

SKRIPSI

**ESTIMASI POSISI SUDUT SIKU SECARA *REAL-TIME*
MENGUNAKAN SINYAL OTOT DENGAN MODEL
NONLINEAR AUTOREGRESSIVE WITH EXOGENOUS INPUT
(NARX)**



MUHAMMAD AMRUL MUHAFIZH

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

**ESTIMASI POSISI SUDUT SIKU SECARA *REAL-TIME*
MENGUNAKAN SINYAL OTOT DENGAN MODEL *NONLINEAR*
*AUTOREGRESSIVE WITH EXOGENOUS INPUT (NARX)***

SKRIPSI

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

Oleh

MUHAMMAD AMRUL MUHAFIZH

NIM: 081811733047

Disetujui Oleh

Pembimbing I,



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

NIP. 197001251993031003

Pembimbing II,



Akif Rahmatillah, S.T., M.T.

NIP. 198109122015041001

LEMBAR PENGESAHAN NASKAH SKRIPSI

Judul : Estimasi Posisi Sudut Siku secara *Real-time*
Menggunakan Sinyal Otot dengan Model *Nonlinear*
Autoregressive with Exogenous Input (NARX)
Penyusun : Muhammad Amrul Muhafizh
NIM : 081811733047
Tanggal Ujian : 19 Agustus 2022

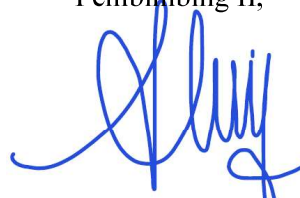
Disetujui oleh,

Pembimbing I,



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

Pembimbing II,



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

Mengetahui,

Kepala Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Airlangga



Digitally signed
by Herri
Trilaksana, M.Si.,
Ph.D.
Date: 2022-08-23
22:03+07:00

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

Koordinator 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 sumbernya sesuai kebiasaan ilmiah. Dokumen skripsi ini merupakan hak milik Universitas Airlangga.

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Muhammad Amrul Muhafizh

NIM : 081811733047

Program Studi : Teknik Biomedis

Judul Skripsi : **Estimasi Posisi Sudut Siku Secara *Real-Time* Menggunakan Sinyal Otot Dengan Model *Nonlinear Autoregressive With Exogenous Input* (NARX)**

Menyatakan dengan sungguh-sungguhnya 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 ini, 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, 24 Agustus 2022



Muhammad Amrul Muhafizh
NIM. 081811733047

Muhafizh, Muhammad Amrul. 2022. **Estimasi Posisi Sudut Siku Secara *Real-Time* Menggunakan Sinyal Otot Dengan Model *Nonlinear Autoregressive With Exogenous Input* (NARX)**. Skripsi di bawah bimbingan Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T dan Akif Rahmatillah, S.T., M.T. Program Studi S1 Teknik Biomedis, Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga, Surabaya.

ABSTRAK

Eksoskeleton merupakan alat pembantu terapi selain ahli medis yang dapat bekerja secara kontinu dan terus menerus yang mana pelatihannya dapat mengembalikan kemampuan fungsi gerak yang hilang. Eksoskeleton sebagai alat rehabilitasi ini tentunya perlu sistem kontrol yang dapat mengendalikannya sehingga gerakan eksoskeleton tersebut dapat sesuai dengan gerakan anggota tubuh yang diinginkan. Umumnya sistem kontrol untuk pengendalian eksoskeleton ini memanfaatkan sinyal EMG yang disadap pada otot pengguna. Berdasarkan konsep dasar tersebut, banyak dikembangkan berbagai metode untuk mengestimasi gerakan sendi seperti pada bagian *upper-limb* untuk gerakan ekstensi-fleksi sendi siku dengan cara melakukan estimasi sudut dari sinyal EMG. Berdasarkan berbagai studi yang telah dilakukan terhadap eksoskeleton dan beberapa metode tersebut, penulis termotivasi untuk melakukan penelitian untuk mengimplementasikan model NARX menggunakan ANN dengan algoritma optimasi LM secara *real-time*. Pada penelitian ini, desain sistem terbaik untuk melakukan estimasi posisi sudut siku secara *real-time* menggunakan sinyal otot dengan model *nonlinear autoregressive with exogenous input* (NARX) terdiri dari perhitungan nilai *threshold zero crossing*, *filtering* sinyal, segmentasi dengan teknik *disjoint window* sebesar 50 ms, ekstraksi fitur *zero crossing* dan *integrated* EMG tiap segmen, dan estimasi sudut dengan model dalam bentuk *closed-loop* yang dilatih dengan 9 *hidden layer*, 5 *input delays*, dan 5 *feedback delays*. Hasil estimasi posisi sudut siku secara *real-time* menggunakan sinyal otot dengan model *nonlinear autoregressive with exogenous input* (NARX) menunjukkan nilai RMSE sebesar 9,3204°, nilai koefisien relasi sebesar 0,9675 dan nilai NRMSE sebesar 0,2773 atau akurasi sebesar 72,27%.

Kata kunci: Eksoskeleton, Estimasi sudut, sinyal EMG, NARX, *Neural network*

Muhafizh, Muhammad Amrul. 2022. **Real-time Estimation of Elbow Angular Position using Muscle Signal with Nonlinear Autoregressive with Exogenous Input (NARX) Model**. This undergraduate thesis was supervised by Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T and Akif Rahmatillah, S.T., M.T. Biomedical Engineering Undergraduate Program, Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Airlangga University, Surabaya.

ABSTRACT

Exoskeleton is a therapeutic aid tool other than medical experts that can work continuously and continually where the training can restore lost movement function abilities. The exoskeleton as a rehabilitation tool certainly needs a control system that can control it so that the movement of the exoskeleton can match the desired limb movements. Generally, the control system for controlling this exoskeleton utilizes EMG signals that are tapped in the user's muscles. Based on these basic concepts, various methods have been developed to estimate joint motion, such as the upper-limb for elbow joint extension-flexion movements by estimating the angle from the EMG signal. Based on various studies that have been carried out on the exoskeleton and several of these methods, the authors are motivated to conduct research to implement the NARX model using ANN with LM optimization algorithm in real-time. In this study, the best system design to estimate the position of the elbow angle in real-time using muscle signals with a nonlinear autoregressive model with exogenous input (NARX) consists of calculating the zero crossing threshold value, signal filtering, segmentation with a disjoint window technique of 50 ms, extraction of zero crossing and integrated EMG features for each segment, and angular position estimation using a closed-loop model trained with 9 hidden layers, 5 input delays, and 5 feedback delays. The results of real time estimation of elbow angular position position using muscle signals with nonlinear autoregressive model with exogenous input (NARX) show an RMSE value of 9.3204° , a relation coefficient value of 0.9675 and an NRMSE value of 0.2773 or an accuracy of 72. 27%.

Keywords: Exoskeleton, Angular position estimation, EMG signal, NARX,
Neural network

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah senantiasa memberikan rahmat, hidayah dan karunia-Nya sehingga penulis bisa menyelesaikan naskah proposal skripsi dengan judul “Estimasi Posisi Sudut Siku secara *Real-time* Menggunakan Sinyal Otot dengan Model *Nonlinear Autoregressive with Exogenous Input* (NARX)”.

Dalam penyusunan naskah proposal skripsi ini, penulis banyak memperoleh dukungan serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi.
2. Muhammad Hairul Hidayat dan Erni Yulita selaku orang tua serta Nur ‘Adya Fitri Monaristi dan Nur Rifda Satira selaku saudara-saudari dan keluarga yang telah mendukung, membantu, dan mendoakan selama masa perkuliahan hingga terselesaikannya skripsi.
3. Bapak Herri Trilaksana S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Departemen Fisika dan Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Biomedis Departemen Fisika Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga yang telah mengabdikan sepenuh hati untuk perkembangan semua civitas akademika.
4. Dosen pembimbing penulis yaitu Ibu Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing I dan Bapak Akif Rahmatillah, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing II yang telah dengan sabar dan rela meluangkan waktu untuk membimbing penulis.
5. Dosen-dosen S1 Teknik Biomedis yang telah mendidik dan memberikan wawasan ilmu yang bermanfaat bagi penulis selama perkuliahan.
6. Anaqi Syaddad Ihsan, Achmad Zainal Abidin Satryo, Ilham Nova Widiyanto, Brian Johannes Reynaldi, Zalsabila, dan Abdufattah Yurianta yang telah membantu penulis hingga terselesaikannya skripsi ini.

7. Teman-teman mahasiswa Teknik Biomedis yang telah menemani, memberi dukungan, serta selalu bersedia membantu penulis selama perkuliahan.

Tentunya penulis menyadari bahwa naskah skripsi ini jauh dari kata sempurna dan tidak luput dari kekurangan. Sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Penulis berharap naskah skripsi ini sedikit banyaknya dapat memberi manfaat baik kepada penyusun sendiri dan juga orang lain.

Surabaya, 24 Agustus 2022

Penulis



Muhammad Amrul Muhafizh

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN	i
LEMBAR PENGESAHAN NASKAH SKRIPSI	ii
PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI.....	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iv
ABSTRAK.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Eksoskeleton untuk Rehabilitasi.....	5
2.1.1 Definisi Eksoskeleton.....	5
2.1.2 Eksoskeleton <i>Upper-limb</i>	5
2.2 Elektromiografi	6
2.2.1 Sensor Otot Myoware.....	6
2.3 NI myDAQ <i>Student Data Acquisition Device</i>	7
2.4 <i>Artificial Neural Network</i> (ANN)	8
2.4.1 Definisi ANN	8
2.4.2 Algoritma Levenberg-Marquardt.....	9
2.5 <i>Nonlinear Autoregressive with Exogenous Input</i> (NARX).....	10
BAB III METODE PENELITIAN	12
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	12
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	12
3.3 Metode Penelitian	12
3.3.1 Studi Literatur	13
3.3.2 Perancangan dan Implementasi Sistem.....	14

3.3.3 Pengambilan <i>Dataset</i> dan Kalibrasi Sensor	15
3.3.4 Data Preprocessing	16
3.3.5 Pelatihan, Validasi, dan Pengujian Model NARX.....	18
3.3.6 Implementasi Model NARX secara <i>Real-time</i>	20
3.3.7 Analisis Hasil.....	20
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	22
4.1 Hasil Perancangan dan Akuisisi Data	22
4.2 Hasil <i>Preprocessing</i> Data.....	26
4.2.1 <i>Filtering</i> Sinyal EMG.....	26
4.2.2 <i>Filtering</i> Data Sudut	29
4.2.3 Ekstraksi Fitur	30
4.3 Hasil Pelatihan, Validasi, dan Pengujian Model NARX.....	33
4.4 Hasil Implementasi Model NARX secara <i>Real-time</i>	41
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	48
5.1 Kesimpulan	48
5.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA	50
LAMPIRAN	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Klasifikasi eksoskeleton <i>upper-limb</i>	5
Gambar 2. 2 Sensor otot Myoware dan dimensinya.....	7
Gambar 2. 3 <i>Layout</i> sensor otot Myoware	7
Gambar 2. 4 NI myDAQ <i>Student Data Acquisition Device</i>	8
Gambar 2. 5 Struktur ANN.....	8
Gambar 2. 6 Diagram untuk pelatihan menggunakan algoritma LM.....	10
Gambar 2. 7 Diagram Model NARX.....	11
Gambar 3. 1 Diagram alir rancangan metode penelitian	13
Gambar 3. 2 Desain sistem yang akan digunakan	14
Gambar 3. 3 Diagram alir program akuisisi data.....	15
Gambar 3. 4 Segmentasi sinyal dengan teknik <i>disjoint window</i>	17
Gambar 3. 5 Struktur pelatihan model NARX	19
Gambar 3. 6 Arsitektur <i>Parallel</i> dan Arsitektur <i>Series-parallel</i>	20
Gambar 4. 1 Dataset sinyal EMG dan data potensiometer.....	23
Gambar 4. 2 Hasil regresi linier hubungan sudut dan tegangan potensiometer ..	25
Gambar 4. 3 Respon fasa dan respon magnitude <i>filter bandpass</i> (10 Hz – 450 Hz)	26
Gambar 4. 4 Respon frekuensi <i>filter bandpass</i> (10 Hz – 450 Hz)	27
Gambar 4. 5 Hasil sinyal EMG sebelum dan setelah <i>filtering bandpass</i> (10 Hz – 450 Hz) dalam domain waktu	27
Gambar 4. 6 Respon fasa dan respon magnitude <i>notch filter</i> (50 Hz)	28
Gambar 4. 7 Respon frekuensi <i>notch filter</i> (50 Hz)	28
Gambar 4. 8 Hasil sinyal EMG sebelum dan setelah <i>notch filter</i> (50 Hz) dalam domain waktu	29
Gambar 4. 9 Contoh <i>motion artifact</i> pada salah satu data.....	29
Gambar 4. 10 Hasil sebelum dan setelah <i>filtering</i> sudut	30
Gambar 4. 11 Hasil ekstraksi fitur salah satu <i>dataset</i> dengan <i>window</i> 50 ms.....	32
Gambar 4. 12 Hasil ekstraksi fitur salah satu <i>dataset</i> dengan <i>window</i> 100 ms... 32	
Gambar 4. 13 Hasil ekstraksi fitur salah satu <i>dataset</i> dengan <i>window</i> 200 ms .. 33	
Gambar 4. 14 Contoh hasil pembagian <i>dataset</i>	34
Gambar 4. 15 Diagram alir (<i>flowchart</i>) proses pelatihan model NARX.....	35
Gambar 4. 16 Hasil uji model dalam bentuk <i>open-loop</i> dengan <i>window</i> 50 ms. 36	
Gambar 4. 17 Hasil uji model dalam bentuk <i>open-loop</i> dengan <i>window</i> 100 ms 36	
Gambar 4. 18 Hasil uji model dalam bentuk <i>open-loop</i> dengan <i>window</i> 200 ms 37	

Gambar 4. 19 Struktur model pelatihan NARX <i>open-loop</i> yang terbaik	38
Gambar 4. 20 Nilai regresi hasil pelatihan network <i>open-loop</i> terbaik	38
Gambar 4. 21 Struktur model pelatihan NARX <i>closed-loop</i> yang terbaik.....	39
Gambar 4. 22 Hasil uji model dalam bentuk <i>closed-loop</i> dengan <i>window</i> 50 ms	39
Gambar 4. 23 Hasil uji model dalam bentuk <i>closed-loop</i> dengan <i>window</i> 100 ms	39
Gambar 4. 24 Hasil uji model dalam bentuk <i>closed-loop</i> dengan <i>window</i> 200 ms	40
Gambar 4. 25 Diagram alir implementasi model NARX secara <i>real-time</i>	42
Gambar 4. 26 Hasil estimasi dan hasil pengukuran salah satu pengujian secara <i>real-time</i> dengan <i>window</i> 50 ms	43
Gambar 4. 27 Hasil estimasi dan hasil pengukuran salah satu pengujian secara <i>real-time</i> dengan <i>window</i> 100 ms	45
Gambar 4. 28 Hasil estimasi dan hasil pengukuran salah satu pengujian secara <i>real-time</i> dengan <i>window</i> 200 ms	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Spesifikasi kelistrikan sensor otot Myoware.....	6
Tabel 4. 1 Data masing-masing naracoba.....	22
Tabel 4. 2 Hasil pengukuran tegangan potensiometer dan sudut goniometer	24
Tabel 4. 3 Hasil analisis perhitungan <i>error</i> sudut hasil regresi linier	25
Tabel 4. 4 Hasil perhitungan nilai <i>threshold</i> pada tiap <i>dataset</i>	31
Tabel 4. 5 Hasil pengujian model NARX dalam bentuk <i>closed-loop</i> dengan <i>window</i> 50 ms.....	40
Tabel 4. 6 Hasil pengujian model NARX dalam bentuk <i>closed-loop</i> dengan <i>window</i> 50 ms.....	41
Tabel 4. 7 Hasil pengujian model NARX dalam bentuk <i>closed-loop</i> dengan <i>window</i> 200 ms.....	41
Tabel 4. 8 Hasil uji model NARX secara <i>real-time</i> dengan <i>window</i> 50 ms.....	43
Tabel 4. 9 Hasil uji model NARX secara <i>real-time</i> dengan <i>window</i> 100 ms.....	44
Tabel 4. 10 Hasil uji model NARX secara <i>real-time</i> dengan <i>window</i> 200 ms.....	45
Tabel 4. 11 Perbandingan hasil antara <i>window</i> 50 ms, 100 ms, dan 200 ms	46