

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт кибернетики  
Направление подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»  
Кафедра вычислительной техники

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Программная реализация обратного композиционного алгоритма Гаусса-Ньютона в задаче определения перемещений на изображениях поверхности материалов

УДК 004.415: 004.421.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8В2А	Береснев Алексей Павлович		01.06.2016

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер-исследователь каф. ММС ИФВТ ТПУ	Любутин П.С.	к.т.н.		01.06.2016
Доцент каф. ВТ	Болотова Ю.А.	к.т.н.		01.06.2016

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. МЕН	Николаенко В.С.	-		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭБЖ	Невский Е.С.	-		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ВТ	Марков Н.Г.	д.т.н.		01.06.2016

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт кибернетики  
Направление подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»  
Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Марков Н.Г.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
8В2А	Бересневу Алексею Павловичу

Тема работы:

Программная реализация обратного композиционного алгоритма Гаусса-Ньютона в задаче определения перемещений на изображениях поверхности материалов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	19.02.2016 г., № 1319/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.16
--	----------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Обратный композиционный алгоритм Гаусса-Ньютона.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Аналитический обзор по алгоритмам нахождения оптического потока; реализация алгоритма должна быть осуществлена на языке C++ в двух вариантах: однопоточная программа, многопоточная с использованием графического процессора; тестирование реализованного алгоритма на тестовых изображениях.
<b>Перечень графического материала</b>	Разметка областей на изображении; график зависимости случайной погрешности от смещения; график зависимости систематической ошибки от смещения; Приложение А «Блок-

	схема алгоритма программы»; Приложение Б «Блок-схема многопоточного алгоритма программы»
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко Валентин Сергеевич
Социальная ответственность	Невский Егор Сергеевич

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	7.09.2015
---	-----------

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Инженер-исследователь каф. ММС ИФВТ ТПУ	Любутин П.С.	к.т.н		7.09.2015

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8В2А	Береснев Алексей Павлович		7.09.2015

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики  
 Направление подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»  
 Уровень образования Бакалавриат  
 Кафедра Вычислительной техники  
 Период выполнения осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года  
 Форма представления работы:

Бакалаврская работа

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.11.2015	Анализ предметной области, выбор алгоритма для реализации	10
14.03.2016	Исследование выбранного метода	10
15.04.2016	Реализация выбранного метода в однопоточном режиме	10
16.05.2016	Реализация выбранного метода в многопоточном режиме	20
20.05.2016	Проведение численных экспериментов на тестовых данных	10
25.05.2016	Оформление пояснительной записки	20
1.06.2016	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
1.06.2016	Социальная ответственность	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер-исследователь каф. ММС ИФВТ ТПУ	Любутин П.С.	к.т.н		07.09.2015
Доцент кафедры ВТ	Болотова Юлия Александровна	к.т.н.		07.09.2015

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Вычислительной техники	Марков Николай Григорьевич	д.т.н., профессор		07.09.2015

**ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ОСНОВНОЙ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ 09.03.01  
«ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА», ИК ТПУ, ПРОФИЛЬ  
«ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ, КОМПЛЕКСЫ, СИСТЕМЫ И СЕТИ»**

Код резу льта та	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критерии АИОР
Р1	Применять базовые и специальные естественнонаучные и математические знания в области информатики и вычислительной техники, достаточные для комплексной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 10, ПК-4, 5, 6), критерий 5 АИОР (п. 1.1)
Р2	Применять базовые и специальные знания в области современных информационных технологий для решения инженерных задач.	Требования ФГОС (ОК-11, 12, 13, ПК-1, 2, 11), критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.2)
Р3	Ставить и решать задачи комплексного анализа, связанные с созданием аппаратно-программных средств информационных и автоматизированных систем, с использованием базовых и специальных знаний, современных аналитических методов и моделей.	Требования ФГОС (ОК-1, 8, ПК-2, 4, 6), критерий 5 АИОР (п. 1.2)
Р4	Разрабатывать программные и аппаратные средства (системы, устройства, блоки, программы, базы данных и т. п.) в соответствии с техническим заданием и с использованием средств автоматизации проектирования.	Требования ФГОС (ОК-2, 3, ПК-3, 4, 5), критерий 5 АИОР (п. 1.3)
Р5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования, включающие поиск и изучение необходимой научно-технической информации, математическое моделирование, проведение эксперимента, анализ и интерпретация полученных данных, в области создания аппаратных и программных средств информационных и автоматизированных систем.	Требования ФГОС (ОК-6, ПК-6, 7), критерий 5 АИОР (п.1.4)
Р6	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные программно-аппаратные комплексы, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья, безопасность труда, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ОК-4, 15, 16, ПК-9, 10, 11), критерий 5 АИОР (п. 1.5)
<b>Универсальные компетенции</b>		
Р7	Использовать базовые и специальные знания в области проектного менеджмента для ведения комплексной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 4, ПК-1, 6, 7), критерий 5 АИОР (п. 2.1)
Р8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать	Требования ФГОС (ОК-14, ПК-7),

	документацию, презентовать и защищать результаты комплексной инженерной деятельности.	критерий 5 АИОР (п. 2.2)
P9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	Требования ФГОС (ОК-2, 3, 4), критерий 5 АИОР (п. 2.3, 2.4)
P10	Демонстрировать знания правовых, социальных, экономических и культурных аспектов комплексной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 5, 9), критерий 5 АИОР (п. 2.5)
P11	Демонстрировать способность к самостоятельной к самостоятельному обучению в течение всей жизни и непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии.	Требования ФГОС (ОК-6, 7), критерий 5 АИОР (п. 2.6)

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 64 с., 10 рис., 3 табл., 17 источников, 2 прил.

Ключевые слова: оптический поток, бикубическая интерполяция, многопоточность, обратный композиционный алгоритм Гаусса-Ньютона, быстрое преобразование Фурье, взаимная корреляция, цифровая обработка изображений.

Объектом исследования является задача определения перемещений на поверхностях материалов.

Цель работы – исследование и программная реализация метода определения векторов смещений.

В процессе исследования были изучены и проанализированы существующие методики вычисления оптического потока, а также методы интерполяции на субпиксельном смещении.

В результате исследования был реализован алгоритм для нахождения векторов смещений, а также разработана и реализована его параллельная версия.

Область применения: оценка степени деформации материалов в машиностроении, определение направления и скорость движения на серии изображений, материаловедение.

В будущем планируется развитие работы в направлении оптимизации существующей параллельной реализации и внесение изменений в существующий алгоритм.

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ И НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Оптический поток — представляет собой поле скоростей движения точек на изображении [1]. Может возникать из-за относительного движения объекта и зрителя. Как правило, оптический поток соответствует полю движения. Обычно применяется к серии изображений, имеющих небольшой сдвиг между собой во времени, например, кадры видео. Оптический поток вычисляет скорость для точек в изображении и оценивает то, где точки могут быть на следующем изображении последовательности;

IC-GN (Inverse compositional Gauss–Newton algorithm) – обратный композиционный алгоритм Гаусса-Ньютона;

FFT (Fast Fourier transform) – быстрое преобразование Фурье;

FT (Fourier transform) – преобразование Фурье;

ZNSSD (Zero-mean Normalized Sum of Squared Differences) – нормализованная сумма разностей квадратов;

Reference subset – исходная (эталонная) область изображения (до деформации);

Target subset – предполагаемая (целевая) область изображения (после деформации);

Субпиксельное смещение – вещественное смещение между точками, которые соответствуют пикселям на серии изображений объекта;

Интерполяция – определение промежуточных значений функции по известному дискретному набору значений этой функции.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	12
1.1 Методы нахождения оптического потока .....	12
1.1.1 Дифференциальные методы.....	12
1.1.2 Фазовая корреляция.....	15
1.1.3 Блочные методы.....	16
1.2 Методы интерполяции.....	18
1.2.1 Интерполяция методом ближайшего соседа.....	18
1.2.2 Билинейная интерполяция .....	19
1.2.3 Бикубическая интерполяция.....	20
5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	24
Введение.....	24
5.1 Технология QuaD .....	25
5.2 SWOT-анализ.....	27
5.3 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований .....	28
Вывод .....	30
ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ.....	31

## ВВЕДЕНИЕ

В наши дни наблюдается тенденция к увеличению качества цифровых фотографий, а также к увеличению вычислительной мощности систем. В связи с этим, стало возможно программно реализовать алгоритмы, предложенные еще долгое время назад, для обработки этих цифровых изображений.

Одной из областей, где возможно применение новых технологий, может быть машиностроение. В процессе разработки и изготовления новых деталей необходимо провести их испытание и тестирование. Проверка на их устойчивость к различного рода нагрузкам и другим воздействиям – это один из этапов испытаний деталей. Задача определения минимальной силы воздействия на исследуемый объект, при которой он начнет деформироваться или придет в негодность.

Для того чтобы описать деформационное состояние объекта, создаются математические модели, описывающие поведение этого объекта под воздействием определенных нагрузок. В итоге, получают теоретическое описание физических процессов, протекающих во время эксперимента. Для того чтобы на практике проверить построенную модель, необходимо провести эксперимент над исследуемым объектом. Одним из способов фиксирования результатов эксперимента является съемка на скоростную камеру. Таким образом, на выходе для анализа имеем серию снимков эксперимента, сделанных с определенным интервалом времени, на основании этих снимков необходимо получить численное описание опыта. Первоначальным этапом при решении подобных задач является определение векторов смещений ключевых точек на серии последовательных изображений поверхности материалов.

Целью работы является исследование и программная реализация метода определения векторов смещений (оптического потока).

Объектом исследования является задача определения перемещений на поверхностях материалов. Предметом исследования является обратный композиционный алгоритм Гаусса-Ньютона.

Для достижения цели необходимо решить задачи:

- Исследование существующих алгоритмов по определению перемещений на изображениях и выбор алгоритма для реализации;
- реализация выбранного алгоритма в однопоточном и многопоточном режиме;
- оценка точности и скорости вычислений.

# 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

## 1.1 Методы нахождения оптического потока

Суть оптического потока в том, что для каждой точки исходного изображения  $I_1(x, y)$  находится соответствующая ей точка на втором изображении  $I_2(x + dx, y + dy)$ , где  $(dx, dy)$  – это сдвиг между соответствующими точками изображений. В наше время появилось большое количество техник для его вычисления. Каждая методика имеет свои достоинства и недостатки, поэтому ее выбор, как правило, определяется поставленной задачей. Например, если использовать такие критерии как точность и скорость работы, то они будут иметь обратно пропорциональную зависимость. Если же необходима высокая скорость, то необходимо пренебречь точностью и наоборот. Например, в охранных системах слежения важным фактором является детектирование движения как такового. В таких системах крайне важна скорость работы, так как они работают в реальном времени.

В рассматриваемой нами области исследуется деформационное поведение материалов и элементов инженерных конструкций. В этом случае необходимо точно описать состояние объекта, поэтому важнейшим параметром, которым будем руководствоваться при выборе алгоритма, является точность его работы. Скорость же не является самым важным параметром.

Представим классификацию методов нахождения оптического потока и приведем в пример некоторые из известных методик.

### 1.1.1 Дифференциальные методы

В основе дифференциальных методов лежит вычисление частных производных функции яркости изображения в горизонтальном и вертикальном направлениях. Примером является алгоритм Лукаса-Канаде который предложили Брюс Лукас и Такео Канаде в 1981 году [2].

Предположим, что при переходе от одного кадра к другому яркость пикселей сохраняется (brightness constancy). Таким образом, делается допущение, что яркость пикселей, которые относятся к одному и тому же

объекту, сохраняется в процессе смещения в какую-либо сторону. Это можно записать так:

$$I(x, y, t) = I(x + u_x, y + u_y, t + 1), \quad (1)$$

где  $I$  — функция яркости пикселей от положения на кадре во времени; координаты пикселя в плоскости кадра,  $u_x, u_y$  — это смещение, а  $t$  — это номер кадра в последовательности. Условимся, что между двумя соседними кадрами проходит единичный отрезок времени.

Запишем разложение в ряд Тейлора для  $I(x + u_x, y + u_y, t)$  и сразу отбросим все старшие производные. Вместо первой производной появляется градиент [3]:

$$I(x + u_x, y + u_y, t) = I(x, y, t) + \vec{u}\nabla I(x, y, t), \quad (2)$$

где  $\vec{u} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$  — вектор смещения.

Сделанное допущение (1) эквивалентно:

$$I(x, y, t + 1) = I(x + u_x, y + u_y, t),$$

тогда

$$\begin{aligned} I(x, y, t + 1) &= I(x, y, t) + \vec{u}\nabla I(x, y, t), \\ I(x, y, t) - I(x, y, t + 1) + \vec{u}\nabla I(x, y, t) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Так как между двумя кадрами последовательности проходит единичный интервал времени, то можно сказать, что  $I(x, y, t) - I(x, y, t + 1)$  — это производная по времени. Тогда выражение (3) можно записать как:

$$\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} + \vec{u}\nabla I(x, y, t) = 0.$$

Раскрываем градиент:

$$\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} + u_x \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x} + u_y \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

Получили уравнение, из которого следует, что сумма частных производных должна быть равна нулю. Проблема в том, что уравнение одно, а неизвестных в нем два:  $u_x, u_y$  [3].

Для решения этой проблемы вносится еще одно допущение. Пусть соседние пиксели сдвигаются на одинаковое расстояние. Возьмем фрагмент

изображения  $n \times m$  пикселей, и условимся, что для каждого из  $n \times m$  пикселей сдвиги  $u_x$  и  $u_y$  равны. Тогда получим сразу  $n \times m$  уравнений. В общем случае система не имеет решения, поэтому ищем такие  $u_x$  и  $u_y$ , которые минимизируют ошибку:

$$E(u_x, u_y) = \sum_{i,j} \left[ \frac{\partial I(x,y,t)}{\partial t} + u_x \frac{\partial I(x,y,t)}{\partial x} + u_y \frac{\partial I(x,y,t)}{\partial y} \right]^2. (5)$$

Найдем минимум (5), для этого используем метод наименьших квадратов.

Найдем частные производные  $E(u_x, u_y)$  по  $u_x$  и  $u_y$

$$\frac{\partial E(u_x, u_y)}{\partial u_x} = \sum_{i,j} \left[ u_x \left( \frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 + u_y \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial I}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial I}{\partial x} \right] = 0,$$

$$\frac{\partial E(u_x, u_y)}{\partial u_y} = \sum_{i,j} \left[ u_x \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial I}{\partial x} + u_y \left( \frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial I}{\partial y} \right] = 0.$$

В матричном виде:

$$M\vec{u} = \vec{b},$$

где

$$M = \begin{bmatrix} \sum_{i,j} \left( \frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 & \sum_{i,j} \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial I}{\partial x} \\ \sum_{i,j} \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial I}{\partial x} & \sum_{i,j} \left( \frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 \end{bmatrix}$$

$$\vec{b} = - \begin{bmatrix} \sum_{i,j} \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial I}{\partial x} \\ \sum_{i,j} \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial I}{\partial y} \end{bmatrix},$$

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix},$$

Если матрица  $M$  обратима (имеет ранг 2), то можем вычислить  $u_x$  и  $u_y$ , при соблюдении условия минимизации ошибки  $E$ :

$$\vec{u} = M^{-1}\vec{b}.$$

Данный метод нахождения оптического потока имеет три основополагающих допущения, которые хоть и дают возможность вычислить оптический поток, но также и вносят погрешность в вычисления.

Дифференциальные методы, как правило, являются локальными, то есть для того чтобы определить смещение определенного пикселя используется только область вокруг этого пикселя — локальная окрестность. Следовательно, невозможно определить смещение внутри достаточно больших равномерных областей изображения [3].

Данный метод позволяет определить перемещение в пределах одного пикселя, т.к. происходит попытка определения изменения значения функции в окрестности рассматриваемой точки, но производная дает представление о бесконечно малой окрестности [3].

Другим слабым местом описанного метода является то, что анализируются не гладкие непрерывные функции, а с произвольные, к тому же дискретные. Поэтому на некоторых фрагментах изображения метод может работать плохо, так как интенсивность может изменяться неравномерно, например, из-за шумов, или на границах объектов.

Дифференциальный подход к вычислению оптического потока может быть непрактичен в связи с присутствием шумов на изображениях или недостаточным количеством изображений в последовательности.

### 1.1.2 Фазовая корреляция

Фазовая корреляция опирается на частотную область представления данных и, как правило, рассчитывается путем преобразований Фурье. Данный подход использует известное свойство сдвига Фурье: сдвиг в пространственной области двух изображений приводит к различию линейной фазовой составляющей в частотной области преобразования Фурье (FT).

