

УДК 004.021

П.Ю. Гусев, В.В. Сокольников, В.В. Ветохин, А.А. Агеев

Оптимизация параметров алгоритмов вычисления оптического потока для систем навигации беспилотных транспортных средств

Рассматривается применение алгоритмов оптического потока в задаче расчета смещения изображений при использовании подстилающей поверхности. Рассмотрены существующие подходы к определению истинного смещения с помощью вычисления оптического потока, а также поставлена цель работы и сформулированы задачи исследования. Приведено описание наиболее известных и частых алгоритмов оптического потока. Сформулированы требования к алгоритму. Приведено описание программного симулятора для имитации полета по подстилающей поверхности. Приведены в графическом виде результаты проведения экспериментов по определению оптимальных параметров алгоритма оптического потока.

Ключевые слова: оптический поток, подстилающая поверхность, управление, методы.

DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-1-79-85

Современные вычислительные средства позволяют обрабатывать большие массивы информации, в том числе и визуальной, с высокой скоростью. Это обеспечивает возможность применения методов и алгоритмов для управления техническими системами, которые ранее не могли быть применены [1]. Например, методы управления на основе оптического потока не позволяли разработать эффективные системы управления ввиду длительной обработки информации и как следствие недостаточной скорости реакции системы управления. Оптический поток представляет собой видимое движение, т.е. определяет сдвиг точек между двумя изображениями.

Системы управления на основе оптического потока являются универсальными и применимы во всех областях человеческой деятельности [2]. В широком смысле системы управления на основе оптического потока могут применяться в медицине – для проведения высокоточных операций, в контроле качества – для выявления нарушений в выполнении операций, в беспилотных автомобилях – для определения пути следования, в беспилотных летательных аппаратах – для определения местоположения в отсутствие других сигналов.

Среди практических задач применения оптического потока можно выделить задачу определения изменения положения точек на двух изображениях в случае, если два изображения получены с одинаковой точки съемки. Или в случае, если требуется определить смещение определенного объекта, который присутствует на обоих изображениях. Другая задача заключается в оценке изменения положения точки съемки. То есть требуется найти вектор смещения точки съемки относительно предыдущего кадра.

Подобная задача широко применяется при построении систем управления беспилотными аппаратами при отсутствии других способов навигации – в этом случае в качестве изображения выступает видимая часть подстилающей поверхности. В такой задаче все точки на двух соседних изображениях имеют одинаковый сдвиг [3].

Несмотря на то, что для таких случаев, при которых все точки имеют один и тот же сдвиг, может быть применен метод фазовой корреляции – точность данного метода не позволяет использовать результаты вычислений для построения системы управления. Подобный метод и алгоритмы на его основе неустойчивы к поворотам и прочим искажениям. Дополнительную трудность при определении вектора смещения всего кадра накладывает неоднородность подстилающей поверхности – могут встречаться участки с объектами, которые имеют минимальное трудно заметное изменение в двух соседних изображениях.

При решении подобных задач отдельное внимание требуется уделить методам и функциям сопоставления точек. В идеальном случае требуется функция, которая не изменится в результате смещения. Как правило, такими функциями выбирают интенсивность, градиент, гессиан, лапласиан и т.д. Однако на практике выбор функции сильно зависит от условий применения результатов распознавания оптического потока. Также выбор функции зависит от выбранного алгоритма, который используется для определения смещения точек на двух соседних изображениях.

Целью данной работы является повышение точности вычисления вектора смещения при работе с подстилающей поверхностью путем оптимизации параметров алгоритмов работы с оптическим потоком. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Выбраны функции сопоставления точек на двух изображениях применительно к задаче определения вектора смещения.
2. Разработан программный симулятор перемещения беспилотного аппарата по подстилающей поверхности.
3. Проведена оценка алгоритмов работы определения вектора смещения применительно к изображениям подстилающей поверхности.
4. Определены оптимальные параметры алгоритмов оптического потока при вычислении вектора смещения на основе подстилающей поверхности.

Точность вычисления вектора может трактоваться различно в зависимости от поставленной практической задачи [2].

В данной работе рассматривается оптический поток подстилающей поверхности и используется программный симулятор получения оптического потока. Таким образом, возникает возможность получить идеализированное смещение и смещение, полученное расчетным путем.

Пусть $a_i = (x_i + dx_i, y_i + dy_i)$ – расчетная координата точки на втором изображении, где x – координата по оси X в исходном изображении, y – координата по оси Y в исходном изображении, dx – рассчитанное смещение точки по оси X во втором изображении относительно исходного изображения, dy – рассчитанное смещение точки по оси Y во втором изображении относительно исходного изображения, i – порядковый номер точки, взятой для расчета вектора смещения. Тогда $a'_i = (x_i + dx'_i, y_i + dy'_i)$ – фактическая координата точки на втором изображении, где x – координата по оси X в исходном изображении, y – координата по оси Y в исходном изображении, dx' – фактическое смещение точки по оси X во втором изображении относительно исходного изображения, dy' – фактическое смещение точки по оси Y во втором изображении относительно исходного изображения, i – порядковый номер точки, взятой для расчета вектора смещения. Таким образом, можно записать погрешность в вычислении координат расчетным методом (1):

$$A = a_i - a'_i. \quad (1)$$

Для повышения точности вычисления смещения используется не одна точка, а набор точек. Таким образом, суммарная погрешность вычисления всех точек будет определена по формуле (2).

$$\sigma_\Sigma = \sum_1^I a_i - a'_i, \quad (2)$$

где I – количество точек, выбранное для расчета. В том случае, когда практическая задача представляет собой определение произвольной координаты при перемещении беспилотного объекта, интерес представляет суммарная погрешность, накопленная за всё время получения оптического потока. Поэтому суммарную ошибку можно представить формулой (3):

$$S_\Sigma = \sum_1^J \sum_1^I a_{ij} - a'_{ij}, \quad (3)$$

где j – порядковый номер изображения, для которого производится вычисление смещения относительно предыдущего изображения, J – количество изображений за вычетом одного, используемое для распознавания оптического потока.

Таким образом, повышение точности вычисления вектора смещения обеспечивается минимизацией ошибки, вычисляемой по формуле (4):

$$S_\Sigma \rightarrow \min. \quad (4)$$

Алгоритмы оптического потока

Для определения смещения точек на двух изображениях существует ряд общеизвестных методов и

алгоритмов на их основе. Представленные методы и алгоритмы обладают как явными преимуществами, так и имеют недостатки по отношению к определенным задачам расчета оптического потока.

Одним из наиболее известных алгоритмов является метод Лукаса–Канаде [4]. Суть метода заключается в использовании метода наименьших квадратов для всех пикселей вокруг выбранного окна. Данный метод может показывать хорошие результаты при сдвиге минимального количества пикселей. Однако уже при сдвиге трех пикселей результат будет непредсказуемым.

Алгоритм Лукаса–Канаде включает определение градиентов яркости в двух изображениях, вычисление коэффициента корреляции между ними, расчет смещения на основе коэффициента корреляции и градиентов яркости, а также фильтрацию шумов с использованием медианной фильтрации.

Метод Лукаса–Канаде не является единственным вариантом вычисления оптического потока. Существует также метод Хорна–Шунка, который имеет более глобальный характер, чем метод Лукаса–Канаде [5].

Этот метод основан на предположении, что движение сцены между двумя кадрами может быть аппроксимировано полем скоростей, которое является непрерывным и дифференцируемым.

Метод Хорна–Шунка включает определение градиентов интенсивности в каждом кадре, вычисление поля скоростей на основе градиентов интенсивности и уравнения движения, а также фильтрацию шума с использованием медианной или гауссовой фильтрации.

Основным преимуществом метода Хорна–Шунка являются его простота и эффективность, однако он может давать неточные результаты при наличии шума или резких изменений яркости.

Метод Фарнбека (Farneback) – это еще один метод вычисления оптического потока [6]. Этот метод использует представление оптического потока в виде дискретного набора векторов, каждый из которых соответствует смещению между двумя соседними пикселями.

Метод Фарнбека включает определение градиентов интенсивности в каждом кадре, их разбиение на векторы смещения, вычисление оптического потока на основе векторов смещения и уравнения движения, а также фильтрацию шума с использованием медианной или гауссовой фильтрации.

Метод SimpleFlow – это один из самых простых и популярных методов для вычисления оптического потока между двумя изображениями.

Для вычисления оптического потока с помощью метода SimpleFlow необходимо вычислить градиенты яркости для каждого изображения, найти коэффициент корреляции между ними и использовать этот коэффициент и значения градиентов для вычисления смещения между двумя изображениями.

Хотя метод SimpleFlow достаточно прост и эффективен, он также имеет некоторые ограничения.

Например, известны трудности при работе с изображениями с высоким уровнем шума или на изображениях, где объекты сильно меняются в размерах или форме между кадрами.

В данной работе для исследования и выбора оптимальных параметров рассмотрены алгоритмы Лукаса–Канаде и Фарнбека. Выбор этим алгоритмов объясняется следующими факторами:

- алгоритм Лукаса–Канаде является одним из наиболее быстрых по производительности и применим в максимально широком спектре задач;

- алгоритм Фарнбека наиболее приспособлен для расчета плотного потока, т.е. случая, когда расчет смещения происходит для всех точек изображения – именно такой случай представляет собой определение перемещения при анализе подстилающей поверхности.

Выбранные алгоритмы реализованы в библиотеке машинного зрения OpenCV. Реализация алгоритмов в OpenCV оптимизирована и разработка собственных имплементаций алгоритмов нецелесообразна. Разработанный программный симулятор предполагает использование OpenCV для распознавания оптического потока.

Каждая реализация алгоритмов предполагает возможность настройки параметров. Для обоих алгоритмов схожими параметрами выступают предыдущее и следующее изображения. В качестве специфических параметров настройки алгоритма Лукаса–Канаде можно выделить:

- prevPts – вектор точек, для которых необходимо рассчитать оптический поток;

- nextPtsoutput – выходной вектор измененных положений точек;

- winSize – размер выбранного окна для применения метода наименьших квадратов;

- maxLevel – количество уровней с разными размерами выбранного окна;

- criteria – параметр, определяющий критерии завершения итеративного поиска.

Алгоритм Фарнбека предполагает возможность изменения следующих параметров:

- pyr_scale – параметр, задающий масштаб изображения;

- levels – количество слоев в работе алгоритма;

- winsize – размер окна для выбора пикселей;

- iterations – количество итераций при работе алгоритма;

- poly_n – размер окрестности пикселя, который используется для нахождения полиномиального расширения между пикселями;

- poly_sigma – стандартное отклонение.

Поиск оптимальных значений перечисленных параметров обеспечит возможность минимизации ошибки и достижения поставленной цели. Помимо минимизации ошибки, немаловажным фактором работы алгоритма является быстродействие, поэтому в ходе проведения экспериментов по установлению оптимальных параметров будет проведена оценка скорости работы алгоритмов.

Проведение эксперимента

Для проведения экспериментального исследования и изучения алгоритмов оптического потока разработан программный симулятор, который обеспечивает имитацию перемещения беспилотного аппарата. При перемещении беспилотному аппарату доступна для обзора поверхность Земли в надиру. Программный симулятор обеспечивает имитацию возможности перемещения беспилотного аппарата по 3 осям. На рис. 1 представлено главное окно программного симулятора.



Рис. 1. Главное окно программного симулятора полета над подстилающей поверхностью

На главном окне программы представлено аэрофотоизображение местности – подстилающей поверхности. Имеется возможность выбора изображений, имитирующих различные участки местности с их характерными особенностями, а также использование синтетических изображений с периодическими и аperiodическими узорами, на которых удобно оценивать точность работы алгоритмов навигации в сложных условиях. Представленный кадр местности подбирался таким образом, чтобы включить участки с разной контрастностью изображения.

На рис. 1 представлены участки: с высокой контрастностью – лес, дорога; с низкой контрастностью – поле. Полупрозрачным квадратом белого цвета выделена зона начала перемещения беспилотного аппарата. В программном симуляторе происходит отрисовка двух траекторий перемещения – пунктир (реальное перемещение) и сплошная линия (расчетное перемещение). Дополнительно в отдельном кадре отображается фактический видимый в настоящее время фрагмент подстилающей поверхности. В настоящее время на главном окне программы также выводится статистическая информация, по распределению ошибки по координате X .

Первая серия экспериментов имела целью определение оптимального алгоритма расчета смещения при сдвиге поля зрения камеры на заданное число пикселей. Было проведено сравнение двух алгоритмов: Лукаса–Канаде и Фарнбека. Оба алгоритма используют метод оптического потока. Для расчетов использовались одинаковые исходные данные. Оба алгоритма реализованы в библиотеке машинного зрения OpenCV, имеют хорошую оптими-

зацию и апробированы во множестве исследований. В этой серии экспериментов для алгоритмов взяты стандартные рекомендованные значения параметров. Оба алгоритма были использованы для расчета смещения изображений с различным шагом – от 1 до 20 пикселей, по 30 кадров в каждой серии экспериментов из одной и той же начальной точки. Использовалась контрастная область изображения в левом верхнем углу (см. рис. 1). На рис. 2 приведены результаты 4 экспериментов для указанного над графиком смещения. По оси X отложены номера кадров, по 30 в каждом эксперименте. По оси Y отложено смещенное среднеквадратичное отклонение расчетного расстояния.

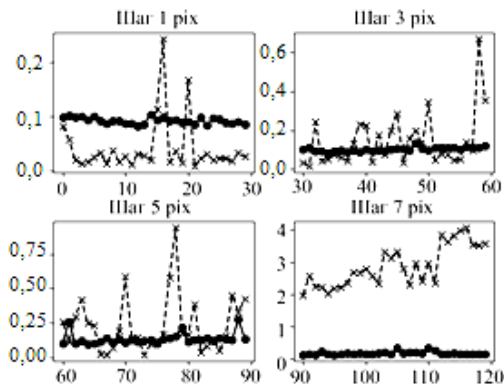


Рис. 2. Сравнение алгоритмов Фарнбека и Лукаса–Канаде: -.-.- - метод Фарнбека; -x-x- - метод Лукаса–Канаде

Как видно из графика, представленного на рис. 2, алгоритм Лукаса–Канаде при смещении более 5 пикселей дает значительную погрешность. При смещении более 8 пикселей алгоритм выдает нерелевантный результат. Алгоритм Фарнбека дает меньшую погрешность при смещениях до 10 пикселей. Около 10 пикселей наблюдается пик погрешности, далее погрешность несколько снижается. Для дальнейших экспериментов выбран алгоритм Фарнбека.

Рассмотрим подробнее влияние величины смещения в пикселях на ошибку расчета смещения по алгоритму Фарнбека. На рис. 3 представлены графики рассчитанного значения смещения. Предполагается, что для каждой выбранной величины смещения рассчитанное при помощи алгоритма смещение будет лежать около истинного значения с некоторым разбросом, причем пик распределения должен находиться вблизи истинного значения смещения. Как видно из рис. 3, для смещения в 7 пикселей наблюдается стабильный результат, близкий к истинному значению (общее среднеквадратичное отклонение по всем экспериментам – 0,17).

Аналогичная картина для меньшего смещения, графики для этих экспериментов не приводятся, среднее отклонение для смещения в 1 пиксель – 0,09. Однако начиная с 9 пикселей смещения наблюдается скачкообразный рост погрешности. Для 11 пикселей рассчитанное смещение не совпадает по знаку и не может быть использовано для приблизи-

тельной ориентации по направлению. Эта погрешность может быть снижена подбором параметров алгоритма и дополнительной обработкой изображения. Однако, адаптация алгоритма для больших смещений может нарушить его работу на малых смещениях. Для каждого типа беспилотного аппарата и параметров оптики бортовой камеры необходим индивидуальный подбор алгоритмов пред-обработки изображений, их параметров и частоты кадров.

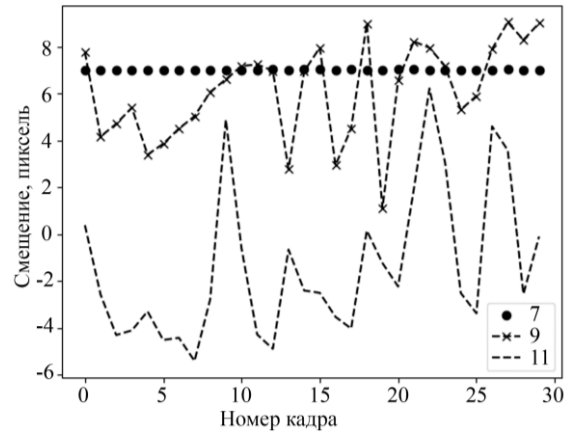


Рис. 3. График зависимости ошибки расчета от значения смещения пикселей на контрастном изображении

Для оценки работы алгоритма в разных условиях проведен аналогичный эксперимент на слабоконтрастном изображении. Использовалась область изображения без выраженных деталей в нижнем левом углу экрана (см. рис. 1). На рис. 4 представлен график зависимости рассчитанного смещения по кадрам. Смещение производилось на значениях от 2 до 15 с шагом 3, показаны графики для смещения в 2, 5 и 8 пикселей.

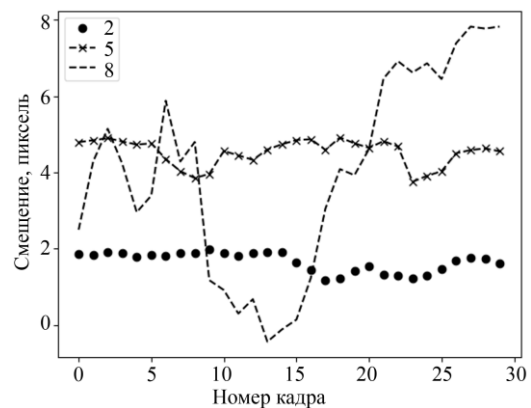


Рис. 4. График зависимости ошибки расчета от значения смещения пикселей на слабоконтрастном изображении

Как видно из графика, общая погрешность выше, чем для контрастного изображения. Тем не менее при смещении в 5 пикселей результат все еще может использоваться для приблизительной оценки пройденного пути. При смещении в 8 пикселей явно прослеживается занижение расчетного результата, однако данные все еще могут быть использованы для определения общего направления истинного

перемещения. При большем смещении результаты имеют недопустимые погрешности и не приводятся.

Зависимость точности расчета от контраста изображения показывает, что точность расчетов можно повысить, повысив контрастность изображения. Для проверки этой гипотезы был повышен контраст изображения методом адаптивного выравнивания гистограммы. Используем алгоритм ограниченного повышения контраста (CLAHE), который наиболее устойчив к шумам изображения [7]. Алгоритм также имплементирован в библиотеке OpenCV, ключевым параметром является порог ограничения контраста.

Проводились исследования со значениями порога от 5 до 200. Установлено, что значение порога в пределах 20...50 приводит к повышению точности расчета смещения, порог в пределах 50...150 одинаково хорошо работает на однородных ортогональных перемещениях. Результаты исследований влияния фильтра контраста на слабоконтрастных изображениях показаны на рис. 5. Пороговое значение от 150 до 200 дает прирост точности на неортогональных перемещениях. Принято значение этого параметра, равное 200.

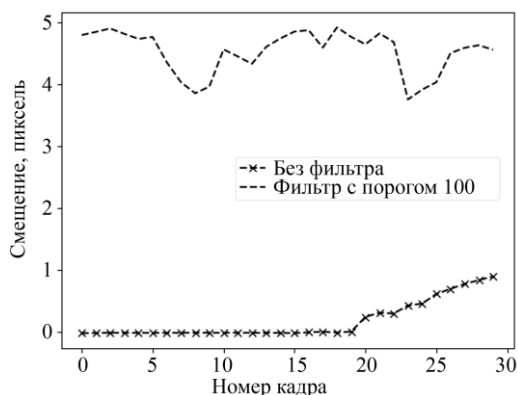


Рис. 5. Оценка эффективности повышения контраста на изображениях со слабым контрастом

В целях определения оптимальных параметров алгоритма также проведены исследования влияния параметров алгоритма на конечную точность. Установлено, что большинство параметров, таких как масштаб пирамид, число слоев и размер окрестности пикселя, заданных по умолчанию, обеспечивают максимальную точность работы алгоритма. Ключевым параметром, влияющим на точность и скорость работы, является число итераций.

Ниже приведены результаты эксперимента по определению оптимального количества итераций. Эксперимент проведен на контрастном изображении с числом итераций от 1 до 30. На рис. 6 представлен график зависимости ошибки от количества итераций вычисления. По оси X — номер кадра, по Y — усредненное расчетное смещение. Истинное смещение в этом эксперименте 5 пикселей. Видно повышение точности расчета при увеличении числа итераций и повышение устойчивости к резкому изменению общего фона изображения. Между 23 и 27 кадром в

поле камеры попадает область, отличающаяся от основной (пятно на поле). Это приводит к временному снижению точности работы алгоритма, что выражается в заниженном рассчитанном значении смещения.

Усредненное расчетное смещение

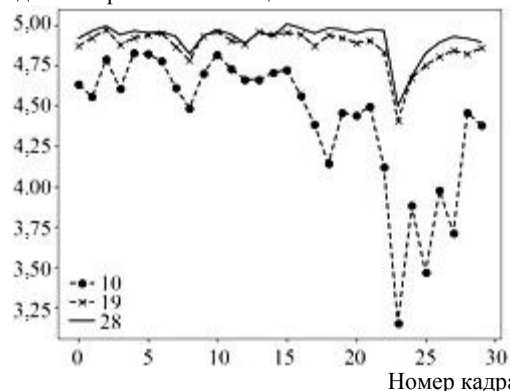


Рис. 6. График зависимости расчётной величины смещения от количества итераций алгоритма

Количество итераций ключевым образом влияет на время вычисления, поэтому выбор данного параметра важен при практическом применении алгоритма и реализации системы управления на базе аппаратных систем с ограниченными возможностями по скорости вычислений с плавающей точкой. Оценим скорость работы алгоритма при разном количестве итераций (рис. 7). На графике по оси X — номера кадров, по осям Y — усредненное расчетное смещение в пикселях и время работы алгоритма в мс.

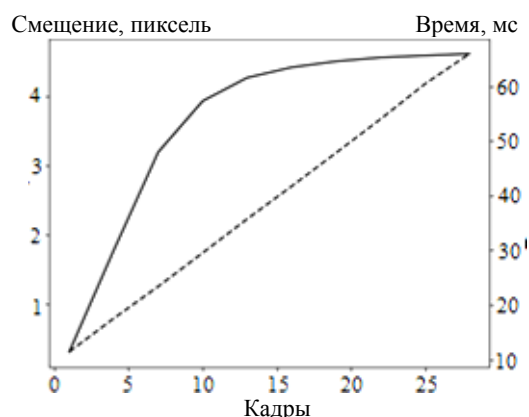


Рис. 7. Взаимосвязь числа итераций и времени расчета: — смещение; ----- — время

Как видно, точность расчета повышается асимптотически, и после 15 итераций прирост точности снижается. Предполагается, что точности порядка 0,5 пикселя будет достаточно для построения приблизительного пути в отсутствие других способов геопозиционирования. При затратах времени 60 мс на кадр будет обеспечена частота 16 кадров в секунду. При необходимости имеется большой запас времени, так как для задач позиционирования процедуру расчета можно проводить 1 раз в секунду и даже реже при небольших скоростях перемещения или большой высоте.

Таким образом, установлено, что число итераций алгоритма Фарнбека наиболее сильно влияет как на время работы алгоритма, так и на точность расчета истинного смещения. Как было показано выше и как видно из рис. 6 и 7, оптимальное по времени и точности число итераций – 17.

Заключение

В результате проведенной работы были представлены результаты сравнения двух алгоритмов – Лукаса–Канаде и Фарнбека, а также проведена оптимизация алгоритмов оптического потока для применения в системе управления техническими системами. Оптимизация позволила улучшить эффективность и точность алгоритмов, что обеспечивает более надежное управление техническими системами.

Был проведен ряд экспериментов, которые подтвердили эффективность предложенных мероприятий по оптимизации. В частности, было показано, что использование оптимизированных алгоритмов позволяет повысить точность определения положения объектов в пространстве и улучшить реакцию системы на внешние воздействия.

Таким образом, результаты данной работы могут быть использованы для усовершенствования систем управления техническими системами, в том числе в области робототехники, автономных транспортных средств и других областях, где требуется обработка данных с камер и управление объектами в реальном времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011).

Литература

1. Шебалов А.А. Исследование производительности методов вычисления оптического потока / А.А. Шебалов, А.Н. Баженов // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2012. – № 6 (162). – С. 152–158.
2. Молчанов А. Оценка точности определения параметров скорости поступательного движения видеокамеры по данным оптического потока / А. Молчанов, В. Картунов, Ф.Р. Махаммади // ВЕЖПТ. – 2017. – № 9 (88). – С. 37–45.
3. Асылбаев Н.А. О распространении степного пожара по наклонной подстилающей поверхности // Вестник Башкир. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 978–982.
4. Сакович И.О. Применение метода Лукаса–Канаде для вычисления оптического потока / И.О. Сакович, Ю.С. Белов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – № 7 (31). – С. 9.
5. Distribution of aromatic hydrocarbons in a section of deposits of oil-and-gas complexes (by the example of the fields of the Krasnoleninsky arch) / Y.V. Korzhov, V.I. Isaev, A.A. Zhiltsova, O.V. Latipova // Geophysical journal. – 2013. – Vol. 35, No. 1. – P. 113–129.
6. Вагнер А.В. Способы параметризации движения в системах обработки мультимедийных данных / В.И. Вагнер, А.А. Тропченко // Междунар. науч.-исслед. журнал (МНИЖ). – 2016. – № 11-4 (53). – С. 34–38.
7. Reza A. M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement // Journal of VLSI signal processing systems

for signal, image and video technology. – 2004. – Vol. 38. – P. 35–44.

Гусев Павел Юрьевич

Канд. техн. наук, доцент каф. систем автоматизированного программирования информационных систем (САПРИС) Воронежского государственного технического ун-та (ВГТУ)
20-летия Октября ул., 84, г. Воронеж, Россия, 394006
Тел.: +7 (473-2) 07-22-20
Эл. почта: pgusev@cchgeu.ru

Сокольников Виктор Владимирович

Ст. преп. каф. компьютерных интеллектуальных технологий проектирования (КИТП) ВГТУ
20-летия Октября ул., 84, г. Воронеж, Россия, 394006
Тел.: +7 (473-2) 07-22-20
Эл. почта: vsokolnikov@cchgeu.ru

Ветохин Валерий Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. КИТП ВГТУ
20-летия Октября ул., 84, г. Воронеж, Россия, 394006
Тел.: +7 (473-2) 07-22-20
Эл. почта: daiolix@yandex.ru

Агеев Андрей Александрович

Техник науч.-образоват. лаборатории «Учебный-научный центр радиотехники и электроники» ВГТУ
20-летия Октября ул., 84, г. Воронеж, Россия, 394006
Тел.: +7 (473-2) 07-22-20
Эл. почта: aageew@bk.ru

Gusev P.Y., Sokolnikov V.V., Vetokhin V.V., Ageev A.A.
Optimization of optical flow algorithms of a technical chain control system

This paper examines the use of optical flow algorithms in the problem of calculating image displacement when using an underlying surface. The existing approaches to solving the problem are considered, and the goal of the work and tasks to achieve the goal are set. A description of the most well-known and common optical flow algorithms is given. The requirements for the algorithm are formulated. A description of a software to simulate flight on the underlying surface is given. The results of experiments determining the optimal parameters of the optical flow algorithm are presented in graphical form.

Keywords: optical flow, underlying surface, control, methods.
DOI: 10.21293/1818-0442-2024-27-1-79-85

References

1. Shebalov A.A., Bazhenov A.N. [Study of the performance of methods for calculating optical flow]. *Computing, Telecommunications and Control*, 2012, no. 6 (162), pp. 152–158 (in Russ.).
2. Molchanov A., Kortunov V., Mohammadi F.R. [Estimation of the accuracy of determining the parameters of the speed of translational motion of a video camera based on optical flow data]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, no. 9 (88), pp. 37–45 (in Russ.).
3. Asylbaev N. A. [On the spread of steppe fire along an inclined underlying surface]. *Vestnik Bashkirskogo Universiteta*, 2013, no. 4, pp. 978–982 (in Russ.).

4. Sakovich I.O., Belov Y.S. [Application of the Lucas-Kanade method for calculating optical flow]. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, no. 7 (31), pp. 9 (in Russ.)

5. Korzhov Y.V., Isaev V.I., Zhiltsova A.A., Latipova O.V. Distribution of aromatic hydrocarbons in a section of deposits of oil-and-gas complexes (by the example of the fields of the Krasnoleninsky arch). *Geophysical Journal*, 2013, vol. 35, no. 1, pp. 113–129.

6. Vagner A.V., Vagner V.I., Tropchenko A.A. [Methods for parameterizing motion in multimedia data processing systems]. *International Research Journal (MNIZH)*, 2016, no. 11-4 (53), pp. 34–38 (in Russ.)

7. Reza A.M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement. *Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology*, 2004, vol. 38, pp. 35–44.

Pavel Y. Gusev

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Department of Systems of Automated Programming of Information Systems, Voronezh State Technical University 84, 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh, Russia, 394006
Phone: +7 (473-2) 07-22-20
Email: pgusev@cchgeu.ru

Viktor V. Sokolnikov

Lecturer, Department of Computer Intelligent Design Technologies, Voronezh State Technical University 84, 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh, Russia, 394006
Phone: +7 (473-2) 07-22-20
Email: vsokolnikov@cchgeu.ru

Valery V. Vetohin

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Department of Computer Intelligent Design Technologies, Voronezh State Technical University 84, 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh, Russia, 394006
Phone: +7 (473-2) 07-22-20
Email: daiolix@yandex.ru

Andrey A. Ageev

Technician, Scientific and Educational Laboratory «Training and Research Center of Radio Engineering and Electronics», Voronezh State Technical University 84, 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh, Russia, 394006.
Phone: +7 (473-2) 07-22-20
Email: aageew@bk.ru