович – e-mail: crer@vniia.ru; руководитель центра робототехники и аварийного реагирования.

Собольников Сергей Александрович – e-mail: sasobolnikov@vniia.ru; тел.: +79263879088; к.т.н.; начальник научно-исследовательской лаборатории.

Носков Владимир Петрович – НИИ Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79166766057. к.т.н.; зав. сектором.

Barichev Yury Sergeevich – FSUE "VNIIA"; e-mail: ybarichev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79191396529; technician of the research laboratory.

Goydin Oleg Petrovich – e-mail: crer@vniia.ru; head of the Center for robotics and emergency response.

Sobolnikov Sergey Aleksandrovich – e-mail: sasobolnikov@vniia.ru; phone: +79263879088; cand. of eng. sc.; head of the research laboratory.

Noskov Vladimir Petrovich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79166766057; cand. of eng. sc.; sector head.

УДК 004.932.2

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-225-233

П.А. Гессен, А.И. Лизин, В.А. Павлова, В.Д. Саенко, В.А. Тупиков

ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ

Было произведено исследование в области систем технического зрения, а также подходов к решению задач обнаружения и сопровождения объектов интереса без априорного знания об их типе с учетом целевой платформы в виде встраиваемого вычислителя оптико-электронной системы. На основании полученных данных был произведен анализ сферы и предложен новый гибридный алгоритм сопровождения для встраиваемых систем. Он основан на сочетании нескольких типов алгоритмов сопровождения, с одним из них в качестве приоритетного, обеспечивающего основную работу, и нескольких вспомогательных для стабилизации и расширения функционала приоритетного. Они связаны внешним циклом обработки, который на основе консенсусного решения внутренних алгоритмов самостоятельно, принимает решение о положении целевого объекта в кадре и хранит в себе вспомогательную информацию для обеспечения корректной работы всего алгоритма, а также отвечающего за принятие решения о повторном обнаружении цели. Предложены две возможные реализации данного подхода,

используемые в зависимости от мощности доступных вычислительных ресурсов. Реализован вариант алгоритма для доступных вычислительных мощностей, проведены его полунатурные испытания на основании реальных видеопоследовательностей. Они представляют разные фоны и разные структурные объекты интереса с различной динамикой изменения с течением времени. Проведена оценка результатов работы предложенного алгоритма в задачах обнаружения и сопровождения объекта интереса в режиме реального времени на представленных видео при помощи программного комплекса автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения. По итогу алгоритм показал высокую эффективность в поставленных задачах, улучшив точностные показатели сопровождения, в сравнении с внутренними алгоритмами, которые работали по-отдельности, за счет добавления поворотной и масштабной инвариантности, а также значительно повысил способность к повторному обнаружению объекта после его потери. В заключении представлены предложения по дальнейшему развитию и внедрению во встраиваемые вычислители оптико-электронных систем.

Автоматическое обнаружение; автоматическое сопровождение; встраиваемые системы; консенсусное решение.

P.A. Gessen, A.I. Lizin, V.A. Pavlova, V.D. Saenko, V.A. Tupikov

HYBRID ALGORITHM OF AUTOMATIC TRACKING FOR EMBEDDED COMPUTERS OF OPTOELECTRONIC NAVIGATION AND GUIDANCE SYSTEMS

The authors of the work carried out research in the field of technical vision systems, as well as approaches to solving problems of detecting and tracking objects of interest without a priori knowledge of their type, taking into account the target platform in the form of an embedded optoelectronic system computer. Based on the data obtained, the sphere was analyzed and a new hybrid maintenance algorithm for embedded systems was proposed. It is based on a combination of several types of maintenance algorithms, with one of them as a priority, providing the main work, and several auxiliary ones to stabilize and expand the functionality of the priority one. They are connected by an external processing cycle, which, based on a consensus decision of internal algorithms, independently decides on the position of the target object in the frame and stores auxiliary information to ensure the correct operation of the entire algorithm, as well as responsible for making a decision on the re-detection of the target. The authors propose two possible implementations of this approach, used depending on the power of available computing resources. A variant of the algorithm has been implemented for the available computing power, and its semi-natural tests have been carried out based on real video sequences. They represent different backgrounds and different structural objects of interest with different dynamics of change over time. The evaluation of the results of the proposed algorithm in the tasks of detecting and tracking an object of interest in real time on the presented videos using a software package for automating testing of detection and tracking algorithms has been carried out. As a result, the algorithm showed high efficiency in the tasks set, improving the accuracy of tracking, in comparison with internal algorithms that worked separately, by adding rotary and scale invariances, and also significantly increased the ability to re-detect an object after its loss. In conclusion, the authors present proposals for the further development and implementation of optoelectronic systems into embedded computers.

Automatic detection; automatic tracking; embedded systems; consensus decision.

Введение. В современных оптико-электронных системах остро стоит проблема обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов. Данная задача является объектом интереса уже достаточно долгое время, и как итог, в научной литературе предложено уже множество вариантов решения. В последнее время тренд в разработке новых подходов перешел к использованию нейронных сетей и искусственного интеллекта. Построенные по такому принципу реализации показывают отличные показатели точности в задачах обнаружения и сопровождения, однако обладают общими особенностями: они требуют предварительного априорного знания о типе объекта интереса (обучающей выборки) [1–2] и/или имея высокую вычислительную сложность, требуют использования мощных вы-

числителей (например, графические ускорители уровня GeForce GTX Titan X) [3–5], что в условиях встраиваемых систем реального времени и необходимости обнаружения любого объекта и его сопровождения без априорного знания о нем, делает предлагаемые реализации слабо применимыми в поставленной среде. Проведя исследования предметной области, были выявлены общие подходы к решению заявленной проблемы без использования искусственных нейронных сетей [6–7], среди которых одним из перспективных был признан метод совмещения нескольких простых алгоритмов сопровождения и обнаружения для принятия консенсусного решения о положении цели в кадре [8–10].

На основании данного подхода, авторами статьи был предложен новый алгоритм сопровождения и обнаружения произвольных объектов без априорного знания об их типе для встраиваемых оптико-электронных систем на основе нескольких реализаций алгоритмов сопровождения и консенсусного принятия решения о положении цели.

Предлагаемый подход. В данной работе авторами предлагается новый алгоритм сопровождения объекта, сочетающий в себе несколько реализаций иных алгоритмов слежения и обнаружения объектов, объединенных в единую систему для повышения точностных показателей путем консенсусного принятия решения и нивелирования недостатков каждого алгоритма по-отдельности. Для упрощения понимания в дальнейшем изложении предлагаемый подход будет называться “внешний алгоритм”, а иные алгоритмы – “внутренние алгоритмы”.

Сопровождение. Предлагаемое решение основано на циклическом использовании различных методов обнаружения объектов для каждого кадра в видеопоследовательности: в момент инициализации программы создается структура, которая хранит в себе последовательность внутренних алгоритмов, при этом первый в списке принимается внешним алгоритмом как приоритетный и в дальнейшем валидация результатов остальных внутренних решений идет на основе приоритетного. После первичной инициализации, содержащей n внутренних алгоритмов, первые n кадров обрабатываются каждым методом отдельно и последовательно (то есть кадр 1 обрабатывается первым в контейнере алгоритмом, кадр 2 – вторым, и так далее), то есть на каждом кадре работает отдельная реализация, никак не связанная с другими. На данной стадии происходит сбор начальных данных для работы внешнего алгоритма, при этом сохраняется возможность сопровождения объекта. Далее выполняются действия внутри одного прохода по контейнеру с алгоритмами, начиная с первого:

1. Выбирается очередной внутренний алгоритм;
2. Производится проверка того, что выбранный алгоритм не выдал ошибку сопровождения в предыдущей итерации;
3. На вход подается текущий кадр и происходит его обработка с последующей выдачей результата в виде описывающего прямоугольника;
4. Если результат получен от приоритетного алгоритма, то происходит сохранение результата, если нет, то сначала вычисляется расстояние между выходными данными первого алгоритма и текущего, после чего идет сохранение результата в виде описывающего прямоугольника и дополнительной информации о статусе работы;
5. Происходит сглаженное перемещение центра общего результирующего прямоугольника в сторону текущего положения;

По достижении и обработки результатов последнего внутреннего алгоритма происходит обобщающий анализ полученных данных:

1. Выполняется проверка того, что все внутренние алгоритмы одновременно не выдали результаты, соответствующие ошибке. При неудачном прохождении внешний алгоритм принимает решение об остановке процесса сопровождения и выдаче информационного сообщения. При успешной проверке происходит переход на следующий пункт;

2. Выполняется проверка того, что все внутренние алгоритмы одновременно не выдали результаты, соответствующие потере объекта. При неудачном прохождении внешний алгоритм принимает решение о переключении в режим поиска объекта. При успешной проверке происходит переход на следующий пункт;
3. Вычисляется усредненный коэффициент уверенности сопровождения. Если коэффициент меньше заданного порога, то происходит переход в режим обнаружения объекта. При прохождении порога происходит переход на следующий пункт;
4. Проводится создание общего результирующего прямоугольника путем объединения и обработки каждого из результатов внутренних алгоритмов;
5. Осуществляется запоминание нового результата и принятие его в качестве эталона для следующего цикла.

Повторное обнаружение. Предлагаемый подход включает в себе возможность повторного обнаружения объекта при принятии решения о его потере только в том случае, если хотя бы из внутренних алгоритмов содержит в себе такую возможность, как в [11–12]. Если она не предусмотрена, как в [13], то переход в режим повторного обнаружения объекта приводит к принятию решения об окончательной потере объекта и процесс сопровождения останавливается. Если механизм повторного обнаружения присутствует, то переход внешнего алгоритма в режим обнаружения приводит к последовательному поиску каждым внутренним алгоритмом с возможностью обнаружения заданного объекта на кадрах по аналогии с алгоритмом, описанным выше. При нахождении объекта какой-либо внутренней реализацией, внешний алгоритм принимает решение о запуске процесса слежения по вышеописанным последовательностям.

Альтернативный предлагаемый подход. Вышеописанные алгоритмы и последовательности предполагают под собой использование малого количества вычислительных ресурсов или невысоких мощностей, вследствие чего для достижения достаточной скорости работы для поддержания режима реального времени необходимо использовать последовательный вызов внутренних реализаций и их последующий анализ. В случае, когда возможно использование больших вычислительных мощностей, предлагается использовать улучшенную версию внешнего алгоритма. Вместо последовательной обработки одним внутренним алгоритмом одного кадра, а затем обработки финальных результатов один раз в n кадров, можно выполнять операции обнаружения объекта на каждом кадре одновременно всеми методами, а потом анализировать их результат на каждом кадре при помощи многопоточного механизма [14]. Такой подход имеет как плюсы в виде большей точности работы и более плавного выдаваемого на выходе смещения результирующего прямоугольника, так и минусы в виде больших затрачиваемых ресурсов и необходимости тщательнее выбирать внутренние алгоритмы из-за их зависимости друг от друга в момент обработки.

Особенность. Особенностью предлагаемых подходов является то, что внутренние алгоритмы могут выбираться любые в зависимости от требований и не ограничены по количеству, т.е. при наличии большого количества реализаций можно увеличивать количество используемых методов для потенциального достижения большей уверенности в результате или же наоборот сокращать их количество при недостатке ресурсов.

Реализация. В соответствии с предлагаемым подходом (для систем с ограничением по используемым ресурсам) авторами статьи был разработан и реализован гибридный алгоритм автоматического сопровождения для встраиваемых систем. По результатам тестового моделирования на различных видеопоследовательностях с отличающимися представленными условиями было определено, что оптимальное количество внутренних алгоритмов равняется трем, а сами алгоритмы представлены следующими реализациями:

1. Корреляционный алгоритм – представляет собой стандартный корреляционный алгоритм [15] с добавлением расчета интегральных изображений и построения пирамиды изображения для улучшения качества сопровождения и масштабной инвариантности. Выступает в качестве приоритетного внутреннего алгоритма ввиду скорости, устойчивости к помехам и качества работы.

2. Многоагентный алгоритм – алгоритм основанный на сопоставлении ключевых точек с добавлением масштабной пирамиды изображения, подробное описание работы представлено в статье – [16]. Выступает в роли корректирующего элемента, так как значительно повышает поворотную инвариантность и хорошо обрабатывает перекрытия объекта.

3. Квадрантно-обучаемый алгоритм - алгоритм основанный на корреляции с последующим обучением для точности распознавания, подробное описание работы представлено в статье [17]. Выступает в роли корректирующего элемента и служит для стабилизации процесса сопровождения.

При использовании меньшего количества внутренних алгоритмов качественные и точностные результаты оказывались хуже, выражаясь в нестабильности, и расползании описывающего прямоугольника. При большем количестве реализаций проявлялось сильное отставание рамки сопровождения от текущего положения объекта и хуже обрабатывались ситуации резкого изменения положения объекта в кадре. При текущей конфигурации достигнуто плавное сопровождение с низкой разницей между центрами описывающей рамки и целевой сущности, качественно обрабатываются масштабные и поворотные изменения объекта, сохраняется возможность сопровождать объект при последовательном сильном изменении его представления с течением времени.

Результаты. Тестирование выполнялось при помощи полунатурного моделирования с использованием программного комплекса автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения, разработанного АО НПП «АМЭ» [18], и реальных видеозаписей, полученных в различных условиях наблюдения. Для тестирования были размечены видеопоследовательности, содержащие объекты интереса типа «Кунг», «Здание», «Мост» и др. размером от ~64x64 до ~256x256 пикселей.

Для наиболее полной оценки точности предлагаемого модуля, использовалась метрика IoU (Intersection over Union) [19]. Данная метрика подразумевает оценку отношения площадей пересечения описывающих прямоугольников к площади их объединения. Один из прямоугольников (S_1), определяющий истинное положение объекта в кадре, задается оператором при тестировании, второй (S_2) является результатом работы того или иного алгоритма сопровождения:

$$IoU = \frac{S_1 \cap S_2}{S_1 \cup S_2} \in [0; 1]$$

Чем ближе получаемое значение IoU к единице, тем более точное предсказание истинного положения объекта и его размеров даёт оцениваемый алгоритм.

В дополнение к IoU возможно добавить еще одну метрику. Анализ ошибки определения центра (средняя квадратическая ошибка, root mean square error [20]) объекта, позволяющие оценить отклонение между истинным положением отслеживаемого объекта и полученным положением в результате сопровождения объекта. Ниже представлена формула расчета среднеквадратичной ошибки отклонения центра по всей видеопоследовательности:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2},$$

где N – количество кадров в видеопоследовательности, x_1 и y_1 – координаты центра прямоугольника, предсказывающего положение объекта, от тестируемого алгоритма, x_2 и y_2 – координаты центра прямоугольника, описывающего истинное положение объекта.

Тестирование проводилось для каждого из вышеописанных внутренних алгоритмов и предлагаемого решения по следующей методике:

1. На интересующей видеозаписи в определенный момент выполнялся захват объекта на сопровождение;
2. На протяжении видеопоследовательности на каждом кадре собирались данные об отклике алгоритма сопровождения;
3. Полученные сведения сравнивались с заранее размеченными эталонными кадрами и вычислялись метрики.

Результаты экспериментов по данной методике представлены на рис. 1 и 2.

Из приведенных графиков видно, что в большинстве случаев предлагаемое решение показывает сильное улучшение результатов. На графиках, где происходит падение значений в 0, таким образом показывается ситуация потери алгоритмом слежения объекта и невозможности восстановления. Таким образом видно, что не только улучшаются точностные показатели как области пересечения, так и дистанции до истинного центра, но и не происходит ситуаций, в которых происходит окончательная потеря объекта.

