A 05.11.17
M-477

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՃԱՐՏԱՐԱԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ
(ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿ)

ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ ՍՄԲԱՏ ՏԻԳՐԱՆԻ

ԲԺՇԿԱԿԱՆ ՆՇԱՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՌՈԲՈՏԱՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՍԱՐՔԵՐԻ ՄԱՆԻՊՈՒԼՅԱՑԻՈՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ, ՕՊՏԻՄԱԼ ՍԻՆԹԵԶԻ ԵՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՇՎՈՂԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ

Ե.11.17 "Բժշկական նշանակության սարքեր, համակարգեր, արտադրատեսակներ" մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2011

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ
(ПОЛИТЕХНИК)**

МЕЛКОНЯН СМБАТ ТИГРАНОВИЧ

РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА, ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА И УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.17 - “Приборы, системы и изделия медицинского назначения”

ЕРЕВАН 2011

© National Library of Armenia OCR by Portmind

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարանի (Պոլիտեխնիկ) գիտական խորհրդի կողմից

Գիտական ղեկավար՝ ՀՀ ԳԱԱ ակադ., տ.գ.դ., պրոֆ. Յուրի Լևոնի Սարգսյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ բժ.գ.դ. Հրանտ Յուրիի Տեր-Պողոսյան

տ. գ. դ. Միհրան Գրիգորի Ստակյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ Առողջապահության նախարարության Վնասվածքաբանության և օրթոպեդիայի գիտական կենտրոն

Պաշտպանությունը կայանալու է 2011թ. նոյեմբերի 11- ին ժամը 14^{30} -ին Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարանում (Պոլիտեխնիկ) գործող ԲՈՀ-ի 034 մասնագիտական խորհրդի նիստում:
Հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՊԵՀ գրադարանում:
Սեղմագիրը առաքված է 2011թ. հոկտեմբերի 7-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,
տեխ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ Մ.Գ. Հարությունյան

Тема диссертации утверждена Ученым советом Государственного инженерного университета Армении (Политехник)

Научный руководитель: акад. НАН РА, д.т.н., проф. Юрий Левонович Саркисян

Официальные оппоненты: д.м.н. Грант Юрьевич Тер-Погосян
д.т.н. Мигран Григорьевич Стакян

Ведущая организация: Научный центр травматалогии и ортопедии Министерства здравохранения РА

Защита состоится 11-го ноября 2011г. в 14^{30} ч. на заседании специализированного совета 034 ВАК при Государственном инженерном университете Армении (Политехник) по адресу: 0009, Ереван, ул. Теряна, 105.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГИУА.
Автореферат разослан 7-го октября 2011г.

Ученый секретарь специализированного совета
канд. техн. наук, доцент М.Г. Арутюнян

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԳՐԱԴԱՐԱՆ
5624-2011

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Робототехнические устройства широко используются в различных областях медицины: для замены отсутствующих конечностей человека, или восстановления их двигательных функций, для проведения тонких операций, нейровосстановительной терапии и решения других задач в расширяющейся сфере медицинских приложений.

Согласно известной формулировке Американского робототехнического института, робот – перепрограммируемый, многофункциональный манипулятор, предусмотренный для передвижения материалов, частей, инструментов или специализированных устройств с помощью различных запрограммированных движений, необходимых для осуществления многообразных рабочих задач. Данное определение предполагает, что медицинская робототехника охватывает разнообразные устройства хирургии, реабилитационной терапии, ортезной и протезной техники, устройства, помогающие больным с нарушениями опорно-двигательного аппарата, которые обладают робототехническими характеристиками программирования и управления приводами. В отличие от промышленных роботов, которые призваны автоматизировать утомительные, опасные и нечистые рабочие операции, медицинские роботы предназначены для непосредственного взаимодействия с человеком-пользователем с вытекающими отсюда особыми требованиями к точности, безопасности и надежности. Анализ современных тенденций развития медицинской робототехники показывает, что возможности применения промышленных роботов в медицинских целях ограничены, и для медицинских приложений сегодня предпочтительнее разрабатывать новые специализированные робототехнические устройства с функциональными и оперативными характеристиками, соответствующими специфическим требованиям заданий проектирования. Для создания новых образцов специализированных медицинских роботов особое значение имеет разработка оптимальных технических решений их манипуляционных механизмов и приводов с обеспечением минимальных размеров и веса устройств, высокого уровня отношения "вес-мощность", простоты конструкции и управления, безопасности и совместимости с окружающей средой. Новые технологические задачи, в свою очередь, требуют усовершенствования существующих методов и вычислительных алгоритмов моделирования и проектирования манипуляторов и приведения их в соответствие с современными требованиями, предъявляемыми к медицинским роботам, чем и обусловлена актуальность данного исследования.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является усовершенствование вычислительных методов и алгоритмов моделирования, оптимального синтеза и управления манипуляционных механизмов в соответствии с особенностями их медицинских приложений.

В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие основные задачи исследования:

- анализ функциональных и структурных требований, предъявляемых к медицинским роботам, и уточнение объектов исследования;

© National Library of Armenia

- разработка методологии проблемно ориентированного структурно-параметрического синтеза манипуляционных механизмов медицинских устройств,
- кинематическое моделирование последовательных и параллельных манипуляционных механизмов, лежащих в основе медицинских устройств;
- формирование динамических моделей манипуляторов с электромеханическими приводами, рассмотрение прямой, обратной и смешанной задач динамики;
- развитие вычислительных методов и алгоритмов оптимального синтеза и управления электромеханических манипуляторов;
- применение разработанных методов и вычислительных алгоритмов при решении задач численного моделирования, оптимального проектирования и управления реабилитационных систем и других робототехнических устройств медицинского назначения.

Методы исследования. В процессе исследований использованы методы теоретической и аналитической механики, теории механизмов, биомеханики, матричного исчисления, вычислительной математики и математической теории оптимальных процессов, а также численные методы компьютерного моделирования в программной среде MathCad.

Научная новизна работы. Научная новизна работы выражена в следующих результатах исследования:

1. Разработка методологии проблемно ориентированного структурно-параметрического синтеза манипуляторов медицинского назначения.
2. Использование уравнений Лагранжа-Максвелла для динамического моделирования электромеханических манипуляторов и реабилитационных устройств с последовательной структурой.
3. Формирование динамических моделей электромеханических манипуляторов с параллельной структурой с возможностью совместного рассмотрения механических и электрических параметров системы.
4. Разработка теоретических положений и вычислительных методов анализа, оптимального динамического синтеза и управления манипуляционных механизмов робототехнических устройств медицинского назначения.

Практическая ценность работы. Разработанные методы и алгоритмические-программные средства были применены в конкретных задачах исследования и проектирования медицинских манипуляторов и реабилитационных систем. Успешно испытаны их практические возможности и эффективность, показаны области и перспективы дальнейшего применения.

С приложением предложенной методологии структурного синтеза была разработана кинематическая схема нового робототехнического устройства непрямого массажа сердца, в основе которой лежит реконфигурируемый манипулятор типа 3 (ВВЦ) с тремя степенями свободы и переменной структурой. Благодаря своей особой геометрии манипулятор обеспечивает управляемое поступательное движение сжимающей платформы с возможностью развязки и автономного управления рабочими и двумя корректирующими прямолинейными

движениями. Техническая новизна устройства подтверждена выдачей авторского свидетельства РА на изобретение.

Разработаны упрощенные алгоритмы кинематического анализа указанного манипулятора и четырехподвижных манипуляционных механизмов реабилитационных устройств конечностей человека, которые позволяют получить в явной форме решения прямой и обратной задач кинематики и таким образом максимально упростить задачи управления движениями и определение рабочего пространства. На основе предложенных динамических моделей проведен динамический анализ электромеханических систем данных устройств с определением закономерностей изменения обобщенных координат и электрических мощностей в приводах.

Предложенные численные методы оптимального динамического синтеза и управления манипуляторов применялись в задачах восстановления двигательных функций нижних конечностей человека и улучшения энергетических характеристик экзоскелетонов с двумя и четырьмя степенями свободы. В случае двухподвижных экзоскелетонов при помощи оптимального динамического синтеза были определены механические и позиционные параметры уравновешивающих пружин с сокращением (почти в два раза) энергозатрат. Для четырехподвижных экзоскелетонов по критерию минимальных энергозатрат определены функции оптимального управления обобщенных координат и осуществлен соответствующий выбор электродвигателей.

Результаты диссертации могут быть использованы в учебнометодическом процессе ГИУА (П) с целью развития и модернизации специальных курсов по робототехническим системам и приборам медицинского назначения, исследовательской базы магистерской и аспирантской программ.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Методологические принципы и процедуры проблемно ориентированного структурного параметрического синтеза медицинских манипуляторов.
2. Методы формирования и исследования динамических моделей электромеханических манипуляторов с последовательной и параллельной структурами на основе уравнений Лагранжа-Максвелла.
3. Теоретические основы и вычислительные алгоритмы оптимального динамического синтеза и управления мехатронных систем робототехнических устройств с электроприводами.
4. Результаты применения разработанных методов и алгоритмов в задачах исследования и проектирования робототехнических устройств медицинского назначения и реабилитационных систем.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на ежегодных научных конференциях ГИУА (П) (Ереван, Армения, 2008-2010 гг.) и 18-й Международной научно-технической конференции "Машиностроение и техносфера 21 века" (Севастополь, Украина, 2011 г.)

© National Library of Armenia

Публикации. Результаты исследования опубликованы в восьми научных трудах, один из которых - патент РА. Список трудов представлен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 129 наименований. Общий объем диссертации составляет 117 страниц, включая 29 рисунков, 4 таблицы. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность данной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, практическая ценность работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ литературы, посвященной областям применения, принципам классификации, структурным разновидностям и особенностям проектирования медицинских роботов. В развитие медицинской робототехники и формировании ее научных основ большой вклад внесли исследования Пьеро, Тейлора, Троказа и др. С точки зрения задач, рассматриваемых в диссертации, наибольший интерес представляет классификация медицинских роботов по структурному признаку, т.е. по структуре лежащих в их основе манипуляционных механизмов. Манипуляционные механизмы, используемые как в роботах общего назначения, так и в медицинских роботах, относятся к трем структурным разновидностям: последовательного соединения (антропоморфные), параллельного соединения (платформенные) и смешанной структуры (гибридные).

Рассмотрены современные методы и задачи кинематического моделирования и синтеза манипуляционных механизмов медицинского назначения. Подчеркнуто отсутствие методологии проблемно ориентированного структурного синтеза медицинских роботов и показана необходимость ее разработки. Изучены также современные методы и задачи динамического моделирования, оптимального динамического синтеза и управления устройств медицинского назначения. Показана необходимость решения задачи оптимального управления медицинских устройств и обосновано применение уравнений Лагранжа-Максвелла для решения данной задачи.

Во второй главе рассмотрены вопросы, посвященные структурному синтезу и кинематическому анализу манипуляционных механизмов устройств медицинского назначения.

Разработана методология проблемно ориентированного структурно-параметрического синтеза манипуляторов медицинского назначения, которая представлена на рис.1 в виде блок-схемы.

Указаны основные условия, которым должны соответствовать искомые схемы. Из них наиболее важные: минимальное число степеней свободы, возможность аналитического решения уравнений кинематических связей, простота управления, возможность развязки управляемых движений и т.д.

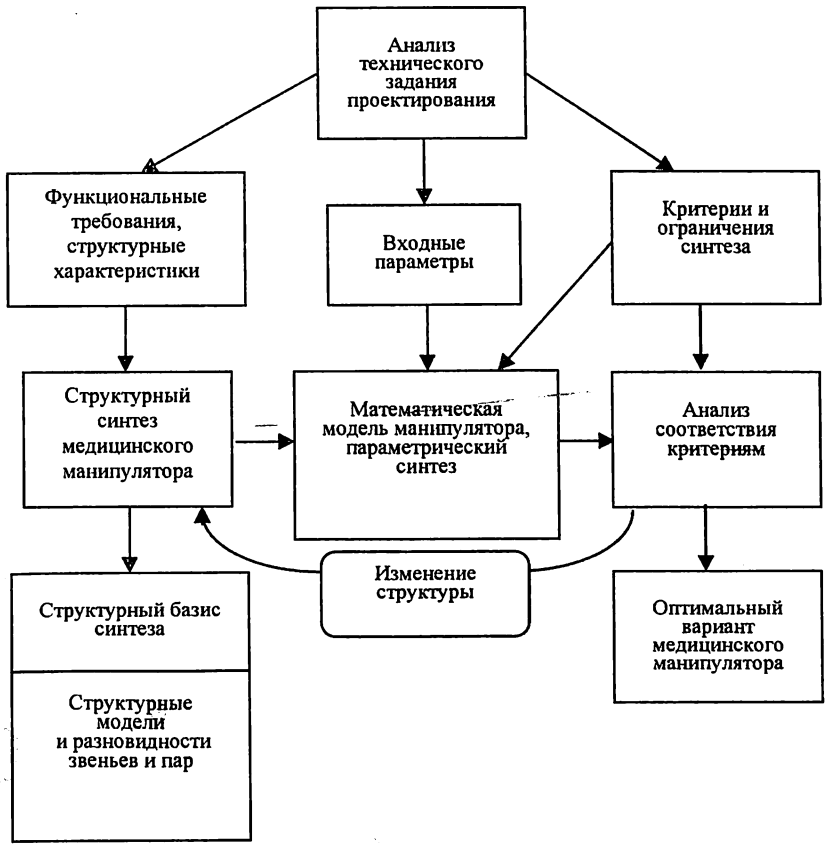


Рис.1. Обобщенная схема синтеза медицинских манипуляторов

Согласно указанной методологии, проведен структурный синтез механизмов последовательной структуры реабилитационного устройства конечностей человека (рис.2), для которых разработаны методы кинематического анализа.

Для рассматриваемых схем (рис.2) сформулированы и решены прямые и обратные задачи кинематики. В случае прямой задачи, при известных обобщённых координатах, скоростях и ускорениях системы, определены положения, скорости и ускорения выходного звена 7 или платформы **e** и их характерных точек. В случае обратной задачи, при известных положениях звена 7 или платформы **e**, определены обобщенные координаты системы таким образом, чтобы они обеспечивали заданные положения.

© National Library of Armenia

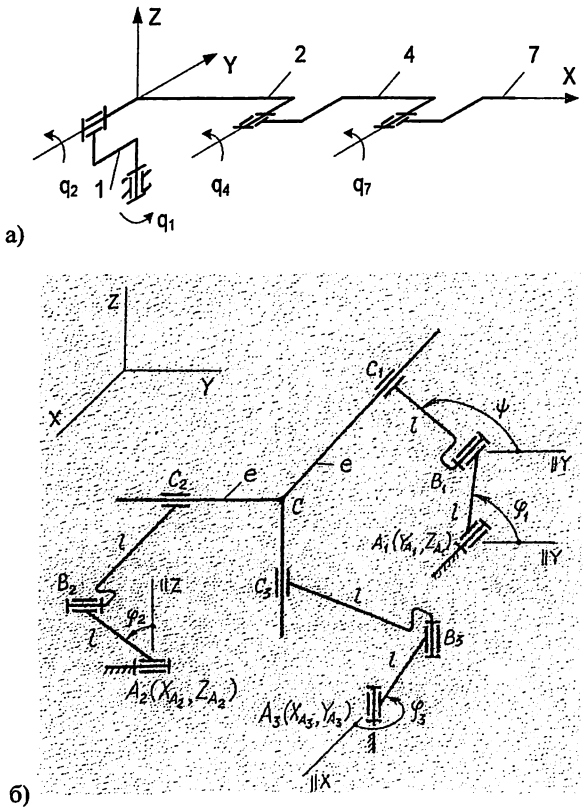


Рис.2. Схема экзоскелетона нижней конечности человека (а) и структурная схема манипулятора типа 3 (ВВЦ) (б)

Используя метод Денавита-Хартенберга описания кинематических связей и их геометрических интерпретаций, разработаны методы аналитического решения рассматриваемых задач, которые были успешно испытаны в численных примерах, приведенных в данной работе.

В третьей главе разработаны методы динамического моделирования и исследования электромеханических манипуляторов медицинских устройств.

На основе принципов Лагранжа-Максвелла и Ньютона-Эйлера выведены дифференциальные уравнения, описывающие поведение электромеханических манипуляторов с последовательной и параллельной структурами.

Показано, что для механизмов последовательной структуры вышеуказанные уравнения приводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=j}^{n} a_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k - u_i\frac{dL_{12i}}{dq_i}I_{1i}I_{2i} = Q_i\,,$$

$$L_{1i}\frac{dI_{1i}}{dt} + u_i\frac{dL_{12i}}{dq_i}I_{2i}\dot{q}_i = U_i - I_i\overline{R}_i\,,\ i = 1,2,\ldots,n, \qquad (1)$$

а для механизмов параллельной структуры - к смешанной системе дифференциальных и алгебраических уравнений:

$$\sum_{i=1}^{m} a_{ki}(p,q)\ddot{q}_i + \sum_{i=1}^{n} b_{ki}(p,q)I_i + \sum_{j=1}^{s} c_{ki}(p,q)R_i + \sum_{i=1}^{n} d_{ki}(p,q)Q_i = e_k(t,p,q,\dot{q}),\ k=1,2,\ldots,m$$

$$\sum_{i=1}^{n} f_{ij}(p,q)\dot{I}_j + g_i(p,q,\dot{q},I) = U_i - I_i\overline{R}_i\,,\ i=1,2,\ldots,n,$$

$$F_j(p,q) = 0\,, \qquad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial F_j}{\partial q_i}\dot{q}_i = 0\,,$$

$$\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial F_j}{\partial q_i}\ddot{q}_i + \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\frac{\partial^2 F_j}{\partial q_i \partial q_k}\dot{q}_i\dot{q}_k = 0\,,\ j=1,2,\ldots s\,.$$

На основе полученных уравнений (1) и (2) применительно к рассматриваемым манипуляторам как к электромеханическим системам впервые разработаны универсальные численные методы для решения прямой, обратной и смешанной задач динамики, которые играют существенную роль в задачах их оптимального проектирования и управления.

В случае прямой задачи динамики предполагается, что даны вектор $p = (p_1, p_2, \ldots, p_\mu)$ постоянных параметров, законы изменения обобщенных координат, скоростей и ускорений механической и электрической частей электромеханической системы:

$$q_i = q_i(t)\,,\ \dot{q}_i = \dot{q}_i(t)\,,\ \ddot{q}_i = \ddot{q}_i(t)$$
$$I_i = I_i(t)\,,\ \dot{I}_i = \dot{I}_i(t)\,,\ i = 1,2,\ldots,n\,. \qquad (3)$$

Требуется вычислить законы изменения обобщенных сил, приведенных к обобщенным координатам $Q_i = Q_i(t)$ $(i = 1,2,\ldots,n)$ механической части, и напряжений $U_i = U_i(t)$ $(i = 1,2,\ldots,n)$ в электрических цепях в зависимости от времени таким образом, чтобы они удовлетворяли указанным законам изменения обобщенных координат системы (3).

В случае обратной задачи динамики предполагается, что известны вектор $p = (p_1, p_2, \ldots, p_\mu)$ постоянных параметров, законы изменения обобщенных сил $Q_i = Q_i(t)$ $(i = 1,2,\ldots,n)$ и напряжений $U_i = U_i(t)$ $(i = 1,2,\ldots,n)$ электромеханической системы в зависимости от времени.

© National Library of Armenia

Предполагается, что также известны начальное состояние электромеханической системы, т.е. обобщенные координаты, и начальные величины скоростей в момент $t = t_0$:

$$q_i^0 = q_i(t_0),\ \dot{q}_i^0 = \dot{q}_i(t_0),\ I_i^0 = I_i(t_0),\ i = 1,2,...,n.$$

Требуется определить законы изменения $q_i = q_i(t)$, $\dot{q}_i = \dot{q}_i(t)$, $I_i = I_i(t)$ обобщенных координат и скоростей.

Наиболее важная задача из множества смешанных задач динамики электромеханических манипуляторов, которая имеет существенное значение для оптимального проектирования и управления данных систем, формулируется следующим образом. Даны вектор $p = (p_1, p_2, ..., p_\mu)$ постоянных параметров электромеханической системы, законы изменения обобщенных координат, скоростей и ускорений механической части:

$$q_i = q_i(t),\quad \dot{q}_i = \dot{q}_i(t),\quad \ddot{q}_i = \ddot{q}_i(t),\qquad i = 1,2,...,n, \tag{4}$$

а также законы изменения сил $Q_i = Q_i(t)$ $(i = 1,2,...,n)$, приведенных к механическим обобщенным координатам q_i $(i = 1,2,...,n)$.

Требуется определить законы изменения напряжений $U_i = U_i(t)$ $(i = 1,2,...,n)$ в электрических цепях в зависимости от времени таким образом, чтобы они удовлетворяли указанным законам (4) изменения обобщенных координат системы.

Для решения рассматриваемых задач разработаны вычислительные алгоритмы и программы, эффективность которых подтверждена и испытана примерами численного динамического анализа мехатронных систем манипуляционных устройств медицинского назначения.

В качестве прикладных примеров рассмотрены задачи динамического анализа экзоскелетонной системы, полученной соединением конечности человека и реабилитационного устройства (рис.2а), а также манипуляционного механизма непрямого массажа сердца параллельной структуры (рис.2б). Определены законы изменения напряжений электроприводов данных систем, которые обеспечивают заданные функции изменения обобщенных координат для реабилитационного устройства:

$$q_1(t) = \frac{\pi}{9} sin\left(\pi \frac{t}{\tau}\right),\ q_2 = \frac{\pi}{2} sin\left(\pi \frac{t}{\tau}\right) - \frac{\pi}{6},$$

$$q_4 = \frac{\pi}{3}\left(1 - \frac{1}{2} sin\left(\pi \frac{t}{\tau}\right)\right),\ q_7 = \frac{\pi}{3}\left(1 + \frac{1}{3} sin\left(\pi \frac{t}{\tau}\right)\right),$$

и для манипуляционного устройства непрямого массажа:

$$\varphi(t) = arccos\left(\frac{z(t)}{2l}\right),\qquad z(t) = 2l\cos\varphi_0 + a\frac{t}{\tau}$$

Графики изменения искомых параметров, полученные в результате численного моделирования, изображены на рис. 3 и 4.

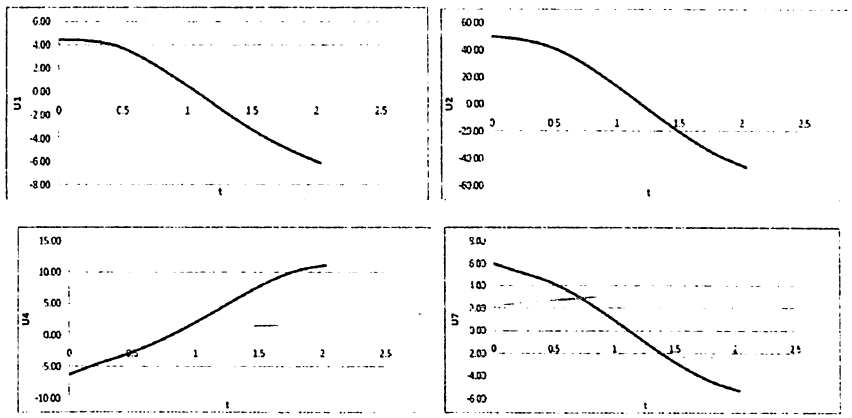


Рис. 3. Электрическое напряжение приводов реабилитационного устройства нижней конечности

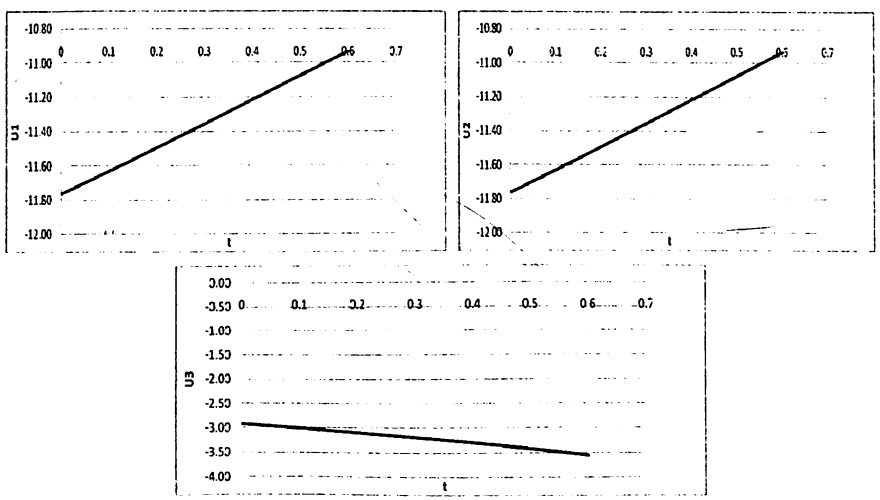


Рис. 4. Электрическое напряжение приводов устройства непрямого массажа сердца

© National Library of Armenia

В четвертой главе сформулированы и решены задачи оптимального динамического синтеза и управления электромеханических манипуляторов.

В случае оптимального динамического синтеза предполагается, что дан функционал,

$$\Psi_0 = \int_{t_0}^{t_v} f_0(t, q(t), \dot{q}(t), I(t), R(t), P)dt \qquad (5)$$

оценивающий работу устройства, который количественно оценивает разницу реальных и требуемых показателей.

Требуется вычислить величины $P^* = (P_1^*, P_2^*, ..., P_\mu^*)$ постоянных параметров и законы изменения соответствующих обобщенных и "лишних" координат, скоростей, $q^*(t), \dot{q}^*(t), I^*(t)$ и сил реакции $R^*(t)$, которые удовлетворяют уравнениям (1), (2) и минимизируют функционал качества (5).

Искомые постоянные и переменные параметры P, $q(t)$, $\dot{q}(t)$ и $I(t)$ в общем случае не могут принимать произвольные значения. Поэтому интервалы их изменений ограничиваются неравенствами

$$\Psi_l(t, q(t), \dot{q}(t), I(t), R(t), P) \le 0\ ,\ t \in [t_0, t_v],\ l = 1,2,...,m,$$

которые необходимо учитывать при решении вышеизложенной задачи динамического синтеза манипуляторов.

В случае задачи оптимального управления предполагается, что дан критерий

$$\Psi_0(q, \dot{q}, I, U) = \int_0^{\tau} f_0(q, \dot{q}, I, U)dt, \qquad (6)$$

оценивающий качество работы устройства, его начальное:

$$C_0 = (q_1(0), ..., q_n(0), \dot{q}_1(0), ..., \dot{q}_n(0)) \qquad (7)$$

и конечное состояния:

$$C_{t_v} = (q_1(\tau), ..., q_n(\tau), \dot{q}_1(\tau), ..., \dot{q}_n(\tau)) \qquad (8)$$

в моменты времени $t = 0$, $t = \tau$, где функция $f_0(q, \dot{q}, I, U)$ определяется условиями задачи.

Необходимо вычислить функции управления $U(t) = (U_1(t), U_2(t), ..., U_n(t))$ и соответствующие им фазовые координаты $q(t) = (q_1(t), q_2(t), ..., q_n(t))$, $\dot{q}(t) = (\dot{q}_1(t), \dot{q}_2(t), ..., \dot{q}_n(t))$ таким образом, чтобы они удовлетворяли уравнениям движений (1), (2) и, переводя систему из начального состояния (7) в состояние (8), минимизировали критерий качества (6) при следующих ограничениях:

$$f_{1i}(t) \le q_i(t) \le f_{2i}(t),\ f_{3i}(t) \le \dot{q}_i(t) \le f_{4i}(t),\ f_{5i}(t) \le I_i(t) \le f_{6i}(t),$$

$$f_{7i}(t) \le U_i(t) \le f_{8i}(t),\ \ t \in [0;\tau],\ i = 1,2,...,n,$$

где $f_{1i}(t), f_{2i}(t), ..., f_{8i}(t)$ - известные функции.

Для решения сформулированных задач оптимального динамического синтеза и управления разработаны упрощенные численные итерационные методы,

позволяющие переходить от начальных значений искомых параметров к значениям, при которых функционал качества принимает меньшее значение. В результате получаем убывающую последовательность значений искомых параметров, которая стремится к решению задачи.

С помощью разработанных алгоритмов решены прикладные примеры оптимального динамического синтеза и управления.

В качестве примера динамического синтеза рассмотрено реабилитационное устройство нижней конечности человека (рис.5).

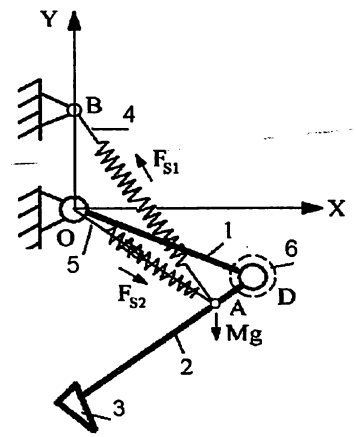


Рис.5. Структурная схема экзоскелетона нижней конечности

В данном случае требуется вычислить координаты точек крепления пружин, их жесткости и величины начального натяга, при которых во время реабилитационных движений мгновенные электрические мощности приобретают минимальные значения. Результаты, полученные последством численного моделирования, приведены на рис.6.

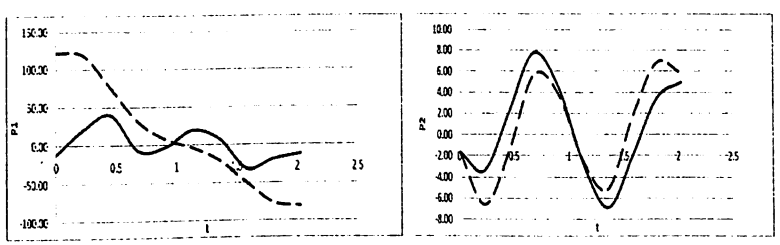


Рис 6. Графики мощностей приводов экзоскелетона нижней конечности до оптимизации (пунктирная линия) и после нее (непрерывная линия)

© National Library of Armenia

Непрерывными линиями представлены графики изменения электрических мгновенных мощностей приводов 1 и 2 после оптимизации, а пунктирными - до оптимизации.

В качестве прикладного примера оптимального управления рассмотрена схема управления механизма манипулятора реабилитационного устройства (рис.2а) нижней конечности человека с четырьмя степенями свободы.

В данном случае в качестве критерия качества оптимального управления взята сумма квадратов мгновенных электрических мощностей в четырех электроприводах:

$$\Psi_0 = \sum_{r=0}^{N}\left(\left(U_1^r I_1^r\right)^2 + \left(U_2^r I_2^r\right)^2 + \left(U_4^r I_4^r\right)^2 + \left(U_7^r I_7^r\right)^2\right), \qquad (9)$$

минимизация которых приводит к минимизации энергии, затрачиваемой на реабилитационный процесс.

Предположим, в моменты времени $t = 0$ и $t = \tau$ даны начальное:

$$q_{10} = 0,\ \dot{q}_{10} = \frac{\pi^2}{9\tau},\ q_{20} = -\frac{\pi}{6},\ \dot{q}_{20} = \frac{\pi^2}{2\tau},\ q_{40} = \frac{\pi}{3},\ \dot{q}_{40} = -\frac{\pi^2}{6\tau},\ q_{70} = \frac{\pi}{3},\ \dot{q}_{70} = \frac{\pi^2}{9\tau} \qquad (10)$$

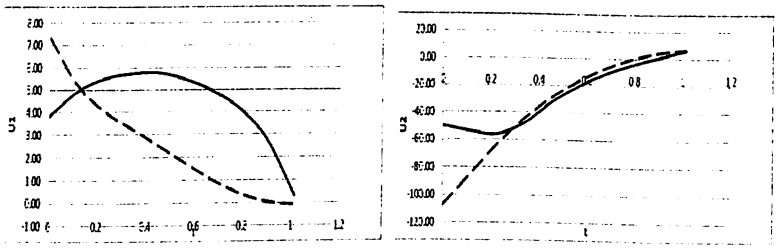
и конечное:

$$q_{1\tau} = \frac{\pi}{9},\ \dot{q}_{1\tau} = 0,\ q_{2\tau} = \frac{\pi}{3},\ \dot{q}_{2\tau} = 0,\ q_{4\tau} = \frac{\pi}{6},\ \dot{q}_{4\tau} = 0,\ \dot{q}_{7\tau} = 0,\ q_{7\tau} = \frac{4\pi}{9} \qquad (11)$$

состояния механических частей устройства.

Требуется определить функции управления $U_1(t), U_2(t), U_3(t)$ и $U_4(t)$ таким образом, чтобы при переводе системы из начального состояния (10) в конечное (11) минимизировали критерий качества (9).

Результаты, полученные в результате численного моделирования, представлены на рис.7.



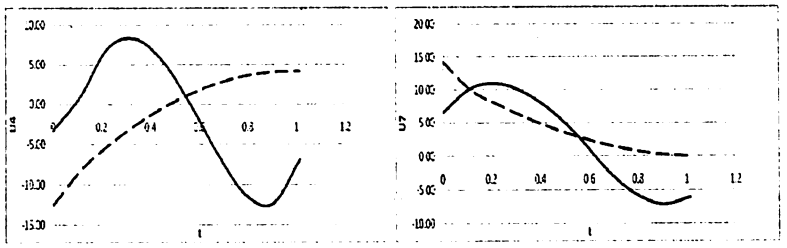


Рис.7. График электрических напряжений приводов экзоскелетона нижней конечности до оптимизации (пунктирная линия) и после оптимизации (непрерывная линия)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Изучение современных тенденций развития и опыта приложений медицинской робототехники показывает необходимость разработки принципиально новых, специализированных медицинских роботов с удовлетворением комплексных требований совместимости с окружающей средой, безопасности, точности действий и надежности. Создание нового поколения медицинских роботов и реабилитационных устройств, в свою очередь, требует развития существующих методов и вычислительных алгоритмов проектирования и управления манипуляционных механизмов этих устройств. и приведения их в соответствие со специфичными требованиями медицинских приложений.

2. На основе анализа методологических принципов, структурных и функциональных требований проектирования медицинских роботов разработана методология проблемно-ориентированного структурно-параметрического синтеза манипуляционных механизмов, согласно которой вычислительный процесс "задание - оптимальное техническое решение" осуществляется с помощью последовательности двух итерационных циклов формирования структуры и определения параметров. В рамках этой методологии предложены общий алгоритм и базовые принципы структурного синтеза медицинских манипуляторов согласно требованиям задания проектирования.

3. Предлагаемая методология в упрощенном виде применяется при концептуальном проектировании манипуляционного устройства для непрямого массажа сердца. На основе анализа движений искусственного дыхания двумя руками во время неожиданной остановки сердца сформулированы исходные требования структурного синтеза параллельных манипуляторов, имитирующих эти движения. В результате сравнения и развития возможных структурных вариантов создан новый трехподвижный, реконфигурируемый манипулятор типа 3(ВВЦ), обеспечивающий управляемое поступательное движение сжимающей опорной платформы с

© National Library of Armenia

возможностью развязки и автономного управления трех прямолинейных составляющих поступательного движения. Разработаны простые алгоритмы управления движениями для определения рабочего пространства и сингулярных положений предлагаемого манипулятора.

4. Представлен общий метод кинематического моделирования манипуляционных механизмов реабилитационных устройств (экзоскелетонов) конечностей человека с последовательной структурой, применение которого привело к аналитическим решениям прямой и обратной задач кинематики.

5. Для динамического моделирования электромеханических манипуляторов с последовательной структурой использованы уравнения Лагранжа-Максвелла, позволяющие одновременно вводить в уравнения движения манипулятора параметры механической и электрической составляющих системы.

6. Для описания динамики электромеханических манипуляторов с параллельной структурой предлагается комбинировать применение принципов Ньютона-Эйлера и Лагранжа-Максвелла и моделировать рассматриваемую динамическую систему посредством смешанной системы дифференциальных и алгебраических уравнений.

7. На основе полученных моделей разработаны универсальные численные методы и вычислительные алгоритмы решения прямой, обратной и смешанной задач динамики электромеханических систем манипуляторов с электроприводами, которые сопровождаются конкретными численными примерами динамического исследования экзоскелетонов и медицинских манипуляторов.

8. На основе динамической модели Лагранжа-Максвелла в минимаксной постановке, сформулирована задача оптимального динамического синтеза электромеханических манипуляторов для случаев одного и многих законов движения системы. Предлагаемый вычислительный метод осуществляется посредством дискретизации задачи и построения убывающей последовательности задач нелинейного программирования.

9. В дискретном виде рассмотрена также задача оптимального управления электромеханических манипуляторов с использованием моделирующих уравнений Лагранжа-Максвелла. Разработан универсальный итерационный метод решения задачи, отправной точкой которого является условие равенства чисел обобщенных координат и обобщенных сил электромеханической системы. Данный метод осуществляется посредством

построения убывающей последовательности опорных траекторий в фазовом пространстве. В целях уменьшения числа искомых параметров (размерности задачи) предлагается отыскать численное решение задачи в виде степенного многочлена, удовлетворяющего граничным условиям.

10. Функциональные возможности и эффективность предлагаемых методов моделирования, оптимального динамического синтеза и управления и их вычислительных алгоритмов апробированы рядом конкретных численных примеров медицинских приложений. Анализ численных результатов показывает значительные перспективы применения разработанных методов и вычислительных алгоритмов в задачах усовершенствования и создания новых образцов медицинских манипуляторов и реабилитационных устройств.

© National Library of Armenia

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих статьях:

1. Արզումանյան Կ.Ս., Մելքոնյան Ս.Տ. Զուգահեռ մեխանիզմների կիրառությունը բժշկության մեջ // ՀՊՃՀ (Պ) Լրաբեր: Գիտական և մեթոդական հոդվածների ժողովածու.-Երևան, 2009.- Հ.1,№1.-էջ 108-113:

2. Ստեփանյան Կ.Գ., Արզումանյան Կ.Ս., Մելքոնյան Ս.Տ. Բժշկական նշանակության սարքերի էլեկտրամեխանիկական համակարգերի դինամիկական վերլուծությունը // ՀՊՃՀ (Պ) Լրաբեր.-Երևան, 2010.- Հ.2 №1.- էջ 74-78:

3. Мелконян С.Т., Степанян К.Г., Арзуманян К.С., Саркисян Ю.Л. Оптимальное управление манипуляторами с учетом характеристик электроприводов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2010. – Том LXIII, N 2. – С. 111 – 122.

4. Գյուտի արտոնագիր №2424A (ՀՀ). Կառավարվող համընթաց շարժում իրագործող մանիպուլյատոր / Սարգսյան Յու.Լ., Խառատյան Ա.Գ., Մելքոնյան Ս.Տ. -Օգոստոս, 2010.- 8 էջ:

5. Мелконян С.Т., Саргсян С.А., Арутюнян М.Г. Степанян К.Г., Саркисян Ю.Л. Динамический анализ и оптимальное управление биомехатронных систем реабилитационных устройств конечностей человека // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2011. – Том LXIV, N 1. – С. 3 – 14.

6. Մելքոնյան Ս.Տ. Սրտի անուղղակի մերսման մանիպուլյատորի կառուցվածքային սինթեզ և կինեմատիկական մոդելավորում // ՀՊՃՀ (Պ) Լրաբեր. Երևան, 2011.- հատոր 3, №2.- էջ 78-83:

7. Мелконян С.Т., Саргсян С.А., Арутюнян М.Г. Степанян К.Г., Саркисян Ю.Л. Оптимальное динамическое проектирование реабилитационных устройств конечностей человека // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2011. – Том LXIV, N 3. – С. 235 – 242.

8. Саркисян Ю.Л., Степанян К.Г., Мелконян С.Т. Методология проблемно-ориентированного синтеза реконфигурируемых параллельных манипуляторов с примером медицинского приложения // 18-я Международная научно-техническая конференция "Машиностроение и техносфера 21 века", Севастополь 12-17 сентября 2011г.-Том 3. - С. 78-81.

Մելքոնյան Սմբատ Տիգրանի

ԲԺՇԿԱԿԱՆ ՆՇԱՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՌՈԲՈՏԱՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՍԱՐՔԵՐԻ ՄԱՆԻՊՈՒԼՅԱՑԻՈՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ, ՕՊՏԻՄԱԼ ՍԻՆԹԵԶԻ ԵՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՇՎՈՂԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ատենախոսական աշխատանքի նպատակն է զարգացնել մանիպուլյացիոն մեխանիզմների մոդելավորման, օպտիմալ սինթեզի և կառավարման հաշվողական մեթոդները և ալգորիթմական ապարատը՝ բժշկական կիրառությունների առանձնահատկություններին համապատասխան:

Առաջին գլխում կատարվել է բժշկական ռոբոտների դասակարգման սկզբունքներին, նախագծման ֆունկցիոնալ և կառուցվածքային պահանջներին և մեթոդաբանական առանձնահատկություններին նվիրված աշխատանքների քննական վերլուծություն, որի արդյունքում ճշգրտվել են հետազոտության խնդիրները և ուսումնասիրության օբյեկտները: Հիմնավորվել է, մասնավորապես, բժշկական ռոբոտների նախագծային առաջադրանքով ուղղորդված կառուցվածքային սինթեզի մեթոդաբանության, վերականգնողական նշանակության ռոբոտատեխնիկական սարքերի քոմփյութերային մոդելավորման և օպտիմալ նախագծման հաշվողական ապարատի զարգացման անհրաժեշտությունը:

Բժշկական նշանակության մանիպուլյատորների դինամիկական մոդելավորման, օպտիմալ սինթեզի և կառավարման հայտնի մեթոդների համադրական վերլուծության հիման վրա առանձնացվել են այն հետազոտական հիմնահարցերը, որոնք հետագա զարգացման և նոր մոտեցումների մշակման կարիք ունեն: Ընդհանուր առմամբ, գրականության վերլուծությունը հնարավորություն է տվել գնահատել բժշկական ռոբոտոտեխնիկայի զարգացման գիտական և գործնական հեռանկարները, բացահայտել հետազոտությունների պահանջարկված նոր ուղղություններ, այս համատեքստում հիմնավորել ատենախոսական աշխատանքի արդիականությունը և ցույց տալ առաջարկված խնդիրների լուծման ուղիներ:

Երկրորդ գլխում դիտարկվել են բժշկական նշանակության սարքերի մանիպուլյացիոն մեխանիզմների կառուցվածքային սինթեզին և կինեմատիկական վերլուծությանը նվիրված հարցեր:

Առաջարկված է բժշկական նշանակության մանիպուլյացիոն մեխանիզմների կառուցվածքային-պարամետրական սինթեզի ընդհանրացված բլոկ-սխեմա: Առաջարկվող մեթոդաբանության շրջանակներում ներկայացված են բժշկական մանիպուլյատորների կառուցվածքային սինթեզի (կառուցվածքային սխեմայի որոշման) ընդհանուր ալգորիթմ և որոնելի սխեմաներին ներկայացվող ընդհանուր պահանջներ: Մշակված են հաջորդական և զուգահեռ կառուցվածքով մանիպուլյացիոն մեխանիզմների կինեմատիկական վերլուծության պարզեցված հաշվողական ալգորիթմներ, որոնք թույլ են տալիս բացահայտ տեսքով ստանալ դիրքերի ուղիղ և

© National Library of Armenia

հակադարձ խնդիրների լուծումները: Թվային օրինակները ցույց են տալիս մշակված ալգորիթմների արդյունավետությունը: Զուգահեռ համընթաց մանիպուլյացիոն մեխանիզմների հայտնի սխեմաների համադրական ուսումնասիրության և զարգացման արդյունքում առաջարկվել է սրտի անուղղակի մերսման գործողության ավտոմատացման համար կիրառել 3 (ՊՊԳ) տիպի եռաշարժուն նոր մանիպուլյացիոն մեխանիզմ: Առաջարկությունը հաստատագրված է գյուտի հեղինակային իրավունքի ՀՀ արտոնագրով:

Երրորդ գլխում կատարված է էլեկտրամեխանիկական մանիպուլյատորների դինամիկական վերլուծություն Լագրանժ-Մաքսվելի հավասարումների հիման վրա՝ բժշկական սարքերի հետազոտման թվային օրինակներով:

Հաջորդական կառուցվածքով էլեկտրամեխանիկական մանիպուլյատորների դինամիկական մոդելավորման համար օգտագործվել են Լագրանժ-Մաքսվելի հավասարումները, որոնք թույլ են տալիս մանիպուլյատորի շարժման հավասարումներում միաժամանակ ներառել համակարգի մեխանիկական և էլեկտրական բաղադրամասերի պարամետրերը և դիտարկել դրանք ամբողջության մեջ:

Մշակվել են էլեկտրաշարժաբերներով մանիպուլյատորների էլեկտրամեխանիկական համակարգերի դինամիկայի ուղիղ, հակադարձ և խառը խնդիրների լուծման թվային համապիտանի մեթոդներ և հաշվողական ալգորիթմեր:

Կատարված է մարդու ստորին վերջույթի հաջորդական կառուցվածքով վերականգնողական սարքի (էկզոսկելետոնի) բիոմեխատրոնային համակարգի և սրտի անուղղակի մերսման զուգահեռ մանիպուլյատորի դինամիկական վերլուծություն՝ ընդհանրացված կոորդինատների և շարժաբերներում էլեկտրական հզորությունների փոփոխման օրինաչափությունների որոշման թվային օրինակներով:

Չորրորդ գլխում դիտարկված են էլեկտրամեխանիկական մանիպուլյատորի օպտիմալ սինթեզը և կառավարումը, ներկայացված են բժշկական սարքերում կիրառության օրինակներ:

Լագրանժ-Մաքսվելի դինամիկական մոդելի հիման վրա ձևակերպվել է էլեկտրամեխանիկական մանիպուլյատորների օպտիմալ դինամիկական սինթեզի խնդիրը համակարգի մեկ և բազմաթիվ շարժման օրենքների դեպքերի համար: Դիսկրետ տեսքով դիտարկվել է նաև էլեկտրամեխանիկական մանիպուլյատորների օպտիմալ կառավարման խնդիրը՝ Լագրանժ-Մաքսվելի մոդելավորող հավասարումների օգտագործմամբ: Առաջարկվող մեթոդները և հաշվարկային ալգորիթմները հաջողությամբ փորձարկվել են թվային օրինակներով, որոնք բացահայտում են առաջարկվող հաշվողական մեթոդների կիրառման զգալի հեռանկարները վերականգնողական համակարգերի և՝ բժշկական նշանակության այլ ռոբոտոտեխնիկական սարքերի նոր նմուշների ստեղծման, մասնավորապես, դրանց մանիպուլյացիոն մեխանիզմների օպտիմալ տեխնիկական լուծումների մշակման խնդիրներում:

Melkonyan Smbat

DEVELOPMENT OF COMPUTATIONAL METHODS FOR THE ANALYSIS, OPTIMAL SYNTHESIS AND CONTROL OF MANIPULATION MECHANISMS OF MEDICAL ROBOTIC DEVICES

RESUME

The aim of the dissertation is to develop computational methods and algorithms for modeling, optimum synthesis and control of manipulation mechanisms, appropriate to the special features of medical applications.

In Chapter 1 the critical analysis of papers devoted to the classification principles of medical robots, functional, structural requirements and methodology of their design is performed, and as a result, problems and objects of studies in thesis are clarified. The necessity for developing a task based methodology of structural synthesis, computing toolset for computer simulation and optimum design of robotic rehabilitation devices is substantiated. Based on the comparative analysis of known methods of dynamic simulation, optimum synthesis and control for medical purpose manipulators, some research issues are identified which need further development and new approaches. In general, the analysis of literature enables to evaluate scientific and practical perspectives, reveal new directions of required investigations, substantiate the actuality of the dissertation in this context and show the ways of solution for the formulated problems.

In Chapter 2 the problems concerning structural synthesis and kinematic analysis of manipulation mechanisms having medical importance are discussed. A generalized block-diagram for structural-parametric synthesis of medical purpose manipulators is proposed. In the frame of proposed methodology a generalized algorithm for structural synthesis of medical manipulators and general requirements to the sought-for structures are presented. For the kinematic analysis of manipulation mechanisms of serial and parallel structure simplified computing algorithms enabling to obtain solution of direct and inverse position problems in explicit form are developed. Numerical examples show the efficiency of the proposed algorithms. As a result of a comparative study and further development of known versions of parallel manipulation mechanisms, a new manipulator 3

© National Library of Armenia

(RRC) is proposed to perform three-degree-of-freedom translational motion for the indirect chest massage. This manipulator was awarded with RA copyright certificate for the invention.

In Chapter 3 a dynamical analysis of electro-mechanical manipulators based on Lagrange-Maxwell equations is performed illustrated by the numerical examples of investigation of medical devices. For the dynamic modeling of electro-mechanical manipulators with serial structure the Lagrange-Maxwell equations are used which enable to include in motion equations simultaneously the parameters of the mechanical and electric system components, and to consider them in totality.

Unified methods and computational algorithms for solving direct, inverse and mixed problems of dynamics for electro-mechanical manipulators were developed.

A dynamic analysis of parallel manipulators for a rehabilitation device of man's lower extremity with serial structure (exoskeleton) and for the parallel manipulator for indirect chest massage is performed illustrated by the numerical examples of determining generalized coordinates and variation functions of electric powers in actuators.

In Chapter 4 the optimal synthesis and control of electro-mechanical manipulators are discussed with the examples of applications in medical devices.

Based on Lagrange-Maxwell dynamic model, the problem of electro-mechanical manipulators optimal dynamic synthesis is formulated for cases of system's one or more laws of motion. In the discrete form the optimal control problem of electro-mechanical manipulators is considered by using Lagrange-Maxwell modeling equations. The proposed methods and computational algorithms are successfully tested by numerical examples showing significant perspectives for applications of proposed computational methods in developing new samples of rehabilitation systems and other medical robots, particularly, in finding optimal technical solutions for their manipulation mechanisms.

15.05.2014

© National Library of Armenia

© National Library of Armenia