

UNIVERSITAS BINA NUSANTARA

Jurusan Sistem Komputer
Skripsi Sarjana Komputer
Semester Ganjil tahun 2002/2003

SIMULASI KINEMATIKA ROBOT MITSUBISHI RV-M1

Karyanto Chandra 0300453421
Gunawan 0300463845
Wihardi 0300469501

Abstrak

Tujuan penelitian adalah membuat alat bantu yang berupa *software* simulasi untuk mempelajari kinematika melalui pemodelan matematis robot Mitsubishi RV-M1. Manfaat penelitian ini adalah diperolehnya informasi/data yang menggambarkan sifat-sifat kinematis dari robot RV-M1 yang telah dibatasi untuk tiga *joint* pertama dan menjadi alat bantu utama di dalam proses mengintegrasikan robot RV-M1 dengan perangkat lain yang berada di Laboratorium Mekatronika, UPT Perangkat Keras, serta membantu proses pembelajaran Robotika di Universitas Bina Nusantara. Metodologi penelitian yang digunakan adalah studi kepustakaan yang berhubungan dengan kinematika robot beserta perkembangannya. Kemudian dilakukan penerjemahan algoritma dan implementasi ke dalam *software*. Pada *direct kinematics* melalui matriks transformasi *homogenous*, sedangkan pada *inverse kinematics* melalui tiga pendekatan, yaitu geometris, *algebraic*, dan numerik. Setelah itu dilakukan analisis hasil simulasi. Hasil yang dicapai adalah pada *direct kinematics* didapatkan posisi dan orientasi dari *end effector* dengan memasukkan nilai sudut *joint* 1, 2 dan 3. Sedangkan pada *inverse kinematics* didapatkan nilai sudut *joint* 1, 2 dan 3 dengan memasukkan posisi *end effector*. Pendekatan geometris dan *algebraic* selalu menghasilkan solusi yang sama, sedangkan pendekatan numerik kadang-kadang hanya didapatkan solusi pendekatan karena solusi numerik tergantung terhadap resolusi perhitungan yang digunakan, waktu kalkulasi untuk pendekatan numerik relatif lebih lama akibat algoritma yang digunakan. Program simulasi yang dikembangkan dapat membantu untuk menganalisa kinematika robot.

Kata Kunci:

Kinematika, Simulasi, Robot, Mitsubishi RV-M1

Kata Pengantar

Pertama-tama penulis mengucapkan puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat rahmat-Nya sehingga Skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Judul skripsi yang kami buat adalah 'Simulasi Kinematika Robot Mitsubishi RV-MI'. Skripsi ini dibuat sebagai syarat dalam menyelesaikan studi Strata-I (S1) pada Jurusan Sistem Komputer Universitas Bina Nusantara.

Penulis sadar bahwa karya ilmiah ini masih belum sempurna, sehingga masukan guna pengembangan lebih lanjut dan lebih sempurna dengan senang hati kami persilahkan.

Dalam kesempatan ini juga kami ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan moril selama pembuatan skripsi sehingga dapat menyelesaikannya dengan baik, mereka adalah :

1. Seluruh anggota keluarga penulis, yang memberikan dukungan baik moril maupun materil secara terus-menerus dalam segala hal.
2. Bapak Iman H. Kartowisastro, Ph.D., selaku Dosen Pembimbing dan Ketua Jurusan Sistem Komputer yang telah memberikan dukungan moril, mengorbankan waktu dan tenaganya untuk memberikan bimbingan, nasihat, saran dan kritik yang membangun selama pembuatan skripsi ini.
3. Ibu Dr. Th. Widia S., MM, selaku Rektor Universitas Bina Nusantara, yang telah memberikan kepercayaan dan kesempatan kepada penulis selama pembuatan skripsi ini.
4. Rekan-rekan mahasiswa yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah memberikan dorongan semangat kepada penulis.
5. Civitas Akademika Universitas Bina Nusantara tempat penulis menimba ilmu selama ini.

Akhir kata dengan segala kerendahan hati, penulis mohon maaf apabila ada kata-kata yang kurang berkenan dihati. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan almamater dalam studi akademik dimasa yang akan datang.

Jakarta, 31 Januari 2003

Penulis

SIMULASI KINEMATIKA ROBOT MITSUBISHI RV-M1

Karyanto Chandra, Gunawan, Wihardi

Usaha untuk mengutip, menjiplak, memperbanyak sebagian atau seluruh isi dari skripsi ini, hanya diperbolehkan untuk kepentingan akademik. Pembaca dapat menggunakan isi dari skripsi ini sebagai bahan acuan, pelajaran, dan masukan.

DAFTAR ISI

Halaman Judul Luar.....	i
Halaman Judul Dalam.....	ii
Halaman Persetujuan <i>Hardcover</i>	iii
Halaman Pernyataan Dewan Penguji.....	iv
Abstrak.....	vii
Kata Pengantar.....	viii
Halaman Penulis.....	x
Daftar Isi.....	xi
Daftar Tabel.....	xiv
Daftar Gambar.....	xvi
Daftar Lampiran.....	xxii
Daftar Variabel.....	xxv

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Ruang Lingkup.....	3
1.3. Tujuan dan Manfaat.....	4
1.4. Metodologi.....	4
1.4.1. Studi Kepustakaan.....	4
1.4.2. Penerjemahan Algoritma dan Implementasi ke Dalam <i>Software</i>	5
1.4.3. Analisis Hasil Simulasi.....	5
1.5. Sistematika Penulisan.....	6

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1. Teori-teori Dasar.....	7
2.1.1. Matematika.....	7
2.2. Teori-teori Khusus yang Berhubungan dengan Topik Yang Dibahas.....	12
2.2.1. Kinematika Dasar.....	12
2.2.2. <i>Direct Kinematics</i>	15

2.2.3. <i>Inverse Kinematics</i>	25
BAB 3 IMPLEMENTASI PERSAMAAN KINEMATIKA DALAM SIMULASI	
3.1. Karakteristik Robot RV-M1	30
3.2. Perancangan Program Simulasi	35
3.2.1. MATLAB sebagai Lingkungan Pemrograman	35
3.2.2. Modul <i>Input</i> Secara Umum.....	37
3.2.3. Modul Proses Secara Umum.....	37
3.2.4. Modul <i>Output</i> Secara Umum	38
3.3. Modul Proses	38
3.3.1. Penggunaan Konsep Denavit-Hartenberg Dalam Simulasi	39
3.3.2. <i>Direct Kinematics</i>	39
3.3.3. Penggunaan Cara Geometris Dalam Simulasi <i>Inverse Kinematics</i>	41
3.3.4. Penggunaan Cara <i>Algebraic</i> Dalam Simulasi <i>Inverse Kinematics</i>	51
3.3.5. Penggunaan Cara Numerik Dalam Simulasi <i>Inverse Kinematics</i>	60
3.3.6. Penggunaan Variabel	69
3.3.7. Jenis Program Simulasi.....	70
3.4. Modul <i>Input</i>	76
3.4.1. Menentukan Arah Gerak Negatif dan Positif Untuk <i>Direct Kinematics</i> Robot RV-M1	81
3.5. Modul <i>Output</i>	82
3.5.1. Pembulatan Hasil Simulasi	93
3.5.2. Pesan <i>Error</i> Pada Simulator.....	96
3.6. Penggunaan Simulator.....	100
BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI	
4.1. <i>Direct Kinematics</i>	103
4.1.1. Analisa Posisi Hasil Simulasi <i>Direct Kinematics</i> Terhadap Nilai Sudut <i>Joint</i> Yang Di- <i>input</i>	103
4.1.2. Analisa Pengaruh Kenaikan Nilai Sudut Pada Masing-Masing <i>Joint</i> (θ_i) Terhadap Posisi End Effector	108

4.1.3. Analisa Orientasi Hasil Simulasi <i>Direct Kinematics</i>	117
4.1.3.1. Orientasi Awal <i>End Effector</i>	120
4.1.3.2. Wilayah Putaran Vertikal.....	122
4.1.3.3. Wilayah Putaran Horisontal	125
4.1.3.4. Wilayah Putaran Vertikal dan Horisontal	127
4.2. <i>Inverse Kinematics</i>	128
4.2.1. Analisa Batasan Posisi Maksimum dan Minimum Robot RV-M1	129
4.2.1.1. Posisi Maksimum dan Minimum untuk Sumbu X (P_x).....	132
4.2.1.2. Posisi Maksimum dan Minimum untuk Sumbu Y (P_y).....	136
4.2.1.3. Posisi Maksimum dan Minimum untuk Sumbu Z (P_z)	139
4.2.2. Analisa Nilai Sudut <i>Joint</i> Hasil Simulasi <i>Inverse Kinematics</i> Terhadap posisi Yang Di- <i>Input</i>	142
4.2.2.1. Nilai Pada Salah Satu Sumbu Posisi Input Variabel (Dua Buah Sumbu Bernilai Konstan).....	147
4.2.2.2. Nilai Pada Dua Buah Sumbu Posisi <i>Input</i> Variabel (Satu Buah Sumbu Bernilai Konstan).....	159
4.2.2.3. Nilai Sumbu P_x , P_y dan P_z Variabel	163
4.2.2.4. Sumbu P_x , P_y , P_z Bernilai Sama.....	171
4.2.3. Analisa Sudut <i>Joint</i> Terhadap Posisi Awal dan Posisi Akhir <i>End Effector</i>	174
4.2.4. Perbandingan Antara Geometris, <i>Algebraic</i> dan Numerik.....	181

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	190
5.2 Saran.....	190
DAFTAR PUSTAKA	191
RIWAYAT HIDUP	192
LAMPIRAN	L1

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Batasan operasi robot RV-M1 dalam derajat	32
Tabel 3.2 Parameter robot RV-M1	32
Tabel 3.3 Sistem satuan variabel	35
Tabel 3.4 Arah-arrah gerak masing-masing <i>joint</i>	82
Tabel 4.1 Hasil simulasi <i>direct kinematics</i>	104
Tabel 4.2 Tabel kebenaran analisa posisi	105
Tabel 4.3 Tabel posisi terhadap kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 1 kelipatan 10	109
Tabel 4.4 Tabel posisi terhadap kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 2 kelipatan 10	112
Tabel 4.5 Tabel posisi terhadap kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 3 kelipatan 10	115
Tabel 4.6 Tabel sampel posisi maksimum dan posisi minimum	130
Tabel 4.7 Tabel hasil simulasi untuk posisi Px maksimum	132
Tabel 4.8 Tabel hasil simulasi untuk posisi Px minimum	135
Tabel 4.9 Tabel hasil simulasi untuk posisi Py maksimum	137
Tabel 4.10 Tabel hasil simulasi untuk posisi Py minimum	139
Tabel 4.11 Tabel hasil simulasi untuk posisi Pz maksimum	140
Tabel 4.12 Tabel hasil simulasi untuk posisi Pz minimum	142
Tabel 4.13 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Px variabel, Py dan Pz konstan....	147
Tabel 4.14 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Px variabel, Py =Pz = 0	148
Tabel 4.15 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Px variabel, Py =Pz = 10	148
Tabel 4.16 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Py variabel, Px dan Pz konstan....	152
Tabel 4.17 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Py variabel, Px = Pz = 0	152

Tabel 4.18 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Py variabel, $P_x = P_z = 10$	152
Tabel 4.19 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Pz variabel, P_x dan P_y konstan...	156
Tabel 4.20 Tabel hasil simulasi dengan sumbu Pz variabel, $P_x = P_y = 0$	157
Tabel 4.21 Tabel hasil simulasi dengan sumbu Pz variabel, $P_x = P_y = 100$	157
Tabel 4.22 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu P_x konstan, P_y dan Pz variabel....	160
Tabel 4.23 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu P_y konstan, P_x dan Pz variabel...	161
Tabel 4.24 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Pz konstan, P_x dan P_y variabel...	162
Tabel 4.25a Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu P_x , P_y dan Pz variabel.....	163
Tabel 4.25b Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu P_x , P_y dan Pz variabel.....	164
Tabel 4.25c Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu P_x , P_y dan Pz variabel.....	164
Tabel 4.26 Tabel sudut-sudut <i>joint</i> yang dibutuhkan terhadap posisi yang dimasukkan	169
Tabel 4.27 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu $P_x =$ sumbu $P_y =$ sumbu P_z	172
Tabel 4.28 Tabel ringkas untuk hasil simulasi dengan nilai $P_x = P_y = P_z$	174
Tabel 4.29 Tabel tahapan pergerakan robot RV-MI	177
Tabel 4.30 Tabel hasil simulasi untuk perbandingan geometris, <i>algebraic</i> dan numerik	181
Tabel 4.31 Tabel perbandingan hasil simulasi antara geometris vs <i>algebraic</i> vs numerik	182

