

УДК 004.896

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ВОПРОСУ РЕГЛАМЕНТАЦИИ ПОВЕДЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРА ПРИ НАЗЕМНОМ МОНИТОРИНГЕ

Т.Г. Габиббейли

(Представлено академиком НАНА Р.М.Алигулиевым)

Для информационной поддержки развития объектов инфраструктуры и сельского хозяйства в областях, характеризующихся горными и лесными массивами, в некоторых случаях требуется проведение наземного мониторинга с применением беспилотных технологий. В этой связи предлагается алгоритм формирования 3D-траектории движения квадрокоптера при наземном пилотировании в условиях горно-лесистого ландшафта, подразумевающего автономное маневрирование для преодоления возможных препятствий. В качестве базовой модели применяется система нечеткого вывода с входными характеристиками в виде лингвистических переменных, отражающих нечеткие сектора пространства, в рамках которых наличие препятствий и расстояния до них интерпретируются вербально, то есть в виде термов. Преодоление препятствий предлагается выполнять на основе нечетких выводов данной системы, формулируемых в виде термов выходных лингвистических переменных, которые отражают изменения угла поворота в горизонтальной плоскости, высоты полета и скорости движения квадрокоптера. В статье анализируются результаты поведения квадрокоптера при различных сценариях полета, что стало основой для оперативного формирования траектории посредством нейросетевого моделирования.

Ключевые слова: квадрокоптер, траектория полета, наземный мониторинг, нечеткое множество, нечеткий вывод, нейронная сеть

Введение

Существующий уровень беспилотных технологий актуализирует применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для проведения наземного мониторинга зарождающихся объектов инфраструктурных и сельского хозяйства на освобожденных территориях Карабаха Азербайджанской Республики, характеризующихся большими горными и лесными массивами. Для наземного мониторинга различных объектов более предпочтительным является использование винтокрылых БПЛА (квадрокоптеров) [1], которые несмотря на собственные ограничения являются сейчас наиболее популярными среди исследователей. Преимущественная особенность квадрокоптера состоит в том, что каждый из его четырех винтов обеспечивает подъемную силу и высокую полетную стабильность. Тем не менее, квадрокоптер, как достаточно сложное техническое устройство, характеризуется трудно формализуемой полетной динамикой из-за

своей «чувствительности» к влияниям внешних факторов воздействия [1, 2]. Поэтому решение задачи управления квадрокоптером для проведения наземного мониторинга объектов инфраструктуры и сельского хозяйства в условиях наличия естественных препятствий горно-лесистого ландшафта и труднодоступных мест является интересной как с научной, так и с практической точек зрения. В этой связи интересными являются технологические решения компании DJI, выпускающей квадрокоптеры, которые отличаются интеллектуальными режимами полета и своими компактными размерами [3].

Постановка задачи

В условиях отсутствия необходимого информационного обеспечения и, как следствие, невозможности построения точной тематической модели применение методов нечеткой логики в управлении квадрокоптерами обусловлено предоставляемыми ими возмож-

ностями компиляции эвристических знаний и использования интуитивных данных. В настоящее время нечёткие подходы к решению задач автоматического регулирования рассматриваются в двух аспектах [4-6]. Первый связан с созданием классификатора ситуаций, формирующего цели и задачи функционирования динамической системы. Второй подход предполагает непосредственное нечёткое регулирование переменных объекта управления. Исходя из этих предпосылок, становится очевидна важность и актуальность разработки программного обеспечения автономного движения квадрокоптера при наземном пилотировании в условиях горно-лесистой местности, включая автоматическое маневрирование для обхода возможных препятствий. В контексте сказанного необходимо сформулировать принципы создания «умной» системы обхода препятствий для автопилотирования квадрокоптера, основанной на применении методов нечёткого логического вывода и нейросетевого моделирования.

Система нечеткого вывода для управления траекторией полета квадрокоптера

Квадрокоптер DJI Mavic 2 оснащён шестью датчиками обнаружения препятствий во всех направлениях, что обеспечивает качественную работу дрона даже в самых сложных ситуациях. Благодаря системе автопилотирования FlightAutonomy данные передаются и обрабатываются непрерывно в режиме реального времени. В [7] предложен алгоритм формирования траектории полета квадрокоптера с применением системы нечёткого вывода, построенной на основе эмпирического анализа данных. Данный алгоритм обеспечивает наземное автопилотирование квадрокоптера, наделенного датчиками обнаружения препятствий в пяти фронтальных секторах обзора.

Отталкиваясь от результатов, полученных в [7], для определения регламента наземного автопилотирования квадрокоптера в указанных пяти направлениях (см. рис. 1) в пространстве рассматривается ограниченный набор логически непротиворечивых правил в виде следующих информационных фрагментов:

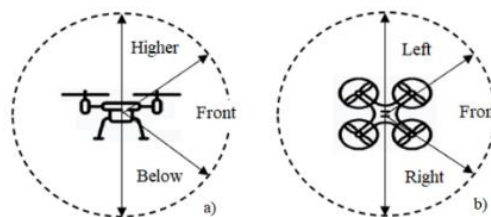


Рис.1. Секторы обзора наличия препятствий:
а) вид сбоку, б) вид сверху

d_1 : «Если по курсу полета квадрокоптера не выявлено какое-либо препятствие или же оно находится на удалении, то отсутствует необходимость в изменении курса, высоты и снижении скорости»;

d_2 : «Если по курсу полета квадрокоптера датчиком обнаружено препятствие на среднем удалении¹ и сектор слева свободен, то следует сбавить скорость до средней величины, и, не меняя высоту полета, повернуть немного влево»;

d_3 : «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на близком удалении и левый сектор свободен, то следует сбавить скорость до минимума, и, не меняя высоту полета, резко повернуть влево»;

d_4 : «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на среднем удалении, в левом секторе на не удалённом расстоянии также имеет место препятствие и сектор справа свободен, то следует сбавить скорость до средней величины и, не меняя высоту полета, повернуть немного вправо»;

d_5 : «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на близком удалении, в левом секторе на не удалённом расстоянии также имеет место препятствие и сектор справа свободен, то следует сбавить скорость до минимума и, не меняя высоту полета, повернуть резко вправо»;

d_6 : «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на среднем удалении, в левом и правом секторах на не удалённом расстоянии также имеют место препятствия, а верхний сектор свободен, то следует сбавить

¹ Максимальный радиус обзора датчика слежения составляет 300 метров. После отображения измерений датчика на единичный отрезок, средним расстоянием можно считать величину в 0.5.

скорость до средней величины и, не проводя рыскание, немного увеличить высоту полета (кабрировать));

d₇: «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на близком удалении, в левом и правом секторах на не удалённом расстоянии также имеют место препятствия, а верхний сектор свободен, то следует сбавить скорость до минимума и, не проводя рыскание, резко увеличить высоту полета»;

d₈: «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на среднем удалении, в левом, правом и верхнем секторах на не удалённом расстоянии также имеют место препятствия, а нижний сектор свободен, то следует сбавить скорость до средней величины и, не проводя рыскание, немного уменьшить высоту полета (пикировать));

d₉: «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на близком удалении, в левом, правом и верхнем секторах на не удалённом расстоянии также имеют место препятствия, а нижний сектор свободен, то следует сбавить скорость до минимума и, не проводя рыскание, резко уменьшить высоту полета»;

d₁₀: «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на среднем удалении и слева по курсу также обнаружено препятствие на среднем расстоянии, справа, снизу и сверху по курсу обнаружены препятствия на не удалённом расстоянии, то при сохранении курса и высоты полета следует сбавить скорость до средней величины»;

d₁₁: «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на близком удалении, а слева по курсу препятствие обнаружено на среднем расстоянии, справа, снизу и сверху по курсу обнаружены препятствия на не удалённом расстоянии, то при сохранении высоты полета следует сбавить скорость до минимума и резко повернуть влево»;

d₁₂: «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на среднем удалении, слева по курсу препятствие обнаружено на близком расстоянии, справа препятствие обнаружено на среднем удалении, а снизу и сверху по курсу обнаружены препятствия на не удалённом расстоянии, то при сохранении курса и

высоты полета следует сбавить скорость до средней величины»;

d₁₃: «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на близком удалении, слева по курсу препятствие обнаружено также на близком расстоянии, справа препятствие обнаружено на среднем удалении, а снизу и сверху по курсу обнаружены препятствия на не удалённом расстоянии, то при сохранении высоты полета следует сбавить скорость до минимума и резко повернуть вправо»;

d₁₄: «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на среднем удалении, слева по курсу препятствие обнаружено на близком расстоянии, справа также обнаружено препятствие на близком удалении, сверху обнаружено препятствие на среднем расстоянии, а снизу по курсу обнаружено препятствие на не удалённом расстоянии, то при сохранении курса и высоты полета следует сбавить скорость до средней величины»;

d₁₅: «Если по курсу полета, а также в левом и правом секторах обнаружены препятствия на близких удалениях, выше по курсу обнаружено препятствие на среднем расстоянии, а ниже по курсу обнаружено препятствие на не удалённом расстоянии, то следует сбавить скорость до минимума и, не проводя рыскание, резко увеличить высоту полета»;

d₁₆: «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на среднем удалении, слева, справа и выше по курсу обнаружены препятствия на близком расстоянии, а ниже по курсу обнаружено препятствие на среднем расстоянии, то при сохранении курса и высоты полета следует сбавить скорость до средней величины»;

d₁₇: «Если по курсу полета, а также слева, справа и выше обнаружены препятствия на близком удалении, однако ниже по курсу обнаружено препятствие на среднем расстоянии, то следует сбавить скорость до минимума и, не проводя рыскание, резко уменьшить высоту полета»;

d₁₈: «Если по курсу полета квадрокоптера препятствие обнаружено на среднем удалении, слева, справа, выше и ниже по курсу обнаружены препятствия на близком расстоянии, то

при сохранении курса и высоты полета следует сбавить скорость до средней величины»;

d_{19} : «Если во всех секторах обзора обнаруженные препятствия находятся на близком удалении, то следует сбавить скорость до минимума, и, не меняя высоту полета, резко повернуть влево».

Выходя влево (или вправо, что также уместно) из фронтального тупика, обусловленного наличием препятствий во всех пяти секторах обзора (см. правило d_{19}), квадрокоптер продолжает маневрировать и, тем самым, про-

кладывать себе новую траекторию полета согласно регламенту, установленному по средствам правил $d_1 - d_{19}$.

Анализ информационных фрагментов $d_1 - d_{19}$ позволяет сформировать полный набор лингвистических переменных и правил для построения системы нечеткого вывода, регламентирующую поведение квадрокоптера при наземном пилотировании в условиях наличия препятствий. Для удобства все переменные сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Переменные системы нечёткого вывода			
Входы	x_1	Имя переменной	Удаленность препятствия прямо по курсу
		Терм-множество	$\{X_{11}=\text{ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ}, X_{12}=\text{СРЕДНЯЯ}, X_{13}=\text{НЕЗНАЧИТЕЛЬНАЯ}\}$
		Универсум	$[0, 1]$
	x_2	Имя переменной	Удаленность препятствия слева по курсу
		Терм-множество	$\{X_{21}=\text{ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ}, X_{22}=\text{СРЕДНЯЯ}, X_{23}=\text{НЕЗНАЧИТЕЛЬНАЯ}\}$
		Универсум	$[0, 1]$
	x_3	Имя переменной	Удаленность препятствия справа по курсу
		Терм-множество	$\{X_{31}=\text{ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ}, X_{32}=\text{СРЕДНЯЯ}, X_{33}=\text{НЕЗНАЧИТЕЛЬНАЯ}\}$
		Универсум	$[0, 1]$
	x_4	Имя переменной	Удаленность препятствия выше по курсу
		Терм-множество	$\{X_{41}=\text{ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ}, X_{42}=\text{СРЕДНЯЯ}, X_{43}=\text{НЕЗНАЧИТЕЛЬНАЯ}\}$
		Универсум	$[0, 1]$
	x_5	Имя переменной	Удаленность препятствия ниже по курсу
		Терм-множество	$\{X_{51}=\text{ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ}, X_{52}=\text{СРЕДНЯЯ}, X_{53}=\text{НЕЗНАЧИТЕЛЬНАЯ}\}$
		Универсум	$[0, 1]$
Выходы	y_1	Имя переменной	Скорость полета
		Терм-множество	$\{Y_{11}=\text{ПРЕДЕЛЬНАЯ}, Y_{12}=\text{СРЕДНЯЯ}, Y_{13}=\text{НУЛЕВАЯ}\}$
		Универсум	$[0, 1]$
	y_2	Имя переменной	Рыскание ¹
		Терм-множество	$\{Y_{21}=\text{РЕЗКО ВЛЕВО}, Y_{22}=\text{НЕМНОГО ВЛЕВО}, Y_{23}=\text{ОТСУТСТВУЕТ}, Y_{24}=\text{НЕМНОГО ВПРАВО}, Y_{25}=\text{РЕЗКО ВПРАВО}\}$
		Универсум	$[-0.5, 0.5]$
	y_3	Имя переменной	Тангаж ²
		Терм-множество	$\{Y_{31}=\text{РЕЗКО ВВЕРХ}, Y_{32}=\text{НЕМНОГО ВВЕРХ}, Y_{33}=\text{ОТСУТСТВУЕТ}, Y_{34}=\text{НЕМНОГО ВНИЗ}, Y_{35}=\text{РЕЗКО ВНИЗ}\}$
		Универсум	$[-0.5, 0.5]$

Система правил в символьной форме будет иметь вид, приведенный ниже:

$$d_1: (x_1=X_{11}) \Rightarrow (y_1=Y_{11}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33});$$

$$d_2: (x_1=X_{12}) \& (x_2=X_{21}) \Rightarrow (y_1=Y_{12}) \& (y_2=Y_{22}) \& (y_3=Y_{33});$$

$$d_3: (x_1=X_{13}) \& (x_2=X_{21}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{21}) \& (y_3=Y_{33});$$

$$d_4: (x_1=X_{12}) \& (x_2=\neg X_{21}) \& (x_3=X_{31}) \Rightarrow (y_1=Y_{12}) \& (y_2=Y_{24}) \& (y_3=Y_{33});$$

$$d_5: (x_1=X_{13}) \& (x_2=\neg X_{21}) \& (x_3=X_{31}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{25}) \& (y_3=Y_{33});$$

¹ Рыскание, как угол поворота летательного аппарата в горизонтальной плоскости из диапазона $[-90^\circ, +90^\circ]$, простым отображением трансформируется в условную единицу из интервала $[-0.5, 0.5]$.

² Тангаж, вызываемый отклонением руля высоты, как угол поворота летательного аппарата относительно поперечной оси инерции из интервала $[-90^\circ, +90^\circ]$, простым отображением, трансформируется в условную единицу из интервала $[-0.5, 0.5]$.

- $d_6: (x_1=X_{12}) \& (x_2=\neg X_{21}) \& (x_3=\neg X_{31}) \& (x_4=X_{41}) \Rightarrow (y_1=Y_{12}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{34});$
 $d_7: (x_1=X_{13}) \& (x_2=\neg X_{21}) \& (x_3=\neg X_{31}) \& (x_4=X_{41}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{35});$
 $d_8: (x_1=X_{12}) \& (x_2=\neg X_{21}) \& (x_3=\neg X_{31}) \& (x_4=\neg X_{41}) \& (x_5=X_{51}) \Rightarrow (y_1=Y_{12}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{32});$
 $d_9: (x_1=X_{13}) \& (x_2=\neg X_{21}) \& (x_3=\neg X_{31}) \& (x_4=\neg X_{41}) \& (x_5=X_{51}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{31});$
 $d_{10}: (x_1=X_{12}) \& (x_2=X_{22}) \& (x_3=\neg X_{31}) \& (x_4=\neg X_{41}) \& (x_5=\neg X_{51}) \Rightarrow (y_1=Y_{12}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33});$
 $d_{11}: (x_1=X_{13}) \& (x_2=X_{22}) \& (x_3=\neg X_{31}) \& (x_4=\neg X_{41}) \& (x_5=\neg X_{51}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{21}) \& (y_3=Y_{33});$
 $d_{12}: (x_1=X_{12}) \& (x_2=X_{23}) \& (x_3=X_{32}) \& (x_4=\neg X_{41}) \& (x_5=\neg X_{51}) \Rightarrow (y_1=Y_{12}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33});$
 $d_{13}: (x_1=X_{13}) \& (x_2=X_{23}) \& (x_3=X_{32}) \& (x_4=\neg X_{41}) \& (x_5=\neg X_{51}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{25}) \& (y_3=Y_{33});$
 $d_{14}: (x_1=X_{12}) \& (x_2=X_{23}) \& (x_3=X_{33}) \& (x_4=X_{42}) \& (x_5=\neg X_{51}) \Rightarrow (y_1=Y_{12}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33});$
 $d_{15}: (x_1=X_{13}) \& (x_2=X_{23}) \& (x_3=X_{33}) \& (x_4=X_{42}) \& (x_5=\neg X_{51}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{35});$
 $d_{16}: (x_1=X_{12}) \& (x_2=X_{23}) \& (x_3=X_{33}) \& (x_4=X_{43}) \& (x_5=X_{52}) \Rightarrow (y_1=Y_{12}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33});$
 $d_{17}: (x_1=X_{13}) \& (x_2=X_{23}) \& (x_3=X_{33}) \& (x_4=X_{43}) \& (x_5=X_{52}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{31});$
 $d_{18}: (x_1=X_{12}) \& (x_2=X_{23}) \& (x_3=X_{33}) \& (x_4=X_{43}) \& (x_5=X_{53}) \Rightarrow (y_1=Y_{12}) \& (y_2=Y_{23}) \& (y_3=Y_{33});$
 $d_{19}: (x_1=X_{13}) \& (x_2=X_{23}) \& (x_3=X_{33}) \& (x_4=X_{43}) \& (x_5=X_{53}) \Rightarrow (y_1=Y_{13}) \& (y_2=Y_{21}) \& (y_3=Y_{33}).$

Для окончательного формирования системы нечеткого вывода, обеспечивающей автопилотирование квадрокоптера согласно формализованному регламенту, необходимо отобразить введенные лингвистические переменные на множество соответствующих им действительных чисел путем задания функций принадлежности, то есть, другими словами, фаззифицировать термы лингвистических переменных. С этой целью будем оценивать преимущество одного элемента над другим по отношению к свойству заданного нечеткого подмножества дискретного универсума $U = \{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$.

Согласно 9-балльной шкале Саати [8], матрица парных сравнений для построения функции принадлежности нечеткого множества (НМ) «незначительная» – терма лингвистической переменной «Удаленность препятствия» (см. Таблицу 1) будет иметь вид:

$$X_{13} = \begin{bmatrix} \text{Удалённость} & 0 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 3 & 7 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 0.1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 7 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 0.2 & 1 & 1 & 1 & 3 & 5 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 0.3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 5 & 5 & 5 & 7 & 9 & 9 \\ 0.4 & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 3 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ 0.5 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 1/5 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 & 5 & 7 \\ 0.6 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 5 \\ 0.7 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ 0.8 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.9 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

где если предпочтительность i -го числа по сравнению с j -ым имеет одно из приведенных значений, то оценка предпочтительности j -го числа перед i -ым имеет обратное значение ($i, j = 0, 1, 2, \dots, 10$).

Находя собственный вектор $(\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{10})$ из уравнения $(X_{13} - \lambda E) \cdot \mu = 0$, получим значения функции принадлежности $\mu(u_i)$ нечеткого множества X_{13} , сведенные в таблицу 2. Как заданную в табличном виде каждую такую функцию принадлежности можно аппроксимировать тем или иным способом¹ и получить графическое представление соответствующего нечеткого множества.

¹ В частности, функцию, заданную в табличном виде, можно легко аппроксимировать с помощью трехслойной feedforward нейронной сети.

Таблица 2

Значения функции принадлежности НМ незначительная

Удаленность	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$\mu(u_i)$	1	1	1	0.9865	0.0113	0.0098	0.0064	0.0035	0.0021	0.0008	0.0002

Таким образом, применяя 9-балльную шкалу Саати ко всем термам, составляющих входные и выходные характеристики нечёткой модели, можно идентифицировать соответствующие функции принадлежности, аппроксимируя их на базе опорных точек, например, как в нашем случае, с абсциссами 0, 0.1, 0.2, ..., 0.9, 1.

В редакторе MATLAB\Fuzzy Inference System эти функции были установлены эмпирическим путем. В частности, входные и выходные характеристики модели в виде термов лингвистических переменных (ЛП) представлены на рис. 2 и рис. 3, соответственно.

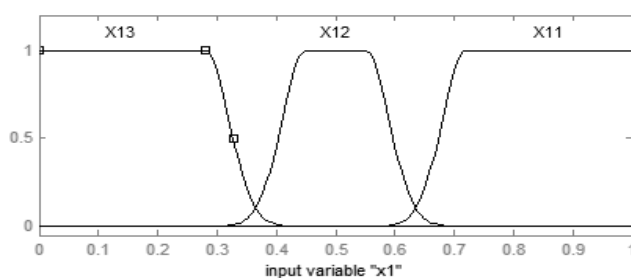
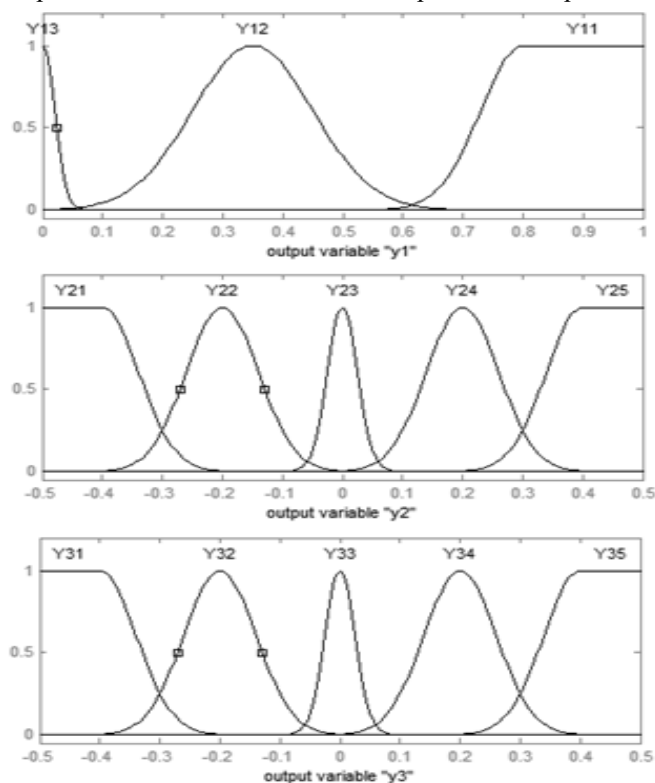


Рис. 2. Термы входной ЛП «Удаленность препятствия прямо по курсу»

Рис. 3. Термы выходных ЛП: y_1 – скорость полета, y_2 – рыскание, y_3 – тангаж

После задания всех переменных, функций принадлежности и правил нечеткой базы знаний можно приступать к формированию различных сценариев автопилотирования квадрокоптера с применением интерактивного окна графического интерфейса редактора MATLAB\FIS (рис. 4). Реализация правил посредством этого интерфейса дала продукцию, которая сведена в таблицу 3. В таблице 4 представлены 35 сценариев, регламентирующих поведение квадрокоптера при столкновении с различными препятствиями в пяти секторах обзора.

