

УДК: 004.932.2

Автоматическое обнаружение препятствий на взлётно-посадочной полосе средствами технического зрения

Князь В. В.*, Бусурин В. И. **

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: vl.kniaz@gosniias.ru*

***e-mail: vbusurin@mai.ru*

Аннотация

В настоящее время широко востребованы системы бортовой авионики, осуществляющие контроль состояния взлётно-посадочной полосы (ВПП) для обеспечения безопасности движения самолёта на этапах взлёта, посадки и руления. В ряде аэропортов вводятся в эксплуатацию наземные системы обнаружения препятствий на взлётно-посадочной полосе, основанные на радиолокационных и оптико-электронных методах. Однако большой интерес представляет разработка оптико-электронной системы автоматического обнаружения препятствий для размещения на борту самолёта. В статье предложен алгоритм обнаружения препятствий на взлётно-посадочной полосе, основанный на итеративной минимизации разности масштабных фотопланов взлётно-посадочной полосы. Алгоритм производит обнаружение препятствий на основе анализа видеопоследовательности, поступающей с бортовой камеры.

Ключевые слова: летательные аппараты, системы обнаружения препятствий, безопасность воздушного движения, обработка цифровых изображений, фотограмметрия

Введение

Качество покрытия взлётно-посадочной полосы, а также отсутствие на её поверхности препятствий имеет ключевое значение для обеспечения безопасности движения самолёта на этапах взлёта, посадки и руления. Любое препятствие на взлётно-посадочной полосе представляет собой потенциальную угрозу для безопасности воздушного движения. Ежегодный ущерб мировых авиакомпаний от столкновений воздушных судов с препятствиями на взлётно-посадочной полосе оценивается в 13 миллиардов долларов [1].

В качестве примера препятствий можно привести:

- утерянные контейнеры;
- части обшивки летательных аппаратов;
- камни, фрагменты покрытия взлётно-посадочной полосы;

Автоматические системы обнаружения препятствий широко востребованы в аэропортах. Подобные системы включают в себя оптико-электронные или радиолокационные датчики, которые производят проверку поверхности взлётно-посадочной полосы на наличие каких-либо изменений или посторонних объектов. Наземные системы обладают высокой разрешающей способностью и могут обнаруживать препятствия, размер которых превышает 10 см [2]. В настоящее время

наземными системами обнаружения препятствий оборудовано лишь небольшое число наиболее крупных аэропортов, поэтому актуальна разработка мобильной системы обнаружения препятствий для установки на борту самолёта.

В статье рассматривается задача обнаружения, оценки положения и габаритов препятствий на взлётно-посадочной полосе с помощью бортовой видеокамеры. После обнаружения препятствия ставится задача отнесения его к одному из типов объектов, заданных в базе данных 3D-моделей ожидаемых препятствий.

Предлагается алгоритм обнаружения, оценки положения и габаритов препятствий, основанный на итеративной минимизации разности масштабных фотопланов взлётно-посадочной полосы. Данный алгоритм может быть реализован с использованием видеокамер, входящих в состав систем улучшенного видения (СУВ). Видеокамеры СУВ обеспечивают заданный угол обзора передней полусферы в положительном направлении строительной оси самолёта и применяются для обеспечения безопасности воздушного движения при заходе на посадку в условиях плохой видимости.

Разработка алгоритма обнаружения препятствий

Выбранный подход к решению задачи основывается на методах стереофотограмметрии [3] и анализа цифровых изображений. Принимается допущение о том, что на взлётно-посадочной полосе присутствует разметка боковых границ, порога полосы, зоны приземления, известны геометрические параметры разметки, и она различима на снимках, полученных камерой.

Задача поиска препятствий на исходных кадрах представляет сложность из-за перспективных искажений, вызванных взаимной ориентацией камеры и ВПП. Кроме того, разметка и следы колёс на поверхности ВПП могут быть ошибочно интерпретированы, как препятствия. Для устранения искажений производится построение ортофото – масштабного фотоплана ВПП, являющегося ортогональной проекцией трёхмерных точек сцены (ВПП и препятствий на её поверхности) на плоскость ВПП. На этапе обнаружения предполагается, что все трёхмерные точки сцены лежат в плоскости ВПП. Тогда при наличии препятствий на поверхности ВПП ортофото, построенные по снимкам, полученным для различных положений камеры, будут отличаться. При оценке положения и габаритов препятствий формируется трёхмерная модель сцены, для которой разность ортофото, построенных для различных положений камеры, будет минимальна.

Для ортогонального проектирования точек сцены на плоскость ВПП, требуется произвести оценку пространственного и углового положения камеры в системе координат ВПП. Оценка производится по набору опорных точек на ВПП, связанных с элементами её разметки – краями разметки порога ВПП и краями разметки зоны приземления. Структура алгоритма обнаружения препятствий и оценки их параметров на основе итеративной минимизации разности ортофото, представлена на рисунке 1.

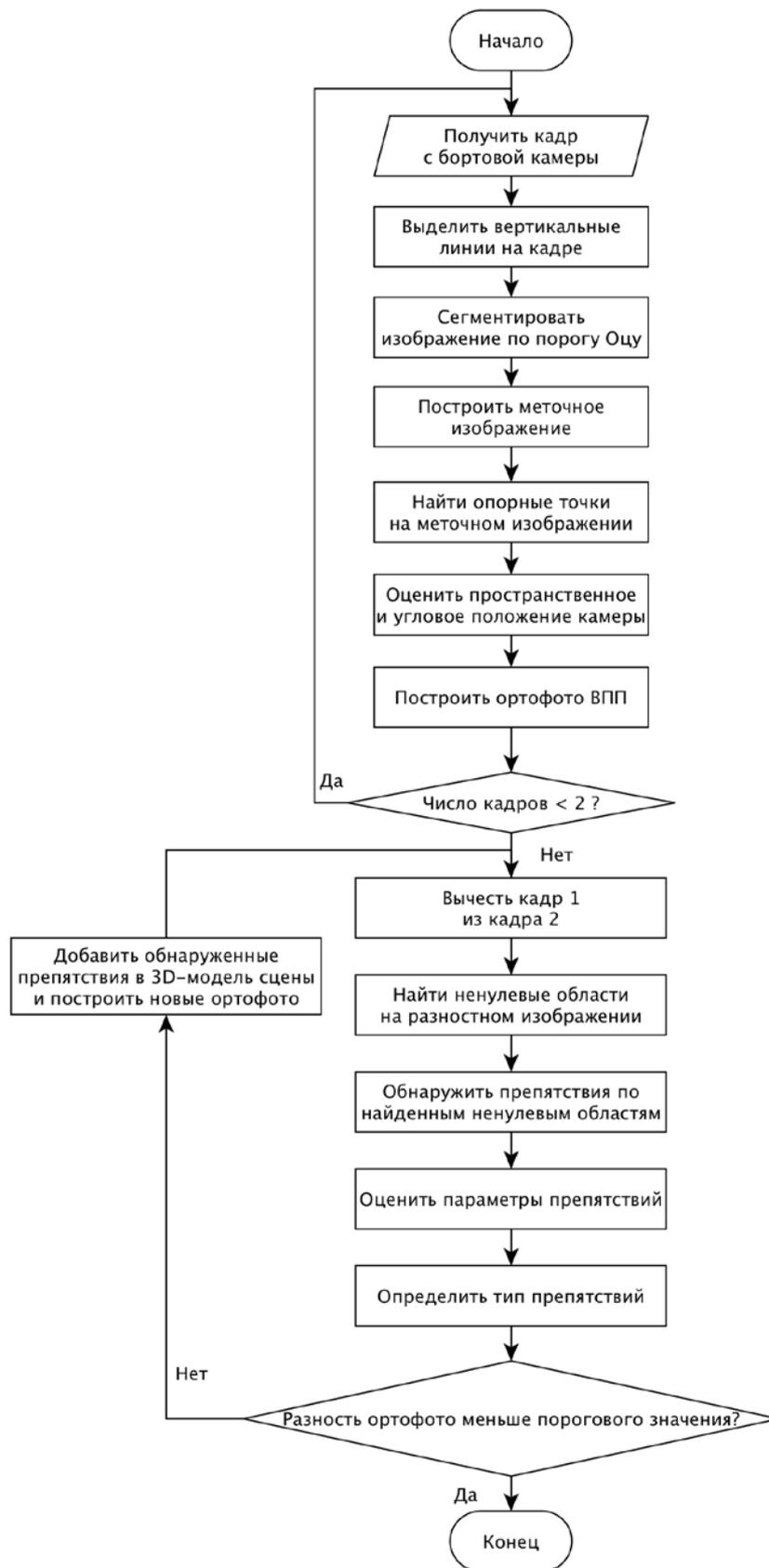


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма обнаружения препятствий и оценки их параметров на основе итеративной минимизации разности ортофото

Для выделения разметки ВПП на исходном кадре производится свёртка с ядром оператора выделения вертикальных границ. Полученное изображение разбивается на области поиска с помощью сегментации по порогу Оцу [4], после чего строится меточное изображение [5]. Автоматический поиск разметки границ ВПП среди областей, полученных после сегментации, производится в соответствии со следующими предположениями:

- границы области параллельны её оси симметрии (область представляет собой вытянутый прямоугольник);
- у прямой, соответствующей левой границе ВПП, положительный угловой коэффициент, а у прямой – соответствующей правой границе ВПП – отрицательный.

Для проверки найденных областей на соответствие данным предположениям производится их линейная аппроксимация [6]. После линейной аппроксимации проверяется условие параллельности границ каждой области аппроксимированной оси симметрии. Для этого вычисляется значение расстояний от оси симметрии до границ области (профили границ). Области с низкими значениями среднеквадратического отклонения расстояний до границ принимаются за искомые границы ВПП.

Поиск разметки порога и зоны приземления ВПП производится в области между границами ВПП, обнаруженными на предыдущем шаге по профилям сегментированного изображения, параллельным линии, соединяющей точки начала левой и правой границ ВПП. Если на одном из профилей обнаруживается заданное

число областей с разными индексами, равное числу полос порога ВПП, данные области являются разметкой порога ВПП (рис. 2).

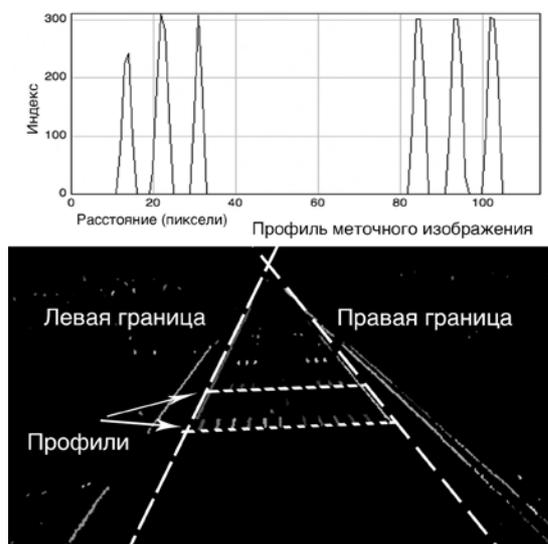


Рисунок 2. Процесс обнаружения разметки порога и зоны приземления ВПП

Построение ортофото взлётно-посадочной полосы

Для построения ортофото требуется произвести оценку пространственного и углового положения камеры в системе координат ВПП. При решении задачи сначала по разметке боковых границ ВПП находится угловое положение камеры с использованием метода гауссовой сферы [7]. Затем положение центра проекции определяется на основе знания положения опорных точек, найденных на изображении.

Для решения задачи определим следующие системы координат. Начало системы координат ВПП $O_B X_B Y_B Z_B$ расположено в начале правой разметки границы ВПП, ось X_B совпадает с правой границей разметки, ось Y_B параллельна разметке порога полосы, а ось Z_B - перпендикулярна осям X_B и Y_B ;

Начало системы координат изображения $O_{и}X_{и}Y_{и}Z_{и}$ расположено в нижнем левом пикселе изображения, ось $X_{и}$ направлена вправо, ось $Y_{и}$ направлена вверх.

Система координат камеры $O_{к}X_{к}Y_{к}Z_{к}$ имеет начало в центре проекции, ось $X_{к}$ параллельна оси $X_{и}$ системы координат изображения, ось $Y_{к}$ параллельна оси $Y_{и}$ системы координат изображения, а ось $Z_{к}$ – перпендикулярна осям $X_{к}$ и $Y_{к}$. Рисунок 3 показывает связь выбранных систем координат.

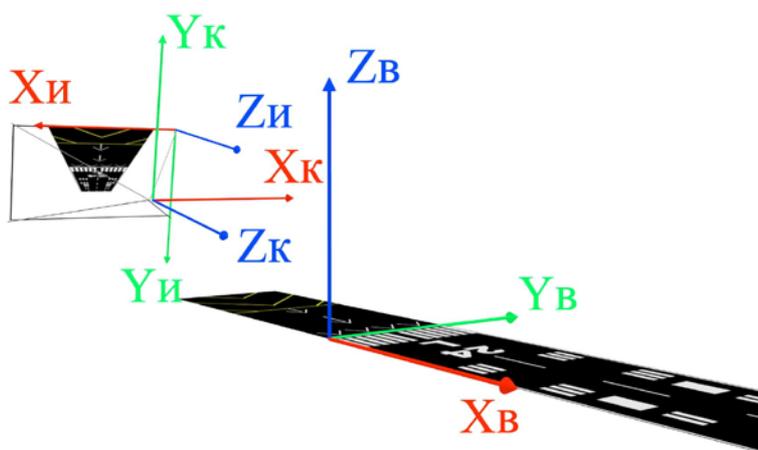


Рисунок 3. Системы координат

Матрица поворота определяет переход от системы координат камеры к системе координат ВПП и находится с использованием оценки положения точки схода перспективы на исходном изображении. Поскольку изображение формируется по законам центральной проекции, любая группа параллельных линий на формируемом кадре сходится в одной точке, называемой точкой схода. Оценивая положение точки пересечения параллельных прямых, лежащих в какой-либо плоскости, можно найти угловое положение камеры относительно данной плоскости. Точка схода продолжений границ разметки ВПП задаёт направление оси $X_{в}$ системы координат ВПП в системе координат камеры. Для нахождения направления оси $Y_{в}$ системы координат ВПП используется разметка порога ВПП и

зоны приземления. Направление оси Z_B , определяется векторным произведением векторов, задающих направления осей X_B и Y_B .

Опорные точки на ВПП обозначены следующим образом (рис. 4):

- g_{LB}, g_{RB} – точки начала левой и правой границы ВПП;
- h_{LB}, h_{RB} – точки окончания левой и правой границы ВПП;
- p_{LB}, p_{RB} – точки начала левой и правой полосы порога ВПП;
- k_{LB}, k_{RB} – точки начала левой и правой полосы зоны приземления ВПП.

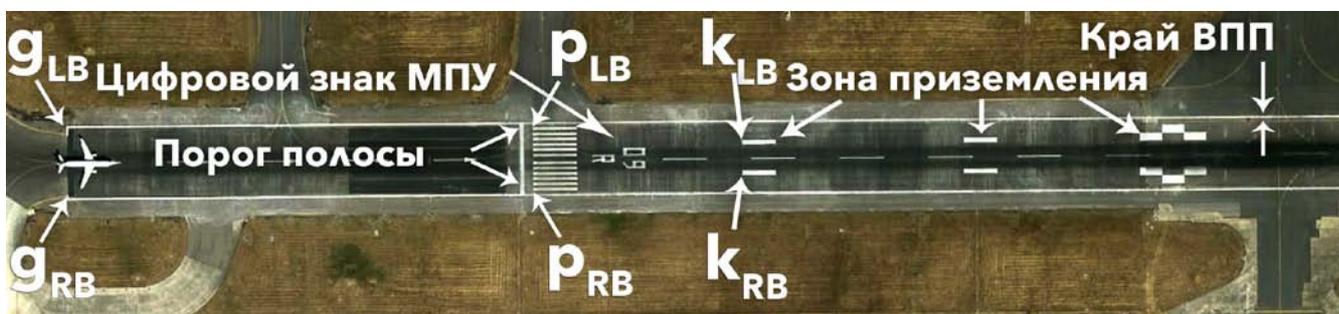


Рисунок 4. Разметка взлётно-посадочной полосы и положение опорных точек

Переход от системы координат изображения к системе координат камеры определяется уравнением:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda(x_{0и} - x_{и}) \\ \lambda(y_{0и} - y_{и}) \\ -f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где λ – масштаб изображения, $x_{0и}, y_{0и}$ – координаты главной точки в системе координат изображения, f – фокусное расстояние камеры.

Нормали к плоскостям, содержащим левую и правую линии разметки ВПП в системе координат камеры, задаются соотношениями:

$$\mathbf{n}_{Lk} = \mathbf{q}_{Lk} \times \mathbf{h}_{Lk}; \mathbf{n}_{Rk} = \mathbf{q}_{Rk} \times \mathbf{h}_{Rk}. \quad (2)$$

Вектор x_{BK} , определяющий направление оси X_B системы координат ВПП, определяется как:

$$x_{BK} = \frac{n_{RK} \times n_{LK}}{|n_{RK} \times n_{LK}|}. \quad (3)$$

Вектор y_{BK} , задающий направление оси Y_B системы координат ВПП в системе координат камеры, находится аналогичным образом с использованием точек $p_{LK}, p_{RK}, k_{LK}, k_{RK}$, расположенных на линиях разметки порога ВПП и зоны приземления.

Вектор z_{BK} , задающий направление оси Z_B системы координат ВПП в системе координат камеры, находится как векторное произведение x_{BK} и y_{BK} .

Матрица поворота R , задающая переход от системы координат ВПП к системе координат камеры, определяется как:

$$R = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где a_1, a_2, a_3 – косинусы углов, составленных осью X_K с осями X_B, Y_B, Z_B ; b_1, b_2, b_3 – косинусы углов, составленных осью Y_K с осями X_B, Y_B, Z_B ; c_1, c_2, c_3 – косинусы углов, составленных осью Z_K с осями X_B, Y_B, Z_B . Элементы матрицы поворота – направляющие косинусы перехода от системы координат ВПП к системе координат камеры [8].

Пространственное положение камеры определяет вектор O_{BK} , задающий положение начала координат системы ВПП в системе координат камеры. Вектор g_{RK} проходит через начало системы координат ВПП. Поворот данного вектора матрицей R дает вектор, направленный в центр системы координат камеры. Чтобы найти модуль этого вектора, используется пара опорных точек на ВПП – g_{L6} и g_{R6} , –

расстояние между которыми в системе координат ВПП известно. Используя данные точки и матрицу поворота, находим:

$$\mathbf{O}_{BK} = \mathbf{R} \cdot \square_{RK} \frac{|\mathbf{R}^{-1} \cdot (\square_{LB} - \square_{RB})|}{|(\square_{LK} - \square_{RK})|}. \quad (5)$$

Для формирования ортофото на ВПП задается сетка точек, каждая из которых соответствует пикселю результирующего ортофото. Значение интенсивности в каждой точке ортофото $\mathbf{p}_{\phi\psi}$ задаёт точка изображения $\mathbf{p}_{ив}$, лежащая на пересечении прямой, соединяющей точку $\mathbf{p}_{\phi\psi}$ и центр проекции $\mathbf{O}_{KB} = -\mathbf{O}_{BK}$, с плоскостью изображения (рис. 5). Её координаты в системе координат ВПП задаются уравнением:

$$\mathbf{p}_{ив} = \mathbf{O}_{KB} + k(\mathbf{O}_{KB} - \mathbf{p}_{\phi\psi}), \quad (6)$$

где k – коэффициент пропорциональности, который находится из отношения фокусного расстояния камеры $f = |\mathbf{F}|$ к проекции вектора $(\mathbf{O}_{KB} - \mathbf{p}_{\phi\psi})$ на нормаль к плоскости изображения \mathbf{F} :

$$k = \frac{|\mathbf{F}|^2}{(\mathbf{O}_{KB} - \mathbf{p}_{\phi\psi}) \cdot \mathbf{F}}. \quad (7)$$

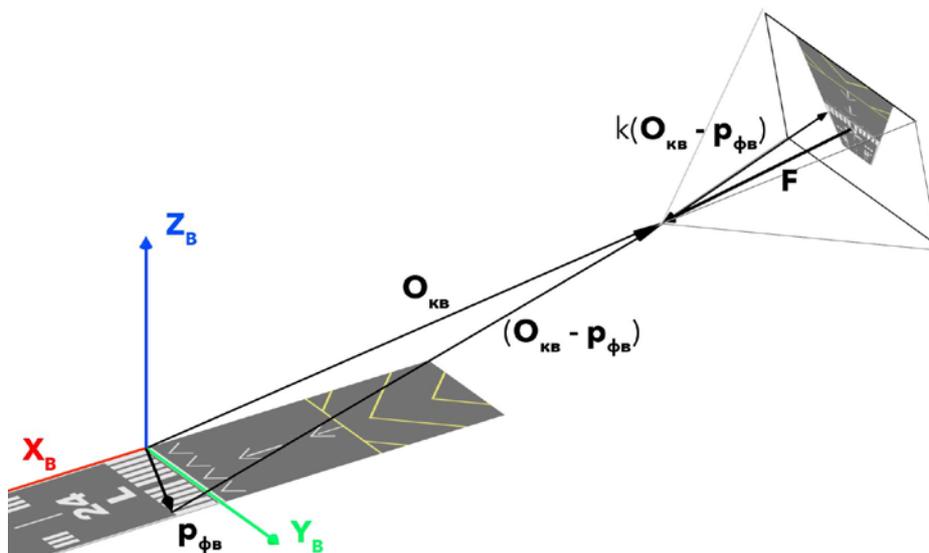


Рисунок 5. Построение ортофото

Переход от системы координат ВПП к системе координат изображения производится по формулам (1), (4), (5). Схема построения ортофото представлена на рис. 6, а.

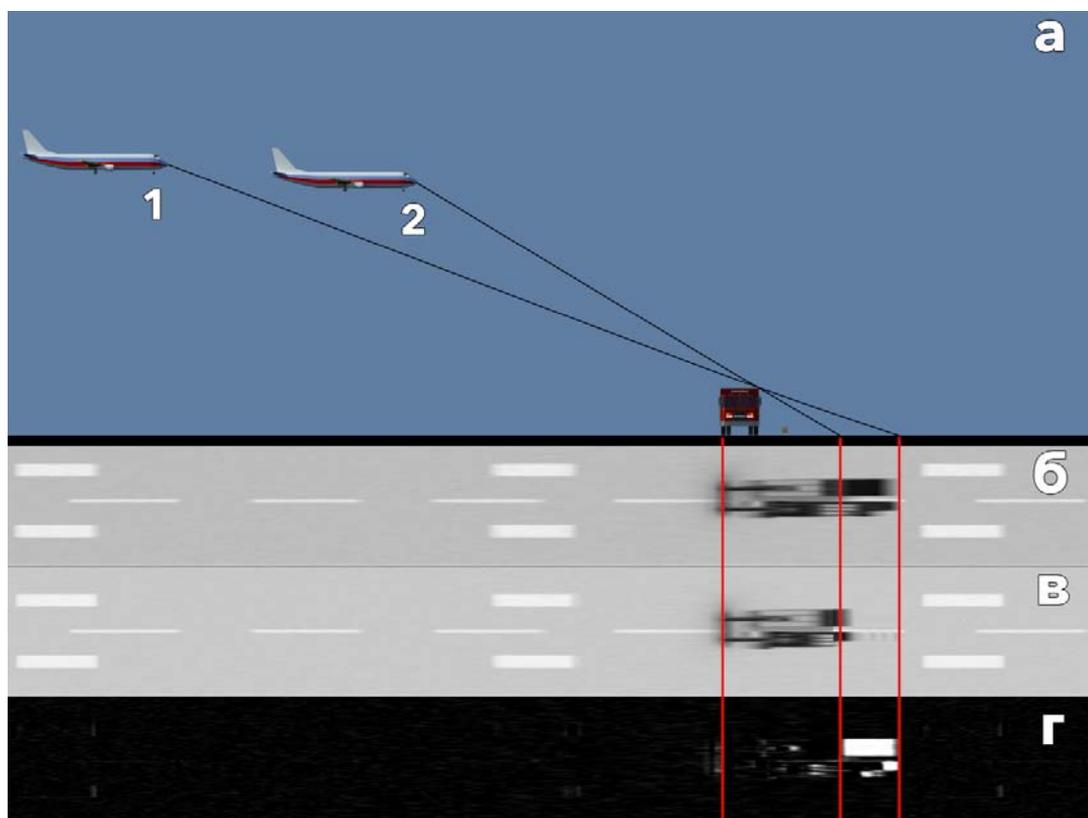


Рисунок 6. Схема построения разности ортофото: модельная
а – 3D-сцена, вид сбоку; б – пример ортофото, построенного для изображения,
полученного в точке 1; в – ортофото для точки 2; г – разность ортофото

Обнаружение и определение типа препятствия на ВПП

Для обнаружения препятствия на ВПП используется метод построения дифференциального ортофото [3]. Поскольку изображения, последовательно получаемые камерой при полёте самолета, имеют различное внешнее ориентирование, то объекты, не принадлежащие ВПП, могут быть выделены на продольной стереопаре изображений. Для обнаружения таких объектов

формируется пара ортофото ВПП (рис. 6, б,в), полученных для разных положений бортовой камеры. Разность ортофото (рис. 6, г), составляющих пару, используется для обнаружения препятствия. Любой пиксель на разностном изображении, с интенсивностью, отличной от нуля, является потенциальным посторонним объектом на ВПП.

Тип обнаруженного препятствия определяет объект с наиболее близкими габаритными размерами, найденный в базе данных 3D-моделей предполагаемых препятствий. Для определения положения препятствий на ВПП выполняется сегментация ортофото [4] (рис. 7, а) и аппроксимация ненулевых областей прямоугольниками (рис. 7, б).

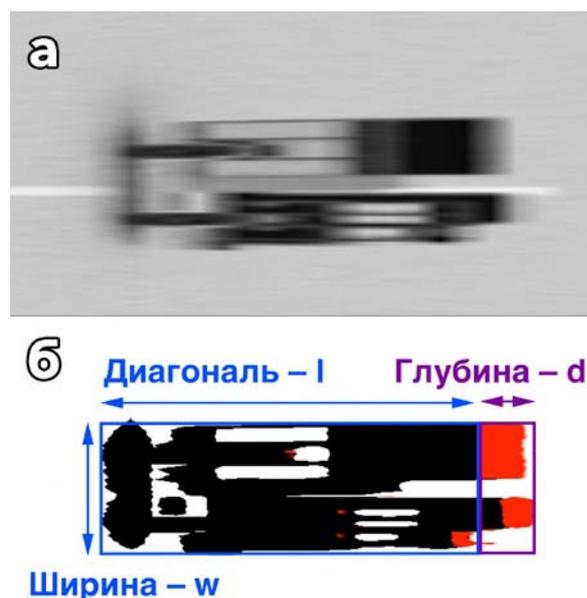


Рисунок 7. Оценка габаритов препятствия: а – фрагмент исходного ортофото с препятствием; б – ортофото после сегментации

Габариты препятствия задаются шириной, высотой и глубиной минимального описывающего параллелепипеда, в который может быть заключено препятствие. Высота прямоугольной области на разности ортофото определяет ширину

минимального описывающего параллелепипеда в трёхмерном пространстве. Ширина ненулевой области определяет глубину минимального описывающего параллелепипеда. Ширина препятствия определяется диагональю яркой области в плоскости «высота-глубина».

$$h = \sqrt{l^2 - d^2}, \quad (10)$$

где h – высота, l – диагональ (ширина минимального описывающего параллелепипеда), d – глубина (ширина яркой области).

