

Управление полетом квадрокоптера при параметрическом задании траектории движения

С.А. Белокопьев, Ю.Н. Золотухин, К.Ю. Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров,
М.А. Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

E-mail: zol@idisys.iae.nsk.su

Ключевые слова: квадрокоптер AR.Drone, управление траекторным движением, параметрическое задание траектории движения

Аннотация: Рассматривается задача управления траекторным движением квадрокоптера. Показано, что предложенный ранее метод построения системы автоматического управления движением по заданной в неявном виде траектории распространяется на случай задания траектории в параметрическом виде. Работоспособность системы управления в присутствии шумов измерений и внешних возмущений подтверждается результатами экспериментов с квадрокоптером AR.Drone.

1. Введение

При перемещении робота в заранее неизвестной или сложной среде осуществляется непрерывное планирование и построение траектории движения [1], [2]. Удобным в этом случае является задание траектории опорными точками и дальнейшее представление траектории в параметрическом виде [3]. В случае необходимости соблюдения требований ограниченности производных по времени координат целевого положения или гладкости вырабатываемых управляющих воздействий используются различные методы интерполяции желаемой траектории, например аппарат сплайнов [4], [5].

В последнее десятилетие значительно возрос интерес к управлению компактными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) мультироторных конфигураций, что объясняется простотой и гибкостью конструкции, надежностью и управляемостью таких аппаратов [6], [7], [8].

Данная работа посвящена траекторному управлению квадросроторным БПЛА (далее квадрокоптером). Известные подходы к решению задачи отслеживания желаемой траектории по целевому положению можно разбить на несколько основных групп: методы основанные на использовании динамической обратной связи [9], [10] бэкстэппинга и скользящих режимов [11], [12].

Для управления квадрокоптером мы используем разработанный нами и успешно примененный в ряде приложений метод организации вынужденного движения по желаемой траектории в пространстве состояний объекта [13], [14], [15]. В работах

[14], [15] было использовано неявное описание траектории движения. В данной работе показано, что без изменения структуры алгоритма желаемая траектория может быть задана в параметрическом виде.

Проведенные эксперименты по управлению полетом квадрокоптера в помещении показали работоспособность предложенной системы управления.

2. Описание объекта управления

В качестве объекта управления используется квадрокоптер AR.Drone, разработанный компанией Parrot (США) [16] и построенный по классической четырехвинтовой схеме. Выбор этого устройства в качестве платформы для экспериментов обусловлен приемлемым соотношением цена — технические характеристики, а также полноценной программной поддержкой со стороны производителя и пользователей.

Основная компьютерная система аппарата — процессор ARM9 с тактовой частотой 468 МГц, оперативная память DDR 128 Мб на шине 200 МГц и операционная система GNU Linux — позволяет вести обработку информации, получаемой от различных датчиков квадрокоптера, и выдавать управляющие команды для поддержания необходимого режима полета (взлет, зависание, задание "пилота", посадка).

Система навигации AR.Drone состоит из PIC микроконтроллера с тактовой частотой 40 МГц, выполняющего функции сбора и предобработки навигационных данных, и набора датчиков: ультразвукового вышотомера, трехосевого модуля акселерометров, двухосевого гироскопа и одноосевого высокоточного курсового гироскопа. Система технического зрения AR.Drone имеет две видеокамеры: фронтальную с разрешением видеопотока 640 x 480 пикселей и частотой 15 кадров/с и вертикальную, расположенную в нижней части корпуса, с меньшим разрешением видеопотока, но большей частотой 60 кадров/с. При габаритах 52,5 см x 51,5 см и массе аппарата около 420 г время полета составляет около 15 минут. Максимальная скорость 5 м/с.

Программное обеспечение системы управления предполагает модульную архитектуру и должно обеспечить получение данных и передачу управляющих команд с помощью механизма межпроцессного взаимодействия ROS (Robot Operating System) [17]. Этот механизм основан на использовании общего сервера и коммуникации всех модулей через единый интерфейс, основанный на протоколе TCP. Авторами использован пакет ROS tum_ardrone, каждый модуль которого представляет собой независимый процесс и предназначен для решения узкоспециализированной задачи: коммуникации с аппаратом, оценки состояния в расширенном фильтре Калмана и реализации визуального алгоритма локализации и построения карты РТАМ [18], а также формирования управляющих команд.

Разработанный авторами блок управления написан на языке Python с использованием асинхронной отработки данных на основе gobject и интегрирован в систему ROS.

Аппарат AR.Drone обладает собственной многоконтурной системой управления, обеспечивающей движение аппарата с заданной "пилотом" ориентацией ψ_{ref} , ϕ_{ref} , θ_{ref} . Стабилизация по высоте выполняется посредством подачи команды на изменение вертикальной скорости \dot{z}_{ref} [16].

3. Постановка задачи и алгоритм управления

Положение квадрокоптера в пространстве характеризуется координатами x, y, z центра масс аппарата в неподвижной декартовой системе координат и тремя углами поворота вокруг осей связанной системы координат [19].

По причине того, что управление \dot{z}_{ref} по высоте аппарата всегда направлено вдоль оси z , движение аппарата может быть рассмотрено в виде проекции траектории движения на плоскость (x, y) [20]. Упрощенные уравнения динамики, описывающие движение квадрокоптера в координатах (x, y) имеют следующий вид

$$(1) \quad \begin{cases} \ddot{x} = c_1 \cdot (\cos \psi \cdot \sin \phi \cdot \cos \theta - \sin \psi \cdot \sin \theta) - c_2 \cdot \dot{x}; \\ \ddot{y} = c_1 \cdot (\sin \psi \cdot \sin \phi \cdot \cos \theta - \cos \psi \cdot \sin \theta) - c_2 \cdot \dot{y}; \end{cases}$$

Здесь c_1, c_2 — постоянные коэффициенты, определенные экспериментально. Точками над знаками переменных обозначаются производные по времени.

В работе [14] предложена методика определения управляющих параметров и углов ориентации аппарата $\psi_{ref}, \phi_{ref}, \theta_{ref}$, гарантирующих движение квадрокоптера по траектории, определяемой уравнениями

$$(2) \quad l(x, y) = 0,$$

и

$$(3) \quad z = z_{ref}(x, y),$$

со скоростью

$$(4) \quad v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = v_{ref}(x, y).$$

В данной работе поставим перед квадрокоптером задачу отслеживания желаемой траектории по целевому положению $(x_0(t), y_0(t))$ в плоскости (x, y) . Такая постановка задачи управления соответствует заданию траектории в параметрическом виде. Отметим, что по причине независимого управления высотой квадрокоптера, требуемые углы ориентации аппарата будем рассчитывать исходя только из соотношений (2), (4).

С сохранением структуры метода предложенного в [14], запишем (2) в виде

$$(5) \quad l(x(t) - x_0(t), y(t) - y_0(t)) = 0.$$

Здесь функция l определяет величину отклонения аппарата от целевого положения $(x_0(t), y_0(t))$.

В данной постановке задачи необходимым является задание направления движения квадрокоптера или компонент (\dot{x}, \dot{y}) линейной скорости v . Запишем (4) в виде

$$(6) \quad v = [\dot{x}, \dot{y}] = v_{ref}(x, y) = [\dot{x}_{ref}, \dot{y}_{ref}].$$

Для описания направления движения объекта к целевому положению естественно воспользоваться градиентом функции l . При движении аппарата в точку $(x_0(t), y_0(t))$ необходимо ориентировать вектор скорости v параллельно вектору $[-l_x, -l_y]$, а при

нахождении аппарата в некоторой заданной окрестности точки $(x_0(t), y_0(t))$ — параллельно вектору $[\dot{x}_0(t), \dot{y}_0(t)]$.

Для того, чтобы обеспечить ограниченность модуля скорости v_{ref} , целесообразно выбрать в качестве функции l функцию с ограниченным градиентом $[l_x, l_y]$, например

$$(7) \quad l(x(t) - x_0(t), y(t) - y_0(t)) = \sqrt{(x(t) - x_0(t))^2 + (y(t) - y_0(t))^2}.$$

Окончательно зададим v_{ref} как [21]

$$(8) \quad \begin{cases} \dot{x}_{ref} = -v_m \cdot l_x \cdot (1 - h) + \dot{x}_0 \cdot h, \\ \dot{y}_{ref} = -v_m \cdot l_y \cdot (1 - h) + \dot{y}_0 \cdot h, \end{cases}$$

где

$$(9) \quad h = \exp(-\gamma \cdot l(x(t) - x_0(t), y(t) - y_0(t))).$$

Здесь $v_m > 0$, $\gamma > 0$. Величина модуля скорости v_m может быть определена исходя из требуемого времени выхода на траекторию и скорости перемещения целевого положения $v_0 = \sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2}$.

Аналогично [14] введём функции

$$(10) \quad \begin{cases} S_l = \frac{dl}{dt} + k_l \cdot l; \\ S_v = \sqrt{(\dot{x} - \dot{x}_{ref})^2 + (\dot{y} - \dot{y}_{ref})^2}. \end{cases}$$

Потребуем выполнения условий

$$(11) \quad S_l = 0; S_v = 0,$$

что обеспечивает экспоненциальный выход квадрокоптера на траекторию (5), (6) с постоянной времени $1/k_l$.

Для удержания квадрокоптера на заданной траектории условия (11) должны выполняться во всех точках траектории, т. е. необходимо

$$(12) \quad \dot{S}_l = -\alpha_l \cdot S_l; \dot{S}_v = -\alpha_v \cdot S_v.$$

Здесь $\alpha_l > 0$, $\alpha_v > 0$ определяют постоянные времени $1/\alpha_l$, $1/\alpha_v$, с которыми S_l , S_v экспоненциально стремятся к нулю.

Дальнейшие расчеты идентичны приведенным в [14] с незначительными изменениями, которые определяются способом задания функций l и S_v , и позволяют вычислить необходимые значения ускорений центра масс квадрокоптера по осям x, y, z и углы ориентации аппарата ψ_{ref} , ϕ_{ref} , θ_{ref} из соотношений (1) при движении квадрокоптера по траектории, определяемой уравнениями (5) и (6). Система уравнений (1) является недоопределенной, поэтому для решения системы (1) угол ψ_{ref} выбирается произвольным образом, и не связан с управлением направлением движения.

Процессы изменения углов ориентации ϕ_{ref} , θ_{ref} и ψ_{ref} в пакете `tum_ardrone` представлены в виде независимых уравнений первого и второго порядка, соответственно [20]. Оцениваемый в расширенном фильтре Калмана вектор состояния имеет вид

$$(13) \quad X^k = [x^k, y^k, z^k, \dot{x}^k, \dot{y}^k, \dot{z}^k, \phi^k, \theta^k, \psi^k, \dot{\psi}^k]^T,$$

где k — шаг дискретизации по времени.

Следует отметить, что в пакете `tum_ardrone` реализована компенсация транспортного запаздывания в фильтре Калмана, аналогично приведенной в работе [22].

4. Экспериментальные результаты

Для исследования вопросов устойчивости и качества управления в предложенной системе управления проведен ряд экспериментов по управлению полетом квадрокоптера в помещении по траекториям различного вида.

Входными данными для фильтра Калмана в пакете `tum_drone` являются получаемые от модуля РТАМ координаты x, y центра масс, а также определяемые бортовой навигационной системой компоненты линейной скорости в связанной системе координат, высота над поверхностью и углы ориентации ψ^k, ϕ^k, θ^k аппарата.

Абсолютная погрешность определения координат x, y в модуле РТАМ зависит от точности определения масштабирующего коэффициента и составляет около 5 см при нахождении видимых объектов на расстоянии 2-10 м от видеокамеры [20]. Перед каждым полетом аппарата выполнялась оценка абсолютного отклонения координат от истинного значения посредством перемещения квадрокоптера вручную на заданное расстояние. Отклонение не превысило 0.1 м.

Для проверки предложенного подхода к траекторному управлению были проведены эксперименты по перемещению квадрокоптера из начального положения с выходом на замкнутую траекторию движения, рис. 1а и по заданной траектории в конечное положение, рис. 2а.

Параметры управления имеют значения $k_l = \alpha_l = \alpha_v = 1.5$, $v_0 = 0.4$ м/с. Перемещение цели осуществлялось по кусочно-линейным траекториям. Подача управляющих команд выполнялась с шагом дискретизации 0.01 с. Данные об ориентации аппарата, вычисленные навигационной системой аппарата, а также координаты центра масс аппарата поступали с интервалами около 0.1 с.

Перед началом движения аппарат отработывал команду на удержание неподвижного целевого положения в течение 30 с. В этом случае среднеквадратичное отклонение не превысило 0.1 м, что согласуется с результатами работы [20]. При движении квадрокоптера вдоль заданной траектории отклонение составило около 0.2 м с систематическим сдвигом, пропорциональным значению желаемой скорости, рис. 1б,в и рис. 2б,в. Данная систематическая погрешность обусловлена тем, что величина S_l может быть равна нулю при ненулевых слагаемых в правой части уравнения (10).

