

Синтез систем управления стабилизацией курса автономного подводного аппарата на основе применения метода ANFIS

Фам Ван Туан

Кафедра систем управления, Военно-морская академия
город Нячанг, провинция Кханьхоа, Вьетнам
tuanhvhq@gmail.com

Аннотация. В статье, исследование и разработка алгоритма стабилизации курса малогабаритного автономного подводного аппарата (МАПА) на основе применения метода адаптивной нейро-нечеткой системы вывода. Нелинейная модель, описывающая динамику, и изучается кинематика МАПА. Представлен алгоритм использования нейросетевых методов нечеткой логики на параметрах когерентной системы управления, что приводит к снижению результатов работы нечеткого регулятора. Этот алгоритм может быть применен к другим контроллерам, что делает его универсальным механизмом построения системы автоматического управления. Основные результаты в данной статье получены для подводных аппаратов, динамика которых существенно отличается от динамики объекта. Представлены результаты моделирования управления подводным аппаратом в горизонтальном направлении, которые выявляют высокую эффективность функций восприятия нейро-нечеткого управления при наблюдении с пропорционально-дифференциальным регулятором.

Ключевые слова: автономный подводный аппарат, нейро-нечеткий, адаптивный, ANFIS

I. ВВЕДЕНИЕ

Малогабаритный автономный подводный аппарат, обычно используемый для выполнения опасных подводных задач, таких как исследование и обследование потенциально опасных затонувших кораблей, наблюдение, инспекция и т. д. плавать рефлекторно или динамически бродить рядом с предпочтительным местом или перемещаться на разной глубине под водой [1]. Чтобы этот тип транспортного средства был действительно автономным, необходимо, разработка надежной бортовой системой навигации, управления и позиционирования. Ключевым элементом этой системы является подсистема управления, отвечающая за многие передовые инженерные концепции управления, включая: скользящий режим [2] и теорию адаптации [3], которые используются при разработке автопилотов и встречались с переменным успехом. Подходы искусственного интеллекта теперь также внедряются в процесс проектирования. Сообщалось об автопилотах, созданных с использованием методов нечеткой логики [4, 5] и искусственных нейронных сетей [6], и было показано, что они наделены похвальными свойствами надежности.

В настоящее время перспективным направлением построения систем автономных подводных аппаратов является представление метода адаптивной нейро-нечеткой системы вывода. Совершенствование, миниатюризация и удешевление органов управления и навигационных датчиков позволяет проектировать и производить относительно недорогие подводные аппараты различного назначения. В свою очередь возникает проблема эффективного дистанционного управления такими устройствами. Получив такие результаты, в этой статье обсуждается разработка автопилота, поддерживающего курс, на основе новаторской нейро-нечеткой методологии, известной как система нечеткого вывода на основе адаптивной сети (Adaptive neuro fuzzy inference system – ANFIS).

Объект, который исследуется в данной работе, малогабаритный автономный подводный аппарат, был разработан и изготовлен на кафедре управления Морской академии (рис. 1). Тип объекта – МАПА поискового типа, оснащенный двумя парами воздушных винтов соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Параметры пространственного движения измеряются с помощью инерционного модуля на основе микромеханических элементов, а также датчика гидростатического давления. В результате масса МАПА составляет около 10 кг с возможностью размещения до 1 кг полезной нагрузки.



Рис. 1. Подводный аппарат

II. НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАПА

Математическая модель пространственного движения МАПА, по результатам анализа объекта, можно описать:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t), x \in R^{12}$$

где x – вектор состояния МАПА, включающий: компоненты линейных скоростей V (рис. 2) в связанной системе координат; компоненты угловых скоростей Ω в связанной системе координат; углы Эйлера; компоненты линейного перемещения $[x_g, y_g, z_g]$ в полусвязанной системе координат; $f(x, t)$ – векторная функция, включающая: расчет приведенных сил и моментов, действующих на МАПА, с учетом массогабаритных характеристик, присоединенных масс и моментов инерции, а также описанных выше допущений и ограничений; расчет составляющих линейной и угловой скоростей на основе уравнений связи поступательного и вращательного движения.

Математическая модель получена на основе традиционных уравнений динамики твердого тела. Для описания гидродинамики использовались упрощенные квадратичные зависимости. Коэффициенты гидродинамических сил и моментов уточнялись по результатам натурных испытаний. В итоге моделирование показало достаточное сходство с реальным движением МАПА. Построение модели включает следующие этапы: выбор системы координат, расчет геометрических и инерциальных составляющих, расчет и уточнение гидродинамических характеристик. В данной работе принята связанная система координат с центром, совпадающим с центром тяжести аппарата, показано на рисунке 2.

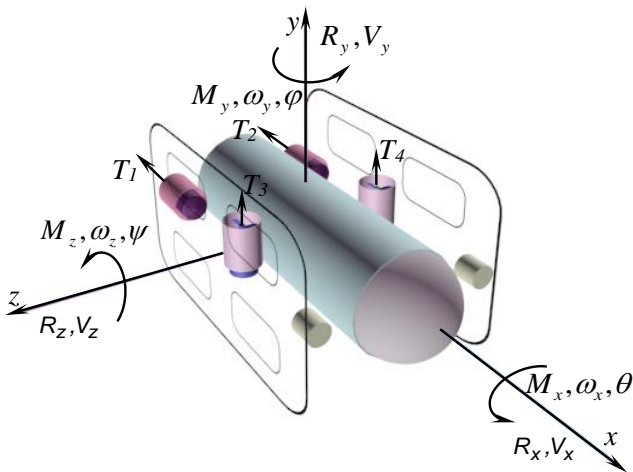


Рис. 2. Связанная система координат МАПА: φ, θ, ψ – углы рыскания, крена и дифферента соответственно; $V = [V_x, V_y, V_z]^T$ – вектор линейной скорости МАПА; $\Omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ – вектор угловой скорости МАПА; $R = [R_x, R_y, R_z]^T$, $M = [M_x, M_y, M_z]^T$ – векторы сил и моментов, действующих на МАПА соответственно; где T_1, T_2, T_3, T_4 – силы упора винтов МАПА.

III. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАПА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ANFIS

Структурная схема системы управления заданным углом курса МАПА приведена на рис. 3. Структура состоит из 2 контроллеров ANFIS, используемых для управления силой 2 винтов T_1 и T_2 . Входными данными ANFIS являются угловое отклонение $\Delta\varphi$ и скорость вращения ω_y .

Как упоминалось выше, конструкция нечеткого контроллера, используемая в этом исследовании, основана на ANFIS.

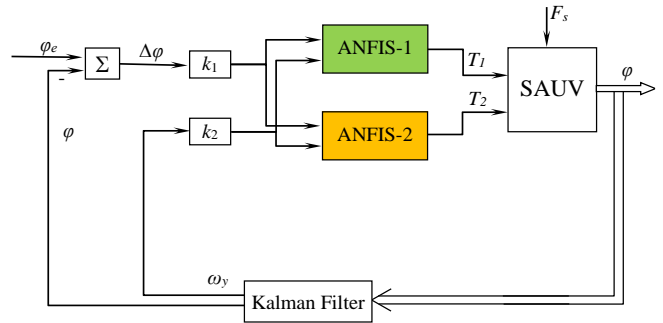


Рис. 3. Структура системы управления с регулятором ANFIS, где: φ – угол рыскания; k_1, k_2 – масштабные коэффициенты; T_1, T_2 – силы управляющего воздействия; F_s – внешнее воздействие сил

Рассматриваемая система нечеткого вывода имеет 2 входа (φ, ω) и один функциональный выход (T), нечеткий алгоритм на основе правил может быть представлен в форме Сугено первого порядка, как показано вид:

Rule 1: If x is A_1 and y is B_1 then $T = p_1x + q_1y + r_1$

Rule 2: If x is A_2 and y is B_2 then $T = p_2x + q_2y + r_2$

...

Rule n : If x is A_n and y is B_n then $T = p_nx + q_ny + r_n$

В данной работе предложено выбрать пять термов для курса φ : отрицательная большая (NL), отрицательная малая (NS), нулевая (Z), положительная малая (PS), положительная большая (PL). Для описания угловой скорости ω достаточно трех термов: отрицательная (N) нулевая (Z) положительная (P). Управляющее усилие двух гребных винтов направлено в противоположные стороны для создания вращения МАПА. Соответствующая структура ANFIS показана на рис. 4. Функции узла на том же уровне относятся к одному и тому же семейству функций, как описать вид:

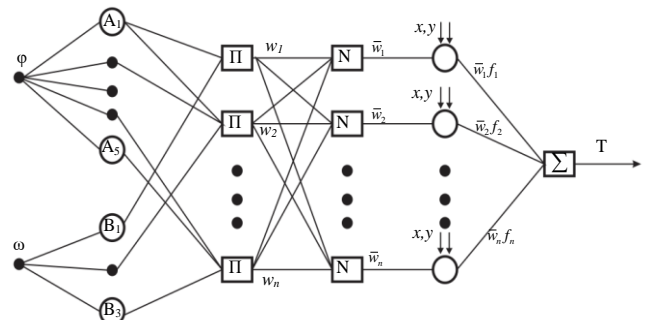


Рис. 4. Структура нейро-нечеткой сети

Уровень 1. Каждый i -й узел на этом уровне является адаптивным узлом с выходом узла, заданным формулой

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x)$$

где x – вход в общий узел и A_i – нечеткое множество, связанное с этим узлом. Другими словами, выходы этого уровня являются значениями членства в предпосылочной части. Здесь функциями принадлежности для A_i могут быть любые подходящие параметризованные функции принадлежности. Здесь A_i характеризуется обобщенной функцией колокола.

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}}$$

где $\{a_i, b_i, c_i\}$ – набор параметров. Параметры на этом уровне называются параметрами помещения.

Уровень 2. Каждый узел в этом слое является фиксированным узлом, помеченным П, который умножает входящие сигналы и выводит результат оператора произведения или Т-нормы, например.

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2$$

Выходные данные каждого узла представляют силу срабатывания правила.

Уровень 3. Каждый узел в этом слое является фиксированным узлом с меткой N. i -й узел вычисляет отношение силы срабатывания i -го правила к сумме силы срабатывания всех правил:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2$$

Для удобства выходные данные этого слоя называются нормализованными огневыми силами.

Уровень 4. Каждый i -й узел в этом слое является адаптивным узлом с функцией узла

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)$$

где \bar{w}_i – выход слоя 3, и $\{p_i, q_i, r_i\}$ – набор параметров. Параметры этого уровня называются последующими параметрами.

Уровень 5. Единственный узел в этом слое помечен Σ , который вычисляет общий вывод как сумму входящих сигналов:

$$O_{5,i} = \text{overall output} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}$$

Таким образом, может быть построена адаптивная сеть, которая имеет точно такую же функцию, что и нечеткая модель Сугено.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА

С целью исследования эффективности разработанного алгоритма было проведено

моделирование стабилизацией курса МАПА с помощью разработанного комплекса программ, работающего в режиме управления с помощью ANFIS. Использовались следующие исходные данные: параметры АНПА – в соответствии с [4], начальный курс – 0^0 и заданный курс – 10^0 и 30^0 .

Для оценки качества регулятора, построенного на базе применения метода адаптивной нейро-нечеткой системы вывода. Результаты моделирования сравниваются с классическим ПД-регулятором. Результаты моделирования стабилизацией курса МАПА под управлением ANFIS приведены на рис. 5 и 6. На рисунке приведены зависимости текущих и заданных курсов от времени.

