

УДК 681.3.07

В.И. МАНАЕНКОВ, В.И. КОРТУНОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ ОСОБЫХ ТОЧЕК  
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОРИЕНТАЦИИ ПО ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

*Рассмотрены основные методы определения смещений на изображении, которые используются для решения ориентационной задачи по оптической системе. Разработано специальное программное обеспечение с использованием библиотеки OpenCV, предназначенное для сбора экспериментальных данных для анализа методов. Проведены эксперименты, в которых оценены быстродействие, точность и оптимальные условия применения каждого из методов, а так же проведен сравнительный анализ.*

**Ключевые слова:** *оптическая система, особые точки, взаимокорреляционная функция, метод Лукаса-Канаде, метод SURF, ориентационная задача, смещения особых точек, текстура изображения*

**Введение**

Развитие ресурсов вычислительной техники и появление на рынке быстродействующих приборов с зарядовой связью (ПЗС) матриц обусловило стремительное развитие подходов к решению навигационной и ориентационной задач с использованием цифровой камеры. Поэтому, определение собственной пространственной ориентации с использованием цифровой оптической системы является актуальной.

На текущий момент разработано множество методологий для решения ориентационной задачи с использованием оптической системы: методы с использованием эталонных карт местности, методы с построением карт местности в масштабе реального времени и методы, основанные на обработке оптического потока [1]. Все методы машинного зрения основаны на последовательной обработке серии цифровых изображений, сравнивая поступивший кадр на вход алгоритма обработки с предыдущим.

Большинство методов программно реализованы в библиотеке с открытым исходным кодом OpenCV, но реализация каждого из методов выполнена в виде базовых функций, которые можно использовать для решения навигационной и ориентационной задачи с использованием цифровой оптической системы [2].

Каждый из приведенных методов обладает как достоинствами, так и недостатками, а так же оптимальными условиями применения, которые зависят от освещенности сцены, яркостных и контрастных характеристик изображения.

В статье проанализированы методы, которые

позволяют решать задачу определения угловой и пространственной ориентации камеры. Проведено тестирование, по результатам которого определено быстродействие, качество, точность и условия применения каждого из методов.

**1. Обзор методов определения смещений**

Методы определения смещений основаны на работе с последовательностью кадров цифровых изображений. Принцип работы каждого из методов основан на анализе текущего кадра из потока изображений по отношению к предыдущему. К каждому из кадров применяется определенный математический аппарат, который позволяет определить, насколько сместился текущий кадр сцены по сравнению с предыдущим из последовательности изображений.

Наиболее интересными для исследования методами являются: метод определения смещения на основе взаимокорреляционной функции (ВКФ), метод на основе оптического потока Лукаса - Канаде и метод на основе алгоритма SURF.

Метод на основе взаимокорреляционной функции двух изображений. Используя этот метод, мы можем найти участок одного изображения на другом, а разница между местоположениями участков на этих двух изображениях и будет соответствовать смещению поверхности относительно камеры, которое произошло за время поступления нового кадра [3].

Метод на основе оптического потока Лукаса-Канаде выполняет поиск смещения в окрестностях какой-либо точки. Задается вектор, который содер-

жит координаты особых точек, после этого алгоритм Лукаса-Канаде выполняет поиск смещения изображения в окрестности этих точек [4]. Если смещение в окрестности особой точки найдено, положение особой точки обновляется для дальнейших поисков. В противном случае особая точка в дальнейших вычислениях не участвует.

SURF (Speeded Up Robust Feature) – один из наиболее современных и многообещающих алгоритмов поиска особых точек. Этот алгоритм пришел на замену более старого метода определения особых точек, SIFT (Scale-invariant feature transform). Независимые тесты показывают, что SURF в несколько раз быстрее, чем SIFT. Данный алгоритм основывается на матрицах Гессе, градиент яркости, которые вычисляются при помощи вейвлетов Хаара.

В отличие от методов, рассмотренных выше, алгоритм SURF не выполняет отслеживания особых точек в кадре и поиск их смещений. Алгоритм SURF выполняет поиск особых точек, то есть уникальных участков изображений, по которым можно выполнить идентификацию изображения. Данный алгоритм формирует вектор особых точек, с их координатами, и вектор дескрипторов длиной от 64 до 128 элементов, по которым можно идентифицировать выделенную особую точку на следующем кадре [5].

## 2. Проведение эксперимента по сравнению методов

### 2.1. Оценка помех камеры и калибровка

В эксперименте используется веб-камера CNL-WCAM813A, с CMOS матрицей, разрешающая способность которой составляет 1280\*960 пикс.

Шумовые характеристики камеры, которая использовалась в эксперименте, снимались в трех условиях, полный засвет светочувствительной матрицы камеры, частичный засвет светочувствительной матрицы камеры на однородной текстуре и в условиях отсутствия светового потока на светочувствительной матрице.

Таблица 1

Условия оценки шумовой характеристики камеры

Условие освещенности на ПЗС матрице	Математическое ожидание	Дисперсия
Отсутствие светового потока	7,4	4,7
Однородная текстура белого цвета	156,9	11,85
Полный засвет	255	0

Камера, которая используется в эксперименте, обладает хорошими характеристиками светочувствительной матрицы, то есть светочувствительная матрица обладает низким показателем собственных шумов. Условия освещенности, в которых проводится эксперимент по тестированию, обеспечат необходимое быстродействие камеры (30 кадров/сек при разрешении 640\*480 пикс.), а также низкие показатели собственных помех матрицы.

Прежде чем выполнять эксперимент, были вычислены характеристики оптической системы камеры. Данная процедура называется калибровкой камеры. Калибровка камеры необходима для устранения искажений на изображении, которые вносит оптическая система. Калибровка выполняется по изображению с использованием шахматной доски. В процессе калибровки камеры вычисляются две матрицы: внутренняя и внешняя матрицы. Внутренняя матрица состоит из параметров камеры: фокального расстояния по двум осям ( $f_x, f_y$ ) и координат центра фокуса ( $c_x, c_y$ ), а внешняя матрица - это матрица растяжения, поворота и переноса модели [6].

При выполнении калибровки камеры, вычислены внутренняя и внешняя матрицы. Рассчитанные матрицы используются в алгоритме устранения искажений оптической линзы камеры.

### 2.2. Постановка эксперимента

При выполнении эксперимента необходимо установить: быстродействие, точность, оптимальные условия применения, особенности текстур для каждого из анализируемых методов.

Освещенность помещения, в котором запланировано проведение эксперимента - 300 лк. Такое значение освещенности необходимо и достаточно для того, чтобы выбранная камера работала с частотой захвата изображений 30 кадров/с. Обычно в камерах встроен алгоритм, который повышает значение выдержки при условии недостаточной освещенности. Такой алгоритм понижает быстродействие камеры и частоту захвата изображений до 10-15 кадров/с.

Эксперимент проводится на разных видах текстур. Это позволяет оценить качество работы каждого алгоритма на текстурах разного типа. В эксперименте тестирование методов проводится на ярко выраженных однородных текстурах, текстурах с высокой контрастностью и на слабовыраженных не контрастных текстурах.

Для сбора экспериментальных данных по каждому из методов разработано специальное программное обеспечение, в котором используется библиотека OpenCV для реализации исследуемых методов.

Експеримент виконувався на ноутбуку HP ProBook 4720s наступної конфігурації: процесор Intel Core i3 M370 2.4 ГГц, 3 Гб ОЗУ, операційна система Microsoft Windows 7 64 біт.

### 3. Результати експеримента

#### 3.1. Результати експеримента для метода на основі взаємкорреляційної функції

Метод має ряд обмежень, в частині, максимальна величина вичисляемого зміщення рівна половині різниці розміра сторони вікна підстилюючої поверхності і розміра сторони вікна захопту. На рис. 1 приведено приклад роботи алгоритма, пошуку зміщення на основі взаємкорреляційної функції.

Метод визначення зміщення на основі ВКФ показав високе швидкодія для різних розмірів вікон від 32 пікс. до 256 пікс. забезпечуючи обробку потоку зображень з частотою до 30 кадрів в секунду. Таке швидкодія обумовлено можливістю застосування швидкого перетворення Фур'є в алгоритмі обчислення.



Рис. 1. Приклад роботи метода на основі ВКФ

Максимальне швидкодія метод показав в приміщенні з освітленістю 300 лк, що забезпечило максимальну швидкість роботи пристрою відеозахопту камери (30 кадрів/сек).

В ході проведення експеримента було встановлено, що метод на основі ВКФ забезпечує субпіксельну точність визначення зміщення частки зображення в кадрі.

Метод показав так же відмінну здатність на частках зображень з яскраво вираженою текстурою (математичне очікування частки зображення становить від 50 до 185, дисперсія до 60). Метод на основі ВКФ може працювати со слабо вираженими текстурами частки зображення, но при цьому точність метода значно зменшується.

Метод на основі ВКФ виявився нестійким к повороту искомого частки зображення, а так же к афінним искаженням, що ускладнює його застосування для рішення задачі орієнтації камери.

#### 3.2. Результати експеримента для метода на основі Лукаса-Канаде

На рис. 2, 3 приведені експериментальні дані дослідження алгоритму Лукаса-Канаде на точність відстеження зміщення особлих точок по послідовності цифрових зображень. На рис.2 приведені експериментальні дані для точок з завищеними показателями локальної яркостної характеристики околиці особливої точки

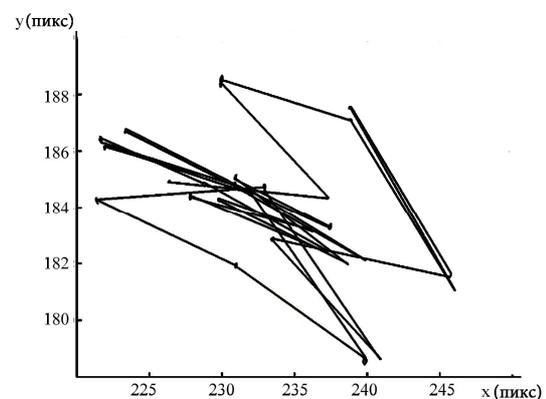


Рис. 2. Результати тестування метода на точках со слабо вираженою текстурою

На рис. 3 приведені експериментальні дані для точок з такими яркостними і контрастними характеристиками, які дозволяють алгоритму Лукаса-Канаде безошибочно визначати зміщення особлих точок в кадрі.

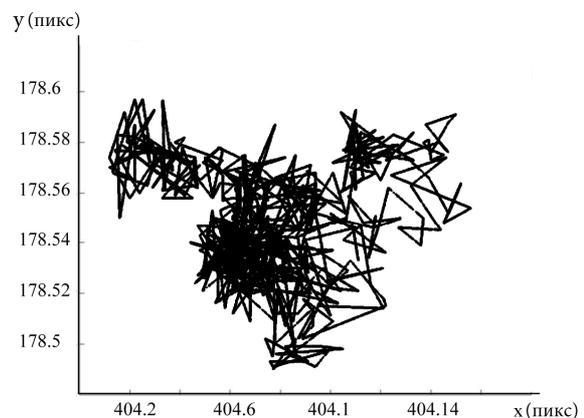


Рис. 3. Результати тестування метода на точках з яскраво вираженою текстурою

Результаты тестирования метода показали, что алгоритм отслеживания особых точек на основе оптического потока Лукаса-Канаде обладает высоким быстродействием. Скорость обработки последовательности изображений, во время проведения тестирования, составляет 30 кадров/сек, то есть обработка потока изображений, и отслеживание особых точек на видео выполняется в масштабе реального времени.

Результаты эксперимента показывают, что точность отслеживания координат особых точек на ярко выраженной текстуре колеблется в пределах одного пикселя (субпиксельная точность). Для слабо выраженной текстуры точность определения координаты особой точки в кадре колеблется в пределах от 2 до 20 пикселей.

Таким образом, алгоритм обеспечивает субпиксельную точность, но при этом, точность определения смещения особой точки в кадре зависит от выраженности текстуры ее окрестности.

Достоинствами метода Лукаса-Канаде являются высокая скорость работы во время отслеживания перемещения особых точек в кадре, вычисления положения особой точки в кадре выполняются с субпиксельной точностью, что подтверждено многочисленными экспериментами.

К недостаткам метода можно отнести некорректную работу при отсутствии ярко выраженной текстуры подстилающей поверхности, сильную зависимость от изменения яркости и аффинных искажений. Также, с определенной периодичностью необходимо обновлять вектор особых точек, что в свою очередь приводит к потере одной итерации обработки потока.

### 3.3. Результаты эксперимента для метода SURF

В данном методе решена проблема выраженности текстуры. Алгоритм SURF исключает использование участков изображений со слабо выраженными текстурами, то есть текстурами с однородным распределением яркостной характеристики пикселя. На рис. 4 представлен пример работы алгоритма поиска особых точек.

Данный метод имеет ряд значительных преимуществ в отличие, от ранее рассмотренных методов. Но при этом быстродействие данного метода оставляет желать лучшего. Частота обработки последовательности изображений составила 20 кадров/сек при размере окна 64\*64 пикс.

Алгоритм SURF обладает множеством преимуществ – инвариантность к аффинным искажениям, изменению яркости, масштаба, повороту изображения, высокая точность определения положения особой точки, но при этом значительно уступает

по скорости работе алгоритма на основе оптического потока Лукаса-Канаде.

Так же следует отметить, что, несмотря на то, что алгоритм предназначен для поиска объектов на изображении, он не работает с самими объектами. Алгоритм рассматривает изображение как единое целое и выполняет поиск особенностей этого изображения. Именно поэтому, метод плохо работает для объектов без ярко выраженной текстуры, использование таких текстур просто-напросто исключено в данном алгоритме.



Рис. 4. Пример работы алгоритма поиска особых точек SURF

## Выводы

Наилучшие результаты по быстродействию среди методов показали методы, основанные на взаимокорреляционной функции и оптическом потоке Лукаса-Канаде. В табл. 2 приведена детальная информация по быстродействию каждого из методов.

Таблица 2  
Оценка быстродействия методов

	Размер окна, пикс.		
	64x64	128x128	256x256
БКФ	30 кадр/сек	30 кадр/сек	30 кадр/сек
OF LK	30 кадр/сек	28 кадр/сек	27 кадр/сек
SURF	20 кадр/сек	14 кадр/сек	10 кадр/сек

Точность определения смещения особых точек в кадре для каждого из методов, при идеальных условиях сцены, при которых каждый из методов работает максимально эффективно, колеблется в пределах одного пикселя. То есть каждый из методов обеспечивает субпиксельную точность определения координат смещения особых точек. Но в случае, если условия сцены отклоняются от идеальных для конкретного метода, точность значительно падает. Кроме того, алгоритм SURF составляет вектор ин-

вариантных дескрипторов особых точек, которые можно достаточно точно определить на последующем кадре.

К сожалению, каждый из методов имеет ограничения, при которых использование каждого из них для конкретных условий сцены становится затруднительным.

Метод на основе ВКФ неустойчив к поворотам и аффинным искажениям, а так же не учитывает особенности текстуры. Метод, основанный на оптическом потоке Лукаса-Канаде, плохо работает при наличии слабовыраженной текстуры поверхности на изображении, неустойчив к аффинным искажениям и обладает высокой чувствительностью к изменению яркости. Для алгоритма SURF проблемы с аффинными искажениями и поворотом искомого изображения исключены, но при этом данный алгоритм обладает более низким быстродействием по сравнению с предыдущими.

В ходе эксперимента установлены необходимые условия, при которых эффективнее применять конкретный метод. Таким образом, основываясь на экспериментальных данных можно разработать алгоритм, который в зависимости от условий сцены на кадре, а так же особенностей объектов на изображении, будет выбирать метод, который будет работать

с максимальной эффективностью для решения задачи определения пространственной ориентации камеры.

## Литература

1. *Техническое зрение в системах управления мобильными объектами 2010: Труды научно-технической конференции-семинара [Текст] / Под ред. P.P. Назирова. – Вып. 4. – М.: КДУ, 2011. – 328 с.*
2. *Bradski, G. Learning Computer Vision with the OpenCV Library [Text] / G. Bradski, A. Kaebler // Sebastopol. - 2008. – P. 577.*
3. *Bonin-Font, F. Visual Navigation for Mobile Robots: a Survey [Text] / F. Bonin-Font, A. Ortiz, G. Oliver // Journal of Intelligent and Robotic System. – 2008. – P. 263 – 296.*
4. *Shi, J. Good features to track [Text] / J. Shi, C. Tomasi // Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vision and Pattern Recogn. – 1994. – P. 593.*
5. *Gool Speeded-Up Robust Features (SURF) [Text] / H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, L.V. Gool // Computer Vision and Image Understanding. – 2008. – P. 346 – 359.*
6. *2D->3D in Augmented reality [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/139429/>. – 21.09.2012г.*

Поступила в редакцию 24.09.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. производства радиоэлектронных систем ЛА (502), декан факультета РТСЛА В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ТЕСТУВАННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЗСУВУ ОСОБЛИВИХ ТОЧОК ДЛЯ РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОРІЄНТАЦІ ПО ОПТИЧНІЙ СИСТЕМІ

*В.І. Манаєнков, В.І. Кортунів*

Розглянуто основні методи визначення зсувів на зображенні, які використовуються для вирішення орієнтаційної задачі по оптичній системі. Розроблено спеціальне програмне забезпечення з використанням бібліотеки OpenCV, призначене для збору експериментальних даних для аналізу методів. Проведено експерименти, в яких оцінені ефективність, точність і оптимальні умови застосування кожного з методів, а також проведений порівняльний аналіз.

**Ключові слова:** оптична система, особливі точки, взаємкореляційна функція, метод Лукаса-Канаде, метод SURF, орієнтаційне завдання, зміщення особливих точок, текстура зображення

## TESTING METHODS DETECTING DISPLACEMENTS OF SINGULAR POINTS FOR ORIENTATION BY THE OPTICAL SYSTEM

*V.I. Manaienkov, V.I. Kortunov*

Basic methods of displacements on picture identification which are used in optical navigation tasks are considered. Special software for this methods analysis was developed using OpenCV library. Tests for estimation of performance, precision and optimal conditions for each method were carried out as well as its comparison analysis.

**Keywords:** optical system, singular points, cross-correlation function, the method of Lucas-Canada method SURF, orientation, the displacement of singular points, texture of image

**Манаєнков Вячеслав Игоревич** – аспирант каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: onizzuka@gmail.com

**Кортунів Вячеслав Іванович** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: vkortunov@yandex.ru