



**JOHN ATANASOFF SOCIETY
OF AUTOMATICS AND INFORMATICS**

JOHN ATANASOFF CELEBRATION DAYS

International Conference
**AUTOMATICS AND
INFORMATICS'2014**

PROCEEDINGS

Edited by
Michail Petrov

Published by
**JOHN ATANASOFF SOCIETY
OF AUTOMATICS AND INFORMATICS**

Bulgaria, Sofia, October 1-3, 2014

CONTENTS

A. PLENARY SESSIONS	A-1
A.1. Sorin Olaru	A-3
<i>Control of Multi-Agent Dynamical Systems</i>	
A.2. Emil Nikolov	A-15
<i>Generalized Fractional Calculation in Control Theory</i>	
I. SCIENTIFIC SESSIONS	I-1
I.1. Session DATA BASE SYSTEMS AND DATA ANALYSIS	I-1
Y. Pavlov, V. Terzieva, P. Kademova-Katsarova	I-3
<i>Utility and Optimal Allocation of Financial Resources in a Store: Game Theory Approach</i>	
K. Stoilova, T. Stoilov	I-7
<i>Traffic Management with Some Autonomic Properties</i>	
D. Budakova, L. Dakovski	I-11
<i>Generalized Net Model for Determining the Behaviour of the Basic Poker Player Types</i>	
I.2. Session DECISION SUPPORT SYSTEMS	I-15
Y. Mitev, L. Kirilov	I-17
<i>Decision Making Solutions for Implementing the Information Technology Infrastructure Library (ITIL)</i>	
Y. P. Pavlov	I-21
<i>Value Driven Design and Decision Control in Complex Systems</i>	
V. Boeva, E. Hodzova	I-25
<i>A Minimum Cut Tree Clustering Algorithm for Analysis of DNA Microarray Data</i>	
V. Sigurev, S. Drangajov	I-29
<i>Minimal Cost Circulation of Mobile Agents on a Risky Network by Network Flow Method</i>	

I.3. Session INTELLIGENT DIAGNOSTICS AND RELIABILITY I-33

M. Mladenov I-35

Complex Assessment of Food Products using Image and Hyperspectral Analyses

M. Mladenov, E. Dimitrov, M. Dejanov, S. Penchev I-39

A System for Hyperspectral Imaging Based on „Point Scan” Spectrophotometer

L. Lahtchev I-43

*Entropy-Based Algorithm for Detecting Outlying Observations in Modis (NASA)
Lai Time Series*

D. Borisova, E. Bantutov, I. Mustakerov I-47

*Approach for Determination the Theoretical Parameters of Night Vision Devices
Considering the Temperature Influence*

R. Botcova I-51

*Water Levels Measurement of Water Pools Using Electro-Mecanical Float Level
Gauge*

T. Titova, V. Nachev, Ch. Damyanov I-55

Hybrids Algorithms for Non-Destructive Food Quality Determination

T. Todorov, T. Nenov, S. Ivanov I-59

A Gas Sensor Based System for Quality Control of Food Products

G. Mihalev, S. Yordanov I-63

Use of Image Filtering Algorithms in Machine Vision System

Y. Rayanov, T. Nenov I-69

Impedance Detection Method of Added Water in the Milk

I.4. Session ADVANCED INDUSTRIAL CONTROL APPLICATIONS I-73

E. Garipov, T. Peltekov, V. Ruykova I-75

Choice of Proper Tunable Coefficients in Generalized Predictive Controller Design

V. Ruykova, E. Garipov I-79

*Optimal Tuning Coefficients in Generalized Predictive Controllers Design by
Multiple-Criteria Procedures*

L. Tomov, E. Garipov I-83

Discretisation in Control Systems with Generalized Digital PID Controller

St. Enev I-87

Model Predictive Control of Processes with Significant Time Delay – Experimental Results

R. Rusinov I-91

Application of Adaptive Digital Filter for Rotor Position Determination of Switched Reluctance Robots in Automated Manufacturing

I.5. Session INFORMATION TECHNOLOGIES AND E-LEARNING I-95

K. Shvertner I-97

Managed Services as Part of the IT Outsourcing Industry

E. Paunova, V. Terzieva, P. Kademova-Kacarova I-103

Creating Options for the Use of Educational Games in Bulgarian Schools

V. Terzieva, E. Paunova, P. Kademova-Katsarova I-107

The Role of ICT Tools In Bulgarian Schools from the Teachers' Perspective

D. Dimova I-111

Statistical Assessment of Data on Total Expenditure of Household

E. Dimitrova I-115

Synthesis of a System for Monitoring and Control on Train Traffic - Part I: Selecting Devices for Connection with Object

E. Dimitrova I-119

Synthesis of a System for Monitoring and Control on Train Traffic – Part II: Selecting Control Devices

S. Hristova I-123

Knowledge Management Systems in the Organization

S. Stoyanov, N. Christova, V. Stanchev I-127

Strategies and Methods for Optimal Decision Making in the Public Administration Management

I.6. Session INTELLIGENT SYSTEMS AND ADVANCED CONTROL I-135

G. Sandou I-137

Zero-Parameter Mono and Multi Objective Methods for the Tuning of Controllers Based on Particle Swarm Optimization

M. T. Nguyen, C. Stoica Maniu, S. Olaru, A. Grancharova	I-141
<i>About Formation Reconfiguration for Multi-Agent Dynamical Systems</i>	
I. Madjarov, A. Grancharova	I-145
<i>A Concept for Service-Based Workflow for Scientific Data Processing and Prediction of Environmental Parameters</i>	
A. Grancharova, S. Olaru, G. Sandou, C. Stoica, P. Rodriguez	I-149
<i>Distributed Model Predictive Control of a Hydro-Power Valley by Dual Decomposition</i>	
S. Ahmed, M. Petrov, A. Taneva	I-153
<i>Type-2 Fuzzy-Neural PID Controller for Nonlinear Plants</i>	
I.7. Session INTERNET AND NETWORK TECHNOLOGIES	I-157
K. Kolchakov, V. Monov	I-159
<i>Management Approach by Weight Coefficients of the Traffic in Crossbar Commutator</i>	
V. Aleksieva	I-163
<i>Method for Improvement of the QoS for Wimax Service Classes</i>	
H. Valchanov	I-167
<i>Transfer of Multimedia WEB Traffic across WAN Networks</i>	
I. Atanasov, N. Nikolov	I-171
<i>Client Servicing Through Multiway Tree in a UDP Based Client-Server Communication Library</i>	
M. Angelov	I-175
<i>Routers for MPP Computers, using Direct Communication Networks</i>	
Z. Minchev, V. Dimitrov, M. Tulechka, L. Boyanov	I-179
<i>Multimedia as an Emerging Cyberthreat in Modern Social Networks</i>	
A. Aleksandrov	I-183
<i>Methods for Optimization of ZigBee Based Autonomous Sensor Systems</i>	
Z. Ivanov, S. Vasileva	I-187
<i>Information System for Inventory of Computers and Computing Devices</i>	
V. Metodiev, G. Megdanov, G. Elenkov	I-191
<i>Reconfigurable Laboratory Stand Based on MikroTik™ Network Operating System</i>	

D. Pilev	I-195
<i>Comparative Analysis of Platforms for WEB-based Applications</i>	
I.8. Session CONTROL THEORY AND SYSTEMS	I-199
N. Nikolova, E. Nikolov	I-201
<i>Fractional Dual-Stage Repetitive Control Systems</i>	
S. Darmonski	I-205
<i>Adaptive Control Design for a Class of Nonlinear Systems with Asymptotic Stability of the Estimation Error</i>	
V. Petrov	I-209
<i>Nonlinear Adaptive Observer Design with Exponential State and Parameter Estimation</i>	
K. Perev	I-213
<i>Approximation of Linear Systems with Walsh Functions</i>	
O. Ognjanova, T. Puleva	I-217
<i>Comparative Analysis of Control Algorithms for Wind Turbine</i>	
J. Kralev, K. Filipova	I-221
<i>Control of Indirectly Driven Inverted Pendulum</i>	
J. Kralev, T. Slavov, P. Petkov	I-225
<i>Design and Implementation of Linear Quadratic Controller for Two Wheeled Robot Control</i>	
I.9. Session PROCESS CONTROL SYSTEMS	I-229
N. Deliiski, V. Brezin, N. Tumbarkova	I-231
<i>2D Modelling of the Logs' Freezing Process at Exponentially Changing Boundary Conditions</i>	
N. Deliiski, V. Brezin, I. Radkova, N. Tumbarkova	I-235
<i>Modelling of the Energy Consumption Needed for the Melting of the Frozen Free Water in Wood Chips</i>	
M. Hadjiski, K. Boshnakov, S. Kojnov	I-239
<i>Decision Making for Predictive Maintenance with Case-Based Reasoning</i>	

M. Hadjiski, K. Boshnakov, S. Kojnov	I-243
<i>Optimization of Operational Impacts at Predictive Maintenance on Copper Converters</i>	
M. Hadjiski, N. Christova, K. Boshnakov, S. Kojnov	I-247
<i>Strategy Choice for Integrated Management of Pellet Manufacturing</i>	
I. Ganchev	I-253
<i>An Algorithm for Automatic Tuning of PI Controllers</i>	
G. Terzijski, I. Dragotinov	I-257
<i>Automation of Investigations in Modelling and Simulation of Technological Processes</i>	
P. Vasilev, E. Yanev, I. Gospodinov	I-261
<i>ANSI/ISA-95 Personnel Qualification Adaptive Testing</i>	
I.10. Session INDUSTRIAL INFORMATICS	I-265
D. Markov	I-267
<i>Analysis and Future Evolution of Systems for Remote Management and Control of Machines and Facilities</i>	
I. Antonova, I. Batchkova	I-273
<i>Model Driven Development of Manufacturing Execution Systems</i>	
D. Gotcheva, I. Batchkova	I-277
<i>Transformation of UML Class Diagram to OWL Ontology</i>	
H. Karamishev	I-281
<i>Development of IEC-61499 Based Resource for Control of Sorting Station</i>	
T. Stoyanova	I-285
<i>Development of Software Process Metamodels using SPEM 2.0</i>	

СИНТЕЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ НА ЛИНЕЙНО КВАДРАТИЧЕН РЕГУЛATOR ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ДВУКОЛЕСЕН РОБОТ

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF LINEAR QUADRATIC CONTROLLER FOR TWO WHEELED ROBOT CONTROL

J. Kralev, T. Slavov, P. Petkov

Technical University of Sofia, Department of Systems and Control, Sofia 1000, "Kliment Ohridski" bul. No 8, bl.2, e-mail: jkralev@tu-sofia.bg, ts_slavov@tu-sofia.bg, php@tu-sofia.bg

Abstract: In this paper the developed two-wheeled robot and LQR controller, Kalman filters and PI controller are presented. The LQR controller stabilizes two wheeled robot in upright position and ensures good tracking of wheel position reference. The PI controller controls two wheeled robot rotation around the vertical axis. A software in MATLAB®/Simulink environment for generation of code which is embedded in a Texas Instruments Digital Signal Controller is developed. Simulation and experimental results of system performance are given that confirm the efficiency of the control system developed.

Key words: real time control, LQR controller, embedded control system, digital signal controller

УВОД

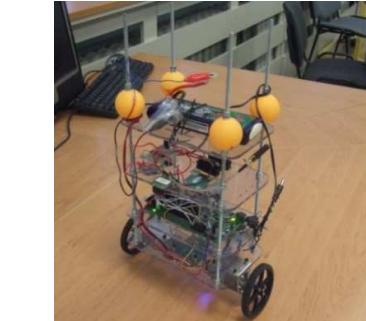
Поради трудностите възникващи при управление на крачещите мобилни роботи, в последните години се наблюдава засилен интерес към колесните мобилни роботи [1]. Те започват да се използват във все повече области на човешката дейност като антитерористична дейност, спасителни операции, ежедневна домашна дейност и др. Нещо повече, колесните роботи са енергийно по-ефективни от крачещите и механичната им конструкция е сравнително проста, което обуславя и не високата им цена. От гледна точка на управлението те могат да бъдат устойчиви обекти, ако имат най-малко три колела или неустойчиви обекти ако са с по-малко от три колела. Въпреки неустойчивостта си двуколесните роботи имат редица предимства в сравнение с устойчивите колесни роботи като компактни размери, висока маневреност, поради факта че могат да се въртят около вертикалната си ос, способност за преминаване през тесни пространства, възможност за бързо ускоряване и др. Всичко това обуславя засиления интерес към тях и възникването на търговски продукти, представляващи двуколесни роботи. Най-популярният тъкъв продукт е средството за персонално придвижване Сегуей (Segway®), произвеждано от Segway Inc., САЩ [2], което напоследък придобива популярност и у нас. Някои от неговите модели имат максимална скорост 20 km/h и могат да пропътуват до 38 km с единствено зареждане на батерията. Приложение в обучението намира и двуколесният робот, построен въз основата на развойния кит LEGO® Mindstorms NXT [3]. Поради неустойчивостта си двуколесните роботи трябва да бъдат стабилизираны принудително около вертикалното положение с помощта на система за управление. За целта обикновено се използват линейно-квадратични или ПИД-закони за управление, с които се постига вертикална стабилизация на робота и преместване в желана точка на хоризонталната равнина [4].

В настоящата работа са представени теоретични и експериментални резултати, свързани с разработването на вградена система за управление на двуколесен робот, в

която за вертикалната стабилизация се използва линейно-квадратичен регулатор с ПИ филтър на Калман, от 18 ред а за управление на движението около вертикалната ос се използва ПИ регулатор с ПИ филтър на Калман от 2 ред. Поради отсъствието на аналитичен модел при синтеза на системата за управление се използва модел, построен от авторите с подходящи процедури за идентификация [5]. В средата на MATLAB/SIMULINK е разработен специализиран софтуер за генериране на код, който е вграден в цифров сигнален процесор TMS320F28335. Представени са резултати от реален експеримент с вградената система за управление и SIMULINK симулация на разработения алгоритъм за управление.

ОБЕКТ НА УПРАВЛЕНИЕ

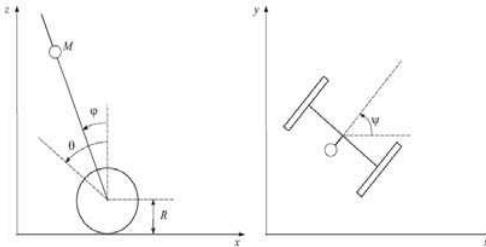
Снимка и кинематична схема на разработения от авторите двуколесен мобилен робот са показани на фиг.1 и фиг.2.



Фиг. 1. Двуколесен мобилен робот

Механичната конструкция се състои от свързани чрез шпилки четири плексигласови платформи. На най-долната платформа са монтирани два постояннотокови серво двигатели с куплирани за ротора редуктор, колело и електромагнитен енкодер. На втората платформа от долу на горе е монтирана развойна платка *Spectrum Digital eZdsp™ F28335* с вграден цифров сигнален контролер

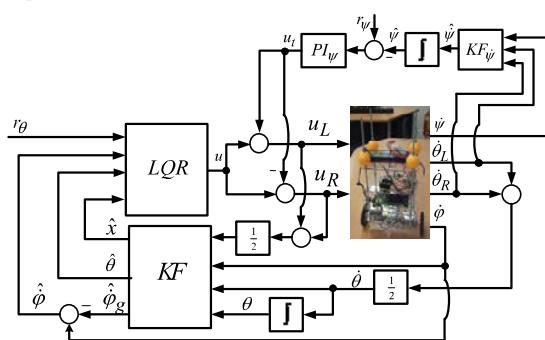
Texas Instruments TMS320F28335, в който се вгражда алгоритъм за управление на движението на робота в равнината. На третата платформа е поставен инерциален сензор *ADIS16350*, с който се измерва ъгловата скорост на наклона на робота $\dot{\phi}$ и ъгловата скорост на въртене на робота около вертикалната ос $\dot{\psi}$. На най-горната платформа е монтирана 5 клетъчна литиево полимерна батерия. Управляващите сигнали u_1 и u_2 са заданията към двата сервомотора, а в реално време се измерват ъгловите скорости на двете колела $\dot{\theta}_l$ и $\dot{\theta}_r$ и скоростите $\dot{\phi}$ и $\dot{\psi}$.



Фиг. 2. Кинематична схема на двуколесен мобилен робот

ЛИНЕЙНО КВАДРАТИЧНО УПРАВЛЕНИЕ НА ДВУКОЛЕСЕН РОБОТ ПРИ НЕПЪЛНА ИНФОРМАЦИЯ

Структурната схема на системата за управление на двуколесния робот е показана на фиг.3. По отношение на стабилизацията в горно равновесно състояние и на движението напред-назад роботът се описва с получените чрез средствата на идентификацията ARMAX и BJ модели. ARMAX моделът със структурни параметри $na = 7, nb = 7, nc = 7, nk = 3$ дава връзката между управляващия сигнал u и скоростта $\dot{\phi}$, докато BJ моделът със структурни параметри $nb = 3, nf = 7, nc = 3, nd = 3, nk = 1$ дава връзката между скоростите $\dot{\phi} = (\dot{\theta}_l + \dot{\theta}_r)/2$, където $\dot{\theta}_l$ и $\dot{\theta}_r$ са скоростите на лявото и дясното колело.



Фиг. 3. Структурна схема на системата за управление

ARMAX и BJ моделите се трансформират в описание в пространство на състоянието

$$\begin{aligned} x_{\dot{\phi}}(k+1) &= A_{\dot{\phi}}x_{\dot{\phi}}(k) + B_{\dot{\phi}}u(k) + J_{\dot{\phi}}v_{\dot{\phi}}(k), \\ \dot{\phi}(k) &= C_{\dot{\phi}}x_{\dot{\phi}}(k) + H_{\dot{\phi}}v_{\dot{\phi}}(k) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_{\dot{\theta}}(k+1) &= A_{\dot{\theta}}x_{\dot{\theta}}(k) + B_{\dot{\theta}}\dot{\phi}(k) + J_{\dot{\theta}}v_{\dot{\theta}}(k), \\ \dot{\theta}(k) &= C_{\dot{\theta}}x_{\dot{\theta}}(k) + H_{\dot{\theta}}v_{\dot{\theta}}(k) \end{aligned} \quad (2)$$

където $x_{\dot{\phi}}(k) = [x_{\dot{\phi}1}(k) \ x_{\dot{\phi}2}(k) \ \dots \ x_{\dot{\phi}9}(k)]^T$ и

$x_{\dot{\theta}}(k) = [x_{\dot{\theta}1}(k) \ \dots \ x_{\dot{\theta}6}(k)]^T$ са вектори на състоянието, $A_{\dot{\phi}}, B_{\dot{\phi}}, C_{\dot{\phi}}, H_{\dot{\phi}}, A_{\dot{\theta}}, B_{\dot{\theta}}, C_{\dot{\theta}}, H_{\dot{\theta}}$ са матрици със съответните

размерности, съдържащи параметрите на моделите, $v_{\dot{\phi}}(k)$ и $v_{\dot{\theta}}(k)$ са остатъчните грешки от идентификацията и отразяват неопределеността в модела. Тези грешки се използват за получаване на модели на робота с входна мултиплектична неопределеност, които ще бъдат използвани за анализа на системата за управление. Към моделите (1) и (2) се включва уравнение за неизмеримия ъгъл на завъртане на колелата

$$\theta(k+1) = \theta(k) + T_0\dot{\theta}(k) = T_0C_{\dot{\theta}}x_{\dot{\theta}}(k) + T_0H_{\dot{\theta}}v_{\dot{\theta}}(k) \quad (3)$$

и две допълнителни състояния, представляващи интеграл от ъгловата скорост $\dot{\phi}$ и интеграл от грешката по задание за ъгъла на завъртане на колелата

$$x_{\dot{\phi}_i}(k+1) = x_{\dot{\phi}_i}(k) - T_0C_{\dot{\phi}}x_{\dot{\phi}}(k), \quad (4)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + T_0(r_{\theta}(k) - \theta(k)),$$

където $T_0 = 0.005s$ е такт на дискретизация и $r_{\theta}(k)$ е заданието за ъгъла на завъртане на колелата. За описание на разширения обект на управление се получава модел от 18 ред

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Jv(k), \\ y(k) = Cx(k) + Hv(k) \end{cases}, \quad (5)$$

където

$$x(k) = [x_{\dot{\phi}}^T \ x_{\dot{\theta}}^T \ \theta \ x_{\dot{\phi}_i}^T \ x_i^T]^T, \quad y(k) = [\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \theta \ \varphi]^T,$$

$$v = [v_{\dot{\phi}} \ v_{\dot{\theta}}]^T$$

и матриците A, B, J, C, H се формират след обединяване на уравнения (1)-(4). За синтеза на регулятора се използва квадратичен критерий

$$J = \sum_{k=1}^{\infty} [x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)], \quad (6)$$

където тегловните матрици Q и R се определят от

$$Q = \begin{vmatrix} Q_{x_{\dot{\phi}_i}} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{x_i} & 0 \\ 0 & 0 & C^T \end{vmatrix}, \quad R = 375, \quad (7)$$

$$Q_{x_{\dot{\phi}_i}} = 15000, Q_{x_i} = 1.8, Q_{\dot{\phi}} = 1, Q_{\dot{\theta}} = 25.01, Q_{\theta} = 375$$

Управлението, което минимизира (6) с отчитане на модела (5) се определя от

$$u(k) = -Kx(k), \quad (8)$$

където матрицата на регулятора K се определя от израза

$$K = (R + B^T P B)^{-1} B^T P A, \quad (9)$$

а P е положително определено решение на уравнението $A^T P A - P - A^T P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P A + Q = 0$. (10)

По отношение на отделните компоненти на вектора на състоянието на обекта (5), матрицата на регулятора се представя във вида

$$K = [K_{\dot{\phi}} \ K_{\dot{\theta}} \ K_{\theta} \ K_{\dot{\phi}_i} \ K_{x_i}]. \quad (11)$$

