

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО НАДВОДНОГО МИНИ-КОРАБЛЯ

Гуренко Б.В., Федоренко Р.В., Назаркин А.С.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия (344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42), e-mail: toe@tgn.sfedu.ru

В статье рассматривается задача автоматического управления надводным мини-кораблем. Подобные суда могут быть полезны для выполнения широкого круга задач, включая мониторинг окружающей среды, работу на загрязненных участках, поисковые и спасательные операции. Предложена система автоматического управления для автономного мини-корабля, реализующая выполнение миссии, заданной с наземного пункта управления. Миссия строится оператором в виде маршрута, который должен пройти корабль на карте. В работе приведена архитектура аппаратного обеспечения системы управления и навигации, представлен алгоритм управления мини-кораблем и архитектура программного обеспечения, построенного на базе клиент-серверной модели взаимодействия со слабой связностью компонентов. Подробно описаны результаты натуральных экспериментов, показавшие минимальные отклонения фактической траектории движения мини-корабля от заданной миссии при высокой стабильности скорости перемещения.

Ключевые слова: робот, автономный мини-корабль, лодка, управление, навигация.

CONTROL SYSTEM OF AUTONOMOUS SURFACE MINI VEHICLE

Gurenko B.V., Fedorenko R.V., Nazarkin A.S.

Southern federal university, Rostov-on-Don, Russia (344006, Rostov-on-Don, B.Sadovayast., 105/42), e-mail: toe@tgn.sfedu.ru

Article considers the problem of automatic control for autonomous surface mini vehicle. Similar vessels can be useful to perform wide range of tasks including environment monitoring, work on the polluted sites, search and rescue operations. The system of automatic control for the autonomous mini vehicle, realizes the performance of the mission, set from land point of management. Mission is set by the operator in the form of a route which the vehicle has to pass. The architecture of hardware of a control system and navigation is given in paper, the algorithm of management by the mini vehicle and architecture of the software constructed on the basis of client-server model of interaction with weak coherence of components is presented. The results of the natural experiments which have shown the minimum deviations of the actual trajectory of movement of the mini vehicle from set mission and high stability of speed of movement are described.

Keywords: robot, autonomous surface vehicle, boat, control, navigation system.

Робототехника стремительно развивается в направлении водных средств [1], [2], [3]. Автономные мини-корабли способны обеспечить длительную работу в водной среде. Таким образом, автономные мини-корабли могут быть полезны для таких задач, как мониторинг окружающей среды, дикой жизни, поиск и спасательные операции.

Схема использования автономного мини-корабля заключается в следующем: сначала оператор пункта управления визуально на карте строит миссию, состоящую из сегментов (как показано на рисунке 6), а система управления вычисляет необходимые управления (силы, моменты и уставки приводов) для выполнения данной миссии.

Задача заключается в построении системы навигации и управления мини-корабли для автономного выполнения данной миссии.

В данной статье приведены как практически детали, связанные с архитектурой аппаратного и программного обеспечения, так и результаты экспериментов.

Статья организована следующим образом. Вначале описана архитектура аппаратного обеспечения системы управления и навигации автономного мини-корабля. Далее представлен алгоритм управления, после чего описана архитектура программного обеспечения. За этим следуют результаты нескольких экспериментов и некоторые выводы и планы дальнейших работ.

Архитектура аппаратного обеспечения системы управления и навигации автономного мини-корабля

Структура аппаратного обеспечения системы управления и навигации автономного мини-корабля показана на рисунке 1. При разработке использована парадигма разделения вычислительной части на высокоуровневую (компьютер) и низкоуровневую (микроконтроллерный блок). Микроконтроллерный блок получает данные от компьютера или пульта дистанционного управления и генерирует ШИМ-сигнал для управления двигателями и сервоприводами. Компьютер вычисляет требуемые управляющие воздействия в соответствии с алгоритмом управления, выполняет программное обеспечение навигационной системы, и обменивается данными с наземным пунктом управления.

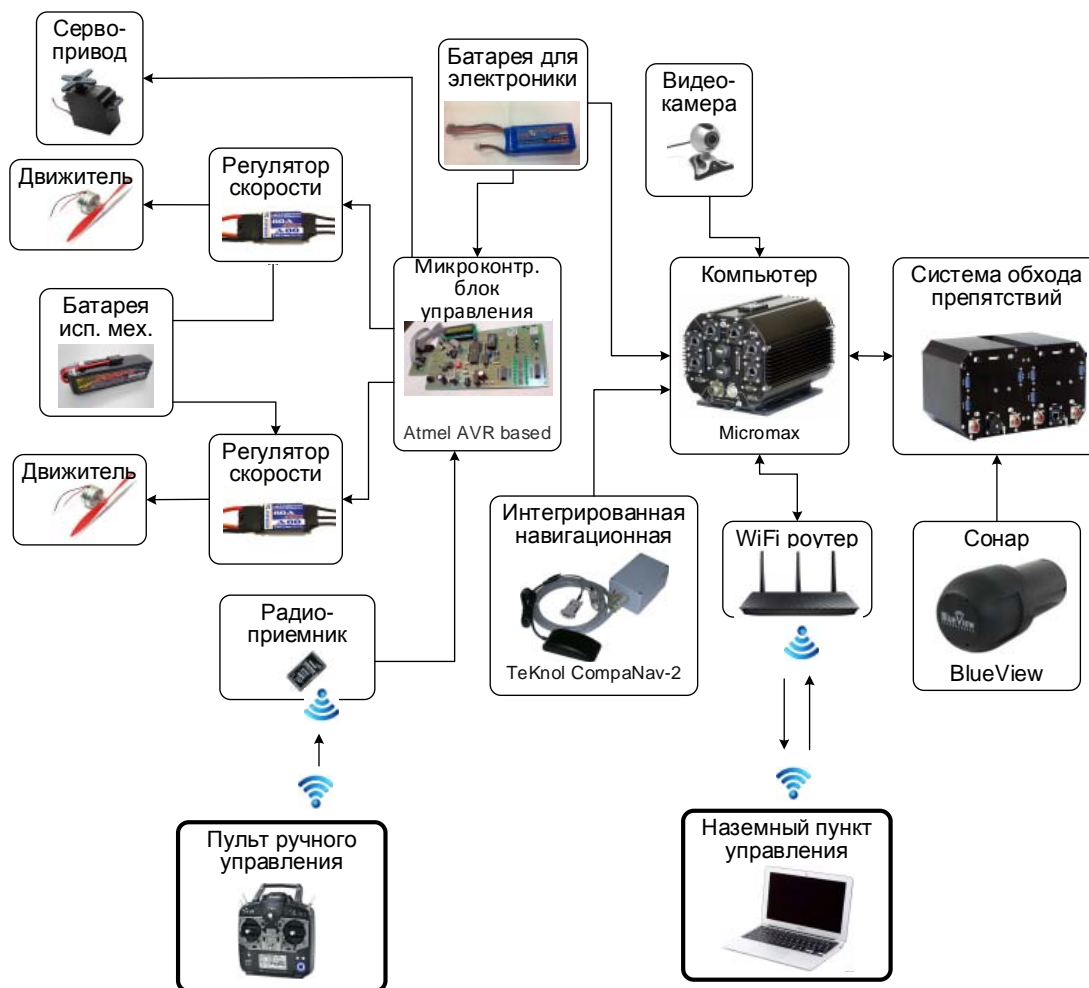


Рисунок 1. Аппаратная реализация автономного мини-корабля

Автономный мини-корабль и наземный пункт управления показан на рисунке 2



Рисунок 2. Внешний вид разработанного комплекса: а) автономный мини-корабль; б) наземный пункт управления; в) задание миссии мини-корабля

Пункт управления может использоваться как для задания миссии мини-корабля путем прокладки маршрута на карте, так и для управления кораблем в ручном режиме.

Алгоритм управления

Математическая модель автономного мини-корабля в соответствии с результатами, полученными в [1], имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_g \\ \dot{z}_g \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_x \\ V_z \\ \omega_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m \frac{dV_x}{dt} &= F_{xg}^u + R_X^{AG} + R_X + F \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} &= M_y^u + M_Y^{AG} + M_Y + M_g \end{aligned} \quad (2)$$

где m – масса мини-корабля; V_x – продольная скорость мини-корабля; R_X^A, R_X^G, M_Y^A, M_Y – гидро- и аэродинамические силы и моменты; J_y – момент инерции вокруг оси Y ; ω_y – угловая скорость вокруг оси Y ; F_x^u, M_y^u – управляющие сила и момент, создаваемые посредством движителей и поворотного устройства; \dot{x}_g, \dot{z}_g – производные координат центра масс мини-корабля в земной системе координат; $\dot{\varphi}$ – производная угла ориентации мини-корабля в земной системе координат.

Следующий алгоритм автопилота был разработан на основе методики, описанной в [2, 3, 4, 5] для математической модели (1, 2):

$$F_u = -M\Psi_u - F_d - \hat{F} \quad (3)$$

где $\Psi_u = \begin{bmatrix} -T_3^{-1}\Psi_{ск} \\ -(T_1T_2)^{-1}[(T_1+T_2)\dot{\Psi}_{mp} + \Psi_{mp}] \end{bmatrix}$; $\Psi_{mp} = \varphi - \varphi_3 = 0$; $\Psi_{ск} = V_x - V_3 = 0$; T_1, T_2, T_3 – постоянные времени; \hat{F}_6 –

оценки внешних возмущений.

Для оценки внешних возмущений в соответствии с [2] синтезирован следующий наблюдатель:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -Lz - LMX - L(F_u + F_d) \\ \hat{F}_6 &= z + LMX \end{aligned} \quad (4)$$

где $L = \begin{pmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \end{pmatrix}$ – коэффициенты настройки наблюдателя.

Алгоритм управления вычисляет управляющие продольную силу и момент относительно оси ординат Y: F_{ux}, M_{uy} .

Для реализации управляющих сил и моментов нужно распределить эти управления на приводы.

Рассматриваемый автономный мини-корабль имеет два движителя, работающих синхронно, и поворотное устройство, позволяющий управлять вектором тяги, как показано на рисунке 3. Таким образом, доступные каналы управления: ШИМ-сигнал управления движителями и ШИМ-сигнал управления сервоприводом поворотного устройства.

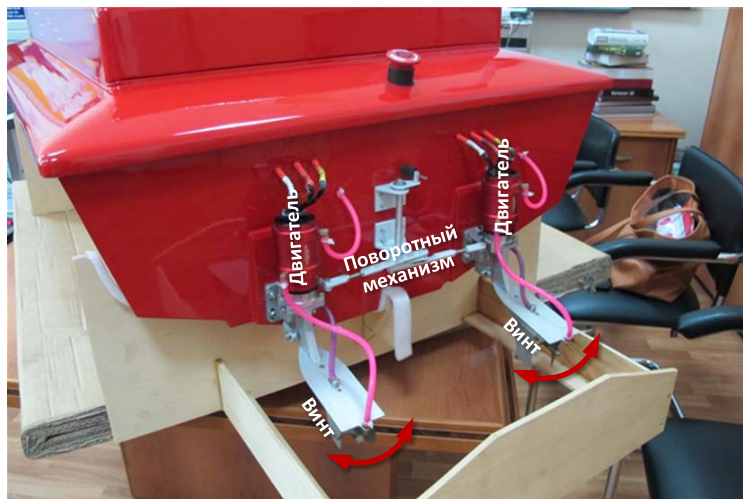


Рисунок 3. Исполнительные механизмы автономного мини-корабля

Для преобразования вектора управлений $F_u = [F_{ux}, M_{uy}]^T$ вставки исполнительных механизмов используются следующие формулы:

$$F_{uz} = M_{uy}/k$$

$$F_u = \sqrt{F_{ux}^2 + F_{uz}^2}$$

$$\alpha = -\text{atan2}(F_{uz}, F_{ux}),$$

где F_{uz} – проекция управляющей силы на поперечную ось координат, которая создает управляющий момент, F_u – модуль управляющей силы, α – угол поворота вектора тяги для создания проекций F_{ux} и F_{uz} .

Т.к. двигатели и их регуляторы, которые поставляются как готовые продукты, имеют нелинейную характеристику зависимости генерируемой тяги от ШИМ-сигнала, для адекватного управления нужно построить зависимость тяги от ШИМ-сигнала. Для этого с использованием динамометра были выполнены замеры тяги для нескольких ШИМ-сигналов во всем их диапазоне. В результате получен следующий полином, аппроксимирующий зависимость между тягой и ШИМ-сигналом:

$$PWM_{speed} = p_1 * F_u^2 + p_2 * F_u + p_3,$$

где $p_1 = -0.005466, p_2 = 1.014, p_3 = 254.3$ – коэффициенты полинома, рассчитанные посредством классического регрессионного анализа.

Аналогично, выражения для зависимости угла поворота вектора тяги и ШИМ-сигнала управления сервоприводом имеет вид:

$$PWM_{angle} = p_4 * \alpha + p_5,$$

где $p_4 = 216.6, p_5 = 336$, α задан в градусах.

Программная реализация системы управления

В качестве операционной системы бортового компьютера используется UbuntuLinux. Программное обеспечение построено на базе Robot Operating System, что позволяет реализовать слабую связанность компонентов и клиент-серверный шаблон их взаимодействия. Структура программного обеспечения системы управления показана на рисунке 4. Овалами обозначены процессы, прямоугольниками – темы (именованные каналы обмена данными между модулями).

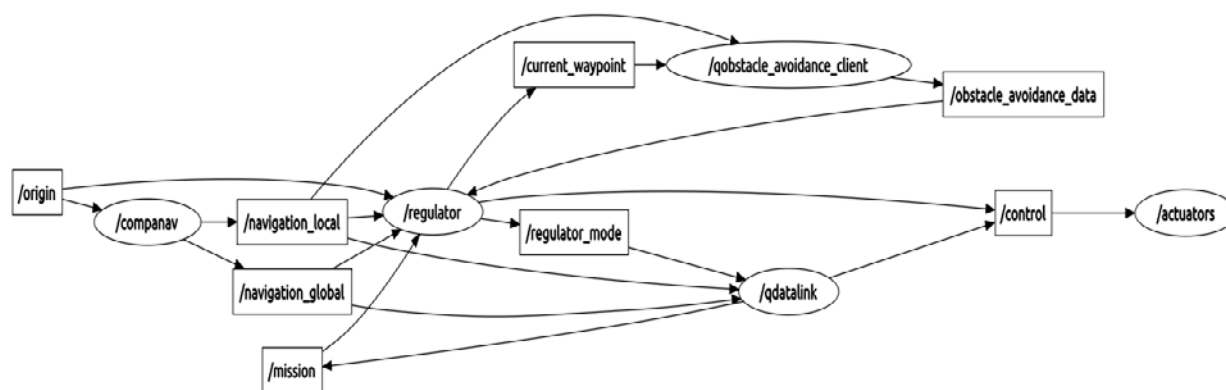


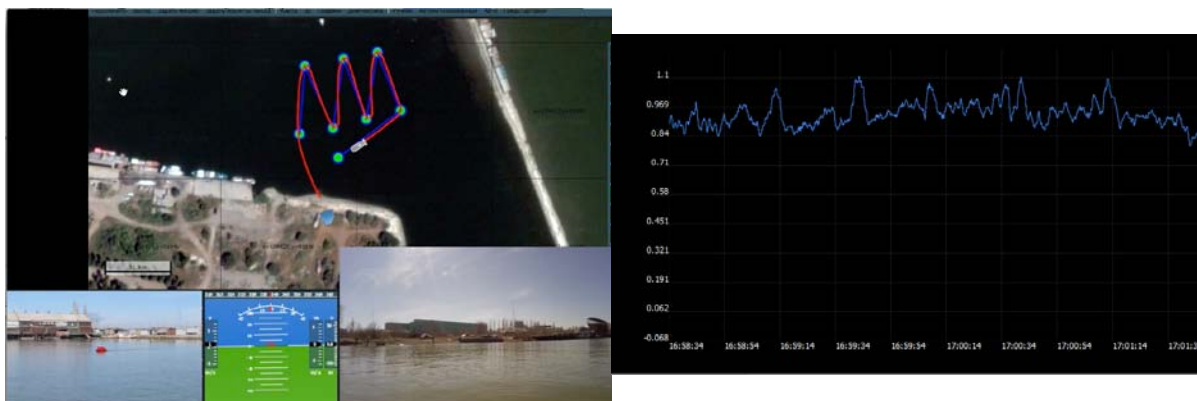
Рисунок 4. Структура программного обеспечения

Программа состоит из следующих модулей:

- модуль «/regulator» регулятора и наблюдателя внешних возмущений; Модуль регулятора и наблюдателя внешних возмущений читает навигационные данные, данные для обхода препятствий (система обхода препятствий является темой отдельной статьи), заданный режим работы, данные миссии и рассчитывает управляющие воздействия, публикуя их затем в соответствующий именованный канал (тема);
- модуль «/companav» интерфейса интегрированной навигационной системы; Модуль интерфейса интегрированной навигационной системы осуществляет чтение и декодирование пакетов навигационной системы, преобразует координаты в локальную систему и публикует полученные данные в соответствующий именованный канал (тема);
- модуль «/actuators» интерфейса блока управления исполнительными механизмами; Модуль интерфейса блока управления исполнительными механизмами осуществляет чтение управляющих воздействий, рассчитанных модулем регулятора, либо полученных модулем обмена с пунктом управления, формирует пакет и отправляет его по последовательному порту в блок управления исполнительными механизмами;
- модуль «/qdatalink» обмена данными с пунктом управления; Модуль обмена данными с пунктом управления осуществляет обмен данными с программным обеспечением пункта управления – передает на пункт управления телеметрическую информацию, загружает на борт миссию и получает команды дистанционного управления;
- модуль «/qobstacle_avoidance_client» обмена данными с системой обхода препятствий. Модуль обмена данными с системой обхода препятствий передает навигационные данные и данные о миссии и получает данные для обхода препятствия; система обхода препятствий является темой отдельной статьи.

Эксперименты

Результаты автономного выполнения миссии показаны на рисунке 5. С наземного пункта управления были заданы 8 путевых точек, как показано на рисунке 5а. Миссия состоит в последовательном прохождении через эти точки. График скорости при прохождении миссии показан на рисунке 5б. Некоторые результаты для других миссий показаны на рисунках 5в, 5д.



а)

б)



в)



г)

Рисунок 5. Результаты экспериментов: а) наземный пункт управления при выполнении миссии; б) график скорости; в) результаты выполнения миссии 2; г) результаты выполнения миссии 3

Заключение

Система управления показала хорошие результаты. Разработанная структура системы управления, оборудование и программное обеспечение позволят проводить дальнейшие испытания с различными алгоритмами управления в более сложных средах с препятствиями.

Авторы глубоко признательны их научному руководителю профессору Вячеславу Пиихопову.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, НИР №114041540005 «Теория и методы позиционно-траекторного управления морскими роботизированными системами в экстремальных режимах и условиях неопределенности среды» по государственному заданию ВУЗам и научным организациям в сфере научной деятельности, грантами Президента Российской Федерации № НШ-3437.2014.10, МД-1098.2103.10 и грантом РФФИ 13-08-00315а.

1. Pshikhopov, V.K., Medvedev, M.Y., Gurenko, "Homing and docking autopilot design for autonomous underwater vehicle", 2014, Applied Mechanics and Materials.
2. Pshikhopov, V.Kh., Medvedev, M.Yu., Gaiduk, A.R., Gurenko, B.V., Control system design for autonomous underwater vehicle, 2013, Proceedings - 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013, doi:10.1109/LARS.2013.61.
3. Pshikhopov, V., Sergeev, N., Medvedev, M., and Kulchenko, A., "The Design of Helicopter Autopilot," SAE Technical Paper 2012-01-2098, 2012, doi:10.4271/2012-01-2098.
4. Pshikhopov, V., Medvedev, M., Kostjukov, V., Fedorenko, R., Gurenko, B., Krukhmalev, V. "Airship Autopilot Design", SAE Technical Paper 2011-01-2736, 2011, doi:10.4271/2011-01-2736.
5. Pshikhopov, V.Kh., Krukhmalev, V.A., Medvedev, M.Yu., Budko, A.Yu., Chufistov, V.M., Adaptive control system design for robotic aircrafts, 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013, doi:10.1109/LARS.2013.59.
6. Pshikhopov, V.Kh., Medvedev, M.Yu., Block design of robust control systems by direct Lyapunov method, 2011, IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.00006.
7. Pshikhopov, V.Kh., Ali, A.S., Hybrid motion control of a mobile robot in dynamic environments, 2011, IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2011 – Proceedings.
8. Pshikhopov, V.Kh., Medvedev, M.Yu, Robust control of nonlinear dynamic systems, 2010, IEEE ANDESCON Conference Proceedings, ANDESCON 2010.

Рецензенты:

Юханов Ю.В., д.т.н., зав. кафедрой АиРПУ, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;

Финаев В.И., д.т.н., зав. кафедрой САУ, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону.