

DOI: 10.18721/JCSTCS.10201

УДК 621.865.8

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ЗАДАЮЩИХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

С.В. Харузин¹, О.А. Шмаков²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

²Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники
и технической кибернетики, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Приведена классификация задающих манипуляционных систем (ЗМС) по типу кинематической схемы и характеру механического взаимодействия с оператором. Приведен структурированный обзор перспективных исследовательских и коммерчески доступных ЗМС общего и специального назначения. По результатам проведенной работы составлены и приведены обобщающие выводы.

Ключевые слова: манипулятор; силовое ощущение; задающие манипуляционные системы; мехатроника; робототехника; экзоскелет.

Ссылка при цитировании: Харузин С.В., Шмаков О.А. Основные тенденции и перспективные решения в области разработки задающих манипуляционных систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 7–21. DOI: 10.18721/JCSTCS.10201

MAIN TRENDS AND PROMISING SOLUTIONS IN HAPTICS

S.V. Kharuzin¹, O.A. Shmakov²

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

²State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC),
St. Petersburg, Russian Federation

The main objective of this paper is to provide a comprehensive and highly structured review of promising research and commercial solutions in haptics. The subject of the presented review is small- and human-sized haptic devices, emerged mainly in the past ten years. This paper consists of three main sections. First section provides classification of haptic systems. Two classification criteria are considered. The first criterion is the kinematics type of the haptic device and the other is the principle of interaction of the device's mechanical parts and human operator. Based on the suggested classification, four categories of haptic devices is presented: continuous devices, parallel devices, exoskeleton devices and combined devices. The second section provides a review of research and commercially available haptic devices developed for general and special usage. The final section provides generalized conclusions.

Keywords: manipulator; haptic feedback; master-slave systems; mechatronics; robotics; exoskeleton.

Citation: Kharuzin S.V., Shmakov O.A. Main trends and promising solutions in haptics. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2017, Vol. 10, No. 2, Pp. 7–21. DOI: 10.18721/JCSTCS.10201

Введение

Задающие устройства, используемые в системах телеуправления средствами робототехники, можно условно распределить по двум группам.

К устройствам первой группы относятся джойстики, задающие рукоятки, клавиатуры и т. п. Информация об изменении состояния какого-либо элемента таких устройств (об отклонении рукоятки, нажатии кнопки и т. п.) преобразуется в движение исполнительных систем объекта управления. В простейшем случае каждый управляющий элемент соотнесен с одной базовой функцией управляемой системы. Усложнение кинематики или расширение набора функций исполнительного устройства приводит к увеличению количества управляющих элементов и/или привязке нескольких функций к одному элементу. Использование управляющих устройств, перегруженных функциональными элементами, приводит к увеличению когнитивной рабочей нагрузки на оператора и снижает эффективность его работы [1]. К устройствам второй группы относятся т. н. задающие манипуляционные системы (ЗМС).

В издаваемой отечественной и зарубежной литературе под ЗМС понимается устройство ввода или совокупность устройств ввода, состоящих из конструктивно объединенных механизмов и устройств – управляющих органов, состояние которых отображается на состоянии управляемого объекта. Включение в состав ЗМС обратных силовых, тактильных или вибрационных связей позволяет снабдить оператора информацией о конфигурации объекта управления (ОУ) и возмущающих воздействиях, прикладываемых к его исполнительным системам со стороны окружающей среды. Такие системы обладают низким уровнем негативного воздействия на работоспособность оператора, имеют интуитивно понятную структуру и позволяют выполнять задачи, требующие одно-

временного неавтоматического скоординированного движения нескольких ОУ.

Цель настоящей работы – составление структурированного обзора перспективных или активно используемых в робототехнике решений в области создания задающих манипуляционных систем. Ниже приведена классификация задающих манипуляционных систем. Затем рассмотрены перспективные исследовательские и коммерчески доступные ЗМС общего и специального назначений.

Классификация задающих манипуляционных систем

Разрабатываемые ЗМС по типу кинематической схемы и характеру механического взаимодействия с оператором можно условно разделить на четыре группы: 1) ЗМС последовательной структуры; 2) параллельной структуры; 3) экзоскелетного типа; 4) гибридные ЗМС.

В составе конструкций ЗМС первых двух типов можно выделить неподвижное основание, поддерживающую систему и подвижную платформу. Неподвижное основание используется для размещения манипулятора на специально подготовленном стенде или на произвольной опорной поверхности. Как правило, разработчики стремятся расположить в основании все активные подсистемы манипулятора. Поддерживающие системы используются для соединения неподвижного основания и подвижной платформы с сохранением необходимого количества ее степеней свободы. В их состав входят одна или несколько цепей из звеньев, попарно образующих кинематические пары различного уровня. Подвижная платформа жестко соединена с задающей рукояткой и в ряде случаев конструктивно объединена с ней. Под задающей рукояткой подразумевается элемент ЗМС, ориентация, положение и конфигурация которого отображаются на состоянии ОУ. Через задающую рукоятку оператор непосредственно получает все тактильные

ощущения и ощущения, связанные с эффектом отраженного усилия.

Второй группой признаков, по которым можно произвести деление задающих систем по группам, является количество точек, через которые оператор взаимодействует с рабочей средой. Существующие разработки можно отнести к системам с одной контактной точкой и к системам с несколькими контактными точками. В первую группу входят манипуляторы последовательного типа и подавляющее большинство манипуляторов параллельного типа. Ко второй группе принадлежат ЗМС экзоскелетного и часть систем гибридного и параллельного типов.

По подходу к реализации эффекта отраженного усилия, представленные в литературе разработки можно разделить на две группы: системы с ситуационным силовым очувствлением и системы с полным силовым очувствлением.

В системах, построенных в соответствии с первым подходом, усилия к звеньям ЗМС

прикладываются только при наличии контакта ОУ и элементов окружающей среды. В системах с полным силовым очувствлением усилия к звеньям ЗМС прикладываются постоянно, вне зависимости от наличия контакта ОУ и элементов рабочей среды.

ЗМС последовательной структуры

ЗМС последовательной структуры в составе своей поддерживающей системы имеют только одну разомкнутую цепь из звеньев. Как правило, такие манипуляторы позволяют ориентировать и позиционировать задающую рукоятку в угловой (схема ВВВ) или цилиндрической (схема ВПП) системах координат. Для снижения негативного воздействия собственных инерциальных и гравитационных сил, возникающих при перемещении задающей рукоятки манипулятора, разработчики стремятся расположить все активные подсистемы в неподвижном основании и на первом звене манипулятора. Однако это не всегда возможно, особенно при обеспечении силового очувствления

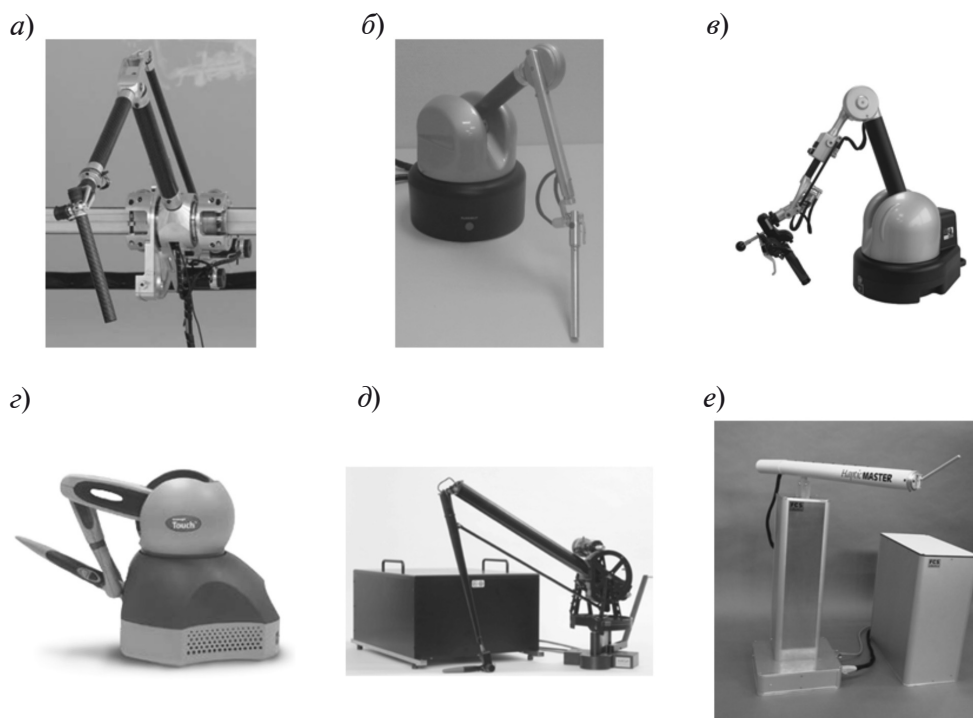


Рис. 1. Фотографии ЗМС LHifAM (а); Virtuouse 3D Desktop (б); Haption Virtuouse 6D TAO (в); Geomagic Touch (г); PHANTOM (д); HapticMaster (е)

Fig. 1. Haptic devices LHifAM (a), Virtuouse 3D Desktop (b), Haption Virtuouse 6D TAO (c), Geomagic Touch (g), PHANTOM (d), HapticMaster (e)

ориентирующих степеней подвижности задающей рукоятки. Поэтому в состав механической системы манипуляторов нередко включаются компенсирующие пассивные механизмы (пружины, противовесы), а в их вычислительные устройства внедряются активные компенсирующие алгоритмы.

Разработка задающих манипуляторов последовательной структуры является хорошо исследованной областью. В коммерческом секторе представлено множество робастных технических решений, используемых на производствах и во время исследований. Фотографии некоторых ЗМС последовательной структуры, рассмотренных ниже, приведены на рис. 1.

Представленный в [2] прототип ЗМС предназначен для управления удаленным манипулятором, масса которого значительно превосходит массу задающего устройства. Прототип состоит из шести попарно соединенных модулей, первые пять из которых составляют поддерживающую систему устройства, а последний является задающей рукояткой. ЗМС обладает относительно большой рабочей областью и позволяет ориентировать задающую рукоятку в широком диапазоне углов, однако размещение приводов в основании каждого модуля привело к увеличению массы звеньев и, как следствие, к увеличению инерциальных сил, возникающих при выполнении рабочих операций. Необходимость жесткого механического крепления первого модуля ЗМС к опорной поверхности сужает диапазон возможного применения устройства.

Задающая система LNI_fAM [3, 4] разработана испанским некоммерческим исследовательским институтом CEIT в рамках проекта по расширению возможностей персонала, занятого техническим обслуживанием реактивных двигателей самолетов. Механическая система LNI_fAM состоит из двух компонентов: собственно манипулятора, обладающего двумя позиционирующими и тремя ориентирующими степенями подвижности, и напольной системы, состоящей из двух вертикальных направляющих и закрепленной между ними горизонтальной направляющей. Манипулятор крепится на горизонтальной направляющей, вслед-

ствие чего оператор способен осуществлять его перемещение в вертикальной плоскости. Активные системы ЗМС обеспечивают формирование отраженных усилий только по трем позиционирующим степеням подвижности.

Одна из компаний, вносящих значительный вклад в исследования в области телеуправления, эргономического обеспечения производств и манипулирования объектами виртуальной реальности посредством ЗМС, – французская компания Haption [5]. Haption является дочерней фирмой CEA (French Nuclear Research Agency) и входит в сообщества European Association for Virtual Reality и French Association of Virtual Reality. Основное направление деятельности компании – разработка ЗМС в производственных, образовательных и исследовательских целях. Модельный ряд компании представлен тремя семействами настольных и крупногабаритных ЗМС: Haption Desktop, Haption Virtuouse 6D и Haption Mat 6D [6]. Ниже рассмотрены задающие системы первых двух семейств.

Устройства семейства Haption Desktop представлены двумя моделями: Virtuouse 3D Desktop [7] и Virtuouse 6D Desktop [8]. Поддерживающая система манипуляторов характеризуется тремя вращательными степенями подвижностями, позиционирующими рабочий орган, и тремя степенями подвижностями, ориентирующими его. Задающая рукоятка ЗМС Haption Virtuouse 3D Desktop не оснащена приводами. Поэтому наибольший интерес в качестве интерфейсного решения при телеуправлении представляет задающий манипулятор Haption Virtuouse 6D Desktop, активная система которого формирует вращающие моменты по трем ориентирующим степеням задающей рукоятки. Устройства обладают относительно большой рабочей зоной по сравнению с другими настольными системами. При этом максимальная величина усилий, прикладываемых к их задающим рукояткам, невелика – порядка 10 Н.

Семейство Haption Virtuouse 6D представлено тремя устройствами, разработанными непосредственно для использования при телеуправлении: Haption Virtuouse

6D Standard [9], Haption Virtuoise 6D TAO [10] и Haption Virtuoise 6D High Force [11]. Устройства обладают более мощными приводами по сравнению с устройствами серии Haption Virtuoise 3D Desktop и оснащены приводами, формирующими усилия по всем степеням подвижности манипуляторов. Все рассматриваемые ЗМС оснащены задающими рукоятками с программируемыми кнопками. Задающий манипулятор Haption Virtuoise 6D Standard является базовым устройством рассматриваемого семейства. На его основе построены модификации High Force и TAO. Модификация High Force предназначена для телеуправления с широким диапазоном значений отраженных усилий. ЗМС Haption Virtuoise 6D TAO обладает эргономичной рукояткой с расширенным функционалом.

Деятельность компании Geomagic [12] направлена на разработку ЗМС общего назначения и сопровождающего программного обеспечения. Область применения производимых компанией задающих интерфейсов включает в себя научно-исследовательскую деятельность, работы с компьютерной графикой, трехмерное моделирование и скульптуру, а также телеуправление и дополненное эффектом отраженного усилия взаимодействие с объектами виртуальной реальности. Модельный ряд производимых Geomagic устройств представлен двумя семействами ЗМС: Touch и PHANTOM.

ЗМС семейства Touch предназначены главным образом для работ по созданию виртуальных скульптур. Все устройства имеют три степени подвижности, по каждой из которых обеспечивается эффект отраженного усилия. Ввиду ориентированности устройств на художественные работы, силового очувствления вращающихся степеней подвижности задающих рукояток не предусмотрено. Устройства обладают достаточно малыми значениями отраженных усилий – до 7,9 Н и малыми габаритами рабочего пространства. Модель Geomagic Touch обладает относительно низкой ценой и высокой точностью определения координат задающей рукоятки, вследствие чего особенно популярна у исследователей при разработке систем телеуправления и систем

взаимодействия с элементами виртуальной реальности [13].

Устройства серии PHANTOM предназначены для использования при проведении исследований в области разработки систем телеуправления. Устройства обладают большей рабочей зоной по сравнению с устройствами семейства Touch, имеют приводы, формирующие эффект отраженного усилия по трем переносным степеням подвижности и, в зависимости от оснащения, по трем ориентирующим степеням подвижности.

Одной из активно используемых в машиностроении и легкой промышленности ЗМС является коммерчески доступная система HapticMaster [14, 15]. Устройство представляет собой задающий манипулятор последовательного типа, построенный в соответствии со схемой РПП. Обратное очувствление в системе обеспечивается только по трем позиционирующим степеням задающей рукоятки. Устройство использует схему управления, при которой оператор прикладывает усилия к задающей рукоятке, которые затем преобразуются в движение исполнительных систем объекта управления. HapticMaster обладает относительно большой величиной формируемого отраженного усилия – порядка 250 Н.

ЗМС параллельной структуры

В состав поддерживающей системы ЗМС параллельной структуры входит несколько цепей звеньев, соединенных с общей подвижной платформой. Замкнутая структура параллельных ЗМС обуславливает большие показатели жесткости таких устройств, а также малый уровень воздействия инерционных сил на их задающие рукоятки. Параллельные ЗМС обеспечивают необходимую избыточность, робастность и возможность активной реконфигурации рабочего пространства непосредственно во время функционирования. Наиболее распространенной схемой построения ЗМС параллельной структуры, представленной в публикуемой литературе и среди коммерчески доступных моделей, является схема модифицированного дельта-механизма, прямая и обратная задачи кинематики и

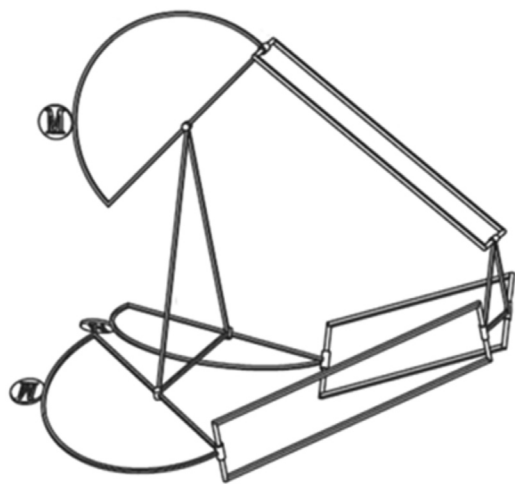


Рис. 2. Схематическое изображение манипуляционной платформы, построенной в соответствии со схемой модифицированного дельта-механизма

Fig. 2. Schematic illustration of a manipulator that is built based on the modified delta-mechanism scheme

динамики для которого решены в [16]. Схематическое изображение манипуляционной платформы, построенной в соответствии со схемой модифицированного дельта-механизма, приведено на рис. 2.

Фотографии некоторых ЗМС параллельной структуры, рассмотренных ниже, приведены на рис. 3.

ЗМС VirtuaPower [17] разработана в рамках проекта по созданию кооперативной системы телеуправления с несколькими задающими и одним исполнительным устройством. Поддерживающая система прототипа сформирована из двух параллельных пятизвенных механизмов, связанных с общим основанием и рукояткой. Активные подсистемы ЗМС формируют отраженные усилия по трем переносным и трем ориентирующим степеням свободы. Все приводы за исключением последнего – связанного с третьей ориентирующей степенью задающей рукоятки – расположены

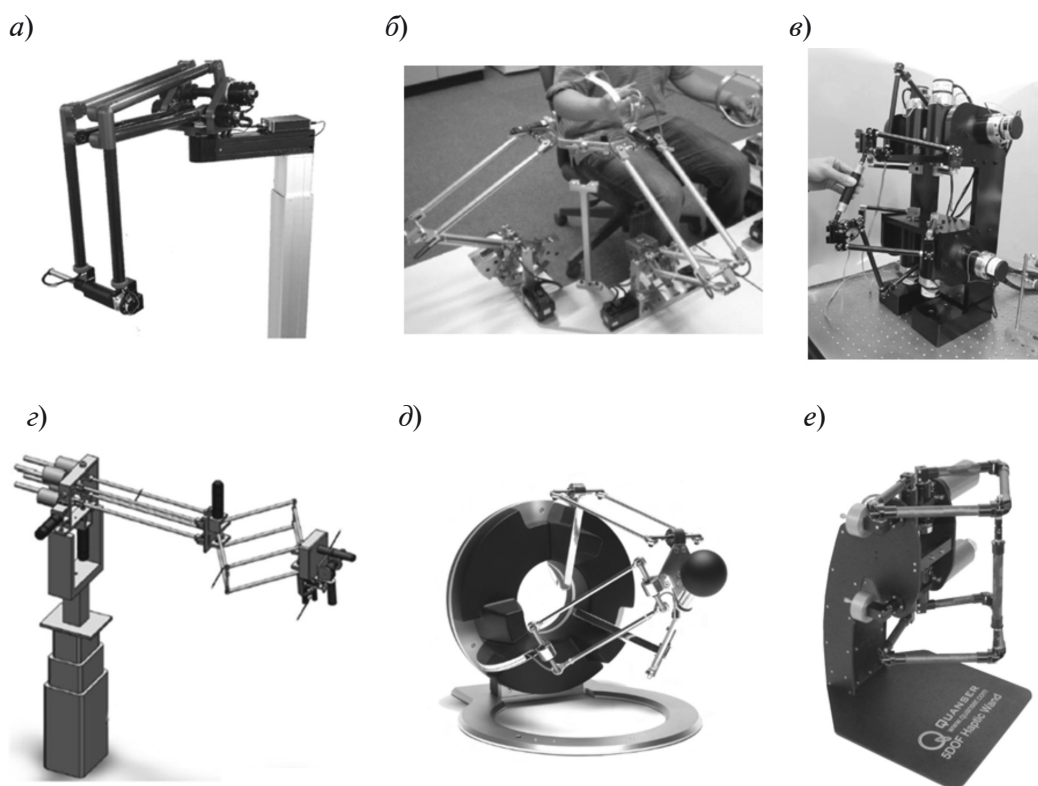


Рис. 3. Фотографии ЗМС VirtuaPower (а), DELTA-R (б), комбинированной ЗМС [24] (в), ЗМС, представленной в [25] (г), Omega.3 (д), 5-DOF Haptic Wand (е)

Fig. 3. Haptic devices VirtuaPower (a), DELTA-R (b), hybrid device [24] (c), haptic device [25] (d), Omega.3 (d), 5-DOF Haptic Wand (e)

в основании и на первом звене. ЗМС обладает относительно большими габаритными размерами и большой рабочей зоной. Размещение устройства при этом возможно только на специально подготовленном неподвижном основании.

Авторами работы [18] приведено описание прототипа параллельной ЗМС DELTA-R, построенной в соответствии с модифицированной схемой дельта-механизма. Особенностью рассматриваемого устройства является сопоставимость его габаритов и размеров рабочей области. В состав базового варианта устройства входит неподвижное основание, два поддерживающих механизма, подвижная платформа и задающая рукоятка – резиновая сфера. Кинематика ЗМС позволяет только позиционировать его задающую рукоятку.

В работе [19] авторы описали макет задающего манипулятора общего назначения и подход к оптимизации его массогабаритных параметров. ЗМС построена в соответствии со схемой дельта-механизма: выходные звенья поддерживающих механизмов соединены с подвижной платформой посредством пассивных сферических шарниров. Все приводы устройства расположены в его основании, что обуславливает малое влияние собственных инерций звеньев поддерживающей системы на величину возмущающих усилий, возникающих при смещении подвижной платформы.

Другим примером задающего манипулятора, параметры механической части которого подвергались предварительной оптимизации, является устройство, представленное в [20]. ЗМС предназначено для взаимодействия с элементами виртуальной реальности. Особенностью устройства является его конструкция: в состав его поддерживающей системы входит три пантографных механизма, связанных с подвижной платформой. При этом с каждой цепью звеньев пантографа связан отдельный привод.

Описание манипулятора, представляющего собой комбинацию из двух манипуляционных систем параллельной структуры приведено в работах [21, 22]. В состав каждой манипуляционной системы входит

по три двухзвенных механизма. Выходные звенья механизмов связаны с рукояткой посредством двухступенных пассивных универсальных шарниров. Кинематика рассмотренной системы позволяет изменять только пять координат задающей рукоятки, две из которых характеризуют ориентацию. Для того чтобы обеспечить управление третьей ориентирующей степенью свободы, рукоятка крепится к универсальным шарнирам посредством винтовой передачи. Таким образом, при вращении рукоятки места крепления механизмов поддерживающей системы взаимно удаляются.

Манипуляционная система параллельной структуры с тремя позиционирующими и тремя ориентирующими степенями подвижности, а также дополнительной степенью, обусловленной наличием схвата, рассмотрена в работе [23]. Все приводы (в т. ч. участвующие в обеспечении обратных силовых связей по степени подвижности схвата) расположены в основании устройства. В состав манипулятора входит основание, восемь ног и механизм схвата, интегрированный в механическую структуру ЗМС. Ноги ЗМС попарно установлены на каждой из четырех граней основания. Каждая нога состоит из двух звеньев. Первое звено соединено с основанием посредством одностепенного активного шарнира, ко второму звену оно крепится посредством двухступенного пассивного шарнира.

ЗМС [24] представляет собой комбинацию из двух параллельных механизмов и предназначена для управления мобильными роботами, оснащенными манипуляторами. Нижний параллельный механизм состоит из неподвижного основания, трех цепей звеньев и подвижной платформы. При этом оси вращения всех шарниров механизма параллельны, что позволяет позиционировать задающую рукоятку и верхний параллельный механизм в горизонтальной плоскости. Второй механизм построен в соответствии со схемой дельта-механизма и способен осуществлять вертикальное перемещение и разворот в горизонтальной плоскости относительно подвижной платформы первого механизма.

Отличительной особенностью манипу-

лятора [25] является его оснащенная схватами для трех пальцев оператора задающая рукоятка. К каждому из схватов со стороны исполнительной системы ЗМС возможно приложение независимых усилий. Это позволяет реализовать управление исполнительным устройством через три контактные точки. Основание манипулятора состоит из трех попарно скользящих друг в друге профилей, относительно которых может смещаться поддерживающая система. Посредством смещения поддерживающей системы и изменения высоты ее крепления возможна реконфигурация рабочей зоны ЗМС непосредственно во время выполнения рабочих операций.

ЗМС **Novint Falcon** предназначен для использования как в научно-исследовательских и производственных целях, так и при выполнении задач общего назначения (например, в качестве рабочего органа при взаимодействии с графическими редакторами, пакетами 3D-моделирования и игровыми приложениями). Устройство разработано американской компанией **Novint** [26]. С момента основания главными направлениями деятельности компании являлись разработка и производство ЗМС специального назначения для предприятий, занятых в автомобильной и авиакосмической отрасли. Однако в рамках кампании по расширению рынка потребителей **Novint** инициировала разработку общедоступной ЗМС нового поколения. Результатом трёхлетней разработки стал задающий манипулятор **Novint Falcon**. Конструкция **Novint Falcon** отличается от конструкций других манипуляторов, построенных в соответствии со схемой модифицированного дельта-механизма. Оси вращения шарниров рассматриваемой ЗМС, соединяющих подвижную платформу и выходные звенья поддерживающих механизмов, ориентированы не к центру окружности, проведенной через центры шарниров, а по ребрам треугольника, вписанного в нее. Манипулятор обладает небольшими габаритами и малыми максимальными значениями формируемых отраженных усилий.

Одним из лидеров в производстве и разработке высокоточных задающих систем

для телеуправления в медицине и индустриальных отраслях является швейцарская компания **Force Dimension** [27]. Все производимые **Force Dimension** устройства представляют собой ЗМС параллельного типа, построенные в соответствии со схемой модифицированного дельта-механизма. Модельный ряд [28] задающих манипуляторов **Force Dimension** представлен устройствами трёх семейств: **Delta.X**, **Omega.X** и **Sigma.X**. В рамках одного семейства манипуляторы различаются формой и функционалом задающих рукояток.

Поддерживающая система базовой платформы семейства **Omega.X** включает в себя три цепи звеньев, приводимых в движение посредством тросовых передач, соединенных с установленными в основании устройства приводами. Все необходимые кинематические вычисления устройства семейства **Omega.X** производят непосредственно на борту, предоставляя станции управления уже обработанную информацию. В качестве задающей рукоятки **Omega.3** используется резиновая сфера, на которой расположена одна программируемая кнопка. Устройство **Omega.6** обладает задающей рукояткой-пером, на которой также расположена одна программируемая кнопка. При этом в состав рукоятки не входят активные компоненты. Рукоятка **Omega.7** оснащена активным рычагом, позволяющим управлять схватной степенью подвижности объекта управления, и способна осуществлять вращение относительно подвижной платформы по трем степеням подвижности.

ЗМС **Force Dimension Delta.X** представляют собой результат дальнейшей работы по улучшению эргономических характеристик и расширению рабочей области манипуляторов серии **Omega.X**. Устройства семейства **Delta.X** имеют такую же кинематическую схему, и в их состав входят те же конструктивные компоненты, что и в состав манипуляторов серии **Omega.X**. Отличие между устройствами двух семейств заключается в длинах звеньев и в наличии пассивного шарнира, расположенного в основании ЗМС **Delta.X**. Шарнир обеспечивает вращение основания манипулятора от 0° (горизонтальная ориентация) до 90°

(вертикальная ориентация), что позволяет использовать его в более широком диапазоне условий применения.

Серия *Sigma.X* представлена только одним устройством – *Sigma.7*. ЗМС имеет семь степеней подвижности (три позиционирующие, три ориентирующие и одну схватную). Все степени подвижности обеспечены приводами отраженных усилий. Рукоятка ЗМС оснащена одной программируемой кнопкой. Устройство обладает меньшей погрешностью определения положения задающей рукоятки по сравнению с ЗМС серии *Omega.X* и *Delta.X* и предназначено преимущественно для использования в качестве задающего манипулятора в медицинских системах телеуправления.

Основными направлениями деятельности компании Quanser [29] являются разработка и производство испытательных стендов средств мобильной робототехники, стендов, наглядно поясняющих основные принципы теории управления в робототехнических системах, вибрационных испытательных стендов, а также систем интерфейсных решений для телеуправления в научных, образовательных и производственных целях. Клиентами компании являются порядка 2500 образовательных и исследовательских учреждений. Среди всех производимых Quanser продуктов можно выделить три задающие системы.

Первой системой является *Twin-Pantograph 3-DOF Haptic Interface*. ЗМС предназначен для телеуправления и манипулирования виртуальными объектами с использованием технологий дополненной реальности. В качестве поддерживающих механизмов в устройстве использована пара пантографов. Центры шарниров, соединяющих противоположные системы рычагов в рамках одного пантографа, соединены жестким звеном. Звено способно неограниченно вращаться относительно мест его крепления. Перемещение звена при этом возможно только в горизонтальной плоскости.

Второй производимой Quanser ЗМС является *5-DOF Haptic Wand* [30]. Поддерживающая система манипулятора состоит из двух пантографов, входные звенья кото-

рых крепятся к неподвижному основанию посредством систем из пар активных шарниров с ортогональными осями вращения, вследствие чего задающая рукоятка манипулятора имеет пять степеней свободы: три поступательных и две вращательные.

Наибольшим числом степеней подвижности из всех предлагаемых Quanser ЗМС обладает устройство *HDI High Definition Haptic Device*. В состав поддерживающей системы ЗМС входят два последовательных манипулятора, установленных параллельно. Каждый манипулятор имеет три степени подвижности. Оба манипулятора закреплены на общем неподвижном основании, их последние звенья соединены задающей рукояткой. Для всех шести степеней свободы обеспечивается формирование отраженных усилий.

ЗМС экзоскелетного типа

Одним из активно развивающихся направлений в области создания задающих манипуляционных систем является разработка и исследование возможностей устройств экзоскелетного типа. Сенсоры и приводы обратных силовых связей в таких системах закрепляются непосредственно на операторе. Фотографии некоторых ЗМС экзоскелетного типа приведены на рис. 4.

Разработанная в Токийском университете задающая система *Kento* [31] представляет собой оснащенный приводами отраженного усилия костюм, надеваемый на верхнюю половину тела оператора. Устройство предназначено как для непосредственного телеуправления демонстрационным антропоморфным роботом *Kojiro* [32], так и для его обучения различным движениям. По результатам проведенного анализа авторы пришли к выводу, что наиболее применимыми исполнительными элементами для передачи усилий от ОУ на мускульно-скелетную систему оператора является система т. н. «мышечных элементов». «Мышечный элемент» состоит из защитного корпуса, привода, системы блоков и связанной с ними посредством троса пружины. Переменное сопротивление движениям оператора формируется за счет активного сжатия и распрямления пружины.

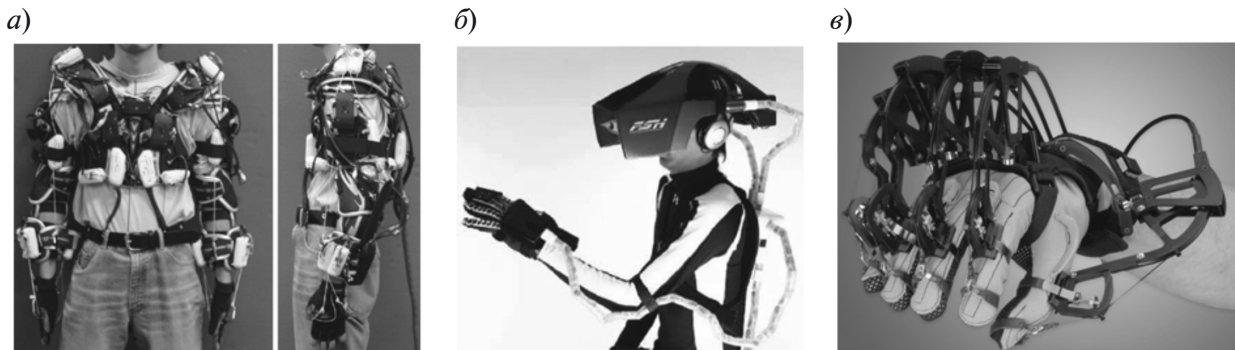


Рис. 4. Фотографии ЗМС Kento [31] (а), ЗМС с сенсорными трубками, представленной в [33] (б), CyberGrasp (в)

Fig. 4. Kento [31] (a), haptic exoskeleton [33] (b), CyberGrasp (c)

В работе [33] рассмотрена задающая система-костюм с тактильными обратными связями. Система предназначена для телеуправления антропоморфным роботом. В состав системы входят шлем трехмерной реальности, рюкзак с вычислительным устройством и аккумуляторами, а также пара перчаток. В большой, указательный и средний пальцы каждой перчатки встроены вибрационные моторы. Ориентация и положение рук и головы оператора определяется с помощью гибких сенсорных трубок, соединенных с рюкзаком. Каждая трубка представляет собой последовательность звеньев, соединенных универсальными шарнирами, углы взаимной ориентации которых измеряются потенциометрами. Ввиду сложности сопоставления координат элементов конечностей оператора и конечностей робота, а также ввиду отсутствия обратных связей по усилию, разработка не показала высокой эффективности при выполнении манипуляций предметами с помощью обеих рук.

