

## Интеграция беспроводной связи для оптимизации распознавания окружения и расчёта траектории движения группы роботов

<sup>1</sup> М.В. Иванов, ORCID: 0000-0002-5523-0343 <ivanovm@uabc.edu.mx>

<sup>1</sup> О.Ю. Сергиенко, ORCID: 0000-0003-4270-6872 <srgnk@uabc.edu.mx>

<sup>2</sup> В.В. Тырса, ORCID: 0000-0003-1623-5704 <vtysa@uabc.edu.mx>

<sup>1</sup> Л. Линднер, ORCID: 0000-0002-0623-6976 <lindner.lars@uabc.edu.mx>

<sup>2</sup> Х.С. Родригес-Киньонес, ORCID: 0000-0002-1830-0226 <julio.rodriguez81@uabc.edu.mx>

<sup>2</sup> В. Флорес-Фуэнтес, ORCID: 0000-0002-1477-7449 <flores.wendy@uabc.edu.mx>

<sup>1</sup> М. Ривас-Лопес, ORCID: 0000-0001-8751-4693 <mrivas@uabc.edu.mx>

<sup>2</sup> Д. Эрнандес-Бальбуэна, ORCID: 0000-0002-0055-4797 <dhernan@uabc.edu.mx>

<sup>3</sup> Х.И. Ньето Иполито, ORCID: 0000-0003-0105-6789 <jniето@uabc.edu.mx>

<sup>1</sup> Автономный университет Нижней Калифорнии (UABC), Инженерный институт, Мехикали, Н.К., Мексика

<sup>2</sup> Автономный университет Нижней Калифорнии (UABC), Инженерный факультет, Мехикали, Н.К., Мексика

<sup>2</sup> Автономный университет Нижней Калифорнии (UABC), Факультет инженерии, архитектуры и дизайна, Энсенада, Н.К., Мексика

**Аннотация.** В настоящее время искусственный интеллект и групповая робототехника становятся широко распространенными и используются в гражданских задачах. Основная цель статьи – показать возможность использования знаний о совместном окружении группы роботов при решении задачи навигации путем обеспечения передачи данных между роботами. В методике, представленной в статье, рассматривается комплекс задач, выполнение которых улучшает результаты роботизированной групповой навигации. Исследование затрагивает проблемы робототехнического зрения, планирования путей, хранения и обмена данными. В статье описывается структура лазерной системы технического зрения реального времени как основного инструмента взаимодействия роботов с окружающей. В системе зрения используется принцип динамической триангуляции. В статье приведены примеры полученных данных, методы сохранения разрешающей способности сканирования на расстоянии и контроля скорости. В соответствии с данными, полученными с помощью предоставленной системы зрения, было решено использовать матричный подход для планирования пути роботов, что позволяет решать задачи дискретизации окружения и аппроксимации траектории. Сравниваются два типа структуры сети для передачи данных. Авторы предлагают методологию формирования динамической сети на основе системы смены лидеров. Для апробации теории было разработано программное обеспечение для моделирования группы роботов. Полученные результаты показывают, что обмен знаниями внутри группы может значительно улучшить планирование траекторий движения роботов.

**Ключевые слова:** группа роботов; планирование путей; система зрения; 3D лазерный сканер; сети; передача данных.

**Для цитирования:** Иванов М.В., Сергиенко О.Ю., Тырса В.В., Линднер Л., Родригес-Киньонес Х.С., Флорес-Фуэнтес В., Ривас-Лопес М., Эрнандес-Бальбуэна Д., Ньето Иполито Х.И. Интеграция беспроводной связи для оптимизации распознавания окружения и расчёта траектории движения группы роботов. Труды ИСП РАН, том 31, вып. 2, 2019 г., стр. 67-82. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(2)-6

## Wireless integration to optimize environmental recognition and calculate the trajectory of a group of robots

<sup>1</sup> M.V. Ivanov, ORCID: 0000-0002-5523-0343 <ivanovm@uabc.edu.mx>

<sup>1</sup> O.Yu. Sergiyenko, ORCID: 0000-0003-4270-6872 <srgnk@uabc.edu.mx>

<sup>2</sup> V.V. Tyrsa, ORCID: 0000-0003-1623-5704 <vtysa@uabc.edu.mx>

<sup>1</sup> L. Lindner, ORCID: 0000-0002-0623-6976 <lindner.lars@uabc.edu.mx>

<sup>2</sup> J.C. Rodriguez-Quinonez, ORCID: 0000-0002-1830-0226 <julio.rodriguez81@uabc.edu.mx>

<sup>2</sup> W. Flores-Fuentes, ORCID: 0000-0002-1477-7449 <flores.wendy@uabc.edu.mx>

<sup>1</sup> M. Rivas-Lopez, ORCID: 0000-0001-8751-4693 <mrivas@uabc.edu.mx>

<sup>2</sup> D. Hernández-Balbuena, ORCID: 0000-0002-0055-4797 <dhernan@uabc.edu.mx>

<sup>3</sup> J.I. Nieto Hipólito, ORCID: 0000-0003-0105-6789 <jniето@uabc.edu.mx>

<sup>1</sup> Universidad Autonoma de Baja California (UABC), Instituto de Ingeniería, Mexicali, B.C., Mexico

<sup>1</sup> Universidad Autonoma de Baja California (UABC), Facultad de Ingeniería, Mexicali, B.C., Mexico

<sup>3</sup> Universidad Autonoma de Baja California (UABC), Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Ensenada, B.C., Mexico

**Abstract.** Nowadays artificial intelligence and swarm robotics become wide spread and take their approach in civil tasks. The main purpose of the article is to show the influence of common knowledge about surroundings sharing in the robotic group navigation problem by implementing the data transferring within the group. Methodology provided in article reviews a set of tasks implementation of which improves the results of robotic group navigation. The main questions for the research are the problems of robotics vision, path planning, data storing and data exchange. Article describes the structure of real-time laser technical vision system as the main environment-sensing tool for robots. The vision system uses dynamic triangulation principle. Article provides examples of obtained data, distance-based methods for resolution and speed control. According to the data obtained by provided vision system were decided to use matrix-based approach for robots path planning, it inflows the tasks of surroundings discretization, and trajectory approximation. Two network structure types for data transferring are compared. Authors are proposing a methodology for dynamic network forming based on leader changing system. For the confirmation of theory were developed an application of robotic group modeling. Obtained results show that common knowledge sharing between robots in-group can significantly decrease individual trajectories length.

**Keywords:** robotic group; path planning; vision system; 3D laser scanner; network; data transferring

**For citation:** Ivanov M.V., Sergiyenko O.Yu., Tyrsa V.V., Lindner L., Rodriguez-Quinonez J.C., Flores-Fuentes W., Rivas-Lopez M., Hernández-Balbuena D., Nieto Hipólito J.I. Wireless integration to optimize environmental recognition and calculate the trajectory of a group of robots. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 31, issue 2, 2019. pp. 67-82 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(2)-6

## 1. Введение

Успешное использование мобильных роботов в различных областях гражданской промышленности приводит исследователей к задаче эффективного контроля группы роботов. В качестве примеров можно упомянуть обнаружение объектов в различных видах окружающей среды, использование группы в качестве распределенной сенсорной системы для химического анализа и т. д.

Обобщая все задачи, мы можем сказать, что взаимодействие агентов в группе роботов на трудно проходимой местности является одной из основных проблем. В окружении такого типа группа обычно рассредоточивается по территории. Такое размещение дает роботам возможность выполнять задачи обнаружения динамических событий в реальном времени в окружающей среде, поиска объектов и т. д. лучше, чем, например, сеть статических датчиков. Это достижимо, потому что каждый отдельный робот может покрывать большую часть

площади, патрулируя, а не оставаясь в неподвижном состоянии. Это означает, что группа может выполнять мониторинг среды с меньшим количеством датчиков. Для достижения автоматизации внутри группы при выполнении таких задач роботы должны работать с предопределенными правилами коллективного поведения.

Каждый отдельный робот в группе – это устройство с определенным набором функций (восприятие, связь, движение и вычислительная обработка) и ограничивающими их факторами. В статье рассматривается возможность использования однородной группы роботов ([1], [2]), которые могут независимо выполнять различные простые задачи. Кроме того, роботы должны иметь возможность двигаться к своей цели в окружающей среде, не теряя при этом контакта с членами группы. Именно поэтому были выделены три типа задач, которые необходимо решать одновременно в режиме реального времени.

- Обнаружение и локализация препятствий. Успех мобильной группы роботов в неструктурированной среде возможен только в том случае, если они способны приспосабливаться к переменным факторам среды. Эти изменения, которые включают в себя наличие новых препятствий, могут быть обнаружены с использованием сенсорных систем, таких как лазерные системы технического зрения, камеры и т. д. Обнаружение препятствий служит начальным состоянием планирования движения для прогнозирования возможных маршрутов.
- Обмен данными в группе ([3], [4]). Необходимость в передаче данных может возникнуть в случае, когда группа роботов должна принять коллективное решение, при отсутствии данных для принятия индивидуального решения или также для информирования других роботов о возникновении резких изменений окружающей среды.
- Планирование траектории или коллективная навигация ([5], [6], [7], [8]). Для группы роботов в трудно проходимой местности реализуется задача планирования потенциальных траекторий через неизвестное поле препятствий из заданной начальной точки в искомую.

Таким образом, основной вклад статьи заключается в рассмотрении возможных решений этих проблем и их внедрении в модель, чтобы понять влияние обмена данными на взаимодействие роботизированной группы с окружающей средой во время задачи картографирования [9] и обнаружения цели.

## 2. Система технического зрения

Наиболее распространенные системы видения используют подходы, основанные на CCD или CMOS ([10], [11], [12], [13]), более дорогое оборудование, например, камеры Time-of-Flight [14] или на лазерной основе [15]. Большинство из них хороши для распознавания объектов, планирования пути и других задач. Однако в случае более сложных условий, таких как слабое освещение или резкое изменение ландшафта система зрения должна удовлетворять этим обстоятельствам. Рассматриваемый подход основан на лазерной системе технического зрения (СТЗ) [16] (рис. 1). Эта система по сравнению с другими имеет широкий угол обзора (до 160°) и идеально подходит для работы в совершенно темных условиях, что совершенно невозможно для систем с камерами.

В системе используется метод, называемый динамической триангуляцией [17]. Система рассчитывает декартовы координаты по двум обнаруженным углам  $B_{ij}$  и  $C_{ij}$  (в данном конкретном случае  $ij$  – шаги горизонтального и вертикального сканирования) лазера подсвеченной точки и фиксирует расстояние между проектором и приемником. В полученном треугольнике (рис. 2) угол  $B_{ij}$  рассчитывается как простое соотношение двух счетчиков: количества тактовых импульсов между двумя исходными импульсами на интервале 'home pulse – spot pulse' (1).

$$B_{ij} = \frac{2\pi N_A}{N_{2\pi}}, \quad (1)$$

где  $N_A$  – количество опорных импульсов, когда лазерные лучи обнаруживаются датчиком остановки, а  $N_{2\pi}$  – количество тактовых опорных импульсов, когда зеркало в 45° завершает поворот на 360°, обнаруженный датчиком нуля.

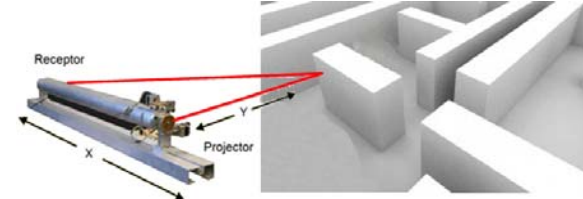


Рис. 1. Система технического зрения  
Fig. 1. Technical Vision System

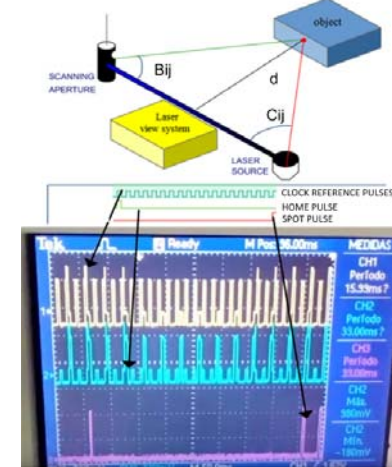


Рис. 2. Принцип динамической триангуляции СТЗ  
Fig. 2. The principle of dynamic triangulation

Для вычисления координат  $x$ ,  $y$  и  $z$  используются следующие уравнения (2-5):

$$x_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \cos \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \quad (2)$$

$$y_{ij} = a \left( \frac{1}{2} - \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij}}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \text{ at } B_{ij} \leq 90^\circ \quad (3)$$

$$y_{ij} = -a \left( \frac{1}{2} - \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij}}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \text{ at } B_{ij} \geq 90^\circ \quad (4)$$

$$z_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \cos \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \quad (5)$$

СТЗ может дать очень подробную информацию об обнаруженном препятствии. В задаче распознавания и классификации образов это можно рассматривается как выгода. Но во время

планирования движения робота, чтобы избежать столкновения, информация о препятствии должна содержать общие данные (ширина, глубина, высота и большие выпуклости его поверхности, которые могут препятствовать движению). Другими словами, препятствие для робота должно быть представлено в виде простой трехмерной фигуры с низким разрешением. Это делается путем вычисления эквивалентов углов раскрытия, на разных расстояниях сканирования, чтобы поддерживать одинаковое разрешение используемой изображения СТЗ.

Авторы в [18] рекомендуют три различных угла 14.5636°, 5.5455°, 1.9091°. Они представляют три типа разрешения, в виде лингвистических переменных: «Low», «Medium» и «High».

Поле зрения СТЗ может быть представлено в виде дуги. Разницу между горизонтальными шагами мы будем называть «Угол раскрытия», а радиус дуги – «Расстояние сканирования» (расстояние до обнаруженного объекта).

В соответствии с этими допущениями будут рассчитаны углы раскрытия, необходимые для достижения определенного разрешения (количества точек на дуге) для разных расстояний сканирования. Диапазон расстояний сканирования разделяется на три сектора: «Эффективный», когда роботу не нужно снижать свою скорость, чтобы избежать столкновения; «Оптимальный» реакция зависит от маневра, который необходимо выполнить; «Критический» робот должен замедляться или даже останавливаться.

Как видно, средний угол для «Critical» диапазона в конце расстояния даст низкое разрешение, которого недостаточно для обнаружения критических препятствий. В этом случае необходимо увеличить разрешение. Поэтому берется предельное значение угла для данного диапазона. Набор углов становится следующим: 5.209°, 2.474°, 1.247°.

С использованием полученных данных может быть выполнен набор правил для контроля скорости роботов и стабилизации разрешения во время движения (табл. 1).

Табл. 1. Правила разрешения и контроля скорости  
Tab. 1. Rules for resolution and speed control

Расстояние сканирования (SD) (м)	Тип радиуса (лингвистическая переменная)	Углы раскрытия (Град.)	Разрешение (лингвистическая переменная)
$SD \leq 1$	Critical	5.209	Low
$1 < SD \leq 3$	Optimal	2.474	Medium
$3 < SD \leq 5$	Effective	1.247	High

Использование представленных правил изменение углов раскрытия поможет сохранить условно равный уровень детализации препятствий в памяти одного робота. Кроме того, этот процесс дискретизации позволяет осуществлять обмен данными внутри группы для обновления общей базы знаний чаще, чем с необработанными данными из СТЗ. На этом этапе возникает необходимость формирования сети обмена данными для группы.

3. Динамические сети передачи данных

В статье будут рассмотрены две модели передачи данных: обмен информацией с централизованным управлением (рис. 3а) и стратегия централизованного иерархического управления (рис. 3б).

3.1 Формирование сети для роя роботов

Рассматривая общий случай роя, можно предложить метод формирования сети, основанный на создании связующего дерева. Алгоритм состоит из семи этапов и включает использование классических подходов:

- 1. построить полносвязную топологию сети;
- 2. используя алгоритм Крускала для построения минимального остова дерева;

- 3. в полученном дереве используя алгоритм Флойда-Уоршелла, чтобы получить список всех возможных маршрутов в сети;
- 4. рассчитать среднюю длину маршрута для каждого узла;
- 5. выбрать узел с наименьшей средней длиной установить его как узел высокого уровня;
- 6. узлы с односторонним подключением устанавливаются как узлы низкого уровня;
- 7. другие узлы конфигурируются как узлы среднего уровня;

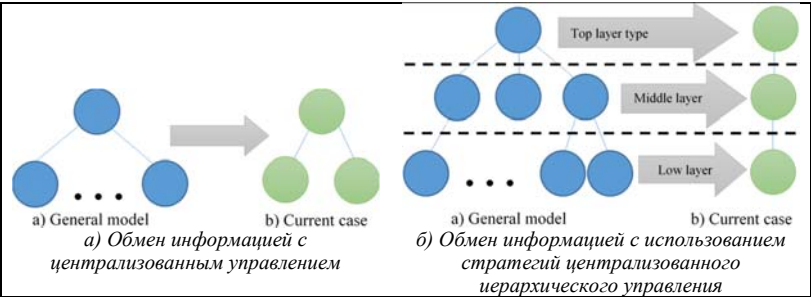


Рис. 3. Модели обмена информацией с централизованным и централизованным иерархическим решением для общего случая и группы из трех роботов

Fig. 3. Models of information exchange with a centralized and centralized hierarchical solution for the general case and a group of three robots

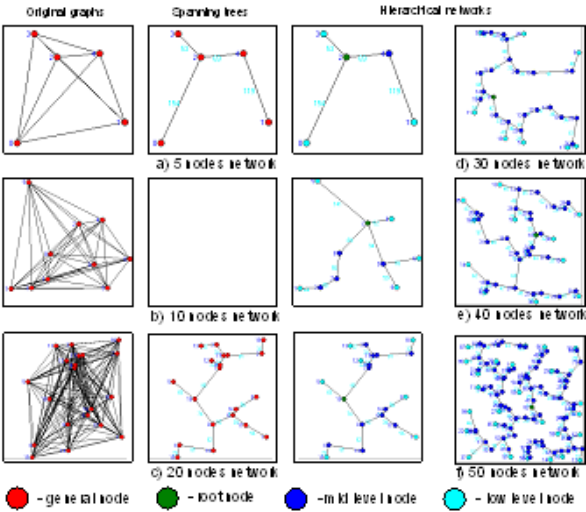


Рис. 4. Рассчитанные сети  
Fig. 4. Calculated networks

Применяя этот метод, можно автоматически получить оба типа сетей (зависит от размещения роботов, их количества и качества сигнала сети). В частных случаях (рис. 4) в расчетах рассматривается открытое пространство без препятствий, поэтому использовались расстояния между узлами. В более сложных сценариях расстояния должны быть заменены уровнями сигнала беспроводной сети.

### 3.2 Метод формирования сети передачи данных на основе смены лидера

В соответствии со сложностью алгоритмов Крускала и Флойда-Варшалла в группе с небольшим количеством роботов более рационально использовать методологию распределения ролей. Именно поэтому будет рассмотрен метод распределения ролей, основанный на задаче выбора лидера.

Под термином «Лидер» мы будем понимать центральный узел обмена данными (робот на короткий срок станет точкой для хранения, слияния и оценки данных). Для выбора лидера роботы будут использовать процесс голосования.

Каждый робот может быть описан как набор параметров

$$R = (I, L, E, N), \quad (6)$$

где  $I$  – идентификатор робота,  $L$  – идентификатор агента для голосования,  $E$  – оценка лидера  $L$  (количество голосов, которое необходимо отдать за лидера),  $N$  – список соединений, доступных для робота (его соседей).

Процесс голосования на начальном этапе проходит следующим образом: каждый робот оценивает своих соседей на роль лидера в соответствии с набором ранее определенных его характеристик; каждая из этих характеристик имеет свой вес; с помощью функции членства робот выбирает соседа с наибольшим значением.

Для значения голоса будет реализована лингвистическая переменная  $e$  = «оценка робота». Его значение основано на шкале  $M = \{\text{“very low”}, \text{“low”}, \text{“medium”}, \text{“high”}, \text{“very high”}\}$  или может иметь цифровой эквивалент  $M = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ . После процесса голосования будет создано много альтернатив для  $E$ , поэтому он будет иметь следующую форму:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}, \quad (7)$$

где  $e_i$  – альтернативный «кандидат» ( $i = 1..n$ ) и  $n$  это количество видимых соседей.

Оценка  $i$ -го соседа использует следующую формулу:

$$e_i = \sum_{j=1}^k w_j c_{ij} \quad (8)$$

Робот оценивает всех своих видимых соседей по набору характеристик:

$$C_i = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{ik}\}, \quad (9)$$

где  $c_j$  – характерное значение  $i$ -го «кандидата» при  $j = 1..k$ .

Каждая из характеристик имеет свой вес:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}, \quad (10)$$

где  $w_j$  – вес  $j$ -той характеристики,  $\sum w_i = 1$ .

Для определения значения лингвистической переменной мы используем три типа функций принадлежности, представленных на рис. 5.

Для получения результатов мы рассмотрим реализацию метода смены лидера в сети централизованного иерархического управления с пятью узлами (роботами). Первоначально роботизированная группа работает на основе централизованной модели управления. На рис. 6 представлено общее количество запросов на обработку и количество запросов, которые были обработаны (показывает сумму от всех доступных роботов). Потеря данных и дубликаты запросов объясняют разницу между сериями графиков.

Потеря данных в таких задачах вызывает дополнительную нагрузку на модули планирования пути (неизвестные участки местности вызывают дополнительные пересчеты маршрута), что

также увеличивает время, необходимое для решения основных задач (картирование местности, поиск объектов и т.д.). В соответствии с этим должны быть реализованы структурные изменения в сети передачи данных.

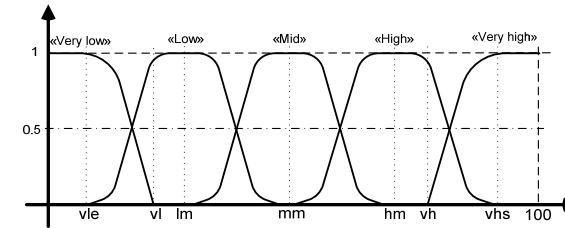


Рис. 5. Функции принадлежности  
Fig. 5. Membership Functions

Внедрение системы смены лидеров позволяет роботам, потерявшим связь с центральным узлом, отправлять полученные данные с помощью соседей, компенсируя этим все потери (рис. 7).

На рис. 8 сравниваются обработанные запросы до и после использования системы смены лидеров. Представленные результаты нашего подхода помогают увидеть, что для каждого отдельного робота в группе общие данные (знания) становятся доступными более часто.

Рассмотрим влияние такого обмена данными и формирования общей базы знаний на группу роботов в трудно проходимой местности.

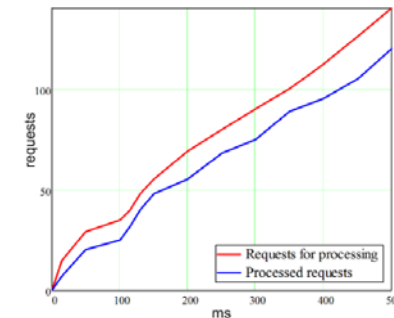


Рис. 6. Общий объем отправленных и обработанных запросов  
Fig. 6. Total amount of sent and processed requests



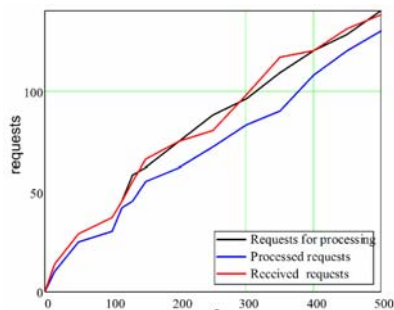


Рис. 7. Общий объем отправленных, полученных и обработанных запросов с потерей сигнала с использованием централизованного иерархического управления

Fig. 7. Total amount of sent, received and processed requests with signal loss using centralized hierarchical control

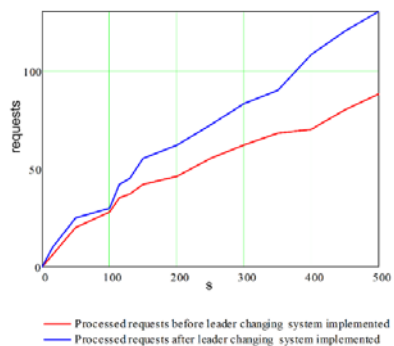


Рис. 8. Сравнение количества обработанных запросов до и после внедрения смены лидера

Fig. 8. Comparison of the number of processed requests before and after introducing a change of leader

#### 4. Планирование маршрутов движения

Для формирования плавной траектории используются алгоритм А\* и метод Безье на основе полигона из четырех точек ([18], [19], [20]). После каждого нового предупреждения СТЗ (обнаружение препятствий) текущий маршрут просчитывается заново.

Вышеупомянутый СТЗ представляет окружение в виде облака точек. Следовательно, для планирования пути можно разделить рельеф местности на небольшие участки (ячейки), чтобы уменьшить количество узлов, необходимых для более быстрого расчета бездействия (рис. 9).

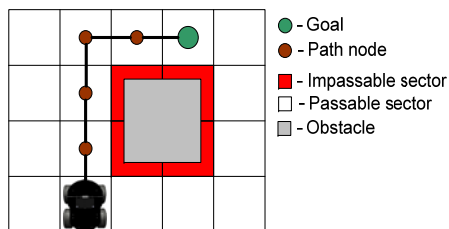


Рис. 9. Дискретизация окружающего пространства

Fig. 9. Discretization of the surrounding space

Экспериментальные результаты включают моделирование трех сцен (рис. 10). Каждая из них рассматривает группу из трех роботов ( $n = 3$ ) с возможностью коммуникации и СТЗ. В экспериментах рассматривается следующий сценарий: для группы из трех роботов задана неизвестная местность, каждый из роботов имеет одинаковую общую цель для достижения и одну дополнительную (индивидуальную); роботы начинают двигаться к своим индивидуальным целям, после достижения роботы продолжают движение к общей цели; когда все роботы достигают общей цели, сценарий останавливается.

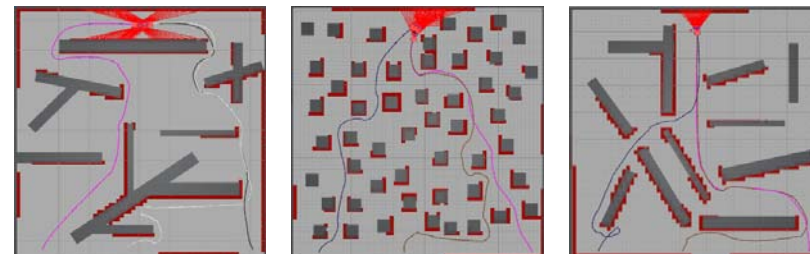


Рис. 10. Примеры использованных в моделировании сцен

Fig. 10. Examples of scenes used in modeling

Полученные результаты показаны на рис. 11–13. На рисунках используется следующая маркировки WxGRx или WxSRx, здесь Wx – номеру сцены, G - для группового движения (с обменом знаниями), если S – движение без обмена данными, Rx – номер робота.

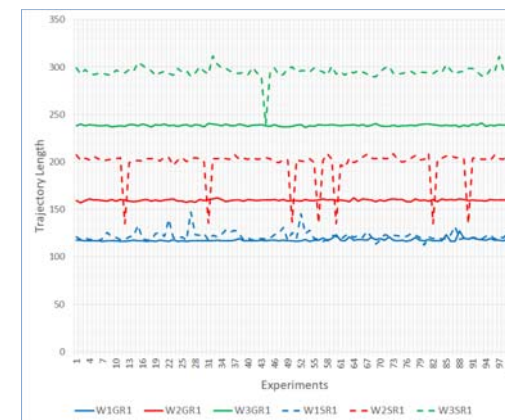


Fig. 11. Trajectories length for scene# 1  
Рис. 11. Длина траекторий для сцены 1



Fig. 12. Trajectories length for scene# 2  
Рис. 12. Длина траекторий для сцены 2



Fig. 13. Trajectories length for scene# 3  
Рис. 13. Длина траекторий для сцены 3

В табл. 3 приведены результаты усредненных расстояний для каждого робота в случае обмена данными по сравнению с движением без обмена. В результате показано, что реализация планирования пути с помощью общей базы знаний может сократить маршрут роботов до 21,3%.

Табл. 3. Сравнение результатов планирования движения  
Table 3. Motion planning comparing results

	Scene #1	Scene #2	Scene #3
Robot 1	0.035	0.213	0.19
Robot 2	0.002	0.0042	0.012
Robot 3	0.13	0.0025	0.018
Total	0.066	0.098	0.1

## 5. Заключение

Эта статья предлагает оригинальное решение, которое улучшает групповую маршрутизацию в неизвестной местности и взаимодействие между роботами в группе. Предложены модели формирования динамической сети передачи данных для роботизированного роя показывает улучшения в процессе обмена данными.

По результатам моделирования внедрение системы смены лидеров, основанной на процессе голосования и общей базе знаний, повышается эффективность планирования пути. Реализованный подход создает непрерывные траектории во время движения. Метод стабилизации разрешения дает дополнительную возможность настройки детализации в соответствии со спецификой среды или текущей задачей. Использование нечеткой логики в различных подзадачах делает поведение роботов более изменчивым и обеспечивает стабильное функционирование группы при меньших энергозатратах. Согласно полученным результатам, длина отдельных траекторий улучшилась до 21,3%.

## Список литературы/References

- [1] B. Eskridge, E. Valle, I. Schlupp. Emergence of Leadership within a Homogeneous Group. PLoS ONE, vol. 10, № 7, 2015
- [2] V. Pshikhovop, M. Medvedev, A. Kolesnikov, R. Fedorenko, G. Boris. Decentralized Control of a Group of Homogeneous Vehicles in Obstructed Environment. Journal of Control Science and Engineering, 2016, 8 p.
- [3] O. Sergiyenko, M. Ivanov, V. Tyrsa, M. Rivas-López, D. Hernández-Balbuena, W. Flores-Fuentes, J. C. Rodríguez-Quinonez, J. I. Nieto-Hipólito, W. Hernandez, A. Tchernykh. Data transferring model determination in robotic group. Robotics and Autonomous Systems, vol. 83, 2016, pp. 251-260.
- [4] O.Yu. Sergiyenko, M.V. Ivanov, V.M. Kartashov, V.V. Tyrsa, D. Hernández-Balbuena and J.I. Nieto-Hipólito. Transferring model in robotic group. In Proc. of the 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2016, pp. 946-952.
- [5] David J. Grymin, Charles B. Neas and Mazen Farhood. A hierarchical approach for primitive-based motion planning and control of autonomous vehicles. Robotics and Autonomous Systems, vol. 62, no. 2, 2014, pp. 214-228.
- [6] Bence Kovács, Géza Szayer, Ferenc Tajti, Mauricio Burdelis, Péter Korondi. A novel potential field method for path planning of mobile robots by adapting animal motion attributes. Robotics and Autonomous Systems, vol. 82, 2016, pp. 24-34.
- [7] V.A. Bobkov, Y.I. Ron'shin, A.P. Kudryashov, V.Y. Mashentsev. 3D SLAM from stereomages. Programming and Computer Software, vol. 40, № 4, 2014, pp. 159-165.
- [8] V.A. Bobkov, A.P. Kudryashov, S.V. Mel'man. On the Recovery of Motion of Dynamic Objects from Stereo Images. Programming and Computer Software, vol. 44, № 3, 2018, pp. 148-158.
- [9] N. Kamaev, V.A. Sukhenko, D.A. Karmanov. Constructing and visualizing three-dimensional sea bottom models to test AUV machine vision systems. Programming and Computer Software, vol. 43, № 3, 2017, pp. 184-195.
- [10] O. Vilão, D.H. Perico, I.J. Silva, T.P.D. Homem, F. Tonidandel, R.A.C. Bianchi. A Single Camera Vision System for a Humanoid Robot. In Proc. of the Joint Conference on Robotics: SBR-LARS Robotics Symposium and Robocontrol, vol. 1, 2014, pp. 181-186.
- [11] N. Gryaznov and A. Lopota. Computer Vision for Mobile On-Ground Robotics. Procedia Engineering, vol. 100, 2015, pp. 1376-1380.
- [12] M.C. Achtelik и D. Scaramuzza. Vision-Controlled Micro Flying Robots: From System Design to Autonomous Navigation and Mapping in GPS-Denied Environments. IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 21, № 3, 2014, pp. 26-40.
- [13] N.F. Pashchenko, K.S. Zipa, A.V. Ignatenko. An algorithm for the visualization of stereo images simultaneously captured with different exposures. Programming and Computer Software, vol. 43, № 4, 2017, pp. 250-257.
- [14] G. Alenyà Ribas, S. Foix Salmerón, C. Torras Genís. ToF cameras for active vision in robotics. Sensors and Actuators A: Physical, vol. 218, 2014, pp. 10-22.

- [15] A. Mikhaylichenko и A.B. Kleshchenkov. Approach to Non-Contact Measurement of Geometric Parameters of Large-Sized Objects. *Programming and Computer Software*, vol. 44, № 4, 2018, pp. 271-277.
- [16] L.C. Basaca-Preciado, O.Y. Sergiyenko, J.C. Rodríguez-Quinonez, X. García, V.V. Tyrsa, M. Rivas-Lopez, D. Hernandez-Balbuena, P. Mercorelli, M. Podrygalo, A. Gurko, I. Tabakova, O. Starostenko. Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot. *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 54, 2014, pp. 159-169.
- [17] O. Sergiyenko, W. Hernandez, V. Tyrsa, L.D. Cruz, O. Starostenko, M. Pena-Cabrera. Remote Sensor for Spatial Measurements by Using Optical Scanning. *Sensors (Basel)*, vol. 9, № 7, 2009, pp. 5477-5492.
- [18] P.E. Bezier. How Renault Uses Numerical Control for Car Body Design and Tooling. *Society of Automotive Engineers*, Detroit, MI, USA, 1968.
- [19] L. Han, H. Yashiro, T. Nejad, Q. Do, S. Mita. Bezier curve based path planning for autonomous vehicle in urban environment. In *Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2010, pp. 1036-1042.
- [20] Kuniaki Kawabata, Liang Ma, Jianru Xue, Chengwei Zhu, Nanning Zheng. A path generation for automated vehicle based on Bezier curve and via-points, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 74, № A, 2015, pp. 243-252.
- [21] J. Hocking, *Unity in Action: Multiplatform Game Development in C# with Unity 5*. Shelter Island, New York, Manning Publications, 2015, 352 p.
- [22] X. García, O. Sergiyenko, V. Tyrsa, M. Rivas-Lopez, D. Hernandez-Balbuena, J. C. Rodríguez-Quinonez, L. C. Basaca-Preciado, P. Mercorelli. Optimization of 3D laser scanning speed by use of combined variable step. *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 54, 2014, pp. 141-151.
- [23] R. Vincent, B. Morisset, A. Agno, M. Eriksen, C. Ortiz. Centibots: Large-scale autonomous robotic search and rescue experiment. In *Proc. of the 2nd International Joint Topical Meeting on Emergency Preparedness & Response and Robotics & Remote Systems*, 2008.
- [24] Abduladhem A. Ali, Abdulmuttalib T. Rashid, Mattia Frasca, Luigi Fortuna. An algorithm for multi-robot collision-free navigation based on shortest distance. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 75, 2016, pp. 119-128.
- [25] P. Muñoz, R.-M. D. María, D.F. Barrero. Unified framework for path-planning and task-planning for autonomous robots. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 82, 2016, pp. 1-14.
- [26] V. Trianni, E. Tuci, C. Ampatzis, M. Dorigo. Evolutionary swarm robotics: A theoretical and methodological itinerary from individual neuro-controllers to collective behaviors. In *The horizons of evolutionary robotics*, Cambridge [MA], MIT Press, 2014, pp. 153–178.

## Информация об авторах / Information about authors

Михаил Валерьевич ИВАНОВ получил степень магистра в 2012 г. в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Харьков, Украина. В настоящее время работает исследователем в Инженерном институте Автономного университета Нижней Калифорнии, Мексика. В число научных интересов входят робототехника, лазерные системы технического зрения, навигационные системы, модели передачи данных, динамически образуемые сети.

Mikhail Valerievitch IVANOV received the M.S. degree in Kharkov National Aerospace University «KhAI», Kharkiv, Ukraine, in 2012. Currently he is a researcher in the Institute of Engineering of the Autonomous University of Baja California, Mexico. His research interests include robotics, laser technical vision systems, navigation systems, data transferring models, dynamical network forming.

Олег Юрьевич СЕРГИЕНКО защитил кандидатскую диссертацию в 1997 г. в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт», Украина. В настоящее время возглавляет отдел прикладной физики в Инженерном институте Автономного университета Нижней Калифорнии, Мексика. Научные интересы включают автоматизированную метрологию, интеллектуальные сенсоры, управляющие системы, навигацию роботов и трехмерные лазерные сканеры.

Oleg Yurievitch SERGIYENKO received the Ph.D. degree in Kharkiv National Technical University in 1997. He is currently Head of Applied Physics Department of Engineering Institute of Baja California Autonomous University, Mexico. His current research interests include automated metrology & smart sensors, control systems, robot navigation, измерение трехмерных координат.

Вера Валентиновна ТЫРСА защитила кандидатскую диссертацию в 1996 г. в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт», Украина. В настоящее время работает на Инженерном факультете Автономного университета Нижней Калифорнии, Мексика. Научные интересы: автоматизированная метрология, системы машинного зрения, быстрые электрические измерения, управляющие системы, навигация роботов и трехмерные лазерные сканеры.

Vera Valentinovna TYRSA received the Ph.D. degree in Kharkiv National Polytechnic University in 1996. Currently she is working at the Engineering Faculty of the Baja California Autonomous University, Mexico. Her current research interests include automated metrology, machine vision systems, fast electrical measurements, control systems, robot navigation, and 3D laser scanners.

Ларс ЛИНДНЕР получил степень магистра в Дрезденском техническом университете, Германия в 2009 г., а степень доктора философии – в Инженерном институте Автономного университета Нижней Калифорнии, Мексика в 2017 г. С 2009 г. преподает на Инженерном факультете Автономного университета Нижней Калифорнии. Основные научные интересы – управляющие системы и компьютерная оптика.

Lars LINDNER received his master's degree from the Technical University of Dresden in January 2009, and degree of PhD from the Institute of Engineering of the Baja California Autonomous University, Mexico. He currently teaches at the Faculty of Engineering of the Autonomous University of Baja California Mexicali campus. Main research interests include control systems and computer optics.

Хулио Сезар РОДРИГЕС-КИНЬОНЕС получил степень PhD в Автономном университете Нижней Калифорнии, Мексика в 2013 г. В настоящее время он работает профессором на Инженерном факультете Автономного университета Нижней Калифорнии. В число его текущих научных интересов входят автоматизированная метрология, системы стереозрения, управляющие системы, навигация роботов и трехмерные лазерные сканеры.

Julio Cesar RODRÍGUEZ-QUINONEZ received the Ph.D. degree from Baja California Autonomous University, México, in 2013. He is currently Professor of Electronic Topics with the Engineering Faculty, Autonomous University of Baja California. His current research interests include automated metrology, stereo vision systems, control systems, robot navigation, and 3D laser scanners.

Венди ФЛОРЕС-ФУЭНТЕС получила степень PhD в Автономном университете Нижней Калифорнии, Мексика в 2014 г. В настоящее время она является профессором-исследователем на Инженерном факультете Автономного университета Нижней Калифорнии. Научные интересы: робототехника, машинное зрение, навигация, управляющие системы.

Wendy FLORES-FUENTES received the Ph.D. degree from Autonomous University of Baja California in June 2014. Currently, she is a full-time professor-researcher at Universidad Autónoma de Baja California, at the Faculty of Engineering. Her research interests include robotics, machine vision, navigation, control systems.

Мойзес РИВАС-ЛОПЕС получил степень PhD в Автономном университете Нижней Калифорнии, Мексика в 2010 г. В настоящее время работает в отделе прикладной физики Инженерного института Автономного университета Нижней Калифорнии.

Moises RIVAS-LOPEZ received the Ph.D. degree from Autonomous University of Baja California in 2010. He is currently a Full Researcher with the Applied Physics Department, Engineering Institute, Baja California Autonomous University, Mexico.

Даниэль ЭРНАНДЕС-БАЛЬБУЭНА получил степень PhD в Автономном университете Нижней Калифорнии, Мексика в 2007 г. В настоящее время он является профессором Инженерного факультета Автономного университета Нижней Калифорнии. Его научные интересы связаны с метрологией времени и частоты и радиочастотными измерениями.

Daniel HERNÁNDEZ-BALBUENA received the Ph.D. degree from Autonomous University of Baja California in 2007. He is currently a Full Professor at the Engineering Faculty of Baja California Autonomous University, Mexico. His research interests are in the areas of time and frequency metrology and RF measurements.

Хуан Иван НЬЕТО ИПОЛИТО получил степень PhD в Политехническом университете Каталонии, Испания в 2005 г. В настоящее время он является профессором Автономного университета Нижней Калифорнии. Его научные интересы затрагивают компьютерную инженерию, компьютерные сети, мобильные вычисления.

Juan Iván NIETO HIPÓLITO received the Ph.D degree from Polytechnic University of Catalonia, Spain. He is currently a Full Professor of Baja California Autonomous University, Mexico. His research interests are in the areas computer engineering, computer networks, mobile computing.