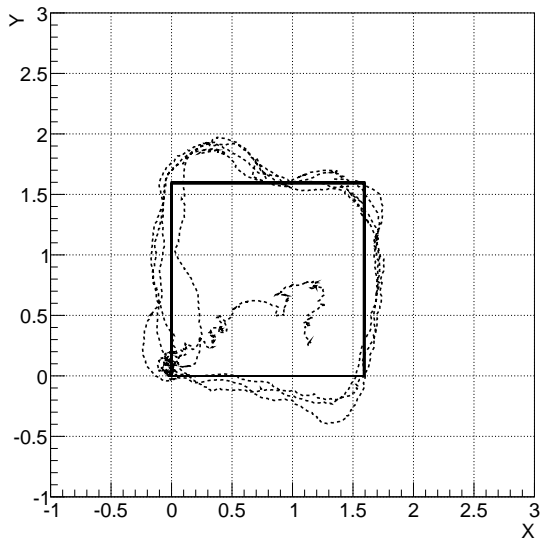
5. Заключение

Показано, что предложенный ранее метод управления квадрокоптером, предназначенный для реализации движения по желаемой траектории с заданной скоростью, распространяется на случай задания траектории в параметрическом виде. Представлены результаты экспериментов с разработанной системой управления траекторным движением. Достигнутая погрешность позиционирования квадрокоптера относительно желаемой траектории при полетах в помещении составила 0.1 – 0.2 м.

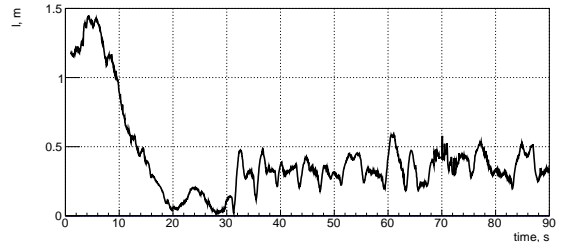
Список литературы

1. Brock Oliver, Khatib Oussama. Real-time replanning in high-dimensional configuration spaces using sets of homotopic paths. // ICRA. — IEEE, 2000. — Pp. 550–555.
2. Stentz Anthony (Tony). The focussed d* algorithm for real-time replanning // Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence. — 1995. — August.

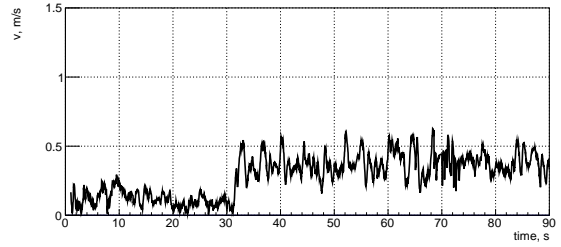
3. Winning the darpa grand challenge / S. Thrun, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann, K. Lau, C. Oakley, M. Palatucci, V. Pratt, P. Stang, S. Strohband, C. Dupont, L.-E. Jendrossek, C. Koelen, C. Markey, C. Rummel, J. van Niekerk, E. Jensen, P. Alessandrini, G. Bradski, B. Davies, S. Ettinger, A. Kaehler, A. Nefian, P. Mahoney // *Journal of Field Robotics*. — 2006. — accepted for publication.
4. *Connors John, Elkaim Gabriel*. Analysis of a spline based, obstacle avoiding path planning algorithm // VTC Spring. — IEEE, 2007. — Pp. 2565–2569.
5. Manipulating B-Spline Based Paths for Obstacle Avoidance in Autonomous Ground Vehicles. — San Diego, CA, 2007.
6. Comparison of fixed and variable pitch actuators for agile quadrotors / M. Cutler, N. Kemal Ure, B. Michini, J. P. How // Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (GNC). — Portland, OR: 2011. — August. — (AIAA-2011-6406).
7. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment / Gabriel M. Hoffmann, Haomiao Huang, Steven L. Wasland, Er Claire J. Tomlin // Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. — Hilton Head, South Carolina: 2007.
8. *Mellinger D., Kumar V*. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors // Proc. of the IEEE Intern. Conference on Robotics and Automation (ICRA). — Shanghai, China: IEEE, 2011. — May 9-13. — Pp. 2520 – 2525.
9. *Egerstedt Magnus, Hu Xiaoming, Stotsky Alexander*. Control of mobile platforms using a virtual vehicle approach // *IEEE Trans. Automat. Contr.* — 2001. — Vol. 46, no. 11. — Pp. 1777–1782.
10. *Белинская Ю. С. Четвериков В. Н.* Управление четырехвинтовым вертолетом // *Наука и образование*. — 2012. — № 5. — С. 157–171.
11. *Boiabdallah Samir, Siegwart Roland*. Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor. // Proc. of the IEEE Intern. Conference on Robotics and Automation (ICRA). — Barcelona, Spain: IEEE, 2005. — April 18-22. — Pp. 2247–2252.
12. *Уткин В. И.* Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. — Москва, Россия: Наука, 1981.
13. *Золотухин Ю.Н., Нестеров А.А.* Управление перевёрнутым маятником с учётом диссипации энергии // *Автометрия*. — 2010. — № 5. — С. 3–11.
14. Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории / С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, М.Н. Филиппов, А.П. Ян // *Автометрия*. — 2012. — № 5. — С. 32–41.
15. Использование фильтра Калмана в системе управления траекторным движением квадрокоптера / С.А. Белоконь, Ю.Н. Золотухин, К.Ю.Котов, А.С. Мальцев, А.А. Нестеров, В.Я.Пивкин, М.А.Соболев, М.Н. Филиппов, А.П. Ян // *Автометрия*. — 2013. — № 6. — С. 14–24.
16. The navigation and control technology inside the ar.drone micro uav / P.-J. Bristeau, F. Callou, D. Vissiere, N. Petit // 18th IFAC World Congress. — Milano, Italy: 2011. — Pp. 1477–1484.
17. Ros: an open-source robot operating system / Morgan Quigley, Ken Conley, Brian P. Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Rob Wheeler, Andrew Y. Ng // ICRA Workshop on Open Source Software. — 2009.
18. *Klein Georg, Murray David*. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces // Proc. Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'07). — Nara, Japan: 2007. — November.
19. *J. Kim, M.-S. Kang, S. Park*. Accurate modeling and robust hovering control for a quad-rotor vtol aircraft // *Journ. Intell. Robotics Syst.* — 2010. — Vol. 57, no. 1-4. — Pp. 9–26.
20. *Engel J., Sturm J., Cremers D.* Accurate figure flying with a quadcopter using onboard visual and inertial sensing // Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). — Vilamoura, Algarve, Portugal: 2012. — Oct. 11. — Pp. 43–48.
21. *Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Нестеров А.А.* Управление автономным объектом при плоском движении по заданной траектории с обходом препятствий // В кн. *Труды IX Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах"*. — 2007. — С. 213–219.
22. *Золотухин Ю.Н. Котов К.Ю. Мальцев А.С. Нестеров А.А. Филиппов М.Н. Ян А.П.* Коррекция транспортного запаздывания в системе управления мобильным роботом // *Автометрия*. — 2011. — № 2. — С. 46–57.



а)

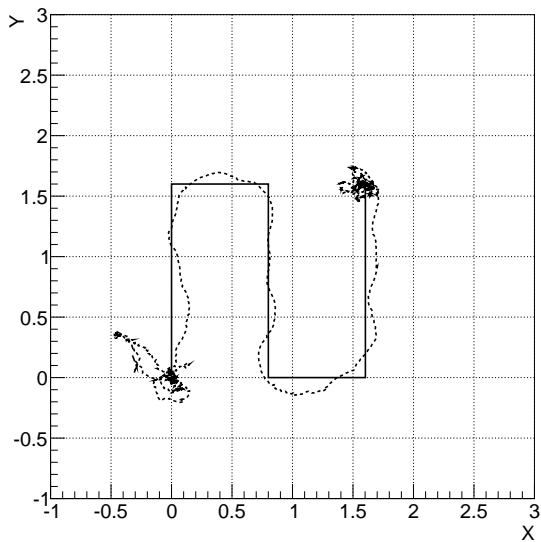


б)

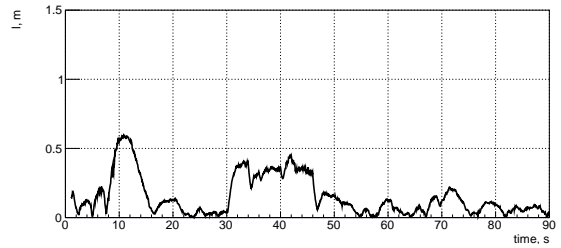


в)

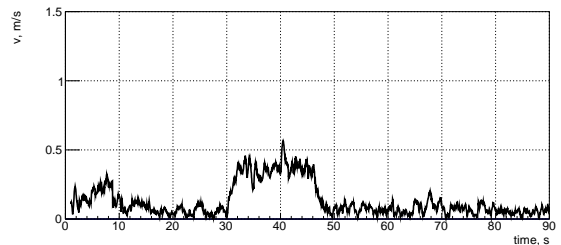
Рис. 1. Движение квадрокоптера вдоль замкнутой траектории: а — координаты центра масс x, y (сплошная кривая — желаемая траектория, пунктирная кривая — оценка фильтра Калмана); б — текущее отклонение $l(x, y)$ от целевого положения; в — текущая линейная скорость v .



а)



б)



в)

Рис. 2. Движение квадрокоптера из начального положения в конечное по желаемой траектории (пояснения к а-в соответствуют рис. 1).