



58-я научная конференция МФТИ
Секция динамики и управления движением
космических аппаратов



Система определения движения макетов системы управления на аэродинамическом столе с использованием видеокамеры

Николай Прошунин

Михаил Коптев

Данил Иванов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Содержание

- Цель работы
- Модель камеры
- Внутренняя и внешняя калибровка
- Определение движения
- Исследование точности алгоритма
- Эксперименты на столе

Цель работы

Разработка и исследование алгоритма определения движения макетов по известным меткам с помощью видеокамеры

Требования к системе:

- Оценка положения и угла поворота макетов относительно стола;
- Оценка скорости макетов;
- Фильтрация полученных измерений.

Аэродинамический стол для моделирования движения макетов



Калибровка

1. Внутренняя

- фокусное расстояние
- координаты оптического центра
- коэффициенты дисторсии

2. Внешняя

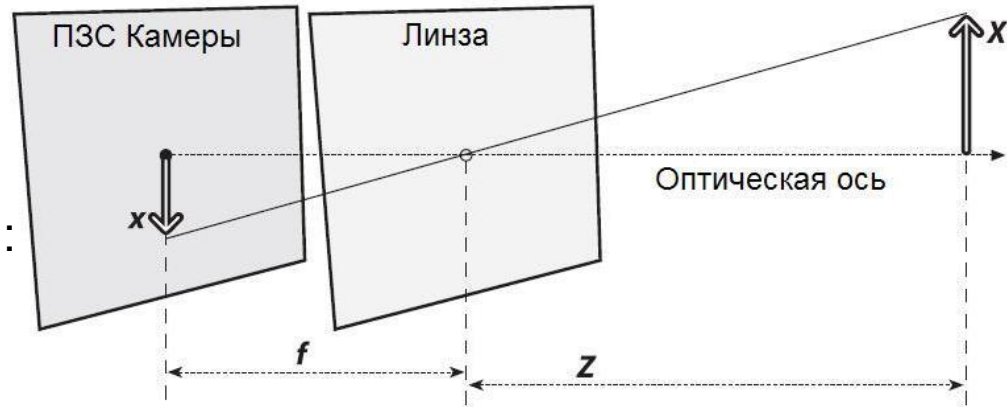
- вектор переноса
- матрица поворота

Модель камеры

Подобие треугольников: $x = f \frac{X}{Z}$

С учётом смещения оптической оси:

$$x = f_x \frac{X}{Z} + c_x \quad y = f_y \frac{Y}{Z} + c_y$$



Проективная геометрия

Поправка на размер пикселя:

$$f_x = s_x f \quad f_y = s_y f$$

В матричной форме:

$$\mathbf{q} = \frac{1}{Z} \mathbf{M} \mathbf{Q}, \quad \text{где}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{q} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Дисторсии

Преобразование координат
раскладывают в ряд
Тейлора:

$$x_{corr} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4),$$

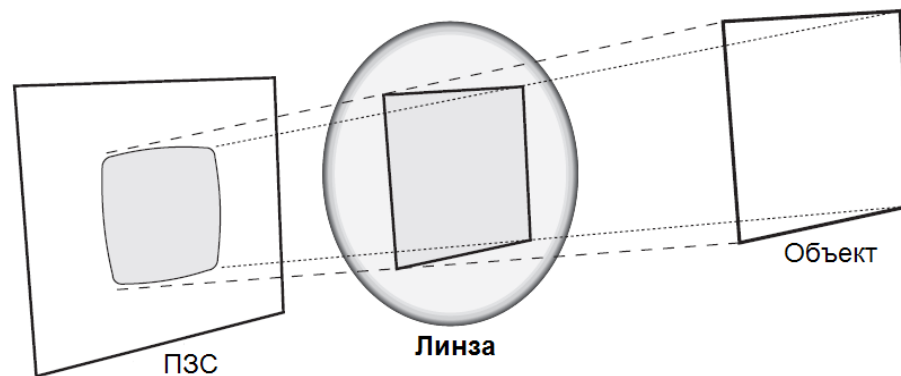
$$y_{corr} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4).$$

Обозначим

$$\lambda = 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4$$

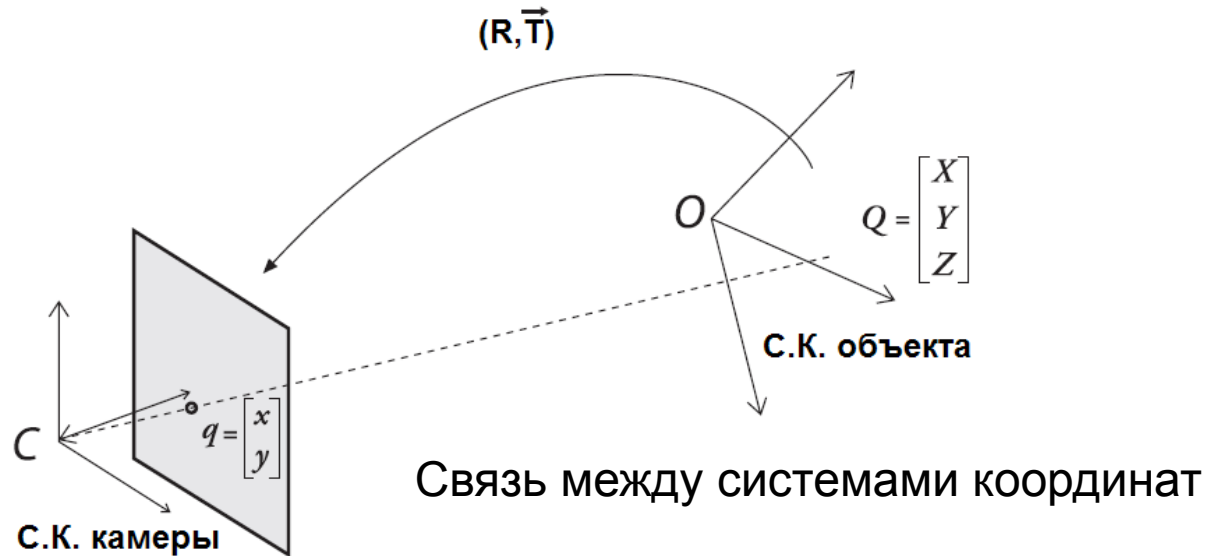
Тогда с учетом дисторсий:

$$\mathbf{q}_{corr} = \frac{1}{Z} \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{MQ}.$$



Искажение изображения линзой

Внешняя калибровка камеры

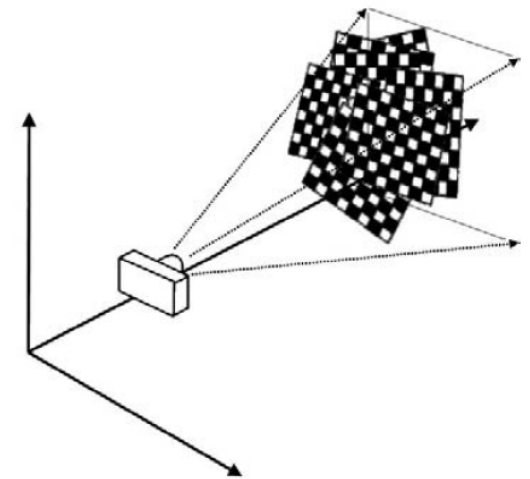
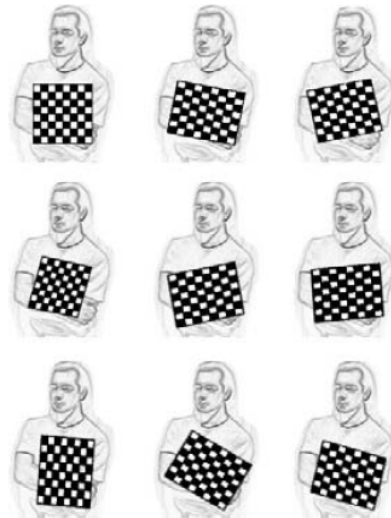


Окончательная модель:

$$\mathbf{q}_{corr} = \frac{1}{Z} \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} MR(\mathbf{Q}_{стол} + \mathbf{T}).$$

Определение параметров камеры

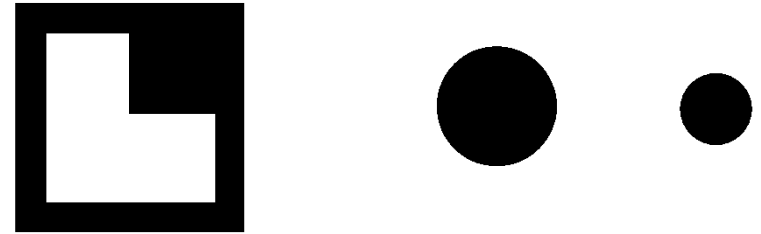
- Для калибровки используется Matlab Camera Calibration Toolbox.
- На вход подается множество изображений шахматных досок.
- Методом наименьших квадратов производится вычисление параметров камеры.



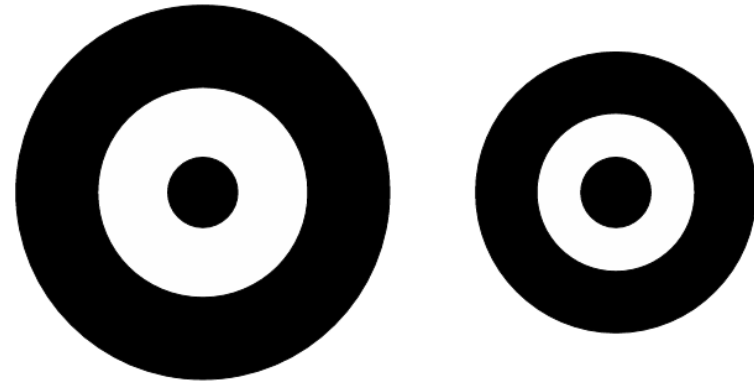
Формирование массива изображений

Распознавание меток

- Меткой была выбрана пара из вложенных кругов черного и белого цветов
- Вложенность позволяет увеличить точность распознавания
- Макеты различаются по расстоянию между центрами кругов

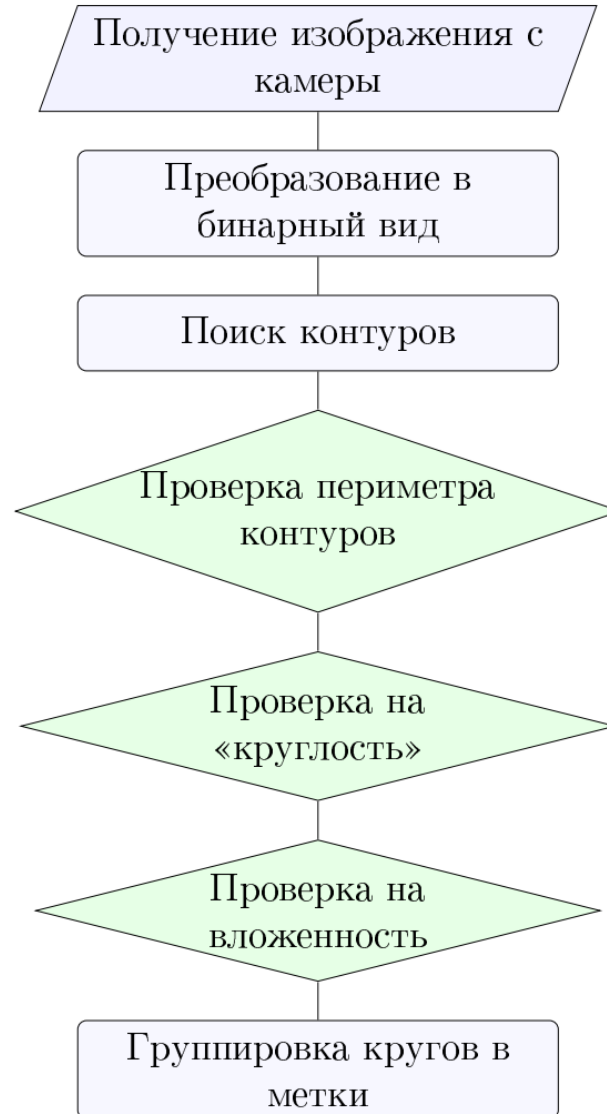


Начальные варианты меток



Финальный вариант метки

Алгоритм распознавания меток



Координаты меток на столе

Модель:

$$\mathbf{q}_{corr} = \frac{1}{Z} \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} MR(\mathbf{Q}_{стол} + \mathbf{T}).$$

После обращения

$$Z\mathbf{q}_n = R\mathbf{Q}_{стол} + \tilde{\mathbf{T}}.$$

Макет в плоскости стола:

$$Z_{стол} = 0.$$

Фильтр Калмана

Вектор состояния:

$$\mathbf{x} = (x, y, \varphi, v_x, v_y, \omega)^T$$

Модель свободного
равномерного движения,
с учетом погрешности
модели:

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + \delta\mathbf{w},$$

$$\text{где } A = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & E_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{pmatrix}$$

Вектор измерений:

$$\mathbf{z} = (x, y, \varphi)^T$$

Их связь с учетом
погрешности измерений:

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

$$\text{где } H = \begin{pmatrix} E_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{pmatrix}$$

Фильтр Калмана

1. Предикция:

$$\mathbf{x}_{k+1}^- = \Phi \mathbf{x}_k^+, \quad \text{где } \Phi = E + A\Delta t,$$

Δt — шаг по времени.

Ковариационная матрица ошибки:

$$P_{k+1}^- = \Phi P_k^+ \Phi^T + Q,$$

где Q — ковариационная матрица погрешностей модели.

2. Коррекция:

Весовая матрица:

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

где R — ковариационная матрица погрешностей измерений.

Апостериорная оценка вектора состояния системы и ковариационной матрицы ошибки:

$$\mathbf{x}_{k+1}^+ = \mathbf{x}_{k+1}^- + K_{k+1} (\mathbf{z}_{k+1} - H \mathbf{x}_{k+1}^-),$$

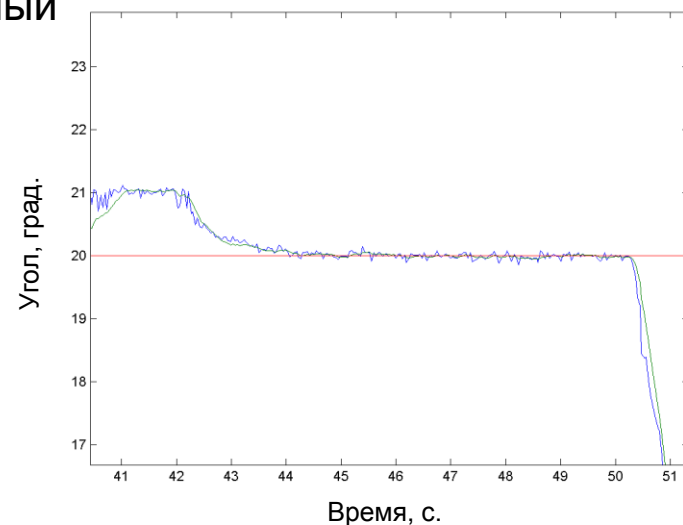
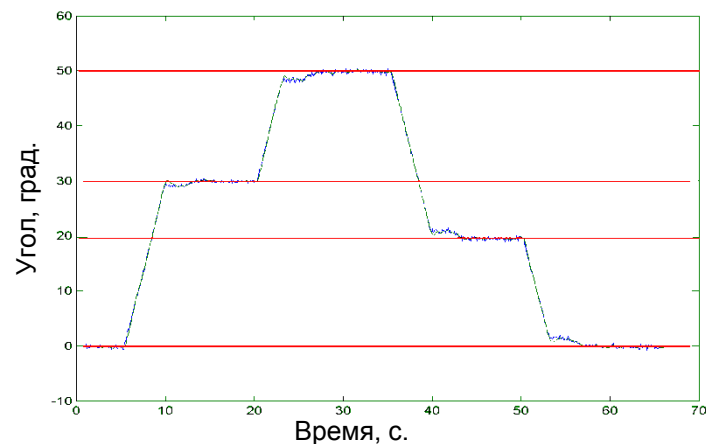
$$P_{k+1}^+ = (E - K_{k+1} H) P_{k+1}^-.$$

Точность определения угла поворота

Эксперименты на поворотном столе



Сравнение заданных углов поворота и оцененных с помощью алгоритма

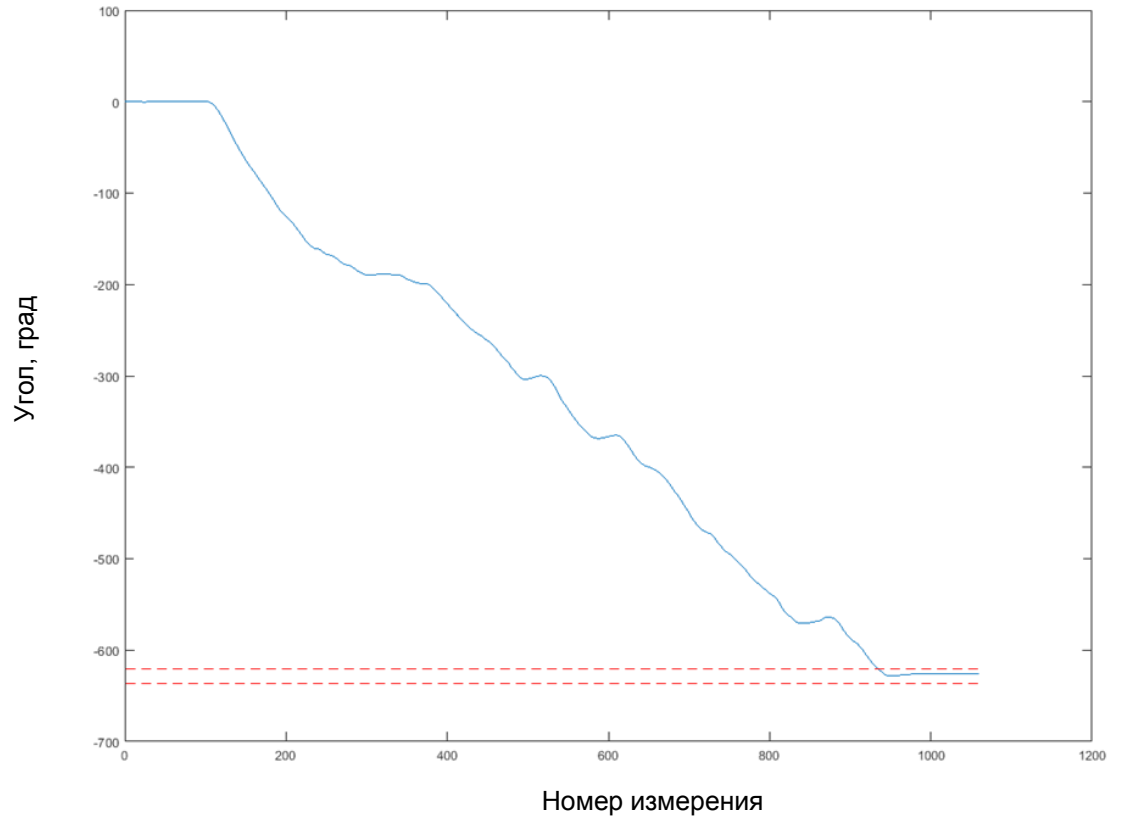


Эксперименты на аэродинамическом столе



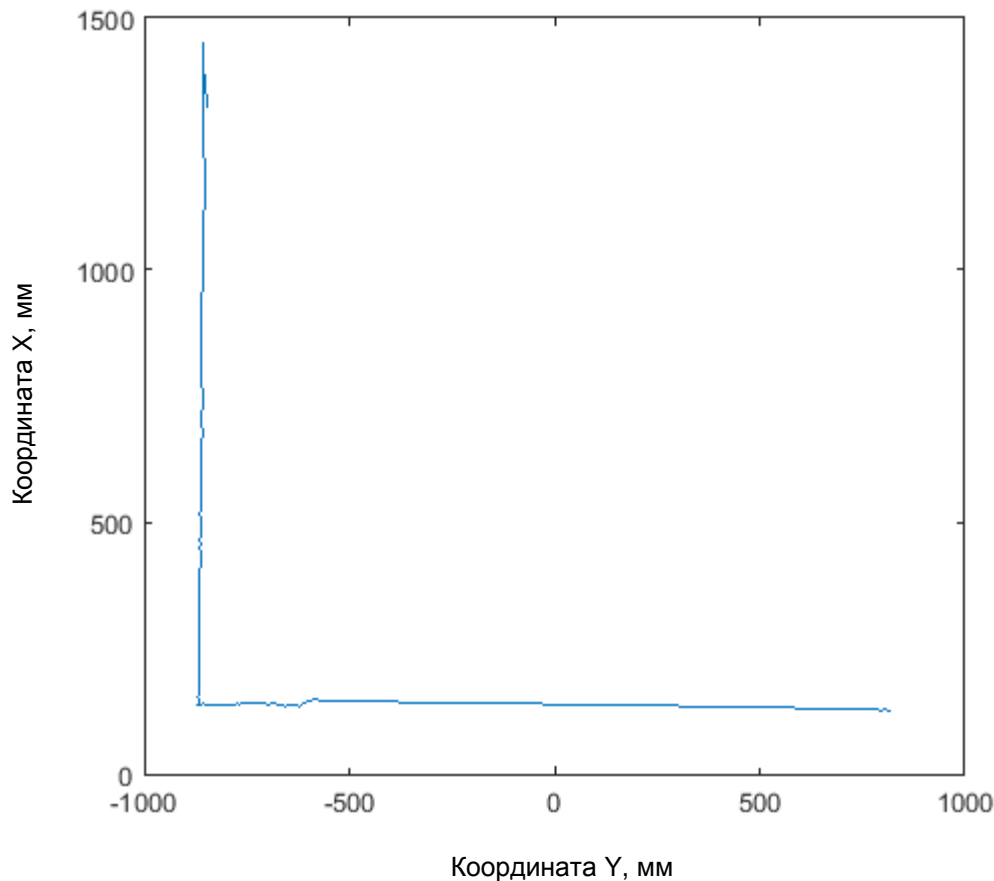
Качение диска

- Проводилось качение диска без проскальзывания вдоль борта стенда для измерения его угла поворота.
- Угол поворота совпал с рассчитанным.



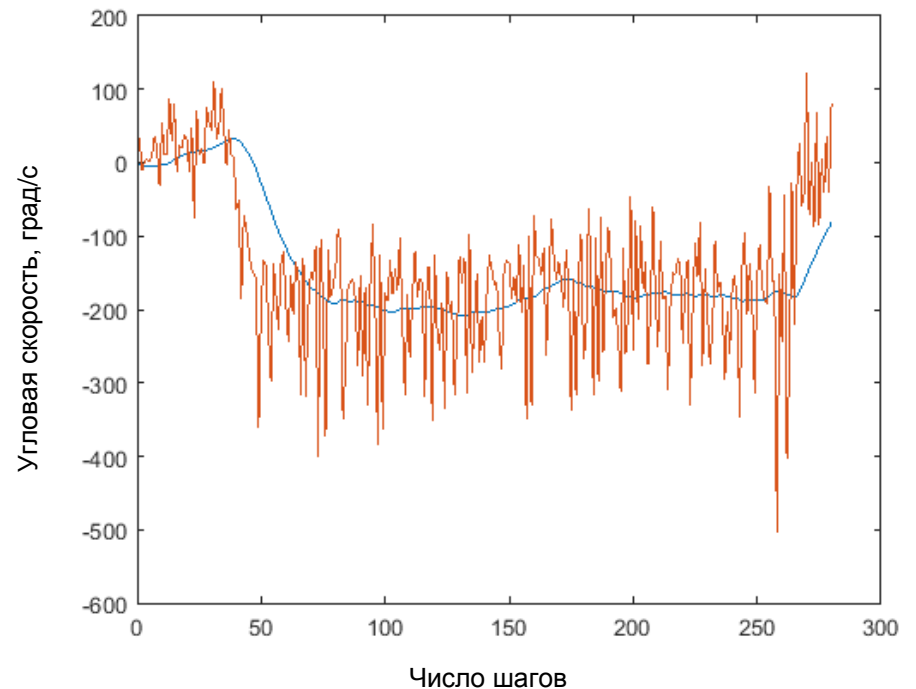
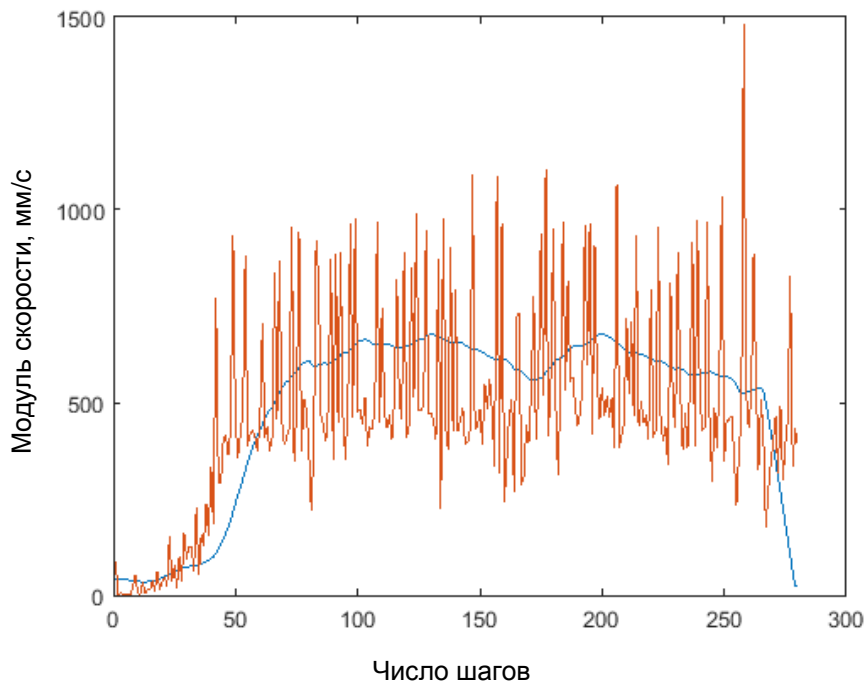
Движение по периметру

- Проводилось движение макета вдоль двух бортов стола
- Измерение длин стола совпало с реальным значением с точностью до 2 см.



Свободное движение

Оценка модуля скорости и угловой скорости при свободном движении макета по аэродинамическому столу



Заключение

- Разработана и апробирована система для определения движения макетов на аэродинамическом столе.
- Эксперименты показали, что точность определения положения составляет около 1 см, точность определения ориентации около 0.2 градуса.
- Во время свободного движения возмущения со стороны аэродинамического стола приводят к изменению линейной скорости на величину порядка 10 см/с и изменению угловой скорости на 20 град/с.
- Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, грант № 15-31-20058_мол_а_вед.