

Pemodelan Forward Kinematic dan Inverse Kinematic Robot Berlengan PUMA 560

Atikah Surriani, Muhammad Arrofiq, Fahmizal

Departemen Teknik Teknik Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada
Jalan Yacarana Sekip Unit IV, Caturtunggal, Depok, Sleman, Yogyakarta 55281
e-mail: atikah.surriani.sie13@mail.ugm.ac.id, rofiqm@gmail.com, fahmizal@ugm.ac.id

Abstract

Robot arm manipulator needs the proper degree movement for obtaining the right position. This research concerns to kinematics problem for manipulate kinematics chains of robot that has six joints. It shows relation of the angle in each joint and the position of end-effector. Robot arm manipulator is modeled as PUMA 560 which has 6 joints. DH (Denavit-Hartenberg) parameter is used as the method to present modelling of PUMA 560. Moreover, forward kinematics and inverse kinematics of the robot can be computed and analyzed in mathematic model. For the legitimation of the modeling, we do simulate the PUMA 560 robot based on the Robotic, Vision and Control (RVC) tools by Peter. I. Corke. Forward kinematic of PUMA 560 robot is displayed in 4 modes that each mode has a different angle in every joint. It is represented in 3D to verify movement and position of this six joints robot manipulator. The result for inverse kinematic of PUMA 560 based on its position or coordinate has a different angle to its forward kinematic's value for each mode. The differences occur because the configuration of PUMA 560, so inverse kinematic's value has no a unique solution.

Keywords: PUMA 560, forward kinematic, inverse kinematics

Abstrak

Robot berlengan memerlukan derajat pergerakan yang tepat untuk mendapatkan posisi yang tepat. Pada penelitian ini fokus pada permasalahan kinematika robot berlengan yang memiliki 6 *joint*. Penelitian ini akan menunjukkan hubungan dari sudut setiap *joint* dan posisi dari *end-effector*. Robot berlengan dimodelkan sebagai robot PUMA 560 yang memiliki 6 *joint*. Representasi matematis dari robot PUMA 560 menggunakan parameter pada metode DH (*Denavit-Hartenberg*), dan *forward kinematic* sehingga *inverse kinematic* dari robot PUMA 560 dapat dianalisis dalam model matematis. Sebagai legitimasi dari model matematis tersebut akan dilakukan simulasi dengan menggunakan *Robotic, Vision and Control (RVC) tools* berdasarkan model Peter.I.Corke. *Forward kinematic* dari robot PUMA 560 model akan ditampilkan dalam 4 mode yang memiliki sudut yang berbeda pada masing-masing *joint*. Simulasi *forward kinematic* direpresentasikan dalam 3D untuk memperlihatkan perubahan pergerakan dan posisi dari robot berlengan dengan 6 *joint*. Hasil dari *inverse kinematic* robot PUMA 560 berdasarkan posisi dan koordinat robot memiliki nilai sudut yang berbeda dari nilai sudut saat *forward kinematic* di setiap mode. Perbedaan tersebut terjadi karena perbedaan konfigurasi dari robot PUMA 560, sehingga nilai *inverse kinematic* robot PUMA 560 adalah tidak unik.

Kata Kunci: PUMA560; forward kinematic; inverse kinematics

1. Pendahuluan

Kompetisi pada pasar global bersaing sangat ketat pada beberapa dekade ini. Berbagai produk industri banyak berkembang dalam berbagai bidang. Salah satu industri yang berkembang adalah industri robot terutama industri robot berlengan. Industri robot berlengan berkembang secara pesat karena sangat membantu dalam proses manufaktur agar lebih efisien dan memiliki kualitas yang sangat baik [1] [2].

Robot berlengan yang menjadi standar penelitian dan masih menjadi rujukan hingga sekarang adalah robot PUMA 560[3]. Robot PUMA 560 memiliki dasar model konstruksi dan konfigurasi yang fundamental dalam penelitian mengenai robot berlengan. Bidang penelitian yang sangat esensial bagi Robot berlengan PUMA 560 adalah analisis *forward kinematic* dan *inverse kinematic* [4]. Penelitian mengenai *forward kinematic* dan *inverse kinematic* Robot PUMA 560 masih menjadi penelitian yang sangat populer dikarenakan pada Robot PUMA 560 memiliki 6 *joint*

revolute sebagai konfigurasi dasar penyusun kerangka Robot PUMA 560. Dengan konfigurasi yang terdiri dari 6 *joint* maka pemodelan, analisis *forward kinematic* dan *inverse kinematic* menjadi sangat rumit. Konfigurasi robot PUMA 560 dengan 6 *joint* menjadikan nilai *inverse kinematic*-nya tidak unik.

Forward kinematic dan *inverse kinematic* Robot PUMA 560 dianalisis dengan menggunakan parameter Denavit Hartenberg. Denavit Hartenberg merupakan metode klasik yang digunakan untuk menganalisis *forward kinematic* dan *inverse kinematic* [5] [6]. Standar Robot PUMA yang digunakan pada penelitian ini menggunakan standar robot berdasarkan pemodelan Peter I. Corke [7]. Pada penelitian ini, akan memodelkan dan mensimulasikan *forward kinematic* dan *inverse kinematic* dari robot berelengan 6 *joint*, PUMA 560. Hasil *forward kinematic* dan *inverse kinematic* dari robot PUMA 560 pada penelitian ini akan ditampilkan dalam bentuk simulasi 3 dimensi menggunakan Matlab.

2. Metode Penelitian

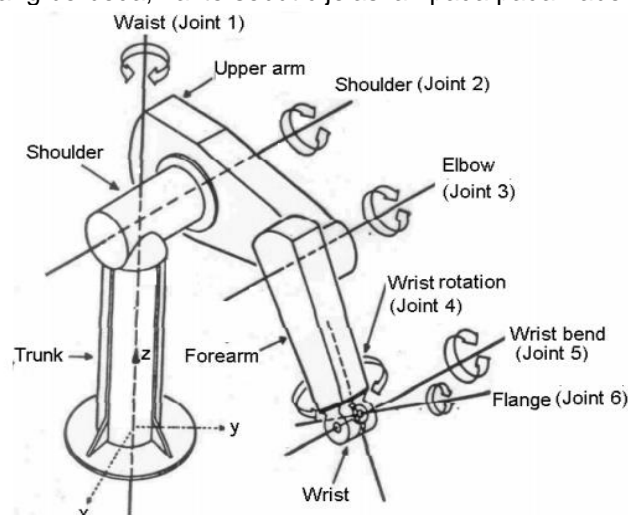
2.1. Konfigurasi Robot PUMA 560

Pada bidang otomasi, salah satu robot berelengan adalah robot yang sangat penting. Robot berelengan memiliki banyak fungsi yang mendukung dunia otomasi pada industri manufaktur. Konfigurasi robot PUMA 560 akan digunakan pada penelitian ini. Robot PUMA 560 atau (*Programmable Universal Manipulator for Assembly*) pertama kali dirilis pada tahun 1978. Robot PUMA dikembangkan oleh *Victor Scheinmann* di bawah industri robot *unimation* seperti pada Gambar 1 [3].



Gambar 1. *Unimate* robot PUMA 560 [8]

Robot PUMA 560 memiliki 6 *joint*. Seluruh *joint* yang terdapat pada robot PUMA 560 merupakan *joint revolute*. Dengan *joint* tersebut berarti robot dapat melakukan pergerakan memutar. Konfigurasi robot PUMA 560 dengan 6 *joint* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Gambar 2 menunjukkan 6 *joint* yang terdapat pada robot PUMA 560. Masing-masing *joint* memiliki batas dan area rotasi yang berbeda, hal tersebut dijelaskan pada pada Tabel 1.



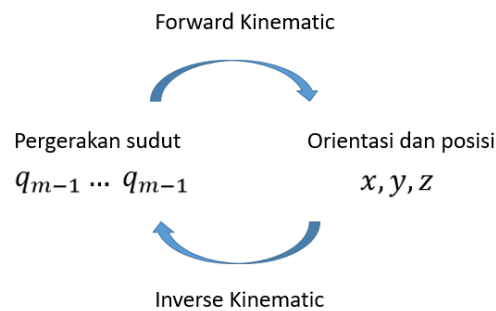
Gambar 2. 6 *Joint* pada robot PUMA 560 [9].

Tabel 1. Area kerja 6 *joint* robot PUMA 560 [1]

<i>Joint</i>	Area Kerja (Derajat)
1	-160 – 160
2	-245 – 45
3	-45 – 225
4	-110 – 170
5	-100 – 100
6	-266 – 266

2.2. Forward Kinematic dan Inverse Kinematic

Ilmu mengenai kinematika robot merupakan ilmu yang mempelajari tentang pergerakan kerangka robot [9]. Pergerakan kerangka robot tersebut dianalisis dengan memperhatikan konfigurasi dan kerangka tubuh robot secara mekanis yang memiliki lebih dari 1 *joint* (*multi-joints*) [1]. Pada *forward kinematic* adalah bagaimana mencari posisi dan orientasi dari *end-effector* dari robot berdasarkan nilai pergerakan sudut pada seriap kerangka koordinat atau *frame* masing-masing *joint*. *Inverse kinematic* adalah sebaliknya, menentukan nilai konfigurasi dari pergerakan *joint* dari nilai posisi dan orientasi tertentu [10]. Penjelasan mengenai *forward kinematic* dan *inverse kinematic* akan diilustrasikan pada Gambar 3,



Gambar 3. Hubungan *forward kinematic* dan *inverse kinematic*.

Forward kinematic dapat ditulis sebagai

$$\mathfrak{K}_F = \mathfrak{J}(q) \tag{1}$$

Dengan posisi *end-effector* sebagai fungsi untuk menentukan koordinat. Menentukan *forward kinematic* dapat dilakukan dengan menggunakan matrik transformasi homogen. Matrik transformasi homogen tersebut dapat digunakan pada robot yang memiliki m-sumbu [7][11].

Pada model robot PUMA 560 yang dimodelkan oleh Peter.I.Corke memiliki 4 posisi yaitu: *zero angle* saat posisi setiap sumbu di setiap *joint* bernilai (0,0,0,0,0,0), posisi *ready* $(0, \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}, 0, 0, 0)$, posisi *stretch* $(0, 0, -\frac{\pi}{2}, 0, 0, 0)$, dan posisi *nominal* $(0, \frac{\pi}{4}, -\pi, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$. *Inverse kinematic* dinotasikan (\mathfrak{J}) sebagai berikut

Jurnal Ilmu Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI)
 Vol. 4, No. 2, Desember 2018 (2)

k. Sehingga ketika ingin menentukan posisi *end-effector* dari sebuah robot dapat memiliki solusi lebih dari satu.

2.3. Matrik Transformasi Homogen

Matrik transformasi homogen adalah matrik yang digunakan untuk menentukan nilai *forward kinematic* maupun *inverse kinematic* suatu robot yang memiliki lebih dari satu sumbu. Matrik transformasi homogen berukuran 4x4 yang mana dapat merepresentasikan orientasi dan posisi dari Robot [12]. matrik homogen digunakan untuk menunjukkan hubungan spasial antar *joint* untuk mendapatkan transformasi matrik antara *end effector* dan kerangka koordinat utama [13]. Persamaan dari matrik transformasi homogen adalah,

$$\mathbf{N}_F = \begin{bmatrix} {}^0_F\mathbf{R} & {}^0_F\mathbf{o} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{N}_F \sim {}^0_FT = {}^0_1\mathbf{A} {}^1_2\mathbf{A} \dots {}^{m-1}_m\mathbf{A}, \quad (4)$$

$${}^{m-1}_m\mathbf{A} = \begin{bmatrix} {}^0_F\mathbf{R} & {}^0_F\mathbf{o} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Maka,

$$\mathbf{N}_F \sim {}^0_FT = {}^0_1\mathbf{A} {}^1_2\mathbf{A} \dots {}^{m-1}_m\mathbf{A} = \begin{bmatrix} {}^0_F\mathbf{R} & {}^0_F\mathbf{o} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Dimana, ${}^0_F\mathbf{R}$ adalah rotational matrik yang berputar dari *frame* 0 ke *frame* F dan ${}^0_F\mathbf{o}$ merupakan orientasi.

2.4. Metode Denavit-Hartenberg

Metode *Denavit-Hartenberg* (DH) merupakan metode perhitungan robot berelengan klasik yang masih relevan digunakan hingga sekarang[14]. Metode ini digunakan untuk membangun korespondensi berupa matrik homogen yang merepresentasikan hubungan spasial antar *joint* untuk mendapatkan transformasi matrik antara *end-effector* dan kerangka koordinat utama [13].

Forward kinematic dapat dihitung berdasarkan jumlah dan tipe *joint* yang digunakan, hal ini yang menjadi dasar perhitungan *forward kinematic* robot PUMA 560 yaitu dengan menggunakan parameter *Denavit-Hartenberg*. Denavit Hartenberg mendeskripsikan setiap *link* pada robot dalam beberapa parameter [15].

Terdapat empat parameter dasar yang dapat merepresentasikan *link* m dan *joint* m, yaitu *link length*, *link twist*, *link offset*, dan *joint angle*. Setiap parameter dinotasikan sebagai a_m untuk *link length*, α_m untuk *link twist*, d_m untuk *link offset* dan θ_m untuk *joint angle* [16]. Berdasarkan ketetapan dari formula Denavit Hartenberg, setiap nilai matrik homogen ${}^{m-1}_m\mathbf{A}$ merepresentasikan ketetapan berikut,

$${}^{m-1}_m\mathbf{A} = Rot_{z,\theta_m} Trans_{z,d_m} Trans_{x,\alpha_m} Rot_{x,\alpha_m}. \quad (7)$$

Notasi tersebut didapat untuk merepresentasikan aspek geometri masing-masing parameter terhadap *frame* tertentu.

3. Hasil dan Pembahasan

Mula-mula ditentukan DH Parameter robot PUMA 560. Setelah menentukan DH Parameter kemudian membuat pemodelan dan melakukan simulasi robot *inverse kinematic* dan *forward kinematic* PUMA 560.

3.1. DH Parameter Robot PUMA 560

Pada penelitian ini, robot PUMA 560 menggunakan DH parameter yang terdapat pada RVC *tool* oleh Corke. DH Parameter yang digunakan adalah *link length*, *link twist*, *link offset*, dan *joint angle* yang dinotasikan sebagai a_m , α_m , d_m θ_m . DH parameter ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. *Link* DH parameter (Peter Corke, *Unimation; viscous friction, params of 8/95*) [8].

Denavit Hartenberg <i>Link</i> Parameter Untuk Robot PUMA 560				
$Joint_m$	θ_m	d_m	a_m	α_m
1	q1	0	0	1,571
2	q2	0	0,4318	0
3	q3	0,15	0,0203	-1,571
4	q4	0,4318	0	1,571

5	q5	0	0	-1,571
6	q6	0	0	0

Berdasarkan matrik transformasi homogen pada (6) dan (7) dari Robot PUMA 560, jika semua *joint*-nya berputar maka didapat persamaan berikut pada masing-masing *joint*,

$${}^0_1A = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$${}^1_2A = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2s_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^2_3A = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & s_3 & a_3c_3 \\ s_3 & 0 & -c_3 & a_3s_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^3_4A = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$${}^4_5A = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & -c_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^5_6A = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Sehingga berdasarkan (6), didapat persamaan

$${}^0_3T = {}^0_3A = {}^0_1A {}^1_2A {}^2_3A = \begin{bmatrix} {}^0_3R & {}^0_3O \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c_1c_{23} & -s_1 & c_1s_{23} & a_2c_1c_2 + a_3c_1c_{23} - d_2s_1 \\ s_1c_{23} & c_1 & s_1s_{23} & a_2s_1c_2 + a_3s_1c_{23} - d_2c_1 \\ -s_{23} & 0 & c_{23} & -a_2s_2 - a_2s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^3_6T = {}^3_6A = {}^3_4A {}^4_5A {}^5_6A = \begin{bmatrix} {}^3_6R & {}^3_6O \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$${}^3_6T = \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -c_4c_5s_6 - s_4c_6 & c_4s_5 & d_6c_4s_5 \\ s_4c_5c_6 + c_4s_6 & -s_4c_5s_6 - c_4c_6 & s_4s_5 & d_6s_4s_5 \\ -s_5c_6 & s_5s_6 & c_5 & d_6c_5 + d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Dengan $c_{ij} \equiv \cos(\theta_i + \theta_j)$ dan $s_{ij} \equiv \sin(\theta_i + \theta_j)$. Maka transformasi matrik antara *end-effector* dan kerangka koordinat utama ${}^0_F T$ adalah

$${}^0_6T = {}^0_3T {}^3_6T = {}^0_1A {}^1_2A {}^2_3A {}^3_4A {}^4_5A {}^5_6A. \quad (18)$$

Maka matrik transformasi yang menyatakan hubungan dari kerangka koordinat utama (0) hingga kerangka koordinat pada *joint* terakhir yang merupakan *end-effector* (6), 0_6T , adalah

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} {}^0_6R & {}^0_6\mathbf{o} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & o_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & o_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & o_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Berdasarkan (19), maka didapatkan persamaan *kinematic* dari Robot PUMA 560 sebagai berikut,

$$r_{11} = c_1 [c_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_{23} s_5 c_6] - s_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6) \quad (20)$$

$$r_{21} = s_1 [c_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_{23} s_5 c_6] + c_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6) \quad (21)$$

$$r_{31} = -s_{23} - (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - c_{23} s_5 c_6 \quad (22)$$

$$r_{12} = c_1 [-c_{23} (c_4 c_5 s_6 + s_4 s_6) + s_{23} s_5 s_6] - s_1 (-s_4 c_5 s_6 + c_4 s_6) \quad (23)$$

$$r_{22} = s_1 [-c_{23} (c_4 c_5 s_6 + s_4 s_6) + s_{23} s_5 s_6] + c_1 (-s_4 c_5 s_6 + c_4 s_6) \quad (24)$$

$$r_{32} = s_{23} (c_4 c_5 s_6 + s_4 s_6) + c_{23} s_5 s_6 \quad (25)$$

$$r_{13} = c_1 (c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5) - s_1 s_4 s_5 \quad (26)$$

$$r_{23} = s_1 (c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5) + c_1 s_4 s_5 \quad (27)$$

$$r_{33} = -s_{23} c_4 s_5 + c_{23} c_5 \quad (28)$$

$$o_x = c_1 [d_6 (c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5) + s_{23} d_4 + a_3 c_{23} + a_3 c_2] - s_1 (d_6 s_4 s_5 + d_2) \quad (29)$$

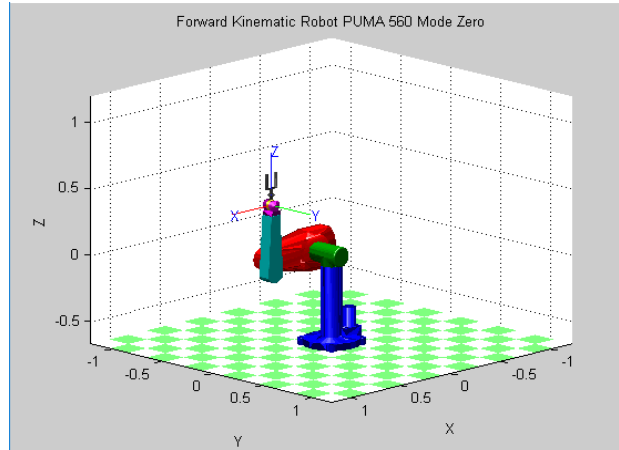
$$o_y = s_1 [d_6 (c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5) + s_{23} d_4 + a_3 c_{23} + a_3 c_2] - c_1 (d_6 s_4 s_5 + d_2) \quad (30)$$

$$o_z = d_6 (c_{23} c_5 - s_{23} c_4 s_5) + c_{23} d_4 - a_3 s_{23} - a_2 s_2. \quad (31)$$

3.2. Simulasi dan Analisis

3.2.1. Forward kinematic

Pada penelitian yang berbasis pada model robot PUMA 560 yang dimodelkan oleh Peter.I.Corke memiliki 4 posisi yaitu: *zero angle* saat nilai sudut setiap sumbu pada masing-masing 6 *joint* bernilai (0,0,0,0,0,0), posisi *ready* $(0, \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}, 0,0,0)$, posisi *stretch* $(0,0, -\frac{\pi}{2}, 0,0,0)$, dan posisi *nominal* $(0, \frac{\pi}{4}, -\pi, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$. Hasil simulasi menggunakan *RVC tool* menunjukkan posisi masing-masing mode robot PUMA 560. Gambar 4 menunjukkan posisi robot PUMA 560 pada mode *zero*

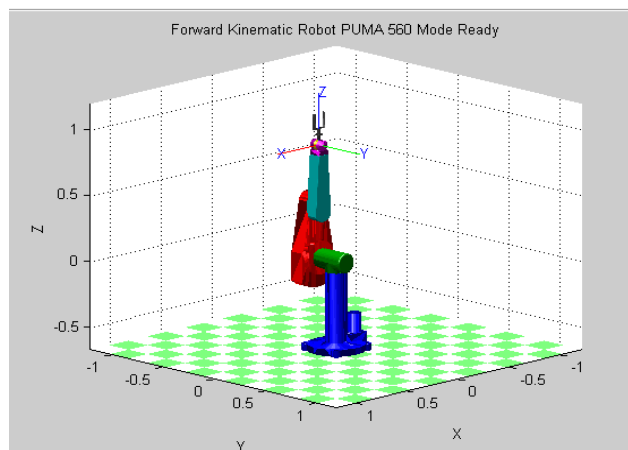


Gambar 4. Robot PUMA 560 zero mode

Hasil simulasi posisi dari *forward kinematic* mode zero adalah

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,4521 \\ 0 & 1 & 0 & -0,1500 \\ 0 & 0 & 1 & 0,4381 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Nilai koordinat posisi *end-effector* (x, y, z) hasil *forward kinematic* pada (32) adalah (0,4521; -0,1500; 0,4381). Pada Gambar 5. Menggambarkan posisi robot PUMA 560 pada mode *ready*,



Gambar 5. Robot PUMA 560 ready mode.

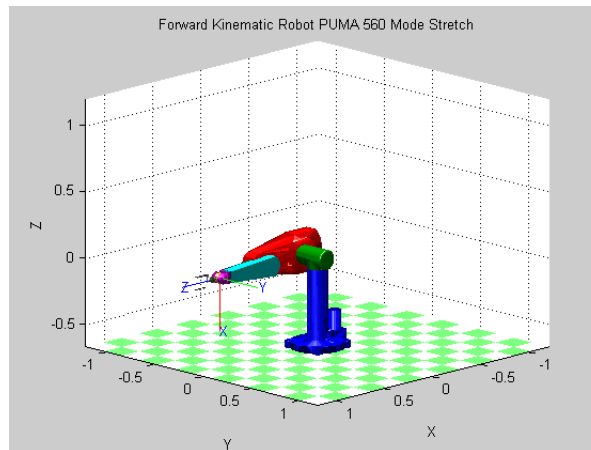
Pada robot PUMA mode *ready*, posisi robot adalah lurus dan vertikal. Hasil simulasi posisi dari *forward kinematic* mode *ready* adalah :

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,0203 \\ 0 & 1 & 0 & -0,1500 \\ 0 & 0 & 1 & 0,8636 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Nilai koordinat posisi *end-effector* (x, y, z) hasil *forward kinematic* pada (33) masing-masing adalah (0,0203; -0,1500; 0,8636). Gambar 6. Memperlihatkan posisi robot PUMA 560 pada mode *stretch*, dimana posisi lengan robot PUMA 560 adalah lurus dan horizontal. Posisi lengan robot pada mode *stretch* adalah sebagai berikut

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0,8636 \\ 0 & 1 & 0 & -0,1501 \\ -1 & 0 & 0 & -0,0203 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Koordinat posisi *end-effector* (x, y, z) hasil *forward kinematic* pada (34) masing-masing memiliki nilai (0,8636; -0,1501; -0,0203).

