

IMPLEMENTASI MANIPULATOR PLANAR 4-DOF PENGHINDAR HALANGAN BERBASIS ARDUINO MEGA 2560

Supardiansyah ¹⁾, Elang Derdian Marindani ²⁾, Redi Ratiandi Yacoub ³⁾
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura
e-mail: supardiansyah0@gmail.com ¹⁾, elangdm@yahoo.co.id ²⁾, rediyacoub@yahoo.com ³⁾

ABSTRAK

Dalam dunia teknologi khususnya robot telah mengalami perkembangan yang sangat cepat salah satunya adalah robot manipulator planar. Robot ini berbentuk menyerupai lengan manusia yang dilengkapi dengan beberapa sendi. Namun permasalahan yang dihadapi oleh robot ini adalah ketika di area kerja robot terdapat penghalang (*obstacle*), maka kinerja robot terganggu sehingga hasil yang diinginkan robot tersebut tidak tercapai. Dalam tugas akhir ini dirancang sebuah robot yang dapat bergerak secara otomatis untuk menghindari dari suatu halangan dalam bidang 2 dimensi. Robot ini berbentuk lengan dengan 4-DOF (*Degree Of Freedom*) dan dikendalikan menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560. Sensor ultrasonik yang berjumlah 8 buah dipergunakan untuk mendeteksi halangan (*obstacle*) sehingga robot tidak akan menyentuh *obstacle* tersebut. Robot ini menggunakan 4 buah servo. Pada setiap sendi dipasang satu buah servo sehingga robot memiliki 4 sendi.

Berdasarkan hasil pengujian dan pengukuran sensor ultrasonik pada robot yang menggunakan *obstacle* berbentuk tabung dengan diameter 10 cm dan dengan nilai *set point* jarak antara sensor ultrasonik dan *obstacle* sebesar 6 cm, maka diperoleh nilai *error* keseluruhan sensor ultrasonik adalah 0,4375 cm dimana *error* sensor ultrasonik 1 yaitu 0,28 cm, *error* sensor ultrasonik 2 yaitu 0,38 cm, *error* sensor ultrasonik 3 yaitu 0,81 cm, *error* sensor ultrasonik 4 yaitu 0,6 cm, *error* sensor ultrasonik 5 yaitu 0,28 cm, *error* sensor ultrasonik 6 yaitu 0,25 cm, *error* sensor ultrasonik 7 yaitu 0,21 cm dan *error* sensor ultrasonik 8 yaitu 0,69 cm. Robot dalam keadaan *standby* hanya membutuhkan daya sebesar 0,01125 Watt dan saat beroperasi membutuhkan daya sebesar 1,4125 Watt. Robot menyentuh *obstacle* ketika menghindari halangan berbentuk balok dengan posisi sudut balok tepat menghadap sensor ultrasonik yang menyebabkan terjadinya *error* pada pembacaan jarak oleh sensor ultrasonik. Hasil pengujian menyimpulkan bahwa robot manipulator planar 4-DOF penghindar halangan berbasis Arduino Mega 2560 dapat bekerja dengan baik.

Kata kunci: planar 4-DOF, penghindar halangan, mikrokontroler Arduino Mega 2560

1. Latar Belakang

Pada saat ini dunia teknologi khususnya robot telah mengalami perkembangan yang sangat cepat dan dipergunakan untuk mempermudah pekerjaan manusia, salah satunya adalah robot manipulator planar. Robot ini berbentuk menyerupai lengan manusia yang dilengkapi dengan beberapa sendi. Namun permasalahan yang dihadapi oleh robot ini adalah ketika di area kerja robot terdapat penghalang (*obstacle*), maka kinerja robot terganggu sehingga hasil yang diinginkan robot tersebut tidak tercapai.

Penelitian ini merancang sebuah robot planar yang memiliki 4 derajat kebebasan atau yang biasa disebut *Degree of Freedom* (DOF). Robot ini berbentuk sebuah lengan dimana pada lengan terdapat 4 buah sendi yang dapat bergerak bebas melalui suatu bidang dua dimensi. Robot akan secara

otomatis bergerak dan menghindari halangan (*obstacle*) yang telah disediakan dengan jumlah halangan yang bervariasi. Robot dikendalikan secara otomatis menggunakan Arduino Mega 2560 dan menggunakan sensor ultrasonik untuk mendeteksi keberadaan halangan.

Peneitian ini merupakan gagasan awal untuk peneliti-peneliti selanjutnya agar dikembangkan menjadi sebuah robot yang dapat diaplikasikan langsung kepada masyarakat sehingga akan mempermudah pekerjaan manusia. Salah satunya adalah robot berbentuk ular yang memiliki beberapa sendi dan dipasang sensor untuk menghindari halangan pada reruntuhan bangunan ketika terjadinya gempa bumi sehingga dapat memantau keadaan dibawah reruntuhan dengan memasuki celah-celah kecil pada reruntuhan bangunan tersebut.

2. Tinjauan Pustaka

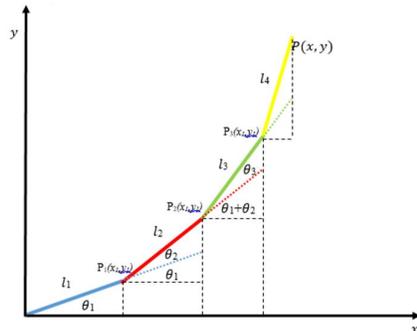
Penelitian ini menghadirkan rancang bangun dan implementasi Robot Planar 4-DOF Penghindar Halangan Berbasis Arduino Mega 2560. Kinerja robot hasil perancangan dievaluasi dengan melihat kemampuannya dalam menghindari *obstacle* dengan ukuran dan konfigurasi yang berbeda-beda di dalam suatu bidang 2 dimensi.

Hasil rancangan diujicobakan pada bidang 2 dimensi dengan ukuran dan konfigurasi *obstacle* yang berbeda-beda dan kemudian dilakukan pengamatan terhadap jarak antara *obstacle* dan masing-masing sensor ultrasonik robot pada saat menghindari *obstacle* dengan ukuran dan konfigurasi yang berbeda-beda tersebut

3. Metodologi Penelitian

3.1. Analisis Kinematika Robot

Kinematika robot manipulator menggunakan dua transformasi, yaitu transformasi kinematika maju dan transformasi kinematika balik. Jika panjang setiap link dan besar sudut setiap sendi robot n-DOF diketahui, maka posisi end effector dapat dihitung secara pasti. Transformasi ini dikenal sebagai kinematika maju. Jika posisi end effector diketahui, maka besar sudut tidak langsung dapat dihitung tanpa mendefinisikan jumlah DOF dari robot tersebut. Transformasi ini dikenal sebagai kinematika balik.



