



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Wydział Mechaniczny

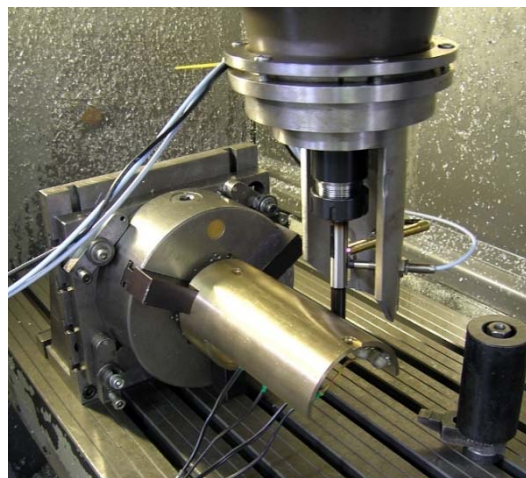
**ROZWIĄZANIA MECHATRONICZNE W ZASTOSOWANIU
DO NADZOROWANIA WYBRANYCH PROCESÓW DYNAMICZNYCH**

**Prof. Krzysztof J. Kaliński
Katedra Mechaniki i Mechatroniki
Zespół Mechatroniki**

Seminarium Naukowe Wydziału Mechanicznego PG, Gdańsk, 01 marca 2017 r.



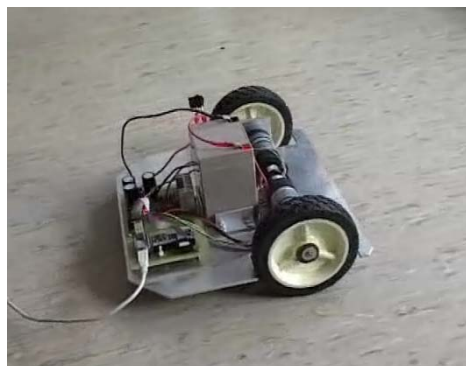
Nadzorowanie drgań podczas frezowania materiałów konwencjonalnych i trudno-obrabialnych



Projekt TANGO (NCBiR)

7 projektów MNiSW, NCN, 2 projekty UE (m.in. CRAFT)

Sterowanie optymalne ruchem 2 i 3-kołowych platform mobilnych przy energetycznym wskaźniku jakości



Modyfikacja strategii sterowania optymalnego

Wskaźnik jakości uwzględniający zmianę w czasie energii kinetycznej układu:

$$J(t) = \frac{1}{2}(\dot{q} - \dot{q} - \dot{q})^T OM(\dot{q} - \dot{q} - \dot{q}) + \frac{1}{2}u^T Ru$$
 Wyznaczenie optymalnego sygnału sterującego:

$$u = -(R + R^T)^{-1} \left[B^T \left(e^{\int t} \tau \, dt \right)^T T^T (M^T O^T + OM) (\dot{q} - \dot{q} - \dot{q}) \right]$$

Potwierdzenie skuteczności nadzorowania

Wyznaczenie dodatkowych prędkości, wyrzających z błędnego położenia platformy:

$$\frac{\dot{x}_w - x_w}{k \cdot \Delta t} = \dot{v}_w \cos \beta - l_s \dot{\beta} \sin \beta$$

$$\frac{\dot{y}_w - y_w}{k \cdot \Delta t} = \dot{v}_w \sin \beta + l_s \dot{\beta} \cos \beta$$

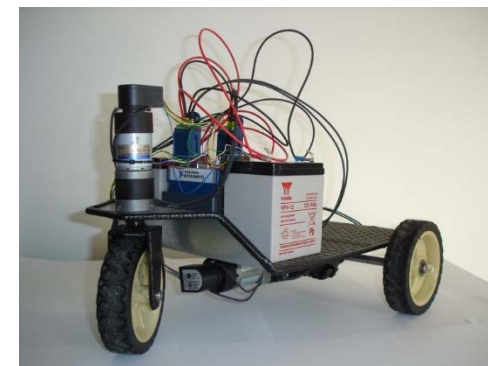
Przebieg błędów kąta obrotu ramy

Więzy nieholonomiczne

układ silnie nieliniowy

Rezultat końcowy:
Autonomiczny robot mobilny własnej konstrukcji

Tor punktu H
Tor punktu H





1. Prof. dr hab. inż. **Krzysztof Kaliński**, prof. zw. PG – kierownik
Krajowe projekty badawcze: kierownik **6**, główny wykonawca **2**, wykonawca **7**
Projekty międzynarodowe: kierownik **1**, wykonawca **4**, wnioskodawca **3**
Projekty w ramach funduszy strukturalnych: kierownik/koordynator **3**,
uczestnik/przedstawiciel **2**
2. Dr hab. inż. Marek Galewski
Krajowe projekty badawcze: główny wykonawca **3**, wykonawca **2**
Projekty międzynarodowe: wykonawca **1**
3. Dr inż. Michał Mazur
Krajowe projekty badawcze: wykonawca **4**, Projekty międzynarodowe: wykonawca **2**
4. Dr inż. Leszek Dziewanowski
Krajowe projekty badawcze: główny wykonawca **3**
5. Dr inż. Marek Chodnicki
Krajowe projekty badawcze: wykonawca **2**
6. Mgr inż. Bartłomiej Bondarczuk, Krajowe projekty badawcze: wykonawca **1**
7. Mgr inż. Jan Kapliński, Krajowe projekty badawcze: wykonawca **1**
8. Dr inż. Cezary Buchholz
9. Mgr inż. Barbara Kowalska



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**
WYDZIAŁ MECHANICZNY

**Katedra Mechaniki i Mechatroniki
Zespół Mechatroniki**



Rozwiązania mechatroniczne

+

Rozwiązania mechatroniczne

Techniki projektowania mechatronicznego

(*Petko M.: 2008, Kaliński K., Buchholz C.: 2010-2014*)

Wirtualne prototypowanie

- badania symulacyjne

Symulacja w czasie rzeczywistym

- Szybkie prototypowanie
- *Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS)*

Szybkie prototypowanie na sprzęcie (urządzeniu) docelowym

- zdefiniowane kryteria wyboru



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**
WYDZIAŁ MECHANICZNY

**Katedra Mechaniki i Mechatroniki
Zespół Mechatroniki**



PRACE BADAWCZE BAZUJĄCE NA STEROWANIU OPTYMALNYM PRZY ENERGETYCZNYM WSKAŹNIKU JAKOŚCI



Liniowy układ niestacjonarny

Opis we współrzędnych uogólnionych

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}}^* + \mathbf{L}^* \dot{\mathbf{q}}^* + \mathbf{K}^* \mathbf{q}^* = \mathbf{f}^* + \mathbf{B}_u^* \mathbf{u}$$

Opis we współrzędnych stanu

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{z} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{w} \end{cases}$$

Obserwator

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{A} - \mathbf{K}_e \mathbf{C}$$

Energetyczny wskaźnik jakości

$$J(t) = \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{Q} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) + \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}^{*T} & \mathbf{q}^{*T} \end{bmatrix}^T$$

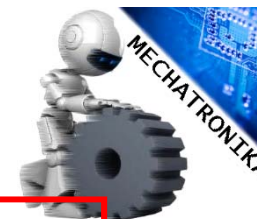
$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^{*-1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 \mathbf{M}^* & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q}_2 \mathbf{K}^* \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}^{*-1} \mathbf{L}^* & -\mathbf{M}^{*-1} \mathbf{K}^* \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^{*-1} \mathbf{B}_u^* \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\bar{\mathbf{q}}}^T & \bar{\mathbf{q}}^T \end{bmatrix}^T$$



Liniowy układ niestacjonarny o działaniu dyskretnym

Równanie tranzycji stanu

$$= (\mathbf{I}z - \Phi_{t+\Delta t})^{-1} \cdot \bar{\Phi}_{t+\Delta t} \cdot \frac{1}{2} [\mathbf{B}_{t+\Delta t} \mathbf{u}_{t+\Delta t} + \mathbf{D}_{t+\Delta t} \mathbf{z}_{t+\Delta t}] \cdot \left(1 + \frac{1}{z}\right)$$

Równanie obserwatora

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \left(\mathbf{I} - \frac{1}{z} \Phi_{0,t}\right)^{-1} \cdot \bar{\Phi}_{0,t} \cdot \frac{1}{2} [\mathbf{B}_t \mathbf{u}_t + \mathbf{K}_{e,t} \mathbf{y}_t] \cdot \left(1 + \frac{1}{z}\right)$$

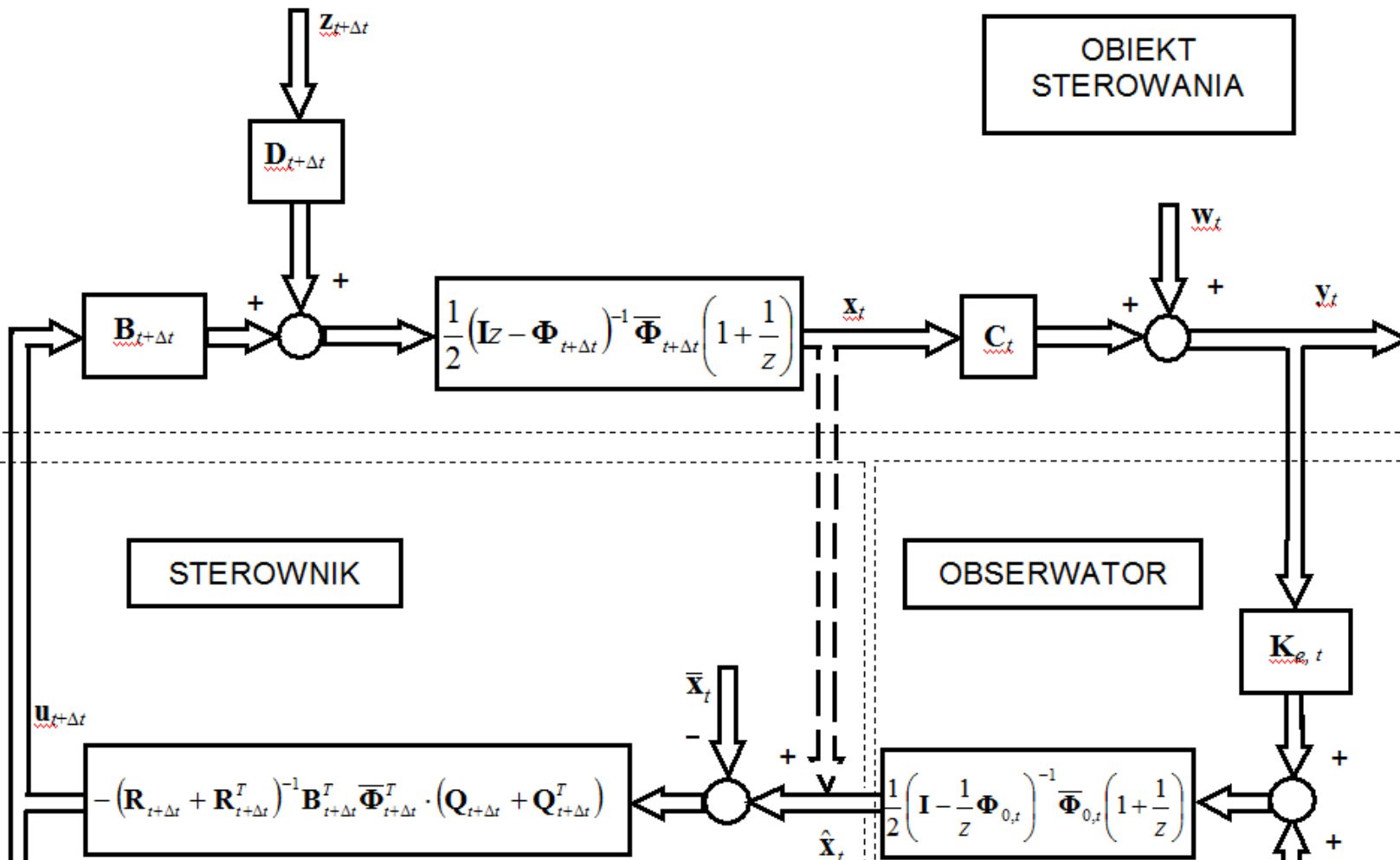
Optymalny sygnał sterujący

$$\Delta t = -(\mathbf{R}_{t+\Delta t} + \mathbf{R}_{t+\Delta t}^T)^{-1} \mathbf{B}_{t+\Delta t}^T \bar{\Phi}_{t+\Delta t}^T \cdot (\mathbf{Q}_{t+\Delta t} + \mathbf{Q}_{t+\Delta t}^T) \cdot (\mathbf{x}_t - \bar{\mathbf{x}}_t)$$

Sprzężenie od
 zmiennych stanu
 (przemieszczenie,
 prędkość)

Równanie wyjść

$$\Phi_{t+\Delta t} = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}^k \Delta t^k \quad \Phi_{t+\Delta t} \equiv \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}^k \frac{\Delta t^k}{k!}$$



Sterowanie optymalne przy energetycznym wskaźniku jakości ze sprzężeniem od przyspieszeń

Proponowana **modyfikacja** umożliwia
względnienie zależności optymalnego sygnału
sterującego u od przyspieszeń y układu
sterowanego (są to zarazem sygnały mierzone
akcelerometrami, co bardzo często ma miejsce
w praktyce pomiarowej układów drgających).

Modyfikacja

Optymalny sygnał sterujący należy uzależnić od **pocho**dney wektora współrzędnych stanu

Optymalny sygnał sterujący – **postać różnicowa**

$$\Delta \mathbf{u}_{t+\Delta t} = -(\mathbf{R}_{t+\Delta t} + \mathbf{R}_{t+\Delta t}^T)^{-1} \mathbf{B}_{t+\Delta t}^T \overline{\Phi}_{t+\Delta t}^T \cdot \Delta t \cdot (\mathbf{Q}_{t+\Delta t} + \mathbf{Q}_{t+\Delta t}^T) \cdot \dot{\mathbf{x}}_t$$

$$\dot{\mathbf{x}}_t = \frac{\Delta \mathbf{x}_t}{\Delta t}$$

a po uporządkowaniu

$$\Delta \mathbf{u}_{t+\Delta t} = -(\mathbf{R}_{t+\Delta t} + \mathbf{R}_{t+\Delta t}^T)^{-1} \mathbf{B}_{t+\Delta t}^T \cdot \overline{\overline{\Phi}}_{t+\Delta t}^T \cdot (\mathbf{Q}_{t+\Delta t} + \mathbf{Q}_{t+\Delta t}^T) \cdot \dot{\mathbf{x}}_t$$

$$\overline{\overline{\Phi}}_{t+\Delta t} = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}_{t+\Delta t}^k \frac{\Delta t^{(k+2)}}{k!}$$

anie wyjść

$$\overline{\mathbf{v}}_t = \overline{\mathbf{C}}_t \dot{\mathbf{x}}_t + \mathbf{w}_t$$

Sprzężenie
od pochodnej wektora
stanu

Modyfikacja

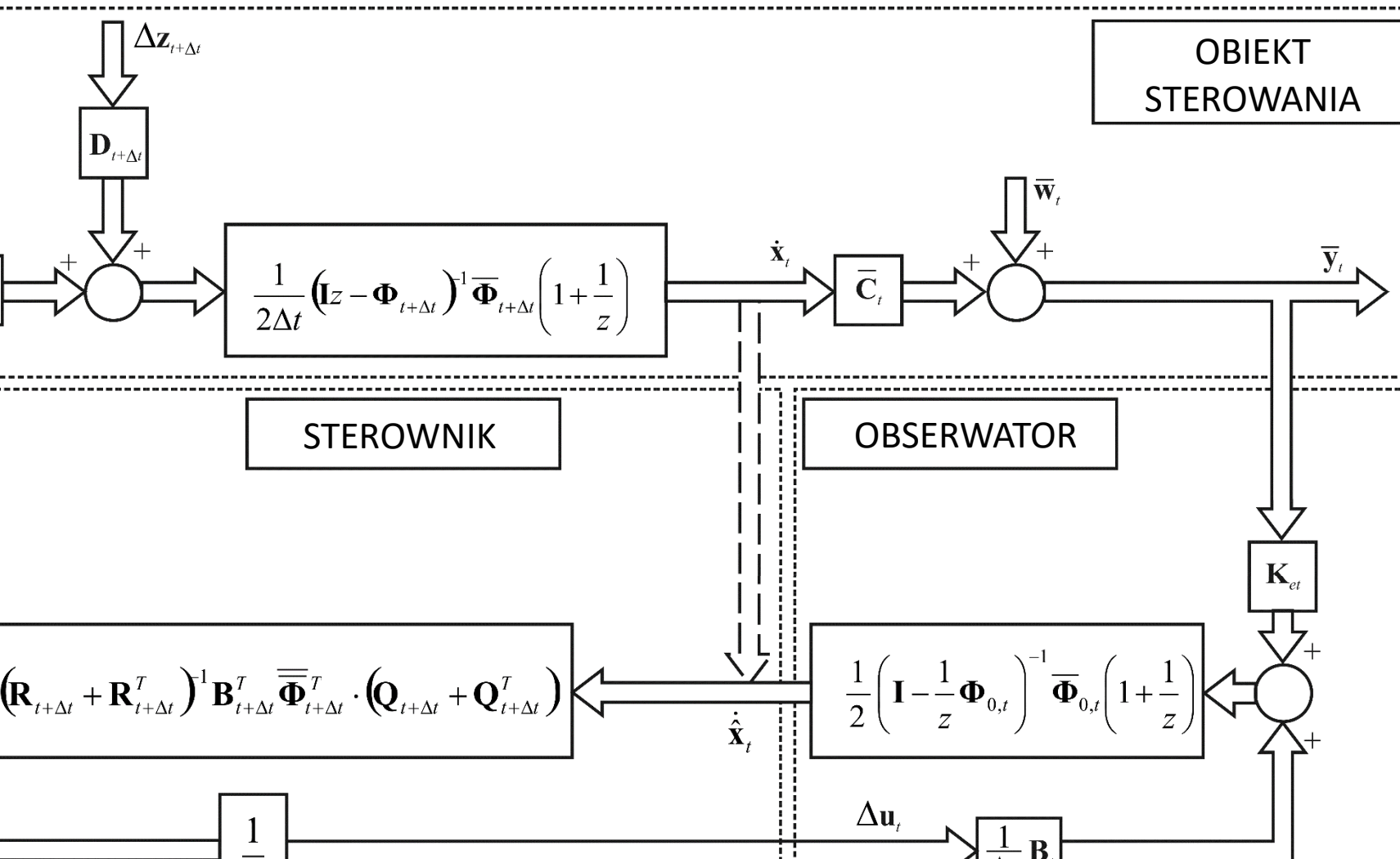
Równanie tranzycji stanu – po **zróżniczkowaniu** względem czasu

$$\dot{\mathbf{x}}_t = \left(\mathbf{I}Z - \mathbf{\Phi}_{t+\Delta t}\right)^{-1} \cdot \overline{\mathbf{\Phi}}_{t+\Delta t} \cdot \frac{1}{2\Delta t} \cdot \left[\left(\mathbf{B}_{t+\Delta t}\Delta\mathbf{u}_{t+\Delta t} + \mathbf{D}_{t+\Delta t}\Delta\mathbf{z}_{t+\Delta t}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{Z}\right) \right]$$

Równanie obserwatora – odtworzenie **pochoďnej** wektora stanu

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_t = \left(\mathbf{I} - \frac{1}{Z}\mathbf{\Phi}_{0,t}\right)^{-1} \cdot \overline{\mathbf{\Phi}}_{0,t} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{\Delta t}\mathbf{B}_t\Delta\mathbf{u}_t + \mathbf{K}_{e,t}\bar{\mathbf{y}}_t \right] \cdot \left(1 + \frac{1}{Z}\right)$$

Modyfikacja





W przypadkach sterowania przy energetycznym wskaźniku jakości od przyspieszeń drgań, chwilowe wartości optymalnego sygnału sterującego są generowane w trybie *on-line*

przyrostowo.

Tranzycja stanu i działanie obserwatora dotyczą wektora pochodnych zmiennych stanu.

W przypadku sterowania przy energetycznym wskaźniku jakości od zmiennych stanu, chwilowe wartości optymalnego sygnału



**Kaliński K. J., Galewski M. A.: A modified
method of vibration surveillance by using the
optimal control at energy performance index.
Mechanical Systems and Signal Processing
2015, 58-58,
s. 41-52. **40 JCR****

**NADZOROWANIE
PROCESÓW
DYNAMICZNYCH
W UKŁADACH
MECHANICZNYCH**

KRZYSZTOF J. KALIŃSKI



WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ



**A modified method of vibration surveillance by using
the optimal control at energy performance index**

Krzysztof J. Kaliński¹, Marek A. Galewski*

Gdańsk University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Poland

ARTICLE INFO

Article history:
Received 31 May 2013
Received in revised form
14 February 2014
Accepted 23 December 2014
Available online 17 January 2015

Keywords:
Vibration surveillance
Optimal control
Energy performance index
Acceleration feedback

ABSTRACT

A method of vibration surveillance by using the optimal control at energy performance index has been creatively modified. The suggested original modification depends on consideration of direct relationship between the measured acceleration signal and the optimal control command. The paper presents the results of experiments and Hardware-in-the-loop simulations of a new active vibration reduction algorithm based on the energy performance index idea modified in such a way, that it directly utilises the acceleration feedback signal. Promising prospects towards real application of the modified method in case of the high speed milling are predicted as well.

© 2015 Published by Elsevier Ltd.

1. Introduction

The performed former experiments evidenced that the active vibration control of flexible plates produces promising results in scope of reducing vibration level [1]. The energy performance index [2] was utilised with success earlier, in case of the spindle speed optimal control during high speed milling [3]. However, in case of accelerometer-based vibration measurement, the algorithm of signal processing meets a lot of difficulties due to necessity of integrating instantaneous acceleration values. Thus the main goal of this paper is to develop a method of on-line vibration surveillance, which is thought to be competitive with respect to previous attempts towards control of non-stationary discrete systems. The latter depends on usage of direct acceleration feedback in the algorithm.

The used control algorithms for computing control signal in the active vibration reduction purposes often utilise integration of velocity or acceleration signal [4]. The results of other research on a cantilever beam vibration control disclosed that active damping is efficient only in case of generating acting force with a use of the derivative controller during the displacement measurement [5]. In publication [1], for vibration damping the Authors proposed the energy performance index method [6], which was earlier applied with success i.e. for the optimal spindle speed generation during the High



NADZOROWANIE DRGAŃ W PROCESIE FREZOWANIA



Badanie drgań podczas frezowania szybkościowego

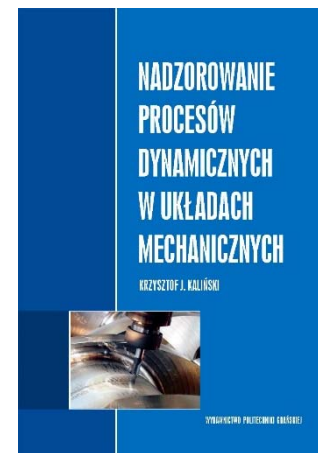
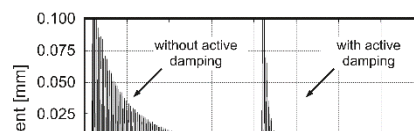
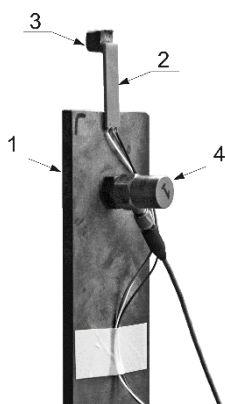
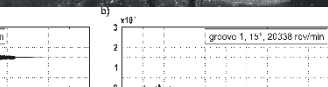
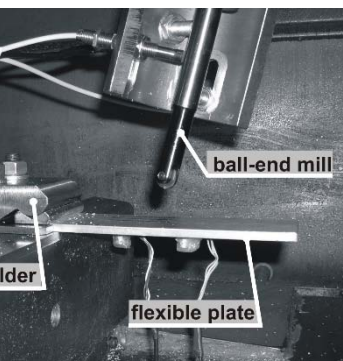
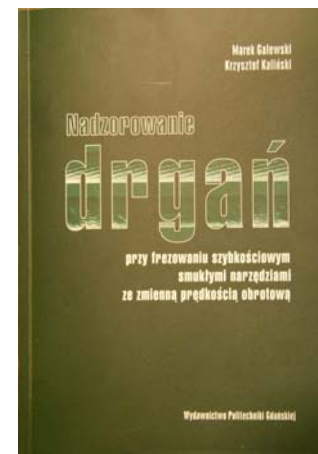
Badanie wpływu sterowania zmiennej prędkości obrotowej wrzeciona,
i sterowanie optymalne przy energetycznym wskaźniku jakości

Wyznaczenie optymalnej prędkości obrotowej

Wygenerowanie mapy optymalnych prędkości obrotowych

Wpływ tłumienia drgań przedmiotu obrabianego

Optimalizacja sztywności zamocowania przedmiotu obrabianego





zane z oddziaływaniem poprzez prędkość obrotową

większanie prędkości skrawania

regulacja prędkości obrotowej wrzeciona z dopasowaniem do
własności drgań własnych układu

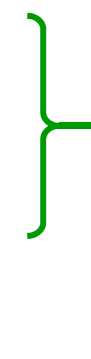
regulacja prędkości obrotowej wrzeciona z dopasowaniem do
optymalnego kąta przesunięcia fazowego w kolejnych przejściach
narzędzia ←

sterowanie pulsacją prędkości obrotowej wrzeciona

sterowanie optymalne prędkością obrotową wrzeciona

sterowanie programowe prędkością obrotową wrzeciona

Rezultaty



Optymalna prędkość obrotowa wrzeciona



określenie optymalnej prędkości obrotowej wrzeciona

- Prędkość optymalna – prędkość, przy której poziom drgań przedmiotu obrabianego jest najmniejszy

na częstotliwość i amplitudę drgań mają wpływ własności dynamiczne przedmiotu obrabianego

- W różnych obszarach przedmiotu mogą dominować inne postacie drgań

- Konieczne jest określenie „mapy” opisującej prędkość optymalną dla każdego punktu przedmiotu



POLITECHNIKA
GDAŃSKA

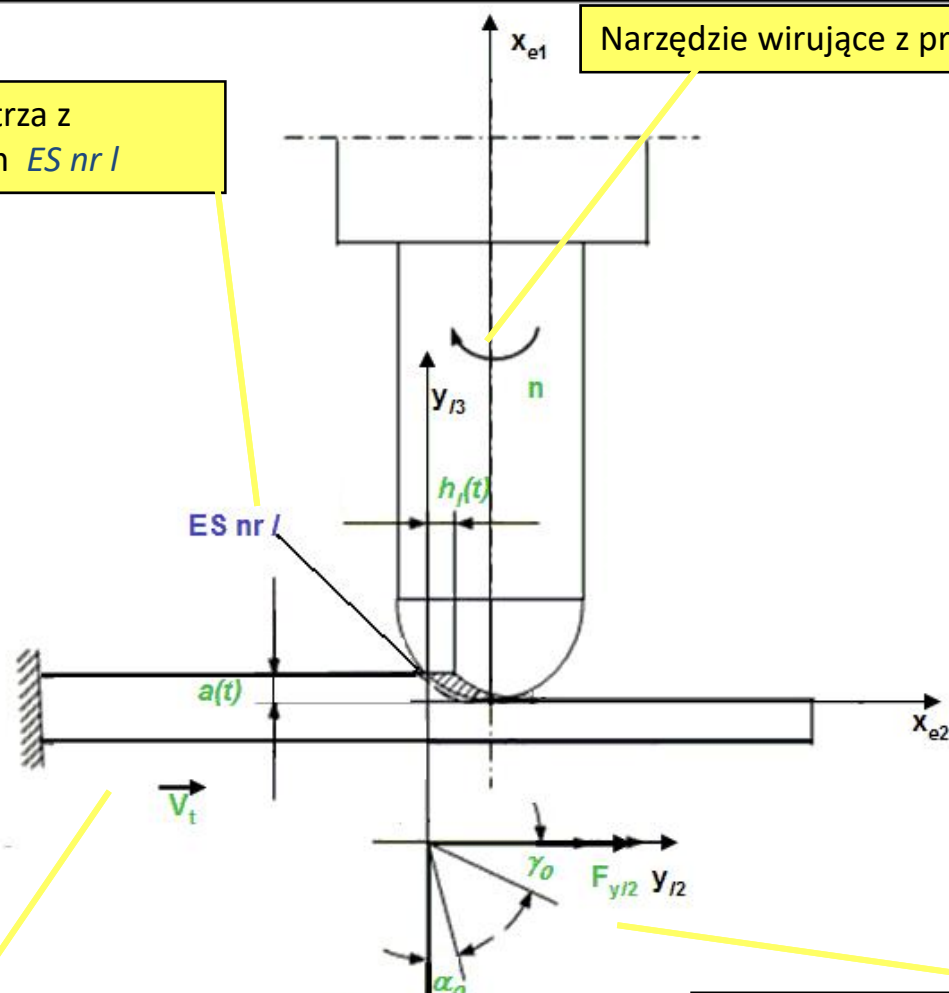
WYDZIAŁ MECHANICZNY

Dynamika skrawania frezem kulistym



Współrzędna punktu styku ostrza z przedmiotem obrabianym ES nr 1

Narzędzie wirujące z prędkością obrotową n



Dynamika skrawania frezem kulistym



czny opór skrawania
rzchniowy właściwy

Zmienna w czasie głębokość skrawania

$$F_1(t) = \begin{cases} k_{dl} [a_p(t) - \Delta a_p(t)] [h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l)], & h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) > 0 \\ 0, & \begin{aligned} & \wedge a_p(t) + \Delta a_p(t) > 0 \\ & , h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) \leq 0 \\ & \vee a_p(t) + \Delta a_p(t) > 0 \end{aligned} \end{cases}$$

$$F_2(t) = \begin{cases} \mu_l k_{dl} [a_p(t) - \Delta a_p(t)] [h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l)], & h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) > 0 \\ 0, & \begin{aligned} & \wedge a_p(t) + \Delta a_p(t) > 0, \\ & , h_{Dl}(t) - \Delta h_l(t) + \Delta h_l(t - \tau_l) \leq 0 \\ & \vee a_p(t) + \Delta a_p(t) > 0. \end{aligned} \end{cases}$$



ożenie. W widmie amplitudowym drgań przedmiotu występuje jedna dominująca częstotliwość drgań własnych

hipoteza minimalnej pracy sił skrawania na kierunku grubości warstwy skrawanej – kryterium **uogólnione** (warunek **Liao-unga** 1996)

$$\frac{zn_o}{60} = \frac{f_\alpha}{0,25 + k}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

- częstotliwość drgań własnych przedmiotu obrabianego [Hz],
- poszukiwana prędkość obrotowa wrzeciona [obr/min],
- liczba ostrzy narzędzia

Optymalna prędkość obrotowa wrzeciona



potrzeba minimalnej pracy sił skrawania na kierunku głębokości
skrawania – kryterium **zmodyfikowane** (*Kaliński* 2016)

$$n < 60 \cdot f_{\alpha}, \quad n_o = 60 f_{\alpha} \cdot (0,25 + k), \quad k = 0,$$

$$n > 60 \cdot f_{\alpha}, \quad n_o = 60 f_{\alpha} \cdot (-0,25 + k), \quad k = 2, 3, \dots$$

$$n < 120 \cdot f_{\alpha}, \quad n_o = 60 f_{\alpha} \cdot (0,25 + k), \quad k = 0, 1$$

$$n > 120 \cdot f_{\alpha}, \quad n_o = 60 f_{\alpha} \cdot k, \quad k = 3, 4, \dots$$

**Dominacja drgań
wymuszonych w
procesie skrawania**

**Dominacja
drgań
swobodnych
przedmiotu**

- częstotliwość drgań własnych przedmiotu obrabianego [Hz],
- poszukiwana prędkość obrotowa wrzeciona [obr/min],

Optymalna prędkość obrotowa n_o **nie zależy** od liczby ostrzy z

Optymalna prędkość obrotowa nie ma wpływu efekt regeneracji



Wyznaczenie mapy optymalnych prędkości obrotowych

Cel: minimalizacja poziomu drgań narzędzie-przedmiot obrabiany

Wierzenie przedmiotów podatnych

Wyznaczanie dominujących postaci drgań własnych w wybranych punktach na powierzchni przedmiotu obrabianego

Określenie prędkości optymalnej dla danej postaci drgań

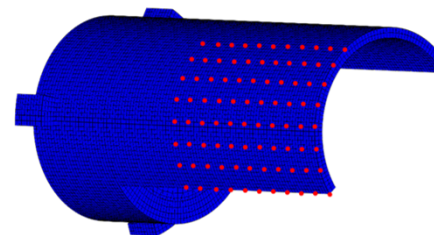
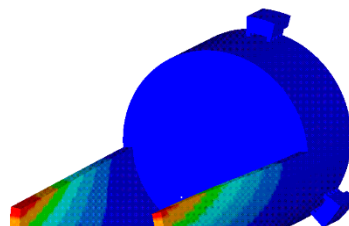
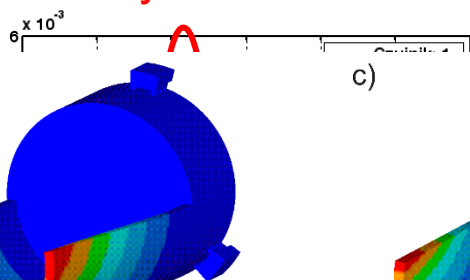
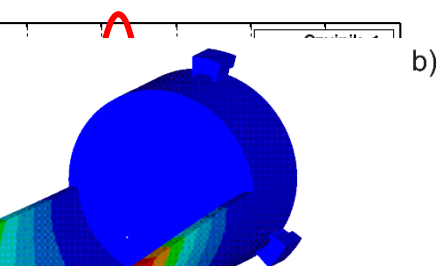
Określenie obszarów o stałej prędkości obrotowej wrzeciona

Modyfikacja kodu NC dla obrabiarki

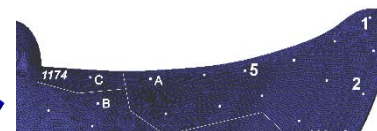
Efekt: eliminacja drgań samowzbudnych typu *chatter*

bieguny i harmoniki

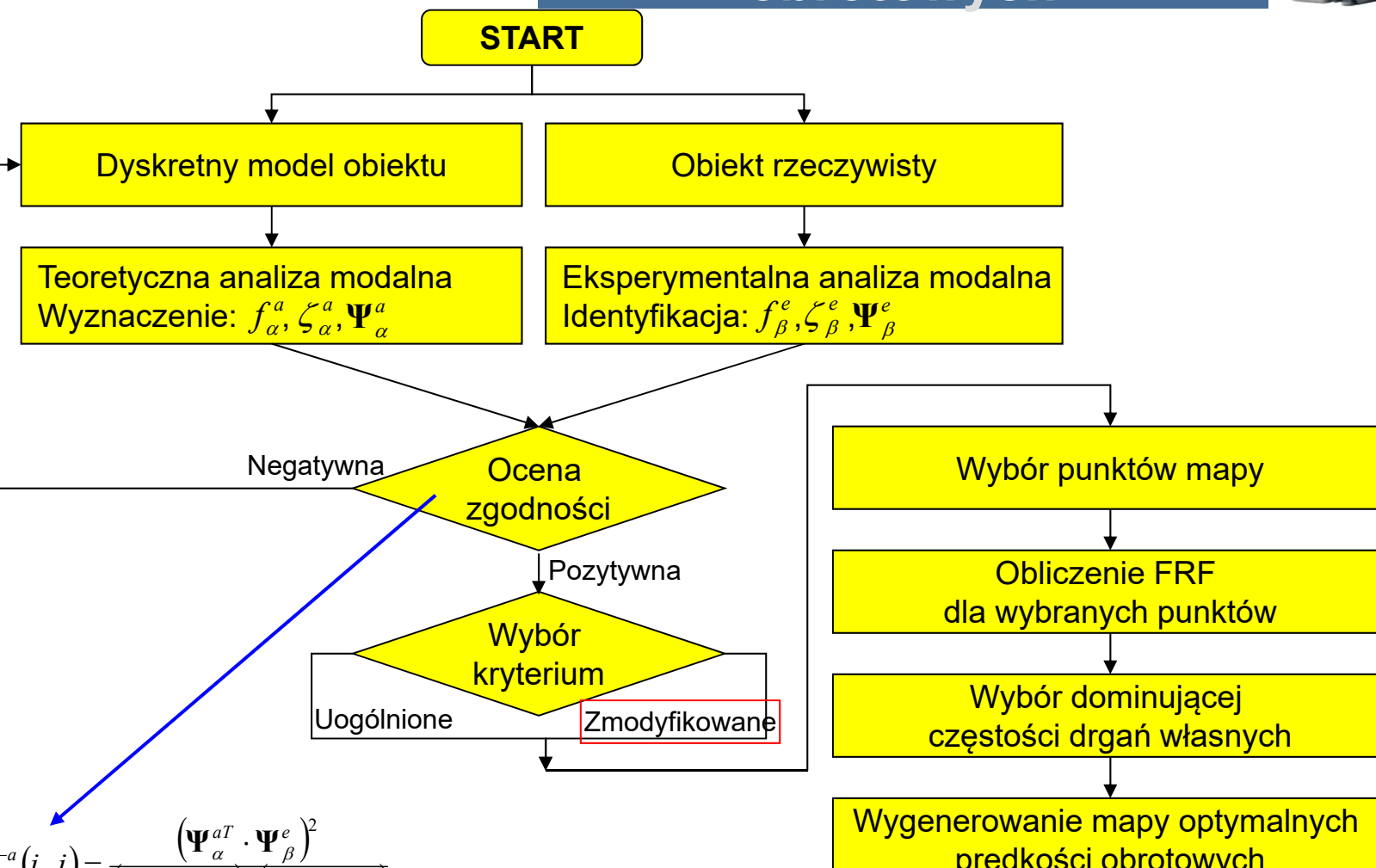
tylko harmoniki



Ster strumieniowy



Podstawowa mapa optymalnych prędkości obrotowych





d. Frezowanie próbki podatnej półwałcowej

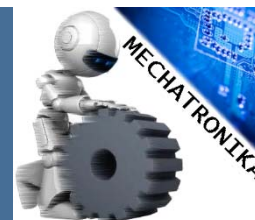
materiał: brąz CC331G (BA1032)

wymiary: 150x100x5 mm

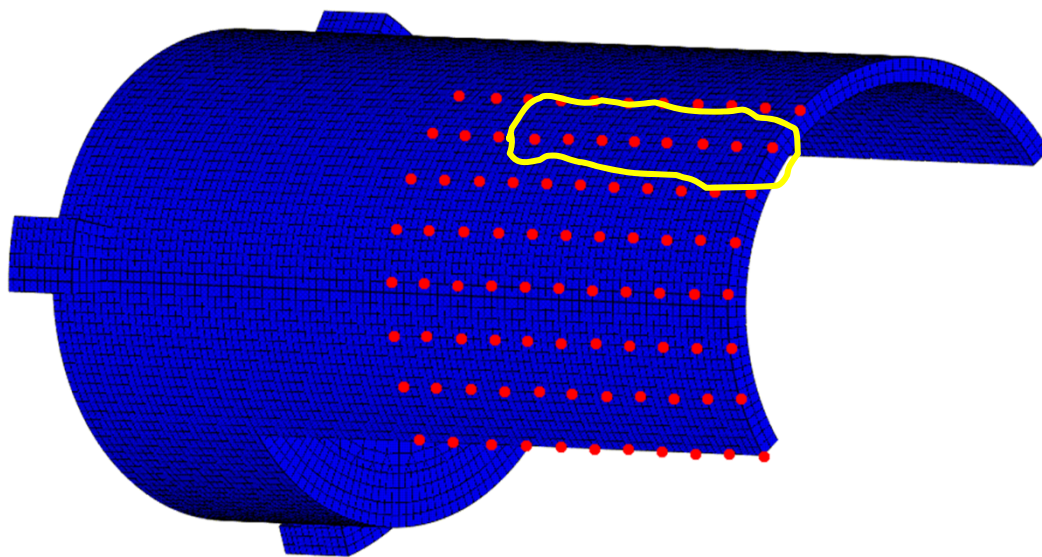
frezarka: Deckel Maho DMU 50eVo Linear (LONZAPET Sp. z o.o. w Gdańsku)



Cel:
minimalizacja
poziomu drgań
narzędzie-przedmiot
obrabiiany



Wyznaczanie postaci drgań dominujących w wybranych punktach na powierzchni przedmiotu obrabianego



Określenie prędkości optymalnej dla danej postaci drgań

Określenie obszarów o stałej prędkości obrotowej wrzeciona



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Podstawowa mapa optymalnych prędkości obrotowych wrzeciona frezarki



Fragment mapy optymalnych prędkości

# Grid	X	Y	Z	Mapa_1	Mapa_2	Freq_1	Freq_2	Freq_3
71594	-0.000	-50.000	-0.000	11280	11280	846.00	728.00	436.00
71584	+10.820	-48.810	-0.000	11280	11280	846.00	436.00	728.00
71574	+21.130	-45.320	-0.000	10464	10464	436.00	846.00	728.00
71564	+30.440	-39.670	-0.000	10464	10464	436.00	728.00	846.00
71554	+38.300	-32.140	-0.000	10464	10464	436.00	728.00	846.00
71544	+44.350	-23.090	-0.000	10464	10464	436.00	846.00	728.00
71534	+48.300	-12.940	-0.000	10464	10464	436.00	846.00	728.00
71522	+50.000	-0.000	-0.000	10464	10464	436.00	846.00	728.00
70499	-0.000	-50.000	-10.000	11280	11280	846.00	728.00	435.80
70489	+10.820	-48.810	-10.000	11280	11280	846.00	436.00	728.00
70479	+21.130	-45.320	-10.000	10464	10464	436.00	846.00	728.00
70469	+30.440	-39.670	-10.000	10464	10464	436.00	728.00	846.00
70459	+38.300	-32.140	-10.000	10464	10464	436.00	728.00	846.00

Na podstawie mapy, postprocesor **modyfikuje** program sterujący dla obrabiarki, umieszczając w nim instrukcje zmiany prędkości obrotowej wrzeciona



Programowanie obrabiarki

Geometria

Kinematyka

Oprogramowanie biurowe
MASTERCAM

Oprogramowanie
MP.DLL
(cechy obrabiarki)

Oprogramowanie użytkowe
postprocesor
(tablica optymalnych
prędkości obrotowych)

NC – frezowanie normatywne

NC – kod zmodyfikowany

System sterowania obrabiarką
Heidenhain iTNC 530



Kaliński K. J., Galewski M. A.: Optimal spindle speed determination for vibration reduction during ball-end milling of flexible details. International Journal of Machine Tools and Manufacture **2015**. 92. 19-30.

45 JCR

**NADZOROWANIE
PROCESÓW
DYNAMICZNYCH
W UKŁADACH
MECHANICZNYCH**

KRZYSZTOF J. KALIŃSKI



WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ



1. Introduction

In case of modern machining centres, ball-end milling of flexible details is observed frequently. In this case, dynamic phenomenon of considerable importance is tool-workpiece relative vibration. In certain conditions it may lead to a loss of stability and cause generation of self-excited chatter vibration. Additionally, vibrations in a machine tool system reduce the quality of the machined surface, increase tool wear and, in extreme cases, may lead to the destruction of a tool or a workpiece [2].

The regeneration phenomenon is recognised as the most important cause of chatter vibrations [3]. There are many dif-

ferences that milling flexible workpieces at variable spindle speed appears unsuccessful, from a point of view of vibration surveillance. Thus, the paper proposes different method of vibration reduction, which is based on matching the spindle speed to the optimal phase shift proposed by Liao and Young [1].

2. Cutting process dynamics

Dynamic analysis of a slender ball end milling process has been performed, based upon following assumptions [13]:

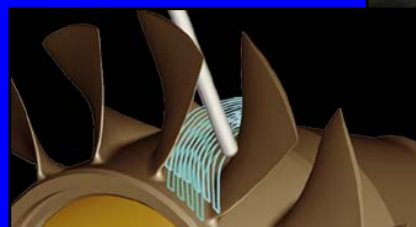


PROJEKTOWANIE MECHATRONICZNE SYSTEMÓW NADZOROWANIA PROCESU FREZOWANIA PRZEDMIOTÓW PODATNYCH




wymagania w zakresie frezowania przedmiotów podatnych

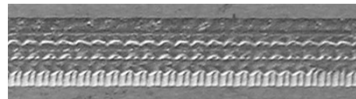
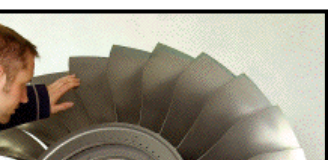
na geometria wyrobu – łopatki turbin, małe złożone geometrycznie części
wanie smukłymi narzędziami
wanie z dużymi prędkościami skrawania - do kilku lub kilkunastu tys. m/min
wanie z dużą prędkością posuwu
głębokości skrawania i grubości warstwy skrawanej
ka „na gotowo” (jakość powierzchni i precyzja wykonania)



wibracje - drgania

wibracje swobodne i przypadkowe
wibracje wymuszone
wibracje samowzbudne – **chatter** 

- Długie smukłe narzędzia, przedmioty podatne
- Pojawiają się nagle nie dając czasu na reakcję
- Chropowatość obrabianej powierzchni, zniszczenie narzędzia, hałas
- Zróżnicowane przyczyny powstawania

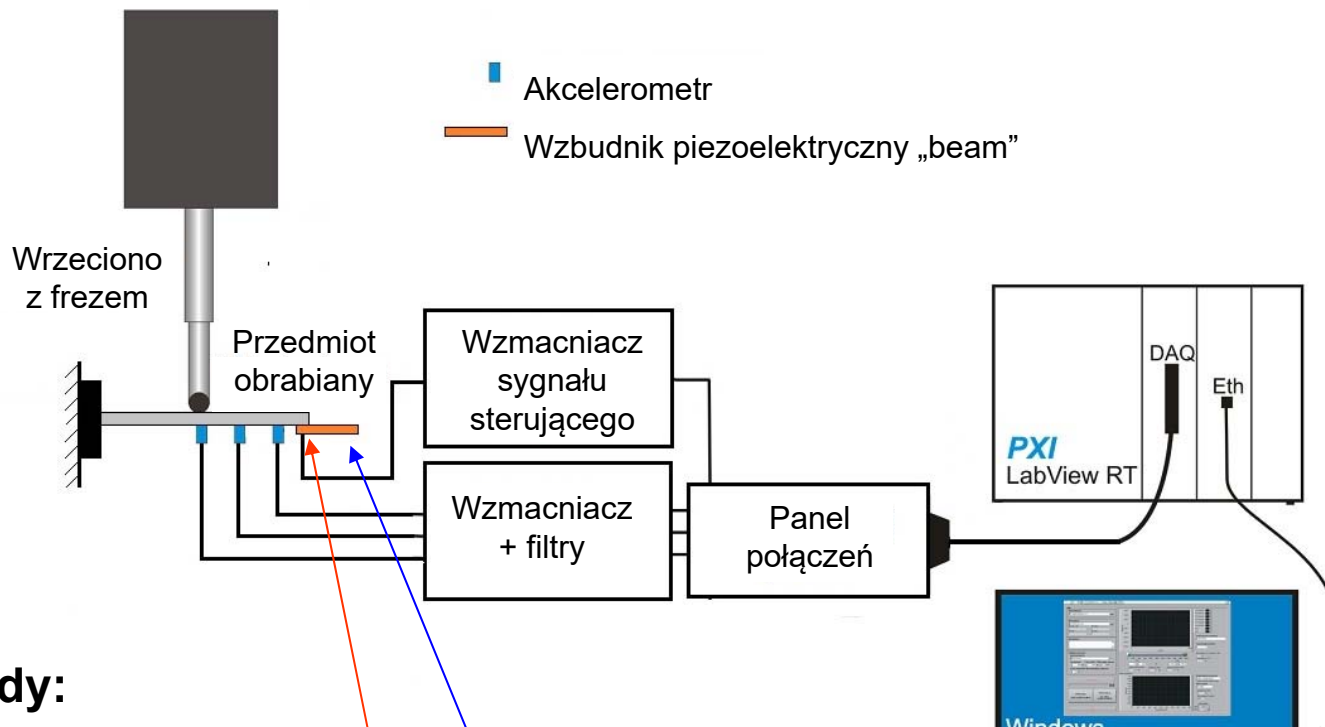


Uwaga: sterowanie prędkością



System nadzorowania drgań podczas frezowania szybkościowych przedmiotów podatnych z wykorzystaniem wzbudników piezoelektrycznych „beam”

LASER MV204 II U/15 - Przedsiębiorstwo Hydromechanika w Ostaszewie



Wady:

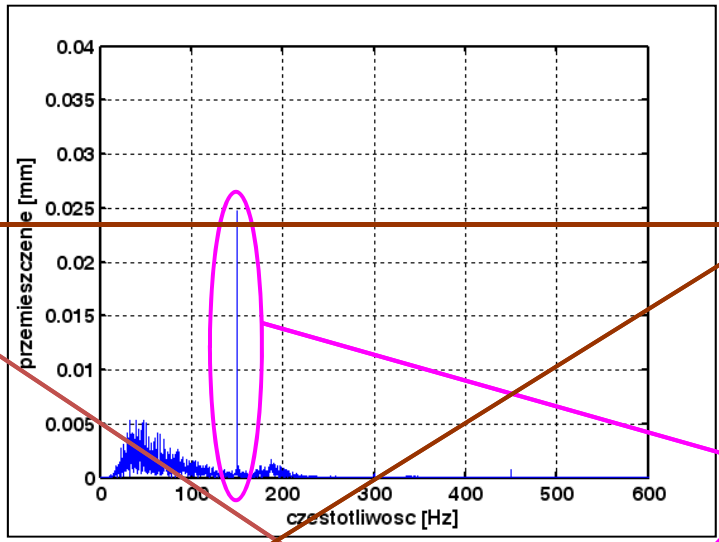
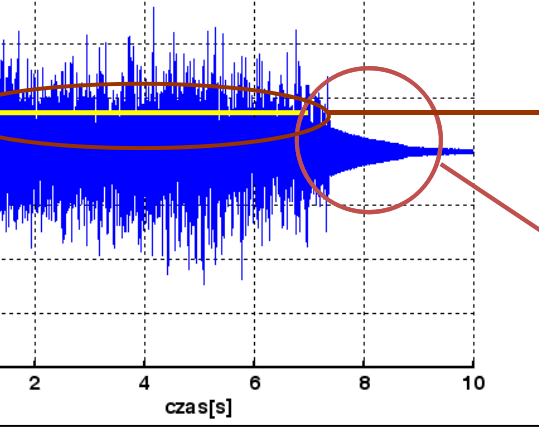


nie - wzбудnik wyłączony

Badania na obrabiarce

n=9000 obr/min

Staby” cykl graniczny

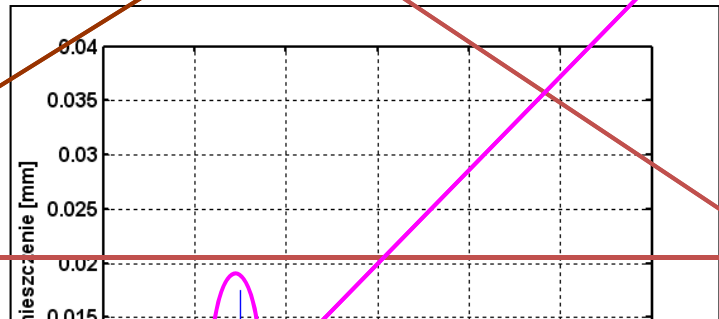
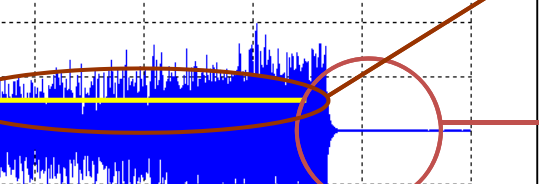


Redukcja
RMS

Redukcja
amplitudy
drgań

nie - wzbudnik włączony

ak cyklu granicznego



Wydatne
skrócenie
czasu drgań
nieustalonych



on Surveillance During Milling Flexible
with the Use of Active Optimal

odnicki, Krzysztof J. Kaliński and Marek A.

from
nal of
**LOW FREQUENCY
NOISE, VIBRATION
AND ACTIVE CONTROL**

VOLUME 32 NUMBER 1&2 2013



-SCIENCE PUBLISHING COMPANY LTD.

cki M., Kaliński K. J., Galewski M. A.:
n Surveillance During Milling of Flexible

**Kaliński K. J., Galewski M. A.: *Vibration
Surveillance Supported by Hardware-In-the-
Loop Simulation in Milling of Flexible
Workpieces. Mechatronics 2014, Vol. 24,
1071-1082. 30 JCR***

Mechatronics 24 (2014) 1071–1082



**Vibration surveillance supported by Hardware-In-the-Loop Simulation
in milling flexible workpieces**



Krzysztof J. Kaliński¹, Marek A. Galewski^{*}

Gdańsk University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Poland

ARTICLE INFO

Article history:
Received 22 April 2013
Accepted 27 June 2014
Available online 6 August 2014

Keywords:
Active vibration control
High speed milling
Optimal control
Hardware-in-the-Loop Simulation

ABSTRACT

The paper concerns modern approaches towards minimizing the vibration level during the high speed milling process of flat flexible details. Dynamic analysis of the milling process is performed and dynamics of non-stationary controlled system in hybrid coordinates is described. On the basis of the process dynamics, as well as on the energy performance index, suitable control law is derived in order to reduce vibration level. This control law is applied for active force generation by the piezoceramic plate actuator. The implementation issues, which concern a proposed method of vibration surveillance, are described. At first, in order to predict and obtain good efficiency of vibration surveillance within a wide range of spindle speeds, Hardware-in-the-Loop Simulation (HLS), as a mean of mechatronic design, is applied. Subsequently, the predicted results are verified during the real cutting experiment. The latter ones evidenced good performance in the scope of vibration reduction.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

High speed milling of the details with complex surfaces is often used in case of modern machining centres [1]. Technological justification results from the need of precise execution of complex, geometric configurations (i.e. turbine blades, propellers, rotors, and various thin-walled elements). Making such devices is an important task from the point of view of the expectations of the automotive, aviation or food industry, as well as machine engineering. Shape milling process is also featured by variable cutting geometry. The complexity of the product and its technology, as well as high machining costs, are the reasons to consider milling process as finishing treatment. Due to the global trend of increasing cutting speeds of milling above 1000 m/min and feed rates over 100 mm/min, it is possible to achieve high performance.

When the cutter cutting the workpiece surface, increase tool wear and, in extreme cases, may lead to the destruction of a tool or a workpiece [4].

Chatter is generally classified in two categories: primary and secondary [5]. The primary chatter is frictional chatter when rubbing on the clearance face excites vibration along the direction of the cutting force and limits in the thrust force direction, thermo-mechanical chatter caused due to the temperature and strain rate in the plastic deformation zone, and mode coupling chatter as result of mutual vibration along directions of the cutting force and the thrust force. The secondary chatter, whose importance is dominant, and which is the most common form of self-excited vibration, is called regenerative chatter. It can occur often because most metal cutting operations involve overlapping cuts which can be a source of vibration amplification. The cutter vibrations leave a



STEROWANIE OPTYMALNE PRZY ENERGETYCZNYM WSKAŹNIKU JAKOŚCI RUCHEM ROBOTÓW MOBILNYCH PODĄŻAJĄCYCH PO TRAJEKTORII ZADANEJ

Poziomy sterowania

soki



iski



Nadzorowanie ruchu jest związane ze sterowaniem niskiego

el: minimalizacja błędów położenia i prędkości
podczas realizacji zadanej trajektorii ruchu

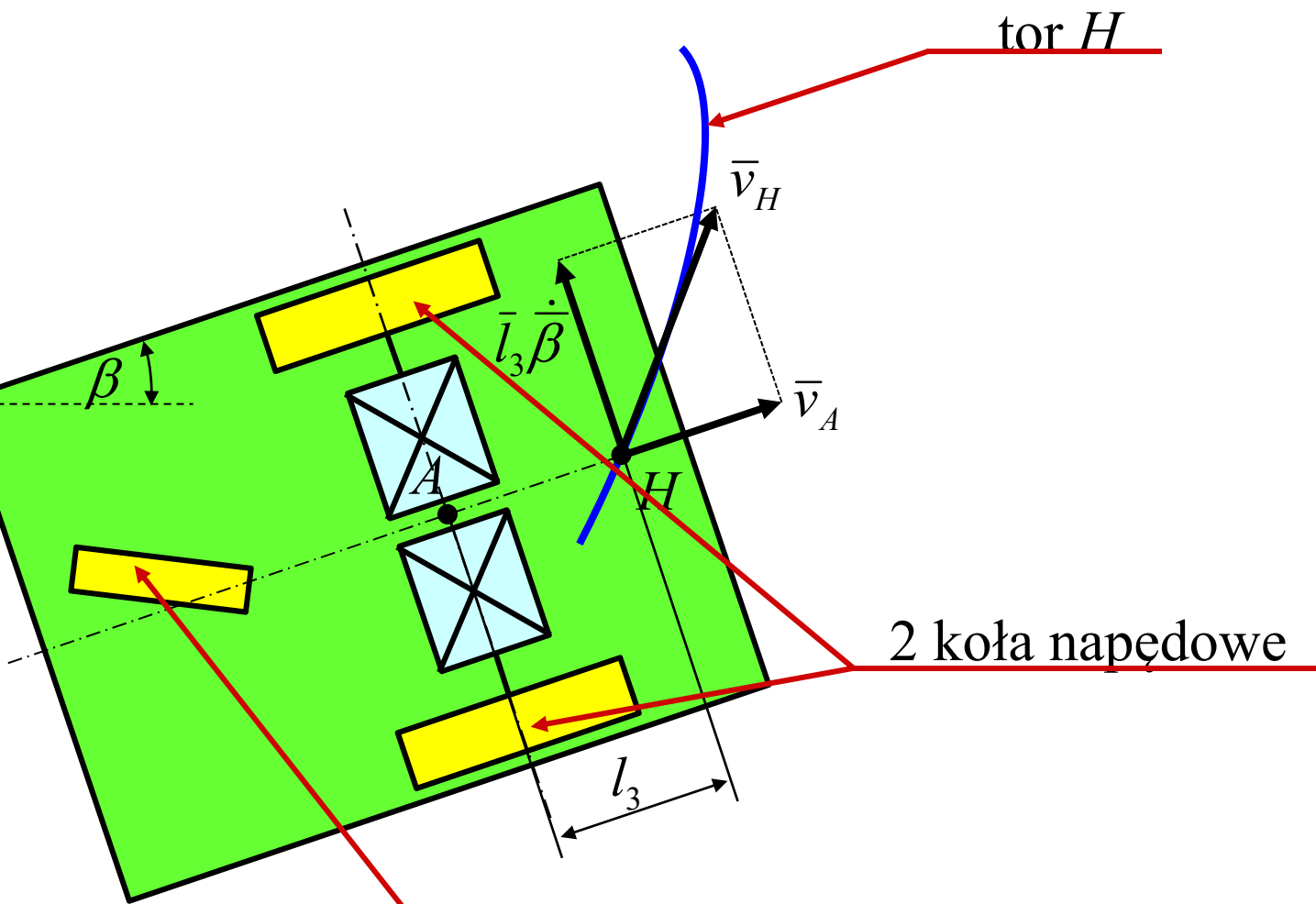
Model deterministyczny

znane są wartości parametrów modelu obliczeniowego

znana jest konfiguracja modelu obliczeniowego

na układ nałożono więzy nieholonomiczne

2-kołowa platforma mobilna



Dynamika platformy



Równania Lagrange'a II rodzaju z mnożnikami

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial T(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{f}(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) + \mathbf{B}_u(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\mathbf{u} + \mathbf{J}^T(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\boldsymbol{\lambda}$$

konieczność odsprzęgnięcia mnożników Lagrange'a w równaniach ruchu zależnego

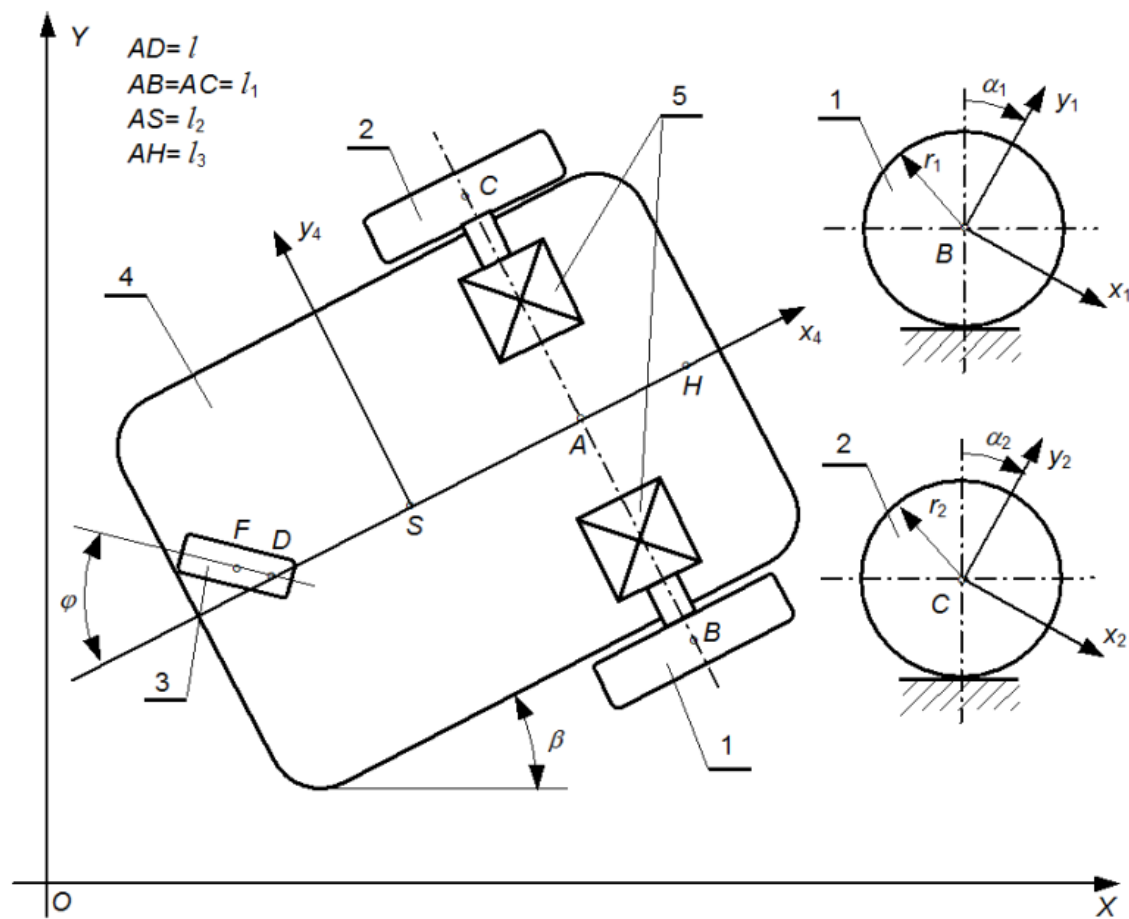
Równania Maggiiego

$$\mathbf{C}_0(\mathbf{q}) \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial T(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} - \mathbf{f}(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) - \mathbf{B}_u(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\mathbf{u} \right] = \mathbf{0}$$

Równania Appella-Gibbsa

$$\frac{\partial S}{\partial \dot{\mathbf{w}}} = \mathbf{f}(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) + \mathbf{B}_u(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\mathbf{u}$$

Dynamika platformy



Koło napędowe 1: masa m_1 , masowe momenty bezwładności $I_{x_1}, I_{y_1}, I_{z_1}$

Dynamika platformy



enia:

forma symetryczna – $m_1=m_2$, $l_{x1}=l_{x2}=l_{y1}=l_{y2}$, $r_1=r_2=r$

ktor współrzędnych uogólnionych

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}$$

Macierzowe równanie dynamiki układu sterowanego:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{L}(\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{f} + \mathbf{B}_u \mathbf{u}$$

$$\mathbf{M} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (4m_1+m_4)r^2 + m_4r^2 \frac{l_2^2}{l_1^2} + \frac{r^2}{l_1^2} (2I_{x1}+I_{z4}) + 4I_{z1} & m_4r^2 - m_4r^2 \frac{l_2^2}{l_1^2} - \frac{r^2}{l_1^2} (2I_{x2}+I_{z4}) \\ m_4r^2 - m_4r^2 \frac{l_2^2}{l_1^2} - \frac{r^2}{l_1^2} (2I_{x1}+I_{z4}) & (4m_2+m_4)r^2 + m_4r^2 \frac{l_2^2}{l_1^2} + \frac{r^2}{l_1^2} (2I_{x2}+I_{z4}) + 4I_{z2} \end{bmatrix}$$

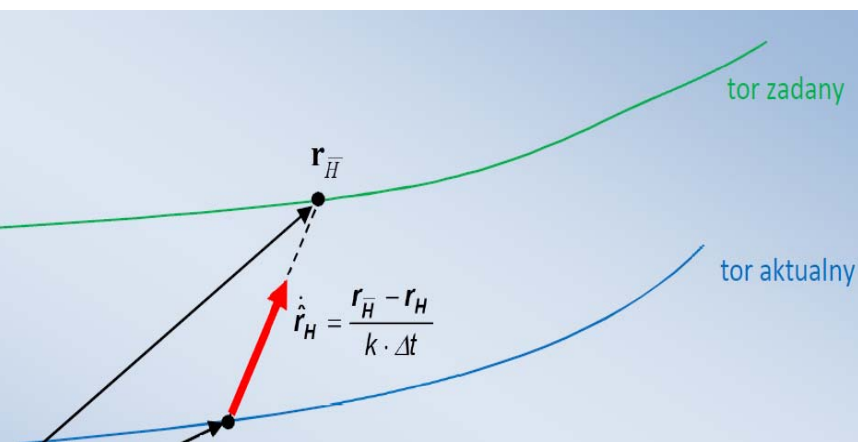
$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} -N_1 f_1 - N_2 f_2 \\ \dots \end{bmatrix} \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_u^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Błędy położenia



1. Określenie błędu położenia punktu H
2. Obliczenie prędkości korygujących dla punktu H

W czasie sterowania w trybie *on-line* przy stałokrokowej metodzie sterowania, w czasie Δt **nie występuje proces generacji sygnału sterującego**. System sterowania platformą jest nieaktywny. W tym czasie platforma mobilna doznaje dewiacji (błędu) od założonych parametrów ruchu. Istnieje potrzeba kompensacji tych odchyłek i wprowadzenia do systemu sterowania **prędkości korygujących**.



$$\dot{\hat{x}}_H = \frac{\bar{x}_H - x_H}{k \cdot \Delta t}$$

$$\dot{\hat{y}}_H = \frac{\bar{y}_H - y_H}{k \cdot \Delta t}$$

Energetyczny wskaźnik jakości

$$J(t) = \frac{1}{2}(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\bar{\mathbf{q}}} - \dot{\hat{\mathbf{q}}})^T \mathbf{Q} \mathbf{M} (\dot{\mathbf{q}} - \dot{\bar{\mathbf{q}}} - \dot{\hat{\mathbf{q}}}) + \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}$$

Optymalny sygnał sterujący – wyznaczany w trybie *on-line*:

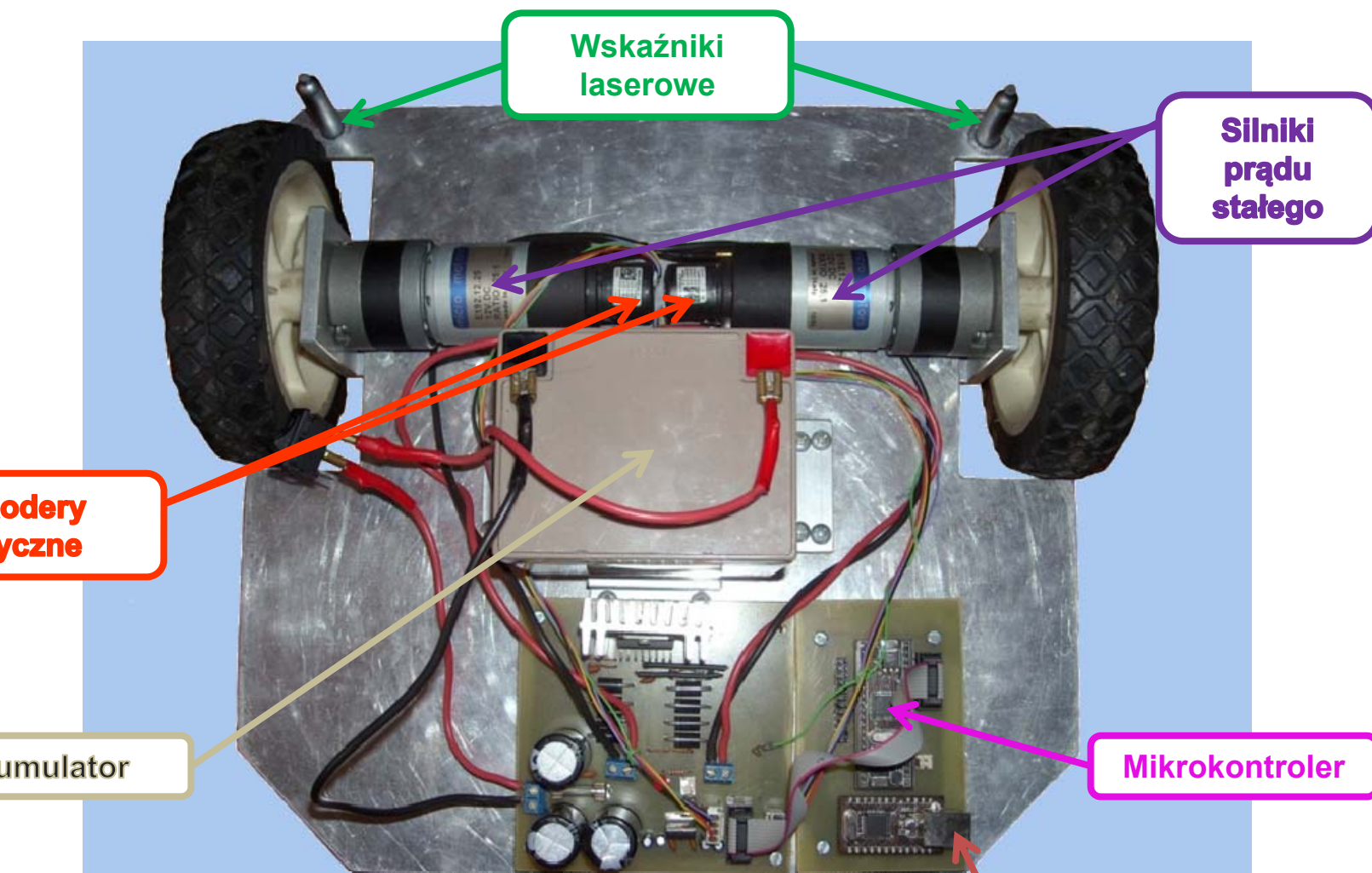
$$\mathbf{u} = -(\mathbf{R} + \mathbf{R}^T)^{-1} \int_t^{t+\Delta t} \mathbf{B}^T(\tau) \mathbf{\Phi}^T(t, \tau) d\tau \cdot \mathbf{T}^T (\mathbf{M}^T \mathbf{Q}^T + \mathbf{Q} \mathbf{M}) (\dot{\mathbf{q}} - \dot{\bar{\mathbf{q}}} - \dot{\hat{\mathbf{q}}})$$

\mathbf{R} - macierz wpływu sygnału sterującego

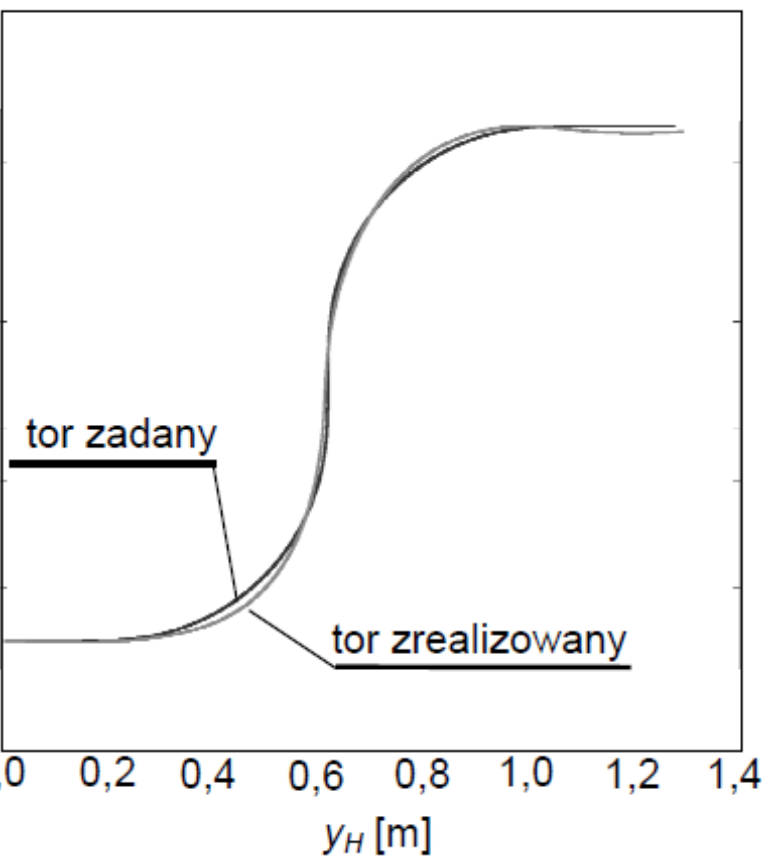
\mathbf{Q} - macierz bezwymiarowych współczynników wagowych

Wektor
prędkości
korygujących

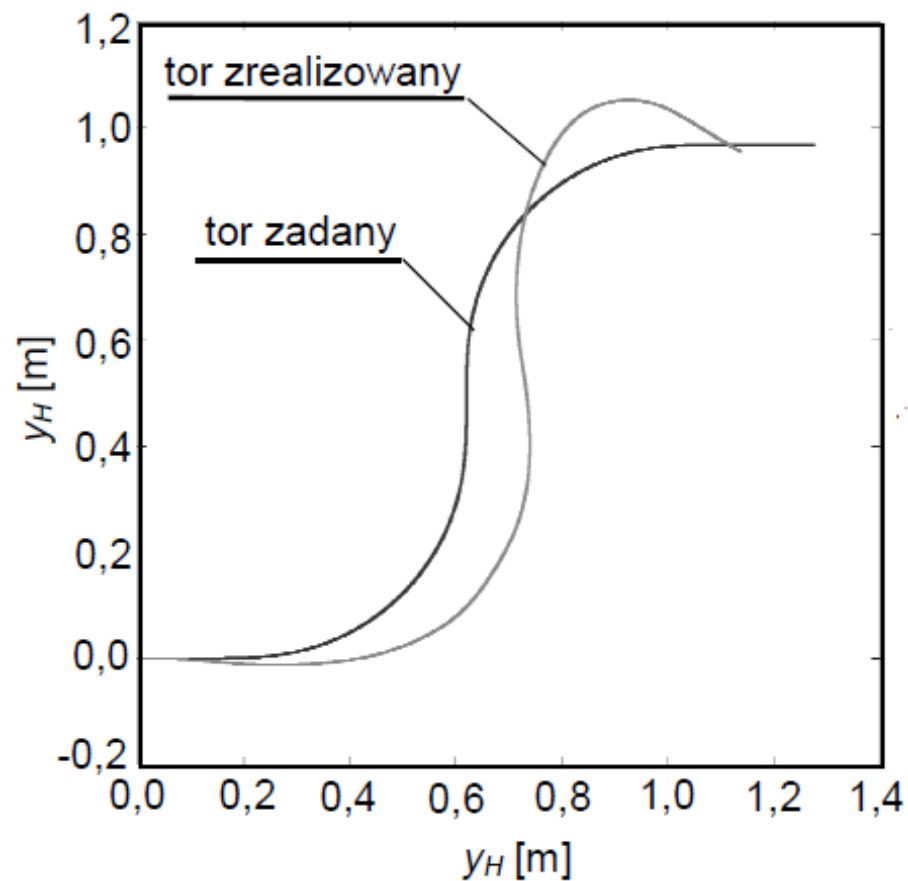
2-kołowa platforma mobilna



Badania doświadczalne toru ruchu platformy

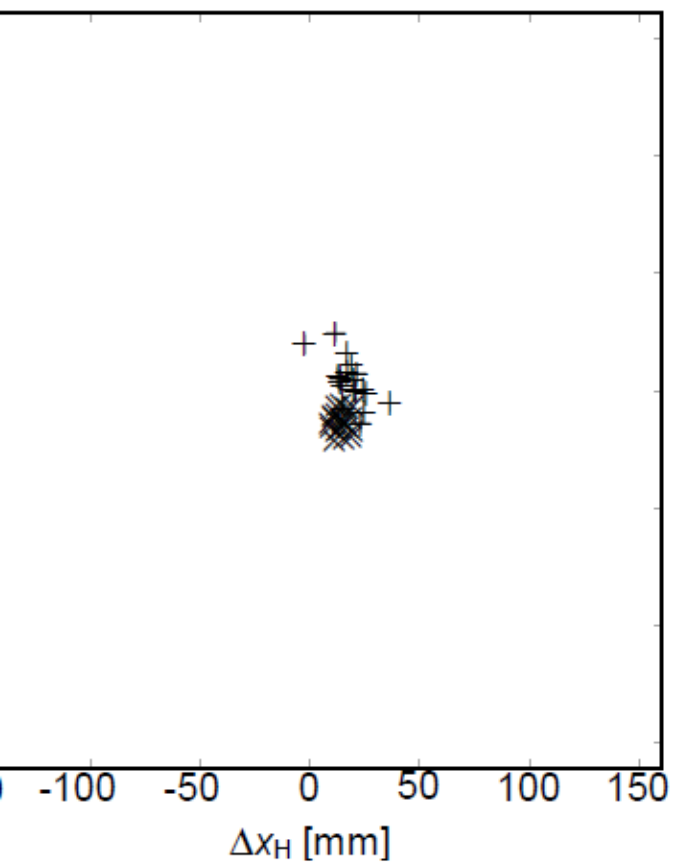


sterowanie optymalne

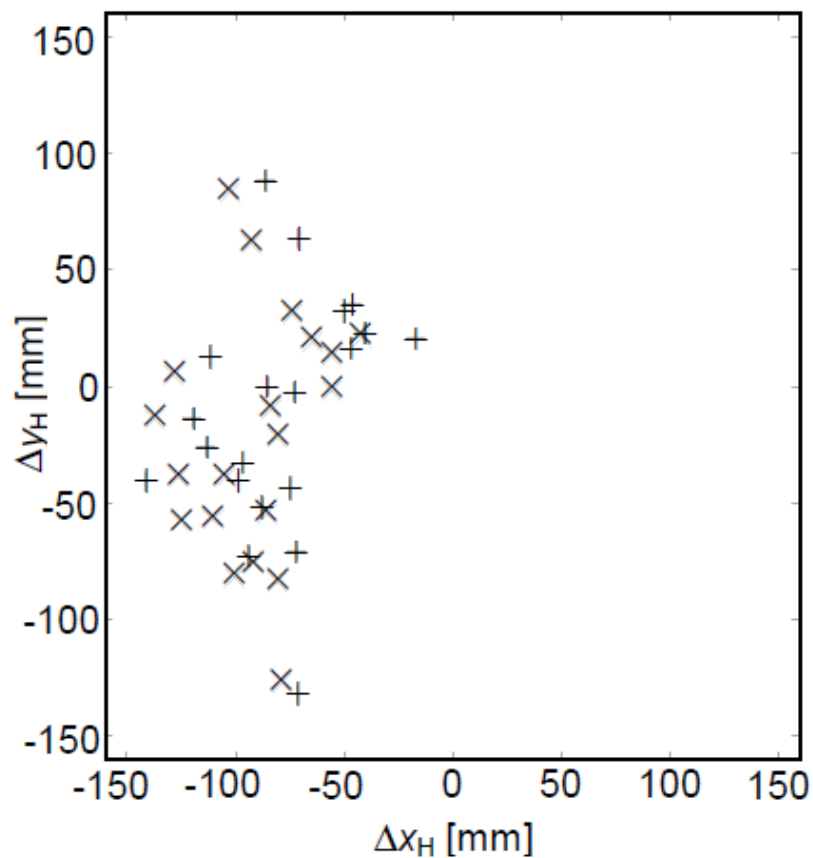


sterowanie z regulatorami PID

Powtarzalność pozycji końcowej punktu H



sterowanie optymalne



sterowanie z regulatorami PID



**Kaliński K. J., Mazur M.: Optimal control of
2-wheeled mobile robot at energy performance
index. Mechanical Systems and Signal
Processing 2016, 70-71, s. 373-386.**

45 JCR

**NADZOROWANIE
PROCESÓW
DYNAMICZNYCH
W UKŁADACH
MECHANICZNYCH**

KRZYSZTOF J. KALIŃSKI



WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Mechanical Systems and Signal Processing 70-71 (2016) 373-386



Optimal control of 2-wheeled mobile robot at energy
performance index



Krzysztof J. Kaliński, Michał Mazur*

Gdańsk University of Technology, Poland

ARTICLE INFO

Article history:
Received 22 January 2015
Received in revised form
12 September 2015
Accepted 26 September 2015
Available online 21 October 2015

Keywords:
Wheeled robots
Nonlinear systems
Dynamics
Motion control

ABSTRACT

The paper presents the application of the optimal control method at the energy performance index towards motion control of the 2-wheeled mobile robot. With the use of the proposed method of control the 2-wheeled mobile robot can realise effectively the desired trajectory. The problem of motion control of mobile robots is usually neglected and thus performance of the realisation of the high level control tasks is limited.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Nowadays mobile robots are essential group of utility robots. Even though utility robots are far less formally considered than industrial robots, they become very important and numerous group of robots. As the utility robots they become useful in domestic, office or even war environments. Mobile robots are also applied in industry. However they usually do not achieve the level of precision and reliability of typical industrial manipulators. Nevertheless they are used with success as efficient means of automatic transportation.

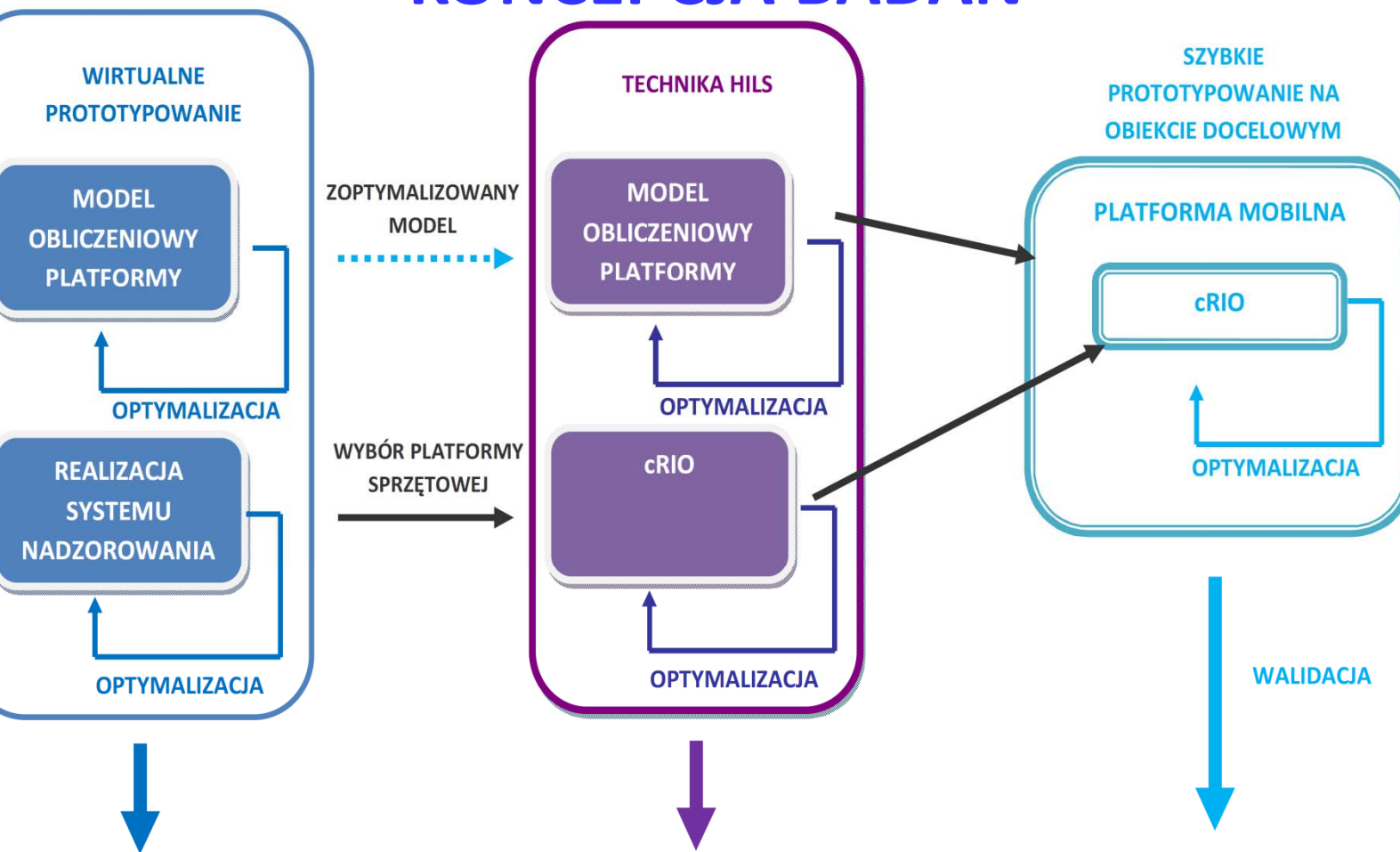
The most effective way of transportation or generally speaking – movement, in most cases is to use wheels. Thus wheeled mobile robots are more popular than others, non-wheeled mobile ones. Let us consider relatively small robots which are moving with relatively small velocities over the flat and even surface. Such robots may be very simple, not expensive, but they are still very useful. For example, they may be used for cleaning floors, entertainment, communication, transportation and inspection. For realisation of more complicated tasks there may be used more complex mobile robots.



PROJEKTOWANIE MECHATRONICZNE TRÓJKOŁOWEJ PLATFORMY MOBILNEJ

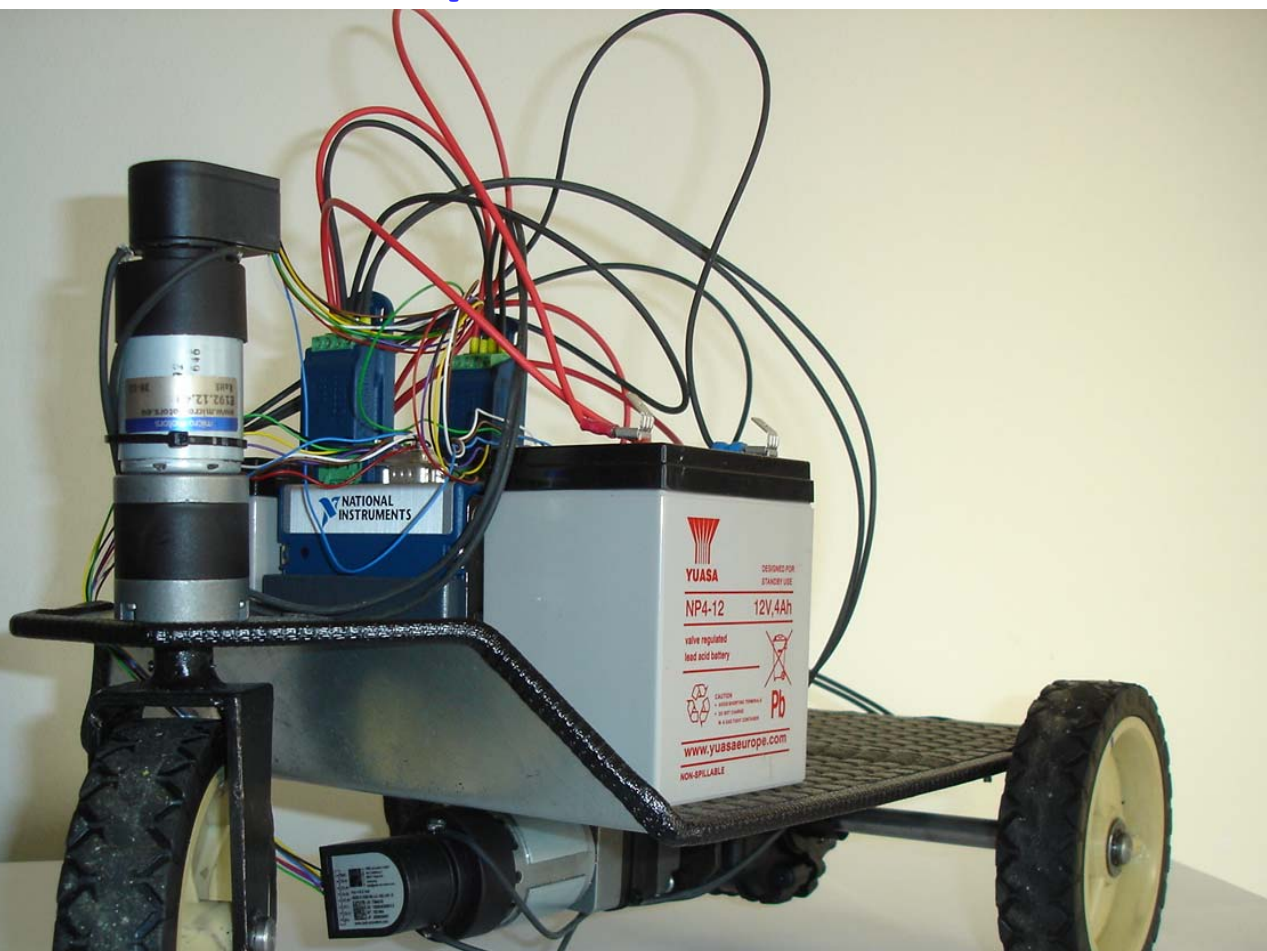


KONCEPCJA BADAŃ





3-kołowa platforma mobilna





**Kaliński K. J., Buchholz C.: Mechatronic
Design of Strongly Nonlinear Systems on a
Basis of Three Wheeled Mobile Platform.
Mechanical Systems and Signal Processing
2015, 52-53, 700-721. 40 JCR**

**Buchholz C.: Techniki projektowania
mechatronicznego systemu nadzorowania
przebiegu trójkątowej platformy mobilnej z
wykorzystaniem energetycznego wskaźnika
niepewności. Rozprawa doktorska. Politechnika
Gdańska, Wydział Mechaniczny 2012.**



Review

Mechatronic design of strongly nonlinear systems on a basis
of three wheeled mobile platform



Krzysztof J. Kaliński¹, Cezary Buchholz^{*}

Gdańsk University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Poland

ARTICLE INFO

Article history
Received 15 April 2014
Received in revised form
5 June 2014
Accepted 10 June 2014
Available online 20 August 2014

Keywords:
Mechatronic design
Mobile platform
Nonlinear systems
Energy performance index
Mechatronic techniques
LabVIEW

ABSTRACT

Remarkable grow in demand both of mobile platform operability performance and reduction of project leading time development encourage to apply modern algorithms and reliable engineering tools for the design process.

The paper discusses the mechatronic design applied for the surveillance system based on the energy performance index algorithm. The exploited mechatronic techniques i.e. virtual prototyping, Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS) and rapid prototyping on target object, supported by the LabVIEW, allowed for integration of the developed control system and strongly nonlinear mobile platform, built simultaneously for the research purposes.

Mathematical complexity of on-line algorithm and sophisticated model description affected all the process design. In order to boost mobile platform performance and handle its real time motion surveillance the authors implemented the Real Time controller.

The presented design approach allowed authors to achieve the highest level of a mobile platform performance and increased probability of the final concept success.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Contents

1. Introduction	701
2. Design approach of real time surveillance system for the platform	702
2.1. Design methodology	702
2.2. Algorithm improvement. Correction velocities	705
2.3. Mobile platform improvement	709
3. Mechatronic approach in the design of three-wheeled mobile platform	713
3.1. Virtual prototyping	713
3.2. Hardware in the loop simulation	715
3.3. Rapid prototyping on target object	717
4. Mechatronic design. Enhanced performance	719
5. Conclusion	720
References	720



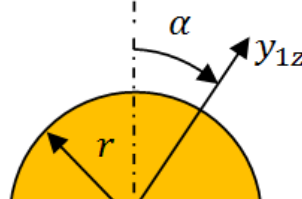
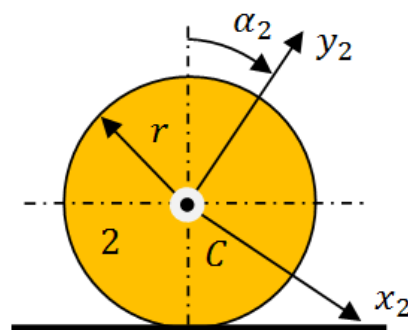
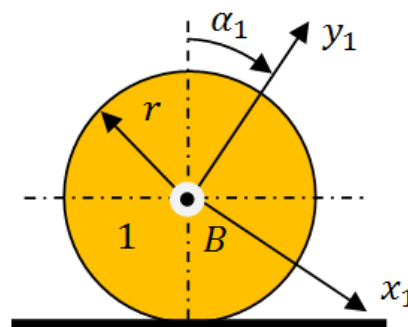
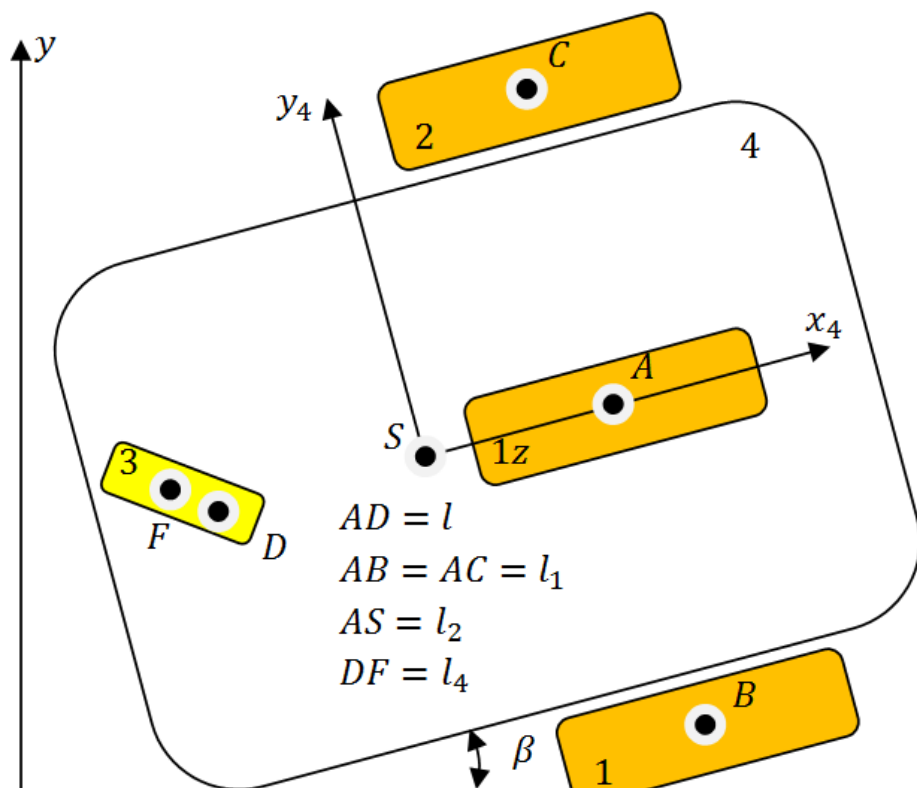
STEROWANIE OPTYMALNE PRZY ENERGETYCZNYM WSKAŹNIKU JAKOŚCI RUCHEM ROBOTÓW MOBILNYCH PODĄŻAJĄCYCH PO TRAJEKTORII TWORZONEJ DYNAMICZNIE

Model deterministyczny

- parametry modelu obliczeniowego są znane
- znane są konfiguracje modelu obliczeniowego
- sterowany system jest ograniczony więzami nieholonomicznymi
- trajektoria ruchu jest **tworzona dynamicznie**



2-kołowy robot mobilny





Dynamika

nia Appella-Gibbsa:

$$\frac{\partial S}{\partial \dot{\mathbf{w}}} = \mathbf{f}(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) + \mathbf{B}_u(t, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\mathbf{u}$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{C}_0^T(\mathbf{q})\mathbf{w} + \mathbf{G}_0(\mathbf{q})$$

$$= S(\mathbf{q}, \mathbf{w}, \dot{\mathbf{w}})$$

funkcja Appella, wyznaczana podobnie jak energia kinetyczna, ale zamiast prędkości uogólnionych uwzględnia się przyspieszenia uogólnione

Energetyczny wskaźnik jakości

Brak
prędkości
korygujących

$$J(t) = \frac{1}{2}(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\bar{\mathbf{q}}})^T \mathbf{Q} \mathbf{M} (\dot{\mathbf{q}} - \dot{\bar{\mathbf{q}}}) + \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}$$

Optymalne sygnały sterujące

wartości dla każdej chwili czasu wyznaczane są w trybie *on-line* :

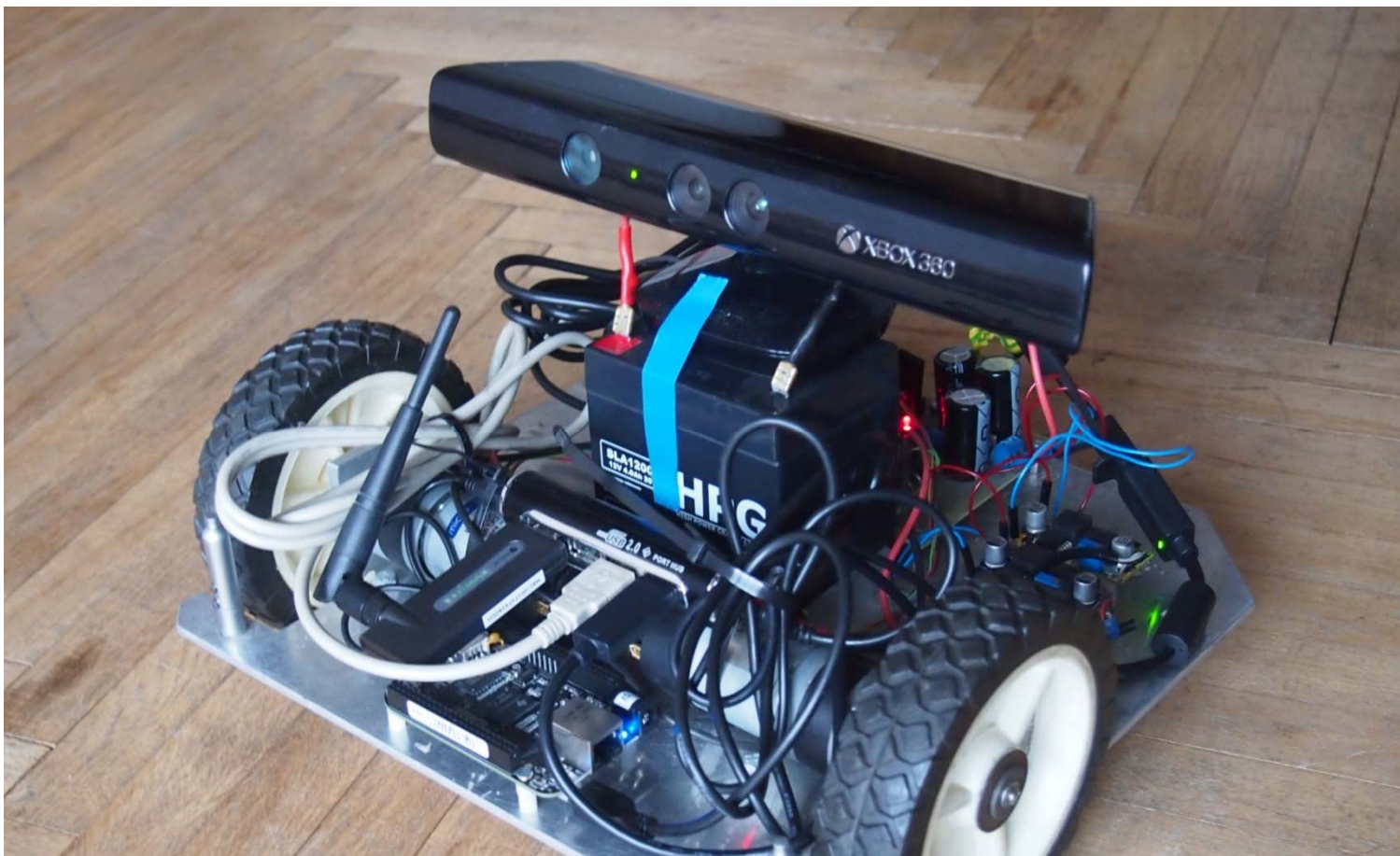
$$\mathbf{u} = -(\mathbf{R} + \mathbf{R}^T)^{-1} \int_t^{t+\Delta t} \mathbf{B}^T(\tau) \Phi^T(t, \tau) d\tau \cdot \mathbf{T}^T (\mathbf{M}^T \mathbf{Q}^T + \mathbf{Q} \mathbf{M}) (\dot{\mathbf{q}} - \dot{\bar{\mathbf{q}}})$$

\mathbf{R} - macierz wpływu sygnałów sterujących

\mathbf{Q} - macierz bezwymiarowych współczynników skalujących

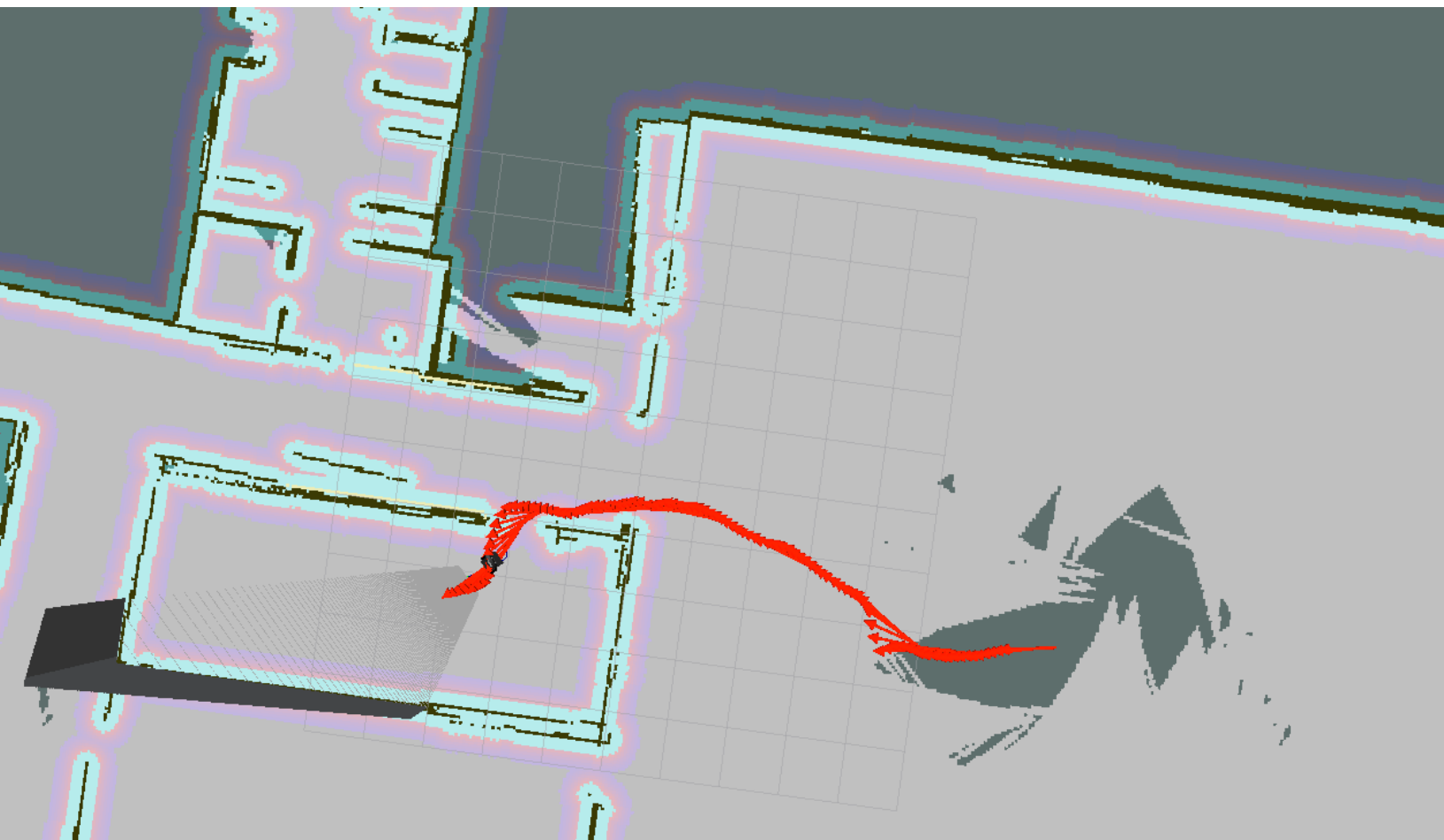


2-kołowy robot mobilny



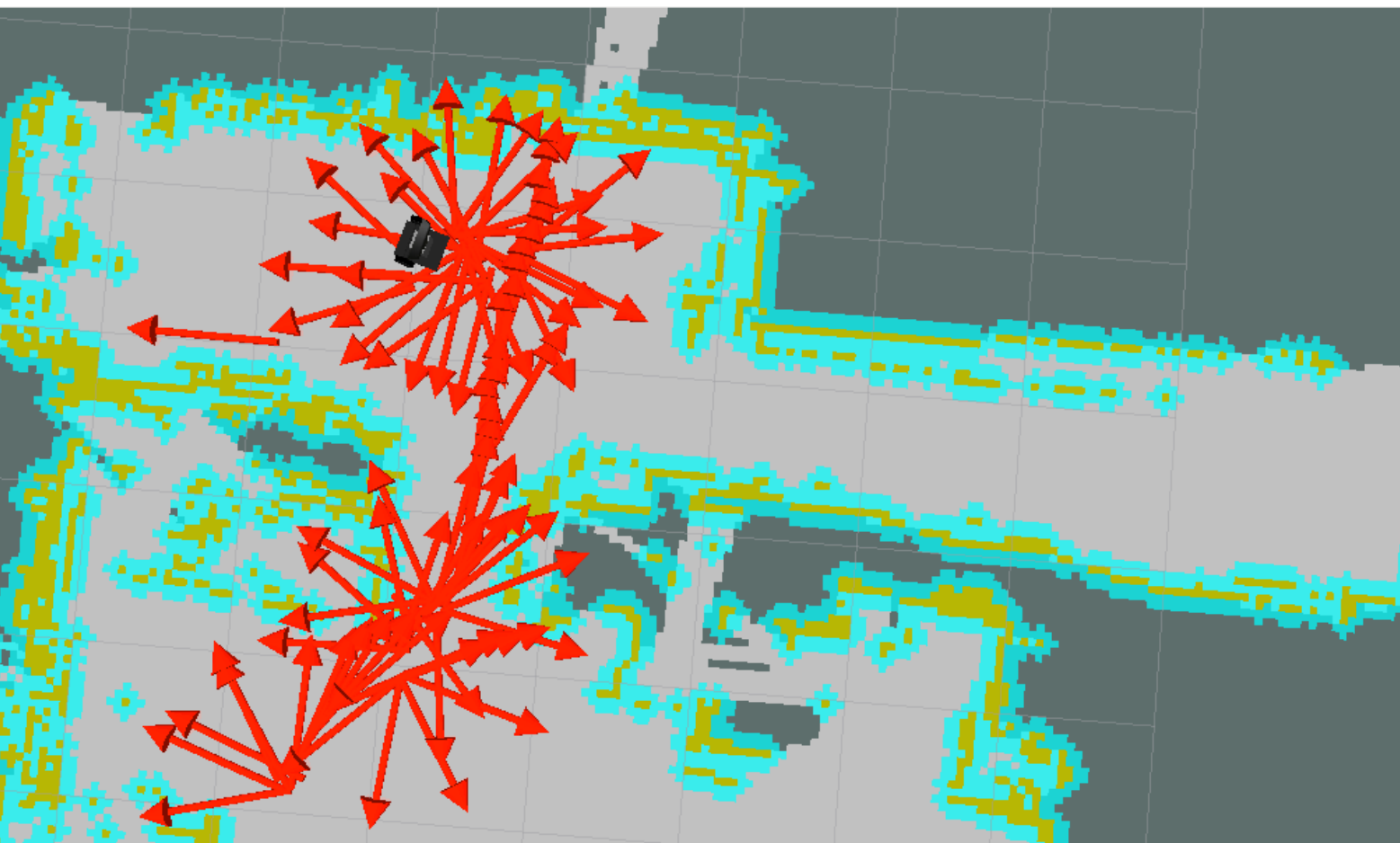


Symulacja - fragment





Eksperyment





Kaliński K. J., Mazur M.: Optimal control of energy performance index of the mobile robots following dynamically created trajectories. Mechatronics 2016, 37, 79-88. 30 JCR



Optimal control at energy performance index of the mobile robots following dynamically created trajectories



Krzysztof J. Kaliński, Michał Mazur*

Gdańsk University of Technology, Poland

ARTICLE INFO

Article history:
Received 22 August 2015
Revised 12 January 2016
Accepted 14 January 2016
Available online 3 February 2016

Keywords:
Wheeled robots
Nonlinear systems
Dynamics
Motion control

ABSTRACT

In practice, the problem of motion control of the wheeled mobile robots is often neglected. Wheeled mobile robots are strongly nonlinear systems and restricted by non-holonomic constraints. Motion control of such systems is not trivial task and usage of non-optimal control signals can lead to deterioration of the overall robot system's performance. In case of autonomous application of the mobile robots all parts of its control system should work perfectly. The paper presents the theory and application of the optimal control method at the energy performance index towards motion control of the two-wheeled mobile robot during the realisation of complex, dynamically created trajectories. With the use of the proposed control method the two-wheeled mobile robot can realise effectively the desired trajectory, which is generated ad-hoc by the navigation system of the robot. Thus the proposed method can be used for motion control of autonomous or semi-autonomous wheeled mobile robots. The presented results of both computer simulations and experiments indicate that the proposed method works effectively from the point of view of the motion control of two-wheeled mobile robot. Movement of the mobile robot appeared reliable and predictable during all the tests.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Nowadays mobile robots can realise their tasks in dynamic environment. In such a case it is usually required a frequent calculation of local trajectory parameters of the mobile platform. The latter would be based on the goal of the global trajectory, but also take into account actual position and orientation of the mobile robot and the presence of obstacles and the other agents. Global trajectory of the robot can only be based on known, static map. It cannot take into account dynamic changes in the robot environment, movement of other agents and eventually robot's movement errors. Omission of the above circumstances could lead to unexpected collisions. Local path planner is usually responsible for correcting eventual position and orientation errors by generating forward courses of appropriate velocities of the mobile robot. In case of wheeled robots restricted by the non-holonomic constraints it could be linear and angular velocity of the mobile robot. Realisation of those velocities commands is done by motion controller. Thus typically complicated task of following the desired path at known velocity becomes simplified by following only the desired velocity courses. Position and orientation errors may be slightly

greater than in classical approach for the motion control of the path. However robots' reactions to changes in the environment could be faster. Correction of the position and orientation errors of the mobile robot is realised by local path planner, instead of motion controller.

Performance of the mobile robots strongly depends on its ability to follow accurately the given trajectory. However motion control (sometimes called *low level control*) is a problem being often neglected. In case of mobile robots bounded with non-holonomic constraints, the controlled system is strongly nonlinear. Thus, commonly used methods based mainly on the PID controllers are not effective [1,2]. Their usage may lead to sluggish reactions of the mobile robot to the velocity commands. In the other case, the overly high, non-optimal driving torques may lead to slippages at the same settings of the PID controllers. The latter are strongly unwanted, because they consequently lead to deterioration of the mobile robot's performance.

Global position and orientation of the mobile robot could be only estimated by direct measurements, but it is usually impossible to achieve sufficient resolution and time of direct measurements for typical mobile robots applications. Thus, local measurements based on indirect methods are used to achieve the desired accuracy and time resolution, but they could be sensitive to the slippages of the robots wheels. The latter could be partially caused

* Corresponding author. Tel.: +48 607572510.
E-mail addresses: kkalinski@p.z.p.gd.pl (K.J. Kaliński), mazur.ms@gmail.com



Katedra Mechaniki i Mechatroniki
Zespół Mechatroniki



PROJEKTY BADAWCZE I ROZWOJOWE



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

TANGO1/266350/NCBR/2015



***„Zastosowanie wybranych rozwiązań
mechatronicznych do nadzorowania procesu
skrawania przedmiotów wielkogabarytowych
na wielosiowych centrach obróbkowych”
2015-2018***



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Techniki projektowania mechatronicznego



**Uzasadnienie: podstawowa mapa optymalnych
prędkości obrotowych
wymaga modyfikacji**

1. Wirtualne Prototypowanie (WP)

**2. Wirtualne Prototypowanie Wspomagane
Eksperymentem (WPWE)**

3. Realizacja w systemie docelowym (RSD)



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Przykłady systemów docelowych



in Obróbki Elementów Wielkogabarytowych (**COEW**), P.H.S. HYDROTOR S.A.:





**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Podpisanie porozumienia z PHS HYDROTOR S.A.





ROZWÓJ KADRY NAUKOWEJ



Prace doktorskie

Imię i nazwisko doktoranta	Tytuł pracy doktorskiej	Data otwarcia przewodu oraz nadania stopnia doktora
Marek Adam ALEWSKI	Nadzorowanie drgań podczas frezowania szybkościowego smukłymi narzędziami z wykorzystaniem zmiennej prędkości obrotowej wrzeciona. Praca wyróżniona.	Otwarcie przewodu: 16/02/2005. Data nadania stopnia doktora: 24/10/2007.
Krzysztof ASIŃSKI	Nadzorowanie drgań układów nośnych robotów przemysłowych z zastosowaniem sterowania optymalnego przy energetycznym wskaźniku jakości.	Otwarcie przewodu: 20/04/2005. Data nadania stopnia doktora: 19/11/2008.
Michał Roman MAZUR	Nadzorowanie ruchu 2-kołowej platformy mobilnej z zastosowaniem sterowania optymalnego przy energetycznym wskaźniku jakości.	Otwarcie przewodu: 20/12/2006. Data nadania stopnia doktora: 23/06/2010.
Marek HODNICKI	Nadzorowanie drgań podczas frezowania przedmiotów podatnych z wykorzystaniem aktywnego sterowania optymalnego.	Otwarcie przewodu: 23/04/2008. Data nadania stopnia doktora: 14/12/2011.



Habilitacje

Imię i nazwisko habilitanta	Temat osiągnięcia naukowego	Data nadania stopnia doktora habilitowanego
Marek Adam GALEWSKI	Rozwiązania mechatroniczne w nadzorowaniu drgań w procesie frezowania smukłymi narzędziami	05/07/2016

Tytuły naukowe

Imię i nazwisko	Rodzaj tytułu naukowego	Data nadania tytułu naukowego
Krzysztof Jan	Profesor nauk technicznych	12/11/2013



MIĘDZYNARODOWA WSPÓŁPRACA NAUKOWA



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

The ICM Conference



International Conference

MECHATRONICS

Ideas for Industrial Applications

MAY 11-13, 2015 – GDAŃSK, POLAND



organising committee



International Conference
MECHATRONICS
Ideas for Industrial Applications



GDAŃSK UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING



Gdansk
May 11-13, 2015

Advances in Intelligent Systems and Computing 414

Jan Awrejcewicz
Krzysztof J. Kaliński
Roman Szewczyk
Małgorzata Kaliczyńska *Editors*

**Mechatronics:
Ideas,
Challenges,
Solutions and
Applications**

37
Mechatronics Vol. 37 (2016) 1-112



Volume 37 • August 2016 ISSN 0957-4158

30 JCR

Mechatronics
The Science of Intelligent Machines

Contains Special Issue:
Theoretical and Applied Aspects of Modern Mechatronics
Guest Edited by Jan Awrejcewicz and Krzysztof Kaliński

**Guest editor:
Krzysztof J. Kaliński**



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Wydział Mechaniczny

ROZWIĄZANIA MECHATRONICZNE W ZASTOSOWANIU

NADZOROWANIA WYBRANYCH PROCESÓW DYNAMICZNYCH

Prof. Krzysztof J. Kaliński
Katedra Mechaniki i Mechatroniki
Zespół Mechatroniki