

<https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202403.619-625>
УДК 519.714.3

Оригинальная статья

Учет ограничений в задаче визуального позиционирования на основе управления с прогнозирующими моделями

Р. А. Севостьянов

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Адрес: 199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9
sevastyanov.ruslan@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена задаче визуального позиционирования произвольного полноприводного подвижного объекта на плоскости. На объекте жестко закреплена видеокамера, направленная на визуальный маркер, параллельный плоскости движения объекта. Маркер представляет собой квадрат, углы которого являются точками интереса. Управление объектом осуществляется путем задания вектора скоростей. Задача заключается в синтезе такого управления, которое обеспечит желаемое положение проекции визуального маркера в плоскости изображения. Задача осложняется тем фактом, что область видимости камеры ограничена, и при выходе проекции одного из углов маркера за пределы этой области, весь маркер перестает распознаваться. Таким образом, дополнительным требованием к управлению является постоянное удержание проекции маркера в пределах области видимости. Для решения задачи визуального позиционирования без учета ограничений, как правило, используется метод управления с визуальной обратной связью (*visual servoing*). Учет заданных ограничений возможен при использовании подхода управления с прогнозирующими моделями. Таким образом, в статье представлено решение задачи визуального позиционирования с учетом ограничений на перемещение проекции визуального маркера при помощи комбинации методов управления с визуальной обратной связью и управления с прогнозирующими моделями. Для демонстрации работоспособности представленного подхода приводятся результаты экспериментов с компьютерной моделью полноприводного плоского объекта управления.

Ключевые слова: теория управления, обратная связь, ограничения, управление с визуальной обратной связью, управление с прогнозирующими моделями

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Севостьянов Р. А. Учет ограничений в задаче визуального позиционирования на основе управления с прогнозирующими моделями // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2024. Т. 20, № 3. С. 619-625. <https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202403.619-625>

© Севостьянов Р. А., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Model-Predictive Constrained Visual Positioning

R. A. Sevostyanov

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Address: 7/9 Universitetskaya Emb., St Petersburg 199034, Russian Federation

sevostyanov.ruslan@gmail.com

Abstract

The paper is devoted to the problem of moving fully-actuated plant visual positioning on the plane. There is a video-camera rigidly mounted on the plant, pointing at the visual marker parallel to the object's plane of motion. Marker is a square, the corners of which are points of interest. The plant is controlled by setting the velocity vector. The task is to synthesize such control that provides the desired position of the marker projection in the image plane. The task is complicated by the fact that the camera's field of view is limited, and when the projection of one of the marker's corners goes beyond this area, the entire marker ceases to be recognized. Thus, an additional requirement for control is constant retention of the marker projection within the field of view. To solve the problem of visual positioning without taking into account the constraints, usually the visual servoing control method is used. Taking into account the specified constraints is possible by the usage of the model-predictive control approach. Thus, the paper demonstrates a solution to the visual positioning problem taking into account the constraints on the projection of the visual marker using a combination of the visual servoing method and the model-predictive control approach. The efficiency of the presented approach is demonstrated by the results of experiments with a computer model of fully-actuated planar object.

Keywords: Control theory, feedback, constraints, visual servoing, model-predictive control

Conflict of interests: The author declares no conflict of interests.

For citation: Sevostyanov R.A. Model-Predictive Constrained Visual Positioning. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2024;20(3):619-625. <https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202403.619-625>



Введение

Современные системы автоматического управления все чаще используют визуальную информацию в контуре обратной связи. В качестве примеров можно привести логистических роботов на автоматизированных складах, или системы автоматизированной стыковки. Использование видеокамер позволяет существенно расширить круг решаемых задач, а также повысить эффективность их выполнения.

Визуальная информация может быть использована двумя способами. Во-первых, по одному или нескольким изображениям можно оценить текущее положение объекта управления, а также положение целевых объектов [1]. Далее эту оценку положения можно применить в классических методах синтеза обратных связей.

Во-вторых, в ряде случаев возможно использование визуальной информации напрямую в контуре обратной связи. Например, если поставлена задача позиционирования мобильного робота относительно некоторого визуального маркера (в виде, например, ArUco-маркера [2]), то цель управления может быть переформулирована в виде обеспечения желаемого положения проекции визуального маркера в плоскости изображения за счет движения робота. Такой подход известен в литературе как управление с визуальной обратной связью (*image-based visual servoing, IBVS*) [3-5]. Это достаточно актуальная тематика, по которой в последнее время в научной литературе опубликовано большое количество работ [6-14].

Как правило, оба подхода подразумевают использование некоторого алгоритма распознавания, который выделит на изображении точки интереса визуальных маркеров. При этом некоторые алгоритмы требуют, чтобы маркер целиком находился на изображении для его успешного распознавания. Однако область видимости камеры ограничена, и некоторые законы управления могут обеспечивать такое движение объекта управления, при котором маркер частично выходит за пределы области видимости камеры, что приводит к проблемам с распознаванием. Таким образом, можно поставить задачу визуального управления с учетом ограничений на положение визуального маркера в плоскости изображения.

Подобные задачи могут решаться при помощи управления с прогнозирующими моделями (*Model-Predictive Control, MPC*)¹. Этот подход требует решения некоторой оптимизационной задачи на каждом шаге управления, что может занимать значительное время, однако это позволяет явно учитывать различные виды ограничений, а также задавать различные функционалы качества. Это подход имеет большое практическое значение, поэтому в этой области также постоянно публикуются новые научные работы [15-25].

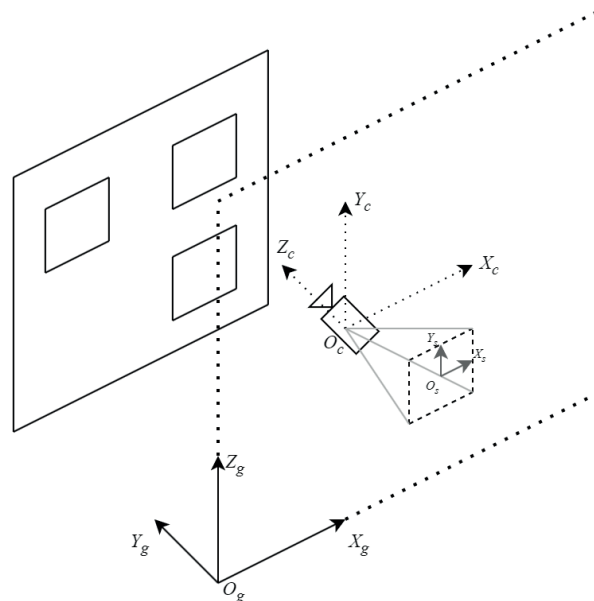
Таким образом, в данной работе предлагается решение задачи визуального позиционирования полноприводного объекта управления с учетом ограничений на основе комбинации методов управления с визуальной обратной связью и управления с прогнозирующими моделями. Эксперименты с компьютерной моделью объекта управления, реализованной на языке Python, используются для демонстрации работоспособности предлагаемого подхода.

Постановка задачи

Рассмотрим произвольный полноприводный плоский подвижный объект (рис. 1), управление движением которого осуществляется путем задания вектора скоростей. Объект движется в плоскости $O_g x_g y_g z_g$ неподвижной системы координат. Для простоты будем считать, что математическая модель динамики его движения описывается уравнением

$$\dot{\eta} = \mathbf{v}, \quad (1)$$

где $\eta = (x \ z \ \varphi)^T$ – положение объекта относительно неподвижной системы координат в плоскости движения, $\mathbf{v} = (v_x \ v_z \ \omega)^T$ – вектор управляющих скоростей.



Р и с. 1. Системы координат

F i g. 1. Coordinate systems

Источник: здесь и далее в статье все рисунки составлены автором.

Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the author.

Предположим, что в геометрическом центре объекта управления находится видеокамера, направленная перпендикулярно плоскости движения. С камерой жестко связана подвижная система координат $O_c x_c y_c z_c$. Рассмотрим нормированную плоскость изображения $O_s x_s y_s$, перпендикулярную оптической оси и находящуюся на фокусном расстоянии $f = 1$. Если задана некоторая точка пространства (X_c, Y_c, Z_c) в системе координат камеры, то проекцию этой точки на нормированную плоскость изображения можно найти по формулам²

$$x_s = \frac{X_c}{Z_c}, \quad y_s = \frac{Y_c}{Z_c}. \quad (2)$$

¹ Веремей Е. И., Сотникова М. В. Управление с прогнозирующими моделями. Воронеж: ООО «Изд-во "Научная книга"», 2016. 214 с. EDN: VZWUFB

² Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.



Предположим, что в поле зрения камеры находится визуальный маркер в виде квадрата, в плоскости изображения представленный набором точек $\mathbf{s} = (x_i, y_i)$, $i = 1, N$, являющимися проекциями точек маркера (X_i, Y_i, Z_i) , $i = 1, N$, в системе координат камеры. Поставим задачу позиционирования объекта относительно маркера таким образом, чтобы проекции точек маркера $\mathbf{s}$ на изображении оказались в желаемом положении $\mathbf{s}_d$. Таким образом, необходимо обеспечить выполнение условия:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \mathbf{s}(t) = \mathbf{s}_d. \quad (3)$$

Дополнительно поставим требование соблюдения ограничений на значения проекций $\mathbf{s}(t)$ в каждый момент времени. Проекция не должны выходить за границы изображения. Пусть границы изображения в нормированной плоскости заданы значениями $x_{\max}$, $x_{\min}$, $y_{\max}$ и $y_{\min}$. Тогда формально условие (3) можно дополнить системой неравенств

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(t) &\leq \mathbf{s}_{\max}, \\ -\mathbf{s}(t) &\leq -\mathbf{s}_{\min}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{s}_{\max} = (x_{\max} \ y_{\max} \ \dots \ x_{\max} \ y_{\max})^T \in E^{2N}$,

$\mathbf{s}_{\min} = (x_{\min} \ y_{\min} \ \dots \ x_{\min} \ y_{\min})^T \in E^{2N}$.

Синтез классической визуальной обратной связи

Введем в рассмотрение вектор $\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}_d$, представляющий собой невязку между фактическим и желаемым положением проекций визуального маркера на нормированную плоскость изображения. Динамику изменения этого вектора можно связать со скоростью движения объекта управления при помощи уравнения [3]

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}_s(\mathbf{s}, \mathbf{Z}_c) \mathbf{v}. \quad (5)$$

Вектор расстояний $\mathbf{Z}_c \in E^N$ содержит значения Z_i , $i = \overline{1, N}$ для каждой спроецированной точки маркера, $\mathbf{L}_s(\mathbf{s}, \mathbf{Z}_c)$ – матрица взаимосвязей, компоненты которой для каждой проекции (x_i, y_i) задаются следующим образом [3]:

$$\mathbf{L}_s(x_i, y_i, Z_i) = \begin{pmatrix} \frac{1}{Z_i} & 0 & y_i \\ 0 & \frac{1}{Z_i} & -x_i \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Отметим, что в рассматриваемой задаче с учетом плоского движения объекта управления, все компоненты вектора $\mathbf{Z}_c$ постоянны и равны между собой. С учетом (5) и (6) задачу управления можно переформулировать в виде

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \mathbf{e}(t) = \mathbf{0}. \quad (7)$$

Классический подход управления с визуальной обратной связью предполагает формирование вектора скоростей в виде [3]

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{L}_s^+ \mathbf{e}, \quad (8)$$

где $\lambda > 0$ – постоянный коэффициент, $\mathbf{L}_s^+ = (\mathbf{L}_s^T \mathbf{L}_s)^{-1} \mathbf{L}_s^T$ – псевдообращение Мура-Пенроуза. Обратная связь (8) сводит (5) к

$$\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e}. \quad (9)$$

Описанный подход обеспечивает экспоненциальную сходимость невязок к нулю, однако не учитывает ограничения на движение проекций точек визуального маркера в плоскости изображения. Таким образом, условие (4) постановки задачи не может быть выполнено, необходим другой подход к синтезу управления.

Управление с прогнозирующей моделью

Учет условия (4) возможен при использовании подхода управления с прогнозирующей моделью³. Зададим функционал качества управления в виде квадратичной формы

$$J(\mathbf{e}, \mathbf{v}) = J(\mathbf{v}) = \int_0^{T_p} (\mathbf{e}^T \mathbf{e} + \mu \mathbf{v}^T \mathbf{v}) dt \quad (10)$$

где T_p – горизонт прогноза, $\mu > 0$ – постоянный коэффициент, позволяющий регулировать интенсивность управления и, соответственно, время сходимости. Будем считать, что (5) задает прогнозирующую модель, интегрируя которую на горизонте прогноза, можно получить траектории невязок $\mathbf{e}$. Тогда задача управления сводится к решению нелинейной оптимизационной задачи $J \rightarrow \min$ на допустимом множестве, заданном ограничениями (4). Для того, чтобы задачу можно было бы решать при помощи вычислительных техники, дискретизируем систему (5) с некоторым шагом дискретизации Δt , тогда функционал (10) можно представить в виде суммы

$$J(\mathbf{e}, \mathbf{v}) = J(\mathbf{v}) = \sum_{i=0}^P (\mathbf{e}[i]^T \mathbf{e}[i] + \mu \mathbf{v}[i]^T \mathbf{v}[i]), \quad (11)$$

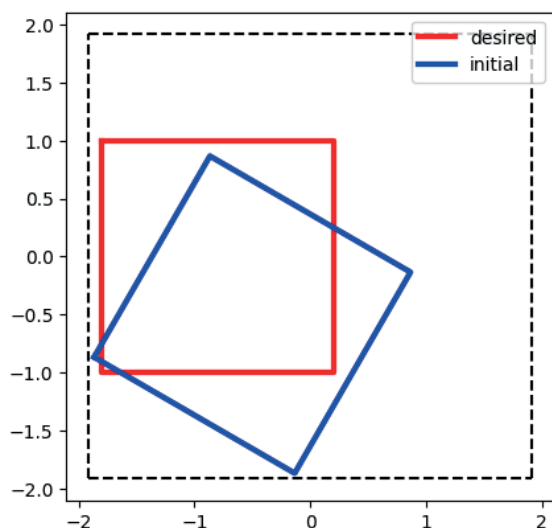
где $P = T_p / \Delta t$. Однако, решение такой оптимизационной задачи на горизонте прогноза даст программное управление. Чтобы обеспечить определенный уровень адаптивности, подход МРС предполагает, что на каждом шаге управления из полученного решения берется только первый элемент, подается на объект управления, измеряется новое состояние, которое является начальным условием для прогнозирующей модели на следующем шаге управления.

Результаты исследования

Для демонстрации работоспособности предложенного подхода была реализована компьютерная модель рассматриваемого объекта управления на языке Python. Рассмотрим задачу обеспечения перехода проекций маркера на плоскости изображения из начального положения $(-1.866 \ -0.866 \ -0.866 \ 0.866 \ 0.866 \ -0.134 \ -0.134 \ -1.866 \ 0.5)$ в конечное положение $(-1.8 \ 1.0 \ 0.2 \ 1.0 \ 0.2 \ -1.0 \ -1.8 \ -1.0)$ (рис. 2).

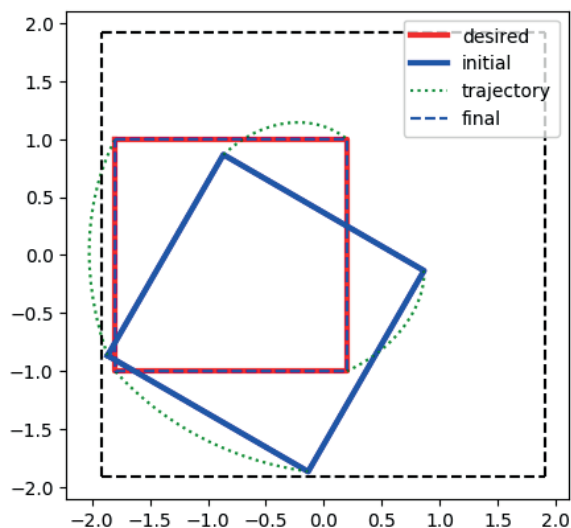
³ Веремей Е. И., Сотникова М. В. Управление с прогнозирующими моделями. Воронеж: ООО «Изд-во "Научная книга"», 2016. 214 с. EDN: VZWUFB





Р и с. 2. Начальное и желаемое положения проекций визуального маркера
Fig. 2. The initial and desired positions of the visual marker projections

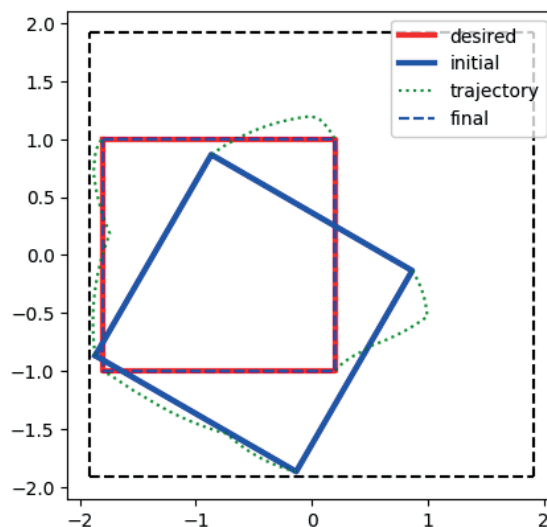
На рис. 3 представлена траектория движения проекций углов маркера с классической визуальной обратной связью (8) при $\lambda = 1$. Можно заметить, что один из углов в процессе перемещения выходит за левую границу изображения. Таким образом, действительно, при определенных условиях, классический подход управления с визуальной обратной связью может приводить к тому, что некоторые точки визуального маркера окажутся за пределами видимой области, и весь маркер не будет распознан.



Р и с. 3. Траектория движения проекции маркера при классическом управлении с визуальной обратной связью

Fig. 3. The trajectory of the marker's projected motion under classical control with visual feedback

Теперь при тех же начальных условиях применим управление с прогнозирующей моделью. Примем горизонт прогноза $P = 2$ с шагом дискретизации $\Delta t = 0.1$ с и $\mu = 0.1$. Задача минимизации на каждом шаге решалась при помощи функции `minimize` из модуля `scipy.linalg`, метод оптимизации "trust-constr". Как видно из рис. 4, в этом случае ни один из углов маркера не выходит за границы изображения. Таким образом, MPC-подход действительно позволяет избежать проблемы с распознаванием маркера из-за потери некоторых ключевых точек.



Р и с. 4. Траектория движения проекции маркера при управлении с прогнозирующей моделью

Fig. 4. The trajectory of the marker's projection under model predictive control

Обсуждение и заключение

В работе рассмотрена задача управления движением полноприводного объекта в плоскости таким образом, чтобы проекции углов некоторого визуального маркера, расположенного параллельно плоскости движения объекта управления, на нормированную плоскость изображения видеокамеры, закрепленной на объекте, оказались в заданном положении. При этом показано, что классический подход управления с визуальной обратной связью не учитывает ограничения на движение проекций, и может приводить к тому, что некоторые точки окажутся за пределами изображения, из-за чего весь маркер не будет распознан. Предложено решение на основе метода управления с прогнозирующей моделью, позволяющей учитывать заданные ограничения при решении оптимизационной задачи. Результаты экспериментов с компьютерной моделью продемонстрировали работоспособность описанного подхода.



References

- [1] Schönberger J.L., Frahm J.-M. Structure-from-Motion Revisited. In: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA: IEEE Press; 2016. p. 4104-4113. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445>
- [2] Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marín-Jiménez M.J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. 2014;47(6):2280-2292. <https://doi.org/10.1109/MRA.2007.339609>
- [3] Chaumette F., Hutchinson S. Visual Servo Control: Basic Approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2006;13(4):82-90. <https://doi.org/10.1109/MRA.2006.250573>
- [4] Chaumette F., Hutchinson S. Visual Servo Control: Advanced Approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2007;14(1):109-118. <https://doi.org/10.1109/MRA.2007.339609>
- [5] Malis E., Chaumette F., Boudet S. 2 1/2 D Visual Servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1999;15(2):238-250. <https://doi.org/10.1109/70.760345>
- [6] Nazari A.A., Zareinia K., Janabi-Sharifi F. Visual Servoing of Continuum Robots: Methods, Challenges, and Prospect. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. 2022;18:e2384. <https://doi.org/10.1002/rcs.2384>
- [7] Cong V.D., Hanh L.D. A review and performance comparison of visual servoing controls. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. 2023;7(1):65-90. <https://doi.org/10.1007/s41315-023-00270-6>
- [8] Al-Shanoon A., Lang H. Robotic manipulation based on 3-D visual servoing and deep neural networks. *Robotics and Autonomous Systems*. 2022;152:104041. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104041>
- [9] Huang H., Bian X., Cai F., Li J., Jiang T., Zhang, Z., Sun C. A review on visual servoing for underwater vehicle manipulation systems automatic control and case study. *Ocean Engineering*. 2022;260:112065. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112065>
- [10] Li C., Li B., Wang R., et al. A survey on visual servoing for wheeled mobile robots. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. 2021;5:203-218. <https://doi.org/10.1007/s41315-021-00177-0>
- [11] Li C., Zhang X., Gao H., Wang R., Fang Y. Bridging the Gap Between Visual Servoing and Visual SLAM: A Novel Integrated Interactive Framework. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2022;19(3):2245-2255. <https://doi.org/10.1109/TASE.2021.3067792>
- [12] Keipour A., Pereira G.A.S., Bonatti R., Garg R., Rastogi P., Dubey G., Scherer S. Visual Servoing Approach to Autonomous UAV Landing on a Moving Vehicle. *Sensors*. 2022;22:6549. <https://doi.org/10.3390/s22176549>
- [13] Aghili F. Fault-Tolerant and Adaptive Visual Servoing for Capturing Moving Objects. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2022;27(3):1773-1783. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3087729>
- [14] Zhang H., Li M., Ma S., Jiang H., Wang H. Recent Advances on Robot Visual Servo Control Methods. *Recent Patents on Mechanical Engineering*. 2021;14(3):298-312. <https://doi.org/10.2174/2212797613999201117151801>
- [15] Sotnikova M.V., Veremey E.I. Synthesis of Astatic MPC-Regulator for Magnetic Levitation Plant. *Transactions on Systems and Control*. 2017;16:355-361. Available at: <https://wseas.com/journals/articles.php?id=2825> (accessed 26.04.2024).
- [16] Schwenzer M., Ay M., Bergs T., et al. Review on model predictive control: an engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;117(5-6):1327-1349. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07682-3>
- [17] Elmorshedy M.F., Xu W., El-Sousy F.F.M., Islam M.R., Ahmed A.A. Recent Achievements in Model Predictive Control Techniques for Industrial Motor: A Comprehensive State-of-the-Art. *IEEE Access*. 2021;9:58170-58191. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073020>
- [18] Fouquier A., Robert S., Suard F., Stephan L., Jay A. State of the art in building modelling and energy performances prediction: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;23:272-288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.004>
- [19] Samuel M., Mohamad M., Hussein M., Mad Saad S. Lane Keeping Maneuvers Using Proportional Integral Derivative (PID) and Model Predictive Control (MPC). *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2021;2(2):78-82. <https://doi.org/10.18196/jrc.2256>
- [20] Wang D., et al. Model Predictive Control Using Artificial Neural Network for Power Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022;69(4):3689-3699. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3076721>
- [21] Salzmann T., Kaufmann E., Arrizabalaga J., Pavone M., Scaramuzza D., Ryll M. Real-Time Neural MPC: Deep Learning Model Predictive Control for Quadrotors and Agile Robotic Platforms. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2023;8(4):2397-2404. <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3246839>
- [22] Nguyen K., Schoedel S., Alavilli A., Plancher B., Manchester Z. TinyMPC: Model-Predictive Control on Resource-Constrained Microcontrollers. In: 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Yokohama, Japan: IEEE Press; 2024. p. 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICRA57147.2024.10610987>
- [23] Rodriguez J., et al. Latest Advances of Model Predictive Control in Electrical Drives – Part II: Applications and Benchmarking with Classical Control Methods. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022;37(5):5047-5061. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3121589>
- [24] Harbi I., et al. Model-Predictive Control of Multilevel Inverters: Challenges, Recent Advances, and Trends. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2023;38(9):10845-10868. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3288499>
- [25] Sotnikova M.V., Veremey E.I. Dynamic Positioning Based on Nonlinear MPC. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013;46(33):37-42. <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00058>

Поступила 26.04.2024; одобрена после рецензирования 18.06.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Submitted 26.04.2024; approved after reviewing 18.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.



Об авторе:

Севостьянов Руслан Андреевич, ассистент кафедры компьютерных технологий и систем факультета прикладной математики – процессов управления, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5783-6931>, sevostyanov.ruslan@gmail.com

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the author:

Ruslan A. Sevostyanov, Assistant of the Chair of Computer Applications and Systems, Faculty of Applied Mathematics and Control Processes, Saint-Petersburg State University (7/9 Universitetskaya Emb., St Petersburg 199034, Russian Federation), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5783-6931>, sevostyanov.ruslan@gmail.com

The author has read and approved the final manuscript.

