

Ключевые вопросы создания интеллектуальных мобильных роботов

© В.П. Носков, И.В. Рубцов

НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрена проблема создания полностью автономного транспортного робота. Определен круг задач, решаемых его бортовой системой управления и ее состав. Описан опыт создания таких систем управления и результаты их испытаний в составе мобильных роботов в условиях различных сред. Сформулированы перспективные направления дальнейшего развития средств автовождения.

Ключевые слова: *мобильный робот, внешняя среда, система управления, система технического зрения, навигационная система, картографическая база данных.*

Как показал отечественный и зарубежный опыт разработки и использования мобильных роботов (МР), особенно МР военного и специального назначения, системы дистанционного управления в настоящее время имеют ряд принципиальных недостатков и ограничений. Впервые недостатки дистанционного управления проявились при эксплуатации советских луноходов, запаздывание в контуре управления которых было 5 с, при этом скорость движения в среднем составляла не более 0,1 км/ч при технически возможной 2 км/ч. Затем в процессе ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС при успешной эксплуатации МР СТР-1 на открытых площадках (рис. 1, а) возникли проблемы в экранированных зонах, особенно в помещениях. В связи с этим был создан МР со сбрасываемыми ретрансляторами, однако и это не позволило обеспечить устойчивую радиосвязь во всех помещениях АЭС типа Чернобыльской. Аналогичные недостатки характерны и для современных экспериментальных и принятых на вооружение дистанционно-управляемых образцов робототехнических комплексов (РТК) (рис. 1, б, в).

Таким образом, основными недостатками и ограничениями дистанционно-управляемых МР являются:

- повышенные требования к надежности радиоканала вследствие непрерывного участия человека в процессе управления;
- ограниченный зоной уверенного радиобмена радиус действия;
- возможность эффективного применения противником средств противодействия и уничтожения вследствие постоянной работы радиоканала.

Рис. 1. Образцы дистанционно-управляемых МР:

а — СТР-1 на крыше Чернобыльской АЭС;
б — экспериментальный РТК на базе инженерной разведывательной машины (ИРМ);
в — РТК «Разнобой» (принят на вооружение войсками радиационной, химической и биологической защиты)



а



б



в

Поэтому дальнейшее развитие мобильной робототехники, позволяющее преодолеть отмеченные принципиальные ограничения и недостатки дистанционного управления, связано с повышением автономности МР за счет передачи функций, выполняемых человеком-оператором, бортовым средствам. Такая «интеллектуализация» МР требует комплексного решения бортовыми средствами следующих основных задач:

- дистанционного определения геометрических и опорных характеристик зоны маневрирования;
- определения текущих координат и ориентации МР;
- формирования оперативной (локальной) и тактической (глобальной) моделей внешней среды с учетом оперативной (показания бортовых датчиков и сенсоров) и априорной (картографические данные) информации о районе маневрирования;
- планирования целенаправленных траекторий движения на оперативном и тактическом уровнях;
- отработки планируемых траекторий движения.

Следовательно, автономная система управления движением (АСУД), решающая перечисленные выше задачи, должна иметь в своем составе системы технического зрения (СТЗ), формирования модели внешней среды и планирования движения, картографическую базу данных (КБД), навигационную и исполнительную системы.

В настоящее время созданы АСУД цехового МР, МР для индустриально-городских (урбанизированных) сред, сети дорог и пересеченной местности (рис. 2), функционирование которых экспериментально проверено в реальных условиях [1, 2].

Рис. 2. Образцы МР с автономными системами управления движением:

а — цеховой МР концерна VOLVO;
б — МР, принятый на вооружение МЧС;
в — экспериментальный МР массой 170 кг;
г — экспериментальный МР массой 45 т



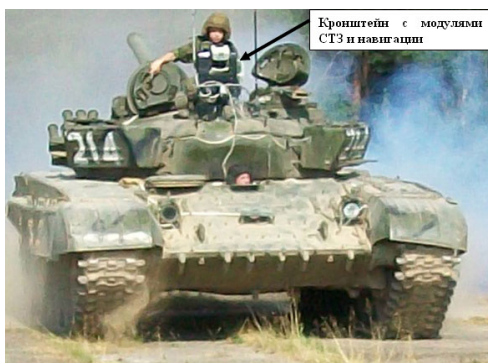
а



б



в



г

Рассмотрим принципы построения основных подсистем АСУД и продемонстрируем их работу.

СТЗ является источником основного объема необходимой для обеспечения автономного движения информации и представляет собой наиболее сложную систему. Создано несколько СТЗ на базе 2D- и 3D-лазерных сенсоров, сканаторов, видеоподлинки и видеокамер (рис. 3).

В зависимости от среды функционирования и решаемых задач используют те или иные СТЗ. В цехах и в урбанизированных средах достаточно использовать 2D-лазерный сенсор типа SICK, который дает дальнометрические изображения в виде горизонтальных сечений рабочей зоны [1]. На пересеченной местности и в подвергшихся разрушениям индустриально-городских средах, а также при движении в зданиях по лестницам следует применять 3D-лазерные сенсоры, которые дают объемные дальнометрические изображения внешней среды в телесных углах обзора [2, 3]. На малых скоростях можно использовать 3D-лазерный сенсор на базе 2D-лазерного сенсора типа SICK и одноступенчатого сканатора (см. рис. 3, *а*), позволяющий получать около 13,6 тыс. измерений в секунду. На больших скоростях необходимо применять более быстродействующие сенсоры, например HDL-32E LiDAR (см. рис. 3, *б*), позволяющий получать 700 тыс. измерений в секунду

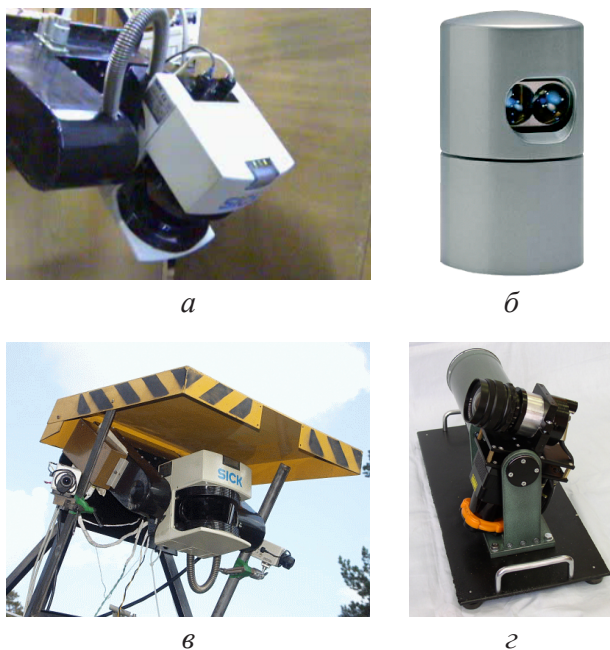


Рис. 3. Системы технического зрения для автономного вождения:

а — 3D-лазерный сенсор на базе 2D-лазерного сенсора SICK и сканатора;
б — 3D-лазерный сенсор HDL-32E; *в* — 3D-лазерный сенсор и 2 видеокамеры;
г — 2D-лазерный сенсор, видеополоска и сканатор

при круговом обзоре. При движении по дорогам [4] и для формирования объемных моделей внешней среды [5] необходимо использовать комплексированные СТЗ, построенные на базе лазерных сенсоров и видеокамер (см. рис. 3, *в*, *г*).

По дальнометрическим изображениям в соответствии с законами сканирования, а также с учетом угловых и линейных перемещений МР строится геометрическая модель внешней среды. Затем выполняется классификация данной геометрической модели по критерию проходимости с учетом кинематических и динамических характеристик данного объекта управления и строится формальная модель внешней среды [6]. Формальная модель представляется в виде плоского однородного графа или графа со взвешенными ребрами и может быть использована для нахождения локальной траектории движения, безопасной для данного объекта управления. Задача поиска локальной траектории сводится к нахождению в этом графе связной последовательности вершин и ребер, принадлежащей разрешенной для движения зоне и удовлетворяющей какому-либо критерию (например, критерию минимума суммы весов ребер, входящих в последовательность, что соответствует нахождению кратчайшей траектории, если в качестве весов ребер приняты

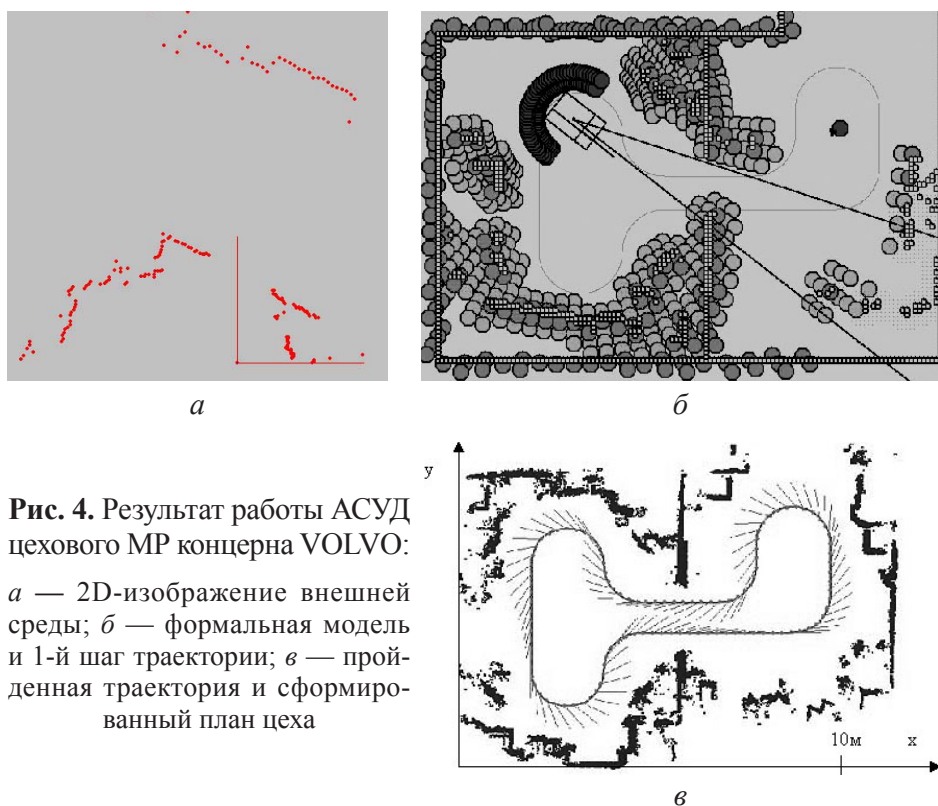


Рис. 4. Результат работы АСУД цехового МР концерна VOLVO:

а — 2D-изображение внешней среды; *б* — формальная модель и 1-й шаг траектории; *в* — пройденная траектория и сформированный план цеха

соответствующие смежным вершинам расстояния в плоскости перемещений). Результаты работы АСУД в цеховых условиях приведены на рис. 4, а в естественной среде — на рис. 5.

Планирование тактической траектории выполняется на тактической модели, представляемой в виде глобального графа, который автоматически строится по КБД с учетом начального (текущего) и целевого положений МР [7]. Исходными данными для формирования КБД является цифровая карта района маневрирования и потенциальные возможности МР.

В настоящее время построены примеры КБД для индустриальной среды, города, сети дорог и пересеченной местности. Они интегрированы в бортовые системы управления действующих МР и прошли экспериментальную проверку в реальных условиях. Глобальный граф в процессе функционирования МР должен по мере необходимости корректироваться автоматически по данным СТЗ и навигационной системы [7]. При обнаружении не учтенного в КБД непроходимого препятствия (например, перекрыта дорога, разрушен мост) оно в соответствии с текущими координатами вносится в память. При этом корректировка глобального графа сводится к добавлению или исключению вершин и дуг в исходном графе (исключаются вершины и дуги, принадлежащие

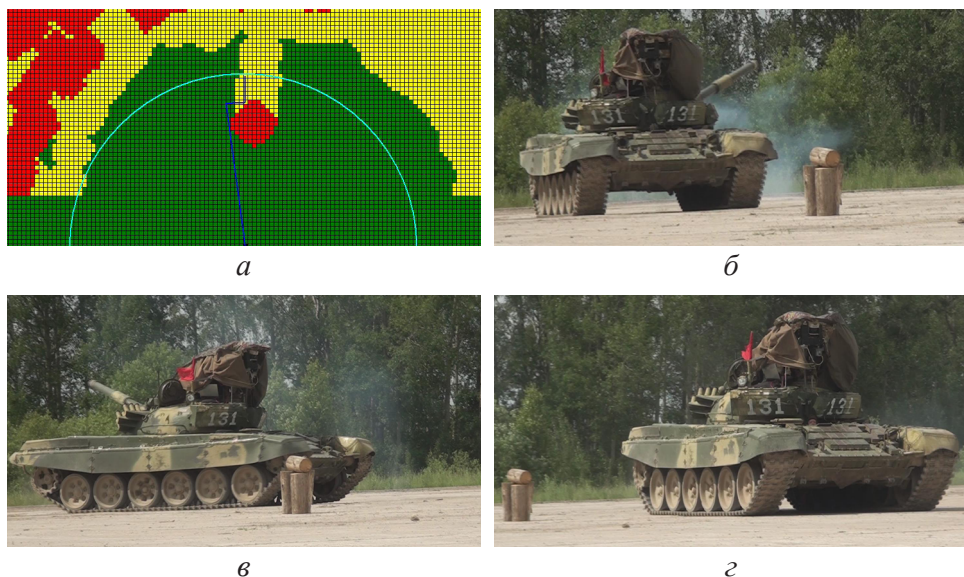


Рис. 5. Результат работы АСУД в естественной среде:

а — формальная модель внешней среды и 1-й шаг траектории; *б–г* — отработка траектории обхода препятствия

и проходящие через обнаруженное препятствие, добавляются новые вершины и дуги, соответствующие обнаруженному препятствию). На рис. 6 демонстрируется использование глобального графа для нахождения траектории и ее корректировка по данным СТЗ при автономном движении в индустриальной среде (утолщенные ломаные линии — спланированные глобальные траектории, заштрихованный объект — обнаруженное СТЗ препятствие).

Навигационную систему МР целесообразно создавать на основе комплексирования средств спутниковой навигации, инерциальных и одометрических подсистем. Кроме того, в экранированных зонах (здания, плотная городская застройка, ущелья) необходимо применять методы экстремальной навигации по дальнометрическим изображениям внешней среды [8]. Результат работы такой навигационной системы приведен на рис. 4, в, здесь по последовательности 2D-изображений (см. рис. 4, а) определены ориентация и координаты МР, которые совпали с магнитопроводом, по которому он двигался, и сформирован план цеха. Комплексное использование различных систем и методов навигации позволяет достоверно решать навигационную задачу бортовыми средствами при функционировании МР в условиях пересеченной местности, города и индустриальной среды.

Исполнительная система представляет собой комплекс следящих приводов, обеспечивающих отработку локальных траекторий при воз-

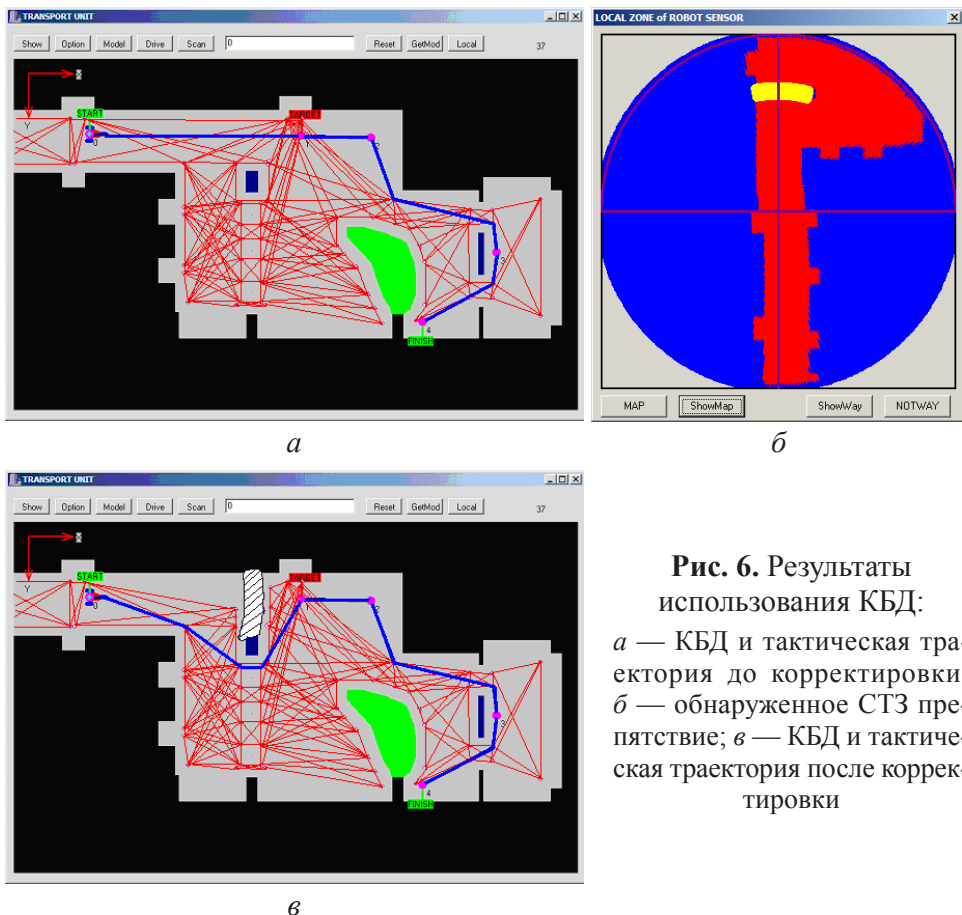


Рис. 6. Результаты использования КБД:
а — КБД и тактическая траектория до корректировки;
б — обнаруженное СТЗ препятствие;
в — КБД и тактическая траектория после корректировки

мущающих воздействиях со стороны грунта на движитель. На рис. 7 приведен результат работы исполнительной системы роботизированного танка Т72 на твердых грунтах при выполнении поворота на за-

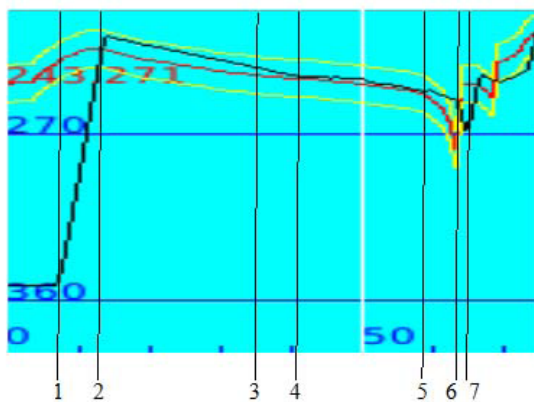


Рис. 7. Результат работы исполнительной системы АСУД

данный курсовой угол (участок 1–2) и удержании курса в заданной трубке ошибок (участок 2–5). При этом выполнялся разгон от 0 до 30 км/ч при соответствующем переключении передач. В качестве навигационных данных использовались данные GPS-приемника и оцифрованные показания штатных тахометра ведущей звездочки и гироскопического курсоуказателя.

Работы по созданию и исследованию средств автовождения велись в рамках ряда НИОКР по заказу различных министерств. В частности, по заказу МЧС России выполнена ОКР по разработке комплекта программно-аппаратных средств, обеспечивающих автоматический возврат пожарного МР (см. рис. 2, б) в точку старта или в зону уверенного радиообмена при потере радиосвязи.

В заключение отметим основные проблемы и перспективные пути дальнейшего развития методов и средств автовождения.

При автовождении АСУД выполняет согласованное планирование движения на локальной и глобальной моделях внешней среды, масштабы которых существенно различаются, что снижает эффективность автономного режима движения. Разрешение отмеченного противоречия и повышение эффективности использования МР возможно путем использования выносного пункта технического зрения (ВПТЗ) на базе беспилотного летательного аппарата, непосредственно связанного и функционирующего в комплексе с МР (или с группой МР) [9, 10]. Данные с такого ВПТЗ позволяют связать оперативную информацию о среде передвижения с картографической информацией, поскольку являются промежуточными по размерам и масштабу представления, а также на два-три порядка увеличить зону обзора и оперативно в темпе движения уточнять картографические данные.

При автовождении желательно хранить дальнометрические изображения, полученные в процессе движения, что позволяет снизить навигационную ошибку при формировании планов внешней среды [7] и обеспечить возврат МР в точку старта по опорным изображениям [8]. Однако для хранения исходных дальнометрических изображений требуется много памяти. В данном случае перспективным является переход от исходного 3D-изображения к семантическому описанию, что позволит значительно сократить объем хранимой информации. Подтверждением этому служат изображения на рис. 8, где показаны выделенные из исходного 3D-изображения семантические объекты типа «стена», «лестница», «дверной проем», для описания которых достаточно несколько линейных уравнений. Кроме того, семантическое описание («понимание») внешней среды позволяет не только более успешно решать задачи автовождения, но и приступить к автоматизации «поведенческого» уровня управления.

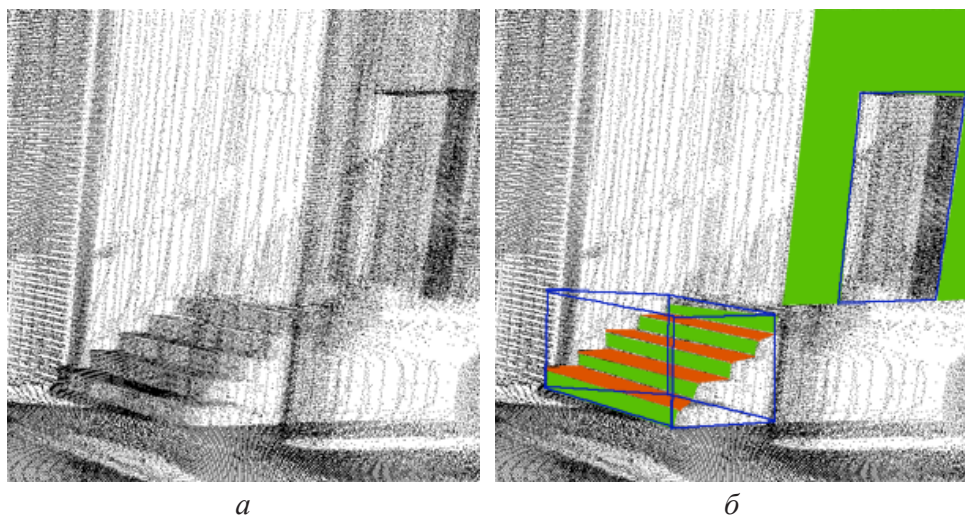


Рис. 8. Пример перехода к семантическому описанию локальной зоны:
a — исходное 3D-изображение; *б* — выделенные объекты

Перспективным направлением развития является комплексирование различных сенсоров: видеокамер, сканирующих лазерных дальнометров (в том числе с различной и даже переменной длиной волны, что позволяет дистанционно определять состав опорной поверхности), радиолокаторов, тепловизоров и т. д. Например, комплексирование видео- и дальнометрических изображений позволяет:

- формировать объемные визуально-подобные модели внешней среды [5], которые могут успешно использоваться не только для управления МР и его навесного оборудования, но и для планирования различных спецопераций [10];
- более качественно решать навигационную задачу [11];
- более качественно решать задачу распознавания дорожной сцены и управления МР при движении по сети дорог [4].

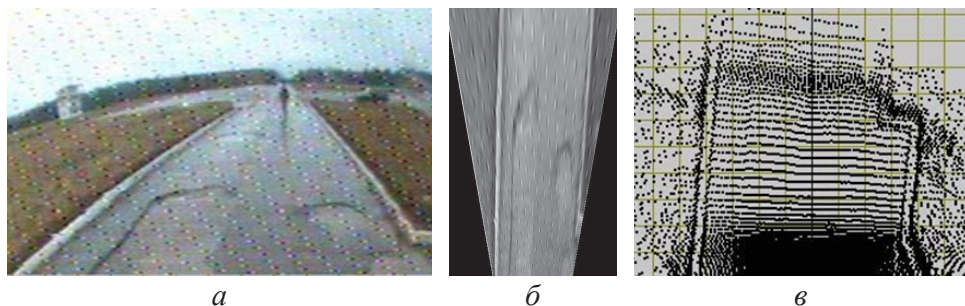


Рис. 9. Комплексная обработка видео- и 3D-изображений дорожной сцены:
a — исходное видеозображение; *б, в* — преобразованные видео- и дальнометрическое изображения

В частности, на рис. 9 показаны соответствующие друг другу видео- и дальнометрическое (рис. 9, б, в) изображения, приведенные в систему координат дороги, комплексная обработка которых значительно проще, чем отдельного исходного изображения (рис. 9, а).

Комплексирование сенсоров различной физической природы позволит формировать более полные модели внешней среды и в перспективе решить актуальную задачу дистанционного определения опорной проходимости (несущая способность грунта, коэффициенты сцепления, сопротивления движению и повороту).

В части исполнительской системы требуются разработка и создание:

- адаптивной к рельефу опорной поверхности подвески;
- средств обеспечения нефиксированного радиуса поворота для гусеничных машин;
- средств рационального распределения моментов и скоростей по движителям в зависимости от текущих характеристик грунтового основания под каждым движителем.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лакота Н.А., Носков В.П., Рубцов И.В., Лундгрэн Я.-О., Моор Ф. Опыт использования элементов искусственного интеллекта в системе управления цехового транспортного робота. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2000, № 4, с. 44–47.
- [2] Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2005, № 12, с. 21–24.
- [3] Кузин Ю.Р., Носков А.В., Носков В.П. Разработка и исследование СТЗ для обеспечения автономного движения. *Научно-технический сб. «Оборонная техника»*. Москва, ФГУП «НТЦ «Информтехника», 2001, с. 34–39.
- [4] Носков В.П., Ханин А.А. Комплексирование светолокационных и телевизионных данных в задачах выделения дороги. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, спец. вып. «Специальная робототехника и мехатроника», с. 149–158.
- [5] Носков В.П., Рубцов И.В., Романов А.Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальнометра. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2007, № 8, с. 2–5.
- [6] Буйволов Г.А., Носков В.П. и др. Аппаратно-алгоритмические средства формирования модели проблемной среды в условиях пересеченной местности. *Сб. научн. тр. «Управление движением и техническое зрение автономных транспортных роботов»*. Москва, ИФТП, 1989, с. 61–69.
- [7] Евсеев А.А., Носков В.П., Платонов А.К. Электронная карта в системе управления автономным движением мобильного робота. *Известия Тульского государственного университета. Сер. Вычислительная техника, информационные технологии, системы управления, вып. 3 «Системы управления»*, 2006, т. 1, с. 166–169.
- [8] Носков В.П., Носков А.В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2005, № 12, с. 16–21.

- [9] Аникин В.А., Ким Н.В., Носков В.П., Рубцов И.В. Мобильный робототехнический комплекс с системой технического зрения на базе БПЛА. *Вопросы оборонной техники. Сер. 9 «Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы»*. Москва, ФГУП «НТЦ «Информтехника», 2010, вып. 1 (242)—2 (243), с. 40–46.
- [10] Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Бой в городе. Боевые и обеспечивающие роботы в условиях урбанизированной территории. *Известия ЮФУ. Технические науки*. Таганрог, Изд-во ТИ ЮФУ, 2011, № 3, с. 142–146.
- [11] Медведев А.И. Система калибровки видеокамеры и лазерного дальнометрического сканатора мобильного транспортного робота. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, спец. вып. «Специальная робототехника и мехатроника», с. 99–108.

Статья поступила в редакцию 21.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

В.П. Носков, И.В. Рубцов. Ключевые вопросы создания интеллектуальных мобильных роботов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/629.html>

Носков Владимир Петрович родился в 1951 г., окончил Таганрогский радиотехнический институт в 1974 г. Канд. техн. наук, зав. сектором НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ и монографий в области робототехники. e-mail: noskov_mstu@mail.ru

Рубцов Иван Васильевич родился в 1946 г., окончил Московский лесотехнический институт в 1969 г. Канд. техн. наук, зав. кафедрой «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, зав. отделом НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники за 2008 г. Автор более 100 научных работ в области робототехники и систем управления. e-mail: lapvs@rambler.ru