

Mu Jihad
Munadi
22/02/2013.



UNIVERSITAS DIPONEGORO

DESAIN PEMODELAN KINEMATIK DAN DINAMIK

HUMANOID ROBOT

TUGAS AKHIR

BENI ANGGORO

L2E007022

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN TEKNIK MESIN

SEMARANG

FEBRUARI 2013

HALAMAN TUGAS SARJANA

Diberikan kepada :
Nama : Beni Anggoro
N I M : L2E007022
Pembimbing : Dr. Eng. Munadi, ST, MT
Jangka waktu : 10 (sepuluh) bulan
Judul : Desain Pemodelan Kinematik dan Dinamik *Humanoid Robot*
Isi tugas :

1. Mendesain *humanoid robot* menggunakan salah satu *software CAD (Computer Aided Design)* yaitu SolidWorks.
2. Mendiskripsikan pemodelan kinematik *humanoid robot*.
3. Mendiskripsikan pemodelan dinamik *humanoid robot* dengan persamaan *Lagrangian* untuk mendapatkan torsi pada aktuator dan mendiskripsikan *trajectory* pada setiap *joint* dari *humanoid robot*.

Semarang, 18 Februari 2013

Pembimbing



Dr. Eng. Munadi, ST, MT

NIP. 197706012003121004

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tugas Akhir ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

NAMA : BENI ANGGORO

NIM : L2E 007 022

Tanda Tangan : 

Tanggal : 18 Februari 2013


HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Sarjana ini diajukan oleh :
NAMA : BENI ANGGORO
NIM : L2E 007 022
Jurusan/Program Studi : TEKNIK MESIN
Judul Tugas Akhir : Desain Pemodelan Kinematik dan Dinamik
Humanoid Robot


Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

TIM PENGUJI

Pembimbing : Dr. Eng. Munadi, ST, MT
Penguji : Dr. Ir. Eflita Yohana, MT
Penguji : Dr. Sulardjaka, ST, MT



Semarang, 18 Februari 2013
Ketua Jurusan Teknik Mesin



Dr. Sulardjaka, ST, MT
NIP. 197104201998021001

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Diponegoro, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Beni Anggoro
NIM : L2E 007 022
Jurusan/Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tugas Akhir

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Diponegoro **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*None-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

DESAIN PEMODELAN KINEMATIK DAN DINAMIK *HUMANOID ROBOT*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti/Noneksklusif ini Universitas Diponegoro berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Semarang

Pada Tanggal : 18 Februari 2013

Yang menyatakan



(Beni Anggoro)

NIM : L2E 007 022

ABSTRAK

Dewasa ini, perkembangan teknologi robot sangat cepat. Robot diciptakan karena robot diharapkan dapat membantu manusia mengerjakan pekerjaan yang memerlukan ketelitian dan ketepatan tinggi. Salah satu perkembangan robot yang mendapat perhatian paling besar adalah robot manusia atau *humanoid robot*. Untuk mengembangkan *humanoid robot* diperlukan biaya yang tidak murah dan waktu yang lama.

Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan konstruksi mekanik *humanoid robot* yang sederhana, murah dan ringan. Selanjutnya akan dilakukan pemodelan kinematik dan pemodelan dinamik pada *humanoid robot*. Pemodelan kinematik ini menganalisa tentang *forward kinematics* dengan menggunakan notasi parameter *Denavit-Hartenberg* (DH parameter). Pada pemodelan dinamik menganalisa tentang torsi pada *joint ankle humanoid robot* dengan menggunakan persamaan *Lagrangian*. Dalam analisa perhitungan menggunakan alat bantu *software* MATLAB.

Pemodelan kinematik melalui tahapan penempatan *frames link* robot, mencari DH parameter, memasukan sudut referensi: $\theta_{RL1}= 0$, $\theta_{RL2}= 45^\circ$, $\theta_{RL3}= -55^\circ$, $\theta_{RL4}= 10$, $\theta_{RL5}= 0$, $\theta_{LL1}= 0$, $\theta_{LL2}=-55^\circ$, $\theta_{LL3}= 35^\circ$, $\theta_{LL4}= 20^\circ$, $\theta_{LL5}=0^\circ$, sehingga diperoleh posisi koordinat (x,y,z) pada *joint* kelima kaki kiri *humanoid robot* yaitu (18.77, -67.85, 53.77). Pemodelan dinamik dilakukan berdasarkan turunan persamaan *Lagrangian* pada tiap *link humanoid robot*, sehingga diperoleh torsi *joint ankle* yang bekerja sebesar 0.65 Nm. Berdasarkan besarnya torsi tersebut maka dapat menentukan jenis dan besarnya aktuator yang dibutuhkan. Dalam pergerakan *humanoid robot* pada *joint space* mempunyai jalur lintasan (*trajectory*) sebagai fungsi *trajectory* terhadap waktu. Dari hasil penelitian ini, maka akan diperoleh model awal pengembangan *humanoid robot* yang dapat digunakan untuk dunia pendidikan dan perlombaan seperti KRI atau KRCI.

Kata kunci : *DH parameter, forward kinematics, Humanoid robot, Lagrangian, trajectory.*

ABSTRACT

Now day, the development of robot technology has grown rapidly. The robot was created because the robot is expected to help people do the work that requires precision and accuracy. One of the development of robots that gets the most attention is the human robot or humanoid robots. Furthermore, the development of humanoid robots is expensive and time-costly.

This research will make simple mechanical design of a humanoid robot construction which are inexpensive and lightweight. Furthermore, modeling will be performed kinematics and dynamics modeling in humanoid robots. Kinematic modeling analyzes of forward kinematics using Denavit-Hartenberg notation parameters (DH parameters). The dynamic analysis model of torque at the ankle joint humanoid robot using Lagrangian equation. In the analysis of the calculation using MATLAB software tools.

Kinematic modeling through the placement that the frames of link robot, find DH parameters then enter the angle references: $\theta_{RL1} = 0$, $\theta_{RL2} = 45^\circ$, $\theta_{RL3} = -55^\circ$, $\theta_{RL4} = 10^\circ$, $\theta_{RL5} = 0$, $\theta_{LL1} = 0^\circ$, $\theta_{LL2} = -55^\circ$, $\theta_{LL3} = 35^\circ$, $\theta_{LL4} = 20^\circ$, $\theta_{LL5} = 0^\circ$, that can be obtained the coordinates (x, y, z) in joint fifth left foot humanoid robot that is (18.77, -67.85, 53.77). Dynamic modeling is based on a derivative Lagrangian equations on each link humanoid robot, in order to obtain the ankle joint torque of 0.65 Nm. Based on the amount of torque is then able to determine the type and size of required actuators. In the movement of humanoid robots in space having joint trajectory (trajectory) as a function of time trajectory. From these results, it will obtain the initial model development humanoid robot that can be used for education and competition, such as KRI or KRCI.

Keywords : DH parameter, forward kinematics, Humanoid robot, Lagrangian, trajectory.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat melewati masa studi dan menyelesaikan Tugas Akhir yang merupakan tahap akhir dari proses pembelajaran untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin di Universitas Diponegoro.

Pada dasarnya karya ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan dan dorongan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini perkenankanlah penulis untuk mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak, diantaranya:

1. Bapak Dr. Eng. Munadi, ST. MT., selaku dosen pembimbing utama, atas bantuan, bimbingan, pengarahan dan didikan kepada penulis, terutama dalam pengerjaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini.
2. Teman-teman di Laboratorium Komputasi dan Otomasi, Puji Haryanto, Andy Rahmawan, Budi utomo, Septian Ari Nugroho, Rony Cahyadi Utomo, dan Adtitya Nendra Pandu yang telah memberikan semangat dan ide untuk penulis.

