

УДК 528.482

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-2-18-27

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВЕРХНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ И СООРУЖЕНИЙ

Иван Александрович Кноль

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

Разработка принципиально новых методов геодезического мониторинга инженерных объектов и сооружений, находящихся в аварийном состоянии, является актуальной научно-технической задачей геодезии. Результаты подобных исследований позволят обеспечить оперативность и достоверность получения данных о пространственном состоянии объекта с целью их безопасного функционирования. В статье представлены экспериментальные исследования модели квадрокоптера в рамках разработанной автором методики геодезического мониторинга инженерных объектов и сооружений на основе теории мультиагентных систем. Приведены опытная модель квадрокоптера и вычисление средней квадратической ошибки (СКО) измерения превышения на станции в лабораторных условиях. В результате проведения эксперимента сделан вывод о возможности измерений описанным способом. Предлагаемый способ измерения возможен для применения в ситуациях, когда измерения при участии человека невозможны, а объект геомониторинга является труднодоступным местом.

Ключевые слова: геодезический мониторинг, лазерный дальномер, теория мультиагентных систем, роботизированное измерительное устройство, квадрокоптер, отражательная призма, пространственно-временное состояние

Введение

Категория технического состояния строительной конструкции или здания и сооружения в целом, включая состояние грунтов основания, характеризующаяся повреждениями и деформациями, свидетельствующими об исчерпании несущей способности и опасности обрушения, и (или) кренами, которые могут вызвать потерю устойчивости объекта, формулируется в ГОСТ 31937–2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» как аварийное состояние [1, 2].

Наличие на территории нашей страны зданий и сооружений в аварийном состоянии повышает требования к обеспечению безопасности их эксплуатации путем разработки и внедрения комплекса специальных мер, включающих, в том числе, и геодезический мониторинг их пространственного состояния, что отражено в Федеральном законе «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

Современные технологии в строительстве, к сожалению, не обеспечивают полной безопасности эксплуатации подобных инженерных зданий и сооружений, находящихся в ограниченно работоспособном или аварийном состоянии (здесь и далее – инженерных зданий и сооружений), а это повышает риск возникновения аварийных ситуаций глобального и локального масштабов, например, аварии на Саяно-Шушенской ГЭС и на АЭС Фукусима, обрушение кровли жилых и промышленных зданий, крупных торговых и развлекательных центров (Басманный рынок в г. Москве, городской торгово-развлекательный центр «Галактика» в г. Барнауле) и т. д.

Геодезический мониторинг пространственного состояния инженерного объекта или сооружения включает как традиционные методы измерений, так и применение автоматизированных систем мониторинга инженерных конструкций (СМИК), к возможностям которых относят непрерывный сбор, передачу и обработку информации в автоматическом и ручном режимах и выработку управ-

ляющих решений [3–8]. Ярким примером использования современных устройств в инженерной геодезии является мониторинг с применением роботизированных электронных тахеометров и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Новое поколение легких и малых БПЛА позволяет разрабатывать воздушные робототехнические системы широкого спектра применения. Один из таких проектов – ANCHORS (UAV – Assisted Ad Hoc Networks for Crisis Management and Hostile Environment Sensing) по применению технологии одноранговых сетей БПЛА для управления в аварийных ситуациях и дистанционного сканирования зоны заражения. Основной целью проекта ANCHORS является организация автономной сети, состоящей из различных беспилотных систем, которые могут быть использованы в качестве независимой коммуникационной инфраструктуры для аварийных служб при возникновении чрезвычайной ситуации. В результате анализа сделан вывод о том, что недостатком данного проекта является высокая СКО результатов измерений, к положительным аспектам использования БПЛА и других устройств в синхронизированном режиме можно отнести высокую скорость получения данных и высокую отказоустойчивость системы (децентрализованная система).

В условиях возникновения чрезвычайных ситуаций функционирование СМИК может быть нарушено, а для проведения геодезического мониторинга состояния объекта с использованием традиционных методов измерений не всегда имеется возможность непосредственного доступа человека к элементам конструкций потенциально опасных объектов (ПОО) с целью выявления возможности его дальнейшего безопасного функционирования [9–17]. В наибольшей степени данное обстоятельство относится к верхней поверхности, т. е. крыше потенциально опасного объекта, обрушение которой, как показала практика, может привести к человеческим жертвам (обрушение развлекательного комплекса «Трансвааль-парк»). В результате нарушения оперативности получения информации о пространственном состоянии ПОО становится затруднительным своевременное

принятие управленческих решений по проведению соответствующих восстановительных мероприятий.

