

Метод автоматического управления взлетом и посадкой для одновинтового робота-вертолёта

Дайебал Джаффар Бакер Джабар

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Одной из наиболее перспективных конструкций беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является одновинтовая схема, однако в силу сложности принципов управления подобными летательными аппаратами на сегодня отсутствуют эффективные методы автоматизации их взлёта и посадки. Применение традиционных для БПЛА мультикоптерного типа систем, основанных на спутниковом позиционировании и вычислении управляющих воздействий с помощью строгих математических формул, не позволяют в полной мере реализовать преимущества одновинтовой схемы. В статье рассмотрена существующая модель процесса управления БПЛА с одновинтовой схемой, предложены и обоснованы её изменения, а также сформулирован метод автоматического управления взлётом и посадкой одновинтового робота-вертолёта.

Ключевые слова: одновинтовая схема, робот-вертолёт, автоматический взлёт, автоматическая посадка, метод, управление.

Введение

Одной из нетривиальных задач является построение автоматических систем управления БПЛА. В зависимости от конструкции и принципов создания подъемной силы, сложность решения данной задачи варьируется в значительной степени [1]. К наиболее развитым с точки зрения автоматизации управления относятся беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного типа, в то время как наиболее перспективными можно считать БПЛА вертолетного типа [2,3], поскольку они способны решать гораздо более широкий круг задач. Последние также могут быть классифицированы, в первую очередь по количеству несущих винтов на одновинтовые и многовинтовые. В зависимости от количества винтов и их расположения, существенно меняются характеристики летательного аппарата, а также сложность автоматического управления. Несмотря на большую устойчивость, в том числе к отказам отдельных двигателей, широкие возможности по управлению и распространенность, использование мультикоптеров ограничивается максимальной полезной нагрузкой, которую они способны переносить. В качестве альтернативы данным летательным

аппаратам может рассматриваться вертолёт, построенный по традиционной одновинтовой схеме. Данный тип конструкции позволяет в значительной мере увеличить полезную нагрузку и автономность (за счет использования жидкостных двигателей), снизить уровень шума (за счет меньшего количества винтов).

В то же время автономное управление роботом-вертолётom наименее исследовано в современной науке. Причины низкого уровня проработки заключаются в малой распространенности данного типа летательных аппаратов в соотношении к самолетам и дронам (мультикоптерам). Малая распространенность, в свою очередь, вызвана более сложной, по сравнению с мультикоптером, схемой управления. Физика управления одновинтовым вертолётom, в отличие от других летательных средств, требует от пилота не только контроля приборных показаний и визуального ориентирования, но также учета тенденций в изменении угла тангажа и крена, что для вертолётa имеет критическое значение в момент взлёта или посадки. Причина этого состоит в отсутствии возможности свободного пикирования и иных, по сравнению с самолётom и мультикоптером, инерционных характеристик управления.

Одновинтовые роботы-вертолётy являются наименее стабильными в плане управления [4-6], что создает дополнительные трудности при решении задачи автоматизации управления всеми режимами и фазами полётa. Системы, покрывающие полный цикл пилотирования БПЛА подобного типа, помимо непосредственного решения задач управления, требуют от исследователей нахождения ответов на сопутствующие вопросы по оптимизации алгоритмов и состава аппаратных средств, реализующих эти алгоритмы.

На сегодняшний день известны системы, успешно решающие задачу управления одновинтовым роботом-вертолётom в фазе полётa на эшелоне [7],

в то время как задача полной автоматизации взлёта и посадки одновинтового робота-вертолёта изучена слабо, а известные её решения разрабатываются с многими допущениями и упрощениями [8,9].

В статье предлагается новый метод решения задачи автоматического управления взлётом и посадкой одновинтового робота-вертолёта, основная идея которого состоит в приближении принципов управления к действиям пилота. В первой главе представлена модель процесса управления одновинтовым роботом-вертолётом. Во второй сформулирован метод автоматического управления взлётом и посадкой одновинтового робота-вертолёта. Основные выводы и оценки приводятся в заключении.

Модель процесса управления взлётом и посадкой одновинтового робота-вертолёта

Основываясь на анализе научных работ, посвященных задаче автоматического управления взлётом и посадкой одновинтового робота-вертолёта, можно предложить следующую обобщенную модель, показанную на рис. 1.

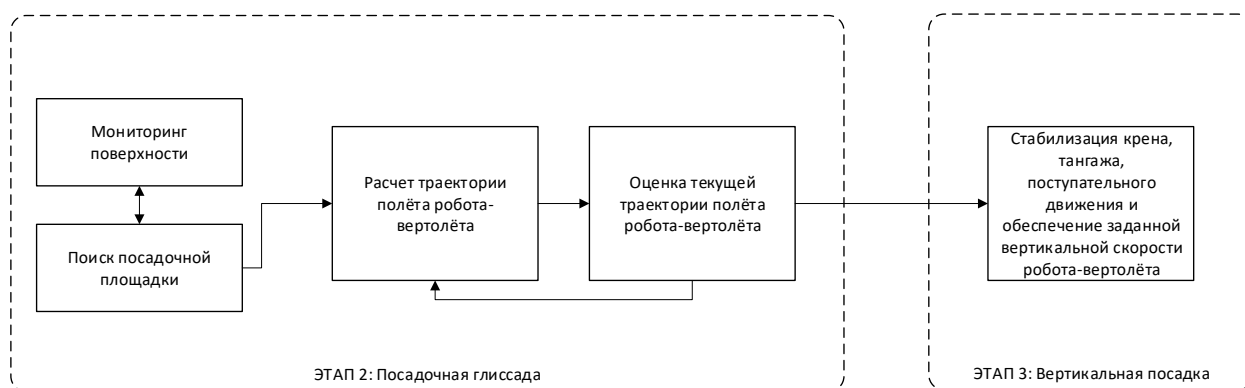


Рис. 1 – Модель процесса управления взлётом и посадкой одновинтового робота-вертолёта

Принимая во внимание тот факт, что посадка из режима висения является наиболее сложной и может быть ограничена конструктивными особенностями движителей робота-вертолёта [10], остановимся на посадке с поступательным движением, изображенного на рис. 2.

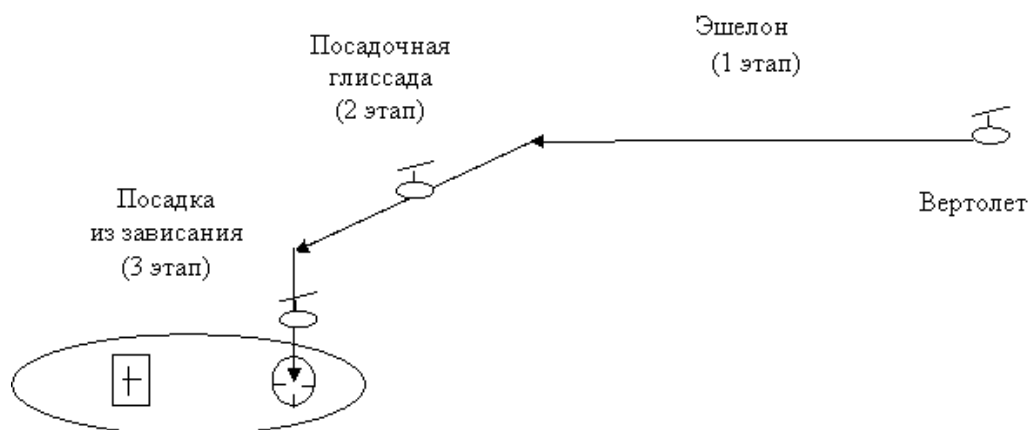


Рис. 2. – Рассматриваемая схема посадки робота-вертолётa

Система автоматического управления взлётom и посадкой решает задачи пилотирования вертолётa на 2 и 3 этапах как видно на рис. 2.

В выбранном режиме автоматическое управление посадкой сводится к следующему:

1. На 2 этапе ведется непрерывный мониторинг поверхности с целью поиска и захвата цели, которая представляет собой оборудованное или пригодное место посадки;
2. На 2 этапе осуществляется расчет траектории и скорости движения на этапе сближения с посадочной площадкой;
3. На 2 этапе осуществляется контроль и корректировка отклонения фактической траектории движения от расчётной;
4. На 3 этапе осуществляется стабилизация БПЛА в 4 плоскостях (крен, тангаж, поступательное движение, вертикальное движение) вплоть до соприкосновения с посадочной площадкой.

Для решения задачи обнаружения места посадки могут применяться как пассивные (знак хелипорта, буква «Н»), так и активные (радиомаяки, световые излучатели и пр.) ориентиры. В случае отсутствия в зоне посадки оборудованных площадок задача обнаружения ориентиров может заменяться на трёхмерный анализ поверхности с целью поиска подходящего места [11,12]. Поскольку данная задача может быть вынесена за рамки

непосредственно системы управления и представляет собой отдельную область исследования, то в данной статье будет рассмотрен один из вариантов маркировки оборудованной площадки – знак хелипорта [13].

Несмотря на то, что расчет траектории и контроль её соблюдения являются разными задачами, они, как правило, реализуются одним алгоритмом, в котором заложены некоторые базовые и общие для всех ситуаций принципы. В таких алгоритмах широко применяются ПИД-регуляторы, фильтр Калмана [14,15]. В результате растет вычислительная сложность алгоритмов управления, что на этапе взлёта и посадки приобретает дополнительные негативные следствия – возрастает необходимость повышения производительности бортовых вычислителей и, следовательно, падает грузоподъемность и/или автономность БПЛА. Известны попытки упрощения алгоритмов управления за счет использования нечеткой логики [16-18], однако исследователи прибегают к грубому решению – замене представления информации о позиционировании по отдельным координатным осям, в то время как имеется возможность применения сложных лингвистических переменных для комплексного представления положения объекта [19]. Применение нечетких лингвистических переменных позволяет не только упростить представление положения объекта в многомерном пространстве, но также приблизить это представление к тому, которым пользуется пилот: близко, далеко слева и пр.

Используемая исследователями модель процесса управления показанная на рис. 1 обладает одним существенным недостатком – в ней отсутствует оценка и прогнозирование ситуации. Именно этот фактор отличает автоматическое и ручное пилотирование, поскольку он обусловлен наличием множества степеней свободы вертолёта и сложной механикой управления. Поэтому предложено модифицировать модель процесса

управления и внести туда этап оценки и прогнозирования развития ситуации, показанной на рис. 3.

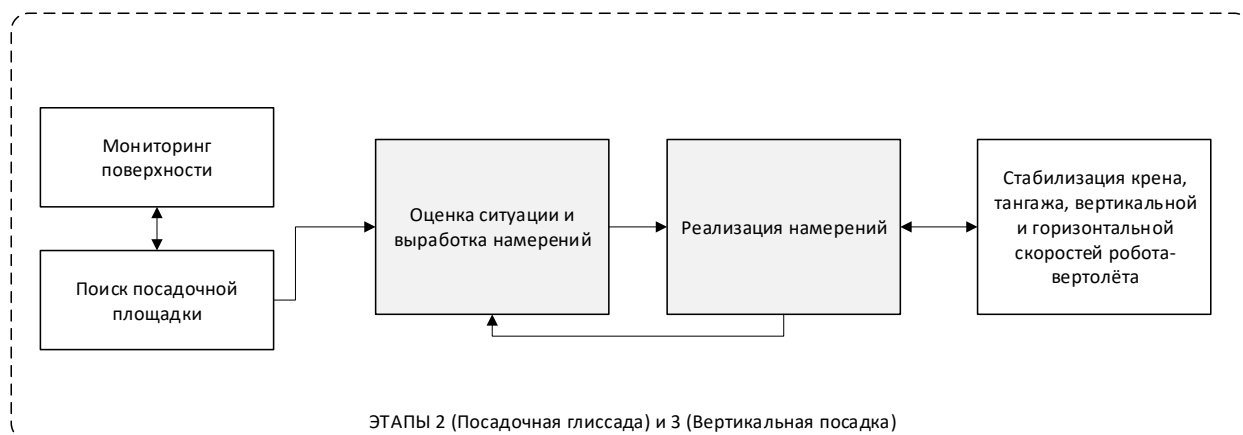


Рис. 3. – Модифицированная модель процесса управления взлѐтом и посадкой робота-вертолѐта

Основным отличием предложенной модели является то, что принятие решения по управлению осуществляется на основе оценки ситуации и намерений системы, в то время как алгоритм расчета и контроля траектории выполняет только функции по реализации намерений до момента следующего их пересмотра и может быть существенно упрощѐн. То есть его роль не больше не является определяющей.

Метод автоматического управления взлетом и посадкой для одновинтового робота-вертолѐта

Перейдем к формулировке метода автоматического управления взлѐтом и посадкой одновинтового робота-вертолѐта, который позволит реализовать предложенную в предыдущей главе модель процесса управления, показанного на рис. 3.

Метод базируется на следующих принципах и граничных условиях:

- 1) для распознавания знака хелипорта могут быть использованы любые доступные методы и технологии, реализуемые как программно, так и аппаратно;

- 2) входными данными для метода является геометрическое представление знака хелипорта с помощью совокупности прямых линий;
- 3) управление реализуется не заменой элементов существующей системы, а включением нового элемента, способного решать интеллектуальные задачи взамен пилота (действовать, как пилот), за счет чего имеющиеся элементы могут быть упрощены;
- 4) взлёт и посадка рассматриваются как одна операция, в которой отличается только намерение БПЛА – приближение к месту посадки от точки начала посадки на эшелоне, либо отдаление от места посадки к точке занятия эшелона;
- 5) работа метода начинается на 2 этапе управления БПЛА изображено на рис. 2.

В соответствии со схемой на рис. 3, сформулируем подходы к реализации её основных этапов.

Для решения задачи мониторинга поверхности с целью поиска предполагаемого места посадки предлагается использовать закрепленную на нижней части БПЛА камеру с возможностью отклонения в двух плоскостях для компенсации углов крена и тангажа, а также для расширения наблюдаемой зоны. Изображение из камеры обрабатывается любым из известных методов распознавания, позволяющим на выходе получить геометрическое представление знака хелипорта (Буквы «Н»), например [20]. Сопутствующей задачей является вычисление центра знака хелипорта и его совмещение с центром изображения, транслируемого камерой, для чего она может отклоняться от нулевого положения относительно корпуса робота-вертолёта с помощью шаговых двигателей [21]. В случае, когда достигнуты предельные значения отклонений камеры, но центр изображения знака хелипорта не может быть совмещен с центром изображения камеры, система

управления полётом БПЛА должна компенсировать недостающее отклонение поступательным движением по направлению к обнаруженному маркеру.

После совмещения центров изображения камеры и знака хелипорта производится оценка положения БПЛА относительно места посадки. Для этого предлагается использовать сложные лингвистические переменные [19]. Сама модель положения может быть представлена следующим образом:

$$\langle \beta u, T, X, G, M \rangle, \quad (1)$$

где βu — наименование лингвистической переменной - «ПОЛОЖЕНИЕ ОБЪЕКТА НА ПЛОСКОСТИ»; T — базовое терм-множество, $T = \{ \langle \text{«КРАЙНИЙ БЛИЖНИЙ ЛЕВЫЙ УГОЛ»}, \langle \text{«ЦЕНТР БЛИЖНЕЙ ГРАНИ»}, \langle \text{«КРАЙНИЙ БЛИЖНИЙ ПРАВЫЙ УГОЛ»}, \langle \text{«БЛИЖНИЙ ЛЕВЫЙ УГОЛ»}, \langle \text{«БЛИЖНИЙ ПРАВЫЙ УГОЛ»}, \langle \text{«ЦЕНТР ЛЕВОЙ ГРАНИ»}, \langle \text{«ЦЕНТР»}, \langle \text{«ЦЕНТР ПРАВОЙ ГРАНИ»}, \langle \text{«ДАЛЬНИЙ ЛЕВЫЙ УГОЛ»}, \langle \text{«ДАЛЬНИЙ ПРАВЫЙ УГОЛ»}, \langle \text{«ДАЛЬНИЙ КРАЙНИЙ ЛЕВЫЙ УГОЛ»}, \langle \text{«ЦЕНТР ДАЛЬНЕЙ ГРАНИ»}, \langle \text{«КРАЙНИЙ ДАЛЬНИЙ ПРАВЫЙ УГОЛ»} \}$, $T = T \cdot \cup T \perp \cup T \angle$, $T \cdot$ - центральные термы, $T \perp$ - крайние термы, $T \angle$ - угловые термы, X – область определения в классическом виде – предметная плоскость, G – синтаксическая процедура, M – семантическая процедура.

Так как наблюдение за объектом ведется с помощью цифровой камеры, то для снижения вычислительной сложности и избавления от вычисления координат предлагается закодировать значения нечетких лингвистических переменных, определяющих зоны на плоскости. Численное представление положения не всегда является приемлемым, поскольку положение объекта характеризуется не одним, а множеством ненулевых значений нечетких лингвистических переменных (от 1 до 6). Такой переменной может быть цвет пикселя, однозначно интерпретируемый как оператором, так и компьютерной программой. Для задания цвета пикселя может быть выбрана любая цветовая схема, глубина цвета которой позволяет закодировать

необходимое количество вариаций. Так, минимальная палитра, используемая для кодирования положения объекта, должна включать 9×11 цветов для кодирования значений нечетких лингвистических переменных положения, а также 3×5 цветов для кодирования точек пересечения. Итого, для кодирования координат плоскости при использовании шага значений нечетких лингвистических переменных в 0,1 необходимо как минимум 114 цветов или 8-битная палитра RGB-модели [22].

Для реализации возможности понимания системой своего положения и оценки намерений системы предлагается использовать фреймовую модель [23], упрощенное представление которой представлено на рис. 4.

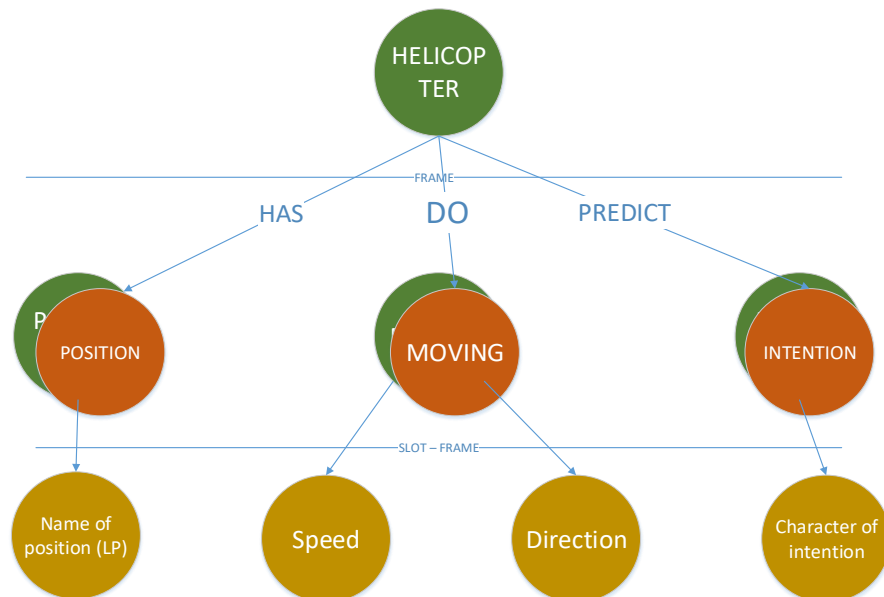


Рис. 4. – Упрощенное представление фреймовой модели системы управления взлетом и посадкой робота-вертолёта

Данная фреймовая модель содержит фреймы для определения положения вертолёта в терминах сложных лингвистических переменных, фрейм для оценки текущего движения БПЛА и фрейм для оценки намерений. Значения слотов каждого фрейма вычисляются с помощью присоединённых процедур.

Для выработки управляющих на основе фреймовой модели предлагается использовать продукции, генерация которых осуществляется в процессе наблюдения за действиями оператора [24]

Таким образом, метод автоматического управления взлетом и посадкой для одновинтового робота-вертолёта (на примере посадки) может быть сформулирован следующим образом:

Шаг 1: Поиск и обнаружение знака хелипорта на изображении подвижной камеры, установленной на корпусе робота-вертолёта.

Шаг 2: Совмещение центров знака хелипорта и изображения подвижной камеры. В случае достижения предельных значений отклонения камеры и невозможности центровки изображения – поступательное движение в сторону их уменьшения.

Шаг 3: Оценка геометрических искажений знака хелипорта на основе параллельных линий [20].

Шаг 4: Конвертирование данных об искажении в цветовое представление с помощью модели RGB.

Шаг 5: Определение значений лингвистических переменных, описывающих положение вертолета.

Шаг 6: Оценка ситуации и определение намерений робота-вертолёта с помощью фреймовой модели.

Шаг 7: Выработка управляющих воздействий на основе продукционных правил и их реализация.

Шаг 8: Возврат к Шагу 3. Если геометрические искажения знака хелипорта присутствуют, то повтор Шагов 4–8, если искажения отсутствуют, то переход к 3 этапу полёта как на рис. 3, снижение и посадка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в статье метод управления, в отличие от известных, базируется на идее сближения принципов автоматического и ручного

управления. Для того, чтобы обеспечить возможность понимания системой не только текущего положения БПЛА, но и оценки дальнейшего развития событий, предложено использовать фреймовую модель, в которой за счет присоединенных процедур реализуется непрерывный процесс оценки ситуации и выработки управляющих воздействий. Для формирования управляющих воздействий предложено использовать базу продукционных правил, формируемых в результате наблюдения за действиями пилота. Отличительной особенностью используемых продукций является использование сложных лингвистических переменных для представления действий оператора и запоминания управляющих воздействий в базе правил. Еще одним отличием является комплексное представление положения БПЛА с помощью сложных лингвистических переменных, что за счет отсутствия необходимости обработки отдельных координатных осей позволяет на треть сократить вычислительную сложность по сравнению с другими известными подходами к разработке систем управления БПЛА на базе нечеткой логики.

Использование единого базиса в виде сложных лингвистических переменных для представления результатов наблюдения, оценки ситуации и выработки управляющих воздействий позволяет в значительной степени повысить эффективность системы автоматического управления взлётом и посадкой робота-вертолёта.

Литература

1. Сыров А. С., Пучков А. М., Рутковский В. Ю., Глузов В. М. Задачи управления движением многорежимных беспилотных летательных аппаратов // Проблемы управления. 2014. № 4. С. 45-52.

2. Veres O. A. J. a. S. M., Nonlinear Attitude Control Design and Verification for a Safe Flight of a Small-Scale Unmanned Helicopter // 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2019, pp. 1652-1657.

3. Rasheed A. Helicopter attitude control // 2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), 2018, pp. 1-5.

4. Bortoff S. A., The university of toronto RC helicopter: a test-bed for nonlinear control // IEEE International Conference on Control Applications, Hawaii, 1999, pp.333-338.

5. Cai G., Peng K., Chen B. M. and Lee T. H., Design and Assembling of a UAV Helicopter System // 5th International Conference on Control and Automation , Budapest, Hungary, 2005. pp. 697-702.

6. Johnson E. N. , Kannan S. K. Adaptive Trajectory Control for Autonomous Helicopters // AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005. V. 28, pp. 524-538.

7. Пшихопов В.Х. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами: Монография // Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. С 183.

8. Тупиков В. А., Павлова В. А., Каплинский Г. Э., Крюков С. Н. Алгоритм автоматической посадки беспилотного летательного аппарата вертолетного типа с использованием бортовой оптико-электронной системы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 11-3. С. 86-95.

9. Saripalli S., Montgomery J. F., and Sukhatme G. S. Vision-based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle// in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat, Washington, DC, USA, May 2002, pp. 2799–2804.

10. Тиняков Г.А. Пилотирование вертолета. // Издание 2-е, исправленное. Москва: Военное издательство Министерства обороны Союза ССР, 1960

11. Savage J., Harrington W., McKinley R. A., Burns H. N., Braddom S., et al. 3D-LZ helicopter ladar imaging system// Proc. SPIE 7684, Laser Radar Technology and Applications XV, April 29, 2010 p .768407.

12. Cheung R., Spatial Orientation – Nonvisual Spatial Orientation Mechanisms // Spatial Disorientation in Aviation. Progress in Astronautics and

Aeronautics Volume 203. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. Reston, VA, USA. 2004. pp. 37–94.

13. International Civil Aviation Organization. Aerodromes: ANNEX 14 to the Convention on International Civil Aviation, vol. 2: Heliports. International Civil Aviation Organization, Montreal, Quebec. 1990. URL: <files.stroyinf.ru/Data2/1/4293835/4293835980.pdf>.

14. Roy T.K., Garratt M., Pota H. R., and Teimoori H. Hover Flight Control of a Small Helicopter Using Robust Backstepping and PID // 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, July 6-8, Beijing, China, 2012. pp. 1688-1693.

15. Katsuhiko O. Modern Control Engineering // Prentice-Hall, New Jersey, Fourth Edition, 2002. P. 567

16. Amaral T.G.B. and Crisostomo M.M. Automatic Helicopter Motion Control Using Fuzzy Logic// 10th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, Melbourne, Australia, December 2- 5, 2001, Vol. 2, pp. 860-863.

17. Asere H., Lei C., and Jia R. Cruise Control Design Using Fuzzy Logic Controller // IEEE Conf. on Systems, Man and Cybernetics, DOI 10.1109/SMC.2015.386, pp. 2210-2215.

18. Васильев С.В., Ефимов В.О., Пикулев А.Н., et al. Исследование математических методов идентификации пеленгов беспилотных летательных аппаратов в группе // Инженерный вестник Дона. 2017. №4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_24_Efimov.pdf_0e8b595f30.pdf.

19. Сергеев Н. Е., Нечеткие модели инструментальных двигательных действий оператора. Ростов н/Д: изд-во Рост. ун-та, 2004. 135 с.

20. Zhi-Fang Yang, Wen-Hsiang Tsai Using parallel line information for vision-based landmark location estimation and an application to automatic helicopter landing // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing/ 1998. V. 14. pp. 297-306.

21. Дайебал, Д. Б., Сергеев Н.Е. Метод управления следящей камерой винтокрылого летательного аппарата на основе теории нечетких множеств // Инженерный вестник Дона. 2019. № 8. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_17_7y2019_Sergeev__last_.pdf_314652102a.pdf.

22. "The Evolution of Color Pigment Printing". Artfacts.org. "Color Television Success in Test". NY Times. 1940-08-30. p. 21 URL: zdocs.mx/doc/modelo-de-corr-rgb-wp9n77kyl415

23. Минский М. Фреймовое представление знаний. -М.: Энергия, 1979. С. 152.

24. Дайебал, Д. Б., Сергеев Н.Е. Подход к автоматической генерации правил для нечеткого регулятора в процессе обучения с учителем // 20-я Международная многопрофильная научная геоконференция SGEM 2020, Албена, 18–24 августа 2020 года. – София: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2020. С. 59-66.

References

1. Syrov A. S., Puchkov A. M., Rutkovskij V. Yu., Glumov V. M. Problemy upravleniya. 2014. № 4. pp. 45-52.
 2. Veres O. A. J. a. S. M., 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2019, pp. 1652-1657.
 3. Rasheed A., 2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), 2018, pp. 1-5.
 4. Bortoff S. A., IEEE International Conference on Control Applications, Hawaii, 1999, pp.333-338.
 5. Cai G., Peng K., Chen B. M. and Lee T. H., 5th International Conference on Control and Automation , Budapest, Hungary, 2005. pp. 697-702.
 6. Johnson E. N. , Kannan S. K. Adaptive AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005. V. 28, pp. 524-538.
-

7. Pshixopov V.X. Pozicionno-traektornoe upravlenie podvizhny`mi ob`ekta-mi: Monografiya [Position-trajectory control of moving objects]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009. 183 p.
 8. Tupikov V. A., Pavlova V. A., Kaplinskij G. E., Kryukov S. N. Izvestiya Tul skogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki. 2016. № 11-3. pp. 86-95.
 9. Saripalli S., Montgomery J. F., and Sukhatme G. S. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., Washington, DC, USA, May 2002, pp. 2799–2804.
 10. Tinyakov G.A. Pilotirovanie vertoleta.[Helicopter piloting]Izdanie 2-e, ispravlennoe. Moskva: Voennoe izdatel`stvo Ministerstva oborony` Soyuza SSR, 1960
 11. Savage J., Harrington W., McKinley R. A., Burns H. N., Braddom S., et al. Proc. SPIE 7684, Laser Radar Technology and Applications XV, April 29, 2010 p .768407.
 12. Cheung R., Spatial Disorientation in Aviation. Progress in Astronautics and Aeronautics Volume 203. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. Restin, VA, USA. 2004. pp. 37–94.
 13. International Civil Aviation Organization. Aerodromes: ANNEX 14 to the Convention on International Civil Aviation, vol. 2: Heliports. International Civil Aviation Organization, Montreal, Quebec. 1990. URL: files.stroyinf.ru/Data2/1/4293835/4293835980.pdf.
 14. Roy T.K., Garratt M., Pota H. R., and Teimoori H. Hover 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, July 6-8, Beijing, China, 2012. pp. 1688-1693.
 15. Katsuhiko O. Prentice-Hall, New Jersy, Fourth Edition, 2002. P. 567
 16. Amaral T.G.B. and Crisostomo M.M. 10th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, Melbourne, Australia, December 2- 5, 2001, Vol. 2, pp. 860-863.
-



17. Asere H., Lei C., and Jia R. Cruise IEEE Conf. on Systems, Man and Cybernetics, DOI 10.1109/SMC.2015.386, pp. 2210-2215.

18. Vasilev S.V., Efimov V.O., Pikulev A.N., et al. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_24_Efimov.pdf_0e8b595f30.pdf.

19. Sergeev, N. E. Nechetkie modeli instrumentalnyx dvigatelnyx dejstvij operatora. [Fuzzy models of operator's instrumental motor actions] Rostov n/D: izd-vo Rost. un-ta, 2004. 135 p.

20. Zhi-Fang Yang, Wen-Hsiang Tsai Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 1998. V. 14. pp. 297-306

21. Dajebal, D. B. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 8. URL: vdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_17_7y2019_Sergeev__last_.pdf_314652102a.pdf.

22. "The Evolution of Color Pigment Printing". Artfacts.org. "Color Television Success in Test". NY Times. 1940-08-30. p. 21 URL: zdocs.mx/doc/modelo-de-cor-rgb-wp9n77kyl415

23. Minskij M. Frejmovoe predstavlenie znaniy. [Frame representation of knowledge]. M.: E`nergiya, 1979. p. 152.

24. Dajebal, D. B. 20-ya Mezhdunarodnaya mnogoprofil`naya nauchnaya geokonferenciya SGEM 2020, Albena, 18–24 avgusta 2020 goda. Sofiya: Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost`yu STEF92 Texnologzhi, 2020. pp. 59-66.