



УДК 007:621.865.8

**ПЛАНИРОВАНИЕ ТАКТИЧЕСКОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ  
ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

**PLANNING TACTICAL MOTION TRAJECTORIES OF AUTOMATED ROBOTIC  
MEANS DURING DISASTER RELIEF**

**А.И. Мотиенко**  
**A.I. Motienko**

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,  
Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14 линия, 39*

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,  
14-th Line V.O., 39, St. Petersburg, 199178, Russia*

*anna.gunchenko@gmail.com*

*Аннотация.* В статье делается обзор современного состояния в области создания аварийно-спасательных роботов. Рассмотрены основные направления, на которых концентрируются ведущие разработчики, а именно, создание дистанционно управляемых роботов, ориентированных на работу на различных стадиях ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. В работе анализируется возможность применения существующих образцов роботов, дистанционно управляемых группой людей-операторов и способных осуществлять как силовые воздействия на различные, встречающиеся в районе катастрофы объекты, так и тонко координированные действия, связанные с различными видами анализа образцов на месте катастрофы и с оказанием первой помощи людям, пострадавшим во время чрезвычайной ситуации. Также разрабатывается методика планирования тактической траектории движения спасательных роботов.

*Resume.* The article provides a short survey of the state-of-the-art rescue robots. The paper also describes the main areas in which leading developers were concentrated, namely, the establishment of remote-controlled robots oriented at various stages of disaster management. The possibility of using existing models of robots, remote-controlled by group of operators, that can carry force action on various facilities occurring in the area of disaster and finely coordinated actions related to different types of analysis of samples at the crash site and the provision of the first assistance to people affected by the emergency is presented in the review. Also the developing technique of planning tactical trajectories of rescue robots is considered.

*Ключевые слова:* робототехника, автоматизированные робототехнические средства, аварийно-спасательные роботы, траектория движения, алгоритм нахождения кратчайшего пути.

*Keywords:* robotics, automated robotic means, emergency rescue robots, movement trajectory, algorithm for finding the shortest path.

## **Введение**

Целью любых аварийно-спасательных и других неотложных работ является спасение людей и оказание помощи пострадавшим, локализация аварий и устранение повреждений, препятствующих проведению спасательных работ, а также создание условий для последующего проведения восстановительных работ [1]. При возникновении чрезвычайных ситуаций создаются временный штаб по ликвидации и предварительный план мероприятий. Последний включает в себя:

а) предварительную разведку маршрутов движения формирований и участков предстоящих работ и уточнение ситуации в районе чрезвычайной ситуации;

б) дальнейшую наземную разведку, прокладку колонных путей и устройство проездов (проходов) в завалах и на зараженных участках, а также локализацию и тушение пожаров на путях движения формирований и участках работ;

в) локализацию аварий на коммунально-энергетических и технологических сетях;

г) розыск пострадавших и извлечение их из-под завалов, поврежденных и горящих зданий, загазованных, задымленных и затопленных помещений, санитарная обработка людей, обеззараживание их одежды, территории, сооружений, техники, воды и продовольствия;

д) оказание первой помощи пострадавшим и транспортировка их в лечебные учреждения.

Аварийно-спасательные работы характеризуются наличием факторов, угрожающих жизни и здоровью проводящих эти работы людей (спасателей, пожарных и др.) и требуют специальной подготовки, экипировки и оснащения. Свести к минимуму степень риска для спасателей позволяет использование так называемых безлюдных технологий – автоматизированных робототехнических средств (АРТС).



## Применение автоматизированных робототехнических средств для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций

Рынок робототехники в России существует и развивается уже более 10 лет. Современные разработки применяются в разных областях: от социально-бытовой до военно-технической как в штатных ситуациях, так и в экстремальных. Робототехническое оборудование используется при проведении аварийно-спасательных работ, в медицине, в ходе боевых действий и антитеррористических операций, разведки, охраны, разминирования и пр., обеспечивая высокую эффективность проводимых работ и максимальную безопасность здоровью и жизни человека. При разработке робототехнических комплексов, непосредственно контактирующих с людьми, важным вопросом остается способ человеко-машинного взаимодействия, поэтому подходы на основе многомодальной обработки информации являются здесь наиболее перспективными [2, 3].

В ноябре 2014 года на заседании Коллегии МЧС России были рассмотрены вопросы переоснащения до 2017 года подразделений МЧС России современными техническими средствами и техникой, а также использования в пожарно-спасательных подразделениях робототехнических комплексов, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и дальнейшего развития робототехники и технологий ее применения.

На данный момент в подразделениях МЧС России на вооружении находятся наземные, подводные и воздушные робототехнические комплексы различной номенклатуры и целевого предназначения. Но отечественных АРТС, способных решать полный комплекс задач по ликвидации чрезвычайных ситуаций, подразделения, согласно имеющимся данным, не имеют [4].

Задачу по предварительной разведке маршрутов движения формирований и участков предстоящих работ и уточнению ситуации в районе чрезвычайной ситуации в настоящее время можно решать на базе отечественной техники с помощью различного класса БПЛА отечественного производства.

Для дальнейшей наземной разведки, прокладки колонных путей и устройства проездов могут быть использованы беспилотные гусеничные платформы типа роботов ICARUS [5], снабженные необходимыми манипуляторами и инструментами, которые производят анализ радиационного и химического загрязнения и задымления воздуха на местности, тушат очаги возгорания и расчищают путь для продвижения других видов аварийной техники. Для локализации аварий на коммунально-энергетических и технологических сетях совместно с роботами типа ICARUS направляются роботы типа SHIMP [6], обладающие способностью пролезать через завалы и люки, карабкаться по пожарным лестницам, открывать замки и двери, закрывать предохранительные клапаны и заслонки, проводить ремонт и восстановление поврежденных защитных сооружений, а также обеззараживать очаги поражения. Для розыска пострадавших и извлечения их из-под завалов могут быть использованы роботы типа ATLAS [7], HUBO [8] и BEAR [9]. Важной задачей при этом является планирование траектории движения АРТС различных типов.

Методы и алгоритмы решения задач планирования траекторий движения как АРТС, так и БПЛА, при заданной геометрии окружающего пространства известны [10–12]. Традиционно траектория движения наземного АРТС строится в два этапа: сначала определяется глобальная траектория по картографическим данным, которая затем в процессе движения периодически уточняется по данным подсистемы компьютерного зрения [10, 13]. Такому подходу свойственны противоречия и недостатки, обусловленные существенным отличием масштабов представления информации на этих двух этапах [14].

В источнике [12] представлен новый метод локального планирования пути при навигации робота, основанный на теории опорных векторов и использующий последовательные позиции траектории глобального пути. Полученная в результате применения подхода локальная карта проходимости используется для построения безопасной и оптимальной траектории движения интеллектуального мобильного робота с помощью нейронной сети формально-логического типа. Необходимость поиска глобального пути актуализирует задачу по разработке методики транспортировки пострадавшего с учетом габаритных размеров и требований к минимизации энергопотребления автоматизированных робототехнических средств [15, 16]. Применение указанных параметров, кроме того, расширяет область известных знаний о параметрах, используемых в логистике, а учет препятствий (завалов) при построении глобального пути (путей) позволяет устранить недостаток свободного от коллизий метода движения робота к человеку [17]. Способствует этому применение метода статистической идентификации объектов с использованием параметрического обучения, позволяющего компенсировать искажение изображений [18].



### Методика планирования тактической траектории движения АРТС при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций

Использование БПЛА для предварительной разведки маршрутов движения позволяет с одной стороны оперативно уточнять картографические данные, а с другой – с учетом этой информации планировать, как на первом, так и на втором этапах, оптимальные траектории движения, повышая тем самым эффективность использования АРТС при решении задач по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. При этом возможен вариант трехэтапного планирования траекторий движения АРТС с использованием картографических данных (глобальная траектория), данных с БПЛА (тактическая траектория) и данных бортовой подсистемы компьютерного зрения АРТС (локальная траектория). В данном случае тактическая траектория, построенная по данным с БПЛА, представляет собой скрытную траекторию, проходящую по складкам местности [19].

Для ее планирования предлагается методика, в основу которой положены представление траектории движения в виде ориентированного ациклического графа; алгоритм нахождения  $K$  кратчайших путей между двумя заданными вершинами в ориентированном ациклическом графе; алгоритм назначения весов вершинам указанного графа с учетом габаритных размеров и требований к минимизации энергопотребления АРТС [20]. Исходными данными для ее реализации являются:

- картографические данные;
- данные, полученные с БПЛА;
- число  $M$  и массогабаритные показатели (ширина  $l_{ШАРТСi}$  и высота  $l_{ВАРТСi}$  ( $i = 1, \dots, M$ )), планируемых к применению АРТС.

Разрабатываемая методика включает в себя следующие шаги:

Шаг 1. Формирование на основе исходных данных графа  $G(A, B)$  тактических траекторий движения. При этом вершинам графа  $A = \{a_i\}$ ,  $i = 1, \dots, N$ , ставятся в соответствие места изменения траектории движения АРТС и в виде координат  $\{x_i, y_i\}$  задаются их географические местоположения, а ребрам  $B$  – участки пути движения между соответствующими узлами (при наличии такого пути) и их конфигурация. Отклонение тактической траектории от глобальной связано с наличием завалов и трудно проходимых участков. В качестве параметров конфигурации участков пути движения АРТС выступают:

- длина  $l_y$  участка;
- минимальная ширина  $l_{ш}$  «коридора», необходимого для движения АРТС на данном участке;
- минимальная высота  $l_b$  «коридора», необходимого для движения АРТС на данном участке.

Шаг 2. Выбор для проведения дальнейших расчетов  $K=M$  в предположении, что для выполнения работ по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (расчистки завала, тушения пожара, поиска пострадавшего и т.п.), планируемых к применению АРТС будут направляться одновременно.

Шаг 3. Нахождение  $K$  кратчайших путей между начальной и конечной вершинами графа  $G(A, B)$ . В качестве начальной вершины выбирается место «запуска» АРТС, в качестве конечной – участок предстоящих работ, а в качестве весов ребер –  $l = l_y$ .

Шаг 4. Преобразование графа  $G(A, B)$  в  $G^*(A, B)$ , содержащий только  $K$  кратчайших путей (и инцидентных им вершин), полученных на предыдущем шаге.

Шаг 5. Нахождение  $K^*$  кратчайших путей между начальной и конечной вершинами графа  $G^*(A, B)$ . При этом в качестве весов ребер выбирается величина:

$$l = \begin{cases} 1, & \text{если } l_{ш} > \max(l_{ШАРТСi}); \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 6. Если  $K^* < M$ , то  $K=K+1$  и переход шагу 2; в противном случае – переход к следующему шагу.

Шаг 7. Преобразование графа  $G^*(A, B)$  в  $G^{**}(A, B)$ , содержащий только  $K^*$  кратчайших путей (и инцидентных им вершин), полученных на шаге 5.

Шаг 8. Нахождение  $K^{**}$  кратчайших путей [25] между начальной и конечной вершинами графа  $G^{**}(A, B)$ . При этом в качестве весов ребер выбирается величина:

$$l = \begin{cases} 1, & \text{если } l_b > \max(l_{ВАРТСi}); \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Шаг 9. Если  $K^{**} < M$ , то  $K=K+1$  и переход шагу 2; в противном случае - переход к следующему шагу.

Шаг 10. Если число кратчайших путей  $K^{**} > M$ , то выбор в качестве тактической траектории движения планируемых к применению АРТС первых  $M$  путей.





4. Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Павлюк Н.А. 2015. Современные разработки аварийно-спасательных роботов, возможности и принципы их применения. Научный вестник НГТУ, 60 (3), 147–165.  
Motienko A.I., Ronzhin A.L., Pavljuk N.A. 2015. The modern development of rescue robots, opportunities and principles of their application. Nauchnyj vestnik NGTU, 60 (3), 147–165.
5. De Cubber G., Serrano D., Berns K., Chintamani K., et al. 2013. Search and rescue robots developed by the european ICARUS project. 7th Int. Workshop on Robotics for Risky Environments.
6. Stentz A., Herman H., Kelly A., Meyhofer E., et al. 2015. CHIMP, the CMU Highly Intelligent Mobile Platform. *Journal of Field Robotics*, 32 (2), 209–228.
7. Kolawole E. 2013. What if this ATLAS shrugged? - DARPA unveils new humanoid robot. *Washington Post*. Available at: <http://www.washingtonpost.com/blogs/innovations/wp/2013/07/12/what-if-this-atlas-shrugged-darpa-unveils-new-humanoid-robot/> (accessed 22 January 2016).
8. Zucker M. et al. 2015. A General-purpose System for Teleoperation of the DRC-HUBO Humanoid Robot. *Journal of Field Robotics*.
9. Theobald D. Mobile reconfigurable robot. US 8106616 B1. 2012. Available at: <http://www.google.com/patents/US8106616/> (accessed 29 January 2016).
10. Носков В.П., Рубцов И.В. 2005. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 12, 21–24.  
Noskov V.P., Rubcov I.V. 2005. Experience of solving the problem of autonomous motion control of mobile robots. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 12, 21–24.
11. Загоруйко С.Н., Казьмин В.Н., Носков В.П. 2014. Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 8, 62–67.  
Zagorujko S.N., Kaz'min V.N., Noskov V.P. 2014. Navigacija UAV navigation and 3D-reconstruction of the environment according to the board TVS. *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 8, 62–67.
12. Charalampous K., Kostavelis I., Gasteratos A. 2015. Thorough robot navigation based on SVM local planning. *Robotics and Autonomous Systems*, 70, 166–180.
13. Сапрыкин Р.В. 2015. Алгоритмы информационного взаимодействия интеллектуальных мобильных роботов при картографировании внешней среды функционирования. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 3 (164), 164–174.  
Saprykin R.V. 2015. Algorithms of information interaction of intelligent mobile robots for mapping of the environment of functioning. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 3 (164), 164–174.
14. Аникин В.А., Ким Н.В., Носков В.П., Рубцов И.В. 2010. Мобильный робототехнический комплекс с системой технического зрения на базе БПЛА. *Вопросы оборонной техники*, 1 (242)–2 (243), 40–46.  
Anikin V.A., Kim N.V., Noskov V.P., Rubcov I.V. 2010. Mobile robot with computer vision system based on the UAV. *Voprosy obronnoj tehniki*, 1 (242)–2 (243), 40–46.
15. Мотиенко А.И., Макеев С.М., Басов О.О. 2015. Анализ и моделирование процесса выбора положения для транспортировки пострадавшего на основе байесовских сетей доверия. *Труды СПИИРАН*, 43, 135–155.  
Motienko A.I., Makeev S.M., Basov O.O. 2015. Analysis and Modeling of Position Choice Process for Transportation of the Sufferer on the basis of Bayesian Belief Networks. *Trudy SPIIRAN*, 43, 135–155.
16. Мотиенко А.И., Басов О.О. 2015. Вероятностная модель положения транспортировки пострадавшего. *Сборник трудов 7-й Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015)*, 230–235.  
Motienko A.I., Basov O.O. 2015. Probabilistic model of Position for Transportation of the Sufferer. *Sbornik trudov 7-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii po imitacionnomu modelirovaniju i ego primeneniju v nauke i promyshlennosti «Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i praktika» (IMMOD-2015)*, 230–235.
17. Nishitani I., Matsumura T., Ozawa M., Yorozu A., Takahashi M. 2015. Human-centered space path planning for mobile robot in dynamic environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 66, 18–26.
18. Бархоткин В.А., Петров В.Ф., Кочетков М.П., Корольков Д.Н. 2014. Обработка изображений для идентификации наземной обстановки мобильными роботизированными комплексами. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 3 (152), 77–87.  
Barhotkin V.A., Petrov V.F., Kochetkov M.P., Korol'kov D.N. 2014. Image processing for identification of the terrestrial environment by mobile robotic complexes. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 3 (152), 77–87.
19. Аникин В.А., Ким Н.В., Носков В.П., Рубцов И.В. 2015. Решение целевых задач комплексом РТК – выносной пункт СТЗ. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 1 (162), 121–132.  
Anikin V.A., Kim N.V., Noskov V.P., Rubcov I.V. 2015. The solution of target task by RTC complex - remote item of technical vision system. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 1 (162), 121–132.
20. Богданов С.П., Басов О.О., Иванов А.А. 2014. Применение методов теории графов для проектирования средств измерения тактильных параметров. *Труды СПИИРАН*, 2(33), 27–44.  
Bogdanov S.P., Basov O.O., Ivanov A.A. 2014. Graph Theory Practice for Tactile Characteristics Measuring Means Design. *Trudy SPIIRAN*, 2(33), 27–44.
21. Щербинина Н.В. 2014. Алгоритм определения субпиксельных координат точечного объекта. *Научные ведомости БелГУ. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика*, Т. 29, 1–1 (172), 88–93.  
Shcherbinina N.V. 2014. Algorithm for of determination subpixel coordinates of point targets. *Nauchnye vedomosti BelGU. Serija: Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika*, Issue 29, 1–1 (172), 88–93.
22. Корсунов Н.И., Егоров Д.В. 2014. Применение методов теории графов для проектирования средств измерения тактильных параметров. *Научные ведомости БелГУ. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика*, Т. 30, 8–1 (179), 76–82.  
Korsunov N.I., Egorov D.V. Mathematical model for determining the spatial coordinates by passive radar. 2014. *Nauchnye vedomosti BelGU. Serija: Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika*, Issue 30, 8–1 (179), 76–82.