

5. Beni G. *From swarm intelligence to swarm robotics*. *Swarm Robotics Workshop*, Springer, 2004.
6. Dorigo M., Birattari M., Blum C. *Ant colony optimization: New variations on themes*. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006. Vol. 1(4), pp. 28–39.
7. Khatib O. *Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots*. *The International Journal of Robotics Research*, 1986. Vol. 5(1), pp. 90–98.
8. Koren Y., Borenstein J. *Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation*. *IEEE Conference on Robotics and Automation*, 1991. pp. 1398–1404.
9. Ge S. S., Cui Y. J. *New potential functions for mobile robot path planning*. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000. Vol. 16(5), pp. 615–620.
10. Koenig N., Howard A. *Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator*. *IEEE/RSJ IROS*, 2004.
11. Quigley M. et al. *ROS: an open-source Robot Operating System*. *ICRA Workshop*, 2009.
12. Hubaux J. P. *Securing critical infrastructure with autonomous systems*. *IEEE Security & Privacy*, 2020. Vol. 18(4), pp. 44–52.

UDK 621.791

Bryhyda M., Khomyuk V., Piontkevych O. (*Vinnytsia National Technical University, Ukraine*).

APPLICATION OF A DIGITAL TWIN OF A ROBOTIC WELDING COMPLEX FOR TORCH TRAJECTORY OPTIMIZATION

Abstract: *The study is devoted to the application of digital twin technology to improve the efficiency of robotic welding complexes in modern mechanical engineering. The transition from traditional robot programming by teaching to virtual simulation in CAD/CAE environments is substantiated as a key factor in reducing production downtime and increasing technological flexibility. A method for optimizing the trajectory of the welding torch is proposed based on minimizing the welding cycle time and automatic collision detection during motion simulation. The digital twin model enables accurate reproduction of the robot kinematics, including dynamic constraints such as acceleration and inertial effects. Simulation results demonstrate improved trajectory smoothness and reduced velocity variation, which is essential for ensuring uniform weld quality. The implementation of virtual modeling allows early detection of programming errors and eliminates the risk of equipment damage. The approach significantly reduces setup time and enhances operational safety, confirming the effectiveness of digital twin integration into robotic welding systems.*

Keywords: *digital twin; robotic welding; trajectory optimization; CAD/CAE; collision detection; industrial robot; welding torch; cycle time.*

Анотація: *Робота присвячена застосуванню технології цифрового двійника для підвищення ефективності роботизованих зварювальних комплексів у сучасному машинобудуванні. Обґрунтовано доцільність переходу від традиційного програмування роботів методом навчання до віртуального моделювання у середовищах CAD/CAE як ключового чинника зменшення простоїв виробництва та підвищення гнучкості*

технологічних процесів. Запропоновано метод оптимізації траєкторії руху зварювального пальника, що базується на мінімізації тривалості зварювального циклу та автоматичному виявленні колізій під час симуляції руху. Цифровий двійник дозволяє точно відтворювати кінематику робота з урахуванням динамічних обмежень, зокрема прискорень та інерційних навантажень. Результати моделювання демонструють підвищення плавності руху та зменшення варіації швидкості, що є критично важливим для забезпечення рівномірної якості зварного шва. Використання віртуальної моделі дає змогу виявляти помилки програмування на ранніх етапах та усувати ризик пошкодження обладнання.

Ключові слова: цифровий двійник; роботизоване зварювання; оптимізація траєкторії; CAD/CAE; виявлення колізій; промисловий робот; зварювальний пальник; цикл.

Statement of the problem and its connection with scientific and practical works. Robotic welding is a key element of modern mechanical engineering, operating under conditions of high intensity and increased requirements for the accuracy and stability of technological processes [1, 2, 3]. Traditional methods of programming welding robots by direct teaching of the manipulator require significant time consumption [4, 5], suspension of the production process, and the involvement of highly qualified personnel [6, 7, 8].

In this regard, the application of digital twins [9, 10] is highly relevant, allowing the transfer of the programming and debugging stage into a virtual CAD/CAE environment [11, 12, 13]. This approach ensures a reduction in production preparation time and increases the operational safety of welding equipment.

The main purpose of the study is to evaluate the effectiveness of using digital twins of a robotic welding complex to optimize the trajectory of the torch.

Presentation of the main material of the research. The digital twin is based on the creation of an accurate geometric model of the robotic welding complex (Figure 1), which includes a manipulator, a welding torch, a platform, and technological equipment. The assembly of the twin and the research results were performed in the SOLIDWORKS environment. To analyze the motion, collision detection algorithms were applied, which determine the minimum distances between system elements during the simulation process.

A 6-axis industrial robot Fanuc Arc Mate 120iD, specifically designed for arc welding, was chosen as the primary equipment for performing welding operations. The Abicor Binzel ABIROB W500 welding torch model was selected. The Austrian Fronius TPS/i series equipment was chosen as the welding power source for integration with Fanuc. For wire feeding, a Fronius WF 25i Robacta Drive mechanism is used, with the wire being fed from a Marathon Pac, which is also located on the platform. The Marathon Pac is a

high-capacity continuous wire feeding system. The platform provides linear movement of the industrial robot with equipment up to 3 m [14].

Unlike static approaches, the use of a digital twin allows taking into account accelerations, inertial loads, and kinematic constraints of the manipulator. In addition, the simulation made it possible to avoid kinematic singularities, where the robot loses a degree of freedom, which often occurs during the manual teaching of complex seams.

Instead of a direct comparison with traditional methods, the effectiveness of the developed digital twin based on the Fanuc Arc Mate 120iD was evaluated through iterative simulation in a CAD/CAE environment. The optimization of the cycle time T_{cycle} is based on minimizing the total welding time and idle movements:

$$T_{cycle} = \sum (L_{weld} / v_{weld}) + \sum (L_{idle} / v_{idle}), \quad (1)$$

where L_{weld} is the total length of the welding seams; L_{idle} is the length of the idle trajectories; v_{weld} and v_{idle} are the respective movement speeds of the welding torch.

By using the T_{cycle} minimization algorithms according to formula (1), a trajectory was calculated that takes into account not only the seam length L_{weld} but also the dynamic constraints of the manipulator – acceleration and inertial loads. This allowed achieving high smoothness of motion, confirmed by a low coefficient of velocity variation (at the level of 4.8%), which is critical for ensuring uniform penetration depth.

The introduction of the virtual platform model (with a stroke of up to 3 m) and Fronius wire feeding mechanisms allowed for a comprehensive analysis of the reachability zones. Collision detection algorithms automatically identified potential collision points of the torch with technological equipment at the development stage, which in real conditions guarantees a zero probability of damaging expensive equipment.

Based on the simulation of complex trajectories, it was established that the virtual setup stage takes about 3.2 hours. This indicates the high efficiency of transferring programming from the physical workshop to the virtual environment, as it allows preparing control programs without stopping the production process.

The use of the digital twin allows taking into account the kinematic features of the 6-axis system, ensuring the optimal orientation of the ABIROB W500 torch relative to the weld pool throughout the entire trajectory.

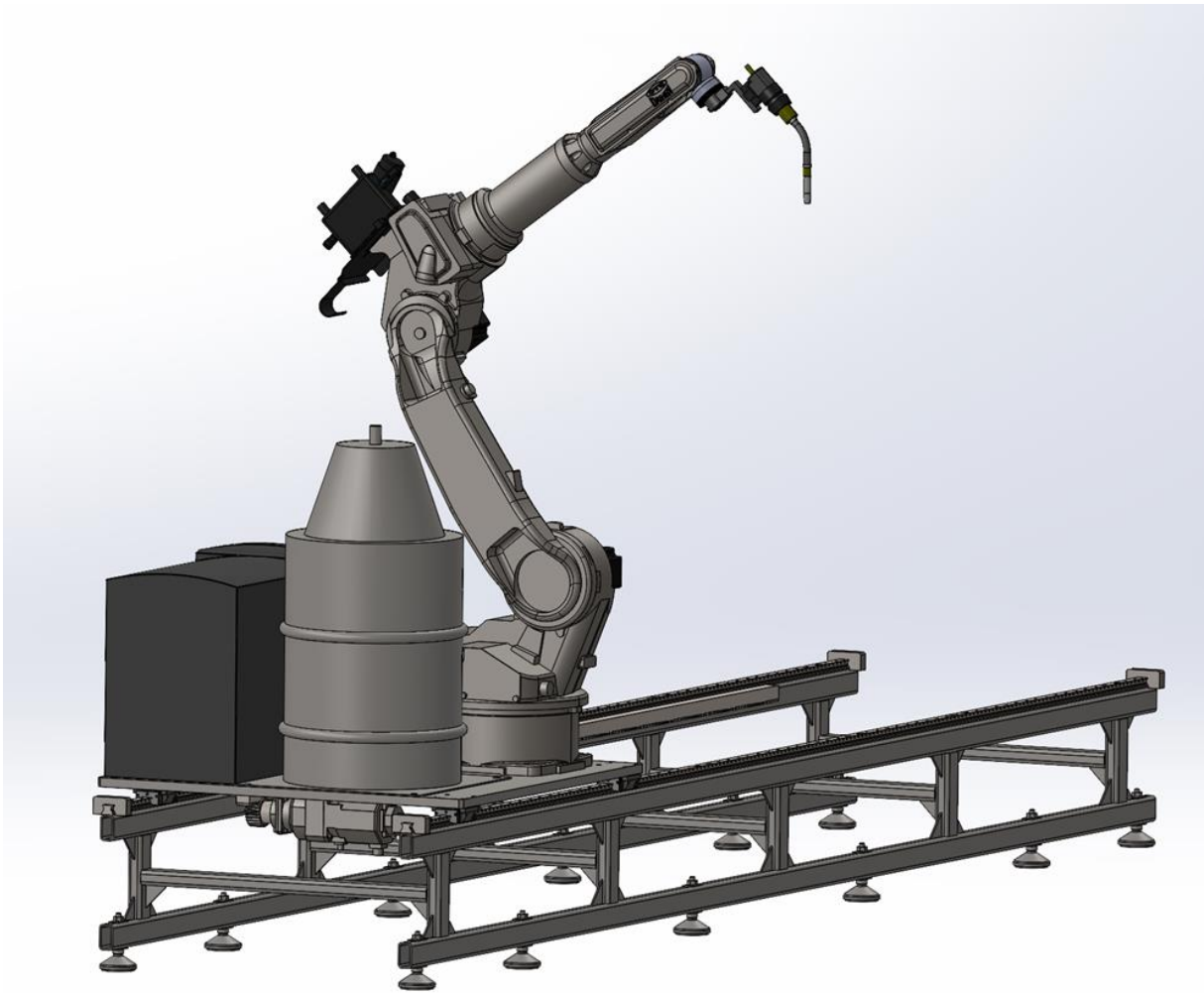


Fig. 1. Three-dimensional model of the welding complex

The obtained data demonstrate that the application of virtual models allows detecting programming errors at early stages. Ignoring the simulation stage leads to significant risks of damaging expensive technological equipment. The main economic effect of the implementation is the elimination of downtime of the robotic complex during the development of new technological programs.

Conclusion. The paper implements an approach to optimizing a robotic welding complex using digital twin technology. The integration of CAD/CAE systems into the production preparation process allows reducing programming time, eliminating collisions, and shortening the duration of the welding cycle.

The obtained results justify the feasibility of introducing digital twins in modern mechanical engineering to increase the efficiency, safety, and quality of welded structures.

REFERENCES

1. Mohanraj R., Balaji S. N. *Digital Twin Technology: A Comprehensive Review of Modeling, Applications, Challenges and Future Directions in Complex System Integration*. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2025. 26 p. <https://doi.org/10.1007/s11831-025-10397-3>
2. Kovarikova Z., Duchon F., Trebula M., Nagy F., Dekan M., Labat D., Babinec A. *Prototyping an intelligent robotic welding workplace by a cyber-physic tool*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023. No. 125(9), pp. 4855-4882. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10986-1>

3. Піонткевич О.В. Про лазерний технологічний комплекс на машинобудівному підприємстві / О. В. Піонткевич, С. І. Сухоруков, О. В. Сердюк, В. М. Домославський // Вісник машинобудування та транспорту, 2022. № 16(2). С. 96-100. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-96-100>
4. Biesinger F., Kraß B., Weyrich M. A survey on the necessity for a digital twin of production in the automotive industry, in Proc. IEEE 23rd Int. Conf. Mechatronics Technol. (ICMT), 2019, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICMECT.2019.8932144>
5. Hägele M., Nilsson K., Pires J.N., Bischoff R. Industrial robotics. Springer Handbook of Robotics, Springer, 2016. pp. 1385-1422. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_54
6. Villani V., Pini F., Leali F., Secchi C. (). Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. Mechatronics, 2018. No. 55, pp. 248-266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
7. Березюк О. В. Використання віртуального лабораторного стенда для проведення лабораторної роботи «Дослідження ефективності освітлення у виробничих приміщеннях». Педагогіка безпеки, 2017. Вип. 2(1), С. 35-39. <https://doi.org/10.31649/2524-1079-2017-2-1-35-39>
8. Muller F., Koch M., Hasse A. User Study to Validate the Performance of an Offline Robot Programming Method That Enables Robot-Independent Kinesthetic Instruction through the Use of Augmented Reality and Motion Capturing. Robotics, 2024. No. 13(3), 35. <https://doi.org/10.3390/robotics13030035>
9. Kritzing W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. Ifac-PapersOnline, 2018. No. 51(11), pp. 1016-1022.
10. Ковалевський С. В. Швидкодійні моделі штучного інтелекту для реального часу в цифрових двійниках процесів обробки металів тиском. Materials working by pressure, 2025. Вип. 1 (54), С. 141-146. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2025-1\(54\)141](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2025-1(54)141)
11. Піонткевич О. В., Березюк О. В., Лозінський Д. О., Кавецький О. І. Застосування CAD/CAE-системи Autodesk Inventor для удосконалення фрезерногравірувального верстата з ЧПК. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Вінниця: ВНТУ, 2025. Вип. 1. С. 1–9. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-1-178-186>
12. Петров О. В., Піонткевич О. В., Буда А. Г., Коломієць В. С. Застосування CAD/CAE-системи Solidworks у задачах аналізу міцності деталей верстатних пристосувань. Вісник машинобудування та транспорту. Вінниця : ВНТУ, 2024. Вип. 19. № 1. С. 95–102.
13. Піонткевич О. В., Сухоруков С. І., Петров О. В., Сердюк О. В. «Комп'ютеризовані системи проєктування» для здобувачів вищої освіти зі спеціальності «Прикладна механіка»: електронний лабораторний практикум. Вінниця : ВНТУ, 2025. 142 с.
14. Соколовський М. Є. Удосконалення автоматизованого приводу модуля лінійних переміщень з використанням CAD/CAE-систем: магістерська кваліфікаційна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» / М. Є. Соколовський. Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2025. 112 ст.

UDC 004.891:001.8:528.94

Gyula Mester¹, Janos Santa² (¹University of Szeged, Szeged, Hungary;
²Metropolitan University, Belgrade, Serbia).

THE RANKING LIST OF HUNGARIAN ROBOTICS RESEARCHERS 2026

Abstract: This scientific paper presents the 2026 ranking of Hungarian researchers in the field of robotics based on bibliometric indicators. The primary criterion for ranking is the h-index, which reflects both productivity and citation impact of researchers. In cases where