

УДК 621.865.8

Анализ динамических погрешностей дельта-робота, вызванных упругой деформацией компонентов

Лянлян Чжу, С.С. Гаврюшин

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Analysis of the delta robot dynamic errors caused by the components elastic strain

Liangliang Zhu, S.S. Gavryushin

Bauman Moscow State Technical University

Дельта-робот — один из самых успешных и коммерциализированных видов параллельных роботов, широко применяемых в производстве и других сферах человеческой деятельности. К их преимуществам перед роботами другого вида относятся простота конструкции, высокая скорость выполнения операций и прочностная надежность. Вместе с тем появилась тенденция облегчения конструкции для повышения скорости выполнения операций. Однако это ведет к увеличению деформативности конструкции и появлению нежелательных колебаний, что влияет на точность позиционирования дельта-робота, существенно ограничивая его применение при проведении высокоскоростных и высокоточных операций. Рассмотрены погрешности позиционирования исполнительного органа дельта-робота, вызванные упругой деформацией его компонентов при проведении высокоскоростных операций захвата, размещения и перемещения объектов. На основе динамической модели параллельного робота с жестко-гибкими связями предложена расчетная методика, позволяющая оптимизировать конструкцию и существенно снизить нежелательные эффекты. Предлагаемая методика расчета построена на последовательном применении коммерческих (Hypermesh, Adams) и авторских программ, созданных в среде MATLAB. Планирование траектории дельта-робота выполнено с помощью модифицированной кривой трапецевидного ускорения, позволяющей получить рациональные законы изменения управляющих параметров для трех приводных рычагов во время движения механизма. Найденные решения задачи обратной кинематики использованы для моделирования динамики дельта-робота и расчета динамических погрешностей, вызванных упругой деформацией его компонентов. Приведены результаты расчетов, позволяющие минимизировать влияние упругой деформации дельта-робота на точность его позиционирования и повысить его производительность при выполнении технологических операций.

EDN: UNXJRI, <https://elibrary/unxjri>**Ключевые слова:** дельта-робот, моделирование динамики, жестко-гибкая связь, погрешность позиционирования, планирование траектории

Delta robot is one of the most successful and commercialized types of the parallel robots, they are widely used in manufacture and other various areas of the human activity. Their advantages over the other types of robots include design simplicity, high operation speed and strength reliability. At the same time, there appears a trend to lighten the design to increase the operation speed. However, this leads to an increase in structure deformability and undesirable oscillations, which affects the delta robot positioning accuracy and significantly limits its use in high-speed and high-precision operations. The paper considers positioning

errors in the delta robot executive tools caused by the elastic strain of its components during the high-speed operations of the object capture, placement and displacement. Based on a dynamic model of the parallel robot with rigid-elastic connections, it proposes a computation method making it possible to optimize the design and significantly reduce the undesirable effects. The proposed computation method is based on the consistent introduction of the commercial (Hypermesh, Adams) and proprietary software programs created in the MATLAB environment. The delta robot trajectory is planned using the modified curved trapezoidal acceleration, which makes it possible to obtain rational laws for changing the control parameters of the three drive levers during its motion. The found solutions to the inverse kinematics problem were used to simulate the robot dynamics and calculate the dynamic errors caused by elastic strain of its components. Computation results are presented making it possible to minimize the influence of the delta robot elastic deformation on its positioning accuracy and increase its productivity in the technological operations.

EDN: UNXJRI, [https://elibrary/unxjri](https://elibrary.unxjri)

Keywords: delta robot, dynamics simulation, rigid elastic coupling, positioning error, trajectory planning

Роботы с параллельной структурой стали одними из самых популярных в современной робототехнике благодаря относительно большой жесткости конструкции, высокой точности перемещения, значительной грузоподъемности, малой инерции движения и простому решению задачи обратной кинематики, которые недоступны для других видов роботов.

Эти качества имеют большое прикладное значение в областях применения, требующих высокой производительности, скорости и точности [1–5]. Дельта-робот (ДР), являющийся одним из наиболее успешных коммерциализированных параллельных роботов, широко применяется в таких сферах, как авиация, аэрокосмическая промышленность, складирование, логистика и хирургия [6–8].

Для изготовления ведомых штанг (ВШ) ДР обычно используют тонкие стержни из углеродного волокна легкого качества. Приводные рычаги (ПР), как правило, выполнены из углеродного волокна или алюминиевого сплава. Во время высокоскоростного перемещения упругая деформация компонентов будет оказывать большое влияние на точность позиционирования ДР. Традиционные методы динамического анализа для жестких роботов не могут точно отразить влияние упругой деформации стержня на точность позиционирования [9].

Многие публикации российских и зарубежных ученых посвящены углубленному исследованию погрешностей позиционирования и методов анализа динамики жестко-гибких соединений параллельных роботов. Так, в работе [10] для статического и модального анализа ПР робота использовано программное обеспечение

(ПО) ANSYS, чтобы проверить, соответствует ли максимальная деформация ПР требованиям точности ДР. В результате были изучены его динамические свойства.

Авторы статьи [11] сделали ПР и ВШ робота гибкими, применили ПО Adams для моделирования жестко-гибкой связи и изучили динамическую погрешность позиционирования параллельного робота для пересадки растений. Исследованию влияния статической жесткости на точность позиционирования параллельного манипулятора 6-RUS посвящена работа [12].

В статье [13] подвижная платформа робота рассмотрена как гибкое тело, изучено влияние жесткости системы на точность параллельного робота 3-PSP. Авторы работы [14] определили влияние гибкости суставов на робота и предложили оптимальный метод проектирования плоскопараллельных роботов с гибкими суставами, основанный на критериях кинематики и упругой динамики.

