

Perbandingan Desain dan Pemodelan Tangan Robot Lima Jari sebagai Sistem Underactuated

Tresna Dewi*, Pola Risma*, Yurni Oktarina*, dan M. Taufik Roseno*

*Department of Electrical Engineering, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia
Email: {tresna_dewi, polarisma, yurni_oktarina, m_taufik_roseno}@polsri.ac.id

Abstrak—Arm robot manipulator adalah jenis robot yang paling banyak digunakan, dan bagian terpenting dari arm robot manipulator ini adalah end-effector. Walaupun pada banyak aplikasi di industri, end-effector dibuat sesederhana mungkin, pada beberapa aplikasi seperti prosthetic arm diperlukan end-effector yang menyerupai tangan manusia. Paper ini membahas perbandingan desain dan pemodelan tangan robot 5 jari, mulai dari penurunan model kinematis sampai pemilihan sistem kendali yang paling tepat untuk mengatasi batasan underactuated system. Dari studi literatur ini, dapat dilihat model kinematis sangat penting untuk mendapatkan persamaan yang paling mendekati sistem mekanis yang ada dan untuk kemudian akan mendapatkan desain sistem kendali yang paling tepat. Untuk mengatasi batasan underactuated system, maka digunakan penggerak pasif seperti spring, oleh karena itu pengaplikasian Impedance Control adalah paling tepat dengan menggunakan tambahan spring damper virtual.

Index Terms—five-fingered robot hand, dynamics model, kinematics model, spring damper virtual, underactuated system.

I. PENDAHULUAN

Arm-robot manipulator adalah jenis robot yang paling banyak digunakan di industri mulai dari 3 Degree of Freedoms (DOF) Robot SCARA hingga Robot Delta atau Robot Paralel yang memiliki lebih dari 6 DOF atau redundant. Bagian terpenting dari arm-robot manipulator adalah end-effector yang berhubungan langsung dengan objek yang menjadi tugas dari robot tersebut. End-effector umumnya dibuat sesederhana mungkin untuk menghindari pemodelan yang kompleks, contohnya berupa caput, sucker, atau magnet, akan tetapi pada aplikasi tertentu robot memerlukan 5 jari seperti jari tangan manusia untuk pekerjaan-pekerjaan yang membutuhkan ketelitian tinggi, contohnya aplikasi robot sebagai service robot atau social robot untuk membantu penyandang cacat.

Tangan robot dengan 5 jari (5 fingered robot hand) juga sangat berguna untuk robot humanoid, dimana perkembangan robot humanoid saat ini semakin menyerupai manusia, sehingga detail jari-jemari pun harus se-fleksible dan seluwes jari-jari manusia [1]. Tangan robot lengkap dengan 5 jari sudah diproduksi sebuah perusahaan pembuat robot bernama The Shadow Robot Company dimana perusahaan tersebut mengaku telah membuat tangan robot yang sudah sangat menyerupai tangan manusia, dapat menggenggam dan memegang benda-benda yang membutuhkan genggam yang lembut, contohnya memegang bola lampu dan tomat [2].

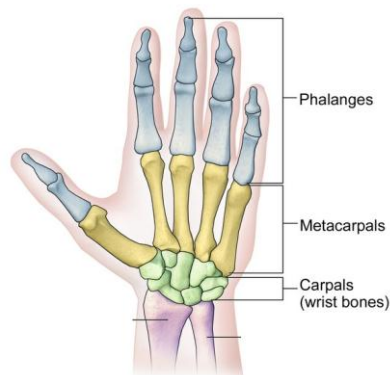
Selain untuk robot humanoid, lengan robot lengkap dengan tangan yang memiliki 5 jari ini dapat dipasang di mobile robot menjadi mobile arm manipulator. Robot jenis ini sangat berguna untuk mengambil dan mengangkut barang-barang di pabrik, dengan 5 jari, maka robot ini bisa berfungsi layaknya tangan pekerja manual. Lengan robot lengkap dengan 5 jari dapat dipasang pada tubuh manusia yang kehilangan anggota tubuhnya, atau yang biasa disebut sebagai prosthetic hand atau exoskeletons [3][4][5].

Untuk memastikan robot dapat memegang dan mengendalikan force yang digunakan dalam pergerakan jari-jarinya, maka diperlukan perancangan sistem kendali. Dengan perancangan sistem kendali yang tepat, robot dapat menyesuaikan force yang diperlukan untuk memegang, contohnya robot akan menggunakan force yang besar untuk memegang benda pejal seperti pipa cylinder, atau akan menggunakan sedikit force untuk memegang telur atau bersalaman dengan manusia[3][6][7][8].

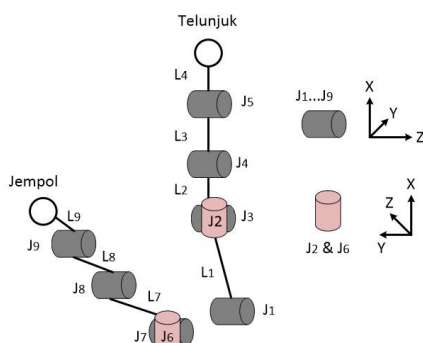
Tangan robot berjari termasuk pada underactuated system dimana sistem penggerak yang terpasang pada sistem lebih sedikit dibanding dengan DOF dari robot tersebut. Hal ini haruslah menjadi perhatian bagi peneliti yang mempelajari sistem tangan robot ini dan telah dibahas pada beberapa

literatur. Untuk mengkompensasi kurangnya sistem penggerak aktif, maka pada umumnya digunakan sistem pasif sebagai pengganti seperti spring (pegas) [9][10][11].

Paper ini membahas model dan desain tangan robot dengan cara membandingkan metode yang telah digunakan oleh beberapa peneliti. Perbandingan ini dimulai dari penurunan model kinematika jari-jari tangan manusia dan jari-jari tangan robot hingga kemungkinan untuk mengatasi keterbatasan underactuated system menggunakan spring damper virtual. Penulis melakukan studi literatur dan membandingkan antara metode-metode yang telah dipakai pada riset-riset yang telah ada, dan dari hasil studi tersebut didesain sistem yang paling cocok untuk aplikasi tangan robot lima jari. Paper ini adalah studi awal untuk pengembangan tangan robot lima jari, oleh karena itu untuk future work, hasil dari studi ini akan diterapkan pada simulasi dan real robot.



Gambar 1: Struktur tangan manusia [14]



Gambar 2: Model Jari Telunjuk dan Jempol Tangan Manusia

II. PEMODELAN KINEMATIKA TANGAN ROBOT 5 JARI

2.62. Model Kinematika Tangan Manusia

Untuk mendesain suatu sistem yang menyerupai tangan dan jari-jari manusia, hal pertama yang harus dilakukan adalah memodelkan tangan manusia secara matematis dari sudut pandang robotika. Chen Chen et. al. (2011) dan Gustus et. al. (2012) telah menurunkan persamaan kinematis tangan manusia dengan memperhitungkan 5 jari (jari kelingking, manis, tengah, telunjuk dan jempol). Jari jempol memiliki 3 artikulasi dan 3 ruas, sedangkan jari-jari yang lain memiliki

3 artikulasi dan 4 ruas. Semua artikulasi dan ruas tersebut menyumbang DOF tangan manusia, secara model kinematika, jari jempol memiliki 3 links dan 4 DOF dan jari-jari lainnya memiliki 4 links dan 5 DOF sehingga secara keseluruhan jari-jemari manusia memiliki 19 links dan 24 DOF [12][13], sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1[14].

Tabel I: Denavit-Hartenberg Convention untuk Jari telunjuk Tangan Manusia [12]

Joint	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
J_1	$\pi/2$	0	0	θ_1
J_2	$-\pi/2$	L_1	0	θ_2
J_3	$\pi/2$	0	0	θ_3
J_4	0	L_2	0	θ_4
J_5	0	L_3	0	θ_5

Tabel II: Denavit-Hartenberg Convention untuk Jari Jempol Tangan Manusia [12]

Joint	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
J_6	0	0	0	θ_6
J_7	$\pi/2$	0	0	θ_7
J_8	0	L_7	0	θ_8
J_9	0	L_8	0	θ_9

Tabel I menunjukkan convention Denavit-Hartenberg untuk jari telunjuk dan tabel II untuk jari jempol, dimana i adalah nomor atau jumlah joints, α_{i-1} adalah sudut antara sumbu z_{i-1} dan z_i diukur pada sumbu x_i , d_i adalah jarak sepanjang sumbu z_{i-1} hingga persimpangan antara sumbu x_i dan z_{i-1} , a_i adalah panjang link robot, dan θ adalah sudut rotasi joint jari robot. Dari Tabel I dan II, homogenous transformation matrix untuk jari telunjuk dan jari jempol manusia, diberikan oleh convention Denavit-Hartenberg sebagai berikut:

Prosiding
ANNUAL RESEARCH SEMINAR 2016

6 Desember 2016, Vol 2 No. 1

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} C\theta_i & S\theta_i & 0 & a_i \\ S\theta_i C\alpha_i & C\theta_i C\alpha_i & -S\alpha_i & -S\alpha_i d_i \\ S\theta_i S\alpha_i & C\theta_i S\alpha_i & -S\alpha_i & -S\alpha_i d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

dimana i adalah jumlah joint jari robot, T^I adalah homogenous transformation matrix untuk joint $i-1$ sampai i , $C\theta_i$ adalah $\cos\theta$, dan $S\theta_i$ adalah $\sin\theta$.

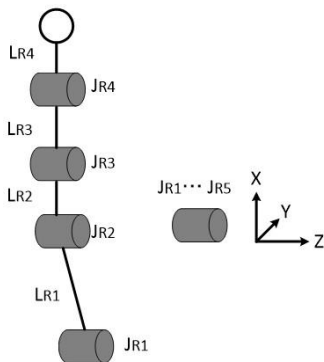
Dari pers (1) dan tabel I, maka diperoleh forward kinematika dari jari telunjuk sebagai berikut

$${}^5_0T_T = {}^1_0T_T \cdot {}^2_1T_T \cdot {}^3_2T_T \cdot {}^4_3T_T \cdot {}^5_4T_T \quad (2)$$

Sedangkan forward kinematika dari jari jempol diberikan oleh

$${}^4_0T_J = {}^1_0T_J \cdot {}^2_1T_J \cdot {}^3_2T_J \cdot {}^4_3T_J \quad (3)$$

dimana T^I adalah homogenous transformation matrix untuk jari telunjuk dan T^J adalah homogenous transformation matrix untuk jempol, superscript 1,2,3,4,5 dan index 1,2,3,4,5 mengacu pada tanda dan jumlah link dan joint.



Gambar 3: Model Jari Tangan Robot

B. Model Kinematika Tangan Robot 5 Jari

Desain model kinematika tangan robot 5 jari diambil dari model tangan manusia yang disederhanakan seperti yang diperlihatkan pada gambar 3. Berbeda dengan pemodelan matematis tangan manusia, untuk memudahkan desain, maka

semua jari robot termasuk jempol dianggap memiliki 3 links dan 4 joints sehingga tangan robot 5 jari ini dianggap memiliki 20 DOF. Beberapa referensi telah memberikan penurunan rumus model kinematika tangan robot, yaitu [15-19].

Tabel III: Denavit-Hartenberg Convention untuk Jari Robot

Joint	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
J _{R1}	0	0	0	θ_1
J _{R2}	0	L_{R1}	0	θ_2
J _{R3}	0	L_{R2}	0	θ_3
J _{R4}	0	L_{R3}	0	0

$${}^4_0T_R = {}^1_0T_R \cdot {}^2_1T_R \cdot {}^3_2T_R \cdot {}^4_3T_R \quad (4)$$

dimana T_R adalah homogenous transformation matrix salah satu jari tangan robot.

$${}^1_0T_R = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^2_1T_R = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & L_{R1} \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

dimana L_{R1} adalah panjang link antara J_{R1} dan J_{R2} .

$${}^3_2T_R = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & L_{R2} \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

dimana L_{R2} adalah panjang link antara J_{R2} dan J_{R3} .

$${}^4_3T_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_{R3} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

dimana L_{R3} adalah panjang link antara J_{R3} dan J_{R4} .

Dengan mensubstitusikan persamaan (5)-(8) ke persamaan (4), maka di peroleh homogeneous transformation matrix untuk jari tangan robot.

$${}^4_0T_R = \begin{bmatrix} C_{123} & -S_{123} & 0 & L_{R1}C_1 + L_{R2}C_{12} + L_{R3}C_{123} \\ S_{123} & C_{123} & 0 & L_{R1}S_1 + L_{R2}S_{12} + L_{R3}S_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

dimana $C_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$, $S_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$, dan $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$.

III. INVERSE KINEMATIKA DAN MODEL DINAMIS TANGAN ROBOT 5 JARI

Untuk mendapatkan inverse kinematika, gambar 3 diubah menjadi gambar 4, untuk memperlihatkan komponen-komponen yang perlu diketahui dan didapat melalui inverse kinematika.

Berdasarkan gambar 4, untuk homogeneous transformation matrix hanya diperlukan sampai 3T_R , yang diberikan oleh

$${}^3_0T_R = \begin{bmatrix} C_{123} & -S_{123} & 0 & L_{R1}C_1 + L_{R2}C_{12} \\ S_{123} & C_{123} & 0 & L_{R1}S_1 + L_{R2}S_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$= \begin{bmatrix} C_\phi & -S_\phi & 0 & x \\ S_\phi & C_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

sehingga

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \arctan 2(y, x) - \arctan 2(k_1, k_2) \\ \theta_2 &= \arctan 2(S_2, C_2) \\ k_1 &= r \cos y \\ k_2 &= r \sin y \\ \phi &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{aligned}$$

IV. DESAIN GRASPING FORCE TANGAN ROBOT 5 JARI

Untuk mendesain control grasping force robot 5 jari, desain model jari telunjuk pada gambar 3 dikembangkan menjadi 2 jari yang memegang sebuah kotak, seperti yang diperlihatkan pada gambar 5. Dari model 2 jari robot pada gambar 5, persamaan kinematika diturunkan kembali, dan dari inverse kinematika diperoleh nilai dari θ_1 , θ_2 , θ_3 , x dan y .

Setelah nilai-nilai θ_1 , θ_2 , θ_3 , x dan y diketahui, nilai kecepatan dan percepatan, baik angular dan translational dapat diperoleh. Setelah semua variabel diketahui, maka persamaan dynamic sistem robot 5 jari dapat di ketahui dan kemudian persamaan contact force dapat ditentukan.

Cole et. al. (1992) telah mendesain dua metode untuk tugas regrasping atau memegang kembali bagi robot berjari. Metode pertama adalah dengan membagi dan menentukan kembali poin kontak pada objek yang akan dipegang, dan metode kedua adalah dengan meletakkan ujung jari pada permukaan objek. Desain kedua metode ini sangat tergantung pada skema dynamic coordinate control tangan untuk memastikan posisi tangan terhadap orientasi objek yang akan dipegang pada bidang planar [20]. Selain memperhitungkan model dynamics dari tangan robot, Cole et. al. juga menurunkan persamaan dynamics dari objek yang akan dipegang [20].

Song et. al. (2009) menitikberatkan desain metode mereka pada model dynamics, kendali untuk memegang (grasping) dan regulasi pergerakan yang dilakukan oleh tangan robot 2 jari [7]. Song et. al. mengemukakan bahwa untuk manipulasi sebuah objek, maka keseluruhan gerakan jari haruslah dibatasi pada state space dari objek yang akan dimanipulasi. Untuk membuktikan kestabilan sistem ini, analisa stabilitas Lyapunov diturunkan. Teorema yang dikemukakan Song et. al. ini menarik karena langsung pada model matematis dan menggunakan analisa fisik ujung jari robot dan objek yang akan dimanipulasi untuk bagian-bagian yang tidak bisa diselesaikan dengan persamaan matematika biasa. Song et. al. menurunkan model dynamic sebagai berikut

$$A\ddot{\theta} = B\dot{q} + C\dot{\theta} + D \quad (13)$$

dimana q adalah posisi dan orientasi robot, dan A, B, C, D adalah matrix yang diturunkan dari persamaan kinematika

Persamaan (13) adalah input control sehingga contact force antara ujung jari dan permukaan benda haruslah diperhitungkan [7]. Untuk memastikan tangan robot dapat menggengam benda dengan baik, normal force yang diinginkan F_d haruslah diberikan secara terus-menerus. Salah satu contoh persamaan contact force dapat dilihat sebagai berikut:

$$F_t = M\dot{q} + N F_d \quad (14)$$

Prosiding
ANNUAL RESEARCH SEMINAR 2016

6 Desember 2016, Vol 2 No. 1

ISBN : 979-587-626-0 | UNSRI

<http://ars.ilkom.unsri.ac.id>

dimana F_t adalah designed contact force, F_d adalah normal normal force, dan M dan N adalah matrix yang diturunkan dari persamaan dinamis jari robot.

Pada saat tangan robot memegang benda (manipulated object), posisi dan orientasi jari-jari robot haruslah tetap konstan selama proses pergerakan jari-jari tersebut.

Corrales et. al. (2010) mengembangkan model kinematika, dynamics dan model kontak dari tangan robot berjari tiga untuk mendapatkan deskripsi yang lengkap mengenai sistem yang akan dimanipulasi. Sistem yang didesain mampu menghitung transmisi force dari tangan ke objek. Corales et. al. membuktikan efektifitas sistem yang mereka desain dengan menggunakan model matematika dan simulasi [18].

Teorema desain sistem tangan robot berjari dengan hanya memperhitungkan model dynamics juga dikemukakan oleh Boughdiri et. el. (2012). Dalam penelitian mereka, Boughdiri et. el. menganggap objek yang akan dimanipulasi telah diketahui karakteristik geometrisnya dan untuk membuktikan teorema mereka, dilakukan simulasi dengan model tangan robot 5 jari. Untuk memperkuat teorema ini, analisa formulasi Lagrange dilakukan. Penelitian ini menggunakan kendali Impedance Controller yang cocok untuk sistem yang memerlukan aplikasi force control [21].

Reis et. al (2015) menggunakan tangan robot dengan 3 jari untuk membuktikan teorema mereka. Dalam penelitian tersebut, Reis et. al. juga memulai desain sistem mereka dari model kinematika tangan robot 3 jari hingga mendesain sistem kendali untuk jari-jari robot memegang benda yang akan dimanipulasi. Setiap jari dimodelkan sebagai manipulator paralel dan batasan kinematika dihitung dari analisa empiris untuk menghindari kompleksitas mekanik sistem. Penggunaan matrix Jacobian memungkinkan desain kontrol yang bersamaan antara objek yang akan di manipulasi dan tiga jari yang akan memegang objek tersebut [19].

V. SISTEM TANGAN ROBOT 5 JARI SEBAGAI UNDERACTUATED SYSTEM

Underactuated system adalah sistem yang memiliki jumlah control input kurang dari jumlah DOF atau kurang dari jumlah yang harus dikendalikan. Pada sistem tangan robot yang dibahas pada paper ini, penggerak hanya pada base jari, sehingga pada setiap jari terdapat 2 uncontrollable DOF. Seperti pada underactuated system lainnya, actuator penggerak diganti dengan komponen pasif, dalam hal ini

spring atau pegas, sehingga pemodelan yang paling tepat adalah dengan memodelkan sistem sebagai spring damper system.

Laliberte´et. al. (2002) memberikan analisa mendalam mengenai underactuated system dari tangan robot berjari dengan membandingkan beberapa prototipe dari tangan robot dan mengemukakan beberapa algoritma sistem kendali sederhana untuk mengatasi kekurangan underactuated system [11].

Fassih et. al. (2010) mendesain sistem tangan robot untuk aplikasi prosthetic hand. Sistem kendali ini diturunkan dengan menggunakan virtual spring damper yang dianggap terpasang pada ujung jari robot dengan memperhitungkan hanya sistem dynamics [3].

Albalasie et. al. (2016) mengemukakan skema adaptive model predictive control untuk mengendalikan sistem tangan robot yang termasuk underactuated system. Metode adaptive model predictive control diperlukan untuk mengendalikan sistem yang menjadi sangat nonlinear akibat adanya sumbu pasif akibat aplikasi penggerak pasif untuk menyokong kekurangan sistem penggerak pada jari-jari tangan robot. Albalasie et. al. membuktikan efektifitas teorema yang dikemukakan dengan simulasi dan analisa numerik [9].

VI. PEMBAHASAN

Desain tangan robot lima jari dimulai dari penurunan model kinematika. Model kinematika tangan robot sebenarnya mencontoh dari pemodelan tangan manusia, namun pada beberapa aplikasi model tangan robot dibuat lebih sederhana dibandingkan dengan tangan manusia, baik dari segi jumlah jari maupun dari DOF jari-jari tersebut, contohnya pada beberapa literatur, beberapa penulis lebih memilih mendesain tangan yang memiliki tiga jari, karena dianggap tiga jari pun cukup untuk melakukan pekerjaan yang diperuntukkan bagi robot tersebut [18][19][21]. Namun untuk beberapa aplikasi yang lain, seperti prosthetic hand, diperlukan tangan robot yang memiliki 5 jari [1][3].

Setelah semua variabel yang diturunkan dari pemodelan kinematika diketahui, maka diturunkanlah persamaan dynamics yang untuk kemudian diperlukan dalam pemilihan desain sistem kendali tangan robot 5 jari ini. Desain sistem kendali ini ditekankan pada bagaimana cara agar tangan robot mampu menggenggam (grasping) dengan mantap. Akan lebih disukai lagi jika robot tersebut mampu mengendalikan kekuatan genggamannya, hingga mampu menyesuaikan

Prosiding
ANNUAL RESEARCH SEMINAR 2016
6 Desember 2016, Vol 2 No. 1

ISBN : 979-587-626-0 | UNSRI

<http://ars.ilkom.unsri.ac.id>

dengan objek yang digenggam [2]. Desain kendali grasping ini tidak hanya memperhitungkan persamaan tangan robot tapi juga memperhatikan sistem dynamic dari objek yang akan dimanipulasi [19]. Namun untuk alasan penyederhanaan sistem, ada juga peneliti yang memilih untuk menganggap jika objek yang akan dimanipulasi telah diketahui karakteristik empirisnya [21].

Tangan robot 5 jari termasuk pada kategori underactuated system dimana jumlah sistem penggerak lebih sedikit dari jumlah DOF. Untuk mengatasi batasan ini, maka pada umumnya digunakan sistem pasif sebagai pengganti penggerak, salah satunya dengan menggunakan spring. Penggunaan spring dan adanya kebutuhan akan pengendalian force pada "sentuhan" tangan robot ini, maka jenis sistem kendali yang paling tepat diaplikasikan pada sistem ini adalah

Impedance Control yang didesain dengan pengaplikasian sistem spring damper virtual.

VII. KESIMPULAN

Paper ini mengemukakan perbandingan desain dan pemodelan tangan robot lima jari sebagai sistem underactuated. Perbandingan ini menggunakan metode studi literatur, dimana penulis menarik kesimpulan kelebihan dari berbagai penelitian yang telah ada. Sistem Tangan robot 5 jari merupakan system underactuated sehingga desain pemodelan dan kendali harus diperhitungkan dengan tepat. Pemodelan mekanis tangan robot diturunkan dari pemodelan tangan manusia yang telah disederhanakan berdasarkan kegunaan dan aplikasi tangan robot tersebut, apakah akan menggunakan 3 jari atau 5 jari. Desain dan pemodelan dimulai dari penurunan rumus model kinematika hingga perancangan sistem kendali yang paling tepat untuk diaplikasikan. Pada beberapa literatur, peneliti lebih memilih langsung menurunkan model dynamics tanpa perlu melalui model kinematika. Penggerak pasif seperti spring digunakan sebagai pengganti penggerak aktif untuk mengatasi batasan underactuated system, karenanya aplikasi spring damper virtual untuk desain Impedance Control adalah yang paling tepat untuk sistem tangan robot 5 jari. Hasil analisa perbandingan desain dan model ini, akan diaplikasikan pada simulasi dan real robot sebagai future work.

REFERENSI

- [1] N. Fukaya, T. Asfour, R. Dillmann and S. Toyama, Development of a five-finger dexterous hand without feedback control: The TUAT/Karlsruhe humanoid hand, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, 2013, pp. 4533-4540.
- [2] Shadow Robot Company, Shadow Dexterous Hand E1 Series (E1M3R, E1M3L, E1P1R, E1P1L), Technical Specification. January 1, 2013.
- [3] A. Fassih, D. S. Naidu, S. Chiu, and M. P. Schoen, Precision Grasping of a Prosthetic Hand Based upon Virtual Spring Damper Hypothesis, 2010 5th Cairo Int. Biomedical Engineering Conf., Cairo, Egypt, 2010, pp. 79-82.
- [4] A. Crawford, J. Molitor, A. Pe'rez Gracia, and S. Chiu, Steve. Design of a robotic hand and simple EMG input controller with a biologically-inspired parallel actuation system for prosthetic applications, E-prints UPC - Universitat Politecnica de Catalunya-, 2010. Retrieved at November 20, 2016.
- [5] W. Schweitzer, Getting a Virtual Grasp on the Virtual Grasp: Virtually inside a Myoelectric Prosthetic Arm, Journal of Forensic Radiology and Imaging, 2014, Vol. 2. Issue 4, pp. 217-218.
- [6] S. Ueki, H. Kawasaki, and T. Mouri, Adaptive Control of Multifingered Robot Hand Using Quaternion, Proc. 17th World Congress International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, 2008, pp. 6757- 6762.
- [7] S.K. Song, J. B. Park, and Y. Ho. Choi, Grasping Control of 3-Joint Dual Finger Robot: Lyapunov Stability Approach, 2009 American Control Conf., St. Louis, USA, 2009, pp. 2879-2884.
- [8] V. Kumar, E. Todorov and S. Levine, Optimal control with learned local models: Application to dexterous manipulation., 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, 2016, pp. 378-383.
- [9] A. Albalasie, G. Seliger, and A. A. Hanieh, Using Adaptive Model Predictive Technique to Control Underactuated Robot and Minimize Energy Consumption, 13th Global Conf. on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use, Procedia CIRP, 2016, pp. 407-412.
- [10] L. Wang, J. DelPreto, S. Bhattacharyya, J. Weisz and P. K. Allen, A highly-underactuated robotic hand with force and joint angle sensors, 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, 2011, pp. 1380-1385.
- [11] T. Laliberte', L. Birglen, and C. M. Gosselin, Underactuation in Robotic Grasping Hands, Machine Intelligence & Robotics Control, 2002, Vol 4, No. 3, pp. 1-11.
- [12] F. Chen Chen, A. Favetto, M. Mousavi, E. P. Ambrosio, S. Appendino, A. Battezzato, D. Manfredi. F. Pescarmona, and

Prosiding
ANNUAL RESEARCH SEMINAR 2016
6 Desember 2016, Vol 2 No. 1

ISBN : 979-587-626-0 | UNSRI

<http://ars.ilkom.unsri.ac.id>

- B. Bona, Human Hand: Kinematics, Statics and Dynamics, in 41st International Conference on Environmental Systems, Portland, Oregon, 2011.
- [13] A. Gustus, G. Stillfried, J. Visser, H. Jo^o mtell, and P. van der Smagt, Human hand modelling: Kinematics, Dynamics, Applications, Biol Cybern, 2012, Vol 106, Issue 11, pp. 741-755.
- [14] Blausen.com staff, Blausen gallery 2014, Wikiversity Journal of Medicine. DOI:10.15347/wjm/2014.010. ISSN 20018762.
- [15] I. Virgala, M. Kelemen, M. Varga, and P. Kurylo, Analyzing, Modeling and Simulation of Humanoid Robot Hand Motion, Modeling of Mechanical and Mechatronics System MMaMS 2014, Prodecia Engineering, pp. 489-499.
- [16] L. Han, Z. Li, J. C. Trinkle, Z. Qin, and S. Jiang, The Planning and Control of Robot Dextrous Manipulation, Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065), 2000, Vol. 1, pp 263 - 269.
- [17] W. Faizura Binti W. Tarmizi, I. Elamvazuthi, and M. Begam, Kinematic and Dynamic Modeling of a Multi-Fingered Robot Hand, International Journal of Basic & Applied Science IJBAS-IJENS, 2009, Vol. 09, pp. 61-68.
- [18] J. A. Corrales, C. A. Jara, and F. Torres, Modeling and Simulation of a Multifingered Robotic Hand for Grasping Task, 2010 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision, 2010, 1577-1582.
- [19] M. F. Reis, A. C. Leite, and F. Lizarralde, Modeling and Control of a Multifingered Robot Hand for Object Grasping and Manipulation Tasks, 2015 IEEE 54th Annual Conf. on Decision and Control (CDC), 2015, pp. 159-164.
- [20] A. A. Cole, P. Hsu, and S. S. Sastry, Dynamic Control of Sliding by Robot Hands for Regrasping, IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1992, Vol. 8, No. 1, pp. 42-52.
- [21] R. Boughdiri, H. Nasser, H. Bezine, N. K. M'Sirdi, A. M. Alimi, and A. Naamane, Dynamic Modeling and Control of a Multi-Fingered Robot Hand for Grasping Task, Int. Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012), Prodecia Engineering, 2012, Vol 41, pp. 923-931.