После оценки габаритных размеров всех препятствий в исходную 3D-модель ВПП (плоскость) добавляются параллелепипеды, соответствующие найденным габаритам препятствий, после чего происходит построение новой пары ортофото. Если форма найденных препятствий хорошо описывается простым параллелепипедом, то суммарная разность пикселей новой пары ортофото будет близка к нулю. В противном случае, шаг оценки габаритов повторяется, для получения размеров и положения составных элементов найденных препятствий (кабина автомобиля, ковш снегоуборщика, и т.д.). В 3D-модель добавляются параллелепипеды, найденные для элементов препятствий и происходит построение новой пары ортофото. Процесс минимизации разности продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто пороговое значение суммарной разности пикселей ортофото.

Отработка алгоритма на масштабной модели ВПП и 3D-модели ВПП

Отработка алгоритма производилась на 3D-модели ВПП и масштабной модели ВПП и препятствий. 3D-модель ВПП была создана с помощью программы

трёхмерного моделирования. Модель включает в себя объекты аэродромной инфраструктуры, поверхность ВПП с нанесённой разметкой и модели возможных препятствий. Для моделирования захода на посадку была задана траектория движения камеры, соответствующая стандартной глиссаде.

С использованием данной траектории был получен ряд модельных видеопоследовательностей, имитирующих вид с бортовой камеры при заходе на посадку с различными препятствиями на ВПП (рис. 8).

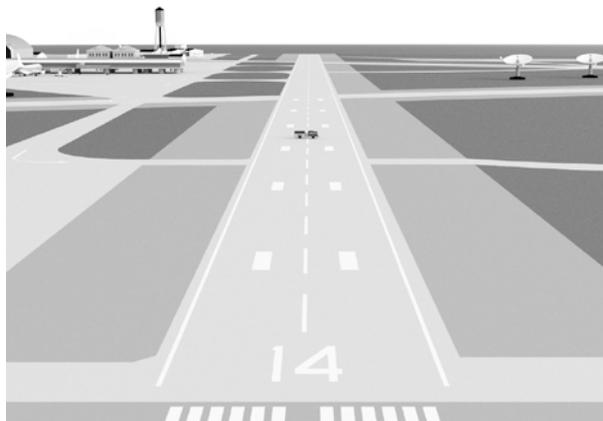


Рисунок 8. Пример кадра из синтезированной видеопоследовательности

При проверке работы алгоритма на полученных последовательностях ошибка оценки пространственного положения камеры в системе координат ВПП не превышала 5 м. Данная точность обеспечивает устойчивую работу алгоритма обнаружения и определения типа препятствия.

Для отработки алгоритма на изображениях, полученных с промышленной камеры, изготовлена модель разметки ВПП в масштабе 1:87 (рис. 9). Разрешение камеры составляло 1384x1032 пиксела.

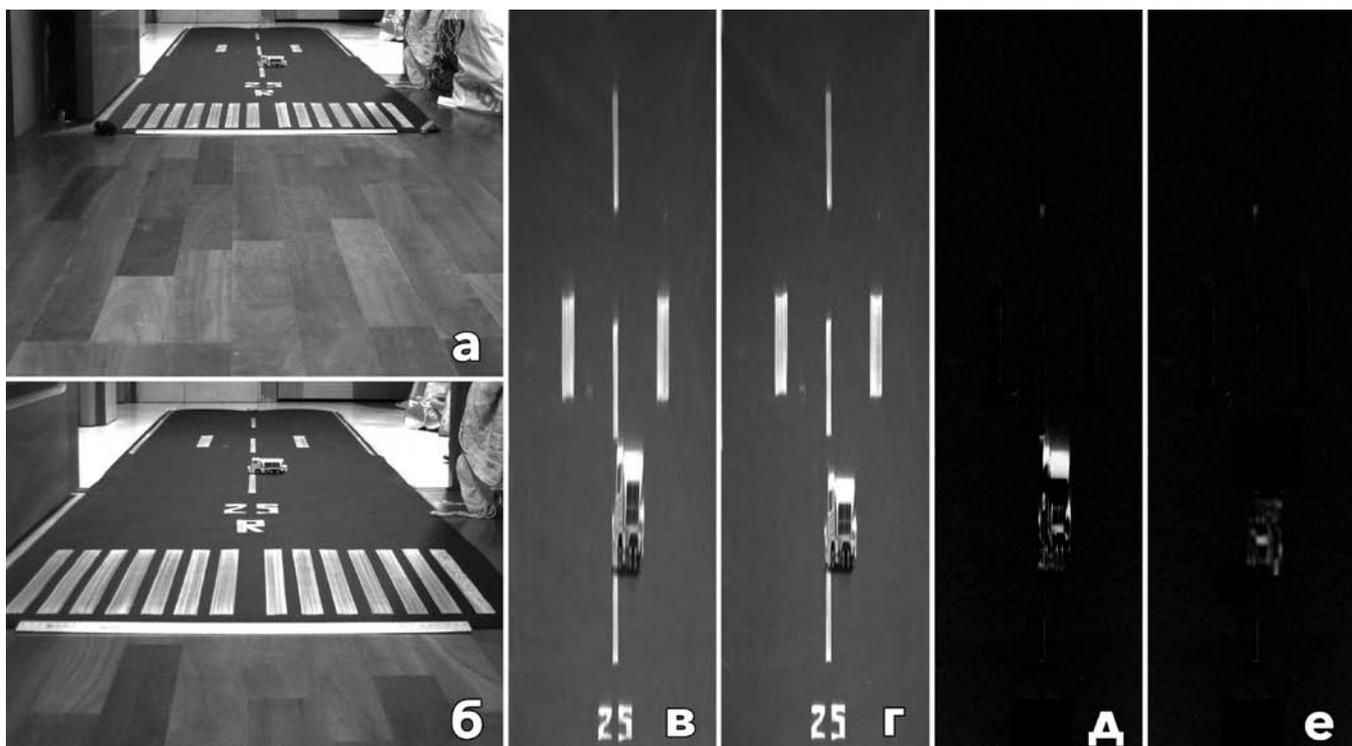


Рисунок 9. Обнаружения препятствий на масштабной модели ВПП: а – изображение, полученное в точке 1; б – изображение для точки 2; в – ортофото для точки 1; г – ортофото для точки 2; д – разность ортофото (в) и (г); е – минимизированная разность ортофото

Для тестирования алгоритма была произведена имитация движения камеры по глиссаде и получены наборы снимков (рис. 9 а, б) для различных моделей препятствий на ВПП. Обнаружение препятствия производилось по разности ортофото (рис. 9, д), а оценка его положения и габаритов – путём минимизации разности ортофото (рис. 9, е). Ошибка в оценке пространственного положения камеры в системе координат ВПП не превышала 8 метров, после пересчёта к масштабу 1:1.

Выводы

Сочетание СУВ и алгоритма обнаружения препятствий и оценки их параметров на основе итеративной минимизации разности ортофото, позволяет повысить безопасность движения самолёта на этапах взлёта, посадки и руления. Разработанный алгоритм реализован в виде прикладного программного обеспечения для тестирования на модельных данных.

Модельные данные для отладки алгоритма созданы с использованием программы 3D-моделирования и масштабной модели ВПП. При тестировании работы алгоритма на 3D-модели и масштабной модели ВПП ошибка в оценке параметров ориентирования камеры не превышала 8 метров в системе координат ВПП.

Для уменьшения ошибки предлагается использовать большее число опорных точек на ВПП, видимых во время захода на посадку. Для перехода от оценки габаритных размеров к параметрической 3D-модели объекта алгоритм определения типа препятствий предлагается усовершенствовать, добавив этап автоматического построения структурной модели, состоящей из простейших 3D-элементов.

Библиографический список

1. U.S. Federal Aviation Administration. Advisory circular on Airport Foreign Object Debris (FOD) Detection Equipment (30 Sep. 2009).
2. Weller J.R. FOD Detection System. Wildlife and Foreign Object Debris (FOD) Workshop, Cairo, Egypt, 2014.

3. Желтов С.Ю., Сибиряков А.В. Method of 3d-object detection based on orthophoto difference analysis. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B3. Amsterdam, 2000.
4. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Ососков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012 – 1104 с.
6. Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., and Flannery, B.P., Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, Third Edition. – NewYork: Cambridge University Press, 2007, – 1235 p.
7. Barnard, S. T., Interpreting perspective images. ArtificialIntelligence 21,1983, 435-462 pp.
8. Лобанов А. Н. Фотограмметрия: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 552 с.