Приведенные результаты исследований предназначены главным образом для анализа погрешности позиционирования, вызванной упругой деформацией отдельного компонента или сустава параллельного робота определенного вида, в то время как влияние упругой деформации каждого компонента ДР на динамическую погрешность позиционирования всесторонне не рассматривалось.

Цель работы — исследование динамических погрешностей позиционирования ДР, вызванных упругой деформацией его компонентов.

В качестве объекта исследования выбран ДР WSC-600DJ компании Warsonco. Применен метод модальной суперпозиции для создания гиб-

ких тел в ПР и ВШ робота в программе Hypermesh. В среде MATLAB использована модифицированная кривая трапецевидного ускорения для планирования траектории ДР.

На основе данных, полученных в ПО Adams и MATLAB, проведено моделирование динамики робота как системы жестких тел, соединенных гибкими связями. Путем сравнения кривых моделирования динамики ДР получена динамическая погрешность исполнительного органа, вызванная гибкой деформацией компонентов робота.

Дельта-робот, как правило, состоит из неподвижно закрепленного основания, подвижной платформы, трех ПР и трех ВШ, составленных из параллелограмма. Три приводных двигателя закреплены на основании и связаны с тремя ПР вращательными парами. Параллелограммный замкнутый механизм соединен четырьмя сферическими парами, а активные рычаги и подвижная платформа — параллелограммным механизмом.

Три набора параллелограммных механизмов ограничивают направление движения подвижной платформы так, что она всегда была параллельна основанию. Для удовлетворения реальных потребностей ДР обычно оснащают телескопическим валом, который управляет вращением исполнительного органа, либо приводной двигатель устанавливают непосредственно на подвижную платформу, вследствие чего образуется четвертую ось ДР. Таким образом, ДР имеет четыре степени свободы. Трехмерная модель ДР WSC-600DJ компании Warsonco приведена на рис. 1.



Рис. 1. Трехмерная модель ДР WSC-600DJ компании Warsonco:

1 — основание; 2 — ПР; 3 — ВШ; 4 — четвертая ось;
5 — подвижная платформа

Создание динамической модели жестко-гибкой связи в среде Adams. Габаритные параметры ДР следующие: длина ПР — 253,67 мм; длина ВШ — 600 мм; диаметр описанного круга подвижной платформы — 119 мм; диаметр описанного круга основания — 269,6 мм. Трехмерную модель ДР импортировали в ПО Adams. В качестве материала основания и подвижной платформы выступал алюминиевый сплав, материал ПР и ВШ — углеродное волокно.

К механизму добавлялись кинематические пары, которые включали в себя фиксированную пару между землей и основанием, вращательные пары между основанием и ПР и сферические пары между ПР и ВШ, а также между ВШ и подвижной платформой. Когда направление силы тяжести устанавливалось перпендикулярным неподвижной платформе и вертикально направленным вниз, процесс динамического моделирования завершился.

Так как ПР и ВШ изготовлены из легкого углеродного волокна, во время высокоскоростного движения механизм будет генерировать большую инерционную силу, а гибкая деформация компонентов приведет к гибкой вибрации ДР, что окажет существенное влияние на точность его позиционирования. Чтобы уменьшить потерю точности позиционирования ДР, вызванную упругой деформацией компонентов при высокоскоростном движении, необходимо рассматривать ПР и ВШ как гибкие тела и анализировать динамику жестко-гибкой связи.

В среде Adams для представления упругости шатуна использована модальность, а его деформацию можно выразить линейной суперпозицией модальностей. Этот метод называют модальной суперпозицией. Для создания гибких тел для ПР и ВШ использовано ПО Hypermesh. В этом ПО материал определялся как углеродное волокно, затем сетка разделялась, и в местах соединений сустава создавались внешние точки соединения и жесткие зоны. Затем обработанная модель сохранялась как модально-нейтральный файл MNF, и достигалась гибкость компонентов ДР. В среде Adams ПР и ВШ заменены гибкими телами, а остальные части оставлены жесткими.

Чтобы изучить влияние ПР и ВШ на точность позиционирования ДР, динамические модели жестких тел (рис. 2, а), жестко-гибких связей с учетом гибкости ПР (рис. 2, б), ВШ (рис. 2, в), ПР и ВШ (рис. 2, г) моделировали отдельно.

