



УДК 681.5

DOI: 10.31799/2007-5687-2020-4-3-12

УПРАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОЛЁТА КВАДРОКОПТЕРА ПРИ ЗАДАНИИ СЛОЖНОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

Н. В. Богатов, А. С. Костин

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В статье рассмотрено решение задачи автономного пилотирования квадрокоптера по сложному полётному заданию для определения погрешности позиционирования. Для решения поставленной задачи предлагается математическая модель уравнения динамики углового движения в связанной системе координат. Рассматриваются этапы проработки и создания полётного задания, приводится модель на основе ориентированных графов, отражающая различные варианты организации движения квадрокоптера. В качестве объекта исследования были выбраны квадрокоптеры «Клевер». Исследование проводилось в лётном поле лаборатории беспилотных авиационных систем ГУАП. Приводятся фрагменты программного кода реализации автономного пилотирования на языке Python. Полётное задание состояло в формировании в пространстве букв ГУАП. В статье рассматриваются необходимые аппаратные средства, приборные комплексы и режимы работы фотокамеры для фиксации перемещения квадрокоптера. В результате исследования проводятся фотографии перемещения квадрокоптера в пространстве и определяется допустимый интервал погрешности позиционирования для выполнения полётного задания.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, квадрокоптер клевер, автономный полет, управление траекторным движением, задание траектории движения, aruco-маркеры, погрешность позиционирования, пространственное перемещение.

Для цитирования:

Богатов Н. В., Костин А. С. Управление и анализ полёта квадрокоптера при задании сложной траектории движения // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №4(26), ISSN 2077-5687. – СПб.: ГУАП., 2020 – с. 3-12. РИНЦ.

CONTROL AND ANALYSIS OF QUADROCOPTER FLIGHT WHEN SETTING A COMPLEX TRAJECTORY OF MOTION

N. V. Bogatov, A. S. Kostin

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The article present the solution to the problem of autonomous piloting of a quadcopter for a complex flight task to determine the positioning error. Mathematical model is proposed for the equation of the dynamics of angular motion in a connected coordinate system to solve this problem. The stages of elaboration and creation of a flight task are considered, a model based on directed graphs is presented, reflecting various options for organizing the movement of a quadcopter. Klever quadcopters were taken as the object of research. The study was carried out in the airfield of the laboratory of unmanned aerial systems of the SUAI. Fragments of the program code for the implementation of autonomous piloting in Python are given. The flight mission consisted in the formation of the letters SUAI in space. The article discusses the necessary hardware, instrumental systems and camera modes of operation for fixing the movement of the quadcopter. As a result of the reserch, special photographs of the movement of the quadcopter are taken and the permissible range of positioning errors is determined for performing the flight task.

Key words: unmanned aerial vehicles, quadcopter klever, autonomous flight, trajectory motion control, setting the trajectory of motion, aruco markers, positioning error, spatial movement.

For citation:

Bogatov N. V., Kostin A. S. Control and analysis of quadcopter flight when setting a complex trajectory of motion // System analysis and logistics.: №4(26), ISSN 2077-5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2020 – p. 3-12.

Введение

Сегодня наблюдается значительное увеличение практического примирения квадрокоптеров для задач индустрии. За последнее пятилетие в авиационной индустрии появилась новая экосистема Аэронет, включающая в себя производителей и эксплуатантов беспилотных авиационных систем,



разработчиков программного обеспечения, интеграторов, поставщиков услуг, отраслевые объединения, профильные научно-исследовательские лаборатории [1]. Основными крупными сегментами применения рынка Аэронет являются: сельское хозяйство, решение задач логистики и обеспечения транспортных процессов, дистанционное зондирование земли, построение цифровых моделей на основе данных от беспилотников, задачи мониторинга. Круг задач и новых решений постоянно расширяется. Новыми практическими примерами являются задачи инвентаризации, анализа и мониторинга городской среды, мониторинг пассажиропотоков. В статье [2] представлен анализ рынка беспилотных авиационных систем. На основе проведенного анализа можно сказать о том, что на первых местах сегодня стоят задачи переноса груза, решение задачи автономного пилотирования, группового или роевого управления. Данные задачи формируют потребность разработки новых математических моделей, методик и новых приборных комплексов. Основным практическим применением является транспортная отрасль и сфера интеллектуальных транспортных систем. Беспилотные авиационные системы следует применять к задачам исследования пассажиропотоков, как приведено в работе [3], или для мониторинга акваторий в районах портов, как приведено в работе [4], так как они позволяют получать динамические данные о состоянии сложных технических систем.

Базой для проведения исследований является специализированная лаборатория беспилотных авиационных систем инженерной школы ГУАП (далее – ЭБАС ГУАП). Квадрокоптерами, на которых проводилось исследование, являются квадрокоптеры «Клевер» компании ООО «Коптер экспресс» [5]. Данное оборудование установлено в выбранной лаборатории. Для проверки полета по выбранной траектории использовалось специальное учебное летное поле, входящее в состав лаборатории ЭБАС ГУАП. Основные квадрокоптеры компании СОЕХ представляют собой группу квадрокоптеров как для учебных, так и промышленных задач (табл. 1).

Таблица 1 – Квадрокоптеры ООО «Коптер экспресс»

Название	Описание	Квадрокоптеры
ООО «Коптер экспресс»	«Коптер Экспресс» – разработчик и производитель беспилотных летательных аппаратов и программного обеспечения для их автономности. Компания является лидером на рынке дронов для образования и применения их в подготовке по специальностям, связанным с разработкой, эксплуатацией, управлением и программированием БПЛА. В интересах промышленности «Коптер Экспресс» разрабатывает и производит БПЛА для автономного мониторинга территорий, доставки легковесных грузов и других миссий [3].	БАС Клевер СОЕХ Клевер 4 Code СОЕХ Клевер 4 WorldSkills Russia СОЕХ Клевер 4 Рой дронов Пеликан – автономный квадрокоптер с тепловизором для мониторинга СОЕХ Пеликан Мини (Доставка посылков весом до 2 кг)- Автономный квадрокоптер с зарядной станцией

Особенностью квадрокоптеров Клевер (рис. 1) является то, что они представляют собой учебный конструктор программируемого квадрокоптера, который можно применять для решения различных задач: перенос груза, FPV-пилотирование, автономное пилотирование.



Рис. 1. Квадрокоптер «Клевер 4»

При перемещении квадрокоптера в сложной среде осуществляется непрерывное планирование и построение траектории движения [6]. Необходимо понимание следующих особенностей:

- определение базовой системы координат, точек старта, границ полетного поля;
- понимание движения квадрокоптера в пространстве, построение идеальной модели;
- включение в модели ошибок, связанных с позиционированием коптера в пространстве и возможные отклонения при движении, вызванное как аэродинамическими свойствами, так и возможными вибрациями корпуса квадрокоптера.

В данном случае идентификация перемещения квадрокоптера выполнена на основе идентификации в полетном поле по Агисо-маркерам [7, 8]. Хорошо апробированным решением является задание траектории опорными точками и дальнейшее представление траектории в параметрическом виде. В случае необходимости соблюдения требований ограниченности производных по времени координат целевого положения используются различные методы интерполяции желаемой траектории: например, аппарат сплайнов.

В данной работе квадрокоптер должен нарисовать аббревиатуру «ГУАП», при этом прямого управления устройством оператором не будет, полет будет происходить автономно. Для того, чтобы увидеть нарисованные буквы будет использоваться светодиодная лента, а также фотокамера марки Nikon 3320 с установкой режима на длинной выдержке.

Постановка задачи и алгоритм управления

Положение квадрокоптера в пространстве характеризуется координатами x , y , z центра масс аппарата в неподвижной декартовой системе координат и тремя углами поворота вокруг осей связанной системы координат [9, 10, 11]. На начальных этапах разработки можно также считать несущую часть аппарата твёрдым телом, а ветер учитывать только как внешнее возмущение. Так как полеты происходят в закрытом летном поле, то влияние внешней среды будет приниматься крайне малой величиной, не оказывающей сильного возмущения при выполнении полёта. При выполнении полётного задания необходимо учитывать зависание квадрокоптера в определенной точке (определенном Агисо-маркере). На рисунке 2 показаны взаимное положение связанной (x_k, y_k, z_k) и нормальной, соответствующей маркеру, (x_m, y_m, z_m) систем координат в режиме зависания и действующие на квадрокоптер силы и моменты.

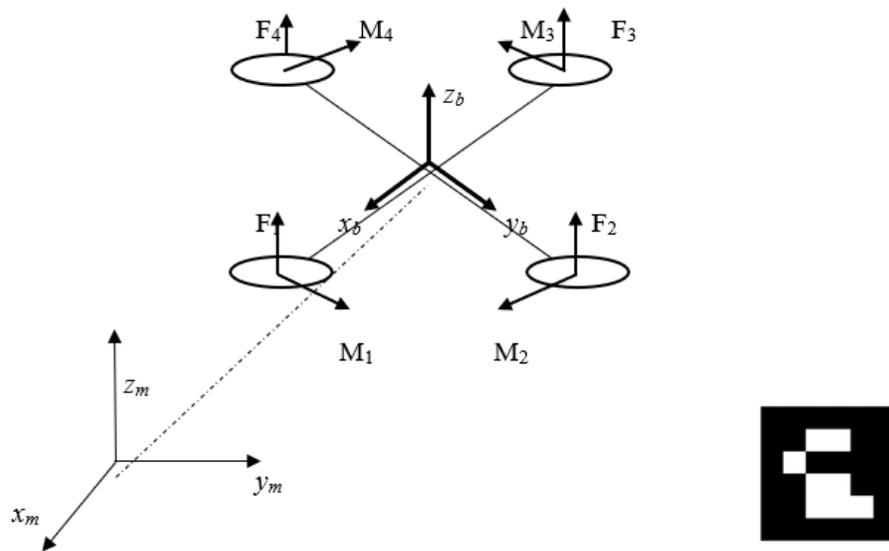


Рис. 2. Системы координат квадрокоптера в режиме зависания

На рисунке 2 F_1, F_2, F_3, F_4 – силы тяги винтов, M_1, M_2, M_3, M_4 – моменты от сопротивления винтов. Матрицей преобразования двух систем координат R является:

$$\begin{cases} F_b = [F_{x_b}, F_{y_b}, F_{z_b}]^T = [0, 0, L]^T \\ L = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = b(w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_4^2), \\ b = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot A_i \cdot R_i^2 \end{cases} \quad (1)$$

где L – суммарная тяга; b – коэффициент силы тяги; ρ – плотность воздуха; C_D – коэффициент подъемной силы; A_i – площадь ометаемой лопастями винта поверхности; R_i – радиус винта; w_i – угловая скорость вращения i -го винта.

Сила тяги в системе координат маркера:

$$F_m = [F_{x_m}, F_{y_m}, F_{z_m}] = R \cdot F_b = L[s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta, c_\varphi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\theta, c_\varphi c_\theta]^T, \quad (2)$$

где

$$R = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\varphi s_\theta - c_\varphi s_\psi & s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta \\ c_\theta s_\psi & c_\varphi c_\theta + s_\varphi s_\psi s_\theta & c_\varphi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\varphi c_\theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $C_x = \cos x, S_x = \sin x, \varphi, \psi, \theta$ – углы рыскания, тангажа, крена соответственно; R – матрица перехода.

Для построения полной системы уравнений необходимо включить силу тяжести и силу сопротивления воздуха (4).



$$\begin{cases} f_m = [f_x, f_y, f_z]^T \\ G = [0, 0, -mg]^T \end{cases} \quad (4)$$

С учётом симметрии квадрокоптера и считая, что центр масс расположен в начале координат связанной системы, уравнения динамики углового движения в связанной системе координат можно записать в виде:

$$\begin{cases} \dot{p} = \frac{(I_{yy} - I_{zz})}{I_{xx}} qr + \frac{L_2}{I_{xx}} \\ \dot{q} = \frac{(I_{zz} - I_{xx})}{I_{yy}} pr + \frac{L_3}{I_{yy}} \\ \dot{r} = \frac{(I_{xx} - I_{yy})}{I_{zz}} pq + \frac{L_4}{I_{zz}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} L_2 = M_{xq} + M_{xm} + M_{xp} \\ L_3 = M_{yq} + M_{ym} + M_{yp} \\ L_4 = M_{zq} \end{cases} \quad (6)$$

где $p = w_x, q = w_y, r = w_z$ – проекции вектора угловой скорости аппарата; I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – осевые моменты инерции аппарата; M_{xq}, M_{yq}, M_{zq} – моменты, создаваемые винтами, $M_{xm}, M_{ym}, M_{xp}, M_{yp}$ – гироскопические моменты двигателей и винтов.

На основании представленных уравнений определяется уравнение динамики квадрокоптера. На рисунке 3 представлено поле меток в лаборатории беспилотных авиационных систем.



Рис. 3. Пример поля Агисо-маркеров и полет квадрокоптера Клевер в лаборатории беспилотных авиационных систем

Модель полетного задания

В качестве модели полётного задания было выбрано слово, которое является сокращенной аббревиатурой Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего



образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП). Квадрокоптер должен выполнить полёт по меткам, выводя в пространстве буквы. Коптер будет выполнять полёт, выполняя задание по одной букве. Необходимо представить модель перемещения квадрокоптера. От заданных переходов и изменений высот будет зависеть различная прорисовка букв. Представим данные варианты с помощью теории графов (рис. 4). В качестве примера возьмем букву «Г».

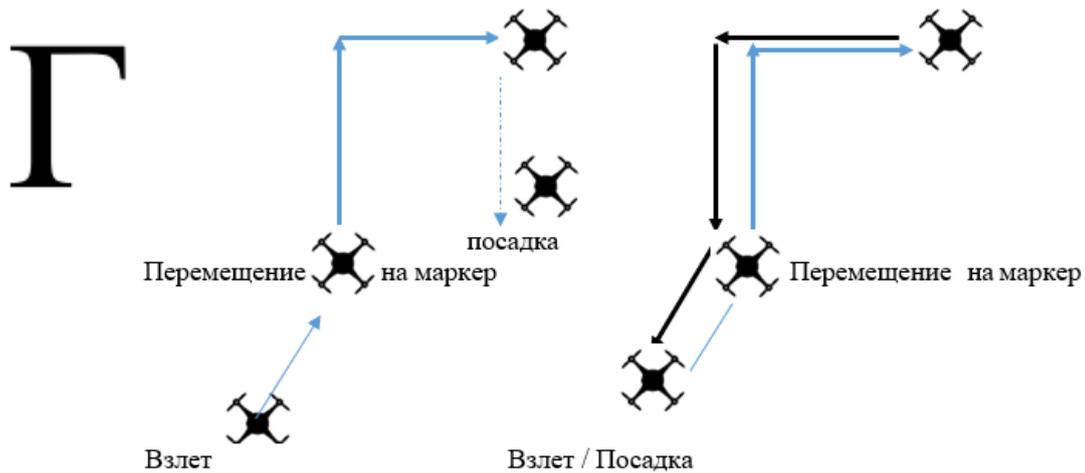


Рис. 4. Модель перемещения квадрокоптера для построения буквы в пространстве

В первом варианте полет и посадка производятся в различных точках летного поля. При этом в точках изменений движения коптер производит небольшое зависание и дальнейшее перемещение. Во втором варианте полностью реализован полет при котором квадрокоптер по маршруту перемещается как в прямом, так и в обратном направлении. Во втором случае построен полностью кольцевой маршрут через систему отпределенных точек.

По аналогии с задачами транспортной логистики такая модель является моделью маятниковых маршрутов при реализации одностороннего и двухстороннего движения с грузом [12]. Рассмотрим практическую реализацию полетных заданий.

Практическая реализация полётного задания

Для реализации автономного полёта, квадрокоптер должен выполнить следующие задачи:

- выполнить автономный запуск двигателей и произвести взлет на заданную высоту;
- показать определенную цветовую индикацию на адресной светодиодной ленте;
- проследовать по заданному маршруту;
- выполнить автономную посадку и остановку двигателей.

Для выполнения эксперимента потребуются: одноплатный компьютер Raspberry PI, фотокамера NIKON с возможностью делать длинную выдержку, светодиодная лента и ArUco-маркеры. Raspberry PI необходим для выполнения программы автономного пилотирования на языке программирования Python и для навигации дрона при помощи машинного зрения без применения GPS. Сам одноплатный компьютер крепится к нижней деке квадрокоптера (рис. 5) и подсоединяется к полётному контроллеру при помощи micro-USB to USB кабеля.

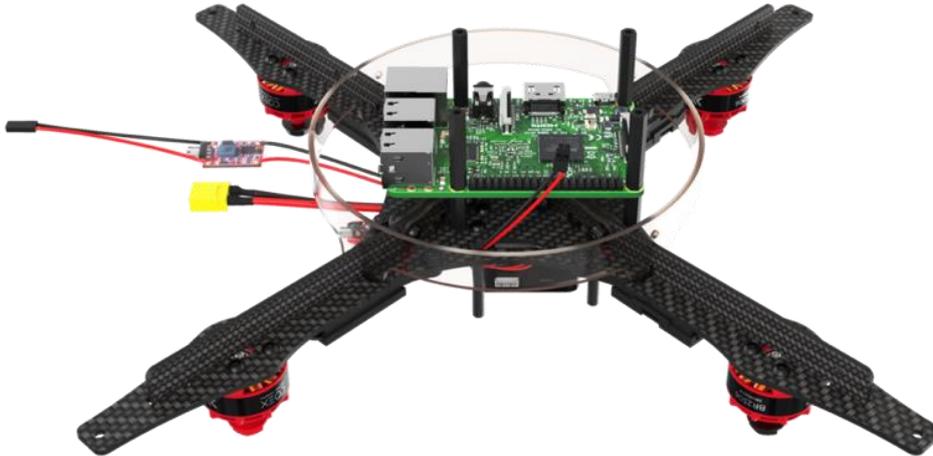


Рис. 5. Размещение Raspberry PI на квадрокоптере

На основании серии экспериментов с фотокамерой NIKON 3320 было установлено, что выдержка до 30 секунд – более чем достаточно для запечатления траектории буквы. Для цветовой индикации была использована адресуемая RGB-светодиодная лента. Адресуемая RGB-светодиодная лента позволяет выставлять произвольные 24-битные цвета на каждый из отдельных светодиодов. Это позволяет сделать полет дрона более ярким, а также визуально получать информацию о полетных режимах, этапе выполнения пользовательской программы и других событиях.

Квадрокоптер, при помощи нижней камеры распознает маркер и сопоставляет ID маркера с файлом карты всех меток, находящихся в полетной зоне. В файле-карте указаны координаты всех меток, с учетом их *id-номера*, а также размера самого маркера. За счет идентификации маркера при помощи машинного зрения, а также сопоставления *id* –номера распознанной метки и ее координат в файле-карте, дрон может достаточно точно определить текущие координаты, а также осуществить дальнейшую навигацию.

В представленном ниже фрагменте кода (рис. 6) производится автономный взлет, зависание над аркусо-маркером на высоте 1м метр, а затем полет к маркеру с *id* = 83. Все поле меток заранее занесено в память квадрокоптера.

```
2 import rospy
3 from clever import srv
4 from std_srvs.srv import Trigger
5 from mavros_msgs.srv import CommandBool
6 from clever.srv import SetLEDEffect
7
8 arming = rospy.ServiceProxy('mavros/cmd/arming', CommandBool)
9
10 rospy.init_node('flight')
11
12 get_telemetry = rospy.ServiceProxy('get_telemetry', srv.GetTelemetry)
13 navigate = rospy.ServiceProxy('navigate', srv.Navigate)
14 land = rospy.ServiceProxy('land', Trigger)
15 set_effect = rospy.ServiceProxy('led/set_effect', SetLEDEffect)
16
17 navigate(x=0, y=0, z=1.0, speed=0.3, frame_id='body', auto_arm=True) #взлет на один метр
18 set_effect(r=255, g=0, b=0)
19 rospy.sleep(6)
20
21 navigate(frame_id='aruco_83', x=0, y=0, z=1.0, speed=1.0)
22 set_effect(r=255, g=0, b=0)
23 rospy.sleep(3)
24
25 navigate(frame_id='aruco_103', x=0, y=0, z=1.2, speed=1.0)
26 set_effect(r=255, g=0, b=0)
```

Рис. 6. Фрагмент кода автономного полета



Платформа Клевера 4 позволяет использовать Raspberry Pi для того, чтобы запрограммировать автономный полет дрона. Чаще всего программа для автономного полета пишется на языке Python. Программа может получать телеметрию (заряд батареи, ориентацию, расположение и т. д.) и отправлять команды: полететь в точку, установить ориентацию, угловую скорость и другие функции.

Для того чтобы указать координаты точки, в которую должен переместиться дрон используется сервис navigate (прилететь в обозначенную точку по прямой).

Параметры:

x, y, z – координаты (м);

yaw – угол по рысканью (радианы);

yaw_rate – угловая скорость по рысканью (применяется при установке yaw в NaN) (рад/с);

$speed$ – скорость полета (скорость движения setpoint) (м/с);

$auto_arm$ – перевести коптер в OFFBOARD и заармить автоматически (коптер взлетит);

$frame_id$ – система координат, в которой заданы x, y, z и yaw .

Для навигации квадрокоптера во время взлета, посадки и выполнения полётной миссии используется $frame_id$ – система координат для значений x, y, z, v_x, v_y, v_z . Для взлета применяется система координат $body$ — координаты относительно квадрокоптера без учета наклонов по тангажу и крену. Во время использования данной системы координат считываются данные с датчиков, которые находятся в полетном контроллере без использования камеры, так как камера находится слишком близко к маркеру и распознать его не получится. Во время выполнения полетной миссии используется система координат $aruco_N$ – координаты относительно маркера с $ID=N$.

Результаты и анализ выполнения полетного задания

В качестве выбранного полетного задания были выбраны буквы «ГУАП». Результаты полета квадрокоптера приведены на рисунке 7.

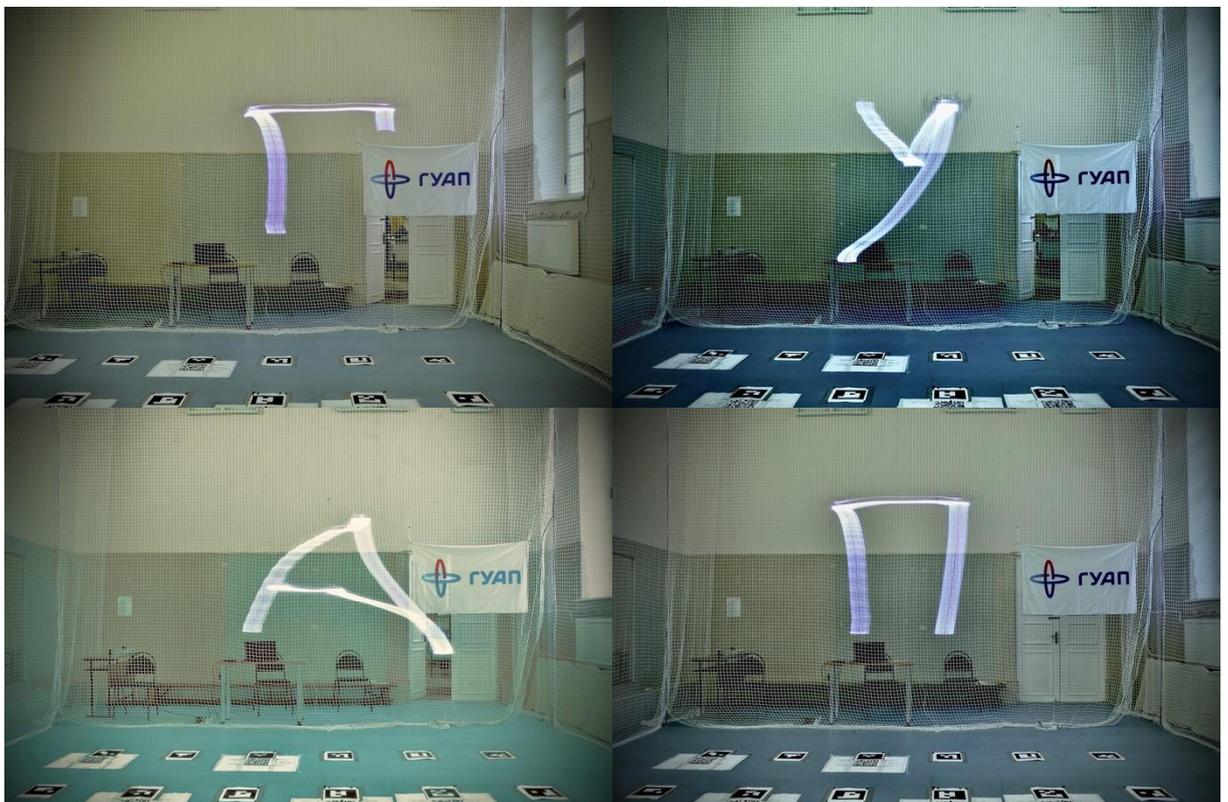


Рис. 7. Результаты полета квадрокоптера при выполнении полётного задания



Результат анализа на определение погрешности позиционирования коптера приведено на рисунке 8.



Исследование полетного задания

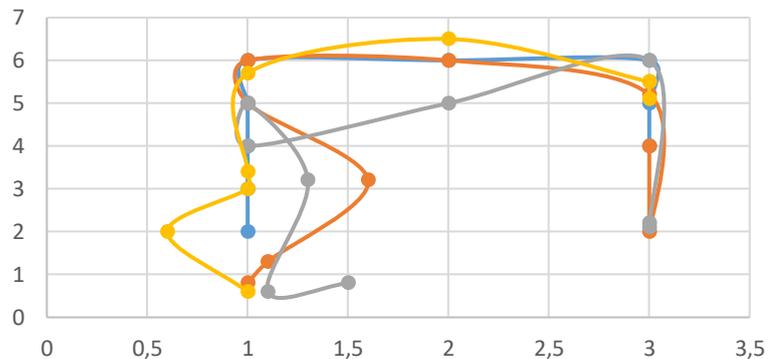


Рис. 8. Исследование полетного задания для определения погрешности позиционирования

Представленные на рисунке 8 примеры графиков функций были построены для каждой буквы.

Заключение

Для проверки предложенного подхода были проведены эксперименты по перемещению квадрокоптера из начального положения с выходом на траекторию движения. Движение фиксировалось фотокамерой с выдержкой 30 секунд. Перемещение квадрокоптера осуществлялось по кусочно-линейным траекториям. Данные об ориентации квадрокоптера, вычисленные навигационной системой поступали с интервалами около 0.1 с. При движении квадрокоптера вдоль заданной траектории отклонение составило около 0.15м с систематическим сдвигом, пропорциональным значению желаемой скорости. Достигнутая погрешность позиционирования квадрокоптера относительно желаемой траектории при анализе автономного полета по всем четырем буквам в лаборатории беспилотных авиационных систем составила 0.1 – 0.2 м

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АЭРОНЕТ. Ассоциация эксплуатантов и разработчиков беспилотных авиационных систем. – URL: <https://aeronet.aero/> (дата обращения: 01.09.2020).
2. Костин А.С. Вопросы современного развития рынка беспилотных летательных аппаратов / А.С. Костин, Н.В. Богатов // Системный анализ и логистика. 2019. –№ 4 (22). – С. 65-72.
3. Костин, А.С. Анализ пассажиропотока остановок городского транспорта на основе использования беспилотных авиационных систем / А.С.Костин, Н.Н.Майоров // Организация и безопасность дорожного движения: материалы XIII Национальной научно-практической конференции с международным участием (Тюмень, 19 марта 2020 г.). Тюмень: ТИУ, 2020. С. 367-371.
4. Maiorov, N.N. Forecasting the operational activities of the sea passenger terminal using intelligent technologies / N.N. Maiorov, V.A. Fetisov, S. Krile // Transport Problems. – 2018. – Vol.13 (Issue 1). – pp. 27-36. DOI: 10.21307/tp.2018.13.1.3.
5. ООО «Коптер экспресс». COEX. – URL: <https://ru.coex.tech/> (дата обращения: 01.09.2020).
6. Hoffmann G.M., Naomiao Huang, Wasland S.L., Tomlin E.C.J. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment // Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Hilton Head, South Carolina, 2007.



7. Генератор Aruco-маркеров // ArUco markers generator. – Режим доступа: <https://chev.me/arucogen/> (дата обращения: 01.09.2020).
8. *Rafael Munoz-Salinas*. Aruco: a minimal library for augmented reality applications based on opencv. Universidad de Cordoba. 2012.
9. *Kim J., Kang M.-S., Park S.* Accurate Modeling and Robust Hovering Control for a Quad-rotor VTOL Aircraft // Journ. Intell. Robotics Syst. 2010. –Vol. 57. No. 1-4. –P. 9-26.
10. *Белоконь С.А., Золотухин Ю.Н., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Филиппов М.Н., Ян А.П.* Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории // Автометрия. 2012. № 5. С. 32-41.
11. *Engel J., Sturm J., Cremers D.* Accurate Figure Flying with a Quadrocopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing // Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012. P. 43-48.
12. *Майоров, Н.Н.* Практические задачи моделирования транспортных систем / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Санкт-Петербург : ГУАП, 2012. - 185 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Богатов Никита Владимирович –

магистр кафедры системного анализа и логистики

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: nikita.bogatow@gmail.com

Костин Антон Сергеевич –

аспирант кафедры системного анализа и логистики, заведующий лабораторией беспилотных авиационных систем ИИШ ГУАП

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: anton13258@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bogatov Nikita Vladimirovich –

master of the Department of Systems Analysis and Logistics

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SUAI, 67, Bolshaya Morskaia str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: nikita.bogatow@gmail.com

Kostin Anton Sergeevich –

post-graduate student of the Department of System Analysis and Logistics, Head of the Laboratory of Unmanned Aviation Systems SUAI

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SUAI, 67, Bolshaya Morskaia str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: anton13258@mail.ru