

DESAIN KONTROL ROBOT MANIPULATOR KAPASITAS 1.25 kgf

Sirojuddin

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Negeri Jakarta
Program Studi Teknik Mesin
sirojuddin@unj.ac.id

Yudha Adigutama

Mahasiswa Teknik Mesin
Universitas Negeri Jakarta
Yudhasd45@gmail.com

Eko Arif Syaefudin

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Negeri Jakarta
Program Studi Teknik Mesin
eko-arif-syaefudiin@unj.ac.id

Mohamad Ilham Al Fatah

Mahasiswa Teknik Mesin
Universitas Negeri Jakarta
milhamalfat@gmail.com

A robotic manipulator is one type of popular industrial robot which has a shape and movement that resemble a human arm. Robotic Manipulator mainly consists of a base, arm, gripper, and control system. This research focused on the control aspect of robot manipulators to handle 1.25 kgf load through experiment as a model of the robot with inverse kinematics. The design of the robot control uses 5 degrees of freedom using a servo motor as its actuator to achieve an accurate and stable movement on its x, y, and z coordinates using a microcontroller to calculate the inverse kinematic in real-time. The robot's control involved the kinematic system, control diagram, microcontroller, and robot programming. From the experiment, it was found that the robot manipulator was able to grip and move an object from one coordinate to another position accurately and stable with a deviation in each axis were 2-3 mm on the X, 2 mm on the Y, and 1-3 mm on the Z. As for the movement timeframe deviation that was obtained between the programmed and measured was 0 seconds.

Keywords: Control System, Inverse Kinematic, Microcontroller, Robot Manipulator

1. PENDAHULUAN

Robot manipulator adalah salah satu jenis robot industri yang memiliki gerakan dan bentuk menyerupai lengan manusia. Biasanya digunakan untuk memindahkan benda, alat, atau peralatan tertentu dengan gerakan yang terprogram. Komponen utamanya adalah penumpu (*base*), lengan (*arm*), sendi (*joint/wrist*), pemegang/penjepit (*Gripper*), serta sistem pengendali (*controller*) [1].

Aspek terpenting dalam robot manipulator adalah sistem kontrolnya. Komponen ini merupakan otak yang berfungsi untuk mengendalikan perilaku robot melalui dalam sebuah mikrokontroler. Pada paragraf sebelumnya, telah disebutkan bahwa robot manipulator memiliki gerakan yang meniru gerakan lengan manusia. Dengan itu, lengan dan sendi menjadi pengarah posisi griper menuju ke benda yang akan dipindahkan serta mengarahkan posisi ke tempat benda akan dipindahkan [2].

Desain sebuah model kontrol robot manipulator telah dilakukan untuk membantu orang cacat dalam aktivitas seperti makan, minum, dan mandi yang dimodelkan secara matematis dengan cara menentukan model kinematika inverse pada robot [4]. Selanjutnya penelitian mengenai desain kontrol robot dengan biaya yang murah dapat dicapai dengan cara menggunakan arduino UNO sebagai kontrolernya[5]. Studi mengenai kinematika pada robot manipulator yang bersifat *articulated* telah dilakukan untuk memodelkan sebuah kontrol sistem yang dapat menghitung kinematika robot secara real time[6].

Suatu simulasi model robot manipulator dengan 5 DOF dikembangkan dengan membuat sebuah model robot yang dapat menghasilkan gerakan 5 DOF dan diharapkan untuk dapat diaplikasikan di dunia nyata, desain ini masih dalam model simulasi[7]. Sebuah penelitian pada robot mainan dengan 2 DOF dimana mainan robot tersebut dapat mengambil dan memindahkan benda[8]. Dalam penelitian pengembangan pada *robotic arm input* dengan *virtual input* dengan WRAI diperoleh hasil bahwa robot tersebut memenuhi aspek ergonomis dan kognitif tetapi masih sedikit kaku[9].

Suatu review pengembangan robot manipulator menunjukkan bahwa robot dapat menghasilkan gerakan yang akurat dengan accelerometer[10]. Sebuah penelitian implementasi robot 3 DOF dilakukan untuk memindahkan benda menggunakan rumus fungsi trigonometri dengan hasil pergerakan robot rata-rata 6-7 detik pada error sudut motor servonya sebesar 0,64%[11]. Dalam penelitian sistem kendali *articulated* robot

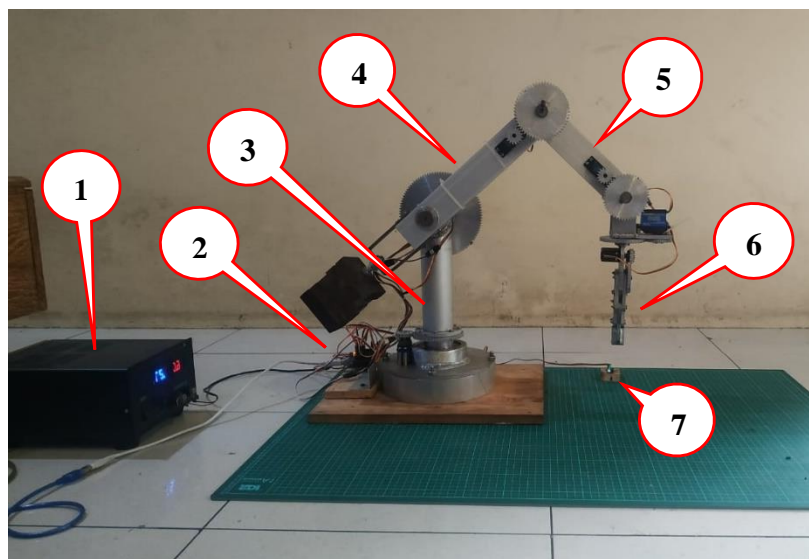
manipulator modern dengan menggunakan hukum kontrol MPC hasilnya dapat mencegah overshoot pada pergerakan robotnya [12].

Selanjutnya penelitian mengenai sistem kontrol robot *line follower* menggunakan *logika fuzzy* diperoleh hasil bahwa robot tersebut dapat belok mengikuti garis yang memiliki jari-jari sebesar 15 cm, 20 cm, dan 25 cm dengan hasil respon yang cepat.[13]. Pada penelitian sistem kendali gripper robot menggunakan sensor MPU 6050 dan sensor flex dimana gripper tersebut dapat dikendalikan dengan mode gesture manusia dan IoT yang hasilnya mendapat selisih waktu error sebesar 2,08%[14]. Penelitian gripper robot lainya yang dikembangkan menggunakan *force feedback* dimana gripper diberi sensor gaya sehingga dapat mengetahui besar gaya dengan error sebesar 1% dibawah gaya tekan dan error sebesar 5% diatas gaya tekan sehingga tidak merusak benda yang diambil [15].

Penelitian sebelumnya memiliki waktu error antara program dan hasil eksperimen sebesar 2,08%[14]. Berikutnya pada robot sebelumnya membutuhkan 6-7 detik[11] dengan sistem kontrol yang dibuat dapat memnggerakan robot ke koordinat yang dituju dengan waktu 2-5 detik. Setelah itu robot pemindah barang sebelumnya hanya memiliki 2 DOF[8]. Penelitian ini memperbaiki penelitian robot manipulator sebelumnya secara eksperimen dari segi aspek desain kontrol dengan 5 DOF untuk mengambil dan memindahkan benda seberat 1.25 kgf dengan mengatur rotasi pada sumbu y dan z serta translasi pada sumbu x, y, z dengan error waktu antara program dan eksperimennya sebesar 0%. Gerakan robot yang dikontrol menggunakan motor servo sebagai aktuatornya. Pengambilan benda untuk menggerakkan robot menggunakan sensor infra merah.

2. METODE DAN BAHAN

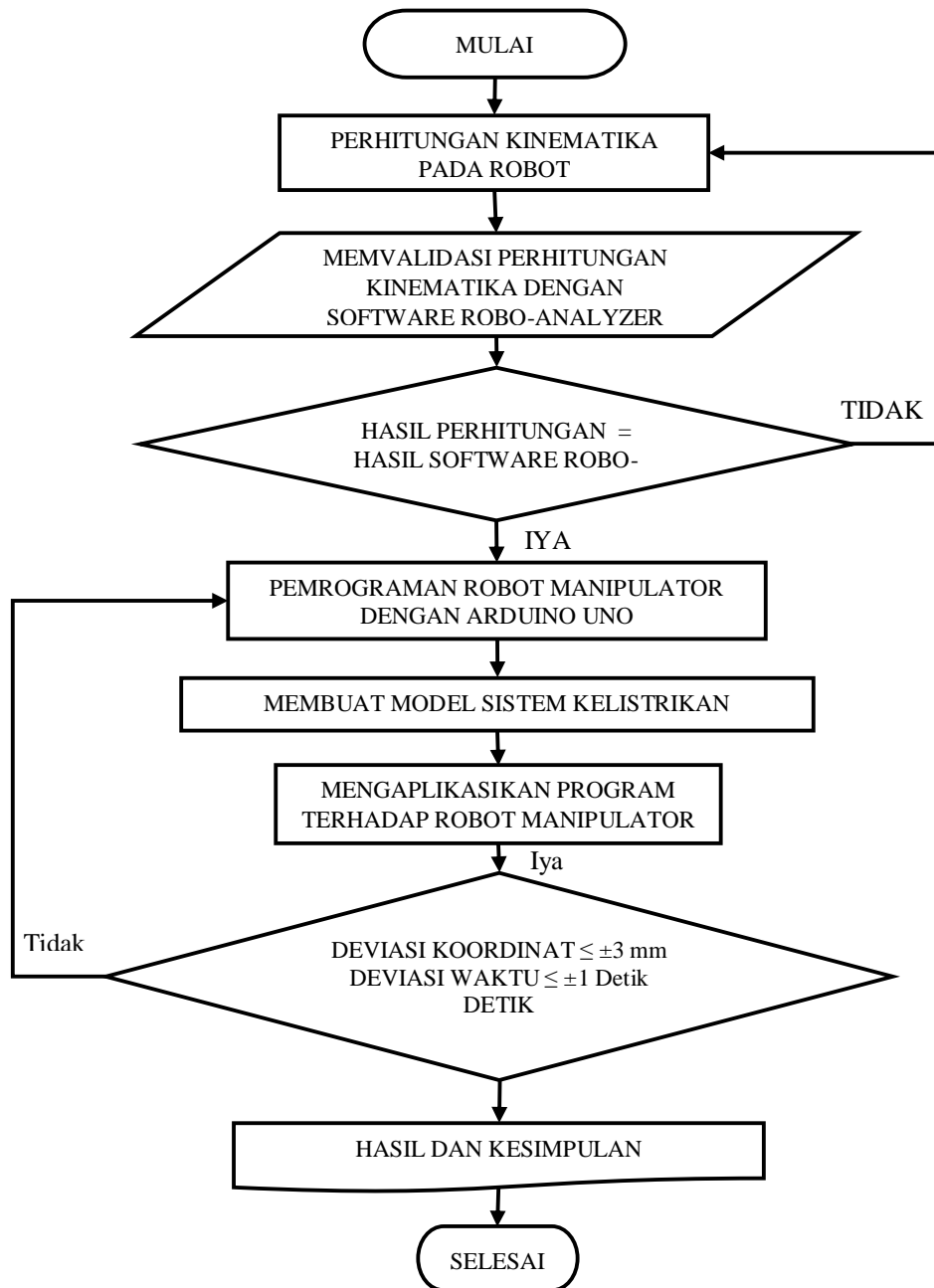
Sistem kontrol diaplikasikan ke robot manipulator dengan 5-DOF yang memiliki panjang lengan 1 = 300 mm, 2 = 250 mm, a3 = 190 mm, gripper = 240 mm. Robot bergerak menggunakan motor servo yang memiliki gear pada setiap joint. Komponen robot di tunjukan pada Gambar 1 dibawah ini:



Keterangan:

1. Catu Daya
2. Kontroler
3. Lengan a1
4. Lengan a2
5. Lengan a3
6. Gripper
7. Sensor Infra Merah

Gambar 1: Komponen Robot Manipulator kapasitas 1,25 Kgf



Gambar 2: Diagram Alir Desain Kontrol

2.1 Perhitungan Kinematika Robot

Untuk mengetahui kinematika pada robot manipulator pada setiap sendi (joint) di susun menggunakan metode matriks 3D Denavit Hatenberg (DH). Berikut ini adalah susunan matrix tersebut :

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} C_{\theta 1} & 0 & S_{\theta 1} & 0 \\ S_{\theta 1} & 0 & -C_{\theta 1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} C_{\theta 2} & -S_{\theta 2} & 0 & a_2 C_2 \\ S_{\theta 2} & C_{\theta 2} & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} C_{\theta 3} & -S_{\theta 3} & 0 & a_3 C_3 \\ S_{\theta 3} & C_{\theta 3} & 0 & a_3 S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} C_{\theta 4} & -S_{\theta 4} & 0 & a_4 C_{\theta 4} \\ S_{\theta 4} & C_{\theta 4} & 0 & a_4 S_{\theta 4} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_5 \\ 0 & C_{\alpha 5} & S_{\alpha 5} & 0 \\ 0 & S_{\alpha 5} & C_{\alpha 5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Perhitungan analitis inverse kinematika pada robot untuk menentukan sudut joint (θ_n) dari setiap lengan robot manipulator dari koordinat kartesian (x,y,z,) diselesaikan dengan rumus trigonometri berikut :

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{x}{y} \right) \quad (6)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 - a_2^2 - r_3^2}{-2a_2 r_3} \right) \quad (7)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{r_3^2 - a_2^2 - a_3^2}{-2a_2 a_3} \right) - 180 \quad (8)$$

$$\theta_4 = \omega - \theta_2 - \theta_3 \quad (9)$$

$$\theta_5 = \cos(\omega) * \theta_1 - \theta_1 + \Psi \quad (10)$$

$$r_1 = \sqrt{x^2 + y^2} - a_4 \cos(\omega) \quad (11)$$

$$r_2 = z_3 - a_1 \quad (12)$$

$$z_3 = z - a_4 \sin \omega \quad (13)$$

$$r_3 = \sqrt{r_1^2 + r_2^2} \quad (14)$$

Dimana :

ω = orientasi *pitch* pada *end effector (gripper)*

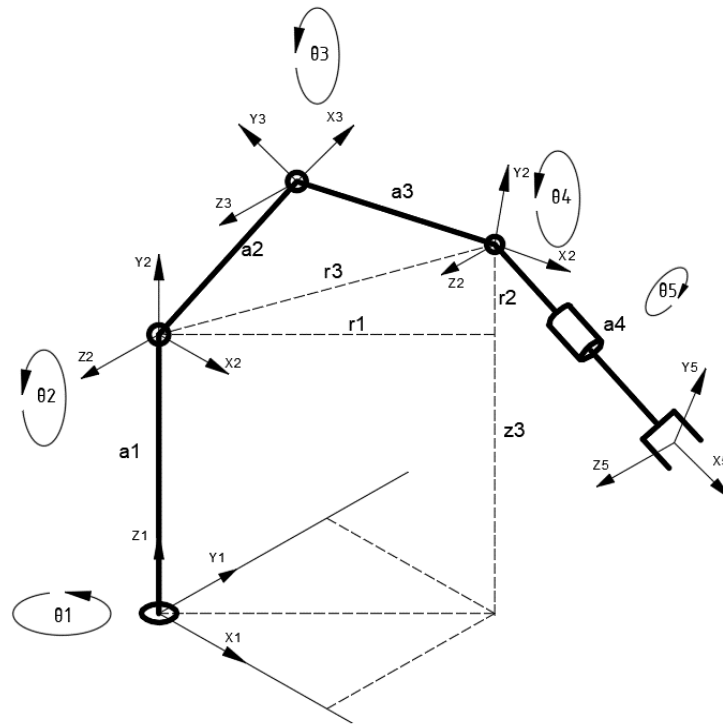
Ψ = orientasi *yaw* pada *end effector (gripper)*

a_1 = panjang Lengan 1

a_2 = panjang Lengan 2

a_3 = panjang Lengan 3

a_4 = panjang Gripper



Gambar 3: Diagram Kinematika Invers Robot

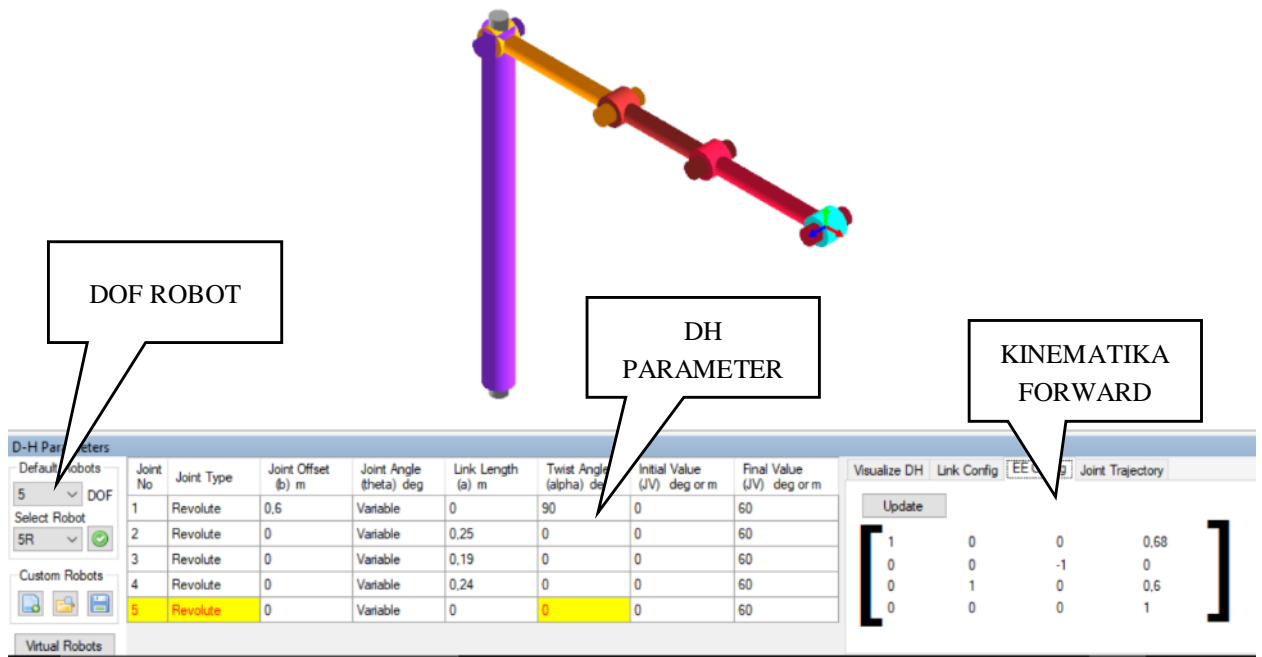
Koordinat yang dituju oleh robot tertera pada Tabel 1. berikut:

Tabel 1: Koordinat Tujuan Robot

NOMOR	KOORDINAT			SATUAN
	X	Y	Z	
1	660	0	300	mm
2	350	0	120	mm
3	350	0	0	mm
4	0	350	120	mm
5	0	350	0	mm

2.2 Menvalidasi Perhitungan Menggunakan Software Robo Analyzer

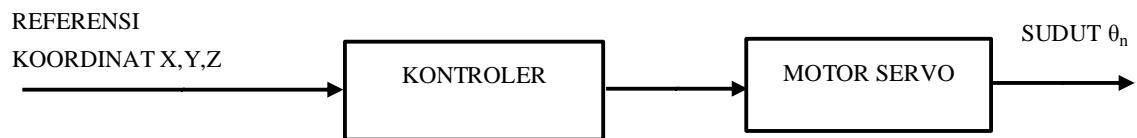
Hasil perhitungan pada inverse kinematika dianalisa menggunakan Robo-analyzer. Software ini melakukan analisa dengan forward kinematik yang diselesaikan dengan cara memasukan nilai θ_n sebagai berikut:



Gambar 4: Software Robo Analyzer

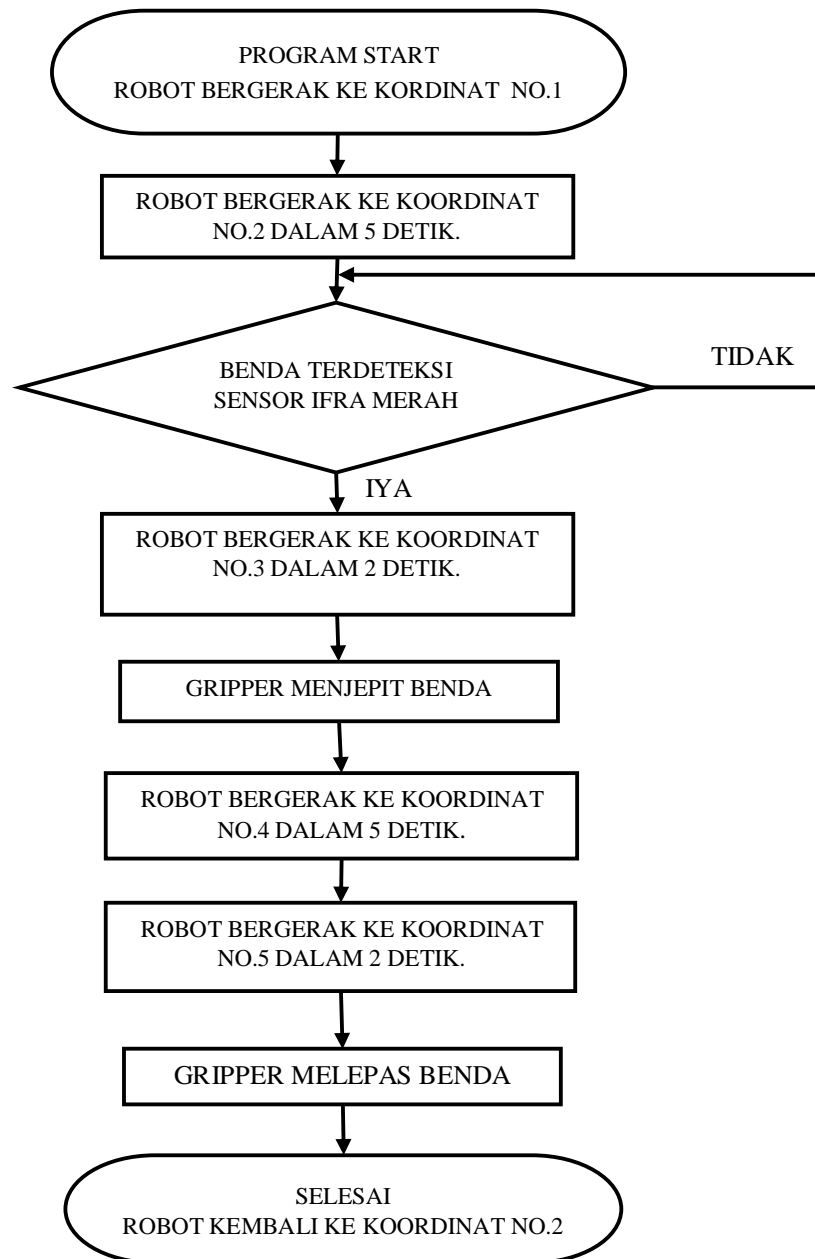
2.3 Pemrograman Kontrol Gerakan Robot dengan Arduino UNO

Pada tahap ini gerakan robot diprogram menggunakan mikrokontroler Arduino Uno menggunakan bahasa C atau C++ dengan cara memasukkan koordinat yang ditentukan. Berikut ini diagram kontrol dari robot manipulator:



Gambar 5: Diagram Kontrol Robot

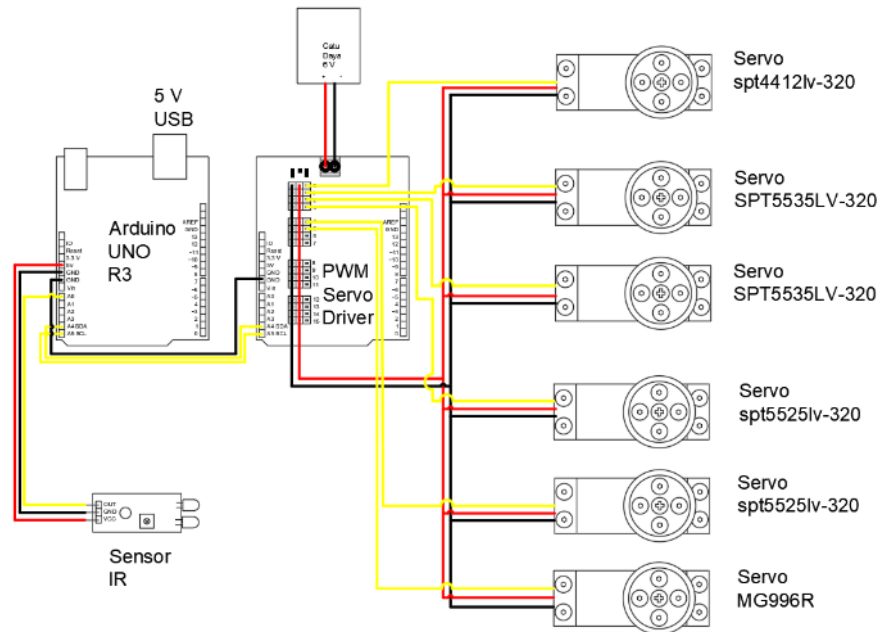
Robot Manipulator diprogram untuk memindahkan benda seberat 1.25 kg dari koordinat No. 1 sampai No.5. Sistem kontrol memiliki sensor infrared untuk mendeteksi keberadaan benda. Berikut ini adalah diagram pergerakan pada robot manipulator yang diprogram:



Gambar 6: Diagram Program Robot

2.5 Sistem Kelistrikan Robot

Robot manipulator menggunakan motor servo yang menerima sinyal PWM dari Mikrokontroler. Berikut ini adalah sistem kelistrikan pada robot:



Gambar 7: Sistem Kelistrikan Robot

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Hasil Perhitungan Kinematika Invers Robot

Hasil Perhitungan kinematika invers tersebut ditunjukkan pada Tabel berikut:

Tabel 2: Hasil Perhitungan Kinematika Invers

NO	KOORDINAT					SATUAN	Sudut Lengan					SATUAN
	X	Y	Z	ω	Ψ		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	
1	680	0	300	0°	0°	mm	0	0	0	0	0	°
2	350	0	120	-90°	0°	mm	0	40.53	-73.17	-57.36	0	°
3	350	0	0	-90°	0°	mm	0	21.08	-73.17	-37.9	0	°
4	0	350	120	-90°	0°	mm	90	40.53	-73.17	-57.36	-90	°
5	0	350	0	-90°	0°	mm	90	21.08	-73.17	-37.9	-90	°

Dari Tabel 2 diatas menunjukkan bahwa sisi kiri adalah koordinat robot dan sebelah kanan adalah hasil sudut joint robot menurut perhitungan kinematika invers. Koordinat No.1 menunjukkan bahwa nilai θ_1 sampai θ_5 adalah 0° sehingga robot bergerak ke posisi tegak lurus terhadap sumbu x. Berikutnya koordinat No. 2 menghasilkan nilai $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 40,53^\circ$, $\theta_3 = -73,17^\circ$, $\theta_4 = 57,36^\circ$, dan $\theta_5 = 0$ membuat robot bergerak ke

atas benda. Setelah itu koordinat No.3 yang menghasilkan nilai $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 21,08^\circ$, $\theta_3 = -73,17^\circ$, $\theta_4 = 37,9^\circ$, dan $\theta_5 = 0^\circ$, menggerakkan robot ke posisi benda. Selanjutnya koordinat No. 4 dengan nilai $\theta_1 = 90^\circ$, $\theta_2 = 40,53^\circ$, $\theta_3 = -73,17^\circ$, $\theta_4 = 57,36^\circ$, dan $\theta_5 = 0$ menggerakkan robot 90 derajat berlawanan jarum jam. Akhirnya koordinat No.5 dengan nilai $\theta_1 = 90^\circ$, $\theta_2 = 21,08^\circ$, $\theta_3 = -73,17^\circ$, $\theta_4 = 37,9^\circ$, dan $\theta_5 = 0^\circ$ menggerakkan robot untuk meletakkan benda.

3.2 Hasil Validasi RoboAnalyzer

Hasil perhitungan pada Tabel 2 divalidasi menggunakan Software Robo Analyzer dengan cara melakukan perhitungan kinematika forward sebagai berikut:

Tabel 3: Validasi hasil perhitungan

NO	KOORDINAT PERHITUNGAN			SATUAN	KOORDINAT SOFTWARE ROBOANALYZER			SATUAN
	X	Y	Z		X	Y	Z	
1	680	0	300	mm	0,68	0	0,3	m
2	350	0	120	mm	0,35	0	0,12	m
3	350	0	0	mm	0,35	0	0	m
4	0	350	120	mm	0	0,35	0,12	m
5	0	350	0	mm	0	0,35	0	m

Menurut Tabel 3 hasil koordinat yang diperhitungkan sama dengan hasil koordinat dari software Roboanalyzer. Hasil ini menunjukkan bahwa perhitungan kinematika invers sudah valid.

3.3 Mengaplikasikan Sistem Kontrol Terhadap Robot

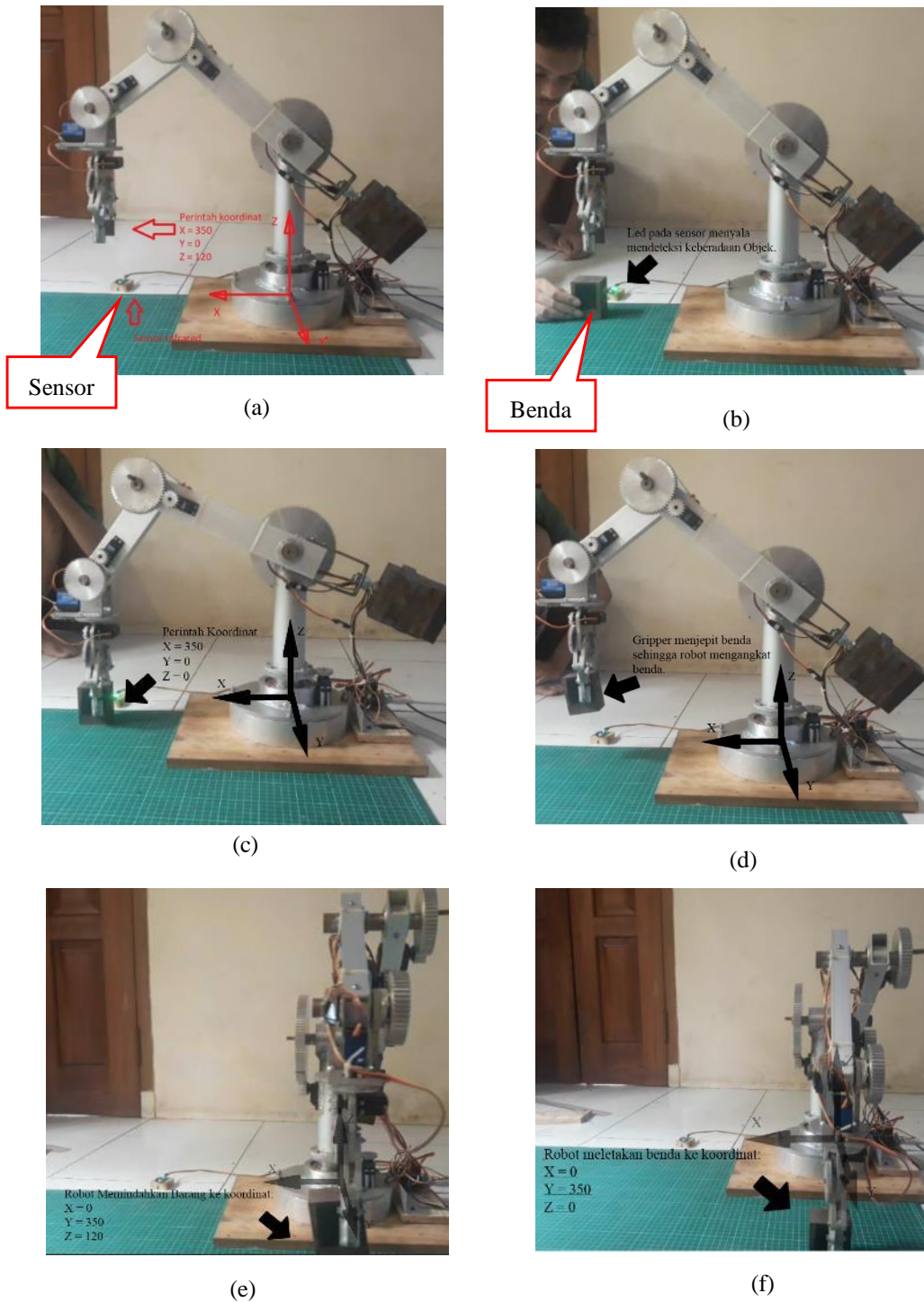
Robot manipulator memiliki gear pada setiap joint. Sinyal PWM (Pulse Width Modulation) yang dihasilkan oleh sistem kontrol dikalibrasi sebagai berikut:

Tabel 4: Kalibrasi Sinyal PWM Servo pada Joint Robot

NOMOR JOINT	SUDUT JOINT		SATUAN	SINYAL PWM		SATUAN
	SUDUT MIN	SUDUT MAX		PWM MIN	PWM MAX	
1	0	90	°	760	2500	µs
2	0	48.5	°	500	2500	µs
3	0	-88	°	500	2500	µs
4	0	-97	°	500	2500	µs
5	90	-90	°	500	2500	µs

Pada Tabel 4 kalibrasi pada sinyal PWM untuk menghasilkan kendali sudut pada motor ditentukan dengan sinyal dari 500 us sampai 2500 us pada joint 1 sudut lengan robot adalah 0° sampai 90° , joint 2 sudut lengan robot adalah 0° sampai $48,5^\circ$, joint 3 sudut lengan robot adalah 0° sampai -88° , joint 4 sudut lengan robot adalah 0° sampai -97° , dan joint 5 sudut lengan robot adalah 90° sampai -90° .

3.4 Uji Coba Gerakan Robot



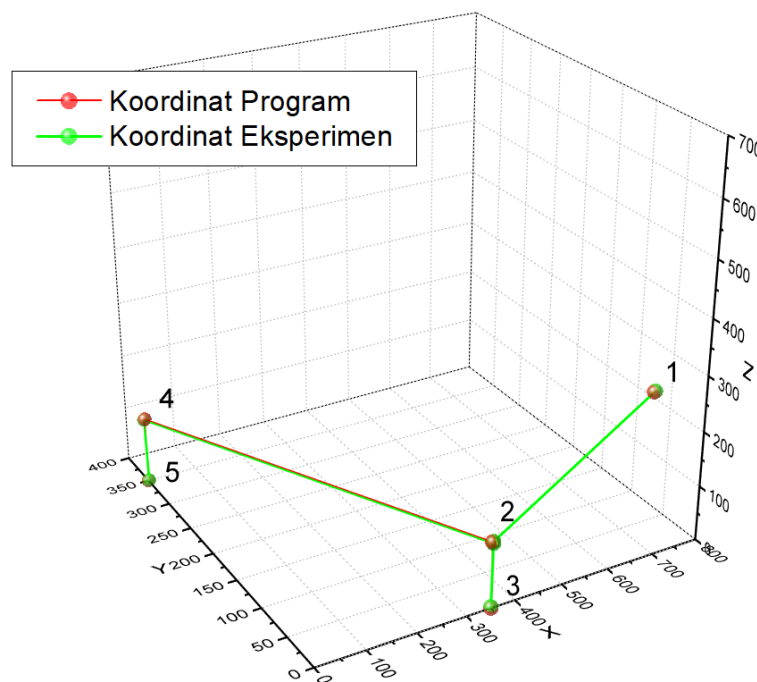
Gambar 8 : Gerakan Robot (a) Menunggu Keberadaan Benda (b) Sensor Infrared Mendeteksi Benda (c) Mengambil Benda (d) Mengangkat Benda (e) Memindahkan Benda (f) Meletakkan Benda

Disaat sensor infra merah mendeteksi keberadaan benda pada Gambar 8b, robot mengarahkan gripper ke benda yang terletak di koordinat No.3 pada Gambar 8c, setelah itu robot mengangkat benda tersebut dan memindahkannya ke koordinat No. 5. yang dimulai dari Gambar 8d sampai 8f.

Berikut ini data yang dihasilkan di saat robot diperintahkan untuk bergerak ke koordinat yang dituju:

Tabel 5: Hasil Uji Coba Akurasi Koordinat Gerakan Robot

NOMOR	KOORDINAT INPUT			KOORDINAT EKSPERIMEN						SATUAN
	X	Y	Z	X	ERROR	Y	ERROR	Z	ERROR	
1	680	0	300	683	3	0	0	301	1	mm
2	350	0	120	352	2	0	0	120	0	mm
3	350	0	0	350	0	0	0	3	3	mm
4	0	350	120	0	0	352	2	117	3	mm
5	0	350	0	0	0	348	2	3	3	mm



Gambar 9 : Diagram Uji Coba Akurasi Gerakan Robot

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 9 dapat dilihat bahwa program Arduino Uno menggerakkan robot mulai dari koordinat no.1 sampai no.5. Dari hasil eksperimen diperoleh deviasi koordinat no. 1 sebesar 3 mm di sumbu X dan 1 mm pada sumbu Z. Selanjutnya koordinat no. 2 memiliki deviasi sebesar 2 mm pada sumbu X. Pada koordinat No. 3 terjadi deviasi sebesar 3 mm pada sumbu Z. Pada koordinat no. 4 terjadi deviasi sebesar 2 mm pada sumbu Y, dan 3 mm pada sumbu Z. Setelah itu koordinat No.5 terjadi deviasi sebesar 2 mm pada sumbu Y, dan 3 mm pada sumbu Z.

Tabel 6: Hasil Uji Coba Akurasi Sudut Servo [11]

SUDUT TERHITUNG	SUDUT EKSPERIMEN	ERROR	SATUAN
90,5	90	0,5	°
30,13	30	0,13	°
45,02	46	0,98	°
153,51	153	0,51	°
192,02	194	1,02	°
240,05	239	1,05	°
60	60	0	°
180,13	180	0,13	°
76	76	0	°
38,53	38	0,68	°

Tabel 7: Hasil Uji Coba Akurasi Sudut pada $\theta_1, \theta_2, \theta_3$

NO	SUDUT TERHITUNG			SUDUT EKSPERIMEN						SATUAN
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	ERROR	θ_2	ERROR	θ_3	ERROR	
2	0	40.53	-73.17	0	0	40.13	0,4	-73.28	0,11	°
3	0	21.08	-73.17	0	0	21.64	0,56	-73.39	0,22	°
4	90	40.53	-73.17	90	0	39.74	0,83	-72,51	0,66	°
5	90	21.08	-73.17	90	0	21.94	0,86	-74.27	1,1	°

Tabel 8: Hasil Uji Coba Akurasi Sudut pada θ_4, θ_5

NO	SUDUT TERHITUNG		SUDUT EKSPERIMENT				SATUAN
	θ_4	θ_5	θ_4	ERROR	θ_5	ERROR	
2	-57.36	0	-57,84	0,12	0	0	°
3	-37.9	0	-38,25	0,35	0	0	°
4	-57.36	-90	-57,23	0,13	-90	0	°
5	-37.9	-90	-37,67	0,23	-90	0	°

Tabel 6 menunjukkan hasil pengujian terhadap sudut servo yang dilakukan oleh Rimas[11] dimana hasil error diperoleh sebesar 0 - 0,15° yang memiliki rata rata nilai error sebesar 0,64 %. Sudut rotasi yang diuji hanya satu sudut saja.

Sedangkan hasil pengukuran sudut servo pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 7 dan 8 dimana sudut θ_1 mengalami deviasi sebesar 0°. Berikutnya θ_2 mengalami deviasi sebesar 0,4-0,86°, selanjutnya pada θ_3 mengalami deviasi sebesar 0,11-1,1°. Pada sudut θ_4 terjadi deviasi sebesar 0,12-0,35°. Pada sudut θ_4 terjadi deviasi sebesar 0°. Pada table 6 didapat rata-rata error sebesar 0,64 % sedangkan pada Tabel di atas di dapat rata-rata error sebesar 0,29 %. Sudut rotasi yang diuji berjumlah 5 sudut.

Tabel 9: Hasil Uji Coba Akurasi [11]

WAKTU PERGERAKAN	SATUAN
6,6	Detik
7,1	Detik
6,7	Detik
7,0	Detik

Tabel 10: Hasil Uji Coba Akurasi Waktu Tempuh Robot

PERGERAKAN ROBOT	WAKTU PROGRAM	WAKTU TERUKUR	ERROR	SATUAN
Dari Koordinat No. 1 ke No. 2	5	5	0	Detik
Dari Koordinat No.2 ke No.3	2	2	0	Detik
Dari Koordinat No.2 ke No.4	5	5	0	Detik
Dari Koordinat No.4 ke No.5	2	2	0	Detik

Tabel 9 menunjukkan hasil pengujian terhadap waktu pergerakan robot yang dilakukan oleh Rimas [11] diperoleh waktu bergerak dalam jangka 6,6 - 7,1 detik.

Kemudian dari hasil uji coba dalam Tabel 10 pada penelitian ini dapat dilihat bahwa robot dapat melakukan pergerakan dalam jangka 2 - 5 detik. Dengan itu waktu yang disetting dari program dibandingkan dengan waktu sesungguhnya menghasilkan deviasi sebesar 0 detik. Ini adalah hasil yang sangat valid dibandingkan dengan hasil pengujian Rimas[11].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan uji coba gerakan robot di atas dapat disimpulkan :

1. Pemindahan benda dengan beban 1.25 kgf dapat dilakukan secara matematis menggunakan rumus kinematika diprogram menggunakan Arduino Uno.
2. Akurasi koordinat gerakan robot berdasarkan eksperimen dari koordinat No. 1 sampai No. 5 disaat memindahkan benda dengan beban 1.25 kgf memiliki besar deviasi sebesar 2-3 mm pada sumbu X, 2 mm pada sumbu Y, dan 1-3 mm pada sumbu Z.
3. Akurasi waktu tempuh robot menuju koordinat No. 1 sampai No.5 untuk memindahkan benda dengan beban 1.25 kgf memiliki selisih waktu antara yang diprogram dan yang terukur pada eksperimen sebesar 0 detik, hasil ini menunjukkan akurasi yang tinggi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] WIDODO, B., *Robotika Modern*, Edisi 1, Yogyakarta Andi Offset, Jakarta, 2014
- [2] ENDRA, P. dan DHEWIBERTA, H., *Robotika Desain Kontrol, dan Kecerdasan Buatan*, Andi, Yogyakarta, 2011
- [3] NIRANJAN, L. SUHAS, A.R., SREEKANTH, B., “Design and Implementation of Robotic Arm Using Proteus Design Tool and Arduino-UNO”, *Indian J.Sci.Res.*, e-ISSN: 2250-0138, p-ISSN: 0976-2876, India, 2018.
- [4] ILIUKHINA, V. N., MITKOVSKII, K.B., BIZYANOVA, D.A., & AKOPYAN, A.A., “The modeling of Inverse Kinematics for 5 DOF Manipulator”, *Procedia Engineering*, pp.498 – 505, 2017
- [5] ASHRAF, E., EDUARDO, Y., KAREN, B., RICARDO, S., “Design and Development of a Competitive Low-Cost Robot Arm with Four Degrees of Freedom”, *Modern Mechanical Engineering*, v.47, n5, 2011
- [6] SUYASH, S dan EKLAVYA, G., "Forward Kinematics of Articulated Robotic Arm". *International Journal of Research and Scientific Innovation*, v.6, n.7, 2017
- [7] YAGNA, J dan BHAVESH, P., “Design And Development Of 5-DOF Robotic Arm Manipulators”, *Internasional Journal Of Scientific Research*, v.8, n.11, 2019.

- [8] HARISH, K., MEGHA, D., SHUKLAMBARI, M., AMIT, K., CHAITANYA, K., “Pick and Place Robotic Arm Using Arduino”, *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, v.6, n.12, 2017
- [9] EKAPUTRA, I.M.W., dan JOGA, D. S., “Pengembangan Wearable Robotic Arm Input dan Virtual Instrument Untuk Pengendalian dan Pemantauan Lengan Robot”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, v.18, v.2, 2017
- [10] RAHUL, G., ANKUSH, G., ASHISH, Z., AJAY, M., “Review on Development of Industrial Robotic Arm”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, v.4, n.3, 2017
- [11] Rimas, O., Rizal, M., Gembong, E.S., “Implementasi Robot Lengan Pemindah Benda 3 DOF Menggunakan Metode Inverse Kinematics”, *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, v.2, n.8, 2018
- [12] JAMSHED, I., “Modern Control Laws for an Articulated Robotic Arm”, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v.9, n.2, 2019
- [13] RIMAS, O., RIZAL, M., GEMBONG, E. S., “Rancang Bangun Sistem Kontrol Robot Line Follower menggunakan logika fuzzy”, *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, v.3, n.4, 2018
- [14] HABIB, N. MAKHSUN, YAN, M, D., “Prototype Sistem Kendali Robot ARM Gripper Manipulator menggunakan Flex Sensor Dan MPU6050 Berbasis Internet of Things”, *Factor Exacta*, v.13, n.4, 2020
- [15] RAHUL, K. UTKAL, M. PRANEEL, C., “A Low-Cost Linear Force Feedback Control System for a Two-Fingered Parallel Configuration Gripper”, *International Symposium on Robotics and Intelligent*, pp.264-269, 2016
- [16] SAHA, S.K., RoboAnalyzer, <http://www.roboanalyzer.com/>. Diakses: Juli 2021.