

УДК 528.9:621.865.8

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-4-120-131

## ГЕОМОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РОБОТОТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

*Иван Александрович Кноль*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ассистент кафедры прикладной информатики и информационных систем, тел. (903)903-54-99, e-mail: ivanknol@mail.ru

В настоящее время робототехника и теория мультиагентных систем применяются в МЧС, транспортной сфере, торговле, однако, в геодезии теория мультиагентных систем в настоящее время не используется. В статье описана методика геомониторинга техногенных объектов с применением робототехники на основе теории мультиагентных систем, приведены результаты эксперимента. Для сравнения разработанной методики с традиционными геодезическими методами в статье приводятся результаты геомониторинга лабораторного корпуса СГУГиТ, получаемые геороботом и геометрическим нивелированием короткими лучами (сравнение реализовано по двум параметрам – точность и время). Сформулирован вывод о том, что измерения, полученные при помощи робототехнических устройств, имеют меньшую точность по сравнению с методом геометрического нивелирования короткими лучами, но при необходимости оперативного мониторинга техногенных объектов в процессе ликвидации чрезвычайной ситуации данная точность является допустимой. Изложенную в статье методику геомониторинга техногенных объектов с применением робототехники на основе теории мультиагентных систем рекомендуется рассматривать как первичный контроль, используемый в сложных условиях съемки, за которым должно следовать применение традиционных методов, дающих высокую точность измерений.

**Ключевые слова:** теория мультиагентных систем, геомониторинг, роботизированное устройство, техногенный объект, пространственно-временное состояние, геоинформационные ресурсы, web-приложение.

### *Введение*

В настоящее время для контроля деформаций и предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС) на техногенных объектах (ТО) используют автоматизированные системы мониторинга инженерных конструкций (СМИК). К возможностям СМИК относят: непрерывный сбор, передачу и обработку информации в автоматическом и ручном режиме, установку индивидуальных критериев для отдельных подсистем, отдельных зон, отдельных датчиков, контроль и определение отклонений от нормативных значений, создание статистических и аналитических выкладок, прогнозирование возникновения аварийных ситуаций, объединение различных технологий в единой системе, автоматизированное взаимодействие основных систем и подсистем, оперативное взаимодействие с дежурно-диспетчерскими службами. Сбор данных в СМИК осуществляется с помощью разнообразного геодезического оборудования: инклинометры, тензо-

датчики, щелемеры, датчики давления, лазерные сканеры, роботизированные тахеометры, беспилотные летательные аппараты [1–15].

Несмотря на то, что нормативная база для установки и внедрения СМИС создана (ГОСТ Р 22.1.12–2005) и ведется активная работа по внедрению СМИС на ТО (например, компания МОНСОЛ РУС), проблема заключается в том, что какой бы отказоустойчивой ни была система прогнозирования техногенной аварии, всегда есть риск ее возникновения из-за неучтенного фактора среды, человеческого, экономического или других факторов, которые могут повлечь за собой частичный или полный отказ внедренной системы или невозможность непосредственного присутствия человека на объекте для контроля разрушающих процессов. Для решения этой проблемы необходима разработка новых методик, связанных с робототехническими и интеллектуальными системами, основанными на понятии мультиагентности [16].

В настоящее время робототехника и теория мультиагентных систем применяется в МЧС, транспортной сфере, торговле, однако в геодезии теория мультиагентных систем в настоящее время не используется. Основу мультиагентной системы составляют интеллектуальные агенты. В геодезии интеллектуальным агентом может быть робот, который выполняет сбор геоинформации. Ранее для разработки такого робота не существовало технических возможностей. В связи с этим мультиагентные системы в геодезии не применялись. В настоящее время существует противоречие: робототехника стремительно развивается, в том числе и в геодезии, о чем свидетельствует применение квадрокоптеров и роботизированных тахеометров, однако методики с применением робототехники на основе теории мультиагентных систем для мониторинга быстроразвивающихся деформационных процессов до сих пор не существует. Под *быстроразвивающимися процессами* будем понимать опасные изменения структуры объекта, характеризующие его аварийность, что не допускает непосредственного присутствия человека на станциях измерений [17–31].

### *Методика геомониторинга*

В статье предлагается методика, позволяющая оперативно проводить мониторинг быстроразвивающихся деформационных процессов техногенных объектов на основе теории мультиагентных систем с применением робототехники. Для обозначения роботизированных устройств, способных в автоматическом режиме оперативно выполнять измерения в труднодоступных для человека местах и определяющих координаты точек техногенного объекта в относительных координатах с точностью до 3 мм, будем использовать термин *георобот*. Данный термин до настоящего времени в геодезии не использовался.

Методика представлена обобщенным сформулированным порядком действий (рис. 1), апробированным на модели роботизированного аппаратно-программного комплекса для определения быстроразвивающихся деформаций на техногенных объектах на основе теории мультиагентных систем.



Рис. 1. Обобщенная схема мониторинга техногенных объектов с применением робототехники на основе теории мультиагентных систем

Модель роботизированного аппаратно-программного комплекса состоит из трех взаимосвязанных модулей: модуль сбора данных, модуль аналитики, модуль управления геоинформацией (рис. 2). На примере лабораторного корпуса Сибирского университета геосистем и технологий проведена экспериментальная оценка методики по точности измерения и времени.

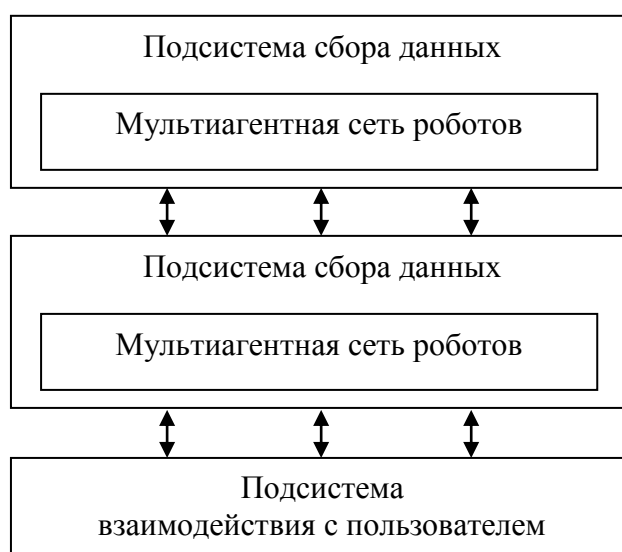


Рис. 2. Схема функционирования роботизированного аппаратно-программного комплекса

Первым шагом геомониторинга является определение географических координат объекта мониторинга. На основе анализа космического снимка в подсистеме аналитики определяются геометрические характеристики техногенного объекта (рис. 3).

В систему поступают геодезические координаты углов объекта.

В подсистеме аналитики генерируется полетное задание для георобота. На рис. 4 представлена схема полетного задания для лабораторного корпуса СГУГиТ.



Рис. 3. Космический снимок лабораторного корпуса СГУГиТ

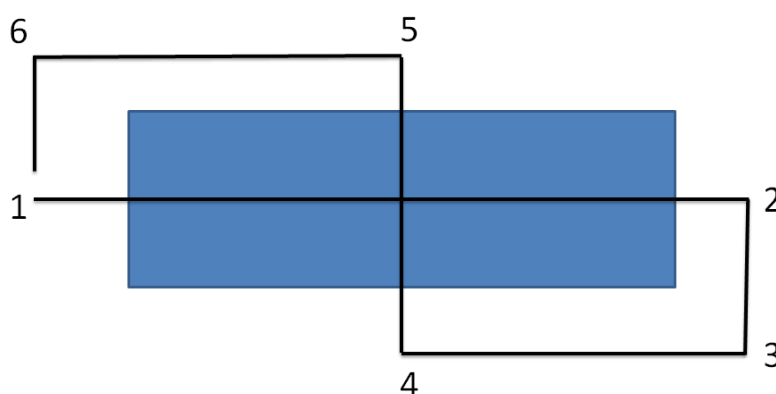


Рис. 4. Схема полетного задания для георобота

На рис. 5 изображен георобот – устройство, предназначенное для получения мониторинговой информации (совокупность навигационной и телеметрической информации, привязанной к шкале времени). Аппаратную базу георобота составляет DJI F450 и полетный контроллер NAZA MV2. Ультразвуковой дальномер HC-SR04 встроен в конструкцию георобота.

В результате облета в режиме удержания высоты на бортовом компьютере генерируется таблица значений расстояния до поверхности объекта, поступающих с ультразвукового датчика. На основе анализа значений система строит модель техногенного объекта, повторяется облет и анализ, определяется количество дополнительных геороботов. Роботы способны корректировать полетное задание на основе «договоренностей». А именно – в случае, если два георобота намерены занять одно и то же местоположение, на основе разработанного автором алгоритма роботами принимается решение, кто из них первый должен занять данное место.

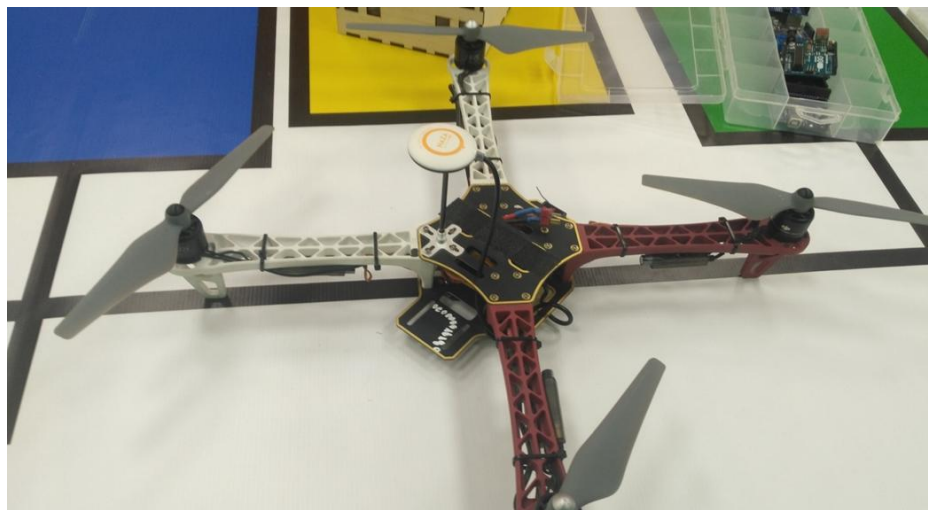


Рис. 5. Георобот, оснащенный ультразвуковым дальномером

Георобот способен принимать следующие параметры: высота, широта и долгота в системе координат WGS-84 либо ПЗ-90, дальность до соседних геороботов (на основе радиосигнала и оптически-лазерной системы), углы наклона с гироскопического датчика, температура внешней среды для внесения поправок, показатель собственной скорости, данные с ультразвуковых датчиков.

### *Эксперимент*

Для оценки точности измерений, получаемых с помощью ультразвукового датчика HC-SR04 в работе выполнен эксперимент, концептуальная схема которого представлена на рис. 6. Точность достигается с помощью применения медианного фильтра, который отсеивает случайные значения (медианой является средний по порядку член ряда, получающегося при упорядочении исходной последовательности измерений).

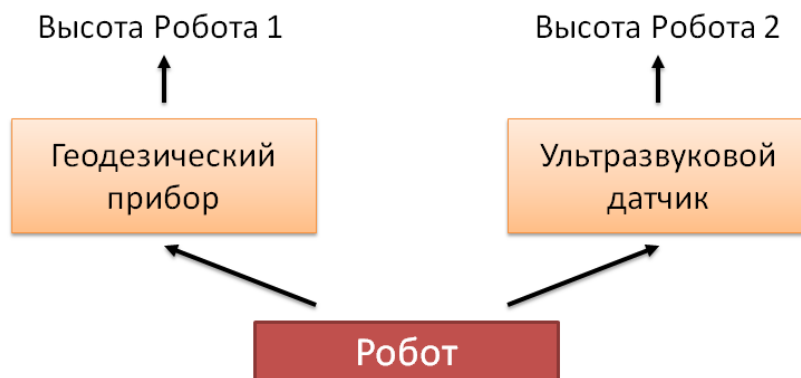


Рис. 6. Концептуальная схема эксперимента для оценки точности данных, получаемых геороботом

Для сравнения разработанной методики с традиционными геодезическими методами в статье приводятся результаты геомониторинга лабораторного корпуса СГУГиТ, получаемые геороботом и геометрическим нивелированием короткими лучами (сравнение реализовано по двум параметрам – точность и время). Совместно с кафедрой инженерной геодезии и маркшейдерского дела была разработана модель геодезической марки. На базе Центра инжиниринга и робототехники СГУГиТ изготовлены геодезические марки, которые установлены в фундаменте здания лабораторного корпуса СГУГиТ для дальнейшего получения высот методом геометрического нивелирования короткими лучами.

В сентябре 2018 г. с помощью высокоточного цифрового нивелира Trimble DiNi 0.3 были получены высотные отметки установленных марок (схема нивелирного хода отображена на рис. 7, в табл. 1 содержатся результаты измерений). Затрачено 3 часа при точности измерений  $\pm 0,3$  мм.

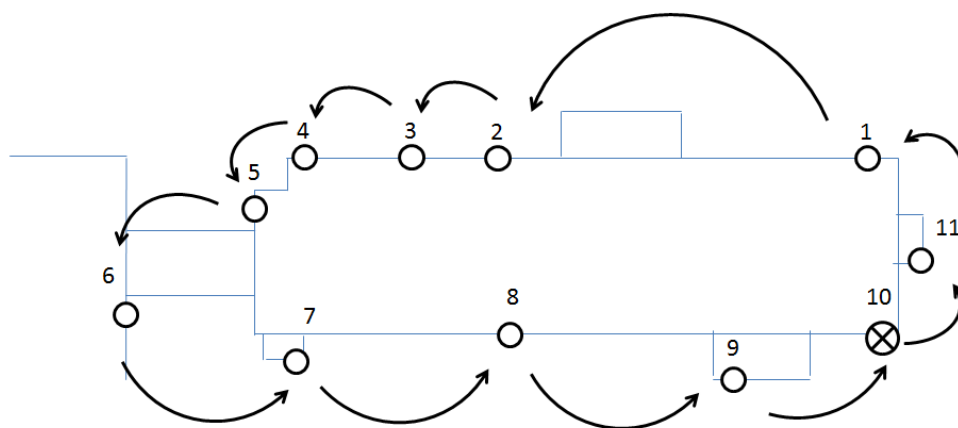


Рис. 7. Схема нивелирного хода

Таблица 1

Результаты измерений

Пункт 1	Пункт 2	Средние превышения, мм
1	2	-646,3
2	3	-342,45
3	4	-123,45
4	5	50,775
5	6	-362,2
6	7	431,6
7	8	6,7
8	9	5,15
9	10	978,3
10	11	-225,2
11	1	228,15

В мае 2019 г. с помощью оптического нивелира Н-05 были получены высотные отметки установленных геодезических марок. Затрачено 6 часов при точности измерений  $\pm 0,3$  мм. Также следует уточнить, что при наступлении критических осадок дальнейшее нивелирование невозможно по технике безопасности, так как объект находится в аварийном состоянии.

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики методики геомониторинга с применением робототехники на основе теории мультиагентных систем и метода геометрического нивелирования короткими лучами.

Таблица 2

## Сравнительные характеристики

Методика	Точность определения	Время на 1 цикл измерений	Автоматизация
Методика геомониторинга с применением робототехники на основе теории мультиагентных систем	$\pm 1$ мм	Около 15 минут	Измерения и вычисления полностью автоматизированы
Метод геометрического нивелирования короткими лучами с помощью высокоточного цифрового нивелира Trimble DiNi 0.3	$\pm 0,3$ мм	Около 3 часов	Измерения производятся вручную, вычисления частично автоматизированы
Метод геометрического нивелирования короткими лучами с помощью оптического нивелира Н-05	$\pm 0,3$ мм	Около 6 часов	Измерения и вычисления производятся вручную

**Заключение**

На основании результатов, приведенных в табл. 1, можно сделать вывод, что измерения, полученные при помощи робототехнических устройств, имеют меньшую точность по сравнению с методом геометрического нивелирования короткими лучами, но при необходимости оперативного мониторинга техногенных объектов в процессе ликвидации чрезвычайной ситуации данная точность является допустимой.

Практическая апробация методики геомониторинга техногенных объектов выполнена на имитационной экспериментальной модели техногенного объекта и лабораторном корпусе СГУГиТ. Полученные в ходе экспериментов данные подтверждают непротиворечивость, адекватность и жизнеспособность разработанной методики.

Одной из прикладных целей данной научно-исследовательской работы может являться разработка системы комплексного геомониторинга элементов горных разработок на производственных объектах предприятий горнодобывающей отрасли с целью прогнозирования и предупреждения опасных дефор-

маций по результатам обработки и анализа данных, получаемых в режиме реального времени.

Изложенную в статье методику геомониторинга техногенных объектов с применением робототехники на основе теории мультиагентных систем, прежде всего, следует рассматривать как первичный контроль, используемый в сложных условиях съемки, за которым должно следовать применение традиционных методов, дающих высокую точность измерений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геоинформатика : учеб. для студ. вузов / Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарёв, В. С. Тикунов и др. ; под ред. В. С. Тикунова. – М. : Академия, 2005. – 480 с.
2. Pinde Fu, Jiulin Sun. Web GIS: principles and applications. – 1st ed. – Esri Press, 380 New York Street, Redlands, California. – P. 16.
3. Карпик А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 259 с.
4. Зонирование и межевание земель, прилегающих к ядерным полигонам, для целей их хозяйственного использования (на примере Семипалатинского испытательного ядерного полигона / Г. А. Уставич, Я. Г. Пошивайло, А. В. Дубровский, Б. Ж. Ахметов, А. О. Пошивайло // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 145–160.
5. Лисицкий Д. В., Чернов А. В. Теоретические основы трехмерного кадастра объектов недвижимости // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 153–170.
6. Методологические принципы системы точной спутниковой навигации подвижных объектов с использованием наземной инфраструктуры ГЛОНАСС / А. П. Карпик и др. // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 5. – С. 69–74.
7. Горяинов И. В. Экспериментальные исследования применения обратной линейно-угловой засечки для оценки стабильности пунктов плановой деформационной геодезической сети // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 28–39.
8. Исследование методов определения геометрических параметров вращающихся агрегатов по данным лазерного сканирования / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. В. Иванов, А. В. Середович, Е. К. Лагутина, А. В. Мартынов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 89–107.
9. Краев А. Н., Новиков Ю. А. Геодезические наблюдения за осадками здания в рамках проведения геотехнического мониторинга // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 28–41.
10. Лазерный деформограф и вариации приливной деформации во времени / В. Ю. Тимофеев, В. М. Семибаламут, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, Ю. Н. Фомин, Е. И. Грибанова, Е. В. Бойко, С. В. Панов, М. Д. Парушкин // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 42–58.
11. Чан Тхань Шон, Кузин А. А. Алгоритм преобразования координат из геоцентрической системы в топоцентрическую и его применение при строительстве во Вьетнаме // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 59–71.
12. Войнаровский А. Е., Тихонов С. Г. Калибровка наземного лазерного сканера по сканам испытательного полигона // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 5–18.
13. Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю., Поливач В. И. Геофизический мониторинг опасных техногенных проявлений на подрабатываемых территориях // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 35–44.
14. Каленицкий А. И., Соловицкий А. Н. О развитии многоуровневых построений на геодинамическом полигоне при освоении недр Кузбасса // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 45–55.



15. Камнев И. С. Исследование технологии лазерного сканирования при инженерно-геодезических изысканиях для ремонта автодороги // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 67–77.
16. ГОСТ Р 22.1.12–2005. Структурированная система мониторинга и управления Инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. – М. : ИПК, Изд-во стандартов, 2005.
17. Бугакова Т. Ю. К вопросу оценки риска геотехнических систем по геодезическим данным // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 151–157.
18. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. Философия, психология, информатика. – М. : Эдиториал, 2002. – С. 8.
19. Евгеньев Г. Б. Мультиагентные системы компьютерной инженерной деятельности // Информационные технологии. – 2000. – № 4. – С. 2–7.
20. Рыгалов А. Ю., Кубарьков Ю. П. Применение мультиагентных систем в электроэнергетике // Сборник трудов Кольского научного центра РАН, 2012. – С. 102–105.
21. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2007. – 1410 с.
22. Чекинов С. Г. Интеллектуальные программные исполнительные устройства (агенты) в системах связи // Информационные технологии. – 2001. – № 4. – С. 6–11.
23. Бугакова Т. Ю., Шляхова М. М., Кноль И. А. Структурная декомпозиция объекта методами математического моделирования с последующей визуализацией на основе WebGL // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 142–147.
24. Коичи Мацуда, Роджер Ли. WebGL: программирование трехмерной графики / Пер. с англ. А. Н. Киселев. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 494 с.
25. Еременко О. С. Сравнение трехмерных интернет-технологий [Электронный ресурс] // Молодежный научный форум «Технические и математические науки» : электр. сб. ст. по мат. XI междунар. студ. науч.-практ. конф. № 4(11). – Режим доступа: [https://nauchforum.ru/archive/MNF\\_tech/4\(11\).pdf](https://nauchforum.ru/archive/MNF_tech/4(11).pdf) (дата обращения: 30.10.2019).
26. Бугакова Т. Ю. Моделирование изменения пространственно-временного состояния инженерных сооружений и природных объектов по геодезическим данным // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 34–42.
27. Multi-agent reinforcement learning in sequential social dilemmas / J. Z. Leibo, V. Zambaldi, M. Lanctot, J. Marecki, T. Graepel // In Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2017. – P. 464–473.
28. Shoham Y., Powers R., Grenager T. If multi-agent learning is the answer, what is the question? // Artificial Intelligence. – 2007. – Vol. 171(7). – P. 365–377.
29. Opponent modeling in deep reinforcement learning / H. He, J. Boyd-Graber, K. Kwok, H. Daumé III // In Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning. – 2016. – P. 1804–1813.
30. Ad hoc autonomous agent teams: collaboration without pre-coordination / P. Stone, G. Kaminka, S. Kraus, J. Rosenschein // In Proceedings of the 24th AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2010. – P. 1504–1509.
31. Genter K., Laue, T., Stone P. Three years of the RoboCup standard platform league drop-in player competition: Creating and maintaining a large scale ad hoc teamwork robotics competition // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2017. – Vol. 31(4). – P. 790–820.

Получено 03.10.2019

© И. А. Кноль, 2019

## GEOMONITORING OF TECHNOGENIC OBJECTS USING ROBOTICS ON THE BASIS OF MULTIAGENT SYSTEM THEORY

*Ivan A. Knol*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Assistant, Department of Applied Informatics and Information Systems, phone: (903)903-54-99, e-mail: ivanknol@mail.ru

Currently, robotics and the theory of multi-agent systems are used in the Ministry of Emergencies, transport, and trade, however, the theory of multi-agent systems is not currently used in geodesy. The article describes the geomonitoring technique of technogenic objects using robotics based on the theory of multi-agent systems, and presents the results of the experiment. To compare the developed technique with traditional geodetic methods, the article presents the results of geomonitoring of the laboratory building of the SSUGT obtained by a geo-robot and geometric leveling with short beams (the comparison is implemented in two parameters - accuracy and time). It is concluded that the measurements obtained using robotic devices have less accuracy compared to the method of geometric leveling with short rays, but if necessary, operational monitoring of technogenic objects in the process of emergency response is possible. The methodology for the geomonitoring of technogenic objects using robotics based on the theory of multi-agent systems described in the article is recommended to be considered as the primary control used in difficult shooting conditions, followed by the application of traditional methods that give high measurement accuracy.

**Key words:** theory of multi-agent systems, geomonitoring, robotic device, technogenic object, spatio-temporal state, geoinformation resources, web application.

### REFERENCES

1. Kapralov, E. G., Koshkarev, A. V., & Tikunov, V. S. (2005). *Geoinformatika: [Geoinformatics]*. Tikunov, V. S. (Ed.). Moscow: "Akademiya" Publ. [in Russian]
2. Pinde, Fu, Jiulin, Sun. (2011). *Web GIS: principles and applications* (1st ed.). Esri Press, 380 New York Street, Redlands, California, P. 16.
3. Karpik, A. P. (2004). *Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformatsionnogo obespecheniya territoriy [Methodological and technological bases of geoinformation support areas]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 259 p. [in Russian]
4. Ustavich, G. A., Poshivaylo, Ya. G., Dubrovsky, A. V., Akhmetov, B. Zh., & Poshivaylo, A. O. (2016). Zoning and delimitation lands, adjacent to nuclear test sites, for purposes of commercial using (for example Semipalatinsk test site territory). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 145–160 [in Russian].
5. Lisitsky, D. V., & Chernov, A. V. (2018). Theoretical basis of three-dimensional cadaster of real estate objects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 153–170 [in Russian].
6. Karpik, A. P., & et al. (2014). Methodological principles of precise satellite navigation system of mobile objects with the use of GLONASS. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka. [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5, 69–74 [in Russian]
7. Goryainov, I. V. (2018). Pilot studies of linear – angular resection application for point stability estimation in horizontal deformation geodetic network. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 28–39 [in Russian].
8. Mogilny, S. G., Sholomitsky, A. A., Ivanov, A. V., Seredovich, A. V., Lagutina, E. K., & Martynov, A. V. (2018). Research of rotating agrigates geometrical parameters determination methods on the basis of laser scanning. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(3), 89–107 [in Russian].

9. Kraev, A. N., & Novikov, Y. A. (2019). Geodetic overseeing by building settlements within carrying out geotechnical monitoring. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(1), 28–41 [in Russian].
10. Timofeev, V. Yu., Semibalamut, V. M., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., Fomin, Yu. N., Griбанова, E. I., Boyko, E. V., Panov, S. V., & Parushkin, M. D. (2019). Laser extensometer and time variation of tidal deformation. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(1), 42–58 [in Russian].
11. Thanh Son Tran, & Kuzin, A. A. (2019). Algorithm of transforming coordinates from a geocentric system to a topocentric system and its application in construction in Vietnam. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(1), 59–71 [in Russian].
12. Wojnarowski, A. E., & Tikhonov, S. G. (2019). Laser scanner calibration using scans of test polygon. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 5–18 [in Russian].
13. Gordeev, V. F., Malyshev, S. Yu., & Polivach, V. I. (2019). Geophysical monitoring of technogenic hazards on anthropogenic soils. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 35–44 [in Russian].
14. Kalenizkiy, A. I., & Solowitskiy, A. N. (2019). The development of multilevel structured on the geodynamic polygon in exploitation of subsurface resources in Kuzbass. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 45–55 [in Russian].
15. Kamnev, I. S. (2017). Research of laser scanning technology at engineering geodesic surveys for repairing motorway. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(2), 67–77 [in Russian].
16. Standarts Russian Federation. (2005). GOST R 22.1.12-2005. Structured system for monitoring and control of engineering systems of buildings and structures. General requirements. Moscow : IPK, Standards Publ.
17. Bugakova, T. Yu. (2011). On the question of risk assessment of geotechnical systems for geodetic data. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2011: T. 1, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2011. Vol. 1, Part 1]* (pp. 151–157). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
18. Tarasov, V. B. (2002). *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam. Filosofiya, psikhologiya, informatika [From multi-agent systems to intelligent organizations. Philosophy, psychology, computer science]*. Moscow: Editorial Publ., p. 8 [in Russian].
19. Evgeny, G. B. (2000). Multi-agent systems computer engineering. *Informatsionnye tekhnologii [Information Technology]*, 4, 2–7 [in Russian].
20. Rygalov, A. Y., & Kubarkov, J. P. (2012). Application of multi-agent systems in the power industry. In *Sbornik trudov Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN [Proceedings of the Kola Science Center RAS]* (pp. 102–105) [in Russian].
21. Russell, S., & Norvig, P. (2007) *Iskusstvennyy intellekt. Sovremennyy podkhod [Artificial Intelligence. Modern approach]* (2d ed). Moscow: Vil'yams Publ., 1410 p. [in Russian]
22. Chekina, S. G. (2001). Intelligent software actuators (agents) in communication systems. *Informatsionnye tekhnologii [Information Technology]*, 4, 6–11 [in Russian].
23. Bugakova, T. Yu., Shlyakhova, M. M., & Knol' I. A. (2016). Structural decomposition methods of mathematical modeling of the object, followed by visualization based on WebGL. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 4 Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 142–147). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
24. Matsuda, K., & Li, R. (2015). *WebGL: programmirovaniye trekhmernoy grafiki [WebGL: three-dimensional graphics programming]*. A. N. Kiselev (Trans.). Moscow: DMK Press Publ., 494 p. [in Russian].
25. Eremenko, O. S., Cherdyntsev, E. S. Comparison of three-dimensional Internet technologies. In *Elektronnyy sbornik statey XI mezhdunarodnoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: No. 4(11). Molodezhnyy nauchnyy forum: Tekhnicheskies i matematicheskies nauki [Elektronic Proceedings of XI International Students Scientific and Practical Conference: No. 4 (11)]*.

*Youth Scientific Forum: Technical and Mathematical Sciences*]. Retrieved from at <http://nauchforum.ru/node/3187> [in Russian].

26. Bugakova T. Y. (2015). Modeling spatio-temporal changes in the state of engineering structures and natural sites on geodetic data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(29), 34–42 [in Russian].

27. Leibo, J. Z., Zambaldi, V., Lanctot, M., Marecki, J., & Graepel, T. (2017). Multi-agent reinforcement learning in sequential social dilemmas. In *Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* (pp. 464–473).

28. Shoham, Y., Powers, R., & Grenager, T. (2007). If multi-agent learning is the answer, what is the question? *Artificial Intelligence*, 171(7), 365–377, 2007.

29. He, H., Boyd-Graber, J., Kwok, K., & Daumé III, H. (2016). Opponent modeling in deep reinforcement learning. In *Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning* (pp. 1804–1813).

30. Stone, P., Kaminka, G., Kraus, S., & Rosenschein, J. (2010). Ad hoc autonomous agent teams: collaboration without pre-coordination. In *Proceedings of the 24th AAAI Conference on Artificial Intelligence* (pp. 1504–1509).

31. Genter, K., Laue, T., & Stone, P. (2017). Three years of the RoboCup standard platform league drop-in player competition: Creating and maintaining a large scale ad hoc teamwork robotics competition. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 31(4), 790–820.

Received 03.10.2019

© I. A. Knol', 2019