

19. *Bakhshiev A.V. Model' neyrona so strukturnoy adaptatsiey dendritnogo apparata dlya modelirovaniya estestvennykh neyronnykh setey upravleniya dvizheniem* [Model of a neuron with a dendritic structural adaptation of the device to simulate a natural neural network motion control], *Neyroinformatika, ee prilozheniya i analiz dannykh: Materialy XVIII Vseross. seminara, 27-29 sentyabrya 2013 g.* [Narainpur-MATIC, its application and data analysis: Proceedings of the XVIII all-Russian. workshop, 27-29 September 2013], ed. by A.N. Gorbanya, E.M. Mirkesa. Krasnoyarsk, 2013, pp. 36-43.
20. *Bakhshiev A.V., Gundelakh F.V. Issledovanie biopodobnoy modeli neyronnoy seti dlya upravleniya dvizheniem robototekhnicheskikh sistem* [Biosimilar study a neural network model for motion control of robotic systems], *Robototekhnika i iskusstvennyy intellekt: materialy VI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Zheleznogorsk, 13 dekabrya 2014 g.)* [Robotics and artificial intelligence: proceedings of the VI all-Russian scientific-technical conference with international participation (Zheleznogorsk, December 13, 2014)], ed. by V.A. Ugleva. Krasnoyarsk: Tsentri informatsii, TsNI «Monografiya», 2014, pp. 164-169.
21. *Bakhshiev A.V., Gundelakh F.V. Issledovanie metoda zapominaniya prostranstvennykh konfiguratsiy robototekhnicheskoy sistemy na neyronnykh setyakh so strukturnoy adaptatsiey* [Study of method of memorizing the spatial configurations of the robotic system on neural network with structural adaptation], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2015, No. 3 (8), pp. 46-51.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.С. Потапов.

Бахшиев Александр Валерьевич – Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: alexab@rtc.ru; 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр. 21; тел.: +78125520569; старший научный сотрудник.

Смирнова Екатерина Юрьевна – e-mail: eus@rtc.ru; начальник отдела систем технического зрения и управления динамическими объектами.

Мусиенко Павел Евгеньевич – Институт трансляционной биомедицины СПбГУ; e-mail: pol-spb@mail.ru; 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9; тел.: +79818165060; д.мед.н.; профессор; заведующий лаборатории нейропротезов.

Bakhshiev Aleksandr Valeryevich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC); e-mail: alexab@rtc.ru; 21, Tikhoretskiy pr., Saint-Petersburg, 194064, Russia; phone: +78125520569; senior researcher.

Smirnova Ekaterina Yurevna – e-mail: eus@rtc.ru; head of department of computer vision systems and dynamical objects control.

Musienko Pavel Evgenievich – Institute of Translation Biomedicine SPBU; e-mail: pol-spb@mail.ru; 7-9, Universitetskaya nab., Saint-Petersburg, 199034, Russia; phone: +79818165060; dr. of med. sc.; professor; head of laboratory of neuroprosthetics.

УДК 681.532.62

В.Ф. Головин, А.Г. Лесков, М.В. Архипов, М.Ю. Рачков, С.Д. Леготин

ОБУЧЕНИЕ РОБОТА ПОКАЗОМ ДВИЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СРЕДЫ

Рассматривается метод обучения показом необходимого движения с деформированием мягких тканей инструментами робота для выполнения приёмов восстановительной медицины. Этот метод является наиболее естественным для ввода в робот данных о необходимых движениях и усилиях. С позиций постановки задачи управления обсуждаются методы управления, учитывающие информацию об усилиях взаимодействия инструмента робота со средой – позиционного, импедансного, позиционно-силового, податливого управ-

ления. Для обучения путём показа необходимых движений с деформированием мягких тканей разработаны новые алгоритмы податливого управления и биомехатронные модули. Частным случаем обучения показом является метод обучения "силовых" точек, содержащих информацию о заданных усилиях деформирования мягких тканей. После определения обученных "силовых" точек программа робота выполняет интерполяцию для получения непрерывной траектории. Недостатком метода является программное задание усилия. Рассматривается общий пространственный случай обучения показом с деформированием мягких тканей и приводится схема размещения датчиков усилия по отношению к рукоятке, задающей необходимые усилия и движения. Этот метод показа не требует от врача программного задания необходимых усилий для деформирования мягких тканей. Для роботов, содержащих датчики моментов в суставах или имеющих возможность измерения моментов в суставах путём измерения токов электродвигателей, приводятся схемы обучения показом. Разделяя сеанс выполнения массажной механотерапии на две фазы – обучения необходимым движениям и усилиям и воспроизведения обученной траектории, разработанный метод позволяет автоматизировать деятельность врача при выполнении приёмов восстановительной медицины, необходимой для повышения работоспособности населения.

Манипуляционные роботы; многокомпонентный силовой датчик; восстановительная медицина; массаж; обучение; показ; деформирование; мягкие ткани; податливое управление.

V.F. Golovin, A.G. Leskov, M.V. Arkhipov, M.Yu. Rachkov, S.D. Legotin

ROBOT TRAINING BY MOVEMENT SHOWING AND CONSIDERING ENVIRONMENT DEFORMING

The method of robot teaching by showing considering deforming of the soft tissues is considered in the article. This method is the most natural for inputting to the robot the necessary data of forces and movements. From the point of task setting the control problems considering the information about forces of interacting of robot tool with environment - position, impedance, position-force and compliant control are discussed. For training by showing of the necessary movements with the deforming of soft tissues the new algorithms and biomechatronic compliant modules were developed. The method of teaching "force" points containing the information about assigned forces of soft tissues deforming is a special case. The robot program performs an interpolation for continuous path obtaining after "force" points determination. The program task setting of "force" points is the method drawback. The general spatial case of teaching by showing with the deforming of soft tissues is considered and the layout of force sensors relatively to the handle defining the necessary movement and force is given. This method of showing does not require program setting of necessary forces for deforming of the soft tissues by a doctor. The schemes of training by showing are given for robots containing torque joint sensors or having the ability to determine the joint torque by measuring electric currents of motors. Sharing séance of performing massage mechanotherapy into two phases - training for necessary movements and forces and reproduction of trained trajectory the developed method allows to automate the activities of a doctor, performing techniques of restorative medicine, which is necessary to improve the working ability of the population.

Manipulation robot; multi-component force sensor; restorative medicine; massage; training; showing; soft tissue; admittance control.

Введение. В практике реабилитации и восстановления все чаще применяются автоматизированные и механизированные устройства, обеспечивающие необходимый сервис для врача-оператора [1]. Для данных систем характерно нахождение в рабочей зоне робота нескольких человек: врача-оператора и пациента. В связи с этим появляются требования к системе, связанные с удобством ее использования оператором и эффективностью для пациента.

Наиболее естественной формой обучения и ввода данных является показ необходимого движения с помощью задающей рукоятки с податливым управлением робота. Это бионический подход к организации управления, позволяющий при-

ближать управление роботом к естественным действиям опытного массажиста – человека [2–6]. Системы с организацией обучения показом необходимого движения показом относятся к классу систем полуавтоматического биотехнического управления, к классу человеко-машинных систем или систем эргатического управления [7]. Особенностью класса систем эргатического управления для медицинской техники является объект управления – пациент с психофизиологическими свойствами, которые отсутствуют у технических объектов управления [8].

В дальнейшем под объектом будет подразумеваться деформируемая среда – мягкие ткани тела пациента, с которыми взаимодействует робот во время проведения массажа [9, 10]. Ввод задаваемых параметров движения и усилий может осуществляться программно или показом (демонстрацией).

Управление движением и силой в одинаковых или ортогональных направлениях. Позиционное, упругое, позиционно-силовое, податливое управление. В задачах управления манипуляционными роботами управляемыми переменными могут быть переменные движения $X(t)$ и (или) силовые переменные $F(t)$. Эти переменные могут вводиться в робот как заданные или как сигналы обратных связей. По переходным процессам именно этих переменных определяют устойчивость системы как основное свойство работоспособности.

В системах позиционного управления задаваемыми и измеряемыми являются переменные движения $X(t)$ и целью управления является синтез такого закона управления $\tau(t)$, который обеспечивает приближение реального движения к запланированному:

$$X(t) \rightarrow X_0(t).$$

Переменные движения $X_0(t)$ задаются несколькими способами: программно, с пульта ручного управления (ПРУ), от изометрической тензорюкятки. При этом усилия не задаются и не измеряются (рис. 1). Они являются возмущениями для системы, и их действие уменьшается действием обратных связей по параметрам движения.

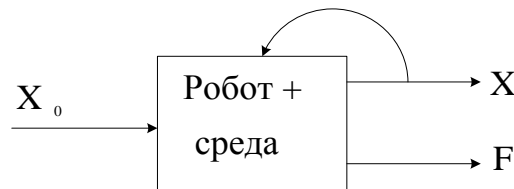


Рис. 1. Структура позиционного управления

Переменные движения $X(t)$ связаны с обобщёнными координатами робота $q(t)$ следующими зависимостями:

$$\dot{X} = J(q)\dot{q},$$

где $J(q) \in R^{n \times m}$ – матрица Якоби, связывающая скорости обобщённых координат \dot{q} и декартовых координат конечного звена \dot{X} .

Дифференциальное уравнение модели многозвенного манипуляционного робота, взаимодействующего со средой, в обобщённых координатах робота имеет вид

$$H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + C(q) = F_r + J^T(q)F_e,$$

где $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ – векторы обобщённых координат положения, скорости, ускорения соответственно; $H(q) \in R^{n \times n}$ – матрица, характеризующая инерционные

свойства манипулятора; $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbf{R}^n$ – вектор, характеризующий, центробежные, кориолисовы силы в звеньях манипулятора; $\mathbf{C}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^n$ – вектор, характеризующий гравитационные силы в звеньях манипулятора; $\mathbf{F}_r \in \mathbf{R}^n$ – вектор, управляющих моментов, развиваемых приводами манипулятора; $\mathbf{F}_e \in \mathbf{R}^m$ – вектор сил, действующих на конечное звено (инструмент) манипулятора со стороны среды.

Для позиционного управления вектор управляющих моментов, развиваемых приводами манипулятора, является функцией только обобщённых координат робота, но не усилий:

$$\mathbf{F}_r = \mathbf{f}(\mathbf{q}_0(t), \mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)).$$

Существенно может уменьшить действие возмущений измерение реальных усилий взаимодействия робота со средой в системах с упругим управлением. Чтобы провести разграничение между видами управления, вместо термина "импедансное" управление (impedance control) предлагается ввести и в дальнейшем использовать новый термин – "упругое" управление, которое подразумевает и учитывает сопротивляемость среды. Упругое управление может рассматриваться как улучшенное позиционное управление [2].

Цель упругого управления такая же, как у позиционного управления и состоит в следующем:

$$\mathbf{X}(t) \rightarrow \mathbf{X}_0(t).$$

В системах упругого управления не предусматривается обеспечение необходимого усилия $\mathbf{F}(t) \rightarrow \mathbf{F}_0(t)$, но обратная связь по усилию корректирует позиционную ошибку

$$e(t) = \mathbf{X}_0(t) - \mathbf{X}(t),$$

поддерживая импеданс как отношение усилия к позиционной ошибке, передаточная функция системы будет иметь вид

$$\mathbf{F}(s)/\mathbf{E}(s) = \mathbf{M}s^2 + \mathbf{B}s + \mathbf{K},$$

где \mathbf{M} , \mathbf{B} , \mathbf{K} – матрицы, описывающие инерционные, демпфирующие и упругие свойства системы [11].

Для абсолютно упругого робота импеданс стремится к бесконечности, передаточная функция по перемещениям стремится к единице.

Схема, отражающая планируемые и реальные переменные при упругом управлении, приведена на рис. 2.

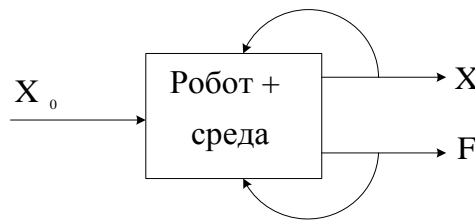


Рис. 2. Структура упругого управления

Обратные связи существуют по параметрам движения. Для упругого управления вектор управляющих моментов, развиваемых приводами манипулятора, является функцией обобщённых координат робота и усилий:

$$\mathbf{F}_r = \mathbf{f}(\mathbf{q}_0(t), \mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t), \mathbf{F}(t)).$$

В отличие от упругого управления при позиционно-силовом управлении (ПСУ) необходимо одновременное выполнение двух целевых условий (рис. 3):

$$\mathbf{X}(t) \rightarrow \mathbf{X}_0(t) \text{ и } \mathbf{F}(t) \rightarrow \mathbf{F}_0(t).$$

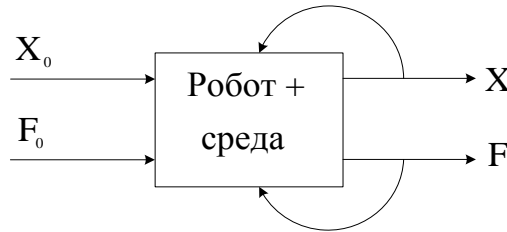


Рис. 3. Структура позиционно-силового управления

На планируемой траектории $\mathbf{X}_0(t)$ должны развиваться планируемые усилия $\mathbf{F}_0(t) \equiv f(\mathbf{q}_0(t), \dot{\mathbf{q}}_0(t))$.

Обратные связи существуют по параметрам движения и усилий [12]. Для позиционно-силового управления вектор управляющих моментов, развиваемых приводами манипулятора, является функцией заданных и измеренных обобщённых координат робота и усилий:

$$\mathbf{F}_r = f(\mathbf{q}_0(t), \mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t), \mathbf{F}_0(t), \mathbf{F}(t)).$$

Данное выражение отражает постановку задачи, когда переменные движения и усилия могут планироваться как заданные.

В ряде исследований приводятся данные о том, что переменные движения и усилия одновременно в одном направлении не могут контролироваться [13]. Действительно, если контролируется усилие $\mathbf{F}(t)$, то перемещение от этого усилия находится в зависимости от силы

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{M}^{-1} \iint \mathbf{F}(t_1, t_2) dt_1 dt_2,$$

поэтому не имеет смысла обеспечивать контроль этих перемещений.

Поэтому предлагаются системы или с приоритетом движения, или усилия, или с разделением контролируемых переменных движения и усилия в ортогональных направлениях [13].

В одном из видов ПСУ, в гибридном, управление движением осуществляется в одних направлениях, а силовое управление выполняется в других ортогональных направлениях. Цель ПСУ точно выполняется лишь в идеальных условиях независимого управления, например, для планарного робота, при отсутствии трения, когда позиционное управление в направлении \mathbf{X} осуществляется независимо от силового управления в ортогональном направлении \mathbf{Y} [11]:

$$\tau_x = U_1(\mathbf{X}(t), \dot{\mathbf{X}}(t)),$$

$$\tau_y = U_2(\mathbf{F}_y).$$

В большинстве случаев даже в ортогональных направлениях цель выполняется с приоритетом или управления усилия или движения.

В системах параллельного ПСУ усилия и движение контролируются в одних направлениях, но силовое управление преобладает.

В системах податливого (уступчивого, адмитансного, admittance control) управления направления управляемых движений совпадают с направлением задаваемых усилий (моментов) [14]. В структурных схемах задание определяется только усилием (рис. 4):

$$\mathbf{F}(t) \rightarrow \mathbf{F}_0(t).$$

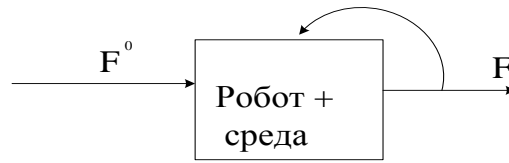


Рис. 4. Структура податливого управления

Перемещения интегрально связаны с усилиями зависимостью

$$X(t) = M^{-1} \iint F(t_1, t_2) dt_1 dt_2.$$

Поэтому структура податливого управления может быть также представлена структурой на рис. 5.

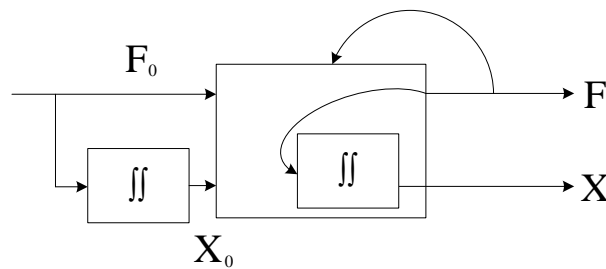


Рис. 5. Структура податливого управления с учётом зависимости перемещений от усилий

Для податливого управления вектор управляющих усилий (моментов), развиваемых приводами манипулятора является функцией заданных и измеренных усилий:

$$F_r = f(F_0(t), F(t)).$$

В контактных задачах, чтобы избежать недопустимо больших сил при возникновении контакта, какое-либо из взаимодействующих тел (робот или среда) должно быть мягким. Если робот жёсткий (импедансный), то среда должна быть податливой. Если среда импедансная (жёсткая), то робот должен быть мягким податливым (адмитансным). Являясь величиной, обратной импедансу, адмитанс идеально податливого робота стремится к бесконечности.

Следует заметить, что задание $F_0(t)$ формируется как представление оператором образа движения, которому способствуют зрительное и кинестетическое ощущения оператора. В процессе выполнения движения оператор, адаптируясь к среде, может изменять задание (рис. 6).

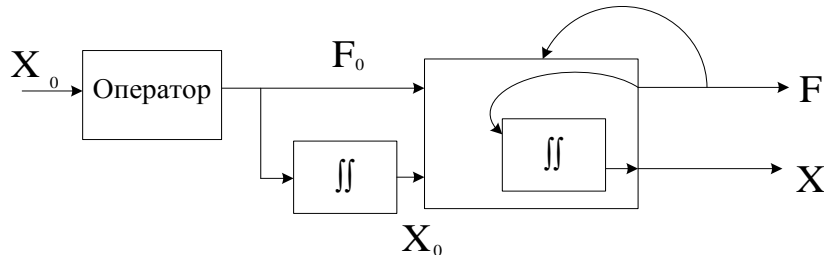


Рис. 6. Структура податливого управления с учётом образа оператора

Этот тип управления в отличие от импедансного (сопротивляющегося) и ПСУ можно назвать податливым (уступчивым) управлением. Как правило, податливое управление используется для обучения показом, чтобы потом неоднократно воспроизводить обученное движение. Однако режим податливого управления для систем копирующего управления является основным.

К этому же типу управления относится режим управления усилием вдоль заданного направления, например, в инструментальной системе координат робота [10]. Перемещение в том же направлении зависит от силы и не контролируется (рис. 7). Этот режим может быть использован как полуавтоматический для обучения силовых точек показом направления траекторий с ПРУ и как автоматический при программно заданном направлении [15]. Усилие может задаваться программно или показом с деформированием среды с помощью одномерной показывающей перчаткой. Это эквивалент тактильного ощупывания с деформированием точки.