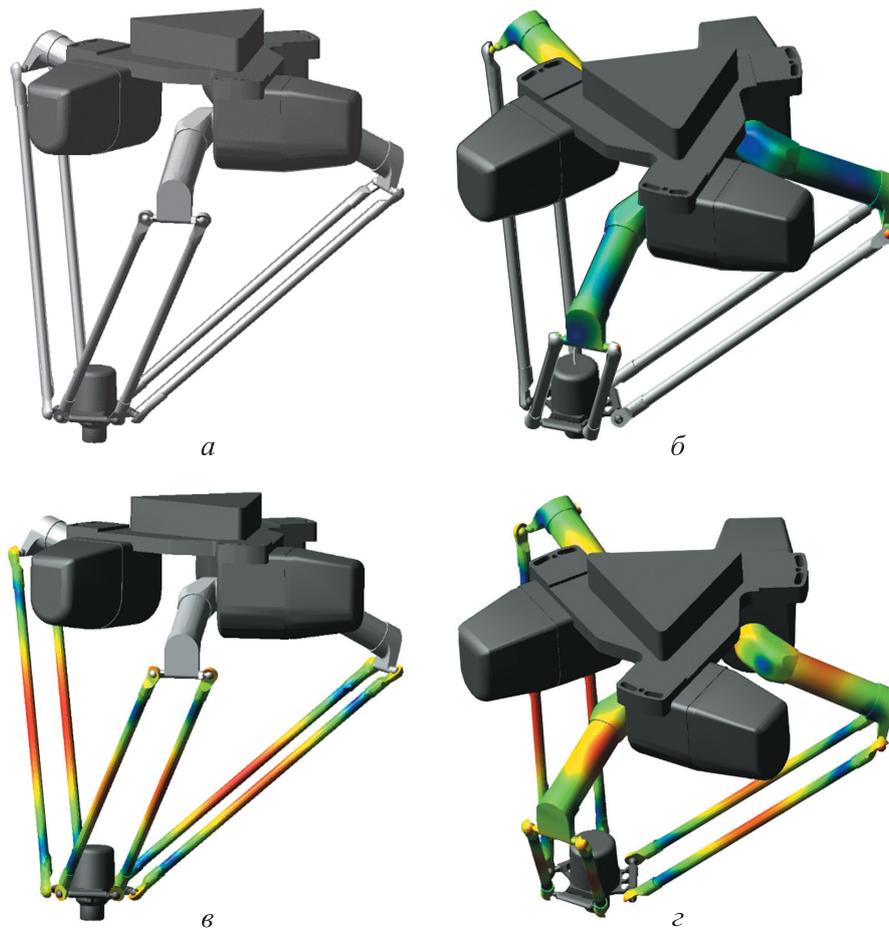


Рис. 2. Динамические модели системы жестких тел (а) и жестко-гибких связей с учетом ПР (б), ВШ (в), ПР и ВШ (г)

Планирование траектории ДР на основе ПО МАТЛАВ. Рассматриваемые роботы, как правило, предназначены для выполнения высокоскоростных операций захвата и размещения на автоматизированных производственных линиях, т. е. для захвата и переноса предметов из одной позиции в другую.

В практических приложениях, чтобы уменьшить вибрацию и затраты времени, часто используют дугообразную переходную траекторию Adept. Алгоритм планирования траектории с применением модифицированной кривой трапецеидального ускорения относится к наиболее часто применяемым алгоритмам планирования траектории ДР. При одинаковых перемещениях и ускорениях по сравнению с полиномиальным и синусоидальным режимами время его работы наименьшее [15].

Выбрана дугообразная переходная траектория Adept, а для планирования траектории

ДР — алгоритм модифицированной кривой трапецеидального ускорения. Такой алгоритм может гарантировать, что ДР будет работать быстро, плавно и без резких ударов. Ускорение ДР определяется как

$$a = \begin{cases} a_{\max} \sin\left(\frac{4\pi}{T}t\right) & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{1}{8}T; \\ a_{\max} & \text{при } \frac{1}{8}T \leq t \leq \frac{3}{8}T; \\ a_{\max} \cos\left[\frac{4\pi}{T}\left(t - \frac{3}{8}T\right)\right] & \text{при } \frac{3}{8}T \leq t \leq \frac{5}{8}T; \\ -a_{\max} & \text{при } \frac{5}{8}T \leq t \leq \frac{7}{8}T; \\ -a_{\max} \cos\left[\frac{4\pi}{T}\left(t - \frac{7}{8}T\right)\right] & \text{при } \frac{7}{8}T \leq t \leq T, \end{cases}$$

где a_{\max} — максимальное ускорение, допустимое во время движения; t — время; T — рабочий цикл.

После двойного интегрирования двух частей уравнения кривой ускорения получено следующее уравнение кривой перемещения из граничного условия $t = 0$ при $s = 0$ и непрерывности перемещения:

$$s = \begin{cases} -\left(\frac{T}{4\pi}\right)^2 a_{\max} \sin\left(\frac{4\pi}{T}t\right) + \\ \quad + \frac{1}{4\pi} a_{\max} Tt \quad \text{при } 0 \leq t \leq \frac{1}{8}T; \\ \frac{1}{2} a_{\max} t^2 + \left(\frac{1}{4\pi} - \frac{1}{8}\right) a_{\max} Tt + \\ \quad + \left(\frac{1}{128} - \frac{1}{16\pi^2}\right) a_{\max} T^2 \quad \text{при } \frac{1}{8}T \leq t \leq \frac{3}{8}T; \\ -\left(\frac{T}{4\pi}\right)^2 a_{\max} \cos\left[\frac{4\pi}{T}\left(t - \frac{3}{8}T\right)\right] + \\ \quad + \left(\frac{1}{4\pi} + \frac{1}{4}\right) a_{\max} Tt - A \quad \text{при } \frac{3}{8}T \leq t \leq \frac{5}{8}T; \\ -\frac{1}{2} a_{\max} t^2 + \left(\frac{1}{4\pi} + \frac{7}{8}\right) a_{\max} Tt + \\ \quad + \left(\frac{1}{16\pi^2} - \frac{33}{128}\right) a_{\max} T^2 \quad \text{при } \frac{5}{8}T \leq t \leq \frac{7}{8}T; \\ \left(\frac{T}{4\pi}\right)^2 a_{\max} \cos\left[\frac{4\pi}{T}\left(t - \frac{7}{8}T\right)\right] + \\ \quad + \frac{1}{4\pi} a_{\max} Tt + \frac{1}{8} a_{\max} T^2 \quad \text{при } \frac{7}{8}T \leq t \leq T, \end{cases}$$

где $A = a_{\max} T^2 / 16$.

При $t = T$ существует

$$s = \left(\frac{1}{4\pi} + \frac{1}{8}\right) a_{\max} T^2.$$

Отсюда получаем

$$T = \sqrt{\frac{s}{\left(\frac{1}{4\pi} + \frac{1}{8}\right) a_{\max}}}. \quad (1)$$

Алгоритм модифицированной кривой трапециевидного ускорения использован для планирования траектории в вертикальном и горизонтальном направлениях траектории Adept. Выбраны следующие параметры траектории ДР: координаты начальной точки $(-150, 150, -650)$; координаты конечной точки $(150, -150, -650)$; расстояние подъема по вертикали — 150 мм, максимальное ускорение — 100 м/с^2 .