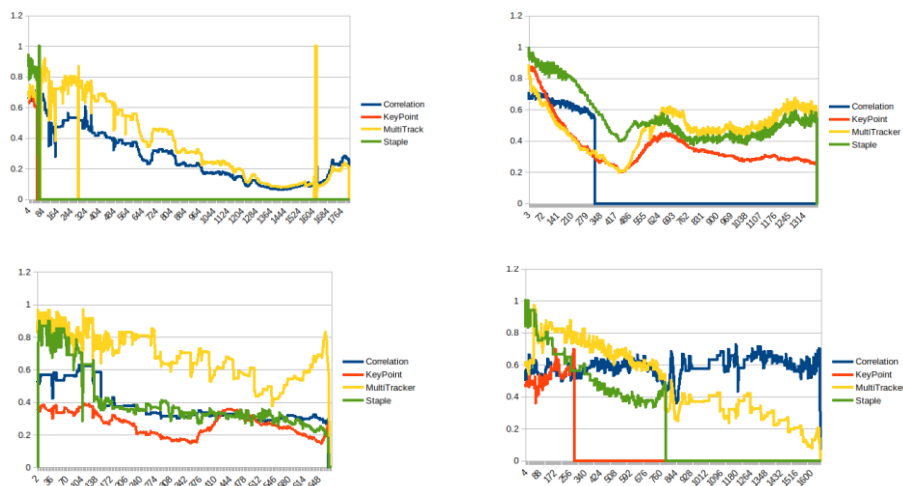


Рис. 1. Графики областей пересечения IoU

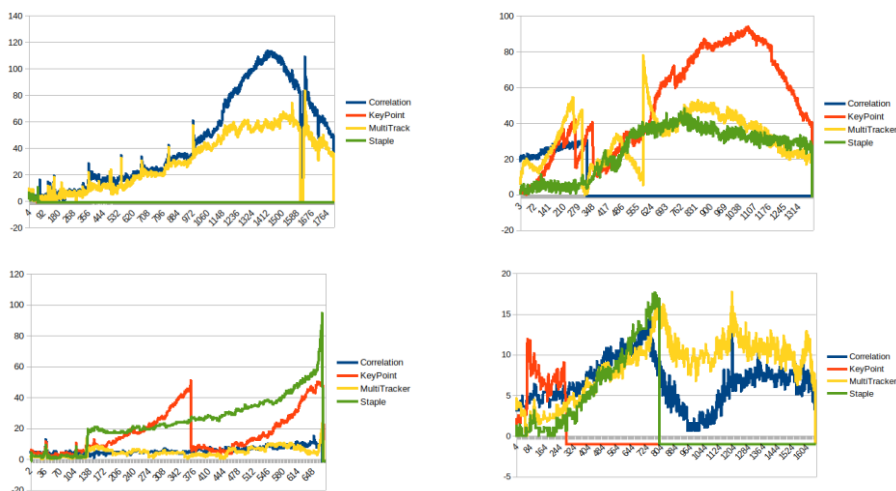


Рис. 2. Графики разницы расстояний центров $RMSE$

Заключение. По результатам полунатурного моделирования с использованием программного комплекса автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения использование предложенного алгоритма дало точность прироста охвата цели относительно других отдельных реализаций, на достаточно высокой скорости, что дает возможность использовать данный алгоритм, например, в составе специального программного обеспечения опτικο-электронных систем беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов.

На дальнейших этапах развития планируется внедрение данного алгоритма в опτικο-электронную систему и проведение натурных испытаний для выявления возможных недостатков и их устранение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Dillon Reis, Jordan Kupec, Jacqueline Hong, Ahmad Daoudi.* Real-Time Flying Object Detection with YOLOv8 // ArXiv. – 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2305.09972.
2. *Wang, Chien-Yao & Bochkovskiy, Alexey & Liao, Hong-yuan.* YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors // arXiv. – 2022. – DOI: 10.48550/arXiv.2207.02696.
3. *Bertinetto L., Valmadre J., Henriques J.F., Vedaldi A., Torr P.H.S.* Fully-Convolutional Siamese Networks for Object Tracking / In: Hua G., Jégou H. (eds) // Computer Vision – ECCV 2016 Workshops. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9914. – Springer, Cham.
4. *Zhang Y., Wang L., Qi J., Wang D., Feng M., Lu H.* Structured Siamese Network for Real-Time Visual Tracking / In: Ferrari V., Hebert M., Sminchisescu C., Weiss Y. (eds) // Computer Vision – ECCV 2018. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 11213. – Springer, Cham.
5. *Li D., Yu Y. & Chen X.* Object tracking framework with Siamese network and re-detection mechanism // J Wireless Com Network. – 2019. – 261.
6. *Fei Chen, Xiaodong Wang, Yunxiang Zhao, Shaohu Lv, Xin Niu.* Visual object tracking: A survey // Computer Vision and Image Understanding. – 2022. – 222. – DOI: 10.1016/j.cviu.2022.103508.
7. *Zahra Soleimanitaleb, Mohammad Ali Keyvanrad.* Single Object Tracking: A Survey of Methods, Datasets, and Evaluation Metrics // ArXiv. – 2022. – DOI: 10.48550/arXiv.2201.13066.
8. *Nebehay G. and Pflugfelder R.* Consensus-based matching and tracking of keypoints for object tracking // IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Steamboat Springs, CO, USA, 2014. – P. 862-869. – DOI: 10.1109/WACV.2014.6836013.
9. *Qi Y., Zhang S., Qin L., Yao H., Huang Q., Lim J., and Yang M.H.* Hedged deep tracking // In CVPR. – IEEE, 2016. – P. 4303-4311.
10. *Wang N. and Yeung D.-Y.* Ensemble-Based Tracking: Aggregating Crowdsourced Structured Time Series Data // In ICML. – 2014.
11. *Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J.* Tracking-Learning-Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – Vol. 34, No. 7. – P. 1409-1422.
12. *Bertinetto L., Valmadre J., Golodetz S., Miksik O. and Torr P.H.S.* Staple: Complementary Learners for Real-Time Tracking // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016. – P. 1401-1409. – DOI: 10.1109/CVPR.2016.156.
13. *Henriques J.F., et al.* High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2015. – Vol. 37, No. 3. – P. 583-596.
14. *Tullsen D.M., Eggers S.J. and Levy H.M.* Simultaneous multithreading: Maximizing on-chip parallelism // Proceedings 22nd Annual International Symposium on Computer Architecture, Santa Margherita Ligure, Italy, 1995. – P. 392-403.
15. *Bolme David, Beveridge J., Draper Bruce, Lui Yui.* Visual object tracking using adaptive correlation filters // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2010. – P. 2544-2550. – DOI: 10.1109/CVPR.2010.5539960.
16. *Бондаренко В.А., Ельцова Д.К., Лизин А.И., Павлова В.А., Созинова М.В., Тутиков В.А.* Многоагентный алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1 (211). – С. 218-232.
17. *Бондаренко В.А., Гагарина А.Ю., Павлова В.А., Тутиков В.А.* Программный комплекс автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения объектов на видеопоследова-

