

УДК 62.529+004.896+004.932.2+629.734.4

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ МУЛЬТИРОТОРНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОЛЕТА НАД ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ

М.М. Сурцуков (*msurtsukov@gmail.com*)

А.Д. Московский (*moscowskyad@gmail.com*)

Московский физико-технический институт, НИЦ
«Курчатовский институт», Москва

Аннотация. В статье описывается система управления и навигации мультироторным летательным аппаратом. Система разработана под управлением ROS и решает задачу движения летального аппарата вдоль заданной траектории, обозначенной пунктирной линией с помощью 4-х PID-регуляторов.

Ключевые слова: квадрокоптер, навигация, ROS, PID-регулятор.

Введение

В последнее время расширяется использование мультироторов, в особенности квадрокоптеров. Рост вычислительной мощности вкупе с уменьшением размеров компьютеров и совершенствованием технологий беспроводной связи открыл путь к созданию небольших беспилотных летательных аппаратов в бытовых, коммерческих, а также военных целях. По сравнению с другими типами аппаратов, мультироторы обладают большей стабильностью полета при относительной простоте конструкции. Чтобы стимулировать развитие интереса у широкого круга любителей робототехники и выявлению интересных подходов решения задач в области навигации и управления мультироторными аппаратами, стали проводиться специализированные международные соревнования.

К ним относится RobotChallenge, являющийся одним из наиболее масштабных международных соревнований роботов (<http://www.robotchallenge.org/>). Одна из дисциплин в RobotChallenge - это AirRace - соревнование мультироторов, призванное показать способность роботов ориентироваться в пространстве и быстро и точно маневрировать. По регламенту нужно облететь 2 столба по заданной траектории максимальное количество раз за 10 минут, см. рис. 1.

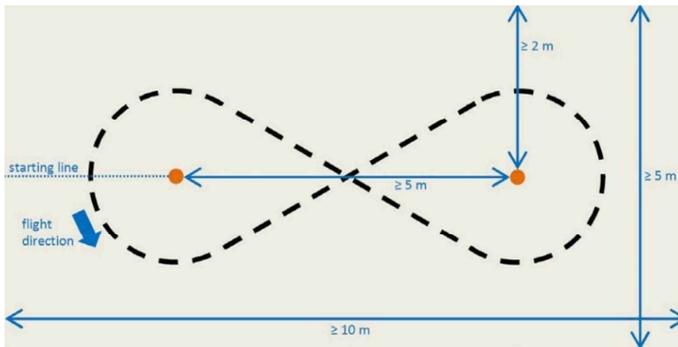


Рис. 1. Схема трассы

Засчитывается результат самого долгого непрерывного полета без участия человека. Контроль над полетом робота должен осуществляться с помощью ноутбука или джойстика для экстренного отключения в случае опасности. Для ориентировки робота в пространстве на земле на белом фоне нарисована черная пунктирная линия. Разрешается также наклеивать на трассу любые легко снимаемые метки.

Среди различных подходов участников соревнований к решению этой задачи можно выделить 3 основных:

1. С минимальной привязкой к трассе. Роботы летают «по памяти», изредка корректируя свое положение по различным самодельным меткам.
2. С абсолютным позиционированием себя на поле и использованием тэгов с изображения камер, различных дальномеров и т. д.
3. С ориентированием по пунктирной линии. Робот летает вдоль пунктирной линии, удерживаясь над ней.

Среди достоинств подходов первого типа можно выделить простоту их реализации и достаточно хорошую результативность на трассах с заранее известными траекториями. Главными же недостатками являются необходимость сложной подгонки алгоритма полета под конкретную трассу и, соответственно, невозможность полета по заранее неизвестным траекториям или при недостатке времени на подготовку. Также существует высокая вероятность слета с трассы вследствие накопления ошибки и невозможность возвращения на трассу.

Достоинствами подходов второго типа является их универсальность. Однако сложность реализации и довольно высокая вероятность сбоя в полете сильно препятствуют успешности их применения.

У подходов третьего типа основным достоинством является возможность полета по заранее неизвестным траекториям, несложная

настройка на конкретную трассу. Основным же недостатком является то, что это подходит только для круга задач с существующей заранее начерченной трассой.

1. Описание метода

Поскольку по условиям задачи можно пользоваться начерченной на земле траекторией, то был выбран подход третьего типа. В качестве летательного аппарата использовался квадрокоптер Parrot Ar.Drone 2.0. Аппарат размерами 52,5 x 51,5 см имеет на борту ЭВМ с операционной системой Linux; оснащен двумя видеокамерами, Wi-Fi модулем, рядом сенсоров; включает в себя компас, акселерометр, гироскопы, высотометр и др. В квадрокоптере уже реализованы алгоритмы стабилизации. Также разработчики предоставляют SDK (комплект средств разработки), позволяющий реализовать базовые функции управления, а также получать данные с квадрокоптера (показание сенсоров, видео).

В горизонтальной плоскости квадрокоптер симметричен относительно осей OX , OY , из чего следует симметричность относительно точки O . Можно заметить, что естественным базисом, через который описывается любое движение квадрокоптера в пространстве, является движение вдоль осей OX , OY , OZ и поворот вокруг оси OZ , см. рис. 2. В модели управления пренебрегается наклонами вокруг осей OX и OY . Таким образом, управляющая скорость задается через сообщение скоростей по каждому из 4-х направлений в отдельности [Hoffman, 2007], что линеаризует задачу и позволяет до определенных пределов эффективно использовать PID-регуляторы.

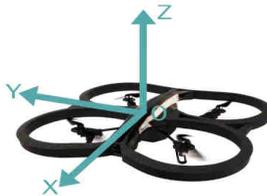


Рис. 2. Выделенные оси квадрокоптера

Таким образом, движение над линией сводится к использованию PID-регуляторов для каждого направления.

1.1 Описание программных модулей

Программный пакет был реализован в среде ROS [Quigley, 2010]. Он

состоит из 3 модулей, а также модуля **ardrone_autonomy**, реализующего функцию приема/передачи данных.

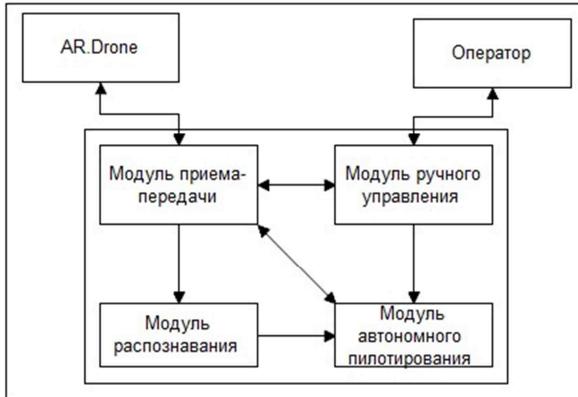


Рис. 3. Структура программного комплекса

В терминах ROS модуль - программный узел, модули взаимодействуют посредством, так называемых топиков, записывая (публикуя) в них сообщения заранее определенного формата. Модули, которые прослушивают эти топики – подписчики.

Control – модуль, реализующий интерфейс взаимодействия квадрокоптера с человеком. Этот модуль подписывается на топики, в которых `ardrone_autonomy` публикует навигационные данные. В нем реализуется возможность управления квадрокоптером с клавиатуры, запуска автономных режимов. Этот модуль позволяет экстренно отключить квадрокоптер, также выводит на экран вспомогательную информацию, такую как высота, скорость, заряд батареи, запускает окно с видео потоком от активной камеры на квадрокоптера.

Video – модуль, обрабатывающий видеоданные квадрокоптера с помощью библиотеки компьютерного зрения `OpenCV`. Модуль подписывается на специальный топик, в который `ardrone_autonomy` публикует изображения с активной камеры квадрокоптера, также создает топик для передачи распознанных параметров модулю управления. В модуле реализован алгоритм поиска прямоугольных ориентиров по следующей схеме:

1. Изображение преобразуется в черно-белое.
2. Размывается для устранения мелких помех и артефактов.
3. Преобразуется в двухцветное по некоторому порогу.
4. В отфильтрованном изображении ищутся контуры связанных областей [Фисенко, 2008].

5. Для каждого контура ищется обрамляющий прямоугольник с минимальной площадью.
6. Сравняются площади области и описывающего ее прямоугольника. Если площади отличаются более, чем на заранее подобранный параметр, то контур отбрасывается.

Далее список всех, распознанных объектов и их параметров (координаты, нормированные на единицу относительно размеров изображения, наклон, ориентацию) публикуется в созданный топик.

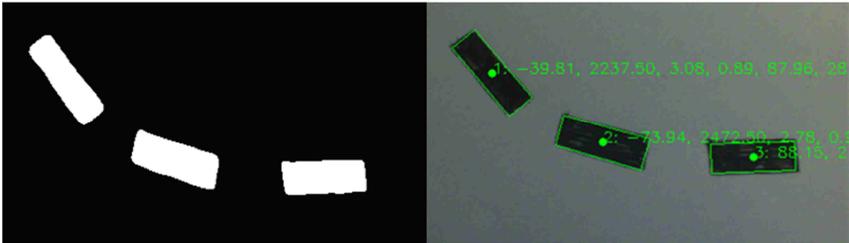


Рис. 4. Отфильтрованное изображение (слева) и обнаруженные контуры (справа)

Pilot – модуль автономного пилотирования. В задачи модуля входит формирование управляющего воздействия для квадрокоптера. Модуль поддерживает работу в нескольких режимах полета. Во всех режимах логика поведения различна, однако наибольший интерес имеет участок над линией. В этом режиме работа модуля основана на PID-регуляторах [Li, 2006]. Сначала найденные в **video** контуры дополнительно фильтруются: проверяется, чтобы площади контуров, а также отношения их высот к ширинам находились в заданных пределах, не подошедшие контуры также отсеиваются. Далее по центрам оставшихся контуров по методу наименьших квадратов строится прямая. Затем расстояние между этой прямой и началом координат (боковое смещение) и угол поворота в радианах (курсовой угол) прямой от вертикальной оси передаются в PID-регуляторы, см. рис. 5. Также в PID-регуляторы передаются отклонения от заданной высоты и скорость квадрокоптера.

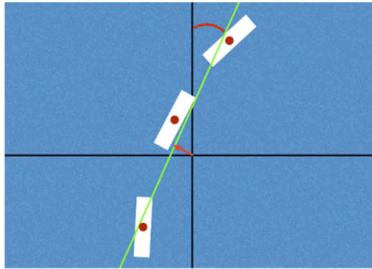


Рис. 5. Аппроксимирующая прямая, красная дуга – курсовой угол, красная стрелка – боковое смещение

Всего было реализовано 4 PID-регулятора на 4 базисных скорости, см. рис. 6:

1. Регулятор на курсовой угол A_z .
2. Регулятор на боковое отклонение L_y .
3. Регулятор на отклонение от заданной высоты L_z .
4. Регулятор на ошибку продольной скорости ΔL_x .

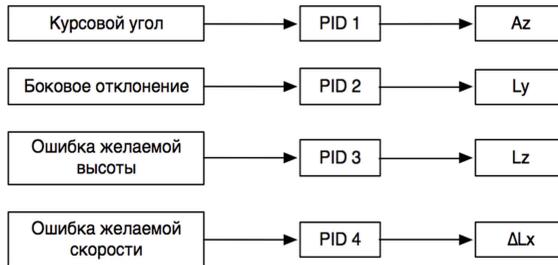


Рис. 6. Входные и выходные параметры PID-регуляторов

Начальные параметры PID-регуляторов были определены на основе математической модели квадрокоптера, построенной в среде Matlab. Далее они испытывались и корректировались на самодельном полноразмерном полигоне. При подборе PID-коэффициентов [Sellers, 2007] учитывалось следующее:

1. Камера 16:9 с углом обзора 94° , наклонена на 5° вперед, 30 FPS.
2. Координаты прямоугольников лежат в квадрате $[-1;1]*[-1;1]$.
3. За единицу принята скорость в 5 м/с.
4. Высота считается в метрах.
5. Скорости прохождения поворотов и прямых участков трассы слегка отличаются: 1.5 м/с и 2.5 м/с.

Таблица. 1. Параметры PID-регуляторов

Параметр	P	D	I
Боковое смещение от центра	0,14	60,0	0,017
Поворот	3,0	40,0	0,5
Недостаток заданной высоты	2,0	0,0	0,0
Недостаток продольной скорости	0,6	8,0	0,0

Для определения, на каком участке трассы находится квадрокоптер, используется подсчет прямоугольников и магнетометр. Для определения направления пролета над крестом прямоугольники разделяются на 2 множества по углу наклона, и учитывается только то множество, у которого модули углов меньше.

2. Эксперименты

Разработка и тестирование системы проводились на полномасштабном домашнем полигоне. Разработанная система показывает результаты в 46 кругов за 10 минут. Квадрокоптер стабильно держится над линией и не слетает с трассы при хорошем Wi-Fi соединении. Разброс значений времени отклика также достаточно мал, чтобы не учитывать его программно.

В ходе экспериментов выяснилось, что на искривленных участках конфликтуют PID-регуляторы на боковое смещение и поворот. При заходе на поворот с достаточно большой поперечной скоростью из-за бокового смещения эта скорость преобразуется в продольную, так как квадрокоптер поворачивается вдоль траектории. Таким образом, скорость может сильно колебаться на поворотах, однако настроенный PID-регулятор на продольную скорость позволяет нивелировать этот эффект. Также было выяснено, что вследствие довольно сильной инерционности квадрокоптера интегральный коэффициент обычно только мешает, вместо того чтобы сглаживать эффекты от случайных колебаний, он лишь добавляет инерционности. Влияние же дифференциального коэффициента наоборот делает поведение квадрокоптера менее инерционным.

Встроенная система стабилизации квадрокоптера. Система стабилизации и поддержания заданной скорости в самом квадрокоптере работает таким образом, что корректирующее ускорение пропорционально разности заданной скорости и текущей скорости, а значит, в краткосрочном плане переданная на квадрокоптер контролирующая скорость на самом деле будет восприниматься как ускорение (с предварительным вычитанием из заданной скорости текущей).

Наклоны при сильных ускорениях. Чем сильнее получившееся

корректирующее ускорение, тем сильнее квадрокоптер наклоняется, что означает также и наклон камеры в противоположную сторону. Для избегания такой ситуации рассчитывается смещение центра координат из-за наклона и вычитается из координат центров прямоугольников перед построением прямой.

Работа PID-регуляторов крайне сильно зависит от частоты кадров, поэтому для работоспособности системы частоту кадров необходимо поддерживать такой же, для которой настраивались PID-регуляторы (30 FPS).

Заключение

Создана система, показывающая хорошие результаты (46 кругов) в несколько раз превосходящие лучшие результаты, которых добивались команды за всю историю этих соревнований (24 круга в 2015, 17 кругов в 2014, 13 кругов в 2013).

Опыт выступления на реальных соревнованиях показал, что основной уязвимостью является связь с квадрокоптером по каналу Wi-Fi. При плохой связи частота поступления изображений с квадрокоптера может снизиться и сильно нарушится настройка PID-регуляторов. Для избегания этого рассматриваются варианты переноса управляющего компьютера на борт квадрокоптера или переход к более мощному каналу связи с квадрокоптером.

Список литературы

- [**Stafford, 2014**] Stafford, J. How a Quadcopter works | Clay Allen. // University of Alaska, Fairbanks. 2014.
- [**Hoffman, 2007**] Hoffman G., Huang H., Waslander S.L., Tomlin C.J. Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment // In the Conference of the American Institute of Aeronautics and Astronautics. Hilton Head, South Carolina. 20–23 August 2007.
- [**Quigley, 2010**] Quigley M., Gerkey B., Conley K., Faust J., Foote T., Leibs J., Berger E., Wheeler R., Ng. A. ROS: an open-source Robot Operating System. // 2010.
- [**Li, 2006**] Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. PID control system analysis and design - Problems, remedies, and future directions // IEEE Control Systems Magazine, 2006.
- [**Sellers, 2007**] Sellers D. An Overview of Proportional plus Integral plus Derivative Control and Suggestions for Its Successful Application and Implementation // 2007.
- [**Фисенко, 2008**] Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю., Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие. // СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.