

УДК 621.865.8; 519.688

О решении задачи замыкания предметов антропоморфными захватными устройствами при задании формы предмета массивами данных

А.П. Лукинов, А.Н. Сыромятин

Рассмотрен способ решения задачи замыкания предметов при задании их формы массивами данных. Предложен унифицированный и эффективный алгоритм замыкания с помощью антропоморфных захватных устройств объектов манипулирования, характеризующихся как гладкими регулярными, так и негладкими и нерегулярными поверхностями, идентификация которых реализуется оптоэлектронными системами.

Ключевые слова: антропоморфное захватное устройство, объект манипулирования, фаланга, замыкание, удержание, алгоритм, массив данных, гладкая регулярная поверхность, негладкая нерегулярная поверхность, идентификация, виртуальный контур, точка контакта.

On the solution of objects closure problem by anthropomorphic grippers when specifying the object shape by data arrays

A.P. Lukinov, A.N. Syromyatin

The method for solving the objects closure problem when the object's shape is presented as a data array has been considered. The article proposes a unified and efficient algorithm for objects closing by anthropomorphic grippers when manipulation objects are characterized by smooth regular and rough irregular surfaces, which identification is implemented by opto-electronic systems.

Keywords: anthropomorphic gripper, manipulation object, closure, holding, algorithm, data array, smooth regular surface, rough irregular surface, identification, virtual outline, point of contact.

С развитием робототехники все острее стоит проблема разработки математического обеспечения для расчетов процессов захватывания предметов антропоморфными захватными устройствами (АЗУ). По своей конструкции АЗУ схоже с рукой человека, но отличается от нее кинематической схемой, количеством степеней подвижностей, диапазоном угловых отклонений в кинематических парах и другими характеристиками. Между собой АЗУ отличаются количеством подвижностей, количеством и типами сенсоров, приводов, способами



ЛУКИНОВ
Александр Павлович
доцент



СЫРОМЯТИН
Алексей Николаевич
аспирант
кафедры «Робототехника
и мехатроника»
ФГБОУ ВПО МГТУ
«СТАНКИН»
e-mail:
redwindrider@gmail.com

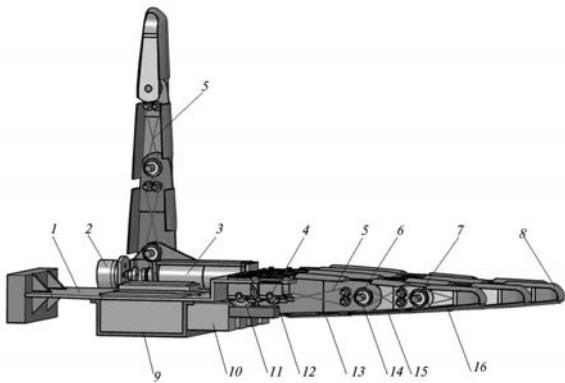


Рис. 1. Антропоморфное захватное устройство:

- 1 — несущая плита; 2, 3 — электродвигатель;
- 4, 6, 7 — вал; 5 — тяговый трос; 8 — облицовка фаланги; 9 — скоба; 10 — привод линейного перемещения; 11 — зубчатое колесо, шкив;
- 12, 14 — шкив; 13 — часть эластичного кожуха («перчатки»); 15 — фаланга; 16 — корпус фаланги

передачи движения. Пример характерной конструкции АЗУ приведен на рис. 1.

Особенности рассматриваемого типа АЗУ: пять трехфаланговых пальцев, автономное программируемое управление независимым движением каждого сустава каждого пальца,

только положительные отклонения последующей фаланги от предыдущей, отсутствие тактильных датчиков в каждой точке возможного контакта поверхности пальцев с объектами манипулирования (ОМ).

С целью удешевления конструкции и упрощения программного обеспечения процедур захватывания ОМ механизм большого пальца выполнен таким образом, чтобы первая (проксимальная) фаланга была нормальна ладони, а на жесткой части ее поверхности нанесены ребра, параллельные нормали к ладони и лежащие в плоскостях движения остальных пальцев АЗУ (рис. 2). Таким образом, замыкание ОМ любым пальцем АЗУ осуществляется по стандартной схеме, которую назовем схемой замыкания «координатный угол — палец», а полное замыкание ОМ реализуется в точках, лежащих в четырех плоскостях.

Таким образом, построив эффективный алгоритм замыкания в плоскости, получили унифицированное программное обеспечение замыкания ОМ при помощи АЗУ.

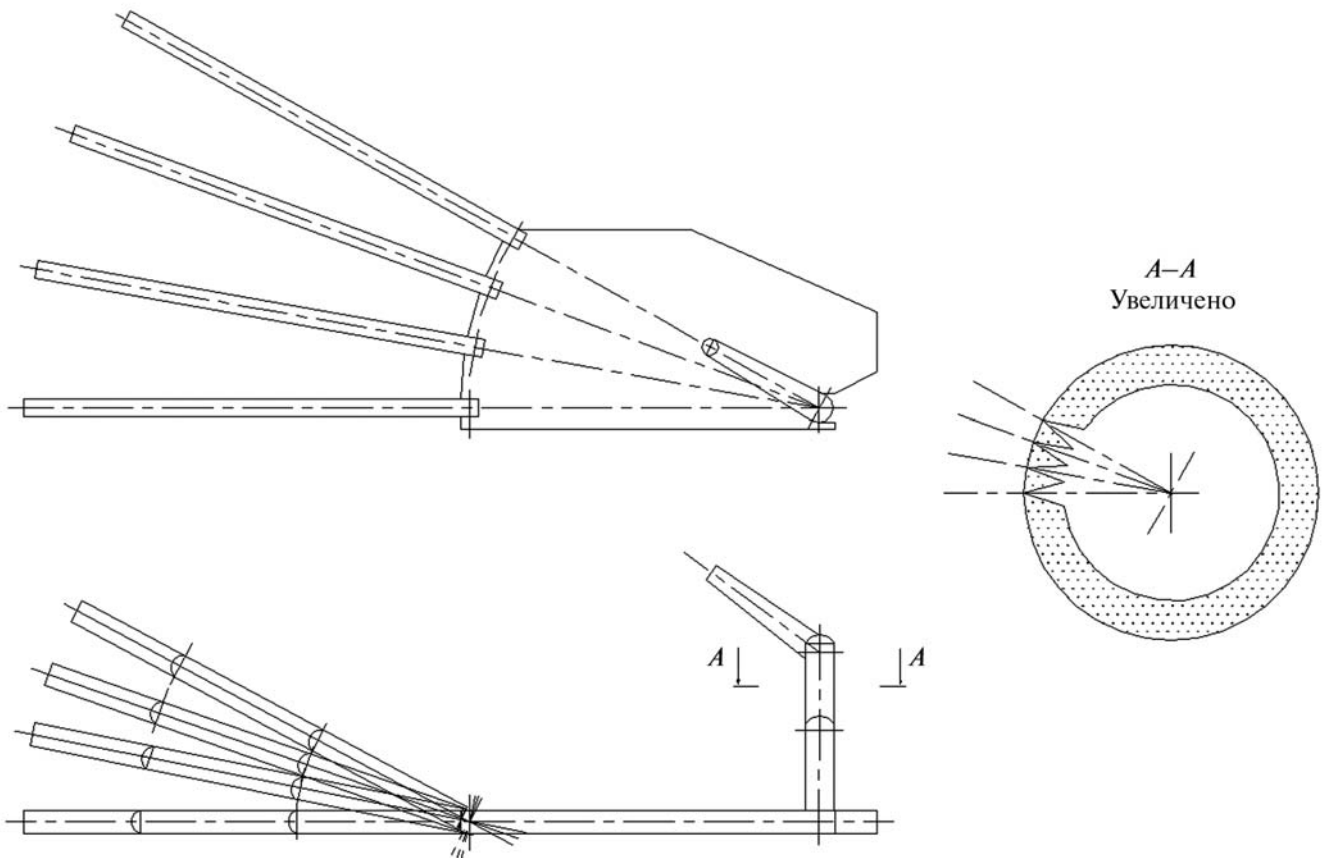


Рис. 2. Схема организации замыкания ОМ пальцами АЗУ

Если поверхность ОМ является гладкой и регулярной и описывается априорно заданной аналитической моделью, то решение задачи захватывания решается аналитически (имеет символьное решение) [1]. В промышленной робототехнике достаточно много таких ОМ, но доля ОМ с негладкими и нерегулярными поверхностями также значительна. В непромышленной робототехнике (медицинские роботы, кисти-протезы, антропоморфные роботы и т. п.) доля ОМ с заранее известной моделью, размещенной в базе данных робота, не столь значительна. Кроме того разработчики зачастую имеют дело со случайным появлением ОМ любой формы. Идентификация ОМ в этом случае реализуется чаще всего оптоэлектронными системами (техническое зрение [2], лазерное сканирование [3] и т. п.). При этом выходная информация об ОМ выводится в виде многомерных массивов данных. Идентификация массивов формулами возможна только для ограниченного набора поверхностей и не решает задачу в общем случае. При этом технология оптоэлектронной идентификации позволяет получить массивы данных как результат сечения поверхности ОМ виртуальной плоскостью. В этом случае плоскости, в которых выполняется идентификация ОМ, могут быть выбраны как плоскости замыкания по схеме «координатный угол — палец».

Отсюда возникает задача формирования алгоритмов замыкания ОМ, заданных массивами данных, идентифицирующих как гладкие регулярные [4], так и негладкие нерегулярные поверхности.

Решение задачи замыкания состоит в априорном определении точек контакта фаланг пальцев с ОМ для оценки возможности удержания ОМ при выбранной стратегии захватывания и параметров программируемого управления движений пальцев АЗУ.

Задачи замыкания ОМ антропоморфными схватами вызывают большой научный и практический интерес, частично решены [5–7], но окончательного и полного решения этой проблемы авторам данной статьи не известно. Далее приводятся результаты решения рассмотренной выше проблемы.

В предлагаемой работе решается задача замыкания ОМ с момента, когда АЗУ подведено к ОМ и нужно только «сжать пальцы». Такие важные и интересные задачи, как выбор метода оптической идентификации ОМ, формирование массивов данных об ОМ, выбор стратегии подвода АЗУ к ОМ с целью захватывания и расчет параметров программированного движения в целом решены в различных разделах робототехники [6–8] и требуют только адаптации к целям и задачам захватывания, а их изложение в рамках данной статьи ограничено возможностями публикации.

Постановка задачи замыкания предметов с нерегулярными поверхностями антропоморфным захватным устройством. Пусть заданы:

- базовая (инерциальная) правая система координат (БСК) $[X, Y, Z]$;
- массив данных идентификации контура ОМ в плоскости замыкания $M = (i^*, \alpha^*, \beta^*)$, где i^* — номер точки контура с координатами α^*, β^* , определенных относительно устройства идентификации ОМ;
- система координат ОМ (СКОМ) $[\alpha, \beta, \gamma]$ — правая ортогональная система координат, жестко связанная с ОМ, причем начало координат является внутренней точкой поверхности ОМ;
- система координат АЗУ (СКА) $[x, y, z]$ — правая ортогональная система координат жестко связанная с основанием АЗУ;
- система координат j -го пальца (СКП $_j$) $[x_j, y_j, z_j]$ — правая ортогональная система координат, жестко связанная с основанием j -го пальца, $j = 1, 2, \dots, J \leq 5$;
- система координат λ -го звена (фаланги) j -го пальца (СКП $_{j,\lambda}$) $[x_{j,\lambda}, y_{j,\lambda}, z_{j,\lambda}]$ — правая ортогональная система координат жестко связанная с основанием λ -го звена, $\lambda = 1, 2, \Lambda \leq 3$ (фаланги) j -го пальца, $j = 1, 2, \dots, J \leq 5$;
- соотношения между системами координат: R_0 — вектор (3×1) смещения СКА относительно БСК, T_0 — матрица (3×3) ориентаций СКА относительно БСК, $\|T_0\| = 1$; R_{0j} — вектор (3×1)

смещения СКП_j относительно СКА, T_{0j} — матрица (3×3) ориентаций СКП_j относительно СКА, $\|T_{0j}\|=1$; $R_{j\lambda}$ — вектор (3×1) смещения СКП_{j,\lambda} относительно СКП_j, $T_{j\lambda}$ — матрица (3×3) ориентаций СКП_{j,\lambda} относительно СКП_j, $\|T_{j\lambda}\|=1$; R_{OM} — вектор, 3×1 , смещения СКОМ, относительно БСК, T_{OM} — матрица ориентаций СКОМ (3×3) относительно БСК, $\|T_{OM}\|=1$;

- длины фаланг пальцев как элементов кинематических схем $L_{j\lambda}$;
- допустимый зазор (натяг) при замыкании ОМ j -м пальцем АЗУ Δ_j ;
- $q_0 = 0$ — начальное угловое положение разогнутого пальца;
- координаты оси вращения первой фаланги в СКА: x_{01} y_{01} .

Найти координаты точек $A_x(x,y)$, $A_y(x,y)$; координаты точек контакта $B_{j,\lambda}(x,y)$ (если они есть) каждой фаланги с контуром контакта ОМ; обобщенные координаты каждой фаланги.

Рассмотренный набор исходных данных иллюстрирует рис. 3.

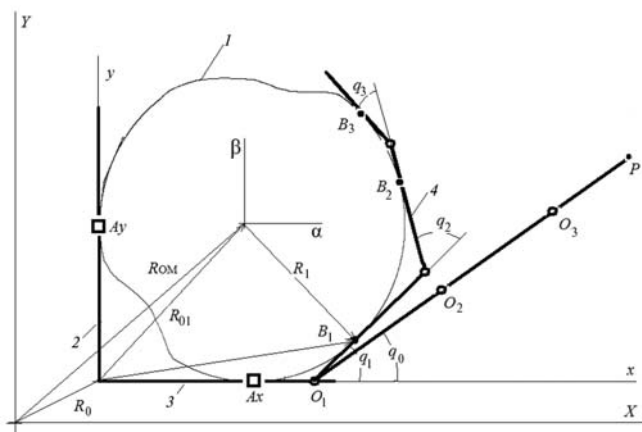


Рис. 3. Схема замыкания «координатный угол — палец»:

1 — контур ОМ в плоскости замыкания; 2 — первая фаланга большого пальца, находящаяся в положении замыкания; 3 — платформа (ладонь) АЗУ; 4 — замыкающий трехфаланговый палец; q_0 — угол исходного положения разогнутого пальца; $q_1 - q_3$ — программируемые отклонения пальцев (обобщенные координаты); A_y , A_x — точки контакта ОМ с платформой и проксимальной фалангой большого пальца; $O_1 - O_3$ — оси вращения фаланг

При решении задачи исходили из того, что отдельные фрагменты контура захватывания $F(\alpha, \beta) = 0$ могут идентифицироваться или аппроксимироваться гладкими регулярными плоскими кривыми, удовлетворяющими условию такому, что в каждой точке интервалов $\alpha_{1,k} \leq \alpha \leq \alpha_{2,k}$, $\beta_{1,k} \leq \beta \leq \beta_{2,k}$, где $\alpha_{1,k}$, $\alpha_{2,k}$, $\beta_{1,k}$, $\beta_{2,k}$ — константы и $k = 1, 2, \dots, K < \infty$, существуют производные любого порядка и выполняется условие: $(\partial F(\alpha, \beta) / \partial \alpha)^2 + (\partial F(\alpha, \beta) / \partial \beta)^2 > 0$ [9].

Основные положения, формирующие концепцию алгоритма замыкания. Замыкание ОМ может происходить «с зазором» (расширением контура), когда дополнительное смятие поверхности ОМ силами бóльшими, чем гравитационные недопустимо (геометрическое замыкание), или с «натягом» (сжатием контура), когда удержание ОМ осуществляется не только поддерживанием, но и силами трения между поверхностями пальцев и ОМ, возникающими вследствие деформаций ОМ (силовое замыкание). Поэтому первым этапом решения задачи замыкания должно быть формирование виртуального контура эквидистантного исходному. Примем следующую парадигму эквидистантности: любая точка контура $M(\alpha, \beta)$ эквидистантна с расширением точке контура $M^+(\alpha^+, \beta^+)$, где $\alpha^+ = if(\alpha \leq 0, \alpha - \Delta_\alpha, \alpha + \Delta_\alpha)$, $\beta^+ = if(\beta \leq 0, \beta - \Delta_\beta, \beta + \Delta_\beta)$; $\Delta_\alpha > 0$, $\Delta_\beta > 0$; любая точка контура $M(\alpha, \beta)$ эквидистантна со сжатием контура точке $M^-(\alpha^-, \beta^-)$, где $\alpha^- = if(\alpha \leq 0, \alpha - \Delta_\alpha, \alpha + \Delta_\alpha)$, $\beta^- = if(\beta \leq 0, \beta - \Delta_\beta, \beta + \Delta_\beta)$; $\Delta_\alpha > 0$, $\Delta_\beta > 0$.

Такой подход приводит к некоторому развороту полученного контура, но характеризуется низкой вычислительной сложностью.

В дальнейшем знак «+» опускаем, полагая, что виртуальный контур задан как исходные данные.

Вторым этапом решение задачи замыкания является приведение всех данных к одной системе координат. В качестве такой системы удобно использовать систему координат АЗУ (СКА) $[x, y, z]$. В этом случае точки виртуального контура замыкания будут представляться

вектором $R_1(x, y)$. При этом важным фактором является выбор стратегии захватывания и, в частности, разворот основания АЗУ относительно СКОМ. Выбор стратегии — отдельный важный вопрос, выходящий за рамки данной работы.

Будем считать, что задана максимальная хорда контура H_m в виде координат ее концов $A_y(\alpha_1, \beta_1)$, $A_{y1}(\alpha_2, \beta_2)$ и координаты точки $A_x(\alpha_0, \beta_0)$ такой, что ее отклонение от H_m максимально в выбранную сторону. Отметим, что эта стратегия не единственная. Не доказано, что она оптимальна, но во многих случаях она работоспособна. Какова бы ни была стратегия, она приведет к выбору некоторой хорды и отрезка, задающего отклонение от этой хорды к некоторой характерной точке.

Размер контура по оси x порождает две схемы замыкания:

- схема 1 (рис. 4, а), при которой $x_{01} \leq \max_x [\text{Пр}_x R_1(x, y)] = \max_i [\text{Пр}_x R_{1,i}]$, где $\text{Пр}_x R_1(x, y)$ — проекция вектора $R_1[x(i), y(i)] = R_{1,i}$ на ось x ;
- схема 2 (рис. 4, б), при которой $x_{01} > \max_x [\text{Пр}_x R_{1,i}]$.

Лемма 1. Если задан в параметрической форме произвольный замкнутый плоский контур (см. рис. 4) $x = x(i)$, $y = y(i)$, $i = 1, 2, \dots, I$: $x(i) \geq 0$, $y(i) \geq 0 \forall i \in I$ и луч $L(x, y)$, лежащий в исходном положении вне контура с началом в точке $O(x_1, y_1)$: $x_1 \geq 0$, $y_1 \leq \max_i y(i)$, лежащей вне контура, то при вращении луча в положительном направлении угол поворота луча до первого касания с контуром ограничен углом между исходным положением контура и прямой, проходящей через точки $O(x_1, y_1)$ и $M[\max_x x(i), y(I)]$: $x(I_1) = [\max_x x(i)]$.

Доказательство леммы 1. Рассмотрим схему, представленную на рис. 4, а. Запишем уравнение угла между прямой $O_1M(I_m)$ с уравнением $y = k_1x + b_1$, ($k_1 = [y(I_m) - y_1] / [x(I_m) - x_1]$, $b_1 = [y_1x(I_m) - x_1y(I_m)] / [x(I_m) - x_1]$) и прямой «Начальное положение» с уравнением $y = k_2x + b_2$ ($k_2 = 0$, $b_2 = y_1$), которое примет вид [9]:

$$q_m = \arctg[(y(I_m) - y_1) / (x(I_m) - x_1)].$$

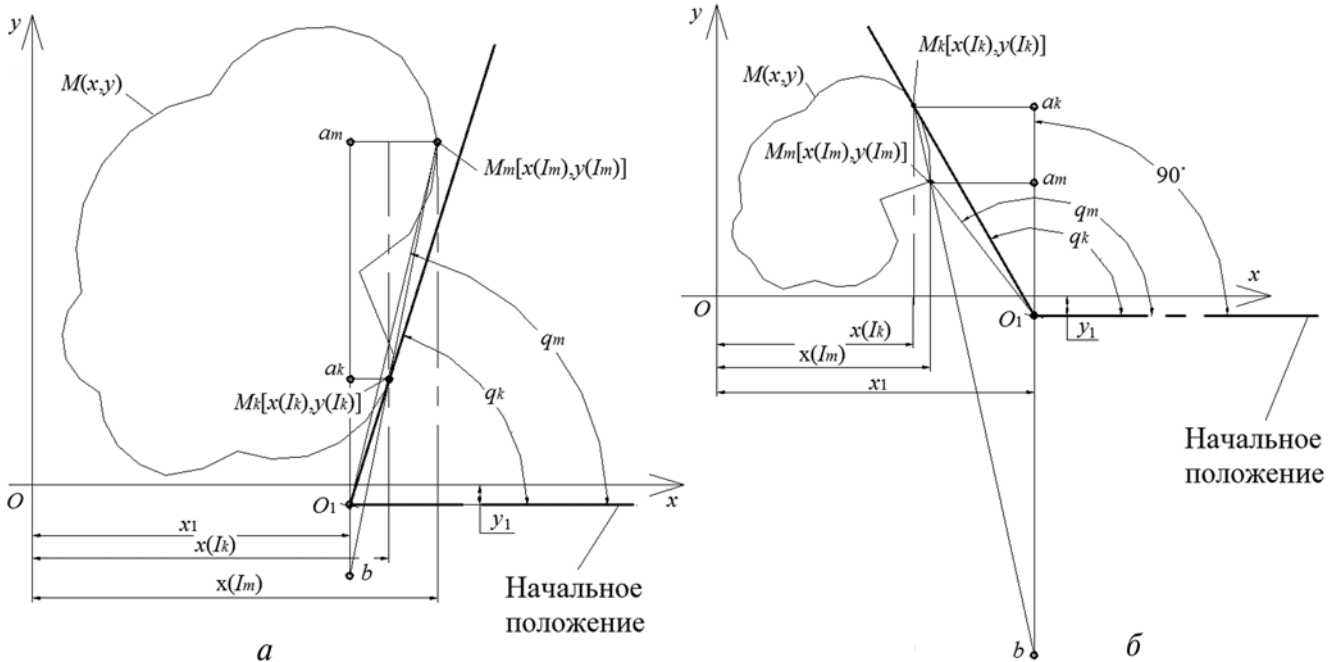


Рис. 4. Иллюстрация к лемме 1:

а — схема с углом поворота луча $q_k \leq \pi / 2$; б — схема с углом поворота луча $q_k > \pi / 2$

При соприкосновении луча $L(x, y)$ с контуром $M(x, y)$ без пересечения контура угол касания будет $q_k = \arctg\left[\frac{y(I_k) - y_1}{x(I_k) - x_1}\right]$ [4]. Получим разность этих углов:

$$\Delta q = q_m - q_k = \arctg\left[\frac{y(I_m) - y_1}{x(I_m) - x_1}\right] - \arctg\left[\frac{y(I_k) - y_1}{x(I_k) - x_1}\right] =$$

$$= \arctg\left[\frac{\frac{y(I_m) - y_1}{x(I_m) - x_1} - \frac{y(I_k) - y_1}{x(I_k) - x_1}}{1 + \left[\frac{y(I_m) - y_1}{x(I_m) - x_1}\right]\left[\frac{y(I_k) - y_1}{x(I_k) - x_1}\right]}\right] =$$

$$= \arctg\left[\frac{\frac{y(I_k) - y_1}{x(I_k) - x_1} \left[\frac{x(I_k) - x_1}{x(I_m) - x_1} \frac{y(I_m) - y_1}{y(I_k) - y_1} - 1\right]}{1 + \left[\frac{y(I_m) - y_1}{x(I_m) - x_1}\right]\left[\frac{y(I_k) - y_1}{x(I_k) - x_1}\right]}\right]. \quad (1)$$

Поскольку $x(I_m) - x_1 \geq 0$, $y(I_m) - y_1 \geq 0$, $x(I_k) - x_1 \geq 0$, $y(I_k) - y_1 \geq 0$, что следует из условий схемы, изображенной на рис. 4, а, $y(I_m) \geq y(I_k)$ — что следует из подобия треугольников $a_k O_1 M_k$ и $a_m O_1 M_m$, то:

$$\frac{y(I_m) - y_1}{x(I_m) - x_1} \geq 0; \quad \frac{y(I_k) - y_1}{x(I_k) - x_1} \geq 0; \quad \frac{x(I_k) - x_1}{x(I_m) - x_1} \geq 1;$$

$$\frac{y(I_m) - y_1}{y(I_k) - y_1} \geq 1; \quad \frac{[x(I_k) - x_1][y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1][y(I_k) - y_1]} \geq 1;$$

$$\frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]} \left[\frac{[x(I_k) - x_1][y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1][y(I_k) - y_1]} - 1\right] \geq 0;$$

$$1 + \frac{[y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1]} \frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]} \geq 1;$$

$$\frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]} \left[\frac{[x(I_k) - x_1][y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1][y(I_k) - y_1]} - 1\right] \geq 0;$$

$$1 + \frac{[y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1]} \frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]} \geq 0;$$

$$\arctg\left[\frac{\frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]} \left[\frac{[x(I_k) - x_1][y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1][y(I_k) - y_1]} - 1\right]}{1 + \frac{[y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1]} \frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]}}}\right] \geq 0;$$

$$\Delta q \geq 0.$$

Поскольку $\Delta q \geq 0$, то $q_m \geq q_k$ и лемма 1 доказана для схемы, приведенной на рис. 4, а.

Рассмотрим схему, представленную на рис. 4, б. Определим углы q_m и q_k также, как это было сделано для схемы, показанной на рис. 4, а. Получим разность этих углов, которая примет форму (1). Поскольку $x(I_m) - x_1 \leq 0$, $y(I_m) - y_1 \geq 0$, $x(I_k) - x_1 \geq 0$, $y(I_k) - y_1 \leq 0$, что следует из условий схемы, изображенной на рис. 4, а; $y(I_m) \leq y(I_k)$ — что следует из подобия треугольников $a_k O_1 M_k$ и $a_m O_1 M_m$, то:

$$\frac{y(I_m) - y_1}{x(I_m) - x_1} \leq 0; \quad \frac{y(I_k) - y_1}{x(I_k) - x_1} \leq 0;$$

$$0 \leq \frac{x(I_k) - x_1}{x(I_m) - x_1} \leq 1; \quad 0 \leq \frac{y(I_m) - y_1}{y(I_k) - y_1} \leq 1;$$

$$0 \leq \frac{[x(I_k) - x_1][y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1][y(I_k) - y_1]} \leq 1;$$

$$\frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]} \left[\frac{[x(I_k) - x_1][y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1][y(I_k) - y_1]} - 1\right] \geq 0;$$

$$1 + \frac{[y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1]} \frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]} \geq 1;$$

$$\frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]} \left[\frac{[x(I_k) - x_1][y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1][y(I_k) - y_1]} - 1\right] \geq 0;$$

$$1 + \frac{[y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1]} \frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]} \geq 0;$$

$$\arctg\left[\frac{\frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]} \left[\frac{[x(I_k) - x_1][y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1][y(I_k) - y_1]} - 1\right]}{1 + \frac{[y(I_m) - y_1]}{[x(I_m) - x_1]} \frac{[y(I_k) - y_1]}{[x(I_k) - x_1]}}}\right] \geq 0;$$

$$\Delta q \geq 0.$$

Поскольку $\Delta q \geq 0$, то $q_m \geq q_k$ и лемма 1 доказана для схемы, приведенной на рис. 4, б, то она доказана в целом. В этом случае для первой схемы справедливо следующее утверждение.

Утверждение 1. Для схемы на рисунке 4, а областью определения точек возможного контакта являются интервалы $[x_{o1}, \max_i x(i)]$ и $[y_{o1}(I_{n1}), y_{o1}(I_{k1})]$, где $I_{n1} = i \cdot x(i) = x_{o1}$, $I_{k1} = = i \cdot x(i) = \max_i x(i)$.

Доказательство утверждения 1. Пусть угол q_1 меняется от $q_1 = 0$ до $q_1 = \pi / 2$. Тогда любая точка прямой $O_1 P = L_{j,1} + L_{j,2} + L_{j,3}$, $B[x(i), y(i)]$,

способная быть точкой контакта с контуром, определенным на интервале $[x_{O_1}, \max_i x(i)]$ и $[y_{O_1}(I_{H1}), y_{O_1}(I_{K1})]$, будет иметь абсциссу $x_B(i): \max_i x(i) > x_B(i) \geq x_{O_1}$. Так как вращение прямой O_1P в положительном направлении ограничено отрезком, проходящим через точки $[x_{O_1}, y_{O_1}(I_{H1})]$ и $[\max_i x(i), y_{O_1}(I_{K1})]$, то точка возможного контакта будет иметь ординату $y_B(i): y_{O_1}(I_{H1}) \leq y_B(i) \leq y_{O_1}(I_{K1})$. Утверждение 1 доказано.

Справедливо также утверждение 2.

Утверждение 2. Для схемы на рисунке 4, б областью определения точек возможного контакта являются интервалы $[x_{O_1}, \max_i x(i)]$ и $[y_{O_1}(I_{H1}), y_{O_1}(I_{K1})]$, где $I_{H1} = i: x(i) = x_{O_1}$, $I_{K1} = i: x(i) = \max_i x(i)$. Доказательство утверждения 2 аналогично доказательству утверждения 1.

Решение задачи отыскания точки контакта с лучом $L(x, y)$ для схемы 1 может состоять в поиске минимума угла $q_k = \min_i \arctg[(y(i) - y_1) / (x(i) - x_1)]$ на интервале $0 \leq [(y(i) - y_1) / (x(i) - x_1)] < +\infty$ с одновременным исключением номеров, в которых $x(i) < x(i-1)$.

Поиск минимума функции $\Phi(i) = \arctg[(y(i) - y_1) / (x(i) - x_1)]$ на этом интервале может быть заменен менее трудоемкой процедурой поиска минимума функции $\Phi(i)^* = [(y(i) - y_1) / (x(i) - x_1)]$. Для схемы 2 решение задачи может состоять в поиске минимума угла $q_k = \pi - \min_i \arctg[(y(i) - y_1) / (x_1 - x(i))]$ на интервале $0 \leq [(y(i) - y_1) / (x_1 - x(i))] < +\infty$ с одновременным исключением номеров, в которых $x(i) < x(i-1)$. При этом также можно использовать менее трудоемкую процедуру поиска минимума функции $\Phi(i)^* = [(y(i) - y_1) / (x_1 - x(i))]$.

В общем случае, когда доказательств регулярности кривой контура нет, методом решения может являться прямое исследование положения луча $L(x, y)$ для каждого номера $i \in [I_{H1}, I_{K1}]$ (сканирование).

После нахождения значения q_k для первого звена определяют координаты оси второй кинематической пары $O_2(x, y)$ и процедура повторяется. Последней итерацией является отыскание обобщенной координаты третьего звена.

Алгоритм решения задачи замыкания плоского контура трехфаланговым схватом. Исходные данные: L_1, L_2, L_3 — длины фаланг пальцев; трехмерный массив данных о контуре замыкания $M_i = M[\alpha(i), \beta(i), i]$, где $i=1, 2, \dots, I$ — номера столбцов; координаты максимальной хорды $H_1(\alpha_1, \beta_1), H_2(\alpha_2, \beta_2)$ и координаты точки выбранного максимального отклонения $N_1(\alpha_3, \beta_3)$; γ — угол между максимальной хордой и осью α ; R_{OM} — вектор смещения СКОМ относительно БСК размерностью 3×1 ; T_{OM} — матрица ориентаций СКОМ относительно БСК (3×3), $\|T_{OM}\| = 1$; допустимый зазор (натяг) при замыкании ОМ, $\Delta_\alpha > 0, \Delta_\beta > 0$; координаты оси вращения первой фаланги в СКА: x_{O1}, y_{O1} ; правило размещения хорды замыкания и точек максимального уклонения относительно АЗУ, определенное стратегией захватывания (для определенности будем полагать, что точка с номером H_1 всегда контактирует с большим пальцем, а N_1 с основанием АЗУ).

Процедура. Формируем виртуальный контур замыкания $M_i := M[\alpha^+(i), \beta^+(i), i]$: $\alpha^+(i) = \text{if}(\alpha(i) \leq 0, \alpha(i) - \Delta_\alpha, \alpha(i) + \Delta_\alpha)$, $\beta^+(i) = \text{if}(\beta(i) \leq 0, \beta(i) - \Delta_\beta, \beta(i) + \Delta_\beta)$ при зазоре или $\alpha^+(i) = \text{if}(\alpha(i) \leq 0, \alpha(i) + \Delta_\alpha, \alpha(i) - \Delta_\alpha)$, $\beta^+(i) = \text{if}(\beta(i) \leq 0, \beta(i) + \Delta_\beta, \beta(i) - \Delta_\beta)$ при натяге. На виртуальном контуре определяем координаты концов хорды замыкания $H_1(\alpha_1^+, \beta_1^+), H_2(\alpha_2^+, \beta_2^+)$ и координаты точек максимального уклонения $N_1(\alpha_3^+, \beta_3^+), N_2(\alpha_4^+, \beta_4^+)$.

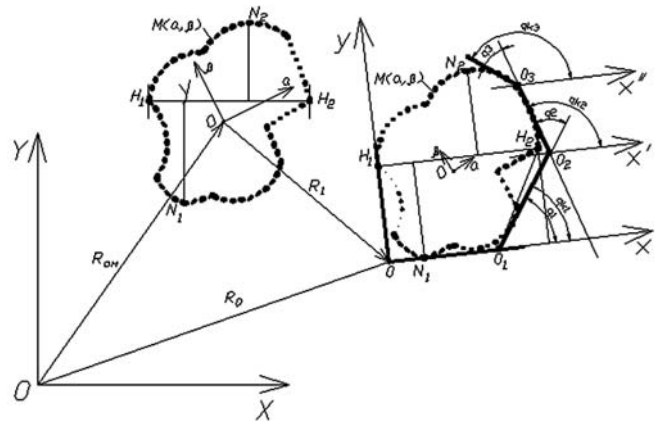


Рис. 5. Графические пояснения к алгоритму

Вводим вспомогательную систему координат (x, y) , у которой ось абсцисс проходит через точку $H_1(\alpha_1^+, \beta_1^+)$, а ось ординат через точку $N_1(\alpha_3^+, \beta_3^+)$. Начало координат $O(\alpha_0, \beta_0)$ системы (α', β') в системе (α, β) найдем как пересечение под прямым углом прямых, проходящих через точки H_1 и N_1 :

$$\alpha_0 = \left[(\beta_2 - \beta_1)(\beta_3(\alpha_2 - \alpha_1) + \alpha_3(\beta_2 - \beta_1)) + (\alpha_2 - \alpha_1)(\beta_1(\beta_2 - \beta_1) - \alpha_1(\alpha_2 - \alpha_1)) \right] / \left[(\alpha_2 - \alpha_1)^2 - (\beta_2 - \beta_1)^2 \right];$$

$$\beta_0 = [(\beta_2 - \beta_1)\alpha_0 + \beta_3(\alpha_2 - \alpha_1) + \alpha_3(\beta_2 - \beta_1)] / (\alpha_2 - \alpha_1).$$

Отметим, что система (x, y) совпадает с СКА в плоскости xOy . Переформатируем массив $M(\alpha, \beta, i)$ так, чтобы номер $i = 1$ соответствовал точке $N_1(\alpha_1^+, \beta_1^+)$ и преобразуем контур $M(\alpha, \beta)$ в систему (x, y) , получив массив $M_i = M[x(i), y(i), i]$. Определим номер I_{H1} , соответствующий координатам точки (x_{O1}, y_{O1}) и номер I_{K1} , соответствующий координатам точки H_2 .

В соответствии с леммой 1 найдем: $q_k = = q_1 = \min_i \arctg[(y(i) - y_1) / (x(i) - x_1)]$ на интервале $I_{H1} \leq i < I_{K1}$ и $I_k : q_k(I_k) = q_1; x(I_k)$ и $y(I_k)$.

Если точка контакта принадлежит первой фаланге, то процесс продолжается, иначе — имеем все выходные данные.

Конец алгоритма.

Выводы

1. Предложенный алгоритм можно применять для определения обобщенных координат точек контакта трехфалангового пальца с объектом, модель которого представлена виртуальным точечным контуром в плоскости «координатный угол — палец».

2. При использовании нескольких пальцев, устроенных так, что их плоскости «координатный угол — палец» не совпадают, последовательное применение алгоритма решения задачи замыкания плоского контура, полученного сечением пространственного объекта, формирует пространственную модель контактов АЗУ с ОМ.

3. Рассмотренный подход позволяет создать унифицированное математическое обес-

печение компьютерного решения задачи замыкания ОМ антропоморфным захватным устройством как для моделей с гладкими регуляторами, так и с негладкими и нерегулярными поверхностями, при распознавании которых при помощи оптоэлектронных систем информация о форме объектов представляется в виде многомерных массивов данных.

Литература

1. Лукинов А.П., Сыромятин А.Н. О решении задач кинематики антропоморфного захватного устройства при условиях неопределенности геометрических параметров захватываемых объектов // Труды Первой Международной конференции «Интеллектуальные технологии и средства реабилитации людей с ограниченными возможностями» (ИТСР-2010). М.: Изд-во МГСГИ, 2010. С. 20—26.
2. Richard J. Campbell, Patrick J. Flynn A Survey Of Free-Form Object Representation and Recognition Techniques // Signal Analysis and Machine Perception Laboratory, Department of Electrical Engineering, Ohio State University, 2000. 45 p. URL: <http://nd.edu/~flynn/papers/Campbell%20CVIU01.pdf> (дата обращения: 05.04.2012).
3. Andreas Nuchter, Hartmut Surmann. Automatic Classification of Objects in 3D Laser Range Scans // Fraunhofer Institute for Autonomous Intelligent Systems. Germany, 2004. 8 p. URL: <http://148.81.54.64/Repository/o215.pdf> (дата обращения: 05.04.2012).
4. Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 832 с.
5. Yu Zheng, Chee-Meng. Chew Efficient Procedures for Form-Closure Grasp Planning and Fixture Layout Design // National University of Singapore, Journal of manufacturing Science and Engineering, 2009. 11 p. URL: [http://www.cs.unc.edu/~yuzheng/publications/%5B2009%5D%20Efficient%20Procedures%20for%20Optimal%20Form-Closure%20Grasp%20Planning%20and%20FixtureLayout%20Design%20\(JMSE\).pdf](http://www.cs.unc.edu/~yuzheng/publications/%5B2009%5D%20Efficient%20Procedures%20for%20Optimal%20Form-Closure%20Grasp%20Planning%20and%20FixtureLayout%20Design%20(JMSE).pdf) (дата обращения: 05.04.2012).
6. Berenson D., Siddhartha S. Srinivasa Grasp Synthesis in Cluttered Environments for Dexterous Hands // IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids08), 2008. 6 p. URL: http://automation.berkeley.edu/~berenson/berenson_dmitry_2008_2.pdf (дата обращения: 05.04.2012).
7. Begoc V., Durand C. On the Form-Closure Capability of Robotic Underactuated Hands // ICARCV'06: 9th International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision. Singapur, 2006. 8 p. URL: http://www.lirmm.fr/~krut/internal-pdf://2006_begoc_icarcv-2232367360/2006_begoc_icarcv.pdf (дата обращения: 05.04.2012).
8. Полякова М.А. Планирование оптимальных траекторий движения исполнительного органа антропоморфного манипулятора // Вестник СевГТУ. Вып. 80. 2007. С. 9—14. URL: <http://sevtu.com.ua/jspui/bitstream/123456789/1090/1/mechan.75.2005.22-34.pdf> (дата обращения: 05.04.2012).
9. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия. М.: Наука, 1974. 176 с.

Статья поступила в редакцию 07.08.2012