

PERANCANGAN SISTEM KENDALI PERGERAKAN ARM MANIPULATOR BERBASIS SENSOR *INERTIAL MEASUREMENT UNIT* (IMU) DAN SENSOR *FLEX*

Arief Saifuddin^{*)}, Sumardi, and Darjat

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)E-mail: ariefsaifuddin124@gmail.com}

Abstrak

Pada zaman yang sudah maju ini banyak pekerjaan manusia yang sudah mulai dikerjakan oleh robot. Robot digunakan untuk mempermudah pekerjaan yang tidak dapat dilakukan oleh manusia, seperti memindahkan suatu barang pada tempat yang berbahaya. Salah satu robot yang diciptakan adalah robot yang memiliki bentuk seperti lengan manusia yang disebut dengan arm manipulator. Arm manipulator adalah robot yang memiliki kemampuan bergerak seperti lengan manusia. Arm manipulator terdiri atas lengan (link), sendi (joint), dan ujung (end-effector) yang saling terhubung. Penelitian ini merancang sistem kendali arm manipulator melalui pergerakan sensor inertial measurement unit (IMU) dan sensor flex. Sensor ini dipasang pada sebuah sarung tangan sehingga arm manipulator bergerak sesuai dengan gesture tangan operator. Dalam penelitian ini, arm manipulator dapat bergerak dengan error pergerakan pada sendi body sebesar $2,353^\circ$, sendi shoulder sebesar $2,857^\circ$, sendi elbow sebesar $2,25^\circ$, sendi wrist sebesar $2,2^\circ$, dan sendi gripper sebesar $1,75^\circ$. Hasil pengujian secara keseluruhan arm manipulator mampu memindahkan benda pada koordinat tertentu.

Kata Kunci : robot, arm manipulator, inertial measurement unit (IMU), sensor flex

Abstract

In this advanced era a lot of human work has begun in the work of robots. Robots are used to facilitate work that can not be done by humans, such as moving an item in a dangerous place. One of the robots created is a robot that has a shape like a human arm called the arm manipulator. Arm manipulator is a robot that has the ability to move like a human arm. The manipulator arm consists of joint, link, and end-effector. This research designs an arm control system manipulator through inertial measurement unit (IMU) and flex sensor. The sensor is mounted on a glove so that the arm manipulator moves according to the operator's hand gesture. In this study, the arm manipulator can move with a movement error in the body joints of 2.353° , shoulder joints of 2.857° , elbow joints of 2.25° , wrist joints of 2.2° , and gripper joints of 1.75° . The results of the overall testing arm manipulator able to move objects in certain coordinates.

Keyword: robot, arm manipulator, inertial measurement unit (IMU), sensor flex

1. Pendahuluan

Pada zaman yang sudah maju ini banyak pekerjaan manusia yang sudah mulai dikerjakan oleh robot. Robot digunakan untuk mempermudah pekerjaan yang tidak dapat dilakukan oleh manusia, seperti memindahkan suatu barang pada tempat yang berbahaya. Salah satu robot yang diciptakan adalah robot yang memiliki bentuk seperti lengan manusia yang disebut dengan *arm manipulator*.

Arm manipulator adalah robot yang memiliki kemampuan bergerak seperti lengan manusia. Robot ini sering digunakan dalam bidang industri seperti robot lengan pemindah barang dan pemilah barang [1], robot lengan *cartesian space trajectory planning* [2], dan ada juga yang

digunakan pada bidang kedokteran seperti robot lengan *Dental Light* [3]. Bentuk robot yang diaplikasikan mempunyai konfigurasi yang berbeda-beda tergantung dari tingkat kesulit tugas yang akan dikerjakan. Salah satu bentuk robot yang sering dipakai adalah bentuk robot lengan *anthropomorphic* [4]. Bentuk robot lengan ini mempunyai keunggulan fleksibilitas daerah kerja daam 3 dimensi ruang sehingga sangat cocok untuk diaplikasikan.

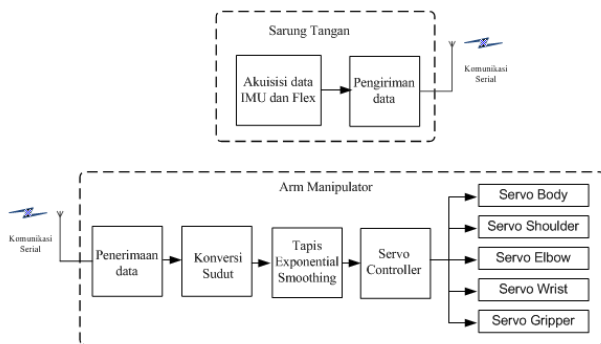
Arm manipulator dapat bergerak dengan suatu sistem pergerakan yang dilakukan oleh instruksi dari operator manusia. Pergerakan *arm manipulator* melalui masukan sudut-sudut pada setiap sendinya. Sensor dan tombol tertentu biasanya digunakan untuk memasukkan sudut-

sudut pada sendi robot sehingga robot dapat bergerak sesuai keinginan dari operator.

Dalam penelitian ini akan dirancang suatu robot *arm manipulator* yang dikendalikan melalui pergerakan sensor *inertial measurement unit* (IMU) dan sensor *flex*. Sensor ini dipasang pada sarung tangan sehingga dengan pergerakan tertentu oleh tangan operator, robot *arm manipulator* dapat bergerak sesuai keinginan.

2. Metode

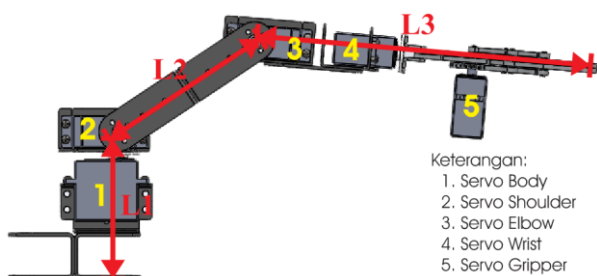
Robot *arm manipulator* yang dirancang memiliki 5 derajat kebebasan. Sarung tangan digunakan untuk meletakkan sensor-sensor. Hasil bacaan sensor kemudian diolah untuk menentukan besar sudut yang dikeluarkan oleh sendi *arm manipulator* sehingga dapat mengubah kordinat dari *end effector*. Gambar 1 merupakan diagram blok sistem secara umum.



Gambar 1. Diagram blok sistem.

2.1. Perancangan Perangkat Keras

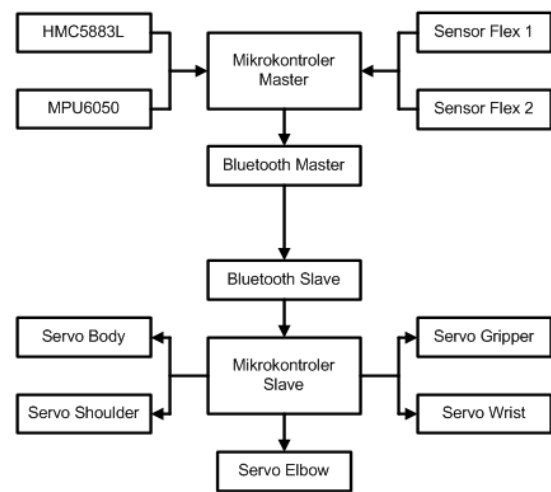
Robot *arm manipulator* ini memiliki spesifikasi mekanik dengan panjang *link* 1 (L1) 95 mm, *link* 2 (L2) 105 mm, dan *link* 3 (L3) 205 mm. Dari spesifikasi diatas, robot dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Desain mekanik.

Dalam rangkaian elektronik terdapat 2 buah mikrokontroler yaitu mikrokontroler *master* dan mikrokontroler *slave*. Mikrokontroler master terdapat pada rangkaian sarung tangan sedangkan mikrokontroler slave

terdapat pada rangkaian *arm manipulator*. Mikrokontroler master terhubung dengan sensor MPU6050, sensor HMC5883L dan sensor *flex*. Mikrokontroler master bertugas membaca data dari sensor-sensor yang kemudian dikirim ke mikrokontroler slave. Mikrokontroler slave terhubung dengan 5 buah motor servo. Mikrokontroler slave bertugas sebagai penerima data dari mikrokontroler master dan *servo controller*. komunikasi kedua mikrokontroler ini menggunakan komunikasi tanpa kabel. Tabel 1 merupakan alokasi *port* pada rangkain sarung tangan. Tabel 2 merupakan alokasi *port* pada rangkain *arm manipulator*.



Gambar 3. Rangkaian elektronik.

Tabel 1. Alokasi penggunaan *port* pada sarung tangan.

No	Komponen	Alokasi Port Mikrokontroler
1	Sensor Flex 1	PC0 (ADC0)
2	Sensor Flex 2	PC1 (ADC1)
3	Modul Bluetooth HC-05	Rx → PD1 (Tx) Tx → PD0 (Rx)
5	Sensor MPU6050	SCL → PC4 (SCL) SDA → PC5 (SDA)
6	Sensor HMC5883L	SCL → PB0 (SCL) SDA → PB1 (SDA)

Tabel 2. Alokasi penggunaan *port* pada *arm manipulator*.

No	Komponen	Alokasi Port Mikrokontroler
1	Modul Bluetooth HC-05	Rx → PD1 (Tx) Tx → PD0 (Rx)
2	Servo Body	PA0
3	Servo Shoulder	PA1
4	Servo Elbow	PA2
5	Servo Wrist	PA3
6	Servo Gripper	PA4

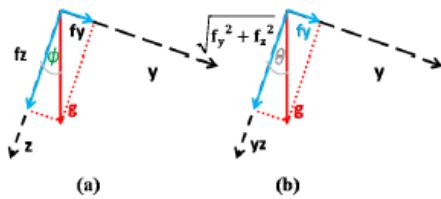
2.2. Pembacaan Sensor IMU

Inertial measurement unit (IMU) terdiri atas sensor giroskop, akselerometer dan magnetometer [5]. Sensor ini mengukur sudut orientasi dengan karakteristik yang

berbeda-beda. Sensor giroskop memiliki karakteristik yang baik ketika benda bergerak atau dalam kondisi dinamis, sedangkan sensor akselerometer justru lebih baik ketika kondisi diam atau statis. Sensor giroskop mampu mengukur sudut orientasi di ketiga sumbu. Akselerometer mampu mengukur sudut *roll* dan *pitch* sedangkan magnetometer dapat mengukur sudut *yaw* [6].

2.2.1. Sudut Orientasi dengan Sensor Akselerometer

Sensor akselerometer digunakan untuk menghitung sudut *pitch* dan *roll* pada benda. Pembentukan sudut *roll* dan *pitch* ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pembentukan sudut akselerometer.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \phi \\ -\cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dimana f_x, f_y, f_z adalah percepatan pada sumbu x, y, dan z. θ adalah sudut *roll*. Φ adalah sumbu *pitch* dan g adalah besar nilai percepatan gravitasi. Sehingga didapatkan.

$$\frac{f_y}{f_z} = \frac{-g \cos \theta \sin \phi}{-g \cos \theta \cos \phi} \quad (2)$$

$$\frac{f_y}{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}} = \frac{-g \sin \theta}{\sqrt{g^2 \cos^2 \theta (\sin^2 \phi + \cos^2 \phi)}} \quad (3)$$

Dengan penyederhanaan persamaan diatas maka didapatkan.

$$\tan \phi = \frac{f_y}{f_z}, \tan \theta = \frac{-f_x}{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}} \quad (4)$$

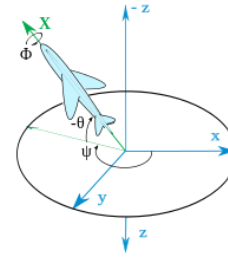
Maka didapatkan nilai θ dan Φ .

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{f_y}{f_z} \right), \theta = \tan^{-1} \left(\frac{-f_x}{\sqrt{f_y^2 + f_z^2}} \right) \quad (5)$$

2.2.2. Sudut Orientasi dengan Sensor Giroskop

Kecepatan sudut benda yang diukur menggunakan sensor giroskop memiliki sumbu acuan badan (dilambangkan dengan p, q, dan r). Data giroskop perlu diubah sesuai dengan rotasi *euler angles* yang memiliki sumbu acuan bumi. Hal ini dapat dilakukan dengan mengalikan matriks rotasi sumbu *roll, pitch* dan *yaw* dengan urutan gerak

tertentu. Sumbu koordinat *pitch, roll* dan *yaw* dapat dilihat pada [7].