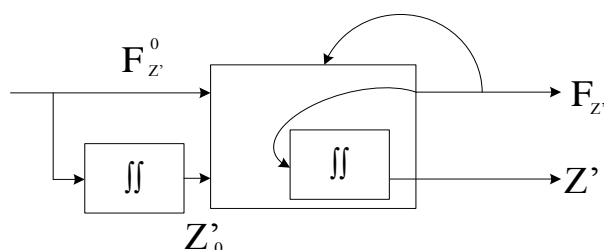


Рис. 7. Структура податливого управления с заданием усилия F_z вдоль заданного направления z

Обучение робота показом планируемого движения с учётом деформирования среды. Так как обучение показом движения с деформированием мягких тканей в массаже позволяет запоминать заданную траекторию движения $X_0(t)$, в которой содержится информация об усилиях деформирования МТ, то эти усилия можно рассматривать как задаваемую силовую траекторию $F_0(t)$. Это позволяет избежать необходимости задавать усилия, рассчитывая их, использовать данные предыдущих сеансов или измерять усилия, например, специальной перчаткой и одновременно измерять координаты перемещения перчатки, например, с помощью системы технического зрения.

Обучение показом движений может быть организовано указанием направлений подхода инструмента робота к отдельным точкам тела и заданием усилия деформирования МТ в этих точках. Если затем робот перемещается в указанном направлении и деформирует среду с заданным усилием, то появляется и запоминается обученная силовая точка.

Система обучения силовых точек, созданная на роботе РМ-01 с однокомпонентным силовым датчиком на фланце, приведена на рис. 12. Алгоритм метода силового самообучения программно задаёт направление перемещения по инструментальной оси. Инструмент, деформируя мягкую ткань, создаёт точку с усилием F_{z0} . Геометрические координаты силовой точки, прочитанные с энкодеров, записываются в память.

Условия подхода к точке с заданным усилием даны неравенствами:

$$\begin{aligned} \text{if } F_z \leq F_{z0} - \Delta F \text{ then } \Delta z' &= \Delta, \\ \text{if } F_{z0} - \Delta F < F_z < F_{z0} + \Delta F \text{ then } \Delta z' &= 0, \\ \text{if } F_z \geq F_{z0} + \Delta F \text{ then } \Delta z' &= -\Delta, \end{aligned} \quad (1)$$

где ΔF – допустимое отклонение от заданной силы; $\Delta z'$ – шаг перемещения в направлении инструментальной оси.

Условия подхода к точке с заданным усилием можно задать нелинейной характеристикой контроллера (рис. 8) и интегратором, так как шаги Δz будут суммироваться и система управления по усилию будет астатической.

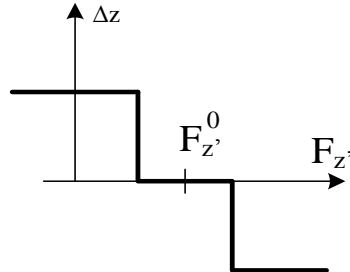


Рис. 8. Нелинейная характеристика контроллера

Программа выполняется с использованием команды `move Δx, Δy, Δz`.

Аналогичные исследования были выполнены на робота LWR KUKA на отдельных звеньях робота с соответствующими суставными датчиками моментов.

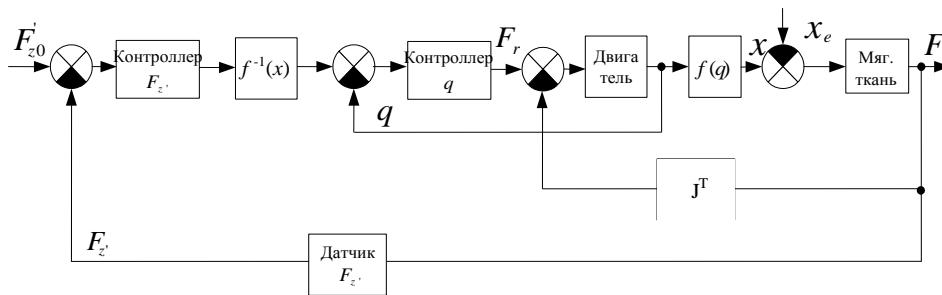


Рис. 9. Функциональная схема робота при обучении силовых точек

На рис. 9 $f(q)$ и $f^{-1}(x)$ – преобразования координат в прямой и обратной кинематических задачах, x_e – вектор рельефа мягкой ткани.

Если инструмент робота не касается мягкой ткани и робот совершает движение в свободном пространстве, то усилие $F = 0$ (рис. 10).

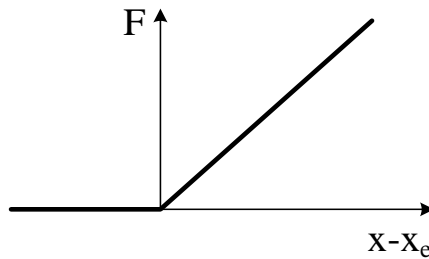


Рис. 10. Статическая характеристика модели МТ

Можно рассматривать процесс получения силовых обученных точек как результат показа. Множество обученных силовых точек могут быть соединены в непрерывную кривую интерполятором.

Обучение показом может выполняться не только для отдельных точек, но возможно обучение показом движения вдоль непрерывной траектории. При этом известен показ движения в свободном пространстве без сопротивления среды (для окраски краскопультом, для дуговой сварки) и возможен показ движения с деформированием среды. В случае показа движения с деформированием среды с помощью задающей рукоятки направление усилий совпадает с направлением движений.

При обучении показом движения в свободном пространстве робот оказывает незначительное сопротивление руке по причине действия сил инерции робота. Цель управления:

$$F_0 \rightarrow F.$$

При обучении показом движения с деформированием среды оператор в основном, так же как при непосредственном контакте с МТ, испытывает сопротивление упругой МТ. Это силовое управление, когда задаётся рукой массажиста усилие, а движение происходит как следствие. Поэтому на схемах, определяющих планируемые величины, задаваемой переменной является только усилие (рис. 4–7, 9).

