310000011476

PERENCANAAN TRAYEKTORI ROBOT

UNTUK APLIKASI PENULISAN HURUF

TUGAS AKHIR

MILIK PERPUSTAKAAN
ITS

Disusun oleh :

TONNY LEONARD
NRP : 2291 100 122

PERPUSTAKAAN
ITS
Tgl. Terima 6-3-00
Terima Dari H
No. Agenda Prp. 8996

RSE
629.892
Leo
p-1
1998

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1998

PERENCANAAN TRAYEKTORI ROBOT

UNTUK APLIKASI PENULISAN HURUF

TUGAS AKHIR

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

Mengetahui/Menyetujui

Dosen Pembimbing

DR.Ir. Achmad Jazidie, M.Eng
NIP. 131 647 788

SURABAYA
Oktober, 1998

buat keluargaku,

ABSTRAK

ABSTRAK

Salah satu aspek penting dalam pengendalian sebuah robot adalah perencanaan trayektori, yaitu perencanaan tentang lintasan yang akan dilalui oleh *end-effector* dalam ruang kerjanya. Perencanaan ini dipakai jika robot diinginkan untuk melalui banyak posisi dengan menjaga gerakan robot tetap mulus pada saat melalui posisi-posisi tersebut. Dalam tugas akhir ini diusulkan perencanaan trayektori untuk penulisan sebuah huruf ataupun kata dengan menambahkan posisi-posisi yang harus dilewati dalam koordinat Cartesian. Data posisi diperoleh dengan membangun sebuah file yang berisi posisi-posisi yang harus dilalui end-effector. Selanjutnya dalam tugas akhir ini juga dikembangkan sebuah program untuk mensimulasikan gerakan robot dalam koordinat Cartesian yang membentuk tulisan sebuah huruf atau kata, yang pada akhirnya akan diperoleh nilai-nilai sudut joint yang sesuai dengan lintasan end-effector yang dinginkan. Untuk implementasi real time, nilai sudut joint yang diperoleh dijadikan sebagai referensi trayektori joint.

The whole earth is my birthplace and all humans are my brothers.
(Kahlil Gibran, 1883-1931)

KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan yang Maha Pengasih dan Penyayang, yang telah melimpahkan rahmat dan petunjukNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana Jurusan Teknik Elektro.

Dalam menyusun tugas akhir ini, penulis mendapat bimbingan serta bantuan atau saran dari berbagai pihak. Dengan terselesaikannya tugas akhir ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada :

- Bapak Dr. Ir. Achmad Jazidie M.Eng., selaku Dosen Pembimbing dalam penyusunan tugas akhir ini yang telah banyak sekali memberikan arahan, nasehat, bimbingan dan semangat kepada penulis.
- Bapak Dr. Ir. Moch Rameli , selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan yang telah banyak memberikan fasilitas kepada penulis.
- Bapak dan ibu dosen pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan pada khususnya dan Jurusan Teknik Elektro pada umumnya.
- Keluarga besarku, Mami, Papa, Cus Henny & mas Yudi, Yance & Bibit, Wawan, Pipit, Frans dan Ema, yang telah memberikan segalanya bagi penulis.
- Rekan-rekan di Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Ancha, Johan, Zul, Kojar, Yusuf, Adi, Wambe, Wiku, Dron, Mak, Endah,

Gundul, Felix, Yoyok, Sahal, Abed, Okim, Dodo, Lasman, Witwot, Ateng, Ople, Yana dll. atas segala spirit dan dukungannya.

- Rekan-rekan Elektro ITS khususnya E-31 dimanapun berada, atas segala hiburan, dukungan maupun gangguan yang diberikan selama masa kuliah penulis.
- Rekan-rekan Smalapala, Pay, Aries, Chiang, Eko, Tommy, Catur, Ponti, Ableh, Joko, Firjik, Azis, Diah, Nur, Ratih dll. yang selalu mengingatkan penulis bahwa waktunya telah tiba.
- *Friends of mine*, Ririn, Alfi, Sonny atas pelajaran yang dilewati bersama.
- Christ yang selalu menemani penulis.
- Semua pihak yang membantu terselesaikannya Tugas Akhir ini yang tidak mungkin untuk disebutkan satu-persatu .

Besar harapan penulis semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi para pembaca pada umumnya serta mahasiswa Teknik Elektro pada khususnya. Penulis menyadari segala kekurangan yang ada sehingga tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu kritik dan saran selalu penulis harapkan.

Surabaya, Agustus 1998

Penulis.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

	halaman
strak	ii
ta pengantar	iii
ftar isi	v
ftar gambar	viii
B I	
NDAHULUAN	1
Latar belakang	1
Rumusan masalah	2
Batasan masalah	2
Tujuan	3
Sistematika pembahasan	3
B II	
NEMATIKA	5
. Kinematika Instantaneous	5
. Perpindahan Virtual	8
B III	
RAYEKTORI ROBOT	10
1 Perencanaan dalam koordinat joint	10
2 Perencanaan dalam koordinat Cartesian	11

3. Kendala-kendala (constraints) dalam perencanaan trayektori 11

3.3.1. Persamaan polinomial orde tiga (cubic polinomial) 13

3.3.2. Persamaan polinomial orde lima 16

AB IV

ERENCANAAN TRAYEKTORI UNTUK PENULISAN HURUF 20

1. Pembangkitan batasan-batasan (constraints) posisi 20

2. Transformasi koordinat screen ke koordinat Cartesian 21

3. Translasi koordinat untuk penulisan huruf 23

AB V

NALISA HASIL SIMULASI 26

1. Simulasi penulisan huruf 'e' 27

2. Simulasi penulisan kata 'elits' 32

AB VI

ENUTUP 37

1. Kesimpulan 37

1. Saran 37

AFTAR PUSTAKA 39

AMPIRAN 40

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

		halaman
Gambar 2.1	Manipulator planar dengan 2 derajat kebebasan	6
Gambar 2.2	Perpindahan virtual pada end-effector dan tiap joint	8
Gambar 3.1	Blok diagram pengaturan robot dalam koordinat Cartesian	11
Gambar 3.2	Lintasan robot untuk meghindari rintangan	12
Gambar 4.1.	Posisi hasil scanning huruf e relatif terhadap koordinat screen	22
Gambar 4.2.	Posisi huruf a relatif terhadap koordinat kartesian	23
Gambar 4.3.	Translasi koordinat huruf	24
Gambar 4.4.	Translasi dan transisi koordinat huruf	25
Gambar 5.1	Konfigurasi awal robot	26
Gambar 5.2	Posisi referensi pada sumbu koordinat x-y	27
Gambar 5.3	Posisi hasil simulasi pada sumbu koordinat x-y	28
Gambar 5.4	Grafik posisi x terhadap waktu	29
Gambar 5.5	Grafik posisi x terhadap waktu	30
Gambar 5.6	Grafik posisi sudut joint terhadap waktu	31
Gambar 5.7	Posisi referensi pada sumbu koordinat x-y	32
Gambar 5.8	Posisi hasil simulasi pada sumbu koordinat x-y	32
Gambar 5.9	Grafik posisi x terhadap waktu	33
Gambar 5.10	Grafik posisi y terhadap waktu	34
Gambar 5.11	Grafik posisi sudut joint terhadap waktu	

35

O. alangkah dalamnya kekayaan, hikmat dan pengetahuan Allah
sungguh tak terselidiki keputusan-keputusanNya dan sungguh tak terselami jalan-jalanNya
Sebab siapakah yang mengetahui pikiran Tuhan ?
Ataukah siapakah yang pernah menjadi penasihatNya ?
Atau siapakah yang pernah memberikan sesuatu kepadaNya sehingga ia harus menggantikannya

(Rm 13:33-35)

BAB I

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Dalam melaksanakan tugasnya, seringkali lintasan yang dilalui robot didefinisikan dalam koordinat Cartesian, sementara pengaturan gerakan sebuah robot pada dasarnya adalah pengaturan gerakan pada tiap joint. Berbagai penelitian telah dikembangkan untuk merencanakan trayektori dalam koordinat Cartesian, antara lain perencanaan trayektori untuk menghindari rintangan dalam ruang kerja dengan memperlakukannya sebagai permasalahan geometri (Moravec, 1980; Lozano-Perez, 1983; Brooks dan Lozano-Perez, 1985). Pengaturan dengan waktu minimum melalui lintasan yang telah ditentukan (Bobrow, 1985).

Penulisan sebuah huruf atau kalimat adalah sebuah tugas sehari-hari yang dengan mudah dapat dilakukan manusia. Dengan kemampuan motorik dan kemampuan untuk berpikir yang dimiliki oleh manusia, menulis huruf adalah sebuah pekerjaan sederhana yang tidak begitu rumit untuk dilaksanakan. Sehubungan dengan kemampuan robot yang terbatas baik dalam melakukan sebuah gerakan maupun dalam proses pengambilan sebuah keputusan, apalagi jika dibandingkan dengan organ tubuh yang dimiliki manusia untuk melakukan sebuah gerakan maupun pengambilan keputusan, tugas ini adalah sebuah tugas yang tidak mudah bagi sebuah robot. Dalam hal ini dibutuhkan sebuah proses perhitungan yang cukup panjang dan rumit , dengan melibatkan banyak fungsi

matematis maupun pemrosesan oleh komputer sebelum robot bisa digunakan untuk menjalankan tugas tersebut.

Untuk tujuan pengaturan gerak robot supaya membentuk sebuah lintasan huruf, diperlukan sebuah perencanaan trayektori dengan memperhitungkan posisi-posisi yang dilewati dan menghubungkan posisi-posisi yang dilalui dengan menggunakan persamaan matematis tertentu, sehingga diperoleh suatu gerakan yang halus. Trayektori yang dihasilkan dapat digunakan untuk menghasilkan sinyal referensi bagi robot untuk tiap-tiap joint dalam aplikasi yang lebih lanjut. Sejauh ini, setidaknya di Indonesia, belum ada penelitian khusus tentang perencanaan trayektori untuk penulisan huruf atau kata. Hal ini boleh jadi disebabkan perencanaan trayektori untuk penulisan huruf atau kata dianggap sebagai kasus khusus dari perencanaan trayektori secara umum.

1.2. RUMUSAN MASALAH

Masalah yang hendak diselesaikan dalam tugas akhir ini bisa dirumuskan sebagai berikut:

a. Bagaimana menentukan strategi gerakan *end-effector* untuk menempuh suatu lintasan sehingga membentuk suatu huruf atau kata tertentu.
b. Bagaimana mengubah gerakan *end-effector* yang sudah diperoleh dari (a) menjadi gerakan joint yang sesuai.

1.3. BATASAN MASALAH

Pada tugas akhir ini bidang yang akan digunakan untuk menulis adalah bidang x-y dalam koordinat kartesian, sementara huruf yang dapat dituliskan adalah huruf kecil a-z maupun huruf kapital A-Z. Dalam pembahasannya, diasumsikan juga bahwa gerakan robot tidak mempunyai pembatasan joint (*joint limitation*).

1.4. TUJUAN

Tujuan dari tugas akhir ini adalah mengembangkan sebuah perencanaan trayektori robot yang dimulai langsung dari gerakan *end-effector* yang akan membentuk sebuah huruf atau kata. Kemudian dengan perhitungan yang didasarkan pada algoritma kendali kinematika, akhirnya akan diperoleh nilai-nilai joint (lintasan joint) yang bersesuaian dengan lintasan *end-effector* yang dikehendaki.

1.5. SISTEMATIKA PEMBAHASAN

Pada Tugas Akhir ini penulis membagi buku dalam beberapa bagian. Urutan pembahasan yang dilakukan adalah sebagai berikut.

Pembahasan latar belakang pengambilan judul, permasalahan yang dihadapi, batasan permasalahan yang akan dicapai dan sistematika pembahasan diberikan pada bab 1.

Bab 2 membahas teori yang berkaitan dengan permasalahan kinematika robot. Penjelasan tentang matriks transformasi, *kinematika instantaneous* dan hubungan gaya dan torsi joint dibahas pada bagian ini.

Kemudian pembahasan tentang perencanaan trayektori yang menjadi dasar bagi gerakan robot dalam ruang kerjanya akan dibahas pada bab 3. Pada bagian ini dibahas pula beberapa metode yang sering dipergunakan dalam pembangkitan sebuah trayektori.

Pada bab 4 dibahas tentang perancangan trayektori yang dipakai dalam tugas akhir ini, yang dibuat dengan mengacu pada pembahasan pada bab sebelumnya serta metode yang digunakan dalam tugas akhir ini.

Hasil simulasi dan analisa dari program yang telah dibuat diberikan pada bab 5.

Akhirnya, pada bab 6 diberikan kesimpulan yang didapat setelah semua pembahasan diatas dan saran untuk pengembangan lebih lanjut tentang masalah yang berkaitan dengan Tugas Akhir ini.

We have been created to love and to be loved.
(Mother Teresa, 1910-1997)

BAB II

MILIK PERPUSTAKAAN
ITS

BAB II

KINEMATIKA ROBOT

Sebuah manipulator dapat dimodelkan sebagai rangkaian terbuka benda tegar (link) yang dihubungkan secara serial dengan joint revolute maupun prismatic yang digerakkan oleh actuator. Gerakan relatif joint akan menyebabkan gerakan pada *end-effector* menuju posisi dan orientasi yang diinginkan.

Kinematika robot berhubungan dengan studi terhadap analisa geometri gerakan robot terhadap sistem koordinat referensi yang tetap tanpa memandang gaya ataupun torsi yang menyebabkan gerakan dari manipulator.

Pada bagian ini akan dibahas kinematika robot dengan titik berat pembahasan pada kinematika *instantaneous*.

2.1. KINEMATIKA INSTANTANEOUS

Ditunjukkan manipulator planar dengan 2 derajat kebebasan seperti pada Gambar 2.1.

Persamaan kinematika yang menghubungkan posisi *end-effector* (x,y) ke posisi joint (θ_1,θ_2) diberikan :

$$x(\theta_1,\theta_2) = l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{2.1}$$

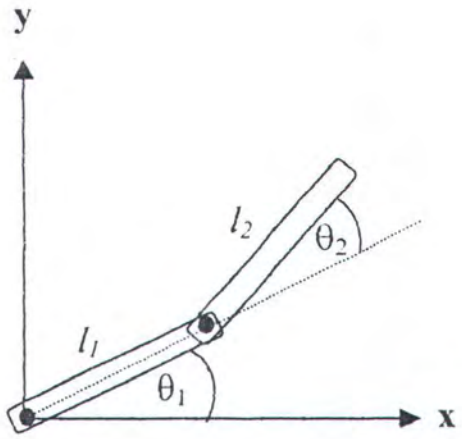
$$y(\theta_1,\theta_2) = l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{2.2}$$

dengan mendiffrensialkan kedua persamaan diatas, diperoleh :

$$dx = \left(\frac{\partial x(\theta_1, \theta_2)}{\partial \theta_1} d\theta_1 \right) + \left(\frac{\partial x(\theta_1, \theta_2)}{\partial \theta_2} d\theta_2 \right) \tag{2.3}$$

$$dy = \left(\frac{\partial y(\theta_1, \theta_2)}{\partial \theta_1} d\theta_1 \right) + \left(\frac{\partial y(\theta_1, \theta_2)}{\partial \theta_2} d\theta_2 \right) \tag{2.4}$$

dimana $dx_e = [dx \quad dy]^T$ dan $d\theta = [d\theta_1 \quad d\theta_2]^T$ adalah vektor perpindahan yang sangat kecil (displacement) dari *end-effector* dan joint.



Gambar 2.1 Manipulator planar dengan 2 derajat kebebasan

Generalisasi persamaan (2.3) dan (2.4), untuk manipulator dengan n derajat kebebasan dan dimensi *end-effector* space adalah m diberikan sebagai :

$$dx_e = Jd\theta \tag{2.5}$$

disini

$$dx_e = [dx_1 \quad dx_2 \quad \ldots \quad dx_m]^T \tag{2.6}$$

adalah turunan dari vektor posisi dan orientasi *end-effector*, dan

$$d\theta = [d\theta_1, d\theta_2, \ldots d\theta_n]^T \tag{2.7}$$

serta J adalah matriks Jacobian ($m \, x \, n$)

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \theta_1} d\theta_1 & \frac{\partial x_1}{\partial \theta_2} d\theta_2 & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial \theta_n} d\theta_n \\ \frac{\partial x_2}{\partial \theta_1} d\theta_1 & \frac{\partial x_2}{\partial \theta_2} d\theta_2 & \dots & \frac{\partial x_2}{\partial \theta_2} d\theta_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial x_m}{\partial \theta_1} d\theta_1 & \frac{\partial x_m}{\partial \theta_2} d\theta_2 & \dots & \frac{\partial x_m}{\partial \theta_n} d\theta_n \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

Matriks Jacobian merepresentasikan hubungan yang sangat kecil antara posisi joint dengan posisi dan orientasi *end-effector*.

Matriks J berisi turunan parsial dari fungsi $x(\theta_1, \theta_2)$ terhadap penempatan joint θ_1 dan θ_2. Matriks J disebut sebagai manipulator Jacobian. Matriks Jacobian merepresentasikan hubungan yang sangat kecil antara penempatan joint dengan posisi *end-effector*.

Dengan membagi kedua sisi persamaan (2.5) dengan perubahan waktu yang sangat kecil, dapat diperoleh :

$$\frac{dx_e}{dt} = J \frac{d\theta}{dt} \tag{2.9}$$

atau lazim ditulis :

$$v = J\omega \tag{2.10}$$

Persamaan (2.10) menunjukkan hubungan antara kecepatan *end-effector* dan kecepatan joint yang ditentukan dengan manipulator Jacobian. Persamaan ini seringkali disebut sebagai persamaan kinematika *instantaneous*.

2.3. PERPINDAHAN VIRTUAL (VIRTUAL DISPLACEMENT)

Ditunjukkan sebuah perpindahan virtual pada tiap joint, $d\theta$ dan pada *end-effector*, dx_e dan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2. Perpindahan virtual adalah perpindahan sembarang yang sangat kecil pada sistem mekanik yang memenuhi batasan geometri dari sebuah sistem. Perpindahan virtual berbeda dengan perpindahan aktual, perpindahan virtual hanya memenuhi batasan geometri dan tidak harus memenuhi hukum gerakan yang lain.

Persamaan (2.5) dapat kita tulis ulang sebagai :

$$dx_e = Jd\theta \tag{2.11}$$

dengan dx_e adalah pemindahan *end-effector*. Diasumsikan bahwa torsi joint $\tau_i (i = 1,2,...,n)$ dan gaya serta momen pada ujung manipulator, $F_i (i = 1,2,...,m)$ bekerja pada manipulator sementara joint bergeser sebesar $d\theta_i$.

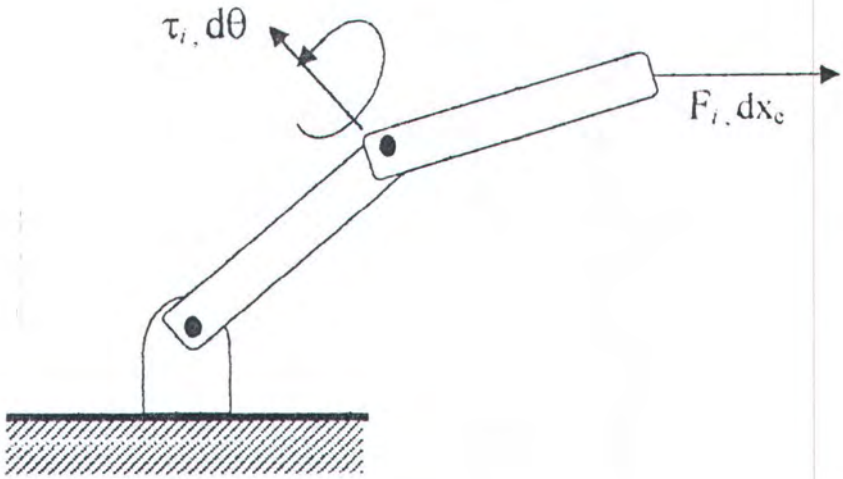
Perpindahan virtual yang dikerjakan oleh gaya dan momen diberikan sebagai :

$$dWork = \tau^T d\theta - F^T dx_e \tag{2.12}$$

Menurut prinsip kerja virtual (*virtual work*), rangkaian lengan dalam keadaan setimbang jika dan hanya jika kerja kerja virtual menghilang untuk perpindahan virtuil sembarang. Perpindahan virtuil $d\theta$ dan dx_e tidak independen tapi dihubungkan dengan manipulator Jacobian untuk memenuhi batasan geometri rangkaian lengan.

Dengan menggunakan (2.5) kita dapat menulis (2.12) sebagai :

$$dWork = \tau^T d\theta - F^T dx = \left(\tau - J^T F\right)^T d\theta \tag{2.13}$$



Gambar 2.2 Perpindahan virtual pada *end-effector* dan tiap joint

persamaan (2.13) hanya melibatkan $d\theta$, sebagai independen variabel untuk perpindahan geometri yang dapat diterima. Untuk menghilangkan kerja virtual, dapat dilakukan dengan menghilangkan $dWork$, sehingga persamaan (2.13) menjadi :

$$\tau = J^T F \tag{2.14}$$

Persamaan (2.14) menunjukkan hubungan torsi yang diberikan pada tiap joint dengan gaya pada *end-effector*, yang sering disebut sebagai hubungan gaya statis robot.

Boleh jadi ia dituntun kebijaksanaan dijalan yang berbelok-belok dahulu,
sehingga ia didatangi ketakutan dan getaran,
boleh jadi kebijaksanaan menyiksa dia dengan siasat
sampai dapat percaya padanya,
dan mengujinya dengan segala aturannya
Tetapi kemudian kebijaksanaan kembali kepadanya
dengan kebaikan yang menggembirakan,
dan menyingkapkan kepadanya pelbagai rahasia.

(Sir. 4:17-18)

BAB III

BAB III

TRAYEKTORI ROBOT

Jenis gerakan robot yang paling sederhana adalah gerakan titik ke titik (point to point). Pada gerakan ini, robot digerakkan dari kondisi awal ke kondisi akhir yang diinginkan tanpa memandang lintasan yang akan dilalui *end-effector*. Jenis gerakan ini cukup memadai jika ruang kerja robot bebas dari rintangan. Jika lintasan yang dilalui oleh *end-effector* harus melewati rintangan seringkali harus ditambahkan sebuah titik antara (*via point*), sehingga *end-effector* tidak menabrak rintangan yang ada.

Secara sistematik untuk perencanaan trayektori dapat dibagi menjadi dua, meliputi:

1. Perencanaan dalam koordinat joint
2. Perencanaan dalam koordinat cartesian

3.1. PERENCANAAN DALAM KOORDINAT JOINT

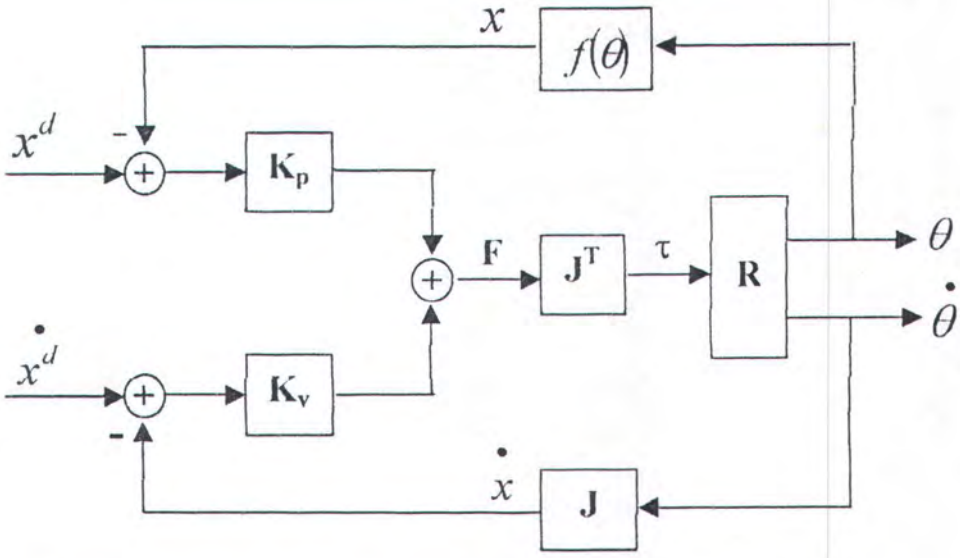
Dengan pendekatan ini, kendala-kendala (*constraints*) ditentukan dalam koordinat joint. Keuntungan dalam penggunaan pendekatan ini adalah bahwa perencanaan dapat langsung dilakukan pada tiap joint, yang dapat secara langsung digunakan sebagai acuan untuk tiap link sehingga dapat menghemat waktu komputasi yang diperlukan. Kekurangan dari pendekatan ini adalah, lintasan yang dilalui oleh *end-effector* tidak dapat diketahui.

MILIK PERPUSTAKAAN
ITS

3.2. PERENCANAAN DALAM KOORDINAT CARTESIAN

Pendekatan ini digunakan jika gerakan *end-effector* dinginkan untuk melewati lintasan tertentu dalam koordinat kartesian.

Diagram blok untuk pengendalian robot dalam koordinat kartesian dapat dilihat pada Gambar 3.1.

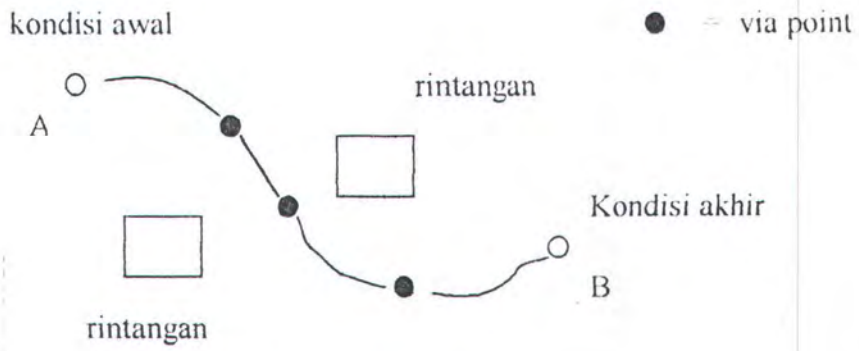


Gambar 3.1 Blok diagram pengaturan robot dalam koordinat Cartesian

3.3. KENDALA-KENDALA (CONSTRAINTS) DALAM TRAYEKTORI ROBOT

Untuk beberapa tujuan, seringkali robot dirancang untuk dapat menghindari rintangan yang ada, dengan cara menambahkan titik-titik diantara titik awal dan titik akhir lintasan. Pada titik-titik yang dilalui, harus dijaga kecepatan dan percepatan dari *end-effector* sehingga diperoleh gerakan *end-effector* yang cukup halus. Titik- titik yang dilewati dapat didekati dengan

menggunakan persamaan polinomial orde ke-n. Lintasan robot untuk menghindari rintangan dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2. Lintasan robot untuk menghindari rintangan

Secara umum lintasan robot dapat didekati dengan menggunakan persamaan polinomial orde ke-n. Untuk memperoleh kurva hasil interpolasi, digunakan kendala-kendala (*constraints*) tertentu yang harus dipenuhi untuk memperoleh persamaan kurva yang halus.

Pada bagian ini akan dibahas dua macam pendekatan yang sering dipakai dalam perencanaan trajectory robot, yaitu perencanaan dengan menggunakan persamaan polinomial orde ketiga (*cubic polynomial*) dan persamaan polinomial orde kelima.

Persamaan polinomial orde ke-n dapat ditulis sebagai:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \ldots.. + a_n t^n \qquad (3.1)$$

Dengan menurunkan persamaan diatas terhadap waktu, diperoleh persamaan kecepatan dan percepatan joint sebagai berikut:

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + ... + na_n t^{n-1} \tag{3.2}$$

$$\ddot{q}(t) = 2a_2 + 6a_3 t^2 + ... + n(n-1)a_n t^{n-2} \tag{3.3}$$

Dengan menggunakan kendala yang ada, maka harga-harga dari koefisien a_k dapat dicari, yang selanjutnya digunakan sebagai posisi, kecepatan dan percepatan referensi robot .

3.3.1. PERSAMAAN POLINOMIAL ORDE TIGA (CUBIC POLINOMIAL)

Pada bagian ini, akan dibahas pembangkitan trayektori dengan menggunakan persamaan polinomial orde tiga. Persamaan ini cukup memadai untuk menghasilkan trayektori dengan banyak via point berdasarkan pada kendala-kendala yang ada.

Secara umum persamaan posisi trayektori orde tiga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \tag{3.4}$$

dengan persamaan kecepatan:

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \tag{3.5}$$

Kendala-kendala yang ada pada titik awal dapat kita tulis:

$$q(t_0) = q_0$$

$$\dot{q}(t_0) = \dot{q}_0 \tag{3.6}$$

Untuk titik akhir trayektori:

$$q(t_f) = q_f$$

$$\dot{q}(t_f) = q_f \tag{3.7}$$

Dengan menggabungkan persamaan (3.4) sampai (3.7), dapat diperoleh empat persamaan dengan empat variabel yang tidak diketahui:

$$q_0 = a_0 + a_1 t_0 + a_2 t_0^2 + a_3 t_0^3 \tag{3.8}$$

$$\dot{q}_0 = a_1 + 2a_2 t_0 + 3a_3 t_0^2 \tag{3.9}$$

$$q_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \tag{3.10}$$

$$\dot{q}_f = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 \tag{3.11}$$

Persamaan (3.8) sampat (3.11) dapat ditulis dalam persamaan matriks menjadi :

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ \dot{q}_0 \\ q_f \\ \dot{q}_f \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

Dengan menyelesaikan persamaan (3.12), diperoleh:

$$a_0 = \Big\{ (t_f - t_0)\left[q_0 t_f^2 (t_f - 3t_0) - q_f t_0^2 (t_0 - 3t_f)\right] +$$

$$(t_f - t_0)^2 t_0 t_f \left[-\dot{q}_0 t_f - \dot{q}_f t_0 \right] \Big\} / \Delta \tag{3.13}$$

$$a_1 = \Big\{ (t_f - t_0) t_0 t_f \left[6q_0 - 6q_f\right] +$$

$$(t_f - t_0)^2 \left[\dot{q}_0 t_f (t_f + 2t_0) + \dot{q}_f t_0 (t_0 + 2t_f)\right] \Big\} / \Delta \qquad (3.14)$$

$$a_2 = \Big\{ (t_f - t_0)(t_f + t_0)\left[-3q_0 + 3q_f\right] +$$

$$(t_f - t_0)^2 \left[-\dot{q}_0 (t_0 + 2t_f) - \dot{q}_f (t_f + 2t_0)\right] \Big\} / \Delta \qquad (3.15)$$

$$a_3 = \Big\{ (t_f - t_0)\left[2q_0 - 2q_f\right] + (t_f - t_0)^2 \left[q_0 + q_f\right] \Big\} \Delta \qquad (3.16)$$

dimana, $\Delta = (t_f - t_0)^4$ merupakan determinan dari matriks persegi pada persamaan (3.12).

Didefinisikan:

$$t' = \left(\frac{t - t_0}{t_f - t_0} \right) \qquad (3.17)$$

sebagai waktu ternormalisasi, dimana $0 \le t' \le 1$.

Dengan mengeliminasi t pada persamaan (3.4) dan mensubstitusikan persamaan (3.13)-(3.16) ke persamaan (3.4) diperoleh persamaan trayektori polinomial orde tiga:

$$q(t') = (1 - t')^2 \left\{ q_0 + \left[2q_0 + \dot{q}_0^s \right] t' \right\} + (t')^2 \left\{ q_f + \left[2q_f - \dot{q}_f^s \right] (1 - t') \right\}$$

$$(3.18)$$

dimana, $\dot{q}^s = (t_f - t_0)\dot{q}$.

Persamaan (3.18) adalah persamaan polinomial orde tiga antara dua titik $\left[t_0, q_0, \dot{q}_0\right]$ dan $\left[t_0, q_f, \dot{q}_f\right]$. Jika persamaan yang diinginkan digunakan untuk melalui beberapa via point, persamaaan (3.18) dapat digunakan untuk menghasilkan trayektori antara dua titik yang berdekatan, misalnya $\left[t_k, q_k, \dot{q}_k\right]$ dan $\left[t_{k+1}, q_{k+1}, \dot{q}_{k+1}\right]$. Persamaan (3.18) dapat dimodifikasi menjadi:

$$q(t') = (1-t')^2 \left\{ q_k + \left[2q_k + \dot{q}_k^s \right] t' \right\} + (t')^2 \left\{ q_{k+1} + \left[2q_{k+1} - \dot{q}_{k+1}^s \right] (1-t') \right\} \tag{3.19}$$

dimana,

$$\dot{q}^s = (t_{k+1} - t_k)\dot{q},$$

$$t' = \left(\frac{t - t_k}{t_{k+1} - t_k} \right)$$

dengan k adalah bilangan integer $1 \le k \le (n-1)$, dengan n adalah jumlah via point yang telah ditentukan.

3.3.2. PERSAMAAN POLINOMIAL ORDE LIMA

Dengan menambahkan kendala percepatan pada persamaan trayektori, maka dipergunakan persamaan polinomial orde lima. Dengan prosedur seperti

pada polinomial orde tiga, persamaan trayektori untuk polinomial orde lima diperoleh(Koivo,A.,J.,1989):

$$q(t') = (1-t')^3 \left\{ q_0 + \left(3q_0 + \dot{q}_0^s \right) t' + \left(\ddot{q}_0^s + 6\dot{q}_0^s + 12q_0 \right) \frac{(t')^2}{2} \right\}$$

$$+ (t')^3 \left\{ q_f + \left(3q_f - \dot{q}_f^s \right)(1-t') + \left(\ddot{q}_f^s - 6\dot{q}_f^s + 12q_f \right) \frac{(1-t')^2}{2} \right\}$$

(3.20)

dimana,

$$\dot{q}^s = (t_f - t_0)\dot{q}$$

$$\ddot{q}^s = (t_f - t_0)^2 \ddot{q}$$

$$t' = \left(\frac{t - t_0}{t_f - t_0} \right), \; 0 \le t' \le 1$$

Untuk trayektori dengan beberapa via point:

$$q(t') = (1-t')^3 \left\{ q_k + \left(3q_k + \dot{q}_k^s \right) t' + \left(\ddot{q}_k^s + 6\dot{q}_k^s + 12q_k \right) \frac{(t')^2}{2} \right\} +$$

$$(t')^3 \left\{ q_{k+1} + \left(3q_{k+1} - \dot{q}_{k+1}^s \right)(1-t') + \left(\ddot{q}_{k+1}^s - 6\dot{q}_{k+1}^s + 12q_{k+1} \right) \frac{(1-t')^2}{2} \right\}$$

(3.21)

dimana,

$1 \le k \le (n-1)$, n jumlah via point

$$\dot{q}^s = (t_{k+1} - t_k)\dot{q}$$

$$\ddot{q}^s = (t_{k+1} - t_k)^2 \ddot{q}$$

$$t' = \left(\frac{t - t_k}{t_{k+1} - t_k}\right), \quad 0 \le t' \le 1$$

Dengan menguraikan persamaan (3.21) dapat diperoleh:

$$q(t) = (1-t')^3 q_k + (1-t')^3 t' \left(3q_k + \dot{q}_k^s\right) + (1-t')^3 (t')^2 \frac{1}{2}\left(\ddot{q}_k^s + 6\dot{q}_k^s + 12q_k\right) +$$

$$(t')^3 q_{k+1} + (t')^3 (1-t')\left(3q_{k+1} - \dot{q}_{k+1}\right) + (t')^3 (1-t')^2 \frac{1}{2}\left(\ddot{q}_{k+1}^s - 6\dot{q}_{k+1}^s + 12q_{k+1}\right)$$

(3.22)

misalkan:

$$A = \left(3q_k + \dot{q}_k^s\right)$$

$$B = \frac{1}{2}\left(\ddot{q}_k^s + 6\dot{q}_k^s + 12q_k\right)$$

$$C = \left(3q_{k+1} - \dot{q}_{k+1}\right)$$

$$D = \frac{1}{2}\left(\ddot{q}_{k+1}^s - 6\dot{q}_{k+1}^s + 12q_{k+1}\right)$$

Persamaan (3.22) dapat ditulis sebagai:

$$q(t') = q_k + (A - 3q_k)t' + (3q_k + B - 3A)(t')^2 + (3A - q_k - 3B + q_{k+1} + C + D)(t')^3$$

$$+ (3B - A - C - 2D)(t')^4 + (D - B)(t')^5 \qquad (3.23)$$

Persamaan (3.23) adalah persamaan polinomial orde lima untuk dua titik yang berdekatan $\left[t_k, q_k, \dot{q}_k, \ddot{q}_k\right]$ dan $\left[t_{k+1}, q_{k+1}, \dot{q}_{k+1}, \ddot{q}_{k+1}\right]$.

Dengan menurunkan persamaan diatas terhadap waktu, diperoleh persamaan kecepatan :

$$\dot{q}(t') = (A - 3q_k) + 2(3q_k + B - 3A)(t') + 3(3A - q_k - 3B + q_{k+1} + C + D)(t')^2$$

$$+ 4(3B - A - C - 2D)(t')^3 + 5(D - B)(t')^4 \qquad (3.24)$$

dan percepatan :

$$\ddot{q}(t') = 2(3q_k + B - 3A) + 6(3A - q_k - 3B + q_{k+1} + C + D)(t')$$

$$+ 12(3B - A - C - 2D)(t')^2 + 20(D - B)(t')^3 \qquad (3.25)$$

Persamaan (3-23)-(3.25) adalah persamaan yang dipakai untuk membangkitkan trayektori robot berdasarkan persamaan polinomial orde lima yang dipakai dalam Tugas Akhir ini.

MILIK PERPUSTAKAAN ITS

Apa yang tidak pernah dilihat oleh mata, dan tidak pernah didengar oleh telinga, dan yang tidak pernah timbul dalam hati manusia; semua yang disediakan Allah untuk mereka yang mengasihi Dia.

(I Kor. 2:9)

BAB IV

BAB IV

PERENCANAAN TRAYEKTORI UNTUK PENULISAN HURUF

Pembangkitan trayektori untuk penulisan sebuah huruf dapat dipandang sebagai trayektori dengan n posisi antara. Dengan melalui posisi-posisi antara yang telah diberikan, *end-effector* dapat bergerak mengikuti lintasan sebuah huruf.

4.1. PEMBANGKITAN KENDALA-KENDALA (CONSTRAINTS) POSISI

Kendala-kendala (*constraints*) posisi untuk tiap huruf, diperoleh dengan melakukan *'scanning'* hasil tampilan huruf pada mode grafik fungsi pustaka yang disediakan oleh Turbo C++ 3.0. Dari hasil scanning data yang diperoleh, data diurutkan dengan menentukan posisi awal penulisan huruf. Untuk proses pengurutan huruf, huruf yang ada dapat dibagi menjadi dua kasus.

1. Untuk kasus yang pertama, huruf yang ditulis adalah huruf yang kontinyu, dalam artian proses penulisan untuk tiap posisi cukup dilakukan sekali tanpa melewati lintasan yang sama. Sebagai contoh adalah huruf *'a'*, *'b'* dan huruf *'e'*.
2. Untuk kasus kedua, huruf yang ditulis adalah huruf yang tidak kontinyu, dimana proses penulisan pada posisi tertentu akan melewati posisi yang sama lebih dari sekali. Sebagai contoh adalah huruf *'A'*,*'B'* dan huruf *'E'*

Untuk kasus yang pertama, setelah penentuan posisi awal posisi berikutnya diperoleh dengan mencari posisi terdekat dari posisi sebelumnya. Penentuan posisi terdekat diperoleh dengan menggunakan rumus jarak :

$$d_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \qquad (4.1)$$

Untuk kasus kedua dengan cara yang sama, jika ditemui posisi yang jaraknya sama akan dipilih posisi yang dapat meminimalkan pengulangan, pemilihan dilakukan secara manual.

Pada file ditambahkan kendala-kendala (*constraints*) waktu untuk tiap posisi. Waktu yang dipakai dalam file adalah waktu ternormalisasi, dimana $0 \le t_{ternormalisasi} \le 1$, sebagaimana telah dibahas sebelumnya. Besarnya waktu ternormalisasi pada posisi ke-k untuk tiap huruf dihitung dengan menggunakan:

$$t(k)_{ternormalisasi} = k * \left(\frac{1}{jumlahdata} \right) \qquad (4.2)$$

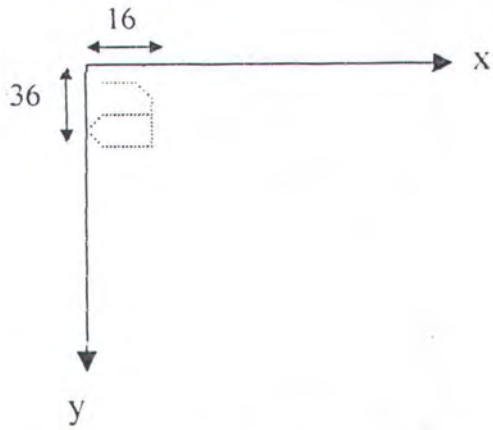
dimana *jumlahdata* adalah jumlah constraint posisi tiap huruf.

4.2. TRANSFORMASI KOORDINAT SCREEN KE KOORDINAT CARTESIAN

Hasil *'scanning'* dalam koordinat '*screen*' mempunyai koordinat yang berbeda dengan koordinat kartesian. Sistem koordinat *'scanning'* dapat dengan contoh posisi huruf koordinat huruf *'a'* dilihat pada Gambar 4.1.

Pada Gambar 4.1 ukuran huruf *'a'* adalah *16 x 36* dengan dimensi dalam *pixel*. Dari perolehan hasil scanning data yeng diperoleh untuk posisi x berkisar antara 0-16 dan posisi y berkisar antara 12-40. Dari data yang ada, maka lebar dan tinggi huruf yang dipakai ditentukan sebesar 20 dan 24 *pixel*.

ambar 4.1 posisi hasil scanning huruf a relatif terhadap koordinat screen



Gambar 4.1 Posisi hasil scanning huruf a relatif terhadap koordinat screen

Karena koordinat diatas sumbu y tidak memiliki nilai negatif dan posisi untuk y positif berlawanan arah dengan sumbu kartesian, dilakukan transformasi sumbu koordinat posisi huruf posisi y dengan menggunakan rumus:

$$y_{new} = (-y_{old}) + C \tag{4.3}$$

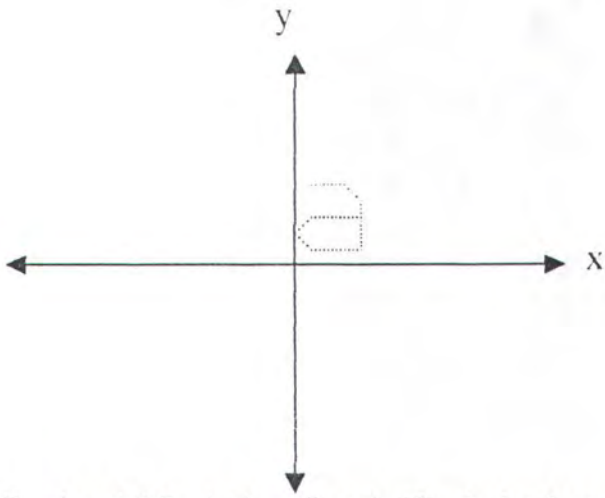
dimana C sebuah adalah kostanta yang menentukan jarak posisi terbawah dari huruf terhadap sumbu y. Harga C di atur sebesar 40, dengan memperhatikan tinggi dari huruf hasil *'scanning'*.

Posisi baru hasil transformasi dapat dilihat pada Gambar 4.2.

Satuan pixel dalam file yang ada diubah menjadi satuan meter dengan menggunakan :

$$p_{new} = p_{old} / 100 \tag{4.4}$$

sehingga lebar dan tinggi untuk tiap huruf adalah 0,2 x 0,4 m.



Gambar 4.2 Posisi huruf a relatif terhadap koordinat kartesian

4.3. TRANSLASI KOORDINAT UNTUK PENULISAN HURUF

Karena semua posisi huruf yang tersimpan memiliki range posisi yang sama, untuk dapat menuliskan huruf secara teratur, diperlukan translasi untuk meggeser posisi dengan awal huruf. Proses pergeseran huruf dapat dilihat pada Gambar 4.3. Besar harga translasi ditentukan dengan mengacu pada posisi awal huruf yang akan ditulis dan jumlah huruf yang akan ditulis.

Pada kondisi awal, *end-effector* berada pada posisi (x_{awal}, y_{awal}), kemudian bergerak menuju posisi awal huruf pertama yang akan ditulis.

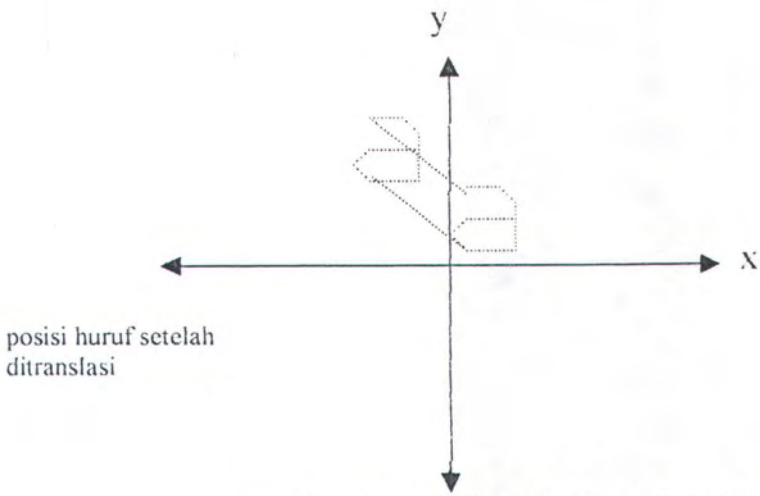
Harga translasi untuk penulisan huruf ke-k dihitung dengan :

$$x(k)_{translasi} = -\frac{(nxlebar)}{2} + \left(\frac{k}{2} - 1\right)xlebar \tag{4.5}$$

$$y(k)_{translasi} = C_y \tag{4.6}$$

dimana n jumlah huruf yang ingin dituliskan, *lebar* adalah lebar dari huruf dan C_y konstanta. Untuk transisi antar huruf berikutnya *end-effector* mengambil

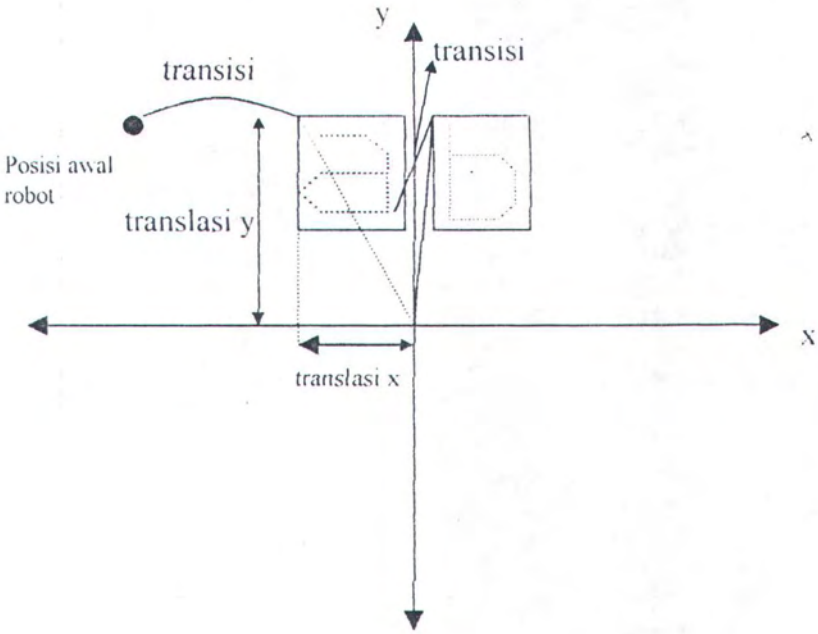
posisi awal dari harga terakhir huruf yang ditulis, menuju posisi awal huruf berikutnya.



Gambar 4.3 Translasi koordinat huruf

Semua proses gerakan dari posisi awal ke posisi akhir dilakukan dengan menggunakan persamaan polinomial orde 5 dengan mengacu pada pembahasan bab sebelumnya.

Gambaran lengkap untuk proses penentuan translasi maupun transisi tiap huruf dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Translasi dan transisi koordinat huruf

We can do no great things, only small things with great love
(Mother Teresa, 1910-1997)

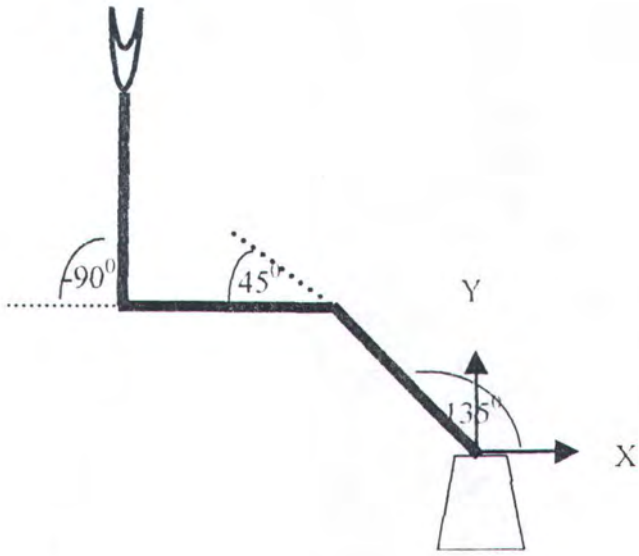
BAB V

BAB V

ANALISA HASIL SIMULASI

Untuk mengevalusi program yang telah dibuat, pada bagian ini akan ditampilkan hasil simulasi program untuk kasus penulisan huruf maupun penulisan kata. Pada simulasi yang pertama robot digunakan untuk menuliskan sebuah huruf '*e*', sedang simulasi yang kedua robot digunakan untuk menuliskan sebuah kata '***elits***'

Untuk mempermudah perhitungan, digunakan jenis dan karakter link yang sama yaitu panjang link sebesar 0,25 m , massa 1 kg, dan momen inersia 4,3 kg.m^2. Konfigurasi awal dari robot dapat dilihat pada Gambar 5.1



Gambar 5.1 Konfigurasi awal robot

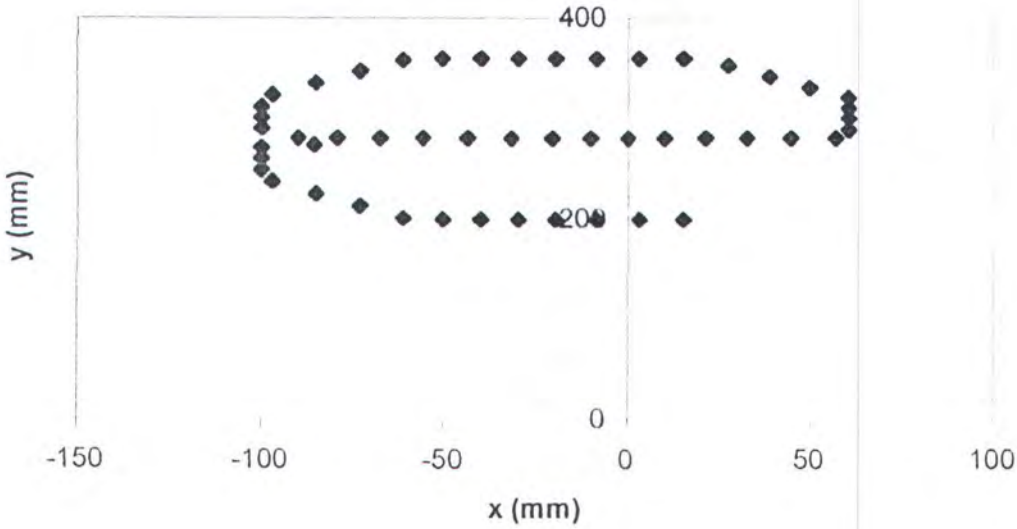
Pada simulasi yang dilakukan , tiap huruf diberi lebar dan tinggi masing-masing sebesar 0,2 m dan 0,4 m. Sebelum dan diantara penulisan huruf, disediakan waktu

transisi yang pada simulasi diberi waktu sebesar 2 detik. Sedangkan waktu untuk penulisan satu huruf adalah 5 detik, dengan waktu sampling yang dipakai 0,001 detik.

5.1. SIMULASI PENULISAN HURUF 'e'

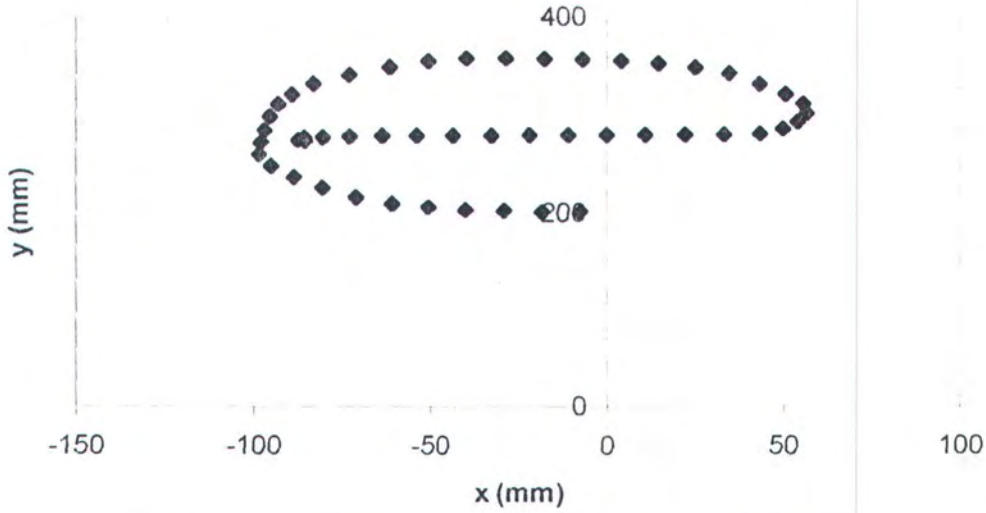
Pada simulasi yang pertama untuk penulisan huruf '*e*' *end-effector* bergerak dari posisi awal di titik (-0.4263, 0.4263) menuju posisi awal untuk penulisan huruf '*e*' di titik (-0.1, 0.28) selama 2 detik, kemudian mulai menulis huruf selama 5 detik.

Posisi referensi dan hasil simulasi posisi titik koordinat yang dilalui oleh *end-effector* dapat dilihat pada Gambar 5.2 dan Gambar 5.3. Untuk posisi referensi dan hasil simulasi pada arah sumbu x dan y dapat dilihat pada Gambar 5.4 dan 5.5. Sementara posisi tiap joint setiap waktu dapat dilihat pada Gambar 5.6



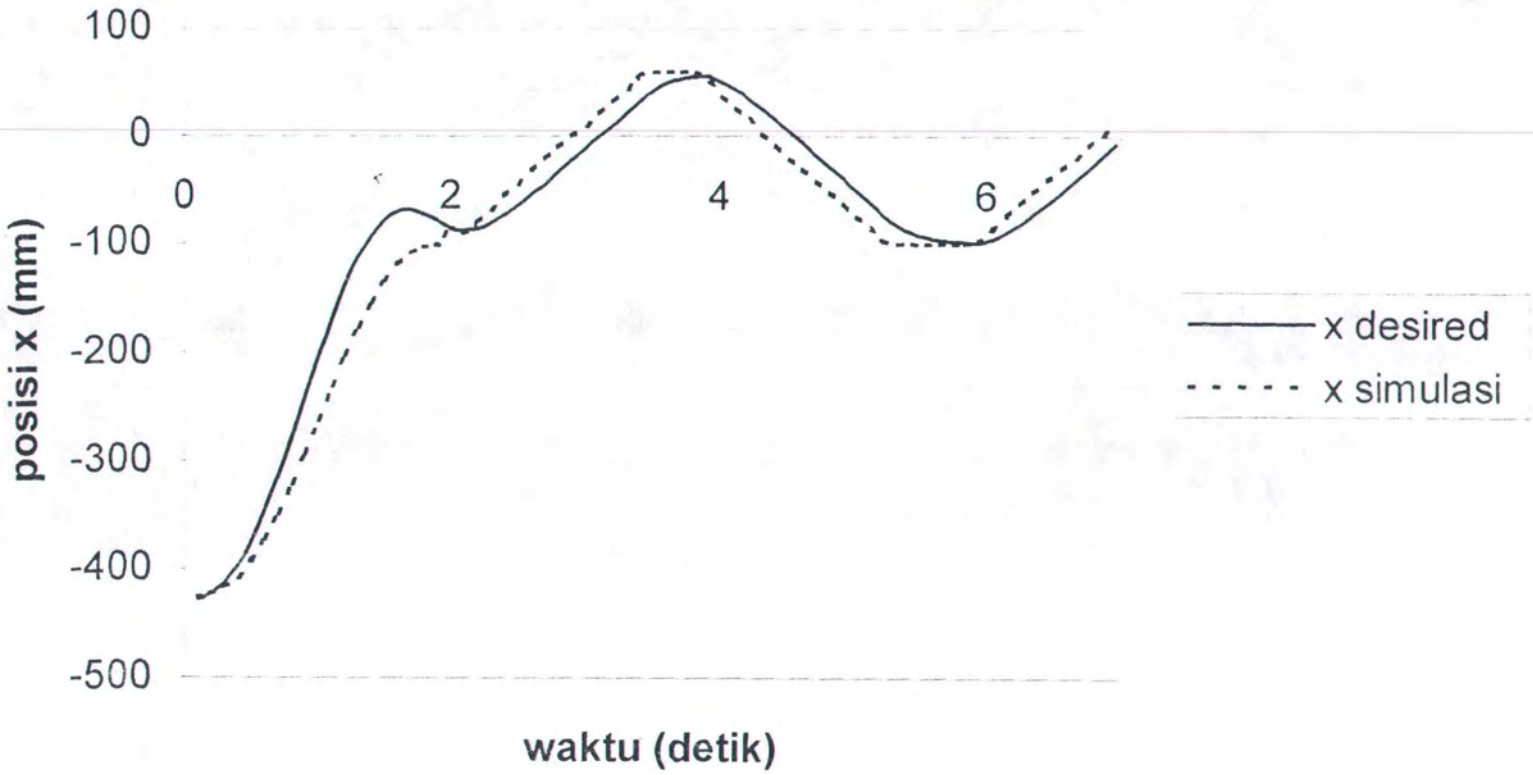
Gambar 5.2 Posisi referensi pada sumbu koordinat x-y

MILIK PERPUSTAKAAN ITS

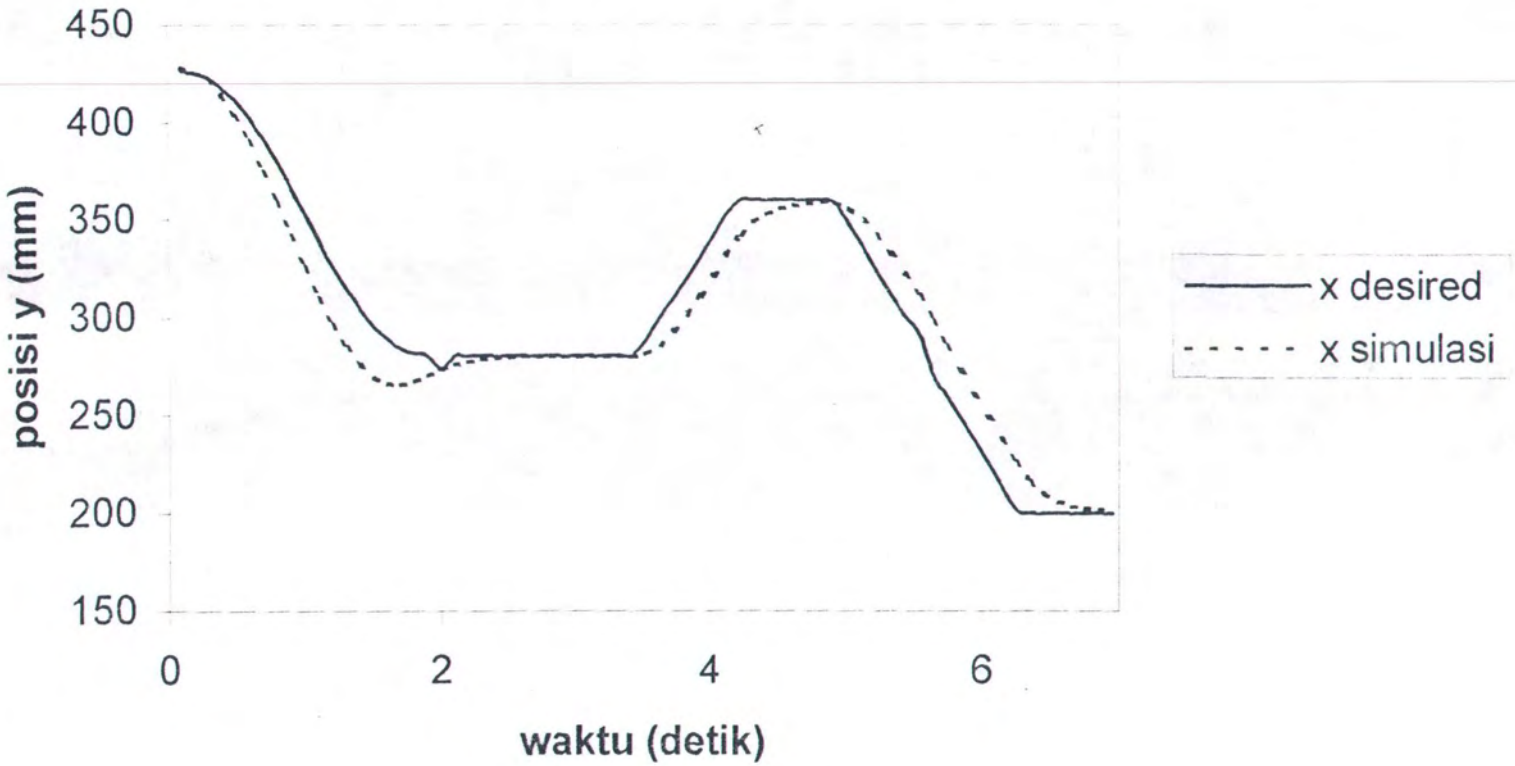


Gambar 5.3 Posisi hasil simulasi pada sumbu koordinat x-y

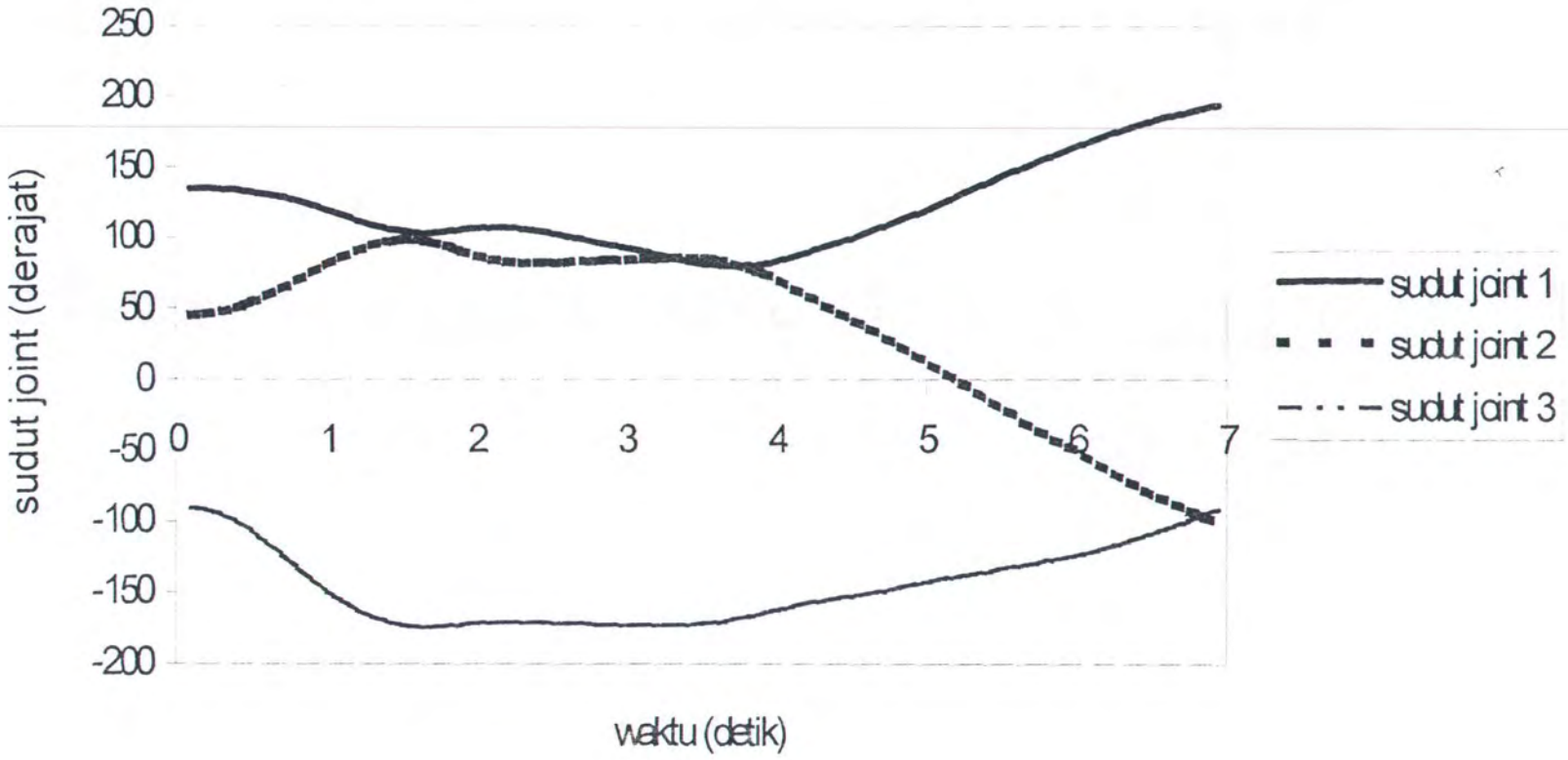
Untuk posisi *end-effector* sebagai fungsi waktu dapat dilihat pada Gambar 5.4 dan 5.5.



Gambar 5.4 Grafik posisi x terhadap waktu



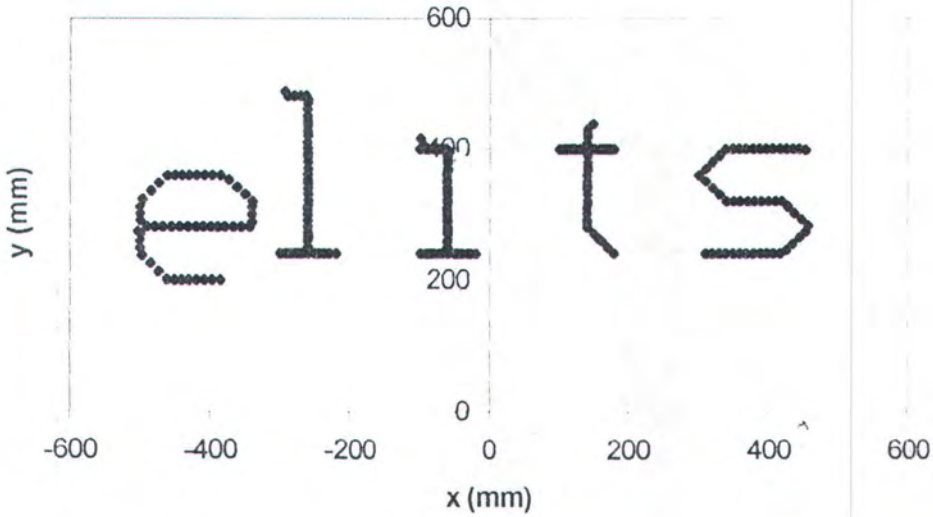
Gambar 5.5 Grafik posisi y terhadap waktu

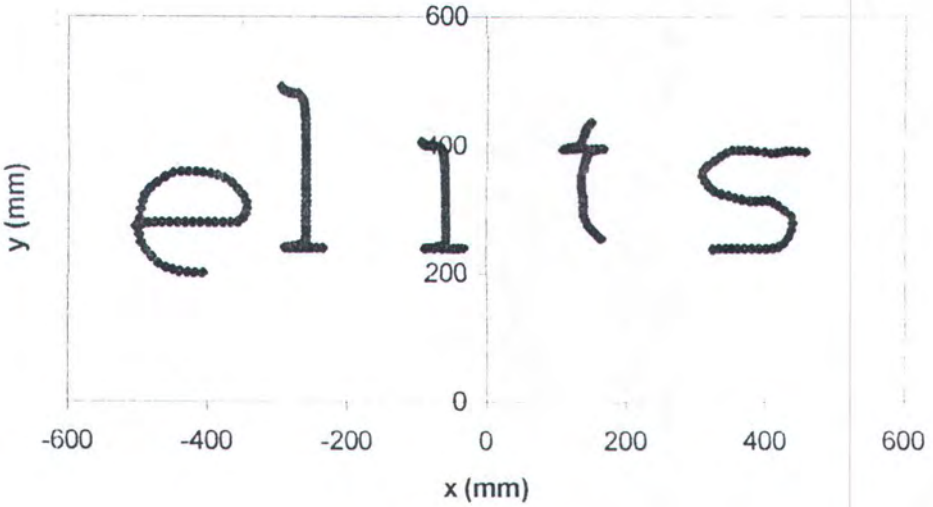


Gambar 5.6 Grafik posisi sudut joint terhadap waktu

5.2. SIMULASI PENULISAN KATA 'elits'

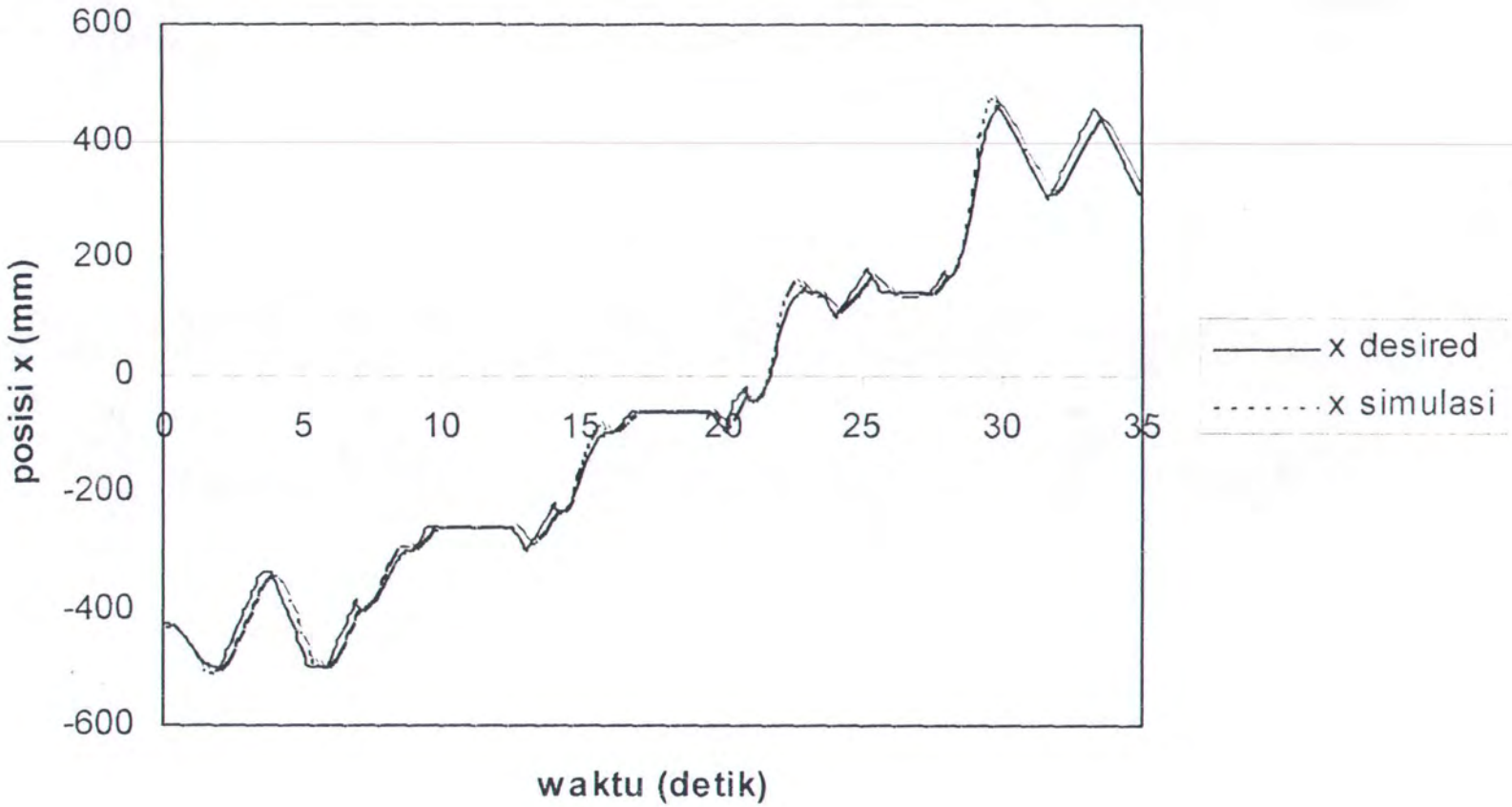
Pada simulasi ini, *end-effector* dipergunakan untuk menuliskan sebuah kata '***elits***'. Posisi referensi dan hasil simulasi dalam sumbu koordinat cartesian dapat dilihat pada Gambar 5.7 dan Gambar 5.8.



