

СУБПИКСЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИНФРАКРАСНЫХ ОРИЕНТИРОВ НА ФОТОМАТРИЦЕ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Адъюнкт **Проценко В.В.**

(Военный учебно-научный центр "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" Министерства обороны Российской Федерации)

SUBPIXEL IMAGE PROCESSING FOR CALCULATING THE COORDINATES OF INFRARED LANDMARKS ON A PHOTOMATRIX IN THE TASK OF AUTOMATIC LANDING OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

V.V. Protsenko, Postgraduate

(Military Air Force Training and Research Center "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin")

Беспилотный летательный аппарат, автоматическая посадка, инфракрасный ориентир, система технического зрения, субпиксельная обработка изображения.

Unmanned aerial vehicle, automatic landing system, infrared landmark, vision system, subpixel image processing.

Предложен алгоритм предобработки изображения инфракрасного контрастного ориентира, учитывающий локальные особенности и свойства контуров соответствующих изображений, позволяющий снизить влияние искусственных и естественных помех, а также исключить определение ложных контуров. Разработан способ субпиксельной обработки изображения инфракрасного ориентира для определения координат беспилотного летательного аппарата относительно посадочной площадки, позволяющий вычислять центр ориентира на фотоматрице с субпиксельной точностью.

An algorithm for the preprocessing of an infrared contrast landmark is proposed, taking into account the local features and properties of the contours of the corresponding images, which makes it possible to reduce the influence of artificial and natural interference, as well as the determination of false contours. A method has been developed for subpixel image processing of an infrared landmark to determine the coordinates of an unmanned aerial vehicle relative to the landing site, which allows calculating the center of the landmark on a photomatrix with subpixel accuracy.

Введение

Одним из наиболее ответственных этапов применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является посадка. Она характеризуется высоким уровнем сложности технической реализации и во многом определяет такие важные характеристики комплексов с БПЛА, как допустимые условия применения, автономность и оперативность повторного применения. Основным препятствием на пути гарантированного решения задачи автоматизации посадки является низкая точность и помехозащищенность систем измерения положения БПЛА.

Существующие системы посадки обладают рядом недостатков, связанных с высокими массогабаритными характеристиками, низкой автономностью и помехоустойчивостью к средствам радиоэлектронного подавления. Так применение спутниковых систем обеспечения посадки (горизонтальная и вертикальная погрешности измерений более 10 м) [1] целесообразно только для мирного времени и в условиях конфликта с низко-технологичным противником. Применение для автоматической посадки БПЛА известных в пилотируемой авиации радиотехнических систем посадки (горизонтальная погрешность более 3 м, вертикальная погрешность до 1,5 м) [2] не представляется возможным по причине высоких массогабаритных характеристик и низкой автономности. Лазерные системы посадки [3, 4]

обладают более высокой точностью (горизонтальная и вертикальная погрешность менее 1 м), но позволяют определять только линейные координаты БПЛА, причем для организации автоматического управления необходима командно-телеметрическая линия связи, что усложняет систему, увеличивает ее стоимость и снижает надежность. Одним из многообещающих средств измерения и навигации БПЛА являются системы технического зрения (СТЗ). Достоинством таких систем является возможность автономной (не привязанной к внешним системным компонентам и средствам) посадки, а также высокие точности измерения координат (горизонтальная и вертикальная погрешности менее 0,5 м). Недостатками систем на основе СТЗ видимого диапазона являются сложность алгоритмов, зависимость от времени суток, а также высокие требования к качеству аэродромов и посадочных площадок.

В работах [5, 6] предложен способ определения координат беспилотных летательных аппаратов с использованием СТЗ инфракрасного диапазона. Система, которая его осуществляет, состоит из трех наземных активных инфракрасных ориентиров, размещаемых на посадочной площадке в заданной конфигурации и СТЗ, установленной на борту БПЛА, которая производит расчет угловых и линейных координат летательного аппарата относительно посадочной площадки при условии попадания инфракрасных ориентиров в поле зрения камеры (рис 1).

В отличие от существующих систем посадки, достоинства такого способа заключаются в помехозащищенности к средствам радиоэлектронной борьбы и в возможности применения на необорудованных посадочных площадках. За счет использования ближнего инфракрасного диапазона излучения длиной волны 1,55 мкм, также возможно расширить допустимый диапазон метеословий применения. Однако, в связи с тем,

что вычисление координат БПЛА сводится к определению особенностей изображения монохроматического излучения на фотоматрице, влияние таких особенностей снижает точности определения пространственного положения БПЛА. Изображения ориентиров всегда отличаются геометрически, ввиду меняющихся условий освещения и погодных условий, которые приводят к геометрическим искажениям их формы и ореола.