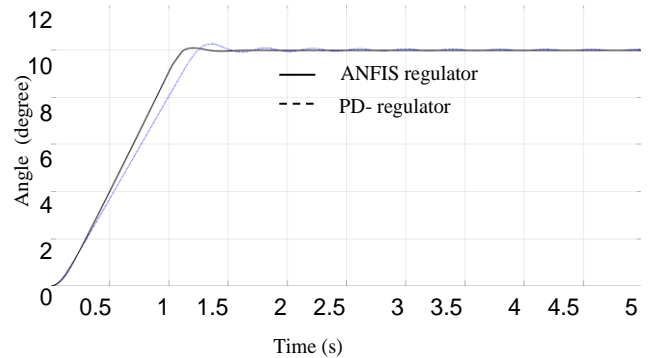


Рис. 5. Сравнение регуляторов PD и ANFIS на заданных 10^0

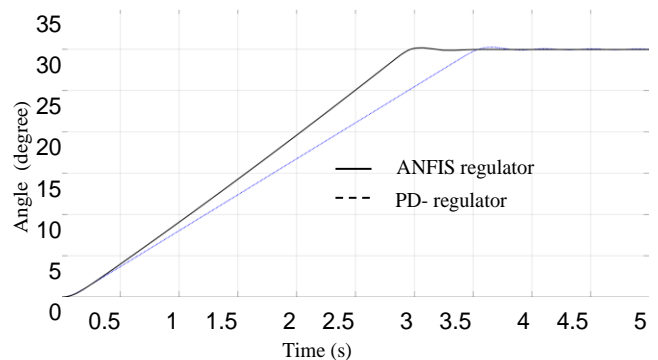


Рис. 6. Сравнение регуляторов PD и ANFIS при заданных 30^0

С данными, установленными на 10 градусов, переходные и установившиеся режимы показаны на рис. 7. Рис. 7 показывает, что контроллер ANFIS стабилен с определенной ошибкой 0,01, в то время как контроллер PD колеблется вокруг положения равновесия.

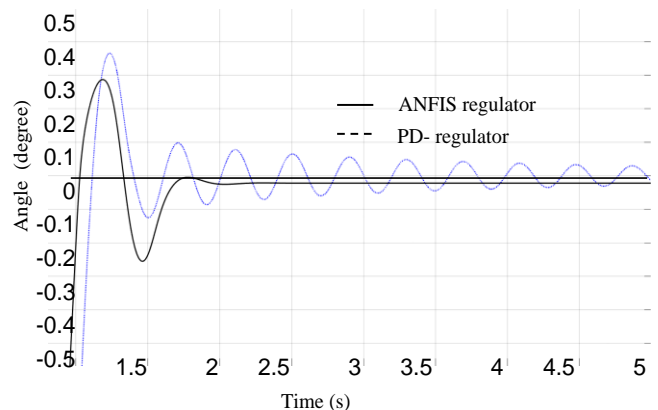


Рис. 7. Переходные и установившиеся режимы при заданных 10^0

Таким образом, регулятор ANFIS стабилизирует курс МАПА практически с той же точностью, как и ПД-регулятор. Вместе с тем имеется возможность повышения его точности за счет увеличения объема выборки обучения, количества правил нечеткого вывода для ANFIS и использования других функций принадлежности входных и выходной переменных.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы был разработан алгоритм управления стабилизацией курса МАПА на основе применения методов ANFIS. Сравнение результатов работы созданного регулятора управления с результатами работы ПД-регулятора позволяет сделать вывод, что ANFIS воспроизводит результат работы ПД-регулятора в режиме стабилизации курса МАПА. В данной работе на примере управления стабилизацией курса МАПА в режиме стабилизации курса показано, что с помощью комбинации нечетких систем и нейронных сетей можно воспроизвести высокоэффективные системы управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ageev M.D., Kiselev L.B., Matvienko Y.V. and др. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М.: Наука, 2005. 398 с.
- [2] Randeni P, S. A. T., Forrest A.L., Cossu R., Leong Z.Q. and Ranmuthugala D. (2015). Estimating flow velocities of the water column using the motion response of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) // OCEANS 2015 – MTS/IEEE Washington, Washington, DC, pp. 1-6.
- [3] X. Liu, Y. H. Tan, B. Di and B. M. Chen. "Hydrodynamic modelling for a small-scale underwater vehicle using computational fluid dynamics", // 13th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA). Ohrid, 2017, pp. 373-378.
- [4] Pham Van Tuan, "Fuzzy Control of the Stabilization Process of Remote-controlled Underwater Robot" // IEEE Conference on Soft Computing and Measurements (SCM-2020). St. Petersburg, May 27-29, 2020 St. Petersburg: ETU "LETI". pp. 119-122.
- [5] Pham Van Tuan, "Maneuvering Algorithms of a Small-sized Underwater Robot," // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 802-806, doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039167.
- [6] T.V. Pham and A.G. Shpektorov, "Comparative analysis of fuzzy regulators for controlling the movement of an autonomous underwater vehicle," // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow, 2018, pp. 954-957, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317247.