
Kaskadowe sterowanie przegubowym robotem mobilnym w systemie RMP-SW*

Maciej Michalek¹, Marcin Kielczewski¹, Tomasz Jedwabny¹

Streszczenie

Artykuł poświęcony jest problemowi sterowania przegubowym robotem mobilnym składającym się z dwukołowego ciągnika wyposażonego w pozaosiowo mocowane pasywne przyczepy. Zaproponowany w pracy kaskadowy układ sterowania wykorzystuje specyficzne własności kinematyki robota przegubowego, a przede wszystkim równania propagacji prędkości wzdłuż łańcucha pojazdu. Pętlę nadrzędną stanowi sterownik VFO zastosowany do segmentu ostatniej przyczepy, natomiast pętla podrzędna pozwala na przeliczanie żądanych prędkości przyczepy wzdłuż łańcucha pojazdu w funkcji aktualnych kątów przegubowych. Praca zawiera wyniki eksperymentów weryfikujących jakość sterowania dla zadań śledzenia trajektorii i stabilizacji w punkcie w strategii ruchu tyłem w systemie RMP-SW z trójprzyczepowym robotem RMP i wizyjnym sprzężeniem zwrotnym.

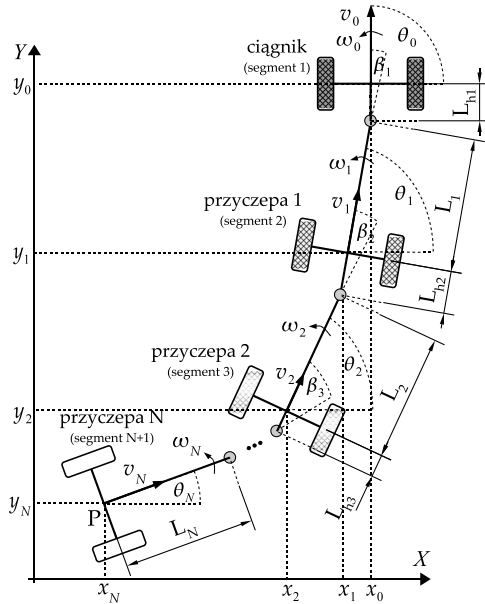
1. WPROWADZENIE

Pod pojęciem przegubowych robotów mobilnych będziemy rozumieć autonomiczne pojazdy składające się z aktywnego (napędzanego) ciągnika oraz jednoosiowych przyczep mocowanych w łańcuch kinematyczny za pomocą pasywnych przegubów obrotowych. W zależności od sposobu łączenia przyczep (osiowe lub pozaosiowe) wyróżnia się w literaturze trzy rodzaje przegubowych pojazdów N-przyczepowych: standardowy pojazd N-przyczepowy (SNT – ang. *Standard N-Trailer*) wyłącznie z mocowaniem osiowym [4, 3], niestandardowy pojazd N-przyczepowy (nSNT – ang. *non-Standard N-Trailer*) wyłącznie w mocowaniu pozaosiowym [2] oraz ogólny pojazd N-przyczepowy (GNT – ang. *General N-Trailer*), w którym występują kombinacje mocowań osiowych i pozaosiowych [5, 1]. Zagadnienie sterowania robotami N-przyczepowymi należy do zadań trudnych ze względu na cechy kinematyki tych pojazdów takie, jak silna nieliniowość modelu, niedosterowanie (ang. *underactuation*) w obecności więzów nieholonomicznych, niestabilność dynamiki konfiguracji przegubów podczas ruchu tyłem oraz nieminimalnofazowość dynamiki kątów przegubowych podczas jazdy przodem. Wydaje się, iż automatyzacja ruchu takich pojazdów jest zagadnieniem nie tylko interesującym, ale także praktycznie uzasadnionym.

Artykuł przedstawia propozycję rozwiązania zagadnienia sterowania robotem przegubowym typu nSNT dla problemów śledzenia trajektorii oraz stabilizacji w punkcie referencyjnym w strategii ruchu tyłem (problem cofania z przyczepami). Pra-

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy nr N N514 087038.

¹Katedra Sterowania i Inżynierii Systemów, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, {maciej.michalek/marcin.kielczewski/tomasz.jedwabny}@put.poznan.pl



Rys. 1. Struktura kinematyczna robota N-przyczepowego w układzie globalnym $\{X, Y\}$

ca zawiera wyprowadzenie kaskadowej postaci kinematyki robota N-przyczepowego, w którym poszczególne segmenty pojazdu traktowane są jako monocykle połączone wzajemnie układem pasywnych przegubów. Metoda sterowania zaproponowana dalej wynika z kaskadowej natury modelu pojazdu nSNT i korzysta z równań propagacji prędkości wzdłuż łańcucha kinematycznego. Takie podejście pozwala na konstrukcję kaskadowego układu sterowania, w którym wyróżnia się blok sterownika ostatniej przyczepy (SOP) oraz blok transformacji zadanych prędkości ostatniej przyczepy wzdłuż łańcucha kinematycznego pojazdu. Działanie bloku SOP będzie wynikać z zastosowania metody VFO pozwalającej na realizację zarówno zadania śledzenia jak i stabilizacji [6]. Zasadniczą część pracy stanowi prezentacja stanowiska doświadczalnego RMP-SW oraz wyników eksperymentalnej weryfikacji jakości proponowanego sterowania z wykorzystaniem robota przegubowego wyposażonego w trzy przyczepy i wizyjne sprzężenie zwrotne.

2. KINEMATYKA ROBOTA N-PRZYCZEPOWEGO

Rys. 1 przedstawia szkielet kinematyczny przegubowego robota N-przyczepowego. Pierwszym (aktywnym) segmentem pojazdu – numerowanym indeksem zerowym – jest ciągnik z napędem różnicowym i wejściem sterującym $\mathbf{u}_0 = [\omega_0 \ v_0]^T \in \mathbb{R}^2$. Segmenty o numerach od 1 do N to przyczepy o długościach $L_i > 0$ połączone za pomocą pasywnych przegubów. Zakładamy, że każda przyczepa jest mocowana pozaośiowo co oznacza, że odsunięcia przegubów $L_{hi} \neq 0$ dla wszystkich $i = 1, \dots, N$. Na ostatnim segmencie robota zdefiniowano tzw. *punkt prowadzenia pojazdu* P o współrzędnych (x_N, y_N) . Punkt ten spełnia kluczową rolę z punktu widzenia definicji

i realizacji zadań ruchu robota. Konfigurację robota N-przyczepowego można jednoznacznie określić za pomocą wektora $\mathbf{q} = [\boldsymbol{\beta}^T \bar{\mathbf{q}}_N^T]^T = [\beta_1 \dots \beta_N \theta_N x_N y_N]^T$, gdzie $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1 \dots \beta_N]^T \in \mathbb{R}^N$ jest wektorem kątów przegubowych, a $\bar{\mathbf{q}}_N = [\theta_N x_N y_N]^T \in \mathbb{R}^3$ jest konfiguracją (orientacją i pozycją) ostatniej przyczepy. Zgodnie z oznaczeniami z rys. 1 model kinematyki robota przegubowego można przedstawić jako kaskadowe połączenie modeli monocykli

$$\bar{\mathbf{q}}_i = \mathbf{G}_i(\bar{\mathbf{q}}_i)\mathbf{u}_i, \quad \bar{\mathbf{q}}_i = \begin{bmatrix} \theta_i \\ x_i \\ y_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_i(\bar{\mathbf{q}}_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos \theta_i \\ 0 & \sin \theta_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} \omega_i \\ v_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

z wirtualnym wejściem sterującym \mathbf{u}_i , gdzie ω_i oraz v_i są odpowiednio prędkością katową segmentu i -tego oraz prędkością postępową środka osi kół tego segmentu. Orientacja θ_i segmentu i -tego wynika z równania kąta przegubu:

$$\beta_i = \theta_{i-1} - \theta_i. \quad (2)$$

Relacje między prędkościami sąsiadujących segmentów pojazdu wynikają z następujących jednoznacznych odwzorowań:

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{J}_i(\beta_i)\mathbf{u}_{i-1} \quad \text{oraz} \quad \mathbf{u}_{i-1} = \mathbf{J}_i^{-1}(\beta_i)\mathbf{u}_i, \quad (3)$$

gdzie

$$\mathbf{J}_i(\beta_i) = \begin{bmatrix} -\frac{L_{hi}}{L_i} c\beta_i & \frac{1}{L_i} s\beta_i \\ L_{hi} s\beta_i & c\beta_i \end{bmatrix} \quad \text{oraz} \quad \mathbf{J}_i^{-1}(\beta_i) = \begin{bmatrix} -\frac{L_i}{L_{hi}} c\beta_i & \frac{1}{L_{hi}} s\beta_i \\ L_i s\beta_i & c\beta_i \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Zwróćmy uwagę, że macierz $\mathbf{J}_i^{-1}(\beta_i)$ jest dobrze określona, gdy tylko $L_{hi} \neq 0$. Stosując zależności (3) możemy wyrazić prędkości dowolnego segmentu robota w funkcji prędkości ciągnika \mathbf{u}_0 lub w funkcji prędkości ostatniej przyczepy \mathbf{u}_N :

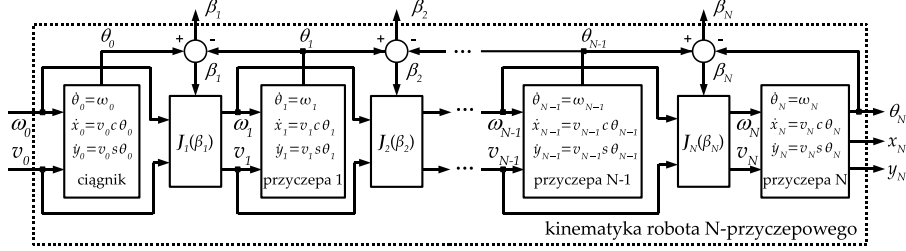
$$\mathbf{u}_i = \prod_{j=i}^1 \mathbf{J}_j(\beta_j)\mathbf{u}_0, \quad \mathbf{u}_{i-1} = \prod_{j=i}^N \mathbf{J}_j^{-1}(\beta_j)\mathbf{u}_N, \quad i = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Formuły (5) reprezentują równania propagacji prędkości wzdłuż łańcucha kinematycznego pojazdu odpowiednio w tył (od ciągnika w kierunku ostatniego segmentu) i w przód (od ostatniej przyczepy w kierunku ciągnika). Równania (1)-(4) definiują kinematykę robota N-przyczepowego w postaci kaskadowej zilustrowaną schematem blokowym na rys. 2.

3. ZASADA STEROWANIA POJAZDEM

3.1. Definicja zadania sterowania

Rozważać będziemy dwa alternatywne zadania ruchu: śledzenie trajektorii oraz sterowanie do punktu (dalej nazywane także *stabilizacją*). Zadanie ruchu będzie zdefiniowane dla wyróżnionego segmentu pojazdu tj. dla ostatniej przyczepy, której konfiguracja jest reprezentowana wektorem $\bar{\mathbf{q}}_N = [\theta_N x_N y_N]^T$. Zakładamy, że w każdej chwili



Rys. 2. Schemat kaskadowej postaci modelu kinematyki robota N-przyczepowego

dla ostatniej przyczepy określono referencyjną konfigurację $\bar{\mathbf{q}}_{Nt}$, która w przypadku zadania stabilizacji jest punktem stałym $\bar{\mathbf{q}}_{Nt} = \text{const}$, natomiast w przypadku zadania śledzenia jest funkcją czasu $\bar{\mathbf{q}}_{Nt}(\tau)$ klasy (przynajmniej) C^2 spełniającą równanie monocykla (1) (trajektoria dopuszczalna) taką, że $\forall \tau \geq 0 \dot{x}_{Nt}^2(\tau) + \dot{y}_{Nt}^2(\tau) \neq 0$ (trajektoria ustawicznie pobudzająca, [6]). Zdefiniujmy błąd sterowania dla ostatniej przyczepy

$$\bar{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} e_\theta \\ e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\theta \\ \bar{\mathbf{e}}^* \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \mathcal{F}(\theta_{Nt} - \theta_N) \\ x_{Nt} - x_N \\ y_{Nt} - y_N \end{bmatrix} \in [-\pi, \pi) \times \mathbb{R}^2, \quad (6)$$

gdzie $\mathcal{F} : \mathbb{R} \mapsto [-\pi, \pi)$ odwzorowuje błąd kąta orientacji na przedział $[-\pi, \pi)$. Zadaniem sterowania jest zaproponowanie takiej reguły sterowania $\mathbf{u}_0 = \mathbf{u}_0(\bar{\mathbf{e}}, \cdot)$ dla segmentu ciągnika, która zapewni zbieżność błędu (6) w takim sensie, że

$$\lim_{\tau \rightarrow T} \|\bar{\mathbf{e}}(\tau)\| \leq \delta, \quad (7)$$

przy czym $\delta \geq 0$ determinuje założoną precyzję sterowania, a $T \in (0, \infty)$ jest horyzontem zbieżności. W dalszej części przedstawiony zostanie algorytm kaskadowy pozwalający na rozwiązanie tak postawionego zadania.

3.2. Algorytm sterowania kaskadowego

Kaskadowa struktura modelu kinematyki robota N-przyczepowego wraz z formułami propagacji prędkości (5) sugeruje następującą metodykę postępowania projektowego. Na podstawie (5) możemy w każdej chwili wyrazić żądane prędkości ciągnika \mathbf{u}_{0c} w funkcji aktualnie żądanych prędkości ostatniego segmentu \mathbf{u}_{Nc} jak następuje:

$$\mathbf{u}_{0c} = \prod_{j=1}^N \mathbf{J}_j^{-1}(\beta_j) \mathbf{u}_{Nc}. \quad (8)$$

Załóżmy chwilowo, że dana jest funkcja sterująca $\Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot)$, która zastosowana do modelu monocykla gwarantuje spełnienie relacji (7) dla zadania śledzenia i stabilizacji. Skoro ostatnią przyczepę możemy potraktować jako monocykl z wejściem sterującym $\mathbf{u}_N = [\omega_N \ v_N]^T$, to możemy w konsekwencji przyjąć postulat, na podstawie którego chcemy, aby $\mathbf{u}_N \equiv \Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot)$. Realizacja postulatu zagwarantuje rozwiązanie zadania sterowania postawionego w rozdziale 3.1. Przyjmijmy zatem żądane prędkości ostatniej

przyczepy $\mathbf{u}_{Nc} := \Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot)$, a w konsekwencji wzoru (8) otrzymamy regułę sterowania dla segmentu ciągnika postaci:

$$\mathbf{u}_{0c}(\bar{\mathbf{e}}, \cdot) \triangleq \prod_{j=1}^N \mathbf{J}_j^{-1}(\beta_j) \Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot). \quad (9)$$

Powyższe równanie stanowi ogólną definicję reguły sterowania kaskadowego. W definicji tej funkcja $\Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot)$ reprezentuje zewnętrzną pętlę sterującą dedykowaną ostatniemu segmentowi pojazdu, natomiast transformacja $\prod_{j=1}^N \mathbf{J}_j^{-1}(\beta_j)$ stanowi pętlę wewnętrzną reprezentującą propagację żądanych chwilowych prędkości ostatniej przyczepy wzdłuż łańcucha pojazdu aż do segmentu ciągnika. Fizyczna realizacja prędkości \mathbf{u}_{0c} przez ciągnik pozwala zapisać $\mathbf{u}_0 \equiv \mathbf{u}_{0c}(\bar{\mathbf{e}}, \cdot)$ i tym samym:

$$\mathbf{u}_N \stackrel{(5)}{=} \prod_{j=N}^1 \mathbf{J}_j(\beta_j) \mathbf{u}_{0c}(\bar{\mathbf{e}}, \cdot) \stackrel{(9)}{=} \prod_{j=N}^1 \mathbf{J}_j(\beta_j) \prod_{j=1}^N \mathbf{J}_j^{-1}(\beta_j) \Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot) \equiv \Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot). \quad (10)$$

Zatem reguła sterowania (9) zapewnia wymuszenie funkcji sterującej $\Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot)$ na (wirtualnym) wejściu \mathbf{u}_N ostatniej przyczepy.

W tym momencie należy określić postać funkcji sterującej $\Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot)$. Funkcję $\Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot)$ zdefiniujemy w formie sterownika VFO, którego szczegółowe wyprowadzenie i analizę można znaleźć w pracy [6]. Sterownik VFO w wersji oryginalnej zastosowany do modelu monocykla spełnia zależność (7), przy czym dla zadania śledzenia $\delta = 0$ oraz $T = \infty$, natomiast dla zadania stabilizacji $\delta > 0$ a horyzont T jest skończony. Ogólną postać sterowania VFO wyraża następujące równanie:

$$\Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot) = \begin{bmatrix} \phi_\omega(\bar{\mathbf{e}}, \cdot) \\ \phi_v(\bar{\mathbf{e}}, \cdot) \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} k_a e_a + \dot{\theta}_a \\ h_x \cos \theta_N + h_y \sin \theta_N \end{bmatrix}, \quad (11)$$

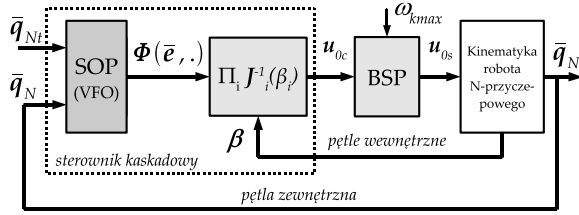
przy czym dla zadania stabilizacji definicja (11) jest słuszna dla $\|\bar{\mathbf{e}}^*\| > \delta$, natomiast dla $\|\bar{\mathbf{e}}^*\| \leq \delta$ przyjmujemy $\Phi(\bar{\mathbf{e}}, \cdot) := \mathbf{0}$. Poszczególne elementy ze wzoru (11) zdefiniowano jak następuje:

$$h_x \triangleq k_p e_x + v_x, \quad h_y \triangleq k_p e_y + v_y, \quad e_a \triangleq \theta_a - \theta_N, \quad (12)$$

$$\theta_a \triangleq \text{Atan2c}(\sigma \cdot h_y, \sigma \cdot h_x), \quad \dot{\theta}_a = (\dot{h}_y h_x - h_y \dot{h}_x) / (h_x^2 + h_y^2). \quad (13)$$

Współczynniki $k_a, k_p > 0$ są parametrami projektowymi sterownika, a dwuwartościowa zmienna *decyzyjna* $\sigma \in \{-1, +1\}$ decyduje o wyborze strategii ruchu: ruch przodem ($\sigma = +1$) lub ruch tyłem ($\sigma = -1$). Od tej pory przyjmujemy $\sigma := -1$, ponieważ interesuje nas problem *cofania* pojazdem przegubowym. Struktura równań (11)-(13) jest uniwersalna dla zadań śledzenia i stabilizacji. Zasadniczą różnicą, którą trzeba uwzględnić przy wyborze zadania jest sposób definiowania elementów sprzężenia wyprzedzającego v_x i v_y . I tak, dla zadania śledzenia $v_x \triangleq \dot{x}_{Nt}(\tau)$, $v_y \triangleq \dot{y}_{Nt}(\tau)$, a dla zadania stabilizacji $v_x \triangleq -\eta \sigma \|\bar{\mathbf{e}}^*\| \cos \theta_{Nt}$, $v_y \triangleq -\eta \sigma \|\bar{\mathbf{e}}^*\| \sin \theta_{Nt}$, przy czym $\eta \in (0, k_p)$ jest dodatkowym parametrem projektowym odpowiedzialnym za tzw. *efekt naprowadzania* przyczepy w otoczeniu pozycji referencyjnej [6].

Połączenie definicji (9) i (11) daje pełną postać *nominalnego* kaskadowego sterownika robota N-przyczepowego typu nSNT, którego schemat blokowy przedstawia rys. 3. Pojęcie *nominalny* odnosi się tutaj do faktu, iż sterownik (9)-(11) nie



Rys. 3. Schemat blokowy kaskadowego układu sterowania robotem przegubowym (SOP – sterownik ostatniej przyczepy; BSP – blok skalowania prędkości)

uwzględnia jeszcze praktycznych ograniczeń sygnałów sterujących wynikających z maksymalnej dopuszczalnej prędkości silników napędowych kół ciągnika. W kolejnym punkcie przedstawiono algorytm skalowania prędkości zapewniający spełnienie ograniczeń prędkościowych związanych z napędami robota.

3.3. Blok skalowania prędkości (BSP)

Niech $\omega_{kmax} > 0$ oznacza maksymalną dopuszczalną wartość prędkości kątowej kół ciągnika o napędzie różnicowym. Oznaczając przez r i b odpowiednio promień koła oraz rozstaw kół ciągnika nominalne żądane prędkości kół $\omega_{0c} = [\omega_{0Pc} \ \omega_{0Lc}]^T$ można wyznaczyć ze znanej zależności

$$\omega_{0c} = \begin{bmatrix} \omega_{0Pc} \\ \omega_{0Lc} \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{u}_{0c}(\bar{\mathbf{e}}, \cdot), \quad \text{gdzie} \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} r/b & -r/b \\ r/2 & r/2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Aby zagwarantować, że w każdej chwili żądane prędkości kół nie przekroczą wartości $\pm \omega_{kmax}$ proponuje się następujący algorytm skalowania prędkości:

$$\mathbf{u}_{0s}(\bar{\mathbf{e}}, \cdot) \triangleq \frac{1}{s} \mathbf{u}_{0c}(\bar{\mathbf{e}}, \cdot), \quad \text{gdzie} \quad s \triangleq \max \left\{ 1; \frac{|\omega_{0Pc}|}{\omega_{kmax}}, \frac{|\omega_{0Lc}|}{\omega_{kmax}} \right\}. \quad (15)$$

Algorytm (15) skaluje normę wektora sterowania, ale nie zmienia jego kierunku i tym samym pozwala na zachowanie chwilowej żądanej krzywizny ruchu ciągnika: $\omega_{0s}(\tau)/v_{0s}(\tau) = \omega_{0c}(\tau)/v_{0c}(\tau)$ [6, 2]. Sposób wykorzystania algorytmu (15) w strukturze sterowania robota przedstawiono na rys. 3 w postaci bloku BSP.

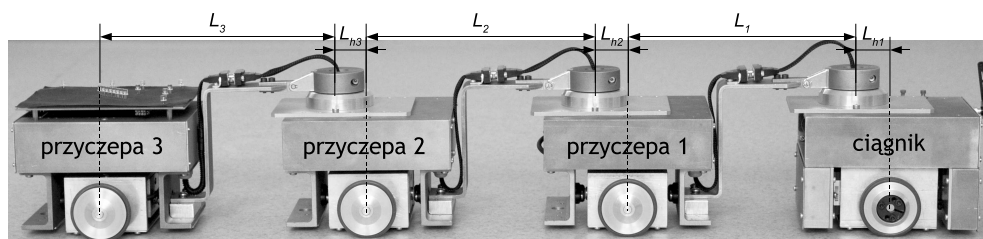
4. EKSPERYMENTY

Zaproponowany sterownik kaskadowy poddano weryfikacji na stanowisku doświadczalnym RMP-SW zaprojektowanym i wykonanym przez autorów w Katedrze Sterowania i Inżynierii Systemów Politechniki Poznańskiej.

4.1. Opis stanowiska doświadczalnego RMP-SW

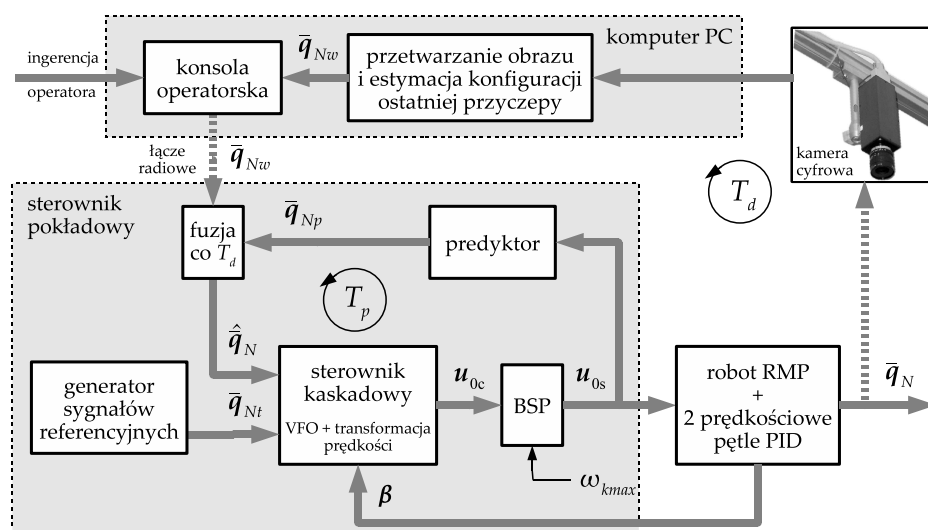
System RMP-SW składa się z przegubowego robota mobilnego (RMP) przedstawionego na rys. 4 oraz zewnętrznego systemu wizyjnego (SW) wyposażonego w kame-

Kaskadowe sterowanie przegubowym robotem mobilnym . . .



Rys. 4. Robot RMP z przyczepami mocowanymi pozaosiowo (pojazd typu nS3T)

rę USB typu uEye UI-1240SE-C (rozdzielczość 1280x1024, odświeżanie 25Hz) oraz komputer PC. Pojazd składa się z dwukołowego ciągnika o napędzie różnicowym (napędy BLDC Maxon o mocy 50W, przekładnia 47:1) z dołączonymi trzema pasywnymi przyczepami o długościach $L_1 = L_2 = L_3 = 0.229$ m. W miejscach łączenia przyczep zamocowano 14-bitowe kodowe czujniki kątów przegubów (model Hengstler AD36). Na ostatniej przyczepie umieszczono znacznik diodowy (rys. 4) pozwalający na jej lokalizację w przestrzeni roboczej przy użyciu systemu wizyjnego. Komunikacja między robotem a systemem wizyjnym odbywa się za pomocą łącza radiowego (moduł CC2500 TI, prędkość transmisji 230,4kb/s). Robot RMP jest obliczeniowo samowystarczalny – cały algorytm sterowania jest realizowany przez pokładowy sterownik wyposażony w zmiennoprzecinkową jednostkę obliczeniową DSP (procesor TMS320F28335). System wizyjny wraz z komputerem PC pełnią funkcję zewnętrznego układu pomiarowego konfiguracji ostatniej przyczepy (lokalizacja bezwzględna) oraz funkcję interfejsu człowiek-robot (HRI). Rozdzielczość lokalizacji przyczepy przez system wizyjny wynosi: 0.4 mm dla współrzędnych pozycji oraz 0.3° dla orientacji. Schemat blokowy ilustrujący praktyczną realizację układu sterowania i lo-



Rys. 5. Schemat realizacyjny układu sterowania robota przegubowego w systemie RMP-SW

kalizacji robota RMP przedstawia rys. 5. W układzie sterowania można wydzielić dwa zasadnicze podsystemy obliczeniowe synchronizowane dwoma różnymi okresami próbkowania T_p i T_d . Pętla sterowania i lokalizacja względna realizowane są z okresem $T_p = 10$ ms, natomiast lokalizacja bezwzględna ostatniej przyczepy jest realizowana przez system zewnętrzny z okresem $T_d = 4T_p = 40$ ms (czas przetwarzania informacji wizyjnej wynosi około 8 ms). Połączenie obu podsystemów w układzie sterowania wynika z mechanizmu fuzji względnej i bezwzględnej lokalizacji ostatniej przyczepy – mechanizm ten wyjaśniono dalej.

4.2. Praktyczna realizacja zewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego

Ze względu na znaczny poziom zakłóceń, którymi obarczone są pomiary systemu wizyjnego do estymacji konfiguracji ostatniej przyczepy $\bar{\mathbf{q}}_N$ wykorzystano mechanizm fuzji pomiaru bezwzględnego $\bar{\mathbf{q}}_{Nw}$ (pochodzącego z systemu wizyjnego) oraz względnego $\bar{\mathbf{q}}_{Np}$ (pochodzącego z predyktora pokładowego) zgodnie z poniższą formułą:

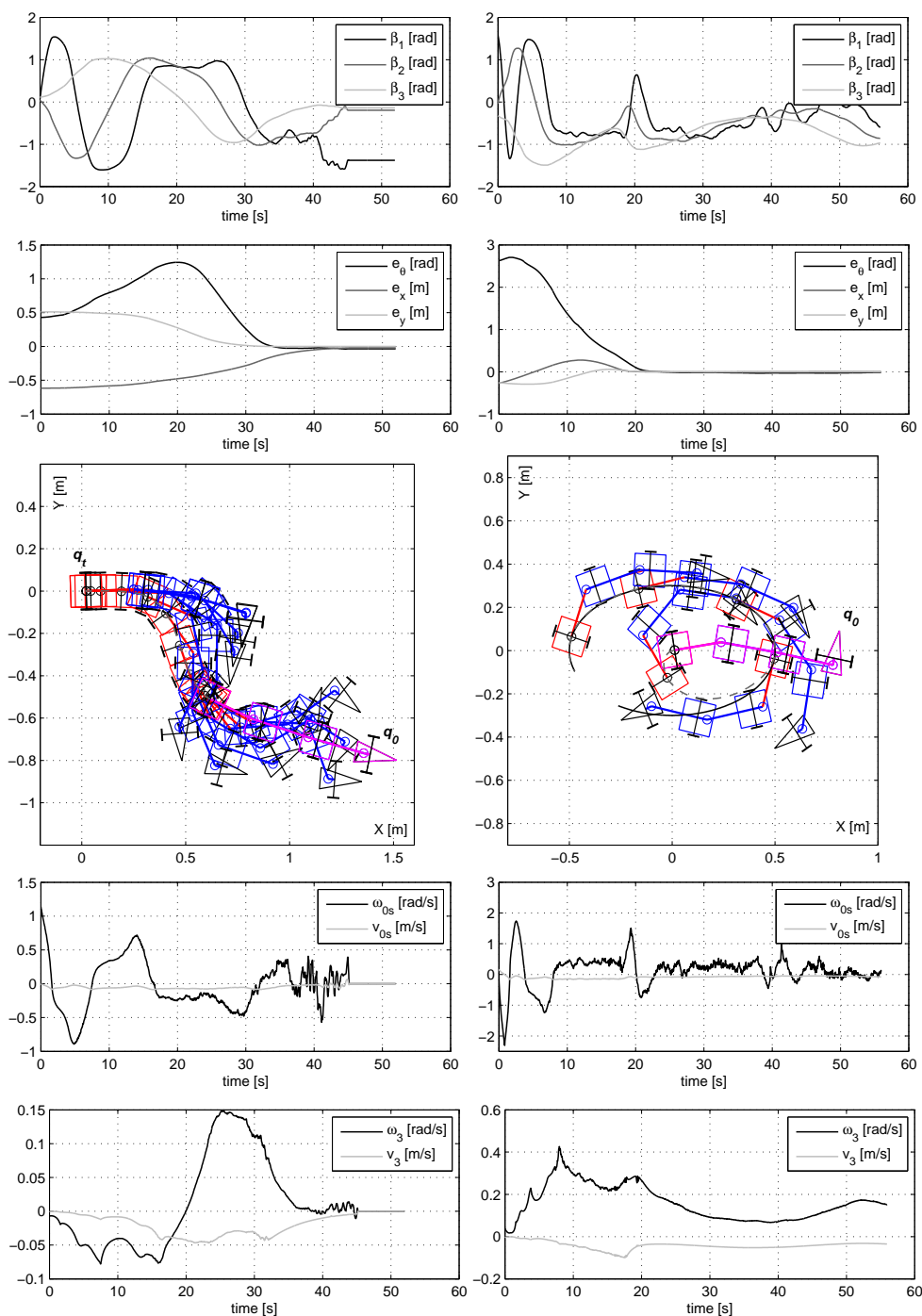
$$\hat{\mathbf{q}}_N(nT_p) = \begin{cases} \bar{\mathbf{q}}_{Np}(nT_p) & \text{dla } nT_p \neq mT_d \\ w_1 \cdot \bar{\mathbf{q}}_{Np}(mT_d) + w_2 \cdot \bar{\mathbf{q}}_{Nw}(mT_d) & \text{dla } nT_p = mT_d \end{cases}, \quad (16)$$

gdzie $\hat{\mathbf{q}}_N$ jest estymatą wypadkową, wagi w_1 i w_2 spełniają równanie $w_1 + w_2 = 1$, natomiast nT_p i mT_d oznaczają chwile czasu wynikające odpowiednio z synchronizacji systemu sterowania i zewnętrznego systemu wizyjnego (rys. 5). Zgodnie z (16) mechanizm fuzji jest wywoływany co okres T_d (czyli około raz na cztery pętle sterowania) wówczas, gdy dostępna jest świeża wartość pomiaru z systemu wizyjnego. Lokalnie, w ramach czterech okresów T_p , pętla sprzężenia zwrotnego dla ostatniej przyczepy oparta jest wyłącznie o estymatę predyktora pokładowego $\bar{\mathbf{q}}_{Np}$ obliczaną poprzez numeryczne całkowanie równania kinematyki monocykla przy warunku początkowym $\hat{\mathbf{q}}_N$ oraz dla aktualnie wyznaczanego (w bloku SOP) i skalowanego sterowania \mathbf{u}_{0s} , mianowicie: $\bar{\mathbf{q}}_{Np}(n) = \bar{\mathbf{q}}_{Np}(n-1) + T_p \cdot \mathbf{G}_N(\bar{\mathbf{q}}_{Np}(n-1)) \prod_{i=N}^1 \mathbf{J}_i(\beta_i) \mathbf{u}_{0s}(n-1)$. Przy odpowiednio dobranych wagach mechanizm fuzji (16) skutkuje znacznym zmniejszeniem zaszumienia estymaty $\hat{\mathbf{q}}_N$, a w konsekwencji gładszym przebiegiem sygnałów sterujących i płynniejszym ruchem robota. Poza tym, wykorzystanie wyników odometrii w okresach czasu, kiedy nie jest jeszcze dostępny świeży pomiar wizyjny pozwala na istotne osłabienie wpływu opóźnienia systemu wizyjnego na wypadkową jakość lokalizacji pojazdu.

4.3. Wyniki eksperymentów i komentarze

Na rys. 6 przedstawiono wyniki dwóch eksperymentów E1 (zadanie stabilizacji konfiguracji $\bar{\mathbf{q}}_t = \mathbf{0}$) i E2 (zadanie śledzenia trajektorii eliptycznej $x_t(\tau) = 0.5 \cos(0.1\tau)$, $y_t(\tau) = 0.3 \sin(0.1\tau)$) ilustrujących manewry w strategii cofania pojazdem RMP z pozaosiowym mocowaniem przyczep przy odsunięciach przegubów $L_{h1} = 0.032$ m oraz $L_{h2} = L_{h3} = 0.048$ m. Przyjęto następujące wartości paramaterów projektowych: $k_a = 2$, $k_p = 1$, $\eta = 0.8$, $\delta = 0.02$ m, $\omega_{k \max} = 3$ rad/s dla E1 oraz $\omega_{k \max} = 6$ rad/s dla E2, $w_1 = 0.98$, $w_2 = 0.02$. Na wykresach X-Y linią przerywaną oznaczono ścieżkę zakreślaną przez punkt prowadzenia pojazdu P podczas sterowania, natomiast linią ciągłą ślad trajektorii referencyjnej pozycji dla ostatniej przyczepy.

Kaskadowe sterowanie przegubowym robotem mobilnym . . .



Rys. 6. Wyniki eksperymentów E1 i E2 uzyskane w systemie RMP-SW: E1 – wykresy z kolumny lewej, E2 – wykresy z kolumny prawej (symbolem q_0 oznaczono konfigurację początkową robota, a symbolem q_t konfigurację referencyjną)

Analizując wyniki z rys. 6 warto zwrócić uwagę na fakt, iż charakter ruchu ostatniej przyczepy wynika bezpośrednio z własności metody VFO z efektem naprowadzania w pobliżu punktu (x_t, y_t) dla przypadku eksperymentu E1 oraz z nieoscylacyjnym wjazdem na trajektorię referencyjną w eksperymencie E2. Charakterystyczną cechą jest również osiąganie przez sygnały prędkości ciągnika (ω_{0s}, v_{0s}) znacznie większych wartości w porównaniu do prędkości ostatniej przyczepy (ω_3, v_3) ze względu na konieczność częstej i intensywnej rekonfiguracji łańcucha pojazdu podczas manewrów w stanach przejściowych. Zauważmy, że definicja zadania sterowania oraz zaproponowany sposób jego rozwiązania nie wymagają obliczania trajektorii referencyjnej całego wektora konfiguracji \mathbf{q}_t , a tylko podwektora $\bar{\mathbf{q}}_t$, którego ewolucja wynika z rozwiązania równania monocykla. Na zakończenie warto wspomnieć, że przedstawiona metoda sterowania kaskadowego nie gwarantuje spełnienia ewentualnych ograniczeń na maksymalne/minimalne dopuszczalne wartości kątów przegubowych – trudne zagadnienie sterowania z uwzględnieniem ograniczeń wektora stanu pozostaje nadal problemem otwartym.

LITERATURA

- [1] C. Altafini. Some properties of the general n-trailer. *Int. Journal of Control*, 2001, wolumen 74, numer 4, s. 409–424.
- [2] M. Michałek. Application of the VFO method to set-point control for the N-trailer vehicle with off-axle hitching. *Int. Journal of Control*, 2012, wolumen 85, numer 5, s. 502–521.
- [3] F. Jean. The car with N trailers: characterisation of the singular configurations. *Control, Opt. Calc. Variations*, 1996, wolumen 1, s. 241–266.
- [4] J. P. Laumond. Controllability of a multibody mobile robot. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1993, wolumen 9, numer 6, s. 755–763.
- [5] D. A. Lizarraga, P. Morin, C. Samson. Chained form approximation of a driftless system. Application to the exponential stabilization of the general n-trailer system. *Int. Journal of Control*, 2001, wolumen 74, numer 16, s. 1612–1629.
- [6] M. Michałek, K. Kozłowski. Vector-Field-Orientation feedback control method for a differentially driven vehicle. *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 2010, wolumen 18, numer 1, s. 45–65.

CASCADED CONTROL OF AN ARTICULATED MOBILE ROBOT IN THE RMP-SW SYSTEM

The paper is devoted to a motion-control problem for an articulated mobile robot which consists of a two-wheeled tractor and passively interconnected trailers with off-axle hitching type. Cascaded control system is proposed, which utilizes specific properties of robot kinematics, especially velocity propagation formulas along a vehicle chain. The outer loop of the controller results from the VFO control method applied to the last trailer segment; the inner loop allows transformation of the desired velocities toward the tractor segment by using feedback from current joint angles. The paper includes results of experimental validation for backward trajectory tracking and set-point control using the three-trailer robot in the RMP-SW system with vision feedback.