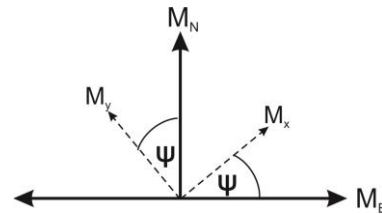
Gambar 5. Sumbu koordinat *roll, pitch* dan *yaw*.

Persamaan *euler angle* adalah sebagai berikut, dimana ϕ adalah kecepatan sudut *pitch*, θ adalah kecepatan sudut *roll*, ψ adalah kecepatan sudut *yaw*.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2.3. Sudut Orientasi dengan Sensor Magnetometer

Magnetometer adalah peralatan elektronik yang berguna untuk mengukur kekuatan dari medan magnet. Adanya medan magnet bumi yang berasal dari utara membuat sensor magnetometer dapat digunakan untuk mengukur sudut terhadap arah utara bumi. Hubungan antara medan vektor magnet bumi komponen utara (M_N) dan komponen timur (M_E) dengan besar pembacaan sensor terhadap sumbu X sensor (M_x) dan sumbu Y sensor (M_y) [8].



Gambar 6. Pembentukan sudut magnetometer.

$$\begin{bmatrix} M_y \\ M_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_N \\ M_E \end{bmatrix} \quad (7)$$

Vektor medan magnet bumi yang dipecah ke masing-masing sumbu dengan sumbu Y mengarah pada arah utara mengakibatkan vektor medan magnet bumi ke arah timur sama dengan nol ($M_E = 0$).

$$\begin{bmatrix} M_y \\ M_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \times M_N \\ \sin \psi \times M_N \end{bmatrix} \quad (8)$$

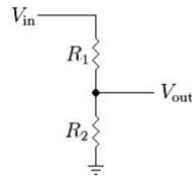
$$\psi = \text{atan} \left(\frac{M_x}{M_y} \right) \quad (9)$$

2.3. Pembacaan Sensor Flex

Sensor *flex* adalah sensor yang berfungsi untuk mendeteksi suatu kelengkungan. Prinsip kerjanya sama seperti

potensio yaitu resistor variabel. Sensor *flex* apabila semakin melengkung maka nilai resistansinya akan bertambah. Rangkaian pembagi tegangan digunakan untuk membaca nilai tegangan dari sensor *flex*.

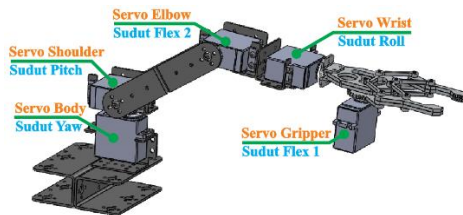
$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (10)$$



Gambar 7. Rangkaian pembagi tegangan.

2.4. Perancangan Sistem Kendali Pergerakan Arm manipulator

Metode gerak adalah metode bagaimana *arm manipulator* dalam menggerakkan *end effector* ke posisi tertentu atau koordinat tertentu. Pada sistem kendali pergerakan *arm manipulator* ini, sensor-sensor berada pada tangan untuk memberikan sudut-sudut yang akan menggerakkan posisi *end effector* sesuai keinginan operator.

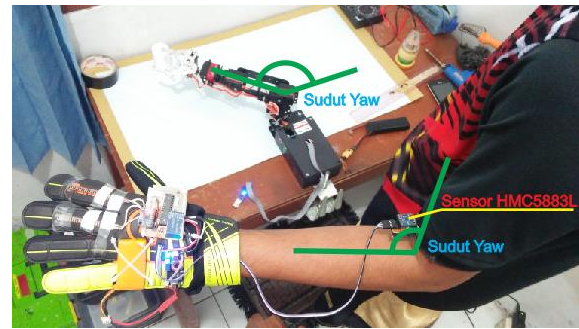


Gambar 8. Masukan sudut ke masing-masing sendi.

Sensor IMU memiliki keluaran nilai *pitch*, *roll*, *yaw* ditambah dengan 2 sensor *flex* sehingga terdapat 5 keluaran sensor. Nilai *yaw* digunakan untuk menggerakkan servo *body*, nilai *pitch* digunakan untuk menggerakkan servo *shoulder*, nilai *roll* digunakan untuk menggerakkan servo *wrist*, nilai sensor *flex* 2 digunakan untuk menggerakkan servo *elbow* dan nilai sensor *flex* 1 digunakan untuk menggerakkan *gripper*. Gambar 8 menunjukkan ilustrasinya.

