



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Коптев М.Д., Прошунин Н.Н.,
Иванов Д.С.

Определение движения
макетов системы
управления микроспутников
на аэродинамическом столе
с использованием
видеокамеры

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Коптев М.Д., Прошунин Н.Н., Иванов Д.С. Определение движения макетов системы управления микроспутников на аэродинамическом столе с использованием видеокамеры // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 109. 32 с.

URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-109>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Российской академии наук**

М.Д. Коптев, Н.Н. Прошунин, Д.С. Иванов

**Определение движения макетов
системы управления микроспутников
на аэродинамическом столе
с использованием видеокамеры**

Москва — 2015

Коптев М.Д., Прошунин Н.Н., Иванов Д.С.

Определение движения макетов системы управления микроспутников на аэродинамическом столе с использованием видеокамеры

Предложен алгоритм определения поступательного и вращательного движения макетов на аэродинамическом столе с использованием обработки видеоизображения. Алгоритм основан на распознавании образов особых меток, установленных на верхней крышке макетов, и позволяет оценить положение центра масс макетов, их скорости, угловое положение и угловую скорость в системе координат, связанной со столом. В работе проводится исследование точности определения движения макетов, приведены результаты лабораторных испытаний разработанной системы управления.

Ключевые слова: определение движения, фильтр Калмана, обработка видеоизображения

Koptev M.D., Proshunin N.N., Ivanov D.S.

Motion Determination of Microsatellite Control System Mock-Ups on Aerodynamic Testbed Using Monocular Vision

An algorithm for center of mass and attitude motion determination of control system mock-ups moving on the aerodynamic testbed is proposed. The algorithm is based on the recognition of reference points installed on the mock-up top cap. It estimates the position, translational velocity, attitude and angular velocity of the mock-ups. The accuracy of the algorithm estimation is studied in the paper. There presented the results of the laboratory experiments.

Key words: motion determination, Kalman filter, monocular vision processing

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-31-20058_мол_а_вед.

1. Введение

Перед выводом на орбиту система управления движением космического аппарата проходит через серию испытаний. На этапе его разработки проводятся аналитические и численные исследования алгоритмов управления. Следующим этапом верификации алгоритмов управления являются испытания в условиях, максимально приближенных к орбитальным. Для этого создаются различные стенды, имитирующие движение спутников в условиях невесомости. В ИПМ им. М.В. Келдыша РАН разработан стенд, представляющий собой аэродинамический стол, по которому на воздушной подушке движутся макеты аппаратов с системами управления. На бортовых компьютерах этих макетов можно реализовать алгоритмы управления относительным движением и провести таким образом их лабораторные испытания. Для определения движения макетов на поверхности стола необходима независимая система определения движения, благодаря которой можно оценить точность работы бортовых алгоритмов. Разработке такой системы посвящена настоящая работа.

Подобные стенды для моделирования относительного движения группы спутников распространены в исследовательских институтах и университетах мира. Например, в Центре космических технологий и микрогравитации (ZARM) Бременского университета (Германия) создан стенд "LuVeX" [1]. В нем макеты включают в себя пневматическую систему, создающую воздушную подушку через пористые ножки для минимизации трения со стеклянной поверхностью стола. Недостатками такого подхода является повышенная сложность макета и малая отказоустойчивость системы. Кроме того, необходимо довольно часто заправлять баллоны сжатым воздухом. Испытания системы управления проекта Массачусетского технологического института "SPHERES" проводятся для отработки движения группы спутников на параболической траектории самолета и на МКС [2]. Группа состоит из трех наноспутников, которые совершают движения в состоянии невесомости. Такой эксперимент является весьма дорогим и требует больших затрат времени и денег на подготовительном этапе. Поэтому для этих наноспутников построили специальную подставку на воздушной подушке и предварительные эксперименты и отработку проводили на гладкой поверхности. В Стенфордском университете разработаны три робота, способные скользить по гладкой поверхности на воздушной подушке [3]. Этот проект весьма экономичен и не требует больших затрат времени для подготовки проведения экспериментов. Создание таких роботов позволяет проводить эксперименты по исследованию динамики и по отработке алгоритмов управления сложными многосвязными системами. В Милане в Политехническом университете занимаются созданием робота, названного Smart-Flyer, использующегося для тестирования алгоритмов управления движением [4]. Этот робот оснащен двумя пропеллерами, имитирующими воздействия им-

пульсных двигателей. В римском университете "La Sapienza" с использованием макета "PINOCCHIO" проводятся испытания системы сближения и стыковки, а также моделируется управление спутником с нежесткими элементами конструкции [5].

Для определения положения макетов на каждом стенде используются свои подходы. Так, макет "LuVeX" с помощью снимков потолка, на котором установлен имитатор звездного неба, определяет свое положение в пространстве [6]. На макете "PINOCCHIO" также используется обработка видеоизображения, но камера направлена на второй аппарат, с которым планируется стыковка [5]. Если на макете установлена особая метка, то алгоритм определяет относительное положение макетов и подает информацию о положении на вход алгоритмов управления. Также для автономной навигации на макетах используются инфракрасные датчики, датчики угловой скорости, акселерометры и т.д. Для достижения большей точности часто необходимо комбинировать эти системы [6]. Так, на стенде в ИПМ планируется использование совокупности датчиков, установленных на макете, совместно с системой камер над столом, независимо определяющих положение объектов на нем. Эта работа лежит в русле направления исследований в ИПМ им. М.В. Келдыша по определению относительного движения космических аппаратов [7,8].

Основной задачей настоящей работы является разработка и исследование алгоритма определения движения макетов по известным меткам с помощью видеокамеры. В результате работы алгоритма ожидается получать оценку координат макета в связанной со столом системе координат, угла его поворота, а также вектора линейной (поступательной) скорости и угловой скорости в каждый момент времени. В рамках настоящей работы также исследуется точность определения вектора состояния макетов на столе с использованием фильтрации Калмана. Кроме того, по результатам определения движения макетов проводится исследование ровности поверхности стола, что позволяет оценить уровень действующих на макеты возмущений, возникающих вследствие разноровности поверхности стола.

2. Алгоритм определения движения

Для определения движения макетов на плоскости с помощью веб-камеры необходимо провести предварительную подготовку. Прежде всего, нужно установить камеру таким образом, чтобы в область видимости попадала вся поверхность стола. Так как аэродинамический стол имеет большие габариты, то при наиболее удобном расположении камеры на потолке вертикально над столом вся поверхность не помещается в кадр. Это приводит к необходимости установки камеры под углом относительно вертикали к столу. Далее, для получения четкого изображения поверхности стола требуется настройка фокального расстояния линзы, чтобы чувствительная матрица находилась в фокальной плоскости. Как правило, программно нельзя задать фокусное расстояние для стандартных веб-камер, но можно воспользоваться функцией автофокусировки.

Для нахождения фактического фокусного расстояния, а также еще ряда внутренних параметров камеры проводится ее калибровка, которая заключается в обработке набора изображений объекта с известной формой. В качестве такого объекта была выбрана шахматная доска, так как черно-белые квадратные поля с известными размерами несложно распознать по причине достаточной контрастности. После того как камера зафиксирована, требуется определить переход между системой координат, связанной с веб-камерой, и системой координат, связанной со столом. Для этого в начало системы координат стола устанавливается также шахматная доска с известными размерами полей, что позволяет провести необходимые измерения для нахождения матрицы поворота и вектора между началами системы координат. На этом предварительная подготовка заканчивается.

Макеты на плоском столе имеют три степени свободы – одна вращательная и две поступательные. Для определенности положение макетов будем задавать координатами центра масс, который совпадает с геометрическим центром макетов, и углом поворота связанной с макетом системы координат относительно системы координат, связанной со столом. Для определения положения необходимо, чтобы на поверхности каждого макета находились бы легко распознаваемые "особенности" известной формы, по которым можно было бы вычислить координаты центра масс и ориентацию каждого из макетов. Наиболее удобным вариантом такой "особенности" является плоское и контрастное изображение на верхних крышках макетов. При этом варианте, если камера находится над столом, исключается затенение или заслонение меток соседними макетами, а контрастность меток обеспечивает эффективность работы алгоритма распознавания.

Для работы алгоритмов управления с обратной связью необходимо знать на каждом такте управления не только положение объектов, но и их скорость. Поэтому возникает задача определения фазового вектора состояния макетов на столе. На изображении макетов неизбежно возникают шумы различной природы. Это приводит к ошибкам определения положения и угла поворота. Для повышения точности определения фазового вектора разумно применять статистический алгоритм обработки измерений для оценки вектора состояния в режиме реального времени. Даже при использовании достаточно грубой модели движения макетов на столе алгоритм на основе фильтра Калмана значительно уменьшит ошибку определения параметров движения.

В настоящем разделе описываются все этапы построения алгоритма определения движения макетов на поверхности аэродинамического стола.

2.1. Модель веб-камеры

Рассмотрим модель камеры, состоящую из тонкой собирающей линзы и ПЗС (прибор с зарядовой связью) матрицы камеры. Введем систему координат $OXYZ$, связанную с центром ПЗС-матрицы, которая находится в фокальной плоскости линзы. Оси OX и OY направлены параллельно сторонам ПЗС-

матрицы, а ось OZ – перпендикулярно плоскости матрицы в сторону линзы. Также свяжем с ПЗС-матрицей и так называемую "пиксельную" плоскую систему координат Kxu , начало которой находится в углу прямоугольника чувствительной матрицы, а оси Kx и Ky параллельны осям OX и OY (см. рис.1).

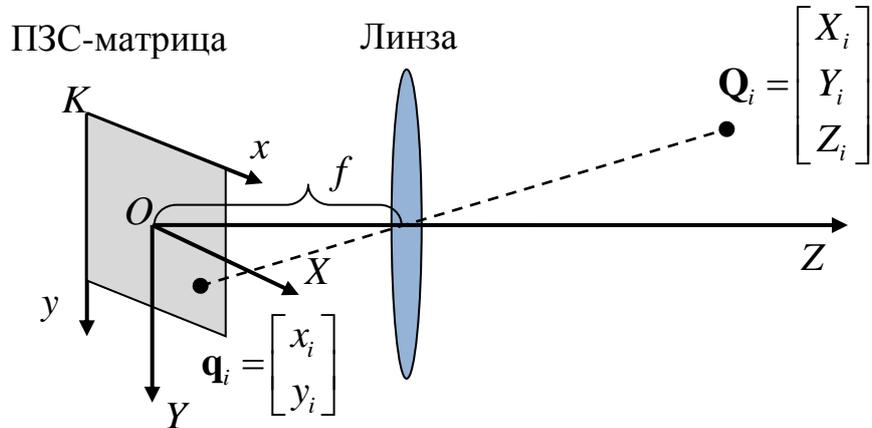


Рис. 1. Системы координат, связанные с ПЗС-матрицей

Связь между координатами i -й точки $[X_i, Y_i, Z_i]^T$ в системе $OXYZ$ и пиксельными координатами $[x_i, y_i]^T$ в системе Kxy выражается формулами проективной геометрии:

$$x_i = f_x \frac{X_i}{Z_i} + c_x \quad y_i = f_y \frac{Y_i}{Z_i} + c_y,$$

где f – фокусное расстояние, c_x и c_y — координаты точки пересечения оптической оси камеры OZ с ПЗС-матрицей, а $f_x = s_x f$, $f_y = s_y f$, где s_x и s_y — коэффициенты, определяющие размер пикселя.

Для удобства формулы проективной геометрии можно записать в матричной форме:

$$\mathbf{q}_i = \frac{1}{Z_i} M \mathbf{Q}_i, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{Q}_i = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix}, \quad \mathbf{q}_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Формула (1) хорошо описывает модель камеры с идеально тонкой линзой. Однако на самом деле линза имеет толщину и вносит искажения в изображение. Радиальные искажения возникают из-за формы линзы, а тангенциальные — вследствие неперпендикулярности плоскости ПЗС матрицы главной оптической оси.

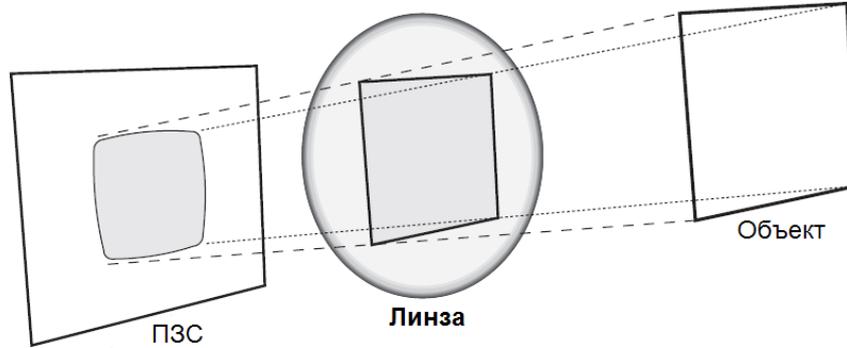


Рис. 2. Искажения линзы

Как правило, тангенциальные искажения малы и не учитываются при коррекции изображения. Радиальные искажения равны нулю в точках пересечения оптической оси и ПЗС-матрицы и увеличиваются по мере удаления от него. Для устранения искажений функцию преобразования координат раскладывают в ряд Тейлора по степеням удаленности от оптической оси r , ограничиваясь несколькими первыми слагаемыми. Вследствие того, что функция должна быть симметричной по r , коэффициенты при нечетных степенях r обнуляются. В итоге, скорректированные координаты проекции точки имеют вид

$$\tilde{x}_i = x_i(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4), \quad \tilde{y}_i = y_i(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4),$$

где k_1 и k_2 — некоторые коэффициенты, определяющие искажения, а расстояние от оптической оси определяется так:

$$r_i = \sqrt{(x_i - c_x)^2 + (y_i - c_y)^2}.$$

Обозначим $\lambda_i = 1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4$. Тогда матричное уравнение проективной геометрии с учетом искажений, вносимых линзой, примет вид

$$\tilde{\mathbf{q}}_i = \frac{1}{Z_i} \begin{pmatrix} \lambda_i & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} M \mathbf{Q}_i.$$

Согласно постановке задачи, по координатам точек на изображении необходимо определить положение и ориентацию макетов на столе. Введем систему координат $CX^cY^cZ^c$, связанную с поверхностью стола (рис. 3). Чтобы перевести вектор i -й точки \mathbf{Q}_i^c , записанный в системе $CX^cY^cZ^c$, в систему координат $OXYZ$, связанную с камерой, необходимо знать матрицу поворота A между системами координат и вектор \mathbf{R} , связывающий начала систем координат и записанный в $OXYZ$. Тогда для радиус-вектора i -й точки будет справедливо:

$$\mathbf{Q}_i = A\mathbf{Q}_i^c + \mathbf{R}.$$

Тогда связь между пиксельными координатами изображения точки и координатами этой же точки в системе $CX^cY^cZ^c$ будет выглядеть следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{q}}_i = \frac{1}{Z_i} \begin{pmatrix} \lambda_i & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} M(A\mathbf{Q}_i^c + \mathbf{R}). \quad (2)$$

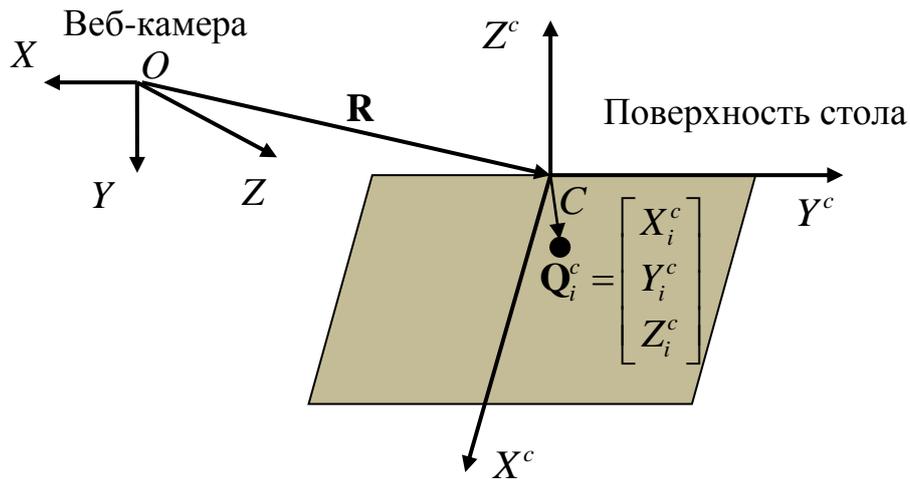


Рис. 3. Система координат, связанная со столом

Таким образом, согласно модели (2), для зафиксированной относительно стола камеры необходимо определить параметры f_x, f_y, c_x, c_y , обусловленные положением линзы относительно ПЗС-матрицы, коэффициенты k_1, k_2 , для учета искажения изображения линзой, и, наконец, матрицу перехода A и вектор \mathbf{R} , которые задают взаимное положение и ориентацию систем координат, связанных с ПЗС-матрицей и со столом.

2.2. Определение параметров камеры

Разделим параметры камеры на внутренние и внешние. В качестве внутренних параметров будем рассматривать $f_x, f_y, c_x, c_y, k_1, k_2$, которые определяются свойствами веб-камеры, а в качестве внешних параметров будем считать матрицу перехода A и вектор \mathbf{R} , задающие положение и ориентацию камеры.

Для определения внутренних параметров положение камеры не важно, внутренние параметры определяются только один раз и при дальнейшей работе остаются неизменными, тогда как внешние параметры необходимо определять при каждом изменении относительного положения камеры и стола.

Для нахождения внешних и внутренних параметров камеры используем *Matlab Camera Calibration Toolbox* [9]. Это открытое программное обеспечение разработано в Калифорнийском техническом университете. Для нахождения внутренних параметров веб-камеры необходимо сделать множество фотографий (рекомендуется 20) шахматной доски с известным размером поля, причем для большей точности желательно, чтобы снимки были сделаны под разными углами к доске и доска находилась в разных областях изображения (рис. 4). Далее для каждой фотографии необходимо на каждом изображении вручную задать четыре точки пересечения полей в углах шахматной доски (рис. 5). Программа по установленным точкам согласно формулам проективной геометрии (1) вычисляет прогноз пересечения остальных полей доски. Однако вследствие неточности знания внутренних параметров прогноз изображений пересечения полей не совпадает с их изображением на снимке, как можно увидеть на рис. 5. Поэтому возникает задача нахождения таких параметров $f_x, f_y, c_x, c_y, k_1, k_2$, чтобы отличие прогноза положения точек пересечения (1) от их реального положения на снимках было минимальным. В качестве функционала рассматривается сумма квадратов разницы положений точек в пикселях на всех снимках шахматных досок. В результате численной минимизации функционала определяются положения досок относительно снимающей веб-камеры (рис. 6а), величины внутренних параметров, их среднеквадратическое отклонение, а также остаточные невязки – окончательные разницы между изображением пересечения полей и их прогнозом согласно модели (1) (рис. 6б).



Рис. 4. Изображения шахматной доски для калибровки

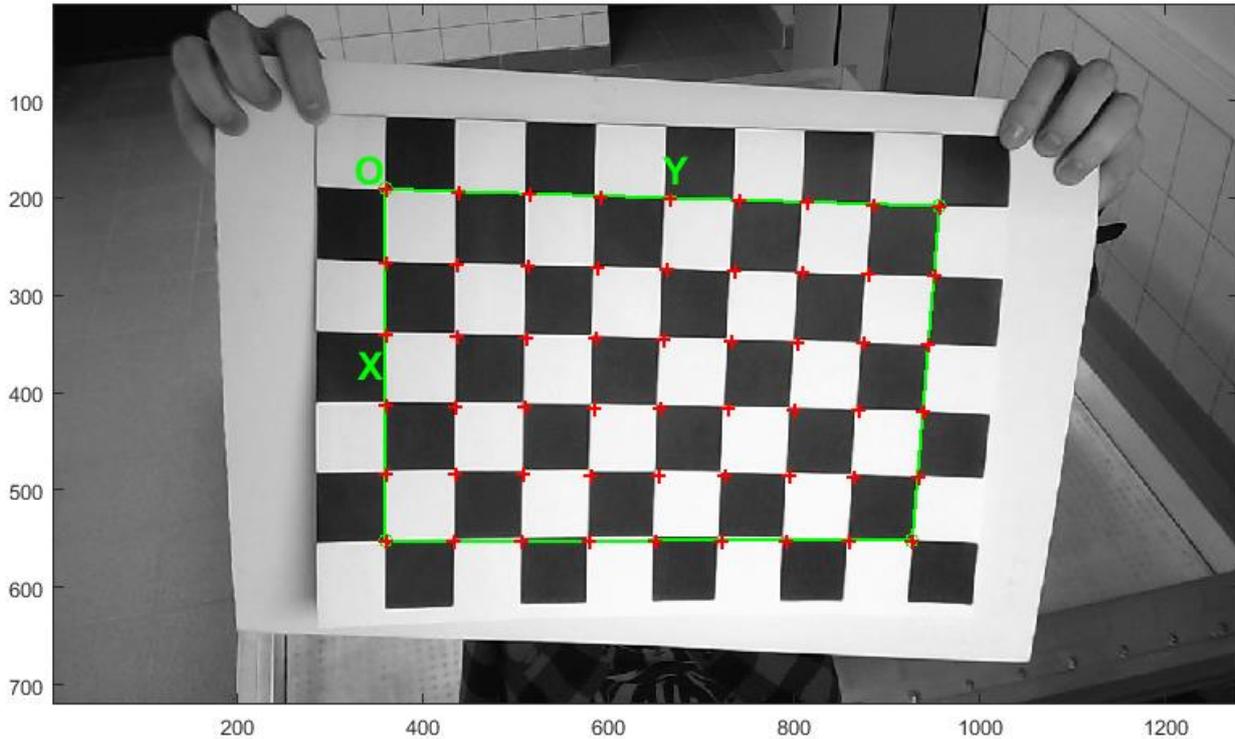


Рис. 5. Задание 4-х крайних точек на шахматной доске и спрогнозированное положение точек пересечения полей

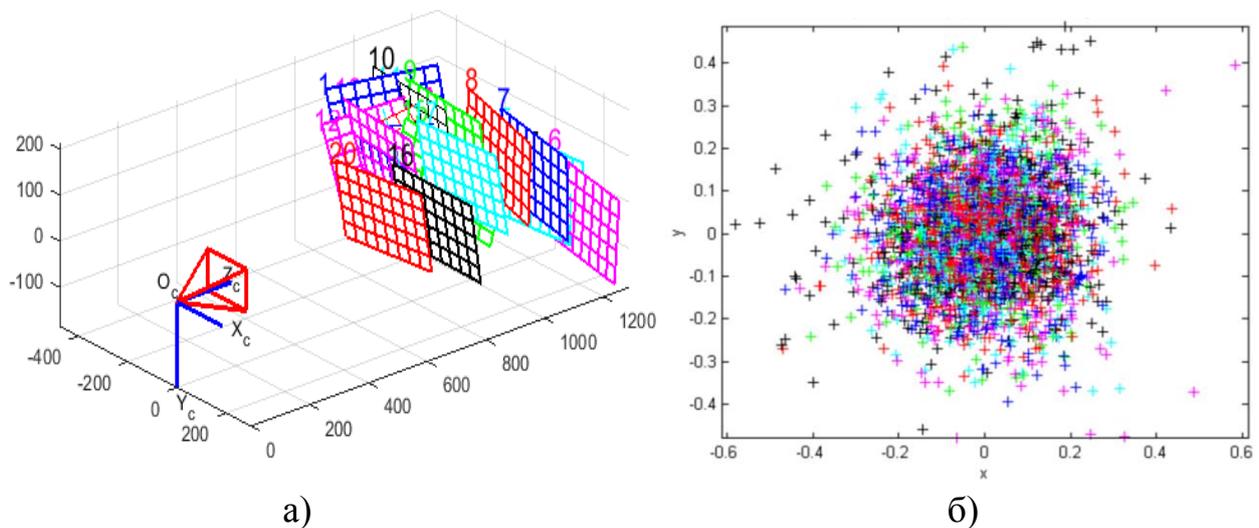


Рис. 6. Вычисленное взаимное положение камеры и шахматной доски (а) и ошибки положения пересечения шахматных полей (б)

Для определения внешних параметров – матрицы перехода A и вектора \mathbf{R} , согласно модели (2) – необходимо закрепить веб-камеру неподвижно относительно поверхности стола и поместить шахматную доску таким образом, чтобы ее стороны и оси системы координат, связанной со столом, совпадали, а начало системы координат находилось в одном из четырех крайних пересечений полей в углах доски (рис. 7). На изображении шахматной доски так же, как и при внутренней калибровке, требуется отметить вручную четыре точки в углах дос-

ки. Далее по отмеченным на изображении точкам строится прогноз точек пересечения полей по модели (2) и сравнивается с их реальным положением на изображении. С помощью численной минимизации суммы квадратов от разности прогноза для точек пересечения полей и их положения на снимке определяются внешние параметры камеры и их среднеквадратическое отклонение.

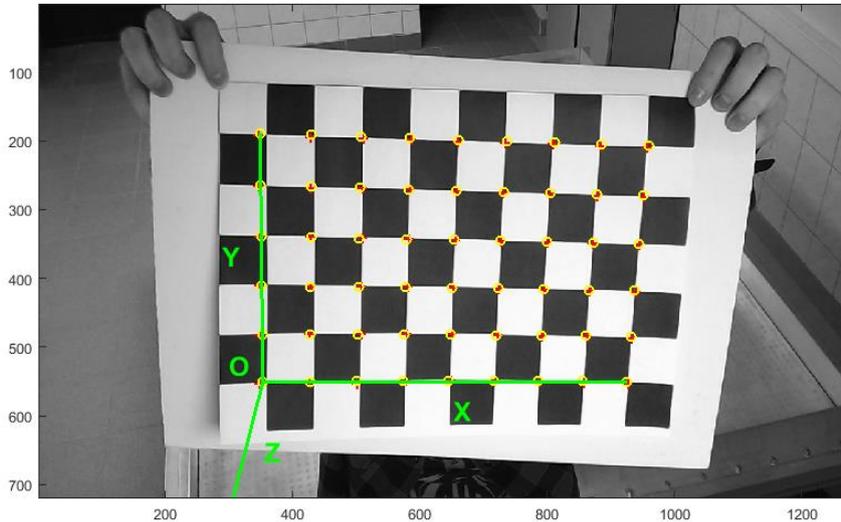


Рис. 7. Система координат, связанная с шахматной доской

2.3. Вычисление координат точки по ее изображению

После того как проведена калибровка веб-камеры, найдены ее внутренние и внешние параметры, можно найти координаты заданной точки в системе координат, связанной со столом, по координатам изображения этой точки в "пиксельной" системе координат, связанной с ПЗС-матрицей. Для этого, используя модель (2), преобразуем "пиксельные" координаты i -й точки $\tilde{\mathbf{q}}_i$ в нормализованные координаты \mathbf{q}_i^* , которые определяются так:

$$\mathbf{q}_i^* = \left[\begin{pmatrix} \lambda_i & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} M \right]^{-1} \tilde{\mathbf{q}}_i.$$

Тогда возникает векторное уравнение вида:

$$Z_i \mathbf{q}_i^* = A \mathbf{Q}_i^c + \mathbf{R}. \quad (3)$$

Компоненты вектора \mathbf{q}_i^* определяются по вектору $\tilde{\mathbf{q}}_i$, измеренному на изображении, и являются известными. Матрица перехода A и вектор \mathbf{R} определены после внешней калибровки. Векторное уравнение (3) имеет четыре неизвестных

– это дальность до точки Z_i в системе $OXYZ$, связанной с камерой, и компоненты вектора $\mathbf{Q}_i^c = [X_i^c, Y_i^c, Z_i^c]^T$ в системе координат, связанной со столом. Однако известно, что макеты движутся по поверхности стола, т.е. их координата Z_i^c остается неизменной и ее определение не является обязательным для задачи навигации на поверхности стола. Без потери общности примем $Z_i^c = 0$. В этом случае система из трех уравнений (3) однозначно разрешается относительно трех неизвестных – Z_i , X_i^c и Y_i^c . Из этих трех переменных для определения положения, например, центра масс на столе требуются только две – X_i^c и Y_i^c . Однако для того чтобы определить ориентацию макетов на столе, необходимо найти положение еще как минимум одной точки на макете. Таким образом, возникает задача выбора таких уникальных меток на поверхности макетов, чтобы с помощью них можно было определить не только положение их центров масс, но и ориентацию.

2.4. Выбор меток

Для решения задачи навигации на столе по видеоизображению необходимо, чтобы на поверхности макетов находились уникальные особенности – метки с особой структурой, с помощью которых можно было бы определить как положение центра масс, так и ориентацию макетов на столе. Было принято решение расположить метки на верхней плоской крышке макетов, что исключает проблему затенения/заслонения меток соседними макетами. Основными требованиями к метке являются контрастность и особая узнаваемая форма. Для автоматического определения положения сначала используется процедура распознавания меток, которая зависит от выбранной их структуры.

Перед процедурой распознавания меток проводится предварительная обработка изображения, полученного с камеры. Сначала цветное изображение приводится к бинарному виду, т.е. все цвета приводятся к черному или белому. Затем выполняется поиск контуров в бинарном изображении. Среди найденных контуров выделяются те, что подходят в примерный диапазон по количеству точек (периметр контура в пикселях). Далее производится анализ формы на соответствие заданной метке.

Изначально планировалось использовать в качестве метки совокупность квадратов (рис. 8). Алгоритм распознавания такой метки заключается в нахождении минимального описывающего исследуемый контур прямоугольника и последующем сравнении его площади с площадью, охваченной контуром. Они должны совпадать с заданной точностью. Однако из-за того, что камера закреплена под значительным углом к поверхности стола, искажения, вносимые перспективой, оказались критическими, что привело к неприменимости такой метки для задачи определения положения макета на столе.

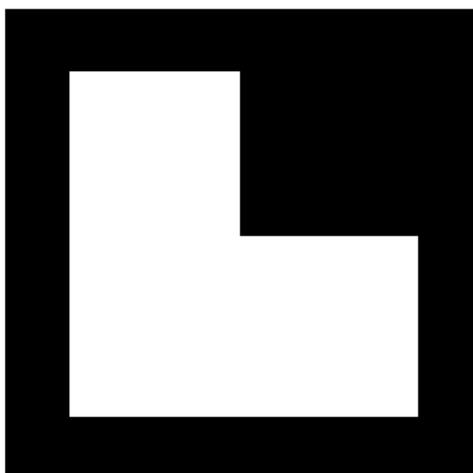


Рис. 8. Метка в виде совокупности квадратов

Далее было решено использовать метку, состоящую из двух различных по размеру черных кругов на белом фоне, один из которых являлся основным, а второй — вспомогательным, необходимым для определения угла поворота (рис. 9). Для проверки на «округлость» проводится сравнение расстояний между противоположными точками контура. Если все эти расстояния оказываются примерно одинаковыми при заданной погрешности, то объект считается кругом, а за его диаметр принимается среднее арифметическое по всем диаметрам контура. Два круга, составляющие метку, различаются по диаметру. Однако такой алгоритм во время экспериментального тестирования определял много лишних контуров, поэтому было решено добавить еще один критерий — проверку по цвету. Для этого находится геометрический центр контура, и цвет этой точки на исходном изображении должен примерно соответствовать черному.

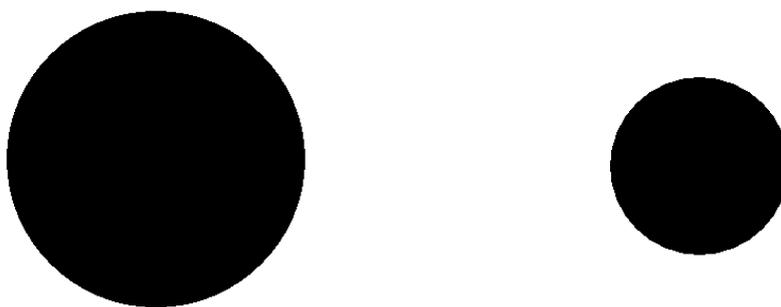


Рис. 9. Метка в виде совокупности черных кругов

При дальнейшем тестировании выяснилось, что при движении объекта, а также при изменении освещения цвет центра контура на цветном изображении может меняться. Этот факт влияет на правильность распознавания меток, поэтому было решено отказаться от проверки на цвет. Вместо нее был придуман эффективный критерий отсеивания лишних контуров. Он основан на том, что

структура метки представляет собой вложенные окружности (рис. 10). Благодаря отслеживанию иерархии вложенности контуров было достигнуто безошибочное определение меток. В результате работы алгоритма находятся все вложенные круги, составляющие метку. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 11. Для разделения кругов, относящихся к разным объектам, проверяется расстояние между всеми кругами. У каждой метки оно фиксированное и отличное от других. Таким образом различаются объекты с разными метками. На данном этапе в программе реализовано отслеживание двух объектов.

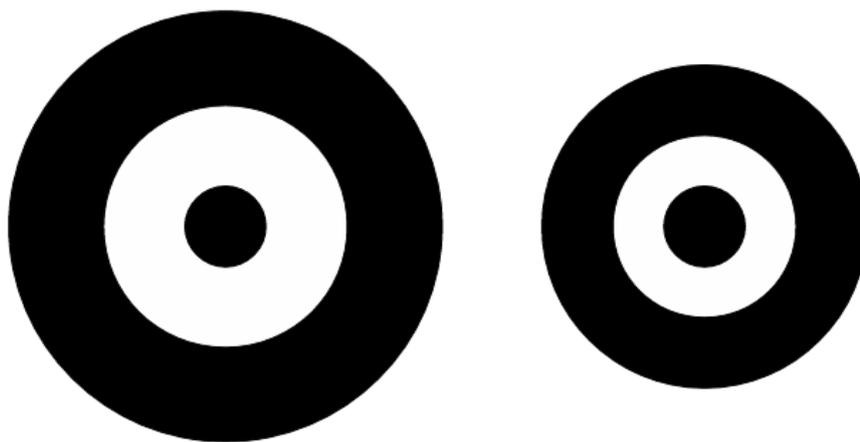


Рис. 10. Финальный вариант метки с concentрическими кругами

После распознавания меток на поверхности макета вычисляются "пиксельные" координаты центров вложенных кругов как средневзвешенные координаты пикселей, из которых составлены периметры кругов (рассматривается три concentрических круга). Такое вычисление центра окружностей позволяет значительно уменьшить ошибки, полученные при определении периметров. Если основная (большая) окружность метки находится в геометрическом центре верхней крышки макета, то предполагается, что центр этой окружности находится в центре масс макета. Вспомогательная окружность задает направление некоторой связанной с макетом оси, которая определяется вектором с началом в центре основной окружности и концом в центре вспомогательной окружности. Таким образом, вычислив "пиксельные" координаты центров окружностей на изображении с помощью уравнения (3), можно найти положение центра масс макета в системе координат, связанной со столом, и угол поворота макета относительно этой системы координат. Для определенности будем считать углом поворота угол между осью макета, задаваемой центрами окружностей, и осью OX^c системы координат, связанной со столом, отсчитываемый против часовой стрелки.

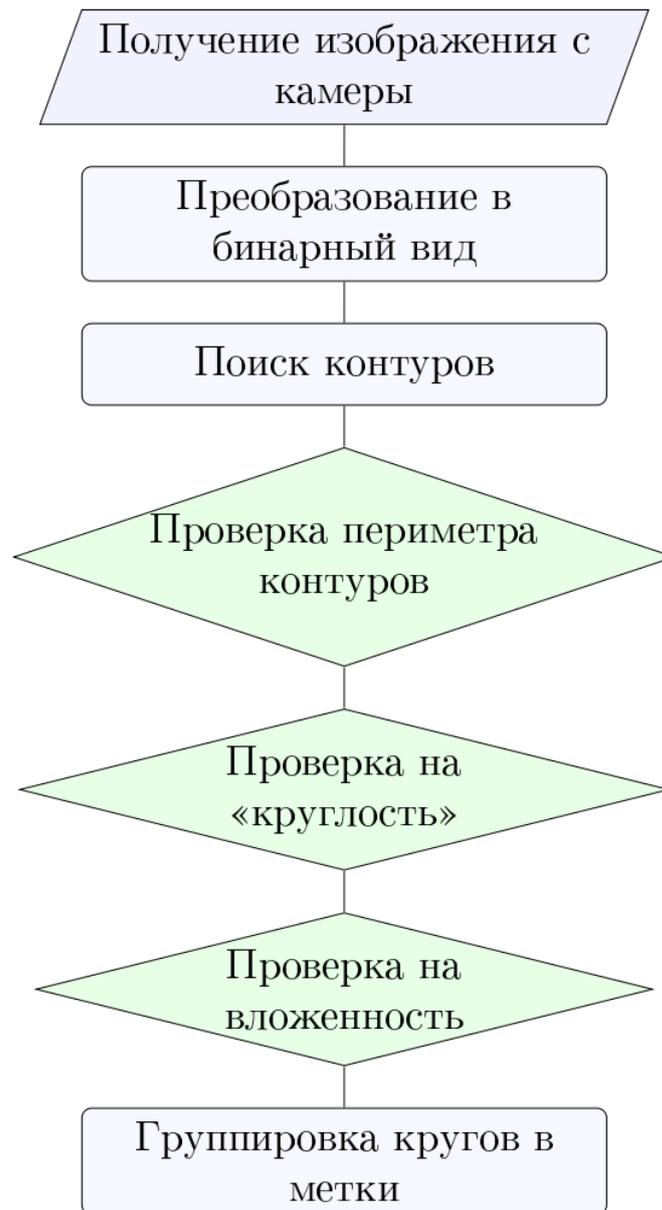


Рис. 11. Блок-схема алгоритма распознавания меток

2.5. Фильтрация

Описанный алгоритм распознавания меток позволяет вычислить только положение макета в координатном пространстве, т.е. определить позиционные переменные $[X_m^c, Y_m^c, \varphi_m^c]^T$, где X_m^c, Y_m^c – координаты положения центра масс макета в системе координат, связанной со столом, φ_m^c – угол поворота макета. Однако, кроме позиционных переменных, необходимо определить их производные по времени. Если вычислять линейную скорость движения центра масс макета и угловую скорость как численную производную от измерений, это будет приводить к большим ошибкам, вызванным дифференцированием шума измерений. Шум измерений возникает вследствие темновых шумов ПЗС-элементов, нестационарности освещения, дискретности при определении кон-

туров меток. Будем предполагать, что шум измерений есть нормально распределенная случайная величина с нулевым математическим ожиданием.

Для задачи определения позиционных переменных и их производных в режиме реального времени применяется фильтр Калмана. Он использует динамическую модель системы и модель измерений для получения наилучшей оценки вектора состояния по среднеквадратическому критерию. Рассмотрим вектор состояния системы как шестимерный фазовый вектор $\mathbf{x} = [X_m^c, Y_m^c, \varphi_m^c, \dot{X}_m^c, \dot{Y}_m^c, \omega_m^c]^T$, где \dot{X}_m^c, \dot{Y}_m^c – компоненты вектора линейной скорости движения центра масс макета в системе координат, связанной со столом, ω_m^c – угловая скорость макета.

Аэродинамический стол создает воздушную подушку между поверхностью стола и диском, на котором установлен макет, что позволяет ему двигаться практически без трения. Рассмотрим неуправляемое движение макетов. В этом случае разумно использовать модель свободного движения макетов на поверхности, когда на макеты не действуют силы, но присутствует некоторая ошибка в модели движения $\delta\mathbf{w}$, обусловленная, например, неравномерностью воздушного потока или неровностью стола. Модель выглядит следующим образом:

$$\dot{\mathbf{x}} = F\mathbf{x} + \delta\mathbf{w}. \quad (4)$$

Здесь $F = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix}$, $0_{3 \times 3}$ – нулевая матрица с размером 3×3 , $E_{3 \times 3}$ – единичная матрица с размером 3×3 , математическое ожидание ошибки модели движения $M(\delta\mathbf{w}) = 0$, а ковариационная матрица $M(\delta\mathbf{w}\delta\mathbf{w}^T) = Q$.

В качестве вектора измерений рассматривается трехмерный вектор $\mathbf{z} = [X_m^c, Y_m^c, \varphi_m^c]^T$. Тогда модель измерений имеет вид, который связан с вектором состояния выражением

$$\mathbf{z} = H\mathbf{x} + \delta\mathbf{z},$$

где $H = [E_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3}]$, $\delta\mathbf{z}$ — нормально распределенная ошибка измерений с нулевым математическим ожиданием $M(\delta\mathbf{z}) = 0$ и ковариационной матрицей $M(\delta\mathbf{z}\delta\mathbf{z}^T) = R$.

Работа фильтра Калмана состоит из двух этапов – прогноза вектора состояния на момент получения измерения и его коррекции при обработке измерения. На этапе прогноза априорная оценка вектора состояния \mathbf{x}_{k+1}^- вычисляется путем интегрирования уравнения движения (4) с начальными условиями, кото-

рые задаются апостериорной оценкой вектора состояния на предыдущем шаге \mathbf{x}_k^+ . Решением линейного уравнения (4) является матричная экспонента

$$\mathbf{x}_{k+1}^- = \Phi \mathbf{x}_k^+, \quad (5)$$

которую можно разложить в ряд и взять только нулевой и первый член разложения, $\Phi = E + F\Delta t$, для уменьшения объема вычисления, где $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

Также на этапе прогноза необходимо проинтегрировать ковариационную матрицу ошибок вектора состояния $P_k = M(\delta \mathbf{x}_k \delta \mathbf{x}_k^T)$. Для этого априорная матрица P_{k+1}^- вычисляется следующим образом:

$$P_{k+1}^- = \Phi P_k^+ \Phi^T + Q. \quad (6)$$

На этапе коррекции апостериорная оценка вектора состояния \mathbf{x}_{k+1}^+ и апостериорная ковариационная матрица P_{k+1}^+ вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1}^+ &= \mathbf{x}_{k+1}^- + K_{k+1}(\mathbf{z}_{k+1} - H\mathbf{x}_{k+1}^-), \\ P_{k+1}^+ &= (E - K_{k+1}H)P_{k+1}^-, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- H^T (H P_{k+1}^- H^T + R)^{-1}.$$

Для работы фильтра Калмана в начальный момент времени требуется задать вектор состояния \mathbf{x}_0 , ковариационные матрицы ошибок модели движения Q , ошибок измерений R и ошибок знания начального вектора состояния P_0 . Величину матрицы Q можно оценить экспериментально, исходя из величины неучтенных в модели движения возмущений. Ковариационная матрица R , как правило, задается диагональной, где по диагонали стоят дисперсии ошибок измерений, которые определяются экспериментально. Матрица P_0 задается исходя из начального незнания вектора состояния \mathbf{x}_0 .

Таким образом, по уравнениям (5)-(7) итерационно для каждого момента времени получения измерения с помощью фильтра Калмана определяется вектор состояния \mathbf{x} . Однако основным вопросом работы любой системы определения движения является точность оценок вектора состояния, которую можно определить с помощью экспериментов на лабораторном столе.

3. Эксперименты на аэродинамическом столе

Разработанный алгоритм определения движения макетов на поверхности стола был реализован в среде C++ с использованием библиотек OpenCV. Видеосъемка макетов проводится с помощью веб-камеры Defender G-LENS-2693 с разрешением 1280x720 пикселей.

Перед проведением экспериментов веб-камера была откалибрована согласно методике, описанной в разделе 2.2. Далее для исследования достижимых точностей определения движения было проведено тестирование алгоритма с использованием высокоточного программируемого поворотного стола. Также был проведен ряд тестов для оценки точности определения положения меток.

В ИПМ им. М.В.Келдыша находится стенд для моделирования движения группы спутников, который был разработан и введен в эксплуатацию компанией ООО Спутникс [10]. Стенд предназначен для изучения в лабораторных условиях алгоритмов управления движением группы микроспутников в их совместном полете и стыковке. Стенд способен имитировать свободное движение (в двух линейных и одной вращательной степенях свободы) орбитального полета микроспутника под действием крутящего момента и линейных ускорений от бортовых устройств микроспутника [11].

В состав стенда входит аэродинамический стол, промышленный вентилятор с блоком управления и системой трубопроводов, а также платформы для установки макетов микроспутниковых систем. Аэродинамический стол представляет собой плоское металлическое основание с отверстиями, через которые поступает воздух, нагнетаемый промышленным вентилятором по системе воздуховодов. Таким образом создается воздушная подушка между поверхностью стола и доскообразной платформой, на которую устанавливается макет системы управления.

С фронтальной стороны стола под углом к его поверхности установлена на потолке веб-камера, которая подключена к стационарному компьютеру. На компьютере производится обработка изображений, получаемых с веб-камеры, и вычисляются параметры движения макетов, на верхних крышках которых установлены особые метки.

3.1. Результаты калибровки веб-камеры

В результате использования методики калибровки веб-камеры, описанной в разделе 2.2, были получены следующие значения параметров:

- Фокальное расстояние $f_x = 1397.15 \pm 5.34$ пикс, $f_y = 1384.50 \pm 5.15$ пикс.
- Координаты пересечения оптической оси и ПЗС-матрицы $c_x = 634.74 \pm 0.59$ пикс, $c_y = 367.65 \pm 0.55$ пикс.

Тогда матрица камеры имеет вид

$$M = \begin{pmatrix} 1397.15 & 0 & 634.74 \\ 0 & 1384.50 & 367.65 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

- Коэффициенты дисторсий $k_1 = 0.2758 \pm 0.0023$, $k_2 = -1.0962 \pm 0.0629$.
- Матрица направляющих косинусов

$$A = \begin{bmatrix} 0.981 & -0.194 & -0.011 \\ -0.129 & -0.605 & -0.786 \\ 0.146 & 0.772 & -0.619 \end{bmatrix}.$$

- Вектор переноса

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -0.768 \\ -0.073 \\ 2.823 \end{bmatrix} \text{ м.}$$

3.2. Интерфейс программы

Параметры определения движения макетов на аэродинамическом столе отображаются в режиме реального времени на всплывающих окнах. На основном окне (рис. 12) на исходное изображение, полученное с веб-камеры, наложены распознанные контуры вложенных кругов – меток макетов. Для контроля контрастности изображения в другом окне оно отображается преобразованным в бинарное (рис. 13). По вычисленным координатам и ориентации (слева) и по оценкам, полученным с помощью фильтра Калмана, (справа) рисуется схематическое изображение макетов на столе (рис. 14). Все вычисленные параметры отображаются в отдельном окне (рис. 15).

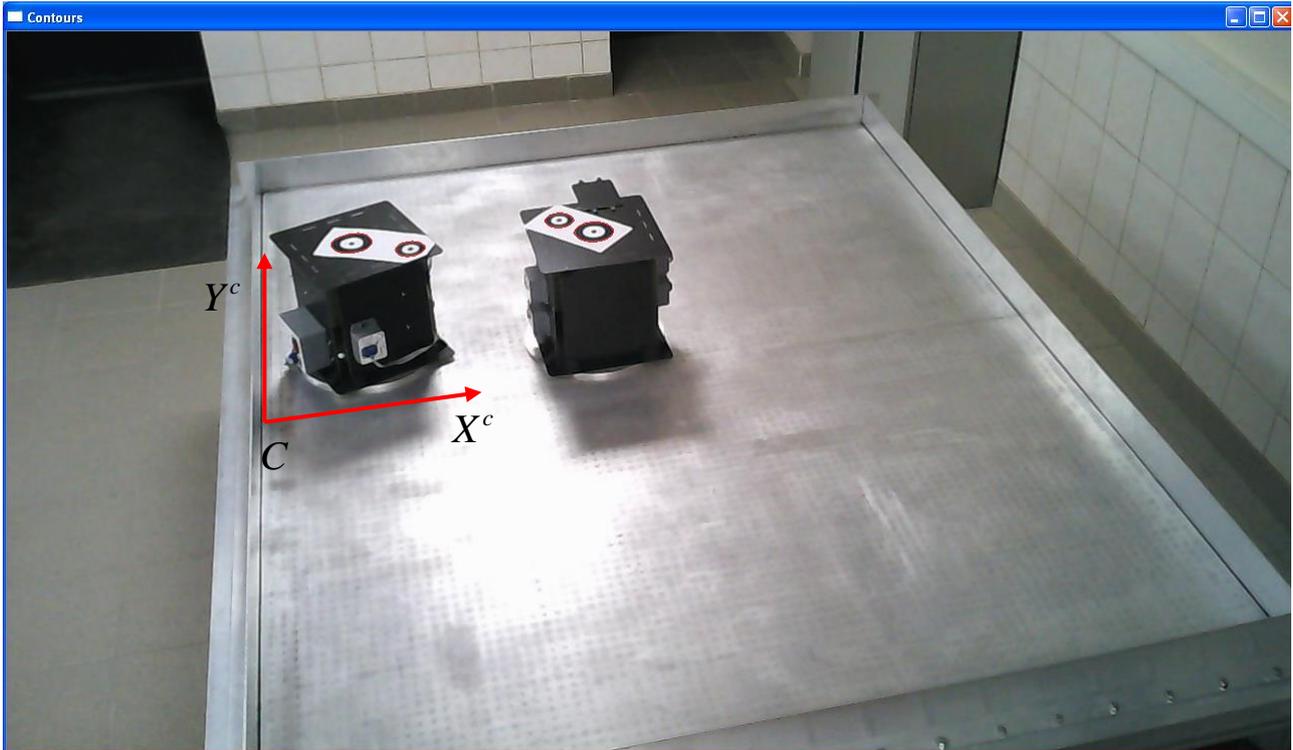


Рис. 12. Окно программы с выделенными метками на стенде



Рис. 13. Окно с бинарным изображением

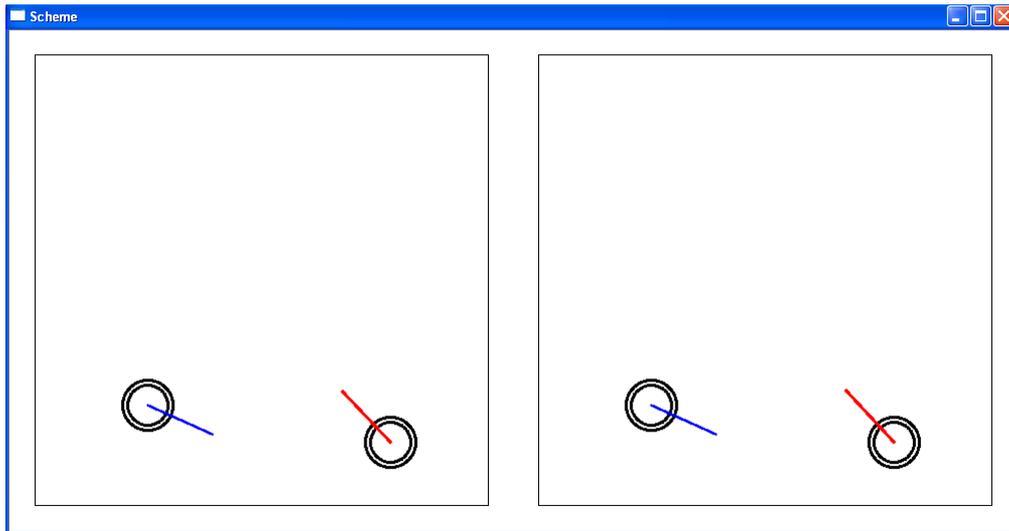


Рис. 14. Схематическое отображение положения макетов на столе по измерениям (слева) и по оценкам фильтра Калмана (справа)

Data	
Object1, Unfiltered:	Object1, Filtered:
x: 706.013123	x: 706.017029
y: 127.177963	y: 127.171974
Vx: 0.600623	Vx: -0.020474
Vy: 0.769939	Vy: -0.096608
phi: 132.951679	phi: 132.908157
omega: 1.286916	omega: -0.102664
Object2, Unfiltered:	Object2, Filtered:
x: 223.865036	x: 223.867432
y: 200.994644	y: 201.039261
Vx: -0.093386	Vx: 0.002094
Vy: -1.738571	Vy: 0.039285
phi: -24.368252	phi: -24.345459
omega: 0.152042	omega: 0.017769

Рис. 15. Окно с вычисленными параметрами движения двух макетов

3.3. Исследование точности на поворотном столе

Для исследования точности оценок вектора состояния с помощью алгоритма при угловом движении использовался поворотный стол. Двухступенной поворотный стол позволяет совершать заданные повороты с точностью в одну угловую минуту, а также угловое вращение с заданной угловой скоростью. На поворотный стол была установлена метка в виде концентрических контрастных кругов (рис. 16). Над поворотным столом размещена веб-камера, в поле зрения которой попадала метка. На поворотный стол подавались команды для совершения заданного поворота и проводилось сравнение заданного поворота с поворотом, оцененным алгоритмом определения движения.

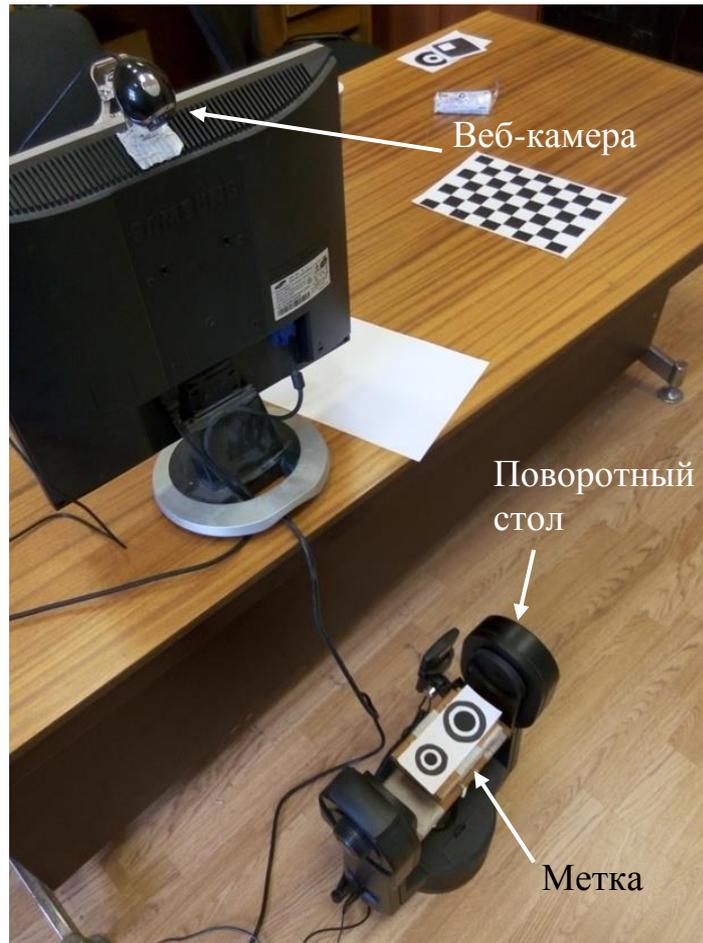


Рис. 16. Поворотный стол

На рис. 17 представлен график измерений угла отклонения, на котором отмечены заданные углы поворота. Из рисунка видно, что измерения почти совпадают с заданными углами поворота. На рис. 18 показано увеличение рис. 17. Ошибка измерений составляет около 0.1 градуса. Однако оценка фильтра Калмана имеет значительно меньшую ошибку, чем измерения, и она равна около 0.03 градуса.

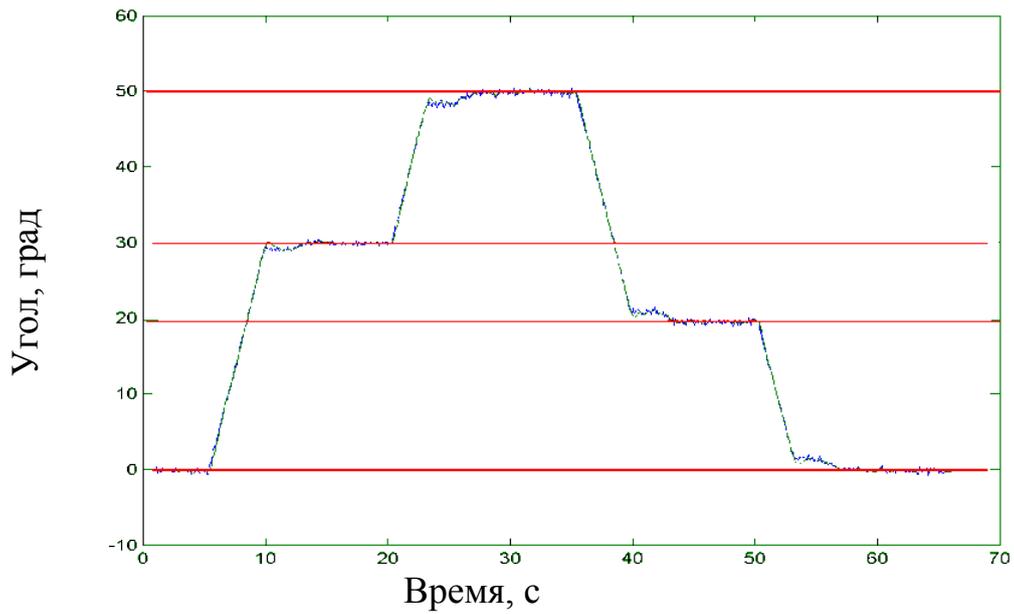


Рис. 17. Заданные углы поворота и их оценка с помощью алгоритма

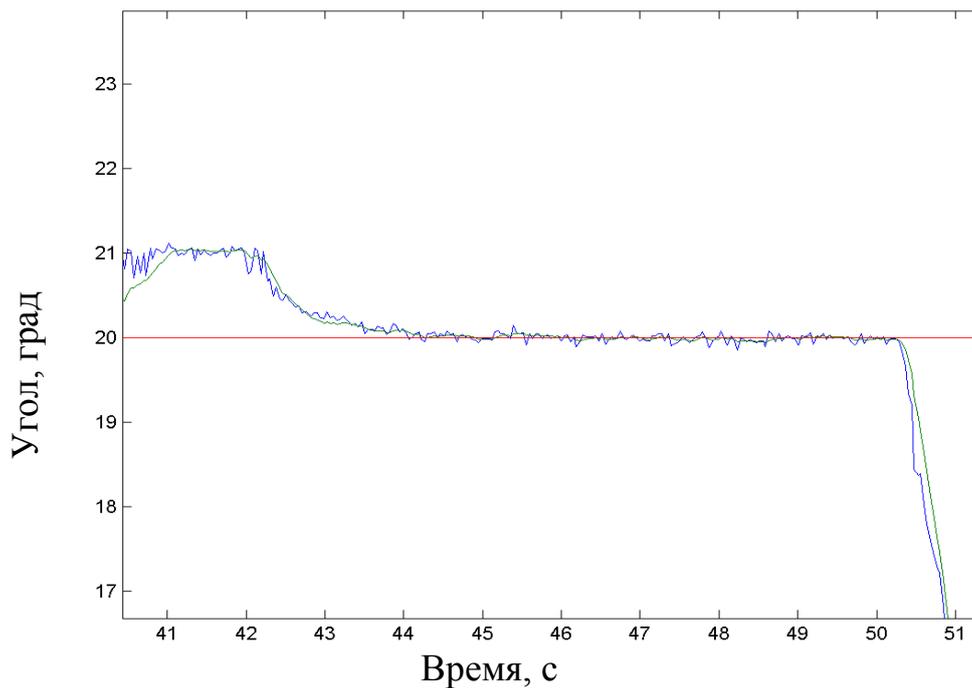


Рис. 18. Сравнение измерений и оценок углового положения с помощью фильтра Калмана

3.4. Оценка случайной составляющей ошибки измерений

Для оценки случайной составляющей ошибки измерений макет с меткой неподвижно устанавливался на поверхности стола. Вследствие шумов в ПЗС-

матрице, а также небольшого изменения освещенности контуры на метке определяются с некоторой ошибкой, что приводит к случайным ошибкам в определении положения макета на столе и его ориентации. Эта ошибка также зависит от удаленности от веб-камеры, так как меняется размер фиксируемых периметров для меток. Поэтому были проведены эксперименты по определению случайной составляющей ошибки измерения положения и ориентации в зависимости от положения на столе. На рис. 19 представлена разница между вычисленным положением макета по каждому кадру и его средним значением по 1000 измерений. Из графиков видно, что чем дальше находится макет от камеры, тем больше ошибка. Максимальная ошибка наблюдается на максимальном удалении на краю аэродинамического стола. Также можно увидеть, что ошибка плавно изменяется со временем. Это может быть вызвано слабым и постепенным изменением условий освещенности метки. На рис. 20 представлены ошибки определения угла ориентации для разных положений макета на столе. Максимальные ошибки составляют около 1.5 мм по положению и 0.5 град по ориентации.

На рис. 21 и 22 представлены графики оценки скорости и угловой скорости неподвижного макета. Если вычислять скорость и угловую скорость как производные положения по двум точкам, то ошибка достигает 10 мм/с и около 10 град/с соответственно. Однако оценка, полученная с помощью фильтра Калмана, значительно точнее – ошибка составляет около 1 мм/с по скорости и 0.5 град/с по угловой скорости.

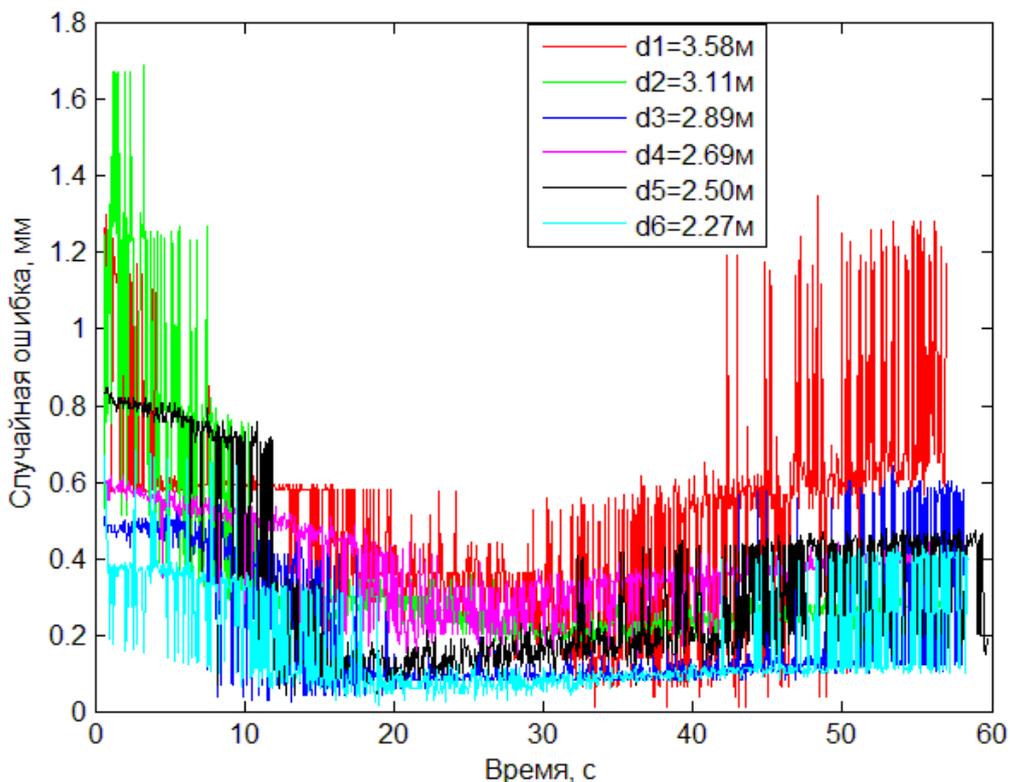


Рис. 19. Модуль ошибки определения положения

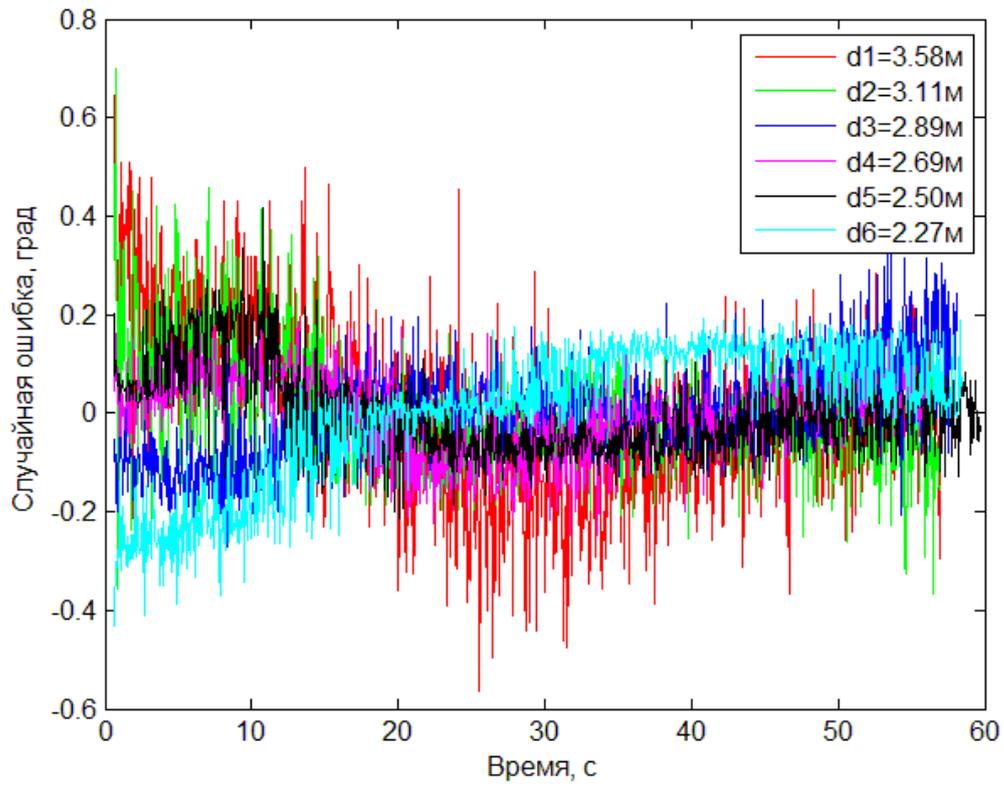


Рис. 20. Ошибка определения углового положения

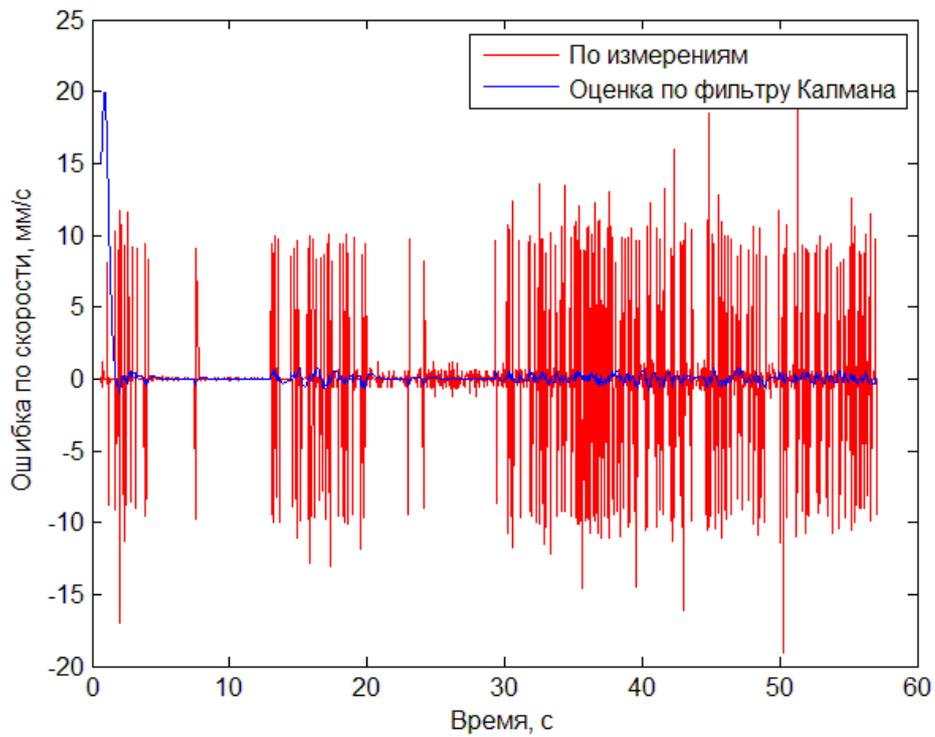


Рис. 21. Ошибка определения скорости

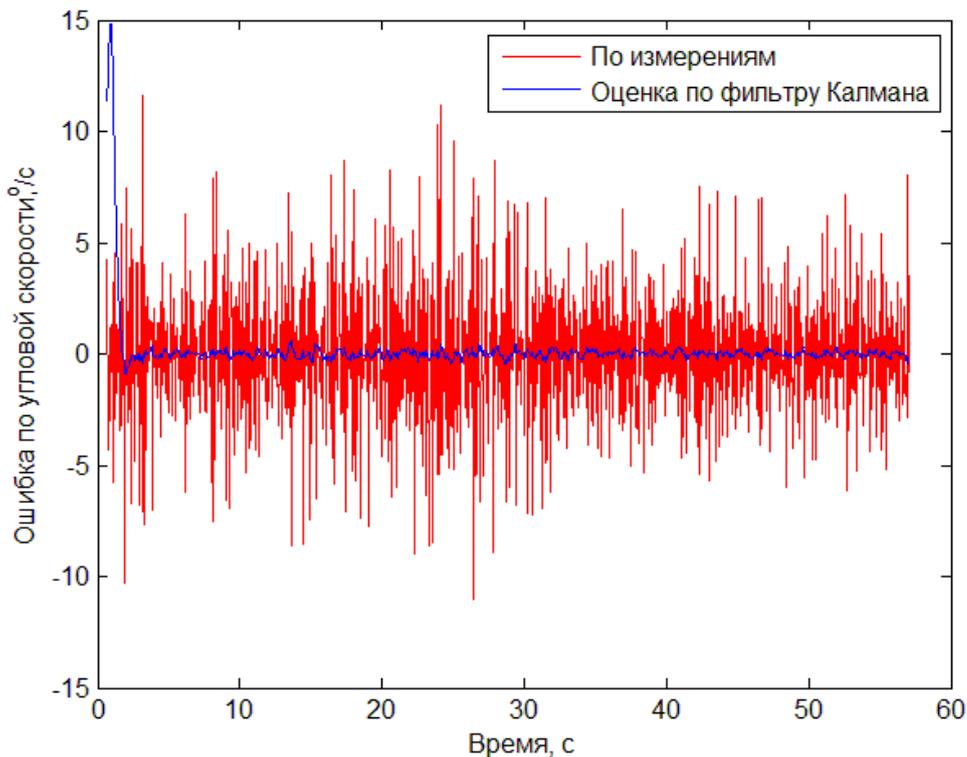


Рис. 22. Ошибка определения угловой скорости

3.5. Оценка систематической составляющей ошибки измерений

Кроме случайной составляющей, в ошибках определения движения присутствует систематическая погрешность, вызванная неточностью калибровки, ошибками в определении параметров дисторсии, а также погрешностью установки метки на макете, которая составляет около 2 мм. Оценим систематическую составляющую ошибки с помощью измерения периметра стола. Для этого проведем вдоль борта аэродинамического стола диск с установленным макетом. Положение метки будет соответствовать центру диска с ошибкой около 2 мм. Зная диаметр диска (300 ± 1 мм) и размеры стола от борта до борта (2020×1620 мм² с точностью ± 2 мм), можно сравнить измеренный экспериментально периметр стола с расчетным значением.

На рис. 23 представлен график измерения периметра стола – положение центра диска при движении вплотную к борту – и расчетное значение положения диска, исходя из размеров стола. Из рисунка видно, что измеренное положение хорошо совпадает с расчетным, однако наихудшая ошибка составляет около 15 мм. Таким образом, систематическая ошибка определения положения может составлять до 1-2 см. Следует отметить, что это суммарная ошибка как от неточности калибровки, так и от погрешности установки метки и неидеальной ровности бортов стола.

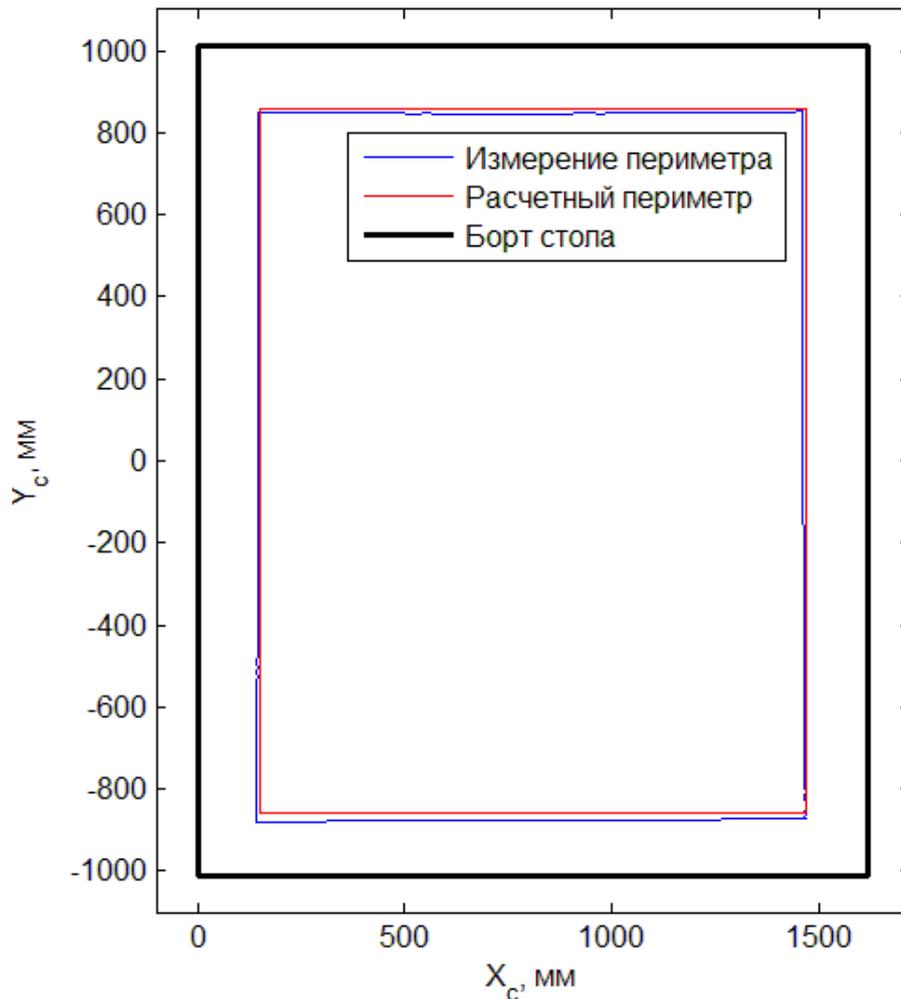


Рис. 23. Измеренное и расчетное положение центра диска при движении вдоль борта стола

3.6. Оценка возмущений со стороны аэродинамического стола

Для оценки уровня возмущений со стороны аэродинамического стола (нестационарности воздушных потоков и неровности поверхности), были проведены эксперименты со свободным движением макета при различной частоте вращения вентилятора. Макет устанавливается неподвижно на поверхности стола, и далее включается вентилятор, благодаря которому создается воздушная подушка между поверхностью стола и платформой, на которой закреплен макет. Далее макет движется по поверхности стола свободно. На рис. 24 представлены графики траектории макета по поверхности стола. Из рисунка видно, что при малых частотах вращения вентилятора движение слабо возмущается нестационарностью воздушного потока и является ограниченным в окрестности локального положения равновесия с координатами около $[35 \text{ см}, 25 \text{ см}]^T$, обусловленного небольшой неровностью поверхности стола. Однако при увеличе-

нии частоты вращения вентилятора размер окрестности заметно увеличивается, а при максимальной частоте (50 Гц) макет выходит из зоны притяжения локального минимума. Это означает, что при управляемом движении макета необходимо работать на небольших частотах вентилятора для уменьшения уровня возмущений.

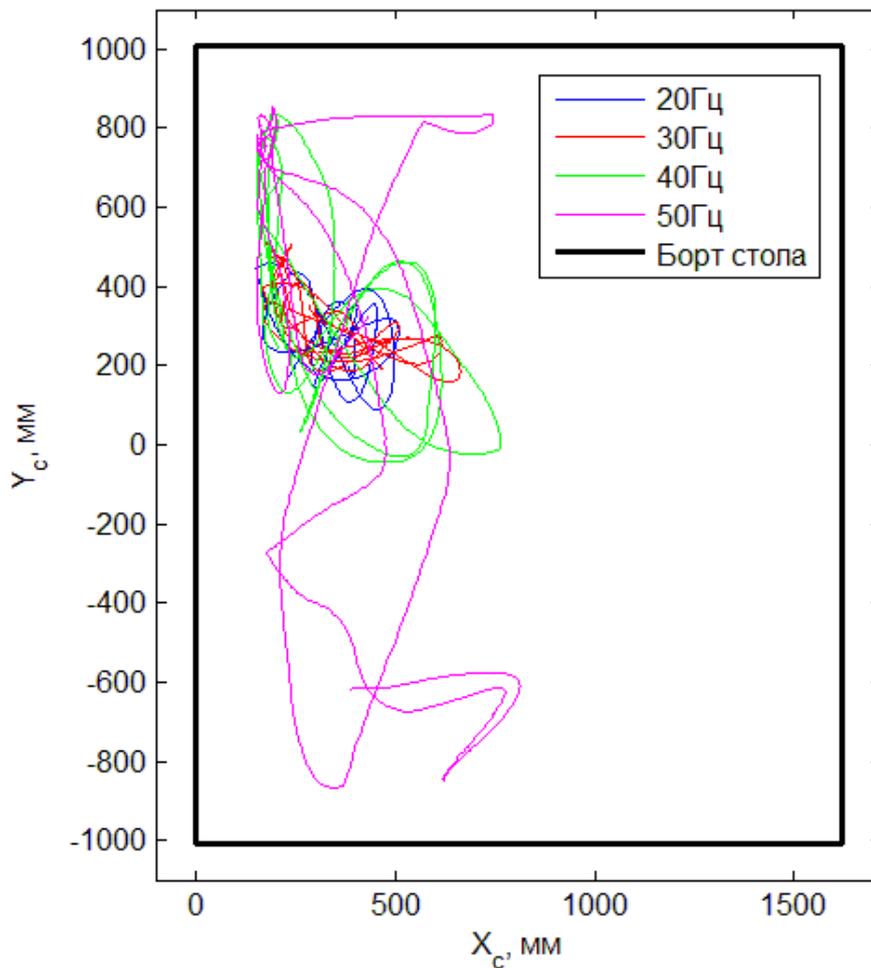


Рис. 24. Свободное движение макета по поверхности стола

Другой эксперимент для оценки сил трения, действующих на макет, заключается в измерении угловой скорости вращения при длительном движении. На рис. 25 представлен график изменения угловой скорости вращения макета за 600 секунд. Согласно оценке угловой скорости вращения, полученной с помощью фильтра Калмана, за 5 минут угловая скорость изменилась на 40 град/с. Однако можно увидеть, что, видимо вследствие нестационарности воздушного потока, угловая скорость убывает не монотонно.

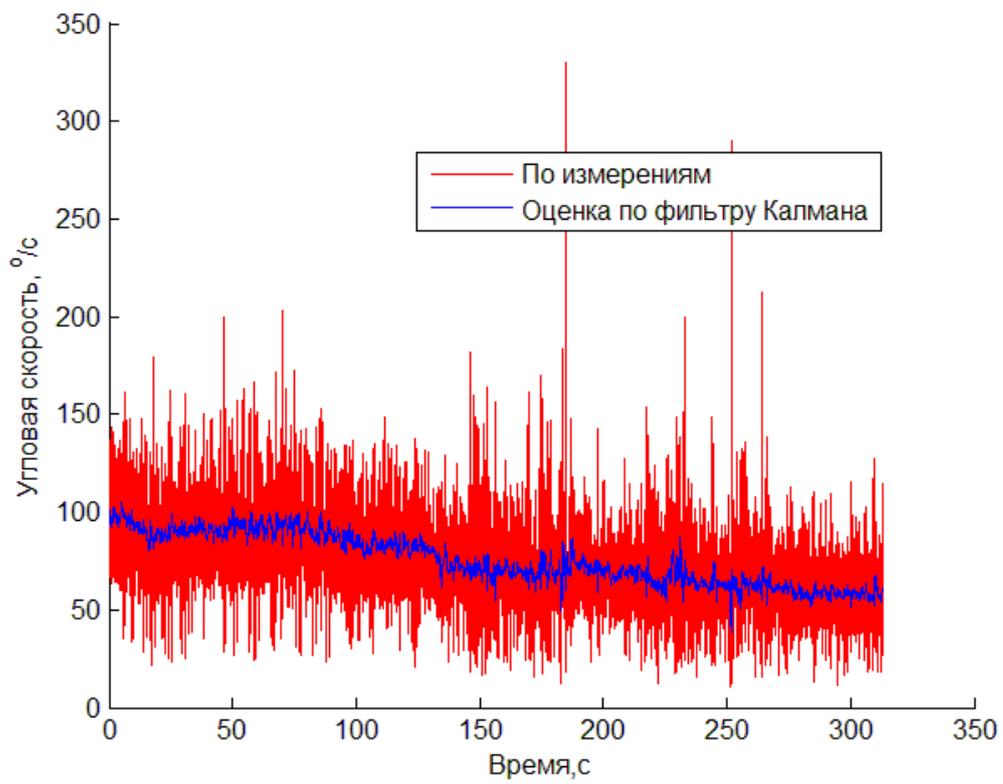


Рис. 25. Изменение угловой скорости при свободном вращении

Заключение

Разработана и апробирована система для определения движения макетов систем управления микроспутников на аэродинамическом столе с использованием внешней веб-камеры. Эксперименты показали, что точность определения положения составляет около 2 см, точность определения ориентации – около 0.2 градуса. Применение фильтра Калмана позволило получить точность определения линейной скорости около 1 мм/с и около 0.5 град/с по определению угловой скорости. Во время свободного движения возмущения со стороны воздушного потока и неровности стола приводят к движению макета в некоторой окрестности локального положения равновесия. Выявленные возмущения могут рассматриваться как имитация возмущений орбитального движения, которые необходимо учитывать и парировать с помощью системы управления.

Литература

1. Биндель Д. и др. Лабораторный стенд для верификации алгоритмов управления группировкой спутников // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. Т. 48, № 5. С. 109–117.
2. Saenz-Otero A., Katz J.G., Miller D.W. SPHERES Demonstrations of Satellite Formations aboard the ISS // AAS Guid. Navig. Conf. Breckenridge. Pap. 09-011. 2009.
3. Wilson E., Rock S.M. Neural Network Control of a Free-Flying Space Robot // Simulation. 1995. Vol. 65, № 2. P. 103–115.
4. Space Robotics: Autonomous In-Orbit Operations [Online]. URL: http://www.aero.polimi.it/~space/?Major_Research_Areas:Space_Robotics:Autonomous_In-Orbit_Operations (accessed: 22.12.2015).
5. Sabatini M. et al. Image based control of the “PINOCCHIO” experimental free flying platform // Acta Astronaut. Elsevier, 2014. Vol. 94, № 1. P. 480–492.
6. Иванов Д.С., Овчинников М.Ю., Трофимов С.П. Применение фотограмметрического метода в задаче автономного определения относительного движения группы макетов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2010. № 5. 22 с.
7. Иванов Д.С. и др. Определение относительного движения спутников при их разделении по результатам обработки видеоизображения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. № 57. 24 с.
8. Богуславский А.А. и др. Автоматический мониторинг стыковки космического корабля с орбитальной станцией по видеоинформации // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2004. № 74. 20 с.
9. Camera Calibration Toolbox for Matlab [Online]. URL: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ (accessed: 14.12.2015).
10. ООО Спутниковые инновационные космические системы [Online]. URL: <http://sputnix.ru/ru/> (accessed: 15.12.2015).
11. Карпенко С.О. Аэродинамический стол для проведения испытаний систем управления поступательным и вращательным движением микроспутников. Руководство по эксплуатации. Москва: ООО Спутникс, 2015. 15 с.

Оглавление

1. Введение.....	3
2. Алгоритм определения движения	4
2.1. Модель веб-камеры.....	5
2.2. Определение параметров камеры.....	8
2.3. Вычисление координат точки по ее изображению.....	11
2.4. Выбор меток.....	12
2.5. Фильтрация	15
3. Эксперименты на аэродинамическом столе.....	18
3.1. Результаты калибровки веб-камеры.....	18
3.2. Интерфейс программы.....	19
3.3. Исследование точности на поворотном столе	21
3.4. Оценка случайной составляющей ошибки измерений.....	23
3.5. Оценка систематической составляющей ошибки измерений	26
3.6. Оценка возмущений со стороны аэродинамического стола.....	27
Заключение.....	30
Литература	31