

The Real Time Robust Control of a Force Reflecting Master-arm Integrated with a Robot

Force Reflection 기능을 갖는 Master Arm의 실시간 건설에 관한 연구

장준화¹, 김휘동², 전완수³, 이진⁴, 한성현⁴

1. 경남대학교 대학원 기계설계학과, 631-701 경남 마산시 월영동 449번지
2. 연암공업대학 정밀기계과 660-750, 진주시 가좌동 780번지
3. 국방과학 연구소
4. 경남대학교 기계자동화공학부, 631-701 경남 마산시 월영동 449번지

Abstract : A lot of researches have been done in teleoperation field. For accurate and reliable teleoperation, force reflection is required so that the master can feel the same force, which is measured at reflection have been applied to most of the master device. Therefore the master can not control the force exerted by the slave robot to the environment. But some tasks such as an insertion with very small tolerance, skewing bolt and so forth, require the force command from the master.

1.Introduction

로봇의 경로를 생성하기 위해 자동 경로 생성기나 teaching/playback 등과 같은 수많은 알고리즘이 개발되고 있다. 그중에 Teleoperation은 동적인 작업공간에서 다양한 작업을 해야할 경우와 인간과 같은 사고 결정력이 요구되거나 인간이 접근하기 위험한 지역의 작업등에 주로 사용된다.

Teleoperation은 원자력 시스템에 적용된[2] 이래로 많은 발전을 거듭해 왔으며, 비전시스템의 사용은 먼 거리에서 로봇을 제어할 수 있도록 하였으며 로봇 TCP(tool center point)에서 측정된 힘을 master가 느낄 수 있도록 힘을 feedback한 것은 작업의 효율을 한층 높여 주었다[4]. 더욱이 기존 대부분의 master/slave system의 동일한 기구학 구조를 벗어나 상이한 기구학적 구조에서 좌표계 변환을 통하여 force reflection을 구현하였다[1,7].

또한, master device는 slave system과 동일한 kinematics와 동일한 액츄에이터를 이용함으로써 크고 무거웠으나 공압 액츄에이터를 사용하여 가볍고 착용이 간편한 master device를 설계하여 여유자유도를 갖는 인간형 로봇에 적용할 수 있도록 하였다[4].

자유 공간상에서 매우 안정적이던 높은 강성의 PID제어는 강인한 주변환경과의 접촉을 통하여 이루어지는 작업을 수행할 때 불안정해지기 쉽다. 이런 경우 미분게인(derivative gain)을 높임으로써 진동을 줄일 수 있지만 너무 높으면 불안정해진다. 따라서 접촉이 생기면 master는 로봇의 임피던스를 적절히 조절하여 움직일 필요성이 대두되었다. Impedance control이 처음 적용된[3] 이래로 hybrid position/force control[6]이나 로봇 dynamics의 불확실성을 보상하기 위한 PID inner loop 와 force control을 위한 outer loop으로 구성된 position based impedance control[5]등 많은 힘 제어 알고리즘들이 개발되고 있다.

본 연구에서는 slave 로봇의 kinematics에 기반하여 해석적 역학기구학 해를 유도함으로써 실시간 teleoperation을 구현한다. 또한, master로 하여금 slave 로봇의 TCP에서 측정된 주변 환경과의 상호 작용력을 느낄 수 있도록 하며, 이때 master가 slave robot의 dynamics(inertia, damping, stiffness)를 능동적으로 변경할 수 있도록 하여 주변환경과의 접촉시 순수 PID제어의 불안정 가능성을 배제하며 단일방향 force reflection보다 높은 작업효율을 낼 수 있는 양방향 force reflection을 적용한 원격제어 방법을 제

시하고 실험을 통하여 결과를 고찰하였다.

2.Kinematic analysis

본 연구에서 사용한 slave 로봇은 삼성 FARAMAN AM1으로 그림 1.과 같다. AM1은 6 자유도를 갖고 있으며 그림 2.에서 볼 수 있듯이 4, 5, 6축의 회전축(Z축)은 손목중심(W_c)에서 만나고 손목중심의 orientation에서 만 영향을 주며 손목중심의 position은 1, 2, 3축에 의해서만 변화되는 특징을 갖고 있다. 즉, AM1 robot의 역기구학은 손목중심의 position과 손목중심에서 본 TCP의 상대적인 orientation으로 분리되어 각각 독립적인 전개가 가능하다.