2.4.1. Pergerakan Servo Body

Gambar 9 menunjukkan pembentukan sudut *yaw*. Pergerakan servo *body* berdasarkan perputaran bahu ke kiri dan kekanan. Pergerakan ini membentuk sudut *yaw* (ψ). Pergerakan ini memiliki jangkauan 0° sampai 180° . Sensor HMC5883L dipasang pada lengan bagian atas untuk menghindari pergerakan *roll* (θ) dan *pitch* (ϕ) yang mengakibatkan pembacaan tidak akurat.



Gambar 9. Pembentukan sudut *yaw*.

2.4.2. Pergerakan Servo Shoulder

Pergerakan servo *shoulder* berdasarkan pergerakan telapak tangan dari mendatar keatas dan kebawah. Pergerakan ini membentuk sudut *pitch* (θ). Pergerakan ini memiliki jangkauan 0° sampai 60° . Sensor MPU6050 berada pada punggung tangan. Gambar 10 menunjukkan pembentukan sudut *pitch*.



Gambar 10. Pembentukan sudut *pitch*.

2.4.3. Pergerakan Servo Elbow

Pergerakan servo *elbow* berdasarkan pergerakan jari tengah dari lurus sampai menekuk 90° . Pergerakan ini memiliki jangkauan 0° sampai 30° . Gambar 11 menunjukkan pembentukan sudut dari sensor *flex* 2.

2.4.4. Pergerakan Servo Wrist

Pergerakan servo *wrist* berdasarkan perputaran telapak tangan searah jarum jam dari mendatar. Pergerakan ini membentuk sudut *roll* (ϕ). Pergerakan ini memiliki jangkauan 0° sampai 90° . Sensor MPU6050 berada pada punggung tangan. Gambar 12 menunjukkan pembentukan sudut *roll*.



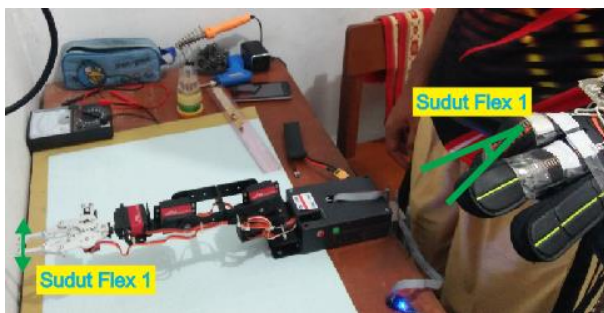
Gambar 11. Pembentukan sudut *flex 2*.



Gambar 12. Pembentukan sudut *roll*.

2.4.5. Pergerakan Servo Gripper

Pergerakan servo *gripper* berdasarkan pergerakan jari telunjuk dari lurus sampai menekuk 90°. Pergerakan ini memiliki jangkauan 0 mm (tertutup) sampai 10 mm (terbuka). Gambar 13 menunjukkan pembentukan sudut *flex*.



Gambar 13. Pembentukan sudut *flex 1*.

3. Hasil dan Analisa

3.1. Pengukuran Sudut *Roll*, *Pitch* dan *Yaw*

Pengukuran sensor *inertial measurement unit* (IMU) dilakukan dengan cara memberikan variasi nilai sudut pada sudut orientasi *roll*, *pitch* dan *yaw*. Robot tidak diberikan kontroler untuk mendapatkan data sudut yang sama seperti referensi yang diberikan. Pengukuran ini dilakukan dengan 5 iterasi percobaan yang kemudian dicari rata-ratanya.

Pada pengukuran ini, variasi sudut *roll* adalah 0°, 30°, dan 60°.

Tabel 3. Pengukuran sudut *roll*.

No	Pengujian (°)		
	0	30	60
1	-0,02	30,29	60,04
2	-0,01	30,28	60,05
3	0	30,3	60,03
4	-0,03	30,31	60,06
5	-0,04	30,27	60,01
Rata - rata	-0,02	30,29	60,04

Dari Tabel 3 dapat diketahui bahwa pada pengujian sudut 0° memiliki rata - rata nilai sebesar -0,02°, pengujian sudut 30° memiliki rata – rata nilai sebesar 30,29° dan pengujian 60° memiliki rata – rata nilai sebesar 60,04°.

Tabel 4. Pengukuran sudut *pitch*.

No	Pengujian (°)		
	0	30	60
1	0,01	30,22	60,12
2	0,02	30,23	60,13
3	0,03	30,24	60,14
4	0,04	30,19	60,15
5	0,03	30,18	60,13
Rata - rata	0,03	30,21	60,13

Dari hasil pengukuran dapat diketahui bahwa pada pengujian sudut 0° memiliki rata – rata nilai sebesar 0,03°, pengujian sudut 30° memiliki rata – rata nilai 30,21° dan pengujian sudut 60° memiliki rata – rata nilai 60,13°. Tabel 4. Merupakan hasil pengukuran.

Tabel 5. Pengukuran sudut *yaw*.

No	Pengujian (°)		
	0	90	180
1	0,01	90,29	180,12
2	0,02	90,28	180,13
3	0,03	90,3	180,14
4	0,04	90,31	180,15
5	0,03	90,27	180,13
Rata - rata	0,03	90,29	180,13

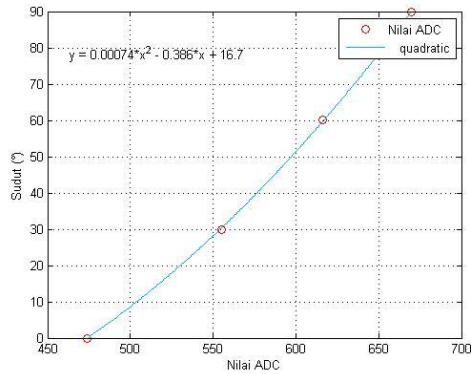
Dari Tabel 5 dapat diketahui bahwa pada pengujian sudut 0° memiliki rata – rata nilai sebesar 0,03°, pengujian sudut 90° memiliki rata – rata nilai 90,29° dan pengujian sudut 180° memiliki rata – rata nilai 180,13°.

3.2. Pengukuran Sensor *Flex*

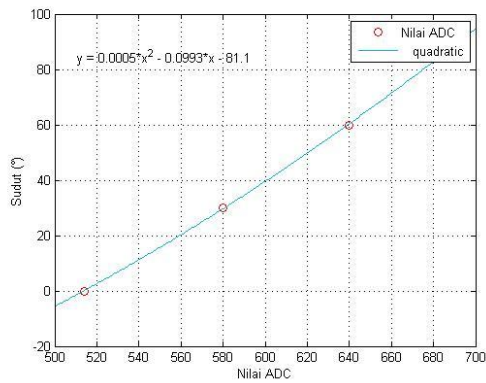
Pengukuran pembacaan kelengkungan dilakukan dengan mengukur derajat kelengkungan dengan nilai ADC yang diperoleh. Gambar 14 merupakan grafik hubungan antara nilai ADC terhadap nilai sudut pada sensor *flex 1*. Gambar 15 merupakan grafik hubungan antara nilai ADC terhadap nilai sudut pada sensor *flex 2*. Dari kedua grafik tersebut maka didapatkan persamaan dengan pendekatan fungsi kuadrat.

$$\text{Sudut} = 0.00074(\text{ADC})^2 - 0.386(\text{ADC}) + 16.7 \quad (10)$$

$$\text{Sudut} = 0.0005(\text{ADC})^2 - 0.0993(\text{ADC}) - 81.1 \quad (11)$$



Gambar 14. Pengujian sensor *flex 1*.



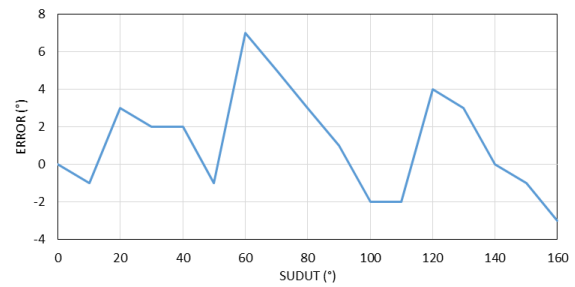
Gambar 15. Pengujian sensor *flex 2*.

3.3. Pengujian Pergerakan *Arm Manipulator*

Pengujian pergerakan *arm manipulator* dilakukan untuk menguji kepresisian dari masing-masing servo pada sendi robot *arm manipulator* terhadap masukan sudut dari sarung tangan.

3.3.1. Pergerakan Servo *Body*

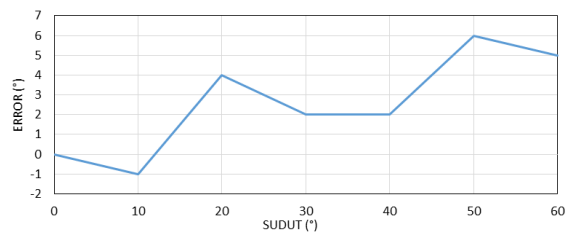
Pengujian pergerakan servo *body* dilakukan pada rentang sudut dari 0° sampai dengan 160°. Gambar 16 merupakan grafik hasil pengujian servo *body*. Berdasarkan hasil pengujian, rata – rata *error* pada pergerakan servo *body* sebesar 3,353° dan *error* sudut terbesar adalah 7°. *Error* sudut terbesar terjadi pada masukan 60° dengan hasil keluaran terukurnya 67°.



Gambar 16. Pengujian pergerakan servo *body*.

3.3.2. Pergerakan Servo *Shoulder*

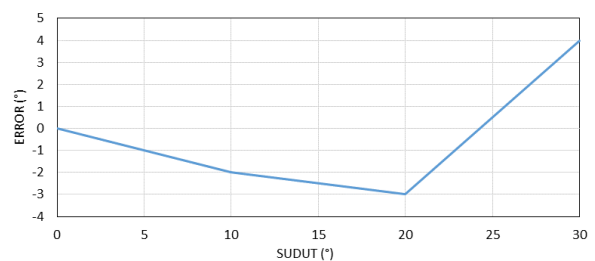
Gambar 17 merupakan grafik hasil pengujian servo *shoulder*. Pengujian pergerakan servo *shoulder* dilakukan pada rentang sudut 0° sampai dengan 60°. Rata – rata *error* pada *shoulder* sebesar 2,857° dan *error* sudut terbesar adalah 6°. *Error* sudut terbesar terjadi pada saat masukan sudut 50° dengan hasil keluarannya adalah 56°.



Gambar 17. Pengujian pergerakan servo *shoulder*.

3.3.3. Pergerakan Servo *Elbow*

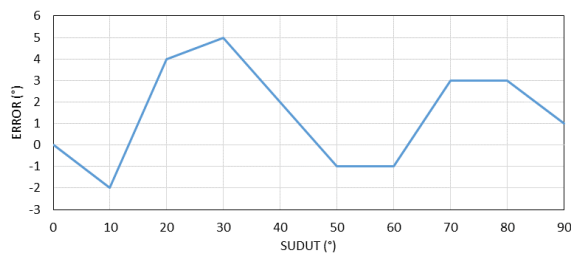
Dari hasil pengujian didapatkan grafik hubungan masukan sudut terhadap *error* sudut pada Gambar 18 rata – rata *error* pada *elbow* sebesar 2,25° dan *error* sudut terbesar adalah 4°. *Error* sudut terbesar terjadi pada saat masukan sudut 30° dengan hasil keluarannya adalah 34°. Pengujian pergerakan servo *elbow* dilakukan dengan rentang sudut dari 0° sampai dengan 30°.



Gambar 18. Pengujian pergerakan servo *elbow*.

3.3.4. Pergerakan Servo Wrist

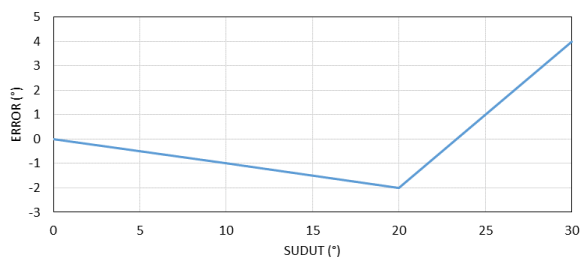
Pengujian pergerakan servo *wrist* dilakukan pada rentang sudut 0° sampai dengan 90° . Berdasarkan hasil pengujian, *error* sudut terbesar terjadi pada saat masukan sudut 30° dengan hasil keluarannya adalah 35° . Rata – rata *error* pada *wrist* sebesar $2,2^\circ$ dan *error* sudut terbesar adalah 5° .



Gambar 19. Pengujian pergerakan servo *wrist*.

3.3.5. Pergerakan Servo Gripper

Pengujian gerak servo *gripper* dilakukan dengan rentang sudut dari 0° sampai dengan 30° . Pada pengujian servo *gripper*, rata – rata *error* pada *gripper* sebesar $1,75^\circ$ dan *error* sudut terbesar adalah 4° . *Error* sudut terbesar terjadi pada saat masukan sudut 30° dengan hasil keluarannya adalah 34° .



Gambar 20. Pengujian pergerakan servo *gripper*.



Gambar 21. Benda yang akan dipindahkan.

3.4. Pengujian Pemindahan Barang

Pada pengujian sistem secara keseluruhan digunakan sebuah benda berbentuk tabung yang akan dipindahkan oleh *arm manipulator*. Gambar 21 merupakan benda yang akan dipindahkan berbentuk tabung dengan diameter 40 mm dan tinggi 70 mm. Gambar 22 Merupakan proses

pengambilan data. *Arm manipulator* akan memindahkan benda tersebut sebanyak 5 kali dengan posisi yang berbeda-beda.



Gambar 22. Pengujian pemindahan barang.

Tabel 6. Pengujian pemindahan barang.

No.	Posisi Tujuan (mm) (A)		Posisi Akhir (mm) (B)		Error (mm) (B-A)	
	X	Y	X	Y	X	Y
1	50	300	44	280	-6	-20
2	150	260	155	250	5	-10
3	260	150	244	140	-16	-10
4	260	-150	245	-155	-15	-5
5	150	-260	140	-230	-10	30
Rata – rata error (mm)					10,4	15

Berdasarkan hasil pengujian pemindahan barang, barang berhasil dipindahkan. *Arm manipulator* berhasil memindahkan benda sebanyak 5 kali dengan rata – rata *error* pemindahan pada sumbu X sebesar 10,4 mm dan sumbu Y sebesar 15 mm.

4. Kesimpulan

Sistem kendali pergerakan *arm manipulator* berbasis sensor *inertial measurement unit* (IMU) dan sensor *flex* telah berhasil dirancang. *Arm manipulator* dapat bergerak dengan *error* pergerakan pada sendi *body* sebesar $2,353^\circ$, sendi *shoulder* sebesar $2,857^\circ$, sendi *elbow* sebesar $2,25^\circ$, sendi *wrist* sebesar $2,2^\circ$, dan sendi *gripper* sebesar $1,75^\circ$. hasil pengujian secara keseluruhan *arm manipulator* mampu memindahkan benda pada koordinat tertentu.

Referensi

- [1]. B. N. W. Bimantaka and A. Harjoko, "Purwarupa Robot Lengan Pemilih Objek Berdasarkan Label Tulisan Secara Realtime," *Ijeis*, vol. 4, no. 2, pp. 135–146, 2014.
- [2]. M. F. Faris, A. Triwiyatno, and I. Setiawan, "Perancangan Arm Manipulator 4 Dof Dengan Menggunakan Pengendalian Cartesian Space-Trajectory Planning," *Transient*, vol. 1, pp. 151–158, 2012.
- [3]. H. Prabantara, Saprindo, "Analisis Kinematika Balik pada Kendali Robot Lengan Dental Light Berbasis Pengolahan Citra Digital Berdasarkan Isyarat Tangan 1," *Ijeis*, vol. 3, no. 2, p. 207–2018, 2013.

- [4]. N. A. Senanayake, K. B. How, and Q. W. Wai, "Tele-Operated Anthropomorphic Arm and Hand Design," vol. 2, no. 3, pp. 166–171, 2008.
- [5]. S. Fux, "Development of a Planar Low Cost *Inertial Measurement Unit* for UAVs and MAVs," Tesis, Institute Teknologi Zurich, Swiss, 2008.
- [6]. R. Nurfansyah, "Estimasi Sudut Orientasi Benda Menggunakan Sensor 6 DOF IMU dan Sensor Magnetometer 3 Aksis," *Transient*, vol. 2 no. 3, 2013.
- [7]. S. Römbäck, "Development of a INS / GPS navigation loop for an UAV," Tesis, Universitas Teknologi Lulea, Swedia, 2000.
- [8]. M. F. Luthfa, "Perancangan Sistem Pemantau Posisi Pejalan Kaki dengan Menggunakan Fusi Data MEMS Sensor Accelerometer, Magnetometer dan GPS." 2014.