

PENUGASAN MENGENAI MATA KULIAH KINEMATIKA ROBOT

Makalah Proyek Kinematika Robot Lengan

Ditujukan Untuk Menunjang Pembelajaran Kinematika Robot



Dosen Pengampu:

Eko Setiawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

Disusun oleh:

Bryan Nicholas Josephin Hotlando Simangunsong 215150307111017

Duta Kukuh Pribadi 215150301111016

Fawwaz Anrico Purnomo 215150301111019

Felix Baringin Jeconiah William Samosir 215150301111024

Nandito Yuda Samosir 215150301111014

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS ILMU KOMPUTER

TEKNIK KOMPUTER

2023

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Latar belakang kinematika robot lengan tidak hanya mencakup konsep dasar seperti konversi Denavit-Hartenberg (DH) dan forward kinematic, tetapi juga merambah ke aspek penting lainnya seperti inverse kinematic dan kalibrasi di setiap servo. Konversi DH, yang merupakan metode umum untuk menggambarkan hubungan geometris antara link dan sendi pada robot lengan, membuka jalan bagi pengembangan model matematis yang menggambarkan pergerakan robot secara akurat. Proses ini melibatkan penentuan parameter DH untuk setiap sendi dan link, yang kemudian digunakan dalam formulasi matriks transformasi untuk mendapatkan posisi dan orientasi akhir dari efektor (end effector) robot.

Forward kinematic, yang merupakan konsep kritis dalam kinematika robot, memungkinkan perhitungan posisi dan orientasi akhir efektor berdasarkan nilai sendi yang diberikan. Dengan demikian, mahasiswa yang belajar kinematika robot dapat memahami bagaimana pergerakan setiap sendi memengaruhi posisi akhir efektor, memperdalam pemahaman mereka tentang dinamika robot secara keseluruhan.

Sementara itu, inverse kinematic membuka peluang untuk merancang algoritma yang memungkinkan robot lengan mencapai posisi dan orientasi tertentu dengan mengatur sendi-sendinya secara efektif. Ini menjadi penting ketika robot harus diatur untuk mencapai tujuan tertentu dalam ruang kerja yang kompleks. Mahasiswa yang belajar inverse kinematic akan dapat mengembangkan pemahaman mendalam tentang bagaimana menghubungkan posisi dan orientasi yang diinginkan efektor dengan nilai sendi yang diperlukan.

Selain itu, kalibrasi di setiap servo menjadi aspek krusial untuk memastikan akurasi pergerakan robot. Proses ini melibatkan penyesuaian parameter servo untuk mengatasi ketidakmampuan atau ketidak sempurnaan mekanisme fisik, sehingga posisi yang diinginkan dapat dicapai dengan presisi yang tinggi.

Dengan menyelidiki dimensi kinematika robot lengan ini secara komprehensif, mahasiswa dapat membangun keterampilan praktis dan teoritis yang dibutuhkan untuk merancang, memahami, dan mengelola robot lengan dengan efektif. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya mencakup konsep dasar kinematika robot tetapi juga menyelidiki aspek yang lebih mendalam untuk memberikan fondasi yang kokoh bagi pembelajaran kinematika robot.

1.2 Tujuan

Tujuan dari pengukuran dimensi robot dalam rangka pembelajaran mata kuliah kinematika robot adalah untuk mengetahui secara akurat desain dan rancangan dari pergerakan robot. Dengan melakukan pengukuran dimensi robot, mahasiswa dapat:

1. Memahami arsitektur dari robot lengan
2. Memahami kalibrasi di setiap servo robot lengan
3. Memahami pengukuran dimensi robot melalui konversi Denavit-Hartenberg
4. Memahami prosedur pengukuran dimensi
5. Melakukan pengukuran konversi Denavit-Hartenberg
6. Memahami implementasi dari konversi DH melalui forward kinematics
7. Memahami invers kinematic pada koordinat tiga dimensi

1.3 Manfaat

Pencarian Dimensi Robot dalam rangka pembelajaran mata kuliah kinematika robot memiliki beberapa manfaat, yaitu:

- a. Meningkatkan pemahaman mahasiswa mengenai arsitektur dari robot lengan
- b. Memahami cara kalibrasi di setiap servo dari robot lengan
- c. Meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap pengukuran dimensi robot
- d. Meningkatkan keterampilan mahasiswa dalam mengaplikasikan konversi Denavit-Hartenberg
- e. Menambah keterampilan dalam implementasi forward kinematics
- f. Menambah keterampilan dalam implementasi inverse kinematics
- g. Meningkatkan kreativitas mahasiswa dalam mendesain dimensi robot
- h. Menjadi media pembelajaran yang efektif

Kajian Teori

1. Arsitektur Proyek Akhir

1.1. Komponen yang akan digunakan:

- Arduino Uno R3

(https://shopee.co.id/Uno-R3-with-Cable-Arduino-Uno-Compatible-ATmega328p-dengan-kabel-i.14183026.1135589378?sp_atk=c190879d-64ab-4a73-9e72-31026e637333&xpt_dk=c190879d-64ab-4a73-9e72-31026e637333)



Spesifikasi

- Mikrokontroler ATMega328p (DIP Chip atau SMD Chip)
- Batas Tegangan Input: 6-20V (Dibawah 6V arduino tidak bekerja dan di atas 20V IC regulator akan terbakar)
- Tegangan Input (Rekomendasi): 7-12V DC
- Tegangan Input (Tidak Rekomendasi) < 7V DC (port tidak stabil)
- Tegangan Input (Tidak Rekomendasi) > 12V DC (Regulator cepat panas)
- Pin I/O: 14 (6 pin bisa sebagai output PWM)
- Pin Input Analog: 6
- Tegangan Operasional: 5V DC
- Arus Pada Pin Digital: 40 mA DC
- Arus Pada Pin 3,3: 50 mA DC
- Kabel Data USB A to USB B
- Flash Memory: 32KB (0,5KB untuk bootloader)
- SRAM: 2KB
- EEPROM: 1KB
- Clock Speed: 16MHz.

Alasan kami memilih arduino uno r3 adalah karena kami menggunakan 4 servo yang membutuhkan input PWM, sehingga Arduino dengan 6 pin PWM ini mencukupi kebutuhan untuk project kami

- Servo SG90

(https://shopee.co.id/Mikro-Servo-Motor-Sg90-for-RC-250-450-Helicopter-Airplane-Car-Boat-i.173966459.4445068079?sp_atk=10b58a87-f877-4de3-b143-98c510502cba&xptd_k=10b58a87-f877-4de3-b143-98c510502cba)

Spesifikasi

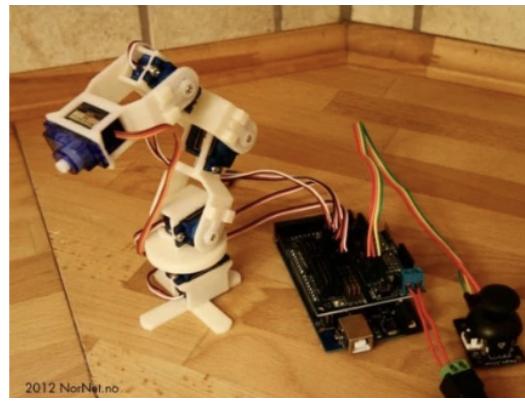
- Ukuran : 22 x 11,5 x 27mm
- Berat : 10,6 gram
- Tegangan operasi : 4 - 7,2v
- Torsi motor pada 4,8v : 1,2 kg/cm
- Kecepatan putaran pada 4,8v : 0,12s/60°
- Sudut rotasi : 120
- Kisaran suhu : 0 - 55°C



Alasan kami memilih servo SG90 agar servo ini bisa memenuhi spesifikasi pembelian dari gripper yang ditentukan.

- Micro Robot arm for 9g Micro Servo

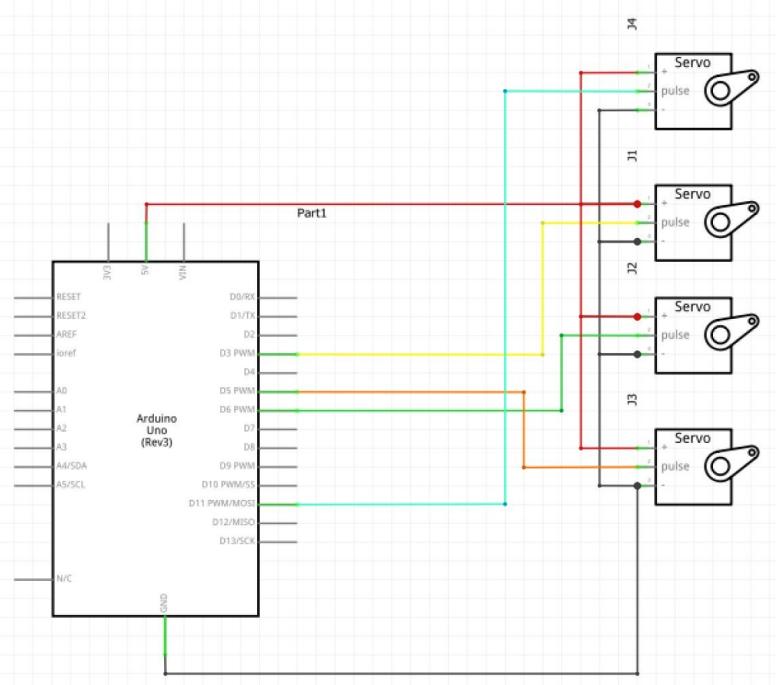
(https://www.tokopedia.com/artaurniture/micro-robot-arm-9g-micro-servo?utm_source=salinlink&utm_medium=share&utm_campaign=PDP-66041873-811083070-010923-iNmYzC&branch_match_id=1022723500346483268&branch_referrer=H4sIAAAAAAAAAB8soKSkottLXL8nPzi9ITclM1MvJzMvWLyo0cQ1OrPTzdE4CAEuFd1YiAAAA)



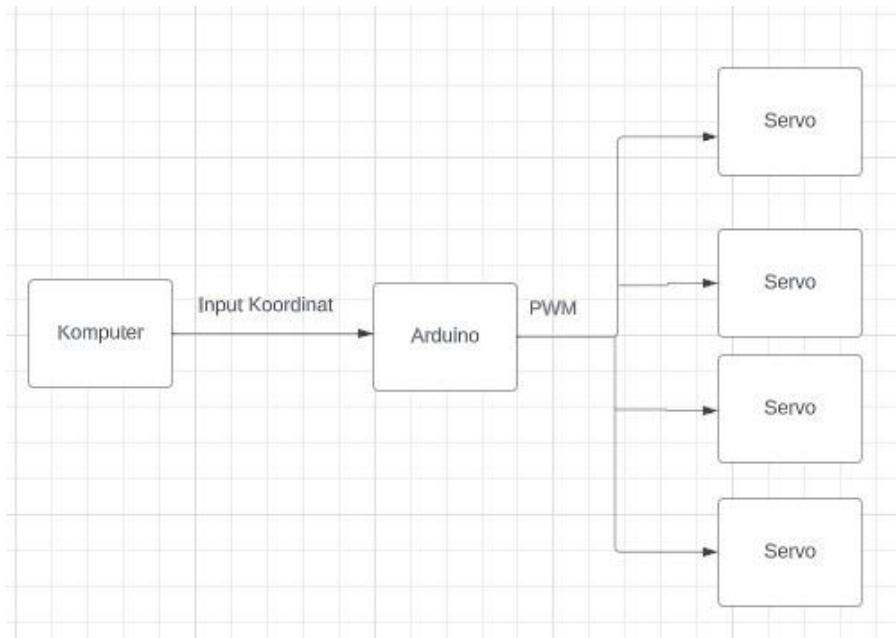
Spesifikasi: Robot yang sangat kecil dan murah dengan 4 sumbu plus gripper. Dibangun di atas servo mikro 9g dengan bahan PLA dicetak dengan 3D printer

Alasan kami memilih produk ini karena bahan yang digunakan berjenis FLA yang relatif kuat dan kokoh dalam penggunaan project ini, terutama dengan terlibatnya penggunaan servo SG90 yang membutuhkan bahan servo untuk akurasi yang baik.

1.2. Diagram Skematik Rangkaian



1.3. Blok Diagram



2. Perakitan Modul Robot

2.1. Deskripsi sistem

Sistem yang digunakan untuk percobaan pergerakan ini adalah robot lengan 4 DOF (Degree of Freedom) yang memiliki empat derajat kebebasan. Dalam percobaan ini, robot tangan dikendalikan dengan memperhitungkan sudut sendi setiap motor servo. Hal ini diperlukan untuk menggerakkan lengan robot ke atas, ke bawah, dan ke samping dengan presisi dan akurat. Sistem akan menyerupai mesin lengan di pabrik dengan DOF paling bawah sebagai pemutar lengan hingga 360 derajat mengacu pada sumbu x dan 3 dof lainnya sebagai bergerak mengacu pada sumbu Y

2.2. Spesifikasi Robot

a. Arduino Uno

Arduino Uno R3 adalah papan mikrokontroler yang berbasis IC ATmega328P. Papan ini memiliki 14 pin input/output digital, di mana 6 pin dapat digunakan sebagai output PWM . Selain itu, Arduino Uno R3 juga dilengkapi dengan 6 pin input analog , kristal kuarsa 16 MHz , konektivitas USB , colokan listrik , header ICSP , dan tombol reset. Dengan semua fitur ini, Arduino Uno R3 adalah pilihan terbaik untuk memulai belajar elektronik dan pemrograman¹.

Arduino Uno R3 memiliki spesifikasi yang rinci. Papan ini beroperasi pada tegangan DC 5 V dan dapat menerima input tegangan DC antara 7 V hingga 12 V. Arduino Uno R3 memiliki 14 pin input/output digital, di mana 6 pin di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM. Selain itu, Arduino Uno R3 juga dilengkapi dengan 6 pin input analog. Setiap pin I/O pada Arduino Uno R3 dapat menangani arus hingga 20 mA. Papan ini juga memiliki arus DC pin pada tegangan 3,3 V sebesar 50 mA.

Dengan spesifikasi yang lengkap dan fitur yang kuat, Arduino Uno R3 adalah pilihan yang tepat untuk eksperimen robot lengan dikarenakan pertimbangan spesifikasi yang telah disebutkan



b. Servo SG90

Servo SG90 adalah motor servo mini yang dapat digunakan dalam berbagai proyek elektronik dan robotika. Servo ini memiliki dimensi yang sangat kompak, sehingga mudah diintegrasikan ke dalam proyek-proyek di mana ruang sangat penting. Selain itu, servo SG90 sangat ekonomis dan mudah digunakan, dengan kebutuhan energi yang sangat rendah, sehingga memungkinkan juga untuk digunakan di embedded, IoT atau aplikasi konsumsi rendah lainnya .

Servo SG90 dilengkapi dengan konektor tipe S universal yang dapat muat di sebagian besar perangkat komersial. Servo ini terdiri dari 3 kabel dengan warna yang mengidentifikasi untuk apa masing-masing kabel digunakan: Merah: adalah kabel power positif atau Vcc (+), Coklat: apakah kabel power negatif (-) atau GND (ground), dan Oranye: itu adalah kabel yang membawa sinyal PPM (Pulse Position Modulation) untuk mengontrol servo motor .

Dalam hal karakteristik teknis dari servomotor ini, Servo SG90 menonjol karena:

- Berat yang didukung: antara 1.2 dan 1.6 Kg (cukup untuk ukurannya yang kecil)
- Torsi motor pada 4.8v: 1.2kg/cm
- Tegangan operasi: 4 – 7.2v
- Kecepatan putaran pada 4.8v: 0.12s/60°
- Sudut rotasi: 120°
- Rangkaian suhu operasi: -30°C hingga +60°C
- Ukuran: 22 × 11.5 × 27 mm
- Berat: 9 g atau 10.6 g termasuk kabel dan konektor
- Kompatibel dengan Arduino .

