

РОБАСТНАЯ СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО МАКЕТА НАДВОДНОГО СУДНА

С. М. ВЛАСОВ, О. И. БОРИСОВ, В. С. ГРОМОВ,
А. А. ПЫРКИН, А. А. БОБЦОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a.pyrkin@gmail.com*

Представлена робототехническая установка, предназначенная для моделирования движения надводного судна с целью апробации алгоритмов управления системой динамического позиционирования и системой компенсации внешних возмущений. Проанализирована математическая модель робототехнической системы, выполнена декомпозиция многоканальной модели робота на статическую функцию и независимые динамические каналы с одним входом и одним выходом. Разработана робастная система динамического позиционирования судна на основе закона управления „последовательный компенсатор“. Приведены результаты экспериментальных исследований.

***Ключевые слова:** робастное управление, параметрическая неопределенность, система динамического позиционирования, надводное судно, робототехнические системы, последовательный компенсатор.*

Введение. Одной из интересных и актуальных прикладных задач теории управления является разработка систем динамического позиционирования [1—4]. Такие системы применяются, в частности, для автоматического управления надводными судами. В комбинации с алгоритмом планирования пути они могут использоваться для осуществления движения судна по заданным маршрутам без непосредственного участия человека, например при курсировании между портами. Для уменьшения риска выхода из строя реального судна предлагается использовать специальную недорогую робототехническую установку, оснащенную системой технического зрения, с возможностью исследования эффективности различных регуляторов.

В настоящей статье представлена робастная система динамического позиционирования для роботизированного макета надводного судна и результаты ее апробации. Приведено решение задачи стабилизации заданных координат и ориентации макета с некоторой точностью, проведено компьютерное моделирование. Также решена задача слежения за командным сигналом с целью удержания макета на маршруте. Представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных на робототехнической установке моделирования движения надводного судна.

Робототехническая установка. Основным элементом робототехнической установки, функциональная схема которой представлена на рис. 1, является роботизированный макет судна с тремя исполнительными приводами: основной двигатель и два подруливающих устройства туннельного типа на корме и носу. В оснастку робота также входят аккумулятор и три печатные платы: на первой расположены входные порты, главный микроконтроллер,

стабилизаторы напряжения и выпрямитель электропитания; на второй — модуль беспроводной связи и блок преобразователя сигнала; третья плата полностью состоит из трех драйверов приводов робота, которые получают обрабатываемый вспомогательным микроконтроллером сигнал с широтно-импульсной модуляцией. Затем через блок полевых транзисторов соответствующее напряжение подается на исполнительные приводы. Помимо этого, в состав установки входят бассейн, представляющий собой рабочую область, цифровая камера, закрепленная на штативе над бассейном, джойстик для удаленного управления и компьютер. Локализация робота осуществляется с помощью указанной системы технического зрения и алгоритма обработки видеоизображения в целях получения текущих координат объекта.

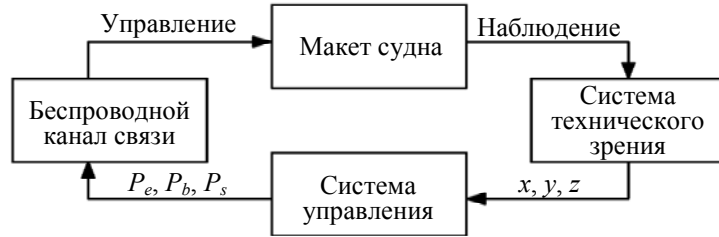


Рис. 1

Математическая модель движения макета. Рассмотрим схему расположения приводов робота, представленную на рис. 2, а, где P_e соответствует основному (продольному) двигателю, в котором также располагается руль, P_b и P_s соответствуют подруливающим устройствам (носовому и кормовому).

Для синтеза алгоритма управления рассматриваемой робототехнической системой выполним декомпозицию нелинейной динамической модели на три составляющие: статическую функцию и независимые динамические каналы с одним входом и одним выходом [4, 5]. Каждый из каналов соотнесем с соответствующими регулируемым переменными x, y и z . Введем виртуальные сигналы управления, действующие на судно (рис. 2, б): обобщенные силы (упоры) P_x, P_y и момент вращения судна M_z , которые являются суперпозицией всех движущих сил исполнительных приводов P_e, P_b и P_s .

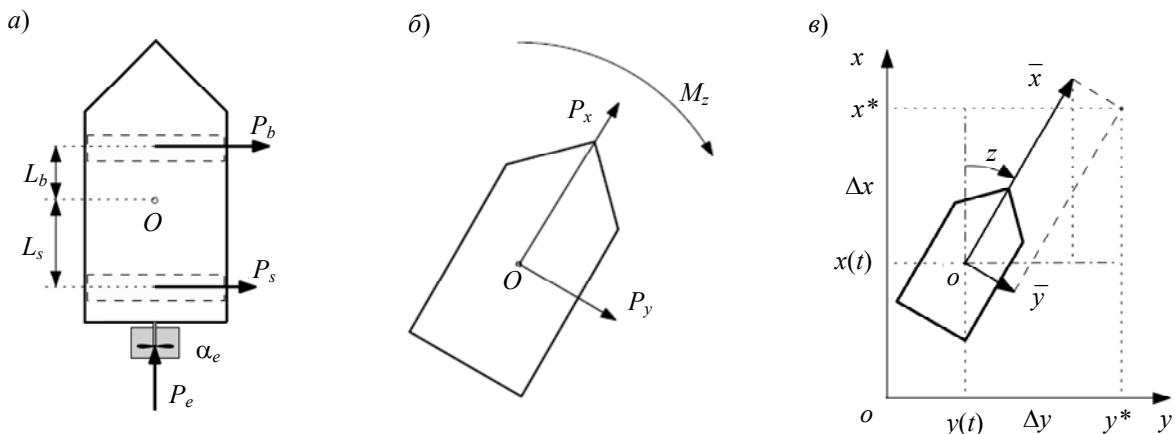


Рис. 2

Уравнения для сил, прилагаемых к центру масс O макета, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} P_x &= P_e; \\ P_y &= P_b + P_s; \\ M_z &= -\alpha_e P_e L_e + P_b L_b - P_s L_s, \end{aligned} \right\}$$

где L_e — расстояние от центра масс до основного двигателя; L_b и L_s — расстояние от центра масс до носового и кормового подруливающих устройств соответственно; α_e — угол рулевого устройства.

Помимо абсолютной (неподвижной) системы координат $oxyz$, введем в рассмотрение локальную (подвижную) — $o\bar{x}\bar{y}\bar{z}$, жестко связанную с судном (рис. 2, в). Необходимо осуществить преобразование координат из одной системы в другую, с учетом их поворота и линейного смещения друг относительно друга:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos z & -\sin z \\ \sin z & \cos z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix},$$

где x_0, y_0 — координаты начальной точки; \bar{x} и \bar{y} — смещения соответственно в продольном и поперечном направлениях в локальной системе координат.

Модель динамических каналов робототехнической системы может быть достаточно сложной для некоторых типов судов, но в общем случае ее можно представить следующим выражением:

$$y(t) = \frac{b(p)}{a(p)}u(t) + \frac{g(p)}{a(p)}\omega(t),$$

где $y(t)$ — регулируемая переменная, доступная измерению; $p = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования; $a(p) = p^n + \dots + a_1p + a_0$, $b(p) = b_m p^m + \dots + b_1p + b_0$, $g(p) = g_r p^r + \dots + g_1p + g_0$ — полиномы с неизвестными коэффициентами, причем $b(p)$ гурвицев, $b_m > 0$ и $r \leq n-1$; относительная степень передаточной функции $\frac{b(p)}{a(p)}$ предполагается известной и для рассматриваемого объекта принимается равной $\rho = n - m = 2$; нелинейная функция $\omega(t) = \varphi(y(t))$ удовлетворяет условию $|\varphi(y)| \leq C_0 |y| \quad \forall y$, где C_0 — неизвестный параметр.

Синтез закона управления. Разработка алгоритма управления выполняется в два этапа. Сначала синтезируются виртуальные входные сигналы P_x, P_y и M_z для каждого динамического канала, для чего используется метод „последовательного компенсатора“, описанный в работах [6—8], с фиксированными параметрами регулятора. На следующем этапе необходимо распределить нагрузку между приводами судна, рассчитав сигналы управления P_e, P_b и P_s , которые после введения на них ограничений и цифрового кодирования будут подаваться на соответствующие приводы корабля.

Для стабилизации динамических каналов рассматриваемой системы используем следующие алгоритмы для виртуальных управляющих сигналов P_x, P_y и M_z :

$$\begin{aligned} P_x &= k_x (\xi_x + \dot{\xi}_x), \dot{\xi}_x = \sigma_x (-\xi_x + \bar{x}); \\ P_y &= k_y (\xi_y + \dot{\xi}_y), \dot{\xi}_y = \sigma_y (-\xi_y + \bar{y}); \\ M_z &= k_z (\xi_z + \dot{\xi}_z), \dot{\xi}_z = \sigma_z (-\xi_z + z^* - z(t)), \end{aligned}$$

где $k_x, k_y, k_z, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — фиксированные настроечные коэффициенты, которые могут быть выбраны независимо от параметров объекта; смещения \bar{x} и \bar{y} вычисляются в соответствии со следующим выражением:

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos z & \sin z \\ -\sin z & \cos z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x^* - x(t) \\ y^* - y(t) \end{bmatrix}.$$

На выходе „последовательного компенсатора“ формируются виртуальные сигналы управления P_x , P_y и M_z . Движение по оси x будем регулировать основным двигателем, кормовое подруливающее устройство будет выполнять позиционирование по оси y . Носовое подруливающее устройство будет на 75 % выполнять задачу по вращению и на 25 % — по позиционированию вдоль оси y , что необходимо ввиду специфики размещения приводов в работе. Распределитель упоров описывается следующим образом:

$$P_e = P_x, P_s = P_y, P_b = 0,75 \frac{M_z}{L_b} + 0,25 P_y.$$

Экспериментальные исследования. Апробация робастной системы динамического позиционирования роботизированного макета судна включает следующие этапы:

- организация системы технического зрения робототехнической системы;
- обработка видеоизображения с целью определения текущих координат объекта [9];
- преобразование координат по продольному и поперечному каналам из абсолютных в локальные;
- вычисление параметров закона управления типа „последовательный компенсатор“ для каждого из каналов системы и их дискретизация (время дискретизации $T_s = 0,25$ с);
- расчет управляющих воздействий упоров на исполнительные приводы судна;
- экспериментальная апробация, анализ, отладка.

Алгоритм определения координат корабля заключается в поиске на темном фоне белого прямоугольника, соответствующего контуру объекта. Далее определяется его геометрический центр и соответственно текущие координаты по осям x и y . Определение ориентации судна на плоскости осуществляется с помощью красной метки на носовой части, после чего можно определить угол между продольной осью корабля и осью x . На выходе распределителя упоров формируются сигналы управления, которые преобразуются в цифровой формат целочисленных значений на интервале $[-127; 127]$ и затем передаются макету судна по беспроводному каналу связи [10]. В ходе экспериментальных исследований на робототехнической установке получены следующие результаты по определению желаемого положения и ориентации макета и параметров регулятора: $x^* = 0,48$ м, $y^* = 0,36$ м, $z^* = 0$, $k_x = 2$, $k_y = 3$, $k_z = 12$, $\sigma_x = 10$, $\sigma_y = 10$, $\sigma_z = 7$.

На рис. 3 показаны графики переходных процессов для одноканального режима, т.е. когда активен только один динамический канал системы.

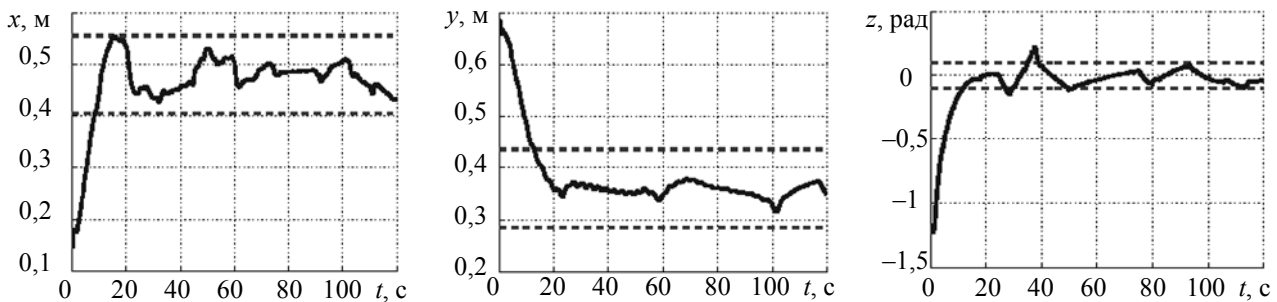


Рис. 3

Графики изменения координат судна для многоканального режима представлены на рис. 4, а, а на рис. 4, б показан путь следования макета судна в заданную область. Анализируя

результаты эксперимента, можно сделать вывод, что координаты судна удалось свести в заданную область Δ_i , $i = \{x, y, z\}$ (отмечена пунктиром).

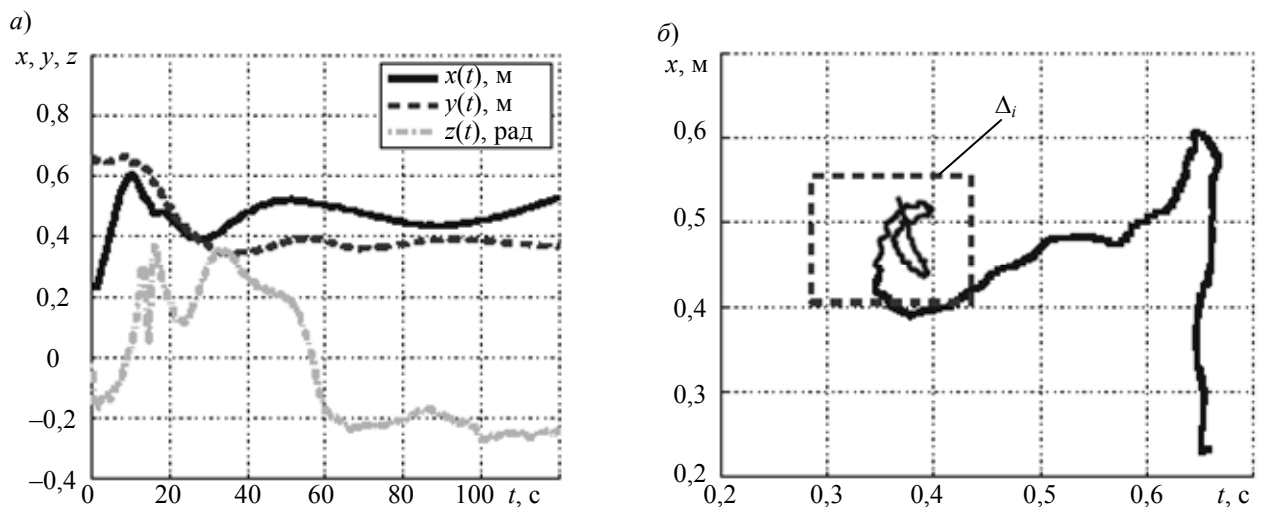


Рис. 4

Заключение. Представлена робототехническая установка, предназначенная для апробации различных алгоритмов управления, в том числе системой динамического позиционирования. Разработана робастная система динамического позиционирования макета надводного судна. Перспективным направлением является исследование простых адаптивных алгоритмов управления [8, 11—15] для решения задачи динамического позиционирования макета судна в заданной точке.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (гос. задание 2014/190, проект 2118; субсидия 074-U01, проект 14.Z50.31.0031).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fossen T. I. Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Trondheim: Marine Cybernetics, 2002.
2. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons Ltd., 2011.
3. Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Kolyubin S. A., Surov M. O., Vedyakov A. A., Feskov A. D., Vlasov S. M., Krasnov A. Y., Borisov O. I., Gromov V. S. Dynamic positioning system for nonlinear MIMO plants and surface robotic vessel // Proc. of the 7th IFAC Conf. on Modelling Manag. and Control. 2013. Vol. 7, N 1. P. 1867—1872.
4. Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Kolyubin S. A. Output controller for nonlinear and MIMO systems with delay // Proc. of the 21st Mediterranean Conf. on Control and Automation. 2013. P. 1063—1068.
5. Пыркин А. А., Мальцева Т. А., Лабадин Д. В., Суров М. О., Бобцов А. А. Синтез системы управления квадрокоптером с использованием упрощенной математической модели // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 4. С. 47—51.
6. Бобцов А. А. Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. 2002. № 11. С. 108—117.
7. Бобцов А. А., Николаев Н. А. Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова // Автоматика и телемеханика. 2005. № 1. С. 118—129.
8. Bobtsov A. A note to output feedback adaptive control for uncertain system with static nonlinearity // Automatica. 2005. Vol. 41, N 12. P. 1277—1280.

9. Фаронов М. В., Пыркин А. А., Фуртат И. Б., Колюбин С. А., Суров М. О., Ведяков А. А. Робастное управление мобильными роботами с использованием технического зрения // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 12. С. 63—65.
10. Шаветов С. В., Ведяков А. А., Пыркин А. А. Архитектура системы удаленного управления робототехническими объектами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 161—163.
11. Fradkov A. L. Synthesis of adaptive system of stabilization of linear dynamic plants // Automation and Remote Control. 1974. Vol. 35, N 12. P. 1960—1966.
12. Barkana I. Parallel Feedforward and Simplified Adaptive Control // Intern. J. of Adaptive Control and Signal Processing. 1987. Vol. 1, N 2. P. 95—109.
13. Andrievsky B. R., Fradkov A. L., Kaufman H. Necessary and sufficient conditions for almost strict positive realness and their application to direct implicit adaptive control systems // Proc. of the Amer. Control Conf. 1994. Vol. 2. P. 1265—1266.
14. Kaufman H., Barkana I., Sobel K. S. Direct Adaptive Control Algorithms — Theory and Applications. N. Y.: Springer, 1998.
15. Barkana I. Comment on design of strictly positive real systems using constant output feedback // IEEE Trans. on Automatic Control. 2004. Vol. 49, N 10. P. 2091—2093.

Сведения об авторах

- | | |
|-----------------------------------|--|
| Сергей Михайлович Власов | — Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; инженер; E-mail: vlasov.serge.m@gmail.com |
| Олег Игоревич Борисов | — Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; инженер; E-mail: oleg.borisow@gmail.com |
| Владислав Сергеевич Громов | — Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; инженер; E-mail: object253@yandex.ru |
| Антон Александрович Пыркин | — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: a.pyrkin@gmail.com |
| Алексей Алексеевич Бобцов | — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: bobtsov@mail.ifmo.ru |

Рекомендована кафедрой
систем управления и информатики

Поступила в редакцию
22.04.15 г.

Ссылка для цитирования: Власов С. М., Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А., Бобцов А. А. Робастная система динамического позиционирования для роботизированного макета надводного судна // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 9. С. 713—719.

**ROBUST SYSTEM OF DYNAMIC POSITIONING
FOR ROBOTIZED MODEL OF SURFACE CRAFT**

**S. M. Vlasov, O. I. Borisov, V. S. Gromov,
A. A. Pyrkin, A. A. Bobtsov**

*ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: a.pyrkin@gmail.com*

A robotic setup for surface craft movement modeling is presented. The setup is used for testing of algorithms of control over dynamic positioning and external disturbances effects compensation systems. Mathematical model of the robotic system is analyzed; the multi-channel model is decomposed to separate a static function and independent single input — single output dynamic channels. A robust system for dynamic positioning of the craft based on consequent compensation control law is developed. Results of experimental study are demonstrated.

Keywords: robust control, parametric uncertainty, dynamic positioning system, surface craft, robotic system, consequent compensation.

Data on authors

- Sergey M. Vlasov** — ITMO University; Department of Computer Science and Control Systems; Engineer; E-mail: vlasov.serge.m@gmail.com
- Oleg I. Borisov** — ITMO University; Department of Computer Science and Control Systems; Engineer; E-mail: oleg.borisov@gmail.com
- Vladislav S. Gromov** — ITMO University; Department of Computer Science and Control Systems; Engineer; E-mail: object253@yandex.ru
- Anton A. Pyrkin** — PhD, Associate Professor; ITMO University; Department of Computer Science and Control Systems; E-mail: a.pyrkin@gmail.com
- Alexey A. Bobtsov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Computer Science and Control Systems; E-mail: bobtsov@mail.ifmo.ru

For citation: Vlasov S. M., Borisov O. I., Gromov V. S., Pyrkin A. A., Bobtsov A. A. Robust system of dynamic positioning for robotized model of surface craft // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 9. P. 713—719 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-9-713-719