

В. Ф. Филаретов¹, д-р техн. наук, проф., зав. лаб., filaretov@inbox.ru,

А. С. Губанков^{1, 2}, канд. техн. наук, доц., gubankov@iacp.dvo.ru,

И. В. Горностаев^{1, 2}, мл. науч. сотр., gornostaev_iv@mail.ru,

¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,

²Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток

Разработка метода формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов манипуляторов с избыточными степенями подвижности. Часть I*

Статья посвящена вопросам сохранения динамической точности управления рабочими инструментами много-степенных манипуляторов (ММ) при их перемещениях по произвольным пространственным траекториям с учетом конструктивных ограничений во всех степенях подвижности и особых случаях расположения их звеньев. Сохранение точности управления предлагается обеспечивать за счет исключения выхода всех степеней подвижности манипуляторов на ограничения и в указанные особые положения, характеризующие неоднозначностью в решении обратных задач кинематики ММ, а также исключения выхода их рабочих инструментов на границы рабочей области за счет использования избыточной степени подвижности при подходе к указанным нежелательным положениям.

В первой части статьи рассмотрены особенности нового решения обратной задачи кинематики и описаны особые положения для шестистепенных манипуляторов с кинематическими схемами типа PUMA. Представленное решение обратной задачи кинематики учитывает различные комбинации обобщенных координат ММ, обеспечивающие перемещения их рабочих инструментов в заданные положения с требуемой пространственной ориентацией. Это решение имеет малую вычислительную сложность по сравнению с другими известными методами, что позволяет использовать для управления ММ маломощные микропроцессорные вычислители.

Результаты выполненного математического моделирования подтвердили высокую эффективность использования предлагаемого подхода к контурному управлению ММ.

Ключевые слова: многостепенный манипулятор, избыточная степень подвижности, ограничения, особые положения, обратная задача кинематики, динамическая точность управления

Введение

В настоящее время применение многостепенных манипуляторов (ММ) для выполнения различных технологических операций (ТО) в автоматическом режиме часто существенно осложняется тем, что даже при перемещении их рабочих инструментов (РИ) внутри рабочей области отдельные степени подвижности могут выходить на конструктивные ограничения. Если это происходит, то контроллер немедленно останавливает ММ с соответствующим сообщением об ошибке. Кроме того, этот же ММ может войти в одно из особых (вырожденных) положений, характеризующих неоднозначностью в решении обратной задачи кинематики

(ОЗК). В результате при продолжении движения РИ по пространственным траекториям в соответствующих степенях подвижности ММ могут возникать неожиданные реверсы, приводящие к уменьшению скорости движения РИ, столкновениям с объектами работ, к поломке инструментов и иным аварийным ситуациям. Кроме того, при работе с протяженными объектами часть траектории, по которой должен пройти РИ, может находиться вне рабочей области ММ, что потребует дополнительной переустановки этих объектов.

Если траектории движения РИ ММ формируются не во время его перемещения, то для традиционного исключения описанных негативных ситуаций требуется предварительно проводить многочисленные и трудоемкие тестовые испытания и вручную вносить коррективы в заранее спланированные траектории,

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках грантов № 19-08-00347 и 20-08-00701.

в том числе и тогда, когда в обрабатываемых деталях во время их закрепления возникают непредвиденные деформации [1, 2].

Для расширения рабочей области ММ можно обеспечивать его дополнительной линейной степенью подвижности в горизонтальной плоскости [3], получив новое решение ОЗК для конкретного многосвязника [4]. Подобная задача была решена для манипулятора, установленного на подводном аппарате [5, 6], но только для его работы в передней полусфере аппарата, что накладывало дополнительные ограничения на соответствующие степени подвижности манипулятора. В результате, используя известное решение ОЗК [7] и формируя линейное смещение аппарата вблизи объекта работ, удавалось быстро вычислять обобщенные координаты многосвязного манипулятора в заданных диапазонах и значительно расширять его рабочую область.

Однако для ММ требования к диапазонам изменения его обобщенных координат (включая избыточную) значительно расширяются и не ограничиваются только одной полусферой. Кроме того, для ММ возможны различные варианты поворота его степеней подвижности (конфигурации [8]), при которых РИ находится в одном и том же положении с одной и той же ориентацией. Все это требует нового решения ОЗК.