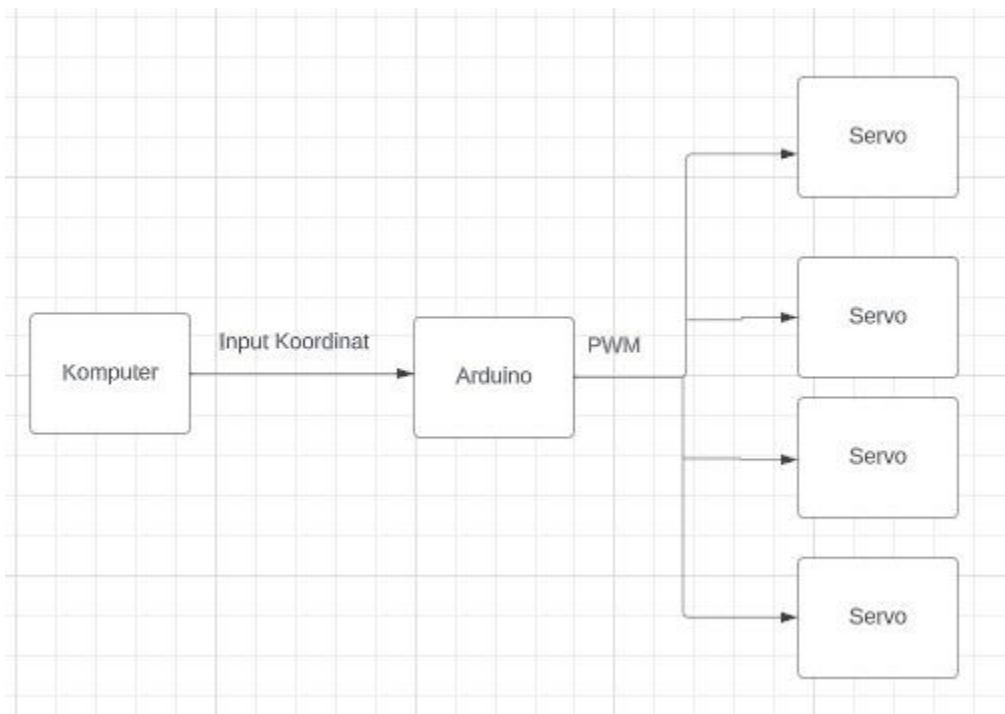
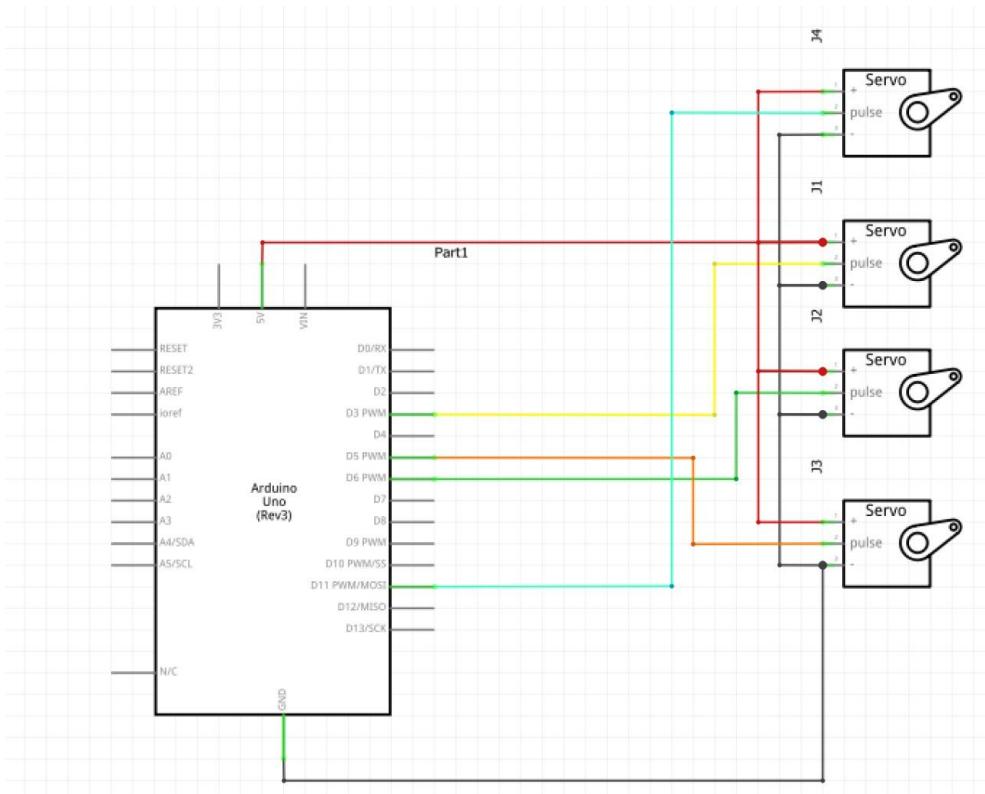


c. Micro Robot Arm

Micro Robot arm adalah modul robot manipulator yang berbentuk tangan dan menggunakan servo mikro 9g untuk pergerakannya. Robot manipulator adalah jenis robot tangan (arm robot) yang dirancang untuk berbagai keperluan dalam meningkatkan produksi. Robot ini terdiri dari lengan-lengan kaku yang terhubung secara seri dan memiliki sendi yang dapat bergerak berputar (rotasi) atau memanjang/memendek (translasi atau prismatic). Salah satu sisi lengan, yang disebut pangkal, ditanam pada bidang atau meja yang statis (tidak bergerak), sedangkan sisi lainnya, yang disebut ujung (end of effector), dapat dimuat dengan alat tertentu sesuai dengan tugas robot. Dalam dunia mekanikal, manipulator ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu tangan atau lengan (arm) dan pergelangan (wrist). Robot manipulator ini memiliki berbagai kegunaan, termasuk spot welding dan arc welding, spray painting, grinding, parts handling / transfer, operasi perakitan, parts sorting, dan aplikasi lainnya yang melibatkan peralatan rotasi

2.3. Blok Diagram dan Skematik

Dalam penggerjaan proyek ini, tentunya memerlukan blok diagram dan diagram skematik sebagai acuan dalam pembuatan lengan robot yang akan digunakan sebagai percobaan. Berikut adalah diagram skematik dan blok diagramnya.



2.4. Tahap Pengrakitan

1. Tahap perakitan dimulai dengan mengumpulkan semua bagian dari robot lengan yang akan dibuat.
2. Dikarenakan kita tidak menggunakan bagian pencapit dari robot lengan tersebut, maka kita hanya perlu menggunakan motor servo SG90 sebanyak 4 buah.
3. Servo SG90 dipasang pada setiap bagian lengan robot, dengan bagian kepala servo menghadap ke bagian yang tidak bertutup dan kabel dari servo tersebut dikeluarkan melalui celah yang terdapat pada sisi lengan robot tersebut.
4. Terdapat pula bagian robot yang memiliki bentuk seperti tanda tambah (+). Bagian ini merupakan bagian dasar atau paling bawah dari robot lengan ini. Pada bagian ini, servo dipasang dengan bagian kepala servo menghadap ke atas dan kabel servo dikeluarkan melalui lubang yang terdapat pada bagian sisi robot tersebut.
5. Lalu kita memasang sekrup (baut) untuk memastikan servo dapat terpasang dengan baik pada lengan robot. Kita menggunakan sekrup besar bawaan dari pembelian servo, kemudian memasangkannya pada bagian kiri dan kanan servo yang melekat pada bagian lengan robot.
6. Kemudian setiap bagian dari lengan robot tersebut dipasang satu sama lain. Bagian yang memiliki servo dimasukkan ke bagian lengan robot yang lainnya dengan bagian kepala servo (yang dapat berputar) dimasukkan ke lubang yang lebih kecil, dan bagian lubang yang lebih besar diisi oleh bagian belakang servo tersebut.
7. Kemudian kita perlu memasang bagian penyangga seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini. Bagian ini dimasukkan melalui celah yang terdapat pada sisi lengan robot, kemudian bagian yang berbentuk lingkaran dimasukkan melalui lubang yang terdapat pada sisi lengan robot tersebut. Bagian lubang dari bagian ini diarahkan lurus pada kepala servo (bagian servo yang dapat berputar), kemudian disekrup menggunakan sekrup kecil bawaan servo. Apabila bagian ini sulit dimasukkan pada bagian lengan servo, pastikan untuk membersihkan bagian lubang lengan robot dari bekas plastik pencetakan terlebih dahulu agar dapat lebih mudah dimasukkan.

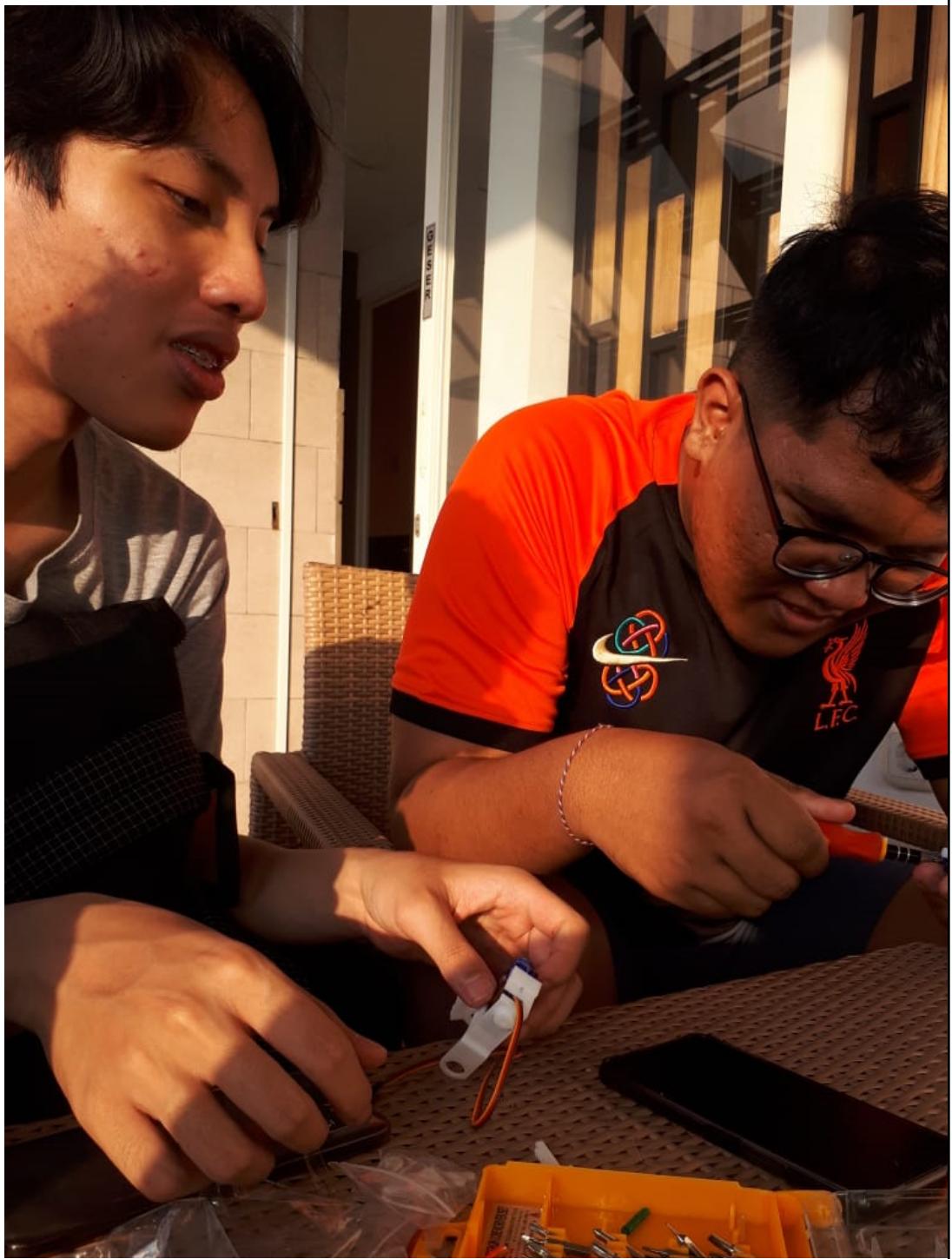


8. Setelah selesai pada perakitan lengan robot, kita akan menghubungkan setiap servo tersebut pada mikrokontroler Arduino Uno.
9. Kita menghubungkan pin VCC dan Ground terlebih dahulu pada bagian pinggir dari breadboard menggunakan kabel jumper male to male sebagai sumber daya dari servo.

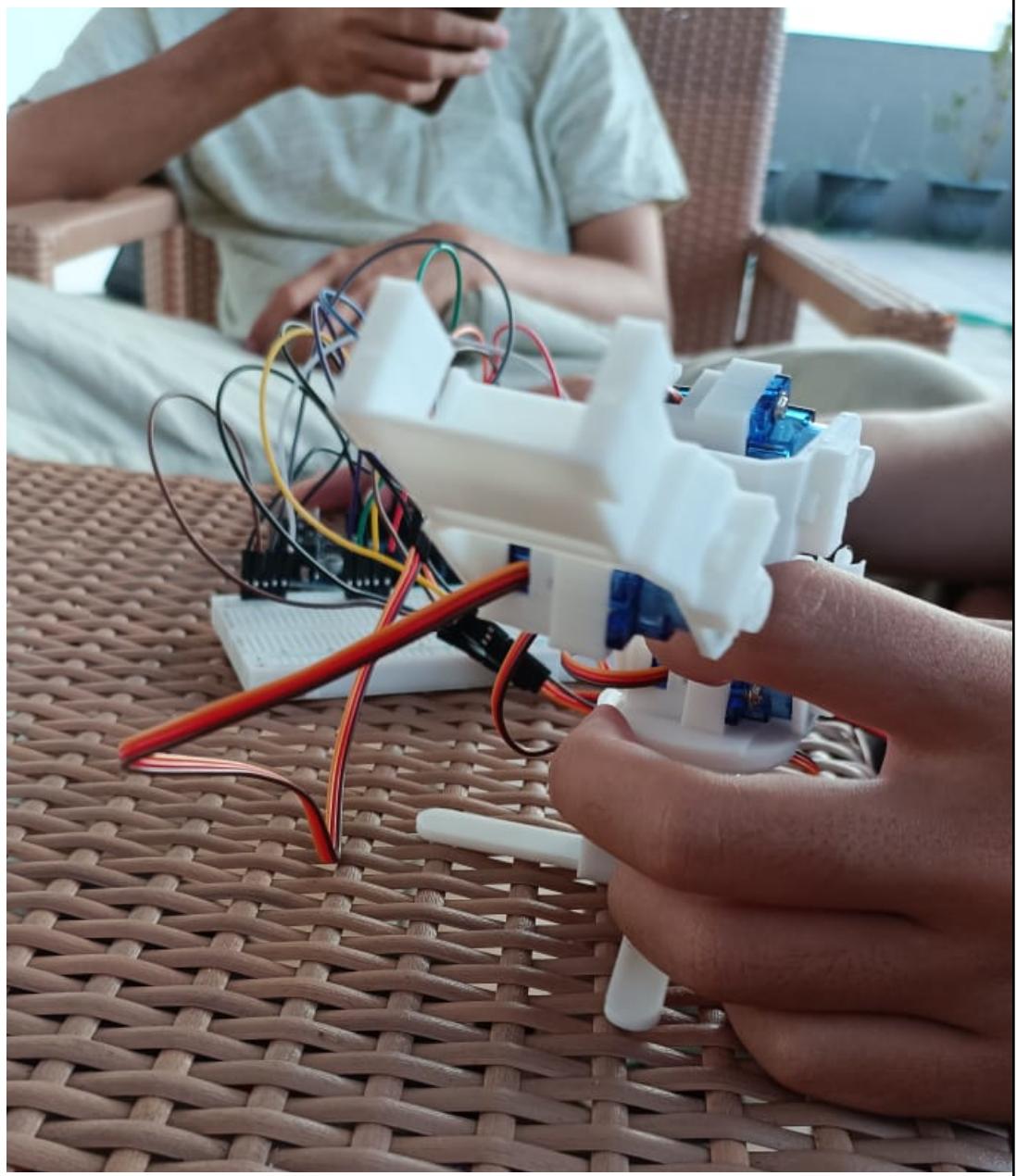
10. Kemudian kita menghubungkan servo tersebut menggunakan kabel jumper male to male. Servo memiliki 3 buah kabel yang memiliki warna merah untuk VCC, coklat untuk Ground, dan oranye kabel yang membawa sinyal PPM (Pulse Position Modulation) untuk mengontrol servo motor. Kita dapat menghubungkan kabel merah dan coklat pada pada breadboard yang telah dihubungkan dengan VCC dan Ground dari Arduino dan untuk setiap kabel berwarna oranye dari servo kita hubungkan langsung ke Arduino menggunakan kabel jumper male to male. Berdasarkan diagram skematik yang kelompok kami buat pada penugasan sebelumnya, kami menghubungkan kabel pin servo pada pin D3, D5, D6 dan D11 PWM.
11. Setelah semua kabel telah dihubungkan, robot lengan sudah siap untuk diprogram dan digunakan.