Фазовые методы предполагают сохранение фазы на каждом канале полосы [11]. Градиент фазы в упрощенном виде:

$$\nabla \phi(\vec{x}_1 t) \cdot \vec{u} + \phi_t(\vec{x}, t) = 0,$$

может быть с объединен с другими методами для нахождения оптического потока. На практике, поскольку фаза представляет собой функцию, определенную однозначно только на интервале с периодом  $2\pi$ , разделить дифференциал сложно. Вместо этого, удобно использовать следующие тождества для вычисления производных по направлению и различию во времени:

$$\frac{\partial \phi(\vec{x}, t)}{\partial x} = \frac{\text{Im}[r_x(\vec{x}, t)r^*(\vec{x})]}{|r(\vec{x})|^2},$$

$$\delta \phi(\vec{x}, t) = \arg[p(\vec{x}, t + 1)r^*(\vec{x} \cdot z)],$$

где  $\text{Im}[r]$  – мнимая часть от  $r$ ,  $r^*$  - комплексно-сопряженное значение  $r$  и  $r_x \equiv \frac{\partial r}{\partial x}$ .

В сравнении с фазой,  $r(\vec{x}, t)$  проще дифференцировать и интерполировать[11].

В отличие от многих алгоритмов пространственной области метод фазовой корреляции является устойчивым к шуму, перекрытию объектов и другим дефектам, характерным для медицинских или спутниковых снимков. Однако, для периодических изображений (таких как шахматная доска), фазовые корреляции могут давать неоднозначные результаты нескольких пиков в результате, что приводит к неоднозначности. Этот метод может быть расширен для определения поворотов и масштабирования через использование лог-полярных координат.

### 1.1.3 Блочные методы

Данные методы позволяют поставить соответствие блокам на последовательностях видеок кадров в задаче определения движения. Основополагающее предположение блочных методов состоит в том, что образцы, соответствующие объектам и фону в кадре видеопоследовательности, перемещаются в пределах кадра, образуя соответствующие объекты на последующем кадре. Эти методы могут быть использованы для того, чтобы обнаруживать временную избыточность в последовательности видеок кадров, увеличивая эффективность межкадрового сжатия, определяя содержимое блока путем ссылки на содержимое известного блока, который минимально отличается.



Алгоритм сопоставления блоков включает в себя разделение текущего кадра видео на блоки и сравнение каждого из блоков с соответствующим блоком и прилегающих к нему соседей в соседнем кадре из видео (рисунок 1.1). В результате создается вектор, который моделирует движение блока из одного места в другое. Это смещение, рассчитанное для всех блоков, содержащих кадр, образует движение в оцененном кадре.

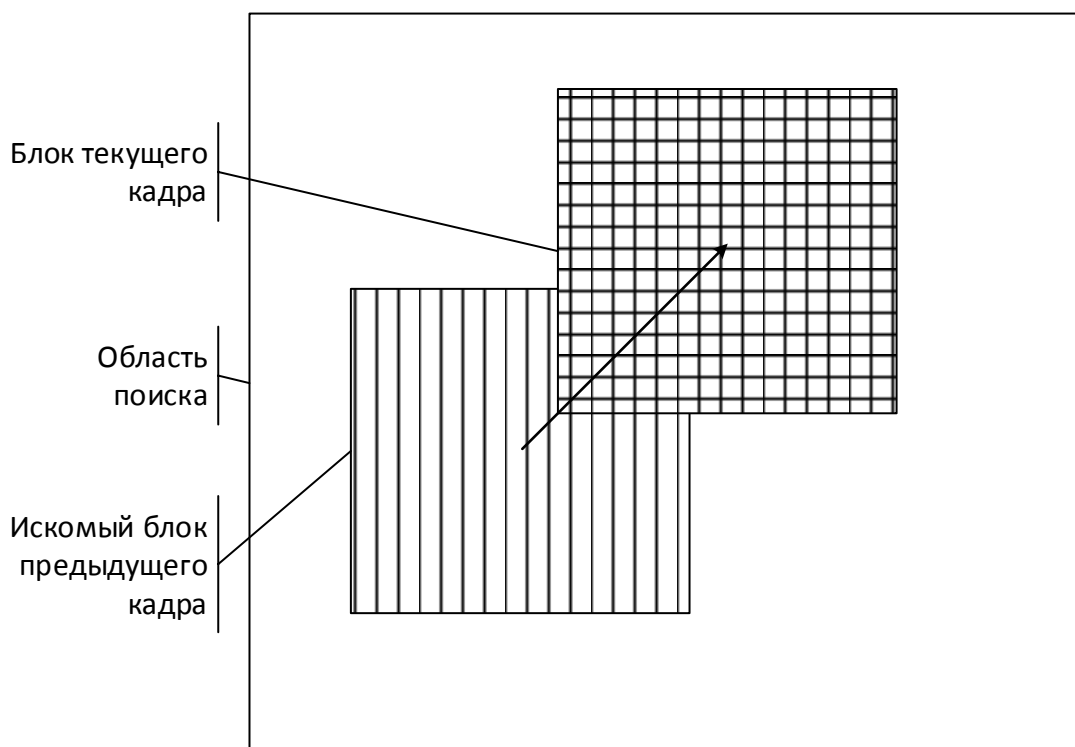


Рисунок 1.1. Сопоставление блоков соседних кадров

В качестве критерия для сравнения при поиске смещения в различных алгоритмах используются различные параметры. Приведем некоторые из них:

Среднее отклонение (mean absolute difference):

$$MAD = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} |C_{ij} - R_{ij}|$$

Среднеквадратичное отклонение (mean squared error):

$$MSE = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} (C_{ij} - R_{ij})^2$$

где  $N$  – размер блока,  $C_{ij}$  и  $R_{ij}$  – сравниваемые пиксели на блоке текущего кадра и блоке соседнего кадра соответственно. Таким образом, находят сдвиг, минимизирующий норму разности изображений в окне. В чистом виде такой алгоритм будет работать долго и неустойчиво к поворотам и прочим искажениям. Некоторые из них, например Three Step Search (TSS) используется в кодеках MPEG1 и H.261 для сжатия видеопотока.

## 1.2 Методы интерполяции

В рассмотренных методах смещение вычисляется с субпиксельной точностью. В некоторых методах для вычислений необходимо знать значения яркости на изображении в точке с вещественными координатами. Так как изображения представляют собой двумерный массив из пикселей, то мы имеем дискретный набор значений яркости. Значит, для того чтобы найти значение яркости в промежуточной точке, необходимо использовать интерполяцию. Рассмотрим некоторые способы интерполяции.

### 1.2.1 Интерполяция методом ближайшего соседа

Метод интерполяции, при котором в качестве промежуточного значения выбирается ближайшее известное значение функции. Данный метод является самым простым методом интерполяции. На рисунке 1.2 приведен пример, на котором значение функции  $f(x, y)$  в окрестностях точки принимается равным значению функции в этой точке и выделены штриховкой.

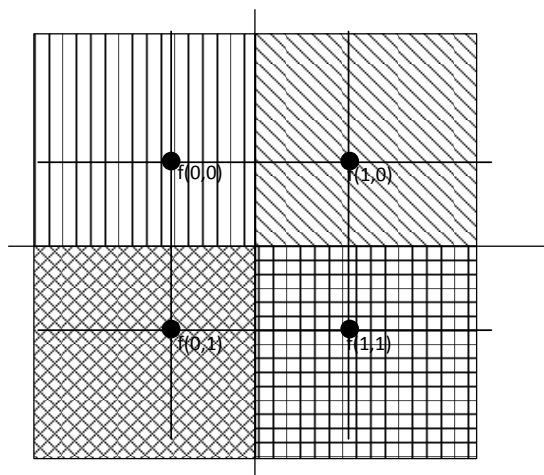


Рисунок 1.2. Интерполяция методом ближайшего соседа

## 1.2.2 Билинейная интерполяция

Рассмотрим одномерный случай. Для данного метода используется алгебраический двучлен  $P(x) = ax + b$  функции  $f(x)$ , заданной в двух точках  $x_1, x_2$ . График представлен на рисунке 1.3.

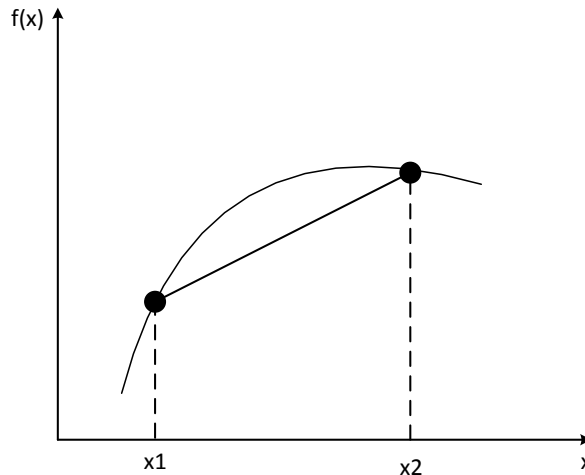


Рисунок 1.3. Одномерный случай линейной интерполяции

Уравнение прямой примет вид:

$$\frac{y-f(x_0)}{f(x_1)-f(x_0)} = \frac{x-x_0}{x_1-x_0},$$

откуда:

$$f(x) \approx y = f(x_0) + \frac{f(x_1)-f(x_0)}{x_1-x_0}(x-x_0).$$

Это и есть формула линейной интерполяции.

Билинейная интерполяция является расширением линейной интерполяции для функции двух переменных  $f(x, y)$  [4].

Сначала в точке  $x, y$  сначала находится значение вспомогательных точек  $R_1 = f(x, y_1)$ ,  $R_2 = f(x, y_2)$  с помощью линейной интерполяции вдоль оси абсцисс. Затем, используя полученные значения вспомогательных точек, аналогично находится интерполируемое значение вдоль оси ординат:

$$f(x, y) \approx \frac{y_2-y}{y_2-y_1}f(R_1) + \frac{y-y_1}{y_2-y_1}f(R_2).$$

Данный метод получил распространение в компьютерной графике в процессе масштабирования изображения.

### 1.2.3 Бикубическая интерполяция

Поверхность, полученная в результате применения данного метода, является гладкой функцией, в отличие от поверхностей, полученных в результате билинейной интерполяции или интерполяции методом ближайшего соседа.

Рассмотрим одномерный случай – кубическую интерполяцию [ссылка]. Если значение функции  $f(x)$  и её производных известно в точках  $x=0$ ,  $x=1$ , тогда функция может быть интерполирована в интервале  $[0,1]$  используя полином третьего порядка.

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad (6)$$

$$f'(x) = 3ax^2 + 2bx + c.$$

Откуда

$$f(0) = d,$$

$$f'(0) = c,$$

$$f(1) = a + b + c + d,$$

$$f'(1) = 3a + 2b + c.$$

Можно выразить как

$$a = 2f(0) - 2f(1) + f'(0) + f'(1),$$

$$b = -3f(0) + 3f(1) - 2f'(0) - f'(1),$$

$$c = f'(0),$$

$$d = f(0).$$

Так как мы имеем дело с изображениями, то значения производных нам неизвестно. Мы принимаем за это значение уклон линии между предыдущей и текущей точкой. Тогда, если мы имеем значения интенсивности в точках  $p_1, p_2, p_3, p_4$ , имеющих координаты  $x_1 = -1, x_2 = 0, x_3 = 1, x_4 = 2$  соответственно, то

$$f(0) = p1,$$

$$f'(0) = \frac{p2-p0}{2},$$

$$f(1) = p2,$$

$$f'(1) = \frac{p^3 - p^1}{2},$$

В результате имеем:

$$a = -\frac{1}{2}p_0 + \frac{3}{2}p_1 - \frac{3}{2}p_2 + \frac{1}{2}p_3,$$

$$b = p_0 - \frac{5}{2}p_1 + 2p_2 - \frac{1}{2}p_3,$$

$$c = -\frac{1}{2}p_0 + \frac{1}{2}p_2,$$

$$d = p_1.$$

Полученные коэффициенты подставляем в (6) и можем получить интерполированное значение функции.

Бикубическая интерполяция это кубическая интерполяция в двух измерениях [4]. Если нам известно 16 точек  $p_{ij}$  таких, что

$$i, j \in [-1; 3],$$

то тогда мы можем интерполировать в диапазоне  $[0,1]$  сначала в одном измерении, затем в другом:

$$g(x, y) = f(x, f(y, p_{00}, p_{01}, p_{02}, p_{03}), f(y, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13}), \\ f(y, p_{20}, p_{21}, p_{22}, p_{23}), f(y, p_{30}, p_{31}, p_{32}, p_{33})) \quad (7)$$

Если рассматривать функцию (7) как многомерный полином, то получим:

$$g(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j, \quad (8)$$

где

$$a_{00} = p_{11},$$

$$a_{01} = -\frac{1}{2}p_{10} + \frac{1}{2}p_{12},$$

$$a_{02} = p_{10} + \frac{5}{2}p_{11} + 2p_{12} - \frac{1}{2}p_{13},$$

$$a_{03} = -\frac{1}{2}p_{10} + \frac{3}{2}p_{11} - \frac{3}{2}p_{12} + \frac{1}{2}p_{13},$$

$$a_{10} = -\frac{1}{2}p_{01} + \frac{1}{2}p_{21},$$

$$a_{11} = \frac{1}{4}p_{00} - \frac{1}{4}p_{02} - \frac{1}{4}p_{20} + \frac{1}{4}p_{22},$$

$$a_{12} = -\frac{1}{2}p_{00} + \frac{5}{4}p_{01} - p_{20} + \frac{1}{4}p_{03} + \frac{1}{2}p_{20} - \frac{5}{4}p_{21} + p_{22} - \frac{1}{4}p_{23},$$

$$a_{13} = \frac{1}{4}p_{00} - \frac{3}{4}P_{01} + \frac{3}{4}p_{02} - \frac{1}{4}p_{03} - \frac{1}{4}p_{20} + \frac{3}{4}p_{21} - \frac{3}{4}p_{22} + \frac{1}{4}p_{23},$$

$$a_{20} = p_{01} - \frac{5}{2}P_{11} + 2p_{21} - \frac{1}{2}p_{31},$$

$$a_{21} = -\frac{1}{2}p_{00} + \frac{1}{2}p_{02} + \frac{5}{4}p_{10} - \frac{5}{4}p_{12} - p_{20} + p_{22} + \frac{1}{4}p_{30} - \frac{1}{4}p_{32},$$

$$a_{22} = p_{00} - \frac{5}{2}p_{01} + 2p_{02} - \frac{1}{2}p_{03} - \frac{5}{2}p_{10} + \frac{25}{4}p_{11} - 5p_{12} + \frac{5}{4}p_{13} + 2p_{20} - 5p_{21} + 4p_{22} - p_{23} - \frac{1}{2}p_{30} + \frac{5}{4}p_{31} - p_{32} - \frac{1}{4}p_{33},$$

$$a_{23} = -\frac{1}{2}p_{00} + \frac{3}{2}p_{01} - \frac{3}{2}p_{02} + \frac{1}{2}p_{03} + \frac{5}{2}p_{10} - \frac{15}{4}p_{11} + \frac{15}{4}p_{12} - \frac{5}{4}p_{13} - 2p_{20} + 3p_{21} - 3p_{22} + p_{23} + \frac{1}{4}p_{30} - \frac{3}{4}p_{31} + \frac{3}{4}p_{32} - \frac{1}{4}p_{33},$$

$$a_{30} = -\frac{1}{2}p_{01} + \frac{3}{2}P_{11} - \frac{3}{2}p_{21} + \frac{1}{2}p_{31},$$

$$a_{31} = \frac{1}{4}p_{00} - \frac{1}{4}P_{02} - \frac{3}{4}p_{10} + \frac{3}{4}p_{12} + \frac{3}{4}p_{20} - \frac{3}{4}p_{22} - \frac{1}{4}p_{30} + \frac{1}{4}p_{32},$$

$$a_{32} = -\frac{1}{2}p_{00} + \frac{5}{4}p_{01} - p_{02} + \frac{1}{4}p_{03} + \frac{3}{2}p_{10} - \frac{15}{4}p_{11} + 3p_{12} - \frac{3}{4}p_{13} - \frac{3}{2}p_{20} + \frac{15}{4}p_{21} - 3p_{22} + \frac{3}{4}p_{23} + \frac{1}{2}p_{30} - \frac{5}{4}p_{31} + p_{32} - \frac{1}{4}p_{33},$$

$$a_{33} = \frac{1}{4}p_{00} - \frac{3}{4}p_{01} + \frac{3}{4}p_{02} - \frac{1}{4}p_{03} - \frac{3}{4}p_{10} - \frac{9}{4}p_{11} - \frac{9}{4}3p_{12} + \frac{3}{4}p_{13} + \frac{3}{4}p_{20} - \frac{9}{4}p_{21} + \frac{9}{4}p_{22} - \frac{3}{4}p_{23} - \frac{1}{4}p_{30} + \frac{3}{4}p_{31} - \frac{3}{4}p_{32} + \frac{1}{4}p_{33}$$

интерполяционные коэффициенты. Нужно отметить, что для того, чтобы интерполировать значения на участке от  $[0,0]$  до  $[1,1]$  необходимо только один раз вычислить коэффициенты полинома (8).

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА**  
**«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И**  
**РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8В2А	Береснев Алексей Павлович

Институт	Кафедра	
Уровень образования	Направление/специальность	09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
	Бакалавриат	

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	На основании информации, представленной в научных статьях и публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах, определить методику расчета экономической эффективности.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценка ресурсной, социальной эффективности НИ и потенциальных рисков.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Оценка плана проведения НИ
2. QuaD-технология
3. Матрица SWOT
4. Морфологический анализ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. МЕН	Николаенко В.С.	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8В2А	Береснев Алексей Павлович		

## **5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

### **Введение**

В данной работе рассматривается разработка, которая представляет из себя библиотечный модуль для консольного приложения. Созданная библиотека содержит в себе функции реализующие алгоритм для нахождения векторов смещений. Данный алгоритм использует в качестве входных данных серии изображений проведения опыта над неким образцом. Главная особенность разработки состоит в том, что смещения областей на изображениях вычисляются с большой точностью, что позволяет использовать её в широком кругу задач. В частности, возможно использование в машиностроении при анализе и исследовании новых и тестировании изготовленных объектов и конструкций. Так как данная разработка позволяет на основании произведенных вычислений смещений оценить деформационное состояние материалов и объектов. Рассматриваемая разработка написана на высокоуровневом кроссплатформенном языке, что позволяет использовать её на различных операционных системах.

Целью данного раздела выпускной квалификационной работы является создание и проектирование конкурентоспособных разработок, отвечающих требованиям в области ресурсосбережения и ресурсоэффективности. Также целью является оценка коммерческого потенциала разработки, перспективности проекта.

Чтобы достичь эти цели проводится QuaD и SWOT анализы. А для определения возможных альтернатив проведения исследования используется морфологический анализ.

QuaD позволяет проанализировать разработку с использованием взвешенных значений различных показателей. Эти показатели разбиты на две группы:

- показатели оценки коммерческого потенциала разработки;



- показатели оценки качества разработки
- Выбор показателей зависит от специфики самого проекта с учетом его технических и экономических особенностей.

SWOT позволяет комплексно описать разработку с точки зрения сильных и слабых сторон. Применяется для анализа внешней и внутренней среды проекта. Проводится в несколько этапов и для анализа используются следующие понятия:

1. сильные стороны;
2. слабые стороны;
3. возможности;
4. угрозы.

Морфологический подход основывается том, что необходимо исследовать все возможные варианты строения объекта исследования. Получают ряд решений, комбинируя варианты. Реализация включает этапы:

- 1 точной формулировки проблемы исследования;
- 2 раскрытие весомых морфологических данных объекта исследования;
- 3 раскрытие вероятных разновидностей по всякой из характеристик
- 4 выбор более предпочтительных функционально определенных заключений.

### **5.1 Технология QuaD**

Чтобы проанализировать разработку были выделены следующие критерии оценки. Показатели качества разработки:

1. Надежность – способность системы работать без отказа и ошибок во время обработки текущих задач. Способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения.

2. Качество пользовательского интерфейса – удобство работы пользователя с системой, интуитивность использования элементов и их адекватность, возможность запомнить расположение элементов.

3. Точность вычислений – способность системы обеспечить определенную точность вычислений на заданных данных и минимизация

случайных и систематических ошибок. Предоставление результирующих данных с заданной точностью.

4. Время обработки – необходимый интервал времени, в течении которого система обрабатывает данные.

5. Универсальность выполняемых задач – способность системы производить операции над разнородными данными, независимость от типа исследуемого объекта, однородность представленных результатов.

6. Требования к ресурсам – требования, которые выдвигает построенная система к аппаратно-программным средствам, на которых она производит вычисления.

Показатели коммерческого потенциала разработки:

1. Перспективность рынка – оценка заинтересованности клиентов к данной разработке в рассматриваемом сегменте рынка

2. Законченность работы – характеризует ту стадию разработки, на которой находится система.

3. Конкурентоспособность – свойство, характеризующее степень удовлетворения разработкой в сравнении с аналогичными, представляемыми на данном рынке

4. Доступность – свобода продавать на рынке.

5. Финансовая эффективность – соотношение реальной или предполагаемой прибыли к затратам.

Таблица 5.1 – Оценочная карта

Критерии оценки	Вес	Баллы	Макс. балл	Отн. Знач.	Ср.-взвеш. знач.
Показатели оценки качества разработки					
1. Надежность	0,1	60	100	0,6	0,06
2. Качество пользовательского интерфейса	0,05	30	100	0,3	0,015
3. Точность вычислений	0,24	90	100	0,9	0,216
4. Время обработки	0,1	60	100	0,6	0,06

5. Универсальность выполняемых задач	0,15	80	100	0,8	0,12
6. Требования к ресурсам	0,2	50	100	0,5	0,1
<b>Показатели оценки коммерческого потенциала разработки</b>					
1. Перспективность рынка	0,01	90	100	0,9	0,009
2. Законченность работы	0,05	50	100	0,5	0,025
3. Конкурентоспособность	0,05	70	100	0,7	0,035
4. Доступность	0,05	60	100	0,6	0,03
5. Финансовая эффективность	0,05	70	100	0,7	0,035
<b>Итого:</b>					<b>0,705</b>

Перспективность и качество разрабатываемого продукта технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum V_i B_i,$$

где  $P_{cp}$  – взвешенное значение показателя перспективности и качества разработанного продукта,  $V_i$  – вес показателя (в долях единицы),  $B_i$  – взвешенное значение  $i$ -го показателя.

Полученная оценка равна 0,705, что соответствует проекту, перспективность которого выше среднего.

## 5.2 SWOT-анализ

Результаты анализа представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты SWOT-анализа

	<b>Сильные стороны</b> 1. Высокая точность 2. Кроссплатформенность 3. Использование современных технологий 4. Востребованность	<b>Слабые стороны</b> 1. Низкая скорость работы 2. Сложный интерфейс пользователя 3. Сложность интерпретации результатов
<b>Возможности</b> 1. Возможность улучшения существующего алгоритма 2. Возможность коммерциализации разработки	В2С1: коммерциализация разработки в сочетании с высокой точностью может обеспечить прибыль, улучшить конкурентоспособность и снабдить средствами для дальнейших улучшений	В1Сл1: возможность улучшения алгоритма позволит увеличить скорость работы.

<p><b>Угрозы</b></p> <p>1. Ошибки в реализации</p> <p>2. Недостаточная точность в сравнении с конкурентами</p>	<p>У1С1: несмотря на высокую точность алгоритма, ошибки при реализации могут привести к катастрофическим последствиям</p> <p>У2С4: хотя в настоящее время существует необходимость в данных разработках, но недостатки по точности могут привести к тому, что потребители будут выбирать конкурирующие продукты</p>	<p>У1Сл1: ошибки при реализации могут привести не только к некорректным результатам, но также и к низкой скорости, вкуче оба фактора являются крайне негативными и могут привести к отказу от использования разработанной системы</p>
--	---	---

Таким образом можно прийти к выводу, что основными рисками при дальнейшей разработке и продвижении системы является возможные ошибки при реализации и недостаточная точность вычислений, предоставляемых разработкой.

### **5.3 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований**

В данной работе рассматривается реализация алгоритма нахождения векторов смещений. Существует множество методик для решения данной задачи. Для анализа уместно использовать морфологический подход как инструмент для определения возможных альтернатив, которые на первый взгляд кажутся незаметными.

Раскроем наиболее значимые характеристики объекта исследования.

Для реализации используется алгоритм нахождения оптического потока. Существует классификация этих алгоритмов, каждый из которых имеет свои недостатки и преимущества.

Дифференциальный метод хоть и имеет высокую точность, но на зашумленных изображениях этот метод работает очень плохо. Фазовая

корреляция лучше работает с зашумленными изображениями. Блочные методы хоть и похожи на корреляционные методы, но тоже имеют свои недостатки.

Для языка реализации может использоваться как платформонезависимый язык C#, так и язык высокого уровня C++, который имеет большие возможности, как и по скорости, так и по платформонезависимости.

Так как реализуемый метод должен иметь высокую точность, то смещение должно находиться субпиксельно, т.о. должна использоваться интерполяция. По точности самую высшую имеет бикубическая интерполяция, но она имеет низкую скорость работы. В сравнении с ней, линейная проста, но не обеспечивает достаточную точность.

Для удобства, выходные данные должны быть представлены в удобном формате. Из возможных, данные могут быть представлены в численном варианте, в виде текстового файла, или же в виде визуализации, в виде изображения, на которое нанесены вектора. Существует альтернативный метод, который сочетает в себе разнородные данные – иерархическая структура данных. В результате, выходные данные могут храниться вместе с входными и могут быть представлены визуализатором в дальнейшем или же другими аналогичными программами.

Для многопоточной реализации может быть использован параллелизм как с точки зрения процессора, так и с точки зрения графического процессора. Существует большое множество технологий.

Далее представлена таблица, в которой описаны различные морфологические характеристики и их возможные варианты.

Таблица 5.3 – Морфологическая матрица

	1	2	3
А. Алгоритм	Дифференциальный	Фазовая корреляция	Блочные методы
Б. Язык реализации	C++	Java	C#
В. Функция интерполяции	B-spline	Бикубическая	Линейная
Г. Представление	Текстовый файл	Изображение	Иерархическая структура данных

ВЫХОДНЫХ данных			
Д. Многопоточная библиотека	OpenMP	OpenCL	OpenCV
Е. Оценка качества реализации	Скорость выполнения	Точность вычислений	

### **Вывод**

С помощью рассмотренных методов был проведен практический анализ проекта и выявлен его коммерческий потенциал и перспективность. Проведен SWOT и QuaD анализ разработанной системы. Дополнительно проведен морфологический анализ для выявления перспективных направлений проведения исследований.

В результате SWOT-анализа выявлены сильные и слабые стороны разработанной системы, позитивные и негативные риски, связанные с ее жизненным циклом. Выявлены и описаны зависимости между сильными и слабыми сторонами и рисками.

В ходе QuaD-анализа составлена оценочная карта разработанного продукта. В результате проект получил достаточно высокую оценку.

Морфологический подход определения возможных альтернатив проведения научных исследований показал, что у проекта есть множество путей развития, при этом каждый из вариантов имеет свои преимущества.

## ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ

1. Реализация обратного композиционного алгоритма Гаусса-Ньютона для построения полей векторов перемещений в задаче оценки деформационного состояния материалов [Электронный ресурс] / А. П. Береснев, Ю. А. Болотова, П. С. Любутин // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 9-13 ноября 2015 г. в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт кибернетики (ИК) ; под ред. Т. Е. Мамоновой [и др.]. — 2016. — Т. 1. — [С. 111-112]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.

Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/17096>

2. Вычисление оптического потока [Электронный ресурс] / А.П. Береснев, науч. рук. Ю. А. Болотова // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г.Томск, 25-26 марта 2015 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт кибернетики ; ред. кол. А. В. Лиепиньш [и др.]. — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — [С. 150-152]. — Заглавие с титульного листа. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader.  
Режим доступа: [http://mic.tpu.ru/sbornik\\_2015.pdf](http://mic.tpu.ru/sbornik_2015.pdf)