

Анализ обеспечения точности позиционирования промышленных роботов¹

Габитов А.А., Каляшина А.В.

Аннотация

Промышленные манипуляторы используются для автоматизированного выполнения таких задач, как сварка, фрезеровка, паллетизация, лазерная обработка и аддитивное производство. Однако одним из основных ограничивающих факторов использования роботов в прецизионных технологических операциях является точность позиционирования. Примером таких операций является аддитивное выращивание и восстановление. Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное сопоставление метрологических характеристик промышленных манипуляторов на основе открытых и замкнутых кинематических цепей.

Ключевые слова: автоматизация, промышленный робот, абсолютная точность, воспроизводимость, геометрические ошибки

Positioning accuracy analysis of industrial robots¹

A.A. Gabitov, A.V. Kalyashina

Abstract

The industrial robots are used in the process of welding, milling, palletizing, laser processing and additive production. However, one of the main limiting factors of the use of robots in precision technological operations is positioning accuracy. An example of such operations is additive manufacturing and recovery. The purpose of this work is the theoretical and experimental comparison of the metrological characteristics of industrial manipulators based on open- and closed-loop kinematic chains.

Key words: automation, industrial robot, accuracy, repeatability, geometrical errors

Погрешность позиционирования промышленных роботов

Точность позиционирования промышленных роботов обуславливается конструктивными особенностями механического блока, геометрическими погрешностями, ошибками систем управления и датчиков обратной связи, а также тепловыми погрешностями и погрешностями, вызванных действием сил тяжести. Также некоторая погрешность вызвана невозможностью системой управления роботов распознать различие в двух положениях, условное расстояние между которыми меньше разрядности робота.

При выполнении технологической операции действительное положение движение центральной точки рабочего инструмента (ТСР) отличается от расчетного. Ее положение, скорость и ускорение в любой точке реализуемой ей траектории в общем случае могут не совпадать с расчетными.

К геометрическим погрешностям относят отклонения линейных размеров звеньев и формы их продольных осей от заданных значений. В результате наличия технологических ошибок,

¹ Работа выполнена в рамках Молодежного гранта АН РТ 03-64-ц-Г 2018

А также поддержана грантом гос. контракт с Министерством образования и науки РФ договор №14.Z50.31.0023 от 04.03.2014 г.

возникающих при изготовлении деталей звеньев, а также ошибок, возникающих в процессе эксплуатации механического блока (температурные, силовые и износные), фактические размеры звеньев, определяющие положение ТСР в пространстве, отличаются от идеальных, на основании которых составлены расчетные алгоритмы и действительное положение рабочего органа отличается от расчетного. Такие ошибки называют первичными ошибками, и результат действия каждой такой ошибки на величину погрешности позиционирования точки ТСР промышленного робота можно определить независимо от действия других первичных ошибок. Значение результирующей погрешности позиционирования вычисляют в соответствии с принципом суперпозиции.

Для осуществления движения рабочего органа необходимо от системы управления при помощи автономных двигателей задать движения несколькими или всем звеньям механического блока промышленного робота. Так как система управления и двигатели работают с погрешностями, то в результате управление осуществляется неточно и действительные движения звеньев отличаются от расчетных.

Анализ геометрических ошибок механического блока с открытой кинематической цепью

Наиболее распространенные в настоящее время манипуляторы имеют антропоморфный вид и напоминают человеческую руку. Низкая нагрузочная способность и невысокая точность обусловлены архитектурой существующих манипуляторов и, в частности, последовательным расположением их звеньев. Каждое из них несет на себе вес последующего сегмента в дополнение к полезной нагрузке, поэтому на них действуют большие изгибающие моменты, что повышает требования к жесткости и, следовательно, ведет к увеличению массы. Существенным источником возникновения ошибок позиционирования является нарушение заданных геометрических соотношений между осями звеньев. Последовательное расположение звеньев вместе с требованием их жесткости подразумевает, что движущиеся части робота имеют значительную массу. Как следствие, при высокоскоростных перемещениях манипулятор испытывает влияние сил инерции, центробежных сил и сил Кориолиса, что усложняет управление роботом. Точность роботов определяется погрешностями позиционирования характеристической точки ТСР и погрешностями ее угловой ориентации. Погрешности позиционирования определяются технологическими отклонениями размеров звеньев манипулятора, зазорами в кинематических парах манипулятора и механизмов приводов, деформациями (упругими и температурными) звеньев, а также погрешностями системы управления и датчиков обратной связи.

Матрицу перехода T_n связывающую систему координат ТСР $\{T\}$ и мировую систему координат $\{B\}$ можно представить в следующем виде:

$$T_n = A_1 A_2 A_3 \dots A_n, \quad (1)$$

$$A_i = \text{Rot}(Z, \theta_i) \cdot \text{Trans}(0, 0, d_i) \cdot \text{Trans}(a_i, 0, 0) \cdot \text{Rot}(X, \alpha_i) \quad (2)$$

Где A_i – матрица преобразования координат между звеньями $i-1$ и i кинематической цепи, a_i – длина i -звена кинематической цепи, α_i – угол i -звена кинематической цепи, d_i – отклонение i -звена кинематической цепи, и θ_i – угол поворота i -соединения.

Из уравнения (2) следует, что A_i зависит от 4 параметров. В случае свободы вращения, угол θ_i – является переменным параметром, в то время как остальные три зафиксированы. И для механического блока с шарнирным соединением угол θ_i является joint координатой. Дифференцирование уравнения (2) дает:

$$dA_i = \frac{\partial A_i}{\partial a_i} \Delta a_i + \frac{\partial A_i}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i + \frac{\partial A_i}{\partial d_i} \Delta d_i + \frac{\partial A_i}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i = A_i \delta A_i \quad (3)$$

Где Δa_i - смещение a_i , $\Delta \alpha_i$ - смещение α_i , Δd_i - смещение d_i и $\Delta \theta_i$ - смещение θ_i . Таким образом δA_i - матрица ошибок A_i :

$$\delta A_i = \begin{bmatrix} 0 & -\delta z_i^A & -\delta y_i^A & -dx_i^A \\ \delta z_i^A & 0 & -dx_i^A & -\delta y_i^A \\ \delta z_i^A & dx_i^A & 0 & \delta z_i^A \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

В этой матрице dx_i^A, dy_i^A, dz_i^A - ошибки позиционирования при переходе от $i-1$ к i , а $\delta x_i^A, \delta y_i^A, \delta z_i^A$ угловые ошибки. С учетом этих ошибок, модель преобразования между рабочей и мировой системой координат:

$$T_n + dT_n = (A_1 + dA_1)(A_2 + dA_2)...(A_n + dA_n) = \prod_{i=1}^n (A_i + dA_i) \quad (5)$$

Если пренебречь дифференциальным членом высокого порядка, получим:

$$dT_n = T_n \sum_{i=1}^n (U_{i+1}^1 \delta A_i U_{i+1}^1) = T_n \delta T_n \quad (6)$$

Где δT_n - матрица ошибок T_n и $U_i^1 = A_1 A_2 A_3 \dots A_n$. Согласно дифференциальной кинематике:

$$\delta T_n = \sum_{i=1}^n (U_{i+1}^1 \delta A_i U_{i+1}^1) = \begin{bmatrix} 0 & -\delta z_n & \delta y_n & dx_n \\ \delta z_n & 0 & -\delta x_n & dy_n \\ -\delta y_n & \delta x_n & 0 & dz_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Где dx_n, dy_n, dz_n - ошибка по положению системы координат $\{n\}$ по отношению к системе координат $\{0\}$, а $\delta x_n, \delta y_n, \delta z_n$ - угловые ошибки. Таким образом конечные выражения для ошибок позиционирования примут вид:

$$d_n = [dx_n, dy_n, dz_n]^T \quad (8)$$

$$\delta_n = [\delta x_n, \delta y_n, \delta z_n]^T \quad (9)$$

В качестве тестовых роботов с открытой кинематической цепью мы использовали роботов Fanuc R-2000iB 165F и KUKA KR-150. Роботы данного типа являются одними из самых востребованных в мире. Обладая высокой производительностью и грузоподъемностью в диапазоне от 100 до 300 килограмм, подобные роботы являются универсальными решением для выполнения огромного спектра задач. Каждый из этих роботов содержит шести-осевой механический блок и шкаф управления. Согласно методу, описанному в работе [7] определены ошибки геометрических параметров этих роботов. В сравнительной таблице приведены значения отклонений длин звеньев Δa , сдвиг координат Δd , а также угловые ошибки $\Delta \alpha$ и $\Delta \theta$.

Таблица 1

Ось	Δa (мм)	Δd (мм)	$\Delta \alpha$ (рад)	$\Delta \theta$ (рад)
1	0,25	-0,78	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$3,43 \cdot 10^{-4}$
2	-0,22	$0,05 \cdot 10^{-4}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$-1,07 \cdot 10^{-3}$
3	-0,7	$-0,03 \cdot 10^{-4}$	$-0,5 \cdot 10^{-4}$	$4,45 \cdot 10^{-4}$
4	0,18	-0,13	$-6,89 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$

5	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$-0,23 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$-3,34 \cdot 10^{-4}$
6	$-2 \cdot 10^{-5}$	0,05	$-7,34 \cdot 10^{-4}$	$4,65 \cdot 10^{-6}$

Определение геометрических ошибок робота Fanuc R-2000iB 165F

Таблица 2

Ось	Δa (мм)	Δd (мм)	$\Delta \alpha$ (рад)	$\Delta \theta$ (рад)
1	0,42	1,1	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,19 \cdot 10^{-4}$
2	-0,11	$0,18 \cdot 10^{-4}$	$-2,43 \cdot 10^{-5}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$
3	-1,1	$3,59 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$7,12 \cdot 10^{-4}$
4	-0,25	-0,29	$-6,54 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$
5	$0,22 \cdot 10^{-2}$	$-2,4 \cdot 10^{-4}$	$-5,9 \cdot 10^{-4}$	$-6 \cdot 10^{-5}$
6	$-3 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$	$5,55 \cdot 10^{-4}$	$-1,01 \cdot 10^{-7}$

Определение геометрических ошибок робота KUKA KR150

Рабочая система координат робота привязана к основанию робота, относительно которого задается референсное положение всего механического блока. Измерение точности позиционирования роботов проводилось с помощью лазерного трекера, при этом измерительные метки устанавливались в нескольких местах на измерительном блоке, закрепленном на фланце запястья робота.

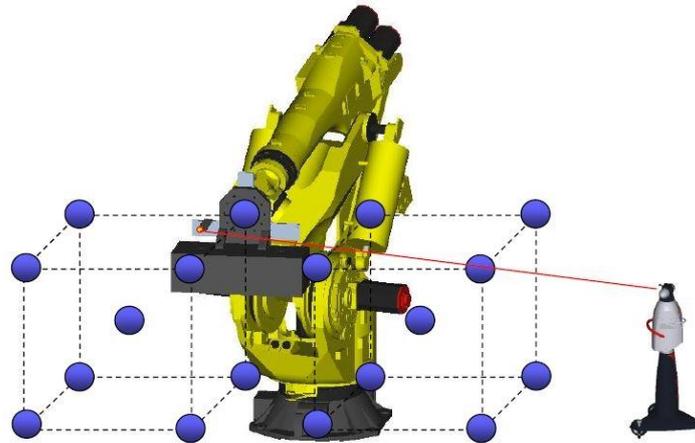


Рис. 1 Схема измерения абсолютной точности позиционирования механического блока промышленного робота с открытой кинематической цепью

В ходе измерений робот совершал циклическое перемещение между запрограммированными положениями. После согласования систем координат робота и лазерного трекера, можно определить разницу между целевыми координатами точки ТСР механического блока и фактическими.

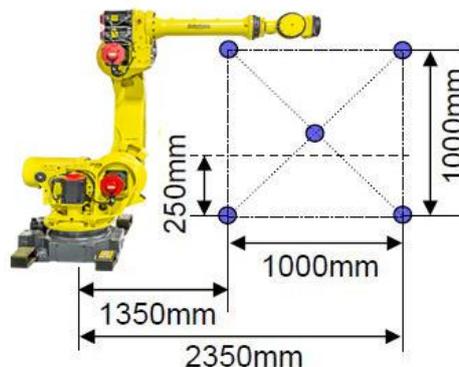


Рис. 2 Область измерения ошибки позиционирования

Измерения ошибок позиционирования робота Fanuc R-2000iB 165F и KUKA KR150 производились по 18 точкам, расположенных в разных зонах досягаемости механического блока, что позволит учесть влияние ошибок систем управления, а также влияние внешних сил, таких как сила тяжести, сила Кориолиса и т.д.

Результаты измерений погрешности позиционирования роботов с нагрузкой 30 и 100 кг приведены в таблице (3).

Таблица 3

Точка	Fanuc R-2000iB 165F 10 кг, ΔX (мм)	KUKA KR150 10 кг, ΔX (мм)	Fanuc R-2000iB165F 100 кг, ΔX (мм)	KUKA KR150 100 кг, ΔX (мм)
1	0,09	0,1	0,29	0,25
2	0,16	0,18	0,35	0,21
3	0,13	0,09	0,21	0,18
4	0,1	0,13	0,09	0,14
5	0,12	0,14	0,31	0,42
6	0,1	0,1	0,3	0,37
7	0,09	0,07	0,2	0,25
8	0,07	0,09	0,12	0,19
9	0,08	0,11	0,09	0,12
10	0,12	0,13	0,15	0,16
11	0,16	0,09	0,29	0,27
12	0,18	0,19	0,2	0,2
13	0,15	0,12	0,16	0,15
14	0,1	0,14	0,11	0,14
15	0,08	0,17	0,42	0,33
16	0,12	0,1	0,27	0,28
17	0,15	0,09	0,16	0,17
18	0,12	0,14	0,14	0,19

Измерения погрешности позиционирования роботов Fanuc R-2000iB 165F и KUKA KR150

Анализ механического блока с замкнутой кинематической цепью

До недавних пор применение параллельных роботов носило преимущественно лабораторный характер, однако в последнее время такие манипуляторы все чаще применяются в большом количестве задач, в которых требуется высокоточное позиционирование рабочего инструмента, либо высокая скорость прохода рабочей траектории.

Для осуществления движения рабочего органа необходимо от системы управления при помощи автономных двигателей задать движения нескольким или всем звеньям исполнительного устройства механического блока. Так как система управления и двигатели работают с погрешностями, то в результате управление осуществляется неточно и действительные движения звеньев отличаются от расчетных. Разность между действительными и расчетными значениями обобщенной координаты, вызванная погрешностью работы системы управления и двигателей представляет собой ошибку ввода обобщенной координаты.

Измерение расстояний линейных переходов робота производилось с помощью рычажного часового индикатора (микрометра) и концевых мер. Для этого устанавливаются концевые меры разных длин в разных местах рабочей области робота. Часовой индикатор закрепляют на фланце робота. Перемещение робота происходит в ручном режиме. Измерения проводились следующим образом: прислоняли сферу микрометра к точной поверхности концевой меры (момент касания) до небольшого отклонения индикатора. По двум показаниям микрометра (в двух точках касания) и длине эталонной меры вычисляется фактическое расстояние между двумя положениями фланца робота. Заданное расстояние рассчитывается из координат фланца робота в точках касания (из системы управления). Рабочая область промышленного робота Eidos Hexapod X-6.R500.50.3 изображена на Рис. 3. Горизонтальная плоскость прохода точки TCP может иметь нелинейные

искажения, что можно связать с возникновением паразитных вращений рабочей платформы механического блока.

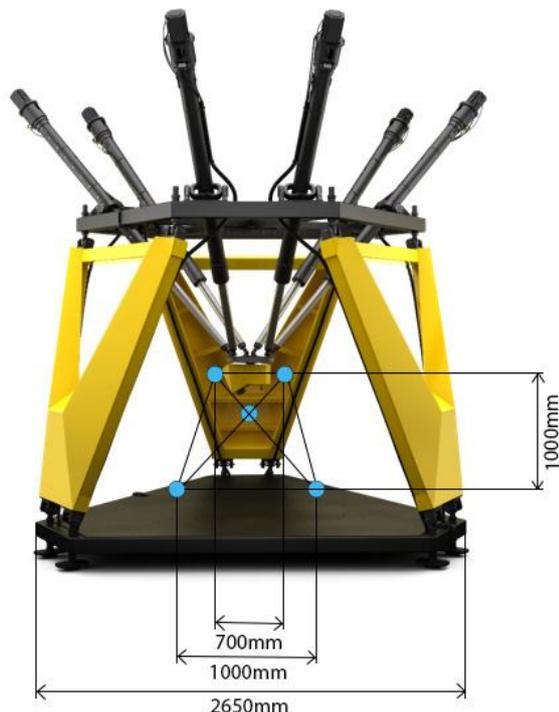


Рис. 3 Область измерения ошибки позиционирования робота Eidos Hexapod X-6.R500.50.3

В данном эксперименте (таблица 4) мы провели измерение точности позиционирования в девяти точках с двумя разными нагрузками – 10 и 40 кг

Таблица 4

Точка	ΔX (мм), 10 кг	ΔX (мм), 40 кг
1	0,02	0,03
2	0,02	0,04
3	0,03	0,03
4	0,02	0,04
5	0,03	0,06
6	0,04	0,05
7	0,04	0,08
8	0,03	0,06
9	0,01	0,03

Ошибка позиционирования с нагрузками 10 и 40 кг

Основными преимуществами гексаподов являются:

- Сокращение времени подготовки производства и повышение его рентабельности за счет объединения обрабатывающих, разметочных и измерительных функций в единой мехатронной системе;

- Высокая точность измерений и обработки, которая обеспечивается повышенной жесткостью стержневых механизмов (до 5 раз), применением прецизионных датчиков обратной связи и лазерных измерительных систем, использованием компьютерных методов коррекции (например, тепловых воздействий);

- Повышенная скорость движений (скорость быстрых перемещений достигает 10 м/с, рабочих движений – до 2,5 м/с);

- Отсутствие направляющих (в качестве несущих элементов конструкции используются приводные механизмы), отсюда улучшенные массогабаритные характеристики и материалоемкость;

- Высокая степень унификации мехатронных узлов, обеспечивающая технологичность изготовления и сборки машины и конструктивную гибкость;
- Высокое качество управления движением благодаря малой инерционности механизмов, применению линейных мехатронных модулей движения как объектов управления, использованию методов автоматизированной подготовки и исполнения в реальном времени управляющих программ, наличию дружелюбного интерфейса "человек – машина".

К недостаткам гексаподов следует отнести:

- Соотношение пространства для обработки и всего объема, занимаемого станком - гексаподом, хуже по сравнению с традиционными станками;
- Любое линейное перемещение требует одновременного управления сразу по шести осям;
- Необходимо иметь шесть независимых приводов для перемещений рабочей платформы;
- Ограничен угол поворота рабочей платформы, для его увеличения необходима дополнительная ось поворота (привод и система управления);
- Затруднен контроль точности перемещений;
- Имеются значительные тепловые удлинения вдоль осей в связи с большей длиной узлов.

Заключение

Манипуляторы, построенные по принципу платформы Гью-Стюарта, обладают улучшенной абсолютной точностью в силу своей пространственной структуры и кинематики. Причины этого в следующем:

Робот с замкнутой кинематической цепью	Робот с открытой кинематической цепью
Параллельное соединение подвижных звеньев	Последовательное соединение звеньев
Нагрузка распределяется гораздо более равномерно между звеньями. Центр тяжести находится внутри силовой рамы	Нагрузка распределяется неравномерно, максимум нагрузки ложится на первые звенья. Центр тяжести активно перемещается в широком диапазоне.
↓↓↓	↓↓↓
Деформации незначительны	Большие деформации в редукторах и сочленениях
Незначительные искажения, поддающиеся учету в мат. модели	Значительные нелинейные искажения в огромном пространстве состояний, сильно зависящие от нагрузки, скорости и ускорений и других параметров, неподдающиеся учету в модели
↓↓↓	↓↓↓
Итоговая точность математического пространства робота может составлять от единиц микронов до 0,1мм	Итоговая точность математического пространства робота может составлять от 0,05мм до 1-2мм

Список литературы

1. *Adel Olabi, Mohamed Damak, Richard B'ear'ee, Olivier Gibaru, St'ephane Leleu, Improving the Accuracy of Industrial Robots by offline Compensation of Joints Errors, 2013*
2. *Jianhao Zhang, Jinda Cai, Error Analysis and Compensation Method Of 6-axis Industrial Robot, 2013*
3. *Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов*
4. *Андряшин В.А., Каляшина А.В. Самдаров Роботизированный комплекс третьего поколения по обработке металлов // Вестник КНИТУим. А.Н. Туполева, 2015 № 4*
5. *Каляшина А.В. Самдаров Т.Р. Комплексное решение интеграции волоконного лазера и роботизированного комплекса третьего поколения // Фундаментальные исследования, 2016 № 22(4) с. 730-735*

6. *Фролов К.В., Воробьев Е.И.* Механика промышленных роботов. Основы конструирования. Книга 3

7. *Фролов К.В., Воробьев Е.И.* Механика промышленных роботов. Расчет и проектирование механизмов. Книга 2

8. *Фролов К.В., Воробьев Е.И.* Механика промышленных роботов. Кинематика и динамика. Книга 1

Дата отправки в редакцию: 9 октября 2018

Сведения об авторах:

1) Каляшина Анна Викторовна, к.т.н., доцент кафедры Автоматика и управление КНИТУ-КАИ, anna_vik@mail.ru +7-927-459-85-41

2) Габитов Артур Айдарович, аспирант кафедры Автоматика и управление КНИТУ-КАИ, arthurgabitov@gmail.com, +7-903-182-93-06