

Penerapan Metode *Invers* kinematik Pada Kontrol Gerak Robot Lengan Tiga Derajat Bebas

¹Fathur Rokhman Iskandar, ²Imam Sucahyo, ³Meta Yantidewi

^{1,2,3} Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: ¹fathuriskandar16030224024@mhs.unesa.ac.id, ²imamsucahyo@unesa.ac.id,
³metayantidewi@unesa.ac.id

Abstrak

Robot didefinisikan sebagai suatu instrumen yang terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak yang berfungsi untuk membantu pekerjaan manusia. Salah satu pekerjaan yang dapat dilakukan oleh robot adalah proses pemindahan barang dari satu tempat ke tempat yang lain. Sistem gerak robot lengan diadaptasi dari sistem gerak lengan manusia yang memiliki sendi atau disebut dengan *joint* dan *link* sebagai penghubung antar *joint*. Pergerakan robot lengan dapat ditentukan dengan menggunakan metode *trial-error* atau yang biasa dikenal dengan *forward* kinematik. Namun, metode ini dinilai lebih memakan waktu dan memori. Untuk mengatasi hal tersebut dibutuhkan metode yang merupakan kebalikan dari metode *forward* kinematik, yaitu metode *invers* kinematik. Metode *invers* kinematik merupakan metode pergerakan robot lengan dengan variabel yang diketahui adalah titik koordinat tujuan. Penelitian dilakukan dengan memberi masukan berupa koordinat (x, y, z) pada mikrokontroler. Data tersebut akan diproses menggunakan metode *invers* kinematik untuk mendapat sudut yang harus dituju oleh motor servo (θ'). Sudut sebenarnya yang dituju robot akan diukur secara langsung menggunakan busur derajat (θ) sebagai pembanding. Dari penelitian yang dilakukan, didapatkan hasil persentase *error* rata-rata untuk servo 1 sebesar 0,14%, servo 2 sebesar 0,43%, dan servo 3 sebesar 6,47%, servo 3 pada robot lengan memiliki nilai minimal yang bisa dicapai yaitu sebesar 50°. Persentase *error* rata-rata untuk sumbu X sebesar 0,42%, sumbu Y sebesar 5,03%, dan sumbu Z sebesar 3,46%. Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa metode *invers* kinematik merupakan metode yang baik sebagai metode kontrol gerak robot lengan.

Kata Kunci: robot lengan, *Invers* kinematik, *forward* kinematik.

Abstract

Robot is determined as an instrument consisting of hardware and software that functions to help human work. One of the jobs that can be done by robots is the process of moving goods from one place to another. Robot arm motion system is adapted from the human arm motion system which has joints and links to connected the joints. The movement of the robot arm can be determined by using the trial-error method or commonly known as forward kinematics. However, this method consumes more time and memory. To overcome this, we need a method which is the opposite of the forward kinematics method, that is in inverse kinematics method. Inverse kinematics method is a method of robot arm movement with the coordinates point of destination as the known variable. The study was conducted by providing *input* in the form of coordinates (x, y, z) on the microcontroller. The data will be processed using inverse kinematics method to get the desired angle that will be reached by the servo motor (θ'). The actual angle that the robot is pointing to will be measured directly using a protractor (θ) as a comparison. From the experiments carried out, the average error percentage for servo 1 is 0.14%, servo 2 is 0.43%, and servo 3 is 6.47%, servo 3 on the robot arm has a minimum value that can be achieved that is equal to 50°. The average error percentage for the X axis is 0.42%, the Y axis is 5.03%, and the Z axis is 3.46%. From these results, it can be said that the inverse kinematics method is a good method as a controlling method of robot arm motion.

Keywords: robot arm, inverse kinematics, forward kinematics.

PENDAHULUAN

Robot secara umum dapat diartikan sebagai sebuah perangkat yang berfungsi untuk membantu pekerjaan manusia. Adapun secara lebih khusus robot didefinisikan sebagai suatu instrumen yang terdiri dari perangkat keras (sistem mekanik dan elektrik) dan perangkat lunak (program sebagai pengendali) yang berfungsi untuk membantu pekerjaan manusia. Teknologi robot saat ini sudah sangat berkembang dan diterapkan dalam berbagai bidang kehidupan. Salah satu pekerjaan yang dapat dilakukan oleh robot yaitu proses pemindahan barang dari satu tempat ke tempat yang lain.

Dengan mempertimbangkan beberapa faktor seperti berat barang, jumlah barang, jarak perpindahan dan tenaga yang dibutuhkan (Oktama, 2018), serta ketidakmungkinan tenaga manusia bekerja selama 24 jam yang yang memengaruhi tingkat efektifitas dan kualitas kegiatan tersebut (Saefullah, 2014). Dan yang lebih penting adalah faktor akurasi dan keselamatan kerja, sehingga pekerjaan memindahkan barang secara konvensional dengan tenaga manusia bisa digantikan oleh suatu robot berbentuk lengan yang berfungsi sebagai penggerak atau manipulator yang didesain untuk memindahkan suatu barang.

Sistem gerak robot lengan diadaptasi dari sistem gerak lengan manusia yang memiliki sendi atau disebut dengan *joint* dan *link* sebagai penghubung antar *joint*. Terdapat dua jenis *joint* robot, yaitu *joint revoluter* yang memiliki pergerakan memutar dan *joint prismatic* yang memiliki pergerakan maju atau mundur. Agar robot lengan bergerak dan mencapai titik yang ditentukan pada koordinat kartesius, diperlukan suatu model atau metode yang menghubungkan antara posisi dan orientasi robot pada koordinat kartesius dengan *joint* robot (D. E. Whitney, 1986).

Pergerakan robot lengan dapat ditentukan dengan menggunakan metode *trial-error* atau yang biasa dikenal dengan *forward* kinematik. Namun metode tersebut dinilai kurang fleksibel karena untuk mengubah pergerakan robot harus melakukan *trial-error* terlebih dahulu sehingga dinilai lebih memakan waktu dalam proses pengerjaannya (Muslimin, Salahuddin, & Prihatini, 2017). Selain itu, posisi masing-masing sudut servo juga harus ditetapkan untuk setiap posisi robot lengan sehingga memakan lebih banyak memori (Kusuma, 2013). Untuk itu, dibutuhkan metode yang merupakan kebalikan dari metode *forward* kinematik, yaitu metode *invers* kinematik.

Metode *invers* kinematik merupakan metode pergerakan robot bersendi dengan variabel yang diketahui adalah titik koordinat tujuan, sehingga dibutuhkan perubahan besar sudut pada masing-masing *joint* robot agar robot mampu mencapai titik tersebut (Oktama, 2018). Penerapan metode *invers* kinematik bertujuan untuk

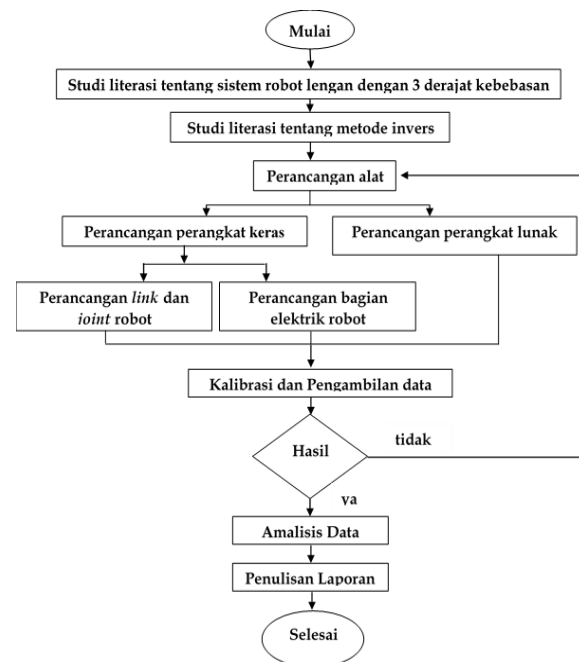
memudahkan proses pemrograman agar ujung lengan dari robot mampu mencapai titik yang diinginkan dengan mengetahui perubahan sudut dari masing-masing *joint*-nya.

Penelitian tentang penerapan metode *invers* kinematik pada gerak robot yang memiliki sistem *link* dan *joint* telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Kusuma (2017) menerapkan metode *invers* kinematik pada kontrol gerak kaki robot hexapod, hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode *invers* kinematik dapat diterapkan pada kontrol pergerakan kaki robot *hexapod*. Penelitian lain yang dilakukan oleh Oktama (2018) menerapkan metode *invers* kinematik pada kontrol gerak root lengan pemindah barang dengan 3 derajat kebebasan dengan mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino UNO dengan frekuensi kerja 16 MHz dan resolusi 16 bit.

Berdasarkan uraian latar belakang dan penelitian yang telah dilakukan oleh Kusuma (2017) dan Oktama (2018), penulis bermaksud untuk mempelajari penerapan metode *invers* kinematik pada kontrol gerak robot lengan tiga derajat bebas. Untuk meningkatkan performa robot lengan dari penelitian yang telah dilakukan oleh Oktama (2018), penelitian ini menggunakan mikrokontroler STM32F103 yang memiliki frekuensi kerja 72 MHz dan resolusi 32 bit sebagai komponen utama untuk mengolah dan menjalankan perintah pada kontrol gerak robot lengan.

METODE

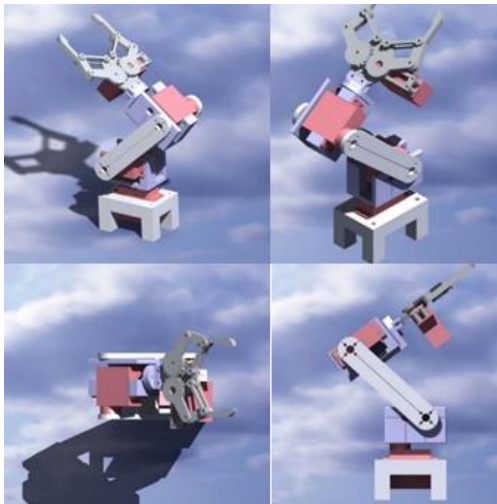
Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen. Langkah – langkah dan prosedur yang dilakukan pada penelitian ini disajikan dalam diagram alir berikut:



Gambar 1. Dia gram Alir Penelitian.

Tahap pertama yang dilakukan adalah studi literasi mengenai sistem gerak robot lengan dengan tiga derajat kebebasan dan studi literasi mengenai model atau metode kontrol gerak robot lengan dengan tiga derajat kebebasan. Tahap selanjutnya, yaitu membuat instrumentasi penelitian.

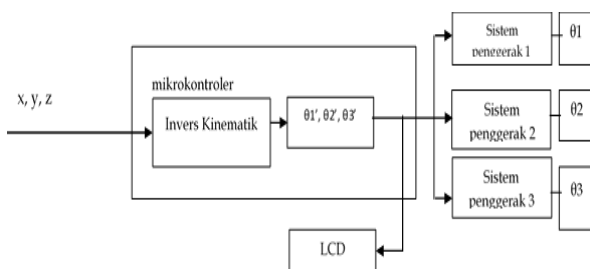
Instrumentasi pada penelitian ini secara umum dibagi menjadi dua, yaitu perangkat keras dan perangkat lunak. Dalam penelitian ini perangkat keras yang dimaksud adalah prototipe robot lengan dengan tiga derajat bebas. Mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini adalah STM32F103 dengan frekuensi kerja sebesar 72MHz.