Тъй като векторът $x(k)$ е неизмерим, управлението (8) се определя от

$$u(k) = -K_{\dot{\phi}}\hat{x}_{\dot{\phi}}(k) - K_{\dot{\theta}}\hat{x}_{\dot{\theta}}(k) - K_{\theta}\hat{\theta}(k) - K_{x_i}\hat{x}_{x_i}(k) \quad (12)$$

където $\hat{x}_{\dot{\phi}}(k)$ и $\hat{x}_{\dot{\theta}}(k)$ са оценки на $x_{\dot{\phi}}(k)$ и $x_{\dot{\theta}}(k)$ и

$$\begin{aligned}\hat{x}_{\dot{\phi}_i}(k+1) &= \hat{x}_{\dot{\phi}_i}(k) - T_0 \hat{\phi}(k), \\ \hat{x}_i(k+1) &= \hat{x}_i(k) + T_0(r_\theta(k) - \hat{\theta}(k))\end{aligned}\quad (13)$$

са оценки на $x_{\dot{\phi}_i}(k)$ и $\hat{x}_i(k)$. Оценките $\hat{\phi}(k) = C_{\dot{\phi}} \hat{x}_{\dot{\phi}}(k)$ и $\hat{\theta}(k)$ се получават с филтър на Калман. Използваният в системата за управление жироскоп се характеризира със значителен шум $\dot{\phi}_g$, който се моделира с уравнението

$$\dot{\phi}_g(k+1) = \dot{\phi}_g(k) + J_g v_g(k), \quad (14)$$

където $v_g(k)$ е дискретен нормиран бял гаусов шум и $J_g = 0.0001$ е коефициент, който е експериментално определен така, че да се получи точна оценка на ъгловата скорост $\dot{\phi}(k)$. Обединявайки уравнения (1),(2),(3) и (14) за синтеза на ПИ филтъра на Калман се получава модела

$$\begin{aligned}x_f(k+1) &= A_f x_f(k) + B_f u(k) + J_f v_f(k) \\ y_f(k) &= C_f x_f(k) + H_f v_f(k)\end{aligned}, \quad (15)$$

където

$$x_f = [x_{\dot{\phi}}^T \quad x_{\dot{\theta}}^T \quad \theta \quad \dot{\phi}_g]^T, \quad y_f = [\dot{\phi} \quad \dot{\theta} \quad \theta \quad \dot{\phi}_g]^T,$$

$$v_f = [v_{\dot{\phi}} \quad v_{\dot{\theta}} \quad v_g]^T$$

и A_f, B_f, J_f, C_f, H_f са матрици със съответните размерности. Уравнението на ПИ филтъра на Калман от 18 ред за системата (15) е

$$\begin{aligned}\hat{x}_f(k+1) &= A_f \hat{x}_f(k) + B_f u(k) + \\ K_f(y_f(k+1) - C_f B_f u(k) - C_f A_f \hat{x}_f(k)), \\ \hat{y}_f(k) &= C_f \hat{x}_f(k)\end{aligned}\quad (16)$$

Матрицата K_f на филтъра на Калман се определя от

$$K_f = D C_f^T (C_f D C_f^T + 0.00001)^{-1}, \quad D = A_f D_e A_f^T + J_f D_{v_f} J_f^T, \quad (17)$$

където D_e е положително определено решение на уравнението

$$D_e = D - D C_f^T (C_f D C_f^T + 0.00001)^{-1} C_f D \quad (18)$$

и $D_{v_f} = I_3$ е дисперсионната матрица на шума v_f .

Оценката $\hat{\phi}(k)$, която се използва в уравнение (13) при формирането на управлението (12) се определя от

$$\hat{\phi}(k) = \dot{\phi}(k) - \hat{\phi}_g(k), \quad (19)$$

където $\hat{\phi}_g(k)$ е последният елемент на \hat{x}_f .

На базата на получените от идентификацията модели с входна мултиплитативна неопределеност [5] е извършен анализ на системата за управление в честотната област. На фиг.4-6 са показани сингулярните стойности на системата за управление, функцията на изходната чувствителност, и структурираното сингулярно число за анализ на робастната устойчивост. Вижда се, че системата за управление ще отработва без статична грешка задания за положението на колелата с честота до 1 rad/s и нискочестотните изходни смущения ще се потискат в достатъчна степен. Анализът на робастната устойчивост показва, че има достатъчен запас по устойчивост. В ниските честоти могат да се допуснат с около 30% по-големи неопределености, а във високите честоти около два пъти по-големи неопределености.

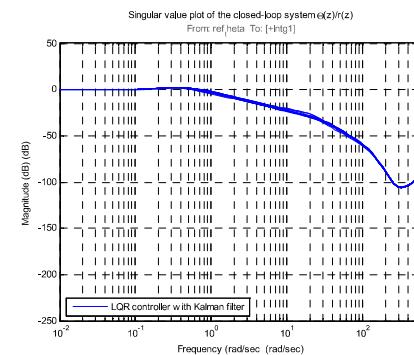
За управление на движението на робота около вертикалната ос по представените в [5] модели, описващи връзката между управлението към лявото и дясното колело u_l и u_r и ъгловите скорости на лявото и дясното колела $\dot{\theta}_l$ и $\dot{\theta}_r$ и връзката между скоростите на колелата и ъгловата скорост на въртене около вертикалната ос ψ , се

синтезира ПИ регулатор. Управляващият сигнал на този регулатор се определя от

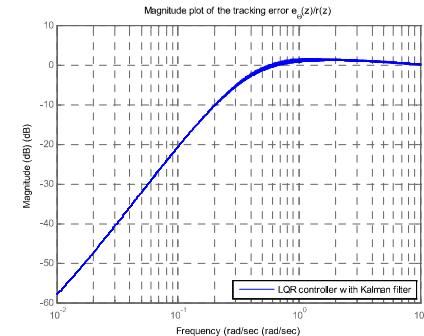
$$\begin{aligned}u_t(k) &= K_{\psi_n}(r_\psi(k) - \hat{\psi}(k)) + K_{\psi_i} I_\psi(k), \\ I_\psi(k+1) &= I_\psi(k) + T_0(r_\psi(k) - \hat{\psi}(k))\end{aligned}, \quad (20)$$

където $r_\psi(k)$ е заданието за ъгъла $\psi(k)$, K_{ψ_n} и K_{ψ_i} са коефициенти на пропорционалност и интегриране. От съображения за реализиране на компромис между качеството на следене на заданието $r_\psi(k)$ и големината на управляващия сигнал $u_t(k)$, който се добавя към управлението на регулатора за движението напред-назад, се определя $K_{\psi_n} = 2$ и $K_{\psi_i} = 0.01$. В израз (20) $\hat{\psi}(k)$ е оценка на ъгъла $\psi(k)$, която се получава от

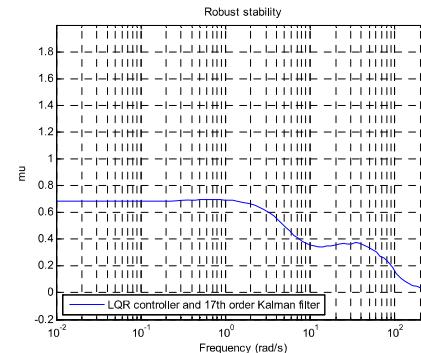
$$\hat{\psi}(k+1) = \hat{\psi}(k) + T_0 \hat{\psi}(k), \quad (21)$$



Фиг. 4. Сингулярни стойности на затворената система



Фиг. 5. Функции на изходната чувствителност

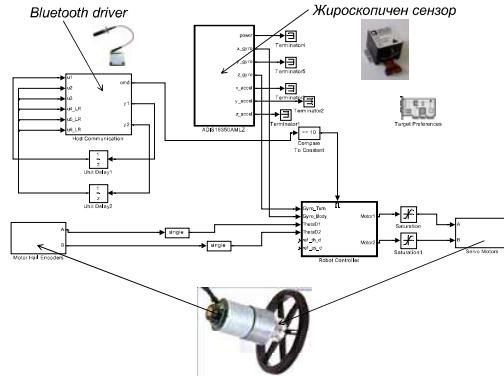


Фиг. 6. Робастна устойчивост

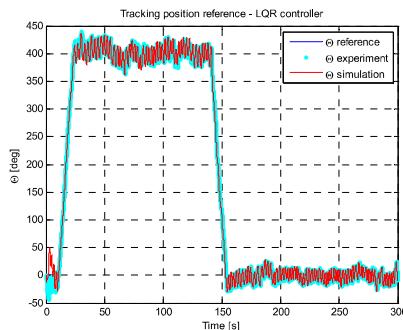
където $\hat{\psi}(k)$ е оценка на измерената от жироскопа скорост $\psi(k)$, която се определя аналогично на оценката (19), като се използва аналогичен на (16) ПИ филтър на Калман, синтезиран по отношение на модела на движението около вертикалната ос и по отношение на модела на шума на жироскопа за измерване на $\dot{\psi}(k)$.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