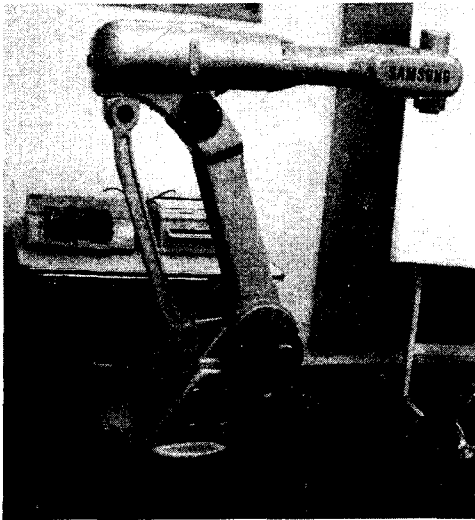


그림 1.AM1 Robot Manipulator

위와 같은 기구학적 특징을 이용하면 TCP의 position과 orientation은 식(1). 에서 식 (13).에 의해서 필요한 joint angle로 변환 될 수 있다. 그림 3.은 각 joint angle을 구하는데 필요한 파라미터를 보여주고 있다.

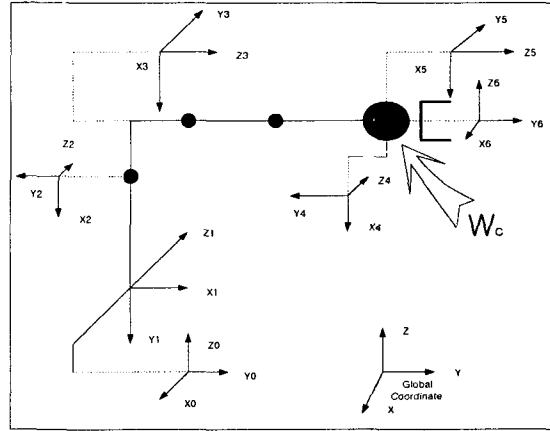


그림2. AM1 Robot좌표계 정의

주어진 TCP의 position으로부터 W_c 의 위치는 식(1). 과 같이 구할 수 있고 orientation은 동일하다. $\theta_i, a_i, d_i, \alpha_i$ 는 DH notation에 의해 정의된 파라미터이다.

$$\vec{W}_c(x,y,z) = \vec{TCP}(x,y,z) - d_6 * \vec{Y}_6 \quad (1)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{-W_c(x)}{W_c(y)} \right) \quad (2)$$

$$\vec{R} = \vec{W}_c - \vec{O}_1 \quad (3)$$

Where

$$O_1 = \left(a_1 * \cos \left(\theta_1 + \frac{\pi}{2} \right), a_1 * \sin \left(\theta_1 + \frac{\pi}{2} \right), d_1 \right) \quad (4)$$

$$\theta_3 = \pi - \epsilon - \beta$$

where

$$\epsilon = \tan^{-1} \left(\frac{350}{100} \right)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{\gamma_2^2 + \gamma_3^2 - |\vec{R}|^2}{2 * \gamma_2 * \gamma_3} \right)$$

$$\gamma_2 = 350, \quad \gamma_3 = \sqrt{a_3^2 + d_4^2}$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{(0,0,1) * (\vec{W}_c - \vec{O}_1)}{|\vec{W}_c - \vec{O}_1|} \right) \quad (5)$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{\gamma_3 * \sin(\beta)}{|\vec{R}|} \right) \quad (6)$$

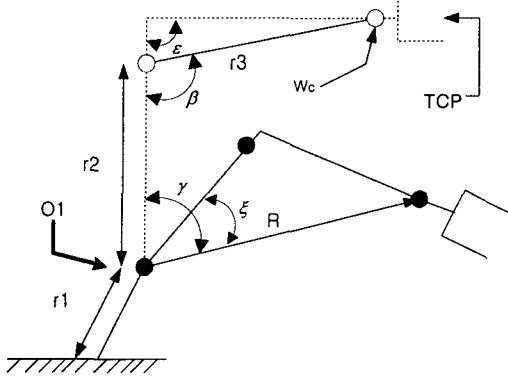


그림 3.Parameter definition

$$\theta_2 = \gamma - \zeta, \text{ when } R(y) > 0 \quad (7)$$

$$\theta_2 = -\gamma - \zeta, \text{ when } R(y) < 0$$

주어지는 TCP(x, y, z, φ, ψ, ω)에 의한 변환행렬은 식 (8)과 같다. 식 (9)는 손목의 중심에서 TCP까지의 벡터 ($\overrightarrow{W2E}$)를 전체좌표에서 표현하고 있다. 식 (10)은 ($\overrightarrow{W2E}$)를 θ_4 가 zero 일 때 4번 좌표계에서 본 벡터를 말하며 $\overrightarrow{v}_1^{W2E}$ 는 ($\overrightarrow{W2E}$)를 i좌표계에서 본 벡터를 표현한다.

$$TFM_0^6 = \begin{bmatrix} c_\phi * c_\psi & c_\phi s_\psi s_u - s_\phi c_u & c_\phi s_\psi c_u + s_\phi s_u & TCP(x) \\ s_\phi c_\psi & s_\phi s_\psi s_u + c_\phi c_u & -s_\phi c_\psi c_u - c_\phi s_u & TCP(y) \\ -s_\psi & c_\phi s_u & c_\psi c_u & TCP(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\overrightarrow{W2E}(x,y,z) = \overrightarrow{TCP} - \overrightarrow{W_c} \quad (9)$$

$$\overrightarrow{V}_{4t}^{W2E}(x) = \overrightarrow{W2E} * X_{4t}$$

$$\overrightarrow{V}_{4t}^{W2E}(y) = \overrightarrow{W2E} * Y_{4t} \quad (10)$$

$$\overrightarrow{V}_{4t}^{W2E}(z) = \overrightarrow{W2E} * Z_{4t}$$

where

$$\begin{pmatrix} \overrightarrow{X}_{4t} & \overrightarrow{Y}_{4t} & \overrightarrow{Z}_{4t} & \overrightarrow{O}_{4t} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$TEM_0^1 * TEM_1^2 * TEM_2^3 * TEM_3^4$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{\overrightarrow{V}_{4t}^{W2E}(y)}{\overrightarrow{V}_{4t}^{W2E}(x)} \right) \quad (11)$$

θ_5, θ_6 은 유사한 방식에 의해서 식 (12)와 식 (13)에 의해서 구해진다.

$$\theta_5 = \cos^{-1} \left(-\frac{\overrightarrow{V}_4^{TCP}(y)}{|\overrightarrow{V}_4^{TCP}(x)|} \right), \text{ where } V_4^{TCP}(x) > 0 \quad (12)$$

$$\theta_5 = -\cos^{-1} \left(-\frac{\overrightarrow{V}_{4t}^{W2E}(y)}{|\overrightarrow{V}_{4t}^{W2E}(x)|} \right)$$

$$\theta_6 = \tan^{-1} \left(\frac{\overrightarrow{V}_5^{TCP}(y)}{\overrightarrow{V}_5^{TCP}(x)} \right) \quad (13)$$

3.Force control

Master가 직교 좌표계에 의하여 정의된 힘을 느끼거나 slave 로봇이 정해진 방향으로 힘을 내고자 할 때는 힘을 joint torque로 변환하는 과정을 필요로 한다. 식(14)~식(17)은 직교 좌표계에 의하여 정의된 force를 joint torque로 변환하는 과정을 나타낸다[4]

$$\overrightarrow{X} = KIN(\overrightarrow{\theta}) \quad (14)$$

$$\overrightarrow{\theta} = KIN(\overrightarrow{X}) \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt}(\overrightarrow{X}) = J(\overrightarrow{\theta}) * \frac{d}{dt}(\overrightarrow{\theta}) \quad (16)$$

$$\overrightarrow{\tau} = J^T(\overrightarrow{\theta})(\overrightarrow{F}) \quad (17)$$

MDK system의 dynamics는 식 (18)와 같다. 따라서 식(17)은 식(18)에 의해서 식 (19)로 변환되어 slave 로봇이나 master device의 joint torque로 적용이 가능하다. Master device에 적용할 때는 식 (19)에서 M_x, D_x, K_x 항은 zero로 놓고 F항만을 적용한다.

$$M_x = J^T \left[\frac{d^2}{dt^2} \overrightarrow{X} + D_x \frac{d}{dt} \overrightarrow{X} + K_x \overrightarrow{X} \right] = \overrightarrow{F} \quad (18)$$

$$\overrightarrow{\tau} = J^T \left[M_x J \frac{d^2}{dt^2} \overrightarrow{E} + D_x \frac{d}{dt} \overrightarrow{E} + K_x \overrightarrow{E} + \overrightarrow{F} \right] \quad (19)$$

Where

$$\overrightarrow{E} = \overrightarrow{X}_d - \overrightarrow{X}$$

$$\overrightarrow{E} = \overrightarrow{E}_d - \overrightarrow{E}_{environment}$$

K_x : stiffness matrix

D_x : accommodation matrix

M_x : inertia matrix

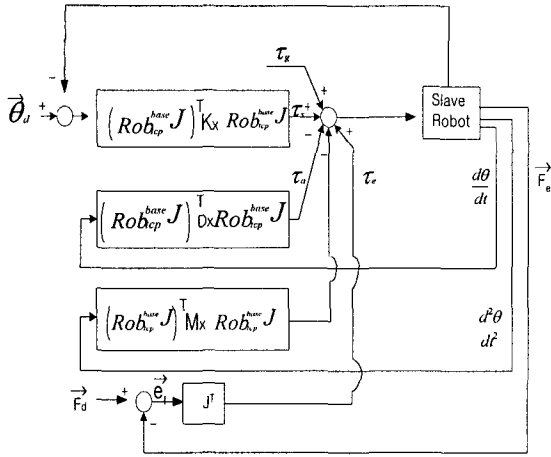


그림 4. Impedance control block diagram

그림 4.는 Force controller block diagram이다. 속도의 역전과 방법에 의해서 구해진 jacobian matrix는 전체 좌표에 대한 속도 성분으로 이루어져 있으나 force 제어는 툴 좌표에 대해서 정의하는 것이 편리하므로 jacobian matrix를 회전행렬에 의해서 툴 좌표로 변경하였다. D_x 는 admittance matrix의 역행렬이며 식 (20).을 이용하여 critical damping motion을 얻을 수 있다.

$$D_x = k_{admittance}^{-1} = 2\sqrt{M_x K_x} \begin{bmatrix} f \\ v \end{bmatrix} \quad (20)$$

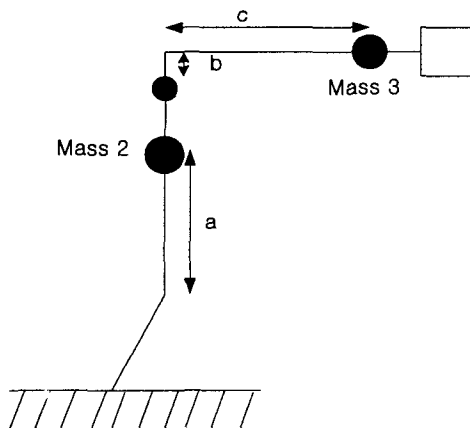


그림 5.중력보상을 위한 모델

AM1 Robot은 servo가 걸리지 않을 때는 중

력에 의해서 2번과 3번 link가 밑으로 회전할때는 급격하게 움직이며 반대 상황에서는 움직이지 못하는 사태가 발생할 수 있다. 그림 5.은 중력보상을 위하여 AM1 로봇을 모델링한 것이며 식 (21).에 의해서 중력에 의한 torque를 계산해 낼 수 있다. 중력 보상은 중력에 직접적인 영향을 받는 2축과 3축에 적용된다.

$$\tau_2 = M_2 * g * a * \sin(\theta_2) + \tau_3 \quad (21)$$

$$\tau_3 = M_3 * g * [c * \cos(\theta_2 + \theta_3 - \pi/2) + b * \sin(\theta_2 + \theta_3 - \pi/2)]$$

Where

g : 중력 가속도

a, c : center of mass

b : offset

그림 6과 같은 환경에서 접촉물의 표면을 따라 수직으로 내려오도록 Y축을 compliance 좌표계로 설정하고 Z축에 강성을 주어 실행해 보면 초기에 벽으로 접근하여 벽 표면을 따라 접촉될 상태로 내려간다.

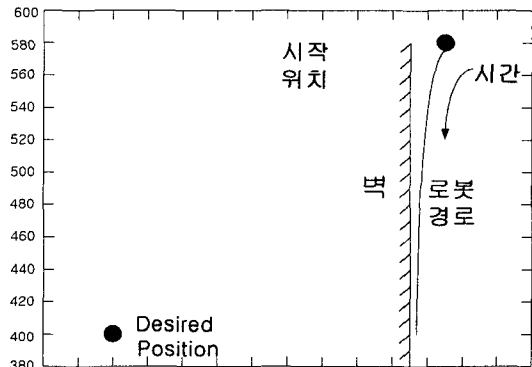


그림6. TCP의 YZ 평면 이동 경로

4. System integration

Slave 로봇제어기는 12bit DA와 24bit counter 그리고, 12bit AD를 사용하여 PC에서 구성하였다. 또한, master 제어기와 force 및 TCP position 그리고, orientation의 정보교환을 위하여 38400[bps] RS232c protocol을 채택하였다. Sampling time은 자유공간상 모터 제어를 위한 inner loop은 2[msec]이며, trajectory 갱신을 위

한 outer loop는 20[msec]이다. contact model에서는 inner loop과 outer loop 모두 동일한 [20ms] sampling time에 의해서 제어된다.

본 연구에서는 slave 로봇으로 AM1 로봇을 이용하여 teleoperation을 수행했으며 graphic model을 이용하여 가상현실 시스템을 구축하였다. 그림 7은 전체 시스템에 대한 개략적인 정보의 흐름을 나타내고 있다.

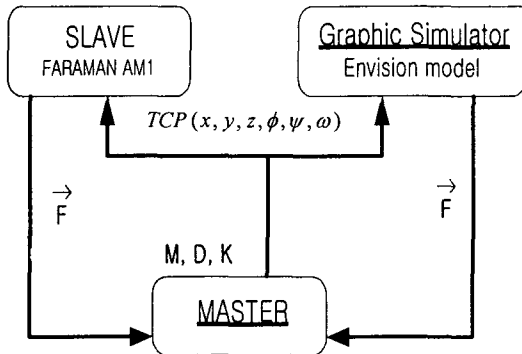


그림 7. 정보의 흐름도

그림 8은 Open GL를 이용하여 가상현실 구현에 사용되는 그래픽 모델을 보여주고 있다. 본 연구에서 사용한 그래픽 모델은 편의상 slave robot과 동일한 kinematics를 갖고 있지만 slave robot과 다른 kinematics여도 무방하다.[4]

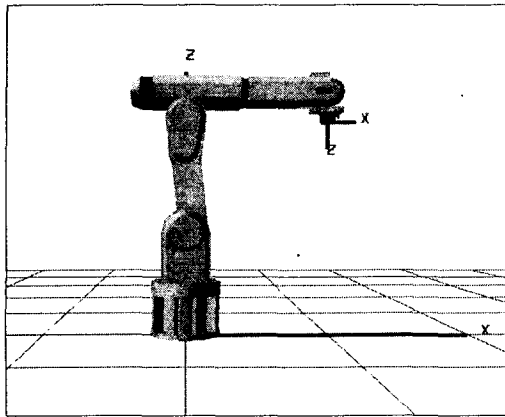


그림 9. Graphic Model

slave 로봇은 master 끝단의 position과 orientation을 실시간으로 정확하게 추종하며 slave robot의 TCP에 부착된 FT sensor로부터 측정된 힘의 크기와 방향을 master가 느낄 수 있

도록 한다. 이때 master는 slave robot의 크기와 방향을 master가 느낄 수 있도록 한다. 이때 master는 slave robot의 동역학적 특성(inertia, damping, stiffness)을 능동적으로 변화시켜가며 slave의 동 특성을 제어할 수 있다.

5. Conclusion

본 연구에서는 slave 로봇의 해석적 역기구학 해를 유도하여 실시간으로 원격제어를 수행하였으며 master가 느낄 수 있도록 하였다. 더불어 master가 slave 로봇의 동역학적 특성을 능동적으로 변화시킬 수 있는 interface를 구축함으로써 원격제어작업의 효율을 한 차원 높일 수 있었다.

참고 문헌

- [1] K. corker, A.K. Bejczy, "Recent advances in telepresence technology development", *Proceedings of 22nd Space Congress*, Kennedy Space Center, 1985
- [2] R. Goertz, "Manipulator Systems Development at ANL", *Proc. of 12nd Conf. On Remote Systems' Technology*, American Nuclear Society, vol. 12, 1964
- [3] Neville Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation(parts I - II)", *The Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 107, pp. 1-16, 1985.
- [4] S. Lee, et.al, "Design of a Force Reflecting Master and Master Hand using Pneumatic Actuators", *IEEE International Conferenc on Robotics and Automation*, 1998.
- [5] J. Maples, and J. Becker, "Experiments in Force control of Robotic Manipulators", *Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics*.
- [6] M. Raibert, and J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, vol. 102, June 1981.
- [7] J.K. Salisbury, "Articulated hands : Force control and Kinematic Issues", *Joint Automatic Control Conference*, 1981.