

다기능 다관절 로봇의 설계 및 제어

주진화
오산대학 전자통신과
jinhju@osan.ac.kr

Design and Control of a Multi-Function and Multi-Joint Robot

Jin-Hwa Joo
Dept. of Electronic Communication, Osan College

요 약

In this paper show how to design a redundant robot which is suitable for the multiple task without any constraints on the workspace. The implementation is possible by the rigid connection of a mobile robot and a task robot. Use a five joint articulated robot as the task robot; designed the 3 joint mobile robot for this usage. For a task execution assigned to the redundant robot, not only the task robot but the mobile robot should work in the coordinated way. therefore, a kinematic connection of the two robots should be clearly represented in a frame. And, also the dynamic interaction between the two robots needs to be analyzed. Clarified these issues considering the control of the redundant robot. Finally, demonstrate away of utilization of the redundancy as the cooperation between the mobile robot and the task robot to execute a common task.

1. 서론

최근 산업체의 제품 생산 현장에서는 생산력 증대를 위해 산업용 로봇의 활용을 고려하고 있지만, 투자 규모에 따른 생산력의 증대 등을 고려한 경제성이 부적절한 관계로 인하여 실제 산업현장에서 로봇의 생산현장 투입은 기대에 부응하지 못하고 있다.

이러한 원인들로는 로봇이 그 설계과정에 있어서 수행하여야 할 작업에 대하여 전혀 고려되지 않고 설계되어진다는 점과 비록 로봇이 범용의 목적으로 설계되어졌더라도 실제 사용에 있어서는 그 작업 공간이 제한되는 관계로 다양한 작업에 사용하기에는 적합하지 않다는 점이다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 기저의 3축을 차륜 구동 방식을 사용하여 이동할 수 있도록 하는 이동로봇으로 구성하고, 그 상단에는 다축의 작업용 로봇이 장착 가능하도록 설계하여 이동로봇과 작업로봇의 결합에 의해 기존의

잉여다관절 로봇들이 가지는 작업공간에 대한 제약을 해소하고, 작업조건에 따라 상단에 장착된 작업로봇을 교환함으로써 보다 다양한 작업의 수행이 가능할 수 있는 다기능 다관절 로봇을 설계하고, 제안된 로봇이 실현되었을 때 그 성능을 예측해 본다.

2. 다기능 다관절 로봇 시스템의 구성

독립적인 목적으로 설계된 두 개의 로봇을 묶어서 하나의 잉여(Redundant) 다관절 로봇을 구성함에 있어서 문제점은 전체 잉여 로봇이 작업 수행을 위하여 동시에 제어되어야 한다는 것이며, 그러기 위해서는 궤적 계획이 잉여로봇에 대해 행해져야 하며 이는 하나의 제어시스템을 필요로 한다. 또한, 각각의 로봇의 키네마틱 해석 및 다이내믹 해석으로부터 전체 시스템의 키네마틱 및 다이내믹 해석이 용이해야 할 것이다. 이러한 점들을 고려하여 이동 로봇 및 작업 로봇이 선정되어야 할 것이다.

본 연구에서 사용될 다기능 다관절 로봇 시스템의 구조를 그림 1과 같이 설계하였다.

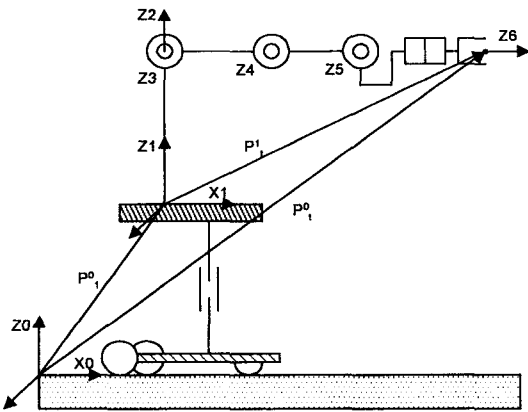


그림 1. 다기능 다관절 로봇시스템과 링크 좌표계

2.1. 제어 시스템의 구성 및 기구학

본 연구에서 사용되는 작업용 로봇으로는 스테핑 모터를 사용하는 5축의 교육용 로봇으로 하고, 이동 로봇은 3축의 DC 서보 모터를 사용하는 로봇으로 설계되어 있다. 현재 설계된 전체 다관절 다기능 로봇의 제어시스템은 그림 2와 같다.

