

Pengendali Robot Lengan Menggunakan Wearable Device

Addarojatul Ula Syaharuddin Anshori, Margo Pujiantara, Ardyono Priyadi
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: margo@ee.its.ac.id.

Abstrak—Di dunia yang semakin praktis ini, interaksi dengan robot membutuhkan media dan inovasi yang lebih baik di berbagai bidang. Salah satu cara untuk mencapai interaksi manusia-robot yang lebih baik adalah dengan mengurangi gesekan dalam proses interaksi. Contohnya adalah jika seorang robot terinspirasi dari lengan manusia, akan lebih baik jika interaksi yang diperlukan untuk menggerakkan lengan robot dilakukan melalui gerakan lengan pengguna, meminimalkan kurva pembelajaran yang diperlukan untuk mengendalikan robot. Ini adalah salah satu alasan mengapa perangkat kontrol yang baik, seperti pada lengan robotik, diperlukan. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja di pengaturan industri dengan memperbaiki aspek seperti efisiensi pembelajaran pengguna, keamanan tempat kerja, peningkatan akurasi dan presisi, masukan kreatif dari manusia dalam tugas-tugas di mana diperlukan, efektivitas biaya dalam pemanfaatan robot, dan lain-lain. Tujuan dari penelitian akhir ini adalah untuk mengembangkan perangkat kontrol untuk lengan robot yang memungkinkan kontrol melalui gerakan yang mirip dengan gerakan pengguna, menggunakan mikrokontroler dan sensor IMU untuk mengendalikan robot Dobot Magician.

Kata Kunci—Dobot Magician, Mikrokontroler, Interaksi Manusia Dan Robot.

I. PENDAHULUAN

ROBOT lengan layaknya teknologi pada umumnya telah menjadi bagian integral dari industri modern, dan ada beberapa alasan mengapa mereka dibutuhkan lebih dari sebelumnya. Salah satu alasan utamanya adalah peningkatan permintaan untuk otomatisasi di berbagai bidang [1]. Dalam manufaktur, misalnya, robot dapat melakukan tugas seperti pengelasan, pengecatan, dan perakitan dengan tingkat akurasi dan konsistensi yang tinggi. Hal ini dapat membantu perusahaan meningkatkan efisiensi dan produktivitas, memenuhi permintaan barang dan jasa yang semakin meningkat [2].

Selain memenuhi kebutuhan otomatisasi, robot seperti lengan robotik juga diperlukan untuk mengatasi kekurangan tenaga kerja dan populasi yang menua [3]. Di banyak bagian dunia, kekurangan tenaga kerja umum, terutama dalam industri seperti manufaktur dan pertanian. Robot dapat membantu mengisi kesenjangan ini dengan melakukan tugas-tugas yang sulit atau tidak mungkin dilakukan oleh staf manusia. Selain itu, di banyak negara maju, populasi mengalami penuaan, dan angkatan kerja menyusut [4]. Robot dapat membantu mengatasi tren ini dengan menangani tugas-tugas yang mungkin terlalu membutuhkan fisik atau berbahaya bagi pekerja manusia [5].

Perangkat kontrol berbasis gerak merupakan cara yang efektif untuk mengendalikan lengan robotik karena mereka memberikan cara berinteraksi yang lebih intuitif dan alami dengan robot [2]. Dengan menggunakan gerakan tangan atau

tubuh untuk mengendalikan lengan, operator dapat langsung meniru gerakan lengan, memberikan kontrol dan akurasi yang lebih tepat. Ini sangat bermanfaat dalam tugas-tugas yang membutuhkan tingkat presisi yang tinggi, seperti pengelasan atau perakitan [3].

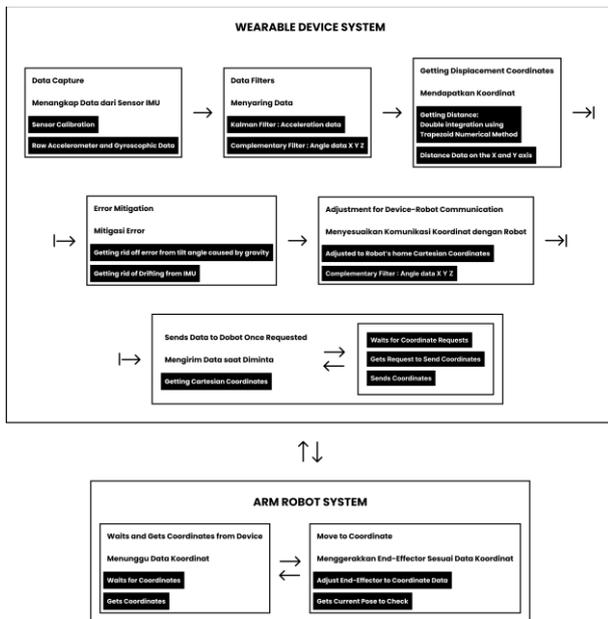
Perangkat kontrol berbasis gerak juga dapat meningkatkan keamanan dalam situasi tertentu [6]. Misalnya, di lingkungan berbahaya atau ketika lengan mengatasi benda berat atau tajam, mungkin lebih aman bagi operator untuk mengendalikan lengan secara remote menggunakan perangkat kontrol berbasis gerak daripada berada secara fisik di ruang kerja. Hal ini dapat membantu mengurangi risiko kecelakaan atau cedera pada pekerja manusia [7].

Interaksi Manusia-Robot (HRI) mengacu pada studi, desain, dan implementasi robot yang mampu berinteraksi dengan manusia dalam berbagai cara. Bidang lintas disiplin ini menggabungkan aspek robotika, kecerdasan buatan, psikologi, interaksi manusia-komputer, dan bidang terkait lainnya untuk menciptakan robot yang dapat memahami, merespons, dan berkolaborasi dengan manusia secara efektif. Signifikansi HRI dalam robotika sangat dalam dan dapat dijelaskan dengan beberapa cara [8].

