

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19)

RU

(11)

2 724 769 C1

(13)

(51) МПК

B25J 9/16 (2006.01)

B25J 13/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА

ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

Статус: может прекратить свое действие (последнее изменение статуса: 28.12.2024)
Пошлина: учтена за 5 год с 28.12.2023 по 27.12.2024. Установленный срок для уплаты пошлины за 6 год: с 28.12.2023 по 27.12.2024. При уплате пошлины за 6 год в дополнительный 6-месячный срок с 28.12.2024 по 27.06.2025 размер пошлины увеличивается на 50%.

(52) СПК

B25J 9/16 (2020.02); B25J 13/00 (2020.02)

(21)(22) Заявка: **2019144634**, 27.12.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.12.2019

Дата регистрации:
25.06.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **27.12.2019**

(45) Опубликовано: **25.06.2020** Бюл. № **18**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 125508 U1, 10.03.2013. RU 146552 U1, 10.10.2014. US 4986280 A1, 22.01.1991. ЮРЕВИЧ Е.И. Управление роботами и робототехническими системами. - СПб: СПбГТУ, 2000. - 171 с. - с. 123-131.**

Адрес для переписки:

355017, Ставропольский край, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, Северо-Кавказский федеральный университет, Управление науки и технологий, Лиховид Андрей Александрович

(72) Автор(ы):

**Петренко Вячеслав Иванович (RU),
Тебуева Фариза Биляловна (RU),
Гурчинский Михаил Михайлович (RU),
Свистунов Николай Юрьевич (RU),
Павлов Андрей Сергеевич (RU),
Некрасова Евгения Александровна (RU),
Апурин Артем Александрович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Северо-Кавказский федеральный университет" (RU)

(54) **СПОСОБ КОПИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРАМИ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА**

(57) Реферат:

Изобретение относится к робототехнике и может быть использовано в системах копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота. Способ копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота предусматривает копирование движений рук оператора не по вектору углов поворота в суставах рук оператора, а по обобщенным координатам. Техническим результатом изобретения является расширение функциональных возможностей копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота с помощью задающего устройства в виде экзоскелета. 5 ил.

Изобретение относится к робототехнике и может быть использовано в системах копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота.

Известен способ копирующего управления, используемый в дистанционном манипуляторе, защищенном патентом RU №125508, кл. B25J 3/04, 2013 г. Согласно данному способу захват движений рук оператора выполняют с помощью экзоскелета с кинематической схемой, аналогичной кинематической схеме руки человека, измеряют вектор углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета, осуществляют перемещение антропоморфного манипулятора в положение, соответствующее вектору углов поворота $\bar{\theta}''$.

Существенными признаками аналога, совпадающими с признаками заявляемого изобретения, являются захват движений рук оператора с помощью экзоскелета с кинематической схемой, аналогичной кинематической схеме руки человека, измерение вектора углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета.

Недостатком данного способа копирующего управления является низкая точность измерений углов поворота в суставах руки оператора. Она обусловлена тем обстоятельством, что в процессе движения руки оператора нарушается параллельность между звеньями экзоскелета и отделами руки оператора. Данный факт приводит к различиям между значениями углов поворота в суставах руки оператора и измеренными значениями углов поворота в кинематических парах экзоскелета.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому способу (прототипом) является способ копирующего управления, используемый в комплексе управления антропоморфным манипулятором, (заявка на изобретение RU 2018146275 А). Согласно данному способу захват движений рук оператора выполняют с помощью экзоскелета с кинематической схемой, аналогичной кинематической схеме руки человека, измеряют вектор углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета, измеряют антропометрические параметры оператора, используют вычислитель для вычисления вектора углов поворота $\bar{\theta}'$ в суставах руки оператора на основе антропометрических параметров оператора и вектора углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета, осуществляют перемещение антропоморфного манипулятора в положение, соответствующее вектору углов поворота $\bar{\theta}'$.

Существенными признаками прототипа, совпадающими с признаками заявляемого изобретения, являются захват движений рук оператора с помощью экзоскелета с кинематической схемой, аналогичной кинематической схеме руки человека, измерение вектора углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета, измерение антропометрических параметров оператора, использование вычислителя для вычисления вектора углов поворота $\bar{\theta}'$ в суставах руки оператора на основе антропометрических параметров оператора и вектора углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета.

Недостатком способа-прототипа является низкая точность выполнения целевых операций при непропорциональности антропометрических параметров оператора системы копирующего управления и аналогичных параметров антропоморфного робота. Кроме того, при наличии двух манипуляторов в способе-прототипе возможно несоответствие относительного положения кистевых звеньев манипуляторов антропоморфного робота относительному положению кистей рук оператора. Данные недостатки обусловлены тем, что в качестве вектора целевых углов поворота манипуляторов антропоморфного робота используются вектор углов поворота в суставах рук оператора. Вследствие того, что в общем случае длины звеньев манипуляторов антропоморфного робота не пропорциональны длинам соответствующих отделов рук оператора, в процессе копирующего управления возможно возникновение различных нежелательных ситуаций. В частности, если при пропорциональности всех прочих звеньев, звенья манипуляторов антропоморфного робота, соответствующие предплечьям рук оператор непропорционально короче, при сведении оператором рук ладонь к ладони между кистевыми звеньями антропоморфного манипулятора останется зазор, как это показано на фиг. 1. Приведенные недостатки в общем случае снижают точность, а в частных случаях делают невозможным выполнение целевых операций.

Техническим результатом изобретения является расширение функциональных возможностей копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота с помощью задающего

устройства в виде экзоскелета.

Для достижения технического результата в способе копирующего управления, включающего захват движений рук оператора с помощью экзоскелета с кинематической схемой, аналогичной кинематической схеме руки человека, измерение вектора углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета, измерение антропометрических параметров оператора, использование вычислителя для вычисления вектора углов поворота $\bar{\theta}'$ в суставах руки оператора на основе антропометрических параметров оператора и вектора углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета, дополнительно измеряют расстояние l'_1 от центра плечевого сустава руки оператора до центра его локтевого сустава, расстояние l'_2 от центра локтевого сустава руки оператора до центра его лучезапястного сустава, расстояние l'_3 от центра лучезапястного сустава руки оператора до центра его кисти, расстояние между плечевыми суставами оператора m' , для каждой руки вычисляют с помощью вычислителя максимальное расстояние от центра плечевого сустава руки оператора до центра его ладони по формуле:

$$r'_m = l'_1 + l'_2 + l'_3,$$

расстояние O'_7 от центра кисти оператора до центра плечевого сустава этой же руки, расстояние O'_7 от центра кисти оператора до центра плечевого сустава второй руки оператора, относительное расстояние R'_7 от центра кисти оператора до центра плечевого сустава этой же руки по формуле:

$$R'_7 = \frac{O'_7}{r'_m},$$

относительное расстояние r'_7 от центра кисти оператора до центра плечевого сустава второй руки оператора по формуле:

$$r'_7 = \frac{O'_7}{r'_m},$$

угол α' между плоскостью, образованной центром кисти руки оператора и центрами его плечевых суставов, и фронтальной плоскостью оператора, угол β' между плоскостью, образованной центрами плечевого, локтевого и лучезапястного суставов руки оператора, и вертикальной плоскостью, проходящей через центры плечевого и лучезапястного суставов руки оператора, углы Эйлера φ' , ϑ' , ψ' кисти оператора, для каждого антропоморфного манипулятора с помощью вычислителя вычисляют вектор целевых углов $\bar{\theta}$ в кинематических парах манипуляторов антропоморфного робота, при которых относительное расстояние R_7 от центра схвата антропоморфного манипулятора до центра плечевого сочленения этого же манипулятора, рассчитываемое по формуле:

$$R_7 = \frac{O_7}{r_m},$$

где O_7 – расстояние от центра схвата манипулятора до центра плечевого сочленения этого же манипулятора,

r_m – максимальное расстояние от центра схвата манипулятора до центра плечевого сочленения этого же манипулятора,

относительное расстояние r_7 от центра схвата антропоморфного манипулятора до центра плечевого сочленения второго манипулятора, рассчитываемое по формуле:

$$r_7 = \frac{O_7}{r_m},$$

где O_7 – расстояние от центра схвата манипулятора до центра плечевого сочленения второго

манипулятора,

угол α между плоскостью, образованной центром схвата манипулятора и центрами его плечевых сочленений, и фронтальной плоскостью антропоморфного робота, угол β между плоскостью, образованной центрами плечевого, локтевого и лучезапястного сочленений манипулятора, и вертикальной плоскостью, проходящей через центры плечевого и лучезапястного сочленения манипулятора, углы Эйлера φ, θ, ψ кистевого звена для каждого манипулятора антропоморфного робота будут соответствовать аналогичным параметрам рук оператора, осуществляют перемещение манипуляторов антропоморфного робота в положение, соответствующее вектору целевых углов $\bar{\theta}$.

Теоретическое доказательство наличия причинно-следственной связи между заявляемыми признаками и достигаемым техническим результатом заключается в следующем.

При реализации копирующего управления важной задачей является определение вектора углов поворота исполнительного манипулятора на основе известного вектора углов поворота в суставах руки оператора. В способе-прототипе предлагается использовать в качестве вектора целевых углов исполнительного манипулятора вектор углов поворота в суставах руки оператора. В общем случае конструктивные параметры антропоморфного робота не пропорциональны аналогичным антропометрическим параметрам оператора. Данный факт обуславливает возникновение при использовании способа-прототипа ситуаций, в которых система копирующего управления функционирует некорректно. Например, если длины звеньев манипуляторов пропорциональны аналогичным длинам отделов руки оператора, но «ширина плеч» робота, т. е. расстояние между центрами плечевых сочленений, непропорционально больше расстояния между центрами плечевых суставов оператора, при использовании способа-прототипа возникнет ситуация, изображенная на фиг. 1. За счет того, что «ширина плеч» робота больше, при сведении рук оператора ладонь к ладони между кистевыми звеньями манипуляторов останется зазор, т. е. становится невозможным сведение манипуляторов антропоморфного робота «ладонь» к «ладони». Таким образом, способ-прототип работает корректно только при полной пропорциональности конструктивных параметров манипуляторов антропоморфного робота и антропометрических параметров рук оператора, что требует создания уникального антропоморфного робота под каждого оператора, или реализации возможности подстройки конструктивных параметров антропоморфного робота.

Для решения данной проблемы и расширения функциональных возможностей систем копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота предлагается осуществлять копирование движения каждой руки оператора не по вектору углов поворота в её суставах, а по специализированным обобщенным координатам, к которым относятся:

1. Относительное расстояние R_7^i от центра кисти руки оператора до центра плечевого сустава этой же руки, вычисляемое по формуле:

$$R_7^i = \frac{O_7^i}{r_m^i}, r_m^i = l_1^i + l_2^i + l_3^i,$$

где O_7^i – расстояние от центра кисти оператора до центра плечевого сустава этой же руки, r_m^i – максимальное расстояние от центра плечевого сустава руки оператора до центра его ладони,

l_1^i – расстояние от центра плечевого сустава руки оператора до центра его локтевого сустава,

l_2^i – расстояние от центра локтевого сустава руки оператора до центра его лучезапястного сустава,

l_3^i – расстояние от центра лучезапястного сустава руки оператора до центра его кисти.

2. Относительное расстояние r_7^i от центра кисти оператора до центра плечевого сустава второй руки оператора, вычисляемое по формуле:

$$r_7^i = \frac{O_7^i}{r_m^i},$$

где σ_7' – расстояние от центра кисти оператора до центра плечевого сустава второй руки оператора.

3. Угол α' между плоскостью, образованной центром кисти руки оператора и центрами его плечевых суставов, и фронтальной плоскостью оператора.

4. Угол β' между плоскостью, образованной центрами плечевого, локтевого и лучезапястного суставов руки оператора, и вертикальной плоскостью, проходящей через центры плечевого и лучезапястного суставов руки оператора.

5. Углы Эйлера φ' , ϑ' , ψ' кисти оператора.

Для осуществления копирующего управления по перечисленным специализированным обобщенным координатам необходимо использование вычислителя, который на основе вектора углов поворота в суставах рук оператора и его антропометрических параметров вычислит специализированные обобщенные координаты рук оператора, а также вычислит такой вектор углов поворота в кинематических парах манипуляторов антропоморфного робота, при которых значение специализированных обобщенных координат манипуляторов антропоморфного робота будет совпадать со значениями аналогичных специализированных обобщенных координат руки оператора. Т. е. будет осуществляться копирование движения рук оператора не по вектору углов поворота в суставах рук оператора, а по специализированным обобщенным координатам.

Копирующее управление по специализированным обобщенным координатам с одной стороны позволяет достичь заявленного технического результата, а с другой – требует применения заявленных признаков, что обуславливает причинно-следственную связь между заявляемыми признаками и достигаемым техническим результатом.