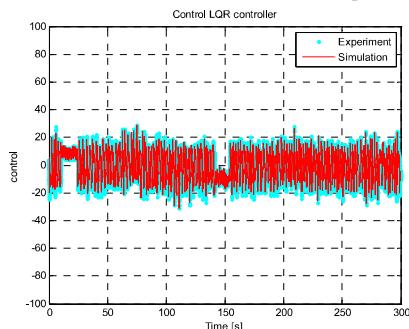
В средата на *Simulink* са разработени симулационна схема на системата за управление и специализиран софтуер. С помощта на *Simulink Coder* и *Code Composer Studio* от този софтуер се генерира код, който се вгражда в цифровия сигнален процесор. На фиг.7 е показана схемата за генериране на кода за цифровия сигнален процесор. Проведени са редица експерименти с разработените регулятори и е извършено сравнение с резултатите от симулационните изследвания. На фиг. 8-11 са показани получените резултати от експеримента и от симулацията по отношение на основните сигнали в системата за управление.



Фиг. 7. Схема за генериране на код за вграждане в цифровия сигнален процесор



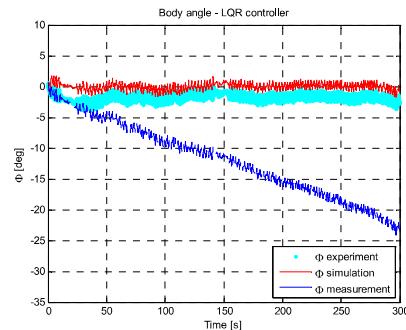
Фиг. 8. Положение на колелата на робота



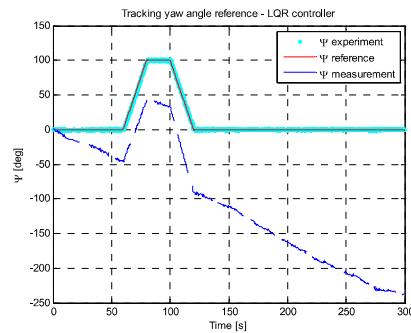
Фиг. 9. Управляващ сигнал

От фиг.8 се вижда, че пререгулирането е незначително и роботът успява да следи линейно нарастващото задание за ъгъла на колелата. Забелязва се и нечувствителност на движението напред-назад към завъртането на робота около вертикалната ос. Използването на $\hat{\phi}(k)$ и $\hat{\psi}(k)$ вместо $\phi(k)$ и $\psi(k)$ осигурява точна стабилизация на робота в горно положение и завъртането му около вертикалната ос без грешка, докато в измерените стойности на $\phi(k)$ и $\psi(k)$ се забелязват значителни

отмествания с течение на времето, което се дължи на интегрирането на дрейфовете на жироскопите (фиг. 10, фиг.11). Управляващият сигнал на системата за управление има приемлив вид и е значително по-малък от амплитудните си ограничения от ± 50 .



Фиг. 10. Ъгъл на наклона на тялото на робота



Фиг. 11. Ъгъл на завъртане около вертикалната ос

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата е представена разработената вградена система за управление на двуколесен робот. Разработените линейно-квадратични регулятор, ПИ регулятор и ПИ филтри на Калман за управление на равнинното движение са вградени в цифров сигнален процесор TMS320F28335. Дадени са експериментални и симулационни резултати за движението на робота в равнината, които показват качеството на вградената система за управление. Близостта между симулационните и експерименталните резултати показват валидността на разработените модели.

БЛАГОДАРНОСТ

Изследванията в тази статия са извършени по проект 142 ПД0008-08, финансиран от НИС при ТУ-София

ЛИТЕРАТУРА

- Ronald Ping Man Chan, Karl A. Stol, C. Roger Halkyard. *Review of modelling and control of two-wheeled robots*. Annual Reviews in Control. Vol. 37, 2013, p.89-103.
- Segway Personal Transporters. Bedford, NH, 2012 <http://www.segway.com>
- Yamamoto, Y. NXTway-GS (Self-Balanced Two-Wheeled Robot Controller Design). <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/>
- G. Campion, W. Chung. Wheeled Robots. In B. Siciliano and O. Khatib, editors, Springer Handbook of Robotics, chapter 17, p. 391-410, Springer, Berlin, 2008.
- Славов Ц., Кралев Й., П. Петков. Идентификация на двуколесен робот като обект с неопределеност. Годишник на ТУ-София, том 64, кн. 1, Международна конференция „Автоматика 2014”, стр. 343-352, 2014.