

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

2007, том 43, № 3

УДК 681.53

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ
В СОСТАВЕ МАНЕВРИРУЮЩЕЙ ГРУППЫ*

Ю. Н. Золотухин, К. Ю. Котов, А. А. Нестеров

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: zol@idisys.iae.nsk.su*

Представлен метод управления группировкой подвижных аппаратов в режиме следования за лидером, обеспечивающий отслеживание движения цели и основанный на использовании скользящего режима вдоль желаемой траектории в пространстве состояний объекта. Приведены результаты моделирования в среде MATLAB/SIMULINK, подтверждающие эффективность предложенного алгоритма.

Введение. Возникший в последние два десятилетия интерес к совместному использованию подвижных объектов привел к необходимости разработки методов управления группой объектов, обеспечивающих устойчивость группы, ее перестроение и эффективное применение [1–4]. При этом желательным является децентрализованное (автономное) управление членами группы, минимизирующее информационный обмен между ними. В литературе описаны различные критерии эффективности управления: минимум квадратичного функционала, зависящего от отклонений объектов от заданной точки пространства и относительных скоростей объектов [1]; минимум потенциальной энергии объекта в некотором виртуальном потенциальном поле [4] и др.

В данной работе рассматривается алгоритм управления, основанный на организации вынужденного движения вдоль желаемой траектории в пространстве состояний объекта, приводящей его к заданному положению в составе группы.

Скользящий режим управления подвижным объектом. По аналогии с [1] рассмотрим движение объекта в плоскости (x, y) в соответствии с системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= v \sin \varphi, \\ \dot{y} &= v \cos \varphi, \\ \dot{v} &= F/m, \\ \ddot{\varphi} &= M/J, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке Сибирского отделения РАН (Комплексный интеграционный проект № 1.4).

где x, y – координаты объекта на плоскости; v – линейная скорость объекта ($v \geq 0$); φ – угол, характеризующий направление движения объекта относительно оси ординат ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$) (рис. 1); m – масса объекта; J – момент инерции объекта. К управляющим (входным) переменным относятся продольная движущая сила F и вращающий момент M . Здесь и далее точка над переменной обозначает ее производную по времени.

Управление объектом осуществляется изменением параметров F/m и M/J – линейным и угловым ускорениями объекта. Выделим в составе группы объект-лидер, относительно которого остальные члены группы определяют свое положение и за которым они следуют.

Поставим перед лидером задачу выхода в точку с координатами $(x_0(t), y_0(t))$ на некоторой кривой в плоскости (x, y) и дальнейшего движения вдоль этой кривой. Направление на точку $(x_0(t), y_0(t))$ определяется углом $\varphi_0(t)$, $0 \leq \varphi_0 \leq 2\pi$ (см. рис. 1). Зададим ошибку в положении лидера относительно точки $(x_0(t), y_0(t))$ тремя величинами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x(t) &= x(t) - x_0(t), \\ \Delta y(t) &= y(t) - y_0(t), \\ \Delta \varphi(t) &= \varphi(t) - \varphi_0(t). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Угол $\varphi_0(t)$ определим следующим образом:

$$\varphi_0(t) = \begin{cases} \text{Arctg}(-\Delta x / -\Delta y) & \text{при } \Delta x^2 + \Delta y^2 > \varepsilon, \\ \text{Arctg}(-\dot{x}_0 / -\dot{y}_0) & \text{при } \Delta x^2 + \Delta y^2 \leq \varepsilon \text{ и } \dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2 \neq 0, \\ \varphi_{0_ref} & \text{при } \Delta x^2 + \Delta y^2 \leq \varepsilon \text{ и } \dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь угол φ_{0_ref} задает ориентацию лидера при неподвижной точке (x_0, y_0) , ε определяет некоторую окрестность точки (x_0, y_0) . Желаемую траекторию

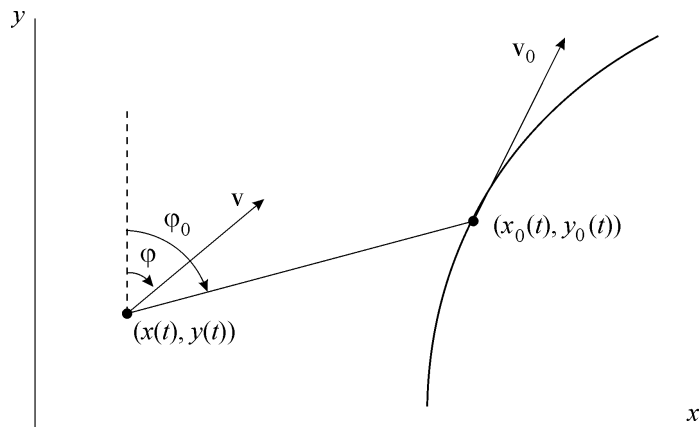


Рис. 1. Движение объекта относительно заданного положения на траектории

движения в пространстве переменных $x, \dot{x}, y, \dot{y}, \varphi, \dot{\varphi}$ определим системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} + k_1 \Delta x &= 0, \\ \dot{y} + k_1 \Delta y &= 0, \\ \dot{\varphi} + k_2 \Delta \varphi &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Выполнение условий (4) при неподвижной точке (x_0, y_0) обеспечивает экспоненциальное уменьшение ошибок $\Delta x, \Delta y, \Delta \varphi$ в положении объекта с постоянными времени $T_1 = 1/k_1, T_2 = 1/k_1, T_3 = 1/k_2$ соответственно. При подвижной точке $(x_0(t), y_0(t))$ ошибки $\Delta x, \Delta y, \Delta \varphi$ будут обрабатываться с некоторой динамической погрешностью, определяемой производными $\dot{x}_0(t), \dot{y}_0(t)$ и маневренностью объекта.

К сожалению, с помощью двух параметров F и M , не воздействующих непосредственно на $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\varphi}$, невозможно обеспечить одновременное выполнение условий (4), однако можно организовать вынужденное движение системы в скользящем режиме [5, 6] вдоль траектории, заданной этими уравнениями.

Определим отклонение объекта от траектории (4) функциями

$$\left. \begin{aligned} S_1(x, \dot{x}) &= \dot{x} + k_1 \Delta x, \\ S_2(y, \dot{y}) &= \dot{y} + k_1 \Delta y, \\ S_3(\varphi, \dot{\varphi}) &= \dot{\varphi} + k_2 \Delta \varphi, \\ S(x, \dot{x}, y, \dot{y}, \varphi, \dot{\varphi}) &= \frac{1}{2}(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

и выберем управляющие параметры F, M из условия

$$dS/dt \leq 0. \quad (6)$$

Знак равенства в (6) допустим только при $S = 0$, что гарантирует выполнение условий (4). В случае $S \neq 0$ выполнение условия $\dot{S} < 0$ вынуждает движение системы в окрестности траектории, заданной уравнениями (4).

Вычислим

$$\dot{S} = S_1 \dot{S}_1 + S_2 \dot{S}_2 + S_3 \dot{S}_3. \quad (7)$$

С учетом (5) и уравнений движения (1)

$$\dot{S} = S_1(F/m) \sin \varphi + S_2(F/m) \cos \varphi + S_3(M/J) + \dots \quad (8)$$

Здесь многоточием обозначены члены, не содержащие переменные F и M .

Положим

$$u = -(S_1 \sin \varphi + S_2 \cos \varphi). \quad (9)$$

При отсутствии ограничений на переменные F и M и с учетом требования (6) и условия $v \geq 0$ определим управляющий параметр F/m как

$$F/m = \begin{cases} c_1 u & \text{при } v > 0 \text{ или } u \geq 0, \\ 0 & \text{при } v = 0 \text{ и } u < 0. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь c_1 – коэффициент усиления в канале управления скоростью. Аналогично

$$M/J = -c_2 S_3, \quad (11)$$

где c_2 – коэффициент усиления в канале управления курсом (углом φ).

Очевидно, что при достаточно больших значениях коэффициентов c_1 и c_2 можно выполнить условие (6), если u и S_3 не равны нулю тождественно. Легко показать, что равенства $u \equiv 0$, $S_3 \equiv 0$ эквивалентны тождественному выполнению условий (4), т. е. точному движению системы по заданной траектории.

Если u и S_3 не равны нулю тождественно, при достаточно больших значениях коэффициентов усиления в системе возможно возникновение скользящих режимов, характеризующихся движением системы в пограничном слое [5] в окрестности заданной траектории.

