

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ РОБОТОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ И АНАЛИЗ ИХ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ

В.А. Глазунов

Институт машиноведения им. А.А. Благодравова РАН
Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4
E-mail: vaglznv@mail.ru

А.А. Романов

Институт машиноведения им. А.А. Благодравова РАН
Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4
E-mail: dru.ny@mail.ru

Ключевые слова: робот параллельной структуры, системы для аддитивных технологий, динамическая точность.

Аннотация: Робототехнические системы находят все более широкое применение в различных областях техники, имеются в виду технологические, медицинские, транспортные системы, тренажеры. Особое место в данных системах занимают механизмы параллельной структуры, это обусловлено конструктивными особенностями данных механизмов. Параллельная структура обеспечивает наибольшую жесткость и точность позиционирования выходного звена, поскольку воспринимает нагрузку как пространственную ферму, однако для механизмов данного класса присущи сложности при создании системы управления и согласования приводов. В данной работе рассматриваются новые технические решения в данной области, а также вопросы точности отработки требуемого закона движения.

1. Введение

Робототехнические системы являются одним из эффективных средств решения многих проблем, что обуславливает нарастающие тенденции их применения в различных областях техники, имеются в виду технологические, манипулирующие, медицинские, транспортные системы, тренажеры [1-8].

В Институте машиноведения имени А.А. Благодравова РАН в последнее время были синтезированы новые устройства параллельной структуры. Механизмы данного класса за счет своей конструкции воспринимают нагрузку как пространственные фермы, что обеспечивает высокую грузоподъемность, жесткость и точность. Данные показатели обеспечивают применимость данных механизмов для аддитивных технологий, для проведения медицинских операций на позвоночнике или путем лапароскопии в брюшной полости человека, для изготовления керамических печатных плат, а также в множестве других сфер деятельности человека.

Механизм робота, предназначенного для аддитивных технологий (рис. 1), имеет два модуля. Один из них соответствует плоской структуре и обладает тремя степенями свободы. Далее к этой структуре присоединена еще одна вращательная пара. Второй модуль представляет собой линейный привод и направляющие, по которым

перемещается обрабатываемое изделие. Оказалось, что подобный механизм [9] (с некоторыми изменениями) может быть использован также для операций на позвоночнике человека.

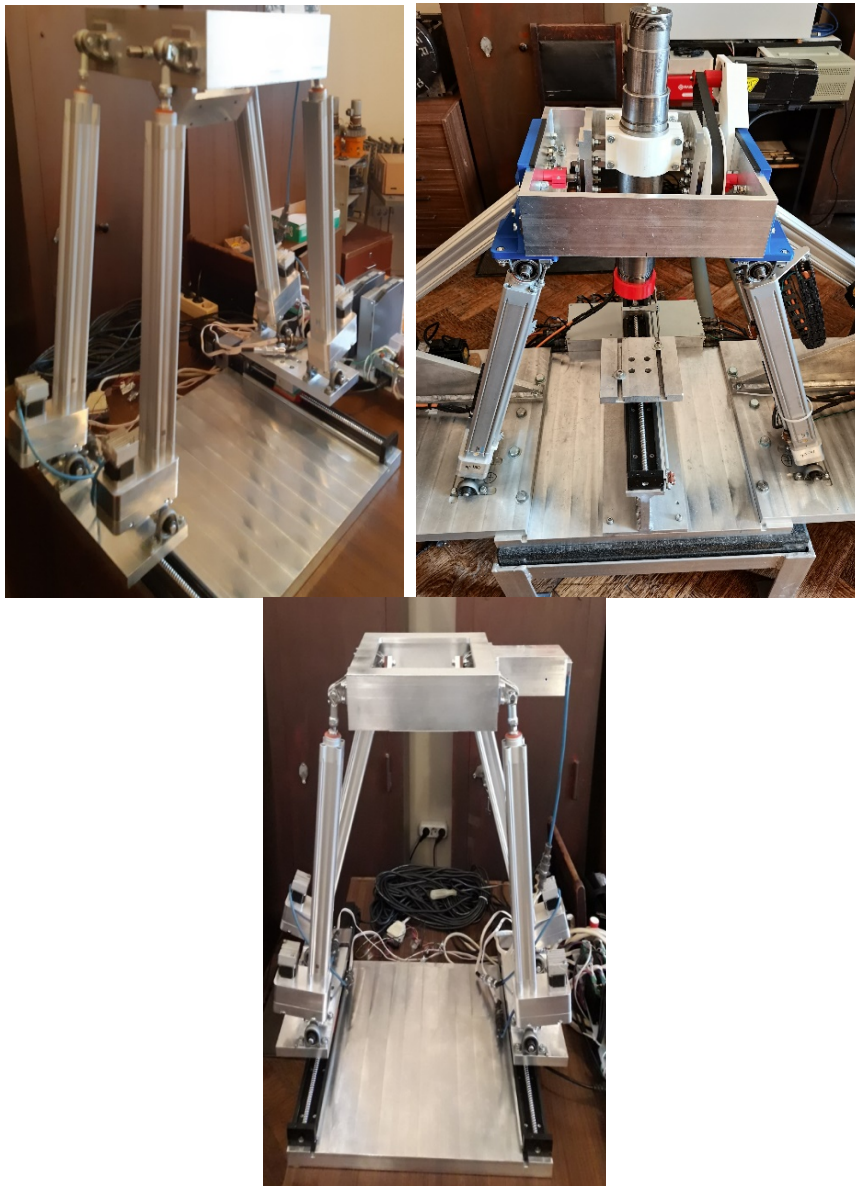


Рис. 1. Механизм для аддитивных технологий.

Механизм робота, обладающий свойством постоянства точки ввода рабочего инструмента, предназначенный для операций лапароскопических операций в брюшной полости человека (рис. 2) [10].

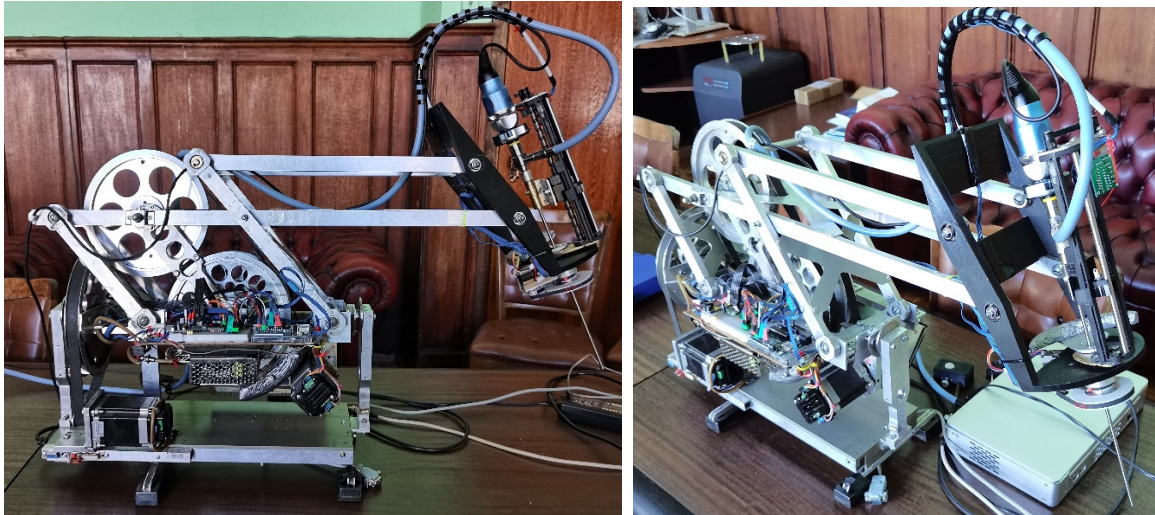


Рис. 2. Механизм с постоянной точкой ввода.

Постоянство точки ввода рабочего инструмента достигается за счет применения двух шарнирных параллелограммов в кинематической цепи. Выходное звено совершает движения, соответствующие движениям инструментов, применяемых при лапароскопических операциях. Также представленное устройство может быть применено для перемещения камеры, необходимой при проведении лапароскопических операций. В данном случае это может быть альтернативой имеющимся зарубежным аналогам.

Аналогичный механизм параллельной структуры, предназначенный для проведения лапароскопических операций в брюшной полости человека (рис. 3), обладает четырьмя степенями свободы, а также свойством сохранения постоянства точки ввода инструмента [11].

