



Prototipe Manipulator Lengan Robot Berbasis Arduino dengan Metoda Kendali *Lead-Through*

Erwin Sitompul¹ dan Sodri²

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Presiden, email: sitompul@president.ac.id

²Program Studi Teknik Elektro Universitas Presiden, email: sodrii7@gmail.com

Abstrak

Pada penelitian ini diajukan suatu prototipe manipulator lengan robot (MLR) berbasis Arduino yang bekerja dengan metoda kendali lead-through. Melalui metoda kendali lead-through, proses pemrograman gerakan robot digantikan dengan proses perekaman gerakan robot yang sederhana dan mudah. Pada proses perekaman (recording), bagian-bagian dari MLR digerakkan secara manual oleh pengguna. Setelah itu dapat dilakukan proses pemutaran ulang (playback) dari gerakan yang telah direkam. MLR memiliki 3 derajat kebebasan dengan mempergunakan tiga motor servo untuk melakukan gerakan rotasi, gerakan naik-turun, dan gerakan maju-mundur. Selain itu, MLR memiliki satu pencengkeram (gripper) yang digerakkan oleh satu motor servo. Motor servo dimodifikasi sehingga memiliki satu terminal tambahan yang berfungsi untuk memberikan umpan balik posisi. Pada proses perekaman, posisi dari semua motor servo direkam pada EEPROM Arduino Uno setiap rentang waktu 200 milidetik. Pada proses pemutaran ulang, posisi yang telah direkam dikirimkan sebagai masukan motor servo, dan MLR mengulangi gerakan yang telah direkam. MLR diuji untuk memindahkan benda kerja dengan tuntutan akurasi sebesar $\pm 3\text{cm}$. MLR mampu mengulangi gerakan memindahkan 1 benda kerja berjarak perpindahan 30 cm dengan tingkat keberhasilan 80%. Selain itu, MLR mampu memutar ulang gerakan memindahkan 2 benda kerja berjarak perpindahan 60 cm dengan tingkat keberhasilan 85%. Akurasi yang ditunjukkan MLR menjadi pendorong untuk penggunaannya pada tugas pemindahan benda pada sebarang lini produksi suatu proses manufaktur.

Kata kunci: manipulator lengan robot, metoda kendali lead-through, umpan balik posisi, EEPROM

Abstract

In this research, a prototype of Arduino-based robot arm manipulator (RAM) controlled with lead-through method is proposed. By using lead-through control methods, the robot movement programming process is replaced by a simple and easy robot movement recording process. The recording process is performed when parts of the RAM are manually moved by the user. Afterwards, the playback process of the recorded movement can be performed. The RAM has 3 degrees of freedom and uses three servo motors to perform rotational movement, upward-downward movement, and forward-backward movement. Furthermore, RAM has one gripper which is moved by one servo motor. The servo motors are modified so that each of them has one additional terminal that serves to provide position feedback. On the recording process, the position of all servo motors is recorded on Arduino Uno EEPROM every 200 milliseconds time interval. In the playback process, the recorded position is sent to the servo motors as input, and the RAM repeats the recorded movement. The RAM is tested to move workpiece with accuracy requirement of $\pm 3\text{cm}$. RAM is able to repeat the movement to move 1 workpiece for 30 cm

displacement with a success rate of 80%. In addition, RAM is able to playback the movement to move 2 workpieces for 60 cm displacement with a success rate of 85%. The accuracy achieved by the RAM encourages its implementation on object moving tasks in a production line of a manufacturing process.

Keywords: robot arm manipulator, lead-through control method, position feedback, EEPROM

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi di bidang mekanika dan elektronika mendorong perkembangan yang pesat pada bidang robotika. Dengan kecanggihan teknologi yang dimilikinya, semakin banyak pekerjaan-pekerjaan yang sebelumnya dilakukan oleh manusia menjadi dilakukan oleh robot. Di sektor hiburan, robot telah dapat diimplementasikan untuk memainkan alat musik dengan akurasi yang tinggi [1]. Selain itu, melalui penggunaan robot di berbagai sektor industri, konsistensi kualitas dan kuantitas produksi dapat ditingkatkan [2].

Suatu program robot berfungsi mengendalikan seluruh aktuator yang dimiliki robot tersebut untuk dapat berfungsi sesuai dengan perancangannya. Menurut Robot Institute of America [3], robot adalah mesin multifungsi yang dapat diprogram ulang, dirancang untuk memindahkan material, komponen, alat, atau perangkat khusus, melalui gerakan terprogram yang variabel untuk pengerjaan berbagai tugas. Salah satu tugas yang dapat menjadi bagian dari suatu lini produksi adalah pemindahan benda dari suatu tempat ke tempat yang lain. Apabila suatu robot dapat diimplementasikan dan menggantikan manusia dalam melaksanakan tugas ini, maka efisiensi proses produksi akan dapat ditingkatkan. Selain itu, robot juga diharapkan dapat dioperasikan dengan mudah dan sederhana.

Robot dapat diprogram untuk melakukan gerakan sesuai dengan referensi yang didapat dari sensor-sensor yang dimilikinya. Pada [4] misalnya, diajukan rancangan robot yang dapat mendekati dan memanjat tiang secara otomatis dengan menggunakan sensor kamera dan sensor proximity yang memperlengkapinya. Robot dapat pula digerakkan untuk mengikuti suatu lintasan gerak tertentu, dari satu posisi ke posisi lainnya pada suatu sistem koordinat. Terdapat berbagai metoda untuk melakukan pemrograman gerakan robot berdasarkan posisi. Metoda teoritis memerlukan pemodelan matematis gerakan lengan robot, yang dikenal dengan *forward* dan *inverse kinematics*, yang menyatakan hubungan timbal balik antara sudut-sudut lengan dan orientasi posisi lengan kerja [5]. Serangkaian upaya telah dilakukan untuk menyederhanakan pemrograman gerakan robot [6]. Dalam aplikasi industri, terdapat dua metoda pemrograman gerakan robot, yaitu pemrograman daring (*online programming*) dan pemrograman luring (*offline programming*) [7]. Walaupun tidak mengakibatkan penghentian produksi (*production downtime*), pemrograman luring memerlukan seorang operator dengan kemampuan pemrograman perangkat lunak yang tinggi. Sementara itu, pada saat melakukan pemrograman daring, proses produksi memang perlu dihentikan. Akan tetapi prosesnya dapat dilakukan dengan lebih mudah dan tidak menuntut kemampuan pemrograman perangkat lunak. Termasuk ke dalam metoda pemrograman daring adalah metoda *teach pendant* dan metoda *lead-through*. Pada metoda *teach pendant* masih diperlukan perangkat pengontrol genggam untuk mengatur gerakan robot, sedangkan pada metoda *lead-through*, robot langsung digerakkan dengan mempergunakan tangan sesuai dengan gerakan yang diinginkan [8].

Metoda *lead-through* dipandang sebagai metoda yang paling sederhana dan paling mudah untuk dilakukan, dimana robot dituntun untuk melakukan suatu gerakan, untuk kemudian dapat mengulangi gerakan tersebut. Dengan menggunakan metoda kendali ini, dilakukan perekaman (*recording*) posisi robot pada saat robot digerakkan. Gerakan yang telah direkam ini kemudian dapat diputar ulang (*playback*). Metoda *lead-through* menawarkan sejumlah kelebihan seperti

proses pemrograman yang cepat dan tanpa memerlukan aktivitas pemrograman yang menuntut kemampuan menggunakan suatu bahasa pemrograman tertentu.

Pada penelitian ini, penulis mengajukan prototipe manipulator lengan robot (MLR) berbasis Arduino yang bekerja dengan metoda kendali *lead-through*. Desain dasar dari MLR berasal dari lengan robot *open source* Lite Arm i2 [9], yang kemudian mendapatkan sejumlah perubahan. MLR dirancang untuk mampu memindahkan suatu benda kerja dari satu tempat ke tempat lainnya. Penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan pengendalian lengan robot dapat dilihat pada [10]. Diajukan suatu rancang bangun pengendalian lengan robot 4 derajat kebebasan dengan penekanan pada antarmuka pengguna grafis (*graphical user interface*). Fasilitas ini mempermudah pengendalian gerakan lengan robot. Namun tidak terdapat kemampuan untuk merekam gerakan dan memutar ulang gerakan yang telah direkam, seperti halnya MLR. [11] mengajukan desain lengan robot yang dapat memindahkan benda berdasarkan warna. Untuk hal ini dipergunakan mekanisme aktuator katup pneumatik dan motor DC. Apabila sensor warna mendeteksi keberadaan benda, lengan robot akan turun untuk mengambil benda dan membawa benda ke posisi yang telah ditetapkan. Tidak dilakukan pengujian terhadap akurasi posisi pengambilan dan peletakan benda. Suatu kendali lengan robot mempergunakan *accelerometer* dan potensiometer diajukan pada [12]. Dilakukan proses perekaman gerakan tangan yang kemudian dipetakan dan dipergunakan untuk menggerakkan lengan robot melalui motor servo. Perekaman segmen gerakan dapat dilakukan hingga maksimal 8 segmen berbeda, dan perekaman dilakukan berkali-kali hingga didapatkan segmen gerakan yang diinginkan. Akurasi lengan robot dalam memindahkan benda hanya terbagi atas *sesuai* dan *tidak sesuai*, tanpa mempergunakan ukuran kuantitatif tertentu. Kelebihan solusi yang diajukan oleh penulis pada perancangan MLR adalah perekaman dilakukan sekaligus tanpa terbagi dalam segmen gerakan dan tanpa perlu diulang. Gerakan yang direkam oleh MLR langsung dapat diputar ulang dengan akurasi yang terukur dalam orde sentimeter.

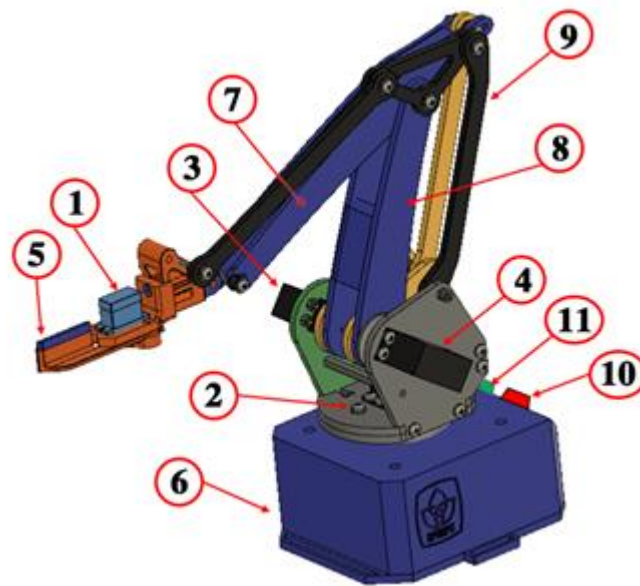
Setelah melewati tahap prototipe, pada implementasi sepenuhnya MLR diharapkan dapat menjadi bagian terintegrasi dari sebarang lini produksi dalam suatu proses manufaktur, dengan kontribusi positif pada efisiensi dan dengan akurasi yang memenuhi toleransi. Keberhasilan prototipe MLR ini dapat menjadi titik awal pengembangan robot dengan ukuran dan kekuatan yang lebih besar dan kompleksitas gerakan yang lebih tinggi.

2. Desain Prototipe MLR dan Pengukuran Akurasi Posisi *Gripper*

Prototipe MLR dirancang untuk dapat melakukan rotasi pada bidang horizontal, memiliki dua buah lengan, dan dilengkapi dengan suatu mekanisme cengkeram. MLR memiliki 3 derajat kebebasan, yang diwujudkan melalui penggunaan 3 motor servo. Masing-masing motor servo mendukung MLR untuk melakukan gerakan rotasi, gerakan naik-turun, dan gerakan maju mundur. Satu servo berikutnya bertugas menggerakkan pencengkeram (*gripper*).

Desain prototipe MLR ditampilkan pada Gambar 1. Motor servo pertama (1) berfungsi untuk menggerakkan *gripper*. Dudukan (2) adalah tempat dimana motor servo kedua dipasang, dan berfungsi sebagai penopang lengan robot. Dudukan dapat melakukan rotasi dari sudut minimum 0° hingga ke sudut maksimum 180° . Gerakan naik-turun dilakukan oleh motor servo ketiga (3) dan gerakan maju-mundur ditentukan oleh motor servo keempat (4).

Gripper (5) berfungsi untuk menggenggam suatu benda. Kotak basis (6) berfungsi sebagai tempat penyimpanan rangkaian Arduino dan sebagai tumpuan dari lengan robot. Lengan depan (7) dan lengan utama (8) dihubungkan oleh mekanisme sambungan siku (9). Tombol merah (10) berfungsi untuk memulai dan mengakhiri perekaman gerakan (*record*), sedangkan tombol hijau (11) berfungsi sebagai memutar ulang gerakan yang telah direkam sebelumnya (*playback*).



Gambar 1. Desain prototipe MLR

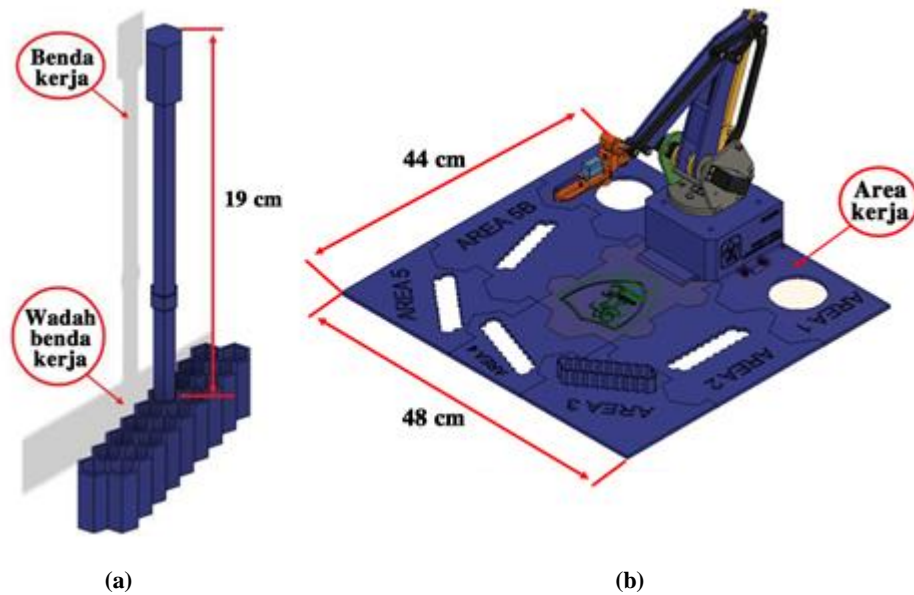
Desain MLR merupakan perubahan dari desain dasar lengan robot Lite Arm i2 [9] dalam hal bagian lengan utama diubah dari 4 bagian menjadi 1 bagian, bagian lengan depan diubah dari 5 bagian menjadi 1 bagian, dan penempatan rangkaian Arduino di dalam kotak basis pada bagian bawah robot. Selain itu, dilakukan penambahan sistem bantalan (*bearing*) sehingga gerakan lengan menjadi lebih halus. Sistem *gripper* dan motor servo yang diletakkan pada ujung lengan depan juga merupakan perubahan dari desain dasar.

Gambar 2(a) menampilkan benda kerja dan wadah benda kerja. Benda kerja berbentuk prisma segi enam dengan jarak antar sisi berhadapan 1.5 cm dan tinggi 19 cm. Benda kerja didesain untuk dapat dicengkeram dengan baik oleh *gripper*. Wadah benda kerja memiliki tinggi 3 cm dan berbentuk deretan lubang persegi enam. Ukuran penampang lubang identik dengan ukuran penampang benda kerja. Wadah benda kerja berfungsi menjadi tempat letak benda kerja untuk dapat berdiri tegak pada suatu posisi tertentu. Area kerja MLR berukuran 44 cm × 48 cm, seperti ditampilkan pada Gambar 2(b). Area kerja terbagi atas 7 area. Area kerja menjadi tempat menguji MLR untuk memindahkan benda kerja dari satu area ke area lainnya. Terdapat 5 pilihan posisi untuk meletakkan wadah benda kerja pada area kerja. Tempat peletakan akhir benda kerja didesain berbentuk silinder. Wadah silinder ini memiliki diameter 6 cm dan dapat diletakkan secara bebas di atas area kerja.

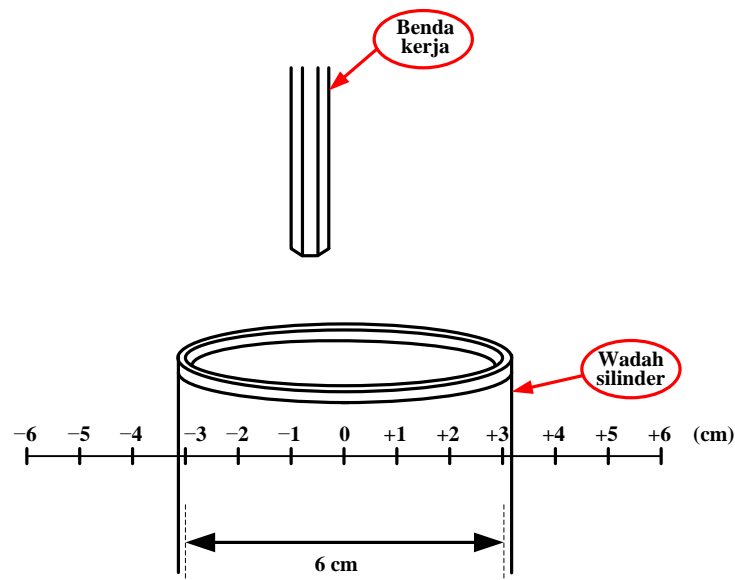
Pada posisi terbuka, kedua ujung terluar dari *gripper* berjarak sekitar 6 cm. Akurasi pengambilan benda kerja dari wadah benda kerja diukur berdasarkan jarak antara titik tengah *gripper* dan posisi benda kerja. Hal ini dilakukan tepat saat lengan robot telah berhenti bergerak dan *gripper* mulai melakukan gerakan mencengkeram. Nilai positif diambil pada arah dimana titik tengah *gripper* melenceng ke sebelah kanan dari benda kerja. Akurasi peletakan benda kerja ke wadah silinder diukur berdasarkan jarak antara titik tengah *gripper* (yang sekarang adalah sama dengan posisi benda kerja yang dicengkeram) dan titik tengah wadah silinder, seperti dapat dilihat pada Gambar 3. Penyimpangan ke kiri diambil bernilai negatif, sedangkan penyimpangan ke kanan diambil bernilai positif.

Penentuan nilai akurasi dilakukan secara visual, dengan selalu membandingkan hasil pengamatan dengan penggaris yang terletak berdekatan. Pengukuran akurasi dengan menggunakan penggaris secara langsung tidak dapat dilakukan karena kecepatan gerak MLR dan variasi posisi *gripper* secara tiga dimensi. Penyimpangan dibulatkan kepada nilai sentimeter terdekat. Penyimpangan antara -0,5 cm dan +0,5 cm dikelompokkan menjadi akurasi tertinggi

0 cm. Penyimpangan antara +0,5 cm dan +1,5 cm menjadi akurasi +1 cm, dan demikian seterusnya. Pada saat pengukuran akurasi pengambilan dan peletakan benda kerja, posisi penulis berada di depan MLR.



Gambar 2. Desain bagian pendukung; (a) Benda kerja dan wadah benda kerja, (b) Area kerja



Gambar 3. Penentuan titik peletakan benda kerja pada wadah silinder

Arduino Uno R3 dipilih sebagai pengontrol MLR. Mikrokontroler berbasis chip Atmega328P ini memiliki jumlah pin dan kapasitas memori yang mampu mendukung kinerja MLR untuk memenuhi tujuan desain. Arduino Uno memiliki EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) sebesar 1 kB yang nantinya dapat dipergunakan sebagai

media rekam untuk posisi dari MLR pada saat melakukan suatu gerakan [13],[14]. Dengan merekam gerakan pada media rekam ini, tidak diperlukan perekaman ulang apabila Arduino mengalami *reset*.

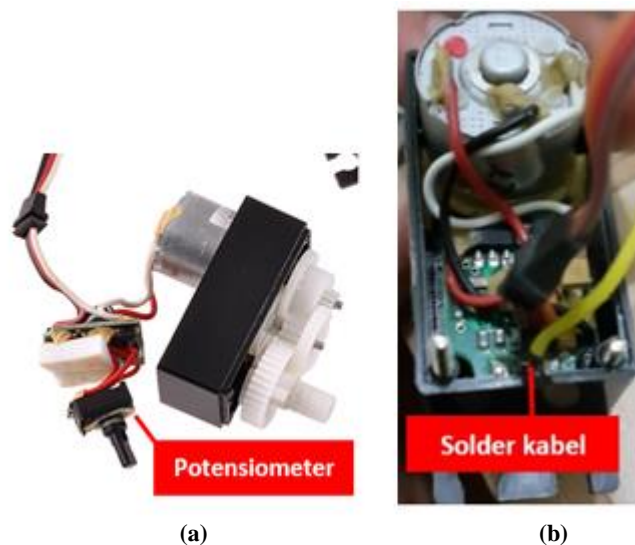
Motor servo adalah motor arus searah yang dapat bergerak dalam dua arah. Arah dan sudut gerakan dari motor servo dikendalikan dengan mengatur siklus tugas (*duty cycle*) dari sinyal modulasi lebar pulsa (*pulse width modulation*) yang diberikan ke terminal kontrolnya. Dalam implementasi MLR, dibutuhkan motor servo yang dapat memberikan umpan balik posisi, sebagai data yang akan direkam ke dalam EEPROM. Pada bagian selanjutnya akan dibahas modifikasi yang dilakukan terhadap suatu tipe motor servo yang memiliki tiga terminal (catu daya, pbumian, dan kontrol) sehingga didapat satu terminal tambahan untuk umpan balik posisi.

3. Implementasi Desain

3.1 Modifikasi dan Kalibrasi Motor servo

Motor servo GWS S03N dipergunakan sebagai penggerak MLR. Motor servo ini dapat bergerak dalam rentang sudut 0° sampai dengan 180° , dan bekerja dengan tegangan antara 4,8 VDC (torsi 3,4 kg/cm) hingga 6 VDC (torsi 4 kg/cm) [15]. Motor servo tipe lain yang memiliki torsi sebanding dan secara pabrikan telah memiliki terminal untuk umpan balik posisi berharga 3-4 kali lebih tinggi dibandingkan motor servo GWS S03N. Untuk itu, motor servo GWS S03N dimodifikasi untuk dapat memberikan umpan balik posisi. Hal ini dilakukan dengan menyolder satu kabel tambahan pada terminal tengah dari potensiometer internal yang terdapat di dalam motor servo. Kabel ini menjadi terminal keempat dari motor servo.

Potensiometer internal dari motor servo ditampilkan pada Gambar 4(a). Sambungan kabel tambahan pada potensiometer internal yang menjadi terminal keempat dari motor servo ditunjukkan pada Gambar 4(b). Nilai resistansi dari potensiometer internal berubah sesuai dengan perputaran motor servo. Pada pengoperasian, motor servo mendapatkan catu daya dengan tegangan tertentu dari Arduino Uno. Terminal keempat kemudian dihubungkan ke pin analog dari Arduino Uno. Dari terminal keempat ini diperoleh pembacaan tegangan analog yang terkonversi menjadi nilai 0-1024 (10 bit resolusi), yang berhubungan dengan suatu posisi tertentu dari suatu motor servo.



Gambar 4. Modifikasi pada motor servo GWS S30N; (a) Potensiometer internal (b) Kabel tambahan disolder pada terminal tengah potensiometer internal

Pada langkah selanjutnya dilakukan kalibrasi pada masing-masing motor servo untuk memperoleh hubungan antara posisi motor servo dan nilai yang terbaca pada terminal keempat. Urutan masukan

sudut 0°, 10°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 170°, dan 180° diberikan kepada motor servo dan nilai yang terbaca pada terminal keempat dicatat sebagai umpan balik posisi. Urutan masukan ini diulang sebanyak 10 kali dan nilai yang didapat untuk suatu sudut dirata-ratakan. Nilai rata-rata ini dapat dilihat pada Tabel 1 kolom 2 sampai dengan kolom 5.

Dapat dilihat bahwa rentang nilai umpan balik posisi yang didapatkan dari tiap motor servo berbeda-beda. Nilai yang didapat dari motor servo gerakan rotasi (106-461), berbeda dengan nilai yang didapat dari motor servo gerakan naik-turun (101-481). Hal yang sama terjadi pada motor servo gerakan maju-mundur dan motor servo *gripper*.

Tabel 1. Hasil Kalibrasi Umpan Balik Posisi Motor Servo

Sudut	Umpan Balik Posisi Motor Servo				Nilai memori
	Rotasi	Naik-turun	Maju-Mundur	<i>Gripper</i>	
0	106	101	97	130	0
10	126	122	118	150	14
30	165	164	159	189	42
60	224	228	221	247	85
90	284	291	284	306	127
120	343	354	346	365	169
150	402	418	408	423	212
170	441	460	449	462	240
180	461	481	470	482	254

Untuk ukuran memori penyimpanan satu nilai umpan balik posisi, dipilih ukuran memori 1 byte (8 bit, 0-255). Agar didapat nilai bulat untuk posisi 90°, setiap nilai umpan balik posisi dikonversi menjadi nilai antara 0 dan 254. Sebelum disimpan, umpan balik posisi terlebih dahulu dikonversi menjadi nilai memori. Konversi untuk tiap-tiap motor servo dilakukan sesuai dengan rentang nilai masing-masing. Nilai memori untuk tiap sudut dan tiap nilai umpan balik posisi diberikan pada Tabel 1 kolom 6.

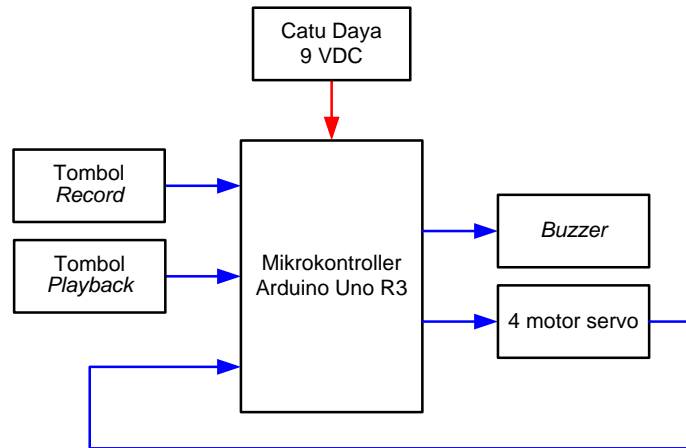
Sebagai ilustrasi, bila pada saat *recording* diperoleh nilai umpan balik 150 untuk motor servo rotasi, maka nilai ini dikonversi menjadi nilai memori $(150-106)/(461-106) \times 254 = 31$ dan direkam ke dalam EEPROM. Pada saat *playback*, dilakukan pembacaan EEPROM dan didapat nilai memori 31, yang kemudian dikonversi menjadi nilai sudut $31/254 \times 180^\circ = 22^\circ$ dan diberikan kepada motor servo sebagai masukan.

Dengan ukuran memori penyimpanan suatu posisi sebesar 1 byte, maka untuk setiap perekaman posisi 4 motor servo dibutuhkan memori sebesar 4 byte. Sesuai kapasitas EEPROM Arduino Uno sebesar 1 kB, dapat dilakukan 250 kali perekaman. Dengan rentang waktu antar rekaman yang dipilih sebesar 200 milidetik, maka durasi gerakan MLR yang dapat direkam adalah selama 50 detik.

3.2 Konstruksi MLR

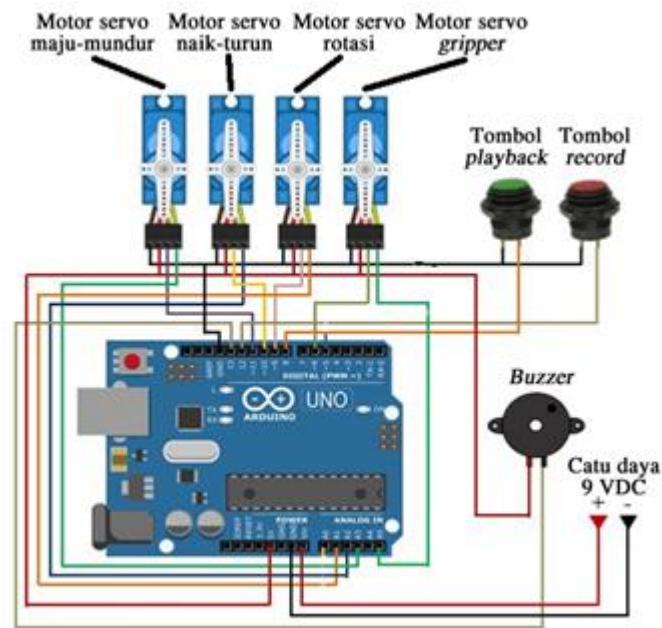
MLR direalisasikan dengan menggunakan mesin cetak 3 dimensi (*3D printer*). Bahan pembuat adalah polylactic acid (PLA). Diagram blok dari MLR dapat dilihat pada Gambar 5. Garis

biru menunjukkan aliran informasi, sedangkan garis merah menyatakan aliran daya utama. Tombol *record* berfungsi untuk menentukan titik awal dan titik akhir perekaman gerakan. Tombol *playback* berfungsi untuk melakukan pemutaran ulang gerakan yang telah direkam. *Buzzer* berfungsi sebagai pemberi sinyal audio setiap kali tombol *record* ditekan. Keempat motor servo memiliki fungsi ganda, baik sebagai masukan pada saat proses perekaman, maupun sebagai keluaran pada saat proses pemutaran ulang.



Gambar 5. Diagram blok MLR

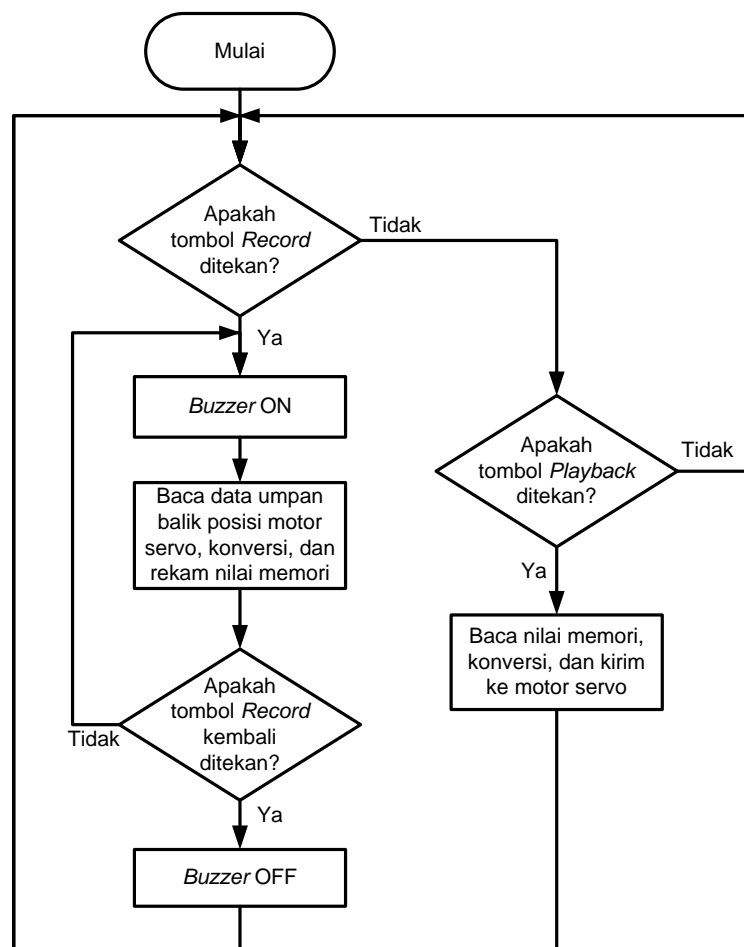
Koneksi komponen perangkat keras ditampilkan pada Gambar 6. Keempat motor servo dan kedua tombol terkoneksi ke pin-pin tertentu pada Arduino. Masing-masing motor servo memiliki 4 terminal, dimana terminal paling kanan memberikan umpan balik posisi dan terhubung dengan pin input analog dari Arduino. Suara bel (*buzzer*) dipergunakan sebagai penanda awal dan akhir proses perekaman. Keseluruhan rangkaian dicatu oleh sumber tegangan 9 VDC.



Gambar 6. Koneksi komponen perangkat keras MLR

Diagram alir dari prototipe MLR ditampilkan pada Gambar 7. Pada awal, tombol *record* ditekan dan *buzzer* mengeluarkan bunyi yang menandakan proses perekaman dimulai. MLR kemudian digerakkan oleh pengguna sesuai dengan lintasan dan tugas yang diharapkan. Pada proses ini, seluruh bagian MLR, seperti *gripper*, lengan depan, dan lengan utama digerakkan dengan perlahan untuk satu siklus gerakan. Setelah satu siklus gerakan selesai, tombol *record* kembali ditekan sebagai akhir proses perekaman. Akhir proses perekaman ini ditandai dengan berhentinya bunyi *buzzer*.

Kini, proses pemutaran ulang dapat dilakukan dengan menekan tombol *playback*. Bila tombol ini ditekan, MLR akan secara otomatis mengulangi gerakan yang telah direkam. Setelah rekaman selesai dimainkan, MLR akan kembali ke posisi awal. Gerakan yang sama dapat dengan mudah diulangi dengan kembali menekan tombol *playback*. Untuk melakukan siklus gerakan yang baru, proses perekaman kembali perlu dilakukan dengan pertama-tama menekan tombol *record*.

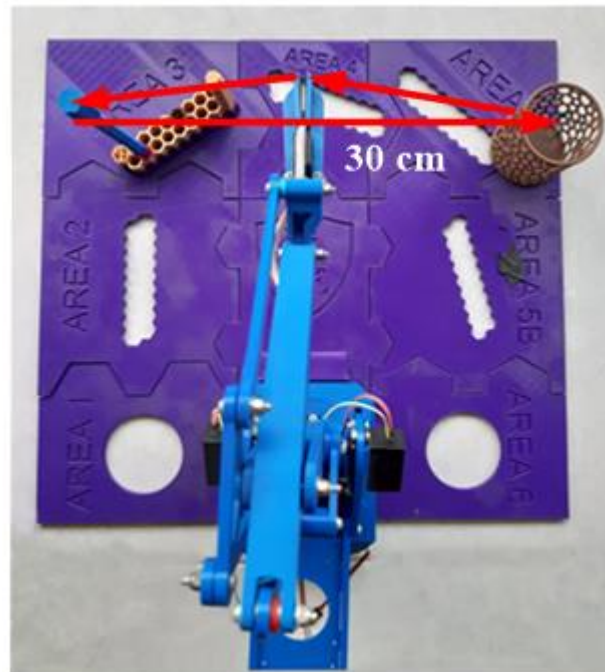


Gambar 7. Diagram alir MLR

4. Pengujian dan Analisa

4.1 Pengujian Memindahkan Satu Benda Kerja

Pada pengujian pertama, MLR dicobakan untuk memindahkan sebuah benda kerja sejauh 30 cm dari wadah kerja ke dalam wadah silinder berdiameter 6 cm. Berdasarkan ukuran wadah silinder, pada saat pemutaran ulang dibutuhkan akurasi posisi peletakan sebesar ± 3 cm agar benda kerja dapat diletakkan ke dalam silinder. Tata letak pengujian ini ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Pengujian memindahkan satu benda kerja

Pada proses perekaman, *gripper* dipegang pada posisi awal dan digerakkan menuju benda kerja. *Gripper* kemudian dibuka dan digerakkan untuk mencengkeram benda kerja. Setelah benda kerja tercengkeram dengan baik, *gripper* lalu digerakkan menuju titik pusat penampang wadah silinder. Selanjutnya, benda kerja diletakkan ke dalam wadah silinder dengan membuka *gripper*. Perekaman untuk memindahkan satu benda kerja ini kemudian dilakukan sebanyak satu kali. Durasi gerakan adalah 5,68 detik.

Selanjutnya, hasil rekaman yang didapatkan diputar ulang sebanyak 10 kali. Tabel 2 menampilkan hasil pengujian. Berdasarkan tata letak pengujian sesuai Gambar 8, titik referensi adalah titik pusat penampang benda kerja dan titik pusat penampang wadah silinder.

Tabel 2. Hasil Pengujian Memindahkan Satu Benda Kerja

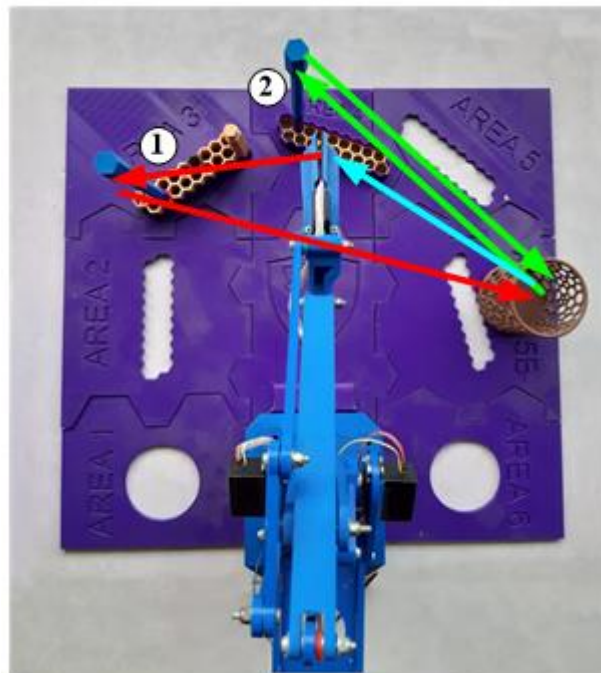
Percobaan	Akurasi Pengambilan (cm)	Akurasi Peletakan (cm)	Keterangan
1	+2	-2	Berhasil
2	+2	+2	Berhasil
3	0	-2	Berhasil
4	+3	0	Berhasil
5	+2	-1	Berhasil
6	+3	-2	Berhasil
7	+2	-5	Gagal
8	+3	-2	Berhasil
9	0	-6	Gagal
10	+2	+1	Berhasil

Hasil pengujian menunjukkan kinerja yang cukup baik dari MLR. Dari 10 percobaan, tingkat keberhasilan MLR adalah 80%. Untuk percobaan yang berhasil, akurasi peletakan berkisar pada ± 2 cm dari titik pusat penampang silinder. Pada 2 percobaan dimana terjadi kegagalan, akurasi melebihi toleransi ± 3 cm, yaitu -5 cm dan -6 cm, yang menyebabkan benda kerja diletakkan di luar wadah silinder.

4.2 Pengujian Memindahkan Dua Benda

MLR kemudian diuji untuk melakukan gerakan lebih kompleks dengan memindahkan dua benda kerja secara sekaligus dalam satu siklus gerakan. Tata letak pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 9. Pada saat pemutaran ulang, MLR menggerakkan *gripper* dari posisi awal menuju benda kerja pertama (1) dan kemudian memindahkan benda kerja tersebut ke wadah silinder. Alur perpindahan ditunjukkan oleh garis merah. Kemudian, MLR bergerak menuju benda kerja kedua (2) dan memindahkannya ke wadah silinder. Alur perpindahan ditunjukkan garis hijau. Sesudah itu, *gripper* kembali ke posisi awal. Alur perpindahan ditunjukkan garis biru muda.

Jarak perpindahan adalah 35 cm untuk benda kerja pertama dan 25 cm untuk benda kerja kedua, dengan total jarak perpindahan 60 cm. Perekaman untuk memindahkan dua benda kerja ini kemudian dilakukan sebanyak satu kali. Durasi gerakan adalah 10,20 detik.



Gambar 9. Pengujian memindahkan dua benda kerja

Selanjutnya, hasil rekaman yang didapatkan diputar ulang sebanyak 10 kali. Tabel 3 menampilkan hasil pengujian. Berdasarkan tata letak pengujian pada Gambar 9, titik referensi adalah titik pusat penampang benda kerja dan titik pusat penampang wadah silinder.

Tabel 3. Hasil Pengujian Memindahkan Dua Benda Kerja

Percobaan	Benda Kerja 1		Benda Kerja 2		Keterangan
	Akurasi Pengambilan (cm)	Akurasi Peletakan (cm)	Akurasi Pengambilan (cm)	Akurasi Peletakan (cm)	
1	+2	+2	+1	+2	Berhasil
2	+1	+4	+1	-1	1 Gagal
3	+2	-3	+2	+1	Berhasil
4	+2	0	+1	+1	Berhasil
5	0	+5	+3	+6	1 dan 2 Gagal
6	+3	+2	+2	+2	Berhasil
7	-2	+3	+2	-3	Berhasil
8	0	+1	+1	-2	Berhasil
9	+3	-2	+2	-2	Berhasil
10	-3	-2	0	+1	Berhasil

Pada pengujian memindahkan dua benda kerja ini, MLR tetap menunjukkan kinerja yang baik, dengan tingkat keberhasilan 85%. MLR mampu memindahkan benda kerja pertama sebanyak 8 kali dan benda kerja kedua sebanyak 9 kali, dengan kegagalan dalam memindahkan 3 benda kerja. Selisih posisi pada saat pengambilan benda kerja tetap berkisar ± 3 cm. Selisih posisi pada saat peletakan benda kerja juga berkisar ± 3 cm, terkecuali pada saat terjadi kegagalan, dimana benda kerja diletakkan pada posisi +4 cm, +5 cm, dan +6 cm dari posisi seharusnya.

Sebagai analisa, penyebab terjadinya akurasi yang rendah sehingga terjadi selisih antara posisi saat perekaman dan posisi saat pemutaran ulang, adalah nilai umpan balik posisi yang tidak konstan untuk suatu posisi yang sama. Pada proses kalibrasi didapatkan nilai rata-rata 10 percobaan untuk suatu posisi sudut. Nilai rata-rata berbeda dengan nilai pengukuran pada rentang 2-4 nilai. Untuk rentang nilai umpan balik posisi yang berkisar 360, perbedaan 4 nilai ini sebanding dengan 2° . Untuk suatu lengan robot dengan panjang 30 cm, selisih sudut 2° sama dengan selisih jarak 1 cm. Perbedaan antara posisi saat perekaman dan posisi saat pemutaran ulang ini dapat terakumulasi pada saat 4 motor servo dipergunakan secara bersamaan. Akumulasi ini menyebabkan selisih antara posisi pengambilan dan posisi peletakan, yang apabila melebihi toleransi ± 3 cm akan menyebabkan kegagalan.

5. Kesimpulan

Prototipe manipulator lengan robot (MLR) dengan 3 derajat kebebasan berbasis Arduino dengan mempergunakan metoda kendali *lead-through* telah berhasil dirancang dan direalisasikan. Berdasarkan metoda ini, pada proses perekaman (*recording*), gerakan MLR pada saat melakukan satu siklus gerakan direkam. Gerakan yang telah direkam kemudian dapat diulangi pada proses pemutaran ulang (*playback*). Dengan menggunakan metoda kendali ini, proses pemrograman gerakan robot yang rumit dan memerlukan pengetahuan pemrograman dapat dihindari.

Motor servo dimodifikasi untuk mendapatkan tambahan terminal keempat untuk umpan balik posisi. Pada proses perekaman, data ini disimpan pada EEPROM Arduino Uno untuk tiap rentang waktu 200 milidetik. Melalui penggunaan EEPROM ini pula, rekaman gerakan dapat terjadi dan dapat dimainkan ulang walaupun Arduino mengalami *reset*.

MLR diuji untuk memindahkan benda kerja dengan tuntutan akurasi posisi ± 3 cm. Pada saat memindahkan satu benda kerja sejauh 30 cm, MLR memperoleh tingkat keberhasilan 80%. MLR juga mampu memindahkan dua benda kerja dalam satu rangkaian gerakan sekaligus, dengan jarak total perpindahan benda kerja sejauh 60 cm, menghasilkan tingkat keberhasilan 85%.

Tingkat keberhasilan tidak mencapai 100% diakibatkan nilai umpan balik posisi dari motor servo yang tidak konstan untuk suatu posisi yang sama. Selisih yang terjadi pada setiap motor servo terakumulasi pada saat keempat motor servo bekerja secara bersamaan dan menyebabkan selisih posisi yang melebihi toleransi. Akurasi dari MLR dapat ditingkatkan dengan menggunakan motor servo yang dari fabrikasi telah memiliki terminal umpan balik posisi yang terstandar dan diharapkan tidak memberikan nilai yang berubah-ubah untuk suatu posisi yang sama.

Keberhasilan prototipe MLR ini menjadi titik awal untuk pengembangan MLR yang berukuran lebih besar dan terbuat dari bahan yang lebih kuat, untuk melakukan tugas-tugas yang lebih kompleks dan lebih berat. Akurasi yang dihasilkan MLR berada pada kisaran sentimeter, sehingga MLR berpotensi untuk dipergunakan untuk melaksakan tugas pemindahan benda pada lini produksi suatu proses manufaktur. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan untuk memungkinkan MLR menyimpan lebih dari satu gerakan untuk kemudian dapat dipilih dan diputar ulang. Kebutuhan memori tambahan untuk merekam gerakan dengan durasi melebihi 50 detik dapat dipenuhi dengan penggunaan kartu memori eksternal.

Daftar Pustaka

- [1] Rikardo, S., Jaenudin, J., dan Zaira, J. Y., "Robot Pemain Piano," *Jurnal Elektro dan Mesin Terapan JURNAL ELEMENTER*, vol. 1, no. 1, pp. 26–33, 2015.
- [2] Perzylo, A., et al. "SMERobotics: Smart Robots for Flexible Manufacturing," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 26, no. 1, IEEE, pp. 78–90, 2019.
- [3] Spong, M. W., Hutchinson, S., dan Vidyasagar, M., "Robot Modeling and Control," John Wiley & Sons, First Edition, ISBN-100-471-649, 2005.
- [4] Hendriko, H., Sukses, B. L., dan Novison, R., "Pengembangan Robot Pemanjat Tiang Otomatis," *Jurnal Elektro dan Mesin Terapan JURNAL ELEMENTER*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2019.
- [5] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., dan Oriolo, G., "Robotics: Modelling, Planning and Control," Springer Science and Business Media, 2010.
- [6] Rossano, G.F., Martinez, C., Hedelind, M., Murphy, S., dan Fuhlbrigge, T.A., Easy robot path programming concepts: An industrial perspective on path creation, dalam *IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics*, pp. 1-6, 2013.
- [7] Pan, Z., Polden, J., Larkin, N., Van Duin, S., dan Norrish, J., "Recent progress on programming methods for industrial robots," *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, pp. 1-8, June 2010.
- [8] Gupta, A. K., dan Satish K. Arora. "Industrial automation and robotics," Laxmi Publications, 2009.
- [9] Pierson, L., "Open Source Robotic Arm (Lite Arm i2)," Armatech Healdsburg CA, <https://www.thingiverse.com/thing:480446>, diakses tanggal 4 Maret 2020.

- [10] Didi, M., "Rancang Bangun Pengendalian Robot Lengan 4 DOF dengan GUI (Graphical User Interface) Berbasis Arduino Uno," *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, vol. 1, no. 1, 2016.
- [11] Wiliam, W., Kartadinata, B., dan Wijayanti, L, "Pengendalian Lengan Robot untuk Proses Pemindahan Barang," *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 21, no. 1, pp. 69-78, 2019.
- [12] Utomo, B., Setyaningsih, N.Y.D. dan Iqbal, M., "Kendali Robot Lengan 4 DoF Berbasis Arduino Uno dan Sensor MPU-6050," *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer*, vol. 11, no. 1, pp.89-96, 2020.
- [13] Girdling, G., dan Weiss, B., "Introduction to Microcontroller," Vienna Institute of Technology, 2007.
- [14] Arduino, "Arduino Uno R3 Data Sheet"
- [15] Grand Wing Motor Servo-Tech, "GWS S03N Standart Series Specifications," Grand Wing U. S. A. Inc, [https://gwsus.com/english/product/motor servo/standard.htm](https://gwsus.com/english/product/motor%20servo/standard.htm), diakses tanggal 2 Februari 2020.