УДК 62.519

Метод оценки эффективности копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота

Сычков В. Б.

Постановка задачи: *наличие большого количества разнородных научно-технических решений в области копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота (МАР) актуализирует вопросы оценки их эффективности посредством количественной оценки эффективности копирующего управления. Под эффективностью копирующего управления МАР понимается соответствие требованиям подобия положений рук оператора и МАР, максимизация задействованного рабочего пространства МАР, отсутствие столкновений звеньев МАР. При оценке эффективности копирующего управления МАР с помощью существующего метода на основе совпадения углов поворота руки оператора и МАР, для некоторых положений рук оператора эффективными являются недопустимые положения МАР.* ***Целью работы является*** *методическое обеспечение количественного сравнения математических методов и технических решений в области копирующего управления по положению МАР. Для достижения цели выполнен анализ требований, предъявляемых к копирующему управлению, и предложен метод оценки эффективности копирующего управления МАР по частным критериям для отдельных положений рук оператора. Введены интегральные критерии оценки, позволяющие сравнивать эффективность копирующего управления различных методов и технических решений на всём конфигурационном пространстве возможных положений рук оператора.* ***Используемые методы:*** *введены искусственные параметры, характеризующие положения рук оператора и МАР. В рамках разработанного метода в качестве критериев оценки использовались отклонения введенных искусственных параметров положений МАР от аналогичных параметров руки оператора.* ***Новизна:*** *элементом новизны предлагаемой разработки является возможность производить более адекватную оценку эффективности копирующего управления МАР за счет использования для сравнения следующих параметров: 1) углов Эйлера кисти руки оператора и углов Эйлера кистевого звена МАР; 2) углов Эйлера плоскости, образованной плечевым, лучезапястным и локтевым суставами руки оператора, и аналогичных углов МАР; 3) «степени выпрямления» руки оператора и аналогичной степени МАР.* ***Результат****: использование предложенного метода не допускает некорректную оценку эффективности копирующего управления МАР в положениях, когда ладони рук оператора находятся близко друг к другу. Используемые в методе критерии позволяют учитывать положение и ориентацию не только кистей рук оператора, но и локтевых суставов. Проведенное моделирование показало, что положения МАР, эффективные с точки зрения метода-аналога, являются недопустимыми для некоторых положений рук оператора. С другой стороны, целесообразные положения МАР являются эффективными с точки зрения разработанного метода и неэффективными с точки зрения метода-аналога.* ***Практическая значимость:*** *Разработанный метод позволят количественно оценивать и сравнивать эффективность существующих и разрабатываемых систем копирующего управления МАР.*

Ключевые слова: *антропоморфный робот, антропоморфный манипулятор, копирующее управление, метод оценки эффективности, углы Эйлера*.

Библиографическая ссылка на статью:
Сычков В. Б. Метод оценки эффективности копирующего управления манипуляторами антропоморфного робота // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 179-201. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10309.

Reference for citation:
Sychkov V. B. Effectiveness Evaluating Method of Anthropomorphic Robot Manipulators Copying Control. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 179-201. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10309 (in Russian).

Актуальность

В настоящее время во многие области человеческой деятельности интенсивно внедряются робототехнические системы. Одним из перспективных направлений робототехники являются антропоморфные роботы. Возможности антропоморфных роботов зависят от используемого типа управления. Наиболее эффективное управление роботами возможно при копирующем типе. Копирующее управление реализует виртуальное присутствие оператора в роботе, что позволяет с помощью робота решать сложные задачи в недетерминированных средах при выполнении аварийно-спасательных операций, освоении космоса, ведении военных действий. В основе этого типа управления лежит одновременное формирование законов движения по всем степеням подвижности антропоморфного робота (антропоморфного манипулятора) через задающее устройство копирующего типа.

Наиболее перспективными в копирующем управлении являются задающие устройства в виде экзоскелетных комплексов [1], так как они позволяют реализовать копирующее управление с силомоментным очувствлением. В рабочем режиме экзоскелет надевается на оператора, при этом звенья рычажной системы располагаются параллельно руке оператора (рис. 1).

Рис. 1. Копирующее управление с помощью экзоскелета

На основе измеренных значений углов поворота звеньев экзоскелета осуществляется копирующее управление манипуляторами антропоморфного робота (МАР). Копирующее управление может осуществляться различными способами. В [1] предложено использовать углы поворота звеньев экзоскелета в качестве целевых углов поворота звеньев МАР. В общем случае длины звеньев МАР не пропорциональны длинам звеньев экзоскелета, что обусловливает недостатки способа, предложенного в [1]. Пример проблемного случая приведен на рис. 2.

На рис. 2а изображено положение рук оператора, сведенных ладонь к ладони. В случае, если длины звеньев МАР и расстояние между МАР («ширина плеч» m' робота) строго пропорциональны соответствующим антропометриче-

ским параметрам оператора, положению МАР будет соответствовать рис. 2а. Однако, если эти параметры отличаются, например, «ширина плеч» m' робота непропорционально больше ширины плеч m человека, положению МАР будет соответствовать рис. 2б. Т. к. дальнейшее сведение рук оператора невозможно, сведение МАР становится проблематичным.

В [2] предложена методика расчёта углов поворота руки оператора на основе углов поворота звеньев экзоскелета. Использование данной методики позволяет точнее определить углы поворота руки оператора, однако принципиальные недостатки такого способа копирующего управления не решаются.

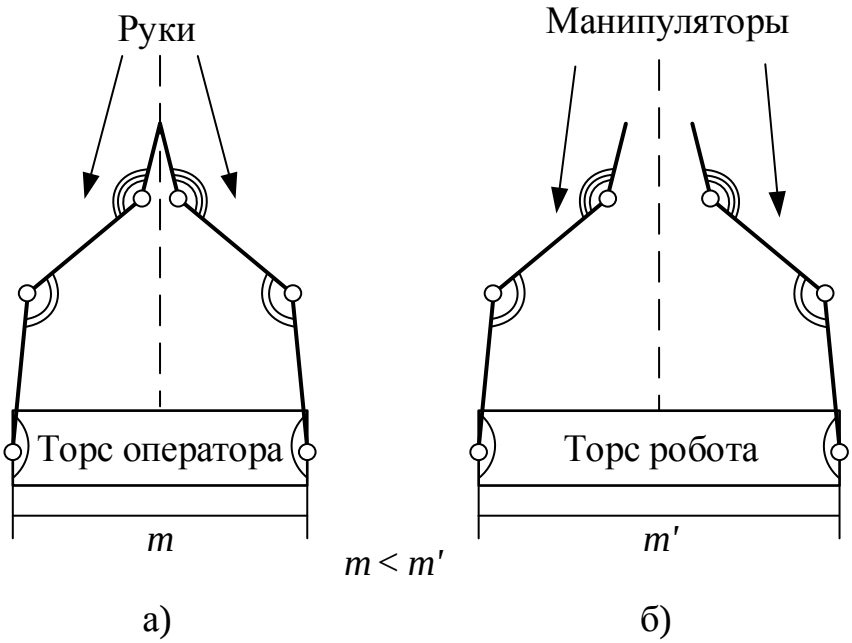


Рис. 2. Проблемный случай: а) положение рук оператора; б) положение МАР

Альтернативным способом является копирующее управление МАР на основе декартовых координат характерных точек руки оператора: центра кисти, локтевого сустава и др., т. е. копирующее управления по положению в декартовых координатах. Наиболее сложной вычислительной задачей является расчет обобщенных координат руки оператора на основе данных о положении суставов руки оператора, для которых используются методы решения прямой и обратной задач кинематики [3]. Решение прямой задачи кинематики необходимо для преобразования информации о положении манипулятора из собственной координатной системы в рабочую (абсолютную) систему для определения координат звеньев манипулятора. Решение обратной задачи кинематики предназначено для вычисления пространственной конфигурации МАР по положению его звеньев [4]. Данное решение требует описания габаритных характеристик манипулятора в форме, удобной для их анализа и записи уравнений преобразования координат. Из существующих подходов к описанию габаритных характеристик манипулятора основными являются выражение их в виде системы линейных или матричных уравнений [5].

Основой для решения задач кинематики является выбор параметров, однозначно определяющих ориентацию твердого тела в пространстве. Для этого существует ряд кинематических параметров: направляющие косинусы и углы Эйлера [6-9], параметры Родрига-Гамильтона (кватернионы) [10-13], параметры Кейли-Клейна [6-7; 14] и представление Денавита-Хартенберга [15-16].

При расчете углов поворота руки оператора возникает задача определения координат локтевого сустава руки оператора, т. к. существует бесконечное количество его возможных положений. Решение данной задачи предложено в работе [17]. Решение задачи избыточной подвижности рассмотрено в работе [18]. Решение задачи расчёта положений сочленений избыточного МАР с произвольной кинематической структурой предложено в работах [19-22]. Вопросы управления манипуляторами в определенных, неопределенных и сложных динамических средах рассмотрены в работах [23-26].

Различие в кинематических параметрах, таких как длины звеньев МАР и частей руки оператора, подвижности суставов и сочленений, различие кинематических схем, методическая и случайная погрешность задающего устройства обусловливают отклонение движения МАР от рук оператора при копирующем управлении. Данные отклонения компенсируются за счет свойства человеческой психики – проприоцепции. Это свойство плохо поддаётся количественному анализу. Тем не менее, очевидно, что чем точнее МАР копирует руку оператора, тем комфортнее и проще становится процесс управления для оператора. Категория «точнее» является условной вследствие отсутствия в научно-технической литературе методов оценки эффективности копирующего управления.

Как следует из приведенного обзора, в научной литературе описано большое количество различных решений, которые могут быть положены в основу для копирующего управления по положению МАР в декартовых координатах. Однако отсутствие количественных методов оценки эффективности копирующего управления МАР не позволяет оценить преимущества того или иного метода или технического решения на стадии оценки целесообразности их применения и моделирования конечной системы. Таким образом, становится актуальной задачей разработка метода оценки эффективности копирующего управления МАР.

Математическая модель антропоморфного манипулятора

В данном разделе приводятся обозначения и математическая модель для одной руки оператора. Все приведенные выкладки могут без изменений применяться ко второй руке оператора и МАР. Для параметров МАР используются обозначения параметров руки оператора со штрихом «$'$».

Рассмотрим абстрактный антропоморфный манипулятор (АМ), являющийся моделью как МАР, так и руки оператора. Кинематическая схема АМ приведена на рис. 3.

Плечевое сочленение АМ включает в себя кинематические пары $a_1 - a_3$, локтевое сочленение – кинематическую пару a_4, лучезапястное сочленение –

№3. 2019
ISSN 2410-9916

кинематические пары $a_5 - a_7$. Обозначим часть АМ между плечевым и локтевым сочленениями как плечо, между локтевым и лучезапястным сочленениями как предплечье, между лучезапястным сочленением и рабочим окончанием – как кисть. В качестве рабочего окончания примем середину 1 схвата АМ (рис. 4), так как именно данная точка определяет необходимое положение схвата для взятия предметов или манипулирования инструментами [27]. Пальцы 2 схвата АМ предназначены для обхватывания объекта манипуляции.

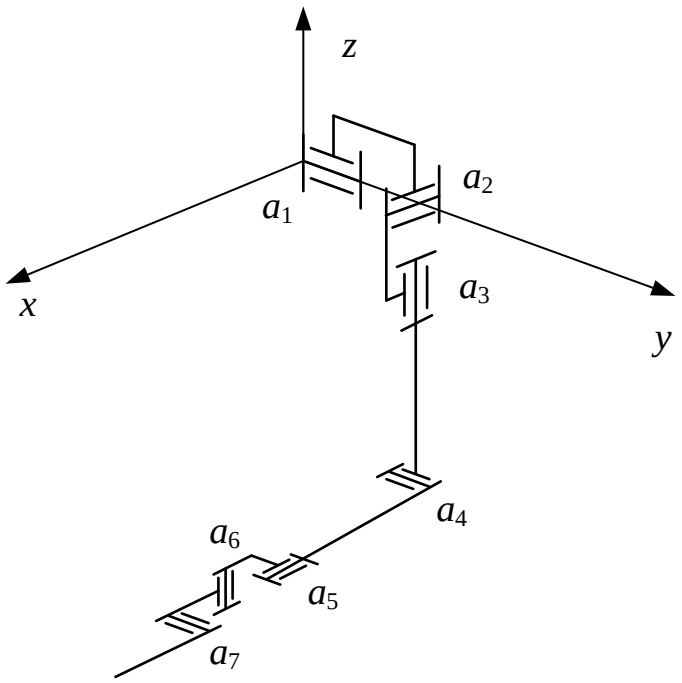


Рис. 3. Кинематическая схема АМ

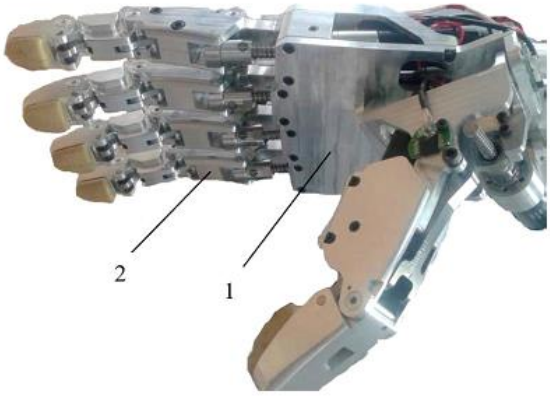


Рис. 4. Схват АМ

Для описания кинематики АМ воспользуемся представлением Денавита-Хартенберга (ПДХ). В соответствии с правилами ПДХ введем системы координат (рис. 5), связанные со звеньями АМ. Также на рисунке изображена глобальная система координат *Oxyz*.

DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10309
URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2019-03/09-Sychkov.pdf

№3. 2019
ISSN 2410-9916

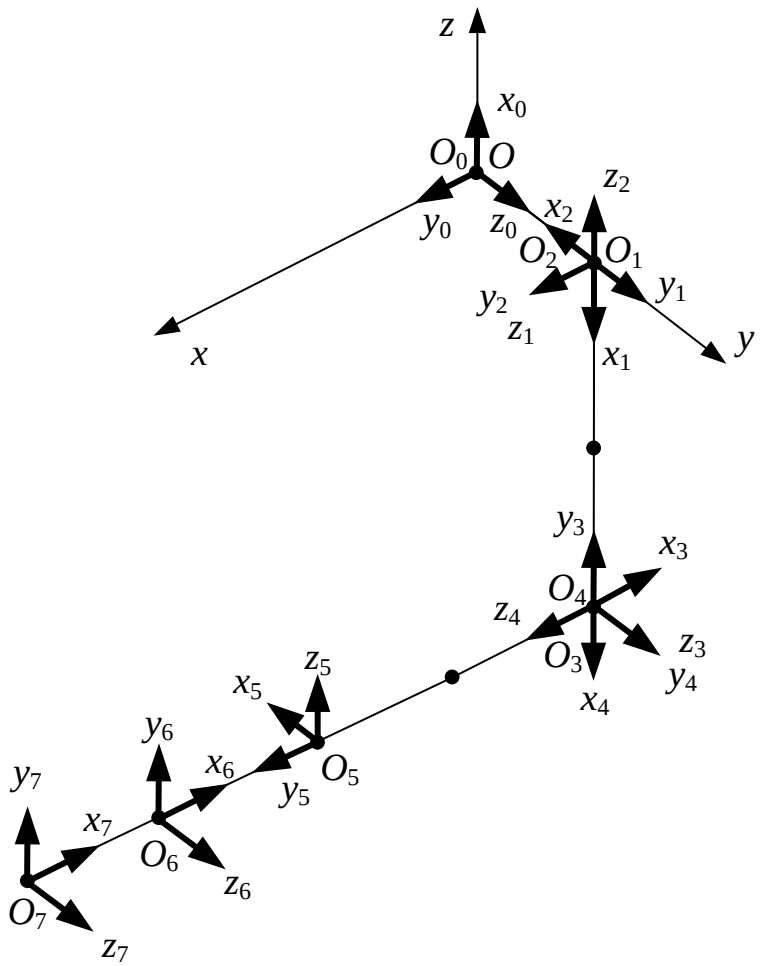


Рис. 5. Системы координат, связанные со звеньями АМ

В соответствие с ПДХ, положение и ориентация i-го звена в системе координат, связанной с $(i-1)$-м звеном описывается четырьмя параметрами: $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$, где a_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом i-й системы координат, отсчитываемое вдоль оси x_i, т. е. кратчайшее расстояние между осями z_{i-1} и z_i; d_i – расстояние между пересечением оси z_{i-1} с осью x_i и началом $(i-1)$-й системы координат, отсчитываемое вдоль оси z_{i-1}; α_i – угол, на который необходимо повернуть ось z_{i-1} вокруг оси x_i, чтобы она стала сонаправленной с осью z_i (знак определяется в соответствии с правилом правой руки); θ_i – угол, на который надо повернуть ось x_{i-1} вокруг оси z_{i-1}, чтобы она стала сонаправлена с осью x_i (знак определяется в соответствии с правилом правой руки).

