

상반신 양팔 로봇의 무게 중심 및 매니플레이터 제어

류광현, 오용환, 조준희
한국과학기술연구원

Center-of-Mass and Manipulator Control of Upper-Body Dual Arm Robot

Ryu, Kwanghyun, Oh, Yonghwan, Jo, Joonhee
Korea Institute of Science and Technology
e-mail : khryu26@gmail.com

요 약

본 논문은 허리와 양팔로 구성된 상반신 양팔 로봇의 제어 방법을 제시한다. 상반신 양팔 로봇을 이용하여 작업을 할 때 무게 중심을 이용하여 로봇의 자세 제어가 가능하다. 이는 여유 자유도 때문에 로봇의 자세가 흐트러지는 것을 막아주며, 무게 중심을 적절한 곳에 위치시켜 로봇의 균형을 유지 시킬 수 있다.

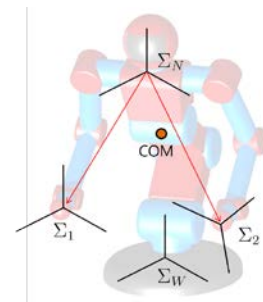
1. 서론

상반신 양팔 로봇은 넓은 작업 공간을 확보할 수 있다는 장점이 있지만 자유도가 늘어남에 따라 제어가 복잡해 진다. 허리 관절이 추가 되어 생기게 된 여유 자유도에 대한 처리 및 자세 제어를 위해 로봇의 무게 중심을 이용한다. 로봇의 무게 중심은 관절 모션과 무게 중심 모션 사이의 속도 관계를 나타내는 무게 중심 자코비안[1-4] 을 이용하여 제어 할 수 있다.

본 논문의 목적은 양팔과 무게 중심을 동시에 제어 하여 양팔이 제어 되는 순간에도 로봇의 원하는 자세를 유지 시키도록 하는 것이다. 이를 위한 제어기의 설계는 arimoto[5-7] 가 제안한 여유자유도 매니플레이터 제어 방법을 기반으로 한다. 이 방법은 역기구학이나 역동역학 등을 풀지 않고 여유 자유도 매니플레이터를 제어가 가능하다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2.1 절에서는 양팔 제어에 필요한 자코비안을 유도하고, 2.2 절에서는 무게 중심 제어를 위해 무게 중심 자코비안을 유도한다.

2.3 절은 무게 중심과 양팔 제어를 위한 제어기를 설명하고, 마지막으로 2.4 절에서는 RoboticsLab 을 이용한 시뮬레이션 결과를 보인다.



그림(1) 상반신 양팔 로봇 좌표계

2. 본론

2.1 자코비안

본 논문의 매니플레이터 제어를 위해서는 양팔에 대한 자코비안이 필요하다. 그림(1) 과 같은 트리 형태의 상반신 양팔 로봇의 자코비안은 로컬 자코비안을 이용하여 유도 된다.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{p}}_i &= \dot{\mathbf{p}}_N + \dot{\mathbf{R}}_N^N \mathbf{p}_i + \mathbf{R}_N^N \dot{\mathbf{p}}_i \\ &= \dot{\mathbf{p}}_N \mathbf{R}_N^N \mathbf{p}_i + \mathbf{R}_N^N \dot{\mathbf{p}}_i \\ &= \mathbf{R}_N^N \dot{\mathbf{p}}_i\end{aligned}\quad (1)$$

$\mathbf{v}_i = [\dot{\mathbf{p}}_i]^T$ 이라 정의하면,

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{X}_{iN} \mathbf{J}_N \dot{\mathbf{q}}_N + \mathbf{Y}_N^N \mathbf{J}_i \dot{\mathbf{q}}_i \quad (2)$$

여기서

$$\mathbf{X}_{iN} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 \mathbf{\Omega} \mathbf{p}_i \\ \mathbf{O}_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_N & \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{O}_3 & \mathbf{R}_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{E}_3 는 3×3 단위 행렬이고, $\mathbf{\Omega}(a)b = a \times b$ 를 뜻한다. 식(2) 에 따라 양팔 말단장치의 속도는 다음 식과 같고,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{1N} \mathbf{J}_N & \mathbf{Y}_N^N \mathbf{J}_1 & \mathbf{O} \\ \mathbf{X}_{2N} \mathbf{J}_N & \mathbf{O} & \mathbf{Y}_N^N \mathbf{J}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_N \\ \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \dot{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

따라서 상반신 양팔 로봇의 자코비안은 다음과 같다.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{1N} \mathbf{J}_N & \mathbf{Y}_N^N \mathbf{J}_1 & \mathbf{O} \\ \mathbf{X}_{2N} \mathbf{J}_N & \mathbf{O} & \mathbf{Y}_N^N \mathbf{J}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 무게중심 자코비안

2.2.1 무게중심 자코비안

n 자유도를 갖는 매니퓰레이터를 고려했을 때, 매니퓰레이터의 무게 중심 \mathbf{p}_G 는 관절 각 \mathbf{q} 의 함수이기 때문에 다음과 같은 관계식이 존재한다.

$$\dot{\mathbf{p}}_G = \mathbf{J}_G \dot{\mathbf{q}} \quad (6)$$

여기서 \mathbf{J}_G 는 무게 중심 자코비안으로 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{J}_G = \frac{\partial \mathbf{p}_G}{\partial \mathbf{q}} \quad (7)$$

임의의 프레임 \sum_o 을 매니퓰레이터의 베이스 프레임이라 했을 때, \mathbf{J}_G 을 구하기 위한 Sugihara[2,3] 에 의해 제안된 방법은 다음과 같다.

$${}^o \dot{\mathbf{p}}_G = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} m_i {}^o \dot{\mathbf{r}}_{Gi}}{\sum_{i=0}^{n-1} m_i} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} m_i {}^o \mathbf{J}_{Gi} \dot{\mathbf{q}}}{\sum_{i=0}^{n-1} m_i} = {}^o \mathbf{J}_G \dot{\mathbf{q}} \quad (8)$$

여기서 m_i 와 ${}^o \mathbf{r}_{Gi}$ 는 각각 i 번째 링크의 질량과 무게 중심 위치를 뜻한다. 식(8) 에 의해 베이스 프레임에 대한 무게중심 자코비안은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$${}^o \mathbf{J}_G = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} m_i {}^o \mathbf{J}_{Gi}}{\sum_{i=0}^{n-1} m_i} \quad (9)$$

2.2.1 상반신 양팔 로봇의 무게중심 자코비안

상반신 양팔 로봇의 무게중심 자코비안을 구하기 위해 로봇 전체의 무게 중심 속도를 다음과 같이 정의하였다.

$$\dot{\mathbf{p}}_G = \frac{M_N \dot{\mathbf{p}}_{N_G} + M_1 \dot{\mathbf{p}}_{1_G} + M_2 \dot{\mathbf{p}}_{2_G}}{M_N + M_1 + M_2} \quad (10)$$

여기서 $\dot{\mathbf{p}}_{N_G}$ 와 $\dot{\mathbf{p}}_{i_G}$ 는 각각 월드 프레임에 대한 로봇 몸체와 i 번째 매니퓰레이터의 무게 중심 속도이고 M_N 과 M_i 는 로봇 몸체와 i 번째 매니퓰레이터 무게를 뜻한다. $\dot{\mathbf{p}}_{N_G}$ 와 $\dot{\mathbf{p}}_{i_G}$ 은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{p}}_{N_G} &= \mathbf{J}_{N_G} \dot{\mathbf{q}}_N \\ \dot{\mathbf{p}}_{i_G} &= \dot{\mathbf{p}}_N + \dot{\mathbf{R}}_N^N \mathbf{p}_{i_G} + \mathbf{R}_N^N \dot{\mathbf{p}}_{i_G} \\ &= \dot{\mathbf{p}}_N \mathbf{R}_N^N \mathbf{p}_{i_G} + \mathbf{R}_N^N \dot{\mathbf{p}}_{i_G} \\ &= \left[\mathbf{E}_3 \mathbf{\Omega} \mathbf{R}_N^N \mathbf{p}_{i_G} \right] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_N \\ \dot{\mathbf{R}}_N^N \end{bmatrix} + \mathbf{R}_N^N \dot{\mathbf{p}}_{i_G} \\ &= \left[\mathbf{E}_3 \mathbf{\Omega} \mathbf{R}_N^N \mathbf{J}_{i_G} \dot{\mathbf{q}} \right] \mathbf{R}_N^N + \mathbf{J}_{i_G} \dot{\mathbf{q}}_i\end{aligned}\quad (11)$$

이를 식 (8)에 대입하면

$$\dot{\mathbf{p}}_G = \frac{\begin{bmatrix} M_N \mathbf{J}_{N_G} + M_1 \mathbf{Z}_1 + M_2 \mathbf{Z}_2 \\ M_1 \mathbf{R}_N^N \mathbf{J}_{1_G} \\ M_2 \mathbf{R}_N^N \mathbf{J}_{2_G} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_N \\ \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \dot{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix}}{M_N + M_1 + M_2} \quad (12)$$

여기서

$$\mathbf{Z}_i = \mathbf{R}_3 \mathbf{p} - (\mathbf{J}_N^N \mathbf{i}_G) \quad (13)$$

따라서 상반신 양팔 로봇의 무게중심 자코비안은 다음과 같다.

$$\mathbf{J}_G = \frac{\begin{bmatrix} M_N \mathbf{J}_{N_G} + M_1 \mathbf{Z}_1 + M_2 \mathbf{Z}_2 \\ M_1 \mathbf{R}_N^N \mathbf{J}_{1_G} \\ M_2 \mathbf{R}_N^N \mathbf{J}_{2_G} \end{bmatrix}^T}{M_N + M_1 + M_2} \quad (14)$$

2.3 상반신 양팔 로봇 제어

이번 절에서는 arimoto[5-7]에 의해 제안된 여유 자유도 매니플레이터 제어 방법을 기반으로 앞에서 구한 자코비안과 무게 중심 자코비안을 이용하여 상반신 양팔 로봇의 매니플레이터와 무게 중심을 함께 제어한다.

$$\boldsymbol{\tau} = \ddot{\mathbf{q}}(\mathbf{f}) + \dot{\mathbf{q}}(\mathbf{f})_G \mathbf{K} \mathbf{q}_d + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (15)$$

여기서

$$\boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_N \quad \boldsymbol{\tau}_1 \quad \boldsymbol{\tau}_2]^T, \quad \ddot{\mathbf{q}} = [\ddot{\mathbf{q}}_N \quad \ddot{\mathbf{q}}_1 \quad \ddot{\mathbf{q}}_2]^T \quad (16)$$

이고, \mathbf{f} 는 양팔 말단 장치 제어에 필요한 힘을 발생시키며 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}_p \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_1 \\ \Delta \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} - \mathbf{K}_v \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_1 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 $\Delta \mathbf{x}_i$ 는 6×1 벡터로 i 번째 매니플레이터 말단 장치의 추종점(desired position/orientation) 벡터와 현재 위치 및 방향 벡터의 차이다.

\mathbf{f}_G 는 로봇의 무게 중심 제어에 필요한 힘을 발생시키며 다음과 같은 식으로 나타낸다.

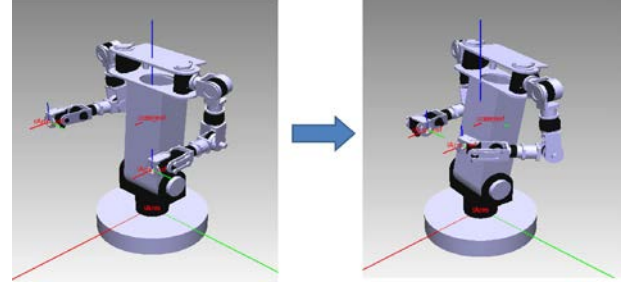
$$\mathbf{f}_G = \mathbf{K}_{p_G} \Delta \mathbf{p}_G - \mathbf{K}_{v_G} \dot{\mathbf{p}}_G \quad (18)$$

여기서 $\Delta \mathbf{p}$ 는 3×1 벡터로 무게 중심 추종 위치와 현재 무게 중심 위치 벡터의 차이다.

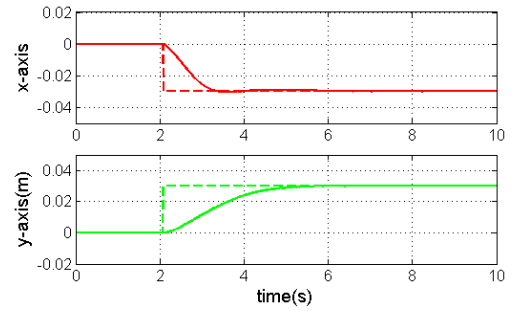
2.2 시뮬레이션

이번 절에서는 시뮬레이터 RoboticsLab 으로 시뮬레이션 한 결과를 그래프로 나타내었다. 추종 점의

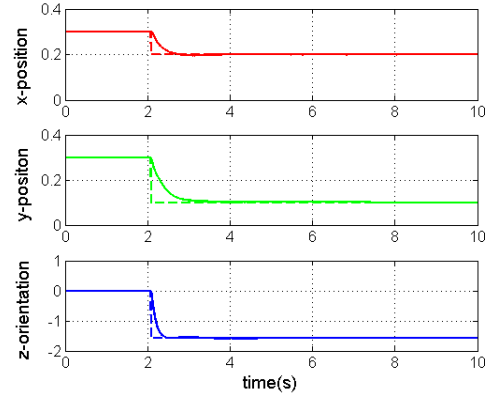
변화가 없는 축은 그래프에서 제외하였다. 그래프에서 2 초가 지났을 때 무게 중심과 양팔 말단 장치의 추종 점을 변화 시키고 그 결과 무게 중심과 말단 장치 모두 추종 점으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.



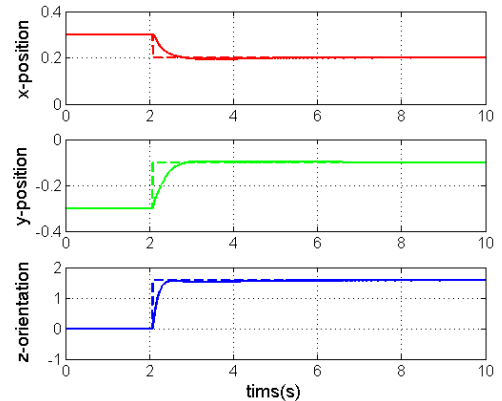
그림(2) 시뮬레이션



그림(3) x, y 축 무게중심



그림(4) 왼팔 말단 장치 x, y 축 위치와 z 축 방위



그림(5) 오른팔 말단 장치 x, y 축 위치와 z 축 방위

참고문헌

- [1] S. Kagami, F. Kanehiro, Y. Tamiya, M. Inaba, and H. Inoue, "Autobalancer: An online dynamic balance compensation scheme for humanoid robots", in The 4th International Workshop on Algorithmic Foundation on Robotics (WAFR'00), 2000, no Paper.
- [2] T. Sugihara, Y. Nakamura, and H. Inoue, "Realtime humanoid motion generation through ZMP manipulation based on inverted pendulum control", in IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, may 2002, pp.1404-1409.
- [3] T. Sugihara and Y. Nakamura, "Whole-body cooperative balancing of humanoid robot using COG jacobian", in International Conference on Intelligent Robots and Systems, EPFL, Lausanne, Swizerland, oct 2002, pp.2575-2580.
- [4] D. Kim, Y. Choi, and C. Kim, "Motion-embedded cog jacobian for a real-time humanoid motion generation", in 2nd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2005), 2005, pp.55-61.
- [5] S. Arimoto, H. Hashiguchi, M. Sekimoto, and R. Ozawa, "Generation of natural motions for redundant multi-joint systems: A differential geometric approach based upon the principle of least actions", Journal of Robotic Systems, 2005, vol. 22, no. 11, pp. 583-605
- [6] S. Arimoto, M. Sekimoto, "Human-like movements of robotic arms with redundant DOFs: Virtual spring-damper hypothesis to tackle the Bernstein problem", in Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2006), 2006, pp. 1860-1866.
- [7] M. Sekimoto, S. Arimoto, "Experimental Study on Reaching Movements of Robot Arms with Redundant DOFs Based upon Virtual Spring-Damper Hypothesis", International conference of Intelligent Robots and Systems, 2006, pp. 562-567