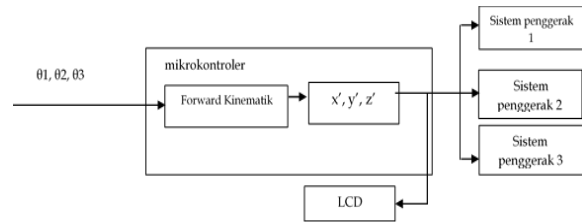
Gambar 2. Desain Robot Lengan 3 Derajat Bebas.

Prototipe robot lengan ini menggunakan empat buah motor servo sebagai alat penggerak. Motor servo dipasang pada tiap *joint* robot lengan. Pergerakan motor servo akan mengakibatkan lengan dengan *link* yang dihubungkan dengan motor servo ikut bergerak.

Perangkat lunak pada penelitian ini berupa algoritma pemrograman untuk menentukan pergerakan robot lengan yang selanjutnya dimasukkan pada mikrokontroler. Perancangan perangkat lunak dilakukan dengan membangun logika pemrograman atau algoritma sebagai sistem kerja lengan robot dalam mencapai target. Algoritma tersebut disajikan dalam diagram alir berikut:



Gambar 3. Diagram Blok Sistem Kerja Robot Lengan Menggunakan Metode *Invers* Kinematik.



Gambar 4. Diagram Blok Sistem Kerja Robot Lengan Menggunakan Metode *Forward* Kinematik.

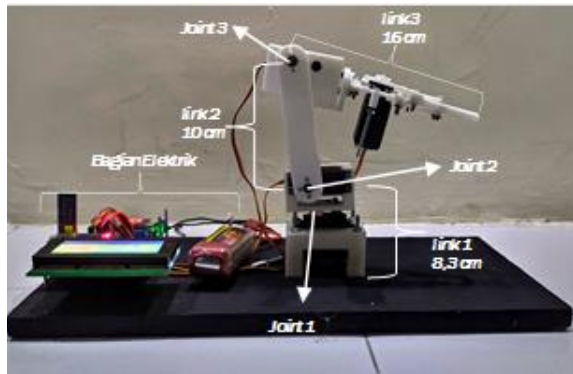
Pengambilan data dilakukan dengan memberi masukan berupa koordinat (x, y, z) pada mikrokontroler. Kemudian data koordinat tersebut akan diproses oleh mikrokontroler menjadi data sudut yang harus dituju oleh masing-masing motor servo dengan menggunakan persamaan *invers* kinematik. Kemudian robot lengan akan bergerak menuju koordinat yang telah diberikan sebelumnya. Saat robot lengan telah sampai pada koordinat yang dituju, maka robot akan berhenti dan menampilkan data berupa $\theta'_1, \theta'_2, \theta'_3$ yang menunjukkan sudut yang dituju motor servo 1, 2, dan 3. Kemudian sudut yang dibentuk antar *link* robot lengan akan diukur menggunakan busur derajat untuk mengetahui sudut sebenarnya yang telah dituju motor servo (θ).

Kemudian *input* berupa sudut sebenarnya yang telah dituju motor servo hasil pengukuran langsung menggunakan busur derajat ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) diberikan pada mikrokontroler. Kemudian dari data sudut tersebut akan diproses oleh mikrokontroler menjadi data koordinat yang telah dicapai atau dituju robot lengan dengan menggunakan persamaan *forward* kinematik. Data yang diperoleh berupa posisi akhir robot lengan pada koordinat kartesius (x', y', z') . Data tersebut dianalisis dengan membandingkan koordinat posisi akhir robot lengan dengan koordinat *input* (x, y, z) .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Robot Lengan

Robot lengan merupakan robot yang dibuat menyerupai lengan manusia dengan sistem gerak memiliki lengan dan sendi atau yang disebut dengan *joint* dan *link* sebagai penghubung antar *joint*-nya. Pada penelitian ini robot lengan memiliki tiga derajat bebas dengan tiga *joint revoluter* yang menghubungkan setiap *link*-nya. Ujung robot lengan disebut *End of Effector*. Pada bagian *End of Effector* diberi suatu perangkat untuk memegang suatu barang yang diinginkan yang disebut *gripper*.



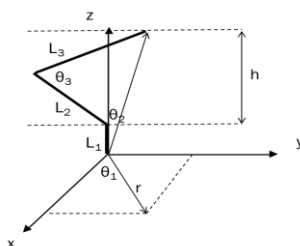
Gambar 5. Robot Lengan 3 Derajat Bebas.

Transformasi Kinematik

Kinematika robot mengacu pada studi analisis tentang gerak manipulator robot. Dalam perancangan sistem kontrol robot lengan, model matematis transformasi kinematika robot menjadi suatu hal utama (Kucuk, 2006). Transformasi kinematika pada perancangan sistem robot lengan ini membahas tentang hubungan antara posisi *joint* robot dengan posisi *end of effector* atau posisi akhir robot dalam bidang koordinat kartesian (RUS, 2011). Dalam perancangan kinematika transformasi robot lengan, terdapat beberapa hal yang perlu dilakukan. Tahap pertama adalah perumusan model kinematik robot lengan. Perumusan model kinematik ini bertujuan untuk menganalisis pergerakan dan posisi robot lengan yang berhubungan dengan desain mekanik robot lengan. Tahap yang kedua adalah menginversi model *forward* kinematik yang telah didapat untuk mendapatkan persamaan *invers* kinematik. Setelah itu, persamaan *invers* kinematik tersebut akan diterapkan pada kontrol gerak robot (Stone, 1987).

Forward Kinematik

Forward kinematik merupakan persamaan yang digunakan untuk mengetahui letak koordinat posisi dan orientasi *End of Effector* robot lengan dari posisi tiap *Joint* (Khomariah & Huda, 2018). Persamaan model *forward* kinematik relatif lebih mudah dan tidak membutuhkan penurunan persamaan yang relatif kompleks. Selain itu,



Gambar 6. Analisis vektor Sistem Gerak Robot Lengan Tiga Derajat Bebas.

selalu ada satu solusi untuk permasalahan *forward* kinematik (Kucuk, 2006).

Dengan menggunakan analisis trigonometri dari Gambar 6, didapatkan beberapa persamaan *forward* kinematik sebagai berikut:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 - 180) \quad (1)$$

$$h = z - L_1 = L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 - 180) \quad (2)$$

$$x = [L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 - 180)] \cos \theta_1 \quad (3)$$

$$y = [L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 - 180)] \sin \theta_1 \quad (4)$$

$$z = L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 - 180) \quad (5)$$

Invers Kinematik

Algoritma *invers* kinematik merupakan metode analisis kinematika transformasi robot dari ruang kartesian ke ruang sendi (Kusuma, 2013). Persamaan *invers* kinematik memberikan parameter tiap *joint* robot untuk posisi dan orientasi *End of Effector* yang diberikan atau diinginkan (Frisyras, Moulianus, & Aspragatos, 2018). *Invers* kinematik mempermudah kontrol gerak lengan robot karena pergerakan aktuator robot akan diketahui dari posisi robot yang diberikan. Metode ini juga akan mempersingkat waktu pengerjaan karena tidak perlu melakukan metode *trial-error* untuk menentukan posisi dan orientasi robot.

Namun ada beberapa hal yang membuat *invers* kinematik sulit dilakukan, diantaranya: untuk mentransformasikan posisi dan orientasi robot menjadi posisi revolusi *joint* robot menggunakan metode *invers* kinematik, diperlukan trigonometri balik yang membutuhkan persamaan yang relatif panjang dan rumit. Metode *invers* kinematik juga memiliki lebih dari satu solusi untuk satu posisi dan robot *End of Effector* robot tergantung dari desain robot dan persamaan yang digunakan. Selain itu, keterbatasan gerak yang disebabkan oleh desain robot membuat robot dapat kehilangan beberapa derajat kebebasannya untuk beberapa konfigurasi (RUS, 2011).

Dari Gambar 6 dan persamaan *forward* kinematik yang telah didapat diketahui bahwa

$$x^2 + y^2 + (z - L_1)^2 = r^2 + h^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & x^2 + y^2 + (z - L_1)^2 \\ &= L_2^2 \cos^2 \theta_2 + L_3^2 \cos^2(\theta_2 + \theta_3 - 180) + 2L_2L_3 \cos \theta_2 [\cos \theta_2 \cos(\theta_3 - 180) - \sin \theta_2 \sin(\theta_3 - 180)] + L_2^2 \sin^2 \theta_2 \\ &+ L_3^2 \sin^2(\theta_2 + \theta_3 - 180) + 2L_2L_3 \sin \theta_3 [\sin \theta_2 \cos(\theta_3 - 180) + \cos \theta_2 \cos(\theta_3 - 180)] \end{aligned} \quad (7)$$

Dengan meninjau persamaan identitas trigonometri, yaitu:

$$\cos(\theta_1 + \theta_2) = \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \quad (8)$$

Persamaan 7 dapat ditulis menjadi:

$$x^2 + y^2 + (z - L_1)^2 = L_2^2 + L_3^2 + 2L_2L_3 \cos(\theta_3 - 180) \quad (9)$$

Dengan meninjau persamaan identitas trigonometri, yaitu:

$$\cos(\theta_1 - \theta_2) = \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \quad (10)$$

Persamaan 9 dapat ditulis menjadi:

$$x^2 + y^2 + (z - L_1)^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos \theta_3 \quad (11)$$

$$\cos \theta_3 = \frac{L_2^2 + L_3^2 - x^2 - y^2 - (z - L_1)^2}{2L_2L_3} \quad (12)$$

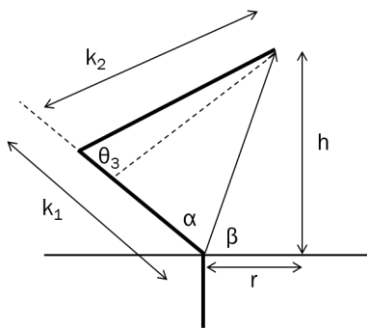
Dan nilai $\sin \theta_3$ diketahui dengan persamaan:

$$\sin \theta_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3} \quad (13)$$

Dari persamaan 12 dan 13, nilai sudut θ_3 dapat diketahui dengan persamaan:

$$\theta_3 = \tan^{-1}(\sin \theta_3, \cos \theta_3) \quad (14)$$

Penyelesaian θ_2 diketahui dengan mengkaji ulang analisis vektor Sistem Gerak Robot Lengan pada Gambar 6.



Gambar 7. Analisis vektor Sistem Gerak Robot Lengan Tiga Derajat Bebas pada ruang dua dimensi.

Dari Gambar 7 diketahui besar sudut θ_2 adalah:

$$\theta_2 = \alpha + \beta$$

Garis k merupakan garis bantu untuk mencari nilai sudut α dimana nilai dari masing-masing garis k adalah sebagai berikut:

$$k_1 = L_2 + L_3 \cos(180 - \theta_3) = L_2 - L_3 \cos \theta_3 \quad (16)$$

$$k_2 = L_3 \sin(180 - \theta_3) = L_3 \sin \theta_3 \quad (17)$$

Dengan menganalisis Gambar 3 nilai sudut θ_2 dapat diketahui dengan persamaan:

$$\theta_2 = \tan^{-1}(k_2, k_1) + \tan^{-1}(h, r) \quad (18)$$

Dan nilai sudut θ_1 diketahui dengan persamaan:

$$\theta_1 = \tan^{-1}(y, x) \quad (19)$$

Pengujian Ketepatan Motor Servo

Performa dari suatu sistem dapat diketahui melalui beberapa pengujian (Khomariah & Huda, 2018). Pengujian yang pertama, yaitu ketepatan motor servo. Pengujian ini

dilakukan dengan cara memberi masukan kepada mikrokontroler berupa koordinat yang akan dituju robot dengan rentan manipulasi pada tiap sumbu sebesar 5 cm dan pengulangan sebanyak 3 kali.

Tabel 1. Hasil pengujian sudut servo pada manipulasi sumbu Z.

koordinat input (cm)			sudut hasil perhitungan (°)			sudut hasil pengukuran (°)			error (%)		
X	Y	Z	θ'_1	θ'_2	θ'_3	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3
0	15	5	90	62.52	67.95	90	63	68	0	0.77	0.07
						90	63	68	0	0.77	0.07
						90	63	67	0	0.77	1.4
0	15	10	90	82.96	66.4	90	83	65	0	0.05	2.11
						90	83	66	0	0.05	0.6
						90	84	67	0	1.25	0.9
0	15	15	90	93.79	74.39	90	93	75	0	0.84	0.82
						90	94	74	0	0.22	0.52
						90	94	74	0	0.22	0.52
0	15	20	90	95.15	91.05	90	95	91	0	0.16	0.05
						90	95	91	0	0.16	0.05
						90	95	91	0	0.16	0.05
0	15	25	90	87.27	117.53	90	87	117	0	0.31	0.45
						90	88	117	0	0.84	0.45
						90	87	117	0	0.31	0.45

Dari Tabel 1 diketahui pada manipulasi sumbu Z, persentase *error* untuk servo 1 (θ_1) sebesar 0% hal ini karena pada manipulasi sumbu Z, nilai sumbu X diatur pada posisi 0, sehingga servo 1 tidak berpindah pada dari 90°. Persentase *error* terbesar untuk servo 2 (θ_2) sebesar 1,25% dan untuk servo 3 (θ_3) sebesar 2,11%.

Tabel 2. Hasil pengujian sudut servo pada manipulasi sumbu Y.

koordinat input (cm)			sudut hasil perhitungan (°)			sudut hasil pengukuran (°)			error (%)		
X	Y	Z	θ'_1	θ'_2	θ'_3	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3
0	5	15	90	174.27	26.61	90	174	50	0	0.15	87.9
						90	174	50	0	0.15	87.9
						90	174	50	0	0.15	87.9
0	10	15	90	126.47	48.72	90	127	50	0	0.42	2.63
						90	127	50	0	0.42	2.63
						90	127	50	0	0.42	2.63
0	15	15	90	93.79	74.39	90	93	75	0	0.84	0.82
						90	94	74	0	0.22	0.52
						90	94	74	0	0.22	0.52
0	20	15	90	65.3	106.13	90	65	105	0	0.46	1.06
						90	65	105	0	0.46	1.06
						90	65	106	0	0.46	0.12
0	25	15	90	21.91	168.79	90	22	169	0	0.41	0.12
						90	22	169	0	0.41	0.12
						90	22	168	0	0.41	0.47

Dari Tabel 2 pada manipulasi sumbu Y bernilai 5 cm dan 10 cm, sudut perhitungan menggunakan metode *invers* kinematik untuk sudut servo 3 (θ'_3) bernilai 26,61° dan

48,72° sedangkan sudut servo 3 (θ_3) hasil pengukuran menggunakan busur derajat bernilai 50° baik pada sumbu Y cm maupun 10 cm. Dari data tersebut, diketahui bahwa servo 3 pada robot lengan memiliki nilai minimal yang bisa dicapai, yaitu sebesar 50°. Ini disebabkan desain mekanik robot lengan yang tidak memungkinkan untuk *link* 2 dan 3 membentuk sudut yang lebih kecil dari 50° sehingga membatasi pergerakan dari motor servo 3. Hal ini juga sesuai dengan kekurangan metode *invers* kinematik dimana robot lengan dapat kehilangan beberapa derajat bebasnya untuk suatu titik tertentu (RUS, 2011). Pada kasus ini, yaitu *link* 3 robot lengan kehilangan derajat bebasnya ketika nilai sudut θ_3 di bawah 50°.

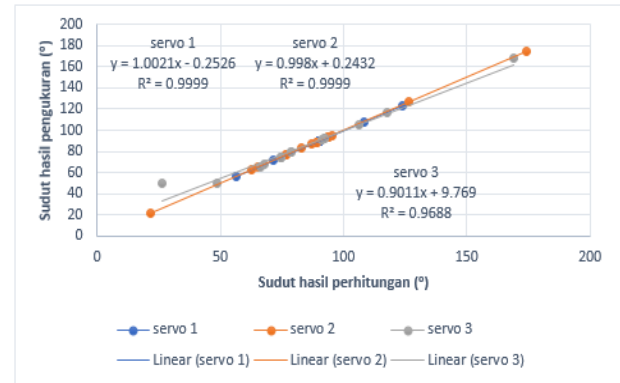
Persentase *error* servo 1 (θ_1) pada manipulasi sumbu Y bernilai 0% karena pada manipulasi sumbu Y, sumbu X diatur pada posisi 0 sehingga servo 1 tidak berpindah pada dari 90°. Persentase *error* terbesar untuk servo 2 (θ_2) sebesar 0,84% dan untuk servo 3 (θ_3) sebesar 87,9%.

Tabel 3. Hasil pengujian sudut servo pada manipulasi sumbu X.

koordinat input (cm)			sudut hasil perhitungan (°)			sudut hasil pengukuran (°)			error (%)		
X	Y	Z	θ'_1	θ'_2	θ'_3	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3
-10	15	15	123.69	76.6	92.49	123	77	92	0.56	0.52	0.53
						124	77	92	0.25	0.52	0.53
						124	76	92	0.25	0.78	0.53
-5	15	15	108.43	89.11	78.99	108	89	80	0.4	0.12	1.28
						108	89	79	0.4	0.12	0.01
						108	89	79	0.4	0.12	0.01
0	15	15	90	93.79	74.39	90	93	75	0	0.84	0.82
						90	94	74	0	0.22	0.52
						90	94	74	0	0.22	0.52
5	15	15	71.57	89.11	78.99	71	89	79	0.8	0.12	0.01
						71	89	79	0.8	0.12	0.01
						72	89	79	0.6	0.12	0.01
10	15	15	56.31	76.6	92.49	56	77	92	0.55	0.52	0.53
						56	78	93	0.55	1.83	0.55
						56	77	92	0.55	0.52	0.53

Dari Tabel 3 diketahui nilai sudut θ_1 tidak konstan pada 90° hal ini karena koordinat sumbu X tidak diatur tetap pada posisi 0. Pada manipulasi sumbu X, Persentase *error* terbesar untuk servo 1 (θ_1) sebesar 0,8% untuk servo 2 (θ_2) sebesar 1,83%, dan untuk servo 3 (θ_3) sebesar 1,28%.

Dari ketiga tabel tersebut, dibuat suatu grafik hubungan antara sudut servo hasil perhitungan (θ') dan pengukuran (θ) untuk servo 1, 2, dan 3 sebagai berikut.



Gambar 8. Graik Perbandingan Sudut Servo Hasil Perhitungan Dengan Hasil Pengukuran.

Dari Gambar 8 diketahui baik servo 1, 2 maupun 3 memiliki grafik perbandingan sudut hasil perhitungan dengan hasil pengukuran yang linier dengan linieritas untuk servo 1 dan 2 sebesar 0,99 dan servo 3 sebesar 0,97. Hal ini menunjukkan bahwa motor servo yang digunakan sebagai aktuator robot lengan memiliki akurasi yang baik dengan presentase *error* rata-rata untuk servo 1 sebesar 0,14%, servo 2 sebesar 0,43%, dan servo 3 sebesar 6,47%.

Pengujian Ketepatan Robot Lengan

Pengujian ketepatan robot lengan bertujuan untuk mengetahui performa robot lengan dengan kontrol gerak metode *invers* kinematik. Pengujian dilakukan dengan menghitung koordinat sebenarnya yang dituju robot lengan dengan menggunakan metode *forward* kinematik. Perhitungan yang dilakukan berdasarkan sudut servo hasil pengukuran menggunakan busur derajat (θ). Nilai *error* merupakan selisih koordinat posisi robot hasil perhitungan dengan koordinat masukan. Persentase *error* merupakan persentase nilai error posisi robot dengan koordinat masukan.

Tabel 4. Ketepatan Robot Lengan Pada Manipulasi Sumbu Z.

koordinat input (cm)			koordinat hasil perhitungan (cm)			error (cm)			error (%)		
X	Y	Z	X'	Y'	Z'	x	y	z	x	Y	z
0	15	5	0	15.04	5.13	0	0.04	0.13	0	0.27	2.6
			0	15.04	5.13	0	0.04	0.13	0	0.27	2.6
			0	14.82	4.95	0	0.18	0.05	0	1.2	1
0	15	10	0	14.79	9.75	0	0.21	0.25	0	1.4	2.5
			0	14.93	9.98	0	0.07	0.02	0	0.47	0.2
			0	15.04	10.49	0	0.04	0.49	0	0.27	4.9
0	15	15	0	15.13	14.96	0	0.13	0.04	0	0.87	0.27
			0	14.95	14.95	0	0.05	0.05	0	0.33	0.33
			0	14.95	14.95	0	0.05	0.05	0	0.33	0.33
0	15	20	0	15.04	19.93	0	0.04	0.07	0	0.27	0.35
			0	15.04	19.93	0	0.04	0.07	0	0.27	0.35
			0	15.04	19.93	0	0.04	0.07	0	0.27	0.35
0	15	25	0	15.14	24.79	0	0.14	0.21	0	0.93	0.84
			0	14.85	25.06	0	0.15	0.06	0	1	0.24
			0	15.14	24.79	0	0.14	0.21	0	0.93	0.84

Dari Tabel 4 diketahui nilai *error* terbesar untuk sumbu X sebesar 0 cm dengan persentase *error* sebesar 0%, nilai *error* terbesar untuk sumbu Y sebesar 0,15 cm dengan persentase *error* sebesar 1%, dan nilai *error* terbesar untuk sumbu Z sebesar 0,49 cm dengan persentase *error* sebesar 4.9%.

Tabel 5. Ketepatan Robot Lengan Pada Manipulasi Sumbu Y.

koordinat input (cm)			koordinat hasil perhitungan (cm)			error (cm)			error (%)		
X	Y	Z	X'	Y'	Z'	x	Y	z	x	Y	z
0	5	15	0	1.56	20.46	0	3.44	5.46	0	68.8	36.4
			0	1.56	20.46	0	3.44	5.46	0	68.8	36.4
			0	1.56	20.46	0	3.44	5.46	0	68.8	36.4
0	10	15	0	9.96	15.45	0	0.04	0.45	0	0.4	3
			0	9.96	15.45	0	0.04	0.45	0	0.4	3
			0	9.96	15.45	0	0.04	0.45	0	0.4	3
0	15	15	0	15.13	14.96	0	0.13	0.04	0	0.87	0.27
			0	14.95	14.95	0	0.05	0.05	0	0.33	0.33
			0	14.95	14.95	0	0.05	0.05	0	0.33	0.33
0	20	15	0	19.98	14.58	0	0.02	0.42	0	0.1	2.8
			0	19.98	14.58	0	0.02	0.42	0	0.1	2.8
			0	20.03	14.86	0	0.03	0.14	0	0.15	0.93
0	25	15	0	24.98	15.1	0	0.02	0.1	0	0.08	0.67
			0	24.98	15.1	0	0.02	0.1	0	0.08	0.67
			0	25.03	14.82	0	0.03	0.18	0	0.12	1.2

Dari Tabel 5 pada pengujian ketepatan robot lengan manipulasi sumbu Y bernilai 5 cm, *error* untuk sumbu Y dan Z robot lengan memiliki nilai yang relatif besar, yaitu sebesar 3,44 cm untuk sumbu Y dan 5,46 cm untuk sumbu Z dengan persentase *error* sumbu Y sebesar 68,8% dan sumbu Z sebesar 36,4%. Hal ini disebabkan karena servo 3 yang tidak bisa mencapai posisi di bawah 50°. Dari hal tersebut dapat diketahui bahwa setiap aktuator mempengaruhi ketepatan robot lengan pada setiap sumbu, tidak hanya satu sumbu saja.

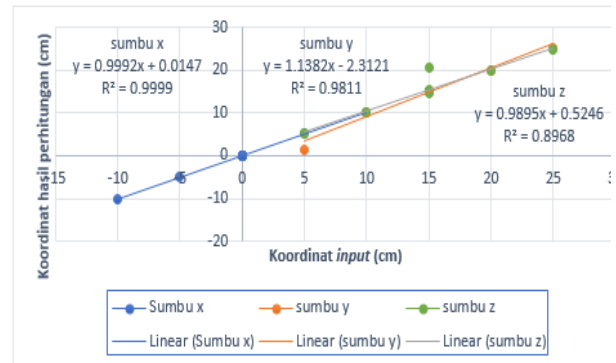
Tabel 6. Ketepatan Robot Lengan Pada Manipulasi Sumbu X.

koordinat input (cm)			koordinat hasil perhitungan (cm)			error (cm)			error (%)		
X	Y	Z	X'	Y'	Z'	x	y	Z	x	Y	z
-10	15	15	-9.78	15.06	14.99	0.22	0.06	0.01	2.2	0.4	0.07
			-10.04	14.89	14.99	0.04	0.11	0.01	0.4	0.73	0.07
			-10.1	14.98	14.69	0.1	0.02	0.31	1	0.13	2.07
-5	15	15	-4.91	15.1	15.25	0.09	0.1	0.25	1.8	0.67	1.67
			-4.89	15.05	14.97	0.11	0.05	0.03	2.2	0.33	0.2
			-4.89	15.05	14.97	0.11	0.05	0.03	2.2	0.33	0.2
0	15	15	0	15.13	14.96	0	0.13	0.04	0	0.87	0.27
			0	14.95	14.95	0	0.05	0.05	0	0.33	0.33
			0	14.95	14.95	0	0.05	0.05	0	0.33	0.33
5	15	15	5.15	14.96	14.97	0.15	0.04	0.03	3	0.27	0.2
			5.15	14.96	14.97	0.15	0.04	0.03	3	0.27	0.2
			4.89	15.05	14.97	0.11	0.05	0.03	2.2	0.33	0.2
10	15	15	10.04	14.89	14.99	0.04	0.11	0.01	0.4	0.73	0.07
			10	14.82	15.58	0	0.18	0.58	0	1.2	3.87
			10.04	14.89	14.99	0.04	0.11	0.01	0.4	0.73	0.07

Dari Tabel 6 diketahui nilai *error* terbesar untuk sumbu X sebesar 0,22 cm dengan persentase *error* sebesar 2,2%, nilai *error* terbesar untuk sumbu Y sebesar 0,18 cm dengan persentase *error* sebesar 1,2%, dan nilai *error* terbesar untuk sumbu Z sebesar 0,58 cm dengan persentase *error* sebesar 3,87%.

Dari Tabel 4, 5, dan 6 dapat dilihat untuk nilai masukan posisi dan orientasi robot lengan pada koordinat yang sama dapat terjadi nilai *error* yang berbeda. Nilai *error* yang berbeda tersebut disebabkan karena untuk tiap nilai koordinat yang dimasukkan, semua servo akan bergerak untuk mencapai posisi dan orientasi yang dimasukkan. Setiap motor servo memiliki nilai *error* dan nilai *error* motor servo tidak dipengaruhi oleh nilai masukan yang diberikan. Dari ketiga tabel tersebut diketahui persentase *error* rata-rata untuk sumbu X sebesar 0,42%, sumbu Y sebesar 5,03%, dan sumbu Z sebesar 3,46%. Persentase *error* terbesar untuk sumbu X sebesar 3%, sumbu Y sebesar 68,8% dan sumbu Z sebesar 36,4%. Nilai *error* terbesar pada sumbu Y dan Z terjadi ketika nilai sudut θ_3 hasil perhitungan bernilai 50° sedangkan desain mekanik robot lengan tidak memungkinkan hal tersebut.