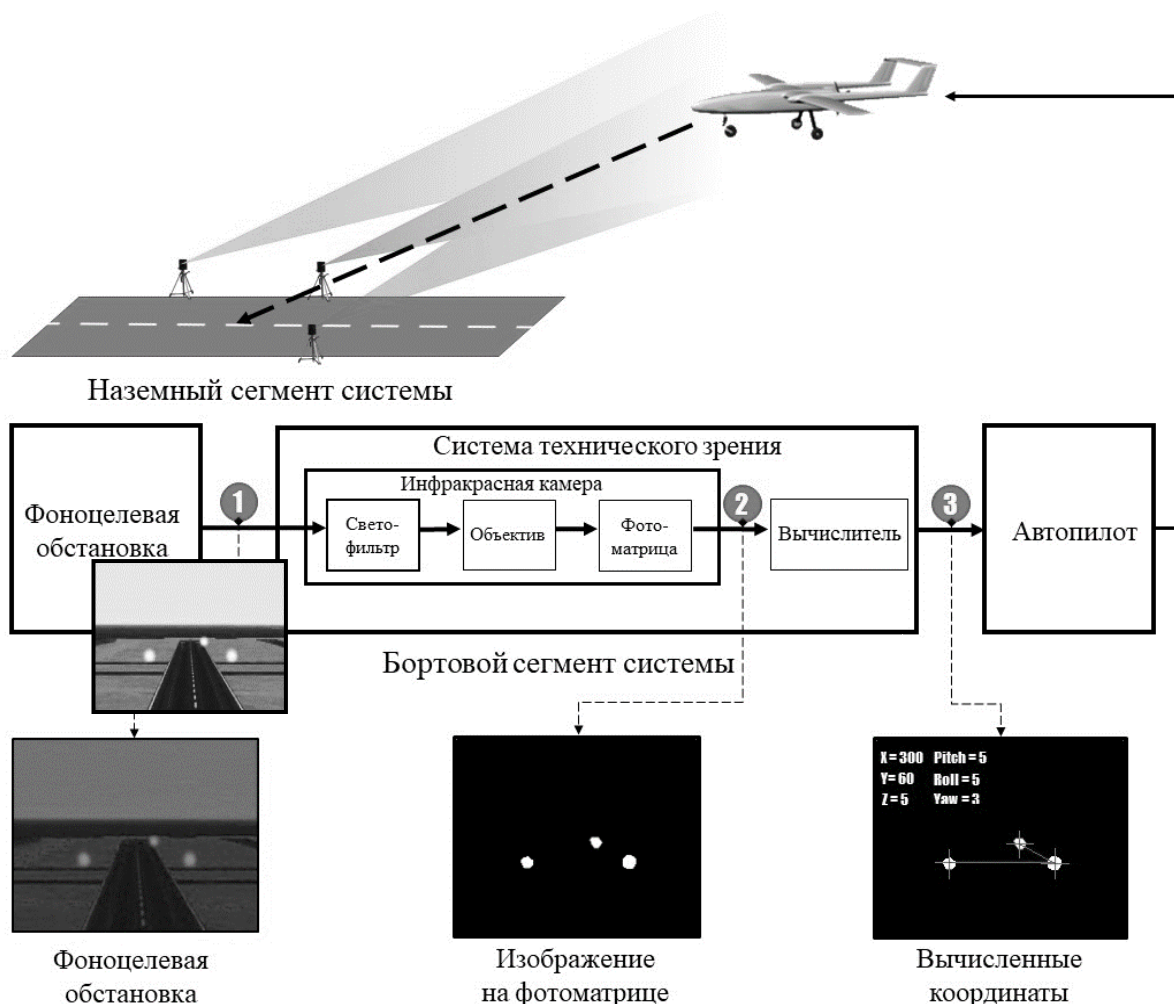


Рис. 1. Схема системы посадки БПЛА с использованием СТЗ и наземных инфракрасных ориентиров

Существующие алгоритмы определения центра объектов на фотоматрице основаны на нахождении контуров этих объектов и аппроксимации полученного контура геометрической фигурой с известными параметрами (центр, радиус) [7]. Недостатком такого подхода в задаче определения координат БПЛА являются погрешности, связанные со значительными флуктуациями контура пятна, формируемого монохроматическим излучением ориентира на фотоматрице, что влияет на точность определения координат его центра, а как следствие и на определение координат БПЛА. Точности определения центра с использованием контурного анализа составляют порядка 1 пикселя, что также снижает достижимые точностные характеристики системы.

Для устранения указанных недостатков необходимо учитывать форму изображений контрастных ориентиров, а также вычислять их центры с повышенной точностью обеспечивая нечувствительность к паразитным ореолам формирующимся на фотоматрице при использовании активного инфракрасного ориентира.

Постановка задачи

Задачей исследования является разработка алгоритма предобработки изображения, который учитывает локальные особенности ориентира и выделяет области интереса на изображении с подходящими по классификации участками, а также разработка способа субпиксельной обработки изображения, основанного на анализе яркости пикселей выделенной области интереса для вычисления центра изображения инфракрасного ориентира на фотоматрице.

1. Алгоритм предобработки изображения инфракрасного ориентира

Анализ показывает, что на изображениях инфракрасного ориентира могут присутствовать шумовые составляющие, которые возникают из-за несовершенства фотоматриц и оптических систем, бликов, переотражений, воздействия естественных помех. Все это затрудняет распознавание инфракрасных ориентиров с помощью СТЗ, и если их не сократить (в идеале – удалить), помехи могут привести к значительным ошибкам.

Снизить уровень ошибок при распознавании инфракрасных ориентиров позволяет использование быстрых алгоритмов предварительной обработки изображений сразу после их получения с фотоматрицы. Рассмотрим этапы предлагаемого алгоритма предварительной обработки изображений инфракрасного ориентира (рис 2).



Рис. 2. Основные этапы алгоритма предобработки изображения инфракрасного ориентира

Этап 1. Бинаризация. Бинаризация является одним из основных методов обработки изображений в робототехнике, позволяющих выделять объекты в поле зрения СТЗ. Она заключается в выборе значения порога, разграничивающего моды распределения яркостей на изображении. Наиболее известны следующие алгоритмы бинаризации:

- обработка с постоянным порогом [8];
- адаптивная бинаризация [9];
- методы кластеризации (К-средних, EM-алгоритм) [10];
- метод бинаризации Отсу [11].

Исследования показали, что лучшие результаты как по скорости, так и по качеству уменьшения шума при обработке изображения инфракрасного ориентира, дает метод Отсу. Данный способ состоит из двух основных шагов.

Шаг 1. Автоматическое определение порога бинаризации по нормированной гистограмме яркостей изображения по формуле

$$p_i = \frac{n_i}{N},$$

где N – общее число пикселей на изображении, n_i – число пикселей с уровнем яркости i .

Шаг 2. Процедура порогового разбиения изображения. Диапазон яркостей делится на два класса с помощью порогового значения уровня яркости t (целое значение от нуля до L), каждому из которых соответствуют следующие характеристики:

$$\omega_0(t) = \sum_{i=0}^t p_i, \quad \omega_1(t) = 1 - \omega_0(t),$$

где $\omega_0(i)$ и $\omega_1(i)$ – относительная частота двух классов 0 и 1, разделенных порогом i ;

$$\mu_0(t) = \frac{\sum_{i=0}^t ip_i}{\omega_0(t)}, \quad \mu_1(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^L ip_i}{\omega_1(t)},$$

где $\mu_0(0)$ и $\mu_1(0)$ – средний уровень каждого из двух классов 0 и 1 изображения, разделенных порогом i .

Этап 2. Применение маски к исходному изображению. После этапа бинаризации формируется маска изображения с значениями «0» и «1», где «1» соответствуют пиксели исходного изображения с выделенным на этапе бинаризации значениями яркости, а «0» – пиксели, не вошедшие в этот порог. Для дальнейшей обработки изображения необходимо совместить исходное изображение и маску. Эта операция сводится к умножению исходного изображения и маски попиксельно:

$$g(x, y) = f(x, y)m(x, y),$$

где $m(x, y)$ – маска полученная после бинаризации, $f(x, y)$ – исходное изображение, $g(x, y)$ – изображение полученное в ходе перемножения.

Этап 3. Поиск контуров. Для решения задачи выделения контуров на изображении существует множество алгоритмов [12, 13]. Наиболее подходящим способом при выделении контура инфракрасного ориентира является детектор границ Канни, в связи с возможностью отслеживания значения и направления градиента в каждой точке на полутоновом изображении. Алгоритм выполняется в несколько шагов:

Шаг 1. Сглаживание. Оператор Канни использует размытие по Гауссу. Уравнение распределения Гаусса в N измерениях имеет вид:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2},$$

где $(x^2 + y^2)$ – радиус размытия, σ – стандартное отклонение распределения Гаусса.

Пиксели, где распределение отлично от нуля, используются для построения матрицы свертки, которая применяется к исходному изображению. Значение каждого пикселя становится средневзвешенным для окрестности. Исходное значение пикселя принимает наибольший вес (имеет наивысшее Гауссово значение), и соседние пиксели принимают меньшие веса, в зависимости от расстояния до них.

Шаг 2. Поиск градиентов. Выбор границ происходит в тех местах, где наблюдается максимальное значение градиента. Это значение зависит от направления поиска градиента. Выделяются четыре ядра фильтра, отвечающие за горизонтальное, вертикальное и два диагональных направления.

Шаг 3. Подавление ложных максимумов. К пикселям границ относятся пиксели, которые дают локальный максимум градиента в направлении его вектора. Угол направления должен быть кратен 45° (рис 3).

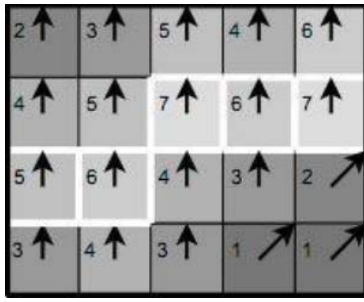


Рис 3 Принцип подавления «ложных» максимумов

Шаг 4. Двойная пороговая фильтрация. Метод использования порогов заключается в определении областей на изображении, где могут располагаться границы, за счет пороговых значений. Пороговая фильтрация нужна, если фон и объекты сильно отличаются друг от друга, а нужно выделить лишь контур границы. Например, результат применения фильтрации с порогами 55 и 60 % от выделенного диапазона дает 5 % промежуточных границ.

Шаг 5. Трассировка области неоднозначности. Пиксели, прошедшие предыдущие этапы, проверяются на близость расположения друг к другу. Пиксели, лежащие обособленно или отдаляющиеся от границы, не учитываются, а пиксели, которые расположены в непосредственной близости по одному из вертикальных, горизонтальных или диагональных направлений, определяются как результирующая граница.

Этап 4. Определение свойств контура. Этот этап необходим для устранения нетипичных областей, выделенных на предыдущих этапах, которые могут возникать из-за переотражений, бликов, помех вызванных естественным, или искусственным освещением (рис 4).

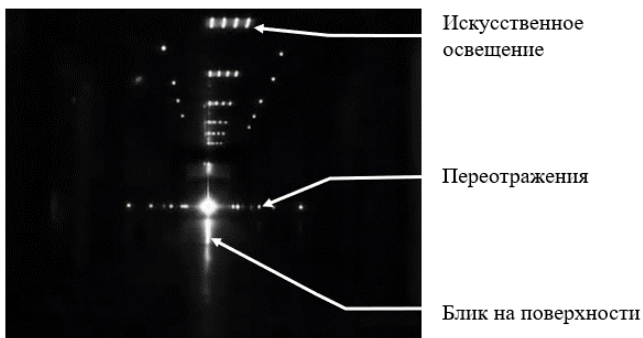


Рис. 4. Нетипичные области при распознавании инфракрасного ориентира

Для исключения таких областей предложен фильтр, учитывающий особенности контура по четырем параметрам:

1) **Размер области.** В этом параметре учитываются минимальная и максимальная площадь формируемого пятна в пикселях (фильтруются все пятна, площадь которых не соответствует установленному в параметре значению).

2) **Округлость.** Данный параметр учитывает, насколько близко по форме к окружности формируемое пятно. Параметр рассчитывается по формуле:

$$O = \frac{4\pi A}{P^2},$$

где A – площадь пятна, P – длина контура.

Например, если пятно имеет длину контура равную $2\pi R$, а площадь πR^2 , то параметр $O = 1$, и значит, что мы имеем дело с идеальной окружностью. Для квадрата этот параметр равен 0,785. Задав нижние и верхние пороги данного параметра можно фильтровать контуры по степени схожести с окружностью, что очень критично в применении инфракрасных ориентиров, так как они формируют на матрице изображения близкие по форме к окружности.

3) **Коэффициент сжатия.** Этот параметр учитывает отношение длин малой и большой полуосей формируемого пятна и задается соотношением:

$$k = \frac{b}{a},$$

где a – большая полуось, b – малая полуось.

Он показывает, насколько пятно вытянуто вдоль одной из осей. У окружности этот параметр равен 1, а у линии равен 0. Он позволяет фильтровать блики, формируемые на поверхностях, так как они имеют вытянутую форму.

4) **Выпуклость.** Параметр показывает, насколько выпукла форма пятна. Рассчитывается согласно формуле:

$$V = \frac{S}{S_v},$$

где S – площадь пятна, S_v – площадь выпуклой оболочки пятна.

Выпуклая оболочка рассчитывается согласно алгоритму Джарвиса. Метод можно представить как обтягивание веревкой множества вбитых в доску гвоздей. Алгоритм работает за время $T(nh)$, где n – общее число точек на изображении пятна, h – число точек в контуре. Этот параметр позволит избавиться от переотражений получаемых в оптической части СТЗ.

