

Analisis Kinematika Maju dari Tangan Robotik Berjari 4 yang Digunakan pada Robot Humanoid T-FLoW

Kevin Ilham Apriandy¹, Bima Sena Bayu Dewantara², Raden Sanggar Dewanto³, Dadet Pramadihanto⁴

¹kevinapriandy@gmail.com, ²bima@pens.ac.id, ³sanggar@pens.ac.id, ⁴dadet@pens.ac.id

Robotics and Intelligent Systems Center (RoISC), Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS)

Informasi Artikel

Diterima : 19 Jul 2023
Direview : 26 Jul 2023
Disetujui : 17 Ags 2023

Kata Kunci

Pemodelan Kinematika, Robot Humanoid T-FLoW, Pendekatan Matriks Transformasi Homogen, MATLAB.

Abstrak

Model kinematika merupakan bagian penting dalam pengembangan robot humanoid karena dapat merepresentasikan karakteristik dari robot, membuat pemahaman tentang robot menjadi lebih mudah. Mengingat perkembangan robot humanoid T-FLoW yang saat ini dilengkapi dengan sepasang tangan baru, maka perlu dibangun model kinematika untuk memahami lebih lanjut tentang tangan robot baru tersebut. Oleh karena itu, dalam pekerjaan ini, disajikan sebuah analisis kinematika maju untuk memperoleh model kinematika dari tangan berjari 4 baru robot humanoid T-FLoW. Dengan menggunakan pendekatan matriks transformasi homogen, model kinematika tangan robot diturunkan berdasarkan perkalian beberapa matriks rotasi dan matriks translasi yang tersusun dari *frame* koordinat pangkal ke *frame* koordinat tujuan. Model kinematika yang diturunkan disimulasikan dalam tugas gerak dasar tangan: menggenggam sebuah benda, dihitung dengan bantuan MATLAB, dan divisualisasikan menggunakan fitur plot 3D MATLAB. Hasil menunjukkan bahwa model tersebut memberikan berbagai karakteristik tangan robot seperti konfigurasi, posisi sendi, dan posisi *end-of-effector*, yang kemudian dapat divisualisasikan menjadi kerangka tangan. Kedepannya, pekerjaan kami dapat memfasilitasi pengembang T-FLoW dalam membangun pergerakan tangan dengan sistem umpan balik, yang kemudian dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan desain gerakan tangan.

Keywords

Kinematics Modelling, T-FLoW Humanoid Robot, Homogeneous Transformation Matrix Approach, MATLAB.

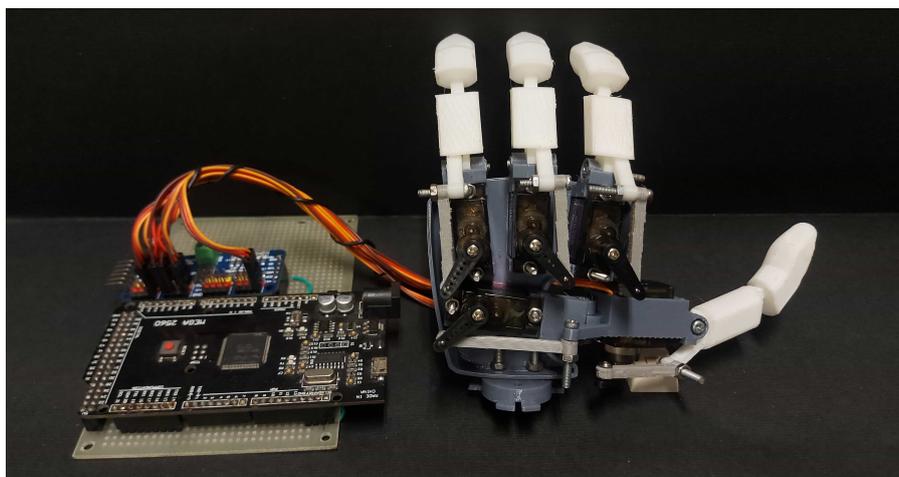
Abstrak

Kinematics models are important part of humanoid robot development as they can represent the characteristics of the robot, making understanding the robot easier. Given the development of the T-FLoW humanoid robot which is currently equipped with a new pair of hands, it is necessary to build a kinematics model to understand more about the new robot hands. Therefore, in this work, a forward kinematics analysis is presented to derive the kinematics model of the new 4-fingered T-FLoW humanoid robot hand. Using a homogeneous transformation matrix approach, the kinematics model of the robot hand is derived based on the multiplication of several rotation and translation matrices arranged from the base coordinate frame to the goal coordinate frame. The derived kinematics model is simulated in a basic hand motion task: grasping an object, calculated with the help of MATLAB, and visualized using MATLAB's 3D plot feature. The results show that the model provide various characteristics of the robot hand such as configuration, joint positions, and end-of-effector positions, which then be visualized into a hand skeleton. In the future, our work can facilitate T-FLoW developers in building hand movement and feedback systems, which then can be used to solve various hand motion design problems.

A. Pendahuluan

RoISC (Robotics and Intelligent Systems Center), —sebelumnya dikenal sebagai ER2C (EEPIS Robotics Research Center)— telah mengembangkan robot humanoid yang bernama T-FLoW [1]–[3] selama beberapa tahun terakhir. Robot tersebut dikembangkan dengan konsep remaja yang memiliki tinggi berkisar antara 140 cm sampai 170 cm [4]–[5]. Pada iterasi pengembangan T-FLoW yang terbaru (T-FLoW 4.0), konsep pengembangan diubah dari yang semula berukuran remaja menjadi berukuran balita dengan tinggi sekitar 95 cm. Perubahan konsep tersebut mengharuskan RoISC untuk merancang ulang semua komponen robot T-FLoW, mulai dari bagian *bipedal*, *torso*, lengan, dan khususnya tangan, agar mencapai ukuran yang sepadan dengan ukuran balita. Pada bagian tangan, rancangan tangan yang awalnya memiliki 5 jari dengan 6 sendi / derajat kebebasan (*DoF*) [6], disederhanakan dan dirancang ulang menjadi 4 jari dengan 5 sendi / derajat kebebasan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Perubahan rancangan tersebut dilakukan agar tangan menjadi lebih ringkas, kecil, dan ringan, sehingga proporsional dengan tubuh robot T-FLoW baru secara keseluruhan. Peluncuran versi baru robot humanoid T-FLoW akan menjadi langkah besar lain dalam upaya RoISC untuk menghadapi tantangan robot humanoid dengan ukuran yang berbeda.

Dengan adanya rancangan tangan yang baru, diperlukan analisis dan pemodelan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih lanjut tentang bagian robot tersebut. Analisis kinematika maju sering digunakan sebagai alat untuk membantu memahami robot, karena model yang dihasilkan dapat merepresentasikan konfigurasi, posisi sendi, posisi *end-of-effector*, dan kemudian dapat divisualisasikan menjadi bentuk sederhana dari struktur robot [7]. Selain itu, model kinematika dapat disimulasikan pergerakannya untuk mengobservasi ruang kerja dan rentang gerak sendi dari robot, serta dapat dibandingkan dengan robot nyata untuk mengidentifikasi perbedaan pergerakan yang mungkin terjadi akibat masalah mekanis [8]. Dengan demikian, analisis dan pemodelan kinematika maju memegang peranan penting dalam memahami bagian baru dari robot, karena model yang terbentuk dapat mendeskripsikan karakteristik robot, sehingga batasan dan perilakunya dapat diketahui [9].



Gambar 1. Tangan robotik berjari 4 yang digunakan pada robot humanoid T-FLoW generasi terbaru

Terdapat berbagai cara untuk menurunkan model kinematika, beberapa di antaranya adalah dengan menggunakan representasi *Screw Theory* [10]–[11], metode *Dual Quaternion* [12]–[13], pendekatan Geometri [14]–[15], dan dua yang paling sering digunakan adalah parameter *Denavit-Hartenberg* (DH) [16]–[18] dan pendekatan matriks transformasi homogen [19]–[20]. Pada pendekatan matriks transformasi homogen, beberapa matriks rotasi dan matriks translasi yang tersusun dari *frame* koordinat pangkal ke *frame* koordinat tujuan dikalikan untuk mendapatkan model kinematika maju. Sementara pada parameter *DH*, idenya pada dasarnya sama, tetapi ada beberapa aturan khusus dalam menentukan *frame* koordinat di tiap-tiap *joint* [21]. Pada akhirnya, hasil dari model kinematika maju yang diperoleh dari kedua pendekatan ini identik, satu-satunya perbedaan adalah pada seberapa mudah solusinya untuk dikerjakan.

Dalam pekerjaan ini, sebuah solusi kinematika maju analitis untuk tangan berjari 4 baru dari robot humanoid T-FLoW menggunakan pendekatan matriks transformasi homogen disajikan. Manfaat dari pekerjaan yang diberikan adalah kesederhanaan, akurasi, dan efisiensi dalam membangun model kinematika. Model kinematika maju tangan yang diturunkan disimulasikan dalam tugas pergerakan tangan dasar, yaitu menggenggam sebuah benda. *Testbed* analisis dilakukan dengan menggunakan lingkungan MATLAB untuk memudahkan operasi matematika dari proses penurunan model kinematika, mengamati konfigurasi dan gerakan tangan, mendapatkan posisi sendi dan *end-of-effector*, dan menampilkannya dalam bentuk grafik. Berdasarkan hasil penelitian, model kinematika maju dari tangan T-FLoW yang dihasilkan dapat memberikan informasi tentang konfigurasi, posisi sendi, dan posisi *end-of-effector*. Informasi tersebut kemudian dapat digunakan sebagai model kerangka robot dalam simulasi, dan dapat dibandingkan dengan robot nyata untuk menemukan perbedaan gerakan jika muncul masalah mekanis. Untuk pekerjaan di masa depan, pekerjaan kami dapat memfasilitasi pengembang T-FLoW dalam membangun pergerakan tangan dengan sistem umpan balik, dan bahkan dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan metode kontrol, perencanaan lintasan, dan desain pergerakan dari tangan robot yang diusulkan.

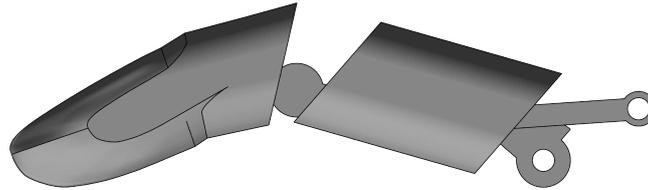
B. Bahan dan Metode

1. Tangan robotik berjari 4 dari robot humanoid T-FLoW

Iterasi terbaru dari robot humanoid T-FLoW (T-FLoW 4.0) memperkenalkan tangan robotik berjari 4 sebagai salah satu bagian tubuhnya. Karena dibangun sebagai bagian dari robot T-FLoW, proses desain dari tangan sangat terpengaruh oleh desain robot secara keseluruhan. Batasan ukuran menjadi pertimbangan saat melakukan proses desain dari tangan, karena mengejar proporsionalitas dengan tubuh T-FLoW 4.0 yang seukuran balita. Hasilnya, tangan robot yang diusulkan didesain hanya untuk menyerupai versi dari tangan manusia yang disederhanakan. Terlepas dari kenyataan bahwa tangan robot yang diusulkan jauh dari kesempurnaan tangan manusia baik dalam fungsi maupun penampilan, tangan tersebut masih mampu melakukan tugas-tugas utama tertentu, misalnya menggenggam dan mencubit.

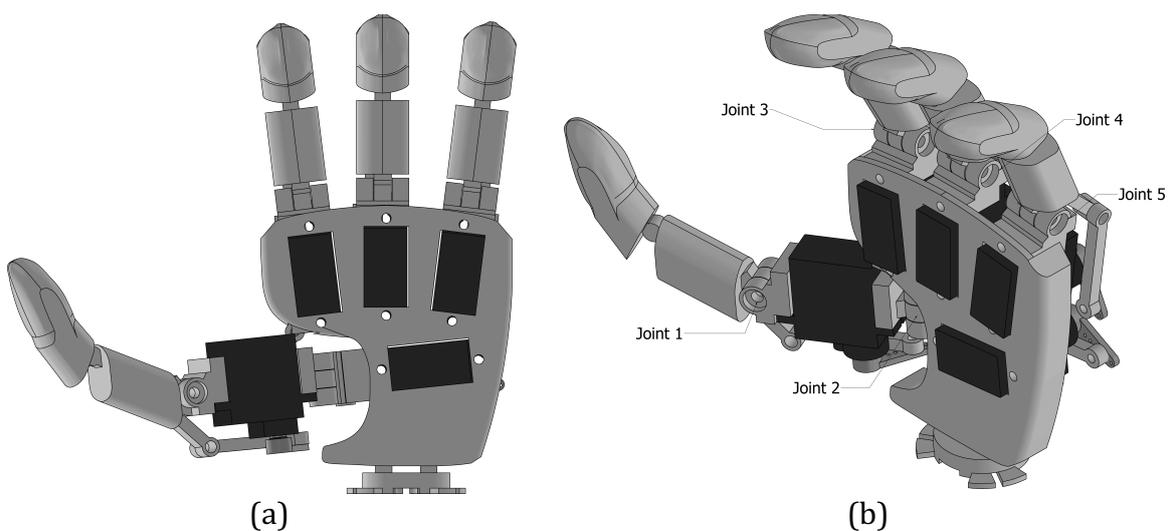
Dalam upaya mencegah tangan robot yang diusulkan menjadi terlalu besar dan rumit, serta mempertahankan ukurannya agar proporsional dengan ukuran balita, dibuatlah keputusan yang tidak populer, yaitu menghilangkan jari kelingking.

Tangan robotik berjari 4 yang diusulkan didesain dengan konfigurasi ibu jari, jari telunjuk, jari tengah, dan jari manis agar tetap berada dalam kriteria tangan robot antropomorfik. Tangan ini hadir dengan empat jari dan lima derajat kebebasan (DoF), yang dibagi menjadi 2-DoF untuk ibu jari dan 1-DoF untuk setiap jari lainnya. Setiap jari tangan memiliki desain yang sama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2., terdiri dari dua *link* dengan panjang 31,9 mm dan 35,8 mm. Terdapat satu *link* tambahan pada ibu jari (*thenar part*), yang memungkinkan tangan untuk memiliki gerakan yang lebih cekatan, dengan panjang 43,43 mm, seperti yang terlihat pada Gambar 8 (a).



Gambar 2. Desain mekanik dari jari robot humanoid T-FLoW

Desain mekanik dari tangan robotik berjari 4 yang diusulkan terdiri dari jari, telapak tangan, dan beberapa unit elektronik pendukung. Terdapat empat metakarpal virtual pada telapak tangan dengan panjang 34,68 mm, 81.74 mm, 78.93 mm, dan 78.83 mm, yang menentukan posisi sendi setiap jari dari pangkal tangan. Enam mikro-servo MG90S, satu untuk setiap sendi jari dan dua untuk sendi ibu jari, digunakan untuk mengendalikan semua sendi / *joint* pada tangan robot. Servo-servo tersebut disematkan ke dalam telapak tangan dan *thenar part* untuk memberikan hasil yang lebih kompak dan tidak memakan ruang. Setiap jari dan *thenar part* memiliki aktuator dan mekanismenya sendiri, dimodulasi menjadi satu unit untuk mencapai hasil yang ringkas dan mudah dirakit. Gambar 3. menunjukkan desain mekanik dari tangan robot yang diusulkan dan Tabel 1 menunjukkan konfigurasi sendi setiap jari tangan robot.



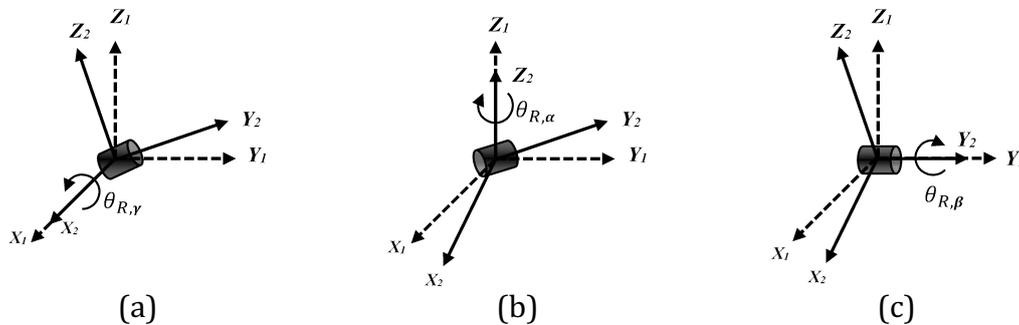
Gambar 3. Desain mekanik dari tangan berjari 4 baru robot humanoid T-FLoW (a) tampak bawah (b) tampak isometri

Tabel 1. Konfigurasi DoF pada tangan robotik berjari 4 dari robot humanoid T-FloW

Part	Angle	Actuator
Thumb Finger	Pitch	1
	Yaw	1
Index Finger	Roll	1
Middle Finger	Roll	1
Ring Finger	Roll	1

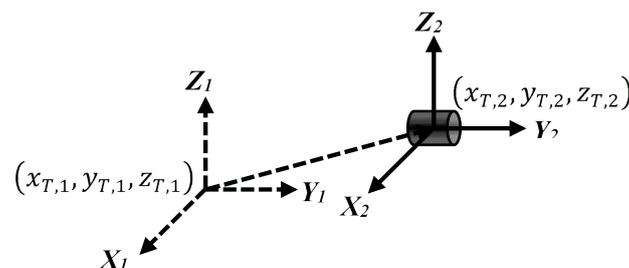
2. Konsep transformasi, rotasi, dan translasi

Transformasi adalah konsep dasar yang mendeskripsikan suatu proses perubahan pose (posisi dan orientasi) dalam suatu ruang tertentu [22]. Transformasi umumnya diterapkan pada berbagai bidang, termasuk pada bidang matematika, fisika, grafik komputer, dan robotika. Transformasi memainkan peran penting dalam pemodelan dan manipulasi objek, memungkinkan representasi dan manipulasi struktur kompleks dengan cara yang lebih nyaman dan intuitif.



Gambar 4. Ilustrasi dari rotasi 3D (a) rotasi sumbu X (Roll) (b) rotasi sumbu Y (Pitch) (c) rotasi sumbu Z (Yaw)

Terdapat berbagai faktor yang dapat menyebabkan transformasi, beberapa diantaranya adalah translasi dan rotasi. Rotasi (perputaran) adalah transformasi yang menggeser atau memindahkan titik dengan cara memutar titik tersebut sejauh θ sepanjang busur lingkaran pusat rotasi. Rotasi bernilai positif jika arahnya berlawanan jarum jam, dan juga sebaliknya. Terdapat 3 jenis pada rotasi 3D yaitu rotasi *Roll*, *Pitch*, dan *Yaw*. Translasi (pergeseran) adalah transformasi yang memindahkan objek sepanjang garis lurus dengan arah dan jarak tertentu [23]. Translasi bernilai positif jika perpindahannya searah dengan *axis* dari *frame* koordinat acuan, dan sebaliknya. Transformasi dari ketiga jenis rotasi dan translasi tersebut diilustrasikan pada Gambar 4. (a), (b), (c), dan Gambar 5. dibawah ini.



Gambar 5. Ilustrasi dari translasi 3D

3. Matriks Transformasi Homogen

Matriks transformasi homogen adalah matriks 4×4 yang digunakan untuk menyatakan posisi dan orientasi dari suatu *frame* koordinat dalam sistem koordinat *Cartesian* [24]. Matriks ini merangkum informasi transformasi (umumnya rotasi dan translasi), sehingga memungkinkan deskripsi yang tepat mengenai hubungan spasial antar *frame* koordinat yang berbeda. Matriks transformasi homogen terdiri dari empat submatriks, bagian kiri atas matriks adalah submatriks (R) 3×3 yang merepresentasikan matriks rotasi, bagian kanan atas matriks adalah submatriks (P) 3×1 yang merepresentasikan vektor posisi, bagian kiri bawah matriks adalah submatriks (F) 1×3 yang merepresentasikan transformasi perspektif, dan bagian kanan bawah 1×1 adalah matriks identitas. Bentuk matriks transformasi homogen dapat dilihat pada Persamaan (1) di bawah ini:

Secara umum, matriks yang digunakan dalam transformasi pose adalah matriks rotasi dan translasi. Matriks rotasi adalah matriks transformasi geometri yang berupa pergeseran atau perpindahan titik-titik pada bidang geometri sepanjang busur lingkaran berdasarkan titik pusat lingkaran sebagai titik rotasi. Terdapat tiga jenis matriks rotasi, yaitu matriks rotasi terhadap sumbu X (roll), Y (pitch) dan Z (yaw). Matriks translasi adalah matriks transformasi yang memindahkan sebuah objek sepanjang garis lurus dengan arah dan jarak tertentu. Matriks translasi dibagi menjadi tiga bagian yaitu Translasi $1D$, Translasi $2D$, dan Translasi $3D$. Matriks-matriks rotasi tersebut dinyatakan dalam persamaan (2), (3), (4), dan matriks translasi $3D$ dinyatakan dalam persamaan (5) di bawah ini:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ F_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_x(\theta_{R,\gamma}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{R,\gamma} & -\sin \theta_{R,\gamma} \\ 0 & \sin \theta_{R,\gamma} & \cos \theta_{R,\gamma} \end{bmatrix} \quad (2)$$

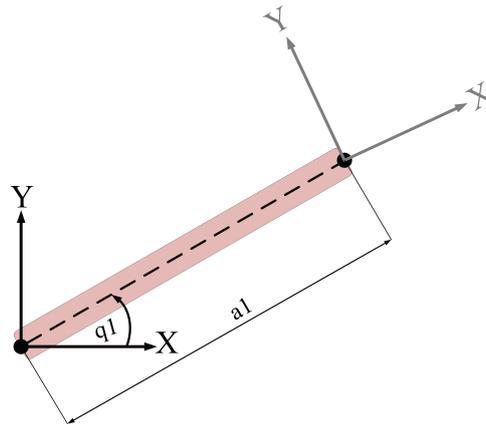
$$R_y(\theta_{R,\beta}) = \begin{bmatrix} \cos \theta_{R,\beta} & 0 & \sin \theta_{R,\beta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{R,\beta} & 0 & \cos \theta_{R,\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_z(\theta_{R,\alpha}) = \begin{bmatrix} \cos \theta_{R,\alpha} & -\sin \theta_{R,\alpha} & 0 \\ \sin \theta_{R,\alpha} & \cos \theta_{R,\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P_{x,y,z} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

4. Kinematika maju transformasi homogen

Ketika ingin mendeskripsikan suatu pose (posisi dan orientasi) dari sebuah objek, maka yang harus dilakukan adalah melampirkan *frame* koordinat pada obyek tersebut. Posisi objek dapat diketahui berdasarkan perpindahan posisi suatu *frame* koordinat obyek dari posisi awal (posisi *frame* koordinat acuan) ke posisi akhir (posisi *frame* koordinat obyek saat ini). Sementara orientasi obyek dapat diketahui berdasarkan rotasi sudut antara *frame* koordinat obyek dengan *frame* koordinat acuan [25]. Gabungan sejumlah proses translasi dan rotasi dalam kesatuan gerak tersebut dinamakan pendekatan kinematika maju transformasi homogen.



Gambar 6. Ilustrasi dari manipulator planar 1-link 1-DoF

Gambar 6. mengilustrasikan sebuah *frame* koordinat acuan dan *frame* koordinat *end-of-effector* dengan sumbu X dan Y . Untuk dapat mengetahui pose dari *end-of-effector*, maka yang harus dilakukan adalah memutar *frame* koordinat *end-of-effector* terhadap *frame* koordinat acuan sebesar q_1 , dimana q_1 adalah *joint angle* dari sendi / derajat kebebasan (*DoF*) robot. Kemudian dilakukan perpindahan pada *frame* koordinat *end-of-effector* terhadap *frame* koordinat acuan sebesar a_1 , dimana a_1 adalah panjang *link* dari lengan robot. *Frame* koordinat transparan pada Gambar 6. adalah *frame* koordinat dari *end-of-effector* yang mewakili pose dari robot, dimana pose tersebut dapat dicapai dengan cara merotasi dan mentranslasi *frame* koordinat itu sendiri terhadap *frame* koordinat acuan.

Mengacu pada Gambar 6., sepasang *frame* koordinat acuan dan *frame* koordinat *end-of-effector* dilekatkan pada manipulator planar satu bidang (X,Y), satu link yang mengarah ke sumbu X , dan satu sendi dengan rotasi *DoF* terhadap sumbu Z . Pose *end-of-effector* dari manipulator tersebut dapat ditemukan dengan menggunakan model kinematika maju transformasi homogen. Model kinematika tersebut dihasilkan dari perkalian dua matriks transformasi, yaitu matriks rotasi dan matriks translasi, seperti yang ditunjukkan pada persamaan (6). Posisi (X,Y) *end-of-effector* didefinisikan dari elemen matriks kolom 4 baris 1 dan 2 ($a_1 \cos q_1$, $a_1 \sin q_1$) pada matriks model kinematika yang telah dibangun, yang ditunjukkan pada persamaan (7).

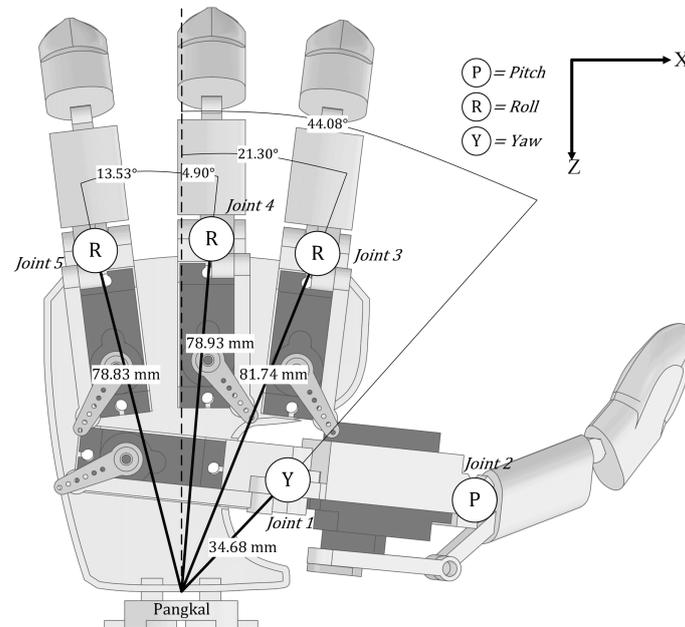
$$FK = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$FK = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & a_1 \cos q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & a_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

5. Model kinematika tangan 4 jari dengan menggunakan pendekatan matriks transformasi homogen

Model kinematika maju dari tangan robotik berjari 4 yang diusulkan dibangun dengan menggunakan pendekatan transformasi homogen. Pendekatan transformasi homogen dipilih karena kesederhanaan, efisiensi, dan akurasi dalam membangun model kinematika. Proses perhitungan model menggabungkan

setiap *checkpoint* selangkah demi selangkah dari pangkal hingga mencapai *end-of-effector* jari, yang nantinya menghasilkan posisi sendi dan *end-of-effector* jari. Ilustrasi desain kinematika dibangun untuk mengetahui parameter-parameter apa saja yang diperlukan sehingga memudahkan proses pemodelan. Gambar 7. dan Gambar 8. menggambarkan desain kinematika tangan robot diusulkan, serta Tabel 2, 3 dan 4 menampilkan konfigurasi sendi dan *end-of-effector* setiap jari.



Gambar 7. Desain kinematika telapak tangan robot humanoid T-FLoW 4.0

Terdapat empat sendi, yaitu $J1$, $J3$, $J4$, dan $J5$, di empat posisi yang berbeda pada telapak tangan robotik berjari 4 yang diusulkan. Empat sendi tersebut dapat dilihat pada desain kinematika yang ditunjukkan oleh Gambar 7. Berdasarkan desain kinematika tersebut, untuk mencapai posisi sendi $J1$, $J3$, $J4$, $J5$, dari *frame* koordinat pangkal dirotasikan sebesar $(-44,08)$, $(-21,3)$, $(-4,9)$, $(13,53)$ derajat terhadap sumbu Y secara berurutan, dan ditranslasi sebesar $(-34,68)$, $(-81,74)$, $(-78,93)$, $(-78,83)$ mm terhadap sumbu Z secara berurutan. Untuk lebih jelasnya, silakan lihat Gambar 7. dan Tabel 2. Kemudian dengan menggunakan pendekatan matriks transformasi homogen, model kinematika maju dari pangkal ke posisi setiap sendi pada telapak tangan dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan (8), (9), (10), dan (11) di bawah ini:

Tabel 2. Konfigurasi kinematika telapak tangan dari tangan robot yang diusulkan

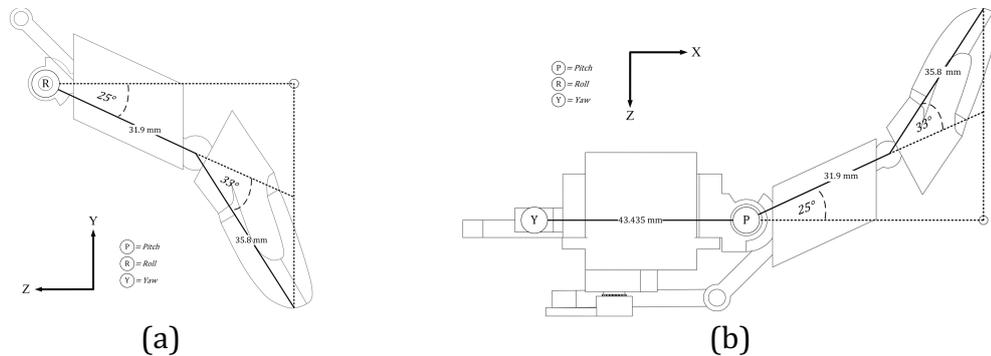
No.	Joint	Rotational	Translational
1.	$J1$	$R_y(-44,08)$	$T_z(-34,68)$
2.	$J3$	$R_y(-21,3)$	$T_z(-81,74)$
3.	$J4$	$R_y(-4,9)$	$T_z(-78,93)$
4.	$J5$	$R_y(13,53)$	$T_z(-78,83)$

$$J1 = R_y(-44,08) \cdot T_z(-34,68) \quad (8)$$

$$J3 = R_y(-21,3) \cdot T_z(-81,74) \quad (9)$$

$$J4 = R_y(-4,9) \cdot T_z(-78,93) \quad (10)$$

$$J5 = R_y(-13,53) \cdot T_z(-78,83) \quad (11)$$



Gambar 8. Desain kinematika jari-jari robot humanoid T-FLoW 4.0 (a) mewakili jari telunjuk, jari tengah, dan jari manis (b) ibu jari

Karena jari telunjuk, jari tengah, dan jari manis pada tangan robotik berjari 4 yang diusulkan memiliki bentuk dan terletak pada bidang yang sama, maka jari-jari tersebut dapat diilustrasikan dengan menggunakan desain kinematika yang sama. Berdasarkan desain kinematika tersebut, untuk mendapatkan posisi *end-of-effector* jari telunjuk, jari tengah, dan jari manis, dari masing-masing posisi sendi $J3$, $J4$, dan $J5$ dirotasikan sebesar $(-25 + (-\theta_{J_{3|4|5}}))$ derajat terhadap sumbu X , dan ditranslasi sebesar $(-31,9)$ mm terhadap sumbu Z , kemudian dirotasikan sebesar (-33) derajat terhadap sumbu X , dan ditranslasi sebesar $(-35,8)$ mm terhadap sumbu Z secara berurutan. Untuk lebih jelasnya, silakan lihat Gambar 8 (b). di atas dan Tabel 3 dibawah. Kemudian dengan menggunakan pendekatan matriks transformasi homogen, kinematika maju dari posisi sendi $J3$, $J4$, dan $J5$ ke posisi *end-of-effector* jari telunjuk, jari tengah, dan jari manis dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan (12), (13), dan (14) di bawah ini:

Tabel 3. Konfigurasi kinematika jari dari tangan robot yang diusulkan

No.	EoE	Rotational	Translational	Rotational	Translational
1.	$EoEJ3$	$R_x(-25 + (-\theta_{J3}))$	$T_z(-31,9)$	$R_x(-33)$	$T_z(-35,8)$
2.	$EoEJ4$	$R_x(-25 + (-\theta_{J4}))$	$T_z(-31,9)$	$R_x(-33)$	$T_z(-35,8)$
3.	$EoEJ5$	$R_x(-25 + (-\theta_{J5}))$	$T_z(-31,9)$	$R_x(-33)$	$T_z(-35,8)$

Sedikit berbeda dengan jari yang lain, terdapat satu *link* tambahan (*thenar part*) pada desain kinematika ibu jari. Berdasarkan desain kinematika tersebut, untuk mencapai posisi $J2$, dari posisi sendi $J1$ dirotasikan sebesar $(-25 + (-\theta_{J1}))$ derajat terhadap sumbu Z , dan ditranslasikan sebesar $(43,435)$ mm terhadap sumbu X . Kemudian untuk mendapatkan posisi *end-of-effector* ibu jari, dari posisi sendi $J2$ dirotasikan sebesar $(25 + (\theta_{J2}))$ derajat terhadap sumbu Y , dan ditranslasikan sebesar $(31,9)$ mm terhadap sumbu X , kemudian dirotasikan sebesar (33) derajat terhadap sumbu Y , dan ditranslasikan sebesar $(35,8)$ mm terhadap sumbu X . Untuk lebih jelasnya, silakan lihat Gambar 8 (a). di atas dan Tabel 4 dibawah. Kemudian dengan menggunakan pendekatan matriks transformasi homogen, kinematika maju dari posisi sendi $J1$ ke posisi sendi $J2$, dan posisi sendi

J_2 ke posisi *end-of-effector* ibu jari dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan (15) dan (16).

Tabel 4. Konfigurasi kinematika ibu jari dari tangan robot yang diusulkan

No.	EoE	Rotational	Translational	Rotational	Translational
1.	J_2	$R_z(-25 + (-\theta_{J1}))$	$T_x(43,435)$	-	-
2.	$EoEJ_2$	$R_y(25 + (\theta_{J2}))$	$T_x(31,9)$	$R_y(33)$	$T_x(35,8)$

$$EoEJ_3 = J_3 \cdot R_x(-25 + (-\theta_{J3})) \cdot T_z(-31,9) \cdot R_x(-33) \cdot T_z(-35,8) \quad (12)$$

$$EoEJ_4 = J_4 \cdot R_x(-25 + (-\theta_{J4})) \cdot T_z(-31,9) \cdot R_x(-33) \cdot T_z(-35,8) \quad (13)$$

$$EoEJ_5 = J_5 \cdot R_x(-25 + (-\theta_{J5})) \cdot T_z(-31,9) \cdot R_x(-33) \cdot T_z(-35,8) \quad (14)$$

$$J_2 = J_1 \cdot R_z(-25 + (-\theta_{J1})) \cdot T_x(-43,435) \quad (15)$$

$$EoEJ_2 = J_2 \cdot R_x(25 + (\theta_{J2})) \cdot T_z(-31,9) \cdot R_x(-33) \cdot T_z(-35,8) \quad (16)$$

Dari persamaan (8), (9), (10), (11) dan (15), vektor posisi sendi dapat dihitung dengan persamaan (17), (18), (19), (20), dan (21) di bawah ini. Kemudian dari persamaan (12), (13), (14), dan (16), vektor posisi *end-of-effector* jari dapat dihitung dengan persamaan (22), (23), (24), dan (25) dibawah ini.

$$J1_{(x,y,z)} = J1 \times [0,0,0,1]^T \quad (17)$$

$$J2_{(x,y,z)} = J2 \times [0,0,0,1]^T \quad (18)$$

$$J3_{(x,y,z)} = J3 \times [0,0,0,1]^T \quad (19)$$

$$J4_{(x,y,z)} = J4 \times [0,0,0,1]^T \quad (20)$$

$$J5_{(x,y,z)} = J5 \times [0,0,0,1]^T \quad (21)$$

$$EoEJ_2_{(x,y,z)} = EoEJ_2 \times [0,0,0,1]^T \quad (22)$$

$$EoEJ_3_{(x,y,z)} = EoEJ_3 \times [0,0,0,1]^T \quad (23)$$

$$EoEJ_4_{(x,y,z)} = EoEJ_4 \times [0,0,0,1]^T \quad (24)$$

$$EoEJ_5_{(x,y,z)} = EoEJ_5 \times [0,0,0,1]^T \quad (25)$$

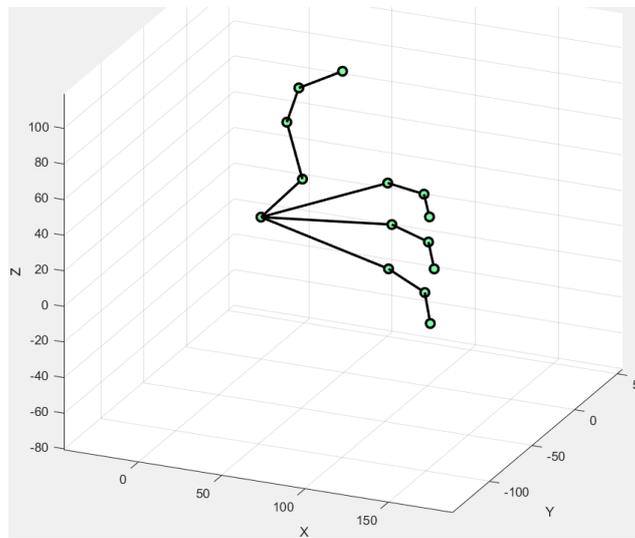
C. Hasil dan Pembahasan

Model kinematika tangan robotik berjari 4 yang telah dibangun akan diuji dengan mensimulasikan model tersebut dalam sebuah tugas gerak dasar tangan, yaitu menggenggam sebuah benda. *Testbed* simulasi dan analisis dilakukan dalam lingkungan MATLAB untuk memudahkan operasi matematika dari proses penurunan model kinematika, serta memungkinkan visualisasi dari model yang telah dibangun dengan menggunakan fitur plot 3D dari MATLAB. Urutan pengujian diawali dengan mensimulasikan tangan pada pose awal, dan diakhiri dengan mensimulasikan tangan dalam pose menggenggam. Hasil simulasi kemudian akan diamati dan dianalisa mengenai konfigurasi, pergerakan, posisi sendi dan posisi *end-of-effector* dari tangan tersebut.

1. Model kinematika tangan robotik 4 jari saat dalam pose awal

Simulasi ini bertujuan untuk menghasilkan representasi visual dari konfigurasi sendi tangan robot serta representasi visual dari kondisi tangan robot dalam pose awal. Pengujian dilakukan dengan memberikan setiap sendi tanpa nilai

input, atau nol. Hasil dari simulasi ini adalah posisi dari beberapa bagian tangan seperti pangkal tangan, sendi-sendi tangan, dan *end-of-effector* jari.



Gambar 9. Representasi visual dari model kinematika tangan robot humanoid T-FLoW 4.0 ketika dalam pose awal

Seperti yang terlihat pada Gambar 9., konfigurasi sendi tangan dapat direpresentasikan secara akurat. Terdapat 10 posisi utama yang disorot lebih, seperti pangkal tangan, sendi tangan 1, sendi tangan 2, sendi tangan 3, sendi tangan 4, sendi tangan 5, *end-of-effector* ibu jari, *end-of-effector* jari telunjuk, *end-of-effector* jari tengah, dan *end-of-effector* jari manis. Hasil posisi posisi dari bagian tersebut tercantum dalam Tabel 5 di bawah ini.

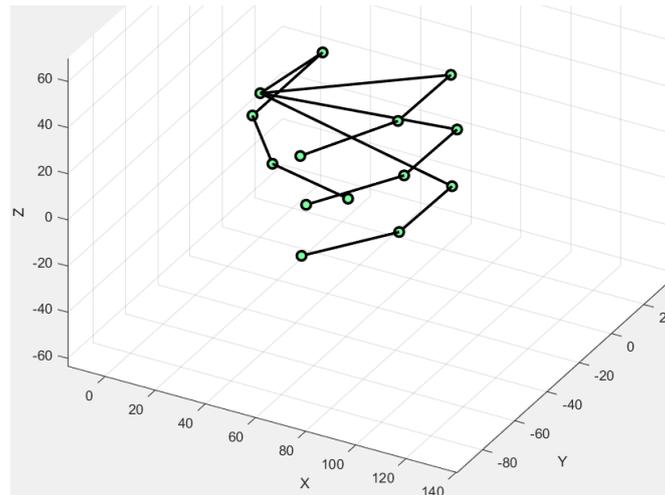
Tabel 5. Hasil posisi bagian yang disorot dari model kinematika tangan robot humanoid T-FLoW 4.0 ketika dalam pose awal

No.	Part name	Posisi		
		x	y	z
1.	Pangkal	0	0	0
2.	Sendi 1	24,91	0	24,13
3.	Sendi 2	24,91	-18,36	63,49
4.	Sendi 3	76,16	0	29,69
5.	Sendi 4	78,64	0	6,74
6.	Sendi 5	76,64	0	-18,44
7.	<i>End-of-effector</i> ibu jari	68,75	-38,59	106,9
8.	<i>End-of-effector</i> jari telunjuk	123,7	-43,84	35,53
9.	<i>End-of-effector</i> jari tengah	126,5	-43,84	6,74
10.	<i>End-of-effector</i> jari manis	124,2	-43,84	-24,28

Data yang dihasilkan dari simulasi ini akan sangat penting untuk mengidentifikasi posisi robot dalam ruang *Cartesian*, dan juga dapat digunakan sebagai input untuk pose awal untuk menghasilkan perencanaan gerakan untuk gerakan menjangkau. Selain itu, posisi yang dihasilkan dapat dikonversi ke dalam representasi visual selama pose awal, sehingga membantu proses analisis ketika robot belum diproduksi.

2. Model kinematika tangan robotik 4 jari saat dalam pose menggenggam

Simulasi ini bertujuan untuk menghasilkan representasi visual dari keadaan tangan robot ketika dalam pose menggenggam. Pengujian dilakukan dengan menerapkan sudut konfigurasi genggam maksimal pada setiap sendi. Sudut dari kedua ibu jari, jari telunjuk, jari tengah, dan jari manis, ketika dalam pose genggam maksimal diatur diangka 22° , 90° , 66° , 66° , dan 66° . Hasil dari simulasi ini adalah posisi dari beberapa bagian tangan seperti pangkal tangan, sendi-sendi tangan, dan *end-of-effector* jari, ketika tangan robot dalam kondisi menggenggam.

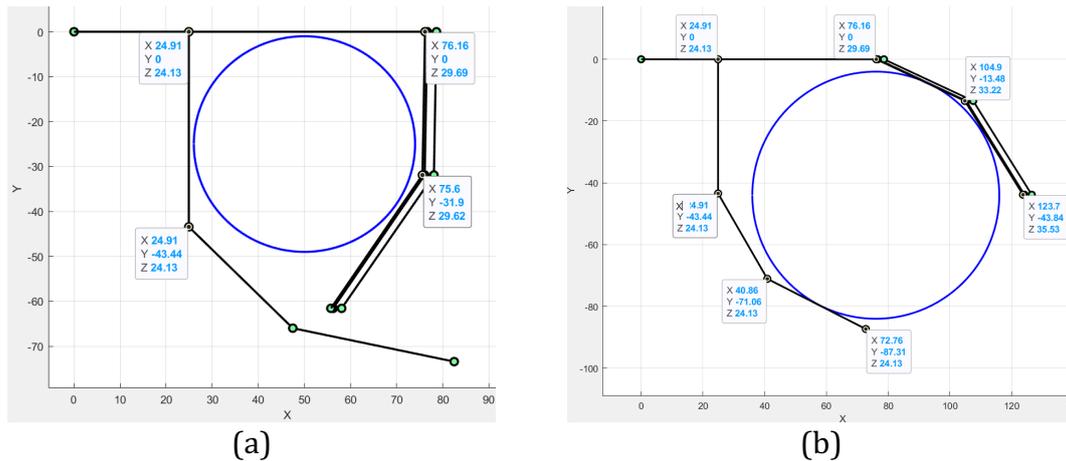


Gambar 10. Representasi visual dari model kinematika tangan robot humanoid T-FLoW 4.0 ketika dalam pose menggenggam

Seperti yang terlihat pada Gambar 10., konfigurasi sendi tangan yang dihasilkan dapat direpresentasikan secara akurat, ditunjukkan oleh posisi sendi dan posisi *end-of-effector* jari yang sesuai. Posisi-posisi utama tersebut terangkum pada Tabel 6 di bawah ini. Dengan data posisi yang telah dihasilkan, dapat dilakukan estimasi mengenai ukuran minimal dan maksimal dari benda yang dapat digenggam. Hasil menunjukkan bahwa, untuk benda yang berbentuk tabung, maka rentang diameter minimal dan maksimal benda yang dapat digenggam adalah di sekitar 48 mm – 80 mm, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 11 (a) dan (b).

Tabel 6. Hasil posisi bagian yang disorot dari model kinematika tangan robot humanoid T-FLoW 4.0 ketika dalam pose menggenggam

No.	Part name	Posisi		
		x	y	z
1.	Pangkal	0	0	0
2.	Sendi 1	24,91	0	24,13
3.	Sendi 2	24,91	-43,44	24,13
4.	Sendi 3	76,16	0	29,69
5.	Sendi 4	78,64	0	6,74
6.	Sendi 5	76,64	0	-18,44
7.	<i>end-of-effector</i> ibu jari	82,49	-73,43	24,13
8.	<i>end-of-effector</i> jari telunjuk	55,73	-61,57	27,18
9.	<i>end-of-effector</i> jari tengah	58,07	-61,57	6,74
10.	<i>end-of-effector</i> jari manis	56,22	-61,57	-15,94



Gambar 11. Estimasi ukuran yang dapat digenggam oleh tangan robot humanoid T-FLoW 4.0 (a) tabung ukuran minimum dengan diameter 48 mm (b) tabung ukuran maksimum dengan diameter 80 mm

D. Simpulan

Dalam pekerjaan ini, sebuah model kinematika dari tangan robotik berjari 4 yang digunakan pada robot humanoid T-FLoW telah berhasil dibangun. Pendekatan matriks transformasi homogen digunakan untuk menurunkan model kinematika dari tangan robot yang diusulkan. Model dari pendekatan tersebut dibangun dengan cara mengkalikan beberapa matriks rotasi dan matriks translasi yang tersusun dari frame koordinat pangkal tangan ke frame koordinat tujuan (sendi / *end-of-effector* jari). Pendekatan transformasi homogen dipilih karena efisiensi dan kemudahannya dalam proses pembangunan model kinematika, sehingga menghasilkan persamaan yang sederhana, mudah digunakan, dan akurat. Dari pekerjaan ini, terlihat bahwa model kinematika yang dihasilkan dapat memberikan informasi mengenai konfigurasi, posisi sendi, dan posisi *end-of-effector* dari tangan robot tersebut. Informasi-informasi tersebut dapat diolah menjadi representasi dari tangan robot dalam simulasi, sehingga dapat memudahkan proses analisis mengenai pembangunan *motion planning* dari robot ketika robot belum diproduksi. Pekerjaan ini diharapkan dapat memberikan wawasan dan pemahaman baru dalam membangun model kinematika yang sederhana, mudah, dan efisien. Penerapan dari pekerjaan ini adalah untuk mengestimasi cakupan rentang dari tangan robot yang diusulkan. Selain itu, pekerjaan ini dapat diterapkan untuk membangun pergerakan tangan dengan sistem umpan balik, menyelesaikan berbagai permasalahan metode kontrol, perencanaan lintasan, dimana pekerjaan-pekerjaan tersebut akan dikerjakan di penelitian yang akan datang.

E. Referensi

- [1] R. D. Pristovani, Ajir, B. E. Henfri, K. A. Subhan, D. Sanggar, and Pramadihanto. Dadet, "Implementation of direct pass strategy during moving ball for 'T-FLoW' Humanoid Robot," in *2017 2nd International conferences on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)*, Yogyakarta: IEEE, Nov. 2017, pp. 223–228. doi: 10.1109/ICITISEE.2017.8285500.

-
- [2] R. D. Pristovani, D. Sanggar, and P. Dadet, "Implementation and design of new low-cost foot pressure sensor module using piezoelectric sensor in T-FLoW humanoid robot," *Int. J. Electr. Comput. Eng. IJECE*, vol. 9, no. 1, p. 203, Feb. 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i1.pp203-214.
- [3] F. Ulurrasyadi, R. S. Dewanto, A. Barakbah, and D. Pramadihanto, "Walking Gait Learning for 'T-FLoW' Humanoid Robot Using Rule-Based Learning," in *2021 International Electronics Symposium (IES)*, Surabaya, Indonesia: IEEE, Sep. 2021, pp. 527–531. doi: 10.1109/IES53407.2021.9593960.
- [4] V. C. P. H. Putra, K. I. Apriandy, D. Pramadihanto, and A. R. Barakbah, "FLoW-Vision: Object Recognition and Pose Estimation System based on Three-Dimensional (3D) Computer Vision," in *2021 International Electronics Symposium (IES)*, Surabaya, Indonesia: IEEE, Sep. 2021, pp. 593–599. doi: 10.1109/IES53407.2021.9593994.
- [5] W. Dewandhana, K. I. Apriandy, B. S. B. Dewantara, and D. Pramadihanto, "Forward Kinematics with Full-Arm Analysis on 'T-FLoW' 3.0 Humanoid Robot," in *2021 International Electronics Symposium (IES)*, Surabaya, Indonesia: IEEE, Sep. 2021, pp. 356–361. doi: 10.1109/IES53407.2021.9594017.
- [6] K. I. Apriandy, B. Sena Bayu Dewantara, R. S. Dewanto, and D. Pramadihanto, "Mechanical Design and Forward Kinematics Analysis of T-FLoW 3.0 Prosthetic Robot Hand: Lever-based Finger Movement Mechanism," in *2022 International Electronics Symposium (IES)*, Surabaya, Indonesia: IEEE, Aug. 2022, pp. 343–348. doi: 10.1109/IES55876.2022.9888385.
- [7] F. Gonçalves, T. Ribeiro, A. F. Ribeiro, G. Lopes, and P. Flores, "A Recursive Algorithm for the Forward Kinematic Analysis of Robotic Systems Using Euler Angles," *Robotics*, vol. 11, no. 1, p. 15, Jan. 2022, doi: 10.3390/robotics11010015.
- [8] A. Chawla, C. Frazelle, and I. Walker, "A Comparison of Constant Curvature Forward Kinematics for Multisection Continuum Manipulators," in *2018 Second IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, Laguna Hills, CA: IEEE, Jan. 2018, pp. 217–223. doi: 10.1109/IRC.2018.00046.
- [9] B. Jerbić *et al.*, "RONNA G4—Robotic Neuronavigation: A Novel Robotic Navigation Device for Stereotactic Neurosurgery," in *Handbook of Robotic and Image-Guided Surgery*, Elsevier, 2020, pp. 599–625. doi: 10.1016/B978-0-12-814245-5.00035-9.
- [10] Y. Li, Y. Zhao, T. Zhang, and T. Li, "Forward kinematics analysis and experiment of hybrid high-altitude board installation robot based on screw theory," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 11, no. 4, p. 1687814019846266, Apr. 2019, doi: 10.1177/1687814019846266.
- [11] J. A. Medrano-Hermosillo, R. Lozoya-Ponce, J. Ramirez-Quintana, and R. Baray-Arana, "Forward Kinematics Analysis of 6-DoF Articulated Robot using Screw Theory and Geometric Algebra," in *2022 XXIV Robotics Mexican Congress (COMRob)*, Mineral de la Reforma/State of Hidalgo, Mexico: IEEE, Nov. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/COMRob57154.2022.9962312.
- [12] W. Ge, L. Chen, X. Wang, E. Xing, and T. Zielinska, "Kinematics Modeling and Analysis of Manipulator Using the Dual Quaternion," in *2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Tianjin, China: IEEE, Aug. 2019, pp. 750–755. doi: 10.1109/ICMA.2019.8816603.

- [13] N. T. Dantam, "Robust and efficient forward, differential, and inverse kinematics using dual quaternions," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 40, no. 10–11, pp. 1087–1105, Sep. 2021, doi: 10.1177/0278364920931948.
- [14] Y. Zhang, "Geometric Modeling and Free-elimination Computing Method for the Forward Kinematics Analysis of Planar Parallel Manipulators," *J. Mech. Eng.*, vol. 54, no. 19, p. 27, 2018, doi: 10.3901/JME.2018.19.027.
- [15] S. P. Santosh Kumar and S. Bandyopadhyay, "Forward Kinematics of the 3-RPRS Parallel Manipulator Using a Geometric Approach," in *Machines, Mechanism and Robotics*, D. N. Badodkar and T. A. Dwarakanath, Eds., in Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 159–169. doi: 10.1007/978-981-10-8597-0_14.
- [16] S. Shrey, S. Patil, N. Pawar, C. Lokhande, A. Dandage, and R. R. Ghorpade, "Forward kinematic analysis of 5-DOF LYNX6 robotic arm used in robot-assisted surgery," *Mater. Today Proc.*, vol. 72, pp. 858–863, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.080.
- [17] M. L. Strydom, A. Banach, J. Roberts, R. Crawford, and A. T. Jaiprakash, "Kinematic Model of the Human Leg Using DH Parameters," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 191737–191750, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031295.
- [18] G. Qiu, "Robot kinematics modeling and parameter identification based on DH parameters," in *Proceedings of the 7th International Conference on Cyber Security and Information Engineering*, Brisbane QLD Australia: ACM, Sep. 2022, pp. 171–177. doi: 10.1145/3558819.3565072.
- [19] R. S. Wijaya, K. I. Apriandy, M. R. H. Al Banna, R. S. Dewanto, and D. Pramadihanto, "Analisis Kinematika dan Pola Gerakan Berjalan pada Robot Bipedal Humanoid T-FLoW 3.0," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 10, no. 1, p. 31, Jan. 2022, doi: 10.26760/elkomika.v10i1.31.
- [20] R. D. Pristovani, B. Eko Henfri, S. Dewanto, and D. Pramadihanto, "Forward Kinematics with Full Body Analysis in 'T-FLoW' Humanoid Robot," in *2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA)*, Bali: IEEE, Oct. 2018, pp. 84–89. doi: 10.1109/ELECSYM.2018.8615512.
- [21] Z. Liqiu, A. Juan, Z. Ronghao, and M. Hairong, "Trajectory Planning and Simulation of Industrial Robot Based on MATLAB and RobotStudio," in *2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET)*, Chengdu, China: IEEE, May 2021, pp. 910–914. doi: 10.1109/ICET51757.2021.9451021.
- [22] J. F. Hughes, *Computer graphics: principles and practice*, Third edition. Upper Saddle River, New Jersey: Addison-Wesley, 2014.
- [23] J. Vince, *Mathematics for computer graphics*, Sixth edition. London: Springer London, 2022. doi: 10.1007/978-1-4471-7520-9.
- [24] R. N. Jazar, "Rotation Kinematics," in *Theory of Applied Robotics*, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 37–89. doi: 10.1007/978-3-030-93220-6_2.
- [25] *Robotics, vision and control*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017.