



На правах рукописи

БУГАЕНКО ЕЛЕНА ИВАНОВНА

**МЕТОД, АЛГОРИТМ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ
УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ПАНОРАМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА
ОСНОВЕ МЕТРИЧЕСКИХ ДЕРЕВЬЕВ**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО
«Юго-Западный государственный университет»
на кафедре «Вычислительная техника».

Научный руководитель:	заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор Титов В.С.
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор Леньшин А.В. кандидат технических наук Спеваков А.Г.
Ведущая организация:	Учреждение Российской Академии Наук Институт проблем информатики РАН

Защита диссертации состоится «19» июля 2011 г. в 16.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.105.02 при ГОУ ВПО Юго-Западный государственный университет по адресу: 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета.

Автореферат разослан «18» июня 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций Д 212.105.02,
кандидат технических наук



Титенко Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Вычислительные устройства, преобразующие представленную в виде изображений информацию об объекте управления, являются основными элементами систем управления и находят все большее применение в различных областях науки и техники для контроля, принятия решений, планирования и проведения расчетов. Особое значение для представления визуальной информации имеют панорамные изображения, позволяющие наблюдать непрерывную сцену целиком вместо просмотра разрозненных ее частей. Несмотря на бурное развитие элементной базы вычислительной техники, в частности многоэлементных приемников изображений, существуют технологические и физические ограничения на размер получаемого изображения, но для решения некоторых прикладных задач необходимо получение изображений значительно большего размера. Для определенных областей применения, например картографии, создание панорамных изображений является неотъемлемой операцией обработки изображений. В медицине панорамные изображения используются при постановке диагнозов по онкологическим заболеваниям, при ортопантомографии в стоматологии и при других рентгеновских исследованиях.

Решение задачи формирования панорамных изображений характеризуется рядом сложностей, связанных с искажениями геометрии исходных цифровых изображений и различиями в условиях съемки рабочей сцены и временными ограничениями. В связи с этим целесообразна разработка и применение специализированных вычислительных устройств, позволяющих производить формирование панорамных изображений с коррекцией искажений геометрии, инвариантно к изменению масштаба, ориентации и освещенности исходных изображений, обеспечивающих повышенную производительность.

В настоящее время достигнут значительный прогресс в решении указанной задачи и наибольший вклад в развитие методов и устройств формирования панорамных изображений, а также методов выделения, описания и сопоставления особенностей изображений как наиболее важных этапов обработки изображений, внесли С. Harris, М. Brown, Н. Moravec, М. Stephens, J. Shi, С. Tomasi, Н. Wang, М. Brady, R.I. Hartley, А. Zisserman, Р. Torr, А. Zisserman, В. Triggs, R. Szeliski, М. Irani, R. Radke, Р. Ramadge, Т. Echigo, S. Iisaku, Т. Lindeberg, K. Mikolajczyk, С. Schmid, J. Matas, О. Chum, М. Urban, Т. Pajdla, D. Capel, D. Lowe, Н. Bay, Т. Tuytelaars, L. Van Gool, Сойфер В.А., Потапов А. А., Пахомов А. А., Никитин С. А., Гуляев Ю. В., Фурман Я.А. Существенные результаты в данной области получены в отечественных работах, выполненных в Институте прикладной математики РАН, Московском государственном университете, Московском физико-техническом институте и в других организациях. Однако большинство из известных методов и устройств имеют существенные недостатки, такие как низкая производительность, являющаяся следствием большой вычислительной сложности алгоритмов, и низкая точность результирующих изображений, обусловленная наличием случайных искажений различной природы на исходных изображениях. Кроме того, не в полной мере решена задача сопоставления объектов изображений, имеющих схожие характеристики, что также обуславливает понижение точности панорамных изображений.

Таким образом, объективно имеет место **противоречие** между необходимостью повышения точности панорамных изображений и производительности устройств формирования панорамных изображений и возможностями известных методов и устройств.

В этой связи **актуальной научно-технической задачей является** разработка методов, алгоритмов и специализированных вычислительных устройств, позволяющих

формировать панорамные изображения при различных условиях съемки рабочей сцены с учетом геометрических искажений, отличающихся повышенными точностью сопоставления особенностей изображений и производительностью.

Перспективным подходом к решению этой задачи является использование методов коррекции радиальной дисторсии, метрических деревьев для сохранения связей между особенностями исходных изображений, что позволяет повысить точность и снизить вычислительную сложность алгоритма сопоставления особенностей за счет учета их взаимосвязей. Повышение производительности обеспечивается введением специализированных элементов, аппаратной реализацией и распараллеливанием основных операций обработки изображений.

Диссертационная работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», которые ведутся в Юго-Западном государственном университете (Госконтракт П2398 от 17.11.2009 г.) «Создание интеллектуальной оптико-электронной системы для оцувствления и управления транспортным роботом», при финансовой поддержке программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.») по теме «**Разработка способов и устройства повышения качества изображений**» (госконтракт №7463р/10265 от 04.12.2009 г.).

Цель работы состоит в разработке метода, алгоритма и специализированного, характеризующегося повышенной производительностью, вычислительного устройства формирования панорамных изображений на их основе, обеспечивающих увеличение точности панорамных изображений за счет коррекции радиальной дисторсии, являющейся основным источником геометрических искажений, и использования алгоритма сопоставления на базе метрических деревьев, который позволяет учитывать связи между особенностями изображений.

Задачи исследования, решаемые в работе:

1. Сравнительный анализ существующих методов и устройств формирования панорамных изображений и обоснование необходимости создания метода, алгоритма и специализированного вычислительного устройства формирования панорамных изображений высокой точности.
2. Разработка математической модели специализированного вычислительного устройства формирования панорамных изображений на основе использования метрических деревьев для хранения информации об особенностях изображений, учитывающей влияние радиальной дисторсии.
3. Создание метода и алгоритма формирования панорамных изображений с коррекцией искажений, вызванных радиальной дисторсией, инвариантных к различным условиям съемки исходных изображений.
4. Разработка структурно-функциональной организации специализированного вычислительного устройства формирования панорамных изображений.

Новыми научными результатами и положениями, выносимыми на защиту, являются:

1. Математическая модель специализированного вычислительного устройства формирования панорамных изображений, обеспечивающая повышенную точность панорамных изображений за счет коррекции исходных изображений от влияния радиальной дисторсии и использования специальных структур данных для хранения информации об особенностях изображений при сопоставлении.
2. Метод и алгоритм формирования панорамных изображений, основанные на использовании метрических деревьев, характеризующиеся пониженной

вычислительной сложностью и повышенной точностью, отличающиеся возможностью параллельной обработки данных.

3. Структурно-функциональная организация специализированного вычислительного устройства формирования панорамных изображений, особенностью которого является разработка и введение элементов, реализующих параллельную обработку данных.

Объект исследования – средства формирования панорамных изображений.

Предмет исследования – методы, алгоритмы и устройства обработки изображений и формирования панорамных изображений.

Методы исследования. В работе использованы методы цифровой обработки сигналов и изображений, математического моделирования, распознавания изображений объектов и анализа дискретных изображений.

Практическая ценность работы состоит в том, что ее результаты являются основой для разработки класса специализированных вычислительных устройств формирования панорамных изображений, применение которых возможно в системах: управления и контроля технологических процессов, сбора картографической информации, видеонаблюдения и в телемедицинских диагностических комплексах.

Разработанный метод создания панорамных изображений характеризуется возможностью реализации как на программном, так и на аппаратном уровне. Особенностью метода является наличие ряда параметров, обеспечивающих баланс точности сопоставления особенностей на исходных изображениях, производительности и аппаратных затрат в зависимости от условий применения.

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «ЯНДЕКС» в прототипах разрабатываемых продуктов и используются в учебном процессе Юго-Западного государственного университета на кафедре ВТ по дисциплине «Архитектура систем обработки, анализа и интерпретации данных».

Соответствие паспорту специальности. Согласно паспорту специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует следующим областям исследования:

1. Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления.

2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на международных и российских конференциях: Всероссийская конференция по проблемам информатики, физики и химии (г. Москва, РУДН, 2005 г.); Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание 2005, 2008, 2010» (г. Курск, Курский государственный технический университет, 2005, 2008, 2010 гг.); «Молодежь и XXI век: 2005, 2006, 2007» (г. Курск, Курский государственный технический университет, 2005, 2006, 2007 гг.), Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР - 2007» (г. Томск, 2007 г.), Международная научно-техническая конференция «Медико-экологические технологии-2007» (г. Курск, Курский государственный технический университет, 2007 г.), Международная конференция «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии» (г. Йошкар-Ола, 2007 г.), Международная научно-

техническая конференция «Диагностика - 2009» (г. Курск, Курский государственный технический университет 2009 г.), а также на научно-технических семинарах кафедры «Вычислительная техника» с 2005 по 2011 годы.

Публикации. Основные результаты выполненных исследований и разработок опубликованы в 15 печатных работах, в том числе в 3 статьях. Среди них: 3 статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень журналов и изданий, рекомендуемых ВАК РФ, а также 3 патента Российской Федерации.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателем предложены: в [3, 5, 10, 12, 15] – метод формирования панорамных изображений; в [7, 8, 9] – метод и устройства создания панорамных изображений на основе поиска особенностей с коррекцией геометрических искажений; в [1, 2, 4, 6, 9, 13, 14] – методы и устройства автоматического определения и коррекции радиальной дисторсии.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 76 наименований, изложена на 147 страницах и поясняется 65 рисунками и 8 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведен анализ существующих методов и устройств формирования панорамных изображений, который позволил установить их основные недостатки: низкая точность и скорость сопоставления особенностей на исходных изображениях и низкая производительность.

Низкая точность сопоставления обусловлена использованием данных, полученных из исходных искаженных радиальной дисторсией изображений, и применением алгоритмов сопоставления, не учитывающих специфику анализируемых данных. Существующие алгоритмы сопоставления, применяемые при сопоставлении особых точек SIFT (Scale-invariant feature transform) или SURF (Speed-Up Robust Features), принимают в расчет только информацию об окрестности особой точки (дескриптор), но не используют информацию о взаимном расположении особых точек на изображении, поэтому они имеют высокую вероятность ошибочных сопоставлений, что приводит к выполнению дополнительных действий, таких как фильтрация ложных сопоставлений, как в работе Кудряшова А.П., или увеличению количества итераций при подборе трехмерной модели снимаемой сцены, что в целом негативно сказывается на производительности. Кроме того, производительность снижается из-за необходимости оценки всех возможных вариантов сопоставления.

По результатам проведенного исследования сделан вывод о необходимости разработки новых алгоритмов, методов и устройств формирования панорамных изображений высокой точности, характеризующихся повышенной производительностью.

Наиболее перспективным подходом в решении задачи формирования панорамных изображений является использование методов и алгоритмов, обеспечивающих предварительную коррекцию радиальной дисторсии на исходных изображениях и выполнение сопоставления особых точек исходных изображений не только на основе их дескрипторов, а с учетом их взаимосвязей, и специализированных вычислительных устройств, содержащих элементы, поддерживающие параллельное выполнение и аппаратную реализацию основных операций. Сохранение связей между особыми точками обеспечивается организацией хранения их дескрипторов в виде метрических деревьев, строящихся на основе расстояний между объектами многомерного пространства.

Во второй главе разработана математическая модель $MM_{\text{СВУФПИ}}$ специализированного вычислительного устройства формирования панорамных изображений (СВУФПИ):

$$MM_{\text{СВУФПИ}} = M_{\text{СШИ}}(M_{\text{РМП}}(M_{\text{СОТ}}(M_{\text{ПМД}}(M_{\text{СД}}(M_{\text{ВОТ}}(M_{\text{КРД}}(M_{\text{ОКРД}}, M_{\text{ВИ}}))))))), \quad (1)$$

которая описывает преобразование пары входных изображений $I_{\text{BX1}}, I_{\text{BX2}}$ в панорамное изображение $I_{\text{ПАН}}$, выполняя операции, описанные следующими моделями: $M_{\text{ВИ}}$ - модель ввода изображений; $M_{\text{ОКРД}}$ - модель определения коэффициента радиальной дисторсии; $M_{\text{КРД}}$ - модель коррекции радиальной дисторсии; $M_{\text{ВОТ}}$ - модель выделения особых точек на изображениях; $M_{\text{СД}}$ - модель создания дескрипторов особых точек; $M_{\text{ПМД}}$ - модель построения метрических деревьев для хранения дескрипторов особых точек; $M_{\text{СОТ}}$ - модель сопоставления особых точек; $M_{\text{РМП}}$ - модель расчета матрицы преобразования; $M_{\text{СШИ}}$ - модель соединения исходных изображений.

Модель ввода изображений рабочей сцены $M_{\text{ВИ}} = f(I_{\text{BX1}}, I_{\text{BX2}})$ описывает преобразование входных цифровых изображений $I_{\text{BX1}}, I_{\text{BX2}}$ (цветовая модель RGB) в изображения I_{O1} и I_{O2} (цветовая модель RGB) и соответствующие рабочие изображения I_1 и I_2 в градациях серого.

Если коэффициент радиальной дисторсии k_1 не задан, то его определяют в соответствии с моделью определения коэффициента радиальной дисторсии $M_{\text{ОКРД}} = f(I_{\text{BX1}}, I_{\text{BX2}}, I_{\text{ВХД1}}, I_{\text{ВХД2}}, I_{\text{ВХД3}})$.

Модель коррекции радиальной дисторсии $M_{\text{КРД}} = f(M_{\text{ВИ}}, k_1)$ описывает получение изображений $I'_1, I'_2, I'_{\text{O1}}$ и I'_{O2} с восстановленной геометрией и заключается в перемещении точек (x_d, y_d) исходных изображений на их истинные позиции (x_u, y_u) :

$$x_u = x_d(1 + k_1 r_d^2), y_u = y_d(1 + k_1 r_d^2), r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}. \quad (2)$$

Поиск особенностей на изображениях I'_1, I'_2 выполняют в соответствии с моделью выделения особых точек $M_{\text{ВОТ}} = f(M_{\text{КРД}})$.

Выделение особых точек основано на расчете определителя матрицы Гессе. Матрица Гессе для точки изображения $X(x, y)$ выглядит следующим образом:

$$H(x, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, \sigma) & L_{xy}(x, \sigma) \\ L_{xy}(x, \sigma) & L_{yy}(x, \sigma) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $L_{xx}(x, \sigma)$ - свертка по Гауссу производной второго порядка $\partial^2 g(\sigma)/\partial x^2$ изображения I в точке X , аналогично для $L_{xy}(x, \sigma)$ и $L_{yy}(x, \sigma)$; $g(\sigma)$ - функция Гаусса, значение σ позволяет задавать масштаб для вычисления определителей.

Вычисление определителя матрицы Гессе аппроксимируют применением фильтров соответствующего размера $\det(H_{\text{approx}}) = M_{xx}M_{yy} - (0,9M_{xy})^2$, где M_{xy}, M_{xx} и M_{yy} - значения, полученные в результате применения фильтров к изображению по соответствующим направлениям, что повышает точность и скорость выявления особых точек. Для обеспечения инвариантности к изменению масштаба поиск особых точек осуществляют на нескольких масштабах исходных изображений. Для этого создают серии карт откликов, содержащих рассчитанные значения определителей для различных масштабов изображений, таким образом, карты откликов представляют собой пирамиду изображений. Особые точки характеризуются максимумами определителя матрицы Гессе.

Для сопоставления особых точек создаются дескрипторы на основе их окрестностей в соответствии с моделью создания дескрипторов $M_{CD} = f(M_{BOT})$, которая позволяет ассоциировать каждую особую точку с некоторым вектором значений (вектором признаков) и обеспечивает инвариантность к незначительным изменениям угла обзора сцены, условий съемки (освещенности).

Формирование дескрипторов основано на использовании откликов вейвлета Хаара первого порядка и включает определение ориентации окрестности особой точки и вычисление сумм вейвлета Хаара в соответствии с подходом SURF (Speed-Up Robust Features). Хранение дескрипторов особых точек организовано в виде метрических деревьев, их создание описывается моделью построения метрических деревьев $M_{ПМД} = f(M_{CD})$.

Создание метрического дерева происходит последовательным добавлением дескрипторов O_n к наиболее подходящему узлу. Первоначальный поиск рассчитан на то, что существует такой листовой узел в поддереве $T(O_r)$, радиус покрытия которого не больше, чем расстояние между родительским узлом и новым объектом:

$$d(O_r, O_n) \leq r(O_r), \quad (4)$$

где d - расстояние между родительским узлом и новым объектом (особой точкой); r - радиус покрытия узла.

Анализ дерева начинается с корня и постепенно происходит спуск к искомому листовому узлу. На каждом уровне анализируется очередное поддерево. Если существует более одного поддерева, которое удовлетворяет (4), то выбирается поддерево O_r^* с наименьшим расстоянием до нового объекта $O_r^* : \min(d(O_r^*, O_n))$. Если ни одного объекта в соответствии с (4) не найдено, то выбирается узел O_r^* , ближайший к новому объекту при условии $O_r^* : \min(d(O_r^*, O_n) - r(O_r^*))$. Далее увеличивают радиус покрытия найденного дочернего узла до тех пор, пока новый объект не будет покрыт. Новый радиус определяют как $r(O_r^*) = d(O_r^*, O_n)$. Хранение дескрипторов особых точек в метрических деревьях организовано для возможности дальнейшего использования при сопоставлении изображений, учитывающего взаимосвязи особых точек.

Сопоставление особых точек основано на поиске «ближайших» или «соответствующих» поддеревьев с дескрипторами в метрических деревьях и описывается моделью сопоставления особых точек $M_{СОТ} = f(M_{ПМД})$.

Исходя из того, что исходные изображения имеют общие области, существует такое поддерево $T(O_i) \in T_1$, которое соответствует поддереву $T(O_j) \in T_2$, T_1 и T_2 - множества деревьев, созданных после формирования дескрипторов особых точек двух рабочих изображений.

Первоначальный отбор поддеревьев производят по параметрам: расстоянию до родительского узла и радиусу покрытия:

$$d(O_j) \in [d(O_i) - \gamma, d(O_i) + \gamma], \quad r(O_j) \in [r(O_i, O_{pi}) - \varepsilon, r(O_i, O_{pi}) + \varepsilon], \quad (5)$$

где γ, ε - величины допустимых отклонений значений, определяются экспериментально.

Когда найдено первое совпадение, т.е. определены поддерева, для которых выражения (5) выполняются, происходит сравнение их «соседних» объектов по тем же параметрам. Если не менее трех уровней выбранных поддеревьев соответствуют, выполняют сравнение по значениям. Между соответствующими объектами рассчитывают евклидово расстояние $r_E(O_i, O_j)$ в пространстве признаков, значения которых содержат дескрипторы. Если величина вычисленного расстояния меньше заданного порогового значения, то объекты признаются «схожими».

Как только первая пара поддеревьев $T(O_i) \in T_1$ и $T(O_j) \in T_2$ определена, поиск заканчивается. Данные поддеревья содержат необходимое количество объектов-дескрипторов, которые позволяют продолжить формирование панорамных изображений. Результатом сопоставления является множество «соответствующих» особых точек, на основе которых вычисляют матрицу преобразования V изображения I'_{o2} в соответствии с моделью расчета матрицы преобразования $M_{PMI} = f(M_{COT})$.

Если априорно известно, что входные изображения были получены с незначительным изменением угла обзора в одном масштабе, то матрица будет описывать преобразования на плоскости, иначе - в пространстве. Вычисление матрицы преобразования в пространстве включает в себя подбор трехмерной модели сцены, удовлетворяющей большинству найденных соответствующих особых точек, с помощью алгоритма определения основной матрицы по восьми точкам и метода RANSAC (Random Sample Consensus), получения вектора переноса и матрицы поворота одной камеры относительно другой на основе сингулярного разложения (SVD).

После определения матрицы преобразования V , выполняют собственно преобразование и соединение исходных изображений, этот процесс описывается моделью соединения изображений $M_{CMI} = f(M_{PMI}, M_{KPD})$. Трансформацию изображения I'_{o2} производят в соответствии с правилами выполнения аффинных преобразований $I''_{o2} = I'_{o2} \cdot V$, и затем соединяют изображения I'_{o1} с I''_{o2} на основе применения многомасштабного сплайна методом широкодиапазонного смешивания (multi-band blending). В результате соединения получают итоговое панорамное изображение $I_{пан}$.

Разработанная математическая модель СВУФПИ позволяет получать панорамные изображения повышенной точности за счет коррекции геометрических искажений, сопоставления особенностей на основе использования метрических деревьев, инвариантно к изменению масштаба, ориентации и освещенности исходных изображений, и с повышенной скоростью за счет исключения полного перебора всех вариантов при сопоставлении и при подборе трехмерной модели сцены.

В третьей главе получены математические выражения, для определения точности сопоставления особенностей при использовании метрических деревьев и для оценки производительности СВУФПИ. Полученные математические выражения позволили предложить метод формирования панорамных изображений, отличительной особенностью которого является повышенная точность сопоставления за счет коррекции радиальной дисторсии и сопоставления изображений на базе метрических деревьев, что в конечном итоге позволяет получать панорамные изображения высокой точности.

Отличительной новизной метода также является отсутствие необходимости выявления всех возможных соответствий на изображениях, что значительно сокращает вычислительную сложность алгоритма сопоставления и позволяет реализовать основные этапы обработки изображений аппаратно.

Сущность метода (патент №2365998) заключается в том, что на основе обработки поступающих в СВУФПИ двух изображений выполняют:

- создание рабочих изображений в градациях серого;
- определение коэффициента радиальной дисторсии, если он не задан;
- коррекцию радиальной дисторсии;
- выделение особых точек на рабочих изображениях;
- создание дескрипторов для особых точек;
- построение метрических деревьев для хранения дескрипторов;
- сопоставление особых точек;
- вычисление матрицы преобразований на основе найденных соответствий;

- трансформацию и соединение входных изображений, скорректированных от радиальной дисторсии.

Алгоритм формирования панорамных изображений, реализующий рассмотренный метод, представлен на рис. 1.

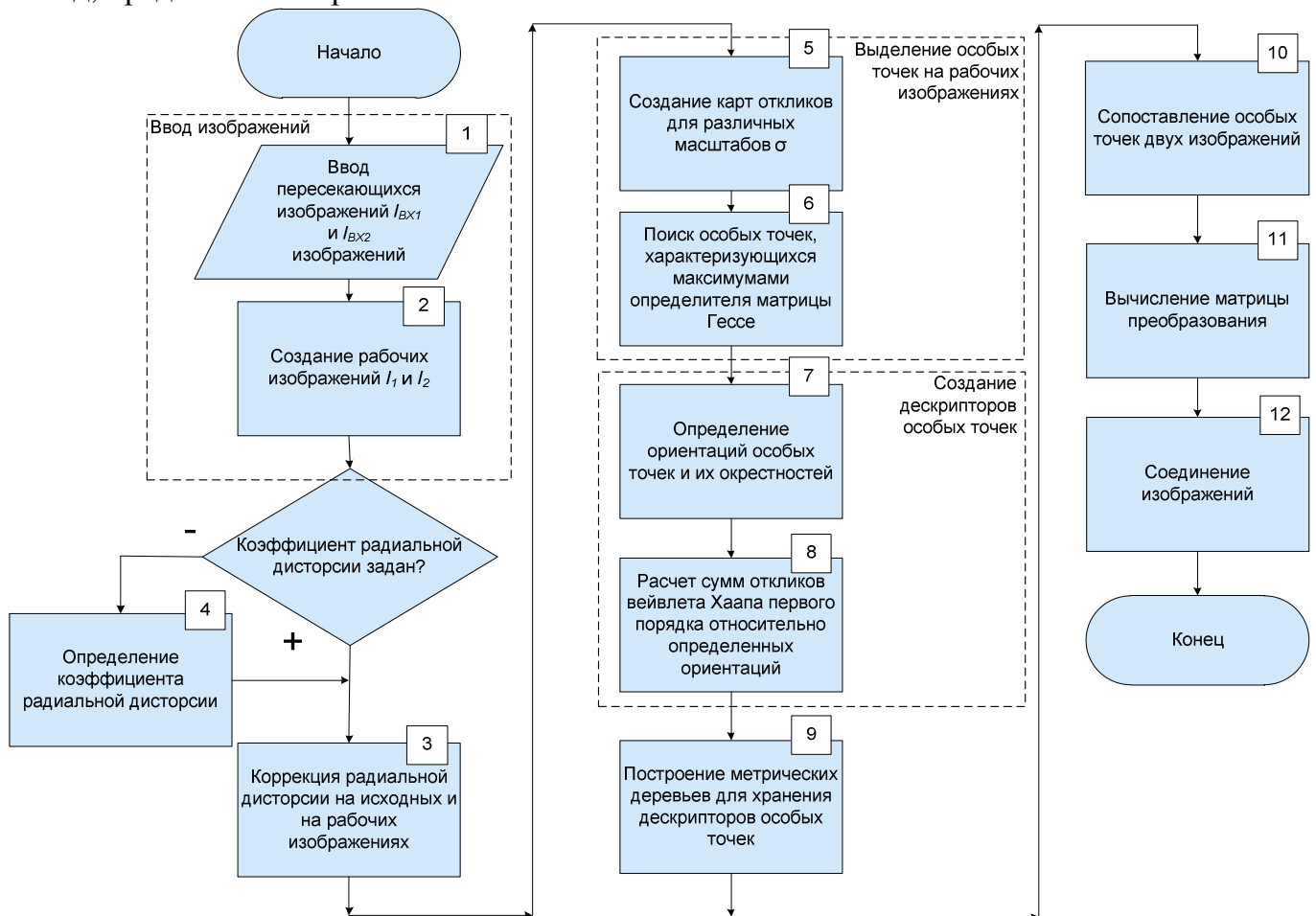


Рис. 1. Алгоритм формирования панорамных изображений

На основе данного метода формирования панорамных изображений разработано СВУФПИ (рис. 2), которое состоит из программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) Virtex 4 XC4VSX35, цифрового сигнального процессора (ЦСП) TMS320F2810, быстродействующего ЗУ1 объемом 64кб, подключенного непосредственно к ПЛИС и работающего на частоте ПЛИС, ЗУ2 объемом 128Мб, блока синхронизации и элементов взаимодействия с внешними устройствами (блок ввода и коррекции изображения, блок передачи).

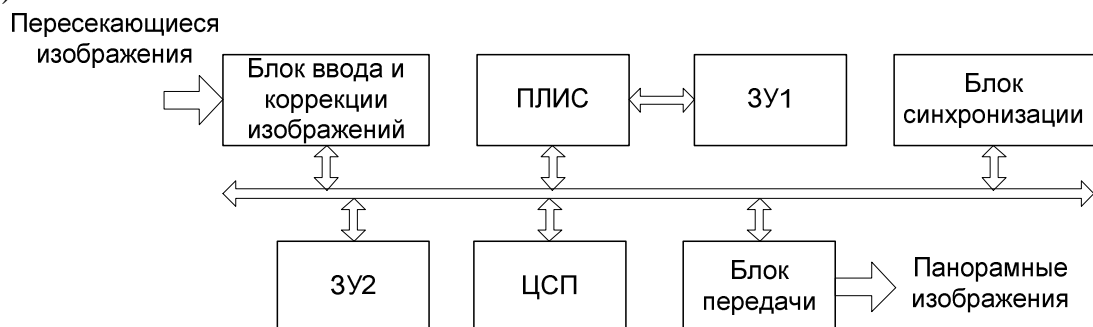


Рис. 2. Обобщенная структурная схема СВУФПИ

СВУФПИ включает блоки: ввода изображений БВИ; коррекции изображений от влияния радиальной дисторсии БКРД; определения коэффициента радиальной дисторсии БОКРД; выделения особенностей БВО; формирования дескрипторов БФД; построения метрических деревьев БПС; анализа и выявления соответствующих точек БАиВСТ;

вычисления матрицы преобразования БВМП; соединения изображений БСИ; ЗУ1 – быстродействующее ОЗУ, используемое для хранения промежуточных данных, таких как карты откликов, метрические деревья и соответствующие особые точки; ЗУ2 – ОЗУ для хранения исходных и результирующего изображений (рис. 3).

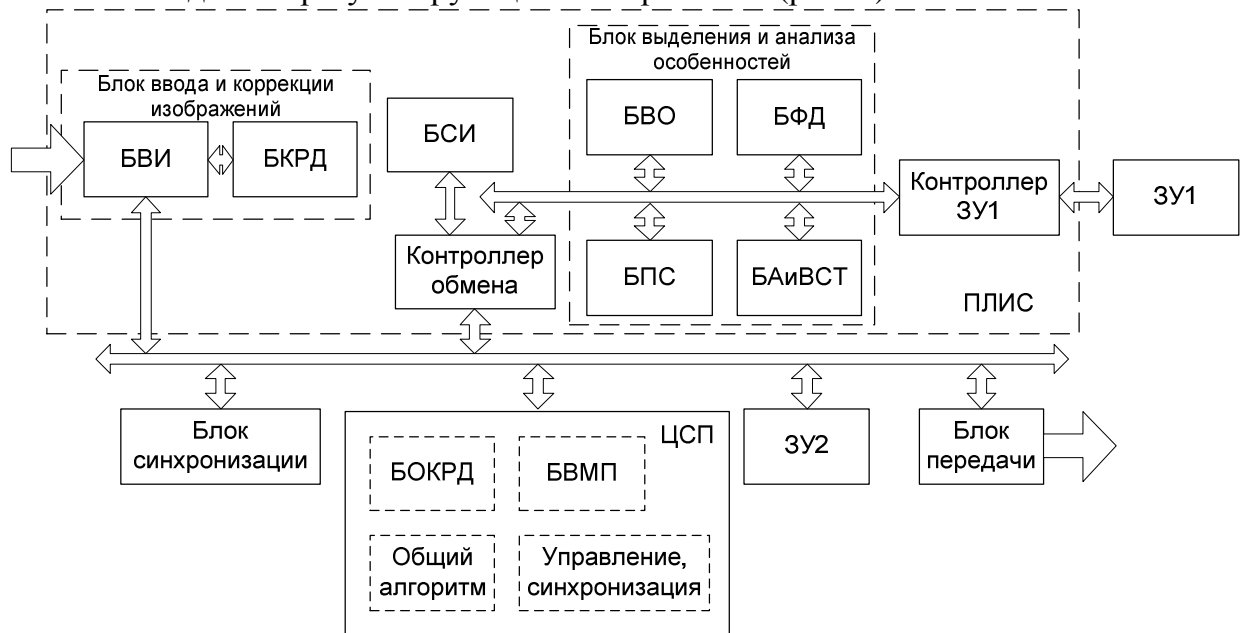


Рис. 3. Структурно-функциональная организация СВУФПИ

Отличительной особенностью структурно-функциональной организации СВУФПИ является реализация большей части вычислений на ПЛИС, что, во-первых, позволило реализовать параллельные вычисления (рис. 4) и повысить производительность устройства как за счет параллельности выполнения, так и за счет индивидуальной реализации каждой вычислительной процедуры строго в соответствии с алгоритмом без накладных расходов, характерных для процессорной реализации, и, во-вторых, – снизить вычислительную сложность выполняемых на ЦСП операций.

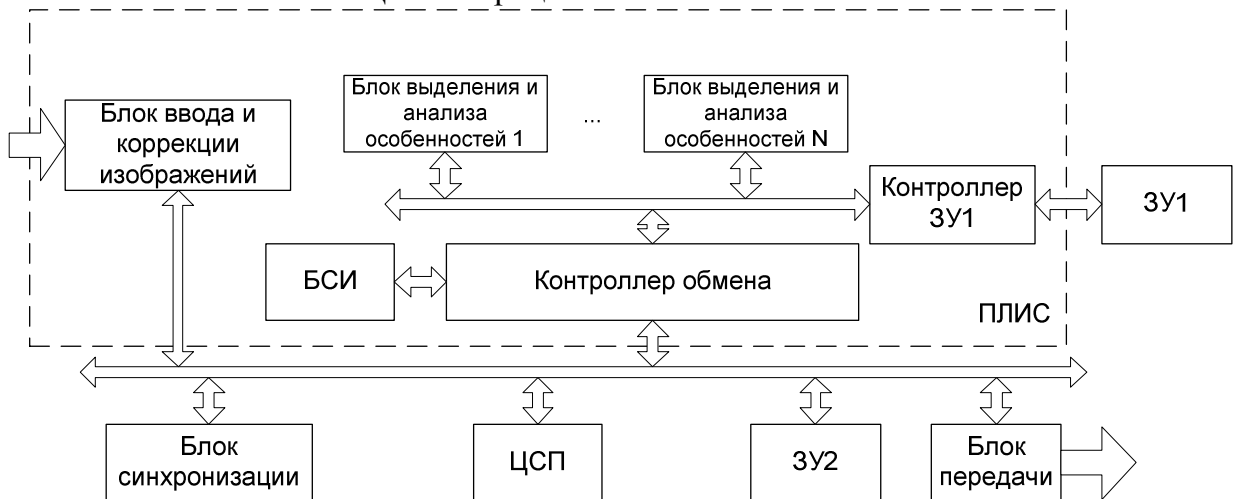


Рис. 4. Структурно-функциональная организация СВУФПИ с параллельной архитектурой

Так, на ПЛИС реализованы блоки БКРД, БФД, БПС, БАиВСТ, БСИ, БВО. Подключение ЗУ1 непосредственно к ПЛИС обеспечивает обмен данными на частоте работы самой ПЛИС, что намного больше частоты работы основного ЗУ2, используемого для хранения больших по размеру изображений. Принцип функционирования блока ввода и коррекции изображения заключается в переносе точек исходных изображений на их истинные позиции. Отличительной особенностью функционирования СВУФПИ является коррекция радиальной дисторсии в зависимости от условий получения изображения: при

единственном изображении, содержащем прямые линии (патент №2351091), при нескольких изображениях, полученных специальным образом (патент №2346326).

Отдельно следует подчеркнуть особенности блоков БПС и БАиВСТ, аппаратно реализующих алгоритмы построения метрических деревьев и выполнения поиска соответствующих поддеревьев, что позволило сопоставлять особые точки с существенно большей скоростью. Структура метрического дерева для повышения производительности хранится в ЗУ1.

Отличительный принцип функционирования СВУФПИ заключается в том, что ЦСП управляет процессом создания панорамных изображений, управляет вводом изображений, выполняет операции блоков БОКРД и БВМП; ПЛИС выполняет остальные наиболее значимые операции в соответствии с алгоритмом формирования панорамных изображений, обмен информацией внутри ПЛИС организован по внутреннему интерфейсу, соединенному с общим интерфейсом через контроллер обмена; внутренний интерфейс ПЛИС соединен с ЗУ1 через контроллер, управляющий доступом к ЗУ1.

В четвертой главе приведено описание разработанного аппаратно-программного комплекса (АПК) для проверки адекватности положений, полученных в результате теоретических исследований математической модели специализированного вычислительного устройства и метода формирования панорамных изображений, а также определения точности сопоставления и производительности разработанного устройства. В состав АПК (рис. 5) входят макет СВУФПИ на базе платы ML405SXVideo, включающий ПЭВМ Dell Latitude M4310, две видеокамеры Logitech 9000, фотоаппарат Canon 50D, видеокамера из состава модуля ML405SXVideo.

Внешний вид АПК представлен на рис. 6. Макет СВУФПИ, реализованный на базе ПЛИС-модуля ML405SXVideo, соединенный по специальному интерфейсу с видеокамерой, был подключен к ПЭВМ. ПЭВМ выполняла функции ЦСП, остальные блоки устройства были реализованы на ПЛИС в соответствии со схемой, изображенной на рис. 5. С видеокамер или с фотоаппарата получали изображения при их различных положениях, которые поступали в макет СВУФПИ и далее модуль совместно с ПЭВМ синтезировал панорамное изображение.

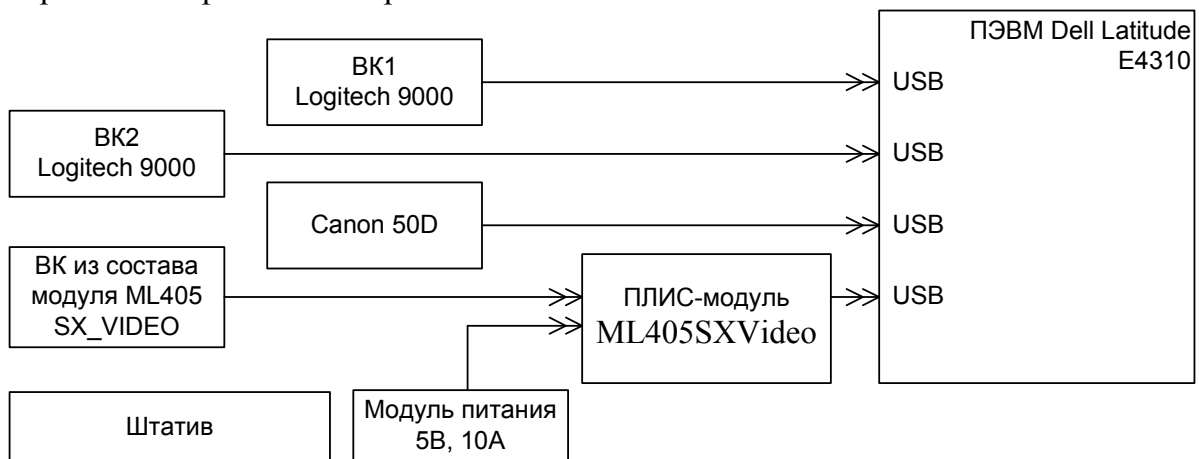


Рис. 5. Схема АПК

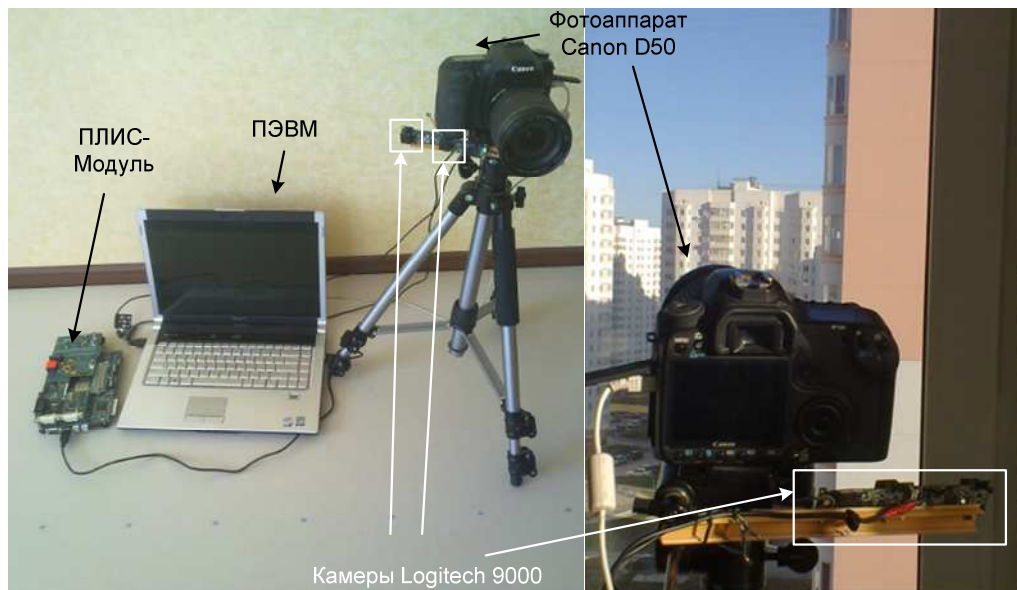


Рис. 6. Внешний вид АПК

Для проведения экспериментальных исследований устройства формирования панорамных изображений было разработано специальное программное обеспечение на языке C++ (среда разработки Microsoft Visual Studio 2010), реализующее функции ЦСП устройства формирования панорамных изображений, и специальное программное обеспечение для ПЛИС в среде САПР «ICE 8.2» с использованием языка VHDL. Взаимодействие с вычислительной платформой ML405SXVideo обеспечивалось по порту USB с использованием стандартных программных библиотек.

Методика эксперимента заключалась в:

- установке видеокамер и фотоаппарата на поворотном штативе;
- ориентации и смещении видеокамер и фотоаппарата в определенные положения;
- получении наборов тестовых изображений;
- запуске программного обеспечения для формирования панорамных изображений;
- оценке характеристик устройства по результатам формирования.

Эксперимент был проведен в два этапа, первый из которых проводился для оценки точности сопоставления изображений разработанным алгоритмом, основанным на использовании метрических деревьев. Результаты его работы приведены в сравнении с результатами работы двух известных алгоритмов сопоставления особых точек:

- выявления соответствий на основе расчета евклидова расстояния между всеми особыми точками двух изображений и сравнения с пороговым значением (использует similarity-threshold-based matching стратегию);
- выявления соответствий на основе расчета евклидова расстояния между всеми особыми точками двух изображений и выбора наиболее похожих, т.е. имеющих расстояние, в два раза меньшее, чем расстояния до всех остальных особых точек (использует the nearest-neighbour-ratio matching стратегию). В данном методе учитывается знак лапласиана и этот метод используется для сравнения SURF (Speed-Up Robust Features) дескрипторов.

Сравнение производилось на основе методики оценки точности сопоставления, используемой авторами Ke, Sukthankar, Mikolajczyk и Schmid в их работах. В зависимости от общего количества выявленных и ложных соответствий вычисляют значения *1-precision* по следующей формуле:

$$1 - precision = \frac{\text{количество ложных соответствий}}{\text{общее количество выявленных соответствий}}. \quad (6)$$

Входными данными для первого этапа были три набора (рис. 7) по 50 пар изображений размером 640x480 в каждом наборе:

Набор 1. Искусственные изображения. Пары пересекающихся изображений были вырезаны из изображений, полученных с размещенного на штативе и вращаемого в различных направлениях фотоаппарата Canon 50D, таким образом, чтобы иметь пересечения. Количество особых точек в каждом изображении этого набора от 50 до 200.

Набор 2. Реальные изображения. Пары изображений были получены с камер Logitech 9000, которые были размещены таким образом, чтобы с них можно было получать пересекающиеся изображения сцены. Количество особых точек небольшое от 50 до 200.

Набор 3. Реальные изображения. Пары изображений (снимков поверхности Земли со спутника) были заранее подготовлены и хранились в памяти ПЭВМ. Характеризуются большим количеством особых точек - от 200 до 700.

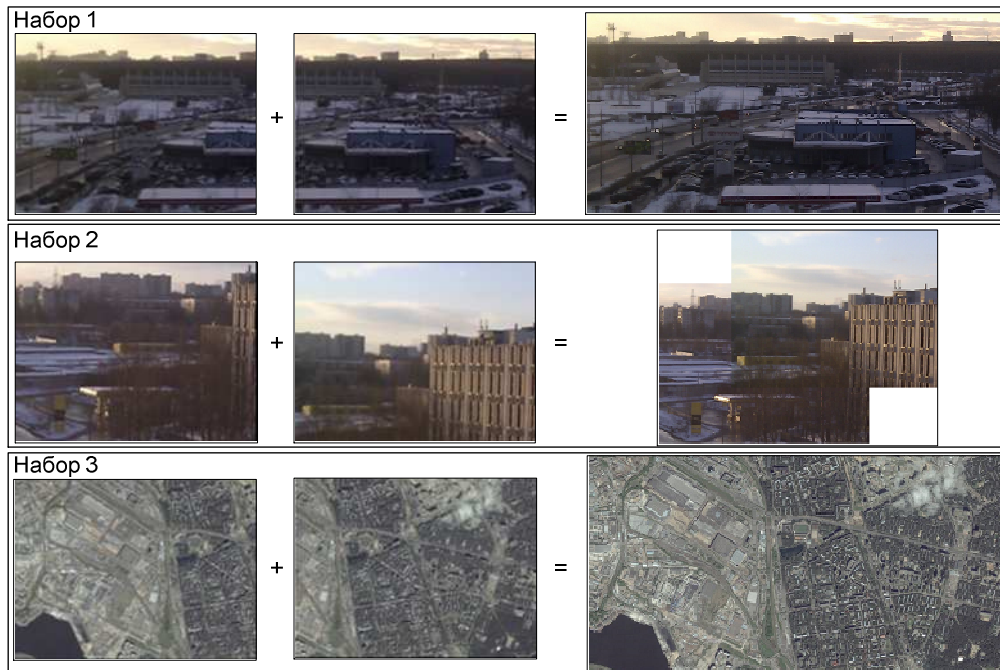


Рис. 7. Примеры исходных данных для проведения эксперимента и результирующих панорамных изображений

На рис. 8 представлены усредненные значения точности алгоритмов, рассчитанные в результате проведения первого этапа эксперимента.

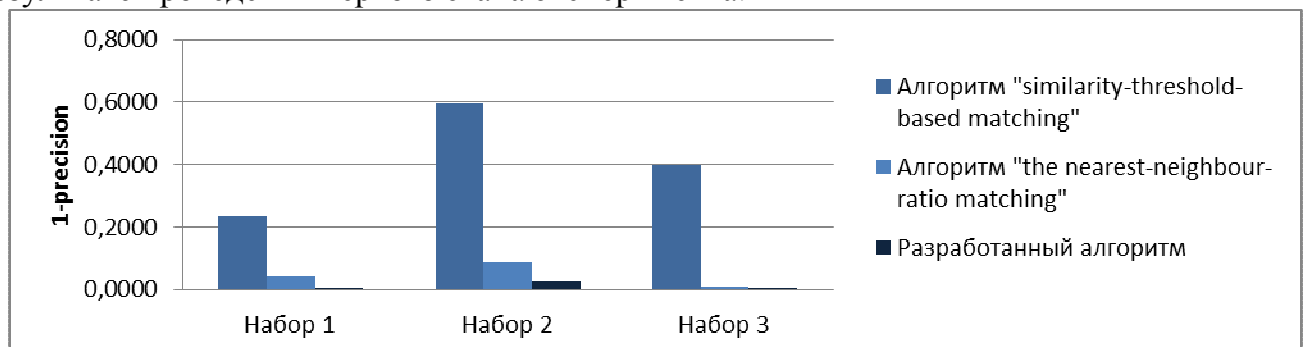


Рис. 8. Сравнение точности сопоставления тремя различными алгоритмами

Из графика, представленного на рис. 8, видно, что точность выявления ложных сопоставлений разработанным алгоритмом выше по сравнению с аналогами, ошибок сопоставления в 5,5 раза меньше как для искусственных изображений, так и для реальных.

Наибольшее влияние на производительность устройства формирования панорамных изображений оказывают размер входных изображений и количество особенностей, выявляемых на входных изображениях. В рамках второго этапа эксперимента были проведены исследования этого влияния и сравнения производительности разработанного

СВУФПИ с существующими устройствами. В качестве аналогов рассматривались ПЭВМ Dell M1530 и ПЭВМ на базе Intel Core 2 Quad, реализующие разработанный метод и метод, основанный на SURF. Для оценки времени работы метода формирования панорамных изображений, основанного на применении SURF, была использована программа, свободно распространяемая авторами метода (<http://www.vision.ee.ethz.ch/~surf/>). Показатели производительности разработанного устройства, полученные в ходе исследования, представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Производительность устройств в зависимости от размера входных изображений

Производительность, пан.изображение/с	ПЭВМ Dell M1530		ПЭВМ на базе Intel Core 2 Quad		Разработанное устройство, N=1
Размер входных изображений	Метод, основанный на SURF	Разработанный метод	Метод, основанный на SURF	Разработанный метод	Разработанный метод
320x240	7,69	8,06	8,85	9,43	15,87
640x480	3,52	3,60	3,88	3,95	9,35
800x600	2,24	2,29	2,50	2,54	5,62
1600x1100	0,83	0,84	0,91	0,92	2,15
3200x2400	0,38	0,38	0,42	0,43	1,06

Таблица 2. Производительность устройств в зависимости от количества особых точек на входных изображениях

	ПЭВМ Dell M1530		ПЭВМ на базе Intel Core 2 Quad		Разработанное устройство, N=1
Производительность, пан.изображение/с	Метод, основанный на SURF	Разработанный метод	Метод, основанный на SURF	Разработанный метод	Разработанный метод
50 - 200 особенностей	3,39	3,46	3,65	3,72	9,43
200 - 700 особенностей	1,52	1,54	1,74	1,75	3,86

Данные, представленные в таблице 1 и таблице 2, позволяют сделать вывод, что производительность разработанного вычислительного устройства с одним блоком выявления и анализа особенностей (N=1) выше, чем производительность аналогов в 2,33 раза. Дальнейшее повышение производительности СВУФПИ достигается за счет увеличения количества параллельных блоков.

Для оценки производительности разработанного устройства в зависимости от количества параллельных блоков были получены 50 пар изображений размером 3200x2400, из них были сформированы панорамные изображения разработанным СВУФПИ с различным количеством N = 1, 2, 4, 8, 16 параллельных блоков выявления и анализа особых точек. Зависимость производительности от количества параллельных блоков в СВУФПИ представлена в виде гистограммы на рис. 9.

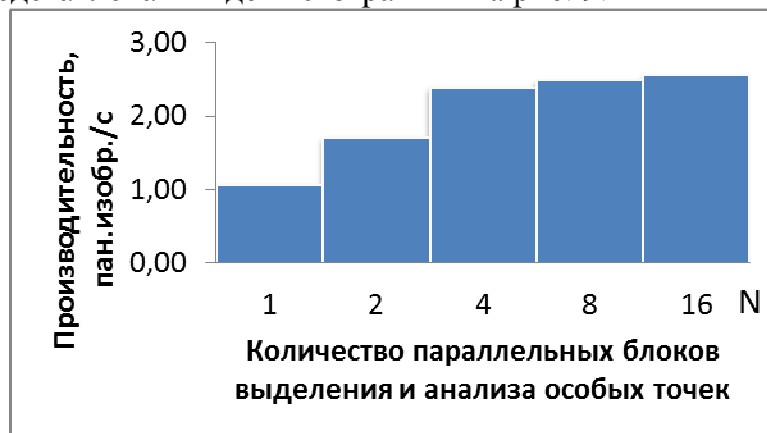


Рис. 9. Зависимость времени формирования панорамных изображений от количества параллельно функционирующих блоков СВУФПИ

Полученные данные позволили сделать вывод, что рациональным количеством параллельных блоков является четыре. Использование четырех блоков выявления и анализа особенностей вместо одного позволяет увеличить производительность СВУФПИ в 2,25 раза. Дальнейшее увеличение количества блоков не приводит к значительному увеличению производительности. Таким образом, производительность разработанного устройства выше производительности аналогов в 5,58 раза.

Из анализа характеристик специализированного вычислительного устройства формирования панорамных изображений сделан вывод, что точность разработанного устройства выше за счет коррекции радиальной дисторсии на исходных изображениях и исключения возможности ложных сопоставлений, производительность выше в 5,58 раза за счет использования алгоритма сопоставления на базе метрических деревьев, исключения дополнительных этапов фильтрации ложных сопоставлений, уменьшения количества дополнительных итераций при подборе трехмерной модели рабочей сцены, распараллеливания выполнения основных операций и аппаратной реализации основных операций метода.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

При решении поставленной в диссертационной работе задачи были получены следующие основные результаты:

1. На основании проведенных исследований методов и устройств формирования панорамных изображений разработана математическая модель специализированного вычислительного устройства формирования панорамных изображений, отличающегося повышенной точностью сопоставления особенностей по сравнению с существующими аналогами.

2. Разработаны метод и алгоритм формирования панорамных изображений, основанные на использовании метрических деревьев для хранения информации об особенностях изображений и предварительной коррекции исходных изображений от влияния радиальной дисторсии, отличающиеся повышенной точностью и возможностью параллельной обработки данных, позволившие разработать специализированное вычислительное устройство формирования панорамных изображений.

3. Разработана структурно-функциональная организация специализированного вычислительного устройства формирования панорамных изображений, особенностью которой является разработка и введение специализированных вычислительных элементов, выполняющих параллельную обработку данных и аппаратно реализующих основные операции в соответствии с разработанным методом.

4. В процессе экспериментальных исследований подтверждена адекватность разработанной математической модели специализированного вычислительного устройства формирования панорамных изображений, проведен анализ полученных результатов, который показал, что разработанное устройство характеризуется повышенной точностью сопоставления особенностей и производительностью, которая увеличена в 5,58 раз по сравнению с существующими аналогами. Разработанное СВУФПИ, обладающее высокими качественными и эксплуатационными показателями, обеспечивающее ускорение научно-технического прогресса, является основой для разработки класса специализированных вычислительных устройств формирования панорамных изображений, применение которых возможно в различных системах, и имеет важное народно-хозяйственное значение.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ по перечню ВАК

1. Бугаенко, Е.И. Коррекция искажений изображения, вызванных яркими объектами в кадре и монохроматическими аберрациями [Текст] / Е.И. Бугаенко, М.И. Труфанов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Сер. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. – 2006. – Вып.1.– С. 47 - 50.
2. Бугаенко, Е.И. Способ автоматического определения и коррекции радиальной дисторсии на цифровых изображениях [Текст] / Е.И. Бугаенко, М.И. Труфанов // Известия вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, №2. – С. 16 - 21.
3. Бугаенко, Е.И. Метод автоматического формирования панорамных изображений на основе аппарата нечеткой логики [Текст] / Е.И. Бугаенко, В.Н. Гридин // Известия вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, №2. – С. 7 - 11.

другие публикации

4. Bugaenko, E. Radial distortion calibration method and device for images input on its base [Text] / D. Titov, M. Truphanov, E. Bugaenko // Proceeding of 8th international conference Pattern recognition and image analysis: new information technologies. Vol. 2. – Yoshkar-Ola, 2007. – P. 181 - 184.
5. Бугаенко, Е.И. Способ получения панорамных изображений с автоматической коррекцией радиальной дисторсии [Текст] / М.И. Труфанов, Е.И. Бугаенко // Материалы докладов всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР - 2007». Ч. 4. Сек. Информационно-измерительные приборы и устройства. – Томск, 2007. – С. 14-15.
6. Оптико-электронные системы распознавания и анализа трехмерных динамических объектов: монография / под ред. В.С. Титова, С.С. Тевса, М.И. Труфанова; Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2008. 142 с. (Параграф 2.2.4, С. 44-52).
7. Bugaenko, E. Creation of panoramic images with use of fuzzy logic [Text] / V. Titov, E. Bugaenko // Proceeding of 9th international conference «Pattern recognition and image analysis: new information technologies» (PRIA-9-2008). Vol. 1. – Nizhni Novgorod, 2008 – P. 63 - 65.
8. Bugaenko, E. Creating panoramic images with radial distortion correction [Text] / V. Titov, E. Bugaenko // Proceeding of Sixth International Conference "Information and telecommunication technologies in intelligent systems". Crete, Greece, 2008. – P. 89 - 92.
9. Адаптивные системы технического зрения : монография / под ред. В.Н. Гридина, В.С. Титова, М.И. Труфанова; Центр информационных технологий в проектировании РАН. Москва, 2009. 441 с. (Разделы 3.5., 3.1.1, С. 114-128, 160-168).
10. Бугаенко, Е.И. Подходы к формированию панорамных изображений [Текст] / М.И. Труфанов, Е.И. Бугаенко // Материалы международной научно-технической конференции «Диагностика - 2009». – Курск, 2009. – С. 145-147.
11. Бугаенко, Е.И. Способ формирования панорамных изображений [Текст] / Е.И. Бугаенко // Всерос. науч.-техн. конф. «Интеллектуальные и информационные системы - 2009». - Тула, 2009. – С. 120-121.

12. Пат. №2365998 Российская Федерация, МПК G06T9/00. Способ формирования панорамных изображений [Текст] / Бугаенко Е.И., Труфанов М.И., Сорокин П.А. – №2006144943; заявл. 18.12.2006; опубл. 27.08.09, Бюл. № 24. - 14 с.
13. Пат. №2351091 Российская Федерация, МКИ H04N3/23, G06T5/40. Способ автоматического определения и коррекции радиальной дисторсии на цифровом изображении [Текст] / Бугаенко Е.И., Труфанов М.И. – №2006142839; заявл. 4.12.2006; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9. - 13 с.
14. Пат. №2346326 Российская Федерация, МКИ G06M11/02. Способ калибровки радиальной дисторсии оптической подсистемы системы технического зрения [Текст] / Бугаенко Е.И., Титов В.С., Труфанов М.И. – №2007107774; заявл. 1.03.2007; опубл. 10.02.09, Бюл. № 2. - 12 с.
15. Бугаенко, Е.И. Формирование панорамных изображений на основе поиска особенностей на изображении [Текст] / О.Б. Тарасова, С.В. Кузнецов, Е.И. Бугаенко // Сб. матер. 9-й Междунар. конф. «Распознавание-2010». – Курск; 2010. – С. 71 - 73.



Соискатель

Бугаенко Е.И.

ИД №06430 от 10.12.01

Подписано к печати 14.06.2011. Формат 60х84 1/16.

Печатных листов 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 56.

Юго-Западный государственный университет.

Издательско-полиграфический центр

Юго-Западного государственного университета.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.