

**APLIKASI MODEL MOBILE MANIPULATOR PADA ROBOT  
PENJINAK BOM**

***MODEL APLICATION ON MOBILE MANIPULATOR BOMB  
DISPOSAL ROBOT***

**RANDIS**



**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2013**

**APLIKASI MODEL MOBILE MANIPULATOR PADA ROBOT  
PENJINAK BOM**

**Tesis**

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister**

**Program Studi  
Teknik Mesin / Konstruksi Mesin**

**Disusun dan diajukan oleh**

**RANDIS  
P2202211403**

**Kepada**

**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2013**

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : RANDIS

Nomor Pokok : P2202211403

Program studi : Teknik Mesin / Konstruksi Mesin

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 1 Agustus 2013

Yang menyatakan,

**RANDIS**

## PRAKATA



*Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,*

Puji syukur atas segala nikmat yang begitu banyak yang Allah *subhanahu wa ta'ala* anugrahkan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Aplikasi Model Mobile Manipulator Pada Robot Penjinak Bom** sesuai dengan waktu yang telah di tentukan.

*“ Jika kamu menghitung-hitung nikmat Allah, maka niscaya kamu tidak akan dapat menentukan jumlahnya”. [QS. An Nahl:18]*

*“ Dan apa saja nikmat yang ada pada kamu, maka dari Allahlah (datangngya)”. [QS. An Nahl:53]*

Tugas Akhir ini merupakan kewajiban dan salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Master pada Jurusan Mesin Fakultas Teknik Pascasarjana Universitas Hasanuddin.

Pelaksanaan dan penyusunan Tugas Akhir ini melibatkan banyak pihak. Atas dukungan dan bantuannya kami mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. **Bapak Rafiuddin Syam, ST., M.Eng., PhD.**, selaku ketua Program Studi Pascasarjana Teknik Mesin sekaligus sebagai ketua komisi penasehat atas segala waktu dan bimbingannya selama penyusunan tesis ini.

2. **Prof. Dr. Ir. H.Hammada Abbas, MSME**, selaku anggota komisi penasehat atas segala waktu dan bimbingannya selama penyusunan tesis ini..
3. **Prof. Dr. Ir. Syukri Himran, MSME**, selaku Ketua Tim Penguji atas waktu dan segala masukan yang bermanfaat dalam penyelesaian tesis ini.
4. **Dr. Eng, Jalaluddin, ST, MT.** selaku Anggota Tim Penguji atas waktu dan segala masukan yang bermanfaat dalam penyelesaian tesis ini.
5. **Dr.Ir.Johannes Leonard, DEA**, selaku Anggota Tim Penguji atas waktu dan segala masukan yang bermanfaat dalam penyelesaian tesis ini.
6. **Dosen dan Staff karyawan pada Program Pascasarjana Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin** yang telah memberikan pengetahuan serta membimbing penulis selama proses perkuliahan.
7. **Segenap Tekhnisi di Workhsop Fakultas Teknik Gowa**, yang telah membantu dalam penyelesain Tugas Akhir ini.
8. **Ibunda H. Haya dan Ayahanda H. Baharuddin** yang tak henti-hentinya mendoakan dan memberikan bantuan financial demi tercapainya penyelesaian Tugas Akhir ini.
9. **Istri tercinta, Nurul Hardiyanti** yang setia mendampingi dan memberi semangat.

10. **Sahabat terbaikku, Zulkifli, Saiful, Pak Edi, Hamka, Pak John dan Pak Iqbal** serta seluruh teman-teman yang telah memberikan semangat dan dorongannya. Terima kasih untuk semuanya.

Penulis menyadari dalam penyusunan Tugas Akhir kami masih jauh dari kesempurnaan. Akhir kata penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun karena penulis sangat menyadari sepenuhnya bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan dan tidak lepas dari kekurangan karena sesungguhnya kesempurnaan itu hanyalah milik Allah *subhanahu wa ta'ala*.

Harapan terakhir penulis semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan digunakan sebagaimana mestinya bagi semua pihak khususnya bagi mahasiswa di Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Makassar, 1 Agustus 2013

Randis

## ABSTRAK

**RANDIS.** Aplikasi Model Mobile Manipulator Pada Robot Penjinak Bom (dibimbing oleh **Rafiuddin Syam** dan **Hammada Abbas**).

Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun robot penjinak bom serta menghitung kinematika manipulator dan mobile robot, kemudian mengujinya pada program matlab.

Penelitian dilakukan di workshop Jurusan Teknik Mesin Universitas Hasanuddin Gowa. Data yang diambil adalah panjang setiap lengan dari manipulator robot, jari-jari roda, lebar robot, dan jarak antara titik tengah antara 2 roda. Perhitungan kinematika mobile manipulator selanjutnya di formulasikan dan di simulasikan pada program matlab, selanjutnya merancang robot penjinak bom sesuai dengan perhitungan dan simulasi yang telah di lakukan.

Hasil penelitian diperoleh inverse kinematik dari kinematika manipulator yaitu  $\theta_1 = 47,5003^\circ$ ,  $\theta_2 = 226,9114^\circ$ ,  $\theta_3 = 85,5884^\circ$ , perhitungan mobile robot untuk kecepatan diperoleh  $\dot{x} = 5,932\pi$ ,  $\dot{y} = 10,155\pi$   $\dot{\theta} = 13,33\pi$ . Sedangkan perhitungan mobile robot untuk percepatan diperoleh  $\ddot{x} = -15,07$ ,  $\ddot{y} = -5,59$ ,  $\ddot{\theta} = 10,66$ . Simulasi pada program Matlab dengan merubah variabel sudut lengan robot menggambarkan pergerakan lengan dari aktuator robot.

Kata kunci : robot penjinak bom, mobile manipulator, program Matlab.

## ABSTRACT

**RANDIS.** Model Application on Mobile Manipulator Bomb Disposal Robot (mentored by **Rafiuddin Syam** and **Hammada Abbas**).

This research aims to design a bomb disposal robot and calculating manipulator and mobile robot kinematics, and then test it on matlab program.

The research was conducted in the Department of Mechanical Engineering workshop Hasanuddin Universitas of Gowa. The data is taken from the long arm robotic manipulator, the radius of the wheel, the width of the robot, and the distance between the midpoints of the two wheels. Mobile manipulator kinematics calculations further formulated and simulated on matlab program, further designed a bomb disposal robot in accordance with the calculations and simulations that have been done.

The results obtained by the inverse kinematics of the manipulator kinematics  $^{\circ} \theta_1 = 47.5003$ ,  $\theta_2 = 226.9114$   $^{\circ}$ ,  $\theta_3 = 85.5884$   $^{\circ}$ , a mobile robot for velocity calculations obtained  $x = 5.932\pi$ ,  $y = 10.155\pi$ ,  $\theta = 13.33\pi$ . While the calculation for the acceleration of the mobile robot is obtained  $\ddot{x} = -15.07$ ,  $\ddot{y} = -5.59$ ,  $\ddot{\theta} = 10.66$ . Matlab simulation program by changing the angle variables describing the movement of the robot arm from the actuator arm robot.

Keywords: bomb disposal robots, mobile manipulator, Matlab program.

## DAFTAR ISI

|                            |             |
|----------------------------|-------------|
| <b>PRAKATA</b> .....       | <b>v</b>    |
| <b>ABSTRAK</b> .....       | <b>viii</b> |
| <b>ABSTRACT</b> .....      | <b>ix</b>   |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....    | <b>x</b>    |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....  | <b>xiv</b>  |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> ..... | <b>xv</b>   |

### **BAB I PENDAHULUAN**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| A. Latar Belakang .....     | 1 |
| B. Rumusan Masalah .....    | 3 |
| C. Tujuan Penelitian .....  | 3 |
| D. Manfaat Penelitian ..... | 4 |
| E. Batasan Masalah .....    | 4 |

### **BAB II TEORI DASAR**

|  |    |
|--|----|
| A. Jenis Robot Mobile Manipulator .....              | 5  |
| 1. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 4 roda ..... | 6  |
| 2. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 6 roda ..... | 7  |
| 3. Robot Mobile Manipulator Beroda Caterpillar ..... | 8  |
| 4. Robot Mobile Manipulator Beroda Omni .....        | 9  |
| B. Komponen Dasar Robot .....                        | 10 |
| 1. Manipulator .....                                 | 10 |
| 2. Sistem Kendali .....                              | 11 |
| 3. Power Supply .....                                | 12 |
| 4. Efector .....                                     | 13 |
| C. Robot Manipulator.....                            | 14 |
| 1. Konfigurasi Manipulator .....                     | 14 |
| a. Robot Cartesian .....                             | 16 |
| b. Robot Silindris .....                             | 17 |

|   |    |
|---|----|
| c. Robot Polar .....                              | 18 |
| d. Robot SCARA .....                              | 19 |
| e. Robot Articulated .....                        | 19 |
| 2. Sistem Penggerak Robot .....                   | 20 |
| 3. Sensor .....                                   | 20 |
| D. Kinematika Robot .....                         | 21 |
| 1. Denavit-Hartenberg Parameters .....            | 21 |
| 2. Penggunaan Denavit-Hartenberg Parameters ..... | 22 |
| E. Mobile Robot .....                             | 25 |
| 1. Konsep Dasar Mobile Robot .....                | 25 |
| 2. Kinematika Mobile Robot .....                  | 27 |
| F. Kesetimbangan .....                            | 29 |
| G. ATmega 8535 .....                              | 31 |
| H. Prinsip Kerja Sensor Garis .....               | 37 |
| I. Error Tracking Lintasan .....                  | 40 |
| J. Prinsip Dasar Sistem Kendali .....             | 43 |
| 1. Jenis-jenis Pengontrolan .....                 | 44 |
| a. Sistem Kontrol Loop Terbuka .....              | 44 |
| b. Sistem Kontrol Loop Tertutup .....             | 44 |

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

|  |    |
|--|----|
| A. Waktu dan Tempat .....              | 46 |
| B. Alat dan Bahan yang Digunakan ..... | 46 |
| 1. Alat .....                          | 46 |
| 2. Bahan .....                         | 49 |
| C. Pelaksanaan Penelitian .....        | 53 |
| 1. Tahap Persiapan .....               | 53 |
| 2. Tahap Perancangan .....             | 53 |
| 3. Tahap Simulasi .....                | 53 |
| D. Gambar Ilustrasi Perancangan .....  | 54 |
| E. Diagram Alir Penelitian .....       | 56 |

**BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

|  |    |
|--|----|
| A. Analisis Kinematika Robot penjinak Bom .....    | 57 |
| Persamaan Kinematika Manipulator Robot .....       | 57 |
| Analisis Kinematika Mobile Robot .....             | 78 |
| B. Keseimbangan Robot .....                        | 82 |
| C. Perhitungan Error untuk tracking lintasan ..... | 86 |
| D. Simulasi Matlab .....                           | 89 |

**BAB V PENUTUP**

|                     |    |
|---------------------|----|
| A. Kesimpulan ..... | 97 |
| B. Saran .....      | 98 |

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b> | <b>99</b> |
|-----------------------------|-----------|

**LAMPIRAN**

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Aksi terorisme yang terjadi belakangan ini semakin meningkat terutama di Indonesia. Jenis bom yang digunakan juga sudah bervariasi, mulai dari jenis bom dengan daya rendah sampai dengan penggunaan bom dengan daya ledak yang cukup besar seperti: bom Bali pada tahun 2002, bom di JW Marriot pada tahun 2003, bom di depan kedutaan besar Australia pada tahun 2004 dan bom Bali II pada tahun 2005, dan yang terakhir bom solo pada tahun 2012 (Hutama, 2013). Bahkan aksi terorisme berupa bom ini tidak hanya terjadi di kota-kota besar akan tetapi sudah merambah ke perkampungan dan pedesaan.

Salah satu langkah untuk mengurangi terjadinya ledakan bom adalah menjinakkan bom tersebut. Namun pekerjaan menjinakkan bom adalah salah satu pekerjaan yang memiliki resiko tinggi (Budianto, 2013). Sewaktu-waktu bom tersebut dapat meledak, sebagaimana peristiwa bom buku yang memakan korban seorang anggota polisi (Winarto, 2011). Oleh karena itu untuk mengurangi resiko jatuhnya korban jiwa diperlukan sebuah alat yang dapat menggantikan tugas manusia.

Salah satu hal yang dapat dibuat untuk menggantikan tugas manusia dalam pelaksanaan tugas tersebut adalah Robot. Robot yang sering digunakan untuk pelaksanaan penjinak bom adalah jenis dari

*security robot* . *Security robot* yang paling sering digunakan untuk menjinakkan bom adalah *mobile robot* yang dilengkapi lengan manipulator dengan gripper diujungnya yang berfungsi untuk memindahkan bom tersebut ke tempat yang aman untuk dijinakkan (Rahman, 2011). Pada prinsipnya robot penjinak bom ini sama dengan *security robot* yaitu gabungan antara *mobile robot* dan *manipulator robot*. *Mobile robot* merupakan base dari sistem ini. Sedangkan *manipulator robot* diletakkan dibagian atas dari base, yang berfungsi mirip lengan manusia.

Problem yang muncul saat ini adalah belum adanya robot penjinak bom dengan harga yang terjangkau dengan kemampuan yang menjanjikan. Robot penjinak bom yang sering digunakan untuk pertahanan keamanan di Indonesia adalah robot penjinak bom dari Amerika yang memiliki harga yang sangat tinggi (Igun, 2011). Sedangkan apabila dibandingkan dengan mendesain dan membuat robot penjinak bom sendiri kita dapat menggunakan biaya yang lebih murah tetapi fungsi yang sama, sehingga dapat menghemat pengeluaran negara dalam bidang pertahanan dan keamanan.

Pada penelitian sebelumnya, digunakan robot penjinak bom dengan menggunakan manipulator 4-Joint (DOF) yang didapat dengan metode DH Parameter dengan sistem kontrol berbasis wireless, dengan kontrol cukup baik untuk mengarahkan robot *path* (lintasan) yang telah ditentukan (Suwarno, 2008).

Berdasarkan hal tersebut diatas, penulis tertarik untuk mendesain suatu robot. Dalam hal ini adalah robot penjinak bom yang dapat membantu manusia dalam menjinakkan bom demi mengurangi jatuhnya korban jiwa. Selain itu diharapkan dengan diciptakannya robot ini dapat menghemat pengeluaran negara dalam pembelian robot penjinak bom yang sangat mahal itu. Oleh karena itu penulis mengangkat masalah ini sebagai bahan penulisan Tesis dengan judul : ***Aplikasi model Mobile Manipulator Pada Robot Penjinak Bom.***

### **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas maka dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana mendesain dan membuat Robot penjinak bom..
2. Bagaimana merumuskan persamaan-persamaan kinematika mobile manipulator pada robot penjinak bom.
3. Bagaimana mensimulasikan pergerakan mobile dan manipulator robot dengan program berbasis MATLAB.

### **C. Tujuan Penelitian**

Secara umum tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian Analisis Kinematika Mobile Manipulator Robot Penjinak Bom ini adalah :

1. Rancang bangun robot penjinak bom.

2. Menganalisa pergerakan dan kinematika pada robot penjinak bom.
3. Mensimulasikan pergerakan mobile dan manipulator robot dengan program berbasis MATLAB.

#### **D. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat-manfaat yang dapat diperoleh dari Analisis Kinematika Mobile Manipulator Robot Penjinak Bom ini adalah :

1. Manfaat umum : dapat diaplikasikan pada bidang pertahanan dan keamanan yaitu membantu TNI dan Polri dalam menjinakkan bom.
2. Manfaat khusus : Untuk menambah referensi serta diharapkan berguna sebagai bahan perbandingan untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan penelitian ini.

#### **E. Batasan Masalah**

Mengingat luasnya ruang lingkup masalah, maka penelitian ini dibatasi pada :

1. Analisis kinematika berkaitan dengan kajian gerakan robot tanpa meninjau penyebabnya.
2. Perhitungan kesetimbangan pada robot penjinak bom.

## **BAB II**

### **TEORI DASAR**

#### **A. Jenis Robot Mobile Manipulator**

Penggunaan robot mobile manipulator pada saat ini sudah sangat luas, dimana sistem robot ini dibangun dan mengacu pada lengan manipulator robot yang terpasang pada platform mobile robot. Sistem robot mobile manipulator menggabungkan keuntungan dari platform mobile dan lengan manipulator robot, serta mengurangi kelemahan keduanya. Misalnya, platform mobile memperluas ruang kerja lengan, sementara lengan menawarkan fungsi operasional yang lebih kompleks.

Sebuah sistem Mobile Manipulator menawarkan keuntungan ganda yaitu, mobilitas yang ditawarkan oleh platform mobile dan ketangkasan yang ditawarkan oleh manipulator. Platform mobile menawarkan ruang kerja tak terbatas untuk manipulator. Derajat kebebasan ekstra dari platform mobile juga menyediakan pengguna dengan lebih banyak pilihan. Namun pengoperasian sistem tersebut lebih sulit karena banyak derajat kebebasan dan masukan yang di butuhkan.

Robot dapat dibangun dengan menggunakan berbagai macam roda, misalnya beroda empat, beroda enam, dan beroda caterpillar (tank-treaded), atau beroda omni. Pemilihan jenis roda juga harus cermat dimana material roda yang lebih lembut memiliki koefisien traction yang besar, dan koefisien traction yang besar memberi friction yang besar pula,

sehingga dibutuhkan daya yang besar untuk menggerakkan motor. Berikut kelebihan dan kekurangan dari tiap jenis roda yang digunakan pada robot mobile manipulator :

### 1. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 4 Roda



Gambar 1. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 4 Roda  
Sumber : <http://www.mobilerobots.com/researchrobots/SeekurJr.aspx>

Kelebihan :

- Berat roda terbagi rata antara keempat roda *driver* robot.
- Memiliki 4 motor. Bila 1 motor rusak, maka robot masih dapat berjalan lurus.

Kekurangan :

- Memerlukan daya baterai yang lebih besar untuk menggerakkan 4 motor.
- Saat berputar arah, daya yang diperlukan lebih besar lagi.

## 2. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 6 Roda



Gambar 2. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 6 Roda  
Sumber: <http://bomb.turbosquid.com/>

Kelebihan :

- Memiliki semua kelebihan yang dimiliki robot beroda 4.
- Memiliki 6 motor sehingga kekuatannya lebih besar dan lebih seimbang.

Kekurangan :

- Menggunakan baterai berdaya besar.
- Cepat menguras daya baterai.
- Saat berputar arah, daya yang diperlukan sangat besar.

### 3. Robot Mobile Manipulator Beroda Caterpillar (tank-tread)



Gambar 3. Robot Mobile Manipulator beroda caterpillar  
Sumber : <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article.html>

Kelebihan :

- Stabil pada segala kondisi tanah dan permukaan yang berkontur, berkat permukaan roda yang luas.
- Hanya memerlukan 1 motor setiap roda.

Kekurangan :

- Sulit untuk bergerak berbelok, karena tread lebih mudah lepas.
- Tread Harus ditahan sedemikian rupa agar tidak lepas dari motor.
- Saat berbelok, memakan daya yang besar dari baterai karena harus melepaskan diri dari frictional contact dari permukaan.
- Memerlukan motor kuat untuk melepaskan frictional contact.

#### 4. Robot Mobile Manipulator Beroda Omni



Gambar 4. Robot Mobile Manipulator Beroda Omni

Sumber: <http://www.armedrobots.com/kukas-youbot-expensive-but-beautiful>

Kelebihan :

- Mampu bergerak ke segala arah pada sudut manapun tanpa harus memutar terlebih dahulu.
- Mampu melakukan gerakan yang kompleks untuk mencapai posisi tertentu.
- Tidak membutuhkan torsi motor yang besar.

Kekurangan :

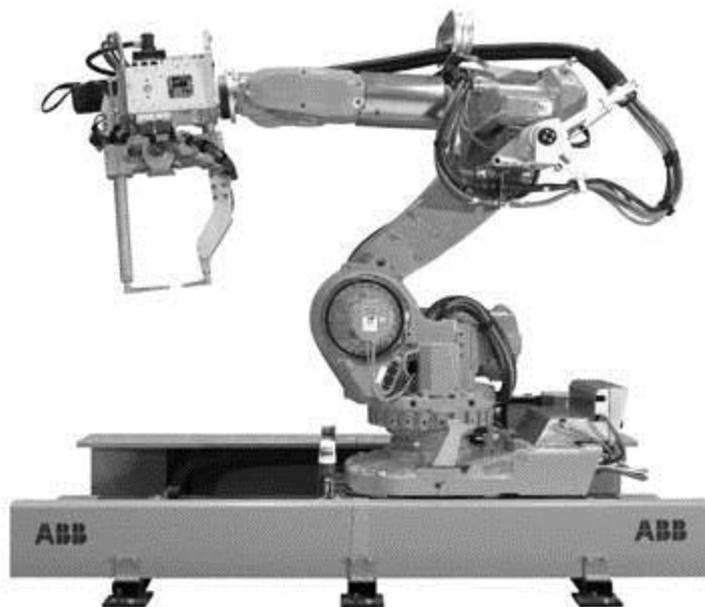
- Tidak memungkinkan bekerja pada contour permukaan yang kasar dan tidak rata.

## B. Komponen Dasar Robot

Sistem robot memiliki memiliki tiga komponen dasar, yaitu : Manipulator, kendali, dan Power (daya). *Efektor* sering ditemukan pada beberapa sistem robot, tetapi sifatnya tidak harus ada (Asriadi, 2006).

### 1. Manipulator

Manipulator memiliki dua bagian, yaitu bagian dasar dan bagian tambahan. Gambar 5 memberikan gambaran tentang bagian dasar dan bagian tambahan.



Gambar 5. Komponen dasar Manipulator robot

Sumber: <http://www.edn.com/design/industrial-control/4209595/Build-a-Robot-with-your-Kid-Part-I>

Bagian dasar manipulator bisa kaku terpasang pada lantai area kerja ataupun terpasang pada rel. Rel berfungsi sebagai path atau alur sehingga

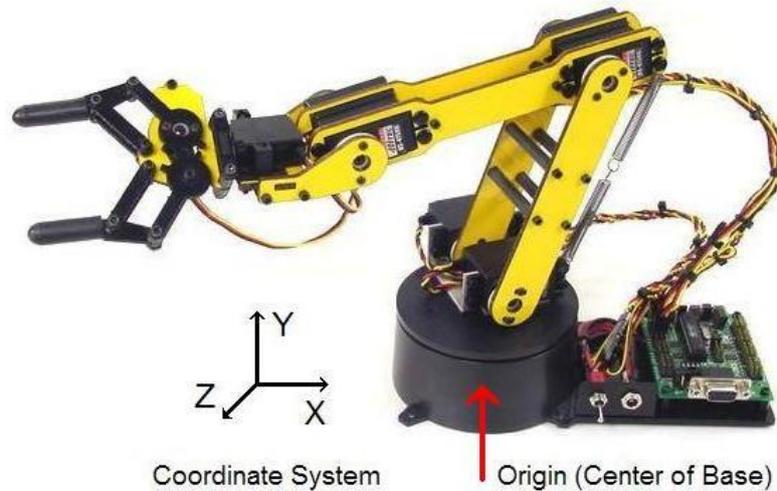
memungkinkan robot untuk bergerak dari satu lokasi ke lokasi lainnya dalam satu area kerja.

Bagian tambahan merupakan perluasan dari bagian dasar, bisa disebut juga lengan/arm. Bagian ujungnya terpasang efektor yang berfungsi untuk mengambil/mencekam material. Manipulator digerakkan oleh aktuator atau disebut sistem drive. Aktuator atau sistem drive menyebabkan gerakan yang bervariasi dari manipulator. Aktuator bisa menggunakan elektrik, hidrolis ataupun pneumatik.

Sistem kendali merupakan jantung dari sistem robot sehingga keberadaannya sangat penting. Kontroler menyimpan informasi yang berkaitan dengan data-data robot, dalam hal ini data gerakan robot yang telah diprogram sebelumnya. Gambar 6 memberikan gambaran sebuah kontroler dan manipulator robot.

## **2. Sistem Kendali**

Sistem Kendali berfungsi untuk mengontrol pergerakan dari manipulator. Sistem Kendali sendiri diatur oleh sebuah informasi atau program yang diisikan dengan menggunakan bahasa pemrograman tertentu. Informasi tersebut kemudian disimpan didalam memori. Data dalam memori dapat di keluarkan atau di edit sesuai dengan yang dibutuhkan.



Gambar 6. Robot dan Kontroller

Sumber: <http://www.promrds.com/Chapter12/ArmMover.htm>

Dahulu sistem kendali dibuat dari drum mekanik yang bekerja langkah demi langkah secara sequential. dan sangat sederhana. Dimasa sekarang kontroler menggunakan PLC (programmable logic control) yang dapat bekerja dengan pergerakan yang sangat kompleks dari sistem robot.

### 3. Power Supply

Power supply adalah sebuah unit yang menyediakan tenaga pada kontroler dan manipulator sehingga dapat bekerja. Power supply dalam suatu sistem robot dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian untuk kontroler dan bagian untuk manipulator. Bagian kontroler menggunakan elektrik sedangkan bagian manipulator bisa menggunakan elektrik, pneumatik, hidrolis ataupun ketiganya.



Gambar 7. Sebuah Power Supply  
Sumber:<http://www.testequipmentdepot.com/elenco/power-supplies/>

#### 4. Efector

Efektor dapat ditemukan hampir semua aplikasi robot, walaupun keadaannya bukan merupakan komponen dasar dari sistem robot. Efektor berfungsi sebagai bagian terakhir yang menghubungkan antara manipulator dengan objek yang akan dijadikan kerja dari robot.



Gambar 8. Efector Sebuah Robot  
Sumber:<http://www.promrds.com/Chapter12/ArmMover.htm>

Sebagai contoh efektor dapat berupa peralatan las, penyemprot cat ataupun hanya berupa penjempit objek. Efektor jika disamakan dengan manusia seperti jari-jari tangan yang dapat digerakan untuk memindah atau mengangkat materilal ataupun peralatan yang dapat digunakan untuk mengelas, mengecat, menempa, mengisi botol, dan lain-lain sesuai dengan kebutuhan. Kerja efektor dapat berupa mekanik, elektrik, pneumataik (*gripper*), maupun hidrolik (Asriadi, 2006)

### **C. Robot Manipulator**

Robot manipulator adalah robot yang memiliki karakteristik lengan manusia. *Manipulator* robot adalah sistem mekanik yang menunjukkan pergerakan dari robot. Sistem mekanik terdiri dari susunan *link* (rangka) dan *joint* (engsel) yang mampu menghasilkan gerakan yang terkontrol. Rangka tersebut menggambarkan bahu, siku dan pergelangan tangan manusia. Selain itu, pada ujung dari lengan robot tersebut terdapat *end-effector* yang disebut *gripper*.

Robot manipulator dapat diklasifikasikan menjadi beberapa keriteria yaitu :

#### **1. Konfigurasi Manipulator**

Ada beberapa jumlah dari konfigurasi robot yang umum dipakai. Biasanya dikontrol secara elektronik, hidrolik atau pneumatik. Tiap jenis konfigurasi memiliki area kerja yang berbeda. Oleh karenanya sangat penting untuk mengerti konfigurasi dan memilih tipe yang paling cocok di gunakan serta penerapan pada aplikasi yang dibutuhkan.

Konfigurasi adalah cara untuk mengklasifikasikan di dalam robot-robot industri. Konfigurasi merujuk pada bentuk geometri dari manipulator robot, yaitu bagaimana cara hubungan dari manipulator pada setiap joint. Robotic Industries Association (RIA) mendefenisikan robot sebagai manipulator yang didesain untuk memindahkan material, benda, alat atau peralatan tertentu lewat pergerakan yang terprogram untuk melakukan berbagai macam tugas (Adi, 2009)

Secara umum struktur robot dapat dibedakan menurut sumbu koordinat yang digunakan, untuk lebih jelasnya diuraikan dalam tabel 1.

| No. | Jenis Robot | Sumbu 1 | Sumbu 2 | Sumbu 3 | Total Rotasi |
|-----|-------------|---------|---------|---------|--------------|
| 1   | Cartesian   | P       | P       | P       | 0            |
| 2   | Cylindrical | R       | P       | P       | 1            |
| 3   | Spherical   | R       | R       | P       | 2            |
| 4   | SCARA       | R       | R       | P       | 2            |
| 5   | Articulated | R       | R       | R       | 3            |

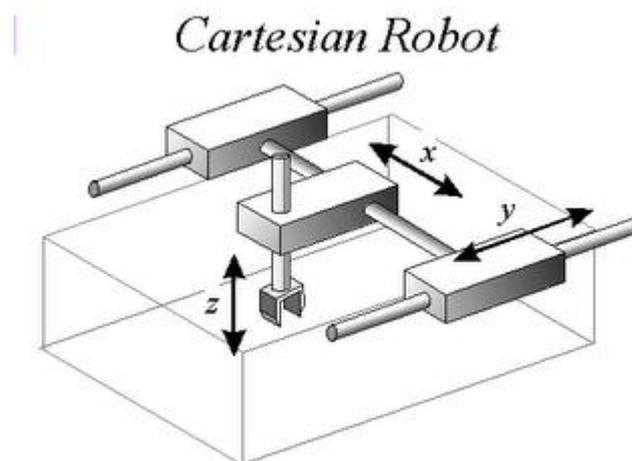
Tabel 1. Struktur Umum Robot.

*Catatan : P = Prismatic joint yaitu pergeseran sepanjang sumbu tertentu*

*R = Revolute joint yaitu perputaran pada sumbu tertentu*

### a. Robot cartesian

Cartesian Robot memiliki struktur yang paling kaku. Hal ini sangat menguntungkan untuk mengangkat beban yang berat dan pengulangan yang tinggi pada seluruh area pergerakan. Cartesian Robot memiliki pengulangan yang lebih baik pada area kerja yang luas dibandingkan dengan SCARA atau articulated arm. Pergerakan aksis X dan Y lebih lambat dibandingkan pergerakan rotasi dari konfigurasi yang lain dan membutuhkan area penempatan yang paling besar dibandingkan dengan konfigurasi lain untuk luas daerah kerja yang sama.



Gambar 9. Konfigurasi Cartesian  
Sumber: <http://thnet.co.uk/thnet/robots/25.htm>

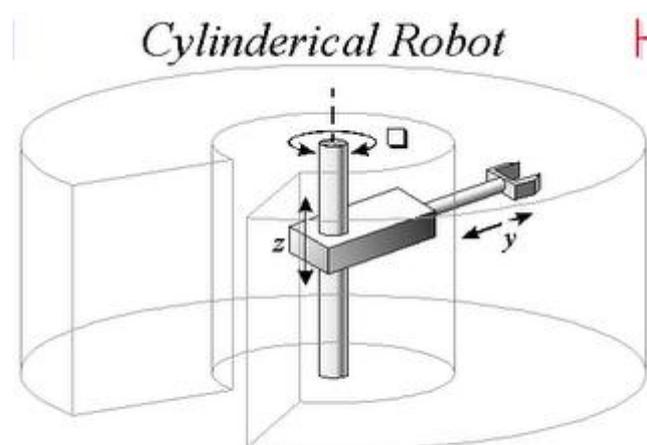
Pada Gambar 9 memperlihatkan manipulator berkonfigurasi cartesian dimana secara relatif adalah yang paling kokoh untuk tugas mengangkat beban yang berat. Struktur ini banyak dipakai secara permanen pada instalasi pabrik baik untuk mengangkat dan memindahkan

barang-barang produksi maupun untuk mengangkat peralatan-peralatan berat pabrik ketika melakukan kegiatan instalasi.

### **b. Robot Silindris**

Robot Cylindrical memiliki 2 pergerakan aksis ortogonal prismatic (horisontal dan vertikal) dan satu aksis putar, membentuk sistem koordinat silindris. Konfigurasi ini memiliki kemampuan yaitu kecepatan pergerakan yang lebih tinggi pada bidang horisontal dibandingkan dengan sistem cartesian.

Namun untuk pergerakan garis lurus pada konfigurasi ini membutuhkan perhitungan yang rumit dan lebih lambat. Resolusi penempatan dari end effector tidak konstan tapi tergantung pada derajat pergerakan. Beberapa contoh aplikasi robot cylindrical untuk pemindah barang ataupun perakitan, banyak diadopsi untuk sistem *gantry* atau *crane* karena strukturnya yang kokoh untuk tugas mengangkat beban.



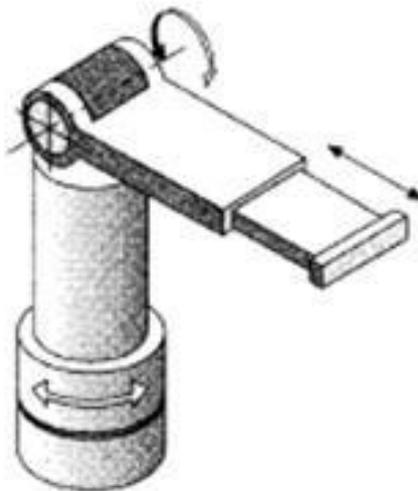
Gambar 10. Konfigurasi Cylindrical  
Sumber: <http://thnet.co.uk/thnet/robots/25.htm>

Konfigurasi silinder mempunyai kemampuan jangkauan berbentuk ruang silinder yang lebih baik, meskipun sudut ujung lengan terhadap garis penyangga tetap.

### c. Robot Polar

Konfigurasi struktur robot ini mirip dengan sebuah tank dimana terdiri atas *Rotary Base*, *Elevated Pivot*, dan *Telescopic Arm*. Keuntungan dari robot jenis ini adalah fleksibilitas mekanik yang lebih baik.

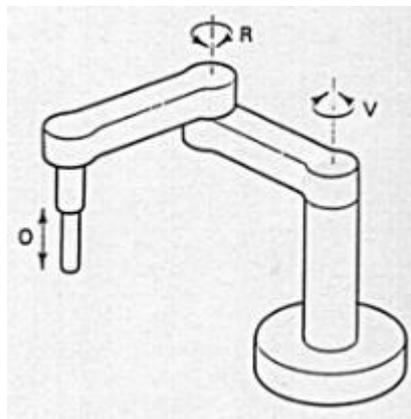
Pada Gambar 11 terlihat konfigurasi polar dimana badan dapat berputar ke kiri atau kanan. Sendi pada badan dapat mengangkat atau menurunkan pangkal lengan secara polar. Lengan ujung dapat digerakkan maju-mundur secara translasi.



Gambar 11. Konfigurasi Robot Polar  
Sumber: <http://thnet.co.uk/thnet/robots/25.htm>

#### d. Robot SCARA

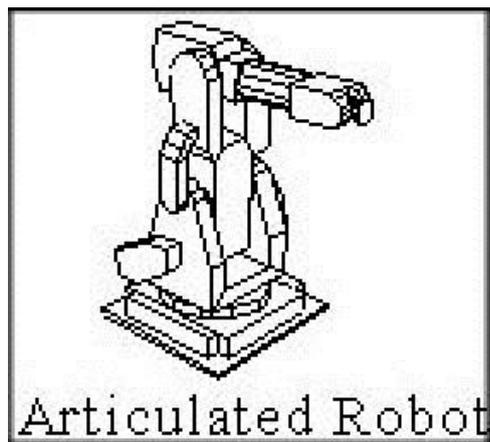
Robot *Assembly* bisa didesain menurut koordinat kartesian, silindris maupun spheris. Pada beberapa aplikasi hanya membutuhkan sumbu gerak vertikal, misalnya robot *assembly* yang memasang komponen pada PCB. Robot ini mempunyai lengan dengan dua artikulasi, sedangkan *wrist* mempunyai gerakan linier dan rolling. Struktur robot *assembly* dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12. Konfigurasi Robot SCARA  
Sumber: <http://thnet.co.uk/thnet/robots/25.htm>

#### d. Robot Articulated

Robot ini terdiri dari tiga lengan yang dihubungkan dengan dua *Revolute Joint*. *Elbow Joint* menghubungkan *Force Arm* dengan *Upper Arm*. *Shoulder Joint* menghubungkan *Upper Arm* dengan *Base*. Struktur robot artikulasi ini dapat dilihat pada gambar 13 dibawah ini.



Gambar 13. Konfigurasi Robot Articulated  
Sumber: <http://thnet.co.uk/thnet/robots/25.htm>

Konfigurasi ini yang paling populer untuk melaksanakan fungsi layaknya pekerja pabrik seperti mengangkat barang, mengelas, memasang komponen mur dan baut, dan sebagainya. Struktur lengan-sendi cocok digunakan untuk menjangkau daerah kerja yang sempit dengan sudut jangkauan yang beragam.

## **2. Sistem penggerak Robot**

Penggerak diperlukan oleh robot agar robot mampu bergerak atau berpindah posisinya serta mampu mengangkat beban pada end effectornya. Macam-macam penggerak yang biasa digunakan adalah penggerak hidrolis (berbasis bahan cair seperti oli), penggerak pneumatik (perangkat kompresi berbasis udara atau gas nitrogen) dan penggerak elektrik (motor servo, motor DC dan motor stepper).

## **3. Sensor**

Adalah perangkat atau komponen yang bertugas mendeteksi (hasil) gerakan atau fenomena lingkungan yang diperlukan oleh sistem kontroler. Dapat dibuat dari sistem yang paling sederhana seperti sensor

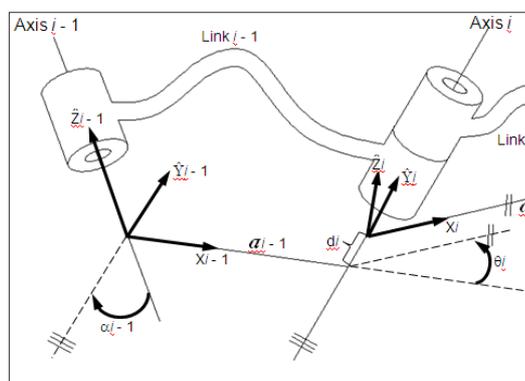
ON/OFF menggunakan limit switch, sistem analog, sistem bus parallel, sistem bus serial, hingga sistem mata kamera.

## D. Kinematika Manipulator

Analisis persamaan kinematik dapat diselesaikan dengan Metoda Denavit-Hartenberg Parameters (DH Parameter).

### 1. Denavit-Hartenberg Parameters

Analisis persamaan kinematik dapat diselesaikan dengan Metoda Denavit-Hartenberg Parameters (DH Parameter). Suatu cara khas representasi analisa hubungan gerak rotasi dan translasi antara lengan-lengan yang terhubung dalam suatu manipulator telah diperkenalkan oleh Denavit dan Hartenberg (1955). Meskipun telah lima dasawarsa yang lalu, metoda ini masih banyak digunakan utamanya untuk pemrograman robot-robot manipulator di industri. Mereka memperkenalkan suatu metoda yang berguna untuk menetapkan suatu sistem koordinat berorientasi *body* untuk setiap link/lengan yang terhubung dalam suatu struktur hubungan seperti rantai.



Gambar 14. Parameter Denavit-Hartenberg (Rosen 1989)

Dari gambar dapat dilihat bahwa :

- *Panjang rangka ( $a_{i-1}$ )* adalah jarak antara sumbu  $i$  dengan sumbu  $i-1$
- *Perputaran rangka ( $\alpha_{i-1}$ )* adalah sudut yang diukur dari sumbu  $i-1$  ke sumbu  $i$ .
- *Link offset ( $d_i$ )* adalah jarak yang diukur sepanjang sumbu  $i$  dimana  $a_{i-1}$  berpotongan dengan sumbu  $i$ , dan dimana  $a_i$  berpotongan dengan sumbu  $i$ . Sebagai catatan, variabel  $d_i$  hanya berlaku jika sambungan/engsel  $i$  berupa *Prismatik joint* yaitu pergeseran sepanjang sumbu  $i$ .
- *Sudut sambungan ( $\theta_1$ )* adalah sudut yang dibuat antara perluasan  $a_{i-1}$  dengan  $a_i$  yang diukur sekitar sumbu  $i$ .

Catatan : Sudut  $\theta_1$  hanya berlaku jika variable  $i$  berupa *Revolute joint* yaitu perputaran pada sumbu tertentu.

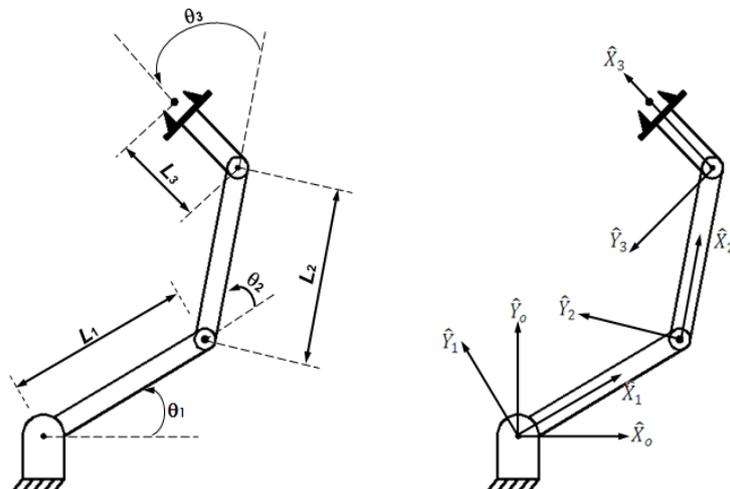
## 2. Penggunaan Denavit-Hartenberg Parameters

Prinsip dasar representasi D-H Parameter adalah melakukan transformasi koordinat antara dua link yang berdekatan. Hasilnya adalah suatu matrix (4 x 4) yang menyatakan system koordinat dari suatu link dengan link yang terhubung pada pangkalnya (link sebelumnya). Dalam konfigurasi serial, koordinat (ujung) link-1 dihitung berdasarkan sendi-0 atau sendi pada tubuh robot. Sistem koordinat link-2 dihitung berdasarkan posisi sendi-1 yang berada di ujung link-1 dengan mengasumsikan link-1 adalah basis gerakan link-2. demikian seterusnya, link-3 dihitung berdasarkan link-2, hingga link ke-( $n$ ) dihitung berdasarkan link ke-( $n-1$ ).

Dengan cara ini maka tiap langkah perhitungan atau transformasi hanya melibatkan sistem 1 DOF saja. Terakhir, posisi koordinat tangan atau posisi ujung robot (*end effector*) akan dapat diketahui. Representasi DH Parameter menggunakan 4 buah parameter, yaitu  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $d$  dan  $a$ . Untuk robot dengan  $n$ -DOF maka keempat parameter itu ditentukan hingga yang ke- $n$  (Craig, 1989). Batasan-batasan dari Parameters Denavit-Hartenberg adalah :

- $a_i$  - Jarak dari  $\hat{Z}_i$  ke  $\hat{Z}_{i+1}$  diukur sepanjang  $\hat{X}_i$
- $\alpha_i$  - Sudut antara  $\hat{Z}_i$  ke  $\hat{Z}_{i+1}$  diukur sekitar  $\hat{X}_i$
- $d_i$  - Jarak dari  $\hat{X}_{i-1}$  ke  $\hat{X}_i$  diukur sepanjang  $\hat{Z}_i$
- $\theta$  - Sudut antara  $\hat{X}_{i-1}$  ke  $\hat{X}_i$  diukur sekitar  $\hat{Z}_i$

Aplikasi perhitungan DH parameter dapat kita lihat pada perhitungan-perhitungan parameter pada Manipulator Tiga Sendi.



Gambar 15. Konfigurasi Robot Tangan Tiga Sendi (Rosen, 1989)

Tabel : DH Parameter :

| $i$ | $\alpha_{i-1}$ | $a_{i-1}$ | $d_i$ | $\theta_i$ |
|-----|----------------|-----------|-------|------------|
| 1   | 0              | 0         | 0     | $\theta_1$ |
| 2   | 0              | $L_1$     | 0     | $\theta_2$ |
| 3   | 0              | $L_2$     | 0     | $\theta_3$ |

Rumus umum adalah :

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (01)$$

Berdasarkan Tabel DH Parameter didapat transformasi matriks sebagai berikut :

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi :

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(02)$$

Dimana :

$$r_{11} = c_{123}$$

$$r_{21} = s_{123}$$

$$r_{12} = -s_{123}$$

$$r_{22} = c_{123}$$

$$P_x = L_2 c_{12} + L_1 c_1$$

$$P_y = L_2 s_{12} + L_1 s_1$$

$$r_{31} = r_{32} = r_{13} = r_{23} = P_z = 0 \text{ dan } r_{33} = 1$$

Jadi :

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_2 c_{12} + L_1 c_1 \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_2 s_{12} + L_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(03)$$

## E. Mobile Robot

### 1. Konsep Dasar Mobile Robot

*Mobile robot* berarti robot yang dapat bergerak ke tempat lain, dengan jarak yang agak jauh. Mobile robot banyak digunakan pada aplikasi pertahanan dan keamanan, dan penjelajahan lingkungan yang ekstrim. *Rescue robot* dari *International Rescue System Institute (IRS)*

merupakan salah satu *mobile robot* yang dipergunakan untuk keperluan SAR (Search and Rescue), khususnya pada bangunan yang mengalami kerusakan akibat gempa bumi dan ledakan. Robot ini dikendalikan oleh seorang operator.

*Mobile robot dengan operator oriented* adalah pengenalan gerakan dari robot yang membutuhkan seorang operator. Jadi seluruh gerakan robot untuk memindahkan tubuhnya tergantung dari instruksi yang diberikan oleh seorang operator. Sistem ini lebih banyak dipakai untuk aplikasi dilapangan, dibandingkan sistem full otomatis, disebabkan oleh keadaan lingkungan yang tidak dapat ditebak.

Contoh aplikasi yang lain dapat dijumpai dalam peralatan militer. Robot penjinak bom (*bomb disposal robot*) justru dianggap lebih aman jika dikendalikan oleh operator. Setidaknya hingga sekarang, masih belum dijumpai robot penjinak bom yang sepenuhnya dapat bergerak secara otomatis. Alasannya adalah bahwa penggunaan robot otomatis dapat lebih mencelakakan jika robot gagal berfungsi dan dapat bertindak liar.

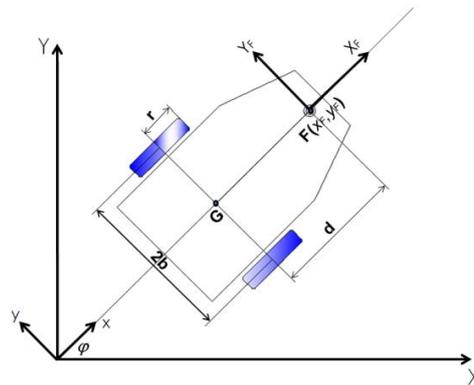
*Mobile Robot* adalah konstruksi robot yang ciri khasnya mempunyai aktuator berupa roda untuk menggerakkan keseluruhan badan robot tersebut, sehingga robot tersebut dapat melakukan perpindahan posisi dari satu titik ke titik yang lain.

Secara umum, *mobile robot* terdiri atas komponen mekanik dan komponen elektronik. Komponen mekanik terdiri atas motor penggerak yang dihubungkan ke poros roda (*Wheel robot*), Tracking Wheel (robot

yang menggunakan sabuk atau belt) dan mekanisme rangka. Sedangkan untuk komponen elektronik terdiri atas baterai, sensor dan kontroler. Baterai sebagai sumber tenaga, sensor yang bertugas mendeteksi (hasil) gerakan atau fenomena lingkungan yang diperlukan oleh sistem kontroler yaitu software yang berisi program kemudi.

## 2. Kinematika Mobile Robot

Mobile robot yang dimaksud disini ialah mobile robot berpengerak dua roda kiri-kanan yang dikendalikan terpisah (*Differentially Driven Mobile Robot, disingkat DDMR*), seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 16 Berikut ini.



Gambar 16. DDMR Pada Medan 2D Cartesian (Endra, 2006)

Robot diasumsikan berada dalam kawasan 2D pada koordinat Cartesian XY. Parameter-parameter dalam gambar adalah :

- $\varphi$  = sudut arah hadap robot
- $2b$  = lebar robot yang diukur dari garis tengah roda ke roda
- $r$  = jari-jari roda (roda kiri dan kanan adalah sama dan sebangun)
- $d$  = jarak antara titik tengah antara 2 roda,  $G$  dengan titik acuan  $F$

$(x,y)$  = koordinat acuan di tubuh robot terhadap sumbu  $XY$

Dalam kajian kinematik ini robot diasumsikan bergerak relatif pelan dan roda tidak slip terhadap permukaan jalan. Maka komponen  $x$  dan  $y$  dapat diekspresikan dalam suatu persamaan nonholonomic sebagai berikut,

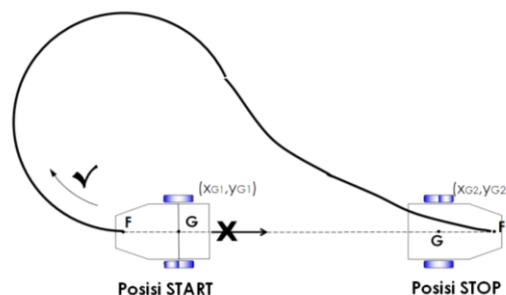
$$\dot{x}_G \sin \varphi - \dot{y}_G \cos \varphi = 0 \dots\dots\dots (04)$$

Untuk titik  $F$  sebagai acuan analisa, persamaan di atas dapat ditulis,

$$\dot{x}_G \sin \varphi - \dot{y}_G \cos \varphi + \dot{\varphi} d = 0 \dots\dots\dots (05)$$

Masalah klasik dalam kontrol kinematik DDMR ini adalah bahwa ia memiliki dua aktuator, namun parameter kontrolnya lebih dari dua, yaitu  $x$  untuk gerakan ke arah  $X$  (1 DOF) dan  $y$  untuk arah  $Y$  (1 DOF) yang diukur relatif terhadap perpindahan titik  $G$ , dan gerakan sudut hadap  $\varphi$  yang diukur dari garis hubung titik  $G$  dan  $F$  terhadap sumbu  $x$  (1DOF). Inilah ciri khas dari sistem nonholonomic.

Dari persamaan (5) nampak bahwa derajat kebebasan dalam kontrol kinematiknya berjumlah tiga, yaitu  $(x,y,\varphi)$  karena ketiga parameter ini perlu dikontrol secara simultan untuk mendapatkan gerakan nonholonomic. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar berikut ini.



Gambar 17. Contoh Manuver DDMR (Endra, 2006)

Perpindahan kedudukan robot dari START ke STOP bila dipandang pada titik G adalah perpindahan dari koordinat  $(x_{G1}, y_{G1})$  ke  $(x_{G2}, y_{G2})$  secara translasi. Namun hal ini tidak dapat dilakukan sebab robot harus dikontrol agar bergerak maju, sehingga ia harus membuat manuver belok membentuk lingkaran terlebih hingga pada posisi yang memungkinkan untuk mengarahkannya ke koordinat  $(x_{G2}, y_{G2})$ . Oleh karena itu diperlukan titik acuan F yang berada di luar garis yang menghubungkan kedua roda agar sudut hadap dapat dihitung.

Bentuk umum persamaan kinematik untuk DDMR ini dapat dinyatakan dalam persamaan kecepatan sebagai berikut:

$$\dot{q}(t) = T_{NH}(q)\dot{\theta}(t) \dots\dots\dots (06)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \text{sistem koordinat umum robot} \\ \dot{q} &= [x_F, y_F, \varphi]^T \text{ atau } \dot{q} = \begin{bmatrix} x_F \\ y_F \\ \varphi \end{bmatrix} \\ \dot{\theta} &= \text{Kecepatan radial} \\ \dot{\theta} &= [v, \omega]^T \text{ atau } \dot{\theta} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \\ T_{NH} &= \text{Matriks transformasi nonholonomic} \end{aligned}$$

## F. Kestimbangan

Sebuah benda dikatakan dalam kondisi keseimbangan jika gaya luar beraksi padanya membentuk gaya equivalen dengan nol. Ini berarti sistem tidak mempunyai resultan kopel. Syarat perlu dan cukup untuk keseimbangan sebuah benda tegar yang berada dalam kondisi statik

tertentu dapat dinyatakan secara analitis dengan persamaan sebagai berikut:

$$\Sigma F_H = 0$$

$$\Sigma F_V = 0 \dots\dots\dots (07)$$

$$\Sigma M = 0$$

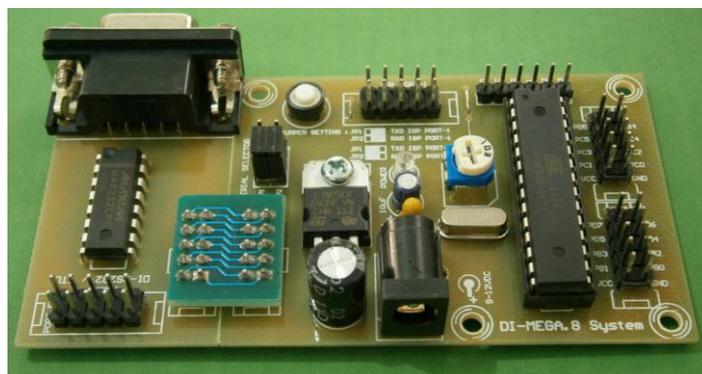
Persamaan diatas menunjukkan gaya luar yang beraksi pada benda tegar tidak menimbulkan gerak translasi pada benda itu dan menyebabkan rotasi pada titik manapun. Aksi tiap gaya luar diiadakan oleh gaya reaksi dari sistem itu. Sebelum menetapkan persamaan diatas, perlu ditunjukkan dengan tepat sebuah gaya yang bekerja pada benda itu baik gaya reaksi yang bekerja pada benda juga gaya reaksi yang timbul pada tumpuan. Penggambaran semua gaya yang bekerja pada benda disebut digram benda bebas.

Persamaan kesetimbangan diatas telah cukup untuk menyelesaikan benda pada kondisi tertentu. Penambahan persamaan lainnya tidak mengandung informasi baru, hanya berguna untuk memeriksa pemecahan yang diperoleh dari ketiga persamaan semula.

Setiap persamaan keseimbangan diatas hanya berlaku untuk menyelesaikan tiga besaran yang tidak diketahui yang dikatakan bersifat statik tak tentu, hal ini diperlukan persamaan-persamaan yang lain dengan memperhatikan kondisi yang mempertimbangkan geometri dari deformasi yang terjadi seperti pada jepitan yang mempunyai slop sama dengan nol.

## G. ATmega 8535

Mikrokontroler AVR ATmega 8535 memiliki fitur yang cukup lengkap. Mikrokontroler AVR ATmega 8535 telah dilengkapi dengan ADC *internal*, *EEPROM internal*, *Timer/Counter*, *PWM*, *analog comparator*, dll (M.Ary Heryanto, 2008). Sehingga dengan fasilitas yang lengkap ini memungkinkan kita belajar mikrokontroler keluarga AVR dengan lebih mudah dan efisien, serta dapat mengembangkan kreativitas penggunaan mikrokontroler ATmega 8535. PWM (*Pulse Width Modulation*) dapat digunakan untuk mengatur kecepatan motor, yaitu dengan cara mengatur lebar pulsa (waktu ON) dari tegangan sumbernya (tegangan DC). Perbandingan antara waktu ON dan waktu OFF disebut *duty cycle* (siklus kerja). Semakin besar siklus kerjanya, akan semakin besar pula keluaran yang dihasilkan, sehingga kecepatan motor akan semakin besar. Pembangkitan sinyal PWM dengan mikrokontroler memiliki beberapa keuntungan, seperti teknik pemrograman yang sederhana, dan rangkaian listrik menjadi sederhana.



Gambar 18 ATmega 8535  
Sumber: Foto, Scan (2013)

Fitur-fitur yang dimiliki oleh mikrokontroler ATmega 8535 adalah sebagai berikut:

1. Saluran I/O sebanyak 32 buah, yaitu port A, port B, port C, dan port D.
2. ADC internal sebanyak 8 saluran.
3. Tiga buah Timer/Counter dengan kemampuan perbandingan.
4. CPU yang terdiri atas 32 buah register.
5. SRAM sebesar 512 byte.
6. Memori Flash sebesar 8 kb dengan kemampuan Read While Write.
7. Port antarmuka SPI
8. EEPROM sebesar 512 byte yang dapat diprogram saat operasi.
9. Antarmuka komparator analog.
10. Port USART untuk komunikasi serial.
11. Sistem mikroprosesor 8 bit berbasis RISC dengan kecepatan maksimal 16 MHz.
12. Dan lain-lainnya.

Mikrokontroler ATmega 8535 memiliki 3 jenis memori, yaitu memori program, memori data dan memori EEPROM. Ketiganya memiliki ruang sendiri dan terpisah.

a. Memori program

ATmega 8535 memiliki kapasitas memori program sebesar 8 Kbyte yang terpetakan dari alamat 0000h – 0FFFh dimana masing-masing alamat memiliki lebar data 16 bit. Memori program ini

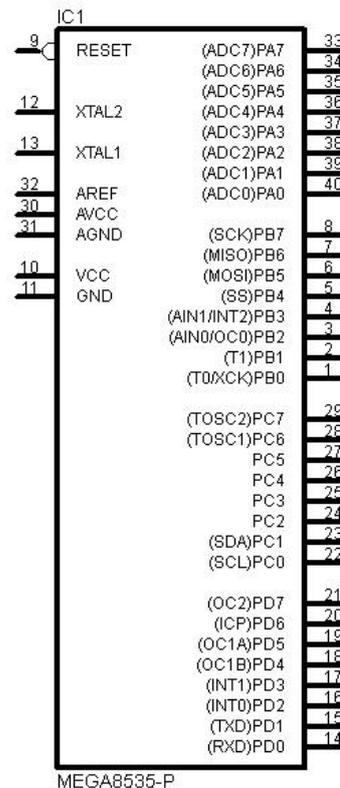
terbagi menjadi 2 bagian yaitu bagian program *boot* dan bagian program aplikasi.

b. Memori data

ATmega 8535 memiliki kapasitas memori data sebesar 608 byte yang terbagi menjadi 3 bagian yaitu register serba guna, register I/O dan SRAM. Atmega 8535 memiliki 32 byte register serba guna, 64 byte register I/O yang dapat diakses sebagai bagian dari memori RAM (menggunakan instruksi LD atau ST) atau dapat juga diakses sebagai I/O (menggunakan instruksi IN atau OUT), dan 512 byte digunakan untuk memori data SRAM.

c. Memori EEPROM

ATmega 8535 memiliki memori EEPROM sebesar 512 byte yang terpisah dari memori program maupun memori data. Memori EEPROM ini hanya dapat diakses dengan menggunakan register-register I/O yaitu register EEPROM *Address*, register EEPROM *Data*, dan register EEPROM *Control*. Untuk mengakses memori EEPROM ini diperlakukan seperti mengakses data eksternal, sehingga waktu eksekusinya relatif lebih lama bila dibandingkan dengan mengakses data dari SRAM.



Gambar 19. Konfigurasi pin ATmega 8535 (Data Sheet AVR)

Konfigurasi *pin* ATmega 8535 dengan kemasan 40 pin DIP (*Dual Inline Package*) dapat dilihat pada gambar 19. Dari gambar di atas dapat dijelaskan fungsi dari masing-masing *pin* ATmega 8535 sebagai berikut:

1. VCC merupakan *pin* yang berfungsi sebagai masukan catu daya.
2. GND merukan *pin Ground*.
3. *Port* A (PortA0...PortA7) merupakan *pin input/output* dua arah dan *pin* masukan ADC.
4. *Port* B (PortB0...PortB7) merupakan *pin input/output* dua arah dan dan *pin* fungsi khusus, seperti dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

| Pin | Fungsi Khusus   |
|-----|---|
| PB7 | SCK ( <i>SPI Bus Serial Clock</i> )   |
| PB6 | MISO ( <i>SPI Bus Master Input/ Slave Output</i> )  |
| PB5 | MOSI ( <i>SPI Bus Master Output/ Slave Input</i> )  |
| PB4 | SS ( <i>SPI Slave Select Input</i> )  |
| PB3 | AIN1 ( <i>Analog Comparator Negative Input</i> )<br>OC0 ( <i>Timer/Counter0 Output Compare Match Output</i> ) |
| PB2 | AIN0 ( <i>Analog Comparator Positive Input</i> )<br>INT2 ( <i>External Interrupt 2 Input</i> )                |
| PB1 | T1 ( <i>Timer/ Counter1 External Counter Input</i> )  |
| PB0 | T0 T1 ( <i>Timer/Counter External Counter Input</i> )<br>XCK ( <i>USART External Clock Input/Output</i> )     |

Tabel 2. Fungsi Khusus Port B

4. Port C (PortC0...PortC7) merupakan *pin input/output* dua arah dan *pin* fungsi khusus, seperti dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

| Pin | Fungsi khusus                          |
|-----|--|
| PC7 | TOSC2 ( <i>Timer Oscillator Pin2</i> ) |
| PC6 | TOSC1 ( <i>Timer Oscillator Pin1</i> ) |
| PC5 | <i>Input/Output</i>                    |
| PC4 | <i>Input/Output</i>                    |
| PC3 | <i>Input/Output</i>                    |

|     |  |
|-----|--|
| PC2 | <i>Input/Output</i>                                      |
| PC1 | <i>SDA ( Two-wire Serial Bus Data Input/Output Line)</i> |
| PC0 | <i>SCL ( Two-wire Serial Bus Clock Line)</i>             |

Tabel 3. Fungsi Khusus Port C

5. *Port D (PortD0...PortD7)* merupakan *pin input/output* dua arah dan *pin* fungsi khusus, seperti yang terlihat pada tabel dibawah ini.

| Pin | Fungsi khusus  |
|-----|--|
| PD7 | OC2 ( <i>Timer/Counter Output Compare Match Output</i> )     |
| PD6 | ICP ( <i>Timer/Counter1 Input Capture Pin</i> )              |
| PD5 | OC1A ( <i>Timer/Counter1 Output Compare A Match Output</i> ) |
| PD4 | OC1B ( <i>Timer/Counter1 Output Compare B Match Output</i> ) |
| PD3 | INT1 ( <i>External Interrupt 1 Input</i> )                   |
| PD2 | INT0 ( <i>External Interrupt 0 Input</i> )                   |
| PD1 | TXD ( <i>USART Output Pin</i> )                              |
| PD0 | RXD ( <i>USART Input Pin</i> )                               |

Tabel 4. Fungsi Khusus Port D

6. RESET merupakan *pin* yang digunakan untuk me-*reset* mikrokontroler.

7. XTAL1 dan XTAL2 merupakan *pin* masukan *clock* eksternal.

## H. Prinsip Kerja Sensor Garis

Sensor garis adalah jenis sensor yang berfungsi mendeteksi warna garis hitam atau putih. Sensor ini penting karena sensor menentukan arah dan gerakan robot. Sensor pendeteksi garis yang digunakan dalam robot adalah berdasarkan pada prinsip pemantulan cahaya dari *LED* dan *photodiode* sebagai penerima cahaya.

Sensor garis berfungsi untuk mendeteksi warna dari permukaan yang berada di bawah robot penjejak garis dengan maksud agar sensor garis ini dapat menghasilkan logika posisi dari robot penjejak garis terhadap garis tepat berada di bawah robot. Logika posisi yang dihasilkan oleh sensor garis ini kemudian akan dijadikan *input* ke mikrokontroler pada robot. (<http://repository.gunadarma.ac.id/bitstream/123456789/1327/1/21107264.pdf>)

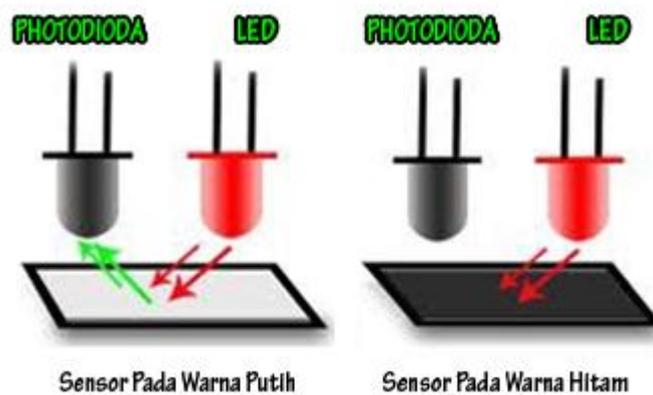
### 1. Cara Kerja Sensor Garis

Pada sensor garis, komponen yang digunakan yaitu *photodiode* sebagai pendeteksi garis hitam dengan dasar putih yang menjadi jalur robot dan LED (*Light Emitting Diode*) sebagai pemancar cahaya ke lantai yang kemudian dipantulkan dan diterima oleh *photodiode*.

LED Pada sensor garis berfungsi sebagai pengirim cahaya ke garis untuk dipantulkan lalu dibaca sensor (*photodiode* ataupun LDR). Sifat pemantulan cahaya yang berbeda dari berbagai macam warna digunakan dalam hal ini. Ketika LED memancarkan cahaya ke bidang berwarna putih, cahaya akan dipantulkan hampir semuanya oleh bidang berwarna

putih tersebut. Sebaliknya, ketika LED memancarkan cahaya ke bidang berwarna gelap atau hitam, maka cahaya akan banyak diserap oleh bidang gelap tersebut, sehingga cahaya yang sampai ke sensor (photodiode atau LDR) sedikit.

Karena perbedaan cahaya yang diterima oleh sensor akan menyebabkan hambatan yang berbeda pula di dalam sensor maka prinsip ini yang digunakan untuk membedakan pembacaan garis. Gambar dibawah ini adalah ilustrasi mekanisme pemantulan cahaya sensor garis.



Gambar 20. Mekanisme Pemantulan Cahaya Sensor Garis

Sumber : <http://a2pd.blog.student.eepis-its.edu/>

Saat sensor pada garis putih, maka sensor akan terkena banyak cahaya sehingga nilai resistansinya akan sangat kecil atau dapat diabaikan. Karena  $R_{sens}$  sangat kecil maka  $V_{out}=0$ .

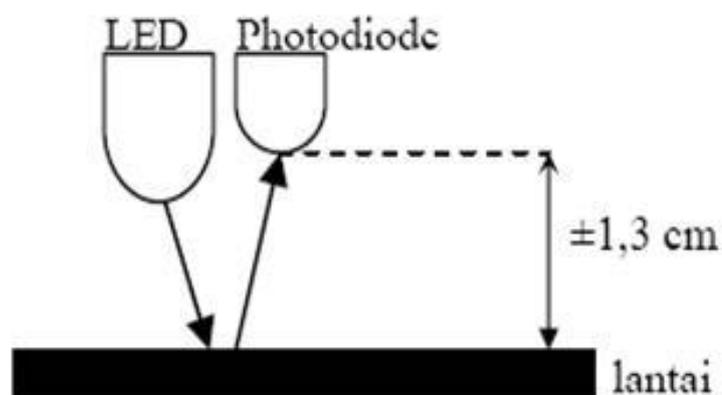
Saat sensor pada garis hitam, maka sensor akan tidak terkena cahaya sehingga nilai resistansinya akan besar atau dapat diasumsikan tak hingga. Karena  $R_{sens}$  sangat besar maka  $V_{out}=V_{in}$

Dengan arti kata dengan rangkaian diatas perubahan  $V_{out}$  berbanding lurus dengan cahaya. Untuk membuat rangkaian dengan  $V_{out}$  berbanding terbalik dengan perubahan cahaya hanya dengan mengganti letak sensor berada dekat dengan  $V_{in}$ .

Seperti dibahas diatas Saat Sensor mendeteksi warna berbeda maka  $V_{out}$  pun akan ikut berubah. Perubahan  $V_{out}$  inilah yang akan digunakan sebagai pembeda warna hitam dan putih baik dengan menggunakan komparator ataupun dengan menggunakan ADC internal mikrokontroler.

## 2. Mekanisme Perancangan Sensor Garis

LED *superbright* berfungsi sebagai pengirim cahaya ke garis untuk dipantulkan lalu dibaca oleh sensor *photodiode*. Sifat dari warna putih (permukaan terang) yang memantulkan cahaya dan warna hitam (permukaan gelap) yang tidak memantulkan cahaya digunakan dalam aplikasi ini. Gambar dibawah ini adalah ilustrasi mekanisme sensor garis.



Gambar 21. Ilustrasi mekanisme sensor garis  
Sumber : <http://fahmizaleeits.wordpress.com/2010/09/02/robot-line-follower-dengan-multiplekser-adc/>

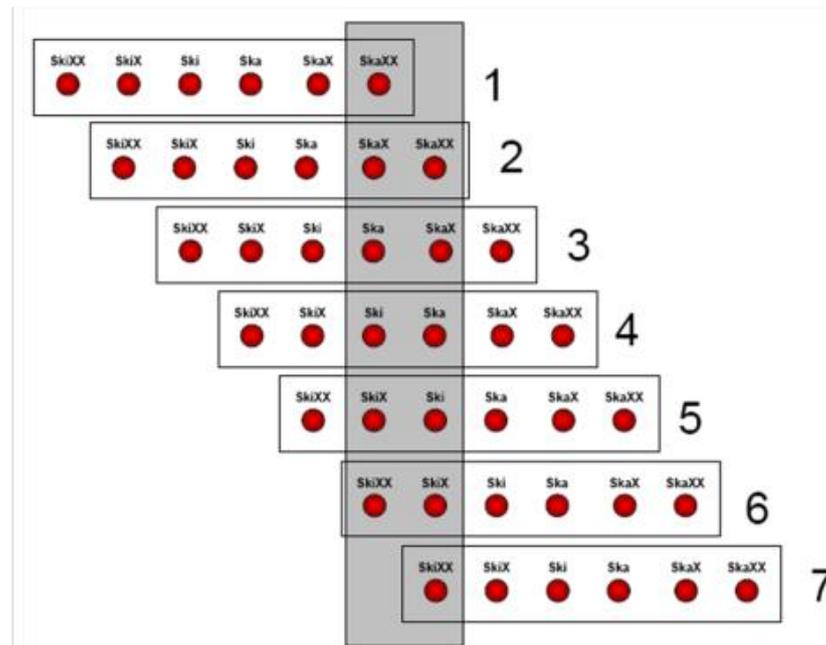
Sensor garis sering digunakan pada robot line follower (robot pengikut garis), digunakan juga sebagai pendeteksi objek dengan permukaan bidang pantul yang kontras. Selain menggunakan *photodiode* dapat juga dirancang dengan menggunakan *phototransistor*, dan *infra red*.

### **I. Error Tracking Lintasan**

Dalam pergerakan omni wheel ini semua komponen-komponen mempunyai peranan tersendiri. Atmega 8535 berperan dalam sistem pengendalian motor/roda yang menerima input dari sensor garis, saat Sensor mendeteksi warna berbeda maka Vout pun akan ikut berubah.

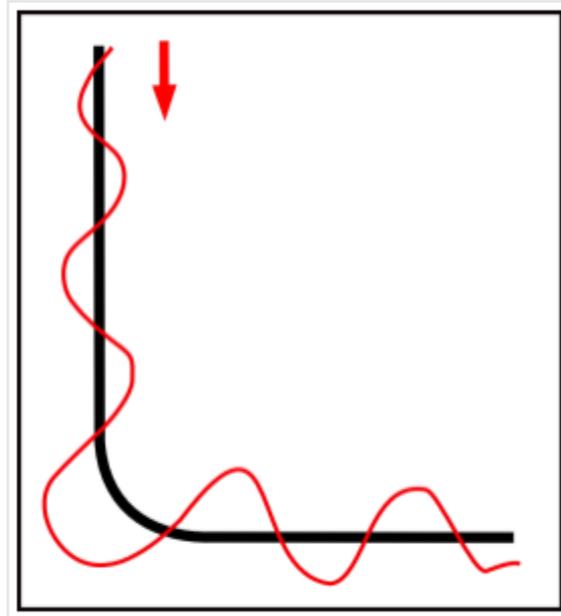
Skema posisi 8 buah sensor robot terhadap garis lintasan di tunjukkan pada gambar 19, idealnya robot selalu berada di tengah-tengah terhadap garis atau pada kondisi ke-4. ketika robot semakin menyimpang ke kiri dari garis maka dikatakan eror robot semakin besar untuk sisi kiri begitu pula untuk sisi kanan garis. dengan demikian eror terbesar adalah kondisi ke-7 dan ke-1 sedangkan eror terkecil adalah kondisi ke-4.

Karena prinsip line tracer ini menggunakan *differential wheel* atau dua roda dengan masing masing kendali, maka agar robot berada di tengah lintasan adalah dengan mengatur kecepatan masing masing motor penggerakannya. (<http://kurangsangu.wordpress.com/2011/05/13/line-tracer-dengan-kontrol-pid/>)



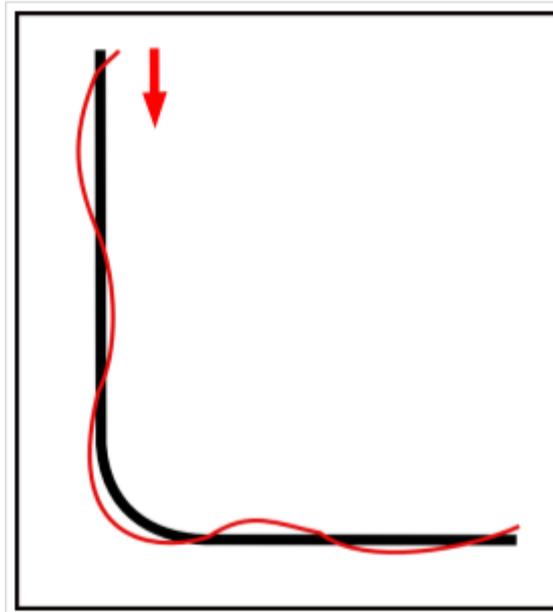
Gambar 22. Skema posisi sensor robot terhadap garis lintasan  
 Sumber : <http://kurangsangu.wordpress.com/2011/05/13/line-tracer-dengan-kontrol-pid/>

Fungsi *proportional control* pada robot line tracer ini adalah hanya menentukan aksi kecepatan motor kanan dan kiri setiap keadaan eror robot (menyimpang dari garis). ketika robot menyimpang ke kanan dari garis dengan kondisi ke-5 maka motor kanan harus lebih cepat dari motor kiri agar robot kembali ke kiri (manut garis). ketika kondisi eror ke-7 maka motor kanan harus tambah semakin cepat lagi dari motor kiri agar robot kembali ke lintasan,, dst.. kelemahan dari kontrol ini adalah masih adanya overshoot eror terhadap set point (nilai yg diinginkan) karena hanya merespon nilai eror. akibatnya robot masih terlihat bergelombang saat jalan. seperti yang ditunjukkan pada gambar 23



Gambar 23. Tracking lintasan yang bergelombang  
 Sumber :[http://www.societyofrobots.com/member\\_tutorials/node/355](http://www.societyofrobots.com/member_tutorials/node/355)

Kontrol diferensial berfungsi untuk merespon perubahan error setiap saatnya,, sehingga ketika robot semakin cepat berubah erornya, misal dari kondisi  $eror=0$  tiba tiba eror menjadi 6 maka motor kanan robot sebelah kanan akan semakin cepat dibandingkan ketika perubahan eror dari 0 ke  $eror=4$ . ini berguna untuk tikungan tikungan tajam di lintasan. Sedangkan kontrol integral berfungsi merespon jumlah total error yg telah terakumulasi. semakin lama robot menemukan set point semakin besar akumulasi erornya sehingga semakin besar respon integralnya. Agar robot bisa lebih alus (smooth) lagi jalannya, perlu ditambahkan kontrol integral dan diferensial ("I" dan "D").



Gambar 24. Tracking lintasan yang lebih smoot  
Sumber :[http://www.societyofrobots.com/member\\_tutorials/node/355](http://www.societyofrobots.com/member_tutorials/node/355)

## I. Prinsip Dasar Sistem Kendali

Sistem kendali merupakan sebuah sistem yang terdiri atas satu atau beberapa peralatan yang berfungsi untuk mengendalikan sistem lain yang berhubungan dengan sebuah proses. Keberadaan sistem kendali dalam sebuah sistem kontrol mempunyai kontribusi yang besar terhadap perilaku sistem. Pada prinsipnya hal itu disebabkan tidak dapat di ubahnya komponen penyusun sistem tersebut. Artinya, karakteristik plant harus diterima sebagaimana adanya, sehingga perubahan perilaku sistem hanya dapat dilakukan melalui penambahan suatu sub sistem, yaitu sistem kendali.

## 1. Jenis-Jenis Pengontrolan

### a. Sistem kontrol lup terbuka (open- loop control system)

Sistem kontrol terbuka adalah sistem kontrol yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi pengontrolan. Jadi pada sistem kontrol lup terbuka, keluaran tidak diukur atau diumpam-balikkan untuk dibandingkan dengan masukan.

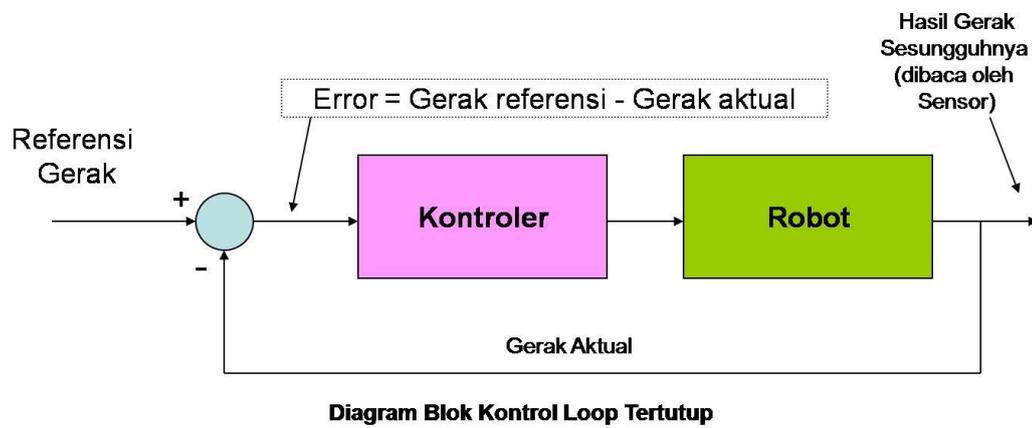


**Diagram Blok Kontrol Loop Terbuka**

Gambar 25. Sistem kontrol lup terbuka (Ogata, 1993)

### b. Sistem kontrol lup tertutup (closed-loop control system)

Sistem kontrol lup tertutup adalah sistem kontrol yang sinyal keluarannya mempunyai pengaruh langsung pada aksi pengontrolan. Jadi sistem kontrol lup tertutup adalah sistem kontrol berumpan balik (yang dapat berupa sinyal keluaran atau suatu fungsi sinyal keluaran dan turunannya), diumpamakan ke kontroler untuk memperkecil kesalahan dan membuat agar keluaran sistem mendekati harga yang diinginkan.



Gambar 26. Sistem Kontrol lup tertutup (Ogata, 1993)