Gambar 3.2 *Stick Picture* Manipulator Planar 4-DOF dalam Bidang Kartesien

Gambar 3.2 menjelaskan bentuk *stick picture* manipulator planar 4-DOF dengan posisi titik *joint* dinyatakan dalam bentuk titik koordinat. Pada penelitian ini menggunakan analisis kinematika maju. Analisis ini relatif sederhana dan mudah diimplementasikan. Variable yang digunakan dalam kinematika maju berupa besaran sudut setiap sendi dan panjang satep *link* robot. Dari persamaan kinematika maju dapat diperoleh hubungan antara ruang sendi pada robot dengan konsep koordinat yang

digunakan untuk menentukan posisi *end effector*.

Pada setiap ujung *link* terdapat titik koordinat yang dinyatakan dengan $P(x_n, y_n)$. Titik koordinat x pada ujung masing-masing *link* diperoleh menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} x_1 &= l_1 \times \cos \theta_1 \\ x_2 &= l_2 \times \cos (\theta_1 + \theta_2) \\ &\vdots \end{aligned} \quad \dots (3.1)$$

sedangkan untuk memperoleh titik koordinat y pada ujung masing-masing *link* diperoleh menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} y_1 &= l_1 \times \sin \theta_1 \\ y_2 &= l_2 \times \sin (\theta_1 + \theta_2) \\ &\vdots \end{aligned} \quad \dots (3.2)$$

posisi *end effector* dinyatakan dengan koordinat $P(x,y)$. Koordinat x *end effector* diperoleh menggunakan persamaan

$$x = x_1 + x_2 + \dots + x_n \dots \dots \dots (3.3)$$

sedangkan koordinat y *end effector* diperoleh menggunakan persamaan

$$y = y_1 + y_2 + \dots + y_n \dots \dots \dots (3.4)$$

sehingga koordinat *end effector* $P(x,y)$ dinyatakan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} x &= l_1 \times \cos \theta_1 + l_2 \times \cos(\theta_1 + \theta_2) + \\ & l_3 \times \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_4 \times \\ & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \dots \dots \dots (3.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y &= l_1 \times \sin \theta_1 + l_2 \times \sin(\theta_1 + \theta_2) + \\ & l_3 \times \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_4 \times \\ & \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \dots \dots \dots (3.6) \end{aligned}$$

Pada Manipulator Planar 4-DOF Penghindar Halangan Berbasis Arduino Mega 2560 digunakan parameter $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 10$ cm. Sedangkan untuk nilai parameter sudut masing-masing *link* diberikan contoh nilai $\theta_1 = 30$ derajat dan $\theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 90$ derajat, maka dengan menggunakan persamaan (3.1) diperoleh

$$\begin{aligned} x_1 &= 10 \times \cos 30 \\ x_2 &= 10 \times \cos (30 + 110) \\ x_3 &= 10 \times \cos (30 + 110 + 110) \\ x_4 &= 10 \times \cos (30 + 110 + 110 + 90) \end{aligned}$$

dan menggunakan persamaan (3.2) diperoleh

$$\begin{aligned} y_1 &= 10 \times \sin 30 \\ y_2 &= 10 \times \sin (30 + 110) \\ y_3 &= 10 \times \sin (30 + 110 + 110) \\ y_4 &= 10 \times \sin (30 + 110 + 110 + 90) \end{aligned}$$

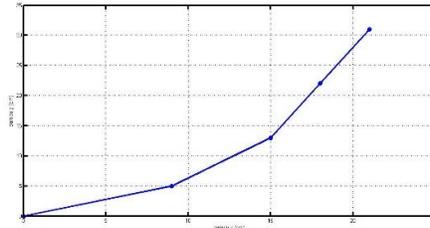
dengan menggunakan persamaan (3.5) dan (3.6) diperoleh titik koordinat *end effector* $P(x,y)$ dengan persamaan:

$$\begin{aligned} x &= 10 \times \cos 30 + 10 \times \cos(30+110) + \\ & 10 \times \cos(30+110+110) + 10 \times \\ & \cos(30+110+110+90) \end{aligned}$$

$$y = 10 \times \sin 30 + 10 \times \sin(30+110) + 10 \times \sin(30+110+110) + 10 \times \sin(30+110+110+110)$$

diperoleh hasil $x = 21$ dan $y = 31$. Sehingga *end effector* berada pada koordinat P(21, 31).

Grafik Robot Planar 4-DOF menggunakan *software* MATLAB dengan dengan P(21, 31) dan nilai sudut yang telah ditentukan tersebut dapat dijelaskan pada Gambar 3.3.

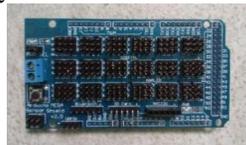


Gambar 3.3 *Stick Picture* Manipulator Planar 4-DOF

3.2. Instrumen dan Bahan Penelitian

3.2.1. Arduino Mega 2560

Arduino Mega2560 merupakan sebuah papan mikrokontroler berbasis ATmega2560 (*datasheet* ATmega2560). Arduino Mega2560 memiliki 54 pin digital *input/output*, dimana 15 pin dapat digunakan sebagai output PWM, 16 pin sebagai input *analog*, dan 4 pin sebagai UART (*port serial hardware*), 16 MHz kristal osilator, koneksi USB, *jack power*, header ICSP, dan tombol reset. Arduino Mega2560 kompatibel dengan sebagian besar *shield* yang dirancang salah satunya adalah *shield* sensor dijelaskan pada Gambar 3.5 serta Gambar 3.6 menunjukkan Arduino Mega 2560 versi terbaru yang menggantikan versi Arduino Mega sebelumnya.



Gambar 3.5 *Shield* Sensor Arduino Mega 2560



Gambar 3.6 Arduino Mega 2560

3.2.2. Motor Servo

Motor servo adalah sebuah motor dengan sistem loop tertutup di mana posisi dari motor akan diinformasikan kembali ke rangkaian kontrol yang ada di dalam motor servo. Motor ini terdiri dari sebuah motor,

serangkaian gear, potensiometer dan rangkaian kontrol. Potensiometer berfungsi untuk menentukan batas sudut dari putaran servo. Sedangkan sudut dari sumbu motor servo diatur berdasarkan lebar pulsa PWM yang dikirim melalui pin kontrol dari motor servo. Dengan pulsa 1,5 ms pada periode selebar 2 ms maka sudut dari sumbu motor akan berada pada posisi tengah dengan sudut 0 derajat. Sistem Mekanik Motor Servo tampak pada Gambar 3.7.



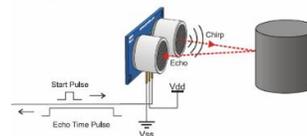
Gambar 3.7 Sistem Mekanik Motor Servo

Sumber: http://robosavvy.com/store/images/DAGU/MG945_gears.jpg

3.2.3. Sensor Ultrasonik

Sensor ultrasonik adalah sensor yang bekerja berdasarkan prinsip pantulan gelombang suara dan digunakan untuk mendeteksi keberadaan atau jarak suatu objek tertentu di depannya.

Sensor mendeteksi jarak objek dengan cara memancarkan gelombang ultrasonik (40 KHz) melalui *Transmitter (Tx)* kemudian mendeteksi gelombang pantulnya menggunakan *Receiver (Rx)*. Sensor ini memancarkan gelombang ultrasonik sesuai dengan instruksi dari mikrokontroler pengendali (pulsa trigger dengan tout min 10 us). Jangkauan HC-SR04 2 cm sampai 4 m. prinsip kerja sensor ultrasonik dapat dijelaskan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Prinsip Kerja Sensor Ultrasonik

Sumber: <http://4.bp.blogspot.com/>

Pada robot ini menggunakan sensor ultrasonik *type* HC-SR04 dengan jenis output berupa sinyal analog. Sensor pada robot ini dipasang pada bagian ujung setiap *link*. Pada bagian ujung kiri dan kanan masing-masing *link* dipasang dua buah sensor ultrasonik sehingga memungkinkan pergerakan lengan robot untuk kekiri maupun kekanan melalui putaran motor servo. Sensor ultrasonik HC-SR04 dapat dilihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Sensor Ultrasonik HC-SR04
Sumber: <https://cdn.instructables.com/>

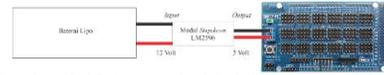
3.2.4. Arduino IDE

Tugas dari **Arduino Software** atau **Arduino IDE** adalah menghasilkan sebuah *file* berformat *hex* yang akan di *download* pada papan arduino atau papan sistem mikrokontroler lainnya. Ini mirip dengan *Microsoft Visual Studio*, *Eclipse IDE*, atau *Netbeans*. Lebih mirip lagi adalah IDE semacam *Code Blocks*, *CodeLite* atau yang mempermudah untuk menghasilkan *file* program. Bedanya kesemua IDE tersebut menghasilkan program dari kode bahasa C (dengan GNU GCC) sedangkan **Arduino Software (Arduino IDE)** menghasilkan *file hex* dari baris kode yang dinamakan *sketch*.

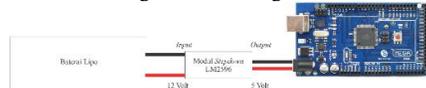
3.3. Antarmuka Instrumen dan Bahan Penelitian

3.3.1. Antarmuka Modul Stepdown dengan Arduino Mega 2560

Pada modul pertama digunakan sebagai sumber tegangan mikrokontroler arduino mega 2560 dimana modul *stepdown* ini telah diatur tegangan keluaran sebesar 5 Volt, sedangkan untuk modul kedua dipasang pada *Shield Sensor v.2.0 Arduino Mega 2560* dengan tegangan yang sama yaitu sebesar 5 Volt yang digunakan sebagai sumber tegangan sensor ultrasonik dan motor servo. Pemisahan sumber tegangan ini dilakukan agar arus yang digunakan pada mikrokontroler tetap stabil sehingga tidak mengganggu kinerja dari mikrokontroler ketika sensor ultrasonik dan motor servo bekerja secara bersamaan. *Shield sensor v.2.0* dipasang tepat diatas *Arduino Mega 2560*. Pada *shield* terdapat *jumper* yang berfungsi untuk menghubungkan atau memisahkan sumber tegangan antara mikrokontroler dengan sensor ultrasonik dan motor servo. Pada robot ini, *jumper* yang terdapat pada *shield* harus dilepas agar mikrokontroler dengan sensor ultrasonik dan motor servo memiliki sumber tegangan yang terpisah. Pada Gambar 3.15 dan Gambar 3.16 dijelaskan hubungan antarmuka modul *stepdown* LM2596 dengan *Arduino Mega 2560* dan *Shield Sensor v.2.0*.



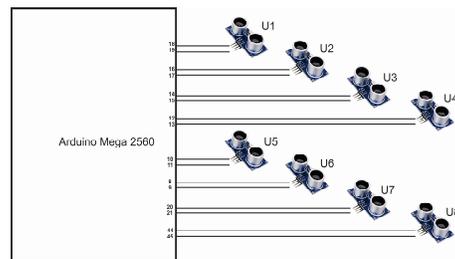
Gambar 3.15 Antarmuka Modul *Stepdown* LM2596 dengan *Arduino Mega 2560*



Gambar 3.16 Antarmuka Modul *Stepdown* LM2596 dengan *Shield Sensor v.2.0 Arduino Mega 2560*

3.3.2. Antarmuka Modul Stepdown dengan Arduino Mega 2560

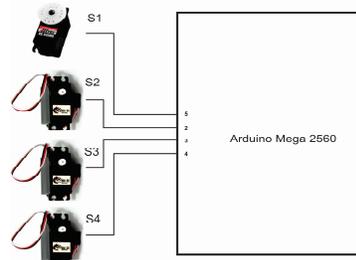
Sensor Ultrasonik HC-SR04 memiliki empat buah pin yaitu VCC, Trig, Echo dan GND. Pada pin VCC diberikan masukan tegangan sebesar 5 Volt dengan GND sebagai *ground*. Sedangkan pin Trig berfungsi mengirim sinyal dari sensor (*Transmitter*) dan pada pin Echo berfungsi menerima pantulan sinyal (*Receiver*) Pada Gambar 3.17 dijelaskan antarmuka sensor ultrasonik dengan *Arduino Mega 2560* dimana pin 1 sampai pin 16 digunakan untuk sensor ultrasonik sebanyak 8 buah sensor dengan masing-masing sensor menggunakan 2 buah pin yaitu sebagai *Transmitter (Tx)* dan *Receiver (Rx)*.



Gambar 3.17 Antarmuka Sensor Ultrasonik dengan *Arduino Mega 256*

3.3.3. Antarmuka Motor Servo dengan Arduino Mega 2560

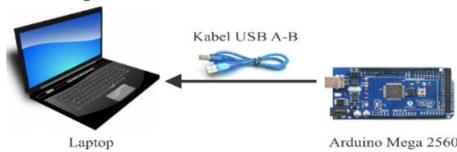
Pada motor servo menggunakan tiga buah kabel penghubung dengan warna yang berbeda. Warna kuning atau *orange* merupakan kabel yang berfungsi untuk menghubungkan sinyal instruksi dari mikrokontroler, kabel warna merah berfungsi sebagai penghubung sumber tegangan dan kabel warna hitam sebagai *ground*. Pada mikrokontroler, kabel sinyal perintah pada masing-masing servo dipasang pada pin 17 sampai 20 yang dapat dijelaskan pada Gambar 3.18.



Gambar 3.18 Antarmuka Motor Servo dengan Arduino Mega 2560

3.3.4. Antarmuka Modul Stepdown dengan Arduino Mega 2560

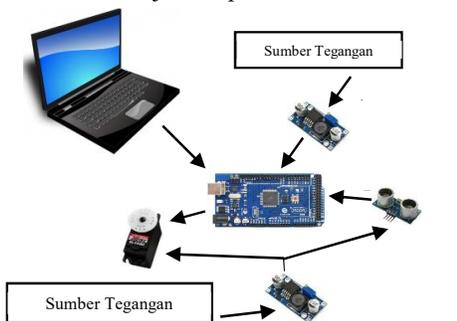
Arduino adalah kit atau papan rangkaian elektronik yang di dalamnya terdapat komponen utama yaitu sebuah *chip* mikrokontroler dengan jenis AVR yang bisa diprogram menggunakan komputer yang telah terhubung secara langsung menggunakan kabel USB A-B seperti yang terlihat pada Gambar 3.19.



Gambar 3.19 Antarmuka *Software* Arduino IDE dengan Arduino Mega 2560

3.4. Rancang Bangun Perangkat Keras

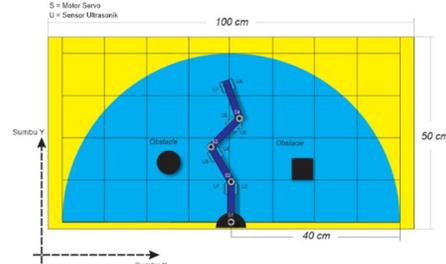
Rancang bangun perangkat keras manipulator planar 4-DOF menggunakan tiga buah komponen utama, yaitu: (1) Arduino Mega2560 sebagai mikrontroler, (2) satu buah motor servo *standard* Hitec HS-645 dan tiga buah motor servo *continuous* DS04-NFC sebagai penggerak robot, dan (3) delapan buah sensor ultrasonik SF04 sebagai *feedback* serta satu buah perangkat pembantu yaitu komputer. Secara umum diagram skematik ditunjukkan pada Gambar 3.20.



Gambar 3.20 Diagram Skematik Sistem Kendali Robot Manipulator Planar 4-DOF

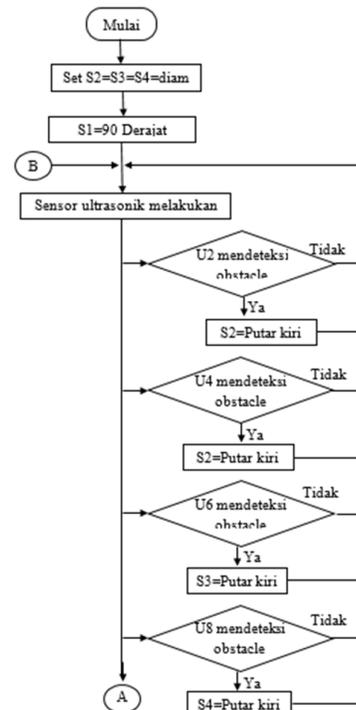
Robot dibuat diatas sebuah bidang berbentuk persegi panjang dengan bahan *multiplex* yang berukuran panjang 100 cm

dan lebar 50 cm. Pada Gambar 3.22 dijelaskan desain robot tampak atas. Daerah kerja atau area yang memungkinkan untuk dilewati robot dibuat dalam bentuk setengah lingkaran dengan panjang jari-jari 40 cm.



Gambar 3.22 Desain Robot Tampak Atas

Diagram alir pemrograman robot dapat dilihat pada Gambar 3.23.



Gambar 3.23 Diagram *Flowchart* Robot Manipulator Planar 4-DOF (*lanjutan*)

3.5. Integrasi Software dan Hardware

Proses integrasi atau penggabungan antara *hardware* dan *software* ini dilakukan pada saat keseluruhan komponen-komponen telah dipasang pada robot. Sebelum Arduino dapat digunakan, terlebih dahulu melakukan instalasi aplikasi dan driver. Instalasi dilakukan pada sistem operasi Windows 10.

4. Pengujian dan Analisis

4.1. Pengujian Sensor Ultrasonik Terhadap Tabung dengan Diameter 10 cm

Pengujian sensor ultrasonik dilakukan dengan mendekati satu obstacle berbentuk tabung terhadap sensor dengan diameter tabung 10 cm. Pengujian ini dilakukan sebanyak 10 kali percobaan pada masing-masing sensor ultrasonik. Dari hasil pengujian dan pengukuran diperoleh nilai *error* yaitu selisih antara nilai *set point* jarak sensor ultrasonik terhadap *obstacle* (6 cm) dan nilai pengukuran jarak sensor ultrasonik terhadap *obstacle* pada saat pengujian. Sensor ultrasonik 1 (U1) berada pada ujung *link-1* bagian kiri, sensor ultrasonik 2 (U2) berada pada ujung *link-1* bagian kanan, sensor ultrasonik 3 (U3) berada pada ujung *link-2* bagian kiri, sensor ultrasonik 4 (U4) berada pada ujung *link-2* bagian kanan, sensor ultrasonik 5 (U5) berada pada ujung *link-3* bagian kiri, sensor ultrasonik 6 (U6) berada pada ujung *link-3* bagian kanan, sensor ultrasonik 7 (U7) berada pada ujung *link-4* bagian kiri dan sensor ultrasonik 8 (U8) berada pada ujung *link-4* bagian kanan. Sensor ultrasonik berfungsi dengan baik ketika adanya respon motor servo untuk bergerak menghindari *obstacle*. Dalam pengujian ini digunakan sebuah penggaris untuk mengukur jarak antara sensor ultrasonik dan *obstacle* pada saat setelah robot berhenti bergerak menghindari *obstacle* yaitu dengan nilai *set point* 6 cm. Posisi awal robot pada saat pengujian pertama berada pada posisi seperti tampak pada Gambar 4.1.



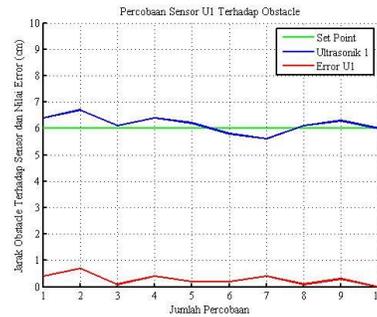
Gambar 4.1 Posisi awal robot pengujian sensor ultrasonik

- (a) Hasil pengujian dan pengukuran sensor ultrasonik 1 (U1) terhadap *obstacle*

Pengujian sensor U1 terhadap *obstacle* yang dilakukan sebanyak 10 kali percobaan. Servo 1 dipasang dibagian awal *link-1* dengan posisi menghadap ke atas.

Pada saat *obstacle* didekatkan dengan sensor ultrasonik 1 disebelah kiri robot bagian ujung *link-1*, robot bergerak menghindari *obstacle* dengan bergerak

kearah kanan dengan nilai *error* pada masing-masing percobaan dijelaskan dengan grafik pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik Jarak Sensor Ultrasonik 1 Terhadap Obstacle

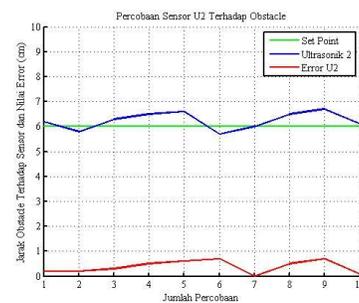
Dari Gambar 4.3 diperoleh nilai *error* tertinggi 0,7 cm pada percobaan ke-2 dan *error* terendah 0 cm pada percobaan ke-10. Dari 10 percobaan yang telah dilakukan, sehingga diperoleh nilai rata-rata *error* sensor ultrasonik 1

$$\begin{aligned} \text{Error U1} &= \frac{\sum \text{Error}}{\text{Jumlah Percobaan}} \\ &= \frac{2,8}{10} \\ &= 0,28 \text{ cm.} \end{aligned}$$

- (b) Hasil pengujian dan pengukuran sensor U2 terhadap *obstacle*

Pengujian sensor U2 terhadap *obstacle* dilakukan sebanyak 10 kali percobaan

Pada saat *obstacle* didekatkan dengan sensor ultrasonik 2 disebelah kanan robot bagian ujung *link-1*, robot bergerak menghindari *obstacle* dengan bergerak kearah kiri dengan nilai *error* pada masing-masing percobaan dijelaskan dengan grafik pada Gambar 4.4.



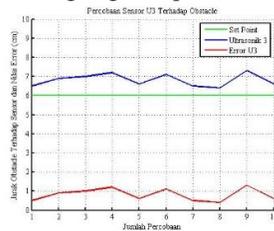
Gambar 4.4 Grafik Jarak Sensor Ultrasonik 2 Terhadap Obstacle

Dari Gambar 4.4 diperoleh nilai *error* tertinggi 0,7 cm pada percobaan ke-7 dan *error* terendah 0 cm pada percobaan ke-7. Dari 10 percobaan yang telah dilakukan, sehingga diperoleh nilai rata-rata *error* sensor ultrasonik 2

$$\begin{aligned}
 \text{Error U2} &= \frac{\sum \text{Error}}{\text{Jumlah Percobaan}} \\
 &= \frac{3,8}{10} \\
 &= 0,38 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

- (c) Hasil pengujian dan pengukuran sensor U3 terhadap *obstacle*

Pengujian sensor U3 terhadap *obstacle* yang dilakukan sebanyak 10 kali percobaan. Pada saat *obstacle* didekatkan dengan sensor ultrasonik 3 disebelah kiri robot bagian ujung *link-2*, robot bergerak menghindari *obstacle* dengan bergerak kearah kanan dengan nilai *error* pada masing-masing percobaan dijelaskan dengan grafik pada Gambar 4.5.



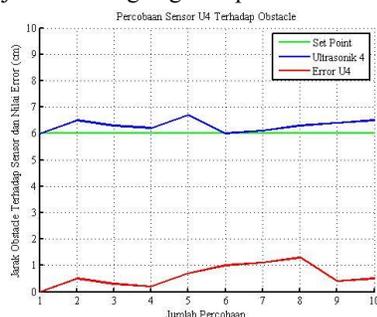
Gambar 4.5 Grafik Jarak Sensor Ultrasonik 3 Terhadap *Obstacle*

Dari Gambar 4.5 diperoleh nilai *error* tertinggi 0,7 cm pada percobaan ke-7 dan *error* terendah 0 cm pada percobaan ke-7. Dari 10 percobaan yang telah dilakukan, sehingga diperoleh nilai rata-rata *error* sensor ultrasonik 3

$$\begin{aligned}
 \text{Error U3} &= \frac{\sum \text{Error}}{\text{Jumlah Percobaan}} \\
 &= \frac{8,1}{10} \\
 &= 0,81 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

- (d) Hasil pengujian dan pengukuran sensor U4 terhadap *obstacle*

Pengujian sensor U4 terhadap *obstacle* dilakukan sebanyak 10 kali percobaan. Pada saat *obstacle* didekatkan dengan sensor ultrasonik 4 disebelah kanan robot bagian ujung *link-2*, robot bergerak menghindari *obstacle* dengan bergerak kearah kiri dengan nilai *error* pada masing-masing percobaan dijelaskan dengan grafik pada Gambar 4.6.



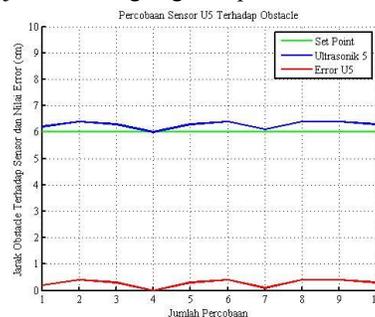
Gambar 4.6 Grafik Jarak Sensor Ultrasonik 4 Terhadap *Obstacle*

Dari Gambar 4.6 diperoleh nilai *error* tertinggi 1,1 cm pada percobaan ke-7 dan *error* terendah 0 cm pada percobaan ke-1. Dari 10 percobaan yang telah dilakukan, sehingga diperoleh nilai rata-rata *error* sensor ultrasonik 4

$$\begin{aligned}
 \text{Error U4} &= \frac{\sum \text{Error}}{\text{Jumlah Percobaan}} \\
 &= \frac{6}{10} \\
 &= 0,6 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

- (e) Hasil pengujian dan pengukuran sensor U5 terhadap *obstacle*

Pengujian sensor U5 terhadap *obstacle* yang dilakukan sebanyak 10 kali percobaan. Pada saat *obstacle* didekatkan dengan sensor ultrasonik 5 disebelah kiri robot bagian ujung *link-3*, robot bergerak menghindari *obstacle* dengan bergerak kearah kanan dengan nilai *error* pada masing-masing percobaan dijelaskan dengan grafik pada Gambar 4.7.



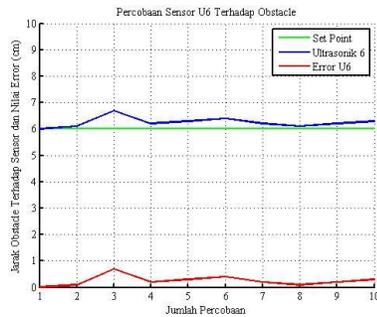
Gambar 4.7 Grafik Jarak Sensor Ultrasonik 5 Terhadap *Obstacle*

Dari Gambar 4.7 diperoleh nilai *error* tertinggi 0,4 cm dan *error* terendah 0 cm. Dari 10 percobaan yang telah dilakukan, sehingga diperoleh nilai rata-rata *error* sensor ultrasonik 5

$$\begin{aligned}
 \text{Error U5} &= \frac{\sum \text{Error}}{\text{Jumlah Percobaan}} \\
 &= \frac{2,8}{10} \\
 &= 0,28 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

- (f) Hasil pengujian dan pengukuran sensor U6 terhadap *obstacle*

Pengujian sensor U6 terhadap *obstacle* dilakukan sebanyak 10 kali percobaan. Pada saat *obstacle* didekatkan dengan sensor ultrasonik 6 disebelah kanan robot bagian ujung *link-3*, robot bergerak menghindari *obstacle* dengan bergerak kearah kiri dengan nilai *error* pada masing-masing percobaan dijelaskan dengan grafik pada Gambar 4.8.



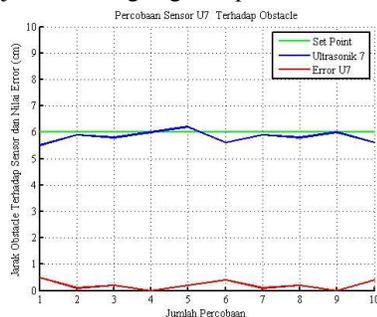
Gambar 4.8 Grafik Jarak Sensor Ultrasonik 6 Terhadap *Obstacle*

Dari Gambar 4.8 diperoleh nilai *error* tertinggi 0,7 cm pada percobaan ke-3 dan *error* terendah 0 cm pada percobaan ke-1. Dari 10 percobaan yang telah dilakukan, sehingga diperoleh nilai rata-rata *error* sensor ultrasonic 6

$$\begin{aligned} \text{Error U6} &= \frac{\sum \text{Error}}{\text{Jumlah Percobaan}} \\ &= \frac{2,5}{10} \\ &= 0,25 \text{ cm.} \end{aligned}$$

- (g) Hasil pengujian dan pengukuran sensor U7 terhadap *obstacle*

Pengujian sensor U7 terhadap *obstacle* yang dilakukan sebanyak 10 kali percobaan. Pada saat *obstacle* didekatkan dengan sensor ultrasonik 7 disebelah kiri robot bagian ujung *link-4*, robot bergerak menghindari *obstacle* dengan bergerak kearah kanan dengan nilai *error* pada masing-masing percobaan dijelaskan dengan grafik pada Gambar 4.9



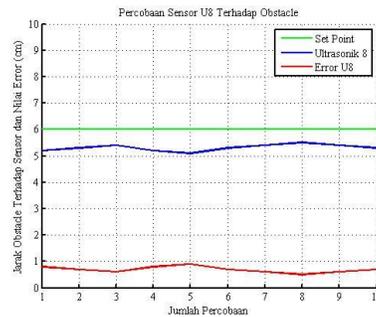
Gambar 4.9 Grafik Jarak Sensor Ultrasonik 7 Terhadap *Obstacle*

Dari Gambar 4.9 diperoleh nilai *error* tertinggi 0,5 cm pada percobaan ke-1 dan *error* terendah 0 cm pada percobaan ke-4. Dari 10 percobaan yang telah dilakukan, sehingga diperoleh nilai rata-rata *error* sensor ultrasonic 7

$$\begin{aligned} \text{Error U7} &= \frac{\sum \text{Error}}{\text{Jumlah Percobaan}} \\ &= \frac{2,5}{10} \\ &= 0,25 \text{ cm.} \end{aligned}$$

- (h) Hasil pengujian dan pengukuran sensor U8 terhadap *obstacle*

Pengujian sensor U8 terhadap *obstacle* dilakukan sebanyak 10 kali percobaan. Pada saat *obstacle* didekatkan dengan sensor ultrasonik 8 disebelah kanan robot bagian ujung *link-4*, robot bergerak menghindari *obstacle* dengan bergerak kearah kiri dengan nilai *error* pada masing-masing percobaan dijelaskan dengan grafik pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik Jarak Sensor Ultrasonik 8 Terhadap *Obstacle*

Dari Gambar 4.10 diperoleh nilai *error* tertinggi 0,9 cm pada percobaan ke-5 dan *error* terendah 0,5 cm pada percobaan ke-8. Dari 10 percobaan yang telah dilakukan, sehingga diperoleh nilai rata-rata *error* sensor ultrasonic 8

$$\begin{aligned} \text{Error U8} &= \frac{\sum \text{Error}}{\text{Jumlah Percobaan}} \\ &= \frac{6,9}{10} = 0,69 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Dari semua percobaan dan pengujian sensor ultrasonik terhadap *obstacle* yang menghasilkan nilai *error* dari masing-masing sensor ultrasonic, sehingga diperoleh nilai *error* rata-rata sensor ultrasonik secara keseluruhan

$$\begin{aligned} \text{Error keseluruhan} &= \frac{\sum \text{Error}}{\text{Jumlah Sensor Ultrasonik}} \\ &= \frac{3,5}{8} \\ &= 0,4375 \text{ cm} \end{aligned}$$