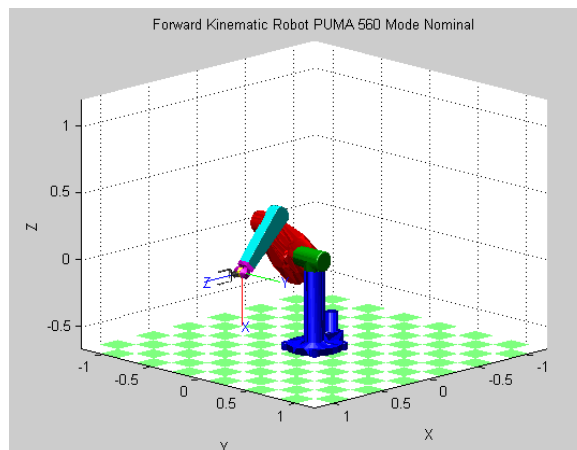


Gambar 6. Robot PUMA 560 *stretch* mode.

Gambar 7. Memperlihatkan posisi robot PUMA 560 pada mode nominal, yaitu posisi lengan robot dalam kondisi bekerja. Posisi lengan robot pada mode *nominal* adalah sebagai berikut

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0,5963 \\ 0 & 1 & 0 & -0,1501 \\ -1 & 0 & 0 & -0,01435 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Koordinat posisi *end-effector* (x, y, z) hasil *forward kinematic* pada (35) masing-masing memiliki nilai (0,5963; -0,1501; -0,01435).



Gambar 7. Robot PUMA 560 *nominal* mode.

3.2.2. Inverse kinematic

Setelah melakukan simulasi posisi pergerakan terhadap masing-masing *joint* berdasarkan beberapa mode dan mendapatkan ilustrasi posisi dari robot PUMA 560, maka selanjutnya akan dilakukan simulasi dan analisis pada *inverse kinematic* robot tersebut. Berdasarkan simulasi didapat nilai *inverse kinematic* dari masing-masing mode, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. *Inverse kinematic* robot PUMA 560.

<i>Joint</i>	Mode Zero	Mode Ready	Mode Stretch	Mode Nominal
1	2,5007	0,2689	2,7975	2,6486
2	1,6167	1,5708	-3,1416	-3,9270
3	0,0000	-1,4768	-1,4768	0,0940
4	3,1416	3,1416	1,8269	2,5326
5	1,6167	0,0940	0,3562	0,9743
6	0,6409	2,8726	1,2984	0,3734

Berdasarkan *Inverse kinematic* robot PUMA 560 pada Tabel 3 memperlihatkan hasil yang berbeda dengan nilai *joint* pada *forward kinematic*. Hal ini menunjukkan bahwa solusi dari *inverse kinematic* adalah tidak unik. Perbedaan tersebut dikarenakan konfigurasi dari robot berelengan yang dapat menggunakan berbagai konfigurasi. Kombinasi konfigurasi dari robot berelengan PUMA 560 diantaranya yaitu kondisi dimana *right* atau *left handed*, *elbow* dalam kondisi *up* atau *down*, *wrist* dalam kondisi *flipped* atau *not flipped*. Analisis lebih lanjut terkait robot PUMA 560 diperlukan agar konfigurasi tersebut mendapatkan nilai *inverse kinematic* yang tepat.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilaksanakan, dapat diambil kesimpulan bahwa *forward kinematic* pada robot PUMA 560 telah disimulasikan dan didapatkan posisi dengan ilustrasi 3 dimensi pada beberapa mode, diantaranya *zero* (0,0,0,0,0,0), *ready* $(0, \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}, 0,0,0)$, *stretch* $(0,0, -\frac{\pi}{2}, 0,0,0)$, dan *nominal* $(0, \frac{\pi}{4}, -\pi, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$. Pada *inverse kinematic* didapatkan solusi yang berbeda dari nilai *joint forward kinematic* yaitu, pada mode *zero* (2,5; 1,6; 0; 3,1; 1,6; 0,6), pada mode *ready* (0,2; 1,5; -1,4; 3,1; 0,09; 2,8), pada mode *stretch* (2,7; -3,1; -1,4; 1,8; 0,3; 1,2), pada mode *nominal* (2,6; -3,9; 0,09; 2,5; 0,9; 0,3). Perbedaan nilai tersebut membuktikan bahwa solusinya *inverse kinematic* tidak unik. Perbedaan tersebut dikarenakan perbedaan kondisi dan konfigurasi robot PUMA 560.

Referensi

- [1] A. Benitez, I. Huitzil, M. M. A. Jorge, D. La Calleja, T. Carril, and J. C. Bonilla, "A 3D Simulation Environment for Kinematic TAsk of the PUMA 560 Robot.", *Conf. 21st Int. Conf. on Electr. Com. and Comp., April, 2011*
- [2] C. Han, H. Ma, W. Zuo, S. Chen, and X. Zhang, "A general 6-DOF industrial robot arm control system based on Linux and FPGA," *Proc. 30th Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2018*, pp. 1220–1225, 2018.
- [3] H. A. Hendarto, Munadi, and J. D. Setiawan, "ANFIS application for calculating inverse kinematics of programmable universal machine for assembly (PUMA) robot," *2014 1st Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Electr. Eng. Green Technol. Its Appl. a Better Futur. ICITACEE 2014 - Proc.*, pp. 35–40, 2015.
- [4] A. Patil, M. Kulkarni, and A. Aswale, "Analysis of the inverse kinematics for 5 DOF robot arm using D-H parameters," *2017 IEEE Int. Conf. Real-Time Comput. Robot. RCAR 2017*, vol. 2017–July, pp. 688–693, 2018.
- [5] A. N. Barakat, K. A. Gouda, and K. A. Bozed, "Kinematics analysis and simulation of a robotic arm using MATLAB," *4th Int. Conf. Control Eng. Inf. Technol. CEIT 2016*, no. December, pp. 16–18, 2017.
- [6] K. Lee, J. Lee, B. Woo, and J. Lee, "Modeling and Control of a Articulated Robot Arm with

- Embedded Joint Actuators,” *2018 Int. Conf. Inf. Commun. Technol. Robot.*, pp. 1–4.
- [7] B. Siciliano, O. Khatib, and F. Groen, “Robotics, Vision and Control,” *Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 73. Springer, Berlin, p. 570, 2011.
- [8] P. Corke, *Robotics Vision and Control, Fundamental Algorithms in MATLAB ®*, vol. 73. Springer Tracts in Advance Robotics, 2011.
- [9] P. Marothiya and S. Saha, “Robot inverse kinematics and dynamics algorithms for windows,” *Recent Trends Manuf.*, pp. 229–237, 2003.
- [10] K. Bouzguo and Z. Ahmed-Foith, “Geometric modeling and singularity of 6 DOF Fanuc 200IC robot,” *4th Int. Conf. Innov. Comput. Technol. INTECH 2014 3rd Int. Conf. Futur. Gener. Commun. Technol. FGCT 2014*, pp. 208–214, 2014.
- [11] M. Gao, Z. Li, X. Meng, Z. He, J. Huang, and K. Yin, “Adaptive velocity planning for 6-DOF Robots with fixed tracks,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 2016–November, pp. 350–354, 2016.
- [12] M. M. Ali, H. Liu, R. Stoll, and K. Thurow, “Arm grasping for mobile robot transportation using Kinect sensor and kinematic analysis,” *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, vol. 2015–July, pp. 516–521, 2015.
- [13] Y. Feng, Z. Huang, and Y. Zhang, “Motion Planning of a 6-Dofs Robot Arm for Bandaging Nursing Task”, *Asia-Pacific Sig. and Inf. Proc. Assoc. Annual Summit and Conf.*, December, pp. 409–413, 2017.
- [14] S. Han, H. Wang, and Y. Tian, “Integral backstepping based computed torque control for a 6 DOF arm robot,” *Proc. 29th Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2017*, pp. 4055–4060, 2017.
- [15] P. Srisuk, A. Sento, and Y. Kitjaidure, “Forward kinematic-like neural network for solving the 3D reaching inverse kinematics problems,” *ECTI-CON 2017 - 2017 14th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol.*, pp. 214–217, 2017.
- [16] Spong, “Robot dynamics and control,” *Automatica*, vol. 28, no. 3, pp. 655–656, 1992.