

УДК 681.51

ДВИЖЕНИЕ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СТРОЮ ТИПА “КОНВОЙ” — ТЕОРИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

С.Л. Зенкевич (*zenkev@bmstu.ru*)Хуа Чжу (*zhuhua1302@gmail.com*)Цзяньвень Хо (*huojianwen2008@hotmail.com*)

Научно-учебный центр «робототехника» МГТУ им. Н.Э.

Баумана, Москва

Аннотация. В статье решен ряд задач, связанных с движением группы мобильных роботов в строю типа “конвой”. Описаны способ локализации ведомых роботов и метод управления ими. Указано разумное количество роботов в таком типе движения. Проведено моделирование движения группы роботов в среде Stage (+ROS). Проведен эксперимент с участием реальных мобильных роботов. Разработана распределенная система управления ведущими и ведомыми роботами в среде ROS. Приведены результаты экспериментов, в том числе, построенная карта среды ведущим роботом и траектории роботов в группе.

Ключевые слова: группа мобильных роботов, конвой, управление, локализация, эксперимент, ROS.

Введение

Часто возникает ситуации, когда один мобильный робот не в состоянии выполнить задачу и возникает проблема согласованного управления группой роботов. Одной из важных задач такого класса является согласованное движение группы роботов, образующих строй типа «конвой».

Приложения, связанные с такого типа движением, состоят, например, в смене дислокации группы роботов, в перевозке большого количества грузов, которые каждый робот в отдельности не в состоянии перевезти. В этой ситуации ведущий робот должен быть оснащен богатой сенсорной системой, позволяющей планировать траекторию в непредсказуемой обстановке, например, сканирующими лазерными дальномерами, системами спутниковой навигации, стереозрением. Ведомые роботы в этом случае должны только следить за положением своего ведущего робота.

Осуществлению движения группы роботов в строю типа “конвой” в настоящее время уделяется большое внимание [Das et al., 2002] [Chiem et al., 2004] [Thuilot et al., 2004] [Yazbeck et al., 2013] [Yazbeck et al., 2014] [Mark, 2014]. В таблице 1 представлены сравнительные характеристики существующих методов.

Таблица 1

Сравнение существующих методов

Метод	Принцип работы или цель управления	Преимущество	Недостаток
1	Решение задачи следования или стабилизация	Простота реализации	Возможность столкновения с препятствиями; низкая точность
2	Аппроксимация траектории кривой Безье	Простота реализации	Зависимость точности следования от точности построения кривой Безье
3	Следование к ближайшей точке	Высокая точность	Возможность возникновения колебаний
4	Максимальная степень совпадения траектории роботов	Высокая точность	Высокая вычислительная сложность

1. Модель роботов

Пусть мобильные роботы движутся в плоскости OXY строем типа “конвой” (рис. 1). Роботы пронумерованы от R_0 – ведущего робота до R_N – замыкающего конвой. Этот тип движения требует, чтобы каждый i -ый робот, $i = 1, \dots, N$, кроме ведущего, двигался по траектории, вдоль которой движется $i - 1$ -ый робот, с некоторым временным запаздыванием T .

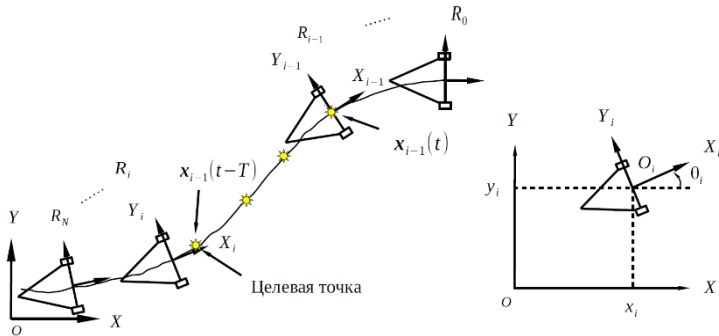


Рис. 1. Строй типа «конвой»

Ведущий робот R_0 либо управляется оператором, либо является полностью автономным. В том случае, когда ведущий робот автономен, он оснащен спутниковой системой навигации или сканирующим лазерным дальномером. Остальные роботы имеют систему одометрии и менее мощные лазерные сканеры. Кроме того, все роботы являются узлами беспроводной локальной сети, следовательно, могут обмениваться информацией друг с другом.

Математическая модель роботов имеет вид [Зенкевич и др., 2006]:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix} = J(\theta_i) \begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

где x_i y_i θ_i – положение и ориентация робота, ω_i – угловая скорость робота, а v_i – линейная скорость начала связанной системы координат O_i (далее линейная скорость робота).

1.1 Управление роботами

Стратегия управления для каждого ведомого робота состоит в выполнении соотношения:

$$\mathbf{x}_i(t) = \mathbf{x}_{i-1}(t - T) \quad (2)$$

где, $\mathbf{x}_i(t)$ представляет собой положение робота R_i в текущий момент, $\mathbf{x}_{i-1}(t - T)$ — положение робота R_{i-1} в момент времени $t - T$.

Заметим, что такая стратегия предлагалась одним из авторов в 1973-1976 гг. в работах, связанных с исследованием управления движением самолётов в строю типа конвой. Преимущество такого метода состоит в том, во-первых, расстояние между роботами является переменной, т.е. чем быстрее скорости движения конвоя, тем больше расстояние между роботами, а параметр управления T является постоянным; во-вторых, при проходе через

узкую область ведомый робот успешно обходит препятствие, который уже обходит его ведущий робот.

Для реализации стратегии необходимо:

1. Запоминание фрагмента траектории ведущего робота

В процессе движения каждый ведомый робот R_i имеет в качестве программной траектории сдвинутую во времени траекторию ведущего робота R_{i-1} , динамически меняющуюся во времени. Характер этой траектории, учитывающий дискретность измерений, представлен на рис. 2, где N — число точек, T/N — скважность измерений.

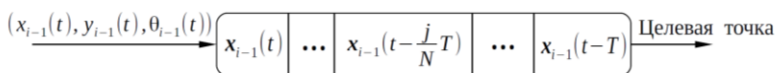


Рис. 2. Процесс нахождения целевых точек для робота R_i

2. Формирование закона управления движением робота вдоль траектории

Закон управления состоит в способе движения робота вдоль динамически меняющейся траектории, заданной набором точек (рис. 2), и представляющей очередь.

Будем считать, что время обновления данных T/N мало по сравнению с инерционными свойствами робота. Это означает, что на вход системы управления поступает непрерывная последовательность в виде программной траектории $(x^*(t), y^*(t), \theta^*(t))$. Тогда из уравнения (1) следует соотношение:

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = J^+(\theta) \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad (3)$$

где, $J^+(\theta)$ — псевдообратная матрица, $J^+(\theta) = (J^T J)^{-1} J^T$, а линейная скорость равна проекции вектора (\dot{x}, \dot{y}) на направление движения робота.

Принимая:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (x^* - x), \\ \dot{y} &= \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (y^* - y), \\ \dot{\theta} &= \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (\theta^* - \theta), \end{aligned}$$

Окончательно имеем закон управления в виде:

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1(x^* - x) \cos \theta + k_1(y^* - y) \sin \theta \\ k_2(\theta^* - \theta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

где k_1, k_2 — параметры.

На рис. 3 представлена схема, иллюстрирующая формирование управляющих сигналов, обеспечивающих движение робота вдоль произвольной траектории.

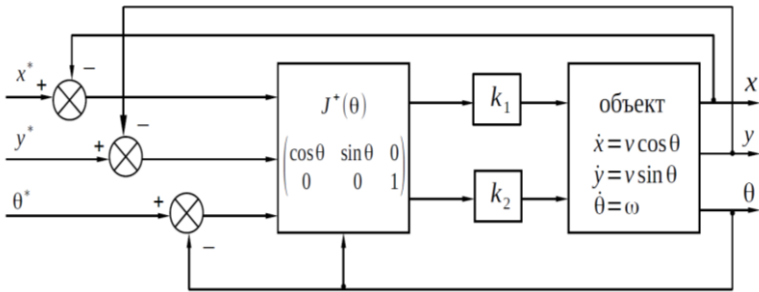


Рис. 3. Структурная схема управления роботом

1.2. Локализация ведомых роботов

Предложенный способ локализации роботов состоит в том, что каждый робот определяет собственное положение, используя взаимное положение роботов, при которых необходимо знание глобального положения ведущего робота. Для осуществления такого способа требуется выполнение трёх условий:

- знание глобального положения ведущего робота;
- знание положения ведущего робота относительно ведомого;
- возможность передавать информацию о положении ведомому роботу

Используя эту информацию, каждый робот определяет собственное положение в абсолютной системе координат. В процессе решения задачи управления движением каждого робота строя возникает проблема определения собственного положения каждого робота R_{i-1} относительно R_i . В лабораторных условиях эта проблема может быть решена путем установки систем зрения, определяющих декартовы координаты всех членов конвоя, что является невозможным при движении роботов в открытом пространстве.

В статье [Зенкевич и др., 2017] используется известный расширенный фильтр Калмана для обработки измерений, проводимых лазерным сканером. На рис. 4 показана зависимость погрешности локализации ведомых роботов в строю типа “конвой” от номера робота R_i ($i = 1, 2, \dots, 10$).

Из результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

- Из-за неизбежных неточностей измерений, полученных от лазерного сканера, погрешности накапливаются, что естественно.

2. Как видно из рис. 4, погрешности локализации ведомых роботов с 6 по 10 увеличились с течением времени, в то же время, погрешность локализации роботов с 1 по 4 стали почти постоянными с течением времени.

3. С точки зрения локализации с помощью используемого метода, наилучшим количеством роботов в строю типа “конвой” является 5, т.е., один ведущий робот и четыре ведомых роботов.

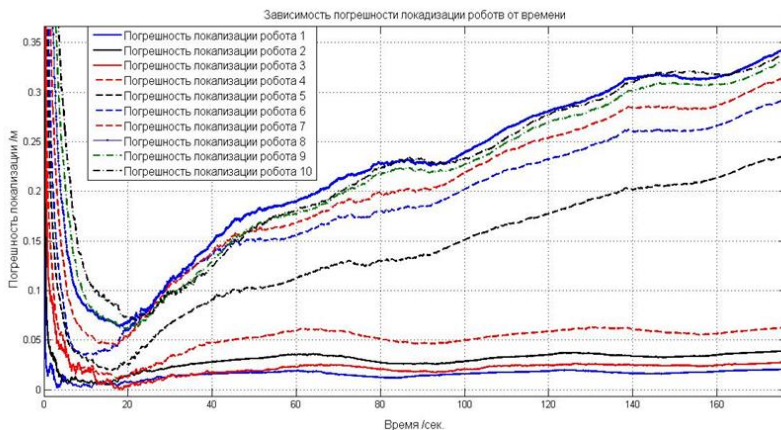


Рис. 4. Погрешности локализации ведомых роботов

2. Практическая часть

2.1. Моделирование движения роботов в группе

В настоящее время существуют различные программные среды для моделирования движения группы роботов, в том числе, ARGoS (Autonomous Robots Go Swarming), Gazebo/Stage. В настоящей работе для моделирования двумерного движения роботов используется эмулятор Stage_gos в среде ROS. Моделируется движение “конвой” из одиннадцати роботов. Ведущий робот R_0 совершает движение с постоянной линейной скоростью $v_i = 5 \text{ m/s}$ и угловой скоростью $\omega_i = 0.1 \text{ rad/s}$ при $t < 62.8 \text{ s}$, $\omega_i = -0.1 \text{ rad/s}$ при $t > 62.8 \text{ s}$, т.е. движется по траектории типа «восьмерка». Скорости остальных роботов вычисляются в соответствии с (5):

$$\begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1(x_{i-1}(t-T) - x_i(t))\cos\theta_i(t) + k_1(y_{i-1}(t-T) - y_i(t))\sin\theta_i(t) \\ k_2(\theta_{i-1}(t-T) - \theta_i(t)) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Как видно из результатов моделирования, траектории роботов в группе почти совпадают, а также движение последнего робота не имеет колебаний (видно из его скорости).

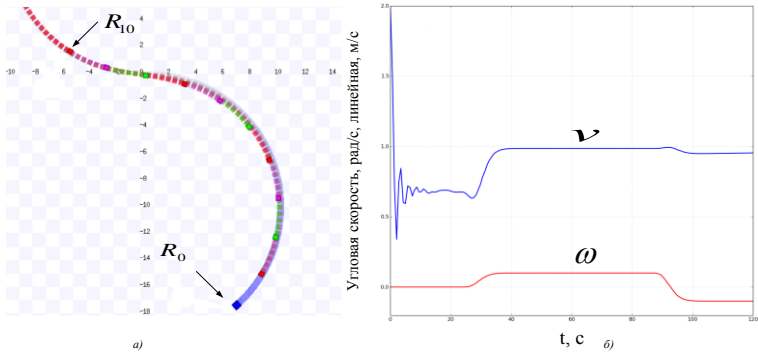
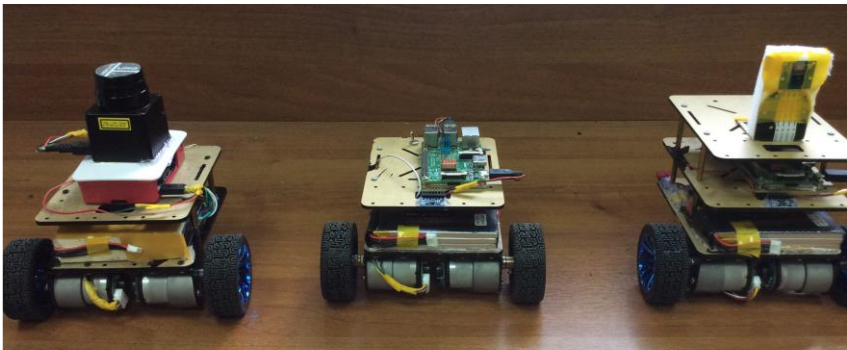


Рис. 4. Результаты моделирования, а) Траектории роботов б) Скорость последнего робота R_{10}

2.2. Экспериментальное исследование

Для дальнейшей проверки работоспособности предложенного алгоритма, проведен эксперимент для осуществления этого типа движения с участием реальных мобильных роботов, внешний вид которых представлен на рис. 5, их структурная схема показана на рис. 6.



а) Ведущий робот

б) Ведомый робот

в) Последний ведомый робот

Рис. 5. Внешний вид роботов

В состав робота входят следующие компоненты: 1). Механическая платформа, имеющая два независимых ведущих колеса и одно пассивное.

2). Два электродвигатель с магнитными энкодерами. 3). Одноплатный компьютер Raspberry Pi 2B (частота: 900MHz, ОЗУ: 1гб). 4). Микроконтроллер Arduino Uno для управления двигателями. 5). Лазерный сканер Hokuuo urg-04lx-urg01 (диапазон измерения: 5.6 m, скорость сканирования: 100мс/скан, только у ведущего робота). 6). Raspberry Pi камера (только у последнего ведомого робота).

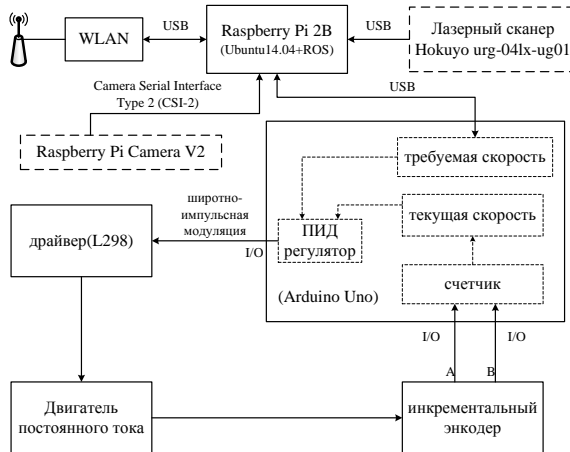


Рис. 6. Структурная схема робота

Цель эксперимента состоит в том, чтобы в условиях отсутствия априорных знаний о внешней среде перевести группу мобильных роботов из начального положения в положение, заданное оператором. Для реализации такой системы в масштабе реального времени, роботы оснащены операционной системой Ubuntu 14.04, совместно с ROS (Robot Operating System). В среде ROS построена распределённая система управления роботами (рис. 7.).

Процесс `/hector_mapping` используется для построения двухмерной карты окружающей среды и определения собственного положения в ней с помощью информации лазерного сканера, обслуживаемого процессом `/hokuuo_node`. Процесс `/move_base` служит для динамического формирования роботом отслеживаемой траектории, а также формирования команды управления. Процесс `/follower` ведомого робота предназначен для отслеживания им траектории своего ведущего робота. Определение положения ведомого робота в окружающей среде осуществляется процессом `/odometry`. Управление исполнительном механизмом осуществляется процессом `/serial_node`. Процесс `/raspicam_node`, принад-

лежащий последнему ведомому роботу, служит для мониторинга движения роботов оператором с помощью камеры, установленной на роботе. Из-за ограниченной вычислительной мощности бортового компьютера, части задачи ведущего робота выполняются удаленным компьютером.

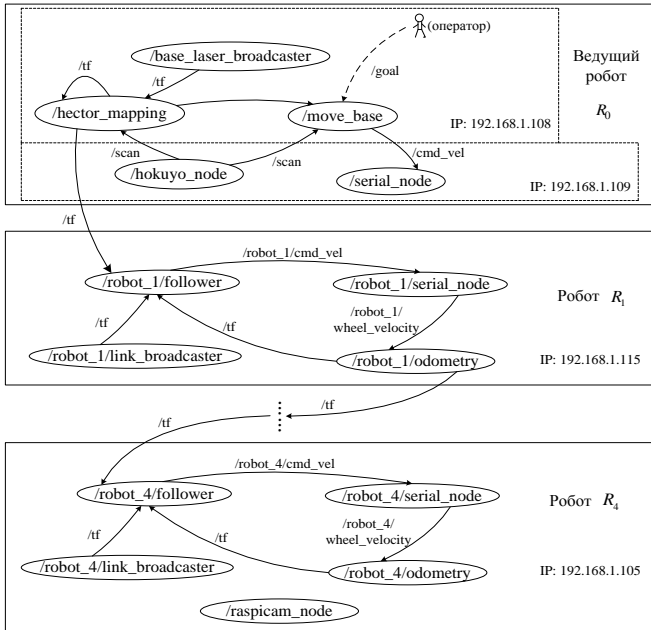


Рис. 7. Распределённая система управления роботами

Были проведены два эксперимента

а) Проверки функционирования в автономном режиме ведущего робота

При заданной оператором последовательности целевых точек А, В, С, D, ведущий робот автономно проходил эти целевые точки, в процессе движения распознавая окружающую среду и планируя траекторию. Реальная траектория робота показана на рис. 8.

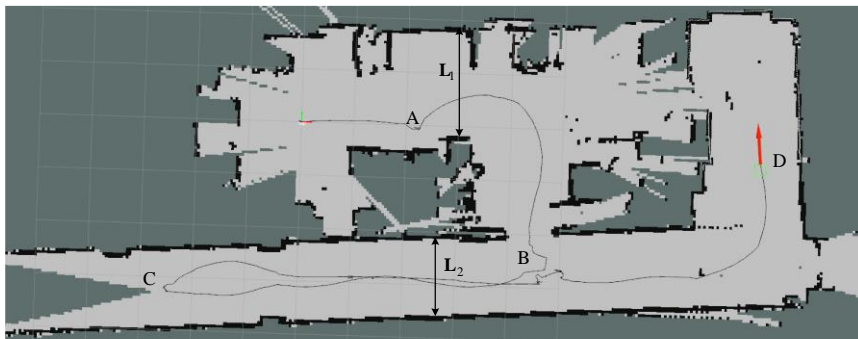


Рис. 8. Траектория ведущего робота в построенной карте

Точности построенной карты может характеризоваться таблицей 2.

Таблица 2

Сравнение реальной дистанции и дистанции на карте

Имя отрезки	Реальная дистанция (m)	Дистанция на карте (m)	Погрешность (m)	%
L_1	2.05	1.98539	0.06461	3.15
L_2	1.5	1.43363	0.06637	4.4

б) Проверки работоспособности закона управления движения группы роботов в строю типа “конвой”

При движении робота в строю линейная скорость ведущего робота ограничена в диапазоне $\left[0.1 \frac{m}{s}, 0.2 \frac{m}{s}\right]$, угловая скорость ограничена в диапазоне $\left[-1.5 \frac{rad}{s}, 2 \frac{rad}{s}\right]$. Безопасное расстояние между роботами установлено 0.15 m. Результаты движения показаны на рис. 9.

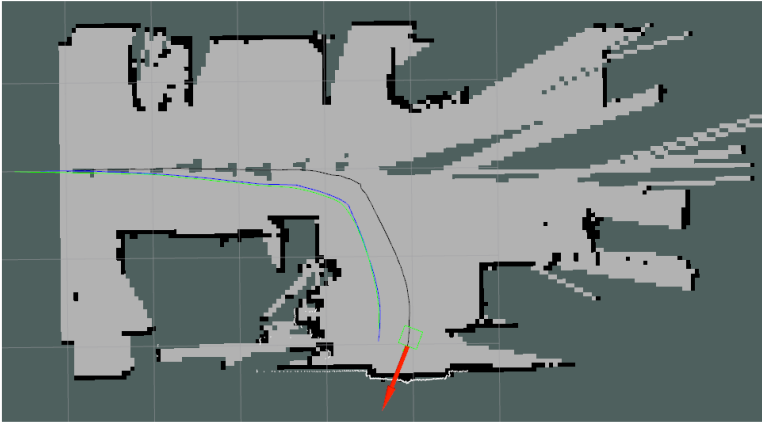


Рис. 9. Траектории роботов R_0 (чёрная), R_1 (синяя) и R_2 (жёлтая)

Заключение

Исследованы движения группы мобильных роботов в строю типа “конвой”. Разработаны закон управления движением ведомых роботов и их способы локализации. Получено разумное количество роботов в таком типе движения по результатам моделирования способы локализации. Доказана работоспособность предложенного метода управления роботами по результатам моделирования и эксперимента.

Отметим, что в данной работе рассматривается только один случай задачи конвоирования, другие случаи задачи конвоирования, например, вход робота в конвой, выход робота из конвоя, объединение конвоев, разделение конвоя и т.д., т.е. изменения топологии строя, рассматриваются в следующей работе авторов «логическое управление группой мобильных роботов с помощью конечного автомата».

Список литературы

- [Das et al., 2002] Das K., Fierro R., Kumar V. Ostrowski J. P., Spletzer J., Taylor C. J. A vision-based formation control framework // IEEE Transactions on Robotics and Automation. — 2002. — Vol. 18, № 5. — P. 813-825.
- [Chiem et al., 2004] Chiem S., Cervera E. Vision-based robot formations with Bezier trajectories // In: Proceedings of the 8th Conference on Intelligent and Autonomous System. — 2004. — P. 191-198.
- [Yazbeck et al., 2013] Yazbeck J., Scheuer A., Charpillat F. Optimized lateral control for a decentralized near-to-near platooning. // INRIA, Tech. Rep. — 2013.

- [**Thuilot et al., 2004**] Thuilot B., Bom J., Marmoiton F., Martinet P. Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic GPS sensor. // In: 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisboan (Portugal). — 2004.
- [**Yazbeck et al., 2014**] Yazbeck J., Scheuer A., Charpillat F. Decentralized Near-to-Near Approach for Vehicle Platooning based on Memorization and Heuristic Search. // IEEE International Conference on Robotics & Automation. — 2014. — P. 631-638
- [**Mark, 2014**] Mark Daniel Ollis. Position estimation and vehicle control in autonomous multi-vehicle convoys. // Patent Application Publication, Pub. №: US 2014/0309836 A1.
- [**Зенкевич и др., 2006**] Зенкевич С. Л., Назарова А. В. Система управления мобильного колесного робота // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. “приборостроение”. 2006. №3. С. 31-51.
- [**Зенкевич и др., 2017**] Зенкевич С. Л., Чжу Хуа Управление движением группы роботов в строю типа “конвой” // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т.18, №1. С. 30-34.
- [**Чжу, 2014**] Чжу Хуа. Система управления коллективом мобильных роботов. // Молодежный научно-технический вестник. 2014. № 12. С. 48.