Согласно уравнению (1), время вертикального перемещения $T_1 = T_3 = 0,0856 \text{ с}$, а время горизонтального перемещения $T_2 = 0,121 \text{ с}$. Горизонтальное

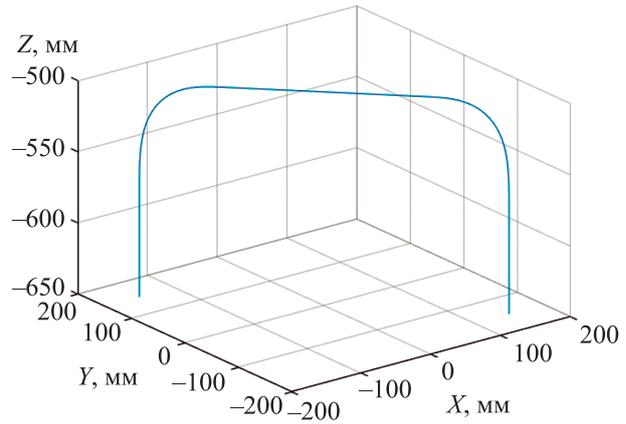


Рис. 3. Траектория исполнительного органа ДР

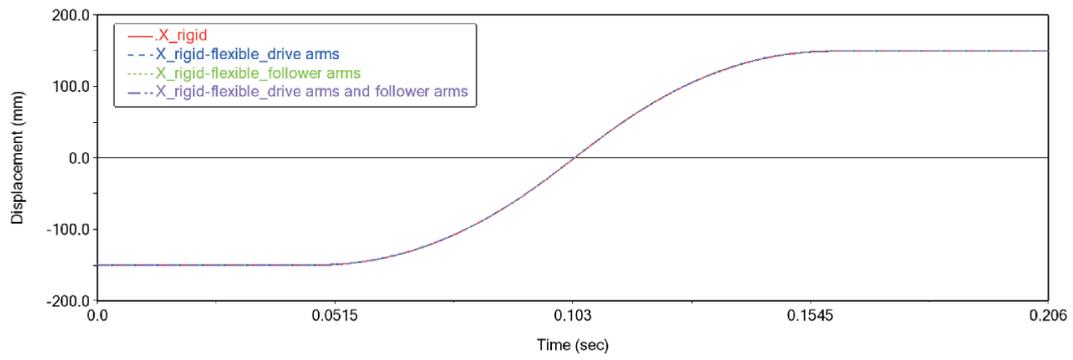
перемещение начинается при $t = T_1/2$. Из симметрии траектории видно, что общее время перемещения $T = T_1 + T_2$. Траектории в горизонтальном и вертикальном направлениях объединяются в дугообразную переходную траекторию Adept, как показано на рис. 3.

Планирование траектории ДР с использованием описанного метода выполнено в среде MATLAB, а данные об угловых перемещениях трех двигателей получены с помощью уравнения обратной кинематики и сохранены в виде файла txt.

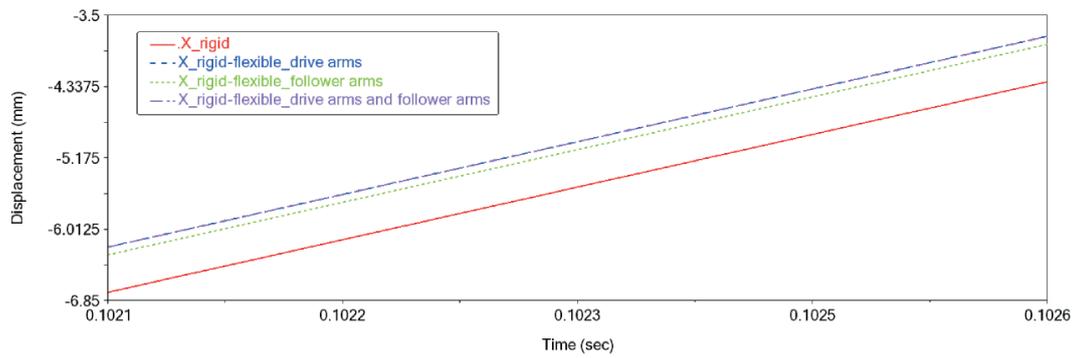
Анализ погрешности траектории. Данные об угловых перемещениях приводного двигателя, полученные в результате планирования траектории в среде MATLAB, импортировались в ПО Adams, и генерировалась сплайновая кривая SPLINE. Затем к вращательной паре между основанием и ПР добавлялась шлицевая кривая SPLINE в качестве драйвера, загруженная функцией AKISPL.

Одновременно к центру масс подвижной платформы прилагалась вертикальная направленная вниз сила 30 Н. Направление силы тяжести устанавливалось перпендикулярным статической платформе и вертикально направленным вниз. Проводилось динамическое моделирование в среде Adams.

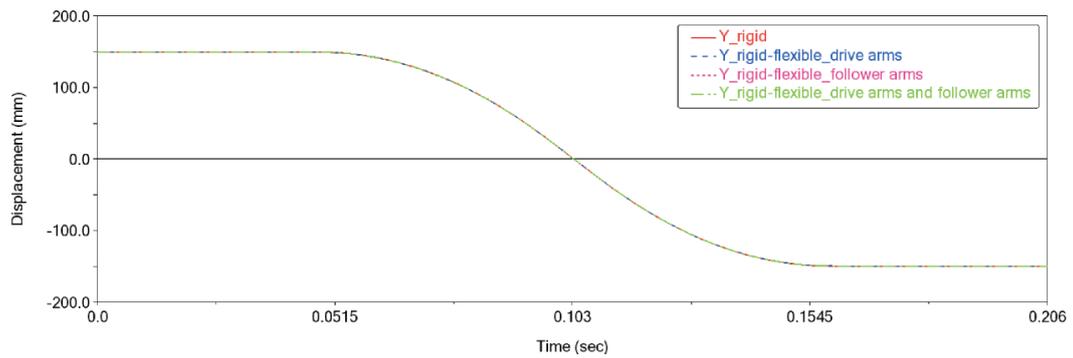
Результаты моделирования перемещения центра масс подвижной платформы ДР приведены на рис. 4, где красная кривая соответствует динамической модели системы жестких тел, синяя — жестко-гибкой связи с учетом гибкости ПР; фиолетовая — жестко-гибкой связи с учетом гибкости ВШ, зеленая — жестко-гибкой связи с учетом гибкости ПР и ВШ.



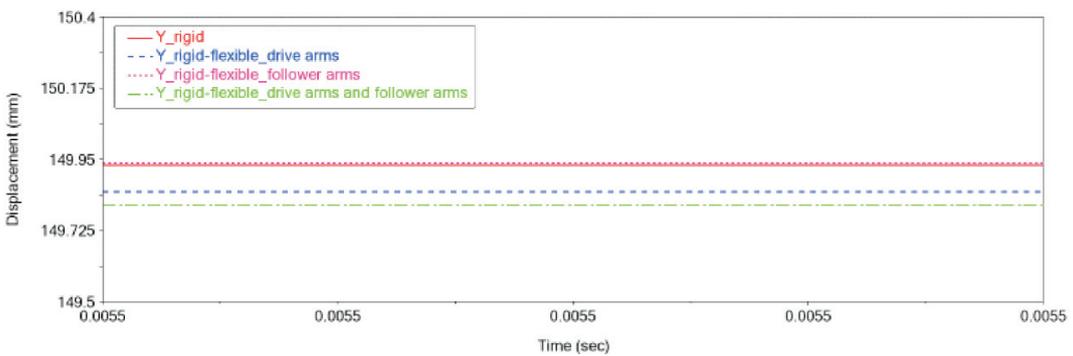
a



b



b



z

Рис. 4 (начало). Результаты моделирования перемещения центра масс подвижной платформы ДР:

a, в и б, z — кривые перемещения ЦМ подвижной платформы по направлению X, Y, Z и увеличенный вид выделенной точки на кривой соответственно

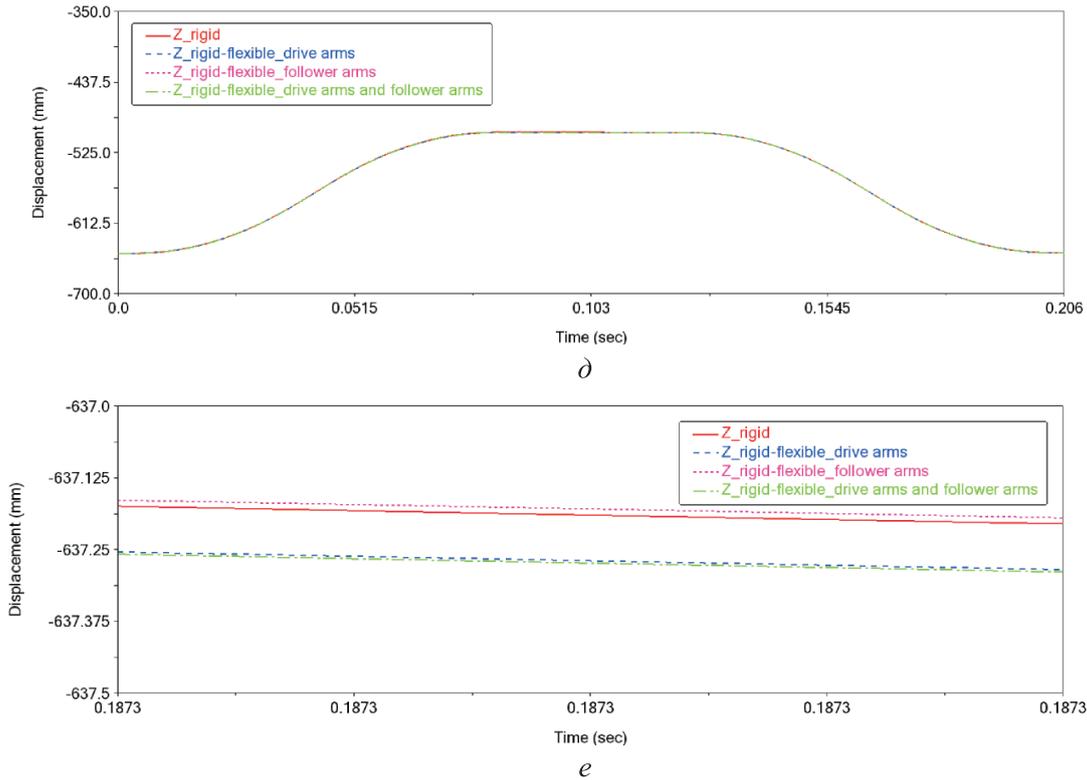


Рис. 4 (окончание). Результаты моделирования перемещения центра масс подвижной платформы ДР:

δ и e — кривые перемещения ЦМ подвижной платформы по направлению X, Y, Z и увеличенный вид выделенной точки на кривой соответственно

Как видно из рис. 4, траектория, полученная при моделировании динамики жестко-гибкой связи ДР, в основном такая же, как и при моделировании динамики системы жестких тел. Кривая перемещения ДР меняется плавно, без возникновения резких точек мутации, что показывает рациональность планирования траектории.

Однако после частичного увеличения кривой траектории обнаружено существенное отклонение между различными траекториями, указывающее на то, что гибкая деформация компонентов оказывает влияние на точность позиционирования ДР.

Результаты моделирования жестко-гибкой связи ДР в направлениях X, Y и Z , вычитались из кривой перемещения исполнительного органа, полученной путем моделирования динамики системы жестких тел, чтобы построить кривые динамических погрешностей позиционирования исполнительного органа ДР, как показано на рис. 5.

Здесь кривая 1 соответствует погрешности между динамическими моделями системы жестких тел и жестко-гибкой связи с учетом гибкости только ПР, кривая 2 — погрешности

между моделями системы жестких тел и жестко-гибкой связи с учетом гибкости только ВШ, кривая 3 — погрешности между моделями системы жестких тел и жестко-гибкой связи с учетом гибкости ПР и ВШ.

Как видно из рис. 5, вследствие упругой деформации ПР и ВШ исполнительный орган ДР имеет разную степень изменения погрешности в направлениях X, Y и Z , и ее значение существенно колеблется. На начальном и конечном этапах наблюдаются очевидные колебания кривой погрешности, так как гибкие компоненты ДР вибрируют из-за инерции системы при пуске и остановке.

После анализа результатов моделирования, показанных на рис. 5, влияние гибкой деформации ПР и ВШ на погрешности позиционирования ДР суммировалось в виде данных деформации, приведенных в таблице.

Как следует из таблицы, погрешность позиционирования в направлении X (параллельно ПР) является наибольшей, а погрешность в направлении Y — наименьшей. Кроме того, погрешность на каждом этапе в основном исходит из составляющей погрешности в направлении X .

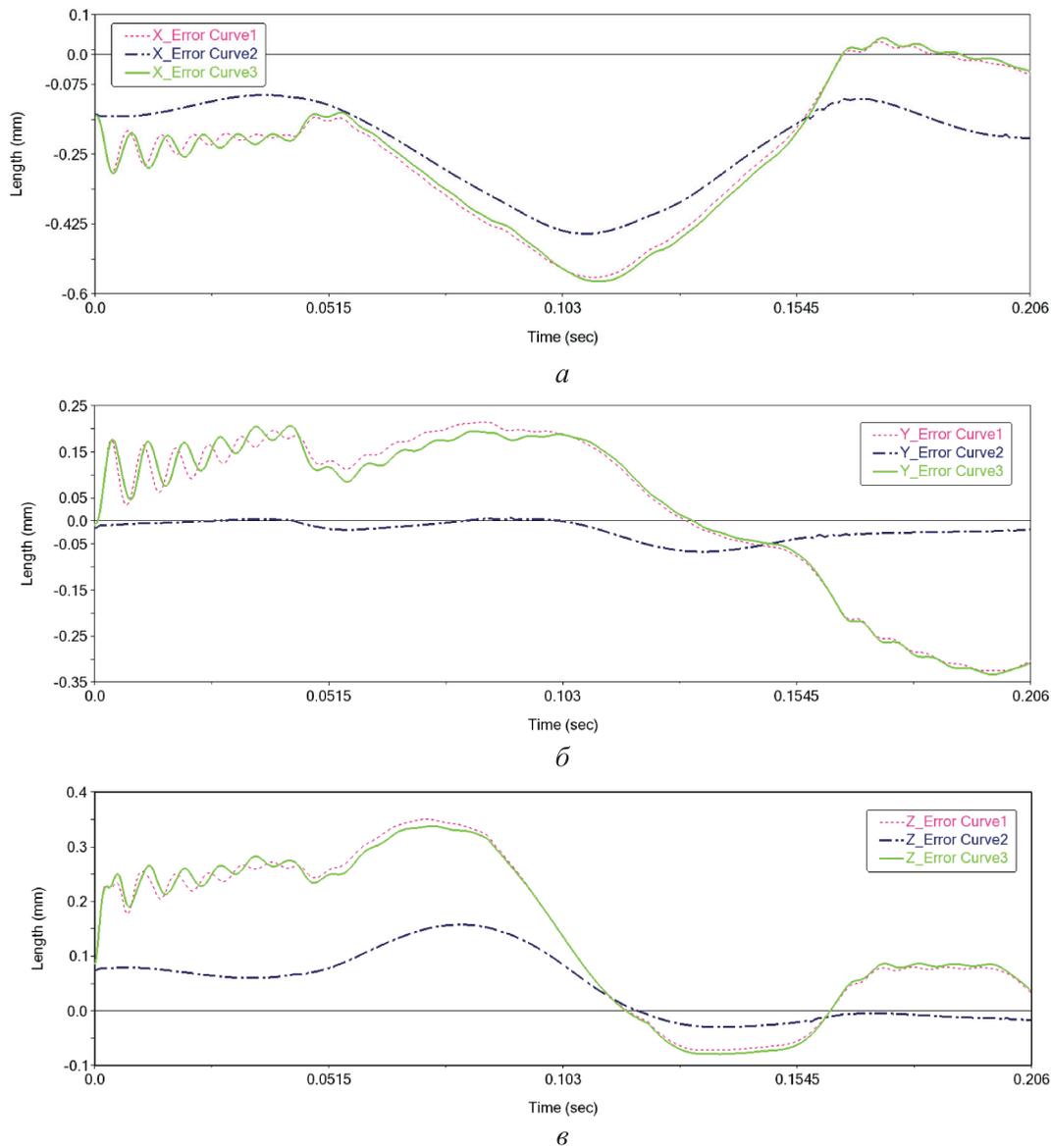


Рис. 5. Кривые погрешности в направлениях X (а), Y (б) и Z (в)