Dari ketiga tabel tersebut, dibuat suatu grafik hubungan antara koordinat *input* dan koordinat sebenarnya yang dituju robot lengan berdasarkan metode *forward* kinematik sebagai berikut.



Gambar 9. Graik Perbandingan koordinat *input* dengan koordinat hasil perhitungan menggunakan metode *forward* kinematik.

Dari Gambar 9 diketahui baik koordinat sumbu x, y maupun z memiliki grafik perbandingan sudut hasil perhitungan dengan hasil pengukuran yang linier dengan linieritas untuk sumbu X sebesar 0,99, sumbu Y sebesar 0,98, dan sumbu Z sebesar 0,89. Hal tersebut menunjukkan bahwa metode *invers* kinematik merupakan metode yang baik sebagai metode kontrol gerak robot lengan dengan rata-rata persentase *error* yang relatif kecil.

Dari hasil uji yang telah dilakukan juga diketahui bahwa terdapat penurunan nilai *error* dari penelitian terdahulu. Pada penelitian yang dilakukan oleh Oktama (2018), nilai *error* rata-rata koordinat sumbu X sebesar

4,66 cm, sumbu Y sebesar 4,98 cm, dan untuk sumbu Z sebesar 9,57 cm. Dari hasil uji ketepatan robot lengan, didapatkan nilai *error* rata-rata koordinat sumbu X sebesar 0,08 cm, sumbu Y sebesar 0,3 cm, dan sumbu Z sebesar 0,5 cm. Penurunan nilai *error* rata-rata dari penelitian sebelumnya untuk koordinat sumbu X sebesar 4,58 cm, untuk sumbu Y sebesar 4,68 cm, dan sumbu Z sebesar 9,07 cm.

SIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan didapat hasil motor servo yang digunakan sebagai aktuator robot lengan memiliki akurasi yang baik dengan persentase *error* rata-rata untuk servo 1 sebesar 0,14%, servo 2 sebesar 0,43%, dan servo 3 sebesar 6,47%. Servo 3 pada robot lengan memiliki nilai minimal yang bisa dicapai yaitu sebesar 50° . Hal tersebut disebabkan karena desain mekanik robot lengan yang tidak memungkinkan untuk *link* 2 dan 3 membentuk sudut yang lebih kecil dari 50° . Hal ini juga sesuai dengan kekurangan metode *invers* kinematik dimana robot lengan dapat kehilangan beberapa derajat bebasnya untuk suatu titik tertentu (RUS, 2011). Pada penelitian, persentase *error* rata-rata robot lengan untuk sumbu X sebesar 0,42%, sumbu Y sebesar 5,03%, dan sumbu Z sebesar 3,46%. Persentase *error* terbesar untuk sumbu X sebesar 3%, sumbu Y sebesar 68,8% dan sumbu Z sebesar 36,4%. Nilai *error* terbesar pada sumbu Y dan Z terjadi ketika nilai sudut θ_3 hasil perhitungan bernilai 50° . Pada penelitian yang dilakukan, terdapat penurunan nilai *error* rata-rata dari penelitian yang dilakukan oleh Oktama (2018), yaitu untuk koordinat sumbu X sebesar 4,58 cm, untuk sumbu Y sebesar 4,68 cm, dan sumbu Z sebesar 9,07 cm. Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa Metode *invers* kinematik merupakan metode yang baik sebagai metode kontrol gerak robot lengan dengan rata-rata persentase *error* yang relatif kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- D. E. WHITNEY, C. A. (1986). INDUSTRIAL ROBOT FORWARD CALIBRATION METHOD AND RESULTS. JOURNAL OF DYNAMIC SYSTEM, MEASUREMENT, AND CONTROL, 108(1):1-8.
- Frisyras, A. K., Moulitanus, V. C., & Aspragatos, N. A. (2018). ANNs to approximate all the invers kinematic solutions off non-cuspidal manipulators. *IFAC*, 418-423.
- Khomariah N. E., & Huda, S. (2018). Udiebot: Implementasi Inverse Kinematic pada Quadrupe Robot. *ISSN*, 2541-4585.
- Kucuk, S. a. (2006). Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics, Industrial. *ISBN*, 3-86611-285-8.
- Kusuma, J. W. (2013). Penerapan Invers Kinematik Terhadap Pergerakan Kaki Pada Robot Hexapod.
- Muslimin, S., Salahuddin, K., & Prihatini, E. (2017). Implementasi Invers Kinematics Terhadap Pola Gerak Hexapod Robot 2 DOF. *ISSN*, 2579-650.
- Oktama, R. R. (2018). Implementasi Robot Lengan Pindah Barang 3 DOF Menggunakan Metode Invers Kinematics. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 2810-2816.
- RUS, D. (2011). *Robotics System and science Lecture 14: Forward and Inverse Kinematics*. Cambridge: MIT.
- Saefullah, a. D. (2014). Sistem Kontrol Robot Pindah Barang Menggunakan Aplikasi Arduino Berbasis ARDUINO UNO. *ISSN*, 1978-8282.
- STONE, H. W. (1987). *KINEMATIC MODELING IDENTIFICATION, AND CONTROL OF ROBOTIC MANIPULATORS*. 101 PHILIP DRIVE, ASSINIPPI PARK, NORWELL, MASSACHUSETTS 02061. : KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS .