

УДК 004.896

DOI: 10.47928/1726-9946-2020-20-1-26-32

Моделирование влияния возмущающих воздействий на стабильность воздушной манипуляционной системы в программе UAVManipulatorModeling

Нгуен В.В.

Представлено академиком АМАН Шибзуховым З.М.

С увеличением энергоемкости бортовых систем питания беспилотных летательных аппаратов (БЛА) стали исследоваться задачи не только бесконтактного мониторинга, но физического взаимодействия БЛА с наземными объектами. Наличие манипулятора существенно усложняет процесс стабилизации БЛА, а при движении манипулятора приводит к трудностям позиционирования БЛА и снижает точность наведения концевой механизма, например захвата [1-3]. Кроме того, физическое взаимодействие манипулятора с объектами требует повышенных энергоресурсов БЛА. Большинство существующих конструкторских решений манипуляционных систем БЛА представляют собой манипулятор с несколькими степенями свободы, на конце короткого установлены один или несколько различных захватных устройств, что позволяет удерживать предметы разнообразных форм.

Например, в работе [4] механический захват с магнитом, прикрепленный к нижней части БЛА, позволяет поднимать, транспортировать и собирать различные элементы в единую конструкцию. В ходе выполнения экспериментов БЛА собрал конструкцию из квадратных перекладин, оснащенных магнитом для усиления их сцепления с захватом. В работе [5] для перемещения различных типов объектов авторы разработали вакуумный захват, который для распределения равномерной нагрузки оснащен 4 вакуумными насадками с равным расстоянием между ними. Данный захват не способен удерживать предметы с большим весом и предметы с негладкой поверхностью.

Конструкция манипуляционной системы в [6] представляет собой роботизированную руку с четырьмя степенями свободы, прикрепленную к нижней части трикоптера. Для управления данным манипулятором авторы разработали подход, объединяющий нейронные сети и регуляторы нечеткой логики. Такой подход устраняют необходимость в точной настройке обычных регуляторов путем изучения динамики системы и не требует больших вычислительных ресурсов благодаря алгоритму обучения, основанного на методе быстрого скользящего окна, который не требует невырожденных матриц или частных производных. Экспериментальные результаты показали, что предлагаемый регулятор управления способен снизить среднеквадратичную ошибку примерно на 50% по сравнению с пропорциональным (П-) и ПИД-регулятором.

В работе [7] воздушная манипуляционная система с двумя степенями свободы, закрепленная на квадранторе, позволяет поднять и переместить предмет внутри горизонтальной полки. Управление осуществляется адаптивным регулятором, параметры которого настроены по методу скользящего окна. По результатам исследований на этапе поднятия предмета среднеквадратичная ошибка положения квадрантора составила всего 2,08 см,

а в момент спуска 2,56 см. Даже несмотря на то, что никакая информация, такая как масса и момент инерции предмета, не передается регулятору, манипуляции происходят успешно благодаря устойчивости регулятора, основанного на методе скользящего окна.

При использовании в качестве рабочего органа механического захвата, могут возникнуть некоторые недостатки: ограниченное рабочее пространство захвата и ограниченная захватная способность по массе или объему. Кроме того, при использовании механического захвата полезная нагрузка жестко соединяется с корпусом БЛА. Соответственно, не только ориентация полезной нагрузки ограничена ориентацией БЛА, но и доступная дальность действия рабочего органа ограничена из-за корпуса и лопастей БЛА. Чтобы справиться с этими ограничениями, одним из альтернативных подходов является оснащение БЛА роботизированным манипулятором, способным активно взаимодействовать с окружающей средой. Сочетая мобильность летательного аппарата с универсальностью роботизированного манипулятора, можно максимально повысить полезность мобильных манипуляций.

Существует два подхода к решению задач моделирования и управления. Первый независимый подход делит систему на две независимые части и рассматривает методы моделирования каждой из них соответственно. Этот подход рассматривает движение и динамику манипулирующих устройств как внешние возмущения для БЛА. Второй подход рассматривает БЛА и манипулятор как целостную систему, решающую проблемы, связанные с тем, что центр масс постоянно меняется, а внутренняя динамика взаимосвязана. Контроллеры для беспилотных летательных аппаратов и манипулирующих устройств разрабатываются с ранних времен исследований ПИД-регуляторов до настоящего времени. Адаптивное управление скользящим режимом и управление обратной связью используются для беспилотных летательных аппаратов, в то время как управление импедансом и визуальное управление сервомотором используются для манипулирования устройствами. Контроллер должен управлять стабильностью полета при изменяющихся значениях следующих параметров: переменная масса, инерция, неизвестные характеристики манипулируемого объекта. Сбалансированные характеристики полета и манипуляций рассчитываются в целях достижения минимальных затрат на траекторию полета при тяжелой полезной нагрузке. Непрерывное управление точным и стабильным положением конечного эффектора осложняется тем, что БЛА не может контролировать положение и ориентацию одновременно особенно в уличных условиях [8].

Существует множество способов конструирования манипулятора для стабилизации центра масс воздушной манипуляционной системы. В работе [9] предложенная воздушная манипуляционная система состоит из двух симметричных манипуляторов, что обеспечивает минимальный СОМ и минимальное возмущение углового момента платформы во время захвата. В работе [10] был разработан легкий манипулятор 5 степенями свободы. Конструкция задумана так, чтобы максимально приблизить центр тяжести манипулятора к основанию БЛА, тем самым уменьшив общую инерцию и статическую неуравновешенность системы. В исследовании [11] манипулятор оснащен тремя руками, образующих равносторонний треугольник с углом 120° . В работе [12] авторы разработали манипулятор, имеющий два рабочих органа: один для полезной нагрузки, а другой для противовеса. Данное исследование показывает, что горизонтальное смещение центра

масс оказывает сильное влияние на полет БЛА. Следовательно, для стабилизации БЛА должны преодолевать любое горизонтальное смещения центра масс. В тоже время нужно учитывать, что вертикальное смещение центра масс вызывает изменение величины момента инерции. Для преодоления данных проблем в рассмотренных выше работах центр масс смещен вниз, что приводит к повышению устойчивости БЛА.

В данном исследовании для воздушной манипуляционной системы была предложена конфигурация манипулятора с 3 степенями свободы и с тремя поворотными шарнирами. Две последовательные оси шарниров вращения параллельны друг другу. Рассматриваемый манипулятор имеет 3 звена весом по 0,15 кг и следующими размерами $L_1 = 0,15$ м, $L_2 = 0,30$ м, $L_3 = 0,15$ м. Данные размеры выбраны исходя из рабочей длины манипулятора и базового размера БЛА. Манипулятор перемещает, поднимает и отпускает объект, при этом сохраняя его центр тяжести на вертикальной оси. Также, предполагается, что центр масс каждого звена является средней точкой этого звена. В предложенной конструкции центром масс манипулятора является середина второго звена и рабочий орган перемещается только по вертикальной оси.

Для моделирования управляющих воздействий комбинированной системы: беспилотного летательного аппарата и установленного на нем манипулятора была разработана программная система UAVManipulatorModeling. Программа содержит модули решения прямой и обратной задачи кинематики манипулятора, а также динамические модели управления и стабилизации движения манипулятора беспилотного летательного аппарата. Программная система разработана на языке C#, имеет графический пользовательский интерфейс и производит вывод расчетов положения центра масс комбинированной системы и отдельных ее элементов, траектории движения манипулятора в текстовом и графическом виде.

Решение обратной задачи кинематики для манипулятора заключается в нахождении значений положений шарниров с учетом положения и ориентации рабочего органа относительно основания БЛА и значений всех геометрических параметров звеньев. Параметры рабочего положения и углов сочленения манипулятора, рассматриваемого в данном исследовании показаны на рисунке 1.

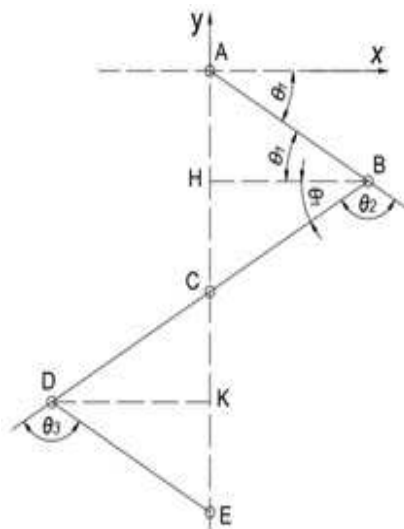


Рисунок 1 – Параметры моделируемого манипулятора

Экспериментальные результаты были получены при управлении манипулятором по 4-й степени полинома с воздействием возмущения. Хотя скорость и ускорение траектории звеньев не изменяются плавно (рис. 2), манипулятор движется с незначительными отклонениями по заданной траектории (рис. 3) при воздействии возмущения с большой амплитудой.

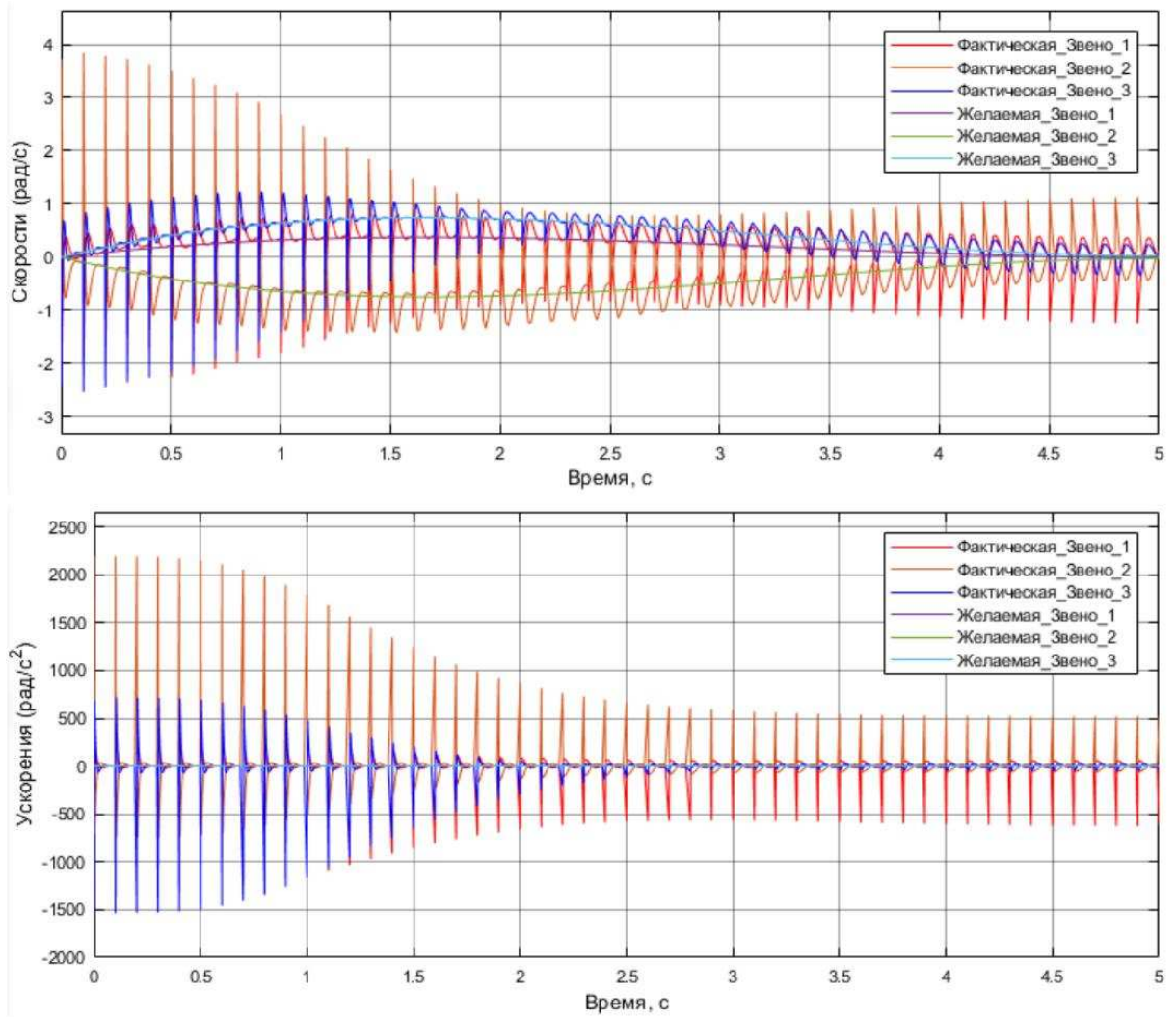


Рисунок 2 – Изменение скорости и ускорения звеньев манипулятора при воздействии возмущения

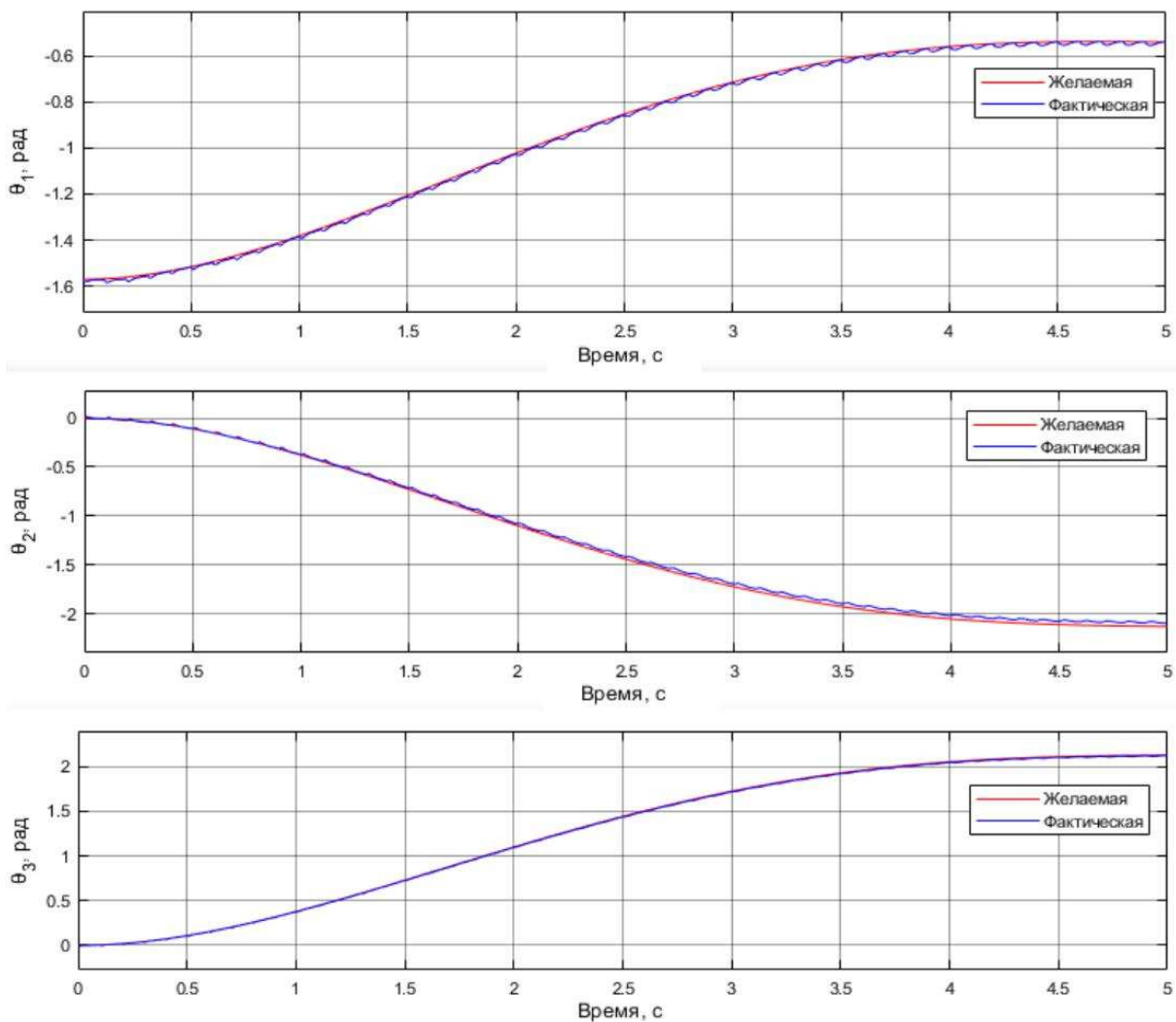


Рисунок 3 – Измерение отклонений углов между звеньями манипулятора при воздействии возмущения

В разработанной воздушной манипуляционной системе с тремя степенями свободы устойчивость обеспечивается только в том случае, если центр масс манипулятора существенно не отклоняется от вертикальной оси. В данном исследовании для манипулятора был разработан нечеткий ПИД-регулятор. Полученные результаты показали, что центр масс манипулятора перемещался горизонтально менее чем на 1 мм при работе с полезной нагрузкой. Динамический отклик каждого звена достаточен для быстрой стабилизации системы с небольшим перерегулированием. По результатам моделирования сделан вывод о возможности применения разработанного манипулятора для воздушных манипуляций с наземными объектами весом до 0,15 кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ронжин А.Л., Нгуен В.В., Соленая О. Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами // Труды МАИ. 2018. № 98. С. 28–28.

2. *Nguyen V., Saveliev A., Ronzhin A.* Mathematical modelling of control and simultaneous stabilization of 3-DOF aerial manipulation system // Interactive collaborative robotics. Springer. LNCS/LNAI, 2020, vol. 12336, pp. 253-264. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_25
3. *Чернышев В.И., Савин Л.А., Фоминова О.В.* Непрямое управление колебаниями: элементы теории // Труды СПИИРАН. 2018. № 1 (18). С. 148–175.
4. *Lindsey Q., Mellinger D., Kumar V.* Construction of cubic structures with quadrotor teams // Proc. Robotics: Science & Systems VII. 2011.
5. *Kessens C.C., Thomas J., Desai J.P., & Kumar V.* Versatile aerial grasping using self-sealing suction // 2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, 2016, pp. 3249–3254. DOI: [10.1109/ICRA.2016.7487495](https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487495)
6. *Imanberdiyev N., Kayacan E.* A fast learning control strategy for unmanned aerial manipulators // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, vol. 94, № 3-4, pp. 805–824. <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0884-7>
7. *Kim S., Choi S., Kim H.J.* Aerial manipulation using a quadrotor with a two dof robotic arm // 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013, pp. 4990–4995. DOI: [10.1109/IROS.2013.6697077](https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6697077)
8. *Nguyen V., Vu Q., Ronzhin A.* Mathematical Modeling of Stable Position of Manipulator Mounted on Unmanned Aerial Vehicle // Proceedings of 15-th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings». Springer, Singapore, vol. 187, pp. 151–164. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5580-0_12.
9. *Yu P., Wang Z., Wong K.C.* Exploring aerial perching and grasping with dual symmetric manipulators and compliant end-effectors. International Journal of Micro Air Vehicles, 2019, vol. 11, pp. 1756829319877416. <https://doi.org/10.1177/1756829319877416>.
10. *Bellicoso C.D., Buonocore L.R., Lippiello V., Siciliano B.* Design, Modeling and Control of a 5-DoF Light-Weight Robot Arm for Aerial Manipulation // 23-rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2015, pp. 853–858.
11. *Orsag M., Korpela C., Oh P.* Modeling and control of MM-UAV: Mobile manipulating unmanned aerial vehicle // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, vol. 69. № 1-4, pp. 227–240. DOI: [10.1007/s10846-012-9723-4](https://doi.org/10.1007/s10846-012-9723-4).
12. *Hafez O.M.A., Jaradat M.A., Hatamleh K.S.* Stable under-actuated manipulator design for mobile manipulating Unmanned Aerial Vehicle (MM-UAV) // 7-th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO). IEEE, 2017, pp. 1-6. DOI: [10.1109/ICMSAO.2017.7934879](https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2017.7934879).

ABSTRACT

The paper discusses the scientific problem of controlling an air manipulation system and describes the experimental results of modeling the influence of disturbing influences on the stability of the manipulator movement with 3 degrees of freedom in the developed software system UAVManipulatorModeling.

Keywords: aerial manipulator system, air manipulation system, manipulator, robotics, fuzzy PID controller, center of mass, UAV.

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg; nguyenvanvinhhvkt@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В работе обсуждается научная задача управления воздушной манипуляционной системой и описаны экспериментальные результаты моделирования влияния возмущающих воздействий на стабильность движения манипулятора с 3 степенями свободы в разработанной программной системе UAVManipulatorModeling.

Ключевые слова: беспилотный летательный манипулятор, воздушная манипуляционная система, манипулятор, робототехника, нечеткий ПИД-регулятор, центр масс, БЛА.

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург; nguyenvinhvkt@gmail.com

© В.В. Нгуен, 2020