- тельность // Перспективные системы и задачи управления: Матер. XVI Всероссийской научно-практической конференции и XII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог: ИП Марук М.Р., 2021. – 355 с.
18. Гагарина А.Ю., Гессен П.А., Лизин А.И., Павлова В.А., Созинова М.В., Туников В.А. Квадратно-обучаемый алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – 11. – С. 3-13.
19. Rezatofighi H., Tsoi N., Gwak J., Sadeghian A., Reid I., Savarese S., Generalized Intersection Over Union: A Metric and a Loss for Bounding Box Regression // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019. – P. 658-666.
20. Hodson T.O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not // Geoscientific Model Development. – 2022, – 15. – P. 5481-5487. – DOI: 10.5194/gmd-15-5481-2022.

REFERENCES

1. Dillon Reis, Jordan Kupec, Jacqueline Hong, Ahmad Daoudi. Real-Time Flying Object Detection with YOLOv8, *ArXiv*, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2305.09972.
2. Wang, Chien-Yao & Bochkovskiy, Alexey & Liao, Hong-yuan. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors, *arXiv*, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2207.02696.
3. Bertinetto L., Valmadre J., Henriques J.F., Vedaldi A., Torr P.H.S. Fully-Convolutional Siamese Networks for Object Tracking. In: Hua G., Jégou H. (eds), *Computer Vision – ECCV 2016 Workshops. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science*, 2016, Vol. 9914. Springer, Cham.
4. Zhang Y., Wang L., Qi J., Wang D., Feng M., Lu H. Structured Siamese Network for Real-Time Visual Tracking. In: Ferrari V., Hebert M., Sminchisescu C., Weiss Y. (eds), *Computer Vision – ECCV 2018. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science*, 2018, Vol. 11213. Springer, Cham.
5. Li D., Yu Y. & Chen X. Object tracking framework with Siamese network and re-detection mechanism, *J Wireless Com Network*, 2019, 261.
6. Fei Chen, Xiaodong Wang, Yunxiang Zhao, Shaohe Lv, Xin Niu. Visual object tracking: A survey, *Computer Vision and Image Understanding*, 2022, 222. DOI: 10.1016/j.cviu.2022.103508.
7. Zahra Soleimanitaleb, Mohammad Ali Keyvanrad. Single Object Tracking: A Survey of Methods, Datasets, and Evaluation Metrics, *ArXiv*, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2201.13066.
8. Nebehay G. and Pflugfelder R. Consensus-based matching and tracking of keypoints for object tracking, *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Steamboat Springs, CO, USA, 2014*, pp. 862-869. DOI: 10.1109/WACV.2014.6836013.
9. Qi Y., Zhang S., Qin L., Yao H., Huang Q., Lim J., and Yang M.H. Hedged deep tracking, *In CVPR. IEEE*, 2016, pp. 4303-4311.
10. Wang N. and Yeung D.-Y. Ensemble-Based Tracking: Aggregating Crowdsourced Structured Time Series Data, *In ICML*, 2014.
11. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-Learning-Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, Vol. 34, No. 7, pp. 1409-1422.
12. Bertinetto L., Valmadre J., Golodetz S., Miksik O. and Torr P.H.S. Staple: Complementary Learners for Real-Time Tracking, *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016*, pp. 1401-1409. DOI: 10.1109/CVPR.2016.156.
13. Henriques J.F., et al. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, Vol. 37, No. 3, pp. 583-596.
14. Tullsen D.M., Eggers S.J. and Levy H.M. Simultaneous multithreading: Maximizing on-chip parallelism, *Proceedings 22nd Annual International Symposium on Computer Architecture, Santa Margherita Ligure, Italy, 1995*, pp. 392-403.
15. Bolme David, Beveridge J., Draper Bruce, Lui Yui. Visual object tracking using adaptive correlation filters, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2010, pp. 2544-2550. DOI: 10.1109/CVPR.2010.5539960.
16. Bondarenko V.A., El'tsova D.K., Lizin A.I., Pavlova V.A., Sozinova M.V., Tupikov V.A. Mnogoagentnyy algoritm avtomaticheskogo obnaruzheniya i soprovozhdeniya nedeterminirovannykh ob"ektov [Multi-agent algorithm for automatic detection and tracking of non-deterministic objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2020, No. 1 (211), pp. 218-232.