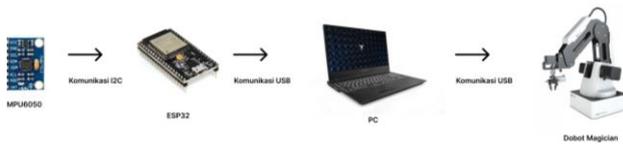
HRI bertujuan untuk menciptakan antarmuka yang ramah pengguna, memungkinkan manusia berinteraksi dengan robot secara intuitif. Kedua, HRI memungkinkan pengembangan robot yang dapat bekerja bersama manusia sebagai mitra atau anggota tim. Hal ini penting dalam industri di mana manusia dan robot perlu bekerja bersama secara efisien dan aman. Selain itu, HRI juga memainkan peran dalam memahami dan mengatasi aspek sosial dari interaksi manusia-robot untuk meningkatkan penerimaan masyarakat terhadap robot. Adaptabilitas, keamanan, interaksi emosional, dan peran robot dalam pendidikan dan hiburan juga merupakan fokus utama HRI untuk memastikan kesuksesan dan penerimaan luas robot dalam berbagai konteks.

Pertumbuhan Interaksi Manusia-Robot (HRI) ditandai oleh kemajuan signifikan dalam penelitian dan aplikasi. Awalnya, HRI terutama berfokus pada pengaturan industri di mana robot bekerja terpisah dari manusia karena masalah keamanan. Namun, seiring dengan kemajuan teknologi, penelitian mulai mengeksplorasi cara untuk memungkinkan kerja kolaboratif antara robot dan manusia. Pergeseran fokus ini mengarah pada pengembangan antarmuka yang ramah pengguna, mekanisme keamanan, dan sistem adaptif.

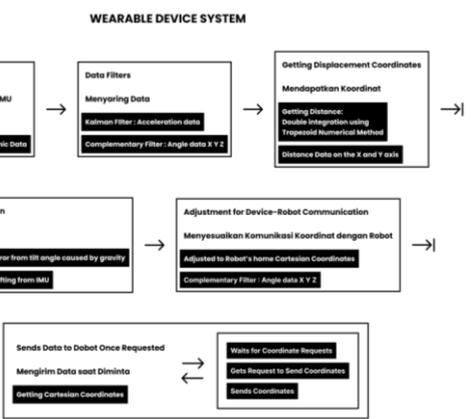
Abad ke-21 menyaksikan lonjakan penelitian HRI yang didorong oleh minat yang meningkat pada layanan dan robot sosial. Para peneliti mulai mengeksplorasi aplikasi di luar manufaktur, termasuk kesehatan, pendidikan, dan lingkungan domestik. Perluasan ini dipermudah oleh kemajuan dalam kecerdasan buatan, teknologi sensor, dan robotika, yang memungkinkan interaksi yang lebih canggih dan kontekstual.



Gambar 1. Pertukaran Diagram metodologi sistem.



Gambar 2. Diagram rancangan sitem alat studi.



Gambar 3. Pertukaran isotop oksigen gas dan oksigen dalam patatan katalis perovskit. Biasakan untuk menunjukkan signifikansi dari gambar pada judul gambar (caption).



Gambar 4. Tampak luar alat wearable device.



Gambar 5. Tampak dalam alat wearable device.

Pertumbuhan HRI juga telah mendapat manfaat dari kolaborasi lintas disiplin antara ahli robotika, ilmu komputer, psikolog, dan spesialis interaksi manusia-komputer. Kolaborasi ini menghasilkan pemahaman yang lebih baik tentang perilaku manusia, emosi, dan proses kognitif, meningkatkan desain robot yang mampu berinteraksi dengan bermakna dan sosial.

Dalam beberapa tahun terakhir, HRI telah menemukan aplikasi praktis dalam berbagai domain. Robot kolaboratif (cobots) digunakan dalam manufaktur, membantu pekerja dalam tugas-tugas yang memerlukan presisi atau kekuatan. Robot sosial digunakan dalam pengaturan kesehatan untuk keterlibatan pasien dan kebersamaan. Robot asisten membantu individu dengan kecacatan dalam kehidupan sehari-hari, menunjukkan spektrum luas dari aplikasi HRI [9].

Dengan kemajuan teknologi yang terus berlangsung, masa depan HRI menjanjikan interaksi yang lebih canggih dan terintegrasi antara manusia dan robot. Penelitian yang sedang berlangsung bertujuan untuk mengatasi tantangan seperti pertimbangan etis, kekhawatiran privasi, dan integrasi yang mulus dari robot ke dalam berbagai konteks masyarakat. Evolusi HRI mencerminkan bidang yang dinamis dan terus berkembang yang terus membentuk hubungan antara manusia dan robot secara praktis dan bermakna.

Gerakan yang melibatkan seluruh tubuh dapat menyampaikan instruksi yang kompleks. Misalnya, miring ke depan mungkin menunjukkan minat, sementara mundur bisa menandakan ketidaknyamanan. Di ranah robotika, memanfaatkan gerakan seperti ini memiliki beberapa aplikasi yang relevan.

Dalam domain navigasi dan kontrol robot, perintah berbasis gerakan dapat secara efektif memandu gerakan robot. Misalnya, gestur tangan sederhana dapat dimanfaatkan

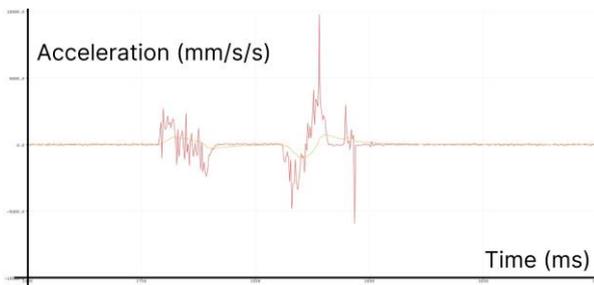
untuk mengendalikan gerakan robot melalui ruang, memberikan cara navigasi yang nyaman di berbagai lingkungan [10].

Selain itu, dalam konteks tugas kolaboratif, gerakan tubuh dapat memfasilitasi komunikasi yang lancar antara manusia dan robot. Para pekerja dapat menggunakan gestur seluruh tubuh untuk mengarahkan robot di lingkungan industri atau selama tugas-tugas kerja sama, mendorong interaksi yang lebih intuitif dan efisien.

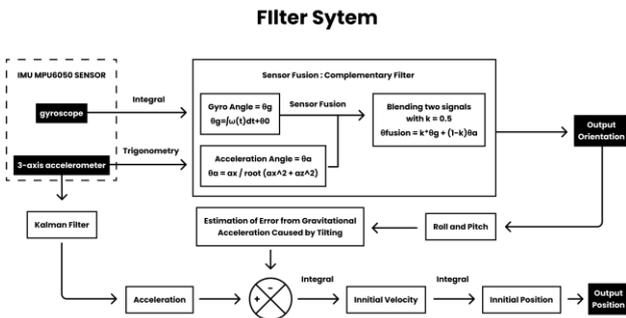
Integrasi gerakan dinamis juga dapat meningkatkan keterlibatan pengguna selama interaksi dengan robot, dengan demikian meningkatkan pengalaman pengguna secara keseluruhan. Keuntungan ini sangat mencolok dalam peran berorientasi layanan atau aplikasi yang berfokus pada hiburan.

Selain itu, menggabungkan gerakan seluruh tubuh ke dalam interaksi robotik dapat secara signifikan meningkatkan ekspresi emosional robot. Penggunaan gestur atau postur emosional memungkinkan robot untuk menyampaikan suasana hati atau tanggapan terhadap berbagai situasi, mendorong interaksi yang lebih alami dan empatik dengan pengguna.

Dalam bidang teknologi bantu, interpretasi interaksi berbasis gerakan terbukti menjadi alat yang kuat bagi



Gambar 6. Grafik performa *kalman filter* terhadap data akselerasi IMU MPU6050. Garis merah adalah garis data akselerasi murni dan garis oranye adalah garis akselerasi setelah diberikan *kalman filter*.



Gambar 7. Pengaplikasian sistem penyaringan data untuk mendapatkan nilai aproksimasi perpindahan posisi pada studi.

individu dengan mobilitas atau kemampuan komunikasi terbatas. Robot dapat memecahkan gerakan halus untuk membantu pengguna dalam tugas-tugas sehari-hari atau bertindak sebagai perantara dalam komunikasi, membuka peluang baru untuk kemandirian dan keterlibatan dalam aktivitas sehari-hari.

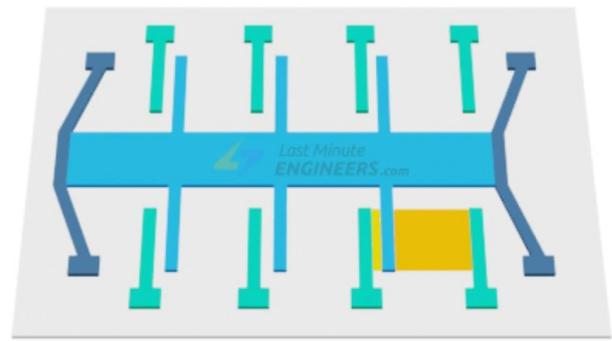
Interpretasi gerakan, terutama dalam pengaturan budaya yang beragam yang memerlukan algoritma adaptif, memperkenalkan aspek penting dari ambiguitas. Mencapai presisi dan pengenalan gerakan di lingkungan dinamis merupakan tantangan, memerlukan teknologi pemrosesan gambar dan pembelajaran mesin yang canggih. Umpan balik kepada pengguna memainkan peran kunci dalam memastikan interaksi yang lancar, melibatkan sinyal visual atau auditori untuk mengkonfirmasi interpretasi robot terhadap perintah yang diberikan [11]. Selain itu, integrasi gerakan dengan modalitas lain, seperti ucapan atau penglihatan, dapat menciptakan sistem komunikasi responsif, menuntun integrasi yang mulus untuk Interaksi Manusia-Robot (HRI) yang efektif [12].

Sebagai kesimpulan, interaksi berbasis gerakan menawarkan mode yang dinamis dan ekspresif dalam HRI, memberikan jalur kaya untuk komunikasi alami antara manusia dan robot. Seiring dengan terus majunya teknologi, peningkatan dalam kemampuan pengenalan gerakan akan berkontribusi pada evolusi sistem robotik yang lebih intuitif dan responsif.

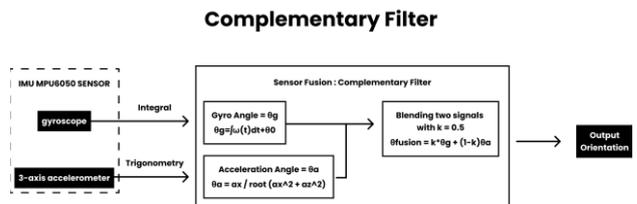
II. METODOLOGI

A. Metodologi Sistem

Metodologi yang digunakan dalam studi ini akan dijelaskan secara rinci pada bagian selanjutnya. Pemilihan metode dan pendekatan penelitian menjadi kunci dalam mencapai tujuan studi dan menghasilkan alat pengendali robot yang efektif serta responsif terhadap gerakan lengan



Gambar 8. Ilustrasi MEMS (*Micro-Electrical Mechanical Systems*).



Gambar 9. Pengaplikasian sistem *complementary filter* yang digunakan untuk mendapatkan aproksimasi perpindahan posisi pada studi.

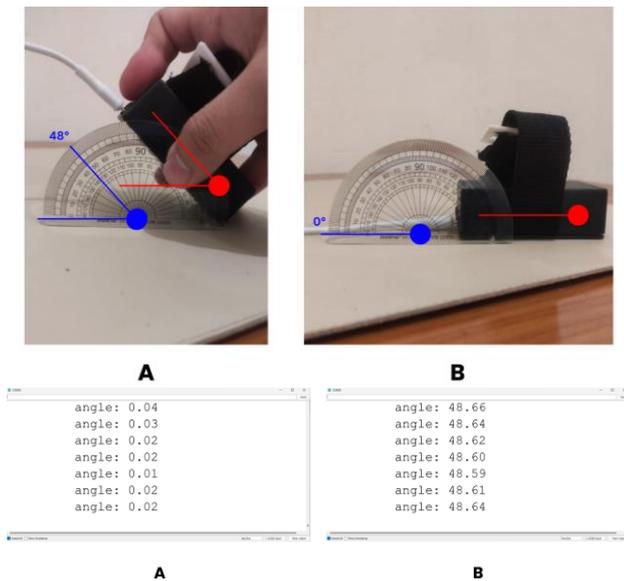
pengguna. Metodologi Sistem yang diaplikasikan dalam studi ini secara singkat dapat dilihat pada Gambar 1. Pada metodologi sistem yang diaplikasikan dapat dibagi menjadi dua bagian yakni bagian pertama adalah sistem bagian pada alat kendali atau disebut wearable device sistem dan yang kedua adalah sistem bagian pada robot lengan atau disebut arm robot system.

Penulis memilih untuk mengeksplorasi lebih lanjut tentang kendali robot berbasis gerakan tangan manusia, mengidentifikasi potensi kegunaan dan kelebihanannya dalam konteks pengendalian robot. Dengan demikian, studi ini tidak hanya bertujuan untuk menciptakan alat pengendali robot, tetapi juga untuk memahami dan mengevaluasi kemungkinan pengaplikasiannya serta manfaat yang dapat diperoleh. Tujuan utama dari studi ini adalah menciptakan sebuah alat pengendali robot lengan yang mampu menginterpretasikan gerakan lengan pengguna sebagai input untuk mengendalikan pergerakan robot. Dengan demikian, diharapkan dapat meningkatkan kemudahan penggunaan dan efisiensi interaksi antara manusia dan robot, terutama dalam konteks penggunaan robot lengan.

B. Rancangan Sistem Alat

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2 rancangan sistem alat yang dibuat dibagi menjadi dua bagian yakni bagian alat wearable device yang terdiri atas Sensor IMU MPU6050 untuk mengambil data dan mikrokontroler ESP32 untuk mengolah data. Kemudian data tersebut dikirim kepada sistem robot lengan menggunakan koneksi serial usb kabel melalui media laptop pribadi. Laptop dan robot lengan Dobot Magician merupakan satu kesatuan sistem dikarenakan laptop dalam studi ini berguna sebagai antar muka antara robot lengan Dobot Magician dengan pengguna yang menggunakan alat wearable device.

Setelah membahas rancangan sistem alat dari studi ini tentunya sekarang terbentuk sebuah gambaran bagaimana bentuk hasil akhir dari studi ini. Namun sebelum bisa membahas kinerja pemakaian dari alat *wearable device* yang dibuat tentunya perlu diketahui metodologi kerja dari rancangan sistem alat yang diimplementasikan. Demi



Gambar 10. Pengaplikasian sistem *complementary filter* yang digunakan untuk mendapatkan aproksimasi perpindahan posisi pada studi.

mengetahui hal tersebut dibutuhkan pengetahuan dalam setiap komponen pada rancangan sistem alat yang dibuat.

Berikut adalah penjelasan komponen yang digunakan dalam rancangan sistem alat:

1) *IMU MPU6050*

Dalam perancangan alat pemilihan sensor IMU MPU6050 didasarkan pada pertimbangan ekonomis, ketersediaan tinggi, dan juga sebagai faktor pembeda. Sebagai sensor Inertial Measurement Unit atau sensor inersia yang terjangkau, MPU6050 memberikan solusi efisien untuk melakukan eksperimen dan membuat prototipe. Keunggulan sensor ini terletak pada kemampuannya untuk mendeteksi gerakan dan percepatan dengan akurasi yang dapat dilihat pada informasi spesifikasi.

Aksesibilitas yang tinggi dan juga banyak contoh referensi lampau, menjadikan sensor IMU MPU6050 pilihan yang baik untuk mendeteksi gerakan lengan manusia dengan akurasi yang diperlukan untuk mendeteksi gerakan pengguna alat. 26 Kombinasi sensor gyro dan akselerometer pada MPU6050 memberikan data yang baik tentang orientasi dan akselerasi titik gerak seperti posisi lengan pengguna, yang merupakan aspek kritis dalam pengendalian robot. Selain itu, keberhasilan penggunaan MPU6050 dalam berbagai studi membuatnya menjadi pilihan yang terpercaya untuk kebutuhan ini.

2) *Mikrokontroler ESP32*

Dalam studi ini, ESP32 dipilih sebagai mikrokontroler utama karena beberapa keunggulan kunci yang dimilikinya. Kemampuannya untuk mengendalikan robot lengan dan menangani algoritma pengolahan sinyal kompleks menjadikannya pilihan yang tepat. Keberhasilan penggunaan ESP32 dalam berbagai studi telah membuktikan kredibilitasnya. Kemudahan pengembangan juga menjadi pertimbangan utama dalam pemilihan ESP32.

Platform mikrokontroler ESP32 sebagai salah satu mikrokontroler yang populer digunakan dalam berbagai macam proyek dan telah mendapat banyak dukungan dari komunitas, serta menyediakan berbagai library dan dokumentasi yang memadai. Kepintaran ESP32 dalam

mengontrol robot lengan dengan respons yang cepat menjadi faktor utama dalam pengambilan keputusan.

3) *Robot Lengan Dobot Magician*

Studi ini berfokus pada pengendalian robot lengan Dobot Magician melalui wearable device. Dobot Magician dipilih karena fleksibilitas, presisi, dan kemampuan untuk menyelesaikan tugas-tugas kompleks. Dengan enam sumbu gerak, robot ini sangat cocok untuk penelitian di bidang pengendalian robotik. Integrasi dengan sensor IMU MPU6050 dan ESP32 diharapkan dapat menciptakan sistem yang responsif dan akurat. Penggunaan Dobot Magician memungkinkan implementasi fungsi-fungsi kinematika dan dinamika yang kompleks, serta memudahkan pengujian solusi-solusi kendali yang diusulkan.

Selanjutnya, pengembangan wearable device yang menggunakan sensor IMU MPU6050 dan ESP32 memungkinkan pengguna untuk mengendalikan robot lengan dengan gerakan tangan. Hal ini meningkatkan fleksibilitas dan kontrol dalam pengoperasian, serta membuka peluang aplikasi yang lebih luas, termasuk aspek-aspek ergonomi dalam interaksi dengan robot.

