

Diferenčno vodenje agilnega dvokolesnega mobilnega robota

Jon Tofant¹, Dušan Gleich¹

¹University of Maribor, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science

Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenia

E-pošta: jon.tofant@student.um.si

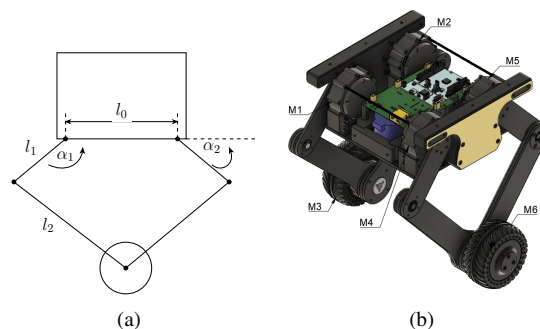
Differential control of an agile two-wheeled mobile robot

Self-balancing two-wheeled robots represent a significant field of research in modern robotics. The literature often decouples balance control from position control, which diminishes the coordination between the respective controllers. Existing works are based on rigid-body models, whereas papers addressing robots with an articulated torso utilize complex dynamic and kinematic models for control. For orientation determination, they often rely on a magnetometer, which is highly sensitive to electromagnetic interference, limiting the robot's reliability in military environments. In this paper, we present a control approach based on simplified equations of motion and a method for improved controller coordination. By separately controlling the left and right sections of the torso and the wheels, we enable differential motion, which we leverage to maintain the robot's orientation without the use of a magnetometer. The proposed strategy enhances robustness and accuracy in dynamic environments.

1 Uvod

Mobilni roboti so postali del sodobne avtomatizacije, saj prinašajo rešitve na področju logistike, industrije ter vojaške uporabe. Mobilni roboti s štirimi kolesi so pogosta izbira, zaradi cenovne ugodnosti, enostavnosti in stabilnosti. Omejeni pa so z manevrsko sposobnostjo v tesnih in dinamičnih okoljih. Dvokolesni roboti, ki delujejo na principu inverznega nihala, so obetavne alternative. Delimo jih na robote z odprto in zaprto kinematično verigo [1]. Njihova pomanjkljivost je seveda nestabilnost. V tem članku se bomo omejili na robote z zaprto kinematično verigo petih členov [1]. Model in izračun kinematike in dinamike dvokolesnega robota zaprte kinematične verige petih členov je bil predlagan [2] in se lahko implementira na vgrajenem sistemu. Zaradi nehomogene porazdelitve mase vertikalna postavitev robota ni nujno ravnotežna [3]. Dinamični model celotnega modela za robota z nespremenljivo višino je obravnaval G. Zambella et al. [4]. V zadnjem času se uporablja vnaprejšnje učenje za identifikacijo modela robota [5]. V tem članku smo zgradili fizični model robota in ga modelirali z uporabo lineariziranega matematičnega modela inverznega nihala na vozičku in za načrtovanje kaskadnega regulacijskega sistema nismo uporabili modernega globokega učenja. No-

vost v tem članku je, da smo model robota razdelili na dva neodvisna sistema, kar omogoča diferencialno vodenje in enostavno manevriranje. Nova struktura ne potrebuje kompenzatorja v smeri vožnje [2] in robot ohranja orientacijo brez uporabe magnetometra, fuzije podatkov in estimacije položaja. Vodenje je izvedeno z notranjo in zunanjo zanko kaskadnega regulatorja, kjer notranja zanka kaskadnega regulatorja uporablja kvadratični integralni regulator (angl. Linear Quadratic Integral controller, LQI). Predlagali smo nov izračun regulacijskega pogreška regulatorja LQI, ki uporabi vsoto trenutnega nagiba trupa in spremembo kota platforme in ga poimenovali usklajevalni mehanizem regulatorjev. Z diskretnim spreminjanjem parametrov regulatorja LQI glede na višino robota, dosežemo stabilnost in vodljivost pri poljubni višini platforme robota. Zunanja zanka kaskadnega regulatorja temelji na regulacijskem pogrešku položaja, ki določi želen nagib robota za doseg ravnotežnega stanja pri nesimetrični porazdelitvi mase. Eksperimentalni rezultati kažejo na robustnost vodenja mobilnega robota v različnih ekosistemih.



Slika 1: (a) Parametri modela robota. (b) CAD model robota.

2 Model dvokolesnega mobilnega robota

Zasnovali smo dvokolesnega robota, kot je prikazan na sliki 1, kjer je na sliki 1(a) prikazan model robota in na sliki 1(b) CAD model robota. Na sliki 1(a) je predstavljen stranski pogled robota, kjer 2 motorja s spremembo kota α_1 in α_2 omogočata nagib robota. Nogi imata dolžino l_1 in l_2 , noga pa je vpeta na os motorja. Celoten robot je sestavljen iz platforme, 6 motorjev (M1-M3 na levi strani in M4-M6 na desni strani), ki omogočajo premik platforme,

2 nog in 2 pogonskih koles. Razdalja med motorjem M1 in M2 je l_0 . Mehanska zasnova je opisana v poglavju 3. V literaturi se za načrtovanje vodenja pogosto uporabljajo obsežni, linearizirani dinamični modeli [2]. V tem članku predlagamo model, kjer vsako stran robota (levo in desno kolo s pripadajočim delom trupa) modeliramo kot neodvisno inverzno nihalo na vozičku (slika 2). Ta pristop je uporabljen, ker omogoča načrtovanje zelo učinkovitega kaskadnega regulatorja. Za načrtovanje regulatorja LQI uporabimo lineariziran model sistema, ki je prikazan na sliki 2 v prostoru stanj. Spremenljivke stanja so definirane kot:

$$\mathbf{x} = [s, \dot{s}, \varphi, \dot{\varphi}]^T. \quad (1)$$

kjer so spremenljivke $s, \dot{s}, \varphi, \dot{\varphi}$, pot, hitrost, kot, kotna hitrost. Po linearizaciji nelinearnih enačb gibanja okoli zgornje ravnovesne točke ($\varphi = 0$) dobimo model:

$$\dot{\mathbf{x}}_{\Delta} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{\Delta} + \mathbf{B}u_{\Delta} \quad (2)$$

$$\mathbf{y}_{\Delta} = \mathbf{C}\mathbf{x}_{\Delta} \quad (3)$$

kjer so sistemske matrike $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ in $\mathbf{C}$ podane z:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

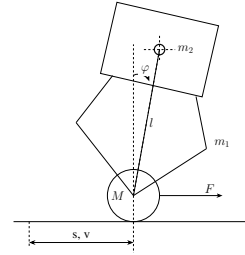
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Kjer so $a = J + ml^2 - \frac{m^2 l^2}{M+m}$, $a_{22} = -\frac{k_{vt}}{M+m} - \frac{k_{vt} m^2 l^2}{(M+m)^2 a}$, $a_{23} = \frac{-m^2 l^2 g}{(M+m)a}$, $a_{43} = \frac{mlg}{a}$, $a_{42} = \frac{k_{vt} ml}{(M+m)a}$, $b_2 = \frac{1}{M+m} + \frac{m^2 l^2}{(M+m)^2 a}$, $b_4 = -\frac{ml}{(M+m)a}$.

Parametri M, m, l in J predstavljajo maso koles, maso platforme, razdaljo od osi kolesa do masnega centra in vztrajnostni moment trupa. Njihove natančne vrednosti so določene iz CAD modela robota, medtem ko je koeficient viskoznega trenja k_{vt} določen eksperimentalno. Podrobna izpeljava modela je zapisana v knjigi [6]. Za določitev ojačanj k_1, k_2, k_3, k_4 in integralnega ojačanja k_I LQI regulatorja se reši razširjena Riccatijeva enačba, pri čemer se matrike uteži R in Q nastavijo tako, da se minimizira odstopanje kota in kotne hitrosti. Uteži za pot in hitrost (s, v) se nastavijo na 0, medtem ko se uteži za integral napake kota vključi v matriko Q . To se doseže z matriko $Q = \text{diag}([0, 0, Q_{33}, Q_{44}, Q_{55}])$, kjer so Q_{33}, Q_{44} in Q_{55} uteži za kot, kotno hitrost in integral kota. Za generiranje sile za levo (F_L) in desno (F_D) kolo se uporabljata dva enaka regulatorja, ki neodvisno izračunata svojo silo. Ker sila F vpliva na središče kolesa, je navor motorja $\tau = F \cdot r$, tok motorja pa $I = \tau/k_t$. Z regulatornimi ojačanjmi in predpostavko $k_3 = k_4 = 0$ (za pot in hitrost), se tokovi motorjev M3 in M6 na sliki 1(b) izračunajo kot:

$$I_L = \frac{F_L \cdot r}{k_t}, \quad I_D = \frac{F_D \cdot r}{k_t}$$

kjer sta $F_L = k_1 \varphi + k_2 \dot{\varphi} + k_I \int \varphi dt$ in $F_D = k_1 \varphi + k_2 \dot{\varphi} + k_I \int \varphi dt$.



Slika 2: Poenostavljen model sistema kot inverzno nihalo na vozičku, kjer M predstavlja maso motorja s kolesom, m_1 maso člena l_1 in l_2 , m_2 maso platforme, s položaj, v linearno hitrost, F silo, φ kot nagiba in l razdaljo od osi kolesa do masnega centra.

3 Mehanska zasnova in implementacija

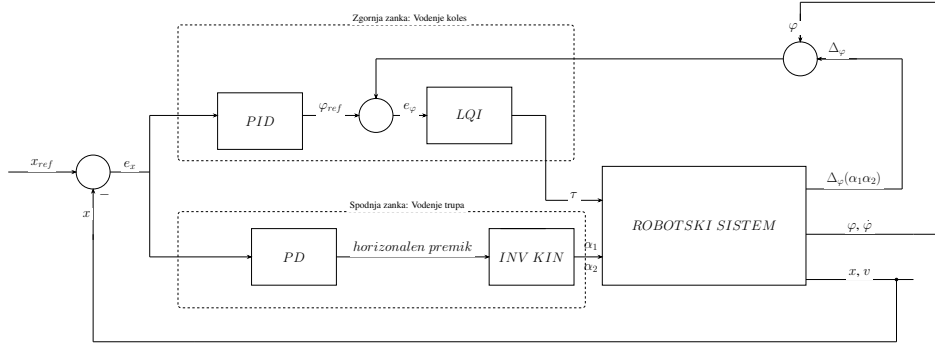
Mehanizem zaprte kinematične verige petih členov realiziramo z štirimi aktivnimi sklepi, kot je prikazano na sliki 1(b). Direktno gnana motorja DDSM115 (na sliki označena z M3) poganjata kolesa, štirje motorji Xiaomi CyberGear (na sliki označeni z M1 in M2) skrbijo za gibanje trupa. Imamo neodvisno vodenje nagiba in višine težišča. Baterija in mikrokrmilnik z prilagoditvenim vezjem za regulacijo napetosti, sta nameščena na ploščo trupa. S tem se poveča vztrajnostni moment. Inercialna merilna enota BNO080 je nameščena na spodnjo stran plošče, bližje vrtilišču. CAD modelu na sliki 1(b) smo dodali nosilno ploščo, na katero lahko pritrdimo radar, kamero itd. Gibljivi členi so sestavljeni iz kompozitne strukture lasersko rezanega akrila ter plasti 3D-tiskanega PETG materiala. Prehod členov v singularnost, ki je opisana v [2] preprečimo z mehanskimi omejevalniki gibanja, ki hkrati služijo kot nosilci za modularne dodatke. Glavni mikrokrmilnik (STM32) izvaja regulacijske zanke, vodenje motorja preko CAN in RS485 vodila, ter pripravlja podatke za telemetrijo. BNO080 komunicira s pomožnim (ESP32) mikrokrmilnikom, kateri je uporabljen za ponovno inicializacijo BNO080 v primeru izpada. Dodatni pomožni (ESP32) mikrokrmilnik se uporablja za telemetrijo preko UDP protokola, in Bluetooth komunikacijo z Dualshock krmilnikom.

4 Predlagana arhitektura vodenja

V tem članku predlagamo kaskadno regulacijo za stabilizacijo in premikanje robota, ter vzporedno vodenje gibljivega trupa za izboljšanje agilnosti, kot je prikazano na sliki 3. V tem članku smo predlagali vodenje robota z dvema neodvisnima sistemoma za stabilizacijo sistema z neodvisnim vodenjem motorjev M1-M3 in M4-M6.

4.1 Kaskadna regulacija za stabilizacijo trupa in gibanje

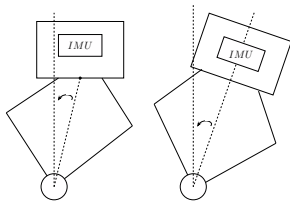
Slika 4 prikazuje gibanje robota. V prvem primeru se robot giba in je platforma vodoravna, v drugem primeru pa ima platforma nek kot, ki je posledica nagiba zaradi zasuka pogonskih koles. Kot, ki nastane kot posledica gibanja platforme Δ_{φ} lahko izračunamo kot J. Yang et al. [2]:



Slika 3: Shema celotne arhitekture vodenja, ki združuje kaskadno regulacijo koles (zgornja veja) in vzporedno vodenje trupa z inverzno kinematiko (spodnja veja).

$$\Delta_\varphi = \arctan\left(\frac{x_c - l_0/2}{y_c}\right) \quad (6)$$

Za stabilizacijo nagiba platforme je uporabljen LQI regulator. Regulator LQI uporablja integriran kot napake $\int e_\varphi dt$, kar odpravi stacionarno napako. Motor pogonskih koles je voden po navoru, zato LQI regulator zagotavlja potreben navor za premik robota. Na shemi 3 je za povratno zanko LQI regulatorja uporabljena vsota kotov nagibov $\varphi + \Delta_\varphi$, kot je prikazano na sliki 4, ki omogoča avtomatsko zaznavo nagiba platforme in s tem LQI regulator omogoči zmanjšanje navora na kolesih. Ta način zagotavlja izboljšano stabilnost in splošno obnašanje robota. PID regulator na sliki 3 se nahaja v zunanji zanki regulatorja za vodenje robota po položaju x , vsakega kolesa. Na podlagi napake $e_x = x_{ref} - x$ PID regulator izračuna referenčni kot nagiba φ_{ref} za notranjo zanko. Parametre PID regulatorja smo nastavili s pomočjo modela za čim krajši čas vzpona. Zavijanje robota dosežemo z nastavljanjem različnih referenčnih položajev ($x_{ref,L} \neq x_{ref,R}$) za levo in desno zunanjo zanko.



Slika 4: Posledica nagiba trupa Δ_φ (levo) in posledica nagiba baze φ (desno)

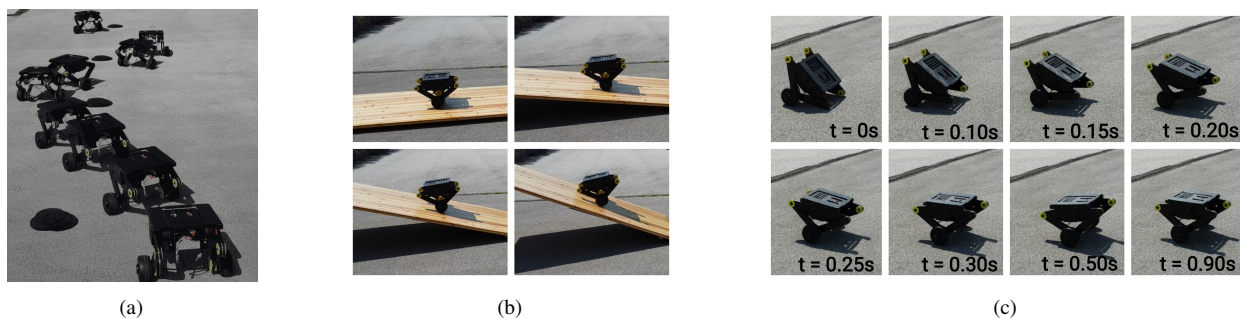
4.2 Vzporedno vodenje trupa za povečanje agilnosti

Za doseganje hitrih pospeškov in izboljšanje odzivnosti sistema s kaskadno regulacijo vodimo gibljiv trup v vzporednem načinu. Za izračun potrebnih kotov α_1 in α_2 , za doseg želenega položaja platforme uporabimo inverzno kinematiko [7], kjer sta x_c in y_c horizontalni položaj platforme in višina platforme, ki je poljubno izbrana med vožnjo. Na sliki 3 horizontalen premik predstavlja x_c , ki je hkrati izhod položajnega PD regulatorja. Iz položaja trupa lahko izračunamo virtualni kot nagiba, ki je nastal

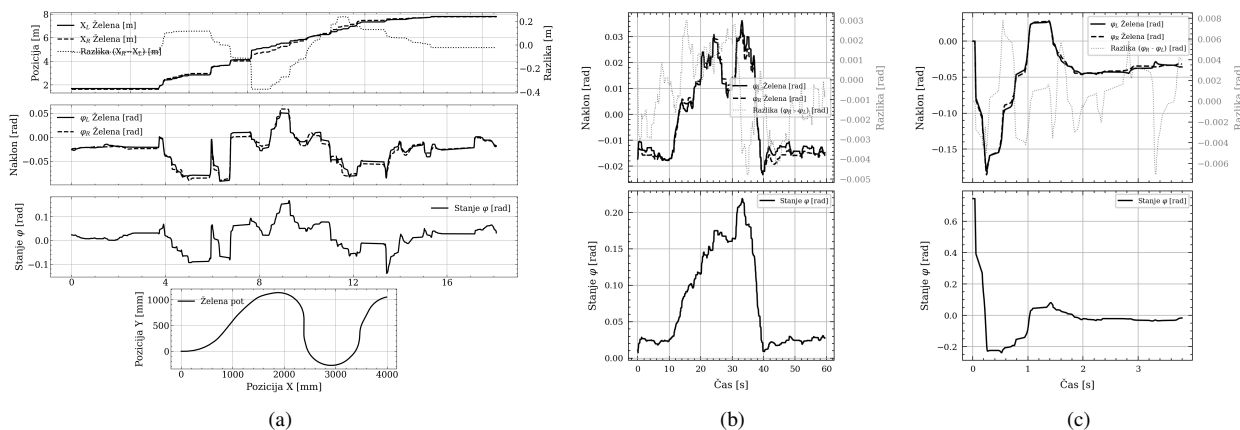
zaradi spremembe kota α_1 in α_2 . Celotna arhitektura, ki povezuje oba pristopa, je na sliki 3. Za zagotavljanje stabilnosti pri različnih višinah se uporablja pristop menjave naprej pripravljenih parametrov LQI regulatorja.

5 Eksperimentalni rezultati

Za validacijo predlagane arhitekture vodenja smo izvedli več eksperimentov, ki demonstrirajo stabilnost, agilnost in robustnost okolja v dinamičnih scenarijih. Eden ključnih ciljev je bil pokazati, da robot učinkovito manevrira in ohranja orientacijo brez magnetometra z uporabo diferenčnega vodenja koles in trupa, kar poveča zanesljivost sistema v okoljih, kjer so magnetni senzorji podvrženi motnjam. Na sliki 5(a) je prikazana slika robota pri manevriranju med ovirami. Na sliki 6(a) lahko vidimo želeno pot robota od zgoraj. Na sliki jasno vidimo, da se ustvari diferenca med želeno potjo levega in desnega kolesa ter med želenim kotom levega in desnega trupa, ki sledi trajektoriji manevriranja. Z različnim želenim kotom nagiba baze in trupa platforma uspešno manevrira brez uporabe magnetometra. Stanje φ , ki ga izmeri inercialna merilna enota, je povprečje φ_L in φ_R . Eksperiment s spremembo naklona podlage na sliki 5(b) je pokazal, kako integralno delovanje zunanje zanke kompenzira nagib, ki ga povzroča nagnjena površina in s tem ohranja stabilen položaj robota. Na sliki 6(b) vidimo spremembo φ_L in φ_R skozi čas. Platforma nagib površine uspešno kompenzira s učinkovitim spreminjanjem naklona baze, kar preprečuje nezaželeno drsenje. Najzahtevnejši test je samostojna postavitev platforme iz ležečega položaja na sliki 5(c). To pokaže, da je robot sposoben vodenja pri vseh možnih naklonih. Na sliki 6(c) jasno vidimo hitro spremembo φ_L in φ_R . Robot se za postavitev posledično odpelje od začetnega položaja, kar je hitro kompenzirano z spremembo horizontalnega položaja trupa x_c . Diferenca, ki jo vidimo na grafu, je učinkovito kompenziranje neenakosti koles ter nehomogene porazdelitve mase. Brez uporabe magnetometra učinkovito obdržimo dober nadzor nad orientacijo z izboljšano agilnostjo. PD regulator položaja trupa zmanjša potreben manevrski prostor za dvig robota. Zaradi PID regulatorja položaja, platforma ne potrebuje simetrične porazdelitve mase.



Slika 5: (a) Maneuvriranje, (b) Prilagajanje naklonu podlage, (c) Samostojna postavitev robota.



Slika 6: (a) Položaj ter diferencial kotov med manevriranjem, (b) Sprememba želenega kota φ za ohranjanje položaja, (c) Stanje φ med postavitvijo robota iz ležečega položaja.

6 Zaključek

V članku smo predstavili diferenčno vodenje dvokolesnega robota. Razdelitev robota na dva neodvisna sistema omogoča enostavno načrtovanje regulatorjev in odpravlja potrebo po magnetometru. Eksperimentalni rezultati potrjujejo robustnost predlaganega pristopa. Nadaljnjo je smiselno raziskati uporabo strojnega učenja za prilagajanje parametrov fizikalnega modela v realnem času.

Literatura

- [1] X. Liu, Y. Sun, S. Wen, K. Cao, Q. Qi, X. Zhang, H. Shen, G. Chen, J. Xu, and A. Ji, "Development of Wheel-Legged Biped Robots: A Review," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 21, pp. 607–634, Mar. 2024.
- [2] J. Yang, Q. Wu, S. Li, Y. Ye, and C. Luo, "Integrated Modeling and Control Optimization of Biped Wheel-Legged Robot," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 10, pp. 1465–1472, Feb. 2025. Conference Name: IEEE Robotics and Automation Letters.
- [3] S. Wang, L. Cui, J. Zhang, J. Lai, D. Zhang, K. Chen, Y. Zheng, Z. Zhang, and Z.-P. Jiang, "Balance Control of a Novel Wheel-legged Robot: Design and Experiments," in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6782–6788, May 2021. ISSN: 2577-087X.
- [4] G. Zambella, G. Lentini, M. Garabini, G. Grioli, M. G. Catalano, A. Palleschi, L. Pallottino, A. Bicchi, A. Settini,

and D. Caporale, "Dynamic Whole-Body Control of Unstable Wheeled Humanoid Robots," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, pp. 3489–3496, Oct. 2019.

- [5] M. A. Khan, D.-e.-Z. Baig, H. Ali, B. Ashraf, S. Khan, A. Wadood, and T. Kamal, "Efficient System Identification of a Two-Wheeled Robot (TWR) Using Feed-Forward Neural Networks," *Electronics*, vol. 11, p. 3584, Jan. 2022.
- [6] J. Ritonja, *Modeliranje, analiza, sinteza in realizacija regulacijskih sistemov*. Univerzitetna založba Univerze v Mariboru, Aug. 2020. Publication Title: Univerzitetna založba Univerze v Mariboru.
- [7] N. Mao, J. Chen, E. Spyarakos-Papastavridis, and J. S. Dai, "Dynamic modeling of wheeled biped robot and controller design for reducing chassis tilt angle," *Robotica*, vol. 42, pp. 2713–2741, Aug. 2024.