

Target Position 에 수렴하는 6 자유도 로봇팔의 역기구학 실험 모델 Inverse kinematic experiment model of a robot arm with 6 degrees of freedom converging to the Target position

○남 인 수*

광운대학교 로봇학부 (E-mail: nam3096@gmail.com)

Abstract In this paper, I present a the analysis of kinematics using Jacobian of a robotic arm, and experimenting with simulations to verify. I conducted an experiment using Panda robot arm's model in V-rep of Coppeliassim and IMU sensor. The panda robot arm's model is 7 degrees of freedom, but it uses 6 degrees of freedom for smooth calculations. The angular velocity and linear velocity of the end effector can be determined using the Jacobian matrix and the angular velocity of the joint. Conversely, if we know the linear velocity and angular velocity of the end effector, we can know the angular velocity of each joint. Using this point, input the linear velocity and angular velocity of the IMU sensor to obtain the joint angular velocity of the robot arm. The obtained angular velocity is integrated to determine the position and posture of the end effector. So when moving and rotating the IMU, the end effector of the robot arm also moves.

Keywords Kinematic, Inverse Kinematic, Manipulator, Simulation

1. 서론

현대 로봇에서 기구학은 매우 중요하다. [1]~[8] 이유는 첫째로, Manipulator 를 사용하는 데 기구학이 필요하다. 현재 4 차 산업혁명과 더불어 Robot 도 생활에 밀접한 요소로 자리잡아가며 미세수술을 위한 소형 Manipulator Robot[1], 부상당한 사람을 운반하는 Robot[2], 농업을 도와주는 Robot[3] 그리고 공부하기 위한 교육용 Robot Arm[4]등을 개발하고 있는데, 제시한 로봇들은 모두 Manipulator 가 사용되고 있다. 실제로도 Robot 의 동작을 위해서 Manipulator 를 많이 사용 중이다. 이러한 Manipulator 들을 사용하며 개발하기 위해서는 기구학 해석은 필수 요소이다. [5][6] 둘째, 로봇의 Odometry 에 사용된다. 이동 로봇의 활용에 따라 고찰이 많이 이루어짐에 따라 실외 위치인식 즉, Odometry 는 이동로봇의 핵심 기술 중 하나이다. 이에 GPS, IMU 와 기구학을 접목하여 위치 인식개선을 위한 연구를 진행하고 있다. [7][8]

이러한 이유로 현재 로봇공학에서 컴퓨터 디자인 (CAD)등과 같은 프로그램들을 이용하여 시뮬레이션을 통해 실습을 진행하며 교육을 하고 있지만 문제점이 존재한다. [9][10] 현대로 오면서 로봇 동역학 시뮬레이션에 있어 로봇 시스템의 복잡도가 증가하고 시뮬레이션 하고자 하는 현상의 난이도가 상승하게 되어 이러한 프로그램은 한계가 있다.

시뮬레이션을 위해서는 물리적인 실제시스템과 동적환경을 효과적으로 나타내는 모델이 필요하지만 컴퓨터 디자인(CAD)의 경우에는 정적인 움직임으로 해석하고 있기 때문에 실제 로봇이 움직이는 경우의 해석은 부적합하다. 그래서 이러한 프로그램 외의 실제 환경과 흡사한 시뮬레이션 환경을 구성하는 새로운 프로그래밍 도구를 이용하여 실험을 할 필요가 있다.

이 논문에서는 실제 환경과 흡사한 물리 엔진이 적용되어 있으며, 로봇의 다양한 움직임을 구현할 수 있는 시뮬레이션을 이용하여 Jacobian Matrix를 이용한 역기구학을 적용하여 Target Position 을 정해주었을 때 로봇 팔의 운동 및 반응을 확인한다.

2. 관련 연구

기계의 메커니즘을 해석하기 위해 기구학은 1800년대부터 연구되어왔다. [11]

시초로 Franz Reuleaux 는 Symbolic Language 로 Mechanism 을 설명하려 했지만 완전한 설명에 필요한 모든 변수를 포함되지 않아 유용성이 떨어졌다. [11][12]

$${}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & r_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & r_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. 제안 내용

로봇 팔의 정기구학을 이용하여 Jacobian Matrix 를 얻은 다음, End Effector 를 Target Position 으로 수렴하게 하는 Joint Angle 을 구한다. 그리고 이를 시뮬레이션에 대입해 Target Position 과 End-Effector 의 좌표를 비교한다.[16]

첫번째로 정기구학 해석이다. 로봇 팔 모델은 Franka Emika 사의 Fanda 로봇 팔이다. 로봇 팔의 각 Joint angle 이 주어졌을 때 End-Effector 의 위치와 접근 방향을 구해내는 것을 정기구학이라 칭한다. 본 논문에서는 가장 일반적으로 사용하고 있는 Denavit-Hartenberg 방법에 의한 정기구학을 사용하였다.[17]

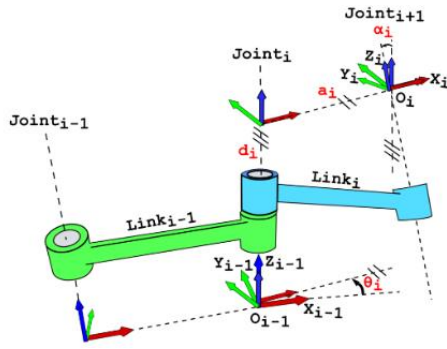


그림 1. D - H Convention

앞서 말한 Franz의 한계를 극복하기 위해 Jacques Denavit과 Richard S. Hartenberg가 그들의 이름을 따 D-H Convention을 도입했다. Mechanism을 설명하기 위한 D-H parameter라는 변수를 도입하였고, Link간의 연결을 Matrix로 표현하여 Link간의 상관관계를 나타냈다.[12]

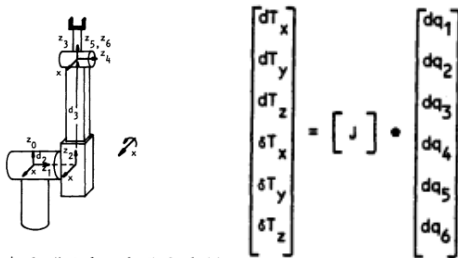


Figure 4. Coordinate frames for the Stanford Arm.

그림 2. Richard Paul' s research

Richard Paul은 D-H Convention을 사용하여 로봇 시스템의 기구학 분석에 대한 가치를 입증했다. Stanford Arm을 모델로 D-H Convention을 이용하여 기구학을 풀며 그 가치를 입증했다. 거기다 End Effector의 속도와 각속도를 조작할 수 있는 식을 Jacobian Matrix와 Joint의 각속도로 증명하였다.[13][14]

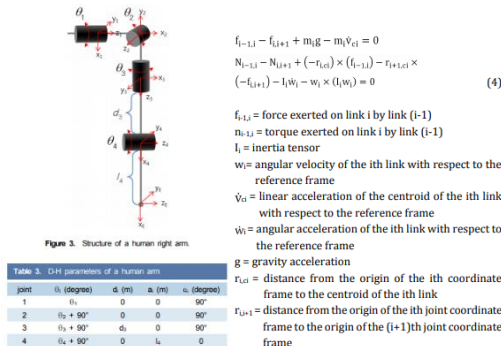


그림 3. Kinematics and Dynamics

현재는 기구학으로 Joint 의 목표 속도를 도출해 낼 수 있지만 Manipulator 의 토크가 얼마인지는 모르는 한계가 드러났다. 이를 극복하기 위해 Dynamic 까지 같이 고려하는 방식으로 연구를 진행하고 있다.[15]

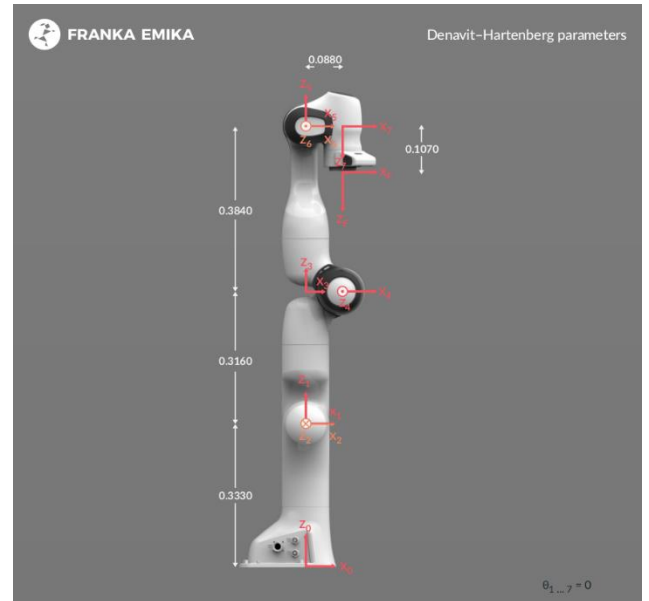


그림 4. Franka Emika Panda 의 축 지정.

표 1. Franka Emika Panda 의 link 좌표 변수

Joint	$a(m)$	$d(m)$	$\alpha(rad)$	$\theta(rad)$
Joint 1	0	0.333	0	θ_1
Joint 2	0	0	$-\frac{\pi}{2}$	θ_2
Joint 3	0	0.316	$\frac{\pi}{2}$	θ_3
Joint 4	0.0825	0	$\frac{\pi}{2}$	θ_4
Joint 5	-0.0825	0.384	$-\frac{\pi}{2}$	θ_5
Joint 6	0	0	$\frac{\pi}{2}$	θ_6
Joint 7	0.088	0	$\frac{\pi}{2}$	θ_7
Flange	0	0.107	0	0

θ_i : The angle between x_{i-1} to x_i measured along z_i
 α_i : The angle between z_i to z_{i+1} measured along x_i
 d_i : The distance between x_{i-1} to x_i measured along z_i
 a_i : The distance between z_i to z_{i+1} measured along x_i

로 지정하였다. n-1 번째 link 의 좌표계에서 n 번째 link 의 좌표계로의 homogeneous transformation 관계를 A_n matrix로 표현하며 이들 간의 관계는 4×4 행렬로 나타낸다. 일반적인 식으로 표시하면 식 (1)과 같다.

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ S\theta_i C\alpha_{i-1} & C\theta_i C\alpha_{i-1} & -S\alpha_{i-1} & -d_i S\alpha_{i-1} \\ S\theta_i S\alpha_{i-1} & C\theta_i S\alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1} & d_i C\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $S\theta_i = \sin \theta_i$ $C\theta_i = \cos \theta_i$
 $S\alpha_{i-1} = \sin \alpha_{i-1}$ $C\alpha_{i-1} = \cos \alpha_{i-1}$
 로봇 팔의 기준좌표(base coordinate)에 대한 End-Effector 의 변환 관계는 T_F^0 로 표현된다.

$$T_F^0 = T_1^0 * T_2^1 * T_3^2 * T_4^3 * T_5^4 * T_6^5 * T_7^6 * T_F^7 \quad (2)$$

그리고 기준좌표에 대한 i 번째 Joint 까지의 4×4 행렬 T_i^0 의 구조는 다음과 같다.

$$T_i^0 = \begin{bmatrix} n_i & o_i & a_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

for $i = 1, \dots, n$

$$z_i = \begin{cases} a_x & \text{for } x\text{-axis} \\ a_y & \text{for } y\text{-axis} \\ a_z & \text{for } z\text{-axis} \end{cases} \quad (4)$$

두번째는 **Jacobian Matrix**를 이용한 역기구학이다. 로봇 팔의 속도 기구학에서 Kinematics 는 다음과 같이 정의된다.[18]

$$\dot{p} = \frac{\partial f(q)}{\partial q} = J(q)\dot{q} \quad (5)$$

행렬 $J(q)$ 는 조인트 속도 \dot{q} 와 End-Effector 속도 \dot{p} 의 선형 관계를 나타내는 행렬 식이다. 만일 행렬 $J(q)$ 가 정방행렬일 경우, 관절의 속도는 다음과 같다.

$$\dot{q} = J(q)^{-1}\dot{p} \quad (6)$$

로봇 팔 End-Effector 의 선속도, 각속도인 속도 \dot{p} 을 식(5)을 통해 행렬 $J(q)$, 조인트 속도 \dot{q} 으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{p}_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} J_p(3 \times n) \\ J_o(3 \times n) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_{n-2} \\ \dot{q}_{n-1} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

End-Effector 의 속도와 조인트 속도 \dot{q} 의 관계를 나타내는 행렬 $J(q)$ 은 로봇 팔의 자코비안 행렬이라 한다. 이 자코비안 행렬 $J(q)$ 는 다음 계산 규칙을

따른다.

$$J \in \mathcal{R}^{6 \times n} \quad (8)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} J_{p_i} \\ J_{o_i} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} & \text{for a prismatic joint} \\ \begin{bmatrix} (p_n - p_{i-1}) \times z_{i-1} \\ z_{i-1} \end{bmatrix} & \text{for a revolute joint} \end{cases} \quad (9)$$

for $i = 1, \dots, n$

z_{i-1} 과 p_n , p_{i-1} 는 앞서 구한 식(3)을 통해 얻을 수 있다. 원하는 End-Effector 의 운동속도와 기구학을 풀어 얻은 자코비안 행렬을 이용하면 조인트 속도 \dot{q} 를 얻을 수 있다.

$$\theta_i = \int \dot{q}_i d\Delta t + pre_ \theta_i \quad \text{for } i = 1, \dots, n \quad (10)$$

얻은 조인트 속도 \dot{q} 를 이용해 위의 식(10)과 같이 단위 시간으로 적분하여 이전 각도를 더하면 새로운 각도를 얻는다. 이 각도 값을 로봇 팔에 적용하면 로봇 팔의 End-Effector 가 운동할 것이다.

4. 실험 결과

실험에서 사용한 시뮬레이션은 CoppeliaSim 의 V-rep 이다. 로봇 팔은 V-rep 내 구현되어 있는 Franka Emika 의 Panda 모델을 활용한다.

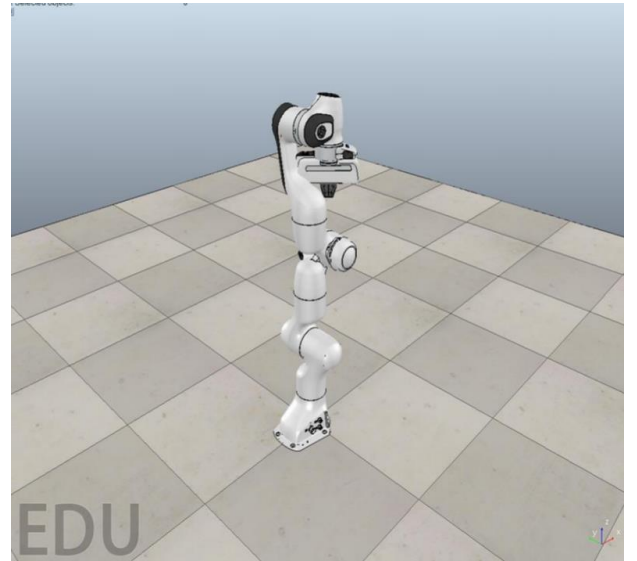


그림 5. V-rep 내 로봇 팔 Franka Emika Panda

Panda 로봇팔의 초기각도를 주어 로봇 팔의 End-Effector 의 위치와 제안한 방식의 정기구학 알고리즘을 대입하여 확인했을 때 오차는 존재 했지만 시뮬레이션과 흡사하였다.

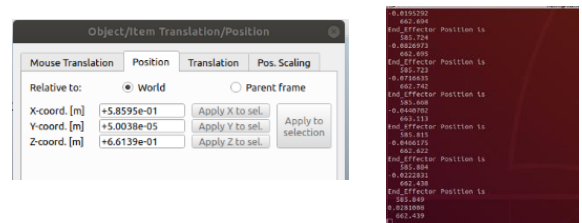


그림 6. End-Effector Position 비교

Jacobian Matrix 을 이용한 역기구학 알고리즘을 제작하여 Target Position 을 설정해주었을 때 End-Effector 가 수렴하는지 실험해 보았을 때 수렴하는 모습을 보였다.

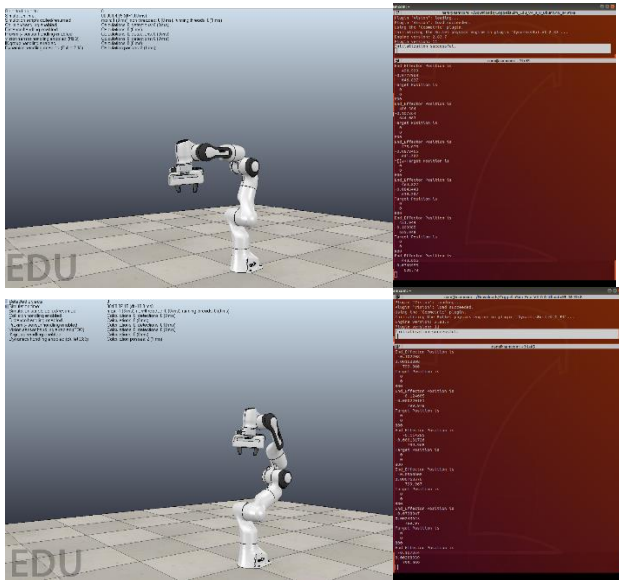


그림 7. Target Position 수렴

Target Position 을 계속 변화를 주어도 End-Effector 가 잘 수렴하는 모습을 보였다.

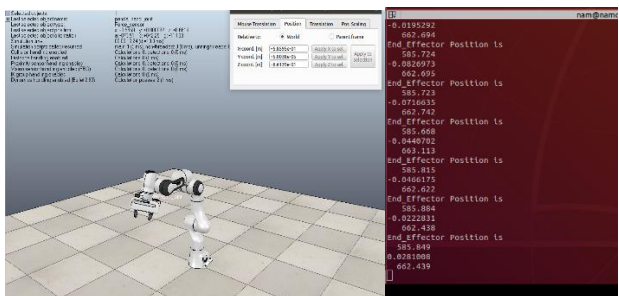


그림 8. 변하는 Target Position 에도 수렴

본 논문에서는 제작한 Target Position 을 주었을 때 수렴하는 Jacobian Matrix 역기구학 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 실험하였다. Target Position 을 주었을 때 현재 위치에 따라 다른 Trajectory 를 그리며 End-Effector 가 이동하는 모습을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Eunchan Kim, Ingu Choi, Sungwook Yang “Design and Analysis of a Handheld Micromanipulator for Robot-Assisted Microsurgery”, 대한기계학회 춘추학술대회, 2019.11, 999-1001(3 pages)
- [2] G.Won, T. K. Kim, J. H. Hwang. “Development of Simulator Based on 7 DoF Manipulator for Relief Operation”, 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, 2016.5, 271-271(1 pages)
- [3] 김정인, 김정은, 손형일, “Development of Deep Learning-based Tomato Detection and Manipulator Control System for Tomato Harvesting Robot”, 제어로봇시스템학회 국내학술대회 논문집, 2020.7, 525-526 (2 pages)
- [4] 최동일, “인공지능 응용 연구를 위한 저가의 교육용 매니플레이터”, 기계저널 60(6), 2020.6, 32-37(6 pages)
- [5] 박경택, 박찬훈, “Dual Arm Robot System for Precision Assembly Process”, 제어로봇시스템학회 국내학술대회 논문집, 2009.9, 48-53(6 pages)
- [6] Jin-Il Kang, Hyeung-Sik Choi, Bong-Huan Jun, Dae-Hyeong Ji, Ji-Yoon Oh, Joon-Young Kim, “Design and Control of Robot Arm for Inspection and Rescue Operations”, 제어로봇시스템학회 논문지 22(11), 2016.11, 888-894(7 pages) Journal of Institute of Control, Robotics and Systems 22(11), 2016.11, 888-894(7 pages)
- [7] Kon woo Kim, Young Youp Cha, “Efficient Localization of Mobile Robots based on GPS/IMU Sensors in Outdoor Terrain”, 제어로봇시스템학회 합동학술대회 논문집, 2009.12, 126-129(4 pages)
- [8] Xiaoli Meng, Heng Wang, Bingbing Liu, “A Robust Vehicle Localization Approach Based on GNSS/IMU/DIM/LiDAR Sensor Fusion for Autonomous Vehicles”, Sensors 2017, 17(9), 2140
- [9] 박중훈, “로봇공학 SW 도구로서의 시뮬레이션”, Korea robotics society review 7(2), 2010.4, 3-4(2pages).
- [10] 이주장, 김성우, 이종권, “제어시스템에서의 시뮬레이션 기법과 로봇공학에의 응용”, The Magazine of the IEEE 22(8), 1995.8, 874-881(8 pages).
- [11] Franz Reuleaux, “Kinematics of Machinery”, London : Macmillan (1876)
- [12] Denavit Jacques, Hartenberg Richard, “A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices”, Trans ASME J. Appl. Mech. 23: 215-221.
- [13] Paul. Richard, “Robot manipulators: mathematics, programming, and control : the computer control of robot manipulators”, Cambridge, MA: MIT Press. ISBN 978-0-262-16082-7. Archived from the original on 2017-02-15. Retrieved 2016-09-22.
- [14] Richard P. Paul, “ Kinematic Control Equations for Simple Manipulators”, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOL. SMC-1 1, NO. 6, JUNE 1981
- [15] Junghee Kim, Sungho Cho, Choongho Lee, Jaewoong Han, Heon Hwang, “Kinematic and Dynamic Analyses of Human Arm Motion”, 바이오시스템공학 제38권 제2호, 2013, 138-143(11 pages)

- [16] John J. Craig, “Intoroduction to Robotics Mechanics and Control”, 1997.05.30
- [17] Hyoung Jun Park, Duk Soo Han, Kwae Hi Lee, “A Study on Kinematics and Inverse Kinematics of Industrial FANUC Robot”, 대한전자공학회 학술대회, 1991.01, 551~556(6 pages)
- [18] Omar W. Maarroof, Erkin Gezgin, Mehmet smet Can Dede, “General Subtask Controller for Redundant Robot Manipulators”, 제어로봇시스템학회 국제 학술대회 논문집, 2012.10, 1352~1357