



Кинематический анализ роботизированной руки Zhugirmek v1.0

Ж.Т. Жумашева¹ , Е.Н. Жолдасов*¹ , Ж.Ж. Байгунчеков¹ 
А.Ж. Абекова² , Г.Ж. Хамитова^{3*} 

^{1,2,3} *Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

⁴ *Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, Алматы, Казахстан*

⁵ *Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, Астана, Казахстан*

*E mail: Zhadyra_14@mail.ru, jera.kz@mail.ru, bzh47@mail.ru,
Abekova310792@gmail.com, g.khamitova@kazatu.edu.kz,*

Аннотация. В данной работе представлен кинематический анализ роботизированной руки гуманоидного робота Zhugirmek v1.0. Роботизированная рука имеет шесть степеней свободы, что обеспечивает возможность выполнения широкого спектра манипуляционных задач. Для математического описания пространственного движения звеньев использован метод Денавита–Хартенберга, позволяющий сформировать кинематическую модель манипулятора. Получены уравнения прямой кинематики, определяющие положение и ориентацию рабочего органа в пространстве. На основе разработанной модели выполнено моделирование движения роботизированной руки в среде MATLAB. Проведен анализ рабочей зоны манипулятора и исследованы его кинематические возможности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем управления и дальнейшей модернизации гуманоидного робота Zhugirmek v1.0. Представленные результаты анализа могут служить основой для разработки алгоритмов обратной кинематики и траекторного управления. Разработанная модель позволяет оптимизировать конструктивные параметры манипулятора для повышения его функциональности. Полученные данные важны для создания эффективных систем визуального контроля и адаптивного взаимодействия с окружающей средой.

Ключевые слова: гуманоидный робот, роботизированная рука, кинематика, прямая кинематика, MATLAB, Денавит-Хартенберг.

Введение.

В последние годы наблюдается активное развитие гуманоидной робототехники, обусловленное необходимостью создания роботизированных систем, способных взаимодействовать с окружающей средой по аналогии с человеком. Одним из ключевых элементов гуманоидного робота являются роботизированные руки, обеспечивающие выполнение манипуляционных операций различной сложности. Для эффективного управления движением роботизированной руки необходимо разработать математическую модель, позволяющую определять положение и ориентацию рабочего органа в пространстве.

В настоящее время ведущие мировые компании, такие как Tesla, Figure AI и Agility Robotics, активно развивают гуманоидные роботы, предназначенные для работы в промышленности, логистике и сфере обслуживания. Одним из основных требований к таким роботам является наличие высокоманевренных роботизированных рук с несколькими степенями свободы. Разработка и внедрение таких роботов требует много затрат, и надо отметить, что еще не были разработаны гуманоидные роботы отечественного производства. Данное исследование ведется в рамках проекта AP25796579 при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан и направлен на разработку гуманоидного робота Zhugirmek v1.0. Конструкция робота включает мобильную платформу с четырьмя меканум-колесами, голову с двумя степенями свободы и две роботизированные руки, каждая из которых имеет шесть степеней свободы. Такая конфигурация позволяет выполнять широкий спектр операций, связанных с захватом и перемещением объектов.



Рисунок 1. 3D модель общего вида робота Zhugirmek v1.0, разработанная в программе SolidWorks

На рисунке 1 приведена 3D модель робота Zhugirmek v1.0. Целью данной работы является разработка кинематической модели роботизированной руки гуманоидного робота Zhugirmek v1.0 и получение уравнений прямой кинематики.

Методология

Методология исследования включает:

1. Библиографический и сравнительный анализ — поиск, систематизация и изучение мировой научной литературы, статей и патентов в области гуманоидной робототехники и проектирования антропоморфных манипуляторов.

2. Математическое моделирование — исследование принципов пространственного движения звеньев руки робота и применение кинематического метода Денавита–Хартенберга.

3. Метод однородных матричных преобразований — разработка аналитических уравнений для точного определения положения и ориентации конечного эффектора в пространстве.

4. Метод компьютерного и имитационного моделирования — верификация полученных математических моделей и визуализация пространственного поведения манипулятора в специализированной программной среде.

Основные исследовательские вопросы, на которые направлено данное исследование, касаются возможности точного математического описания геометрии движений роботизированной руки с шестью степенями свободы и оценки её кинематических возможностей. В частности, исследуется, как параметры Денавита–Хартенберга адаптируются под физическую структуру плечевого, локтевого и запястного суставов робота Zhugirmek v1.0, какие аналитические зависимости связывают углы поворота в суставах с координатами рабочего органа, а также при каких условиях разработанная модель обеспечивает корректный расчет траекторий без вычислительных неопределенностей.

В рамках исследования выдвигается гипотеза о том, что применение метода Денавита–Хартенберга к оригинальной шестиосевой конструкции манипулятора позволяет получить замкнутые уравнения прямой кинематики, обеспечивающие прецизионное позиционирование рабочего органа робота Zhugirmek v1.0 в реальном времени.

Этапы исследования включают четыре основных этапа: на первом этапе был проведен сбор научно-технической литературы по теме гуманоидной робототехники и существующих методов анализа многозвенных манипуляторов. На втором этапе изучены структурно-геометрические аспекты робота Zhugirmek v1.0, разработана 3D-модель его общего вида и определены точные количественные параметры длин звеньев. На третьем этапе сформирована кинематическая диаграмма левой руки робота, расставлены локальные системы координат и рассчитана таблица параметров Денавита–Хартенберга. На основе этих данных синтезированы матрицы однородного преобразования для каждого сочленения. На четвертом этапе получено итоговое уравнение прямой кинематики, проведено численное моделирование в среде MATLAB и сформулированы выводы о работоспособности разработанной модели.

Результаты и Обсуждение.

Гуманоидный робот Zhugirmek v1.0 разработан для выполнения манипуляционных задач и воспроизведения основных движений человека. Конструкция робота включает голову с двумя вращательными степенями свободы, две роботизированные руки, каждая

Кинематическая структура роботизированной руки состоит из четырех основных звеньев. Длина первого звена составляет $L_1 = 170$ мм, второго звена — $L_2 = 300$ мм, третьего звена — $L_3 = 200$ мм, а длина четвертого звена составляет $L_4 = 70$ мм. Общая длина руки от основания до рабочего органа составляет 740 мм.

Координатные системы расположены следующим образом. Базовая система координат $O_{B_1}X_{B_1}Y_{B_1}Z_{B_1}$ устанавливается в центре шеи и служит базовой системой координат для головы и рук [1][3]. Прямая кинематическая задача заключается в определении положения и ориентации рабочего органа по известным значениям обобщенных координат манипулятора. В рассматриваемой роботизированной руке такими координатами являются углы поворота шести вращательных сочленений.

Для математического описания пространственного движения роботизированной руки использован метод ДН, который является одним из наиболее распространенных методов моделирования последовательных манипуляторов [2]. Согласно данному методу каждому звену манипулятора присваивается собственная система координат (Рисунок 3), а взаимное расположение соседних звеньев описывается четырьмя параметрами: углом поворота θ_i , линейным смещением d_i , длиной звена a_i и углом скручивания α_i [3]. В целях упрощения кинематической модели базовая система координат была размещена в центре плечевого сустава руки. В связи с этим расстояние от центра корпуса до плечевого сустава L_1 не учитывается в модели.

1. Определение параметра d_i .

Параметр d_i характеризует расстояние от начала $(i - 1)$ -й системы координат до точки пересечения оси z_{i-1} с осью x_i , измеряемое вдоль оси z_{i-1} . В этом случае:

1.1) $d_1 = 0$ мм (расстояние от начала координаты O_0 до точки пересечения оси z_0 с осью x_1 , измеряемое вдоль оси z_0);

1.2) $d_2 = 0$ мм (расстояние от начала координаты O_1 до точки пересечения оси z_1 с осью x_2 , измеряемое вдоль оси z_1);

1.3) $d_3 = 300$ мм (расстояние от начала координаты O_2 до точки пересечения оси z_2 с осью x_3 , измеряемое вдоль оси z_2);

1.4) $d_4 = 0$ мм (расстояние от начала координаты O_3 до точки пересечения оси z_3 с осью x_4 , измеряемое вдоль оси z_3);

1.5) $d_5 = 200$ мм (расстояние от начала координаты O_4 до точки пересечения оси z_4 с осью x_5 , измеряемое вдоль оси z_4);

1.6) $d_6 = 0$ мм (расстояние от начала координаты O_5 до точки пересечения оси z_5 с осью x_6 , измеряемое вдоль оси z_5).

2. Определение параметра a_i .

Параметр a_i представляет собой расстояние от точки пересечения оси z_{i-1} с осью x_i до начала i -й системы координат, измеряемое вдоль оси x_i . В этом случае:

2.1) $a_1 = 0$ мм (расстояние от точки пересечения оси z_0 с осью x_1 до начала системы координат O_1 , измеряемое вдоль оси x_1);

2.2) $a_2 = 0$ мм (расстояние от точки пересечения оси z_1 с осью x_2 до начала системы координат O_2 , измеряемое вдоль оси x_2);

2.3) $a_3 = 0$ мм (расстояние от точки пересечения оси z_2 с осью x_3 до начала системы координат O_3 , измеряемое вдоль оси x_3);

2.4) $a_4 = 0$ мм (расстояние от точки пересечения оси z_3 с осью x_4 до начала системы координат O_4 , измеряемое вдоль оси x_4);

2.5) $a_5 = 0$ мм (расстояние от точки пересечения оси z_4 с осью x_5 до начала системы координат O_5 , измеряемое вдоль оси x_5);

2.6) $a_6 = 70$ мм (расстояние от точки пересечения оси z_5 с осью x_6 до начала системы координат O_6 , измеряемое вдоль оси x_6).

3. Определение параметра θ_i .

Параметр θ_i определяет угол поворота оси x_{i-1} вокруг оси z_{i-1} , необходимый для её совмещения с осью x_i . Для вращательного сочленения параметр θ_i является переменной обобщённой координатой. Знак угла θ_i определяется в соответствии с правилом правой руки. Направление положительного вращения рассматривается вдоль положительного направления оси z_{i-1} . При повороте оси x_{i-1} к оси x_i против часовой стрелки угол θ_i считается положительным, а при повороте по часовой стрелке — отрицательным. В этом случае:

3.1) $\theta_1 = 0$ (угол поворота оси x_0 вокруг оси z_0 , необходимый для её совмещения с осью x_1 , поскольку оси x_0 и x_1 совпадают по направлению значение параметра $\theta_1=0$);

3.2) $\theta_2 = 0$ (угол поворота оси x_1 вокруг оси z_1 , необходимый для её совмещения с осью x_2 , поскольку оси x_1 и x_2 совпадают по направлению значение параметра $\theta_2=0$);

3.3) $\theta_3 = 90$ (угол поворота оси x_2 вокруг оси z_2 , необходимый для её совмещения с осью x_3 . Для определения знака угла θ_1 необходимо рассматривать направление вращения вдоль положительного направления оси z_2 . При повороте оси x_2 к оси x_3 по кратчайшему пути наблюдается вращение против часовой стрелки. В соответствии с правилом правой руки угол θ_3 является положительным);

3.4) $\theta_4 = 0$ (угол поворота оси x_3 вокруг оси z_3 , необходимый для её совмещения с осью x_4 , поскольку оси x_3 и x_4 совпадают по направлению значение параметра $\theta_4=0$);

3.5) $\theta_5 = -90$ (угол поворота оси x_4 вокруг оси z_4 , необходимый для её совмещения с осью x_5 . Для определения знака угла θ_5 необходимо рассматривать направление вращения вдоль положительного направления оси z_4 . При повороте оси x_4 к оси x_5 по кратчайшему пути наблюдается вращение по часовой стрелке. В соответствии с правилом правой руки угол θ_5 является отрицательным);

3.6) $\theta_6 = 90$ (угол поворота оси x_5 вокруг оси z_5 , необходимый для её совмещения с осью x_6 . Для определения знака угла θ_6 необходимо рассматривать направление вращения вдоль положительного направления оси z_5 . При повороте оси x_5 к оси x_6 по кратчайшему пути наблюдается вращение против часовой стрелки. В соответствии с правилом правой руки угол θ_6 является положительным).

4. Определение параметра α_i .

Параметр α_i задаёт угол поворота оси z_{i-1} вокруг оси x_i , необходимый для её совмещения с осью z_i . Знак угла α_i определяется в соответствии с правилом правой руки.

4.1) $\alpha_1=90$ (угол поворота оси z_0 вокруг оси x_1 , необходимый для её совмещения с осью z_1 . При повороте оси z_0 к оси z_1 по кратчайшему пути наблюдается вращение против часовой стрелки. В соответствии с правилом правой руки угол α_1 является положительным);

4.2) $\alpha_2 = -90$ (угол поворота оси z_1 вокруг оси x_2 , необходимый для её совмещения с осью z_2 . При повороте оси z_1 к оси z_2 по кратчайшему пути наблюдается вращение по часовой стрелке. В соответствии с правилом правой руки угол α_2 является отрицательным);

4.3) $\alpha_3=90$ (угол поворота оси z_2 вокруг оси x_3 , необходимый для её совмещения с осью z_3 . При повороте оси z_2 к оси z_3 по кратчайшему пути наблюдается вращение против часовой стрелки. В соответствии с правилом правой руки угол α_3 является положительным);

4.4) $\alpha_4 = -90$ (угол поворота оси z_3 вокруг оси x_4 , необходимый для её совмещения с осью

z_4 . При повороте оси z_3 к оси z_4 по кратчайшему пути наблюдается вращение по часовой стрелке. В соответствии с правилом правой руки угол α_4 является отрицательным);

4.5) $\alpha_5=90$ (угол поворота оси z_4 вокруг оси x_5 , необходимый для её совмещения с осью z_5 . При повороте оси z_4 к оси z_5 по кратчайшему пути наблюдается вращение против часовой стрелки. В соответствии с правилом правой руки угол α_5 является положительным);

4.6) $\alpha_6=-90$ (угол поворота оси z_5 вокруг оси x_6 , необходимый для её совмещения с осью z_6 . При повороте оси z_5 к оси z_6 по кратчайшему пути наблюдается вращение по часовой стрелке. В соответствии с правилом правой руки угол α_6 является отрицательным);

На основании выполненного анализа взаимного расположения систем координат и определения параметров ДН для каждого сочленения роботизированной руки были получены значения параметров θ_i , d_i , a_i и α_i [4]. Результаты расчёта и принятые параметры кинематической модели представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры Денавита Хартенберга левой руки робота Zhugirmek v1.0.

i	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	0	90	0	0
2	0	-90	0	0
3	90	90	0	300
4	0	-90	0	0
5	-90	90	0	200
6	90	-90	70	0

Матрица ДН использует эти четыре параметра для определения положения и направления каждой дополнительной связи или соединения. Матрица ДН для каждого соединения записывается следующим образом:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i \cdot s\theta_i & s\alpha_i \cdot s\theta_i & a_i \cdot c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i \cdot c\theta_i & -s\alpha_i \cdot c\theta_i & a_i \cdot s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & | & \\ 0 & R_{i-1}^i & 0 & | & p_{i-1}^i \\ 0 & 0 & 0 & | & - \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

В формуле (1) используются следующие сокращения: $c\theta_i = \cos\theta_i$, $s\theta_i = \sin\theta_i$, $c\alpha_i = \cos\alpha_i$, $s\alpha_i = \sin\alpha_i$.

Матрица R описывает вращение или ориентацию объекта. Эта матрица представляет собой изменение системы координат объекта в пространстве. Обычно матрица R имеет размер 3×3 и выполняет вращение, необходимое для перехода из одной системы координат в другую. Она описывает вращение объекта в трех основных направлениях.

Вектор p представляет собой положение или перемещение объекта в пространстве. Этот вектор представляет координаты начального или конечного положения объекта в пространстве. Обычно вектор p представляет положение точки (например, центра объекта) в одной системе координат. Этот вектор описывает положение объекта или изменение положения определенной точки в новой системе координат.

Подставляя значения параметров ДХ, приведенные в таблице 1, в матрицу однородного преобразования A_i^{i-1} , получаем матрицы преобразования для каждого сочленения роботизированной руки:

$${}^0_1A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

После получения матриц однородного преобразования для каждого сочленения выполняется их последовательное переумножение. В результате формируется итоговая матрица прямой кинематики, определяющая положение и ориентацию конечного звена роботизированной руки относительно базовой системы координат:

$$\begin{aligned} {}^1_2A_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^4_5A_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 200 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^2_3A_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 300 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^5_6A_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 70 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^3_4A_4 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Из формулы (2) видно, что при полностью вытянутой конфигурации руки расстояние от основания до конечного эффектора равно 570 мм [5]. Верхний левый блок матрицы с размерами 3x3 характеризует ориентацию конечного звена относительно базовой системы координат. Последний столбец матрицы определяет положение конечного звена относительно базовой системы координат:

$$P = [x \ y \ z]^T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 570 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

На основе кинематической модели была разработана и реализована программа в среде MATLAB (рисунок 4), позволяющая вычислить положение рабочего органа при заданных углах поворота суставов, а также визуализировать пространственное положение роботизированной руки в реальном времени. Эта программа позволяет задавать значения углов поворота всех шести суставов и отображать соответствующие пространственные положения звеньев руки робота. Координаты конечного эффектора вычисляются на основе кинематической модели и матриц преобразования ДН. Таким образом, при заданных параметрах звеньев и угловых положениях сочленений рабочий орган робота

Zhugirmek v1.0 располагается на расстоянии 570 мм от базовой системы координат вдоль оси Z_0 .

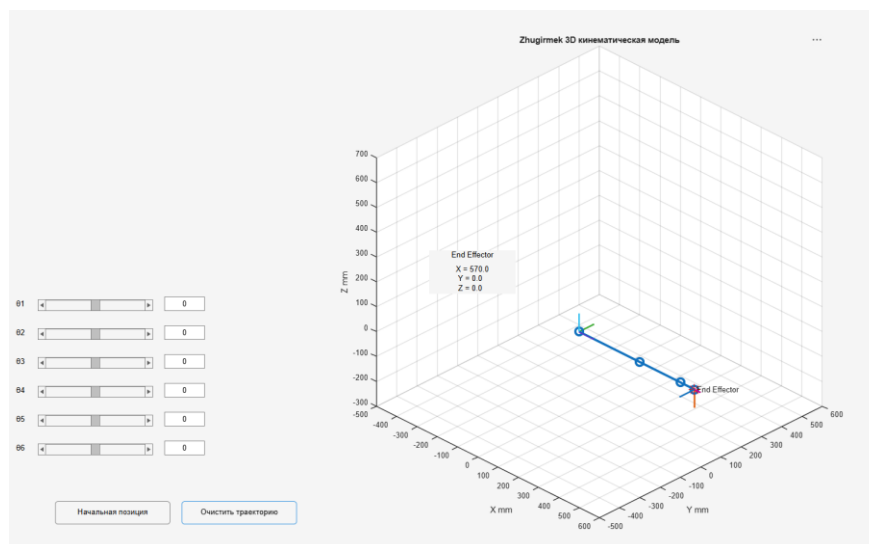


Рисунок 4. Кинематическая диаграмма левой руки робота Zhugirmek v1.0.

Заключение

В данной работе разработана нижняя мобильная платформа робота с колесами механум, проведен структурный анализ и разработана конструкция роботизированной руки гуманоидного робота Zhugirmek v1.0, выполнен ее кинематический анализ. Для описания пространственного положения звеньев была сформирована кинематическая схема руки робота и построена система координат для каждого сочленения в соответствии с методом Денавита-Хартенберга. На основе полученных параметров были определены матрицы однородных преобразований и разработана математическая модель прямой кинематики. Полученные аналитические зависимости позволяют вычислять положение и ориентацию конечного эффектора по заданным значениям углов поворота суставов. Для проверки корректности разработанной модели была реализована программа в среде MATLAB, обеспечивающая визуализацию пространственного положения роботизированной руки и расчет координат рабочего органа. Результаты моделирования подтвердили работоспособность разработанной кинематической модели и возможность ее дальнейшего использования при разработке алгоритмов управления робота.

Полученная кинематическая модель в дальнейшем может служить основой для решения задач обратной кинематики, динамики, планирования траектории движения и создания системы управления роботизированной руки.

Благодарность, конфликт интересов

Данная работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта AP25796579 «Разработка гуманоидного робота Zhugirmek v1.0».

Вклад авторов

Жумашева Ж.Т. – внесла значительный вклад в разработку концепции, систематизацию параметров и критический пересмотр содержания статьи. Она определила ключевые

направления кинематического анализа шестизвеного манипулятора, провела детальный анализ существующих мировых аналогов гуманоидных роботов, что позволило обосновать корректность применения выбранного метода и сформулировать итоговые выводы.

Жолдасов Е.Н. – внес существенный вклад в сбор первичных данных, проведение аналитических расчетов и программную реализацию исследования. Им была разработана трехмерная модель робота в SolidWorks, составлена таблица параметров Денавита-Хартенберга, выведены уравнения прямой кинематики, а также осуществлено имитационное моделирование и визуализация пространственного движения руки робота в среде MATLAB.

Байгунчеков Ж.Ж. – внес определяющий вклад в разработку теоретической концепции исследования, определение методологического базиса и критический пересмотр содержания рукописи. Он сформулировал основополагающие принципы структурно-кинематического анализа антропоморфных систем, утвердил окончательный вариант статьи для публикации, а также обеспечил надлежащее изучение и решение всех вопросов, связанных с достоверностью математических данных и целостностью всех частей исследования.

Абекова А.Ж. — сбор данных, анализ результатов, написание отдельных разделов статьи.

Хамитова Г. — сбор данных, интерпретация результатов.

Список литературы

1. Z Baigunchekov, G. Carbone, Z. Zhumasheva, B. Amanov, Y. Zholdassov and S. Tolenov, "Kinematics of the 'Ai-Gerim' robot arm," in *Mechanisms and Machine Science: Advances in Service and Industrial Robotics (RAAD 2022)*, pp. 11-18, 2022.
2. N. A. M. Ali et al., "Kinematics analysis of humanoid robot arm," in *Proc. Int. Undergraduate Research Conf.*, 2021.
3. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G. *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1987, 29-68 pp.
4. X. Zhang et al., "Structural design and kinematic analysis of humanoid robot arm," *Int. J. Robotics and Automation*, 2022.
5. R. M. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1994.
6. Saci Felahi, Walid Mohamedi (2024) Order Analysis of a Vibration Signal of a Rotating Machine. *Journal of Biosensors and Bioelectronics Research*. SRC/JBBER-121. [https://doi.org/10.47363/JBBER/2024\(2\)114](https://doi.org/10.47363/JBBER/2024(2)114)
7. Randall, R. B. A history of cepstrum analysis for machine diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 97: 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.12.026>
8. Lei, Y.; et al. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 138: 106587. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106587>
9. Zhao, R.; et al. Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 115: 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050>
10. Nguyen, V.-T.; Diep, Q. B. Vibration-based gearbox fault diagnosis using a multi-scale CNN with depth-wise feature concatenation. *PLOS ONE*, 2025, 20(7): e0324905. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324905>

11. Wang X.; et al. Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network. *Measurement*, 2021, 173: 108518. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108518>
12. Wen L., Li X., Gao L., Zhang Y. A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, Vol. 65(7), pp. 5990–5998. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2774777>
13. Zhang S., Zhang S., Wang B., Habetler T. G. Deep learning algorithms for bearing fault diagnostics - A comprehensive review. *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 104518–104538. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972859>
14. Li X., Ding Q., Sun J.-Q. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, Vol. 172, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.11.021>
15. Bi Z., Yu X., Huangfu Y., Yao J., Zhou P., He Q., Peng Z. Vibration source inversion-based fault diagnosis: Approach and application. *Journal of Sound and Vibration*, 2025, Vol. 597, Part B, 118818. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118818>
16. K. Horváth, “Noise, Vibration, and Harshness (NVH) Challenges in Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles,” *Energy Science & Engineering* 0 (2025): 1-14, <https://doi.org/10.1002/ese3.70400>.

**Zh.T. Zhumasheva¹, Y.N. Zholdassov¹, Zh. Zh. Baigunchekov¹, A. Abekova²,
G. Khamitova³**

¹ *al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

² *Kazakh national research technical university, Republic of Kazakhstan*

³ *S.Seifullin Kazakh agro technical research university, Astana, Republic of Kazakhstan*

Kinematic analysis of the Zhugirmek v1.0 robotic arm

Abstract. This paper presents a kinematic analysis of the robotic arm of the Zhugirmek v1.0 humanoid robot. The robotic arm has six degrees of freedom, enabling it to perform a wide range of manipulation tasks. The Denavit–Hartenberg method was used to mathematically describe the spatial motion of the links, allowing the formation of a kinematic model of the manipulator. Forward kinematic equations were derived that determine the position and orientation of the end-effector in space. Based on the developed model, the robotic arm's motion was simulated in MATLAB. The manipulator's working area was analyzed, and its kinematic capabilities were investigated. The obtained results can be used in the development of control systems and further modernization of the Zhugirmek v1.0 humanoid robot.

Keywords: humanoid robot, robotic arm, kinematics, forward kinematics, MATLAB, Denavit-Hartenberg

References

1. Z Baigunchekov, G. Carbone, Z. Zhumasheva, B. Amanov, Y. Zholdassov and S. Tolenov, “Kinematics of the ‘Ai-Gerim’ robot arm,” in *Mechanisms and Machine Science: Advances in Service and Industrial Robotics (RAAD 2022)*, pp. 11-18, 2022.
2. N. A. M. Ali et al., “Kinematics analysis of humanoid robot arm,” in *Proc. Int. Undergraduate Research Conf.*, 2021.

3. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1987, 29-68 pp.
4. X. Zhang et al., “Structural design and kinematic analysis of humanoid robot arm,” *Int. J. Robotics and Automation*, 2022.
5. R. M. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1994.
6. Saci Felahi, Walid Mohamedi (2024) Order Analysis of a Vibration Signal of a Rotating Machine. *Journal of Biosensors and Bioelectronics Research*. SRC/JBBER-121. [https://doi.org/10.47363/JBBER/2024\(2\)114](https://doi.org/10.47363/JBBER/2024(2)114)
7. Randall, R. B. A history of cepstrum analysis for machine diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 97: 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.12.026>
8. Lei, Y.; et al. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 138: 106587. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106587>
9. Zhao, R.; et al. Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 115: 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050>
10. Nguyen, V.-T.; Diep, Q. B. Vibration-based gearbox fault diagnosis using a multi-scale CNN with depth-wise feature concatenation. *PLOS ONE*, 2025, 20(7): e0324905. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324905>
11. Wang X.; et al. Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network. *Measurement*, 2021, 173: 108518. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108518>
12. Wen L., Li X., Gao L., Zhang Y. A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, Vol. 65(7), pp. 5990–5998. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2774777>
13. Zhang S., Zhang S., Wang B., Habetler T. G. Deep learning algorithms for bearing fault diagnostics - A comprehensive review. *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 104518–104538. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972859>
14. Li X., Ding Q., Sun J.-Q. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, Vol. 172, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.11.021>
15. Bi Z., Yu X., Huangfu Y., Yao J., Zhou P., He Q., Peng Z. Vibration source inversion-based fault diagnosis: Approach and application. *Journal of Sound and Vibration*, 2025, Vol. 597, Part B, 118818. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118818>
16. K. Horváth, “Noise, Vibration, and Harshness (NVH) Challenges in Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles,” *Energy Science & Engineering* 0 (2025): 1-14, <https://doi.org/10.1002/ese3.70400>.

Сведения об авторах:

Жумашева Жадыра Токановна – кандидат технических наук, профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, проспект Аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Байгунчеков Жумадил Жанабаевич – доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, проспект Аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Жолдасов Ернар Нурдосулы – автор для корреспонденции, магистр, научный сотрудник, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, проспект Аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Абекова Айдана Жумагалиевна – старший преподаватель, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан.

Хамитова Гульжазира – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, Астана, Казахстан.

Zhumasheva Zh.T. – Candidate of Technical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Avenue, 71, 050040, Almaty, Kazakhstan

Baigunchekov Zh.Zh. - Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Avenue, 71, 050040, Almaty, Kazakhstan.

Zholdassov Y.N. - Corresponding author, Master degree, research fellow, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Avenue, 71, 050040, Almaty, Kazakhstan.

Abekova A.Zh.- senior lector, Kazakh National Research Technical University, 22 Satpayev St., Almaty, Kazakhstan.

Khamitova Gulzhazira – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan

