

Г.И. Малыгин, Ю.Л. Сиек

(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
e-mail: malygin_dom@mail.ru)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Проведён анализ методов проектирования подводных роботов, обеспечивающих устойчивость в динамических процессах и повышающих безопасность функционирования в экстремальных условиях. Предложена математическая модель движения подводного робота. Материал может быть полезен при решении проблем техносферной безопасности.

Ключевые слова: математическое моделирование, нечёткая логика, робот, гидротехнические сооружения, мониторинг.

G.I. Malygin, Ju.L. Siek

MATHEMATICAL MODELING MOVING OF UNDERWATER ROBOT ON BASIS OF FUZZY LOGIC

The analysis of the design techniques of underwater robots to ensure stability in dynamical processes and improve safety of its functioning in extreme conditions. Mathematical modeling moving of underwater robot is proposed. The material can be useful in solving problems technosphere safety.

Key words: mathematical modeling, fuzzy logic, robot, hydraulic facilities, monitoring.

Введение

Популярность автономных необитаемых подводных аппаратов резко увеличилась в последние два десятилетия благодаря возможности автоматической работы в неблагоприятных условиях без риска для человека.

Связано это с расширением функциональных возможностей, благодаря решению ряда теоретических задач. В первую очередь, это задачи управления и навигации, ориентирования в пространстве, сбора и накопления разнообразной информации, обеспечение безопасности в штатных режимах и в особых ситуациях. С учётом развития современных вычислительных средств и технологического оснащения, робототехнические устройства способны быстрее и точнее выполнять поставленные задачи, что расширяет области их применения.

Современные многоцелевые автономные подводные аппараты представляют собой отдельный класс робототехнических средств с определенными задачами и практическим применением, составом систем и функциональными свойствами. К числу наиболее актуальных сфер их применения можно отнести [1, 3, 5]:

- обзорно-поисковые работы;
- топографические и геологоразведочные работы, включающие фотовидеосъемку морского дна, акустическое профилирование и картографирование рельефа;
- подлёдные работы, обслуживание систем наблюдения и освещения подледной обстановки;

- океанографические исследования;
- экологический мониторинг водной среды;
- инспекцию и техническое обслуживание гидротехнических сооружений;
- работы военного назначения.

Главная проблема управления подводным робототехническим средством заключается в нелинейностях аппарата (параметрические неопределенности – присоединенные массы, гидродинамические коэффициенты, динамика движения и реакции аппарата на возмущающее воздействие водной среды и управляющих устройств и т.п.) и водной среды (неравномерность и неструктурируемость водных масс, влияние течений и ветроволновых колебаний) [4, 5, 8]. Это заставляет решать многочисленные сложные задачи управления, навигации и взаимосвязи подобных аппаратов.

Предлагается методика синтеза нелинейной модели движения подводного аппарата, основанная на теории нечеткой логики, и обеспечивающая безопасность функционирования при проведении технического мониторинга подводных гидротехнических сооружений в составе системы автоматического контроля. На основе предложенной модели можно решать задачи синтеза законов управления, учитывающие неточности и неопределенности динамических процессов движения.

Применение подводных робототехнических средств

Гидротехнические сооружения играют важную роль в экономике России (рис. 1). Построенные десятки лет назад на крупнейших реках страны гидроэлектростанции не только вносят существенный вклад в энергетическую систему страны, но и обеспечивают сквозное функционирование речных транспортных коридоров. Строящиеся и вводимые в эксплуатацию современные порты в различных регионах России обеспечивают стабильность экономических отношений с зарубежными странами. Подводные сооружения буровых платформ представляют собой сложные инженерные комплексы с развитой системой подводных коммуникаций, которая требует периодического контроля для обеспечения безопасности функционирования нефте- и газопроводов.



Рис. 1. Примеры гидротехнических сооружений и объектов

Обеспечение технической безопасности подобных гидротехнических сооружений является одной из приоритетных задач, так как условия и сроки их эксплуатации требуют постоянного контроля за состоянием подводных конструкций. Для технического контроля перечисленных объектов целесообразно создание автоматических систем контроля подводных гидротехнических сооружений [7, 10], преимущества которых в следующем:

- отсутствие необходимости поддержки систем жизнеобеспечения при проведении подводных работ с участием человека;
- отсутствие случайных ошибок при ручном управлении;
- повышение скорости и эффективности работы благодаря современной вычислительной технике;
- отсутствие риска для персонала при проведении технического мониторинга;
- большей автономности функционирования под водой по отношению к системе, управляемой человеком.

Математическая модель управляемого движения подводного робота

Пространственное движение подводного робота традиционно описывается в 6-ти степенях свободы, включая независимые координаты, необходимые для описания расположения и ориентации, и записывается в виде системы нелинейных векторно-матричных дифференциальных уравнений [4].

Для формирования математической модели управляемого движения применяются различные методы анализа и синтеза, разработанные в рамках динамики и кинематики твердого тела и теории автоматического управления. Для большинства подводных аппаратов пространственную траекторию движения можно представить как совокупность участков движения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Для синтеза математической модели управляемого движения при маневрировании в этих плоскостях рационально воспользоваться следующими формами с учётом кинематических условий движения для соответствующей плоскости и нулевого крена [4, 6, 9]:

- для вертикальной плоскости

$$f(x, \delta, t) = \begin{cases} D^{-1}(F - BDq); \\ \omega_z; \\ v_x \cos \theta - v_y \sin \theta; \\ v_x \sin \theta + v_y \cos \theta; \end{cases} \quad (1)$$

- для горизонтальной плоскости

$$f(x, \delta, t) = \begin{cases} D^{-1}(F - BDq); \\ \omega_y; \\ v_x \cos \psi + v_z \sin \psi; \\ -v_x \sin \psi + v_z \cos \psi, \end{cases} \quad (2)$$

где x – вектор состояния;
 δ – вектор управляющих воздействий;
 q – вектор обобщённых скоростей;
 F – вектор внешних сил и моментов;
 D – матрица присоединённых масс;
 B – матрица обобщённых скоростей;
 V_x, V_y, V_z – линейные скорости движения;
 ω_y, ω_z – угловые скорости движения;
 ψ – угол курса;
 θ – угол дифферента.

На основе этих моделей динамики движения подводного аппарата в пространстве при построении системы управления выполняется синтез управляющих функций. Система автоматического управления движением подводного робота должна обеспечивать необходимое маневрирование в районе обследования подводного объекта, в процессе которого выполняются необходимые работы. Задавая различные функции управления, строится необходимая траектория маневрирования подводного робота для исследования подводной части гидротехнического сооружения.

Для решения задач, стоящих перед подводными роботами предъявляются высокие требования к качеству пространственного маневрирования:

- точность приведения робототехнического средства в заданное место в минимально короткие сроки;
- оптимальность траектории движения – минимизация отклонений фазовых координат;
- динамическое позиционирование во время выполнения поставленной задачи.

Современные требования к повышению точности движения и наличие нелинейных составляющих в описании объекта управления и морской среды соответствуют так называемому принципу несовместимости. Он заключается в том, что с увеличением точности математического описания динамических процессов управляемого движения подводного робота существенно увеличивается неточность и неопределенность самой модели движения и описания водной среды, кроме того, заметно усложняется математическое моделирование. Обеспечение высокой адекватности линейной модели становится практически невозможным.

Проблемы высокоточного управления подводными роботами обнаруживают различные трудности из-за их нелинейной динамики, наличия внешних возмущений и шумов измерения. Это особенно появляется в неглубоких и ограниченных водных пространствах, где фактор мелководности, динамическое волновое взаимодействие, приливно-отливное течение, прибрежное течение и искусственные сооружения создают целый ряд трудностей. Эти обстоятельства делают целесообразным применение *методов нечёткой логики*.

Развитие численных и качественных методов анализа и синтеза нелинейных систем предоставляет возможность рационального описания протекания динамических процессов управления для различных классов нелинейных объектов [8]. Мощность и производительность современных бортовых вычислительных машин позволяет закладывать в робототехнические средства огромное количество сложных и разнообразных алгоритмов, благодаря которым существенно возросли возможности роботов и расширилась сфера их применения.

Работы по созданию новых алгоритмов, основанных на нечёткой логике, актуальны, поскольку конкретные прикладные задачи настолько разнообразны, что невозможно предложить единственный универсальный подход, который показал бы себя одинаково эффективно во всех возможных случаях.

Нелинейная математическая модель управляемого движения подводного робота

Весомый вклад в развитие данной тематики внесли исследовательские работы Фоссена (*Thor I. Fossen*) и Сагатуни (*Svein I. Sagatun*), публикации которых в начале 1990-х годов привлекли повышенное внимание. Впоследствии методы нечёткой логики при проектировании робототехнических средств получили широкое распространение и применяются при разработке технических устройств в разнообразных исследовательских проектах [3, 4].

Исследования прошлого и текущего десятилетий сосредоточены на методах интеллектуального и/или адаптивного управления и поисков оригинальных методов повышения эффективности, надёжности и безопасности функционирования роботов. В рамках этой тематики развитие получили направления, связанные с применением нечётких множеств, нейронных сетей, нечётко-ориентированного мышления, оценивания математических функций с высокой нелинейностью и их совокупности [2, 5, 8]. Эти методы являются мощными инструментами и обладают огромным потенциалом при работе с нелинейными и неопределёнными системами, в том числе подводными аппаратами.

Разумно проектировать нечёткие модели, если мы обладаем определёнными знаниями об объекте, условиях и задачах функционирования. В этом случае мы можем говорить о неопределённости и/или неполноте наших знаний.

Для построения нелинейной модели подводного робота воспользуемся нечёткой моделью *TS*-типа, предложенной Такаги (*Takagi Tomohiro*) и Сугено (*Sugeno Michio*) [1, 2] и представляющей собой совокупность линейных уравнений-правил вида "ЕСЛИ, ТО". Главная идея проста и заключается в получении

определенного линейного управляющего сигнала для каждого случая в нелинейной системе.

Решение в общем виде можно представить следующим. Предположим, что интересующий нас нелинейный параметр можно описать функцией $x'(t) = f(x(t))$, находящейся в некотором "секторе нелинейности" (рис. 2, слева). Нелинейная система описывается в общем виде в матричной форме [1, 4]:

$$x'(t) = A \cdot x(t) + D \cdot u(t), \quad (3)$$

где $x(t)$ – вектор параметров состояния нелинейной системы;

$u(t)$ – вектор параметров управления;

A и D – матрицы коэффициентов и параметров системы.

В случае, когда трудно или невозможно определение общего сектора нелинейности для всей нелинейной системы, целесообразно разделение на локальные сектора с последующим объединением в общее решение.

Нашей целью является нахождение $x'(t) = f(x(t)) \in [c_1, c_2] x(t)$. Из локального сектора нелинейности (рис. 2, справа) можно геометрически определить

$$f(x(t)) \in [c_1, c_2] x(t) = M_1(t) \cdot c_1 x(t) + M_2(t) \cdot c_2 x(t), \quad (4)$$

где $a(t)$ – исследуемый параметр;

$M_1(t)$ и $M_2(t)$ – нечёткие значения;

два линейных уравнения $c_1 x(t)$ и $c_2 x(t)$ линеаризуют нелинейную функцию.

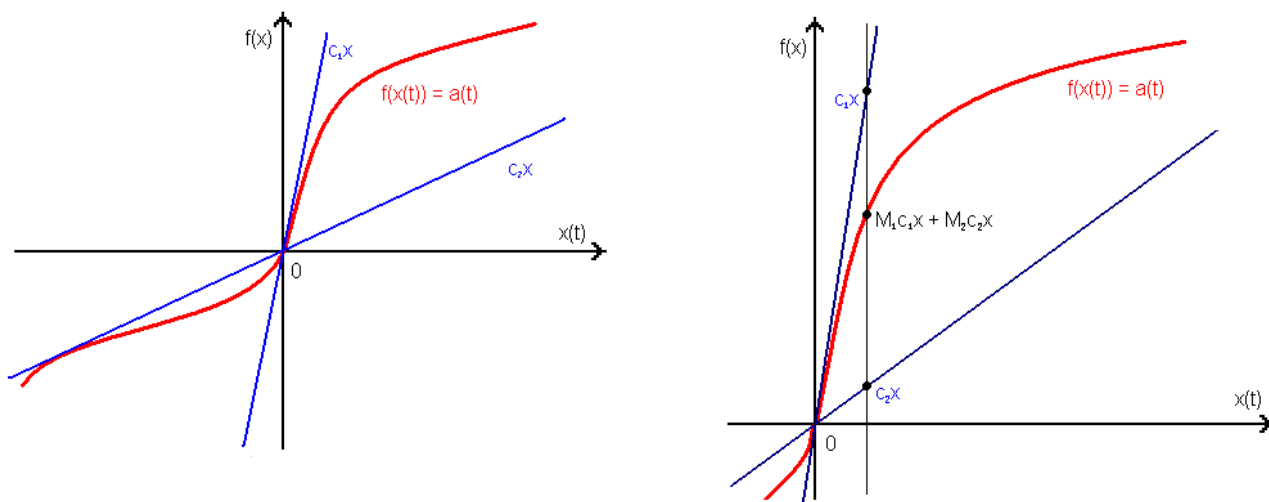


Рис. 2. Геометрическое представление нелинейной переменной (слева) и локальный сектор нелинейности (справа)

Очевидно, что $M_1(t)$ и $M_2(t)$ могут быть выражены:

$$M_1(t) = \frac{a(t) - c_2 x(t)}{c_1 x(t) - c_2 x(t)} \text{ и } M_2(t) = \frac{c_1 x(t) - a(t)}{c_1 x(t) - c_2 x(t)}, \quad (5)$$

$$M_1(t), M_2(t) \geq 0 \text{ и } M_1(t) + M_2(t) = 1. \quad (6)$$

Так же функцию принадлежности $a(t)$, используя выражения (5) и (6), можно представить в виде:

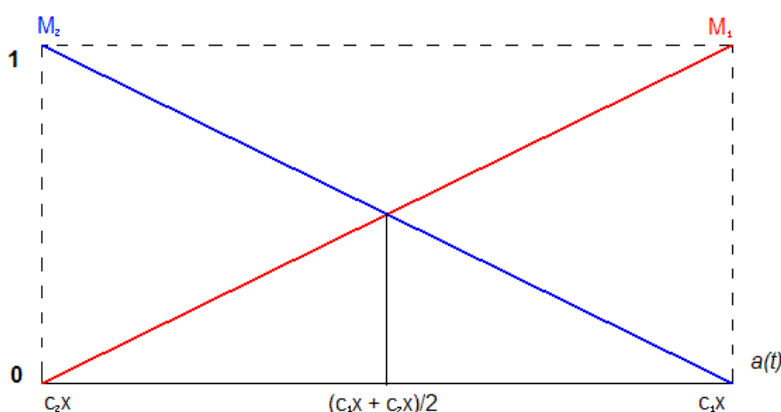


Рис. 3. Функция принадлежности $a(t)$

Далее, искомую нелинейную систему представляют в виде TS -модели, как совокупность линейных уравнений вида "ЕСЛИ, ТО", зависящих от функций принадлежности.

$$\begin{aligned} \text{ЕСЛИ: } a_1(t) \text{ является } M_{i1} \text{ и } \dots \text{ и } a_p(t) \text{ соответствует } M_{ip}, \\ \text{ТО: } x'(t) = A_i x(t) + D_i u(t), \quad i = 1, 2, \dots, q, \end{aligned} \quad (7)$$

где $a_p(t)$ – вектор, содержащий искомые переменные, где p – их число;

i – количество правил;

M_{ip} – набор значений (нелинейный).

Можно вывести следующий окончательный результат для нелинейной системы:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^q h_i(a(t)) [A_i x(t) + D_i u(t)], \quad (8)$$

где $h_i(a(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(a_j(t))$ является весовой функцией для i -го правила.

Для иллюстрации предложим для выражения (1) новую нелинейную модель, компенсирующую ошибки измерения вектора состояния подводного робота – неопределённость измерения угловой и линейной скорости в измерительном канале при маневрировании по глубине.

В этом случае

$$x(t) = [V_x, V_y, \omega_z, \theta, \zeta, \eta]^T,$$

где V_x и V_y – линейные скорости,

ω_z – угловая скорость,

θ – угол дифферента,

ζ и η – координаты центра тяжести;

$$u(t) = f(\tau),$$

где $\tau = \delta(t)$ – управляющие воздействия в зависимости от сил тяги, угла перекладки рулей.

Тогда, произведя ряд математических преобразований и упрощений, запишем модель движения подводного робота (1) в форме (3):

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{m_{11}} & 0 & \frac{m_{22}}{m_{11}} \cdot V_Y & \frac{a_2}{m_{11}} & 0 & 0 \\ -\frac{m_{11}}{m_{22}} \cdot \omega_Z & 0 & \frac{a_5}{m_{22}} & \frac{a_6}{m_{22}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a_{10}}{m_{66}} & \frac{a_{11}}{m_{66}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{a_8}{m_{22}} \\ \frac{a_{13}}{m_{66}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t), \quad (9)$$

где m и a – массовые и гидродинамические коэффициенты подводного робота.

Создадим модель движения в предположении, что параметры V_y и ω_z нелинейны и находятся в пределах $V_y \in [-0,2; 0,2]$ и $\omega_z \in [-0,1; 0,1]$.

В соответствии с выражениями (4, 5, 6) запишем:

$$V_y(t) = M_{11}(V_y(t)) \cdot 0,2 + M_{12}(V_y(t)) \cdot (-0,2), \quad (10)$$

где $M_{11}(V_y(t)) + M_{12}(V_y(t)) = 1$.

$$\text{Тогда } M_{11}(t) = \frac{0,2 + V_y(t)}{0,4} \text{ и } M_{12}(t) = \frac{0,2 - V_y(t)}{0,4}; \quad (11)$$

$$\omega_z(t) = M_{21}(\omega_z(t)) \cdot 0,1 + M_{22}(\omega_z(t)) \cdot (-0,1), \quad (12)$$

где $M_{21}(\omega_z(t)) + M_{22}(\omega_z(t)) = 1$.

$$\text{Тогда } M_{21}(t) = \frac{0,1 + \omega_z(t)}{0,2} \text{ и } M_{22}(t) = \frac{0,1 - \omega_z(t)}{0,2}. \quad (13)$$

Воспользуемся TS-моделью и сформулируем правила, "линеаризующие" исследуемую нелинейную модель (9) [1, 2]:

1. **ЕСЛИ:** $V_y(t) = M_{11}$ и $\omega_z(t) = M_{21}$,
ТО: $x'(t) = A_1 \cdot x(t) + D_1 \cdot u(t)$.
2. **ЕСЛИ:** $V_y(t) = M_{11}$ и $\omega_z(t) = M_{22}$;
ТО: $x'(t) = A_2 \cdot x(t) + D_2 \cdot u(t)$.
3. **ЕСЛИ:** $V_y(t) = M_{12}$ и $\omega_z(t) = M_{21}$,
ТО: $x'(t) = A_3 \cdot x(t) + D_3 \cdot u(t)$.
4. **ЕСЛИ:** $V_y(t) = M_{12}$ и $\omega_z(t) = M_{22}$,
ТО: $x'(t) = A_4 \cdot x(t) + D_4 \cdot u(t)$.

где A_i и D_i – матрицы, элементы которых вычисляются учитывая формулы (11) и (13).

В результате нелинейная модель движения подводного робота при маневрировании по глубине с двумя нечёткими параметрами V_y и ω_z в пространстве $[-0,2; 0,2] \times [-0,1; 0,1]$ полностью описывается следующим выражением:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 h_i(a(t)) [A_i x(t) + D_i u(t)],$$

где

$$\begin{aligned} h_1(x(t)) &= M_{11}(V_Y(t)) \cdot M_{21}(\omega_Z(t)); \\ h_2(x(t)) &= M_{11}(V_Y(t)) \cdot M_{22}(\omega_Z(t)); \\ h_3(x(t)) &= M_{12}(V_Y(t)) \cdot M_{21}(\omega_Z(t)); \\ h_4(x(t)) &= M_{12}(V_Y(t)) \cdot M_{22}(\omega_Z(t)). \end{aligned}$$

В итоге, нелинейная модель движения, основанная на *TS*-модели с изменяющимися параметрами, является совокупностью простых линейных уравнений, использующих набор правил "ЕСЛИ, ТО", представляющих локальные линейные выражения нечётко заданных параметров модели.

Заключение

Непрерывный рост сложности технических систем, а также требований к точности управления ими приводит к необходимости развития методов синтеза нелинейных интеллектуальных систем, обеспечивающих высококачественное функционирование робототехнических устройств.

Разработанные математические модели могут использоваться для решения задач синтеза нечёткого управления, повышая эффективность, избегая не точности и/или неопределенности наших знаний при составлении моделей.

Применение методов нечёткой логики для синтеза законов управления современных автоматических систем контроля, состоящих из набора различных подводных роботов, может повысить надёжность функционирования подводных гидротехнических сооружений в сложных и/или экстремальных условиях за счёт периодического контроля их состояния.

Литература

1. *Chang W.J., Chang W., Liu H.H.* Model-based fuzzy modeling and control for autonomous underwater vehicles in the horizontal plane // Journal of Marine Science and Technology, vol. 11, №3, 2003. Pp. 155-163.
2. *Takagi T., Sugeno M.* Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // IEEE Transactions on systems, man and cybernetics. № 15 (1), 1985. Pp. 116-132.
3. *Yildiz O., Gokalp R.B., Yilmaz A.E.* A review on motion control of the underwater vehicles // International Conference "Electrical and Electronics Engineering, 2009". IEEE. Pp. 337-341.
4. *Автономные подводные роботы: системы и технологии* / Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. М.: Наука, 2005. 398 с.
5. *Агеев М.Д., Киселев Л.В., Рылов Н.И.* Актуальные вопросы создания и использования автономных необитаемых подводных аппаратов. М.: Мехатроника, автоматизация, управление. Ч. 1, 2. №№ 2, 6, 2003.

6. **Жуков Ю.И., Малыгин Г.И.** Автоматическое управление подводным роботом-спасателем в режиме сближения с объектом спасения // Труды II Всеросс. науч.-практ. конф. "Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму". С.-Пб: С.-Пб УГПС МЧС России, 2007. С. 184-186.

7. **Жуков Ю.И., Малыгин Г.И.** Робототехнические средства контроля безопасности подводных гидротехнических сооружений // Проблемы управления рисками в техносфере, № 4, 2008. С. 62-72.

8. **Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Медведев А.В.** О некоторых особенностях динамической модели АНПА с элементами нечёткой логики // Морские технологии, № 5, 2003. Владивосток: Дальнаука. С. 18-31.

9. **Малыгин Г.И.** Разработка системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата специального назначения. // Матер. XI конф. молодых учёных "Навигация и управление движением". С.-Пб: ЦНИИ "Электроприбор", 2009. С. 301-307.

10. **Малыгин Г.И.** Применение современных информационных технологий для создания робототехнических средств контроля безопасности подводных гидротехнических сооружений в арктических условиях // Избранные материалы докладов и выступлений международного форума "Transportsafety / Безопасность транспортных комплексов". С.-Пб., 2010. С. 100-102.