

Конов Станислав Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОБИЛЬНОЙ КООРДИНАТНО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность 05.11.16

**Информационно-измерительные и управляющие системы
(по машиностроению и машиноведению)**



Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена на кафедре измерительных информационных систем и технологий Московского Государственного Технологического Университета «Станкин».

Научный руководитель: Кандидат технических наук, профессор
Марков Борис Николаевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Мельников Владимир Павлович

Кандидат технических наук, профессор
Гольгин Николай Христофорович

Ведущая организация: ООО "Автопрогресс-М"

Защита состоится «14» сентября 2011 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.142.04 при ГОУ ВПО Московский Государственный Технологический Университет «Станкин» по адресу: 127994, Москва, ГСП-4, Вадковский пер., 1, ауд. ____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО МГТУ «Станкин».

Автореферат разослан «14» сентября 2011 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н.


Иванов В.И.

2011А
8599

3



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Фотограмметрические информационно-измерительные системы с фото- или видеокамерами на основе ПЗС-матриц получают все более широкое распространение в области контроля изделий сложной формы в самых различных отраслях машиностроения. Расширение возможностей их применения требует совершенствования или создания новых измерительных информационных технологий при использовании измерительных систем данного направления.

Основным преимуществом бесконтактных методов сканирования поверхности с помощью цифровых технологий фотограмметрирования является высокая скорость получения больших массивов измерительной информации, а в современных серийно выпускаемых образцах – еще и высокая точность (заявляемая погрешность до 0,005 мм). Однако при всех своих достоинствах бесконтактные фотограмметрические измерительные системы обладают и существенным недостатком, обусловленным невозможностью сканирования поверхностей, расположенных под малыми углами к оптическим осям камер или вообще невидимых со стороны камер. Так, например, сканирование поверхностей отверстий или пазов при помощи фотограмметрической технологии часто не представляется возможным.

Одним из наиболее эффективных методов совершенствования фотограмметрических измерительных систем является реализация на их базе контактных технологий получения измерительной информации. Вопросы, связанные с разработкой алгоритмов реализации контактных технологий в рамках фотограмметрических информационно-измерительных систем, на сегодняшний день остаются неизученными. Ряд иностранных компаний, применяющих контактные устройства, оставляют принципы построения и результаты метрологических исследований указанных систем в сегменте технологий, являющихся коммерческой тайной. Реализация и внедрение подобных измерительных технологий на сегодняшний день имеет большое значение

для решения широкого спектра измерительных задач в машиностроении, авиастроении, судостроении и ряде других важнейших отраслей промышленности.

Объектом исследования является измерительная информационная система, построенная на принципах ближней фотограмметрии и оснащенная системой автономных измерительных головок с измерительными наконечниками, приводимыми оператором в соприкосновение с элементами контролируемых объектов, и комплектами маркеров, пространственные координаты центров которых воспринимаются двумя ПЗС-матрицами, определенным образом ориентированными друг относительно друга.

Предметом исследования является архитектура автономных измерительных головок, алгоритмы получения измерительной информации о пространственных координатах маркеров измерительных головок по двумерным координатам их центральных проекций на ПЗС-матрицах и определения по ним координат точек исследуемых поверхностей изделий, алгоритмы решения ряда конкретных измерительных задач, метрология рабочего пространства, охватываемого измерительной системой.

Цель диссертационной работы заключается в расширении метрологических возможностей фотограмметрических измерительных информационных систем с помощью автономных измерительных головок, реализующих возможность проведения контактных измерений, в разработке архитектуры их построения, в создании методов и алгоритмов преобразования и обработки измерительной информации.

Исходя из указанной цели, основные задачи исследования заключаются в следующем:

1. Оценка предельных метрологических возможностей сканирующих фотограмметрических систем с использованием структурированной подсветки объекта исследования.

2. Поиск оптимальной архитектуры автономных измерительных головок в отношении определения числа и геометрии размещения маркеров по поверхности головок.
3. Разработка последовательности вычислительных процедур и комплекса алгоритмов, необходимых для определения пространственных координат центров измерительных наконечников по двухмерным координатам системы маркеров на чувствительных поверхностях ПЗС-матриц. Создание программно-математического обеспечения для проведения экспериментальных исследований.
4. Проведение сравнительных экспериментальных исследований с целью оптимизации архитектуры измерительных головок и программно-математического обеспечения измерительной системы.
5. Выполнение экспериментальных исследований по нахождению погрешностей определения координат точек, относящихся к рабочему пространству системы.
6. Проведение анализа результатов экспериментов в целях выявления тех параметров измерительных головок и элементов программно-математического обеспечения, которые оказывают наибольшее влияние на погрешность измерительной системы.

Методологической базой исследования послужили работы В.И. Телешевского, А.С. Назарова, В.А. Гапшиса, Дж.А. Боша и Я.П. Понарина.

Методы исследования. В работе использованы методы теории множеств, результаты, полученные в проекционной и аффинной геометрии, методы цифровой картографии, численные методы поиска решений. Расчеты и комплекс прикладных программ выполнены в средах Maple и MathCAD, программно-математическое обеспечение реализовано на языке C++.

Научная новизна работы заключается:

1. в математической модели системы для проведения контактных измерений на базе технологии ближней фотограмметрии с примени-

- ем автономных измерительных головок, обеспечивающих возможность контроля изделий с труднодоступными поверхностями и изделий сложной формы;
2. в архитектуре измерительных головок, минимизирующей дополнительные погрешности, вносимые ими в погрешность фотограмметрической системы;
 3. в установлении закономерностей влияния шума ПЗС – матрицы, неравномерности освещенности контролируемой поверхности изделия и проекционных искажений, вносимых произвольностью расположения измерительных головок в момент фиксации положения маркеров, на суммарную погрешность распознавания координат центров маркеров, и в определении методов компенсации дополнительных погрешностей;
 4. в установлении характера совместного влияния погрешностей распознавания координат центров маркеров автономных измерительных головок на точность определения координат характерной точки измерительного наконечника в рабочем пространстве с применением предложенных методов расчета искомых координат.

Практическая значимость.

Определены области применения и созданы все необходимые предпосылки для применения измерительных информационных систем, использующих технологии фотограмметрии, для проведения контактных измерений характеристик изделий со сложной геометрической формой, в частности:

1. разработан комплекс алгоритмов преобразований измерительной информации для проведения контактных измерений и обработки их результатов на базе бесконтактных технологий фотограмметрии с применением аффинных и проекционных преобразований.
2. разработаны рекомендации по рациональному проектированию автономных измерительных головок для проведения контактных измерений на базе фотограмметрических технологий.

Достоверность результатов исследования обосновывается:

- применением известных математических методов, использовавшихся ранее при решении прикладных задач;
- соответствием полученных результатов с аналитическими и экспериментальными данными, полученными как в рамках экспериментальной части данной работы, так и работ других авторов.

Апробация работы и публикации. Основные положения работы докладывались автором на следующих конференциях:

- Всероссийская научно-практическая конференция с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области информационно-телекоммуникационных технологий», проводимой Международным союзом приборостроителей и специалистов по информационным и телекоммуникационным технологиям, в Москве на территории ВВЦ, 26-28 октября 2010 г.;

- Третья Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», проводимой Союзом машиностроителей России и МГТУ им. Н.Э. Баумана, в Москве на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-25 сентября 2010 г.;

- XII научная конференция «Математическое моделирование и информатика», проводимой «Учебно-научным центром Математического моделирования МГТУ «Станкин» и ИММ РАН», в Москве на базе МГТУ «Станкин», 12-14 мая 2010 г.

Основные результаты работы также докладывались на научно-методическом семинаре кафедры «Измерительные информационные системы и технологии» МГТУ «Станкин», 4 октября 2010 г. Основное содержание диссертации отражено в десяти печатных работах, три из которых опубликованы в изданиях из перечня ВАК.

В настоящее время соискателем ведется работа внедрению результатов диссертационного исследования в качестве руководителя работ по государственному контакту от 1 октября 2010 г. №14.740.11.0490, шифр заявки

«2010-1.3.2-214-005/41»); тема контакта «Разработка интеллектуальной системы слежения за пространственными перемещениями подвижных узлов станков и робототехнических систем на базе бесконтактной оптической измерительной системы». Государственный контракт заключен в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Математическая модель системы для проведения контактных измерений изделий с труднодоступными поверхностями и изделий сложной формы на базе технологий ближней фотограмметрии и применения автономных измерительных головок;
- Архитектура измерительных головок, позволяющая минимизировать дополнительные погрешности, вносимые контактными измерительными головками;
- Методические основы определения координат центров маркеров измерительных головок с учетом шума ПЗС – матрицы, неравномерности освещенности контролируемой поверхности изделия и проекционных искажений, вносимых произвольным характером расположения измерительных головок в момент фиксации положения маркеров;
- Методология поиска координат характерных точек измерительных окончаний посредством обработки результатов определения координат центров маркеров измерительных головок;
- Результаты реализации фотограмметрической измерительной системы с контактными измерительными головками с оценкой ее метрологических возможностей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 55 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 174 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе приведен анализ возможностей использования фотограмметрических систем для контроля изделий сложной формы в машиностроении. Большое внимание уделено описанию процесса работы с фотограмметрическими системами, описаны основные достоинства и недостатки применения фотограмметрических систем для решения различных измерительных задач. Описаны возможные варианты использования (и специфика работы) фотограмметрической технологии получения измерительной информации в следующих областях деятельности:

- геодезия и картография (получение трехмерной информации о рельефе исследуемой местности);
- строительство и архитектура (исследование трехмерных строительных объектов и памятников);
- машиностроение, судо- и авиастроение (измерение корпусных деталей, изделий сложной формы и крупногабаритных объектов);
- развлекательные медиа технологии (съемки трехмерных фильмов, разработка трехмерных приложений, имитирующих взаимодействие человека с окружающим миром, в т.ч. игровых).

Приведено подробное исследование существующих фотограмметрических систем, выпускаемых серийно и применяемых в машиностроении. Следует отметить, что подавляющее большинство подобных систем производится в США. На сегодняшний день достижимым уровнем погрешности для указанных систем считается 0,005 мм, однако в большинстве случаев объектами измерения являются корпусные и кузовные элементы с шириной поля допуска порядка 0,5 мм и более.

Во второй главе приведена математическая модель численных преобразований, необходимых для обработки измерительной информации при работе фотограмметрических систем. Для работы указанных систем применя-

ется проективная модель камер, использующая математический аппарат, базирующийся на аффинном и проективном преобразованиях. Составлен комплекс параметров проективной модели камер. Рассмотрен процесс настройки системы, заключающийся в поиске совокупности значений указанных параметров, соответствующих априорной информации об образцовом объекте измерения, используемом при настройке. Выведены системы уравнений, используемые для решения задач прямой и обратной засечки соответственно. Для каждой из двух камер система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} (x-x_0) = -f \frac{a_1(X_M - X_S) + b_1(Y_M - Y_S) + c_1(Z_M - Z_S)}{a_3(X_M - X_S) + b_3(Y_M - Y_S) + c_3(Z_M - Z_S)} \\ (y-y_0) = -f \frac{a_2(X_M - X_S) + b_2(Y_M - Y_S) + c_2(Z_M - Z_S)}{a_3(X_M - X_S) + b_3(Y_M - Y_S) + c_3(Z_M - Z_S)} \end{cases}; \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_M - X_S = (Z_M - Z_S) \frac{a_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) - a_3f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f} \\ Y_M - Y_S = (Z_M - Z_S) \frac{b_1(x-x_0) + b_2(y-y_0) - b_3f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f} \end{cases}; \quad (2)$$

где:

X_M, Y_M, Z_M – координаты точки в глобальной системе координат измерительной информационной системы;

x, y – координаты изображения этой точки в двухмерном пространстве фотокамеры;

$x_0, y_0, X_S, Y_S, Z_S, f$ – параметры камеры;

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ – направляющие косинусы главной оптической оси камеры в глобальной системе координат измерительной информационной системы.

Составлен алгоритм настройки фотограмметрической системы по образцовому объекту. Построена классификация погрешностей фотограмметрических систем путем их разделения на инструментальные погрешности (обусловленные оптическими aberrациями, шумом цифровых матриц камер и т.п.) и методические погрешностями (обусловленные погрешностями рас-

познавания объектов). Приведена сравнительная характеристика возможных компоновок фотограмметрических систем, описаны достоинства и недостатки, а также круг задач, решаемых применением каждой из компоновок.

В третьей главе обоснована структура системы для контактных измерений на базе фотограмметрической технологии получения измерительной информации. Предложено два принципа получения измерительной информации о координатах характерной точки измерительного наконечника автономной измерительной головки. В качестве такой точки рассматривается либо центр сферы наконечника, либо вершина острья иглы.

Первый способ основан на идентификации матрицы аффинного преобразования, связанного с изменением положения системы координат измерительной головки при ее перемещении из начального положения в рабочее положение, соответствующее акту измерения. В однородных координатах для центра каждого маркера получаем систему из трех уравнений, которая в матричной форме имеют вид:

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \\ i & j & k & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

где x_n, y_n, z_n — координаты центра маркера в рабочем положении измерительной головки;

x, y, z — координаты центра того же маркера при исходном положении измерительной головки;

d, h, l — параметры аффинного преобразования, отвечающие за плоскопараллельный перенос;

$a, b, c, e, f, g, i, j, k$ — параметры аффинного преобразования, каждый из которых вычисляется исходя из углов поворотов относительно координатных осей и масштабных коэффициентов вдоль каждой из осей.

При использовании четырех маркеров получается система из двенадцати уравнений, решением которой и получаются значения двенадцати коэффициентов матрицы преобразования.

Второй способ основан на использовании информации о расстояниях от характерной точки наконечника до центров маркеров, формируемой при настройке параметров измерительной головки. Настройка заключается в многократном измерении координат центров маркеров при различных положениях измерительной головки, но при фиксированном расположении характерной точки наконечника (например, при базировании сферы измерительного наконечника в конической оправке). По результатам настройки в памяти компьютера создается файл-эталон, содержащий информацию о расстояниях между центрами маркеров и характерной точкой измерительного наконечника.

При обработке результатов измерения, положение характерной точки шупа в пространстве определяется как точка, находящаяся на известных расстояниях от центров соответствующих маркеров.

Решение задачи осуществляется методами поиска оптимального решения путем последовательного приближения с минимизацией суммы:

$$\sum_i (R_i - R_{i,0})^2 \rightarrow \min; \quad (4)$$

где R_i – расстояние между измеренным положением i -й метки и предполагаемым (на данном шаге приближения) расположением характерной точки шупа; $R_{i,0}$ – расстояния между центрами маркеров и характерной точкой шупа, хранящиеся в файле-эталоне.

В виду того, что основным источником погрешности фотограмметрической системы является погрешность распознавания центров измерительных маркеров, проведен подробный анализ погрешности их распознавания для выбранного алгоритма. Выявлены основные составляющие погрешности:

- шум матрицы,

- геометрические искажения изображений маркеров (ввиду оптических aberrаций и перспективных искажений),
- градиентная заливка фона (ввиду неравномерностей освещения),
- погрешность от дискретизации изображения (в связи с использованием цифровых фотокамер).

Рассмотрены методы распознавания центров измерительных меток в форме круга, в качестве базового метода для построения контактных измерительных систем на базе фотограмметрической технологии измерения выбран метод поиска центра масс изображения:

$$x = \frac{\sum_i \left(\sum_j m_{i,j} \cdot i \right)}{\sum_i \sum_j m_{i,j}}; \quad (5)$$

$$y = \frac{\sum_j \left(\sum_i m_{i,j} \cdot j \right)}{\sum_j \sum_i m_{i,j}};$$

где x, y – координаты центра метки,

i и j – номера соответственно столбца и строки пикселя в матрице изображения,

$m_{i,j}$ – соответствующие значения элементов матрицы изображения.

Использованы основные методы снижения указанных погрешностей распознавания, широко применяемые в современных измерительных системах (такие как нормализация и фильтрация). Предложен метод коррекции перспективных искажений изображения на базе комбинации аффинного и проективного преобразования, реализуемый выбранной архитектурой измерительных головок с использованием опорных маркеров, расположенных в вершинах квадрата произвольного размера.

Сформулированы основные требования к подобным измерительным информационным системам, построен алгоритм работы и описана последовательность преобразований измерительной информации, реализуемая программно-математическим обеспечением системы.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований макета измерительной информационной системы, их обработка и анализ, сделаны выводы об адекватности математической модели преобразований, проводимых в процессе сбора и преобразования измерительной информации. Исследованы источники дополнительных составляющих суммарной погрешности, связанные с использованием автономных измерительных головок и выявленные в ходе экспериментов, разработаны рекомендации по снижению значений этих составляющих.

Эксперименты проводились на базе фотограмметрической системы со структурированной подсветкой, произведенной компанией ФГУП «ГосНИИАС». Заявленная погрешность системы составляет 0,15 мм, производительность составляет 10000 точек/мин.

Эксперименты разделены на две группы:

- эксперименты, связанные с распознаванием измерительных меток в пространстве изображения;
- эксперименты, связанные с реализацией контактных координатных измерений на базе разработанной измерительной фотограмметрической системы.

Для проведения экспериментов по исследованию погрешностей распознавания координат центров измерительных меток использовалось специальное программно-математическое обеспечение, написанное на языке C++. Погрешности, связанные с распознаванием координат центра метки были классифицированы следующим образом:

- погрешность от смещения изображения маркера на доли пикселя (обусловлена дискретизацией);
- погрешность от перспективных искажений изображения маркера;
- погрешность от шума ПЗС - матрицы;
- погрешность от градиентных искажений фона изображения маркера (связана с неравномерной подсветкой метки);

При исследовании погрешности от смещения круга (изображения маркера) на доли пикселя была выявлена зависимость низкочастотной (по пространственной частоте) составляющей погрешности от диаметра измерительной метки. С увеличением диаметра метки спектр погрешности становится более равномерным, а погрешность уменьшается, в основном, в низкочастотной области спектра. В целом, погрешность от смещения круга, обусловленная дискретизацией изображения метки, для меток диаметром от 20 пикселей и выше, не превышает $\pm 0,003$ пикселя. При этом чувствительность экспериментальной системы составляет порядка 0,25 мм/пиксель, соответственно, для меток, не менее 5 мм в диаметре, погрешность не превышает $\pm 0,00075$ мм. Таким образом, погрешность от смещения круга на доли пикселя является величиной пренебрежимо малой по сравнению с погрешностями используемой экспериментальной фотограмметрической системы ФГУП «ГосНИИАС», составляющей величину порядка 0,15 мм.

Для исследования погрешности от перспективных искажений автором работы было создано специальное программно-математическое обеспечение, вносящее в изображение перспективные искажения, соответствующие различным углам отклонения линии наблюдения от нормали к плоскости, в которой располагаются маркеры. В основе построения программы лежит комбинация проективного и аффинного преобразований координат точек изображения, реализуемая посредством выражений:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_k^*}{z_k^*} \\ \frac{y_k^*}{z_k^*} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_k^* \\ y_k^* \\ z_k^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} = 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

где x_u, y_u – начальные (неискаженные) координаты точек изображения;

x_k, y_k – координаты точек изображения (с искажениями).

Координаты x_k^*, y_k^*, z_k^* по результатам аффинного преобразования располагаются в плоскости $z = c_1 x + c_2 y + 1$, не являющейся плоскостью

изображения ($z = 1$), поэтому по отношению к результатам (x_x^*, y_x^*, z_x^*) преобразования применяют операцию нормализации однородных координат путем деления каждого из членов результирующего вектора на z_x^* .

При этом $a_{00}, a_{01}, a_{02}, a_{10}, a_{11}, a_{12}$ – коэффициенты аффинного преобразования, а a_{20} и a_{21} – коэффициенты, отвечающие за перспективные искажения. В зависимости от знаков и значений коэффициентов будет меняться направление и «крутизна» перспективы.

Описанные преобразования являются обратимыми, поэтому, после внесения соответствующих искажений, программа определяет координаты центра масс полученной фигуры (искаженной перспективой), а к полученным координатам применяет обратное преобразование. Таким образом, появляется возможность оценки погрешности от перспективных искажений изображения. Для исключения перспективных искажений изображения, необходимо, чтобы в плоскости изображения располагалось четыре точки, описывающие квадрат. Используя априорную информацию о конечной форме четырехугольника, создаваемого центрами четырех маркеров, можно определить значения коэффициентов матрицы преобразования (6) и применить его к изображению.

По результатам проведенных исследований получены зависимости (рис. 1), иллюстрирующие высокую эффективность предложенного алгоритма компенсации погрешности от перспективных искажений. Различия экспериментальной и теоретической кривой обусловлены наличием погрешности от дискретизации, возникающей при работе с цифровыми изображениями.

Результаты математического моделирования говорят о том, что применение предложенного метода компенсации погрешности от перспективных искажений позволяет в большинстве случаев (при отклонениях линии наблюдения от нормали до $45-50^\circ$) снизить погрешность от перспективных искажений в несколько раз до $-0,1$ пикселя ($-0,025$ мм).

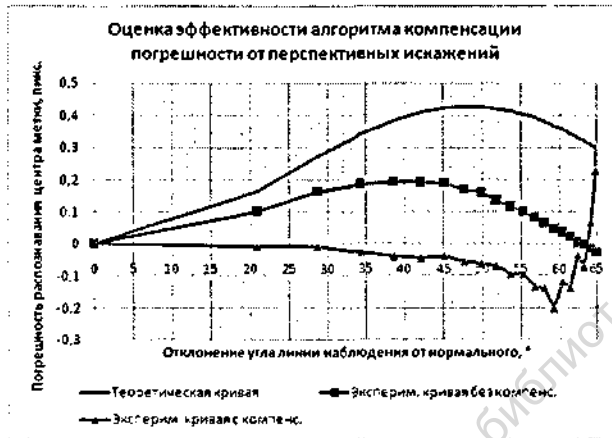


Рис.1 – Оценка эффективности метода компенсации погрешности от перспективных искажений

Для исследования влияния собственного шума цифровой матрицы фотоприемника на погрешность распознавания координат центра измерительных меток использовался программный генератор случайных чисел, распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и различными значениями среднеквадратического отклонения. Учитывая случайный характер подмешиваемого шума, для вычисления значения погрешности использовались следующие оценки: среднее арифметическое, медиана и максимальное отклонение в выборке из 40 реализаций. В результате получен линейный характер нарастания погрешности распознавания в зависимости от мощности шума. Для изображений, полученных на экспериментальной фотограмметрической измерительной информационной системе, значение среднеквадратического отклонения шума не превышает 0,6% максимальной яркости, при этом погрешность распознавания координат центра маркера не превышает 0,02 пикселя (0,005 мм).

При анализе погрешности от градиентной заливки фона изображения метки использовалось специальное программно-математическое обеспечение, изменяющее фон изображения метки. Ожидаемым результатом явилось получение линейной зависимости погрешности от уровня перепада градиен-

та. В качестве метода снижения погрешности от шума матрицы фотоприемника и градиентной заливки фона, выбрана процедура нормализации изображения с нижним и верхним порогами от 6% максимальной яркости и выше.

Во второй части экспериментального раздела приведены исследования разработанного макета автономных измерительных головок для использования в измерительной информационной системе на базе фотограмметрической технологии получения информации. По результатам эксперимента, направленного на выявление повторяемости результатов измерения полученной системы, метод поиска координат характерной точки шупа, основанный на идентификации матрицы аффинного преобразования, показал себя менее устойчивым, чем метод, основанный на использовании априорной информации о расстояниях от характерной точки измерительного наконечника до измерительных маркеров.

В ходе экспериментальных исследований была выявлена возможность повышения точности измерений за счет расположения маркеров в двух параллельных плоскостях. Результаты эксперимента на повторяемость результатов измерений при использовании модифицированной измерительной головки показали следующие значения среднеквадратических отклонений по осям координат:

по X – 0,05 мм;

по Y – 0,04 мм;

по Z – 0,06 мм.

Данные результаты сопоставимы с погрешностью используемой в качестве базовой фотограмметрической системы.

Были произведены измерения нескольких тестовых объектов образцовой формы: калибра-пробки 36 Н8 ПР и концевой меры длины с номинальным размером 50 мм. Результат измерения диаметра калибра: 36,029 мм, круглограмма, полученная по результатам измерений, приведена на рис.2.

Измеренный размер концевой меры длины составляет 50,079 мм.

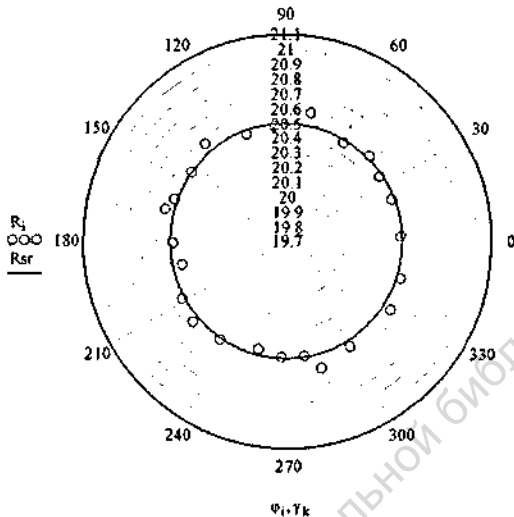


Рис.2 -- Результаты координатных измерений поверхности калибра

Результаты экспериментальных исследований позволяют определить области возможного использования подобных систем для контактных измерений на базе фотограмметрической технологии получения измерительной информации: контроль размеров, параметров формы и расположения в корпусных, кузовных и других изделиях, характеризующихся допусками на линейные размеры порядка 0,2-0,5 мм и выше.

В заключении кратко изложены обладающие научной новизной положения диссертации и наиболее значимые результаты, полученные в работе:

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

1. Проведенная оценка предельных метрологических возможностей сканирующих фотограмметрических систем с использованием структурированной подсветки объекта исследования показала ограниченность возможностей их применения только классом поверхностей с относительно небольшим изменением кривизны (поворот нормали не более $\pm 15^\circ$) и четко выраженным диффузионным характером отражения света.

2. В результате поиска оптимальной архитектуры автономных измерительных головок в отношении определения числа и геометрии размещения маркеров по их поверхности выявлено, что маркеры должны располагаться в различных плоскостях наблюдения, а положение характерной точки измерительного наконечника должно стремиться к равноудаленному от измерительных маркеров. Экспериментальные исследования с целью оптимизации архитектуры автономных измерительных головок показали справедливость сформулированных требований, при этом доля погрешности, вносимой контактной измерительной системой снижается до 10-15% от погрешности базовой системы.

3. Разработанные последовательности вычислительных процедур и комплекс алгоритмов, необходимых для определения пространственных координат центров измерительных наконечников по двумерным координатам изображений маркеров позволяет более рационально использовать вычислительные ресурсы и реализовывать указанные процессы в режиме реального времени.

– первый вариант основан на идентификации матрицы аффинного преобразования, связанного с изменением положения системы координат измерительной головки при ее перемещении из начального положения в рабочее положение, соответствующее акту измерения;

– второй вариант основан на использовании информации о расстояниях от характерной точки наконечника до центров маркеров, формируемой при настройке параметров измерительной головки;

Подход на основе первого варианта обеспечивает высокую производительность вычислений, однако при плохой обусловленности матрицы аффинных преобразований возможно появление anomalously высоких погрешностей.

Главным недостатком второго варианта является необходимость использования алгоритмов поиска решения, которые требуют больших вычислительных затрат, однако согласно проведенным экспериментальным исследованиям неопределенность результатов по каждой из координатных осей снижается до 0,06 мм.

4. В ходе экспериментальных исследований с целью оптимизации программно-математического обеспечения измерительной системы была доказана особая значимость процесса настройки системы, как источника дополнительной погрешности, и подтверждена эффективность предложенных алгоритмов.
5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований подтвердили основные положения диссертационного исследования. Погрешность, вносимая за счет применения автономных головок, в дополнение к погрешности базовой фотограмметрической системы составляет величину порядка 10-15% от погрешности базовой системы.
6. Проведенный анализ результатов экспериментов в целях выявления параметров измерительных головок и элементов программно-математического обеспечения, оказывающих наибольшее влияние на погрешность измерительной системы дал возможность установления закономерностей влияния на значение суммарной погрешности измерительной системы следующих параметров:
 - шум ПЗС – матрицы фотоаппарата, приводящий к практически линейному росту суммарной погрешности системы;
 - неравномерность освещенности контролируемой поверхности изделия приводит к значительному смещению распознанных координат центров маркеров и росту погрешности измерения при использовании автономных измерительных головок;

– проекционные искажения приводят к нелинейному росту погрешности значительно усиливающемуся при увеличении размеров маркеров.

7. Для повышения точности распознавания координат центров маркеров, размещаемых на поверхности головки, предложен оригинальный алгоритм коррекции погрешности от перспективных искажений. Применение этого метода позволило снизить погрешность распознавания координат центров маркеров в 2-3 раза (в зависимости от значения угла отклонения линии наблюдения от нормали поверхности маркера).
8. При установлении характера совместного влияния погрешностей распознавания координат центров маркеров автономных измерительных головок на точность определения координат характерной точки измерительного наконечника в рабочем пространстве выявлено значительное нелинейное увеличение суммарной погрешности системы для контактных измерений при росте погрешности базовой фотограмметрической системы, обусловленной, в том числе, погрешностью распознавания координат центров измерительных маркеров.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Конов С.Г., Марков Б.Н. Алгоритм коррекции погрешности от перспективных искажений изображений измерительных меток // Метрология. – Москва: ФГУП «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия». – 2011. – №3. – С.8-15.
2. Конов С.Г. Мобильная координатно-измерительная система контактного типа на базе фотограмметрической системы // Измерительная техника. – Москва: ФГУП «Российский научно-технический центр информа-

ции по стандартизации, метрологии и оценке соответствия». – 2010. – №2. – С.24-26.

3. Конов С.Г. Разработка координатно-измерительной машины контактного типа на базе фотограмметрической системы // Вестник МГТУ «Станкин». – Москва: ГОУ ВПО МГТУ «Станкин». – 2010. – №2. – С.119-121.

Статьи и материалы конференций:

4. Konov S.G. Mobile contact-type coordinate-measurement system based on a photogrammetric system // Measurement Techniques. – New York: Springer New York Consultants Bureau. – 2010. – №2 С.149-152.
5. Конов С.Г. Исследование метрологических характеристик контактной измерительной системы на базе фотограмметрической технологии получения информации // Сборник тезисов конференции по результатам проектов, реализованных в рамках Федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2012 годы» в области информационно-телекоммуникационных технологий. – Москва. – 2010 г., С.44-45, ISBN 978-5-904602-04-8.
6. Конов С.Г. Особенности разработки координатно-измерительной машины на базе фотограмметрической системы // Сборник трудов третьей всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». – Москва. – 2010 г., С.81-82, ISBN 978-5-4253-0016-4.
7. Конов С.Г. Разработка портативной трехмерной фотограмметрической измерительной системы // Сборник трудов всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». – Москва. – 2008 г., С.85-86, ISBN 978-5-7038-3235-6.
8. Конов С.Г. Разработка фотограмметрической измерительной системы // Материалы студенческой научно-практической конференции «Автоматизация

тизация и информационные технологии (АИТ-2008)». Второй тур. Сборник тезисов докладов. – Москва: МГТУ «Станкин», 2008 г., С.92-94.

9. Шулепов А.В., Конов С.Г., Косинский Д.В. Использование фотограмметрических технологий при проектировании и эксплуатации деталей сложной формы // Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Российский автопром: теоретические и прикладные проблемы механики и машиностроения». – Москва: Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, 2007 г., С.66.
10. Конов С.Г., Косинский Д.В. Использование фотограмметрических технологий при построении трехмерной бесконтактной портативной измерительной системы // Молодые ученые – промышленности, науке, технологиям и профессиональному образованию: проблемы и новые решения: Сборник научных докладов VII Международной научно-практической конференции. – Москва: МГИУ, 2007 г., С.177-179.

Из фондов Российской национальной библиотеки

Из фондов Российской национальной библиотеки

Из фондов Российской национальной библиотеки

Подписано в печать: 22.04.11

Тираж: 120 экз. Заказ № 25

Отпечатано в типографии «Реглет»
119526, г. Москва, пр-т Вернадского, 39
(495) 363-78-90; www.reglet.ru

2-8599

2011A
8599

Из фондов Российской национальной библиотеки