

## PERANCANGAN SISTEM KONTROL PID PADA EKSOSKELETON UNTUK MEMBANTU PERGERAKAN PERGELANGAN KAKI

\*Lauw, David Kennard Kristianto<sup>1</sup>, Mochammad Ariyanto<sup>2</sup>, Munadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: davidkennard03@gmail.com

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*) pada perangkat eksoskeleton pergelangan kaki untuk membantu pergerakan subjek pada medan datar. Masalah utama dalam pengendalian eksoskeleton berbasis kabel *bowden* adalah adanya osilasi dan latensi transmisi data yang dapat memengaruhi stabilitas bantuan torsi. Metode *tuning* Ziegler-Nichols digunakan untuk mendapatkan konstanta kontroler yang optimal dengan menetapkan *Ultimate Gain* ( $K_u$ ) sebesar 13 dan *Ultimate Period* ( $P_{cr}$ ) rata-rata sebesar 3,640 detik. Dari hasil kalkulasi tersebut, diperoleh nilai konstanta akhir  $K_p = 7.8$ ;  $K_i = 4.29$ ;  $K_d = 3.55$ . Validasi sistem dilakukan melalui pemodelan *plant* motor DC orde ketiga pada Simulink yang mengintegrasikan *transport delay* sebesar 50 ms untuk menyimulasikan karakteristik nirkabel ESP-NOW dan sensor MPU6050. Hasil pengujian eksperimen aktual menunjukkan performa sistem yang sangat responsif dengan *Rise Time* sebesar 0,750 detik, *Settling Time* 1,92 detik, serta *Overshoot* yang terkendali sebesar 8,51%. Pengujian dinamis menggunakan input sinusoidal dan *ramp* juga mengonfirmasi kemampuan sistem dalam melakukan *trajectory tracking* secara presisi dengan galat yang minimal. Dengan demikian, sistem kendali yang dirancang telah memenuhi kriteria keamanan dan stabilitas untuk aplikasi bantuan gerak pergelangan kaki.

**Kata kunci:** eksoskeleton pergelangan kaki; *esp-now*; pid; *trajectory tracking*; ziegler-nichols

### Abstract

*This research aims to design and implement a PID (Proportional-Integral-Derivative) control system for an ankle exoskeleton device to assist subject movement on flat ground. The primary challenge in controlling a bowden-cable-based exoskeleton lies in the presence of oscillations and data transmission latency, which can affect the stability of torque assistance. The Ziegler-Nichols tuning method was employed to obtain optimal controller constants by establishing an Ultimate Gain ( $K_u$ ) of 13 and an average Ultimate Period ( $P_{cr}$ ) of 3.640 seconds. From these calculations, the final constant values were determined as  $K_p = 7.8$ ;  $K_i = 4.29$ ;  $K_d = 3.55$ . System validation was conducted through a third-order DC motor plant model in Simulink, integrating a transport delay of 50 ms to simulate the characteristics of ESP-NOW wireless communication and the MPU6050 sensor. Actual experimental results demonstrated a highly responsive system performance, featuring a Rise Time of 0.750 seconds, a Settling Time of 1.92 seconds, and a controlled Overshoot of 8.51%. Dynamic testing using sinusoidal and ramp inputs further confirmed the system's capability to perform precise trajectory tracking with minimal error. Consequently, the designed control system has met the criteria for safety and stability for ankle movement assistance applications.*

**Keywords:** ankle exoskeleton; *esp-now*; pid; *trajectory tracking*; ziegler-nichols

### 1. Pendahuluan

Pergelangan kaki memiliki peran penting dalam stabilitas, keseimbangan, dan efisiensi energi selama berjalan. Gerakan *plantarflexion* dan *dorsiflexion* memungkinkan manusia beradaptasi dengan berbagai medan serta mengoptimalkan gaya dorong [1]. Namun, gangguan neuromuskular atau cedera ligamen sering menyebabkan penurunan kontrol otot yang berdampak pada gangguan mobilitas dan peningkatan biaya metabolik.

Eksoskeleton telah dikembangkan sebagai solusi augmentasi mobilitas dan rehabilitasi medis untuk memulihkan fungsi motorik dan mengurangi kelelahan otot [2]. Saat ini, sebagian besar eksoskeleton bersifat *rigid-frame* yang memiliki keterbatasan dalam fleksibilitas dan kenyamanan [3]. Oleh karena itu, pengembangan *soft wearable exoskeleton* berbasis kabel (*cable-driven*) menjadi solusi inovatif karena lebih ringan dan mampu beradaptasi dengan biomekanika alami pengguna.

Tantangan utama dalam pengembangan eksoskeleton *cable-driven* adalah karakteristik non-linearitas seperti kekenduran tali (*slack*) dan elastisitas yang mempersulit pengendalian presisi [4]. Sistem kontrol yang efektif, intuitif, dan aman menjadi kunci keberhasilan implementasi perangkat ini. Kontroler PID (*Proportional-Integral-Derivative*) sering menjadi pilihan karena kesederhanaannya namun efektif dalam melakukan *tracking* posisi dan torsi [5]. Penelitian ini berfokus pada perancangan sistem kendali PID pada prototipe eksoskeleton pergelangan kaki untuk mencapai respons yang stabil dan aman.

## 2. Metode Penelitian

Metodologi penelitian mencakup rancang bangun sistem, perancangan sistem kontrol PID, dan prosedur *tuning* PID.

### 2.1 Rancang Bangun Sistem

Sistem eksoskeleton ini menggunakan aktuasi kabel *Bowden* yang digerakkan oleh Motor DC JGB37-545. Penempatan aktuator dilakukan di pinggang untuk mengurangi massa inersia pada kaki (*distal mass*). Sensor IMU MPU6050 dipasang pada punggung kaki untuk mendeteksi sudut *pitch* dan fase *gait* secara *real-time* [6].

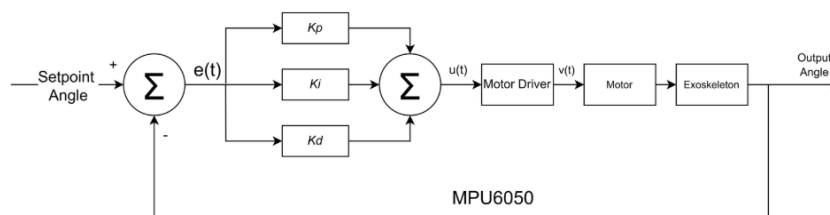
Arsitektur kontrol menggunakan dua mikrokontroler ESP32-C6 yang berkomunikasi secara nirkabel menggunakan protokol ESP-NOW untuk meminimalkan latensi [7]. Unit *Sender* bertugas mengakuisisi data sensor, sedangkan Unit *Receiver* menjalankan algoritma kontrol PID dan menggerakkan motor melalui driver L298N.

### 2.2 Desain Sistem Kontrol PID

Sistem kontrol dirancang dengan arsitektur lup tertutup (*closed-loop*) [9]. Sinyal kontrol  $u(t)$  dihitung berdasarkan selisih (*error*) antara *setpoint* sudut dan sudut aktual yang terbaca sensor [10], menggunakan persamaan:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Di mana  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  adalah konstanta Proporsional, Integral, dan Derivatif. Implementasi kode dilengkapi dengan mekanisme *Anti-Windup* untuk mencegah akumulasi *error* integral yang berlebihan [8].



Gambar 1. Blok Arsitektur Kontrol PID

### 2.3 Prosedur Tuning PID

Proses tuning dilakukan dengan metode osilasi Ziegler-Nichols untuk mengestimasi parameter sistem. Pengujian P-only ( $K_i=0$ ,  $K_d=0$ ) dengan menaikkan  $K_p$  (13, 15, 17) menunjukkan osilasi berkelanjutan di sekitar  $K_p=13$ . Dari data ini, diestimasi Ultimate Gain  $K_u = 13.0$  dan Ultimate Period ( $P_{cr}$ ) = 3.640 detik.

## 3. Hasil dan Pembahasan

Dalam penelitian ini, pada akhirnya mengarah pada pemilihan satu set konstanta PID final yang dianggap memberikan performa terbaik antara kecepatan dan stabilitas dalam batasan arsitektur kontroler yang digunakan.

### 3.1 Penentuan Konstanta PID (Ziegler-Nichols)

Pengujian awal dilakukan untuk mencari *Ultimate Gain* ( $K_u$ ). Pada saat  $K_p$  dinaikkan menjadi 13, sistem menunjukkan osilasi yang berkelanjutan dan stabil dengan amplitudo yang konsisten sehingga nilai  $K_p = 13$  ditetapkan sebagai  $K_u$ . Berdasarkan rata-rata dari 5 puncak siklus osilasi, diperoleh  $P_{cr} = 3.640$  detik, dari nilai tersebut, konstanta PID dapat dihitung sebagai berikut:

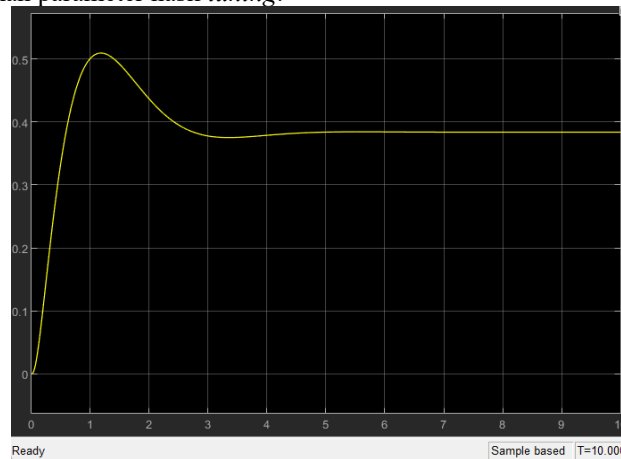
- $K_p = 0.6 \times K_u = 7.8$
- $K_i = K_p / (0.5 \times P_{cr}) = 4.29$
- $K_d = K_p \times (0.125 \times P_{cr}) = 3.55$

Sehingga diperoleh parameter final:  $K_p = 7.8, K_i = 4.29, K_d = 3.55$ .

### 3.2 Validasi Simulasi Simulink

Validasi dilakukan menggunakan model fungsi alih motor DC orde ketiga pada Simulink dengan menyertakan blok *Transport Delay* sebesar 50 ms untuk merepresentasikan latensi sistem nirkabel dan sensor. Hasil simulasi

ditunjukkan pada Gambar 2 bahwa sistem mampu mencapai kestabilan (*steady-state*) pada detik ke-4 tanpa osilasi berlebih, memvalidasi keamanan parameter hasil *tuning*.

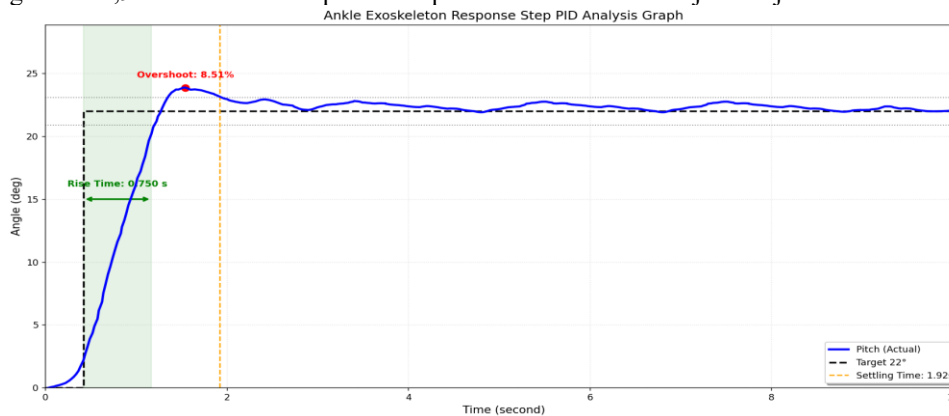


**Gambar 2.** Scope Respons Sistem Simulink

### 3.3 Performa Eksperimen Aktual

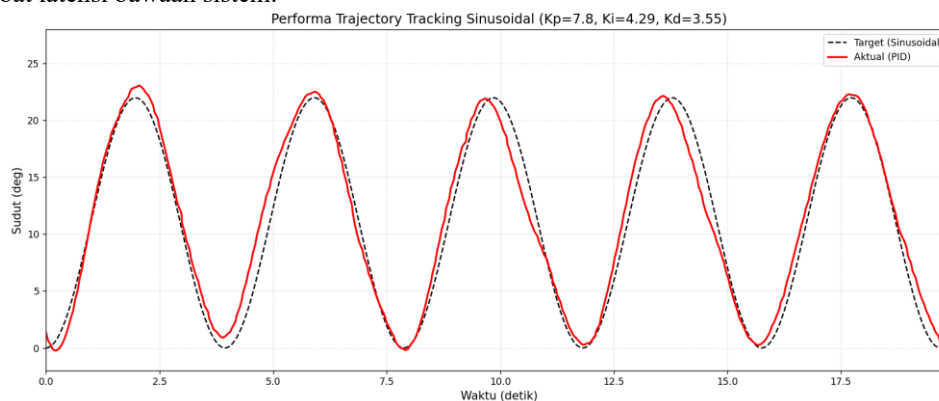
Pengujian aktual dilakukan pada subjek dengan input *step* (target 22 derajat). Grafik respons step pada Gambar 3 menunjukkan karakteristik sebagai berikut:

- Rise Time: 0,750 detik. Ini menunjukkan sistem sangat responsif dalam mencapai target.
- Overshoot: 8,51%. Nilai ini masih di bawah batas toleransi keamanan (<10%), sehingga aman bagi sendi pengguna.
- Settling Time: 1,92 detik. Sistem cepat mencapai kestabilan setelah terjadi lonjakan awal.



**Gambar 3.** Respons Step PID ( $K_p=7.8$ ,  $K_i=4.29$ ,  $K_d=3.55$ )

Selain itu, pada pengujian *Trajectory Tracking* dengan input sinusoidal, sistem mampu mengikuti pola gerakan dengan akurasi tinggi pada rentang 0-22 derajat digambarkan pada Gambar 4, meskipun terdapat sedikit keterlambatan fase (*phase lag*) akibat latensi bawaan sistem.



**Gambar 4.** Plot Trajectory Tracking

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang sistem kendali eksoskeleton pergelangan kaki berbasis *cabl-driven* menggunakan mikrokontroler ESP32. Penerapan metode *tuning* Ziegler-Nichols menghasilkan konstanta PID optimal ( $K_p = 7.8, K_i = 4.29, K_d = 3.55$ ) yang mampu mengatasi tantangan non-linearitas pada mekanisme kabel. Hasil eksperimen menunjukkan performa sistem yang responsif (*Rise Time* 0,750 s) dan aman (*Overshoot* 8,51%), serta mampu melakukan penelusuran lintasan gerak (*trajectory tracking*) dengan baik. Sistem ini dinilai layak untuk alat bantu rehabilitasi dan augmentasi mobilitas.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] Jacobson, M., Kantharaju, P., Vakacherla, S. S., & Kim, M. (2025). A Two-Degree-of-Freedom Ankle Exoskeleton With Control of Plantarflexion and Inversion-Eversion. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, doi: 10.1109/TMECH.2025.3532211.
- [2] Wang, Y., & Geng, Y. (2024). Barrier Lyapunov Function-based Adaptive Control of an Ankle Exoskeleton. *Proceedings - 2024 9th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering, CACRE 2024*, 350–354. doi: 10.1109/CACRE62362.2024.10635073.
- [3] Wang, G., Liu, Y., Liu, K., Jin, L., Yu, J., & Sun, Z. (2024). sEMG data driven-based anti-disturbance control enables adaptive interaction of lower limb rehabilitation exoskeleton. *Biomedical Signal Processing and Control*, 94, doi: 10.1016/j.bspc.2024.106347.
- [4] Di Natali, C., Poliero, T., Sposito, M., Graf, E., Bauer, C., Pauli, C., Bottenberg, E., De Eyto, A., O'sullivan, L., Hidalgo, A. F., Scherly, D., Stadler, K. S., Caldwell, D. G., & Ortiz, J. (2019). Design and Evaluation of a Soft Assistive Lower Limb Exoskeleton. *Robotica*, 37(12), 2014–2034. doi: 10.1017/S0263574719000067.
- [5] Rodriguez-Jorge, D., Zhang, S., Huang, J. Sen, Lopez-Sanchez, I., Srinivasan, N., Zhang, Q., Zhou, X., & Su, H. (2025). Biomechanics-Informed Mechatronics Design of Comfort-Centered Portable Hip Exoskeleton: Actuator, Wearable Interface, Controller. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, doi: 10.1109/TMRB.2025.3560394.
- [6] Sarajchi, M., Al-Hares, M. K., & Sirlantzis, K. (2021). Wearable Lower-Limb Exoskeleton for Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review of Mechanical Design, Actuation Type, Control Strategy, and Clinical Evaluation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 29, 2695–2720, doi: 10.1109/TNSRE.2021.3136088.
- [7] Sun, Y., Tang, Y., Zheng, J., Dong, D., Chen, X., & Bai, L. (2022). From sensing to control of lower limb exoskeleton: a systematic review. In *Annual Reviews in Control* (Vol. 53, pp. 83–96). Elsevier Ltd, doi: 10.1016/j.arcontrol.2022.04.003.
- [8] Ingraham, K. A., Rouse, E. J., & Remy, C. D. (2020). Accelerating the estimation of metabolic cost using signal derivatives: Implications for optimization and evaluation of wearable robots. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 27(1), 32–42, doi: 10.1109/MRA.2019.2954108.
- [9] Selvakumar, A., & Doss, A. (n.d.). *A Standardised Review On Ankle-Foot Exoskeleton*. Retrieved <https://www.researchgate.net/publication/359208809>
- [10] Yao, Y., Shao, D., Tarabini, M., Moezi, S. A., Li, K., & Saccomandi, P. (2024). Advancements in Sensor Technologies and Control Strategies for Lower-Limb Rehabilitation Exoskeletons: A Comprehensive Review. In *Micromachines* (Vol. 15, Number 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/mi15040489.