

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 007:52

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-6-19

А.В. Вазаев, К.Ю. Машков, В.П. Носков, И.В. Рубцов

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗОНЫ МАНЕВРИРОВАНИЯ РТК НА ОСНОВЕ ТАКТИЛЬНОЙ И ЗРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Для повышения возможностей и расширения области применения робототехнических комплексов специального и военного назначения предлагается переходить сначала от принимаемых в настоящее время на вооружение систем дистанционного управления к полуавтономным системам, осуществляющим контроль за действиями оператора и выполняющим часть его функций. А затем – к автономным системам управления, способным функционировать в режиме “молчания”, в экранированных зонах и за пределами дальности средств радиосвязи. Такая интеллектуализация бортовых систем управления позволит исключить принципиальные ограничения и недостатки, обусловленные каналом связи, и обеспечивает реализацию группового управления. Показано, что основой повышения автономности робототехнических комплексов через интеллектуализацию бортовых систем управления, как при управлении движением, так и при управлении навесным оборудованием, является решение бортовыми средствами задач формирования модели внешней среды и определения координат объекта управления. Наличие модели внешней среды и текущих координат объекта управления позволяет автоматизировать планирование и обработку траектории движения, что и обеспечивает автономное функционирование робототехнических комплексов. Рассмотрена сложная проблема классификации зоны маневрирования по критериям геометрической и опорной проходимости с учетом характеристик движителя, геометрии рельефа и опорных свойств грунта. Описаны существующие методы и алгоритмы, а также приведены результаты экспериментальных исследований по решению следующих основных задач данной проблемы: – классификации зоны маневрирования по критерию геометрической проходимости по данным бортовой системы технического зрения на основе 3D-лазерного сенсора; – распознавания типов грунтов по данным комплексированной системы технического зрения, состоящей из взаимно-юстированных 3D-лазерного сенсора, цветной видеокамеры и тепловизора, имеющих общую зону обзора; – использования аппарата нейронных сетей для повышения достоверности распознавания типов грунтов; – определения опорных характеристик грунта по измерениям реакций движителя в процессе движения. Сформулированы перспективные направления дальнейших исследований в части комплексирования тактильной и зрительной информации для повышения достоверности классификации участков зоны маневрирования по комплексному критерию геометрической и опорной проходимости.

Движитель; рельеф; грунт; геометрическая и опорная проходимость; модель внешней среды; система технического зрения.

A.V. Vazaev, K.Yu. Mashkov, V.P. Noskov, I.V. Rubtsov

CONTACT AND VISUAL BASED ENVIRONMENT CLASSIFICATION FOR MOBILE ROBOTS

To increase the capabilities and expand possible applications of robotic systems for special purposes, switching from the currently being adopted remote control systems to semi-autonomous systems that monitor operator actions and perform part of his functions is proposed. Moving to autonomous control systems capable of functioning in the "silent" mode, in shielded areas and

beyond the range of radio communications is proposed as a next step. Such intellectualization of on-board control systems will allow to eliminate fundamental limitations and disadvantages caused by the communication channel and ensures the implementation of robot group control. It is shown that the basis for robot autonomy increasing of on-board control systems, both for movement and tool control, is onboard environment model generation and determining the coordinates of the control object. External environment model and current coordinates makes it possible to automate the trajectory planning and movement, which ensures the autonomous functioning of robotic systems. The complex problem of environment segmentation according to geometric and ground passability is considered, taking into account the characteristics of the chassis, the geometry of the relief and the supporting properties of the ground. The existing methods are described and the results of experimental studies are given to solve the following main tasks: – classification of the operation zone according to geometric passability based data from the onboard technical vision system; – ground types recognition according to the integrated technical vision system; – using the apparatus of neural networks to improve the reliability of ground types recognition; – determination of ground reference characteristics by measuring the reactions of the chassis during movement. The promising directions for further research in integrating tactile and visual information to improve the reliability of the classification of operation zone according to the complex criterion of geometric and support passability are formulated.

Chassis; relief; ground; geometric and support passability; external environment model; technical vision system.

Введение. Как показывает анализ путей развития робототехнических комплексов (РТК) специального и военного назначения, основным перспективным направлением дальнейшего их совершенствования является повышение автономности за счет интеллектуализации бортовых систем управления, что позволит исключить недостатки и ограничения, присущие принимаемым на вооружение в настоящее время дистанционно-управляемым РТК. Принципиальными недостатками дистанционно-управляемых РТК, существенно ограничивающих их область применения, являются:

- ◆ ограниченной зоной уверенного радиообмена радиус действия;
- ◆ невозможность использования в экранированных зонах, которыми изобилует индустриально-городская среда, в том числе и здания;
- ◆ повышенная уязвимость для средств радиоэлектронного и огневого противодействия противника вследствие постоянно работающего канала связи;
- ◆ человеческий фактор (утомляемость и высокая вероятность ошибочных действий оператора, а также низкое соотношение числа операторов к числу роботизированных средств, вследствие сложности объекта управления).

Как показано в [1], повышение автономности целесообразно проводить в последовательном переходе сначала от существующих в настоящее время простейших систем дистанционного управления к интеллектуальным системам дистанционного управления, обеспечивающим повышенную информативную осведомленность оператора, контролирующим его действия и выполняющим часть его функций. А затем – к интеллектуальным системам автономного управления, обеспечивающим автономное функционирование в режиме “молчания”, в экранированных зонах и за пределами дальности средств радиосвязи. Создание интеллектуальных систем дистанционного и автономного управления, в свою очередь, позволит перейти к решению задач группового управления уже на практическом уровне.

