

MODEL DINAMIKA TERBALIK UNTUK ROBOT REHABILITASI EKSTREMITAS BAWAH DENGAN MENGGUNAKAN METODE LAGRANGIAN

INVERS DYNAMICS MODEL FOR LOWER LIMB REHABILITATION ROBOT USING LAGRANGIAN METHOD

Ulfah Khairiyah Luthfiyani^{1*}, Tris Dewi Indraswati², Adi Setiawan³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Indonesia.
Jl. Raya Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan, Indonesia
Email korespondensi: ulfahkl.elektro@iti.ac.id

ABSTRAK

Pesatnya perkembangan teknologi robotik membawa pengaruh yang cukup besar terhadap perangkat kedokteran seperti pada alat rehabilitasi. Salah satu hasil implementasi dari perkembangan teknologi robotik tersebut adalah robot rehabilitasi ekstremitas bawah yang biasa digunakan untuk latihan rehabilitasi pasien yang mengalami kesulitan berjalan akibat stroke atau kecelakaan. Penggunaan robot jenis ini dapat mengurangi jumlah terapis dan meringankan beban mereka saat menopang badan pasien selama proses latihan berlangsung. Selain itu, robot rehabilitasi bertujuan untuk meningkatkan efektifitas latihan rehabilitasi pasien dengan sistem pelatihan yang aman, nyaman, dan terukur. Untuk mencapai tujuan ini maka diperlukan model dinamis robot yang dapat mengenali pola gaya berjalan pasien. Makalah ini mengusulkan model dinamika terbalik robot rehabilitasi ekstremitas bawah menggunakan metode Lagrangian dengan memanfaatkan informasi kinematis dengan berbagai gerakan dan momentum untuk mendapatkan parameter penggerak setiap link pada model exoskeleton ekstremitas bawah. Penerapan tiga fasa gerakan berjalan pada model robot yang mempertimbangkan kendala fisik dan lingkungan telah menghasilkan torsi pada setiap sendi yang dapat digunakan sebagai nilai masukan model dinamika maju pada penelitian selanjutnya untuk mendapatkan gerakan berjalan yang natural.

Kata kunci: model dinamika terbalik, robot rehabilitasi ekstremitas bawah, pola gaya berjalan, metode lagrangian, torsi

ABSTRACT

The rapid development of robotic technology has had a considerable influence on medical devices such as rehabilitation equipment. One of the robotics implementations is a lower limb rehabilitation robot that is commonly used for patients who have walking limitations due to stroke, accident, or even paralysis. This robot is designed to reduce the number of therapists and relieve their duties in assisting and guiding patients during their walking training. Besides that, this robot is intended to increase the effectiveness of lower limb rehabilitation exercises while maintaining a safe, comfortable, and scalable training system. To achieve these purposes, a dynamic robot model that can recognize patient movements is needed. This paper proposes an inverse dynamic model for lower limb rehabilitation robot using the Lagrangian method by utilizing kinematic information in various motions and momentums in order to obtain the driving parameters of each link and joint. The three phases of walking motion that are implemented into robot model considering physical and environmental constraints have generated the joint

torques which can be used as an input value for the forward dynamic model to obtain a natural walking motion in future studies.

Keywords: *inverse dynamics model, lower limb rehabilitation robot, gait patterns, lagrangian method, torque*

1. Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir, robotik telah dikembangkan dan diimplementasikan sebagai perangkat kesehatan seperti perangkat untuk pelatihan rehabilitasi pasien. Perawatan medis yang perlu dilakukan untuk rehabilitasi meliputi penilaian cedera pasien, pengembangan program pelatihan rehabilitasi, dan evaluasi keterbalikan pasien [1]. Pada umumnya, proses rehabilitasi yang bertujuan untuk mengembalikan fungsi motorik pasien dilakukan secara konvensional dengan bantuan beberapa fisioterapis untuk menopang tubuh pasien. Kunci keberhasilan dari latihan rehabilitasi tersebut adalah intensitas dan durasi latihan terapi fisik. Namun, karena pelatihan rehabilitasi konvensional saat ini sangat bergantung pada fisioterapis yang memiliki keterbatasan waktu, tenaga, dan ketepatan maka hal ini dapat menghambat rutinitas latihan rehabilitasi pasien. Oleh karena itu, pelatihan rehabilitasi otomatis dengan bantuan robot sangatlah dibutuhkan.

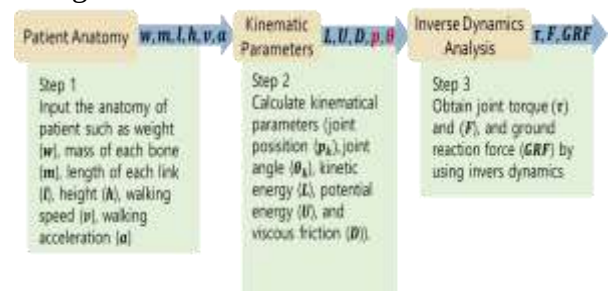
Penggunaan robot adalah sebuah upaya dalam meningkatkan efektivitas program rehabilitasi pasien [2]. Robot juga dapat menghasilkan gerakan berulang yang akurat dan secara selektif mengatur beban, arah, dan waktu yang berubah-ubah, mengukur gerakan dan keterbalikan aktual pasien, memberikan umpan balik yang cepat selama pelatihan motorik berlangsung, dan memungkinkan metode terapeutik baru dengan mengubah interaksi pasien-robot untuk meningkatkan kekuatan otot serta merangsang plastisitas saraf selama pemulihan pasien [3-7]. Robot rehabilitasi ekstremitas bawah yang paling terkenal adalah Lokomat by Hocoma dengan endpoint-type end-effector dengan penyangga berat badan yang dinamis dan menggunakan treadmill. Lokomat memungkinkan translasi lateral dan rotasi transversal panggul untuk mengaktifkan otot inti dan mendapatkan keseimbangan selama latihan berjalan. Melalui eksperimen untuk menguji kinerja klinis rehabilitasi berbasis Lokomat, penulis [8] dan [9] melaporkan bahwa Lokomat memiliki kemampuan mengatur berjalan pasien mulai dari jarak berjalan, kekuatan, tingkat fungsional mobilitas, dan kemandirian pasien.

Analisis gerakan manusia seperti pola gaya berjalan, sudut dan torsi sendi, kekuatan otot, dan adaptasi terhadap lingkungan dapat langsung diterapkan ke strategi kontrol robot rehabilitasi dengan menerjemahkan gerakan manusia ke dalam robot selama sendi mekanis robot dicocokkan *one-to-one* dengan sendi anatomi manusia. Untuk mendapatkan kesesuaian antara gerakan robot dan manusia maka perlu dirancang sebuah model dengan sistem interaksi yang cukup kompleks antara struktur biomekanik robot dengan karakteristik tubuh pasien. Struktur biomekanik yang dibuat perlu mempertimbangkan model kinematika dan dinamika dengan mempertimbangkan karakteristik pasien dan kondisi lingkungan.

Tulisan ini akan menyajikan model dinamika terbalik yang mengacu pada model muskuloskeletal [10] dengan sistem *rigid link* yang memiliki tiga derajat kebebasan (3 DoF) dimana masing-masing DoF diaplikasikan pada pergelangan kaki, lutut, dan pinggul.

2. Metode Penelitian

Gerak berjalan pada manusia melibatkan interaksi yang begitu kompleks antara sistem otot dan skeleton. Komponen-komponen gerak seperti kinematika pada segmen tubuh dapat menjadi nilai masukan untuk menghitung dan merancang model dinamika robot. Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan fungsi dinamika robot rehabilitasi ini diilustrasikan sebagai berikut:



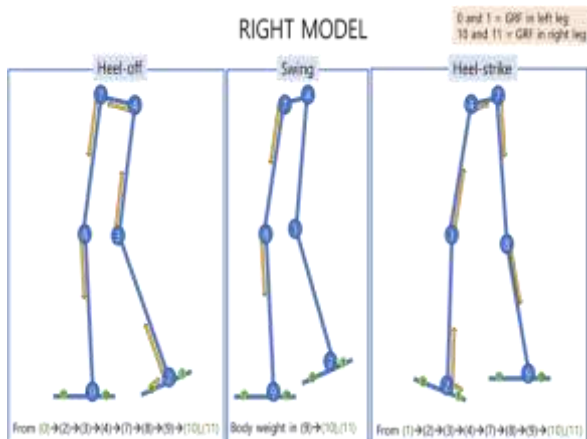
Gambar 1. Proses penentuan model dinamika robot menggunakan metode Lagrangian

Sesuai dengan Gambar 1 diatas, terdapat tiga langkah yang dilakukan untuk mendapatkan fungsi dinamika robot, antaralain:

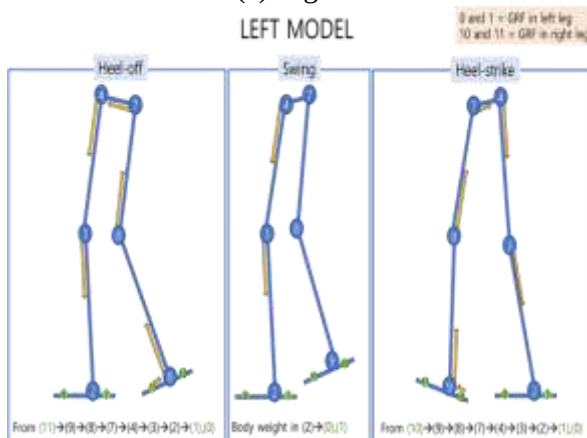
Tahap 1: kondisi anatomi pasien seperti massa dan panjang tulang, kemampuan berjalan (kecepatan dan akselerasi), berat dan tinggi pasien dijadikan nilai masukan untuk mendapatkan parameter kinematika robot.

Tahap 2: informasi anatomi pasien tersebut kemudian dijadikan referensi untuk menentukan parameter-parameter kinematika robot seperti koordinat (x_{gi}, y_{gi}, z_{gi}) posisi (p_{gi}), dan kecepatan ($\dot{p}_{gi}$) center of gravity (COG), energi kinetik ($\mathcal{L}_i$), energi potensial (U_i), dan viscous friction ($\mathcal{D}_i$) disetiap sendi.

Tahap 3: dalam menentukan model dinamika robot, parameter kinematika pada Tahap 2 digunakan dengan mencari fungsi Lagrangian untuk model kaki kanan dan kiri.



(a) Right model



(b) Left model

Gambar 2 Model dinamika robot rehabilitasi ekstremitas bawah dengan 6 segmen utama (3 sendi pada kaki kanan dan kiri) dan 4

segmen tambahan yang berfungsi untuk mendeteksi kontak kaki dengan permukaan tanah / lingkungan (2 titik kontak pada kaki kanan dan kiri).

Jika $\dot{p}_{gi}$ adalah matriks Jacobian yang berhubungan dengan sudut θ_i maka total energi kinetik, potensial, dan viscous friction dalam sistem dinamik dapat dinyatakan sebagai berikut dimana D adalah parameter gesekan dan I merupakan matriks inersia robot yang mempertimbangkan nilai gravitasi (g) pada setiap segmen i .

$$\mathcal{L}_i = \sum_{i=0}^{11} (\dot{\theta}_i^T I_i(\theta) \dot{\theta}_i) - \sum_{i=0}^{11} m_i g^T p_{gi} \quad (1)$$

$$U_i = \sum_{i=0}^{11} m_i g^T p_{gi} \quad (2)$$

$$\mathcal{D}_i = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{11} D_i \dot{\theta}_i^2 \quad (3)$$

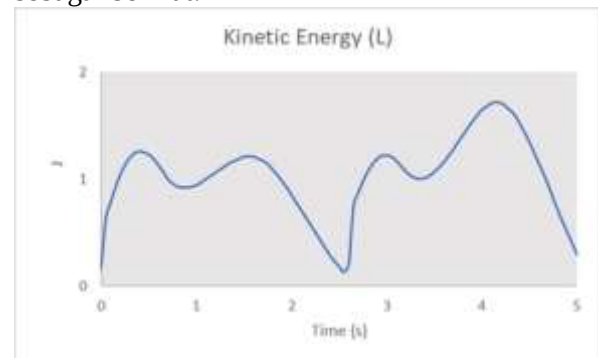
Dengan melakukan proses diferensiasi pada persamaan (1), (2), dan (3) berdasarkan model dinamika pada Gambar 2 maka diperoleh persamaan Lagrangian yang berfungsi untuk mencari nilai torsi dan gaya pada masing-masing segmen i seperti persamaan dibawah ini.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_i} + \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial \dot{\theta}_i} + \frac{\partial U}{\partial \theta_i} \quad (4)$$

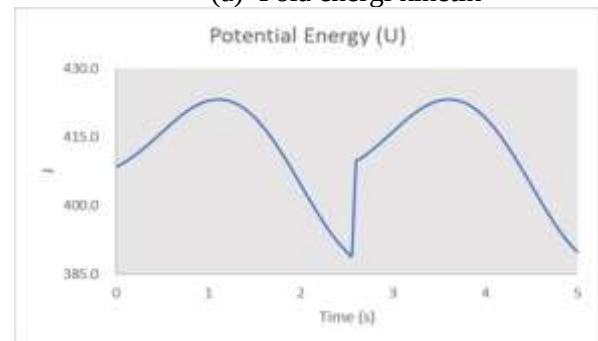
$$-F_{p_i} + F_{p_{i-1}} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{p}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial p_i} + \frac{\partial \mathcal{D}}{\partial \dot{p}_i} + \frac{\partial U}{\partial p_i} \quad (5)$$

3. Hasil dan Pembahasan

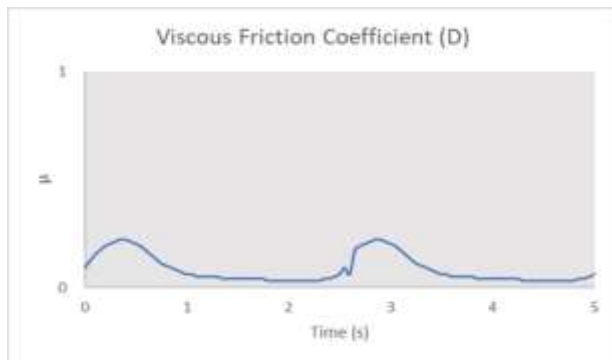
Berdasarkan pengujian persamaan (1-3) maka diperoleh parameter-parameter Lagrangian sebagai berikut.



(a) Pola energi kinetik



(b) Pola energi potensial



(c) Pola *viscous friction*

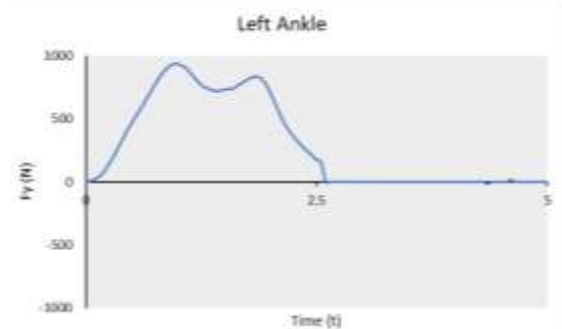
Gambar 3 Parameter-parameter Lagrangian dalam satu kali siklus gerakan berjalan.



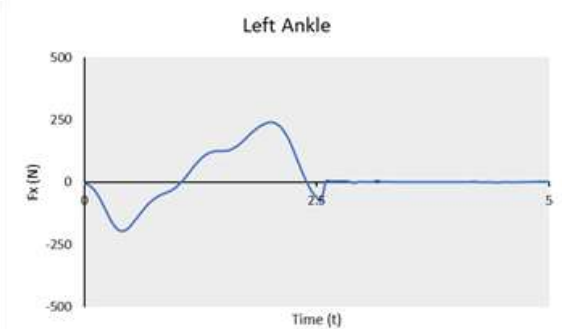
Gambar 4 Pola pergerakan torsi pada kaki kiri

Gambar 3 merupakan parameter-parameter Lagrangian untuk satu kali siklus berjalan yang menunjukkan pola-pola energi kinetik, energi potensial, dan *viscous friction* yang kemudian diaplikasikan kedalam persamaan (4) untuk memperoleh nilai torsi seperti pada Gambar 4 dari setiap segmen yang terhubung.

Pergantian model kanan dan kiri terjadi pada setiap setengah periode dengan $T = 5$ detik.



(a) Gaya horizontal pada kaki kiri



(b) Gaya vertikal pada kaki kiri

Gambar 5 Pola gaya pada kaki kiri

Pola gaya yang ditunjukkan pada Gambar 5 mengilustrasikan adanya kekuatan interaksi yang cukup untuk mendorong pergerakan pada kaki kiri yang dimulai sejak kaki mulai dari posisi *heel-off* menuju *swing* hingga ke posisi *stance* dimana terjadi perubahan model robot kanan (kaki kanan pada posisi *stance*) ke model robot kiri (kaki kiri pada posisi *stance*) seperti terlihat pada Gambar 2. Titik puncak yang ditampilkan pada Gambar 5 mengindikasikan bahwa telah terjadi interaksi antara kaki dan lingkungan (permukaan tanah) sehingga memungkinkan gerakan kontak yang natural.

4. Kesimpulan

Tulisan ini menyajikan model dinamika terbalik untuk robot rehabilitasi ekstremitas bawah dengan mengaplikasikan metode lagrangian untuk mendapatkan nilai torsi pada setiap segmen serta gaya horizontal dan gaya vertikal. Berdasarkan hasil pengujian melalui simulasi diperoleh bahwa model dinamika yang disajikan dapat mengukur interaksi yang terjadi antara tubuh manusia (kaki) dengan lingkungan (permukaan tanah). Selanjutnya, nilai yang diperoleh dalam penelitian ini akan digunakan untuk beberapa konfigurasi kinematika untuk

memverifikasi kelayakan model dinamika dan menjadi nilai masukan untuk mendapatkan model dinamika maju pada penelitian selanjutnya.

5. Daftar Pustaka

- [1] Langhorne, P., Bernhardt, J., & Kwakkel, G. (2011). Stroke rehabilitation. *The Lancet*, 377 (9778), 1693 –1702.
- [2] Hesse S, MD, & Uhlenbrock D.(2000). A mechanized gait trainer for restoration of gait. *Journal of Rehabilitation Research and Development* Vol. 37 No. 6, Pages 701-708.
- [3] Zhang, X., Yue, Z., & Wang, J. (2017). Robotics in Lower-Limb Rehabilitation after Stroke. *Behavioural Neurology*, 2017, 1–13.
- [4] Hesse, S., Mehrholz, J., & Werner, C. (2008). Robot-Assisted Upper and Lower Limb Rehabilitation After Stroke. *Deutsches Aerzteblatt Online*.
- [5] Robertson, J.V.G., Jarasse, N., Roby-Brami, A. (2010). Rehabilitation Robots: a compliment to virtual reality. *Schedae*. 77-94
- [6] Dundar, U., Toktas, H., Solak, O., Ulasli, A. M., & Eroglu, S. (2014). A Comparative Study of Conventional Physiotherapy Versus Robotic Training Combined with Physiotherapy in Patients with Stroke. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 21(6), 453–461.
- [7] Lo, K., Stephenson, M., & Lockwood, C. (2017). Effectiveness of robotic assisted rehabilitation for mobility and functional ability in adult stroke patients. *JBIC Database of Systematic Reviews and Implementation Reports*, 15(12), 3049–3091.
- [8] Li, L., Xiang, Z., Liu, H., Shao, Y., Zhang, J. (2017). Design and Simulation of Lower Limb Rehabilitation Robot Based on Human Physiological - 64 - Characteristics. *IOS Press, Advances in Transdisciplinary Engineering*, Vol. 5, Page: 428-437.
- [9] Calabrò, R. S., Cacciola, A., Bertè, F., Manuli, A., Leo, A., Bramanti, A., Bramanti, P. (2016). Robotic gait rehabilitation and substitution devices in neurological disorders: where are we now?. *Neurological Sciences*, 37(4), 503–514.
- [10] Luthfiyani, U. K. (2020). Kinematical and Dynamical Analysis on Robot Assisted Lower Limb Rehabilitation System. *Master Thesis*. Korea National University of Transportation.