

ДВУХСЕНСОРНАЯ ПОСАДОЧНАЯ СИСТЕМА ТЯЖЕЛОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА

И. ЧЭНЬ¹, Ц. ГО¹, Ц. МА¹, С.Х. ЖЭНЬ¹, С.В. ЛИТВИНОВ², М.И. ЗОРЬКО¹, В.Ю. ЦВЕТКОВ¹

1 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь;
2 – ООО «ЮВР», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 05 марта 2024

Аннотация. Рассматривается задача обеспечения посадки тяжелого БЛА вертолетного типа при отсутствии сигналов навигационной системы и управления. Разработана структура двухсенсорной посадочной системы тяжелого БЛА вертолетного типа, позволяющая повысить точность определения координат точки приземления за счет использования поворотного видеосенсора и дополнительного фиксированного видеосенсора, установленного в надир. Поворотный видеосенсор используется на малых высотах полета БЛА для захвата реперов в дальней окрестности посадочной площадки и на уровне горизонта, когда снижается качество изображений фиксированного видеосенсора из-за перемещения объектов под действием воздушных потоков от винтов БЛА. Фиксированный видеосенсор используется на больших и средних высотах полета БЛА для поиска потенциальных мест посадки, составления базы дескрипторов траектории полета и захвата реперов в пределах и ближайшей окрестности посадочной площадки.

Ключевые слова: БЛА вертолетного типа, посадочная система.

Введение

В связи с развитием производства тяжелых БЛА актуальна задача обеспечения безопасности полетов, включающая аварийную посадку БЛА при пропадании сигналов навигационной системы и управления [1–6]. В такой ситуации БЛА должен выбрать пригодную для приземления площадку и совершить посадку, используя данные, формируемые бортовой видеосистемой, инерциальной системой, компасом и высотомером.

Цель работы: повышение точности определения координат точки приземления тяжелого БЛА вертолетного типа при отсутствии сигналов навигационной системы и управления.

Постановка задачи

Для разработки прототипа посадочной системы (ПС) использованы тактико-технические характеристики БЛА вертолетного типа «САКАВИК» (рис. 1) [7]:

- количество двигателей: 1;
- тип двигателя: внутреннего сгорания (115 л/с);
- максимальная взлётная масса: 500 кг;
- максимальная грузоподъёмность (включая топливо): 200 кг;
- максимальный вес целевой нагрузки: 150 кг;
- радиус применения: 240 км;
- максимальное время полета: 8 ч (бак 150 л);
- максимальное время полета с целевой нагрузкой 50 кг: 3 ч (бак 40 л);
- диапазон скоростей: 0–185 км/ч;
- крейсерская скорость: 120 км/ч;
- скорость ветра при взлете (в полете): 10 (20) м/с;
- диаметр несущего винта: 6,28 м.



Рис. 1. БЛА вертолетного типа «САКАВИК»

БЛА «САКАВИК» имеет следующий функционал [7]:

- вертикальный взлет и посадка;
- полет по маршрутным точкам в полностью автоматическом режиме;
- в случае потери сигнала связи функция возвращения в точку взлёта, продолжения полёта по маршруту или выбор иного сценария;
- перевозка грузов в грузовом отсеке и на внешней подвеске, в частности с автоматическим отцеплением груза без совершения посадки;
- эксплуатация в тёмное время суток;
- эксплуатация при осадках (дождь, снег);
- эксплуатация в условиях низкой видимости (туман, метель).

С учетом тактико-технических и функциональных характеристик БЛА «САКАВИК» определены основные условия функционирования ПС, влияющие на точность определения координат точки посадки тяжелого БЛА вертолетного типа и ограничивающие выбор методов обработки видеоданных:

- 1) естественные условия формирования изображений, для которых характерны изменения яркости объектов (в том числе из-за поворота видеокамеры);
- 2) изменение масштаба объектов при снижении БЛА;
- 3) возможность наличия подвижных объектов в зоне посадки;
- 4) необходимость использования для посадки ровной, стабильной поверхности значительной площади;
- 5) ухудшение качества изображения посадочной площадки при снижении (из-за множественного перемещения объектов на поверхности, вызываемого движением воздуха из-под вращающихся винтов БЛА);
- 6) необходимость наличия в зоне посадки и окрестности ландшафтных и инфраструктурных неоднородностей, которые могли бы использоваться в качестве реперов;
- 7) быстрое накопление ошибки определения координат в инерциальной системе;
- 8) предварительное определение потенциальной посадочной площадки в процессе полета БЛА и возможность возврата к данному месту без сигналов навигационной системы;
- 9) отсутствие сигналов навигационной системы;
- 10) наличие бортового компаса БЛА и достаточно точное фиксирование положения строительной оси БЛА относительно сторон света;
- 11) функционирование гироскопов и акселерометров инерциальной системы БЛА;
- 12) функционирование высотомера БЛА;
- 13) достаточно точное фиксирование углов ориентации видеосенсоров относительно строительной оси БЛА;
- 14) необходимость согласования типа видеосенсора с временем суток;
- 15) возможность перехвата управления поворотным видеосенсором БЛА для его использования в качестве источника видеоданных для посадки.

Структура посадочной системы

Исходя из рассмотренных в предыдущем разделе условий предлагается структура ПС, обеспечивающая повышение точности определения координат точки посадки тяжелого БЛА вертолетного типа при отсутствии сигналов навигационной системы за счет использования для

захвата реперов бортовой видеосистемы БЛА на основе поворотного видеосенсора на средних и малых высотах и дополнительного фиксированного видеосенсора, установленного в надир, на больших и средних высотах.

Предлагаемая структура ПС включает (рис. 2): фиксированный видеосенсор с ориентацией в надир стандартного или высокого разрешения с широкими углами обзора; поворотный видеосенсор высокого или сверхвысокого разрешения с узкими (или изменяемыми) углами обзора; блоки обработки данных видеосенсоров – по одному на каждый видеосенсор; блок определения положения БЛА относительно выбранной точки посадки (ТП), на которую непосредственно должен приземлиться БЛА.



Рис. 2. Структура посадочной системы

Фиксированный видеосенсор формирует изображения посадочной площадки и ее ближайшей окрестности на достаточно больших высотах положения БЛА для поиска реперов и точного определения координат БЛА относительно ТП. Он перестает использоваться на малых высотах из-за ухудшения качества изображения, вызванного движением объектов под действием воздушных потоков из-под вращающихся винтов БЛА. Фиксированный видеосенсор используется также системой поиска мест посадки, которая ищет однородные фрагменты изображений, оценивает их размеры и угловую ориентацию для выбора соответствующих участков поверхности в качестве потенциальных мест посадки БЛА. Эти участки связываются с траекторией полета БЛА, для описания которой кроме географических координат используются также дескрипторы реперов, определяемых на изображениях от фиксированного видеосенсора вдоль траектории полета БЛА. Система поиска мест посадки может также выбирать ТП, связывая ее с географическими координатами и пиксельными координатами на изображении посадочной площадки, формируемом фиксированным видеосенсором. При отсутствии навигационных сигналов информация о ближайших потенциальных местах посадки БЛА передается по запросу в систему выбора места посадки. Для возврата к месту посадки используются реперы вдоль траектории полета БЛА, дескрипторы которых постоянно накапливаются.

Поворотный видеосенсор формирует изображения окрестности посадочной площадки и горизонта на средних и особенно на малых высотах положения БЛА для поиска реперов и точного определения координат БЛА относительно ТП. На больших и средних высотах или в случае отсутствия неоднородностей на (или в непосредственной близости от) посадочной площадке поворотный видеосенсор используется параллельно с фиксированным видеосенсором для повышения надежности.

Блок обработки данных видеосенсоров (фиксированного и поворотного) осуществляет поиск реперов на изображениях и устанавливает соответствие между реперами различных видеок кадров для последующего определения соответствующего перемещения и изменения угловой ориентации БЛА. В режиме автопосадки этот блок перехватывает управление поворотным видеосенсором и может наводить его в окрестность посадочной площадки на больших и средних высотах БЛА, на горизонт на малых высотах БЛА.

Блок определения положения БЛА фиксирует ТП по команде автопилота (предполагается, что системы поиска мест посадки, фиксирования мест посадки и возврата к месту посадки

отработали и выдали автопилоту пиксельные координаты ТП на изображении, формируемом фиксированным видеосенсором); определяет относительные координаты ТП в системе реперов изображения фиксированного видеосенсора и системе координат БЛА, используя данные компаса, высотомера, инерциальной системы, полученные на основе показаний акселерометров и гироскопов; формирует виртуальную посадочную плоскость с центром координат в ТП; определяет текущее положение и угловую ориентацию в системе реперов текущего изображения от фиксированного или (и) поворотного видеосенсора; вычисляет перемещение и изменение угловой ориентации фиксированного и поворотного видеосенсоров в трехмерном пространстве относительно ТП (с учетом изменения угловой ориентации поворотного видеосенсора по данным системы контроля этого видеосенсора); вычисляет смещение проекции текущего положения БЛА на виртуальной посадочной плоскости от ее центра, связанного с ТП; передает значения смещения проекции текущего положения БЛА от центра виртуальной посадочной плоскости в автопилот. ТП может быть привязана или не привязана к реперам на изображении от фиксированного видеосенсора.

Внешними по отношению к посадочной системе являются (см. рис. 2):

- автопилот (запускает и останавливает работу посадочной системы, задает ТП, получает от посадочной системы значения смещений проекции текущего положения БЛА от центра виртуальной посадочной плоскости; получает данные компаса, высотомера и инерциальной системы, выбирает посадочную площадку, обеспечивает возврат БЛА к ближайшей посадочной площадке при пропадании сигналов навигационной системы, управляет снижением БЛА при посадке, корректирует положение БЛА в трехмерном пространстве для выхода в ТП);

- инерциальная система (определяет перемещение и изменение угловой ориентации БЛА в трехмерном пространстве на основе показаний гироскопов и акселерометров);

- канал связи и управления (транслирует видеоизображения от фиксированного и (или) поворотного видеосенсоров в центр управления, транслирует команды управления в автопилот, транслирует команды управления подвижным видеосенсором для управления им при наличии сигналов навигационной системы);

- видеорегистратор (записывает видеоизображения от фиксированного и (или) поворотного видеосенсоров);

- система поиска мест площадки (осуществляет поиск горизонтальных однородных поверхностей с площадью, соответствующей размерам БЛА, отсутствием подвижных объектов и наличием достаточного количества реперов);

- система возврата к месту посадки (постоянно находит реперы по трассе полета с использованием фиксированного видеосенсора, формирует и сохраняет их дескрипторы, использует информацию о сохраненных реперах для возврата к местам посадки).

При отсутствии на БЛА фиксированного видеосенсора его роль выполняет поворотный видеосенсор.

Модель определения положения БЛА

Основным элементом ПС является блок определения положения БЛА. Его основные функции представляются следующей математической моделью.

Трехмерная точка P_w в пространстве обозначается как $P_w = [x_w, y_w, z_w]^T$, а ее пиксельные координаты в пиксельной плоскости обозначаются как $P_i = [u_i, v_i]^T$. Взаимосвязь между точкой P_w и ее проекцией P_i в пиксельной плоскости определяется с помощью выражения

$$z_w \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = KP_w, \quad (1)$$

где K – внутренняя матрица камеры; f_x, f_y – фокусные расстояния, выраженные в пикселях; c_x, c_y – параметры, учитывающие возможное несовпадение главной точки с центром изображения.

Предположим, дана пара совпадающих характерных точек на двух изображениях (рис. 3).

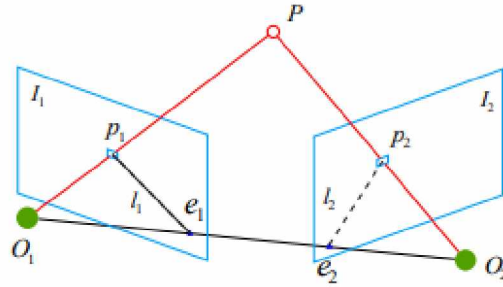


Рис. 3. Проекция точки на двух видеокадрах

Перемещение между первым и вторым кадрами составляет R, t . Центрам камер соответствуют точки O_1, O_2 . В этом случае существует особая точка p_1 в I_1 , которой соответствует характерная точка p_2 в I_2 , полученная путем сопоставления признаков. Позиции пикселей p_1 и p_2 описываются с помощью выражений $z_1 p_1 = KP$, $z_2 p_2 = K(RP + t)$. Пусть $m_1 = K^{-1} p_1$, $m_2 = K^{-1} p_2$. Тогда $z_2 m_2 = z_1 R m_1 + t$. После приведения получаем выражения $z_2 m_2 \times m_2 = 0$, $z_1 R m_1 \times m_2 + t \times m_2 = 0$. В результате решения этих уравнений можно получить значения m_1 и m_2 .

Заключение

Предложена структура двухсенсорной посадочной системы тяжелого БЛА вертолетного типа, обеспечивающая посадку при отсутствии сигналов навигационной системы и позволяющая повысить точность определения координат точки посадки за счет использования поворотного и дополнительного фиксированного видеосенсора, установленного в надир. Фиксированный видеосенсор используется на больших и средних высотах полета БЛА для поиска потенциальных мест посадки, составления базы дескрипторов траектории полета и захвата реперы в пределах и ближайшей окрестности посадочной площадки. На малых высотах полета БЛА при ухудшении качества изображений, формируемых фиксированным видеосенсором, из-за движения объектов, вызванного работой винтов БЛА, для захвата реперов используется поворотный видеосенсор, направляемый в дальнюю окрестность посадочной площадки или на линию горизонта.

DUAL-SENSORY LANDING SYSTEM FOR HEAVY HELICOPTER-TYPE UNMANNED AIRCRAFT

Y.M. CHEN, Z. GO, J. MA, X.H. REN, S.V. LITVINOV, M.I. ZORKO, V.YU. TSVIATKOU

Abstract. The problem of ensuring the landing of a heavy helicopter-type UAV in the absence of navigation system signals is considered. The structure of a dual-sensor landing system for a heavy helicopter-type UAV has been developed, which makes it possible to increase the accuracy of determining the coordinates of the landing point through the use of a rotary video sensor and an additional fixed video sensor installed at nadir. A rotating video sensor is used at low UAV flight altitudes to capture benchmarks in the distant vicinity of the landing site and at horizon level, when the quality of the fixed video sensor images decreases due to the movement of objects under the influence of air currents from the UAV propellers. A fixed video sensor is used at high and medium altitudes of UAV flight to search for potential landing sites, compile a database of flight path descriptors and capture benchmarks within and in the immediate vicinity of the landing site.

Keywords: Helicopter-type UAV, landing system.

Список литературы

1. Xin, L.; Tang, Z.; Gai, W.; Liu, H. // *Aerospace* 2022, 9, 634.
2. Gautam, A.; Sujit, P.B.; Saripalli, S. // *Proceedings of the 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Orlando, FL, USA, 27–30 May 2014; pp. 1210–1218.
3. Kong, W.; Zhou, D.; Zhang, D.; Zhang, J. // *Proceedings of the 2014 International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems (MFI)*, Beijing, China, 28–29 September 2014; pp. 1–8.
4. Yang, Z.; Li, C. // *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST)*, Shenzhen, China, 14–16 April 2017; pp. 453–457.
5. Yuan, H.; Xiao, C.; Xiu, S.; Zhan, W.; Ye, Z.; Zhang, F.; Zhou, C.; Wen, Y.; Li, Q. // *Electronics* 2018, 7, 68.
6. Nguyen, P.H.; Kim, K.W.; Lee, Y.W.; Park, K.R. // *Sensors* 2017, 17, 1987.
7. <https://uvr.aero/ru/what-we-do-ru/sakavik-ru/>.