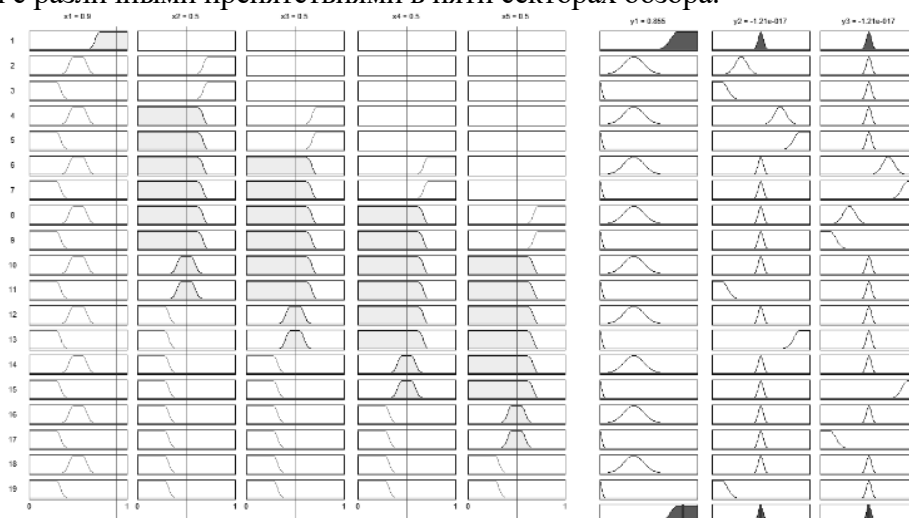


Рис. 4. Графический интерфейс редактора MATLAB\FIS для просмотра правил

Таблица 3

Продукция системы нечёткого вывода, регламентирующей полет квадрокоптера

№	Входные характеристики					Выходные характеристики		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1	y_2	y_3
1	0.95	0.50 ¹	0.50	0.50	0.50	0.855	0	0
2	0.50	0.95	0.50	0.50	0.50	0.350	-0.200	0
3	0.10	0.90	0.50	0.50	0.50	0.013	-0.411	0
4	0.50	0.50	0.90	0.50	0.50	0.350	0.200	0
5	0.10	0.50	0.90	0.50	0.50	0.013	0.411	0
6	0.50	0.50	0.50	0.90	0.50	0.350	0	0.200
7	0.10	0.50	0.50	0.90	0.50	0.013	0	0.411
8	0.50	0.50	0.50	0.50	0.90	0.350	0	-0.200
9	0.10	0.50	0.50	0.50	0.90	0.013	0	-0.411
10	0.50	0.50	0.40	0.40	0.40	0.350	0	0
11	0.10	0.50	0.50	0.50	0.50	0.013	-0.411	0
12	0.50	0.10	0.50	0.50	0.50	0.350	0	0
13	0.10	0.10	0.50	0.50	0.50	0.013	0.411	0
14	0.50	0.10	0.10	0.50	0.50	0.350	0	0
15	0.10	0.10	0.10	0.50	0.50	0.013	0	0.411
16	0.50	0.10	0.10	0.10	0.50	0.350	0	0
17	0.10	0.10	0.10	0.10	0.50	0.013	0	-0.411
18	0.50	0.10	0.10	0.10	0.10	0.350	0	0
19	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.013	-0.411	0

¹ Отсутствие в d_1 и в остальных правилах информации о наличии препятствий в тех или иных секторах обзора обуславливает применение среднего значения, собственно, каковым и является 0.5 на универсуме $[0, 1]$.

Таблица 4

Сценарии маневрирования препятствий при автопилотировании квадрокоптера

№	Входные характеристики					Выходные характеристики		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1	y_2	y_3
1	0.433	0.291	0.628	0.076	0.961	0.350	0.055	-0.190
2	0.611	0.824	0.460	0.862	0.855	0.380	-0.194	0.000
3	0.374	0.622	0.139	0.750	0.702	0.337	-0.154	0.215
4	0.712	0.738	0.568	0.438	0.469	0.854	0.000	0.000
5	0.922	0.535	0.320	0.107	0.102	0.855	0.000	0.000
6	0.396	0.283	0.318	0.925	0.001	0.349	0.000	0.204
7	0.026	0.563	0.311	0.177	0.959	0.013	-0.001	-0.410
8	0.627	0.457	0.127	0.826	0.117	0.467	0.000	0.171
9	0.570	0.359	0.197	0.404	0.663	0.351	0.000	-0.169
10	0.296	0.631	0.224	0.938	0.827	0.019	-0.097	0.384
11	0.426	0.026	0.464	0.954	0.842	0.350	0.000	0.200
12	0.602	0.563	0.781	0.415	0.181	0.363	0.197	0.000
13	0.510	0.253	0.232	0.894	0.429	0.350	0.000	0.200
14	0.333	0.292	0.856	0.275	0.762	0.131	0.386	0.000
15	0.645	0.632	0.452	0.743	0.643	0.658	-0.103	0.103
16	0.524	0.833	0.781	0.985	0.546	0.350	-0.200	0.000
17	0.152	0.557	0.453	0.289	1.000	0.013	-0.001	-0.410
18	0.709	0.310	0.242	0.138	0.410	0.853	0.000	0.000
19	0.389	0.113	0.828	0.625	0.121	0.347	0.209	0.000
20	0.133	0.292	0.972	0.499	0.693	0.013	0.411	0.000
21	0.534	0.148	0.532	0.721	0.969	0.350	0.000	0.200
22	0.492	0.921	0.376	0.131	0.585	0.350	-0.200	0.000
23	0.283	0.965	0.307	0.287	0.305	0.015	-0.410	0.000
24	0.178	0.407	0.298	0.385	0.427	0.016	-0.394	0.000
25	0.004	0.521	0.704	0.257	0.895	0.013	0.387	-0.088
26	0.557	0.562	0.291	0.562	0.910	0.350	-0.001	-0.200
27	0.296	0.592	0.922	0.910	0.104	0.019	0.400	0.000
28	0.189	0.123	0.004	0.101	0.411	0.015	-0.010	-0.399
29	0.410	0.491	0.864	0.569	0.522	0.350	0.201	0.000
30	0.605	0.961	0.766	0.756	0.306	0.367	-0.196	0.000
31	0.702	0.644	0.219	0.000	0.740	0.851	-0.001	-0.001
32	0.433	0.629	0.741	0.405	0.838	0.350	0.144	0.000
33	0.465	0.793	0.395	0.745	0.086	0.350	-0.200	0.000
34	0.065	0.004	0.789	0.553	0.318	0.013	0.411	0.000
35	0.026	0.245	0.480	0.651	0.787	0.014	0.000	-0.195

Нейросетевое управление траекторией полета квадрокоптера

В таблице 4 представлены различные сценарии поведения квадрокоптера в процессе наземного мониторинга при наличии препятствий в пяти секторах обзора. При этом траектория полета формируется на основе оперативной пятикритериальной оценки наличия (или отсутствия) препятствий во всех секторах обзора квадрокоптера, где члены входных лингвистических переменных x_k ($k = 1 \div 5$) выступают в качестве каче-

ственных критериев оценки. Аналитический подход к такой оценке позволяет сравнивать альтернативные маршруты полета квадрокоптера по искомому вектору (y_1, y_2, y_3), отражающему относительное влияние факторов x_k в виде отображения $F: R^5 \rightarrow R^3$. Поэтому рабочую модель формирования траектории полета квадрокоптера целесообразно представлять в виде «черного ящика», входы и выходы которого изначально определяются экспертными суждениями, составляющими эвристическую базу знаний (базу

знаний, как внешнее представление о данной проблеме) в виде информационных фрагментов $d_1 \div d_{19}$. Таким образом, для построения аналитической модели формирования траектории полета квадрокоптера целесообразно использовать многослойную нейронную сеть, которая может служить эффективным инструментом для компиляции знаний о поведении квадрокоптера в условиях наземного мониторинга.

В рассматриваемой задаче «внешние знания» о 35-ти возможных сценариях формирования траектории полета квадрокоптера представлены в виде следующей информационной модели (см. также таблицу 4) $\{(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, x_{4j}, x_{5j}) \rightarrow (y_{1j}, y_{2j}, y_{3j})\}_{j=1}^{35}$. Тогда отображение F можно аппроксимировать посредством трехслойной feedforward нейронной сети (см. рис. 5), которая индуцирует выходные сигналы в следующем виде:

$$z_{rj} = \sum_{k=1}^m c_{rk} \phi \left[\sum_{i=1}^5 w_{ki} x_{ij} - \theta_k \right] \quad (r=1 \div 3; j=1 \div 35),$$

где m — количество нелинейных нейронов в «скрытом» слое, выбираемое пользователем при моделировании эмпирическим методом; w_{ki} и c_{rk} ($k=1 \div m$) — веса входной и выходной синаптических связей, соответственно; θ_k — порог (смещение) k -го нелинейного нейрона из «скрытого» слоя; $\phi(\cdot)$ — функция активации нелинейного нейрона из «скрытого» слоя, например, сигмоидального типа $\phi(t)=1/(1+e^{-t})$.

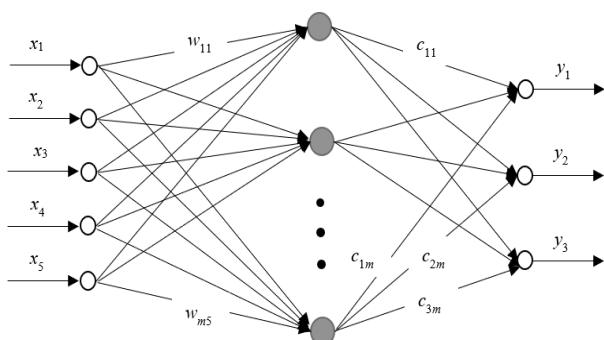


Рис. 5. Трехслойная feedforward нейронная сеть

Нейронная сеть (НС), формирующая эвристические знания относительно маршрута полета квадрокоптера, обрабатывает входные векторы с компонентами по количеству критериев оценки «близости» препятствий во всех секторах обзора, которые представлены в виде чисел из отрезков $[0; 1]$. После настройки параметров (весов синаптических связей и порогов) нейронная сеть способна аппроксимировать воображаемое отображение $F: R^5 \rightarrow R^3$, представленного в табличном виде (см. табл. 4). Для каждого случая на выходе нейронная сеть формирует командное управление траекторией полета квадрокоптера в виде трехкомпонентного вектора $(y_1, y_2, y_3) = (\text{Airspeed}, \text{Yaw}, \text{Pitch})$. В частности, нейронная сеть отвечает выходом $(0.350, 0.000, 0.200)$ в позиции входного вектора $(0.510, 0.253, 0.232, 0.894, 0.429)$ (см. сценарий 13 из таблицы 4).

Как показано на рис. 6, сеть имеет один скрытый слой, который состоит из 5 нелинейных нейронов с логарифмически-сигмоидальными функциями активации, диапазон которых позволяет реализовать: скорость полета в интервале $[0, 1]$, рыскание — в интервале $[-0.5, 0.5]$, тангаж — в пределах интервала $[-0.5, 0.5]$.

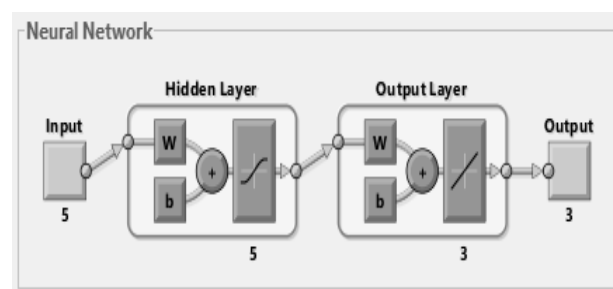


Рис. 6. Трехслойная feedforward нейронная сеть в нотации пакета MATLAB

После обучения, тестирования и валидации (см. рис. 7) нейронная сеть формирует соответствующие продукции (результаты пар типа «вход-выход»), которые сведены в таблицу 5.

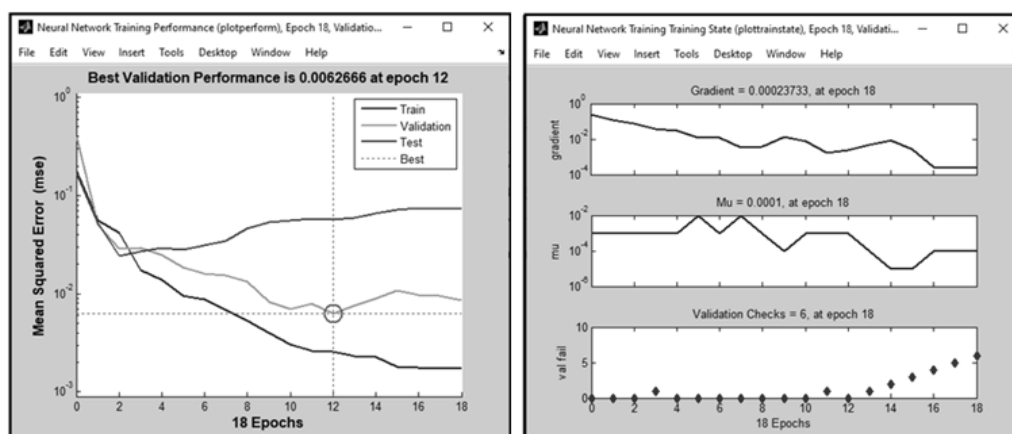


Рис. 7. Результаты обучения, тестирования и валидации нейронной сети в нотации MATLAB

Таблица 5

Сигналы управления, генерируемые feedforward нейронной сетью

Сценарий	Входы					Выходы, полученные с использованием:					
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	FIS			feedforward HC		
						y_1	y_2	y_3	z_1	z_2	z_3
1	0.433	0.291	0.628	0.076	0.961	0.350	0.055	-0.190	0.3805	0.0638	-0.2155
2	0.611	0.824	0.460	0.862	0.855	0.380	-0.194	0.000	0.3720	-0.2092	0.0435
3	0.374	0.622	0.139	0.750	0.702	0.337	-0.154	0.215	0.1603	-0.1010	0.1908
4	0.712	0.738	0.568	0.438	0.469	0.854	0.000	0.000	0.8450	-0.0334	0.0307
5	0.922	0.535	0.320	0.107	0.102	0.855	0.000	0.000	0.8925	0.0019	-0.0344
6	0.396	0.283	0.318	0.925	0.001	0.349	0.000	0.204	0.3445	-0.0126	0.1790
7	0.026	0.563	0.311	0.177	0.959	0.013	-0.001	-0.410	0.0161	-0.0592	-0.3609
8	0.627	0.457	0.127	0.826	0.117	0.467	0.000	0.171	0.4858	0.0041	0.2113
9	0.570	0.359	0.197	0.404	0.663	0.351	0.000	-0.169	0.3067	0.0290	-0.1231
10	0.296	0.631	0.224	0.938	0.827	0.019	-0.097	0.384	0.1858	-0.1288	0.3603
11	0.426	0.026	0.464	0.954	0.842	0.350	0.000	0.200	0.3424	0.0212	0.2167
12	0.602	0.563	0.781	0.415	0.181	0.363	0.197	0.000	0.8288	-0.1886	0.3207
13	0.510	0.253	0.232	0.894	0.429	0.350	0.000	0.200	0.3598	-0.0156	0.1699
14	0.333	0.292	0.856	0.275	0.762	0.131	0.386	0.000	0.1945	0.3646	-0.0119
15	0.645	0.632	0.452	0.743	0.643	0.658	-0.103	0.103	0.6319	-0.0920	0.2408
16	0.524	0.833	0.781	0.985	0.546	0.350	-0.200	0.000	0.3832	-0.0907	0.1373
17	0.152	0.557	0.453	0.289	1.000	0.013	-0.001	-0.410	0.0147	0.0025	-0.3394
18	0.709	0.310	0.242	0.138	0.410	0.853	0.000	0.000	0.8375	0.0191	-0.0102
19	0.389	0.113	0.828	0.625	0.121	0.347	0.209	0.000	0.2847	0.2029	0.0528
20	0.133	0.292	0.972	0.499	0.693	0.013	0.411	0.000	0.0004	0.4498	-0.0840
21	0.534	0.148	0.532	0.721	0.969	0.350	0.000	0.200	0.3557	0.0093	0.1589
22	0.492	0.921	0.376	0.131	0.585	0.350	-0.200	0.000	0.4234	-0.0783	-0.1872
23	0.283	0.965	0.307	0.287	0.305	0.015	-0.410	0.000	0.0327	-0.3269	-0.1404
24	0.178	0.407	0.298	0.385	0.427	0.016	-0.394	0.000	0.0261	-0.3941	-0.0363
25	0.004	0.521	0.704	0.257	0.895	0.013	0.387	-0.088	-0.0061	0.4013	-0.0879
26	0.557	0.562	0.291	0.562	0.910	0.350	-0.001	-0.200	0.1962	-0.0842	-0.2622
27	0.296	0.592	0.922	0.910	0.104	0.019	0.400	0.000	0.0552	0.3839	-0.0457
28	0.189	0.123	0.004	0.101	0.411	0.015	-0.010	-0.399	0.0470	-0.1082	-0.3173
29	0.410	0.491	0.864	0.569	0.522	0.350	0.201	0.000	0.3144	0.2509	0.0694
30	0.605	0.961	0.766	0.756	0.306	0.367	-0.196	0.000	0.7688	-0.1998	0.3088
31	0.702	0.644	0.219	0.000	0.740	0.851	-0.001	-0.001	0.8111	-0.0211	-0.0081
32	0.433	0.629	0.741	0.405	0.838	0.350	0.144	0.000	0.3401	0.1108	-0.0560
33	0.465	0.793	0.395	0.745	0.086	0.350	-0.200	0.000	0.1829	-0.2772	0.1751
34	0.065	0.004	0.789	0.553	0.318	0.013	0.411	0.000	0.0047	0.4062	-0.0850
35	0.026	0.245	0.480	0.651	0.787	0.014	0.000	-0.195	0.0159	-0.0078	-0.0427

Заклучение

Сложность, многосвязность, нелинейность, наличие неопределенных параметров таких технических объектов, как квадрокоптер, вызывает необходимость поиска способов решения задач управления, альтернативных известным классическим П-, ПИ-, ПИД-регуляторам. Результатом экспертно-эмпирического исследования, проведенного в данной статье, является получение представления о способах управления квадрокоптерами при наземном мониторинге, об особенностях их практического применения, достоинствах и недостатках. Нам кажется, что улучшение результатов должно быть достигнуто с использованием методов нейронного и нейро-нечеткого моделирования. Например, любая функция принадлежности, заданная в ключевых точках, полученная с использованием 9-балльной шкалы Саати, может быть легко аппроксимирована с помощью трехслойной feedforward нейронной сети с прямой связью. На основе сценариев, представленных в табл. 4, можно сформировать нейро-нечеткий контроллер, способный обеспечить наземное автопilotирование квадрокоптера при различных препятствиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Michael D.S. Simulation and control of a quadrotor unmanned aerial vehicle. URL: uknowledge.uky.edu/gradschool_theses/93 (handling date 12.01.2015).
2. Astha Sharma, Amol Barve. Controlling of Quad-rotor UAV Using PID Controller and Fuzzy Logic Controller. International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering. 2012. № 2277-2626. pp. 38-42.
3. Дроны DJI: виды и возможности летательных аппаратов бренда. URL: <https://korabelov.info/2021/11/220373/drony-dji-vidy-i-vozmozhnosti-letatelnyh-apparatov-brenda/> (handling date 12.01.2015).
4. Hicham Khebbache, Mohamed Tadjine. Robust Fuzzy Backstepping Sliding Mode Controller For a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. Control Engineering and Applied Informatics. 2013. Vol. 15 – pp. 3–11.
5. Victoria Lopez, Francisco Morata. Intelligent Fuzzy Controller of a Quadrotor. International Conference on Intelligent System and Knowledge Engineering. ISKE, 2010. pp. 141–146.
6. Bourhane Kadmiry. Fuzzy Control for an Unmanned Helicopter / Linköping Studies in Science and Technology, Sweden, 2002. P. 122.
7. Неретина В.В., Нафиков И.Р. Формирование траектории движения БПЛА при наземном мониторинге лесных экосистем на основе аппарата нечеткой логики // Проблемы и перспективы развития научно-технологического пространства России: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 11 июня 2020г.: Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2020. С. 27–34. URL: <https://apni.ru/article/845-formirovanie-traektorii-dvizheniya-bpla>
8. Saaty, T.L., Vargas L.G.: The Logic of Priorities. Applications of Business, Energy, Health and Transportation. Kluwer Nijhoff Publishing, Massachusetts (1982), 278 p.

YERÜSTÜ MONİTORİNG ŞƏRAİTİNDƏ KVADROKOPTERİN DAVRANIŞININ TƏNZİMLƏNMƏSİ MƏSƏLƏSİNƏ BİR YANAŞMA HAQQINDA

T.H. Həbibbəyli

Dağlıq və meşəlik ərazilərlə xarakterizə olunan ərazilərdə infrastrukturun və kənd təsərrüfatının inkişafının informasiya təminatı üçün bəzi hallarda pilotsuz texnologiyalardan istifadə etməklə yerin monitorinqi tələb olunur. Bununla əlaqədar, dağlıq və meşəlik landşaftda yerüstü pilotaj zamanı 3D kvadrokopter trayektoriyasının formalaşdırılması alqoritmı təklif olunur ki, bu da mümkün maneələri dəf etmək üçün avtonom manevr etməyi nəzərdə tutur. Baza model olaraq, fəzanın qeyri-səlis sektorlarını əks etdirən linqvistik dəyişənlər şəklində giriş xarakteristikaları ilə qeyri-səlis çıxarış sistemi istifadə olunur, onların daxilində maneələrin mövcudluğu və onlara olan məsafə verbal şəkildə, yəni termlər şəklində şərh olunur. Üfüqi müstəvidə fırlanma bucağının, uçuş hündürlüyünün və kvadrokopterin sürətinin dəyişməsinə əks etdirən çıxış linqvistik dəyişənlərin şərtləri kimi formalaşdırılan bu sistemin qeyri-səlis nəticələri əsasında maneələrin aradan qaldırılması prosedurası təklif olunur. Məqalədə neyron şəbəkəsinin modelləşdirilməsi vasitəsilə trayektoriyanın operativ formalaşması üçün əsas olan müxtəlif uçuş ssenariləri çərçivəsi daxilində kvadrokopterin davranışının nəticələri təhlil edilir.

Açar sözlər: kvadrokopter, uçuş trayektoriyası, yerüstü monitorinq, qeyri-səlis çoxluq, qeyri-səlis çıxarış, neyron şəbəkə

ABOUT ONE APPROACH TO THE ISSUE OF REGULATING THE BEHAVIOR OF A QUADCOPTER UNDER OVERLAND MONITORING

T.H. Habibbayli

For information support of the development of infrastructure and agriculture in fields characterized by mountainous and forested areas, in some cases ground monitoring using unmanned technologies is required. In this regard, an algorithm for the formation of a 3D quadcopter trajectory under overland piloting in a mountainous and wooded landscape is proposed, which implies autonomous maneuvering to overcome possible obstacles. As a basic model, a fuzzy inference system is used with input characteristics in the form of linguistic variables that reflect fuzzy sectors of space, within which the presence of obstacles and the distance to them are interpreted verbally, that is, in the form of terms. It is proposed to overcome obstacles based on fuzzy conclusions of this system, formulated as terms of output linguistic variables, which reflect changes in the angle of rotation in the horizontal plane, flight altitude and speed of the quadcopter. The article analyzes the results of the behavior of a quadcopter under various flight scenarios, which became the basis for the operational formation of the trajectory through neural network modeling.

Keywords: *quadcopter, flight path, overland monitoring, fuzzy set, fuzzy inference, neural network*