Penyusun menyadari bahwa dalam menyusun laporan ini terdapat kekurangan dan keterbatasan, oleh karena itu kritik dan saran yang sifatnya membangun untuk kesempurnaan dan kemajuan penulis dimasa yang akan datang sangat diharapkan. Akhir kata penulis berharap semoga hasil laporan ini dapat bermanfaat bagi seluruh pembaca

Semarang, 18 Februari 2013



Penulis

HALAMAN PERSEMBAHAN

Untuk kedua orang tuaku, bapak Suwarno dan ibu Miskem yang telah melimpahkan kasih sayangnya kepadaku

Untuk kakak-kakaku, Zaenal Afandi, Son Ashari, dan M. Riazal yang selalu memberi semangat

Untuk kekasihku yang tercinta yang selalu memberi dukungan dan semangat

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Halaman Tugas Sarjana.....	ii
Halaman Pernyataan Orisinalitas	iii
Halaman Pengesahan	iv
Halaman Persetujuan Publikasi.....	v
Abstrak	vi
<i>Abstract</i>	vii
Kata Pengantar	viii
Halaman Persembahan	ix
Daftar Isi.....	x
Daftar Gambar.....	xiv
Daftar Tabel	xix
Daftar Singkatan dan Lambang.....	xx

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Metoda Penelitian.....	2
1.5 Sistematika Penulisan	3

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Definisi Robot	4
2.2 Sejarah dan Perkembangan Robot	4
2.3 Klasifikasi Umum Robot	6
2.3.1 Klasifikasi Robot Berdasarkan Penggunaan Aktuator	6
2.3.1.1 Manipulator	6
2.3.1.2 <i>Mobile robot</i>	8
2.3.2 Klasifikasi Robot Berdasarkan Kebutuhan Akan Operator Robot	10

2.3.2.1	<i>Autonomous Robot</i>	10
2.3.2.2	<i>Teleoperated Robot</i>	10
2.3.2.3	<i>Semi Autonomous</i>	11
2.3.3	Klasifikasi Robot Berdasarkan Kegunaan	11
2.3.3.1	Robot Industri (<i>Industrial Robot</i>)	12
2.3.3.2	Robot Pelayan (<i>Service Robot</i>)	12
2.4	Struktur Umum Robot	13
2.4.1	Badan (<i>body</i>)	13
2.4.2	Lengan (<i>arm</i>)	13
2.4.3	Pergelangan (<i>wrist</i>)	14
2.4.4	Ujung (<i>end effector</i>)	14
2.4.5	Aktuator (<i>Actuator</i>)	15
2.4.6	Sensor	16
2.4.7	Pengendali (<i>controller</i>)	17
2.4.8	Catu Daya (<i>Power Supply</i>)	18
2.5	Motor Penggerak	19
2.5.1	Pengertian Motor	19
2.5.2	Jenis-Jenis Motor	20
2.5.2.1	Motor AC (<i>Alternating Current</i>)	20
2.5.2.2	Motor DC (<i>Direct Current</i>)	21
2.5.3	Cara Pengendalian <i>Servomotor</i>	25
2.6	Konfigurasi Robot	26
2.6.1	Konfigurasi Kartesian	26
2.6.2	Konfigurasi Silindris	27
2.6.3	Konfigurasi <i>Spheris/Polar</i>	28
2.6.4	Konfigurasi SCARA (<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>)	28
2.6.5	Konfigurasi Sendi Lengan	29
2.7	Dasar Teori <i>Humanoid Robot</i>	29
2.7.1	Gait dua kaki (<i>Bipedal</i>)	31
2.7.2	Pemodelan Kinematik	32
2.7.2.1	Konsep Kinematik	32

2.7.2.2 Denavit-Hertenberg (DH) Parameter	33
2.7.3 Persamaan Dinamik <i>Humanoid Robot</i>	37

BAB 3 DESAIN HUMANOID ROBOT

3.1 Tahapan Desain <i>Humanoid Robot</i>	39
3.1.1 Pemodelan dengan SolidWorks	40
3.1.2 Pemodelan Kinematik	40
3.1.3 Pemodelan Dinamik dengan Persamaan <i>Lagrangian</i>	40
3.2 Diagram Alir Penelitian	41
3.3 Pemodelan <i>Humanoid Robot</i> dengan SolidWorks	42
3.3.1 Derejat Kebebasan atau <i>Degrees of Freedom (DoF)</i>	42
3.3.2 Desain Struktur <i>Humanoid Robot</i>	44
3.3.2.1 Kaki (<i>leg</i>)	45
3.3.2.2 Badan (<i>body</i>)	49
3.3.2.3 Kepala (<i>head</i>)	52
3.4 Pemodelan Kinematik <i>Humanoid Robot</i>	53
3.4.1 Menentukan <i>Frames Robot</i>	53
3.4.2 Mengidentifikasi <i>Link</i> Parameter	55
3.4.3 Menentukan Matriks Transformasi	62

BAB 4 ANALISA FORWARD KINEMATICS DAN DYNAMICS

HUMANOID ROBOT

4.1 <i>Fordward Kinematics</i>	68
4.2 Pemodelan Dinamik dengan Persamaan <i>Lagrangian</i>	80
4.2.1 Penyederhanaan Kinematik	81
4.2.2 Penyederhanaan Koordinat <i>Frame</i>	88
4.2.3 Kecepatan Sudut pada tiap <i>Joint</i>	89
4.2.4 Eneregi Kinetik Pada Tiap <i>Joint</i>	91
4.2.5 Energi Potensial	93
4.2.6 Moment Inersia	94
4.3 Menentukan Persamaan Lagrangian pada <i>Joint Ankle</i> Kaki Kanan (τ_{RL1}) ..	95

4.4	Analisa Trajectory pada <i>Joint Ankle</i> Humanoid Robot.....	97
4.4.1	Analisa Trajectory pada <i>Frontal Plane</i>	97
4.4.2	Analisa Trajectory pada <i>Sagittal Plane</i>	99

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1.	Kesimpulan	104
5.2.	Saran	105

DAFTAR PUSTAKA	106
-----------------------------	-----

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Manipulator robot</i>	7
Gambar 2.2	Robot beroda dua dan robot beroda caterpillar	8
Gambar 2.3	Robot ASIMO	9
Gambar 2.4	<i>Autonomous robot</i>	10
Gambar 2.5	<i>Mobile robot</i> dan <i>remote control</i>	11
Gambar 2.6	<i>Semi autonomous legged robot</i>	11
Gambar 2.7	Robot industri	12
Gambar 2.8	<i>Servise robot</i>	12
Gambar 2.9	Badan dan <i>limbs humanoid robot</i>	13
Gambar 2.10	Lengan robot dan lengan pada <i>humanoid robot</i>	13
Gambar 2.11	Pergelangan robot	14
Gambar 2.12	<i>End effector arm robot</i> dan <i>end effector humanoid robot</i>	14
Gambar 2.13	Solenoid	15
Gambar 2.14	Aktuator hidrolik	15
Gambar 2.15	Aktuator pneumatik	16
Gambar 2.16	Sensor warna	17
Gambar 2.17	Robot dan kontroler	18
Gambar 2.18	Catu daya pneumatik, catu daya hidrolik, dan catu daya listrik	18
Gambar 2.19	Jenis-jenis motor pada robot	19
Gambar 2.20	<i>Synchronous motor</i> dan <i>Induction motor</i>	20
Gambar 2.21	<i>Brushed motor DC</i> dan <i>DC motor rotation</i>	22
Gambar 2.22	Konstruksi <i>synchronous motor</i>	22
Gambar 2.23	<i>Brushless motor</i>	22
Gambar 2.24	<i>homopolar motor</i> dan <i>ball bearing motor</i>	23
Gambar 2.25	Motor stepper	23
Gambar 2.26	Sistem mekanik <i>servomotor</i>	24
Gambar 2.27	Motor servo standar dan <i>servomotor continuous</i>	25
Gambar 2.28	Pergerakan <i>servomotor</i>	26
Gambar 2.29	Konfigurasi cartesian	26

Gambar 2.30	Konfigurasi silinder	27
Gambar 2.31	Konfigurasi Polar	28
Gambar 2.32	Struktur robot SCARA	28
Gambar 2.33	Konfigurasi <i>joint arm</i>	29
Gambar 2.34	<i>Support polygon</i>	30
Gambar 2.35	<i>Support Polygon</i> dengan Warna Abu-abu : <i>Double Support Polygon</i> , <i>Double Support Polygon (Pre-Swing)</i> , dan <i>Single Support Polygon</i>	30
Gambar 2.36	Gait manusia berjalan	31
Gambar 2.37	Gait Berlari Manusia	31
Gambar 2.38	Transformasi kinematika maju dan kinematika balik	32
Gambar 2.39	Koordinat sumbu sendi	34
Gambar 3.40	Transformasi <i>link</i> konvensi parameter Denavit-Hartenberg	35
Gambar 2.41	Notasi <i>Denavit-Hartenberg</i>	36
Gambar 3.1	Diagram alir tahapan desain <i>humanoid robot</i>	39
Gambar 3.2	Diagram alir penelitian	42
Gambar 3.3	Lokasi dan <i>degrees of freedom</i>	43
Gambar 3.4	Lokasi <i>degrees of freedom</i> tampak <i>isometric</i> dan tampak depan desain <i>humanoid robot</i>	44
Gambar 3.5	Desain <i>humanoid robot</i> tampak depan dan tampak samping	45
Gambar 3.6	Kaki (<i>Leg</i>) tampak <i>isometric</i> dan tampak samping.	46
Gambar 3.7	Telapak kaki tampak <i>isometric</i> dan tampak depan	46
Gambar 3.8	Betis tampak <i>isometric</i>	47
Gambar 3.9	Sketsa <i>link</i> 1 tampak samping dan tampak depan	47
Gambar 3.10	Gambar 3.10 Paha dan sketsa <i>link</i> tampak samping dan tampak depan	48
Gambar 3.11	Sketsa <i>link</i> pada <i>hip</i> tampak samping dan tampak depan	48
Gambar 3.12	Badan tampak depan	49
Gambar 3.13	<i>Torso</i>	49
Gambar 3.14	Tangan (<i>arm</i>)	50
Gambar 3.15	Gambar 3.15 Bahu dan <i>link</i> tampak depan	51
Gambar 3.16	Bahu, Sketsa <i>link</i> tampak samping dan tampak depan.....	51
Gambar 3.17	Telapak tangan sudut pandang <i>isometric</i> dan sketsa tampak depan.....	52

Gambar 3.18	Kepala tampak <i>isometric</i>	52
Gambar 3.19	<i>Frames humanoid robot</i> dengan kaki kanan sebagai <i>supporting foot</i> dan detail <i>frame</i> {RL5}, {LL0}, {RA0} dan {LA0}	54
Gambar 3.20	<i>Link parameter humanoid robot</i>	55
Gambar 3.21	<i>Link parameter</i> perubahan arah sudut <i>joint</i> α_{i-1} , panjang <i>link</i> a_{i-1} dan perubahan sudut <i>joint</i> θ_i (c) pada kaki kanan.	56
Gambar 3.21	<i>Link parameter</i> perubahan arah sudut <i>joint</i> α_{i-1} , panjang <i>link</i> a_{i-1} dan perubahan sudut <i>joint</i> θ_i pada kaki kiri.	57
Gambar 3.22	Vektor posisi ${}^{RL5}P_{LL0,org}$	58
Gambar 3.23	Vektor posisi ${}^{RL5}P_{RA0,org}$	59
Gambar 2.24	posisi ${}^{RL5}P_{LA0,org}$	59
Gambar 3.25	<i>Link parameter</i> panjang <i>link</i> a_{i-1} , perubahan arah sudut <i>joint</i> α_{i-1} dan perubahan sudut <i>joint</i> θ_i pada tangan kanan.	60
Gambar 3.26	<i>Link parameter</i> panjang <i>link</i> a_{i-1} , perubahan arah sudut <i>joint</i> α_{i-1} dan perubahan sudut <i>joint</i> θ_i pada tangan kiri.	61
Gambar 4.1	<i>Chain link</i> pada kaki kanan	68
Gambar 4.2	Vektor posisi ${}^{RL5}P_{LL0,org}$ dan matrik rotasi <i>frame</i> LL0 relatif terhadap ${}^{RL5}{}_{LL0}R$, <i>chain link</i> pada kaki kiri.	69
Gambar 4.3	Vektor posisi ${}^{RL5}P_{RA0,org}$, matrik rotasi <i>frame</i> RA0 relatif terhadap ${}^{RL5}{}_{RA0}R$ dan <i>chain link</i> pada tangan kanan.	71
Gambar 4.4	posisi ${}^{RL5}P_{LA0,org}$, matrik rotasi <i>frame</i> LA0 relatif terhadap ${}^{RL5}{}_{LA0}R$ dan <i>chain link</i> pada tangan kiri.	73
Gambar 4.5	Matrik transformasi dari matrik ${}^{RL0}T_{RL1}$ (<i>joint</i> pertama kaki kanan) sampai dengan matrik ${}^{LL4}T_{LL5}$ (<i>joint</i> kelima kaki kiri).	75
Gambar 4.6	Matrik transformasi dari matrik ${}^{RL0}T_{RL1}$ (<i>joint</i> pertama kaki kanan) sampai dengan matrik ${}^{RA1}T_{RA2}$ (<i>joint</i> kedua tangan kanan).	76
Gambar 4.7	Gambar 4.7 Matrik transformasi dari matrik ${}^{RL0}T_{RL1}$ (<i>joint</i> pertama kaki kanan) sampai dengan matrik ${}^{LA1}T_{LA2}$ (<i>joint</i> kedua tangan kiri).	77
Gambar 4.8	Posisi dan sudut <i>joint</i> kaki <i>humanoid robot</i> pada saat melangkah.	78
Gambar 4.9	Gambar 4.9 Posisi <i>joint</i> pertama $P_{RL1,org}$ <i>joint</i> kedua $P_{RL2,org}$ dan <i>joint</i> ketiga $P_{RL3,org}$ pada kaki kanan. Dimana m_{RL} adalah massa, I_{RL} adalah	

	momen inersia, g adalah gravitasi, dan a_{RL} adalah panjang <i>link</i> pada kaki kanan.	81
Gambar 4.10	Gambar 4.10 Posisi <i>joint</i> keempat $P_{RL4,org}$ dan <i>joint</i> kelima $P_{RL5,org}$ pada kaki kanan. Dimana m_{RL} adalah massa, I_{RL} adalah momen inersia, g adalah gravitasi, dan a_{RL} adalah panjang <i>link</i> pada kaki kanan.....	82
Gambar 4.11	Posisi <i>joint</i> pertama $P_{LL1,org}$ dan <i>joint</i> kedua $P_{LL2,org}$ pada kaki kiri. Dimana m_{LL} adalah massa, I_{LL} adalah momen inersia, g adalah gravitasi, dan a_{LL} adalah panjang <i>link</i> pada kaki kiri.	83
Gambar 4.12	Posisi <i>joint</i> ketiga $P_{LL3,org}$ dan <i>joint</i> keempat $P_{LL4,org}$ pada kaki kiri. Dimana m_{LL} adalah massa, I_{LL} adalah momen inersia, g adalah gravitasi, dan a_{LL} adalah panjang <i>link</i> pada kaki kiri.	84
Gambar 4.13	Posisi kelima $P_{LL5,org}$ pada kaki kiri. Dimana m_{LL} adalah massa, I_{LL} adalah momen inersia, g adalah gravitasi, dan a_{LL} adalah panjang <i>link</i> pada kaki kiri.	84
Gambar 4.14	Posisi <i>joint</i> pertama $P_{RA1,org}$ dan <i>joint</i> kedua $P_{RA2,org}$ pada tangan kanan. Dimana m_{RA} adalah massa, I_{RA} adalah momen inersia, g adalah gravitasi, dan a_{RA} adalah panjang <i>link</i> pada tangan kanan.	85
Gambar 4.15	Posisi <i>joint</i> pertama $P_{LA1,org}$ dan <i>joint</i> kedua $P_{LA2,org}$ pada tangan kiri. Dimana m_{LA} adalah massa, I_{LA} adalah momen inersia, g adalah gravitasi, dan a_{LA} adalah panjang <i>link</i> pada tangan kiri.	86
Gambar 4.16	Posisi <i>center of mass</i> tangan kanan, <i>center of mass</i> tangan kiri dan <i>center of mass torso</i>	87
Gambar 4.17	Torsi <i>joint ankle</i> (τ_{RL1}) yang bekerja pada pergerakan pada <i>frontal plane</i>	96
Gambar 4.18	Pergerakan pada <i>frontal plane</i> untuk posisi awal dan posisi akhir.....	98
Gambar 4.19	Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{RL1} dan θ_{LL5}	98
Gambar 4.20	Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{RL5} dan θ_{LL1}	99
Gambar 4.21	Pergerakan pada <i>sagittal plane</i> untuk posisi awal dan posisi akhir	99
Gambar 4.22	Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{RL2}	101
Gambar 4.23	Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{RL3}	101
Gambar 4.24	Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{RL4}	101

Gambar 4.25	Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{LL2}	102
Gambar 4.26	Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{LL3}	102
Gambar 4.27	Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{LL4}	102
Gambar 4.28	Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{RA1}	103
Gambar 4.29	Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{LA1}	103

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Lokasi dan <i>degrees of freedom</i>	43
Tabel 3.2	DH parameter pada kaki kanan / <i>Right Leg</i> (RL)	56
Tabel 3.3	DH parameter pada kaki kiri / <i>Left Leg</i> (LL)	57
Tabel 3.4	DH parameter pada tangan kanan / <i>Right Arm</i> (RA)	61
Tabel 3.5	DH parameter pada tangan kiri / <i>Left Arm</i> (LA)	62
Tabel 4.1	Nilai sudut-sudut pada aktuator <i>humanoid robot</i> bidang <i>sagital</i>	100

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
KRI	Kontes Robot Indonesia	2
KRCI	Kontes Robot Cerdas Indonesia	2
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	2
AC	<i>Alternating Current</i>	15
DC	<i>Direct Curent</i>	15
PLC	<i>Programmable Logic Control</i>	17
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	24
CW	<i>Cloackwise</i>	24
CCW	Countercloackwise	24
DoF	<i>Degree of Freedom</i>	33
DH	Denavit-Hertenberg	33
RL	<i>Right Leg</i>	53
LL	<i>Left Leg</i>	53
LA	<i>Left Arm</i>	53
RA	<i>Right Arm</i>	53
LAMBANG	Nama	Halaman
θ	Sudut theta pada <i>joint</i>	33
R_x	Matriks rotasi sumbu x	33
R_y	Matriks rotasi sumbu y	33
R_z	Matriks rotasi sumbu z	33
a_i	Panjang <i>link</i>	36
α_i	Perubahan sudut <i>joint</i>	36
d_i	Jarak terluar	36

EK	energi kinetik satuan m/s^2	38
EP	energi potensial m/s^2	38
L	<i>Lagrangian</i>	39
$\partial\theta_x$	Turunan posisi sudut	
τ	torsi aktuator satuan N.m	39
x_{RL}	Sumbu x pada kaki kanan / <i>right leg</i>	54
y_{RL}	Sumbu y pada kaki kanan / <i>right leg</i>	54
z_{RL}	Sumbu z pada kaki kanan / <i>right leg</i>	54
x_{LL}	Sumbu z pada kaki kiri / <i>left leg</i>	54
y_{LL}	Sumbu y pada kaki kiri / <i>left leg</i>	54
z_{LL}	Sumbu z pada kaki kiri / <i>left leg</i>	54
x_{RA}	Sumbu x pada tangan kanan / <i>right arm</i>	54
z_{RA}	Sumbu z pada tangan kanan / <i>right arm</i>	54
y_{RA}	Sumbu z pada tangan kanan / <i>right arm</i>	54
x_{LA}	Sumbu x pada tangan kiri / <i>left arm</i>	54
y_{LA}	Sumbu y pada tangan kiri / <i>left arm</i>	54
z_{LA}	Sumbu z pada tangan kiri / <i>left arm</i>	54
${}^{RL5}p_{RL0,org}$	Posisi jarak antara joint kelima kaki kanan dengan joint pertama kaki kiri	55
${}^{RL5}p_{RA0,org}$	Posisi jarak antara joint kelima kaki kanan dengan joint pertama tangan kanan	55
${}^{RL5}p_{LA0,org}$	Posisi jarak antara joint kelima kaki kanan dengan joint pertama tangan kiri	55
T	Matrik transformasi	62
m	Massa satuan kg	81
I	Momen inersia satuan	81
g	Gravitasi satuan m/s^2	81