

В. П. Андреев^{1, 2, 3}, д-р техн. наук, проф., andreevvipa@yandex.ru,
В. Л. Ким¹, аспирант, top7733@gmail.com, **П. Ф. Плетнев**¹, аспирант, cpp.create@gmail.com
¹ФГБОУ ВО Московский государственный технологический университет "СТАНКИН",
²Международная лаборатория "Сенсорика",
³Международный институт новых образовательных технологий
(ФГБОУ ВО "Российский государственный гуманитарный университет"), г. Москва

Программно-аппаратное решение оперативного реконфигурирования гетерогенных роботов*

Предлагается программно-аппаратное решение распределенной системы управления модульного робота, которое обеспечивает возможность его оперативного реконфигурирования. Для организации межмодульного взаимодействия используется интерфейс на основе стандарта Ethernet. Информационное взаимодействие реализуется на основе библиотеки ZMQ, дополненной протоколом UDP. В отличие от Robotics Operating System (ROS) такое решение позволяет реализовать спецификацию для таких встраиваемых систем, как микроконтроллеры и одноплатные ЭВМ.

Ключевые слова: мобильный робот, реконфигурируемый модульный робот, управляющая система, распределенное управление

Введение

Началом использования модульного принципа в робототехнике можно считать 80-е годы прошлого столетия, когда в промышленности начали широко использоваться роботы-манипуляторы [1, 2]. В мобильной робототехнике модульный принцип построения и проектирования был предложен в ЦНИИ РТК (г. Санкт-Петербург) и впервые реализован в Советском Союзе в рамках первых государственных пятилетних программ по робототехнике приблизительно в те же годы [3]. Было создано серийное производство унифицированных компонентов роботов — электромеханических модулей, модулей управления и модульной системы программного обеспечения (ПО). К моменту аварии на Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 г.) в ЦНИИ РТК было подготовлено большое число проектов различных модулей, что позволило оперативно создать группировку из 15 специализированных мобильных роботов (МР), предназначенных для работ по ликвидации последствий аварии.

Второй этап развития модульной мобильной робототехники можно отнести к 90-м годам XX века. В ходе работ по устранению последствий

аварии на ЧАЭС возникло новое направление в модульной робототехнике — **реконфигурируемые модульные** роботы [4], т.е. роботы с переменной структурой.

В случае чрезвычайных ситуаций, аварий, катастроф, при освоении территорий Арктики и Антарктики, при исследовании других планет имеет место максимальная неопределенность в отношении предполагаемых условий работы, что значительно усложняет или даже делает невозможным планирование и выбор необходимой робототехники. Поэтому мобильные роботы, ориентированные на использование в подобных ситуациях, должны допускать формирование и изменение своей структуры непосредственно на месте проведения работ и во время самих работ. Другими словами, для выполнения таких работ должны использоваться роботы с переменной структурой, т.е. **реконфигурируемые** модульные МР.

В таких роботах должна осуществляться автоматическая реорганизация общей структуры системы управления в соответствии с быстро меняющимся составом и конфигурацией робототехнического устройства. Одна из основных трудностей создания подобных систем заключается в разработке систем управления (СУ), способных работать в режиме "plug and play". Реализация такого режима позволит быстро собирать робот на месте проведения работ, в том числе из

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ: гранты 16-07-00811а и 16-07-01264а.

модулей разных производителей, что обеспечит экономическую эффективность эксплуатации и производства робототехники. Но данное требование приводит к значительному увеличению сложности системы скоординированного управления всеми модулями робота.

Современные решения модульной мобильной робототехники

В настоящее время модульные МР разделяют на два типа: *гомогенные* и *гетерогенные*. В **гомогенных** роботах все модули, как правило, *одинаковы по структуре и функционалу*. По сути, это технический аналог колониальных организмов. Основная задача таких систем — обеспечить их автономную реконфигурацию и адаптацию к любым условиям окружающей среды. К гомогенным относятся такие модульные роботы, как M-TRAN [5] (2002—2008 гг.), ATRON [6] (2006 г.), Transmote [7] (2012 г.).

Гомогенные роботы обладают рядом уникальных свойств, выделяющих их среди разнообразия МР, а именно:

- адаптация к различным, иногда экстремальным, условиям окружающей среды благодаря автоматической реконфигурации;
- высокая устойчивость к неисправностям отдельных модулей во время выполнения работы;
- масштабируемость системы.

К недостаткам гомогенных роботов можно отнести следующие:

- каждый модуль должен обладать всеми средствами для движения и навигации;
- сложность скоординированного управления модульной системой;
- высокие требования к конструкции и системе управления каждого модуля;
- масштабируемость системы ограничивается возможностями программно-аппаратной реализации модулей.

Кроме того, при одинаковости по структуре и функционалу всех модулей один модуль, как правило, отличается от остальных — это модуль общего управления и связи с внешним супервизором (человеком-оператором).

Отличительной особенностью **гетерогенных** роботов является *дифференциация модулей по их функциям*. Каждый модуль отвечает за свой ограниченный набор задач, поэтому модули в гетерогенных системах неравноправны. Примерами гетерогенных роботов могут служить модульные роботы Thor [8] (2013 г.), SMART [9] (2012 г.), а также модульный робот для космических исследований [10] (2006 г.).

