**Математическое моделирование и контроль экзоскелета нижних конечностей**

Альпер К. Танилдизи, Огуз Якут и Бейда Тасар \*

Кафедра мехатронной инженерии, инженерный факультет, Университет Фират, Элязыг, Турция

\* Автор, ответственный за переписку:

Бейда Тасар

Кафедра мехатронной инженерии

Инженерный факультет, Университет Фират, Элязыг, Турция

Дата принятия: 21 марта 2018 г.

DOI: 10.4066 / биомедицинские исследования.29-18-509

Посетите для получения дополнительных статей по теме биомедицинские исследования

**Абстрактный**

В этом исследовании была реализована новая стратегия активного управления экзоскелетным роботом с 2 степенями свободы. Во-первых, механизм с двойным маятником используется для демонстрации робота-усилителя человека, который следует за движениями нижних частей тела здорового человека и помогает им. Во-вторых, создана математическая модель этой системы и к роботу применен метод ПИД-регулирования. Информация об обратной связи для контроллера поддерживалась датчиками силы давления, расположенными в передней и задней части ноги между ногой человека и двойными маятниковыми звеньями. Результаты моделирования получены для трех сценариев движения и интерпретируются графически. По результатам, полученным графически, очевидно, что робот может успешно следовать за ногой человека при различных условиях нагрузки и успешно переносить эти нагрузки, не передавая их на мышцы ног. Предлагаемая модель TDB представляется подходящей моделью для описания движения экзоскелетного робота.

**Ключевые слова**

Моделирование динамических систем, Управление движением, Экзоскелет, Взаимодействие человека с роботом, Расчет силы взаимодействия.

**Вступление**

В последние годы носимые роботы стали довольно популярными среди исследований и проектов в области робототехники. Носимые роботы определяются как роботизированные устройства, в которых суставы и звенья спроектированы таким образом, чтобы соответствовать скелетно-мышечной системе и двигательной функции человеческого тела, когда оператор их носил [1].

В результате передачи мотивационного желания пользователя роботу через сеть когнитивного взаимодействия, робот-экзоскелет может поддерживать двигательную активность человека и увеличивать физическую силу (грузоподъемность, рабочее время и т. Д.). Первоначально они предназначались для военных и реабилитационных применений [2]. В последние годы исследователи разработали множество различных роботов-экзоскелетов для реабилитации и военных целей [3-6]. Распознавание желания человека к движению очень важно для эффективного управления экзоскелетным роботом, используемым с помощником движения человека. Алгоритмы управления классифицируются в литературе под тремя заголовками в зависимости от метода сбора данных для взаимодействия человека с роботом. Эти методы представляют собой сигналы, записанные только от человеческого тела, сигналы, записанные только от экзоскелета, и измеренное значение силы взаимодействия. В первом методе принцип заключается в том, что прямые биологические сигналы записываются непосредственно от человека, а затем с помощью этих сигналов определяется желание человека двигаться. По этой причине потери информации и времени в этом методе очень низки по сравнению с двумя другими методами, и можно распознать желание движения человека с высокой точностью [1].

Существует два типа биологических сигналов, которые используются для изучения взаимодействия человека с роботом. Это: электромиография поверхности кожи (ЭМГ) и электроэнцефалограмма (ЭЭГ) [7-12]. Эти стратегии контроля, основанные на сигналах, также использовались для оказания помощи пожилым людям или людям с параличом нижних конечностей во время повседневной активности. Регистраторы биомедицинских сигналов бесполезны для военных экзоскелетных роботов. Поскольку биомедицинские датчики подвержены влиянию факторов окружающей среды, подвержены влиянию вибрации и ударов.

Второй метод — это стратегия управления на основе модели, которая не собирает никаких биологических сигналов от человеческого тела [13]. Как известно, эту конструкцию невозможно смоделировать без определенных упущений. Например, звенья ног жесткие, а центр тяжести находится точно в середине звена. Но такая модель не совсем точно отражает реальность и затрудняет контроль.

Третья стратегия управления, используемая в этом исследовании, заключается в разработке когнитивного взаимодействия человека и робота с помощью сил взаимодействия, измеряемых между пользователем и экзоскелетом. Некоторые исследователи измеряют

это сила взаимодействия от точки соединения между пользователем и роботом, в то время как другие вычисляют скорость деформации эластичного материала, помещенного в звено робота [10,14]. Новый метод распределения используется для измерения взаимодействия давления между человеком и роботом [15]. Здоровый человек носил экзоскелетного робота нижней конечности по имени LOPES и исследователи

проверил свой намеченный метод. Результаты показали, что силу взаимодействия между человеком и экзоскелетом-роботом можно точно рассчитать. Кроме того, такая конструкция очень удобна и безопасна для пользователей и позволяет рассчитывать силу взаимодействия в реальном времени. Для HAL-5 использовался силовой метод взаимодействия [16]. Положение центра тяжести было рассчитано с помощью датчика силы реакции пола (FRF) для оценки взаимодействия человека и робота. В конструкции с датчиком силы использовалась информация о физическом взаимодействии [17]. А также Xinyi et al. использовалось нейросетевое управление [18]; Fliess et al. были использованы ПИД-регуляторы экзоскелета [19,20]. Ахмед и др. были использованы регулятор скользящего режима для модели свободного робота [21]. В этом исследовании за основу был взят подход к измерению силы и создана математическая модель системы.

**Обзор и основные моменты исследования**

На рисунке 1 показан обзор этого исследования. В этом исследовании было решено, что лучшая модель, которая может выполнять основные движения ног, — это двойной маятник. По этой причине неподвижный сустав представлен бедром человека; подвижный сустав представлен коленом.

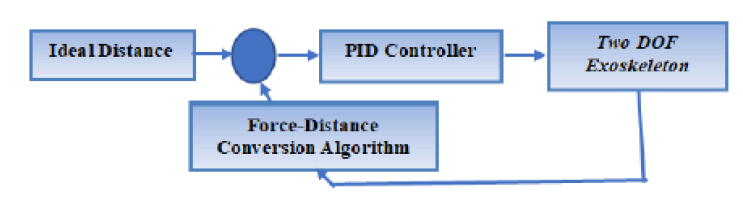


Рис. 1 Обзор исследования.

Силы реакции между роботом и ногой человека были взяты за эталонные, и управление движением робота предполагалось реализовать в соответствии с этим эталонным значением. В то время как в других исследованиях используются датчик IMU, датчик давления на подошве, гироскоп и т. Д., В этом исследовании два датчика силы будут размещены между ногой и роботом. Таким образом, данные, полученные от датчика силы, будут использоваться как ошибки между ногой и роботом. Чтобы продемонстрировать эту ногу и робота, используется парный двойной маятник (TDP).

**Концептуальный дизайн робота-экзоскелета**

В этом исследовании силы реакции между конечностями робота и коленом человека были взяты за эталон, и управление движением робота должно было быть реализовано в соответствии с этим эталонным значением. Датчики измерения силы сконструированного робота расположены на передней и задней части ноги. Таким образом, когда нога начинает двигаться, в этих датчиках будет генерироваться сила реакции, поскольку драйверы робота останутся неподвижными. При попытке переместить ногу человека вперед активируются датчики силы, расположенные на передней поверхности. Со скоростью, определяемой в соответствии с величиной измеренной силы реакции, приводные устройства будут пытаться переместить конечность робота вперед. Водители будут продолжать перемещать робота до тех пор, пока измеренные силы на датчиках передней поверхности не достигнут нуля. Аналогичным образом, если датчики силы на задней стороне почувствуют какое-либо давление, робот двинется назад. Траектория движения рассчитывается по следующему алгоритму.

Алгоритм: получение траектории движения по датчику силы

I\_Force - начальное значение датчика силы, когда нога не двигается

N\_ Force - значение измерения при движении ноги

reference Initial position When Force=0

while true

Interaction\_Force = N\_Force - I\_Force;

if (Interaction\_Force) > 0

reference = reference++;

else

reference = reference--;

end if

end while

**Математическая модель человеческой ноги и человеческого робота-усилителя**

Необходима математическая модель, раскрывающая взаимодействие человека и робота. Кинематическая диаграмма, отражающая физическую модель человеческой ноги и экзоскелета, показана на рисунке 2. Углы конечностей обозначены θi, массы - mi, длины - li, а центры тяжести - Gi. Пружинные элементы k1 и k2 в модели представляют собой датчики силы, которые измеряют силы реакции. Все углы были привязаны к вертикальной оси.



Рис. 2 Модель робота и конечности человека.

При построении математической модели используется метод уравнений Лагранжа [22].



Где T обозначает кинетическую, а V - потенциальную энергию, а - момент, который должен быть приложен к суставу.



Jhu в уравнении 3 показывает матрицу Якоби человеческой ноги, Fxhu - это сила, приложенная к пятке человека в направлении x, а Fyhu - сила, приложенная к пятке человека в направлении y. Матрица Якоба человеческой ноги и конечностей робота выглядит следующим образом:



Выражения кинетической и потенциальной энергии для ноги человека можно записать следующим образом:

Отсюда функцию Лагранжа можно получить следующим образом:



Полученная функция Лагранжа может быть записана в уравнении (2) и записана в виде матрицы следующим образом после необходимых математических операций.



Точно так же эти операции могут быть выполнены для конечностей робота и могут быть получены следующие выражения.



**Внедрение системы PID регулирования**

Классический метод PID регулирование - один из наиболее предпочтительных методов управления с обратной связью в системах управления [23,24]. Для оптимальных значений контрольных параметров использовалась методика генетического алгоритма [25-27]. Коэффициенты полученных параметров ПИД-регулирования приведены в таблице 2.

Таблица 2: Параметры ПИД-регулирования тазобедренных и коленных суставов экзоскелета.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| PID регулирование параметр | KP | KD | KI |
| Привод бедра | 15 | 0.01 | 6 |
| Коленный привод | 5 | 0.012 | 5 |

На рисунке 3 показана блок-схема представления, что коэффициенты регулятора оптимизируются методом генетического алгоритма [28-30]. Сумма квадратов ошибок была выбрана в качестве функции пригодности для генетического алгоритма.



Рис. 3 Блок-схема оптимизации параметров управления.

**Численное моделирование и интерпретация**

Основная цель этого исследования - дать роботу возможность следить за движениями ног при различных нагрузках и нести эти нагрузки, не оставляя ощущения нагрузки на ногу. Чтобы продемонстрировать это достижение, контрольные моменты, которые должны быть приложены к суставам для движения человеческой ноги при моделировании, также получают графически.

При численном моделировании получены 3 различных ситуации. Модель нашего экзоскелетного робота военного назначения; по этой причине было проведено моделирование для анализа передвижения солдатских войск для трех отдельных случаев нагрузки. Вот эти сценарии:

1. Выньте мешок солдата и сделайте открытие, пока он не заряжен.

2. В случае ежедневных упражнений; он несет мешок массой 10 кг, полный продовольствия и легких боеприпасов (была приложена нагрузка 100 Н).

3. В случае реальных упражнений; в нем есть сумка весом 50 кг, полная снаряжения и еды (была приложена нагрузка 500 Н).

Для этих движений уравнения решаются с использованием метода Рунге-Кутта четвертого порядка в программе пакета MATLAB. Кинематические параметры, параметры пружины и демпфирования, а также исходное положение суставов человека и робота были представлены в таблицах 3-5 соответственно.

Таблица 3: Кинематические параметры для численного решения.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Бедренная кость человека | Большеберцовая кость человека | Робот бедренный | Робот большеберцовой кости |
| Масса (кг) | 8 | 4 | 1 | 1 |
| Длина (м) | 0.45 | 0.43 | 0.45 | 0.43 |

Таблица 4: Параметры пружины и демпфирования.

|  |  |
| --- | --- |
| k1 (1. Коэффициент пружины) 5 × 103 Н / м | c1 (1. Коэффициент демпфирования) 0,1 Нс / м |
| k2 (2. Коэффициент пружины) 5 × 103 Н / м | c2 (2. Коэффициент демпфирования) 0,1 Нс / м |

Таблица 5: Начальные условия соединений для моделирования.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Человеческая связь | | Ссылка на робота | |
| Соед. 1 | Соед. 2 | Соед. 3 | Соед. 4 |
| Положение (θi0) | 450 | -450 | 450 | -450 |
| Угловая скорость (θi0) | 0 м/c | 0 м/c | 0 м/c | 0 м/c |

Графики на рисунках 4 и 5 показывают изменение положения ноги и конечностей робота во времени в контексте управления, применяемого в соответствии с различными вариантами нагрузки. Согласно полученным графическим результатам, робот очень успешно отслеживал движения ног.



Рис. 4 Положения тазобедренных и коленных суставов человека для F = 0 Н, F = 100 Н и F = 500 Н.



Рис. 5 Положения тазобедренного и коленного суставов робота для F = 0 Н, F = 100 Н и F = 500 Н.

На рисунке 6 (а) показан график угловой погрешности тазобедренного сустава (θ1-θ3). На рисунке 6 (b) показан график угловых ошибок в коленном суставе (θ2-θ4). На рисунках 7 (a) и (b) показано изменение этих сил реакции между ногой и роботом.



Рис. 6 (а) Ошибка в тазобедренном суставе; (б) Ошибка в коленном суставе.



Рис. 7 (а) Первое усилие пружины; (b) Вторая сила пружины.

На рисунках 8 (a) и (b) показан управляющий сигнал, который следует подать на тазобедренный сустав ноги человека и робота. Как видно, в суставах ноги человека не возникает лишних нагрузок, несмотря на различные прикладываемые нагрузки.



Рис. 8 (а) Контрольный сигнал бедра человека; (б) Управляющий сигнал бедра робота.

На рисунках 9 (a) и (b) показаны управляющие сигналы, которые следует подавать на коленный сустав ноги человека и робота. В частности, как следует из графиков управляющих сигналов коленного сустава, нога робота помогает снизить нагрузку на колено человека.



Рис. 9 (а) Контрольный сигнал человеческого колена; (б) Управляющий сигнал колена робота.

**Заключение**

В этой статье представлен концептуальный дизайн и стратегия активного контроля носимого экзоскелета нижней конечности, разработанного для улучшения здоровья здоровых людей, например солдат. Взаимодействие человека и робота-экзоскелета поддерживалось с помощью датчиков силы. Датчик силы был помещен между ногой и конечностью робота, чтобы обеспечить взаимодействие между человеком и экзоскелетом робота.

По результатам, полученным графически, очевидно, что робот может успешно следовать за ногой человека при различных условиях нагрузки и успешно переносить эти нагрузки, не передавая их на мышцы ног. Система для всех условий нагрузки была переведена в установившееся положение за 0,426 с. Значения времени установившегося состояния и ошибки установившегося состояния нулевой степени через ПИД-регулятор. Предлагаемая модель TDB представляется подходящей моделью для описания движения экзоскелетного робота.

**Подтверждение**

Тема этой статьи - докторская диссертация Альпера ТАНИИЛДИЗИ - была поддержана FUBAP, номер проекта MF-17.12.

**Конфликт интересов**

Огуз Якут, Альпер К. Таньилдизи и Бейда Тасар заявляют, что у нее нет конфликта интересов.