C. *Sistem Pada Wearable Device*

Dalam studi ini terdapat beberapa proses dalam sistem pada wearable device untuk memenuhi tujuan studi. Sistem pengolahan data dari data mentah yang diperoleh dari tangkapan akselerometer dan giroskop pada IMU MPU6050 yang kemudian pada akhirnya menjadi data koordinat yang dapat digunakan robot memiliki beberapa proses yang didapatkan dari sejumlah percobaan sehingga memberikan hasil yang memuaskan. Secara singkat proses ini digambarkan dalam diagram yang dapat dilihat pada gambar 3. Dari diagram tersebut tentunya direalisasikan dengan alat dalam bentuk fisiknya dimana desain luarnya dapat dilihat pada gambar 4 dan internalnya dapat dilihat pada gambar 5.

Dari dalam tahapan awal dibutuhkan raw data dari IMU MPU6050. Untuk mendapatkan raw data ini menggunakan mikrokontroler ESP32, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah menghubungkan kedua perangkat tersebut secara fisik dengan memastikan MPU6050 terpasang dengan benar pada mikrokontroler ESP32 dan menyambungkannya menggunakan koneksi kabel yang sesuai. Untuk melakukan ini tentunya perlu adanya akses register yang sesuai pada MPU6050 untuk membaca data ini. Selanjutnya adalah pemrograman mikrokontroler ESP32 menggunakan Arduino IDE atau wadah pengembangan ESP32 lainnya.

Pada studi ini pemrograman yang dilakukan untuk mengolah data dari IMU menggunakan library yang mendukung MPU6050, seperti untuk komunikasi I2C. Inisialisasi komunikasi I2C akan memungkinkan ESP32 berkomunikasi dengan MPU6050 dengan baik. Dari tahapan inisialisasi komunikasi yang telah dilakukan memungkinkan mikrokontroler ESP32 untuk membaca data dari MPU6050 menggunakan perintah baca I2C. Data yang dapat dibaca termasuk percepatan dari akselerometer dan kecepatan sudut dari giroskop dalam tiga sumbu. Setelah membaca data raw, penulis dapat menyimpannya dalam variabel atau melakukan pemrosesan lebih lanjut sesuai kebutuhan studi penulis.

Perlu untuk diperhatikan bahwa data yang diperoleh mikrokontroler ESP32 dari IMU MPU6050 adalah data dalam bentuk raw yang masih memerlukan pengolahan lebih

Tabel 1.

Nilai Tabel data pengujian akurasi aproksimasi perpindahan posisi dalam sumbu-x

Pengujian	Dunia Nyata (cm)	Data Aproksimasi (cm)
1	20	29,57
2	20	18,91
3	20	22,31
4	20	25,00
5	20	32,04
6	20	8,84
7	20	16,48
8	20	45,18
9	20	34,08

Data menggunakan cm untuk menyesuaikan dengan sistem koordinat pada robot lengan *Dobot Magician*.

Tabel 2.

Nilai Tabel data pengujian akurasi aproksimasi perpindahan posisi dalam sumbu-y

Pengujian	Dunia Nyata (cm)	Data Aproksimasi (cm)
1	20	0,35
2	20	11,66
3	20	7,46
4	20	38,13
5	20	6,53
6	20	13,98
7	20	11,25
8	20	6,52
9	20	23,03
10	20	86,64

Data menggunakan cm untuk menyesuaikan dengan sistem koordinat pada robot lengan *Dobot Magician*.

lanjut. Perlu adanya konversi dan adaptasi nilai-nilai data ini ke dalam satuan yang lebih umum digunakan, seperti percepatan dalam satuan g diubah menjadi percepatan dengan satuan meter atau kecepatan sudut dalam derajat per detik

1) Mendapatkan Data Sensor

Untuk mendapatkan data dari sensor MPU6050 diperlukan langkah pertama yakni mengkalibrasi sensor. Kalibrasi sensor merupakan proses penting untuk memastikan akurasi dan keandalan hasil pengukuran dari sensor. Ini diperlukan untuk mengurangi kesalahan atau ketidakpastian yang mungkin timbul selama penggunaan sensor, terutama untuk sensor IMU (Inertial Measurement Unit) yang mengukur percepatan dan kecepatan angular objek. Kalibrasi IMU membantu mengatasi drift yang dapat disebabkan oleh perubahan suhu, lingkungan, atau faktor internal sensor.

Program kalibrasi seperti IMU Zero digunakan untuk menemukan offset optimal pada sensor MPU6050, sebuah IMU yang umum digunakan. Proses kalibrasi dilakukan dengan metode PID (Proportional, Integral, Derivative) yang memungkinkan penyesuaian offset secara iteratif untuk setiap sumbu percepatan dan kecepatan angular. Program memberikan informasi mengenai progres pencarian offset dan hasil iterasi, serta memungkinkan pengaturan jumlah pembacaan yang digunakan dalam proses kalibrasi. Setelah proses kalibrasi selesai, data sensor dapat diambil menggunakan sensor akselerometer dan giroskop yang

Tabel 3.

Nilai Tabel data pengujian akurasi aproksimasi perpindahan posisi dalam sumbu kombinasi

Pengujian	Dunia Nyata (cm)	Data Aproksimasi (cm)
1	20	7,75
2	20	8,33
3	20	6,10
4	20	5,02
5	20	6,22
6	20	1,74
7	20	13,09
8	20	3,31
9	20	1,56
10	20	0,52

Data menggunakan cm untuk menyesuaikan dengan sistem koordinat pada robot lengan *Dobot Magician*.

terdapat dalam MPU6050. Data tersebut dapat dipanggil menggunakan library MPU6050 dan digunakan sesuai kebutuhan pengguna. Dengan demikian, kalibrasi sensor dan pengambilan data yang akurat menjadi langkah penting dalam memastikan konsistensi dan keandalan informasi yang diperoleh dari sensor IMU seperti MPU6050.

2) Penyaringan Data

Penyaringan data adalah langkah penting dalam penggunaan sensor IMU MPU6050 untuk mendapatkan nilai perpindahan. Data akselerasi dan kecepatan angular dari IMU tersebut memainkan peran penting dalam memberikan informasi tentang perubahan posisi, orientasi, dan percepatan objek. Awalnya, data dari kedua sensor tersebut rentan terhadap distorsi oleh noise atau gangguan. Oleh karena itu, metode penyaringan diperlukan untuk menghasilkan data yang lebih akurat. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah kalman filter, yang dapat membersihkan data akselerometer dari noise. Namun, untuk data giroskop, kalman filter tidak cukup efektif. Untuk mendapatkan informasi orientasi yang lebih baik, metode lain seperti complementary filter diperlukan. Dengan menggabungkan kedua jenis data ini, data orientasi yang lebih akurat dapat diperoleh.

Data akselerasi dan orientasi yang telah melalui proses penyaringan ini menjadi kunci dalam menghitung perubahan posisi pada IMU.

Penyaringan data pada sensor IMU menjadi langkah kritis dalam memastikan akurasi perangkat wearable dan memperluas kemungkinan penggunaannya dalam berbagai konteks aplikasi. Pada Gambar 6 dapat dilihat pengaruh *kalman filter* terhadap data akselerasi dari akselerometer IMU dimana data yang memiliki banyak noise direpresentasikan menggunakan garis merah jauh lebih kasar dibanding dengan data akselerasi setelah diberi *kalman filter* direpresentasikan dengan garis oranye.

Secara keseluruhan fungsi dari sistem penyaringan data adalah untuk menghasilkan nilai aproksimasi perpindahan posisi dengan error seminimal mungkin. Pada Gambar 7 dapat dilihat gambar diagram *filter system* studi. Berawal dari data akselerometer dan giroskop. Data akselerometer diberi *kalman filter*. Data akselerasi kemudian dibersihkan dari error yang ada yakni error *drifting* dan error *agle tilt*. Error

drift dihilangkan dengan metode *reset* setiap detiknya dan error *angle tilt* diatasi dengan menggunakan implementasi *complementary filter*. Kemudian data yang sudah bersih dari error diintegrasikan dua kali menggunakan metode nimerik trapesium.

3) Mitigasi Error

IMU MPU6050 merupakan sensor inersia yang digunakan untuk mengukur percepatan dan kecepatan sudut pada suatu objek. Namun, seringkali sensor ini mengalami beberapa error, seperti drifting dan error karena sudut. Drifting terjadi ketika nilai keluaran sensor berubah seiring waktu tanpa adanya perubahan yang sebenarnya pada posisi atau orientasi objek. Sementara error karena sudut adalah kesalahan dalam sensor dalam mengukur nilai percepatan karena orientasi sensor berpengaruh pada pengambilan nilai akselerasi, biasanya disebabkan oleh ketidaksempurnaan penempatan atau kalibrasi sensor. Pada bagian ini akan dibahas cara mengatasi kedua error ini.

- Mitigasi Error *Drifting*

Error akibat *drifting* bukan merupakan masalah yang dapat dihilangkan begitu saja. Pada studi ini implementasi solusi yang digunakan adalah berupa pemberian nilai ulang kepada data yang didapatkan secara periodik. Data yang diberikan nilai nol kembali adalah data percepatan dari akselerometer IMU setiap detiknya. Ini merupakan solusi yang mudah dan efektif implementasinya sesuai untuk membantu memberikan nilai aproksimasi perpindahan posisi yang lebih akurat dengan cara mengurangi error yang diakibatkan *drifting*.

- Mitigasi Error *Angle Tilt*

Yang kedua ada error yang lebih rumit yakni error pengambilan data yang terjadi saat IMU tidak berada dalam orientasi datar. Sebuah konsep yang perlu diketahui dari IMU MPU6050 adalah mekanisme MEMS dari pendapatan nilai akselerasi dari akselerometranya. MEMS merupakan mekanisme elektronik mikroskopik yang secara esensial berdasarkan dari konsep pegas dan beban seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8.

MEMS atau *Micro-Electrical Mechanical Systems* dapat mendeteksi sebuah pergerakan dan memberikan keluaran data berupa percepatan dari pegas yang bergerak sesuai dengan beban yang merupakan kapasitor dimana pergerakannya dapat memberikan nilai perbedaan resistansi. Hal ini mengakibatkan pengambilan nilai percepatan dapat terganggu oleh beberapa faktor luar contohnya gravitasi.

Oleh karena itu dibutuhkan nilai sudut yang baik dan ini bisa didapatkan menggunakan metode *sensor fusion* dengan bantuan *complementary filter* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 9. Seperti yang dapat dilihat dari gambar grafik sistem kinerja *complementary filter* pada proses dimulai dengan sensor MPU6050 mengambil data raw dari akselerometer dan giroskop (lihat Gambar 6). Sensor akselerometer memberikan informasi tentang percepatan objek, sementara sensor giroskop memberikan informasi tentang perubahan sudut objek. Data raw tersebut kemudian diakses melalui library MPU6050 Light untuk diolah lebih lanjut. Setelah mendapatkan data raw, *complementary filter* pada library MPU6050 Light melakukan integrasi data dari akselerometer dan giroskop. Dengan mempertimbangkan keakuratan perubahan sudut dari giroskop dan memanfaatkan

data akselerometer untuk mengoreksi drift, filter ini menghasilkan estimasi sudut yang lebih stabil dan akurat.

Complimentary filter pada dasarnya merupakan penggabungan dua buah data sensor yang berbeda untuk mendapatkan sebuah data baru yang dapat digunakan sesuai kebutuhan. Pada implementasi *complementary filter* pada studi ini penulis menggunakannya untuk menggabungkan data akselerometer dan data giroskop untuk mendapatkan data baru yakni data sudut kemiringan IMU.

Dalam proses ini pertama data kecepatan angular yang didapat dari sensor giroskop dalam IMU di integralkan terlebih dahulu untuk mendapatkan pendekatan sudut dari kecepatan sudut. Proses kedua melibatkan data percepatan dari sensor sensor akselerometer di dalam IMU. Data percepatan ini kemudian digunakan untuk mencari data sudut kemiringan menggunakan hukum pythagoras. Sekarang setelah didapatkan data sudut dari sensor giroskop dan sensor akselerometer dapat diperoleh sudut gabungan menggunakan *complementary filter*.

Perbandingan performa program dan performa dunia nyata dari *complementary filter* dapat diamati pada Gambar 10. Dari keempat gambar tersebut dapat diketahui terdapat dua bagian dari masing masing gambar yakni A dan B dimana A merupakan gambar performa *complementary filter* pada posisi datar dan B merupakan gambar performa *complementary filter* pada posisi miring. Tentu perlu ditekankan bahwa data sudut yang diperoleh dari *complementary filter* bukan merupakan komponen utama dalam mendapatkan data perpindahan melainkan data sudut ini sangat berguna untuk memberikan alat pengendali berbasis IMU MPU6050 yang sensitif terhadap kemiringan sebuah solusi untuk memperoleh data yang tidak terpengaruh oleh error akibat kemiringan tersebut dan pada akhirnya berfungsi untuk membantu memitigasi error.

4) Mitigasi Error

Setelah melakukan penyesuaian nilai akselerasi terhadap error perhitungan dari faktor drifting dan angle tilt selanjutnya adalah mengolah data akselerasi menjadi data perpindahan dengan menggunakan metode double integral. Integral. Metode numerik tentunya ada berbagai macam yang dapat digunakan, untuk implementasi pada metodologi ini penulis menggunakan metode yang umum digunakan yakni metode trapesium.

$$\text{Distance} = 2\Delta t[a(t_0) + 2a(t_1) + 2a(t_2) + \dots + 2a(t_{n-1}) + a(t_n)] \quad (1)$$

Dari rumus integral ganda pada rumus 1 mengintrgralkan sebanyak dua kali akselerasi terhadap waktu. Terdapat beberapa hal yang perlu dijelaskan sebelum melanjutkan pembahasan. Seperti yang dapat dilihat pada rumus diatas, Δt adalah langkah waktu antar pengukuran. $a(t_i)$ mewakili percepatan pada waktu t_i . t_0, t_1, \dots, t_n adalah titik waktu di mana percepatan diukur. Formula ini adalah pendekatan dari integral ganda percepatan terhadap waktu menggunakan metode trapesium, yang dapat digunakan untuk memperkirakan jarak yang ditempuh. Perlu diingat bahwa akurasi hasil tergantung pada pilihan langkah waktu dan jumlah titik data.

Metode numerik trapesium memberikan aproksimasi nilai integral ganda dari jarak pada planar x dan planar y. Secara singkat metode ini membagi daerah di bawah kurva fungsi menjadi trapesium kecil dan menghitung luasnya untuk mendekati nilai integral. Dengan menerapkan metode numerik ini pada data akselerasi MPU6050, akselerasi dapat diintegrasikan untuk mendapatkan kecepatan dan perubahan posisi objek secara numerik.

Setelah dilakukannya pengolahan data akselerasi IMU MPU6050 menggunakan kalman filter, penulis kemudian mengaplikasikan metode numerik trapesium untuk menghitung jarak dari akselerasi yang telah diintegrasikan sebanyak dua kali, dengan jarak yang diakumulasikan. Pada dasar teori, penulis membahas penggunaan konsep kinematika fisika untuk menghitung jarak dari data akselerasi. Rumus kinematika digunakan dengan memperhatikan kecepatan awal, akselerasi, dan waktu. Penggunaan rumus ini tergantung pada kondisi dan asumsi dalam suatu situasi eksperimental.

Penggunaan metode numerik trapesium untuk menghitung integral dari fungsi akselerasi terhadap waktu digunakan untuk mendekati nilai integral dengan membagi rentang waktu menjadi segmen-segmen kecil dan menghitung luas trapesium di bawah kurva akselerasi. Meskipun metode ini sederhana, akurasi dapat ditingkatkan dengan memperhatikan jumlah segmen waktu. Dari data perpindahan jarak yang sudah diperhitungkan akhirnya diakumulasikan menjadi perpindahan total.

D. Sistem Pada Robot Lengan

Dobot Magician, sebuah robot lengan yang dapat diprogram menggunakan bahasa pemrograman Python, menimbulkan beberapa tantangan dalam penggunaan library resmi DobotLib dan library tidak resmi Pydobot. Penggunaan library ini memberikan kontrol yang baik terhadap pergerakan robot, terutama dalam fungsi point-to-point (ptp) movement yang membutuhkan koordinat sebagai input. Dalam eksplorasi penggunaan library resmi, beberapa aspek perlu diperbaiki, seperti adanya delay pada pergerakan ptp yang tidak dapat dinonaktifkan.

Solusi diambil dengan mengadopsi fungsi Continuous Path (CP) dari library Pydobot, memungkinkan penyesuaian delay sesuai kebutuhan. Kendala lain muncul dari penggunaan sistem antrian pada robot, yang menyebabkan penumpukan data koordinat dan delay yang signifikan. Strategi yang diterapkan adalah menerapkan sistem request, di mana data koordinat hanya dikirimkan saat robot lengan membutuhkannya, untuk menghindari penumpukan dan delay berlebihan. Sebagai kendala ketiga, library resmi tidak menyediakan fungsi buffer yang dapat membatasi pergerakan robot agar tidak melampaui batasan workspace end-effector. Melalui pendekatan ini, performa robot lengan Dobot Magician berhasil ditingkatkan dengan mengurangi delay dan meningkatkan responsivitas terhadap perintah dari perangkat wearable, menjadikan integrasi antara robot lengan dan wearable device lebih efisien.

III. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pada penelitian ini dipaparkan beberapa metode pengujian dan analisis yang dilakukan terhadap alat kendali hasil

penelitian studi. Hasil pengujian dibagi menjadi dua yakni pengujian terhadap akurasi dan pengujian terhadap latensi dari saat alat kendali digerakkan hingga robot lengan Dobot Magician bergerak.

Menggunakan persamaan rata-rata kesalahan mutlak didapatkan rata-rata kesalahan dari percobaan yang telah dilakukan untuk mencari akurasi perpindahan dan latensi.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

MAE, atau *Mean Absolute Error*, adalah metode evaluasi yang digunakan untuk mengukur seberapa dekat rata-rata prediksi model dengan nilai sebenarnya dalam data. Dalam Persamaan 2, nilai n adalah jumlah sampel dalam data, y_i adalah nilai sebenarnya dari sampel ke- i , \hat{y}_i adalah prediksi model untuk sampel ke- i , dan $||$ merupakan fungsi nilai absolut. *MAE* memberikan indikasi tentang seberapa baik kinerja model, dengan nilai yang lebih rendah menandakan bahwa prediksi model mendekati nilai sebenarnya. Keuntungan *MAE* adalah bahwa ia tidak memperhitungkan arah kesalahan (positif atau negatif), hanya besarnya kesalahan absolut, sehingga menjadi metode yang tepat untuk mengukur akurasi dan latensi dalam pengujian studi ini.

A. Pengujian Akurasi Perpindahan

Untuk mendapatkan nilai akurasi dari aproksimasi perpindahan *end-effector* robot lengan Dobot Magician terhadap pergerakan tangan pengguna yang menggunakan alat *wearable device* digunakan media penggaris untuk menghitung perpindahan pada sumbu-x dan sumbu-y. Data yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 1, Tabel 2 dan Tabel 3.

Dari data ketiga tabel yakni Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3 dapat disimpulkan dengan menggunakan metode evaluasi *MAE* atau *Mean Absolute Error* bahwa nilai akurasi aproksimasi perpindahan posisi pada sumbu-x senilai 59.51%, sumbu-y senilai 62.25% dan sumbu kombinasi 79.68%.

B. Pengujian Latensi

Dengan menggunakan basis persamaan rata-rata nilai biasa, pengujian latensi didapatkan dengan cara menguji perbedaan waktu pergerakan tangan dengan pergerakan robot lengan Dobot Magician dalam tiga kecepatan Gerakan tangan yakni 80cm/s 40cm/s dan 20cm/s. Didapatkan bahwa secara berurutan latensi dari sistem adalah sebesar 2.032 detik, 1.931 detik, dan 1.532 detik. Dimana didapatkan bahwa semakin cepat pergerakan semakin besar latensi sistem dan latensi rata-rata senilai 1.832 detik.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Kendali robot lengan Dobot Magician berdasarkan gerakan tangan operator menggunakan sensor IMU MPU6050 berhasil dilakukan. Untuk dapat menggerakkan robot lengan Dobot Magician alat kendali *wearable device* mampu menggerakkan robot lengan Dobot Magician dengan rata-rata akurasi dari aproksimasi nilai perpindahan pada masing-masing sumbu gerakan yakni pada sumbu x senilai 59.51% sumbu y senilai 62.25% sehingga memberikan kemampuan robot lengan Dobot Magician untuk bergerak dalam work space secara leluasa di sumbu x dan sumbu y.

Dengan menggunakan wearable device dengan sensor IMU MPU6050, robot lengan dapat dikendalikan dengan gerakan tangan sebagai langkah awal pengembangan yang berguna sebagai modalitas kendali yang natural menjadikan pengguna mengendalikan robot lengan dengan gerakan tangannya sendiri yang juga minim biaya pembuatan.

REFERENSI

- [1] B. Ballsun-Stanton and J. Schull, "Flying A Manta With Gesture And Controller: An Exploration Of Certain Interfaces In Human-Robot Interaction," in *7th International Workshop on Gesture in Human-Computer Interaction and Simulation*, 2007.
- [2] C. Liu, M. Al Alif, and G. He, "Shoulder Motion Detection Algorithm Based On MPU6050 Sensor And Xgboost Model," in *2022 International Conference on Computing, Communication, Perception and Quantum Technology (CCPQT)*, Xiamen, China: IEEE Computer Society, 2022, pp. 356–360. doi: 10.1109/CCPQT56151.2022.00068.
- [3] E. Solly and A. Aldabbagh, "Gesture Controlled Mobile Robot," in *HORA 2023 - 2023 5th International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, Proceedings*, 2023. doi: 10.1109/HORA58378.2023.10156800.
- [4] J. Lin and T. Ni, "Research on optimized motion control of soccer robot based on Fuzzy-PID control," in *2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, Zhengzhou, China: IEEE Computer Society, 2018, pp. 952–956. doi: 10.1109/ICISCE.2018.00197.
- [5] J. Von Tiesenhausen, U. Artan, J. A. Marshall, and Q. Li, "Hand Gesture-Based Control Of A Front-End Loader," in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, London, ON, Canada: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. doi: 10.1109/CCECE47787.2020.9255828.
- [6] H. E. Stephanou, "Advanced Automation In Manufacturing And Service Industries," in *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2002. doi: 10.1109/ROBOT.1995.525739.
- [7] X. Kong, W. Yang, H. Luo, and B. Li, "Application Of Stabilized Numerical Integration Method In Acceleration Sensor Data Processing," *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 6, pp. 8194–8203, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3051193.
- [8] M. N. Arifin and S. Nuryadi, "Pengendali Lengan Robot dengan Gerakan Tangan Manusia," Departemen Teknik Elektro, Universitas Teknologi Yogyakarta, Yogyakarta, 2019.
- [9] R. Slama, I. Slama, P. Slangen, and O. Ben-Ammar, "Advancing Human-Robot Interaction In A Manufacturing Environment By Incorporating Hand Movements For Remote Control," in *20th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Marseille, France, 2023. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-04267721>
- [10] R. Natharani *et al.*, "Voice Controlled Object Grasping Robotic Arm For Visually Impaired Disabled Veterans," in *Proceedings of CONECCT 2021: 7th IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies*, Bangalore, India: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/CONECCT52877.2021.9622354.
- [11] S. Sidorenko, E. Angeleska, F. Dimitriev, and J. Djokikj, "Methodology for Bio-Inspired Design Innovations Based On Functional Decomposition," in *HORA 2021 - 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications*, Ankara, Turkey: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/HORA52670.2021.9461324.
- [12] S. A. Khoshnevis, S. B. Appakaya, E. Sheybani, and R. Sankar, "Compression Of Gait IMU Signals Using Sensor Fusion And Compressive Sensing," in *Wireless Telecommunications Symposium*, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2020. doi: 10.1109/WTS48268.2020.9198727.