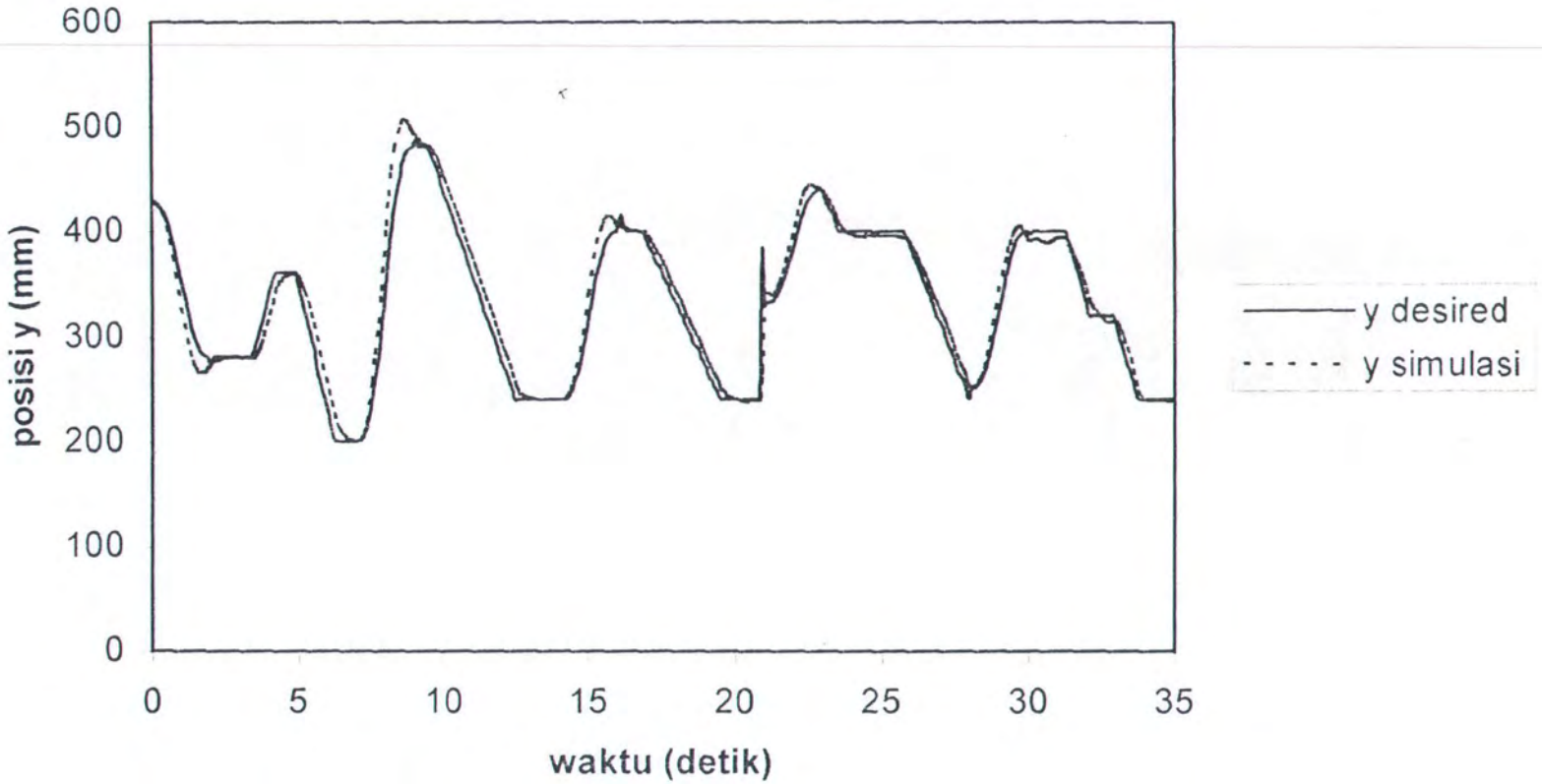


Gambar 5.7 Posisi referensi pada koordinat x-y

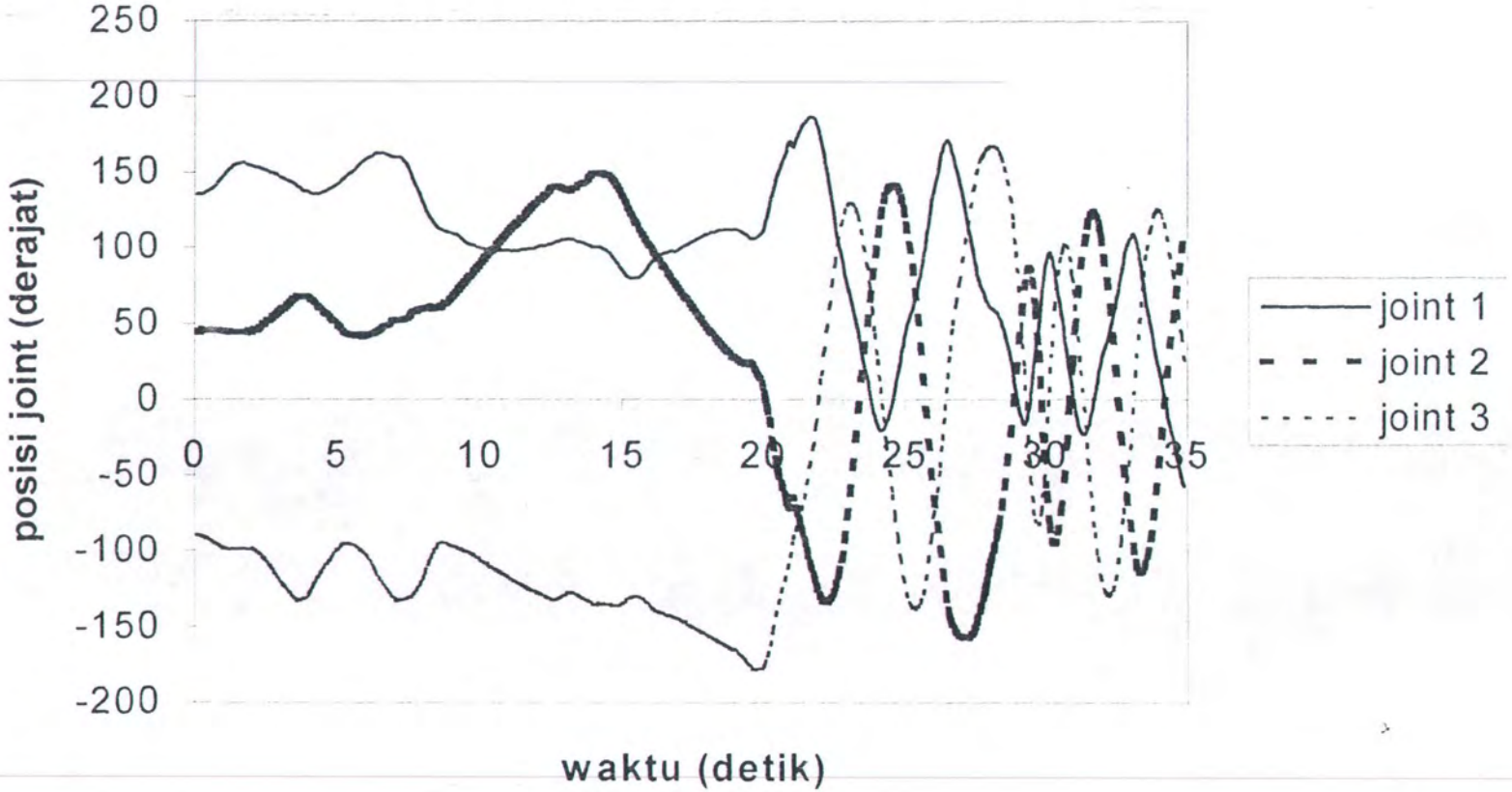
Gambar 5.8 Posisi hasil simulasi pada koordinat x-y



Gambar 5.9 Grafik posisi x terhadap waktu



Gambar 5.10 Grafik posisi y terhadap waktu



Gambar 5.11 Grafik posisi sudut joint terhadap waktu

Grafik posisi x dan posisi y sebagai fungsi waktu dapat dilihat pada Gambar 5.9 dan 5.10. Sementara dari Gambar 5.11 kita dapat melihat posisi tiap joint pada setiap waktu. Dari Gambar 5.11 dapat dilihat, bahwa meskipun perencanaan trayektori dilakukan dalam koordinat cartesian, tidak dijumpai lompatan yang cukup berarti dalam posisi joint.

BAB VI

BAB VI

PENUTUP

6.1. KESIMPULAN

Dari pembahasan yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan. Kesimpulan-kesimpulan tersebut adalah:

1. Pada tugas akhir ini telah dikembangkan suatu simulasi pembangkitan trayektori dengan banyak batasan yang digunakan sebagai trayektori untuk penulisan sebuah huruf maupun kata.
2. Dari hasil data yang diperoleh, meskipun pengaturan dilakukan dengan menggunakan koordinat cartesian, tidak terdapat lompatan harga yang berati setelah diubah dalam pada koordinat joint, sehingga dalam pengendalian gerakan melalui joint tidak akan dijumpai masalah yang cukup berarti.

6.2. SARAN

Saran-saran yang dapat diberikan dengan terselesaikannya tugas akhir ini adalah:

1. Dalam pengembangan lebih lanjut, perlu dikembangkan sebuah penelitian sehingga dalam aplikasinya robot dapat digunakan untuk menulis pada bidang

tulis yang bisa diubah-ubah, maupun untuk menulis berbagai karakter yang ada.

2. Perlunya dimasukkan dinamika robot dengan memasukkan gaya yang timbul karena adanya karena interaksi robot dengan lingkungan , karena dalam kenyataanya untuk dapat menuliskan sebuah huruf atau kata, *end-effector* harus berinteraksi dengan lingkungannya dalam hal ini adalah bidang tulis, sehingga robot dapat menulis dengan baik tanpa merusakkan pena yang ada di *end-effector*

DAFTAR PUSTAKA

MILIK PERPUSTAKAAN
ITS

DAFTAR PUSTAKA

An, C., H., Atkeson, C.,G., Hollerbach, J.,M., Model-based Control of a Robot Manipulator, MIT Press, 1988.

Asada, H. dan Slotine,J.E. Robot Analysis and Control, Massachusettes, John Wiley and Sons, Inc. ,1986.

Bobrow, J., E., Dubowsky, S., dan Gibson, J., S., Time Optimal of Control Robotic Manipulator Along Specified Path, Int. J. Robotic Research,4,3, 1985.

Jazidie, A., Modeling and Simulation Impedance Control of Redundant Manipulator Systems, Doctoral Dissertation, Facultty of Engineering Hiroshima, Hiroshima University, 1995.

Koivo, A., J., Fundamentals for Control of Robotic Manipulators, Canada, John Willey and Sons, Inc. ,1989.

Lozano-Perez, T., Spatial Planning : A Configuration Space Approach, IEEE Trans. Computers, 1983

Moravec, H., P., Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover, Doctoral Dissertation, Stranford University,1980.

Spong, M,. W. dan Vidyasagar, M. , Robot Dynamics and Control, Canada, John Wiley and Sons, Inc., 1989.

Wibowo, A.,B., Perancangan dan Pembuatan Program Simulasi Dinamik Lengan Robot dengan Menggunakan Metode Appel-Gibbs, Tugas Akhir, Teknik Elektro ITS, 1996.

A journey of thousand miles starts with a single step
and if that step is the right step,
it becomes the last step

(Lao Tzu)

LAMPIRAN

LAMPIRAN A: MODEL HURUF

abcdefghijkl

mnopqrstuvwx

yz

ABCDEFGHI

JKLMNOPQR

STUVWXYZ

RIWAYAT HIDUP

Tonny Leonard dilahirkan di Surabaya 5 Juni 1972, sebagai anak ke dua dari tujuh bersaudara keluarga Henry Eduard. Bertempat tinggal di Pakis Tirtosari 10A/1 Surabaya. Sejak tahun 1991 terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Riwayat pendidikan :

- TK YPKP Surabaya lulus tahun 1979
- SDN Pakis I Surabaya lulus tahun 1985
- SMPN 10 Surabaya lulus tahun 1988
- SMAN 5 Surabaya lulus tahun 1991

Pada bulan Agustus 1998 mengikuti seminar dan ujian Tugas Akhir di bidang studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro.