Применение цифровой обработки изображений для позиционирования беспилотного вертолета относительно неподготовленной посадочной площадки

Application of digital image processing for unmanned helicopter positioning relative to an unprepared landing area

Карманов / Karmanov A.
Андрей Геннадиевич
(karmanov.nip@gmail.com)
кандидат технических наук, доцент.
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»
(Университет ИТМО),
доцент факультета инфокоммуникационных технологий (ФИКТ).
г. Санкт-Петербург

Карманова / Karmanova N.
Наталия Андреевна
(natali.karmano@gmail.com)
Университет ИТМО,
инженер научно-технического отдела.
г. Санкт-Петербург

Макаренко / Makarenko A.
Александр Александрович
(a_makarenko@mail.ru)
кандидат технических наук, доцент.
Университет ИТМО, доцент ФИКТ.
г. Санкт-Петербург

Аванесов / Avanesov M.
Михаил Юрьевич
(avanesov@itain.ru)
кандидат технических наук.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
научный секретарь.
г. Санкт-Петербург

Макаров / Makarov A.
Анатолий Дмитриевич
(trolik@mail.ru)
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
ведущий специалист.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: автоматическая посадка – automatic landing; беспилотный летательный аппарат – unmanned aerial vehicle; оптикоэлектронная система – optoelectronic system; лазерный излучатель – laser emitter.

Произведен сравнительный анализ типовых вариантов решения задачи позиционирования беспилотного вертолета и предложена концепция построения оптикоэлектронной измерительной системы, основанной на обработке изображения проецируемой тестовой картины. Наличие активного элемента (лазерного излучателя) позволяет производить измерения в условиях посадки на неподготовленную площадку. Приведено описание калибровочного стенда и лабораторного образца измерительной системы. Представлены некоторые результаты калибровочных и тестовых измерений.

The article describes a comparative analysis of typical solutions for this problem, and a concept for constructing an optoelectronic measuring system based on image processing of a projected test pattern is proposed. The presence of an active element (laser emitter) allows measurements to be made in conditions of landing on an unprepared site. The description of the calibration stand and the laboratory sample of the measuring system is given. Some results of calibration and test measurements are presented.

4 2020.indd 115 24.12.2020 16:49:26

Введение

Одним из основных направлений развития современных беспилотных летательных аппаратов является улучшение массогабаритных характеристик таких устройств, понижение стоимости летательных аппаратов, а также обеспечение все более полной автоматизации выполнения беспилотный летательным аппаратом своего полетного задания.

Вне зависимости от того, каким является полетное задание, оно всегда включает в себя этап посадки – один из самых сложных и ответственных этапов всего полета. При необходимости выполнить посадку в полностью автоматическом режиме этот этап должен быть выполнен безаварийно, то есть летательный аппарат должен сохранить способность осуществить взлет после посадки в таком режиме. Изложенная в статье методика относится к беспилотным летательным аппаратам с вертикальной траекторией посадки – к вертолетам и конвертопланам.

Для осуществления автоматической безаварийной посадки автопилоту летательным аппаратам с вертикальной траекторией взлета и посадки необходимо постоянно контролировать следующие параметры: высоту, вертикальную скорость, параметры собственного движения в различных плоскостях, направление и скорость ветра, пространственное положение посадочной площадки и скорость его изменения (если таковые имеются, например, при посадке на палубу плывущего корабля).

Решаемая задача включает в себя определение степени пригодности для посадки необорудованной посадочной площадки путем определения ее геометрических характеристик (степени ее негоризонтальности на момент соприкосновения с летательным аппаратом), а также измерение положения летательного аппарата относительно посадочной площадки во время снижения. Вопросы измерения скорости и направления ветра, а также собственных движений летательного аппарата в настоящей статье не рассматриваются.

Пути решения поставленной задачи

Вариантом решения поставленной задачи может быть использование лазерной сканирующей системы (LIDAR) [1]. Подобные системы могут быть применены для решения широкого спектра задач, таких как трехмерное сканирование местности путем построения облака точек и создание предварительных или полноценных трехмерных моделей местности. Однако массогабаритные характеристики и потребляемая мощность большинства систем LIDAR делает крайне затруднительным использование подобных систем на борту большинства беспилотных летательных аппаратов. Поэтому разработка специализированной системы, решающей сформулированные задачи, представляется целесообразной. Вариантом подобной системы может служить стереоскопическая система, использующая две и более камеры [2, 3]. Использование стереосистемы подразумевает поиск соответственных точек в стереопарах [4], который требует значительных вычислительных затрат. Данная задача часто решается с помощью нейронных сетей [5, 6]. Также для компенсации возможной ошибки поиска обычно определяются как минимум в два раза больше точек, чем бывает необходимо. Все это затрудняет, а порой и исключает возможность работы такой системы в режиме реального времени. Добавив к вышеупомянутым особенностям необходимость использо-

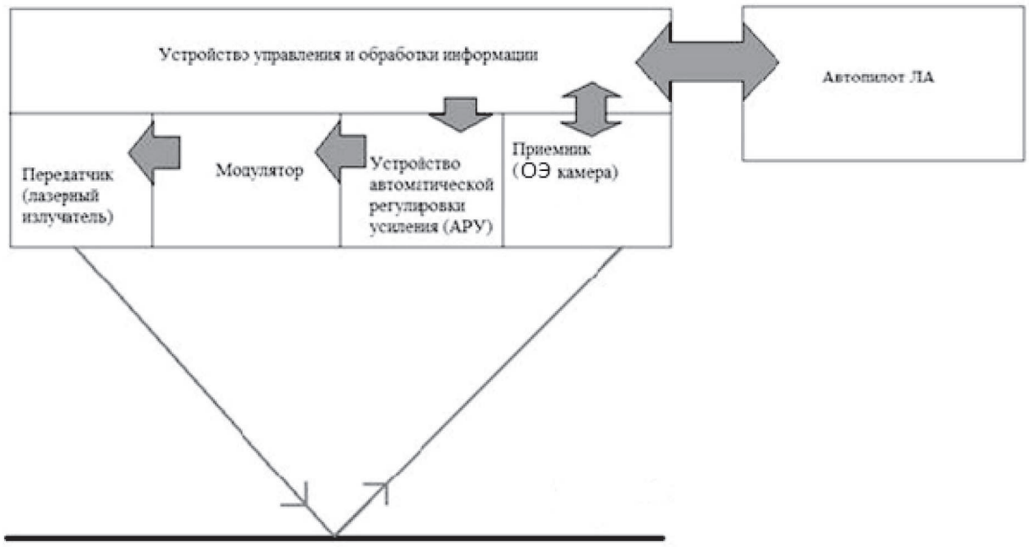


Рис. 1. Структура оптикоэлектронной системы позиционирования

4 2020.indd 116 24.12.2020 16:49:26

вания подсветки в случаях плохой освещенности, можно заключить, что использование активной сканирующей системы (см., например, [7]) является более целесообразным. В данной системе лазерный сканер формирует вертикальную лазерную линию в пространстве и поворачивается вокруг своей оси за счет шагового двигателя, обеспечивая при этом сканирование пространства перед камерами. Рассмотренную систему можно сделать еще более удобной для использования на борту ЛА, если отказаться от подвижного лазерного сканера, а вместо него использовать лазерный модуль со специальной насадкой, формирующей тестовую картину, например массив пятен, «крест» или «решетку». Такой подход к формированию тестовой картины не обеспечивает сканирования всего пространства перед телевизионной камерой, но этот недостаток при острой необходимости можно компенсировать, используя движение ЛА для сканирования площади с последующей оценкой исследуемой поверхности.

Пример оптикоэлектронной системы позиционирования

Вариант выполнения оптикоэлектронной системы позиционирования, ориентированной на решение поставленных выше задач, представлен на рис 1.

Бортовая оптикоэлектронная система позиционирования начинает свою работу при снижении выполняющего посадку летательного аппарата до высоты 10 метров. На начальном этапе по данным, полученным устройством управления и обработки от приемника, производится оценка общей освещенности посадочной площадки и выполняется расчет требуемой мощности излучателя передатчика. Данный расчет можно произвести заранее для нескольких вариантов условий и всего рабочего диапазона высот. В таблице 1 приведены результаты расчета мощности лазерного излучателя с длинной волны 532 нм при максимальной внешней засветке посадочной площадки и в «комнатных условиях». Лазерный излучатель проецирует пятно на поверхность посадочной площадки под углом 90°. Рассчитанная мощность обеспечивает коэффициент контраста отраженного изображения на уровне 0,5 для использованной в экспериментах телевизионной камеры MINTRON 54g30 с максимально открытой диафрагмой.

Расчетные значения мощности излучения для различной дистанции приведены в табл. 1.

Для компенсации влияния внешней засветки посадочной площадки в общую структуру оптикоэлектронной системы позиционирования было введено устройство автоматической регулировки усиления, которое устанавливает режим работы передатчика в соответствии с расчетными значениями и данными о расстоянии до посадочной площадки.

Расчет мощности для случая максимальной освещенности выполнен, исходя из величины пороговой чувствительности телевизионной камеры. Из расчетов следует, что обеспечение приемлемого для пороговой обработки коэффициента контраста возможно при мощности лазерного излучателя порядка 1–2 Вт при проецировании «пятна». Для проецирования более сложной тестовой картины (например «сетки») понадобится еще более мощный излучатель. Следовательно, обеспечивать яркость источника в два раза большую уровня фона не представляется целесообразным. Необходимо использовать более эффективные методы распознавания тестовой картины. Например, использовать узкополосный фильтр, как это представлено в [7], или включить в общую схему элемент временной модуляции сигнала передатчика на частоте, как минимум в два раза меньшей частоты кадров. Такой метод позволит значительно упростить требуемую обработку. Постоянно модулировать сигнал не обязательно: при достаточном для распознавания контрасте система сможет функционировать без модуляции.

Блока передатчика излучения

Блок передатчика оптического испытательного сигнала состоит из трех основных конструктивных элементов (рис. 2) – лазерного излучателя (лазерного диода), модулятора с системой регулировки оптической мощности и проекционной насадки. Учитывая строгие требования к массогабаритным параметрам и энергопотреблению разрабатываемой системы, для экспериментов в качестве основного элемента насадки была выбрана составная цилиндрическая линза и двумерная дифракционная решетка, представляющая из себя совокупность совместно выполненных одномерных решеток, угол между штрихами которых составляет 90 градусов.

Тестовая картина в виде перекрещенных прямых линий (рис. 3) была построена на основе использования составной цилиндрической линзы. Используя дифракционную решетку, удалось другую тестовую картину –

Таблица 1

Высота, м	10	9	7	5
$Ф_e$, Вт; при E_v=100000 Лк	2,85	2,49	2,15	1,83
$Ф_e$, Вт; при E_v=100 Лк	0,14	0,11	0,08	0,06

4 2020.indd 117 24.12.2020 16:49:27

двумерный массив максимумов яркости (рис. 4), периоды которых рассчитываются следующим образом:

$$\begin{cases} d_1(\cos\alpha - \cos\alpha_0) = m_1\lambda \\ d_2(\cos\beta - \cos\beta_0) = m_2\lambda \end{cases} \quad (1)$$

$$x = \sqrt{\left(\frac{h}{\sqrt{1-\sin^2\varphi}}\right)^2 - h^2} \quad (2)$$

В лабораторном образце оптикоэлектронной системы позиционирования, результаты работы которого подтвердили теоретические расчеты, используется наиболее простая тестовая картина – перекрещивающиеся прямые линии.

После установки лазерного излучателя, необходимо откалибровать этот элемент всей измерительной системы, т.е. точно определить его реальное пространственное положение в системе координат оптикоэлектронной системы позиционирования.

Блок приемника излучения

Основным элементом блока приемника излучения в рассматриваемой измерительной системы выступает оптикоэлектронной камеры, в качестве которой использована телевизионная камера MINTRON 54g30. Так как все проводимые измерения основываются на данных, полученных от телевизионной камеры, систему координат всей измерительной системы следует аналитически связать с системой координат телевизионной камеры или совместить их. Чтобы задать систему координат телевизионной камеры, необходимо произвести калибровку параметров внутренней ориентации телевизионной камеры, которые, согласно проективной модели, можно представить в виде следующей матрицы [8]:

$$\begin{bmatrix} -f_x & 0 & u_0 \\ 0 & -f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Произведем калибровку путем сопоставления положения системы координат фотоприемной матрицы телевизионной камеры с глобальной системой координат. Для задания глобальной системы координат в процессе разработки был использован трехмерный калибровочный стенд.

На рис. 3 представлено изображение стенда, маски граничных линий и тестовых объектов, а также положение тестовых точек. После поиска координат тестовых точек в системе координат фотоприемной матрицы телевизионной камеры, необходимо вычислить коэффициенты проективного преобразования, производимого телевизионной камерой.

Согласно методу Фоджераса [9], проективное преобразование координат точки $M_i(X_i, Y_i, Z_i)$ глобальной системы координат в координаты точки $m_i(u_i, v_i)$ системы координат фотоприемной матрицы телевизионной камеры можно представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \lambda_i \cdot u_i \\ \lambda_i \cdot v_i \\ \lambda_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

где λ_i – масштабный коэффициент, p_{ij} – элементы матрицы проективного преобразования.

Для того чтобы вычислить коэффициенты матрицы проекции, необходимо иметь информацию как минимум

Рис 2. Элементы блока передатчика

4 2020.indd 118 24.12.2020 16:49:28

о шести тестовых точках, образующих контрольный объем (точки не должны лежать на одной плоскости). Это позволит получить достаточное количество уравнений, образующих систему однородных уравнений со следующими коэффициентами:

$$L=\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i\cdot X_i & -u_i\cdot Y_i & -u_i\cdot Z_i & -u_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_i\cdot X_i & -v_i\cdot Y_i & -v_i\cdot Z_i & -v_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n\cdot X_n & -u_n\cdot Y_n & -u_n\cdot Z_n & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -v_n\cdot X_n & -v_n\cdot Y_n & -v_n\cdot Z_n & -v_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Полученную систему решаем методом SVD разложения матрицы L [10]:

$$L=U\cdot D\cdot V^T \quad (6)$$

После расчета матрицы проекции P из нее могут быть получены все требуемые параметры внутреннего и внешнего ориентирования.

$$\begin{bmatrix} -f_x & 0 & u_0 \\ 0 & -f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{31} & t_z \end{bmatrix}=$$

$$=\frac{1}{|\lambda|}\cdot\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{14} \\ p_{31} & p_{32} & p_{31} & p_{14} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Описанная методика калибровки была испытана на ТВК Mintron 54g30. Данная камера оснащена объектив с переменным фокусным расстоянием и диафрагмой. Был произведен ряд калибровочных измерений с различным угловым полем, регулируемым шаговым двигателем объектива. Результаты измерений представлены на рис. 4.

В ходе калибровки были определены параметры как внутреннего, так и внешнего ориентирования телевизионной камеры: вектор смещения систем координат $T(t_x t_y t_z)$ и матрица наклона осей

$$R\cdot\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix},$$

из которых нетрудно получить нормальные уравнения плоскостей калибровочного стола в системе координат фотоприемной матрицы телевизионной камеры:

$$\begin{cases} r_{11}\cdot x+r_{21}\cdot y+r_{31}\cdot z-(r_{11}\cdot t_x+r_{21}\cdot t_y+r_{31}\cdot t_z)=0 \\ r_{12}\cdot x+r_{22}\cdot y+r_{32}\cdot z-(r_{12}\cdot t_x+r_{22}\cdot t_y+r_{32}\cdot t_z)=0 \\ r_{13}\cdot x+r_{23}\cdot y+r_{33}\cdot z-(r_{13}\cdot t_x+r_{23}\cdot t_y+r_{33}\cdot t_z)=0 \end{cases} \quad (8)$$

Уравнения плоскостей в глобальной системе координат далее используются для определения пространственного положения лазерного излучателя в системе координат фотоприемной матрицы телевизионной камеры. Определение положения о тестовых линий в системе координат фотоприемной матрицы телевизионной камеры осуществляется путем проециро-

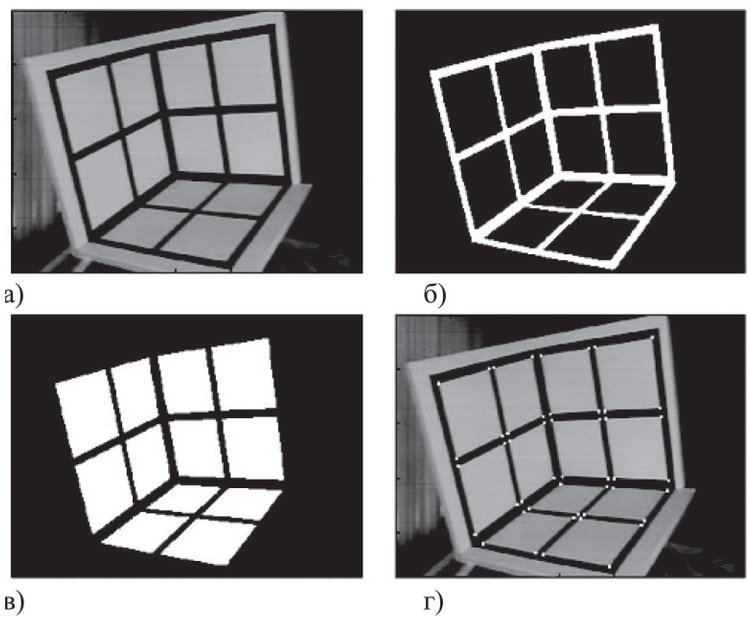


Рис 3. Калибровочный лабораторный стенд (а) исходное изображение калибровочного стенда, б) маска граничных линий тестовой картины, в) маска тестовых объектов, г) исходное изображение с маской тестовых точек

4 2020.indd 119 24.12.2020 16:49:29

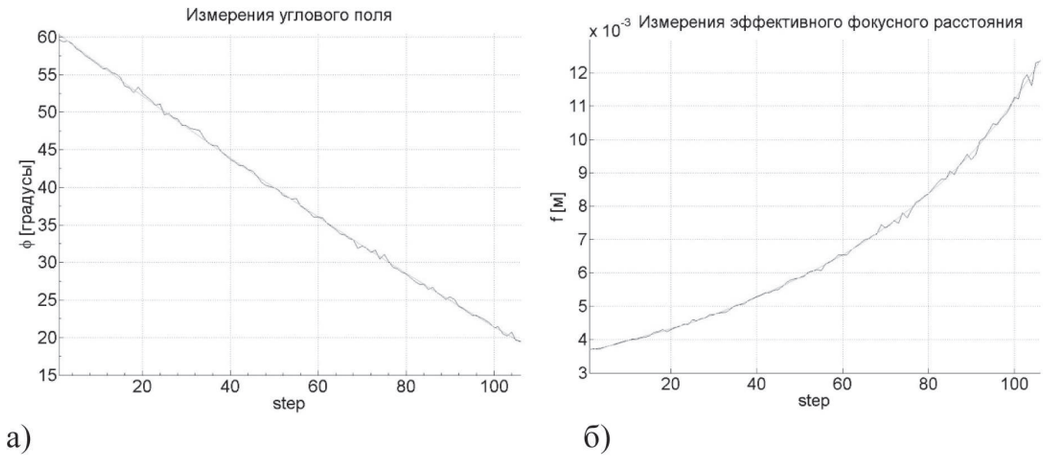


Рис 4. Зависимости углового поля (а) и эффективного фокусного расстояния (б) от относительного изменения шага двигателя

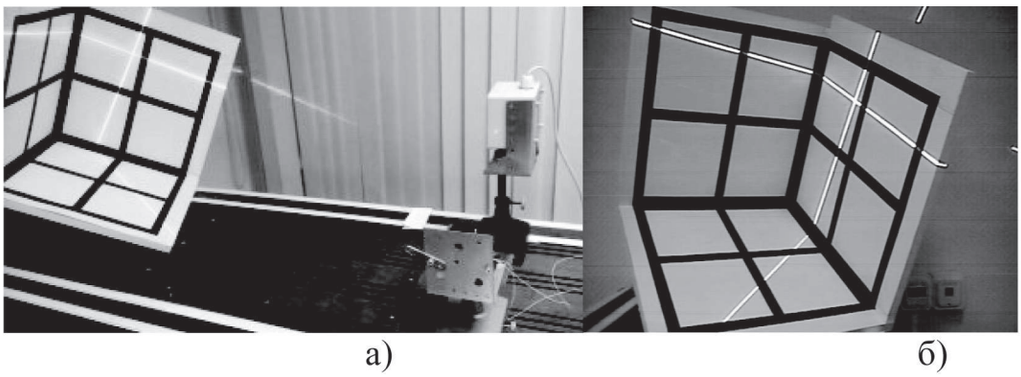


Рис. 5. а) калибровочный стенд, б) картина, наблюдаемая телевизионной камерой

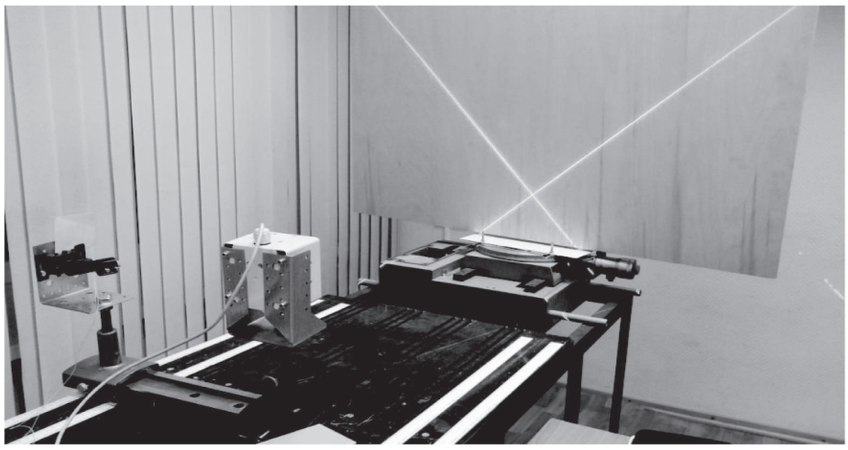
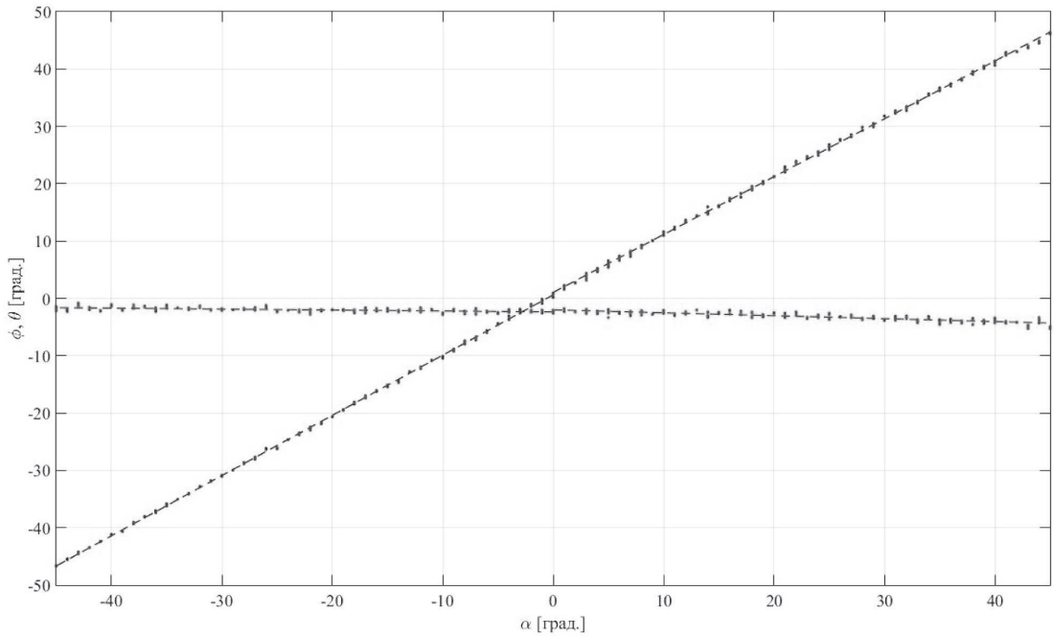


Рис. 6. Лабораторный образец измерительной системы и тестовый калибровочный стенд

4 2020.indd 120 24.12.2020 16:49:29



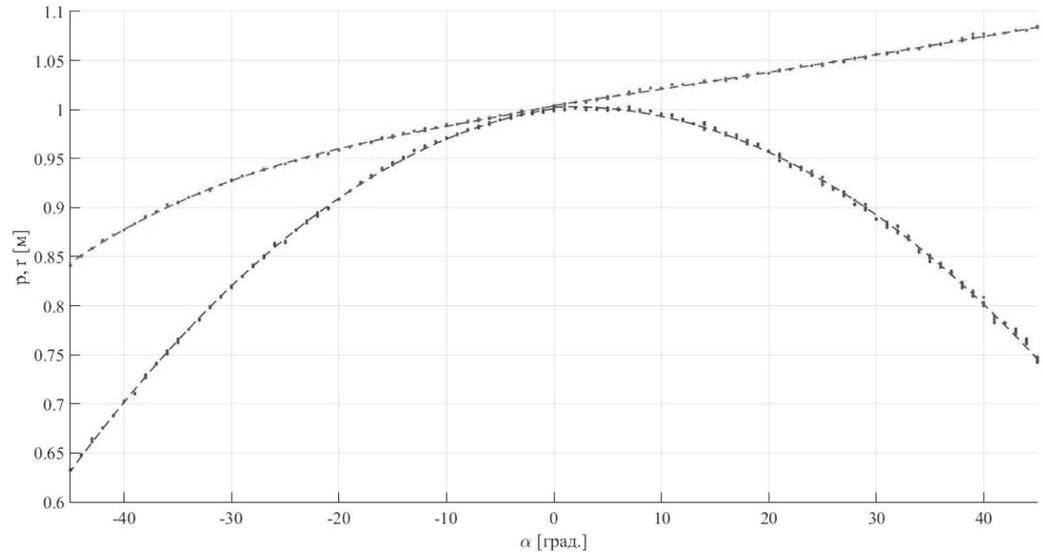


Рис. 7. Результаты измерений углов поворота плоскости, полярного расстояния и расстояния до точки перекрестья

4 2020.indd 121 24.12.2020 16:49:30

вания тестовой картины «перекрестья» на калибровочный стенд. По найденным параметрам положения тестовых линий составляются уравнения «плоскостей излучения».

Лабораторный образец измерительной системы

Для проверки эффективности работы предложенной концепции был собран лабораторный образец и произведена серия измерений на тестовом калибровочном стенде (рис. 6).

Для проведения измерений в состав калибровочного стенда включен поворотный механизм, позволяющий менять угол наклона вокруг вертикальной оси. В процессе калибровки и измерений производится поворот тестовой плоскости в диапазоне углов от −45 до 45 градусов. Результат произведенных измерений представлен в виде двух графиков на рис. 7: на рис. 7а отображены результаты измерения углов наклона плоскости, угловое положение которой требовалось определить (углы поворота вокруг вертикальной φ и горизонтальной θ осей в зависимости от угла наклона поворотного механизма α), а на рис. 7б изображены зависимости полярного расстояния от центра проекции до плоскости p и длины вектора r – расстояния от центра проекции до точки пересечения тестовых линий.

Полученные результаты измерений (рис. 7) демонстрируют, что изменения углов происходит линейно, а изменение полярного расстояния может быть описано полиномом второй степени, что соответствует методу проводимых измерений.

Заключение

В данной статье была предложена методика формирования пространственной информации для автопилота летательного аппарата, необходимой для осуществления безаварийной посадки на неподготовленную платформу. Описана реализация лабораторного образца оптико-электронной измерительной системы. Представлены результаты измерений калибровочных параметров приемного блока и измерения работы всей системы в целом на тестовом стенде. Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенной методики измерения.

В настоящее время реализована программная модель измерительной системы в пакете MATLAB и ведется разработка пути реализации разработанной модели на ПЛИС.

Литература

1. Sterenczak, K. The Accuracy Assessment of DTM Generated from LIDAR Data for Forest Area – a Case Study for Scots Pine Stands in Poland / K. Sterenczak, M. Zasada, M. Brach // Baltic Forestry. – 2013. – Vol. 19, No. 2 (37). – P. 252–262.

2. Араканцев, К. Г. Методы обработки измерительной информации и оценки погрешностей в стереоскопической системе контроля пространственного положения объектов / К.Г. Араканцев, Д.В. Жуков, И.А. Коняхин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2011. – Т. 54, № 12. – С. 10–16.

3. Араканцев, К. Г. Стереоскопическая система контроля фактического положения железнодорожного пути / К.Г. Араканцев, А.А. Горбачёв, М.Г. Серикова // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 5. – С. 34–39.

4. Гришин, В. А. Алгоритмы установления соответствия при обработке изображений для решения задач управления посадкой летательных аппаратов / В.А. Гришин, И.М. Книжный, К.Е. Хрекин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 25–32.

5. Ивашина, Е. А. Формирование ассоциации нейронных сетей для решения задачи стереореконструкции в бортовой системе технического зрения / Е.А. Ивашина, М.О. Корлякова, Е.Ю. Прокопов // Нейроинформатика – 2015: 17 Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, Москва, 19–23 января, 2015: Сборник научных трудов. Ч. 3. Нейросетевые системы обработки данных, распознавание образов и управления. Нейробиология. Теория нейронных сетей. Адаптивное поведение и эволюционное моделирование. – 2015. – С. 29–38.

6. Vitelli, M. DeepStereo Dense Depth Estimation from Stereo Image Pairs using Convolutional Neural Networks [Электронный ресурс] / Matt Vitelli, Saumitro Dasgupta. – March 16, 2015. Режим доступа: http://cs231n.stanford.edu/reports/saumitro-mvitelli-final-report.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

7. Метод определения пространственных координат в активной стереоскопической системе / В.В. Коротаев [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 6 (94). – С. 48–53.

8. Цифровая обработка изображений в информационных системах / Грузман И.С. [и др.]. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 352 с.

9. MetroVisionLab Toolbox for Camera Calibration and Simulation [Электронный ресурс] / D. Samper [et al.]. – Режим доступа: http://metrovisionlab.unizar.es [дата обращения 15.03.2016], свободный. – Загл. с экрана.

10. Golub, G. H. Singular Value Decomposition and Least Squares Solutions [Электронный ресурс] / G.H. Golub, C. Reinsch // Handbook Series Linear Algebra. Numerische Mathematik. – 1970. – P. 403–420. – Режим доступа: http://people.duke.edu/~hpgavin/SystemID/References/Golub+Reinsch-NM-1970.pdf, свободный. Загл. с экрана.

11. Федулин, А. М. Алгоритм навигации беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны / А.М. Федулин, Р.Н. Садеков // Известия института инженерной физики. – 2020. – № 3 (57). – С. 79–84.

4 2020.indd 122 24.12.2020 16:49:32