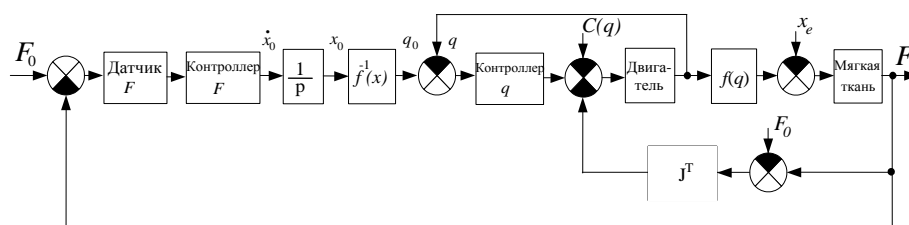


Рис. 11. Функциональная схема робота при обучении движения показом с учётом деформирования среды

Обозначения на данной схеме соответствуют рисунку (рис. 12), на котором показаны силы, действующие на рукоятку со стороны оператора F_0 и со стороны среды – мягкой ткани F .

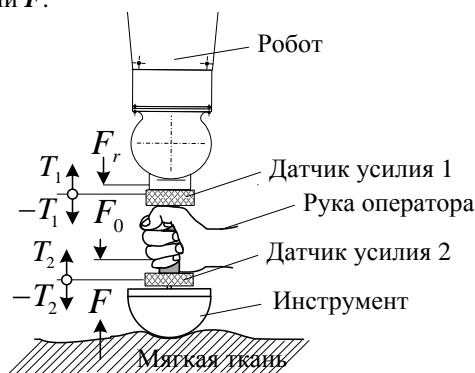


Рис. 12. Усилия, прилагаемые к роботу со стороны оператора и среды

Обозначения векторов усилий (моментов) следующие:

F_r – вектор усилий (моментов), создаваемых двигателями приводов робота;

F_0 – вектор усилий (моментов), создаваемых рукой оператора;

F – вектор усилий (моментов), создаваемых давлением мягкой ткани на инструмент робота;

T_1 – вектор усилий (моментов), измеряемых верхним датчиком усилия;

T_2 – вектор усилий (моментов), измеряемых нижним датчиком усилия.

Режим медленных, плавных и глубоких движений, характерных для массажа, может быть приближен к статическому [16]. Масса звеньев роботов, предлагаемых для выполнения массажа, например LBR4 Kuka или UR5, UR10, намного меньше, чем у других роботов аналогичной грузоподъемности. Тогда, если пренебречь силами инерции, кориолисовыми и центробежными силами и иметь в виду компенсацию сил веса звеньев, имеем

$$H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}) = 0,$$

то имеем

$$\mathbf{F}_r + J^T(\mathbf{q})\mathbf{F}_e = 0,$$

где $\mathbf{F}_e = \mathbf{F}_0 - \mathbf{F}$.

Окончательно имеем

$$-J^T(\mathbf{q})(\mathbf{F}_0 - \mathbf{F}) = \mathbf{F}_r.$$

Цель управления

$$\mathbf{F}_0 \rightarrow \mathbf{F}.$$

Последнее уравнение отражается в функциональной схеме системы обучения демонстрацией с многокомпонентным силовым датчиком (рис. 11).

Если для упругого управления планируется только перемещения $\mathbf{X}(t)$, для ПСУ планируются и перемещения $\mathbf{X}(t)$, и усилия $\mathbf{F}(t)$, то для податливого управления планируется только задание усилий $\mathbf{F}_0(t)$. Поэтому управление роботом при его обучении движения показом от задающей рукоятки с учётом деформирования среды следует считать податливым.

В случае обучения показом движений в свободном пространстве отсутствует контакт со средой, реакция среды $\mathbf{F}=0$, обратная связь по усилию обрывается, система превращается в позиционную, в которой заданная скорость перемещения создаётся датчиком усилия (рис. 13).

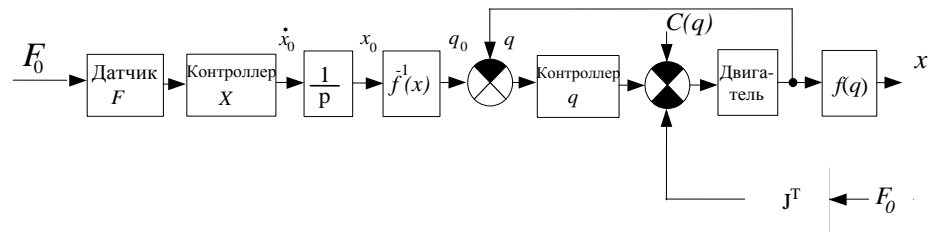


Рис. 13. Функциональная схема робота при обучении показом движения в свободном пространстве

Аналогичная система позиционного управления строится на основе задающей изометрической рукоятки с тензодатчиками [17].

На роботе РМ-01 с однокомпонентным датчиком усилия (рис. 8) был реализован алгоритм обучения демонстрацией при перемещении инструмента вдоль инструментальной оси. Датчик усилия был предварительно поджат. Поджатие в датчике обеспечивает некоторую зону его растягивания для двустороннего управления перемещениями. Контроллер F_z обеспечивает выполнение пошаговых действий в соответствии с неравенствами (1).

Если масса последнего звена сосредоточена в инструменте и не учитывается, то датчики, расположенные выше и ниже руки оператора, с учётом сделанных допущений будут измерять различные усилия в разных режимах:

$$\begin{aligned} T_1 &= F_r = F - F_0, \\ T_2 &= -F = -F_0 - F_r. \end{aligned}$$

Верхний датчик, измеряющий усилие $T_1 \approx F - F_0$, является датчиком, необходимым для организации обучения опросом в схеме на рис. 12. В режиме воспроизведения, когда оператор не держит рукоятку, верхний датчик регистрирует реакцию МТ:

$$T_1 = F_r = F.$$

Нижний датчик, измеряющий усилие $T_2 = F$, может быть полезным для визуального наблюдения за реакцией мягкой ткани или сообщать звуковым сигналом о перегрузке, использоваться для коррекции небольших перемещений мягких тканей пациента, например, при его дыхании.

В процессе обучения перемещения в суставах с энкодеров записываются или в виде отдельных узловых силовых точек, или в виде непрерывной геометрической траектории.

Система, представленная на рис. 12, содержит в цепи прямых воздействий интегратор, а потому является астатической, уменьшающей статическую ошибку и позволяющей изменять скорость пропорционально усилию.

Кроме системы, представленной на рис. 11, возможны другие варианты построения астатических по усилию систем. Это вариант с использованием контроллера с нелинейной характеристикой (рис. 10) и интегрированием шагов перемещения робота. Третий вариант представляет систему с разомкнутыми по положению приводами (рис. 14).

Астатические по усилию системы обеспечивают изменение скорости перемещения робота пропорционально изменению усилия, что удобно для пользователя. Статические по усилию системы обеспечивают изменение перемещения робота пропорционально изменению усилия, поэтому неудобны для управления.

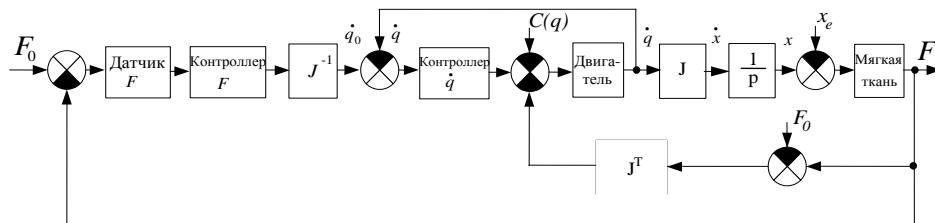


Рис. 14. Функциональная схема робота с астатическим управлением по усилию

Для обучения показом при пространственных перемещениях инструмента в МТ и для измерения соответствующих усилий (моментов) необходим 6-компонентный силовой датчик, расположенный на инструментальном фланце робота выше рукоятки оператора.

Можно использовать усилия, измеряемые датчиками, расположенными в суставах, преобразуя вектор усилий матрицей Якоби $(J^T)^{-1}(q)$ (рис. 15).

Многокомпонентные датчики усилия для решения задач силового управления встраиваются в роботы, например, такие датчики встроены в суставы робота Kuka LBR.

Так как ток двигателя пропорционален усилию (моменту), развиваемому двигателем $F_r = i_{C_r}$, то можно воспользоваться датчиками тока, например датчиками Холла (рис. 16). Идея использования измеренных токов двигателей приводов реализована в роботах UR5 и UR10.

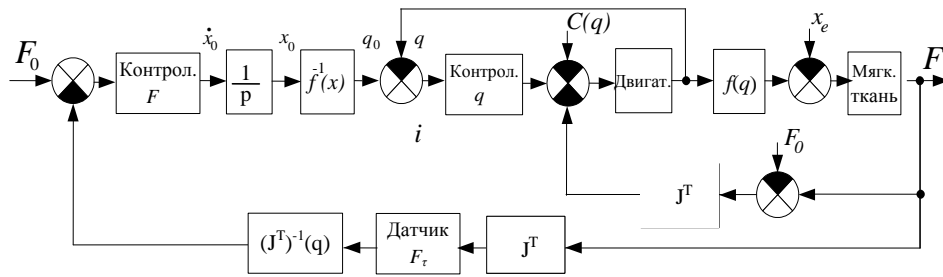


Рис. 15. Функциональная схема системы обучения демонстрацией при деформировании мягкой ткани с использованием датчиков усилий в суставах робота

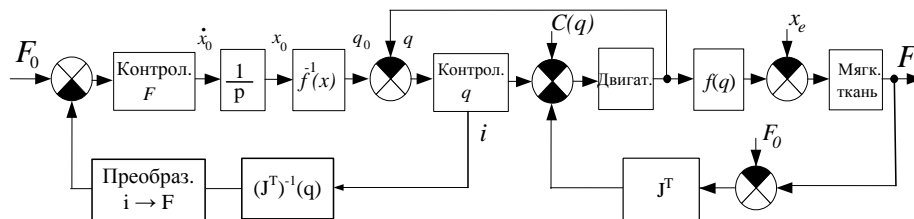


Рис. 16. Функциональная схема системы обучения демонстрацией при деформировании мягкой ткани с использованием токов двигателей приводов

Следует отметить причины погрешностей обучения показом демонстрацией с учётом деформирования мягких тканей:

- ◆ силы инерции пропорциональны массам звеньев и развиваемым ускорениям. Действие этой причины снижается при конструкции лёгкой руки, тросовых трансмиссиях от приводов к звеньям и плавными массажными движениями;
- ◆ центробежные и кориолисовы силы, зависящие от скорости, уменьшаются при медленных массажных движениях;
- ◆ взаимовлияние приводов уменьшается при малой нагрузке;
- ◆ гравитационные силы уменьшаются для легких конструкций манипулятора.

Названные причины вызывают искажения ощущаемых рукой оператора реальных усилий деформирования мягкой ткани на рукоятке. Поэтому оператор-массажист должен адаптироваться к возникающим искажениям путём определённого тренинга.

Манипуляционный механизм, на конечном звене которого закреплена задающая рукоятка, может быть также исполнительным роботом, но может быть легковесным макетом, кинематически повторяющим исполнительный манипулятор. Этот макет должен иметь небольшое трение в суставах и энкодеры. Определённую сложность представляет система совмещения системы координат макета и исполнительного манипулятора.

Задающая рукоятка может находиться не на конечном звене задающего или исполнительного манипулятора, а представлять прибор с отражением на руку оператора реального усилия взаимодействия исполнительного манипулятора со средой [18].

Исследованиям копирующих манипуляторов, взаимодействующих с техническими объектами, посвящена работа [19]. Инвазивному взаимодействию копирующего манипулятора с МТ посвящена работа [18]. В полуавтоматическом режиме копирования эти манипуляторы выполняют основную функцию – манипулирование.

В работах СПИИРАН для обучения показом предложено использовать телекамеру, закреплённую на оцувствленной перчатке на руке оператора. При этом регистрируется не только положение и ориентация руки в пространстве, но и определяются координаты характерных точек моделей объектов относительно телекамеры на руке, что позволяет взаимодействовать с произвольно расположенными телами [20]. Создаются виртуальные объекты, воспринимаемые органами чувств человека и управляемые как реальные.

Для воспроизведения обученная непрерывная траектория движения должна быть записана, а потому должно быть предусмотрено программное решение записи, например, обобщённых координат робота, с возможностью их коррекции.

Метод обучения показом движения полностью отказывается от планирования траекторий, необходимого для программирования траекторий. Массируемый участок должен находиться в рабочей зоне робота, поэтому перед обучением необходимо инструментом робота очертить контур массируемого участка.

Траектория, намеченная показом, всегда выполнима, даже если выполняется роботом с избыточной кинематикой. При показе движения оператор произвольно учитывает рабочую зону робота, что невозможно при программировании траектории.

Выводы. Метод обучения робота показом необходимого движения в свободном пространстве известен в промышленной робототехнике, например, для окраски распылением и дуговой сварки. Метод обучения робота показом необходимого движения с учетом деформации среды может использоваться в задачах податливого управления, в том числе для управления роботами для восстановительной медицины. Для врача это наиболее естественный и быстрый способ обучения, чем обучение отдельных силовых точек. Существующие роботы предназначены в основном для позиционного управления. Реализация метода обучения робота показом необходимого движения с учетом деформации среды требует нового программно-алгоритмического обеспечения и разработки биомехатронного модуля, содержащего шестикомпонентный силомоментный датчик, рукоятку оператора и инструмент.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Головин В.Ф., Саморуков А.Е. Способ массажа и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2145833 от 08.05.1998.
2. Головин В.Ф., Разумов А.Н., Подураев Ю.В. Мехатронный подход при проектировании медицинской техники // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 7.
3. Головин В.Ф., Рачков М.Ю., Архипов М.В., Журавлев В.В. Автоматический массажный манипулятор. Патент РФ на полезную модель РФ № 109407, 17.05.2011.
4. Головин В.Ф., Архипов М.В., Журавлёв В.В. Эргатические и биотехнические системы управления в медицинской робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 5. – С. 54-56.
5. Головин В.Ф., Рачков М.Ю., Архипов М.В. Журавлев В.В. Автоматическая массажная система. Патент на полезную модель РФ № 116042 от 05.10.2011.
6. Головин В.Ф., Архипов М.В., Журавлёв В.В. Робототехника в восстановительной медицине. Роботы для механотерапии. LAPLAMBERT Academic Publishing, GmbH&Co. KG, 2012. – 280 p.

7. Головин В.Ф., Саморуков А.Е., Архипов М.В., Журавлев В.В. Обзор состояния робототехники в восстановительной медицине // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 8. – С. 42-50.
8. Гориневский Д.Н., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю. Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях. – М.: Физматлит, 1994. – 368 с.
9. Еремушкин М.А. Мануальные методы исследования в комплексе реабилитационных мероприятий при патологии опорно-двигательного аппарата: дис. ... д-ра мед. наук. – М., 2006.
10. Кулешов В.С., Лакота Н.А. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. – М.: Машиностроение, 1986. – 328 с.
11. Кулаков Ф.М., Чернакова С.Э. Информационная технология обучения роботов показом движений // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 7. – С. 23-28.
12. Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. Системы управления манипуляционных роботов. – М.: Наука, 1978. – 416 с.
13. Golovin V.F. Robot for massage // Proceedings of JARP 2nd Workshop on Medical Robotics Heidelberg, Germany. – 1997.
14. Golovin V., Zhuravlev V., Arkhipov M. Robotics in Restorative Medicine. LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG, 2012. – 270 p.
15. Golovin V., Zhuravlev V., Arkhipov M. Position/force control of medical robot interacting with dynamic biological soft tissue // Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. – Springer, 2014. – P. 303-310.
16. Golovin V., Arkhipov M., Legotin S., Kocherevskaya L. Expansion of ergonomics function in medical robotics // New Trends in Medical and Service Robots, Proceedings of Third International Workshop on Medical and Service Robots. – Springer, 2015. – P.207-218.
17. Petrović, P., Nikola Lukić and Ivan Danliov. Generalized Backdrive and Compliant Motion Control of Multi Joint Robot Arm in Medical Physical Interaction with Humans. – Springer International Publishing, 2013.
18. Tavakoli M., Patel R.V., Moallem M., Aziminejad A. Haptics for teleoperated surgical robotic systems. Monograph series in the World scientific publishing under the title «New frontiers in robotics». – Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003. – 290 p.
19. Vukobratovic M. How to control interacting with dynamic environment // Journal of Intelligent and Robotic System. – 1997. – № 19. – P. 119-152.
20. Vukobratovic M., Surdilovic D., Ecalo Y., Katic D. Dynamics and robust control of robot – environment interaction. Monograph series in the World scientific publishing under the title «New frontiers in robotics», World Scientific Publishing Company, 2009. – 660 p.

REFERENCES

1. Golovin V.F., Samorukov A.E. Sposob massazha i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Massage method and device for its implementation]. Patent RF, No. 2145833, 1998.
2. Golovin V.F., Razumov A.N., Poduraev Yu.V. Mekhatronnyy podkhod pri proektirovanii meditsinskoj tekhniki [Mechatronic approach to the design of medical technology], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2005, No. 7.
3. Golovin V.F., Rachkov M.Yu., Arkhipov M.V., Zhuravlev V.V. Avtomaticheskij massazhnyj manipulyator [Automatic massage manipulator]. Patent RF, No. 109407, 2011.
4. Golovin V.F., Arkhipov M.V., Zhuravlev V.V. Ergaticheskie i biotekhnicheskie sistemy upravleniya v meditsinskoj robototekhnike [And ergonomics of biotechnical systems management in the medical robotics], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2011, No. 5, pp. 54-56.
5. Golovin V.F., Rachkov M.Yu., Arkhipov M.V. Zhuravlev V.V. Avtomaticheskaya massazhnaya sistema [Automatic massage system]. Patent RF, No. 116042, 2011.
6. Golovin V.F., Arkhipov M.V., Zhuravlev V.V. Robototekhnika v vosstanovitel'noy meditsine. Roboty dlya mekhanoterapii [Robotics in restorative medicine. Robots for mechanotherapy]. LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH&Co. KG, 2012, 280 p.
7. Golovin V.F., Samorukov A.E., Arkhipov M.V., Zhuravlev V.V. Obzor sostoyaniya robototekhniki v vosstanovitel'noy meditsine [An overview of the status of Robotech nicks in restorative medicine], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2011, No. 8, pp. 42-50.

8. *Gorinevskiy D.N., Formal'skiy A.M., Shneyder A.Yu.* Upravlenie manipulyatsionnymi sistemami na osnove informatsii ob usilyakh [Control of manipulation systems on the basis of information about the effort]. Moscow: Fizmatlit, 1994, 368 p.
9. *Eremushkin M.A.* Manual'nye metody issledovaniya v komplekse reabilitatsionnykh meropriyatiy pri patologii oporno-dvigatel'nogo apparata: dis. ... d-ra med. nauk [Manual research methods in the complex rehabilitation measures for pathology of the musculoskeletal system. Dr. med. Sc. diss.]. Moscow, 2006.
10. *Kuleshov V.S, Lakota N.A.* Distantionno upravlyaemye roboty i manipulyatory [Remotely controlled robots and manipulators]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 328 p.
11. *Kulakov F.M., Chernakova S.E.* Informatsionnaya tekhnologiya obucheniya robotov pokazom dvizheniy [Information technology training robots by demonstration of movements], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2008, No. 7, pp. 23-28.
12. *Medvedev V.S., Leskov A.G., Yushchenko A.S.* Sistemy upravleniya manipulyatsionnykh robotov [Control system of manipulator robots]. Moscow: Nauka, 1978, 416 p.
13. *Golovin V.F.* Robot for massage, *Proceedings of JARP 2nd Workshop on Medical Robotics Heidelberg, Germany*, 1997.
14. *Golovin V., Zhuravlev V., Arkhipov M.* Robotics in Restorative Medicine. LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG, 2012, 270 p.
15. *Golovin V., Zhuravlev V., Arkhipov M.* Position/force control of medical robot interacting with dynamic biological soft tissue, *Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*. Springer, 2014, pp. 303-310.
16. *Golovin V., Arkhipov M., Legotin S., Kocherevskaya L.* Expansion of ergonomics function in medical robotics // New Trends in Medical and Service Robots, *Proceedings of Third International Workshop on Medical and Service Robots*. Springer, 2015, pp. 207-218.
17. *Petrović, P., Nikola Lukić and Ivan Danliov.* Generalized Backdrive and Compliant Motion Control of Multi Joint Robot Arm in Medical Physical Interaction with Humans. – Springer International Publishing, 2013.
18. *Tavakoli M., Patel R.V., Moallem M., Aziminejad A.* Haptics for teleoperated surgical robotic systems. Monograph series in the World scientific publishing under the title «New frontiers in robotics». Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003, 290 p.
19. *Vukobratovic M.* How to control interacting with dynamic environment, *Journal of Intelligent and Robotic System*, 1997, No. 19, pp. 119-152.
20. *Vukobratovic M., Surdilovic D., Ecalo Y., Katic D.* Dynamics and robust control of robot – environment interaction. Monograph series in the World scientific publishing under the title «New frontiers in robotics», World Scientific Publishing Company, 2009, 660 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.Г. Капустян.

Лесков Алексей Григорьевич – Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана; e-mail: agleskov1@gmail.com; 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1; тел.: +74992636778; кафедра «СМ-7»; д.т.н.; директор.

Головин Вадим Федорович – Московский государственный машиностроительный университет; e-mail: medicalrobot@mail.ru; 107023, Москва, ул. Б. Семеновская, 38; тел.: +74952763335; к.т.н.; зав. лабораторией «Робототехника».

Архипов Максим Викторович – e-mail: medicalrobot@mail.ru; кафедра автоматике и управления в технических системах; к.т.н.; доцент.

Рачков Михаил Юрьевич – e-mail: michur@gmail.com; кафедра автоматика и управления в технических системах; д.т.н.; профессор.

Леготин Сергей Дмитриевич – e-mail: legotin.msiu@gmail.com; тел.: +74952763726; кафедра конструкторско-технологического обеспечения производства; к.т.н.; доцент.

Leskov Aleksey Grigorievich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: agleskov1@gmail.com; 5, 2nd Bauman street, Moscow, 105005, Russia; phone: +74992636778; dr. of eng. sc.; chief of department.

Golovin Vadim Fedorovich – Moscow State University of Mechanical Engineering; e-mail: medicalrobot@mail.ru; 38, B. Semenovskaya street, Moscow, 107023, Russia; phone: +74952763335; cand. of eng. sc.; chief of robotics laboratory.

Arkhipov Maksim Viktorovich – e-mail: medicalrobot@mail.ru; the department of automation and control in technical systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Rachkov Mikhail Yurievich – e-mail: michyur@gmail.com; the department of automation and control in technical systems; dr. of eng. sc.; professor.

Legotin Sergey Dmitrievich – e-mail: legotin.msiu@gmail.com; phone: +74952763726; the department of design and technology production support; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.5, 531.8

И.Л. Ермолов, М.М. Князьков, А.Н. Суханов, А.А. Крюкова
РАЗРАБОТКА АКТИВНОГО МОДУЛЯ ЭКЗОСКЕЛЕТНОГО
УСТРОЙСТВА ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА
С БИОУПРАВЛЕНИЕМ*

Проводились исследования человеко-машинного интерфейса при использовании устройств управления верхних конечностей человека. Были выявлены причинно-следственные связи между применением электромиографии для регистрации активности мышечных групп и расширением функциональных возможностей человека при управлении экзоскелетным устройством. Применение датчиков биопотенциала для управления экзоскелетным устройством приводит к упрощению интерфейса между оператором и экзоскелетом и позволяет использовать неинвазивную технологию получения данных, что позволяет учитывать физиологические особенности оператора. Неинвазивная технология получения данных о биопотенциале мышечных групп человека позволяет определить изменение сигнала управления до наступления момента полного сокращения мышцы, что имеет существенное преимущество перед управлением, основанным на силовом воздействии на управляющие элементы конструкции экзоскелета. Разработан программно-аппаратный комплекс для сопряжения аппаратуры для регистрации отведённого потенциала мышечных групп оператора с робототехнической частью разработанной системы, предложены алгоритмы выделения полезного сигнала при регистрации ЭМГ. Проведённые экспериментальные исследования помогли выявить необходимые величины значений нормированного сигнала отведённого потенциала действия для формирования управляющего воздействия на исполнительную систему экзоскелета руки. В работе была показана эффективность использования предложенных алгоритмов управления над традиционным подходом к управлению движением экзоскелетных систем в скорости формирования управляющего воздействия на исполнительные элементы экзоскелетной системы. Результаты проведённых экспериментальных исследований показывают перспективность разработанного метода управления для мехатронного привода локтевого модуля экзоскелетного устройства в условиях внешнего силомоментного воздействия. Данные, полученные в результате моделирования и экспериментальных исследований, могут быть использованы в дальнейшем при проектировании экзоскелетных систем для верхних и нижних конечностей человека.

Экзоскелет; человеко-машинная система; человеко-машинный интерфейс; электромиография; неинвазивные сенсорные системы; многосвязные мехатронные системы.

* Работа поддержана Грантом РФФИ № 14-08-00537а.