12116/ITS/H/2000

PERENCANAAN DAN PEMBUATAN ROBOT PLANAR DIRECT DRIVE DUA DERAJAT KEBEBASAN

TUGAS AKHIR

PERPUSTAKAAN
ITS

Tgl. Terima	31-7-2000
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	21.1421

RSE
629.892
Neg
p-1
2000

OLEH:

ABED NEGO

2293 100 097

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA

2000

MILIK PERPUSTAKAAN
ITS

PERENCANAAN DAN PEMBUATAN ROBOT PLANAR DIRECT DRIVE DUA DERAJAT KEBEBASAN

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
PEBRUARI 2000

buat bumi Papua tercinta,

ABSTRAK

ABSTRAK

Untuk pengujian sebuah algoritma kontrol yang telah dikembangkan, diperlukan sebuah robot eksperimen yang dapat mewakili gambaran robot yang sebenarnya. Robot tersebut harus memuat semua faktor yang mempengaruhi dinamika robot. Direct Drive Robot (DD Robot) dibangun untuk mengatasi beberapa keterbatasan kinerja akibat penggunaan *gear* pada robot dengan mengkopel link secara langsung ke poros motor. Dengan penghilangan gear, maka kerugian torsi yang ditimbulkan karena efek pemakaian gear dapat ditekan, sehingga torsi yang dihasilkan motor dapat digunakan untuk mengendalikan link robot

Dalam tugas akhir ini perancangan dan pembuatan robot akan diimplementasikan dalam bentuk robot planar direct drive dua derajat kebebasan.

Segala perkara dapat kutanggung dalam Dia, yang memberikan kekuatan kepadaku

(*Filipi 4:13*)

KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Salam Damai,

Hanya berkat Kasih Karunia dari Allah yang Maha Penyayang dan pemberi kekuatan di dalam segala perkaralah, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul:

PERENCANAAN DAN PEMBUATAN ROBOT PLANAR DIRECT DRIVE DUA DERAJAT KEBEBASAN

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan bagi setiap mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, agar dapat menyandang gelar sarjana.

Tugas Akhir ini disusun sebagai perwujudan mimpi untuk mempunyai sebuah robot yang dapat dipakai untuk pengujian strategi kontrol pada bidang robotika.

Akhirnya, penulis berharap karya ini dapat menjadi berkat bagi setiap orang yang akan mengembangkan ilmu robotika, yang kesemuanya adalah untuk mencapai tujuan menciptakan kehidupan manusia yang lebih baik daripada kehidupan yang sekarang.

Penulis sangat menyadari setiap kelemahan dan kekurangan serta keterbatasan karya ini, oleh karena itu setiap kritikan dan saran yang sifatnya membangun merupakan penghargaan yang sangat besar maknanya bagi penulis.

Semoga Tuhan Selalu menolong dan memberkati tujuan kita.

Surabaya, Januari 2000

Penulis.

Bila sampai waktuku kumau tak seorang kan mendekat
Tidak juga kau...
Aku ini binatang jalang
Dari kumpulannya yang terbuang
Biar peluru menembus kulitku
Aku tetap meradang
Menerjang
Luka dan bisa kubawa berlari
Berlari hingga hilang pedih perih
Dan aku lebih tidak peduli lagi

Aku ingin hidup seribu tahun lagi...

(Chairil Anwar)

UCAPAN TERIMA KASIH

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Yesus Kristus, Tuhan dan Juru Selamat pribadi penulis, 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.

Tugas Akhir ini tidak akan mungkin dapat diselesaikan penulis tanpa bimbingan serta bantuan atau saran dari berbagai pihak. 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 terlalu sabar dan terlalu 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 Ir. Rushdianto Effendi A. K, MT, selaku dosen wali penulis selama kuliah di Jurusan Teknik Elektro ITS, yang telah banyak memberikan bimbingan kepada penulis.
- Bapak dan ibu dosen pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan pada khususnya dan Jurusan Teknik Elektro pada umumnya.
- Hitachi Scholarship Foundation, yang telah memberikan bantuan financial sehingga dapat mewujudkan impian memiliki sebuah robot.
- Keluarga besarku, Bapak, Ibu, Bang Saut & Kak Diana, Kak Butet (Marlin P), Bang Gogo, Bang Olis, Kak Ika, yang telah memberikan segalanya bagi penulis.
- Maliana Timoria T Pardede (Lina) yang selalu berada disamping saya walau dalam keadaan apapun.

- Rekan-rekan di Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, yang telah mendahului saya, Tole, Kojar, Star Trek, Yoyok, Yana, Romli, Jo, Dodo, Aris, Azis, Wiku, Dron, Fx (thanks atas pinjaman buku dan diskusinya), Adi D, Ateng, Mak, Ancha, Pak Yusuf, Pak Sahal, Pak Zul, dan Cak Awi (walau gak tau dimana sekarang) yang telah memberi kebersamaan yang indah pada saya selama menjadi penghuni lab sistem pengaturan
- Rekan-rekan di Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, para penghuni Pulau Biru; Sawit (atas bantuannya dalam program dan yang lainnya), Aris (atas bantuan dalam hal mekanik), Dhaim& Bevie, Setyo, Witwot, Dendi, Ople (atas malam-malam penuh kenangannya), Kresek, Lasman, Okim, Reesa, Ikhsan, Karno, Evin, Atut, Maruli, Ibor, Suryo, Arifin, Peyok, Toon, Nanang, dll. atas segala spirit dan dukungannya serta malam-malam penuh game, chatting dan nyanyian.
- Rekan-rekan dari apt. Elka yang telah membantu dalam hal elektronika praktis, Beny, Lalo, Indra 'dul', Budi, Rusman, Gondrong, dan Edi 'profesor'. Juga rekan-rekan di apt. B401 dan B201 serta apt.PKDST.
- Rekan-rekan arek Mesin ITS yang telah membantu saya dalam hal mekanik, Wahyu dan Arief 'Dolly'.
- Rekan-rekan Elektro ITS khususnya E-33 dimanapun berada, atas segala hiburan, dukungan maupun gangguan yang diberikan selama masa kuliah penulis.
- Teman-teman satu kelompok persekutuanku, Roni, Shinta, Ary, Ito, Djoko, Lasman, Sapto, Wati, Ronny, Toni, Bang Darman, Bang Gustav, Sepur, Aan, mbak Maja dan rekan-rekan lainnya yang juga telah mengasah saya
- Rekan-rekan saya sesama MT dan Co-op di PT. Freeport Indonesia Company, Tetet, Rocky, Qqz, Mul, Ben, Sm, Hardin, Pol, Antok, Tika, Ade, Evan, Edi, Pepta, Totong, Iphul, Argon, Yayak, Toha, Yuli, Fauzan, Hery, Ratna, Jo, Hesti, Arief, Glen, Hashari, Joseph, B'be, Pepen, Regas, Aris, Dedy, Rio, Harry, Cas, Armin, Ulya, Pak Rokhman, Yudy, Agung, Didit, dan Amrul, atas kesan-kesan indah di bumi Irian dan kebersamaan yang tak akan pernah luntur. Juga buat paksaan agar cepat lulus.

- Buat Rekan-rekan kontrakan saya yang tau benar susahnya kuliah, Priadi, Rusman, Toni dan Roni. Thanks berat man!
- Buat Uda Padot dan Inang uda, serta kedua adik saya yang lucu dan pintar, Una dan Sarah, yang selalu mendorong saya
- Buat teman-teman cewek saya di TI ITS yang selalu menggoda dan yang selalu bisa memaksa saya Koming, Gilang, Fifi, Ivo, Sashi. dan Amy.
- Buat Mbah 'Mo' (yang selalu bersedia memberi hutangan pada saya), Pak Djamian (yang membantu dalam membuat link), Pak Yit, Cak Ri, Pak Koesnan, Pak Nasrip, Mas Hendri, Cak Khamid dan seluruh karyawan jurusan Teknik Elektro ITS, yang telah membantu selama saya sekolah di Kampus Elektro ITS. Juga buat bos 'brengos' atas obat sakit kepalanya.
- Khusus buat mas Rudi atas pertolongannya yang tidak akan pernah saya lupakan.
- Buat Bob Marley, Padi, Slank, Dewa, SOS, GNR, Pearl Jam, Ahmad band, Gigi, Blues song, Sliders, Dawson Creek, Highlander, Kojiro, BT-X, Dragon Ball, Doraemon, City Hunter, net volley, bola volley, premiere league, lega calcio, dll yang telah membuat lagu-lagu yang enak untuk dinyanyikan, film yang enak ditonton, cerita-cerita lucu yang membuat saya merasa hidup itu begitu indah.
- 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, Februari 2000

Penulis.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

halaman

Abstrak i

Kata pengantar ii

Ucapan terima kasih iii

Daftar isi vi

Daftar gambar ix

Daftar tabel xi

BAB I

PENDAHULUAN 1

1.1 Latar belakang 1

1.2 Rumusan masalah 2

1.3 Batasan masalah 3

1.4 Tujuan 3

1.5 Sistematika pembahasan 3

BAB II

ROBOT DIRECT DRIVE 5

2.1. Robot direct drive 6

2.2. Implementasi robot direct drive 8

BAB III

RANCANG BANGUN ROBOT 9

3.1 Perancangan mekanik robot 9

3.1.1 Bagian dasar robot 10

MILIK PERPUSTAKAAN
ITS

3.1.2 Bagian penyangga robot (base robot) 10

3.1.3 Lengan pertama robot 11

3.1.4 Lengan kedua robot 12

3.2 Motor penggerak 13

3.2.1 Konstruksi motor 14

3.2.2 Keuntungan motor direct drive 16

3.3 Drive Motor 17

3.4 Peralatan umpan balik (feedback device) 18

3.5 Interface 19

3.6 Sistem pengendalian robot 21

BAB IV

KINEMATIKA DAN DINAMIKA ROBOT PLANAR DUA DERAJAT

KEBEBASAN 23

4.1 Kinematika forward: Notasi Denavit-Hartenberg 23

4.2 Kinematika inverse 27

4.3 Kinematika kecepatan: manipulator Jacobian 28

4.4 Dinamika robot planar dua derajat kebebasan 31

BAB V

PENGUJIAN ROBOT 35

5.1. Kontrol posisi berbasis kartesian 35

5.2. Persamaan polinomial derajat lima (five cubic polynomial) 36

5.3 Pengujian dan analisa 38

5.3.1 Lingkaran 38

5.3.2 Elips 44

BAB VI

PENUTUP 47

6.1. Kesimpulan 47

6.1. Saran 48

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

halaman

Gambar 3.1 Skema dari robot planar dua derajat kebebasan 9

Gambar 3.2 Bagian dasar robot 10

Gambar 3.3 Penyangga robot 11

Gambar 3.4. Lengan pertama robot tampak atas 12

Gambar 3.5. Lengan kedua robot tampak atas 13

Gambar 3.6. Robot planar direct drive tampak samping 13

Gambar 3.7 Konstruksi motor direct drive 14

Gambar 3.8 Motor dynaserv model DM 15

Gambar 3.9 Rangkaian magnetik dynaserv 15

Gambar 3.10 Blok diagram pengontrolan motor 17

Gambar 3.11 Prinsip kerja optical encoder 18

Gambar 3.12 Interface antara komputer dan driver motor 20

Gambar 3.13 Skema sistem pengendalian robot 21

Gambar 3.14 Robot planar direct drive dua derajat kebebasan 22

Gambar 4.1 Manipulator planar dua derajat kebebasan 24

Gambar 4.2 Manipulator planar dengan 2 derajat kebebasan 28

Gambar 4.3 Perpindahan virtual pada end-effector dan tiap joint 31

Gambar 4.4 Parameter robot planar dua derajat kebebasan 32

Gambar 5.1 Kontrol posisi berbasis kartesian 36

Gambar 5.2 Operational space lengan robot berbentuk lingkaran 39

Gambar 5.3 Trayektori robot berbentuk lingkaran 40

Gambar 5.4 Grafik posisi x terhadap waktu 40

Gambar 5.5 Grafik posisi y terhadap waktu 41

Gambar 5.6 Grafik sudut joint terhadap waktu 41

Gambar 5.7 Trayektori robot berbentuk lingkaran dengan pusat (0;0,1) 42

Gambar 5.8 Grafik posisi x terhadap waktu dengan pusat (0;0,1) 42

Gambar 5.9 Grafik posisi y terhadap waktu dengan pusat (0;0,1) 43

Gambar 5.10 Grafik sudut joint terhadap waktu dengan pusat (0;0,1) 43

Gambar 5.11 Operational space lengan robot berbentuk elips 44

Gambar 5.12 Trayektori robot berbentuk elips 45

Gambar 5.13 Grafik posisi x terhadap waktu 45

Gambar 5.14 Grafik posisi y trhadap waktu 46

Gambar 5.15 Grafik sudut joint terhadap waktu 46

DAFTAR TABEL

DAFTAR TABEL

halaman

Tabel 4.1 Notasi Denavit-Hartenberg robot planar dua derajat kebebasan 25

Tabel 4.2 Parameter mekanik robot 32

Tadi malam aku bermimpi ...
Betapa kehidupan itu begitu indah dan menyenangkan ...
Pagi ini ketika aku terjaga ...
Yang kudapati adalah
Kehidupan itu penuh kerja keras dan usaha ...

Anonymous

BAB I

MILIK PERPUSTAKAAN
ITS

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. LATAR BELAKANG

Pada masa sekarang ini aplikasi robot banyak dipergunakan untuk berbagai macam keperluan pada dunia industri. Seiring dengan berkembangnya aplikasi robot industri, maka dikembangkanlah berbagai jenis robot untuk dapat memenuhi tuntutan dari dunia industri. *Direct drive robot* adalah salah satu jenis aplikasi robot yang digerakkan oleh motor listrik dimana robot ini tidak menggunakan *gear reducer*. Robot direct drive dikembangkan untuk mengatasi kekurangan dari desain mekanik yang umumnya terjadi pada robot. Dengan metode ini efek *backlash* pada robot dapat dihilangkan dan efek *friction* pada robot dapat diminimalkan. Kontruksi mekanik yang sederhana membuat kita dapat mengindentifikasi dinamika sistem dengan lebih mudah, selain itu dengan konstruksi sederhana membuat robot direct drive lebih handal dan mudah dalam perawatan.

Konsep dasar dari robot direct drive pertama kali dikembangkan oleh Asada [1980]. Bersama dengan T. Kanade [1981], dikembangkanlah prototipe pertama dari direct drive robot pada Robotic Institute, Carnegie-Mellon University. Kemudian di Massachusetts Institute of Technology, Asada dan Youcef–Toumi [1982-1983] juga ikut mengembangkan direct drive robot. Spong

dan Walsh [1994] di University of Illinois at Urbana-Champaign, mengembangkan robot direct drive planar dua derajat kebebasan.

Dengan semakin berkembangnya ilmu robotika pada perguruan tinggi, maka dituntut pula peralatan yang memadai untuk melakukan eksperimen-eksperimen untuk pengujian suatu teori ataupun pengujian suatu aplikasi robot. Dengan dasar tersebut diatas maka dikembangkanlah suatu prototipe *experimental direct drive arm (EDDA)*. Direct drive robot yang dikembangkan adalah robot planar direct drive dua derajat kebebasan dengan mengacu pada model robot direct drive yang dikembangkan oleh Spong dan Walsh [1994]. Dengan dikembangkannya robot direct drive ini diharapkan dapat menjadi suatu medium antara teori dan penerapan praktis dalam robotika.

I.2. RUMUSAN MASALAH

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

a. Bagaimana mendesain suatu robot planar direct drive dua derajat kebebasan yang dapat dipergunakan sebagai robot eksperimen pada perguruan tinggi.
b. Bagaimana mengimplementasikan desain dari robot planar direct drive tersebut dalam bentuk real time dan melakukan uji coba standar pada implentasi robot tersebut.

I.3. BATASAN MASALAH

Pada tugas akhir ini didesain direct drive robot planar dua derajat kebebasan dengan konstruksi *rigid body*. Pengujian pada implementasi direct drive robot planar yang di desain adalah dengan menggunakan pengaturan posisi dengan menggunakan pengendali *Proportional Derivative (PD Controller)* berbasis koordinat kartesian.

I.4. TUJUAN

Tujuan dari tugas akhir ini adalah membuat sebuah robot direct drive yang dapat dipergunakan dalam pengujian teori dan aplikasi dari ilmu robotika.

I.5. SISTEMATIKA PEMBAHASAN

Pada Tugas Akhir ini penulis membagi buku dalam beberapa bagian. Urutan pembahasan yang dilakukan 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 robot direct drive. Penjelasan mengenai konsep yang digunakan pada direct drive robot dan implementasinya.

Rancang bangun dari robot planar direct drive dua derajat kebebasan akan dibahas pada bab 3. Pada bagian ini akan dibahas mengenai perancangan robot, baik dari segi mekanik maupun elektriknya.

Pada bab 4 dibahas mengenai kinematika dan dinamika dari robot planar dua derajat kebebasan, meliputi notasi Denavit-Hartenberg, kinematika instantaneous, matriks Jacobian dan dinamika dari robot planar dua derajat kebebasan.

Analisa mengenai pengujian robot yang dibuat dibahas pada bab 5. Robot diuji dengan memberikan suatu *manipulation task* dan kemudian dianalisa untuk melihat kemampuan dari robot tersebut.

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

BAB II

ROBOT DIRECT DRIVE

Penelitian dalam bidang robotika banyak mengalami hambatan karena kurangnya robot manipulator yang dipergunakan untuk melakukan eksperimen. Konsensus umum yang selama ini dipegang oleh para ilmuwan mengenai karakteristik yang harus dimiliki suatu robot dan yang banyak ditulis pada paper dalam robotika adalah sebagai berikut:

- Model dinamik lengan adalah lengan pejal *(rigid body)*
- Memiliki kecepatan yang tinggi dan kemampuan mengangkat beban yang memadai
- Kontrol posisi pada join yang akurat
- Sensor posisi yang akurat
- Sensor kecepatan yang akurat
- Memiliki kemampuan untuk kontrol force
- Memiliki kemampuan yang baik pada penghitungan daya untuk implementasi real dari algoritma kontrol.

Kenyataan yang ada hampir tidak terdapat manipulator yang dapat memenuhi semua atau beberapa dari karakteristik yang disebut diatas. Perkembangan teknologi

motor direct-drive telah membuka jalan pada percobaan dalam bidang robotika, ini disebabkan karena dengan teknologi tersebut dapat dibangun sebuah manipulator yang dapat mendekati karakteristik sebuah robot ideal seperti disebutkan terdahulu.

Pada tugas akhir ini akan dibangun suatu robot planar dengan menggunakan teknologi direct-drive yang memiliki dua derajat kebebasan.

II.1. ROBOT DIRECT DRIVE

Prinsip dari direct drive adalah motor yang digerakkan secara elektrik tanpa menggunakan *gear reducer*. Rotor dari motor yang digunakan dikopel langsung pada beban tanpa menggunakan gear mekanik. Robot direct drive didefinisikan sebagai suatu lengan mekanik dimana semua joint lengan aktif digerakkan oleh motor direct drive.

Motor direct drive terdiri dari dua bagian, yaitu motor dan bearing. Motor terdiri dari rotor dan stator. Stator terhubung dengan bearing dan rotor terhubung dengan shaft motor.

Permasalahan yang tidak dapat dihindari oleh motor yang menggunakan gear mekanik dapat diselesaikan dengan direct drive. Efek backlash dapat dihilangkan dan gaya gesek yang timbul dapat dikurangi. Gaya gesek hanya dapat timbul pada bearing yang mendukung shaft motor. Konstruksi yang sederhana dari direct drive menjadikan direct drive memiliki keandalan yang tinggi dan memudahkan dalam hal perawatan. Mekanisme yang sederhana memudahkan untuk mengidentifikasikan

sistem dinamik dari motor. Hal inilah yang menyebabkan direct drive layak dipergunakan sebagai alat uji *manipulation task* pada robot.

Pada robot direct drive, torsi motor ditransmisikan langsung pada joint robot tanpa melalui gear mekanik. Posisi joint langsung dikontrol oleh gaya elektromagnet dari motor, dengan hal ini posisi dan kecepatan sudut yang diharapkan dapat dicapai dengan lebih akurat dan lebih cepat .

Pada umumnya robot industri dibuat dengan menggunakan gear, dimana hal ini menyebabkan ketidakakuratan pada posisi robot akibat gaya gesek statis yang besar atau akibat efek backlash. Selain itu torsi yang akurat sulit diperoleh dengan menggunakan gear. Dengan menghilangkan gear maka inertia yang dihasilkan dapat lebih besar dibandingkan dengan robot konvensional dan lebih banyak memberikan dinamika pada pergerakan robot.

Konsep dari gerakan robot yang digerakkan langsung oleh gaya elektromagnet tanpa menggunakan tranduser mekanik merupakan ide yang menarik bagi seorang sarjana control. Pada saat ini telah banyak dibangun robot direct drive pada laboratorium-laboratorium diseluruh dunia. Haruhiko Asada dan Kamal Youcef-Toumi dianggap sebagai pelopor dalam pengembangan robot direct drive .

Permasalahan yang timbul pada robot direct drive adalah sulitnya membuat suatu motor yang dapat menghasilkan torsi yang besar pada kecepatan yang rendah, tidak memiliki ukuran fisik yang besar dan memiliki berat yang ringan. Kecenderungan yang timbul pada model-model robot direct drive yang ada pada saat sekarang ini adalah memiliki motor yang besar dan berat.

Permasalahan lain yang dihadapi oleh direct drive motor adalah *overheat* (panas berlebihan) pada motor, disebabkan oleh arus yang timbul adalah sangat besar agar dapat menghasilkan torsi yang besar pula untuk dapat menggerakkan inertia link yang besar. Robot yang dibangun pada tugas akhir ini merupakan robot planar, sehingga secara geometris ini dapat mengurangi efek gravitasi yang dapat membuat motor menjadi overheat.

II.2. IMPLEMENTASI ROBOT DIRECT DRIVE

Pada tugas akhir ini diimplementasikan robot planar direct drive dua derajat kebebasan dengan link pejal. Link robot dibuat menggunakan aluminium padat dan terdiri atas dua link. Motor yang dipergunakan adalah Dynaserv direct drive brushless servo dari Parker Compumotor. Motor yang dipergunakan sebanyak dua buah dan diletakkan pada base dan antara link pertama dan link kedua. Interface yang dipergunakan adalah PCL 718 dari Advantech yang berfungsi sebagai analog to digital converter, digital to analog converter dan untuk input dan output digital yang dibutuhkan oleh motor digunakan PPI 8255 dari Intel Corp.

Robot planar direct drive dengan dua link memiliki dinamika yang relatif sederhana, tetapi dengan menggunakan robot ini semua parameter dinamika dapat dilihat (seperti gaya coriolis, gaya centrifugal, inertia, dsb).

Pada tugas akhir diimplementasikan sebuah robot planar direct drive yang dikontrol dengan menggunakan kontrol posisi berbasis koordinat kartesian.

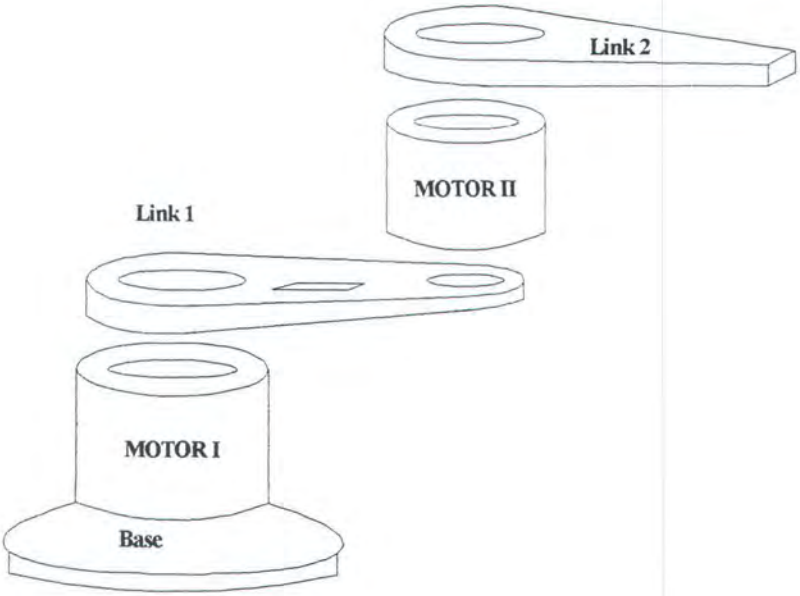
We are not able to do great things, only small things with great love
(Mother Teresa, 1910-1997)

BAB III

BAB III

RANCANG BANGUN ROBOT

Sebuah manipulator dapat dimodelkan sebagai rangkaian terbuka benda tegar (link) yang dihubungkan secara serial dengan joint revolute maupun prismatic yang digerakkan oleh aktuator, seperti gambar 3.1. Gerakan relatif joint akan menyebabkan gerakan pada *end-effector* menuju posisi dan orientasi yang diinginkan.



Gambar 3.1 Skema dari robot planar dua derajat kebebasan

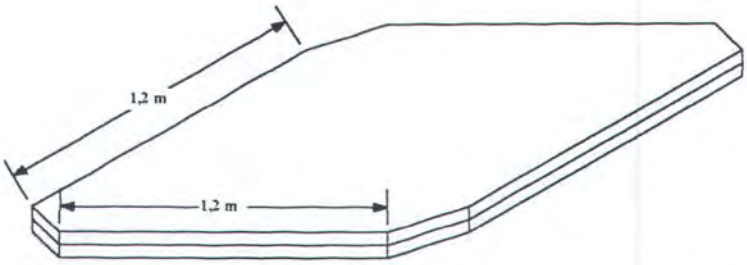
III. 1. PERANCANGAN MEKANIK ROBOT

Bagian ini membahas perancangan mekanik robot dimulai dari landasan, penyangga robot (base robot), lengan pertama robot dan lengan kedua robot.

III. 1.1. Bagian Dasar Robot

Bagian dasar ini merupakan tempat dimana robot akan diletakkan. Faktor utama yang harus diperhatikan dalam merancang bagian ini adalah,

- Memiliki kekokohan dan kekuatan yang cukup.
- Harus dapat menahan beban keseluruhan robot.
- Memiliki sifat *knock down* (dapat dibongkar dan dipasang kembali).
- Bentuknya disesuaikan dengan robot yang dirancang



Gambar 3.2 Bagian dasar robot (dimensi dalam m)

Bagian dasar pada tugas akhir ini berbentuk meja bujur sangkar yang terbuat dari kayu dan dapat diperoleh dengan mudah. Dimensi dari landasan yang digunakan sebagai berikut,

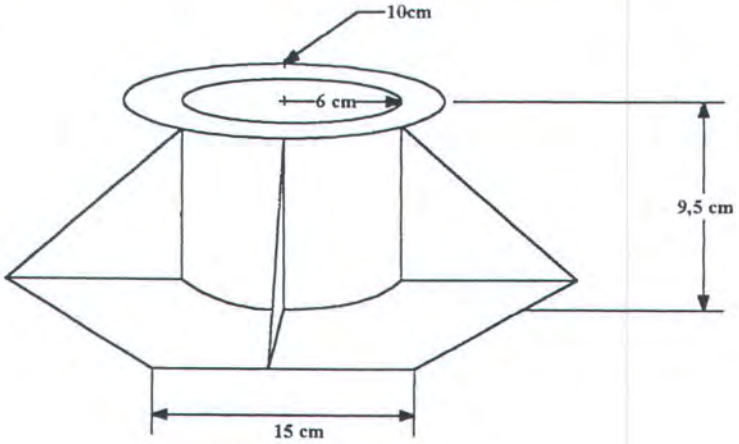
	Panjang (P)	= 60 cm
	Lebar (L)	= 60 cm
	Tebal (T)	= 9 cm

III. 1.2. Bagian Penyangga Robot (Base Robot)

Bagian penyangga robot merupakan konstruksi paling bawah, dimana bagian ini berfungsi sebagai tempat kedudukan dari motor pertama dan sebagai

MILIK PERPUSTAKAAN
ITS

penahan dari keseluruhan lengan robot. Material untuk bagian penyangga ini terbuat dari besi dengan ketebalan 4 mm. Bentuk bagian penyangga seperti pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Penyangga robot (dimensi dalam cm)

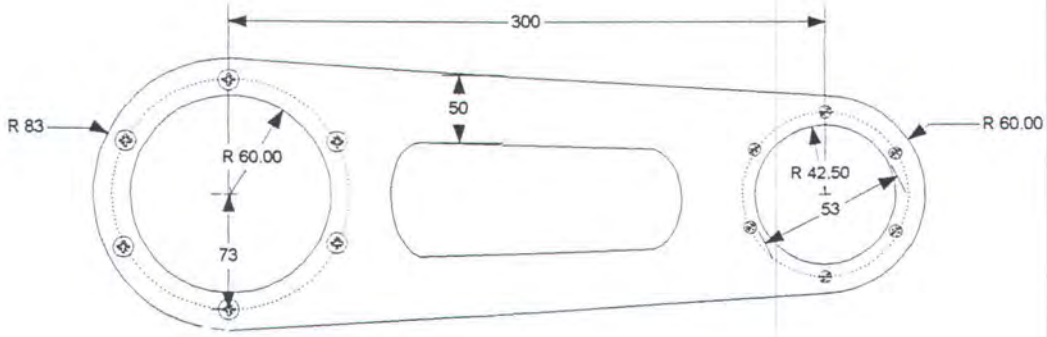
Dimensi dari bagian penyangga adalah sebagai berikut:

Jari-jari (lingkaran dalam)	= 60 cm
Jari-jari (lingkaran luar)	= 100 cm
Tinggi	= 9,5 cm

Bagian penyangga ini diberi 4 buah mur berukuran 10 x 25 mm agar dapat tersambung dengan landasan robot.

III. 1.3. Lengan Pertama Robot

Lengan pertama robot menjadi pusat gerakan dari robot planar direct drive yang dirancang. Lengan ini dikopel langsung pada motor pertama dan bagian stator dari motor kedua disambung pada ujung yang lain. Bentuk dan dimensi dari lengan pertama robot seperti pada gambar 3.4



Gambar 3.4 Lengan pertama robot tampak atas (dimensi dalam mm)

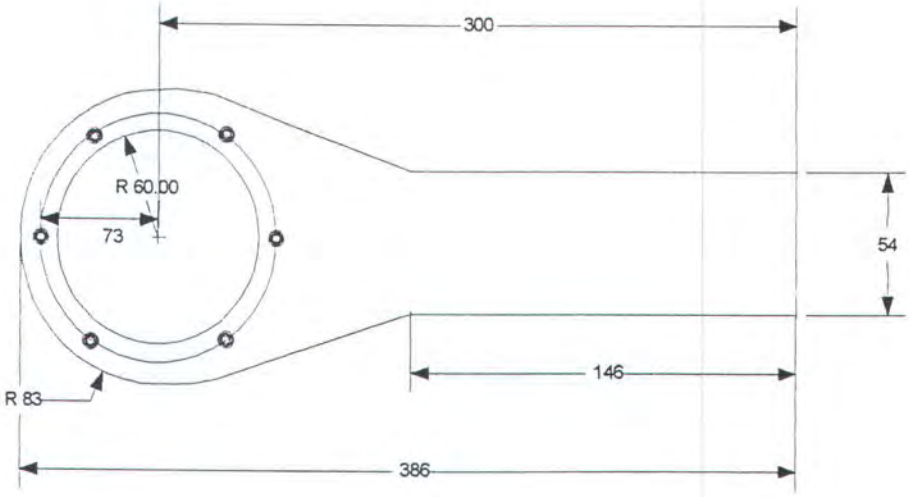
Hal utama yang harus dimiliki oleh lengan robot yang dibuat adalah sebagai berikut,

- Memiliki berat bahan yang ringan
- Mampu menahan beban yang berat
- Memiliki body lengan yang pejal (*rigid body*)

Material untuk lengan pertama adalah aluminium pejal, dengan massa jenis 2669 kg/m^3, yang mudah didapat dan dengan ukuran sesuai pada gambar rancangan.

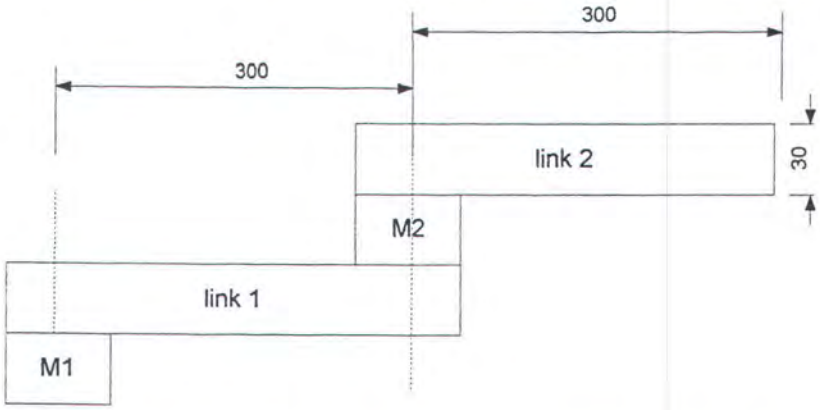
III. 1.4. Lengan Kedua Robot

Lengan kedua dari robot tersambung pada motor kedua. Lengan ini dikopel langsung pada motor kedua dan ujung dari lengan ini berfungsi sebagai end-effector robot. Bentuk dan dimensi dari lengan kedua robot seperti pada gambar 3.5. Material lengan kedua sama dengan material lengan pertama.



Gambar 3.5 Lengan kedua robot tampak atas (dimensi dalam mm)

Kerangka robot dalam bentuk komposisi semua komponen robot seperti gambar 3.6



Gambar 3.6 Robot planar direct drive tampak samping (dimensi dalam mm)

III.2. MOTOR PENGGERAK

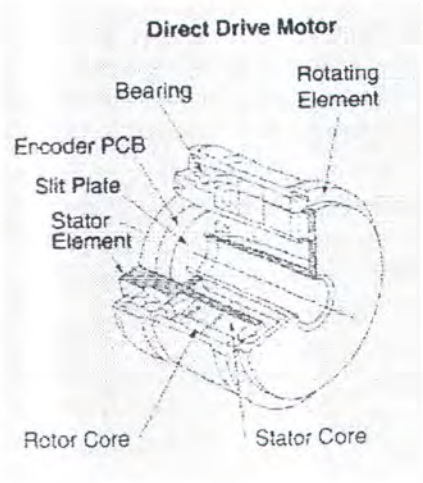
Bagian ini membahas motor direct drive yang dipergunakan pada robot, karena performansi robot direct drive sangat tergantung pada motor yang dipergunakan pada joint. Robot ini menggunakan motor direct drive dari Parker

Compumotor tipe Dynaserv DM 1015-B, dc brushless servo motor, microprocessor-based drive, power supply, dan encoder untuk position feedback Kelebihan utama Dynaserv adalah memiliki keakuratan tinggi dan torsi tanpa speed reducer.

III.2.1. Konstruksi Motor

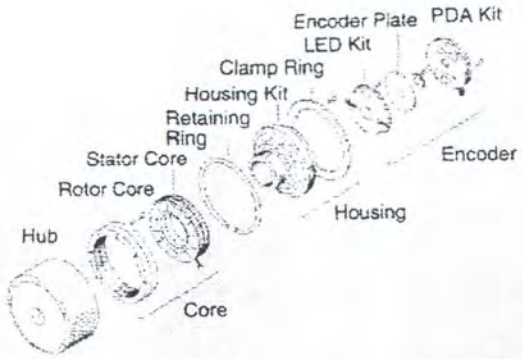
Motor direct drive mengkopel beban langsung pada poros motor tanpa menggunakan belt atau gear. Gambar 3.7 menunjukkan konstruksi dari motor direct drive Dynaserv DM 1015B.

Motor Dynaserv adalah motor brushless servo tanpa menggunakan gear dan motor ini menghilangkan gaya gesek yang terjadi dari transmisi daya pada motor itu. Komponen umpan balik dikopel langsung pada beban sehingga keakuratan sistem akan meningkat dan ini menyebabkan efek backlash dapat dihilangkan.



Gambar 3.7 Konstruksi motor direct drive

Motor terdiri bearing yang presisi, komponen magnetik dan perlatan umpan balik yang terintegrasi dalam suatu motor seperti terlihat pada gambar 3.8.

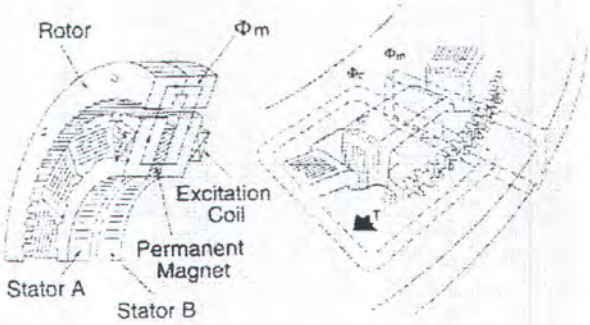


Gambar 3.8 Motor Dynaserv model DM

Motor ini memiliki rotor luar dengan bentuk tertutup, membuat rotor memiliki kekakuan yang bagus dan memudahkan untuk mengkopel beban langsung pada motor. Pada tugas akhir ini lengan robot langsung disambungkan dengan rotor motor.

Torsi yang dihasilkan sebanding dengan kuadrat penjumlahan fluks magnet pada rotor (ϕ_m) dan fluks magnet pada stator (ϕ_c).

$$Torsi = (\phi_m + \phi_c)^2$$



Gambar 3.9 Rangkaian magnetik Dynaserv

Gaya tangensial yang bekerja pada motor sebanding dengan diameter motor, ini mengakibatkan semakin besar konstruksi motor maka torsi yang dihasilkan akan

semakin besar pula. Semakin banyak jumlah gigi dari rotor dan stator akan mengakibatkan semakin besar magnet yang dihasilkan dalam satu putaran, sehingga torsi yang dihasilkan akan semakin besar.

III.2.1. Keuntungan Motor Direct Drive

Beberapa keuntungan yang diperoleh jika kita menggunakan motor direct drive adalah sebagai berikut;

1. Memiliki tingkat ketelitian yang tinggi

   Dynaserv dapat menghilangkan efek backlash jika menggunakan speed reducer.

2. Memiliki settling time yang cepat

   Dynaserv motor mengurangi cycle time dengan cara mengurangi settling timenya. Ini dapat terjadi karena tidak menggunakan gear pada desainnya.

3. Memiliki torsi yang tinggi pada kecepatan tinggi

   Dynaserv motor akan menghasilkan torsi maksimum pada saat kecepatan motor maksimum dan dapat dikontrol dengan baik.

4. Memiliki putaran yang halus

   Memiliki faktor ripple dari kecepatan/torsi yang kecil, sehingga Dynaserv dapat berputar dengan mulus.

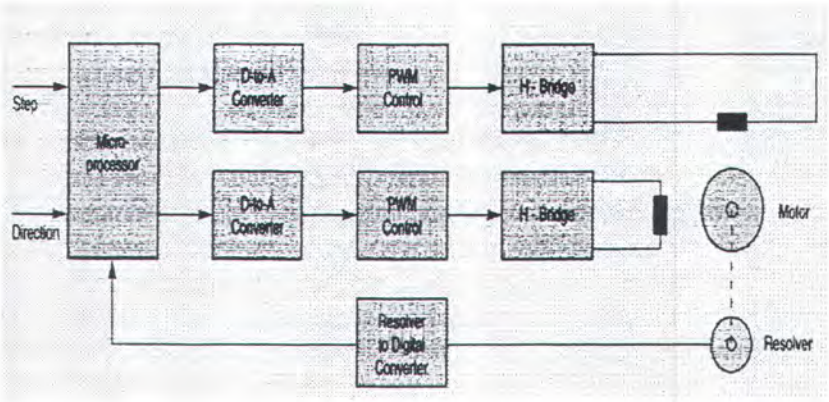
5. Clean Operation

   Menggunakan sistem brushless dan tanpa gear, membuat Dynaserv motor tidak memerlukan perawatan khusus.

III.3. DRIVE MOTOR

Drive motor yang digunakan DD Servo Actuator SD1015B62 dari Compumotor. Driver yang digunakan untuk menggerakkan motor menggunakan teknik PWM (Pulse Width Modulation) seperti dapat terlihat pada gambar 3.10.

Dengan menggunakan PWM kita dapat mengontrol kecepatan dan posisi dari motor dengan menggunakan software yang dikeluarkan dari komputer. PWM merupakan metode umum yang paling sering dipergunakan untuk mengontrol motor. Pertama yang kita lakukan adalah membangkitkan pulsa untuk menggerakkan motor. Dengan mengubah-ubah lebar pulsa yang kita buat, kita dapat merubah kecepatan motor dan jika kita mengubah jumlah pulsa yang dikirim ke motor, maka kita dapat menentukan jumlah putaran dari motor yang kita kontrol.



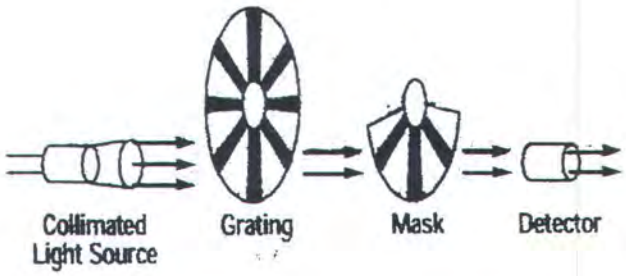
Gambar 3.10 Blok diagram pengontrolan motor

Teknik kontrol yang diimplementasikan pada tugas akhir ini adalah teknik kontrol torsi (computed torque). Motor tidak menggunakan PWM seperti umumnya, tetapi dengan memberikan inputan yang berupa tegangan analog kepada driver motor sesuai dengan torsi yang kita inginkan.

III.4. PERALATAN UMPAN BALIK (*FEEDBACK DEVICES*)

Peralatan yang digunakan sebagai sensor posisi dalam sistem kontrol servo adalah magnetik, kontak, resistive dan optical. Untuk menghasilkan suatu kontrol posisi yang akurat, peralatan sensor yang banyak dipergunakan adalah optical encoder. Dua jenis optical encoder, *incremental encoder* dan *absolute encoder*.

Prinsip kerja optical encoder adalah dengan menempatkan suatu alat seperti filter yang berbentuk seperti jaring, yang bergerak antara sumber cahaya dan detektor. Pada saat cahaya dapat menembus bagian kosong filter dan outputnya dapat dideteksi oleh detektor.



Gambar 3.11 Prinsip kerja dari optical encoder

Untuk menambah resolusi, sumber cahaya yang digunakan adalah sumber cahaya *colimated* dan sebuah pelindung (*mask*) diletakkan antara grating dan detektor. Grating dan mask menghasilkan suatu mekanisme pengatur cahaya, dimana jika bagian kosong dari grating dan mask berada pada satu sumbu maka cahaya dapat dideteksi oleh detektor (seperti pada gambar 3.11)

Incremental encoder akan membangkitkan pulsa sesuai dengan penambahan pulsa pada putaran shaft motor atau pulsa untuk jarak linier yang

diberikan pada motor. Total jarak yang ditempuh atau putaran sudut dari shaft ditentukan dengan menghitung pulsa keluaran dari encoder.

Absolute encoder memiliki beberapa buah chanel keluaran, oleh karena itu setiap perubahan posisi dari shaft motor dengan kode tertentu. Semakin tinggi resolusi yang diinginkan, maka semkin banyak chanel keluaran yang dipakai.

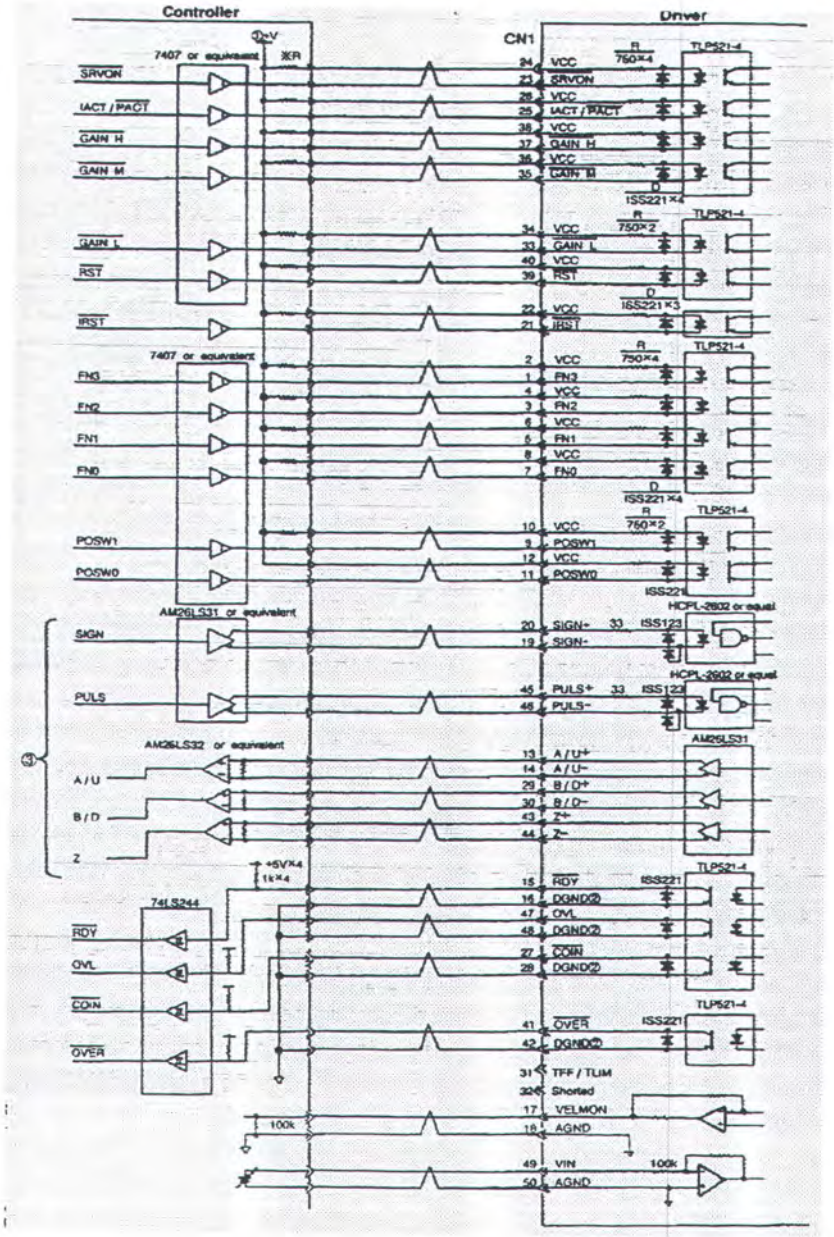
III.5. INTERFACE

Pada tugas akhir ini dipergunakan dua buah interface yaitu PCL-718 dari Advantech Inc. dan Peripheral Programmable Interface (PPI) 8255 dari Intel Corp. PCL-718 memiliki 2 buah channel analog output single ended dan 16 buah channel analog input, analog output digunakan sebagai inputan torsi yang berupa tegangan (max ± 8V) dan analog input digunakan untuk memonitor besar dari kecepatan motor (max ±10V). PPI 8255 memiliki 3 channel (Port A, Port B, dan Port C). Port A dan Port B digunakan sebagai channel output dan Port C sebagai channel input. PPI 8255 digunakan untuk menghidupkan servo driver dan monitor posisi motor.

Pada gambar 3.12, bagian kiri tersambung ke komputer melalui PCL-718 dan PPI 8255 dan bagian kanan merupakan driver dari motor. Komponen penting untuk menggerakkan motor adalah pin 49 & 50 yang merupakan bagian untuk memberi perintah menggerakkan motor (tegangan positif searah jarum jam atau tegangan negatif berlawanan arah jarum jam).

MILIK PERPUSTAKAAN
ITS

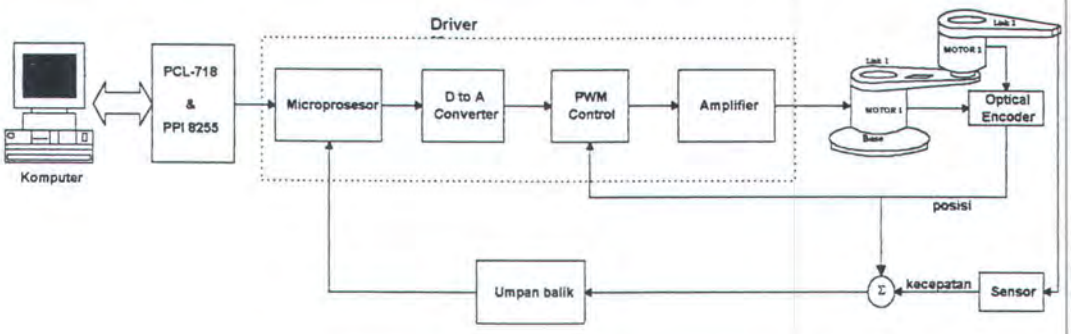
Tegangan masuk melalui driver motor antara ±8V.. Resistor yang dipergunakan untuk umpan balik adalah 100 kΩ. Buffer penggerak motor dan penentu arah putaran dipergunakan *quad differential line driver* dan *receivers*.



Gambar 3.12 Interface antara komputer dan dan driver motor

III.6. SISTEM PENGENDALIAN ROBOT

Pada prinsipnya robot adalah suatu peralatan yang dipergunakan untuk mencapai atau menjangkau suatu posisi tertentu pada suatu bidang. Agar dapat mencapai tujuan tersebut diperlukan suatu sistem pengendalian yang baik. Skema sistem pengendalian dari robot planar direct drive dua derajat kebebasan yang dikerjakan pada tugas akhir ini terlihat seperti pada gambar 3.13.

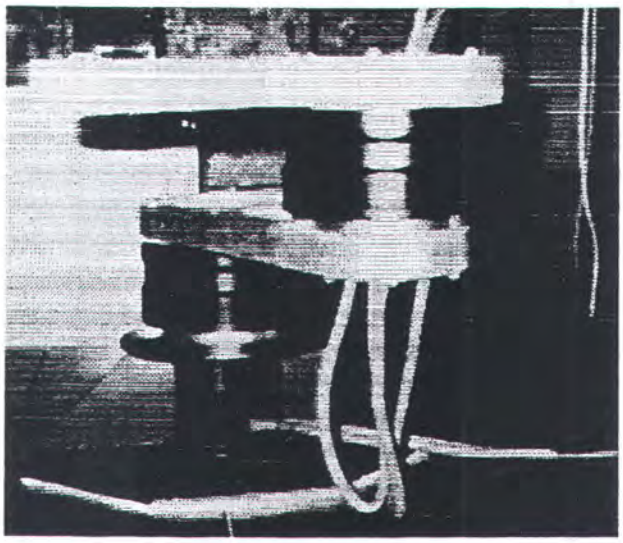


Gambar 3.13 Skema sistem pengendalian robot

Sistem pengendalian seperti ini biasa disebut juga dengan nama sistem pengendalian berbasiskan komputer *(computer based control system)*. Semua instruksi *(manipulation task)* yang hendak dilaksanakan oleh robot diberikan melalui komputer. Komputer akan memberikan besar torsi yang harus digerakkan oleh motor, sesuai dengan teknik kontrol yang dipergunakan yaitu kontrol torsi, kemudian perintah tersebut dilewatkan PCL-718 dan PPI 8255 dan diteruskan ke mikroprosesor yang berada pada servo driver, dimana sinyal digital dari komputer akan diubah kedalam bentuk sinyal analog oleh PCL-718 dan driver motor.

Motor memberikan umpan balik berupa jumlah pulsa yang telah dikerjakan kepada PWM Control dan mikroprosesor melalui optical encoder, yang telah dijelaskan pada bagian terdahulu. Pengaturan Kecepatan dilakukan dengan menggunakan konversi antara tegangan motor dan kecepatan. Dengan menggunakan konversi ini kita dapat mengetahui kecepatan dari motor serta kita dapat mengetahui kecepatan dari joint pada robot.

Berikut ini adalah bentuk jadi dari robot planar direct drive dua derajat kebebasan yang dikerjakan pada tugas akhir ini.



Gambar 3.14 Robot planar direct drive dua derajat kebebasan

Segala sesuatu yang aku lihat mengajar aku untuk mempercayai Penciptaku untuk segala sesuatu yang belum aku lihat.

Ralph Waldo Emerson

BAB IV

BAB IV

KINEMATIKA DAN DINAMIKA ROBOT PLANAR DUA DERAJAT KEBEBASAN

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. Kinematika dipergunakan untuk menghitung posisi dan orientasi dari link terakhir pada suatu lengan robot.

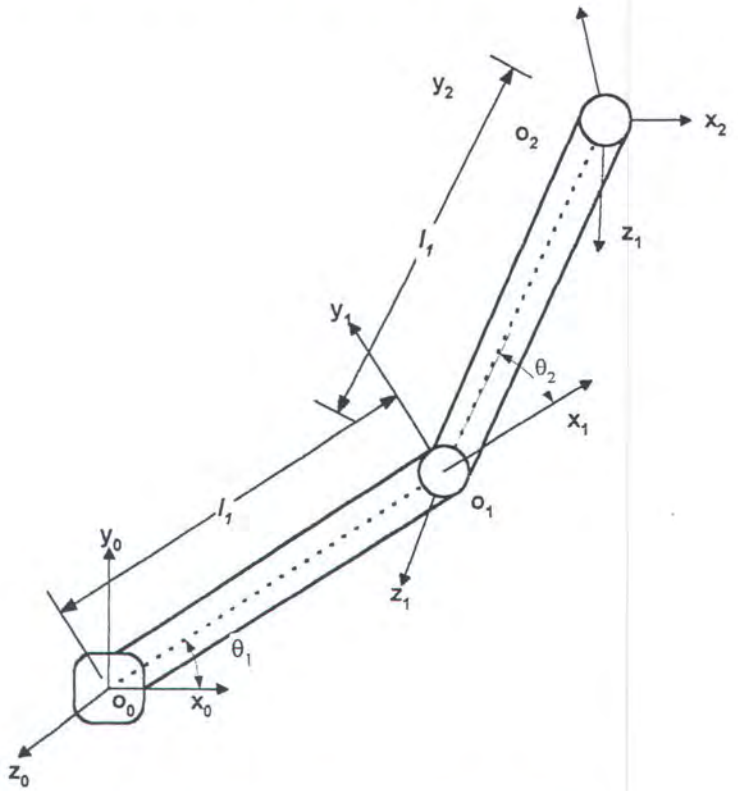
Dinamika robot berhubungan dengan studi terhadap perubahan konfigurasi lengan robot sebagai akibat dari torsi pada joint yang diberikan oleh motor penggerak robot. Hubungan tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan gerak *(equation of motion)* yang mengatur respon dinamik dari lengan robot dalam hubungannya dengan torsi joint.

IV.1. KINEMATIKA FORWARD : NOTASI DENAVIT-HARTENBERG

Kinematika forward dapat dijelaskan secara sederhana seperti berikut, jika kita mengetahui variabel dari joint robot, maka kita bisa menentukan posisi dan orientasi dari end-effector robot.

Notasi Denavit-Hartenberg adalah suatu metode sistematik untuk menggambarkan hubungan kinematik dari suatu lengan robot. Metode ini didasarkan pada matriks 4 x 4 yang merepresentasikan posisi dan orientasi dari lengan robot. Bentuk geometri dari DD Robot yang akan dicari parameternya seperti terlihat pada gambar 4.1

Gambar 4.1 menunjukkan manipulator planar dua derajat kebebasan. Dimana $o_0x_0y_0z_0$ adalah merupakan base frame-nya dan originnya ditentukan dari perpotongan sumbu z_0 terhadap sumbu x_0 dan y_0 . Kemudian origin o_1 adalah perpotongan antara sumbu z_1 dan sumbu x_1 dan y_1. Origin o_2 ditentukan pada ujung dari link kedua seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Manipulator Planar Dua Derajat Kebebasan

Dengan menggunakan notasi Denavit-Hartenberg dimana matriks homogeneous H_i merupakan hasil dari 4 basis transformasi yang ditunjukkan oleh persamaan berikut,

$$H_i = Rot_{z\theta_{i-1}} Trans_{zd_i} Trans_{xa_i} Rot_{x\alpha_i} \tag{4.1}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha & \sin\theta_i\sin\alpha & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha & \cos\theta_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Parameter-parameter yang terdapat pada sebuah link adalah sebagai berikut: l_i adalah panjang dari lengan robot, α_i adalah twist, d_i adalah besaran *offset, dan* θ_i adalah sudut antara x_{i-1} dan x_i pada lengan robot.

Table 4.1 Notasi Denavit-Hartenberg robot planar dua derajat kebebasan

D-H Notation	Link 1	Link 2
θ	θ_1^0	θ_2^0
l	300 mm	300 mm
d	207 mm	176 m m
α	0	0

Dari analisa geometris kita bisa memperoleh nilai dari matriks homogeneous H , yaitu sebagai berikut:

$$H_i = Rot_{z_i\theta_i}\, Trans_{z_i d_i}\, Trans_{x_i a_i}\, Rot_{x_i a_i} \tag{4.3}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & di \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha & \sin\theta_i \sin\alpha & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha & \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

Dari parameter diatas dapat dicari matriks H dari link 1 dan link 2 seperti ditunjukkan dibawah ini:

$$H_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & l_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & l_2 \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & l_2 \cos\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

matriks Transformasi untuk link 1 adalah:

$$T_0^1 = H_1 \tag{4.7}$$

matriks transformasi untuk link 2 adalah:

$$T_0^2 = H_1 H_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_{12} & -\sin\theta_{12} & 0 & l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos\theta_{12} \\ \sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 & l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin\theta_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

IV.2. KINEMATIKA INVERS

Ditunjukkan manipulator planar dengan 2 derajat kebebasan seperti pada Gambar 4.2. Persamaan kinematika yang menghubungkan posisi *end-effector* (x,y) ke posisi joint (θ_1,θ_2) diberikan :

$$x(\theta_1,\theta_2) = l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{4.9}$$

$$y(\theta_1,\theta_2) = l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{4.10}$$

dengan mendifferensialkan kedua persamaan diatas, diperoleh :

$$dx = \left(\frac{\partial x(\theta_1,\theta_2)}{\partial\theta_1} d\theta_1\right) + \left(\frac{\partial x(\theta_1,\theta_2)}{\partial\theta_2} d\theta_2\right) \tag{4.11}$$

$$dy = \left(\frac{\partial y(\theta_1,\theta_2)}{\partial\theta_1} d\theta_1\right) + \left(\frac{\partial y(\theta_1,\theta_2)}{\partial\theta_2} d\theta_2\right) \tag{4.12}$$

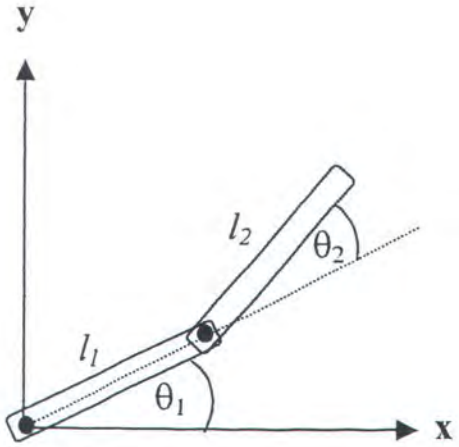
dimana $dx_e = [dx \quad dy]^T$ dan $d\theta = [d\theta_1 \quad d\theta_2]^T$ adalah vektor perpindahan yang sangat kecil (displacement) dari *end-effector* dan joint. Generalisasi persamaan (4.11) dan (4.12), untuk manipulator dengan *n* derajat kebebasan dan dimensi *end-effector* space adalah *m* diberikan sebagai :

$$dx_e = Jd\theta \tag{4.13}$$

dimana $dx_e = [dx_1 \quad dx_2 \quad \ldots \quad dx_m]^T$ (4.14)

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

$$d\theta = [d\theta_1, d\theta_2, \ldots d\theta_n]^T \tag{4.15}$$



Gambar 4.2 Manipulator planar dengan 2 derajat kebebasan

IV.3. KINEMATIKA KECEPATAN : MANIPULATOR JACOBIAN

Manipulator Jacobian atau matriks Jacobian merepresentasikan hubungan yang sangat kecil antara kecepatan joint dengan kecepatan *end-effector*.

Bentuk umum matriks Jacobian (*2 x2*) adalah,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \theta_1} d\theta & \frac{\partial x_1}{\partial \theta_2} d\theta_2 \\ \frac{\partial x_2}{\partial \theta_1} d\theta_1 & \frac{\partial x_2}{\partial \theta_2} d\theta_2 \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

Matriks J berisi turunan parsial dari fungsi $x(\theta_1, \theta_2)$ terhadap penempatan joint θ_1 dan θ_2. Matriks Jacobian pada robot planar dua derajat kebebasan diperoleh sebagai berikut,

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 \sin\theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

dari hasil perancangan dapat diperoleh matrik jacobian untuk robot planar direct drive dua derajat kebebasan adalah,

$$J = \begin{bmatrix} -0{,}3\sin\theta_1 - 0{,}3\sin(\theta_1+\theta_2) & -0{,}3\sin(\theta_1+\theta_2) \\ 0{,}3\cos(\theta_1) + 0{,}3\cos(\theta_1+\theta_2) & 0{,}3\cos(\theta_1+\theta_2) \end{bmatrix}$$

Dengan membagi kedua sisi persamaan (4.13) dengan perubahan waktu yang sangat kecil, dapat diperoleh :

$$\frac{dx_e}{dt} = J\frac{d\theta}{dt} \tag{4.17}$$

atau lazim ditulis :

$$v = J\omega \tag{4.18}$$

Persamaan (4.18) menunjukkan hubungan antara kecepatan *end-effector* dan kecepatan joint yang ditentukan dengan manipulator Jacobian. Persamaan ini seringkali disebut sebagai persamaan kinematika *instantaneous*.

Ditunjukkan sebuah perpindahan virtual pada tiap joint, $d\theta$ dan pada *end-effector*, dx_e dan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. 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 (4.13) dapat kita tulis ulang sebagai :

$$dx_e = Jd\theta \tag{4.19}$$

MILIK PERPUSTAKAAN
ITS

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 :

$$dWork = \tau^T d\theta - F^T dx_e \tag{4.20}$$

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.

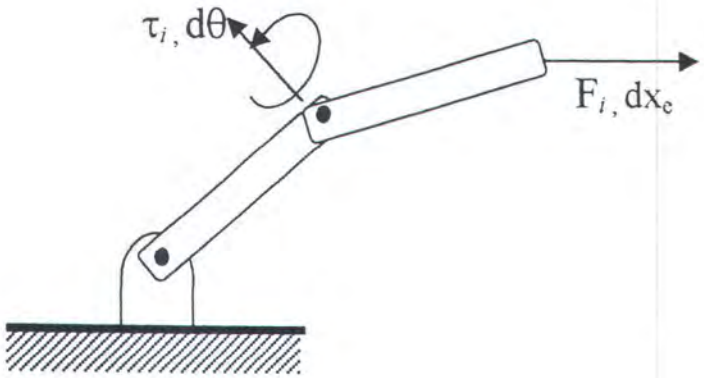
Dengan menggunakan (4.13) kita dapat menulis (4.21) sebagai :

$$dWork = \tau^T d\theta - F^T dx = \left(\tau - J^T F\right)^T d\theta \tag{4.21}$$

persamaan (4.21) hanya melibatkan $d\theta$, sebagai independen variabel untuk perpindahan geometri yang dapat diterima Untuk menghilangkan kerja virtual, dapat dilakukan dengan menghilangkan $dWork$, sehingga persamaan (4.21) menjadi :

$$\tau = J^T F \tag{4.22}$$

Persamaan (4.22) menunjukkan hubungan torsi yang diberikan pada tiap joint dengan gaya pada *end-effector*, yang sering disebut sebagai hubungan gaya statis robot.

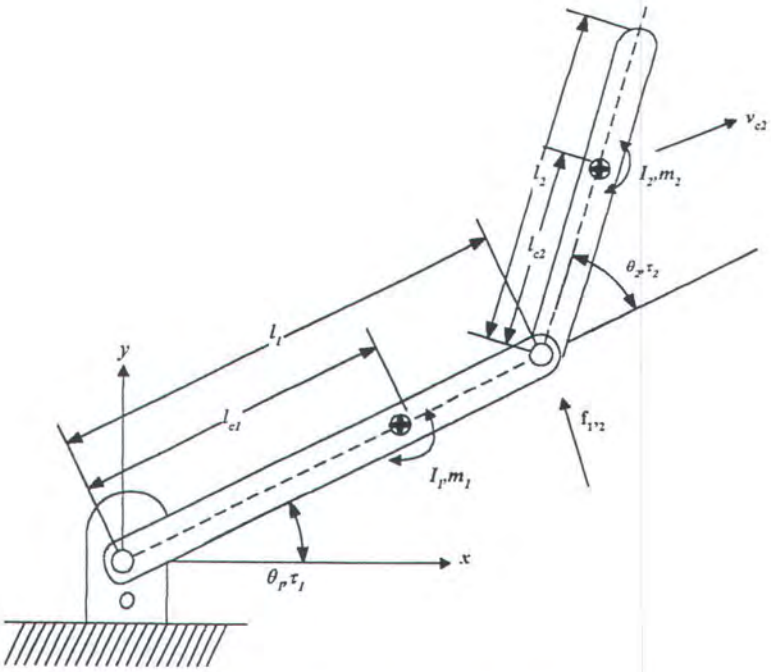


Gambar 4.3 Perpindahan virtual pada end-effector dan tiap joint

IV.4. DINAMIKA ROBOT PLANAR DUA DERAJAT KEBEBASAN

Dinamika robot diperlukan untuk mengetahui berapa besar gaya yang dibutuhkan untuk menggerakkan sebuah robot. Dua metode umum yang dipakai untuk memperoleh persamaan gerak dari robot adalah formulasi *Newton-Euler* dan formulasi *Lagrangian*. Formulasi Newton–Euler merupakan penjabaran langsung dari hukum Newton kedua mengenai gerak suatu benda. Pada bagian ini kita akan membahas mengenai dinamika robot planar dua derajat kebebasan dengan menggunakan formulasi Newton-Euler.

Dari hasil pengukuran parameter mekanik dari lengan robot planar dua derajat kebebasan (gambar 4.4), maka diperoleh hasil sebagai berikut (tabel 4.2);



Gambar 4.4 Parameter robot planar dua derajat kebebasan

Tabel 4.2 Parameter mekanik robot

Parameter	Hasil Pengukuran
M_1 (kg)	2,709
M_2 (kg)	1,862
L_1 (m)	0,3
L_2 (m)	0,3
Lc_1 (m)	0,214
Lc_2 (m)	0,176
I_1 (kg.m^2)	0,262
I_2(kg.m^2)	0,102

Pada robot planar direct drive dua derajat kebebasan, dengan menggunakan hubungan antara join displacement (θ_1, θ_2) dan torsi (τ_1, τ_2), maka akan diperoleh hubungan-hubungan sebagai berikut:

$$\omega_1 = \dot{\theta}_1$$
$$\omega_2 = \dot{\theta}_2 \tag{4.22}$$

$$v_{c1} = \begin{bmatrix} -l_{c1}\dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) \\ l_{c1}\dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) \end{bmatrix} \tag{4.23}$$

$$v_{c1} = \begin{bmatrix} -\{l_1 \sin(\theta_1) + l_{c2}\sin(\theta_1+\theta_2)\}\dot{\theta}_1 - l_{c2}\sin(\theta_1+\theta_2)\dot{\theta}_2 \\ \{l_1 \cos\theta_1 + l_{c2}\cos(\theta_1+\theta_2)\}\dot{\theta}_1 + l_{c2}\cos(\theta_1+\theta_2)\dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan-persamaan diatas kedalam persamaan berikut:

$$\tau_1 - \tau_2 - r_{oc1} \times m_1 \dot{v}_{c1} - r_{oc1} \times m_2 \dot{v}_{c2} + r_{oc1} + m_1 g + r_{0c1} \times m_2 g - I_1 \dot{\omega}_1 = 0 \tag{4.25}$$

maka akan diperoleh,

$$\tau_1 = H_{11}\ddot{\theta}_1 + H_{12}\ddot{\theta}_2 - h\dot{\theta}_2^2 - 2h\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + G \tag{4.26}$$

$$\tau_1 = H_{22}\ddot{\theta}_2 + H_{12}\ddot{\theta}_1 + h\dot{\theta}_1^2 + G_2 \tag{4.27}$$

dimana,

$$H_{11} = m_1 l_{c1}^2 + I_1 + m_2[l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2}\cos(\theta_2)] + I_2 \tag{4.28}$$

$$H_{12} = m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) + m_2 l_{c2}^2 + I_2 \tag{4.29}$$

$$H_{22} = m_2 l_{c2}^2 + I_2 \tag{4.30}$$

$$h = m_2 l_1 l_{c2} \sin(\theta_2) \tag{4.31}$$

$$G_1 = m_1 l_{c1} g \cos(\theta_1) + m_2 g\{l_{c2}\cos(\theta_1+\theta_2) + l_1 \cos(\theta_1)\} \tag{4.32}$$

$$G_2 = m_2 l_{c2} g \cos(\theta_1+\theta_2) \tag{4.33}$$

Dengan mengganti persamaan (4.26) dan (4.27) dengan nilai dari parameter yang telah diketahui, maka persamaan dinamik manipulator pada joint space adalah sebagai berikut,

$$\tau_1 = (0{,}5586 + 0{,}197 \cos\theta_2)\ddot{\theta}_1 + (0{,}16 + 0{,}098 \cos\theta_2)\ddot{\theta}_2 - (0{,}098 \sin\theta_2)\dot{\theta}_2^2 - (0.196 \sin\theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + (11{,}15 \cos\theta_1 + 3{,}21 \cos(\theta_1 + \theta_2))$$

$$\tau_1 = 0{,}16\ddot{\theta}_2 + (0{,}16 + 0{,}098 \cos\theta_2)\ddot{\theta}_1 + (0{,}098 \sin(\theta_2)\dot{\theta}_1^2 + (3{,}21 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

Tujuan dari analisa dinamika adalah untuk mengoptimalkan parameter robot *(mass properties)* dari tiap lengan atau link. Dengan hal tersebut diharapkan dapat dinamika yang diinginkan dapat dicapai.

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)

BAB V

BAB V

PENGUJIAN ROBOT

Bab ini membahas pengujian dari robot yang dibuat, dimana robot tersebut diberi suatu *manipulation task* berupa suatu lingkaran, elips dan garis lurus. Strategi kontrol yang digunakan adalah kontrol posisi berbasis koordinat kartesian. Trayektori yang dilalui oleh robot diperoleh dari persamaan polinomial derajat lima (*five cubic polynomial*).

V. 1. KONTROL POSISI BERBASIS KARTESIAN

Sebelum trayektori robot dapat diaplikasikan dalam koordinat kartesian, terlebih dahulu kita harus mengkonversikan sudut joint daripada robot dengan menggunakan inverse kinematik dari robot tersebut. Kontrol posisi berbasis koordinat kartesian merupakan bagian dari kontrol gaya, dimana variabel-variabelnya dibagi menjadi bagian yang dikontrol untuk posisi dan bagian yang dikontrol untuk gaya.

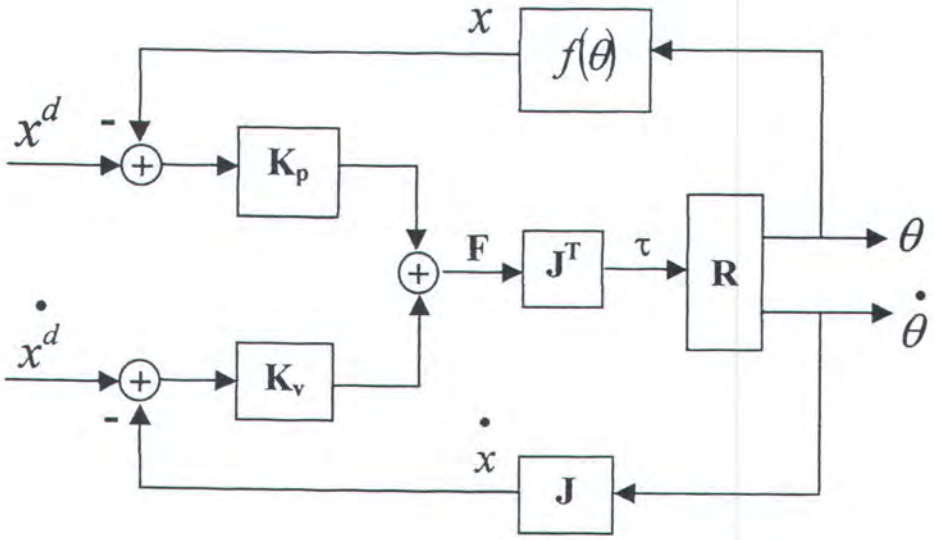
Kontroler proportional derivative posisi berbasiskan kartesian dapat didefinisikan sebagai berikut,

$$f = K_p(x_d - x) + K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) \tag{5.1}$$

dimana f adalah gaya pada end-effector dari robot.

Untuk mengevaluasi strategi kontrol ini, kita harus mengubah posisi dan kecepatan joint menjadi posisi dan kecepatan dari end-effector. Gaya yang bekerja

pada end-effector dapat dikonversikan menjadi torsi joint dengan hubungan seperti gambar 5.1.



Gambar 5.1 Kontrol posisi berbasis kartesian

Dimana dapat diketahui besar dari torsi (τ) dari persamaan berikut,

$$\tau = J^T f \tag{5.2}$$

$$\tau = J^T (K_p (x_d - x) + K_v (\dot{x}_d - \dot{x})) \tag{5.3}$$

V. 2. PERSAMAAN POLINOMIAL DERAJAT LIMA (FIVE CUBIC POLYNOMIAL)

Dalam aplikasinya, bermacam-macam interpolasi dapat digunakan. Akan tetapi pada tugas akhir ini akan dipaki interpolasi dengan menggunakan persamaan polinomial derajat lima. Secara umum persamaan orde lima dapat ditulis sebagai:

MILIK PERPUSTAKAAN ITS

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (5.4)$$

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

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 + 5a_5 t^4 \quad (5.5)$$

dan persamaan percepatan joint:

$$\ddot{q}(t) = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + 20a_5 t^3 \quad (5.6)$$

Dengan batasan-batasan sebagai berikut:

$q(t_0)$ = posisi awal robot

$q(t_f)$ = posisi akhir robot

$\dot{q}(t_0)$ = kecepatan awal robot (biasanya sama dengan nol)

$\dot{q}(t_f)$ = kecepatan akhir robot (biasanya sama dengan nol)

$\ddot{q}(t_0)$ = percepatan awal robot (biasanya sama dengan nol)

$\ddot{q}(t_f)$ = percepatan akhir robot (biasanya sama dengan nol)

Dari batasan yang ada, maka harga-harga dari a_1 sampai a_5 dapat dicari, yang selanjutnya digunakan sebagai posisi, kecepatan dan percepatan referensi robot .

Dari pendekatan polinomial diatas diperoleh persamaan polinomial untuk lingkaran seperti dibawah ini,

$$q(t) = \frac{20\pi}{tf^3} t^3 - \frac{30\pi}{tf^4} t^4 + \frac{12\pi}{tf^5} t^5 \quad (5.7)$$

$$\dot{q}(t) = \frac{60\pi}{tf^3} t^2 - \frac{120\pi}{tf^4} t^3 + \frac{60\pi}{tf^5} t^4 \quad (5.8)$$

$$\ddot{q}(t) = \frac{120\pi}{tf^3}t - \frac{360\pi}{tf^4}t^2 + \frac{240\pi}{tf^5}t^3 \tag{5.9}$$

Elips memiliki pendekatan polinomial yang sama dengan lingkaran untuk memperoleh nilai dari $q(t)$.

V. 3. PENGUJIAN DAN ANALISA

Pada tugas akhir ini robot diuji dengan memberikan suatu trayektori berupa lingkaran, elips dan garis lurus. Trayektori yang diberikan berbasis koordinat kartesian. Setelah robot menyelesaikan manipulation task yang diberikan, kemudian dilakukan analisa mengenai gaya yang terjadi pada lengan robot serta torsi yang diperlukan dengan menggunakan persamaan (5.1), (5.2) dan (5.3). Matrik Jacobian dari robot planar dua derajat kebebasan diperoleh sebagai berikut,

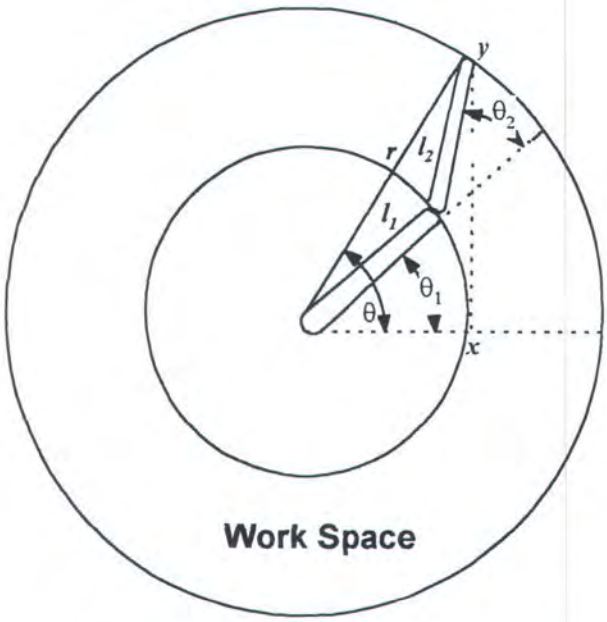
$$J = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \tag{5.10}$$

$$J^T = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

V.3.1. Lingkaran

Pada pengujian pertama robot diberi suatu manipulation task yang berupa lingkaran, dimana r (jari-jari) dari lingkaran ditentukan. Daerah kerja lengan robot ditunjukkan pada gambar 5.2, dimana panjang l_1 dan l_2 adalah 0,3 m; x dan y

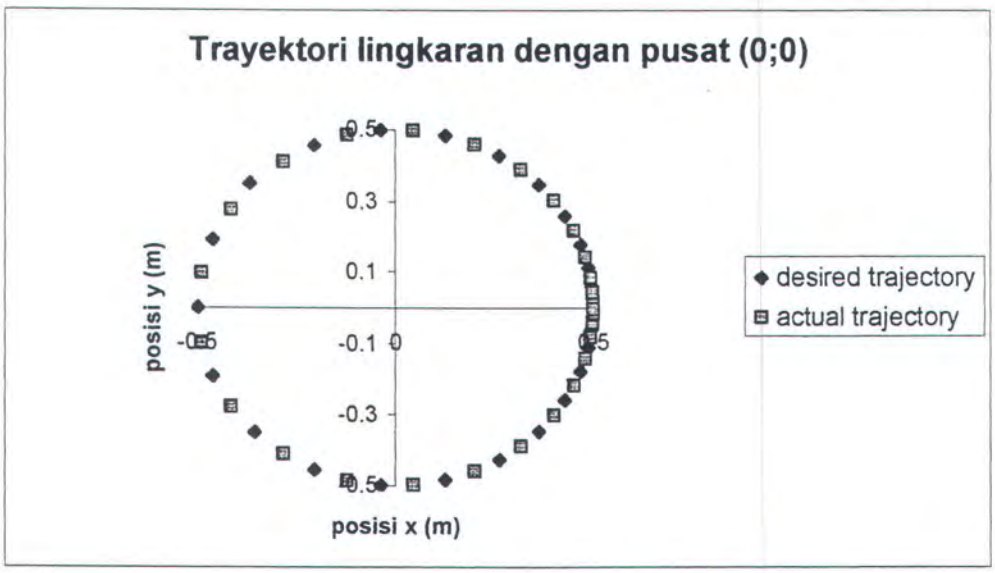
adalah posisi lengan robot pada koordinat kartesian; r adalah jari-jari yang ditentukan; θ adalah sudut antara end-effector terhadap base, θ_1 adalah sudut antara link 1 terhadap base dan θ_2 adalah sudut link 2 terhadap link 1.



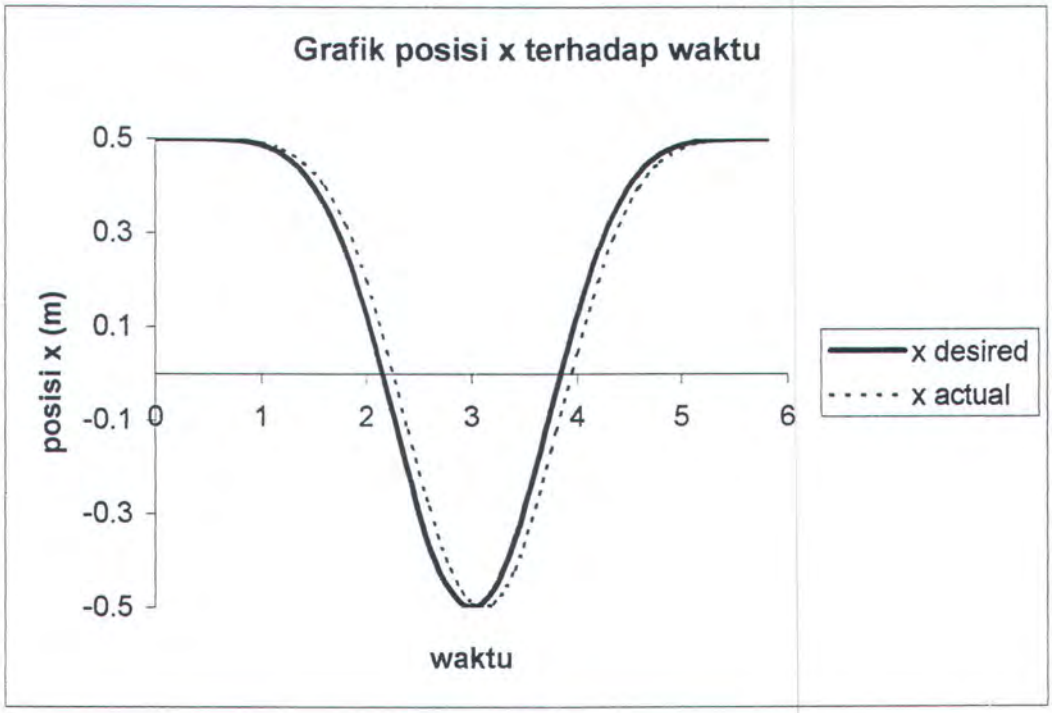
Gambar 5.2 Operational space lengan robot berbentuk lingkaran

Dengan menggunakan persamaan (5.7) dan (5.8) akan diperoleh posisi dari lintasan yang harus dilalui oleh robot. Untuk jari-jari r sebesar 0,5 m, dengan nilai tf sebesar 6 detik dan diambil titik-titik lintasan setiap 0,01 detik.

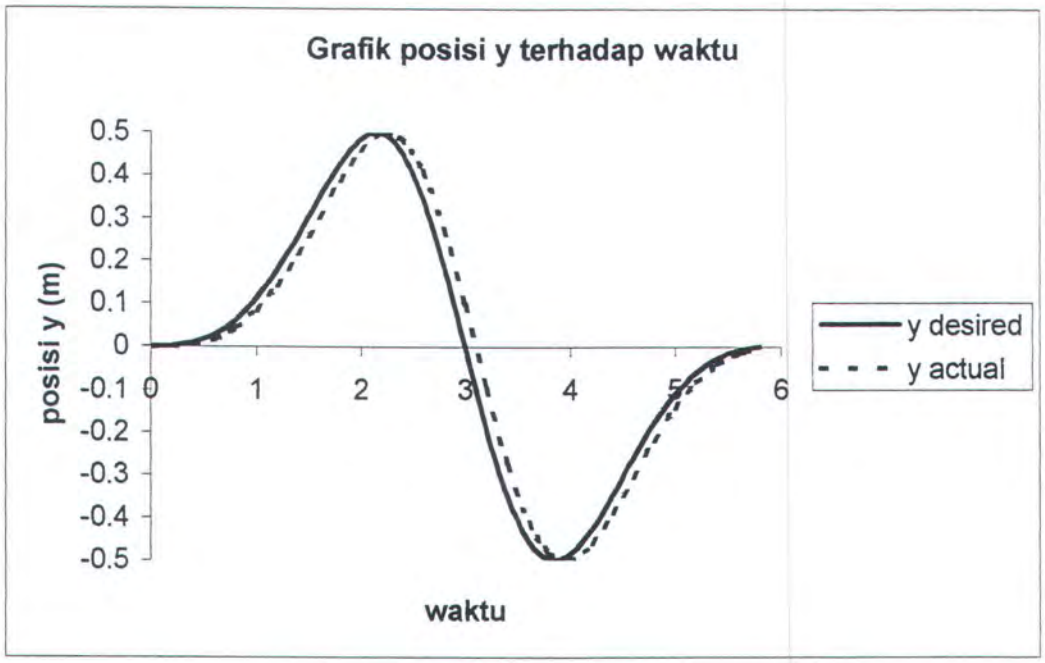
Dari hasil diatas dapat diperoleh gambar lintasan yang dilalui oleh lengan robot seperti pada gambar 5.3 dimana pusat lingkaran adalah (0,0)



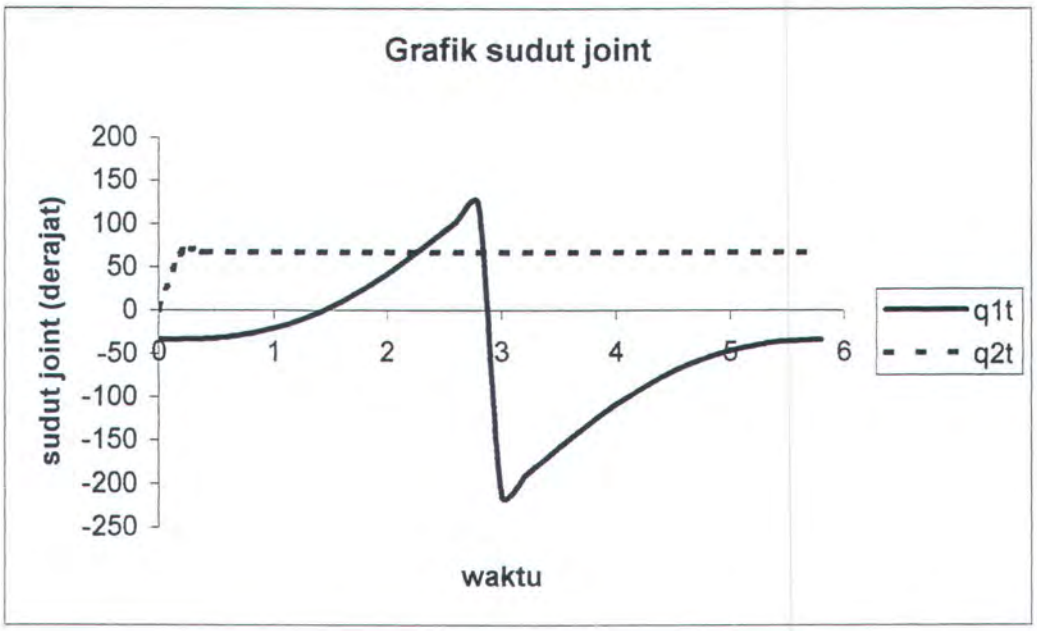
Gambar 5.3 Trayektori robot berbentuk lingkaran



Gambar 5.4 Posisi x terhadap waktu

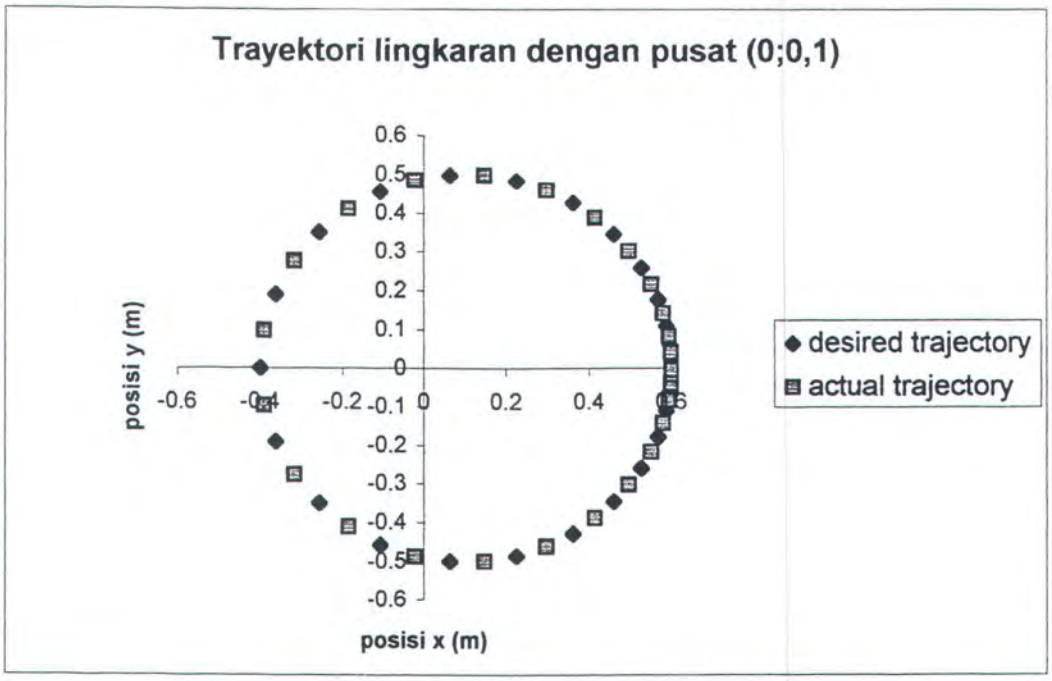


Gambar 5.5 Posisi y terhadap waktu

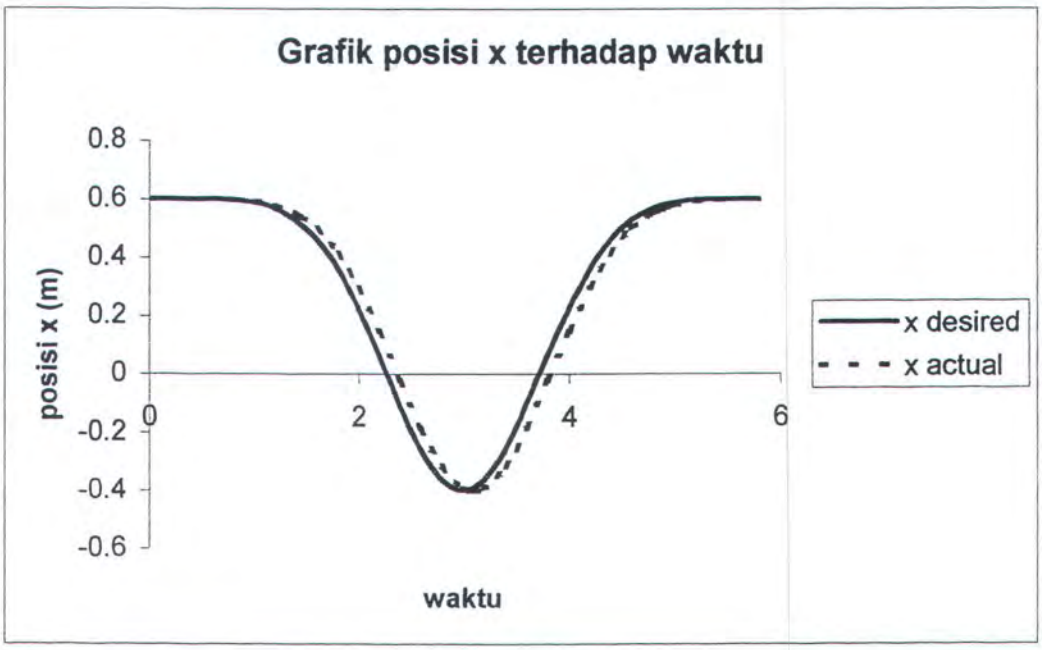


Gambar 5.6 Grafik sudut joint terhadap waktu

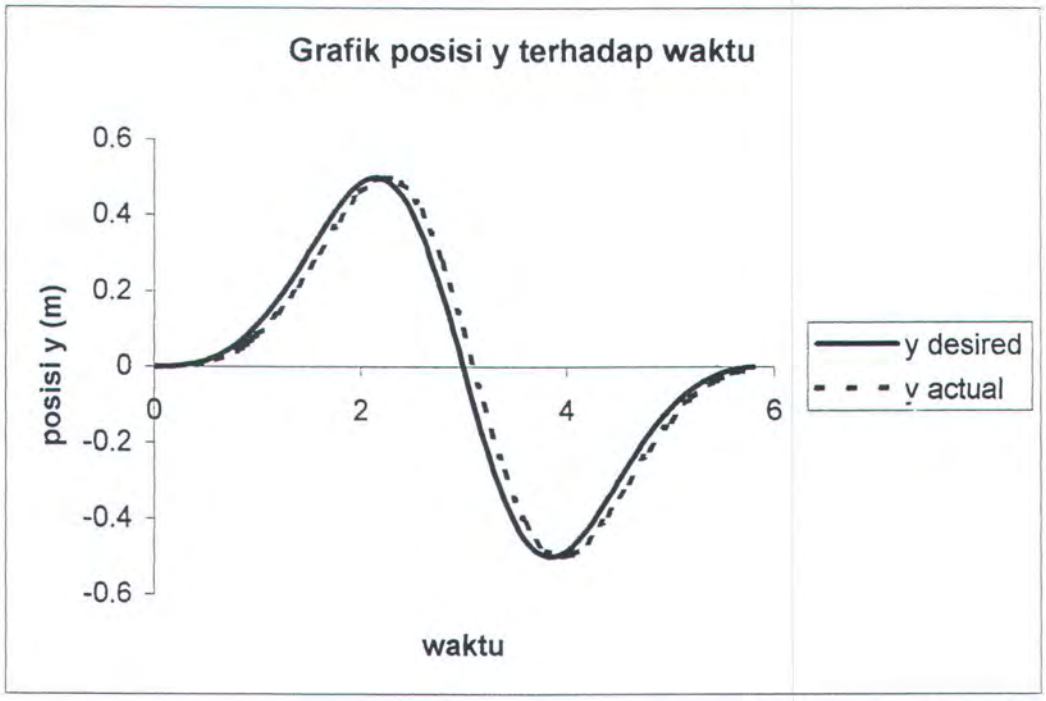
Untuk lingkaran dengan pusat pada (0;0,1) diperoleh hasil seperti berikut,



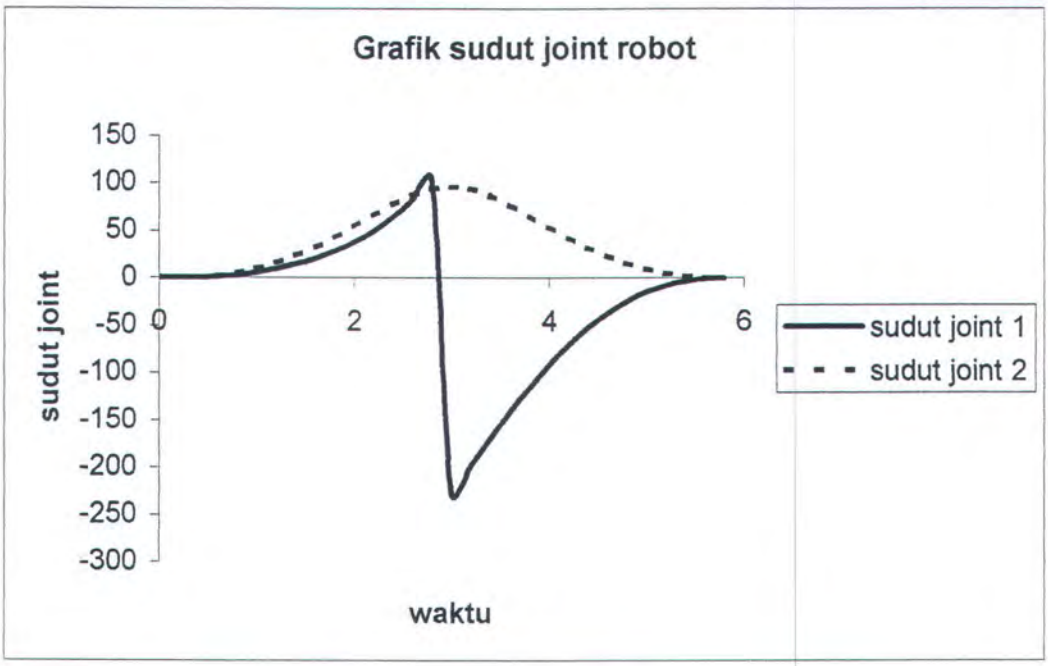
Gambar 5.7 Trayektori robot berbentuk lingkaran



Gambar 5.8 Posisi x terhadap waktu



Gambar 5.9 Posisi y terhadap waktu



Gambar 5.10 Grafik sudut joint terhadap waktu

MILIK PERPUSTAKAAN
ITS

V.3.2. Elips

Pada pengujian kedua robot diberi suatu manipulation task yang berupa elips, dimana r (jari-jari) dari elips dicari dengan menggunakan rumus,

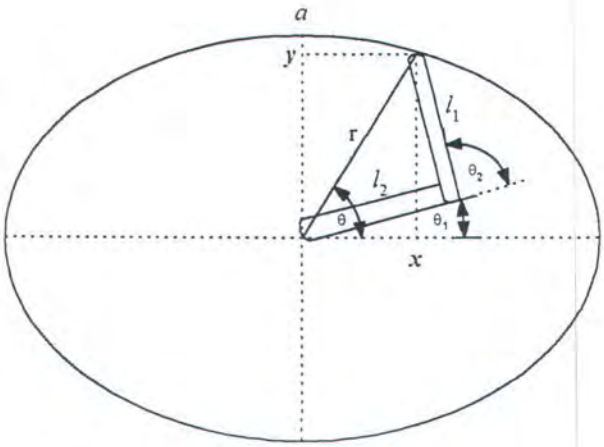
$$r = \sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2)}$$

dimana$a$ = sumbu minor (pendek) dari elips

b = sumbu mayor (panjang) dari elips

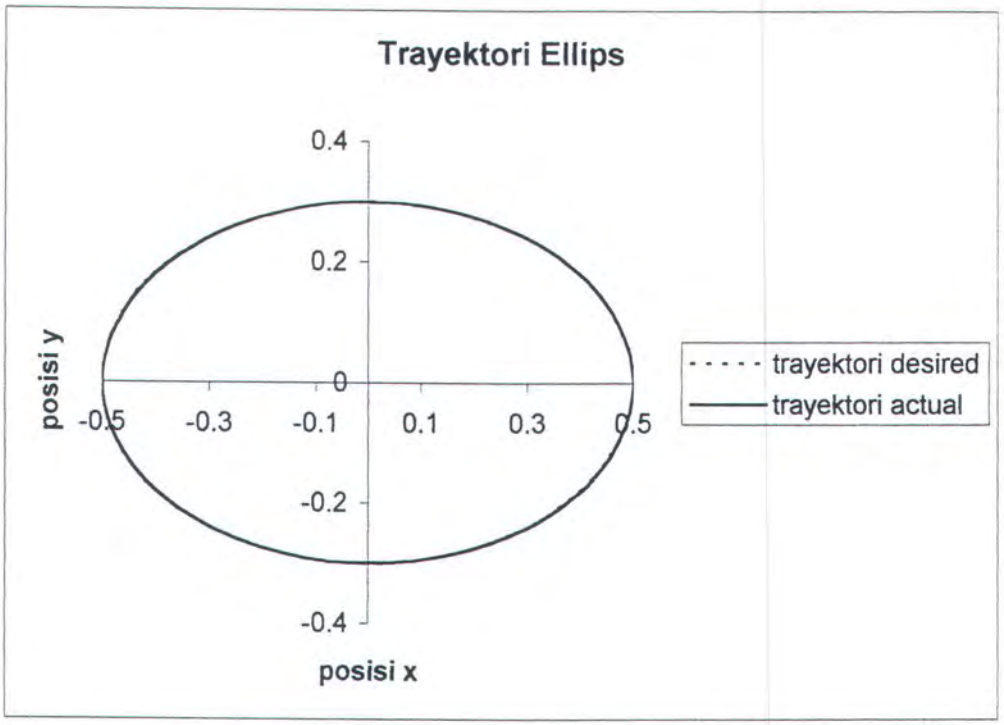
Nilai dari a dan b ditentukan dengan syarat $a < l_1$ dan $b<(l_1 + l_2)$.

Daerah kerja lengan robot ditunjukkan pada gambar 5.11, dimana panjang l_1 dan l_2 adalah 0,3 m; x dan y adalah posisi lengan robot pada koordinat kartesian; r adalah jari-jari yang ditentukan; θ adalah sudut antara end-effector terhadap base, θ_1 adalah sudut antara link 1 terhadap base dan θ_2 adalah sudut link 2 terhadap link 1.

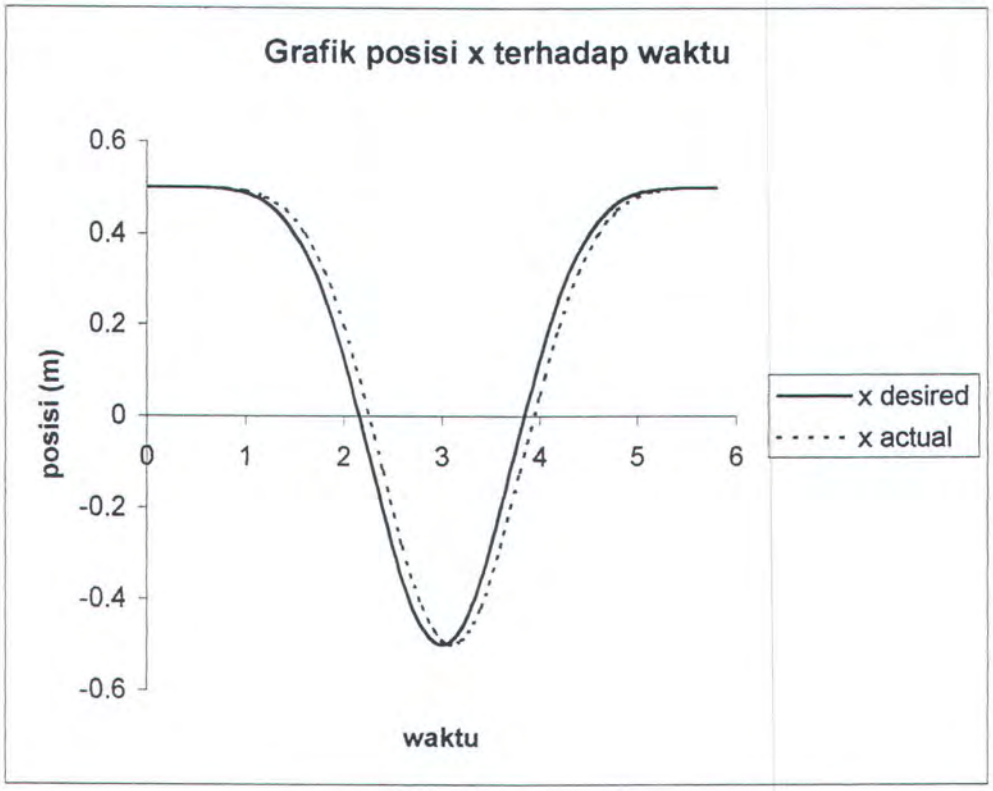


Gambar 5.11 Operational space lengan robot berbentuk elips

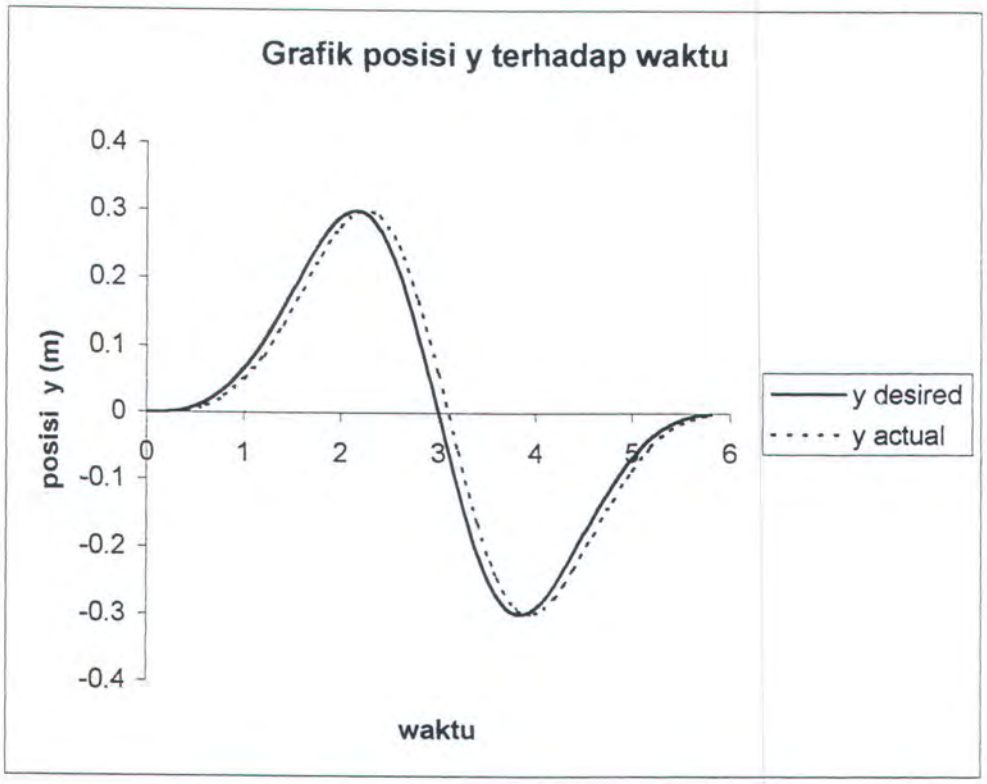
Dengan menggunakan persamaan (5.7) dan (5.8) akan diperoleh posisi dari lintasan yang harus dilalui oleh robot. Untuk jari-jari a = 30 cm dan b = 50 cm, dengan nilai tf sebesar 12 detik dan diambil titik-titik lintasan setiap 0,01 detik.



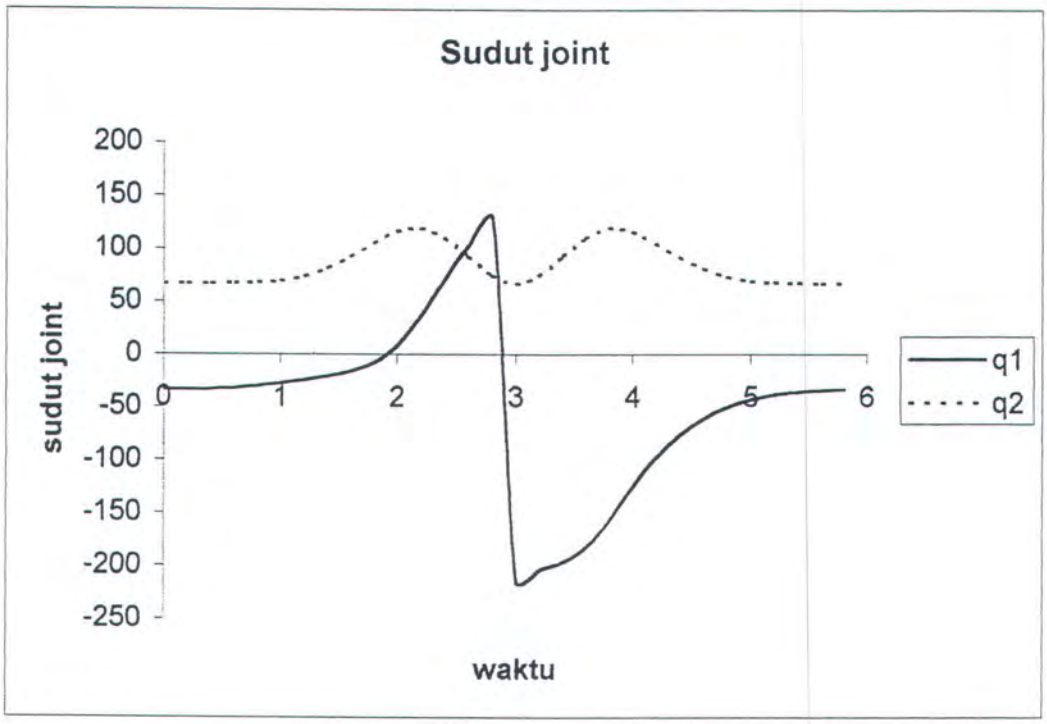
Gambar 5.12 Trayektori robot berbentuk elips



Gambar 5.13 Posisi x terhadap waktu



Gambar 5.14 Posisi y terhadap waktu



Gambar 5.15 Grafik sudut joint terhadap waktu

Akhir yang sesungguhnya dari setiap kehidupan adalah mengenal kehidupan yang takkan berakhit

William Penn

BAB VI

BAB VI

PENUTUP

VII.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 dibangun suatu robot planar direct drive dua derajat kebebasan dengan semaksimal mungkin mendekati model ideal dari suatu robot eksperimen.
2. Robot planar dua derajat kebebasan ini dapat dipergunakan sebagai suatu robot direct drive eksperimen (*experimental direct drive arm*), yang dapat dipergunakan sebagai penguji dari teori-teori robot yang ada dan yang akan dikembangkan.
3. Pengujian robot dilakukan dengan mengaplikasikan robot pada pengontrolan posisi dari end-effector. Dimana pada robot diberikan suatu *manipulation task* yang harus dikerjakan berupa suatu lingkaran, elips. Kontroler yang digunakan adalah kontroler proportional derivative(computed torque).
4. Dari hasil pengujian, terlihat bahwa semakin banyak titik yang dibangkitkan pada suatu trayektori maka gerakan yang dihasilkan oleh robot akan semakin halus.

VII.2. SARAN

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

1. Dalam pengembangan lebih lanjut, khususnya untuk computed torque, digunakan metode inverse dinamik, dimana parameter dinamik robot harus dihitung dengan lebih teliti lagi agar dapat memperoleh hasil yang lebih valid.
2. Perlu dipertimbangkan untuk menambah suatu alat sensor pada end-effector agar umpan balik dari posisi yang dihasilkan dapat diperoleh dengan lebih valid daripada hanya dengan menggunakan encoder pada motor.
3. Agar dapat diaplikasikan pada suatu manipulation task yang lebih kompleks, disarankan agar robot ini ditambah lagi dengan sebuah gripper sehingga dapat diaplikasikan ke suatu tugas tertentu.

Goodbye Everybody... my time has come....
Got live you all behind...
And face the truth...

(Queen)

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

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

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

Asada, H and Youcef-Toumi, Direct-Drive Robots, Theory and Practice, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1987

Compumotor, Step Motor and Servo Motor System and Controls, California, Parker Hannifin Corporation, 1998

Halliday, D and Resnick, R, Physic 3rd Edition, Canada, John Wiley and Sons, Inc., 1978

Leonard, Toni, Perencanaan Trayektori Robot untuk Aplikasi Penulisan Huruf, Laporan Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya,1998

Meriam, J. L, Dynamics 2nd Edition, Canada, John Wiley and Sons, Inc., 1971

Nego, Abed dan Arissandi S, Desain Mekanik pada Direct Drive Robot Planar Dua Derajat Kebebasan, Laporan Kerja Praktek, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya , 1999

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

Walsh, Philip James, Feedback Linearization of a Robotic Manipulator, Master Thesis, University Illinois at Urbana-Champaign, 1994

Carry on…Carry on

LAMPIRAN

LAMPIRAN. DATA PERALATAN ROBOT

Motor

Motor yang dipergunakan pada robot ini adalah DM 1015-B brushless direct drive servo dari Parker Compumotor. Data dari motor direct drive yang dipergunakan dapat dilihat pada tabel dibawah. Motor yang dipergunakan sebanyak dua buah dengan spesifikasi yang sama.

Peak Torque	15 N-m
Maximum Speed	2.0 rps
Encoder Resolution	655360 lines
Rotor Inertia	0,012 kg-m^2
Servo mass	5,5 kg
Rotor mass	2,552 kg
Axial Load	
▪ Compression	6600 lb
▪ Tension	2200 lb
Overhung load	148 ft-lb
Torque ripple	5%

Driver untuk menggerakkan motor adalah DD Servo Actuator SD1015B62 dari Compumotor. Data driver motor pada tugas akhir ini seperti pada tabel berikut,

Input Signal	Speed input signal	DC ± 10 V/2,4 rps
	Positioning input signal	Serial pulsa/1,572 MHz max
	Torque command signal	± 8 V/Maximum torque
	Rotation direction command signal	H: CW ; L:CCW
Output Signal	Speed output	+6V (CW) ; -6V (CCW)
	Encoder output	Zero positioning signal
	Monitor output	2,5 Hz Step response output

PCL-718

PCL-718 adalah digital to analog converter dari Advantech Inc. dengan spsesifikasi berikut,

Analog Input

- Channels: 16 single-ended or 8 differential
- Resolution: 12 bits
- Input range selection: Software controlled
- Auto channel/gain scanning
- Triggering: Software, pacer or external
- Data transfer: Program control, interrupt (IRQ 2 ~ 7) or DMA (Ch. 1 or 3)
- Input impedance: 10 MW
- Input overvoltage: ±30 V DC max.

Analog Output (D/A Converter)

- Channels: One 12-bit (double-buffered)
- Output range:
  0 ~ +5 V or 0 ~ +10 V with internal reference
  0 ~ +10 V or 0 ~ -10 V with external reference

Digital Input/Output

- Channels: 16 inputs, 16 outputs (all TTL compatible)
- Input voltage: Low (0 ~ +0.8 V) High (min. +2.0 V)
- Input load: Low: +0.5 V @ 0.4 mA max. High: +2.7 V @ 0.05 mA max.
- Output voltage: Low: 0 ~ +0.4 V High: min. +2.4 V
- Driving capacity:
  Low: sink 8 mA @ 0.5 V max. High: source -0.4 mA @ 2.4 V min.

A/D Pacer and Counter (8254)

- A/D pacer: 32-bit with 10 MHz or 1 MHz time base
- Max. and min. rates: 2.5 MHz to 0.00023 Hz
- Counter: One 16-bit counter with 100 kHz time base

Lengan Robot

Parameter – Parameter mekanik lengan robot (massa lengan, moment inertia, titik berat) adalah sebagai berikut,

Parameter Link 1

	AutoCad	Pengukuran
Massa (Kg)	2,65	2,709
I_C (Kg-m^2)	0,23	0,262
Titik Berat	0,212	0,214

Parameter Link 2

	AutoCad	Pengukuran
Massa (Kg)	2,11	1,862
I_C (Kg-m^2)	0,123	0,102
Titik Berat	0,1706	0,176

Parameter mekanik yang merupakan gabungan dari semua komponen robot (massa lengan, massa motor, moment inertia, titik berat, kecuali mur dan baut) adalah seperti berikut,

Composite Parameter Link 1

	Pengukuran
Massa (Kg)	8,209
I_C (Kg-m^2)	0,499
Titik Berat	0,214

Composite Parameter Link 2

	Pengukuran
Massa (Kg)	4,414
I_C (Kg-m^2)	0,3325
Titik Berat	0,176

RIWAYAT HIDUP

Abed Nego Gultom dilahirkan di Jayapura 23 Juni 1975, sebagai anak ke enam dari enam bersaudara keluarga B. Parulian Gultom, SH. Bertempat tinggal di Jl. RI Macan Tutul No.10, Jayapura. Sejak tahun 1993 terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Riwayat pendidikan :

- TK BKOW Dok V Atas Jayapura lulus tahun 1981
- SD YPPK Kristus Raja Dok V Jayapura lulus tahun 1987
- SMPN I Jayapura Utara lulus tahun 1990
- SMAN 2 Jayapura lulus tahun 1993

Pada bulan Februari 2000 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.