

УДК 681.51

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ КВАДРОКОПТЕРА ПО ЗАРАНЕЕ
ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

П.А. Гриценко, А.С. Кремлев, Г.М. Шмигельский

Разработан программный продукт, включающий в себя визуализатор и программу управления квадрокоптером, способную решать задачу формирования и отслеживания траектории полета. Приложение предназначено для системы управления квадрокоптером в автоматическом режиме в местах, где невозможно использовать сигнал от спутника (GPS) или сторонних датчиков, но известен подробный план местности или здания, а также при решении задач, где возникает необходимость вмешательства человека. Реализация разработанного алгоритма на квадрокоптере позволяет избежать постоянных обменов сигналами со станцией; как следствие, снижается потребление электроэнергии приемника и повышается время полета. Апробация программного приложения была выполнена на квадрокоптере Ar Drone компании Parrot. В результате работы программы квадрокоптер повторил заданную траекторию с погрешностью не более 5%.

Ключевые слова: квадрокоптер, траекторное управление, БПЛА, полет по траектории.

Введение

Все большую популярность получают беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в виде многовинтовых устройств, а чаще – квадрокоптеров, представляющих из себя платформу с четырьмя роторами, одна пара которых вращается по часовой стрелке, другая – против. По сравнению с БПЛА вертолетного типа с несущим и рулевым винтами квадрокоптеры обладают рядом преимуществ – надежность и простота конструкции, большая стабильность, компактность и маневренность, малая взлетная масса при существенной массе полезной нагрузки. Область применения квадрокоптеров достаточно широка. Например, они могут быть использованы как недорогое и эффективное средство для получения фото- и видеозаписей с воздуха, в том числе при плохих погодных условиях. Так как квадрокоптер – дистанционно управляемый летательный аппарат, он хорошо подходит для наблюдения и контроля объектов, территорий и зон, доступ к которым затруднен (в случае естественных или техногенных катастроф), или в условиях, непригодных для человека, таких как повышенный уровень радиации или сильное загрязнение воздуха [1–3].

Большинство работ, посвященных решению задач мониторинга местности при помощи БПЛА, связано с движением летательного аппарата по известной траектории. В частности, в работе [4] авторами предлагается система управления, реализующая движение квадрокоптера по прямой линии, соединяющей начальную и конечную точки траектории, с заданной скоростью на заданной высоте над поверхностью земли с учетом рельефа местности. В [5] рассмотрен алгоритм передвижения квадрокоптера вдоль любой траектории в пространстве, при котором квадрокоптер способен следовать за движущимся объектом с известными координатами и скоростью.

В настоящей работе предлагается алгоритм полета квадрокоптера по заранее заданной траектории в автономном режиме, реализованный в программном приложении. Актуальность задачи состоит в том, что полет происходит в закрытом помещении с неизвестными объектами [6–8]. В такой постановке задачи, когда автоматическая система не может однозначно идентифицировать препятствие либо происходит сбой в выполнении задания, либо возникает необходимость дополнительного вмешательства человека при формировании и контроле выполнения пролета по заданной траектории БПЛА [9, 10].

Способ задания траектории

Для формирования траектории создана область рисования компьютерной мышью в окне программы, итоговая траектория представляет собой множество точек на декартовой плоскости с координатами (x, y) . Полученные данные имеют числовое представление в форме массива точек. Этот массив разбивается на небольшие части – отрезки кривой, аппроксимирующие первоначальную траекторию (рис. 1).

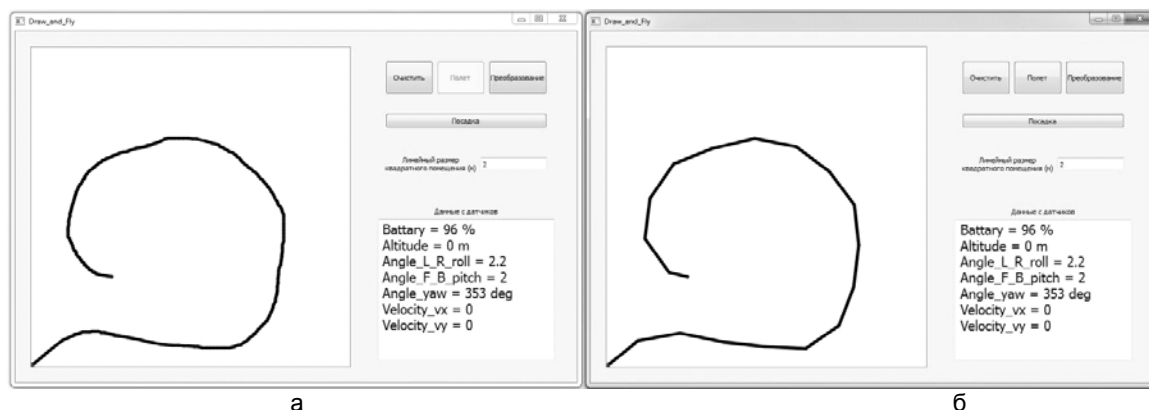


Рис. 1. Окно приложения: траектория, заданная мышью (а); аппроксимированная первоначальная траектория (б)

Аналитический расчет траектории

Перемещение квадрокоптера по траектории складывается из движений следующих типов:

- движение по прямой, соединяющей точки начала и конца элемента-отрезка;
- вращение вокруг вертикальной оси, проходящей через центр квадрокоптера.

Длина продольного перемещения вычисляется как расстояние между двумя точками (в пикселях), умноженное на коэффициент соответствия. Коэффициент соответствия рассчитывается в зависимости от размеров площадки для полета и области рисования на дисплее.

Расчет угла поворота происходит в несколько этапов (рис. 2).

1. Угол α определяется следующим выражением:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{y_0 - y_1}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \right) \cdot \frac{180}{\pi};$$

2. Второй и последующие углы β_i рассчитываются по формуле

$$\beta_i = \arccos \left(\frac{(x_i - x_{i-1}) \cdot (x_{i+1} - x_{i-1}) + (y_i - y_{i-1}) \cdot (y_{i+1} - y_{i-1})}{\sqrt{((x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2) \cdot ((x_{i+1} - x_{i-1})^2 + (y_{i+1} - y_{i-1})^2)}} \right) \cdot \frac{180}{\pi},$$

где $i=1, \dots, N-1$; N – количество отрезков.

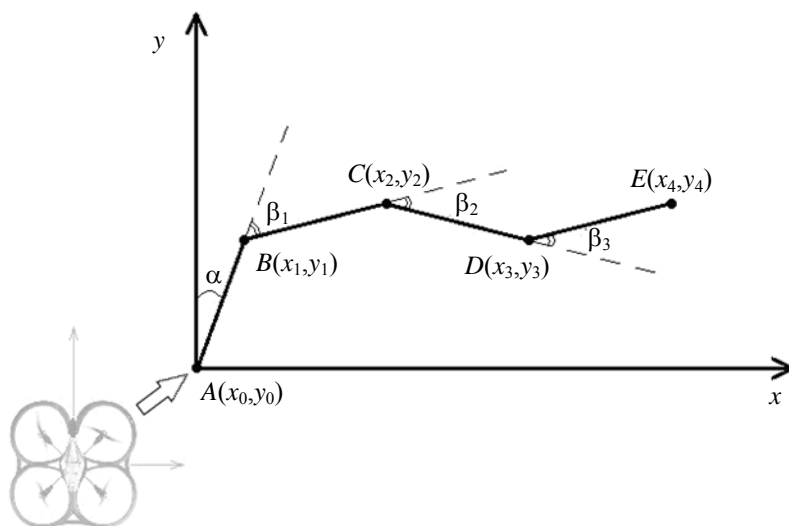


Рис. 2. Расчет угла поворота

Для определения направления поворота квадрокоптера используются несколько условий:

- если $y_i \geq y_{i-1}$ и $\frac{(x_i - x_{i-1}) \cdot (y_{i+1} - y_{i-1})}{(y_i - y_{i-1})} + x_{i-1} \geq x_{i+1}$, то поворот направо, иначе – налево;
- если $y_i \leq y_{i-1}$ и $\frac{(x_i - x_{i-1}) \cdot (y_{i+1} - y_{i-1})}{(y_i - y_{i-1})} + x_{i-1} < x_{i+1}$, то поворот направо, иначе – налево.

Используемый инструментарий (программные средства)

Инструментом для создания оконного приложения был выбран язык программирования C++, реализованный в среде разработки Qt 4.8, что позволило создать исполняемые файлы для различных операционных систем [11]. Вся программа реализована на следующих стандартных классах в Qt:

- QThread – класс, обеспечивающий платформеннонезависимые потоки;
- QWidget – базовый класс для всех объектов пользовательского интерфейса;
- QUdpSocket – класс, предоставляющий возможность использования UDP (UDP – это протокол пользовательских датаграмм (блоков информации));
- QMouseEvent – класс, содержащий параметры событий мыши;
- QGraphicsView – класс, предоставляющий виджет для отображения содержимого QGraphicsScene;
- QGraphicsScene – класс, предоставляющий поверхность для управления большим числом графических двумерных элементов.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- ручное управление летательным аппаратом при помощи клавиатуры или мыши;
- полет по заданной траектории;
- обмен данными между компьютером и летательным аппаратом по каналу беспроводной связи Wi-Fi;
- возможность отслеживать данные с датчиков летательного аппарата.

Использовано программное обеспечение, распространяемое по свободным лицензиям. Программа может работать под управлением операционных систем Windows XP/Vista/7/8, а также Linux. Рекомендуемые системные требования к компьютеру для запуска и работы программы: 50 МБ свободного места на диске; 512 МБ оперативной памяти; процессор с частотой 1 ГГц.

Выбор исполнительного устройства, апробация программного приложения на реальном объекте

В качестве исполнительного устройства при реализации программы движения по траектории был выбран квадрокоптер Ar Drone (рис. 3). К его преимуществам перед аналогами можно отнести наличие беспроводной связи, простое формирование команд управления, встроенные датчики, такие как гироскоп и акселерометр, штатная автоматическая система стабилизации, взлета и посадки.



Рис. 3. Квадрокоптер Ar Drone

Связь компьютера с квадрокоптером осуществляется посредством Wi-Fi, а управление организовано в виде UDP-датаграмм. Общий вид команд управления Ar Drone задается следующим образом:

AT*PCMD=%d,%d,%d,%d,%d,%d<LF>,

где аргумент 1 – порядковый номер команды; аргумент 2 – флаг, разрешающий комбинированные команды; аргументы 3–6 определяют движение влево–вправо, вперед–назад, вверх–вниз и вращение вокруг вертикальной оси соответственно. Все значения находятся в интервале $[-1; 1]$.

При нажатии кнопки «Полет» в главном окне приложения (рис. 1) квадрокоптеру отправляется команда на взлет, после получения которой он автоматически поднимается на заданную высоту. Рассчитанные углы и расстояния между точками формируют управляющее воздействие для Ar Drone, отправляемое в режиме реального времени с использованием данных с датчиков для более точного следования по траектории. Движение осуществляется в горизонтальной плоскости без учета изменения высоты летательного аппарата относительно земли. При достижении конечной точки траектории приложение отправляет квадрокоптеру команду посадки.

В экспериментах квадрокоптер под управлением разработанной программы повторил заданную траекторию с погрешностью не более 5%.

Заключение

Предложен способ управления летательным аппаратом с компьютера по беспроводной связи, который позволяет задавать и отслеживать траекторию полета БПЛА. Сформированная в результате реализации программы траектория предназначена для системы управления квадрокоптером в автоматическом режиме в местах, где невозможно использовать сигнал от спутника (GPS) или сторонних датчиков, но известен подробный план местности или здания. Реализация разработанного алгоритма на квадрокоптере позволяет избежать постоянных обменов сигналами со станцией; как следствие, снижается потребление электроэнергии приемника и повышается время полета, что дает возможность летательному аппарату преодолевать большее расстояние по сравнению с ручным управлением. При проведении экспериментов на квадрокоптере Ar Drone компании Parrot по прохождению заранее заданной траектории в автоматическом режиме летательный аппарат ни разу не потерял связь с наземной станцией, выполняя траекторию с погрешностью не более 5%.

Исследование выполнено при поддержке министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.B37.21.0421 и гос. контракт № 16.740.11.0553.

Литература

1. Ситников Д.В., Бурьян Ю.А., Русских Г.С. Автопилот мультикоптера // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 7. – С. 213–221.
2. Рубин Д.Т., Конев В.Н., Стариковский А.В., Шептунов А.А., Смирнов А.С., Толстая А.М. Разработка квадрокоптеров со специальными свойствами для проведения разведывательных операций // Спецтехника и связь. – 2012. – № 1. – С. 28–30.
3. Эпов М.И., Злыгостев И.Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 2. – № 3. – С. 22–27.
4. Белоконов С.А., Золотухин Ю.Н., Нестеров А.А., М.Н. Филиппов. Управление квадрокоптером на основе организации движения по желаемой траектории в пространстве состояний // Труды XIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. – С. 217–222.
5. Puls T., Hein A. 3D trajectory control for quadcopter // Intelligent Robots and System (IROS), IEEE/RSJ International Conference on, 2010. – P. 640–645.
6. Бобцов А.А., Шаветов С.В. Управление по выходу линейным параметрически неопределенным объектом в условиях возмущающих воздействий и неучтенной динамики // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1 (71). – С. 33–39.
7. Чеботарев С.Г., Кремлев А.С. Анализ линейных систем с переменными параметрами для синтеза интервальных наблюдателей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 6. – С. 50–53.
8. Бобцов А.А., Пыркин А.А. К задаче управления параметрически не определенным линейным объектом с запаздыванием в канале управления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3 (73). – С. 138.
9. Андреев В.Л., Иванов Р.В., Козлов Е.Б., Потупчик С.Г., Соколов П.В. Системы управления малоразмерными дистанционно пилотируемыми самолетами // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 8. – С. 48–57.
10. Литвинов Ю.В., Бушуев А.Б., Гриценко П.А., Шмигельский Г.М. Полет квадрокоптера по произвольно задаваемой траектории // Материалы IX международной научно-практической конференции «Современные научные достижения–2013». – Технические науки: Прага. Издательский дом «Образование и наука» ООО. – 2013. – Часть 77. – 96 с.
11. Бланшет Ж., Саммерфилд М. QT4 программирование GUI на C++. – 2-е изд. – ООО КУДИЦ-Образ, 2008. – 738 с.

Гриценко Полина Андреевна

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Polina.gritsenko@gmail.com

Кремлев Артем Сергеевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, kremlev_artem@mail.ru

Шмигельский Григорий Михайлович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Gri6ka16@gmail.com

УДК 62.50: 681.50.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМАХ С КРАТНЫМИ КОМПЛЕКСНО-СОПРЯЖЕННЫМИ СОБСТВЕННЫМИ ЧИСЛАМИ ИХ МАТРИЦ СОСТОЯНИЯ

Т.А. Акунов, Н.А. Дударенко, Н.А. Полинова, А.В. Ушаков

Рассматривается устойчивая непрерывная система, матрица состояния которой обладает спектром кратных комплексно-сопряженных собственных чисел, кратность которых равна размерности ее вектора состояния. Особое внимание обращается на ситуацию, когда модуль вещественной части собственного числа меньше единицы. Устанавливается, что в этой ситуации уже при малой колебательности собственных чисел появляется заметный выброс в процессах по норме свободного движения по вектору состояния и величина выброса тем больше, чем меньше по модулю вещественная составляющая собственного числа и чем больше его кратность и мнимая часть.

Ключевые слова: комплексно-сопряженные собственные числа, кратность, свободное движение, норма, выброс.

Введение. Постановка задачи

Ставится задача исследования свободного движения устойчивой линейной непрерывной многомерной динамической системы по норме вектора состояния с целью изучения влияния на это поведение кратности собственных чисел ее матрицы состояния и значения их модуля. В работе поставленная задача