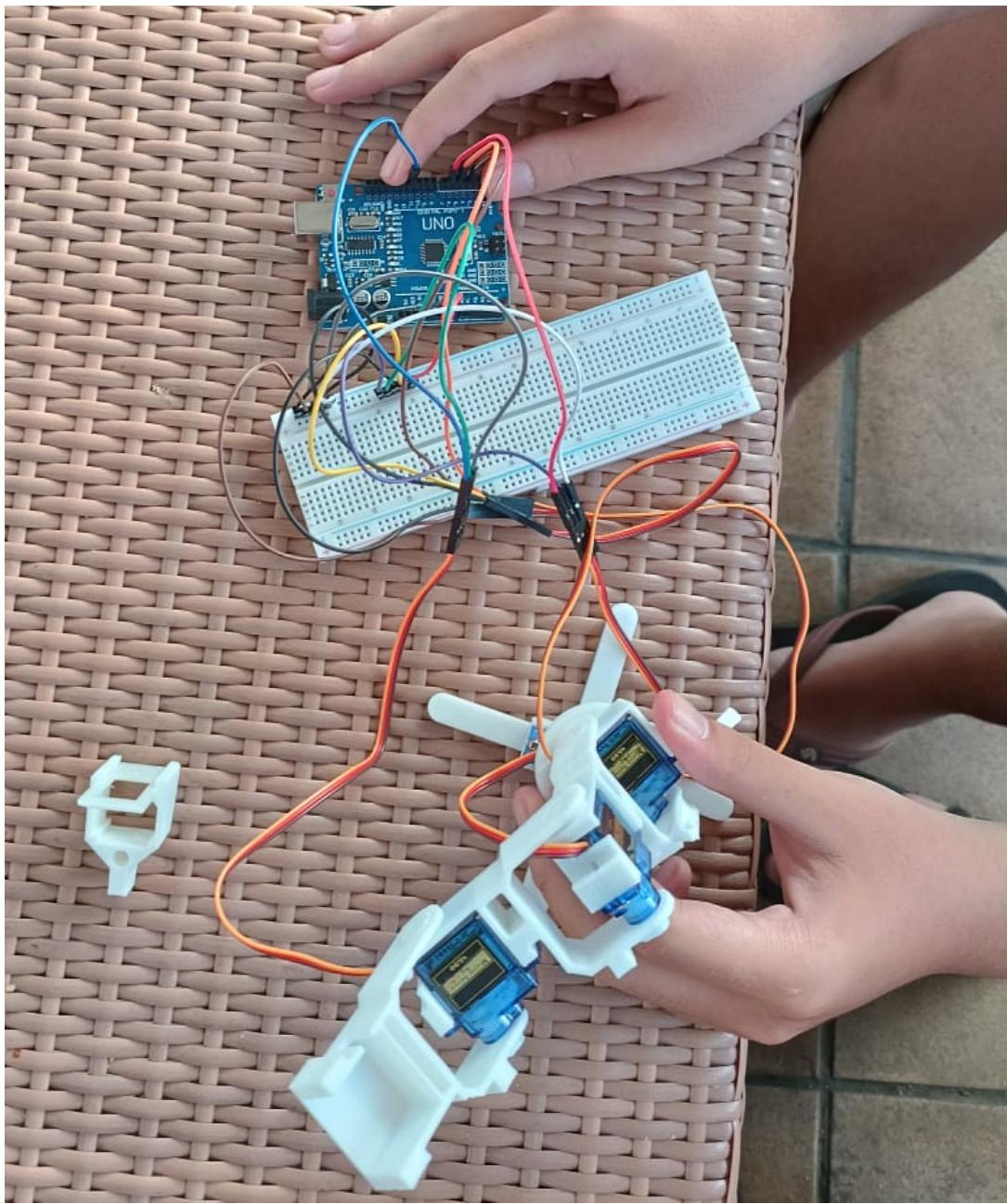
Dokumentasi Hasil Kegiatan:







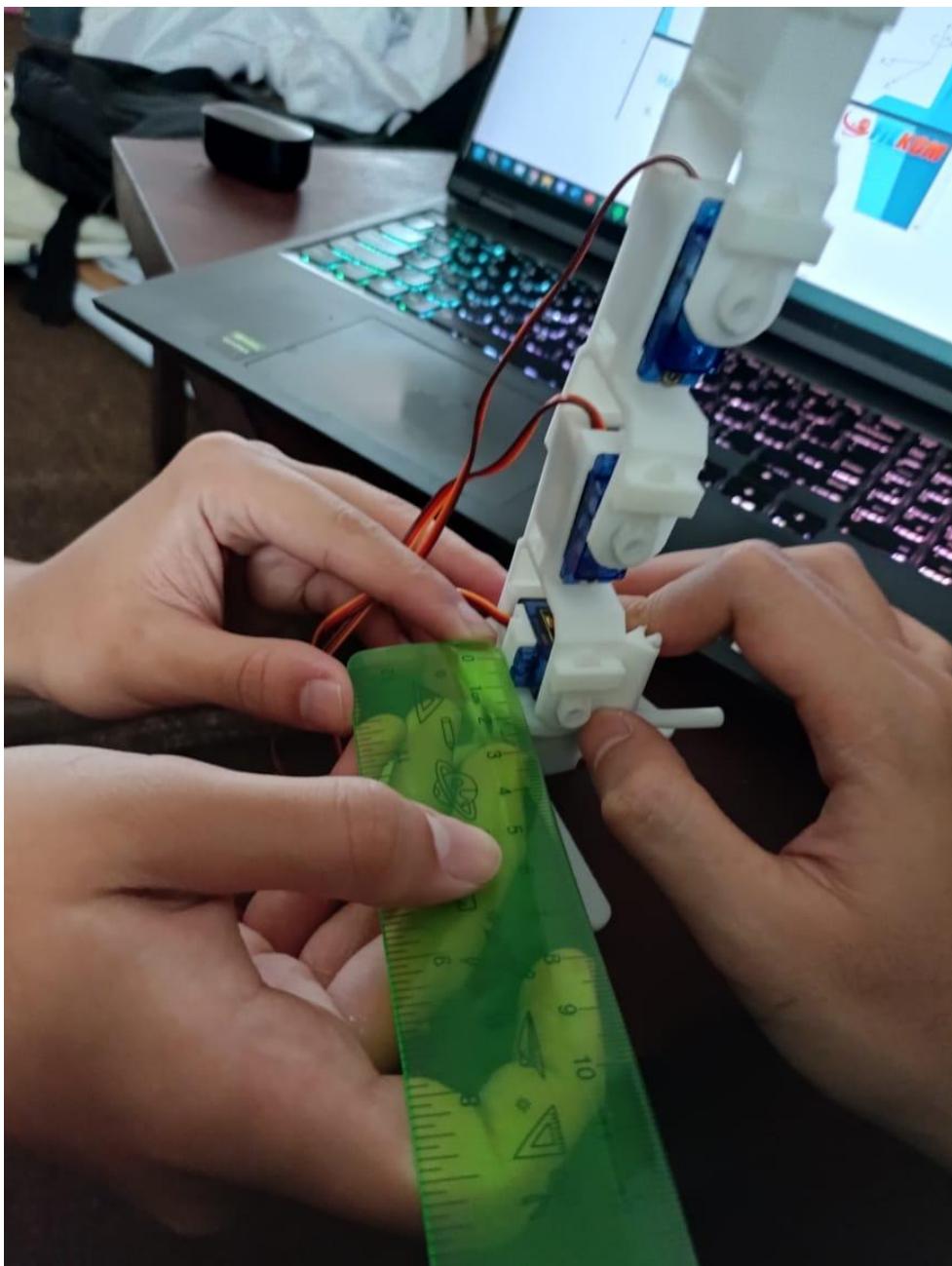
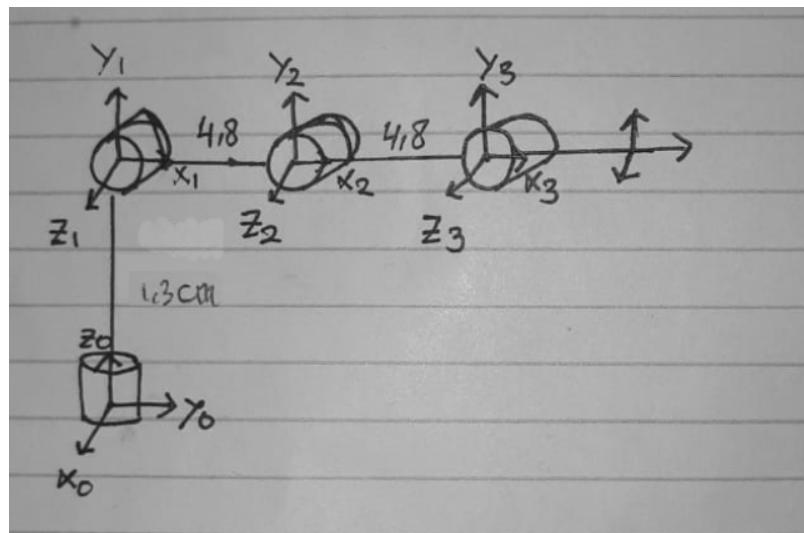




3. Tahap Pengukuran

3.1. Tahapan Pengukuran secara tertulis:

1. Memberi nomor untuk tiap joint dimulai dari nomor 1
2. Menggambar sumbu z untuk tiap-tiap joint, dengan mengetahui bahwa joint pada kasus lengan robot kali ini melibatkan joint revolute, dimana sumbu z sejajar dengan sumbu perputaran.
3. Menggambar sumbu koordinat pada base dengan aturan tangan kanan
4. Menentukan titik o, sumbu xi, dan sumbu yi, sesuai dengan prosedur dan melibatkan aturan tangan kanan



- Mengumpulkan parameter DH, termasuk a_i , d_i , α_i , dan θ_i , untuk setiap sendi dan link dalam robot, dengan melakukan pengukuran secara fisik antara tiap sendi dalam robot.

Link	a	d	α	θ
1	0 cm	5 cm	-90	-
2	4,8 cm	cm	-	-
3	4,8 cm	cm	-	-
4	9 cm	0	-	-

- Langkah selanjutnya adalah menyusun matriks homogen A untuk setiap joint, yang menggambarkan transformasi antara sistem koordinat sendi ke-i dan sendi ke-(i-1) menggunakan parameter DH yang sesuai.
- Terakhir, dengan mengalikan matriks homogen dari setiap sendi secara berurutan, kita dapat membentuk matriks homogen keseluruhan yang menggambarkan pergerakan dari titik awal hingga posisi end-effector dalam robot

$$A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_1 c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_1 s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & -c\theta_i & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

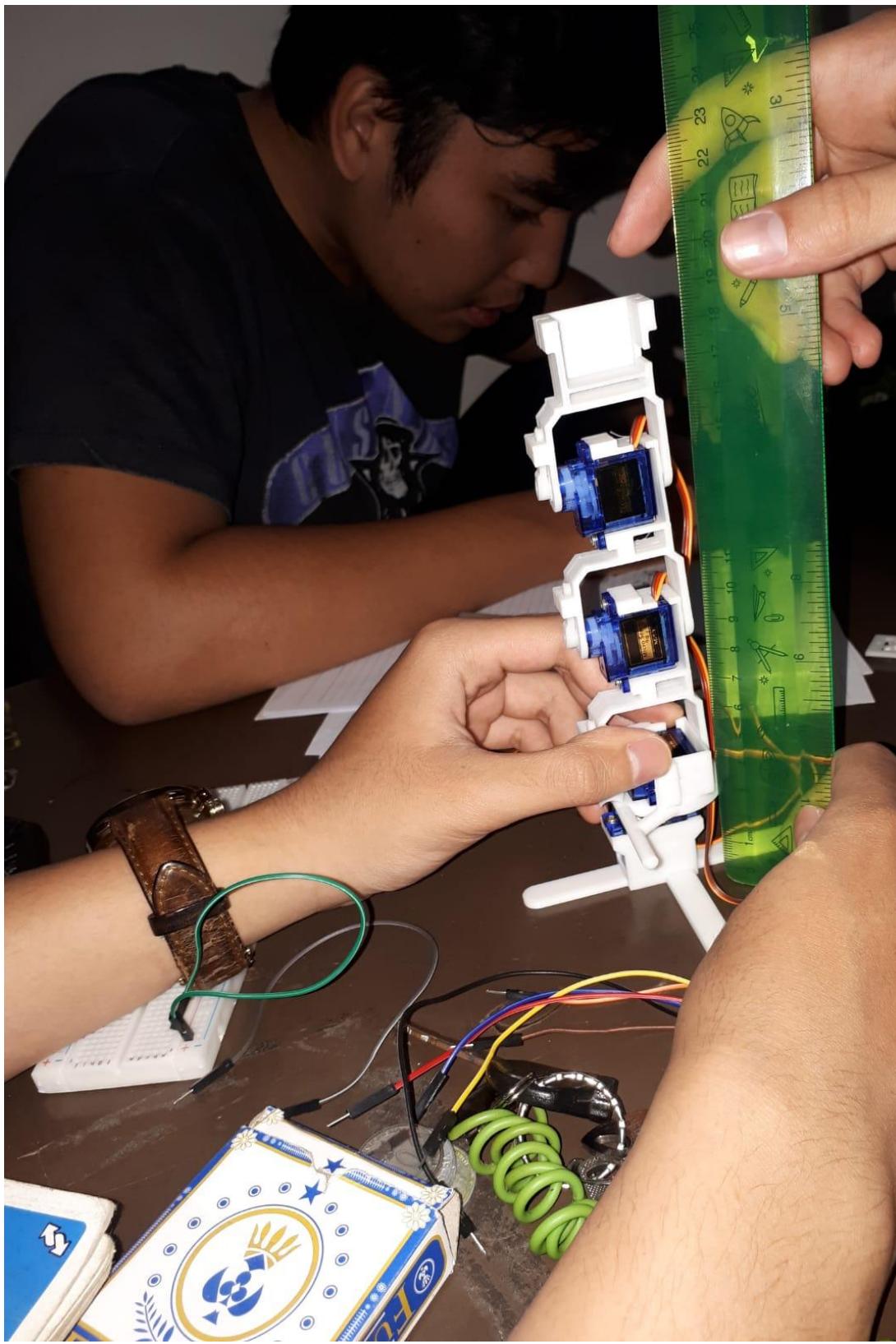
$$A_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 c(-90) & s\theta_1 c(-90) & 4,70 c\theta_1 \\ s\theta_1 & c\theta_1 c(-90) & -c\theta_1 c(-90) & 4,70 c\theta_1 \\ 0 & s(-90) & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c(-90 + \theta_2) & -s(-90 + \theta_2)c0 & s\theta_2 s0 & 4,8c(-90 + \theta_2) \\ s(-90 + \theta_2) & c(-90 + \theta_2)c0 & -c(-90 + \theta_2)s0 & 4,8c(-90 + \theta_2) \\ 0 & s0 & -c(-90 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

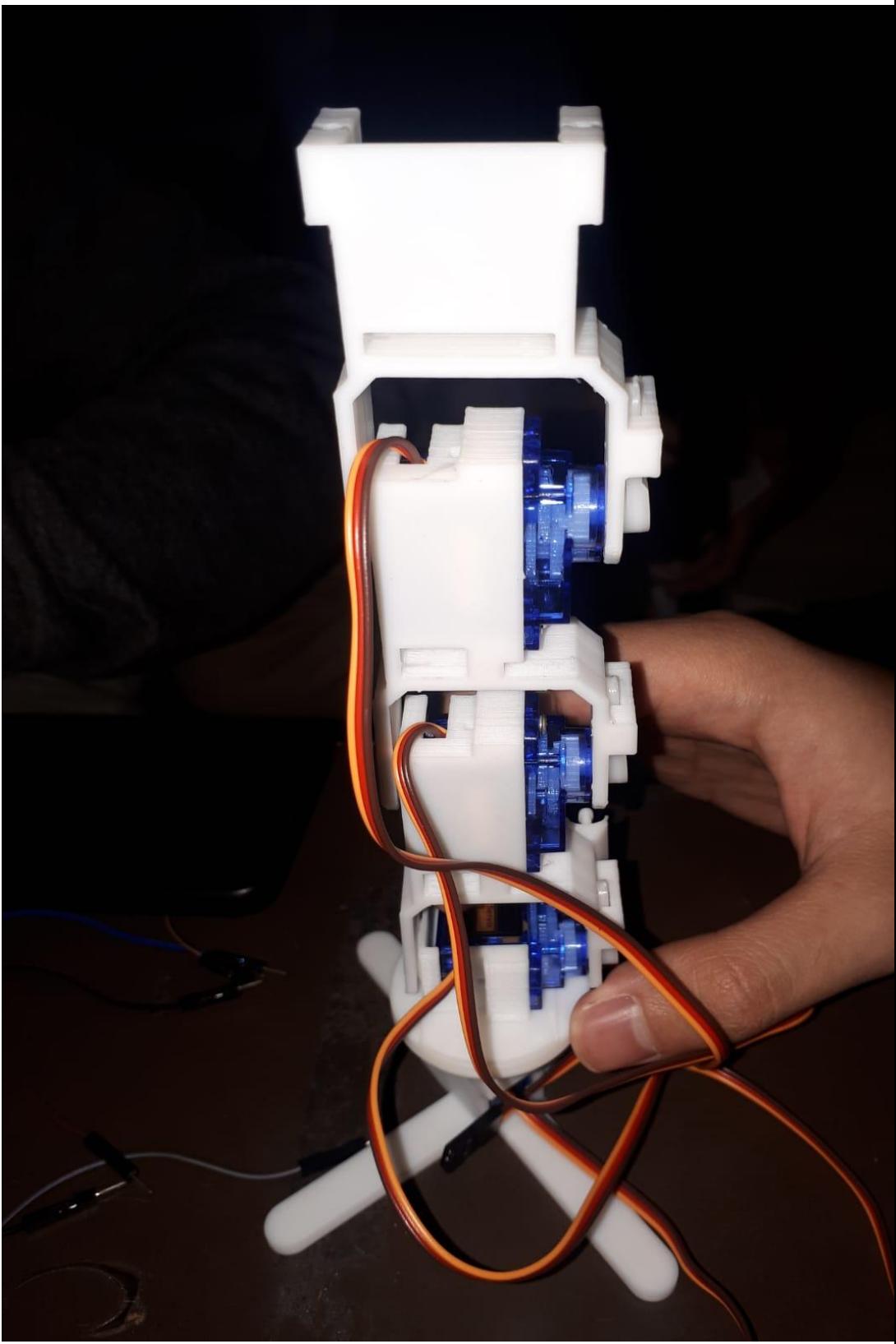
$$A_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 c0 & s\theta_3 s0 & 4,8c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 c0 & -c\theta_3 s0 & 4,8c\theta_3 \\ 0 & s0 & -c\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

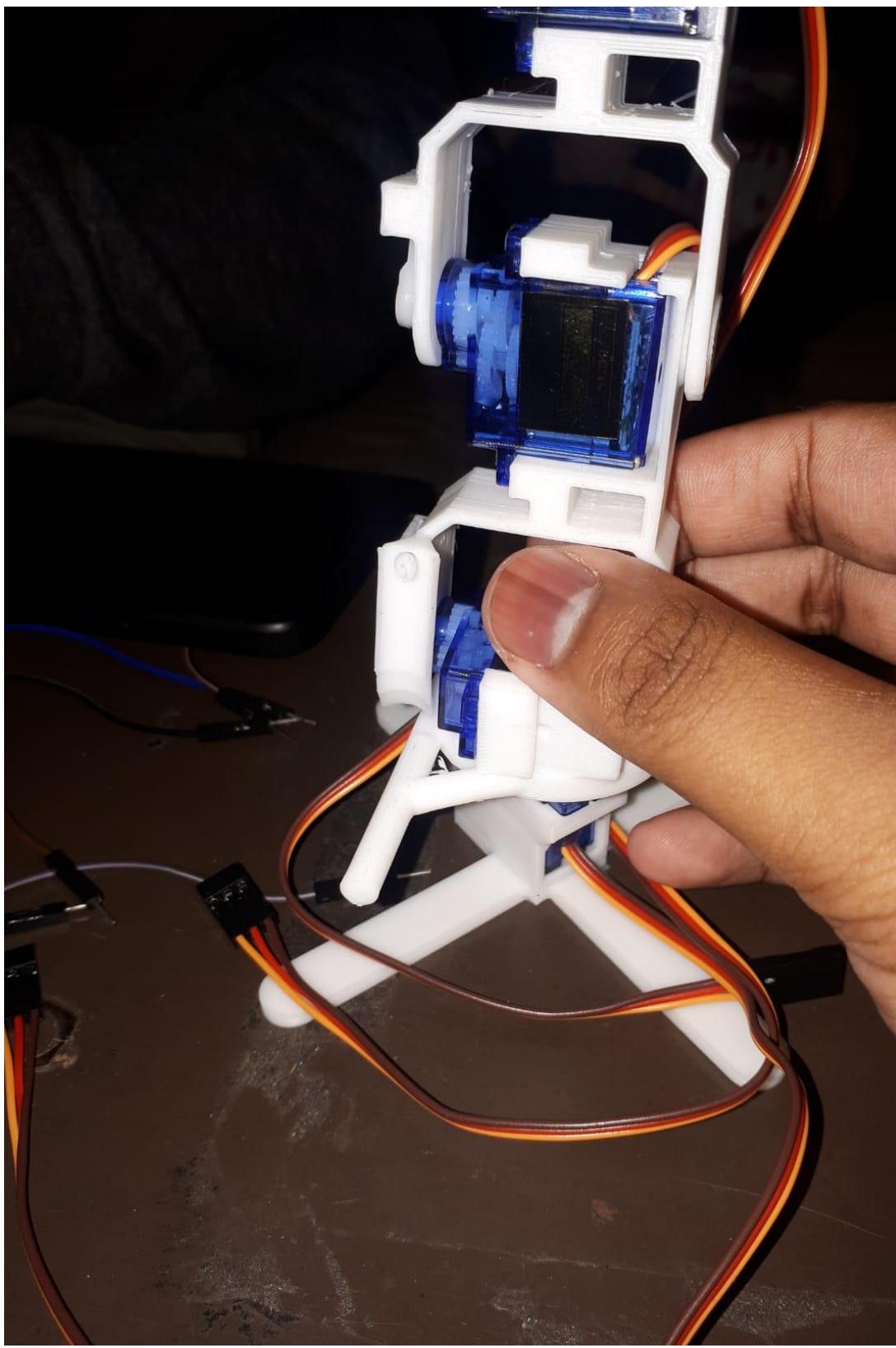
$$A_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 c0 & s\theta_4 s0 & 4,8c\theta_4 \\ s\theta_4 & c\theta_4 c0 & -c\theta_4 s0 & 4,8c\theta_4 \\ 0 & s0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2. Dokumentasi Hasil Kegiatan









4. Konversi DH

4.1. Dimensi Robot

Dimensi robot mengacu pada pengukuran geometri dan parameter fisik dari setiap komponen robot, termasuk panjang link, orientasi sendi, dan posisi relatif antar komponen tersebut. Pengukuran dimensi ini dilakukan untuk memahami secara detail struktur fisik robot, yang merupakan aspek penting dalam pengembangan, perancangan, dan pengoperasian robot. Informasi tentang dimensi robot memungkinkan perancang dan insinyur untuk merancang robot yang sesuai dengan spesifikasi, menjalankan konversi Denavit-Hartenberg (DH) yang akurat dalam model kinematika robot, memastikan pergerakan yang tepat, serta mendukung pemeliharaan dan perbaikan yang efisien dalam lingkungan industri, penelitian, dan aplikasi lainnya.

4.2. Konversi Denavit-Hartenberg

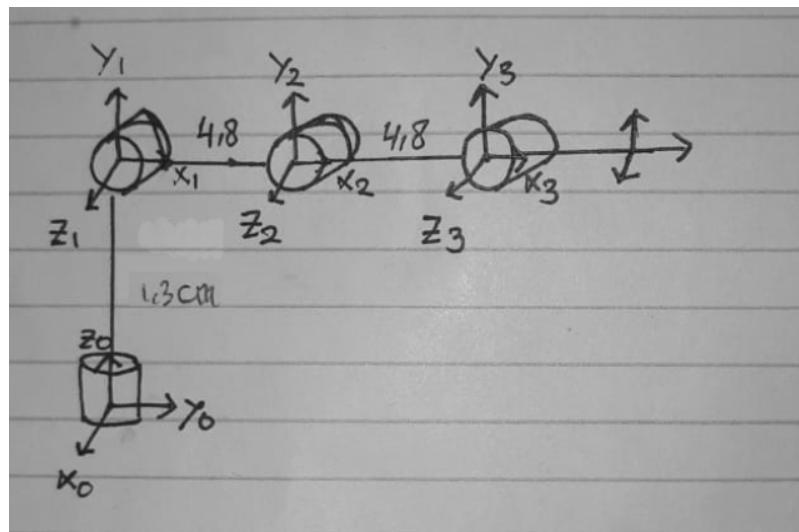
Konversi Denavit-Hartenberg (DH) adalah pendekatan matematis yang sangat penting dalam kinematika robot untuk menggambarkan pergerakan robot manipulator dalam ruang tiga dimensi. Salah satu aspek kunci dari konversi DH adalah kemampuannya untuk menentukan posisi atau koordinat akhir (end-effector) dari robot manipulator pada ruang tiga dimensi. Dengan mengumpulkan parameter geometri dan sudut rotasi dari setiap link dan sendi robot, konversi DH memungkinkan kita untuk secara akurat menghitung posisi relatif dan orientasi antar komponen robot, yang pada akhirnya membantu dalam menentukan posisi akhir alat kerja robot. Informasi ini sangat penting dalam perencanaan gerakan dan pengendalian robot untuk melakukan tugas-tugas seperti pengelasan, penanganan benda, atau pencetakan 3D, yang memerlukan presisi dalam pemosisian di ruang tiga dimensi.

Konversi DH melibatkan tiga tahapan penting yang secara kritis mempengaruhi hasil akhir. Pertama, langkah pertama adalah penggambaran sumbu, yang melibatkan penentuan sistem koordinat relatif untuk masing-masing sendi robot. Ini adalah langkah awal dalam memetakan koordinat dalam model DH. Tahap kedua melibatkan pembuatan tabel DH, yang menggambarkan parameter geometri, panjang link, dan sudut rotasi antara setiap link dan sendi. Tabel ini digunakan untuk menghitung matriks transformasi antar link, yang pada gilirannya memungkinkan kita untuk menggambarkan pergerakan robot secara sistematis. Tahap terakhir adalah melakukan perkalian matriks, di mana matriks transformasi dari setiap segmen robot dikalikan secara berurutan untuk menghasilkan matriks transformasi akhir yang menggambarkan pergerakan dari titik awal hingga end-effector robot. Dengan demikian, konversi DH adalah alat penting dalam analisis kinematika robot yang memungkinkan perencanaan dan pengendalian pergerakan robot dengan tingkat akurasi yang tinggi.

4.3. Prosedur Konversi DH

Tahapan Pengukuran:

1. Memberi nomor untuk tiap joint dimulai dari nomor 0
2. Menggambar sumbu z untuk tiap-tiap joint, dengan mengetahui bahwa joint pada kasus lengan robot kali ini melibatkan joint revolute, dimana sumbu z sejajar dengan sumbu perputaran.
3. Menggambar sumbu koordinat pada base dengan aturan tangan kanan
4. Menentukan titik o, sumbu xi, dan sumbu yi, sesuai dengan prosedur dan melibatkan aturan tangan kanan



5. Mengumpulkan parameter DH, termasuk a_i , d_i , α_i , dan θ_i , untuk setiap sendi dan link dalam robot, dengan melakukan pengukuran secara fisik antara tiap sendi dalam robot.

Link	a	d	α	θ
1	0 cm	5 cm	-90 derajat	θ_1
2	4,8 cm	0 cm	0 derajat	θ_2
3	4,8 cm	0 cm	0 derajat	θ_3
4	9 cm	0 cm	0 derajat	θ_4

6. Langkah selanjutnya adalah menyusun matriks homogen A untuk setiap joint, yang menggambarkan transformasi antara sistem koordinat sendi ke-i dan sendi ke-(i-1) menggunakan parameter DH yang sesuai.
7. Terakhir, dengan mengalikan matriks homogen dari setiap sendi secara berurutan, kita dapat membentuk matriks homogen keseluruhan yang menggambarkan pergerakan dari titik awal hingga posisi end-effector dalam robot

$$A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1,6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 4,8c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 4,8s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -\sin\theta_3 & s0 & 4,8c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 4,8s\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -\sin\theta_4 & s0 & 9c\theta_4 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 9s\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^0 = A_1 A_2 A_3 A_4$$

$$x = 0.96\cos(\theta_1)\cos(\theta_2) - 0.96\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\sin(\theta_3) + \cos(\theta_1)\cos(\theta_3)\sin(\theta_2)) - 0.96\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1)\sin(\theta_2)\sin(\theta_3) - \cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\cos(\theta_3)) + 0.96\cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\cos(\theta_3) - 0.96\cos(\theta_1)\cos(\theta_3)\sin(\theta_2)$$

$$y = 0.96\cos(\theta_2)\sin(\theta_1) - 0.96\cos(\theta_4)(\cos(\theta_2)\sin(\theta_1)\sin(\theta_3) + \cos(\theta_3)\sin(\theta_1)\sin(\theta_2)) - 0.96\cos(\theta_4)(\sin(\theta_1)\sin(\theta_2)\sin(\theta_3) - \cos(\theta_2)\cos(\theta_3)\sin(\theta_1)) - 0.96\cos(\theta_3)\sin(\theta_1)\sin(\theta_2) + 0.96\cos(\theta_2)\cos(\theta_3)\sin(\theta_1)$$

$$z = 1.6 - 0.96\cos(\theta_2)\cos(\theta_3) - 0.96\cos(\theta_3)\sin(\theta_2) - 0.96\cos(\theta_4)(\cos(\theta_2)\sin(\theta_3) + \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)) - 0.96\cos(\theta_4)(\cos(\theta_2)\cos(\theta_3) - \sin(\theta_2)\sin(\theta_3)) - 0.96\cos(\theta_2)$$

θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	x	y	z
0	90	60	30	4.3471	0	-16.2471
0	120	60	30	-2.7588	0	-13.6296
0	150	45	45	-6.6366	0	-9.9364
45	90	45	30	5.7941	5.7941	-17.6168
90	120	60	60	0	0.5354	-10.3354

5. Kalibrasi Servo

5.1. Kalibrasi Servo

Kalibrasi servo adalah proses yang diperlukan untuk memastikan bahwa perangkat servo dapat menggerakkan atau mengendalikan sistem dengan akurat sesuai dengan perintah yang diberikan. Ini melibatkan penyesuaian parameter internal perangkat servo, seperti pengukuran dan kompensasi kesalahan. Servo motor adalah komponen inti dalam sistem otomatisasi yang mengkonversi sinyal kontrol menjadi gerakan mekanis. Pengetahuan mendalam tentang servo motor, seperti jenis motor, tipe penggerak, dan karakteristiknya, sangat penting dalam kalibrasi servo. Ada beberapa metode yang digunakan dalam kalibrasi servo, termasuk kalibrasi otomatis dan manual. Kalibrasi otomatis biasanya melibatkan penggunaan perangkat lunak khusus, sementara kalibrasi manual melibatkan penyesuaian parameter servo secara langsung.

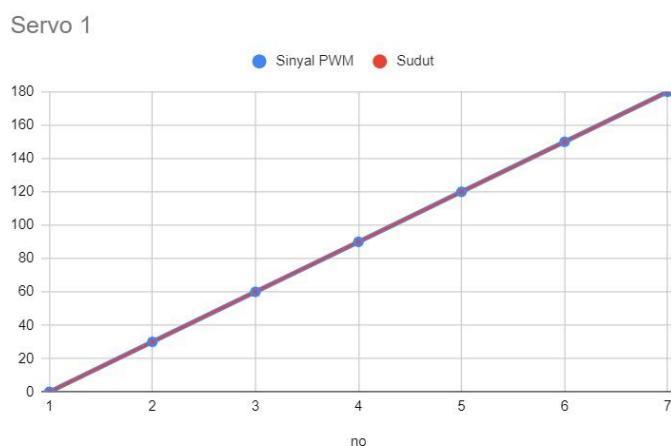
5.2. Prosedur Kalibrasi Servo

Berdasarkan sumbu koordinat yang telah ditetapkan atau digambar pada ::

1. Gerakkan servo pada tiap-tiap joint dan ukur sudut hasil pergerakan dari sinyal kendali/PWM yang dikirimkan menggunakan busur derajat. Lengkapi tabel berikut untuk masing-masing servo.
2. Mendokumentasikan proses pengukuran sudut servo. Catat sinyal kendali maksimal dan minimal dari setiap servo pada lengan robot tersebut.
3. Membuatlah grafik PWM vs sudut dari masing-masing servo. Hitunglah persamaan regresi dari setiap servo

Servo 1		
no	Sinyal PWM	Sudut
1	0	0
2	30	30
3	60	60
4	90	90
5	120	120
6	150	150
7	180	180

Tabel ini adalah tabel data yang diambil pada servo 1. Sinyal PWM merupakan sinyal yang kita masukkan pada arduino untuk mengatur pergerakan lengan. “Sudut” merupakan hasil pengukuran langsung menggunakan busur.

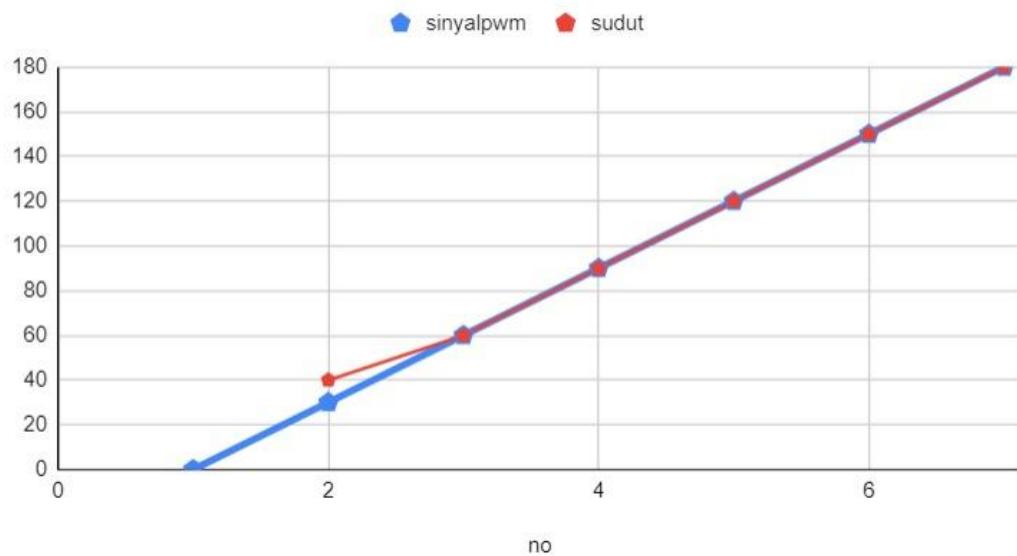


Grafik ini adalah hasil grafik dari tabel Servo 1 . Dapat dilihat dengan Servo 1, hasil PWM dan Sudut adalah sama.

Servo 2		
no	Sinyal PWM	Sudut
1	0	
2	30	40
3	60	60
4	90	90
5	120	120
6	150	150
7	180	180

Tabel yang ada di atas merupakan tabel data yang diambil pada servo 2. Sinyal PWM merupakan sinyal yang kita masukkan pada arduino untuk mengatur pergerakan lengan. "Sudut" merupakan hasil pengukuran langsung menggunakan busur. Dapat dilihat pada Sinyal PWM sama dengan 0, sudut tidak dapat dikalibrasi. Hal ini dikarenakan pada kerangka lengan yang dibeli, terdapat bagian dari kerangka tersebut yang menahan pergerakan lengan.

Servo 2

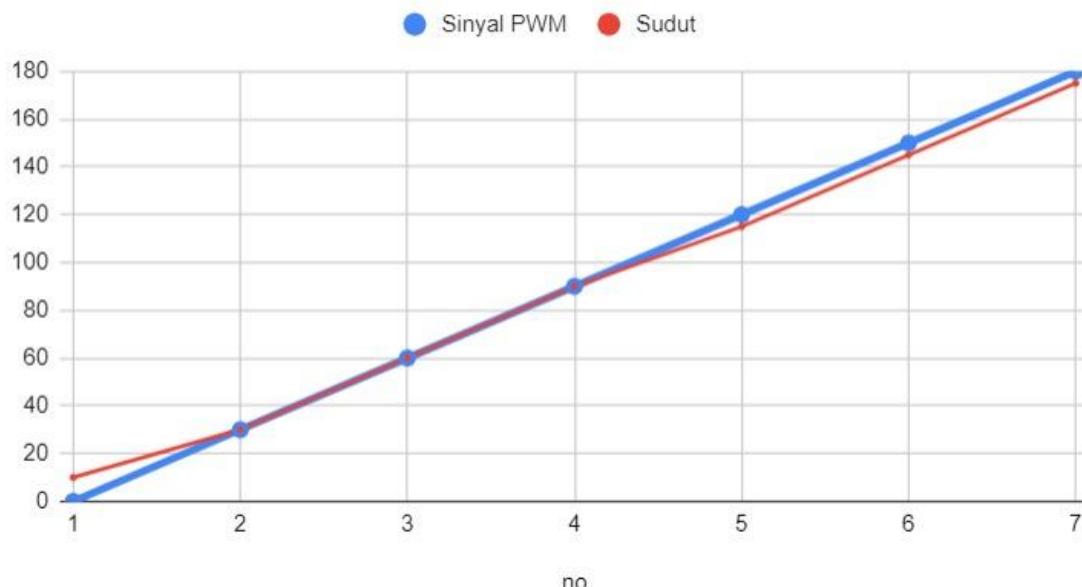


Pada grafik Servo 2 diatas, dapat kita lihat bahwa terjadi sedikit pergeseran pada surut 30.

Servo 3		
no	Sinyal PWM	Sudut
1	0	10
2	30	30
3	60	60
4	90	90
5	120	115
6	150	145
7	180	175

Tabel di atas merupakan tabel Servo 3, dengan hasil data yang sudah terkumpul. Dapat dilihat di beberapa derajat terjadi regresi antara Sinya PWM dan Sudut (hasil hitung langsung)

Servo 3



Hal yang serupa juga dapat kita lihat dari hasil grafik Servo 3, dimana terjadi beberapa regresi di derajat tertentu.

Servo 4		
no	Sinyal PWM	Sudut
1	0	0
2	30	30
3	60	60
4	90	90
5	120	110
6	150	140
7	180	170

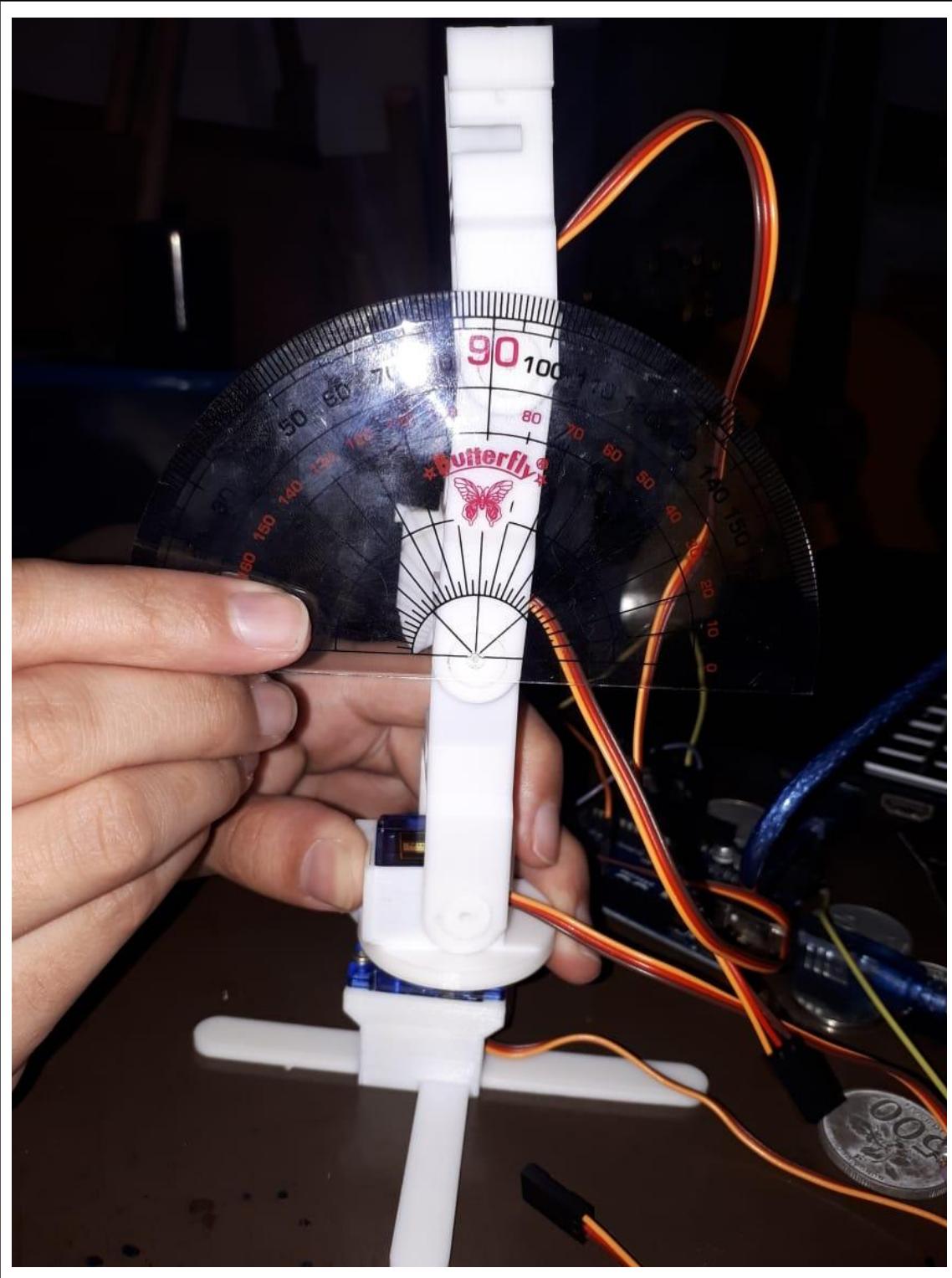
Tabel berikut merupakan tabel dari Servo 4 dengan hasil data yang sudah dikumpulkan sesuai dengan Sinyal PWMnya.

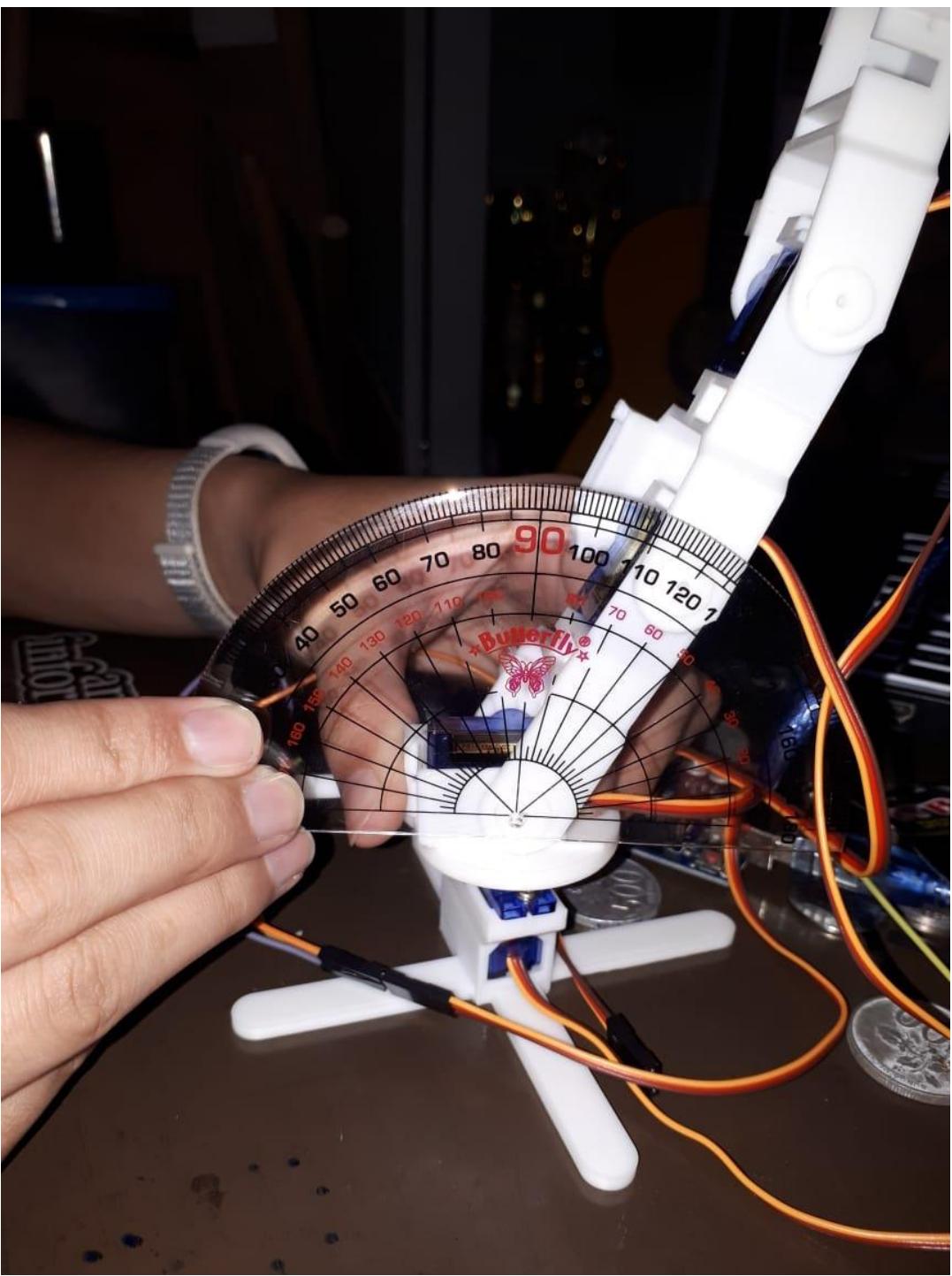
Servo 4

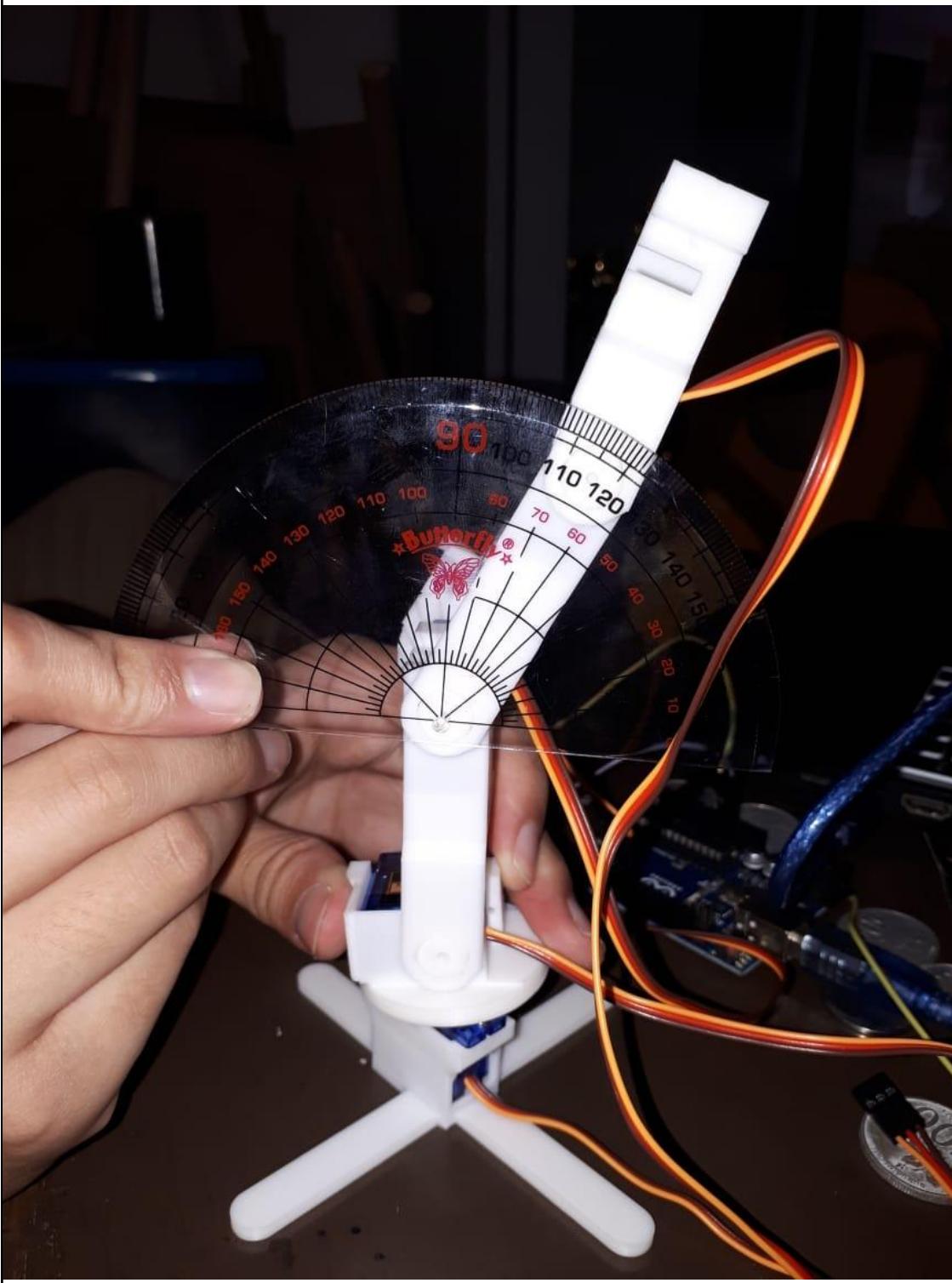


Grafik Servo 4, yang menunjukkan beberapa regresi antara Sinyal PWM dan Sudut yang cukup jauh.

5.3. Dokumentasi











6. Uji Kinematika Maju

6.1. Penjabaran Kode dan Penjelasannya

Berikut merupakan penjabaran kode dari matlab untuk mendapatkan perhitungan koordinat 3 dimensi sebagai pembanding dengan hasil titik dari end effector

$$A_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1,6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 4,8c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 4,8s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -\sin\theta_3 & s0 & 4,8c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 4,8c\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -\sin\theta_4 & s0 & 9c\theta_4 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 9c\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

No	HitungXYZ.m
	<pre> 1 syms theta_1 theta_2 theta_3 theta_4 2 M1 = [cosd(theta_4), -sind(theta_4), 0, 4.8*cosd(theta_4); %TETA 4 3 sind(theta_4), cosd(theta_4), 0, 4.8*cosd(theta_4); 4 0, 0, 1, 0; 5 0, 0, 0, 1]; 6 M2 = [cosd(theta_1), 0, 0, 0; %TETA 1 7 sind(theta_1), 0, 0, 0; 8 0, -1, 1, 1.6; 9 0, 0, 0, 1]; 10 M3 = [cosd(theta_2), -sind(theta_2), 0, 4.8*cosd(theta_2); %TETA 2 11 sind(theta_2), cosd(theta_2), 0, 4.8*cosd(theta_2); 12 0, 0, 1, 0; 13 0, 0, 0, 1]; 14 M4 = [cosd(theta_3), -sind(theta_3), 0, 4.8*cosd(theta_3); %TETA 3 15 sind(theta_3), cosd(theta_3), 0, 4.8*cosd(theta_3); 16 0, 0, 1, 0; 17 0, 0, 0, 1]; 18 19 result = M2 * M3 * M4 * M1; 20 21 disp(result) </pre>

Penjelasan

No	HitungXYZ.m
1	Menentukan variabel sebagai bentuk representasi sudut theta 1 hingga theta 4
2	Varibale M1 yakni memasukkan nilai dari theta 4 yang akan di uji ke dalam persamaan A4 (baris 2 - 5)
3	
4	
5	
6	Varibale M2 yakni memasukkan nilai dari theta 1 yang akan di uji ke dalam persamaan A1 (baris 6 - 9)
7	
8	
9	
10	Varibale M3 yakni memasukkan nilai dari theta 2 yang akan di uji ke dalam persamaan A2 (baris 10 - 13)
11	
12	
13	
14	Varibale M4 yakni memasukkan nilai dari theta 3 yang akan di uji ke dalam persamaan A3 (baris 14 - 17)
15	
16	
17	
18	
19	Variable results adalah variable yang menyimpan nilai dari hasil perkalian M2 dikali

20	dengan M3 dikali dengan M4 dan dikali dengan M1
21	Menampilkan hasil keluaran dari results

Untuk menggunakan kode matlab, perlu diperhatikan dari variabel theta_1 sampai theta_4 sebagai sudut teta di setiap joint yang ingin di uji keakuratan yang akan diimplementasikan langsung di robot

Berikut adalah hasil perhitungan dari beberapa sudut yang dijadikan sebagai sudut uji coba, dengan catatan pada sudut θ2 terdapat penambahan derajat sebesar -180

θ1	θ2	θ3	θ4	x	y	z
0	90	60	30	13.13	0	12.5
0	120	60	30	15.12	0	4.93
0	150	45	45	13.55	0	-1.41
45	90	45	30	8.51	8.51	15.81
90	120	60	60	0	11.90	1.70

Berikut adalah hasil perhitungan dari beberapa sudut yang dijadikan sebagai sudut uji coba, dengan catatan pada sudut θ2 tanpa adanya penambahan derajat sebesar -90

θ1	θ2	θ3	θ4	x	y	z
0	90	60	30	-13.60471	0	2.0529
0	120	60	30	-13.4727	0	10.9158
0	150	45	45	-13.2934	0	14.7935
45	90	45	30	-10.1942	-10.1942	-1.7941
90	120	60	60	0	-10.1785	7.6215

Untuk implementasi kerangka robot, diperlukan perangkat mikrokontroler dalam menguji keakurasiannya. Kelompok kami menggunakan Arduino Uno R3 sebagai perangkat komputasi dalam mengukur pergerakan servo. Berikut adalah kode yang kami gunakan

No	HitungXYZ.ino
	<pre> 1 #include <Servo.h> 2 3 Servo myservo1; // create servo object to control a servo 4 Servo myservo2; 5 Servo myservo3; 6 Servo myservo4; 7 // Recommended PWM GPIO pins on the ESP32 include 8 2,4,12-19,21-23,25-27,32-33 9 int servol = 3; 10 int servo2 = 5; 11 int servo3 = 6; 12 int servo4 = 9; 13 14 void setup() { 15 16 myservo1.attach(servol); 17 myservo2.attach(servo2); 18 myservo3.attach(servo3); 19 myservo4.attach(servo4); 20 } 21 22 void loop() { 23 24 int val1 = 0; 25 int val2 = 90; 26 int val3 = 60; 27 int val4 = 30; 28 29 myservo1.write(0); 30 myservo2.write(90); 31 myservo3.write(0); 32 myservo4.write(0); 33 34 for (int i = 0; i < val1; i++) { 35 myservo1.write(i); 36 delay(100); 37 } 38 39 for (int i = 90; i < val2; i++) { 40 myservo2.write(i); 41 delay(100); 42 } 43 44 for (int i = 0; i < val3; i++) { 45 myservo3.write(i); 46 delay(100); 47 } 48 49 for (int i = 0; i < val4; i++) { 50 myservo4.write(i); 51 delay(100); 52 } 53 myservo1.detach(); </pre>

54	myservo2.detach();
55	myservo3.detach();
56	myservo4.detach();
57	delay(100000);
58	}

Penjelasan

No	HitungXYZ.ino
1	
2	
3	Definisi variable servo dengan nama myservo1
4	Definisi variable servo dengan nama myservo2
5	Definisi variable servo dengan nama myservo3
6	Definisi variable servo dengan nama myservo4
7	
8	Mendefinisikan pin PWM (Pulse Width Modulation) untuk servo ke-1.
9	Mendefinisikan pin PWM untuk servo ke-2.
10	Mendefinisikan pin PWM untuk servo ke-3.
11	Mendefinisikan pin PWM untuk servo ke-4.
12	
13	Awal dari fungsi setup() yang dieksekusi sekali pada awal program.
14	
15	Menghubungkan servo ke-1 (myservo1) dengan pin PWM servo1.
16	Menghubungkan servo ke-2 (myservo2) dengan pin PWM servo2.
17	Menghubungkan servo ke-3 (myservo3) dengan pin PWM servo3.
18	Menghubungkan servo ke-4 (myservo4) dengan pin PWM servo4.
19	
20	
21	Akhir dari fungsi setup().
22	
23	Mendefinisikan variabel val1 dengan nilai 0.
24	Mendefinisikan variabel val2 dengan nilai 90.
25	Mendefinisikan variabel val3 dengan nilai 60.
26	Mendefinisikan variabel val4 dengan nilai 30.
27	
28	Mengatur posisi servo ke-1 (myservo1) ke sudut 0 derajat.

29	Mengatur posisi servo ke-2 (myservo2) ke sudut 90 derajat.
30	Mengatur posisi servo ke-3 (myservo3) ke sudut 0 derajat.
31	Mengatur posisi servo ke-4 (myservo4) ke sudut 0 derajat.
32	
33	Memulai loop untuk menggerakkan servo ke-1 dari 0 derajat ke val1.
34	Mengubah posisi servo ke-1 menjadi i.
35	Menunda eksekusi selama 100 milidetik.
36	
37	
38	Memulai loop untuk menggerakkan servo ke-1 dari 90 derajat ke val2.
39	Mengubah posisi servo ke-2 menjadi i.
40	Menunda eksekusi selama 100 milidetik.
41	
42	
43	Memulai loop untuk menggerakkan servo ke-3 dari 0 derajat ke val3.
44	Mengubah posisi servo ke-3 menjadi i.
45	Menunda eksekusi selama 100 milidetik.
46	
47	
48	Memulai loop untuk menggerakkan servo ke-4 dari 0 derajat ke val4.
49	Mengubah posisi servo ke-4 menjadi i.
50	Menunda eksekusi selama 100 milidetik.
51	
52	Membuang koneksi servo ke-1 untuk menghentikan gerakan.
53	Membuang koneksi servo ke-2.
54	Membuang koneksi servo ke-3.
55	Membuang koneksi servo ke-4.
56	Menunda eksekusi selama 100000 milidetik (100 detik).
57	
58	

6.2. Analisis Pergerakan Robot

Berikut merupakan hasil uji coba servo yang dijalankan pada suatu derajat tertentu di setiap 4 joint

Berikut Uji ukur pada robot yang diimplementasi pada servo dengan menggunakan arduino

θ1	θ2	θ3	θ4	x	y	z

0	90	60	30	14.2	0	15.5
0	120	60	30	9.5	0	16.4
0	150	45	45	16.8	0	2
45	90	45	30	8.3	8.7	17.5
90	120	60	30	0	15.3	9.3

Berikut adalah hasil perhitungan dari beberapa sudut yang dijadikan sebagai sudut uji coba, dengan catatan pada sudut θ_2 terdapat penambahan derajat sebesar -90

θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	x	y	z
0	90	60	30	4.3471	0	-16.2471
0	120	60	30	-2.7588	0	-13.6296
0	150	45	45	-6.6366	0	-9.9364
45	90	45	30	5.7941	5.7941	-17.6168
90	120	60	60	0	0.5354	-10.3354

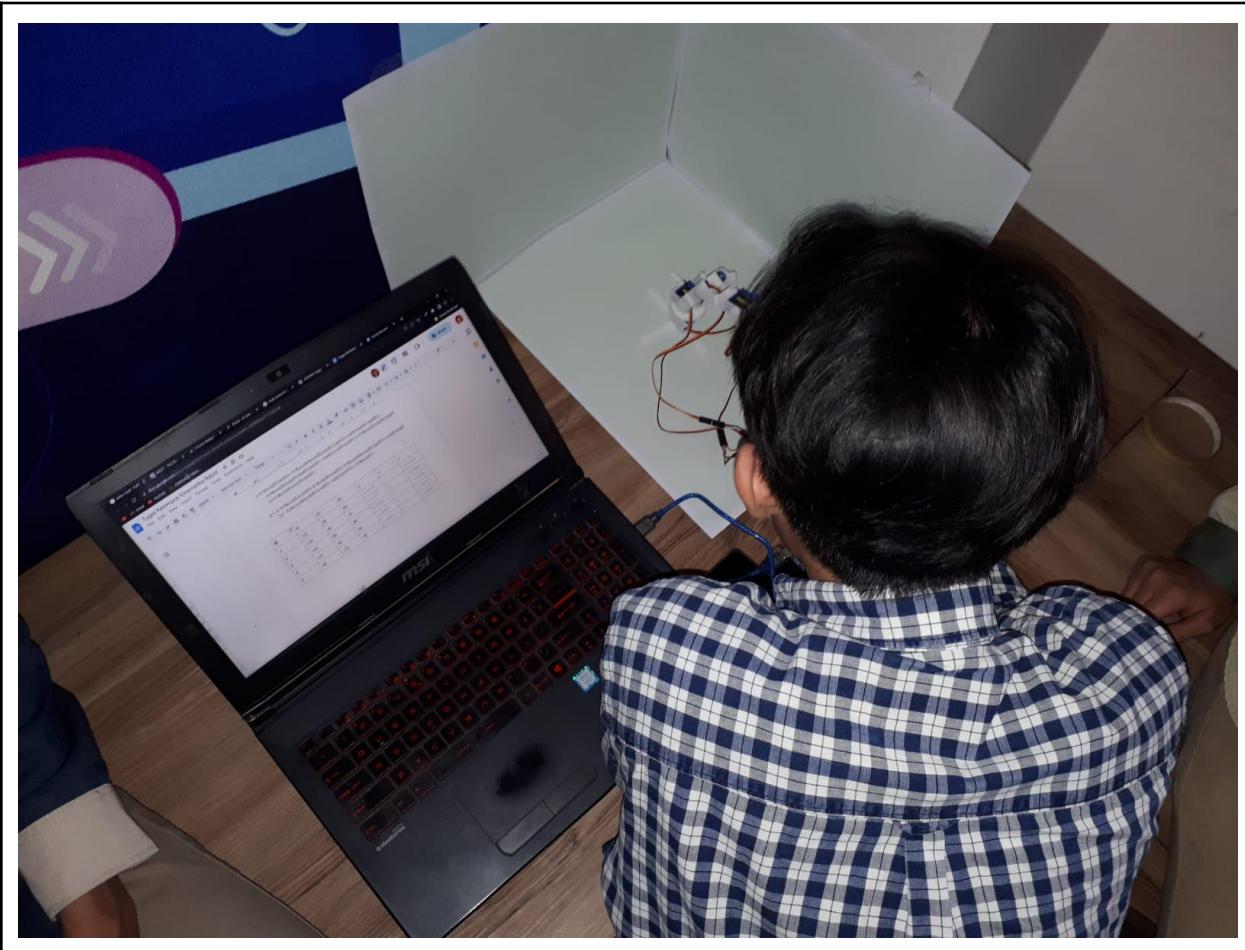
Berikut adalah hasil perhitungan dari beberapa sudut yang dijadikan sebagai sudut uji coba, dengan catatan pada sudut θ_2 tanpa adanya penambahan derajat sebesar -90

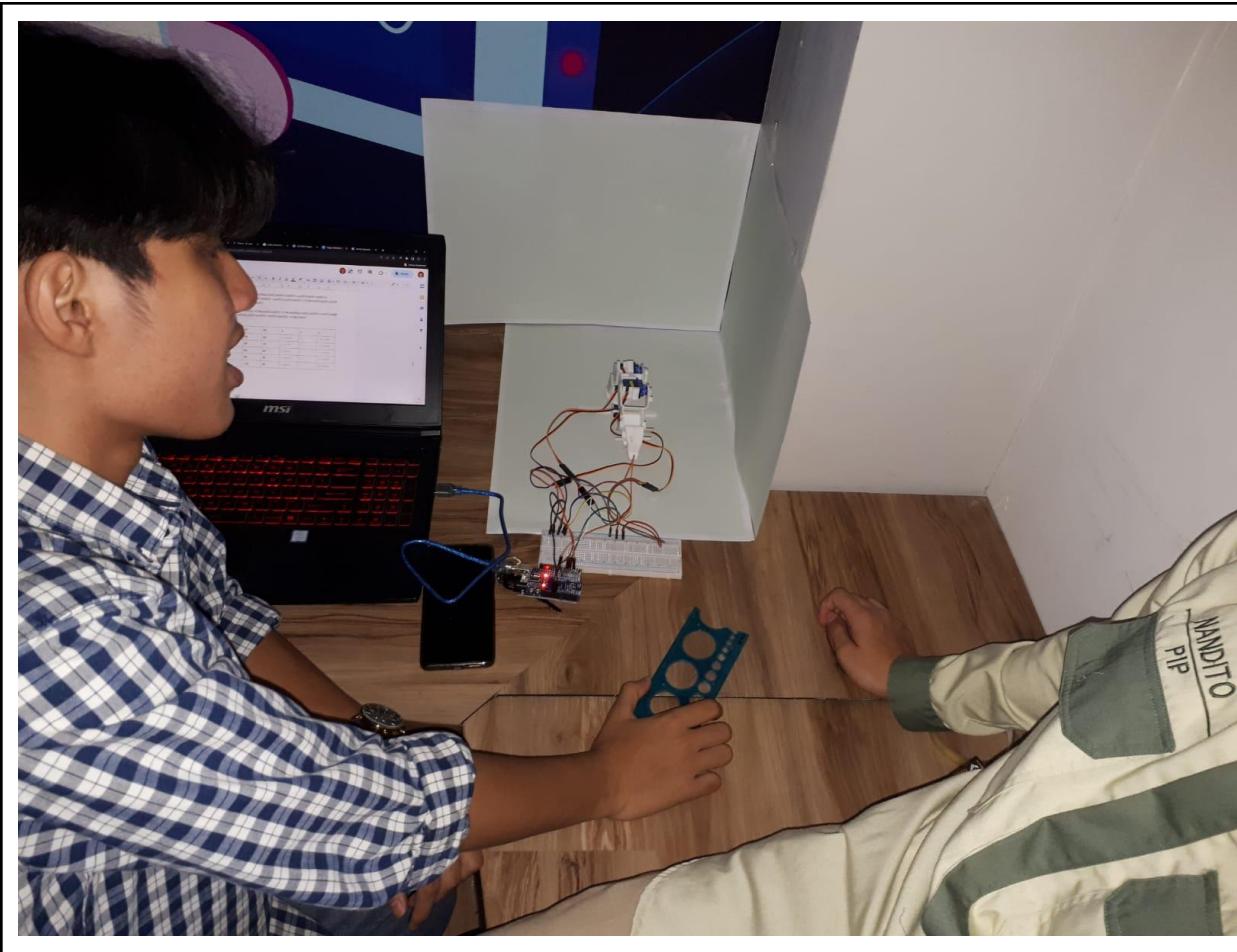
θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	x	y	z
0	90	60	30	-13.60471	0	2.0529
0	120	60	30	-13.4727	0	10.9158
0	150	45	45	-13.2934	0	14.7935
45	90	45	30	-10.1942	-10.1942	-1.7941
90	120	60	60	0	-10.1785	7.6215

Setelah dilakukan perhitungan analisis melalui konversi DH dan pengukuran secara langsung, didapatkan nilai koordinat 3 dimensi dari kedua metode tersebut. Setelah dibandingkan didapatkan dua buah kesimpulan, antara perbandingan pengukuran fisik dengan perhitungan konversi DH:

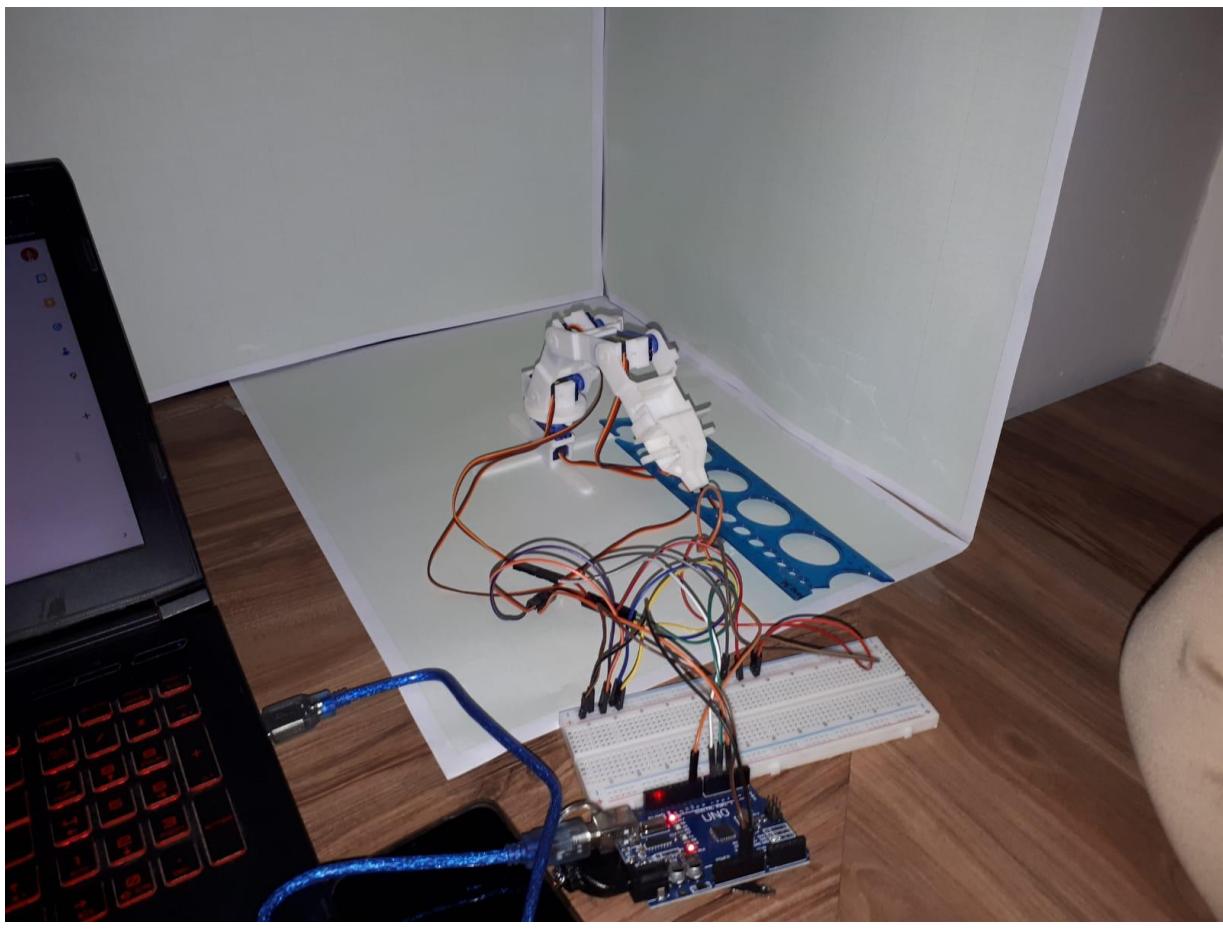
1. Bila dibandingkan antara pengukuran fisik dan perhitungan konversi DH dengan catatan pada sudut θ_2 terdapat penambahan derajat sebesar -90° , didapatkan adanya perbedaan hasil pengukuran yang besar antara kedua hasil.
2. Bila dibandingkan antara pengukuran fisik dan perhitungan konversi DH dengan catatan pada sudut θ_2 tanpa adanya penambahan derajat sebesar -90° , didapatkan adanya kemiripan hasil pengukuran antara kedua hasil.

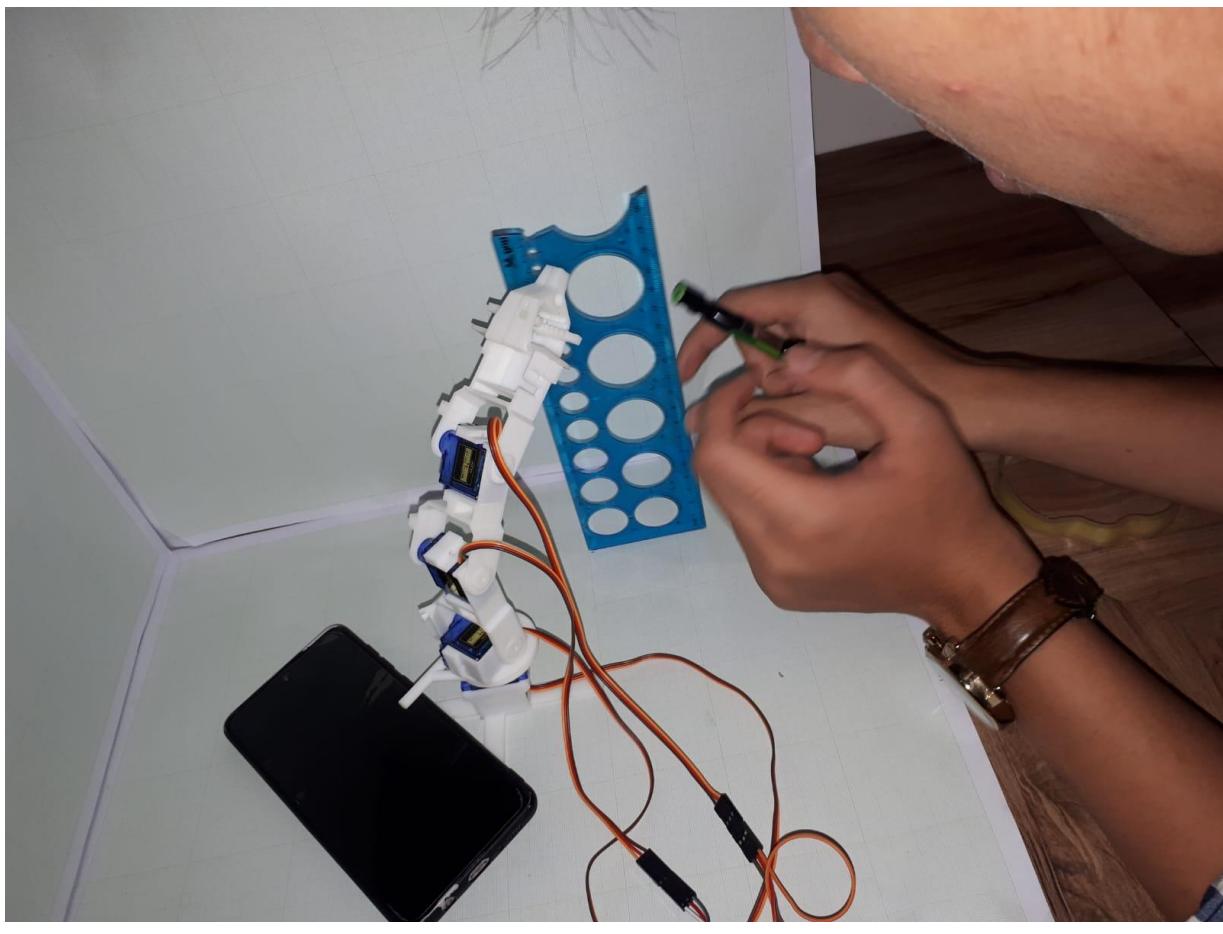
6.3. Dokumentasi





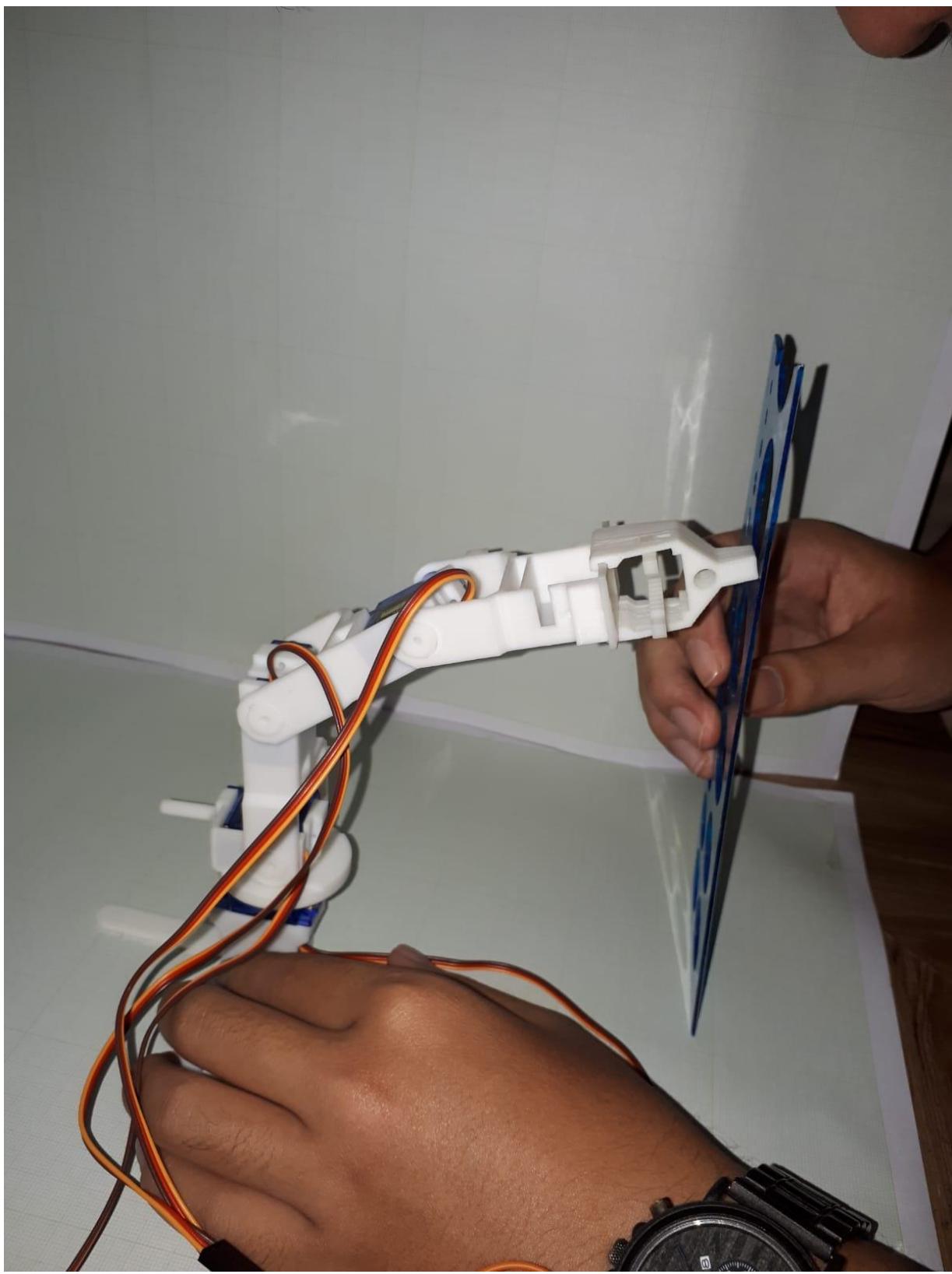








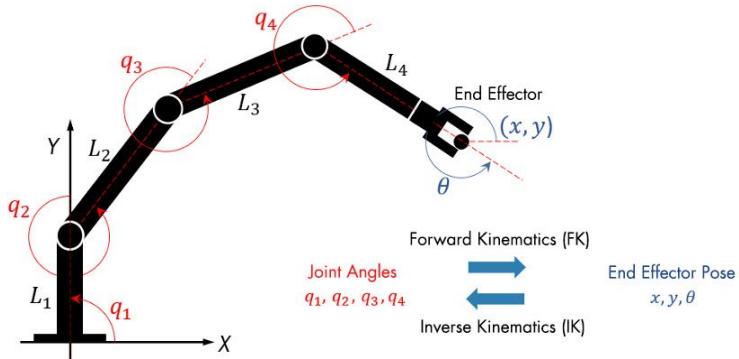




7. Inverse Kinematic

7.1. Dasar Teori Inverse Kinematic

Kinematika invers adalah sebuah proses penentuan nilai parameter tiap-tiap joint (d, θ) jika posisi akhir dari end effector ditentukan. Kinematika invers adalah konsep dasar dalam animasi komputer dan robotika yang melibatkan perhitungan parameter sendi yang diperlukan untuk menempatkan ujung rantai kinematika, seperti robot, pada posisi dan orientasi tertentu. Metode untuk menyelesaikan kinematika invers sering menggunakan matriks yang disebut matriks Jacobian, yang terdiri dari semua turunan parsial orde pertama yang berasal dari model kinematika.



Pada robotika, kinematika invers sangat penting untuk menentukan parameter sendi yang memberikan konfigurasi yang diinginkan untuk setiap *end-effector*. Hal ini penting karena tugas robot dilakukan dengan *end-effector*, sedangkan upaya kontrol diterapkan pada sendi-sendinya. Kinematika invers juga penting untuk perencanaan gerakan, yang melibatkan penentuan pergerakan robot sehingga efektor akhirnya bergerak dari konfigurasi awal ke konfigurasi yang diinginkan. Kesimpulannya, prinsip dasar kinematika invers melibatkan penggunaan proses matematis untuk menghitung parameter sendi yang diperlukan untuk menempatkan ujung rantai kinematika, dan metode ini sangat penting dalam animasi komputer, robotika, dan perencanaan gerakan.

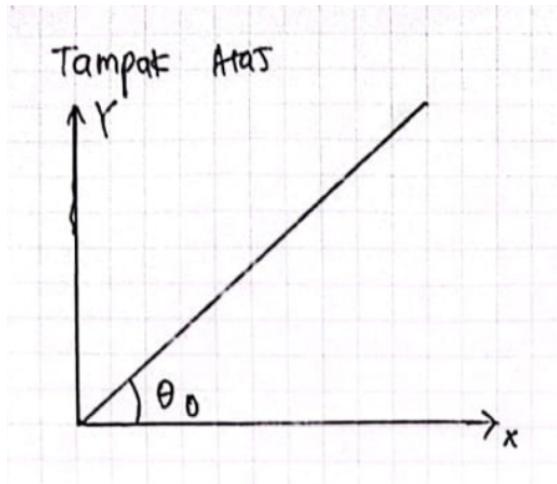
7.2. Prosedur Perhitungan Inverse Kinematic

1. Definisikan Koordinat:
 - Tentukan sistem koordinat untuk lengan robot, seperti sumbu x, y, dan z. Koordinat ini dapat diatur berdasarkan orientasi dan konvensi yang diinginkan.
2. Interpretasikan Pergerakan Robot:

- Tentukan cara pergerakan robot akan diinterpretasikan dalam bentuk koordinat kartesian (x, y, z). Posisi dan orientasi akhir yang diinginkan untuk lengan robot harus dijelaskan dalam sistem koordinat yang telah ditetapkan.
3. Identifikasi Jumlah Sendi:
- Hitung jumlah sendi atau derajat kebebasan pada lengan robot. Ini akan mempengaruhi jumlah variabel yang perlu dihitung dalam perhitungan Inverse Kinematics.
4. Definisikan Panjang Segmen:
- Tentukan panjang segmen setiap sendi (link) dari lengan robot. Informasi ini diperlukan untuk menghitung panjang segitiga pada langkah selanjutnya.
5. Hitung Panjang Segitiga:
- Gunakan rumus Pythagoras untuk menghitung panjang segitiga pada setiap tingkat lengan robot. Hal ini dilakukan dengan mengukur jarak antara sendi atau joint dan memperhitungkan panjang segmen yang telah ditentukan.
6. Hitung Sudut Sendi:
- Gunakan rumus trigonometri (seperti cosinus dan sinus) untuk menghitung sudut sendi pada setiap tingkat lengan robot. Ini melibatkan invers trigonometri untuk menentukan sudut berdasarkan panjang segitiga yang dihitung sebelumnya.
7. Verifikasi dan Uji:
- Lakukan verifikasi hasil perhitungan dengan simulasi atau uji coba pada robot fisik. Pastikan bahwa robot dapat mencapai posisi dan orientasi yang diinginkan sesuai dengan input yang diberikan.
8. Optimasi dan Pemeliharaan:
- Lakukan optimasi jika diperlukan untuk meningkatkan kecepatan atau akurasi perhitungan Inverse Kinematics. Pemeliharaan sistem dan validasi berkala juga diperlukan untuk memastikan kinerja yang baik.

Prosedur ini memberikan gambaran umum, dan perlu dicatat bahwa implementasi Inverse Kinematics dapat bervariasi tergantung pada arsitektur robot dan kebutuhan spesifik aplikasi.

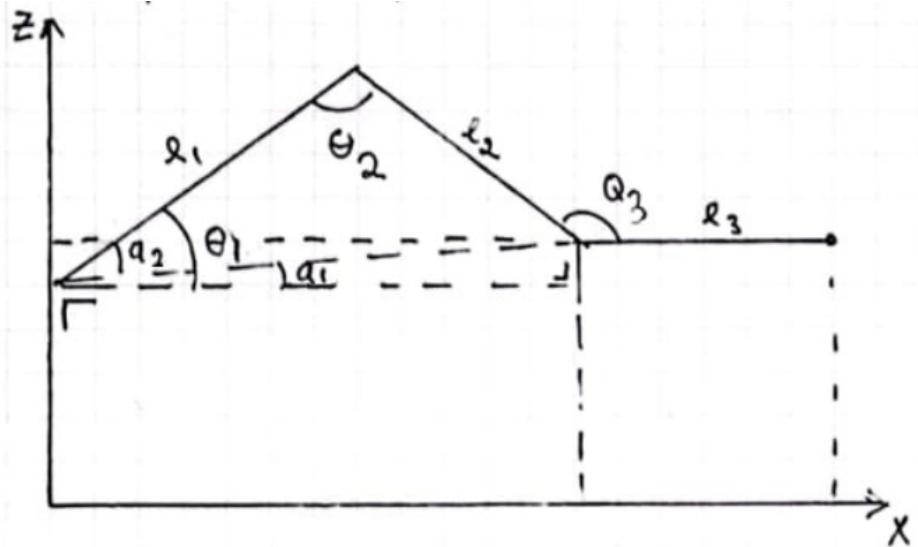
Tampak dari Atas



Dari gambar diatas, dengan mengaplikasikan trigonometri dasar dapat disimpulkan untuk sudut θ_1 , yaitu berikut

$$\theta_0 = \tan^{-1}(y/x)$$

Tampak dari Samping



Untuk membantu mencari sudut-sudut di atas adanya membutuhkan garis bantu yaitu garis a dan c yang masing-masing ditarik dari titik awal garis l1.

Membuat garis bantu a dari titik awal l1 menuju titik akhir l2, yang merupakan penjumlahan garis l1 dan l2.

Mengetahui garis l3 tegak lurus terhadap sumbu x maka didapat garis d,

$$d = x - l_4$$

Dapat dicari juga untuk nilai z offset yaitu nilai antara nilai x dengan titik awal l1 di sumbu z

$$z_{\text{offset}} = z - l_1$$

Maka dapat disimpulkan untuk garis bantu a

$$a^2 = d^2 + z_{\text{offset}}^2$$

$$a = \sqrt{(d^2 + z_{\text{offset}}^2)}$$

Membagi sudut θ_1 menjadi dua sudut yaitu alpha 1 dan alpha 2

$$\theta_1 = \alpha_1 + \alpha_2$$

Dapat dicari untuk nilai α_1

$$\cos(\alpha_1) = d/a$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1}(d/a)$$

Mencari untuk sudut α_2 menggunakan l3, l2 dan a

$$\alpha_2 = \cos^{-1}((l_1^2 + a^2 - l_2^2)/(2l_1a))$$

Untuk mencari sudut θ_2 menggunakan l2, l1, dan a

$$\theta_2 = \cos^{-1}((l_2^2 + l_1^2 - a^2)/(2l_2l_1))$$

Dan untuk θ_3 menggunakan α_2 , θ_2 , dan α_1

$$\theta_3 = 180 - ((180 - (\alpha_2 + \theta_2)) - \alpha_1)$$

Penutup

Dalam mengakhiri makalah ini, kita menunjukkan betapa pentingnya pemahaman tentang pengukuran dimensi robot dengan konversi Denavit-Hartenberg (DH) dalam dunia robotika. Pengukuran dimensi adalah langkah dasar yang membantu kita memahami geometri dan parameter fisik setiap komponen robot, termasuk panjang link, sudut sendi, dan posisi relatif antara link-link tersebut. Dalam konteks konversi DH, pemahaman yang akurat tentang parameter ini menjadi pondasi yang kuat dalam merancang, mengendalikan, dan memelihara robot dengan efisien. Tanpa pengukuran dimensi yang tepat, robot mungkin tidak akan bergerak sesuai yang diharapkan dan performanya dapat terganggu.

Dengan mengetahui rumus konversi DH, kita bisa melakukan perhitungan kinematika maju. Kinematika maju dilakukan untuk mengetahui koordinat 3 dimensi yang merepresentasikan posisi end effector dari lengan robot. Setiap koordinat yang diuji merujuk pada kemampuan di tiap tiap servo dalam menggerakan lengan robot dengan menentukan derajat di setiap joint.

Penentuan uji coba koordinat 3 dimensi juga diketahui dengan cara kinematika balik. Kinematika balik dilakukan dalam rangka uji coba pada kinematika maju untuk menyamakan nilai derajat di setiap jointnya sebagai eksperimen keakuratan lengan robot dalam percobaan.

Makalah ini juga menciptakan jembatan antara teori dan praktik dalam dunia robotika. Dengan penerapan lengan robot dalam pengukuran dimensi robot, kita memiliki alat yang kuat untuk membantu mengembangkan solusi robotika yang lebih canggih dan aplikasi yang lebih beragam. Dengan begitu, pembelajaran dan pemahaman konsep ini merupakan langkah pertama menuju masa depan robotika yang semakin inovatif dan terintegrasi dalam berbagai aspek kehidupan kita.

Referensi

Defra Nugraha, I., Putu, D., & Santika, M. (2021). *Pendekatan Geometri untuk Perhitungan Inverse Kinematics Gerakan Lengan Robot 4 Derajat Kebebasan*. 5(1).

Pembagian Kerja

Bryan Nicolas Simangunsong	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mencari referensi arsitektur robot lengan 2. Mendeskripsikan sistem untuk perakitan modul robot 3. Melakukan analisa pengukuran di setiap joint 4. Melakukan kalibrasi di servo 1 5. Melakukan perkalian konversi DH di matlab 6. Membuat kode untuk forward kinematics 7. Membuat kodingan pada robot lengann dalam inverse kinematic
Duta Kukuh Pribadi	<ol style="list-style-type: none"> 1. Menuliskan deskripsi dari spesifikasi robot lengan 2. Menspesifikasikan arsitektur robot yang akan dirakit 3. Melakukan analisa pengukuran di setiap joint 4. Melakukan kalibrasi di servo 2 5. Melakukan perkalian konversi DH di matlab 6. Melakukan pengamatan modul secara langsung dengan mengukur hasil data lapangan 7. Melakukan pengukuran uji banding
Fawwaz Anrico Purnomo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mencari data sheet yang diperlukan dalam membuat arsitektur robot lengan 2. Membuat blok diagram dan skematik untuk perakitan modul robot 3. Mencatat dan menelaah hasil panjang alpha, d , nilai a dan nilai theta 4. Melakukan persamaan forward kinematics 5. Melakukan uji akurasi koordinat 3 dimensi di forward kinematics 6. Melakukan kalibrasi di servo 3 7. Menentukan rumus di matlab mengenai inverse kinematic sebagai uji banding dengan data lapangan
Felix Baringin Samosir	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mencari referensi tautan pembelian untuk membuat model robot lengan 2. Merakit barang robot lengan secara langsung dari skematik yang sudah di desain 3. Mendokumentasikan tahapan pengukuran di setiap joint 4. Melakukan kalibrasi di servo 4 5. Melakukan pemasukan nilai pengukuran ke matrix DH

	<ol style="list-style-type: none"> 6. Membuat acuan dari inversi kinematic sebagai pembanding menggunakan matlab 7. Membuat persamaan inverse kinematic dari forward kinematic yang telah di sediakan
Nandito Yuda Samosir	<ol style="list-style-type: none"> 1. Menelaah hal hal yang berkaitan arsitektur robot lengan meliputi blok diagram 2. Mendokumentasikan hasil dari penggerjaan perakitan modul robot lengan 3. Melakukan evaluasi pengukuran berdasarkan referensi yang dijadikan acuan 4. Mencatat semua hasil kalibrasi dan dituangkan secara tertulis ke laporan 5. Menuliskan persamaan matriks DH di setiap joint 6. Melekaukan uji random sampling derajat theta di setiap joint 7. Melakukan uji keabsahan forward kinematics dengan inverse kinematic