



TUGAS AKHIR - TE141599

**ANALISIS *INVERSE KINEMATICS* TERSEGMENTASI
PADA *DANCING ROBOT HUMANOID* MENGGUNAKAN
METODE *FUZZY TAKAGI-SUGENO***

**Thri Noerma Agil Rhomadhoni
NRP 2213106025**

**Dosen Pembimbing
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT - TE141599

**ANALYTIC SEGMENTED SOLUTION FOR INVERSE
KINEMATICS OF DANCING HUMANOID ROBOT WITH
FUZZY TAKAGI-SUGENO METHOD**

**Thri Noerma Agil Rhomadhoni
NRP 2213106025**

**Adviser
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.**

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016**

**ANALISIS INVERSE KINEMATICS TERSEGMENTASI PADA
DANCING ROBOT HUMANOID MENGGUNAKAN METODE FUZZY
TAKAGI-SUGENO**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing



Ir. Rusdhianto Effendie A K., MT.

NIP : 1957 04 24 1985 02 1001



ANALISIS INVERSE KINEMATICS TERSEGMENTASI PADA DANCING ROBOT HUMANOID MENGGUNAKAN METODE FUZZY TAKAGI-SUGENO

Nama : Thri Noerma Agil Rhomadhoni
Pembimbing : Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.

ABSTRAK

Dalam perhitungan nilai *theta* setiap sendi pada robot *Humanoid* diperlukan metode perancangan *inverse kinematics*, dalam perhitungan ini dibutuhkan masukan untuk posisi akhir robot. Nilai yang dibutuhkan adalah titik koordinat translasi *x*, *y* dan *z*. Metode yang digunakan untuk perhitungan *inverse kinematics* adalah metode aljabar. Algoritma *inverse kinematics* yang efisien tidak membutuhkan nilai *inverse* dari setiap matriks yang didapat dari setiap nilai *link* pada DH-Parameter untuk robot *Humanoid* Bioid Type-A. Tahap-tahap yang dibutuhkan untuk mencari nilai *inverse kinematics* adalah pertama menemukan nilai *theta* terakhir, kemudian dari hasil tersebut didapatkan nilai *theta* yang lain.

Pada Tugas Akhir ini, perhitungan untuk mencari nilai *theta* menggunakan sistem *fuzzy*. Perancangan sistem *fuzzy* didasarkan pada beberapa nilai yang didapat dari perhitungan *manual* untuk nilai *theta* terakhir. Dari hasil beberapa simulasi menggunakan perbandingan antara hasil sistem *fuzzy* dengan perhitungan *manual* menghasilkan nilai tertinggi rata-rata *error* sebesar 0.93 dalam satuan derajat, sedangkan perbandingan posisi antara rencana dengan realisasi, memiliki rata-rata *error* sebesar 17.24 milimeter.

Pada hasil implementasinya sistem *fuzzy* hanya bisa digunakan pada bagian tangan robot, sedangkan untuk bagian kaki digunakan regresi polinomial untuk proses linierisasi gerak kaki robot, karena sistem *fuzzy* saja tidak cukup untuk menghitung nilai *theta* pada kaki robot karena tiap kaki memiliki pemodelan yang berbeda-beda, serta mempengaruhi keseimbangan robot.

Kata Kunci : *Inverse Kinematics, Fuzzy Takagi-Sugeno, Robot Humanoid*

ANALYTIC SEGMENTED SOLUTION FOR INVERSE KINEMATICS OF DANCING HUMANOID ROBOT WITH FUZZY TAKAGI-SUGENO METHOD

Name : Thri Noerma Agil Rhomadhoni
Adviser : Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.

ABSTRACT

In calculating the value of theta each joint on Humanoid robot inverse kinematics design methods are needed, in these calculations needed input for the final position of the robot. The value that is required is the point of the translational coordinates x , y and z . The method used for the calculation of inverse kinematics is a method of algebra. Efficient inverse kinematics algorithm does not require inverse value of each matrix obtained from each link in the value DH-Parameters for Bioloid Humanoid Robot Type-A. The steps needed to find the value of inverse kinematics was first discovered last theta value, then the results obtained from the value of theta others.

In this final project, the calculation to find the value of theta using a fuzzy system. Fuzzy system design based on some value derived from manual calculations for the last theta value. From the results of some simulations using a comparison between the results of fuzzy systems with manual calculations yield the highest value of the average error of 0.93 in units of degrees, while the comparison between the position of the realization of the plan, has an average error of 17.24 millimeters.

On the results of the implementation of fuzzy systems can only be used on the robot's hand, while the legs are used regression polynomial for the linearization footwork robot, because the fuzzy system alone is not enough to calculate the value of theta on robotic legs because each foot has a different modeling, and influence balance of robot.

Keywords : Inverse Kinematics, Fuzzy Takagi-Sugeno, Humanoid Robot

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Syukur Alhamdulillah kami panjatkan kepada Allah SWT karena hanya dengan rahmat, hidayah dan inayah-Nya kami dapat menyelesaikan proyek akhir ini dengan judul :

Analisis Inverse Kinematics Tersegmentasi pada Dancing Robot Humanoid Menggunakan Metode Fuzzy Takagi-Sugeno

Proyek akhir ini merupakan salah satu syarat akademis untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST.) pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih atas segala bantuan dan dukungannya hingga penulis buku proyek akhir ini selesai kepada :

1. Kedua orang tua atas dukungan, baik spiritual maupun material yang tak ternilai harganya
2. Bapak Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT., selaku dosen pembimbing dan memberikan sebagian ilmunya pada penulis. Serta penulis juga berterima kasih pada bapak dan ibu dosen Teknik Sistem Pengaturan.
3. Seluruh teman-teman Teknik Sistem Pengaturan baik dari kelas LJ Genap 2013 maupun teman-teman asisten laboratorium B-105.
4. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis berharap semoga buku ini bermanfaat dan penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan buku ini. Oleh karena itu, besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik dari pembaca.

Surabaya, Januari 2016

Penyusun

DAFTAR ISI

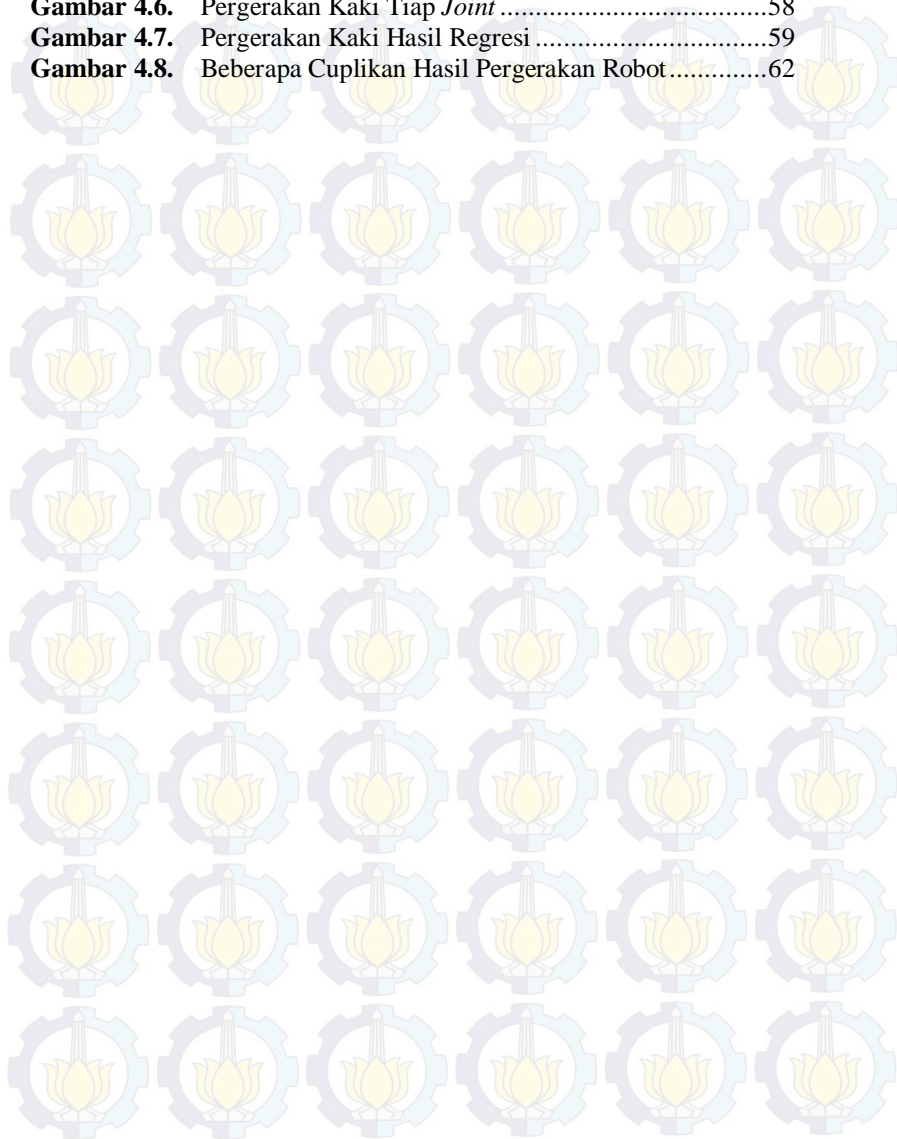
JUDUL	i
TITLE	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian	2
1.5. Metodologi Penelitian	2
1.6. Sistematika Penulisan	3
1.7. Relevansi	4
BAB II TEORI DASAR	5
2.1. Tinjauan Pustaka	5
2.2. Robot <i>Humanoid</i> Bioloid 18-DoF	6
2.3. Pemodelan Robot	8
2.3.1. Pembentukan Sendi	8
2.3.2. Transformasi Homogen	9
2.4. Kinematika	10
2.4.1. <i>Forward Kinematics</i>	11
2.4.1.1. DH-Parameter	11
2.4.1.2. Penghitungan <i>Forward Kinematics</i>	12
2.4.2. <i>Inverse Kinematics</i>	12
2.4.2.1. Pendekatan Geometri	13
2.4.2.2. Pendekatan Aljabar	13
2.4.2.3. Menghitung <i>Theta</i>	14
2.5. Sistem <i>Fuzzy</i>	16
2.5.1. Himpunan <i>Fuzzy</i>	16
2.5.2. Fungsi Keanggotaan <i>Fuzzy</i>	17
2.5.2.1. Fungsi Keanggotaan Segitiga	17
2.5.2.2. Fungsi Keanggotaan Trapesium	18

2.5.2.3. Fungsi Keanggotaan Gaussian.....	18
2.5.3. Operasi Himpunan <i>Fuzzy</i>	19
2.5.4. Sistem Inferensi <i>Fuzzy</i>	20
2.5.5. Metode Takagi-Sugeno.....	22
BAB III DESAIN SISTEM.....	25
3.1. Spesifikasi Sistem.....	25
3.2. Identifikasi Kebutuhan.....	25
3.3. Pemodelan <i>Frame Robot Humanoid Bioloid</i>	26
3.4. Pemodelan Transformasi Homogen Robot <i>Humanoid Bioloid</i> 18-DoF.....	29
3.4.1. DH-Parameter Robot <i>Humanoid Bioloid</i>	29
3.4.2. Model Transformasi Homogen Tiap <i>Link</i>	31
3.5. Kinematika.....	34
3.5.1. <i>Forward Kinematics</i>	34
3.5.2. <i>Inverse Kinematics</i>	38
3.6. Perencanaan Gerak Robot.....	39
3.6.1. Gerak Tangan.....	39
3.6.2. Gerak Kaki.....	41
3.7. Desain Sistem <i>Fuzzy</i>	43
3.8. Diagram Blok Keseluruhan.....	46
3.9. Perancangan Gerak Robot Keseluruhan.....	46
3.10. Implementasi Gerak Robot.....	58
BAB IV HASIL SIMULASI DAN IMPLEMENTASI.....	51
4.1. Pengujian Pemodelan Fuzzy dengan Beberapa Masukan.....	51
4.2. Pengujian Kinematika Tangan Robot.....	54
4.3. Pengujian Kinematika Kaki Robot.....	56
4.4. Pengujian Linierisasi Kinematika Kaki Robot.....	58
BAB V PENUTUP.....	63
5.1. Kesimpulan.....	63
5.2. Saran.....	64
DAFTAR PUSTAKA.....	65
LAMPIRAN.....	67
RIWAYAT PENULIS.....	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	a. Model Robot Humanoid Bioloid 18-DoF.....	6
	b. Kerangka Pergerakan Robot <i>Humanoid</i> Bioloid....	7
Gambar 2.2.	Beberapa Variasi Bentuk Sendi Revolute	8
Gambar 2.3.	Bentuk Sendi Prismatic.....	8
Gambar 2.4.	Bentuk Sumbu Sebagai Referensi Sendi	8
Gambar 2.5.	Perbedaan antara <i>Forward Kinematics</i> dan <i>Inverse Kinematics</i>	11
Gambar 2.6.	Pengaplikasian Pendekatan Geometri pada Robot Manipulator 2-DOF.....	13
Gambar 2.7.	Fungsi Atan2 pada Empat Kuadran	15
Gambar 2.8.	Tata letak <i>Fuzzy Logic Toolbox</i> pada MATLAB.....	16
Gambar 2.9.	Fungsi Keanggotaan Segitiga.....	17
Gambar 2.10.	Fungsi Keanggotaan Trapesium	18
Gambar 2.11.	Fungsi Keanggotaan Gaussian	19
Gambar 2.12.	Sistem Inferensi <i>Fuzzy</i>	20
Gambar 2.13.	FIS Editor pada Toolbox Fuzzy MATLAB.....	21
Gambar 3.1.	Bentuk Fisik Robot.....	26
Gambar 3.2.	a. Bentuk pemodelan sendi tangan kanan	26
	b. Bentuk pemodelan sendi kaki kanan.....	27
	c. Bentuk pemodelan sendi kaki kiri.....	28
	d. Bentuk pemodelan sendi tangan kiri	29
Gambar 3.3.	Perencanaan Gerak Tangan.....	39
Gambar 3.4.	Hasil Plot MATLAB.....	40
Gambar 3.5.	Perencanaan Gerak Kaki.....	41
Gambar 3.6.	Perencanaan Keseluruhan Gerak Kaki.....	42
Gambar 3.7.	Grafik Pergerakan Kaki Robot	43
Gambar 3.8.	Fungsi Keanggotaan Nilai pX	44
Gambar 3.9.	Fungsi Keanggotaan Nilai pY	45
Gambar 3.10.	Diagram Blok Keseluruhan.....	46
Gambar 3.11.	Tampilan RoboPlus Motion	47
Gambar 3.12.	Beberapa Fungsi Pendukung RoboPlus Motion	47
Gambar 3.13.	Sistem Distribusi Data Robot <i>Humanoid</i> Bioloid.....	49
Gambar 3.14.	Rotasi Motor Servo.....	49
Gambar 4.1.	Grafik Variasi Pertama <i>Theta2</i>	52
Gambar 4.2.	Grafik Variasi Kedua <i>Theta2</i>	53
Gambar 4.3.	Grafik Variasi Ketiga <i>Theta2</i>	54
Gambar 4.4.	Perbandingan <i>Input</i> dan <i>Output</i> Pengujian Kinematika Tangan Robot.....	55

Gambar 4.5.	Perbandingan <i>Input</i> dan <i>Output</i> Pengujian Kinematika Kaki Robot	57
Gambar 4.6.	Pergerakan Kaki Tiap <i>Joint</i>	58
Gambar 4.7.	Pergerakan Kaki Hasil Regresi	59
Gambar 4.8.	Beberapa Cuplikan Hasil Pergerakan Robot.....	62



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Beberapa Persamaan Trigonometri yang Digunakan <i>Inverse Kinematics</i>	15
Tabel 3.1.	DH-Parameter Tangan Kanan	30
Tabel 3.2.	DH-Parameter Tangan Kiri	30
Tabel 3.3.	DH-Parameter Kaki Kanan	30
Tabel 3.4.	DH-Parameter Kaki Kiri	30
Tabel 3.5.	Nilai Theta pada Gerak Kaki Robot	40
Tabel 3.6.	Nilai Theta pada Gerak Kaki Robot	43
Tabel 3.7.	Beberapa fungsi pada RoboPlus Motion	48
Tabel 4.1	Variasi Hitungan Pertama	51
Tabel 4.2	Hasil Variasi Hitungan Kedua	52
Tabel 4.3	Hasil Variasi Hitungan Ketiga	53
Tabel 4.4	Hasil Keluaran <i>Inverse Kinematics</i>	55
Tabel 4.5	Hasil Keluaran <i>Forward Kinematics</i>	55
Tabel 4.6	Hasil Keluaran <i>Inverse Kinematics</i>	56
Tabel 4.7	Hasil Keluaran <i>Forward Kinematics</i>	57
Tabel 4.8	Rencana Pergerakan Kaki Robot	58
Tabel 4.9.	Hasil Regresi Pergerakan Kaki Robot	59
Tabel 4.10	Hasil <i>Forward Kinematics</i> Perencanaan Kaki Kanan Robot	60
Tabel 4.11	Hasil <i>Forward Kinematics</i> Perencanaan Kaki Kiri Robot	60
Tabel 4.12	Hasil <i>Forward Kinematics</i> Realisasi Kaki Kanan Robot	61
Tabel 4.13	Hasil <i>Forward Kinematics</i> Realisasi Kaki Kiri Robot	61
Tabel 4.14	Perbandingan Posisi Y Kaki Kanan Robot	61
Tabel 4.15	Perbandingan Posisi Y Kaki Kanan Robot	62

BAB I

PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang, perumusan masalah, dan tujuan dari penelitian pada Tugas Akhir ini. Selain itu, dijelaskan juga mengenai metodologi dan sistematika dalam penyelesaian Tugas Akhir, serta relevansi untuk penelitian selanjutnya.

1.1. Latar Belakang

Robotika ialah ilmu yang mempelajari tentang robot yang meliputi beberapa disiplin ilmu (elektronika, mekanik, kontrol, komputer, dll). Istilah robot berawal bahasa Ceko “robota” yang berarti pekerja atau kuli yang tidak mengenal lelah atau bosan. Robot biasanya digunakan untuk tugas yang berat, berbahaya, kotor dan pekerjaan yang berulang. Biasanya kebanyakan robot industri digunakan dalam bidang produksi. Sistem koordinat pada robotika memiliki 3 derajat kebebasan (*Degree of Freedom*) atau 3 *axis*, yang terdiri dari θ (*theta*) mewakili sumbu putar, sumbu *z* mewakili gerakan naik turun serta sumbu *R* yang mewakili gerakan memanjang atau memendek.

Spesifikasi lintasan yang diinginkan dari robot manipulator biasanya diberikan pada ruang koordinat (*Cartesian*). Sistem dirancang dalam ruang sendi, oleh karena itu diperlukan proses pemetaan antara dua ruang tersebut. Pemetaan untuk robot manipulator umumnya diketahui sebagai *forward kinematics* yaitu kondisi ketika ruang sendi dikonversi ke ruang koordinat dan *inverse kinematics* kondisi ketika ruang koordinat dikonversi ke ruang sendi.

Beberapa peneliti telah melakukan perhitungan untuk mencari nilai *theta* pada *inverse kinematics* [1]. Perhitungan dilakukan dengan mengacu pada pendekatan aljabar, sehingga perhitungan menjadi lebih efisien yaitu dengan mentransformasikan persamaan matriks menjadi 4 persamaan yang mengandung 3 sudut yang tidak diketahui pada tiap-tiap bagian tangan robot *Humanoid Bioloid*, serta 7 persamaan yang mengandung 6 sudut yang tidak diketahui pada tiap-tiap bagian kaki robot *Humanoid Bioloid*. Dalam tahap pemetaan kinematika terdapat beberapa kesulitan yaitu intensif kompleksitas komputasi dari efek *coupling* robot dan kesulitan untuk memperoleh solusi bentuk tertutup dari *inverse kinematics*. Penyelesaian masalah untuk *inverse kinematics* lebih kompleks dibandingkan dengan *forward kinematics* untuk robot dengan struktur seri dan paralel. Hal ini dikarenakan penyelesaian dari persamaan *inverse kinematics* lebih kompleks dan *non-linear*.

Pada Tugas Akhir ini, akan dilakukan perhitungan nilai θ dengan menggunakan sistem *fuzzy* untuk memperoleh solusi sistem *non-linear* yang kompleks. Perhitungan nilai θ untuk *inverse kinematics* robot robot *Humanoid Bioloid* bagian tangan akan diperoleh menggunakan sistem *fuzzy*.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan pada Tugas Akhir ini yaitu desain sistem *fuzzy* untuk pencarian nilai θ sendi terakhir yang akan menjadi referensi bagi persamaan selanjutnya untuk mencari nilai θ yang lain. Nilai seluruh θ akan menentukan pergerakan robot berdasarkan dari masukan nilai vektor translasi titik x , y dan z dengan menggunakan persamaan *inverse kinematics* untuk seluruh nilai θ .

1.3. Batasan Masalah

Perhitungan dibatasi tidak sampai membahas *singularity*. Titik *singularity* menyebabkan nilai θ pada tiap sendi tidak ditemukan sehingga robot tidak dapat bergerak sesuai dengan apa yang diinginkan. Perhitungan dibatasi tidak sampai mencakup perhitungan sistem dinamika robot (*forward dynamic*).

1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian pada Tugas Akhir ini bertujuan untuk mencari besaran nilai θ pada robot *Humanoid Bioloid* yang memiliki 18-*DoF*, dimana 3-*DoF* pada tiap tangan serta 6-*DoF* pada tiap kakinya. Dengan melakukan perhitungan *inverse kinematics* maka akan diperoleh nilai θ sehingga pergerakan robot dapat ditentukan sesuai dengan posisi akhir yang diinginkan. Untuk mencapai posisi akhir yang diinginkan, terdapat beberapa solusi pergerakan dari hasil perhitungan *inverse kinematics*. Dari beberapa solusi tersebut akan dipilih 1 solusi pergerakan, kemudian dilakukan perancangan sistem *fuzzy* untuk mendapat nilai θ terakhir pada robot. Konsep *fuzzy* yang digunakan pada tahapan perancangan sistem adalah model *fuzzy* tipe Takagi-Sugeno.

1.5. Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penyusunan Tugas Akhir ini, antara lain:

a. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan kajian teori mengenai perhitungan *inverse kinematics* untuk robot *Humanoid Bioloid* 18-*DoF*, desain robot *virtual*

dan desain sistem *fuzzy* untuk tiap-tiap bagian robot yang terdiri dari 3-*DoF* pada tiap bagian tangan dan 6-*DoF* pada tiap bagian kaki.

b. **Pemodelan Sistem**

Pencarian tiap sudut dari tiap bagian robot *Humanoid* Bioloid diperoleh dengan menggunakan pendekatan *closed form solution*. Hasil dari pencarian sudut tersebut akan dijadikan referensi untuk tahap perancangan sistem *fuzzy* yang selanjutnya disimulasikan dalam bentuk *virtual* robot yang tersegmentasi menggunakan MATLAB.

c. **Desain Sistem *Fuzzy***

Pada tahap ini dilakukan desain sistem *fuzzy* berupa besaran nilai *theta* terakhir sebagai referensi yang didapat dari tahap pemodelan sistem, sehingga akan diperoleh nilai keseluruhan *theta* tiap bagian robot sesuai dengan posisi *end-effector* yang diinginkan.

d. **Simulasi dan Implementasi**

Hasil desain sistem *fuzzy* selanjutnya disimulasikan dengan bantuan *software* MATLAB R2014a yang telah ditambah dengan *toolbox* Peter E. Corke release 8 yang kemudian diimplementasikan kedalam Bioloid Robot Premium *Humanoid* Type-A untuk membandingkan hasil perhitungan, simulasi, dan realisasi.

e. **Penulisan Buku**

Tahap penyusunan buku, meliputi pendahuluan, teori dasar, desain sistem, hasil simulasi dan implementasi serta kesimpulan dan saran sebagai penutup.

1.6. Sistematika Penulisan

Pembahasan pada Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah batasan masalah, tujuan penelitian, sistematika penulisan, serta relevansi.

BAB II : TEORI DASAR

Bab ini menjelaskan tentang tinjauan pustaka, mengenai pemodelan robot *Humanoid* Bioloid 18-*DoF*, desain *virtual* robot tersegmentasi dan desain sistem kinematika untuk tiap-tiap bagian robot yang terdiri dari 3-*DoF* pada tiap bagian

tangan dan 6-DoF pada tiap bagian kaki, serta teori sistem *fuzzy* tipe Takagi-Sugeno.

BAB III: DESAIN SISTEM

Bagian ini berisi pembahasan mengenai perumusan untuk setiap sendi robot *humanoid* bioloid 18-DoF yang tersegmentasi serta perancangan sistem *fuzzy* berdasarkan teori pada Bab II.

BAB IV : HASIL SIMULASI DAN IMPLEMENTASI

Bab ini memuat hasil simulasi, perbandingan data beserta analisis dari tiap data pengujian.

BAB V : PENUTUP

Analisis yang dilakukan pada Bab IV akan mendapatkan suatu kesimpulan serta saran yang diberikan sebagai bahan evaluasi untuk penelitian selanjutnya.

1.7. Relevansi

Hasil akhir yang diperoleh dari penelitian pada. Tugas Akhir ini dapat dijadikan sebagai referensi untuk mempelajari persamaan *inverse kinematics* robot 2-DoF atau lebih serta pengembangan sistem *fuzzy* yang tepat untuk menemukan sudut pada *inverse kinematics*, serta mengimplementasikan hasilnya kedalam robot *Humanoid* Bioloid Premium Type-A.

BAB II TEORI DASAR

Pada Bab II berisi materi dasar yang digunakan dalam penyelesaian dari Tugas Akhir ini. Beberapa aspek yang akan dibahas pada Bab ini meliputi tinjauan pustaka terkait penelitian robot *Humanoid Bioloid 18-DoF*, *modeling* robot *Humanoid Bioloid 18-DoF*, teori kinematika serta teori mengenai desain sistem *fuzzy* tipe Takagi-Sugeno.

2.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian mengenai pemodelan *inverse kinematics* pada robot humanoid bioloid menggunakan algoritma yang efisien berdasarkan pendekatan aljabar [1]. Dengan memanfaatkan pemodelan kinematik berdasar DH-parameter yang telah ditentukan akan dirancang perhitungan yang hasilnya lebih efisien karena tidak menghitung *inverse* dari masing-masing transformasi homogen setiap *link*. Besarnya nilai *theta* pada setiap sendi (*joint theta*) dari *link* didapat memanfaatkan eliminasi dari persamaan yang didapat pada tahap sebelumnya.

Berdasarkan derajat yang diperoleh untuk setiap sendi (*joint*) pada tahap ini dimanfaatkan untuk beberapa aplikasi dan perhitungan *dynamic* dari robot *Humanoid Bioloid 18-DoF*. Berdasar ilmu kinematika, kinematik adalah ilmu yang mempelajari pergerakan robot dengan mengabaikan gaya-gaya yang terjadi.

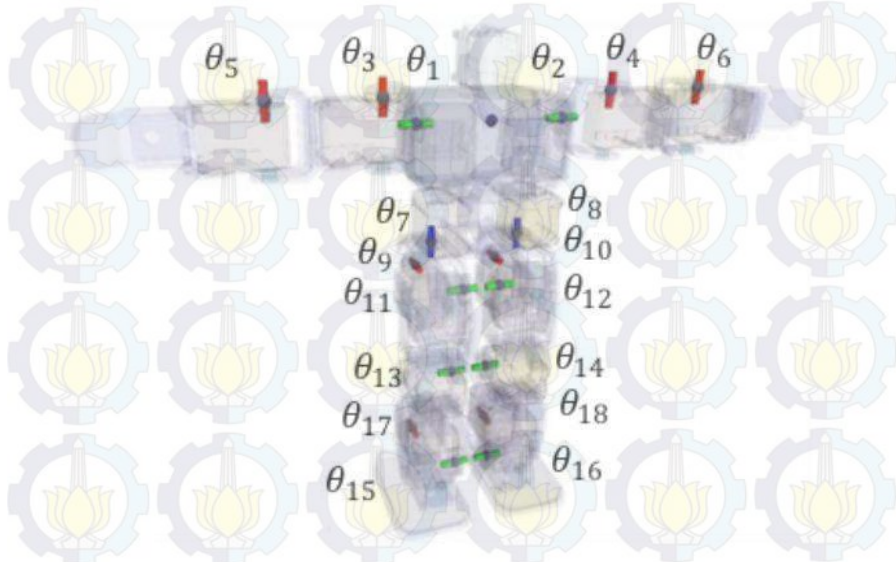
Telah dilakukan penelitian mengenai solusi *inverse kinematics* dari robot lengan *7-DoF* dengan menggunakan sistem *fuzzy*[2]. Dari perhitungan *manual* didapatkan perhitungan untuk besarnya nilai *theta* dari setiap *link*. Setelah didapatkan nilai dari perhitungan *manual*, penyusunan sistem *fuzzy* untuk mencari nilai *theta* pada sendi terakhir[2] berdasarkan nilai untuk titik-titik x dan y untuk pergerakan tangan serta titik y dan z untuk pergerakan kaki. Perolehan nilai *theta* yang lainnya tetap mengambil dari perhitungan rumus yang didapat.

Serupa dengan penelitian [1], pada Tugas Akhir ini dihitung untuk mencari rumus masing-masing nilai *theta* dengan pendekatan aljabar pada robot *Humanoid Bioloid 18-DoF*. Setelah dididapatkannya rumus perhitungan nilai *theta* maka akan dirancang sistem *fuzzy* untuk mencari nilai *theta* dari *link* terakhir, yang menjadi acuan Tugas Akhir karena perancangan sistem *fuzzy* digunakan untuk nilai *theta* terakhir. Desain untuk simulasi menggunakan *toolbox* Simulink yang terdapat pada *software* pada MATLAB 2014a serta implementasi menggunakan *software* RoboPlus sebagai *driver* aplikasi dari robot *Humanoid Bioloid*.

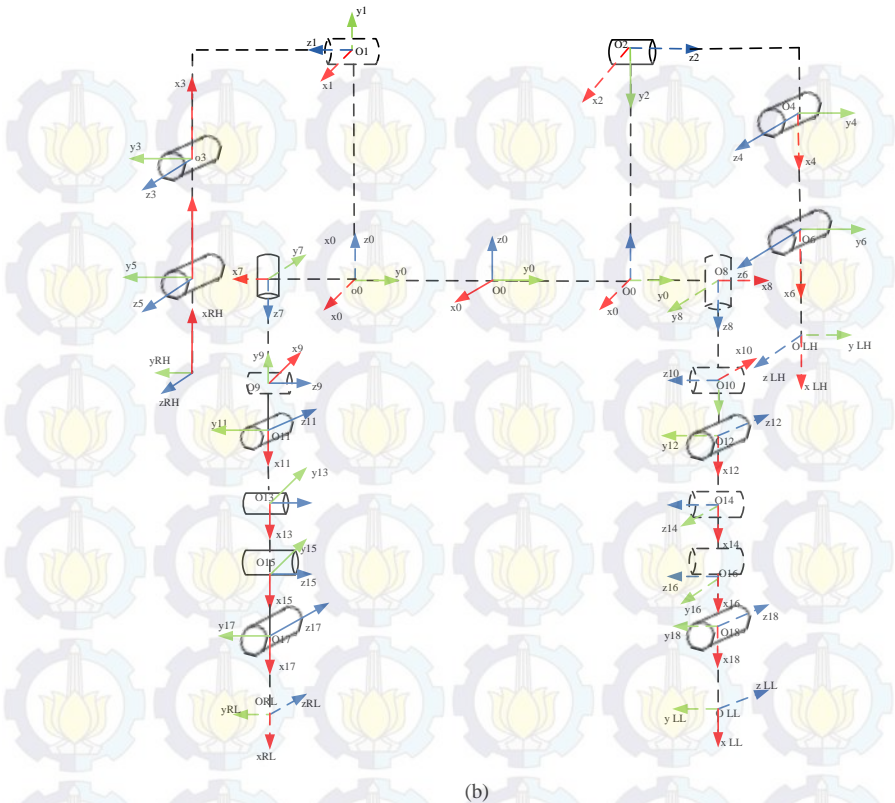
2.2. Robot *Humanoid Bioloid 18-DoF*

Bentuk keseluruhan dari robot *Humanoid Bioloid 18-DoF* terlihat pada Gambar 2.1 (a), dan kerangka gerakan dari robot dapat dilihat pada Gambar 2.1 (b) dengan memperlihatkan bahwa keseluruhan sendi pada robot tersebut merupakan sendi revolute yang berarti gerakan dari setiap sendi hanya bisa rotasi saja. Dari gambar tersebut dapat dikategorikan bahwa robot ini mempunyai struktur parallel. Perancangan simulasi pada robot ini menggunakan model *toolbox* Peter E. Corke pada MATLAB, bagian *end-effector* pada robot ini dapat dikombinasikan dengan beberapa peralatan yang diinginkan, misalkan robot akan digunakan untuk menggambar maka bagian *end-effector* dapat ditambahi bor dan sebagainya.

Pada pengerjaan tugas akhir ini dilakukan pencacahan bagian tubuh yang memiliki *DoF*, dimana pada robot ini memiliki 3-*DoF* dari masing-masing tangan dan 6-*DoF* dari tiap kakinya. Prinsip gerakan robot ini hanya untuk menentukan posisi robot. Dimana, dalam pergerakan robot ini memiliki 4 *end-effector* yang terdapat pada tiap-tiap tangan dan kakinya yang ditentukan berdasarkan gerakan sendi pertama hingga terakhir dari tiap-tiap bagian.



(a)



Gambar 2.1 (a) Model Robot *Humanoid* Bioloid 18-DoF[3]
 (b) Kerangka Pergerakan Robot *Humanoid* Bioloid

Perancangan desain untuk pergerakan robot membutuhkan sistem mekanik seperti hidraulik dan elektrik. Pada robot *Humanoid* Bioloid 18-DoF memiliki kontroler berupa CM-530 yang berisi program dari *software* RoboPlus untuk menggerakkan tiap sendi pada robot.

Desain pemodelan pada robot *Humanoid* Bioloid dirancang berdasarkan DH-Parameter yang terbentuk dari robot. Pemodelan antar *link* robot dapat terintegrasikan dan dihitung pergerakan rotasi. Hasil pemodelan akan disimulasikan menggunakan MATLAB R2014a sesuai perhitungan yang didapat. Penjelasan mengenai desain sistem secara keseluruhan akan dijelaskan pada Bab 3.

2.3. Pemodelan Robot

Pengetahuan mengenai berbagai macam sendi dan pemodelan matriks Transformasi Homogen merupakan hal terpenting dalam mengetahui pemodelan suatu robot. Pemodelan robot adalah hal terpenting untuk dapat menghitung *forward kinematics* dan *inverse kinematics*[4].

2.3.1. Pembentukan Sendi

Sendi pada robot berfungsi untuk menghubungkan dua *link*, sehingga antara *link* tersebut dapat menentukan arah putaran atau gerakan yang diinginkan sesuai dengan bentuk sendinya. Sendi pada robot dapat didefinisikan menjadi dua bentuk, yaitu:

a. Sendi Revolute

Sendi revolute adalah sendi yang bergerak secara berputar / rotasi. Bentuk umum dari sendi revolute terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Beberapa Variasi Bentuk Sendi Revolute

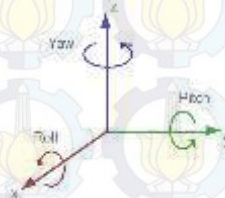
b. Sendi Prismatic

Sendi prismatic merupakan sendi yang bergerak secara translasi. Bentuk umum dari sendi prismatic terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Bentuk Sendi Prismatic

Sedangkan sumbu untuk menentukan koordinat robot menjadi referensi dari sendi untuk melakukan pergerakan dan pembentukan *link* robot. Gambar sumbu dapat terlihat pada Gambar 2.4. Penentuan koordinat yang dibentuk dari sumbu ini didapatkan dari koordinat pada *software* MATLAB 2014a.



Gambar 2.4 Bentuk Sumbu Sebagai Referensi Sendi

Dalam pembentukan koneksi keseluruhan sendi tersebut dibutuhkan beberapa langkah, yaitu.

Langkah 1 : Menempatkan dan memberikan label pada sendi berupa sumbu z_0, \dots, z_{n-1} .

Langkah 2 : Menetapkan *base frame*. Menentukan *origin* pada sumbu z_0 . Sumbu x_0 dan z_0 dipilih secara sembarang untuk membentuk *right-hand frame*.

Langkah 3 : Menempatkan *origin* o_i ke z_i dan z_{i-1} memotong z_i .

Langkah 4 : Menetapkan x_i sepanjang *common normal* antara z_{i-1} dan z_i melalui o_i .

Langkah 5 : Menetapkan y_i untuk melengkapi *right-hand frame*.

Langkah 6 : Menetapkan *end-effector frame* pada $o_n x_n y_n z_n$.

Langkah 7 : Membuat sebuah tabel dari parameter *link* $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$.

Langkah 8 : Membentuk matriks transformasi homogen A_n dengan melakukan substitusi parameter.

Langkah 9 : Membentuk matriks *forward kinematics* $T_0^n = A_1, \dots, A_n$.

Matriks ini memberikan posisi dan orientansi dari *tool frame* yang diekspresikan dalam koordinat dasar.

2.3.2. Transformasi Homogen

Transformasi Homogen adalah matriks untuk merepresentasikan nilai posisi dan rotasi dari sebuah *link*. Rotasi *link* memiliki tiga buah karakteristik yaitu rotasi terhadap sumbu x (*roll*), y (*pitch*) dan z (*yaw*). Matriks rotasi terhadap sumbu x, y dan z masing-masing dituliskan pada Persamaan 2.1, 2.2 dan 2.3.

$$Rot_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$Rot_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$Rot_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Sedangkan untuk matriks translasi terhadap sumbu x, y dan z masing-masing dituliskan pada Persamaan 2.4, 2.5 dan 2.6.

$$Trans_{x,a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$Trans_{y,b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$Trans_{z,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Matriks rotasi dan translasi tersebut akan membentuk matriks Transformasi Homogen yang terbentuk pada Persamaan 2.7. Notasi R berisi matriks rotasi sedangkan notasi d berisi matriks translasi.

$$H = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Sedangkan untuk pencarian *inverse* dari Transformasi Homogen ini diberikan oleh Persamaan 2.8.

$$H^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

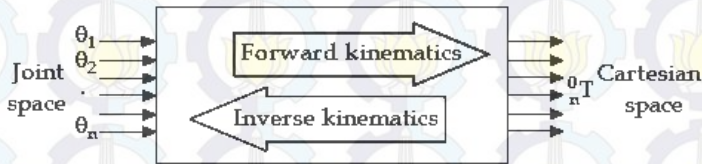
Transformasi Homogen yang paling populer dituliskan pada Persamaan 2.9. Masing-masing rotasi dan translasi digunakan notasi x, y dan z.

$$H = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2.4. Kinematika

Kinematika adalah ilmu yang mempelajari pergerakan robot tanpa memperhitungkan gaya-gaya pada robot itu sendiri. Kinematika terdiri dari *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. Ada masukan sudut dan

posisi yang diperhitungkan pada kedua kinematika tersebut. Gambar 2.5 menjelaskan bagaimana perbedaan antara *forward kinematics* dan *inverse kinematics*.



Gambar 2.5 Perbedaan antara *Forward Kinematics* dan *Inverse Kinematics*

2.4.1. *Forward Kinematics*

Permasalahan dari kinematika maju terletak pada hubungan antara sendi pada robot manipulator dan posisi serta rotasi untuk *end-effector*. Secara formalnya, permasalahan dari kinematika maju adalah untuk menentukan posisi dan rotasi pada *end-effector* setelah diberikan nilai-nilai yang dibutuhkan untuk perumusan kinematika maju itu sendiri. Nilai-nilai tersebut didapat dari DH-parameters yang akan dibahas selanjutnya.

2.4.1.1. DH-Parameters

Dalam merepresentasikan nilai-nilai yang berada pada sebuah *link* dibutuhkan konvensi, yang paling terkenal sampai saat ini adalah *DH-convention* atau Denavit-Hartenberg [5]. Nilai-nilai yang terdapat pada *DH-convention* antara lain θ_i (*joint angle*), a_i (*link length*), d_i (*link offset*) dan α_i (*link twist*). Berdasarkan pembentukan sendi yang telah ditentukan sebelumnya pada sub-bab 2.3.1 maka dapat ditentukan nilai tersebut dengan keterangan seperti berikut.

- a_i = jarak sepanjang x_i dari ke o_i perpotongan dari sumbu x_i dan z_{i-1}
- d_i = jarak sepanjang z_{i-1} dari o_{i-1} ke perpotongan dari sumbu x_i dan z_{i-1} .
 d_i dapat berupa variabel jika sendi i adalah sendi *prismatic*.
- α_i = sudut antara z_i dan z_{i-1} diukur terhadap x_i
- θ_i = sudut antara x_i dan x_{i-1} diukur terhadap z_i . θ_i dapat berupa variabel jika sendi i adalah *revolute*.

Setelah didapatkan nilai-nilai parameternya, maka dapat dibentuk matriks Transformasi Homogen dengan menggantikan nilai-nilai tersebut. Matriks didasarkan terhadap rotasi dan translasi terhadap sumbu x dan z . Persamaan matriks Transformasi Homogen berdasarkan DH-Parameter suatu robot dapat dilihat pada Persamaan 2.10.

$$\begin{aligned}
{}_{i-1}^i T &= Rot_{z, \theta_i} Trans_{z, d_i} Trans_{x, a_i} Rot_{x, \alpha_i} \\
&= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10) \\
&= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} R_i & p_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

2.4.1.2. Penghitungan *Forward Kinematics*

Konsep dari *Forward Kinematics* [6] adalah menghitung nilai tujuan dari sudut yang telah diberikan seperti diilustrasikan melalui Persamaan 2.11.

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \dots, \theta_n) \quad (2.11)$$

Dari sudut–sudut yang telah diberikan tersebut akan didapatkan nilai akhir dari posisi robot. Nilai–nilai ini akan direpresentasikan sesuai matriks yang berisi seperti Persamaan 2.12, dimana notasi n , s dan a berisi nilai rotasi robot sedangkan notasi p berisi nilai vektor posisi robot.

$$Y = (n, s, a, p) \quad (2.12)$$

Sudut yang telah diberikan akan menjadi nilai akhir untuk posisi robot. Nilai akhir tersebut dimasukkan masing–masing ke Persamaan 2.12 menggunakan perkalian dari matriks Transformasi Homogen untuk setiap *link* seperti yang tertera pada Persamaan 2.13.

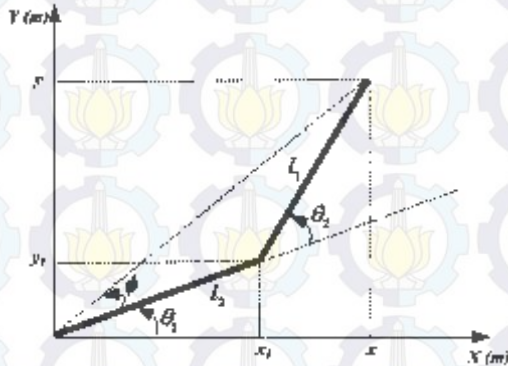
$$T_0^n = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 \dots T_{n-1}^n \quad (2.13)$$

2.4.2. *Inverse Kinematics*

Pada umumnya, perhitungan untuk *inverse kinematics*[7] lebih sulit bila dibandingkan dengan *forward kinematics*. Karena permasalahan pada *inverse kinematics* adalah mencari sudut dari setiap sendi berdasar pada posisi akhir yang diinginkan sebuah robot. Berdasarkan dari matriks yang diberikan untuk kemudian diproses menjadi sudut–sudut pembentuk setiap sendi robot. Sehingga *inverse kinematics* dikatakan solusi yang mempunyai hasil akhir yang unik. Dikatakan unik karena hasil dari sudut untuk tiap sendi ada beberapa macam solusi tergantung dari banyaknya sendi yang digunakan. Metode untuk mencari *inverse kinematics* sendiri ada berbagai macam.

2.4.2.1. Pendekatan Geometri

Pendekatan geometri didasarkan pengkomposisian ruang geometri dari robot ke beberapa permasalahan untuk cakupan geometrinya. Seperti yang terapkan ke robot manipulator 2-DoF seperti pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Pengaplikasian Pendekatan Geometri pada Robot Manipulator 2-DoF

Dari gambar 2.6 dapat diambil Persamaan untuk mencari nilai pX dan pY . Yang masing-masing dijelaskan pada Persamaan 2.14 dan 2.15.

$$pX = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.14)$$

$$pY = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.15)$$

Persamaan diatas menunjukkan bagaimana mendapatkan perhitungan berdasar dari bentuk geometri robot. Berdasarkan dari Persamaan tersebut akan didapatkan θ_1 dan θ_2 .

2.4.2.2. Pendekatan Aljabar

Robot yang mempunyai banyak *link* dan sulit untuk dipecahkan menggunakan pendekatan geometri maka pendekatan aljabar merupakan solusi terbaiknya. Langkah-langkah dalam mencari solusi *inverse kinematics* menggunakan pendekatan aljabar bagi robot yang mempunyai 6-DoF adalah sebagai berikut.

a. Bentuk Persamaan *Direct Kinematics* yang terlihat pada Persamaan 2.16.

$$H = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_0^1(\theta_1)T_1^2(\theta_2)T_2^3(\theta_3)T_3^4(\theta_4)T_4^5(\theta_5)T_5^6(\theta_6) \quad (2.16)$$

- b. Mencari solusi *inverse kinematics* pada sendi pertama sebagai fungsi dari $T_{base}^{end-effector}$, maka transformasi *inverse kinematics* dari link tersebut menjadi Persamaan 2.17.

$$[T_0^1(\theta_1)]^{-1} T_0^6 = [T_0^1(\theta_1)]^{-1} T_0^1(\theta_1) T_1^2(\theta_2) T_2^3(\theta_3) T_3^4(\theta_4) T_4^5(\theta_5) T_5^6(\theta_6) \quad (2.17)$$

dimana $[T_0^1(\theta_1)]^{-1} T_0^6 = I$ sedangkan I adalah matriks identitas. Maka Persamaan 2.17 menjadi Persamaan 2.18.

$$[T_0^1(\theta_1)]^{-1} T_0^6 = T_1^2(\theta_2) T_2^3(\theta_3) T_3^4(\theta_4) T_4^5(\theta_5) T_5^6(\theta_6) \quad (2.18)$$

- c. Berdasarkan algoritma yang dikembangkan [1], pencarian *inverse kinematics* dirumuskan untuk mencari sendi ketiga saja yang akan didapatkan keseluruhan nilai masing-masing sendi. Maka persamaan yang dipakai berdasarkan Persamaan 2.19.

$$T_3^4 T_4^5 T_5^6 = [T_0^1]^{-1} [T_1^2]^{-1} [T_2^3]^{-1} T_0^6 \quad (2.19)$$

- d. Dari Persamaan 2.19 tersebut akan didapat matriks untuk ruas kiri dan kanan yang terlihat pada Persamaan 2.20 dan 2.21.

$$T_3^4 T_4^5 T_5^6 = \begin{bmatrix} R_4 R_5 R_6 & R_4 R_5 R_6 + R_4 R_5 + R_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$[T_2^3]^{-1} [T_1^2]^{-1} [T_0^1]^{-1} T_0^6 = \begin{bmatrix} R_3^T R_2^T R_1^T R & R_3^T R_2^T R_1^T p - R_3^T R_2^T R_1^T p_1 - R_3^T R_2^T p_2 - R_3^T p_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

- e. Hasil terakhir akan didapatkan Persamaan 2.22 dan 2.23. yang berfungsi untuk pencarian sudut masing – masing sendi.

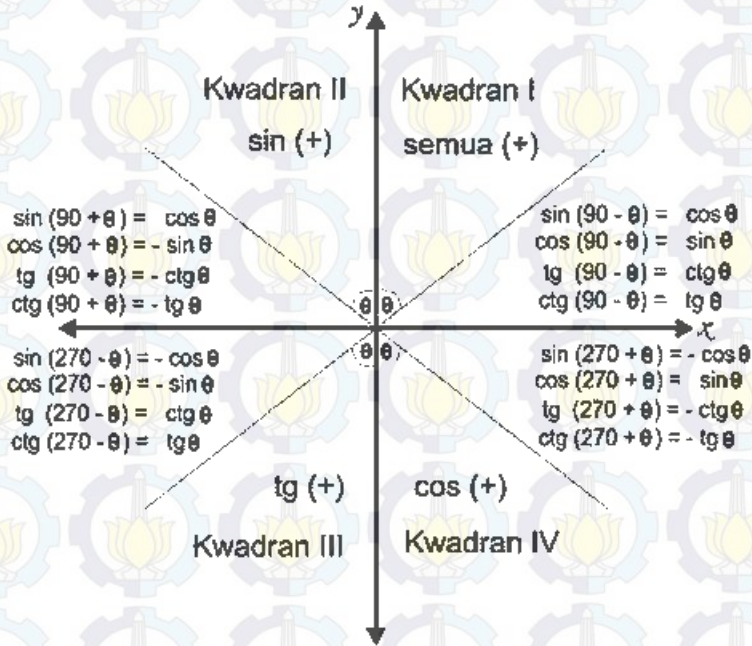
$$R_4 R_5 R_6 = R_3^T R_2^T R_1^T R \quad (2.22)$$

$$R_4 R_5 p_6 + R_4 p_5 + p_4 = R_3^T R_2^T R_1^T p - R_3^T R_2^T R_1^T p_1 - R_3^T R_2^T p_2 - R_3^T p_3 \quad (2.23)$$

2.4.2.3. Menghitung Theta

Dari Persamaan 2.22 dan 2.23 akan didapatkan beberapa persamaan yang dapat disubstitusikan ataupun dieliminasi sehingga akan didapat persamaan sederhana untuk menghitung nilai sudut tertentu. Tabel 2.1 menunjukkan bagaimana persamaan yang sederhana akan didapatkan solusi mencari nilai sudut. Beberapa solusi memakai tanda \pm , yang mempunyai arti bahwa solusi tersebut akan menghasilkan dua hasil, tetapi berbeda dengan solusi yang mempunyai penghubung atau yang

menandakan bahwa solusi hanya mempunyai satu solusi. Pada kasus pemecahan yang mempunyai satu solusi, dikarenakan bahwa karakteristik untuk nilai sinusoida pada kuadran 1 dan 2 bernilai positif sedangkan cosinusoida bernilai positif pada kuadran 1 dan 4, lain halnya dengan nilai *tangent* sama pada kuadran 1 dan 3 yaitu notasi plus (+) seperti diilustrasikan pada Gambar 2.7, maka solusi yang didapat hanya satu.



Gambar 2.7 Fungsi Atan2 pada Empat Kuadran

Tabel 2.1 Beberapa Persamaan Trigonometri yang Digunakan *Inverse Kinematics*

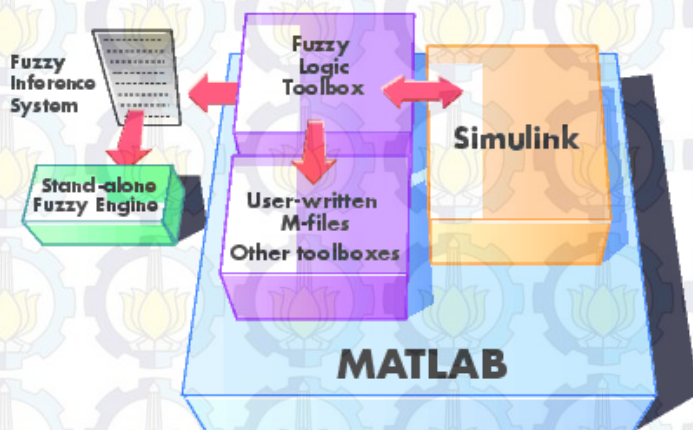
Persamaan	Solusi
$a \sin \theta + b \cos \theta = c$	$\theta = A \tan 2(a, b) \pm A \tan 2(\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c)$
$a \sin \theta + b \cos \theta = 0$	$\theta = A \tan 2(-b, a)$ atau $\theta = A \tan 2(b, -a)$
$\cos \theta = a$ dan $\sin \theta = b$	$\theta = A \tan 2(b, a)$
$\sin \theta = b$	$\theta = A \tan 2(\pm\sqrt{1-a^2}, a)$
$\sin \theta = b$	$\theta = A \tan 2(a, \pm\sqrt{1-a^2})$

2.5. Sistem *Fuzzy*[8]

Sistem *Fuzzy* adalah salah satu bentuk pendekatan sistem manusia, dimana representasi suatu kejadian didistribusikan kedalam sejumlah istilah bahasa (yang menyatakan level kualitatif) dengan nilai kebenaran tiap level terletak antara 0 sampai 1. Sistem *fuzzy* diperkenalkan oleh Dr. Lotfi Zadeh dari Universitas California, Berkeley pada tahun 1965.

Motivasi utama teori sistem *fuzzy* adalah memetakan sebuah ruang masukan (*input*) ke dalam ruang keluaran (*output*) dengan menggunakan *IF-THEN rules*. Perkembangan dari sistem *fuzzy* sendiri memiliki banyak macam, antara lain *fuzzy* tipe Mamdani, Takagi-Sugeno dan lain-lain. Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai himpunan *fuzzy*, fungsi keanggotaan *fuzzy*, operasi himpunan *fuzzy*, sistem inferensi *fuzzy* dan model *fuzzy* Mamdani.

Software MATLAB R2014a mempunyai *Toolbox* yang mendukung untuk menyusun sistem *fuzzy*. *Toolbox* ini berdiri sendiri (*stand alone*) yang mengizinkan user untuk mengakses secara langsung melalui bahasa C serta dapat juga diakses melalui Simulink. Gambaran umum *Toolbox* ini dalam ruang kerja MATLAB diilustrasikan seperti Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Tata letak *Fuzzy Logic Toolbox* pada MATLAB

2.5.1. Himpunan *Fuzzy*

Himpunan *Fuzzy* adalah sebuah himpunan dimana keanggotaan dari tiap elemennya tidak mempunyai batas yang jelas atau suatu himpunan yang beranggotakan sejumlah istilah dalam pengertian bahasa yang menyatakan level kualitatif dari semesta pembicaraan X. Himpunan *fuzzy* juga merupakan cara untuk menerjemahkan tentang beberapa masukan ke

dalam suatu bentuk fungsi keanggotaan. Masing – masing elemen mempunyai derajat keanggotaan untuk menjadi anggota himpunan, dimana fungsi keanggotaan dari suatu himpunan *fuzzy* bernilai 0,0 – 1,0.

2.5.2. Fungsi Keanggotaan *Fuzzy*

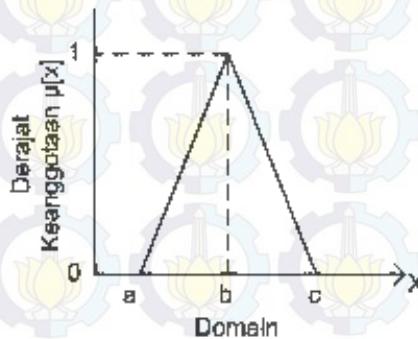
Fungsi keanggotaan mendefinisikan bagaimana tiap titik dalam ruang masukan (*input*) dipetakan menjadi bobot atau derajat keanggotaan antara 0 dan 1. Dalam teori himpunan, ruang masukan juga dikenal sebagai *universe of discourse*. Misalkan ada dua *fuzzy set*, yaitu A dan B serta ada sebuah anggota himpunan X. Anggota himpunan X ini bisa dikelompokkan dalam *fuzzy set B* dengan derajat keanggotaan $\mu_a(x)$ dan juga ada *fuzzy set B* dengan derajat keanggotaan $\mu_b(x)$. Sekarang lihat jika operasi min dilakukan antara dua *fuzzy set* A dan B tersebut, yang dinotasikan pada Persamaan 2.24.

$$\min(\mu_a(x), \mu_b(x)) \tag{2.24}$$

2.5.2.1. Fungsi Keanggotaan Segitiga

Fungsi keanggotaan segitiga ditunjukkan pada Gambar 2.9. Secara matematis, derajat keanggotaan (*member function*) untuk fungsi keanggotaan segitiga ditentukan dengan Persamaan 2.25 sedangkan ilustrasinya terlihat pada Gambar 2.10.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \tag{2.25}$$

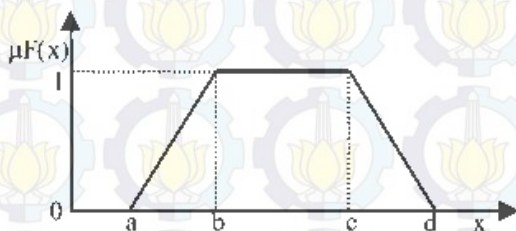


Gambar 2.9 Fungsi Keanggotaan Segitiga

2.5.2.2. Fungsi Keanggotaan Trapezium

Persamaan fungsi keanggotaan trapesium (*trapezoid*) dengan empat parameter skalar $\{a,b,c,d\}$ dengan $a < b < c < d$. Fungsi keanggotaan trapesium ditunjukkan pada Gambar 2.10. Derajat keanggotaannya dituliskan pada Persamaan 2.26.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (2.26)$$



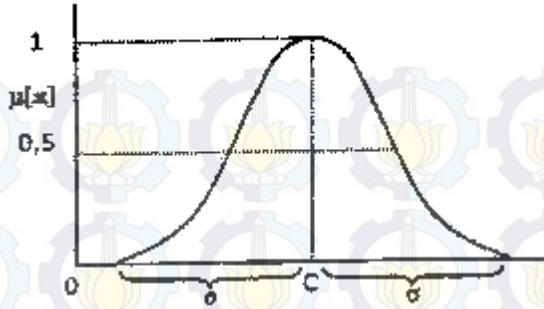
Gambar 2.10 Fungsi Keanggotaan Trapezium

2.5.2.3. Fungsi Keanggotaan Gaussian

Dua parameter $\{c,\sigma\}$ menentukan fungsi keanggotaan Gaussian dan derajat keanggotaannya ditentukan pada Persamaan 2.27.

$$\mu(x) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2} \quad (2.27)$$

dengan c merepresentasikan pusat fungsi keanggotaan dan σ (standar deviasi) mendefinisikan lebar fungsi keanggotaan. Berikut fungsi keanggotaan Gaussian yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. Nilai dari Gaussian tidak akan mencapai 0, karena dari Persamaan 2.27 terlihat bahwa persamaan tersebut nilainya tidak akan mencapai 0 apabila nilai c dan σ diisi dengan nilai berapapun kecuali nilai 0.



Gambar 2.11 Fungsi Keanggotaan Gaussian

2.5.3. Operasi Himpunan Fuzzy

Operasi himpunan *fuzzy* dilakukan dengan mengoperasikan fungsi keanggotaan satu dengan lainnya. Operasi ini dilakukan dalam proses inferensi *fuzzy*. Macam-macam operator *fuzzy* antara lain adalah operator min (*minimum*), max (*maximum*), dan *product*. Pada Gambar 2.13 terdapat himpunan *fuzzy* A dan B yang akan dilakukan operasi himpunan *fuzzy*. Dua himpunan *fuzzy* dalam semesta pembicaraan X dengan fungsi keanggotaan μ_A dan μ_B untuk $x \in X$, maka operasi himpunan *fuzzy* didefinisikan sebagai berikut:

a. Union (OR)

Union (gabungan) dari himpunan *fuzzy* A dan B dengan fungsi keanggotaan $\mu_A(x)$ dan $\mu_B(x)$ adalah $\mu_{A \cup B}(x)$.

b. Interseksi (AND)

Interseksi himpunan *fuzzy* A dan B adalah himpunan *fuzzy* yang fungsi keanggotaannya diberikan sebagai operasi *minimum* Persamaan 2.28 dan operasi *Algebraic product* Persamaan 2.29 dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in X \quad (2.28)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x), x \in X \quad (2.29)$$

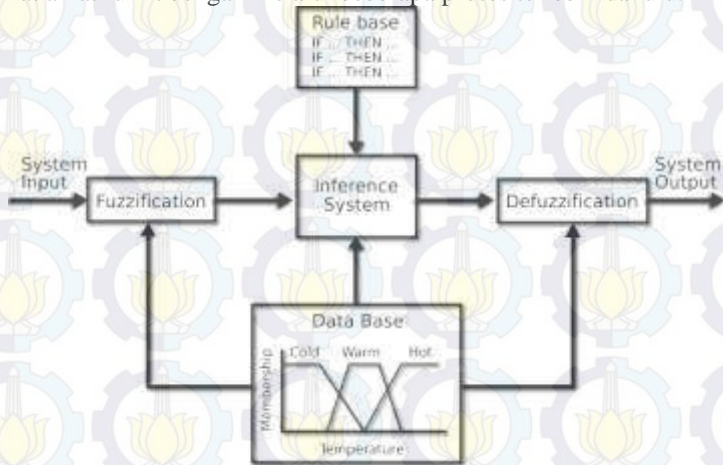
c. Komplemen (NOT)

Komplemen dari suatu himpunan *fuzzy* B dengan fungsi keanggotaan $\mu_B(x)$ pada Persamaan (2.30) berikut:

$$\mu_B^c(x) = 1 - \mu_B(x), x \in X \quad (2.30)$$

2.5.4. Sistem Inferensi Fuzzy

Proses penarikan kesimpulan dari sekumpulan kaidah *fuzzy* atau masukan tegas. Dalam sistem *fuzzy* yang diterangkan pada Gambar 2.12, terlihat bahwa sistem inferensi *fuzzy* dalam membuat sebuah keputusan terlihat amat rumit dengan melalui beberapa proses terlebih dahulu.



Gambar 2.12 Sistem Inferensi Fuzzy

Sistem sistem Inferensi *fuzzy* mempunyai kemiripan dengan penalaran manusia seperti pengetahuan yang meliputi penalaran *fuzzy*. Penalaran *fuzzy* tersebut dinyatakan sebagai aturan dalam bentuk pernyataan ***If-Then*** dinyatakan dengan

$$\underbrace{\text{If } x_1 \text{ is } A \text{ and } x_2 \text{ is } B}_{\text{premis}} \text{ Then } \underbrace{u = C}_{\text{konsekuen}}$$

Dalam menginterpretasikan sebuah ***If-Then*** rule meliputi dua bagian. Pertama, mengevaluasi *antecedent*, melakukan fuzzifikasi pada masukan dan menerapkan operasi-operasi sistem *fuzzy* dengan operator-operator *fuzzy*. Kedua, menerapkan hasil operasi sistem *fuzzy* pada bagian *antecedent* untuk mengambil kesimpulan dengan mengisikan *fuzzy* set keluaran ke variabel keluaran.

Proses inferensi untuk menentukan keputusan dalam suatu sistem sistem *fuzzy* adalah sebagai berikut:

- a. Fuzzifikasi input

Fuzzifikasi masing-masing input tegas pada fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* sehingga didapat derajat keanggotaanya.

b. Aplikasi operator *fuzzy*

Penerapan operator *fuzzy* (seperti *AND*, *OR*) pada masing-masing bagian premis dari aturan *fuzzy*, dimana operasi *AND* berarti mengambil nilai minimum sedangkan *OR* nilai maksimum.

c. Aplikasi implikasi

Proses mendapatkan konsekuen dari aturan (*If-Then*) berdasarkan derajat keanggotaan premis.

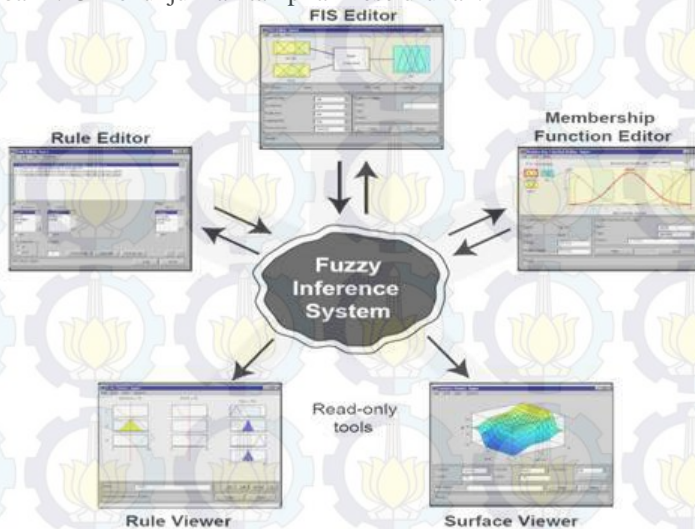
d. Agregasi

Proses penggabungan semua hasil implikasi *fuzzy* dari setiap aturan (*If-Then*) menjadi sebuah *fuzzy* set tunggal.

e. Defuzzifikasi

Perhitungan keputusan *fuzzy* sehingga didapat *output* tegas.

Toolbox pada MATLAB yang digunakan telah mencakup keseluruhan dari sistem inferensi *fuzzy*. *Toolbox* ini telah dapat menangani berapa pun masukan dan keluaran dari sistem *fuzzy* yang diharapkan. Hanya saja ketergantungan berapa masukan dan keluaran yang diijinkan tergantung dari performansi komputer yang digunakan. Gambar 2.13 menunjukkan tampilan keseluruhan.



Gambar 2.13 FIS Editor pada Toolbox Fuzzy MATLAB

Metode defuzzifikasi yang sering digunakan diantaranya adalah *center of gravity*, dan *center average*. Metode defuzzifikasi dengan *center of gravity* dapat diterapkan pada fungsi keanggotaan yang simetris. Sistem inferensi *fuzzy* dapat dibangun dengan dua metode, yaitu metode Mamdani dan metode Takagi-Sugeno. Dalam mekanisme inferensi, perbedaan sistem inferensi *fuzzy* tipe Mamdani dan Sugeno terletak pada jenis fungsi keanggotaan yang digunakan pada bagian konsekuen.

2.5.5. Metode Takagi-Sugeno

Metode ini banyak mempunyai kelebihan apabila dibandingkan dengan tipe Mamdani [9]. Salah satunya dapat menghitung luas daerah di bawah kurva. Hanya saja ada kemiripan pada proses fuzzifikasi, operasi *fuzzy* dan implikasi. Perbedaan terletak pada proses agregasi dan defuzzifikasi, jika pada Mamdani agregasi berupa daerah di bawah kurva maka pada metode Takagi-Sugeno agregasi berupa *singleton-singleton*.

Pada model Takagi-Sugeno, nilai keluaran dari setiap aturan sudah berupa nilai tegas. Bila $f(x_1, x_2)$ merupakan polinomial orde 1, maka keluaran *fuzzy* merupakan kombinasi linier dari masing-masing masukan tegas. Bila $f(x_1, x_2)$ merupakan polinomial orde 0, maka keluaran *fuzzy* merupakan konstanta. Konsekuen orde 0 ini mirip dengan model Mamdani, dimana $u = C$ hanya saja C tersebut berupa *fuzzy singleton*.

Defuzzifikasi pada metode Takagi-Sugeno menggunakan *center average of weighed area* yang terlihat pada Persamaan 2.31.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^r \mu_i b_i}{\sum_{i=1}^r \mu_i} \quad (2.31)$$

Dengan menggunakan model *fuzzy* Takagi-Sugeno, sistem *non-linear* dapat direpresentasikan dengan beberapa model linier untuk daerah kerja yang berbeda. Model keseluruhan sistem merupakan perpaduan antara model-model linier tersebut. Premis dari model *fuzzy* Takagi-Sugeno merupakan model *plant* yang ditulis dengan aturan *If-Then* yang dapat ditulis dalam bentuk berikut:

Aturan plant ke- i :

If z_1 is M_{i1} and z_2 is M_{i2} ... z_j is M_{ij}

Then $x^* = A_i x + B_i u$

$$y = C_i x + D_i u \quad ; i = 1, 2, \dots, q \quad (2.32)$$

dengan i sebagai jumlah aturan *fuzzy*, dan j adalah jumlah himpunan *fuzzy* dalam satu aturan, M_{ij} sebagai himpunan *fuzzy*, z merupakan variabel pada bagian premis yang dapat berupa fungsi dari variabel state dan u

adalah masukan sistem. Vektor state $x \in R^n$, vektor keluaran sistem $y \in R^q$, sedangkan **A**, **B**, **C**, dan **D** adalah matriks dengan ukuran yang sesuai.

Logika penghubung AND (*operator product*) digunakan dalam tahap inferensi pada model *fuzzy* Takagi-Sugeno, sedangkan metode *center average* digunakan dalam tahap defuzzifikasi. Aturan *plant* dalam model *fuzzy* Takagi-Sugeno secara keseluruhan dapat dituliskan sebagai berikut .

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^r m_i(z) [A_i x + B_i u] \\ y &= \sum_{i=1}^r m_i(z) [C_i x + D_i u] \end{aligned} \quad (2.33)$$

dengan

$$m_i(z) = \frac{\mu_i(z)}{\sum_{i=1}^r \mu_i(z)}; \mu_i(z) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j) \quad (2.34)$$

Pembobot $w_i(z)$ dan derajat keanggotaan $\mu_i(z)$ memiliki sifat sebagai berikut .

$$m_i(z) \geq 0; \sum_{i=1}^r m_i(z) = 1; \mu_i(z) \geq 0; \sum_{i=1}^r \mu_i(z) > 0 \quad (2.35)$$

Oleh karena itu, keluaran dari kontroler *fuzzy* dituliskan sebagai berikut.

$$u = \sum_{i=1}^r m_i(z) [-K_i x] \quad (2.36)$$



BAB III DESAIN SISTEM

Pada Bab ini dijelaskan mengenai pemodelan robot *Humanoid Bioloid 18-DoF* yang tersegmentasi berdasarkan anggota tubuh yang bergerak lengkap dengan langkah-langkah memasukkan nilai dari DH Parameter ke Transformasi Homogen, perancangan *inverse kinematics* sampai desain sistem *fuzzy*. Perhitungan *inverse kinematics* yang dipakai menggunakan metode aljabar sedangkan sistem *fuzzy* yang dipakai adalah tipe Takagi-Sugeno.

3.1. Spesifikasi Sistem

Definisi sistem dari penelitian ini adalah konfigurasi robot *Humanoid* jenis *Bioloid Type-A* beserta algoritma pola untuk bergerak sesuai dengan perintah yang diberikan. Fokus pembahasan dari penelitian ini adalah implementasi dari analisa *inverse kinematics* robot *Bioloid* beserta perencanaan gerak. Spesifikasi sistem yang diharapkan dapat tercapai adalah sebagai berikut :

- a. Robot *Humanoid* jenis *Bioloid* dengan *3-DoF* pada masing-masing tangan dan *6-DoF* pada masing-masing kaki mampu bergerak seolah-olah robot sedang bergoyang mengikuti irama yang diberikan.
- b. Robot dapat terjaga keseimbangannya saat bergerak dan memiliki pola bergerak sesuai dengan perencanaan.

3.2. Identifikasi Kebutuhan

Sistem yang akan dibangun harus mampu memenuhi spesifikasi sistem yang telah di rencanakan. Untuk itu perlu dijabarkan sebagai identifikasi kebutuhan sistem yang di antaranya adalah perancangan konfigurasi perangkat elektronik robot, perangkat lunak, *inverse kinematics*, dan perencanaan gerak robot. Adapun robot yang digunakan pada tugas akhir ini ialah robot *Bioloid* produksi dari *Robotis* dengan spesifikasi :

- Berat : 1.7 Kg
- Tinggi : 39.4 cm
- Jumlah Sendi : 18

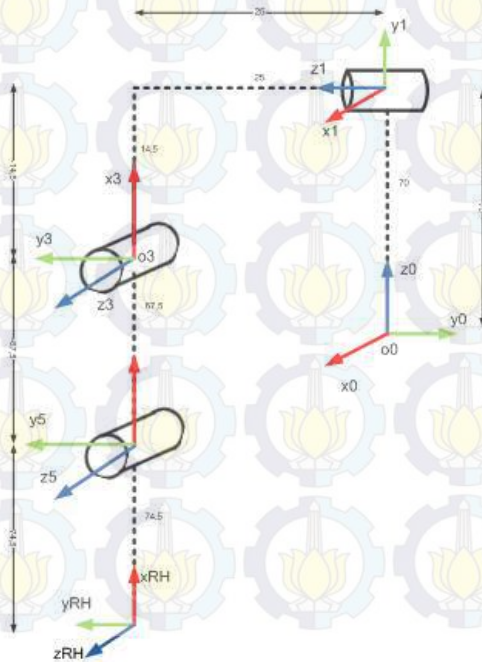
Servo yang digunakan untuk menggerakkan sendi ialah *dynamixel AX – 12 A* dengan kemampuan maksimal saat berputar 300° dan dapat berfungsi sebagai roda berdasarkan konfigurasi yang diberikan pada motor servo tersebut. Pada gambar 3.1 merupakan bentuk fisik dari robot yang akan digunakan dalam implementasi sistem.



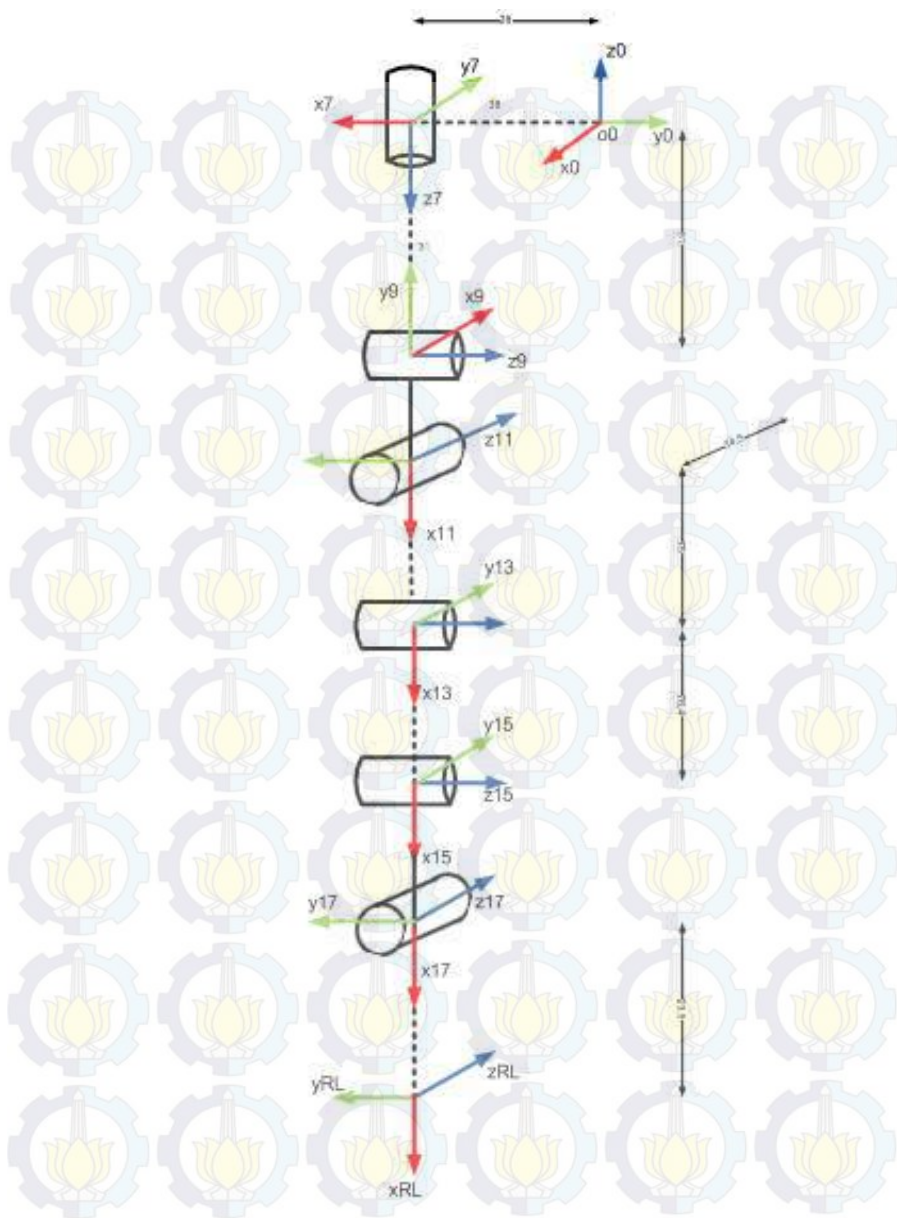
Gambar 3.1 Bentuk Fisik Robot

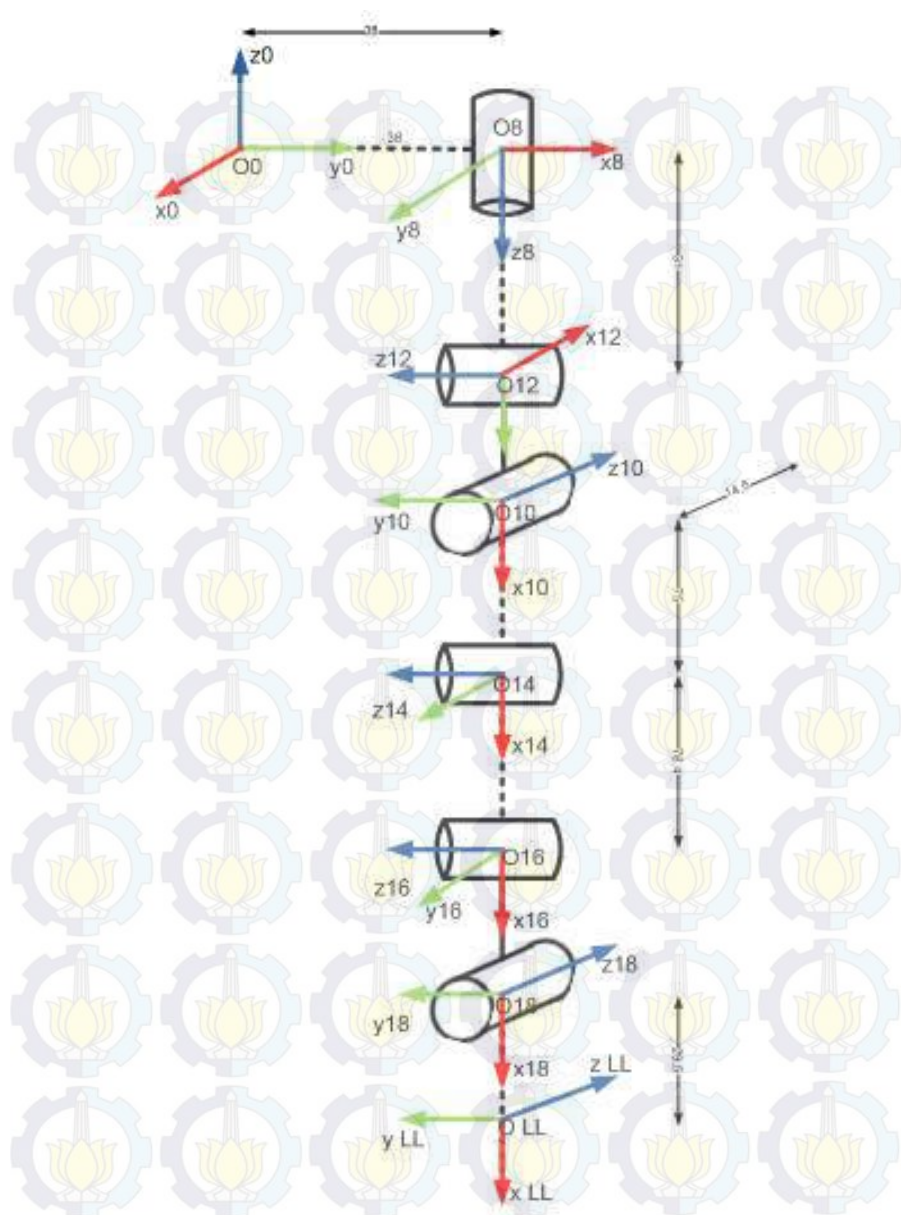
3.3. Pemodelan *Frame Robot Humanoid Bioloid*

Pemodelan frame pada robot *Humanoid Bioloid* dilakukan dengan menentukan letak sumbu x - y - z pada tiap *joint* robot, dimana untuk penjabarannya dilakukan pemetaan tiap bagian robot, seperti 3-*DoF* untuk tangan kanan dan tangan kiri, serta 6-*DoF* untuk kaki kanan dan kiri seperti gambar 3.1. berikut.

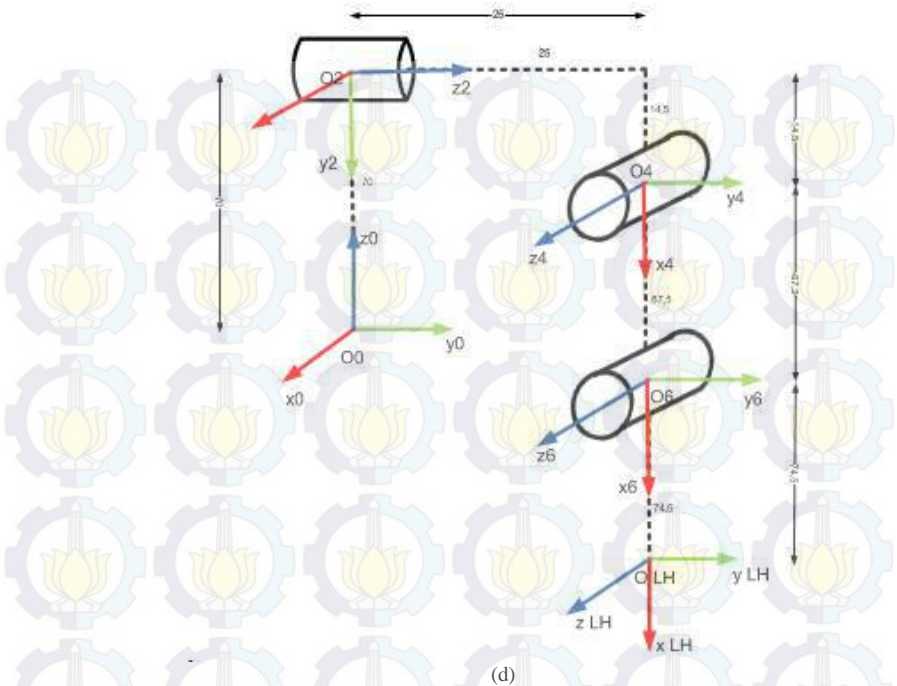


(a)





(c)



Gambar 3.2 (a) Bentuk pemodelan sendi tangan kanan
 (b) Bentuk pemodelan sendi kaki kanan
 (c) Bentuk pemodelan sendi kaki kiri
 (d) Bentuk pemodelan sendi tangan kiri

3.4. Pemodelan Transformasi Homogen Robot *Humanoid Bioloid 18-DoF*

Menurut penelitian tentang DH-Parameter, pemodelan keseluruhan rancangan untuk sebuah robot dapat didefinisikan menjadi θ_i (*joint angle*), a_i (*link length*), d_i (*link offset*) dan α_i (*link twist*). Nilai-nilai yang didapat dari penentuan keempat parameter tersebut akan dimasukkan ke model matriks Transformasi Homogen.

3.4.1. DH-Parameter Robot *Humanoid Bioloid*

Pemodelan DH-Parameter pada robot *Humanoid Bioloid* dijabarkan tiap bagian, antara lain tangan kanan 3-DoF, tangan kiri 3-DoF, kaki kanan 6-DoF, dan kaki kiri 3-DoF yang dijabarkan sesuai dengan Tabel 3.1 hingga Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.1. DH-Parameter Tangan Kanan

Link	a_i	d_i	α_i	θ_i
1	0	70	-90°	0°
2	-14.5	25	90°	$-115^\circ \sim 107^\circ$
3	-67.5	0	0°	$-38^\circ \sim 104^\circ$
4	-74.5	0	0°	$0^\circ \sim 110^\circ$

Tabel 3.2. DH-Parameter Tangan Kiri

Link	a_i	d_i	α_i	θ_i
1	0	70	-90°	0°
2	14.5	25	90°	$-107^\circ \sim 115^\circ$
3	67.5	0	0°	$-104^\circ \sim 38^\circ$
4	74.5	0	0°	$-110^\circ \sim 0^\circ$

Tabel 3.3. DH-Parameter Kaki Kanan

Link	a_i	d_i	α_i	θ_i
1	38	0	90°	0°
2	0	31	-90°	$-30^\circ \sim 58^\circ$
3	0	0	-90°	$0^\circ \sim 36^\circ$
4	75	14.5	90°	$-21^\circ \sim 124^\circ$
5	76.4	0	0°	$0^\circ \sim 38^\circ$
6	0	0	-90°	$-26^\circ \sim 16^\circ$
7	29.5	0	0°	$-21^\circ \sim 10^\circ$

Tabel 3.4. DH-Parameter Kaki Kiri

Link	a_i	d_i	α_i	θ_i
1	-38	0	180°	0°
2	0	31	90°	$-58^\circ \sim 30^\circ$
3	0	0	-90°	$-36^\circ \sim 0^\circ$
4	-75	14.5	90°	$-124^\circ \sim 21^\circ$
5	-76.4	0	0°	$-38^\circ \sim 0^\circ$
6	0	0	-90°	$-16^\circ \sim 26^\circ$
7	-29.5	0	0°	$-10^\circ \sim 21^\circ$

Dari DH-Parameter inilah yang akan digunakan untuk memodelkan Matriks Transformasi Homogen untuk perumusan perhitungan *forward kinematics* dan *inverse kinematics*.

3.4.2. Model Transformasi Homogen Tiap Link

Berdasarkan pemodelan DH-Parameter dapat dimasukkan nilai tersebut seperti pada persamaan 2.10 masing-masing bagian, dimana pada perhitungan ini dibedakan perhitungannya yaitu untuk semua *joint* anggota tubuh bagian kanan penomorannya ganjil, dan genap untuk bagian *joint* kiri seperti berikut.

$$H_0^1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 70 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$H_1^3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & s\theta_3 & -14,5c\theta_3 \\ s\theta_3 & 0 & -c\theta_3 & -14,5s\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$H_3^5 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & -67,5c\theta_5 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & -67,5s\theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$H_5^{RH} = \begin{bmatrix} c\theta_{RH} & -s\theta_{RH} & 0 & -74,5c\theta_{RH} \\ s\theta_{RH} & c\theta_{RH} & 0 & -74,5s\theta_{RH} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$H_0^2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & -s\theta_2 & 0 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 70 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$H_2^4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 14,5c\theta_4 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 14,5s\theta_4 \\ 0 & 1 & 0 & 25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$H_4^6 = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 67,5c\theta_6 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 67,5s\theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$H_6^{LH} = \begin{bmatrix} c\theta_{LH} & -s\theta_{LH} & 0 & 74,5c\theta_{LH} \\ s\theta_{LH} & c\theta_{LH} & 0 & 74,5s\theta_{LH} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$H_0^7 = \begin{bmatrix} c\theta_7 & 0 & s\theta_8 & 38c\theta_7 \\ s\theta_7 & 0 & -c\theta_8 & 38s\theta_7 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$H_7^9 = \begin{bmatrix} c\theta_9 & 0 & -s\theta_9 & 0 \\ s\theta_9 & 0 & c\theta_9 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 31 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$H_9^{11} = \begin{bmatrix} c\theta_{11} & 0 & -s\theta_{11} & 0 \\ s\theta_{11} & 0 & c\theta_{11} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$H_{11}^{13} = \begin{bmatrix} c\theta_{13} & 0 & s\theta_{13} & 75c\theta_{13} \\ s\theta_{13} & 0 & -c\theta_{13} & 75s\theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 & 14,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$H_{13}^{15} = \begin{bmatrix} c\theta_{15} & -s\theta_{15} & 0 & -76,4c\theta_{15} \\ s\theta_{15} & c\theta_{15} & 0 & -76,4s\theta_{15} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$H_{15}^{17} = \begin{bmatrix} c\theta_{17} & 0 & -s\theta_{17} & 0 \\ s\theta_{17} & 0 & c\theta_{17} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$H_{17}^{RL} = \begin{bmatrix} c\theta_{RL} & -s\theta_{RL} & 0 & 29,5c\theta_{RL} \\ s\theta_{RL} & c\theta_{RL} & 0 & 29,5s\theta_{RL} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$H_0^8 = \begin{bmatrix} c\theta_8 & s\theta_8 & 0 & -38c\theta_8 \\ s\theta_8 & -c\theta_8 & 0 & -38s\theta_8 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$H_8^{10} = \begin{bmatrix} c\theta_{10} & 0 & s\theta_{10} & 0 \\ s\theta_{10} & 0 & -c\theta_{10} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 31 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$H_{10}^{12} = \begin{bmatrix} c\theta_{12} & 0 & -s\theta_{12} & 0 \\ s\theta_{12} & 0 & c\theta_{12} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$H_{12}^{14} = \begin{bmatrix} c\theta_{14} & 0 & s\theta_{14} & -75c\theta_{14} \\ s\theta_{14} & 0 & -c\theta_{14} & -75s\theta_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 14,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$H_{14}^{16} = \begin{bmatrix} c\theta_{16} & -s\theta_{16} & 0 & -76,4c\theta_{16} \\ s\theta_{16} & c\theta_{16} & 0 & -76,4s\theta_{16} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$H_{16}^{18} = \begin{bmatrix} c\theta_{18} & 0 & -s\theta_{18} & 0 \\ s\theta_{18} & 0 & c\theta_{18} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$H_{18}^{LL} = \begin{bmatrix} c\theta_{LL} & -s\theta_{LL} & 0 & -29,5c\theta_{LL} \\ s\theta_{LL} & c\theta_{LL} & 0 & -29,5s\theta_{LL} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

3.5. Kinematika

Perhitungan untuk mendapatkan persamaan *forward kinematics* dan *inverse kinematics* menggunakan *software* MATLAB untuk pemrosesan matriks dan mendapatkan solusi beberapa *theta* dari persamaan matriks itu sendiri. Sebelum memasuki perhitungan tersebut, penulis menyederhanakan beberapa simbol, yaitu.

$$s\theta_i = \sin(\theta_i) \quad (3.23)$$

$$c\theta_i = \cos(\theta_i) \quad (3.24)$$

$$s\theta_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j) \quad (3.25)$$

$$c\theta_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j) \quad (3.26)$$

$$\sin(\theta_i + \theta_j) = (\sin \theta_i \cos \theta_j + \cos \theta_i \sin \theta_j) \quad (3.27)$$

$$\cos(\theta_i + \theta_j) = (\cos \theta_i \cos \theta_j - \sin \theta_i \sin \theta_j) \quad (3.28)$$

3.5.1. Forward Kinematics

Pemodelan *forward kinematics* yang mempunyai 6 matriks dapat dihitung berdasarkan Persamaan 3.26. Hasil akhir dari perhitungan akan didapatkan matriks:

$$\begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Setelah perhitungan perkalian antara beberapa *link* model Persamaan 3.1 sampai 3.22, maka didapatkan hasil Persamaan 3.27 sampai 3.71,

dimana persamaan homogenus untuk tangan kanan direpresentasikan pada persamaan 3.27 sampai 3.35, sedangkan untuk tangan kiri direpresentasikan oleh persamaan 3.36 hingga 3.47. Sedangkan kaki kanan dan kaki kiri direpresentasikan dengan persamaan 3.48 hingga 3.71 sebagai berikut.

$$n_x = c\theta_1 c\theta_3 (c\theta_5 c\theta_{RH} - s\theta_5 s\theta_{RH}) - s\theta_1 (s\theta_5 c\theta_{RH} + c\theta_5 s\theta_{RH}) \quad (3.27)$$

$$n_y = s\theta_1 c\theta_3 (c\theta_5 c\theta_{RH} - s\theta_5 s\theta_{RH}) - c\theta_1 (s\theta_5 c\theta_{RH} + c\theta_5 s\theta_{RH}) \quad (3.28)$$

$$n_z = -s\theta_3 (c\theta_5 c\theta_{RH} - s\theta_5 s\theta_{RH}) \quad (3.29)$$

$$s_x = c\theta_1 c\theta_3 (-c\theta_5 s\theta_{RH} - s\theta_5 c\theta_{RH}) - s\theta_1 (-s\theta_5 s\theta_{RH} + c\theta_5 c\theta_{RH}) \quad (3.29)$$

$$s_y = s\theta_1 c\theta_3 (-c\theta_5 s\theta_{RH} - s\theta_5 c\theta_{RH}) + c\theta_1 (-s\theta_5 s\theta_{RH} + c\theta_5 c\theta_{RH}) \quad (3.29)$$

$$s_z = -s\theta_3 (c\theta_5 s\theta_{RH} - s\theta_5 c\theta_{RH}) \quad (3.29)$$

$$a_x = c\theta_1 s\theta_3 \quad (3.30)$$

$$a_y = s\theta_1 s\theta_3 \quad (3.31)$$

$$a_z = c\theta_3 \quad (3.32)$$

$$p_x = c\theta_1 c\theta_3 (-74.5c\theta_5 c\theta_{RH} + 74.5s\theta_5 s\theta_{RH} - 67.5c\theta_5) - s\theta_1 (-74.5s\theta_5 c\theta_{RH} - 74.5c\theta_5 s\theta_{RH} - 67.5s\theta_5) - 14.5c\theta_1 c\theta_3 - 25s\theta_1 \quad (3.33)$$

$$p_y = s\theta_1 c\theta_3 (-74.5c\theta_5 c\theta_{RH} + 74.5s\theta_5 s\theta_{RH} - 67.5c\theta_5) + c\theta_1 (-74.5s\theta_5 c\theta_{RH} - 74.5c\theta_5 s\theta_{RH} - 67.5s\theta_5) - 14.5s\theta_1 c\theta_3 + 25c\theta_1 \quad (3.34)$$

$$p_z = -s\theta_3 (-74.5c\theta_5 c\theta_{RH} + 74.5s\theta_5 s\theta_{RH} - 67.5c\theta_5) + 14.5s\theta_3 + 70 \quad (3.35)$$

$$n_x = c\theta_2 c\theta_4 (c\theta_6 c\theta_{LH} - s\theta_6 s\theta_{LH}) - s\theta_2 (s\theta_6 c\theta_{LH} + c\theta_6 s\theta_{LH}) \quad (3.36)$$

$$n_y = s\theta_2 c\theta_4 (c\theta_6 c\theta_{LH} - s\theta_6 s\theta_{LH}) + c\theta_2 (s\theta_6 c\theta_{LH} + c\theta_6 s\theta_{LH}) \quad (3.37)$$

$$n_z = -s\theta_4 (c\theta_6 c\theta_{LH} - s\theta_6 s\theta_{LH}) \quad (3.38)$$

$$s_x = c\theta_2 c\theta_4 (-c\theta_6 s\theta_{LH} - s\theta_6 c\theta_{LH}) - s\theta_2 (-s\theta_6 s\theta_{LH} + c\theta_6 c\theta_{LH}) \quad (3.39)$$

$$s_y = s\theta_2 c\theta_4 (-c\theta_6 s\theta_{LH} - s\theta_6 c\theta_{LH}) + c\theta_2 (-s\theta_6 s\theta_{LH} + c\theta_6 c\theta_{LH}) \quad (3.40)$$

$$s_z = -c\theta_4 (-c\theta_6 s\theta_{LH} - s\theta_6 c\theta_{LH}) \quad (3.41)$$

$$a_x = c\theta_2 c\theta_4 \quad (3.42)$$

$$a_y = s\theta_2 s\theta_4 \quad (3.43)$$

$$a_z = c\theta_4 \quad (3.44)$$

$$p_x = c\theta_2 c\theta_4 (74.5c\theta_6 c\theta_{LH} - 74.5s\theta_6 s\theta_{LH} + 67.5c\theta_6) - s\theta_2 (74.5s\theta_6 c\theta_{LH} + 74.5c\theta_6 s\theta_{LH} + 67.5s\theta_6) + 14.5c\theta_2 c\theta_4 - 25s\theta_2 \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned}
p_y = & s\theta_2 c\theta_4 (74.5c\theta_6 c\theta_{LH} - 74.5s\theta_6 s\theta_{LH} + 67.5c\theta_6) \\
& + c\theta_2 (74.5s\theta_6 c\theta_{LH} + 74.5c\theta_6 s\theta_{LH} + 67.5s\theta_6) \\
& + 14.5s\theta_2 c\theta_4 + 25c\theta_2
\end{aligned} \tag{3.46}$$

$$\begin{aligned}
p_z = & -s\theta_4 (74.5c\theta_6 c\theta_{LH} - 74.5s\theta_6 s\theta_{LH} + 67.5c\theta_6) \\
& - 14.5s\theta_4 + 70
\end{aligned} \tag{3.47}$$

$$\begin{aligned}
n_x = & [c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} + s\theta_7 s\theta_{11} c\theta_{13} + c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{13} - s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{13}] \\
& [(c\theta_{15} c\theta_{17} - s\theta_{15} s\theta_{17}) c\theta_{RL}]
\end{aligned} \tag{3.48}$$

$$\begin{aligned}
& - [c\theta_7 c\theta_9 s\theta_{11} + s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11}] [(s\theta_{15} c\theta_{17} + c\theta_{15} s\theta_{17}) c\theta_{RL}] \\
& - [c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} + s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{13} + s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{13}] s\theta_{RL} \\
n_y = & [s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_9 s\theta_{11} c\theta_{13} - s\theta_7 s\theta_9 s\theta_{13} + c\theta_7 s\theta_9 s\theta_{13}] \\
& [(c\theta_{15} c\theta_{17} - s\theta_{15} s\theta_{17}) c\theta_{RL}]
\end{aligned} \tag{3.49}$$

$$\begin{aligned}
& - [s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} - c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11}] [(s\theta_{15} c\theta_{17} + c\theta_{15} s\theta_{17}) c\theta_{RL}] \\
& - [s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} - s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{13} - c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{13}] s\theta_{RL} \\
n_z = & [s\theta_{11} c\theta_{13}] [(c\theta_{15} c\theta_{17} - s\theta_{15} s\theta_{17}) c\theta_{RL}] \\
& + c\theta_{11} [(s\theta_{15} c\theta_{17} + c\theta_{15} s\theta_{17}) c\theta_{RL}] \\
& - [s\theta_{11} s\theta_{13}] s\theta_{RL}
\end{aligned} \tag{3.50}$$

$$\begin{aligned}
s_x = & [c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} + s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} + c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{13} - s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{13}] \\
& [- (c\theta_{15} c\theta_{17} - s\theta_{15} s\theta_{17}) s\theta_{RL}]
\end{aligned} \tag{3.51}$$

$$\begin{aligned}
& + [c\theta_7 c\theta_9 s\theta_{11} + s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11}] [(s\theta_{15} c\theta_{17} + c\theta_{15} s\theta_{17}) s\theta_{RL}] \\
& - [c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} + s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{13} + s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{13}] c\theta_{RL} \\
s_y = & [-s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_9 s\theta_{11} c\theta_{13} - s\theta_7 s\theta_9 s\theta_{13} + c\theta_7 c\theta_9 s\theta_{13}] \\
& [(c\theta_{15} c\theta_{17} - s\theta_{15} s\theta_{17}) s\theta_{RL}]
\end{aligned} \tag{3.52}$$

$$\begin{aligned}
& + [s\theta_7 c\theta_9 s\theta_{11} - c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11}] [(s\theta_{15} c\theta_{17} + c\theta_{15} s\theta_{17}) s\theta_{RL}] \\
& - [s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} - s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{13} - c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{13}] c\theta_{RL} \\
s_z = & [-s\theta_{11} c\theta_{13}] [(c\theta_{15} c\theta_{17} - s\theta_{15} s\theta_{17}) s\theta_{RL}] \\
& - c\theta_{11} [(s\theta_{15} c\theta_{17} + c\theta_{15} s\theta_{17}) s\theta_{RL}] \\
& - s\theta_{11} s\theta_{13} c\theta_{RL}
\end{aligned} \tag{3.53}$$

$$\begin{aligned}
a_x = & [c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} + s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} + c\theta_7 s\theta_9 s\theta_{13} - s\theta_7 c\theta_9 s\theta_{13}] \\
& [-c\theta_{15} s\theta_{17} - s\theta_{15} c\theta_{17}] \\
& - [c\theta_7 c\theta_9 s\theta_{11} + s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11}] [-s\theta_{15} s\theta_{17} + c\theta_{15} c\theta_{17}]
\end{aligned} \tag{3.54}$$

$$\begin{aligned}
a_y = & [c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} - s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_9 s\theta_{13} + s\theta_7 c\theta_9 s\theta_{13}] \\
& [-c\theta_{15} s\theta_{17} - s\theta_{15} c\theta_{17}] \\
& - [s\theta_7 c\theta_9 s\theta_{11} - c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11}] [-s\theta_{15} s\theta_{17} + c\theta_{15} c\theta_{17}]
\end{aligned} \tag{3.55}$$

$$\begin{aligned}
a_z = & s\theta_{11} c\theta_{13} [-c\theta_{15} s\theta_{17} - s\theta_{15} c\theta_{17}] \\
& + c\theta_{11} [-s\theta_{15} s\theta_{17} + c\theta_{15} c\theta_{17}]
\end{aligned} \tag{3.56}$$

$$p_x = [c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} + s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} + c\theta_7 s\theta_{11} c\theta_{13} - s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{13}]$$

$$[29.5(c\theta_{15} c\theta_{17} - s\theta_{15} s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76.4c\theta_{15}] \quad (3.57)$$

$$- [c\theta_7 c\theta_9 s\theta_{11} + s\theta_7 s\theta_9 s\theta_{11}] [29.5(s\theta_{15} c\theta_{17} + c\theta_{15} s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76.4s\theta_{15}]$$

$$- 29.5 [c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} + s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_{11} c\theta_{13} + s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{13}] s\theta_{RL}$$

$$+ (c\theta_7 c\theta_9 + s\theta_7 s\theta_9) (75c\theta_{11} c\theta_{13} - 14.5s\theta_{11})$$

$$+ 75c\theta_7 s\theta_9 s\theta_{13} - 75s\theta_7 s\theta_9 s\theta_{13} + 38c\theta_7$$

$$p_y = [s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} c\theta_{13} - s\theta_7 s\theta_9 s\theta_{13} + c\theta_7 c\theta_9 s\theta_{13}]$$

$$[29.5(c\theta_{15} c\theta_{17} - s\theta_{15} s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76.4c\theta_{15}] \quad (3.58)$$

$$+ [-s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} + c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11}] [29.5(s\theta_{15} c\theta_{17} + c\theta_{15} s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76.4s\theta_{15}]$$

$$- 29.5 [s\theta_7 c\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} - c\theta_7 s\theta_9 c\theta_{11} s\theta_{13} - s\theta_7 s\theta_9 c\theta_{13} - c\theta_7 c\theta_9 c\theta_{13}] s\theta_{RL}$$

$$+ (s\theta_7 c\theta_9 - c\theta_7 c\theta_9) (75c\theta_{11} c\theta_{13} - 14.5s\theta_{11})$$

$$+ 75s\theta_7 s\theta_9 s\theta_{13} + 75c\theta_7 c\theta_9 s\theta_{13} + 38c\theta_7$$

$$p_z = [s\theta_{11} c\theta_{13}] [29.5(c\theta_{15} c\theta_{17} - s\theta_{15} s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76.4c\theta_{15}]$$

$$+ c\theta_{11} [29.5(s\theta_{15} c\theta_{17} + c\theta_{15} s\theta_{17})c\theta_{RL} + 76.4s\theta_{15}] \quad (3.59)$$

$$- 29.5 [s\theta_{11} s\theta_{13}] s\theta_{RL}$$

$$+ 75 [s\theta_{11} s\theta_{13}] + 14.5c\theta_{11} - 31$$

$$n_x = [(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12} c\theta_{14} - (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10})s\theta_{14}]$$

$$[(c\theta_{16} c\theta_{18} - s\theta_{16} s\theta_{18})c\theta_{LL}] \quad (3.60)$$

$$- [(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10})s\theta_{12}] [(s\theta_{16} c\theta_{18} + c\theta_{16} s\theta_{18})c\theta_{LL}]$$

$$- [(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12} s\theta_{14} - (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10})c\theta_{14}] s\theta_{LL}$$

$$n_y = [(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12} c\theta_{14} - (s\theta_8 s\theta_{10} + c\theta_8 c\theta_{10})s\theta_{14}]$$

$$[(c\theta_{16} c\theta_{18} - s\theta_{16} s\theta_{18})c\theta_{LL}] \quad (3.61)$$

$$- [(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10})s\theta_{12}] [(s\theta_{16} c\theta_{18} + c\theta_{16} s\theta_{18})c\theta_{LL}]$$

$$- [(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12} s\theta_{14} - (s\theta_8 s\theta_{10} + c\theta_8 c\theta_{10})c\theta_{14}] s\theta_{LL}$$

$$n_z = [-s\theta_{12} c\theta_{14}] [(c\theta_{16} c\theta_{18} - s\theta_{16} s\theta_{18})c\theta_{LL}]$$

$$- c\theta_{12} [(s\theta_{16} c\theta_{18} + c\theta_{16} s\theta_{18})c\theta_{LL}] + s\theta_{12} s\theta_{14} s\theta_{LL} \quad (3.62)$$

$$s_x = -[(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12} c\theta_{14} - (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10})s\theta_{14}]$$

$$[(c\theta_{16} c\theta_{18} - s\theta_{16} s\theta_{18})s\theta_{LL}] \quad (3.63)$$

$$+ [(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10})s\theta_{12}] [(s\theta_{16} c\theta_{18} + c\theta_{16} s\theta_{18})s\theta_{LL}]$$

$$- [(c\theta_8 c\theta_{10} + s\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12} s\theta_{14} - (c\theta_8 s\theta_{10} - s\theta_8 c\theta_{10})c\theta_{14}] c\theta_{LL}$$

$$s_y = -[(s\theta_8 c\theta_{10} - s\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12} c\theta_{14} - (s\theta_8 s\theta_{10} + c\theta_8 c\theta_{10})s\theta_{14}]$$

$$[(c\theta_{16} c\theta_{18} - s\theta_{16} s\theta_{18})s\theta_{LL}] \quad (3.64)$$

$$+ [(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10})s\theta_{12}] [(s\theta_{16} c\theta_{18} + c\theta_{16} s\theta_{18})s\theta_{LL}]$$

$$- [(s\theta_8 c\theta_{10} - c\theta_8 s\theta_{10})c\theta_{12} s\theta_{14} - (s\theta_8 s\theta_{10} + c\theta_8 c\theta_{10})c\theta_{14}] c\theta_{LL}$$

$$s_z = s\theta_{12}c\theta_{14}[(c\theta_{16}c\theta_{18} - s\theta_{16}s\theta_{18})s\theta_{LL}] \quad (3.65)$$

$$+ c\theta_{12}[(s\theta_{16}c\theta_{18} + c\theta_{16}s\theta_{18})s\theta_{LL}] + s\theta_{12}s\theta_{14}c\theta_{LL}$$

$$a_x = -[(c\theta_8c\theta_{10} + s\theta_8s\theta_{10})c\theta_{12}c\theta_{14} - (c\theta_8s\theta_{10} - s\theta_8c\theta_{10})s\theta_{14}] \quad (3.66)$$

$$[c\theta_{16}s\theta_{18} + s\theta_{16}c\theta_{18}] \\ + [(c\theta_8c\theta_{10} + s\theta_8s\theta_{10})s\theta_{12}][s\theta_{16}s\theta_{18} - c\theta_{16}c\theta_{18}]$$

$$a_y = -[(s\theta_8c\theta_{10} - c\theta_8s\theta_{10})c\theta_{12}c\theta_{14} - (s\theta_8s\theta_{10} + s\theta_8c\theta_{10})s\theta_{14}] \quad (3.67)$$

$$[c\theta_{16}s\theta_{18} + s\theta_{16}c\theta_{18}] \\ + [(s\theta_8c\theta_{10} - c\theta_8s\theta_{10})s\theta_{12}][s\theta_{16}s\theta_{18} - c\theta_{16}c\theta_{18}]$$

$$a_z = s\theta_{12}c\theta_{14}[c\theta_{16}s\theta_{18} + s\theta_{16}c\theta_{18}] \quad (3.68)$$

$$+ c\theta_{12}[s\theta_{16}s\theta_{18} - c\theta_{16}c\theta_{18}]$$

$$p_x = [(c\theta_8c\theta_{10} + s\theta_8s\theta_{10})c\theta_{12}c\theta_{14} - (c\theta_8s\theta_{10} - s\theta_8c\theta_{10})s\theta_{14}] \quad (3.69)$$

$$[-29.5(c\theta_{16}c\theta_{18} + s\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL} - 76.4c\theta_{16}] \\ - [(c\theta_8c\theta_{10} + s\theta_8s\theta_{10})s\theta_{12}] \\ [-29.5(s\theta_{16}c\theta_{18} + c\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL} - 76.4c\theta_{16}] \\ + 29.5[(c\theta_8c\theta_{10} + s\theta_8s\theta_{10})c\theta_{12}s\theta_{14} + (c\theta_8s\theta_{10} - s\theta_8c\theta_{10})c\theta_{14}]s\theta_{LL} \\ - (c\theta_8c\theta_{10} + s\theta_8s\theta_{10})(75c\theta_{12}c\theta_{14} + 14.5s\theta_{12}) \\ + 75(c\theta_8s\theta_{10} - s\theta_8c\theta_{10})s\theta_{14} - 38c\theta_8$$

$$p_y = [(s\theta_8c\theta_{10} - c\theta_8s\theta_{10})c\theta_{12}c\theta_{14} - (s\theta_8s\theta_{10} + c\theta_8c\theta_{10})s\theta_{14}] \quad (3.70)$$

$$[-29.5(c\theta_{16}c\theta_{18} + s\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL} - 76.4c\theta_{16}] \\ - [(s\theta_8c\theta_{10} - c\theta_8s\theta_{10})s\theta_{12}] \\ [-29.5(s\theta_{16}c\theta_{18} + c\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL} - 76.4s\theta_{16}] \\ + 29.5[(s\theta_8c\theta_{10} - c\theta_8s\theta_{10})c\theta_{12}s\theta_{14} + (s\theta_8s\theta_{10} + c\theta_8c\theta_{10})c\theta_{14}]s\theta_{LL} \\ - (s\theta_8c\theta_{10} - c\theta_8s\theta_{10})(75c\theta_{12}c\theta_{14} + 14.5s\theta_{12}) \\ + 75(s\theta_8s\theta_{10} + c\theta_8c\theta_{10})s\theta_{14} - 38c\theta_8$$

$$p_z = -s\theta_{12}c\theta_{14}[-29.5(c\theta_{16}c\theta_{18} + s\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL} - 76.4c\theta_{12}] \quad (3.71)$$

$$- c\theta_{12}[-29.5(s\theta_{16}c\theta_{18} + c\theta_{16}s\theta_{18})c\theta_{LL} - 76.4s\theta_{16}] \\ - 29.5s\theta_{12}s\theta_{14}s\theta_{LL} + 75s\theta_{12}c\theta_{14} - 14.5c\theta_{12} - 31$$

Karena perhitungan dari *forward kinematics* menggunakan masukan dari masing-masing *theta* yang telah diberikan, maka *theta* harus didefinisikan terlebih dahulu untuk mendapatkan perubahan orientasi dan posisi *end-effector* robot.

3.5.2. Inverse Kinematics

Masukan yang berbalik dari *forward kinematics* ini mengambil konsep perhitungan aljabar yang telah dibahas pada bab sebelumnya. Dengan menggabungkan persamaan 2.14 dan 2.15 maka akan didapatkan

persamaan 3.72 untuk mendapatkan nilai *theta* terakhir pada tiap bagian anggota gerak robot, sedangkan untuk menentukan nilai *theta* berikutnya menggunakan persamaan 3.73 sebagai berikut:

$$p_x^2 + p_y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cdot \cos \theta_2 \quad (3.72)$$

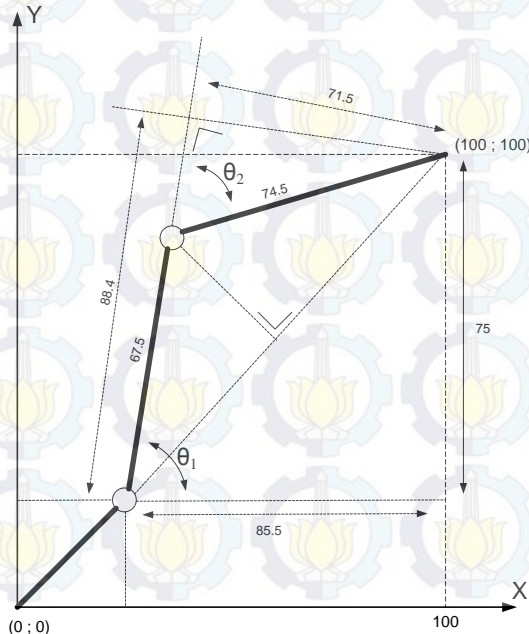
$$\theta_1 = [a \tan 2(l_2, l_1 + l_2 \cos \theta_2)] + [a \tan 2(p_y, p_x)] \quad (3.73)$$

3.6. Perencanaan Gerak Robot

Perencanaan gerak untuk robot boloid dibagi menjadi bagian, yaitu tangan kanan dan kiri, serta kedua kaki-kakinya direncanakan selaras agar gerak robot tetap seimbang, dimana posisi *end-effector* pada tiap bagian direncanakan agar nilai dari *theta* tiap *joint* dapat ditentukan sebagai berikut.

3.6.1. Gerak Tangan

Pada gerakan bagian tangan robot hanya dianalisa pergerakan dibagian *yaw*, sehingga *joint* yang dianalisa hanya yaitu 2 *joint* sebelum *end-effector*, karena gerak tangan kanan dan kiri identik pencerminan maka pada pembahasan ini cukup direncanakan salah satu tangan saja. Berikut penjabaran gerak dari tangan robot.



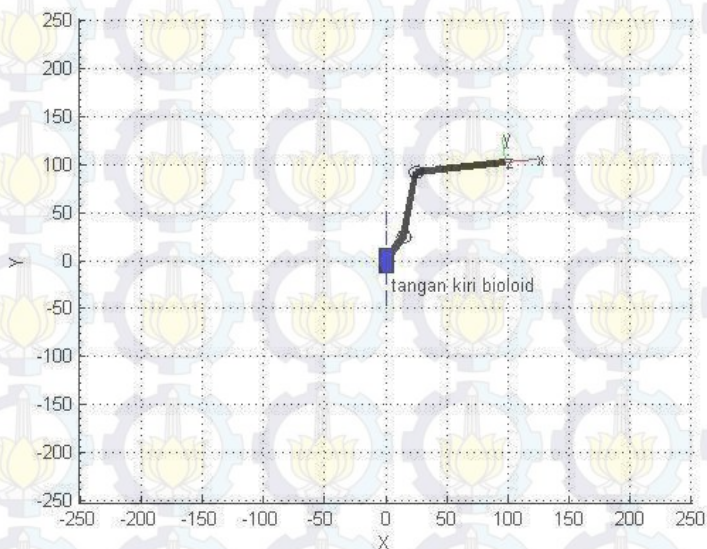
Gambar 3.3. Perencanaan Gerak Tangan

Gambar 3.2 menunjukkan bahwa *end-effector* dirancang sehingga menempati koordinat yang diinginkan yaitu (100;100), dengan demikian nilai *theta* dari tiap *joint* akan mengikuti berdasarkan koordinat yang telah ditentukan sebelumnya, sehingga didapat 80.3° untuk *theta1* dan 74.5° untuk *theta2*.

Dengan menggunakan persamaan 3.72 dan 3.73 dapat ditentukan nilai *theta1* dan *theta2* bila koordinat x,y diketahui serta sumbu z dianggap konstan, pada tabel 3.5 dijabarkan rencana gerak tangan robot yang akan dihitung nilai *theta* pada masing *joint*-nya sebagai berikut.

Tabel 3.5. Nilai Theta pada Gerak Kaki Robot

Rencana Gerak	Koordinat			Nilai Theta (°)	
	X	Y	Z	1	2
1	100	100	70	80.3	74.5
2	100	30	70	60.65	105.4
3	80	-35	70	12.22	101.5



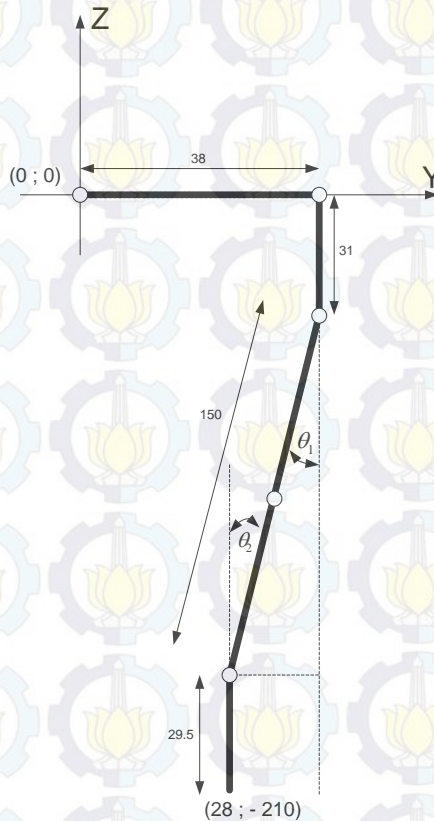
Gambar 3.4. Hasil Plot MATLAB

Karena *workspace* gerak tangan robot lebih banyak dari jumlah *joint*-nya maka diperlukan sistem *fuzzy logic* untuk menentukan nilai *theta* pada tiap sendi pada tangan robot.

3.6.2. Gerak Kaki

Pada gerakan bagian kaki robot dianalisa 2 bagian yaitu bagian pinggul dan bagian engkel, karena pengaruh dari pergerakan kaki sangat mempengaruhi keseimbangan dari robot, oleh karena itu gerakan dari kaki robot harus selaras agar keseimbangan robot tetap terjaga.

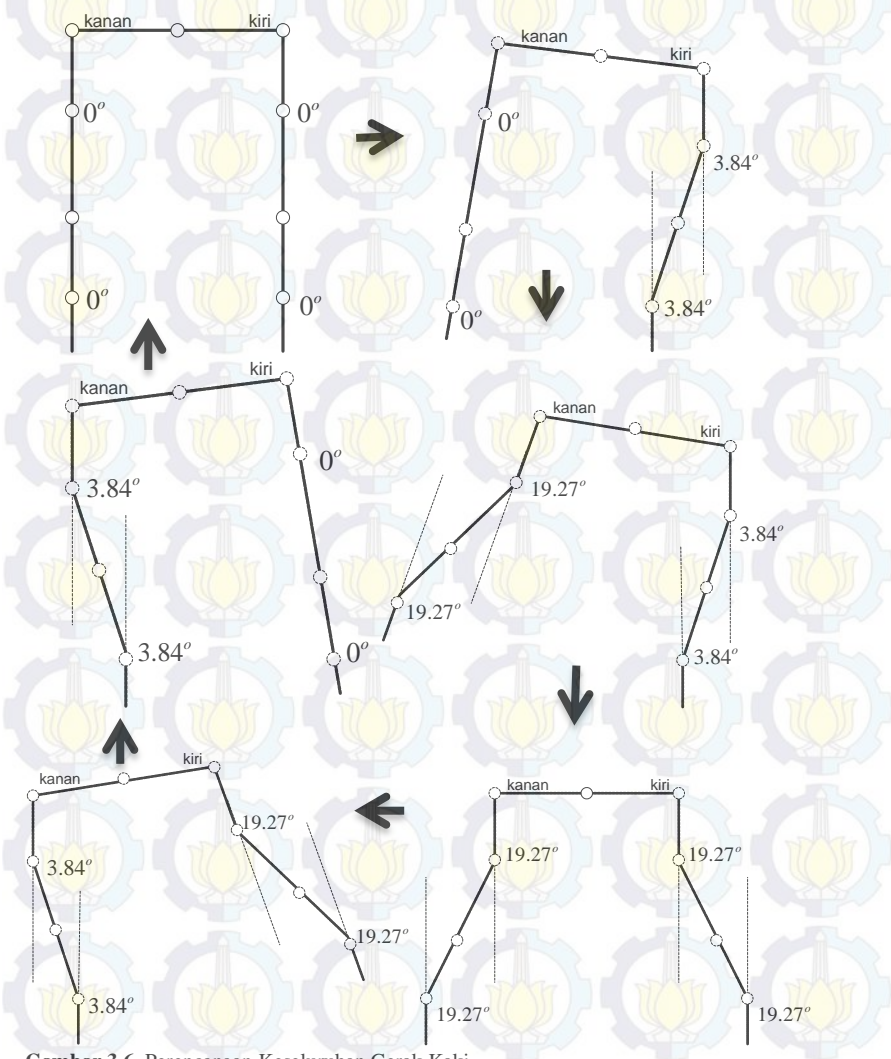
Pada gambar 3.5 merupakan satu dari beberapa rencana gerak kaki robot, dengan hanya menggerakkan dua *joint* pada tiap kakinya serta merencanakan posisi dan orientasi dari *end-effector* kemudian menyelaraskan gerak agar robot tetap terjaga keseimbangannya.



Gambar 3.5. Perencanaan Gerak Kaki

Dari gambar 3.5 didapatkan nilai θ_1 dan θ_2 , dimana nilai θ_1 dan θ_2 besarnya sama yaitu 3.84° karena terletak berseberangan antara satu dengan yang lain. Setelah salah satu gerak didapat, selanjutnya bisa merencanakan gerak-gerak selanjutnya akan

tetapi sumbu yang dianalisa hanya bagian *roll* saja yang terdapat pada koordinat *y,z* saja, sedangkan koordinat *x* diabaikan karena sudut pandang analisisnya dari depan robot. Berikut rancangan gerak kaki secara keseluruhan.

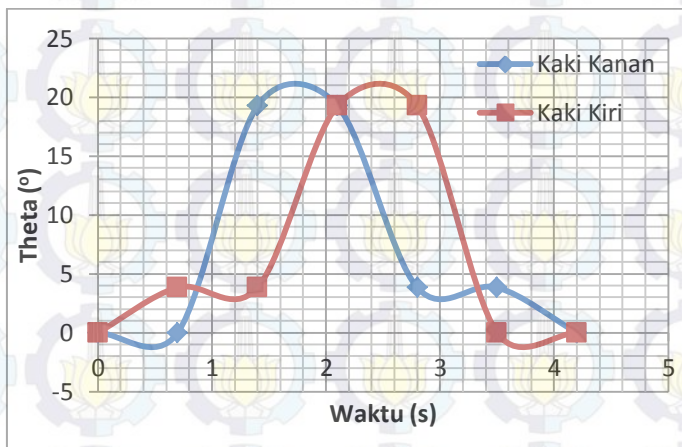


Gambar 3.6. Perencanaan Keseluruhan Gerak Kaki

Mengacu pada gambar 3.6 maka akan didapatkan data berupa nilai *theta* pada tiap kaki, karena nilai *theta* pada satu kaki bernilai sama, maka untuk penjabarannya hanya akan ditampilkan nilai satu *theta* saja untuk tiap kakinya serta grafik hasil pergerakan kaki robot.

Tabel 3.6. Nilai Theta pada Gerak Kaki Robot

Waktu (s)	Sudut Kaki Kanan (°)	Sudut Kaki Kiri (°)
0	0	0
0.7	0	3.84
1.4	19.27	3.84
2.1	19.27	19.27
2.8	3.84	19.27
3.5	3.84	0
4.2	0	0



Gambar 3.7. Grafik Pergerakan Kaki Robot

3.7. Desain Sistem Fuzzy

Pada Tugas Akhir ini, digunakannya sistem *fuzzy* dimaksudkan untuk mendapatkan besarnya nilai *theta* terakhir pada tiap bagian robot yang digunakan untuk memberi nilai masukan pada persamaan 3.73 untuk mencari *theta1*, maka akan didapat beberapa hasil yang dijadikan referensi pembuatan desain sistem *fuzzy*. Beberapa hasil ini dapat dilihat pada Lampiran G.

Hasil yang didapat pada perhitungan yang ada pada Lampiran G didapat dari persamaan untuk mencari *theta2* yang ada pada Persamaan

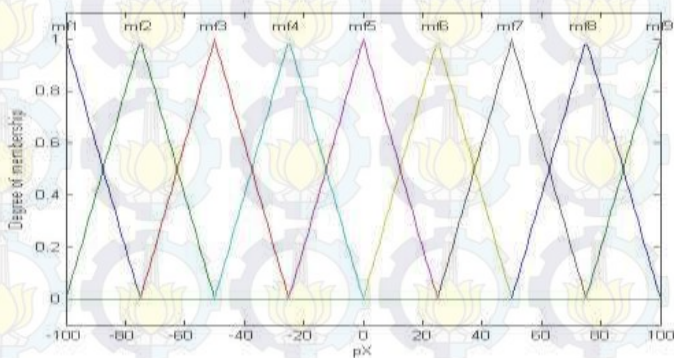
3.72. Nilai masukan yang digunakan mempunyai jarak dari -100 sampai 100 untuk pX dan -100 sampai 150 untuk pY , dimana jarak antar satu kemungkinan dengan kemungkinan yang lain bernilai 25. Digunakannya nilai 25 untuk jarak antar kemungkinan tersebut bertujuan agar semakin akuratnya hasil yang didapat.

Penggunaan sistem *fuzzy* karena secara konsepnya, sistem *fuzzy* mudah untuk dimengerti dan diimplementasikan serta akan menguntungkan dari segi fleksibilitas robot [2]. Dalam tahap desain *inverse kinematics* untuk tangan robot humanoid bioloid sebanyak 3-*DoF* di masing-masing tangannya dijelaskan bahwa untuk mendapatkan nilai keseluruhan θ setiap sendi langkah pertama yang dilakukan adalah menghitung θ sebelum *end-effector*. Berdasarkan tahap desain tersebut maka dapat dijelaskan bahwa nilai θ_2 berpengaruh terhadap nilai θ_1 . Oleh karena itu sistem *fuzzy* yang akan dirancang dikhususkan untuk mencari nilai θ_2 . Perancangan sistem *fuzzy* untuk θ_2 juga ditujukan untuk membandingkan keakuratan hasil yang dikeluarkan bila dibandingkan menggunakan perhitungan manual.

Dengan mengacu pada nilai-nilai kemungkinan yang didapat, maka dapat didesain kontroler *fuzzy* yang dapat memproses beberapa kemungkinan tersebut. Sistem *fuzzy* ini sendiri mempunyai dua masukan dan satu keluaran. Masukan yang berupa nilai koordinat yang dituju oleh *end-effector* untuk nilai pX dan pY . Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendesain sistem *fuzzy* dalam mencari θ_2 sebagai berikut.

- **Langkah 1**

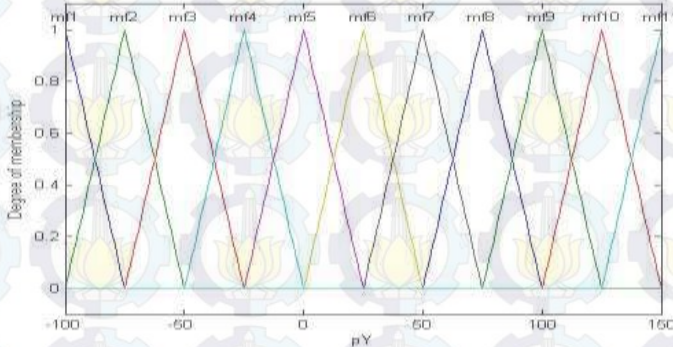
Karena nilai yang diinginkan berjarak dari -100 sampai 100 maka penentuan fungsi keanggotaan (*membership function*) untuk nilai pX dapat dilihat pada Gambar 3.8



Gambar 3.8 Fungsi Keanggotaan Nilai pX

- **Langkah 2**

Sedangkan untuk penentuan fungsi keanggotaan (*membership function*) nilai pY yang berjarak dari -100 sampai 150 dapat dikategorikan pada Gambar 3.9. Fungsi keanggotaan nilai pY berbeda dengan fungsi keanggotaan nilai pX yang berjumlah 9 fungsi keanggotaan.



Gambar 3.9 Fungsi Keanggotaan Nilai pY

- **Langkah 3**

Selanjutnya adalah menentukan fungsi keanggotaan keluaran dari sistem *fuzzy*. Pada Lampiran G terlihat bahwa jarak keluaran berkisar dari 30° sampai 170° . Jarak ini melebihi dari jarak jangkauan untuk *theta2* sesuai dengan DH-Parameter robot *Humanoid Bioloid 18-DOF* yang mempunyai batasan 0° sampai 110° , sehingga gerak tangan robot terbatas. Dalam Tugas Akhir ini metode sistem *fuzzy* yang dipakai adalah Takagi-Sugeno, maka dari itu untuk fungsi keanggotaan keluaran mengikuti besarnya setiap nilai yang dihasilkan dari beberapa kemungkinan pada Lampiran G.

- **Langkah 4**

Setelah penentuan fungsi keanggotaan masukan dan keluaran, selanjutnya adalah menentukan Basis Aturan (*Rule Base*) yang menyatakan hubungan masukan dan keluaran tersebut. Dengan memacu dari data pada Lampiran G maka dapat dibuat Basis Aturan sistem *fuzzy*. Dapat dilihat bahwa basis aturan yang berjumlah 91 dikarenakan keluaran metode Takagi-Sugeno yang berupa *singleton-singleton*, jadi setiap *singleton* mewakili setiap nilai dari beberapa kombinasi fungsi keanggotaan masukan sistem *fuzzy*.

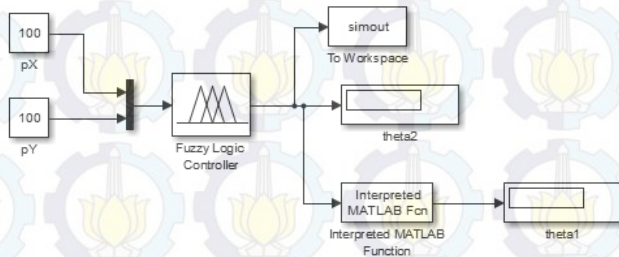
- **Langkah 5**

Penentuan proses agregasi pada sistem *fuzzy* dengan metode Sugeno adalah *max*, sedangkan untuk proses defuzifikasinya menggunakan *waver* atau *average* pada *Toolbox* yang digunakan.

3.8. Blok Diagram Keseluruhan

Penggunaan Simulink untuk Tugas Akhir ditujukan agar jelasnya aliran (*flow*) proses jalannya rancangan yang dibuat. Fungsi *scope* yang lebih mudah untuk menggambarkan hasil keluaran yang berupa garis. Dalam proses untuk memasukkan nilai yang diinginkan juga akan lebih jelas tata letaknya

Pemodelan untuk keseluruhan perhitungan *inverse kinematics* menggunakan m-file yang ada pada blok diagram Simulink. Pemberian masukan untuk posisi yang dituju oleh *end-effector* robot dapat diberikan pada m-file yang ada pada Simulink. Pada Gambar 3.10 ditunjukkan keseluruhan blok diagram untuk sistem.



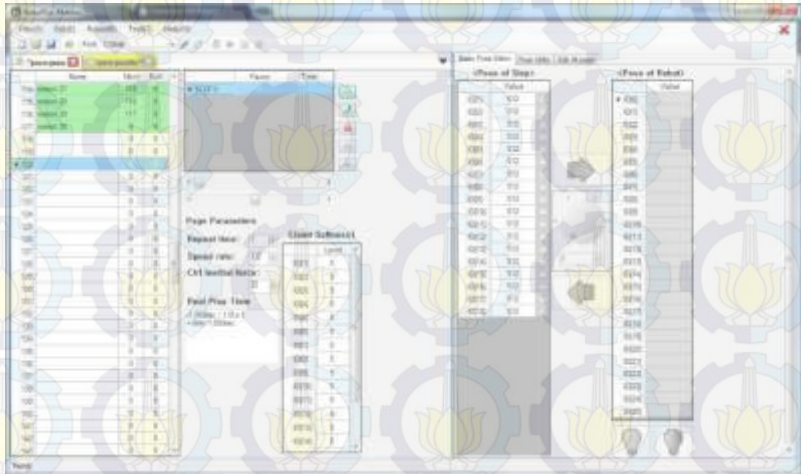
Gambar 3.10 Diagram Blok Keseluruhan

Dari gambar 3.10 dapat dilihat bahwa terdapat blok *toolbox fuzzy logic* yang mendapat nilai masukan berupa koordinat *pX* dan *pY*. Lalu nilai keluarannya berupa nilai *theta2* yang kemudian diproses sehingga mendapatkan nilai *theta1*.

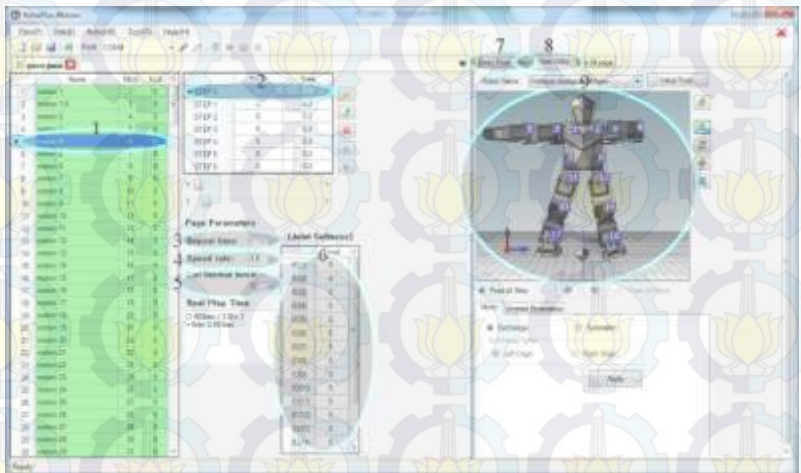
3.9. Perancangan Gerak Robot Keseluruhan

Pada perancangan ini akan dibahas pemrograman untuk menentukan gerak robot sesuai dengan perencanaan dan perhitungan *inverse kinematics*. Dimana pemrograman ini menggunakan RoboPlus Motion sebagai *software* pengendali dari kontroler CM-530 pada robot *Humanoid Bioloid Premium Type-A*. Pada gambar 3.11 terdapat beberapa fungsi yang digunakan dalam pemrograman robot, antara lain *motion task* yang terdiri dari beberapa *motion step* yang berisi data *basic pose editor*, dimana data ini berupa besaran tegangan pulsa yang memiliki satuan

desimal. Selain itu terdapat juga beberapa masukkan parameter pendukung lainnya seperti *repeat time*, *speed rate*, *control inertial force*, *joint softness*, dan juga *pose utility* yang digunakan untuk melihat gerak robot apabila diberi nilai perubahan berupa nilai tegangan pulsa.



Gambar 3.11 Tampilan RoboPlus Motion



Gambar 3.12 Beberapa Fungsi Pendukung RoboPlus Motion

Pada *software* RoboPlus Motion terdapat beberapa fungsi atau parameter yang digunakan untuk mengendalikan robot, antara lain.

Tabel 3.7. Beberapa Fungsi pada RoboPlus Motion

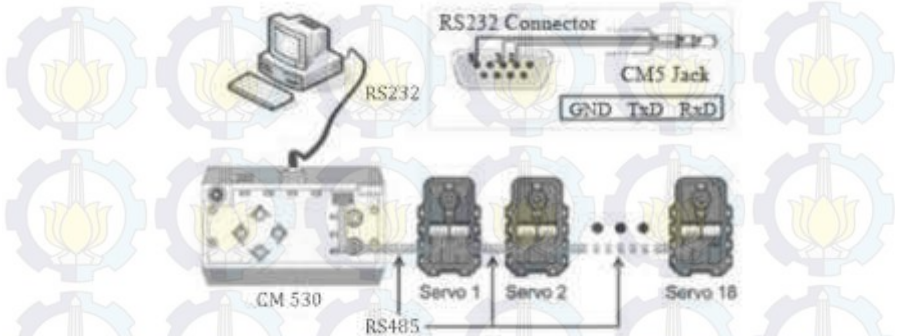
No.	Parameter	Kegunaan
1	Motion Planner	Untuk memasukkan rencana gerak pada robot, dimana pada tiap motion planner dapat berisi maksimal 7 step planner.
2	Step Planner	Untuk merancangkan gerakan sesuai dengan data dari Basic Pose Editor.
3	Repeat Time	Untuk mengatur banyaknya motion planner yang dijalankan.
4	Speed Rate	Untuk mengatur kecepatan program yang terdapat pada motion planner.
5	Control Inertial Force	Untuk mengatur besarnya torsi yang diberikan pada tiap <i>joint</i> .
6	<i>Joint Softness</i>	Untuk mengatur nilai percepatan motor pada tiap <i>joint</i> .
7	Basic Pose Editor	Untuk memberikan besaran pulsa desimal yang digunakan untuk mengatur besarnya sudut pada tiap <i>joint</i> robot.
8	Pose Utility	Untuk menampilkan gerak robot sesuai motion planner.
9	Robot Type	Untuk memilih tipe robot yang digunakan.

3.10. Implementasi Gerak Robot

Pada pengimplementasian ini akan dibahas tentang perangkat keras yang dipakai, dimana pengimplementasian ini menggunakan robot *Humanoid* Bioloid yang merupakan produk robotika dari korea yang memiliki rancangan pengendali motor servo tipe AX-12A yang baik dengan beberapa kelebihan antara lain, memiliki pengendalian arus, tegangan, posisi, dan suhu. Selain itu juga robot ini juga memiliki kontroler utama bernama CM-530 yang terletak dipunggung robot.

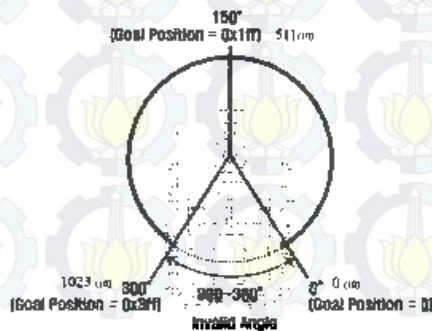
Pada kontroler utama dipasang mikroprosesor Atmega 128 yang dapat mengirim dan menerima informasi dari semua motor servo yang terdapat pada robot, dimana motor servo tersebut bertindak seperti otot-otot sistem *Humanoid* yang menggunakan motor DC dengan memiliki 1 MBps kecepatan komunikasi dengan umpan balik dari sudut penuh posisi 0-300 derajat. Motor servo ini juga dapat diatur sebagai roda dan memiliki sistem *shut down* otomatis berdasarkan batas tegangan dan suhu

terkini, pada gambar 3.13 menunjukkan sistem distribusi motor servo pada robot *Humanoid Bioloid* yang dikontrol oleh kontroler CM-530.

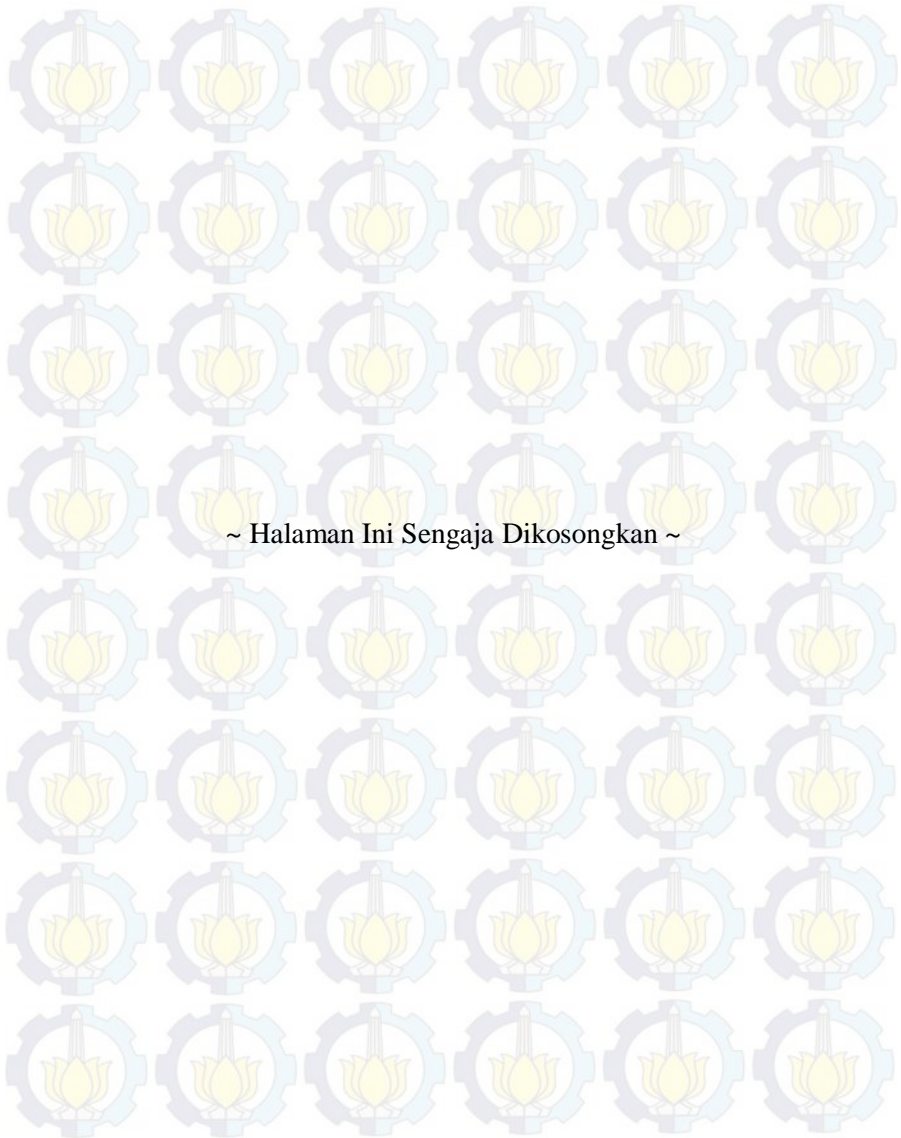


Gambar 3.13 Sistem Distribusi Data Robot *Humanoid Bioloid*[3]

Sensor AX-12A merupakan motor servo yang disertai dengan sistem kendali yang dipasang di tiap-tiap sendi robot, dimana pada motor servo ini juga memiliki beberapa batas rotasi untuk aktuator yang berada dikisaran 0-300 derajat yang dapat direpresentasikan dengan nilai desimal 0-1023, ditunjukkan pada gambar 3.13. Sehingga, nilai desimal 512 merupakan posisi sudut 150 derajat yang menunjukkan posisi tengah rotasi dari motor servo tersebut. Berdasarkan batasan ini, pergerakan robot dapat diidentifikasi dalam mengubah posisi yang akan mengubah nilai desimal sebesar 3,41 atau dalam mengubah desimal nilai dengan 1 akan mengubah posisi sudut rotasi sebesar 0,2932 derajat. Tapi dalam praktiknya posisi rotasi hanya dapat diubah oleh satu derajat berdasarkan nilai desimal yang ditambah atau dikurangi dengan nilai 4 desimal.



Gambar 3.14. Rotasi Motor Servo



BAB IV HASIL SIMULASI DAN IMPLEMENTASI

Pada bab ini menjelaskan hasil percobaan simulasi, analisa beserta implementasinya. Hasil simulasi ini mengacu pada konsep perhitungan *inverse kinematics* dan perancangan sistem *fuzzy* yang telah dibahas pada Bab III dan hasil simulasinya menggunakan perangkat lunak MATLAB R2014a, sedangkan RoboPlus Motion digunakan sebagai *software* dan Robot Bioloid *Humanoid* Type-A sebagai *hardware* implementasinya.

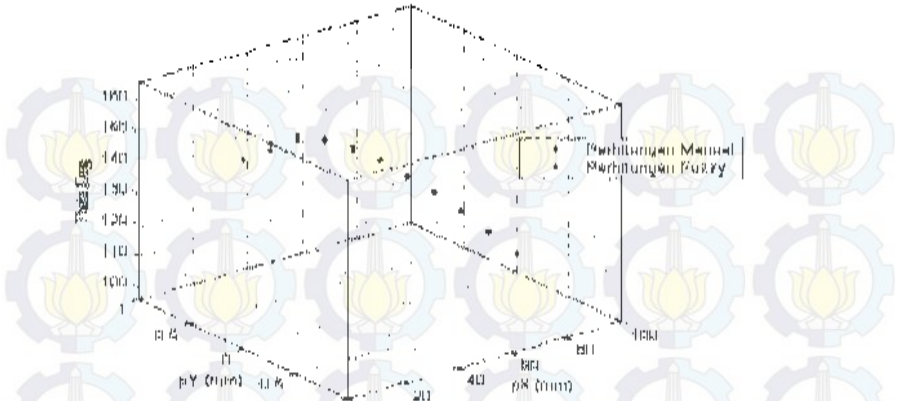
4.1. Pengujian Pemodelan *Fuzzy* dengan Beberapa Masukan

Sistem *fuzzy* yang telah dirancang untuk menemukan hasil *theta2* pada pergerakan tangan dengan beberapa variasi masukan nilai *pX* dan *pY* dibahas pada sub-bab ini. Beberapa hasil keluaran dari sistem *fuzzy* dibandingkan dengan keluaran hasil perhitungan terlihat sedikit berbeda. Hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1, Tabel 4.2 dan Tabel 4.3, dimana masing-masing tabel telah divariasi nilai masukannya.

Tabel 4.1 Hasil Variasi Hitungan Pertama

pX (mm)	pY (mm)	Manual (°)	Fuzzy (°)	Absolut Error
0	0	157.19	157.2	0.01
10	0	160.17	157.8	2.37
20	0	160.01	158.4	1.61
30	0	156.76	155.9	0.86
40	0	151.41	150.4	1.01
50	0	144.83	144.8	0.03
60	0	137.47	137.0	0.47
70	0	129.53	129.3	0.23
80	0	121.07	120.8	0.27
90	0	112.08	111.6	0.48
100	0	102.47	102.5	0.03
Rata-rata Error				0.58

Hasil yang didapat menggunakan sistem *fuzzy* jika dibandingkan dengan perhitungan manual terdapat perbedaan yang tidak begitu jauh berbeda, karena formula yang dipakai untuk perhitungan *manual* dan perhitungan *fuzzy* ialah sama. Dari Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa variasi pertama menunjukkan perhitungan *manual* dan *fuzzy* yang berbeda pada tiap *pX*. Hasil respon yang berbeda pada tiap *pX* dapat dilihat pada Gambar 4.1. Desain sistem *fuzzy* ditetapkan pada saat *pX* bernilai 0 hingga 100, sehingga memperoleh hasil yang akurat pada titik tersebut.



Gambar 4.1 Grafik Variasi Pertama *Theta2*

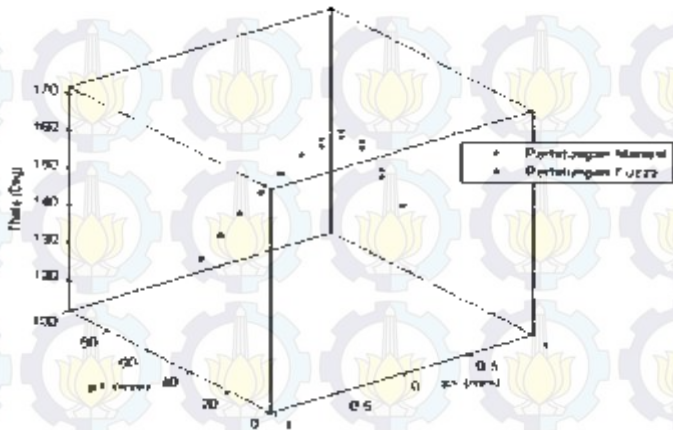
Dengan hasil yang didapat dari variasi pertama ini, maka variasi kedua dilakukan dengan memasukkan nilai $pX = 0$ untuk seluruh kemungkinan dan hanya nilai pY saja yang divariasikan. Beberapa data yang didapatkan dicatat pada Tabel 4.2 untuk perbandingan hasil perhitungan *manual* dan sistem *fuzzy*.

Tabel 4.2 Hasil Variasi Hitungan Kedua

pX (mm)	pY (mm)	<i>Manual</i> (°)	<i>Fuzzy</i> (°)	<i>Absolut Error</i>
0	0	157.19	157.2	0.01
0	10	164.07	162.2	1.87
0	20	168.96	167.2	1.76
0	30	168.96	167.2	1.76
0	40	164.07	162.2	1.87
0	50	157.19	157.2	0.01
0	60	149.56	149.3	0.26
0	70	141.50	141.3	0.20
0	80	133.09	133.0	0.09
0	90	124.32	124.4	0.08
0	100	115.13	115.8	0.67
Rata-rata <i>Error</i>				0.78

Keluaran yang dihasilkan pada variasi kedua menunjukkan keselarasannya hasil perhitungan *manual* dengan sistem *fuzzy* yang dibuat. Hasil yang didapat ini menunjukkan bahwa saat nilai $pX = 0$ saat berapapun nilai pY yang diberikan, maka hasil yang didapat hampir

akurat. Lebih jelasnya dibuatlah plot yang menunjukkan hampir akuratnya data yang dihasilkan, seperti dapat dilihat pada Gambar 4.2.



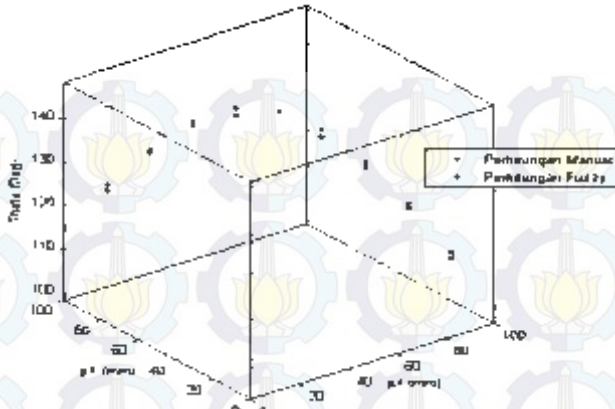
Gambar 4.2 Grafik Variasi Kedua *Theta2*

Pengujian variasi terakhir yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 4.3, dimana nilai untuk pX dimulai dari 100 sampai 0 sedangkan nilai pY dimulai dari 0 sampai 100. Hal ini dilakukan untuk menguji sistem fuzzy yang dibuat, apakah sesuai dengan yang diharapkan atau tidak.

Tabel 4.3 Hasil Variasi Hitungan Ketiga

pX (mm)	pY (mm)	Manual (°)	Fuzzy (°)	Absolut Error
100	0	102.47	102.5	0.03
90	10	114.57	113.2	1.37
80	20	125.16	124.2	1.04
70	30	134.12	133.2	0.92
60	40	140.96	139.4	1.56
50	50	144.83	144.8	0.03
40	60	144.93	143.3	1.63
30	70	141.23	140.3	0.93
20	80	134.51	133.6	0.91
10	90	125.65	124.5	1.15
0	100	115.13	115.8	0.67
Rata-rata Error				0.93

Dari Tabel 4.3 dapat terlihat bahwa data memiliki absolut error yang sedikit untuk beberapa kemungkinan yang diinginkan. Keakuratan data yang dikeluarkan diatas dapat lebih jelas dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik Variasi Ketiga θ_2

Gambar 4.3 menjelaskan bahwa keluaran sistem *fuzzy* hanyalah akurat untuk beberapa kemungkinan saja. Beberapa kemungkinan ini sesuai dengan basis aturan yang telah dirancang sebelumnya pada Bab 3. Basis aturan menjelaskan bahwa untuk beberapa kemungkinan nilai yang ditetapkan untuk nilai pX dan pY maka nilai keluaran sesuai dengan nilai dari *singleton*-nya. Misal, jika diberi masukan $pX = 50$ dan $pY = 50$ maka keluaran sama dengan 144.8. Nilai ini akurat karena basis aturan yang telah dirancang memang harus mengeluarkan nilai tersebut. Akan tetapi untuk nilai-nilai yang mendekati masukan tidak dapat sesuai dengan perhitungan manualnya.

4.2. Pengujian Kinematika Tangan Robot

Pengujian kinematika tangan robot dilakukan untuk mengetahui hasil desain dari *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. Pada pengujian kinematika robot ini, persamaan *inverse kinematics* akan di uji secara bersamaan dengan persamaan *forward kinematics*

Pengujian kinematika tangan robot dilakukan dengan cara memberikan masukan posisi *end-effector* dalam ruang kartesian ke persamaan *inverse kinematics* dan keluaran yang dihasilkan berupa sudut untuk tiga *joint* pada tangan robot Selanjutnya keluaran sudut dari *inverse kinematics* menjadi masukan persamaan *forward kinematics* untuk mendapatkan *output* posisi dalam ruang kartesian. Keluaran posisi dari *forward kinematics* inilah yang nantinya akan dibandingkan dengan masukan posisi yang diinginkan. Tabel 4.4 menunjukkan hasil pengujian dari *inverse kinematics*, dengan *input* merupakan masukan posisi untuk

inverse kinematics dalam ruang kartesian dan *output* adalah keluaran berupa sudut untuk ketiga *joint* yang ada pada tangan robot.

Tabel 4.4 Hasil Keluaran *Inverse Kinematics*

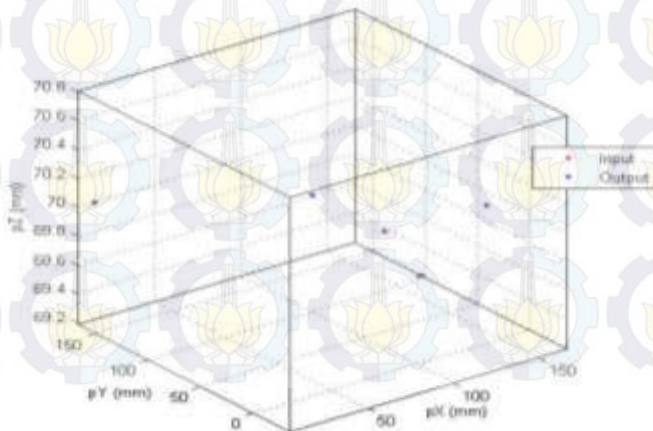
No	Input (mm)			Output ($^{\circ}$)		
	pX	pY	pZ	Θ_1	Θ_2	Θ_3
1	100	100	70	0	80.3	74.5
2	100	30	70	0	60.65	105.4
3	80	-35	70	0	12.22	101.5
4	156.5	25	70	0	0	0
5	14.5	167	70	0	90	0

Selanjutnya *output* sudut dari *inverse kinematics* menjadi masukkan *forward kinematics* untuk mendapatkan posisi dalam ruang katesian kembali. Tabel 4.5 menunjukkan hasil keluaran dari *forward kinematics*.

Tabel 4.5 Hasil Keluaran *Forward Kinematics*

No	Input ($^{\circ}$)			Output (mm)		
	Θ_1	Θ_2	Θ_3	pX	pY	pZ
1	0	80.3	74.5	99.99	99.08	70
2	0	60.65	105.4	100.49	31.37	70
3	0	12.22	101.5	81.41	-35.21	70
4	0	0	0	156.5	25	70
5	0	90	0	14.5	167	70

Dari Tabel 4.4 dan 4.5 serta Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa *output* dari *forward kinematics* menghasilkan keluaran posisi yang sama dengan *input* referensi dari *inverse kinematics*.



Gambar 4.4 Perbandingan *Input* dan *Output* Pengujian Kinematika Tangan Robot

Berdasarkan hasil plot gambar 4.4 dapat diketahui selisih nilai vektor antara perencanaan dengan hasil transformasi homogen yang tidak terlalu besar, hal tersebut dikarenakan banyaknya *joint* yang dianalisa lebih sedikit dari jumlah *joint* yang ada pada tangan robot.

Selain itu, untuk menyesuaikan nilai putaran dari tiap *joint* yang terdapat tangan robot, harus diketahui terlebih dahulu arah sumbu putar (*yaw*) dari masing-masing motor servo. Karena letak dari motor servo ditangan kanan dan tangan kiri ialah berlawanan.

4.3. Pengujian Kinematika Kaki Robot

Pengujian kinematika kaki robot dilakukan untuk mengetahui hasil desain dari *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. Pada pengujian kinematika robot ini, persamaan *inverse kinematics* akan di uji secara bersamaan dengan persamaan *forward kinematics*

Pengujian kinematika kaki robot dilakukan dengan cara memberikan masukan posisi *end-effector* dalam ruang kartesian ke persamaan *inverse kinematics* dan keluaran yang dihasilkan berupa sudut untuk dua *joint* aktif yang menggerakkan kaki robot Selanjutnya keluaran sudut dari *inverse kinematics* menjadi masukan persamaan *forward kinematics* untuk mendapatkan *output* posisi dalam ruang kartesian.

Keluaran posisi dari *forward kinematics* inilah yang nantinya akan dibandingkan dengan masukan posisi yang diinginkan. Tabel 4.6 menunjukkan hasil pengujian dari *inverse kinematics*, dengan *input* merupakan masukan posisi untuk *inverse kinematics* dalam ruang kartesian dan *output* adalah keluaran berupa sudut untuk dua *joint* aktif yang menggerakkan kaki robot, sedangkan empat *joint* lainnya dianggap bernilai 0°.

Tabel 4.6 Hasil Keluaran *Inverse Kinematics*

No	Input (mm)			Output (°)	
	pX	pY	pZ	Θ_1	Θ_2
1	0	38	-210	0	0
2	0	25	-209	5.18	-5.18
3	0	10	-207	10.66	-10.66
4	0	28	-210	3.84	-3.84
5	0	88	-201	19.27	-19.27
6	0	12	-208	10.13	-10.13
7	0	44	-210	-2.14	2.14

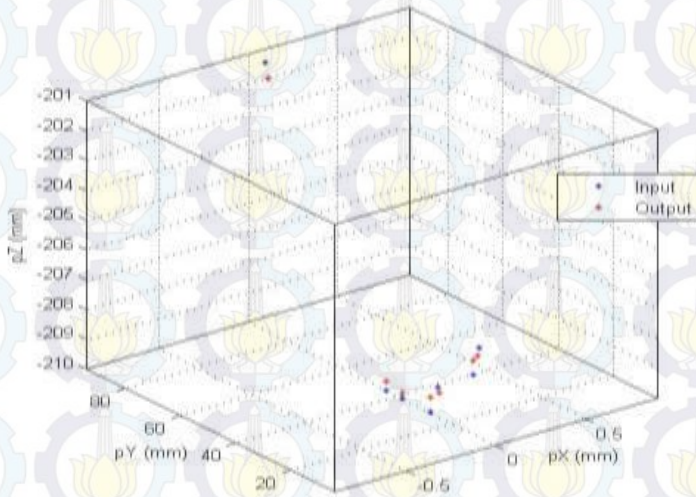
Selanjutnya *output* sudut dari *inverse kinematics* menjadi masukan *forward kinematics* untuk mendapatkan posisi dalam ruang katesian kembali untuk dibandingkan selisih dari besaran posisi yang direncanakan

dengan hasil vektor dari transformasi homogen yang telah diperoleh sebelumnya. Tabel 4.7 menunjukkan hasil keluaran dari *forward kinematics*.

Tabel 4.7 Hasil Keluaran *Forward Kinematics*

No	Input (°)		Output (mm)		
	Θ_1	Θ_2	pX	pY	pZ
1	0	0	0	38	-209.8
2	5.18	-5.18	0	24.6	-209.2
3	10.66	-10.66	0	10.4	-207.3
4	3.84	-3.84	0	28	-209.5
5	19.27	-19.27	0	87	-201.5
6	10.13	-10.13	0	12	-207.5
7	-2.14	2.14	0	44	-209.7

Dari Tabel 4.6 dan 4.7 serta Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa *output* dari *forward kinematics* menghasilkan keluaran posisi yang sama dengan *input* referensi dari *inverse kinematics*.



Gambar 4.5 Perbandingan *Input* dan *Output* Pengujian Kinematika Kaki Robot

Berdasarkan hasil plot gambar 4.5 dapat diketahui selisih nilai vektor antara perencanaan dengan hasil transformasi homogen yang tidak terlalu besar, hal tersebut dikarenakan banyaknya *joint* yang dianalisa lebih sedikit dari jumlah *joint* yang ada pada kaki robot.

Selain itu, untuk menyesuaikan nilai putaran dari tiap *joint* yang terdapat kaki robot, harus diketahui terlebih dahulu arah sumbu putar

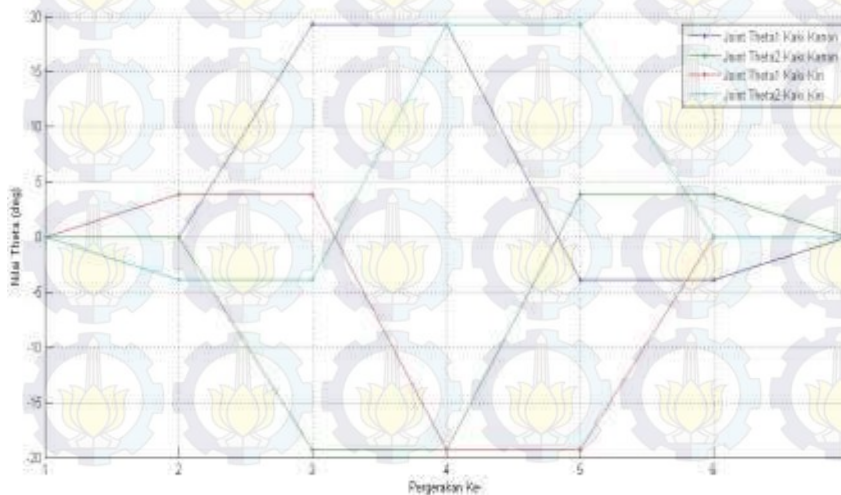
(yaw) dari masing-masing motor servo. Karena letak dari motor servo di kaki kanan dan tangan kiri ialah berlawanan. Bedanya untuk analisa bagian kaki juga harus diperhatikan besarnya nilai *offset* pada setiap *joint*.

4.4. Pengujian Linierisasi Kinematika Kaki Robot

Pengujian linierisasi ini dimaksudkan untuk mencari nilai theta yang sesuai dengan gerak robot, dikarenakan untuk gerakan kaki sangat penting. Selain untuk menggerakkan robot, bagian ini juga berfungsi sebagai penyeimbang. Bilamana hasil perhitungan nilai theta tidak sesuai atau linier maka akan dipastikan robot tersebut akan terjatuh. Pada tabel 4.8 menunjukkan nilai perencanaan gerak robot dan gambar 4.6 menunjukkan hasil plotnya.

Tabel 4.8 Rencana Pergerakan Kaki Robot

Pergerakan ke-	Waktu (s)	Joint Kaki kanan (°)		Joint Kaki Kiri (°)	
		Θ_1	Θ_2	Θ_1	Θ_2
1	0	0	0	0	0
2	0.7	0	0	3.84	-3.84
3	1.4	19.27	-19.27	3.84	-3.84
4	2.1	19.27	-19.27	-19.27	19.27
5	2.8	-3.84	3.84	-19.27	19.27
6	3.5	-3.84	3.84	0	0
7	4.2	0	0	0	0



Gambar 4.6 Pergerakan Kaki Tiap *Joint*

Dari gambar 4.6 diperlukan proses regresi polinomial untuk membuat grafik data tersebut menjadi bentuk kuadratik agar pergerakan kaki robot lebih halus dan mengurangi adanya hentakan yang mengakibatkan robot kehilangan keseimbangan, dengan memperkirakan dalam 7 pergerakan tadi dibuat selama 4.2 detik, berikut adalah persamaan regresi polinomialnya.

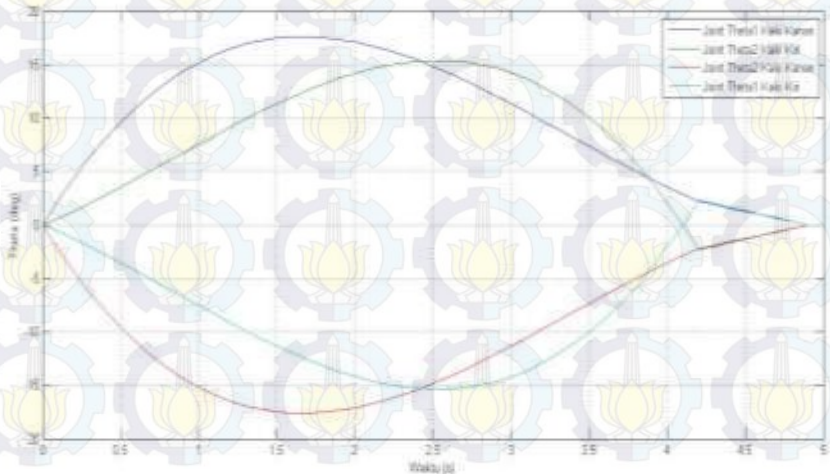
$$x(t) = -3.213 + 23.74t - 9.47t^2 + 0.939t^3 \quad (4.1)$$

$$x(t) = -1.011 + 6.14t + 2.36t^2 - 0.939t^3 \quad (4.2)$$

Dimana, pada persamaan 4.1 digunakan untuk meregresi nilai θ dikaki kanan, sedangkan persamaan 4.2 digunakan untuk meregresi nilai θ dikaki kiri. Pada tabel 4.9 menunjukkan nilai perencanaan gerak robot dan gambar 4.7 menunjukkan hasil plotnya.

Tabel 4.9. Hasil Regresi Pergerakan Kaki Robot

Waktu (s)	Joint Kaki kanan ($^{\circ}$)		Joint Kaki Kiri ($^{\circ}$)	
	Θ_1	Θ_2	Θ_1	Θ_2
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7	12.3	-12.3	5.13	-5.13
1.4	17.25	-17.25	10.66	-10.66
2.1	16.79	-16.79	14.62	-14.62
2.8	12.84	-12.84	15.11	-15.11
3.5	7.34	-7.34	10.14	-10.14
4.2	2.23	-2.23	-2.14	2.14



Gambar 4.7 Pergerakan Kaki Hasil Regresi

Pada gambar 4.7 terlihat bahwa pergerakan tiap joint pada kaki robot lebih teratur dan tidak adanya perubahan gerak secara tiba-tiba yang menimbulkan adanya hentakan, dimana hentakan ini akan mempengaruhi keseimbangan dari robot yang berakibat robot akan terjatuh. Akan tetapi pada akhir waktu 4.2 detik nilai θ tiap joint tidak kembali pada posisi awal, maka dari pada itu akan ditambahkan gerakan sehingga posisi tiap $joint$ robot berada pada posisi awal. Dimana untuk melakukan satu kali gerakan robot memerlukan waktu selama 5 detik.

Karena pada perhitungan kaki robot didapat nilai θ yang baru, secara tidak langsung posisi dari $end\ effector$ juga akan berubah dari perencanaan. Dimana pada tabel 4.10 hingga tabel 4.13 akan dibandingkan posisi $end\ effector$ perencanaan dengan hasil realisasinya.

Tabel 4.10 Hasil *Forward Kinematics* Perencanaan Kaki Kanan Robot

Pergerakan ke-	Joint Kaki Kanan ($^{\circ}$)		Posisi $end-effector$ (mm)		
	θ_1	θ_2	pX	pY	pZ
1	0	0	3.1	-38	-209.8
2	12.3	-12.3	3.1	-69.8	-206.4
3	17.25	-17.25	3.1	-82.3	-203.1
4	16.79	-16.79	3.1	-81.2	-203.5
5	12.84	-12.84	3.1	-71.2	-206.1
6	7.34	-7.34	3.1	-57.1	-208.6
7	2.23	-2.23	3.1	-43.8	-209.7

Tabel 4.11 Hasil *Forward Kinematics* Perencanaan Kaki Kiri Robot

Pergerakan ke-	Joint Kaki Kiri ($^{\circ}$)		Posisi $end-effector$ (mm)		
	θ_1	θ_2	pX	pY	pZ
1	0	0	3.1	38	-209.8
2	3.84	-3.84	3.1	28.1	-209.5
3	3.84	-3.84	3.1	28.1	-209.5
4	19.27	-19.27	3.1	-11.3	-201.5
5	19.27	-19.27	3.1	-11.3	-201.5
6	0	0	3.1	38	-209.8
7	0	0	3.1	38	-209.8

Tabel 4.12 Hasil *Forward Kinematics* Realisasi Kaki Kanan Robot

Pergerakan ke-	Joint Kaki Kanan ($^{\circ}$)		Posisi <i>end-effector</i> (mm)		
	Θ_1	Θ_2	pX	pY	pZ
1	0	0	3.1	-38	-209.8
2	0	0	3.1	-38	-209.8
3	19.27	-19.27	3.1	-87.3	-201.5
4	19.27	-19.27	3.1	-87.3	-201.5
5	-3.84	3.84	3.1	-28.1	-209.5
6	-3.84	3.84	3.1	-28.1	-209.5
7	0	0	3.1	-38	-209.8

Tabel 4.13 Hasil *Forward Kinematics* Realisasi Kaki Kiri Robot

Pergerakan ke-	Joint Kaki Kiri ($^{\circ}$)		Posisi <i>end-effector</i> (mm)		
	Θ_1	Θ_2	pX	pY	pZ
1	0	0	3.1	38	-209.8
2	5.13	-5.13	3.1	24.6	-209.2
3	10.66	-10.66	3.1	10.4	-207.3
4	14.62	-14.62	3.1	0.3	-205.1
5	15.11	-15.11	3.1	-0.9	-204.7
6	10.14	-10.14	3.1	11.7	-207.5
7	-2.14	2.14	3.1	43.6	-209.7

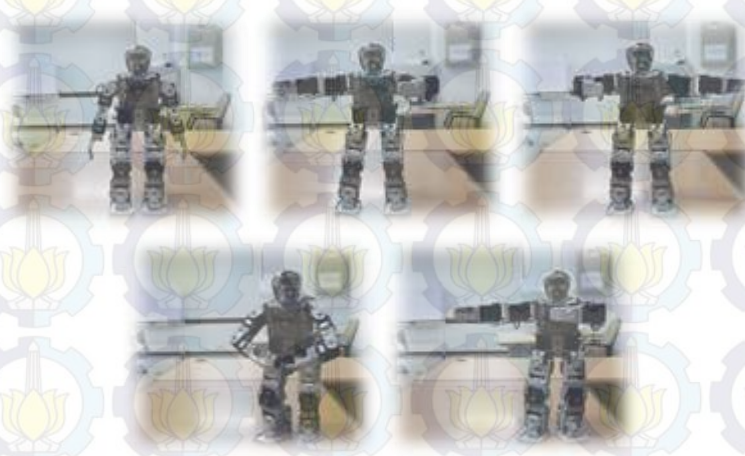
Tabel 4.14 Perbandingan Posisi Y Kaki Kanan Robot

Pergerakan ke-	Posisi <i>end-effector</i> (mm)		Absolut Error
	Perencanaan	Realisasi	
1	38	38	0
2	28.1	24.6	3.5
3	28.1	10.4	17.7
4	-11.3	0.3	11.0
5	-11.3	-0.9	10.4
6	38	11.7	26.3
7	38	43.6	5.6
	Rata-rata		10.64

Tabel 4.15 Perbandingan Posisi Y Kaki Kiri Robot

Pergerakan ke-	Posisi <i>end-effector</i> (mm)		Absolut Error
	Perencanaan	Realisasi	
1	-38	-38	0
2	-38	-69.8	31.8
3	-87.3	-82.3	5.0
4	-87.3	-81.2	6.0
5	-28.1	-71.2	43.1
6	-28.1	-57.1	29.0
7	-38	-43.8	5.8
Rata-rata			17.24

Dari hasil perbandingan nilai posisi yang terdapat pada tabel 4.10 hingga tabel 4.13 dihasilkan nilai *error* dari perencanaan dan realisasinya di tiap kaki robot, karena gerak robot menyamping maka nilai dari sumbu Y yang dibandingkan. Sehingga didapatkan nilai *error* pada tabel 4.14 dan 4.15 yang terbesarnya bernilai 43.1 dalam satuan millimeter, hal tersebut terjadi karena nilai *theta* perencanaan dan realisasi berbeda jauh yang diperoleh dari hasil regresi polinomial yang dihitung sebelumnya untuk mendapatkan nilai *theta* baru untuk memperhalus gerakan robot agar keseimbangan robot tetap terjaga. Berikut hasil penerapan gerak robot sesuai hasil regresi diatas.

**Gambar 4.8.** Beberapa Cuplikan Hasil Pergerakan Robot

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi, dan implementasi ada beberapa hal yang dapat disimpulkan dari penelitian pada Tugas Akhir ini, antara lain :

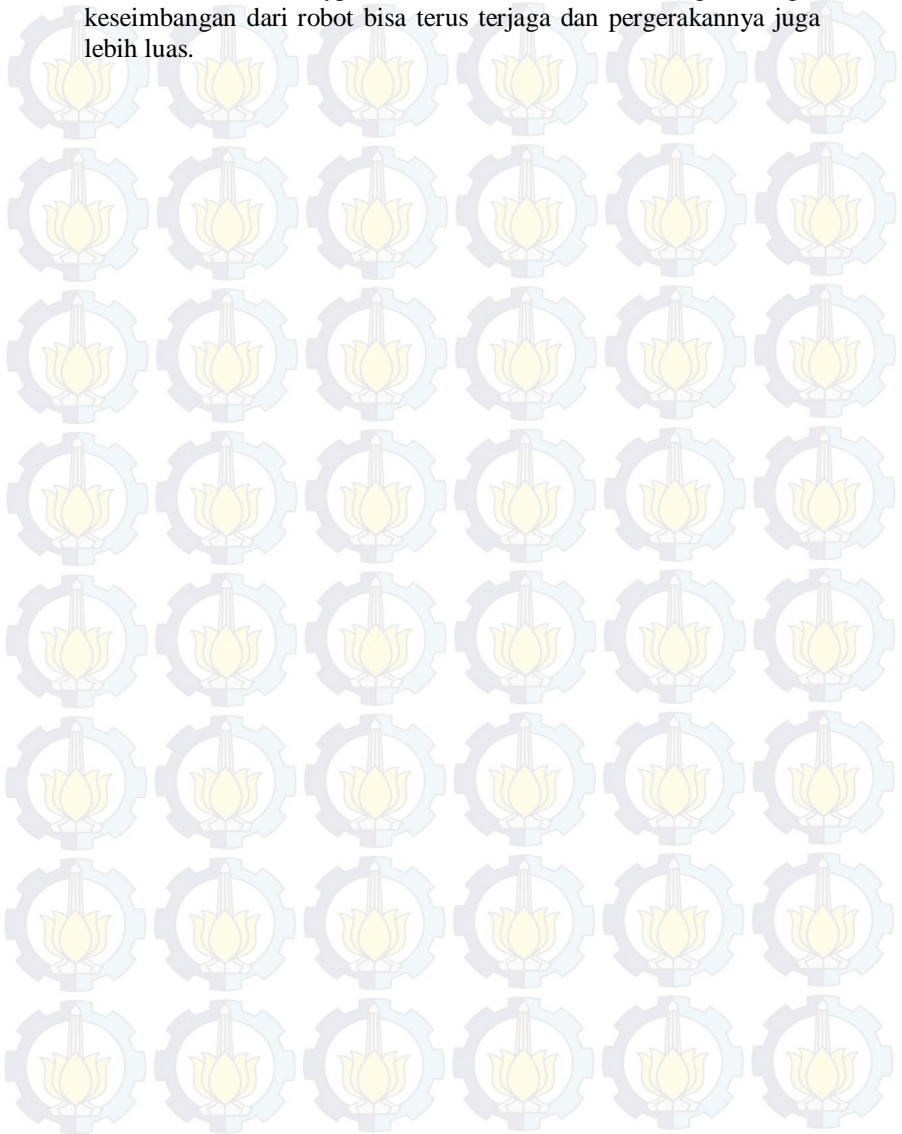
- a. Beberapa percobaan keluaran hasil sistem *fuzzy* dengan perhitungan manual untuk perhitungan nilai θ_2 mempunyai rata-rata *error* sangat kecil yaitu dengan rata-rata sebesar 0.93 dalam satuan derajat, karena formula dari perhitungan *manual* dengan *formula* yang dipakai untuk menentukan *member function* dari sistem *fuzzy* ialah sama.
- b. Untuk menentukan pergerakan kaki robot tidak cukup hanya menggunakan sistem *fuzzy*, sebab pada pergerakan dari salah satu kaki tergantung pada pergerakan kaki lainnya yang memiliki pemodelan yang berbeda. Sehingga pergerakan kaki robot harus direncanakan secara terpisah dan juga memperhatikan keseimbangan robot itu sendiri.
- c. Untuk menentukan nilai θ pada kaki robot diperlukan proses regresi polinomial sebagai proses linierisasi pada pergerakan robot untuk meminimalisasi adanya pergerakan secara tiba-tiba yang menimbulkan suatu hentakan yang mengakibatkan keseimbangan robot menjadi terganggu. Dimana pada hasil regresi ini mempunyai rata-rata *error* yang cukup besar yaitu 17.24 dalam satuan millimeter, dari hasil perencanaan dengan hasil realisasinya.

5.2. Saran

Sebagai pengembangan penelitian penulis menyarankan beberapa hal yang mungkin bisa dikembangkan dari penulisan Tugas Akhir ini, antara lain :

- a. Untuk pemodelan sistem *fuzzy* tidak hanya untuk bagian tangan saja, melainkan dapat digunakan untuk menentukan pergerakan kaki robot juga. Dalam pengklasifikasian fungsi keanggotaan masukan serta basis aturan haruslah memiliki banyak aturan sehingga mempunyai hasil yang tepat seperti yang telah dibahas oleh penulis.
- b. Pengembangan simulasi dan implementasi selanjutnya, dengan menghitung dinamika robot *Humanoid Bioloid Premium Type-A*.
- c. Perhitungan *inverse kinematics* dilakukan dua kali, dengan metode aljabar dan geometri agar terklarifikasinya persamaan *inverse kinematics* yang didapat.

- d. Pemakaian beberapa sensor yang terdapat pada robot *Humanoid Bioloid Premium Type-A* untuk memaksimalkan gerak agar keseimbangan dari robot bisa terus terjaga dan pergerakannya juga lebih luas.



LAMPIRAN A

% Inisialisai antar link berdasarkan Tabel DH
Parameter Tangan Kanan Robot

```
%Li = link([alpha a theta d R/P];  
L1 = link([-pi/2 0 0 70 0]);  
L3 = link([pi/2 -14.5 pi/2 25 0]);  
L5 = link([0 -67.5 0 0 0]);  
LRH = link([0 -74.5 0 0 0]);  
bioloid=robot({L1 L3 L5 LRH});  
bioloid.name='right hand'
```

```
q0=([pi -pi/2 0 0 0]);  
q1=([pi 0 -pi/2 0 0]);  
q2=([pi 0 -0.4519*pi 0.4092*pi]);  
q3=([pi 0 -0.3369*pi 0.5856*pi]);  
q4=([pi 0 -0.0679*pi 0.5639*pi]);  
q5=([pi 0 0 0 0]);
```

```
T=fkine(bioloid, q5);  
t=(0 : 100 : 600);  
jt=jtraj(q3,q5,t);
```

```
plot(bioloid, q5)  
drivebot(bioloid);
```

LAMPIRAN B

```
% Inisialisai antar link berdasarkan Tabel DH
Parameter Tangan Kiri Robot
%joint      %alpha %a %theta %d %type
L1 = link([ -pi/2    0    0    70    0 ]);
L2 = link([  pi/2    14.5  pi/2    25    0 ]);
L3 = link([  0    67.5    0    0    0 ]);
L4 = link([  0    74.5    0    0    0 ]);

q0=[0 pi/2    0    0    ];
q1=[0 0    0.4461*pi -0.4138*pi];
q2=[0 0    0.3369*pi -0.5856*pi];
q3=[0 0    0.0679*pi -0.5639*pi];
q4=[0 0    pi/2    0    ];
q5=[0 0    0    0    ];
q6=[0 0.3333*pi    0    0    ];
q7=[0 0    0    0    ];

R=robot({L1 L2 L3 L4});
R.name='tangan kiri bioloid';

T=fkine(R, q4)
t=(0 : 100 : 500);
jt=jtraj(q0,q4,t);

plot(R, jt)
drivebot(R);
```

LAMPIRAN C

% Inisialisai antar link berdasarkan Tabel DH
Parameter Kaki Kanan Robot

```
%joint      %alpha %a      %theta %d      %type
Lbf = link( [pi      38      -pi/2      0      0]);
L7 = link( [-pi/2      0      pi/2      31      0]);
L9 = link([-pi/2      0      -pi/2      0      0]);
L11 = link([pi/2      75      0      14.5      0]);
L13 = link([0      76.4      -pi*0.074      0      0]);
L15 = link([-pi/2      0      pi*0.074      0      0]);
L17 = link([0      29.5      0      0      0]);
```

```
bioloid=robot({Lbf L7 L9 L11 L13 L15 L17});
bioloid.name='kaki kanan'
```

```
q0=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0      -pi*0.074
pi*0.074 0]);
```

```
q1=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0.0683*pi -pi*0.074
pi*0.074 -0.0683*pi]);
```

```
q2=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0.0958*pi -pi*0.074
pi*0.074 -0.0958*pi]);
```

```
q3=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0.0933*pi -pi*0.074
pi*0.074 -0.0933*pi]);
```

```
q4=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0.0713*pi -pi*0.074
pi*0.074 -0.0713*pi]);
```

```
q5=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0.0408*pi -pi*0.074
pi*0.074 -0.0408*pi]);
```

```
q6=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0.0124*pi -pi*0.074
pi*0.074 -0.0124*pi]);
```

```
q7=([-pi/2 pi/2 -pi*0.674      0      pi*0.071
pi*0.105 0]);
```

```
q8=[-pi/2 pi/2 -pi*0.507    0          pi*0.043  
pi*0.027  0];
```

```
T=fkine(bioloid, q0);  
t=(0 : 100 : 600);  
jt=jtraj(q8,q7,t);
```

```
plot(bioloid, q0)  
drivebot(bioloid);
```



LAMPIRAN D

```
% Inisialisai antar link berdasarkan Tabel DH
Parameter Kaki Kiri Robot
%joint      %alpha    %a         %theta     %d %type
L1 = link([ pi      -38      pi/2      0      0 ]);
L2 = link([ pi/2    0      -pi/2     31     0 ]);
L3 = link([ -pi/2   0      pi/2      0      0 ]);
L4 = link([ pi/2    -75     0      14.5  0 ]);
L5 = link([ 0      -76.4   -0.074*pi 0      0 ]);
L6 = link([ -pi/2   0      0.074*pi 0      0 ]);
L7 = link([ 0      -29.5   0      0      0 ]);

q0=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0      0.074*pi -
0.074*pi 0]);

q1=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0.0285*pi 0.074*pi -
0.074*pi -0.0285*pi]);

q2=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0.0592*pi 0.074*pi -
0.074*pi -0.0592*pi]);

q3=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0.0812*pi 0.074*pi -
0.074*pi -0.0812*pi]);

q4=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0.0839*pi 0.074*pi -
0.074*pi -0.0839*pi]);

q5=([-pi/2 pi/2 -pi/2      0.0563*pi 0.074*pi -
0.074*pi -0.0563*pi]);

q6=([-pi/2 pi/2 -pi/2      -0.0119*pi 0.074*pi -
0.074*pi 0.0119*pi]);

q7=([-pi/2 pi/2 -pi*0.495 0      0.045*pi -
0.069*pi 0]);

q8=([-pi/2 pi/2 -pi*0.327 0      -0.025*pi -
0.103*pi 0]);

q9=([0      0      0      0      0      0
0]);
```



```
q10=[[-pi/2 pi/2 -pi/2          0.0213*pi  0.074*pi -  
0.074*pi  -0.0213*pi]];
```

```
q11=[[-pi/2 pi/2 -pi/2          0.1071*pi  0.074*pi -  
0.074*pi  -0.1071*pi]];
```

```
R=robot({L1 L2 L3 L4 L5 L6 L7});  
R.name='kaki kiri bioloid';
```

```
T=fkine(R, q11)  
t=(0 : 100 : 600);  
jt=jtraj(q8,q7,t);
```

```
plot(R,q11)  
drivebot(R);
```

LAMPIRAN E

```
%hitung theta manual
clear all;
clc;
x = 100;
y = input('Masukan Nilai pY yang inginkan = ');
a=((x-14.5)^2)+((y-25)^2);
b=10106.5;
c=10057.5;
d=a-b;
e=d/c;
f=acos(e);
g=(f/1.5708)*90;
disp(['derajat:' num2str(g)])
```

LAMPIRAN F

```
%program hitung theta fuzzy
function out=tetah2(in)
simout=in(1);
pX=0;
pY=100;
a=67.5;
b=74.5;

u=simout;
u2=(u/180)*3.14;
u1=cos(u2);
c=a+(b*u1);
d=b;
g=pX-14.5;
h=pY-25;

e=atan2(d,c);
f=atan2(h,g);
e1=(e/1.5708)*90;
f1=(f/1.5708)*90;
v=e1+f1;

theta2=v;
out(1)=theta2;
end
```

LAMPIRAN G

Tabel G1. Beberapa Kemungkinan Nilai θ_2

θ_2 ($^\circ$)	pX									
	-100	-75	-50	-25	0	25	50	75	100	
-100	X	X	15.77	45.27	55.28	55.97	47.62	24.13	X	
-75	X	38.2	66.23	81.69	89.4	89.98	83.41	69.31	44.25	
-50	30.91	69.46	91.83	106.88	115.13	115.76	108.68	94.68	73.66	
-25	56.82	87.69	110.04	126.95	137.34	138.19	129.12	113.1	91.69	
0	68.85	98.41	121.94	141.96	157.19	158.71	144.83	125.37	102.47	
25	72.62	102.03	126.24	148.18	169.73	173.67	151.59	129.86	106.14	
50	68.85	98.41	121.94	141.96	157.19	158.71	144.83	125.37	102.47	
75	56.82	87.69	110.04	126.95	137.34	138.19	129.12	113.1	91.69	
100	30.91	69.46	91.83	106.88	115.13	115.76	108.68	94.68	73.66	
125	X	38.2	66.23	81.69	89.4	89.98	83.41	69.31	44.25	
150	X	X	15.77	45.27	55.28	55.97	47.62	24.13	X	

*X = end-effector tidak dapat menjangkau posisi tersebut.



~ Halaman Ini Sengaja Dikосongkan ~

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Liu H., Zhou W., Lai X., Zhu S., “An Efficient Inverse Kinematic Algorithm for a PUMA 560 – Structured Robot Manipulator”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol.10, 236:2013, 18 Maret 2013.
- [2] Crenganis M., Breaz R., Racs G., Bologna O., “The Inverse Kinematics Solutions of a 7 DoF Robotic Arm Using Fuzzy Logic”, *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp.518-523,25 Oktober 2011.
- [3] Hausman K., Knese K., Tinagu R., Kidson R., “Humanoid Olympics Report”, *Humanoid Olympics at TU Munich in Summer Semester*, 2012.
- [4] Spong M.W., Vidyasagar M., “Robot Dynamics and Control”, New York : Wiley, 1989.
- [5] Denavit J., Hartenberg R.S., “A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms Based on Matrices”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 1, pp.215-221. Juni 1955.
- [6] Kucuk S., Bingul Z., “Robot Kinematics : Forward and Inverse Kinematics”, *Industrial Robotics : Theory, Modelling and Control*, Intech, Desember 2006.
- [7] Rosen J., “Advanced Robotic”, MAE 253D Department of Mechanical & Aerospace Engineering UCLA, 2012.
- [8] Hwang, W.R., Thompson W.E., “Design of intelligent fuzzy logic controllers using genetic algorithms”, *Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Fuzzy Systems, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, June 26-29, IEEE Computer Society, Washington DC., USA., pp: 1383-1388. DOI: 10.1109/FUZZY.1994.343566., 1994.
- [9] Takagi T., Sugeno M., “Fuzzy Identification of Systems and Applications to Modeling and Control”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-15, No. 1, Januari 1985.



~ Halaman Ini Sengaja Dikosongkan ~

RIWAYAT PENULIS



Thri Noerma Agil Rhomadhoni, lahir di Surabaya– Jawa Timur pada tanggal 12 Maret 1992. Anak ketiga dari pasangan Margiono dan Nur Aini. Setelah lulus dari SMA NEGERI 21 Surabaya tahun 2010, penulis melanjutkan studi di Diploma 3 Teknik Telekomunikasi Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS) dan lulus tahun 2013. Kemudian melanjutkan kuliah dengan mengambil program Sarjana Lintas Jalur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan mengambil Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro. Pada bulan Januari 2016, penulis mengikuti seminar dan ujian tugas akhir di Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, ITS Surabaya sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro.