

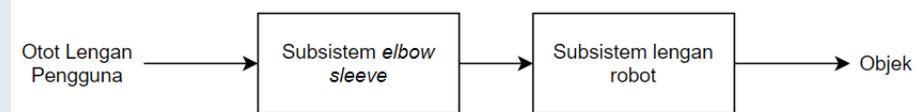
## BAB III

### PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

#### 3.1 Tinjauan Desain Sistem

##### 3.1.1 Desain Sistem Keseluruhan

Desain sistem secara keseluruhan ditunjukkan oleh DFD (*Data Flow Diagram*) pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 DFD EMG *Controlled Assistive Robotic Arm*

Tabel 3.1 Penjelasan Input/Output Sistem Keseluruhan

Parameter	Keterangan
<b>Input</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>● Pergerakan lengan pengguna</li><li>● Konfigurasi awal pengguna</li></ul>
<b>Output</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>● Sistem bergerak meniru pergerakan lengan manusia</li><li>● Sistem mengambil atau meletakkan objek</li></ul>
<b>Fungsi</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>● Melakukan pergerakan untuk mengambil dan meletakkan objek</li></ul>

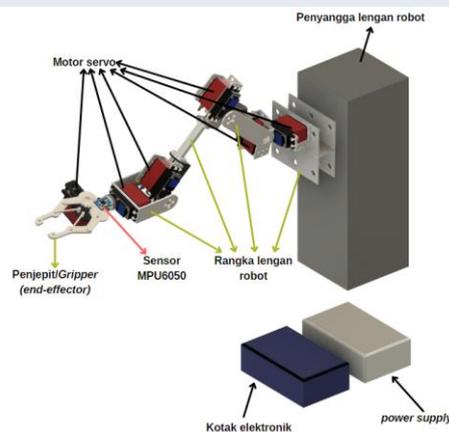
Berdasarkan Gambar 3.1, *EMG Controlled Assistive Robotic Arm* memiliki 2 subsistem, yaitu subsistem *elbow sleeve* (subsistem sensor pada Gambar 3.1). dan subsistem lengan robot. Di dalam subsistem *elbow sleeve* terdapat sensor yang dapat membaca pergerakan lengan pengguna. Data yang diperoleh kemudian akan diproses dan akhirnya

dikirimkan untuk diolah oleh subsistem lengan robot secara nirkabel melalui *bluetooth*.

Data yang dikirimkan dari subsistem *elbow sleeve* kemudian diterima oleh subsistem lengan robot. Subsistem lengan robot mengolah kembali data yang diterima untuk menggerakkan motor servo yang ada pada lengan robot berdasarkan gerak lengan pengguna. Dengan demikian, lengan robot dapat mengikuti pergerakan lengan pengguna.

### 3.1.2 Desain Subsistem Lengan Robot

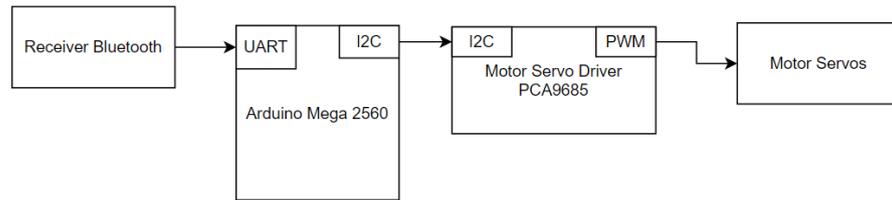
Desain fisik subsistem lengan robot dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Desain subsistem lengan robot

Subsistem lengan robot terdiri dari lengan robot, kotak elektronik, dan *power supply*. Lengan robot dilengkapi dengan sensor IMU sehingga posisi akhir pada ujung *gripper* dapat diketahui. Kotak elektronik digunakan untuk menyimpan mikrokontroler, driver motor servo, modul *bluetooth*, serta pengkabelan di dalamnya. *Power supply* digunakan untuk mengaktifkan sistem lengan robot secara keseluruhan.

