

УДК 681.516:681.525

Применение машинного зрения в задачах координированного управления группой БПЛА в плоскости

Титков И. П., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Системы автоматического управления»*

Научный руководитель: Карпунин А.А., к.т.н., доцент

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

bauman@bmstu.ru

В настоящее время машинное зрение находит применение во всех сферах управления техническими системами. Особое место занимает применение в задачах управления и навигации БПЛА: определение положения, скорости и ориентации объектов, сопровождение движущихся целей, обеспечение траекторной безопасности. Основные функции одиночных БПЛА: наблюдение и рекогносцировка, отслеживание грузов, мониторинг чрезвычайных ситуаций, получение информации в реальном времени, обеспечение связи и вещания, логистическое обеспечение. Применение групп БПЛА позволяет увеличить область покрытия связью обеспечить транспортировку крупногабаритных грузов, получать снимки высокого разрешения с различных ракурсов, выполнять координированный поиск на местности. Плотные группы БПЛА обладают малой заметностью. Данные задачи требуют высокой точности определения взаимного положения БПЛА в группе.

Точность определения относительного положения и скоростей БПЛА в строе ограничена возможностями спутниковых навигационных систем.

Точность навигационных систем

В качестве данных для оценки точности используются требования ГОСТ к навигационным системам, т.к. требуется соответствие технических средств. Согласно ГОСТ Р 54022-2010 требуемый темп обновления навигационных параметров для спутниковых навигационных систем составляет 10Гц. Предельные погрешности определения координатных и скоростных параметров движения объектов на высотах до

2000 км не должны превышать по координатам 12-25 м, по составляющим скорости – 5-10 см/с. При оперативной обработке в реальном времени предельные погрешности определения координат не должны превышать 50-100 м, а скоростных – от 0,3 до 0,5 м/с.

Прецизионные спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС и GPS обладают высокой стоимостью, по сравнению с персональными приемниками. Согласно ГОСТ 31379-2009, персональный приемник предназначен для пользователей, максимальная скорость которых не превышает 50 км/ч, а максимальное ускорение не превышает 1 м/с^2 . При работе в стандартном режиме он должен обеспечивать определение координат и скорости с погрешностью измерения не более 100 м и 0,2 м/с соответственно.

Также могут использоваться наземные навигационные системы. Согласно ГОСТ Р 53169-2008 информационный канал импульсно-фазовой навигационной системы «Чайка» должен обеспечивать точность не менее 10 м (95 %).

Применение машинного зрения

Таким образом, применение систем на основе технического зрения целесообразно при требованиях по точности определения координат и скоростей, превосходящих 100 м и 0,2 м/с при возможности применения спутниковых навигационных систем и 10 м при возможности применения системы «Чайка».

Целесообразно применять комбинированную систему, когда на наблюдателе устанавливается прецизионная система, а на объектах наблюдения менее точная и более экономичная. Применение комбинированной (GPS/ИНС/Машинное зрение) системы на одиночном БПЛА для решения навигационной задачи рассмотрено в работе [9].

Многороторные БПЛА

В качестве примера в данной статье рассматриваются многороторные платформы. В отличие от классической самолетной схемы они могут висеть над одной точкой, обладают большей свободой действий и могут двигаться в любом направлении, превосходят вертолеты по маневренности, стабильности полета. Многороторные платформы не имеют сложных подвижных систем управления, управление производится за счет изменения оборотов двигателей.

Выделение объектов и определение координат

Выделение объектов на фоне производится, например, по набору отличительных признаков на одиночном изображении или с применением карты глубины – матрицы

расстояний, где для каждого пиксела хранится расстояние до плоскости камеры [8]. Применение комбинации двух методов позволяет с высокой точностью выделять на изображении объекты интереса – БПЛА. Пример карты глубины для нескольких объектов в пространстве представлен на рис. 1.

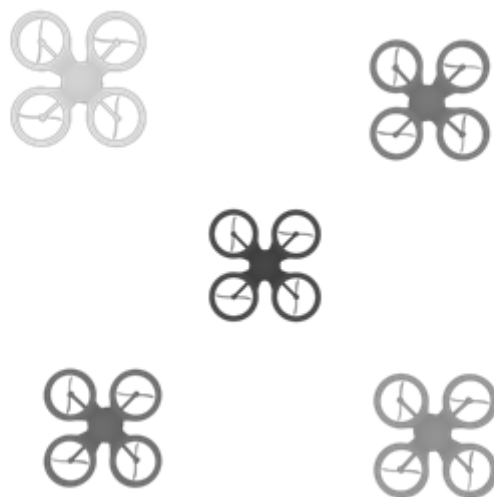


Рис. 1. Карта глубины для нескольких объектов

Решение задачи измерения координат объекта, изображение которого состоит из множества точек, требует определения понятия координат объекта. Под координатами центра объекта может пониматься, например, среднее арифметическое координат составляющих его точек как с учетом яркости, так и без.

Определение координат центра объекта по среднеарифметическому координат составляющих объект точек [7]:

$$x_{ц} = \frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in H} i, \quad y_{ц} = \frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in H} j,$$

где H – множество точек, принадлежащих объекту; M – число точек, составляющих объект.

С учетом яркости составляющих объект точек координаты центра могут быть определены из следующих соотношений:

$$x_{ц} = \frac{\sum_{(i,j) \in H} ih(i,j)}{\sum_{(i,j) \in H} h(i,j)}, \quad y_{ц} = \frac{\sum_{(i,j) \in H} jh(i,j)}{\sum_{(i,j) \in H} h(i,j)},$$

где $h(i, j)$ – значение яркости объекта в точек (i, j) .

В качестве координат объекта может быть принята точка, имеющая отличительный признак – наибольшая яркость, удаление от остальных, центр описанной геометрической фигуры.

Для повышения точности и устойчивости определения координат объекта необходимо предварительно или в режиме реального времени решать задачу выделения из наблюдаемого изображения точек, принадлежащих объектам. Динамическое решение задачи предполагает применение отличительных признаков в зависимости от окружающей среды, требований по быстродействию и точности, фоновых образований.

В [7] приведены модели состояния яркости изображений фона и объектов слежения, движения и изменения конфигурации объекта слежения, модель этапа начального обнаружения и выделения движущегося объекта; алгоритмы автоматического обнаружения и выделения движущихся объектов на неоднородном фоне.

Определение ориентации объектов в пространстве

Задача определения ориентации и динамики для пары БПЛА на основе машинного зрения приведена в работе [13]. Определение положения и скорости относительно наземных объектов рассмотрено в работе [12].

Алгоритмы определения оценивания углов ЛА по двумерному изображению в бортовых системах видеослежения представлены в [1].

Результаты измерений с применением оптической системы обладают меньшими шумами по сравнению с GPS, возможно сразу определить углы относительной ориентации аппаратов.

В [13] рассмотрено применение бортовых навигационных огней (БНО) для беспилотного самолета. Расположение БНО для самолетной схемы представлено на рис. 2. Пример расположения БНО для трехроторного БПЛА представлен на рис. 3а.

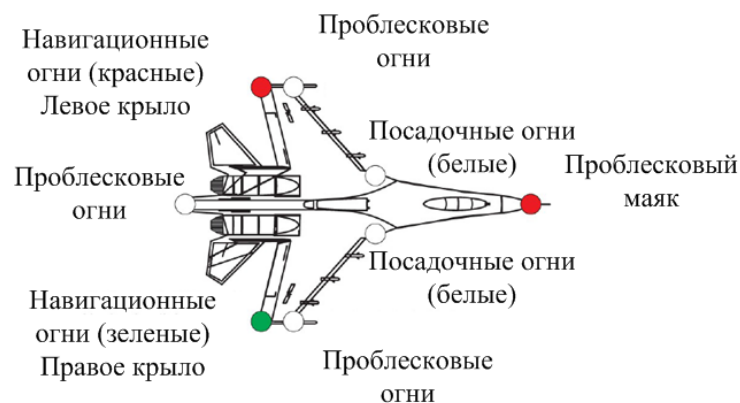


Рис. 2. Расположение бортовых навигационных огней на самолете



Рис. 3. Пример определения координат многоугорного БПЛА:
а) эталонное изображение объекта; б) выделение областей интереса

Определение геометрических размеров объектов

Увеличение быстродействия может быть достигнуто при использовании априорной информации: об ориентации и геометрических размерах объектов наблюдения, положении наблюдателя.

Связь углов обзора и разрешения камеры, принятые обозначения:

$\alpha_{x_{\max}}$ – угол обзора камеры; $\Delta x = |x_2 - x_1|$ – разрешение объекта по оси x ;

$\Delta \alpha_x = \frac{|x_2 - x_1|}{x_{\max}} \alpha_{x_{\max}}$ – угловое разрешение объекта по оси x ; L_x – длина проекции отрезка на ось x .

Расстояние до объекта при известных геометрических размерах и ориентации объекта:

$$D = \frac{1}{2} L_x \operatorname{tg} \frac{\Delta \alpha_x}{2},$$

где $\Delta \alpha_x$ – угловое разрешение объекта на изображении.

Восстановленная проекция отрезка при отклонении ориентации объекта на угол φ :

$$[L_x] = L_x \cos^{-1} \varphi.$$

Определение вертикальных и горизонтальных размеров матрицы соответственно:

$$M_x = \frac{l_x D}{f}, \quad M_y = \frac{l_y D}{f},$$

где f – фокусное расстояние.

Угол поля зрения по горизонтали и вертикали соответственно рассчитывается по вертикали и горизонтали по формуле:

$$\alpha_{x\max} = 2 \arctan\left(\frac{M_x}{2f}\right), \quad \alpha_{y\max} = 2 \arctan\left(\frac{M_y}{2f}\right).$$

Угловая разрешающая способность – минимальный угол, под которым находятся два различаемых объекта, различаемые отдельно.

Угловая разрешающая способность по горизонтали и вертикали:

$$\delta_x = 2 \arctan \frac{M_x}{2fX}, \quad \delta_y = 2 \arctan \frac{M_y}{2fY},$$

где X и Y – разрешение матрицы по горизонтали и вертикали соответственно.

При известных габаритах объектов дальность может быть определена из изменения угловых размеров при приближении или отдалении объекта от наблюдателя и сравнении их с эталонными.

Связь угловых размеров $\alpha_{1,2}$ и дальности $D_{1,2}$ объекта на первом и втором изображениях соответственно:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}.$$

Альтернативным подходом является применение стереозрения для построения карты глубины для определения расстояния до каждого элемента на изображении.

Зависимости ошибки измерения расстояния методом стереозрения, погрешности определения положения объекта от ошибки определения угла между осями камер, зависимости погрешности от расстояния до объекта при различных геометрических размерах объекта рассмотрены в [6].

Проблемы управления группой

Основными подходами к определению координат являются использование наземных средств, космических средств и использование дальномерных и угломерных средств локации и визирования. Окружающие условия могут накладывать ограничения на применение различных средств: видимость объектов управления, погодные условия, наличие спутникового и радионавигационного полей.

Управление многоуровневыми иерархическими группами требует применения комбинированных методов: управление на верхнем уровне требует наличия навигационных данных при значительных расстояниях между группами одного уровня. Для сетевого управления плотной группой требуются более точные данные об относительном положении.

На малых высотах значительные ограничения накладывают препятствия – деревья, здания и другие высотные объекты. Для решения задач может требоваться регулярное изменение строя группы. Решение задач координированных маневров, прокладки маршрута и наведения для групп БПЛА в пространстве и плоскости рассмотрено в [11].

Координированное управление

Координированное управление – согласованное управление движением объектов (БПЛА) с целью поддержания заданного строя (конфигурации). Полетная конфигурация характеризуется относительным положением объектов, ориентацией и направлением движения, определяется условиями и целями функционирования, например, съемка местности, выполнение поиска, движение плотным строем, совместная транспортировка груза.

Существует два основных подхода для координированного управления группой: централизованное и децентрализованное. Централизованное управление предполагает наличие двухуровневой иерархической системы – наблюдатель (лидер) и объекты наблюдения (ведомые). Ведомые образуют сетевой уровень, каждый ведомый движется по траектории, задаваемой лидером.

Децентрализованное (автономное) управление предполагает самостоятельное планирование маршрута, направленное на достижение общей цели, в зависимости от действий всех участников группы.

Для централизованного управления необходимо построение сети связи по схеме «звезда», децентрализованного – полносвязной.

Применение машинного зрения на каждом объекте группы позволяет осуществлять децентрализованное управление при отсутствии традиционных беспроводных каналов

связи. Перспективным направлением становится интеллектуальное автономное управление в группе, когда участники самостоятельно выбирают стратегию поведения и решают тактические задачи – движение по отдельности на значительном удалении, движение плотной группой, меняют конфигурацию в реальном времени в зависимости от внешних условий.

Для управления сложными распределенными пространственными структурами требуется применение дополнительных наблюдателей, например, точно оценивающих разность высот в группе или положение групп. Оптимальное расположение наблюдателей для определения относительного положения объектов в группе или групп является темой отдельных исследований.

Пример плоской конфигурации представлен на рис. 4а. Наблюдатель располагается ниже или выше для обеспечения требуемой точности определения относительного расстояния и обозрения части или полной группы. Пример сложной распределенной конфигурации типа «фрактал» представлен на рис. 4б.

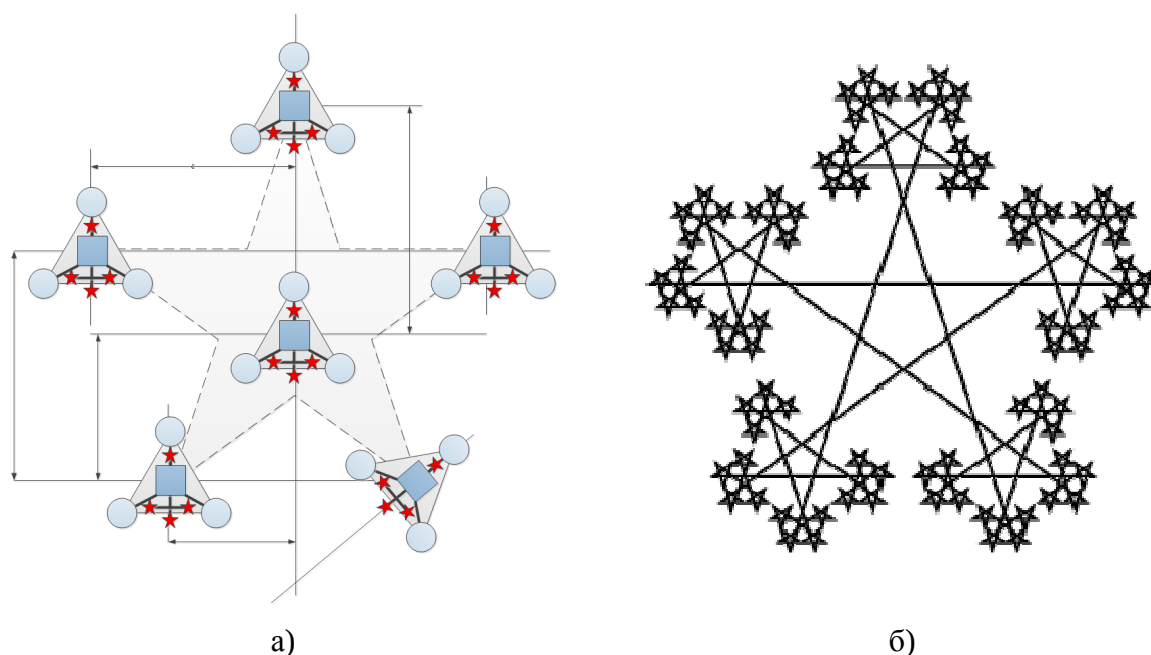


Рис.4. а) Плоская конфигурации типа «звезда»; б) распределенная пространственная конфигурация групп типа «фрактал» [10]

Определения координат и скоростей объектов

Задача определения относительных расстояний и скоростей при плоском движении для изображений с одной камеры сводится к сравнению углового размера объекта с угловым расстоянием между объектами. Фактические размеры определяются, исходя из

параметров оптической системы и априорно известных габаритах объектов. Скорость определяется из изменения положения от кадра к кадру.

Применение стереозрения позволяет сразу определить расстояние до каждого пиксела на изображении. Применение фильтра Калмана к результатам измерений, в том числе для комплексных систем измерений позволяет значительно снизить шумы и повысить точность измерений. Возможно использование нескольких БПЛА в качестве наблюдателей для повышения точности измерений и надежности системы.

Применение групп БПЛА при отсутствии спутниковой навигации

При отсутствии средств спутниковой навигации возможно применение машинного зрения для привязки на местности, использование систем, аналогичных TERCOM и DSMAC.

Альтернативным подходом является инерциальная навигация.

Стоимость группы, использующей средства инерциальной навигации и оснащенной стереозрением, может быть понижена оснащением лидера прецизионной инерциальной системой, а остальных аппаратов минимально необходимыми средствами для обеспечения полета и связи. По известным относительным положениям наблюдатель определяет координаты объектов наблюдения и передает их по радиоканалу. Таким образом, возможно использование разнородных по используемым техническим средствам и стоимости БПЛА.

Алгоритм определения координат и скоростей объектов в реальном времени с применением машинного зрения

Алгоритм определения координат и скоростей объектов в реальном времени состоит из нескольких основных этапов.

Этап 1. Получение и обработка изображений с одной или нескольких камер.

Этап 2. Построение карты глубины или определение дальности до объектов интереса (БПЛА). При применении стереоизображений выполняется построение карты глубины и выделение объектов интереса. Объекты интереса выделяются бинаризацией по диапазону дальностей (рис. 1). с последующей фильтрацией с кластеризацией (рис. 3б). При использовании одиночных изображений выполняется поиск объектов интереса

бинаризацией по яркости или цвету бортовых навигационных огней или по отличительным признакам БПЛА.

Этап 3. Определение координат и относительных скоростей объектов.

Этап 4. Определение ориентации объектов. В зависимости от положения наблюдателя возможно как определение курса, так и углов крена и тангажа БПЛА.

Предложенный алгоритм обработки обеспечивает получение всей необходимой навигационной информации для координированного управления в режиме реального времени за счет простоты применяемых методов. Для повышения точности определения динамики рекомендуется применять фильтрацию результатов измерения, например, фильтром Калмана.

Этап 5. Формирование управления.

Алгоритм формирования управления

Для эталонной конфигурации задаются координаты требуемого расположения в пространстве и задаются допустимые отклонения по положению и скорости. При перемещении группы задача управления сводится к следованию задаваемой или определяемой самостоятельно траектории движения. Для каждого БПЛА формируется эталонная траектория и определяются допустимые отклонения от нее. Таким образом, формирование управления сводится к решению динамической краевой задачи наведения в заданную точку пространства. Граничные условия определяются исходя из решаемой задачи движения вдоль траектории или движения и остановки. Решение задачи дополнительно усложняется необходимостью обеспечения траекторной безопасности.

Обеспечение траекторной безопасности в задачах облета статичной и динамической зон рассмотрено в [3,4]. В [2] рассмотрены вопросы формирования управления, приводящих на границы области достижимости.

При решении задачи перемещения БПЛА самолетной схемы в плоскости появляется множество возможных траекторий. В [5] рассматривается подход к получению оценочных траекторий разворота в реальном масштабе времени.

Задача поддержания конфигурации в неподвижном состоянии сводится к решению стабилизации заданного положения и проекций скорости БПЛА.

Заключение

В данной статье рассмотрено применение машинного зрения в задачах координированного управления группой БПЛА. Предложен алгоритм для определения координат и скоростей объектов группы в реальном времени на основе обработки

изображений, полученных с камер, установленных на БПЛА. Показана целесообразность применения систем на основе стереозрения в задачах управления группами в плотных конфигурациях и его преимущества по сравнению с имеющимися спутниковыми и наземными навигационными системами. Выполнен обзор существующих подходов определения относительных скоростей и углов ориентации БПЛА с применением машинного зрения.

Список литературы

1. Алпатов Б.А. Алгоритмы оценивания ориентации объекта по его двумерному изображению в бортовых системах видеослежения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 45. С. 3-8.
2. Воронов Е.М., Карпунин А.А. Алгоритм оценки границ области достижимости летательного аппарата с учетом тяги. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2007. № 4. С. 81-98.
3. Воронов Е.М., Карпунин А.А. Обеспечение траекторной безопасности в задаче облета динамической круговой зоны. // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 12. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/134335.html> (дата обращения 23.03.2014).
4. Воронов Е.М., Карпунин А.А. Обеспечение траекторной безопасности в задаче облета статичной круговой зоны. // Вестник Российского университета дружбы народов. Инженерные исследования. 2012. № 1. С. 58-70.
5. Карпунин А.А., Зазирный Е.А. Исследование задачи аппроксимации траектории плоского разворота летательного аппарата в заданном диапазоне высот и скоростей на основе рассчитанных опорных траекторий // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2013. № 10. С. 10-12.
6. Локтев Д.А., Алфимцев А.Н. Измерение расстояния до движущегося объекта с помощью комплексной системы видеомониторинга. Инженерный журнал: наука и инновации. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 11. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/996.html> (дата обращения 23.03.2014).
7. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
8. Hartley, R.I., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2004. 672 p.

9. Jinling Wang. Integration of GPS/INS/Vision sensors to navigate unmanned aerial vehicles // Remote Sensing and Spatial Information Sciences: The International Archives of the Photogrammetry, Beijing. 2008, Vol. XXXVII, Part B1. P. 963-969.
10. Lauwerier H. Fractals: Endlessly Repeated Geometric Figures. NJ: Princeton University Press, 1991. P. 72-77.
11. Path Planning for Multiple UAVs, in Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles / A. Tsourdos, [et al.]. John Wiley & Sons, Ltd, 2010. 212 p.
12. Pascual Campoy. Computer Vision onboard UAVs for civilian tasks // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2009. Volume 54, Issue 1-3. P. 105-135.
13. Zouhair Mahboubi. Camera based localization for autonomous unmanned aerial vehicles formation flight. Missouri: AIAA, 2011. 13 p.