

**С. Л. Зенкевич**, д-р физ.-мат. наук, проф., mr.zenkev@mail.ru,  
**Хуа Чжу**, аспирант, zhuhua1302@gmail.com,  
 Научно-учебный центр "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана

## Управление движением группы роботов в строю типа "конвой"

*Рассмотрено управление движением группы роботов в строю типа "конвой". Решена задача локализации роботов с использованием относительного положения. Особое внимание уделено получению закона управления движением роботов вдоль фрагмента траектории предыдущего робота. Приведены результаты моделирования предложенного метода.*

**Ключевые слова:** группа роботов, конвой, локализация, временная задержка

### Введение

Часто возникают ситуации, когда один мобильный робот не в состоянии выполнить задачу, в связи с чем возникает проблема согласованного управления группой роботов. Одной из важных задач такого класса является согласованное движение группы роботов, образующих строй типа "конвой" (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Задачи, связанные с такого типа движением, возникают, например, при смене дислокации группы роботов, при 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.

Рассмотрению движения группы роботов в строю типа "конвой" в настоящее время уделяется большое внимание. В таблице представлены сравнительные характеристики существующих методов.

В данной работе обсуждается способ осуществления движения группы роботов в строю типа "конвой", в том числе, определение положения роботов и получение закона управления.

### Сравнение существующих методов

Метод	Принцип работы или цель управления	Преимущество	Недостаток
1	Решение задачи следования или стабилизации [1]	Простота реализации	Возможность столкновения с препятствиями; низкая точность
2	Аппроксимация траектории кривой Безье [2]	Простота реализации	Зависимость точности следования от точности построения кривой Безье
3	Следование к ближайшей точке [3]	Высокая точность	Возможность возникновения колебаний
4	Максимальная степень совпадения траектории роботов [4–6]	Высокая точность	Высокая вычислительная сложность

### Постановка задачи

Пусть мобильные роботы движутся в плоскости  $OXY$  строем типа "конвой" (рис. 2). Роботы пронумерованы от  $R_0$  — ведущего робота до  $R_N$  — замыкающего конвой. Этот тип движения требует, чтобы каждый  $i$ -й робот,  $i = 1, \dots, N$ , кроме ведущего, двигался по траектории, вдоль которой движется  $(i - 1)$ -й робот, с некоторым временным запаздыванием  $T$ .

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. Ставится задача управления движением группы роботов в строю типа "конвой".

### Задачи локализации роботов

Пусть робот  $R_i$  перемещается в плоскости  $OXY$ , имея два симметрично расположенных ведущих колеса

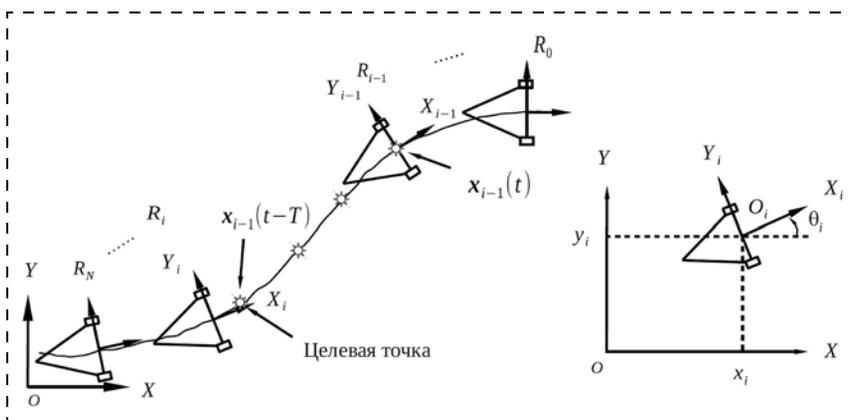


Рис. 2. Постановка задачи

(левое и правое). Свяжем с роботом систему координат, выбрав в качестве начала системы точку, лежащую в центре отрезка, соединяющего центры колес, ось  $X_i$  направим перпендикулярно этому отрезку, а ось  $Y_i$  направим так, чтобы получилась правая система координат (рис. 2). Пусть выполняются следующие условия: отсутствуют продольное и боковое проскальзывания между колесами и плоскостью. В этом предположении вектор линейной скорости направлен вдоль оси  $X_i$ , и кинематические уравнения движения имеют вид [7]

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

где  $x_i, y_i, \theta_i$  — положение и ориентация робота;  $\omega_i$  — угловая скорость робота, а  $v_i$  — линейная скорость начала связанной системы координат  $O_i$  (далее линейная скорость робота). Если предположить, что управлениями являются угловые скорости левого и правого колеса ( $\omega_l, \omega_r$ ), тогда входящие в уравнение (1) параметры  $\omega_i$  и  $v_i$  задаются соотношениями [7]

$$v_i = \frac{R}{2}(\omega_r + \omega_l), \quad \omega_i = \frac{R}{L}(\omega_r - \omega_l), \quad (2)$$

где  $R$  — радиус ведущих колес,  $L$  — расстояние между центрами двух колес.

Существуют два подхода к решению задачи локализации роботов.

Основная идея первого подхода состоит в том, что каждый робот сам определяет собственное положение независимо (метод SLAM [8]) или каждый робот определяет собственное положение, используя взаимное положение роботов, при которых необходимо знание глобального положения ведущего робота [9].

Основная идея второго способа состоит в том, что мы используем сами роботы в виде подвижных указателей. Для осуществления такого способа требуется выполнение трех условий:

а) знание глобального положения ведущего робота;

б) знание положения ведущего робота относительно ведомого;

в) возможность передавать информацию о положении ведомому роботу (рис. 3).

Используя эту информацию, каждый робот определяет собственное положение в абсолютной системе координат. В процессе решения задачи управления движением каждого робота строится 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.

Рассмотрим решение следующей задачи: по измерениям, проводимым лазерным сканером, требуется

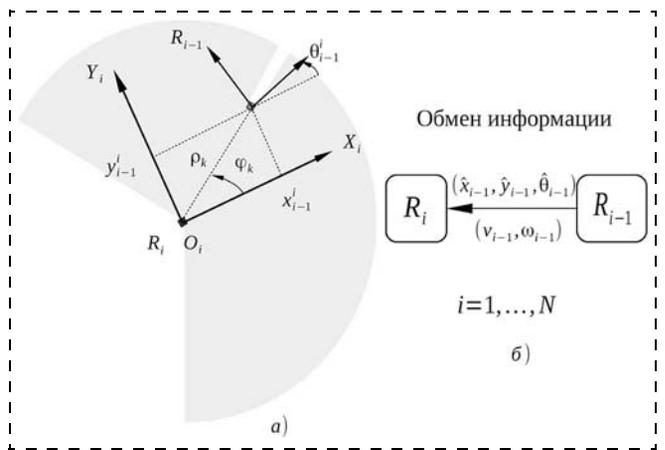


Рис. 3. Локальная окрестность робота  $R_i$  (а) и обмен информацией между роботами (б)

определить относительное положение между роботами. Например,  $(x_{i-1}^j, y_{i-1}^j, \theta_{i-1}^j)$  является относительным положением робота  $R_{i-1}$  в системе координат робота  $R_i$  (рис. 3). Для упрощения записи далее  $(x_{i-1}^j, y_{i-1}^j, \theta_{i-1}^j)$  будем обозначать  $(x, y, \theta_r)$ .

Уравнение движения робота  $R_{i-1}$  в связанной системе координат  $O_i X_i Y_i$  робота  $R_i$  имеет вид [7]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \omega_i y - v_i + v_{i-1} \cos\theta_r; \\ \dot{y} &= -\omega_i x + v_{i-1} \sin\theta_r; \\ \dot{\theta}_r &= \omega_{i-1} - \omega_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения (3) описывают поведение параметров движения робота  $R_{i-1}$  относительно робота  $R_i$ .

Рассмотрим теперь проблему, связанную с неточностью измерений положения ведущего для  $R_i$  робота  $R_{i-1}$ .

Будем считать, что измерения осуществляются лазерным дальнометром, определяющим в дискретные моменты  $t = t_k$  полярные координаты робота  $R_{i-1}(\rho_k, \varphi_k)$ , содержащие аддитивные нормально распределенные случайные последовательности. Будем также считать, что переход от полярных координат к декартовым приводит к появлению в составе измерений нормально распределенных аддитивных шумов.

Таким образом, уравнение объекта в соответствии с уравнением (3) имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (4)$$

где  $\mathbf{x} = (x, y, \theta_r)^T$ ,  $\mathbf{u} = (v_{i-1}, v_i, \omega_{i-1}, \omega_i)^T$ .

Уравнение измерений имеет вид

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \xi_k, \quad \xi_k \sim N(0, \mathbf{R}_k), \quad (5)$$

где  $\mathbf{z}_k = (x_k, y_k)^T$  — вектор измерений;  $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(t_k)$  —

значение вектора  $\mathbf{x}$  в момент  $t = t_k$ ;  $\mathbf{H}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ .

Тогда, используя известный расширенный фильтр Калмана для нелинейного непрерывного объекта с дискретными измерениями, алгоритм получения

оценки  $\hat{\mathbf{x}}$  вектора  $\mathbf{x}$ , можно сформулировать следующим образом [11]:

1. Инициализация:

$$\hat{\mathbf{x}}_{(0|0)} = E[\mathbf{x}(t_0)], \mathbf{P}_{(0|0)} = E[(\mathbf{x}(t_0) - \hat{\mathbf{x}})(\mathbf{x}(t_0) - \hat{\mathbf{x}})^T],$$

где  $E$  — символ математического ожидания.

2. Процесс прогнозирования ( $t_{k-1} < t \leq t_k$ ):

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t), \mathbf{u}(t));$$

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{F}(t)^T.$$

Начальные условия  $\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(t_{k-1}) = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}; \\ \mathbf{P}(t_{k-1}) = \mathbf{P}_{k-1|k-1}. \end{cases}$

Получаем  $\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \hat{\mathbf{x}}(t_k); \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{P}(t_k), \end{cases}$

где  $\mathbf{F}(t) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}|_{\hat{\mathbf{x}}(t), \mathbf{u}(t)} = \begin{pmatrix} 0 & \omega_i & -v_{i-1} \sin \hat{\theta}_r \\ -\omega_i & 0 & v_{i-1} \cos \theta_r \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ .

3. Процесс обновления ( $t = t_k$ ):

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1};$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1};$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1}.$$

### Задача управления движением роботов

Стратегия управления для каждого ведомого робота, как говорилось выше, состоит в выполнении соотношения

$$x_i(t) = x_{i-1}(t - T), \quad (6)$$

где  $x_i(t)$  представляет собой положение робота  $R_i$  в текущий момент,  $x_{i-1}(t - T)$  — положение робота  $R_{i-1}$  в момент времени  $t - T$ .

Заметим, что эту стратегию (6) предлагал С. Л. Зенкевич в 1973—1976 гг. в работах, связанных с исследованием управления движением самолетов в строю типа конвой [10].

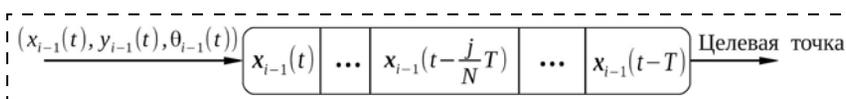


Рис. 4. Процесс нахождения целевых точек для робота  $R_i$

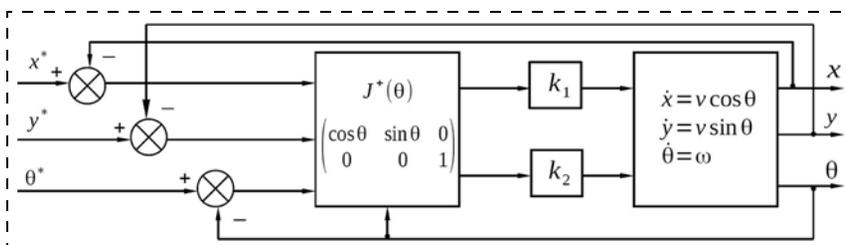


Рис. 5. Структурная схема управления роботом

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. 4, где  $N$  — число точек,  $T/N$  — скважность измерений.

2. *Формирование закона управления движением робота вдоль траектории.*

Закон управления состоит в способе движения робота вдоль динамически меняющейся траектории, заданной набором точек (рис. 4) 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:

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = J^+(\theta) \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

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

$$\dot{x} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (x^* - x);$$

$$\dot{y} = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (y^* - y);$$

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (\theta^* - \theta),$$

окончательно имеем закон управления в виде

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1(x^* - x) \cos \theta + k_1(y^* - y) \sin \theta \\ k_2(\theta^* - \theta) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $k_1, k_2$  — параметры.

На рис. 5 представлена схема, иллюстрирующая формирование управляющих сигналов, обеспечивающих движение робота вдоль произвольной траектории.

### Моделирование управления движением группы роботов

• *Результат моделирования способа локализации*

Проведено моделирование приведенного алгоритма оценивания относительного положения между роботами. Робот  $R_{i-1}$  совершал движение с угловой скоростью  $\omega_{i-1}(t) =$

$= 0,1\sin(0,1(t + 2))$  рад/с и линейной скоростью  $v_{i-1}(t) = 0,6$  м/с. Робот  $R_i$  совершает движение с угловой скоростью  $\omega_i(t) = 0,1\sin(0,1t)$  рад/с и линейной скоростью  $v_i(t) = 0,6$  м/с. Измерения моделируемого лазерного сканера Nokuyo-04-LX проводили с частотой 10 Гц.

Результаты моделирования показывают, что в этих условиях оценки координат мало отличаются от моделируемых величин.

На рис. 6 (см. вторую сторону обложки) 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:

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

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

3. С точки зрения локализации с помощью используемого метода наилучшим числом роботов в строю типа "конвой" является число 5, т.е. один ведущий робот и четыре ведомых роботов. Погрешности локализации этих четырех роботов меньше среднеквадратического отклонения измерения ( $\sigma = 0,09$  м).

• *Результат моделирования закона управления*

На рис. 7 (см. вторую сторону обложки) показаны результаты моделирования закона управления. Робот  $R_0$  совершал движение с угловой скоростью  $\omega_0(t) = 0,1\sin(0,1t)$  рад/с и линейной скоростью  $v_0(t) = 1$  м/с.

Для ведомых роботов выбранные параметры регулирования  $k_1 = k_2 = 10$  с<sup>-1</sup>, выбранное время запаздывания  $T = 2$  с. Как видно, траектории движения трех роботов почти совпадают.

## Заключение

В работе предложен способ управления движением группы роботов в строю типа "конвой", основанный на том, что каждый робот повторяет траекторию предыдущего робота с некоторым временным запаздыванием.

Дальнейшее направление работы авторы видят в проведении экспериментов с участием реальных мобильных роботов, движущихся в строю типа "конвой".

## Список литературы

1. 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, N. 5. P. 813–825.
2. Chiem S., Cervera E. Vision-based robot formations with Bezier trajectories // Proc. of the 8<sup>th</sup> Conference on Intelligent and Autonomous System. 2004. P. 191–198.
3. Yazbeck J., Scheuer A., Charpillat F. Optimized lateral control for a decentralized near-to-near platooning. // INRIA, Tech. Rep. 2013.
4. Thuilot B., Bom J., Marmoiton F., Martinet P. Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic GPS sensor // 5<sup>th</sup> IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisbon (Portugal). 2004.
5. 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.
6. Mark Daniel Ollis. Position estimation and vehicle control in autonomous multi-vehicle convoys. // Patent Application Publication, Pub. № : US 2014/0309836 A1.
7. Зенкевич С. Л., Назарова А. В. Система управления мобильного робота // Вестник МГТУ, серия "Приборостроение". 2006. № 3. С. 31–51.
8. Chen Haoyao. Towards Multi-Robot Formations: Study on Vision Based Localization Systems. URL: <http://hdl.handle.net/2031/5836> (дата обращения: 23.09.2015).
9. Espinosa F., Santos C. Odometry and laser scanner fusion based on a discrete extended Kalman filter for robotic platooning guidance // Sensors. 2011. N. 11. С. 8339–8357.
10. Зенкевич С. Л. и др. Авторское свидетельство. 1977. N 103384.
11. Сейдж Э. Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. Пер. с англ. под ред. проф. Б. П. Левина. М.: Связь, 1976. 496 с.

## Control of a Group of Mobile Robots Moving in the Convoy Type Formation

S. L. Zenkevich, mr.zenkev@mail.ru, Hua Zhu, zhuhua1302@gmail.com✉, Robotics Training-Research Center, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Hua Zhu, Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: zhuhua1302@gmail.com

Received on April 25, 2016

Accepted on May 11, 2016

*In this paper we present the method of control of mobile robots moving in the convoy type formation. The problem of localization of robots, using relative observations between the robots, is solved. The relative position and relative orientation are estimated using an Extend Kalman Filter. Special attention is given to obtain a follower robot motion control law along the trajectory given by the leading robot. The simulation results are also presented.*

**Keywords:** group, mobile robots, convoy, localization, relative observations, motion control, time delay

For citation:

Zenkevich S. L., Hua Zhu. Control of a Group of Mobile Robots Moving in the Convoy Type Formation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 30–34.

DOI: 10.17587/mau.18.30-34

## References

1. 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, no. 5, pp. 813–825.

2. **Chiem S., Cervera E.** Vision-based robot formations with Bezier trajectories, Proc.s of the 8<sup>th</sup> Conference on Intelligent and Autonomous System, 2004, pp. 191–198.
3. **Yazbeck J., Scheuer A., Charpillet F.** Optimized lateral control for a decentralized near-to-near platooning, *INRIA, Tech. Rep.*, 2013.
4. **Thuilot B., Bom J., Marmoiton F., Martinet P.** Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic GPS sensor, Proc. of 5<sup>th</sup> *IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*, Lisboa (Portugal), 2004.
5. **Yazbeck J., Scheuer A., Charpillet F.** Decentralized Near-to-Near Approach for Vehicle Platooning based on Memorization and Heuristic Search, *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2014, pp. 631–638.
6. **Mark Daniel Ollis.** Position estimation and vehicle control in autonomous multi-vehicle convoys, Patent Application Publication, Pub. № : US 2014/0309836 A1.
7. **Zenkevich S. L., Nazarova A. V.** Система управления мобильного робота (System of control mobile robot), *Journal of Bauman Moscow State Technical University*, ser. "Instrumentation", 2006, no. 3, pp. 31–51 (in Russian).
8. **Chen Haoyao.** Towards Multi-Robot Formations: Study on Vision Based Localization Systems, available at: <http://hdl.handle.net/2031/5836> (date of access: 23.09.2015).
9. **Espinosa F., Santos C.** Odometry and laser scanner fusion based on a discrete extended Kalman filter for robotic platooning guidance, *Sensors*, 2011, no. 11, pp. 8339–8357.
10. **Zenkevich S. L. and others.** Certificate of author, 1977, N 103384 (in Russian).
11. **Sage A. P., Melsa J. L.** Estimation Theory with Applications to Communication and control, New York: McGraw-Hill, 1971, 529 p.

УДК 004.896:621.865.8

DOI: 10.17587/mau/18.34-40

**М. А. Аль Аккад**, канд. техн. наук, доц., aimanakkad@yandex.ru,

**И. В. Абрамов**, д-р техн. наук, проф., abramov@istu.ru,

**В. В. Хворенков**, д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе, hvv@istu.ru,

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, Ижевск

## Обратная кинематическая задача для управления амбидекстральными конечностями человекоподобного робота

*Рассмотрены особенности руки робота как объекта управления, представлена ее кинематическая схема. Приводятся результаты анализа и реализации обратной кинематической задачи управления амбидекстральными конечностями человекоподобного робота, а также описание проблемно-ориентированного захвата объектов.*

**Ключевые слова:** рука робота, снижение сложности, проблемно-ориентированное управление, координация в многоагентных системах

### Введение

Сегодня цель исследований, направленных на разработку двуруких роботов, состоит в том, чтобы сделать их настоящими партнерами человека в различных сферах, включающих космические исследования, помощь инвалидам, производство и др. При этом необходимо обеспечить возможность манипуляций различными инструментами, такими как медицинские инструменты и устройства промышленного назначения. В данном контексте решение задачи координации и управления манипуляторами робота становится одной из приоритетных задач различных научных исследований.

Исследование Г. Грюнвальда и др. расширяет законономию захвата Каткоскиса одной рукой для бимануальных захватов [8]. Для манипуляций, ориентированных на цель, две руки физически не взаимодействуют друг с другом, но обе решают одну и ту же задачу (например, нажатие различных клавиш на клавиатуре). При этом в случае несогласованной манипуляции две руки выполняют две различные задачи, при согласованной манипуляции руки робота выполняют разные части одной и той же задачи (манипуляции, ориентированные на цель, и бимануальные манипуляции). Первое определение определяет системы, которые могут состоять из двух

отдельных манипуляторов, выполняющих задачи независимо друг от друга. Так как в данном случае явная координация отсутствует, нет принципиальной разницы по сравнению с системой с одним манипулятором, и анализ не должен отличаться от условий работы с одним манипулятором. Т. Вимбок и др. [9] выделяют две категории управления манипуляторами, к первой относят управление двумя манипуляторами с установленными захватами, ко второй — манипуляции объектом с помощью пальцев. В исследованиях М. Т. Сиокарле и П. К. Аллена [10], М. Габичини и А. Бичи [11], посвященных синтезу захвата, предложена концепция синергии положений или подпространства конфигурации руки для малоприводных систем взаимодействующих манипуляторов. Дополнительно описано использование позиционной системы технического зрения для управления двумя манипуляторами робота и встроенных в захватное устройство на каждой руке камер, использующихся для корректировки положения деталей в каждой руке и выполнения задачи сборки. Е. Грибовская и А. Биллард [12] предлагают концепцию программирования двух манипуляторов путем демонстрации. Действия двух манипуляторов классифицируются на основе пространственных отношений между траекториями рук, выполняющих согласованные действия.