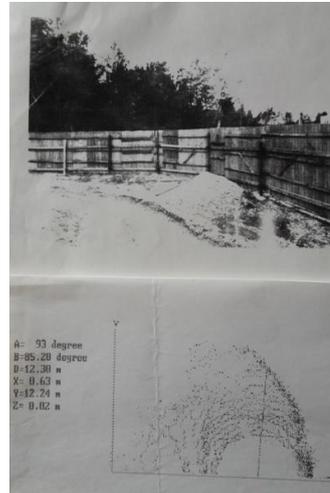
Основой повышения автономности РТК через интеллектуализацию бортовых систем управления, как при управлении движением [2–7], так и при управлении навесным оборудованием [8], является решение бортовыми средствами задач формирования модели внешней среды и определения координат объекта управления. Наличие модели внешней среды и текущих координат объекта управления позволяет автоматизировать планирование и обработку траектории движения, что и обеспечивает автономное функционирование РТК.

Для обеспечения целенаправленного безопасного движения необходимо учитывать геометрию рельефа и опорные характеристики грунта [9, 10]. При этом, чем полнее и точнее сформированная модель описывает данные параметры и характеристики, тем меньше требуется участия человека-оператора в процессе управления и тем большей автономностью обладает РТК. Рассмотрим с этой точки зрения методы формирования модели внешней среды по данным бортовых средств и перспективы их дальнейшего развития.

Классификация зоны маневрирования по критерию геометрической проходимости. Для классификации зоны маневрирования по критерию геометрической проходимости необходимо сначала построить ее геометрическую модель. Впервые геометрическая модель внешней среды по данным бортовой системы технического зрения (СТЗ) была получена в СССР в 80-х годах прошлого столетия, когда был создан первый 3D-лазерный сенсор [11] (см. рис. 1,а), который позволял в реальном времени с достаточной точностью формировать трехмерное облако точек окружающего пространства (см. рис. 2,б).



а – роботизированная БМП с лазерной СТЗ



б – фото и геометрическая модель внешней среды

Рис. 1. Формирование геометрической модели бортовой СТЗ

При наличии геометрической модели в виде трехмерного облака точек $\{(x_i, y_i, z_i)\}$ ($i=1,2,\dots,n$), сформированного в подвижной системе координат, связанной с корпусом шасси и приведенной к местной вертикали, классификация зоны маневрирования по критерию геометрической проходимости может быть эффективно выполнена с использованием функции геометрической проходимости [3]. Функция геометрической проходимости $f(\mathbf{l})$ (рис. 2) содержит информацию о предельно-допустимых наклонах корпуса (γ_m) по углам крена и дифферента и предельную высоту преодолеваемой ступеньки (h_m) для данного объекта управления.

Аргументом функции геометрической проходимости является расстояние $l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ между проверяемой парой точек (x_i, y_i, z_i) и (x_j, y_j, z_j) в горизонтальной плоскости, а значением – предельно допустимый перепад высот опорной поверхности на этом расстоянии. Функция геометрической проходимости определена на интервале $0 < l < L$ (L – максимальный размер шасси в горизонтальной плоскости). Классификация в рассматриваемом случае сводится к вычис-

лению модуля разности высот $\Delta z_{ij} = |z_i - z_j|$ проверяемой пары точек и сравнения его со значением функции проходимости $f(l_{ij})$ (если $\Delta z_{ij} > f(l_{ij})$, то соответствующий участок зоны маневрирования является препятствием). При $l_{ij} = 0$ проверяются вертикальные ступеньки, при $0 < l_{ij} < L$ – наклоны рельефа. Результат такой классификации приведен на рис. 3 (зеленые участки – разрешены для движения, красные – препятствия, серые – зона неизвестности).

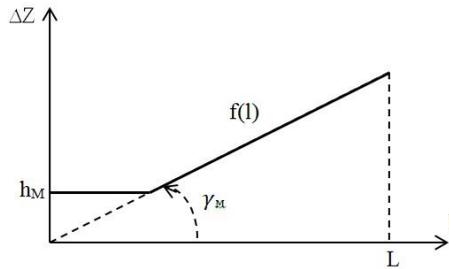
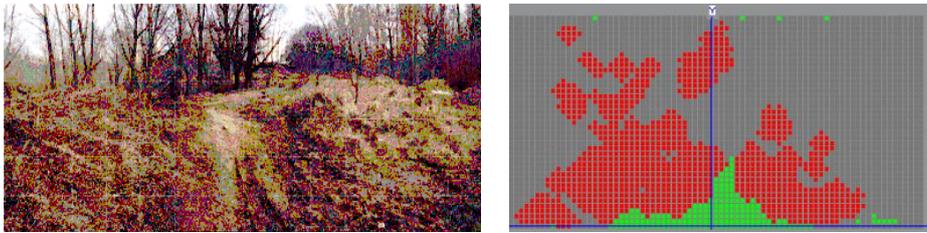


Рис. 2. Функция геометрической проходимости



а – фотопанорама внешней среды б – формальная модель внешней среды

Рис. 3. Результат классификации по критерию геометрической проходимости

Если объект управления имеет несколько скоростей движения, то для классификации рельефа необходимо использовать систему функций геометрической проходимости (рис. 4).

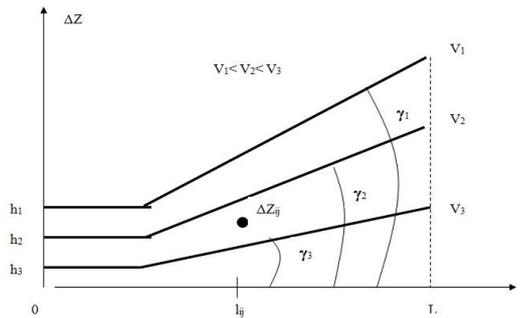


Рис. 4. Система функций геометрической проходимости

В этом случае участки формальной модели будут “раскрашены” разрешенными скоростями движения. Например (см. рис. 4), если для проверяемой пары точек (x_i, y_i, z_i) и (x_j, y_j, z_j) , находящихся друг от друга в горизонтальной проекции на расстоянии l_{ij} , перепад высот Δz_{ij} больше $f_3(l_{ij})$, но меньше $f_2(l_{ij})$, то соответствующий участок рельефа запрещен для движения со скоростью V_3 ($V_3 > V_2 > V_1$).

Метод классификации внешней среды с использованием функции геометрической проходимости успешно проверен в реальных условиях и реализован в программно-аппаратных средствах ряда действующих экспериментальных и макетных образцов РТК, созданных при выполнении НИОКР.

Классификация зоны маневрирования только по критерию геометрической проходимости корректна для относительно твердых грунтов, в общем же случае необходимо учитывать и несущие характеристики грунта.

Распознавание типов грунтов. Существенным приближением к решению задачи классификации зоны маневрирования по критерию опорной проходимости является решение задачи распознавания типов грунтов (песок, гравий, глина, асфальт, растительность и др.). В [5–7] предложен метод дистанционного распознавания типов грунтов по данным бортовой комплексированной СТЗ, состоящей из взаимно-юстированных 3D-лазерного сенсора, цветной видеокамеры и тепловизора, имеющих общую зону обзора (рис. 5).



Рис. 5. Комплексированная система технического зрения

Данные юстировки позволяют совмещать в единой системе координат дальнометрические, видео- и тепловизионные изображения, в результате чего получается геометрия рельефа опорной поверхности в виде облака точек, с распределением на нем цветового и температурного полей:

$$\mathbf{T} = [T_i] = [< \alpha_i, \beta_i, d_i, I_i, R_i, G_i, B_i, Y_i >],$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где n – число точек;

α_i, β_i – углы, соответственно, горизонтальной и вертикальной развёртки 3D-лазерного сенсора;

d_i – измеренная дальность;

I_i – измеренная интенсивность отражённого зондирующего сигнала;

R_i, G_i, B_i – три компоненты цвета пиксела, полученные с телевизионной камеры;

Y_i – температура пиксела, полученная с тепловизионной камеры.

Для каждой произвольной i -й точки сцены вычисляются степени достоверности (вероятности) принадлежности к каждому k -му типу поверхности ($k = 1, 2, \dots, m$):

$$P_{ik} = \frac{1}{b_{\text{цв}} + b_{\text{темп}} + b_{\text{дисп}}} (b_{\text{цв}} P_{ik}^{\text{цв}} + b_{\text{темп}} P_{ik}^{\text{темп}} + b_{\text{дисп}} P_{ik}^{\text{дисп}}),$$

где $P_{ik}^{\text{цв}}$, $P_{ik}^{\text{темп}}$, $P_{ik}^{\text{дисп}}$ – вероятность принадлежности i -й точки к k -му типу поверхности по результатам анализа, соответственно, цвета (компонент R_i, G_i, B_i), температуры (компоненты Y_i) и дисперсии высоты точек в области фиксированного радиуса вокруг i -й точки (определяется с использованием компонент α_i, β_i, d_i);

$b_{\text{цв}}$, $b_{\text{темп}}$, $b_{\text{дисп}}$ – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния данных сенсоров на итоговую вероятность.

Вероятности $P_{ik}^{дв}$, $P_{ik}^{темп}$, $P_{ik}^{дисп}$ принадлежности i -й точки к k -у типу грунта определяется по степени близости (в смысле евклидова расстояния) вектора признаков к эталонному вектору признаков для k -о типа грунта в многомерном пространстве признаков. Эталонные вектора признаков для различных типов грунтов определяются экспертом в результате проведения опытных экспериментальных исследований в реальных условиях. На рис. 6 приведен результат распознавания типов грунтов описанным выше методом в реальных условиях.

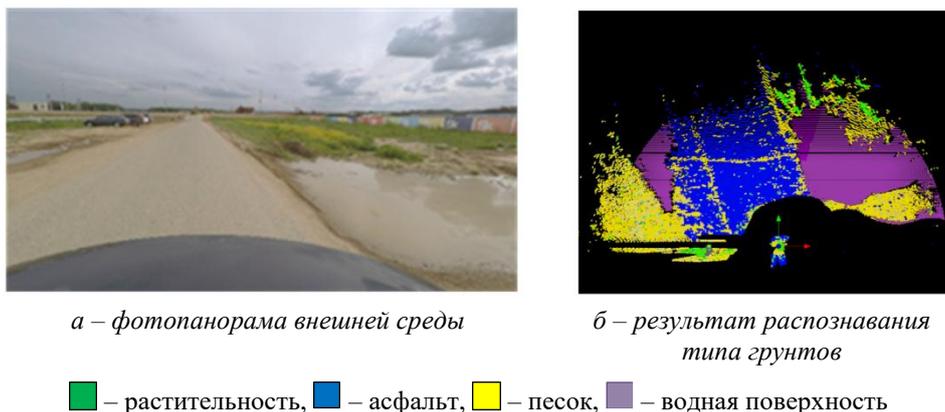


Рис. 6. Результат распознавания типов грунтов

Данный подход обеспечивает достаточно надежное распознавание типов грунтов при относительно стабильных внешних условиях (метеорологические условия, освещенность, время суток, времена года). Однако при изменении этих условий вероятность правильной классификации падает, и эталонные вектора признаков необходимо корректировать. Для автоматизации данного процесса можно использовать аппарат нейронных сетей [7]. В частности хорошие результаты были достигнуты при использовании сверточной нейронной сети CaffeNet (аналог известной AlexNet [12]), содержащей пять свёрточных и три полносвязных слоя. Обучение нейронной сети выполнялось на достаточно большой обучающей выборке изображений, полученной на большом промежутке времени в различные времена года при различных метеорологических условиях. Результаты обучения сети приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обучения в зависимости от размера слоёв сети

Число параметров сети, млн.	60,0	8,0	3,1	2,1	1,1	0,7	0,4
Время классификации, мс	42,7	10,7	7,2	6,0	4,8	4,4	3,0
Точность классификации, %	92,2	92,4	91,8	90,2	84,7	89,3	29,4
Ошибка	0,222	0,217	0,211	0,241	0,386	0,267	1,372

На рис. 7. приведены результаты работы обученной нейронной сети (значения на выходах сети) для одной из сцен при различных условиях внешней среды.



Рис. 7. Результаты классификации

Знание типа грунта позволяет определить из справочных данных ориентировочные значения опорных характеристик данного типа грунта [13, 14]. При классификации грунтов и описания их механических свойств, согласно ГОСТ 25100-2011, различают свыше 150 наименований различных характеристик, что для практического применения при анализе поведения транспортного средства в прямолинейном движении и в повороте является избыточным. Поэтому для описания процессов взаимодействия движителя с грунтом (рис. 8), используются только следующие три безразмерных обобщающих коэффициента [15]: коэффициент сопротивления движению $f = R_{X \text{ текущее}} / R_Z$, коэффициент сцепления $\phi = R_{X \text{ макс}} / R_Z$ и коэффициент сопротивления повороту $\mu = R_Y / R_Z$. Здесь R_X , R_Y , и R_Z – силы, возникающие в пятне контакта движителя с грунтом, δ – угол увода.

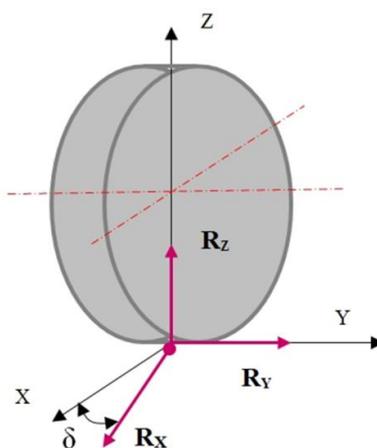


Рис. 8. Силы в пятне контакта колесного движителя с грунтом

Значения обобщённых коэффициентов для различных типов грунтов для колёсных и гусеничных движителей приводятся в справочниках [16]. Пример справочных данных для коэффициента сцепления приведен в табл. 2. Для коэффициентов сопротивления движению и повороту также имеются аналогичные таблицы.

Таблица 2

Максимальные значения коэффициента сцепления

Наименование	Трак с необрезиненной поверхностью	Трак с обрезиненной поверхностью	Шины высокой проходимости
Дорога с асфальтовым покрытием	0,35–0,45	0,7–0,8	0,65–0,85
Сухая бетонная дорога	0,25–0,35	0,71–0,8	0,7–0,8
Мокрая бетонная дорога	0,2–0,3	0,5–0,6	0,5–0,6
Сухая грунтовая дорога	0,6–0,7	0,6–0,7	0,5–0,6
Обледенелая дорога	0,15–0,2	0,12–0,14	0,12–0,14
Грунтовая дорога в период распутицы	0,2–0,5	0,2–0,4	0,2–0,3
Сухой песок	0,4–0,5	0,4–0,45	0,20 ... 0,30
Луг, поросший травой (сухой)	0,9–1,0	0,8–0,9	0,8–0,9
Снег	0,2–0,8	0,15–0,6	0,2–0,5

Табличные значения опорных характеристик грунтов являются ориентировочными и, как показала практика, не всегда совпадают с реальными в данный момент движения РКТ в данной рабочей зоне при данных условиях. Поэтому востребованы бортовые средства, позволяющие непосредственно в процессе движения уточнять текущие значения опорных характеристик грунта.

Контактные методы определения опорных характеристик грунта. Вопросам взаимодействия движителя и деформируемого опорного основания посвящено достаточно много трудов как отечественных, так и зарубежных авторов. В основном эти работы проводились для уже существующих экипажных машин [17, 18]. На настоящий момент сложилось полное понимание, что для эффективного управления даже экипажной машиной необходима автоматизация, обеспечивающая управляемое движение не только с учетом конструктивно-кинематических и силовых особенностей машины, но и с учетом взаимодействия движителя с грунтом [19]. Поэтому для обеспечения адаптивного к изменяющимся условиям внешней среды управления необходимо решать обратную задачу террамеханики – на основе измерений воздействий со стороны грунта на ходовую систему шасси определять текущие значения коэффициентов, характеризующие опорную проходимость грунта. Для этого можно использовать описывающую совместную **ДИНАМИКУ** корпуса и ходовой части (рис. 9) математическую модель движения шасси по деформируемому грунту [20, 21], позволяющую выявлять зависимость между реакциями, возникающими в пятне контакта, и опорными характеристиками грунта. Для снятия динамических воздействий на движитель со стороны грунта (продольная R_x , поперечная R_y и вертикальная R_z силы, крутящий момент M_k , буксование S_k) необходимо использовать силомоментные датчики (например, тензодатчики).

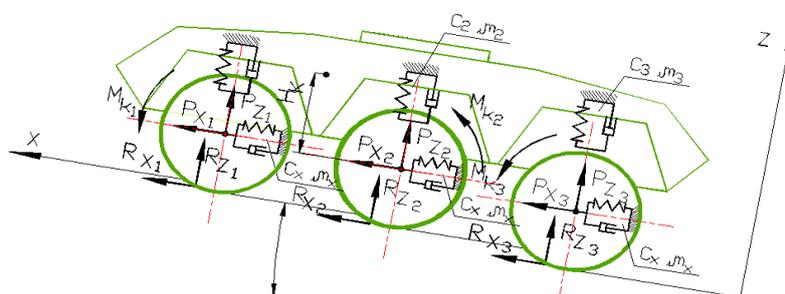


Рис. 9. Динамика прямолинейного движения РТК

Реальные опорные характеристики грунта в этом случае могут быть определены заранее экспериментальным путем по методике «типовых маршрутов» [22], которая предусматривает отработку данным шасси прямолинейного движения и поворотов на типовых для данной местности грунтах при различных климатических условиях с фиксацией экспериментальных данных и последующей обработкой. Вычисленные на основе экспериментальных данных опорные характеристики грунтов могут быть внесены в базу данных (рис. 10) и использованы при эксплуатации РТР в данном районе при различных климатических условиях.

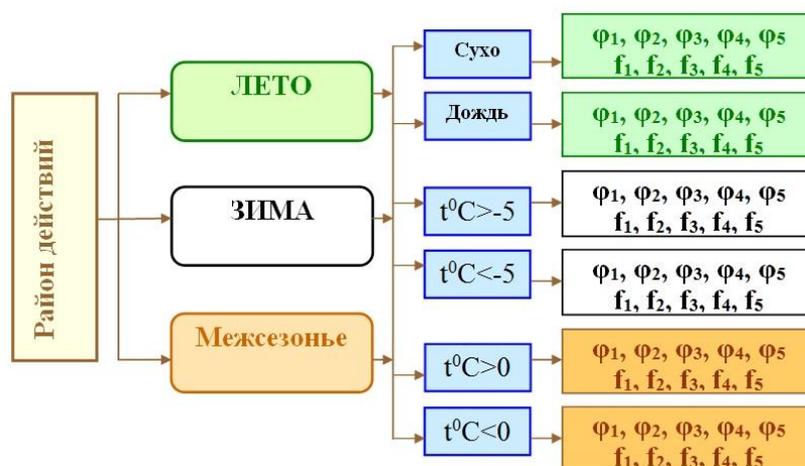


Рис. 10. Опорные характеристики 5-и типов грунтов для данного района при различных климатических условиях

Необходимо отметить, что данная методика экспериментального определения опорных характеристик грунта может быть использована и для оперативного уточнения текущих значений опорных характеристик грунта при непосредственной эксплуатации РТК.

Комплексирование тактильной и зрительной информации при классификации зоны маневрирования. Достоверность распознавания типов грунтов тем выше, чем больше датчиков и сенсоров для этого используется [5–7]. Тактильное определение опорных характеристик грунта позволяет дополнить пространство признаков, сформированное по данным комплексированной СТЗ, текущими значениями опорных характеристик грунта. Увеличение размерности пространства

признаков обеспечивает более достоверную работу классификатора в неблагоприятных условиях, когда один или несколько сенсоров формируют не качественные данные (например, – телевизионная камера при низком уровне освещения). А возможность постоянной коррекции значений характеристик опорной проходимости в процессе движения обеспечивает адаптацию системы управления к изменениям условий во внешней среде, например, к таким, как резкое изменение погоды, или – появление типов грунтов, не имеющих в базе данных. Комплексирование тактильной и зрительной информации позволяет не только существенно повысить достоверность классификации, но и – быстродействие за счет экстраполяции опорных характеристик грунта, полученных в пятне контакта движителя с грунтом, на всю модель, сформированную дистанционно по данным СТЗ [5]. Кроме того появляется возможность автоматизировать трудоемкие процессы выбора соответствующих текущим условиям внешней среды эталонных векторов признаков грунтов, обеспечивающих достоверное их распознавание в многомерном пространстве признаков [5], а также – процессы формирования обучающей выборки и обучения нейронной сети для распознавания типов грунтов по зрительной информации [7].

Дистанционное определение геометрических и опорных характеристик грунта в зоне маневрирования РТК по данным бортовой СТЗ позволяет выполнить ее классификацию по комплексному критерию геометрической и опорной проходимости. Классификацию участков зоны маневрирования по комплексному критерию можно выполнять также с использованием функции геометрической проходимости (см. рис. 2), но скорректированной в соответствии с характеристиками грунта классифицируемого участка. Коррекция функции проходимости в этом случае выполняется аналогично коррекции при изменении скорости (см. рис. 4), т.е., чем более неблагоприятны для движения опорные характеристики грунта, тем меньше допустимые наклоны корпуса (γ_m) и предельная высота преодолеваемой ступеньки (h_m).

Заключение. Результаты приведенных исследований показывают, что в настоящее время имеются все предпосылки для постановки и решения актуальной комплексной проблемы формирования модели зоны маневрирования по данным бортовых средств РТК с учетом опорно-геометрических характеристик грунта и характеристик движителя. Уровень проработки отдельных задач данной проблемы различен, в частности:

- ◆ средства классификации зоны маневрирования по критерию геометрической проходимости по данным бортовой СТЗ реализованы в ряде действующих экспериментальных и макетных образцов РТК, созданных при выполнении НИОКР, и прошли успешные испытания в реальных средах;
- ◆ средства распознавания типов грунтов по данным комплексированной СТЗ реализованы в виде полнофункционального макета и прошли успешные испытания в реальных средах при стационарных климатических условиях;
- ◆ получены положительные результаты по использованию аппарата нейронных сетей для повышения достоверности распознавания типов грунтов по данным комплексированной СТЗ в реальной среде при не стационарных климатических условиях;
- ◆ в лабораторных условиях проведены стендовые испытания средств решения обратной задачи террамеханики для колесного движителя и получены приемлемые точности определения опорных характеристик для связного и несвязного грунтов.

Для окончательного решения вышеперечисленных задач и решения поставленной проблемы до уровня создания программно-аппаратных средств, пригодных для интеграции в серийные образцы МРК, требуется проведение соответствующих НИОКР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лапиов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудианов Н.А., Рябов А.В. Хрущев В.С.* Формирование моделей виртуальной реальности и информационно-навигационных полей для обеспечения автономного функционирования РТК специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1-2. – С. 142-146.
2. *Каляев А.В., Носков В.П., Чернухин Ю.В., Каляев И.А.* Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. – М.: Наука, 1990. – 147 с.
3. *Буйволово Г.А., Носков В.П., Руренко А.А., Распопин А.Н.* Аппаратно-алгоритмические средства формирования модели проблемной среды в условиях пересеченной местности // Управление движением и техническое зрение автономных транспортных роботов: Сб. науч. тр. – М.: ИФТП, 1989. – С. 61-69.
4. *Носков В.П., Рубцов И.В.* Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 12. – С. 21-24.
5. *Носков В.П., Рубцов И.В., Вазаев А.В.* Об эффективности моделирования внешней среды по данным комплексированной СТЗ // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2 (7). – С. 51-55.
6. *Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г.* Распознавание объектов и типов опорной поверхности по данным комплексированной системы технического зрения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 127-139.
7. *Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В.* Нейросетевой модуль выбора эталонов для распознавания типов опорной поверхности // Сб. материалов 14 Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные задачи и системы управления». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 29-32.
8. *Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г.* Комплексированная СТЗ в системе управления пожарного робота // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1 (186). – С. 121-132.
9. *Беляков В.В. и др.* Вездеходные транспортно-технологические машины. – Н. Новгород: Изд-во «Талам», 2004. – 960 с.
10. *Чобиток В.А.* Теория движения танков и БМП. – Воениздат, 1984. – 264 с.
11. *Сологуб П.С., Веселов В.А., Ипатов О.С. и др.* Космические роботизированные комплексы. Ленинградская – Санкт-Петербургская научно-конструкторская школа / под общ. ред. В.А. Веселова. – (Б-ка журн. «Военмех. Вестник БГТУ»). – СПб., 2016. – 200 с.
12. *Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E.* ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems 25 / ed. by Pereira F., Burges C.J.C., Bottou L., Weinberger K.Q. Curran Associates, Inc., 2012. – P. 1097-1105.
13. *Говорухин А.М., Куприн А.М., Коваленко А.Н., Гамезо М.В.* Справочник по военной топографии. – 2-е изд. перераб. – М.: Воениздат, 1980. – 344 с.
14. *Беккер М.Г.* Введение в теорию систем местность–машина: пер. с англ. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1973. – 519 с.
15. Теория и конструкция танка. Т. 8. Параметры внешней среды, используемых в расчётах танков. – М.: Машиностроение, 1987. – 196 с.
16. Полотно пути транспортно-технологических машин: учебник / под ред. В.В. Белякова, А.А. Куркина. – Н. Новгород: НГТУ им Р.Е. Алексеева, 2014.
17. *Красеньков В.И., Харитонов С.А., Шумилин А.В.* Математическая модель криволинейного движения транспортной гусеничной машины по деформируемому основанию // Известия вузов. Машиностроение. – 1989. – № 11. – С. 94-99.
18. *Жилейкин М.М., Захаров А.Ю., Паньшин М.В.* Проверка адекватности и точности математической модели взаимодействия эластичного колеса с деформируемым опорным основанием // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2018. – № 4. – С. 206-214.
19. *Бекетов А.С.* Теория управляемого движения гусеничных машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 125 с.
20. *Наумов В.Н., Машков К.Ю., Котиев Г.О., Чижов Д.А., Горелов В.А.* Метод математического моделирования прямолинейного движения роботизированных транспортных средств по деформируемому грунту // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 11 (11). – С. 34.

21. *Машков К.Ю., Рубцов В.И., Штифанов Н.В.* Автоматическая система обеспечения опорной проходимости мобильного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». Спец. выпуск «Специальная робототехника и мехатроника». – 2012. – С. 95-106.
22. *Mashkov K.Y. Pozdnyakov T.D.* Using strain gages to assess the bearing properties of underlying surface with a robot crawler IOP // Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 820.

REFERENCES

1. *Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Rudianov N.A., Ryabov A.V. Khrushchev V.S.* Formirovanie modeley virtual'noy real'nosti i informatsionno-navigatsionnykh poley dlya obespecheniya avtonomnogo funktsionirovaniya RTK spetsial'nogo naznacheniya [Formation of virtual reality models and information and navigation fields to ensure the autonomous functioning of special-purpose RTCs], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 1-2, pp. 142-146.
2. *Kalyaev A.V., Noskov V.P., Chernukhin Yu.V., Kalyaev I.A.* Odnorodnye upravlyayushchie struktury adaptivnykh robotov [Homogeneous control structures of adaptive robots]. Moscow: Nauka, 1990, 147 p.
3. *Buyvolov G.A., Noskov V.P., Rurenko A.A., Raspopin A.N.* Apparato-algoritmicheskie sredstva formirovaniya modeli problemnoy sredy v usloviyakh peresechennoy mestnosti [Hardware-algorithmic means of forming a model of the problem environment in the conditions of rough terrain], *Upravlenie dvizheniem i tekhnicheskoe zrenie avtonomnykh transportnykh robotov: Sb. nauchn. tr.* [Traffic management and technical vision of autonomous transport robots: Collection of scientific papers]. Moscow: IFTP, 1989, pp. 61-69.
4. *Noskov V.P., Rubtsov I.V.* Opyt resheniya zadachi avtonomnogo upravleniya dvizheniem mobil'nykh robotov [Experience in solving the problem of autonomous motion control of mobile robots], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Management], 2005, No. 12, pp. 21-24.
5. *Noskov V.P., Rubtsov I.V., Vazaev A.V.* Ob effektivnosti modelirovaniya vneshney sredy po dannym kompleksirovannoy STZ [On the effectiveness of modeling the external environment according to the integrated STZ data], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2015, No. 2 (7), pp. 51-55.
6. *Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Tsarichenko S.G.* Raspoznavanie ob"ektov i tipov opornoj poverkhnosti po dannym kompleksirovannoy sistemy tekhnicheskogo zreniya [Recognition of objects and types of the reference surface according to the data of the integrated system of technical vision], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2 (175), pp. 127-139.
7. *Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V.* Neyrosetevoy modul' vybora etalonov dlya raspoznavaniya tipov opornoj poverkhnosti [Neural network module for selecting standards for recognizing types of reference surfaces], *Sb. materialov 14 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye zadachi i sistemy upravleniya»* [Collection of materials of the 14th All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective tasks and Management systems"]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 29-32.
8. *Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Tsarichenko S.G.* Kompleksirovannaya STZ v sisteme upravleniya pozharnogo robota [Integrated STZ in the fire robot control system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 1 (186), pp. 121-132.
9. *Belyakov V.V. i dr.* Vezdekhodnye transportno-tekhnologicheskie mashiny [All-terrain transport and technological machines]. Nizhniy Novgorod: Izd-vo «Talam», 2004, 960 p.
10. *Chobitok V.A.* Teoriya dvizheniya tankov i BMP [Theory of movement of tanks and infantry fighting vehicles]. Voenizdat, 1984, 264 p.
11. *Sologub P.S., Veselov V.A., Ipatov O.S. i dr.* Kosmicheskie robotizirovannye komplekсы. Leningradskaya – Sankt-Petersburgskaya nauchno-konstruktorskaya shkola [Space robotic systems. Leningrad – St. Petersburg Scientific and Design school], under the general ed. of V.A. Veselova. Saint Petersburg, 2016, 200 p.

12. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, *Advances in Neural Information Processing Systems 25*, ed. by Pereira F., Burges C.J.C., Bottou L., Weinberger K.Q. Curran Associates, Inc., 2012, pp. 1097-1105.
13. Govorukhin A.M., Kuprin A.M., Kovalenko A.N., Gamezo M.V. Spravochnik po voennoy topografii [Handbook of Military Topography]. 2nd ed. Moscow: Voenizdat, 1980, 344 p.
14. Bekker M.G. Vvedenie v teoriyu sistem mestnost'-mashina [Introduction to the theory of terrain-machine systems]: trans. from the engl. by V.V. Gus'kova. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 519 p.
15. Teoriya i konstruktsiya tanka. T. 8. Parametry vneshney sredy, ispol'zuemykh v raschetakh tankov [Theory and design of the tank. Vol. 8. Parameters of the external environment used in the calculations of tanks]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 196 p.
16. Polotno puti transportno-tehnologicheskikh mashin: uchebnik [The roadbed of transport and technological machines: textbook], ed. by V.V. Belyakova, A.A. Kurkina. Nizhny Novgorod: NGTU im R.E. Alekseeva, 2014.
17. Krasnen'kov V.I., Kharitonov S.A., Shumilin A.V. Matematicheskaya model' krivolinyenogo dvizheniya transportnoy gusenichnoy mashiny po deformiruemu osnovaniyu [Mathematical model of the curved movement of a transport crawler on a deformable base], *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [Izvestiya vuzov. Mechanical engineering], 1989, No. 11, pp. 94-99.
18. Zhileykin M.M., Zakharov A.Yu., Pan'shin M.V. Proverka adekvatnosti i tochnosti matematicheskoy modeli vzaimodeystviya elastichnogo koleasa s deformiruемым опорным osnovaniem [Checking the adequacy and accuracy of the mathematical model of the interaction of an elastic wheel with a deformable support base], *Tr. NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the NSTU named after R. E. Alekseev]. – Nizhny Novgorod, 2018, No. 4, pp. 206-214.
19. Beketov A.S. Teoriya upravlyаемого dvizheniya gusenichnykh mashin [Theory of controlled movement of tracked vehicles]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2017, 125 p.
20. Naumov V.N., Mashkov K.Yu., Kotiev G.O., Chizhov D.A., Gorelov V.A. Metod matematicheskogo modelirovaniya pryamolineynogo dvizheniya robotizirovannykh transportnykh sredstv po deformiruemu gruntu [Method of mathematical modeling of rectilinear motion of robotic vehicles on deformable ground], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, No. 11 (11), pp. 34.
21. Mashkov K.Yu., Rubtsov V.I., Shtifanov N.V. Avtomaticheskaya sistema obespecheniya opornoй prokhodimosti mobil'nogo robota [Automatic support system for mobile robot patency], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». Spets. vypusk «Spetsial'naya robototekhnika i mekhatronika»* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Mechanical Engineering". Special issue "Special robotics and Mechatronics"], 2012, pp. 95-106.
22. Mashkov K.Y. Pozdnyakov T.D. Using strain gages to assess the bearing properties of underlying surface with a robot crawler IOP, *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 820.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.А. Каляев.

Носков Владимир Петрович – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +7 9166766057; НИИ Специального машиностроения; зав. сектором; кафедра специальной робототехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Рубцов Иван Васильевич – e-mail: noskov_mstu@mail.ru; тел.: 84992636019; НИИ Специального машиностроения; начальник отдела; кафедра специальной робототехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Машков Константин Юрьевич – e-mail: makon111@rambler.ru; кафедра многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов; к.т.н.; доцент.

Вазаев Александр Викторович – e-mail: vazaev@bmstu.ru; тел.: +7 9153976550; НИИ Специального машиностроения; инженер; кафедра специальной робототехники и мехатроники; аспирант.

Noskov Vladimir Petrovich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79166766057; NIISM sector head; the department of special robotics and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Rubtsov Ivan Vasil'evich – e-mail: noskov_mstu@mail.ru; phone: +74992636019; the department of special robotic and mechtronics; chief of department; cand. of eng. sc.; associate professor.

Moshkov Konstantin Yur'evich – e-mail: makon111@rambler.ru; phone: +79161943368; the department of multi-purpose tracked vehicles and mobile robots; cand. of eng. sc.; associate professor.

Vazaev Alexander Viktorovich – e-mail: vazaev@bmstu.ru; phone: +79153976550; NIISM, engineer; the department of special robotics and mechatronics; post-graduate.

УДК 004.75

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-19-30

Г.П. Виноградов, А.С. Емцев, И.С. Федотов

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ В ЗАЩИЩАЕМЫХ ЗОНАХ

В военных целях беспроводные сенсорные сети позволяют «связать автономные системы» в комплекс, обладающий свойством самоорганизации, когда объекты «умеют» сами находить друг друга и формировать сеть, а случае выхода из строя какого-либо из узлов могут устанавливать новые маршруты для передачи сообщений. Достичь желаемой эффективности подобных комплексов возможно, главным образом, путем совершенствования интеллектуальной составляющей их системы управления в целом и отдельным узлом в частности. Однако следует отметить, что подавляющее число исследований в этой области остается на теоретическом уровне. Цель состоит: 1) в исследовании и разработке алгоритмов построения архитектуры сети с мобильными узлами и с возможными их отказами вследствие выполнения боевой задачи; 2) в исследовании и разработке использования узла сенсорной сети для сбора, анализа, передачи данных об обстановке и принятия решения в зоне своей ответственности; 3) предложить в условиях ограничений по энергопотреблению и быстрдействию сравнительно простые алгоритмы для придания узлу сети свойства интеллектуального поведения. Показано, что требуемые алгоритмы можно разработать, если выявить классы типовых ситуаций и успешные способы действия в реальных условиях. На этой основе появляется возможность разработки формальных моделей (паттернов) для реализации в системе управления узлом. Предложена двухуровневая структура интеллектуальной системы управления сетью. Верхний уровень, реализуемый оператором, соответствует таким свойствам, как выживание, безопасность, выполнение обязательств согласно миссии, накопление и корректировка базы знаний в виде эффективных паттернов поведения. Объектом управления для нее является сеть, рассматриваемая как некоторая функциональная система.

Паттерн; беспроводная сеть; сенсор; искусственный интеллект.

G.P. Vinogradov, A.S. Emtsev, I.S. Fedotov

WIRELESS SENSOR NETWORKS IN PROTECTED AREAS

For military purposes, wireless sensor networks allow you to "link autonomous systems" into a complex that has the property of self-organization, when objects "know" how to find each other and form a network, and in the event of a failure of any of the nodes can establish new routes for transmitting messages. It is possible to achieve the desired efficiency of such complexes, mainly by improving the intellectual component of their control system in general and individual node in particular. However, it should be noted that the vast majority of research in this area remains at the theoretical level. The goal is to: 1) the study and development of algorithms for network design with mobile nodes and their possible failures due to the combat mission; 2) the study and development of site use sensor network to collect, analyze, and transmit data about the situation and decision-making in the area of responsibility; 3) to offer relatively simple algorithms for giving the network node the prop-