электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 02, февраль 2016

УДК 007.51

Анализ человеко-машинного взаимодействия на примере активного экзоскелета

Савченко А.Г., *бакалавр*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Кафедра «Биомедицинские технические системы»

Зельцер А.Г., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Кафедра «Инструментальная техника и технологии»

Научный руководитель: Верейкин А.А, аспирант
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»
bmt-1@bmstu.ru

Введение

С давних времен человечество мечтало перешагнуть через предел допустимых для человека нагрузок. Многие столетия данная цель казалась недосягаемой. Но эпоха появления экзоскелетов перевернула привычные представления о человеческих возможностях. Стоит начать с вопроса: «что такое экзоскелет?». Этимология этого слова восходит к греческим «экзо» – внешний и «скелетос» – скелет. Таким образом, экзоскелет представляет собой каркас, повторяющий биомеханику человека и служащий для увеличения силы оператора.

На сегодняшний день сферы возможного применения экзоскелетов самые разнообразные: от сельского хозяйства и медицины до космической и военной промышленности. Вопросам разработки экзоскелетов посвящены исследования [1-16]. Наиболее передовыми образцами, насколько можно судить, являются BLEEX [2, 3], XOS2 [7] и HULC [8]. Настоящая статья продолжает ряд публикаций, посвящённых созданию отечественного экзоскелета [9-16].

Начало эпохи проектирования экзоскелетов

В настоящее время острой проблемой экзоскелетов является их взаимодействие с человеком. Данная проблема родилась еще при создании первого экзоскелета Hardiman

компанией General Electric совместно с армией США в 1960-е годы. При массе исполнительного механизма (ИМ) в 680 кг его грузоподъемность составляла 110 кг, а управление гидравлическими клешнями осуществлялось оператором изнутри [6].

При испытаниях модель с трудом удавалось удерживать под контролем из-за некоторых факторов: 1) система не могла копировать движения человека, то есть не осуществлялась обратная связь «человек –экзоскелет»; 2) инженерам не удалось добиться синхронизации между нижней и верхней частями ИМ. Вдобавок ко всему вышесказанному, экзоскелет зависел от электрогенераторов и вспомогательной аппаратуры, которая занимала внушительное пространство [6].В итоге в 1971 г. из-за отсутствия видимых перспектив проект Hardiman был заморожен.

Человеко-машинное взаимодействие

Хотя проект Hardiman стал одной из неудач американских конструкторов и инженеров, на этом разработки в области экзоскелетов не закончились. В настоящее время во многих странах мира ведутся проекты по созданию экзоскелетов разных типов и конструкций. И одной из наиболее важных задач, которая является камнем преткновения в совершенствовании этой области, представляется взаимодействие оператора с бортовой аппаратурой экзоскелета.

Предлагается модель экзоскелета, в которой рассмотрены несколько способов обеспечения контакта оператора с каркасом экзоскелета. Первый заключается в обеспечении обратной связи с помощью тензодатчиков, которые представляют собой датчики нагрузки, их принцип действия заключается в том, что они способны преобразовывать обычную силу в аналоговый сигнал. На основании этого, экзоскелет будет пилотироваться по принципу электродистанционной системы управления, которая сейчас активно применяется для летательных аппаратов, с использованием отрицательной обратной связи, обеспечивающей слежение за входным сигналом. В нашем случае «органом управления» в экзоскелете является оператор, именно он формирует управляющие сигналы. С помощью тензодатчиков-приемников, которые плавно меняют выходной сигнал пропорционально входному действию, считываются механические перемещения конечностей тела оператора, далее они преобразуются в аналоговые или цифровые электрические сигналы и передаются по электропроводам, посредством отрицательной обратной связи, ввычислитель системы управления. Он, с заложенными в нем алгоритмами управления, преобразует поступившие сигналы в управляющие электросигналы, которые далее поступают к приводу, который, в свою очередь,

принимает сигнал и изменяет значение соответствующих обобщённых координат сочленений ИМ.

Тензодатчики хорошо подходят для данного способа организации обратной связи, так как имеют сверхкороткий ход, что позволяет существенно уменьшить задержку в управлении экзоскелетом, которая должна составлять не более 0,1 с. Эта цифра определяется интервалом времени, за которое мозг передает данные биологическим датчикам процентного удлинения мышц человека.

Второй способ заключается в обеспечении обратной связи с помощью биотоков. Идея основана на прямом взаимодействии нервных импульсов с датчиками-приемниками. Такая связь обеспечит один из важнейших критериев эффективности экзоскелета – естественность управления. Но у нее есть существенный недостаток, который заключается в инвазивном методе имплантирования электродов в периферический нерв для снятия электрических управляющих сигналов, получаемых от двигательных волокон периферического нерва. Наряду с этим недостатком сразу же возникает проблема в снятии и распознании сигнала из-за слабого потенциала покоя волокон, например у мышечной ткани он составляет 80-90 мВ, потенциал действия – 120-135 мВ, а у нейронов и нервных волокон всего 70 мВ [17-20]. Для снятия данных сигналов можно использовать сигма-дельта модуляцию совместно с усилителем сигнала. Сигма-дельта модуляция обеспечит оцифровку сигнала с заданными характеристиками в рабочей полосе частот, а усилитель будет служить для усиления сигнала биопотенциалов.

Самая главная проблема данного способа заключается в отыскании на теле человека нервных окончаний периферической нервной системы, отвечающих за реализуемое движение. На сегодняшний день для реализации данной проблемы можно воспользоваться картой нервной системы человека или же схемой проекции токов нервных сплетений и каналов движения нервных токов на поверхности тела человека.

После того, как сигнал удалось распознать, усилить и модулировать, он передается непосредственно в систему силовых приводов, которая далее реализует поставленное движение.

Обеспечение безопасности оператора в экзоскелете

Как уже отмечалось ранее, экзоскелет представляет собой внешний каркас, который может снимать с человека внешнюю нагрузку. Однако, в военных целях этого мало. Часто увешанный броней боец все равно погибает от выстрела, из-за повреждения внутренних органов. Это происходит по вине удара огромной силы, который наносит пуля или снаряд, даже не пробив броню. Подобные удары бывают не только от попадания из

оружия, но и возможны при прыжках с внушительной высоты. Все эти нагрузки наносят человеку внутренние повреждения за счет того, что энергия воздействия не погашена.

Существуют статистические данные о силе ударов, которые может выдержать человек, его скелет, суставы и внутренние органы. В соответствии с этими данными необходимо гасить всю остальную энергию. Ниже рассмотрены некоторые способы диссипации энергии.

Большинство простейших бронежилетов практически не имеют никаких демпфирующих слоев: уменьшение энергии происходит за счет ее распределения по площади бронепластины.

Такой способ применялся еще в средневековье: до появления огнестрельного оружия доспехи часто были монолитными, панцирными. Часто пробить его мечом было непросто, а вот оглушить человека внутри – вполне реально. Элементы доспеха распределяли энергию по как можно большей площади. Однако в современности этого недостаточно, поэтому предложены еще три возможных пути:

- вставка специальных демпфирующих материалов под бронепластину. Бронепластина не пропускает снаряд, а демпфирующая вставка гасит большую часть энергии;
- бронепластины изготавливают из вязких материалов, задача которых не добиться отскока пули, а добиться того, чтобы пуля, повреждая броню, увязла в ней. За счет вязкости материала гасится (диссипируется) энергия;
- повышение надежности бронежилета за счет компоновки пластин по вертикали и горизонтали. Данный способ дает улучшение эксплуатационных характеристик вследствие возможности замены бронепластин на новые при одновременном улучшении эргономичности индивидуальной бронезащиты за счет повышения свободы движения в процессе эксплуатации и повышения гигиенических показателей благодаря выполнению чехлов разъемными [21].

В экзоскелете оператор не ограничен своей грузоподъемностью, в связи с чем открывается возможность проектирования куда более тяжелой брони, которая будет выдерживать достаточно серьезные нагрузки. Однако необходимо, чтобы до оператора не дошло энергии больше, чем он может выдержать. Возникла идея сделать костюм с внешним панцирем из различных материалов, задача которых остановить пулю. Под данную бронезащиту можно вмонтировать слой жидких демпфирующих материалов. Необходимо расположить их по как можно большей площади тела оператора. Получается такая модель, в которой человек словно плавает в данной вставке. Если представить человека, находящегося в подвижном бассейне, то при тряске до человека доходит далеко

не вся энергия. Также это может дать возможность избежать многих внутренних травм. Как известно, человек по большей части состоит из жидкости. Чтобы избежать перелома костей и ударов внутренних органов, необходимо зафиксировать эти кости и органы. Это отчасти возможно, если сделать внешнее давление на человека регулируемым. Система жидкого демпфера вокруг человека может увеличивать давление на человека до определенных значений, что поможет избежать повреждений. Это поможет человеку выдерживать большую энергию выстрелов, а также приземляться с больших высот с меньшими последствиями.

Факторы опасности для оператора экзоскелета

В разрабатываемой модели экзоскелета рассмотрен следующий фактор опасности для пилота: выход из строя системы управления. Данный фактор чреват травмами любой степени тяжести у оператора, от перелома и растяжения вплоть до летального исхода. Оператор получает перечисленные травмы из-за того, что при выходе из строя системы управления все составляющие части рабочей конструкции экзоскелета могут начать действовать без взаимодействия с пилотом, не подчиняясь его командам и совершать движения, на которые человеческое тело не способно, в связи с чем необходимо интегрировать дополнительные способы обеспечения безопасности. Данная проблема решена путем ограничения диапазонов изменения обобщённых координат сочленений в кинематической схеме экзоскелета. Убраны степени подвижности, на которые не способен человек. К примеру, каркас колена не будет иметь возможности разогнуться более чем на 180 градусов. Если бы каркас выдвинулся дальше, это привело к повреждениям коленного сустава.

Данную систему безопасности можно реализовать несколькими способами:

- введением механического ограничения. Метод является наиболее логичным и простым в исполнении средством обеспечения безопасности. Он заключается в том, что в ИМ экзоскелета закладываются углы поворота, равные предельным значениям углов поворота для суставов человека. Данная система обеспечивает довольно высокие показатели безопасности пилота в экзоскелете, однако у нее есть и существенный минус. Доходя до предельных значений углов с некоторой силой, элементы механизма изнашиваются и со временем выходят из строя. Исходя из минусов механического способа обеспечения безопасности, его следует использовать как резервный;
- введением ограничений, накладываемых программой управления на степени подвижности человека. Данный способ оптимален для штатного режима работы

конструкции экзоскелета. Он обеспечивает максимально плавное ограничение, не вводя силовые приводы и ИМ в граничные положения и не давая на них чрезмерную нагрузку. Но стоит помнить, что подобная система безопасности, хотя и является основной, не должна являться единственной, в связи с тем, что она не так надежна, как механическая, и нуждается в страховке, которая заключается в синхронном взаимодействии двух систем.

Выводы

В ходе проведенной работы были предложены некоторые идеи по обеспечению взаимодействия оператора с бортовой аппаратурой экзоскелета с использованием тензодатчиков и биотоков, выделены опасные факторы, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации экзоскелета, представлены меры по предотвращению данных факторов. В будущем планируется усовершенствовать предложенные способы взаимодействия и обеспечения безопасности оператора экзоскелета для использования в демонстрационном образце экзоскелета капсульного типа, разрабатываемом в данный момент в МГТУ им Н.Э. Баумана в инициативном порядке командой исследователей.

Список литературы

1. Vukobratovic M. Active exoskeletal systems and beginning of the development of humanoid robotics. Monograph of Academy of Nonlinear Sciences. Advances in Nonlinear Sciences II – Sciences and Applications. Belgrade, 2008. Vol. 2. P. 329-348.
2. Kazerooni H., Steger R. The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton // ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control. 2006. Vol. 128. No. 1. P. 14-25. DOI: 10.1115/1.2168164.
3. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) // The International Journal of Robotics Research, 2006. Vol. 25. № 5-6. P. 561-573. DOI: 10.1177/0278364906065505.
4. 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 15.11.15).
5. Лавровский Э.К., Письменная Е.В. О регулярной ходьбе экзоскелетона нижних конечностей при дефиците управляющих воздействий // Российский журнал биомеханики. 2014. Т. 18. № 2. С. 208-225.
6. Аведиков Г.Е., Жмакин С.И., Ибрагимов В.С., Иванов А.В., Кобрин А.И., Комаров П.А., Костенко А.А., Кузнецов А.С., Кузмичев А.В., Лавровский Э.К., Мартыненко

Ю.Г., Митрофанов И.Е., Письменная Е.В., Формальский А.М. Экзоскелет: конструкция, управление // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва, 16-19 июня 2014 г.): тез. докл. М., 2014. С. 84-90.

7. Raytheon XOS 2 Exoskeleton, Second-Generation Robotics Suit, United States of America. Режим доступа: www.gizmag.com/raytheon-significantly-progresses-exoskeleton-design/16479 (дата обращения 15.11.15).
8. HULC – Lockheed Martin. Режим доступа: http://www.lockheedmartin.com/us/products/exoskeleton/hulc.html (дата обращения 15.11.15).
9. 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 // Актуальные вопросы науки. 2014. № XIII. С. 68-76.
10. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Анализ и выбор кинематической структуры исполнительного механизма экзоскелета // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2014. №7. С. 72-93. DOI: 10.7463/0714.0717676.
11. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Каргинов Л.А. Исследование динамики исполнительного механизма экзоскелета нижних конечностей с учётом реакций опорной поверхности // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2014. № 12. С. 256-278. DOI: 10.7463/0815.9328000.
12. Верейкин А.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семёнов С.Е., Каргинов Л.А., Кулаков Б.Б, Яроц В.В. Динамика исполнительного механизма экзоскелета // Техника и технология: новые перспективы развития. 2014. № XIII. С. 5-16.
13. Верейкин А.А. Расчёт исполнительных гидроцилиндров экзоскелета // Молодёжный научно-технический вестник. 2013. № 5. С. 11.
14. Зельцер А.Г., Верейкин А.А., Гойхман А.В., Савченко А.Г., Жуков А.А., Демченко М.А. Концепция экзоскелета капсульного типа для аварийно-спасательных операций // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2015. № 3. С. 14-22.
15. Жуков А.А., Демченко М.А., Верейкин А.А., Савченко А.Г., Зельцер А.Г. Архитектура системы управления экзоскелета // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2015. № 2. С. 546-553.
16. Верейкин А.А., Савченко А.Г., Зельцер А.Г., Жуков А.А., Демченко М.А. Анализ некоторых факторов биомеханики человека как предварительный этап

проектирования исполнительного механизма экзоскелета // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2015. № 2. С. 1-11.

17. Воробьев Е.И., Скворчевский А.К., Сергеев А.М. Проблемы создания алгоритмов управления антропоморфными биопротезами рук и ног // Медицина и высокие технологии. 2012. №1. С. 7-12.
18. Скворчевский А.К., Воробьев Е.И., Скворчевский К.А. Концепция развития технических средств реабилитации (ТСР) людей с ограниченными физическими возможностями на основе антропоморфных биопротезов рук // Медицина и высокие технологии. 2012. №2. С. 7-22.
19. Скворчевский А.К., Воробьев Е.И., Скворчевский К.А., Сергеев А.М., Акентьев А.А., Ковалев Н.С. Технические средства реабилитации (ТСР) на основе антропоморфных биопротезов рук и ног // Информатизация и связь. 2013. № 4. С. 43-58.
20. Потенциал покоя и действия скелетного мышечного волокна. Режим доступа: http://biofile.ru/bio/4548.html (дата обращения 15.11.15).
21. Тиранов В.Г., Разумовская Е.А., Феофанов В.Н., Малахов А.А. Бронежилет: пат. 2202093. Российская Федерация. 2003. Бюл. № 10.