

С.М.Ибраев¹, А.С.Ибраева¹, Н.С.Иманбаева^{1,3},
А.Б.Рахматуллина^{1,2}, А.М.Сакенова¹

¹Институт механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан

²Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан

³Satbayev University, Алматы, Казахстан

E-mail: sam2810@mail.ru

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ЭКСОСКЕЛЕТА НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ

Аннотация. В этой работе рассмотрено экзоскелеты нового поколения с оптимальной структурой с точки зрения минимизации энергетических затрат, упрощения и дешевизны управления за счёт функционального разделения двигателей и использования принципа гравитационной независимой подвески. На поддержание веса корпуса не затрачивается работа, в чём и заключается реализация принцип гравитационно независимой подвески. Разработано опорно-двигательный механизм экзоскелета на основе замкнутых кинематических цепей позволяет повысить жёсткость, грузоподъёмность и удельную мощность конструкции. Также рассмотрена задача оптимального синтеза механизма экзоскелета нижних конечностей, точка прорисовки которого образует семейство горизонтальных линий. Предложено аналитическое решение аппроксимационной задачи квадратического приближения, позволяющее значительно уменьшить размерность численной оптимизации. Предложены две кинематические схемы экзоскелета, соответствующие двум локальным минимумам задачи.

Ключевые слова. Экзоскелет нижних конечностей, анализ, регулируемый механизм, аппроксимационный синтез, квадратическое приближение.

Введение.

Экзоскелеты нашли широкое применение во многих отраслях промышленности для усиление мышечной силы, вспомогательных устройств в реабилитационной медицине, известны устройства военного применения [1-7]. Усиление мышечного усилия, например, в транспортных и погрузочно- разгрузочных операциях, может происходить в десятки раз. Робот- ассистированные технологии предполагают использование экзоскелетов верхних и нижних конечностей для реабилитации инвалидов с полной или частичной потерей подвижности суставов или мышц. Подробный обзор исследований двуногой ходьбы и экзоскелетов ноги представлен в работах [1-4]. Ожидается, что мировой объём рынка экзоскелетов к 2025 году достигнет \$3,3 миллиарда. По данным Международной ассоциации робототехники, если в 2014 году продано около 272 экзоскелетов, в 2017 — уже более 8 тысяч, 2021 эта цифра вырастет до 40 тысяч единиц. В целом исследования в этой области можно разделить на три направления:

- 1) Разработка устройств для работы с большими физическими нагрузками (индустриальные).
- 2) Исследования, направленные на повышение физических возможностей при выполнении боевых задач (специального назначения).
- 3) Разработка комплексов для реабилитации пациентов с ограниченными возможностями (медицинские).

За последние годы были предложены разные конструкции экзоскелетов и архитектуры управления ими [6-8], разработано множество различных схем экзоскелета

нижней конечности, отвечающих требованиям компактности и легкости конструкции и оптимальности по тем или иным критериям [9-12]. В большинстве случаев кинематическая схема экзоскелета ноги представляет собой открытую кинематическую цепь с приводами, расположенными непосредственно на подвижных сочленениях. Несмотря на простоту в таких схемах возникают значительные крутящий момент и мощность в приводах, массивные серводвигатели утяжеляют конструкцию, большое число дорогих активных двигателей усложняют управление. Минимизация усилия в активных приводах и упрощение управления связано с использованием замкнутых кинематических схем (ЗКЦ) ИМ [6-11]. В указанных работах предложено использовать ИМ с одной степенью свободы и использующей только вращательные кинематические пары, например для целей робот-ассистированных технологий и реабилитации.

В работах [6, 7] выполнен размерный синтез параметров на основе аналитических результатов, что позволило добиться оптимальной геометрии механизма ноги. Удалось добиться минимизации числа активных приводов, что положительно влияет на минимизацию энергозатрат. Громоздкость и значительный вес такого рода устройств отмечена, например, в работах [8-10]. Пленчик и МакКарти [10, 11] разработали метод синтеза для генераторов прямолинейных траекторий, причем рассмотрены различные схемы типа Уатта и Стефенсона (несмотря на сложность последних). Однако разработанные ими большое разнообразие механизмов пригодно для многоногих шагающих роботов и не пригодны для использования в качестве ИМ экзоскелетов ввиду громоздкой конструкции, больших габаритов.

Возможность воспроизвести движение аппарата двуногой ходьбы с помощью ИМ с одной степенью свободы также показана в работах [12]. Однако полученная длина шага слишком мала. Возможность сокращения количества звеньев и использования шестизвенного механизма для генерирования двуногой ходьбы показана в работе [13]. Недостатком является использование поступательной кинематической пары и малость длины шага. Восьмизвенный шарнирно-рычажный ИМ был синтезирован в работе [14], однако при генерировании шагового цикла точность воспроизведения прямолинейного участка траектории (что соответствует фазе опоры) слишком грубая.

Материалы и методы.

Рациональный структурный синтез исполнительного механизма с гравитационной независимой топологией

Таким образом, основными недостатками предложенных конструкций являются громоздкость, несоответствие анатомическим параметрам строения нижней конечности человека, большое количество звеньев, что также усложняет конструкцию. Приведённый анализ существующих конструкций позволяет сделать заключение, что рациональный структурный синтез должен быть основан на базе механизмов – генераторов прямолинейных траекторий типа Уатта и Стефенсона. Основной двигатель должен отвечать за прямолинейное движение опорной конечности, в то время как дополнительный – за подъём и опускание стопы, а в случае надобности – за адаптацию на неровности грунта (например, при передвижении по пересеченной местности и местности с препятствиями). Такая декомпозиция движения и разделение функций двигателей позволяет не только уменьшить затраты мощности на горизонтальное перемещение корпуса, но и существенно упрощает систему управления.

Таким образом, необходимо создать метод оптимизации структурно-метрических параметров ИМ экзоскелета параллельной структуры с использованием современных методов проектирования роботов и механики машин. Использование этих методов позволит разработать экзоскелеты нового поколения с оптимальной структурой с точки зрения минимизации энергетических затрат, упрощения и дешевизны управления за счёт

функционального разделения двигателей и использования принципа гравитационной независимой подвески.

Синтез ИМ экзоскелета на основе квадратической аппроксимации.

ИМ экзоскелета нижней конечности представляет собой регулируемый четырёхзвенный шарнирно-рычажный механизм $A(B)CDE$ с изменяемой длиной звена AC (рисунок 1): переменная длина l_{AC} этого звена является регулируемым параметром. Механизм воспроизводит серию горизонтальных параллельных прямых с регулируемой высотой. Желаемое движение опорной конечности P (стопы) задана в виде S траектории – горизонтальных прямых $t_s, s=1, \dots, S$, длина звена $l_{AC}=l_s$ должна быть постоянной на каждой s -ой траектории. Если на каждой траектории задать N точек, заданное выходное движение будет определена абсолютными координатами $[\xi_{P_{is}}, \eta_{P_{is}}]$ $N \cdot S$ точек $P_{is}, i=1, \dots, N, s=1, \dots, S$, относительно неподвижной системы координат $O\xi\eta$.

Пусть параметры диады EDP заданы проектировщиком (в последующем они будут задаваться с помощью генератора случайных чисел). Варьируемые параметры $Q = [x_E, h_E, l_{ED}, l_{DP}]^T$ диады будем считать заданными. Пусть Px_3y_3 является локальной системой координат, жёстко связанной со звеном DP , ось Px_3 направим вдоль звена DP . Путем решения двух поводковой группы EDP для каждого заданного положения точки P_{is} определим положение плоскости Px_3y_3 . Таким образом, задача синтеза регулируемого механизма сводится к синтезу кинематической цепи ABC , так называемого RPR-модуля по известным положениям $\{\{x_{P_{is}}, h_{P_{is}}, q_{is}\}, i=1, \dots, N, s=1, \dots, S$ плоскости Px_3y_3 . При $S=1$ мы имеем дело с традиционной задачей ТММ синтеза бинарного звена AC – определения круговой точки C на плоскости Px_3y_3 . Неизвестными параметрами синтеза являются координаты радиус-вектора центра шарнира C на плоскости Px_3y_3 , центра аппроксимирующей окружности на плоскости Oxh и радиус $R=l_{AC}$. Но когда заданы серии движений (серии параллельных прямых) $S>1$, тогда отыскивается серия концентрических окружностей с общим центром и радиусами $l_s, s=1, \dots, S$.

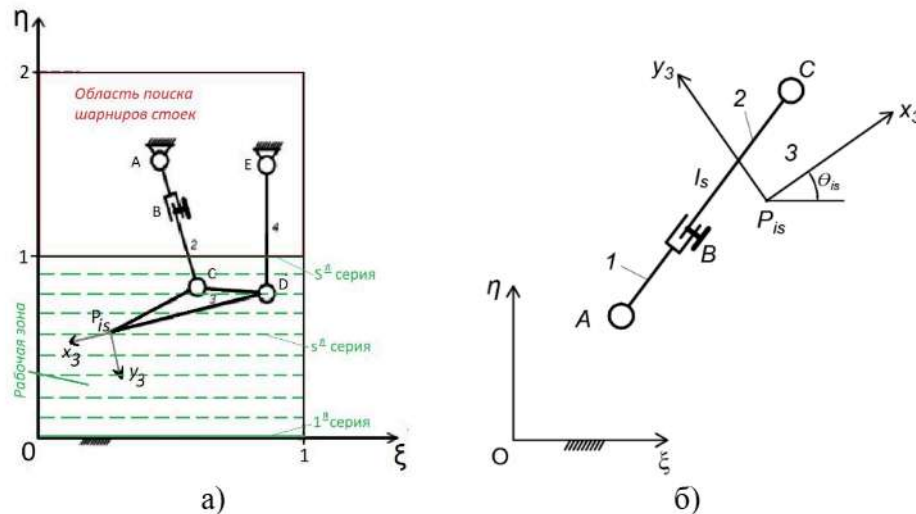


Рисунок 1 – К синтезу кинематической цепи экзоскелета нижней конечности

Уравнение связи представляет собой уравнение искомых концентрических окружностей:

$$\Delta_{is} = (\mathbf{R}_{P_{is}} + \mathbf{\Gamma}(\theta)\mathbf{r}_C^{(3)} - \mathbf{R}_A)^2 - (l_{AC})_s^2 = 0, \quad (1)$$

здесь $\mathbf{\Gamma}(\theta)$ есть матрица поворота, $\mathbf{R}_P, \mathbf{R}_A, \mathbf{r}_C^{(3)}$ - радиус-векторы центров шарниров P, A и C , Δ есть ошибка аппроксимации. Отыскиваются параметры: $\xi_A, \eta_A, x_C^{(3)}, y_C^{(3)}, l_s, s=1, \dots, S$.

Ошибку аппроксимации можно записать в виде:

$$\Delta_{is}^{(1)} = -2\mathbf{R}_{C_{is}}^T \mathbf{R}_A + (\mathbf{R}_A^2 - l_s^2) + \mathbf{R}_{C_{is}}^2, \quad (2)$$

$$\Delta_{is}^{(2)} = -2\mathbf{r}_{A_{is}}^T \mathbf{r}_C + (\mathbf{r}_C^2 - l_s^2) + \mathbf{r}_{A_{is}}^2, \quad (3)$$

здесь

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{C_{is}} &= \mathbf{R}_{P_{is}} + \Gamma(\theta) \mathbf{r}_C^{(3)}, \\ \mathbf{r}_{A_{is}} &= \Gamma^T(\theta_{is})(\mathbf{R}_A - \mathbf{R}_{P_{is}}). \end{aligned}$$

В новых обозначениях

$$\begin{aligned} p_s^{(1)} &= 0,5 \cdot (\mathbf{R}_A^2 - l_s^2), \quad p_s^{(2)} = 0,5 \cdot (\mathbf{r}_C^2 - l_s^2), \quad s = 1, \dots, S, \\ p_{s+1} &= \xi_A, \quad p_{s+2} = \eta_A, \quad p_{s+3} = x_C^{(3)}, \quad p_{s+4} = y_C^{(3)}, \\ 0,5 \cdot \Delta_{is}^{(k)} &= p_s^{(k)} + a_{is}^{(k)} p_{s+1} + b_{is}^{(k)} p_{s+2} + c_{is}^{(k)} = 0, \quad i = 1, \dots, N; \quad s = 1, \dots, S, \end{aligned} \quad (4)$$

где $k=1$ или 2 .

Таким образом, (1) сводится к $N \cdot S$ линейным уравнениям по переменным

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^{(1)} &= [p_1^{(1)}, \dots, p_S^{(1)}, p_{S+1}, p_{S+2}]^T \quad \text{и} \quad \mathbf{P}^{(2)} = [p_1^{(2)}, \dots, p_S^{(2)}, p_{S+3}, p_{S+4}]^T \\ \mathbf{A}^{(k)} \mathbf{P}^{(k)} &= -\mathbf{b}^{(k)}, \quad k = 1, 2, \end{aligned} \quad (5)$$

здесь $\mathbf{A}^{(k)} = [\mathbf{D}_1^{(k)} \mathbf{D}_2^{(k)} \dots \mathbf{D}_S^{(k)}]^T$, $\dim \mathbf{A}^{(k)} = NS \times (S+2)$, $\dim \mathbf{D}_s^{(k)} = (S+2) \times N$, $s = 1, \dots, S$; i -ый столбец матрицы $\mathbf{D}_s^{(k)}$: $\mathbf{d}_{i,s}^{(k)} = [\mathbf{e}_s^T, a_{is}^{(k)}, b_{is}^{(k)}]^T$. Вектор $\mathbf{e}_s$ является S -мерным единичным вектором с компонентами $e_{\mu s} = \delta_{\mu s}$, $\mu = 1, \dots, S$. Вектор $\mathbf{b}^{(k)}$ есть NS -мерный вектор $\mathbf{b}^{(k)} = [\mathbf{b}_1^{(k)T}, \mathbf{b}_2^{(k)T}, \dots, \mathbf{b}_S^{(k)T}]^T$, где $\mathbf{b}_s^{(k)} = [c_{1s}^{(k)}, c_{2s}^{(k)}, \dots, c_{Ns}^{(k)}]^T$; $s = 1, \dots, S$. В общем случае среднеквадратичным решением является

$$\mathbf{P}^{(k)} = -\mathbf{A}_p^{(k)-1} \mathbf{b}^{(k)}, \quad (6)$$

где $\mathbf{A}_p^{-1} = [\mathbf{A}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W}$ есть левая псевдо-инверсия матрицы $\mathbf{A}$, а $\mathbf{W}$ есть диагональная матрица $\text{diag}\{w_1, w_2, \dots, w_{NS}\}$ весовых коэффициентов; $\dim \mathbf{W} = NS \times NS$. Если ввести вектор $\Delta = \mathbf{A} \mathbf{P} + \mathbf{b}$, то решение $\mathbf{P}_0$ представляет собой минимум функции

$$f \equiv \|\Delta\|_2^2 = \Delta^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \Delta. \quad (7)$$

Результаты и обсуждение.

Анатомическая параметризация кинематической схемы экзоскелета

Заданы параметры диады EDP : ξ_E , η_E , l_{ED} , l_{DP} .

1. Требуется определить положения плоскости Px_3y_3 , жёстко связанной со звеном DP , ось Px_3 направлена вдоль звена DP путем решения двухповодковой группы EDP для каждого заданного положения точки P_{is} .

2. Требуется синтезировать кинематическую цепь ABC (RPR-модуль) по известным положениям $\{\xi_{P_{is}}, \eta_{P_{is}}, \theta_{is}\}$, $i = 1, \dots, N$, $s = 1, \dots, S$ плоскости Px_3y_3 . Отыскиваются параметры: ξ_A , η_A , $x_C^{(3)}$, $y_C^{(3)}$, l_s , $s = 1, \dots, S$.

Размеры ИМ, полученных в результате предварительного синтеза (Рис.2) показаны в Таблице 1.

Таблица 1 - Размеры звеньев полученных ИМ

Рис	X_E	Y_E	ED	DP	$x_C^{(3)}$	$y_C^{(3)}$	X_A	Y_A	l_{AC} пределы	точность
2а	0,854	0,044	1,249	1,271	-1,555	-0,014	0,617	0,151	1,196÷0,970	2,6%
2б	0,856	0,316	1,024	1,047	-0,710	-0,048	1,143	0,023	1,167÷1,497	2%
2в	1,599	0,486	1,084	0,778	-0,479	0,323	1,831	-0,064	1,638÷2,090	1,4%

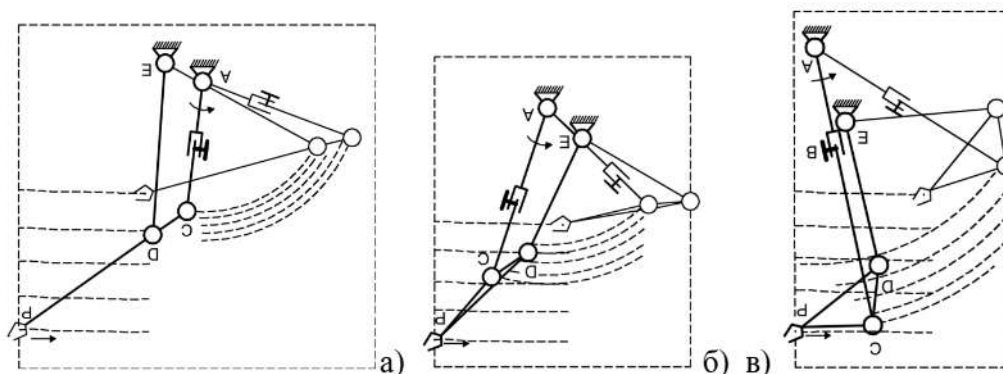


Рисунок 2 – Регулируемые механизмы для воспроизведения семейства прямых

Получены два отличающихся решения а) и б). В первом решении а) при увеличении высоты траекторий длина звена АС укорачивается (работает как «мышца-аддуктор»), в то время как во втором решении б) длина звена АС удлиняется (работает как «мышца-абдуктор»). Видимая разность двух схем, что изменилось только относительное положение шарниров стоек, обманчиво: по-сути имеем два разных принципа регулирования.

Как известно, в статическом положении каждый сегмент тела как часть неустойчивой конструкции стремится упасть под действием силы тяжести. Этому препятствуют мышцы осанки: большая ягодичная мышца, поясничные и дорзальные околопозвоночные мышцы, мышцы задней поверхности шеи, четырехглавые мышцы и трехглавые мышцы голени. Сокращение и тонус названных мышц постоянно контролируются нервной системой, которая учитывает множество сигналов, приходящих от подошвенной опорной зоны, положение различных сегментов тела, объединяя информацию в общую схему тела. При этом мозг принимает во внимание положение головы благодаря улитковому аппарату внутреннего уха и глазным яблокам, ориентированным в направлении горизонта. Именно благодаря постоянным уточнениям действий мышц, во всех позах и при любых движениях, мозг обеспечивает положение равновесия на двух ногах.

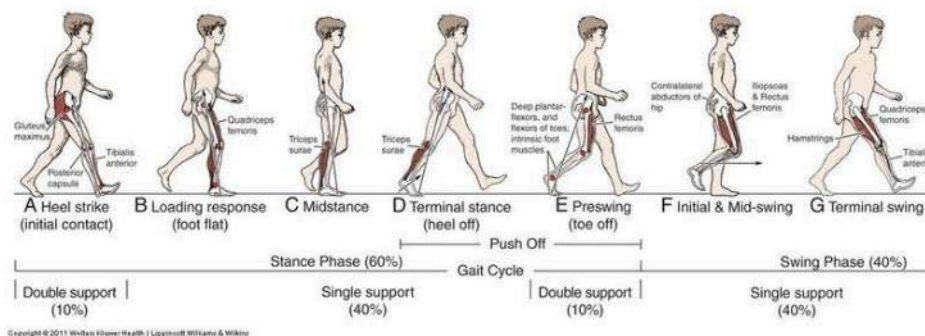


Рисунок 3 – Фазы перемещений ног при ходьбе

Изображение взято с сайта: <http://www.dr.soroushkhoshroo.com/custom-orthotics.html>

При ходьбе происходит перенос веса тела на одну ногу, тем самым другая нога освобождается для движения. При этом горизонтальная проекция перемещающегося центра тяжести сначала переносится в центр основания ступни одной ноги, которая временно стала опорой для всего тела, а затем за его пределы вперед. В циклической последовательности ходьбы выделяют моменты, когда с опорой соприкасаются только одна нога («одноопорный период») и обе ноги, когда передняя конечность уже коснулась опоры, а задняя ещё не оторвалась («двуопорный период»). Период переноса ноги называется «переносным периодом». Полный цикл ходьбы — период двойного шага — складывается для каждой ноги из опорного и переносного интервалов.

При ходьбе проекция центра тяжести всегда выводится за пределы опорного основания, что означает падение тела, которое предотвращается созданием новой опоры.

Перпендикуляр из центра тяжести выходит из площади основания опоры, в результате чего человек падает вперед. Равновесие восстанавливается благодаря переносу другой ноги: она становится на землю впереди перпендикуляра из центра тяжести, так что последний, т.е. перпендикуляр, попадает в площадь, образуемую линиями, которыми соединяются точки опоры обеих ног.

Фаза опоры составляет 60% от двойного шага, а фаза переноса 40%.

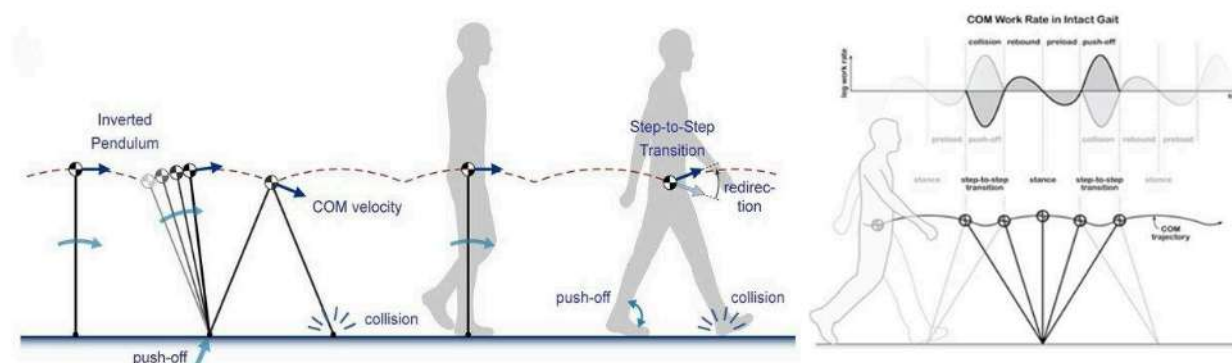


Рисунок 4 – Циклограмма перемещения центра тяжести тела при ходьбе

Изображение взято с сайта:

<http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0009307>

Параметризация экзоскелета на основе анатомических соответствий необходима для определения индивидуальных оптимальных технических параметров исполнительного механизма, позволяющего восполнить утраченные функции нижней конечности. Анатомические соответствия — это соответствия между различными анатомическими характеристиками строения человеческого тела и параметрами механического устройства, обуславливающих оптимальную работу образующейся при этом биомеханической системы.

Анатомическая параметризация должна обеспечить удовлетворение экзоскелета нижней конечности следующим требованиям:

- обладать объемом движений, приближенным к показателям здорового человека;
- иметь фрагменты конструкции, близкие к строению нижней конечности человека;
- иметь легкую и прочную конструкцию, адаптируемую к анатомическим параметрам конечности;
- быть изготовлен из биологически инертных материалов;
- быть мобильным и независимым от источников питания.

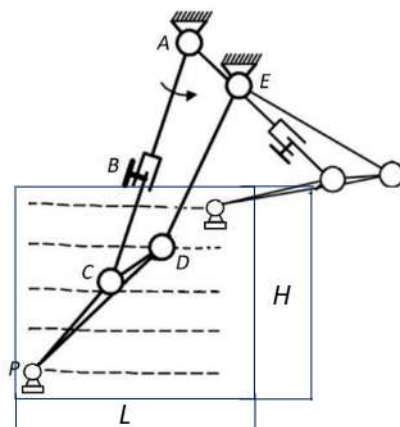


Рисунок 5 – Результат эскизного синтеза

Поскольку задача решается поэтапно, на данном этапе эскизного проектирования ограничимся удовлетворением первых двух требований.

В результате предварительного синтеза были получены следующие размеры звеньев механизма: $ED=1.027$, $DP=1.047$, $x_C^{(3)}=-0.710$, $y_C^{(3)}=-0.048$, $\xi_E - \xi_A = 0.287$, $\eta_E - \eta_A = -0.293$. Регулируемый параметр AC меняется при этом в пределах от 1,497 в нижней траектории до 1,167 в верхней. Относительная высота регулирования $H/L=0,886$, точность воспроизведения прямолинейной траектории составляет 2%, что вполне приемлемо.

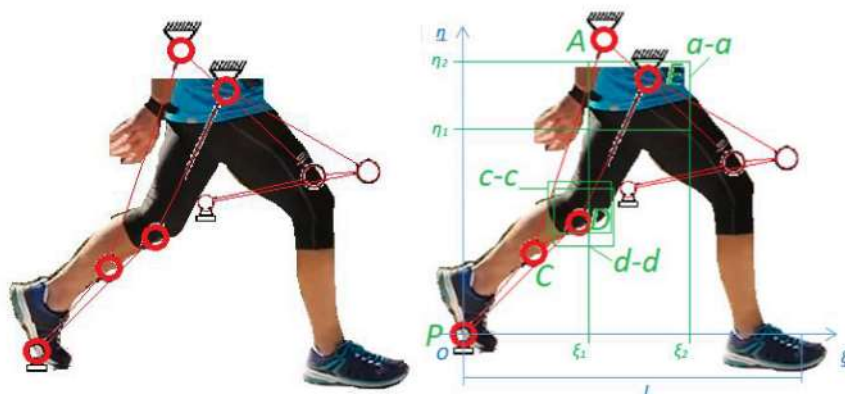


Рисунок 6 – Привязка ИМ к размерам ноги

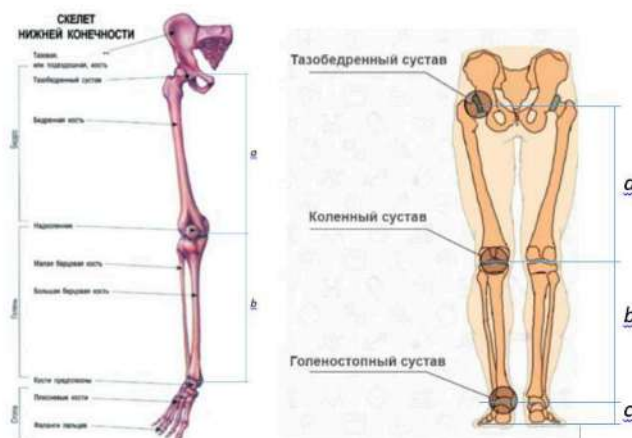


Рисунок 7 – Кости нижней конечности

Изображение взято с сайта: <https://www.winstein.org/publ/1-1-0-4094>

Однако, как явствует из сопоставления с анатомией ноги, прямолинейный участок движения опорной конечности обеспечивается только для половины шага! Это является главным недостатком, который необходимо устранить при последующем синтезе ИМ.

Соотношение длин голени и бедра человека b/a сохраняются пропорциях от 0.9 до 0.95, $c/a=0,15$. Поскольку в нашем случае на шатуне ИМ имеются два подвижных шарнира (D в коленном суставе и дополнительный шарнир C), при этом шарнир C оказался ниже шарнира D , при дальнейшем синтезе соотношение DP/ED имеет смысл варьировать в пределах от 0.9 до 1.2. Для увеличения длины шага решено уменьшить отношение H/L до 0,4.

На абсолютные координаты ξ_A и ξ_E неподвижных шарниров A и E поставлены ограничения $\xi_1=0.35L$, $\xi_2=0.65L$ и введён дополнительный критерий синтеза: $c_1 = (\xi - \frac{L}{2})^2 c$. На абсолютные координаты η_A и η_E шарниров A и E поставлены ограничения $\eta_1=0.53L$, $\eta_2=0.8L$. Область варьирования шарниров стоек показана зелёным прямоугольником $a-a$.



Рисунок 8 – Макет опорно-двигательного механизма экзоскелета нижней конечности



Рисунок 9 – Устройство фиксации высоты ноги по сигналу датчика контакта стопы с опорной поверхностью

На рисунке 8 показан макет экзоскелета нижней конечности с регулируемой высотой прямолинейной траектории. Использование принципа разделения функций приводов и гравитационной независимой подвески позволило разработать кинематическую схему экзоскелета нижней конечности комбинированного типа с минимальным количеством активных силовых приводов с существенной разгрузкой системы управления благодаря декомпозиции движения по степеням свободы. При вращении основного двигателя экзоскелета корпус движется прямолинейно и

горизонтально, на что не тратится механическая мощность. В момент перехода в фазу опоры шагового цикла стопы через датчик контакта стопы с опорной поверхностью срабатывает устройство запирания дополнительного привода подъёма- опускания стопы (на рисунке 9 показано устройство фиксации привода подъёма- опускания по сигналу датчика контакта стопы с опорной поверхностью.). В результате на поддержание веса корпуса не затрачивается работа, в чём и заключается реализация принцип гравитационно независимой подвески. Проведенные испытания показали способность разработанной конструкции выполнить функциональную задачу.

Заключение.

Разработка опорно-двигательного механизма экзоскелета на основе замкнутых кинематических цепей позволяет повысить жёсткость, грузоподъёмность и удельную мощность конструкции. Использование принципа разделения функций приводов и гравитационно независимой подвески позволило разработать кинематическую схему экзоскелета нижней конечности комбинированного типа с минимальным количеством активных силовых приводов с существенной разгрузкой системы управления благодаря декомпозиции движения по степеням свободы. В результате на поддержание веса корпуса не затрачивается мощность, поскольку при вращении основного двигателя экзоскелета корпус движется прямолинейно в горизонтальном направлении, а во вспомогательном приводе в момент перехода в фазу опоры шагового цикла стопы через датчик контакта стопы с опорной поверхностью срабатывает устройство запирания двигателя.

Разработан метод синтеза на основе квадратического приближения и выполнено оптимальное проектирование ИМ экзоскелета нижней конечности комбинированного типа, обладающего достоинствами как активных, так и пассивных экзоскелетов;

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке КН МНВО РК, проект №AP14870080 «Структурно-параметрический синтез опорно-двигательных механизмов экзоскелета нижней конечности».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] T. Mikolajczyk, E. Miko lajewska, H. F. Al-Shuka, T. Malinowski, A. K lodowski, D. Y. Pimenov, T. Paczkowski, F. Hu, K. Giasin, D. Miko lajewski, et al., Recent advances in bipedal walking robots: Review of gait, drive, sensors and control systems, *Sensors* 22 (12) (2022) 4440.
- [2] D. Shi, W. Zhang, W. Zhang, X. Ding, A review on lower limb rehabilitation exoskeleton robots, *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 32 (1) (2019) 1–11.
- [3] I. Tijjani, S. Kumar, M. Boukheddimi, A survey on design and control of lower extremity exoskeletons for bipedal walking, *Applied Sciences* 12 (5) (2022) 2395.
- [4] M. d. C. Sanchez-Villamañan, J. Gonzalez-Vargas, D. Torricelli, J. C. Moreno, J. L. Pons, Compliant lower limb exoskeletons: a comprehensive review on mechanical design principles, *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 16 (1) (2019) 1–16.
- [5] C. Copilusi, S. Dumitru, I. Geonea, L. G. Ciurezu, N. Dumitru, Design approaches of an exoskeleton for human neuromotor rehabilitation, *Applied Sciences* 12 (8) (2022) 3952.
- [6] Shen, Z., Tan, T., Allison, G., Cui, L., A customized one-degree-of-freedom linkage based leg exoskeleton for continuous passive motion rehabilitation, in: *Advances in Italian Mechanism Science: Proceedings of the Second International Conference of IFToMM Italy*, Springer, 2019, pp. 518–526.
- [7] Shen, Z., Allison, G., Cui, L. (2018): An integrated type and dimensional synthesis method to design one degree-of-freedom planar linkages with only revolute joints for exoskeletons. *J. Mech. Des.* 140(9), 2018.

[8] D. Tarnita, I. Geonea, A. Petcu, D. Tarnita, Numerical simulations and experimental human gait analysis using wearable sensors, in: New Trends in Medical and Service Robots: Design, Analysis and Control 5, Springer, 2018, pp. 289–304.

[9] Geonea, I.D., Tarnita, D., Pislă, D., Carbone, G., Dynamic Analysis of a Spherical Parallel Robot Used for Brachial Monoparesis Rehabilitation. Applied Sciences, 2021, 11, 11849. <https://doi.org/10.3390/app112411849>

[10] Plecnik, M.M., McCarthy, J.M. Design of Stephenson linkages that guide a point along a specified trajectory. Mechanism and Machine Theory 96 (2016) 38–51

[11] Plecnik, M.M., McCarthy, J.M. Dimensional synthesis of six-bar linkage as a constrained rpr chain. Mechanisms and Machine Science, Vol.7, 273-280, 2013.

[12] Al-Araidah, O., Batayneh, W., Darabseh, T., BaniHani, S. M., Conceptual Design of a Single DOF Human-Like Eight-Bar Leg Mechanism. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, Volume 5, Number 4, Aug. 2011, Pages 285-289

[13] Batayneh, W., Al-Araidah, O., and Malkawi, S., Biomimetic design of a single dof stephen-son III leg mechanism. Mechanical Engineering Research, 3(2), p.43-50, July 2013.

[14] Brown, B. C., Design of a single-degree-of-freedom biped walking mechanism. Under-graduate Honors Thesis, The Ohio State University, 2006.

Саят Ибраев, т.ғ.д., профессор, Ө. А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан, sayat_m.ibrayev@mail.ru

Арман Ибраева, докторант, Ө. А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан, sayatqyzy@gmail.com

Нұрбибі Иманбаева, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, n.imanbayeva@satbayev.university

Аяулым Рахматулина, PhD, қауымдастырылған профессор, Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан, kazrah@mail.ru

Айжан Сакенова, докторант, Ө. А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан, sam2810@mail.ru

АЯҚ ЭКЗОСКЕЛЕТІНІҢ ТІРЕК-ҚИМЫЛ АППАРАТЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ-ПАРАМЕТРЛІК СИНТЕЗІ

Андатпа. Бұл жұмыста қозғалтқыштарды функционалды бөлу және гравитациялық тәуелсіз аспаның принципін қолдану арқылы энергия шығындарын азайту, басқаруды жеңілдету және арзандату тұрғысынан оңтайлы құрылымы бар жаңа экзоскелеттерді қарастырады. Құрылым салмағын ұстап тұруға жұмыс жұмсалмайды, бұл гравитациялық тәуелсіз аспа принципін жүзеге асыру болып табылады. Жабық кинематикалық тізбектерге негізделген экзоскелеттің тірек-қимыл аппараты құрылымның қатаңдығын, жүк көтергіштігін және меншікті қуатын арттыруға мүмкіндік береді. Аяқ экзоскелетінің механизмін оңтайлы синтездеу міндеті де қарастырылады, оның қозғалысы көлденең түзу сызықтар тобын құрайды. Сандық оңтайландырудың өлшемін едәуір азайтуға мүмкіндік беретін квадраттық жуықтаудың жуықтау мәселесінің аналитикалық шешімі ұсынылды. Тапсырманың екі жергілікті минимумына сәйкес келетін экзоскелеттің кинематикалық схемасы ұсынылған.

Түйінді сөздер. Аяқ экзоскелеті, талдау, реттелетін механизм, жуықтау синтезі, квадраттық жуықтау.

Sayat Ibrayev, doctor of technical sciences, professor, Institute of Mechanics and Engineering named after U.A. Dzholdasbekova, Almaty, Kazakhstan, sayat_m.ibrayev@mail.ru

Arman Ibraeva, doctoral student, Institute of Mechanics and Engineering named after U.A. Dzholdasbekova, Almaty, Kazakhstan, sayatqyzy@gmail.com

Nurbibi Imanbayeva, candidate of technical sciences, associate professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, n.imanbayeva@satbayev.university

Ayaulym Rakhmatulina, PhD, associate professor, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, kazrah@mail.ru

Aizhan Sakenova, doctoral student, Institute of Mechanics and Engineering named after U.A. Dzholdasbekova, Almaty, Kazakhstan, sam2810@mail.ru

STRUCTURAL- PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE MUSCULOSKELETAL MECHANISM OF THE LOWER LIMB EXOSKELETON

Abstract. In this paper, the new generation exoskeletons with an optimal structure are considered in terms of minimizing energy costs, simplifying and cheapening control due to the functional separation of engines and the use of the principle of gravity independent suspension. No work is spent on maintaining the weight of the body, which is the implementation of the principle of gravitationally independent suspension. The musculoskeletal mechanism of the exoskeleton based on closed kinematic chains has been developed to increase the rigidity, load capacity and specific power of the structure. The problem of optimal synthesis of the mechanism of the exoskeleton of the lower extremities, the drawing point of which forms a family of horizontal lines, is also considered. An analytical solution of the approximation problem of the quadratic approximation is proposed, which makes it possible to significantly reduce the dimension of numerical optimization. Kinematic schemes of the exoskeleton corresponding to two local minima of the problem are proposed.

Keywords. Exoskeleton of the lower extremities, analysis, adjustable mechanism, approximation synthesis, quadratic approximation.
