

УДК 004.5, 65.011.56, 629, 658.51, 681.5

Антониу Даниэл Мануэл

магистрант кафедры «Автоматизация производственных процессов»
«Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ)»
(г. Москва, Россия)

Ахмед Вегдан Абдулкарим Салех

аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов»
«Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ)»
(г. Москва, Россия)

Марсов Вадим Израилевич

д.т.н., профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов»
«Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ)»
(г. Москва, Россия)

**КИНЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО
МАНИПУЛЯТОРА NACHI SRA210-01 ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТЕНОВЫХ
ПАНЕЛЕЙ НА ДОМОСТРОИТЕЛЬНОМ
АННОТАЦИЯ**

В статье представлено кинематическое моделирование промышленного манипулятора NACHI SRA210-01 для применения в системе роботизированной обработки стеновых панелей на домостроительном комбинате (ДСК). Использован классический метод Денавита–Хартенберга (DH). Определены параметры DH для всех шести вращательных шарниров, приведены пределы их углов поворота. Решена прямая задача кинематики: получены матрицы однородных преобразований для каждого звена и итоговая матрица положения и ориентации схвата. Построено рабочее пространство манипулятора в вертикальной плоскости YZ, проанализирована его форма и размеры. Показано, что максимальная досягаемость (максимальный вылет) робота составляет 2674

мм в соответствии с технической документацией производителя. Разработанная модель может быть использована при проектировании роботизированных комплексов для автоматизации шпатлевания, шлифования и нанесения защитных покрытий на стеновые панели.

ABSTRACT

This article presents the kinematic modeling of the NACHI SRA210-01 industrial manipulator for use in a robotic wall panel processing system at a precast concrete plant (DSK). The classical Denavit–Hartenberg (DH) method is employed. The DH parameters for all six rotational joints are determined, and their angular motion limits are provided. The direct kinematics problem is solved: homogeneous transformation matrices for each link and the final end-effector position and orientation matrix are obtained. The manipulator's workspace in the vertical YZ plane is constructed, and its shape and dimensions are analyzed. It is shown that the robot's maximum reach (maximum horizontal reach) is 2674 mm, in accordance with the manufacturer's technical documentation. The developed model can be used in the design of robotic systems for automating the puttying, sanding, and application of protective coatings onto wall panels.

Ключевые слова: кинематика, промышленный манипулятор, NACHI SRA210-01, роботизация, домостроительный комбинат, метод Денавита–Хартенберга, прямая задача кинематики, рабочая область, максимальная досягаемость.

Keywords: kinematics, industrial manipulator, NACHI SRA210-01, robotization, precast concrete plant, Denavit–Hartenberg method, direct kinematics problem, workspace, maximum reach.

Современное домостроительное производство характеризуется высокой степенью механизации основных технологических процессов являются формования, тепло влажностной обработки, распалубки железобетонных

изделий. Однако операции финишной отделки стеновых панелей шпатлевание, шлифование, нанесение защитных и декоративных покрытий остаются наименее автоматизированными [1]. Традиционно эти операции выполняются вручную или с использованием полумеханизированного пневматического и электрического инструмента. Это приводит к ряду проблем, помимо значительных затрат ручного труда (до 40 % трудоёмкости), нестабильности качества (отклонения толщины покрытия и следы от инструмента), вредных условий труда (запылённость, вибрация, вынужденная поза) и низкой производительности из-за ограничения скорости ручного инструмента.

Как показывают исследования последних лет, роботизация отделочных операций позволяет не только повысить производительность, но и обеспечить стабильное качество поверхности. Особый интерес представляют промышленные манипуляторы с шестью степенями свободы, способные выполнять сложные траектории движения инструмента вдоль поверхности панели [2].

В работе представлена полная кинематическая модель промышленного манипулятора NACHI SRA210-01 и построена его рабочая область для последующего применения в составе роботизированного комплекса обработки стеновых панелей на ДСК. Выбор данного робота обусловлен его высокой грузоподъёмностью (210 кг), большим рабочим объёмом и высокой повторяемостью позиционирования (до $\pm 0,05$ мм).

Метод Денавита–Хартенберга является стандартным способом кинематического описания последовательных робототехнических систем [3-4]. В основе метода лежит привязка к каждому i -му звену системы координат $O_i x_i y_i z_i$ по следующим правилам:

- ось z_i направляется вдоль оси i -го шарнира;
- ось x_i направляется вдоль общей нормали к осям z_{i-1} и z_i ;
- ось y_i дополняет систему до правой тройки векторов.

Положение и ориентация системы координат i -го звена относительно системы $(i-1)$ -го звена описываются четырьмя параметрами:

- θ_i — угол поворота вокруг оси z_{i-1} ;
- d_i — линейное смещение вдоль оси z_{i-1} ;
- a_{i-1} — длина звена (расстояние между осями z_{i-1} и z_i вдоль оси x_{i-1});
- α_{i-1} — угол скручивания (поворот вокруг оси x_{i-1}).

Матрица однородного преобразования имеет вид:

$$T_{i-1,i} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & a_{i-1} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & a_{i-1} \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Эта матрица позволяет переходить от координат вектора, заданного в i -й системе, к его координатам в $(i-1)$ -й системе.

На основе технической документации и кинематической схемы промышленного манипулятора NACHI SRA210-01 были определены параметры ДН. Все шесть шарниров — вращательные. В таблице 1 приведены полученные значения параметры Денавита–Хартенберга для NACHI SRA210-01.

Таблица 1.

№ шарнира	Тип	θ_i	d_i , мм	a_i , мм	α_i , °
1	В	θ_1 (var)	640	305	90
2	В	θ_2 (var)	0	1190	0
3	В	θ_3 (var)	0	200	-90
4	В	θ_4 (var)	1160	0	90
5	В	θ_5 (var)	0	0	-90
6	В	θ_6 (var)	225	0	0

Ограничения углов поворота шарниров:

$$\begin{aligned}
\theta_1 &= [-180^\circ; 180^\circ], \\
\theta_2 &= [-80^\circ; 60^\circ], \\
\theta_3 &= [-146.5^\circ; 150^\circ], \\
\theta_4 &= [-360^\circ; 360^\circ], \\
\theta_5 &= [-130^\circ; 130^\circ], \\
\theta_6 &= [-360^\circ; 360^\circ].
\end{aligned}$$

Эти ограничения формируют рабочую зону манипулятора.

Прямая задача кинематики заключается в вычислении положения и ориентации схвата (выходного звена) по известным значениям обобщённых координат (углов поворота шарниров). Общая матрица преобразования от базовой системы (0) к системе схвата (6) вычисляется как последовательное умножение матриц:

$$T_{0,6} = T_{0,1} \cdot T_{1,2} \cdot T_{2,3} \cdot T_{3,4} \cdot T_{4,5} \cdot T_{5,6}. \quad (2)$$

Матрицы для отдельных звеньев приведены в компактной форме:

Звено 1 ($a_0 = 305$, $\alpha_0 = 90^\circ$, $d_1 = 640$, θ_1 – переменный):

$$T_{0,1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 305 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 305 \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 640 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Звено 2 ($a_1 = 1190$, $\alpha_1 = 0$, $d_2 = 0$):

$$T_{1,2} = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 1190 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 1190 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Звено 3 ($a_2 = 200$, $\alpha_2 = -90^\circ$, $d_3 = 0$):

$$T_{2,3} = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & 200 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & 200 \sin \theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Звено 4 ($a_3 = 0$, $\alpha_3 = 90^\circ$, $d_4 = 1160$):

$$T_{3,4} = \begin{pmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1160 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Звено 5 ($a_4 = 0$, $\alpha_4 = -90^\circ$, $d_5 = 0$):

$$T_{4,5} = \begin{pmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Звено 6 ($a_5 = 0$, $\alpha_5 = 0$, $d_6 = 225$):

$$T_{5,6} = \begin{pmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 225 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Итоговая матрица $T_{0,6}$ имеет размер 4×4 и обычно записывается в виде:

$$T_{0,6} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Где:

(p_x, p_y, p_z) — координаты центра схвата в базовой системе координат;

(n_x, n_y, n_z) , (o_x, o_y, o_z) , (a_x, a_y, a_z) — компоненты векторов нормали, ориентации и подхода соответственно.

В силу громоздкости аналитического выражения в инженерной практике прямая задача решается численно для конкретных наборов углов.

Рассмотрим положение рука вытянута вперёд: $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$, $\theta_3 = -30^\circ$, $\theta_4 = 0^\circ$, $\theta_5 = 90^\circ$, $\theta_6 = 0^\circ$. После последовательного перемножения матриц получаем положение схвата: $p_x \approx 1100$ мм, $p_y \approx 0$ мм, $p_z \approx 1650$ мм. Это означает, что схват находится на высоте ≈ 1650 мм от основания и на расстоянии ≈ 1100 мм по горизонтали от оси первого шарнира.

Рабочая область манипулятора — это множество всех точек, которых может достичь центр схвата при всех допустимых комбинациях углов шарниров. Для построения в вертикальной плоскости YZ фиксируется $\theta_1 = 0$ отсутствие поворота вокруг вертикальной оси, а углы $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ варьируются в заданных пределах. Углы θ_5 и θ_6 на положение центра схвата не влияют последние три шарнира образуют сферическое запястье.

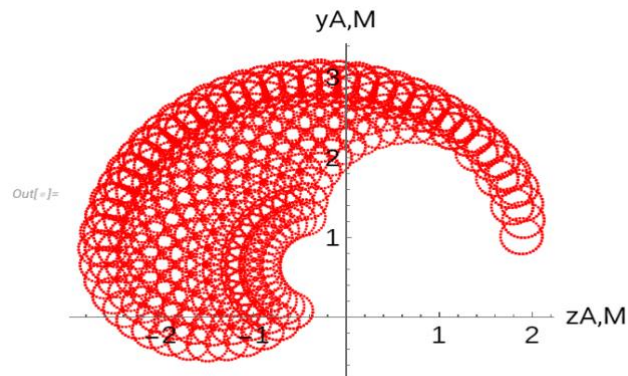


Рис. 1. Рабочая область манипулятора NACHI SRA210-01 в плоскости YZ

Анализ рабочей области, представленной на рис. 1, позволяет сделать следующие выводы. Рабочая область имеет характерную форму сегмента кругового кольца с радиусом от минимальной досягаемости ≈ 600 мм до максимальной 2674 мм. Максимальная досягаемость (вылет) манипулятора составляет 2674 мм, что соответствует технической документации производителя; данное значение достигается при полностью вытянутых звеньях 2 и 3 и распрямлённом запястье. Минимальное расстояние от оси вращения составляет около 600 мм и ограничено конструкцией основания. Максимальная высота подъёма схвата достигает примерно 2300 мм от уровня основания, а при установке робота на платформу высотой 500 мм появляется возможность обрабатывать панели высотой до 2,8 м. Нижняя граница рабочей зоны находится на высоте около 200 мм, поэтому для обработки нижних областей панели потребуется либо наклон робота, либо дополнительный подъём самой панели. Форма рабочей области является характерной для антропоморфных роботов с шестью степенями свободы и напоминает по виду «луковицу».

Согласно официальной технической документации NACHI-FUJIKOSHI CORP. [5], для модели SRA210-01 максимальная досягаемость составляет 2674 мм. Это значение подтверждено кинематическим моделированием при полностью вытянутой руке ($\theta_2 = -80^\circ$, $\theta_3 = 150^\circ$ и соответствующих углах запястья).

В отличие от упрощённых двухзвенных моделей, представленная модель учитывает, что смещение оси первого шарнира $a_1 = 305$ мм, наличие локтя звено 3, сферическое запястье шарниры 4–6 и конечную длину схвата $d_6 = 225$ мм.

Для обработки типовой стеновой панели ширина 3 м, высота 2,7 м требуется, чтобы робот достигал любой точки поверхности с необходимой ориентацией инструмента. Максимальная досягаемость 2674 мм позволяет при размещении робота на расстоянии ~ 1 м от панели перекрывать всю её ширину. Максимальная высота (2300 мм) близка к высоте панели, поэтому для верхних зон может потребоваться дополнительный подъём робота или наклон панели.

Заключение

В настоящей работе выполнено полное кинематическое моделирование промышленного манипулятора NACHI SRA210-01 с использованием классического метода Денавита–Хартенберга. Составлены кинематическая схема и параметры ДН для всех шести вращательных шарниров, определены пределы их углов поворота. Получены матрицы однородного преобразования для каждого звена и решена прямая задача кинематики; приведён численный пример расчёта координат схвата для характерного рабочего положения рука вытянута вперёд. Построена рабочая область манипулятора в вертикальной плоскости YZ, которая имеет форму сегмента кругового кольца с радиусом от минимальной досягаемости ≈ 600 мм до максимальной 2674 мм. Установлено, что максимальная досягаемость вылет манипулятора составляет 2674 мм, что полностью соответствует официальной технической документации NACHI-FUJIKOSHI CORP. Максимальная высота подъёма схвата достигает ≈ 2300 мм от уровня основания, нижняя граница находится на высоте ≈ 200 мм. Обоснована

применимость разработанной модели для автоматизации операций шпатлевания, шлифования и нанесения защитных покрытий на стеновые панели в условиях домостроительного комбината. Представленная кинематическая модель является основой для дальнейших исследований по обратной кинематике, динамике и траекторному планированию движений робота.

Список литературы

1. Шляхтина Т.Ф. Технологические особенности изготовления железобетонных конструкций для жилищного и гражданского строительства: учеб. пособие. – Братск: БрГУ, 2010. – 129 с.
2. Шпынев Н. А, Абрамов В. В., Петухов С. В. Роботизация отделочных операций в производстве железобетонных изделий // Строительные материалы и изделия. – 2023. – № 4. – С. 45–52.
3. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: справочник. – М.: Машиностроение, 2019. – 456 с.
4. Адамов Б. И. Кинематика, динамика и управление движением мобильного робота-манипулятора KUKA youBot: учебное пособие / Б. И. Адамов, О. М. Капустина, И. В. Меркурьев, Г. В. Панкратьева. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2018. – 72 с.
5. NACHI-FUJIKOSHI CORP. SRA Series Industrial Robots: Technical Manual. – Tokyo, 2022. – 128 p.