Авторами [34] рассмотрена ЗМС, используемая при реализации двустороннего телеуправления в условиях значительной асимметрии между задающей и исполнительной системами. ЗМС представляет собой трехпальцевую перчатку-экзоскелет. Перчатка состоит из трех последовательных механизмов. В состав каждого механизма входит пять пассивных и один активный шарнир, установленный в основании каждого «пальца». Отраженное усилие форми-

руется посредством подачи вращающего момента на первое звено пальца. Величина усилия измеряется установленным в основании одностепенным датчиком силы.

Лидером в производстве коммерческих экзоскелетных решений для телеуправления является компания CyberGlove Systems [35]. Основное направление деятельности компании – разработка и производство ЗМС экзоскелетного и гибридного типов с обратными тактильными и силовыми связями. Модельный ряд CyberGlove Systems представлен тремя семействами ЗМС: CyberGlove, CyberGrasp и CyberForce.

CyberGlove – это семейство экзоскелетных ЗМС, выполненных в виде перчатки. Устройства предназначены главным образом для обеспечения оператора информацией о взаимодействии с объектами виртуальной реальности, однако, при использовании соответствующих методов отображения координат возможно применение таких устройств и при телеуправлении. В состав перчатки входят от 18 до 22 тензорезистивных датчиков (в зависимости от версии устройства), определяющих конфигурацию и ориентацию кисти оператора относительно его предплечья.

CyberGrasp представляет собой комбинацию исполнительной манипуляционной системы (ИМС) и устройства CyberGlove II. ИМС необходима для формирования эффекта отраженного усилия при манипуляции виртуальными объектами, телеуправлении, а также удаленной реабилитации.

ИМС состоит из пяти одинаковых механизмов с регулируемыми геометрическими параметрами (по механизму на один палец). Каждый механизм приводится в движение посредством натяжения троса. Устройство обеспечивает обратные связи по усилию в размере до 12 Н. При этом оно обладает относительно большой массой: порядка 450 г без учета массы аккумуляторов.

CyberForce представляет собой комбинацию CyberGrasp и последовательного манипулятора гибридной структуры. Манипулятор имеет шесть степеней подвижности, по каждой из которых обеспечивается отраженное усилие. Подробный анализ кинематики и динамических параметров устройства проведен в [36].

ЗМС гибридного типа

Гибридные манипуляторы представляют собой устройства, в механической системе которых конструктивно объединены элементы ЗМС параллельной и последовательной структур. К ним относятся как манипуляторы с гибридной поддерживающей системой, так и манипуляторы с разными типами задающей и поддерживающей систем. Наиболее распространенным вариантом является совмещение поддерживающей системы параллельного типа и задающей рукоятки последовательного типа. В ряде случаев в состав гибридной схемы входят элементы манипуляторов последовательной

и/или параллельной структуры (используемые в качестве исполнительных систем ЗМС) и элементы экзоскелетных манипуляторов (используемые в качестве системы датчиков, закрепленных непосредственно на операторе). Фотографии рассмотренных ниже ЗМС гибридного типа приведены на рис. 5.

ЗМС общего назначения iFeel3 [37] предназначена главным образом для обогащенного силовыми и вибрационными обратными связями взаимодействия с элементами виртуальной реальности через одну контактную точку. Механическая система устройства состоит из неподвижного основания, пантографа и задающего пера-рукоятки. Пантограф соединен с неподвижным основанием посредством двух активных шарниров с перпендикулярными осями вращения и способен вращаться в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Элементы параллельного механизма обеспечивают частичную пассивную компенсацию сил тяжести, действующих на первые два звена задающего манипулятора. Устройство обладает малыми габаритами и относительно малой рабочей областью. При этом производимое им максимальное отраженное усилие позволяет определять наличие взаимодействия ОУ с элементами рабочей среды с достаточной степенью достоверности.

Задающая система [38] состоит из па-

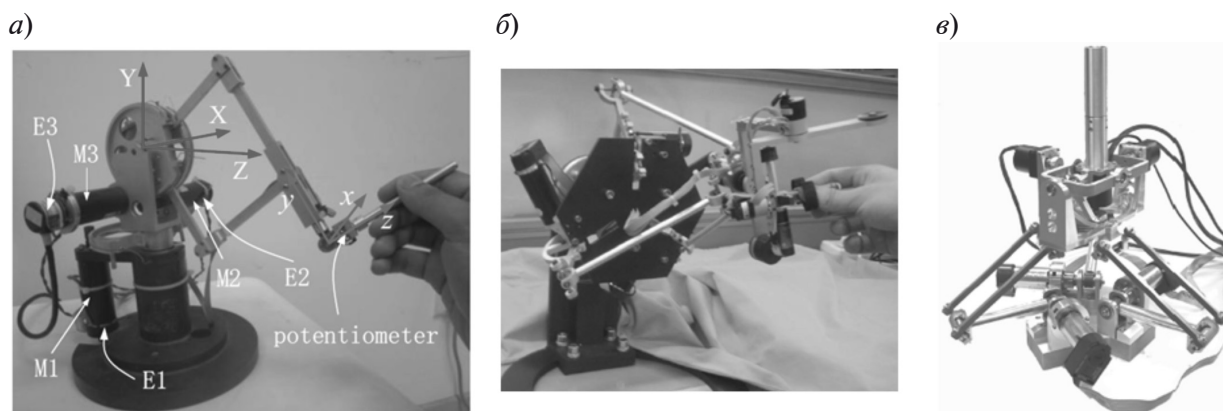


Рис. 5. Фотографии ЗМС iFeel3 (а), медицинской ЗМС, представленной в [38] (б), модульной ЗМС [39] (в)

Fig. 5. iFeel3 (a), medical haptic device [38] (b), modular haptic device [39] (c)

раллельной платформы и задающей рукоятки последовательной структуры, интегрированной в механическую систему ЗМС. Манипулятор предназначен для телеуправления высокоточными исполнительными манипуляторами, в т. ч. медицинскими. Параллельный поддерживающий механизм ЗМС построен в соответствии с модифицированной схемой дельта-механизма и используется для позиционирования задающей рукоятки. Последовательная составляющая поддерживающего механизма построена в соответствии со схемой ВВВ и используется для ориентирования задающей рукоятки.

В работе [39] представлена компактная модульная ЗМС параллельно-последовательной структуры. Система состоит из платформы параллельной структуры и пятизвенного последовательного механизма, используемого в качестве задающей рукоятки. Авторы отмечают, что основным требованием к разработке ЗМС являлось расширение функциональных возможностей устройств, построенных по схеме дельта-механизма, за счет расширения диапазона допустимых углов ориентации задающей рукоятки и обеспечения возможности отработки ее высокочастотных движений. В состав устройства входит параллельный механизм, двухстепенной универсальный механизм и одностепенной механизм. Параллельный механизм обеспечивает позиционирование задающей рукоятки, а два последующих механизма — ее ориентирование.

Заключение

В статье рассмотрены отличительные особенности ЗМС, принадлежащих к классам последовательных, параллельных, экзоскелетных и гибридных манипуляторов. Манипуляционные платформы последовательной структуры обладают сравнительно простыми кинематическими схемами и компактными размерами исполнительных систем. Однако при увеличении показателей жесткости конструкции габаритные размеры таких ЗМС значительно увеличиваются.

Большей жесткостью конструкции и относительно малыми размерами обладают ЗМС параллельной структуры, но такие системы имеют достаточно сложные кинематические схемы, и их применение связано с использованием методов отображения физического рабочего пространства манипулятора на физическое рабочее пространство ОУ и обратно посредством введения связующего виртуального рабочего пространства.

ЗМС экзоскелетного типа являются эргономичными решениями, обеспечивающими необходимый интуитивный базис при взаимодействии между оператором и ОУ, однако к ним предъявляются высокие требования по обеспечению точности определения состояния управляющих элементов. Гибридные ЗМС совмещают достоинства и недостатки включенных в их состав типовых подсистем. При построении таких систем, как правило, используется модульный подход.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cannon D. Perceived mental workload and operator performance of dexterous manipulators under time delay with master-slave interfaces // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications. 2015.
2. Xuewen R. Design of a Force Feedback Teleoperation Master Manipulator // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Information and Automation. Nairar, China, 2014.
3. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС LHIfAM // URL: <http://www4.tecnun.es/assignaturas/control1/LHIfAM.pdf> (Дата обращения: 03.10.2016).
4. Borro D. A Large Haptic Device for Aircraft Engine Manipulability. IEEE, 2004.
5. Официальный сайт компании Haption // URL: <http://www.haption.com/site/index.php/en/company-profile-menu-en> (Дата обращения: 03.10.2016).
6. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС Haption MAT 6D // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Mat_6D.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).
7. Интернет-ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения Haption Virtuouse 3D Desktop // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_3DDesktop.pdf

(Дата обращения: 03.10.2016).

8. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения Haption Virtuouse 6D Desktop // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6DDesktop.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).

9. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения Haption Virtuouse 6D Standard // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_Standard.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).

10. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения Haption Virtuouse 6D TAO // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_TAO.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).

11. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения Haption Virtuouse 6D High Force // URL: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_HF.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).

12. Официальный сайт компании Geomagic // URL: <http://www.geomagic.com/en/products-landing-pages/haptic> (Дата обращения: 03.10.2016).

13. **Quan-Zen A.** Multipoint Haptic Mediator Interface for Robotic Teleoperation // IEEE Systems Journal. 2015. Vol. 9. No. 1.

14. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС HapticMaster // URL: [http://www.vrlab.ctw.utwente.nl/eq/Documentation/HapticMaster_HM_ProductSheet%20\(final\).pdf](http://www.vrlab.ctw.utwente.nl/eq/Documentation/HapticMaster_HM_ProductSheet%20(final).pdf) (Дата обращения: 03.10.2016).

15. **Van der Linde R.Q.** The HapticMaster, a new high-performance haptic interface // URL: <http://people.cs.vt.edu/~wangr06/touch%20review%20organization/VanLFR02.pdf>.

16. **Hao J.** Kinematic and Static Analysis of a Cable-driven 3-DOF Delta Parallel Mechanism for Haptic Manipulators // Proc. of the 34th Chinese Control Conf. Hangzhou, China, 2015.

17. **Giuk L.** A Novel Haptic Device with High-force Display Capability and Wide Workspace // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, Sweden, 2016.

18. **Junpei A.** Haptic Device Using a Newly Developed Redundant Parallel Mechanism // IEEE Transactions on Robotics. 2011. Vol. 27. No. 2.

19. **Sung-Uk L.** Analysis and Optimal Design of a New 6-DOF Parallel Type Haptic Device // Proc. of the IEEE/RSJ Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China, 2006.

20. **Jung W.Y.** Optimum design of 6-DOF parallel manipulator with translational/rotational workspaces for haptic device application // J. of

Mechanical Science and Technology. Springer, 2010.

21. **Minh H.V.** A New 6-DOF Haptic Device for Teleoperation of 6-DOF Serial Robots // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2011. Vol. 60. No. 11

22. **Vu M.H.** Tele-operation of a 6-DOF Serial Robot Using a New 6-DOF Haptic Interface // 2010 IEEE Internat. Symp. Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE).

23. **Lambert P.** A Novel Parallel Haptic Device with 7 Degrees of Freedom // 2015 IEEE World Haptics Conf. (WHC). Evanston, IL, USA, Northwestern University, 2015.

24. **Dongseok R.** Development of a six DOF haptic master for teleoperation of a mobile manipulator // Mechatronics. Elsevier, 2009.

25. **Huanhuan Q.** Design and Calibration of a New 6-DOF Haptic Device // Sensors. 2015. No. 11.

26. Официальный сайт компании Novint // URL: <http://www.novint.com/index.php/novintfalcon> (Дата обращения: 02.10.2016).

27. Официальный сайт компании Force Dimension // URL: <http://www.forcedimension.com/company/about> (Дата обращения: 03.10.2016).

28. Электронный ресурс со спецификациями продуктов компании Force Dimension // URL: <http://www.forcedimension.com/products> (Дата обращения: 03.10.2016).

29. Официальный сайт компании Quanser // URL: <http://www.quanser.com/> (Дата обращения: 03.10.2016).

30. Электронный ресурс с техническими спецификациями ЗМС общего назначения 5-DOF Haptic Wand // URL: http://www.quanser.com/Products/Docs/74/5DOF_Haptic_Wand.pdf (Дата обращения: 03.10.2016).

31. **Kazuo H.** Development of Bilateral Wearable Device "Kento" for Control Robots Using Muscle Actuator Modules // Proc. of the 18th IEEE Internat. Symp. on Robot and Human Interactive Communication. Toyama, Japan, 2009.

32. **Ikuo M.** An Advanced Musculoskeletal Humanoid Kojiro // Proc. of the IEEE-RAS Internat. Conf. on Humanoid Robotics. 2007.

33. **Yosuke M.** Operation Assist for a Teleoperated Robot System Controlled with a Lightweight and High-Operable Master Device // IEEE/SICE Internat. Symp. on System Integration (SII). Meijo University, Nagoya, Japan, 2015.

34. **Brygo A.** Synergy-Based Interface for Bilateral Tele-manipulations of a Master-Slave System with Large Asymmetries // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation

(ICRA). Stockholm, Sweden, 2016.

35. Официальный сайт компании CyberGlove Systems // URL: <http://www.cyberglovesystems.com> (Дата обращения: 08.10.2016).

36. **Martínez-Terran G.** CyberForce Haptic Device: Kinematics and Manipulability // Proc. of the Internat. Conf. on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering.

37. **Chaobin L.** iFeel3: a Haptic Device for Virtual Reality Dental Surgery Simulation //

Статья поступила в редакцию 01.11.2016

REFERENCES

1. **Cannon D.** Perceived mental workload and operator performance of dexterous manipulators under time delay with master-slave interfaces. *Proceeding of the IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA)*, 2015.

2. **Xuwen R.** Design of a Force Feedback Teleoperation Master Manipulator. *Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation*, Hailar, China, 2014.

3. **ZMS LHfAM.** Available: <http://www4.tecnun.es/assignaturas/control1/LHfAM.pdf> (Accessed: 03.10.2016).

4. **Borro D.** *A Large Haptic Device for Aircraft Engine Manipulability*. IEEE, 2004.

5. **Haption.** Available: <http://www.haption.com/site/index.php/en/company-profile-menu-en> (Accessed: 03.10.2016).

6. **ZMS Haption MAT 6D.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Mat_6D.pdf (Accessed: 03.10.2016).

7. **Haption Virtuouse 3D Desktop.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_3DDesktop.pdf (Accessed: 03.10.2016).

8. **Haption Virtuouse 6D Desktop.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6DDesktop.pdf (Accessed: 03.10.2016).

9. **Haption Virtuouse 6D Standard.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_Standard.pdf (Accessed: 03.10.2016).

10. **Haption Virtuouse 6D TAO.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_TAO.pdf (Accessed: 03.10.2016).

11. **Haption Virtuouse 6D High Force.** Available: http://www.haption.com/site/pdf/Datasheet_Virtuose_6D_HF.pdf (Accessed: 03.10.2016).

12. **Geomagic.** Available: <http://www.geomagic.com/en/products-landing-pages/haptic> (Accessed: 03.10.2016).

13. **Quan-Zen A.** Multipoint Haptic Mediator Interface for Robotic Teleoperation. *IEEE Systems*

Proc. of the Internat. Conf. on Virtual Reality and Visualization. 2011.

38. **Hongmin W.** Design of a Novel Serial and Parallel Force Feedback Master Manipulator // Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Biomimetics. Tianjin, China, 2010.

39. **Masaru U.** Design of a Compact 6-DOF Haptic Device to Use Parallel Mechanisms // URL: <http://robots.stanford.edu/isrr-papers/final/final-15.pdf> (Дата обращения: 02.10.2016).

Journal, 2015, Vol. 9, No. 1.

14. **ZMS HapticMaster.** Available: [http://www.vrlab.ctw.utwente.nl/eq/Documentation/HapticMaster_HM_ProductSheet%20\(final\).pdf](http://www.vrlab.ctw.utwente.nl/eq/Documentation/HapticMaster_HM_ProductSheet%20(final).pdf) (Accessed: 03.10.2016).

15. **Van der Linde R.Q.** *The HapticMaster, a new high-performance haptic interface*. Available: <http://people.cs.vt.edu/~wangr06/touch%20review%20organization/VanLFR02.pdf>.

16. **Hao J.** Kinematic and Static Analysis of a Cable-driven 3-DOF Delta Parallel Mechanism for Haptic Manipulators. *Proceedings of the 34th Chinese Control Conference*, 2015, Hangzhou, China.

17. **Giuk L.** A Novel Haptic Device with High-force Display Capability and Wide Workspace. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, 2016.

18. **Junpei A.** Haptic Device Using a Newly Developed Redundant Parallel Mechanism. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, Vol. 27, No. 2.

19. **Sung-Uk L.** Analysis and Optimal Design of a New 6-DOF Parallel Type Haptic Device. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, Beijing, China.

20. **Jung W.Y.** Optimum design of 6-DOF parallel manipulator with translational/rotational workspaces for haptic device application. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Springer, 2010.

21. **Minh H.V.** A New 6-DOF Haptic Device for Tele-operation of 6-DOF Serial Robots. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, Vol. 60, No. 11.

22. **Vu M.H.** Tele-operation of a 6-DOF Serial Robot Using a New 6-DOF Haptic Interface. *IEEE International Symposium Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE)*, 2010.

23. **Lambert P.** A Novel Parallel Haptic Device with 7 Degrees of Freedom. *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference (WHC)*, Northwestern University, Evanston, IL, USA, 2015.

24. **Dongseok R.** Development of a six DOF haptic master for teleoperation of a mobile manipulator. *Mechatronics*, Elsevier, 2009.
25. **Huanhuan Q.** Design and Calibration of a New 6-DOF Haptic Device. *Sensors*, 2015, No. 11.
26. **Novint.** Available: <http://www.novint.com/index.php/novintfalcon> (Accessed: 02.10.2016).
27. **Force Dimension.** Available: <http://www.forcedimension.com/company/about> (Accessed: 03.10.2016).
28. **Products of Force Dimension.** Available: <http://www.forcedimension.com/products> (Accessed: 03.10.2016).
29. **Quanser.** Available: <http://www.quanser.com/> (Accessed: 03.10.2016).
30. **5-DOF Haptic Wand.** Available: http://www.quanser.com/Products/Docs/74/5DOF_Haptic_Wand.pdf (Accessed: 03.10.2016).
31. **Kazuo H.** Development of Bilateral Wearable Device “Kento” for Control Robots using Muscle Actuator Modules. *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. Toyama, Japan, 2009.
32. **Ikuo M.** An Advanced Musculoskeletal Humanoid Kojiro. *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robotics*, 2007.
33. **Yosuke M.** Operation Assist for a Teleoperated Robot System Controlled with a Lightweight and High-Operable Master Device. *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. Meijo University, Nagoya, Japan, 2015.
34. **Brygo A.** Synergy-Based Interface for Bilateral Tele-manipulations of a Master-Slave System with Large Asymmetries. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Stockholm, Sweden, 2016.
35. **CyberGlove Systems.** Available: <http://www.cyberglovesystems.com> (Accessed: 08.10.2016).
36. **Martinez-Terran G.** CyberForce Haptic Device: Kinematics and Manipulability. *Proceedings of International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*, 2015.
37. **Chaobin L.** iFeel3: a Haptic Device for Virtual Reality Dental Surgery Simulation. *Proceedings of the International Conference on Virtual Reality and Visualization*, 2011.
38. **Hongmin W.** Design of a Novel Serial and Parallel Force Feedback Master Manipulator. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Tianjin, China, 2010.
39. **Masaru U.** *Design of a Compact 6-DOF Haptic Device to Use Parallel Mechanisms*. Available: <http://robots.stanford.edu/isrr-papers/final/final-15.pdf> (Accessed: 02.10.2016).

Received 01.11.2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ХАРУЗИН Сергей Вадимович
KHARUZIN Sergey V.
 E-mail: skharuzin@yandex.ru

ШМАКОВ Олег Александрович
SHMAKOV Oleg A.
 E-mail: shmakov@rtc.ru