Несмотря на более низкий по сравнению с гомогенными уровень автономности, многие практические задачи решаются эффективнее систе-

мами с дифференциацией модулей по их функциям, т.е. модульными роботами с гетерогенной архитектурой. Гетерогенные роботы имеют следующие преимущества:

- относительно невысокие требования к системе управления модулей;
- масштабируемость робота теоретически не ограничена;
- способность к выполнению широкого спектра заданий;
- возможность адаптации к условиям окружающей среды.

К недостаткам гетерогенных роботов можно отнести:

- сложность осуществления автоматической реконфигурации;
- низкая устойчивость к неисправностям отдельных модулей;
- сложность скоординированного управления совокупностью модулей.

Следует отметить, что в системе управления рассмотренных гомогенных и гетерогенных роботов наблюдается наличие элементов распределенного управления.

На сегодняшний день, как мы полагаем, для применения в случае экстремальных ситуаций преимуществами обладают **реконфигурируемые гетерогенные** роботы. При решении означенных задач обеспечение *автоматической* реконфигурации робота в целом не является критичным, так как сборка робота может быть выполнена в ручном режиме. Любые изменения в конфигурации робота должны сопровождаться перестройкой соответствующего ПО. В известных гетерогенных роботах, вследствие использования централизованной системы управления, автоматическая перестройка элементов информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС) робота под новые состав и конфигурацию невозможна. Это не позволяет выполнять реконфигурирование роботов в режиме "plug and play".

Реализация режима "plug and play" достигается за счет разработки средств механического, электрического и информационного взаимодействия между модулями, т.е. соответствующих интерфейсов. Каждый интерфейс должен быть, с одной стороны, простым, а с другой — универсальным. Это обеспечит легкость сборки робота из модулей, разработанных разными производителями, таким же образом, как это делается в компьютерных технологиях. Например, сканеры, принтеры и другие внешние устройства разных производителей с помощью соответствующих драйверов легко подключаются через шину USB к компьютеру, оснащенного современной операционной системой (ОС). Мы считаем, что модульный робот должен собираться аналогично.

Низкая устойчивость к неисправностям отдельных модулей обычно решается дублирова-

нием систем, а также возможностью быстрой замены неисправных модулей на аналогичные или модифицированные. Но такая замена также требует от ИИУС робота быстрой адаптации к его новой структуре.

Таким образом, искомое программно-аппаратное решение ИИУС робота должно обеспечить возможность *оперативной реконфигурации* робота. В основу нашего решения положен *принцип полной функциональности модулей* гетерогенного робота. На данном этапе проекта механический интерфейс мы не рассматриваем.

Принцип полной функциональности модулей робота

Каждый модуль робота должен быть полнофункциональным электронным или мехатронным устройством со своей собственной ИИУС, которая содержит все необходимые компоненты: датчики, вычислительные устройства, приводы и т.п. Иными словами, конструкция модуля должна соответствовать его функциональному назначению, а ИИУС модуля должна полностью обеспечивать его информационную и исполнительную функциональность. *Принцип полной функциональности* заключается в том, что *каждый модуль робота должен быть способен любым удобным ему способом выполнять свою целевую функцию, используя только собственные средства для выполнения команд от внешней системы управления* [11].

Общесистемное управление гетерогенным роботом реализуется в отдельном модуле, который является супервизором по отношению к другим модулям робота. В нашем случае модуль-супервизор формирует цель управления и контролирует лишь *результат* ее достижения модулем-исполнителем, а не управляет процессом выполнения задачи этим модулем. Такая функциональная завершенность является *основным отличием* нашего решения от рассмотренных гетерогенных роботов, в которых модуль-супервизор управляет работой всех модулей на *исполнительном уровне*.

Здесь наблюдается определенная аналогия с мультиагентными системами, в которых знания и ресурсы распределяются между достаточно "самостоятельными" агентами, при этом имеется программный модуль общего командного управления — базовый агент (резидент). Сценарии формируются и исполняются каждым агентом самостоятельно. Агенты реагируют на непредсказуемые события, причем реакция может быть самостоятельной или может осуществляться во взаимодействии с резидентом или оператором [12]. В нашем случае "агент" — это не только программа, это программно-аппаратное реше-

ние ИИУС модуля, обеспечивающее его полную функциональность.

Рассмотрим реализацию принципа полной функциональности на примере транспортного модуля в составе гетерогенного модульного МР (рис. 1).

Пусть робот включает в себя следующие модули: модуль-супервизор, транспортный модуль (ТМ) и сенсорные модули. Модуль-супервизор получает от внешнего супервизора (например, человека-оператора) общее задание. В системе управления модуля-супервизора данное задание разбивается на подзадачи, распределяемые между соответствующими модулями. Модуль-супервизор отправляет в ТМ цель управления — вектор желаемого положения робота $[X_G, Y_G, \phi_G]^T$, где X_G, Y_G — координаты характеристической точки робота относительно базовой системы координат, ϕ_G — угол его ориентации.

ТМ должен *самостоятельно* достичь это целевое положение, используя методы управления, заложенные в его системе управления, и информацию, получаемую от своей сенсорной системы, включающей как дистанционные датчики, так и датчики внутреннего состояния (одометры, гироскопы, акселерометры и т.п.). Часть сенсорной системы ТМ, включающая дистанционные датчики, может функционировать как отдельный модуль (сенсорный модуль ближнего радиуса действия, рис. 1) с ограниченной зоной действия (например, в диапазоне 0...100 см) и иметь информационное взаимодействие с процессором ТМ. Вследствие естественных ошибок отработки траектории фактическое положение ТМ, а следовательно, и всего робота, задаваемое вектором $[X'_G, Y'_G, \phi'_G]^T$, отличается от желаемого. Сенсорный модуль дальнего радиуса действия, который использует более сложные дистанционные датчики (телевизионные, ультразвуковые, лазерные

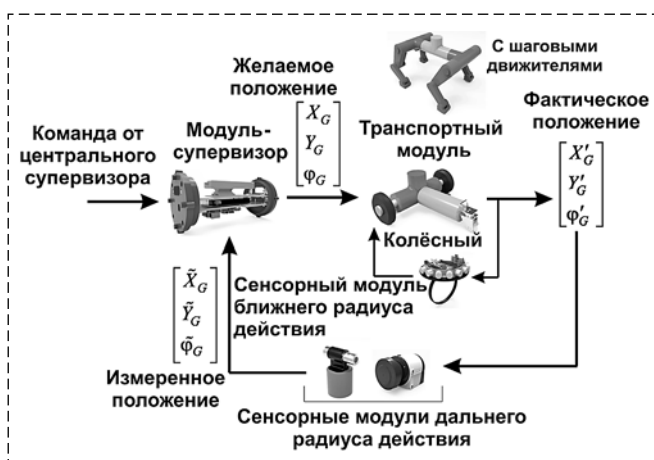


Рис. 1. Использование принципа полной функциональности на примере транспортного модуля

и т.п.), обеспечивает "привязку" робота к базовой системе координат, например, по ориентирам во внешней среде. Точность обработки цели управления контролирует модуль-супервизор с помощью всей сенсорной системы робота. Сравнивая вектор измеренного положения $[\tilde{X}_G, \tilde{Y}_G, \tilde{\phi}_G]^T$ с желаемым, модуль-супервизор корректирует реальное положение робота, задавая новую цель ТМ. Далее процесс повторяется до тех пор, пока не будет решена задача, изначально поставленная модулем-супервизором перед ТМ.

В этой схеме ТМ может быть снабжен колесным, шагающим или каким-либо иным двигателем, но он должен отрабатывать заданную модулем-супервизором цель, независимо от его механической конструкции, структуры информационно-измерительной системы и алгоритма управления модулем. Реализация алгоритмов управления движением ТМ как полнофункционального устройства в составе гетерогенного модульного мобильного робота приведена в работе [13].

Описанную структуру можно рассматривать как одну из *сложных систем* [14], с понятием которых связаны "... следующие фундаментальные идеи...", непосредственно определяющие функционирование *мультисистем (MAS)* [12]:

- в сложных системах существуют автономные объекты, которые взаимодействуют друг с другом при выполнении своих определенных задач;
- агенты должны иметь возможность реагировать на изменяющиеся условия среды, в которой они функционируют, и, возможно, изменять свое поведение на основе полученной информации;
- сложные системы характеризуются возникающими структурами — логически связанными схемами, которые формируются в результате взаимодействия между агентами.

На основе изложенного принципа полной функциональности в модульном МР реализуется **распределенное управление**, т.е. решается задача, близкая по сути задаче "... управления и распределенного взаимодействия в сетях динамических систем" с широким применением мультисистем [12]. Такое распределенное управление позволяет распараллеливать вычислительный процесс реализации целевой функции робота за счет разделения процесса на функциональные подзадачи и распределения их между микропроцессорами модулей. Реализация функциональной подзадачи полностью возлагается на модуль-исполнитель. В результате снижаются требования к производительности вычислительных устройств, установленных в модулях. Тогда за вычислителем модуля-супервизора остаются лишь следующие функции: разбиение процесса на функциональные подзадачи, распределение задач между модулями, контроль за их испол-

нением, синхронизация процессов и отработка "поведенческих" задач. За модулем-супервизором также закрепляется задача информационного взаимодействия с внешним супервизором (человеком-оператором).

По аналогии с мультисистемой, "... в которой несколько агентов могут общаться, передавать друг другу некоторую информацию, взаимодействовать между собой и решать поставленную задачу...", данная система распределенного управления также требует наличия *системы межмодульного информационного взаимодействия*, но, в нашем случае, также и соответствующего программно-аппаратного обеспечения.

Система межмодульного информационного взаимодействия

В современных модульных роботах, как гомогенных, так и гетерогенных, для реализации межмодульного информационного взаимодействия используются коммуникационные каналы, представляющие собой различные последовательные шины: I²C в модулях ЦНИИ РТК; CAN — в роботах M-TRAN, SMART; IrDA (по сути, RS-232) — в роботе ATRON; RS-485 — в роботах Thor, Odin. Последовательная шина используется и в роботе TRANSMOTE (используется беспроводной интерфейс ZigBee). В системах управления таких роботов реализовано, по сути, два варианта работы: отрабатывать набор простых правил, помещенных в ПЗУ микроконтроллеров модулей, либо исполнять команды внешнего компьютера, подаваемые модулям через какой-либо один модуль, к шине которого (а значит, и к общей шине модулей) подключен этот компьютер. Тогда межмодульное взаимодействие в таких системах ограничивается, фактически, наиболее быстрой и эффективной передачей команд исполнительного или тактического уровня от внешнего компьютера к модулям и показаний датчиков — обратно. В этом случае информационный поток в процессе межмодульного взаимодействия невелик, поскольку на каждом модуле таких роботов либо нет возможности установить много датчиков, либо датчиков вообще нет. Как результат, по коммуникационному каналу достаточно передавать лишь команды *исполнительного уровня*. В нашем же случае предполагается использовать одновременно два типа сенсорных систем — ближнего и дальнего радиуса действия, содержащие большое число разнообразных датчиков, включая телевизионные многокамерные. Поскольку между этими системами необходимо обеспечить информационный обмен, информационный поток в коммуникационном канале может быть крайне велик (например, за счет многопоточкового видео). Пе-

речисленные интерфейсы не обладают для этого достаточной пропускной способностью.

Для организации межмодульного взаимодействия предлагается использовать широкополосный, надежный и недорогой интерфейс на основе стандарта Ethernet. Интерфейс на основе EtherCAT [15], представляющий собой расширение Ethernet для работы в реальном масштабе времени, а также Ethernet Powerlink [16] не дают возможности создания горизонтальных связей — все межмодульное взаимодействие в этих системах должно происходить через "ведущего" шины. Это исключает возможность *непосредственного взаимодействия* между любыми модулями (по аналогии с мультиагентными системами) и, как следствие, реализацию *полноценного распределенного управления*. Использование стандарта Ethernet допустимо еще и потому, что в случае полной функциональности модулей отпадает необходимость в передаче команд исполнительного уровня, что приводит к более мягким требованиям к времени доставки сообщений и позволяет использовать интерфейсы с "мягким реальным временем".

Сеть Ethernet изначально не является "шиной" — в ней используются соединения типа "один к одному". Типичная топология такой сети — "звезда". Обе топологии имеют недостатки: "шина" требует либо применения большого числа коммутаторов, либо встраивания в каждое вычислительное устройство модуля нескольких интерфейсов Ethernet, а "звезда" заставляет прокладывать в корпусе робота большое число проводов. Поскольку все проводные соединения в нашем случае ограничены небольшими размерами робота, топология типа "звезда" оказывается предпочтительней.

При выборе топологии сети для модульного робота следует, по-видимому, руководствоваться сопоставлением целого ряда параметров: удобство и цена технической реализации, помехоустойчивость, наличие необходимых сетевых протоколов и соответствующих библиотек, программного и аппаратного обеспечения и т.п. Так, например, для роботов змеевидной конструкции, скорее всего, подойдет шинная топология, а для антропоморфных роботов — "звезда". Но этот вопрос требует подробного изучения и выработки соответствующих рекомендаций, что планирует сделать в дальнейших исследованиях.

В настоящее время для организации управления разнородными мехатронными устройствами широко используется программный каркас (framework) Robotics Operating System (ROS) [17]. Однако непосредственное его применение оказывается "тяжеловесным" — необходим, как минимум, компьютер под управлением полноценной ОС Linux, для работы с ним требуется устанавливать на вычислительные устройства

довольно сложное и объемное ПО, нужен высокий уровень входа для использования (для конфигурации, например, требуются диалекты языка XML).

В связи с экономическими требованиями и минимизацией массогабаритных параметров в модулях робота в качестве вычислительных устройств должны устанавливаться микроконтроллеры или, как максимум, одноплатные компьютеры (встраиваемые системы); ROS не ориентирован для работы непосредственно на встраиваемых системах. Поэтому необходимо такое ПО, которое было бы совместимо с ROS, но при этом было бы реализуемо на встраиваемых системах.

Выбор стандарта Ethernet позволяет реализовать информационно-измерительную и управляющую систему модульного робота в виде *локальной вычислительной сети* (ЛВС), узлами которой являются ИИУС отдельных модулей [18]. Данное решение обеспечивает перенос таких свойств сети, как масштабируемость и возможность автоматической *реконфигурируемости*, на модульную структуру робота.

В основу метода межмодульного информационного взаимодействия была положена разработанная авторами система территориально распределенного управления мехатронными устройствами [19], в которой минимальным объектом управления является любое электронное или мехатронное устройство — бортовой вычислитель, микроконтроллер, сенсор, манипулятор или иной исполнительный механизм. В нашем случае, как и в упомянутой работе, одна из ключевых задач заключается в разработке унифицированной системы правил создания ПО для конкретных моделей робототехнических устройств, позволяющих включать мехатронные компоненты в ЛВС *без переработки их низкоуровневого программного кода*. Иными словами, необходима система правил для разработки соответствующих драйверов — набора программных инструкций управления и сетевых протоколов для интерфейса программирования приложений (API — application programming interface). Такой интерфейс должен обеспечивать прозрачное интегрирование мехатронных устройств и их ПО в информационное пространство ИИУС модульного робота.

Предложенный в работе [19] подход основывался на разработанной библиотеке Zmq_robot [20], которая являлась расширением библиотеки ZMQ [21]. Библиотека Zmq_robot позволяет создавать как ПО для модулей-исполнителей, так и управляющие программы для модуля-супервизора. Однако этой библиотеке присущ тот же недостаток, что и ROS, — для работы с ней необходимо иметь вычислительное устройство большой производительности. Иными словами, программное обеспечение, создаваемое с ис-

пользованием Zmq_robot, не будет работать на встраиваемых системах.

Для решения данной проблемы была создана спецификация на метод межмодульного взаимодействия, учитывающая свойство полной функциональности модулей [22]. Для организации взаимодействий здесь предлагается в качестве основы также использовать библиотеку ZMQ, но дополнить ее протоколом UDP с широковещательными сообщениями. Такое решение дает возможность реализовать спецификацию *для встраиваемых систем*. В отличие от ROS каждый модуль снабжается общим для всех модулей интерфейсом, через который он предоставляет информацию о себе — имя модуля, его описание, функциональные интерфейсы и пр.

Предлагаемый подход межмодульного информационного взаимодействия базируется на следующих постулатах:

- обмен сообщениями реализуется по протоколам TCP и UDP через так называемые сетевые интерфейсы;
- используется "метаинтерфейс" — интерфейс для выполнения общих для всех модулей команд;
- вводится понятие метаданных — формализованное описание выполняемых модулями функций;
- предусмотрены: возможность использования разных методов кодирования информации (JSON, BSON и т.п.) и возможность выбора сетевых протоколов;
- используются "человекочитаемые" языки конфигурации и передачи данных (JSON, YAML и т.п.);
- для описания протокола используются методы организации IETF, позволяющие добиться одинакового поведения на разных платформах.

Подробное описание разработанной спецификации можно найти в работе [23].

Экспериментальные исследования

В настоящее время данные исследования находятся на начальном этапе. Предлагаемая программно-аппаратная реализация гетерогенного модульного мобильного робота протестирована на лабораторном макете (рис. 2), состоящем из модуля-супервизора, колесного ТМ, сенсорного модуля ближнего радиуса действия и силового модуля (батареи АКБ). Основное внимание на этом этапе было уделено обеспечению требований полной функциональности ТМ и силового модуля. Функции всех модулей на сегодняшний день реализованы в минимальном варианте.

ИИУС робота реализована в виде локальной вычислительной сети Ethernet. Программное обеспечение для организации межмодульного информационного взаимодействия построено на

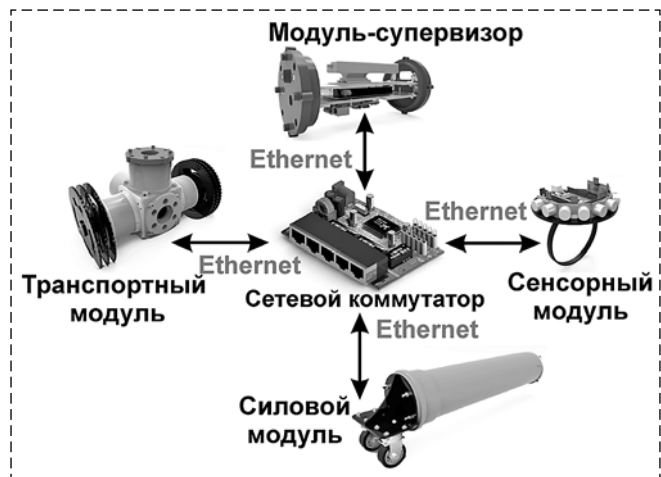


Рис. 2. Сетевая структура межмодульного взаимодействия в лабораторном макете гетерогенного мобильного робота

основе библиотеки ZMQ с использованием сетевого протокола UDP.

Для ТМ предложен новый метод планирования движения для МР с использованием двумерных векторных полей [13]. При этом предполагается, что сенсорный модуль ближнего радиуса действия состоит только из одометрических и ультразвуковых датчиков и микроконтроллера, выполняющего обработку сигналов с датчиков.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что программно-аппаратное решение ИИУС модульного робота, реализованное на основе принципа полной функциональности модулей, имеет хорошую перспективу в обеспечении оперативного реконфигурирования гетерогенных модульных МР.

Перспективы

В ближайшем будущем мы предполагаем увеличить функциональный состав модулей робота, число дистанционных датчиков и их разнообразие в сенсорном модуле ближнего радиуса действия, а также усложнить функционал модуля-супервизора. Это позволит выявить "узкие" места в нашем подходе.

Необходимо исследовать эффективность разделения сенсорной системы МР на системы ближнего и дальнего радиуса действия, реализуемые в виде отдельных модулей. Также необходимо продолжить исследования по использованию методов динамического параллакса в сенсорных системах МР. Предварительные результаты такого решения приведены в работе [24].

Полагаем, что необходимо исследовать возможность применения решений, используемых в мультиагентных системах, для реализации распределенных вычислений в многопроцессорной ИИУС модульного робота.

Заключение

Предложена новая структура программно-аппаратной части системы управления гетерогенного модульного робота, которая достаточно проста в реализации и обладает способностью автоматической реорганизации. Необходимое требование — каждый модуль должен иметь конструкцию, соответствующую его функциональному назначению, и собственную ИИУС, которая полностью обеспечивает его информационную и исполнительную функциональность. В такой структуре автоматическое реконфигурирование системы управления достигается за счет использования:

- сетевой (типа Ethernet) структуры ИИУС робота, в которой каждый модуль является узлом локальной вычислительной сети;
 - разработанной спецификации для метода межмодульной коммуникации, основанной на принципах ROS, но реализуемой на встраиваемых вычислительных системах;
 - разработанного языка межмодульного взаимодействия.
- Данный подход обеспечивает:
- распараллеливание вычислительного процесса управления за счет его распределения между вычислителями модулей, что упрощает общую задачу управления и снижает требования к вычислительным устройствам модулей;
 - возможность быстрой сборки робота из модулей разного функционального назначения и различных производителей за счет использования соответствующих драйверов.

Список литературы

1. Бабич А. В., Баранов А. Г., Калабин И. В. и др. Промышленная робототехника / Под ред. Я. А. Шифрина. М.: Машиностроение, 1982. 415 с.
2. Воробьев Е. И., Козырев Ю. Г., Царенко В. И. Промышленные роботы агрегатно-модульного типа. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
3. Лопота А. В., Юревич Е. И. Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та. 2013. № 1 (164). С. 98—103.
4. Юревич Е. И. Роботы ЦНИИ РТК на Черноморской АЭС и развитие экстремальной робототехники. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. 264 с.
5. Murata S., Yoshida E., Kamimura A., Kurokawa H., Tomita K. & Kokaji S. M-TRAN: selfreconfigurable modular robotic system // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2002. N. 7 (4). P. 432—441.
6. Østergaard E. H., Kassow K., Beck R. & Lund H. H. Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot // Autonomous Robots. 2006. N. 21 (2). P. 165—183.
7. Guifang Qiao, Guangming Song, Jun Zhang, Hongtao Sun, Weiguo Wang & Aiguo Song. Design of Transmote: a Modular Self-Reconfigurable Robot with Versatile Transformation Capabilities // Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 2012. P. 1331—1336.
8. Lyder A. H., Stoy K., Mendoza-Garcia R.-F., Larsen J. C. & Hermansen P. On sub-modularization and morphological

heterogeneity in modular robotics // Intelligent Autonomous Systems of Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2013. Vol. 193, N. 12. P. 649—661.

9. Baca J., Ferre M. & Aracil R. A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks // Robotics and Autonomous Systems, 2012. Vol. 60, N. 4. P. 522—531.

10. Hancher M. D., Hornby G. S. A modular robotic system with applications to space exploration // 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06). Pasadena, CA: Publisher "IEEE", 2006. P. 132—140.

11. Andreev V., Kim V. & Pletenev P. The principle of full functionality — the basis for rapid reconfiguration in heterogeneous modular mobile robots // Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium. P. 0023—0028. B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International. 2017. Vienna, Austria. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.003.

12. НОУ ИНТУИТ. Мультиагентные технологии. URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/10618/1102/lecture/17391> (дата обращения: 17.03.2016).

13. Андреев В. П., Ким В. Л. Метод управления движением модульного мобильного робота с использованием двумерных векторных полей // Робототехника и техническая кибернетика. Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2017. № 4 (17). С. 22—27.

14. Rzevski G. Modelling large complex systems using multi-agent technology // In Proc. of 13th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel / Distributed Computing (SNPD2012), August 8—10, Kyoto, Japan, 2012. P. 434—437.

15. EtherCAT Technology Group, Industrial Ethernet Technologies. URL: https://www.ethercat.org/download/documents/Industrial_Ethernet_Technologies.pdf (дата обращения: 17.03.2016).

16. Ethernet POWERLINK Communication Profile Specification Version 1.2.0. URL: http://www.ethernet-powerlink.org/en/downloads/technical-documents/action/open-download/download/eps-gs-301-v120-communication-profile-specification/element/5158/?no_cache=1 (дата обращения: 17.03.2016).

17. ROS: an open-source Robot Operating System / Morgan Quigley, Brian Gerkey, Ken Conley, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Eric Berger, Rob Wheeler, Andrew Ng // ICRA workshop on open source software. 2009. Vol. 3, N. 3.2. P. 5.

18. Андреев В. П., Ким В. Л., Подураев Ю. В. Сетевые решения в архитектуре гетерогенных модульных мобильных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 3 (12). С. 23—29.

19. Андреев В. П., Кирсанов К. Б. Технология многооператорного управления мобильными роботами через Интернет // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2015. № 10 (171). С. 6—17.

20. Kirsanov K. Software architecture of control system for heterogeneous group of mobile robots // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. 2014. Procedia Engineering (2015). 2015. Vol. 100. P. 216—221.

21. Hintjens P. "ZeroMQ: Messaging for Many Applications", O'Reilly Media.

22. Andreev V., Pletenev P. Organizing Intermodular Communication for Heterogeneous Modular Mobile Robot // Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.). Published by DAAAM International. 2017. Vienna, Austria, pp. 0474—0480. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.066.

23. Плетенев П. Ф. и др. 1/ПММВ — Протокол взаимодействия в гетерогенном модульном мобильном роботе. URL: https://asmfreak.github.io/modular_robots_rfc/1/ПММВ/ (дата обращения: 20.01.2017).

24. Андреев В. П., Тарасова В. Э. Определение формы препятствий мобильным роботом с помощью сканирующих угловых перемещений ультразвукового датчика // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 11, Т. 18. С. 759—763. DOI: 10.17587/mau.18.759-763.

Hardware & Software Solution for Rapid Reconfiguration of Heterogeneous Robots

V. P. Andreev, andreevvipa@yandex.ru, V. L. Kim, top7733@gmail.com,
P. F. Pletenev, cpp.create@gmail.com,
MSTU "STANKIN", ML "Sensorika", IINET RSUH, Moscow

Corresponding author: **Andreev V. P.**, Dr. Tech. Sc., Professor
of Moscow State University of Technology "STANKIN",
127055 Moscow, Russian Federation, e-mail: andreevvipa@yandex.ru

Accepted on May ??, 2018

In cases of emergency situations, accidents, disasters, in process of reclamation of Arctic and Antarctic, exploration other planets the maximum uncertainty in terms of anticipated working conditions makes it very hard or even impossible to plan and to choose the needed robotics. To perform tasks in such conditions, one should use robots with variable structure, i.e. modular mobile robots, which should have hardware and software capable of rapid reconfiguration. We propose a hardware and software solution for information-measuring and control system (IMCS) of a heterogeneous modular robot, which is sufficiently simple to implement and which is able to reconfigure automatically. It is necessary to require that each module's construction must correspond to its functional purpose and its own IMCS must provide informational and executional functionality. We implement distributed control in such structure, similar to multi-agent systems, via decoupling computational and control process of robot goal function execution into functional subprocesses and distributing them between microcomputers of modules. System-wide robot control is running on a separate module, which plays role of a supervisor for other modules. Executive module is fully responsible for functional subprocess realization. We propose usage of a broadband, reliable and low-cost interface on top of Ethernet standard to organize intermodular interaction. The choice of Ethernet standard enables local-area like design of robot IMCS with IMCS of modules as its nodes. One should use microcontrollers or, as maximum, singleboard computers, i.e. embedded systems as computational devices for IMCS of modules. Informational intermodular interaction is developed using ZeroMQ library with addition of UDP protocol with broadcast messages. This solution led to development of the specification for embedded systems (in contrast to Robotic Operating System), i.e. a unified system of driver development rules. Drivers are a set of control instructions and network protocols to create module's application programming interface (API). Proposed hardware and software solution was tested successfully using laboratory model of heterogeneous modular mobile robot, consisting of module-supervisor, wheeled transport module, close-range sensors module and power module (batteries). A new method of movement planning using two-dimension vector fields is proposed for transport module which is implemented as a full-functional mechatronics device.

Keywords: mobile robot, modular robot, reconfigurable modular robot, robotic system, control system, distributed control, local area network

Acknowledgements: The work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research: grants 16 07 00811a and 16 07 01264a

For citation:

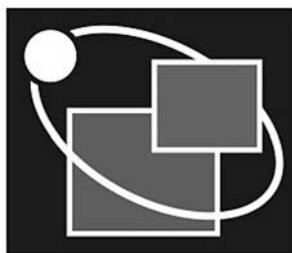
Andreev V. P., Kim V. L., Pletenev P. F. Hardware & Software Solution for Rapid Reconfiguration of Heterogeneous Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 6, pp. 387–395.

DOI: 10.17587/mau.19.387-395

References

1. Shifrin J. A. *Promyshlennyye roboty* (Industrial robotics), Moscow, Mashinostroenie, 1982, 415 p. (in Russian).
2. Vorobyov E. I., Kozyrev Y. G., Tsarenko V. I. *Promyshlennyye roboty agregatno modul'nogo tipa* (Industrial robots of aggregate-modular type), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 240 p. (in Russian).
3. Lopota A. V., Yurevich E. I. *Jetapy i perspektivy razvitiya modul'nogo principa postroyeniya robototekhnicheskikh sistem* (Stages and prospects for the development of a modular principle for the construction of robotic systems), *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2013, no. 1 (164), pp. 98–103 (in Russian).
4. Yurevich E. I. *Roboty CNII RTK na Chernobyl'skoj AJeS i razvitiye jekstremal'noj robototekhniki* (Robots of RSSC for RTC at the Chernobyl nuclear power plant and the development of extreme robotics), SPb., Publishing house of SPbGPU, 2004, 264 pp. (in Russian).
5. Murata S., Yoshida E., Kamimura A., Kurokawa H., Tomita K., Kokaji S. M-TRAN: selfreconfigurable modular robotic system, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2002, no. 7 (4), pp. 432–441.
6. Østergaard E. H., Kassow K., Beck R., Lund H. H. Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot, *Autonomous Robots*, 2006, no. 21 (2), pp. 165–183.
7. Qiao G., Song G., Zhang J., Sun H., Wang W., Song A. Design of Transmote: a Modular Self-Reconfigurable Robot with Versatile Transformation Capabilities, *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2012, pp. 1331–1336.
8. Lyder A. H., Stoy K., Mendoza-Garcia R.-F., Larsen J. C., Hermansen P. On sub-modularization and morphological heterogeneity in modular robotics, *Intelligent Autonomous Systems, of Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer Berlin Heidelberg, 2013, vol. 193, no. 12, pp. 649–661.
9. Baca J. Ferre M., Aracil R. A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks, *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, vol. 60, no. 4, pp. 522–531.
10. Hancher M. D., Hornby G. S. A modular robotic system with applications to space exploration, *2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06)*, Pasadena, CA, Publisher "IEEE", 2006, pp. 132–140.

11. **Andreev V. P., Kim V. L., Pletenev P. F.** The principle of full functionality — the basis for rapid reconfiguration in heterogeneous modular mobile robots, *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*, pp. 0023—0028, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.003.
12. **NOU INTUIT.** Multiagentnye tehnologii (NOU INTUIT. Multiagent technologies), available at: <https://www.intuit.ru/studies/courses/10618/1102/lecture/17391> (accessed: 17.03.2016).
13. **Andreev V. P., Kim V. L.** Metod upravleniya dvizheniem modul'nogo mobil'nogo robota s ispol'zovaniem dvumernykh vektornykh polej (Motion control method for modular mobile robot using two-dimensional vector fields), *Robototekhnika i Tehnicheskaja Kibernetika*, 2017, no. 4 (17), pp. 22—27 (in Russian).
14. **Rzevski G.** Modelling large complex systems using multi-agent technology, *In Proc. of 13th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel / Distributed Computing (SNPD2012)*, August 8—10, Kyoto, Japan, 2012, pp. 434—437.
15. **EtherCAT Technology Group**, Industrial Ethernet Technologies (2014), available at: https://www.ethercat.org/download/documents/Industrial_Ethernet_Technologies.pdf, 2014 (accessed: 17.03.2016).
16. **Ethernet POWERLINK Communication Profile Specification Version 1.2.0** (2014), available at: http://www.ethernet-powerlink.org/en/downloads/technical-documents/action/open-download/download/epsg-ds-301-v120-communication-profile-specification/element/5158/?no_cache=1 (accessed: 17.03.2016).
17. **Quigley M., Gerkey B., Conley K., Faust J., Foote T., Leibs J., Berger E., Wheeler R., Andrew Ng.** ROS: an open-source Robot Operating System (2009), ICRA workshop on open source software, 2009, vol. 3, no. 3.2, pp. 5.
18. **Andreev V. P., Kim V. L., Poduraev Yu. V.** Setevye resheniya v arhitekture geterogennykh modul'nykh mobil'nykh robotov (Network-based design of heterogeneous modular mobile robotic systems), *Robototekhnika i Tehnicheskaja Kibernetika*, 2016, no. 3 (12), pp. 23—29.
19. **Andreev V. P., Kirsanov K. B.** Tehnologija mnogooperatornogo upravleniya mobil'nymi robotami cherez Internet (Technology of multioperator mobile robot control via the internet), *Izvestija Juzhnogo Federal'nogo Universiteta. Tehnicheskie Nauki*, 2015, no. 10 (171), pp. 6—17 (in Russian).
20. **Kirsanov K.** Software architecture of control system for heterogeneous group of mobile robots, *25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 2014, Procedia Engineering, 2015, vol. 100, pp. 216—221.
21. **Hintjens P.** ZeroMQ: Messaging for Many Applications, O'Reilly Media, 2013.
22. **Andreev V., Pletenev P.** Organizing Intermodular Communication for Heterogeneous Modular Mobile Robot, *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*, pp. 0474—0480, B. Katalinic (Ed.), Vienna, Austria, Published by DAAAM International, 2017, DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.066.
23. **Pletenev P. F.** et al. 1/PMMV — Protokol vzaimodejstvija v geterogennom modul'nom mobil'nom robote (Communication protocol in a heterogeneous modular mobile robot), available at: https://asmfreak.github.io/modular_robots_rfc/1/PMMB/ (accessed: 20.01.2017) (in Russian).
24. **Andreev V. P., Tarasova V. E.** Opreделение formy prepjatstvij mobil'nykh robotom s pomoshh'ju skanirujushchih uglovyyh peremeshhenij ul'trazvukovogo datchika (Determination of the Form of Obstacles by a Mobile Robot Using Scanning Angular Movements of Ultrasonic Sensor), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, vol. 18, no. 11, pp. 759—763, DOI: 10.17587/mau.18.759-763 (in Russian).



Конференция "ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ" (ИТУ-2018)

2—4 октября 2018 г., Санкт-Петербург, Россия

При поддержке:

- Российского фонда фундаментальных исследований
- Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН
- Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН
- Международной общественной организации "Академия навигации и управления движением"
- Научного совета РАН по теории управляемых процессов и автоматизации
- Объединенного Научного совета по комплексной проблеме "Процессы управления и автоматизации" РАН
- Российского национального комитета по автоматическому управлению