

## ЭВОЛЮЦИЯ КИНЕМАТИКИ РОБОТА: ЗНАЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ 7-Й СТЕПЕНИ ПОДВИЖНОСТИ

*Ивановский С.П., Фомин Е.И.*

*Московский государственный технологический университет "СТАНКИН",  
Москва*

**Ключевые слова:** 7-ая ось подвижности, пространственные манипуляторы, теории базисов Грёбнера, задача обратной кинематики.

**Аннотация.** Данная статья посвящена эволюции кинематики промышленных роботоманипуляторов и значению добавления седьмой степени подвижности. В работе рассматриваются конструктивные особенности традиционных 6-степенных роботов и их отличие от кинематических возможностей человеческой руки. Показано, что для полного кинематического подобия человеку необходима 7-я степень свободы, реализуемая дополнительной подвижной осью. Проанализированы преимущества 7-степенных манипуляторов, которые связаны с расширением рабочего пространства и гибкостью. Рассмотрен подход к решению обратной задачи кинематики таких роботов на основе теории базисов Грёбнера. Приведены примеры эффективного применения 7-степенных роботов в задачах промышленной сварки. Сделан вывод о перспективности применения дополнительной степени подвижности в современной робототехнике.

## EVOLUTION OF ROBOT KINEMATICS: SIGNIFICANCE AND APPLICATION OF THE 7TH DEGREE OF MOBILITY

*Ivanovsky S.P., Fomin E.I.*

*Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow*

**Keywords:** 7th axis of mobility, spatial manipulators, Gröbner bases theories, inverse kinematics problem.

**Abstract.** This article is dedicated to the evolution of kinematics in industrial robotic manipulators and the significance of adding a seventh degree of freedom. The study examines the structural features of traditional 6-degree-of-freedom robots and their differences from the kinematic capabilities of the human hand. It is demonstrated that for complete kinematic similarity to a human, a 7th degree of freedom is required, realized through an additional movable axis. The advantages of 7-degree-of-freedom manipulators are analyzed, including expanded workspace and flexibility. An approach to solving the inverse kinematics problem for such robots based on Gröbner basis theory is considered. Examples of effective applications of 7-degree-of-freedom robots in industrial welding tasks are provided. The conclusion is drawn regarding the prospects of utilizing an additional degree of freedom in modern robotics.

Пространственные манипуляторы в общем случае имеют 6 степеней свободы движения (три для отработки региональных движений и три – для локальных) кинематически подобных человеческой руке [1, 2]. Такое подобие придает роботам очень большие технологические возможности, поскольку такой робот может выполнять практически все производственные операции, которые выполняет человек. Роботы обладают гораздо большей грузоподъемностью и высокой точностью повторения движений, что позволяет делать им то, что человек делать не способен.

Следует понимать, что кинематическое подобие таких роботов человеческой руке – не является идентичным – поскольку человек может не только сгибать и разгибать руки, но и поворачивать их относительно оси плеча (рис. 1).

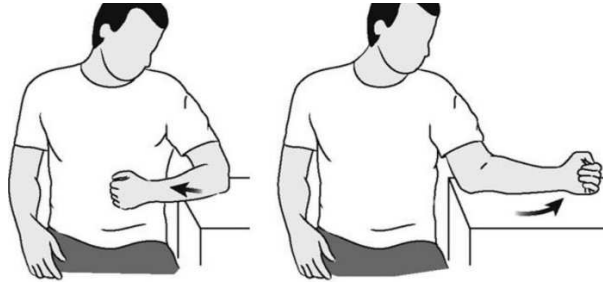


Рис. 3. Дополнительные кинематические возможности человеческой руки

Таким образом, для полного кинематического подобия промышленному роботу требуется дополнительная, 7-я ось подвижности, позволяющая манипулятору поворачивать плоскость вращения локтя относительно плоскости вращения плеча (рис. 2).

