

Анализ и выбор кинематической структуры исполнительного механизма экзоскелета

07, июль 2014

DOI: 10.7463/0714.0717676

Верейкин А. А.^{1,a}, Ковальчук А. К.¹, Кулаков Д. Б.¹, Семенов С. Е.¹

УДК 621.865.8

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

^aaautres@gmail.com

Обоснована актуальность разработки роботизированных экзоскелетов. Поставлена задача синтеза кинематической схемы исполнительного механизма экзоскелета и определены возможные подходы к её решению. Представлены результаты синтеза кинематической схемы, полученные в программных комплексах CATIA и SolidWorks. Обоснована целесообразность проведения кинематического синтеза в программном комплексе SolidWorks с использованием антропометрических данных, предложенных программным комплексом CATIA. Полученные диапазоны изменения обобщённых координат сочленений исполнительного механизма, оснащённых электрогидравлическими следящими приводами, сопоставлены с аналогичными диапазонами для человека.

Ключевые слова: робототехника, древовидная кинематическая структура, синтез кинематической схемы, эргономическое проектирование, экзоскелет, степени подвижности.

Введение

Стремительное развитие робототехники объясняется необходимостью увеличения производительности труда и повышения эффективности выполняемых работ в различных областях деятельности человека, среди которых ведущее место занимают работы в экстремальных условиях. Сюда относятся ликвидация последствий техногенных и природных катастроф, а также решение задач, связанных с манипулированием и транспортированием грузов специального назначения в военной области. В большинстве случаев применяются самоходные колесные или гусеничные машины с установленными на них манипуляторами, средствами наблюдения и другим оборудованием, однако часто приходится выполнять работы в зданиях, кабинах различной техники, т.е. в условиях, изначально созданных для человека, с учетом его кинематики тела и массы.

В мире уже продолжительное время ведутся активные работы по созданию как антропоморфных роботов с массогабаритными параметрами человека, среди которых стоит отметить Atlas [1], Asimo [2], Johnnie [3] и двуногого шагающего робота, разработанного в

МГТУ им. Н.Э. Баумана [4, 5, 6], так и роботизированных экзоскелетов, в числе которых необходимо упомянуть экзоскелет, разработанный в Белградском институте им. М. Пупина [7], XOS2 [8], BLEEX [9], а также перспективную разработку экзоскелета МГТУ им. Н.Э. Баумана [10, 11]. Первые предназначены для выполнения работ, типичных для человека, без его непосредственного участия в области проведения работ. Вторые предназначены для физической разгрузки человека, выполняющего работы, за счёт восприятия нагрузки внешним каркасом, который, собственно, и носит название экзоскелета, при условии повторения им биомеханики человека.

На сегодняшний день существует множество вариантов экзоскелетов, построенных с применением различных приводов (электропривода, гидропривода, пневмопривода), однако практическое их применение весьма ограничено вследствие затруднений, связанных с бортовым источником энергии [12], способным обеспечивать автономность экзоскелета. Впрочем, этот факт служит лишь катализатором прогресса и приводит к постоянному появлению всё новых и новых вариантов и исполнений экзоскелетов. В качестве ещё одной причины растущей популярности данных устройств, следует упомянуть области их возможного применения:

- 1) военная сфера (возможен вариант интеграции бронекостюма в экзоскелет, имеющий целью снятие нагрузок, возникающих при попадании пуль);
- 2) использование людьми с ограниченными физическими возможностями (проблемами опорно-двигательного аппарата) [13];
- 3) ликвидация последствий различных чрезвычайных ситуаций (завалы, обрушения, оползни и т.д.);
- 4) использование в условиях неприменимости тяжёлой техники;
- 5) использование в операциях, где возможна замена тяжёлой техники человеческим трудом (например, прокладка путей железнодорожного сообщения).

На основании обзора, приведённого в [10], можно сделать вывод, что в РФ наблюдается значительное отставание в этой области техники и единственной актуальной ведущейся разработкой, насколько можно судить, является проект Exoatlet [14], разрабатываемый в НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Таким образом, разработка исполнительного механизма (ИМ) экзоскелета и исследование его параметров и характеристик представляются целесообразными и актуальными. При этом в качестве приводов будем использовать электрогидравлические следящие приводы (ЭГСП), поскольку они обладают подходящими динамическими свойствами и массогабаритными параметрами.

В первом разделе сформулирована задача синтеза кинематической схемы (КС) экзоскелета и определены возможные подходы к её решению. Во втором разделе представлены результаты синтеза КС ИМ, полученные в программном комплексе САПР, исследованы подвижности стопы, голени и бедра человека. В третьем разделе предложено совмещение сред анализа и разработки, представлены результаты синтеза КС ИМ, полученные в программном комплексе SolidWorks. На основании проведённого моделирования и антропометрических данных определены диапазоны изменения обобщённых координат

сочленений экзоскелета, оснащённых ЭГСП. Представлена выбранная КС экзоскелета, назначены системы координат Денавита-Хартенберга, получены граф и матрица достижимости, определены параметры основных и вспомогательных систем координат. Сопоставлены диапазоны изменения обобщённых координат для сочленений человека и проектируемого ИМ экзоскелета.

1. Постановка задачи

Одной из важнейших задач, возникающих в процессе создания экзоскелета, представляется анализ кинематики ИМ. Задача состоит, прежде всего, в необходимости синтезировать КС экзоскелета, полностью обеспечивающую требуемые в процессе работы степени подвижности, то есть в процессе движения налагать на человека минимальные ограничения. Данное требование обосновано тем, что в статическом положении сила, действующая со стороны экзоскелета на человека, должна стремиться к нулю.

Возможны два подхода к решению поставленной задачи:

- 1) предельное упрощение модели человека (исключение второстепенных степеней подвижности, под которыми будем понимать такие степени подвижности, которые не влияют напрямую на работу человека в заданных условиях, иначе говоря, “незадействованные” степени свободы). Данный подход имеет несколько существенных недостатков: во-первых, ИМ будет работоспособным только в рамках заданных условий; во-вторых, не всегда представляется возможным спрогнозировать, какие именно степени свободы считать второстепенными; в-третьих, велика вероятность того, что конструкция ИМ, основанная на синтезированной таким образом КС, будет нуждаться в последующей доработке именно в плане создания дополнительных степеней подвижности. С другой стороны, достоинство данного метода состоит в относительной простоте кинематического анализа, и, как следствие, простоте КС.
- 2) Как можно более точное воспроизведение поведения человеческого тела. Недостатки данного подхода сопряжены с многократно возрастающей сложностью модели тела человека, влекущей за собой повышение сложности кинематической структуры ИМ, а также его конструкции. Главным же достоинством данного метода является то, что в результате получаем схему, достаточно точно отвечающую всем движениям человека. Естественно, нельзя полностью исключить возможность возникновения необходимости доработки конструкции ИМ, но риск получения КС, а далее конструкции, не полностью соответствующей заданным условиям, ощутимо ниже в сравнении с первым подходом.

Итак, общую задачу можно сформулировать следующим образом: необходимо выбрать или создать модель человека, как можно более близкую к реальности, а на её основе синтезировать КС ИМ экзоскелета. В случае необходимости, упрощение КС происходит на этапе конструирования.

2. Синтез кинематической схемы исполнительного механизма на базе программного комплекса CATIA

На начальном этапе исследования была выбрана модель человеческого тела, предложенная в подмодуле “Human Activity Analysis” модуля “Ergonomics Design & Analysis” программного комплекса CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application). Данный программный комплекс учитывает достаточное количество степеней подвижности человека, предлагает диапазоны изменения обобщённых координат всех сочленений, основанные на проведённых антропометрических исследованиях, а также позволяет проводить эргономическое проектирование и обладает рядом иных полезных функций.

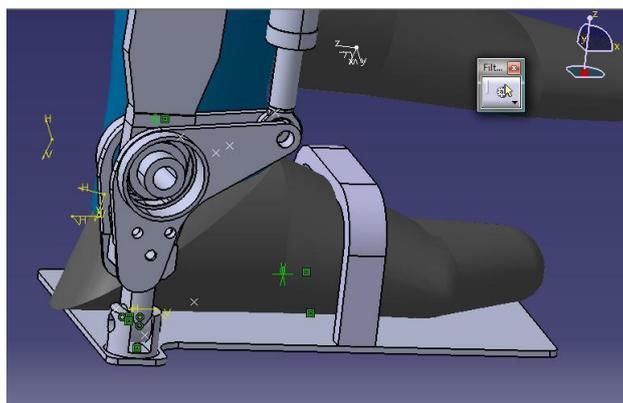


Рис.1. Нейтральное положение стопы человека и соответствующая ему конфигурация ИМ экзоскелета

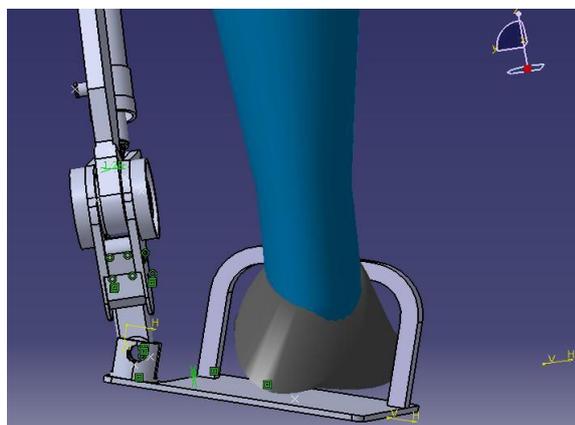


Рис.2. Изменение крена стопы человека

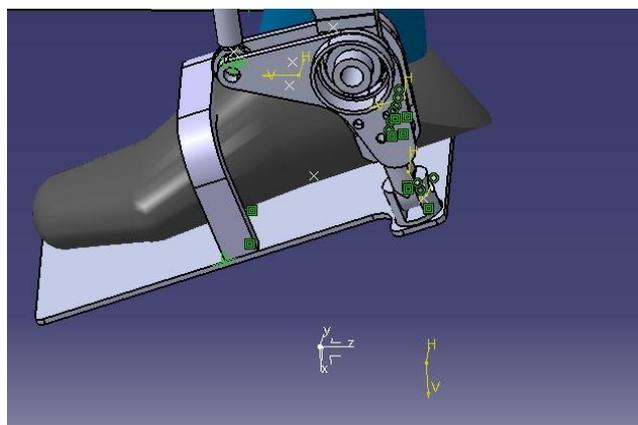


Рис.3. Изменение тангажа стопы человека

В результате кинематического анализа первого варианта КС было обнаружено, что ИМ экзоскелета не может отработать изменение положения стопы человека по крену. В действительности строение щиколоточного сустава у человека наиболее близко к строению сферического шарнира с ограниченными углами поворота. Так как введение сферического шарнира в конструкцию экзоскелета в достаточной степени проблематично, было

решено ввести два цилиндрических шарнира с взаимно перпендикулярными осями. На рис. 1 показана конфигурация ИМ, соответствующая нулевому (нейтральному) положению стопы человека, а на рис. 2 и 3 продемонстрирована возможность изменения положения стопы человека по крену и тангажу соответственно.

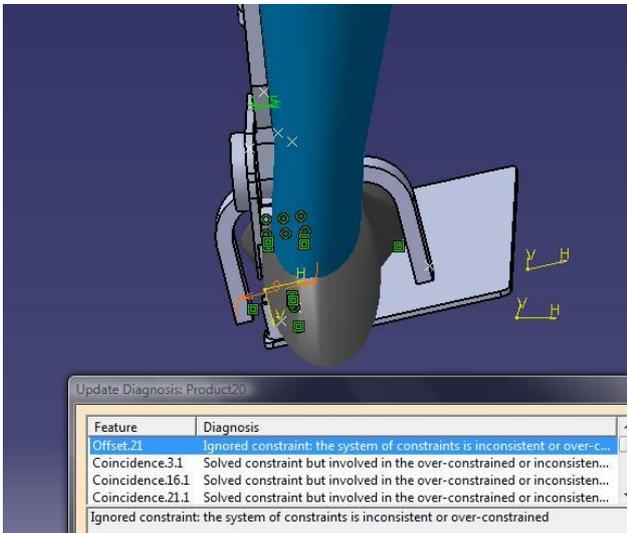


Рис. 4. Ошибка, возникающая при попытке обеспечения изменения положения стопы по крену

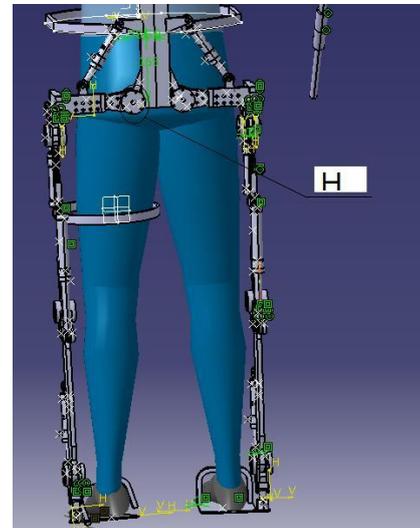


Рис. 5. Причина возникновения конфликта, возникающего при изменении положения стопы по крену

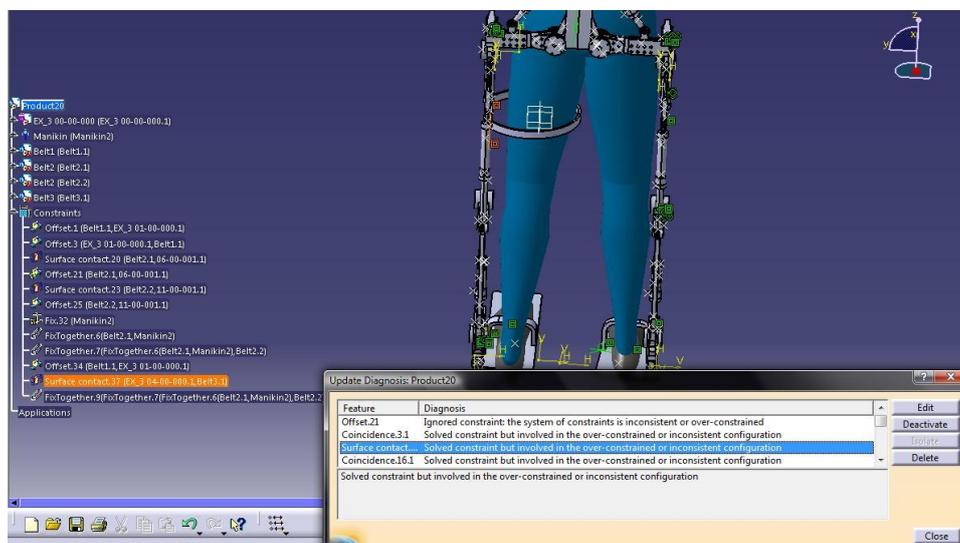


Рис. 6. Конфликт, возникающий при изменении положения стопы по крену вследствие отсутствия возможности поворота бедра человека относительно ремня

После введения дополнительных степеней свободы было обнаружено, что ИМ не обеспечивает изменение положения стопы человека по крену в необходимом диапазоне углов (рис. 4). Это происходит по причине того, что шарнир, обозначенный буквой Н на рис. 5, стремится повернуться вместе со стопой вокруг некоторой оси. Конструкцией же лишь обеспечен поворот в шарнире, а не поворот шарнира относительно некоторой оси.

Решение проблемы состоит в придании ИМ экзоскелета такой конфигурации, которая бы обеспечивала неполное разгибание ноги ИМ, соответствующее полностью выпрямленному положению ноги человека, (в таком случае у конструкции остаётся некоторый резерв по длине и поворот шарнира Н не требуется).

После введения закрепления бедра человека к ИМ был обнаружен конфликт, заключающийся в том, что ограничение “контакт поверхностей”, наложенное на внешнюю поверхность ремня и внутреннюю поверхность звена бедра экзоскелета, не предусматривает поворот ремня вокруг бедра человека (см. подсвеченное ограничение на рис. 6).

С целью решения этой проблемы была введена следующая связь: внутреннее кольцо закреплено на бедре человека и может поворачиваться относительно ремня (рис. 7). На ремень наложено ограничение типа “контакт поверхностей” (ремень – бедро ИМ). Таким образом, кольцо может поворачиваться внутри ремня и смещаться вдоль вертикальной оси, ремень же может смещаться относительно бедра ИМ вдоль горизонтальной оси.

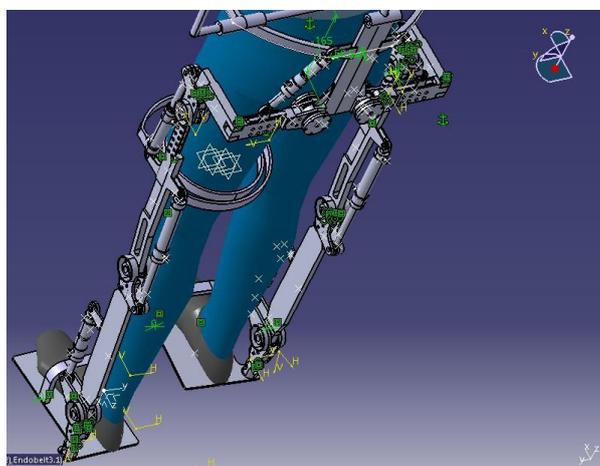


Рис. 7. Конструкция ремня, позволяющая разрешить конфликт

2.1 Исследование подвижности стопы человека

Определим положения стопы человека, обеспечиваемые ИМ экзоскелета.

2.1.1 Тангаж (dorsiflexion/plantar flexion)

Тангаж задаётся в градусах относительно нейтрального положения стопы. Тангаж, соответствующий перемещению мыска вверх, принят за положительный, вниз – за отрицательный. ИМ обеспечивает изменение положения стопы по тангажу от -25° (рис. 8) до 38° (рис. 9) с полным соблюдением всех наложенных ограничений.

В то же время может быть обеспечен тангаж, больший по величине, но с некоторыми отклонениями от заданных степеней свободы ИМ. Например, тангажу в -50° (предельное значение для человека) соответствует следующее положение ИМ, изображённое на рис. 10.

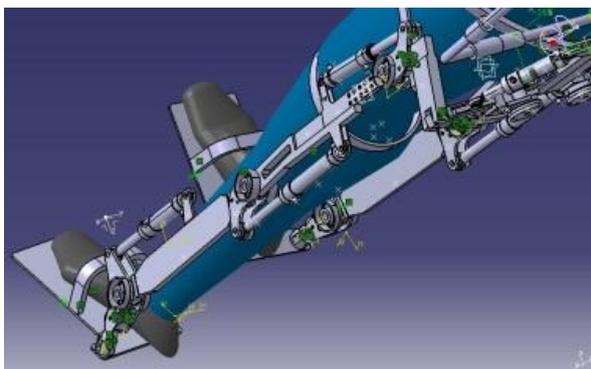


Рис. 8. Конфигурация ИМ, соответствующая тангажу стопы -25°

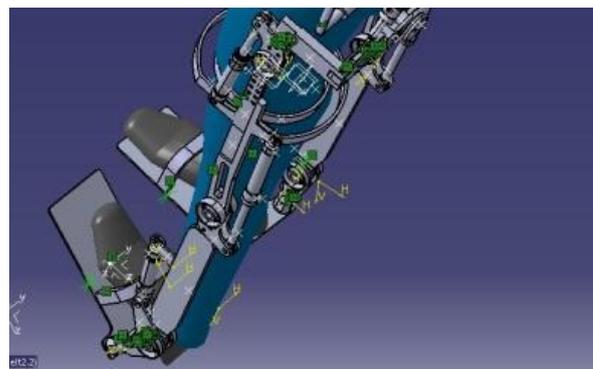


Рис. 9. Конфигурация ИМ, соответствующая тангажу стопы 38°

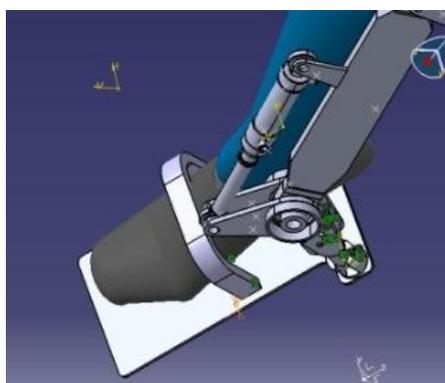


Рис. 10. Положение ИМ, соответствующее значению тангажа стопы -50°

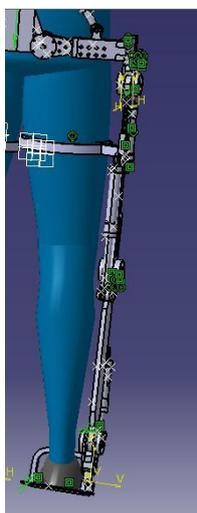


Рис. 11. Конфигурация ИМ, соответствующая крену стопы -5°

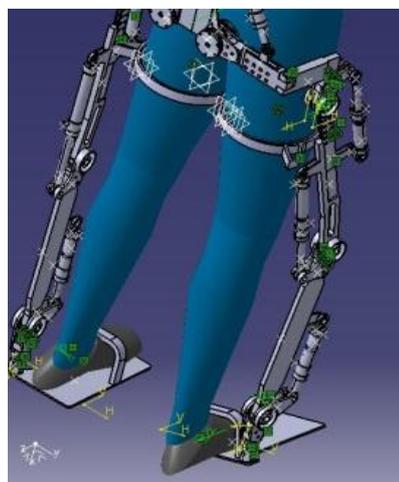


Рис. 12. Конфигурация ИМ, соответствующая крену стопы 20°

Как видно из иллюстрации (рис. 10), заданное положение стопы человека может быть обеспечено при небольшом скольжении ремня, которым крепятся стопы человека и

экзоскелета. Здесь следует учитывать специфику САПР: было задано ограничение, фиксирующее определённое положение ремня относительно стопы человека, которое при изменении положения стопы остаётся неизменным. На деле же возможен определённый сдвиг ноги относительно ремня. В этом случае ИМ обеспечивает все положения стопы человека по тангажу.

2.1.2 Крен (eversion/inversion)

ИМ обеспечивает крен от -5° до 20° с полным соблюдением всех наложенных ограничений. Крайние положения стопы по крену представлены на рис. 11 и 12.

2.2 Исследование подвижности голени человека

Определим положения голени, обеспечиваемые ИМ экзоскелета.

2.2.1 Сгибание – разгибание (flexion/extension)

ИМ обеспечивает движение типа сгибание-разгибание (flexion/extension) в пределах от 0° до 7° с полным соблюдением всех наложенных ограничений. Конфигурация ИМ, соответствующая значению угла flexion 7° , приведена на рис. 13.

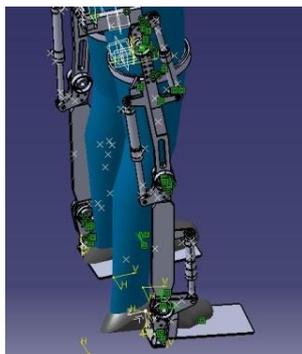


Рис. 13. Конфигурация ИМ, соответствующая углу сгибания голени 7°

2.2.2 Поворот (medial rotation/lateral rotation)

ИМ обеспечивает движение типа поворот (medial rotation/lateral rotation) в диапазоне углов от -43° до 35° с полным соблюдением всех наложенных ограничений. На рис. 14 и 15 показаны конфигурации ИМ, соответствующие крайним положениям голени.

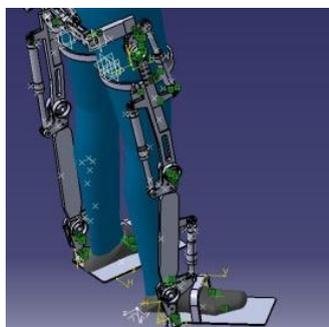


Рис. 14. Конфигурация ИМ, соответствующая lateral rotation голени -43°

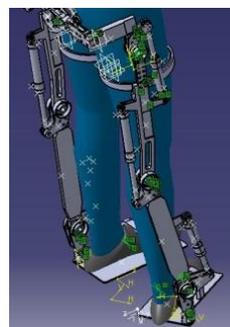


Рис. 15. Конфигурация ИМ, соответствующая medial rotation голени 35°

2.3 Исследование подвижности бедра человека

Определим положения бедра, обеспечиваемые ИМ экзоскелета.

2.3.1 Сгибание – разгибание (flexion/extension)

ИМ экзоскелета обеспечивает движение типа сгибание – разгибание (flexion/extension) в диапазоне углов от -13° до 11° с полным соблюдением всех наложенных ограничений. Конфигурации ИМ экзоскелета, отвечающие углам flexion/extension бедра -13° и 11° представлены на рис. 16 и 17 соответственно.

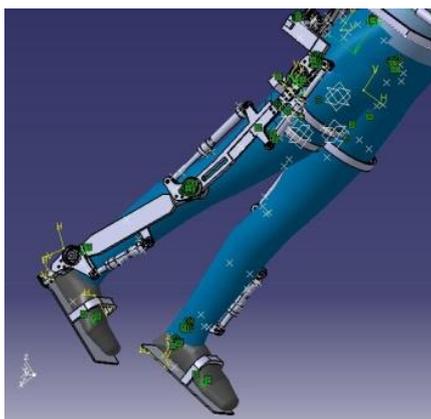


Рис. 16. Конфигурация ИМ, соответствующая flexion бедра -13°



Рис. 17. Конфигурация ИМ, соответствующая extension бедра 11°

2.3.2 Боковое отклонение (abduction/adduction)

ИМ обеспечивает боковое отклонение бедра (abduction/adduction) в пределах от -13° до 9° с полным соблюдением всех наложенных ограничений. На рис. 18 и 19 показаны конфигурации ИМ, соответствующие углам abduction/adduction -13° и 9° .

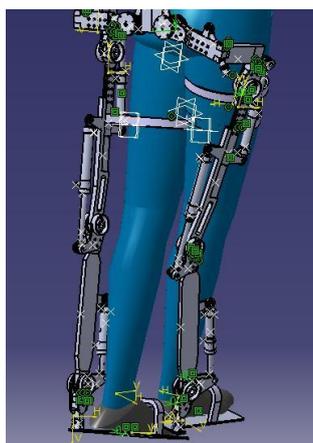


Рис. 18. Конфигурация ИМ, соответствующая adduction бедра -13°

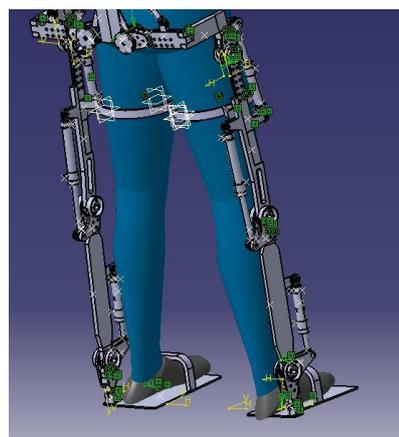


Рис. 19. Конфигурация ИМ, соответствующая abduction бедра 9°

2.3.3 Поворот (medial rotation/lateral rotation)

ИМ обеспечивает поворот бедра (medial rotation/lateral rotation) в диапазоне углов от -2° (рис. 20) до 45° (рис. 21) с полным соблюдением всех наложенных ограничений.

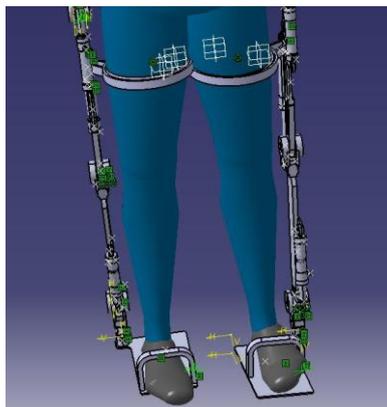


Рис. 20. Конфигурация ИМ, соответствующая lateral rotation бедра -2°

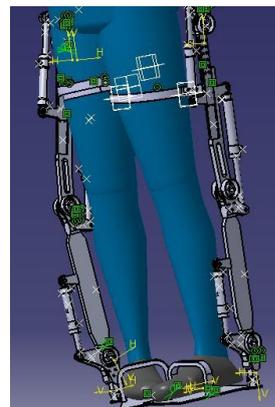
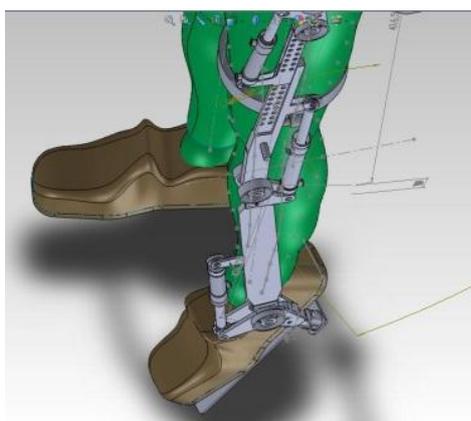


Рис. 21. Конфигурация ИМ, соответствующая medial rotation бедра 45°

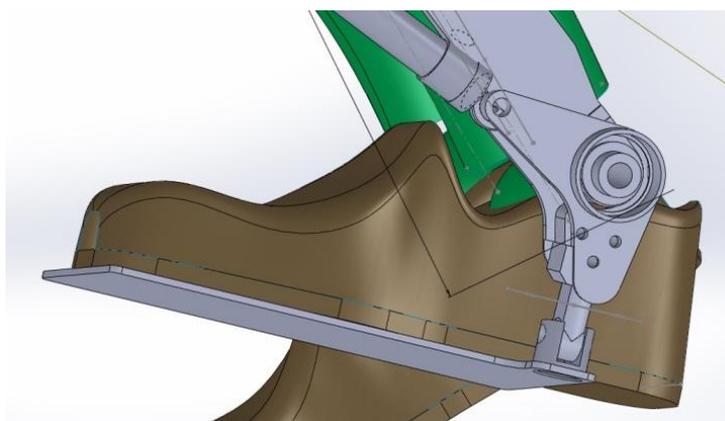
3. Совмещение сред анализа и разработки. Диапазоны изменения обобщённых координат сочленений исполнительного механизма экзоскелета

В результате анализа, проведённого в САПР, были выявлены некоторые недостатки данного программного комплекса, объясняющиеся неоднозначностью решения обратной задачи кинематики. На стадии разработки конструкции было решено совместить среды анализа и разработки, то есть проводить анализ в программном комплексе SolidWorks, для чего предварительно была разработана модель ног человека. Ниже показаны результаты этого анализа, представляющие собой диапазоны изменения обобщённых координат сочленений ИМ экзоскелета.

Обеспечивается тангаж стопы от -50° до 40° (рис. 22).



а) -50°



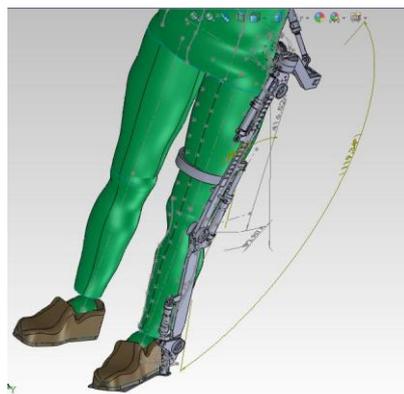
б) 40°

Рис. 22. Диапазон изменения положения стопы человека по тангажу

Обеспечивается крен стопы от -30° до 20° (рис. 23).



а) -30°



б) 20°

Рис. 23. Диапазон изменения положения стопы человека по крену

Обеспечивается диапазон углов сгибания – разгибания для голени человека от 0° до 90° (рис. 24).

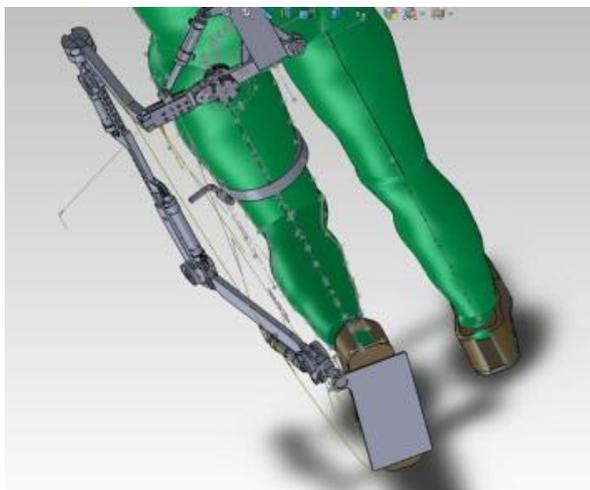


Рис. 24. Конфигурация ИМ, соответствующая углу сгибания для голени человека в 90°

Обеспечивается сгибание – разгибание для бедра человека в диапазоне углов от -4° до 60° (рис. 25).



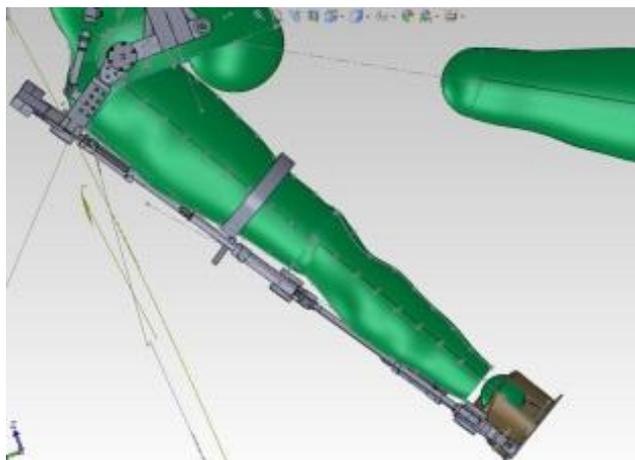
а) -4°



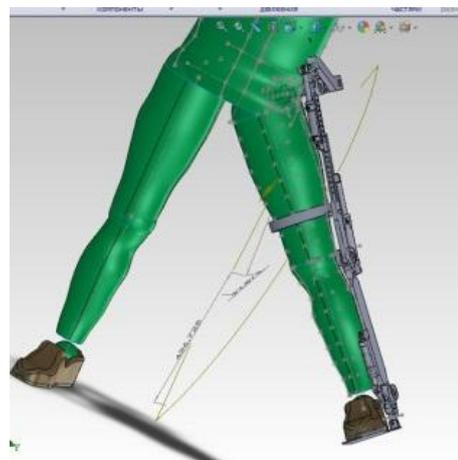
б) 60°

Рис. 25. Диапазон изменения положения бедра человека по углам сгибания – разгибания

Обеспечивается боковое отклонение для бедра человека в пределах от -30° до 45° (рис. 26).



а) -30°



б) 45°

Рис. 26. Диапазон изменения бокового отклонения бедра человека

Обеспечивается угол поворота для бедра человека от -45° до 45° (рис. 27).



а) -45°



б) 45°

Рис. 27. Диапазон изменения положения бедра человека по углу поворота

Диапазоны изменения обобщённых координат сочленений экзоскелета, оснащённых ЭГСП, выбранные с учётом антропометрических данных, представленных в программном комплексе САТИА, приведены в таблице 1. Кинематическая схема ИМ с назначенными системами координат Денавита-Хартенберга [15], синтезированная в соответствии с ука-

занными выше требованиями, представлена на рис. 28, а соответствующая ей 3-D модель, разработанная в программном комплексе SolidWorks, – на рис. 29.

Таблица 1. Диапазоны изменения обобщённых координат в сочленениях экзоскелета, оснащённых приводами

Сочленения	Значение диапазона
q_7, q_{14}	$[135^\circ; 210^\circ]$
q_9, q_{16}	$[120^\circ; 184^\circ]$
q_{10}, q_{17}	$[90^\circ; 180^\circ]$
q_{11}, q_{18}	$[140^\circ; 230^\circ]$

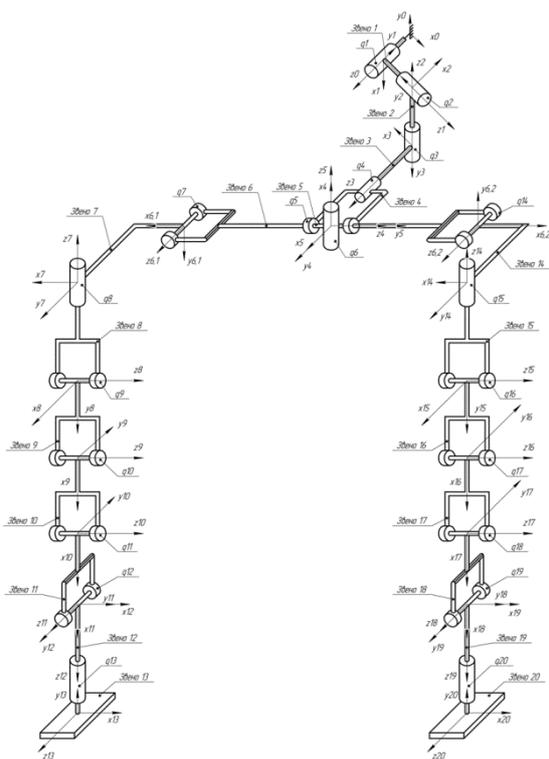


Рис. 28. Кинематическая схема исполнительного механизма экзоскелета

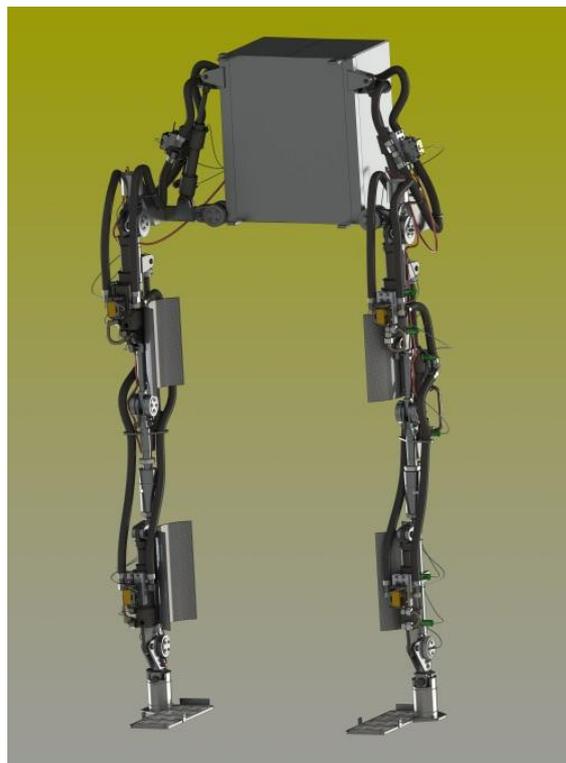


Рис. 29. 3-D модель исполнительного механизма экзоскелета

В соответствии с [16], предложенная КС может быть представлена ориентированным графом достижимости, где вершины графа обозначают звенья ИМ, а дуги – соединяющие их сочленения (рис. 30).

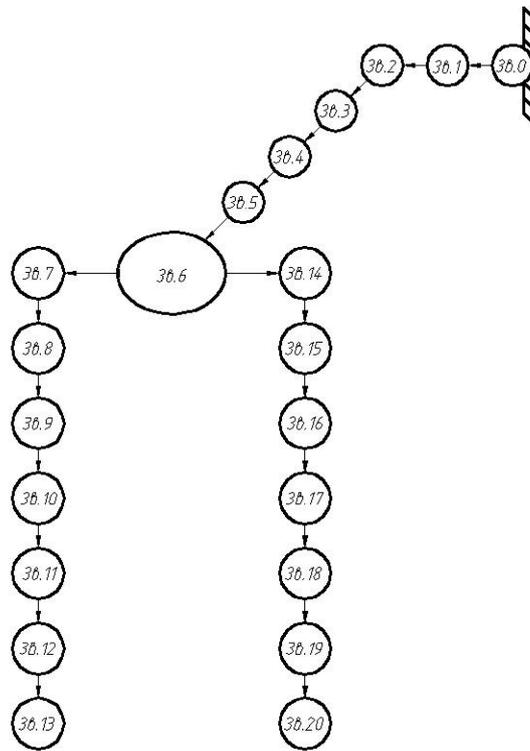


Рис. 30. Граф достижимости ИМ экзоскелета

Матрица достижимости для ИМ экзоскелета, где каждый элемент $d_{ij} = 1$, если звено i достижимо из звена j , и $d_{ij} = 0$, если звено i не достижимо из звена j , представлена в таблице 2.

Таблица 2. Матрица достижимости ИМ экзоскелета

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Значения параметров Денавита-Хартенберга для основных и вспомогательных СК ИМ экзоскелета представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Значения параметров Денавита-Хартенберга основных СК ИМ экзоскелета

№ СК	θ , рад	d , м	a , м	α , рад
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	$-\pi/2$	0	0,238	$-\pi/2$
7	0	0,198	0,167	$\pi/2$
8	$\pi/2$	- 0,107	0	$-\pi/2$
9	$\pi/2$	0	0,526	0
10	0	0	0,674	0
11	0	0	0,094	$\pi/2$
12	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$
13	0	0,101	0	$-\pi/2$
14	π	0,198	- 0,167	$\pi/2$
15	$\pi/2$	- 0,107	0	$-\pi/2$
16	$\pi/2$	0	0,526	0
17	0	0	0,674	0
18	0	0	0,094	$\pi/2$
19	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$
20	0	0,101	0	$-\pi/2$

Таблица 4. Значения параметров Денавита-Хартенберга вспомогательных СК ИМ экзоскелета

№ СК	θ , рад	d , м	a , м	α , рад
6,2	π	0	0,476	0

Итак, синтезированная КС ИМ экзоскелета позволяет человеку совершать ряд типовых движений, таких как приседания, ходьба, бег по лестнице, махи ногами, наклоны корпуса и т.п., при этом ограничения, накладываемые на подвижность человека-оператора, находятся в разумных пределах (рис. 31).

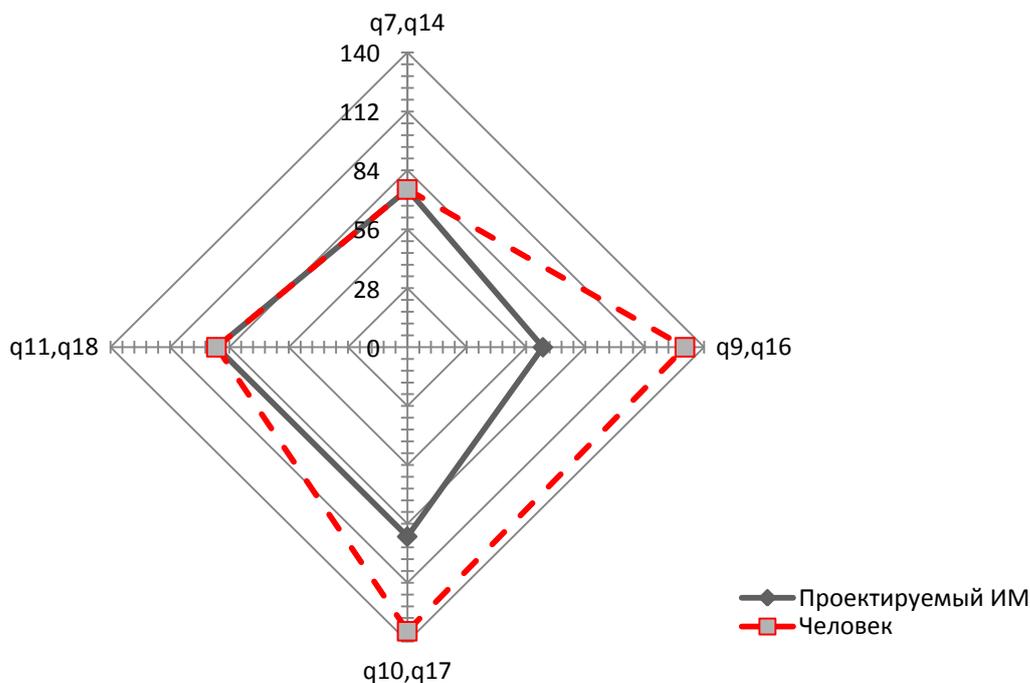


Рис. 31. Сравнение диапазонов изменения обобщённых координат для проектируемого экзоскелета и человека

Заключение

Метод синтеза [17, 18] позволяет успешно решать задачи синтеза КС роботов с древовидной кинематической структурой [19-22], однако проектирование машин, предназначенных для человека, сопровождается рядом трудностей, сопряжённых с необходимостью учёта таких специфических требований как эргономичность, биологические ограничения подвижности в сочленениях, ограничения по максимальным скоростям перемещения и ускорениям звеньев тела человека, в значительной мере усложняющих процесс окончательной доводки проектируемой машины.

Предложенный в настоящей работе метод синтеза КС ИМ экзоскелета позволяет на этапе эскизного проектирования проанализировать различные варианты КС и для каждого из них получить диапазоны изменения обобщённых координат сочленений, сопоставление которых с аналогичными диапазонами для человека позволяет разработчику дать оценку той или иной КС. Так как на этапе синтеза КС важны лишь её геометрические размеры, а также тип и положение степеней подвижности, разработчик может оперативно и с минимальными трудозатратами провести анализ той или иной КС, что позволяет подготовить окончательный вариант КС до начала процесса детальной проработки конструкции ИМ.

Список литературы

1. Atlas. Anthropomorphic Robot: Datasheet // Boston Dynamics: website. Режим доступа: http://www.theroboticschallenge.org/files/ATLAS-Datasheet_v15_DARPA.PDF (дата обращения 01.06.2014).

2. Asimo. Technical Information. Honda Motor Co., Ltd. Public Relations Division, 2007. Режим доступа: <http://asimo.honda.com/downloads/pdf/asimo-technical-information.pdf> (дата обращения 01.06.2014).
3. Biped Robot Johnnie // Institute of Applied Mechanics at the Technischen Universität München: website. Режим доступа: www.amm.mw.tum.de/en/research/current-projects/humanoid-robots/johnnie/ (дата обращения 01.06.2014).
4. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Управление исполнительными системами двуногих шагающих роботов. Теория и алгоритмы / под ред. А.К. Ковальчука. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 160 с. (Сер. Двуногие шагающие роботы).
5. Кулаков Д.Б. Разработка и исследование исполнительного механизма с электрогидравлическими приводами для системы управления движением двуногого шагающего робота: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 173 с.
6. Ковальчук А.К. Проектирование исполнительного механизма антропоморфного шагающего робота // Естественные и технические науки. 2014. № 2 (70). С. 162-166.
7. Vukobratovic M. Active exoskeletal systems and beginning of the development of humanoid robotics // In: Monograph of ANS: Academy of Nonlinear Sciences. Advances in Nonlinear Sciences II – Sciences and Applications. Belgrade, 2008. Vol. 2. P. 329-348.
8. Raytheon XOS 2 Exoskeleton, Second-Generation Robotics Suit, United States of America // Army Technology: website. Режим доступа: www.army-technology.com/projects/raytheon-xos-2-exoskeleton-us/ (дата обращения 01.06.2014).
9. Kazerooni H., Steger R. The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton // ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control. 2005. Vol. 128, no. 1. P. 14-25. DOI: [10.1115/1.2168164](https://doi.org/10.1115/1.2168164)
10. Верейкин А.А. Расчёт исполнительных гидроцилиндров экзоскелета // Молодёжный научно-технический вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 5. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/569290.html> (дата обращения 01.06.2014).
11. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семёнов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Б.Б., Яроц В.В. Синтез кинематической схемы исполнительного механизма экзоскелета // XIII Международная научно-практическая конференция “Актуальные вопросы науки” : материалы. М.: “Спутник+”, 2014. С. 68-76.
12. Raade J.M., Amundson K.R., Kazerooni H. Development of Hydraulic-Electric Power Units for Mobile Robots // Proceedings of IMECE 2005. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (5-11 November, 2005, Orlando, Florida USA). ASME, 2005. Paper no. IMECE2005-80138. P. 27-34. DOI: [10.1115/IMECE2005-80138](https://doi.org/10.1115/IMECE2005-80138)
13. Sankai Y. Hal: Hybrid Assistive Limb based on Cybernics. Global COE Cybernics, System and Information Engineering, University of Tsukuba. Режим доступа: http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/sonota/ISSR_Sankai.pdf (дата обращения 01.06.2014).

14. EXOATLET - российский экзоскелет: экзоскелеты НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова // ExoAtlet: сайт. Режим доступа: www.exoatlet.ru (дата обращения 01.06.2014).
15. Denavit J., Hartenberg R.S. Kinematic notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices // J. Appl. Mech. June 1955. P. 215-221.
16. Алексеев В.Е., Таланов В.А. Графы и алгоритмы. Структуры данных. Модели вычислений. М.: Изд-во Бином, 2006. 319 с.
17. Pupkov K.A., Kovalchuk A.K., Kulakov V.B. Usage of Biological Prototypes for Kinematical Scheme Construction of Modern Robots // Preprints of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. 3-5 June 2009. Moscow, 2009. P. 1829-1834.
18. Ковальчук А.К. Использование биологического прототипа при проектировании древовидных исполнительных механизмов двуногих шагающих роботов // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 9. С. 49-56.
19. Ковальчук А.К. Разработка математической модели исполнительного механизма роботизированного манекена // Научный Вестник МГТУ ГА. 2011. № 6 (168). С. 103-109.
20. Ковальчук А.К. Выбор кинематической структуры и исследование древовидного исполнительного механизма робота-собаки // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 8. С. 65-73.
21. Ковальчук А.К. Выбор кинематической структуры и исследование динамики древовидного исполнительного механизма робота-краба // Известия вузов. Машиностроение. 2013. № 7. С. 73-79.
22. Ковальчук А.К., Семенов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Д.Б., Верейкин А.А., Яроц В.В. Выбор кинематической структуры и исследование динамики древовидного исполнительного механизма робота-треножника // Инженерный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 10. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/654481.html> (дата обращения 01.06.2014).

Analisis and Choice of the Exoskeleton's Actuator Kinematic Structure

07, July 2014

DOI: 10.7463/0714.0717676

A. A. Vereikin^{1,a}, A.K. Kovalchuk¹, D.B. Kulakov¹, S.E. Semenov¹¹Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation^aaautres@gmail.com

Keywords: [robotics](#), [exoskeleton](#), [tree-like kinematic structure](#), [synthesis of kinematic scheme](#), [ergonomic design](#), [degrees of freedom](#)

The urgency of designing of robotic exoskeletons as one of the most prospective means of modern robotics is proved. A literature review concerning the design issues of anthropomorphic walking robots and exoskeletons is performed. Some problems, accompanying the designing process of exoskeleton actuator, are highlighted. Among them synthesis of its tree-like kinematic structure takes leading place. Its complication is explained by the specific human-machine interaction.

The problem of exoskeleton actuator kinematic scheme synthesis is formulated and possible approaches to its solution are shown. The paper presents the synthesis results obtained using the software complex CATIA-based means of ergonomic design. It investigates the degrees of freedom of human-operator's foot, shin, and thigh. And it identifies a number of shortcomings of this software complex associated with the ambiguity to solve the inverse kinematics problem, leading to a significant complication of kinematics synthesis.

A model of human lower limb on which further studies of the exoskeleton actuator kinematic scheme, ensuring fulfillment of the human-operator standard movements (squats, kick their feet, bending body, walking, running stairs, etc.), are based, is developed in SolidWorks software complex. The reasonability of the exoskeleton kinematic scheme synthesis in software package SolidWorks using anthropometric data from the software complex CATIA, is justified.

The proposed method allows to analyze different kinematic schemes of actuator for the stage of conceptual design and to choose the best of them in accordance with established criteri-

ons. Thus, the developer receives the final version of the kinematic scheme before the detailed design of the actuator starts, thus significantly reducing its labor costs.

References

1. Atlas. Anthropomorphic Robot: Datasheet. Boston Dynamics: website. Available at: http://www.theroboticschallenge.org/files/ATLAS-Datasheet_v15_DARPA.PDF , accessed 01.06.2014.
2. Asimo. Technical Information. Honda Motor Co., Ltd. Public Relations Division, 2007. Available at: <http://asimo.honda.com/downloads/pdf/asimo-technical-information.pdf> , accessed 01.06.2014.
3. Biped Robot Johnnie. Institute of Applied Mechanics at the Technischen Universität München: website. Available at: www.amm.mw.tum.de/en/research/current-projects/humanoid-robots/johnnie/ , accessed 01.06.2014.
4. Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. *Upravlenie ispolnitel'nymi sistemami dvunogikh shagayushchikh robotov. Teoriya i algoritmy* [Control of actuating systems of bipedal walking robots. Theory and Algorithms]. Moscow, MGOU Publ., 2007. 160 p. (Ser. *Dvunogie shagayushchie roboty* [Ser. Bipedal walking robots]). (in Russian).
5. Kulakov D.B. *Razrabotka i issledovanie ispolnitel'nogo mekhanizma s elektrogidravlichesкими приводami dlya sistemy upravleniya dvizheniem dvunogogo shagayushchego robota. Kand. diss.* [Development and research of the actuator with electrohydraulic drives for the motion control system of the biped walking robot. Cand. diss.]. Moscow, 2009. 173 p. (in Russian).
6. Koval'chuk A.K. Design of actuator of anthropomorphic walking robot. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 2 (70), pp. 162-166. (in Russian).
7. Vukobratovic M. Active exoskeletal systems and beginning of the development of humanoid robotics. In: *Monograph of ANS: Academy of Nonlinear Sciences. Advances in Nonlinear Sciences II – Sciences and Applications*. Belgrade, 2008. Vol. 2. P. 329-348.
8. Raytheon XOS 2 Exoskeleton, Second-Generation Robotics Suit, United States of America. Army Technology: website. Available at: www.army-technology.com/projects/raytheon-xos-2-exoskeleton-us/ , accessed 01.06.2014.
9. Kazerooni H., Steger R. The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton. *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control*, 2005, vol. 128, no. 1, pp. 14-25. DOI: [10.1115/1.2168164](https://doi.org/10.1115/1.2168164)

10. Vereikin A.A. Calculation of actuating cylinders of exoskeleton. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*. 2013. № 5. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/569290.html> , accessed 01.06.2014. (in Russian).
11. Vereikin A.A., Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Karginov L.A., Kulakov B.B., Yarots V.V. Synthesis kinematic scheme of the actuating mechanism of the exoskeleton. *13 Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Aktual'nye voprosy nauki : materialy* [Proc. of the 13 International Scientific-Practical Conference "Actual Problems of Science"]. Moscow, "Sputnik+" Publ., 2014, pp. 68-76. (in Russian).
12. Raade J.M., Amundson K.R., Kazerooni H. Development of Hydraulic-Electric Power Units for Mobile Robots. *Proceedings of IMECE 2005. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 5-11 November, 2005, Orlando, Florida USA. ASME, 2005, paper no. IMECE2005-80138, pp. 27-34. DOI: [10.1115/IMECE2005-80138](https://doi.org/10.1115/IMECE2005-80138)
13. Sankai Y. *HAL: Hybrid Assistive Limb based on Cybernics*. Global COE Cybernics, System and Information Engineering, University of Tsukuba. Available at: http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/sonota/ISSR_Sankai.pdf , accessed 01.06.2014.
14. EXOATLET - rossiiskii ekzoskelet: ekzoskelety NII Mekhaniki MGU im. M.V. Lomonosova [ExoAtlet is the first Russian exoskeleton: exoskeletons made by scientist of Mechanics Scientific-Research Institute of Lomonosov Moscow State University]. ExoAtlet: website. Available at: www.exoatlet.ru , accessed 01.06.2014. (in Russian).
15. Denavit J., Hartenberg R.S. Kinematic notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. *J. Appl. Mech.*, June 1955, pp. 215-221.
16. Alekseev V.E., Talanov V.A. *Grafy i algoritmy. Struktury dannykh. Modeli vychislenii* [Graphs and algorithms. Data Structures. Models of computation]. Moscow, Binom Publ., 2006. 319 p. (in Russian).
17. Pupkov K.A., Kovalchuk A.K., Kulakov B.B. Usage of Biological Prototypes for Kinematical Scheme Construction of Modern Robots. *Preprints of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 3-5 June 2009. Moscow, 2009, pp. 1829-1834.
18. Koval'chuk A.K. Use of a biological prototype when designing tree-like actuators of bipedal walking robots. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 9, pp. 49-56. (in Russian).
19. Koval'chuk A.K. Development of a mathematical model of the actuating mechanism of robotic mannequin. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA*, 2011, no. 6 (168), pp. 103-109. (in Russian).

20. Koval'chuk A.K. Choice of a kinematic structure and reseach of a "Robot-dog" tree-like actuator. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 8, pp. 65-73. (in Russian).
21. Koval'chuk A.K. Choosing the Kinematic Structure and Dynamics Study of Tree-like Robot Crab Actuator. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 7, pp. 73-79. (in Russian).
22. Koval'chuk A.K., Semenov S.E., Karginov L.A., Kulakov D.B., Vereikin A.A., Yarots V.V. Choice of kinematic structure and study of dynamics of tree-like actuator of robot-tripod. *Inzhenernyi vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Engineering Herald of the Bauman MSTU*, 2013, no. 10. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/654481.html> , accessed 01.06.2014. (in Russian).