На фиг. 1 проиллюстрирована недостаточность функциональных возможностей прототипа для копирующего управления двумя манипуляторами антропоморфного робота. На фиг. 1а изображено положение рук оператора, сведенных ладонь к ладони. На фиг. 1б изображено положение манипуляторов антропоморфного робота, соответствующее положению рук оператора, изображенному на фиг. 1а, при управлении с помощью прототипа.

На фиг. 2 приведена кинематическая схема манипулятора антропоморфного робота, в виде взаимного положения звеньев с первого по седьмое и сочленений с первого по седьмого.

На фиг. 3 изображены системы координат, введенные в соответствии с представлением Денавита-Хартенберга для кинематической схемы, представленной на фиг. 2.

На фиг. 4 приведена визуализация вычисленных положений манипуляторов антропоморфного робота, расстояние между плечевыми сочленениями которого непропорционально уже расстояния между плечевыми суставами оператора для положения рук оператора, когда ладони соединены перед собой, при управлении с помощью способа-прототипа.

На фиг. 5 приведена визуализация вычисленных положений манипуляторов антропоморфного робота, расстояние между плечевыми сочленениями которого непропорционально уже расстояния между плечевыми суставами оператора для положения рук оператора, когда ладони соединены перед собой, при управлении с помощью заявляемого способа.

В соответствии с предлагаемым способом осуществляют следующие действия над задающим устройством, манипуляторами антропоморфного робота и другими материальными объектами:

1. Захватывают движение рук оператора с помощью экзоскелета с кинематической схемой, аналогичной кинематической схеме руки человека.

2. Измеряют вектор углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета.

3. Используют вычислитель для вычисления вектора углов поворота $\bar{\theta}'$ в суставах рук оператора на основе антропометрических параметров оператора и вектора углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета.

1. Измеряют антропометрические параметры l_1' , l_2' , l_3' , m' .

5. Используют вычислитель для вычисления специализированных обобщенных координат

$R'_7, r'_7, \alpha', \beta', \varphi', \vartheta', \psi'$ рук оператора на основе антропометрических параметров и вектора $\bar{\theta}'$ углов поворота в суставах рук оператора.

6. Используют вычислитель для вычисления вектора целевых углов $\bar{\theta}$ манипуляторов антропоморфного робота, при которых специализированные обобщенные координаты $R_7, r_7, \alpha, \beta, \varphi, \vartheta, \psi$ манипуляторов антропоморфного робота соответствуют аналогичным специализированным обобщенным координатам рук оператора.

7. Осуществляют перемещение манипуляторов антропоморфного робота в положение, соответствующее вектору целевых углов $\bar{\theta}$.

Один из вариантов осуществления изобретения для копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота, каждый из которых имеет кинематическую схему, подобную изображенной на фиг. 2, заключается в следующем.

Для захвата движения рук оператора и измерения вектора углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета может использоваться экзоскелет, используемый в дистанционном манипуляторе, защищенном патентом RU №125508, кл. B25J 3/04, 2013 г.

Для вычисления вектора углов поворота $\bar{\theta}'$ в суставах руки оператора на основе антропометрических параметров оператора и вектора углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета может быть использован способ, защищенный патентом RU №2700118 C1, кл. A61B 5/103, 2018 г.

Расстояние l'_1 от центра плечевого сустава руки оператора до центра его локтевого сустава, расстояние l'_2 от центра локтевого сустава руки оператора до центра его лучезапястного сустава, расстояние l'_3 от центра лучезапястного сустава руки оператора до центра его кисти, расстояние между центрами плечевых суставов оператора m' могут быть измерены с помощью соответствующих медицинских методик измерения антропометрических параметров.

Для вычисления специализированных обобщенных координат $R'_7, r'_7, \alpha', \beta', \varphi', \vartheta', \psi'$ рук оператора на основе антропометрических параметров и вектора $\bar{\theta}'$ углов поворота в суставах рук оператора, и вычисления вектора целевых углов $\bar{\theta}$ манипуляторов антропоморфного робота, при которых специализированные обобщенные координаты $R_7, r_7, \alpha, \beta, \varphi, \vartheta, \psi$ манипуляторов антропоморфного робота соответствуют аналогичным параметрам рук оператора может быть использован следующий метод.

Для расчета вектора $\bar{\theta}$ необходимо наличие следующих входных данных:

1. Расстояние l'_1 от центра плечевого сустава руки оператора до центра его локтевого сустава.
2. Расстояние l'_2 от центра локтевого сустава руки оператора до центра его лучезапястного сустава.
3. Расстояние l'_3 от центра лучезапястного сустава руки оператора до центра его кисти.
4. Расстояние m' между центрами плечевых суставов оператора.
5. Векторы $\bar{a}', \bar{d}', \bar{\alpha}', \bar{\theta}'$ параметров Денавита-Хартенберга, описывающих кинематическую структуру руки оператора.
6. Расстояние l_1 от центра плечевого сочленения манипулятора антропоморфного робота до центра его локтевого сочленения.
7. Расстояние l_2 от центра локтевого сочленения манипулятора антропоморфного робота до центра его лучезапястного сочленения.
8. Расстояние l_3 от центра лучезапястного сочленения манипулятора антропоморфного робота до центра его схвата.

9. Расстояние m между центрами плечевых сочленений манипуляторов антропоморфного робота.

10. Векторы $\bar{a}, \bar{d}, \bar{\alpha}, \bar{\theta}$ параметров Денавита-Хартенберга, описывающих кинематическую структуру манипулятора антропоморфного робота.

11. Вектор $\bar{\theta}'$ углов поворота в суставах руки оператора.

Кинематическая схема руки оператора и манипулятора антропоморфного робота приведены на фиг. 2. Системы координат, введенные в соответствии с представлением Денавита-Хартенберга для кинематической схемы, представленной на фиг. 2, представлены на фиг. 3. Центр плечевого сочленения, центр локтевого сочленения, центр лучезапястного сочленения и центр схвата манипулятора антропоморфного робота соответствуют точкам O_0, O_3, O_6, O_7 на фиг. 3. Центры суставов руки оператора расположены аналогично центрам сочленений манипулятора антропоморфного робота.

Расчет вектора $\bar{\theta}$ целевых углов поворота манипулятора антропоморфного робота включает в себя четыре этапа:

1. Расчет декартовых координат центров суставов руки оператора.
2. Расчет специализированных обобщенных координат руки оператора.
3. Расчет декартовых координат сочленения манипулятора антропоморфного робота.
4. Решение обратной задачи кинематики манипулятора антропоморфного робота.

Расчет декартовых координат суставов руки оператора включает в себя следующие действия.

Формирование матриц однородного преобразования для руки оператора согласно представлению Денавита-Хартенберга по формулам:

$${}^i T_j' = \prod_{k=i+1}^j {}^{i-1} A_k', \quad i < j,$$

$${}^{i-1} A_i' = T_{z,\theta}'(\theta_i') T_{z,d}'(d_i') T_{x,\alpha}'(a_i') T_{x,\alpha}'(\alpha_i'),$$

$$T_{z,\theta}'(\theta_i') = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i') & -\sin(\theta_i') & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i') & \cos(\theta_i') & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_{z,d}'(d_i') = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_{x,\alpha}'(a_i') = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i' \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_{x,\alpha}'(\alpha_i') = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i') & -\sin(\alpha_i') & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i') & \cos(\alpha_i') & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где ${}^i T_j'$ – однородная матрица преобразования из j -й в i -ю систему координат (фиг. 3),
 ${}^{i-1} A_i'$ – однородная матрица сложного преобразования между i -й и $(i-1)$ -й системами координат,

$T_{z,\theta}'(\theta_i')$ – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси Oz на угол θ_i' ,

$T_{z,d}'(d_i')$ – однородная матрица перемещения по оси Oz на величину d_i' ,

$T'_{x,a}(a'_i)$ – однородная матрица перемещения по оси Ox на величину a'_i ,
 $T'_{x,\alpha}(\alpha'_i)$ – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси Ox на угол α'_i ,
 $a'_i, d'_i, \alpha'_i, \theta'_i$ – i -е элементы векторов $\bar{a}', \bar{d}', \bar{\alpha}', \bar{\theta}'$.

Расчет радиус-вектора $\bar{O}'_3$ центра локтевого сустава руки оператора по формуле:

$$\bar{O}'_3 = T'_3 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Расчет радиус-вектора $\bar{O}'_6$ центра лучезапястного сустава руки оператора по формуле:

$$\bar{O}'_6 = T'_6 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Расчет радиус-вектора $\bar{O}'_7$ центра кисти руки оператора по формуле:

$$\bar{O}'_7 = T'_7 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Расчет специализированных обобщенных координат руки оператора включает в себя следующие действия.

Расчет максимальной длины r'_m вытянутой руки оператора по формуле:

$$r'_m = l'_1 + l'_2 + l'_3.$$

Расчет значения относительного расстояния R'_7 от центра кисти руки оператора до центра плечевого сустава этой же руки по формуле:

$$R'_7 = \frac{|\bar{O}'_7|}{r'_m}.$$

Расчет значения относительного расстояния r'_7 от центра кисти оператора до центра плечевого сустава второй руки оператора по формуле:

$$r'_7 = \frac{|\bar{a}'_7 + \{0; 0; -m'\}|}{r'_m}.$$

Расчет угла α' между плоскостью, образованной центром кисти руки оператора и центрами его плечевых суставов, и фронтальной плоскостью оператора по формуле:

$$\alpha' = \begin{cases} \arccos \frac{-\bar{e}_x \cdot \{O'_{7x}; O'_{7y}; 0\}}{|\bar{e}_x| \cdot |\{O'_{7x}; O'_{7y}; 0\}|}, & \text{если } O'_{7y} \geq 0, \\ -\arccos \frac{-\bar{e}_x \cdot \{O'_{7x}; O'_{7y}; 0\}}{|\bar{e}_x| \cdot |\{O'_{7x}; O'_{7y}; 0\}|}, & \text{если } O'_{7y} < 0, \end{cases}$$

где $\bar{e}_x = \{0; 0; 1\}$ – орт оси Ox ,

O'_{7x}, O'_{7y} – проекции радиус-вектора $\bar{O}'_7$ на оси Ox, Oy .

Расчет угла γ' между радиус-вектором $\bar{O}'_7$ и плоскостью yOz по формуле:

$$\gamma' = \arcsin \frac{O'_{7x}}{|\bar{O}'_7|}.$$

Расчет векторного произведения $\bar{n}'_\gamma$ векторов $-\bar{e}_x$ и $\bar{O}'_7$ по формуле:

$$\overline{n}_y' = -\overline{e}_x \times \overline{O}_7',$$

Расчет вектора $\overline{n}_0'$, получаемого вращением вектора $-\overline{e}_x$ вокруг вектора $\overline{n}_y'$ на угол γ' по формуле:

$$\overline{n}_0' = R(\overline{n}_y', \gamma') \cdot (-\overline{e}_x),$$

где $R(\overline{r}, \rho)$ – матрица поворота вокруг вектора $\overline{r}$ на угол ρ , вычисляемая по формуле:

$$R(\overline{r}, \rho) = \begin{bmatrix} r_x^2 V(\rho) + C(\rho) & r_x r_y V(\rho) - r_z S(\rho) & r_x r_z V(\rho) + r_y S(\rho) \\ r_x r_y V(\rho) + r_z S(\rho) & r_y^2 V(\rho) + C(\rho) & r_y r_z V(\rho) - r_x S(\rho) \\ r_x r_z V(\rho) - r_y S(\rho) & r_y r_z V(\rho) + r_x S(\rho) & r_z^2 V(\rho) + C(\rho) \end{bmatrix},$$

где r_x, r_y, r_z – проекции вектора $\overline{r}$ на оси Ox, Oy и Oz , соответственно,

$S(\rho)$ – синус угла ρ ,

$C(\rho)$ – косинус угла ρ ,

$$V(\rho) = 1 - \cos(\rho).$$

Расчет радиус-вектора $\overline{K}'$ центра окружности, которую описывает центр локтевого сустава при вращении вокруг оси, проходящей через центры плечевого и лучезапястного суставов руки оператора по формуле:

$$\overline{K}' = \frac{\overline{O}_3' \cdot \overline{O}_7' \cdot \overline{O}_7'}{|\overline{O}_7'|^2}.$$

Расчет вектора $\overline{n}_3'$, соединяющего конец радиус-вектора $\overline{K}'$ и конец радиус-вектор $\overline{O}_3'$ центра локтевого сустава, по формуле:

$$\overline{n}_3' = \overline{O}_3' - \overline{K}'.$$

Расчет угла β' между плоскостью, образованной центрами плечевого, локтевого и лучезапястного суставов руки оператора, и вертикальной плоскостью, проходящей через центры плечевого и лучезапястного суставов руки оператора по формуле:

$$\beta' = \begin{cases} \arccos \frac{\overline{n}_0' \cdot \overline{n}_3'}{|\overline{n}_0'| \cdot |\overline{n}_3'|}, & \text{если } \overline{n}_0' \times \overline{n}_3' \cdot \overline{O}_7' \geq 0 \\ -\arccos \frac{\overline{n}_0' \cdot \overline{n}_3'}{|\overline{n}_0'| \cdot |\overline{n}_3'|}, & \text{если } \overline{n}_0' \times \overline{n}_3' \cdot \overline{O}_7' < 0 \end{cases}.$$

Расчет углов Эйлера $\varphi', \vartheta', \psi'$ кисти оператора по формулам:

$$T_7' \equiv \begin{bmatrix} b_x' & c_x' & d_x' & p_x' \\ b_y' & c_y' & d_y' & p_y' \\ b_z' & c_z' & d_z' & p_z' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \varphi' = \text{ATAN2}(b_x'; -b_y'),$$

$$\vartheta' = \text{ATAN2}(-\cos(\varphi')c_x' - \sin(\varphi')c_y'; \cos(\varphi')d_x' + \sin(\varphi')d_y'),$$

$$\psi' = \text{ATAN2}(\sin(\varphi')b_x' - \cos(\varphi')b_y'; b_z'),$$

где $\overline{b}' = \{b_x'; b_y'; b_z'\}$, $\overline{c}' = \{c_x'; c_y'; c_z'\}$, $\overline{d}' = \{d_x'; d_y'; d_z'\}$, $\overline{p}' = \{p_x'; p_y'; p_z'\}$ – вектор-столбцы матрицы T_7' ,

$\text{ATAN2}(x; y)$ – функция арктангенса, учитывающая квадрант вычисляемого угла.

Специализированные обобщенные координаты манипулятора антропоморфного робота принимаются равными специализированным обобщенным координатам руки оператора:

$$R_7 = R_7',$$

$$r_7 = r_7',$$

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha', \\ \beta &= \beta', \\ \varphi &= \varphi', \\ \vartheta &= \vartheta', \\ \psi &= \psi'.\end{aligned}$$

Расчет декартовых координат центров сочленений манипулятора антропоморфного робота включает в себя следующие действия.

Расчет значения максимального расстояния r_m от центра плечевого сочленения до центра схвата манипулятора антропоморфного робота по формуле:

$$r_m = l_1 + l_2 + l_3.$$

Расчет радиус-вектора $\overline{O_7}$ центра схвата манипулятора антропоморфного робота по формулам:

$$|\overline{O_7}| = r_m R_7,$$

$$|\overline{o_7}| = r_m r_7,$$

$$O_{7z} = \frac{|\overline{O_7}|^2 - |\overline{o_7}|^2 + m^2}{2m},$$

$$O_{7x} = \begin{cases} \sqrt{\frac{|\overline{O_7}|^2 - O_{7z}^2}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}, & \text{если } \alpha \geq 0 \\ -\sqrt{\frac{|\overline{O_7}|^2 - O_{7z}^2}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}, & \text{если } \alpha < 0 \end{cases},$$

$$O_{7y} = -O_{7x} \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

$$\overline{O_7} = \{O_{7x}; O_{7y}; O_{7z}\},$$

где $|\overline{o_7}|$ – расстояние от центра схвата манипулятора антропоморфного робота до центра плечевого сочленения второго манипулятора антропоморфного робота,

O_{7x} , O_{7y} , O_{7z} – проекции радиус-вектора $\overline{O_7}$ на оси Ox , Oy , Oz , соответственно.

Расчет радиус-вектора $\overline{O_6}$ центра лучезапястного сочленения манипулятора антропоморфного робота по формулам:

$$T_7 = \begin{pmatrix} C(\varphi)C(\vartheta) & C(\varphi)S(\vartheta)S(\psi) - S(\varphi)C(\psi) & C(\varphi)S(\vartheta)C(\psi) + S(\varphi)S(\psi) & O_{7x} \\ S(\varphi)C(\vartheta) & C(\varphi)S(\vartheta)S(\psi) + C(\varphi)C(\psi) & S(\varphi)S(\vartheta)C(\psi) - C(\varphi)S(\psi) & O_{7y} \\ -S(\vartheta) & C(\vartheta)S(\psi) & C(\vartheta)C(\psi) & O_{7z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\overline{O_6} = T_7 \cdot \begin{pmatrix} l_3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

где $C(\rho)$ – косинус угла ρ ,

$S(\rho)$ – синус угла ρ .

Расчет вектора нормали $\overline{N}$ к плоскости схвата манипулятора антропоморфного робота по формуле:

$$\overline{N} = T_7 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Расчет радиус-вектора $\bar{K}$ центра вращения центра локтевого сочленения манипулятора вокруг оси, проходящей через центр плечевого сочленения и центр лучезапястного сочленения манипулятора антропоморфного робота по формулам:

$$\begin{aligned}\overline{O_1 O_6} &= \bar{O}_6 - \bar{O}_1, \\ p &= \frac{l_1 + l_2 + |\overline{O_1 O_6}|}{2}, \\ |\overline{K O_3}| &= \frac{2}{|\overline{O_1 O_6}|} \sqrt{p(p - l_1)(p - l_2)(p - |\overline{O_1 O_6}|)}, \\ |\overline{O_1 K}| &= \sqrt{l_1^2 - |\overline{K O_3}|^2}, \\ \lambda &= \frac{|\overline{O_1 K}|}{|\overline{O_1 O_6}| - |\overline{O_1 K}|}, \\ \bar{K} &= \frac{\bar{O}_1 + \lambda \bar{O}_6}{1 + \lambda},\end{aligned}$$

где p – полупериметр треугольника, образованного центрами плечевого, локтевого и лучезапястного сочленений манипулятора антропоморфного робота,

λ – отношение, в котором точка K делит вектор $\overline{O_1 O_6}$.

Расчет угла γ между радиус-вектором $\bar{O}_7$ и плоскостью yOz по формуле:

$$\gamma = \arcsin \frac{O_{7x}}{|\bar{O}_7|}.$$

Расчет векторного произведения $\bar{n}_\gamma$ векторов $-\bar{e}_x$ и $\bar{O}_7$ по формуле:

$$\bar{n}_\gamma = -\bar{e}_x \times \bar{O}_7.$$

Расчет вектора $\bar{n}_0$, получаемого вращением вектора $-\bar{e}_x$ вокруг вектора $\bar{n}_\gamma$ на угол γ по формуле:

$$\bar{n}_0 = R(\bar{n}_\gamma, \gamma) \cdot (-\bar{e}_x).$$

Расчет радиус-вектора $\bar{O}_3$ по формуле:

$$\bar{O}_3 = |\overline{K O_3}| \cdot R(\overline{O_1 O_6}, \beta) \cdot \bar{n}_0.$$

Решение обратной задачи кинематики манипулятора антропоморфного робота включает в себя следующие действия.

Формирование матриц однородного преобразования для манипулятора антропоморфного робота согласно представлению Денавита-Хартенберга по формулам:

$$\begin{aligned}{}^i T_j &= \prod_{k=i+1}^j {}^{i-1} A_i, i < j, \\ {}^{i-1} A_i &= T_{z,\theta}(\theta_i) T_{z,d}(d_i) T_{x,a}(a_i) T_{x,\alpha}(\alpha_i), \\ T_{z,\theta}(\theta_i) &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ T_{z,d}(d_i) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\end{aligned}$$

$$T_{x,a}(a_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_{x,\alpha}(\alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где ${}^i T_j$ – однородная матрица преобразования из j -й в i -ю систему координат,

${}^{i-1} A_i$ – однородная матрица сложного преобразования из i -й в $(i-1)$ -ю систему координат,

$T_{z,\theta}(\theta_i)$ – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси Oz на угол θ_i ,

$T_{z,d}(d_i)$ – однородная матрица перемещения по оси Oz на величину d_i ,

$T_{x,a}(a_i)$ – однородная матрица перемещения по оси Ox на величину a_i ,

$T_{x,\alpha}(\alpha_i)$ – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси Ox на угол α_i ,

$a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$ – i -е элементы векторов $\bar{a}, \bar{d}, \bar{\alpha}, \bar{\theta}$.

Расчет декартовых координаты различных точек в необходимых системах координат:

$$\bar{O}_3^1 = ({}^0 T_1)^{-1} \bar{O}_3,$$

$$\bar{O}_6^2 \bar{O}_3^2 = ({}^0 T_2)^{-1} \bar{O}_3 - ({}^0 T_2)^{-1} \bar{O}_6,$$

$$\bar{O}_6^2 = ({}^0 T_2)^{-1} \bar{O}_6,$$

$$\bar{N}^4 = -({}^0 T_4)^{-1} \bar{N},$$

$$\bar{N}^5 = -({}^0 T_5)^{-1} \bar{N},$$

$$\bar{O}_7^6 = ({}^0 T_6)^{-1} \bar{O}_7,$$

где $\bar{O}_i^j$ – радиус-вектор точки O_i в j -й системе координат,

${}^0 T_i$ – матрица преобразования из i -й системы координат в нулевую систему координат,

$\bar{O}_i$ – радиус-вектор точки O_i в нулевой системе координат,

$\bar{N}^i$ – координаты вектора нормали $\bar{N}$ в i -й системе координат.

Расчет вектора $\bar{\theta}$ целевых углов поворота манипуляторов антропоморфного робота по формулам:

$$\theta_1^* = \text{ATAN2}(O_{3x}^0; O_{3y}^0),$$

$$\theta_1 = \begin{cases} \theta_1^*, & \text{если } \theta_1^* > 90^\circ, \\ \theta_1^* + 2\pi, & \text{если } \theta_1^* < 90^\circ, \end{cases}$$

$$\theta_2 = \theta_2 + \text{ATAN2}(O_{3x}^1; O_{3y}^1),$$

$$\theta_3 = \text{ATAN2}(O_{6x}^2 O_{3x}^2; O_{6y}^2 O_{3y}^2),$$

$$\theta_4 = \theta_4 + \text{ATAN2}(-O_{6x}^2; -O_{6y}^2),$$

$$\theta_5 = \text{ATAN2}(N_x^4; N_y^4),$$

$$\theta_6 = \theta_6 + \text{ATAN2}(N_x^5; N_y^5),$$

$$\theta_7 = \text{ATAN2}(-O_{7x}^6; -O_{7y}^6),$$

$$\bar{\theta} = \{\theta_1; \theta_2; \theta_3; \theta_4; \theta_5; \theta_6; \theta_7\},$$

где θ_1^* – ненормированное значение первого целевого угла поворота манипулятора антропоморфного робота,

$ATAN2(x; y)$ – функция арктангенса, учитывающая квадрант вычисляемого угла,

θ_i – i -й целевой угол поворота манипулятора антропоморфного робота,

$\theta_2, \theta_4, \theta_6$ – константы, отдельно определяемые для каждой модели манипулятора антропоморфного робота.

В качестве вычислителей могут быть использованы специализированные вычислители или ЭВМ общего назначения.

Перемещение манипуляторов антропоморфного робота в положение, соответствующее вектору целевых углов $\bar{\theta}$ является распространенным функционалом существующих роботов.

Подтверждение возможности получения технического результата приведено на фиг. 4, 5. Визуализация вычисленных положений манипуляторов антропоморфного робота при управлении с помощью способа-прототипа, приведена на фиг. 4. Рассматривается случай, когда расстояние между центрами плечевых сочленений антропоморфного робота непропорционально меньше расстояния между центрами плечевых суставов оператора. Оператор держит руки перед собой, ладони соединены. Как следует из фиг. 4, статическое положение манипуляторов антропоморфного робота не адекватно положению рук оператора. Более подробное описание рассматриваемого случая приведено в работе [Сычков В. Б. Метод оценки эффективности копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота // Системы управления, связи и безопасности. 2019. №3]. При возникновении подобной ситуации в процессе управления с помощью способа-прототипа, возможно повреждение манипуляторов. Визуализация вычисленного положения манипуляторов антропоморфного робота для аналогичного положения рук оператора при управлении с помощью заявляемого способа приведено на фиг. 5. Таким образом, с помощью заявляемого способа удастся достичь технического результата, не обеспечиваемого способом-прототипом.

Формула изобретения

Способ копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота, включающий захват движений рук оператора с помощью экзоскелета с кинематической схемой, аналогичной кинематической схеме руки человека, измерение вектора углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета, измерение антропометрических параметров оператора, использование вычислителя для вычисления вектора углов поворота $\bar{\theta}'$ в суставах руки оператора на основе антропометрических параметров оператора и вектора углов поворота $\bar{\theta}''$ в кинематических парах экзоскелета, отличающийся тем, что дополнительно измеряют расстояние l'_1 от центра плечевого сустава руки оператора до центра его локтевого сустава, расстояние l'_2 от центра локтевого сустава руки оператора до центра его лучезапястного сустава, расстояние l'_3 от центра лучезапястного сустава руки оператора до центра его кисти, расстояние между плечевыми суставами оператора m' , для каждой руки вычисляют с помощью вычислителя максимальное расстояние от центра плечевого сустава руки оператора до центра его ладони по формуле:

$$r'_m = l'_1 + l'_2 + l'_3,$$

расстояние O'_7 от центра кисти оператора до центра плечевого сустава этой же руки, расстояние o'_7 от центра кисти оператора до центра плечевого сустава второй руки оператора, относительное расстояние R'_7 от центра кисти оператора до центра плечевого сустава этой же руки по формуле:

$$R'_7 = \frac{O'_7}{r'_m},$$

относительное расстояние r'_7 от центра кисти оператора до центра плечевого сустава второй руки оператора по формуле:

$$r'_7 = \frac{o'_7}{r'_m},$$

угол α' между плоскостью, образованной центром кисти руки оператора и центрами его плечевых суставов, и фронтальной плоскостью оператора, угол β' между плоскостью,

образованной центрами плечевого, локтевого и лучезапястного суставов руки оператора, и вертикальной плоскостью, проходящей через центры плечевого и лучезапястного суставов руки оператора, углы Эйлера ϕ' , θ' , ψ' кисти оператора, для каждого антропоморфного манипулятора с помощью вычислителя вычисляют вектор целевых углов θ в кинематических парах манипуляторов антропоморфного робота, при которых относительное расстояние R_7 от центра схвата антропоморфного манипулятора до центра плечевого сочленения этого же манипулятора, рассчитываемое по формуле:

$$R_7 = \frac{O_7}{r_m},$$

где O_7 - расстояние от центра схвата манипулятора до центра плечевого сочленения этого же манипулятора,

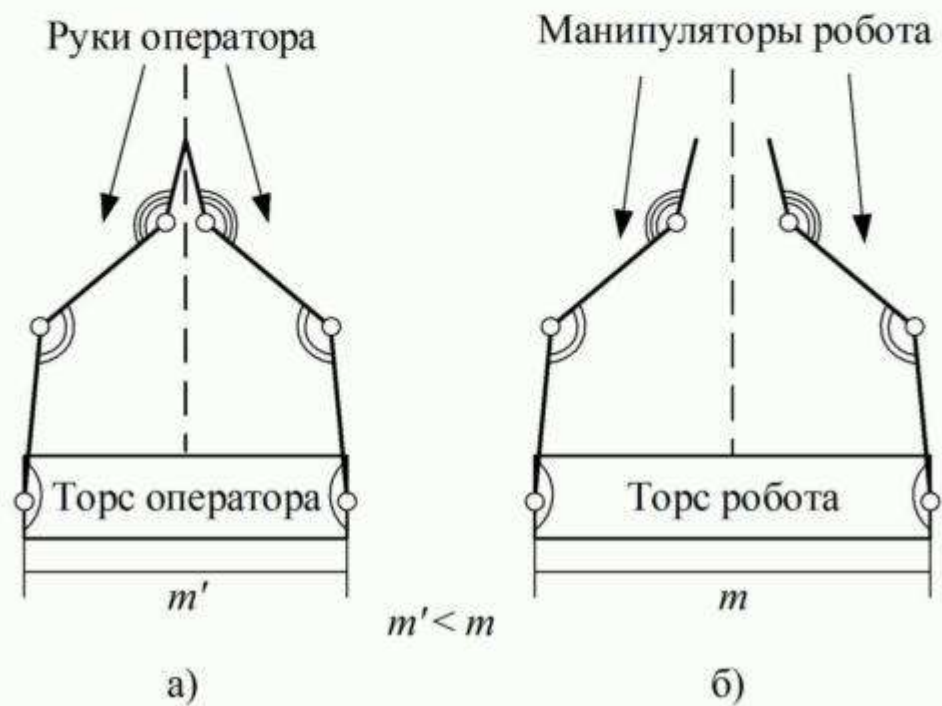
r_m - максимальное расстояние от центра схвата манипулятора до центра плечевого сочленения этого же манипулятора,

относительное расстояние r_7 от центра схвата антропоморфного манипулятора до центра плечевого сочленения второго манипулятора, рассчитываемое по формуле:

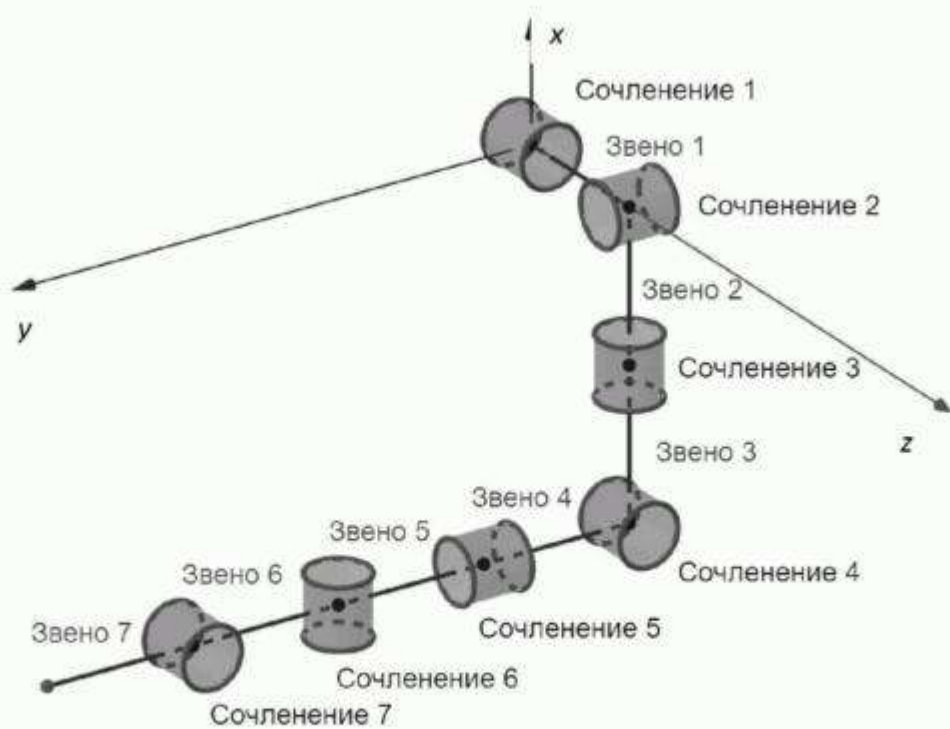
$$r_7 = \frac{O_7}{r_m},$$

где O_7 - расстояние от центра схвата манипулятора до центра плечевого сочленения второго манипулятора,

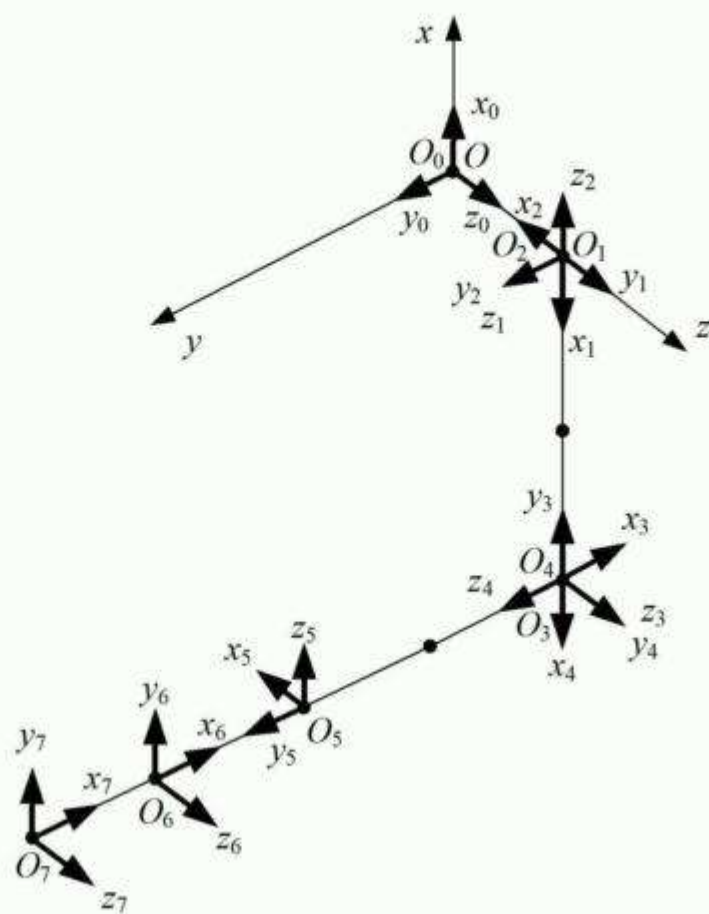
угол α между плоскостью, образованной центром схвата манипулятора и центрами его плечевых сочленений, и фронтальной плоскостью антропоморфного робота, угол β между плоскостью, образованной центрами плечевого, локтевого и лучезапястного сочленений манипулятора, и вертикальной плоскостью, проходящей через центры плечевого и лучезапястного сочленения манипулятора, углы Эйлера ϕ , θ , ψ кистевого звена для каждого манипулятора антропоморфного робота будут соответствовать аналогичным параметрам рук оператора, осуществляют перемещение манипуляторов антропоморфного робота в положение, соответствующее вектору целевых углов θ .



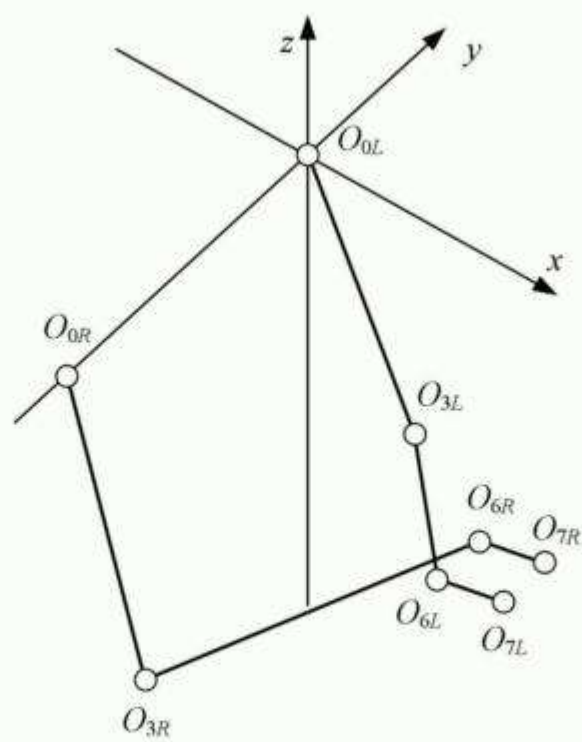
Фиг. 1



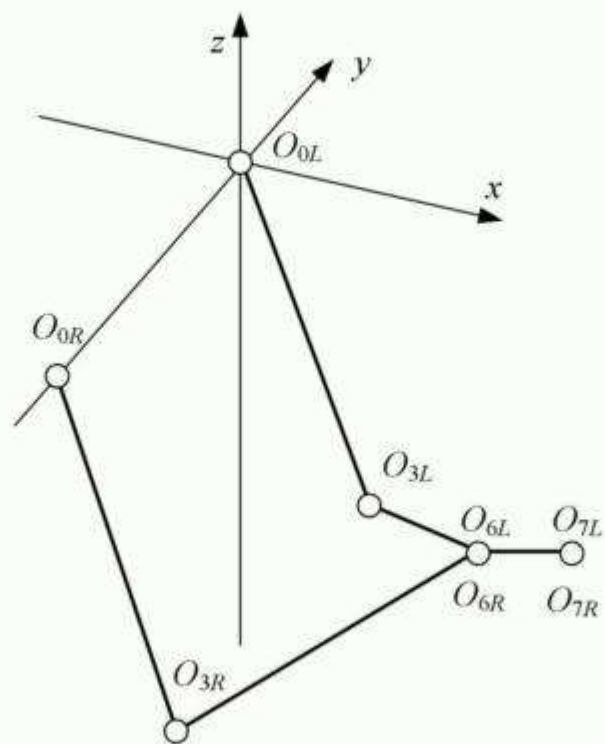
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

ИЗВЕЩЕНИЯ

QB4A Государственная регистрация предоставления права использования по договору

Дата и номер государственной регистрации предоставления права использования по договору: **13.01.2021 РД0351355**

Лицо(а), предоставляющее(ие) право использования: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Северо-Кавказский федеральный университет" (RU)**

Лицо, которому предоставлено право использования: **Акционерное общество "Научно-производственное объединение "Андроидная техника" (RU)**

Вид договора: **лицензионный**

Условия договора: **исключительная лицензия на срок действия патента на территории РФ.**

Дата внесения записи в Государственный реестр: **13.01.2021**

Дата публикации и номер бюллетеня: **13.01.2021 Бюл. №2**