

**С. А. Белоконь**, мл. науч. сотр., serge@idisys.iae.nsk.su,  
**Ю. Н. Золотухин**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., zol@idisys.iae.nsk.su,  
**К. Ю. Котов**, канд. техн. наук, науч. сотр., kotov@idisys.iae.nsk.su,  
**А. С. Мальцев**, канд. техн. наук, науч. сотр., alexandr@idisys.iae.nsk.su,  
**А. А. Нестеров**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., aranesterov@gmail.com,  
**М. А. Соболев**, мл. науч. сотр., max@idisys.iae.nsk.su,  
**М. Н. Филиппов**, канд. техн. наук, зав. лаб., michael@idisys.iae.nsk.su,  
**А. П. Ян**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., yan@idisys.iae.nsk.su,  
 Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск, Россия

## Управление мобильными роботами в составе группы лидер—ведомые<sup>1</sup>

*Рассматривается задача управления движением группы мобильных роботов. Предложенный метод структурного синтеза замкнутых законов управления позволяет добиться явного выражения управляющих воздействий на основе уравнений требуемого движения в пространстве состояний объекта. Входными данными для управления объектами в составе группы лидер—ведомые являются только данные об относительном взаимном расположении лидера и ведомого. Поддержание требуемого расстояния между объектами при условии ограниченного радиуса взаимодействия объектов в группе, движение без столкновений и возможность обхода препятствий реализованы с помощью метода потенциальных функций в рамках данного подхода. Данные экспериментов подтверждают работоспособность системы управления в присутствии шумов измерений и внешних возмущений.*

**Ключевые слова:** группа лидер—ведомые, управление группировкой мобильных роботов, структурный синтез систем автоматического управления, вынужденное движение

### Введение

В течение последних лет наблюдается возрастающий интерес к исследованиям в области управления группировками подвижных автономных объектов — мобильных роботов. Для целого ряда задач совместное использование подвижных роботов в группе более эффективно, чем применение одного робота [1]. Принципы группового управления используются в задачах управления спутниками, автономными подводными [2], наземными [3] или воздушными [4] аппаратами.

В настоящее время можно выделить три основных подхода к управлению группой подвижных объектов: лидер—ведомый [5], ситуационный подход [3], виртуальные структуры [6]. В данной работе используется подход лидер—ведомые, предполагающий разделение членов группы на объекты-лидеры и объекты-ведомые. Задачей объектов-ведомых является следование за лидером. Достоинством данного метода является относительная простота законов управления, а недостатком — зависимость успеха миссии группы от состояния объекта-лидера.

В отличие от работ [3, 7, 8], где для задания требуемого положения ведомого необходимо знать абсолютное положение и/или курс лидера, мы ис-

пользуем метод, в котором положение ведомого задается только в системе координат ведомого с привлечением информации об относительном взаимном расположении лидера и ведомого. Применение такого подхода более оправдано с точки зрения практических приложений — как правило, мобильный робот в группе может располагать данными сенсоров только об относительном расположении по отношению к другим роботам группы.

Коммуникационные или сенсорные возможности автономных роботов накладывают существенные ограничения при использовании данных подходов, связанные с конечной областью взаимодействия объекта с окружением. Также необходимо обеспечить отсутствие столкновений между объектами в группе и обход препятствий. В настоящей работе эти задачи решаются с привлечением метода потенциальных функций [9, 10].

Одним из основных методов, применяемых при синтезе законов управления движением объектов в таких группах, является метод линеаризации обратной связи [11]. Применение данного метода ограничивается сложностью кинематической модели, а также невысокой робастностью данного метода по отношению к внешним возмущениям.

В данной работе развивается метод структурного синтеза (функционального управления) замкнутых законов управления на основе организации

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-08-03233).

движения системы вдоль предписанной траектории в пространстве состояний [12—14]. Для управления движением однородной группы мобильных колесных роботов с дифференциальным приводом используется разработанный и успешно примененный в ряде приложений [8, 15, 16] метод поэтапного задания требуемых уравнений движения, позволяющий в итоге добиться явного выражения управляющих воздействий.

Численные эксперименты подтверждают работоспособность системы управления в присутствии шумов измерений и внешних возмущений.

### 1. Постановка задачи

Рассмотрим однородную группу мобильных роботов, где уравнения кинематики и динамики  $i$ -го робота имеют следующий вид [3]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \sin \phi_i; \\ \dot{y}_i &= v_i \cos \phi_i; \\ \dot{\phi}_i &= \omega_i; \\ \dot{v}_i &= \frac{F_i}{m_i}; \\ \dot{\omega}_i &= \frac{M_i}{J_i}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $x_i, y_i$  — координаты объекта на плоскости;  $v_i, \omega_i$  — линейная и угловая скорости объекта;  $\phi_i$  — угол, характеризующий направление движения объекта относительно оси ординат (рис. 1);  $m_i$  — масса объекта;  $J_i$  — момент инерции объекта. К управляющим переменным относятся продольная движущая сила  $F_i$  и вращающий момент  $M_i$ . Здесь и далее точка над переменной обозначает ее производную по времени.

Управление объектом осуществляется изменением параметров  $\frac{F_i}{m_i}$  и  $\frac{M_i}{J_i}$  — линейного и углового ускорений объекта. Выделим в составе группы объект-лидер группы, относительно которого остальные члены группы определяют свое положение и за которым они следуют. Будем полагать, что движение лидера по предписанной траектории осуществляется согласно некоторому закону управления, например, изложенному в работе [8]. Для описания движения остальных членов группы необходимо указать их место в группе относительно лидера. Считаем, что навигационная система робота-ведомого может определять следующие параметры расположения ведомого относительно лидера:  $d_i$  — расстояние до лидера,  $\alpha_i$  — направление на лидера относительно направления движения ведомого (рис. 1). Такие данные являются дальнометрической информацией и могут быть получены при использовании, например, лазерных сканеров.

Поставим перед роботом-ведомым задачу выхода в целевое положение  $T_0$ , заданное параметрами

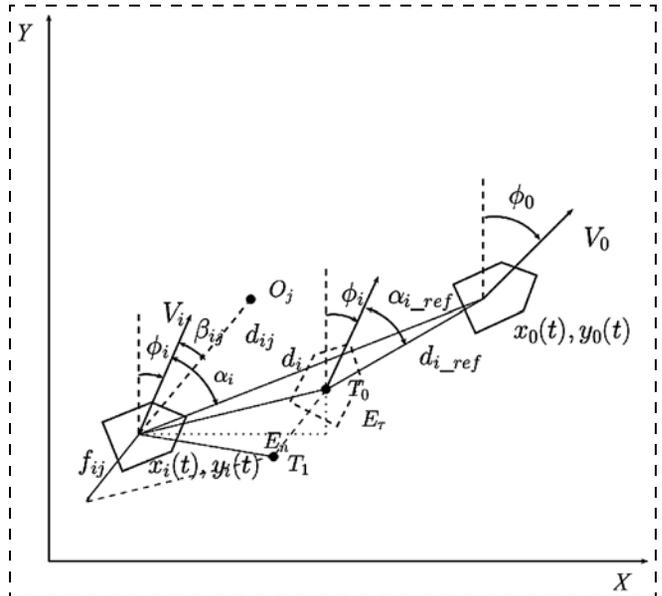


Рис. 1. Движение ведомого относительно заданного положения в группе

относительного положения ведомого и лидера  $d_{i\_ref}, \alpha_{i\_ref}$  (рис. 1). В работе [17] показано, что после завершения переходных процессов в системе управления, т.е. в стационарном режиме, направления движения ведомого и лидера совпадают, и поэтому такой способ задания положения ведомого эквивалентен способу задания целевого положения с привлечением информации о направлении движения лидера. По этой же причине нет необходимости вводить дополнительное управление при приближении ведомого к целевому положению, как это было сделано в работе [8].

Зададим ошибку в положении ведомого относительно целевого положения двумя величинами (рис. 1):

$$\left. \begin{aligned} E_{ti} &= d_i \cos(\phi_i + \alpha_i) - d_{i\_ref} \cos(\phi_i + \alpha_{i\_ref}); \\ E_{ni} &= d_i \sin(\phi_i + \alpha_i) - d_{i\_ref} \sin(\phi_i + \alpha_{i\_ref}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Существенным является требование обхода препятствий и исключения коллизий между объектами в группе. При решении такой задачи управления широко используются методы потенциальных функций [9]. В предложенной постановке задачи достаточно описать отталкивание  $i$ -го объекта от препятствия или другого объекта группы с индексом  $j$  на расстоянии  $d_{ij}$ , например, функцией вида

$$J_{ij}^{rep}(d_{ij}) = \begin{cases} d_0/d_{ij}, & \text{если } d_{ij} < d_0; \\ 0, & \text{если } d_{ij} \geq d_0. \end{cases} \quad (3)$$

Для сохранения целостности группы при условии ограниченного радиуса взаимодействия объектов в группе используем метод, где топология группы задается в виде неориентированного графа, и дальнейший выбор поправки  $J_{ij}^{con}$  в потенциальной функции взаимодействия (3) осуществляется на основе сохранения связности данного графа [10]. Объект  $i$  может удаляться от объекта  $j$  на расстоя-

ние, превышающее радиус видимости  $r$ , в случае, если звено, образованное парой вершин  $(i, j)$ , принадлежит циклу с длиной  $l > 1$  в графе:

$$J_{ij}^{con}(d_{ij}) = \begin{cases} \ln(r - d_{ij}), & \text{если } l = 1; \\ 0, & \text{если } l > 1. \end{cases} \quad (4)$$

Резльтирующая потенциальная функция, действующая на объект, примет вид

$$J_{ij}(d_{ij}) = J_{ij}^{rep}(d_{ij}) + J_{ij}^{con}(d_{ij}). \quad (5)$$

Выражение (2) эквивалентно заданию линейной силы притяжения или ее составляющих к целевому положению. С учетом сил отталкивания от  $N$  препятствий и притяжения к  $M$  объектам группы (5) уравнения (2) примут вид

$$\left. \begin{aligned} E_{\tau i} &= d_i \cos(\phi_i + \alpha_i) - d_{i\_ref} \cos(\phi_i + \alpha_{i\_ref}) - \\ &- \sum_{j=1}^N J_{ij}^{rep} \cos(\phi_i + \beta_{ij}) - \sum_{k=1}^M J_{ik}^{con} \cos(\phi_i + \gamma_{ik}); \\ E_{ni} &= d_i \sin(\phi_i + \alpha_i) - d_{i\_ref} \sin(\phi_i + \alpha_{i\_ref}) - \\ &- \sum_{j=1}^N J_{ij}^{rep} \sin(\phi_i + \beta_{ij}) - \sum_{k=1}^M J_{ik}^{con} \sin(\phi_i + \gamma_{ik}). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь  $\beta_{ij}, \gamma_{ik}$  — направление на препятствие и на объект с индексами  $j$  и  $k$  относительно направления движения объекта. Действие потенциальной функции (5) приведет к смещению целевого положения из т.  $T_0$  в т.  $T_1$  (рис. 1). Отметим, что при использовании выражения (6) существует возможность попадания в локальные минимумы величин  $E_{\tau i}, E_{ni}$  и недостижения целевого положения объектом. Выход из таких локальных минимумов может быть организован на основе проверки выполнения исходных соотношений (2).

## 2. Синтез алгоритма управления

Согласно изложенной в работе [17] методике введем функции

$$\left. \begin{aligned} S_{1i} &= \dot{E}_{\tau i} + k_e E_{\tau i}; \\ S_{2i} &= \dot{E}_{ni} + k_e E_{ni}; \\ S_i &= \frac{1}{2} (S_{1i}^2 + S_{2i}^2) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

и будем выбирать управляющие параметры исходя из условия

$$\frac{d}{dt} S_i \leq 0. \quad (8)$$

Знак равенства в соотношении (8) допустим только при  $S_i = 0$ , что гарантирует выполнение условий  $S_{1i} = 0$  и  $S_{2i} = 0$ . В случае  $S_i \neq 0$  выполнение условия  $\dot{S}_i < 0$  вынуждает движение системы в окрестности траектории, определяемой уравнениями  $S_{1i} = 0$  и  $S_{2i} = 0$ .

Вычислим

$$\dot{S}_i = S_{1i} \dot{S}_{1i} + S_{2i} \dot{S}_{2i}. \quad (9)$$

С учетом (7) и уравнений движения (1)

$$\begin{aligned} \dot{S}_i &= \frac{F_i}{m_i} (S_{1i} \cos(\phi_i) + S_{2i} \sin(\phi_i)) + \\ &+ \frac{M_i}{J_i} (S_{1i} \sin(\phi_i + \alpha_{i\_ref}) - S_{2i} \cos(\phi_i + \alpha_{i\_ref})) + \dots \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь многоточием обозначены члены, не содержащие управляющих параметров  $F_i$  и  $M_i$ . При отсутствии ограничений на переменные  $F_i, M_i$  и с учетом требования (8) определим управляющие параметры как

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_i}{m_i} &= -c_{1i} (S_{1i} \cos(\phi_i) + S_{2i} \sin(\phi_i)); \\ \frac{M_i}{J_i} &= -c_{2i} (S_{1i} \sin(\phi_i + \alpha_{i\_ref}) - S_{2i} \cos(\phi_i + \alpha_{i\_ref})). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Здесь  $c_{1i}, c_{2i}$  — коэффициенты усиления по каналу управления скоростью и курсом соответственно. Очевидно, что при достаточно больших значениях коэффициентов  $c_{1i}$  и  $c_{2i}$  можно выполнить условие (8).

Отметим, что в уравнениях (2), (11) используется курсовой угол  $\phi_i$ , характеризующий направление движения ведомого в абсолютной системе координат. Если считать, что данная система координат связана с роботом или, иначе говоря, является связанной, мы можем принять  $\phi_i = 0$  в уравнениях (2), (11):

$$\left. \begin{aligned} E_{\tau i} &= d_i \cos(\alpha_i) - d_{i\_ref} \cos(\alpha_{i\_ref}); \\ E_{ni} &= d_i \sin(\alpha_i) - d_{i\_ref} \sin(\alpha_{i\_ref}). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_i}{m_i} &= -c_{1i} S_{1i}; \\ \frac{M_i}{J_i} &= -c_{2i} (S_{1i} \sin(\alpha_{i\_ref}) - S_{2i} \cos(\alpha_{i\_ref})). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Таким образом, управление роботом может осуществляться только на основе информации об относительном расположении ведомого и лидера, определяемой параметрами  $d_i, \alpha_i$ . В таком подходе удастся сформировать управляющие параметры в виде сравнительно простых зависимостей от отклонений объекта от желаемой траектории, однако время выхода на желаемую траекторию изменения ошибок при этом не определено.

Выполнение условий  $S_{1i} = 0$  и  $S_{2i} = 0$  можно обеспечить при выполнении следующих неравенств:

$$\frac{d}{dt} S_{1i} \leq 0; \quad \frac{d}{dt} S_{2i} \leq 0. \quad (14)$$

Усилим условия (14), положив

$$\dot{S}_{1i} = -\alpha_{1i} S_{1i}; \quad \dot{S}_{2i} = -\alpha_{2i} S_{2i}. \quad (15)$$

Здесь  $\alpha_{1i} > 0, \alpha_{2i} > 0$  определяют постоянные времени  $1/\alpha_{1i}, 1/\alpha_{2i}$ , с которыми  $S_{1i}, S_{2i}$  экспоненциально стремятся к нулю. Дифференцируя соот-

ношения (2) и подставляя результаты в выражение (15) с учетом (1) и  $\phi_i = 0$ , получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_i}{m_i} &= \ddot{y}_0 - d_{i\_ref} \left( \cos(\alpha_{i\_ref}) \dot{\phi}_i^2 + \sin(\alpha_{i\_ref}) \frac{M_i}{J_i} \right) - \\ &- \alpha_i S_{1i} - k_e \dot{E}_{\tau i}; \\ \frac{M_i}{J_i} &= \frac{1}{d_{i\_ref} \cos(\alpha_{i\_ref})} \times \\ &\times (v_i \dot{\phi}_i - \ddot{x}_0 + d_{i\_ref} \sin(\alpha_{i\_ref}) \dot{\phi}_i^2 + \alpha_2 S_{2i} + k_e \dot{E}_{ni}). \end{aligned} \right\} (16)$$

При условии равномерного движения значения ускорений  $\ddot{x}_0$ ,  $\ddot{y}_0$  лидера можно полагать равными нулю, таким образом, для использования соотношений (16) необходима дополнительная информация о скоростных характеристиках ведомого — параметрах  $v_i$  и  $\dot{\phi}_i$ . Эта информация может быть получена при использовании блока инерциальных датчиков на борту робота-ведомого.

### 3. Результаты моделирования

Проверку эффективности предложенного алгоритма управления проводили посредством числен-

ного моделирования. В качестве объекта управления была выбрана модель робота e-риск с дифференциальным приводом [18], в упрощенном виде задаваемая дискретными соотношениями

$$\left. \begin{aligned} x_i^k &= x_i^{k-1} + \Delta t v_i^k \sin \phi_i^k; \\ y_i^k &= y_i^{k-1} + \Delta t v_i^k \cos \phi_i^k; \\ \phi_i^k &= \phi_i^{k-1} + \Delta t w_i^k; \\ v_i^k &= \frac{1}{2a_0} (U_{1i}^k + U_{2i}^k); \\ w_i^k &= \frac{1}{2a_0 l} (U_{1i}^k - U_{2i}^k), \end{aligned} \right\} (17)$$

где постоянные коэффициенты  $1/(2a_0) = 0,0652 \cdot 10^{-3}$ ,  $2l = 0,05290$ ;  $\Delta t$  — шаг дискретизации по времени.

Управляющие воздействия на колесах  $U_{1i}^k + U_{2i}^k$ ,  $U_{1i}^k - U_{2i}^k$  соответствуют искомым ускорениям

$\frac{F_i}{m_i}$  и  $\frac{M_i}{J_i}$ . Координаты положения и ориентации ро-

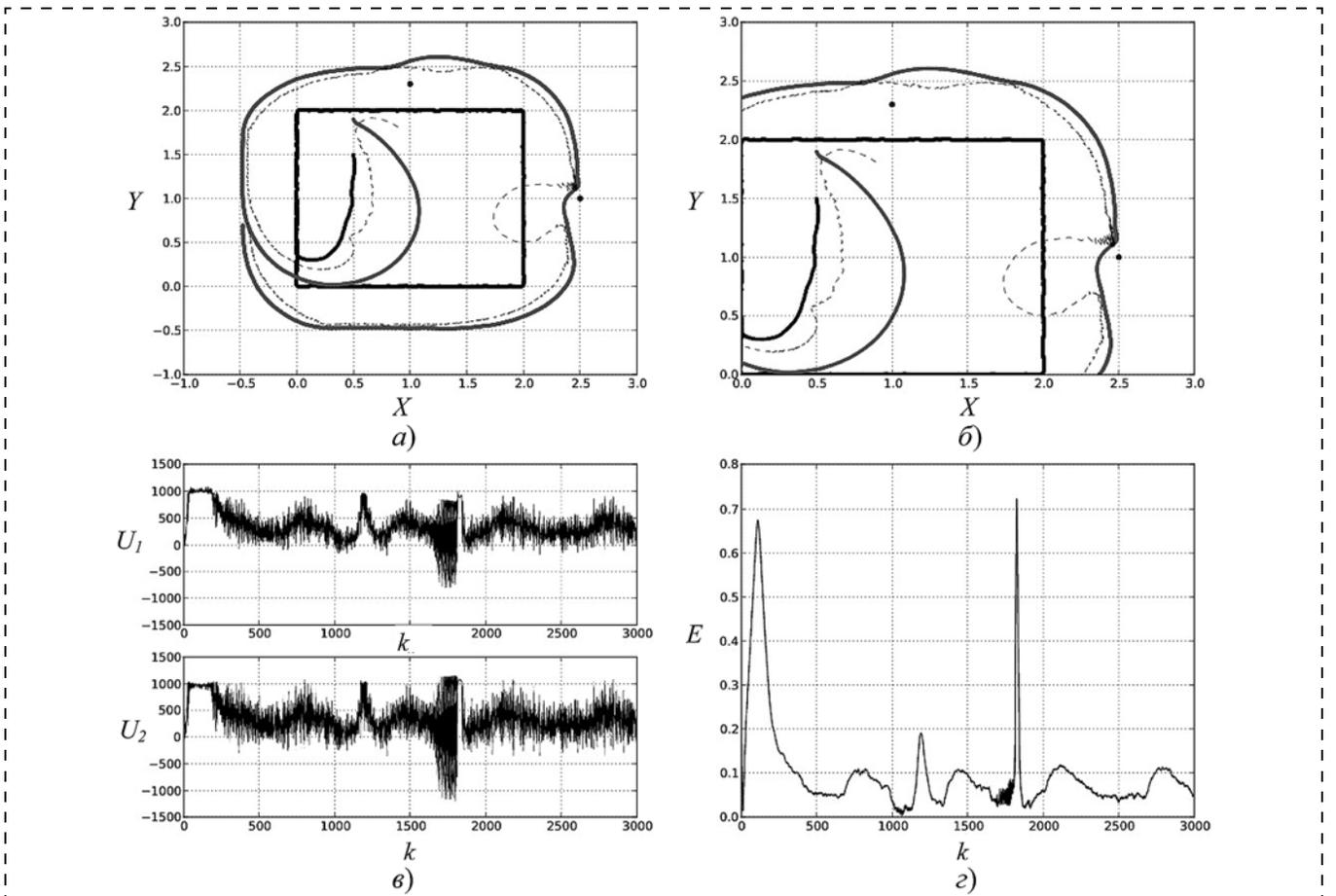
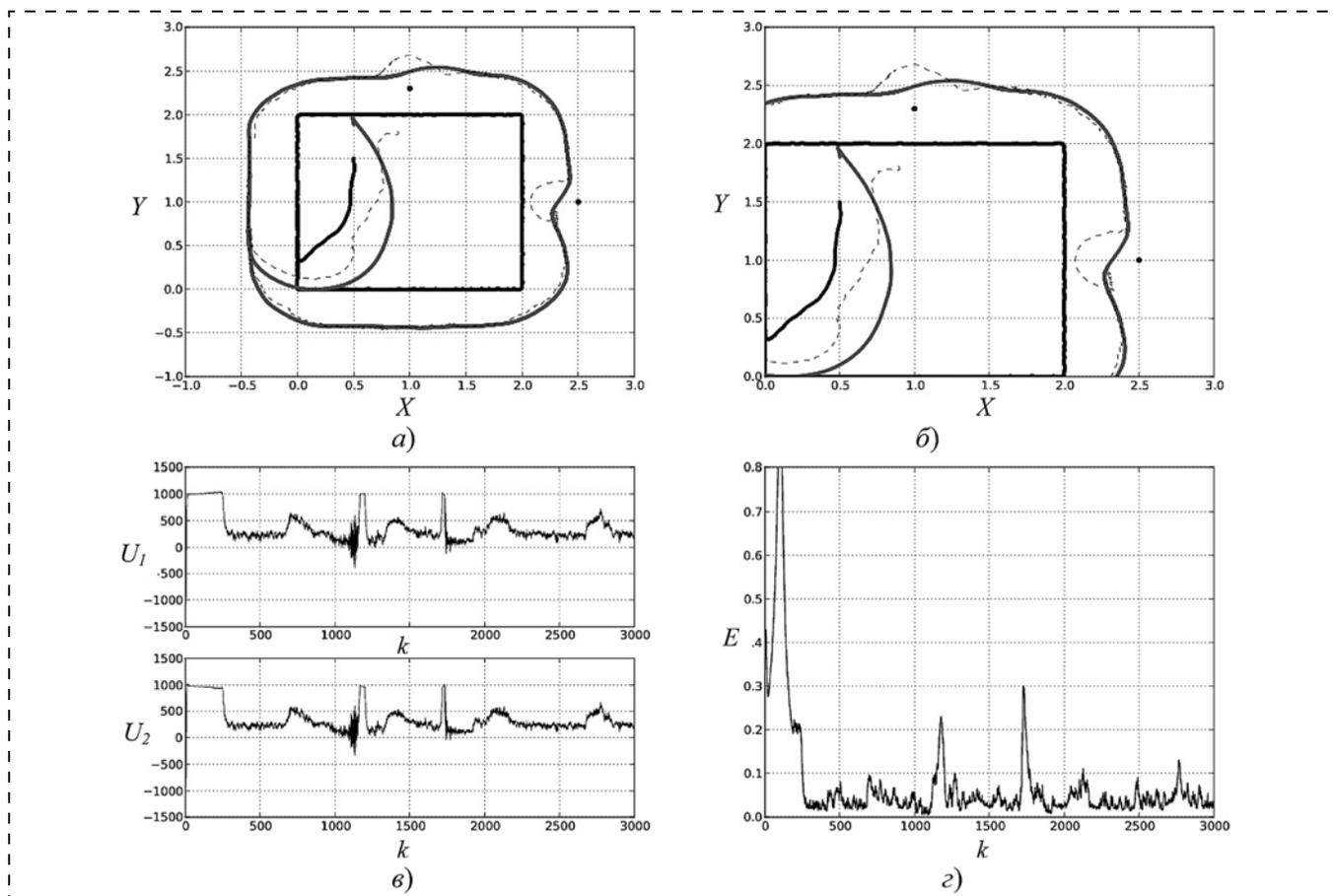


Рис. 2. Движение группы в составе лидер—ведомый на основе алгоритма (13):

а — траектория движения группы в плоскости  $(x, y)$ ; б — увеличенный фрагмент траектории движения группы; в — управляющие параметры; г — отклонение ведомого от заданного целевого положения



**Рис. 3. Движение группы в составе лидер—ведомый согласно алгоритму (16):**  
*a* — траектория движения группы в плоскости  $(x, y)$ ; *b* — увеличенный фрагмент траектории движения группы; *c* — управляющие параметры; *d* — отклонение ведомого от заданного целевого положения

бота  $x_i^k, y_i^k, \phi_i^k$  зашумлялись аддитивным гауссовым шумом с соответствующим разбросом  $\sigma_x = 0,001$  м,  $\sigma_y = 0,001$  м,  $\sigma_\phi = 0,05$  рад. Движение робота-лидера вдоль предписанной траектории осуществлялось согласно алгоритму управления, предложенному в работе [8]. Использовали следующие параметры расположения ведомого относительно лидера:  $d_{1\_ref} = 0,5$  м,  $\alpha_{1\_ref} = \pi/2$  рад. Ведомым выполнялся обход неподвижных препятствий, расположенных в точках  $(1,0, 2,3)$  и  $(2,5, 1,0)$ .

На рис. 2 приведены результаты моделирования для случая движения группы в составе лидер—ведомый с использованием предложенного алгоритма (13). Задание целевого положения ведомого в группе (рис. 2, *a, б*, пунктирная кривая) относительно текущей ориентации ведомого обеспечивает незначительное требуемое ускорение на поворотах траектории (рис. 2, *a, б*, сплошная линия). При этом размах амплитуды колебаний управляющих воздействий составляет около 0,5 от максимально допустимых значений (рис. 2, *в*). Среднеквадратическое отклонение от целевого положения составляет около 0,004 м на участках равномерного движения (рис. 2, *г*).

Использование информации о скоростных характеристиках ведомого в алгоритме (16) позволяет обеспечить более плавный обход препятствий (рис. 3, *a, б*) и использовать существенно меньший ресурс по управлению при движении с соизмеримым значением отклонения ведомого от целевого положения (рис. 3, *в, г*).

### Заключение

Предложен алгоритм управления неголономными мобильными роботами с дифференциальным приводом в составе маневрирующей группы лидер—ведомые. Применяемый авторами метод структурного синтеза позволяет сформировать управляющие воздействия для роботов-ведомых группы только на основе информации об относительном расположении ведомых и лидера без привлечения абсолютных пространственных координат роботов. Для поддержания требуемого расстояния между объектами при условии ограниченного радиуса взаимодействия объектов в группе, движения без столкновений и возможности обхода препятствий используется метод потенциальных функций. Предложенным алгоритмом управления обеспечиваются гладкие траектории движения и высокая робастность по отношению к шумам измерений.

## Список литературы

1. **Schaub Hanspeter, Vadali Srinivas R., Alfriend Kyle T.** Spacecraft formation flying control using mean orbit elements // Journal of the Astronautical Sciences. 2000. Vol. 48, N. 1. P. 69–87.
2. **Smith T. R., Mann H. H., Leonard N. E.** Orientation control of multiple underwater vehicles // Proc. 40th IEEE Conf. Decision and Control. 2001. P. 4598–4603.
3. **Lawton J. R., Beard R. W., Young B. J.** A decentralized approach to formation maneuvers // IEEE Trans. on Robotics and Automation. 2003. Vol. 19, N. 6. P. 933–941.
4. **Burns R.** et al. Techsat21: Formation design, control, and simulation // Proc. IEEE Aerospace Conf. 2000. P. 19–25.
5. **Aveek K. Das, Rafael Fierro, Vijay Kumar, James P. Ostrowski, John Spletzer, Camillo J. Taylor.** A vision-based formation control framework // Robotics and Automation, IEEE Transactions on. 2002. Vol. 18, N. 5. P. 813–825.
6. **Lewis M. Anthony, Tan Kar-Han.** High precision formation control of mobile robots using virtual structures // Auton. Robots. 1997. Vol. 4, N. 4. P. 387–403.
7. **Luca Consolini, Fabio Morbidi, Domenico Prattichizzo, Mario Tosques.** Leader–follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints // Automatica. 2008. Vol. 44, N. 5. P. 1343–1349.
8. **Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю., Нестеров А. А.** Децентрализованное управление подвижными объектами в составе маневрирующей группы // Автометрия. 2007. Т. 43, № 3. С. 31–39.
9. **Fiorelli Edward, Bhatta Pradeep, Leonard Naomi Ehrlich.** Adaptive sampling using feedback control of an autonomous underwater glider fleet // Proc. 13th Int. Symposium on Unmanned Untethered Submersible Tech. 2003. P. 1–16.
10. **Котов К. Ю.** Алгоритм управления группировкой подвижных автономных агентов // Матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП – 2006. 2006. Т. 7. С. 230–235.
11. **Desai Jaydev P., Ostrowski James P., Kumar Vijay.** Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots // Robotics and Automation, IEEE Transactions on. 2001. Vol. 17, N. 6. P. 905–908.
12. **Бойчук Л. М.** Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. М: Энергия, 1971.
13. **Колесников А. А.** Синергетическая теория управления. Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
14. **Крутько П. Д.** Обратные задачи динамики управляемых систем: Нелинейные модели. М.: Наука, 1988. 330 с.
15. **Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А.** Управление перевернутым маятником с учетом диссипации энергии // Автометрия. 2010. № 5. С. 3–11.
16. **Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Мальцев А. С., Нестеров А. А., Филиппов М. Н., Ян А. П.** Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории // Автометрия. 2012. № 5. С. 32–41.
17. **Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю., Мальцев А. С., Нестеров А. А., Соболев М. А., Филиппов М. Н., Ян А. П.** Робастное управление подвижными объектами в группе лидер–ведомые с использованием метода структурного синтеза // Автометрия. 2015. Т. 51, № 5. С. 82–91.
18. **Золотухин Ю. Н., Котов К. Ю., Мальцев А. С., Нестеров А. А., Филиппов М. Н.** Управление траекторным движением группы мобильных роботов: моделирование и эксперимент // Материалы X Междунар. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2010)", Новосибирск. 2010. С. 101–106.

## Control of the Mobile Robots in a Leader–Follower Formation

**S. A. Belokon**, serge@idisys.iae.nsk.su, **Yu. N. Zolotukhin**, zol@idisys.iae.nsk.su, **K. Yu. Kotov**, kotov@idisys.iae.nsk.su✉, **A. S. Maltsev**, alexandr@idisys.iae.nsk.su, **A. A. Nesterov**, aranesterov@gmail.com, **M. A. Sobolev**, max@idisys.iae.nsk.su, **M. N. Filippov**, michael@idisys.iae.nsk.su, **A. P. Yan**, yan@idisys.iae.nsk.su,  
Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, 630090, Russian Federation

*Corresponding author:* **Kotov Konstantin Yu.**, Ph. D.,  
Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, 630090, Russian Federation, e-mail: kotov@idisys.iae.nsk.su

Received on November 13, 2015

Accepted on November 18, 2015

*The authors consider the problem of control of the mobile robots' motion in a leader–follower formation. They use a method, in which the follower position is defined only in the follower-fixed coordinate system and the only information involved is the relative mutual positions of the leader and the follower. Such an approach is more relevant from the viewpoint of applications. For a mobile robot in the formation, the only available information is usually the data from the sensors concerning its relative position with respect to the other robots in the formation. One of the basic methods used for synthesizing of the laws for control of the objects' motion in the formations is the feedback linearization method, although application of this method is limited due to high complexity of the kinematic model and also rather low robustness of this method with respect to the external disturbances. Many researchers dealing with the control of robots in a leader–follower formation use the theory of systems with a variable structure for development of the control laws invariant to the external disturbances. A significant drawback of such control laws is emergence of high-frequency switching in the control signals. Recently specialists have shown an increased interest to the methods of the spatial (functional or program—coordinate) control mainly aimed at a direct solution of the problem of stabilization of the motion over a manifold. A typical feature of the method of the structural synthesis (functional control), also revealed in this work, is the extension of the definition of the relative motion by using an implicit model. Because of the drawbacks of the existing analytical and experimental investigations done by the method of the structural synthesis and also due to certain functional bottlenecks of the existing approaches, the further development of the structural synthesis of the closed control laws on the basis of organizing of a system of motion along a prescribed trajectory in the space of states, is an important task. In this work, the authors use the method of organization of the forced motion along the desired trajectory in the space of states of an object within the problem of control of the motion of a homogeneous formation of the mobile robots with a differential drive. By keeping the required distance between the robots in case of a limited range of interaction of objects in a group by the method of potential functions, it is possible to avoid collisions and obstacles. Numerical experiments confirm the workability of the control system in the presence of the measurement noise and external disturbances.*

**Keywords:** leader–follower formation, control of a formation of mobile robots, structural synthesis of the automated control systems, forced motion

**Acknowledgements:** The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 15-08-03233

For citation:

**Belokon S. A., Zolotukhin Yu. N., Kotov K. Yu., Maltsev A. S., Nesterov A. A., Sobolev M. A., Filippov M. N., Yan A. P.** Control of the Mobile Robots in a Leader—Follower Formation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 166—172.

DOI: 10.17587/mau/17.166-172

### References

1. **Schaub Hanspeter, Vadali Srinivas R., Alfriend Kyle T.** Spacecraft formation flying control using mean orbit elements, *Journal of the Astronautical Sciences*, 2000, vol. 48, no. 1, pp. 69—87.
2. **Smith T. R., Mann H. H., Leonard N. E.** Orientation control of multiple underwater vehicles, *Proc. 40th IEEE Conf. Decision and Control*, 2001, pp. 4598—4603.
3. **Lawton J. R., Beard R. W., Young B. J.** A decentralized approach to formation maneuvers, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2003, vol. 19, no. 6, pp. 933—941.
4. **Burns R. C., McLaughlin A., Leitner J., Martin M.** Techsat21: Formation design, control, and simulation, *Proc. IEEE Aerospace Conf.*, 2000, pp. 19—25.
5. **Aveek K. Das, Rafael Fierro, Vijay Kumar, James P. Ostrowski, John Spletzer, Camillo J. Taylor.** A vision-based formation control framework, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 2002, vol. 18, no. 5, pp. 813—825.
6. **Lewis M. Anthony, Tan Kar-Han.** High precision formation control of mobile robots using virtual structures, *Auton. Robots*, 1997, vol. 4, no. 4, pp. 387—403.
7. **Luca Consolini, Fabio Morbidi, Domenico Prattichizzo, Mario Tosques.** Leader—follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints, *Automatica*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 1343—1349.
8. **Zolotukhin Yu. N., Kotov K. Yu., Nesterov A. A.** Decentralizovannoe upravlenie podvizhnymi obektami v sostave manevriruyushchej gruppy (Decentralized control of mobile robots in formation), *Avtometriya*, 2007, vol. 43, no. 3, pp. 31—39 (in Russian).
9. **Fiorelli Edward, Bhatta Pradeep, Leonard Naomi Ehrlich.** Adaptive sampling using feedback control of an autonomous underwater glider fleet, *Proc. 13th Int. Symposium on Unmanned Un tethered Submersible Tech.*, 2003, pp. 1—16.
10. **Kotov K. Yu.** Algoritim upravleniya gruppировкой podvizhnykh avtonomnykh agentov (Control algorithm of autonomous agents in formation), *Mater. VIII mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Aktualnye problemy elektronnoogo priborostroeniya" APEP-2006*, 2006, vol. 7, pp. 230—235 (in Russian).
11. **Desai Jaydev P, Ostrowski James P, Kumar Vijay.** Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 2001, vol. 17, no. 6, pp. 905—908.
12. **Boychuk L. M.** Metod strukturnogo sinteza nelinejnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya (Structural synthesis method of automatic control nonlinear systems), Moscow, Energiya, 1971 (in Russian).
13. **Kolesnikov A. A.** Sinergeticheskaya teoriya upravleniya (The synergetic control theory), Moscow, Energoatomizdat, 1994, 344 p. (in Russian).
14. **Krutko P. D.** Obratnye zadachi dinamiki upravlyaemykh sistem: Nelinejnye modeli (Inverse Problems of Control System Dynamics: Nonlinear Models), Moscow, Nauka, 1988, 330 p. (in Russian).
15. **Zolotukhin Yu. N., Nesterov A. A.** Upravlenie perevyornutym mayatnikom s uchytom dissipatsii ehnergii (Inverted pendulum control with allowance for energy dissipation), *Avtometriya*, 2010, vol. 46, no 5, pp. 3—10 (in Russian).
16. **Belokon S. A., Zolotukhin Yu. N., Mal'tsev A. S., Nesterov A. A., Filippov M. N., Yan A. P.** Upravlenie parametrami poleta kvadrokoptera pri dvizhenii po zadannoj traektorii (Control of flight parameters of a quadrotor vehicle moving over a given trajectory), *Avtometriya*, 2012, vol. 48, no. 5, pp. 32—41 (in Russian).
17. **Zolotukhin Yu. N., Kotov K. Yu., Mal'tsev A. S., Nesterov A. A., Sobolev M. A., Filippov M. N., Yan A. P.** Robastnoe upravlenie podvizhnymi obektami v grupe lider-vedomye s ispolzovaniem metoda strukturnogo sinteza (Robust Control of Moving Objects in a Leader—Follower Formation by the Method of Structural Synthesis), *Avtometriya*, 2015, vol. 51, no 5, pp. 82—91 (in Russian).
18. **Zolotukhin Yu. N., Kotov K. Yu., Mal'tsev A. S., Nesterov A. A., Filippov M.** Upravlenie traektornym dvizheniem gruppy mobilnykh robotov: modelirovanie i ehksperiment (Trajectory tracking of mobile robots formation: simulation and experiment), *Mater. X mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Aktualnye problemy elektronnoogo priborostroeniya" APEP-2010*, 2010, pp. 101—106 (in Russian).

УДК 621.3

DOI: 10.17587/mau/17.172-177

**В. Г. Градецкий**<sup>1</sup>, гл. науч. сотр., д-р техн. наук, проф., gradet@ipmnet.ru,  
**М. М. Князьков**<sup>1</sup>, ст. науч. сотр., канд. техн. наук, **Е. А. Семёнов**<sup>1</sup>, ст. науч. сотр., канд. техн. наук,  
**А. Н. Суханов**<sup>1, 2</sup>, мл. науч. сотр., аспирант, sukhانov-artiom@yandex.ru,  
<sup>1</sup> Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва

<sup>2</sup> Московский государственный технологический университет СТАНКИН

## Адаптивные захватные устройства мобильных роботов с миниатюрными эжекторами\*

Анализируются принципиальные схемы адаптивных пневматических захватных устройств роботов вертикального перемещения в экстремальных условиях при неизвестных заранее свойствах и качестве поверхностей, по которым происходит движение. Приводятся основные расчетные соотношения и результаты экспериментальных исследований, включая конструктивные схемы адаптивных пневматических захватных устройств.

**Ключевые слова:** адаптивные захватные устройства, принципиальные схемы, миниатюрные эжекторы, роботы вертикального перемещения

### Введение

Для эффективного и надежного использования мобильных роботов, осуществляющих движение в экстремальных условиях по поверхностям непред-

сказуемого во многих случаях качества, в последние годы намечается тенденция разработки и оснащения роботов пневматическими устройствами адаптации к поверхностям, по которым происходит движение [1—4]. Адаптация осуществляется посредством применения различных конструктивных решений или автоматического изменения степени вакуума с помощью миниатюрных вакуумных воздушно-струйных эжекторов [5—15].

\*Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ № 15-08-014117 "Исследования и разработки адаптивных вакуумных устройств мобильных роботов, перемещающихся по сложным поверхностям" и Программы Президиума РАН № П-31 "Актуальные проблемы робототехники".