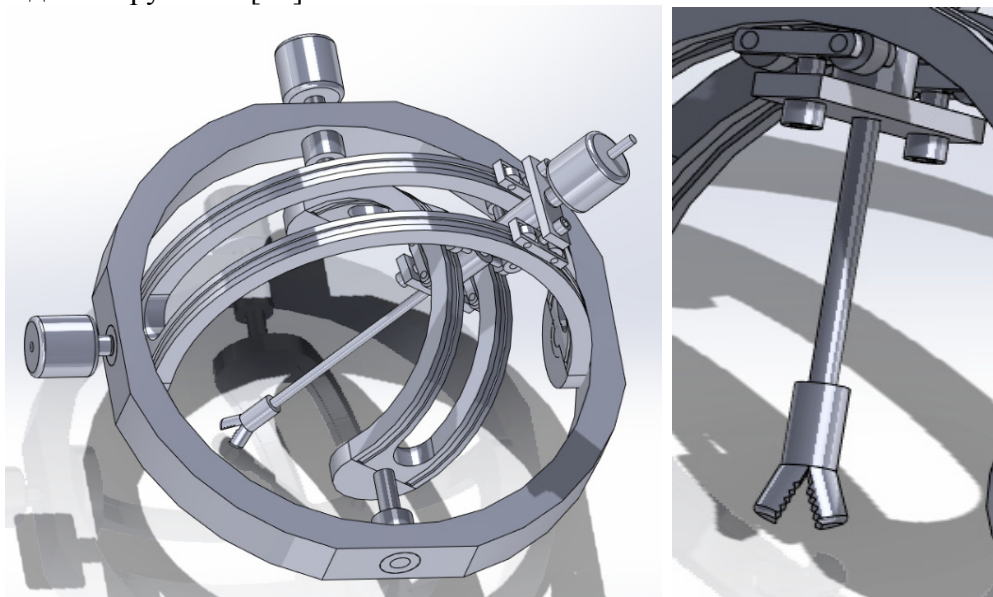


Рис. 3. Механизм с дугами направляющими, обеспечивающий постоянство точки ввода.

Постоянство точки ввода рабочего инструмента в данном случае обеспечивается за счет пересечения осей вращения дугообразных направляющих и выходного звена в одной точке, данная точка и будет являться точкой ввода. Представленный механизм также может быть применен для проведения нейрохирургических операций.

Механизм робота, предназначенного для изготовления керамических печатных плат (рис. 4), содержит четыре кинематические цепи и представляет собой модифицированный механизм Delta [12].

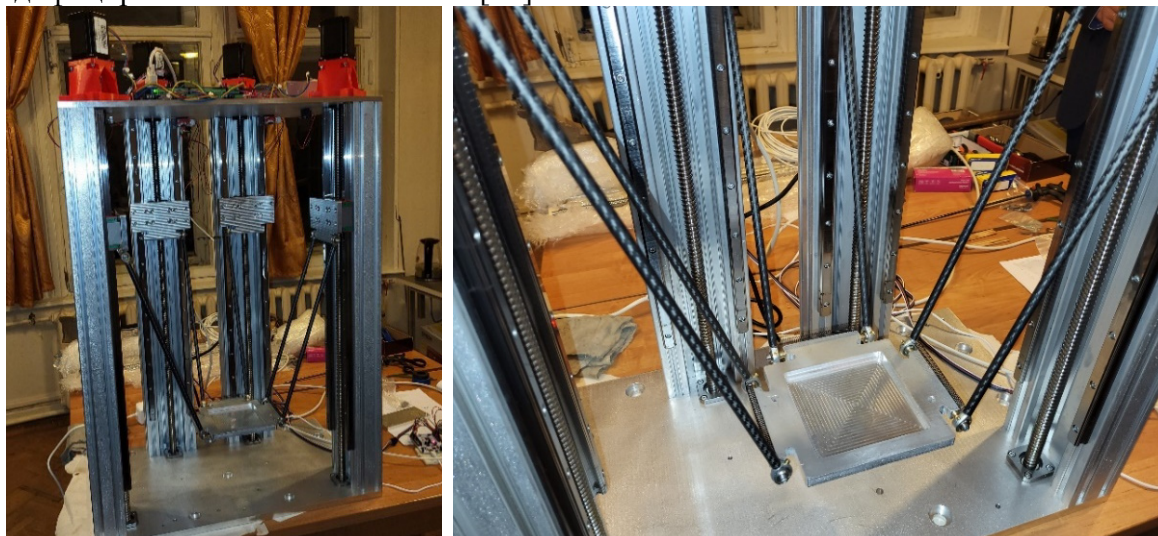


Рис. 4. Механизм для изготовления керамических печатных плат.

Недостатком прототипа является отсутствие вращательных степеней свободы выходного звена. Решением данного вопроса является усовершенствование конструкции, обеспечивающей возможность выходному звену осуществлять поворот вокруг горизонтальной оси, путем добавления четвертой кинематической цепи. Данная модификация важна для изготовления керамических печатных плат, и уже применяется на практике.

2. Динамическая точность

Что касается динамической точности робототехнических систем рассматриваемого класса, то здесь принимаются во внимание алгоритм управления, соответствие модели реальному механизму, наличие трения, упругость звеньев, ограничение мощности двигателей и др.

Применяется алгоритм управления, минимизирующий ошибку по положению, скорости и ускорению выходного звена. Одним из важнейших факторов при динамическом анализе является соответствие реального механизма и его математической модели. Однако незначительные отклонения могут быть компенсированы при правильном подборе коэффициентов обратных связей. Также стоит учитывать мощность используемых приводов, поскольку ее недостаток может значительно повлиять на динамическую точность.

Рассмотрим динамический анализ на примере механизма с дугообразными направляющими, обеспечивающего постоянство точки ввода (Рис. 3).

Для проведения полноценного динамического анализа необходимо учитывать упругие силы и деформации стержня, на котором расположен рабочий инструмент, поскольку данный стержень является наиболее склонной к деформациям и упругим колебаниям деталью. Самой нагруженной частью данного механизма будет отрезок стержня, расположенный от точек опоры до рабочего органа.

Движение выходного звена будем считать возбудителем вибраций и деформации. Далее следует учесть полученные деформации в имеющейся математической модели движения механизма:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \ddot{x}_t + k_1 \cdot (\dot{x}_t - (\dot{x} - \dot{f}_\Sigma)) + k_0 \cdot (x_t - (x - f_\Sigma)), \\ \ddot{y} = \ddot{y}_t + k_1 \cdot (\dot{y}_t - (\dot{y} - \dot{f}_\Sigma)) + k_0 \cdot (y_t - (y - f_\Sigma)), \\ \ddot{z} = \ddot{z}_t + k_1 \cdot (\dot{z}_t - (\dot{z} - \dot{f}_B)) + k_0 \cdot (z_t - (z - f_\Sigma)). \end{cases}$$

В ходе анализа были приняты следующие требуемые законы изменения абсолютных координат, скоростей и ускорений выходного звена и начальных условий:

$$x = y = z = 0,01 \cdot \sin(\omega \cdot t) + 0,1;$$

$$\alpha_0 = 0,13; \beta_0 = 0,12; \gamma_0 = 0,08; \dot{\alpha}_0 = \dot{\beta}_0 = \dot{\gamma}_0 = 0.$$

В ходе динамического анализа с учетом деформации выходного звена были получены функции изменения абсолютных координат, скоростей и ускорений выходного звена (рис. 5).

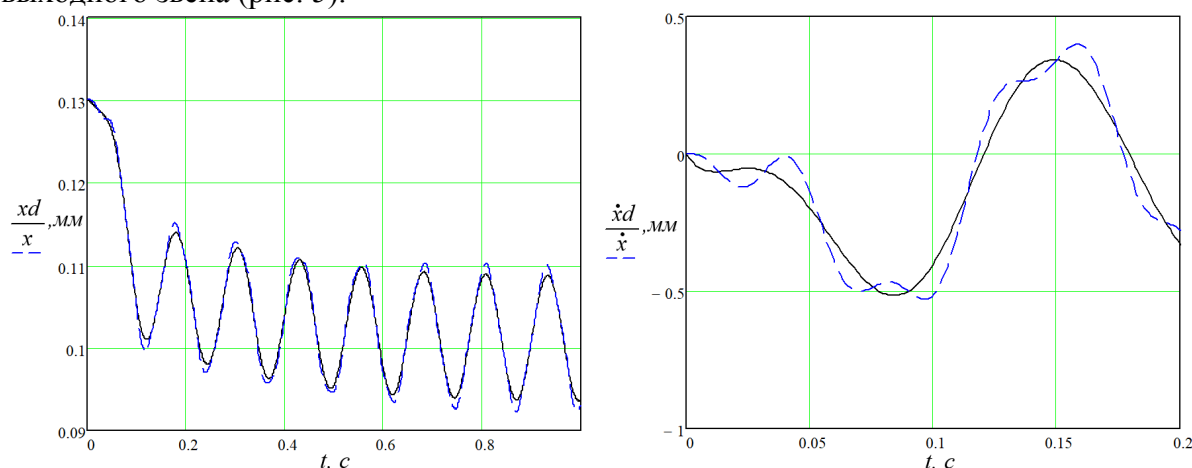


Рис. 5. Графики изменения абсолютных координат и скоростей выходного звена.

3. Заключение

Роботы параллельной структуры являются перспективным направлением для применения в разных отраслях, в том числе технологические, манипулирующие, медицинские, транспортные системы, тренажеры.

Одним из факторов, влияющих на динамическую точность (на ряду с трением, степенью соответствия механизма и математической модели и др.) является упругость выходного звена. Для анализа динамической точности с учетом упругости выходного звена применяется подход, в котором требуемое движение обуславливает характер упругих колебаний выходного звена. Численные и натурные эксперименты показали, что упругость выходного звена оказывает значительное влияние на динамическую ошибку механизмов параллельной структуры.

Список литературы

1. Caprariu A., Tucan P., Vaida C., Pisla A., Gherman B., Pisla D. Design Optimization of RAISE Parallel Robot for Lower Limb Rehabilitation // In: Okada M. (Ed.) Advances in Mechanism and Machine Science. IFToMM WC 2023. Mechanisms and Machine Science. Cham: Springer, 2023. Vol 147. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45705-0_3.
2. Chen Z.Y., Chang J.Y. Development of a Motion-Decoupled Exoskeleton Finger for Hand Rehabilitation Utilizing Double Arc-Slot and Four-Bar Mechanism // In: Okada M. (Ed.) Advances in Mechanism and Machine Science. IFToMM WC 2023. Mechanisms and Machine Science. Cham: Springer, 2023. Vol. 147. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45705-0_8.

3. Jahn P., Gregor P., Raatz A. Movement Simulation and Analysis of a Compliant Parallel Robot Under Cryogenic Working Conditions // In: Okada M. (Ed.) *Advances in Mechanism and Machine Science*. IFToMM WC 2023. Mechanisms and Machine Science. Cham: Springer, 2023. Vol 148. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45770-8_86.
4. Lei Y., Jiang M., Sugahara Y., Takeda Y. Three-Actuated-DOF Parallel Continuum Robot with High Twisting Performance: Cosserat Rod-Based Kineto-Static Modeling and Simulation // In: Okada M. (Ed.) *Advances in Mechanism and Machine Science*. IFToMM WC 2023. Mechanisms and Machine Science. Cham: Springer, 2023. Vol 147. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45705-0_62.
5. Liao, C.Y., Shen F.R., Hsu Sh. Development of a Path-to-Follow Nozzle for Ultraviolet-Assisted Three-Dimensional Bioprinting Technology // In: Okada M. (Ed.) *Advances in Mechanism and Machine Science*. IFToMM WC 2023. Mechanisms and Machine Science. Cham: Springer, 2023. Vol 147. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45705-0_2.
6. Silva-Garces K.N., Torres-San Miguel C.R., Jimenez-Ponce F., Ceccarelli M. Design of Medical Robot for Stereotactic Surgery Based on a 3-RPS Parallel Mechanism. In: Okada M. (Ed.) *Advances in Mechanism and Machine Science*. IFToMM WC 2023. Mechanisms and Machine Science. Cham: Springer, 2023. Vol. 147. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45705-0_5.
7. Simionescu P.A. A Novel Class of Geared Manipulators of the SCARA Type // In Okada M. (Ed.) *Advances in Mechanism and Machine Science*. IFToMM WC 2023. Mechanisms and Machine Science. Cham: Springer, 2023. Vol. 148. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45770-8_35.
8. Zhang T., Zheng S., Liu C., Yang Y., Sun Z., Lam T.I. A Dual-Arm Nasopharyngeal Swab Manipulation Robot for Polymerization Chain Reaction Sampling // In: Okada M. (Ed.) *Advances in Mechanism and Machine Science*. IFToMM WC 2023. Mechanisms and Machine Science. Cham: Springer, 2023. Vol. 148. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45770-8_16.
9. Патент на полезную модель № RU 198352 U1 / Глазунов В.А., Гаврюшин С.С., Григорьянц А.Г., Антонов А.В., Шалюхин К.А., Ульянов Е.Е. Пространственный механизм параллельной структуры с пятью степенями свободы. Оп. 02.07.2020.
10. Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Глушков П.С., Левин С.В., Шалюхин К.А. Разработка новых инструментов для эндоскопических хирургических операций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. № 3. С. 70-77.
11. Духов А.В., Романов А.А., Ерофеев М.Н., Кравченко И.Н., Николаев А.В. Разработка и анализ механизма параллельной структуры, имеющего дугообразные направляющие с прорезями и постоянную точку ввода // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 1 (742). С. 31-38.
12. Laryushkin P.A. Experimental study of force transfer in a delta-type mechanism with four degrees of freedom // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021. Vol. 50, No. 5. P. 379-387.