Влияние гибкости компонентов на погрешность позиционирования исполнительного органа ДР

| Тип динамической модели жестко-гибкой связи | Максимальная погрешность позиционирования, мм, в направлении | | | Средняя погрешность позиционирования, мм, в направлении | | |
|--|--|--------|--------|---|--------|--------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z |
| Модель, учитывающая гибкость ПР | 0,5589 | 0,3254 | 0,3506 | 0,2491 | 0,0225 | 0,1397 |
| Модель, учитывающая гибкость ВШ | 0,4493 | 0,0067 | 0,1575 | 0,2295 | 0,0202 | 0,0456 |
| Модель, учитывающая гибкость ПР и ВШ | 0,5685 | 0,3335 | 0,3381 | 0,2492 | 0,0197 | 0,1384 |

Анализ изменения различных кривых погрешности (см. рис. 5) и статистических данных (см. таблицу) показал следующее. Во-первых, когда ДР движется по длинной траектории, точность начальной стадии очень высока, по-

грешность на промежуточной стадии велика, а начальная стадия и стадия остановки будут колебаться из-за инерции системы.

Во-вторых, при гибкости только ПР закон изменения кривой погрешности аналогичен

таковому при гибкости ПР и ВШ, но численные значения немного различаются. При низких требованиях к точности можно учитывать гибкость только ПР, рассматривая ВШ как жесткие тела.

В третьих, если требуется высокая точность позиционирования ДР, то нельзя игнорировать влияние упругой деформации ПР и ВШ. Упругая деформация ПР оказывает большее влияние на точность позиционирования ДР, чем у ВШ.

Выводы

1. Проведены исследования ДР WSC-600DJ компании Warsonco. В среде MATLAB спланированы траектории исполнительного органа ДР, в ПО Adams подготовлены данные для моделирования параллельного робота, в ПО Hypermesh и Adams смоделированы динамические модели жестко-гибкой связи и системы жестких тел.

2. Анализ результатов исследования выявил следующее:

- кривая погрешности для динамической модели с учетом упругой деформации только ПР аналогична таковой для модели, учитывающей гибкость ПР и ВШ; если требования к точности позиционирования ДР невысокие, то влияние на нее гибкости ВШ можно не принимать во внимание, учитывая гибкость ПР;

- при требовании высокой точности позиционирования ДР, нельзя игнорировать влияние упругой деформации ПР и ВШ;

- при рассмотрении упругой деформации ПР и ВШ максимальная и средняя погрешности позиционирования ДР в направлениях X , Y и Z составляют 0,5685, 0,3335, 0,3381 и 0,2492, 0,0197, 0,1384 мм соответственно.

3. Результаты исследования могут служить основой для компенсации погрешностей и высокоточного управления ДР.

Литература

- [1] Huang Z., Kong L.F., Fang Y.F. *Mechanism theory and control of parallel robots*. Peking, China Machine Press, 1996. 410 p.
- [2] Габутдинов Н.Р., Глазунов В.А., Духов А.В. и др. Хирургические роботы, возможности использования манипуляторов последовательной и параллельной структуры. *Медицина и высокие технологии*, 2015, № 1, с. 45–50.
- [3] Глазунов В.А., Гаврилина Л.В., Духов А.В. и др. Разработка сферических роботов параллельной структуры для полостных операций. *Медицина и высокие технологии*, 2017, № 3, с. 62–66.
- [4] Гаврюшин С.С. Анализ и синтез тонкостенных элементов робототехнических устройств с предписанным законом деформирования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 12, с. 12–19, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-12-12-19>
- [5] Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. *Численный анализ элементов конструкций машин и приборов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 479 с.
- [6] Liang X., Su T.T., Jia Z.Q. et al. Review of delta parallel robot and its trajectory planning method. *Science Technology and Engineering*, 2022, vol. 22, no. 11, pp. 4271–4279.
- [7] Wang Y.N., Xu Y.W., Liu W.X. et al. Simulation analysis and verification of elastic position error of delta robot. *Manufacturing Automation*, 2020, vol. 42, no. 10, pp. 41–45.
- [8] Mei J.P., Zang J.W., Qiao Z.Y. et al. Trajectory planning of 3-DOF delta parallel manipulator. *J. Mech. Eng.*, 2016, vol. 52, no. 19, pp. 9–17, doi: <https://doi.org/10.3901/JME.2016.19.009>
- [9] Wang L.J., Chen Y.J., Zhang D. et al. Kinematics and dynamics simulation analysis of Delta robot based on MATLAB and ADAMS. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, vol. 37, no. 11, pp. 102–122.
- [10] Hu S.J., Wang Y., Yang Z.Y. Static and modal analysis for master arm of delta parallel robot based on ANSYS software. *Machinery Manufacturing and Automation*, 2018, vol. 47, no. 5, pp. 181–183+201.
- [11] Yang Q.Z., Sun M.T., Cai J. et al. Kinematic error analysis and test of high-speed plug seeding transplanting machine for greenhouse based on parallel mechanism. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, vol. 49, no. 3, pp. 18–27.
- [12] Jokin A., Isidro Z., Oscar A. et al. Improving static stiffness of the 6-RUS parallel manipulator using inverse singularities. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2012, vol. 28, no. 4, pp. 458–471, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.02.003>

- [13] Amir R., Alireza A., Mohammad R. et al. An investigation on stiffness of a 3-PSP spatial parallel mechanism with flexible moving platform using invariant form. *Mech. Mach. Theory*, 2012, vol. 51, pp. 195–216, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.11.011>
- [14] Bolzon V.R., Lara-Molina F.A. Optimal kinematic and elastodynamic design of planar parallel robot with flexible joints. *IEEE Lat. Am. Trans.*, 2018, vol. 16, no. 5, pp. 1343–1352, doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8408426>
- [15] Guo C., Xin S.J., Li Y.S. Simulation of delta robot trajectory planning in two kinds of coordinate space. *Manufacturing Automation*, 2014, vol. 36, no. 2, pp. 49–51+93.

