Меркурьев И.В., Власов В.М., Глазков Н.В. Кинематика кисти руки человека и модель искусственной антропоморфной кисти для робототехнического комплекса дефектоскопии // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2026. – № 40. – С. 9-17.

УДК 621.865.8:531.1 https://doi.org/10.26160/2658-3305-2026-40-9-17

КИНЕМАТИКА КИСТИ РУКИ ЧЕЛОВЕКА И МОДЕЛЬ ИСКУССТВЕННОЙ АНТРОПОМОРФНОЙ КИСТИ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЕФЕКТОСКОПИИ

Меркурьев И.В., Власов В.М., Глазков Н.В.
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

Ключевые слова: кинематика манипулятора, кисть руки человека, матрицы Денавита–Хартенберга, антропоморфный захват, механизм с неполным приводом, групповой сервопривод, тактильные датчики.
Аннотация. Рассмотрена кинематика кисти руки человека как биомеханического прототипа антропоморфных захватов робототехнических комплексов визуальной дефектоскопии. Систематизированы степени свободы суставов кисти (21 в пальцах и 2-4 в запястье), определены диапазоны движений и механические связи между суставами PIP и DIP. Проанализирован тактильный сенсорный аппарат кисти и его роль при манипуляции объектами. Разработана модель искусственной кисти на базе захвата Hiwonder uHandPi с шестью сервоприводами. Определены ограничения сервопривода: эффективная сила на кончиках пальцев 2-3 Н, грузоподъёмность до 50-70 г. Выведены параметры Денавита–Хартенберга для всех пяти пальцев захвата, получены аналитические выражения прямой и обратной задач кинематики с учётом четырёхзвенного механизма с неполным приводом, построена матрица Якоби для анализа скоростей. Геометрический предел досягаемости единичного пальца составляет 52,5-132,5 мм, фактически реализуемый при рабочем ходе сервопривода в диапазоне 76,2-132,5 мм; максимальная скорость кончика – 1,25 м/с, оптимальная конфигурация (максимум индекса манипулируемости) достигается при величине угла поворота 45°. Показано, что механическая связь суставов захвата качественно воспроизводит биомеханические пропорции кисти человека.

KINEMATICS OF THE HUMAN HAND AND A MODEL OF AN ARTIFICIAL ANTHROPOMORPHIC HAND FOR A ROBOTIC DEFECTOSCOPY COMPLEX

Merkuryev I.V., Vlasov V.M., Glazkov N.V.
National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow

Keywords: manipulator kinematics, human hand, Denavit–Hartenberg matrices, anthropomorphic gripper, mechanism with incomplete actuation, group servo drive, tactile sensors.
Abstract. The kinematics of the human hand is considered as a biomechanical prototype for anthropomorphic grippers of robotic visual defectoscopy systems. The degrees of freedom of the hand joints (21 DOF in the fingers and 2-4 DOF in the wrist) are systematized, the ranges of motion and mechanical coupling between the PIP and DIP joints are determined. The tactile sensory apparatus of the hand and its role in object manipulation are analyzed. A model of an artificial hand based on the Hiwonder uHandPi gripper with six servomotors is developed. The servo drive limitations are determined: effective fingertip force of 2-3 N, load capacity up to 50-70 g. Denavit–Hartenberg parameters are derived for all five fingers of the gripper, and analytical expressions for the forward and inverse kinematics problems are obtained considering the four-bar linkage mechanism with incomplete actuation. The Jacobian matrix for velocity analysis is constructed. The geometric reach limit of a single finger is 52.5-132.5 mm, while the range actually attainable within the servo travel is 76.2-132.5 mm; the maximum fingertip velocity is 1.25 m/s, and the optimal configuration (maximum manipulability index) is achieved at angle of rotation 45°. The mechanical joint coupling of the gripper is shown to qualitatively reproduce the biomechanical proportions of the human hand.

Введение

Кисть руки является главным инструментом взаимодействия человека с предметной средой. Захват, удержание, вращение и точное позиционирование объектов массой от долей грамма до нескольких килограммов выполняются одной и той же кинематической структурой из 27 костей и более 30 мышц. Ни один серийный промышленный захват пока не воспроизводит эту универсальность: параллельные и вакуумные схваты требуют смены оснастки при переходе к объекту другой формы, а трёхпалые адаптивные захваты ограничены узким диапазоном геометрий. Именно поэтому антропоморфные конструкции, копирующие строение кисти [1], остаются предметом активных исследований в сервисной робототехнике, протезировании и автоматизации контрольных операций.

В задачах визуальной дефектоскопии мелкосерийных изделий требуется захватить деталь произвольной формы, удержать её без повреждений и координированно вращать перед камерой для осмотра всех поверхностей. Жёсткие схваты для этого непригодны: контактные напряжения деформируют хрупкие образцы, а фиксированная геометрия губок не позволяет работать с разнотипной номенклатурой без переналадки. Антропоморфный захват, распределяющий усилие удержания по нескольким точкам контакта и подстраивающий положение фаланг под форму объекта, решает обе задачи, однако грузоподъёмность доступных конструкций невелика, а тактильная обратная связь отсутствует. Для оценки реальных возможностей такого захвата необходим детальный кинематический анализ.

Проектирование антропоморфных захватов опирается на биомеханику кисти руки человека, которая содержит 27 костей, 21 степень свободы в пальцах и ещё 2-4 степени свободы в запястье, а также около 17000 механорецепторов [2, 3]. Большинство доступных захватов имеет неполный привод: число приводов в них меньше числа степеней свободы. Для задач автоматизированного контроля качества интерес к антропоморфным захватам связан с необходимостью адаптивной манипуляции объектами произвольной формы [3-5]. Захват Hiwonder uHandPi, построенный на базе Raspberry Pi, содержит пять пальцев с четырёхзвенными рычажными механизмами и позволяет захватывать объекты диаметром 20-150 мм, однако его грузоподъёмность ограничена массой порядка 50-70 г, а тактильная обратная связь отсутствует (Hiwonder uHandPi. URL: https://www.hiwonder.com/products/uhandpi).

Целью работы является разработка кинематической модели захвата uHandPi на основе анализа биомеханики кисти руки человека, с определением требований к сенсорному обеспечению и приводу. Поставлены задачи: провести анализ кинематики кисти как биомеханического прототипа; определить характеристики захвата и ограничения привода; привести значения параметров Денавита–Хартенберга для пальцев; получить выражения прямой и обратной задач кинематики; построить матрицу Якоби.

Систематический подход к назначению параметров Денавита–Хартенберга для последовательных кинематических цепей предложен Корке и применяется для манипуляторов различной структуры [6, 7]. Ковальчук [8] предложил модифицированную систему координат D–H для древовидных структур, к которым относятся и многопальцевые захваты. Биомеханика кисти исследована Kortier и др. [9] на основе инерциальных датчиков. Тактильное обеспечение для захватов рассмотрено Massari и др. [10] с применением оптоволоконных датчиков на основе Брэгговских решёток.

Материалы и методы исследований. Кисть включает 27 костей (8 запястных, 5 пястных и 14 фаланг), 29 суставов и более 120 связок. Каждый палец (указательный, средний, безымянный, мизинец) содержит три фаланги и три сустава: пястно-фаланговый (MCP, 2 степени свободы – сгибание/разгибание и отведение/приведение), проксимальный межфаланговый (PIP, 1 степень свободы) и дистальный межфаланговый (DIP, 1 степень свободы). Большой палец содержит две фаланги и запястно-пястный сустав (CMC, 2 степени свободы), за счёт которого возможно противопоставление [2, 9]. Кинематическая структура кисти руки человека показана на рисунке 1, а степени свободы суставов приведены в таблице 1.

Табл. 1. Степени свободы суставов кисти руки человека

Сустав	Тип	Степени свободы	Движения	Диапазон, °
CMC (большой)	седловидный	2	сгиб./разг., отв./прив.	15/70, 0/60
MCP (большой)	мыщелковый	2	сгиб./разг., отв./прив.	0/60, 0/30
IP (большой)	блоковидный	1	сгиб./разг.	15/80
MCP (указ.–миз.)	мыщелковый	2	сгиб./разг., отв./прив.	0/90, ±30
PIP (указ.–миз.)	блоковидный	1	сгиб./разг.	0/100
DIP (указ.–миз.)	блоковидный	1	сгиб./разг.	0/80

Суммарно кисть содержит 21 степень свободы в пальцах и 2-4 степени свободы в запястье, то есть 23-25 степеней свободы в целом. Между суставами PIP и DIP существует механическая

связь: угол DIP составляет приблизительно 2/3 от угла PIP (обусловлено ретинакулярной системой) [2]. Эта связь послужила прототипом для механизмов искусственных кистей с неполным приводом. В коже ладони сосредоточено около 17000 механорецепторов четырёх типов (тельца Мейсснера, диски Меркеля, тельца Руффини и Пачини); они отвечают за контроль сил захвата и обнаружение проскальзывания объекта [9, 10].

Робототехнический комплекс для визуальной дефектоскопии (рис. 2) включает две кисти Hiwonder uHandPi на подвижной платформе, статичную камеру с кольцевым осветителем и контроллер Raspberry Pi 5.

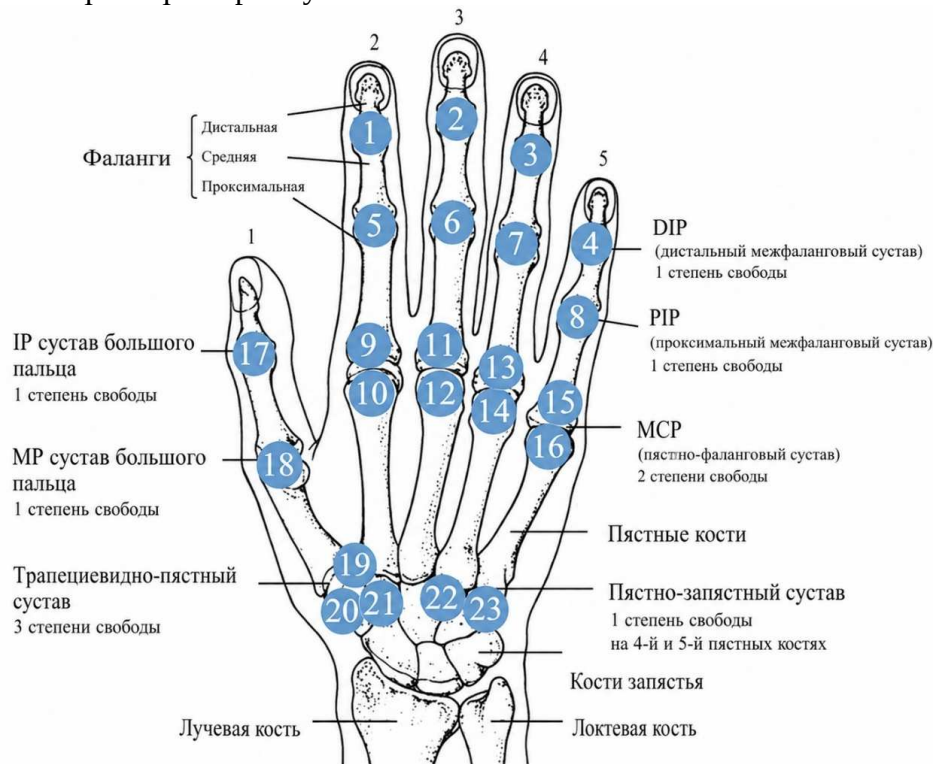


Рис. 1. Кинематическая структура кисти руки человека

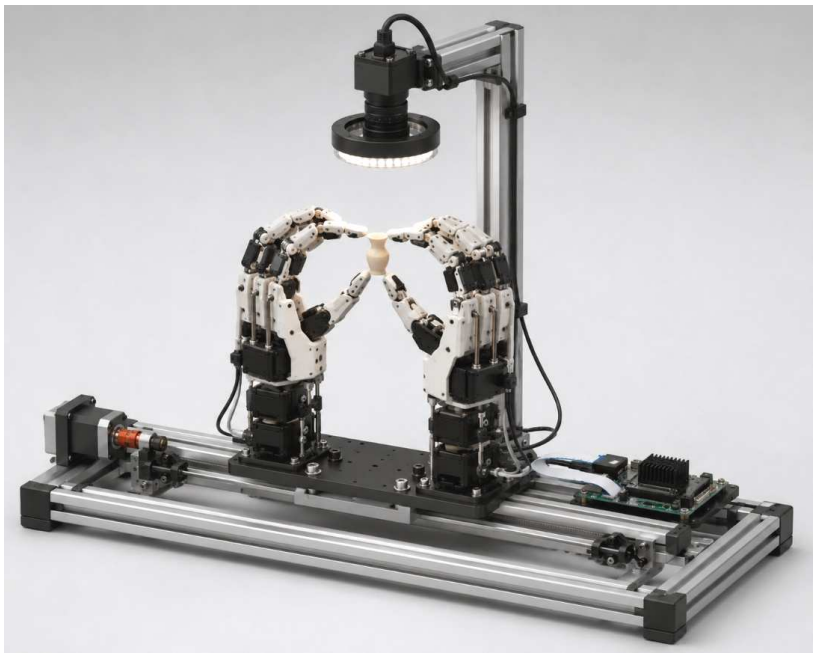


Рис. 2. Общий вид модели робототехнического комплекса визуальной дефектоскопии

Общее число степеней свободы комплекса составляет 13 и складывается из трёх групп: 6 управляемых степеней свободы левой кисти (пять сервоприводов пальцев и один

сервопривод запястья), 6 управляемых степеней свободы правой кисти той же структуры и одна поступательная степень свободы подвижной платформы, обеспечивающая подачу объекта в поле зрения камеры.

Каждая кисть содержит 5 пальцев и 6 сервоприводов (табл. 2). Грузоподъёмность ограничена рычажным механизмом: при крутящем моменте сервоприводов LX-15D 1,67 Н·м (17 кгс·см) и напряжении питания 7,4 В эффективная сила на кончиках пальцев составляет 2-3 Н. Прямой пересчёт момента на эффективное плечо пальца дал бы величину порядка 18 Н; фактическое значение на порядок ниже вследствие передаточного отношения четырёхзвенного механизма, потерь на трение в рычагах и распределения момента между тремя фалангами. Указанной силы достаточно для удержания объектов массой до 50-70 г. Класс контролируемых изделий – лёгкие электронные компоненты, мелкие керамические и пластиковые детали, медицинские изделия.

Табл. 2. Характеристики захвата uHandPi и сервоприводов

Параметр	Значение
Число пальцев / сервоприводов	5 / 6 (5 пальцев + запястье)
Длина кисти / масса	210 мм / 350 г
Момент LX-15D (пальцы)	1,67 Н·м (17 кгс·см) при 7,4 В
Момент LX-225 (запястье)	2,45 Н·м (25 кгс·см) при 7,4 В
Скорость холостого хода (пальцы)	0,22 с/60° (272 °/с; 4,76 рад/с) при 7,4 В
Диапазон / разрешение	0-240° / 0,24°
Обратная связь	позиционная, температурная

Захват использует следующую схему привода: один сервопривод на палец управляет тремя фалангами через четырёхзвенный рычажный механизм. Коэффициенты передачи механизма определены как отношения углов поворота ведомых фаланг (θ_{PIP} и θ_{DIP}) к углу поворота ведущего сустава θ_{MCP}: $k_1 = \theta_{PIP} / \theta_{MCP} = 0{,}78$ и $k_2 = \theta_{DIP} / \theta_{MCP} = 0{,}62$. Их отношение $k_2 / k_1 = 0{,}79$ качественно соответствует биомеханической связи PIP–DIP кисти человека ($\theta_{DIP} \approx 2/3 \cdot \theta_{PIP}$, табл. 1), отличаясь от неё примерно на 19-%; расхождение обусловлено фиксированной геометрией рычагов, не воспроизводящей нелинейность ретинакулярной системы. Захват в стандартной конфигурации не имеет тактильных датчиков, что ограничивает применимость в задачах дефектоскопии. Для контроля силы захвата и обнаружения проскальзывания необходимы ёмкостные или пьезорезистивные датчики с диапазоном 0,01-10 Н и частотой опроса не менее 100 Гц [10].

Кинематическая модель захвата. Пятипальцевый захват образует разветвлённую кинематическую цепь с общим основанием и пятью параллельными ветвями. Её структура описывается графом $G = (V, E)$, в котором V – множество вершин, каждая вершина соответствует твёрдому телу механизма, а E – множество рёбер, каждое ребро соответствует кинематической паре, связывающей два тела. Множество вершин $V = \{B, T, I, M, R, P\}$ включает основание кисти B (base) и пять пальцев: большой T (thumb), указательный I (index), средний M (middle), безымянный R (ring) и мизинец P (pinky). Все рёбра инцидентны вершине B, то есть граф имеет звёздную топологию: пальцы не связаны между собой и образуют пять независимых ветвей общей древовидной цепи [8]. Внутренняя структура каждого пальца – последовательная цепь из четырёх звеньев (пястная кость и три фаланги), соединённых тремя вращательными суставами MCP, PIP и DIP. Кинематическая схема указательного пальца с назначенными системами координат приведена на рисунке 3, соответствующие параметры Денавита–Хартенберга – в таблице 3, параметры большого пальца – в таблице 4.

Каждое звено кинематической цепи характеризуется четырьмя параметрами Денавита–Хартенберга: θ_i (угол поворота), d_i (расстояние вдоль Z), a_i (длина звена), α_i (угол закрутки).

Матрица однородного преобразования [6]:

$$^{i-1}\mathbf{T}_i = Rot(Z, \theta_i) \cdot Trans(z, d_i) \cdot Trans(X, a_i) \cdot Rot(X, \alpha_i).$$

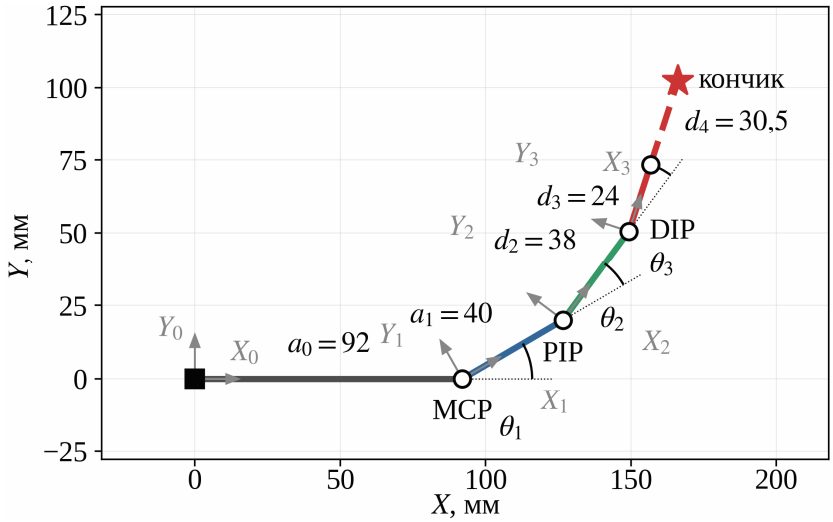


Рис. 3. Кинематическая схема указательного пальца с D–H системами координат

Табл. 3. Параметры Денавита–Хартенберга для указательного пальца

Звено	θ_i, рад	d_i, мм	a_i, мм	α_i, рад
0 (база)	0	0	92	0
1 (MCP)	θ_1	0	40	$-\pi/2$
2 (PIP)	θ_2	38	0	0
3 (DIP)	θ_3	24	0	0
4 (кончик)	0	30,5	0	0

Табл. 4. Параметры Денавита–Хартенберга для большого пальца

Звено	θ_i, рад	d_i, мм	a_i, мм	α_i, рад
0 (база)	0	0	45	$\pi/4$
1 (TMC)	θ_{T1}	0	30	$-\pi/2$
2 (MCP)	θ_{T2}	28	0	0
3 (IP)	θ_{T3}	25	0	0

Параметры среднего пальца:

$$a_0 = 95\,\text{мм},\ a_1 = 45\,\text{мм},\ d_2 = 42\,\text{мм},\ d_3 = 26\,\text{мм},\ d_4 = 42\,\text{мм}.$$

Безымянный палец и мизинец аналогичны указательному с коррекцией длины пястного звена (a_0 = 88 и 82 мм соответственно); длины фаланг уменьшены на 5% и 10%.

Механическая связь суставов. Углы поворота средней фаланги (θ_2, сустав PIP) и дистальной фаланги (θ_3, сустав DIP) связаны с углом поворота проксимальной фаланги (θ_1, сустав MCP), задаваемым сервоприводом, через передаточные отношения четырёхзвенного рычажного механизма (рис. 4):

$$\theta_2 = k_1 \cdot \theta_1;\ \theta_3 = k_2 \cdot \theta_1.$$

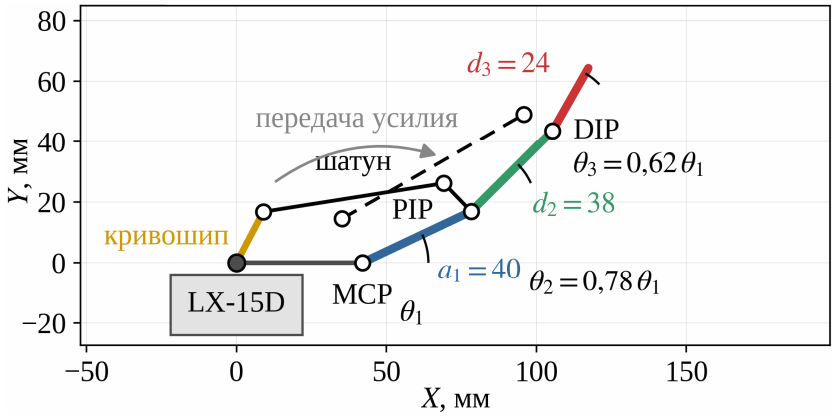


Рис. 4. Четырёхзвенный рычажный механизм пальца

Эти коэффициенты воспроизводят биомеханику кисти и сокращают число независимых переменных с 15 (по три сустава на каждый из пяти пальцев) до 5 (по одному управляющему сервоприводу на палец) на одну кисть [2].

Прямая задача кинематики. С учётом механической связи все углы выражаются через θ_1:

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = (1 + k_1 + k_2)\theta_1 = K\theta_1,$$

где K – суммарный коэффициент передачи механизма, равный отношению угла поворота кончика пальца к углу поворота ведущего сустава MCP:

$$K = 1 + k_1 + k_2 = 1 + 0{,}78 + 0{,}62 = 2{,}4.$$

Координаты кончика пальца в системе координат основания:

$$p_x = a_0 + a_1 \cos\theta_1 + L_{eff} \cos(K\theta_1);$$

$$p_y = a_1 \sin\theta_1 + L_{eff} \sin(K\theta_1).$$

где L_{eff} – эффективная длина дистальной части пальца, равная сумме длины средней и дистальной фаланг и вылета кончика (табл. 3):

$$L_{eff} = d_2 + d_3 + d_4 = 38 + 24 + 30{,}5 = 92{,}5 \text{ мм}.$$

Обратная задача кинематики. Расстояние от основания пальца до целевой точки:

$$r = \sqrt{(p_x^* - a_0)^2 + (p_y^*)^2}.$$

По теореме косинусов:

$$\theta_1 = \frac{1}{K-1} \arccos \frac{r^2 - a_1^2 - L_{eff}^2}{2 a_1 L_{eff}}.$$

Решение существует, если расстояние r от основания пальца до целевой точки не выходит за геометрические пределы двухзвенной схемы: оно не может быть меньше расстояния при предельно согнутом пальце и больше расстояния при полностью разогнутом:

$$|a_1 - L_{eff}| \le r \le (a_1 + L_{eff});\ 52{,}5 \le r \le 132{,}5 \text{ мм}.$$

Указанные границы задают геометрический предел механизма. С учётом рабочего хода сервопривода $\theta_1 \in [0°; 90°]$ фактически реализуемый диапазон уже: $76{,}2 \le r \le 132{,}5$ мм. Рабочая траектория кончика пальца и геометрия решения обратной задачи показаны на рисунке 5.

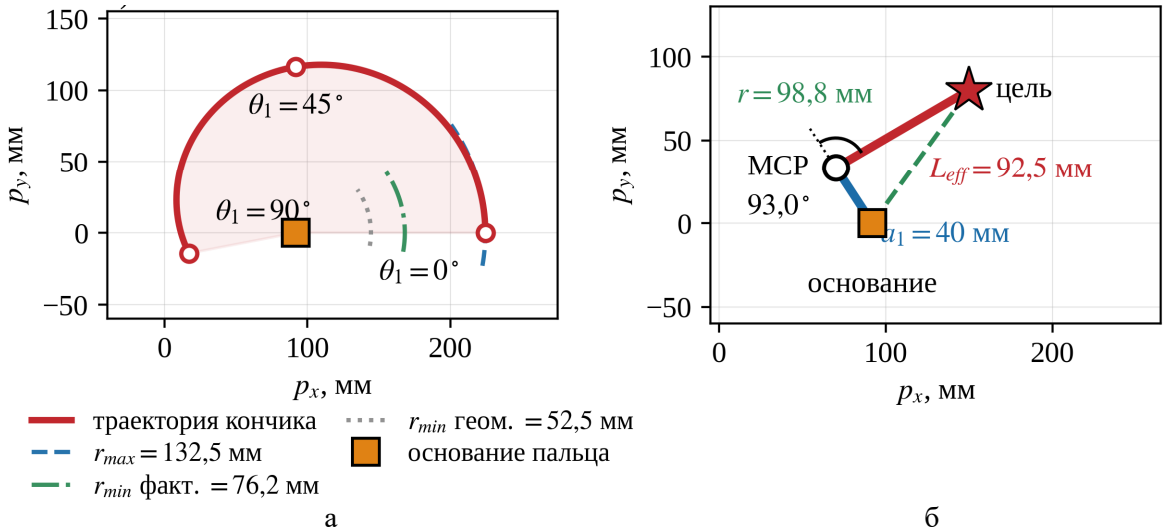


Рис. 5. Рабочая траектория кончика указательного пальца (а) и геометрия обратной задачи кинематики (б); угол излома $(K-1)\cdot\theta_1 = 93{,}0°$ соответствует $\theta_1 = 66{,}5°$

Матрица Якоби. Дифференциальные свойства механизма описываются матрицей Якоби, связывающей скорость кончика пальца со скоростью ведущего сустава. С учётом механической связи она сводится к вектору-столбцу:

$$\tilde{J} = J \cdot [1 \quad k_1 \quad k_2]^T .$$

Скорость кончика пальца:

$$v = \| \tilde{J} \| \cdot \dot{\theta}_1 .$$

Модуль эффективной матрицы Якоби определяет мгновенную скорость кончика пальца при заданной угловой скорости ведущего сустава и достигает максимума в разогнутой конфигурации. Манипулятивные свойства пальца оцениваются индексом манипулируемости Ёсикавы, вычисляемым через определитель матрицы Якоби [11]:

$$w = \sqrt{\det(JJ^T)} .$$

Индекс обращается в нуль на границах рабочего диапазона, где механизм вырождается: при $\theta_1 = 0°$ и $\theta_1 = \theta_{max}$ наблюдаются граничные сингулярности.

Для задач с дополнительными ограничениями обратная задача решается итерационно, на основе псевдообратной матрицы Якоби:

$$\Delta q = J^+ \Delta x ; \; J^+ = J^T (JJ^T)^{-1} .$$

Результаты исследований. Расчёт прямой задачи кинематики выполнен для указательного пальца при $\theta_1 = 45°$, что при $K = 2{,}4$ соответствует суммарному повороту кончика $K \cdot \theta_1 = 108°$:

$$p_x = 92 + 40\cos 45° + 92{,}5\cos 108° = 91{,}70 \text{ мм};$$

$$p_y = 40\sin 45° + 92{,}5\sin 108° = 116{,}26 \text{ мм}.$$

При изменении θ_1 в пределах рабочего хода сервопривода координата p_x изменяется от 224,5 мм ($\theta_1 = 0°$) до 8,4 мм ($\theta_1 = 75°$), то есть полный ход кончика вдоль оси X превышает 216 мм, что перекрывает заявленный диапазон захватываемых объектов диаметром 20-150 мм.

Решение обратной задачи кинематики для целевой точки (150, 80) мм даёт расстояние до основания пальца $r = 98{,}81$ мм, удовлетворяющее условию существования решения, и единственный набор углов $\theta_1 \approx 66{,}5°$, $\theta_2 \approx 51{,}9°$, $\theta_3 \approx 41{,}2°$. Следует подчеркнуть, что после введения механической связи палец сохраняет одну степень свободы, поэтому кончик перемещается вдоль однопараметрической кривой, а не по двумерной области. Обратная задача в такой постановке решается по одной координате – расстоянию r от основания пальца до цели; угловое положение радиуса-вектора не является свободным параметром и однозначно определяется найденным значением θ_1. Вывод целевой точки в требуемое положение плоскости обеспечивается оставшейся степенью свободы комплекса – поступательным перемещением платформы, а также поворотом кисти в запястном сервоприводе.

Досягаемость кончика указательного пальца (рис. 5, а) ограничена геометрическими пределами $52{,}5 \le r \le 132{,}5$ мм; с учётом рабочего хода сервопривода фактически реализуемый диапазон составляет $76{,}2 \le r \le 132{,}5$ мм. Геометрическое построение решения обратной задачи для рассмотренной целевой точки приведено на рисунке 5, б.

Максимальная скорость кончика пальца достигается в разогнутой конфигурации при $\theta_1 = 0°$ и составляет 1,25 м/с при угловой скорости ведущего сустава $\dot{\theta}_1 = 4{,}76$ рад/с, соответствующей паспортной скорости холостого хода сервопривода LX-15D (0,22 с/60° при 7,4 В, табл. 2); под нагрузкой скорость снижается. Для операций визуального контроля скорость перемещения следует ограничивать значениями 0,5-0,8 м/с, при которых смазывание изображения на статичной камере не превышает допустимого. Индекс манипулируемости достигает максимума при $\theta_1 \approx 45°$, что определяет предпочтительную рабочую конфигурацию пальца; зоны граничных сингулярностей $\theta_1 = 0°$ и $\theta_1 = \theta_{max}$ из рабочего диапазона исключаются.

Выводы

Кинематическая схема пальца (рис. 3) подтверждает корректность выведенных D–H параметров: длины звеньев $a_0 = 92$, $a_1 = 40$, $d_2 = 38$, $d_3 = 24$, $d_4 = 30{,}5$ мм соответствуют измеренной геометрии захвата. Коэффициенты передачи четырёхзвенного механизма

$k_1 = 0{,}78$ и $k_2 = 0{,}62$ (рис. 4) качественно воспроизводят биомеханическую связь PIP–DIP кисти человека и сокращают число независимых переменных с 15 до 5.

Расчёт прямой задачи кинематики при $\theta_1 = 45°$ даёт $p_x = 91{,}70$ мм, $p_y = 116{,}26$ мм; полный ход кончика по оси X превышает 216 мм. Множество достижимых положений кончика (рис. 5, а) представляет собой однопараметрическую кривую, ограниченную радиусами 52,5 и 132,5 мм от основания пальца, фактически реализуемый диапазон – 76,2-132,5 мм. Решение обратной задачи для точки (150, 80) мм (рис. 5, б) даёт единственное значение $\theta_1 = 66{,}5°$, что подтверждает однозначность обратной задачи при заданных механических связях и одной степени свободы пальца.

Максимальная скорость кончика составляет 1,25 м/с (при $\theta_1 = 0°$); для визуального контроля рекомендуется ограничение 0,5-0,8 м/с. Индекс манипулируемости максимален при $\theta_1 \approx 45°$; зоны сингулярности ($\theta_1 = 0°$ и $\theta_1 = \theta_{max}$) следует исключить из рабочего диапазона.

Заключение

В данной работе систематизированы данные о кинематике кисти: определены степени свободы (21 в пальцах и 2-4 в запястье), диапазоны движений и механическая связь PIP–DIP ($\theta_{DIP} \approx 2/3 \cdot \theta_{PIP}$). Разработана модель кисти на базе uHandPi. При крутящем моменте сервоприводов 1,67 Н·м (17 кгс·см) эффективная сила на пальцах составляет 2-3 Н, грузоподъёмность – до 50-70 г. Выведены D–H параметры для пяти пальцев. Механическая связь ($k_1 = 0{,}78$; $k_2 = 0{,}62$) качественно воспроизводит биомеханику кисти и сокращает число переменных с 15 до 5. Получены выражения прямой и обратной задач кинематики. Геометрический предел досягаемости пальца: $52{,}5 \le r \le 132{,}5$ мм, фактически реализуемый диапазон – $76{,}2 \le r \le 132{,}5$ мм. Максимальная скорость кончика 1,25 м/с, оптимальная конфигурация (максимум манипулируемости) при $\theta_1 \approx 45°$. Практическая значимость работы состоит в том, что полученная кинематическая модель и определённые ограничения сервопривода могут быть непосредственно использованы при проектировании робототехнических комплексов визуальной дефектоскопии мелкосерийных изделий на базе доступных антропоморфных захватов. Выведенные D–H параметры, формулы прямой и обратной задач кинематики, а также рекомендации по рабочему диапазону углов (исключение зон сингулярности при $\theta_1 = 0°$ и $\theta_1 = \theta_{max}$) пригодны для программной реализации алгоритмов управления захватом без дополнительной калибровки.

Список литературы

1. Saypulaev G.R., Merkuryev I.V., Saypulaev M.R., Shestakov V.K., Glazkov N.V., Andreev D.R. A Review of Robotic Gloves Applied for Remote Control in Various Systems // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-6. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086822.
2. Меркурьев И.В., Чунг Ч.Т., Сайпулаев Г.Р., Сайпулаев М.Р., Диб Д. Разработка модели кинематики пальцев человеческой руки, применяемых в роботизированных перчатках // Механика машин, механизмов и материалов. – 2023. – №4(65). – С. 106-113. – doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-106-113.
3. Kim U., Jung D., Jeong H., Park J., Jung H.-M., Cheong J., Choi H.R., Do H., Park C. Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand // Nature Communications. 2021, vol. 12, no. 1, p. 7177. doi.org/10.1038/s41467-021-27261-0.
4. Ma Y., Yin J., Huang F., Li Q. Surface defect inspection of industrial products with object detection deep networks: A systematic review // Artificial Intelligence Review. 2024, vol. 57, no. 12, p. 333. doi.org/10.1007/s10462-024-10956-3.
5. Воронкин Д.С. Решение прямой задачи кинематики для шестизвенного шарнирного робота-манипулятора // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – №9. – С. 236-241.
6. Corke P.I. A Simple and Systematic Approach to Assigning Denavit–Hartenberg Parameters // IEEE Transactions on Robotics. 2007, vol. 23, no 3, pp. 590-594. doi.org/10.1109/TRO.2007.896765.
7. Jia L., Liu S., Cao C., Kang Y., Zhu Y., Wang L., Xu D., Cheng R. Kinematics and spatial structure analysis of TBM gunite robot based on D–H parameter method // Scientific Reports. 2024, vol. 14, no. 1, p. 13649. doi.org/10.1038/s41598-024-64439-0.
8. Ковальчук А.К. Модифицированная система координат Денавита-Хартенберга для исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 11. – С. 12-30. – doi.org/10.7463/1115.0826673.

9. Kortier H.G., Sluiter V.I., Roetenberg D., Veltink P.H. Assessment of hand kinematics using inertial and magnetic sensors // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2014, vol. 11, no. 1, p. 70. doi.org/10.1186/1743-0003-11-70.
10. Massari L., Oddo C.M., Sinibaldi E., Detry R., Bowkett J., Carpenter K.C. Tactile Sensing and Control of Robotic Manipulator Integrating Fiber Bragg Grating Strain-Sensor // Frontiers in Neurorobotics. 2019, vol. 13, p. 8. doi.org/10.3389/fnbot.2019.00008.
11. Yoshikawa T. Manipulability of Robotic Mechanisms // The International Journal of Robotics Research. 1985, vol. 4, no. 2, pp. 3-9. doi.org/10.1177/027836498500400201.

References

1. Saypulaev G.R., Merkuryev I.V., Saypulaev M.R., Shestakov V.K., Glazkov N.V., Andreev D.R. A Review of Robotic Gloves Applied for Remote Control in Various Systems // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-6. DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086822.
2. Merkuryev I.V., Chung Ch.T., Saypulaev G.R., Saypulaev M.R., Deeb D. Development of a Kinematics Model of Human Fingers for Application in Robotic Gloves // Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials. 2023, no. 4(65), pp. 106-113. doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-106-113.
3. Kim U., Jung D., Jeong H., Park J., Jung H.-M., Cheong J., Choi H.R., Do H., Park C. Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand // Nature Communications. 2021, vol. 12, no. 1, p. 7177. doi.org/10.1038/s41467-021-27261-0.
4. Ma Y., Yin J., Huang F., Li Q. Surface defect inspection of industrial products with object detection deep networks: A systematic review // Artificial Intelligence Review. 2024, vol. 57, no. 12, p. 333. doi.org/10.1007/s10462-024-10956-3.
5. Voronkin D.S. The solution of the direct kinematic problem for six-membered articulated robotic manipulator // News of the Tula State University. Technical Sciences. 2018, no. 9, pp. 236-241.
6. Corke P.I. A Simple and Systematic Approach to Assigning Denavit–Hartenberg Parameters // IEEE Transactions on Robotics. 2007, vol. 23, no 3, pp. 590-594. doi.org/10.1109/TRO.2007.896765.
7. Jia L., Liu S., Cao C., Kang Y., Zhu Y., Wang L., Xu D., Cheng R. Kinematics and spatial structure analysis of TBM gunite robot based on D–H parameter method // Scientific Reports. 2024, vol. 14, no. 1, p. 13649. doi.org/10.1038/s41598-024-64439-0.
8. Kovalchuk A.K. Modified Denavit-Hartenberg coordinate system for robot actuating mechanisms with tree-like kinematic structure // Science and Education of the Bauman MSTU. 2015, no. 11, pp. 12-30. doi.org/10.7463/1115.0826673.
9. Kortier H.G., Sluiter V.I., Roetenberg D., Veltink P.H. Assessment of hand kinematics using inertial and magnetic sensors // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2014, vol. 11, no. 1, p. 70. doi.org/10.1186/1743-0003-11-70.
10. Massari L., Oddo C.M., Sinibaldi E., Detry R., Bowkett J., Carpenter K.C. Tactile Sensing and Control of Robotic Manipulator Integrating Fiber Bragg Grating Strain-Sensor // Frontiers in Neurorobotics. 2019, vol. 13, p. 8. doi.org/10.3389/fnbot.2019.00008.
11. Yoshikawa T. Manipulability of Robotic Mechanisms // The International Journal of Robotics Research. 1985, vol. 4, no. 2, pp. 3-9. doi.org/10.1177/027836498500400201.

Сведения об авторах: / *Information about authors:*

Меркурьев Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин	**Merkuryev Igor Vladimirovich** – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of robotics, mechatronics, dynamics and strength of machines
Власов Владимир Михайлович – аспирант	**Vlasov Vladimir Mihaylovich** – postgraduate student
Глазков Никита Владимирович – аспирант	**Glazkov Nikita Vladimirovich** – postgraduate student
vlasov2000vladimir@yandex.ru	

Получена 27.08.2026