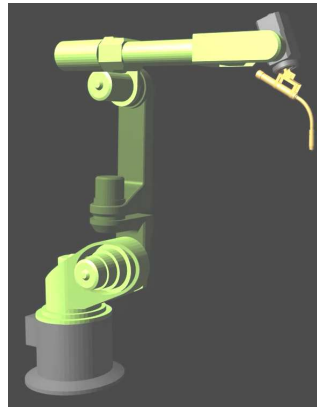


Рис. 4. Робот-манипулятор с дополнительной степенью подвижности (выделена тёмным цветом)

Дополнительная ось подвижности позволяет в широком диапазоне изменять положение локтя робота при неизменном положении инструмента в пространстве (рис. 3).

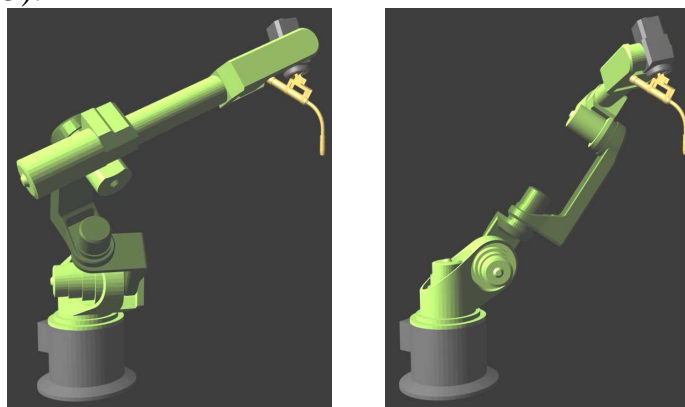


Рис. 5. Изменение положения локтя при неизменном положении инструмента в пространстве

Разумеется, добавление 7-й оси подвижности в математическую модель кинематической цепи манипулятора сделает её кинематически неопределённой

[3]. В этом случае для любых заданных положения и ориентации инструмента существует бесконечное множество решений обратной задачи кинематики:

$$q_n = f_n^{-1}(p). \quad (1)$$

Для управления таким манипулятором, помимо координат инструмента  $p$ , в каждой точке траектории необходимо задавать ещё и значения угла  $\gamma$  поворота дополнительной оси подвижности (угла поворота плоскости локтя относительно плоскости плеча):

$$q_n = f_n^{-1}(p, \gamma). \quad (2)$$

Угол поворота дополнительной оси подвижности становится установочным параметром, который следует задавать в технологической программе для робота.

Одним из способов решения задачи является расчет обратной задачи кинематики с использованием теории базисов Грёбнера. Задача обратной кинематики заключается в нахождении всех комбинаций конфигураций сочленений, которые позиционируют рабочий орган робота в заданной точке пространства. Для ее решения необходимо определить полиномиальные уравнения, описывающие движение роботизированной руки в каждой конфигурации сочленений, чтобы найти все значения сочленений  $\theta$ , позволяющие роботу принять заданную конфигурацию положения (табл. 1).

Табл. 1. Параметры алгоритма Денавита–Хартенберга для 7-степенного робота

$k$	$\alpha_k$ , рад	$a_k$ , мм	$d_k$ , мм	$\theta_k$ , рад
1	$-\pi/2$	0	$d_1$	$\theta_1$
2	$\pi/2$	0	0	$\theta_2$
3	$-\pi/2$	0	$d_3$	$\theta_3$
4	$\pi/2$	0	0	$\theta_4$
5	$-\pi/2$	0	$d_5$	$\theta_5$
6	$\pi/2$	0	0	$\theta_6$
7	0	0	$d_7$	$\theta_7$

Система уравнений в матричной форме:

$${}^{k-1}A_k = \begin{bmatrix} c_{\theta_k} & -s_{\theta_k} c_{\alpha_k} & s_{\theta_k} s_{\alpha_k} & a_k c_{\theta_k} \\ s_{\theta_k} & c_{\theta_k} c_{\alpha_k} & -c_{\theta_k} s_{\alpha_k} & a_k s_{\theta_k} \\ 0 & s_{\alpha_k} & c_{\alpha_k} & d_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $c$  и  $s$  – переменные связанные с вращением,  $d$  – переменная связанная с линейным перемещением.

Умножая все матрицы преобразования, полученные с помощью алгоритма Денавита–Хартенберга, получаем однородную матрицу преобразования, которая идет от базового к конечному эффектору, то есть путем изменения  $k$  от 0 до  $n$ , полученную матрицу можно рассматривать как решение задачи прямой кинематики.

Таким образом, теория базисов Грёбнера вычислительно эффективна, поскольку полученные уравнения для определения семи переменных математически проще решать. Использование дополнительной оси подвижности существенно расширяет манипулятивные возможности робота. Такой робот может решать задачи в стеснённом технологическом пространстве и обходить препятствия, не прерывая технологического процесса. Очень показательна демонстрация возможностей 7-степенного робота в задачах сварки. Например, такой робот может полностью обварить стык колонны с основанием (рис. 4).

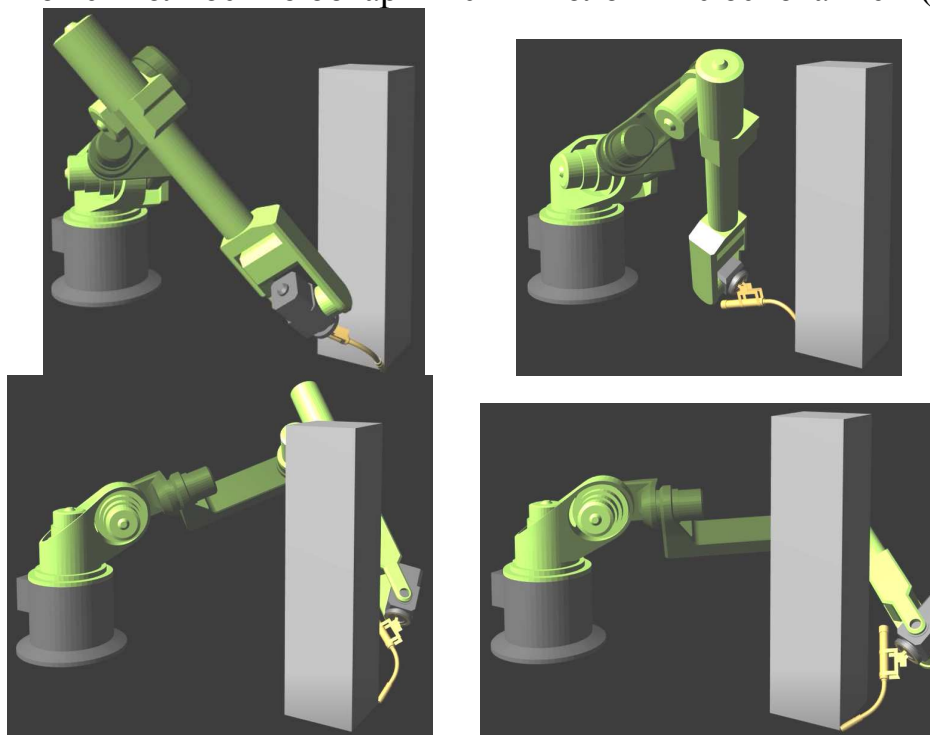


Рис. 6. Непрерывная обварка колонны с поворотом плоскости локтя

Очевидно, что ни один сварочный робот с традиционной 6-степенной кинематикой осью с подобной задачей не справится.

#### Список литературы

1. Ефанов А.М., Назаров В.В. Структура и кинематика манипуляторов. Методические указания к курсовому проектированию по ТММ. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. – 39 с.
2. Хомченко В.Г. Робототехнические системы: Учебное пособие. – Омск: ОмГТУ, 2016. – 195 с.
3. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С., Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: Учеб. для вузов – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 400 с.

#### Сведения об авторах:

*Ивановский Станислав Павлович* – к.т.н., ведущий научный сотрудник;

*Фомин Евгений Игоревич* – ведущий научный сотрудник.