

RANCANG BANGUN KONTROLER PID PADA EKSOSKELETON LOWER-LIMB SENDI PAHA

Nicolas Arthur Utomo^{1*}, Mochammad Ariyanto², Munadi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: nicolasutomo1112@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini mengembangkan prototipe eksoskeleton tungkai bawah *cable-driven* terkontrol PID sebagai *proof of concept* untuk asistensi berjalan bagi lansia dengan pelemahan otot. *Tuning* PID (ZN awal $K_p=12.0$, $K_i=18.81$, $K_d=1.91$; final $K_p=12.0$, $K_i=1.88$, $K_d=1.91$) dievaluasi dengan membandingkan pola sudut paha *baseline* vs eksoskeleton saat berjalan/naik tangga (RMSE, Pearson, DTW). Hasil menunjukkan eksoskeleton mengikuti pola dasar ($r>0.95$), namun dengan deviasi moderat (RMSE~6.2°) dan keterbatasan signifikan (overshoot ~5.5%, osilasi PWM -60, limitasi ekstensi) akibat arsitektur kontroler awal yang suboptimal. Disimpulkan bahwa konsep dasar terbukti, namun refactoring kode kontroler mutlak diperlukan untuk performa optimal.

Kata kunci: analisis gait; *cable-driven*; dtw; eksoskeleton; kontrol pid

Abstract

This research developed a PID-controlled, cable-driven lower limb exoskeleton prototype as a proof-of-concept for walking assistance for the elderly with muscle weakness. PID tuning (initial Ziegler-Nichols $K_p=12.0$, $K_i=18.81$, $K_d=1.91$; final $K_p=12.0$, $K_i=1.88$, $K_d=1.91$) was evaluated by comparing baseline vs. exoskeleton thigh angle patterns during walking/stair ascent (RMSE, Pearson, DTW). Results show the exoskeleton followed basic patterns ($r>0.95$), but with moderate deviation (RMSE~6.2°) and significant limitations (overshoot ~2.2%) due to the suboptimal initial controller architecture. The proof of concept was achieved, but controller code refactoring is essential for optimal performance.

Keywords: cable-driven; dtw; exoskeleton; gait analysis; pid control

1. Pendahuluan

Mobilitas merupakan aspek fundamental dalam kualitas hidup manusia, terutama bagi populasi lansia. Proses penuaan seringkali disertai pelemahan otot kaki (sarcopenia), yang menyebabkan kesulitan berjalan dan meningkatkan risiko jatuh [1], [2]. Teknologi robotik, khususnya eksoskeleton tungkai bawah, menawarkan potensi signifikan sebagai alat bantu gerak (*assistive device*) untuk membantu lansia mempertahankan kemandirian [3]. Eksoskeleton aktif, yang menggunakan aktuator untuk memberikan gaya bantuan eksternal [4], diharapkan dapat mengurangi beban fisik dan memandu pola gerakan..

Pengembangan sistem kontrol yang efektif menjadi kunci keberhasilan eksoskeleton aktif, yang harus intuitif dan aman [5]. Kontroler PID (*Proportional-Integral-Derivative*) sering menjadi pilihan dasar karena kesederhanaannya [6]. Namun, implementasinya pada mekanisme non-konvensional seperti *cable-driven* (penggerak kabel) menghadirkan tantangan. Mekanisme *cable-driven*, meskipun ringan dan fleksibel [7], memiliki karakteristik non-linearitas seperti kekenduran tali (*slack*) dan elastisitas yang mempersulit *tuning* PID.

Penelitian ini berfokus pada perancangan, implementasi, dan evaluasi sistem kontrol PID pada prototipe eksoskeleton *cable-driven low-cost* sebagai *proof of concept* untuk asistensi fase ayun saat berjalan. Kinerja sistem dievaluasi melalui analisis respons *tuning* dan perbandingan kuantitatif (RMSE, Korelasi Pearson, DTW) pola sudut paha pengguna saat berjalan datar dan menaiki tangga antara kondisi *baseline* dan kondisi berbantuan..

2. Metode Penelitian

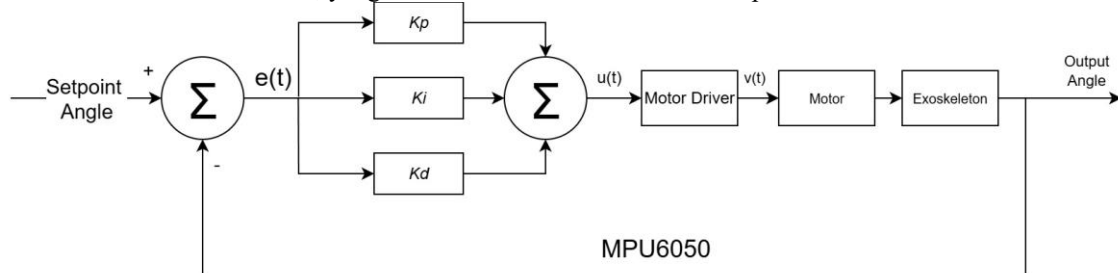
Metodologi penelitian mencakup perancangan sistem, implementasi perangkat lunak, prosedur *tuning* PID, dan metode analisis data.

2.1 Perancangan Sistem dan Perangkat Lunak

Sistem eksoskeleton (Gambar. 1) terdiri dari tiga mikrokontroler ESP32-C6. Dua unit *sender* pada paha membaca data dari sensor IMU MPU6050. *Sender* mengimplementasikan Kalman Filter pada frekuensi 100 Hz untuk estimasi sudut *pitch* yang akurat, mengatasi *noise* akselerometer dan *drift* giroskop. Data sudut dikirim via ESP-NOW ke *receiver* pusat.

Receiver (ESP32) menjalankan logika kontrol *event-driven*, dimana *update()* kontroler dipicu oleh kedatangan data. Kontroler mengimplementasikan *state machine* (IDLE, CONTROLLING_TO_TARGET, RETURNING_TO_ZERO) dengan *trigger* sudut $> 5^\circ$.

Secara krusial, *output* PWM dari perhitungan PID ($u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$). Logika ini, yang digunakan dalam eksperimen, secara fundamental mengubah respons kontroler. Sinyal PWM menggerakkan motor DC JGB37-545 melalui *driver* BTS7960, yang menarik tali untuk asistensi fleksi paha.



Gambar 1. Blok Arsitektur Sistem Eksoskeleton.

2.2 Prosedur Tuning PID

Proses *tuning* dilakukan dalam dua tahap. Pertama, metode osilasi Ziegler-Nichols digunakan pada kode stabil (sebagai acuan teoritis) untuk mengestimasi parameter sistem. Pengujian P-only ($K_i=0$, $K_d=0$) dengan menaikkan K_p (10, 20, 30) menunjukkan osilasi berkelanjutan di sekitar $K_p=20$. Dari data ini, diestimasi Ultimate Gain $K_u=20.0$ dan Ultimate Period $T_u=1.28$ detik. Menggunakan rumus ZN PID klasik, gain awal dihitung: $K_p=12.0$, $K_i=18.8$, $K_d=1.91$.

Kedua, gain ZN awal ini diuji pada kode *receiver*. Hasilnya menunjukkan overshoot masif ($\sim 33.3\%$) dan osilasi parah. Oleh karena itu, dilakukan *fine-tuning* manual dengan fokus utama mengurangi K_i . Setelah beberapa iterasi (termasuk $K_i=1.88$ dan $K_i=0.94$), gain $K_p=12.0$, $K_i=1.88$, $K_d=1.91$ dipilih sebagai konstanta PID final karena memberikan kompromi terbaik (respons cepat dengan overshoot minimal $\sim 2.2\%$).

2.3 Pengambilan dan Analisis Data

Data sudut paha (kiri dan kanan) direkam dari satu subjek penelitian menggunakan skrip logger Python. Perekam dilakukan untuk empat kondisi: baseline berjalan datar, baseline naik tangga, eksoskeleton berjalan datar (dengan PID final), dan eksoskeleton naik tangga (dengan PID final).

Analisis perbandingan kuantitatif antara data *baseline* dan data eksoskeleton (fokus pada paha kiri) dilakukan menggunakan Python. Penggunaan metrik kuantitatif umum digunakan dalam analisis biomekanika *gait* dan perbandingan pola gerak [8], [9]. Tiga metrik digunakan:

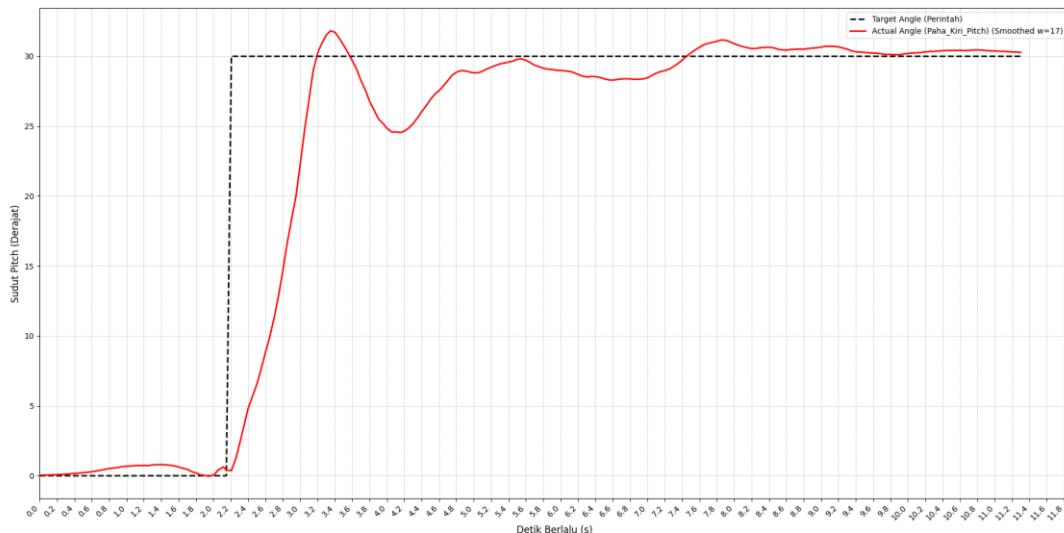
1. RMSE (Root Mean Square Error): Mengukur deviasi amplitudo rata-rata.
2. Korelasi Pearson (r): Mengukur kemiripan tren linear.
3. DTW (Dynamic Time Warping): Mengukur kemiripan bentuk pola dengan toleransi pergeseran waktu.

3. Hasil dan Pembahasan

Dalam penelitian ini, pada akhirnya mengarah pada pemilihan satu set konstanta PID final yang dianggap memberikan kompromi terbaik antara kecepatan dan stabilitas dalam batasan arsitektur kontroler yang digunakan. Performa kuantitatif dari *tuning* final ini, termasuk metrik seperti Rise Time, Overshoot Percentage, dan Settling Time, akan disajikan sebagai dasar evaluasi efektivitas kontroler PID yang telah di-*tuning*.

3.1 Performa Kontroler PID Final

Respons sistem terhadap step input (target 30°) menggunakan gain final $K_p=12.0$, $K_i=1.88$ dan $K_d=1.91$ pada kode asli disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Performa Kontroler PID (Ziegler-Nichols)

Sistem mencapai rise time (10-90%) sekitar 696 ms dan overshoot puncak $\sim 2.2\%$ ($\sim 30.66^\circ$). Meskipun overshoot awal tampak terkontrol, settling time menjadi sangat panjang (> 2.5 detik) karena sistem gagal stabil. Seperti terlihat pada data log, output PWM terjebak pada nilai -60 untuk waktu yang lama setelah overshoot, menyebabkan osilasi persisten.

3.2 Analisis Perbandingan Pola Gerak

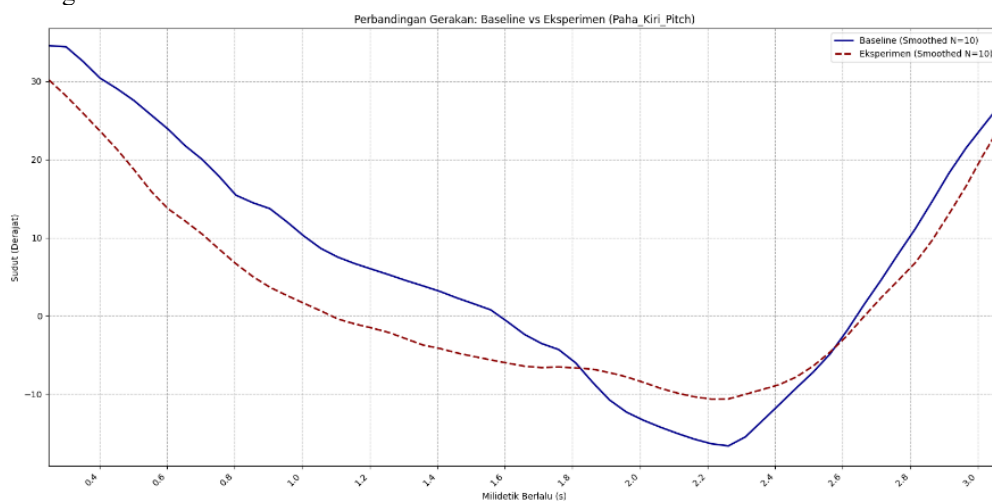
Perbandingan kuantitatif antara pola sudut baseline dan eksoskeleton diringkas pada Tabel 1.

Korelasi Pearson yang sangat tinggi ($r > 0.95$) untuk kedua aktivitas mengindikasikan bahwa eksoskeleton secara umum berhasil mengikuti tren naik-turun gerakan alami pengguna. Nilai RMSE yang moderat (~ 6.2 - 6.3°) menunjukkan adanya deviasi amplitudo rata-rata yang konsisten.

Table 1. Hasil Analisis Kuantitatif (Baseline vs Eksoskeleton - Paha Kiri)

Aktivitas	RMSE	Korelasi Pearson (r)	Jarak DTW
Jalan Datar	6.28	0.96	15.80
Naik Tanggs	6.21	0.98	9.20

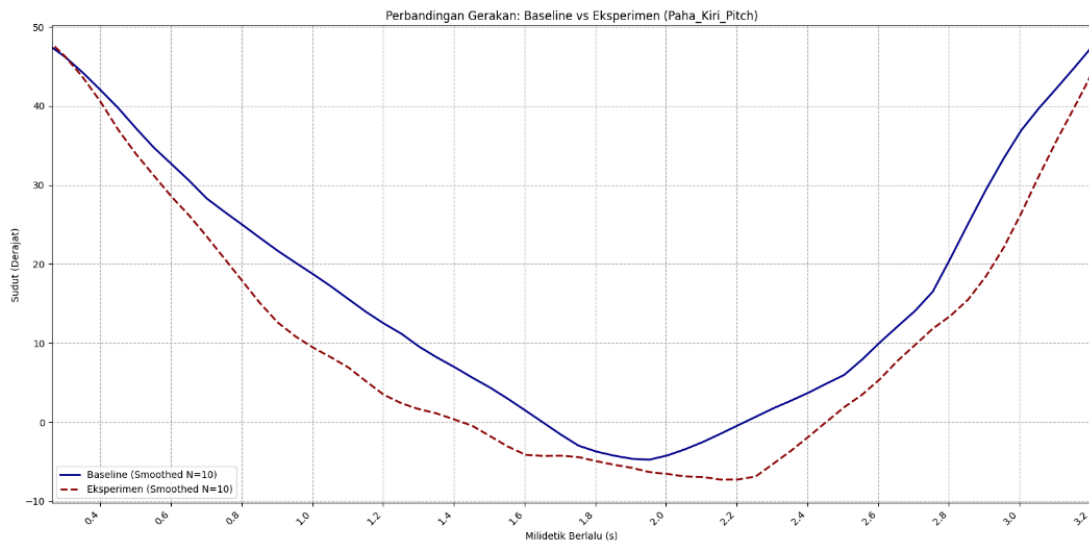
Pada berjalan datar (Gambar 3), analisis kualitatif dan nilai DTW yang tinggi (15.80) menunjukkan perbedaan bentuk pola yang signifikan. Terutama, eksoskeleton membatasi ekstensi paha (lembah $\sim 11^\circ$ vs $\sim 17^\circ$ baseline), kemungkinan menghambat fase terminal stance.



Gambar 3. Perbandingan Pola Sudut Berjalan Datar (Baseline vs Eksperimen)

Pada naik tangga (Gambar 4), nilai DTW yang jauh lebih rendah (9.20) dan korelasi r yang sangat tinggi (0.98) menunjukkan kemiripan bentuk pola yang lebih baik [10]. Puncak fleksi eksoskeleton ($\sim 55^\circ$) berhasil menyamai baseline

(~53°), jauh melampaui target PID 30°. Hal ini mengindikasikan bahwa kontroler tidak mampu membatasi gerakan dan kemungkinan gaya dorong pengguna mendominasi.



Gambar 4. Perbandingan Pola Sudut Naik Tangga (Baseline vs Eksperimen)

4. Kesimpulan

Penelitian proof-of-concept ini berhasil mengimplementasikan eksoskeleton tungkai bawah cable-driven terkontrol PID. Tuning pada arsitektur kontroler awal menghasilkan gain final $K_p=12.0$, $K_i=1.88$, $K_d=1.91$, yang mengontrol overshoot awal menjadi ~5.5% namun gagal mencapai stabilitasi akhir akibat osilasi PWM -60 yang disebabkan oleh keterbatasan fundamental kode (MIN_PWM_SPEED). Analisis perbandingan kuantitatif menunjukkan bahwa eksoskeleton mengikuti pola dasar gerakan ($r > 0.95$), namun tetap memiliki deviasi moderat (RMSE ~6.2°) dan memodifikasi kinematika alami, seperti limitasi ekstensi saat berjalan.%

5. Daftar Pustaka

- [1] E. Pantelaki, E. Maggi, and D. Crotti, 'Mobility impact and well-being in later life: A multidisciplinary systematic review', *Research in Transportation Economics*, vol. 86, May 2021, doi: 10.1016/j.retrec.2020.100975.
- [2] W. Pirker and R. Katzenschlager, 'Gait disorders in adults and the elderly: A clinical guide', *Wien Klin Wochenschr*, vol. 129, no. 3–4, pp. 81–95, 2017, doi: 10.1007/s00508-016-1096-4.
- [3] N. Zhang and Q. Yang, 'Public transport inclusion and active aging: A systematic review on elderly mobility', Apr. 01, 2024, *KeAi Communications Co.* doi: 10.1016/j.jtte.2024.04.001.
- [4] S. K. Hasan and A. K. Dhingra, 'Performance verification of different control schemes in human lower extremity rehabilitation robot', *Results in Control and Optimization*, vol. 4, no. June, p. 100028, 2021, doi: 10.1016/j.rico.2021.100028.
- [5] S. An, E. Song, H. Choi, and K. Kong, 'Measurement of Force Myography in Level Gait and Stair Gait', in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., Sep. 2022, pp. 484–489. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.559.
- [6] M. S. Amiri, R. Ramli, and M. F. Ibrahim, 'Hybrid design of PID controller for four DoF lower limb exoskeleton', *Appl Math Model*, vol. 72, pp. 17–27, 2019, doi: 10.1016/j.apm.2019.03.002.
- [7] L. Sun, A. Deng, H. Wang, Y. Zhou, and Y. Song, 'A soft exoskeleton for hip extension and flexion assistance based on reinforcement learning control', *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, pp. 1–18, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-89764-w.
- [8] H. Dhiman and R. Kumar, 'Measurement : Digitalization An Internet of Things-enabled smart glove for brain stroke rehabilitation', *Measurement: Digitalization*, vol. 1, no. April, p. 100001, 2025, doi: 10.1016/j.meadig.2025.100001.
- [9] L. Morris, R. S. Diteesawat, N. Rahman, A. Turton, M. Cramp, and J. Rossiter, 'The-state-of-the-art of soft robotics to assist mobility: a review of physiotherapist and patient identified limitations of current lower-limb exoskeletons and the potential soft-robotic solutions', Dec. 01, 2023, *BioMed Central Ltd.* doi: 10.1186/s12984-022-01122-3.
- [10] D. Pan, F. Gao, Y. Miao, and R. Cao, 'Co-simulation research of a novel exoskeleton-human robot system on humanoid gaits with fuzzy-PID/PID algorithms', *Advances in Engineering Software*, vol. 79, pp. 36–46, 2015, doi: 10.1016/j.advengsoft.2014.09.005.