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Vektor P pada bidang	8
Gambar 2.2 Vektor P dalam ruang	9
Gambar 2.3 <i>Direct kinematics</i> dan <i>inverse kinematics</i>	12
Gambar 2.4 <i>Frame-frame</i>	14
Gambar 2.5 Vektor P relatif terhadap sistem koordinat A	15
Gambar 2.6 Benda yang berotasi	16
Gambar 2.7 Koordinat <i>OUVW</i> relatif terhadap sistem koordinat <i>OXYZ</i>	17
Gambar 2.8 Sistem-sistem koordinat yang berputar	19
Gambar 2.9 Parameter kinematik menurut konsep Denavit-Hartenberg	23
Gambar 2.10 Dua solusi untuk satu posisi	25
Gambar 2.11 Sudut <i>joint 1</i>	27
Gambar 3.1 Posisi awal dan kerangka koordinat yang terbentuk	31
Gambar 3.2 Area jangkauan horisontal robot RV-M1 dilihat dari atas	33
Gambar 3.3 Area jangkauan vertikal robot RV-M1 dilihat dari samping	34
Gambar 3.4 Lingkungan Pemrograman MATLAB	36
Gambar 3.5 robot RV-M1 dilihat dari samping	41
Gambar 3.6 robot RV-M1 dilihat dari atas	42
Gambar 3.7 robot RV-M1 dilihat dari atas pada sumbu X dan sumbu Y	43
Gambar 3.8 Penyederhanaan gambar 3.7 robot RV-M1 dilihat dari atas pada sumbu X dan sumbu Y	43

Gambar 3.9 robot RV-M1 dilihat dari samping pada sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z	46
Gambar 3.10 Penyederhanaan gambar 3.9 robot RV-M1 dilihat dari samping pada sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z.....	46
Gambar 3.11 Gambar Geometris untuk mencari θ_3	47
Gambar 3.12 Gambar Geometris untuk mencari θ_2	49
Gambar 3.13 Gambar <i>flowchart inverse kinematics</i> numerik secara umum.....	63
Gambar 3.14 Gambar <i>flowchart inverse kinematics</i> secara numerik.....	67
Gambar 3.15 Gambar <i>flowchart</i> prosedur Cari	68
Gambar 3.16 <i>Flowchart</i> Program Kinematika Secara Umum	71
Gambar 3.17 Menu1 Simulator Kinematika robot RV-M1	77
Gambar 3.18 Bagan jenis simulasi kinematika.....	78
Gambar 3.19 Menu21 <i>Input Direct Kinematics</i>	78
Gambar 3.20 Menu31 <i>Input Inverse Kinematics</i>	80
Gambar 3.21 Arah gerak masing-masing <i>joint</i> robot RV-M1.....	81
Gambar 3.22 Menu22 Solusi <i>Direct Kinematics</i>	83
Gambar 3.23 Grafik Posisi <i>End Effector</i> Dilihat Dari Sudut Pandang -22,20	84
Gambar 3.24 Sudut pandang <i>azimuth</i> -22°, elivasi 20°	85
Gambar 3.25 Grafik Posisi <i>End Effector</i> Dilihat Dari Sudut Pandang 0,0	86
Gambar 3.26 Grafik Posisi <i>End Effector</i> Dilihat Dari Sudut Pandang -90,0	87
Gambar 3.27 Grafik Posisi <i>End Effector</i> Dilihat Dari Sudut Pandang -45,90	88
Gambar 3.28 Menu32 Solusi <i>Inverse Kinematics</i>	89
Gambar 3.29 Grafik sudut-sudut <i>joint</i> dan posisi terhadap 9 x <i>sampling</i>	91

Gambar 3.30 Grafik Gerakan robot RV-M1 Hasil 9x <i>Sampling</i>	92
Gambar 3.31 Hasil kalkulasi <i>direct kinematics</i>	94
Gambar 3.32 <i>flowchart</i> algoritma pembulatan elemen matriks rotasi 3x3	95
Gambar 3.33 Kesalahan Memasukkan Nilai Yang Bukan Angka.....	97
Gambar 3.34 Nilai Yang Dimasukkan Di luar Batasan Robot RV-M1 Pada Modul <i>Input Direct Kinematics</i>	97
Gambar 3.35 Nilai Yang Dimasukkan Pada Modul <i>Input Inverse Kinematics</i> Di luar Jangkauan Robot RV-M1.....	98
Gambar 3.36 Nilai Yang Dimasukkan Terkena Batas Singulariti.....	99
Gambar 3.37 Tidak Ditemukan Solusi Terhadap <i>Input</i> Yang Dimasukkan.....	99
Gambar 4.1 Skematik Analisa Kinematika	102
Gambar 4.2 <i>End effector</i> menyentuh sumbu X Y.....	108
Gambar 4.3 Pengaruh kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 1 terhadap posisi <i>end effector</i> pada sumbu X	111
Gambar 4.4 Pengaruh kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 1 terhadap posisi <i>end effector</i> pada sumbu Y	111
Gambar 4.5 Pengaruh kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 2 terhadap posisi <i>end effector</i> pada sumbu X	114
Gambar 4.6 Pengaruh kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 2 terhadap posisi <i>end effector</i> pada sumbu Z.....	114
Gambar 4.7 Pengaruh kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 3 terhadap posisi <i>end effector</i> pada sumbu X.....	116

Gambar 4.8 Pengaruh kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 3 terhadap posisi <i>end effector</i> pada sumbu Z.....	117
Gambar 4.9 <i>Frame-frame</i> yang terbentuk pada robot RV-M1.....	117
Gambar 4.10 <i>Frame</i> 3 relatif terhadap <i>base frame</i> atau <i>frame</i> X-Y-Z.....	118
Gambar 4.11 <i>Frame</i> 3 pada orientasi awal <i>end effector</i>	121
Gambar 4.12 <i>Frame</i> 3 pada wilayah putaran vertikal.....	123
Gambar 4.13 <i>Frame</i> 3 pada wilayah putaran horisontal.....	125
Gambar 4.14 <i>Frame</i> 3 pada wilayah putaran vertikal dan horisontal.....	127
Gambar 4.15 Gambar posisi Px maksimum.....	132
Gambar 4.16. Gambar posisi Px Minimum.....	133
Gambar 4.17 Gambar posisi Px minimum.....	134
Gambar 4.18 Gambar posisi Py maksimum.....	136
Gambar 4.19 Gambar posisi Py minimum.....	138
Gambar 4.20 Gambar posisi Pz maksimum.....	140
Gambar 4.21 Gambar posisi Pz minimum.....	141
Gambar 4.22 Gambar robot RV-M1.....	145
Gambar 4.23 Gambar pergerakan robot RV-M1.....	146
Gambar 4.24 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: Px = variabel, Py = 0, Pz = 0 (geometris).....	148
Gambar 4.25 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: Px = variabel, Py = 0, Pz = 0 (algebraic).....	149
Gambar 4.26 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: Px = variabel, Py = 0, Pz = 0 (numerik).....	149

Gambar 4.27 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_x = \text{variabel}$, $P_y = 10$, $P_z = 10$ (geometris).....	150
Gambar 4.28 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_x = \text{variabel}$, $P_y = 10$, $P_z = 10$ (<i>algebraic</i>).....	150
Gambar 4.29 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_x = \text{variabel}$, $P_y = 10$, $P_z = 10$ (numerik).....	151
Gambar 4.30 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_y = \text{variabel}$, $P_x = 0$, $P_z = 0$ (geometris).....	153
Gambar 4.31 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_y = \text{variabel}$, $P_x = 0$, $P_z = 0$ (<i>algebraic</i>).....	153
Gambar 4.32 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_y = \text{variabel}$, $P_x = 0$, $P_z = 0$ (numerik).....	154
Gambar 4.33 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_y = \text{variabel}$, $P_x = 10$, $P_z = 10$ (geometris).....	154
Gambar 4.34 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_y = \text{variabel}$, $P_x = 10$, $P_z = 10$ (<i>algebraic</i>).....	155
Gambar 4.35 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_y = \text{variabel}$, $P_x = 10$, $P_z = 10$ (numerik).....	155
Gambar 4.36 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_z = \text{variabel}$, $P_x = 100$, $P_z = 100$ (geometris).....	157
Gambar 4.37 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_z = \text{variabel}$, $P_x = 100$, $P_z = 100$ (<i>algebraic</i>).....	158
Gambar 4.38 Grafik nilai sudut <i>joint</i> dengan posisi: $P_z = \text{variabel}$, $P_x = 100$, $P_z = 100$	

(numerik)	158
Gambar 4.39a Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi X,Y,Z (dari tabel 4.25a)	165
Gambar 4.39b Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi X,Y,Z (dari tabel 4.25b)	165
Gambar 4.39c Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi X,Y,Z (dari tabel 4.25c)	166
Gambar 4.40a Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi X,Y,Z (dari tabel 4.25a)	166
Gambar 4.40b Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi X,Y,Z (dari tabel 4.25b)	167
Gambar 4.40c Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi X,Y,Z (dari tabel 4.25c)	167
Gambar 4.41a Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi X,Y,Z (dari tabel 4.25a)	168
Gambar 4.41b Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi X,Y,Z (dari tabel 4.25b)	168
Gambar 4.41c Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi X,Y,Z (dari tabel 4.25c)	169
Gambar 4.42 Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi: $P_x = P_y = P_z$ (geometris)	172
Gambar 4.43 Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi: $P_x = P_y = P_z$ (<i>algebraic</i>)	173
Gambar 4.44 Grafik sudut <i>joint</i> 1,2,3 terhadap posisi: $P_x = P_y = P_z$ (numerik)	173
Gambar 4.45 Pergerakan robot RV-M1 dengan <i>end effector</i> pada posisi awal	176
Gambar 4.46 Pergerakan robot RV-M1 dengan <i>end effector</i> pada posisi akhir	176
Gambar 4.47 Gambar proses pergerakan robot RV-M1 dari posisi awal sampai posisi akhir	177
Gambar 4.48 Grafik perubahan sudut-sudut <i>joint</i> dan posisi <i>end effector</i> dari posisi awal sampai posisi akhir dalam 9 tahapan	180

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran *Listing Program*

Cari.m	L1
Grafik.m	L5
Grafik2.m	L10
Help_Singuliti.m	L18
HitDirect.m	L19
HitGrafik.m	L23
HitGrafik2.m	L26
HitInverse1.m	L28
HitInverse2.m	L29
Menu1.m	L31
Menu21.m	L32
Menu22.m	L39
Menu31.m	L41
Menu32.m	L47
Motion.m	L50
Numeric.m	L63
Petunjuk.m	L67
Posisi.m	L68
 Lampiran Spesifikasi Robot Mitsubishi Movemaster RV-M1	
Standard Specifications & External Dimensions	L70

Operation Space.....	L71
Internal View	L72
Main Specification.....	L73

Lampiran Langkah Penggunaan Simulator

Langkah Penggunaan Simulator	L74
------------------------------------	-----

Lampiran Tabel

Tabel 3.1 Batasan operasi robot RV-M1 dalam derajat	L76
Tabel 3.2 Parameter robot RV-M1	L76
Tabel 3.3 Sistem satuan variabel	L76
Tabel 3.4 Arah-arrah gerak masing-masing <i>joint</i>	L76
Tabel 4.1 Hasil simulasi <i>direct kinematics</i>	L77
Tabel 4.2 Tabel kebenaran analisa posisi	L81
Tabel 4.3 Tabel posisi terhadap kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 1 kelipatan 10	L82
Tabel 4.4 Tabel posisi terhadap kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 2 kelipatan 10	L83
Tabel 4.5 Tabel posisi terhadap kenaikan nilai sudut <i>joint</i> 3 kelipatan 10	L84
Tabel 4.6 Tabel sampel posisi maksimum dan posisi minimum	L84
Tabel 4.7 Tabel hasil simulasi untuk posisi Px maksimum	L84
Tabel 4.8 Tabel hasil simulasi untuk posisi Px minimum.....	L85
Tabel 4.9 Tabel hasil simulasi untuk posisi Py maksimum	L85
Tabel 4.10 Tabel hasil simulasi untuk posisi Py minimum.....	L85
Tabel 4.11 Tabel hasil simulasi untuk posisi Pz maksimum.....	L85

Tabel 4.12 Tabel hasil simulasi untuk posisi Pz minimum.....	L86
Tabel 4.13 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Px variabel, Py dan Pz konstan....	L86
Tabel 4.14 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Px variabel, Py =Pz = 0	L88
Tabel 4.15 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Px variabel, Py =Pz = 10	L88
Tabel 4.16 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Py variabel, Px dan Pz konstan....	L89
Tabel 4.17 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Py variabel, Px = Pz = 0	L91
Tabel 4.18 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Py variabel, Px = Pz = 10	L91
Tabel 4.19 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Pz variabel, Px dan Py konstan...	L92
Tabel 4.20 Tabel hasil simulasi dengan sumbu Pz variabel, Px = Py = 0.....	L93
Tabel 4.21 Tabel hasil simulasi dengan sumbu Pz variabel, Px = Py = 100.....	L94
Tabel 4.22 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Px konstan, Py dan Pz variabel...	L94
Tabel 4.23 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Py konstan, Px dan Pz variabel...	L95
Tabel 4.24 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Pz konstan, Px dan Py variabel...	L95
Tabel 4.25 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Px, Py dan Pz variabel.....	L96
Tabel 4.26 Tabel sudut-sudut <i>joint</i> yang dibutuhkan terhadap posisi yang dimasukan .	L97
Tabel 4.27 Tabel hasil simulasi dengan nilai sumbu Px = sumbu Py = sumbu Pz.....	L98
Tabel 4.28 Tabel ringkas untuk hasil simulasi dengan nilai Px = Py = Pz	L99
Tabel 4.29 Tabel tahapan pergerakan robot RV-M1	L100
Tabel 4.30 Tabel hasil simulasi untuk perbandingan geometris, <i>algebraic</i> dan numerik.....	L100
.....	L100
Tabel 4.31 Tabel perbandingan hasil simulasi antara geometris vs <i>algebraic</i> vs numerik...	L101
.....	L101

DAFTAR VARIABEL

- a_i = *Link*, lengan robot, jarak terpendek antara sumbu Z_{i-1} dan sumbu Z_i .
- C_1 = $\text{Cos } \theta_1$
- C_2 = $\text{Cos } \theta_2$
- C_{23} = $\text{Cos } (\theta_2 + \theta_3)$
- C_3 = $\text{Cos } \theta_3$
- d_i = Jarak dari pusat sumbu koordinat ke (i-1) ke perpotongan sumbu Z_{i-1} dengan sumbu X_i sepanjang sumbu Z_{i-1} .
- i = *Joint* ke-i
- ${}^{i-1}A_i$ = Matriks transformasi, matriks transformasi *homogenous* Denavit-Hartenberg 4x4 yang melakukan transformasi kerangka kordinat $\{i\}$ relatif ke kerangka koordinat $\{i-1\}$
- ${}^{i-1}T_i$ = Matriks transformasi *homogenous*, matriks transformasi *homogenous* 4x4 dari kerangka koordinat $\{i\}$ relatif terhadap kerangka koordinat $\{i-1\}$
- L_2 = Panjang link 2
- L_3 = Panjang link 3
- P = (P_x, P_y, P_z)
- P_x = Posisi *end effector* pada sumbu X
- P_y = Posisi *end effector* pada sumbu Y
- P_z = Posisi *end effector* pada sumbu Z
- S_1 = $\text{Sin } \theta_1$
- S_2 = $\text{Sin } \theta_2$

$$S_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$S_3 = \sin \theta_3$$

Theta = θ atau sudut joint

t_{ij} = Elemen matriks transformasi *homogenous* 4×4 , i merupakan subskrip yang menyatakan baris, dan j subskrip yang menyatakan kolom

α_i = Alpha = Jarak sudut dari sumbu Z_{i-1} ke sumbu Z_i dengan poros sumbu X_i .

θ_i = Sudut pada *joint* dari sumbu X_{i-1} ke sumbu X_i dengan sumbu Z_{i-1} sebagai porosnya.