

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 22

2021

№ 12

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:

БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.

ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.

ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:

АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН

БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН

ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН

ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН

КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН

КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН

КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН

ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН

РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН

СЕБЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН

СИГОВ А. С., акад. РАН

СОЙФЕР В. А., акад. РАН

СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН

ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН

ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН

ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН

ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН

ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:

DORANTES D. J., PhD, Турция

GROUMPOS P. P., PhD, Греция

ISIDORI A., PhD, Италия

KATALINIC B., PhD, Австрия

LIN CH.-Y., PhD, Тайвань

MASON O. J., PhD, Ирландия

ORTEGA R. S., PhD, Франция

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США

STRZELECKI R. M., PhD, Польша

SUBUDHI B. D., PhD, Индия

АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан

ГАРАЩЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина

БОБЦОВ А. А., д.т.н.

БУКОВ В. Н., д.т.н.

ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.

ЖУКОВ И. А., д.т.н.

ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.

КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.

ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.

ЛОХИН В. М., д.т.н.

МАГОМЕДОВ М. Х., д.ф.-м.н.

ПУТОВ В. В., д.т.н.

ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.

РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.

СЕРГЕЕВ С. Ф., д.п.с.н.

ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.

ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.

ФУРСОВ В. А., д.т.н.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:

АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Bykovtsev Y. A., Lokhin V. M. Estimation of the Accuracy of a Control System with a Fuzzy PID Controller Based on the Approximation of the Static Characteristic of the Controller ... 619

Зуев А. В., Жирабок А. Н., Филаретов В. Ф., Проценко А. А. Идентификация дефектов в нестационарных системах на основе скользящих наблюдателей ... 625

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Волкова М. А., Романов А. М., Романов М. П. Распределенная система локализации объектов в рабочей зоне модульного реконфигурируемого мобильного робота ... 634

Бельченко Ф. М., Ермолов И. Л. Новый подход к преобразованию перспективы изображений в системах телеметрии роботов ... 638

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Нечеткая модель ситуационного управления параметрами полета автономного беспилотного летательного аппарата в условиях неопределенности ... 644

Косьянчук В. В., Зыбин Е. Ю., Гласов В. В., Тань Л. Непараметрический метод прогнозирования траектории движения активно маневрирующего судна посадки беспилотного летательного аппарата ... 660

УКАЗАТЕЛЬ статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2021 г. ... 671

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в МНБД Scopus и RSCI (на платформе Web of Science).

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 22

2021

No. 12

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427 (Print) ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.
PODURAEV Yu. V.
YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.
BOLOTNIK N. N.
CHENTSOV A. G.
CHERNOUSKO F. L.
FEDOROV I. B.
KALYAEV I. A.
KURZHANSKI A. B.
KUZNETSOV N. A.
PESHEKHONOV V. G.
REZCHIKOV A. F.
SCHERBATYUK A. F.
SEBRYAKOV G. G.
SIGOV A. S.
SOJFER V. A.
SOLOMENTSEV Yu. M.
VASSILYEV S. N.
YUSUPOV R. M.
ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan
DORANTES D. J., PhD, Turkey
GARASCHENKO F. G., Ukraine
GROUMPOS P. P., PhD, Greece
ISIDORI A., PhD, Italy
KATALINIC B., PhD, Austria
LIN CH.-Y., PhD, Taiwan
MASON O. J., PhD, Ireland
ORTEGA R. S., PhD, France
SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA
STRZELECKI R. M., PhD, Poland
SUBUDHI B. D., PhD, India
BOBTSOV A. A.
BUKOV V. N.
ERMOLOV I. L.
FILARETOV V. F.
FRADKOV V. L.
FURSOV V. A.
ILYASOV B. G.
KOROSTELEV V. F.
LEBEDEV G. N.
LOKHIN V.M.
MAGOMEDOV M. Kh.
PUTOV V. V.
PSHIKHOPOV V. Kh.
RAPOPORT E. Ya.
SERGEEV S. F.
ZHUKOV I. A.

Editorial Staff:

BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and prospective development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

- Bykovtsev Y. A., Lokhin V. M.** Estimation of the Accuracy of a Control System with a Fuzzy PID Controller Based on the Approximation of the Static Characteristic of the Controller . . 619
- Zuev A. V., Zhirabok A. N., Filaretov V. F., Protsenko A. A.** Fault Identification in Non-Stationary Systems Based on Sliding Mode Observers 625

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Volkova M. A., Romanov A. M., Romanov M. P.** Distributed System for Objects Localization in the Working Area of a Modular Reconfigurable Mobile Robot 634
- Belchenko F. M., Ermolov I. L.** A New Approach to Images' Perspective Transformation in Robotics Telemetry 638

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

- Melekhin V. B., Khachumov M. V.** Fuzzy Model of Situational Control of the Flight Parameters of an Autonomous Unmanned Aircraft under Uncertainty Conditions 644
- Kosyanchuk V. V., Zybin E. Yu., Glasov V. V., Tan L.** Nonparametric Method for Predicting the Trajectory of an Actively Maneuvering Vessel for Unmanned Aerial Vehicle Landing 660

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

Y. A. Bykovtsev, bykovcev@mirea.ru, **V. M. Lokhin**, lokhin@mirea.ru,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"MIREA — Russian Technological University", Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: **Bykovtsev Y. A.**, Graduate Student, Assistant, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA—Russian Technological University", Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: bykovcev@mirea.ru

Accepted on October 15, 2021

Estimation of the Accuracy of a Control System with a Fuzzy PID Controller Based on the Approximation of the Static Characteristic of the Controller

Abstract

The problem of estimating the accuracy of an automatic control system with a fuzzy PID controller is solved. To describe a fuzzy controller, its static characteristic is used, which is approximated by two piecewise-linear and one piecewise-constant sections. This approach makes it possible to study the system as a linear one at each section of the approximated characteristic, and accordingly develop the calculation methods known in control engineering, taking into account the features of the system under consideration. In the article, to calculate the error in the steady state, the theorem on the final value of the original is used. For two different types of second-order control objects — static and astatic — on the basis of this theorem, analytical expressions are obtained that relate the accuracy of the control system with the values of the target and disturbance with a different structure of the controller (P-, PI-, PD-). When conducting experimental studies, the fuzzy PID controller was compared with a linear one tuned by the method of the maximum stability. Research results show that a fuzzy controller ensures the accuracy of the control system is not worse than a linear one, while increasing the dynamics of the system. The analytical expressions presented in the article make it possible to assess the accuracy of a control system with a fuzzy controller and can be used as a technique for adjusting the controller based on the accuracy requirements.

Keywords: PID controller, fuzzy controller, error rate method, control system accuracy, final value theorem

For citation:

Bykovtsev Y. A., Lokhin V. M. Estimation of the Accuracy of a Control System with a Fuzzy PID Controller Based on the Approximation of the Static Characteristic of the Controller, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no.12, pp. 619—624.

DOI: 10.17587/mau.22.619-624

УДК 004.05; 681.515

DOI: 10.17587/mau.22.619-624

Ю. А. Быковцев, аспирант, bykovcev@mirea.ru, **В. М. Лохин**, д-р техн. наук, проф., lokhin@mirea.ru,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"МИРЭА—Российский технологический университет", Москва

Оценка точности системы управления с нечетким ПИД регулятором на основе аппроксимации статической характеристики регулятора

Решается задача оценки точности системы автоматического управления с нечетким ПИД регулятором. Для описания нечеткого регулятора используется его статическая характеристика, которая аппроксимируется двумя кусочно-линейными и одним кусочно-постоянным участками. Такой подход позволяет на каждом участке аппроксимированной характеристики исследовать систему как линейную и соответственно развивать известные в ТАУ методы расчета с учетом особенностей рассматриваемой системы. В статье для расчета ошибки в установившемся режиме используется теорема о конечном значении оригинала. Для двух различных типов объектов управления второго порядка — статического и астатического — на основе данной теоремы получены аналитические выражения, связывающие точность системы управления со значениями задающих и возмущающих воздействий при разной структуре регулятора (П, ПИ, ПД). При проведении экспериментальных исследований нечеткий ПИД регулятор сравнивался с линейным, настроенным по методу максимальной степени устойчивости. Результаты исследований показывают, что нечеткий регулятор позволяет обеспечить точность системы управления не хуже, чем линейный, при этом повысить динамику системы. Представленные в статье аналитические выражения позволяют оценить точность системы управления с нечетким регулятором и могут выступить в качестве методики настройки регулятора исходя из требований точности.

Ключевые слова: ПИД регулятор, нечеткий регулятор, метод коэффициентов ошибок, точность системы управления, теорема о конечном значении

Introduction

In the past two decades, against the background of a fairly active use of fuzzy controllers (FCs) in various models of civil and special-purpose equipment, the number of papers devoted to the dynamics of automation control system (ACS) with FCs has increased: the issues of stability and periodic oscillations are investigated on the basis of the application of modifications of ∂V . M. Popov and the second Lyapunov method, the harmonic balance method, the phase plane, etc. [1–4, 7]. At the same time, it is obvious that against the background of these works, which are important for understanding processes in fuzzy ACS and solving problems of synthesis of fuzzy controllers from the standpoint of stability, there has been a lag in the study of such natural problems for ACS as the accuracy and quality of transient processes. Naturally, the solution of the problems of assessing the quality of transient processes can be realized indirectly on the basis of the obtained solutions in the field of stability [4, 5]. However, the problem of estimating the accuracy remains essentially unsolved. This article presents the results of studies to estimate the accuracy of ACS with FC.

Problem formulation of calculating the accuracy of a fuzzy control system

Fig. 1 shows a block diagram of the ACS under consideration, consisting of a controller with a transfer function W_{ctrl} , a control object (linear part) described by a transfer function W_{co} , g is a target, f is a disturbance.

Within the framework of this article, the main idea of which is to study the accuracy in a steady state, two fundamentally different second-order control objects are considered — a static one with a transfer function $W_{co}^{st}(s) = \frac{K_{co}^{st}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ and astatic with the transfer function $W_{co}^{ast}(s) = \frac{K_{co}^{ast}}{s(Ts + 1)}$. As

for the controllers, for convenience of comparison in the basic version, a linear PID controller with coefficients K_p , K_i , K_d will be used, and a fuzzy PID will be used as a fuzzy controller [6, 9].

In a system with a linear controller, due to the principle of superposition, the error in the steady-state mode is expressed by the sum of errors from the target

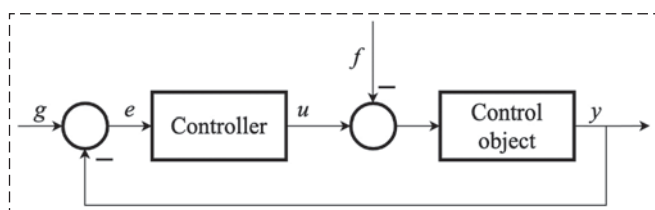


Fig. 1. Block diagram of the considered ACS

Table 1

Components of a system error with a static object

Controller	Target		Disturbance	
	Constant ($g = \text{const}$)	Linear ($g = K_g t$)	Constant ($f = \text{const}$)	Linear ($f = K_f t$)
P	$g \frac{1}{1 + K_{co}^{st} K_p}$	∞	$f \frac{K_{co}^{st}}{1 + K_{co}^{st} K_p}$	∞
PD	$g \frac{1}{1 + K_{co}^{st} K_p}$	∞	$f \frac{K_{co}^{st}}{1 + K_{co}^{st} K_p}$	∞
PI	0	$K_g \frac{1}{K_{co}^{st} K_i}$	0	$K_f \frac{1}{K_i}$

Table 2

Components of a system error with a astatic object

Controller	Target		Disturbance	
	Constant ($g = \text{const}$)	Linear ($g = K_g t$)	Constant ($f = \text{const}$)	Linear ($f = K_f t$)
P	0	$K_g \frac{1}{K_{co}^{ast} K_p}$	$f \frac{1}{K_p}$	∞
PD	0	$K_g \frac{1}{K_{co}^{ast} K_p}$	$f \frac{1}{K_p}$	∞
PI	0	0	0	$K_f \frac{1}{K_i}$

and disturbance, and the values of errors are determined on the basis of the well-known method of error rates. Tables 1 and 2 present expressions for calculating the terms of the steady-state error in systems with linear PID controllers and two types of control objects.

A fuzzy PID controller can be constructed according to any of the known methods of fuzzy inference (Mamdani, Sugeno, Larsen, Tsukamoto) [6]. But at the same time, if we use the traditional (recommended in many literary sources) approach to constructing a fuzzy model of a controller with a uniform distribution of membership functions (MF), then there will be no fundamental difference between linear and fuzzy controllers. Specific nonlinear properties of FC are manifested if we move away from uniform distribution, moving apart from the center the membership function of input and output terms [5]. In this case, the static characteristic of the FC takes the form of curve 1 in Fig. 2. This characteristic allows us to understand the specifics and prospects of the formation of nonlinear control actions in the FC, but does not simplify the procedure for further research. To solve this problem, an approach based on the approximation of the static characteristic of the FC in the form of two piecewise linear sections and one piecewise constant section turns out to be quite effective (Fig. 2, curve 2). This approach makes it possible to study the system as a linear one at each section of the approximated characteristic, and accordingly develop the calculation methods known in control engineering, taking into account the features of the system under consideration.

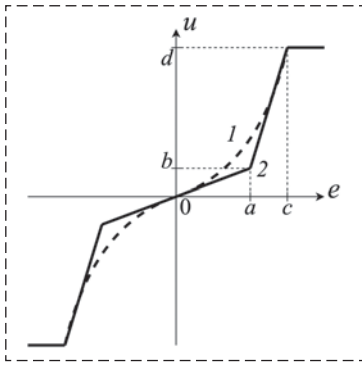


Fig. 2. Static characteristic of FC

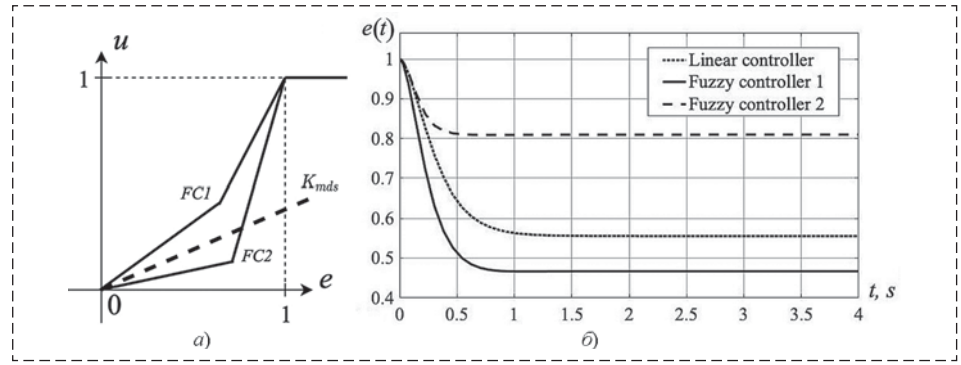


Fig. 3. Static characteristics of FC (a) and transient processes in a system with a static object (b)

Naturally, the parameters of the approximated characteristic: a , b , c and d are completely determined by the initial parameters of the FC (type, number and location of input and output membership functions, the rule base, etc.), but (unlike them) are understandable for specialist in control engineering and quite constructive for solving problems of estimating the accuracy and quality of ACS.

Indeed, when determining the parameters of the static characteristics of the FC, the engineer needs to find a compromise between the quality indicators of the ACS. Changes in the gains in different sections of the static characteristic $\left(K_1 = \frac{b}{a}, K_2 = \frac{d-b}{c-a}\right)$, just like the boundaries of these sections, are reflected in the change in both the accuracy and the dynamics of the system. As an example, in Fig. 3 shows the static characteristics of two fuzzy controllers (FC1 and FC2) with different arrangement of the membership functions of the input terms, as well as the characteristic (transfer coefficient) of the linear controller K_{mds} , which is optimal in terms of stability. Fig. 3, b shows transient processes in a static system with appropriate controllers. It can be seen from the figure that an increase in the gain K_1 (during the transition from FC2 to FC1) leads to an increase in the accuracy of the control system (in comparison with a linear controller). Achieving the same accuracy in a system with a linear controller is possible by increasing the gain, which does not meet the requirements for the maximum stability. In turn, the FC is devoid of this drawback and makes it possible to increase the speed of the ACS at the same time ensuring the specified accuracy.

The advantages shown in the given example of using the FC together with the proposed approach to the analysis based on the approximated characteristic create the prerequisites for the study of this type of controllers both from the standpoint of assessing the dynamics and control accuracy. In this article, the emphasis is placed on the problem of assessing the accuracy of an ACS with an FC and the development of convenient analytical relationships suitable both for calculating the steady-state error and for synthesizing a FC for a given accuracy.

Calculation of the steady-state error in a fuzzy control system

In linear systems, the transition to the limit on the error transfer function (final value theorem) is used to calculate the error in the steady state. In an ACS with FC, due to the nonlinearity of the static characteristic, such a calculation should be carried out taking into account the location of the operating point corresponding to the steady state, on the FC characteristic, for each approximated section, with respect to the range of values of target and disturbance. Analytical expressions for piecewise linear sections of the transformation $u(e)$ of the FC can be written in the form

$$\begin{cases} u = K_n(e - e_n) + u_n, \\ K_n = \frac{u_{n+1} - u_n}{e_{n+1} - e_n}, \end{cases}$$

where $(u_n; e_n)$ and $(u_{n+1}; e_{n+1})$ — are the left and right boundaries of the area under consideration.

For the considered version of the approximated static characteristic, taking into account the introduced designations, the input-output function of the FC has the form (Fig. 2)

$$u(e) = \begin{cases} d, & e \geq c, \\ K_2(e - a) + b, & a \leq e \leq c, \\ K_1e, & -a \leq e \leq a, \\ K_2(e - a) + b, & -c \leq e \leq -a, \\ -d, & e \leq -c, \end{cases}$$

where $K_1 = \frac{b}{a}$, $K_2 = \frac{d-b}{c-a}$.

Using the example of a system with a static object and a fuzzy P-controller, we will show the sequence for calculating the accuracy of the ACS. Based on the structural scheme, an expression for the control signal has the form

$$\begin{aligned} u(s) = g(s) \frac{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{K_{co}^{st}} + \\ + f(s) - e \frac{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{K_{co}^{st}}. \end{aligned}$$

Substituting the corresponding value $u(s)=\mathcal{L}\{u(e)\}$ for each section of the approximated static characteristic, we obtain the transfer function of the error from the target and disturbance. The steady state error value is determined from the original final value theorem:

$$e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{g(t)}{s} \frac{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + K_1 K_{co}^{st}} + \frac{f(t)}{s} \frac{K_{co}^{st}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + K_1 K_{co}^{st}} \right] =$$

$$= g \frac{1}{1 + K_{co}^{st} K_1} + f \frac{K_{co}^{st}}{1 + K_{co}^{st} K_1}, \quad (1)$$

$$e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{g(t)}{s} \frac{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + K_2 K_{co}^{st}} + \frac{f(t)}{s} \frac{K_{co}^{st}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + K_2 K_{co}^{st}} + \frac{s}{s} \frac{K_{co}^{st}(K_2 a - b)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + K_2 K_{co}^{st}} \right] =$$

$$= g \frac{1}{1 + K_{co}^{st} K_2} + f \frac{K_{co}^{st}}{1 + K_{co}^{st} K_2} + \frac{K_{co}^{st}(K_2 a - b)}{1 + K_{co}^{st} K_2}. \quad (2)$$

It is easy to see that the error in the steady-state mode according to expression (1) is fully consistent with Table 1, since it (expression) corresponds to the position of the operating point of the system in the section of the "small" gain of the FC K_1 . A further increase in g and f shifts the operating point to the section of the "large" gain K_2 and the error is determined from expression (2). It is important here to estimate the domain of definition of expressions (1) and (2), which can be easily obtained by substituting the upper boundary of the sections of "small" and "large" gains of the FC, i.e. $e(t) = a$ for the first expression and $e(t) = c$ for the second. Carrying out elementary transformations, we obtain the domain of definition for the expression (1)

$$\frac{g}{K_{co}^{st}} + f \leq \frac{a}{K_{co}^{st}} + b$$

and domain for expression (2)

$$\frac{a}{K_{co}^{st}} + b \leq \frac{g}{K_{co}^{st}} + f \leq \frac{c}{K_{co}^{st}} + d.$$

On the ACS model with the parameters $T_1 = 0.1$, $T_2 = 0.5$, $K_{co}^{st} = 2$, we compare the accuracy of the system with the FC and the linear P-controller, which provides the maximum stability, when working out the reference action. Based on the parameters of the system, the value of the gain of the linear controller $K_{mds} = 0.4$ [8]. Initially, the requirements for ensuring the error in the steady-state mode were set before the ACS with FC, no more than in the

ACS with a linear controller. For this, at the stage of determining the parameters of the static characteristic of the FC, the value of the "small" gain is taken equal to the gain of the linear controller $K_1 = K_{mds}$, and the boundaries of the piecewise linear sections of the characteristic are selected based on the requirements for ensuring a monotonic process [10]. In this case, the static characteristic of the FC has the following parameters: $a = 0.75$, $b = 0.3$, $c = 1.2$, $d = 1$, $K_1 = 0.4$, $K_2 = 1.56$. In Fig. 4 shows a comparison of transient processes when a single step reference action ($g = 1$) is applied to the input of the system with zero disturbing action ($f = 0$) (Fig. 4, a) and $f = 0.3$ (Fig. 4, b).

From Fig. 4, a it can be seen that when working out a single reference action, both controllers provide the same accuracy

$$e(t) = g \frac{1}{1 + K_{co}^{st} K_1} + f \frac{K_{co}^{st}}{1 + K_{co}^{st} K_1} =$$

$$= 1 \cdot \frac{1}{1 + 2 \cdot 0.4} + 0 \cdot \frac{2}{1 + 2 \cdot 0.4} = 0.56,$$

since $\frac{g}{K_{co}^{st}} \leq \frac{a}{K_{co}^{st}} + b$ (the domain of expression (1) at $f = 0$) and the operating point lies in the region of the "small" gain of the FC.

The disturbance shifts the operating point to the section of the "large" gain $\left(\frac{a}{K_{co}^{st}} + b \leq \frac{g}{K_{co}^{st}} + f \right)$,

respectively, for the ACS with HP, the error in the steady state is determined from expression (2) and equals 0.81, which is less than the error in an ACS

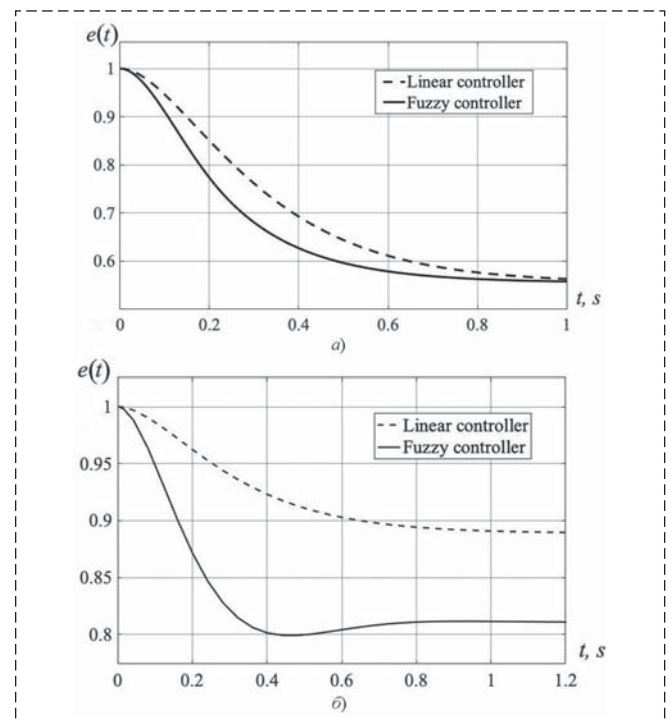


Fig. 4. Comparison of transient processes in ACS with a static object with a linear and fuzzy controller

with a linear controller (the error in such a system is 0.89) (Fig. 4, b).

As can be seen from the given example, the use of a fuzzy controller not only increases the accuracy of the control system, but also reduces the regulation time (Fig. 4, a).

Analyzing expression (2), one can notice that it contains three terms: errors from the target and disturbance, as well as a common term, which is determined by the parameters of the FC and the control object. Taking this into account, by analogy with Tables 1 and 2 for linear systems, we will compile tables of error terms for static and astatic ACS with different structures, taking into account the features of the nonlinear static characteristics of the controller (Tables 3 and 4). In the tables, the superscripts for a , b , c , d , K_1 and K_2 denote the FC control channel to which the indicated parameters relate (p — proportional, i — integral, d — differential) (K_1^p , K_1^i , K_1^d and K_2^p , K_2^i , K_2^d are the gains K_1 and K_2 of the proportional, integral and differential channels, respectively).

In Tables 3 and 4, a dash indicates the degenerate operating conditions of the control system, in which there is no steady state of operation.

Consider a control system with an astatic object with parameters $T = 0.1$, $K_{co}^{ast} = 2$. Let us compare the accuracy of the ACS with a linear P-controller tuned, as in the case of a static system using the method of maximum stability ($K_{mds} = 1.25$), with a fuzzy P-controller. The static characteristic of a fuzzy controller, synthesized according to the same algorithm as the FC for a static system, taking into account the astatism of the control object, has the following parameters: $a = 0.2$, $b = 0.25$, $c = 1.2$, $d = 2$, $K_1 = 1.25$, $K_2 = 1.75$. Fig. 5 shows a comparison of transient processes in an ACS with an optimal in terms of stability of a linear controller and FC under the simultaneous action of $g(t)$ and disturbance of various amplitudes ($f = 0.2$ (Fig. 5, a)

Table 3
Error components for ACS with FC and static object

Con- troller	Target		Disturbance		Common term	Conditions
	Constant ($g = \text{const}$)	Linear ($g = K_g t$)	Constant ($f = \text{const}$)	Linear ($f = K_f t$)		
P	$g \frac{1}{1 + K_{co}^{st} K_1^p}$	—	$f \frac{K_{co}^{st}}{1 + K_{co}^{st} K_1^p}$	—	0	$g + f K_{co}^{st} \leq a^p + b^p K_{co}^{st}$
	$g \frac{1}{1 + K_{co}^{st} K_2^p}$		$f \frac{K_{co}^{st}}{1 + K_{co}^{st} K_2^p}$		$\frac{K_{co}^{st} (K_2^p a^p - b^p)}{1 + K_{co}^{st} K_2^p}$	$a^p + b^p K_{co}^{st} \leq \leq g + f K_{co}^{st} \leq c^p + d^p K_{co}^{st}$
PD	$g \frac{1}{1 + K_{co}^{st} K_1^p}$	—	$f \frac{K_{co}^{st}}{1 + K_{co}^{st} K_1^p}$	—	0	$g + f K_{co}^{st} \leq a^p + b^p K_{co}^{st}$
	$g \frac{1}{1 + K_{co}^{st} K_2^p}$		$f \frac{K_{co}^{st}}{1 + K_{co}^{st} K_2^p}$		$\frac{K_{co}^{st} (K_2^p a^p - b^p)}{1 + K_{co}^{st} K_2^p}$	$a^p + b^p K_{co}^{st} \leq \leq g + f K_{co}^{st} \leq c^p + d^p K_{co}^{st}$
PI	0	$K_f \frac{1}{K_{co}^{st} K_1^i}$	0	$K_f \frac{1}{K_2^i}$	0	$\int e dt \leq a^i$
	0	$K_f \frac{1}{K_{co}^{st} K_2^i}$	0	$K_f \frac{1}{K_2^i}$	0	$\int e dt \leq c^i$

Table 4
Error components for ACS with FC and astatic object

Con- troller	Target		Disturbance		Common term	Conditions
	Constant ($g = \text{const}$)	Linear ($g = K_g t$)	Constant ($f = \text{const}$)	Linear ($f = K_f t$)		
P	0	$K_g \frac{1}{K_{co}^{ast} K_1^p}$	$f \frac{1}{K_1^p}$	—	0	$K_g \frac{1}{K_{co}^{ast}} + f \leq b^p$
	0	$K_g \frac{1}{K_{co}^{ast} K_2^p}$	$f \frac{1}{K_2^p}$		$a^p - \frac{b^p}{K_2^p}$	$b^p \leq K_g \frac{1}{K_{co}^{ast}} + f \leq d^p$
PD	0	$K_g \frac{1}{K_{co}^{ast} K_1^p}$	$f \frac{1}{K_1^p}$	—	0	$K_g \frac{1}{K_{co}^{ast}} + f \leq b^p$
	0	$K_g \frac{1}{K_{co}^{ast} K_2^p}$	$f \frac{1}{K_2^p}$		$a^p - \frac{b^p}{K_2^p}$	$b^p \leq K_g \frac{1}{K_{co}^{ast}} + f \leq d^p$
PI	0	0	0	$K_f \frac{1}{K_1^i}$	0	$\int e dt \leq a^i$
	0	0	0	$K_f \frac{1}{K_2^i}$	0	$\int e dt \leq c^i$

and $f = 0.7$ (Fig. 5, b)). Since the principle of superposition in fuzzy ACS is inapplicable, the error in the steady state, as noted above, is determined by the position of the operating point on the static characteristic $u(e)$. In Fig. 5, a, the disturbance does not exceed the parameter b of the static characteristic of the FC ($0.2 < 0.25$), and the operating point is located in the region of a small gain K_1 , which is reflected in the same accuracy of both systems.

$$e(t) = f \frac{1}{K_1^p} = \frac{0.2}{1.25} = 0.16.$$

As the disturbance increases ($f = 0.7$) (Fig. 5, b), the operating point shifts to a section of large gain K_2 , due to which the error in the steady state in a system with an FC

$$e(t) = f \frac{1}{K_2^p} + a^p - \frac{b^p}{K_2^p} = \frac{0.7}{1.75} + 0.2 - \frac{0.25}{1.75} = 0.46.$$

becomes less than in an ACS with a linear controller

$$e(t) = f \frac{1}{K_{mds}} = \frac{0.7}{1.25} = 0.56.$$

As can be seen, the use of a fuzzy P-controller into a system with an astatic object provided a decrease in the error from the disturbing effect and an increase in the system's performance. Thus, in the future, such an FC can be considered as an alternative to increasing the order of astatism (introducing a PI controller) to improve the accuracy of the ACS under the action of external disturbances.

At the same time, if the introduction of a PI controller is inevitable for one reason or another, then the version of a fuzzy PI controller seems to be preferable. Fig. 6 shows the transient processes in an astatic system with a linear PI controller tuned to the maximum

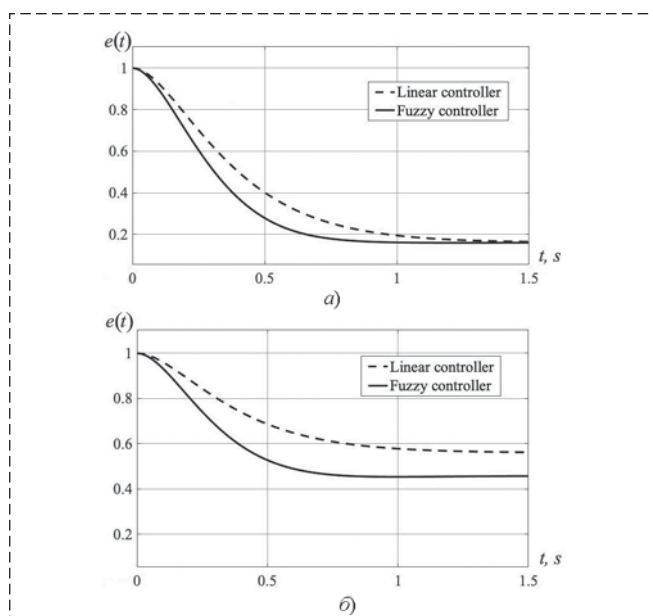


Fig. 5. Comparison of transient processes in an automatic control system with an astatic object with a linear and fuzzy controller

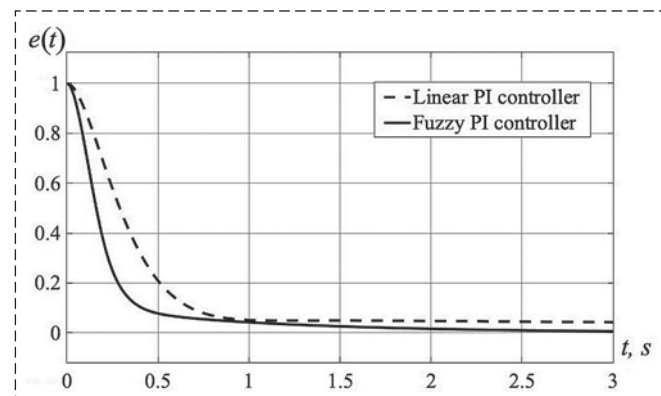


Fig. 6. Transient processes in a system with a linear PI and fuzzy PI controller

of stability and a fuzzy PI controller when the system is exposed to a constant disturbance. It is obvious that a system with a fuzzy PI controller has a shorter regulation time, while the transient process in an ACS with a linear controller is highly prolonged, especially near the equilibrium position of the system.

Conclusion

The paper presents the results of research on assessing the accuracy of control systems with a fuzzy controller, which is described by a nonlinear static characteristic. It is shown in the work that it is more convenient to estimate the accuracy if the static characteristic of the controller is approximated by selecting two sections on it with the gains K_1 and K_2 . The results of experimental studies of ACS with static and astatic objects of the 2nd order show that the FC provides accuracy no worse than a linear controller, while increasing the dynamics of the system. The proposed analytical ratios make it possible to estimate the accuracy of the ACS with an ACS in the range of setting and disturbing influences, and can also be used as a method for synthesizing the parameters of the FC to ensure a given control accuracy.

References

1. Kazachek N. A., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P. Research of periodic oscillations in control systems with fuzzy controllers, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2015, no. 3, pp. 985–997.
2. Tomescu M.-L., Preitl St., Precup R.-E. Fuzzy Logic Control System Stability Analysis Based on Lyapunov's Direct Method, *Int. J. of Computers, Communications & Control*, 2009, no. 4, pp. 415–426.
3. Wu B., Ma L., Perng J., Chin H. Absolute stability analysis in uncertain static fuzzy control systems with the parametric robust Popov criterion, *2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, 2008, pp. 1325–1330.
4. Uskov A. A. A Sufficient Condition for the Stability of Control Systems with One-Dimensional Fuzzy Inference Blocks, *Problemy Upravleniya*, 2014, no. 4, pp. 14–19 (in Russian).
5. Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P., Sitnikov M. S. Stability of intelligent automatic control systems, *Informacionnye Tekhnologii. Prilozhenie*, 2013, no. 2, 31 p. (in Russian).
6. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control, *Physica-Verlag Heidelberg*, 2001, 728 p.
7. Tomescu M.-L., Preitl St., Precup R.-E. Fuzzy Logic Control System Stability Analysis Based on Lyapunov's Direct Method, *Int. J. of Computers, Communications & Control*, 2009, no.4, pp. 415–426.
8. Kim D. P. Automatic Control Theory: Textbook and Workshop for Academic Bachelor's Degree, Urait, 2017, 276 p. (in Russian).
9. Yesil E., Guzelkaya M., Eksin I. Fuzzy PID controllers: An overview, *3rd Triennial ETAI International Conference on Applied Automatic Systems*, 2003, 8 p.
9. Bykovtsev Y. A. Analysis and Synthesis of a Fuzzy Controller by the Phase Plane Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 507–517.

А. В. Зуев^{1, 2}, канд. техн. наук, доц., alvzuev@yandex.ru,
А. Н. Жирабок^{1, 2}, д-р техн. наук, проф., zhirabok@mail.ru,
В. Ф. Филаретов³, д-р техн. наук, проф., filaretov@inbox.ru,
А. А. Проценко², мл. науч. сотр., pro293133@gmail.com,

¹ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,

² Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток,

³ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

Идентификация дефектов в нестационарных системах на основе скользящих наблюдателей*

Рассматривается задача идентификации дефектов в системах, описываемых нестационарными нелинейными динамическими уравнениями, в присутствии возмущений. Для решения задачи используются наблюдатели, работающие в скользящем режиме. Предлагаемый подход базируется на идее построения редуцированной модели исходной системы, обладающей избирательной чувствительностью по отношению к дефектам и возмущению и реализованной в канонической форме. Основной целью введения такой модели является возможность учета нестационарности системы. Кроме того, за счет модели такого вида удастся ослабить ограничения, при которых для исходной системы могут быть построены скользящие наблюдатели. Изложенная теория иллюстрируется практическим примером.

Ключевые слова: нелинейные нестационарные системы, дефекты, наблюдатели, скользящие режимы, идентификация

Введение

Одной из задач функционального диагностирования является задача идентификация дефектов [1], последние годы для ее реализации активно применяется подход, основанный на наблюдателях, работающих в скользящем режиме и использующих особенности этого режима [2]. Далее наблюдатель со скользящим режимом работы будем называть *скользящим наблюдателем*.

Настоящая публикация является логическим продолжением статей [3, 4], посвященных разработке методов построения скользящих наблюдателей для решения задачи идентификации дефектов. Указанные наблюдатели описываются дифференциальным уравнением с разрывной правой частью и обеспечивают возникновение в системе скользящего режима при соблюдении определенных условий.

Скользящие наблюдатели применяются для решения задачи идентификации дефектов в линейных [3, 5–7] и нелинейных [4, 8, 9] системах, для обеспечения отказоустойчивого

управления [10], в ряде практических приложений [11–13]. Во всех таких работах на исходную систему накладывается ряд ограничений, в частности, требуется, чтобы выполнялось так называемое условие согласования, и система была минимально фазовой.

Для ослабления условия согласования были предложены методы, использующие скользящие наблюдатели высокого порядка [14, 15] и каскадное соединение наблюдателей [16], но при этом система должна быть минимально фазовой. В работе [17] последнее условие ослаблено ценой того, что в выражение для оценки дефекта входит производная величины дефекта, в статье [18] для этого вводится предположение об ограниченности ошибки оценивания. В работах [19, 20] требование минимальной фазовости ослаблено до условия детектируемости.

Отметим, что в известных работах скользящие наблюдатели строятся на основе исходной системы и, следовательно, имеют размерность, совпадающую с размерностью этой системы. В настоящей статье предложен метод, позволяющий учитывать нестационарность системы. В его основе лежит идея использования редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели исходной системы, реализованной в канонической форме. Это, а также новый метод

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект 20-38-70161, частично проект 19-08-00347, а также частично стипендией Президента РФ СП-3252.2019.5.

построения скользящих наблюдателей позволили обойтись без условий согласования, минимальной фазовости и детектируемости системы. Кроме того, это дает возможность уменьшить размерность скользящих наблюдателей.

1. Основные соотношения

Рассмотрим систему, описанную нелинейной моделью

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= F(t)x(t) + G(t)u(t) + \\ &+ C(t)\Psi(x(t), u(t)) + Dd(t) + L\rho(t); \quad (1.1) \\ y(t) &= Hx(t).\end{aligned}$$

Здесь $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ — векторы состояния, управления и выхода; $F(t) \in R^{n \times n}$, $G(t) \in R^{n \times m}$ и $C(t) \in R^{n \times s}$ — матричные функции с известными законами изменения во времени, функция $F(t)$ предполагается дифференцируемой; матрицы $D \in R^{n \times 1}$, $L \in R^{n \times p}$ и $H \in R^{l \times n}$ предполагаются постоянными; $d(t) \in R$ — функция, описывающая дефект: при его отсутствии $d(t) = 0$, при появлении дефекта $d(t)$ становится неизвестной функцией времени; $\rho(t) \in R^p$ — неизвестная функция времени, описывающая действующие на систему возмущения; $\Psi(x, u)$ — нелинейная составляющая:

$$\Psi(x, u) = \begin{pmatrix} \varphi_1(A_1x, u) \\ \dots \\ \varphi_s(A_sx, u) \end{pmatrix},$$

$A_1, \dots, A_s$ — матрицы-строки; $\varphi_1, \dots, \varphi_s$ — нелинейные (возможно, недифференцируемые) функции, удовлетворяющие условию Липшица по аргументу x , откуда следует, что функция $\Psi(x, u)$ также удовлетворяет условию Липшица, т. е.

$$\|\Psi(x, u) - \Psi(x', u)\| \leq N \|x - x'\| + M, \quad (1.2)$$

$N, M \geq 0$ — некоторые константы. Предполагается, что известны и ограничены нормы $\|d(t)\|$ и $\|\rho(t)\|$ векторов $d(t)$ и $\rho(t)$.

Скалярный характер функции $d(t)$ соответствует предположению о том, что рассматриваются только однократные дефекты, что, как правило, выполняется на практике. Для решения задачи идентификации кратных дефектов функция $d(t)$ должна предполагаться векторной.

Для решения задачи идентификации функции $d(t)$ в случае постоянных матриц F и G в работе [8]

предполагается, что система (1.1) удовлетворяет следующим условиям: 1) $\text{rank}(H[L \ D]) = \text{rank}([L \ D])$ (условие согласования); 2) все инвариантные нули тройки $(F, [L \ D], H)$ лежат в левой полуплоскости (минимальная фазовость).

Целью настоящей работы является решение задачи идентификации дефектов для нестационарной системы при отказе и от условий согласования, минимальной фазовости и детектируемости. Особенность решения состоит в том, что скользящие наблюдатели строятся на основе модели исходной системы пониженной размерности, что дополнительно приводит к понижению размерности наблюдателей. Эффект отказа от отмеченных выше условий достигается за счет нового метода построения скользящего наблюдателя на основе канонической формы матриц, описывающих модель пониженной размерности.

Принимая, что модель пониженной размерности характеризуется вектором состояния $x_* \in R^k$, $k < n$, будем предполагать, что при отсутствии дефектов и возмущений справедливо равенство

$$x_*(t) = \Phi(t)x(t) \quad (1.3)$$

для некоторой дифференцируемой матричной функции $\Phi(t)$. Также предполагается, что функция $\dot{\Phi}(t)x(t)$ может быть выражена через переменные $x_*(t)$ и $y(t)$, т. е.

$$\dot{\Phi}(t)x(t) = \alpha(x_*(t), y(t), t) \quad (1.4)$$

для всех $t \geq 0$, некоторой функции α .

Построим модель системы (1.1) пониженной размерности, не чувствительную к возмущению $\rho(t)$, которая описывается уравнениями

$$\begin{aligned}\dot{x}_*(t) &= F_*x_*(t) + G_*(t)u(t) + J_*(t)y(t) + \\ &+ C_*(t)\Psi(x_*(t), y(t), u(t)) + \\ &+ \alpha(x_*(t), y(t), t) + D_*(t)d(t); \quad (1.5) \\ y_*(t) &= H_*x_*(t),\end{aligned}$$

где F_* , $G_*(t)$, $J_*(t)$, $C_*(t)$, H_* и $D_*(t)$ — матрицы и матричные функции, подлежащие определению; функция $\Psi(x_*, y, u)$ имеет вид

$$\Psi(x_*, y, u) = \begin{pmatrix} \varphi_{i_1}(A_{*1i_1}x_* + A_{*2i_1}y, u) \\ \dots \\ \varphi_{i_p}(A_{*1i_p}x_* + A_{*2i_p}y, u) \end{pmatrix},$$

$A_{*1i_1}, A_{*2i_1}, \dots, A_{*1i_p}, A_{*2i_p}$ — матрицы, подлежащие определению; $i_1, \dots, i_p$ — номера нелинейностей, входящих в модель (1.5).

Отметим, что в (1.5) матрица F_* предполагается постоянной, имеющей вместе с матрицей H_* канонический вид, определяемый ниже. Этим предлагаемый подход существенно отличается от подходов, развитых в работе [8] и аналогичных работах, где наблюдатели строятся на основе исходной системы (1.1), нестационарность которой существенно усложняет анализ условий возникновения скользящего режима.

По аналогии с (1.3) предполагается, что при отсутствии дефектов и возмущений выполняется равенство $y_*(t) = R_*y(t)$ для некоторой матрицы R_* . Как и в работе [4], можно показать, что справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\Phi(t)F(t) &= F_*\Phi(t) + J_*(t)H; \\ R_*H &= H_*\Phi(t); G_*(t) = \Phi(t)G(t); \\ D_*(t) &= \Phi(t)D; A_i = (A_{*1i} \ A_{*2i}) \begin{pmatrix} \Phi(t) \\ H \end{pmatrix}; i = \overline{i_1, i_p}; \\ C_*(t) &= \Phi(t)C(t).\end{aligned}\quad (1.6)$$

Матрицы F_* и H_* будем искать в каноническом виде

$$F_* = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}; H_* = (1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0).$$

Это всегда можно сделать, если пара (F_*, H_*) наблюдаема [21]. В случае, когда она ненаблюдаема, линейную часть системы (1.5) можно представить в канонической форме наблюдаемости [21], и для ее наблюдаемой части задавать матрицы F_* и H_* в каноническом виде. Такой вид матриц позволяет получить уравнения для строк матриц $\Phi(t)$ и J_* :

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= R_*H; \\ \Phi_i(t)F(t) &= \Phi_{i+1}(t) + J_{*i}(t)H, i = \overline{2, k}; \\ \Phi_k(t)F(t) &= J_{*k}(t)H.\end{aligned}\quad (1.7)$$

В работах [3, 4] показано, что эти уравнения могут быть свернуты в одно:

$$\begin{aligned}R_*HF^k(t) &= J_{*1}(t)HF^{k-1}(t) + \\ &+ J_{*2}(t)HF^{k-2}(t) + \dots + J_{*k}(t)H.\end{aligned}$$

Запишем его в виде

$$(R_* J_{*1}(t) \dots J_{*k}(t))W^{(k)}(t) = 0, \quad (1.8)$$

где

$$W^{(k)}(t) = \begin{pmatrix} HF^k(t) \\ HF^{k-1}(t) \\ \vdots \\ H \end{pmatrix}.$$

Известно, что условие $\Phi L = 0$ нечувствительности к возмущению имеет вид $(R_* J_{*1}(t) \dots J_{*k}(t))L^{(k)}(t) = 0$ [3, 4], где

$$L^{(k)}(t) = \begin{pmatrix} HL & HF(t)L & \dots & HF^{k-1}(t)L \\ 0 & HL & \dots & HF^{k-2}(t)L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Последнее условие и соотношение (1.8) дают уравнение

$$(R_* J_{*1}(t) \dots J_{*k}(t))(W^{(k)}(t) L^{(k)}(t)) = 0, \quad (1.9)$$

решение которого находится при минимальном значении k . Далее из уравнений (1.7) определяются строки матрицы $\Phi(t)$ и проверяется возможность представления функции $\Phi(t)x(t)$ в виде (1.4). При положительном исходе этой проверки находится матрица $C_*(t) = \Phi(t)C(t)$ и проверяется семейство условий

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \Phi(t) \\ H \\ A_i \end{pmatrix} = \text{rank} \begin{pmatrix} \Phi(t) \\ H \\ A_i \end{pmatrix}, i = \overline{i_1, i_p}. \quad (1.10)$$

Если все они выполняются, принимаем $G_*(t) = \Phi(t)G(t)$ и $D_*(t) = \Phi(t)D$; матрицы A_{*1i} и A_{*2i} , $i = \overline{i_1, i_p}$, определяются из соотношений (1.6). При невыполнении условия (1.10) ищется другое решение уравнения (1.9) при прежней или увеличенной размерности k .

2. Преобразование редуцированной модели

Представим описывающие модель (1.5) матрицы и функции в следующем виде:

$$\begin{aligned}F_* &= \begin{pmatrix} F_1 & F_2 \\ F_3 & F_4 \end{pmatrix}; H_* = (1 \ \dots \ 0 \ 0); G_*(t) = \begin{pmatrix} G_1(t) \\ G_2(t) \end{pmatrix}; \\ J_*(t) &= \begin{pmatrix} J_1(t) \\ J_2(t) \end{pmatrix}; C_*(t) = \begin{pmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{pmatrix}; D_*(t) = \begin{pmatrix} D_1(t) \\ D_2(t) \end{pmatrix}; \\ \Phi(t) &= \begin{pmatrix} \Phi^{(1)}(t) \\ \Phi^{(2)}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_*H \\ \Phi^{(2)}(t) \end{pmatrix}; \alpha = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha_2 \end{pmatrix},\end{aligned}\quad (2.1)$$

где

$$F_1 = 0; F_2 = (1 \dots 0 \ 0) \in R^{1 \times (k-1)}; F_3 = 0 \in R^{(k-1) \times 1};$$

$$F_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \in R^{(k-1) \times (k-1)},$$

остальные матрицы в (2.1) имеют соответствующие размеры. Функция α_1 равна нулю, так как она определяется функцией $\dot{\Phi}_1(t)x(t)$, а $\Phi_1(t) = R_*H = \text{const}$.

Введем преобразование координат $z = Tx_*$ с матрицей $T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Q & I_{k-1} \end{pmatrix}$, где $I_{k-1} \in R^{(k-1) \times (k-1)}$ — тождественная матрица, $Q \in R^{(k-1) \times 1}$ выбирается так, чтобы сделать матрицу $\bar{F}_4 = F_4 + QF_2$ устойчивой. Поскольку пара (F_4, F_2) с очевидностью наблюдаема, такая матрица существует, представим ее в виде $Q = (q_1 \ q_2 \dots q_{k-1})^T$. В результате модель (1.3) принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= \bar{F}_1 y_*(t) + \bar{F}_2 z_2(t) + \bar{G}_1(t)u(t) + \bar{J}_1(t)y(t) + \\ &+ \bar{C}_1(t)\Psi(z_2(t), y_*(t), y(t), u(t)) + \bar{D}_1(t)d(t); \\ \dot{z}_2(t) &= \bar{F}_3 y_*(t) + \bar{F}_4 z_2(t) + \bar{G}_2(t)u(t) + \\ &+ \bar{J}_2(t)y(t) + \bar{C}_2(t)\Psi(z_2(t), y_*(t), y(t), u(t)) + \\ &+ \bar{\alpha}_2(z_2(t), y_*(t), y(t), t) + \bar{D}_2(t)d(t); \\ y_* &= z_1, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{F}_1 &= -q_1, \quad \bar{F}_2 = F_2 = (1 \ 0 \ 0 \dots 0) \in R^{1 \times (k-1)}; \\ \bar{F}_3 &= -\begin{pmatrix} q_1^2 + q_2 \\ q_1 q_2 + q_3 \\ q_1 q_3 + q_4 \\ \vdots \\ q_1 q_{k-1} \end{pmatrix}; \quad \bar{F}_4 = \begin{pmatrix} q_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ q_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ q_3 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{k-1} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}; \\ \bar{G}_1(t) &= G_1(t); \quad \bar{G}_2(t) = QG_1(t) + G_2(t); \\ \bar{J}_1(t) &= J_1(t); \quad \bar{J}_2(t) = QJ_1(t) + J_2(t); \\ \bar{C}_1(t) &= C_1(t); \quad \bar{C}_2(t) = QC_1(t) + C_2(t); \\ \bar{D}_1(t) &= D_1(t); \quad \bar{D}_2(t) = QD_1(t) + D_2(t); \\ \bar{\alpha}_2(z_2(t), y_*(t), y(t), t) &= \alpha_2(z_2(t), y_*(t), y(t), t). \end{aligned}$$

Отметим, что ключевую роль в модели (2.2) играет тот факт, что матрица $\bar{F}_4$ устойчива. В работе [8] это следует из минимальной фазо-

вости системы, в работе [20] — из условия ее детектируемости, в нашей работе — из канонического вида матриц F_* и H_* .

3. Построение скользящего наблюдателя

Поскольку матрица $\bar{F}_4$ устойчива, существуют симметрические положительно определенные матрицы P и W такие, что $\bar{F}_4^T P + P \bar{F}_4 = -W$. По аналогии с работой [8] скользящий наблюдатель строится в виде

$$\begin{aligned} \hat{\dot{z}}_1(t) &= \bar{F}_1 y_*(t) + \bar{F}_2 \hat{z}_2(t) + \bar{G}_1 u(t) + \bar{J}_1 y(t) + \\ &+ \bar{C}_1 \Psi(\hat{z}_2(t), y_*(t), y(t), u(t)) + k_2 e_1(t) + k_3 v(t); \\ \hat{\dot{z}}_2(t) &= \bar{F}_3 y_*(t) + \bar{F}_4 \hat{z}_2(t) + \bar{G}_2 u(t) + \\ &+ \bar{J}_2 y(t) + \bar{C}_2 \Psi(\hat{z}_2(t), y_*(t), y(t), u(t)) + \\ &+ \bar{\alpha}_2(\hat{z}_2(t), y_*(t), y(t), t) + \bar{K}_1 v(t); \\ \hat{y}_* &= \hat{z}_1, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $e_1(t) = z_1(t) - \hat{z}_1(t) = y_*(t) - \hat{y}_*(t)$; $v(t) = \text{sign}(e_1(t))$; $\bar{K}_1 = P^{-1} \bar{F}_2^T k_1$; k_1, k_2, k_3 — положительные числа. Из соотношений (2.2) и (3.1) получаем

$$\begin{aligned} \dot{e}_1(t) &= \bar{F}_2 e_2(t) + \bar{C}_1(t) \Delta \Psi(t) + \\ &+ \bar{D}_1(t) d(t) - k_2 e_1(t) - k_3 v_1(t); \\ \dot{e}_2(t) &= \bar{F}_4 e_2(t) + \bar{C}_2(t) \Delta \Psi(t) + \\ &+ \Delta \alpha(t) + \bar{D}_2(t) d(t) - \bar{K}_1 v_2(t), \end{aligned} \quad (3.2)$$

где $e_2(t) = z_2(t) - \hat{z}_2(t)$; $\Delta \Psi(t) = \Psi(z_2, y_*, y, u) - \Psi(\hat{z}_2, y_*, y, u)$; $\Delta \alpha(t) = \bar{\alpha}_2(y_*(t), z_2(t), y(t), t) - \bar{\alpha}_2(y_*(t), \hat{z}_2(t), y(t), t)$.

Будем полагать, что функции $\Psi(x, u)$ и $\alpha_2(x_*, y, t)$ удовлетворяют условию Липшица (1.2), тогда $\Psi(\hat{z}_2, y_*, y, u)$ и $\bar{\alpha}_2(\hat{z}_2, y_*, y, t)$ также удовлетворяют этому условию и

$$\begin{aligned} \|\bar{C}_1 \Delta \Psi\| &\leq N_{*1} \|e_2(t)\| + M_{*1}; \\ \|\bar{C}_2 \Delta \Psi + \Delta \alpha(t)\| &\leq N_{*2} \|e_2(t)\| + M_{*2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

для некоторых $N_{*1}, M_{*1}, N_{*2}, M_{*2} \geq 0$. Отметим, что ненулевые значения M_{*1} и M_{*2} используются в доказательстве асимптотической устойчивости скользящего движения системы (3.2). Вместе с тем, известно [5], что скользящее движение дает $e(t) = 0$, т. е. $\hat{x}_*(t) = x_*(t)$, и в этом случае можно принять $M_{*1} = M_{*2} = 0$.

Теорема. Если $\lambda_{\min}(W) \geq 2\|P\|N_{*2}$, то наблюдатель (3.1) оценивает функцию $d(t)$ в виде

$$\hat{d}(t) = D_2^+ \bar{K}_1 v_{eq}(t) \quad (3.4)$$

в случае, когда $\bar{D}_1 = 0$, и в виде

$$\hat{d}(t) = k_3 D_1^+ v_{eq}(t) \quad (3.5)$$

в противном случае, где $D_1^+ = (\bar{D}_1^T \bar{D}_1)^{-1} \bar{D}_1$ и $D_2^+ = (\bar{D}_2^T \bar{D}_2)^{-1} \bar{D}_2$; $v_{eq}(t)$ — сигнал, представляющий разрывную функцию $v(t)$. Согласно работе [8], в качестве $v_{eq}(t)$ может быть принята непрерывная функция

$$v_{eq}(t) = \frac{e_1(t)}{\|e_1(t)\| + \varepsilon}, \quad (3.6)$$

где ε — малое положительное число.

Доказательство. Детальное доказательство опускается, оно аналогично приведенному в работе [20]. Отметим только, что оно проводится в три этапа, на первом из которых показывается, что $\|e_2\| \leq \delta$ для некоторого $\delta > 0$, на втором доказывается, что при соответствующем выборе коэффициентов усиления k_1, k_2, k_3 наблюдателя $e_1 = 0$ за конечное время, т. е. достигается скользящий режим, на третьем доказывается аналогичное утверждение для ошибки e_2 . Коэффициенты k_1, k_2, k_3 определяются из следующих условий:

$$k_1 \geq \frac{\delta(\beta\|P\bar{D}_2\| + \|P\|(\delta N_{*2} + M_{*2}))}{k_3 - \beta\|\bar{D}_1\| - \delta N_{*1} - M_{*1}};$$

$$k_2 > 0;$$

$$k_3 \geq \beta\|\bar{D}_1\| + \delta(1 + N_{*1}) + M_{*1}, \beta \geq \|d(t)\|.$$

Поскольку в скользящем режиме $e_1 = \dot{e}_1 = 0$ и $e_2 = \dot{e}_2 = 0$, то при $\bar{D}_1 = 0$ функция $d(t)$ может быть оценена из второго уравнения в (3.2) в виде (3.4); в противном случае используется первое уравнение, что дает оценку (3.5).

4. Практический пример

Рассмотрим модель нагруженного электропривода, управляющего одной степенью подвижности многозвенного манипулятора, описанную уравнениями

$$\dot{x}_1(t) = \frac{1}{i_r} x_2(t) + d_1(t);$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{k_b + h^*(t)}{J + H^*(t)} x_2(t) + \frac{k_m}{J + H^*(t)} x_3(t) - \frac{M_b^*(t)}{J + H^*(t)} - \frac{M_{тр}}{J + H^*(t)} \text{sign}(x_2(t)) + d_2(t);$$

$$\dot{x}_3(t) = -\frac{k_\omega}{L_m} x_2(t) - \frac{R_m}{L_m} x_3(t) + \frac{k_y}{L_m} U(t) + d_3(t),$$

где $x_1(t) = \alpha_n(t)$ — угол поворота выходного вала редуктора электропривода; $x_2(t) = \dot{\alpha}(t)$ — скорость вращения ротора электродвигателя; $x_3(t) = I(t)$ — сила тока якоря, где R_m — номинальное активное сопротивление цепи якоря; L_m — индуктивность цепи якоря; k_ω — коэффициент противоЭДС; k_y — коэффициент усиления усилителя мощности; k_b — коэффициент вязкого трения; k_m — коэффициент крутящего момента; J — момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора, приведенный в этому ротору; $M_{тр}$ — величина номинального момента сухого трения; i_r — передаточное отношение редуктора; $U(t)$ — входное напряжение электропривода; $H^*(t)$ — известная переменная компонента, характеризующая инерционные свойства соответствующей степени подвижности манипулятора; $h^*(t)$ — известная переменная компонента кориолисовых и скоростных сил; $M_b^*(t)$ — известное переменное моментное воздействие, учитывающее гравитационные силы и эффекты взаимовлияний между всеми степенями подвижности манипулятора в процессе его движения.

При работе манипулятора в его электроприводах могут возникать различные дефекты, которые приводят к появлению в правых частях уравнений дополнительных составляющих $d_1(t)$, $d_2(t)$ и $d_3(t)$ — неизвестных функций, характеризующих влияние на работу электропривода часто возникающих типовых дефектов: ошибки измерения угла датчиком положения $\hat{\alpha}_n(t)$, появления неучтенного моментного воздействия $\hat{M}(t)$ (например, при увеличении моментов вязкого или сухого трений) и отклонения активного сопротивления цепи якоря от номинального значения $\hat{R}_m$:

$$d_1(t) = \dot{\hat{\alpha}}_n(t);$$

$$d_2(t) = -\frac{\hat{M}(t)}{J + H^*(t)}; d_3(t) = -\frac{\hat{R}_m}{L_m} x_3(t).$$

Приведем матрицы, описывающие электропривод:

$$F = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{i_r} & 0 \\ 0 & -\frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} & \frac{k_m}{J + H^*(t)} \\ 0 & -\frac{k_\omega}{L_m} & -\frac{R_m}{L_m} \end{pmatrix},$$

$$G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k_y/L_m \end{pmatrix}; \quad H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad L = 0;$$

$$\varphi(x, u) = -\frac{M_B^*(t)}{J + H^*(t)} - \frac{M_{тр}}{J + H^*(t)} \text{sign}(Ax(t));$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Рассмотрим синтез скользящего наблюдателя для идентификации величины $\hat{M}(t)$. Решив уравнение (1.9), получим матрицы

$$J_* = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{(k_B + h^*(t))L_m + (J + H^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} \\ 0 & -\frac{k_m k_\omega + (k_B + h^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} \end{pmatrix};$$

$$\Phi(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{k_\omega}{L_m} & \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} \end{pmatrix}; \quad R_* = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$G_* = \begin{pmatrix} k_y/L_m \\ \frac{k_y}{L_m} \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} \end{pmatrix}; \quad C_* = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{k_\omega}{L_m} \end{pmatrix}; \quad D_* = -\frac{k_\omega}{L_m}$$

Известно, что $\dot{H}^*(t) = h^*(t)$; тогда нетрудно видеть, что функция $\dot{\Phi}(t)x(t)$ выражается через переменную $y_2(t)$ и имеет вид

$$\alpha(y(t), t) = \dot{\Phi}(t)x(t) =$$

$$= \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\dot{h}^*(t)(J + H^*(t)) - h^*(t)(k_B + h^*(t))}{(J + H^*(t))^2} y_2(t) \end{pmatrix}.$$

Модель имеет следующий вид:

$$\dot{z}_1(t) = z_2(t) - \frac{(k_B + h^*(t))L_m + (J + H^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} \times$$

$$\times y_2(t) + \frac{k_y}{L_m} u(t);$$

$$\dot{z}_2(t) = -\frac{k_m k_\omega + (k_B + h^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} y_2(t) +$$

$$+ \frac{k_y}{L_m} \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} u(t) - \frac{k_\omega}{L_m} d_2(t) + \alpha(y(t), t) -$$

$$- \frac{k_\omega}{L_m} \left(-\frac{M_B^*(t)}{J + H^*(t)} - \frac{M_{тр}}{J + H^*(t)} \times \right.$$

$$\times \text{sign} \left(\left(-z_2(t) + \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} y_2(t) \right) \frac{L_m}{k_\omega} \right);$$

$$y_* = z_1.$$

Нетрудно видеть, что для нелинейности sign в соотношении (3.3) нужно принять $N_* = 0$, $M_* = 2$. Поскольку $F_4 = 0$ и $F_2 = 1$, примем $Q = -1$; тогда $\bar{F}_4 = -1$, откуда можно положить $P = 1$, что дает $W = 2$. Наблюдатель имеет вид

$$\dot{\hat{z}}_1(t) = \hat{z}_1(t) + \hat{z}_2(t) -$$

$$- \frac{(k_B + h^*(t))L_m + (J + H^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} y_2(t) +$$

$$+ \frac{k_y}{L_m} u(t) + k_2 e_1(t) + k_3 v(t);$$

$$\dot{\hat{z}}_2(t) = -\frac{k_m k_\omega + (k_B + h^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} y_2(t) +$$

$$+ \frac{k_y}{L_m} \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} u(t) + \alpha_2(y(t), t) +$$

$$- \frac{k_\omega}{L_m} \left(-\frac{M_B^*(t)}{J + H^*(t)} - \frac{M_{тр}}{J + H^*(t)} \times \right.$$

$$\times \text{sign} \left(\left(-z_2(t) + \frac{k_B + h^*(t)}{J + H^*(t)} y_2(t) \right) \frac{L_m}{k_\omega} \right) +$$

$$+ \bar{K}_1 v(t) - \hat{z}_1(t) - \hat{z}_2(t) +$$

$$+ \frac{(k_B + h^*(t))L_m + (J + H^*(t))R_m}{(J + H^*(t))L_m} y_2(t) - \frac{k_y}{L_m} u(t);$$

$$\hat{y}_* = \hat{z}_1,$$

где $\bar{K}_1 = P^{-1} \bar{F}_2^T k_1 = k_1$. Функция $d_2(t)$ оценивается в виде

$$\hat{d}_2(t) = k_1 D_2^+ v_{eq}(t)$$

Для проверки работоспособности и эффективности полученного наблюдателя было проведено моделирование на примере электропривода второй степени подвижности (координата q_2) шестистепенного манипулятора

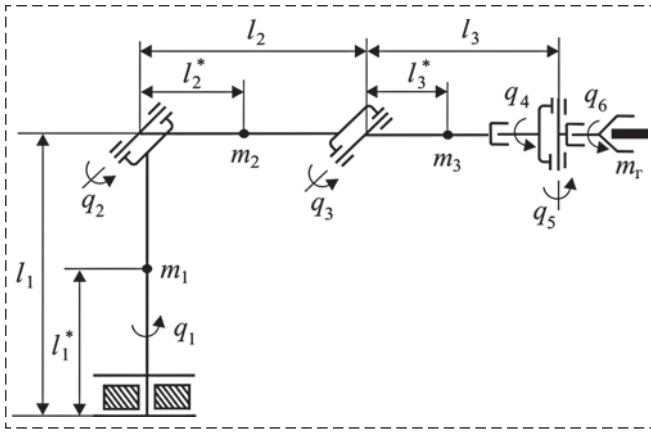


Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора типа PUMA
Fig. 1. Cinematic scheme of PUMA manipulator

типа PUMA, показанного на рис. 1. На этом рисунке введены следующие обозначения: m_i — масса i -го звена; m_r — масса груза (или рабочего инструмента), находящегося в схвате; l_i — длина i -го звена; l_i^* — расстояние от шарнира вращения i -го звена до его центра масс; q_i — угол поворота i -го сочленения; $i = \overline{1,6}$ — номер сочленения манипулятора.

Для второй степени подвижности эффекты взаимовлияния в модели (4.1) описываются следующими уравнениями [22]:

$$\begin{aligned} H(t) &= J_{n2} + J_{n3} + m_2 l_2^{*2} + m_3 l_3^{*2} + (m_3 + m_r) l_2^2 + \\ &+ m_r l_3^2 + 2l_2(m_3 l_3^* + m_r l_3) \cos q_3(t); \\ h(t) &= -2l_2(m_3 l_3^* + m_r l_3) \dot{q}_3 \sin q_3(t); \\ M_B(t) &= [J_{n3} + m_3 l_3^{*2} + m_r l_3^2 + \\ &+ (m_3 l_3^* + m_r l_3) l_2 \cos q_3(t)] \ddot{q}_3(t) - \\ &- l_2(m_3 l_3^* + m_r l_3) \dot{q}_3^2(t) \sin q_3(t) + \\ &+ g[m_2 l_2^* + (m_3 + m_r) l_2] \sin q_2(t) + \\ &+ g(m_3 l_3^* + m_r l_3) \sin(q_2(t) + q_3(t)) - \\ &- \frac{1}{2}[(J_{n2} - J_{s2} + m_2 l_2^{*2} + (m_3 + m_r) l_2^2) \sin(2q_2(t)) + \\ &+ (J_{n3} - J_{s3} + m_3 l_3^{*2} + m_r l_3^2) \sin(2(q_2(t) + q_3(t))) + \\ &+ 2l_2(m_3 l_3^* + m_r l_3) \sin(2q_2(t) + q_3(t))] \dot{q}_1^2(t); \\ H^*(t) &= H(t)/i_r^2; \quad h^*(t) = h(t)/i_r^2; \\ M_B^*(t) &= M_B(t)/i_r, \end{aligned}$$

где J_{si} — момент инерции звена i ($i = \overline{1,3}$) относительно его продольной оси; J_{ni} — момент инерции i -го звена относительно поперечной оси, проходящей через его центр масс; g — ускорение свободного падения.

При моделировании принимались следующие значения параметров звеньев манипулятора в данном описании взаимовлияний: $m_1 = 35,8$ кг; $m_2 = 3,5$ кг; $m_3 = 3$ кг; $l_1 = 0,2$ м; $l_2 = 0,5$ м; $l_3 = 0,4$ м; $l_1^* = 0,1$ м; $l_2^* = 0,12$ м; $l_3^* = 0,1$ м; $J_{s1} = 0,32$ кг·м²; $J_{n2} = 0,12$ кг·м²; $J_{s2} = 0,0047$ кг·м²; $J_{s3} = 0,004$ кг·м²; $J_{n3} = 0,067$ кг·м²; $m_r = 1$ кг.

При моделировании были использованы следующие параметры электропривода: $R_m = 0,5$ Ом; $L_m = 0,0005$ Гн; $k_\omega = 0,04$ В·с; $k_m = 0,04$ Н·м/А; $J = 10^{-4}$ кг·м²; $i_r = 100$, $k_b = 0,005$ Н·м·с/рад, $M_{тр} = 0,02$ Н·м, $k_y = 100$. Для управления электроприводом использовался ПИД регулятор с коэффициентами $k_p = 10$, $k_i = 0,5$, $k_d = 1$ и самонастраивающееся корректирующее устройство. В качестве задающего использовался сигнал $q_2^*(t) = \sin t$. Другие звенья манипулятора перемещались по законам $q_1(t) = 2 \sin(1,5t)$ и $q_3(t) = \sin(2t)$.

Коэффициенты наблюдателя были выбраны следующим образом: $k_1 = 10^7$, $k_2 = 1$, $k_3 = 10^4$. Появление дефекта имитировалось увеличением параметров k_b и $M_{тр}$ на 50 % с момента $t = 3$ с. При этом наблюдателем идентифицировалась функция

$$\hat{M}(t) = -\hat{k}_b(t)x_2(t) - \hat{M}_{тр}(t)\text{sign}(x_2(t)),$$

где $\hat{k}_b(t) = 0,5k_b$ и $\hat{M}_{тр}(t) = 0,5M_{тр}$.

На рис. 2 показана реальное значение функции $\hat{M}(t)$ (кривая 1) и ее оценка наблюдателем (кривая 2). На рис. 3 показана ошибка идентификации функции $\hat{M}(t)$.

Из рис. 2 и 3 видно, что максимальное значение ошибки идентификации после возник-

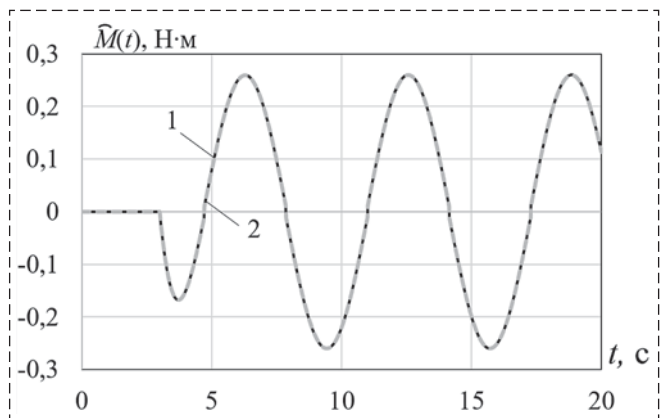


Рис. 2. Функция $\hat{M}(t)$ (кривая 1) и ее оценка наблюдателем (кривая 2)

Fig. 2. Function $\hat{M}(t)$ (curve 1) and its estimation (curve 2)

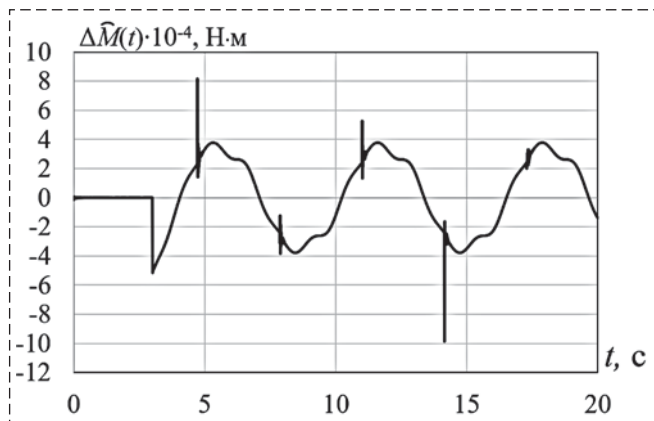


Рис. 3. Ошибка идентификации функции $\hat{M}(t)$
Fig. 3. Function $\hat{M}(t)$ estimation error

новения в электроприводе рассматриваемого дефекта не превышает 0,35 % от идентифицируемой величины $\hat{M}(t)$, что говорит о работоспособности и высокой эффективности синтезированного наблюдателя.

Заключение

В работе рассмотрена задача идентификации дефектов в нестационарных системах, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями, в присутствии возмущений на основе наблюдателей, работающих в скользящем режиме. Скользящий наблюдатель строится на основе редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели исходной системы, обладающей избирательной чувствительностью по отношению к дефектам и возмущению. За счет введения такой модели и канонической формы описывающих ее матриц удалось упростить анализ условий возникновения скользящего режима и ослабить условия существования скользящих наблюдателей по сравнению с известными работами. Эффект ослабления указанных условий возник за счет того, что модель пониженной размерности может не иметь тех свойств, которые присутствуют в исходной системе и препятствуют возможности построения для нее скользящего наблюдателя. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного метода.

Список литературы

1. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.
2. Уткин В. И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974.

3. Жирабок А. Н., Шумский А. Е., Зуев А. В. Подход к диагностированию линейных систем на основе скользящих наблюдателей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 11. С. 728–733.
4. Жирабок А. Н., Зуев А. В., Шумский А. Е. Метод идентификации дефектов в нелинейных системах на основе скользящих наблюдателей // Изв. РАН. ТИСУ. 2021. № 1. С. 11–23.
5. Edwards C., Spurgeon S. On the development of discontinuous observers // Int. J. Control. 1994. V. 59. P. 1211–1229.
6. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer // Int. J. Control. 2004. Vol. 77. P. 622–629.
7. Жирабок А. Н., Зуев А. В., Шумский А. Е. Диагностирование линейных динамических систем: подход на основе скользящих наблюдателей // АиТ. 2020. № 2. С. 18–35.
8. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using sliding mode observers // Automatica. 2007. Vol. 43. P. 1605–1614.
9. He J., Zhang C. Fault reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems // Math. Problems in Eng. 2012. Vol. 2012. ID 451843. P. 1–22.
10. Alwi H., Edwards C. Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation // Automatica. 2008. Vol. 44. P. 1859–1866.
11. Chandra K., Alwi H., Edwards C. Fault reconstruction for a quadrotor using an LPV sliding mode observer // Proc. of 9th IFAC Symp. Safeprocess. Paris, France, 2015. P. 374–379.
12. Zhang K., Jiang B., Yan X., Mao Z. Sliding Mode observer based incipient sensor fault detection with application to high-speed railway traction device // ISA Transactions. 2016. Vol. 63. P. 49–59.
13. Zhirabok A., Zuev A., Filaretov V. Fault identification in underwater vehicle thrusters via sliding mode observers // Int. J. Appl. Math. and Comp. Sci. 2020. Vol. 30, N. 4. P. 679–688.
14. Floquet T., Edwards C., Spurgeon S. On sliding mode observers for systems with unknown inputs // Int. J. Adapt. Contr. and Signal Proc. 2017. Vol. 21. P. 638–656.
15. Fridman L., Levant A., Davila J. Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding-modes // Int. J. Syst. Sci. 2007. Vol. 38. P. 773–791.
16. Tan C., Edwards C. Robust fault reconstruction using multiple sliding mode observers in cascade: development and design // Proc. of American Contr. Conf. St. Louis, USA. 2009. P. 3411–3416.
17. Alwi H., Edwards C., Tan C. Sliding mode estimation schemes for incipient sensor faults // Automatica. 2009. Vol. 45. P. 1679–1685.
18. Rios H., Efimov D., Davila J., Raissi T., Fridman L., Zolghadri A. Non-minimum phase switched systems: HOSM based fault detection and fault identification via Volterra integral equation // Int. J. Adapt. Contr. and Signal Proc. 2014. Vol. 28. P. 1372–1397.
19. Hmidi R., Brahim A., Hmida F., Sellami A. Robust fault tolerant control design for nonlinear systems not satisfying matching and minimum phase conditions // Int. J. Contr., Autom. and Syst. 2020. Vol. 18. P. 1–14.
20. Wang X., Tan C., Zhou D. A novel sliding mode observer for state and fault estimation in systems not satisfying matching and minimum phase conditions // Automatica. 2017. Vol. 79. P. 290–295.
21. Квекернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977.
22. Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Губанков А. С. Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. М.: Наука, 2018.

Fault Identification in Non-Stationary Systems Based on Sliding Mode Observers

A. V. Zuev, alvzuev@yandex.ru, A. N. Zhirabok, zhirabok@mail.ru, V. F. Filaretov, filaretov@inbox.ru,
A. A. Protsenko, pro293133@gmail.com,
Institute of Marine Technology Problems, Vladivostok, 690950, Russian Federation,
Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950, Russian Federation,
Institute of Automation and Control Processes, Vladivostok, 690014, Russian Federation

Corresponding author: **Zhirabok Aleksey N.**, Dr. of Sci., Professor, Far Eastern Federal University,
Vladivostok, 690950, Russian Federation, e-mail: zhirabok@mail.ru

Accepted on September 01, 2021

Abstract

The paper is devoted to the problem of fault identification in technical systems described by non-stationary nonlinear dynamic equations under unmatched disturbances. To solve the problem, sliding mode observers are used. The suggested approach is based on the model of the original system of minimal dimension having different sensitivity to the faults and disturbances in contrast to the traditional approaches to sliding observer design which are based on the original system. Additionally it is assumed that matrices describing such a model have the canonical form and are constant. The main purpose of using such a model is possibility to take into account the non-stationary feature of the systems. As a result, the model has stationary dynamic and non-stationary additional term that allows to promote sliding mode design. Besides, the new approach to design sliding mode observers is suggested. The peculiarity of this approach is that it does not require that original systems should be minimum phase and detectable. According to the traditional approaches stability of the observer is provided by minimum phase and detectability properties. In our approach, stability of the observer is achieved due to the canonical form of the matrices describing the model. In addition, the matching condition is not necessary. This allows to extend a class of systems for which sliding mode observers can be designed. Theoretical results are illustrated by practical example of electric servomotor.

Keywords: nonlinear systems, faults, identification, sliding mode observers

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation of Basic Researches, project no. 20-38-70161, in part project no. 19-08-00347, in part by President grant SP-3252.2019.5.

For citation:

Zuev A. V., Zhirabok A. N., Filaretov V. F., Protsenko A. A. Fault Identification in Non-Stationary Systems Based on Sliding Mode Observers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 12, pp. 625–633.

DOI: 10.17587/mau.22.625-633

References

1. Mironivskii L. A. Functional diagnosis in dynamic systems, Moscow-SPb., MGU-GRIF, 1998 (in Russian).
2. Utkin V. Sliding modes in control optimization. Berlin, Springer, 1992.
3. Zhirabok A. N., Shumsky A. E., Zuev A. V. Approach to fault diagnosis in linear systems via sliding mode observers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, no. 11, pp. 728–733 (in Russian).
4. Zhirabok A. N., Zuev A. V., Shumsky A. E. Methods of fault identification in nonlinear dynamic systems based on sliding mode observers, *J. Computer and Systems Sciences Int.*, 2020, vol. 60, no. 1, pp. 9–21.
5. Edwards C., Spurgeon S. On the Development of Discontinuous Observers, *Int. J. Control*, 1994, vol. 59, pp. 1211–1229.
6. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer, *Int. J. Control*, 2004, vol. 77, pp. 622–629.
7. Zhirabok A. N., Zuev A. V., Shumsky A. Ye. Diagnosis of linear dynamic systems: an approach based on sliding mode observers, *Avtomatika i telemekhanika*, 2020, no. 2, pp. 18–35 (in Russian).
8. Yan X., Edwards C. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using sliding mode observers, *Automatica*, 2007, vol. 43, pp. 1605–1614.
9. He J., Zhang C. Fault reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems, *Math. Problems in Eng.*, 2012, vol. 2012, ID 451843, pp. 1–22.
10. Alwi H., Edwards C. Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation, *Automatica*, 2008, vol. 44, pp. 1859–1866.
11. Chandra K., Alwi H., Edwards C. Fault reconstruction for a quadrotor using an LPV sliding mode observer, *Proc. 9th IFAC Symp. Safeprocess*, Paris, France, 2015, pp. 374–379.
12. Zhang K., Jiang B., Yan X., Mao Z. Sliding Mode observer based incipient sensor fault detection with application to high-speed railway traction device, *ISA Transactions*, 2016, vol. 63, pp. 49–59.
13. Zhirabok A., Zuev A., Filaretov V. Fault identification in underwater vehicle thrusters via sliding mode observers, *Int. Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 679–688.
14. Floquet T., Edwards C., Spurgeon S. On sliding mode observers for systems with unknown inputs, *Int. J. Adapt. Contr. and Signal Proc.*, 2017, vol. 21, pp. 638–56.
15. Fridman L., Levant A., Davila J. Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding-modes, *Int. J. Syst. Sci.*, 2007, vol. 38, pp. 773–791.
16. Tan C., Edwards C. Robust fault reconstruction using multiple sliding mode observers in cascade: development and design, *Proc. of American Contr. Conf.* St. Louis, USA, 2009, pp. 3411–3416.
17. Alwi H., Edwards C., Tan C. Sliding mode estimation schemes for incipient sensor faults, *Automatica*, 2009, vol. 45, pp. 1679–1685.
18. Rios H., Efimov D., Davila J., Raissi T., Fridman L., Zolghadri A. Non-minimum phase switched systems: HOSM based fault detection and fault identification via Volterra integral equation, *Int. J. Adapt. Contr. and Signal Proc.*, 2014, vol. 28, pp. 1372–1397.
19. Hmidi R., Brahim A., Hmida F., Sellami A. Robust fault tolerant control design for nonlinear systems not satisfying matching and minimum phase conditions, *Int. J. Contr., Autom. and Syst.*, 2020, vol. 18, pp. 1–14.
20. Wang X., Tan C., Zhou D. A novel sliding mode observer for state and fault estimation in systems not satisfying matching and minimum phase conditions, *Automatica*, 2017, vol. 79, pp. 290–295.
21. Kwakernaak H., Sivan R. *Linear optimal control systems*, New York, Wiley, 1972.
22. Filaretov V. F., Zuev A. V., Gubankov A. S. Manipulators control when performing various technological operations, Moscow, Nauka, 2018 (in Russian).

М. А. Волкова, ст. преподаватель, volkova_m@mirea.ru, **А. М. Романов**, канд. техн. наук, доц., romanov@mirea.ru,
М. П. Романов, д-р техн. наук, проф., m_romanov@mirea.ru,
МИРЭА — Российский технологический университет

Распределенная система локализации объектов в рабочей зоне модульного реконфигурируемого мобильного робота*

Предлагается новый подход к локализации объектов в рабочей зоне модульного реконфигурируемого робота (МРР), предполагающий установку роботом стационарных опорных измерительных пунктов (ОИП), состоящих из отделяемых от него модулей. В основе данного подхода лежит ранее предложенная авторами архитектура системы управления МРР и новый метод сопоставления информации о скорости и положении объектов, получаемой с различных сенсоров. Суть подхода состоит в следующем: прибыв в зону выполнения задачи, МРР выделяет из своего состава ОИП, содержащий источник питания, вычислительное устройство, беспроводной приемопередатчик и сенсор. ОИП осуществляют слежение за рабочей зоной с использованием разнородных датчиков (камер, дальномеров и т. д.), сегментацию объектов по получаемым измерениям и передачу этой информации на борт робота. Далее с использованием нового метода сопоставления информации о скорости и положении объектов происходит сопоставление измерений, полученных с различных сенсоров, что позволяет локализовать объекты даже в тех случаях, когда они не видны для части ОИП. Одним из ключевых преимуществ нового подхода является возможность его реализации в распределенной архитектуре МРР. Проведенные модельные экспериментальные исследования показали, что по критерию качества отслеживания Multiple Object Tracking Accuracy (МОТА) метод имеет оценку 86 %, что превосходит большинство известных аналогов, а динамическая ошибка локализации объектов в рабочей зоне 8×7 м с использованием двух камер и одного дальномера не превышает 10 см.

Ключевые слова: реконфигурируемые роботы, локализация объектов, слежение за объектами, комплексирование сенсорной информации

Введение

Локализация объектов в рабочей зоне мобильного робота является одной из важнейших задач, которую необходимо решить при создании его системы управления. Для погрузки/разгрузки и осуществления внешних манипуляций с помощью робота требуется определить положение перемещаемых объектов [1]. Для осуществления группового взаимодействия нескольких роботов необходима их постоянная взаимная локализация. Наконец, для предотвращения столкновений следует постоянно отслеживать появление в рабочей области внешних динамических объектов, расположение которых невозможно заранее картографировать [2, 3].

Сейчас для решения этих задач, как правило, используются оптические датчики, уста-

новленные непосредственно на самом роботе [4]. Для определения расстояния до объектов в этом случае используются камеры глубины, стереометрия или дальномеры, основанные на различных физических принципах [5—7]. Такой подход существенно ограничивает возможность разнесения в пространстве отдельных сенсоров, что приводит к тому, что они смотрят на все объекты, по сути, из одной точки. Это, с одной стороны, ограничивает возможности применения стереометрии и аналогичных подходов для определения точного расположения объектов, а с другой стороны, не позволяет решать проблему локализации, когда один объект в поле зрения сенсоров закрыт другим.

Наиболее популярной альтернативой локализации с использованием датчиков, расположенных непосредственно на роботах, является применение спутниковых, ультразвуковых и радионавигационных систем [8]. Первые применяются в условиях открытой местности, а последние — в основном в помещениях.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90301.

Наконец, в строго детерминированных условиях, характерных для промышленной робототехники, научных лабораторных экспериментов и организации киносъемок, в том числе спортивных мероприятий, используются системы локализации объектов с помощью массива видеокамер [9—11]. При этом важно отметить, что существующие технологии не предполагают возможность монтажа таких систем силами робототехнических комплексов, которые в дальнейшем будут использовать их для локализации объектов.

Целью данной работы является создание распределенной системы локализации объектов в рабочей зоне робототехнического комплекса или многоагентной робототехнической системы, которая бы обеспечивала высокую точность измерений и могла быть развернута силами автономной группы роботов.

В данной работе предлагается новый подход к локализации объектов в рабочей зоне модульного реконфигурируемого робота (МРР), предполагающий установку одним или несколькими роботами опорных измерительных пунктов (ОИП), целиком состоящих из отделяемых от этих роботов модулей. Данный подход позволяет быстро разворачивать инфраструктуру навигационного поля, обеспечивающую локализацию самих МРР, манипулируемых объектов, а также динамических объектов, которые могут создавать опасность столкновения или служить источником возмущений. После завершения необходимых работ все сенсоры могут быть вновь интегрированы в состав МРР. При этом достигаемое качество решения задач локализации у такой системы оказывается сопоставимо со стационарными оптическими комплексами, которые ранее можно было применять только в строго детерминированных лабораторных условиях.

Ключевыми новыми результатами данной работы являются:

1. Новая концепция распределенной системы локализации объектов на базе МРР.
2. Новый метод сопоставления информации о скорости и положении объектов в рабочей зоне МРР.
3. Результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие высокое качество отслеживания объектов по критерию *Multiple Object Tracking Accuracy (MOTA)* не хуже 86 % и динамическую точность локализации объектов в рабочей зоне 8×7 м с использованием двух камер и одного дальномера не хуже 10 см.

Работа имеет следующую структуру. Вначале приводится обзор публикаций в научных изданиях, относящихся к тематике исследования. Далее предлагается концепция новой распределенной системы локализации объектов на базе МРР и обсуждаются аспекты ее практической реализации. Следующий раздел посвящен описанию нового метода сопоставления информации о скорости и положении объектов в рабочей зоне МРР с использованием предложенной системы. Затем приводятся результаты модельных экспериментальных исследований, демонстрирующие высокое качество работы разработанных решений. В заключении сформулированы ключевые выводы по результатам исследования.

Обзор работ по тематике исследования

Наиболее часто задача локализации объектов без установки на них специальных маяков решается для определения положения беспилотных летательных аппаратов [12]. Это делается для оценки их траекторий в ходе экспериментальных исследований [12], создания систем активного противодействия беспилотным летательным аппаратам [13], а также резервирования или замены глобальной спутниковой навигационной системы [10], что актуально при полетах внутри помещений или в сложной электромагнитной обстановке, например, при обследовании линий электропередач [14]. Отметим, что в последнем случае оптическими средствами сопровождения могут комплектоваться непосредственно роботизированные стартовые комплексы [15].

Важно отметить, что ни в одном из перечисленных случаев не предполагается, что система позиционирования может быть развернута автономным роботом или их группой самостоятельно. Решению этой проблемы посвящена работа исследователей из немецкого аэрокосмического центра *DLR* [16], которые предложили мультиагентную робототехническую систему, позволяющую выполнять картографирование и локализацию отдельных объектов. В качестве сенсоров на каждом из роботов была установлена стереопара, состоящая из двух камер с разрешением 1024×508 точек и кадровой частотой 14 Гц. В результате им удалось обеспечить среднюю ошибку локализации не хуже 40 см. Главными недостатками данного решения является ограниченный набор датчиков каждого робота,

а также необходимость выведения одного или нескольких роботов из решения задачи в тех случаях, когда за каким-то участком рабочей зоны необходимо организовать непрерывное наблюдение.

В качестве пути преодоления этого недостатка аналогичное решение может быть создано на базе МРР [17]. Такие роботы могут при необходимости разделяться на несколько независимых устройств, а потом объединяться заново под единым централизованным управлением [18]. Таким образом, мобильный робот может выделить из своего состава часть, содержащую необходимые датчики, стационарно установить ее в качестве ОИП, а потом продолжить работу, например, по транспортировке грузов. Концепции построения системы локализации объектов на базе МРР будет посвящен следующий раздел данной работы.

Абстрагируясь от метода установки оборудования в ОИП, саму задачу локализации можно разделить на три этапа: выделение объектов на основе сенсорных данных; их распознавание/сопоставление по информации с различных сенсоров; восстановление расположения каждого объекта. В последние годы наибольшее внимание уделялось этапу выделения объектов [19, 20]. Широкое распространение для этих целей получили искусственные нейронные сети, которые одновременно с сегментацией позволяют проводить и распознавание объектов [20, 21]. В случае качественного сопоставления объектов по информации с различных сенсоров их локализация может быть выполнена тривиально с использованием известных методов трехмерной реконструкции [22, 23]. Ключевой задачей, влияющей на точность локализации, является обеспечение точного слежения за каждым из объектов в рабочей зоне в течение длительного времени. При этом основную сложность составляет отслеживание перемещений подвижных объектов. Остановимся подробнее на существующих методах разрешения этой проблемы.

Методы слежения [24] за движущимися объектами можно разделить на две группы: 1) основанные на выделении и отслеживании отдельных объектов и 2) основанные на построении сетчатых карт занятости.

Методы первой группы отличаются более высокой точностью оценки отдельных параметров объектов [25], но имеют более низкую метрику качества слежения *MOTA*. Последнее

связано с проблемой частого переключения идентификаторов объектов, свойственной этим методам. Еще одной характерной чертой данных методов является высокая вычислительная сложность этапа детектирования объектов, на котором происходит их идентификация по ранее выделенным признакам (цвет, текстура и т. д.) [26]. Распространенным методом сопоставления новых данных с ранее полученными и построения траектории движения каждого конкретного объекта является Венгерский алгоритм, применяемый в сочетании с фильтром Калмана [27]. Также для отслеживания объектов применяются фильтр частиц [28] или метод множественных гипотез [25]. Особенностью методов первой группы является практически неограниченный рост вычислительной сложности с увеличением числа объектов. В связи с этим для упрощения расчетов многие авторы используют представление объектов в виде материальных точек [29]. Еще одной проблемой данных методов являются окклюзии объектов, для борьбы с которыми в работах [30] применяются гомографические преобразования.

Отличительная черта методов второй группы — универсальное представление данных, которое существенно упрощает комплексирование информации с датчиков различного типа [31]. Главным недостатком данных методов является обязательное наличие детерминированной в пространстве плоскости рабочей сцены, что делает невозможным их применение для отслеживания беспилотных летательных аппаратов. К наиболее значимым работам, посвященным слежению за объектами на основе построения сетчатых карт занятости, можно отнести работу [32], а также ее развитие в статьях [33, 34]. Данные методы наиболее часто применяются в задачах отслеживания спортсменов (*Multi-Athlete Tracking*) с помощью системы камер, где, с одной стороны, требование наличия плоскости земли не является существенным ограничением, а с другой стороны, востребовано высокое качество и стабильность работы. Метрика *MOTA* для методов этой группы часто превышает 80 %. В рамках спортивных мероприятий число участников, как правило, ограничено, что приводит к появлению алгоритмов, использующих это значение в качестве важного входного параметра. Очевидно, такие алгоритмы не применимы для достижения цели данной работы. В то же время, в работах [35, 36] представлен метод отслеживания второй груп-

пы на основе фильтра частиц и *Mean-Shift*-кластеризации, который не требует априорной информации о числе объектов. Обратной стороной данного подхода явилось неминуемое увеличение вычислительной сложности. В работах [9, 37] применяется гибридный метод, сочетающий в себе построение карты занятости и выделение основных признаков объектов. Это позволило авторам обеспечить в целом более высокий показатель *MOTA* по сравнению с ранее рассмотренными методами.

Главным препятствием к реализации перечисленных методов на базе МРР является их вычислительная сложность в сочетании с низкой возможностью организации параллелизма наиболее ресурсозатратных вычислений. Для преодоления этой проблемы в данной работе будет предложен новый метод отслеживания траекторий движения объектов в рабочей зоне, который обеспечивает высокое качество слежения по метрике *MOTA* и при этом может быть вычислен в реальном времени на базе распределенной архитектуры системы управления МРР.

Распределенная система локализации объектов на базе МРР

Как отмечалось выше, главным недостатком систем локализации, основанных на применении группы роботов, аналогичных представленным в работе [16], является тот факт, что часть агентов в таких системах, по сути, теряет возможность выполнять еще какие-либо функции. Это связано не столько с ограничением применяемых расчетных методов (например, решение, рассмотренное в работе [16], позволяет осуществлять локализацию в процессе перемещения робота), сколько с тем, что наилучшая точность и охват рабочей зоны достигаются только при специфической стационарной расстановке роботов. В то же время, мобильный робот, особенно оснащенный манипулятором, — это многофункциональное и дорогое изделие, использование которого в роли неподвижного пункта наблюдения является достаточно расточительным. В то же время постоянная транспортировка оборудования таких наблюдательных пунктов в виде отдельных устройств будет существенно сокращать общую грузоподъемность робота, не давая никаких преимуществ на марше. Также в этом случае неминуемо встанет вопрос

обеспечения независимого энергопитания этого оборудования и его подзарядки.

В данной работе предлагается более универсальный подход, который предполагает создание стационарных ОИП на основе модулей гетерогенного МРР. Рассмотрим его на примере робота *SABER* [38].

Робот *SABER* представляет собой моноколесо, которое реконфигурируется в два независимых манипулятора (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Данный робот оснащен платформой (1), андрогинными стыковочными узлами (3) и парой манипуляторов (2), которые могут преобразовываться в моноколесо, при этом для обеспечения равновесия применяются выдвижные опоры (4). На платформе могут устанавливаться сменные модули (5), в том числе инструменты, а также различные датчики, автоматически подключаемые к системе управления по шине *Ethernet POWERLINK* аналогично тому, как описано в работе [18], а также к распределенной системе электропитания робота аналогично тому, как описано в работе [39]. В общем случае, если модуль датчика не имеет собственного источника энергии, он будет запитан от бортовой сети, а если имеет, то этот источник будет автоматически интегрирован в общую распределенную систему электропитания робота. За счет использования андрогинных стыковочных узлов данные датчики для расширения области обзора могут быть установлены, например, на манипуляторе. Программное обеспечение интеллектуальных ядер робота (в терминах работы [18]) реализовано на базе программного инструментария ROS с использованием расширений для работы в реальном времени, описанных в работах [40, 41].

В рамках данной работы предлагается, не выходя за базовые возможности архитектуры, описанной в работе [18], отделить от робота модули, включающие в себя один или несколько датчиков, источник питания, вычислительное устройство и беспроводной приемопередатчик, объединив их в устанавливаемый роботом стационарный ОИП. При таком подходе зарядка аккумуляторных батарей ОИП будет проводиться от бортовой сети робота, а также появится возможность адаптировать состав сенсоров на каждом из ОИП в зависимости от изменяющихся задач. При этом после выполнения миссии в конкретном районе функционирования робота установленные ранее ОИП

могут быть снова интегрированы в состав одного или нескольких роботов, увеличив как энергоемкость его системы электропитания, так и сенсорные возможности.

Связь между ОИП и бортовыми системами управления роботов предлагается осуществлять по беспроводной сети стандарта *IEEE 802.11*, с использованием метода технологии синхронизации узлов между собой, описанной в работе [42]. Последнее позволит с микросекундной точностью обеспечивать одновременную регистрацию измерения со всех ОИП. При этом для снижения объема данных, передаваемых по беспроводному каналу, предлагается процедуру сегментации и выделения объектов проводить непосредственно на вычислителе ОИП, все остальные операции, связанные с комплексированием сенсорной информации и локализацией объектов осуществлять на базе распределенной вычислительной системы, реализованной в архитектуре MPP, методом, описанным в работе [43]. Схема организации коммуникаций в процессе локализации объектов предложенным методом представлена на рис. 2 (см. вторую сторону обложки), где штриховыми линиями показаны результаты сегментации и выделения объектов, а сплошной линией — результаты локализации.

В рамках предложенной концепции система локализации объектов имеет следующий цикл работы: 1) один или несколько MPP выдвигаются в район выполнения миссии; 2) в заранее выбранных точках они устанавливают ОИП, выделяя для этого часть своих модулей; 3) один из MPP выбирается в качестве оператора системы локализации и устанавливает синхронизированную беспроводную связь со всеми ОИП; 4) ОИП наблюдают за рабочей зоной, в которой выполняется миссия, выделяют объекты и передают соответствующие им измерения MPP-оператору, который выполняет комплексирование данных и локализацию объектов (результаты локализации при необходимости передаются на другие MPP); 5) после завершения миссии роботы демонтируют все ОИП и интегрируют в себя обратно их модули.

Отличительными чертами предложенной концепции построения распределенной системы локализации объектов на базе MPP являются: возможность использования на разных ОИП датчиков различного типа (камер, дальномеров и т. д.), а также их комбинации; выполнение сегментации и выделения объектов

на бортовом вычислителе ОИП, а локализации — на базе распределенной вычислительной системы в архитектуре MPP; организация информационного обмена между ОИП и MPP по синхронизированному беспроводному каналу. Следующий раздел будет посвящен разработке метода локализации, который позволит реализовать предложенную концепцию на практике.

Новый метод сопоставления информации о скорости и положении объектов

Рассмотрим систему локализации, которая включает S сенсоров, в поле зрения которых могут находиться N объектов. На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) приведен пример такой системы для $S = 3$ и $N = 3$.

Измерения всеми сенсорами проводятся синхронно. Пусть в момент измерения каждому объекту соответствует его вектор состояния $x_i = (L, V, \alpha, F)^T$, где i — номер объекта; L — вектор, содержащий компоненты положения (координаты); V — вектор, содержащий компоненты скорости; α — вектор, содержащий компоненты ускорения; F — набор дополнительных признаков, характеризующих объект.

Совокупность данных, получаемых с каждого сенсора в момент измерения, представим в виде двух множеств O_M и O_F : $O_M = \{z_n : n = 1, \dots, N\}$, где z_n — вектор координат центра объекта, сегментированного на основе измерений сенсора; $O_F = \{f_n : n = 1, \dots, N\}$, где f_n — вектор, отражающий численные характеристики дополнительного признака (цвет, форма и т. д.), присущего n -му объекту. Все наблюдения, полученные в момент t -го измерения s -м сенсором, обозначим $O_t = \{O_M; O_F\}$.

Важно отметить, что число векторов z может различаться как для синхронно полученных измерений разных сенсоров, так и для последовательных измерений, полученных одним сенсором. Это связано с тем, что число сегментированных объектов может различаться от измерения к измерению. Например, в случае окклюзии двух объектов они сегментируются как один. Аналогичным образом ситуация обстоит с множеством O_F . Более того, наблюдения, полученные для i -го объекта одним и тем же сенсором, в ходе различных измерений могут в действительности соответствовать различным объектам, так как процедура сегментации не гарантирует сохранения числа и поряд-

ка результатов. Это не позволяет напрямую использовать полученные векторы z_i для решения задачи локализации. На решение данной проблемы направлен разработанный метод сопоставления информации о скорости и положении объектов. Новый метод предполагает для каждого измерения в системе координат отдельного сенсора поиск наиболее вероятного соответствия среди ранее отслеживаемых объектов. Иными словами, для каждой пары $\{z_k; f_k\}$ находится такой номер объекта i , что для $\forall h \in [1; N] \wedge h \in \mathbb{N}$ верно неравенство

$$p(O_{i|k}|x_i) \geq p(O_{h|k}|x_i), \quad (1)$$

где $p(O_{i|k}|x_i)$ отражает максимальное соответствие k -го элемента множества O_i объекту x_i . Для вычисления функции правдоподобия $p(O_{i|k}|x_i)$ применяется метод оценки максимального правдоподобия, основанный на байесовской статистике [44].

После того как все измерения распределены по объектам, с их помощью можно восстановить координаты каждого объекта, используя известные методы трехмерной реконструкции [22, 23]. В случае, если для одного сенсора несколько пар $\{z_k, f_k\}$ были сопоставлены с одним и тем же объектом, выбирается пара с наибольшим значением $p(O_{i|k}|x_i)$, а остальные помечаются как нераспределенные. Для них создаются новые объекты: выполняется реконструкция, а N увеличивается на число новых объектов. Начальная инициализация объектов выполняется аналогично тому, как это делается в работе [29]. Вычисление $p(O_{i|k}|x_i)$ для каждой пары $\{z_k, f_k\}$ требует ряда предварительных процедур, что делает разработанный метод трехэтапным.

Этап 1. Формирование выборки наблюдений в системе координат отдельного сенсора, которое заключается в составлении множества

$$O' = \{Z_P; Z_K\},$$

где Z_P — совокупность векторов проецированных координат объектов, измеренных другими сенсорами (для их получения необходимы матрицы преобразований, пример для расчета которых представлен в работе [45]); Z_K — совокупность проецированных векторов координат объектов, прогнозируемых с помощью фильтра Калмана в системе координат, выбранной для локализации. Оценка L составляющей вектора

x_i в момент измерения $t + 1$ и коррекция L, V, α проводятся отдельно для каждой оси на базе формул, представленных в работе [43].

Объединим множества O' и O_M , которые содержат данные о положении объектов: $O'_M = \{O_M; O'\}$. Исходя из этого совокупность всех наблюдений, полученных в момент t -го измерения, перепишем в виде $O_t = \{O'_M; O_F\}$.

Этап 2. Расчет общей функции правдоподобия. Значение общей функции правдоподобия рассчитывается согласно формуле

$$p(O_t|x_i) = p(O'_M|x_i) + p(O_F|x_i). \quad (2)$$

Оценка составляющей $p(O'_M|x_i)$ функции правдоподобия вычисляется согласно формуле

$$p(O'_M|x_i) = A_M \exp\left(-\frac{p^2(L, O'_M)}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где $p^2(L, O'_M)$ — мера подобия между эталонным положением объекта и наблюдением. Данная мера рассчитывается с помощью методов кластерного анализа (например, с использованием *Mean-Shift*-метода, который удобен ввиду отсутствия необходимости заранее задавать число кластеров). Предположим, что $\exp\left(-\frac{p^2(L, O'_M)}{2\sigma^2}\right) \cong 1$, $O'_M \in C$, для векторов координат множества O'_M , входящих в кластер C . В таком случае формулу (3) можно записать в форме

$$p(O'_M|x_i) = \sum_{c=1}^2 \sum_1^{o^c} A_M^c, \quad (4)$$

где c указывает на принадлежность вектора к Z_P ($c = 1$) или Z_K ($c = 2$), o^c — это число векторов координат, входящих в C ; A_M — параметр, отражающий степень достоверности полученной информации о входящих в состав кластера данных. Он задается в соответствии с условием $A_M^{c=1} < A_M^{c=2}$.

Оценка составляющей $p(O_F|x_i)$ функции правдоподобия вычисляется согласно формуле

$$p(O_F|x_i) = A_F \exp\left(-\frac{p^2(F, O_F)}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

где $p^2(F, O_F)$ — мера подобия между референсным признаком объекта и наблюдением, которая может быть рассчитана, например, с использованием методов, изложенных в работе [46]; σ — уровень шума наблюдений сенсора,

а A_F — параметр, являющийся мерой актуальности референсного признака (предполагается, что признаки объектов нестационарны). Данная мера изменяется с течением времени согласно формуле

$$A_F(t_m) = A_{F_{\max}} \exp\left(-\frac{t_m}{d\Delta T_S}\right),$$

где t_m — время, которое прошло с последнего определения признака; ΔT_S — период измерений сенсора; d — коэффициент снижения актуальности данных; $A_{F_{\max}}$ — максимальное значение параметра A_F , обеспечивая снижение влияния наиболее старых измерений того или иного признака.

Этап 3. Сопоставление данных с объектами.

На данном этапе с использованием полученных оценок функции правдоподобия для каждого измерения каждого сенсора ищется соответствующий ему объект, для которого выполняется неравенство (1), что и является результатом процедуры сопоставления информации о скорости и положении объектов.

Экспериментальные исследования

Для оценки эффективности разработанного метода сопоставления информации о скорости и положении объектов в среде компьютерного моделирования *Octave* была проведена серия экспериментов. В ходе этих экспериментов в рабочей зоне 8×7 м моделировалось движение 10 объектов, за которыми наблюдали в первом эксперименте с помощью двух камер, а во втором эксперименте — с помощью двух камер и одного двухкоординатного сканирующего лазерного дальномера, установленных на стационарные ОИП. Схема расположения ОИП и траектории движения объектов в ходе экспериментов представлены на рис. 4 (см. вторую сторону обложки).

По условиям экспериментов предполагалось, что все датчики откалиброваны, синхронизированы по беспроводному каналу и проводят измерения с частотой 25 Гц. Длительность каждого эксперимента составляла 60 с (1500 измерений). На протяжении всех экспериментов для каждого из объектов вычислялась ошибка его локализации, а также метрика *MOTA*. Для вычисления последней использовалось выражение

$$MOTA = \left(1 - \frac{\sum_t (fn_t + fp_t + idsw_t)}{\sum_t gt_t}\right) \cdot 100,$$

где в каждый момент измерения t для пар точек с эталонными и оцененными координатами рассчитывались параметры: fn_t — ложно не сопоставленные пары точек; fp_t — ложно сопоставленные пары точек; $idsw_t$ — число переключений идентификаторов объектов; gt_t — число эталонных точек.

Численные оценки точности локализации и качество отслеживания траекторий объектов с использованием метрики *MOTA* представлены в таблице.

Результаты экспериментальных исследований

Состав сенсоров	Среднее значение ошибки локализации	Средне-квадратическое отклонение ошибки локализации	Максимальное абсолютное значение ошибки локализации	MOTA
Две камеры	1,7 см	0,98 см	10,5 см	82 %
Две камеры и дальномер	1,3 см	0,93 см	9,8 см	86 %

Как видно из таблицы, точность локализации превышает результаты, полученные в работе [16], что можно объяснить возможностью в рамках предложенного подхода обеспечить более выгодное расположение ОИП с точки зрения трехмерной реконструкции по сравнению со стереопарой, установленной на одном роботе. Также можно отметить, что качество отслеживания объектов по метрике *MOTA*, обеспечиваемое предложенным методом, превосходит большинство известных аналогов [47]. Более того, из таблицы отчетливо видно, что увеличение числа комплексируемых сенсоров (в том числе разнородных) приводит как к повышению точности, так и к улучшению качества отслеживания объектов.

Заключение

В работе предложен новый подход к локализации объектов в рабочей зоне, который позволяет автономной группе мобильных МРР самостоятельно развернуть все необходимое оборудование, сконфигурировав состав сенсоров под специфику решаемой задачи. При этом

после завершения миссии все использованные датчики могут быть интегрированы в один или несколько МРР, расширяя их диагностические возможности на марше. Для практической реализации предложенного подхода был разработан новый метод сопоставления информации о скорости и положении объектов в рабочей зоне МРР. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что оценка динамической точности локализации составляет не хуже 10 см, при этом по критерию качества отслеживания *MOTA* новый метод превосходит большинство известных аналогов.

Список литературы

1. **Billard A., Kragic D.** Trends and challenges in robot manipulation // *Science*. 2019. Vol. 364, N. 6446. P. eaat8414.
2. **Yasuda Y. D. V., Martins L. E. G., Cappabianco F. A. M.** Autonomous visual navigation for mobile robots: A systematic literature review // *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2020. Vol. 53, N. 1. P. 1–34.
3. **Tolani V.** et al. Visual navigation among humans with optimal control as a supervisor // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021. Vol. 6, N. 2. P. 2288–2295.
4. **Payá L., Gil A., Reinoso O.** A state-of-the-art review on mapping and localization of mobile robots using omnidirectional vision sensors // *Journal of Sensors*. 2017. Vol. 2017. P. 1–20.
5. **Chen H.** et al. Vision and laser fused SLAM in indoor environments with multi-robot system // *Assembly Automation*. 2019. Vol. 39, N. 2. P. 297–307.
6. **Tang B., Jiang L.** Binocular stereovision omnidirectional motion handling robot // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2020. Vol. 17, N. 3. P. 1729881420926852.
7. **Kuo C. Y.** et al. Development of an immersive SLAM-based VR system for teleoperation of a mobile manipulator in an unknown environment // *Computers in Industry*. 2021. Vol. 132. P. 103502.
8. **Romanov A. M.** et al. A Navigation System for Intelligent Mobile Robots // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). IEEE, 2019. P. 652–656.
9. **Yang Y.** et al. 3D multiview basketball players detection and localization based on probabilistic occupancy // 2018 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA). IEEE, 2018. P. 1–8.
10. **Егорцев М. В., Диане С. А. К., Кац Н. Д.** Алгоритмическое обеспечение системы внешнего наблюдения и маршрутизации автономных мобильных роботов // *Российский технологический журнал*. 2021. Т. 9, № 3. С. 15–23.
11. **Ben Y., Cengiz K.** Research on Visual Orientation Guidance of Industrial Robot Based on CAD Model under Binocular Vision // *Computer-Aided Design and Applications*. 2022. Vol. 19, N. S2. P. 52–63.
12. **Srigrarom S.** et al. Multi-camera Multi-drone Detection, Tracking and Localization with Trajectory-based Re-identification // 2021 Second International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA-SYMP). IEEE, 2021. P. 1–6.
13. **Park S.** et al. Survey on Anti-Drone Systems: Components, Designs, and Challenges // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 42635–42659.
14. **Khalyasmaa A. I.** et al. Diagnostic system for OHL state assessment // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE, 2015. P. 1–5.
15. **Khalyasmaa A. I.** et al. Robotic intelligence laboratory for overhead transmission lines assessment // 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). IEEE, 2016. P. 1–6.
16. **Schuster M. J.** et al. Distributed stereo vision-based 6D localization and mapping for multi-robot teams // *Journal of Field Robotics*. 2019. Vol. 36, N. 2. P. 305–332.
17. **Андреев В. П., Подураев Ю. В.** Функционально-модульный принцип построения гетерогенных мобильных роботов // *Экстремальная робототехника*. 2016. Т. 1, № 1. С. 39–49.
18. **Romanov A. M., Romanov M. P., Shestakov E. I.** A novel architecture for control systems of modular reconfigurable robots // 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS). IEEE, 2017. P. 131–134.
19. **Yao R.** et al. Video object segmentation and tracking: A survey // *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*. 2020. Vol. 11, N. 4. P. 1–47.
20. **Li Y., Ibanez-Guzman J.** Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2020. Vol. 37, N. 4. P. 50–61.
21. **Minaee S.** et al. Image segmentation using deep learning: A survey // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2021.
22. **Ariff S. A. M.** et al. Exploratory Study of 3d Point Cloud Triangulation for Smart City Modelling and Visualization // *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. Vol. 44. P. 71–79.
23. **Álvarez H.** et al. A Multi Camera and Multi Laser Calibration Method for 3D Reconstruction of Revolution Parts // *Sensors*. 2021. Vol. 21, N. 3. P. 765.
24. **Llamazares Á., Molinos E. J., Oca a M.** Detection and tracking of moving obstacles (DATMO): a review // *Robotica*. 2020. Vol. 38, N. 5. P. 761–774.
25. **Zhang Z.** et al. Multiple target tracking based on multiple hypotheses tracking and modified ensemble Kalman filter in multi-sensor fusion // *Sensors*. 2019. Vol. 19, N. 14. P. 3118.
26. **Sekii T.** Robust, real-time 3d tracking of multiple objects with similar appearances // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016. P. 4275–4283.
27. **Sun Q.** et al. Multiple object tracking for yellow feather broilers based on foreground detection and deep learning // *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 58, N. 2.
28. **Мокшин В. В., Кирпичников А. П., Шарнин Л. М.** Отслеживание объектов в видеопотоке по значимым признакам на основе фильтрации частиц // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Vol. 16, N. 18. P. 306–310.
29. **Zhou J., Kwan C.** Tracking of multiple pixel targets using multiple cameras // *International Symposium on Neural Networks*. Springer, Cham, 2018. P. 484–493.
30. **Eshel R., Moses Y.** Homography based multiple camera detection and tracking of people in a dense crowd // 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2008. P. 1–8.
31. **Teizer J., Caldas C. H., Haas C. T.** Real-time three-dimensional occupancy grid modeling for the detection and tracking of construction resources // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2007. Vol. 133, N. 11. P. 880–888.
32. **Coué C.** et al. Bayesian occupancy filtering for multitarget tracking: an automotive application // *The International Journal of Robotics Research*. 2006. Vol. 25, N. 1. P. 19–30.
33. **Gindele T.** et al. Bayesian occupancy grid filter for dynamic environments using prior map knowledge // 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2009. P. 669–676.
34. **Nuss D., Yuan T., Krehl G., Stuebler M., Reuter S., Dietmayer K.** Fusion of laser and radar sensor data with a sequential Monte Carlo Bayesian occupancy filter // *Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seoul, Korea, 28 June–1 July 2015. P. 1074–1081.

35. **Taj M., Cavallaro A.** Distributed and decentralized multi-camera tracking // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2011. Vol. 28, N. 3. P. 46–58.
36. **Taj M., Cavallaro A.** Simultaneous Detection and Tracking with Multiple Cameras // *Machine Learning for Computer Vision*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. C. 197–214.
37. **Liang Q.** et al. Multi-Player Tracking for Multi-View Sports Videos with Improved K-Shortest Path Algorithm // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, N. 3. P. 864.
38. **Romanov A., Yashunskiy V., Chiu W.-Y.** SABER: Modular Reconfigurable Robot for Industrial Applications // *IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* 2021. 2021 (в печати).
39. **Romanov A. M., Mikheenko I. S.** A novel approach for creating modular reconfigurable robots with distributed power system // *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2018. P. 974–978.
40. **Romanov A., Slepynina E.** Real-time Ethernet POWERLINK Communication for ROS. Part I. General Concept // *2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*. IEEE, 2020. P. 159–162.
41. **Romanov A., Slepynina E.** Real-time Ethernet POWERLINK Communication for ROS. Part II. Hardware and Software // *2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*. IEEE, 2020. P. 163–166.
42. **Romanov A. M., Gringoli F., Sikora A.** A precise synchronization method for future wireless TSN networks // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 17, N. 5. P. 3682–3692.
43. **Romanov A. M.** et al. Modular Reconfigurable Robot Distributed Computing System for Tracking Multiple Objects // *IEEE Systems Journal*. 2021. Vol. 15, N. 1. P. 802–813.
44. **Rossi R. J.** Mathematical statistics: an introduction to likelihood based inference. John Wiley & Sons, 2018.
45. **Hu Z.** et al. Extrinsic calibration of 2-D laser rangefinder and camera from single shot based on minimal solution // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2016. Vol. 65, N. 4. P. 915–929.
46. **Yang C., Duraiswami R., Davis L.** Fast multiple object tracking via a hierarchical particle filter // *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05)*. IEEE, 2005. Vol. 1. P. 212–219.
47. **Kong L.** et al. Online Multiple Athlete Tracking with Pose-Based Long-Term Temporal Dependencies // *Sensors*. 2021. Vol. 21, N. 1. P. 197.

Distributed System for Objects Localization in the Working Area of a Modular Reconfigurable Mobile Robot

M. A. Volkova, Senior Lecturer, volkova_m@mirea.ru, **A. M. Romanov**, Associate Professor, romanov@mirea.ru,
M. P. Romanov, Director of the Institute of Cybernetics, m_romanov@mirea.ru,
 MIREA — Russian technological university

Corresponding author: Volkova Maria A. Senior Lecturer,
 Russian technological University, Russian Federation, e-mail: volkova_m@mirea.ru

Accepted on August 26, 2021

Abstract

The paper proposes a novel approach to the objects localization in the working area of a modular reconfigurable robot (MRR), which implies the installation of stationary monitoring points (SMP), consisting of detachable robot's modules and installed by robot itself. This approach is based on the architecture of the MRR control system previously proposed by the authors and a new method for comparing information about the speed and position obtained from various sensors. The key steps of the approach are following. Upon arriving in the target area, the MRR places SMPs, which consist of a power source, a computing device, a wireless transceiver and a sensor, detached from the robot. Then SMPs monitor the working area using different types of sensors (cameras, rangefinders, etc.), perform segmentation of the measured data and transfer this information to the robot. Further a sensor fusion is performed using a novel object tracking method, which makes it possible to localize target objects even in those cases when they are not visible by some of the SMPs. One of the key advantages of the new approach is a possibility of implementation in the distributed architecture of a MRR. The simulation results show that proposed method has Multiple Object Tracking Accuracy (MOTA) metric of 86 %, which is higher than the most of its analogues, while the estimated dynamic object localization error in a 8x7 m working area using 2 cameras and 1 rangefinder does not exceed 10 cm.

Keywords: reconfigurable robots, object localization, object tracking, sensor fusion

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90301.

For citation:

Volkova M. A., Romanov A. M., Romanov M. P. Distributed System for Objects Localization in the Working Area of a Modular Reconfigurable Mobile Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 12, pp. 634–643.

DOI: 10.17587/mau.22.634-643

References

1. **Billard A., Kragic D.** Trends and challenges in robot manipulation, *Science*, 2019, vol. 364, no. 6446, pp. eaat8414.
2. **Yasuda Y. D. V., Martins L. E. G., Cappabianco F. A. M.** Autonomous visual navigation for mobile robots: A systematic literature review, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2020, vol. 53, no. 1, pp. 1–34.
3. **Tolani V.** et al. Visual navigation among humans with optimal control as a supervisor, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 2288–2295.
4. **Payá L., Gil A., Reinoso O.** A state-of-the-art review on mapping and localization of mobile robots using omnidirectional vision sensors, *Journal of Sensors*, 2017, vol. 2017, pp. 1–20.
5. **Chen H.** et al. Vision and laser fused SLAM in indoor environments with multi-robot system, *Assembly Automation*, 2019, vol. 39, no. 2, pp. 297–307.
6. **Tang B., Jiang L.** Binocular stereovision omnidirectional motion handling robot, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 1729881420926852.

7. **Kuo C. Y.** et al. Development of an immersive SLAM-based VR system for teleoperation of a mobile manipulator in an unknown environment, *Computers in Industry*, 2021, vol. 132, pp. 103502.
8. **Romanov A. M.** et al. A Navigation System for Intelligent Mobile Robots, 2019 *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, IEEE, 2019, pp. 652–656.
9. **Yang Y.** et al. 3D multiview basketball players detection and localization based on probabilistic occupancy, 2018 *Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, IEEE, 2018, pp. 1–8.
10. **Egortsev M. V., Diane S. K., Kaz N. D.** Algorithmic support of the system of external observation and routing of autonomous mobile robots, *Russian Technological Journal*, 2021, vol. 9, no. 3, pp. 15–23 (in Russian).
11. **Ben Y., Cengiz K.** Research on Visual Orientation Guidance of Industrial Robot Based on CAD Model under Binocular Vision, *Computer-Aided Design and Applications*, 2022, vol. 19, no. S2, pp. 52–63.
12. **Srigrarom S.** et al. Multi-camera Multi-drone Detection, Tracking and Localization with Trajectory-based Re-identification, 2021 *Second International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA-SYMP)*, IEEE, 2021, pp. 1–6.
13. **Park S.** et al. Survey on Anti-Drone Systems: Components, Designs, and Challenges, *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 42635–42659.
14. **Khalyasmaa A. I.** et al. Diagnostic system for OHL state assessment, 2015 *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, IEEE, 2015, pp. 1–5.
15. **Khalyasmaa A. I.** et al. Robotic intelligence laboratory for overhead transmission lines assessment, 2016 *57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, IEEE, 2016, pp. 1–6.
16. **Schuster M. J.** et al. Distributed stereo vision-based 6D localization and mapping for multi-robot teams, *Journal of Field Robotics*, 2019, vol. 36, no. 2, pp. 305–332.
17. **Andreev V. P., Poduraev Yu. V.** Functional-modular design of heterogeneous mobile robotic systems, *Extreme Robotics*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 39–49 (in Russian).
18. **Romanov A. M., Romanov M. P., Shestakov E. I.** A novel architecture for control systems of modular reconfigurable robots, 2017 *IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*, IEEE, 2017, pp. 131–134.
19. **Yao R.** et al. Video object segmentation and tracking: A survey, *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 1–47.
20. **Li Y., Ibanez-Guzman J.** Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2020, vol. 37, no. 4, pp. 50–61.
21. **Minaee S.** et al. Image segmentation using deep learning: A survey, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2021.
22. **Ariff S. A. M.** et al. Exploratory Study of 3d Point Cloud Triangulation for Smart City Modelling and Visualization, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, vol. 44, pp. 71–79.
23. **Álvarez H.** et al. A Multi Camera and Multi Laser Calibration Method for 3D Reconstruction of Revolution Parts, *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 765.
24. **Llamazares Á., Molinos E. J., Ocaña M.** Detection and tracking of moving obstacles (DATMO): a review, *Robotica*, 2020, vol. 38, no. 5, pp. 761–774.
25. **Zhang Z.** et al. Multiple target tracking based on multiple hypotheses tracking and modified ensemble Kalman filter in multi-sensor fusion, *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 14, pp. 3118.
26. **Sekii T.** Robust, real-time 3d tracking of multiple objects with similar appearances, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 4275–4283.
27. **Sun Q.** et al. Multiple object tracking for yellow feather broilers based on foreground detection and deep learning, *INMATEH-Agricultural Engineering*, 2019, vol. 58, no. 2.
28. **Mokshin V. V., Kirpichnikov A. P., Sharnin L. M.** Particle filtering-based objects tracking in a video stream using significant features, *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 18, pp. 297–303 (in Russian).
29. **Zhou J., Kwan C.** Tracking of multiple pixel targets using multiple cameras, *International Symposium on Neural Networks*, Springer, Cham, 2018, pp. 484–493.
30. **Eshel R., Moses Y.** Homography based multiple camera detection and tracking of people in a dense crowd, 2008 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2008, pp. 1–8.
31. **Teizer J., Caldas C. H., Haas C. T.** Real-time three-dimensional occupancy grid modeling for the detection and tracking of construction resources, *Journal of Construction Engineering and Management*, 2007, vol. 133, no. 11, pp. 880–888.
32. **Coué C.** et al. Bayesian occupancy filtering for multitarget tracking: an automotive application, *The International Journal of Robotics Research*, 2006, vol. 25, no. 1, pp. 19–30.
33. **Gindele T.** et al. Bayesian occupancy grid filter for dynamic environments using prior map knowledge, 2009 *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 2009, pp. 669–676.
34. **Nuss D., Yuan T., Krehl G., Stuebler M., Reuter S., Dietmayer K.** Fusion of laser and radar sensor data with a sequential Monte Carlo Bayesian occupancy filter, *Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Seoul, Korea, 28 June–1 July 2015, pp. 1074–1081.
35. **Taj M., Cavallaro A.** Distributed and decentralized multi-camera tracking, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2011, vol. 28, no. 3, pp. 46–58.
36. **Taj M., Cavallaro A.** Simultaneous Detection and Tracking with Multiple Cameras, *Machine Learning for Computer Vision*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 197–214.
37. **Liang Q.** et al. Multi-Player Tracking for Multi-View Sports Videos with Improved K-Shortest Path Algorithm, *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 864.
38. **Romanov A., Yashunskiy V., Chiu W.-Y.** SABER: Modular Reconfigurable Robot for Industrial Applications, *IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2021, 2021 (in press).
39. **Romanov A. M., Mikheenko I. S.** A novel approach for creating modular reconfigurable robots with distributed power system, 2018 *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, IEEE, 2018, pp. 974–978.
40. **Romanov A., Slepynina E.** Real-time Ethernet POWERLINK Communication for ROS. Part I. General Concept, 2020 *Ural Smart Energy Conference (USEC)*, IEEE, 2020, pp. 159–162.
41. **Romanov A., Slepynina E.** Real-time Ethernet POWERLINK Communication for ROS. Part II. Hardware and Software, 2020 *Ural Smart Energy Conference (USEC)*, IEEE, 2020, pp. 163–166.
42. **Romanov A. M., Gringoli F., Sikora A.** A precise synchronization method for future wireless TSN networks, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, vol. 17, no. 5, pp. 3682–3692.
43. **Romanov A. M.** et al. Modular Reconfigurable Robot Distributed Computing System for Tracking Multiple Objects, *IEEE Systems Journal*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 802–813.
44. **Rossi R. J.** Mathematical statistics: an introduction to likelihood based inference, John Wiley & Sons, 2018.
45. **Hu Z.** et al. Extrinsic calibration of 2-D laser rangefinder and camera from single shot based on minimal solution, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, vol. 65, no. 4, pp. 915–929.
46. **Yang C., Duraiswami R., Davis L.** Fast multiple object tracking via a hierarchical particle filter, *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05)*, IEEE, 2005, vol. 1, pp. 212–219.
47. **Kong L.** et al. Online Multiple Athlete Tracking with Pose-Based Long-Term Temporal Dependencies, *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 197.

Ф. М. Бельченко, аспирант, программист, philepp@mail.ru,
И. Л. Ермолов, д-р техн. наук, проф. РАН, ermolov@ipmnet.ru,
Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва

Новый подход к преобразованию перспективы изображений в системах телеметрии роботов*

Телеуправляемые (дистанционно управляемые) роботы составляют значительную часть современного парка роботов и используются для разведки местности и контроля состояния важных объектов, в качестве военных роботов, роботов-саперов и т. д. Применение телеуправления с участием оператора связано с несовершенством современных автономных робототехнических комплексов, поскольку в определенных ситуациях необходимо быстро и точно принимать решения.

В данной работе исследуются проблемы отображения видеоинформации на мониторах операторов робототехнических комплексов. Рассматриваются особенности представления объемного изображения на плоскости, основанные на теории представления перцептивного пространства. Исследуются технологии в области систем телеметрии и технического зрения, использованные при составлении карт местности по проекту Stanley в рамках конкурса DARPA.

Целью работы является изучение возможностей повышения скорости реакции и снижения процента ошибок операторов при управлении робототехническими комплексами, вызванных недоверием или низким качеством передаваемого изображения. Научная новизна исследования заключается в новых знаниях о применимости целевых искажений в изображениях, передаваемых человеку-оператору, что позволяет повысить эффективность восприятия информации человеком-оператором и, как следствие, улучшить управление технической системой.

Основное внимание уделяется разработке программного обеспечения, реализующего технологию преобразования перспективы изображений. Рассматриваются возможности применения матриц перспективного преобразования при работе с телеуправляемым робототехническим комплексом. Разработана статическая модель программного обеспечения. Для улучшения достоверности передачи информации и исправления дисторсии на передаваемом видеоизображении разработана программа работы видеокамеры с внесением искажений перспективы. По итогам работы испытан прототип системы телеметрии для отработки различных сценариев внесения целевых искажений перспективы. Исследования технологии проводятся совместно с Институтом медико-биологических проблем РАН.

Ключевые слова: телеметрия, робототехнический комплекс, преобразование перспективы, система технического зрения

Введение

Телеметрия в настоящее время является крайне важным направлением в робототехнике. Большое число управляемых робототехнических комплексов оснащены камерами, передающими видеоизображения на пульта операторов робототехнических комплексов. Как правило, это роботы для разведки местности и контроля состояния важных объектов, военные роботы, роботы-саперы. Применение телеуправления с участием оператора связано с несовершенством современных автономных робототехнических комплексов [2], поскольку в определенных ситуациях необходимо быстро и точно принимать решения.

Но в то же время человек в цепи управления роботом является наиболее слабым звеном. Он сильно ограничен техническими возможностями информационных средств робота, ему свой-

ственно допускать ошибки в принятии решений, он подвержен стрессу, усталости. Поэтому необходимо проводить разработки, облегчающие и повышающие эффективность работы оператора [1].

Прикладные исследования по тематике проекта, нашедшие применение в технических системах, наиболее активно проводятся несколько последних десятилетий. Впервые результаты данных исследований были внедрены в космической отрасли академиком Б. В. Раушенбахом. Во время стыковки космических аппаратов для наблюдения за другим кораблем применялись оптические приборы, которые давали изображение по законам геометрической оптики (линейной перспективы) (рис. 1). Поскольку стыковка кораблей требовала идеальной точности, Б. В. Раушенбах пытался ответить на вопрос [4]: насколько точны эти изображения?

Б. В. Раушенбахом при разработке системы телеметрии для космического корабля "Союз" было отмечено, что передача любого трехмерного изображения с помощью двухмерного средства воспроизведения изображения (например,

*Часть работы над данным материалом выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А20-120011690138-6).

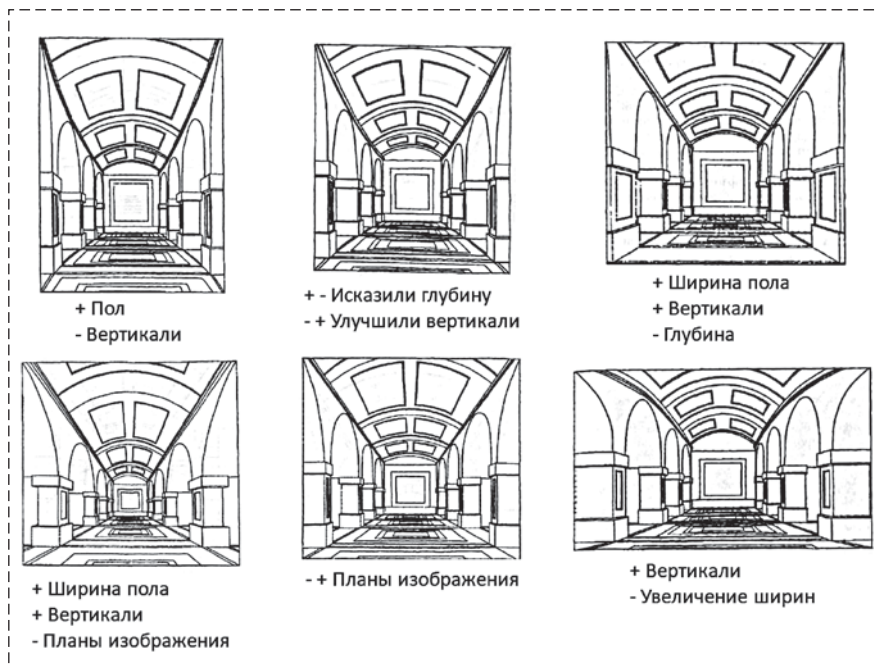


Рис. 1. Варианты отображения перцептивного пространства [4]:

(+) — повышение достоверности характеристики; (-) — понижение достоверности характеристики

Fig. 1. Methods for displaying perceptual space [4]:

(+) — improving the quality of the characteristics; (-) — downgrade of characteristics

экрана ЭВМ) сопровождается появлением искажений [4]. При этом в зависимости от типа искажений можно акцентировать восприятие оператора на тех или иных деталях изображения (боковой части изображения, нижней части изображения, перспективы и пр.) (рис. 1).

В ряде исследований перспективные преобразования используют совместно с перспективными проекциями. В системах навигации роботов, особенно при планировании движения, часто требуется преобразовать вид сцены, получаемый камерой робота, в вид сверху. На рис. 2 показано, как снятая роботом сцена преобразуется в вид сверху, который впоследствии можно использовать для планирования движения в этой плоскости. Дополнительно используются данные, полученные от сонара, лазерного дальномера и других датчиков, работающих в плоскости движения. Данные исследования отражены в работах по Стенфордскому проекту Stanley в рамках конкурса DARPA Grand Challenge 2005 г. [5].

В данном случае камера, установленная на автомобиле-роботе, считывает информацию о дороге. С помощью лазерных дальномеров идентифицируется область возможного расположения дороги перед автомобилем, которая помечена прямоугольником (рис. 2, а). Далее

алгоритмы машинного зрения сегментируют плоские участки, похожие на дорогу (рис. 2, б). Сегментированные участки дороги преобразуются в вид сверху с помощью преобразования перспективы и объединяются картой на основе данных от лазера (рис. 2, в).

Исследования в области использования перспективных проекций при выделении объектов реального мира рассмотрены в работе [14]. В работах авторов перспективные проекции рассмотрены в качестве одного из средств построения "пространственной оболочки" для определения формы объектов [15].

Также следует отметить исследования Института автоматики и электроники СО РАН, связанные с передачей информации от видеокamer на дисплей. Эта проблема продолжительное

время остается актуальной ввиду технических особенностей считывающих элементов видеокamer и сложности преобразования изображения пространства на плоские дисплеи. Данные преобразования всегда приводят к частичной потере достоверности передаваемого изображения. Указанные проблемы отражены в работах А. М. Ковалева [3].

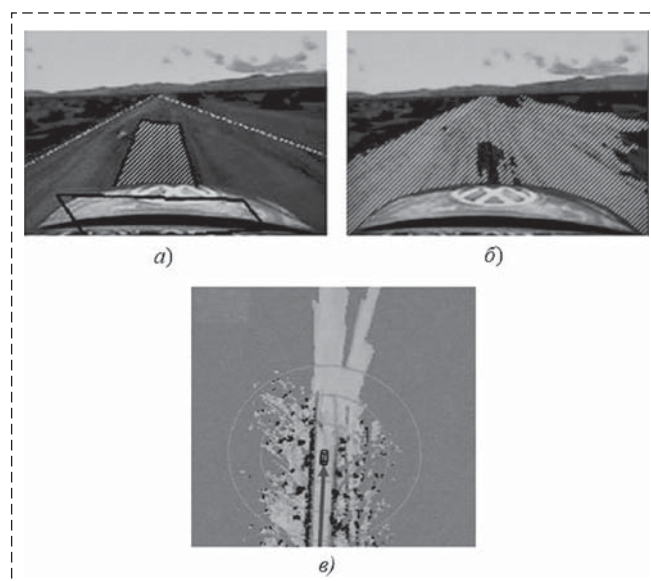


Рис. 2. Пример преобразования перспективы в вид сверху

Fig. 2. Example of converting a perspective to a top view

Большое число работ посвящено изучению особенностей зрения человека и учету этих особенностей при разработке элементов систем технического зрения. В частности, данные вопросы изучаются сотрудниками Института проблем передачи информации РАН при решении задач, имеющих приложения в технических зрительных системах. В работах Г. И. Рожковой поднимаются медицинские вопросы восприятия человеком различной зрительной информации и проблемы восприятия стереоскопических изображений [13].

Таким образом, предлагается применить наработки в области теории отображения перцептивного пространства, ранее успешно использовавшиеся в космической отрасли и ряде проектов, связанных с навигацией [8]. Основные алгоритмы для внесения целевых искажений будут работать с преобразованиями перспективы на видеоизображениях [10].

Постановка задачи

Целью работы является снижение процента ошибок операторов при управлении робототехническими комплексами, вызванных недостоверностью или низким качеством передаваемого изображения. В качестве решения предлагается проводить дополнительную обработку видеоизображений путем применения преобразования перспективы. Таким образом, можно компенсировать часть искажений, возникающих в результате переноса объемной информации на плоское изображение.

В общем случае конверсионная формула преобразования перспективы изображения выглядит следующим образом [11]:

$$[x' \ y' \ w'] = [u \ v \ w] \begin{bmatrix} c_{00} & c_{01} & c_{02} \\ c_{10} & c_{11} & c_{12} \\ c_{20} & c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Здесь u и v — координаты крайней точки преобразованного изображения; w определяет тип перспективного преобразования; c_{ij} — параметры перспективного преобразования, из которых следует выделить:

$c_{00}, c_{01}, c_{10}, c_{11}$ — осуществляют масштабирование, вращение и сдвиг;

c_{20}, c_{21} — определяют панорамирование;

c_{02}, c_{12}, c_{22} — генерируют перспективное преобразование.

Далее обозначим x и y соответствующие преобразованные обобщенные координаты. Составим уравнения для определения значений данных координат:

$$x = \frac{x'}{w'} = \frac{c_{00}u + c_{10}v + c_{20}}{c_{02}u + c_{12}v + c_{22}}; \quad (2)$$

$$y = \frac{y'}{w'} = \frac{c_{01}u + c_{11}v + c_{21}}{c_{02}u + c_{12}v + c_{22}}. \quad (3)$$

Исходя из полученных равенств можно найти координаты точек, к которым применена перспективная трансформация:

$$c_{20} = x_0;$$

$$c_{00} + c_{20} - c_{02}x'_1 = x_1;$$

$$c_{00} + c_{10} + c_{20} - c_{02}x'_2 - c_{12}x'_2 = x_2;$$

$$c_{10} + c_{20} - c_{12}x'_3 = x_3;$$

$$c_{21} = y_0;$$

$$c_{01} + c_{21} - c_{02}y'_1 = y_1;$$

$$c_{01} + c_{11} + c_{21} - c_{12}y'_2 - c_{12}y'_2 = y_2;$$

$$c_{11} + c_{21} - c_{12}y'_3 = y_3.$$

Таким образом, изменяя параметры c_{ij} , мы можем осуществлять преобразование перспективы [12].

Программная реализация технологии перспективного преобразования в библиотеке OpenCV

Для исследования алгоритмов перспективного преобразования будем использовать открытую библиотеку OpenCV, которая содержит алгоритмы для: интерпретации изображений, калибровки камеры по эталону, устранения оптических искажений, определения сходства, анализа перемещения объекта, определения формы объекта и слежения за объектом, 3D-реконструкции, сегментации объекта, распознавания жестов и т. д. Данный функционал позволяет использовать различные виды видеокамер и облегчает написание некоторых программных модулей.

В качестве основного языка программирования выбран C++. Данный язык является базовым для использования библиотеки OpenCV. Также использование данного языка в дальнейшем облегчит перенос кода на встраиваемые системы. Разработка программного обеспечения проводится в Visual Studio 2019.

Предварительно была разработана статическая UML-модель прототипа программного средства

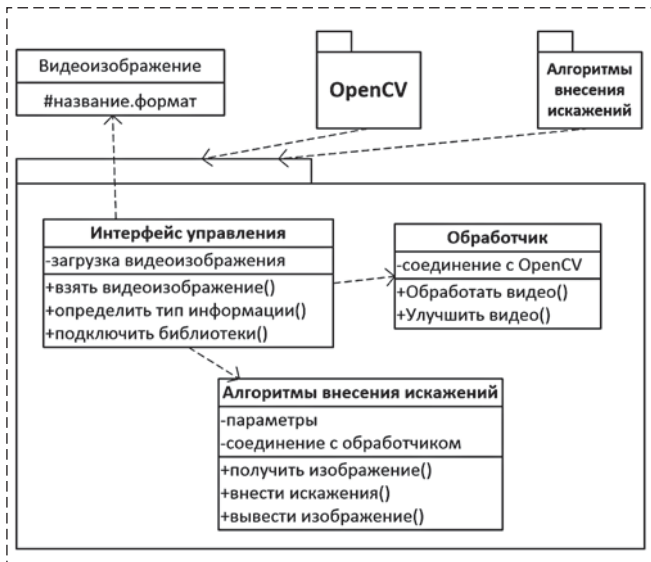


Рис. 3. Статическая UML-модель прототипа программного средства, реализующего функционал с преобразованием перспективы видеоизображений

Fig. 3. A static UML-model of a software prototype that implements a functional with the transformation of the perspective of video images

[16], реализующего преобразование перспективы. Основными внутренними модулями являются:

1. Интерфейс управления. В модуле обеспечивается отображение входного видеоизображения и изображения после обработки алгоритмами внесения искажений (изменения перспективы).
2. Обработчик. Обеспечивает подготовку входного видеопотока перед обработкой. Вносит дополнительные улучшения для отображения в интерфейсе управления (резкость, цветопередача).
3. Алгоритмы внесения искажений. Реализуют финальные преобразования перспективы видеоизображения.

В качестве внешних модулей представлены сама библиотека OpenCV и базовый модуль с реализацией алгоритмов внесения искажений (поворот, масштабирование, растяжение изображения). Статическая UML-модель представлена на рис. 3.

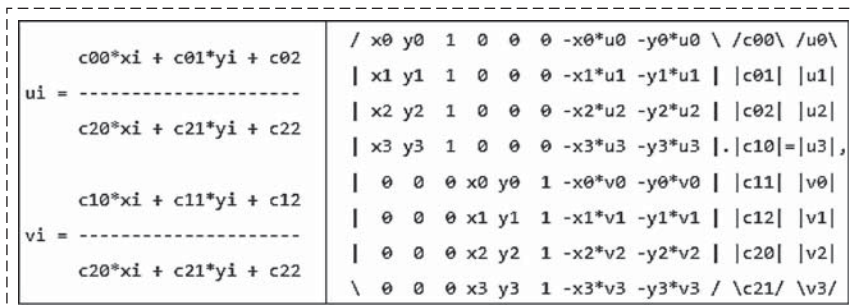


Рис. 4. Матрица перспективного преобразования библиотеки OpenCV

Fig. 4. Perspective transform matrix in the OpenCV library

В OpenCV на основе формул (1)–(3) реализованы вычисления матриц перспективного преобразования, представленные на рис. 4.

Далее загружается видеоизображение. На тестовом прототипе работа проводится с кадрами формата HD, где крайние точки соответствуют следующим пикселям: $[x_0, y_0] \rightarrow [0, 0]$, $[x_1, y_1] \rightarrow [1280, 0]$, $[x_2, y_2] \rightarrow [0, 720]$, $[x_3, y_3] \rightarrow [1280, 720]$.

На базе лаборатории робототехники и мехатроники Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского в настоящее время разработан прототип системы телеметрии для отработки результатов настоящего исследования. В качестве устройства считывания видеоизображений используется камера MicrosoftHD.

На рис. 5 (см. третью сторону обложки) приведен фрагмент кода, в котором выделяется область для преобразования изображения и задается степень перспективной трансформации. В обоих случаях создаются по четыре объекта класса "точка". В данном примере точки выбраны произвольно для заданной области [6].

Далее системе необходимо из выделенных точек получить матрицу перспективного преобразования и применить ее. Для этого используются функции `getPerspectiveTransform` и `warpPerspective`, принимающие в качестве аргументов изображения и массив точек для преобразования (рис. 5).

Функция `getPerspectiveTransform` в данном случае возвращает матрицу перспективного преобразования, вычисленную по массивам `src` (входной кадр) и `dst` (выходной кадр). Далее `warpPerspective` применяет перспективное преобразование к изображению `src` и получает новое изображение `dst`.

В данном примере точки выбраны произвольно для заданной области. Для разных задач эти точки необходимо подбирать индивидуально [7].

Результаты исследований

Для эксперимента был смоделирован сценарий, при котором имеется робот небольшого размера, который должен осуществить разведку в замкнутом пространстве (рис. 6, см. третью сторону обложки).

Рассмотрим оригинальное изображение помещения, полученное

с камеры без внесения искажений перспективы (рис. 6, а).

На оригинальном изображении видно, что объекты, расположенные сбоку на переднем плане, претерпели определенную деформацию при отображении на экране. В данном случае наблюдается пример недостоверного переноса изображения объемного пространства. Одной из причин такого отображения является форма линзы, которая захватывает изображение пространства и переносит его на плоскость матрицы.

После применения перспективного преобразования можно увидеть, что объекты, которые расположены вертикально, отобразились более достоверно (рис. 6, б, см. третью сторону обложки). Вне зависимости от горизонтального поворота камеры мы получаем более правильное видеоизображение, что позволяет качественнее оценить окружающую обстановку внутри замкнутых пространств или открытых пространств с большим числом объектов.

В настоящее время планируются дополнительные исследования описанной технологии с участием Института медико-биологических проблем РАН [9, 10]. В рамках исследования будут проведены испытания технологии перспективного преобразования при работе операторов с системами телеметрии и камерами в рамках космических задач, изучено влияние отображения пространства на усталость оператора, измерено время реакции на события, передаваемые камерой.

Также проводится отработка технологий сегментации изображений в целях дальнейшего внедрения технологий распознавания объектов на преобразованном изображении.

Заключение

Рассмотрены возможности применения технологии преобразования перспективы изображения в телеметрических системах робототехнических комплексов. Исследованы матрицы преобразования изображений в рамках решения прикладных задач. Разработан прототип программного средства, демонстрирующий особенности работы видеокамеры с внесением целевых искажений перспективы. Проведены испытания прототипа программного средства внесения искажений для исследования возможности преобразования изображения на дальних и ближних планах, а также преобразования

изображения, полученного с поверхности Земли. По итогам исследования будут предложены способы внедрения разрабатываемых методов в системы управления робототехнических комплексов и средств видеонаблюдения.

Список литературы

1. **Stoianovici D.** et al. Multi-Imager Compatible, MR Safe, Remote Center of Motion Needle-Guide Robot // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2018. Vol. 65, N.1. P. 165—177. Doi: 10.1109/TBME.2017.2697766.
2. **Ermolov I.** A novel data fusion architecture for unmanned vehicles // 21TH International Symposium On Measurement And Control In Robotics ISMCR'2018. 26—28 September 2018. Vol. 3.
3. **Ковалев А. М.** О визуальном воспринимаемом пространстве предметов // Автометрия. 2003. Т. 39, № 6. С. 3—12.
4. **Раушенбах Б. В.** Геометрия картины и зрительное восприятие. СПб.: Азбука-классика, 2002. 320 с.
5. **Thrun S., Montemerlo M., Dahlkamp H., Stavens D., Aron A., Diebel J., Fong P., Gale J., Halpenny M., Hoffmann G., Lau K., Oakley C., Palatucci M., Pratt V., Stang P., Strohband S., Dupont C., Jendrossek L. E., Koelen C., Markey C., Rummel C., Niekerk J., Jensen E., Alessandrini P., Bradski G., Davies B., Ettinger S., Kaehler A., Nefian A., Mahoney P.** Stanley: The Robot That Won the DARPA Grand Challenge // The 2005 DARPA Grand Challenge. 2007. Springer Tracts in Advanced Robotics. Vol. 36. P. 1. doi:10.1007/978-3-540-73429-1_1.
6. **Garsia G., Soares O., Aranda G., Tersero S., Graso O., Enano N.** Learning Image Processing with OpenCV. USA, Publisher Packt, 2015. 232 p.
7. **Бельченко Ф. М., Ермолов И. Л.** Разработка концепции системы телеметрии РТК с возможностью внесения целевых искажений отображаемого пространства // Робототехника и техническая кибернетика. 2021. Т. 9, № 1. С. 26—31.
8. **Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Крикалев С. К., Кумакшев С. А., Секерж-Зенькович С. Я.** Идентификация системы океанских волн по фотоснимкам из космоса // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2009. № 1. С. 117—127.
9. **Беляев М. Ю., Виноградов П. В., Десинов Л. В., Кумакшев С. А., Секерж-Зенькович С. Я.** Идентификация по фотоснимкам из космоса источника океанских кольцевых волн вблизи острова Дарвин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2011. № 1. С. 70—83.
10. **Алиев Р. Н., Ермолов И. Л.** Преобразование изображения с камеры мобильного робота к системе перцептивной перспективы // Тр. конф. "Робототехника и мехатроника — 2015" в составе МКПУ-2015. 2015. С. 60—62.
11. **URL:** <https://russianblogs.com/article/5658585388/> (дата обращения: 18.07.2021)
12. **URL:** <https://ip76.ru/perspective-transformation/> (дата обращения: 18.08.2020).
13. **Рожкова Г. И., Алексеенко С. В.** Зрительный дискомфорт при восприятии стереоскопических изображений как следствие непривычного распределения нагрузки на различные механизмы зрительной системы // Мир техники кино. 2011. Т. 5, № 3 (21). С. 12—21.
14. **Oliva A., Torralba A.** Scene-Centered Description from Spatial Envelope Properties // Proc. 2nd Workshop on Biologically Motivated Computer Vision (BMCV'02), Tubingen, Germany. 2002.
15. **Oliva A., Torralba A.** Modeling the shape of the scene: a holistic representation of the spatial envelope // International Journal of Computer Vision. 2001. Vol. 42, N. 3. P. 145—175.
16. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 15910—2002.** Информационная технология. Процесс создания документации пользователя программного средства. ВНИИСтандарт.

A New Approach to Images' Perspective Transformation in Robotics Telemetry

F. M. Belchenko, philepp@mail.ru, I. L. Ermolov, ermolov@ipmnet.ru,
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russian Federation

Corresponding author: **Belchenko Fillip M.**, Programming Engineer,
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: philepp@mail.ru

Accepted on September 01, 2021

Abstract

Remotely controlled robots are the majority of contemporary robots' population. As a rule such robots are used for inspection, patrolling, mines disposal. This is caused by a fact that today's level of robots' autonomy is rather low and autonomous robots can not secure reliable performance. However performance of remotely operated robots depends largely on efficiency of information perception by human-operator. This paper studies images representation to operators on robots' control pendants. More specifically it studies 3D images representation on flat displays. The goal of this study is to increase reaction rate and decrease errors done by robot's operator due to image's uncertainty or poor quality. Our main attention is paid to the development of software that implements the technology of transforming the perspective of images. Matrixes for perspective transformation are studied. Hence application of these matrixes within remotely operated robots is discussed. A novelty of this research is in new knowledge about perspective transformation which is done for a better information perception by human-operator and, as an outcome, to increase efficiency of remotely operated robots. The related technologies in the field of telemetry and technical vision systems have been investigated. Also considered are works in medical fields, in particular, the psychology of perception of images and space. A static software model has been developed. The video camera has been implemented with the introduction of perspective distortions to improve the reliability of the transmission of the necessary areas in the image. Research on the technology is carried out jointly with the Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences. A special prototype for perspective transformation basing on various scenarios is being developed.

Keywords: telemetry, robotic systems, perception transformation, machine vision

Acknowledgements: This work was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation within the framework of the Russian State Assignment under contract No. AAAA-A20-120011690138-6.

For citation:

Belchenko F. M., Ermolov I. L. A New Approach to Images' Perspective Transformation in Robotics Telemetry, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol.22, no. 12, pp. 644—649.

DOI: 10.17587/mau.22.644-649

References

1. **Stoianovici D.** et al. Multi-Imager Compatible, MR Safe, Remote Center of Motion Needle-Guide Robot, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2018, vol. 65, no.1, pp. 165—177, Doi: 10.1109/TBME.2017.2697766.
2. **Ermolov I.** Hierarchical data fusion architecture for autonomous systems, *ACTA IMEKO*, 2019, vol. 8, no. 4, pp. 28—32.
3. **Kovalev A. M.** About visually perceived space of objects, *Avtometrija*, 2003, vol. 39, no. 6, pp. 3—12 (in Russian).
4. **Rauschenbach B. V.** Picture's geometry and visual perception, S.-Petersburg, Azbuka-klassika, 2002 (in Russian).
5. **Thrun S., Montemerlo M., Dahlkamp H., Stavens D., Aron A., Diebel J., Fong P., Gale J., Halpenny M., Hoffmann G., Lau K., Oakley C., Palatucci M., Pratt V., Stang P., Stroband S., Dupont C., Jendrossek L. E., Koelen C., Markey C., Rummel C., Niekirk J., Jensen E., Alessandrini P., Bradski G., Davies B., Ettinger S., Kaehler A., Nefian A., Mahoney P.** Stanley: The Robot That Won the DARPA Grand Challenge, *The 2005 DARPA Grand Challenge. Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2007, vol. 36, p. 1, DOI: 10.1007/978-3-540-73429-1_1.
6. **Garsia G., Soares O., Aranda G., Tersero S., Grasoia O., Enano N.** Learning Image Processing with OpenCV, Publisher Packt, USA, 2015, 232 p.
7. **Belchenko F. M., Ermolov I. L.** Concept development of telemetry system for robotic systems with the ability to introduce targeted distortions of displayed space, *Robotics and Technical Cybernetics*, 2021, vol. 9, no. 1 (in Russian).
8. **Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Krikalev S. K., Kumakshv S. A., Sekerzh-Zen'kovich S. Ya.** Identification of a system of oceanic waves based on space imagery, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2009, vol. 48, no. 1.
9. **Belyaev M. Y., Vinogradov P. V., Desinov L. V., Kumakshv S. A., Sekerzh-Zen'kovich S. Y.** Identification of a source of oceanic ring waves near Darwin's Island based on space photos, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 1, pp. 70—83 (in Russian).
10. **Aliev R. N., Ermolov I. L.** Transformation of camera image via perceptive perspective, *Proc. of "Robotics and Mechatronics — 2015" Conference*, Gelendzhik, 2015. pp. 60—62 (in Russian).
11. **Available at:** <https://russianblogs.com/article/5658585388/> (data: 18.07.2021).
12. **Available at:** <https://ip76.ru/perspective-transformation/> (data: 18.08.2020).
13. **Rozhkova G. I., Alekseenko S. V.** Visual discomfort in the perception of stereoscopic images as a result of the unusual distribution of the load on various mechanisms of the visual system, *The world of cinema technology*, 2011, vol. 5, no. 3 (21), pp. 12—21 (in Russian).
14. **Oliva A., Torralba A.** Scene-Centered Description from Spatial Envelope Properties, *Proc. 2nd Workshop on Biologically Motivated Computer Vision (BMCV'02)*, Tübingen, Germany, 2002.
15. **Oliva A., Torralba A.** Modeling the shape of the scene: a holistic representation of the spatial envelope, *International Journal of Computer Vision*, 2001, vol. 42(3), pp. 145—175.
16. **GOST R ISO/IEC 15910—2002.** Information technology. Software user documentation process (in Russian).

В. Б. Мелехин, д-р техн. наук, проф., pashka1602@rambler.ru,
Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала,
М. В. Хачумов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., khmike@inbox.ru,
Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН,
Институт программных систем им. А. К. Айламазяна РАН, с. Вельхово, Ярославская обл.

Нечеткая модель ситуационного управления параметрами полета автономного беспилотного летательного аппарата в условиях неопределенности*

Обозначены основные проблемы автоматического планирования поведения автономного беспилотного летательного аппарата в нестабильных условиях воздушной среды. Показано, что актуальность решаемой в ней задачи обусловлена тем, что автономный беспилотный летательный аппарат самостоятельно формирует и реализует маршрут своего полета без поддержки с наземной станции управления. В связи с этим возникает необходимость в разработке метода автоматического управления программными движениями, связанными с реализацией построенного в решателе задач маршрута воздушного движения. Для решения данной задачи предложен подход к регулированию параметров состояния динамических объектов на основе принципа ситуационного управления целенаправленным поведением сложных систем в изменяющихся условиях функционирования. Целесообразность выбора данного принципа управления связана с тем, что состояние автономного беспилотного летательного аппарата во время полета характеризуется большим числом параметров и действующих на них возмущающих факторов окружающей среды. В целях эффективной реализации данного принципа управления введено понятие полной проблемной ситуации на объекте управления, включающее в себя вектор отклонений параметров состояния автономного беспилотного летательного аппарата от требуемых значений во время полета и возмущающие факторы воздушной среды. На этой основе разработана нечеткая модель ситуационного управления параметрами состояния автономного беспилотного летательного аппарата во время полета в нестабильной воздушной среде, в которой в целях обобщенного представления эталонных проблемных ситуаций, а также описания входящих в их структуру отклонений параметров состояния и возмущающих факторов воздушной среды использованы лингвистические переменные и функции. Определены условия, при выполнении которых эталонные, нечетко представленные проблемные ситуации являются обобщением и поглощают аналогичные друг другу фактические проблемные ситуации, возникающие на объекте управления. Это позволяет существенным образом сократить число логико-трансформационных решающих правил в модели ситуационного управления и оперативным образом автоматически определять в проблемных ситуациях результативные управляющие воздействия, обеспечивающие эффективную реализацию программных движений автономного беспилотного летательного аппарата во время полета в условиях неопределенности. В заключение показано, что для реализации управляющих воздействий, выбранных на ситуационной основе, при повышенных требованиях к точности регулирования изменяющихся во времени параметров состояния объекта управления и значительном уровне возможных рассогласований между фактическими и заданными их значениями в условиях неопределенности целесообразно использовать нечетко реализованные пропорциональный, интегральный и дифференциальный законы регулирования.

Ключевые слова: автономный беспилотный летательный аппарат, нестабильная воздушная среда, параметры полета, ситуационная модель управления, условия неопределенности

Введение

Одной из актуальных проблем современной беспилотной авиации является разработка эффективных систем автоматического планирования поведения автономных беспилотных лета-

тельных аппаратов (АБЛА) различного назначения в нестабильных условиях воздушной среды (ВС). В общем случае под АБЛА будем понимать беспилотные летательные аппараты, способные эффективным образом автоматически планировать свое целенаправленное поведение в изменяющихся условиях воздушного окружения без связи с наземным пунктом управления. Очевидно, что автоматическая система планирования поведения АБЛА должна включать ин-

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056/>

теллектуальный решатель задач, позволяющий, опираясь на модель представления знаний об изменениях, происходящих в воздушной среде, и процедуру вывода решений, обеспечить ему эффективное решение различных задач, связанных с воздушным движением в нестабильных условиях функционирования.

В общем случае к основным задачам планирования поведения АБЛА в воздушной среде следует отнести [1]: управление взлетом и посадкой, автоматическую прокладку маршрута полета в ВС над заданным (контролируемым) квадратом местности и управление процессом реализации сформированного маршрута полета в нестабильных условиях функционирования.

Следует отметить, что эффективное решение задачи управления посадкой АБЛА различного базирования имеется [2] и в настоящей работе не рассматривается.

Необходимо также отметить, что проблема автоматического построения пути полета АБЛА как в априори неописанных условиях, так и при заданной формальной модели карты местности является достаточно исследованной задачей, для решения которой можно использовать, например, следующие методы планирования:

- методы планирования локально-оптимального маршрута полета и подлета к целям на низкой высоте в априори неописанных условиях функционирования при наличии на земле препятствий [3];
- методы планирования пути полета, основанные либо на решении задачи о коммивояжере [4], динамического [5] линейного программирования [6] при заданной карте местности, над которой осуществляется движение, либо базирующиеся на применении эвристических алгоритмов планирования пути полета [7].

Что же касается управления процессом реализации сформированного пути полета в нестабильной ВС, то решение данной задачи состоит в реализации следующих основных подзадач [8]:

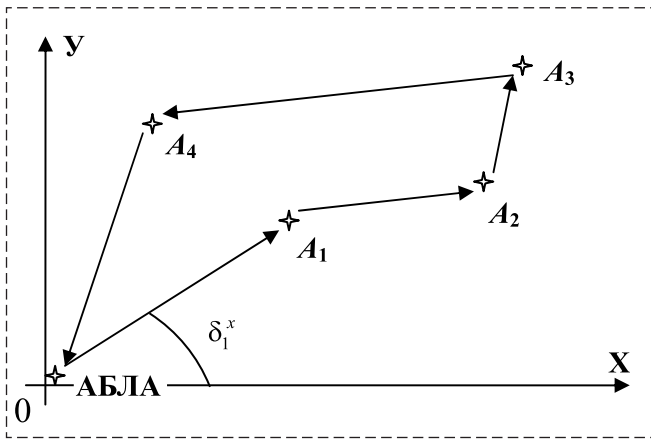
- картографического проецирования или привязки маршрута полета к карте контролируемого или заданного участка местности для ориентации в воздушном пространстве;
- управления параметрами полета в нестабильной ВС по автоматически формируемому маршруту, привязанному, например, к карте местности в заданной системе координат.

В настоящее время существует большое число методов и информационных технологий, связанных с управлением воздушным движением беспилотных летательных аппаратов (см., например, работы [9–11]). Однако данные методы не позволяют обеспечить полную автономность управления полетами АБЛА в нестабильной ВС либо по причинам высокой сложности их реализации на бортовой ЭВМ, требующей поддержки с наземной станции управления и необходимости априори сформулированного полетного задания, либо из-за отсутствия в них инструментальных средств представления и обработки знаний для принятия решений в нестабильных, спонтанно изменяющихся условиях воздушной среды. Это, в свою очередь, существенным образом ограничивает дальность полетов беспилотных летательных аппаратов, так как требует наличия на борту сложной аппаратуры связи с наземной станцией управления, а также априорных знаний рельефа местности, над которой предстоит полет, и характера изменений условий ВС для построения полетного задания.

Для решения отмеченных выше проблем, связанных с управлением отработкой воздушных движений, в работе предлагается один из подходов к организации автоматического управления полетами АБЛА в нестабильных условиях ВС, опирающийся на нечеткую модель ситуационного управления поведением сложных объектов различной природы [12, 13], позволяющую обеспечить практически полную автономность АБЛА различного назначения и на этой основе значительным образом увеличить дальность полетов, а также расширить класс решаемых ими задач. Целесообразность построения автоматической системы управления движением АБЛА на ситуационной основе обусловлено тем, что формальное описание различных ситуаций, возникающих на объекте управления, позволяет учесть достаточно большое число параметров его состояния и действующих на них возмущающих факторов ВС.

Синтез модели ситуационного управления параметрами состояния АБЛА в полете

Рассмотрим пример, поясняющий особенности решения ряда проблем, связанных с картографическим проецированием маршрута полета АБЛА в прямоугольную систему координат карты местности с началом отсче-



Маршрут облета АБЛА четырех целей
ABLA over flight route of four targets

та в точке вылета. Допустим, что в заданном квадрате местности расположены четыре цели $A_1, \dots, A_4$ (см. рисунок).

Пусть в процессе поисково-исследовательской деятельности в этом квадрате АБЛА автоматически сформировал показанный на рисунке маршрут облета расположенных на земле целей с учетом координат их положения на карте местности, а также посадки в точке вылета, который можно представить в следующем виде:

Взлет $(x_0, y_0 = 0) \rightarrow A_1(x_1, y_1) \rightarrow A_2(x_2, y_2) \rightarrow A_3(x_3, y_3) \rightarrow A_4(x_4, y_4) \rightarrow$ Посадка $(x_0, y_0 = 0)$,

где x_0, y_0 — координаты точки взлета и посадки АБЛА; $x_i, y_i, i = \overline{1, 4}$, — координаты местоположения на местности целей в прямоугольной системе координат, построенной относительно точки вылета АБЛА с координатами $(0, 0)$. Таким образом, сформированный маршрут облета целей состоит из пяти участков, на каждом из которых АБЛА следует изменить направление линии пути полета, отработав поворот на угол, заданный относительно основного направления движения, определяемого, например, осью абсцисс. Тогда, если учесть, что направление линии заданного пути полета на каждом i -м участке местности задается путевым углом δ_i , то для эффективной реализации АБЛА данного маршрута полета в нем следует перейти от прямоугольной к полярной системе координат расположения целей на местности относительно точки вылета. В результате получим следующее представление заданного маршрута облета целей:

Взлет $(\delta_1^y; +l_1) \rightarrow A_1(\delta_2^x; +l_2) \rightarrow A_2(\delta_3^x; +l_3) \rightarrow A_3(\delta_4^x; -l_4) \rightarrow A_4(\delta_5^x; l_5) \rightarrow$ Посадка $(\delta_6^y; +l_6)$, (1)

где δ_1^y, δ_6^y — соответственно углы влета и посадки АБЛА относительно земли; δ_i^x — путевой угол маршрута полета вдоль i -го участка местности, у которого верхний индекс x означает, что основное направление движения АБЛА, относительно которого вычисляется угол поворота, определяется осью абсцисс X ; $\pm l_i$ — расстояние, которое АБЛА необходимо преодолеть над i -м участком местности для достижения инцидентной ему цели $A_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$, которое берется с плюсом, если для координаты x_i выполняется условие $x_{i+1} > x_i$ и с минусом — в противном случае; $(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1})$ — соответственно координаты точек начала и конца линии пути полета, соответствующей i -му участку местности с расположенными на нем целями $A_i(x_i, y_i)$ и $A_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$.

Для реализации полученного таким образом маршрута полета системе управления АБЛА следует автоматически во времени сформировать следующую последовательность управляющих воздействий:

Взлететь $\rightarrow u_1(\delta_1^x; \text{полет}(l_1), t_1) \rightarrow$
 $\rightarrow u_2(\delta_2^x; \text{полет}(l_2), t_2) \rightarrow u_3(\delta_3^x; \text{полет}(l_3), t_3) \rightarrow$ (2)
 $\rightarrow u_4(\delta_4^x; \text{полет}(l_4), t_4) \rightarrow$
 $\rightarrow u_5(\delta_5^x; \text{полет}(l_5), t_5) \rightarrow$ Посадка,

где, например, $u_2(\delta_2^x; \text{полет}(l_2), t_2)$ — управляющее воздействие, отрабатываемое в момент времени t_2 , которое означает, что после преодоления расстояния t_1 на предыдущем участке АБЛА необходимо изменить направление линии пути полета, совершив поворот на путевой угол δ_2^x относительно оси координат X и продолжить движение над вторым участком местности по прямой на расстояние, равное l_2 .

Однако учитывая, что во время полета на состояние АБЛА воздействуют различные возмущающие факторы ВС (например, боковой ветер и т. д.), в произвольные моменты времени t следует различать его требуемое и фактическое текущее состояния. В общем случае данные состояния будут определяться упорядоченными векторами различных, поддающихся регулированию параметров, характеризующих:

- текущее местоположение АБЛА в заданной системе координат карты местности;
- состояние органов управления полетом;
- скорость и высоту полета (оценка скорости полета имеет принципиальное значение в случае заданных ограничений на время вы-

полнения полета, а высоты — при низком полете и наличии на земле препятствий).

Таким образом, требуемое и фактическое состояния АБЛА будут определяться, соответственно, векторами следующего вида:

$$S_{\text{зад}}(t) = \langle p_1^*(t), p_2^*(t), \dots, p_j^*(t), \dots, p_n^*(t) \rangle$$

и $S_{\text{фак}}(t) = \langle p_1(t), p_2(t), \dots, p_j(t), \dots, p_n(t) \rangle,$

где $p_j^*(t)$ — желаемое на момент времени t значение j -го показателя состояния летательного аппарата; $p_j(t)$ — фактическое значение этого показателя в текущий момент времени t .

Следовательно, в произвольные моменты времени t в текущем состоянии АБЛА могут возникать нештатные или проблемные ситуации, определяемые вектором недопустимых отклонений

$$\Delta S(t) = \langle \Delta p_1(t), \Delta p_2(t), \dots, \Delta p_j(t), \dots, \Delta p_n(t) \rangle,$$

где $\Delta p_j(t)$ — отклонение фактического $p_j(t)$ значения j -го показателя состояния летательного аппарата от требуемого его значения $p_j^*(t)$ в момент времени t .

Возникновение таких нештатных ситуаций препятствует результативной отработке АБЛА штатных управляющих воздействий (2). Таким образом, задача управления поведением АБЛА в нестабильной ВС сводится к построению и отработке не только штатных, но и нештатных управляющих воздействий $u_j(t)$, которые позволяют устранить текущие значения недопустимых отклонений параметров его состояния $\Delta p_j(t)$ на протяжении всего полета. В связи с этим для построения эффективного управления процессом движения АБЛА, например, по маршруту (1) с учетом возмущающих факторов ВС требуется определить полную проблемную ситуацию на объекте управления (ОУ), которую можно представить в следующем виде:

$$\Delta S(t, H) = \langle \Delta p_1(t, h_1^1(Z_1), h_2^1(Z_2)), \Delta p_2(t, h_1^2(Z_1), h_2^2(Z_3)), \dots, \Delta p_n(t, h_4^n(Z_4), h_5^n(Z_5), h_7^n(Z_7)) \rangle.$$

Каждая такая ситуация соответствует текущему проблемному состоянию АБЛА с учетом действующих в ВС возмущающих факторов

$$h_j(Z_j, t) \in H, H = \{h_j(Z_j(t))\}, j = 1, 2, \dots, m_1,$$

где, например, $h_2^1(Z_2(t))$ — второй возмущающий фактор ВС, влияющий на первый показате-

тель состояния АБЛА; $Z_2(t)$ — множество характеристик, определяющих второй возмущающий фактор воздушной среды в текущий момент времени t , например {скорость бокового ветра, угол под которым он воздействует на летательный аппарат, и т. д.}.

Если для каждой полной допустимой проблемной ситуации $\Delta S(t, H)$, которая может возникнуть на ОУ, опираясь на накопленный опыт операторов, способных эффективным образом управлять полетами беспилотных летательных аппаратов в различных ситуациях нестабильной ВС, а также экспертные данные, полученные от высококвалифицированных специалистов в области воздушной навигации, можно определить вектор управляющих воздействий

$$U(t, Z) = \langle u_1 = f_1(\Delta p_1, h_1^1(Z_1), h_2^1(Z_2), t), \\ u_2 = f_2(\Delta p_2, h_1^2(Z_1), h_3^2(Z_3), t), \dots, \\ u_m = f_m(\Delta p_3, h_4^n(Z_4), h_5^n(Z_5), h_7^n(Z_7), t) \rangle,$$

позволяющих устранить соответствующую проблемную ситуацию на ОУ, то это дает возможность сформировать модель ситуационного управления поведением АБЛА в нестабильной воздушной среде, где, например, $u_1(t) = f_1(\Delta p_1(t), h_1^1(Z_1(t)), h_2^1(Z_2(t)))$ — управляющее воздействие, отработка которого обеспечивает устранение отклонения Δp_1 параметра состояния p_1 , возникшее в результате проявления в окружающем пространстве возмущающих факторов $h_1^1(Z_1(t))$ и $h_2^1(Z_2(t))$.

Построенная таким способом модель ситуационного управления полетами АБЛА в нестабильной ВС будет состоять из множества логико-трансформационных решающих правил следующего вида:

$$Q_{i_1}(t) : \Delta S_{i_1}(t, H_{i_1}) \oplus U_{i_1}(t, H_{i_1}) \rightarrow \\ \rightarrow S_{\text{тр}}^{i_1}(t), i_1 = 1, 2, \dots, m_2. \quad (3)$$

Каждое такое правило означает, что если на ОУ в момент времени t возникает проблемная ситуация $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$ по причине наличия в ВС возмущающих факторов $H_{i_1}(t)$, то отработка (обозначена символом $\oplus$) вектора управляющих воздействий $U_{i_1}(t, H_{i_1})$ позволяет устранить данную проблемную ситуацию, обеспечив таким образом на объекте требуемую на данный момент времени t текущую ситуацию $S_{\text{тр}}^{i_1}(t)$. Необходимо отметить, что любое решающее правило вида (3) фактически пред-

ставляет собой элементарный акт управления воздушным движением АБЛА в нестабильной воздушной среде. Что же касается штатных (запланированных) управляющих воздействий, то они отрабатываются в заданные моменты времени t при достижении требуемых ситуаций $S_{\text{тр}}(t)$.

Параметры отрабатываемых управляющих воздействий $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$, автоматически определяемые на основе решающих правил (3) при наличии в ВС возмущающих факторов $h_k(t, Z_r) \in H_j(t)$, $H_j(t) \subset H_{i_1}(t)$, в произвольные моменты времени t можно рассчитать на основе аналитической зависимости следующего вида:

$$\begin{aligned} u_j(t, H_j) = \\ = F_j(\Delta p_j(t), h_k(t, Z_k)), h_k(t, Z_k) \in H_j, \\ k = 1, 2, \dots, m_3, \end{aligned}$$

где F_j — график лингвистической функции (ЛФ) [14], соответствующей j -му управляющему воздействию, построенной на основе экспертных данных, отражающих характер влияния возмущающих факторов ВС во времени на параметр состояния $p_j(t)$; m_3 — число возмущающих факторов воздушной среды $H_j(t)$, влияющих на j -й параметр состояния АБЛА.

Практика применения ситуационного управления поведением сложных объектов различной природы показывает [12, 13], что число проблемных ситуаций $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$, возникающих на ОУ, как правило, значительным образом превышает число результативных в них управлений $U_{i_1}(t, H_{i_1})$. Другими словами, для ряда аналогичных друг другу проблемных ситуаций $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$ можно определить результативное управление $U_{i_1}(t, H_{i_1})$, которое позволяет выполнить их устранение на ОУ и, таким образом, обеспечить необходимые для успешной отработки маршрута (2) состояния АБЛА во времени, определяемые ситуациями $S_{\text{тр}}(t)$.

В связи с этим в классической модели ситуационного управления множество проблемных ситуаций $\Delta S(t)$ разбивается на подмножества аналогичных друг другу ситуаций $\Delta S_\beta(t)$, $\Delta S_\beta(t) \subset \Delta S(t)$, $\beta = 1, 2, \dots, m_4$, каждому из которых в соответствие ставится результативное управление $U_\beta(t, \Delta, S_\beta)$, позволяющее устранить произвольную проблемную ситуацию $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$ на ОУ, относящуюся к подмножеству ситуаций $\Delta S_\beta(t)$.

Однако при такой организации модели ситуационного управления воздушным движением АБЛА в базе знаний интеллектуального решателя задач необходимо хранить достаточно большое число допустимых проблемных ситуаций. Во избежание этого для каждого подмножества аналогичных друг другу проблемных ситуаций $\Delta S_\beta(t) \subset \Delta S(t)$ целесообразно сформировать обобщенное его описание $\Delta S_\beta^*(t)$ в виде эталонной проблемной ситуации, позволяющей идентифицировать произвольную проблемную ситуацию на ОУ, относящуюся к этому подмножеству ситуаций. Одним из эффективных подходов к решению этой проблемы является использование математического аппарата нечетких множеств для обобщенного представления отклонений параметров состояния АБЛА, характеристик возмущающих факторов ВС и управляющих воздействий в ситуационной модели представления знаний автоматической системы управления воздушным движением АБЛА.

Построение нечеткой модели представления и обработки знаний АБЛА

В целях обобщенного представления аналогичных друг другу проблемных ситуаций и построения соответствующей им эталонной проблемной ситуации $\Delta S_\beta^*(t)$ для всех переменных, участвующих в построении нечеткой ситуационной модели управления, необходимо определить множество R одноименных с ними лингвистических переменных (ЛП) [15, 16]:

$$\begin{aligned} R = \{R_j \cup \Delta R_j \cup R_k \cup R_q\}; \\ j, q = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m_1 \end{aligned}$$

где $R_j, \Delta R_j, R_k, R_q$ — подмножества ЛП, соответственно определяющие параметры состояния АБЛА $p_j(t)$, их отклонения $\Delta p_{i_1}(t, h_k(t, Z_k))$, возмущающие факторы ВС $h_k(t, Z_k) \in H_j(t)$ и управляющие воздействия $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ автоматической системы управления движением АБЛА.

Каждая ЛП [15], например, для отклонений параметров состояния АБЛА, задается следующей четверкой:

$$\Delta R_j = (\Delta P_j, \Delta T_j^p, \Delta P_j^*, \Delta p_j),$$

где ΔP_j — название ЛП, которое идентично с названием отклонения соответствующего

ей параметра состояния АБЛА $p_j(t)$, например, "Отклонение от требуемой скорости полета"; $\Delta T_j^p = \{\Delta T_j^p(j_2)\}$, $j_2 = 1, 2, \dots, 5$, — множество словесных значений ЛП, состоящее из нечетких подмножеств, определяемых следующими термами: $\Delta T_j^p(1)$ — "очень малое отклонение" (отклонение, которым можно пренебречь); $\Delta T_j^p(2)$ — "малое отклонение"; $\Delta T_j^p(3)$ — "среднее отклонение"; $\Delta T_j^p(4)$ — "большое" и $\Delta T_j^p(5)$ — "очень большое отклонение текущей скорости полета от заданного его значения"; $\Delta P_j^* = [\Delta p_j^{\min}, \Delta p_j^{\max}]$ — базовое множество ЛП, которое образует шкалу ее численных значений, соответственно, с нижней $\Delta p_j^{\min}$ и верхней $\Delta p_j^{\max}$ границами допустимых отклонений скорости полета АБЛА.

Здесь шкала на основе экспертных данных в соответствии с числом термов ЛП разбивается на пять непересекающихся подынтервалов с четко заданными границами. Внутри каждого такого подынтервала определяется нечеткое подмножество значений отклонений $\Delta p_j(t)$ соответствующего регулируемого параметра состояния $p_j(t)$. Например, для терма $\Delta T_j^p(j_2) \in \Delta T_j^p$ граничные значения нечеткой шкалы относящихся к нему фактических значений отклонений $\Delta p_j(t)$ определяются подынтервалом $[\Delta p_j(j_2), \Delta p_j(j_2 + 1)]$ численных значений. Таким образом, ограничения, определяемые термами $\Delta T_j^p(j_2) \in T_j^p$ ЛП ΔR_j и накладываемые на значения базовой переменной $\Delta p_j(t)$ отклонений регулируемого параметра состояния $p_j(t)$, задаются четко и выбираются исходя из предельных эксплуатационных характеристик АБЛА или на основе экспертных данных [15]; $\Delta p_j(t)$ — базовая переменная ЛП, или оценка конкретного значения отклонения параметра состояния АБЛА $p_j(t)$ в текущий момент времени t .

Необходимо отметить, что аналогичным образом определяются ЛП и для других переменных, участвующих в построении нечеткой модели ситуационного управления воздушным движением АБЛА.

С учетом того, что с выхода бортовой подсистемы навигации автоматической системы управления полетами АБЛА текущие значения параметров его состояния и возмущающих факторов ВС поступают в количественном виде, для построения эталонных проблемных ситуаций $\Delta S_\beta^*(t)$ все переменные, входящие в их структуру, представляются в нечетком формате. Например, для параметров состоя-

ния $p_j(t)$ формат их описания имеет следующий вид:

$$\langle T_j^p(j_2), [\Delta p_j(j_2), \Delta p_j(j_2 + 1)] \rangle.$$

В свою очередь, параметры управляющих воздействий $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ в логико-трансформационных решающих правилах (3) также переводятся в нечеткий формат представления в виде следующих троек:

$$\langle T_j^u(j_2), [u_j(j_2), u_j(j_2 + 1)] \rangle,$$

где $T_j^u(j_2) \in T_j^u$, T_j^u — множество термов лингвистической переменной, определяющей в нечеткой форме представления текущего значения управляющего воздействия $u_j(t, H_j)$; $u_j(j_2), u_j(j_2 + 1)$ — соответственно нижняя и верхняя границы подынтервала численных значений терма $T_j^u(j_2)$, определяющего характерный для него диапазон изменения параметров управляющего воздействия $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$.

Интервалы $[u_j(j_2), u_j(j_2 + 1)]$ численных значений термов $T_j^u(j_2) \in T_j^u$ определяются таким образом, чтобы параметры управляющих воздействий $u_j(t, H_j)$, выбираемых на основе решающих правил (3), после их корректировки с учетом требуемой точности регулирования обеспечивали бы устранение отклонений $\Delta p_j(t)$ параметров состояния ОУ на всем диапазоне $[\Delta p_j(j_2), \Delta p_j(j_2 + 1)]$ их допустимых значений, заданном в эталонной проблемной ситуации $\Delta S_\beta^*(t)$.

Что же касается текущих фактических $S_{\text{фак}}^{i_1}(t)$ и требуемых $S_{\text{тр}}^{i_1}(t)$ ситуаций, то для фазификации входящих в них переменных, выполняемой в целях их обобщения и сравнения между собой, используются, соответственно, следующие нечеткие форматы их представления: $\langle p_j(t), T_j^p(j_2) \rangle$ и $\langle p_j^*(t), T_j^p(j_2^*) \rangle$, где $p_j(t), p_j^*(t)$ — соответственно текущие значения базовой переменной ЛП в ситуациях $S_{\text{фак}}^{i_1}(t)$ и $S_{\text{тр}}^{i_1}(t)$, определяющей j -й параметр состояния АБЛА.

Определим понятия "нечетко равных" и "аналогичных друг другу произвольных ситуаций", возникающих в текущем состоянии АБЛА.

Определение 1. Две произвольные ситуации, например $S_{\text{фак}}^{i_1}(t)$ и $S_{\text{тр}}^{i_1}(t)$, нечетко равны между собой, если для всех пар " $\langle p_j(t), T_j^p(j_2) \rangle$, $\langle p_j^*(t), T_j^p(j_2^*) \rangle$ " входящих в них одноименных

j -х параметров состояния выполняется условие: $T_j^p(j_2) = T_j^p(j_2^*)$.

Определение 2. Две проблемные ситуации $\Delta S_1(t, H_1)$ и $\Delta S_2(t, H_2)$ являются аналогичными друг другу, если они нечетко равны между собой, т. е. когда все количественные значения одноименных в них переменных попадают в интервалы численных значений $[\Delta p_j(j_2), \Delta p_j(j_2 + 1)]$ одного и того же терма $T_j^p(j_2) \in T_j^p$ соответствующей им ЛП.

Введем понятие "степень $\rho(p_j(t), p_j^*(t))$ нечеткого равенства" двух значений j параметра состояния АБЛА, представленных парами $\langle p_j(t), T_j^p(j_2) \rangle$ и $\langle p_j^*(t), T_j^p(j_2^*) \rangle$, которая определяется на основе следующего решающего правила.

Правило оценки степени нечеткого равенства: "Степень нечеткого равенства

- $\rho(p_j(t), p_j^*(t)) = 1$, если для двух значений $p_j(t)$ и $p_j^*(t)$ одного и того же параметра состояния АБЛА выполняется условие $|p_j(t) - p_j^*(t)| \leq \varepsilon^*$, где $|p_j(t) - p_j^*(t)|$ — абсолютное значение разности; ε^* — допустимое рассогласование между текущим и требуемым значениями j параметра состояния. В этом случае принимается решение о том, что сравниваемые между собой значения j -го параметра состояния с допустимой погрешностью равны между собой и не требуется его регулирования;
- иначе $\rho(p_j(t), p_j^*(t)) = \mu(p_j(t)) \leftrightarrow \mu(p_j^*(t))$, если выполняется условие:

$$((|p_j(t) - p_j^*(t)| > \varepsilon^*) \& (T_j^p(j_2) = T_j^p(j_2^*))),$$

где $\&$ — знак, означающий необходимость выполнения левой и правой частей условия; $\mu(p_j(t)), \mu(p_j^*(t))$ — степени принадлежности сравниваемых между собой значений j -го параметра состояния нечетким множествам, определяемым, соответственно, термами $T_j^p(j_2)$ и $T_j^p(j_2^*)$ [16]; $\leftrightarrow$ — операция нечеткой эквивалентности [17]. При таком значении оценки нечеткого равенства принимается следующее решение: сравниваемые между собой значения j -го параметра состояния нечетко равны между собой, но может потребоваться устранение имеющегося между ними рассогласования, если оно больше допустимой ошибки регулирования ε^* ;

- иначе $\rho(p_j(t), p_j^*(t)) = 0$, если выполняется условие $T_j^p(j_2) \neq T_j^p(j_2^*)$. В этом случае принимается решение о том, что сравниваемые

между собой значения j -го параметра состояния не равны между собой, и требуется устранить имеющееся между ними отклонение".

Отсюда получаем, что степень $\rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t))$ нечеткого равенства сравниваемых между собой ситуаций $S_{\text{фак}}^i(t)$ и $S_{\text{тр}}^i(t)$ можно вычислить следующим образом:

$$\rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t)) = \min_{j=1}^n \rho(p_j(t), p_j^*(t)). \quad (4)$$

На основе полученной таким образом оценки степени нечеткого равенства сопоставляемых между собой ситуаций согласно соотношению (4) принимается одно из следующих решений:

— если $\rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t)) = 1$, то сравниваемые между собой ситуации $S_{\text{фак}}^i(t)$ и $S_{\text{зад}}^i(t)$ практически равны между собой, и на ОУ отсутствует проблемная ситуация;

— в случае, когда $0 < \rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t)) < 1$, сравниваемые между собой ситуации $S_{\text{фак}}^i(t)$ и $S_{\text{тр}}^i(t)$ нечетко равны между собой, и если $\rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t)) > h_0$, то принимается решение, что между ситуациями $S_{\text{фак}}^i(t)$ и $S_{\text{тр}}^i(t)$ наблюдаются только допустимые рассогласования входящих в них одноименных параметров, не требующие дальнейшего устранения, где h_0 — порог сравнения, который определяется исходя из допустимой ошибки регулирования ε^* параметров состояния АБЛА;

— если $\rho(S_{\text{фак}}^i(t), S_{\text{тр}}^i(t)) = 0$, то это говорит о том, что сравниваемые между собой ситуации не равны, а текущее состояние АБЛА определяется проблемной ситуацией $\Delta S_i(t, H_i)$.

Введем и определим операцию "поглощения" текущей проблемной ситуации $\Delta S_i(t, H_i)$ эталонной ситуацией ΔS_β^* .

Определение 3. Эталонная проблемная ситуация ΔS_β^* поглощает проблемную ситуацию $\Delta S_i(t, H_i)$, возникшую в текущем состоянии АБЛА в момент времени t , тогда и только тогда, когда для каждой пары одноименных в них переменных, например, параметров состояния $p_j(t)$, выполняется условие:

$$\Delta p_j(j_2) \leq \Delta p_j \leq \Delta p_j(j_2^*), \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где $\Delta p_j(j_2), \Delta p_j(j_2^*)$ — верхнее и нижнее граничные значения подынтервала численных значений терма $T_j^p(j_2)$, которым определяется отклонение Δp параметра состояния p_j в эталонной

проблемной ситуации; $\Delta p_j(t)$ — количественная оценка отклонения параметра состояния $p_j(t)$ в текущей проблемной ситуации $\Delta S_i(t, H_i)$.

Утверждение. Если эталонная проблемная ситуация ΔS_β^* поглощает текущую проблемную ситуацию $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$, то отработка управляющих воздействий $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$, выбранных на основе решающего правила (3), соответствующего ситуации ΔS_β^* , позволяет преобразовать текущую ситуацию $S_{\text{фак}}^i(t)$ на ОУ в ситуацию $S_{\text{фак}}^*(t)$, нечетко равную ситуации $S_{\text{тр}}^i(t)$.

Доказательство. 1. Пусть эталонная проблемная ситуация ΔS_β^* поглощает текущую проблемную на ОУ ситуацию $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$, тогда согласно определениям 1 и 3 данные ситуации нечетко равны между собой.

2. Согласно принципу организации ситуационного управления [12, 13] управляющие воздействия $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$, выбранные на основе решающих правил (3) по эталонной проблемной ситуации ΔS_β^* , позволяют выполнить преобразование текущей ситуации $S_{\text{фак}}^i(t)$ в ситуацию, нечетко равную требуемой ситуации $S_{\text{тр}}^i(t)$ в том случае, когда фактическая проблемная ситуация на ОУ $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$ нечетко равна ситуации ΔS_β^* .

3. Вместе с тем, очевидно, что каждое выбранное на основе решающих правил (3) отдельное управляющее воздействие $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ в результате отработки обеспечивает такое текущее значение $p_j(t)$ соответствующего j -го параметра состояния, которое попадает в интервал численных значений одного и того же термина $T_j^p(j_2)$, что и его требуемое значение $p_j^*(t)$. Сказанное вытекает из того, что в нечетко равных ситуациях ΔS_β^* и $\Delta S_{i_1}(t, H_{i_1})$ значения одноименных отклонений определяются одними и теми же терминами $\Delta T_j^p(j_2)$ соответствующих им лингвистических переменных.

Следовательно, из пп. 1–3 с очевидностью вытекает справедливость искомого утверждения.

Необходимо отметить, что при повышенных требованиях к точности регулирования j -х параметров состояния АБЛА, значительных уровнях возможных рассогласований между их фактическими и требуемыми значениями возникает необходимость реализации в управляющих воздействиях $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ пропорционального и интегрального законов регулирования. Кроме того, если наблюдается

высокая скорость изменения параметров состояния $v_j(t) = (p_j^H(t_2) - p_j^H(t_1))/(t_2 - t_1)$ под воздействием возмущающих факторов ВС, то в управляющих воздействиях $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ требуется реализовать и дифференциальный закон регулирования.

Следует также отметить, что для автоматического построения ПИД закона регулирования в процессе отработки управляющих воздействий $u_j(t, H_j) \in U_{i_1}(t, H_{i_1})$ все множество параметров состояния P АБЛА целесообразно разбить на подмножество автономных или независимо регулируемых параметров $p_j^H \in P_H, P_H \subset P$ и подмножество параметров $p_j^B \in P_B, P_B \subset P$ с перекрестным влиянием друг на друга. При этом, учитывая высокий уровень динамики ВС и ее не стохастическую неопределенность, в рассматриваемом случае необходимо использовать нечеткий ПИД регулятор [18].

Заключение

Предложенная в работе нечеткая модель ситуационного управления не требует проведения сложных вычислений и может быть реализована на бортовой ЭВМ АБЛА, что позволяет организовать эффективное управление целенаправленными полетами АБЛА в нестабильной воздушной среде.

Представление в нечетком формате входящих в структуру эталонных проблемных ситуаций отклонений параметров состояния АБЛА от требуемых значений и возмущающих факторов воздушной среды позволяет обобщить ситуационную модель представления знаний и на этой основе сократить число логико-трансформационных правил вывода без потери управляемости воздушного движения автономных беспилотных летательных аппаратов в нестабильных условиях функционирования.

Разработанные инструментальные средства, служащие для определения аналогичных друг другу фактических проблемных ситуаций на объекте управления и их сравнения с эталонными проблемными ситуациями, обеспечивают оперативный выбор результативных управляющих воздействий, которые позволяют устранить наблюдаемые отклонения текущих значений параметров состояния АБЛА от требуемых их значений.

Список литературы

1. Merino L., Martinez-de-dios JR., Ollero A. Cooperative Unmanned Aerial Systems for Fire Detection, Monitoring, and Extinguishing. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer, 2014. P. 2693–2722.
2. Сергеев А. А., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Управление автономной посадкой БПЛА самолетного типа на статическую и динамическую посадочные площадки по "гибким" кинематическим траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 3. С. 156–167.
3. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Планирование маршрута целенаправленного полета автономного летательного аппарата на низкой высоте в условиях неопределенности // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 1. С. 18–27.
4. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Об одном подходе решения задачи коммивояжера для планирования автономным беспилотным летательным аппаратом маршрутов облета целей // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021. № 1(48). С. 106–115.
5. Лебедев Г. Н., Ефимов А. В. Применение динамического программирования для маршрутизации облета мобильных объектов в контролируемом регионе // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 6. С. 234–241.
6. Лиго Тань, Фомичев А. В. Планирование пространственного маршрута беспилотных летательных аппаратов с использованием методов частичного целочисленного линейного программирования // Вестник МГТУ им Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 2. С. 53–66.
7. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Планирование автономным беспилотным летательным аппаратом эффективных маршрутов облета целей // Авиакосмическое приборостроение. 2020. № 4. С. 3–14.
8. Черный М. А., Кораблин В. И. Воздушная навигация. М.: Транспорт, 1991. 432 с.
9. Моисеев В. С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов. Казань: Школа, 2015. 444 с.
10. Rysdyk R. Unmanned Aerial Vehicle path following for target observation in wind // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2006. Vol. 29, N. 5. P. 1092–1100.
11. Веремеенко К. К., Желтов С. Ю., Ким Н. В. и др. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2009. 554 с.
12. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
13. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Ситуационный подход в задачах автоматизации управления техническими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 9. С. 562–578.
14. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Управление эффективной реализацией технологических процессов механической обработки деталей в машиностроении // Проблемы управления. 2020. № 1. С. 71–82.
15. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений. М.: Мир, 1976. 168 с.
16. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy Control. Boston (USA): Addison Wesley Longman, 1998. 522 p.
17. Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
18. Абдурагимов Т. Т., Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Информационно-аналитическая модель нечеткого ПИД регулятора // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. № 1 (44). С. 48–60.

Fuzzy Model of Situational Control of the Flight Parameters of an Autonomous Unmanned Aircraft under Uncertainty Conditions

V. B. Melekhin, pashka1602@rambler.ru,

Dagestan State Technical University, Makhachkala, 367015, Russian Federation,

M. V. Khachumov, khmike@inbox.ru,

Federal research center "Computer Science and Control" Russian Academy of Sciences,

Moscow, 117312, Russian Federation,

Program Systems Institute of the Russian Academy of Sciences, Veskovo, 152021, Russian Federation

Corresponding author: Melekhin Vladimir B., D. Sc., Professor, Makhachkala, 367015, Russian Federation, e-mail: pashka1602@rambler.ru

Accepted on August 15, 2021

Abstract

The article outlines the main problems of automatic planning of the behavior of an autonomous unmanned aerial vehicle in unstable air conditions. It is shown that the urgency of the problem is due to the fact that an autonomous unmanned aerial vehicle independently forms and implements its flight route without support from a ground control station. There is therefore a need to develop a method for automatic control of programmed movements associated with the implementation of the route constructed by the problem solver. To solve this problem we propose an approach to regulating the parameters of the state of dynamic objects based on the principle of situational control of the goal-directed behavior of complex systems in changing environmental conditions. The expediency of choosing this control principle is due to the fact that the state of an autonomous unmanned aerial vehicle during its flight is characterized by a large number of parameters and disturbing environmental factors. In order to effectively implement this control principle, we introduce the concept of a complete problematic situation, which consists of deviations of the state parameters of an autonomous unmanned aerial vehicle from the required values during flight and disturbing environmental factors. On this basis, a fuzzy model of situational control of the state parameters of an autonomous unmanned aerial vehicle functioning in an unstable environment is developed, in which

linguistic variables and functions are used to provide a generalized presentation of reference problem situations, as well as to describe the deviations of the state parameters and disturbing environmental factors. The conditions are determined under which the reference indistinctly presented problem situations generalize the actual problem situations that arise at the control object. This makes it possible to significantly reduce the number of logical-transformational decision rules in the situational control model and to promptly automatically determine effective control actions in problematic situations that ensure the effective implementation of programmed movements of an autonomous unmanned aerial vehicle under conditions of uncertainty. In conclusion, it is shown that for the implementation of control actions which are selected on a situational basis with increased requirements for the accuracy of regulation of the time-varying parameters of the control object and a significant level of possible discrepancies between their actual and specified values in conditions of uncertainty, it is advisable to use indistinctly implemented proportional, integral and differential regulation laws.

Keywords: autonomous unmanned aerial vehicle, unstable air environment, flight parameters, situational control model, uncertainty conditions

Acknowledgements: This work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056/>

For citation:

Melekhin V. B., Khachumov M. V. Fuzzy Model of Situational Control of the Flight Parameters of an Autonomous Unmanned Aircraft under Uncertainty Conditions, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 12, pp. 650—659.

DOI: 10.17587/mau.22.650-659

References

1. Merino L., Martinez-de-dios JR., Ollero A. Cooperative Unmanned Aerial Systems for Fire Detection, Monitoring, and Extinguishing. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer, 2014, pp. 2693—2722.
2. Sergeev A. A., Filimonov A. B., Filimonov N. B. Control of autonomous landing of aircraft-type UAVs on static and dynamic landing sites along "flexible" kinematic trajectories. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 156—167 (in Russian).
3. Melekhin V. B., Hachumov M. V. Planning the route of a purposeful flight of an autonomous aircraft at low altitude under conditions of uncertainty, *Aviakosmicheskoe Priborostroenie*, 2018, no. 1, pp. 18—27 (in Russian).
4. Melekhin V. B., Hachumov M. V. On one approach to solving the traveling salesman problem for planning an autonomous unmanned aerial vehicle of target fly-over routes, *Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science*, 2021, vol. 48, no. 1, pp. 106—115 (in Russian).
5. Lebedev G. N., Efimov A. V. The use of dynamic programming for routing overflights of mobile objects in the controlled region, *Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2011, no. 6, pp. 234—241 (in Russian).
6. Ligo Tan', Fomichyov A. V. Planning the spatial route of unmanned aerial vehicles using partial integer linear programming methods, *Bulletin of the Moscow State Technical University named after N. E. Bauman. Ser. Instrumentation*, 2016, no. 2, pp. 53—66 (in Russian).
7. Melekhin V. B., Hachumov M. V. Planning by an autonomous unmanned aerial vehicle of effective routes of overflights of targets, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2020, no. 4, pp. 3—14 (in Russian).
8. CHernyj M. A., Korablin V. I. Air navigation, Moscow, Transport, 1991, 432 p. (in Russian).
9. Moiseev V. S. Fundamentals of the theory of effective use of unmanned aerial vehicles, Kazan', SHkola, 2015, 444 p. (in Russian).
10. Rysdyk R. Unmanned Aerial Vehicle path following for target observation in wind, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, vol. 29, no. 5, pp. 1092—1100.
11. Veremeenko K. K., ZHeltov S. Yu., Kim N. G., Serebryakov G. G., Krasil'nikov M. N. Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft, Moscow, Fizmatlit, 2009, 554 p. (in Russian).
12. Pospelov D. A. Situational management: theory and practice, Moscow, Nauka, 1986, 288 p. (in Russian).
13. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Situational approach in the tasks of automation of management of technical objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 562—578 (in Russian).
14. Melekhin V. B., Hachumov V. M. Management of effective implementation of technological processes of mechanical processing of parts in mechanical engineering, *Problems of Management*, 2020, no. 1, pp. 71—82 (in Russian).
15. Zade L. The concept of a linguistic variable and its application for making approximate decisions. Moscow, Mir, 1976, 168 p. (in Russian).
16. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy Control, Boston (USA), Addison Wesley Longman, 1998, 522 p.
17. Melihov A. N., Bershtejn L. S., Korovin S. Ya. Situational advising systems with fuzzy logic, Moscow, Nauka, 1990, 272 p. (in Russian).
18. Abduragimov T. T., Melekhin V. B., Hachumov V. M. Information-analytical model of a fuzzy PID controller, *Bulletin of the Dagestan State Technical University, Technical science*, 2017, vol. 44, no. 1, pp. 48—60 (in Russian).

В. В. Косьянчук, д-р техн. наук, проф. РАН, vvk@gosniias.ru,

Е. Ю. Зыбин, д-р техн. наук, нач. лаборатории, ezybin@2100.gosniias.ru,

В. В. Гласов, канд. техн. наук, доц., vvglasov@2100.gosniias.ru,

Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, г. Москва,

Л. Тань, канд. техн. наук, доц., tanlihuo@hit.edu.cn,

Харбинский технологический институт, г. Харбин

Непараметрический метод прогнозирования траектории движения активно маневрирующего судна посадки беспилотного летательного аппарата*

Статья посвящена разработке алгоритмов прогнозирования траектории движения маневрирующих объектов на основе непараметрической теории систем. Проводится анализ неопределенностей, влияющих на моделирование движения маневрирующих водных объектов. Приводится обзор параметрических, непараметрических и комбинированных методов прогнозирования траектории их движения. Для решения задачи высокоточного автономного управления посадкой беспилотных летательных аппаратов на судно посадки в условиях его нерегулярного движения, вызванного метеорологическими условиями и активным маневрированием, предлагается метод прогнозирования траектории движения судна посадки, основанный на решении прямых задач динамики с использованием непараметрической теории систем. Преимущества предлагаемого метода заключаются в том, что он не подвержен модельным ошибкам, так как основывается только на ретроспективном анализе нескольких последовательных значений пространственных координат судна посадки, при этом в отличие от аналогичных непараметрических методов не использует статистические вычисления, не требует своего обучения или длительной настройки. Метод не подразумевает решения задач идентификации параметров модели, состояния и управляющих воздействий и может быть применен при любых неизвестных линеаризуемых входных управляющих воздействиях, в том числе при неидентифицируемости модели динамики движения судна посадки. Приводятся результаты численного моделирования решения задачи прогнозирования траектории движения активно маневрирующего малоразмерного судна посадки с применением полной нелинейной динамической модели с шестью степенями свободы. Проведенные исследования подтверждают работоспособность, адекватность и очень быструю настройку разработанного метода в условиях полной параметрической и непараметрической неопределенности. Предлагаемый метод может быть использован для прогнозирования траектории движения любого транспортного средства при условии линеаризуемости его модели и сигналов управления на наблюдаемом интервале времени.

Ключевые слова: маневрирующее судно, прогнозирование траектории, непараметрический метод, параметрическая неопределенность

Введение

Прогнозирование траектории движения надводного судна является важным элементом для решения многих задач судовождения и обеспечения безопасности [1]. Основными данными, определяющими траекторию, являются пространственные координаты судна, изменение которых соответствует закону его движения в пространстве. Траекторные данные в автономных судовых системах управления снимаются с собственных датчиков информации. В системах внешнего контроля и управления траекторные данные снимаются с судовых датчиков через автоматические идентификационные системы или определяются своими средствами наблюдения [2].

Траектория движения судна зависит от многих факторов и условий, таких как тип судна, его скорость, маневренные возможности и т. п. Кроме того, на траекторию движения судна оказывает влияние ряд случайных факторов, под которыми подразумеваются все причины, искажающие траекторию или затрудняющие ее обнаружение и прогнозирование.

В целях повышения безопасности навигации судов в сложных и изменчивых условиях необходимо обеспечить решение задачи прогнозирования их траекторий движения для предупреждения об опасности для интеллектуальной навигационной системы судна, для построения систем поддержки принятия решений в системах управления движением судов, интеллектуальных интегрированных систем обеспечения безопасности транспортных средств в едином воздушном пространстве "умного города" и других систем внешне-

*Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ и ГФЕН Китая № 20-58-53059 (6191101340) и гранта РФФИ № 19-29-06091.

го контроля деятельности судов, а также для обработки параметрической информации при расследовании аварийных случаев.

Анализ методов прогнозирования траекторий движения судов

Приведем краткий обзор некоторых современных методов прогнозирования траектории движения надводных судов. Методы прогнозирования траекторий движения можно условно разбить на две большие группы: параметрические и непараметрические.

Параметрические (parametric) методы или методы, основанные на моделях (model-based), считающиеся классическими, прямо или косвенно используют параметры математических моделей движения судна, значения которых задаются априорно из известных физических принципов или оцениваются в процессе идентификации [1–5]. При этом применяются кинематические, динамические и статистические модели прогнозируемых процессов [1]. Принцип прогнозирования в этих методах основывается на экстраполяции текущих параметров движения (скорости, ускорения) и предположении, что эти параметры существенно не изменятся в будущем. Поэтому эти методы содержат большую ошибку и в большинстве случаев служат только для приблизительной оценки будущего положения судна [6].

Несмотря на то, что параметрические (модельные) методы внесли большой вклад в теорию прогнозирования, большинство из этих методов основываются на идеализированных предположениях, которые нередко имеют расхождения с реальными параметрами и факторами движения судна. Поэтому представленные в литературе методы прогнозирования траектории движения судов часто сложно реализовать на практике.

Отличительной особенностью динамики надводного судна является наличие границы раздела двух сред [7]. Поэтому в процессе хода судна на него влияют внешние факторы, приводящие к появлению дополнительных гидродинамических и аэродинамических сил и моментов, а именно: ветер, волнение, течение, другие суда, стенки каналов и причалов, особенности акватории.

Такие сложные процессы, как ветровые и волновые возмущения, и их влияние на объект

управления являются отдельными крупными научными проблемами моделирования. Помимо этого, при моделировании движения судна необходимо учитывать влияние мелководья, которое искажает его динамические характеристики. На мелководье возрастает сопротивление движению судна, и при одной и той же частоте вращения винтов скорость судна, по сравнению с его скоростью на глубокой воде, уменьшается. При этом возрастает коэффициент нагрузки движителя [8].

Вышеуказанные факторы приводят к тому, что составляющие вектора управляющих воздействий и параметры эффективности органов управления могут содержать набор неопределенностей. Невозможность учета неопределенностей в существующих параметрических методах прогнозирования приводит к неприемлемой для решения некоторых задач точности.

При решении задачи автономного наблюдения за судном и прогнозирования его траектории может быть полностью не доступна информация о его управляющих воздействиях. В этом случае необходимо вовремя обнаружить и обеспечить учет неизвестных маневров при прогнозировании.

Для обнаружения маневров могут быть использованы методы восстановления управляющих воздействий на основании информации о следующих стандартных маневрах судна [9]:

- разгон — реакция на работу гребных винтов в прямом направлении, вплоть до максимальной мощности;
- торможение — реакция на работу гребных винтов в обратном направлении, вплоть до максимальной мощности;
- циркуляция — процесс реакции судна на ступенчатую перекладку руля;
- зигзаг — процесс реакции судна на несколько переключений руля с одинаковым по модулю, но разным по значению уровнем;
- поворот — процесс реакции судна на переключку руля и возврат его в нейтральное положение;
- прямая спираль — процесс реакции судна на ступенчатую перекладку руля от максимального значения к минимальному.
- обратная спираль — процесс реакции судна на ступенчатую перекладку руля от минимального значения к максимальному.

Однако такой подход ограничен только стандартными маневрами.

Обнаружение начала маневра судна можно также осуществлять на основе оценки вероятностных и пороговых значений кинематических параметров движения судна или значений и знаков отклонений и скоростей относительно их средних значений [1]. При этом многие из этих методов являются достаточно сложными, требуют дополнительных данных и не всегда пригодны для медленно изменяющихся кинематических параметров, свойственных судну.

Для учета маневров, как правило, используются алгоритмы параметрической и структурной адаптации прогнозирующих фильтров.

Известны также методы регрессии опорных векторов [10], предназначенные для преодоления недостатков нейронных сетей, которые склонны попадать в локальные минимумы, а также метод на основе стандартной имитационной модели группы моделирования маневрирования Японского общества военно-морских архитекторов и инженеров-океанологов, основанной на определении коэффициентов гидродинамических сил скрытых моделей [11]. Однако в этих исследованиях предполагается, что судовождение осуществляется при постоянных условиях и параметрах, а адаптивность соответствующих состояний и параметров к различным условиям окружающей среды ограничена [12].

В результате большинство известных параметрических методов прогнозирования движения судов обладают либо низкой точностью, обусловленной неточностями моделей и возмущающих воздействий, либо обладают высокой вычислительной сложностью, либо требуют времени реализации большего, чем скорость протекания моделируемых процессов.

Поиски путей повышения точности прогноза траектории движения судов с учетом всех возможных неопределенностей привели к применению непараметрической теории систем. Данная теория широко используется и активно развивается, в основном, в области интеллектуальных систем и направлена на интеллектуальный анализ данных измерений и прогнозирование траектории движения на его основе.

Непараметрические (nonparametric) или безмодельные (model-free) методы, известные также как методы, основанные на знаниях (knowledge-based), данных (data-driven, data-based), сигналах (signal-based) или прошлых измерениях (history-based) [13–16], не требуют информации о параметрах моделей судов и основаны на анализе их входных и выходных

сигналов. Такие методы рассматривают судно в виде "черного ящика" и позволяют решать задачи прогнозирования поведения нестационарных и нелинейных систем в условиях полной параметрической неопределенности.

Для прогнозирования траектории движения наводных судов в условиях нелинейности их надводных моделей, неопределенностей и неполноты исходных данных наиболее широко известными являются непараметрические методы, основанные на применении искусственных нейронных сетей [17–28].

В работе [20] нейронная сеть выполняет функцию идентификации модели движения судна. В статье [21] нейронные сети используются для прогнозирования траектории, при этом коррекция ее параметров выполняется в режиме реального времени по мере движения судна. В статьях [24, 25] предлагается использовать нейронную сеть для прогноза координат судна, в которой ее весовые коэффициенты представляют собой физические характеристики судна. В работе [26] предложена нейронная сеть, преобразующая вектор относительной скорости судна в его координаты в локальной СК. Такая сеть выполняет функции интегрирования относительной скорости судна во времени, и ее свободные параметры не зависят от физических характеристик судна. Обучение сети осуществлялось на данных, полученных в ходе моделирования.

Особый интерес также представляет нейронная сеть, преобразующая внешние факторы непосредственно в координаты судна [27]. Обучение такой сети будет возможно на данных, полученных в результате натурных наблюдений. В статье [23] рассматривается рекуррентная нейронная сеть, прогнозирующая скорость дрейфа судна в условиях воздействия внешних возмущений (ветра и волнения).

В работе [29] метод моделирования и нейросетевой метод объединены. При этом метод моделирования обеспечивает точность прогнозирования траектории в краткосрочной перспективе с учетом динамических параметров движения судна, а нейросетевой — долгосрочное представление о будущих траекториях судна с оценкой и учетом возможных маневров. Схема объединения модельного и нейросетевого методов прогнозирования траектории движения судна приведена на рис. 1 [29].

Несомненными достоинствами нейросетевых методов является отсутствие необходимости соз-

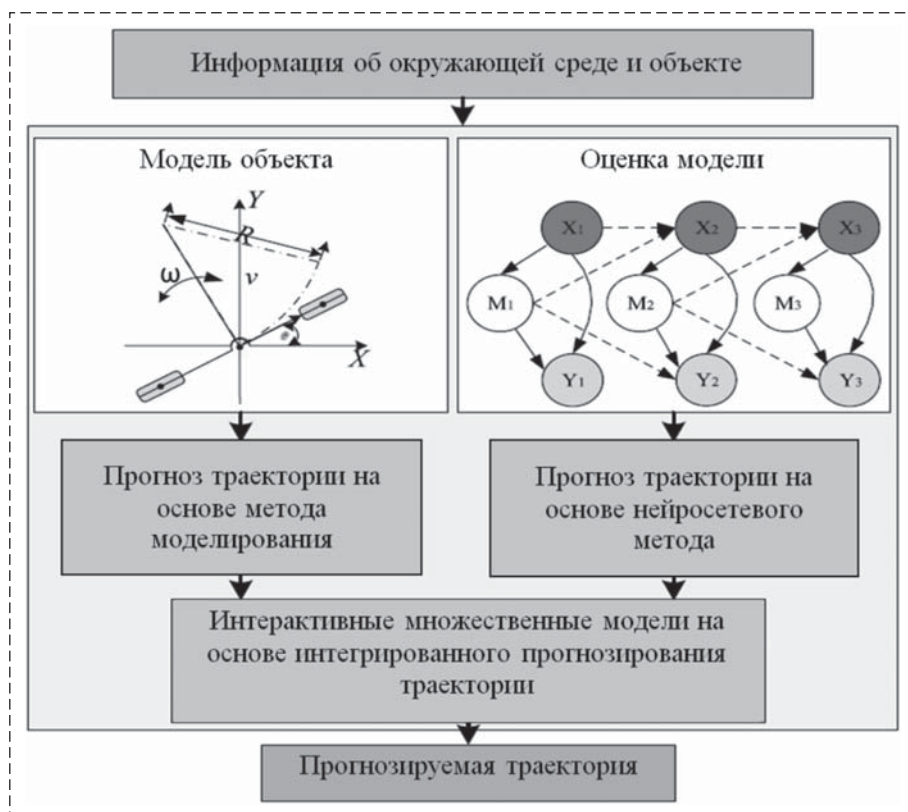


Рис. 1. Схема объединения методов прогнозирования траектории
Fig. 1. Trajectory prediction methods combining scheme

дания точной математической модели процесса движения и возможность учитывать имеющиеся отклонения параметров каждого конкретного судна от стандартных значений, используемых в параметрических методах, а также трудно учитываемые метеорологические факторы, которые, тем не менее, приводят к статистически значимым влияниям на результирующую траекторию. Эти методы применимы для прогнозирования траектории движения любого судна, так как параметры нейронной сети не зависят от физических характеристик судна, а зависят только от вида его траектории. Кроме того, обученная с использованием стандартных маневров сеть эффективно работает с любыми эксплуатационными маневрами, получаемыми в результате любого сочетания стандартных маневров. В результате нейронная сеть в большинстве случаев демонстрирует несколько более точный прогноз координат по сравнению с традиционными методами.

Тем не менее, нейронные сети требуют больших информационно-вычислительных затрат и своего длительного обучения на реальных данных. Поэтому на практике они способны прогнозировать траекторию судна только для ограниченного класса ситуаций, соответству-

ющих тем внешним факторам, которые использовались при формировании данных для обучения.

Недавно в области непараметрической теории систем был представлен оригинальный эффективный подход к решению прямых и обратных задач динамики, основанный на анализе линейной зависимости столбцов матрицы Ганкеля входных-выходных данных и лишенный принципиальных недостатков нейросетевых методов [15, 16]. Описываемый подход не подвержен влиянию модельных ошибок, так как не требует априорной информации о параметрах математической модели судна, решения задач их идентификации или наблюдения вектора состояния. В отличие от аналогичных непараметрических методов он не требует больших

вычислительных затрат, не использует логические или статистические вычисления, обучение или длительную настройку и может быть применен для решения задач прогнозирования в условиях полной параметрической неопределенности даже в случаях неустойчивости и неидентифицируемости математической модели судна [13, 14]. Основным ограничением подхода при решении задачи прогнозирования является необходимость наличия информации об управляющих воздействиях.

В данной статье на основе рассмотренного подхода к решению прямых задач динамики разрабатывается новый метод прогнозирования траектории движения судна в условиях его нерегулярного движения, вызванного сложными метеорологическими условиями и активным маневрированием, в предположениях о наблюдаемости его модели и линеаризуемости неизвестных управляющих сигналов. Заметим, что все перечисленные выше стандартные маневры судна легко линеаризуемы, причем с использованием невысокого порядка уравнений. Эксплуатационные маневры, выполняемые в повседневной практике судовождения, как правило, состоят из различных сочетаний стандартных маневров. Поэтому на

небольшом интервале времени предположение о линеаризуемости неизвестных управляющих сигналов в большинстве практических случаев полностью соответствует действительности.

Разработка непараметрического метода прогнозирования траектории движения маневрирующего судна посадки

Пусть динамика движения судна описывается линейной дискретной моделью в пространстве состояний типа "вход—состояние—выход"

$$x_{i+1}^y = A_y x_i^y + B u_i; \quad (1)$$

$$y_i = C_y x_i^y, \quad (2)$$

где i — дискретные моменты времени; y_i — измеряемые пространственные координаты судна; x_i^y — неизвестный вектор состояния судна; A_y , B , C_y — неизвестные матрицы собственной динамики, эффективности управления и измерения судна; u_i — неизвестный вектор управления, формируемый в виде

$$x_{i+1}^u = A_u x_i^u; \quad (3)$$

$$u_i = C_u x_i^u, \quad (4)$$

где x_i^u — неизвестный вектор состояния системы управления; A_u , C_u — неизвестные матрицы собственной динамики и выхода системы управления (рис. 2).

Подставим выражение (4) в уравнение (1):

$$x_{i+1}^y = A_y x_i^y + B C_u x_i^u, \quad (5)$$

объединим выражения (5) и (3) и запишем эквивалентную (1)–(4) модель с расширенным вектором состояния:

$$x_{i+1} = A x_i; \quad (6)$$

$$y_i = C x_i, \quad (7)$$

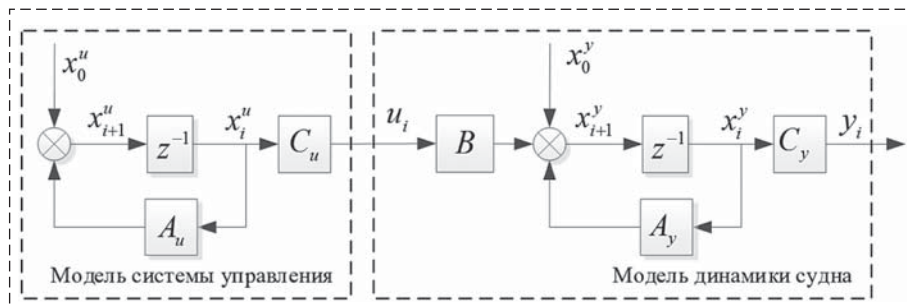


Рис. 2. Модель маневрирующего судна

Fig. 2. The model of a maneuvering vessel

где

$$x = \begin{bmatrix} x^y \\ x^u \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} A_y & B C_u \\ 0 & A_u \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} C_y & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Введем обозначение для произвольной блочной матрицы Ганкеля вида

$$Z_i^{n,m} = \begin{bmatrix} z_{i-n-m} & z_{i-n-m+1} & \cdots & z_{i-n} \\ z_{i-n-m+1} & z_{i-n-m+2} & \cdots & z_{i-n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{i-m} & z_{i-m+1} & \cdots & z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{i-n}^{1,m} \\ Z_{i-n+1}^{1,m} \\ \vdots \\ Z_i^{1,m} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} Z_{i-m}^{n,1} & Z_{i-m+1}^{n,1} & \cdots & Z_i^{n,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{i-n+1}^{1,m} \\ \vdots \\ Z_i^{1,m} \end{bmatrix},$$

где m , n — число блочных строк и столбцов, соответственно. Тогда с использованием матрицы наблюдаемости $\mathbf{C}$ можно записать значения выходных сигналов модели (6)–(7) для $v + 1$ измерений в виде

$$Y_i^{v,1} = \mathbf{C} x_{i-v}, \quad (10)$$

где v — индекс наблюдаемости;

$$Y_i^{v,1} = \begin{bmatrix} y_{i-v} \\ y_{i-v+1} \\ y_{i-v+2} \\ \vdots \\ y_i \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^v \end{bmatrix}.$$

С учетом предположения о наблюдаемости модели зависимые столбцы у матрицы наблюдаемости $\mathbf{C}$ отсутствуют, следовательно, ее можно представить в виде следующего канонического разложения [30]:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где I — единичная матрица, размер которой совпадает с рангом матрицы наблюдаемости; $\tilde{\mathbf{C}}^L$, $\bar{\mathbf{C}}^L$ — левые делители единицы и нуля, удовлетворяющие условию

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Подставим (11) в (10):

$$Y_i^{v,1} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} x_{i-v} \quad (13)$$

и решим задачи наблюдения векторов состояния для искомого

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} x_{i-v} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_i^{v,1} \quad (14)$$

и следующего

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} x_{i-v+1} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_{i+1}^{v,1} \quad (15)$$

моментов времени, которые в соответствии с уравнением (6) также зависят друг от друга:

$$x_{i-v+1} = Ax_{i-v}. \quad (16)$$

Подставим (16) в (15):

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} Ax_{i-v} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_{i+1}^{v,1} \quad (17)$$

и с учетом (14)

$$x_{i-v} = \tilde{\mathbf{C}}^L Y_i^{v,1} \quad (18)$$

запишем

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{\mathbf{C}}^L Y_i^{v,1} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix} Y_{i+1}^{v,1}. \quad (19)$$

Выразим далее матрицу измерения

$$Y_{i+1}^{v,1} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{\mathbf{C}}^L Y_i^{v,1}$$

и окончательно запишем эквивалентную (1)–(2) модель вида "выход":

$$Y_{i+1}^{v,1} = AY_i^{v,1}, \quad (20)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}^L \\ \bar{\mathbf{C}}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} A \tilde{\mathbf{C}}^L. \quad (21)$$

Предположим теперь, что наблюдение за судном ведется на протяжении некоторого времени $h + 1$, тогда модель (20) примет вид

$$\mathbf{Y}_{i+1}^{v,h} = A\mathbf{Y}_i^{v,h}, \quad (22)$$

где

$$\mathbf{Y}_{i+1}^{v,h} = [Y_{i-h+1}^{v,1} \ \dots \ Y_i^{v,1} \ Y_{i+1}^{v,1}]; \quad (23)$$

$$\mathbf{Y}_i^{v,h} = [Y_{i-h}^{v,1} \ \dots \ Y_{i-1}^{v,1} \ Y_i^{v,1}], \quad (24)$$

из которого можно записать линейное матричное уравнение идентификации параметров эквивалентной модели:

$$A\mathbf{Y}_i^{v,h} = \mathbf{Y}_{i+1}^{v,h}. \quad (25)$$

Известно [30], что любое матричное уравнение вида

$$ZQ = W$$

с известными матрицами Q , W разрешимо относительно Z тогда и только тогда, когда выполняется условие разрешимости

$$W\bar{Q}^R = 0, \quad (26)$$

где $\bar{Q}^R$ — правый делитель нуля полного ранга, удовлетворяющий условию

$$Q\bar{Q}^R = 0. \quad (27)$$

Тогда согласно условию (26) для разрешимости уравнения (25) необходимо и достаточно обеспечить выполнение следующего условия:

$$\mathbf{Y}_{i+1}^{v,h} \overline{\mathbf{Y}_i^{v,h}}^R = 0, \quad (28)$$

где правый делитель нуля определяется из выражения

$$\mathbf{Y}_i^{v,h} \overline{\mathbf{Y}_i^{v,h}}^R = 0. \quad (29)$$

В итоге, после подстановки выражений (23) и (24) в уравнение (28) прогнозирование вектора измерений осуществляется по формуле

$$y_{i+1} = -Y_i^{1,h} R_{i-1} r_i^+, \quad (30)$$

где $Y_i^{1,h} = [y_{i-h} \ \dots \ y_{i-1} \ y_i]$, r_i^+ — псевдообращение, а элементы делителя нуля определяются из условия (29):

$$\mathbf{Y}_i^{v,h} \overline{\mathbf{Y}_i^{v,h}}^R = [\mathbf{Y}_{i-1}^{v,h-1} \ Y_i^{v,1}] \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ r_i \end{bmatrix} = 0. \quad (31)$$

Пример решения задачи прогнозирования траектории

Проверка работоспособности разработанного метода осуществлялась на полной нелинейной динамической модели надводного судна посадки с шестью степенями свободы, учитывающей физические ограничения двигательной установки, а также влияние сил инерции, торможения и течений, волновых, ветровых и других возмущений [31].

Для решения задачи прогнозирования траектории движения судна посадки использовались только данные измерений спутниковых, лазерных или оптических датчиков беспилотного летательного аппарата, преобразованные в пространственные координаты судна [32]. Схема моделирования показана на рис. 3, где $y = [x_e \ y_e \ z_e \ V_x \ V_y \ V_z \ \gamma \ \vartheta \ \psi \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$; x_e, y_e, z_e — пространственные координаты (м); V_x, V_y, V_z — линейные скорости (м/с); γ, ϑ, ψ — углы крена, тангажа, рысканья ($^\circ$); $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — угловые скорости ($^\circ/\text{с}$); $u = [u_1 \ u_2]^T$; u_1 — угол отклонения руля направления ($^\circ$), u_2 — скорость вращения двигателя.

Для формирования матриц измерений на интервале наблюдения используется накопитель информации. В блоке синтеза алгоритма прогнозирования реализованы формулы (30)–(31). Ширина окна наблюдения выбрана равной $h = 15$, индекс наблюдаемости $v = 4$. Сигналы управления и соответствующий им вектор состояния судна показаны на рис. 4 и 5. Ошибки прогнозирования траектории движения судна приведены на рис. 6.

Результаты численного моделирования показывают высокие характеристики точности и быстродействия решения задачи. Ошибки прогнозирования траектории движения судна не превышают 4-го десятичного знака по всем пространственным координатам. Ранг матрицы Ганкеля данных не превышает 7, поэтому настройка алгоритма с учетом индекса наблюдаемости происходит в течение 10 измерений, т. е., с учетом шага дискретизации 0,05 с, всего за 0,5 с, при появлении зависимых столбцов, а следовательно, и правого делителя нуля у матрицы данных вида (31).

Заключение

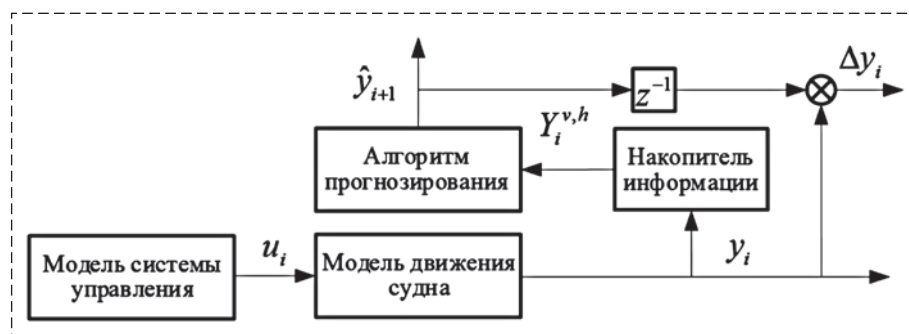


Рис. 3. Схема численного моделирования

Fig. 3. Numerical simulation scheme

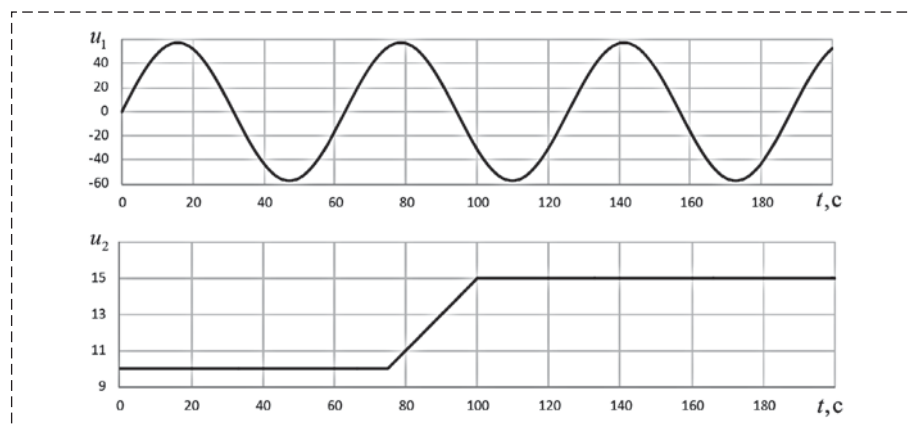


Рис. 4. Сигналы управления судном

Fig. 4. Vessel control signals

В результате проведенных исследований разработан новый непараметрический метод прогнозирования траектории движения надводного судна не использующий априорной информации о параметрах его модели, не требующий решения задач идентификации параметров модели, наблюдения вектора состояния или восстановления вектора управления и основанный только на ретроспективном анализе нескольких последовательных значений его пространственных координат. Предлагаемый метод не подвержен модельным ошибкам и в отличие от аналогичных не использует логические или статистические вычисления, не требует обучения или длительной настройки и может быть использован даже при неидентифицируемости модели движения судна.

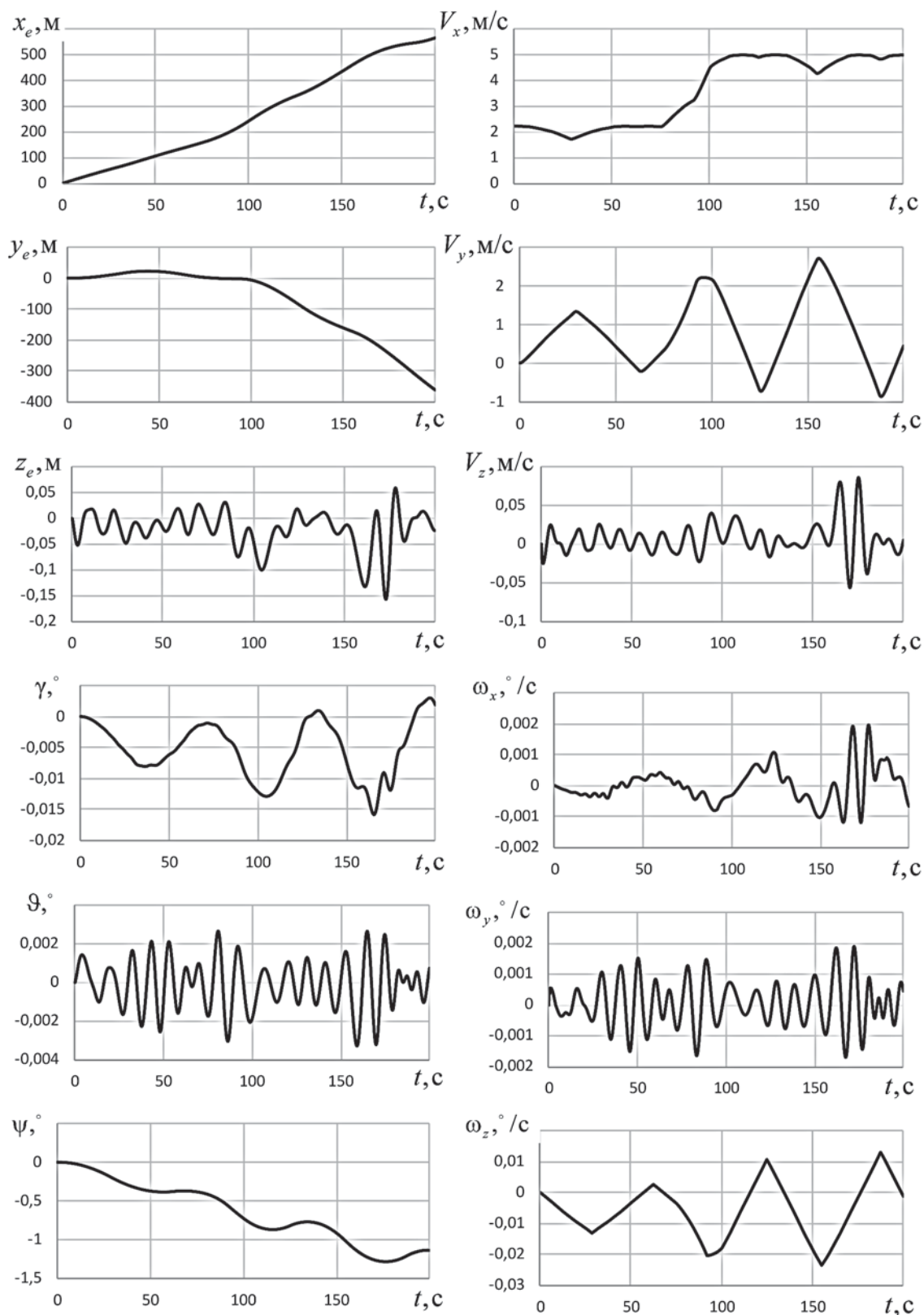


Рис. 5 Вектор состояния судна

Fig. 5. Vessel state vector

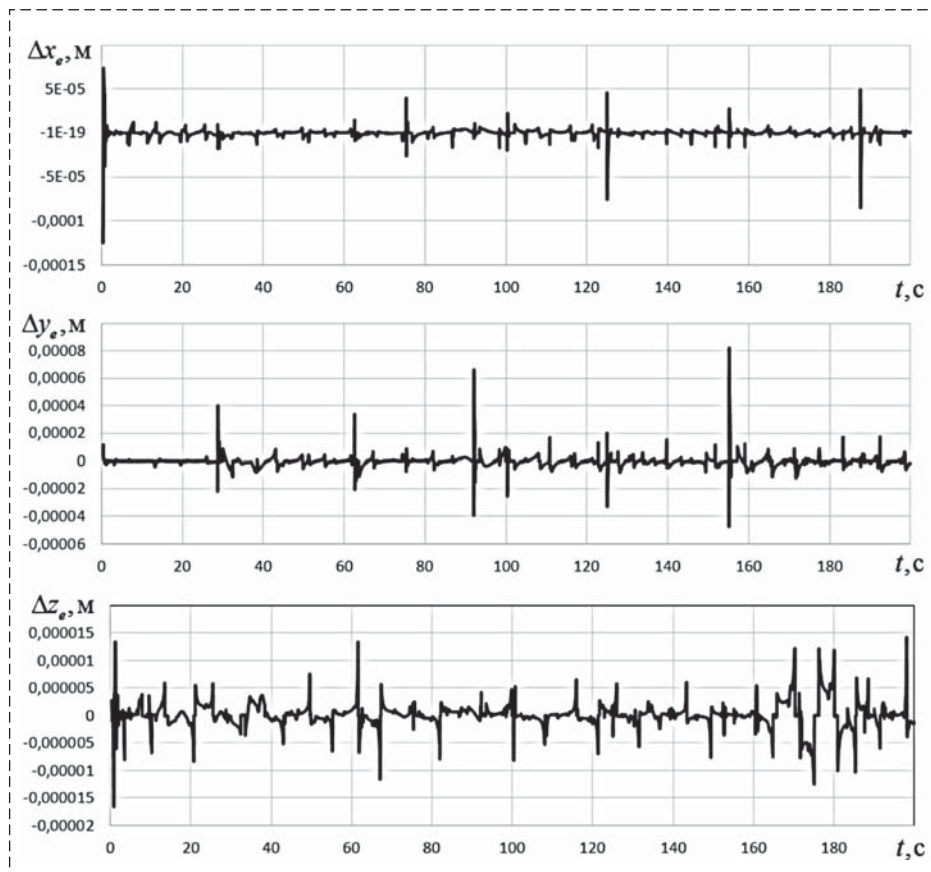


Рис. 6. Ошибки прогнозирования траектории движения судна
Fig. 6. Errors in predicting the trajectory of the vessel

Полученные результаты численного моделирования решения задачи прогнозирования траектории движения судна подтверждают работоспособность и очень быструю настройку разработанного метода в условиях полной параметрической и непараметрической неопределенности. Описанный подход может быть использован для прогнозирования траектории движения любого транспортного средства (автомобиля, водного или воздушного судна и т. д.) при условии линейризуемости его модели и сигналов управления на наблюдаемом интервале времени.

Практическая реализация разрабатываемых непараметрических методов совместно с традиционными параметрическими позволит повысить точность прогнозирования и решить задачу высокоточной посадки беспилотных летательных аппаратов на активно маневрирующее судно, в том числе, в едином воздушном пространстве "умного города", при возникновении различных критических ситуаций: шквалистого ветра, потери связи или включения режима радиомолчания, мелких повреждений корпуса или несущих винтов и т. д.

1. Васьков А. С., Грищенко А. А. Прогнозирование и контроль движения судна // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 2, № 1 (43). С. 92.
2. Мельник В. Г. Методы обработки рядов траекторных измерений в системах прогнозирования и контроля движения судна / Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. (05.22.19). Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2012. 24 с.
3. Селезнева О. В. Сравнение методов прогнозирования траектории морских судов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2015. Т. 2. № 11. С. 541–546.
4. Sutulo S., Moreira L., Soares C. G. Mathematical models for ship path prediction in maneuvering simulation systems // Ocean Eng. 2002. Vol. 29. P. 1–19.
5. Гриняк В. М. Разработка математических моделей обеспечения безопасности коллективного движения морских судов / Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. (05.13.18). Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2016. 36 с.
6. Borkowski P. The ship movement trajectory prediction algorithm using navigational data fusion // Sensors. 2017. Vol. 17, N. 6. P. 1432.
7. Костюков В. А., Маевский А. М., Гуренко Б. В. Математическая модель надводного мини-корабля [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3297> (дата обращения: 26.02.2021).
8. Абдуллаева З. М. Разработка и реализация математических моделей движения судна на мелководье при переменной глубине / Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. Махачкала: ФГБОУВО "ДГТУ", 2017. 270 с.
9. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна. 3-е изд., перераб. и доп. Одесса: Фенікс, 2007. 328 с.
10. Sheng L., Jia S., Bing L., Gao-yun L. Identification of ship steering dynamics based on aca-svr // Proceeding of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2008. P. 514–519.
11. Yasukawa H., Yoshimura Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions // Journal of Marine Science and Technology. 2015. Vol. 20, N. 1. P. 37–52.
12. Perera L. P. Navigation vector based ship maneuvering prediction // Ocean Engineering. 2017. Vol. 138. P. 151–160.
13. Зыбин Е. Ю., Гласов В. В., Чекин А. Ю. Непараметрический метод прогнозирования движения судна посадки беспилотного летательного аппарата // Сборник тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции "Моделирование авиационных систем", 26–27 ноября 2020 г., г. Москва. 2020. С. 212–213.
14. Гласов В. В., Зыбин Е. Ю. Непараметрический метод автономной высокоточной посадки беспилотного летательного аппарата на активно маневрирующее малоразмерное судно // Сборник тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции "Моделирование авиационных систем", 26–27 ноября 2020 г., г. Москва. 2020. С. 213–214.

15. **Зыбин Е. Ю., Косьянчук В. В., Карпенко С. С.** О некоторых непараметрических методах теории управления динамическими объектами // Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции "Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского": сборник докладов. М: ООО "Экспериментальная мастерская Наука-Софт". 2018. С. 288—298.

16. **Косьянчук В. В., Зыбин Е. Ю., Гласов В. В., Чекин А. Ю., Карпенко С. С., Бондаренко Ю. В.** Методы решения некоторых задач теории линейных динамических систем в условиях полной параметрической неопределенности // Труды Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2019). 2019. С. 724—729.

17. **Lacki M.** Intelligent prediction of ship maneuvering // Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp. 2016. N. 10. P. 511—516.

18. **Каллан Р.** Основные концепции нейронных сетей / Пер. с англ. А. Г. Сивак. М.: Издат. дом "Вильямс", 2003. 288 с.

19. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс / Пер. с англ. Н. Н. Кузусль, А. Ю. Шелестова. М.: Издат. дом "Вильямс", 2006. 1104 с.

20. **Ebada A.** Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis (Artificial Neural Networks Application): Doktor-Ing. genehmigte Dissertation; Institute of Ship Technology und Transport Systems, Germany. 2007. 156 p.

21. **Xu T., Liu X., Yang X.** A Novel Approach for Ship Trajectory Online Prediction Using BP Neural Network Algorithm // Advances in Information Sciences and Service Sciences (AISS). 2012. Vol. 4, N. 11. P. 271—277.

22. **Сазонов А. Е., Дерябин В. В.** Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2013. № 3(22). С. 6—13.

23. **Дерябин В. В.** Применение нейронной сети в модели счисления пути судна // Эксплуатация морского транспорта. 2011. № 3 (65). С. 20—27.

24. **Дерябин В. В.** Построение модели счисления пути судна на основе нейронной сети // Эксплуатация морского транспорта. 2010. № 4 (62). С. 33—40.

25. **Дерябин В. В., Сазонов А. Е.** О возможности применения нейронной сети для построения модели счисления пути судна // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2010. № 33. С. 229—246.

26. **Дерябин В. В.** О возможности построения нейронной сети, прогнозирующей координаты судна // Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов: тез. докл. СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2012. Ч. 2.

27. **Дерябин В. В.** Модель счисления пути судна в условиях воздействия внешних факторов // Эксплуатация морского транспорта. 2011. № 1 (63). С. 33—39.

28. **Suo Y.** A ship trajectory prediction framework based on a recurrent neural network // Sensors. 2020. Vol. 20, N. 18. P. 5133.

29. **Xie G., Gao H., Qian L., Huang B., Li K., Wang J.** Vehicle Trajectory Prediction by Integrating Physics- and Maneuver-Based Approaches Using Interactive Multiple Models. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65, N. 7. P. 5999—6008.

30. **Зыбин Е. Ю., Мисриханов М. Ш., Рябченко В. Н.** О минимальной параметризации решений линейных матричных уравнений // Вестник ИГЭУ. 2004. № 6. С. 127—131.

31. **Bergeron N. P.** Model-Based Control of a High-Performance Marine Vessel. University of Louisiana at Lafayette. ProQuest Dissertations Publishing, 2014.

32. **Khan A., Bil C., Marion K. E.** Ship motion prediction for launch and recovery of air vehicles // Proceedings of the OCEANS Conference, Washington, DC, USA, 19—23 September 2005. P. 2795—2801.

Nonparametric Method for Predicting the Trajectory of an Actively Maneuvering Vessel for Unmanned Aerial Vehicle Landing

V. V. Kosyanchuk, vvk@gosniias.ru, **E. Yu. Zybin**, eyzybin@2100.gosniias.ru,

V. V. Glasov, vvglasov@2100.gosniias.ru,

State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, 125319, Russian Federation,

L. Tan, tanlihuo@hit.edu.cn,

Harbin Institute of Technology, Harbin City, 150001, Heilongjiang Province, China

Corresponding author: Glasov Vladislav V., Cand. of Tech. Sc., Associate Professor, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, 125319, Russian Federation, e-mail: vvglasov@2100.gosniias.ru

Accepted on September 01, 2021

Abstract

The article is devoted to the development of algorithms for predicting the trajectory of maneuvering objects based on nonparametric systems theory. The analysis of uncertainties affecting the modeling of the movement maneuvering water objects is presented. An overview of parametric, nonparametric and combined methods for predicting maneuvering water objects trajectory is given. The problem of high-precision autonomous control of the landing unmanned aerial vehicles on the landing vessel in the conditions of its irregular movement caused by meteorological conditions and active maneuvering is being solved. The method for predicting the trajectory of a vessel's movement based on solving direct problems of dynamics using nonparametric systems theory is proposed. The advantages of the proposed method are that it's not affected by model errors, due to the fact that it is based only on a retrospective analysis of several consecutive values of the spatial vessel coordinates. The proposed method differs from similar nonparametric methods in that it does not require statistical calculations, own training, or time-consuming tuning. The method does not imply the solution of identification model parameters, state and control actions problems and can be applied with any unknown linearizable input control actions, including when the model of the vessel's motion dynamics is not identifiable. The results of numerical modeling for solution the problem of predicting the trajectory of an actively maneuvering small-sized landing vessel using a full nonlinear dynamic model with six degrees of freedom are presented. The studies carried out confirm the efficiency, adequacy and very fast adjustment of

the developed method under conditions of complete parametric and nonparametric uncertainty. The proposed method can be used to predict the trajectory of any vehicle under the condition of linearizability of its model and control signals over the observed time interval.

Keywords: maneuvering vessel, trajectory prediction, nonparametric method, parametric uncertainty

Acknowledgements: This article was prepared with the financial support of Russian Foundation for Basic Research and the State Foundation for Basic Research of China 20-58-53059 (6191101340) and of Russian Foundation for Basic Research 19-29-06091.

For citation:

Kosyanchuk V. V., Zybin E. Yu., Glasov V. V., Tan L. Nonparametric Method for Predicting the Trajectory of an Actively Maneuvering Vessel for Unmanned Aerial Vehicle Landing, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 12, pp. 660—670.

DOI: 10.17587/mau.22.660-670

References

1. Vaskov A. S., Grishchenko A. A. Forecasting and monitoring of traffic of the vessel, *Morskie Intellectualnie Technologii*, 2019, vol. 2, no. 1 (43), pp. 92 (in Russian).
2. Melnik V. G. Methods for processing the series of trajectory measurements in forecasting and control systems for the movement of the vessel, Ph.D dissertation abstract (05.22.19), Novorossiysk, State Medical University im. adm. F. F. Ushakova, 2012, 24 p. (in Russian).
3. Selezneva O. V. Comparison of methods for predicting the trajectory of sea vessels, *Sovremennye Informatsionnye Technologii i IT-Obrazovanie*, 2015, vol. 2, no. 11, pp. 541—546 (in Russian).
4. Sutulo S., Moreira L., Soares C. G. Mathematical models for ship path prediction in maneuvering simulation systems, *Ocean Eng.*, 2002, vol. 29, pp. 1—19.
5. Grinyak V. M. Development of mathematical models for ensuring the safety of the collective movement of sea vessels, Doctor of Technical Sciences dissertation abstract (05.13.18), Vladivostok, IAPU FEB RAS, 2016, 36 p. (in Russian).
6. Borkowski P. The ship movement trajectory prediction algorithm using navigational data fusion, *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 6, p. 1432.
7. Kostyukov V. A., Maevsky A. M., Gurenko B. V. Mathematical model of a surface mini-ship, *Engineering journal of Don*, 2015, no. 3, available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3297> (date of access: 26.02.2021) (in Russian).
8. Abdullaeva Z. M. Development and implementation of mathematical models of ship movement in shallow water at variable depth, Ph.D dissertation, Makhachkala, FGBOUVO "DSTU", 2017, 270 p. (in Russian).
9. Vagushchenko L. L., Tsymbal N. N. Automatic ship traffic control systems. 3d ed., Rev. and add, Odessa, Fenix, 2007, 328 p. (in Russian).
10. Sheng L., Jia S., Bing L., Gao-yun L. Identification of ship steering dynamics based on aca-svr, *Proceeding of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2008, pp. 514—519.
11. Yasukawa H., Yoshimura Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions, *Journal of Marine Science and Technology*, 2015, vol. 20, no. 1, pp. 37—52.
12. Perera L. P. Navigation vector based ship maneuvering prediction, *Ocean Engineering*, 2017, vol. 138, p. 151—160.
13. Zybin E. Yu., Glasov V. V., Chekin A. Yu. Nonparametric method for predicting the movement of the landing vessel of an unmanned aerial vehicle, *Sbornic tezisev docladov IV VNTC "Modelirovanie aviacionnich sistem"*, November 26-27, 2020, Moscow, pp. 212—213 (in Russian).
14. Glasov V. V., Zybin E. Yu. Nonparametric method of autonomous high-precision landing of an unmanned aerial vehicle on an actively maneuvering small-sized vessel, *Sbornic tezisev docladov IV VNTC "Modelirovanie aviacionnich sistem"*, November 26—27, 2020, Moscow, pp. 213—214 (in Russian).
15. Zybin E. Yu., Kosyanchuk V. V., Karpenko S. S. On some nonparametric methods of the theory of control of dynamic objects, *Materialy XV VNTC "Naychnie chteniya po aviacii, gjedyashennye pamyati N. E. Zhukovskogo": sbornic docladov*, Moscow, "Eksperimental'naya masterskaya NaukaSoft" Ltd., 2018, pp. 288—298 (in Russian).
16. Kosyanchuk V. V., Zybin E. Yu., Glasov V. V., Chekin A. Yu., Karpenko S. S., Bondarenko Yu. V. Methods for solving some problems of the theory of linear dynamical systems under conditions of complete parametric uncertainty, *Trydi Vserossiiskogo soveshaniya po problemam upravleniya (VSPU-2019)*, 2019, pp. 724—729 (in Russian).
17. Lacki M. Intelligent prediction of ship maneuvering, *Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.*, 2016, no. 10, pp. 511—516.
18. Callan R. Basic concepts of neural networks, Moscow, Izdatelskii dom "Williams", 2003, 288 p. (in Russian).
19. Haykin S. Neural networks: full course, Moscow, Izdatelskii dom "Williams", 2006, 1104 p. (in Russian).
20. Ebada A. Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis (Artificial Neural Networks Application): Doktor-Ing. Genehmigte Dissertation; Institute of Ship Technology and Transport Systems, Germany, 2007, 156 p.
21. Xu T., Liu X., Yang X. A Novel Approach for Ship Trajectory Online Prediction Using BP Neural Network Algorithm, *Advances in Information Sciences and Service Sciences (AISS)*, 2012, vol. 4, no. 11, pp. 271—277.
22. Sazonov A. E., Deryabin V. V. Predicting the trajectory of a vessel's movement using a neural network, *Vestnic gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2013, no. 3 (22), pp. 6—13 (in Russian).
23. Deryabin V. V. Application of a neural network in the dead reckoning model of a ship, *Ekspluatatsiya morskogo transporta*, 2011, no. 3 (65), pp. 20—27 (in Russian).
24. Deryabin V. V. Building a dead reckoning model of a ship's path based on a neural network, *Ekspluatatsiya morskogo transporta*, 2010, no. 4 (62), pp. 33—40 (in Russian).
25. Deryabin V. V., Sazonov A. E. On the possibility of using a neural network for constructing a dead reckoning model of a ship's path, *Nauchno-tekhnicheskii sbornic Rossiiskogo morskogo registra sydhodstva*, 2010, no. 33, pp. 229—246 (in Russian).
26. Deryabin V. V. On the possibility of constructing a neural network that predicts the coordinates of the vessel, *Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i kursantov: tez. dokl.*, SPb., Izdatel'stvo GMA im. adm. S. O. Makarova, 2012, part 2 (in Russian).
27. Deryabin V. V. Reckoning model of the ship's path under the influence of external factors, *Ekspluatatsiya morskogo transporta*, 2011, no. 1 (63), pp. 33—39 (in Russian).
28. Suo Y. A ship trajectory prediction framework based on a recurrent neural network, *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 18, p. 5133.
29. Xie G., Gao H., Qian L., Huang B., Li K., Wang J. Vehicle Trajectory Prediction by Integrating Physics- and Maneuver-Based Approaches Using Interactive Multiple Models, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, no. 7, pp. 5999—6008.
30. Zybin E. Yu., Misrikhanov M. Sh., Ryabchenko V. N. On the minimal parametrization of solutions of linear matrix equations, *Vestnik IGEU*, 2004, no. 6, pp. 127—131 (in Russian).
31. Bergeron N. P. Model-Based Control of a High-Performance Marine Vessel, University of Louisiana at Lafayette, ProQuest Dissertations Publishing, 2014.
32. Khan A., Bil C., Marion K. E. Ship motion prediction for launch and recovery of air vehicles, *Proceedings of the OCEANS Conference, Washington, DC, USA*, 19—23 September 2005, pp. 2795—2801.

УКАЗАТЕЛЬ статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2021 г.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Berdnikov V. P., Lokhin V. M. Control of Parametrically Perturbed Objects with a Full Information. № 1
- Bykovtsev Y. A., Lokhin V. M. Estimation of the Accuracy of a Control System with a Fuzzy PID Controller Based on the Approximation of the Static Characteristic of the Controller. № 12
- Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Сулейманова М. Т. Алгоритмы определения вероятности рисков аварий в тоннелях по характеристикам помехи зашумленных сигналов. № 7
- Бобцов А. А., Ортега Р., Николаев Н. А., Слита О. В., Козачёк О. А., Ван Ч. Оценка переменных состояний математической модели конвертора Чука с частично неизвестными параметрами. № 9
- Бушуев А. Б., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В., Мансурова О. К. Синтез оптимальных информационно-энергетических схем измерительно-преобразовательных устройств. № 10
- Быковцев Ю. А. Анализ и синтез нечеткого регулятора методом фазовой плоскости. № 10
- Воротников В. И., Мартышенко Ю. Г. Об устойчивости по части переменных нелинейных дискретных систем со случайными параметрами. № 1
- Гайдук А. Р. Численный метод синтеза квазилинейных моделей нелинейных объектов. № 6
- Данг Х. Б., Пыркин А. А., Бобцов А. А., Ведяков А. А., Низовцев С. И. Синтез адаптивных наблюдателей по выходу для линейных нестационарных систем с полиномиальными параметрами. № 8
- Жирабок А. Н., Ким Ч. И. Виртуальные датчики в задаче функционального диагностирования. № 6
- Зуев А. В., Жирабок А. Н., Филаретов В. Ф., Проценко А. А. Идентификация дефектов в нестационарных системах на основе скользящих наблюдателей. № 12
- Кабанов А. А., Дубовик С. А. Численные методы контроля редких событий в нелинейных стохастических системах. № 6
- Каляев И. А., Мельник Э. В. Доверенные системы управления. № 5
- Алиев Т. А., Бабаев Т. А., Ализаде Т. А., Рзаева Н. Э., Алибейли Э. Э. Система Noise-контроля технического состояния железнодорожных мостов и туннелей в сейсмоактивных регионах. № 5
- Карабутов Н. Н. О роли S-синхронизируемости и постоянства возбуждения в задаче структурной идентифицируемости нелинейных систем. № 2
- Лаговский Б. А., Рубинович Е. Я. Алгоритмы цифровой обработки данных измерений, обеспечивающие угловое сверхразрешение. № 7
- Ловчаков В. И., Шибякин О. А. Модифицированные фильтры Баттерворса в решении обратной задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов. № 2
- Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Инструментальные средства управления целесообразным поведением самоорганизующихся автономных интеллектуальных агентов. № 4
- Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Элементы понятийного мышления в планировании поведения автономных интеллектуальных агентов. № 8
- Сухинин Б. В., Сурков В. В., Филимонов Н. Б. Феномен Фуллера в задачах аналитического конструирования оптимальных регуляторов. № 7
- Тырва В. О., Саушев А. В. Аналитический подход к конструированию совместного управления движением эргатической системы "судоводитель—судно". № 9
- Хорошавин В. С., Грудинин В. С. Синтез программного движения на основе особого оптимального управления. № 8

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Астапенко Н. В., Кошеков К. Т. Автоматизация контроля технологического процесса хранения в зернохранилище с горизонтальными силосами. № 9
- Крестовников К. Д., Ерашов А. А., Быков А. Н. Масштабируемая архитектура и структура модулей распределенной системы управления процессами промышленных тепличных комплексов. № 10
- Кычкин А. В., Николаев А. В. Архитектура киберфизической системы управления проветриванием подземного горнодобывающего предприятия на базе платформы Интернета вещей. № 3
- Лютов А. Г., Новоженин М. Б. Методология автоматизированного контроля и управления режимами работы насосного комплекса в условиях возникновения кавитации. № 9
- Оморов Т. Т., Такырбашев Б. К., Койбагаров Т. Дж. Управление потерями электроэнергии в распределительных сетях в составе автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии. № 4
- Рябчиков М. Ю., Рябчикова Е. С., Филиппов С. А. Система управления температурой пара после пароперегревательной установки с применением нечеткой логики для упреждающей компенсации возмущений. № 4
- Фомин И. Н., Шульга Т. Э., Иващенко В. А. Синтез алгоритма управления генерирующим оборудованием тепловых электростанций на основе моделей системной динамики. № 1

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Buzlov N. A. Scan Matching for Navigation of a Mobile Robot in Semi-Structured Terrain Conditions. № 5
- Finaev V. I., Medvedev M. Yu., Pshikhov V. Kh., Pereverzev V. A., Soloviev V. V. Unmanned Powerboat Motion Terminal Control in an Environment with Moving Obstacles. № 3
- Gavruishin S. S., Bui V. P., Phung V. B., Dang H. M., Nguyen V. D. Improving the Visual Interactive Analysis Method for Automation and Control of the Decision-Making Process in Multi-Criteria Design of Complex Mechanical Systems. № 2
- Kolpashchikov D. Yu., Gerget O. M. Comparison of Inverse Kinematics Algorithms for Multi-Section Continuum Robots. № 8
- Kurochkin S. Yu., Tachkov A. A. Methods of Formation Control for a Group of Mobile Robots (a Review). № 6
- Nazarova A. V., Jianwen Huo. Application of Distributed Robotic Systems in Earthquakes: Search, Planning and Control. № 11
- Sorokoumov P. S. Formalization of Tasks for Robotic Manipulators: Review and Prospects. № 4
- Бельченко Ф. М., Ермолов И. Л. Новый подход к преобразованию перспективы изображений в системах телеметрии роботов. № 12
- Брискин Е. С., Калинин Я. В., Артемьев К. С. Об устойчивости движения мобильных роботов с шагающими движителями, работающими в "тянущем" режиме. № 1
- Волкова М. А., Романов А. М., Романов М. П. Распределенная система локализации объектов в рабочей зоне модульного реконфигурируемого мобильного робота. № 12
- Голуб А. П., Зубков А. Ф., Мастерова А. А., Селюцкий Ю. Д. Динамика колесной тележки, приводимой в движение ротором Савониуса. № 5
- Грязин Д. Г., Падерина Т. В. Мехатронные устройства управления современным судовым магнитным компасом. № 8
- Калинин Я. В., Марчук Е. А. Особенности учета конструктивной нелинейности в модели динамики тросового робота. № 10
- Карпова И. П. Организация маршрута анимата на основе визуальных ориентиров и распознавания сцен. № 10
- Карташев В. А., Карташев В. В., Кириленко А. А. Имитационное моделирование динамики сборочного механизма. № 1

- Лурье М. С., Лурье О. М., Фролов А. С. Исследование динамических режимов систем стабилизации тока мощных электромагнитов с широтно-импульсной модуляцией. № 6
- Московский А. Д., Бургов Е. В., Овсянникова Е. Е. Об одном подходе к распознаванию сцен группой роботов на основе локального взаимодействия. № 2
- Носков В. П., Губернаторов Д. В. Экстремальная навигация по 3D-изображениям в мобильной робототехнике. № 11
- Попов И. П. Источники гармонических силы и скорости в мехатронных автоматических системах. № 4
- Рубцов В. И., Машков К. Ю., Коновалов К. В. Многоуровневая система управления интеллектуальным роботом, входящим в состав группы. № 11
- Самойлова А. С., Воротников С. А. Система управления шагающим роботом, адаптивным к изменению кинематической схемы. № 11
- Серебрянный В. В., Бошляков А. А., Калинин С. В., Огородник А. И., Коновалов К. В. Шагающий робот для перемещения по вертикальным и произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. № 11
- Серебрянный В. В., Бошляков А. А., Ющенко А. С. К юбилею кафедры "Робототехнические системы и мехатроника" МГТУ им. Н. Э. Баумана. № 11
- Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Жирабок А. Н., Проценко А. А. Разработка системы аккомодации к дефектам в движителях подводных роботов. № 5
- Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А. Двухконтурная система с эталонной моделью для управления пространственным движением грузового необитаемого подводного аппарата. № 3
- Ющенко А. С., Шуай Инь. Диалоговое управление коллаборативными роботами с помощью искусственных нейронных сетей. № 11
- Яковлев Д. С., Тачков А. А. Вероятность столкновения автономного мобильного робота с препятствием. № 3
- Яковлев Р. Н., Рубцова Ю. И., Ерашов А. А. Сравнительная оценка подходов к определению точек захвата объектов робототехническим средством. № 2

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

- Do Quang Thong. Synthesis of a High-Precision Missile Homing System with an Permissible Stability Margin of the Normal Acceleration Stabilization System. № 7
- Алешкин В. В., Здражевский Р. А., Голованов П. Н., Марусич В. О. Методы и алгоритмы коррекции кинематических уравнений в задаче определения ориентации объекта. № 9
- Гвоздев О. Г., Козуб В. А., Кошелева Н. В., Мурынин А. Б., Рихтер А. А. Нейросетевой метод построения трехмерных моделей ригидных объектов по спутниковым изображениям. № 1

- Деятисильный А. С., Шурыгин А. В. Математическая модель спутниково-инерциальной подвижной вычислительной гравиметрии. № 1
- Зубов Н. Е., Рябченко В. Н. Инвариантность управления боковым движением вертолета по углу крена. Аналитический синтез. № 6
- Кабанов С. А., Кабанов Д. С. Управление разведением спиц крупногабаритного трансформируемого рефлектора с использованием алгоритма последовательной оптимизации. № 8
- Корсун О. Н., Ом М. Х., Латт Ч. З. Определение проекций скорости ветра на основе измерений воздушной скорости, углов атаки и скольжения. № 10
- Косьянчук В. В., Зыбин Е. Ю., Гласов В. В., Тань Л. Непараметрический метод прогнозирования траектории движения активно маневрирующего судна посадки беспилотного летательного аппарата. № 12
- Лебедев Г. Н., Гончаренко В. И., Максимов Н. А., Михайлин Д. А., Румакина А. В. Метод оперативного планирования групповых действий летательных аппаратов в режиме "воздушного такси". № 9
- Левский М. В. Динамическая задача оптимального управления ориентацией космического аппарата с ограничением на фазовые переменные. № 6
- Любимов В. В., Бакри И. Управляемое изменение габаритных размеров спускаемого в атмосфере Марса космического аппарата осесимметричной формы. № 7
- Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Нечеткая модель ситуационного управления параметрами полета автономного беспилотного летательного аппарата в условиях неопределенности. № 12
- Пушков С. Г., Ловицкий Л. Л., Горшкова О. Ю., Малахова И. В. Математическое моделирование аэродинамических погрешностей в технологии оценивания средств определения воздушных параметров с применением спутниковых навигационных систем при проведении летных испытаний самолета. № 5
- Распопов В. Я., Лихошерст В. В. Датчик угловых скоростей на базе волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором для систем ориентации, стабилизации и навигации. № 7
- Сергеев А. А., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Управление автономной посадкой БПЛА самолетного типа на статическую и динамическую посадочные площадки по "гибким" кинематическим траекториям. № 3
- Солдаткин В. М., Солдаткин В. В., Ефремова Е. С., Мифтахов Б. И. Модели формирования и обработки сигналов панорамного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости. № 8
- Челноков Ю. Н., Молоденков А. В. Кватернионный алгоритм начальной выставки БИНС с использованием метода регуляризации А. Н. Тихонова. № 4

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская тишина, 23с2

Телефон редакции журнала: +7(916) 392 21 67

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор М. Ю. Безменова.

Сдано в набор 28.09.2021. Подписано в печать 10.11.2021. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1221. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru