

**ANALISIS KINEMATIKA GERAK ROBOT *UPPER-LIMB*
EXOSKELETON UNTUK LENGAN BAGIAN KIRI**

SKRIPSI



ALFIAN MUHAMMAD NUR

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK BIOMEDIS
DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS AIRLANGGA
2022**

**Analisis Kinematika Gerak Robot *Upper-Limb Exoskeleton*
untuk Lengan Bagian Kiri**

SKRIPSI

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Biomedis
pada Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Airlangga

Alfian Muhammad Nur
NIM 081711733028

Disetujui oleh :

Pembimbing I,



Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T.
NIP. 197903152003122002

Pembimbing II,



Akif Rahmatillah S.T., M.T.
NIP. 198601042008121002

LEMBAR PENGESAHAN NASKAH SKRIPSI

Judul : Analisis Kinematika Gerak Robot *Upper-Limb Exoskeleton* untuk Lengan Bagian Kiri
Penyusun : Alfian Muhammad Nur
NIM : 081711733028
Pembimbing I : Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T.
Pembimbing II : Akif Rahmatillah S.T., M.T.
Tanggal Seminar : 9 Juni 2022

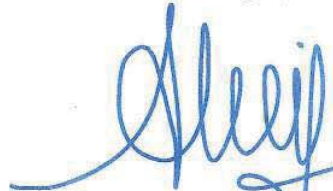
Disetujui oleh,

Pembimbing I,



Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T.
NIP. 197903152003122002

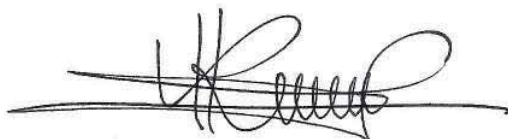
Pembimbing II,



Akif Rahmatillah S.T., M.T.
NIP. 198601042008121002

Mengetahui,

Ketua Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Airlangga



Herri Trilaksana, S.Si, M.Si. Ph.D.
NIP. 197712282003121003

Kepala Program Studi S1 Teknik Biomedis
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Airlangga



Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T.
NIP. 197903152003122002

PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI

Skripsi ini tidak dipublikasikan, namun tersedia di perpustakaan dalam lingkungan Universitas Airlangga. Diperkenankan untuk dipakai sebagai referensi kepustakaan, tetapi pengutipan harus seizin penyusun dan harus menyebutkan sesuai kebiasaan ilmiah. **Dokumen skripsi ini merupakan hak milik Universitas Airlangga.**

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Alfian Muhammad Nur

NIM : 081711733028

Program Studi : S1 Teknik Biomedis

Judul Skripsi : Analisis Kinematika Gerak Robot *Upper-Limb*
Exoskeleton untuk Lengan Bagian Kiri

Menyatakan dengan sungguh-sungguh bahwa bagian atau keseluruhan isi Skripsi ini tidak pernah diajukan untuk mendapat gelar akademis pada bidang studi dan/atau universitas lain dan tidak pernah dipublikasikan/ditulis oleh individu selain penyusun kecuali bila dituliskan dengan format kutipan dalam isi skripsi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku di Universitas Airlangga. Pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar tanpa paksaan dari pihak manapun.

Surabaya, 21 Juni 2022

Yang membuat pernyataan,



Alfian Muhammad Nur

NIM. 081711733028

Alfian Muhammad Nur, 2022. **Analisis Kinematika Gerak Robot *Upper-Limb Exoskeleton* untuk Lengan Bagian Kiri**. Skripsi ini di bawah bimbingan Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T. dan Akif Rahmatillah S.T., M.T. Program Studi Sarjana Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga.

ABSTRAK

Menurut data Riset Kesehatan Dasar Indonesia (Riskesdas) pada tahun 2018 jumlah kasus penyakit stroke nasional mencapai 10,9 per 1000 penduduk di atas usia 15 tahun atau mencapai lebih dari 2 juta orang pengidap penyakit stroke. Salah satu kecacatan yang paling sering ditemui dari pasien stroke adalah hemiparesis yaitu 70-80%. *Upper limb Exoskeleton* dapat menjadi pilihan rehabilitasi pasien paska stroke untuk perbaikan fungsi motorik pada anggota gerak atas. *Upper limb exoskeleton* yang dikembangkan dalam penelitian ini dimodelkan secara kinematika dengan bantuan MATLAB Robotics Toolbox berdasarkan parameter denavit hartenberg, *forward kinematic*, *inverse kinematic*, matriks jacobian, dan *joint space trajectory*. Dari pemodelan kinematika didapatkan nilai posisi *end of effector* dan nilai sudut pada *joint space trajectory* yang selanjutnya menjadi masukan sudut untuk menggerakkan robot *upper limb exoskeleton*. Untuk mengetahui akurasi terbaik yang dihasilkan dari bacaan sudut pada *joint robot* yang dibandingkan dengan sudut pada simulasi *joint space trajectory* dihitung dengan metode perhitungan *error root mean square error (RMSE)*. Dari hasil pengujian robot dengan inkremental 5, 7, 10, 20, 30, 40, dan 48 sudut didapatkan nilai error terkecil pada pengujian dengan inkremental sudut 7. Nilai RMSE (*joint 1, joint 2*) dengan inkremental 7 sudut untuk gerakan *flexion shoulder* yaitu (0.79450° , 0°), *50% flexion shoulder* (1.0510° , 0°), *flexion elbow* (0° , 0.7945°), dan *fully flexed arm* (0.7945° , 1.5336°).

Kata Kunci: Stroke, *Upper Limb Exoskeleton*, *Joint Space Trajectory*, *Forward Kinematic*, *Inverse Kinematic*, Matriks Jacobian

Alfian Muhammad Nur, 2022. **Analisis Kinematika Gerak Robot *Upper-Limb Exoskeleton* untuk Lengan Bagian Kiri**. *Thesis under the guidance of Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T. and Akif Rahmatillah S.T., M.T. Bachelor of Biomedical Engineering Bachelor Program, Science and Technology Faculty, Airlangga University.*

ABSTRACT

Indonesia Basic Health Research (Riskesdas) data in 2018 reported that the number of national stroke cases reached 10.9 per 1000 population over the age of 15 years or reached more than 2 million people with stroke. One of the most common disabilities found in stroke patients is hemiparesis, which is 70-80%. Upper limb exoskeleton can be a rehabilitation option for post-stroke patients to improve motor function in the upper limbs. The upper limb exoskeleton developed in this study was kinematically modeled with the help of the MATLAB Robotics Toolbox based on the Denavit Hartenberg parameters, forward kinematic, inverse kinematic, Jacobian matrix, and joint space trajectory. From the kinematics modeling, the end of effector position value and the angle value at the joint space trajectory are obtained which then becomes the angle input to move the upper limb exoskeleton robot. To find out the best accuracy resulting from the angle reading on the joint robot, which is compared with the angle in the joint space trajectory simulation, it is calculated using the root mean square error (RMSE) calculation method. From the results of testing the robot with incremental 5, 7, 10, 20, 30, 40, and 48 angles, the smallest error value is obtained in the test with an angle incremental of 7. The RMSE value (joint 1, joint 2) with an incremental of 7 angles for the flexion shoulder movement is (0.79450°, 0°), 50% flexion shoulder (1.0510°, 0°), elbow flexion (0°, 0.7945°), and fully flexed arm (0.7945°, 1.5336°).

Keywords: Stroke, Upper Limb Exoskeleton, Joint Space Trajectory, Forward Kinematic, Inverse Kinematic, Jacobian Matriks

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kepada Allah SWT yang selalu memberikan berkat rahmat, hidayah, dan karunia-Nya kepada penulis sehingga skripsi ini dapat diselesaikan. Meskipun skripsi ini selesai tidak tepat waktu, namun hal tersebut menjadikan penulis lebih memahami arti dari sebuah proses pembelajaran.

Perjalanan dalam menyelesaikan tugas terakhir perkuliahan ini merupakan jalan yang tidak mudah bagi penulis. Melewati satu tahun lebih perjuangan, bertemu untuk menimba ilmu dari banyak orang, dan lain hal yang tidak bisa disebutkan satu per satu. Proses penulisan skripsi ini selesai dalam masa pandemi COVID-19, bersama teman-teman lain yang juga berjuang untuk mendapatkan gelar dari kampus tercinta, Universitas Airlangga.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat akademik guna mendapatkan Gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis mendapat banyak bantuan, bimbingan, dan arahan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

1. Orang tua penulis, Abah dan Emak yang selalu mendorong penulis untuk segera menyelesaikan skripsi serta memberikan doa setiap waktu.
2. Bapak Prof. Dr. Moh. Yasin, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga.
3. Bapak Herri Trilaksana, S.Si, M.Si. Ph.D, selaku Kepala Departemen Fisika Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga.
4. Ibu Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T. selaku selaku Koordinator Program Studi S-1 Teknik Biomedis serta dosen pembimbing I atas bimbingan dan arahnya selama proses penyusunan proposal skripsi.
5. Bapak Akif Rahmatillah S.T., M.T. selaku dosen pembimbing II atas bimbingan dan arahnya selama proses penyusunan proposal skripsi.

6. Ibu Prof. Dr. Suryani Dyah Astuti, S.Si., M.Si. selaku dosen wali yang telah membantu melancarkan proses perkuliahan penulis.
7. Tim pengajar S-1 Teknik Biomedis yang telah membimbing serta memberikan wawasan ilmu selama di bangku perkuliahan.
8. Teman-teman Teknik Biomedis Universitas Airlangga angkatan 2017 – *Abducens*, yang telah bersama-sama berjuang dari awal perkuliahan hingga akhir dengan berbagai pertikaian, air mata, dan kasih sayang.
9. Keluarga besar Himpunan Mahasiswa Teknik Biomedis (HMTB) yang menjadi tempat pengembangan diri serta selalu memberikan dukungan.
10. Asrama Bhinneka Tunggal Ika yang menjadi tempat tinggal sehingga membantu penulis untuk bisa hidup berkecukupan dan dulur-dulur asrama yang menjadi motivasi penulis untuk segera menyelesaikan perkuliahan.
11. Lolik, Yudi, Hilmy, Farid, dan Hafidh yang sampai akhir penulisan menemani dan memotivasi penulis.
12. Mas Amin, mas Aji, mas Wildan, dan Arijal yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan robot di workshop IBE Reality.
13. Tim Pejuang Muda Timor Tengah Selatan – Kampus Merdeka, yang kebersamaan penulis di masa jeda penulisan dan menjadi teman penulis selama mengabdikan diri di NTT.
14. Semua pihak yang telah memberikan semangat dan bantuannya selama penyusunan skripsi yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis berharap skripsi ini sedikit banyaknya dapat memberi manfaat baik kepada penyusun sendiri dan juga yang lainnya.

Surabaya, 21 Juni 2022

Penulis

Alfian Muhammad Nur

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN NASKAH SKRIPSI	iii
PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI	iv
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	xvi
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	4
1.4. Tujuan Penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA	5
2.1. Stroke	5
2.2. Eksoskeleton	5
2.3. Dasar Teori Kinematika Robot	7
2.2.1. Anatomi Robot Lengan	7
2.2.2. Derajat Kebebasan (DOF)	8
2.2.3. Parameter DH	9
2.2.4. Forward Kinematics (Kinematika Maju)	13
2.2.5. Inverse Kinematics (Kinematika Balik)	13
2.2.6. Matriks Jacobian	15
2.2.7. Trajectory Planning dan Joint Space Trajectory	16
2.3. Motor Servo	16
2.4. Mikrokontroler STM32F446 Arm-Nucleo	17
2.5. Robotics Toolbox MATLAB	18

2.6. Root Mean Square Error	19
2.7. Rotary Encoder.....	19
2.8. <i>Limit Switch</i> / Saklar Pembatas	20
2.9. Arduino IDE.....	21
2.10. USB TTL.....	21
2.11. Level Converter.....	22
BAB III METODE PENELITIAN.....	23
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	23
3.2. Peralatan dan Bahan Penelitian	23
3.2.1. Peralatan Penelitian	23
3.2.2. Bahan penelitian	24
3.3. Prosedur Penelitian.....	24
3.3.1. Persiapan	25
3.3.2. Perhitungan Kinematika dari <i>Upper-limb Exoskeleton</i>	26
3.3.3. Instalasi Sistem Elektronika pada Eksoskeleton	27
3.3.4. Perancangan Algoritma Gerak Eksoskeleton	28
3.3.5. Pengujian	29
3.3.6. Analisis	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1. Kerangka Eksoskeleton.....	31
4.2. Perangkaian Perangkat <i>Upper-limb Exoskeleton</i>	31
4.3. Perhitungan Kinematika <i>Upper-limb Exoskeleton</i>	34
4.3.1 Parameter Denavit Hartenberg	34
4.3.2 Hasil Model Kinematika	35
4.3.3 Forward Kinematics	37
4.3.4 Inverse Kinematics	38
4.3.5 Matriks Jacobian.....	39
4.3.6 Joint Space Trajectory – Trajectory Planning	40
4.4. Hasil Kinerja <i>Upper Limb Exoskeleton</i>	42
4.5. Tahap Pengujian.....	44
4.4.1 5 Inkremental Sudut	44
4.4.2 7 Inkremental Sudut	45

4.4.3	10 Inkremental Sudut	47
4.4.4	20 Inkremental Sudut	48
4.4.5	30 Inkremental Sudut	48
4.4.6	40 Inkremental Sudut	48
4.4.7	48 Inkremental Sudut	48
4.6.	Hasil Perhitungan Error	49
4.7.	Analisis Hasil	49
4.7.1	Simulasi <i>Upper Limb Exoskeleton</i>	49
4.7.2	Implementasi <i>Upper Limb Exoskeleton</i>	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		58
5.1.	Kesimpulan	58
5.2.	Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA		59
LAMPIRAN.....		62

DAFTAR TABEL

Nomor	Judul Tabel	Halaman
Tabel 2. 1	DH-Parameter Upper-limb Exoskeleton.....	12
Tabel 3. 1	Tabel hasil simulasi dan pengujian robot.....	30
Tabel 4. 1	Ukuran lengan robot eksoskeleton.....	31
Tabel 4. 2	Tabel Parameter DH untuk upper-limb exoskeleton.....	35
Tabel 4. 3	Hasil joint space trajectory untuk 5 step sudut	41
Tabel 4. 4	Uji Gerak Flexion Shoulder - 5 Sudut	44
Tabel 4. 5	Uji Gerak 50%Flexion Shoulder - 5 Sudut	44
Tabel 4. 6	Uji Gerak Flexion Elbow - 5 Sudut	45
Tabel 4. 7	Uji Gerak Fully Flexed Arm - 5 Sudut	45
Tabel 4. 8	Uji Gerak Flexion Shoulder - 7 Sudut	45
Tabel 4. 9	Uji Gerak 50%Flexion Shoulder - 7 Sudut	46
Tabel 4. 10	Uji Gerak Flexion Elbow - 7 Sudut	46
Tabel 4. 11	Uji Gerak Fully Flexed Arm - 7 Sudut	46
Tabel 4. 12	Uji Gerak Flexion Shoulder - 10 Sudut	47
Tabel 4. 13	Uji Gerak 50%Flexion Shoulder - 10 Sudut	47
Tabel 4. 14	Uji Gerak Flexion Elbow - 10 Sudut	47
Tabel 4. 15	Uji Gerak Fully Flexed Arm - 10 Sudut	48
Tabel 4. 16	Hasil perhitungan RMSE untuk 4 gerakan yang diuji	49

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Judul Gambar	Halaman
Gambar 2. 1	Model upper-limb eksoskeleton (a) prototype (b) CAD	6
Gambar 2. 2	Range of motion untuk bahu dan siku.....	7
Gambar 2. 3	Bagian-bagian robot manipulator.....	8
Gambar 2. 4	Skema dari 6 parameter derajat kebebasan dalam ruang 3 dimensi... 8	
Gambar 2. 5	Skema untuk robot manipulator dalam ruang 2 dimensi.....	9
Gambar 2. 6	Contoh koordinat kerangka DH-parameter exoskeleton.....	12
Gambar 2. 7	Konfigurasi end of effector sebagai fungsi dari nilai sendi	14
Gambar 2. 8	Mapping antara deskripsi kinematika	15
Gambar 2. 9	Motor Servo DC terintegrasi sendi robot.....	17
Gambar 2. 10	Bentuk Fisik Perangkat Mikrokontroler.....	18
Gambar 2. 11	Sistem rotary encoder.....	20
Gambar 2. 12	Konstruksi dari limit switch	20
Gambar 2. 13	Arduino IDE	21
Gambar 2. 14	USB to TTL.....	22
Gambar 2. 15	MH Level Converter	22
Gambar 3. 1	Tahapan Penelitian	25
Gambar 3. 2	Upper Limb Exoskeleton	25
Gambar 3. 3	Skema Instrumentasi	27
Gambar 3. 4	Diagram alir pemrograman MATLAB dan Mikrokontroler	28
Gambar 3. 5	Skema gerak eksoskeleton untuk gerakan fleksi pada siku.....	29
Gambar 4. 1	Lengan eksoskeleton (a) Lengan atas dan (b) Lengan bawah.....	31
Gambar 4. 2	Gambar skematik untuk upper-limb eksoskeleton.....	33
Gambar 4. 3	Lengan eksoskeleton yang sudah dirangkai	34
Gambar 4. 4	Model kinematika upper-limb exoskeleton.....	36
Gambar 4. 5	Hasil pemodelan robot di MATLAB 2020b Robotics Toolbox.....	37
Gambar 4. 6	Perbandingan posisi robot (a) Posisi awal dan (b) Flexion-elbow... 41	
Gambar 4. 7	Karakter joint space trajectory hasil program MATLAB 2020b	42
Gambar 4. 8	Posisi gir dan rotary encoder pada motor.....	43
Gambar 4. 9	Pembacaan sudut hasil implementasi.....	43
Gambar 4. 10	Parameter DH untuk upper limb exoskeleton MATLAB	50
Gambar 4. 11	Perbandingan posisi end of effector dari input.....	51
Gambar 4. 12	Grafik plot gerak yang diuji dengan inkremental 5 sudut.....	52
Gambar 4. 13	Grafik plot gerak yang diuji dengan inkremental 7 sudut.....	53
Gambar 4. 14	Grafik plot gerak yang diuji dengan inkremental 10 sudut.....	53
Gambar 4. 15	Grafik plot gerak yang diuji dengan inkremental 20 sudut.....	54
Gambar 4. 16	Grafik plot gerak yang diuji dengan inkremental 30 sudut.....	54
Gambar 4. 17	Grafik plot gerak yang diuji dengan inkremental 40 sudut.....	55

Gambar 4. 18 Grafik plot gerak yang diuji dengan inkremental 48 sudut..... 55

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Judul Lampiran	Halaman
Lampiran 1	Hasil Implementasi Inkremental Sudut 20, 30, 40, dan 48.....	62
Lampiran 2	STM32F446RE dan Arduino IDE	71
Lampiran 3	Code pada MATLAB 2020b terinstal Robotics Toolbox.....	72
Lampiran 4	Code untuk STM32F446RE pada Arduino IDE.....	74