4.2. Pengujian Respon Robot terhadap *Obstacle* Berbentuk Tabung

Pengujian respon dilakukan dengan konfigurasi ukuran dua buah *obstacle* berbentuk tabung yang berbeda-beda dan diletakkan satu-persatu. Setelah *obstacle* pertama diletakkan di titik koordinat tertentu, dilanjutkan *obstacle* kedua diletakkan dengan cara digeser mendekati sensor ultrasonik

yang akan diuji. Posisi *obstacle* diletakkan pada titik koordinat tertentu secara acak dengan ketentuan *link base* berada pada titik koordinat (0,0). Untuk pengujian kedua dan seterusnya dilanjutkan setelah pengujian pertama tanpa mengembalikan robot pada posisi awal. Data hasil pengujian respon robot terhadap *obstacle* tabung dijelaskan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Data Pengujian Respon Robot Terhadap *Obstacle* Berbentuk Tabung

No. Gambar	Ukuran Diameter Tabung (Cm)		Titik Koordinat Tabung (x,y)		Respon Robot
	Tabung 1	Tabung 2	Tabung 1	Tabung 2	
(a)	14	13	(15, 10)	(-10, 30)	Baik
(b)	14	12	(0, 15)	(-10, 30)	Baik
(c)	14	11	(-15, 10)	(20, 30)	Baik
(d)	14	10	(30, 20)	(-5, 10)	Baik
(e)	13	12	(-15, 30)	(10, 10)	Baik
(f)	13	11	(-10, 13)	(15, 30)	Baik
(g)	13	10	(-25, 10)	(15, 20)	Baik
(h)	12	11	(37, 0)	(-10, 10)	Baik
(i)	12	10	(10, 5)	(-10, 20)	Baik
(j)	11	10	(10, 20)	(-20, 35)	Baik

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan tersebut, respon robot tampak baik yaitu ditandai dengan adanya pergerakan robot menghindari *obstacle* tanpa menyentuh.

4.3. Pengujian Respon Robot terhadap *Obstacle* Berbentuk Balok

Selain dilakukan pengujian menggunakan *obstacle* berbentuk tabung, pada penelitian ini juga dilakukan pengujian robot terhadap *obstacle* yang berbentuk balok dengan konfigurasi ukuran yang berbeda-beda. Cara pengujian robot menggunakan *obstacle* balok sama dengan pada saat pengujian robot terhadap *obstacle* berbentuk tabung

Pada pengujian ini, respon robot baik yaitu ditandai dengan tidak menyentuh *obstacle*. Pada kondisi sensor ultrasonik yang tidak tegak lurus terhadap *obstacle* berbentuk tabung, robot tetap memberikan respon menghindar namun jarak antara sensor dan *obstacle* sedikit lebih pendek dibandingkan dengan kondisi yang tegak lurus. Data hasil pengujian respon robot terhadap *obstacle* balok dijelaskan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Data Pengujian Respon Robot Terhadap *Obstacle* Berbentuk Balok

No. Gambar	Ukuran Balok (p × l)		Titik Koordinat Tabung (x,y)		Respon Robot
	Balok 1	Balok 2	Balok 1	Balok 2	
(a)	13 × 13	12 × 12	(-18, 20)	(14, 11)	Baik
(b)	13 × 13	11 × 11	(-18, 20)	(3, 30)	Baik
(c)	13 × 13	10 × 10	(-18, 10)	(-12, 38)	Baik
(d)	13 × 13	9 × 9	(-10, 20)	(12, 20)	Baik
(e)	12 × 12	11 × 11	(-19, 11)	(9, 12)	Baik

(f)	12 × 12	10 × 10	(-12, 9)	(18, 28)	Baik
(g)	12 × 12	9 × 9	(-18, 28)	(10, 7)	Baik
(h)	11 × 11	10 × 10	(2, 18)	(31, 14)	Baik
(i)	11 × 11	9 × 9	(16, 5)	(-1, 32)	Baik
(j)	10 × 10	9 × 9	(-29, 24)	(4, 12)	Baik

Dari Tabel 4.10 dijelaskan hasil pengujian respon robot terhadap dua buah *obstacle* berbentuk balok dengan konfigurasi ukuran yang berbeda-beda. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan tersebut, respon robot terhadap *obstacle* berbentuk balok juga tampak baik yaitu ditandai dengan adanya pergerakan robot menghindari *obstacle* tanpa menyentuh *obstacle* tersebut.

4.4. Pengujian Respon Robot terhadap *Obstacle* Berbentuk Balok dan Tabung

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan dua buah *obstacle* berbentuk tabung dan balok dengan konfigurasi ukuran yang berbeda. Cara pengujian yang menggunakan *obstacle* balok dan tabung sama dengan pengujian menggunakan 2 buah tabung atau 2 buah balok yaitu dengan posisi awal robot sejajar terhadap sumbu y dan pada saat pengujian pertama hingga selesai posisi robot tidak dikembalikan pada kondisi awal.

Pada pengujian ini diperoleh 2 pengujian respon robot yang kurang baik, hal ini dikarenakan posisi sensor berada tepat menghadap sudut balok, sehingga pembacaan jarak oleh sensor ultrasonik menjadi *error*. Pada saat sensor menghadap sudut balok, sinyal ultrasonik yang dipancarkan oleh *transmitter* memantul kearah yang berlawanan dan sinyal ultrasonik tidak dapat diterima kembali oleh *receiver* sehingga nilai jarak yang diperoleh sensor ultrasonik menjadi *error*. Data hasil pengujian respon robot terhadap *obstacle* yang berbentuk balok dan tabung dijelaskan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Data Pengujian Respon Robot Terhadap *Obstacle* Berbentuk Balok dan Tabung

No. Gambar	Ukuran <i>Obstacle</i>		Titik Koordinat <i>Obstacle</i> (x,y)		Respon Robot
	Balok (p×l)	Tabung (d)	Balok	Tabung	
(a)	13 × 13	14	8, 14	-28, 18	Baik
(b)	12 × 12	14	11, 25	-19, 29	Baik
(c)	11 × 11	14	6, 10	-19, 29	Baik
(d)	10 × 10	14	12, 13	-5, 5	Baik
(e)	9 × 9	14	4, 22	-5, 5	Baik
(f)	12 × 12	13	27, 29	-2, 13	Baik
(g)	11 × 11	13	18, 15	-10, 11	Kurang Baik
(h)	10 × 10	13	31, 35	-10, 11	Baik
(i)	9 × 9	13	21, 22	-8, 22	Baik
(j)	11 × 11	12	15, 4	-8, 25	Baik
(k)	10 × 10	12	31, 15	1, 12	Baik
(l)	9 × 9	12	0, 14	27, 5	Baik
(m)	10 × 10	11	-20, 20	18, 5	Baik
(n)	9 × 9	11	-9, 10	1, 34	Kurang Baik

Pada Tabel 4.11 dijelaskan hasil pengujian respon robot terhadap dua buah *obstacle* berbentuk balok dan tabung dimanan terdapat respon robot yang kurang baik yaitu pada percobaan (g) dan percobaan (n). Hal ini disebabkan oleh posisi sisi *obstacle* yang berbentuk balok tidak tegak lurus terhadap sensor ultrasonik sehingga gelombang yang dipancarkan oleh *transmitter* memantul kearah lain akibatnya gelombang yang dipancarkan tersebut tidak dapat diterima kembali oleh *receiver*.

Pada Tabel 4.11 dijelaskan hasil pengujian respon robot terhadap dua buah *obstacle* berbentuk balok dan tabung dimanan terdapat respon robot yang kurang baik yaitu pada percobaan (g) dan percobaan (n). Hal ini disebabkan oleh posisi sisi *obstacle* yang berbentuk balok tidak tegak lurus terhadap sensor ultrasonik sehingga gelombang yang dipancarkan oleh *transmitter* memantul kearah lain akibatnya gelombang yang dipancarkan tersebut tidak dapat diterima kembali oleh *receiver*.

5. Penutup

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan pengamatan implementasi manipulator planar 4-DOF penghindar halangan berbasis arduino mega 2560, maka dapat diberikan kesimpulan sebagai berikut:

1. Manipulator planar 4-DOF penghindar halangan yang dibuat bekerja dengan baik.
2. Robot dalam keadaan *standby* hanya membutuhkan daya sebesar 0,01125 Watt dan saat beroperasi membutuhkan daya sebesar 1,4125 Watt.
3. Modul *step down* LM2596 yang digunakan sebagai sumber tegangan bekerja dengan baik.
4. Komunikasi sensor ultrasonik dan servo dapat bekerja dengan baik tanpa ada tabrakan instruksi.
5. Robot dapat bekerja dengan optimal menggunakan 8 sensor ultrasonik.
6. Dalam menghindari *obstacle* yang berbentuk tabung dengan ukuran diameter 10 cm robot dapat bekerja dengan baik dengan nilai *error* cukup kecil yaitu:
 - Sensor ultrasonik 1 = 0,28 cm
 - Sensor ultrasonik 2 = 0,38 cm
 - Sensor ultrasonik 3 = 0,81 cm
 - Sensor ultrasonik 4 = 0,6 cm
 - Sensor ultrasonik 5 = 0,28 cm
 - Sensor ultrasonik 6 = 0,25 cm

- Sensor ultrasonik 7 = 0,21 cm
 - Sensor ultrasonik 8 = 0,69 cm
7. Nilai *error* rata-rata keseluruhan sensor ultrasonik sebesar 0,4375 cm.
 8. Robot menyentuh *obstacle* pada saat menghindari halangan berbentuk balok dengan posisi sudut balok tepat menghadap sensor ultrasonik yang menyebabkan terjadinya *error* pada pembacaan jarak oleh sensor ultrasonic

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk pengembangan implementasi manipulator planar 4-DOF penghindar halangan berbasis arduino mega 2560 adalah:

1. Pembuatan mekanik robot dapat dibangun dengan menggunakan bahan yang lebih kuat dan tebal agar robot lebih kokoh serta dapat bergerak lebih leluasa.
2. Menggunakan motor servo yang memiliki dua buah *gear* sehingga mendukung sistem mekanik robot menjadi lebih kuat dan kokoh.
3. Penggunaan torsi motor servo yang tepat agar mampu bekerja tanpa kendala.
4. Merancangan robot dengan menggunakan bidang 3 dimensi sehingga dapat diimplementasikan sebagai *arm robot* penghindar halangan.
5. Menambahkan *gripper* pada *end effector* agar robot dapat menghindari *obstacle* sekaligus mengambil benda-benda yang diinginkan.
6. Menambah jumlah DOF agar pergerakan robot lebih lembut dan lebih presisi sehingga dapat menghindari *obstacle* dengan nilai *error* yang lebih kecil.

6. Daftar Pustaka

- Boxall ,John. 2013. Arduino Workshop, a hand on introduction with 65 projects. United States of America: William Pollock
- David Warren, j; Ada'ms, J; Molle, H. 2011. Arduino RobotICS. United States of America: Paul Manning
- Darwison, dkk. 2013. Kontrol Posisi Robot Manipulator Planar Tiga Derajat Kebebasan Berbasis Visual: Laboratorium Elektronika Industri Jurusan Teknik elektro Universitas Andalas.

- Marti558. 2014, Mar 22. Arduino robot arm. Agustus 15, 2016. <http://www.instructables.com/id/Arduino-robot-arm-1/>
- Mjrovai. 2016, Feb 29. Programmed Robot Arm. Agustus 15, 2016. <http://www.instructables.com/id/Programmed-Robot-Arm/step2/THE-PROJECT/>
- Monk,Simon. 2010. 30 Arduino Projects for the Evil Genius. United States of America: Paul Manning
- Ningrum, Endah S., dkk. 2013. Optimasi Pergerakan Robot Planar 3 Sendi Pada Robot Penggenggam Menggunakan Metode Pemrograman Genetika.: Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.
- Oxer,Jonathan; Blemings, Hugh. 2009. PractlCal Arduino. United States of America: Paul Manning
- Sugiarto, Indar. 2008. Pemodelan dan Simulasi Dinamika Lengan Robot 3-DOF Menggunakan Perangkat Lunak Open Source : Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Kristen Petra



Biografi:

Supardiansyah, lahir di Mengkayar pada tanggal 27 Agustus 1994. Menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 28 Mengkayar lulus pada tahun 2006, melanjutkan ke SMP Negeri 5 Teluk Keramat sampai tahun 2009 dan melanjutkan ke SMA Negeri 1 Sambas sampai tahun 2012. Memperoleh gelar sarjana dari Program Studi Teknik Elektro Universitas Tanjungpura Pontianak pada tahun 2017.