

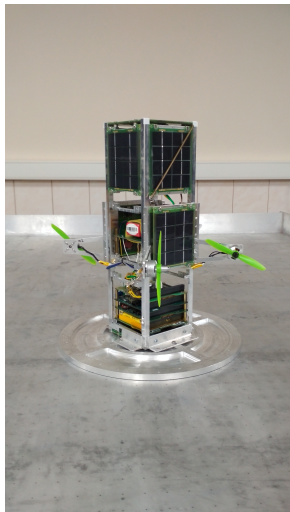
Шачков Марк Олегович

Разработка программного обеспечения для проведения экспериментов на аэродинамическом столе и исследование алгоритмов управления макетом микроспутника

Научный руководитель: к. ф.-м. н., доц. Иванов Данил Сергеевич



Аппаратная платформа	Raspberry Pi Compute Module 3
Программная платформа	GNU/Linux (Raspbian)
Сенсоры	Акселерометр, датчик угловой скорости, магнетометр
Актуаторы	4 вентиляторных актуатора
Способ подключения сенсоров и актуаторов	Шина CAN
Средства связи	Wi-Fi модуль и УКВ радио-модуль



- Практическое изучение математических моделей движения твёрдого тела
- Структурная и параметрическая идентификация математических моделей
- Постановка и решение задач управления, синтез управляющих законов
- Построение и реализация наблюдателей для оценки вектора состояния системы
- Разработка и отладка программного обеспечения реализующего алгоритмы управления
- ...

Исследователь должен разработать ПО исполняемое на борту макета.

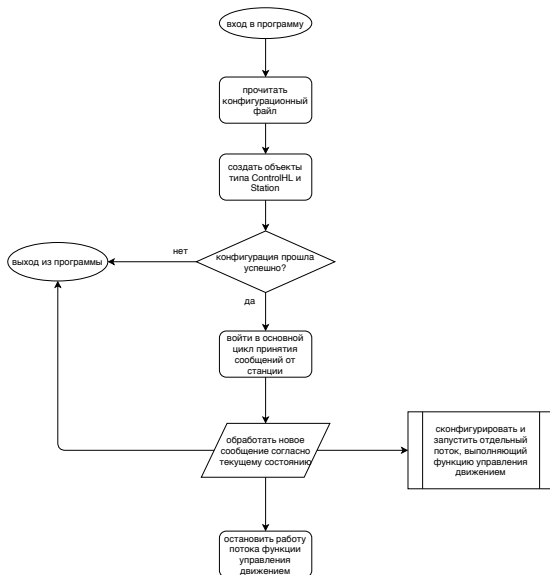
Создать простой программный интерфейс (API) - сэкономить временные затраты на проведение экспериментов.

Требования предъявляемые к программному комплексу

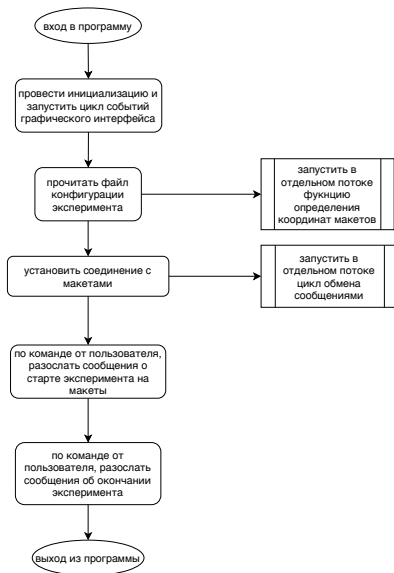
- Должен обеспечивать работу стенда с несколькими макетами
- Должен предоставлять всем макетам информацию об абсолютном положении всех макетов
- Программная кроссплатформенность
- Аппаратная кроссплатформенность

- Модуль Station - программа, исполняемая на стационарном персональном компьютере, являющимся терминалом для управления ходом эксперимента, отвечающая за работу системы определения положения макетов и обеспечивающая передачу, индикацию и сохранение состояния эксперимента.
- Модуль Sat - программа управляющая работой макета, поддерживающая связь со станцией и обеспечивающая выполнение управляющей движением функции.

Модуль написан на C++ с использованием библиотек:
pthread – для работы с потоками, pigpio – для генерации ШИМ сигнала используя DMA, unican – для управления актуаторами второй версии макета, panomsg-NG – для приёма и передачи сообщений.



Модуль написан на C++ с использованием библиотек: Qt – для графического интерфейса и потоков, ArUco – для определения движения макетов, panomsg-NG – для приёма и передачи сообщений.



```
void control_function(StationData* data, ControlBackend* control);
```

- Удержание макетом заданного положения и ориентации
- Определение возмущений действующих на макет
- Стыковка с некооперируемым макетом.

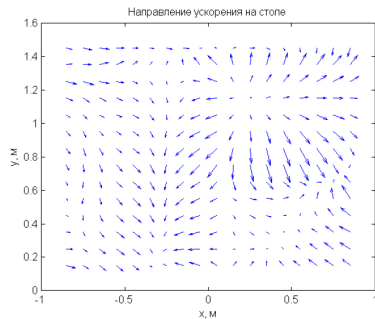
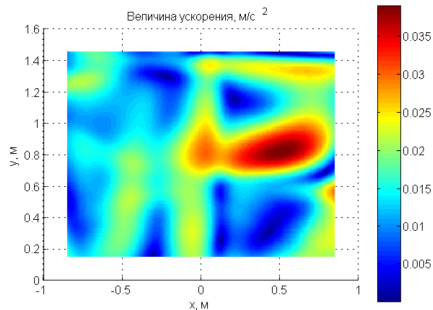
$$\begin{bmatrix} ml & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\vec{v}} \\ \dot{\vec{\omega}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{\omega} \times J\vec{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 \vec{f}_i c_i u_i^2 + \vec{F}_{ext} \\ \sum_{i=1}^4 \vec{r}_i \times \vec{f}_i c_i u_i^2 + \vec{\tau}_{ext} \end{bmatrix} \quad (1)$$

- 1 Проводится серия экспериментов с моделируемой системой, заключающихся в подаче различных входных сигналов и записи соответствующих выходных значений.
- 2 Имея множество последовательностей пар вида $\{\vec{u}(t_i), \vec{y}(t_i)\}_{i=1}^m$, где $\vec{u}(t_i)$ и $\vec{y}(t_i)$ являются входом и выходом системы в момент времени t_i , решается задача поиска параметров модели, позволяющих добиться максимальной схожести результатов моделирования с экспериментом.

$$\underset{m, J, \vec{f}_i, c_i, \vec{r}_i}{\text{minimize}} \sum_i \left\| \vec{y}(t_i) - \tilde{\vec{y}}(t_i) \right\|^2 \quad (2)$$

Для уточнения используемой модели введена аппроксимация сил и моментов, действующих на макет, при помощи бикубических сплайнов, параметры которых определены экспериментально.

Измеренное поле сил



$$\begin{bmatrix} \dot{\vec{v}} \\ \dot{\vec{\omega}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ml & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix}^{-1} \left(- \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{\omega} \times J\vec{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{F}_{ext} \\ \vec{\tau}_{ext} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{F}_u(\vec{u}) \\ \vec{\tau}_u(\vec{u}) \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{F}_u(\vec{u}) \\ \vec{\tau}_u(\vec{u}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{\omega} \times J\vec{\omega} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \vec{F}_{ext} \\ \vec{\tau}_{ext} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ml & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{U}_f(\cdot) \\ \vec{U}_\tau(\cdot) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\vec{v}} \\ \dot{\vec{\omega}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{U}_f(\cdot) \\ \vec{U}_\tau(\cdot) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{f}_1 c_1 & \vec{f}_2 c_2 & \vec{f}_3 c_3 & \vec{f}_4 c_4 \\ \vec{r}_1 \times \vec{f}_1 c_1 & \vec{r}_2 \times \vec{f}_2 c_2 & \vec{r}_3 \times \vec{f}_3 c_3 & \vec{r}_4 \times \vec{f}_4 c_4 \end{bmatrix} [\vec{u}^2] = \begin{bmatrix} \vec{F}_u(\vec{u}) \\ \vec{\tau}_u(\vec{u}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\vec{u}^2 = A^+ b + (I - A^+ A) y \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} \vec{f}_1 c_1 & \vec{f}_2 c_2 & \vec{f}_3 c_3 & \vec{f}_4 c_4 \\ \vec{r}_1 \times \vec{f}_1 c_1 & \vec{r}_2 \times \vec{f}_2 c_2 & \vec{r}_3 \times \vec{f}_3 c_3 & \vec{r}_4 \times \vec{f}_4 c_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{\omega} \times J \vec{\omega} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \vec{F}_{ext} \\ \vec{\tau}_{ext} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ml & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{U}_f(\cdot) \\ \vec{U}_\tau(\cdot) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{y}}{\text{minimize}} \quad \mathbf{y}^T \mathbf{Q} \mathbf{y} + \mathbf{c}^T \mathbf{y}, \\ & \mathbf{Q} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^+ \mathbf{A})^T (\mathbf{I} - \mathbf{A}^+ \mathbf{A}), \\ & \mathbf{c}^T = 2(\mathbf{A}^+ \mathbf{b})^T (\mathbf{I} - \mathbf{A}^+ \mathbf{A}), \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_f(\cdot) \\ \vec{U}_\tau(\cdot) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e^b(-K_1 e_p - K_2 \dot{e}_p + \dot{\vec{v}}_d^e) \\ R_e^b(-K_3 e_o - K_4 \dot{e}_o + \dot{\vec{\omega}}_d^e) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Движение по окружности

Стыковка с некооперируемым объектом

- Доработка графического интерфейса для конфигурирования эксперимента.

- Иванов Д. С. и др. Лабораторный стенд для моделирования движения макетов микроспутников //Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2018. – №. 1. – С. 117-132.
- Ivanov D. et al. Determination of disturbances acting on small satellite mock-up on air bearing table //Acta Astronautica. – 2018. – Т. 142. – С. 265-276.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 17-01-00449,
16-01-00739 ,16-01-00634.