

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, В.А. ПОСОШЕНКО, канд. техн. наук,
Р.И. ЦЕХМИСТРО, канд. физ.-мат. наук, Л.П. ТИМОШЕНКО, канд. техн. наук,
М.М. КОЛЕНДОВСКАЯ, канд. техн. наук*

МЕТОДЫ ОРИЕНТАЦИИ, НАВИГАЦИИ И КОНТРОЛЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ

Введение

Интенсивное развитие робототехнических средств в начале нынешнего века связано, в первую очередь, с приданием их основным элементам – роботам, высокой пространственной мобильности, что является одним из главных их отличий от стационарных или ограниченно мобильных робототехнических систем прошлого века.

Предполагается, что мобильные роботы нацелены на выполнение таких задач, в которых непосредственное участие человека либо невозможно, либо затруднительно по ряду причин. Примерами подобных задач могут служить: выполнение военных и полицейских миссий, работы в космическом пространстве, мониторинг опасных технологических процессов, диагностика труднодоступных, неразборных технических изделий, оперирование с взрывоопасными, ядовитыми, радиационными веществами, работа в агрессивных или экстремальных по физико-химическим характеристикам средах и т.д. Подобные задачи обусловили появление концепции коллективного использования нескольких мобильных роботов, объединенных единой целевой функцией в рамках адаптивного алгоритма функционирования, который предусматривает как автономную работу роботов, так и их взаимодействие с базовым компьютером, человеком-оператором, или с другими роботами, функционирующими по "роевому" принципу.

В зависимости от предназначения РТК и возложенных на них задач, они условно могут быть разделены на специализированные (СРТК) и многофункциональные (МРТК) комплексы. СРТК предназначены для выполнения монотонных, часто повторяющихся операций, для которых характерен ограниченный набор поведенческих функций и алгоритмов функционирования. Подобные комплексы нашли широкое применение в технологических цепочках на производстве, в строительной индустрии, в сельском хозяйстве, на транспорте, в быту и в качестве интеллектуальных игрушек.

МРТК служат для поиска определенных объектов, сбора, предварительной обработки информации о них, а также для управляемого воздействия на эти объекты. Подобные объекты могут находиться в разнообразных, порой некомфортных или опасных для человека местах, а также в непредсказуемых заранее ситуациях. Для МРТК характерны сложные, гибкие алгоритмы работы, высокая степень автономности, значительно более высокая информационная производительность в сравнении с СРТК. В зависимости от среды, характера выполняемых задач и условий функционирования различают военные, космические, подводные, подземные МРТК, а также роботы, предназначенные для работы в условиях радиоактивного заражения, среди взрывчатых и огнеопасных веществ.

1. Структура робототехнической платформы

Назовем совокупность мобильных роботов, функционирующих в рамках единого управляющего алгоритма робототехнической платформой (РТП). Необходимость взаимодействия в составе РТП существенным образом влияет на устройство и тактико-технические характеристики основных элементов мобильных роботов [1 – 8]. К таким элементам в числе других относятся сенсоры ориентации (техническое зрение, распознавание образов, стабилизаторы положения, адаптивная навигация).

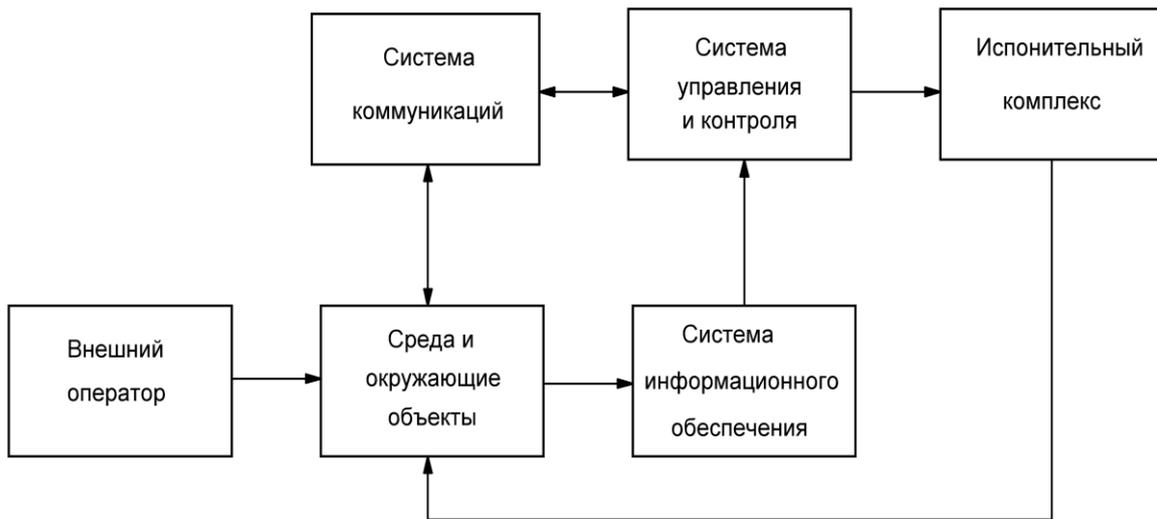


Рис.1. Обобщенная схема робототехнической платформы (РТП)

На рис.1 показана обобщенная структурная схема робототехнической платформы (РТП). Центральными элементами этого комплекса являются "Система управления и контроля" и "Система информационного обеспечения" [2, 3].

Система управления и контроля (СУК), которую еще называют Интеллектуальной системой (ИС), служит:

- для формирования процедур управления исполнительной системой;
- поддержки внешнего управления от человека-оператора или специализированной АСУ;
- реализации жестких алгоритмов управления, а также для адаптации этих алгоритмов в некоторых пределах в соответствии с текущими данными (сигналами), поступающими от системы информационного обеспечения.

В качестве аппаратной базы ИС служат универсальные или специализированные микропроцессорные комплекты со встроенными или отдельными АЦП и ЦАП, устройства связи, элементы энергонезависимой памяти.

Система информационного обеспечения (СИО) служит:

- для приема сигналов с различных специализированных датчиков с последующим преобразованием ансамбля этих сигналов в текущий информационный образ (ИО) состояния окружающей среды, других объектов в ней;
- оценки динамики изменения в ИО;
- фиксации результатов воздействия РТП на окружение;
- коррекции алгоритма функционирования РТП в соответствии с текущими параметрами ИО.

Набор датчиков совместно с преобразователями их сигналов и высокопроизводительным вычислителем (формирователем ИО) образуют сенсорную систему (СС) РТК. Датчики, входящие в состав СС, разнообразны. Чаще всего используются телевизионные устройства, оптико-электронные преобразователи, устройства СВЧ, лазерные и ультразвуковые дальномеры, тактильные сенсоры, силомоментные, индуктивные и емкостные датчики положения в пространстве, скорости, ускорения и взаимодействия с окружающей средой.

Система коммуникаций (СК) и исполнительный комплекс (ИК) являются вспомогательными структурными элементами РТП. СК отвечает за связь РТП с единым управляющим центром, другими РТП или технологическим оборудованием. Эта связь должна быть оперативной (обеспечивать взаимодействие в реальном времени), помехоустойчивой, криптоустойчивой, что позволит РТП функционировать в условиях шумовых и нешумовых помех естественного и искусственного происхождения. Помимо скоростного диалога с оператором

или другим РТП, СК должна обеспечить внешний контроль текущего состояния и функционирования систем РТП, диагностику возникших неисправностей или сбоев в работе РТП, регулярную или эпизодическую регламентную проверку и настройку систем РТП.

ИК (его еще называют исполнительной системой) для своевременной и полной отработки сигналов управления, формируемых процессором СУК (ИС). Именно ИК определяет движение РТП в пространстве, его динамические свойства, а также разные варианты поведения РТП в случае частичной или даже полной утраты связи с ним со стороны оператора или единой АСУ.

2. Методы автономной ориентации и навигации РТП

Существующие методы автономной ориентации и навигации мобильных роботов основаны на использовании данных, которые СИО непрерывно поставляет в СУК. Источники этих данных (ИД) могут быть самыми разнообразными, но, в любом случае, либо внутренними, либо внешними. Причем, ИД удобно разделить на активные (ИДА) и пассивные (ИДП). ИДП предполагают получение сведения РТП о своих координатах, характеристиках движения и расположении других участниках "роя" от внешних источников информации. Работа ИДА основана на использовании внутренних (собственных) аппаратных средств РТП.

К пассивным средствам ориентации и навигации относят спутниковые системы (GPS, GLONASS, перспективные навигационные системы Европы, Китая), пространственные маркеры (координатные маячки).

Системы, основанные на движении по опорным точкам, обеспечивают наилучшие показатели с точки зрения точности перемещения РТП на плоскости или в трехмерном пространстве. Однако этот метод применим лишь для ограниченного (чаще всего – замкнутого) пространства, сложен в применении для нескольких РТП, работающих в непосредственной близости друг от друга, вызывает сбои в работе при появлении ранее не отмеченных препятствий, требует технического обслуживания маркеров (маячков).

Спутниковые системы широко распространены и в настоящее время успешно развиваются. Однако точность подобных систем не всегда бывает удовлетворительной при решении задачи определения координат мобильного РТП при его движении по сложному маршруту. Основные факторы, приводящие к снижению долговременной точности определения координат РТП в спутниковых системах: изменения орбит спутников, появление объектов, временно перекрывающих доступ РТП к сигналам со спутников, мешающее влияние атмосферы Земли, многократные переотражения и интерференция радиоволн.

Активные источники данных (ИДА) для систем навигации РТП широко представлены Инерционными навигационными системами (ИНС). ИНС могут быть условно разделены на системы, не использующие дополнительную информацию о внешней среде, окружающей РТП, и системы, учитывающие подобную информацию.

Классическим примером ИНС служат механические гироскопы и акселерометры, которые позволяют измерить положение, скорость и ускорение объекта относительно некоторого его начального (условно-нулевого) положения в заданной системе координат и момента приложенных сил. Главным недостатком ИНС является непрерывное накопление ошибок в процессе его функционирования, а также резкое снижение эффективности в ситуациях, когда вектор скорости объекта и его модуль резко изменяются в процессе перемещения в пространстве. Кроме того, ИНС не может предоставить информацию о других (часто мешающих) объектах, окружающих РТП. Поэтому ИНС стараются использовать в РТП совместно со специализированными датчиками, среды (ДС), позволяющими получить дополнительную информацию о среде, в которой функционирует РТП.

Датчики среды разнообразны. Это могут быть датчики силы (датчики контактного взаимодействия с другими подвижными объектами или неподвижным препятствием), датчики различного излучения (ультрафиолетового, оптического, инфракрасного, радиационного, радиоволнового, ультразвукового), дальнометры (оптические и ультразвуковые).

Среди датчиков силы различают датчики давления (частный случай – микропереключатели) и датчики изгиба, принцип действия которых основан на изменении сопротивления проводящей среды при изгибе или скручивании. Чаще всего подобные датчики располагают по выступающему периметру РТП.

Датчики излучения настолько разнообразны по принципу действия и практическому применению, что заслуживают отдельного обсуждения. В рамках статьи следует выделить их частный случай – видеокамеры. В общем случае их количество в РТП не ограничено. Системы навигации, которые используют видеокамеры для позиционирования РТП в окружающей среде, являются одними из наиболее распространенных и универсальных. Видеокамеры эффективны как при движении РТП в замкнутом пространстве, так и в случае их использования вне ограничивающих рамок.

Устройство подобных систем позиционирования во многом аналогично зрению человека. Чаще всего используют бинокулярные конструкции, которые позволяют строить объемную модель окружения РТП на основе сопоставления изображений, получаемых из двух пространственно разнесенных точек наблюдения. Возможно использование в одном РТП больше двух видеокамер. Подобный подход позволяет повысить оперативность получения данных об окружении в разных направлениях, а также добиться большей его адекватности. Однако преимущества многокамерных РТП в значительной мере нивелируются резким ростом их стоимости.

Возможны конструкции РТП с одной видеокамерой. Причем, даже в этом случае существует принципиальная возможность получения объемной информации об удаленных объектах или препятствиях. При этом стоимость РТП существенно снижается.

Впрочем, системы позиционирования с использованием видеокамер не лишены недостатков. Как сложная, технически и конструктивно насыщенная система преобразования информации, видеокамера подвержена различным механическим, атмосферным, электромагнитным и другим помехам. Также большие сложности возникают с получением, хранением, обработкой и передачей больших объемов информации, которую содержит видеоизображение. В частности, эти сложности связаны с проблемой распознавания образов объектов, не все из которых априори известны.

Большой класс активных средств позиционирования и навигации представляют оптические и ультразвуковые дальномеры.

Оптические дальномеры (их еще называют лидарами от английской аббревиатуры LIDAR – Light Detection and Ranging) представляют собой активные оптические системы, которые используют явление отражение света, а также его рассеяние в прозрачных и полупрозрачных средах. Принцип действия лидара во многом схож с работой радиолокатора: направленный луч излучателя отражается от объектов исследования или препятствий и возвращается в точку излучения, где улавливается чувствительным датчиком (приемником). Диапазон рабочих длин волн оптических излучателей лежит в пределах от 1550 нм (инфракрасное излучение "дальнее") до 355 нм (ультрафиолетовое излучение "ближнее").

Благодаря малой длине волны световых колебаний (лучей) появляется возможность фиксировать отражающие объекты с малыми геометрическими размерами, определять расстояние до них, оценивать интенсивность рассеяния световых лучей в прозрачных и полупрозрачных средах. Обилие факторов разнонаправленного рассеяния световых колебаний усложняет задачу анализа среды их распространения, распределения в ней различных объектов и расстояний до этих объектов от РТП.

Источниками зондирующего излучения служат либо специальные лазеры, либо светодиоды (или светодиодные матрицы). Лазеры, для которых характерны когерентность, высокая плотность и мгновенная мощность излучения, используются в ситуациях с большими расстояниями (от десятков метров и больше), до исследуемых объектов, с полупрозрачными средами распространения, с требованиями высокой пространственной разрешающей способ-

ностью. В ограниченных пространствах (помещениях, площадках, громоздком оборудовании и т.д.) возможно использование светодиодных излучателей.

Оптическое излучение может осуществляться в виде коротких оптических импульсов (для относительно больших расстояний) или в виде непрерывных колебаний, промодулированных по амплитуде (в случае малых расстояний до исследуемых объектов от РТП).

Для получения объемной модели пространства, окружающего РТП, используют сканирующие оптические излучатели машинного зрения, которые формируют двумерные и трехмерную картину окружения, а также позволяют анализировать свойства среды распространения в заданном секторе обзора. Для сканирования направленного излучения в одной плоскости применяются различные сканирующие головки. В них оптический излучатель и приемник отраженных (рассеянных) колебаний – неподвижны, а сканирование достигается вращением зеркального отражателя, движение которого синхронизируется с помощью специальных реперных меток. Чтобы избежать перегрузки приемника оптического излучения интенсивной засветкой со стороны ближней зоны рассеяния, используют высокоскоростные механические непроницаемые "шторы", которые физически ограничивают доступ рассеянных лучей в приемный оптический канал.

3. Ультразвуковые методы ориентации мобильных роботов

Ультразвуковые способы ориентации мобильных роботов интенсивно развиваются по мере совершенствования элементной базы и технологий генерирования, излучения, приема и обработки акустических сигналов.

Различают активные и пассивные способы ориентации мобильных роботов с использованием одиночных и групповых ультразвуковых датчиков.

Пассивный метод подразумевает сбор сигнальной информации от стационарных ультразвуковых датчиков и дальнейшую передачу данных на мобильную платформу робота по стандартным каналам связи типа Wi-Fi, bluetooth и др. При этом по периметру пространства, в котором передвигается робот, располагаются несколько акустических датчиков (их количество зависит от геометрических особенностей пространства, наличия препятствий и их акустических свойств и т.д.). Эти датчики позволяют измерить координаты подвижного или стационарного объекта. Результаты измерений передаются на мобильный объект, который использует их для коррекции своего движения в ограниченном пространстве. Подобный подход отличается высокой точностью и оперативностью позиционирования, однако является дорогостоящим и недостаточно гибким [9].

Активный способ подразумевает использование разнообразных акустических датчиков, расположенных на платформе робота, как в зафиксированном положении, так и в подвижном состоянии, которое предполагает сканирование пространства по азимуту [10]. Этот метод более перспективный и приспособленный для большинства реальных задач, которые требуют автономной навигации мобильных платформ. В простейшем случае достаточно двух ультразвуковых датчиков, которые функционируют по принципу эхолокации, излучая и принимая отраженные от объектов ультразвуковые волны. Для обеспечения автономного движения робота используются результаты измерений ультразвуковым датчиком расстояний до препятствий, как в неподвижном состоянии робота, так и при его движении по выбранному маршруту [11]. Наличие препятствия рассчитывается анализаторами робота по времени измерений расстояний от излучателя (приемника) до препятствия в случаях неподвижной платформы, а также в процессе ее движения [12]. При этом для случая взаимного движения платформы и препятствия возникает эффект Доплера, который также учитывается в расчетных алгоритмах контроля за перемещениями платформы. В некоторых случаях подобные алгоритмы предусматривают секторальные или круговые вращения датчиков робота для более точного учета месторасположения препятствия и выбора оптимального пути движения [10 – 12].

Значительный интерес представляет использование в мобильных робототехнических платформах фазочувствительных датчиков ультразвуковых дальномеров [13]. Подобные измерители особенно эффективны при создании подсистем управления несколькими одновременно функционирующими платформами. В этих устройствах используется квадратурное детектирование, которое предполагает выделение в реальном масштабе времени квадратурных составляющих полного вектора входного узкополосного колебания (случайного процесса), вычисление текущих отсчетов комплексной огибающей и фазы этого колебания. Подобный подход позволяет конструировать многоканальную систему управления, учитывающую эффект Доплера в каждом канале.

4. Комплексование подсистем ориентации и навигации в мобильных роботах

Развитие технологий создания новых материалов, элементов микроэлектроники, узлов точной механики, оптики в плане их удешевления, миниатюризации, снижения энергопотребления, повышения надежности позволяет ставить и решать задачи по комплексному использованию на одной РТП нескольких однородных, а также разнородных устройств навигации и позиционирования. Однозначных критериев выбора количества и типов подобных устройств еще не сформулировано. Однако можно предположить, что все такие критерии будут опираться на единый принцип: максимизация отношения некоего численного функционала от интегрального эффекта функционирования комплексной системы позиционирования и навигации РТП к стоимости этой системы.

В качестве примера подобного подхода можно привести исследование [14], в котором предложена совместная работа трех пар ультразвуковых датчиков, настроенных на прием сигналов разных частот от опорных излучателей, координаты которых либо известны заранее, либо могут быть переданы по каналам служебной связи. Механически все три пары датчиков расположены на РТП соосно, но вращаются вокруг общей оси независимо друг от друга под действием индивидуальных двигателей и подсистем управления. Таким образом, система из этих трех пар датчиков позволяет в реальном масштабе времени определять текущие значения углов ориентации пар датчиков на соответствующие опорные излучатели. А это, в свою очередь, дает возможность вычислить по методу триангуляции текущее положение и ориентацию РТП в некоем ограниченном пространстве.

В работе [15] предложен комплексный способ навигации РТП, который предполагает комбинированное использование тактильных и ультразвуковых датчиков. Такой подход позволил снизить энергопотребление и стоимость РТП, а также существенно улучшить ее тактико-технические характеристики, в сравнении с использованием датчиков позиционирования и навигации одного типа.

Выводы

Современные робототехнические платформы (РТП) представляют собой сложные кибернетические устройства, предназначенные для решения разнообразных задач преимущественно в автономном режиме работы. Это обстоятельство вынуждает разрабатывать разнообразные аппаратные и программные средства позиционирования и навигации в зависимости от предназначения РТП, условий ее функционирования, рисков сбоев и отказов, радиуса действия и т.п. Датчики, как составная часть аппаратных средств, разнообразны по физическим принципам функционирования и способам организации в составе РТП. Каждый из существующих типов датчиков имеет свои преимущества и ограничения, что делает актуальной задачу их комплексного использования в рамках единой РТП. С учетом современного состояния технологий производства компонентной базы, материалов, элементов точной механики, оптики, средств коммуникации, помехоустойчивого кодирования, программного обеспечения подобное комплексование позволяет существенно улучшить тактико-технические характеристики систем позиционирования и навигации РТК при вполне приемлемых аппаратных и финансовых затратах.

Список литературы:

1. Sergiyenko O.I., Ivanov M.V., Tyrsa V.V., Kartashov V.M., Rivas Lopez M., Hernandez Balbuena D., Flores Fuentes W., Rodriguez Quinonez J.C., Nieto Hipolito J.I., Hernandez W. and Tchernykh A. Data transferring model determination in robotic // Robotics and Autonomus Systems. 2016. Vol. 83. P. 251-260.
2. Юревич Е.И. Основы робототехники. 2-е изд. перераб. и доп. Санкт Петербург : БХВ. Петербург, 2005. 416с.
3. Конюх В.Л. Основы робототехники. Ростов н/Д : Феникс, 2008. 288 с.
4. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой. Москва : ИЛ, 2009. 465с.
5. Бербюк В.Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем. Киев : Наук. думка, 2014. 192с.
6. Вильямс Д. Программируемые роботы. НТ Пресс, 2006. 240с.
7. Ермишин К.В., Воротников С.А. Система управления сервисным мобильным роботом экскурсоводом. Экстремальная робототехника // Труды Междунар. науч.-техн. конф. Санкт Петербург : Политехника – сервис, 2011. С.351-356.
8. Ермишин К.В., Воротников С.А. Мультиагентная сенсорная система сервисного мобильного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение", 2012. С. 50-59.
9. Львов А. В., Агапов М. Н., Тищенко А. И. Распределенная микроконтроллерная система акустической локации // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 11. С. 21-30.
10. Аш Ж. Датчики измерительных систем : в 2 т. ; под ред. А.С. Обухова ; пер. с франц. Москва : Мир, 1992. 480 с.
11. Смольский Д. А. Ориентация робота в условиях коридорной местности // Техника. Технологии. Инженерия. 2018. №3. С. 8-14. URL <https://moluch.ru/th/8/archive/95/3378/> (дата обращения: 21.04.2019).
12. Костишин М.О., Жаринов И.О., Сулов В.Д. Автономная навигация мобильного робота на основе ультразвукового датчика измерения расстояний // Науч.-техн. вестник информ. технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). 162 с.
13. Гонсало Альварес Херес С., Хасимото Ю., Цутя Т. Фазочувствительный ультразвуковой датчик расстояний для робототехнических систем // Системы обработки данных. Автометрия. 2000. № 1. С. 65-77. (Российская академия наук).
14. <http://roboticslib.ru/books/item/f00/s00/z0000016/st033.shtml>.
15. Защелкин К. В., Калинин В. В., Ульченко Н. О. Комбинированный способ навигации автономного мобильного робота // МНПК «Современные информационные и электронные технологии». Одесса, 2013. С.174-177.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 02.10.2019