Другие известные методы решения ОЗК для ММ с избыточной степенью подвижности [9–14] также обладают рядом существенных недостатков. В частности, в работе [9] использован аналитический подход для решения ОЗК для семистепенного манипулятора, который позволяет исключать вход всех степеней подвижности в ограничения, но не исключает появления неожиданных реверсов в отдельных степенях подвижности. В работах [10–12] представлены методы итерационного численного решения ОЗК для кинематически избыточных манипуляторов, а также рассмотрена их реализация для семистепенных ММ. Применение этих методов позволяет однозначно определять текущие конфигурации ММ, одновременно исключая их вход в особые положения, а также вход РИ на границу рабочей области. Рассмотрен и метод введения дополнительных индикаторных функций, исключающий вход всех обобщенных координат и скоростей ММ в ограничения. Но общим недостатком этих методов является необходимость трудоемкого периодического расчета псевдообратных матриц Якоби. В работе [13] представлен метод однозначного решения ОЗК на примере шестистепенных

ММ с возможностью его расширения и для кинематически избыточных ММ с помощью нейронных сетей, а в работе [14] — модификация этого метода, в которой дополнительно используются генетические алгоритмы для улучшения точности получаемых решений. Общим недостатком этих методов является необходимость одновременной параллельной работы трех нейронных сетей с последующим выбором наилучшего получаемого с их помощью результата. Реализация этих методов требует использования мощных вычислительных средств.

Таким образом, проведенный обзор известных источников показал, что эффективных решений ОЗК для кинематически избыточных типовых ММ с учетом ограничений их степеней подвижности и исключения возможных реверсов еще не получено.

1. Постановка задачи

Целью данной работы является создание нового метода автоматического перемещения РИ ММ по произвольным пространственным траекториям без снижения динамической точности управления за счет исключения выхода их степеней подвижности на ограничения и в особые положения, а РИ — на границы рабочей области за счет использования избыточной степени подвижности ММ при подходе к указанным нежелательным положениям. Эта задача решается для ММ с кинематической схемой типа PUMA, когда траектории движения их РИ заранее неизвестны. Этот же подход может быть использован и для манипуляторов с другими кинематическими схемами.

2. Особенности решения обратной задачи кинематики для манипуляторов типа PUMA

Перед решением поставленной общей задачи вначале решается ОЗК для ММ в связанной с его основанием системе координат (СК) и рассматривается метод формирования программного сигнала управления для избыточной степени подвижности, перемещающей его основание в абсолютной СК.

На рис. 1 показана кинематическая схема ММ типа PUMA, установленного на подвижном горизонтальном основании. На рис. 1 введены следующие обозначения: O_{xyz} — абсолютная СК; $O'x'y'z'$ — связанная с подвижным

($q_{3,1}$ или $q_{3,2}$). Это неоднозначное решение ОЗК должно быть учтено при формировании соответствующих координат ММ.

Из рис. 2, а видно, что $q_{1,1} = -\arctg(R'_x/R'_y)$, где $R'_x = r'_x - a'_x L_4$, $R'_y = r'_y - a'_y L_4$ [7]. Но это выражение дает однозначное решение для формирования координаты q_1 только в диапазоне $(-\pi/2; \pi/2)$. Для диапазона $[-\pi; \pi]$ указанное выражение удобно переписать через функцию $\text{atan2}(R'_x, R'_y)$ [8], которая обеспечивает вычисление значения $\arctg(R'_x/R'_y)$ с учетом принадлежности аргумента соответствующему квадранту.

Если учесть два возможных значения q_1 ($q_{1,1}$ или $q_{1,2}$), отличающихся на угол π (рис. 2, а и 2, б), при которых за счет изменения q_2, q_3 точка R' будет иметь одно и то же положение в СК $O'x'y'z'$, то окончательно без введения дополнительных логических условий можно записать

$$q_1 = -\text{atan2}(R'_x, R'_y) + \pi k_1, \quad (2)$$

где k_1 — параметр, определяющий выбор одной из двух возможных конфигураций ММ (k_1 равен 0 или 1, если $\text{atan2}(R'_x, R'_y) \geq 0$, иначе -1). Выбор значения этого и других параметров, определяющих конфигурацию ММ, проводится автоматически и будет рассмотрен ниже.

С помощью выражения (2) можно рассчитать углы $q_{1,1}$ (для $k_1 = 0$) и $q_{1,2}$ (для $k_1 = \pm 1$), причем разворот на угол π должен осуществляться в ту сторону, для которой q_1 не выходит из диапазона $[-\pi; \pi]$. Поэтому знак $q_{1,2}$ должен быть противоположен знаку рассчитанного выше $q_{1,1}$.

При определении обобщенных координат q_2 и q_3 рассматриваются все возможные конфигурации ММ, учитывающие различное расположение характерной точки W' (см. рис. 1) оси третьего шарнира ММ (см. различное расположение точек W'_1 и W'_2 на рис. 2, а и 2, б, которым соответствуют различные пары углов $q_{2,1}, q_{3,1}$ и $q_{2,2}, q_{3,2}$).

Значение q_3 можно определить через $\arctg(s_3/c_3)$, где $s_i = \sin q_i$, $c_i = \cos q_i$, но лучше для этого также использовать функцию $\text{atan2}(\cdot)$ и записать [16]

$$q_3 = \text{atan2}(s_3, c_3). \quad (3)$$

Для определения s_3 можно использовать любой из равных треугольников (все их стороны равны) $P'W'_1R'$ или $P'W'_2R'$ (для $q_1 = q_{1,1}$ на рис. 2, а), где $P'(0; 0; L_1)$ — координаты характерной точки оси второго шарнира в СК $O'x'y'z'$.

Используя теорему косинусов для этих треугольников: $d^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos \delta$ ($\cos \delta = \cos(\pi - q_{3,1}) = \cos(\pi + q_{3,2}) = -c_3$, δ — угол между вторым и третьим звеньями ММ, смежный противоположным по знаку углам $q_{3,1}$ и $q_{3,2}$ ($q_{3,1} = -q_{3,2}$) при его различных (рис. 2, а) конфигурациях), а также тот факт, что длина стороны $P'R'$ $d = \sqrt{R'^2_x + R'^2_y + (R'_z - L_1)^2}$, а $R'_z = r'_z - a'_z L_4$ [7], можно записать

$$c_3 = (d^2 - L_2^2 - L_3^2)/(2L_2L_3). \quad (4)$$

Выражение для определения s_3 имеет вид:

$$s_3 = k_2 \sqrt{1 - c_3^2}, \quad (5)$$

где $k_2 = \pm 1$ — параметр, определяющий выбор знака s_3 для соответствующей ему одной (из двух) конфигураций ММ (рис. 2, а). Подставив выражения (4) и (5) в (3), можно однозначно определить возможные значения $q_{3,1}$ (для $k_2 = -1$) и $q_{3,2}$ (для $k_2 = 1$).

Несложно показать, что если $q_1 = q_{1,2}$ (рис. 2, б), то выражения (3)—(5) полностью сохраняются и при таком повороте ММ вокруг вертикальной оси.

Возможные значения угла q_2 ММ (см. $q_{2,1}$ и $q_{2,2}$ на рис. 2, а и 2, б) можно определить по выражению [16]

$$q_2 = \alpha - \beta, \quad (6)$$

где α — угол между горизонтальной плоскостью, проходящей через точку P' , и прямой $P'R'$, равный α_1 для $k_1 = 0$ или α_2 для $k_1 = \pm 1$; β — угол между вторым звеном ММ и прямой $P'R'$ (его знак совпадает со знаком q_3); $P'_1(R'_x; R'_y; L_1)$ — координаты проекции точки R' на горизонтальную плоскость, проходящую через точку P' , в СК $O'x'y'z'$.

Аналитические выражения для определения углов α и β в равенстве (6) могут быть получены с помощью построений, представленных на рис. 2, а и 2, б.

Из треугольника $P'P'_1R'$ видно, что при $q_1 = q_{1,1}$ (рис. 2, а)

$$\text{tg} \alpha_1 = P'R'/P'P'_1 = (R'_z - L_1)/\sqrt{R'^2_x + R'^2_y}.$$

Выразив из этого равенства α_1 и используя функцию $\text{atan2}(\cdot)$, для обеих представленных на рис. 2, а конфигураций ММ можно записать

$$\alpha_1 = \text{atan2}(R'_z - L_1, \sqrt{R'^2_x + R'^2_y}), \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \pi - \alpha_1. \quad (8)$$
$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= P'_{2,1} R' / (P' W'_1 + W'_1 P'_{2,1}) = \\ &= (L_3 \sin q_{3,1}) / (L_2 + L_3 \cos q_{3,1}). \end{aligned}$$
$$\beta = \text{atan2}(L_3 s_3, L_2 + L_3 c_3). \quad (9)$$

Для расчета остальных обобщенных координат q_4, q_5, q_6 рассматриваемого ММ с учетом расширенных диапазонов их изменений в качестве исходных были использованы выражения, ранее полученные в работе [7]:

$$q_4 = \arccos((-a'_x c_1 - a'_v s_1)/s_5); \quad (10)$$

$$q_5 = \arccos(-a'_x s_1 c_{23} + a'_y c_1 c_{23} + a'_z s_{23}); \quad (11)$$

$$q_6 = \arccos(b'_x(s_1s_{23}c_4 + c_1s_4) + b'_y(-c_1s_{23}c_4 + s_1s_4) + b'_z(c_{23}c_4)), \quad (12)$$

Выражения (10)–(12) справедливы при однозначном решении ОЗК для рассматриваемого ММ, только когда изменения q_4 , q_5 , q_6 происходят в диапазонах $[0; \pi]$. Поэтому следует модифицировать эти выражения так, чтобы они учитывали диапазоны $[-\pi; \pi]$.

При определении координаты q_5 (11), зависящей только от q_1, q_2, q_3 , следует учитывать две различные конфигурации ММ, при которых q_5 принимает значения с противоположными знаками, а требуемая ориентация вектора $\mathbf{a}'$ (см. рис. 1) обеспечивается за счет различных поворотов q_4 . С учетом этого выражение (11) следует переписать в виде

$$q_5 = k_3 \arccos(-a'_x s_1 c_{23} + a'_v c_1 c_{23} + a'_z s_{23}), \quad (13)$$

Поскольку с учетом выражения (10) можно определить только модуль координаты q_4 , то для определения ее знака следует получить логические условия, учитывающие постоянное совпадение векторов $\mathbf{e}_6$ и $\mathbf{a}'$. Для получения этих условий необходимо учитывать, что при изменении q_4 в противоположных направлениях вращения и при фиксированных значе-

ниях q_1, q_2, q_3 (2)–(9) и q_5 (13) наблюдается различный закон изменения (уменьшение или увеличение) проекции вектора $\mathbf{e}_6$ на ось $O'Z'$.

На рис. 3, а и 3, б показаны два варианта расположения звеньев ММ, анализ которых позволяет определить знак q_4 . Для упрощения пояснений на этих рисунках принято, что $q_1 = 0$. Поэтому первые три звена ММ располагаются в плоскости $O'y'z'$, а углы q_2 и q_3 различны, но такие, при которых оба рисунка симметричны относительно плоскости $O'x'z'$. На указанных

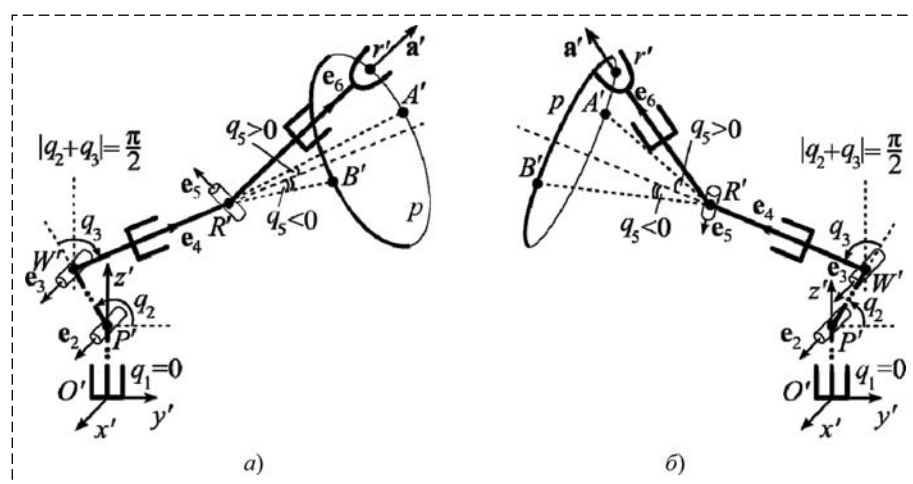


Рис. 3. Определение знака q_4 при:
 $a - |q_2 + q_3| < \pi/2$; б - $|q_2 + q_3| > \pi/2$
Fig. 3. Definition of q_4 sign at:
 $a - |q_2 + q_3| < \pi/2$; б - $|q_2 + q_3| > \pi/2$

рисунках векторы $\mathbf{e}_4$ и $\mathbf{e}_6$ не совпадают, поскольку углы $q_5 \neq 0$. Поэтому при изменении q_4 и $q_5 = \text{const}$ точка r' перемещается по окружности p .

Если вектор $\mathbf{e}_5$ лежит в плоскости $O'y'z'$, то принимается, что $q_4 = 0$, и тогда вектор $\mathbf{e}_6$ располагается в плоскости, в которой также лежит вектор $\mathbf{e}_4$ и которая перпендикулярна вектору $\mathbf{e}_5$. В этом случае в зависимости от знака $q_5 \neq 0$ векторы $\mathbf{e}_6$ на обоих рисунках займут положения $R'A'$ или $R'B'$, а их проекции на оси $O'z'$ будут равны $s_{23}c_5$ [7]. При этом положения $R'A'$ будут соответствовать $q_5 > 0$, а положения $R'B'$ — $q_5 < 0$. Расположение последнего звена ММ, показанное на рис. 3, а, может соответствовать двум различным парам значений углов q_4 и q_5 (в типовых диапазонах $[-\pi; \pi]$), например, соответственно: $\pi/4$ и $\pi/6$, $-3\pi/4$ и $-\pi/6$, а на рис. 3, б — также двум различным парам этих углов: $-\pi/4$ и $\pi/6$, $3\pi/4$ и $-\pi/6$.

На рис. 3, а и 3, б для векторов $\mathbf{a}'$ и $\mathbf{e}_6$ выполняется условие $a'_z > s_{23}c_5$. Из рис. 3, а следует, что, если $|q_2 + q_3| < \pi/2$ и $q_5 > 0$, то при перемещении РТИ из положения $R'A'$ в положение r' по окружности p $q_4 > 0$, а если $q_5 < 0$, то $q_4 < 0$. Если $|q_2 + q_3| > \pi/2$ и $q_5 > 0$ (см. рис. 3, б), то $q_4 < 0$, а если $q_5 < 0$, то $q_4 > 0$.

Несложно показать, что если $a'_z < s_{23}c_5$ (эти конфигурации ММ на рис. 3, а и 3, б не показаны), то в перечисленных ситуациях знак q_4 должен быть просто изменен на противоположный, т. е. $q_4 > 0$, если

- 1) $q_5 > 0$, $a'_z > s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| < \pi/2$;
- 2) $q_5 < 0$, $a'_z < s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| < \pi/2$;
- 3) $q_5 > 0$, $a'_z < s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| > \pi/2$;
- 4) $q_5 < 0$, $a'_z > s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| > \pi/2$.

В представленных условиях не учитывается случай, когда третье звено ММ может быть параллельно оси $O'z'$ ($|q_2 + q_3| = \pi/2$ и $a'_z = s_{23}c_5$). При появлении этого положения необходимо сохранять прежний знак q_4 до очередной смены знака. Поэтому для любых возможных конфигураций ММ с учетом выражения (10) в общем виде можно записать

$$q_4 = \text{sign}(k_3 k_4 k_5) \arccos((-a'_x c_1 - a'_y s_1)/s_5), \quad (14)$$

где $\text{sign} x = 1$, если $x \geq 0$, иначе -1 [8]; $k_4 = a'_z - s_{23}c_5$, $k_5 = \pi/2 - |q_2 + q_3|$.

Для выполнения условия $q_5 \neq 0$ в выражении (14) синтезируемая система управления ММ исключает полное обнуление координаты q_5 . Знак координаты q_6 (12) определяется по взаимному расположению векторов $\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_x \ \gamma_y \ \gamma_z]^T = \mathbf{e}_5 \times \mathbf{b}'$ и $\mathbf{a}'$ [7]. Если эти векторы совпадают, то угол q_6 положителен или равен нулю, иначе — отрицателен. При совпадении векторов $\boldsymbol{\gamma}$ и $\mathbf{a}'$ их скалярное произведение удовлетворяет неравенству $k_6 = \gamma_x a'_x + \gamma_y a'_y + \gamma_z a'_z \geq 0$, иначе оно отрицательно, здесь

$$\gamma_x = b'_z(s_1 s_4 - c_1 s_{23} c_4) - b'_y(c_{23} c_4);$$

$$\gamma_y = -b'_z(c_1 s_4 + s_1 s_{23} c_4) + b'_x(c_{23} c_4);$$

$$\gamma_z = b'_y(c_1 s_4 + s_1 s_{23} c_4) - b'_x(s_1 s_4 - c_1 s_{23} c_4) \quad [7].$$