Hubungan antar komponen yang digunakan pada subsistem lengan robot dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 DFD subsistem lengan robot

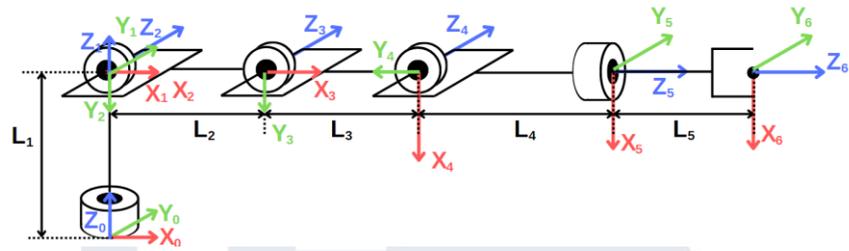
Tabel 3.2 Penjelasan Input/Output Subsistem Lengan Robot

Parameter	Keterangan
<b>Input</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Data sensor EMG dan IMU yang diterima oleh <i>bluetooth receiver</i> setelah diolah pada subsistem sensor</li> </ul>
<b>Output</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sudut/sinyal PWM untuk menggerakkan motor servo</li> </ul>
<b>Fungsi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Melakukan pergerakan untuk mengambil dan meletakkan objek oleh lengan robot agar sesuai dengan pergerakan lengan manusia</li> </ul>

Pada subsistem lengan robot, data pengolahan sensor EMG dan IMU pada subsistem sensor akan diterima sebagai input untuk menggerakkan lengan robot. Dalam menggerakkan motor servo, ditambahkan driver motor servo yang akan berkomunikasi dengan mikrokontroler melalui protokol komunikasi I2C. Driver motor servo akan mengeluarkan output berupa sinyal PWM untuk menggerakkan motor servo. Penggunaan driver motor servo ditujukan untuk mempermudah subsistem dalam mengontrol banyak motor servo.

### 3.1.3 Desain Lengan Robot Ideal

Lengan robot ideal yang ingin diimplementasikan memiliki konfigurasi kinematik seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram kinematik Lengan Robot Ideal yang Ingin Diimplementasikan

Dimensi lengan robot Gambar 3.4 diambil dari salah satu lengan robot 6-DOF yang dijual secara komersial. Informasi detail mengenai massa, panjang, lebar, dan tinggi *link* serta motor yang digunakan dapat dilihat pada lampiran H.

Untuk mengetahui posisi, orientasi, sudut, serta torsi yang bekerja pada lengan robot, persamaan kinematik dan dinamik lengan robot perlu dicari. Pertama-tama, parameter Denavit-Hartenberg (DH parameter) perlu dicari berdasarkan diagram kinematik yang telah dibuat. Tabel parameter DH yang telah ditemukan dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Nilai Parameter DH Lengan Robot Ideal

$axis - i$	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	L1	$\theta_1$
2	0	-90	0	$\theta_2$
3	L2	0	0	$\theta_3$
4	L3	0	0	$\theta_4 + 90$
5	0	90	L4	$\theta_5$
6	0	0	L5	0

Setelah nilai dari setiap parameter DH ditemukan, matriks transformasi homogen dihitung untuk mencari hubungan posisi dan orientasi antar link. Matriks transformasi homogen dapat dicari menggunakan Persamaan (1).

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

Keterangan:

$$s(\theta_i) = \sin(\theta_i)$$

$$c(\theta_i) = \cos(\theta_i)$$

Dengan memasukkan nilai parameter DH untuk  $i = 1$  hingga  $i = 6$ , maka didapatkan matriks transformasi homogen seperti pada Persamaan (2) – (7).

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} -s_4 & -c_4 & 0 & L_3 \\ c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -L_4 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Setelah matriks transformasi homogen antar link ditemukan, hubungan antara posisi *link*-i dengan koordinat global (link-0) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (8)

$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{N-1}T_N \quad (8)$$

Karena lengan robot yang digunakan memiliki 6 *link*, maka matriks transformasi homogen akan dicari dari  ${}^0T_1, {}^0T_2$  hingga  ${}^0T_6$  dicari menggunakan Persamaan (8). Hasil perhitungan matriks transformasi dari  ${}^0T_1$  dapat dilihat pada Persamaan (2) sedangkan matriks  ${}^0T_2$  hingga  ${}^0T_6$  dapat dilihat pada Persamaan (9) – (13).

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & -s_1 & 0 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & c_1 & 0 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3 & -s_{23} c_1 & -s_1 & L_2 c_1 c_2 \\ c_{23} s_1 & -s_{23} s_1 & c_1 & L_2 s_1 c_2 \\ -s_2 c_3 - c_2 s_3 & -c_{23} & 0 & -L_2 s_2 + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} -c_1 s_{234} & -c_1 c_{234} & -s_1 & L_2 c_1 c_2 + L_3 c_1 c_{23} \\ -s_1 s_{234} & -s_1 c_{234} & c_1 & L_3 s_1 c_{23} + L_2 s_1 c_2 \\ -c_{234} & s_{234} & 0 & L_1 - L_3 s_{23} - L_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} -s_5 s_1 - c_5 s_{234} c_1 & s_5 s_{234} c_1 - c_5 s_1 & c_{234} c_1 - s_1 & L_3 c_{23} c_1 + L_4 c_{234} c_1 + L_2 c_1 c_2 \\ s_5 c_1 - c_5 s_{234} s_1 & c_5 c_1 + s_5 s_{234} s_1 & c_{234} s_1 + c_1 & L_3 c_{23} s_1 + L_4 c_{234} s_1 + L_2 s_1 c_2 \\ -c_5 c_{234} & s_5 c_{234} & -s_{234} & -L_3 s_{23} - L_4 s_{234} - L_2 s_2 + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} -s_5 s_1 - c_5 s_{234} c_1 & s_5 s_{234} c_1 - c_5 s_1 & c_{234} c_1 - s_1 & L_5 [c_{234} c_1 - s_1] + L_3 c_{23} c_1 + L_4 c_{234} c_1 + L_2 c_1 c_2 \\ s_5 c_1 - c_5 s_{234} s_1 & c_5 c_1 + s_5 s_{234} s_1 & c_{234} s_1 + c_1 & L_5 [c_{234} s_1 + c_1] + L_3 c_{23} s_1 + L_4 c_{234} s_1 + L_2 s_1 c_2 \\ -c_5 c_{234} & s_5 c_{234} & -s_{234} & -L_5 s_{234} - L_3 s_{23} - L_4 s_{234} - L_2 s_2 + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Keterangan:

$$s_i = \sin(\theta_i)$$

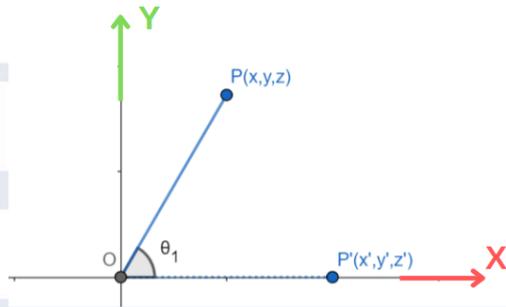
$$c_i = \cos(\theta_i)$$

$$s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$$

$$c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$$

### 3.1.4 Persamaan *Inverse Kinematics* Lengan Robot Ideal

Untuk mencari persamaan *inverse kinematic* lengan robot ideal, pendekatan geometri akan digunakan. Jika dilihat dari bidang xy, maka nilai dari  $\theta_1$  dapat dilihat pada Gambar



Gambar 3.5 Posisi *End-Effector* Setelah Dirotasi oleh *Joint 1* (Titik P) dan Sebelum Rotasi (Titik P') dilihat dari bidang xy.

Berdasarkan Gambar 3.5, nilai dari  $\theta_1$  dapat dicari menggunakan Persamaan (14).

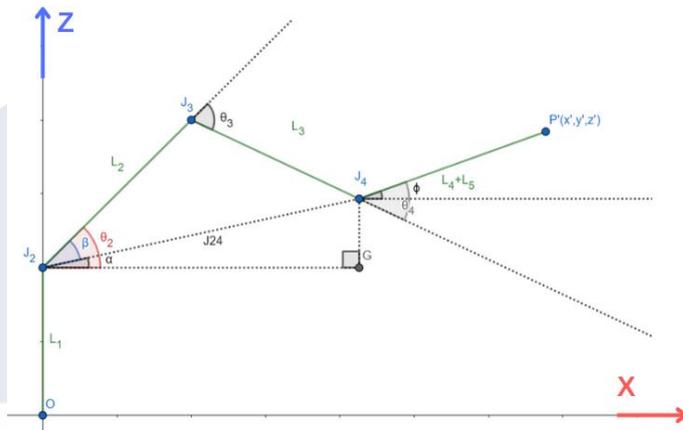
$$\theta_1 = \text{atan} \left( \frac{P_y}{P_x} \right) \quad (14)$$

Nilai dari  $\theta_2$  hingga  $\theta_4$  dapat dicari berdasarkan titik P'. Nilai dari P' dapat dicari menggunakan persamaan matriks rotasi pada Persamaan (15).

$$\begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p \cos(\theta_1) + y_p \sin(\theta_1) \\ -x_p \sin(\theta_1) + y_p \cos(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Persamaan untuk mencari nilai  $\theta_2$  hingga  $\theta_4$  dapat dicari berdasarkan Gambar 3.6.

U N I V E R S I T A S  
M U L T I M E D I A  
N U S A N T A R A



Gambar 3.6 Posisi *End-Effector* Sebelum Dirotasi oleh *Joint* 1 (Titik P') Dilihat dari Bidang XZ.

Berdasarkan Gambar 3.6, nilai dari  $\theta_2$  hingga  $\theta_4$  dapat dicari berdasarkan segitiga J2, J3, J4. Posisi J4 dapat dihitung berdasarkan sudut  $\phi$  yang merupakan orientasi dari lengan robot. Posisi J4 dapat dihitung menggunakan Persamaan (16).

$$J_4 = \begin{bmatrix} J_{4x} \\ J_{4z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p'_x - (L_4 + L_5) \cos(\phi) \\ p'_z - (L_4 + L_5) \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Setelah posisi J4 didapatkan, nilai dari  $\theta_2$  hingga  $\theta_4$  dapat dihitung. Persamaan untuk mencari nilai  $\theta_2$  hingga  $\theta_4$  dapat dilihat pada persamaa (17) – (19).

$$\theta_2 = \alpha + \beta \quad (17)$$

$$\theta_3 = \pm \arccos\left(\frac{\overline{J_2J_4}^2 - L_3^2 - L_4^2}{2L_3L_4}\right) \quad (18)$$

$$\theta_4 = \phi - \theta_2 - \theta_3 \quad (19)$$

Dengan,

$$\overline{J_2J_4} = \sqrt{(J_{4x})^2 + (J_{4z} - L_1)^2} \quad (20)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{J_{4z} - L_1}{J_{4x}}\right) \quad (21)$$

$$\beta = \pm \arccos\left(\frac{L_3^2 - L_2^2 - \overline{J_2 J_4}^2}{-2L_2(\overline{J_2 J_4})}\right) \quad (22)$$

### 3.1.5 Persamaan Dinamik Lengan Robot Ideal

Persamaan dinamik lengan robot dicari untuk mengetahui gaya yang bekerja pada setiap motor servo yang digunakan. Pada penelitian ini, persamaan dinamik lengan robot ideal dicari menggunakan persamaan Lagrange-Euler. Persamaan Lagrange-Euler dapat ditulis seperti pada persamaan (23) dan (24).

$$L = K - P \quad (23)$$

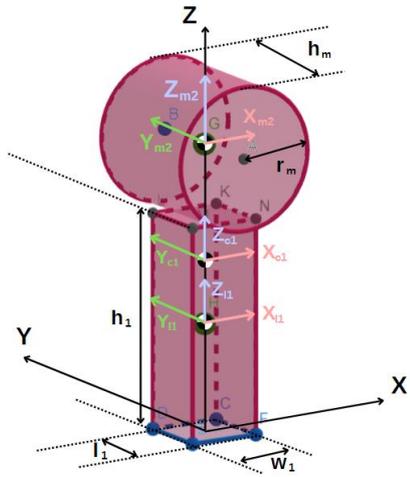
$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_i} = \tau_i \quad (24)$$

Dengan K adalah total energi kinetik setiap *link* dan P adalah total energi potensial dari setiap *link*. Nilai dari energi kinetik dan potensial lengan robot masing-masing dapat dilihat pada Persamaan (25) dan (26).

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i v_{ci}^T v_{ci} + \omega_{ci}^T I_{ci} \omega_{ci} \quad (25)$$

$$P = \sum_{i=1}^n m_i g h_i \quad (26)$$

Untuk mencari nilai energi kinetik dari masing-masing link, pusat massa dari setiap link perlu dicari. Karena bentuk dari setiap link merupakan bentuk komposit (gabungan dari 2 bentuk sederhana atau lebih), maka inersia tensor gabungan perlu dicari dengan teorema sumbu paralel sebelum digunakan untuk menghitung energi kinetik. Dalam penelitian ini, inersia *link* diasumsikan berbentuk balok dan motor servo yang digunakan berbentuk silinder dengan distribusi massa merata.



Gambar 3.7 Posisi Pusat Massa dari *Link-1*

Berdasarkan Gambar 3.7, Posisi pusat massa total jika dilihat dari kerangka acuan dapat dihitung menggunakan Persamaan 27.

$$\begin{bmatrix} x_{eq1} \\ y_{eq1} \\ z_{eq1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{m_{l1} \left(\frac{h_1}{2}\right) + m_m(h_1 + r_m)}{m_{l1} + m_m} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Posisi pusat massa yang didapatkan dari Persamaan (27) jika dilihat dari kerangka koordinat global dapat ditulis seperti pada Persamaan (28).

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h_m + z_{eq} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Setelah posisi dari pusat massa gabungan telah ditemukan, kecepatan linear pada titik pusat massa *link* dapat dicari dengan menurunkan persamaan pada setiap sumbu terhadap waktu menjadi seperti pada Persamaan (29).

$$v_{c1} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{c1} \\ \dot{y}_{c1} \\ \dot{z}_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Dengan demikian, nilai dari energi kinetik secara linear dapat dicari menggunakan Persamaan (30).

$$K_{1,linear} = \frac{1}{2}(m_1 v_{c1}^T v_{c1}) = 0 \quad (30)$$

Setelah menemukan energi kinetik akibat kecepatan linear, energi kinetik akibat kecepatan angular dicari dengan menemukan inersia tensor gabungan terlebih dahulu. Inersia tensor dari gabungan silinder dan balok seperti pada Gambar 3.7 dapat dicari menggunakan teorema sumbu paralel kemudian hasilnya dijumlahkan seperti pada Persamaan (31).

$$I'_{c1} = I'_m + I'_{l1} \quad (31)$$

$I'_{l1}$  merupakan inertia tensor balok pada pusat massa gabungannya dan  $I'_m$  merupakan inertia tensor silinder pada pusat massa gabungannya. Untuk mencari inertia tensor masing-masing objek pada pusat massa gabungannya dapat menggunakan teorema sumbu paralel dapat seperti pada Persamaan (32).

$$I'_{l1} = I_{l1} + m_{l1}[(R_{l1}, R_{l1})] - 2m_{l1}[(R_{l1}, c_{l1})] \quad (32)$$

Dengan  $I_{l1}$  merupakan inertia tensor objek pada pusat masanya masing-masing.  $m_l$  merupakan massa dari masing-masing objek.  $R_{l1}$  merupakan posisi pusat massa gabungan dilihat dari kerangka koordinat pusat massa objek tersebut.  $c_{l1}$  merupakan posisi pusat massa objek terhadap pusat massa objek itu sendiri. Dengan kata lain.  $c_{l1} = (0,0,0)$ .  $[(R_{l1}, c_{l1})]$  didefinisikan seperti pada Persamaan (33)

$$[(R_1, c_1)] = \begin{bmatrix} y_{R1}y_{c1} + z_{R1}z_{c1} & -\frac{1}{2}(x_{R1}y_{c1} + y_{R1}x_{c1}) & -\frac{1}{2}(x_{R1}z_{c1} + z_{R1}x_{c1}) \\ -\frac{1}{2}(x_{R1}y_{c1} + y_{R1}x_{c1}) & x_{R1}x_{c1} + z_{R1}z_{c1} & -\frac{1}{2}(y_{R1}z_{c1} + z_{R1}y_{c1}) \\ -\frac{1}{2}(x_{R1}z_{c1} + z_{R1}x_{c1}) & -\frac{1}{2}(y_{R1}z_{c1} + z_{R1}y_{c1}) & x_{R1}x_{c1} + y_{R1}y_{c1} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Dengan menggunakan Persamaan (27) hingga (33), maka persamaan energi kinetik dan potensial pada *link-1* dapat ditulis seperti pada persamaan (34) dan (35).

$$KE_1 = 0 + \frac{1}{2} \dot{q}_1^2 (0.0000132704167) \quad (34)$$

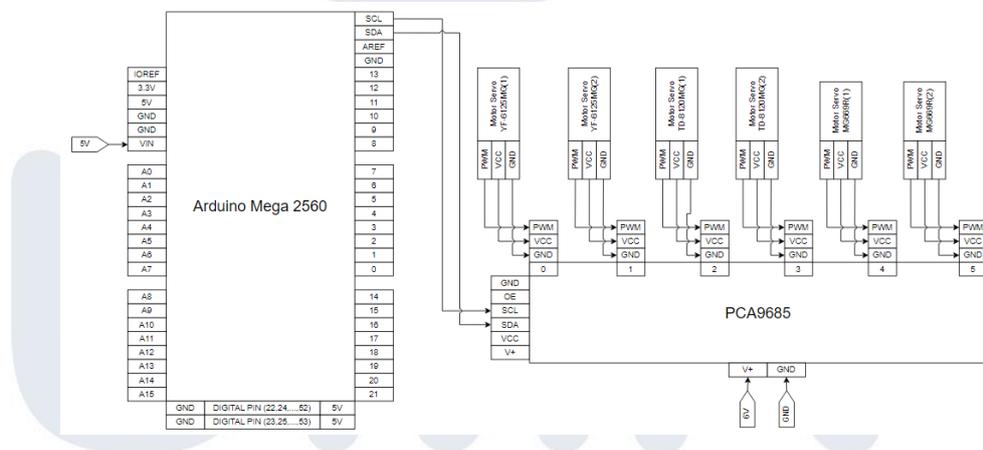
$$PE_1 = m_1 g \left( h_m + \frac{m_{l1} z_{l1} + m_m z_m}{m_{l1} + m_m} \right) \quad (35)$$

Untuk perhitungan lebih detail mengenai energi kinetik dan potensial *link-1* hingga *link-5* dapat dilihat dalam lampiran I.

Setelah persamaan Lagrange pada Persamaan (23) didapatkan, perhitungan dapat dilanjutkan menggunakan persamaan (24) sehingga torsi dari masing-masing *joint* dapat dihitung.

### 3.1.6 Diagram Subsistem Lengan Robot

Diagram subsistem lengan robot dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 3.7 Wiring Diagram Lengan Robot

Berdasarkan wiring diagram pada gambar 3.7, Arduino Mega 2560 merupakan mikrokontroler untuk sistem lengan robot. Arduino Mega 2560 dan driver motor servo PCA9685 diberi daya listrik melalui *power supply*. PCA9685 terhubung pada Arduino Mega 2560 melalui protokol

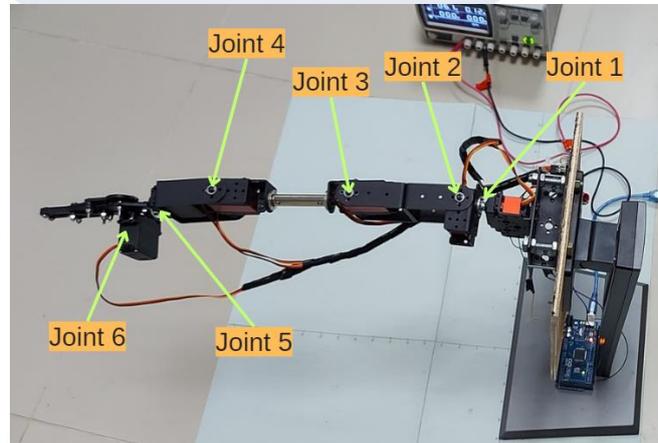
komunikasi I2C sedangkan modul Bluetooth HC-05 terhubung melalui protokol komunikasi UART.

Subsistem lengan robot bekerja berdasarkan data yang dikirim dari subsistem sensor melalui modul *bluetooth*. Ketika mikrokontroler Arduino Mega 2560 mendapatkan data dari modul *bluetooth*, data tersebut diolah untuk dijadikan besaran sudut yang diperlukan untuk menggerakkan motor servo sesuai dengan pergerakan lengan pengguna. Hasil pengolahan data akan dikirimkan ke masing-masing motor servo melalui driver motor servo PCA9685. Proses ini akan terus berulang berdasarkan data yang dikirimkan dari subsistem *elbow sleeve*.

## 3.2 Implementasi Sistem

### 3.2.1 Hasil Implementasi

Secara fisik, pemasangan lengan robot dapat dilihat pada gambar 6.

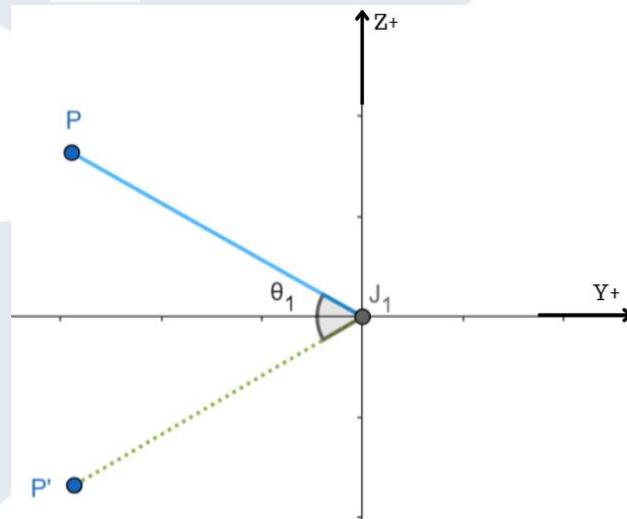


Gambar 3.8 Lengan Robot 6 DOF

Lengan robot yang digunakan pada subsistem ini memiliki 6 DOF (5 joint sebagai penentu posisi dan orientasi lengan robot dan 1 joint untuk membuka dan menutup gripper robot). Lengan robot dirangkai sedemikian sehingga menyerupai pergerakan lengan tangan pada manusia. Lengan robot juga digantung pada tiang penyangga sehingga posisi lengan robot meniru posisi bahu pada lengan manusia.

Selain lengan robot, di dalam subsistem lengan robot terdapat beberapa komponen lainnya seperti Arduino Mega 2560 sebagai mikrokontroler, modul Bluetooth HC-05 sebagai penerima data dari subsistem elbow sleeve, Servo Driver PCA9685 untuk menghubungkan 6 servo pada lengan robot, dan sensor IMU MPU6050 untuk mendeteksi posisi dan orientasi dari ujung lengan robot.

Agar setiap motor servo pada lengan robot dapat mengetahui nilai sudut yang diperlukan, lengan robot perlu diprogram melalui mikrokontroler Arduino Mega 2560 yang akan digunakan. Namun, sebelum lengan robot diprogram, model matematis dari pergerakan lengan robot perlu dicari terlebih dahulu. Pada pengembangan lengan robot ini, persamaan untuk mengetahui nilai sudut setiap joint berdasarkan posisi dan orientasi ujung lengan robot dicari melalui pendekatan geometri.



Gambar 3.9 *Wiring Diagram* Lengan Robot

Gambar 3.9 menunjukkan posisi lengan robot sebelum diputar (titik P') dan setelah diputar (titik P) oleh  $J_1$ . Dari Gambar 3.9 terlihat bahwa nilai dari  $\theta_1$  dapat dicari dengan mencari besar sudut  $P-J_1-P'$ . Dengan

demikian, rumus untuk mencari nilai  $\theta_1$  dapat ditulis seperti pada persamaan (36).

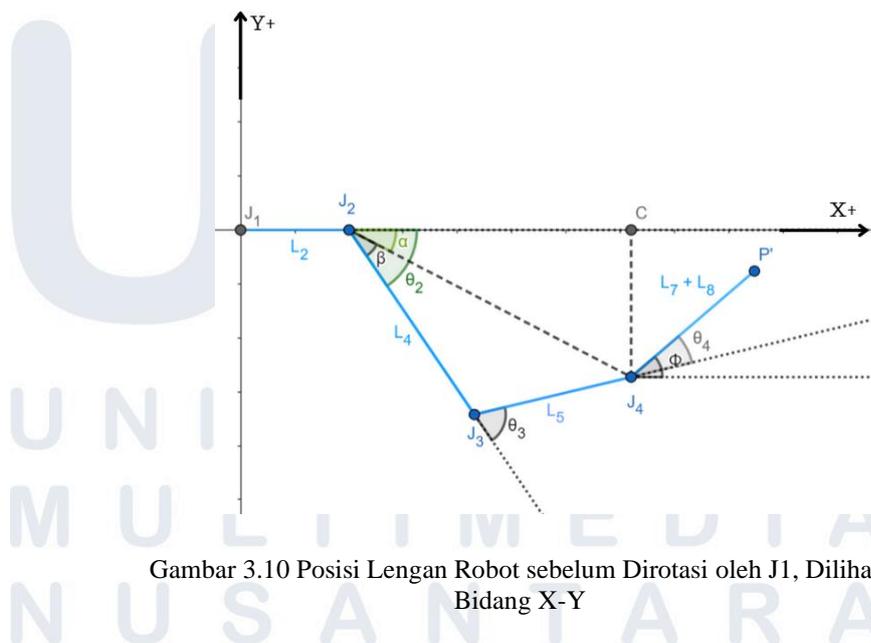
$$\theta_1 = \left(\frac{z}{p}\right) + \left(\frac{z'}{p'}\right) \quad (36)$$

Selanjutnya, untuk mencari nilai sudut  $J_2$  hingga  $J_4$  perlu memperhatikan perubahan yang terjadi akibat rotasi oleh  $J_1$ . Karena  $J_1$  hanya berotasi dengan sumbu rotasi di sumbu x dan posisi dari  $J_1$  tidak berubah, maka posisi lengan robot sebelum berotasi (titik P') dapat dicari dengan menggunakan teorema Pythagoras seperti pada rumus (37).

$$y' = \sqrt{y^2 + z^2 - z'^2} \quad (37)$$

Dengan  $y'$  dan  $z'$  merupakan nilai y dan z pada titik P', sedangkan y dan z merupakan nilai y dan z di titik P.

Setelah posisi dari P' ditemukan, permasalahan untuk mencari nilai sudut  $J_2$  hingga  $J_4$  dapat disederhanakan menjadi permasalahan robot planar 3R seperti pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Posisi Lengan Robot sebelum Dirotasi oleh  $J_1$ , Dilihat Pada Bidang X-Y

Berdasarkan Gambar 3.10, nilai dari  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ , dan  $\theta_4$  dapat dicari dengan menggunakan aturan kosinus pada segitiga. posisi dari  $J_4$  dapat dicari dengan mengurangi posisi akhir lengan robot dengan proyeksi  $L_7 + L_8$  pada masing-masing sumbu x dan y seperti pada rumus (38)

$$j_4 = \begin{bmatrix} j_{4x} \\ j_{4y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - (l_7 + l_8) \cos(\phi) \\ y' - (l_7 + l_8) \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (38)$$

Nilai  $\Phi$  merupakan orientasi *gripper* yang diinginkan. Panjang sisi dari  $J_2J_4$  (disingkat menjadi  $J_{24}$ ) dapat diketahui menggunakan rumus Pythagoras pada segitiga  $J_2$ - $J_4$ -C. Rumus untuk mencari panjang sisi  $J_{24}$  dapat dilihat pada rumus (39).

$$j_{24} = \sqrt{(j_{4x} - l_2)^2 + (j_{4y})^2} \quad (39)$$

Setelah panjang sisi dari  $J_{24}$  didapatkan, nilai dari  $\theta_3$  dapat dicari menggunakan aturan kosinus segitiga pada segitiga  $J_2$ - $J_3$ - $J_4$  sehingga didapatkan rumus (40).

$$\theta_3 = \pm \arccos\left(\frac{l_5^2 - l_4^2 - j_{24}^2}{2l_4l_5}\right) \quad (40)$$

Setelah nilai  $\theta_3$  didapatkan, nilai dari  $\theta_2$  dapat dicari dengan mencari nilai  $\alpha$  dan  $\beta$ .

$$\theta_2 = \alpha + \beta \quad (41)$$

Dengan,

$$\alpha = \arctan\left(\frac{j_{4y}}{j_{4x} - l_2}\right) \quad (42)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{l_5^2 - l_4^2 - j_{24}^2}{-2l_4j_{24}}\right) \quad (43)$$

Nilai  $\theta_4$  bisa dicari dari nilai  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ , dan  $\Phi$ . Rumus untuk mencari nilai  $\theta_4$  dapat dilihat pada rumus (44).

$$\theta_4 = \theta_2 - \theta_3 - \phi \quad (44)$$

Sendi  $J_5$  berotasi pada bidang yang sama dengan  $J_1$ . Maka, nilai dari  $J_5$  dapat dicari dengan menggunakan rumus (45).

$$\theta_5 = r - \theta_1 \quad (45)$$

Dengan  $r$  merupakan orientasi *gripper* yang diinginkan ketika dirotasi terhadap sumbu  $x$ .

Setelah model matematis dari pergerakan lengan robot ditemukan, rumus yang telah ditemukan akan dimasukkan ke dalam program lengan robot.

### 3.2.2 Hambatan dan Solusi Implementasi yang Diterapkan

Pada implementasi subsistem lengan robot, salah satu motor servo MG996R yang digunakan tidak cukup kuat untuk menahan berat dari lengan robot itu sendiri. Hal ini mengakibatkan lengan robot pada *joint* tersebut tidak bergerak meskipun sudah diberikan tegangan maksimum 6V. Oleh karena itu, penggantian tipe motor servo dilakukan dari MG996R menjadi TD-8120MG sehingga lengan robot dapat bergerak dengan baik. Motor servo MG996R memiliki *stall torque* maksimum sebesar 10 kgf.cm sedangkan motor servo TD8120MG memiliki *stall torque* maksimum sebesar 22,8 kgf.cm.

U N I V E R S I T A S  
M U L T I M E D I A  
N U S A N T A R A