

Bab 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi simpulan yang diperoleh dari pembuatan dan pengujian SPT telah dilakukan dan saran untuk perbaikan serta pengembangan SPT selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perancangan dan pengontrolan SPT yang telah dilakukan pada penelitian ini, kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Mekanika *Euler-Lagrange* yang digunakan untuk memperoleh model matematika dari SPT pada (3.30) dan (3.31) dapat menjadi representasi purwarupa SPT yang dibuat pada penelitian ini.
2. Teorema Lyapunov yang digunakan untuk memperoleh persamaan kontrol (3.45) dapat membawa batang pendulum SPT menuju posisi di sekitar sudut $\theta = 0 \text{ rad}$.
3. Aturan Bryson yang diajukan pada [15] dapat digunakan untuk menentukan berat dari matriks Q dan R sehingga matriks K pada sinyal umpan balik LQR dapat diperoleh untuk melakukan stabilisasi batang pendulum pada posisi tegak lurus keatas.
4. Purwarupa dari SPT dapat dibangun sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk dapat lebih mengembangkan purwarupa SPT yang dibuat pada Tugas Akhir tahun 2020 ini, antara lain:

1. Mengembangkan SPT dengan memperhitungkan adanya gangguan eksternal.
2. Mengembangkan metoda alternatif untuk menentukan parameter motor DC.
3. Mengembangkan alternatif dari IDE MATLAB sebagai GUI untuk melakukan pengontrol dan menampilkan hasil respons dari SPT yang memiliki *latency* serta *delay* yang minim saat melakukan hubungan dengan sebuah mikrokontroler.
4. Memperbaiki desain rancang bangun SPT untuk mengurangi gangguan eksternal seperti getaran pada jalur kereta, dan getaran pada kereta yang disebabkan oleh *timing belt* yang rentan longgar.
5. Menambahkan metode untuk mengencangkan *timing belt* pada kereta SPT
6. Mengganti komponen sensor *rotary encoder* inkremental pada penelitian ini dengan sensor *rotary encoder* absolut agar menghasilkan pembacaan sudut yang lebih akurat.

Daftar Pustaka

- [1] K. H. Lundberg and T. W. Barton, "History of inverted-pendulum systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 42, no. 24, pp. 131–135, 2010.
- [2] O. Boubaker, "The inverted pendulum: A fundamental benchmark in control theory and robotics," in *International conference on education and e-learning innovations*. IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [3] S. Jadlovská and J. Sarnovsky, "Swingup and stabilizing control of classical and rotary inverted pendulum systems," in *Proceeding of the 12th Scientific Conference of Young Researchers (SCYR 2012)*. Herlany: The Technical University of Kosice. SCYR, 2012, pp. 38–41.
- [4] P. Bakaráč, M. Kalúz *et al.*, "Design and development of a low-cost inverted pendulum for control education," in *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*. IEEE, 2017.
- [5] C. W. Anderson, "Learning to control an inverted pendulum using neural networks," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 9, no. 3, pp. 31–37, 1989.
- [6] R. C. Ooi, "Balancing a two-wheeled autonomous robot," *University of Western Australia*, vol. 3, 2003.
- [7] M. O. Asali, F. Hadary, and B. W. Sanjaya, "Modeling, simulation, and optimal control for two-wheeled self-balancing robot." *International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708)*, vol. 7, no. 4, 2017.
- [8] C. Fathonah, "Analisis kestabilan dan kontrol optimal double pendulum terbalik pada kereta menggunakan metode linear quadratic regulator (lqr)," Ph.D. dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, 2016.
- [9] A. R. Octavia, D. Nathanlius, and T. A. Tamba, "Implementasi kontrol umpan balik keluaran berbasis tapis kalman dan regulator kuadratik linier pada sistem pendulum terbalik," *Jurnal Otomasi, Kontrol, dan Instrumentasi*, vol. 11, no. 2, p. 81, 2019.

- [10] J. Chandra, T. A. Tamba, and A. Sadiyoko, "Energy-based modeling and swing up control synthesis of an inverted pendulum system," in *2019 International Conference on Mechatronics, Robotics and Systems Engineering (MoRSE)*. IEEE, 2019, pp. 265–269.
- [11] L. B. Prasad, B. Tyagi, and H. O. Gupta, "Optimal control of nonlinear inverted pendulum system using pid controller and lqr: performance analysis without and with disturbance input," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 11, no. 6, pp. 661–670, 2014.
- [12] A. N. K. Nasir, M. A. Ahmad, and M. F. Rahmat, "Performance comparison between lqr and pid controllers for an inverted pendulum system," in *AIP Conference Proceedings*. AIP, 2008, pp. 124–128.
- [13] T. Yamakawa, "Stabilization of an inverted pendulum by a high-speed fuzzy logic controller hardware system," *Fuzzy sets and Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 161–180, 1989.
- [14] R. Lozano, I. Fantoni, and D. J. Block, "Stabilization of the inverted pendulum around its homoclinic orbit," *Systems & control letters*, vol. 40, no. 3, pp. 197–204, 2000.
- [15] I. Kapnisakis and F. Catarinacci, "Swinging up control of an inverted pendulum," Master's thesis, Aalborg Universitet, 2016.
- [16] S. B. Niku, *Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications*, 2nd ed. Wiley, 2010, vol. 1.
- [17] R. N. Jazar, *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control (2nd Edition)*, 2nd ed. Springer US, 2010.
- [18] W. Guo and D. Liu, "Nonlinear dynamic surface control for the underactuated translational oscillator with rotating actuator system," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11 844–11 853, 2019.
- [19] W. Levine, *Control System Applications*. CRC Press, 2018.
- [20] P. Kelly, *Elements of Mechanics*. CRC Press, 2016. [Online]. Available: https://books.google.co.id/books?id=ac_MBQAAQBAJ
- [21] H. K. Khalil, *Nonlinear systems*, 3rd ed. Prentice Hall, 2002.
- [22] J. Hespanha, *Linear Systems Theory*. Princeton University Press, 2009. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=tvd4ILdJUQoC>
- [23] G. DeJong and M. W. Spong, "Swinging up the acrobot: An example of intelligent control," in *Proceedings of 1994 American Control Conference-ACC'94*, vol. 2. IEEE, 1994, pp. 2158–2162.

- [24] M. B. H. David G. Alciatore, *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems, Fourth Edition*, 4th ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2011.
- [25] D. Seborg, D. Mellichamp, T. Edgar, and F. Doyle, *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, 2010. [Online]. Available: https://books.google.co.id/books?id=__PQ42kOvtfwC

