УДК 629.197
DOI: 10.17285/0869-7035.2015.23.2.003-017

М. ПОПП, С. ПРОФЕТ, Г. ШОЛЬЦ, Г. Ф. ТРОММЕР

НОВАЯ СИСТЕМА НАВИГАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ МИКРОЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, СПОСОБНЫХ БЕСПРЕПЯТСТВЕННО ПРОНИКАТЬ В ЗДАНИЯ

Микролетательные аппараты (МЛА) применяются в аварийно-спасательных службах для автономного исследования опасных территорий. Особую сложность представляет автономный доступ в здания в силу неуверенного приема сигналов ГНСС в городских условиях и узких проходах в здания. В статье представлена комплексная система обеспечения полета, состоящая из подсистем наведения, навигации и управления, спроектированных для обеспечения безопасного проникновения в здания. Система наведения разделена на две части. Подсистема наведения по видеоданным обеспечивает маневрирование МЛА в промежуточном положении перед зданием. Подсистема наведения по потенциальным полям позволяет МЛА проникать в здания, избежав столкновений. При этом не требуется никаких исходных данных о структуре здания, а также карт. Чтобы обеспечить управление полетом по данным о реальном кинематическом состоянии МЛА, используется точная и робастная система навигации, не зависящая от спутниковых измерений. Оценивается функционирование комплексной системы путем моделирования полетных данных.

Ключевые слова: микролетательный аппарат, наведение, навигация, ГНСС.

1. Введение

При ликвидации последствий техногенных катастроф или стихийных бедствий возникает необходимость в быстрой рекогносцировке опасной территории. Чтобы избежать лишних рисков для поисково-спасательных служб при их ис-

Попп Мануэль. Аспирант, научный сотрудник Института оптимизации систем, г. Карлсруэ (Германия).

Профет Сильвия. Аспирант, научный сотрудник Института оптимизации систем, г. Карлсруэ.

Шольц Георг. Аспирант, научный сотрудник Института оптимизации систем, г. Карлсруэ.

Троммер Герт Ф. Доктор наук, профессор Института оптимизации систем, г. Карлсруэ (Германия). Университет ИТМО (Россия). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Научный редактор перевода к.т.н. Б.С.Ривкин.

следовании, желательно использовать автономные средства. Для использования в городских условиях и внутри зданий предназначены МЛА, обладающие способностью к зависанию, высокой маневренностью и умением обходить препятствия. При этом ключевым моментом является наличие у МЛА системы наведения, которая позволяет им проникать в здания без привлечения внешней информации. Особого внимания заслуживают условия, обеспечивающие доступ в здания через окна, двери или разломы в стенах и представляющие собой отдельное поле для исследований.

Чтобы автоматически прокладывать траектории полета в динамических условиях, например в городе, можно использовать карты, как показано в [1, 2, 3], но непременное условие наличия карт ограничивает область применения такого метода наведения. Так, в работах [4–6] карты не используются. Вместо этого для наведения МЛА при движении по неизвестной местности применяются данные видеокамеры или лазерного дальномера, или того и другого. Чтобы обеспечить полет без столкновений в незнакомых условиях, дополнительно применяются различные методы обхода препятствий. В работах [7, 8] предлагается осуществлять обход препятствий за счет использования поля оптического потока. В других исследованиях обнаруженные препятствия моделируются как искусственно созданные потенциальные поля. На следующем этапе на основе градиентов этих потенциальных полей рассчитывается траектория полета [9–11].

Собственно подлет к зданию и последующее проникновение в него редко обсуждаются в литературе. Методика наведения, позволяющая МЛА автоматически подлетать к окнам здания, приводится в работе [12]. Управление вертикальными и горизонтальными перемещениями МЛА относительно окна производится на основе видеоизображений, в то время как подлетом к окну управляет контроллер положения на основе GPS-измерений. Таким образом, эффективность такого метода зависит от наличия уверенного приема сигнала GPS. В работе [13] представлены результаты моделирования работы системы наведения, которая также по данным GPS позволяет МЛА подлететь к окну и зависнуть в некоторой точке перед ним. Во избежание столкновения с препятствиями используется концепция потенциального поля с онлайн-оптимизацией. Реальные результаты маневрирования МЛА при проникновении в окно представлены в [14]. При этом используется видеонаведение, при котором внешняя камера отслеживает МЛА и окно. Оба типа данных используются в наземной станции для реализации удаленного наведения МЛА.

Однако в реальных условиях использование внешних камер не всегда возможно. Кроме того, заранее обычно не известны данные о структуре здания, потенциальных препятствиях или расположении входов. Часто, особенно вблизи зданий, сигналы ГНСС недоступны или искажены вследствие эффектов многолучевого распространения и затенения. Предлагаемая в статье новая система наведения и навигации позволяет МЛА безопасно и автономно проникать в здания в указанных условиях. Информацию о реальном положении объекта для системы наведения МЛА предоставляет точная и робастная система навигации, не зависящая от ГНСС-измерений; ее описание дано в разделе 3. Обнаружение и слежение за целью производятся по данным от видеокамеры и лазерного дальномера. Положения цели в видеокадре камеры и по данным лазерного дальномера впоследствии используются для оценки положения цели относительно МЛА, как показано в разделе 4.

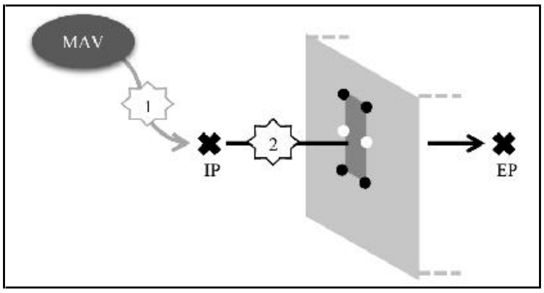

Рис. 1. Последовательность этапов наведения. На первом этапе (1) МЛА занимает промежуточное положение (IP). На втором этапе (2) МЛА направляется через проход в желаемое конечное положение (EP)

Чтобы МЛА мог маневрировать в непосредственной близости от здания (рис. 1), не имея исходных данных о его положении и структуре, применяется методика наведения по видеоданным под названием «видеонаведение» (см. подраздел 5.1). Проникновение в здание начинается из некоторой точки перед зданием, называемой далее «промежуточной», с помощью наведения по местным потенциальным полям, как описано в подразделе 5.2. Использование искусственных потенциальных полей позволяет реализовать безопасный полет, без столкновений. В заключении статьи представлены результаты экспериментальной оценки функционирования представленной системы при воздействии внешних возмущений (раздел 6).

2. Аппаратура

МЛА, используемый для проникновения в здания, представляет собой квадрокоптер диаметром 0,74 м. Это минимальный размер, который позволяет влетать в здания через окно или дверь, но в то же время обеспечивает грузоподъемность, достаточную для размещения необходимого оборудования. МЛА оснащен навигационной платформой, на которой размещены приемник GPS[1], бароальтиметр, датчик магнитного поля и инерциальный измерительный модуль (ИИМ), состоящий из трех гироскопов[2] и трехосного акселерометра[3]. Дополнительно полезная нагрузка содержит две камеры[4] и лазерный дальномер[5] (рис. 2).

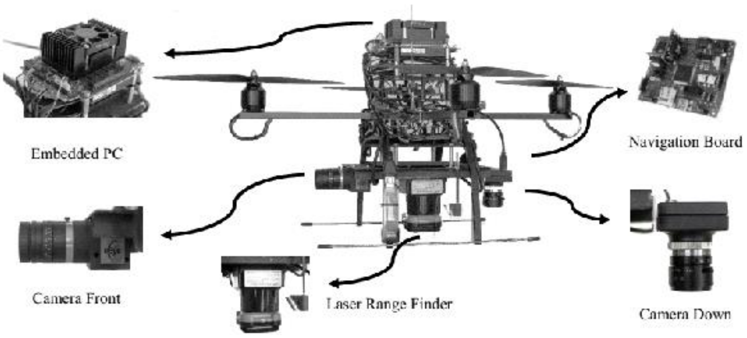

Рис. 2. Квадрокоптер и его полезная нагрузка. *Сверху вниз и слева направо*: встроенный ПК, камеры переднего и нижнего обзора, лазерный дальномер, навигационная платформа

Необходимые алгоритмы реализуются во встроенном компьютере[6], так как обработка данных датчиков требует значительных вычислительных затрат.

[1] µ blox, LEA 5T.
[2] Analog Devices, ADIS 16255.
[3] VTI, SCA3100.
[4] IDS, UI-1240 SE -C-HQ and IDS, UI-1240 ML-C-HG.
[5] Hokuyo, URG UTM-30LN.
[6] Adlink, Cool XpressRunner GS-45 Intel Core 2 Duo (2.26 GHz).

3. Навигационный фильтр

Чтобы получить точное навигационное решение при полете как внутри, так и снаружи здания, применяется навигационный фильтр, представленный в [15]. Принцип его работы состоит в следующем: интегрированная навигационная система дополнительно корректируется по разностным показаниям ориентации, полученным путем сличения сканированных изображений по данным лазерного дальномера и элементов видеоизображения. Камера нижнего обзора оценивает поступательное движение, а камера переднего обзора – вращательное движение с помощью точечных элементов изображения и обнаруженных так называемых «точек схождения» (vanishing points). Комбинация оценок этих двух видов движения позволяет получить навигационное решение с большой точностью, почти не зависящей от окружающей обстановки.

Интегрирование данных датчиков реализуется с помощью стохастического фильтра Калмана с клонированными состояниями (Stochastic Cloning Error State Space Kalman Filter). Чтобы свести к минимуму дрейф навигационного решения и ковариации фильтра, время существования клонированных состояний максимизируется. Таким образом, параллельно используются два ключевых изображения. Для точек схождения продолжительность жизни клонированных состояний еще более увеличивается за счет допущения ортогональности изображений в городских условиях.

4. Обнаружение, слежение и локализация цели

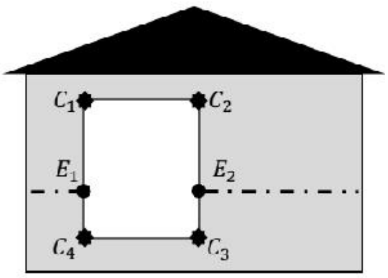

Рис. 3: Модель цели: углы окна C_1 – C_4 и точки пересечения плоскости сканирования лазерного дальномера и рамы окна (E_1 и E_2)

Для безопасного проникновения в здание чрезвычайно важно знание положения входа (цели) относительно МЛА. Чтобы получить эти данные, нужно обнаружить цель и затем отслеживать ее в течение всего полета. Для этого используются данные от камеры и лазерного дальномера. Применение обоих этих датчиков обеспечивает наблюдаемость цели в течение всего полета. В начале приближения к зданию, когда МЛА еще далек от цели, вероятность обнаружить цель в кадре камеры выше, чем в сканированном изображении от лазерного дальномера. Ближе к цели, наоборот, углы окна (двери) в поле зрения камеры исчезают, но остаются в области сканирования лазерного дальномера, даже если МЛА уже находится в проходе.

Поскольку каждый из двух датчиков обнаруживает разные части цели, используется модель цели, показанная на рис. 3. По изображению камеры обнаруживаются четкие углы цели (C_1 – C_4 на рис. 3), а от лазерного дальномера поступает информация о положении двух точек на раме окна. Это точки пересечения плоскости сканирования лазерного дальномера и рамы окна (E_1 и E_2).

4.1. Обнаружение цели

Обнаружение цели по изображению выполняется с помощью алгоритма Suzuki выделения контуров [16]. Все контуры выделяются из изображения в оттенках серого. Для классификации в качестве потенциальной цели контур должен соответствовать следующим критериям:

- контур должен окружать интересующую нас точку цели,
- контур может быть описан четырьмя точками,
- контур покрывает площадь некоторого минимального размера,
- края контура примерно ортогональны друг другу.

Если этим критериям соответствует несколько контуров, в качестве окна-цели классифицируется наименьший по площади контур, окружающий интересующую нас точку. На этапе обнаружения эта точка определяется оператором вручную. Для дальнейшей обработки сохраняются только четыре угла выбранного контура.

Когда МЛА оказывается достаточно близко к окну, цель становится постоянно видна в сканированном изображении лазерного дальномера. Оценивается грубое положение цели в сканированном изображении. При этом все точки P^L лазерного измерения трансформируются в изображение камеры I. Точка $P_i^L(d_i, \delta_i)$, находящаяся на расстоянии d_i и сканированная под углом δ_i, трансформируется в точку $P_i^I(u_i, v_i)$ в изображении камеры следующим образом:

$$\vec{P}_i^I = K \cdot \left[C_L^c \cdot \begin{pmatrix} d_i \cos\delta_i \\ d_i \sin\delta_i \\ 0 \end{pmatrix} + \vec{l}_{cL}^c \right]. \qquad (1)$$

Здесь K – калибровочная матрица камеры. Относительная ориентация камеры C и лазерного дальномера L описывается плечом $\vec{l}_{cL}^c$ и матрицей направляющих косинусов C_L^c. В то время как матрица C_L^c описывает вращение системы координат (СК) лазера[7] относительно СК камеры[8], плечо определяет расстояние между центром камеры и центром СК лазерного дальномера в координатах камеры.

Две точки $T_1^L \in P^L$ и $T_2^L \in P^L$, которые соответствуют точкам $T_1^I \in P^I$ и $T_2^I \in P^I$, ближайшим к положению левой и правой частей рамы окна на изображении (описываемым четырьмя обнаруженными углами в изображении камеры), используются как грубая оценка положения цели в сканированном лазерном изображении. Для дальнейшего уточнения оценки используется дополнительное обнаружение цели по измерениям лазерного дальномера. Адаптивный алгоритм выделения линий [17] выделяет линии из облака точек, определенных лазерным дальномером (рис. 4). Проход здесь представлен как пробел между двумя выделенными линиями. Чтобы найти эти две линии, проверяются все пары выделенных линий по критерию близости их конечных точек E^L к точкам T_1^L и T_2^L. В качестве следующей проверки расстояние W_E^L между двумя крайними точками сравнивается с шириной прохода W_T^L, описываемой точками T_1^L и T_2^L. Если точки проходят эту окончательную проверку, они и будут являться результатом лазерного обнаружения цели.

---

[7] Начало СК лазера задается в центре лазерного дальномера. Оси направлены прямо (x^L), направо (y^L) и вниз (z^L).

[8] Начало СК камеры задается в оптическом центре камеры. Оси направлены прямо (z^c), направо (x^c) и вниз (y^c).

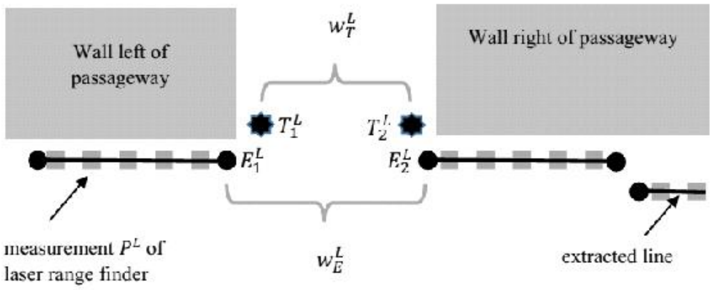

Рис. 4. Обнаружение прохода по данным лазерного дальномера. T_1^L и T_2^L – точечные измерения лазерного дальномера, ближайшие к положению углов окна. Конечные точки E_1^L и E_2^L принадлежат линиям, выделенным адаптивным алгоритмом, и представляют собой окончательный результат лазерного обнаружения цели.
Слева направо и сверху вниз: стена слева от прохода, стена справа от прохода, измерение лазерного дальномера, выделенная линия

4.2. Слежение за целью

Чтобы отследить углы обнаруженного окна в изображении камеры, используется итерационная версия алгоритма оптического потока Лукаса – Канаде [18]. После каждого этапа слежения проводится контроль целостности отслеживаемых элементов: проверяется правильность соотношения ширины и высоты цели и ортогональность краев контура цели друг другу. Если контроль целостности не пройден, необходимо повторное обнаружение цели. Таким образом, процедура, описанная в п. 4.1, повторяется, но интересующая нас точка цели теперь автоматически выбирается в центре последнего отслеженного контура цели. Лазерное слежение за целью выполняется на основе обнаружения, описанного в п. 4.1.

4.3. Локализация цели

Относительная ориентация цели и МЛА рассчитывается по методике, приведенной в работе [19]. При этом для оценки относительной ориентации объектов с помощью двухмерных и трехмерных соответствий используется нестрогое допущение о «манхеттенском устройстве мира» (weak Manhattan world assumption). В нашем случае используемые в указанном подходе данные о глубине изображения предоставляются лазерным дальномером.

5. Наведение МЛА

Чтобы обеспечить выполнение различных и зачастую противоречащих друг другу требований и граничных условий в течение всего полета, система наведения содержит два базовых взаимодополняющих модуля: наведения по видеоданным и наведения по потенциальным полям. При этом плавное переключение между модулями обеспечивает стабильность полета. Обе подсистемы используют данные о цели и окружающих ее препятствиях (полученные в ходе обработки данных датчиков) для расчета управляющих воздействий по скорости и курсу, служащих в качестве входных переменных для исполнительных элементов МЛА. Для этого мы использовали систему каскадного управления: основной ПИД-контроллер скорости высокого уровня и вспомогательный контроллер ориентации и высоты низкого уровня. Общая схема системы наведения представлена на рис. 5.

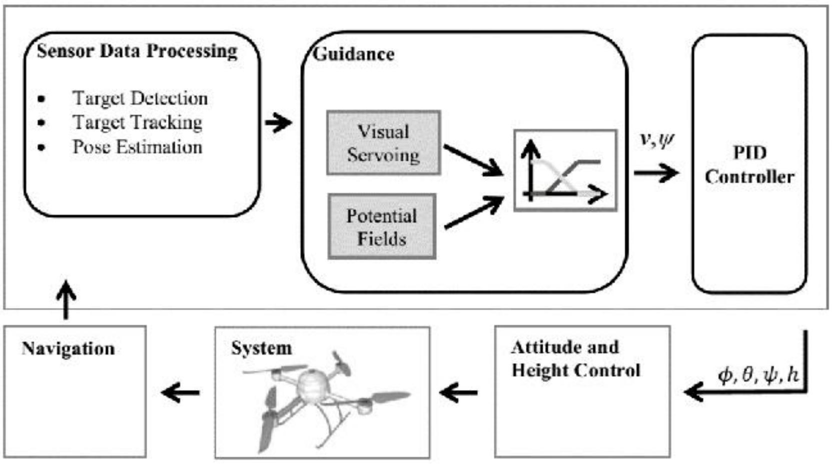

Рис. 5. Компоненты системы навигации и наведения:
Верхний ряд – слева направо и сверху вниз: обработка данных датчиков: обнаружение цели, слежение, оценка ориентации; наведение: видеонаведение, потенциальные поля, ПИД-контроллер.
Нижний ряд – справа налево: контроллер ориентации и высоты, система, навигация

5.1. Наведение по видеоданным

При наведении по видеоданным управление движением МЛА относительно цели производится на основе информационной обратной связи от изображения камеры. Алгоритмы, принадлежащие к методам видеоуправления минимизируют погрешность

$$\vec{e}(t) = \vec{s}(t) - \vec{s}^*(t) \tag{2}$$

между измеряемыми элементами $\vec{s}(t)$ и их искомыми аналогами. Оба вида элементов можно напрямую обнаружить в изображении или рассчитать по данным изображения [20]. Рассчитанный набор точек для скоростей и вращений определяется в СК МЛА[9]. Экспоненциальное снижение погрешности обеспечивается последующим законом управления:

$$\vec{v}_c = -\lambda L_e^+ \vec{e}(t) \ . \tag{3}$$

Здесь $\vec{v}_c$ – пространственная скорость камеры, λ – коэффициент усиления, а $\mathbf{L}_e^+$ – псевдообратная матрица Мура – Пенроуза [21]. Применение уравнения (3) для управления МЛА обеспечивает трансформацию всех измеренных элементов в искомые, в силу чего МЛА постепенно примет необходимое положение и ориентацию относительно цели.

Схемы видеонаведения обычно различаются набором используемых элементов. В нашем гибридном методе сочетаются преимущества классического подхода на основе изображения (ПОИ) и подхода на основе местоположения (ПОМ). Эффективная цифровая схема переключения в каждый момент времени оценивает состояние системы и последовательно решает, следует ли использо-

[9] Начало корпусной СК задается в центре МЛА. Оси направлены вперед (x^b), направо (y^b) и вниз (z^b).

вать в данном случае ПОИ- или ПОМ-контроллер. Основное правило таково: когда функция погрешности, обусловленная работой неиспользуемого в настоящее время ПОИ-контроллера $\xi_{ОИ}(t)$ (или соответственно $\xi_{ОМ}(t)$) превышает порог $\gamma_{ОИ}$, он и будет подключен.

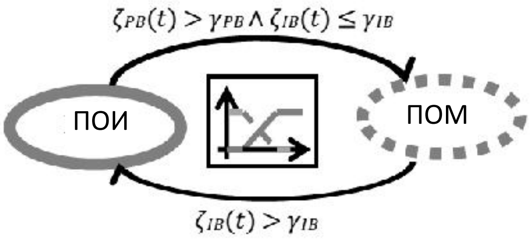

Рис. 6. Гибридное видеоуправление: контроллер схемы переключения с использованием стабильной комбинации Ляпунова ПОИ- и ПОМ-подходов

Схема переключения, показанная на рис. 6, основана на обобщении критерия Ляпунова, предложенном в [22]. При этом обеспечивается приоритет удерживания элементов в поле зрения над гарантией оптимального по времени поведения системы. Чтобы избежать появления команд, приводящих к нестабильному движению, используется гладкое переключение. Чтобы еще более улучшить качество работы системы, для сокращения времени переходного процесса вместо обычно используемого постоянного коэффициента усиления используется адаптивный коэффициент. В соответствии с [23] его можно записать в виде

$$\lambda(x) = a \cdot e^{-b \cdot x} + c \, . \tag{4}$$

Параметры *a, b* и *c* обозначают следующее:

$$a = \lambda(0) - \lambda(x)\Big|_{x \to \infty},$$
$$b = \frac{1}{a} \cdot \dot{\lambda}(x)\Big|_{x=0}, \tag{5}$$
$$c = \lambda(x)\Big|_{x \to \infty}.$$

Дополнительно мы используем определение запретной зоны (см. [24]) на пограничной части изображения, чтобы убедиться, что при маневре МЛА углы отслеживаемого окна остаются внутри поля зрения камеры.

5.2. Наведение по потенциальным полям

Наведение по потенциальным полям позволяет реализовать обход препятствий и пролет через проходы в здании без столкновений. Наличие карты при этом необязательно, но препятствия должны быть наблюдаемы в реальном времени в течение полета. Данный подход основан на классическом методе искусственных потенциальных полей [25], идея которого состоит в обеспечении движения мобильного робота в силовом поле, порожденном наложением потенциалов притяжения и отталкивания, наведенных соответственно целью и препятствием. Затем мобильный робот использует данные о силовом поле для выработки основанных на отрицательном градиенте потенциала поля коэффициентов управления, обеспечивающих траекторию движения к желаемой точке без столкновений. Этот вычислительно эффективный метод с обратной связью служит основой для реализации работы системы при динамически меняющихся внешних условиях в реальном времени. Однако классический подход обладает многочисленными недостатками, связанными с обеспечением безопасности полета [25, 26, 27], а также определенными ограничениями, так что занятие желаемого положения может оказаться невозможным [28, 29, 30]. В нашем методе наведения для парирования этих проблем используются модифицированные подходы.

Потенциал притяжения цели на расстоянии $\rho_d(\vec{x})$ от МЛА в соответствии с [11] определяется как

$$U_{att}(\vec{x}) = \begin{cases} c_{att,1} \cdot \rho_d(\vec{x})^{n_{att}}, & \rho_d(\vec{x}) < \rho_{0,att} \\ c_{att,2} \cdot \rho_d(\vec{x}), & else \end{cases}. \quad (6)$$

Постоянные $c_{att,1}$, $c_{att,2}$ и n_{att} выбираются таким образом, чтобы определенные на отрезках функции были непрерывно сшиваемыми и дифференцируемыми. Это значит, что вектор силы представляет собой полином, который уменьшается при приближении к желаемому положению и там обнуляется, в то время как значение градиента удерживается на постоянном уровне, если расстояние превосходит установленный лимит. Отсюда вывод: уравнение (6) обеспечивает безопасность полета, так как силы отталкивания, представляющие препятствия, не подавляются переоцененной силой притяжения.

Для отталкивания в целях обхода препятствий используется так называемый «потенциал запрета отталкивания вблизи цели», введенный в [27]. Основная идея состоит в объединении потенциала GeCui [29] (названного по именам авторов Ge и Cui), обеспечивающего достижение цели в присутствии близко расположенных препятствий, с классическим потенциалом firas [25], постоянно поддерживающим безопасную дистанцию. Потенциал отталкивания для МЛА на расстоянии $\rho_{obs}(\vec{x})$ от объекта определяется следующим образом:

$$U_{rep}(\vec{x}) = \begin{cases} c_{rep} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{obs}(\vec{x})} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2 \cdot s, & \rho_{obs}(\vec{x}) \leq \rho_0 \\ 0, & else \end{cases}. \quad (7)$$

Коэффициент усиления обозначается c_{rep}, область определения потенциала — ρ_0. Коэффициент отталкивания определяется как

$$s = \min\left(1, c_s \cdot \rho_d^{n_{att}}\right). \quad (8)$$

На очень близком расстоянии от желаемого положения *s* имеет малое значение, но во всех других ситуациях, в отличие от классического подхода GeCui, *s* ограничено единицей. Соответственно уравнение (8) уменьшает отталкивание около цели, но без необходимости не увеличивает его на большом расстоянии.

Сферические функции для задания потенциала отталкивания широко используются в силу своей простоты и удобства применения. Однако при описании удлиненных прямоугольных объектов использование круговых потенциальных барьеров требует гораздо больше места, чем могло бы потребоваться при обходе препятствий [31]. Если желаемая траектория не позволяет произвести обход пространственного препятствия, допустимая дистанция до объекта должна быть сокращена за счет снижения уровня обеспечения безопасности. В противном случае пролет по проходу будет невозможным и операция не будет выполнена, поэтому в предлагаемом методе наведения используется дополнительный потенциал, помогающий избежать данной проблемы. Он создан на основе потенциала вращения, представленного в [32], и адаптирован к нашей системе в части введения отталкивающей силы, направленной по часовой стрелке (c) и против часовой стрелки (cc), задаваемой равенством:

$$\vec{F}_{rep,\frac{c}{cc}} = \begin{cases} \left\|\vec{F}_{att}\right\| \cdot \vec{v}_{\frac{c}{cc}} \cdot \frac{1}{r^2}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_a}\right), & r \le r_a \\ 0, & else \end{cases}. \quad (9)$$

Здесь $\left\|\vec{F}_{att}\right\|$ – модуль силы притяжения обозначается , в то время как $\vec{v}_{\frac{c}{cc}}$, r и r_a обозначают безразмерные параметры. Они рассчитываются по методике, описанной в [32]. Интегрирование $\left\|\vec{F}_{att}\right\|$ гарантирует возможность при необходимости менять направление движения МЛА и таким образом обеспечивать необходимое отклонение для обхода препятствия. Наш алгоритм, получивший название «адаптивное тангенциальное наведение», использует одну функцию поворота по часовой стрелке и одну – против часовой стрелки, чтобы намеренно направить МЛА в проход, как показано на рис. 7. При этом соблюдается безопасное расстояние до стены и в то же время не допускается появление локальных минимумов перед отверстием перед проходом, даже если его размеры меньше заданного допуска на него.

