

2. **Chiem S., Cervera E.** Vision-based robot formations with Bezier trajectories, *Proc.s of the 8th Conference on Intelligent and Autonomous System*, 2004, pp. 191–198.
3. **Yazbeck J., Scheuer A., Charpillet F.** Optimized lateral control for a decentralized near-to-near platooning, *INRIA, Tech. Rep.*, 2013.
4. **Thuilot B., Bom J., Marmouton F., Martinet P.** Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic GPS sensor, *Proc. of 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*, Lisbon (Portugal), 2004.
5. **Yazbeck J., Scheuer A., Charpillet F.** Decentralized Near-to-Near Approach for Vehicle Platooning based on Memorization and Heuristic Search, *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2014, pp. 631–638.
6. **Mark Daniel Ollis.** Position estimation and vehicle control in autonomous multi-vehicle convoys, *Patent Application Publication*, Pub. № : US 2014/0309836 A1.

7. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V.** *Sistema upravleniya mobil'nogo robota* (System of control mobile robot), *Journal of Bauman Moscow State Technical University*, ser. "Instrumentation", 2006, no. 3, pp. 31–51 (in Russian).
8. **Chen Haoyao.** Towards Multi-Robot Formations: Study on Vision Based Localization Systems, available at: <http://hdl.handle.net/2031/5836> (date of access: 23.09.2015).
9. **Espinosa F., Santos C.** Odometry and laser scanner fusion based on a discrete extended Kalman filter for robotic platooning guidance, *Sensors*, 2011, no. 11, pp. 8339–8357.
10. **Zenkevich S. L. and others.** Certificate of author, 1977, N 103384 (in Russian).
11. **Sage A. P., Melsa J. L.** *Estimation Theory with Applications to Communication and control*, New York: McGraw-Hill, 1971, 529 p.

УДК 004.896:621.865.8

DOI: 10.17587/mau/18.34-40

М. А. Аль Аккад, канд. техн. наук, доц., aimanakkad@yandex.ru,

И. В. Абрамов, д-р техн. наук, проф., abramov@istu.ru,

В. В. Хворенков, д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе, hvv@istu.ru,

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск

Обратная кинематическая задача для управления амбидекстральными конечностями человекоподобного робота

Рассмотрены особенности руки робота как объекта управления, представлена ее кинематическая схема. Приводятся результаты анализа и реализации обратной кинематической задачи управления амбидекстральными конечностями человекоподобного робота, а также описание проблемно-ориентированного захвата объектов.

Ключевые слова: рука робота, снижение сложности, проблемно-ориентированное управление, координация в многоагентных системах

Введение

Сегодня цель исследований, направленных на разработку двуруких роботов, состоит в том, чтобы сделать их настоящими партнерами человека в различных сферах, включающих космические исследования, помощь инвалидам, производство и др. При этом необходимо обеспечить возможность манипуляций различными инструментами, такими как медицинские инструменты и устройства промышленного назначения. В данном контексте решение задачи координации и управления манипуляторами робота становится одной из приоритетных задач различных научных исследований.

Исследование Г. Грюнвальда и др. расширяет таксономию захвата Каткоскиа одной рукой для бимануальных захватов [8]. Для манипуляций, ориентированных на цель, две руки физически не взаимодействуют друг с другом, но обе решают одну и ту же задачу (например, нажатие различных клавиш на клавиатуре). При этом в случае несогласованной манипуляции две руки выполняют две различные задачи, при согласованной манипуляции руки робота выполняют разные части одной и той же задачи (манипуляции, ориентированные на цель, и бимануальные манипуляции). Первое определение определяет системы, которые могут состоять из двух

отдельных манипуляторов, выполняющих задачи независимо друг от друга. Так как в данном случае явная координация отсутствует, нет принципиальной разницы по сравнению с системой с одним манипулятором, и анализ не должен отличаться от условий работы с одним манипулятором. Т. Вимбок и др. [9] выделяют две категории управления манипуляторами, к первой относят управление двумя манипуляторами с установленными захватами, ко второй — манипуляции объектом с помощью пальцев. В исследованиях М. Т. Сиокарле и П. К. Аллена [10], М. Габичини и А. Бичи [11], посвященных синтезу захвата, предложена концепция синергии положений или подпространства конфигурации руки для малоприводных систем взаимодействующих манипуляторов. Дополнительно описано использование позиционной системы технического зрения для управления двумя манипуляторами робота и встроенных в захватное устройство на каждой руке камер, использующихся для корректировки положения деталей в каждой руке и выполнения задачи сборки. Е. Грибовская и А. Биллард [12] предлагают концепцию программирования двух манипуляторов путем демонстрации. Действия двух манипуляторов классифицируются на основе пространственных отношений между траекториями рук, выполняющих согласованные действия.

Исследованию кинематики и синтезу управления двумя манипуляторами посвящено немало работ отечественных ученых [13–15]. И. А. Орлов, Е. В. Корягин рассматривают работу робота с одним предметом в двумерной плоскости, при этом конечности робота не являются антропоморфными [14, 15]. В исследованиях А. Г. Лескова и др. приводятся результаты экспериментальных исследований алгоритмов управления движением двуруких роботов при наличии механической связи между руками. При этом рассмотрены случаи, когда алгоритмы основаны как на задании общей плановой траектории движения, так и на задании траектории только для ведущей руки (вторая рука при этом движется в податливом режиме) [13].

Таким образом, анализ существующих технологий и методов показывает, что в основном используется бимануальное функционирование двух отдельных манипуляторов, чаще всего они не рассматриваются как одно целое, кроме того, управление основано на системе технического зрения.

Особенностью данной работы является то, что в ней два манипулятора робота рассматриваются как одно целое; при этом система технического зрения используется не для всех, а лишь для некоторых задач, так как авторы полагают, что некоторые задачи являются систематическими и не требуют работы с визуальными данными, другие задачи могут быть выполнены на основе тактильного восприятия. С учетом всего вышесказанного целью данной работы является *снижение сложности* процесса управления рукой робота за счет сокращения степеней свободы и *реализация объектно-ориентированного управления*, рассматривающего две руки робота как единое целое.

1. Особенности руки робота как объекта управления

В задачах управления человеческой рукой во время захвата преобладает рассмотрение движения в конфигурационном пространстве уменьшенной размерности. Эта размерность определена для конечного числа моделей задач захвата, которые используются для получения алгоритмов планирования, обеспечивающих стабильный захват и предлагающих единый подход к управлению одной или двумя руками при различных ограничениях. Существует необходимость разработки проблемно-ориентированного алгоритма управления одной или двумя руками робота независимо от его комплектации в качестве промежуточного решения для управления манипуляторами [1, 2].

Несмотря на сложность строения руки человека, большая часть вариантов моделей конфигурации рук человека и их движений может быть описана посредством нескольких параметров. Выполнение действий захвата различных объектов и их анализ показали, что предпочтение отдается не отдельным компонентам движения, а комбинированным действиям, которые приводят к сокращению числа степеней свободы (СС), что может быть использовано для сни-

жения степени сложности алгоритма управления и повышения эффективности системы в целом [3, 4]. Конечности робота можно разделить на три типа:

- *манипулятор встроенного типа*, который имеет независимую структуру и может быть использован для разных типов конечностей робота; движение его пальцев осуществляется с помощью двигателей, установленных внутри пальца или ладони; суставы приводятся в движение прямым приводом или зубчатой передачей;
- *внешний манипулятор*, в котором пальцы имеют простую и легкую структуру, и используется ременная или проволочная передача, а пальцы механически соединены с внешними приводами;
- *комбинированный тип*, использующий преимущества обоих типов [5].

Каждая рука может быть изучена в двух конфигурациях — один большой палец и четыре остальных пальца. Модель руки с 24 степенями свободы используется в качестве основы для сравнения упрощенных моделей руки с меньшим, чем 24, числом степеней свободы. Для того чтобы получить упрощенные модели руки, используются кинематические ограничения, которые позволяют сократить число независимых переменных или сочленений в исходной модели. Многие манипуляции, требующие схожих движений пальцев, например, жест с участием пяти пальцев, можно упростить, используя информацию только о трех пальцах, в данном случае этими тремя пальцами могут быть большой, указательный и безымянный. Используя данные о движении указательного пальца, можно воссоздать движение среднего пальца, используя информацию о безымянном пальце, можно воссоздать движение мизинца [6]. Отведение большого и указательного пальцев очень важно, так как, по крайней мере, одна степень свободы для этих пальцев рассматривается в качестве независимой переменной во всех упрощенных моделях руки. Сгибание в дистальном межфаланговом сочленении указательного пальца включено во все упрощенные модели руки. Сведение/разведение в трапециопястном сочленении большого пальца важно, так как при сгибании в межфаланговом сочленении может быть получен контакт с остальными пальцами. Универсальные сочленения большого и указательного пальцев очень важны для получения упрощенных моделей руки, так как представляют важную информацию. Таким образом, основной упор делается на снижение сложности управления и сокращение числа необходимых приводов.

2. Обратная кинематическая задача

В рамках решения обратной кинематической задачи необходимо определить углы движения манипулятора для обеспечения совпадения начальных и конечных точек захвата заданного объекта. Кинематическая модель двух конечностей состоит из 19 звеньев и 24 сочленений (степеней свободы).

Звенья и сочленения пальцев (большого (Thumb), указательного (Index), среднего (Middle), безымянного (Ring), мизинца (Little)) определяются через длины L_{ij} и углы вращения вокруг оси z , θ_{ij} , где $i = 1, \dots, 9$ показывает номер сочленения, а $j = T, I, M, R, L$ определяет рассматриваемый палец. В тексте индекс j используется для обозначения звеньев и сочленений при необходимости.

Конфигурация большого пальца: три звена (длинной L_i) — пястное (L_1), проксимальное (L_2) и дистальное (L_3) — и четыре сочленения (с углами θ_i) — фаланговое (θ_1), межфаланговое (θ_2) и трапециопястное, заданное сочленением с двумя степенями

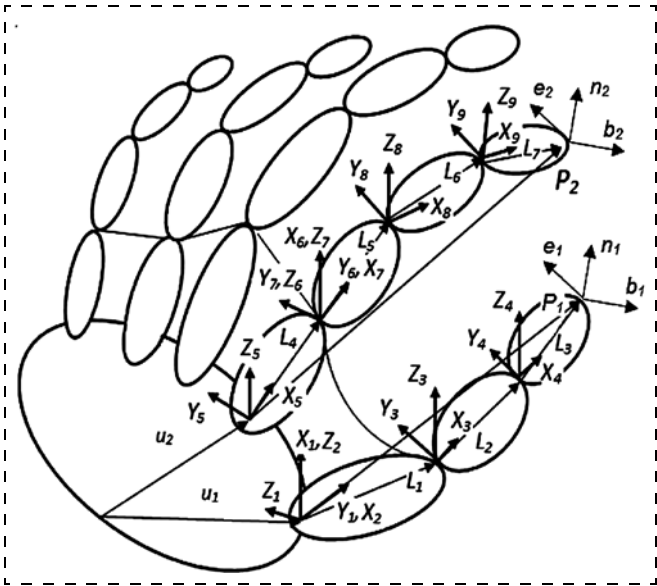


Рис. 1. Кинематическая схема сочленений пальцев

Таблица 1

Параметры Денавита—Хартенберга для большого пальца

i	Левая рука				Правая рука			
	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}
1	θ_1	0	0	$\pi/2$	θ_1	0	0	$-\pi/2$
2	θ_2	0	L_1	0	θ_2	0	L_1	0
3	θ_3	0	L_2	0	θ_3	0	L_2	0
4	θ_4	0	L_3	0	θ_4	0	L_3	0

Таблица 2

Параметры Денавита—Хартенберга для указательного, безымянного, среднего пальцев и мизинца

i	Левая рука				Правая рука			
	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}	θ_i	d_i	a_{i-1}	α_{i-1}
5	θ_5	0	L_4	$\pi/2$	θ_5	0	L_4	$-\pi/2$
6	θ_6	0	0	$-\pi/2$	θ_6	0	0	$+\pi/2$
7	θ_7	0	L_5	0	θ_7	0	L_5	0
8	θ_8	0	L_6	0	θ_8	0	L_6	0
9	θ_9	0	L_7	0	θ_9	0	L_7	0

свободы, определяющими сведение/разведение (θ_3) и сгибание/разгибание (θ_4). Сочленение θ_5 позволяет смоделировать изгиб ладони, деформацию ладони при захвате мяча или аналогичных объектов.

Конфигурация указательного, среднего, безымянного пальцев и мизинца: четыре звена — пястное (L_4), проксимальное (L_5), среднее (L_6) и дистальное (L_7) — и пять сочленений — запястно-пястное (θ_5), проксимальное межфаланговое (θ_6), дистальное межфаланговое (θ_7) и два пястных, заданных сочленением с двумя степенями свободы, которые определяют вращательные движения сведения/разведения (θ_8) и сгибания/разгибания (θ_9). Кинематическая схема руки представлена на рис. 1, а четыре параметра для описания движения (параметры Денавита—Хартенберга [16]: α — угол вращения вокруг оси x ; a — перемещение вдоль оси x ; d — перемещение вдоль оси z и θ — угол вращения вокруг оси z) для большого пальца приведены в табл. 1.

Таким образом, матрица, показывающая положение и ориентацию кончика большого пальца по отношению к центру запястья, может быть представлена как произведение матрицы, представляющей положение кончика большого пальца относительно системы координат большого пальца, и матрицы, учитывающей систему координат запястья:

$$p_i = {}^{-1}_0T_i(u_i) \cdot {}^0_4T_i(\theta_i) = {}^{-1}_0T_i(u_i) \cdot {}^0_1T_i(\theta_1) \cdot {}^1_2T_i(\theta_2) \cdot {}^2_3T_i(\theta_3) \cdot {}^3_4T_i(\theta_4), \quad (1)$$

где ${}^{-1}_0T_i(u_i)$ — матрица, которая учитывает систему координат запястья, u_i — вектор между центром запястья и системой координат большого пальца; ${}^0_4T_i(\theta_i)$ — однородная матрица, представляющая положение кончика большого пальца относительно системы координат большого пальца:

$${}^{-1}_0T(u_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & u_{ix} \\ 0 & 1 & 0 & u_{iy} \\ 0 & 0 & 1 & u_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} n_{1x} & e_{1x} & b_{1x} & p_{1x} \\ n_{1y} & e_{1y} & b_{1y} & p_{1y} \\ n_{1z} & e_{1z} & b_{1z} & p_{1z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где n_i , e_i , b_i — векторы, определяющие положение и ориентацию кончика соответствующего пальца.

В табл. 2 приведены параметры Денавита—Хартенберга для указательного, безымянного, среднего пальцев и мизинца.

Матрица, которая описывает положение и ориентацию кончика i -го пальца по отношению к центру запястья:

$$p_i = {}^0T_i(u_i) \cdot {}^0T_i(\theta_i) = {}^0T_i(u_i) \cdot {}^0T_i(\theta_5) \cdot {}^1T_i(\theta_6) \cdot {}^2T_i(\theta_7) \cdot {}^3T_i(\theta_8) \cdot {}^4T_i(\theta_9), \quad (4)$$

где ${}^0T_i(u_i)$ — матрица, которая учитывает систему координат запястья, u_i представляет собой вектор между центром запястья и системой координат i -го пальца; ${}^0T_i(\theta_i)$ — однородная матрица для системы координат i -го пальца и соответствующего кончика i -го пальца:

$${}^0T_i(u_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & u_x \\ 0 & 1 & 0 & u_y \\ 0 & 0 & 1 & u_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$${}^0T_i = \begin{bmatrix} n_{2x} & e_{2x} & b_{2x} & p_{2x} \\ n_{2y} & e_{2y} & b_{2y} & p_{2y} \\ n_{2z} & e_{2z} & b_{2z} & p_{2z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для решения обратной кинематической задачи сначала необходимо определить ориентацию и конечное положение кончика каждого пальца:

$$\theta_5 = \arctan[b_{2y}/b_{2x}] \text{ (для левой руки),}$$

$$\theta_5 = -\arctan[b_{2y}/b_{2x}] \text{ (для правой руки);}$$

$$\theta_6 = \arctan[b_{2x}/\cos\theta_5/b_{2z}] \text{ (для левой руки),}$$

$$\theta_6 = \arctan[b_{2x}/\cos\theta_5/b_{2z}] \text{ (для правой руки).}$$

Из геометрических соотношений между векторами и длинами (рис. 1) для обеих рук находим:

$$v_2 = p_2 - [L_7 n_2]; \quad h_x = L_4 \cos\theta_5, \quad h_y = L_4 \sin\theta_5, \quad h_z = 0, \\ h = [h_x \ h_y \ h_z]^T; \quad r = v_2 - h, \quad r_2 = \text{norm}v_2, \quad r_3 = \text{norm}r.$$

Используя векторы r_2 , r_3 и длины L_4 , L_5 , L_6 , получаем вспомогательные углы β_4 , β_5 и β_6 :

$$\beta_4 = \arccos\left(\frac{L_4^2 + r_3^2 - r_2^2}{2L_4 r_3}\right), \quad \beta_5 = \arccos\left(\frac{L_5^2 + r_3^2 - L_6^2}{2L_5 r_3}\right),$$

$$\beta_6 = \arccos\left(\frac{L_6^2 + L_5^2 - r_3^2}{2L_6 L_5}\right).$$

Угол сгибания/разгибания в пястном сочленении получаем в виде

$$\theta_7 = \pi - \beta_5 - \beta_4.$$

Угол разгибания и перегиба (гиперэкстензия) в пястном сочленении получаем в виде

$$\theta_{7hyp} = \beta_4 - \pi - \beta_5.$$

Угол проксимального межфалангового сочленения:

$$\theta_8 = \pi - \beta_6.$$

В заключение алгебраическим путем получаем угол дистального межфалангового сочленения:

$$\theta_9 = \arctan2[k_2, k_1],$$

где

$$k_1 = (c_2 c_4 c_3 c_1 - c_4 s_1 s_3 - c_2 s_4 c_1 s_3 - s_4 c_3 s_1) n_x + \\ + (c_2 c_4 c_3 s_1 + c_4 c_1 s_3 - c_2 s_4 s_1 s_3 + s_4 c_3 c_1) n_y + \\ + ((s_4 s_3 - c_4 c_3) s_2) n_z;$$

$$k_2 = (-s_4 c_2 c_1 c_3 + s_4 s_1 s_3 - c_4 c_1 c_2 s_3 - c_4 c_3 s_1) n_x + \\ + (-s_4 c_2 s_1 c_3 - s_4 c_1 s_3 - c_4 s_1 c_2 s_3 + c_4 c_3 c_1) n_y + \\ + ((c_4 s_3 + s_4 c_3) s_2) n_z;$$

здесь $s_i = \sin\theta_i$, $c_i = \cos\theta_i$, аналогично для других s_i и c_i , где $i = 2, 3, 4$;

$$\theta_1 = \arctan\left[\frac{p_{1y}}{p_{1x}}\right] \text{ (для левой руки),}$$

$$\theta_1 = -\arctan\left[\frac{p_{1y}}{p_{1x}}\right] \text{ (для правой руки).}$$

Для обеих рук:

$$v_1 = p_1 - [L_3 n_1], \quad r_1 = \text{norm}v_1,$$

$$x_1 = \frac{r_1 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2}, \quad x_2 = \sqrt{1 - x_1^2}, \quad x_3 = L_1 + L_2 x_1,$$

$$x_4 = L_2 x_2, \quad v_{1xy} = \sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2},$$

$$x_5 = \frac{v_{1z} x_4 + v_{1xy} x_3}{x_3^2 + x_4^2}, \quad x_6 = \frac{v_{1z} x_3 + v_{1xy} x_4}{x_3^2 + x_4^2},$$

$$\theta_3 = \arctan2[x_2, x_1], \quad \theta_2 = \arctan2[x_6, x_5],$$

$$\theta = \arctan2\left[n_{1z}, \sqrt{n_{1x}^2 + n_{1y}^2}\right], \quad \theta_4 = \theta - \theta_2 - \theta_3.$$

Угол θ_2 используется для обеспечения стабильного захвата в зависимости от задачи.

3. Проблемно-ориентированный метод захвата

Представим руку робота в виде трех звеньев: собственно рука (предплечье и плечо), запястье и кисть. Выполнение любого задания требует координации управления этими тремя секторами для правой и левой рук. Предплечье и плечо отвечают за позиционирование запястья в пространстве; их кинематика была изучена в работе [7], также были предложены методы координации двух рук и пред-

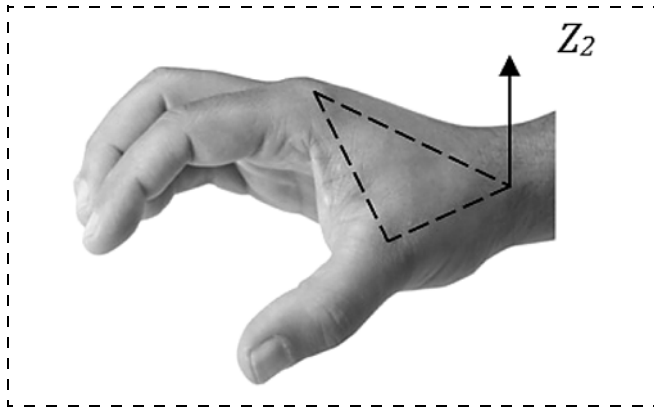


Рис. 2. Нормаль ориентации руки

отвращения столкновений. Запястье отвечает за ориентацию кисти. Кисть выполняет захват, она включает две составляющие, действующие вместе: большой палец и четыре остальных пальца. Для координации и контроля за перемещением рук и для левой, и для правой руки будет использоваться угол наклона нормали треугольника, образованного большим и указательным пальцами руки (сочленения 2, 3, 5) по отношению к установленной системе координат, как показано на рис. 2. Нормаль является осью Z_2 кинематической системы, показанной на рис. 1. Данный угол наклона будет использоваться совместно с углом наклона нормали центра тяжести объекта θ , для того чтобы обеспечить стабильный обхват в зависимости от поставленной задачи, как показано на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

При движении кисти к объекту или двум разным объектам с намерением их обхватить (рис. 3, б) заранее обозначим на каждой руке точки контакта, которые образуют огибающую кривую. По мере движения данная кривая постепенно принимает форму поверхности объекта или его части для достижения стабильного состояния обхвата. При выполнении определенного задания обозначенные точки должны находиться в контакте с выбранными точками на поверхности объекта, которые, как мы предполагаем, лежат на двумерной плоскости сечения трехмерной модели объекта. Сочетание контактных точек на руке соответствует выбранным точкам сечения, таким образом, используя алгоритм коррекции кривизны, мы можем достичь требуемого стабильного обхвата. Будем считать, что число кривых сечений (сплайнов) равно числу пальцев руки, т.е. равно пяти, как показано на рис. 4. Контуры кривых по контактным точкам руки S_a будут корректироваться в зависимости от кривых трехмерной модели S_r , которые принимаются в качестве базового контура, как показано на рис. 5, с учетом того, что обхват и коррекция положения руки являются равномерными и пошаговыми [17].

R — центр окружности, в которую вписан объект, принимается в качестве начала координат (рис. 5),

при этом m — число особых точек кривых, которые выбираются с постоянным интервалом $\theta = 360^\circ/m$ относительно вертикального вектора P_r , где

$v_{ri} = (r_i, \theta)$ — векторы расположения особых точек кривых объекта;

$v_{ai} = (r_{ai}, \theta)$ — векторы расположения соответствующих точек кривых руки;

$i = 1, 2, \dots, N$; $N = 5$ — число кривых (сплайнов);

$$\Delta s = \sum_{i=1}^m |v_{ri} - v_{ai}|; \Delta v_i = |v_{ri} - v_{ai}|.$$

Если $\Delta v_i > 0$, прибавляем его к v_{ai} ; если $\Delta v_i < 0$, вычитаем его из v_{ai} , пока Δs не станет равным 0. Затем сохраняем данную разницу или величины коррекции в поля таблицы (одна запись таблицы для одного сечения), чтобы позднее использовать их в системе.

Вектор центра тяжести v_g рассчитывается по формуле

$$v_g = \frac{\sum_{i=1}^m |v_{ri}| I_{ri}}{\sum_{i=1}^m I_{ri}},$$

где I_{ri} — яркость изображения на границах сплайнов объекта, при этом делается допущение, что масса сечения сосредоточена на границах сплайнов объекта.

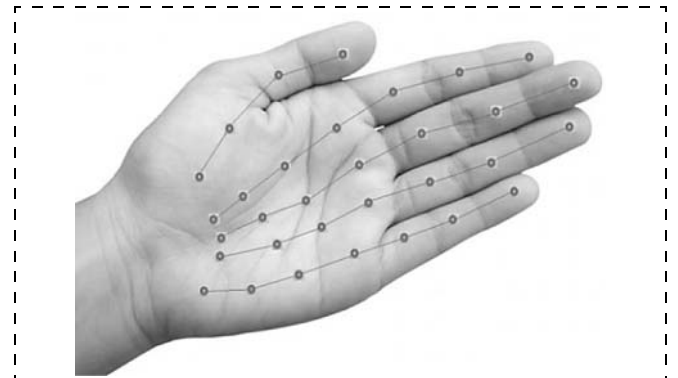


Рис. 4. Контактные точки руки и контуры образованных кривых

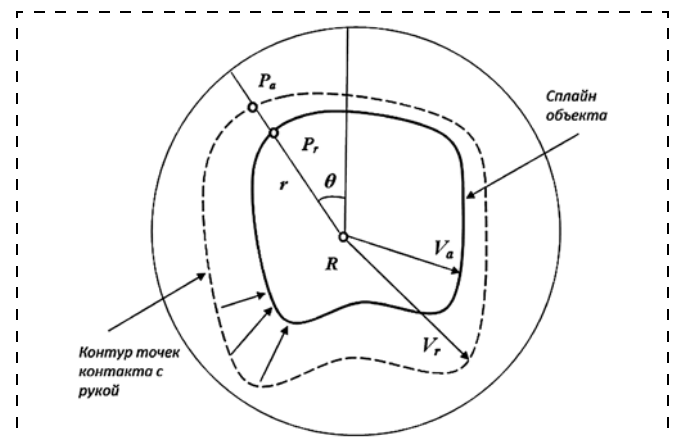


Рис. 5. Пример кривых обхвата и объекта

4. Эксперимент и результаты

Для определения рабочего пространства пальцев была измерена максимальная и минимальная разница углов звеньев (табл. 3).

Таблица 3

Диапазон движения пальцев

θ	Диапазон движений, °							
	min				max			
θ_1	0				60			
θ_2	-10				55			
θ_3	-25				35			
θ_4	-15				80			
	<i>I</i>	<i>M</i>	<i>R</i>	<i>L</i>	<i>I</i>	<i>M</i>	<i>R</i>	<i>L</i>
θ_5	-30	-30	-30	-30	10	10	10	10
θ_6	-30	-8	-14	-19	30	35	20	33
θ_7	-10	0	0	0	90	80	80	80
θ_8	0	0	0	0	90	100	100	100
θ_9	0	-10	-20	-30	60	90	90	90

Данные, полученные в результате эксперимента, будут далее использованы для анализа динамики, планирования траектории и управления движением манипулятора робота.

Результаты эксперимента также подтверждают, что движения пальцев в сочленениях являются ограниченными вследствие межпальцевых ограничений — средний, безымянный пальцы и мизинец имеют общую пястную связку, которая способствует возникновению некоторых дополнительных движений:

$$\theta_{7R} \approx 2/3 \theta_{7M} \approx 7/12 \theta_{7L}, \theta_{7R} - \theta_{7M} < 60^\circ, \\ \theta_{7R} - \theta_{7L} < 50^\circ, \theta_{6R} \approx \theta_{6L}, \theta_{7M} \approx 1/5 \theta_{7I};$$

внутрипальцевых ограничений — в зависимости от внутренних сочленений:

$$\theta_9 \approx 2/3 \theta_8, \theta_7 \approx 4/3 \theta_8, \theta_2 \approx 11/10 \theta_3, \\ \theta_3 \approx 4/5 \theta_4, \theta_{5I} \approx \theta_{5M}, \theta_{5M} \approx 1/2 \theta_{5R},$$

$$\theta_{6M} \approx 1/5 \theta_{6I}, \theta_{5R} \approx 2/3 \theta_{5L}, \theta_{6R} \approx 1/2 \theta_{6L}, \\ \theta_{9R} \approx 1/2(\theta_{9M} + \theta_{9L}) \text{ (круговой захват).}$$

$$\theta_7 \approx 3/2 \theta_8, \theta_8 \approx 2 \theta_9, \theta_{2T} \approx 10/11 \theta_{3T}, \\ \theta_{3T} \approx 6/5 \theta_{4T} \text{ (призматический захват).}$$

Заключение

Конечности человекоподобного робота предназначены для использования в тех областях, где необходимо выполнить определенную последовательность задач, например, в качестве протезов для

людей с ограниченными возможностями, в качестве вспомогательных устройств в работе пожарных, спасателей, на производстве, в хирургии и в качестве платформы для исследований и т.п. Конфигурация, в которой задействовано несколько манипуляторов, требует четкой координации между ними.

Список литературы

1. Li Y., Pollard N. S. A shape matching algorithm for synthesizing humanlike enveloping grasp // IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots: сб. ст. Междунар. конференции (Цукуба, 2005 г.). Цукуба, 2005. С. 442—449.
2. Liu J., Zhang Y. Mapping human hand motion to dexterous robotic hand // ROBIO — IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics: сб. ст. Междунар. конференции (Санья, 2007 г.). Санья, 2007. С. 829—834.
3. Goldfeder C., Allen P., Lackner C., Pelossof R. Grasp planning via decomposition // IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation: сб. ст. Междунар. конференции (Рим, 2007 г.). Рим, 2007.
4. Tsoli A., Jenkins O. C. 2D subspaces for user-driven robot grasping // Robotics, Science and Systems Conference: Workshop on Robot Manipulation: сб. ст. Междунар. конференции. США, 2007.
5. Liu H., Meusel P., Hirzinger G., Jin M., Liu Y., Xie Z. The Modular Multisensory DLR-HIT-Hand: Hardware and Software Architecture // IEEE/ASME Transactions on mechatronics: сб. ст. Междунар. конференции. 2008. Т. 13, № 4. С. 461—469.
6. R  thling F., Haschke R., Steil J., Ritter H. Platform Portable Anthropomorphic Grasping with the Bielefeld 20-DOF Shadow and 9-DOF TUM Hand // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: сб. ст. Междунар. конференции, 2007. С. 2951—2956.
7. Al Akkad M. A. Exploiting two ambidextrous robotic arms for achieving cooperative tasks // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2014. № 4. С. 134—139.
8. Grunwald G., Borst C., and Zollner J. Benchmarking dexterous dualarm/hand robotic manipulation // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop on Performance Evaluation and Benchmarking: сб. ст. Междунар. Конференции (Ницца, 2008). Ницца, 2008.
9. Wimbock T., Ott C., Prassler E., Zollner M., Bischo R., Burgard W., Haschke R., Hagele M., Lawitzky G., Nebel B., Ploger P., Reiser U. Dual-arm manipulation // Towards Service Robots for Everyday Environments, сер. Springer Tracts in Advanced Robotics. Eds. Springer Berlin, Heidelberg, 2012. Т. 76. С. 353—366.
10. Ciocarlie M. T., Allen P. K. Hand posture subspaces for dexterous robotic grasping // The International Journal of Robotics Research. 2009. Т. 28, № 7. С. 851—867.
11. Gabbicini M., Bicchi A., Prattichizzo D., Malvezzi M. On the role of hand synergies in the optimal choice of grasping forces // Autonomous Robots. Springer. 2011. С. 235—252.
12. Gribovskaya E., Billard A. Combining dynamical systems control and programming by demonstration for teaching discrete bimanual coordination tasks to a humanoid robot // 3 IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction: сб. ст. Междунар. конференции (Амстердам, 2008). Амстердам, 2008. С. 33—40.
13. Лесков А. Г., Илларионов В. В. Математическое и полунатурное моделирование операций космических манипуляционных роботов // Пилотируемые полеты в космос: Тезисы докл. 8-й Междунар. науч.-практич. конф. Звездный городок, 2009. С. 70—71.
14. Орлов И. А. Синтез движения манипуляционных систем для пространств со сложными связями и ограничениями: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Институт прикладной математики имени Келдыша М. В. Москва, 2013.
15. Корягин Е. В. Разработка высокоуровневой системы управления антропоморфным роботом // Нейроинформатика. 2013. Т. 7, № 1.
16. Craig J. J. Introduction to Robotics Mechanics, 3rd edition, Pearson Prentice Hall, 2005.
17. Pivarciova E., Bojek P., Al Akkad M. A., Yakomovitch B. A. Automated Systems of Image Verification: монография. Gliwice, Polland: PA NOVA, 2015. С. 130—206.

Inverse Kinematic Analysis for Control of Human-Like Ambidextrous Robotic Hands

M. A. Al Akkad, aimanakkad@yandex.ru✉, I. V. Abramov, abramov@istu.ru,
V. V. Khvorenkov, hvv@istu.ru,

M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, 426069, Russian Federation

Corresponding author: Al Akkad M. A., Ph. D. in Engineering, Associate Professor,
Department of Mechatronic Systems, M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Izhevsk, 426069, Russian Federation, e-mail: aimanakkad@yandex.com

Received on April 11, 2015

Accepted on May 15, 2015

This paper discusses the design of two human-like robotic hands. The kinematics of this design was introduced to offer a more generic, speedy, and precise solution for a wide range of robotic applications. This research is focused on integration of the control of both arms and hands as one entity. A solution involving several manipulators requires coordination between them. In order to arrange a stable grasp, the angle of inclination of the predefined hand orientation normal was used with the angle of inclination of the object's center of gravity vector. The center of the gravity vector was calculated using the image intensity of the object splines. The splines of the predefined hand contact points were adapted to the object 3D model splines. The maximal and minimal values of the joints' angle ranges were measured to define the fingers' workspace. Gestures were classified as prismatic and circular, regardless of the grasping power or precision, while the circular grasping implied a strong correlation among the finger joints. The human-like hands were intended for many applications involving a specific series of tasks like artificial limbs of the handicapped people, they were also meant for the fire fighters, production workers, surgeons, and for use as a research platform.

Keywords: robotic hands, complexity reduction, task-oriented control, mechanism drive, multi-agent coordination

For citation:

Al Akkad M. A., Abramov I. V., Khvorenkov V. V. Inverse Kinematic Analysis for Control of Human-Like Ambidextrous Robotic Hands, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no 12, pp. 34–40.

DOI: 10.17587/mau/16.34-40

References

1. Li Y., Pollard N. S. A shape matching algorithm for synthesizing humanlike enveloping grasp, *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Tsukuba, 2005, pp. 442–449.
2. Liu J., Zhang Y. Mapping human hand motion to dexterous robotic hand, *Proc. of ROBIO – IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Sanya, 2007, pp. 829–834.
3. Goldfeder C., Allen P., Lackner C., Pelossof R. Grasp planning via decomposition, *Proc. of IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, Rome, 2007.
4. Tsoli A., Jenkins O. C. 2D subspaces for user-driven robot grasping, *Proc. of Robotics, Science and Systems Conference: Workshop on Robot Manipulation*, USA, 2007.
5. Liu H., Meusel P., Hirzinger G., Jin M., Liu Y., Xie Z. The Modular Multisensory DLR-HIT-Hand: Hardware and Software Architecture, *Proc. of IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 2008, vol.13, no. 4, pp. 461–469.
6. R  thling F., Haschke R., Steil J. J., Ritter H. Platform Portable Anthropomorphic Grasping with the Bielefeld 20-DOF Shadow and 9-DOF TUM Hand, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp. 2951–2956.
7. Al Akkad M. A. Exploiting two ambidextrous robotic arms for achieving cooperative tasks, *Vestnik Izhevskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2014, no. 4, pp. 134–139.
8. Grunwald G., Borst C., Zilner J. Benchmarking dexterous dualarm/hand robotic manipulation, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop on Performance Evaluation and Benchmarking*, Nice, 2008.
9. Wimbock T., Ott C., Prassler E., Zollner M., Bischo R., Burgard W., Haschke R., Hagele M., Lawitzky G., Nebel B., Ploger P., Reiser U. Dual-arm manipulation, *Towards Service Robots for Everyday Environments*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics, Eds. Springer Berlin, Heidelberg, 2012, vol. 76, pp. 353–366.
10. Ciocarlie M. T., Allen P. K. Hand posture subspaces for dexterous robotic grasping, *The International Journal of Robotics Research*, 2009, vol. 28, no. 7, pp. 851–867.
11. Gabbicini M., Bicchi A., Prattichizzo D., Malvezzi M. On the role of hand synergies in the optimal choice of grasping forces, *Autonomous Robots*, Springer, 2011, pp. 235–252.
12. Gribovskaya E., Billard A. Combining dynamical systems control and programming by demonstration for teaching discrete bimanual coordination tasks to a humanoid robot, *Proc. of 3rd IEEE/ACM International Conference on Human-Robot Interaction*, Amsterdam, 2008, pp. 33–40.
13. Leskov A. G., Illarionov V. V. *Matematicheskoe i polunaturnoe modelirovanie operatsiy kosmicheskikh manipulyatsionnykh robotov* (Mathematical and semirealistic simulation of space robotic manipulators), *Proc. of 8 International scientific conference, Zvezdnyj gorodok*, 2009, pp. 70–71 (in Russian).
14. Orlov I. A. *Sintez dvizheniya manipulyatsionnykh sistem dlya prostranstv so slozhnymi svyaziyami i ogranicheniyami* [(Synthesis of manipulation systems movements for spaces with complex relations and constraints): Ph. D. thesis, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, 2013 (in Russian).
15. Koryagin E. V. *Razrabotka vysokourovnevnoi sistemy upravleniya antropomorfnyim robotom* [(The development of higher-level system for anthropomorphic robot control), *Neiroinformatika*, 2013, vol. 7, no. 1 (in Russian).
16. Craig J. J. *Introduction to Robotics Mechanics*, 3rd edition, Pearson Prentice Hall, 2005.
17. Pivarciova E., Bojek P., Al Akkad M. A., Yakomovitch B. A. *Automated Systems of Image Verification*, Gliwice, Poland, PA NOVA, 2015, pp. 130–206.