Поэтому разработка принципиально новых методов геодезического мониторинга инженерных объектов в условиях аварийных ситуаций, позволяющих обеспечить оперативность и достоверность получения данных о пространственном состоянии объекта с целью их безопасного функционирования является актуальной научно-технической задачей геодезии.

Решение этой задачи возможно путем внедрения новых интеллектуальных технологий, основанных на теории мультиагентных систем, позволяющих оперативно получать пространственную информацию о состоянии техногенного объекта (без присутствия человека в опасных или труднодоступных местах) для последующего оценивания возможности его безопасного функционирования в условиях аварийной ситуации [18–28].

Характерной особенностью мультиагентных технологий является их способность к коллективному поведению с целью решения общей задачи. Коллективом называют группу агентов (например, БПЛА) взаимодействующих между собой для решения общей целевой задачи. При этом коллективное взаимодействие охватывает большое число агентов системы и проявляется в их согласованных действиях [29–33].

Метод коллективного управления заключается в том, что каждый БПЛА самостоятельно управляет процессом своего функционирования, т. е. определяет свои действия, а также согласовывает эти действия с другими агентами группы для наиболее эффективного, т. е. с минимальными затратами и максимальной выгодой для группы, решения целевой задачи.

Экспериментальные исследования

Разработана структурная схема квадрокоптера, которая изображена на рис. 1, и на ее основе сконструирована опытная модель для проведения экспериментов и апробации разработанной методики.

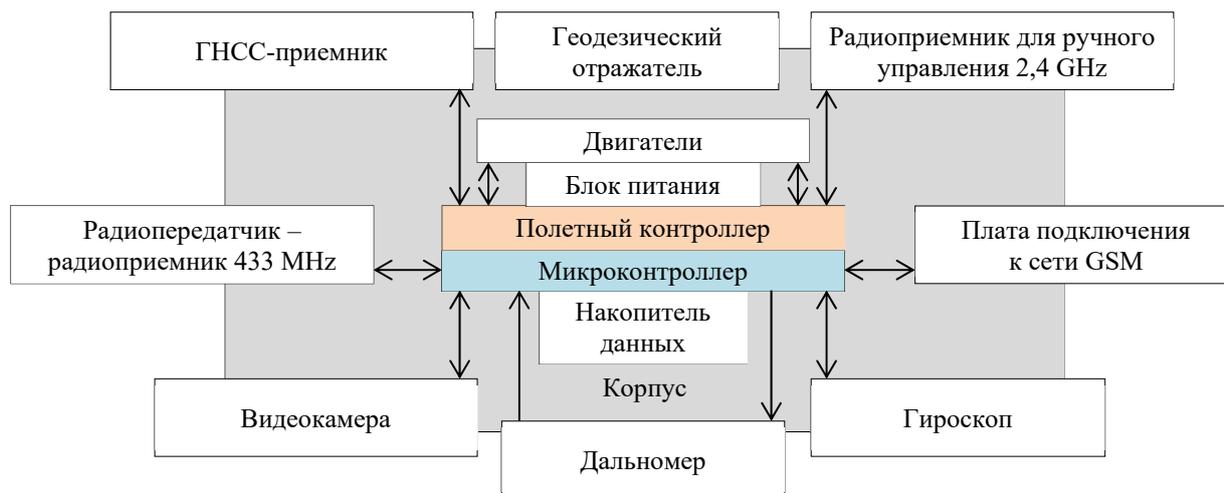


Рис. 1. Структурная схема квадрокоптера, оснащенного дополнительным измерительным технологическим оборудованием

Практическая реализация квадрокоптера выполнена с использованием следующей аппаратной базы: рама DJI F450, моторы DJI 2212 (4 шт.), регуляторы хода DJI ESC 30A (4 шт.), полетный контроллер NAZA MV2, лазерный дальномер, датчик IMU10 (включающий в себя микросхемы, дающие показания по трем осям: акселерометр, гироскоп, компас; барометр), GPS-приемник, устройство Arduino-UNO, передатчик 433 MHz, передатчик 2,4 ГГц.

Данных о местоположении квадрокоптера, получаемых на основе модуля GPS, недостаточно (ошибка определения плановых координат около 2,5 м и 1 м по высоте в системе координат WGS-84). Для уточнения координат необходима привязка местоположения квадрокоптера к системе координат, в которой определены точки объекта геомониторинга. Автором предлагается использовать два взаимосвязанных устройства: роботизированный тахеометр и квад-

рокоптер с закрепленной к конструкции призмой (здесь и далее – отражательная призма «360°»), отражающей сигнал тахеометра независимо от вращения по оси Z. При этом GPS-приемник из конструкции не удаляется и служит резервным устройством определения местоположения летательного аппарата.

По аналогии с существующим креплением разработано и изготовлено крепление отражательной призмы для квадрокоптера. На рис. 2 изображен квадрокоптер с присоединенной к его корпусу геодезической отражательной призмой «360°» с помощью изготовленного крепления.

Прием данных с квадрокоптера реализован с помощью приемника 433 MHz, Arduino UNO и компьютера. На станции приема, изображенной на рис. 2, запускается программное обеспечение для визуализации данных, получаемых с квадрокоптера.

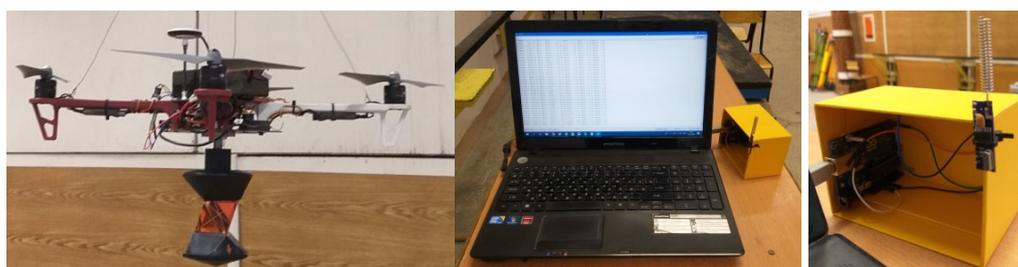


Рис. 2. Квадрокоптер с закрепленной к корпусу отражательной геодезической отражательной призмой «360°» (слева), станция приема данных с квадрокоптера, состоящая из компьютера (по центру), Arduino UNO и приемника 433 MHz (справа)

Входные данные для квадрокоптера: высота, широта и долгота в системе координат WGS-84 на основе приемника GPS, углы наклона с гироскопического датчика, направление на север на основе компаса, температура внешней среды для внесения поправок (датчик температуры), показатель собственной скорости на основе датчика акселерометра, данные с лазерного дальномера.

В результате облета квадрокоптера в режиме удержания высоты на бортовом компьютере генерируется таблица значений расстояния до поверхности объекта, поступающих с лазерного дальномера (СКО ± 3 мм).

Используя программные алгоритмы, возможно проанализировать наличие случайных

ошибок измерения расстояния и уточнить данные. Применен медианный фильтр, который отсеивает случайные значения (медианой является средний по порядку член ряда, получающегося при упорядочении исходной последовательности измерений).

Для оценки точности измерений, получаемых с помощью квадрокоптера, в работе выполнен эксперимент, концептуальная схема которого представлена на рис. 3. Суть эксперимента заключается в том, чтобы, во-первых, вычислить среднюю квадратическую ошибку измерения превышения на станции в лабораторных условиях, во-вторых, сравнить вычисленное значение превышения (ΔZ_1 , м) с «эталонным» (ΔZ_2 , м), измеренным с помощью роботизированного тахеометра GeoMax Zoom70.

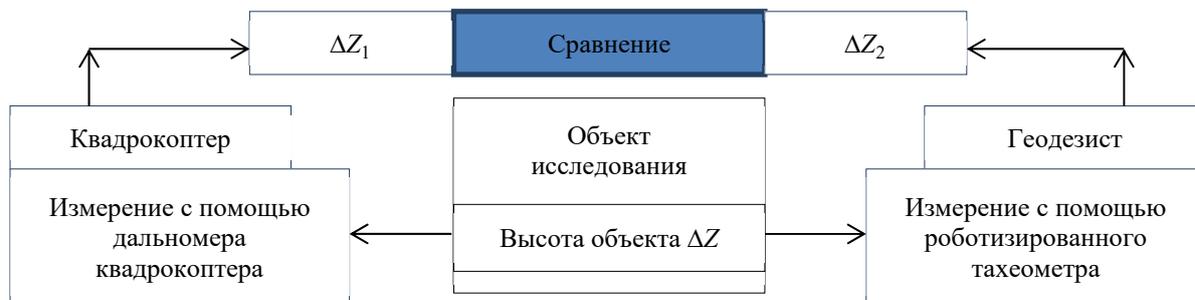


Рис. 3. Концептуальная схема эксперимента для оценки точности данных, получаемых квадрокоптером

На рис. 4 схематично изображена ситуация, когда углами наклона квадрокоптера от нормали к измеряемой поверхности объекта геомониторинга можно пренебречь. В данном случае координаты точки M_2 (одна из множества точек поверхности, определяющей верхнюю поверхность объекта геомониторинга) определяются по формуле

$$M_2(X_2, Y_2, Z_2) = M_1(X_1, Y_1, Z_1 - \Delta Z), \quad (1)$$

где M_1 – точка, соответствующая началу отсчета лазерного дальномера квадрокоптера; ΔZ – расстояние между точками M_1 и M_2 .

Ход экспериментальных исследований в лабораторных условиях следующий. После приведения квадрокоптера в рабочее положение измерение производится 10 раз, что составляет одну серию. Таких серий измере-

ний выполнено семь, результаты измерений представлены в табл. 1.

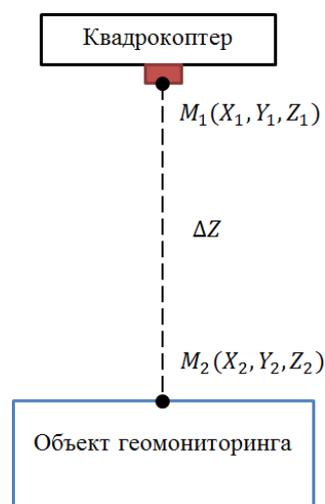


Рис. 4. Функционирование квадрокоптера при идеальных условиях

Таблица 1

Определение средней квадратической ошибки измерения превышения на станции в лабораторных условиях

№ п/п	Серии измерений ΔZ , мм						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1 857,8	1 863,3	1 857,4	1 866,4	1 857,2	1 333,3	1 337,9
2	1 857,8	1 862,1	1 866,6	1 857,4	1 857,4	1 333,1	1 333,4
3	1 858,3	1 862,4	1 858,3	1 866,0	1 861,9	1 337,9	1 328,8
4	1 863,3	1 858,3	1 861,4	1 864,7	1 864,8	1 338,1	1 328,8
5	1 854,7	1 863,4	1 858,6	1 865,9	1 857,2	1 333,8	1 328,6
6	1 859,0	1 859,3	1 863,3	1 871,6	1 860,3	1 338,4	1 332,9
7	1 863,3	1 859,1	1 858,8	1 857,8	1 863,3	1 338,4	1 337,8
8	1 868,6	1 863,3	1 854,7	1 857,1	1 859,0	1 339,5	1 329,1
9	1 863,6	1 858,1	1 862,8	1 865,3	1 859,0	1 339,5	1 330,2
10	1 863,4	1 870,9	1 862,4	1 866,4	1 862,4	1 337,9	1 330,3
Ср.	1 861,0	1 862,0	1 860,4	1 863,9	1 860,3	1 337,0	1 331,8
m_i	4,11	3,79	3,48	4,81	2,73	2,55	3,61
$m_{ст}$	3,66						

Средняя квадратическая ошибка измерения превышения на станции для каждой серии вычисляется по формуле Бесселя

$$m_i = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (2)$$

и окончательная из всех серий

$$m_{ст} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k m_i^2}{k}}, \quad (3)$$

где k – число серий измерений.

Не приняты в расчет углы наклона α , β между осями X , Y соответственно и нормалью к измеряемой поверхности квадрокоптера, представленные на рис. 5, в моменты измерений. Это означает, что данные, полученные с помощью квадрокоптера, имеют дополнительную ошибку.

В данном случае координаты точки M_2' определяются по формуле

$$M_2'(X_2', Y_2', Z_2') = M_1(X_1, Y_1, Z_1 - \Delta Z'), \quad (4)$$

где $\Delta Z'$ – приращение (результаты измерений представлены в табл. 2), вычисляемое по формуле

$$\Delta Z' = \frac{(\cos(\alpha)\Delta Z) + (\cos(\beta)\Delta Z)}{2}. \quad (5)$$

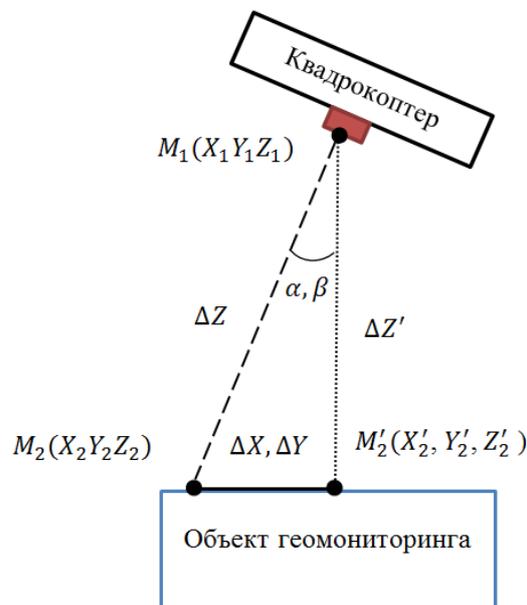


Рис. 5. Функционирование квадрокоптера при фиксации углов наклона

По аналогии с вычислениями для первой серии произведены вычисления для серий 2–7. Определена средняя квадратическая ошибка измерения превышения на станции в лабораторных условиях при учете углов наклона $m_{ст} = 3,60$ мм.

Таблица 2

Вычисление приращения $\Delta Z'$
для первой серии измерений углов α , β

№ п/п	ΔZ , мм	Угол α , град.	Угол β , град.	$\Delta Z'$, мм
1	1 857,8	9,79	6,90	1 837,5
2	1 857,8	9,87	7,01	1 837,1
3	1 858,3	9,84	6,88	1 837,9
4	1 863,3	9,69	6,94	1 843,2
5	1 854,7	9,81	6,98	1 834,3
6	1 859,0	9,96	7,01	1 838,0
7	1 863,3	9,88	6,96	1 842,6
8	1 868,6	9,81	6,86	1 848,3
9	1 863,6	9,76	7,03	1 843,1
10	1 863,4	9,85	6,94	1 842,8
Ср.	1 861,0			1 840,5

Произведены измерение и вычисление «эталонного» превышения с помощью высокоточного роботизированного тахеометра GeoMax Zoom70. Для эксперимента изготовлен макет в форме параллелепипеда, имитирующий ПОО. При измерении превышения необходимо непосредственное участие человека (установка в вертикальное положение телескопической вехи по цилиндрическому уровню на измеряемую поверхность). Выполнены измерения превышений системой «роботизированный тахеометр-квадрокоптер». Вычислена средняя квадратическая погрешность измерений превышения на станции в лабораторных условиях с использованием эталонного значения $h_2 = 529,0$. Результаты вычислений приведены в табл. 3.

Таблица 3

Вычисление средней квадратической погрешности измерений превышения на станции в лабораторных условиях с использованием эталонного значения

№ п/п	Значение дальномера квадрокоптера ΔZ_1 , мм	Значение дальномера квадрокоптера ΔZ_2 , мм	Вычисленное превышение, $\Delta Z = \Delta Z_1 - \Delta Z_2$, мм	Δ , мм	
1	1 857,2	1 337,9	519,3	9,7	
2	1 857,4	1 333,4	524,0	5,0	
3	1 861,9	1 328,8	533,1	-4,1	
4	1 864,8	1 328,8	536,0	-7,0	
5	1 857,2	1 328,6	528,6	0,4	
6	1 860,3	1 332,9	527,4	1,6	
7	1 863,3	1 337,8	525,5	3,5	
8	1 859,0	1 329,1	529,9	-0,9	
9	1 859,0	1 330,2	528,8	0,2	
10	1 862,4	1 330,3	532,1	-3,1	
				0,5	
				$m =$	4,6

Для вычисления используется формула Гаусса

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} \quad (6)$$

Заключение

Предлагаемый способ возможен для применения в ситуациях, когда измерения при

участии человека недопустимы, а объект геомониторинга находится в труднодоступном месте. Точность, полученная в результате эксперимента, достаточна для генерации цифровой модели объекта геомониторинга и заключения о состоянии потенциально опасного объекта (построение верхней поверхности ПОО в трехмерном пространстве в режиме реального времени для выявления отклонений ее параметров от проектных значений).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 305.1325800.2017. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://meganorm.ru/Index2/1/4293741/4293741084.htm>.
2. ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/1200100941>.
3. Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., Тикунов В. С. и др. Геоинформатика : учеб. для студ. вузов / под ред. В. С. Тикунова. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – С. 21.
4. Web GIS: principles and applications / Pinde Fu, Jiulin Sun. – 1st ed. – Esri Press, 380 New York Street, Redlands, California, 2011. – P. 16.
5. Карпик А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 260 с.
6. Уставич Г. А., Пошивайло Я. Г., Дубровский А. В., Ахметов Б. Ж., Пошивайло А. О. Зонирование и межевание земель, прилегающих к ядерным полигонам, для целей их хозяйственного использования (на примере Семипалатинского испытательного ядерного полигона) // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 145–160.
7. Лисицкий Д. В., Чернов А. В. Теоретические основы трехмерного кадастра объектов недвижимости // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 153–170.
8. Карпик А. П. и др. Методологические принципы системы точной спутниковой навигации подвижных объектов с использованием наземной инфраструктуры ГЛОНАСС // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 5. – С. 69–74.
9. Жуков Б. Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий : монография. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 356 с.
10. Могильный С. Г., Шоломицкий А. А., Иванов А. В., Середович А. В., Лагутина Е. К., Мартынов А. В. Исследование методов определения геометрических параметров вращающихся агрегатов по данным лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 89–107.
11. 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.
12. Тимофеев В. Ю., Семибаламут В. М., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В., Фомин Ю. Н., Грибанова Е. И., Бойко Е. В., Панов С. В., Парушкин М. Д. Лазерный деформограф и вариации приливной деформации во времени // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 42–58.
13. 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.
14. Войнаровский А. Е., Тихонов С. Г. Калибровка наземного лазерного сканера по сканам испытательного полигона // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 5–18.
15. Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю., Поливач В. И. Геофизический мониторинг опасных техногенных проявлений на обрабатываемых территориях // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 35–44.
16. 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.
17. Камнев И. С. Исследование технологии лазерного сканирования при инженерно-геодезических изысканиях для ремонта автодороги // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 67–77.
18. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 22.1.12–2005. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. – М. : ИПК, Изд-во стандартов, 2005.
19. 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.
20. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. Философия, психология, информатика. – М. : Эдиториал, 2002. – С. 8.
21. Евгениев Г. Б. Мультиагентные системы компьютерной инженерной деятельности // Информационные технологии. – 2000. – № 4. – С. 2–7.
22. Рыгалов А. Ю., Кубарьков Ю. П. Применение мультиагентных систем в электро-энергетике // Сб. трудов Кольского научного центра РАН, 2012. – С. 102–105.

23. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2007. – 1 410 с.
24. Чекинов С. Г. Интеллектуальные программные исполнительные устройства (агенты) в системах связи // Информационные технологии. – 2001. – № 4. – С. 6–11.
25. 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.
26. Коичи Мацуда, Роджер Ли. WebGL: программирование трехмерной графики / Пер. с англ. Киселев А. Н. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 494 с. : ил.
27. Еременко О. С., Чердынцев Е. С. Сравнение трехмерных интернет-технологий // ООО «МЦНО» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nauchforum.ru/node/3187>.
28. 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.
29. Leibo J. Z., Zambaldi V., Lanctot M., Marecki J., Graepel T. Multi-agent reinforcement learning in sequential social dilemmas // Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2017. – P. 464–473.
30. 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.
31. He H., Boyd-Graber J., Kwok K., Daumé III H. Opponent modeling in deep reinforcement learning // Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning. – 2016. – P. 1804–1813.
32. Stone P., Kaminka G., Kraus S., Rosenschein J. Ad hoc autonomous agent teams: collaboration without pre-coordination // Proceedings of the 24th AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2010. – P. 1504–1509.
33. 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 17.12.2020

© И. А. Кноль, 2021

EXPERIMENTAL STUDIES OF GEODETIC MONITORING ACCURACY OF UPPER SURFACE OF ENGINEERING OBJECTS AND CONSTRUCTIONS

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

The development of totally new methods for geodetic monitoring of engineering objects and constructions in emergency state is a relevant scientific and technical task of geodesy. The results of such studies allow to ensure prompt and reliable data of the condition of a spatial object for the purpose of its safe exploitation. The article presents experimental studies of a quadcopter model according to the developed by the author method for geodetic monitoring of engineering objects and constructions based on the multi-agent system theory. The article describes the test model of quadcopter and mean square error calculation of elevation measurement in the laboratory conditions of the station. Based on the experiment results the article makes the conclusion about the possibility of measurement by the described method. The suggested method is possible in situations when measurements by man are impossible and the object of geo-monitoring is an inaccessible place.

Keywords: geodetic monitoring, laser distance measurer, multi-agent systems theory, robotized measurement device, quadcopter, reflecting prism, spatial and temporal condition

REFERENCES

1. Code of Practice. (2017). SP 305.1325800.2017. Buildings and structures. Rules for conducting geotechnical monitoring during construction. Retrieved from <https://meganorm.ru/Index2/1/4293741/4293741084.htm> [in Russian].
2. Standards Russian Federation. (2011). GOST 31937-2011. Buildings and constructions. Rules for inspection and monitoring of technical condition. Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/1200100941> [in Russian].
3. Kapralov, E. G., Koshkarev, A. V., & Tikunov, V. S. (2005). *Geoinformatika [Geoinformatics]*. Tikunov, V. S. (Ed.). Moscow: Izdatel'skiy tsentr "Akademiya", P. 21 [in Russian].
4. Pinde Fu, & Jiulin Sun. (2011). *Web GIS: principles and applications*. Esri Press, P. 16.
5. 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].
6. 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].
7. 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].
8. 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].
9. Zhukov, B. N. (2003). *Geodezicheskiy kontrol sooruzheniy i oborudovaniya promyshlennykh predpriyatiy [Geodetic control of structures and equipment of industrial enterprises]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 356 p. [in Russian].
10. Mogilny, S. G., Sholomitsky, A. A., Ivanov, A. V., Sereдович, 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].
11. 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].
12. Timofeev, V. Yu., Semibalamut, V. M., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., Fomin, Yu. N., Gribova, 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].
13. 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].
14. 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].
15. Gordeev, V. F., Malyshkov, S. Yu., & Polivach, V. I. (2019). Geophysical monitoring of technogenic hazards on anthropogenic soils. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 35–44 [in Russian].
16. 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].
17. 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].
18. Standards Russian Federation. (2005). GOST R 22.1.12-2005. A structured monitoring and control system for Engineering systems of buildings and structures. General requirements. Moscow: IPK, Standards Publ. [in Russian].
19. 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].
20. Tarasov V. B. (2002). *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektualnym organizatsiyam. Filosofiya, psikhologiya, informatika [From multi-agent systems to intelligent organizations. Philosophy, psychology, computer science]*. Moscow: Editorial, P. 8 [in Russian].

21. Evgeny, G. B. (2000). Multi-agent systems computer engineering. *Informatsionnye tekhnologii [Information Technology]*, 4, 2–7 [in Russian].
22. Rygalov, A. Y., & Kubarkov, J. P. (2012). Application of multi-agent systems in the power industry. In *Sbornik trudov Kolskogo nauchnogo tsentra RAN [Transactions of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences]* (pp. 102–105) [in Russian].
23. Russell, S., & Norvig, P. (2007) *Iskusstvennyy intellekt. Sovremennyy podkhod [Artificial Intelligence. Modern approach]* (2d ed). Moscow: Vilyams Publ., 1410 p. [in Russian].
24. Chekina, S. G. (2001). Intelligent software actuators (agents) in communication systems. *Informatsionnye tekhnologii [Information Technology]*, 4, 6–11 [in Russian].
25. 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. 1. 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].
26. Koichi Matsuda, & Rodzher Li. (2015). *WebGL: programmirovaniye trekhmernoy grafiki [WebGL: three-dimensional graphics programming]*. A. N. Kiselev (Trans.). Moscow: DMK Press Publ., 494 p. [in Russian].
27. Eremenko, O. S., & Cherdyntsev, E. S. (n. d.). Sravnenie trekhmernykh internet-tekhnologiy. OOO "MTsNO". Retrieved from at <http://nauchforum.ru/node/3187> [in Russian].
28. 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].
29. 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).
30. Shoham, Y., Powers, R., & Grenager, T. (2007). If multi-agent learning is the answer, what is the question? *Artificial Intelligence*, 171(7), 365–377.
31. 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).
32. 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).
33. 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 17.12.2020

© I. A. Knol, 2021