

новационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы XI Международной научно-практической конференции / ред.кол.: А. Р. Околов (гл.ред.) [и др.] Минск : Бизнесофсет, 2023. – С. 107–109.

2. Redmon, J. YOLO9000: Better, Faster, Stronger [Electronic resource] / J. Redmon, A. Farhadi // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017. – Mod of access: <https://arxiv.org/pdf/1612.08242.pdf>. Date of access: 20.10.2023.

3. Ren, S. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks [Electronic resource] / S. Ren [and all]: Computing Research Repository (CoRR), 2015. – Mod of access па: <https://arxiv.org/abs/1506.01497>. Date of access: 20.10.2023.

4. Bochkovski, A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection [Электронный ресурс] / A. Bochkovski [and all]: Computing Research Repository (CoRR), 2020. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/2004.10934.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. Яз. Англ. Дата доступа: 20.10.2023.

УДК 621.7.043

## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЦЕНТРА РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА В ПРОЦЕССЕ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

**Сазонникова Н.А., Илюхин В.Н., Петров И.Н., Косов Г.А., Азизов М.Э.**

Самарский Университет, Самара, Российская Федерация

В современных условиях при производстве изделий аэрокосмической техники возрастают требования к гибкости производства и возможности быстро реагировать на требования заказчика. Большие возможности открывают современные информационные технологии, реализуемые с помощью автоматизированных технологических комплексов. Одним из наиболее перспективных технологических процессов является инкрементальное формообразование с использованием промышленных роботов-манипуляторов. Такой подход позволяет отказаться от традиционной штамповой оснастки и оперативно переналаживать производство при освоении новых изделий. [1,2]. Вместе с тем, для успешного внедрения технологии инкрементального формообразования необходимо обеспечить требуемую точность выполнения размеров изделий. Современные роботы-манипуляторы характеризуются высокой повторяемостью перемещений, однако точность перемещений не всегда является достаточной. Решить эту проблему позволяет включение в состав автоматизированного комплекса лазерного трекера. Для повышения точности перемещений робота-манипулятора может проводиться его калибровка перед началом выполнения работы, а также применяется компенсация перемещений робота в процессе выполнения технологической операции [3,4,5].

Лазерный трекер представляет собой следящую триангуляционную измерительную систему, работающую в реальном масштабе времени [4-6]. Для обеспечения требуемой точности измерения необходимо выбрать схему измерений, отвечающую условиям данного технологического процесса и определить влияние параметров измерительной системы на результаты оценки перемещений робота.

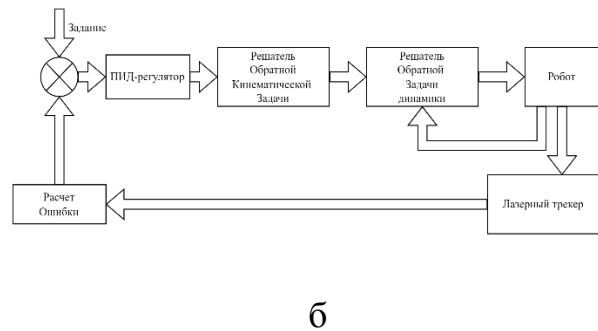
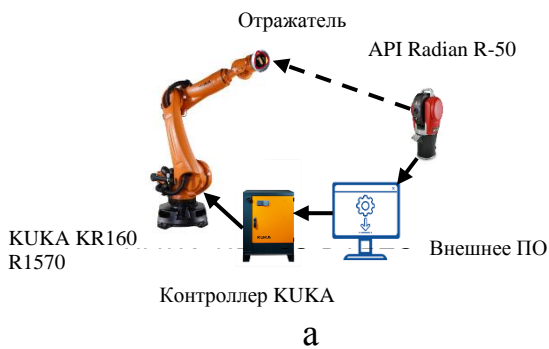
Так как технология калибровки промышленного робота не может учесть все факторы, приводящие к отклонению фактической траектории перемещения инструментального центра робота-манипулятора от заданной, целесообразным является включение лазерного трекера в состав автоматизированного технологического комплекса через систему обратной связи. Это позволяет проводить измерения фактического положения инструментального центра в реальном масштабе времени и сформировать корректирующий сигнал для компенсации отклонения инструментального центра робота от заданного положения. При этом достигаемая точность перемещений по результатам анализа зарубежных источников составляет 200 мкм, а их повторяемость – 100 мкм [7 -12]. В России публикации по данной тематике практически отсутствуют.

В работах [7,13, 14] показано, что компенсацию можно проводить при использовании как контроля по трем степеням свободы, так и шести. При этом удастся повысить точность выполнения технологической операции до 100 мкм. Во втором случае коррекция может осуществляться более плавно, но с меньшей частотой передачи данных от лазерного трекера к роботу-манипулятору. При этом отсутствует разработки систем компенсации в реальном времени отклонения от заданной траектории для процесса инкрементального формообразования.

Анализ существующих работ показал, что разработку системы компенсации отклонений инструментального центра робота-манипулятора от заданной траектории следует проводить с учетом индивидуальных особенностей технологического процесса: скорости перемещения по осям, кривизна траектории, направление приложения усилий инструмента. Процесс инкрементального формообразования характеризуется невысокими скоростями перемещения инструмента, траектории, как правило, являются криволинейными, а направление приложения усилия совпадает с осью пуансона.

Было проведено численное моделирование в программном пакете MATLAB системы компенсации отклонений инструментального центра от заданной траектории с учетом действующих усилий (рис.1 а и б). На систему оказывали влияние две случайные величины: неопределенность измерений лазерного трекера и стабильность повторяемости позиции робота манипулятора. Обе величины считались нормально распределенными в диапазонах, которые были взяты из паспортов устройств.

В ходе моделирования сначала были получены настроенные траектории для подбора ПИД-регулятора. Затем рассчитана ошибка позиционирования для линейных и криволинейных траекторий (рис. 2). Из результатов, полученных при проведении имитационного моделирования, следует, что компенсация дуговых траекторий более сложная задача, чем линейных, начальный заброс при компенсации по осям X и Y превышает исходную точность робота, так как величина компенсации по оси Y и Z зависит, от рассчитанной компенсации по оси X.

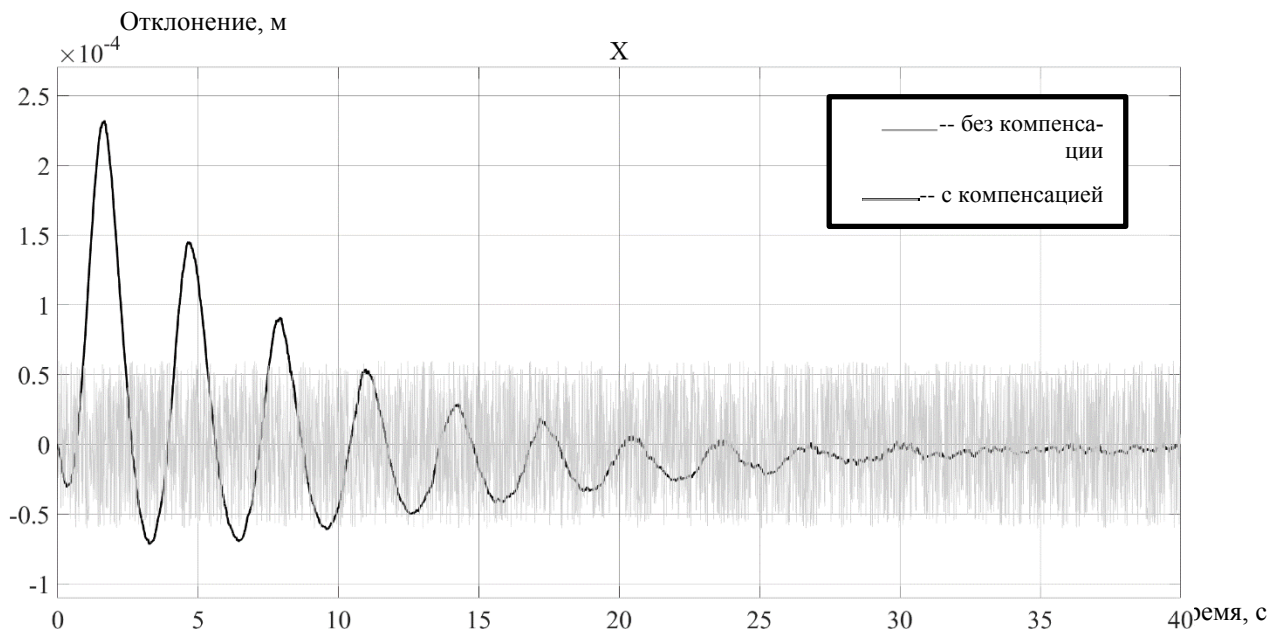


а - Основные элементы системы;

б- Схема системы управления

положением инструментального центра робота.

**Рисунок 1. Система компенсации отклонений инструментального центра робота-манипулятора в ходе выполнения технологической операции**



**Рисунок 2 - Сравнительное изображение ошибки позиционирования по оси X при прохождении тестовой дуговой траектории**

Это значит, что при компенсации ошибки по одной из осей, неотвратно будет корректироваться и компенсация по другим осям, что осложняет задачу регулирования, но по оси Z, где была введена статическая погрешность видны существенные улучшения, кроме того, установившаяся точность все равно оказывается лучше точности без компенсации. Поэтому можно предположить, что на практике при применении такого алгоритма следует закладывать в траекторию некоторое дополнительное расстояние сближения, при прохождении которого система управления придет в установившийся режим. В случае линейных траекторий максимальное отклонение позиции инструментального центра, обеспечиваемое системой управления в установившемся режиме работы, оказалась в пределах  $\pm 20$  мкм. Максимальная величина отклонения составила +15 мкм по верхней границе и -17 мкм по нижней. Максимальный период стабилизации системы управления был равен 10 с. В случае дуговых траекторий

максимальное отклонение позиции инструментального центра в установившемся режиме работы так же попало в пределы  $\pm 50$  мкм. Максимальная величина отклонения по верхней границе составила +16 мкм, по нижней границе -10 мкм. Максимальный период стабилизации системы был равен 40 с.

При проведении экспериментальных исследований по отработке системы компенсации отклонений инструментального центра робота-манипулятора от заданной траектории наиболее важными этапами работы являются: согласование систем координат лазерного трекера и робота, выбор программного пакета, используемого в качестве интерфейса для сопряжения лазерного трекера и робота-манипулятора, написание согласующей программы в Software Development Kit (SDK) в одном из программных пакетов, используемых для анализа результатов измерений лазерного трекера и формирования корректирующего сигнала. компенсация статической и динамической составляющих ошибки позиционирования. Общий вид экспериментальной установки показан на рис.3.



**Рисунок 3 – Общий вид экспериментальной установки для отработки системы компенсации отклонений инструментального центра робота-манипулятора от заданной траектории.**

На первом этапе осуществлялось экспериментальная отработка статической ошибки с использованием программного пакета LABVIEW. Осуществлялось перемещение по линейной траектории без приложения усилия, диапазон перемещений: линия 50 мм в плоскости XOY на высоте  $Z = 750$  мм с координатой  $Y = -790$ .  $X = (-200; -205)$ . Основные параметры эксперимента: скорость перемещения: 0,01 мм/с, частота обмена данными с лазерным трекером:  $\approx 10$  Гц, параметры фильтра нижних частот: 5 Гц, эксперимент проведен с трехкратным дублированием, отсчеты времени по шкале времени с интервалом 4 мс. Использовался пропорциональный регулятор с коэффициентом усиления 1. Статическая ошибка снизилась с 100 мкм до 60 мкм. При проведении эксперимента погрешность измерений не превышала  $\pm 15$  мкм. За счет подбора пропорционально-интегрального регулятора была выявлена область устойчивой работы системы компенсации отклонений. Однако, при работе по криволинейным тра-

екториям, запас устойчивости оказался невелик, особенно в тех точках окружности, где наблюдались максимальные радиальные биения.

На следующем этапе осуществлялась отработка программы на базе API\_SDK\_v4.7.20 для передачи данных с лазерного трекера к роботу-манипулятору. Сборка программы осуществлялась в Visual Studio 2022. Это позволило обеспечить частоту передачи данных до 250 Гц для работы системы коррекции и скорость выполнения технологической операции при работе по криволинейным и сложным траекториям до 30 мм/с.

Результаты выполнения тестовых траекторий показаны на рисунке 4.



Выполнение технологической операции при работе по криволинейной траектории

а



Выполнение технологической операции по сложной траектории

б

**Рисунок 4 – Выполнение тестовых траекторий**

Таким образом, разработана система компенсации отклонений инструментального центра робота манипулятора в процессе выполнения технологической операции инкрементального формообразования по криволинейным и сложным траекториям со скоростью перемещения до 30 мм/с и частоте передачи данных 250 Гц. Показана возможность выполнения обработки по криволинейным траекториям со скоростями, соответствующими условиям рассматриваемого технологического процесса при обеспечении точности обработки на уровне 50 мкм.

Результаты дальнейших исследований позволят создавать адаптивные системы управления качеством изготовления изделий аэрокосмической техники на базе промышленных роботов-манипуляторов и интеллектуальных измерительных систем с использованием лазерного трекера при выполнении технологических операций инкрементального формообразования изделий из металлических материалов, обработки композитных материалов и клепки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. S. Arshad, A. Rashid, A. Melander. "Single point incremental forming. A study of Forming Parameters, Forming limits and Part accuracy of Aluminium 2024, 6061 and 7475 alloys." KTH Royal Institute of technology Stockholm, June 2012, 102p.
2. G. Medina - Sanchez, E. Torres – Jimenez, R. Lopez – Garcia, R. Dorado – Vicente, R. Cazalla – Moral. "Temperature influence on Single Incremental Forming of PVC parts." University of Jaen, Spain, 2017, pp.335–342.
3. L. Li, C. Zhao, C. Li, S. Qin. "End Position Detection of Industrial Robots Based on Laser Tracker." *Instrumentation Measure Métrologie*, Vol. 18, No. 5, October, 2019, pp. 459-464
4. X. Lua, T. Jiang. "Working pose measurement and quality evaluation of rotary drilling rig based on laser tracker." *Optik*, No. 187, 2019, pp. 311 - 317.
5. K. Kamali, A. Joubair, A. Bonev, P. Bigras. "Elasto-geometrical Calibration of an Industrial Robot under Multidirectional External Loads Using a Laser Tracker." *IEEE Trans Robotics*, Canada, 2016.
6. A. Nubiola, A. Bonev. "Absolute calibration of an ABB IRB1600 robot using a laser tracker." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, No. 29(1), February 2013, pp.236-245.
7. C. Moeller, H. Schmidt, P. Koch, C. Boehlmann. "Real Time Pose Control of an Industrial Robotic System for Machining of Large Scale Components in Aerospace Industry Using Laser Tracker System" *SAE Int. J. Aerospace*, No. 10(2), September 2017, pp.134-145.
8. T. Kubela, A. Pochyly, V. Singule. "Assessment of Industrial Robots Accuracy in relation to Accuracy Improvement in Machining Processes." *IEEE PEMC*, September 2016, pp. 360-378.
9. Shi X., Zhang F., Qu X., Liu B. An online real-time path compensation system for industrial robots based on laser tracker, *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2016. – V. 13(5).
10. Wang Z., Zhang R., Keogh P. Real-Time Laser Tracker Compensation of Robotic Drilling and Machining, *J. Manuf. Mater. Process.* – 2020. – V. 4. – P. 79.
11. Dung L.-T., Kang H.-J., Ro Y.-S. Robot manipulator modeling in Matlab-SimMechanics with PD control and online gravity compensation, *International Forum on Strategic Technology*. – 2010. – P. 446-449.
12. Asif, S.;Webb, P. Realtime Calibration of an Industrial Robot. *Appl. Syst. Innov.* **2022**, 5, 96. <https://doi.org/10.3390/asi5050096>
13. Mitchell R. Woodside\*, Joseph Fischer, Patrick Bazzoli, Douglas A. Bristow, Robert G. Landers . A Kinematic Error Controller for Real-Time Kinematic Error Correction of Industrial Robots *Procedia Manufacturing* 53 (2021) 705–715.
14. Wang Z., Zhang R., Keogh P. Real-Time Laser Tracker Compensation of Robotic Drilling and Machining, *J. Manuf. Mater. Process.* – 2020. – V. 4. – P. 79.