УДК 681.5

Е.Е. Пришляк[1,2], А.С. Мальцев[1]

[1]Институт автоматики и электрометрии СО РАН
[2]Новосибирский национальный исследовательский университет

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКОЙ ПАРАМЕТРОВ

В настоящее время беспилотные аппараты (БА) призваны решать широкий спектр задач гражданского направления. Использование беспилотных аппаратов позволяет исключить из их конструкций оборудование, необходимое для экипажа на борту, а при автоматическом управлении также человеческий фактор. К существующим методам пилотирования беспилотными аппаратами относятся: дистанционное управление с помощью пультов, работающих на радиоканалах и взаимодействие с которыми происходит вручную; автоматическое управление, в процессе которого команды управления формируются программой.

Использование нескольких беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в составе группы позволяет решать более сложные задачи, например, мониторинг большой территории или выполнение геологической разведки посредством аэрофотосъемки. Координирование полета нескольких совместных аппаратов требует разработки соответствующего закона управления, который может видоизменяться в зависимости от поставленных задач. Например, во время группового полета БПЛА в случае скоординированного планирования во избежание столкновений между аппаратами и оптимизации мобильности полета [1, 2] или при необходимости поддерживать заданную конфигурацию в групповом полете [3, 4].

Несмотря на то, что проблема автоматического управления беспилотными аппаратами уже имеет множество решений, на сегодняшний день требуется разработка новых оптимальных вариантов, пригодных для более тяжелых задач. Например, в области автоматического управления разнородными аппаратами актуальными проблемами являются необходимость индивидуальной настройки алгоритма и выбор коэффициентов для каждого беспилотного аппарата, а также большие ошибки системы управления с фиксированными коэффициентами в условиях возмущений внешней среды. В связи с этим возникает задача разработки системы управления с автоматической подстройкой коэффициентов в процессе работы к конкретному аппарату и внешним возмущениям.

Для решения данного комплекса проблем в работе предложено алгоритмическое решение для адаптивного управления движением беспилотных аппаратов с автоматической настройкой коэффициентов. Процесс работы включал в себя следующие этапы:

1. Изучение математических моделей движения и способов управления беспилотными аппаратами.
2. Разработка метода управления движением по траектории с адаптацией к конкретному беспилотному аппарату.
3. Разработка программного обеспечения для моделирования движения, включающего математические модели разнородных аппаратов.
4. Разработка программного модуля с законом управления для управляющего контроллера
5. Проведение экспериментов с использованием разнородных аппаратов.

Предлагаемая система управления движением БА отличается от аналогов возможностью маневрирования по трехмерной программной траектории и отсутствием необходимости ручной настройки коэффициентов управления. Для отладки законов управления предложен следующий алгоритм взаимодействия: в процессе выполнения миссии задается целевая точка, которая движется по заданной трехмерной траектории; система управления обеспечивает движение аппарата за целевой точкой, координаты которой вычисляются динамически во время выполнения миссии.

Закон управления для i-го аппарата задан следующим образом:

$$\dot{x}_i = f\left(x_i\right)u_i,$$

$$x_i = [x_i, y_i, v_i, \psi_i, \omega_i]^T,$$

$$u_i = [v_i, \omega_i]^T,$$

где x_i — вектор состояния, содержащий координаты, линейную и угловую скорости; u_i — вектор управления, который задает команды управления по линейной и угловой скоростям.

Потребуем равенство желаемых и текущих значений старших производных переменных состояния:

$$\dot{x}_i = F\left(x_i\right),$$

$$F(x_i) = A(x_{ri} - x_i).$$

Здесь матрица A соответствует набору заданных коэффициентов при старших производных; x_{ri} — желаемые значения координат; x_i — текущие значения координат. Умножая обе части уравнения на $(f^T(x_i)f(x_i))^{-1}f^T(x_i)$, и учитывая, что в нашем случае $f^T(x_i)f(x_i) = I$, получим закон управления в виде команд по линейной и угловой скоростям:

$$u_i = f^T(x_i)F(x_i). \quad (1)$$

Данный закон управления осуществляет движение БА в плоскости XY. Для возможности маневрирования беспилотных летательных аппаратов по трехмерной траектории предложенный закон управления расширен путем добавления команды управления углом наклона в зависимости от скорости и значения желаемых и текущих координат по оси Z:

$$\Theta_{cmd} = \frac{k_\theta}{V}(z_r - z) + k\dot{z}_r,$$
$$\dot{k} = k_z sign(\dot{z}_r)(z_r - z). \tag{2}$$

Для коррекции ошибки движения по траектории, когда аппарат начинал сильно отставать от целевой точки (например, при наличии встречного ветра) либо обгонял ее, в закон управления добавлена автоматическая настройка коэффициентов матрицы A:

$$\dot{a}_{ii} = -k_a\left(d_r - d - k_{az}\dot{z}_r\right), i = 1,2, \tag{3}$$

где k_a и k_{az} — положительные коэффициенты; d_r и d — желаемая и фактическая дистанции до целевой точки.

Отладка разработанного закона управления состоит из двух частей: 1) с помощью системы моделирования, позволяющей выявить значительные отклонения поведения модели БА; 2) проведение экспериментов на реальных малых беспилотных аппаратах с целью оценить устойчивость предложенных алгоритмов в условиях осуществления миссии.

Моделирование

Для предварительной отладки разработанного закона управления и настройки программного обеспечения полетного контроллера разработана система моделирования средствами Pygame, Matplotlib с возможностью 3D визуализации в Flightgear. В разработанной системе моделирования осуществляется отрисовка заданной целевой точки, движущейся по трехмерной траектории, и БА, следующего за целью, что позволяет в реальном времени отследить возникающие отклонения от желаемой траектории и скорректировать задаваемые параметры системы управления для дальнейших экспериментов. С помощью данной системы моделирования установлена необходимость введения поправки, компенсирующей отклонение от желаемой траектории по вертикали.

Эксперименты моделирования проводились для случая полета по трехмерной траектории с законом управления (1) и настраивающимся параметром (2) для коррекции в вертикальной плоскости.

а) *б*)

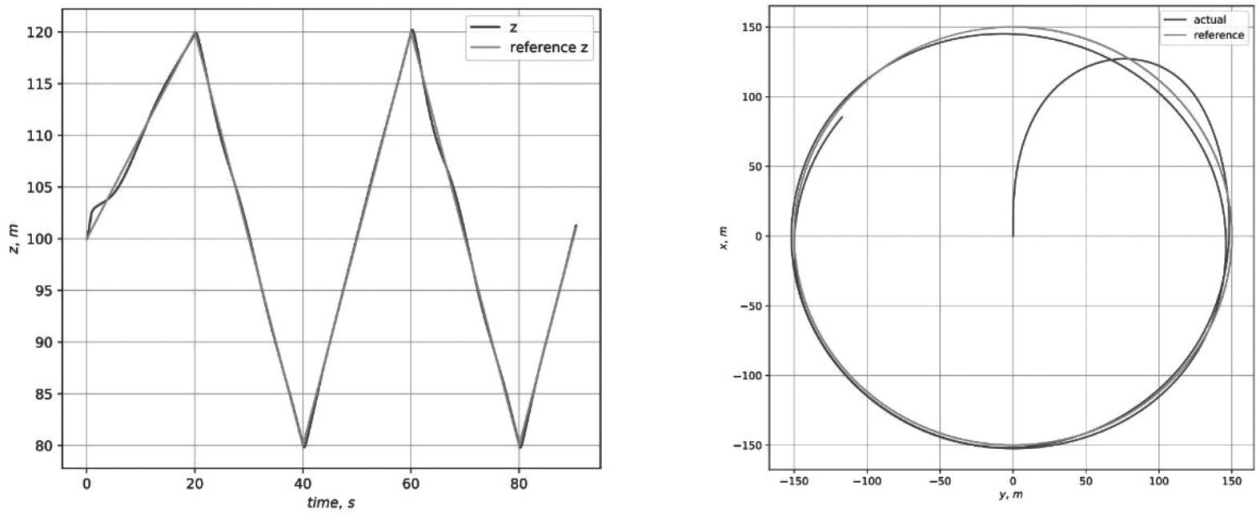

Рис. 1. Трехмерная траектория: *а* — временная зависимость высоты; *б* — траектория полета в плоскости XY

Отладка предложенных алгоритмов с помощью разработанной системы моделирования позволила оценить устойчивость законов управления.

Эксперименты

Предлагаемый закон управления реализован в виде дополнительного программного модуля controller на языке C и встроен в исходный код открытой прошивки INAV6.0. Программное обеспечение контроллера принимает на вход данные системы навигации и позиционирования в воздухе, формирует на их основе команды тяги и углов ориентации, которые передаются на вход электронному регулятору оборотов (ESC) мотора и системе стабилизации соответственно.

Реальные эксперименты проводились с разнородными типами аппаратов: 1) летательный аппарат Dart250 (рис. 2, *а*); 2) плавательный аппарат WLtoys WL916 (рис. 2, *б*) с полетными контроллерами MatekF722miniSE и системой связи Express LRS. На борту аппаратов также были размещены системы GPS, магнитометры и пишущие HD камеры. Преимуществами используемых платформ являются простота и дешевизна конструкции.

а) *б*)

Рис. 2. Используемые БА: *а* — БПЛА Dart250; *б* — Плавательный аппарат WLtoys WL916

Испытания предложенных законов управления в условиях реальных полетов проводились поэтапно. После отладки закона управления по высоте с помощью системы моделирования и добавления автоматической настройки коэффициентов и поправки $k\dot{z}_r$ компенсирующей отклонение от желаемой траектории по вертикали, проведена серия экспериментов с использованием аппарата Dart250. Для случая тестирования управления по высоте траектория была видоизменена и представляла собой трехмерную пилообразную кривую, замкнутую в круг радиуса 150 м в плоскости XY (рис. 3). В этой серии экспериментов желаемая высота целевой точки менялась в пределах от 80 до 120 м с вертикальной скоростью от 1 до 3 м/с, скоростью целевой точки в плоскости XY — 20м/с. Для компенсации внешних возмущений использовался алгоритм (3) автоматической настройки коэффициентов матрицы A.

а) *б*)

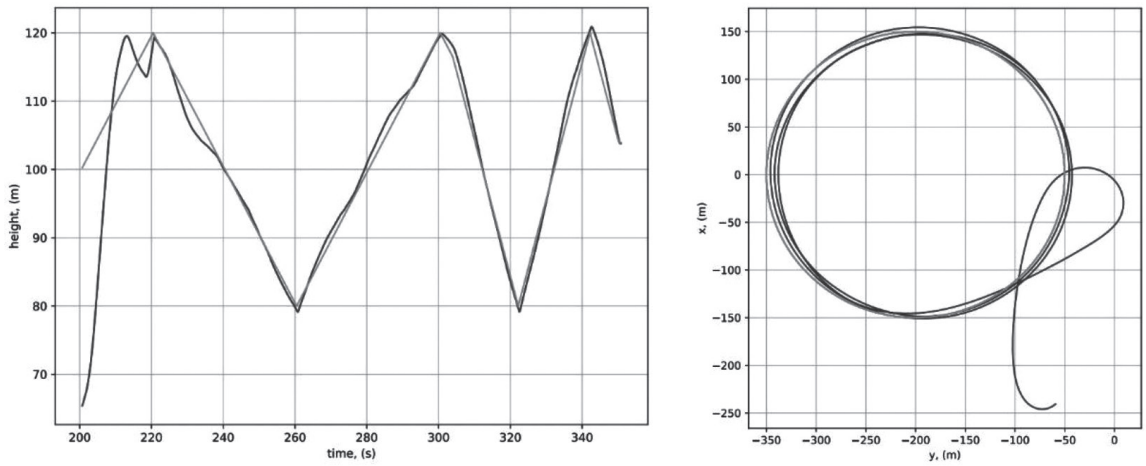

Рис. 3. Полет по трехмерной траектории с аппаратом Dart250: *а* — временная зависимость высоты; *б* — траектория полета в плоскости XY

Другая серия экспериментов проводилась с плавательным аппаратом WLtoys WL916 на озере, поэтому в условиях движения по поверхности воды вертикальная составляющая управления не использовалась. Центр круговой траектории находился в точке (20, 20) м относительно начального положения, радиус траектории составлял 20 м. (рис. 4).

В результате первых экспериментов в случае с движением БПЛА по трехмерной траектории для аппарата Dart250 удалось добиться хорошего совпадения реальной и желаемой траектории как при движении по высоте, так и в плоскости XY. Максимальное отклонение от траектории в данном случае составило около 3 м. что показывает устойчивость предложенного закона управления.

Во второй серии экспериментов с использованием плавательного аппарата значение коэффициента по тяге было ограничено сверху, что привело к уменьшению радиуса траектории движения БА. Однако, даже в условиях возмущения водной поверхности закон управления с автоматической настройкой коэффициентов показал приемлемую точность следования за целевой точкой.

В результате разработана и исследована система управления движением малого беспилотного аппарата с автоматической настройкой параметров. Система управления реализована и опробована на летательном и плавательном аппаратах. Предложенный вариант автоматической настройки коэффициентов закона управления позволяет сделать его независимым от конкретного аппарата.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № 1023032300226–4–1.2.1).

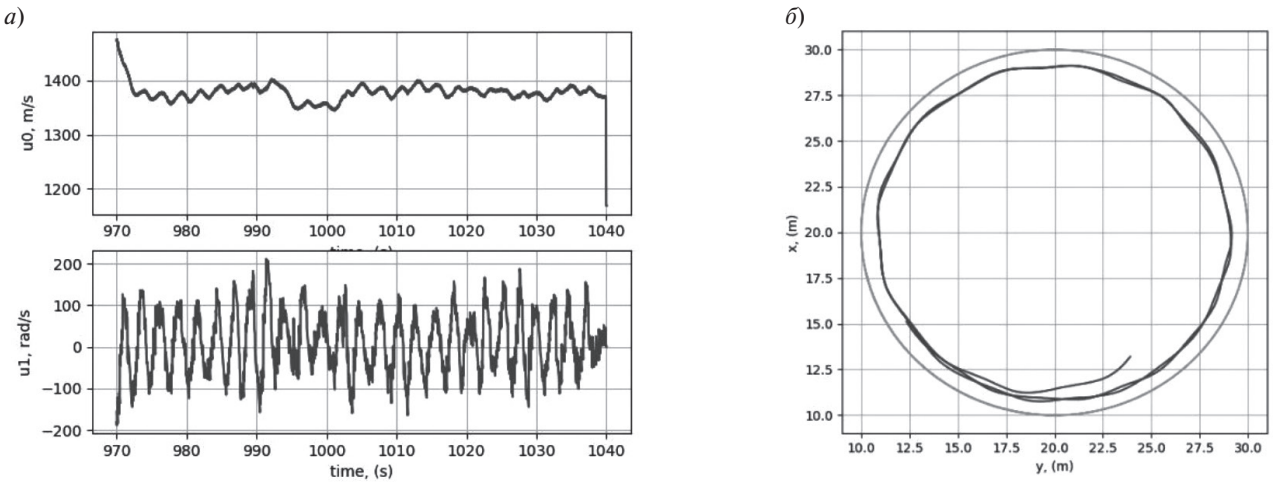

Рис. 4. Заплыв по трехмерной траектории с аппаратами WLtoys WL916: *а* — команды управления; *б* — траектория полета в плоскости XY

Библиографический список

1. Christopher Heintz, Sean C.C. Bailey, Jesse B. Hoagg, Formation Control of Fixed-Wing Unmanned Aircraft: Theory and Experiments // Conference Paper, AIAA Scitech 2019 Forum, January 2019.
2. *Dai Y., Choi K.S., Lee S.G. A*daptive formation control and collision avoidance using a priority strategy for nonholonomic mobile robots // Intern. Journ. Adv. Robot. Syst. 2013. 10, Iss. 2. P. 1–14.
3. Hector Garcia de Marina, Zhiyong Sun, Murat Bronz, Gautier Hattenberge, Circular formation control of fixed-wing UAVs with constant speeds // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), September 2017.
4. *Hausman K., M¨uller J., Hariharan A.* et al. Cooperative multi-robot control for target tracking with onboard sensing // The Intern. Journ. Robot. Research. 2015. 34, Iss. 13. P. 1660–1677.

УДК 004.032.26

И.Д. Серебряков, Н.А. Маркушин

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ МОРСКОЙ ЦЕЛИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Введение

В последние годы наблюдается активное внедрение технологий искусственного интеллекта во многие сферы деятельности, в том числе – в ракетостроение. Происходит это по причине того, что интеграция нейронных сетей в технические системы в большинстве случаев приводит к увеличению их эффективности и надежности. Преимуществом использования нейронных сетей по сравнению с традиционными алгоритмами является их способность выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, выполнять обобщение. Это позволяет использовать их для решения таких задач, как прогнозирование, детекция, кластеризация, распознавание и классификация. Именно возможность решения искусственным интеллектом задачи классификации образов будет использована для реализации алгоритма распознавания цели. Лучше всего в решении таких задач показывают себя сверточные нейронные сети.

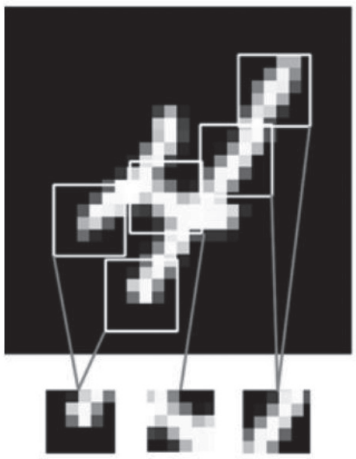

Рис. 1. Пример разбивания изображения на локальные шаблоны

Сверточная нейронная сеть

Основным отличием сверточных нейронных сетей от других является их структура. Состоят они из сверточных слоев, слоев объединения, преобразования и полносвязных слоев.

Сверточные слои выполняют фильтрацию изображения путем анализа так называемых локальных шаблонов, выявляют их свойства (цвета, контуры) [1]. Это позволяет им распознавать мелкие признаки, отличающие экземпляры разных классов. Пример локальных шаблонов приведен на рисунке 1.