В результате выражение (12) с учетом знака можно переписать в виде

$$q_6 = \text{sign}(k_6) \arccos(b'_x(s_1 s_{23} c_4 + c_1 s_4) + b'_y(-c_1 s_{23} c_4 + s_1 s_4) + b'_z(c_{23} c_4)). \quad (15)$$

После получения выражений для расчета всех обобщенных координат $q_1, \dots, q_6$ (см. (2)—(9) и (13)—(15)), учитывающих все возможные конфигурации ММ, требуется выбрать одну из них, для которой при переходе ММ из своего начального положения в конечное этот ММ будет максимально удален от своих особых положений (о них будет сказано ниже), а его степени подвижности — от своих ограничений.

Общая вычислительная сложность предложенного метода решения ОЗК для ММ составляет 27 операций сложения, 47 операций умножения (деления) и 21 операцию вычисления стандартных функций. Это меньше по сравнению с другими известными методами [8, 15], для которых эти значения составляют, соответственно: операций сложения — 34 и 35, умножения (деления) — 84 и 52, а также вычисления стандартных функций — 21 и 22, и при наличии современных процессоров позволяет реализовывать управление ММ в реальном времени.

Как уже отмечалось ранее, при решении ОЗК указанного ММ необходимо учитывать и его четыре особых положения (рис. 4) [17], в которых возникает неоднозначное решение ОЗК и поэтому появляются заранее непредсказуемые реверсы в некоторых степенях подвижности.

В первом особом положении (рис. 4, а) проекция точки R' на плоскость $O'x'y'$ совпадает

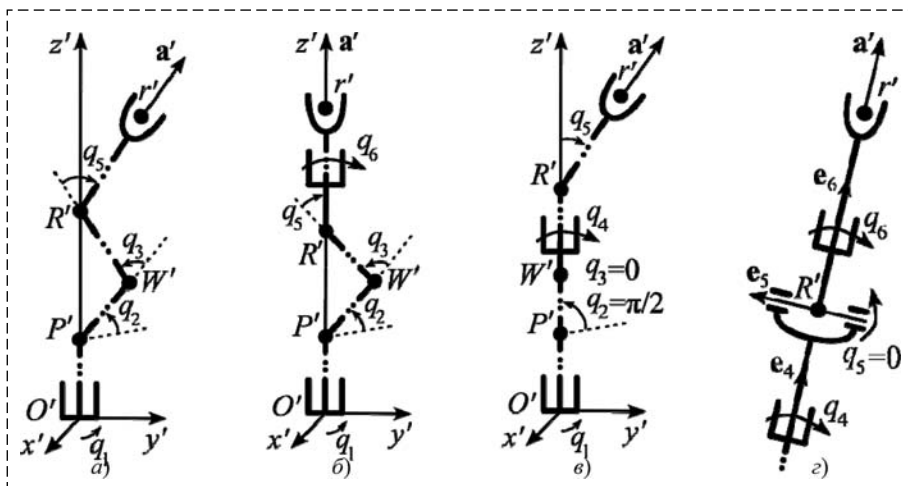


Рис. 4. Особые положения ММ
Fig. 4. Singular positions of the MM

с началом координат. В этом положении возможно множество различных значений угла q_1 , которым будут соответствовать различные q_4 , q_5 , q_6 . Во втором особом положении (рис. 4, б) начало координат, а также точки R' и r' лежат на одной вертикальной прямой, и возможно существование множества пар q_1 и q_6 . В третьем (рис. 4, в) — на одной вертикальной прямой лежат начало координат и точки W' , R' , а координаты q_1 и q_4 однозначно не определены. В четвертом особом положении (рис. 4, г) на одной прямой лежат последние звенья ММ, $q_5 = 0$, а координаты q_4 и q_6 не определены. Кроме того, при работе с крупными объектами возможен выход РИ, сохраняющих заданные пространственные ориентации, на границу рабочей области ММ, где продолжение ТО оказывается невозможным.

Но появление описанных выше особых положений и входов в ограничения ММ можно исключить при введении дополнительной (избыточной) линейной степени подвижности q_7 (см. рис. 1) [5, 6]. Особенности работы ММ с этой избыточной степенью подвижности подробно будут рассмотрены во второй части статьи.

Список литературы

1. Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Губанков А. С. Разработка роботизированного комплекса для механической обработки нежестких пространственных композитных изделий вертолетов // Известия ВУЗов, Машиностроение, Специальный выпуск "Специальная робототехника и мехатроника". 2011. С. 67–75.
2. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Зуев А. В., Губанков А. С., Мурсалимов Э. Ш. Разработка метода совмещения трехмерных моделей обрабатываемых деталей с их CAD-

моделями при наличии деформаций // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 3. С. 60–69.

3. Gubankov A., Gornostaev I. Development of method of forming signals for the actuators of manipulators with redundant degrees of mobility // Proceedings of Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. St. Petersburg, Russia. 2017. P. 1–4.

4. Yahya S., Moghavvemi M., Mohamed H. A. F. Redundant manipulators kinematics inversion // Scientific Research and Essays. 2011. Iss. 26, Vol. 6. P. 5462–5470.

5. Филаретов В. Ф., Губанков А. С., Горностаев И. В., Коноплин А. Ю. Разработка метода формирования программных сигналов управления манипуляторами, установленными на подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2018. Т. 25, № 1. С. 30–37.

6. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I., Konoplin A. Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles // Proceedings of the Int. Russian Automation Conf., Sochi, Russia. 2019. P. 1–6.

7. Филаретов В. Ф., Алексеев Ю. К., Лебедев А. В. Системы управления подводными роботами. М.: Круглый год, 2001. 288 с.

8. Фу, К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.

9. Gong M., Li X., Zhang L. Analytical Inverse Kinematics and Self-Motion Application for 7-DOF Redundant Manipulator // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 18662–18674.

10. Lu Sh., Gu Y., Zhao J., Jiang L. An Iterative Calculation Method for Solve the Inverse Kinematics of a 7-DOF Robot with Link Offset // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 29, N. 4. P. 729–739.

11. Wan J., Wu H. T., Ma R., Zhang L. A study on avoiding joint limits for inverse kinematics of redundant manipulators using improved clamping weighted least-norm method // Journal of Mechanical Science and Technology. Vol. 32, N. 3. 2018. P. 1367–1378.

12. Tashani H., Farrokhi M. Real-time inverse kinematics of redundant manipulators using neural networks and quadratic programming: A Lyapunov-based approach, Robotics and Autonomous Systems. 2014. Vol. 62, N.6. P. 766–781.

13. Koker R. A neuro-simulated annealing approach to the inverse kinematics solution of redundant robotic manipulators // Engineering with Computers. 2013. P. 507–515.

14. Koker R. A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization // Information Sciences, 2012. Vol. 222. P. 528–543.

15. Крейг Д. Дж. Введение в робототехнику: механика и управление, М.-Ижевск.: Институт компьютерных исследований, 2013. 564 с.

16. Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А. Методы управления робототехническими приложениями / Учеб. пособие, СПб.: Университет ИТМО, 2016. 108 с.

17. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы, М.: Наука, 1978. 400 с.

Development of the Method of Formation the Reference Signals for Electric Actuators of Manipulators with Redundant Degrees of Freedom. Part I

V. F. Filaretov¹, filaretov@inbox.ru, A. S. Gubankov^{1, 2}, gubankov@iacp.dvo.ru,

I. V. Gornostaev^{1, 2}, gornostaev_iv@mail.ru,

¹Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation,

²Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, 690091, Russian Federation

Corresponding author: **Gornostaev I. V.**, Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, 690041, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: gornostaev_iv@mail.ru

Accepted on August 17, 2021

Abstract

The solution of task of maintaining the dynamic accuracy of control of working tools of multilink manipulators (MM) when they move along arbitrary spatial trajectories is presented in this paper. In this case, constructive restrictions in all degrees of freedom (DoF) of manipulators and special cases of location of their links are taken into account. These special (singular) positions are characterized by ambiguity in solving inverse kinematics problem of these MM. Maintaining of control accuracy is proposed to be ensured by excluding the enter of all DoFs of manipulators to the restrictions, as well as excluding the enter of their working tools to the boundaries of the working area. This is accomplished by using a redundant DoF when approaching these undesirable positions. In the first part of the article, the features of the new solution of the inverse kinematics problem are considered and singular positions for 6-DoF manipulators with PUMA kinematic schemes are described. The presented solution of the inverse kinematics problem takes into account various combinations of generalized coordinates of the MM, which ensure the movement of their working tools to the specified positions with the required spatial orientation. This solution has low computational complexity compared to other known methods. This allows the use of low-power microprocessor computers to control the MM. The results of the performed mathematical simulation confirmed the high efficiency of using the proposed approach to the contour control of the MM.

Keywords: multilink manipulator, redundant degree of freedom, restrictions, singular positions, inverse kinematics, dynamic accuracy

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (№ 19-08-00347 and 20-08-00701).

For citation:

Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. Development of the Method of Formation the Reference Signals for Electric Actuators of Manipulators with Redundant Degrees of Freedom. Part I, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 23–30.

DOI: 10.17587/mau.23.23-30

References

1. Filaretov V. F., Zuev A. V., Gubankov A. S. The development of a robotics system for machining nonrigid spatial composite parts for helicopters, *Izvestiya VUZov, Mashinostroenie, Special'nyj vypusk "Special'naya robototekhnika i mekhatronika"*, 2011, pp. 67–75 (in Russian).
2. Filaretov V. F., Yuxhimets D. A., Zuev A. V., Gubankov A. S., Mursalimov E. Sh. The method of development of combination of three-dimensional models of processed details with their CAD-models at the presence of deformations, *Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii*, 2016, no. 3, pp. 60–69.
3. Gubankov A., Gornostaev I. V. Development of method of forming signals for the actuators of manipulators with redundant degrees of mobility, *Proceedings of Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1–4.
4. Yahya S., Moghavvemi M., Mohamed H. A. F. Redundant manipulators kinematics inversion, *Scientific Research and Essays*, 2011, iss. 26, vol. 6, pp. 5462–5470.
5. Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V., Konoplin A. Yu. Development of formation method of program control signals of manipulators installed on underwater vehicles, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 30–37 (in Russian).
6. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I., Konoplin A. Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles, *Proceedings of the Int. Russian Automation Conf.*, Sochi, Russia, 2019, pp. 1–6.
7. Filaretov V. F., Alekseev Yu. K., Lebedev A. V. Underwater robot control systems, Moscow, Kruglyj god, 2001, 288 p. (in Russian).
8. Fu. K., Gonzalez R., Lee K. Robotics: control, sensing, vision, and intelligence, Moscow, Mir, 1989, 624 p. (in Russian).
9. Gong M., Li X., Zhang L. Analytical Inverse Kinematics and Self-Motion Application for 7-DOF Redundant Manipulator, *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 18662–18674.
10. Lu Sh., Gu Y., Zhao J., Jiang L. An Iterative Calculation Method for Solve the Inverse Kinematics of a 7-DOF Robot with Link Offset, *Lecture Notes in Computer Science*, 2017, vol. 29, no. 4, pp. 729–739.
11. Wan J., Wu H. T., Ma R., Zhang L. A study on avoiding joint limits for inverse kinematics of redundant manipulators using improved clamping weighted least-norm method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, vol. 32, no. 3, pp. 1367–1378.
12. Toshani H., Farrokhi M. Real-time inverse kinematics of redundant manipulators using neural networks and quadratic programming: A Lyapunov-based approach, *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, vol. 62, no. 6, pp. 766–781.
13. Koker R. A neuro-simulated annealing approach to the inverse kinematics solution of redundant robotic manipulators, *Engineering with Computers*, 2013, pp. 507–515.
14. Koker R. A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization, *Information Sciences*, 2012, vol. 222, pp. 528–543.
15. Craig J. J. Introduction to robotics: mechanics and control, Pearson Education International, 2005, 400 p.
16. Borisov O. I., Gromov V. S., Pyrkin A. A. Robotic application control techniques: study guide, St. Petersburg, ITMO University, 2016, 108 p. (in Russian).
17. Popov E. P., Vereshchagin A. F., Zenkevich S. L. Manipulation robots: dynamics and algorithms, Moscow, Nauka, 1978, 400 p. (in Russian).