

Bab 5

Simpulan dan Saran

Bab ini berisikan kesimpulan yang diperoleh dari hasil perancangan produk dan penelitian dan saran untuk perbaikan serta pengembangan produk selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perancangan sistem TTS pada penelitian ini, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu:

- Algoritma *Pure Pursuit* dapat digunakan sebagai algoritma penjejakan jalur yang cukup efektif dan mudah. Algoritma penjejakan jalur yang dibuat, dikhususkan untuk traktor saja dan trailer hanya mengikuti jalur yang dihasilkan dari pergerakan traktor. Gambar 4.33 dan 4.35 menunjukkan bahwa traktor sudah mampu bergerak mengikuti jalur rujukan yang dirancang dengan nilai persen error pada saat pengujian $< 1\%$.
- Sistem lokalisasi traktor dan trailer dirancang dengan menggunakan kamera yang diposisikan tegak lurus dengan bidang lintasan. Kamera dikalibrasi untuk menemukan unsur intrinsik dan ekstrinsik dari kamera tersebut, dan didapatkan hasil bahwa terdapat error piksel sebesar 0,46 piksel. Setelah kalibrasi dilakukan, kamera akan mengambil frame gambar pada saat merekam pergerakan traktor dan melakukan *image segmentation* untuk mendeteksi warna dengan bantuan metode *color thresholding*. Bidang warna yang terdeteksi akan diseleksi dan dicari posisi center dari bidang tersebut terhadap frame kamera dalam satuan

piksel. Satuan piksel ini kemudian dikonversi menjadi satuan mm dan dijadikan sebagai input posisi terbaru dari traktor sesuai dengan Tabel 4.1.

- Suatu metode baru telah dirancang dengan tujuan agar trailer dapat bergerak pada jalur yang sama dengan jalur yang telah dilewati oleh traktor tanpa adanya jalur pemandu (rel, garis, dsb.). Peran jalur tersebut digantikan oleh metode geometri seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8 yang merepresentasikan model pergerakan sistem traktor trailer. Dengan mempertahankan sudut antara axle belakang trailer dan jari-jari putar traktor, maka kondisi di mana trailer bergerak di atas jalur yang dihasilkan traktor akan tercapai. Sebaliknya, jika kedua sudut tersebut tidak dijaga sama nilainya, maka kondisi di mana trailer bergerak dengan jalur yang sama dengan traktor tidak akan tercapai.
- Untuk dapat memutar axle roda belakang, pada trailer, diberikan motor servo yang diletakkan pada axle roda belakangnya.
- Model kendaraan yang dirancang memiliki dimensi panjang kali lebarnya yaitu 180×120 cm, dengan panjang link penghubung traktor dan trailer adalah 20 cm. Traktor memiliki satu (1) buah roda penggerak dan satu (1) buah roda kemudi. Sedangkan trailer tidak memiliki motor penggerak maupun motor kemudi.
- Trailer hanya bergerak berdasarkan tarikan dari traktor di mana, kecepatan linear traktor adalah sebesar 7 cm/s. Terdapat beberapa batasan yang diakibatkan ukuran dari perancangan traktor dan trailer yang harus diatasi, salah satunya adalah massa sistem. Agar dapat memastikan roda dari masing-masing sistem menjejaki lintasan, maka pada traktor dan trailer diberikan pemberat.
- Sistem TTMR yang dirancang memiliki lintasan berbahan triplek dengan ukuran 120×70 cm.
- Algoritma kontrol antara traktor dan trailer yang dirancang adalah algoritma untuk mengatur dan mempertahankan sudut antara axle roda belakang trailer berdasarkan input sudut antara axle roda belakang traktor dengan link penghubung.
- Traktor dan trailer memiliki mikrokontrollernya masing-masing yang saling terhubung dengan menggunakan konsep I2C (*Inter Integrated Circuit*).

- Pengujian dilakukan pada ruang tertutup dan pencahayaan yang dihasilkan oleh tiga (3) sumber, yaitu lampu utama ruangan, lampu di atas lintasan, dan lampu *flash handphone*. Pencahayaan ini di atur sehingga cahaya yang didapatkan pada saat rekaman, dapat konstan dan warna yang dipakai sebagai parameter deteksi dapat terdeteksi dengan baik.
- Hasil pengujian pergerakan traktor dan trailer ditunjukkan pada Gambar 4.38 dan 4.39 yang menunjukkan bahwa algoritma sudah berhasil diterapkan pada sistem yang sedang bergerak. Dengan nilai simpangan terbesar adalah 4,6% pada saat traktor trailer bergerak melingkar dan 3.7% pada saat traktor trailer diberikan jalur referensi belok kanan.

5.2 Saran

Sistem traktor trailer yang dirancang pada penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut agar menjadi sistem dapat lebih stabil dan dapat diimplementasikan di kehidupan nyata. Beberapa saran yang diajukan untuk pengembangan purwarupa yang telah dibuat antara lain:

1. Perbaiki konstruksi sistem traktor maupun trailer dengan menggunakan bahan-bahan yang lebih kokoh.
2. Menambahkan *spider gears* pada roda gigi differensial untuk mengurangi beban roda penggerak pada saat berbelok.
3. Membuat roda *custom* yang lebih kecil dan berat.
4. Menggunakan motor servo kendali yang memiliki kualitas yang lebih baik agar hasil belokkan dapat maksimal sehingga nilai error posisi dapat diperkecil.
5. Agar hasil perubahan dan penyesuaian sudut dapat berjalan lebih halus, maka algoritma kontrol sudut ini dapat disatukan dengan pengontrol lain seperti PID dan sebagainya.
6. Menurunkan model dinamika sistem yang meninjau massa benda.

Daftar Pustaka

- [1] T. Forklift, “Tonero - engine powered forklift 1.5 - 3.5 ton (product catalogue),” Aug 2022. [Online]. Available: <https://pdf.directindustry.com/pdf/toyota-material-handling/tonero-engine-powered-forklift-15-35-ton/14118-956482.html>
- [2] STILL, “Lifrunner technical data tugger train trailers (product data sheet),” Aug 2022. [Online]. Available: <https://www.still.de/en-DE/trucks/new-trucks/tugger-trains.html>
- [3] K. M. Lynch and F. C. Park, *Modern Robotics*. Cambridge University Press, 2017.
- [4] Y. Ding, “Simple understanding of kinematic bicycle model,” Feb 2020. [Online]. Available: <https://dingyan89.medium.com/simple-understanding-of-kinematic-bicycle-model-81cac6420357>
- [5] M. Samuel, M. Hussein, and M. B. Mohamad, “A review of some pure-pursuit based path tracking techniques for control of autonomous vehicle,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 135, no. 1, pp. 35–38, 2016.
- [6] W. Paszkowiak, T. Bartkowiak, and M. Pelic, “Kinematic model of multiple trailers on a tractor system for production logistics applications,” *Archives of Mechanical Technology and Materials*, vol. 39, no. 1, pp. 16–25, 2019.
- [7] J. A. Tompkins, J. A. White, Y. A. Bozer, and J. M. A. Tanchoco, *Facilities planning*. John Wiley & Sons, 2010.
- [8] C. Keuntje, F. Hormes, and J. Fottner, “Considering technical details in the planning of tugger train systems,” in *Proceedings of the 2nd International*

- Conference on High Performance Compilation, Computing and Communications*, 2018, pp. 97–105.
- [9] C. Keuntje, M. Kelterborn, and W. A. Günthner, “Considering ergonomics in the planning of tugger train systems for production supply,” in *MATEC Web of Conferences*, vol. 95. EDP Sciences, 2017, p. 11005.
- [10] A. Urru, M. Bonini, and W. Echelmeyer, “Planning and dimensioning of a milk-run transportation system considering the actual line consumption,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 9, pp. 404–409, 2018.
- [11] R. M. DeSantis, J. M. Bourgeot, J. N. Todeschi, and R. Hurteau, “Path-tracking for tractor-trailers with hitching of both the on-axle and the off-axle kind,” in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*. IEEE, 2002, pp. 206–211.
- [12] J. Yuan, F. Sun, and Y. Huang, “Trajectory generation and tracking control for double-steering tractor-trailer mobile robots with on-axle hitching,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 12, pp. 7665–7677, 2015.
- [13] R. C. Coulter, “Implementation of the pure pursuit path’hcking algorithm,” 1992.
- [14] E. Cocconi, “Enhanced pure pursuit algorithm & autonomous driving,” 2019.
- [15] R. C. Hibbeler, *Engineering mechanics: Dynamics, Twelfth Edition*. Prentice Hall, 2009.
- [16] R. M. DeSantis, “Path-tracking for a tractor-trailer-like robot: Communication,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 13, no. 6, pp. 533–544, 1994.
- [17] M. Yue, X. Hou, R. Gao, and J. Chen, “Trajectory tracking control for tractor-trailer vehicles: a coordinated control approach,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 91, no. 2, pp. 1061–1074, 2018.
- [18] A. Gasparetto, P. Boscarior, A. Lanzutti, and R. Vidoni, “Path planning and trajectory planning algorithms: A general overview,” *Motion and operation planning of robotic systems*, pp. 3–27, 2015.
- [19] A. K. Khalaji and S. A. A. Moosavian, “Robust adaptive controller for a tractor-trailer mobile robot,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 3, pp. 943–953, 2013.

- [20] A. Khanpoor, A. K. Khalaji, and S. A. A. Moosavian, "Modeling and control of an underactuated tractor-trailer wheeled mobile robot." *Robotica*, vol. 35, no. 12, pp. 2297–2318, 2017.
- [21] J.-w. Choi and G. H. Elkaim, "Bézier curves for trajectory guidance," in *World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS*. Citeseer, 2008, pp. 22–24.
- [22] H. Prautzsch, W. Boehm, and M. Paluszny, *Bézier and B-spline techniques*. Springer, 2002, vol. 6.
- [23] L. Carville, "Properties and applications of acrylic," Dec 2021. [Online]. Available: https://www.carvilleplastics.com/latest_news/key-properties-acrylic/
- [24] C. Veeranjanyulu and U. H. Babu, "Design and structural analysis of differential gear box at different loads," *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, vol. 1, no. II, pp. 65–69, 2012.
- [25] Yousef, "Differential: 9 types of differentials & how they work?" feb 2022. [Online]. Available: <https://www.theengineerspost.com/differential/>
- [26] I. Evan, "Rancang bangun robot bergerak dengan sistem kemudi *Ackermann* dan penggerak roda belakang differensial," 2019.
- [27] S. D. Phillips, W. T. Estler, T. Doiron, K. Eberhardt, and M. Levenson, "A careful consideration of the calibration concept," *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 106, no. 2, p. 371, 2001.
- [28] D. A. Freedman, *Statistical models: theory and practice*. cambridge university press, 2009.
- [29] N. Zambetti and K. Söderby, "A guide to arduino & the i2c protocol (two wire)," Nov 2021. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/wire>
- [30] G. T. Laureano, M. S. V. de Paiva, A. da Silva Soares, and C. J. Coelho, "A topological approach for detection of chessboard patterns for camera calibration," in *Emerging Trends in Image Processing, Computer Vision and Pattern Recognition*. Elsevier, 2015, pp. 517–531.

- [31] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, 2000.
- [32] J. Heikkila and O. Silvén, "A four-step camera calibration procedure with implicit image correction," in *Proceedings of IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*. IEEE, 1997, pp. 1106–1112.
- [33] Mathworks, "Computer vision toolbox user's guide," *The MathWorks Inc*.
- [34] G. Anbarjafari, "Digital image processing," *Video Lectures on Digital Image Processing*. [Online]. Available: <https://sisu.ut.ee/imageprocessing/book/1>
- [35] 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>
- [36] G. Atali, Z. Garip, D. Karayel, and 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.