Этап 5. Выделение области интереса. Результатом поиска контуров и их классификации на бинаризованном изображении являются области пятен, наиболее подходящие по классификации к инфракрасным ориентирам. По ним можно определить область интереса для дальнейшей обработки, если найти крайние точки границ слева, справа, сверху и снизу. Зная крайние положения пятна, несложно выделить его в прямоугольную область и обозначить ее на изображении. Центр области интереса определяется по формуле:

$$x_u = \frac{(x_l - x_n)}{2}, \quad y_u = \frac{(y_g - y_n)}{2},$$

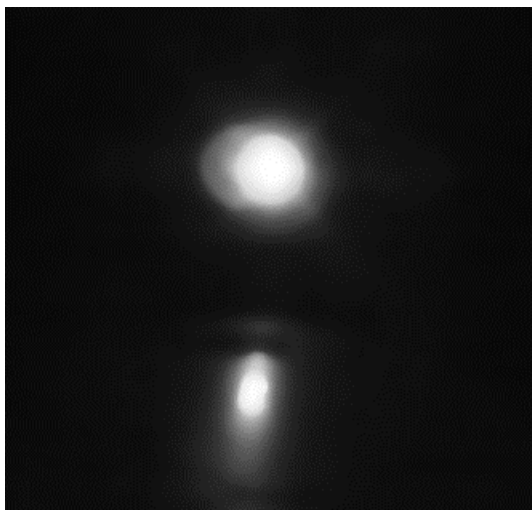
где x_l – координата левого края, x_n – координата правого края, x_u – центр пятна по оси OX , y_g – координата верхнего края, y_n – координата нижнего края, y_u – центр объекта по оси OY .

Выделение области интереса позволит снизить время, затрачиваемое на определение центра пятна, за счет уменьшения размера изображения.

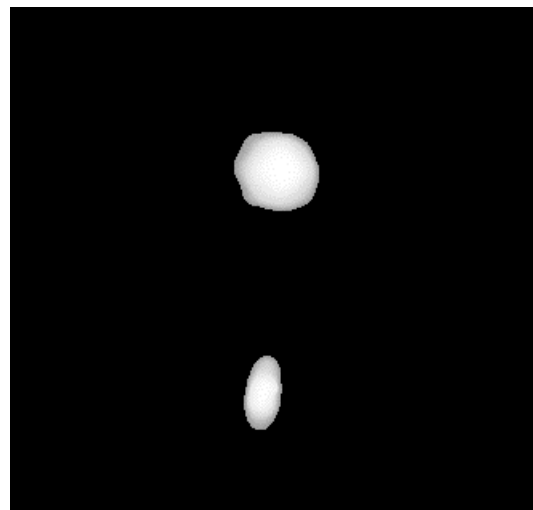
Предложенный алгоритм предобработки изображения инфракрасного ориентира исследовался на 1000 кадрах, полученных системой технического зрения в различных условиях. Результаты их предварительной обработки приведены на рис. 5.

Достоинствами предложенного алгоритма является устойчивость к искусственным и естественным помехам, простота реализации, быстродействие, которое дает возможность идентифицировать инфракрасные

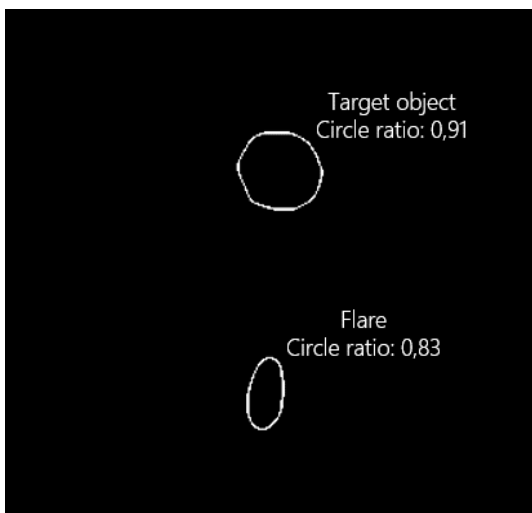
ориентиры в СТЗ, работающих в режиме реального времени. Общее время работы рассмотренного алгоритма составляет 14 мс на вычислителе Nvidia Jetson TX2 при разрешении входного изображения 800x600.



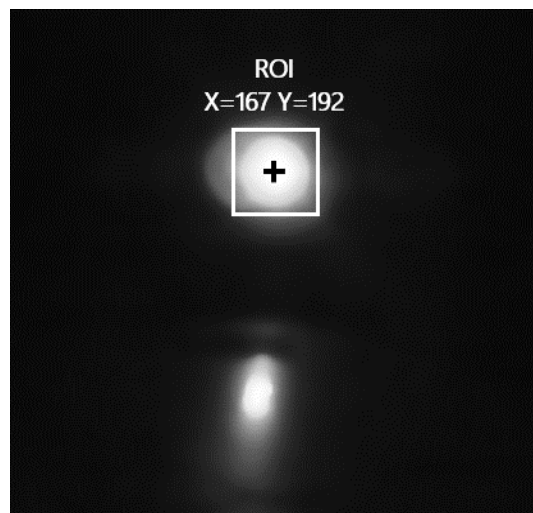
а) исходное изображение



б) бинаризация и применение маски к исходному изображению



г) выделение контуров и определение их свойств



д) определение области интереса на изображении

Рис. 5. Результаты предобработки изображений инфракрасных ориентиров предложенным алгоритмом

2. Способ субпиксельной обработки изображения инфракрасного ориентира

Рассмотренный способ вычисления координат БпЛА относительно посадочной площадки основан на точном определении положения центров изображений инфракрасных ориентиров на фотоматрице. Применение стандартных алгоритмов, основанных на вычислении этого центра с помощью контурного анализа дают плохой результат, связанный со значительными флуктуациями контура ориентира. Изображение ориентира представляет собой фигуру, близкую к кругу, диамет-

ром в десятки пикселей. Причем центральная область изображения с диаметром около 20 пикселей близка к величине изображения светодиода, вычисленной по законам геометрической оптики. Очевидно, что определить центр такого изображения с высокой точностью (порядка 0,1 пикселя) представляется весьма сложной задачей. Тем более, что изображение на фотоматрице формируется при наличии шумов фотоматрицы, накладываемых на собственно изображение, полученное объективом (рис 6).

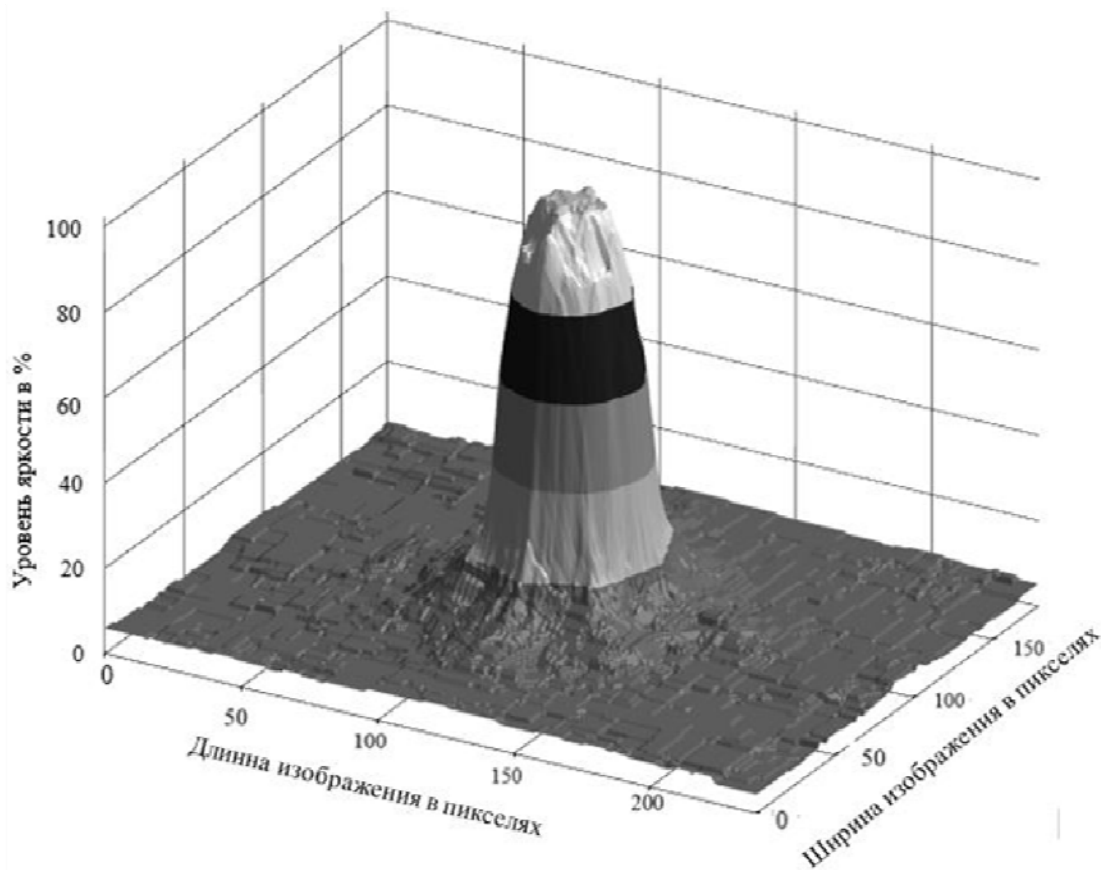


Рис. 6. Распределение яркости изображения инфракрасного ориентира

Для решения задачи необходимо перейти к аналогии из области механики твердых тел. Будем считать распределение массы плоской металлической пластины аналогом распределения яркости изображения по фотоматрице. Пусть средняя часть изображения ориентира удовлетворяет условию $R_{ij} \geq R_{нор}$, где i и j номера пикселей в строке и столбце соответственно (рис 7).

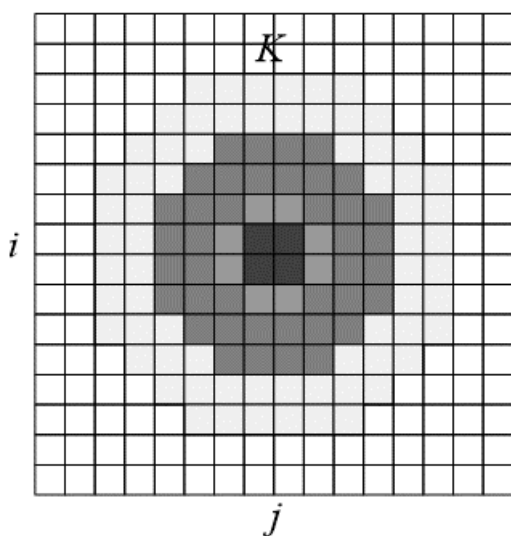


Рис 7 Изображение ориентира

Тогда координаты центра яркости изображения ориентира (по аналогии с центром массы пластины) вычислим следующим образом

$$X_o = \frac{\sum_{i \in K} \sum_{j \in K} R_{ij} r (j-1/2)}{rR} = \frac{\sum_{i \in K} \sum_{j \in K} R_{ij} (j-1/2)}{R},$$

$$Y_o = \frac{\sum_{j \in K} \sum_{i \in K} R_{ij} r (i-1/2)}{rR} = \frac{\sum_{j \in K} \sum_{i \in K} R_{ij} (i-1/2)}{R},$$

где r – размер пикселя, R_{ij} – яркость пикселя в зависимости от номера строки i и столбца j , K – область изображения, удовлетворяющая условию $R_{ij} \geq R_{нор}$,

$R = \sum_{i,j \in K} R_{ij}$ – интегральная яркость изображения области.

Исследования способа проводились на разработанном программном обеспечении. Выполнялся расчет среднеквадратического отклонения (СКО) определения координат центра инфракрасного ориентира контурным и предложенным способом, для тестовых изображений ориентира, сформированных на дальностях от 5 до 100 м с шагом в 5 м. Выборка составляла 100 изображений для каждой из дальностей. Изображения отличались друг от друга из-за случайного характера шумов фотоприемника и естественных помех. Сравнительные результаты зависимости СКО определения центра изображения инфракрасного ориентира для предложенного и контурного способа представлены на рис. 8.

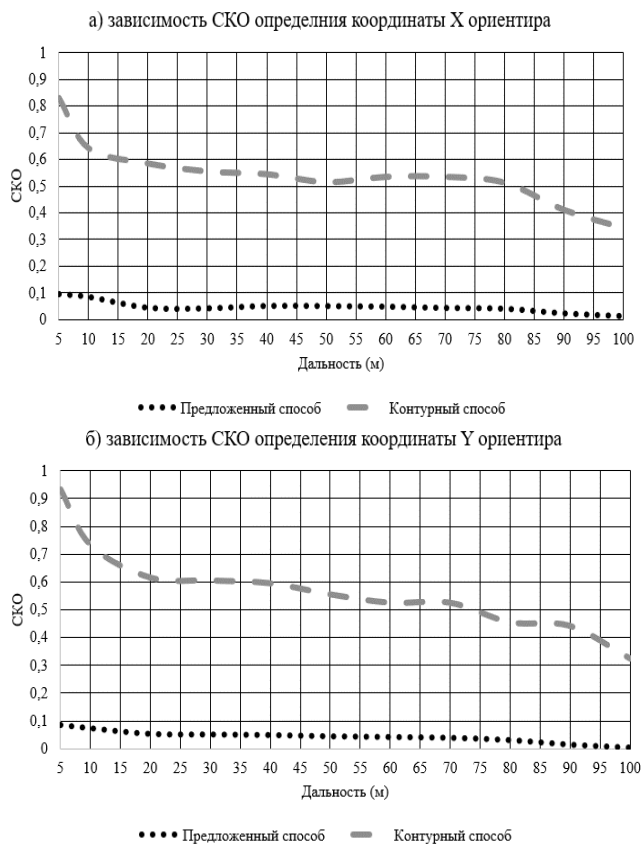


Рис. 8. СКО определения координат инфракрасного ориентира

Как видно из рис. 8 точность определения координат предложенным способом превосходит контурный алгоритм для всех рассмотренных расстояний примерно на порядок. Уступают контурные алгоритмы и по величине вычислительных мощностей, так как на каждом шаге необходимо, по сравнению с предложенным способом, затратить больше времени, в частности за счет дополнительной операции аппроксимации окружностью и проведения нескольких итераций во время расчета.

Заключение

Разработанный в первом разделе алгоритм предобработки изображения инфракрасного ориентира, учитывающий локальные особенности и свойства его контура, позволит снизить вычислительные затраты на постобработку изображения, с целью вычисления координат БПЛА, за счет выделения области интереса, которая существенно меньше исходного изображения.

Предложенный во втором разделе способ субпиксельной обработки изображения инфракрасного ориентира позволяет вычислять центр ориентира на фото-матрице с субпиксельной точностью (порядка 0,1 пикселя). Он оказался точнее контурных алгоритмов, что подтверждают полученные зависимости.

В результате исследования можно сделать вывод о том, что фильтрация по предложенным свойствам позволила снизить влияние искусственных и естественных помех, что увеличит помехозащищенность рассмотренного способа определения координат БПЛА относительно посадочной площадки, а также даст возможность однозначно идентифицировать ориентир и исключить определение ложных контуров.

Целесообразно использовать предложенный алгоритм субпиксельной обработки изображения для определения координат центров изображений инфракрасных ориентиров при вычислении координат БПЛА на этапе

посадки, что существенно позволит расширить возможности комплексов с беспилотными летательными аппаратами и повысить эффективность их применения.

Литература

1) Бартенев В.А., Гречкосеев А.К., Козорез Д.А. и др. Современные и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 191 с.

2) Жихарев В.П., Зазерский Л.К., Ершов Г.А., Криво-ручко Ю.Т. и др. Проблемы развития перспективных средств инструментального захода на посадку воздушных судов. М.: Радиопромышленность, 2015. № 4. С. 107-118.

3) OPATS – The Laser-based Automatic Landing Systems for UAVS. pdf. Режим доступа: <https://uaug.picturepark.com/Go/D4xnjm/V/7623/1>.

4) В РФ разработана собственная лазерная система автоматической посадки беспилотников ЛСОК [Электронный ресурс] Электр. Журнал. – Военное обозрение. 25.06.2017. Режим доступа: <https://topwar.ru/121261-v-rf-razrabotana-sobstvennaya-lazernaya-sistema-avtomaticheskoy-posadki-bespilotnikov-lsokhtml>.

5) Пат. 2700908 РФ, МПК В 64F 1/18. Способ определения координат летательного аппарата относительно взлетно-посадочной полосы [Текст] / Агеев А.М., Бондарев В.Г., Ипполитов С.В., Лопаткин Д.В., Проценко В.В., Смирнов Д.А. (РФ); заявители и патентообладатели ВУНЦ ВВС «ВВА». №2018112532; заявл. 06042018 11 с.: ил.

6) Агеев А.М., Бондарев В.Г., Проценко В.В. Инфракрасная система локальной навигации беспилотных летательных аппаратов для автоматизации режима посадки // Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах. XXX Всероссийская техническая конференция школы-семинара. [Текст]: [сборник статей] – М.: ИД Академии Жуковского, 2019. С. 32-37

7) Старосотников Н.О. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах / Н.О. Старосотников, Р.В. Фёдоров // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 1. С. 79–86.

8) Писаревский А. Н. и др. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение). Л.: Машиностроение, 1988. 424 с.

9) Мошкин В. И., Петров А. А., Титов В. С., Якушенок Ю. Г. Техническое зрение роботов. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.

10) Kanungo T., Mount D. M., Netanyahu N., Piatko C., Silverman R. and Wu A. Y. An efficient k-means clustering: Analysis and implementation // Proc. IEEE Conf Computer Vision and Pattern Recognition, 2002. P. 881–892.

11) Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Syst., Man and Cybern. 1979. Vol. SMC-9. P. 62–66.

12) Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 507 с.

13) Абламейко С. В., Лагуновский Д. М. Обработка изображений: технология, методы, применение: Учеб. пособие. М.: Амалфей, 2000. 304 с.

Сведения об авторе:

Проценко Виталий Викторович, адъюнкт, Военный учебно-научный центр "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" Министерства обороны Российской Федерации".

Адрес: 394064, г Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а. Телефон 910-344-05-68.

E-mail: vitalyprotsenko1993@gmail.com.