Таким образом, кинематическая структура и положение АМ описываются четырьмя векторами $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{d}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}$. Векторы $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{d}, \boldsymbol{\alpha}$ являются постоянными для выбранной кинематической схемы АМ. Вектором обобщённых координат, однозначно определяющим положение АМ, является вектор углов поворота $\boldsymbol{\theta}$. Матрица однородных преобразований из j-й системы координат в i-ю может быть найдена по следующим формулам:

DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10309
URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2019-03/09-Sychkov.pdf

$$ {}^{i}\boldsymbol{T}_{j} = \prod_{k=i+1}^{j} {}^{i-1}\boldsymbol{A}_{i},\ i < j, $$

$$ {}^{i-1}\boldsymbol{A}_{i} = \boldsymbol{T}_{z,\theta}(\theta_i)\boldsymbol{T}_{z,d}(d_i)\boldsymbol{T}_{x.a}(a_i)\boldsymbol{T}_{x,\alpha}(\alpha_i), $$

$$ \boldsymbol{T}_{z,\theta}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, $$

$$ \boldsymbol{T}_{z,d}(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, $$

$$ \boldsymbol{T}_{x.a}(a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, $$

$$ \boldsymbol{T}_{x,\alpha}(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, $$

где: ${}^{i}\boldsymbol{T}_{j}$ – матрица преобразования из j-й в i-ю систему координат; ${}^{i-1}\boldsymbol{A}_{i}$ – однородная матрица сложного преобразования для смежных систем координат; $\boldsymbol{T}_{z,\theta}(\theta)$ – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси z на угол θ; $\boldsymbol{T}_{z,d}(d)$ – однородная матрица элементарного сдвига по оси z на расстояние d; $\boldsymbol{T}_{x.a}(a)$ – однородная матрица элементарного сдвига по оси x на расстояние a; $\boldsymbol{T}_{x,\alpha}(\alpha)$ – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси x на угол α; $\boldsymbol{a},\boldsymbol{d},\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\theta}$ – векторы параметров Денавита-Хартенбрега, описывающие кинематическую схему МАР.

Решение прямой задачи кинематики, т. е. определение декартовых координат точек O_i, может быть выполнено в матричном виде:

$$ \boldsymbol{O}_i = \boldsymbol{T}_i \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, $$

$$ \boldsymbol{T}_i = \boldsymbol{T}_0\, {}^{0}\boldsymbol{T}_i,\ i > 0, $$

$$ \boldsymbol{T}_0 = \boldsymbol{T}_{x,\alpha}(-90^\circ)\boldsymbol{T}_{z,\theta}(-90^\circ), $$

где: $\boldsymbol{O}_i$ – радиус-вектор начала i-й системы координат в глобальной системе координат; $\boldsymbol{T}_i$ – матрица преобразования из i-й системы координат в глобальную систему координат; $\boldsymbol{T}_0$ – матрица преобразований из 0-й системы координат в глобальную систему координат.

Обозначим левую верхнюю подматрицу размером 3x3 матрицы $\boldsymbol{T}_i$ как $\boldsymbol{R}_i$. $\boldsymbol{R}_i$ описывает поворот i-й системы координат относительно глобальной системы координат. Также данный поворот может быть описан с помощью углов Эйлера $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$, которые могут быть вычислены на основе матрицы $\boldsymbol{R}_i$ с помощью следующих формул:

$$\boldsymbol{R}_i \equiv \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix},$$

$$\alpha_i = \operatorname{atan2}\left(a_x,\ -a_y\right),$$

$$\beta_i = \operatorname{atan2}\left(-s_x \cos\alpha_i - s_y \sin\alpha_i,\ n_x \cos\alpha_i + n_y \sin\alpha_i\right),$$

$$\gamma_i = \operatorname{atan2}\left(a_x \sin\alpha_i - a_y \cos\alpha_i,\ a_z\right),$$

где: $\boldsymbol{R}_i$ – матрица поворота i-й системы координат относительно глобальной системы координат; n_j, s_j, a_j – элементы матрицы $\boldsymbol{R}_i$; $\operatorname{atan2}(x, y)$ – функция арктангенса, вычисляющая значение $\operatorname{arctg}(y/x)$ с учетом принадлежности аргумента соответствующему квадранту. Эта функция определена следующим образом:

$$\operatorname{atan2}\left(x,\ \mathrm{y}\right) = \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\mathrm{y/x}\right), \text{если } x > 0,\ y > 0, \\ \operatorname{arctg}\left(\mathrm{y/x}\right) + \pi/2, \text{если } x < 0,\ y > 0, \\ -\operatorname{arctg}\left(\mathrm{y/x}\right) - \pi/2, \text{если } x < 0,\ y < 0, \\ -\operatorname{arctg}\left(\mathrm{y/x}\right), \text{если } x > 0,\ y < 0. \end{cases}$$

Постановка задачи

Копирующее управление предназначено для реализации виртуального присутствия оператора в роботе. Виртуальное присутствие оператора в роботе позволяет удалённо выполнять целевые операции в условиях, опасных для жизни и здоровья человека. Для эффективного выполнения целевых операций процесс копирующего управления должен удовлетворять следующим требованиям:

- подобие положений рук оператора и МАР;
- максимизация задействованного рабочего пространства МАР;
- отсутствие столкновений звеньев МАР.

Требование подобия положений рук оператора и МАР является скорее абстрактным и интуитивным, чем конкретным и формализованным. Подобие может быть реализовано различными способами. Подробнее данный вопрос рассмотрен в следующем разделе.

Метод оценки эффективности копирующего управления должен оценивать соответствие процесса копирующего управления предъявляемым к нему требованиям на основе известных входных величин, характеризующих процесс управления.

Для оценки эффективности копирующего управления в качестве известных входных данных могут использоваться следующие величины:

- неизменяемые параметры Денавита-Хартенберга руки оператора $\boldsymbol{a},\boldsymbol{d},\boldsymbol{\alpha}$ и АМ $\boldsymbol{a}',\boldsymbol{d}',\boldsymbol{\alpha}'$;
- вектор обобщенных координат $\boldsymbol{\theta}$ руки оператора;
- вектор обобщенных координат $\boldsymbol{\theta}'$ МАР;
- ширина плеч оператора m;
- «ширина плеч» антропоморфного робота m'.

Метод оценки эффективности копирующего управления

Абстрактное подобие положений рук оператора и МАР может быть реализовано различными способами. Подобие может быть достигнуто за счет одинаковых углов поворота в суставах руки оператора и сочленениях МАР [1]. Однако такой метод приводит к проблемам, описанным во введении. Суть предлагаемого метода заключается в выборе иных параметров, значения которых должны совпадать у руки оператора и МАР для подобия их положений.

Рассмотрим требование максимизации задействованного рабочего пространства МАР. Рука оператора и МАР в общем случае могут иметь различные длины. Очевидно, что положению руки оператора, в котором она полностью выпрямлена, должно соответствовать положение МАР, в котором он полностью выпрямлен. В случае, если при полном выпрямлении руки оператора МАР выпрямлен не полностью, возникает недоиспользование рабочего пространства МАР. В случае, если МАР выпрямлен при согнутой руке оператора, возникают зоны движения руки оператора, в которых МАР не реагирует на него, т. к. достигнут предел рабочего пространства МАР.

Примем в качестве начала координат для каждой руки оператора (МАР, соответственно) центр плечевого сустава (сочленения). Обозначим радиус-вектор центра кисти оператора как $\boldsymbol{r}$ (рис. 6), а радиус-вектор центра схвата МАР как $\boldsymbol{r}'$. Пусть максимальные значения их модулей соответственно равны r_m и r_m'. В качестве частного критерия максимизации использования рабочего пространства МАР предлагается использовать следующее соотношение:

$$k_r = \left| \frac{|\boldsymbol{r}|}{r_m} - \frac{|\boldsymbol{r}'|}{r_m'} \right|.$$

Данный критерий позволяет использовать степени выпрямления руки оператора и МАР (рис. 6) и не зависит от соотношения между плечом и предплечьем, что позволяет обойти несоответствие кинематических параметров МАР и антропометрических параметров различных операторов. При эффективном копирующем управлении частный критерий k_r должен иметь нулевое значение.

№3. 2019
ISSN 2410-9916

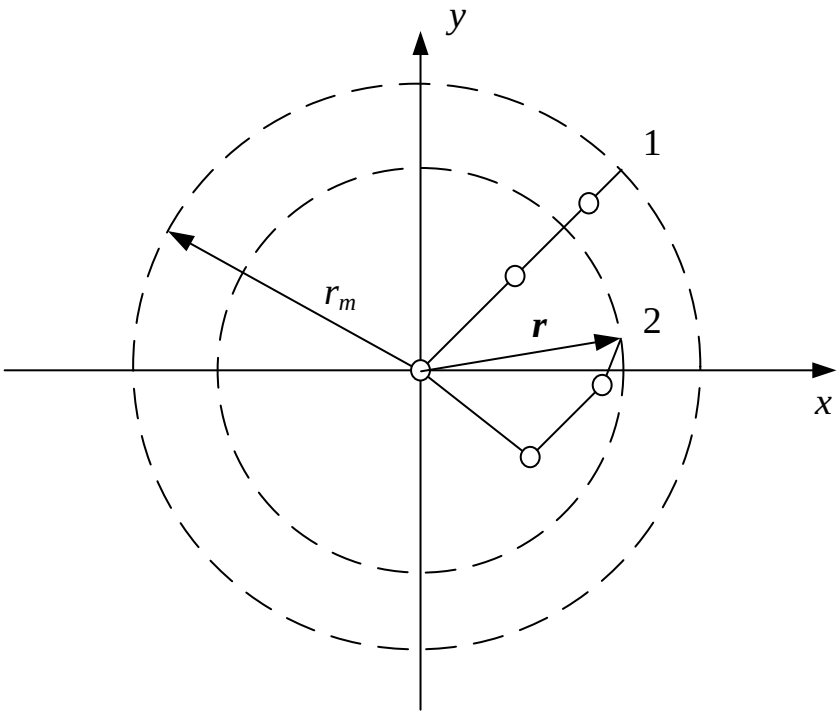


Рис. 6. Радиус-вектор центра кисти оператора: 1 – максимально выпрямленная рука оператора; 2 – согнутая рука оператора

Для человекоподобия движений МАР радиус-вектор $\boldsymbol{r}'$ центра схвата МАР помимо пропорциональности радиус-вектору $\boldsymbol{r}$ центра кисти оператора должен иметь сходное с ним направление. Направление вектора в пространстве задается двумя углами в сферической системе координат. В качестве таких углов удобно использовать азимутальный угол φ и зенитный угол ϑ (рис. 7).

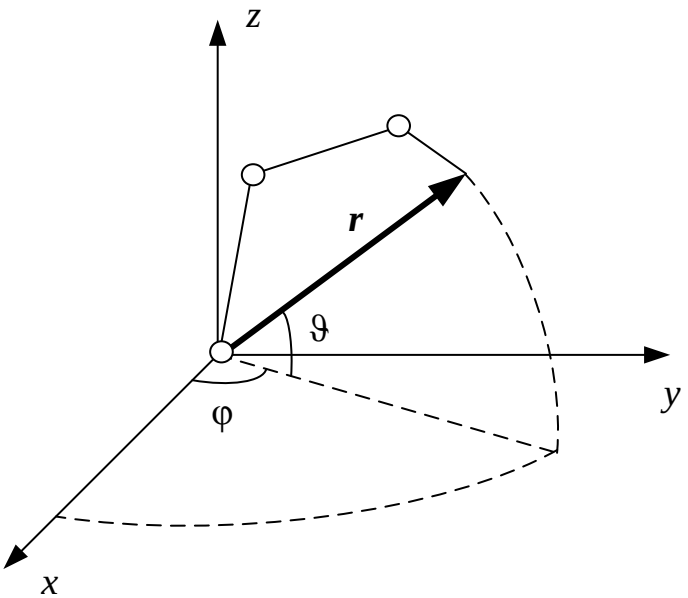


Рис. 7. Координаты радиус-вектора $\boldsymbol{r}$ в сферической системе координат

DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10309
URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2019-03/09-Sychkov.pdf

Для человекоподобия зенитный угол ϑ радиус-вектора $\boldsymbol{r}$ центра кисти оператора и зенитный угол ϑ' радиус-вектора $\boldsymbol{r}'$ центра схвата МАР должны совпадать.

Совпадение азимутальных углов радиус-векторов $\boldsymbol{r}$ и $\boldsymbol{r}'$ соответствует требованию подобия положений рук оператора и МАР, но удовлетворяет требованию отсутствия столкновений звеньев МАР не во всех областях рабочего пространства. В области 1 на рис. 8 азимутальные углы могут совпадать без угрозы столкновения звеньев МАР. Таким образом, обеспечивается совпадение характерных движений оператора и антропоморфного робота – руки в стороны, руки вверх, руки вперед.

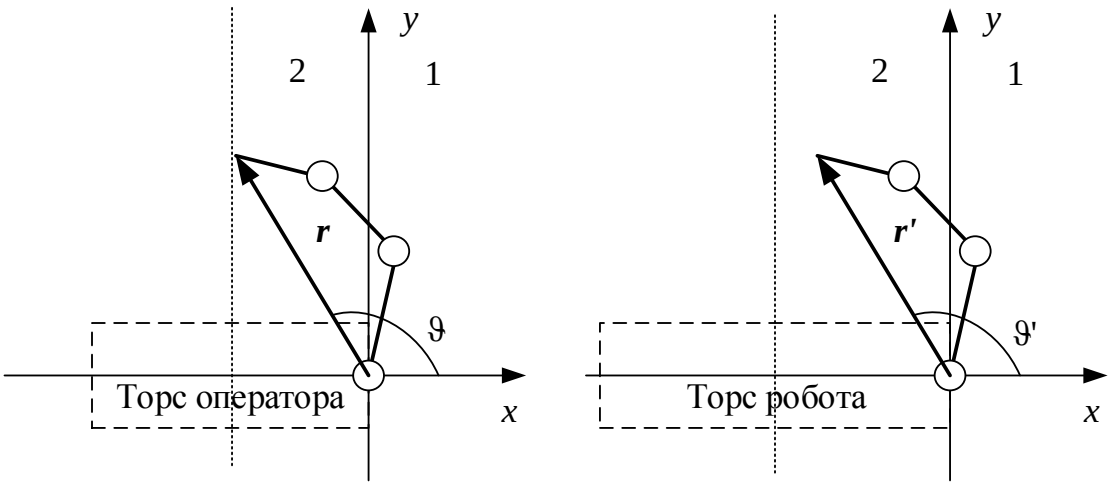


Рис. 8. Азимутальные углы радиус-векторов $\boldsymbol{r}$ и $\boldsymbol{r}'$

В общем случае значение ширины плеч человека m и ширины плеч робота m' отличаются. Данные отличия влекут за собой проблемы при использовании совпадения азимутальных углов φ и φ' в области 2 на рис. 8. Предположим, что оператор сведет руки ладонь к ладони так, чтобы плоскость касания лежала в сагитальной плоскости. Если ширина плеч робота m' больше, чем ширина плеч оператора m, то модуль азимутального угла МАР φ' должен быть больше, чем модуль азимутального угла руки оператора φ. В противном случае, когда оператор сведет ладони, между схватами МАР останется зазор. В таком случае сведение МАР станет невозможным. И наоборот, если ширина плеч робота m' меньше, чем ширина плеч оператора m, то при сведении рук оператором робот сведет манипуляторы раньше, чем оператор. Поэтому предлагается принять в качестве эффективного следующее значение азимутального угла:

$$\varphi' = \begin{cases} \varphi, \text{ если } \varphi < \dfrac{\pi}{2}, \\ c_3\varphi^3 + c_2\varphi^2 + c_1\varphi + c_0, \text{ если } \varphi \geq \dfrac{\pi}{2}, \end{cases}$$

где: c_i – коэффициенты многочлена, определяемые эмпирическим путем на основе оценок эргономичности для конкретной системы копирующего управления.

В области 1 на рис. 8 азимутальный угол руки оператора φ и азимутальный угол МАР φ' равны. В области 2 на рис. 8 обеспечивается гладкий переход к нелинейной зависимости азимутальных углов, обеспечивающей одновременное сведение рук оператора и МАР.

Требование отсутствия столкновения звеньев МАР может быть удовлетворено за счет полного и однозначного контроля МАР рукой оператора. Радиус-вектор центра кисти $\boldsymbol{r}$ (схвата $\boldsymbol{r}'$) задает положение только лучезапястного сустава (сочленения), но не позволяет однозначно определить положение локтевого сустава (сочленения) вследствие кинематической избыточности МАР. Для предупреждения столкновений МАР с объектами среды и человекоподобия его движений предлагается принять эффективным совпадение углов Эйлера для треугольников, образованных плечевым, локтевым и лучезапястным суставами (сочленениями) руки оператора и МАР. При использовании углов Эйлера для поворота по осям z-y-x азимутальный угол φ и зенитный угол ϑ соответствуют повороту по осям z-y, а третий угол вращения ψ описывает поворот локтевого сустава руки оператора вокруг оси x, т. е. вокруг радиус-вектора $\boldsymbol{r}$ центра схвата. В рамках предлагаемого метода в качестве частных критериев эффективности копирующего управления могут использоваться абсолютные отклонения углов Эйлера φ', ϑ', ψ' части МАР до лучезапястного сочленения (транспортной части) от аналогичных углов Эйлера φ, ϑ, ψ руки оператора:

$$k_\varphi = |\varphi - \varphi'|,$$
$$k_\vartheta = |\vartheta - \vartheta'|,$$
$$k_\psi = |\psi - \psi'|.$$

С помощью ПДХ углы Эйлера части руки оператора (МАР) до лучезапястного сустава (сочленения) могут быть найдены по формулам [28]:

$$\varphi = \operatorname{atan2}\left(a_x,\ -a_y\right),$$
$$\vartheta = \operatorname{atan2}\left(-s_x \cos\varphi - s_y \sin\varphi,\ n_x \cos\varphi + n_y \sin\varphi\right)$$
$$\psi = \operatorname{atan2}\left(a_x \sin\varphi - a_y \cos\varphi,\ a_z\right),$$

где: $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{s}$, $\boldsymbol{n}$ – вектор столбцы матрицы $\boldsymbol{R}_3$.

Исходя из требований подобия движений руки оператора и МАР, а также совпадения характерных положений руки оператора и МАР, необходимо обеспечить совпадение ориентации кисти оператора и схвата МАР. Выполнение данного условия необходимо для корректного захвата и манипулирования объектами.

Пусть α, β, γ – углы Эйлера кисти оператора, а α', β', γ' – углы Эйлера схвата МАР при вращении вокруг осей z-y-x относительно базовой системы

координат. Тогда в качестве частных критериев оценки эффективности копирующего управления могут использоваться модули разности этих углов:

$$k_\alpha = |\alpha - \alpha'|,$$
$$k_\beta = |\beta - \beta'|,$$
$$k_\gamma = |\gamma - \gamma'|.$$

В качестве общего критерия оценки эффективности может использоваться модуль вектора ошибки, вычисляемый по формуле:

$$k = \sqrt{w_r^2 k_r^2 + w_\varphi^2 k_\varphi^2 + w_\vartheta^2 k_\vartheta^2 + w_\psi^2 k_\psi^2 + w_\alpha^2 k_\alpha^2 + w_\beta^2 k_\beta^2 + w_\gamma^2 k_\gamma^2},$$

где: k – общий критерий эффективности копирующего управления для отдельного положения; k_r, k_φ, k_ϑ, k_ψ, k_α, k_β, k_γ – частные критерии эффективности копирующего управления; w_r, w_φ, w_ϑ, w_ψ, w_α, w_β, w_γ – весовые коэффициенты частных критериев эффективности копирующего управления.

Значимость частных критериев определяется с помощью вектора весовых коэффициентов $\boldsymbol{w} = \{w_r,\ w_\varphi,\ w_\vartheta,\ w_\psi,\ w_\alpha,\ w_\beta,\ w_\gamma\}$. В простейшем случае все элементы вектора $\boldsymbol{w}$ имеют единичное значение и нужны для согласования размерности частных критериев. В более сложном случае весовые коэффициенты могут быть оптимизированы на основе экспертной оценки эффективности копирующего управления оператором.

На основе общего критерия k для отдельного положения может быть найден интегральный критерий K эффективности копирующего управления на всём конфигурационном пространстве возможных положений руки оператора:

$$K = \frac{\int k(\boldsymbol{\theta})\, d\boldsymbol{\theta}}{\int d\boldsymbol{\theta}}.$$

В реальных приложениях различные векторы обобщенных координат $\boldsymbol{\theta}$ руки оператора имеют разную вероятность появления, поэтому интегральный критерий эффективности копирующего управления может быть уточнен за счет введения вероятности того или иного положения руки оператора:

$$K = \frac{\int k(\boldsymbol{\theta})\, p(\boldsymbol{\theta})\, d\boldsymbol{\theta}}{\int d\boldsymbol{\theta}},$$

где: $p(\boldsymbol{\theta})$ – вероятность нахождения руки оператора в положении $\boldsymbol{\theta}$.

Нулевое значение интегрального критерия эффективности копирующего управления K означает, что система, для которой он вычислен, является эффективной с точки зрения предложенных частных критериев оценки во всём операционном пространстве руки оператора. Чем сильнее значение интегрального критерия K отклоняется от нулевого значения, тем сильнее система копирующего управления отличается от эффективной системы.

Результаты моделирования

Для проверки работоспособности предложенного метода оценки эффективности копирующего управления МАР выполним сравнительный анализ с аналогом на численных примерах. В [1] в качестве целевых углов поворота

МАР $\boldsymbol{\theta}'$ предлагается использовать углы поворота экзоскелета $\boldsymbol{\theta}''$. В работе [17] развивается способ, описанный в [1], и предложена методика, позволяющая рассчитать углы поворота руки оператора $\boldsymbol{\theta}$ на основе углов поворота экзоскелета $\boldsymbol{\theta}''$. С точки зрения работ [1, 17] эффективным является копирующее управление, при котором выполняется равенство $\boldsymbol{\theta}' = \boldsymbol{\theta}$. Т. к. в работах [1, 17] отсутствует явный метод оценки эффективности копирующего управления, то можно провести только качественное сравнение. Для этого было проведено два вычислительных эксперимента. Результаты проведенных вычислительных экспериментов приведены в таблице 1.

В первом вычислительном эксперименте входные данные были подобраны так, чтобы копирующее управление было эффективным с точки зрения метода-аналога, т. е. $\theta_i' - \theta_i = 0, i = [1,7]$ (таблица 1). Результаты визуализации первого вычислительного эксперимента приведены на рис. 9. Параметры МАР m' и d_i' отличаются от параметров руки оператора m и d_i всего на несколько сантиметров. Однако для положения рук оператора на рис. 9а эффективным с точки зрения критериев метода-аналога является гипотетическое положение МАР, изображенное на рис. 9б. Данное положение является недопустимым вследствие столкновения звеньев МАР. С точки зрения предложенного метода данное положение не является эффективным, т. к. частные критерии k_r, k_φ, k_ϑ и k_ψ имеют ненулевое значение (таблица 1), что свидетельствует об их адекватности на исходных данных вычислительного эксперимента.

Таблица 1 – Результаты численного эксперимента

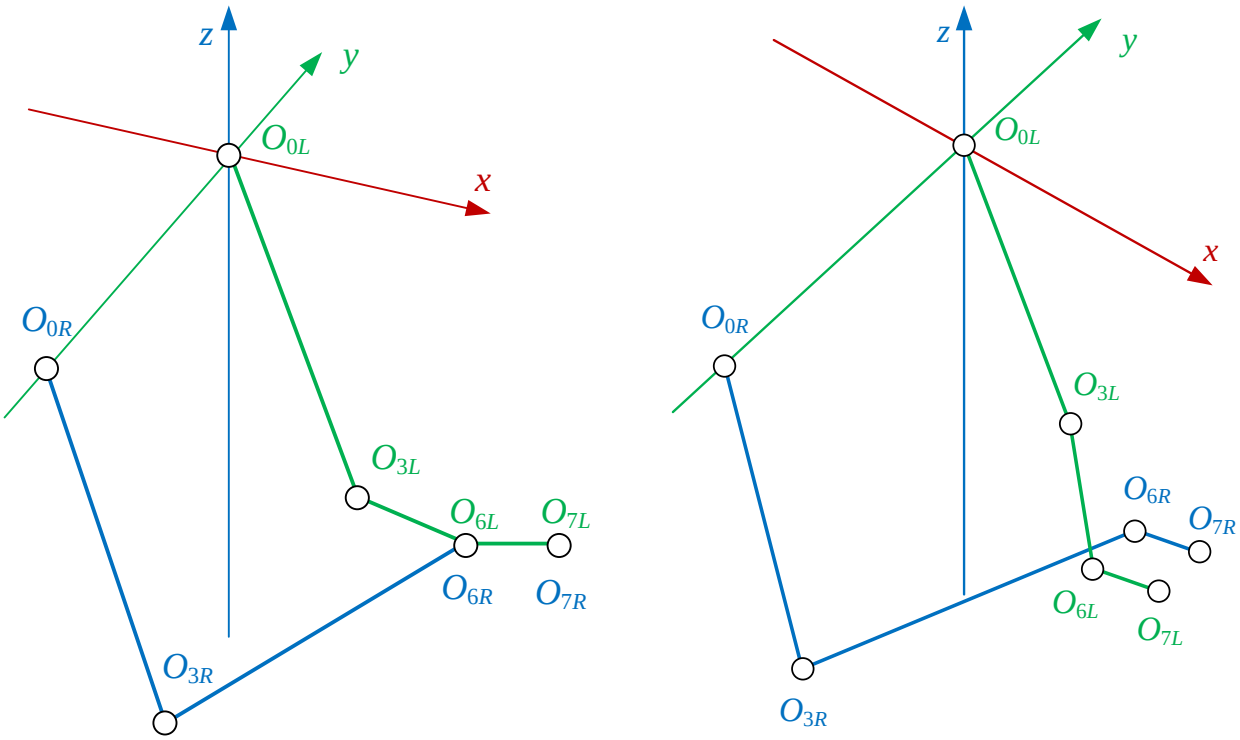
Эксперимент 1. Положение МАР, эффективное с точки зрения метода-аналога									
m =38 см, m' =36, см									
i	a_i, см	d_i, см	α_i,°	a_i', см	d_i', см	α_i',°	θ_i,°	θ_i',°	$\theta_i' - \theta_i$,°
1	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	161,2	161,2	0,0
2	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	–86,4	–86,4	0,0
3	0,0	–34,0	90,0	0,0	–34,0	90,0	–133,3	–133,3	0,0
4	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	–102,0	–102,0	0,0
5	0,0	31,0	90,0	0,0	34,0	90,0	–92,0	–92,0	0,0
6	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	–45,3	–45,3	0,0
7	–8,0	0,0	0,0	–8,0	0,0	0,0	11,4	11,4	0,0
$k_r = 0{,}1\%$, $k_\varphi = 1{,}23°, k_\vartheta = 2{,}48°, k_\psi = 1{,}84°$, $k_\alpha = 0{,}00°, k_\beta = 0{,}00°, k_\gamma = 0{,}00°$.									

Эксперимент 2. Положение МАР, эффективное с точки зрения предложенного метода									
m =38 см, m' =36, см									
i	a_i, см	d_i, см	α_i,°	a_i', см	d_i', см	α_i',°	θ_i,°	θ_i',°	$\theta_i'-\theta_i$,°
1	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	161,2	161,9	0,7
2	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	–86,4	–86,5	0,1
3	0,0	–34,0	90,0	0,0	–34,0	90,0	–133,3	–132,1	1,2
4	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	–102,0	–102,2	0,2
5	0,0	31,0	90,0	0,0	34,0	90,0	–92,0	–92,0	0,0
6	0,0	0,0	90,0	0,0	0,0	90,0	–45,3	–45,2	0,1
7	–8,0	0,0	0,0	–8,0	0,0	0,0	11,4	11,1	0,3
$k_r = 0,0\%$, $k_\varphi = 0,00°, k_\vartheta = 0,00°, k_\psi = 0,00°$, $k_\alpha = 0,00°, k_\beta = 0,00°, k_\gamma = 0,00°$.									

Во втором вычислительном эксперименте входные данные были подобраны так, чтобы копирующее управление было эффективным с точки зрения предложенных в рамках метода критериев, т. е. чтобы критерии k_r, k_φ, k_ϑ, k_ψ, k_α, k_β и k_γ принимали нулевое значение (таблица 1).

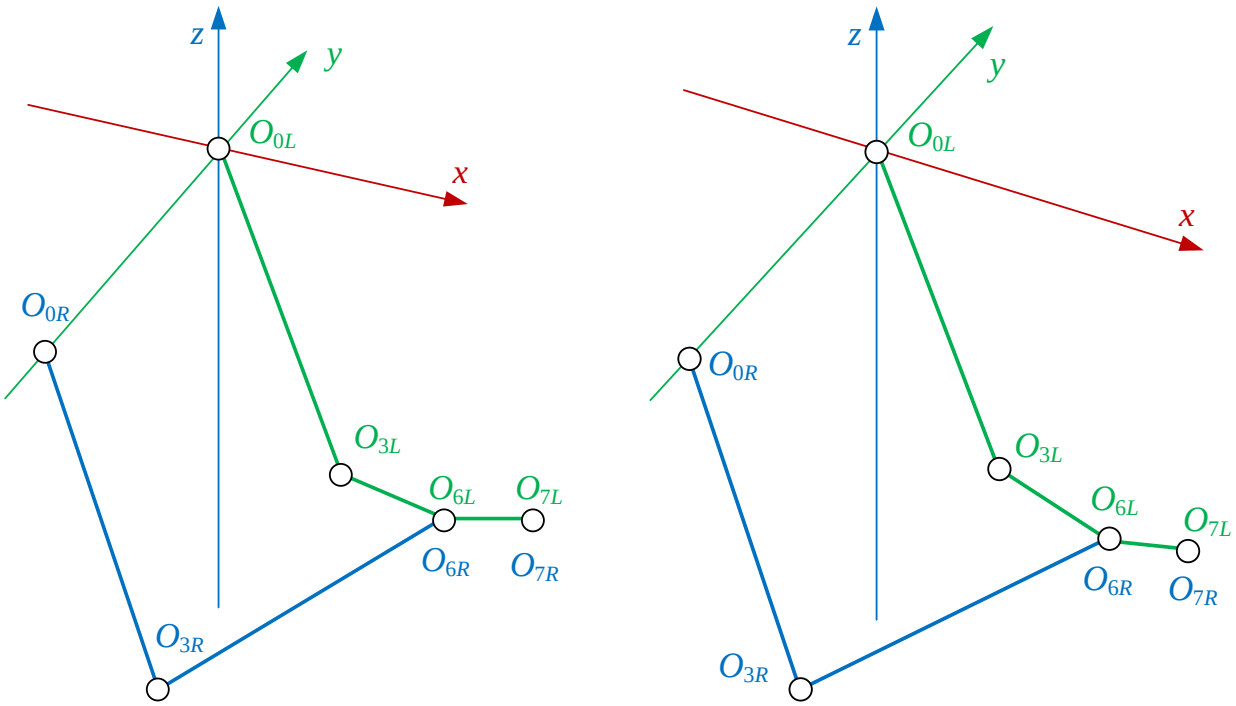
Результаты визуализации второго вычислительного эксперимента приведены на рис. 10. Несмотря на то, что параметры МАР m' и d_i' как и в первом эксперименте отличаются от параметров руки оператора m и d_i, положению рук оператора на рис. 10а соответствует положение МАР, изображенное на рис. 10б. Как видно из рис. 10б, в положении МАР, эффективном с точки зрения предложенного метода, «выпрямленность» МАР пропорциональна «выпрямленности» руки оператора; кисти МАР параллельны кистям оператора; плоскости, образованные плечевыми, локтевыми и лучезапястными сочленениями МАР, параллельным соответствующим плоскостям рук оператора), что свидетельствует о работоспособности предложенного метода на исходных данных вычислительного эксперимента. В то же время такое положение МАР не является эффективным с точки зрения метода-аналога, $\theta_i' - \theta_i \neq 0, i = [1,7]$ (таблица 1).

№3. 2019
ISSN 2410-9916



а) б)

Рис. 9. Результаты первого численного эксперимента: а) положение рук оператора; б) положение МАР. Буквы «*L*» и «*R*» в нижних индексах обозначают левую и правую руку, соответственно



а) б)

Рис. 10. Результаты второго численного эксперимента: а) положение рук оператора; б) положение МАР. Буквы «*L*» и «*R*» в нижних индексах обозначают левую и правую руку, соответственно

DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10309
URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2019-03/09-Sychkov.pdf

Выводы

В статье предложен метод оценки эффективности копирующего управления МАР. Критерии предложенного метода основываются на требованиях подобия положений рук оператора и МАР, максимизации задействованного рабочего пространства МАР, отсутствия столкновений звеньев МАР. Результаты проведенных вычислительных экспериментов свидетельствуют о большей эффективности предложенного метода по сравнению с существующим аналогом. Предложенный метод оценки эффективности копирующего управления позволяет учитывать общий случай, когда кинематические параметры руки оператора и МАР отличаются. Использование масштабирования и перерасчёта значения критериев эффективности копирующего управления позволяет исключить проблемы, возникающие при использовании существующего метода в некоторых характерных положениях. Предложенный метод позволяет выполнить количественное сравнение эффективности копирующего управления при анализе альтернативных научно-технических решений в области копирующего управления МАР.

Работа выполнена в рамках ФЦП ИР 2014-2020 (уникальный идентификатор RFMEFI57517X0166) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме: «Разработка программно-аппаратного комплекса системы управления на основе решения обратной задачи динамики и кинематики».

Литература

1. Богданов А. А., Жиденко И. Г., Кутлубаев И. М., Кияткин Д. В., Пермяков А. Ф. Копирующий манипулятор // Патент на полезную модель RU 135956 U1, опубл. 27.12.2013, бюл. № 36.

2. Tebueva F. B., Petrenko V. I., Antonov V. O., Gurchinsky M. M. The Method for Determining the Relative Positions of the Operator's Arm for Master-Slave Teleoperation of Anthropomorphic Manipulator // International Review of Mechanical Engineering (IREME). 2018. Vol. 12. № 8. P. 694-704. doi: 10.15866/ireme.v12i8.15397.

3. Tebueva F. B., Petrenko V. I., Pavlov A. S., Ryabtsev S. S., Antonov V. O. Determination of the Spatial Position and Orientation of the Links of the Robot Anthropomorphic Grip by the Solution of the Direct and Inverse Kinematics Problem // Multidisciplinary Symposium on ICT Research in Russian Federation and Europe "Integrating Research Agendas and Devising Joint Challenges" (Stavropol-Dombay, 15-20 October 2018). 2018. Vol. 2254. P. 94-104. URL: http://ceur-ws.org/Vol-2254/10000094.pdf (дата обращения 11.05.2019).

4. Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Антонов В. О., Рябцев С. С. Разработка алгоритма построения пространственного положения суставов руки оператора на основе решения обратной задачи кинематики // Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 22-24 ноября 2017 г.). Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2018. С. 733-740.

5. D'Souza A., Vijayakumar S., Schaal S. Learning inverse kinematics // Intelligent Robots and Systems. 2001. Vol. 1. P. 298-303.

6. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 512 с.

7. Лурье А. И. Аналитическая механика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1961. 824 с.

8. Бухгольц Н. Н. Основной курс теоретической механики. Часть 1. – М.: Наука, 1965. 468 с.

9. Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Антонов В. О., Гурчинский М. М. Математическая модель поиска оптимальных углов Эйлера для двигателей трехзвенного манипулятора // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2018. № 3. С. 67-74.

10. Simon L. Altmann rotations, quaternions, and double groups. Mineola: Dover Publications, 1986. 317 p.

11. Колмогоров А. Н., Александров А. Д., Лаврентьев М. А. Математика, ее содержание, методы и значение. Том 3. – М.: Изд. Академии наук СССР, 1956. 336 с.

12. Голубев Ю. Ф. Алгебра кватернионов в кинематике твердого тела // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. № 39. С. 1-23. URL: https://keldysh.ru/papers/2013/prep2013_39.pdf (дата обращения: 20.03.2018).

13. Громыко О. В., Царева А. А. Исследование кинематики манипулятора в аппарате кватернионов и их дуальных аналогов // Теоретическая и прикладная механика. 2013. № 28. С. 201-207.

14. Aguirre E., Gonzales A. Fuzzy behaviors for mobile robot navigation: design, coordination and fusion // Intern. J. of Approximate Reasoning. 2000. Vol. 25. P. 255-289.

15. Hartenberg R. S., Denavit J. A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices // Journal of Applied Mechanics. 1955. Vol. 77. P. 215-221.

16. Антонов В. О. Разработка математических методов и алгоритмов для планирования энергоэффективного пути перемещения манипулятора антропоморфного робота при наличии типичного препятствия: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. – Ставрополь: СКФУ, 2018. 269 с.

17. Petrenko V. I., Tebueva F. B., Sychkov V. B., Gurchinsky M. M., Antonov V. O. Calculating rotation angles of the operator's arms based on generalized coordinates of the master device with following anthropomorphic manipulator in real time // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). 2018. Vol. 9. № 7. P. 447-461.

18. Павловский В. Е., Шишканов Д. В. Исследование динамики и синтез управления колесными аппаратами с избыточной подвижностью // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2006. № 12. С. 1-28. URL: https://www.keldysh.ru/papers/2006/prep12/prep2006_12.html (дата обращения: 20.03.2018).

19. Юсупова Н. И., Шахмаметова Г. Р., Камильянов А. Р. Поиск траектории движения многозвенного манипулятора с заданной начальной конфигурацией на основе интеллектуальных методов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 9. С. 13-17.

20. Шахмаметова Г. Р. Генетический подход к моделированию траекторий избыточных манипуляторов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2000. № 2. С. 214-217.

21. Юсупова Н. И., Шахмаметова Г. Р., Камильянов А. Р. Поиск траекторий движения многозвенного манипулятора в сложном трехмерном пространстве // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2007. Т. 9. № 2. С. 71-75.

22. Юсупова Н. И., Шахмаметова Г. Р., Никифоров Д. В. Моделирование поиска траектории многозвенного манипулятора на основе генетического подхода с использованием экспертной системы // Мехатроника. 2001. № 6. С. 34-38.

23. Несмиянов И. А., Жога В. В., Павловский В. Е. Воробьева Н. С. Система управления манипулятора сельскохозяйственного робота // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2014. № 3. С. 226-231.

24. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределённых средах. – М.: Наука, 2011. 350 с.

25. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю. Оценивание и управление в сложных динамических средах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 295 с.

26. Пшихопов В. Х. Оптимальное по быстродействию траекторное управление электромеханическими манипуляционными роботами // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2007. № 1. С. 51-257.

27. Kutlubaev I. M., Zhydenko I. G., Bogdanov A. A. Basic concepts of power anthropomorphic grippers construction and calculation // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk. 2016. P. 1-4. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7910963.

28. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. – М.: Мир, 1989. 621 с.

References

1. Bogdanov A. A., Zhidenko I. G., Kutlubaev I. M., Kiiatkin D. V., Permiakov A. F. *Kopiruiushchii Manipuliator* [Copy Manipulator]. Patent Russia, no. 135956. 2013.

2. Tebueva F. B., Petrenko V. I., Antonov V. O., Gurchinsky M. M. The Method for Determining the Relative Positions of the Operator's Arm for Master-Slave Teleoperation of Anthropomorphic Manipulator. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 2018, vol. 12, no. 8, pp. 694-704. doi: 10.15866/ireme.v12i8.15397.

3. Tebueva F. B., Petrenko V. I., Pavlov A. S., Ryabtsev S. S., Antonov V. O. Determination of the Spatial Position and Orientation of the Links of the Robot Anthropomorphic Grip by the Solution of the Direct and Inverse Kinematics

Problem. *Multidisciplinary Symposium on ICT Research in Russian Federation and Europe "Integrating Research Agendas and Devising Joint Challenges"*, Stavropol, 2018, vol. 2254, pp. 94-104.

4. Petrenko V. I., Tebueva F. B., Antonov V. O., Ryabtsev S. S. Razrabotka algoritma postroeniia prostranstvennogo polozheniia sustavov ruki operatora na osnove resheniia obratnoi zadachi kinematiki [Development of an Algorithm for Finding the Spatial Position of the Operator's Arm Joints Based on the Solution of the Inverse Kinematics Problem]. *Priborostroenie v XXI veke – 2017. Integratsiia nauki, obrazovaniia i proizvodstva: materialy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Instrument Making in the XXI Century – 2017. Integration of Science, Education and Production: Materials of the XIII International Scientific and Technical Conference]. Izhevsk, Kalashnikov Izhevsk State Technical University Publ., 2018, pp. 733-740 (in Russian).

5. D'Souza A., Vijayakumar S., Schaal S. Learning inverse kinematics. *Intelligent Robots and Systems*, 2001, vol. 1, pp. 298-303.

6. Chelnokov Yu. N. *Kvaternionnye i bikvaternionnye modeli i metody mekhaniki tverdogo tela i ikh prilozheniia. Geometriia i kinematika dvizheniia* [Quaternion and Bi-Quaternion Models and Solid Mechanics Methods and Their Applications. Geometry and Kinematics of Motion]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006. 512 p. (in Russian).

7. Lurie A. I. *Analiticheskaia mekhanika* [Analytical mechanics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 1961. 824 p. (in Russian).

8. Buchholz N. N. *Osnovnoi kurs teoreticheskoi mekhaniki. Chast' 1* [The Main Course of Theoretical Mechanics. Part 1]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 468 p. (in Russian).

9. Petrenko V. I., Tebueva F. B., Antonov V. O., Gurchinsky M. M. Matematicheskaia model' poiska optimal'nykh uglov Eilera dlia dvigatelei trekhzvennogo manipuliatora [Mathematical Model of Finding the Optimal Euler Angles for Three-Link Manipulator Engines]. *Modern Science: actual problems of theory and practice. Series of "Natural and Technical Sciences"*, 2018, no. 3, pp. 67-74 (in Russian).

10. Simon L. *Altmann Rotations, Quaternions, and Double Groups*. Mineola, Dover Publications, 1986. 317 p.

11. Kolmogorov A. N., Aleksandrov A. D., Lavrentiev M. A. *Matematika, ee soderzhanie, metody i znachenie. Tom 3* [Mathematics, Its Content, Methods and Value. Volume 3]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1956. 336 p. (in Russian).

