

МНОГОКОНТУРНАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГРУППИРОВКОЙ ТРАНСПОРТНЫХ РОБОТОВ

А.С. Мальцев, А.Е. Цула

Институт автоматики и электрометрии СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, Россия
alexandr@idisys.iae.nsk.su
тел: +7 (383) 333-26-25

Ключевые слова: управление группой мобильных роботов, подчиненное управление, синтез систем автоматического регулирования, настройка коэффициентов регулятора.

Abstract

The paper addresses how to control a group of mobile robots with differential drive in the problem of cargo transportation along the desired trajectory. We propose a multiple loops structure of the control system with additional adaptive loop for each robot to compensate disturbance in motion dynamic and provide reference dynamic characteristics.

Введение

В ряде случаев, таких как наблюдение, исследование окружающей среды на большой площади, транспортирование груза, совместное использование относительно простых роботов в составе единой группы более эффективно, чем применение одиночного робота сложной конструкции [1]. В то же время, при построении системы в виде набора устройств, совместно работающих в группе, возникает необходимость в разработке специализированных методов и алгоритмов управления, отличающихся от методов управления одиночным роботом [2]. Для разработки таких систем целесообразно применять подходы, основанные на принципах централизации и децентрализации [3-5]. Для задач перемещения груза распространен подход при котором группа роботов окружает объект и двигает его совместно, контролируя, чтобы каждый робот оставался внутри заданной конфигурации [6, 7]. Сохранение конфигурации обеспечивается за счет потенциальных или векторных полей.

В то же время на параметры движения роботов значительное влияние оказывают внешние и внутренние факторы, такие как нестационарные характеристики приводных механизмов, неоднородность поверхности движения, наличие неизвестных преград и нагрузок. В таких условиях целесообразно дополнить систему управления контуром адаптации, который позволит компенсировать априори точно неизвестные динамические характеристики отдельных роботов, либо изменения этих характеристик в процессе движения.

В докладе приведен способ построения системы координированного управления группой мобильных роботов с дифференциальным приводом применительно к задаче транспортирования груза по заданной траектории. Предложена многоконтурная структура системы управления, дополненная блоками адаптации к действию неизвестных и переменных факторов.

1 Постановка задачи

Движение груза при отсутствии возмущений можно описать многомерной нелинейной системой стационарных уравнений, где суммируются компоненты векторов движения каждого робота [8]. Требуется определить структуру и параметры системы управления для перемещения груза группой роботов по заданной траектории с погрешностью, не превышающей требуемую величину. При этом задачу управления перемещением груза предлагается свести к

задаче слежения каждым роботом за желаемым положением относительно его центра, которое определяется требуемой траекторией и распределением роботов, с необходимостью поддержания заданного расстояния между всеми работами группы. В этом случае требуемая траектория перемещения груза формируется в виде программного движения целевой точки по кусочно-линейным участкам между заданными точками пути, либо по проведенному через них сплайну.

Далее приведен способ построения такой следящей системы, которая обеспечивает управление перемещением отдельно взятого робота в заданную точку пространства координат, коррекцию положения этой точки с целью сохранения конфигурации группы роботов и их координированного движения при перемещении груза, а также адаптацию параметров регуляторов к изменению динамических характеристик роботов в процессе движения.

2 Управление перемещением роботов

Для решения поставленной задачи предлагается синтезировать многоконтурную систему подчиненного регулирования, в состав которой входят три контура. Контур управления положением отдельно взятого робота обеспечивает его перемещение из произвольного начального состояния в малую окрестность желаемого положения в пространстве координат. Контур управления конфигурацией группы выполняет коррекцию желаемого положения для каждого робота с целью сохранения конфигурации группы и обеспечения координированного движения. Контур управления перемещением груза формирует сигналы заданного положения для каждого робота в зависимости от требуемой траектории движения груза и необходимого расположения роботов относительно него. Рассмотрим принципы построения каждого из этих контуров в отдельности.

Движение i -го робота при управлении линейной и угловой скоростями описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка [3], дополненных зависящими от времени возмущениями:

$$(1) \quad \begin{cases} \dot{x}_i = (v_i - m_{vi}(t)) \cos \psi_i, \\ \dot{y}_i = (v_i - m_{vi}(t)) \sin \psi_i, \\ \dot{\omega}_i = \omega_i - m_{\omega i}(t), \end{cases}$$

где x_i, y_i, ψ_i – координаты и курсовой угол i -го робота; v_i и ω_i – команды управления линейной и угловой скоростями соответственно; $m_{vi}(t)$ и $m_{\omega i}(t)$ – зависящие от времени возмущения, связанные с проскальзыванием колес при движении по неоднородной поверхности, с изменением нагрузок, либо изменением уровня заряда аккумулятора, причем

$$(2) \quad |m_{vi}(t)| < |v_i|, \quad |m_{\omega i}(t)| \leq \omega_{\max}.$$

Потребуем от системы экспоненциального движения к заданному положению в соответствии со следующими уравнениями:

$$(3) \quad \begin{cases} F_{x_i} = a_1(x_{ri} - x_i), \\ F_{y_i} = a_1(y_{ri} - y_i), \\ F_{\psi_i} = a_2(\psi_{ri} - \psi_i), \end{cases}$$

где $F_{x_i}, F_{y_i}, F_{\psi_i}$ – желаемые значения старших производных переменных состояния; a_1, a_2 – положительные коэффициенты, задающие скорость сходимости к желаемым координатам $(x_{ri}, y_{ri}, \psi_{ri})$, которые определяются требуемым положением робота в соответствии с текущим расположением груза, заданной траекторией его перемещения и необходимым распределением роботов относительно него.

Тогда, приравнявая правые части уравнений (1) и (3), на основе метода решения обратной задачи динамики [9] получим закон управления, обеспечивающий заданное время сходимости процессов:

$$(4) \quad \begin{cases} v_i = a_1(x_{ri} - x_i)\cos\psi_i + a_1(y_{ri} - y_i)\sin\psi_i + m_{vi}(t), \\ \omega_i = a_2(\psi_{ri} - \psi_i) + m_{\omega i}(t), \end{cases}$$

или

$$(5) \quad \begin{cases} v_i = F_{xi} \cos\psi_i + F_{yi} \sin\psi_i + m_{vi}(t), \\ \omega_i = F_{\psi i} + m_{\omega i}(t). \end{cases}$$

Закон управления (5) содержит неизвестные (переменные) параметры и поэтому в точном виде не реализуем. В этой связи неизвестные параметры заменяются на соответствующие настраиваемые коэффициенты регулятора $k_{vi}(t)$ и $k_{\omega i}(t)$:

$$(6) \quad \begin{cases} v_i = F_{xi} \cos\psi_i + F_{yi} \sin\psi_i + k_{vi}(t), \\ \omega_i = F_{\psi i} + k_{\omega i}(t). \end{cases}$$

Система (6) определяется структуру адаптивного регулятора полного порядка с аддитивно входящими настраиваемыми параметрами.

Уравнения закона адаптации находятся согласно методу относительной старшей производной и второму методу Ляпунова [10, 11]. В результате алгоритм настройки коэффициентов регулятора рассматривается в виде:

$$(7) \quad \begin{cases} \dot{k}_{vi} = -\gamma_v L_v (F_{zi} - \dot{z}_i), \\ \dot{k}_{\omega i} = -\gamma_\omega L_\omega (F_{\psi i} - \dot{\psi}_i), \end{cases}$$

либо

$$(8) \quad \begin{cases} \dot{k}_{vi} = -\gamma_v L_{v1} \operatorname{sgn}(L_{v2} (F_{zi} - \dot{z}_i)), \\ \dot{k}_{\omega i} = -\gamma_\omega L_{\omega 1} \operatorname{sgn}(L_{\omega 2} (F_{\psi i} - \dot{\psi}_i)). \end{cases}$$

Здесь γ_v, γ_ω – коэффициенты адаптора; L_v, L_ω – вспомогательные функции, которые зависят от переменных состояния. Значения этих коэффициентов и вид функций выбираются из условия сходимости процессов к желаемой траектории. Функции z_i описывают отклонения роботов от желаемого положения: $z_i = z(x_i, y_i)$.

При наличии шумов оценивания координат, прямое вычисление производных для законов (7) или (8) приведет к значительному усилению влияния этих шумов. В этом случае в выражениях (7) или (8) целесообразно использовать оценки производных, полученных с помощью дифференцирующих фильтров [10].

3 Управление координированным движением группы

Уравнения (6) описывают внутренний контур управления перемещением робота в заданную точку (рисунок 1). Очевидно, что этого закона управления недостаточно для координированного движения группы из-за отсутствия ограничения на расположение роботов друг относительно друга. Для сохранения конфигурации группы, а именно поддержания требуемого расстояния между всеми роботами, уравнения (6) необходимо дополнить потенциальными функциями [12] G_{xi} и G_{yi} , которые описывают изменение величины силы отталкивания и притягивания между роботами по двум координатам в зависимости от текущего и требуемого расстояний, и выполняют задачу коррекции желаемого положения каждого робота так, что:

$$(9) \quad \tilde{x}_{ri} = x_{ri} + G_{xi}, \quad \tilde{y}_{ri} = y_{ri} + G_{yi},$$

где

$$G_{xi} = \sum_{j=1}^n G(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, d_{rij}) \cos \beta_{ij},$$

$$(10) \quad G_{yi} = \sum_{j=1}^n G(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, d_{rij}) \sin \beta_{ij},$$

$$\beta_{ij} = \arctan \frac{\Delta y_{ij}}{\Delta x_{ij}}.$$

Здесь $\tilde{x}_{ri}, \tilde{y}_{ri}$ – скорректированное желаемое положение робота, используемое в законе управления (5) вместо x_{ri}, y_{ri} ; $\Delta x_{ri}, \Delta y_{ri}$ – рассогласование координат между i -м и j -м роботами; $G(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, d_{rij})$ – потенциальная функция отталкивания и притягивания, зависящая от отклонения между текущим и требуемым d_{rij} расстояниями между роботами. В качестве потенциальных функций могут быть использованы выражения вида:

$$(11) \quad G(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, d_{rij}) = k \left(\frac{d_{rij}}{d_{ij}} - 1 \right),$$

либо

$$(12) \quad G(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}, d_{rij}) = k \left(\frac{d_{rij}}{d_{ij}^2} - \frac{1}{d_{ij}} \right),$$

где d_{ij} – расстояние между i -м и j -м роботами; k – положительный коэффициент усиления.

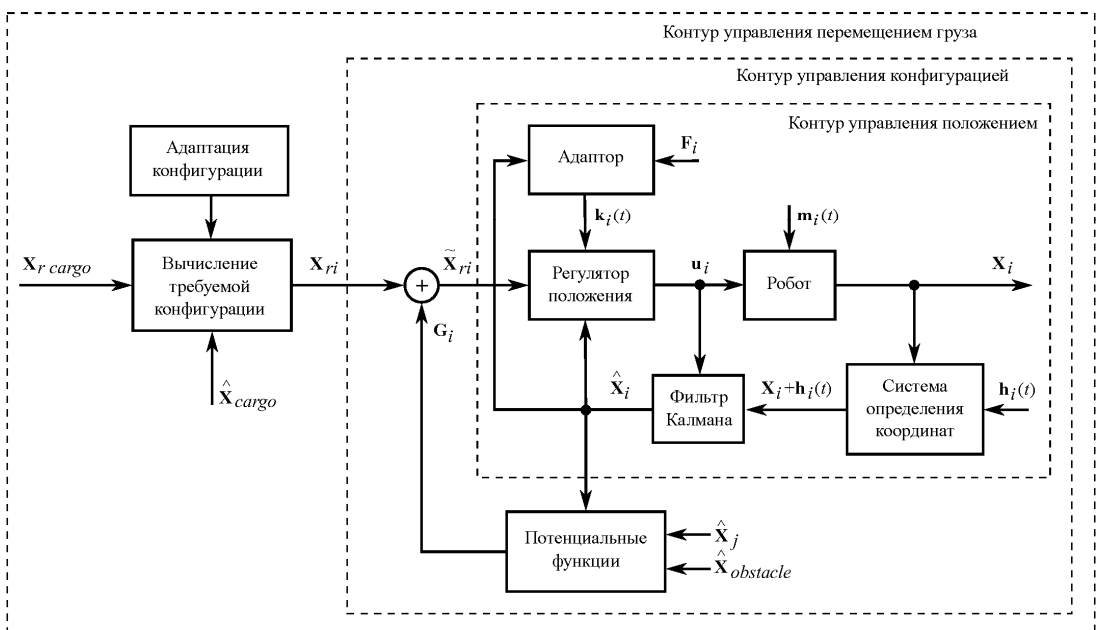


Рисунок 1 – Функциональная схема системы управления

Общая схема функционирования системы представлена на рисунке 1. На схеме $\mathbf{X}_i = [x_i, y_i, \psi_i]$ – вектор состояния i -го робота; $\mathbf{u}_i = [v_i, \omega_i]$ – вектор управляющих воздействий.

вий; $\hat{\mathbf{X}}_i$ – оценка вектора состояния, получаемая в фильтре Калмана [13, 14]; \mathbf{G}_i – вектор значений потенциальных функций; $\mathbf{h}_i(t)$ – вектор шумов измерений.

Моделирование движения группы роботов в условиях действия возмущений показано на рисунке 2. Видно, что наличие адаптивной подстройки (рисунок 2б) в значительной степени уменьшает влияние рассмотренных возмущений на траектории движения каждого робота. При этом на рисунке 3 представлен пример изменения во времени значения настраиваемого коэффициента $k_\omega(t)$ и курсового угла ψ одного робота для системы с адаптивными законами управления (6), (7) при $\gamma_\omega = -2$, $L_\omega = 1$.

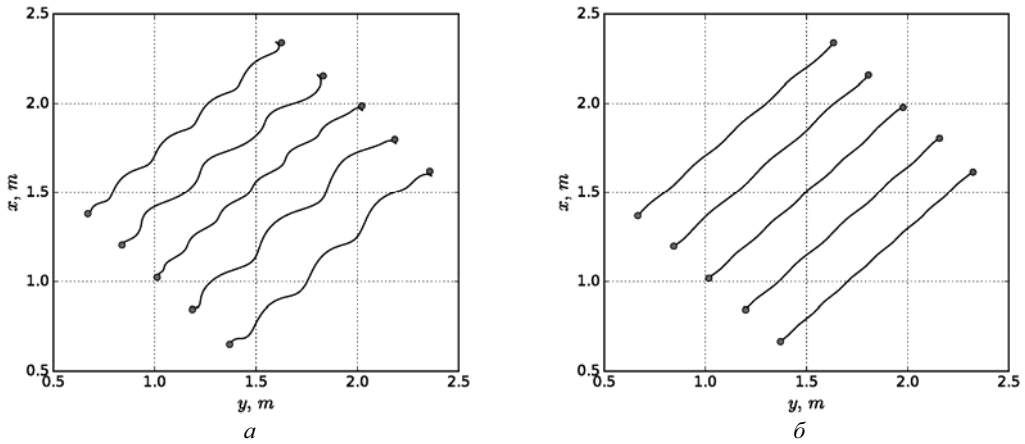


Рисунок 2 – Траектория движения группы роботов в условиях возмущений для случая без адаптации (а) и для случая наличия адаптивного закона в регуляторе положения (б)

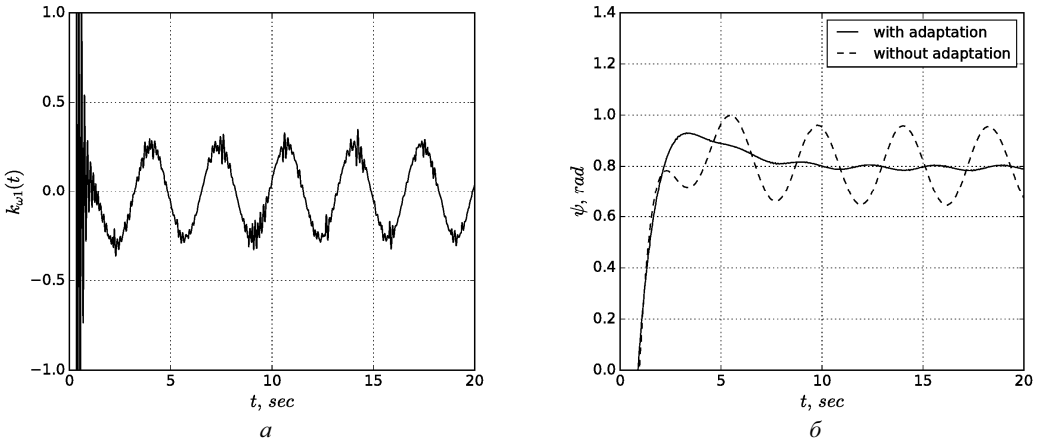


Рисунок 3 – Изменение во времени настраиваемого коэффициента $k_\omega(t)$ (а) и курсового угла ψ (б) для одного робота

Анализ работы контура коррекции желаемого положения каждого робота показал [8] возможность обеспечения координированного движения группы роботов, перемещающих груз по заданной траектории, с поддержанием необходимой конфигурации с погрешностью не более 5% по данным численных и реальных экспериментов.

Заключение

Представлена многоконтурная структура управляющей системы и метод организации движения группы мобильных роботов для решения задачи перемещения груза, основанный на слежении за желаемым положением относительно центра груза, отличающийся введением потенциальных функций отталкивания и притягивания между роботами для коррекции желаемого положения, позволяющий обеспечить сохранение конфигурации группы роботов и их координированное движение при совместном перемещении и вращении груза. Использование дополнительных законов адаптации позволило компенсировать действия возмущений и обеспечить заданные динамические характеристики по каналам управления для каждого робота в составе группы.

Список литературы

- [1] Ogren P., Fiorelli E., Ehrich Leonard N. Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment // *IEEE Trans. on automatic control*. 2004. Vol. 49, No. 8. P. 1292–1302.
- [2] Yanyan Dai, Kyung Sik Choi, Suk Gyu Lee. Adaptive formation control and collision avoidance using a priority strategy for nonholonomic mobile robots // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013. Vol. 10. P. 1-14.
- [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. P. 933–941.
- [4] Nathan M., Jonathan F., Vijay K. Cooperative manipulation and transportation with aerial robots // *Autonomous Robots*. 2011. Vol. 30, No. 1. P. 73–86.
- [5] Yamashita A., Arai T., Ota J., Asama H. Motion planning of multiple mobile robots for Cooperative manipulation and transportation // *Robotics and Automation*. 2003. Vol. 19, No. 2. P. 223–237.
- [6] Rubenstein M., Cabrera A., Werfel J. Collective transport of complex objects by simple robots: theory and experiments // *Proc. of the 40th Int. Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2013)*. Saint Paul, MN, USA, 2013. P. 47–54.
- [7] Sugar T., Kumar V. Multiple cooperating mobile manipulators // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 99)*. Detroit, MI, USA, 1999. P. 1538–1543.
- [8] Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Соболев М.А., Цупа А.Е. Координированное управление группой роботов в задачах перемещения груза // *Вычислительные технологии*. 2016. Т. 21, № 1. С. 70–79.
- [9] Крутько П.Д. Обратные задачи динами в теории автоматического управления. М.: Машиностроение. 2004. 576 с.
- [10] Востриков А.С. Синтез систем регулирования методом локализации. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2007. 252 с.
- [11] Шпилевая О.Я. Адаптивные системы с эталонными моделями: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2007. 103 с.
- [12] Song P., Kumar R. A Potential field based approach to multi-robot manipulation // *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. Washington. 2002. Vol. 2. P. 1217–1222.
- [13] Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. University of North Carolina at Chapel Hill. 1995. 16 p.
- [14] Белоконь С.А., Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Пивкин В.Я., Соболев М.А., Филиппов М.Н., Ян А.П. Использование фильтра Калмана в системе управления траекторным движением квадрокоптера // *Автоматрия*. 2013. Т. 49, № 6. С. 14–24.