Проверка эффективности предложенного алгоритма проводилась на модели объекта и системы управления. Результаты моделирования движения лидера вдоль траектории, заданной уравнениями

$$\left. \begin{array}{l} x_0(t) = t, \\ \dot{x}_0(t) = 1, \\ y_0(t) = 1, \\ \dot{y}_0(t) = 0 \end{array} \right\} \text{при } 0 \leq t < 2; \quad \left. \begin{array}{l} x_0(t) = 2, \\ \dot{x}_0(t) = 0, \\ y_0(t) = t - 1, \\ \dot{y}_0(t) = 1 \end{array} \right\} \text{при } t \geq 2 \quad (12)$$

с начальными условиями $x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = 0$, $y(0) = 2$, $\dot{y}(0) = 0$, $\varphi(0) = -\pi$, $\dot{\varphi}(0) = 0$, представлены на рис. 2, *a, b*.

Управление движением группировки. При описании движения остальных членов группы необходимо указать их место в группе относительно лидера. Будем полагать, что навигационная система каждого объекта может определять либо получать координаты и данные о направлении движения лидера. В таком случае можно однозначно указать требуемые координаты объекта и направление его движения в составе группы.

Сохраним прежние обозначения параметров движения лидера. Присвоим соответствующим параметрам i -го объекта индекс i . Тогда движение i -го объекта будет описываться уравнениями (1) с заменой обозначений $x, y, v, \varphi, F, M, m, J$ обозначениями $x_i, y_i, v_i, \varphi_i, F_i, M_i, m_i, J_i$ соответственно.

Для определения места i -го объекта в группе (рис. 3) введем следующие параметры: d_i – расстояние до лидера, α_i – направление на лидера относительно направления его движения.

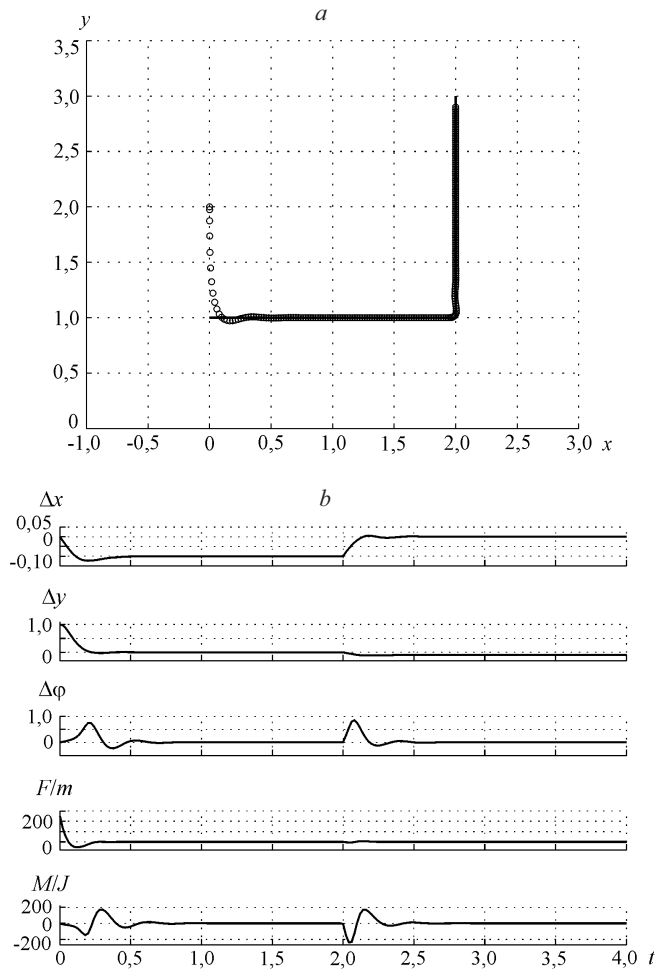


Рис. 2. Моделирование движения лидера вдоль траектории, описанной уравнениями (12): *a* – траектория движения лидера в плоскости x, y (сплошная линия – заданная траектория, кружки – траектория перемещения лидера); *b* – ошибки в положении лидера относительно заданной цели и управляющие параметры

В соответствии с рис. 3 определим значения координат требуемого положения i -го объекта в группе:

$$\left. \begin{aligned} x_{i_ref} &= x - d_i \sin(\varphi + \alpha_i), \\ y_{i_ref} &= y - d_i \cos(\varphi + \alpha_i). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Уравнения (2), (3), (5), (9)–(11) модифицируются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_i(t) &= x_i(t) - x_{i_ref}(t), \\ \Delta y_i(t) &= y_i(t) - y_{i_ref}(t), \\ \Delta \varphi_i(t) &= \varphi_i(t) - \varphi_{i_0}(t); \end{aligned} \right\} \quad (2')$$

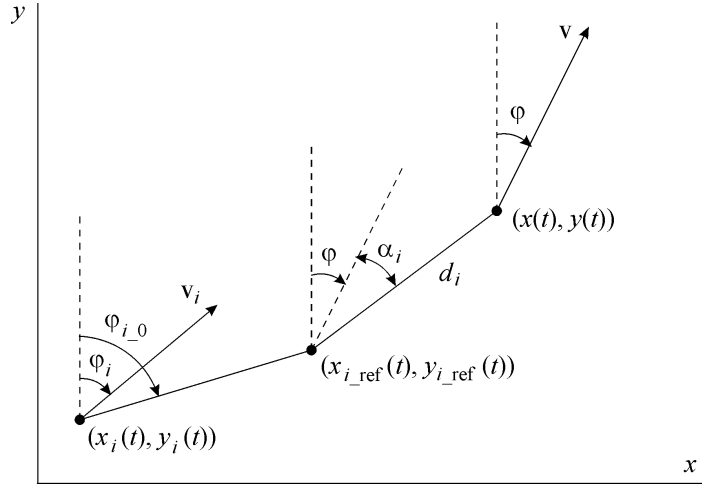


Рис. 3. Движение объекта относительно заданного положения в группе

$$\varphi_{i_0}(t) = \begin{cases} \text{Arctg}(-\Delta x_i / -\Delta y_i) & \text{при } \Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 > \varepsilon, \\ \text{Arctg}(-\dot{x}_{i_ref} / -\dot{y}_{i_ref}) & \text{при } \Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 \leq \varepsilon \text{ и } (\dot{x}_{i_ref})^2 + (\dot{y}_{i_ref})^2 \neq 0, \\ \varphi & \text{при } \Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 \leq \varepsilon \text{ и } (\dot{x}_{i_ref})^2 + (\dot{y}_{i_ref})^2 = 0; \end{cases} \quad (3')$$

$$\left. \begin{aligned} S_{1i}(x_i, \dot{x}_i) &= \dot{x}_i + k_{1i} \Delta x_i, \\ S_{2i}(y_i, \dot{y}_i) &= \dot{y}_i + k_{1i} \Delta y_i, \\ S_{3i}(\varphi_i, \dot{\varphi}_i) &= \dot{\varphi}_i + k_{2i} \Delta \varphi_i; \end{aligned} \right\} \quad (5')$$

$$u_i = -(S_{1i} \sin \varphi_i + S_{2i} \cos \varphi_i). \quad (9')$$

Окончательно управляющие параметры i -го объекта группы определяются из соотношений

$$F_i / m_i = \begin{cases} c_{1i} u_i & \text{при } v_i > 0 \text{ или } u_i \geq 0, \\ 0 & \text{при } v_i = 0 \text{ и } u_i < 0; \end{cases} \quad (10')$$

$$M_i / J_i = -c_{2i} S_{3i}. \quad (11')$$

Соотношения (13), (2'), (3'), (5'), (9') – (11') решают задачу управления i -м объектом в составе группы, следующей за лидером по заданной траектории. При этом сохраняется единообразие управления для всех членов группы, что обеспечивает их взаимозаменяемость при выходе из строя какого-либо члена группы.

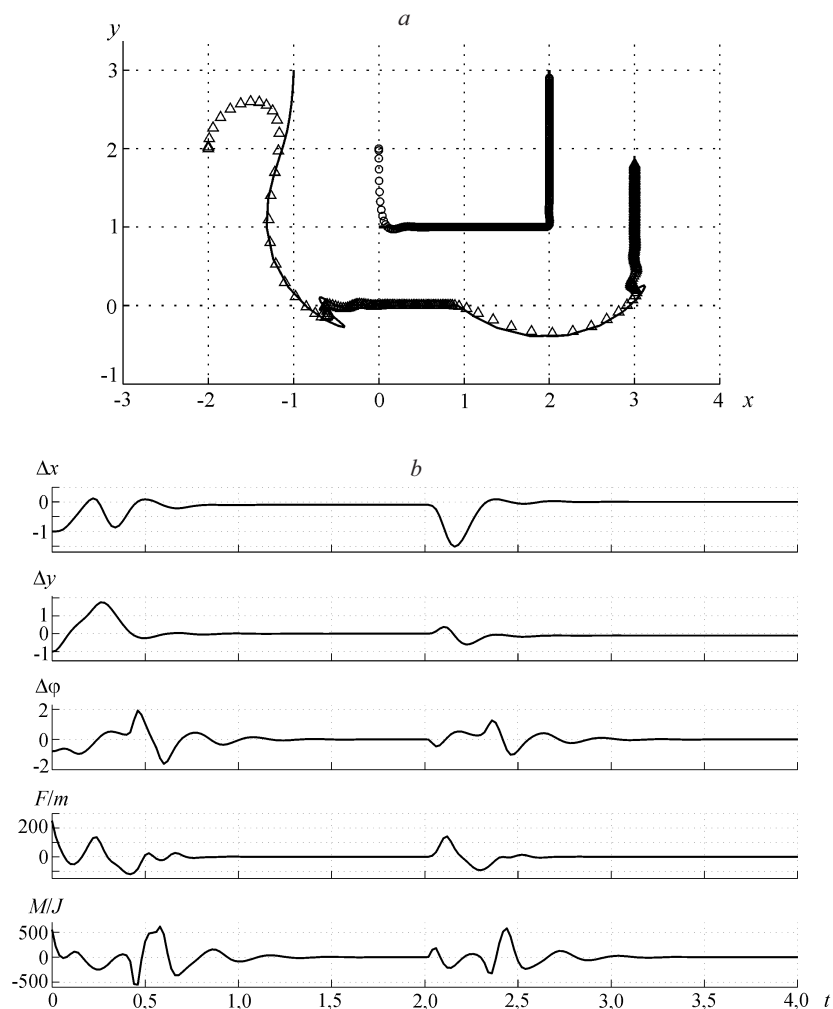


Рис. 4. Движение группы в составе «лидер–ведомый» ($\alpha_1 = -\pi/4$, $d_1 = \sqrt{2}$) вдоль траектории: a – траектория движения группы в плоскости x , y (сплошная утолщенная линия – заданная траектория для лидера, сплошная тонкая линия – заданная траектория для ведомого, кружки – траектория перемещения лидера, треугольники – траектория перемещения ведомого); b – ошибки в положении ведомого относительно заданной цели и управляющие параметры. Начальные условия: $x(0) = 0$, $x_1(0) = -2$, $y(0) = y_1(0) = 2$, $\varphi(0) = -\pi$, $\varphi_1(0) = 0$

Результаты моделирования движения группы в составе «лидер–ведомый» при движении по траектории, заданной уравнениями (12), представлены на рис. 4, a , b . Отчетливо видны этапы формирования группы и маневрирования при резком изменении направления движения.

Два примера движения лидера вдоль окружности показаны на рис. 5, a , b . Во втором примере вводятся ограничения на управляющие параметры F/m и M/J . В обоих случаях использованы одни и те же значения коэффициентов в системе управления и начальные условия.

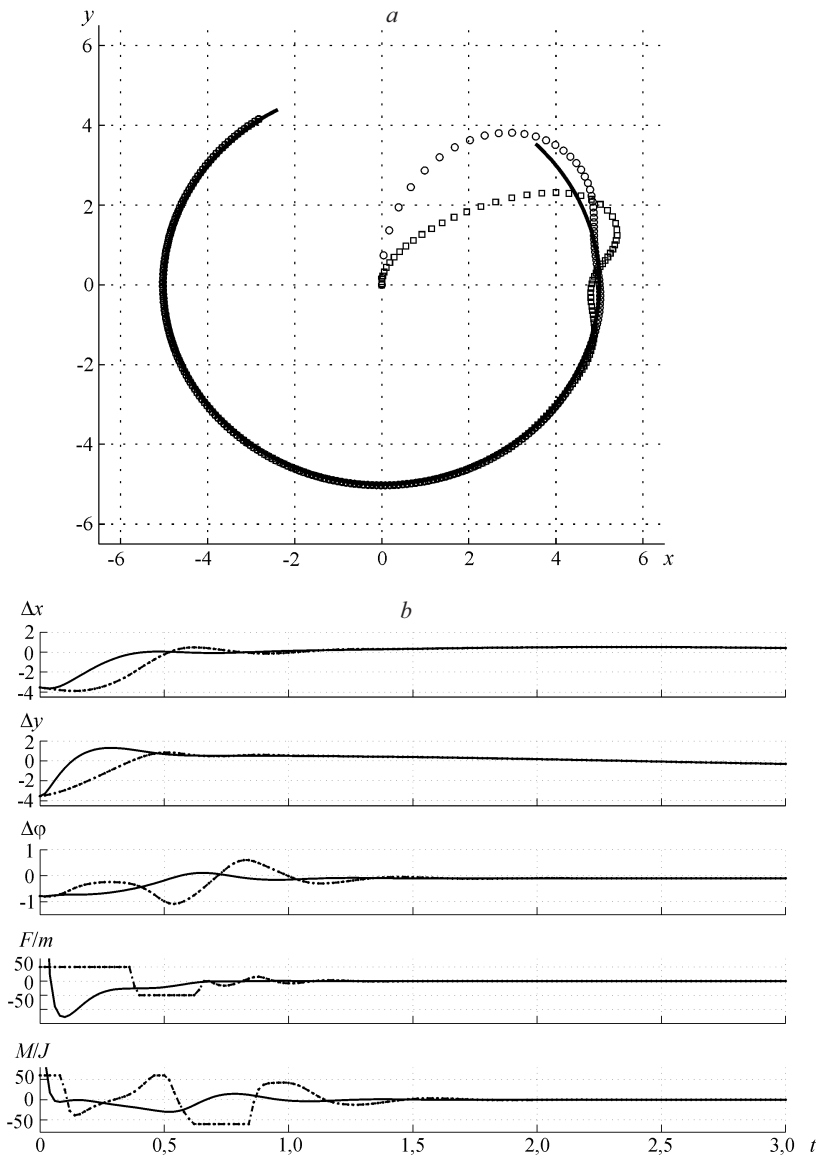


Рис. 5. Сопровождение лидером точки, движущейся по окружности радиуса 5 с центром в начале координат: a – траектория движения лидера в плоскости x , y (сплошная линия – заданная траектория, кружки – траектория движения лидера при отсутствии ограничений на управляющие параметры F/m и M/J , квадраты – траектория движения лидера при $|F/m| \leq 50$, $|M/J| \leq 60$); b – ошибки в положении лидера относительно заданной цели и управляющие параметры (сплошная линия – нет ограничений на управляющие параметры F/m и M/J , пунктирная линия – $|F/m| \leq 50$, $|M/J| \leq 60$). Начальные условия: $x(0) = y(0) = 0$, $\varphi(0) = 0$

Заключение. Для группы автономных роботов с лидером разработан робастный алгоритм отслеживания траектории цели, основанный на применении скользящего режима вдоль желаемой траектории в пространстве состояний. Проведено моделирование объекта и системы управления в среде

MATLAB/SIMULINK для различных случаев движения объекта: вдоль ломаной кривой и вдоль окружности. Результаты моделирования подтверждают эффективность предложенного алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lawton J. R. T., Beard R. W., Young B. J.** A decentralized approach to formation maneuvers // IEEE Trans. Robotics and Automation. 2003. **19**, Issue 6. P. 933.
2. **Шнайдер Ф. Е., Вильдермут Д.** Навигация группировки роботов: направленный и ненаправленный методы потенциального поля // Автометрия. 2006. **42**, № 5. С. 98.
3. **Шнайдер Ф. Е., Вильдермут Д.** Использование относительного положения в навигации группы роботов // Там же. С. 110.
4. **Leonard N. E., Fiorelli E.** Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups // Proc. of the 40th IEEE Conf. on Decision and Control. Orlando, Florida, 2001. P. 2968.
5. **Уткин В. И.** Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981.
6. **Бобко В. Д., Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А.** Нечеткая реализация скользящих режимов в системе возбуждения синхронного генератора // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. междунар. конф. Самара: Самарский научный центр РАН, 1999. С. 229.

Поступила в редакцию 24 января 2007 г.