12. Golubev Yu. F. Algebra kvaternionov v kinematike tverdogo tela [Quaternion Algebra in Kinematics of a Rigid Body]. *Keldysh Institute Preprints*, 2013, no. 39, pp. 1-23. Available at: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-39 (accessed 20 march 2018) (in Russian).

13. Gromyko O. V., Tsareva A. A. Issledovanie kinematiki manipuliatora v apparate kvaternionov i ikh dual'nykh analogov [Study of the Kinematics of the Manipulator in the Apparatus of Quaternions and Their Dual Analogs].

Teoreticheskaia i prikladnaia mekhanika [Theoretical and Applied Mechanics], 2013, no. 28, pp. 201-207 (in Russian).

14. Aguirre E., Gonzales A. Fuzzy Behaviors for Mobile Robot Navigation: Design, Coordination and Fusion. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2000, vol. 25, pp. 255-289.

15. Hartenberg R. S., Denavit J. A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms Based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 1955, vol. 77, pp. 215-221.

16. Antonov V. O. *Razrabotka matematicheskikh metodov i algoritmov dlia planirovaniia energoeffektivnogo puti peremeshcheniia manipuliatora antropomorfnogo robota pri nalichii tipichnogo prepiatstviia. Dis. kand. tekhn. nauk* [Development of Mathematical Methods and Algorithms for Planning an Energy-Efficient Path for Moving a Manipulator of an Anthropomorphic Robot in the Presence of a Typical Obstacle. Ph.D. Thesis]. Stavropol, North-Caucasus Federal University, 2018. 269 p. (in Russian).

17. Petrenko V. I., Tebueva F. B., Sychkov V. B., Gurchinsky M. M., Antonov V. O. Calculating Rotation Angles of the Operator's Arms Based on Generalized Coordinates of the Master Device with Following Anthropomorphic Manipulator in Real Time. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 2018, vol. 9. no. 7, pp. 447-461.

18. Pavlovsky V. E., Shishkanov D. V. Issledovanie dinamiki i sintez upravleniia kolesnymi apparatami s izbytochnoi podvizhnost'iu [Investigation of the Dynamics and Synthesis of Control of Wheel Apparatuses With Excessive Mobility]. *Keldysh Institute Preprints*, 2006, no. 12, pp. 1-28 (in Russian).

19. Yusupova N. I., Shakhmametova G. R., Kamilyanov A. R. Poisk traektorii dvizheniia mnogozvennogo manipuliatora s zadannoi nachal'noi konfiguratsiei na osnove intellektual'nykh metodov [Search for the Motion Trajectory of a Multilink Manipulator With a Given Initial Configuration Based on Intelligent Methods]. *Mechatronics, Automation, Control*, 2007, no. 9, pp. 13-17 (in Russian).

20. Shakhmametova G. R. Geneticheskii podkhod k modelirovaniiu traektorii izbytochnykh manipuliatorov [Genetic Approach to Modeling the Trajectories of Redundant Manipulators]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2000, no. 2, pp. 214-217 (in Russian).

21. Yusupova N. I., Shakhmametova G. R., Kamilyanov A. R. Poisk traektorii dvizheniia mnogozvennogo manipuliatora v slozhnom trekhmernom prostranstve [Search for Motion Paths of a Multilink Manipulator in a Complex Three-Dimensional Space]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, vol. 9, no. 2, pp. 71-75 (in Russian).

22. Yusupova N. I., Shakhmametova G. R., Nikiforov D. V. Modelirovanie poiska traektorii mnogozvennogo manipuliatora na osnove geneticheskogo podkhoda s ispol'zovaniem ekspertnoi sistemy [Simulation of the Search for the Trajectory of the Multi-Link Manipulator Based on the Genetic Approach Using the Expert System]. *Mechatronics, Automation, Control*, 2001, no. 6, pp. 34-38 (in Russian).

23. Nesmiyanov I. A., Zhoga V. V., Pavlovsky V. E. Vorobyova N. S. Sistema upravleniia manipuliatora sel'skokhoziaistvennogo robota [Control System of an

Agricultural Robot Manipulator]. *Proceedings of Nizhnevolzhskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education*, 2014, no. 3, pp. 226-231 (in Russian).

24. Pshikhopov V., Medvedev M. *Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh* [Management of Moving Objects in Certain and Uncertain Environments]. Moscow, Nauka Publ., 2011. 350 p. (in Russian).

25. Pshikhopov V., Medvedev M. *Otsenivanie i upravlenie v slozhnykh dinamicheskikh sredakh* [Evaluation and Control in Complex Dynamic Environments]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009. 295 p. (in Russian).

26. Pshihopov V. Optimal'noe po bystrodeistviiu traektornoe upravlenie elektromekhanicheskimi manipuliatsionnymi robotami [Optimal for Speed Trajectory Control of Electromechanical Manipulation Robots]. *Russian Electromechanics*, 2007, no. 1, pp. 51-257 (in Russian).

27. Kutlubaev I. M., Zhydenko I. G., Bogdanov A. A., Basic Concepts of Power Anthropomorphic Grippers Construction and Calculation. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Chelyabinsk, 2016, pp. 1-4 (in Russian). doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7910963.

28. Fu K., Gonzalez P., Lee K. *Robototekhnika* [*Robotics*]. Moscow, Mir Publ., 1989. 621 p. (in Russian).

Статья поступила 10 июля 2019 г.

Информация об авторе

Сычков Владислав Борисович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Аспирант кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности, институт информационных технологий и телекоммуникаций. Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: системный анализ, управление и обработка информации. E-mail: vladtrav@inbox.ru

Адрес: 355029, Россия, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, д. 2.

Effectiveness Evaluating Method of Anthropomorphic Robot Manipulators Copying Control

V. B. Sychkov

Purpose. *The presence of a large number of heterogeneous scientific and technical solutions in the field of an anthropomorphic robot manipulators (ARM) copying control actualizes the issues of their effectiveness comparison by quantifying the effectiveness of copying control process. The efficiency of the ARM copying control is the similarity requirements compliance between the operator's hands positions and the positions of the ARM, as well as maximization of the involved ARM working space, and the collisions avoidance of ARM links. According to the known effectiveness evaluating method of ARM copying control, based on the rotation angles coincidence between the operator's hand positions and the positions of ARM, some*

positions of the operator's hands are unacceptable for some positions of the ARM, but such ARM positions are rather effective. ***The aim of the work*** *is the methodological support of the quantitative comparison of mathematical methods and technical solutions in the field of the MAR copying control, especially ARM positions. To achieve the aim of the work an analysis of the copying control imposed requirements is carried out and method of quantifying the effectiveness of the ARM copying control for particular operator's hand positions is proposed. In addition, integral evaluation criterions are introduced, which allows to compare the efficiency of copying control of various methods and technical solutions throughout the all possible configuration spaces of operator's hands positions.* ***Methods:*** *artificial parameters that characterize the positions of the operator hands and the ARM are introduced. The deviations of the introduced artificial parameters of the ARM positions from similar parameters of the hands of the operator are used as the evaluation criteria.* ***Novelty:*** *an element of novelty of the proposed method is the ability to produce more productive assessment of the effectiveness of the ARM copying control by using the following parameters for comparison: 1) the Euler angles of the operator's hand and Euler angles of the ARM wrist link; 2) the Euler angles of the plane formed by the shoulder, wrist and elbow joints of the operator's hand, and similar ARM angles; 3) the «degree of straightening» of the operator's hand and a similar degree of ARM. The use of the proposed method avoids an incorrect assessment of the effectiveness of the ARM copying control in positions where the palms of the operator's hands are close to each other. At the same time, the proposed method makes it possible to take into account not only the position and orientation of the operator's hands, but also the elbow joints. The performed simulations showed that the ARM positions, which are effective if the alternative method is used, are unacceptable for some positions of the operator's hands. On the other hand, expedient positions of the ARM are effective if the developed method is used and ineffective if the alternative method is used. The developed method allows to quantify and compare the effectiveness of the existing and developed ARM copying control systems.*

Key words: *anthropomorphic robot, anthropomorphic manipulator, copying control, effectiveness evaluation method, Euler angles.*

Information about Author

Vladislav Borisovich Sychkov – Graduate Student. Graduate student of the Department of Applied Mathematics and Computer Security of the Institute of Information Technology and Telecommunications. North-Caucasus Federal University. Field of research: system analysis, information management and processing. Tel.: +7 963 094 99 88. E-mail: vladtrav@inbox.ru

Address: Russia, 355029, Stavropol, prospekt Kulakova, 2.