17. Bondarenko V.A., Gagarina A.Yu., Pavlova V.A., Tupikov V.A. Programmnyy kompleks avtomatizatsii testirovaniya algoritmov obnaruzheniya i soprovozhdeniya ob"ektov na videoposledovatel'nostyakh [Software package for testing algorithms for detecting and tracking objects on video sequences], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XVI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XII molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Promising management systems and tasks: materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference and the XII youth school seminar "Information Management and processing in technical systems"]. Taganrog: IP Maruk M.R., 2021, 355 p.
18. Gagarina A.Yu., Gessen P.A., Lizin A.I., Pavlova V.A., Sozinova M.V., Tupikov V.A. Kvadratno-obuchаемый алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения неопределенных объектов [A square-trainable algorithm for automatic detection and tracking of non-deterministic objects], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], 2022, 11, pp. 3-13.
19. Rezatofighi H., Tsoi N., Gwak J., Sadeghian A., Reid I., Savarese S., Generalized Intersection Over Union: A Metric and a Loss for Bounding Box Regression, *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019*, pp. 658-666.
20. Hodson T.O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not, *Geoscientific Model Development*, 2022, 15, pp. 5481-5487. DOI: 10.5194/gmd-15-5481-2022.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. П.К. Шульженко.

Тупиков Владимир Алексеевич – АО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника»; e-mail: tupikov@nppame.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88123274667; д.т.н.; профессор.; зам. ген. Директора; директор научно-производственного комплекса робототехнических систем специального назначения.

Павлова Валерия Анатольевна – e-mail: pavlova@nppame.ru; тел.: 88123274667; к.т.н.; зам. директора по НИОКР.

Лизин Алексей Игоревич – e-mail: lizin_a@nppame.ru; начальник центра средств интеллектуальной обработки изображений.

Гессен Павел Алексеевич – e-mail: gessen_pa@nppame.ru; зам. начальника центра средств интеллектуальной обработки изображений.

Саенко Владислав Дмитриевич – e-mail: eltova@nppame.ru; младший программист.

Tupikov Vladimir Alekseevich – SPE "Research and Production Enterprise "Air and Marine Electronics", e-mail: tupikov@nppame.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +78123274667; dr. of eng. sc.; professor; deputy director general; director of Research and production complex of special purpose robotic systems.

Pavlova Valeria Anatolyevna – e-mail: pavlova@nppame.ru; cand. of eng. sc.; deputy director of research at Research and production complex of special purpose robotic systems.

Lizin Aleksey Igorevich – e-mail: lizin_a@nppame.ru; chief of intellectual image processing center.

Gessen Pavel Alekseevich – e-mail: gessen_pa@nppame.ru; deputy chief of intellectual image processing center.

Saenko Vladislav Dmitrievich – e-mail: eltova@nppame.ru; junior programmer.