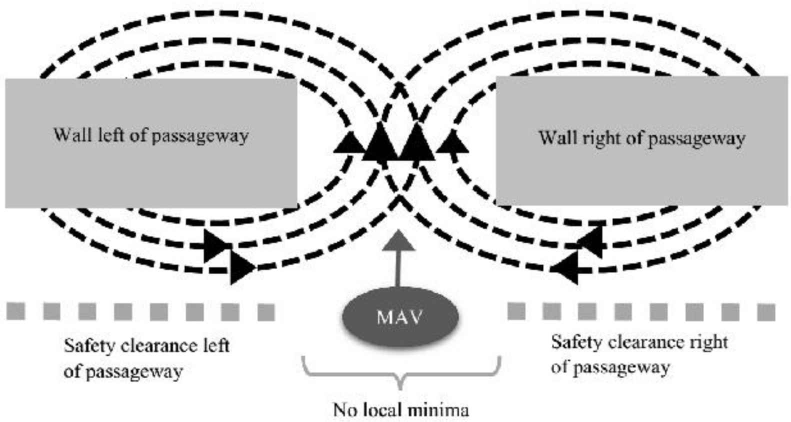

Рис. 7. Адаптивное тангенциальное наведение: потенциалы вращения по и против часовой стрелки реализуют целевой обход препятствий. Дополнительно они предотвращают появление эффектов локальных минимумов

Слева направо и сверху вниз: стена слева от прохода, стена справа от прохода, безопасное расстояние слева от прохода, МЛА, отсутствие локальных минимумов, безопасное расстояние справа от прохода

Кроме управления движением с обратной связью потенциальные поля можно использовать в локальных числовых алгоритмах планирования для дальнейшего повышения качества системы [33]. Этот принцип реализован в методике управления по прогнозируемым данным векторного поля [34], где вводится понятие векторного поля, используемого для оптимизации. На первом этапе с учетом динамики и граничных состояний прогнозируется на некоторый временной горизонт конечный набор достижимых состояний системы. Затем для получения оптимальных переменных управления решается задача минимизации погрешности направления между вектором скорости МЛА и градиентом поля в прогнозируемом положении МЛА. В нашем алгоритме в целях исключения появления при оптимизации локальных минимумов используется обобщенное представление указанной функции стоимости. Таким образом, подобная локальная оптимизация необходима для снижения колебаний в поведении системы, повышения точности и робастности наведения.

6. Результаты

При проведении представленных экспериментов мы использовали разработанную нами среду моделирования, содержащую физическую модель МЛА, а также модели используемых датчиков, включая модели их шума, чтобы создать искусственные, но реалистичные данные датчиков. Дополнительно используется пакет OpenGL с трехмерной моделью студенческого городка, содержащей информацию о зданиях. Виртуальные изображения с камеры создаются с помощью данных о реальном положении ЛА. Пример такого изображения с камеры показан на рис. 8. Более подробно о среде моделирования см. в работе [35].

Рис. 8. Моделированное изображение камеры с обнаруженными углами окна-цели (показаны белым)

Помимо общей оценки работы всей системы наведения и навигации в данном разделе представлено сравнение использования различных схем видеонаведения. Далее показано, как использование алгоритма адаптивных тангенциальных полей влияет на результаты наведения.

6.1. Схемы видеонаведения

Рассмотрим совместное использование для подхода к цели схем видеонаведения на основе изображения и наведения с использованием данных о местоположении.

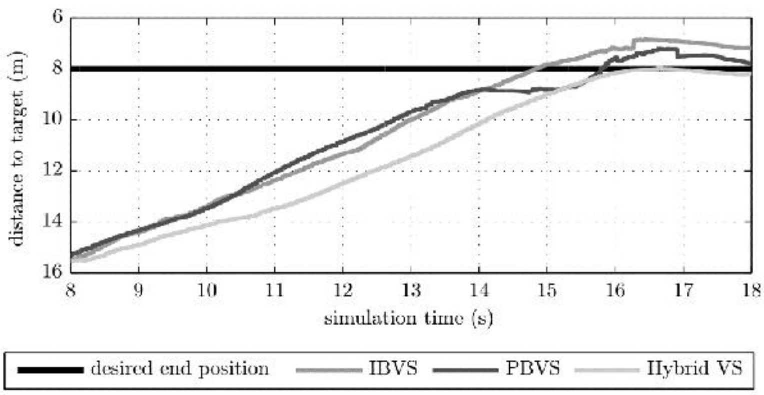

Рис. 9. Сравнение точности трех предлагаемых схем видеонаведения
Слева направо и сверху вниз: расстояние до цели, время моделирования, желаемое конечное положение, ПОИ, ПОМ, гибридное наведение

Как видно из рис. 9, точность наведения увеличивается за счет применения предлагаемой нами гибридной схемы. Для наглядности один и тот же полет был смоделирован с помощью трех различных схем. В сравнении с ПОИ и ПОМ гибридная схема наведения работает лучше всего и приводит к наименьшим погрешностям в установившемся положении.

6.2. Искусственные потенциальные поля

При описании препятствий, расположенных вдалеке от прохода, с помощью сферических потенциалов отталкивания мы использовали методику адаптивного тангенциального наведения, чтобы направить МЛА через отверстие в здании. Эта методика не позволяет ЛА подходить к препятствиям и не блокирует узкий проход. Чтобы визуализировать эту ситуацию, мы смоделировали один и тот же полет с помощью двух различных подходов к потенциальным полям отталкивания. Для одного полета мы использовали обычные радиальные защитные устройства для описания препятствий далеко от прохода и границ самого прохода. Это приводит к так называемой «блокировке прохода»: перед ним появляются локальные минимумы, которые МЛА не может преодолеть (рис. 10). Для другого полета было применено адаптивное тангенциальное наведение, что позволило ЛА пролететь через проход беспрепятственно .

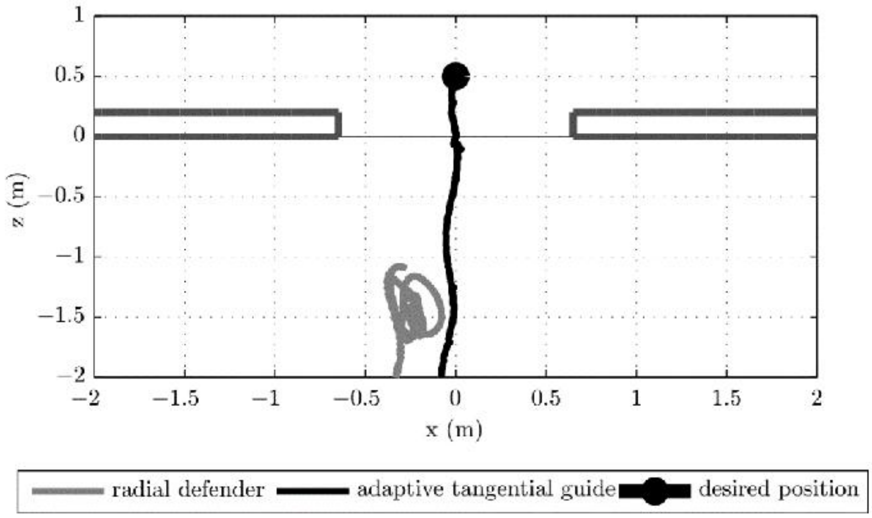

Рис. 10. Сравнение двух траекторий. Черным показана траектория, созданная при помощи адаптивных тангенциальных полей для проведения МЛА через проход. Серым цветом отмечена траектория, созданная с помощью сферического потенциала отталкивания для описания углов прохода.

Слева направо: радиальные защитные устройства, адаптивное тангенциальное наведение, желаемое положение

6.3. Итоговые результаты

Чтобы в целом оценить работу системы наведения и навигации, мы провели 100 смоделированных полетов. Для каждого полета задавались случайные начальные значения параметров шума датчиков. При оценке испытаний мы использовали три категории. Если МЛА влетал в здание без столкновений, испытание считалось успешно пройденным («Операция прошла успешно»), в противном случае присваивалась категория «Подход к цели произведен» (если МЛА успешно достигал промежуточного положения перед окном) или «Подход к цели не осуществлен».

Как видно из рис. 11, большинство полетов прошли успешно (70%), и только в 14% полетов подход к цели не был осуществлен. Причина сбоя состояла в том, что цель пропадала из поля зрения устройства слежения. В этом случае операция повторялась.

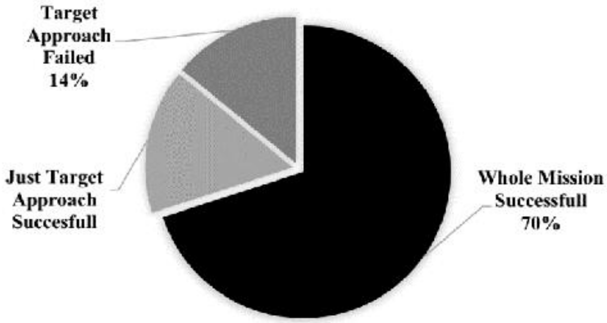

Рис. 11. Итоговая оценка работы системы, проведенная по 100 смоделированным полетам.
Слева направо и сверху вниз: подход к цели не осуществлен – 14%, подход к цели осуществлен, операция прошла успешно – 70%

7. Выводы

Разработана летная система, позволяющая МЛА автономно влетать в здание. Система состоит из аппаратной платформы и подсистем наведения, навигации и управления.

МЛА имеет минимальный размер, который позволяет влетать в здания через окно, но в то же время обеспечивает достаточную грузоподъемность: на МЛА установлены ИИБ, две камеры, лазерный дальномер и встроенный компьютер.

Для оценки положения МЛА использовалась навигационная система, базирующаяся на данных об относительном положении по информации от двух камер и лазерного дальномера. Работа навигационной системы не зависит от спутниковых измерений или наличия карт.

Разработана система наведения, состоящая из двух модулей: наведения по видеоданным и по потенциальным полям. Первый модуль направляет МЛА в желаемое промежуточное положение прямо перед целью, а второй проводит МЛА через проход и затем используется внутри здания. Использование потенциальных полей обеспечило возможность проведения полета без препятствий в сложных условиях.

Работа летной системы была экспериментально оценена в ходе 100 смоделированных полетов. Испытания продемонстрировали пригодность системы для автономных полетов как снаружи, так и внутри помещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chen X. and Zhang J.** The three-dimension path planning of UAV based on improved artificial potential field in dynamic environment, International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2013, Bd. 2, pp. 144-147.
2. **He R., Prentice S. und Roy N.** Planning in information space for a quadrotor helicopter in a GPS-denied environment,“ IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2008, pp. 1814-1820.
3. **Nieuwenhuisen M. und Behnke S.** Layered mission and path planning for MAV navigation with partial environment knowledge, in Proceedings of 13th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS), Padova, Italy, 2014.

4. **Kim S., Lee D., and Kim H. J.** Image based visual servoing for an autonomous quadrotor with adaptive backstepping control, International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2011, pp. 532-537.
5. **Bills, C., Chen, J., and Saxena, A.** Autonomous MAV flight in indoor environments using single image perspective cues," in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, 2011.
6. **Fahimi F. and Thakur K.** An alternative closed-loop vision-based control approach for unmanned aircraft systems with application to a quadrotor, in International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Atlanta, USA, 2013.
7. **Hrabar S. und Sukhatme G.** Vision-based navigation through urban canyons, Journal of Field Robotics, Bd. 26, Nr. 5, 2009, pp. 431-452.
8. **Zingg S., Scaramuzza D., Weiss S., and Siegwart R.** MAV navigation through indoor corridors using optical flow, in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Anchorage, USA, 2010.
9. **Nieuwenhuisen M., Schadler M. and Behnke S.** Predictive potential field-based collision avoidance for multicopters, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS), Bde. %1 von %2XL-1/W2, 2013, pp. 293-298.
10. **Stastny T., Garcia G., and Keshmiri S.** Collision and obstacle avoidance in unmanned aerial systems using morphing potential field navigation and nonlinear model predictive control, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Bd. 137, no. 1, 2014.
11. **Crocoll P., Seibold J., Frietsch N., and Trommer G.** Collision-free trajectory planning and local obstacle avoidance for MAVs, in Proceedings of the European Navigation Conference, London, United Kingdom, 2011.
12. **Mejias L., Saripalli S., Campoy P., and Sukhatme G.S.** Visual servoing of an autonomous helicopter in urban areas using feature tracking, Visual Servoing of an Autonoous Helicopter in Urban Areas using Feature Tracking, Bde. %1 von %23-4, no. 23, 2006, pp. 185-201.
13. **FloresG., Zhou S., Lozano R., and Castillo P.** A vision and GPS-based real-time trajectory planning for MAV in unknown urban environments, in International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Atlanta, USA, 2013.
14. **Julian R.C., Rose C.J., Hu H., and Fearing R.S.** Cooperative control and modeling for narrow passage traversal with an ornithopter MAV and lightweight ground station, in Proceedings of the 12th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), Saint Paul, USA, 2013.
15. **Popp M., Crocoll J., Ruppelt J., and TrommerG.F.** A novel multi image based navigation system to aid outdoor – indoor transition flights of micro aerial vehicles, in Proceedings of ION GNSS+, Tampa, USA, 2014.
16. **Suzuki S. and Abe K.** Topological structural analysis of digitized binary images by border following, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Bd. 30, no. 1, 1985, pp. 32-46.
17. **Yaghobi M., Jadaliha M., Zolghadr J., and Norouzi M.** Adaptive line extraction algorithm for SLAM application, in IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand, 2009.
18. **Bouguet J.** Pyramidal implementation of the affine Lucas Kanade feature tracker description of the algorithm, Intel Corporation, 2001.
19. **Saurer O., Fraundorfer F., and Pollefeys M.** Homography based visual odometry with known vertical direction and weak Manhattan world assumption, in IEEE/IROS Workshop on Visual Control of Mobile Robots, 2012.
20. **Hutchinson S., Hager G.D., and Corke P.I.** A Tutorial on visual servo control, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Bd. 5, no. 12, 1996, pp. 651–670.
21. **Chaumette F. and Hutchinson S.** Visual servo control, Part I: Basic approaches, IEEE Robotics and Automation Magazine, Bd. 13, 2006, pp. 82-90.
22. **Gans N.R. und Hutchinson S.A.** An asymptotically stable switched system visual controller for eye in hand robots, in IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, USA, 2003.

23. **V. 2. Documentation, Tutorial**: How to boost your visual servo control, Lagadic project, 2014.
24. **Chesi G., Hashimoto K., Prattichizzo D., and Vicino A.** Keeping features in the field of view in eye-in-hand visual servoing: a switching approach, IEEE Transactions on Robotics, 2004, Bd. 20, no. 5, p. 908–914, 2004.
25. **Khatib O.** Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, IEEE International Conference on Robotics and Automation , 1985, Bd. 2, pp. 500-505.
26. **Koren Y. and Borenstein J.** Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991, Bd. 2, pp. 1398-1404.
27. **Meister, O.,** Entwurf und Realisierung einer Aufklärungsplattform auf Basis eines unbemannten Minihelikopters mit autonomen Flugfähigkeiten, Karlsruhe, Germany: Institute of Systems Optimization, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2010.
28. **Chengqing L., Ang V M.H., Krishnan H., and Lim S.Y.** Virtual obstacle concept for local-minimum-Rrcovery in potential-field based navigation, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000, Bd. 2, no. 2, pp. 983-988.
29. **Ge S.S. and Cui Y.J.** New potential functions for mobile robot path planning, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, Bd. 16, no. 5, pp. 615-620.
30. **Koditschek D.E.** Exact robot navigation by means of potential functions: Some topological considerations, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1987, Bd. 4, pp. 1-6.
31. **Volpe R. and Khosla P.** Manipulator control with superquadric artificial potential functions: Theory and experiments, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1990, Bd. 20, no. 6, p. 1423–1436.
32. **Rezaee H., and Abdollahi F.** Adaptive artificial potential field approach for obstacle avoidance of unmanned aircrafts, Proceedings of the European Navigation Conference, 2012, pp. 1-6.
33. **Hwang Y.K. and Ahuja N.** A potential field approach to path planning, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, Bd. 8, Nr. 1, pp. 23-32.
34. **Gerlach A.R., Kingston D., and Walker, B.K.** UAV navigation using predictive vector field control, in American Control Conference (ACC), Portland, USA, 2014.
35. **Frietsch N.** Bildbasiertes Navigationssystem eines unbemannten Mini-Helikopters, Berlin: Logos Verlag GmbH, 2012.

Abstract. Micro Aerial Vehicles for autonomous explorations of hazardous areas are predestined to support emergency and rescue forces. Especially the autonomous access to buildings is highly demanding due to insufficient GNSS reception in urban terrain and narrow passageways into buildings. Thus, this paper presents a complete flight system, consisting of guidance, navigation and control subsystems. All these elements are designed to enable save flights into buildings. The guidance subsystem is divided into two parts. The vison based guidance part is manoeuvring the MAV on an intermediate position in front of the building. The potential field based guidance part enables the MAV to fly inside the buildings without having any collisions. For that, neither any prior knowledge about the building's structure, nor any maps are necessary. To provide the flight guidance with information about the actual kinematic state of the MAV an accurate and robust navigation system not depending on GNSS measurements is used. The complete system is evaluated using simulated flight data.

Keywords: MAV, Guidance, Navigation, GNSS Denied Environment

Материал поступил 4.02.2015