

Bab 5

Simpulan dan Saran

5.1 Simpulan

Pada Buku Tugas Akhir ini, terdapat beberapa simpulan dengan penjabaran sebagai berikut:

1. Telah ditentukan model kinematika DDWMR dengan pendekatan kinematika dari struktur mekanis serta menentukan eror pose di mana nilai eror antara pose aktual dengan lintasan referensi dikontrol agar nilai eror seminimal mungkin. Model kinematika DDWMR dan eror pose ditentukan dengan melakukan analisis geometri.
2. Telah berhasil dirancang dan diimplementasikan metode untuk menghasilkan lintasan referensi yang layak untuk dapat dilewati oleh DDWMR dengan mengkombinasikan metode generasi trajektori analitik dan kurva halus global untuk menghasilkan fungsi lintasan referensi dengan waktu sebagai variabel.
3. Telah berhasil dirancang pengontrol berbasis analisis kestabilan Lyapunov agar DDWMR dapat menjejaki lintasan referensi yang telah ditentukan
4. Hasil perancangan lintasan referensi dan kehandalan algoritme kontrol telah diverifikasi melalui simulasi putaran tertutup dan diimplementasikan kembali pada robot DDWMR aktual bertipe LEGO. Dapat divalidasi bahwa algoritme kontrol yang telah dirancang mampu menggerakkan LEGO agar nilai eror antara pose aktual LEGO dan lintasan referensi yang telah dirancang stabil asimtotik.

5.2 Saran

Dari proses penelitian, terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya terkait pengembangan kemampuan pelacakan lintasan pada DDWMR:

1. **Membangun algoritme untuk menghindari objek diam atau bergerak.** Proses eksperimen dilakukan tanpa adanya objek diam atau bergerak selama DDWMR beroperasi. Menambah sensor pada DDWMR serta algoritme untuk menghindari objek dapat meningkatkan kemampuan DDWMR dalam melacak lintasan referensi.
2. **Mengembangkan algoritme penggabungan sensor (*sensor fusion*).** Untuk mengatasi durasi pengambilan sampel (posisi LEGO) yang terlalu lama dari kamera, dapat digunakan metode *sensor fusion* yang dapat menggabungkan data dari kamera dengan data dari sensor yang lebih kecil durasi waktu pembacaannya agar durasi lokalisasi lebih singkat.
3. **Merancang pengontrol bagi DDWMR dengan meninjau subsistem aktuator.** Akibat motor LEGO yang tidak presisi selama eksperimen, torsi yang diberikan motor kepada roda tidak sesuai dengan profil kecepatan angular yang dihasilkan pengontrol berbasis kinematika DDWMR. Untuk itu, torsi yang dihasilkan oleh motor perlu dikontrol untuk menjamin bahwa torsi yang diberikan motor selalu mengikuti profil kecepatan angular yang diberikan pengontrol berbasis kinematika DDWMR.
4. **Merancang pengontrol bagi DDWMR dengan meninjau subsistem sumber tegangan.** Dalam proses eksperimen DDWMR, berkurangnya persentase baterai menjadi isu di mana tegangan yang diberikan kepada LEGO menurun. Untuk nilai sinyal kontrol yang sama, menurunnya persentase baterai dapat memberikan torsi yang lebih lemah dibandingkan ketika LEGO memiliki persentase baterai dengan kapasitas penuh. Isu tersebut dapat ditanggulangi dengan mengontrol sumber tegangan agar tegangan keluaran yang diberikan kepada motor selalu mengikuti profil torsi motor yang diberikan pengontrol torsi meskipun daya baterai menurun.
5. **Mengembangkan metode lokalisasi untuk membaca sudut orientasi DDWMR.** Pada proses eksperimen, terdapat batasan di mana sudut orientasi awal LEGO hanya dapat ditentukan segaris dengan sumbu horizontal atau vertikal. Terdapat isu selama eksperimen di mana nilai sudut orientasi tidak terbaca jika tidak terdapat perubahan posisi akibat pembacaan sudut orientasi hanya mengandalkan posisi terakhir dengan posisi sebelumnya. Pengembangan metode pembacaan sudut orientasi dapat membuat penempatan sudut orientasi DDWMR lebih fleksibel serta menghindari isu nilai sudut orientasi yang tidak terbaca.
6. **Mengembangkan metode perancangan lintasan referensi.** Isu yang dihadapi selama proses eksperimen adalah sinyal kontrol bagi kedua roda

DDWMR pada waktu awal dan akhir di mana sinyal kontrol yang dihasilkan terlalu tinggi dalam melacak lintasan referensi.

7. **Melakukan rancang bangun DDWMR.** LEGO memiliki beberapa keterbatasan terkait dengan penggunaan perangkat keras yang tidak fleksibel. LEGO memiliki modul untuk komunikasi nirkabel tertentu di mana modul komunikasi yang kompatibel dengan LEGO terbatas jumlahnya di pasaran. Membangun DDWMR dapat memberikan opsi yang lebih banyak terkait perangkat modul komunikasi yang dapat disematkan pada DDWMR. Selain itu, opsi untuk menambahkan sensor akan lebih fleksibel karena LEGO hanya dapat disematkan sensor bawaan dari pabrik.
8. **Mengembangkan sistem agar sinyal kontrol dihitung menggunakan mikrokontroler yang tertanam pada DDWMR.** Algoritme proses lokalisasi dan hitung sinyal kontrol dilakukan oleh komputer selama eksperimen berlangsung. Hal ini menjadi isu di mana LEGO dan komputer perlu saling berkomunikasi sehingga terjadi latensi pengiriman. Jika dua algoritme tersebut dapat dilakukan langsung oleh mikrokontroler yang tertanam pada DDWMR, waktu latensi pengiriman dapat dihindari.

Daftar Pustaka

- [1] S. G. Tzafestas, *Introduction to Mobile Robot Control*. Elsevier, 2013.
- [2] G. Klančar, A. Zdešar, S. Blažič, and I. Škrjanc, *Wheeled Mobile Robotics: From Fundamentals Towards Autonomous Systems*. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [3] J. L. Avendaño-Juárez, V. M. Hernández-Guzmán, and R. Silva-Ortigoza, "Velocity and current inner loops in a wheeled mobile robot," *Advanced Robotics*, vol. 24, no. 8-9, pp. 1385–1404, 2010.
- [4] J. R. García-Sánchez, S. Tavera-Mosqueda, R. Silva-Ortigoza, V. M. Hernández-Guzmán, J. Sandoval-Gutiérrez, M. Marcelino-Aranda, H. Taud, and M. Marciano-Melchor, "Robust switched tracking control for wheeled mobile robots considering the actuators and drivers," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4316, 2018.
- [5] C. Liu, J. Gao, and D. Xu, "Lyapunov-based model predictive control for tracking of nonholonomic mobile robots under input constraints," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 15, no. 5, pp. 2313–2319, 2017.
- [6] K. R. Simba, N. Uchiyama, and S. Sano, "Real-time smooth trajectory generation for nonholonomic mobile robots using Bézier curves," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 41, pp. 31–42, 2016.
- [7] M. Sanchez, C.M. and Sanchez, J.R.G. and Cervantes, C.Y.S. and Ortigoza, R.S. and Guzman, V.M.H. and Juarez, J.N.A. and Aranda, "Trajectory Generation for Wheeled Mobile Robots Via Bézier Polynomials," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 11, pp. 4482–4490, 2016.
- [8] J. Mu, X.-G. Yan, S. K. Spurgeon, and Z. Mao, "Nonlinear sliding mode control of a two-wheeled mobile robot system," *International Journal of Modelling, Identification and Control*, vol. 27, no. 2, pp. 75–83, 2017.
- [9] J. R. García-Sánchez, R. Silva-Ortigoza, S. Tavera-Mosqueda, C. Márquez-Sánchez, V. M. Hernández-Guzmán, M. Antonio-Cruz, G. Silva-Ortigoza, and H. Taud, "Tracking Control for Mobile Robots Considering the Dynamics of All Their Subsystems: Experimental Implementation,"

- Complexity*, vol. 2017, pp. 1–18, 2017. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/complexity/2017/5318504/>
- [10] R. S. Ortigoza, J. R. G. Sanchez, V. M. H. Guzman, C. M. Sanchez, and M. M. Aranda, "Trajectory tracking control for a differential drive wheeled mobile robot considering the dynamics related to the actuators and power stage," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 657–664, 2016.
- [11] D. Huang, J. Zhai, W. Ai, and S. Fei, "Disturbance observer-based robust control for trajectory tracking of wheeled mobile robots," *Neurocomputing*, vol. 198, pp. 74–79, 2016.
- [12] S. Roy and I. N. Kar, "Adaptive robust tracking control of a class of nonlinear systems with input delay," *Nonlinear Dynamics*, vol. 85, pp. 1127–1139, 2016.
- [13] Y. Kim and B. K. Kim, "Time-optimal trajectory planning based on dynamics for differential-wheeled mobile robots with a geometric corridor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5502–5512, 2017.
- [14] C.-L. Hwang and W.-L. Fang, "Global fuzzy adaptive hierarchical path tracking control of a mobile robot with experimental validation," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 724–740, 2015.
- [15] T. Fukao, H. Nakagawa, and N. Adachi, "Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 5, pp. 609–615, 2000.
- [16] Z. Peng, G. Wen, S. Yang, and A. Rahmani, "Distributed consensus-based formation control for nonholonomic wheeled mobile robots using adaptive neural network," *Nonlinear Dynamics*, vol. 86, pp. 605–622, 2016.
- [17] Y. Guo, Z. Qu, and J. Wang, "A new performance-based motion planner for nonholonomic mobile robots," in *Proceedings of the 3rd Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*. Citeseer, 2003, pp. 1–8.
- [18] Y. Guo, Y. Long, and W. Sheng, "Global Trajectory Generation for Nonholonomic Robots in Dynamic Environments," in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2007, pp. 1324–1329.
- [19] J.~L.~Junkins and J.~R.~Jancaitis, "Smooth Irregular Curves," *Photogrammetric Engineering*, vol. 38, no. 6, pp. 565–573, 1972.
- [20] F. Zhou, X. Wang, and M. Goh, "Fuzzy extended VIKOR-based mobile robot selection model for hospital pharmacy," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1–11, 2018.
- [21] G. Quaglia, L. Bruzzone, G. Bozzini, R. Oderio, and R. P. Razzoli, "Epi-q-TG: mobile robot for surveillance," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 38, no. 3, pp. 282–291, 2011.

- [22] G. Freitas, G. Gleizer, F. Lizarralde, L. Hsu, and N. R. S. dos Reis, "Kinematic Reconfigurability Control for an Environmental Mobile Robot Operating in the Amazon Rain Forest," *Journal of Field Robotics*, vol. 27, no. 2, pp. 197–216, 2010.
- [23] J. Palacín, J. A. Salse, I. Valganón, and X. Clua, "Building a Mobile Robot for a Floor-Cleaning Operation in Domestic Environments," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 5, pp. 1418–1424, 2004.
- [24] N. Mir-Nasiri, H. S. J, and M. H. Ali, "Portable autonomous window cleaning robot," *Procedia Computer Science*, vol. 133, pp. 197–204, 2018, international Conference on Robotics and Smart Manufacturing (RoSMa2018). [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918309682>
- [25] L. Yenilmez and H. Temeltas, "Autonomous Navigation for Planetary Exploration by a Mobile Robot," in *International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2003. RAST'03. Proceedings of. IEEE*, 2003, pp. 397–402.
- [26] D. Culler and J. Long, "A Prototype Smart Materials Warehouse Application Implemented Using Custom Mobile Robots and Open Source Vision Technology Developed Using EmguCV," *Procedia Manufacturing*, vol. 5, pp. 1092–1106, 2016.
- [27] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," in *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE*, 1990, pp. 384–389.
- [28] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics," in *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans: IEEE*, 1995, pp. 3805–3810.
- [29] S. G. Tzafestas, "Mobile Robot Control I: The Lyapunov-Based Method," in *Introduction to Mobile Robot Control. Oxford: Elsivier*, 2014, pp. 137–183.
- [30] I.-H. Li, M.-C. Chen, W.-Y. Wang, S.-F. Su, and T.-W. Lai, "Mobile robot self-localization system using single webcam distance measurement technology in indoor environments," *Sensors*, vol. 14, no. 2, pp. 2089–2109, 2014. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/2/2089>
- [31] C. Mathworks, *Computer Vision System Toolbox™ User's Guide R 2015 b*. 2015, vol. Version 3.
- [32] Z. Zhang, "A Flexible New Technique for Camera Calibration," Tech. Rep., 1998. [Online]. Available: [http://research.microsoft.com/\\$\sim\\$zhang/Calib/](http://research.microsoft.com/\simzhang/Calib/)
- [33] J. Heikkila and O. Silven, "A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction," in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE*, 1997, pp. 1106–1112.

- [34] P. Corke, *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*, 2nd ed. Berlin: Springer, 2017.
- [35] G. Atali, Z. Garip, D. Karayel, and S. S. Ozkan, "Localization of Mobile Robot using Odometry, Camera Images and Extended Kalman Filter," *Acta Physica Polonica A*, vol. 134, no. 1, pp. 204-207, 2018.
- [36] I. Analyst, "How can I find the pixel size of an image? - MATLAB Answers - MATLAB Central." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/277229-how-can-i-find-the-pixel-size-of-an-image>
- [37] T. Mathworks, *MATLAB ® Support Package for LEGO MINDSTORMS® EV3 Hardware User' s Guide*, 2021. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/supportpkg/legomindstormsev3io/legomindstormsev3io_ug.pdf