

01;03;12

Компьютерная автоматизация обработки оптических измерений в аэробаллистическом эксперименте

© В.А. Сахаров, Э.А. Тропп

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: v.sakharov@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 30 июня 2004 г.)

Представлено развитие идеологии полуавтоматической компьютерной обработки экспериментальных фотоснимков применительно к задаче внешней баллистики — идентификации аэродинамических параметров движущихся объектов по траекторным данным. В основе изложения оригинальный программный продукт, успешно отработанный на реальном экспериментальном материале в процессе создания базы фотоданных баллистического эксперимента в ФТИ и интегрированный в информационно-поисковую систему „Архимед“, используемую для управления этой базой данных. Указаны преимущества данной полуавтоматической методики по сравнению с „ручными“ измерениями, а также с полностью автоматизированным вариантом подхода.

Введение

Среди задач аэродинамики традиционно занимает важное место определение лётных свойств объектов, т.е. их аэродинамических характеристик (АДХ). Последние могут измеряться в экспериментах на разного рода аэродинамических трубах, где осуществляется инверсное моделирование движения (набегание газа на неподвижную модель), а также быть получены из экспериментов на баллистических трассах (прямое моделирование).

Задачу определения аэродинамических характеристик тел в свободном полете можно подразделить на измерение параметров траектории тела (или „задачу идентификации движения“ [1]) и вычисление собственно АДХ из полученных траекторных данных. Методическим вопросам решения второй части задачи посвящен ряд работ (например, [2,3]), и мы не будем здесь останавливаться на этом аспекте проблемы.

Отслеживание положения летящего объекта в аэробаллистическом эксперименте, как правило, производится либо телеметрическими средствами (что выходит за рамки рассмотрения данной работы), либо путем последовательного фотографирования изображения объекта совместно с реперами единой координатной системы баллистической трассы и отметками времени съемки. В последнем случае траекторные данные в виде таблиц пространственно-временных координат тела (в лабораторной системе) должны быть получены в результате измерений на сделанных в ходе баллистического опыта фотоснимках. Необходимо для каждого из моментов регистрации иметь измерения продольной координаты тела вдоль направления стрельбы X , поперечных координат Y (вертикальное смещение) и Z (горизонтальное смещение), а также углов, определяющих пространственное положение оси (характерной линии) тела и его вращения (крена) относительно этой оси. Соответственно требуются две одновременных проекции тела в

каждый момент регистрации. Количество таких пар проекций определяется возможностями экспериментальной установки и особенностями объекта исследований. Однако даже для определения АДХ в линейном приближении (для небольших амплитуд колебаний снаряда) требуется более двух точек регистрации на полупериод колебаний, а для определения демпфирования необходимо регистрировать больше одного периода. Оптимальное число постов регистрации с точки зрения требуемой полноты и точности окончательных результатов может быть найдено численным моделированием [4] для некоторого приближения искомым параметров. Таким образом, количество изображений, подлежащих обработке после каждого эксперимента, может насчитывать несколько десятков. Отсюда следует актуальность компьютеризации процесса измерений на снимках баллистических объектов.

Перевод изображений с фотонегативов в цифровую форму, если регистрация производилась на пленку, конечно, требует известных трудозатрат. Однако, как показывает практика, они окупаются простотой, точностью и безошибочностью дальнейшего манипулирования оцифрованным изображением по сравнению с проведением измерений на оптических измерительных микроскопах, денситометрах и т.п. приборах. К тому же тенденция последних лет ведет к повсеместному переходу к бесфотографической регистрации изображений при помощи ПЗС камер (см. например, [5]; авторами [6] предложен вариант полного оснащения аэробаллистической установки ПЗС камерами). Таким образом, можно считать, что в будущем вопрос об оцифровке фотоизображений будет решаться еще на стадии их получения. Уже сегодня представляется целесообразным перевод на цифровое хранение фотоархивов, накопленных в области экспериментальной аэродинамики, и создание из них единой базы данных (что осуществляется в ФТИ в настоящее время [7]).

Принцип частичной автоматизации

При проведении измерений на оптико-механических устройствах (типа измерительного микроскопа УИМ-23) все действия от позиционирования фотопленки до записи координат производятся „вручную“, а в дальнейшем по завершении измерений на всех снимках одного эксперимента, подвергаются многоступенчатому пересчету для приведения к единой системе координат. По ходу этого процесса неизбежно возникают ошибки, обнаруживаемые слишком поздно и вынуждающие повторять многочисленные времяемкие операции. Основной задачей методики автоматизированных измерений является соединение всех стадий измерительно-вычислительного процесса в единый информационный процесс с возможностью его прерывания, возврата или возобновления без потерь или с минимальными потерями (в случае обнаружения ошибки) ранее полученных данных, а также согласование форматов данных для интерфейса с программами обработки траекторных данных для определения АДХ объекта [8]. Автор уже имел некоторый опыт создания подобного рода вычислительных средств применительно к обработке интерферограмм [9]. Частичная преемственность нового программного обеспечения будет отмечена ниже. Однако новая постановка задачи и иной объект исследования потребовали по-новому решить принципиальный вопрос о степени автоматизации измерений.

Существует точка зрения, что компьютеризация измерительного процесса должна быть максимальной. Имеется в виду, что путем математической обработки поля яркости (grayscale value) цифрового изображения прикладная программа должна выявить контур изображения тела, определить его центр тяжести, трассировать реперные координатные линии, вычислить координаты центра тяжести тела относительно реперов и пересчитать их в единую лабораторную систему координат. Действительно, написать программу, выполняющую такие функции, возможно. Однако практическое их осуществление сопряжено с существенными трудностями. Реальные экспериментальные снимки всегда значительно зашумлены (посторонние засветки, дефекты пленки, статические и движущиеся посторонние предметы в поле зрения оптической системы). Особенно существенно отрицательное влияние этих помех на детектирование реперных линий (изображений тонких нитей или штрихов). Разделить изображения объекта и реперов при их частичном переналожении еще возможно в силу их существенно разных характерных размеров. Однако бывает практически невозможно отличить в автоматическом режиме реперные линии от изображений ударных волн, избежать детектирования ложных объектов. Кроме того, форма изображения летящего тела на снимке зачастую искажена по сравнению с его геометрической проекцией из-за рефракции света в областях сильных градиентов плотности газа, обтекающего объект, да и геометрическая проекция может быть косоугольной. Даже на умеренных скоростях проекция головной части

оказывается искаженной за счет рефракции в ударном слое и, возможно, за счет экранирования отклоненных лучей света оправами элементов оптической системы (при съемке в проходящем свете). На гиперзвуковых скоростях дополнительные искажения возникнут из-за излучения плазмы в поле обтекания. Поскольку перечисленные искажения имеют сложный характер (зависят от скорости и других факторов), ввести поправки для вычисления координат центра тяжести объекта по координатам центра тяжести изображений не представляется возможным. Эти затруднения (ясные и из общих соображений) констатирует автор [10], проделавшая работу по внедрению такого рода полностью автоматизированной системы. Она же на основе опыта вынуждена сделать заключение о проблематичных перспективах использования своей разработки.

Авторы настоящей работы придерживаются той точки зрения, что оператор должен сохранять контроль за объектом в процессе всех измерений. Программно-методический путь реализации этого принципа был уже намечен в работе [9], посвященной обработке интерферограмм. Суть сводится к построению диалогового режима взаимодействия программной среды с оператором через интерфейс графического редактора, в который последовательно загружаются изображения из числа относящихся к рассматриваемому эксперименту. Оператор „вручную“ назначает видимым на снимке объектам функциональный смысл исходя из своего понимания картины, а измерение координат в пространстве снимка и их дальнейшее преобразование осуществляются программно по заданному алгоритму. Таким образом, в задаче оператора входят следующие действия: заранее ввести необходимые параметры баллистической установки и конкретного эксперимента (включая геометрию снаряда), осуществить ввод файлов изображений, относящихся к данному эксперименту (при необходимости сначала отсканировав фотопленки), на каждом из изображений указать положение реперов (т.е. координатных осей) и тела. Ясно, что целью первичной обработки результатов измерений аэробаллистического эксперимента является определение траектории центра масс метаемой модели (если не говорить о ее угловой ориентации). Однако в силу названных выше трудностей определение центра тяжести модели по ее изображениям с приемлемой точностью не всегда возможно. Было принято методическое решение находить положение так называемой характерной точки, т.е. такой точке на объекте или точке пространства, однозначно связанной с объектом, которую можно идентифицировать с требуемой точностью на всех проекциях, а затем ее координаты однозначно пересчитать в координаты центра масс. Например, для шара это может быть его задняя критическая точка для измерения продольной координаты или середина видимого „поперечного диаметра“ при измерении бокового отклонения шара, а для затупленного конуса — точка пересечения линий продолжения образующих конуса. Выбор характерной точки осуществляется в ходе предварительного анализа всей совокупности фотографических изображений исследуемого объекта.

Отдельным вопросом в случае сканирования фото-негативов является необходимое разрешение. Как указывалось в [9], устанавливать этот параметр следует, учитывая свойства оптической схемы и особенности объекта исследования. Когда съемка производится путем проектирования объекта на фотоматериал пучком света без использования объектива и других оптических элементов (случай экспериментов на трассе ФТИ), разрешение негатива практически определяется только свойствами фотопленки. Изопанхроматическая широкоформатная (ширина 320 mm) аэрофотопленка обладает разрешающей способностью порядка 100 линий на миллиметр. Измерения с соответствующей точностью (0.01 mm) заведомо превышают реальные точности юстировки систем фотографирования и поэтому не имеют смысла. Исходя из величин гипотетических средне-квадратичных погрешностей координат порядка 0.1 mm, рекомендуемым значением разрешения можно назначить не ниже 500 точек на дюйм.

Для определения масштаба электронного изображения можно воспользоваться измерением расстояния на изображении, натуральная величина которого известна. Наиболее удобным для этой цели оказывается изображение шкалы на прозрачной основе, впечатанное в кадр. Возможно также подкладывать прозрачную масштабную линейку в процессе сканирования. Сканирование снимка следует производить с оригинала пленки-негатива для минимизации дополнительных искажений (абберации оптики при пересъемке, неравномерная усадка фотоматериала и т.п.). Во избежание потерь точности после сканирования хранение изображений осуществляется без сжатия; принятый формат — „bitmap“ (растр*.bmp). Остальные необходимые действия осуществляются программно.

Программное обеспечение измерителя баллистических снимков

По аналогии с изложением, принятым в [9], можно сказать, что создан комплекс автоматизированного рабочего места (АРМ) исследователя, занимающегося обработкой материалов аэробаллистического эксперимента. В качестве аппаратной части АРМ выступает персональный компьютер (без особо высоких требований: оперативная память порядка 32 мегабайт достаточна для обработки среднего эксперимента) и планшетный сканер (в случае регистрации на пленку в экспериментах). Программная часть комплекса представляет собой пакет ValMeasure (платформа — Windows 32), написанный на языке Pascal. Объектный принцип программирования позволил частично использовать прежние наработки [9] в части организации интерфейса пользователя, что облегчает оператору, знакомому с [9], освоение нового продукта.

На рис. 1 показана блок-схема функционирования программы обработки траекторных снимков — результатов баллистического опыта. Штриховая рамка объединяет действия, выполняемые программно.

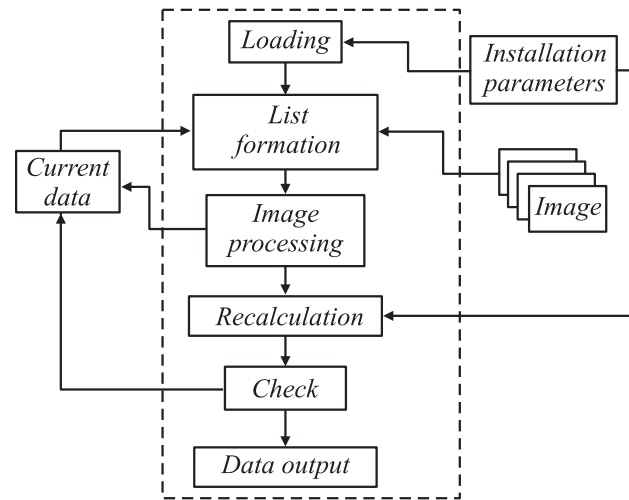


Рис. 1. Блок-схема функционирования программы обработки траекторных снимков.

Необходимым условием начала работы программы является наличие специфического файла-описания баллистической установки (на рис. 1 — „Данные привязки“), содержащего данные привязки постов регистрации к единой системе координат, а также параметры оптической схемы фотографирования. В этом файле содержатся координаты x_i , δy и δz точек пересечений реперных линий снимков ($x'y'z'$) относительно земной координатной системы (XYZ). Здесь же для каждого фотопоста определены расстояния L и a — от фотопленки до источника света и от фотопленки до оси трассы соответственно, необходимые при обработке снимков, полученных в расходящемся пучке света (рис. 2 — случай горизонтальной проекции: OX — продольная ось трассы, S — источник света). Во избежание ошибок оператора, для формирования данного файла в пакете имеется специальная программа.

На первом этапе работы („Загрузка“) оператору предлагается либо начать новый сеанс, либо продолжить предшествующий. В первом случае необходимо выбрать баллистическую трассу (указать имя файла привязки) и ввести величину удаления (по двум осям) центра тяжести модели от характерной точки, которая будет использована при обработке данного опыта.

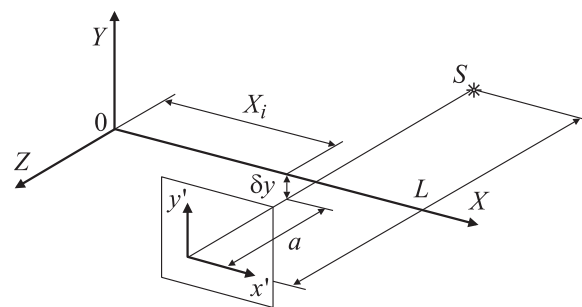


Рис. 2. Системы координат снимка и баллистической трассы (горизонтальная проекция).

При выборе режима с продолжением предшествующего сеанса данные привязки и величина удаления автоматически загружаются из файла „Текущие данные“, который формируется и сохраняется в процессе работы. В этом же файле содержатся уже полученные данные о координатах характерной точки в плоскости обработанных снимков, угла наклона оси модели, а также соответствующие номера постов регистрации, ориентация проецирования (горизонтальная и вертикальная) и имена файлов-изображений, на которых были сделаны эти измерения.

Второй этап („Формирование списка“) заключается в создании списка имен файлов-изображений, намеченных к обработке. Оператор осуществляет набор имен файлов, которые вносятся в список, проходя процедуру проверки, в результате которой из списка имен файлов исключаются либо случайно дублированные файлы, либо уже обработанные (как указано выше, сведения об обработанных изображениях хранятся в файле „Текущие данные“).

Третий этап — работа с изображением, этап, на котором производятся измерения на изображении модели и запись координат характерной точки и угловой ориентации оси¹ тела в файл „Текущие данные“. Этот файл обновляется в момент внесения каждого нового измерения, благодаря чему процесс обработки может быть прерван без потери ранее проведенных измерений. Ниже этот этап работы будет рассмотрен подробнее.

После того как список файлов, который, впрочем, можно дополнять на любом этапе работы, будет исчерпан, производится процедура („Преобразование“ на рис. 1) пересчета измеренных координат проекции характерной точки в координаты центра тяжести модели в единой системе отсчета, связанной с баллистической трассой. На этом этапе привлекаются данные из файла привязки и величина удаления характерной точки от центра тяжести модели.

После определения координат центра тяжести модели оператор имеет возможность просмотреть эти результаты („Контроль“) в виде графических зависимостей изменения линейных и угловых координат вдоль оси баллистической трассы. При наличии ошибок необходимо удалить соответствующие записи в файле „Текущие данные“ и произвести повторную обработку нужных изображений.

На заключительном этапе обработки („Вывод данных“) оператор сопоставляет списку постов наблюдения, для которых проведена обработка фотоснимков, зарегистрированные в эксперименте значения времени съемки. Таким образом оказывается сформирована сводная таблица, куда сведены пространственно-временные (в том числе угловые) координаты тела в полете для всех точек измерения, иначе говоря, узлов плана эксперимента. Эти данные сохраняются в файле, готовом для

¹ В данной реализации программ измерения угла крена не предусматриваются, поскольку для этого нужны специальные меры при съемке, не задействованные в баллистических экспериментах ФТИ.

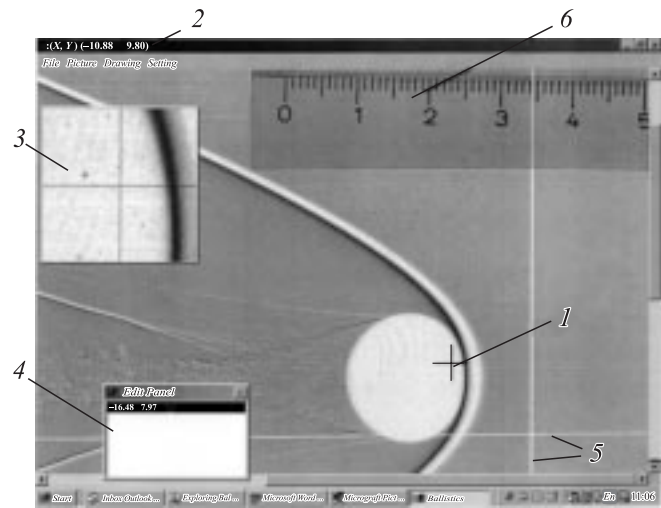


Рис. 3. Типовой вид главного окна программы BalMeasure.

дальнейшей обработки программой вычисления аэродинамических коэффициентов. Вопросы оценивания АДХ по данным траекторных измерений выходят за рамки рассмотрения данной работы (см., например, библиографию в [8]).

Из перечисленных выше этапов работы оператора наиболее трудоемким является третий — обработка изображения при помощи автоматизированного графического редактора. Рассмотрим основные возможности, которые предоставляет этот редактор для облегчения работы оператора.

Типовой вид главного окна программы с загруженным изображением теневой картины сферы, летящей с сверхзвуковой скоростью, показан на рис. 3. Редактор позволяет регистрировать пиксельные координаты текущей точки измерения, на которую указывает курсор в виде креста (1); последний можно перемещать по экрану с помощью мыши или клавиш-„стрелок“. Текущие координаты креста выводятся в заголовок главного окна (2).

Для детального рассматривания изображения его фрагмент в окрестности точки измерения может отображаться с регулируемым увеличением в дополнительном окне (3). Кроме этого, имеется еще одно вспомогательное окно (4) встроенного текстового редактора. Оба дополнительных окна по желанию оператора можно перемещать по экрану или скрыть. Текстовый редактор предназначен для текущего контроля за записями в процессе подготовки и внесению в файл „Текущие данные“.

В опциях меню реализована возможность просмотра на экране всего изображения, а также его поворота на 90° и переворота относительно вертикальной и горизонтальной осей (для случая ошибочной ориентации пленки при сканировании).

Измерениям предшествует установка осей координат. Для этого необходимо совместить крест с точкой пересечения реперных линий (5) на изображении и специальной клавишей зафиксировать начало координат. Затем крест располагается на горизонтальной реперной

линии и другой специальной клавишей определяется направление оси абсцисс („правая“ ось ординат выставляется из начала координат автоматически). По изображению масштабных меток (6), впечатанных в изображение, устанавливается коэффициент для автоматического пересчета текущих пиксельных координат точки измерения в натуральный масштаб.

Графический редактор снабжен простыми средствами рисования линий, окружностей, маркирования точек, измерение длины отрезка и углов, что позволяет выполнять на изображении элементарные геометрические построения. Такие построения бывают весьма полезными в процессе нахождения положения характерной точки на изображении. Этими же средствами осуществляется измерение угла наклона оси модели к оси абсцисс.

Регистрация координат измеряемой точки в системе снимка осуществляется автоматически при нажатии на клавишу „Enter“. При этом координаты точки заносятся в список текстового редактора, каждая строка которого для технологического удобства связана с соответствующей точкой на изображении: двойной щелчок мыши по строке переводит курсор в точку на изображении с записанными в строке координатами. Кроме этого, текстовый редактор позволяет осуществлять манипуляции со строками (вставка, удаление), а также вставлять краткие заметки в конце строки. Все это в совокупности существенно облегчает работу оператора при выполнении геометрических построений на изображении с целью определения координат характерной точки.

После определения характерной точки и записи ее координат в текстовый редактор производится измерение угла наклона оси модели к оси абсцисс при помощи двух вышеназванных специальных клавиш. Регистрации координат характерной точки и угла наклона оси модели в файле текущих измерений („Текущие измерения“ на рис. 3) производится путем выделения соответствующей записи в списке текстового редактора и нажатием клавиши „Recording“. При этом активизируется дополнительный диалог для ввода номера поста регистрации, вида проекции (вертикальная или горизонтальная), а также знака угла наклона оси модели (дополнительная мера предосторожности на случай углов, близких к нулю).

После регистрации координат характерной точки автоматически производится загрузка следующего в списке файла-изображения и повторяется та же последовательность действий.

Использование измерителя баллистических снимков

Разработанный метод, реализованный в пакете программ ValMeasure, был опробован на материале нескольких реальных экспериментов с метанием тел простой и специальной формы.

На рис. 4 представлены полученные по результатам измерений ValMeasure поперечные координаты стального шара $\varnothing 16\text{ mm}$ в некотором выстреле с начальной

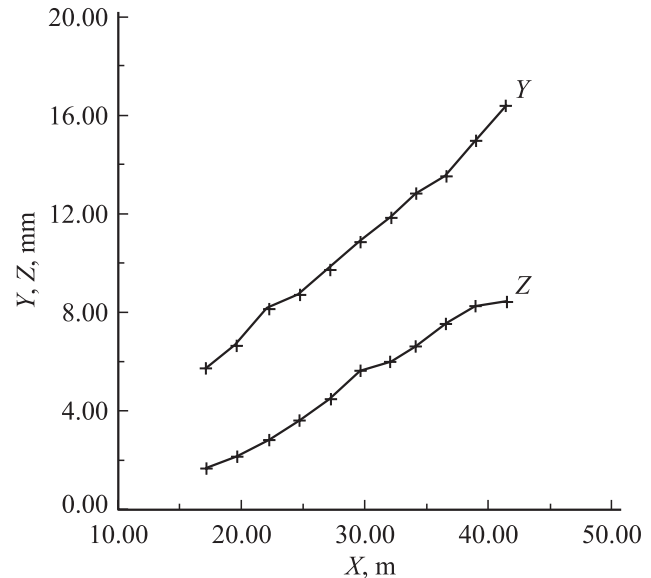


Рис. 4. Пример использования программы ValMeasure: поперечные координаты стального шара.

скоростью 1300 m/s . Видны нерегулярные отклонения графика вертикальной координаты Y от баллистической кривой и графика горизонтальной координаты Z от прямой линии (в данном случае среднеквадратичные отклонения составили 0.46 и 0.26 mm соответственно). Поскольку уравнения движения шара в воздухе известны точно (ошибка аппроксимации отсутствует), назван-

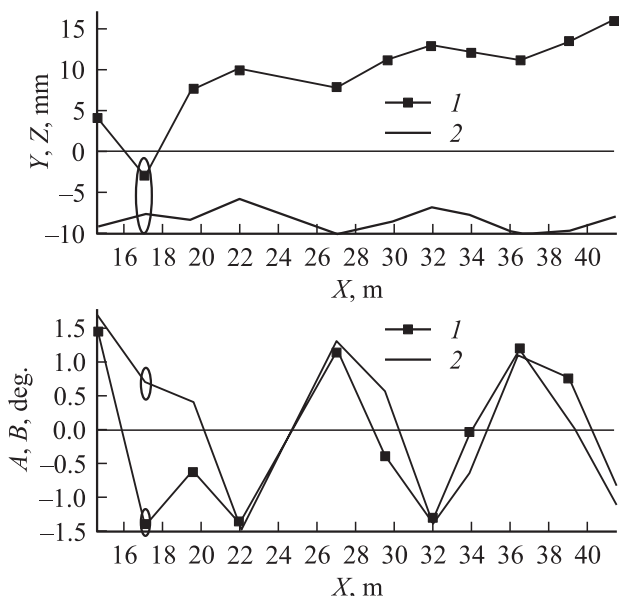


Рис. 5. Контроль результатов в программе ValMeasure: измерения траектории тела специальной формы. Верхний график — поперечные координаты тела на вертикальной (1) и горизонтальной (2) фотографической проекциях, нижний — угловые координаты. Овальной рамкой отмечено место ошибки в измерениях (снимки с регистрационной станции в районе $x = 17\text{ m}$).

ные отклонения являются погрешностями измерений. Последние состоят из случайных ошибок измерителя ValMeasure (неточность визирования оператором) и систематических ошибок, вызванных неточной юстировкой координатных реперов баллистической трассы. Совместная математическая обработка такого рода данных для нескольких выстрелов шарами позволяет выявить фотостанции с неудачной юстировкой и оценить систематическую погрешность, вызванную этой неудачной юстировкой.

В случае тела сложной формы, с неизвестными параметрами уравнений движения, измеритель ValMeasure позволяет лишь провести оперативный контроль качества работы оператора. Так, на рис. 5 показан вид экрана на этапе контроля результатов по завершении обработки всех снимков тела специальной формы. Видно неестественное нарушение регулярного характера осцилляций в районе третьей станции. Проверка показала, что снимок, полученный на этой станции, был отсканирован неправильно — в перевернутом положении.

Заключение

Имеющийся опыт использования автоматизированного измерителя при обработке фотоснимков, полученных на баллистических установках ФТИ и других организаций, свидетельствует о значительном сокращении трудозатрат и уменьшении вероятности возникновения ошибок. Принятая концепция частичной автоматизации в диалоговом режиме представляется правильной. Разработанное программное обеспечение интегрировано в систему „Архимед“ [11], применяемую для поддержки создаваемой базы данных визуализации газодинамических явлений, как это описано в [7].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 03-07-90203).

Список литературы

- [1] *Викторов В.А., Садчиков Г.Д.* // Аннотации докл. III научн. конф. „Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения“. Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 58.
- [2] *Mende N.P.* // Gas Dynamics / Ed. Yu.I. Koptev. New York: Nova Science Publishers, 1992. P. 325–356.
- [3] *Подласкин А.Б.* // ЖТФ. 1998.Т. 68. Вып. 6. С. 32–36.
- [4] *Кронберг Е.Р., Менде Н.П., Самсонов А.В., Седельников А.И.* Препринт ФТИ. № 1465. Л., 1990. 32 с.
- [5] Оптические методы исследования потоков. Тр. VII Межгос. науч.-техн. конф. М.: МЭИ, 2003. 514 с.
- [6] *Крутик М.И., Майоров В.Л., Попов В.В., Семин М.С.* // Аннотации докл. III научн. конф. „Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения“. Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 180–181.
- [7] *Морозов Ю.Г., Подласкин А.Б., Тропп Э.А.* // Оптические методы исследования потоков. Тр. VII Межгос. науч.-техн. конф. М.: МЭИ, 2003. С. 210–213.

- [8] *Менде Н.П.* Препринт ФТИ. № 1326. Л.: ФТИ, 1989.
- [9] *Менде Н.П., Подласкин А.Б., Сахаров В.А.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 2. С. 110–114.
- [10] *Yates L.A.* // Spacecraft and Rockets. Vol. 30 (2). P. 248–254.
- [11] *Морозов Ю.Г.* Канд. дис. СПб.: ФТИ, 1996.