References

- [1] Huang Z., Kong L.F., Fang Y.F. *Mechanism theory and control of parallel robots*. Peking, China Machine Press, 1996. 410 p.
- [2] Gabutdinov N.R., Glazunov V.A., Dukhov A.V. et al. Surgical robots, possibilities of using manipulators serial and parallel structure. *Meditsina i vysokie tekhnologii* [Medicine and High Technology], 2015, no. 1, pp. 45–50. (In Russ.).
- [3] Glazunov V.A., Gavrilina L.V., Dukhov A.V. et al. Development of spherical robots of parallel structure for cavitory operations. *Meditsina i vysokie tekhnologii* [Medicine and High Technology], 2017, no. 3, pp. 62–66. (In Russ.).
- [4] Gavryushin S.S. Analysis and synthesis of robotic devices thin-walled structures with the prescribed Law of deformation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2011, no. 12, pp. 12–19, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-12-12-19> (in Russ.).
- [5] Gavryushin S.S., Baryshnikova O.O., Boriskin O.F. *Chislennyy analiz elementov konstruktsiy mashin i priborov* [Numerical analysis of structural elements of machines and devices]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 479 p. (In Russ.).
- [6] Liang X., Su T.T., Jia Z.Q. et al. Review of delta parallel robot and its trajectory planning method. *Science Technology and Engineering*, 2022, vol. 22, no. 11, pp. 4271–4279.
- [7] Wang Y.N., Xu Y.W., Liu W.X. et al. Simulation analysis and verification of elastic position error of delta robot. *Manufacturing Automation*, 2020, vol. 42, no. 10, pp. 41–45.
- [8] Mei J.P., Zang J.W., Qiao Z.Y. et al. Trajectory planning of 3-DOF delta parallel manipulator. *J. Mech. Eng.*, 2016, vol. 52, no. 19, pp. 9–17, doi: <https://doi.org/10.3901/JME.2016.19.009>
- [9] Wang L.J., Chen Y.J., Zhang D. et al. Kinematics and dynamics simulation analysis of Delta robot based on MATLAB and ADAMS. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, vol. 37, no. 11, pp. 102–122.
- [10] Hu S.J., Wang Y., Yang Z.Y. Static and modal analysis for master arm of delta parallel robot based on ANSYS software. *Machinery Manufacturing and Automation*, 2018, vol. 47, no. 5, pp. 181–183+201.
- [11] Yang Q.Z., Sun M.T., Cai J. et al. Kinematic error analysis and test of high-speed plug seeding transplanting machine for greenhouse based on parallel mechanism. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, vol. 49, no. 3, pp. 18–27.
- [12] Jokin A., Isidro Z., Oscar A. et al. Improving static stiffness of the 6-RUS parallel manipulator using inverse singularities. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2012, vol. 28, no. 4, pp. 458–471, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.02.003>
- [13] Amir R., Alireza A., Mohammad R. et al. An investigation on stiffness of a 3-PSP spatial parallel mechanism with flexible moving platform using invariant form. *Mech. Mach. Theory*, 2012, vol. 51, pp. 195–216, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.11.011>
- [14] Bolzon V.R., Lara-Molina F.A. Optimal kinematic and elastodynamic design of planar parallel robot with flexible joints. *IEEE Lat. Am. Trans.*, 2018, vol. 16, no. 5, pp. 1343–1352, doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8408426>
- [15] Guo C., Xin S.J., Li Y.S. Simulation of delta robot trajectory planning in two kinds of coordinate space. *Manufacturing Automation*, 2014, vol. 36, no. 2, pp. 49–51+93.

Информация об авторах

ЧЖУ Лянлян — аспирант кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: chzhul@student.bmstu.ru).

ГАВРЮШИН Сергей Сергеевич — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gss@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Чжу Лянлян, Гаврюшин С.С. Анализ динамических погрешностей дельта-робота, вызванных упругой деформацией компонентов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 6, с. 55–65.

Please cite this article in English as:

Zhu Liangliang, Gavryushin S.S. Analysis of the delta robot dynamic errors caused by the components elastic strain. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 6, pp. 55–65.

Information about the authors

ZHU Liangliang — Postgraduate, Department of Computer Systems in Production Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: chzhul@student.bmstu.ru).

GAVRIUSHIN Sergei Sergeevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Computer Systems of Industrial Automation Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gss@bmstu.ru).



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

«Автоматическое управление теплоэнергетическими установками»

Авторы: А.Г. Кузнецов, С.В. Харитонов

Рассмотрены вопросы автоматического управления и регулирования применительно к теплоэнергетическим установкам: тепловым двигателям, компрессорам, детандерам, теплообменным аппаратам, трубопроводам и др. Материал изложен в последовательности, принятой при изучении теории управления и регулирования. Наряду со ставшими уже классическими основами теории управления и регулирования приведен актуальный для современных систем управления с электронными блоками материал по законам регулирования, методам настройки контроллеров, использованию нейронных сетей. Рассмотрены примеры, в которых с помощью цифрового моделирования иллюстрируются результаты теоретического анализа и синтеза систем управления применительно к теплоэнергетическим установкам.

Для специалистов и студентов в области теплоэнергетики, изучающих дисциплину «Управление техническими системами».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>