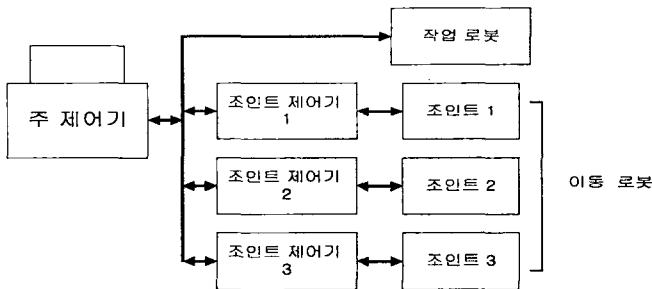


그림 2. 다기능 다관절 로봇 제어시스템의 구성
각각의 조인트에 조인트 제어기를 부착하고, 개별적인 조인트 제어기와의 통신에 의하여 주 제어기에서 계획된 작업계획에 의하여 각 조인트 제어기에 명령을 내려 주는 시스템을 구성한다.

다관절 로봇의 조인트 속도를 $\dot{\theta}$ 로 두면 이 $\dot{\theta}$ 는 이동 로봇의 조인트 속도 $\dot{\theta}_m$ 와 작업로봇의 조인트 속도 $\dot{\theta}_t$ 의 조합으로 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{\theta} \cong \begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

작업로봇의 기저(Base)가 놓이게 되는 이동 로봇의 상단의 동작 ${}^0\dot{X}_m$ 과 작업 로봇의 End-Effector의 동작 ${}^1\dot{X}_t$ 는 이동 로봇의 기저 프레임에 대한 선형 및 회전 속도를 각각 나타내는 자코비언(Jacobian) 행

렬 ${}^0J_m^v$ 과 ${}^0J_m^\omega$ 을 사용하여 다음과 같이 표시된다.

$${}^0\dot{X}_m \cong \begin{bmatrix} {}^0v_m \\ {}^0\omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0J_m^v \\ {}^0J_m^\omega \end{bmatrix} [\dot{\theta}_m] = {}^0J_m [\dot{\theta}_m] \quad (2)$$

$${}^1\dot{X}_t \cong \begin{bmatrix} {}^1v_t \\ {}^1\omega_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1J_t^v \\ {}^1J_t^\omega \end{bmatrix} [\dot{\theta}_t] \quad (3)$$

이제 다관절 로봇의 End-effector의 동작 ${}^0\dot{X}_t$ 를 기저 프레임에 대하여 기술하여 보면,

$$\begin{aligned} {}^0\dot{X}_t &= \begin{bmatrix} {}^0v \\ {}^0\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0v_m + {}^0\omega_m \times P + {}^0R_1 {}^1v_t \\ {}^0\omega_m + {}^0R_1 {}^1\omega_t \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} {}^0J_m^v \dot{\theta}_m + {}^0J_m^\omega \dot{\theta}_m \times P + {}^0R_1 {}^1J_t^v \dot{\theta}_t \\ {}^0J_m^\omega \dot{\theta}_m + {}^0R_1 {}^1J_t^\omega \dot{\theta}_t \end{bmatrix} \\ &\cong {}^0J_m \dot{\theta}_m + {}^0J_t \dot{\theta}_t \quad (\cong J \dot{\theta}) \end{aligned} \quad (4)$$

로 된다. 여기서, P는 작업 로봇의 기저로부터 End-Effector까지의 위치 벡터이고,

$${}^0J_m \cong \begin{bmatrix} {}^0J_m^v - \bar{P} {}^0J_m^\omega \\ {}^0J_m^\omega \end{bmatrix}, \quad {}^0J_t \cong \begin{bmatrix} {}^0R_1 & {}^1J_t^v \\ {}^0R_1 & {}^1J_t^\omega \end{bmatrix} \text{이다.}$$

식(1)에서부터 (4)까지를 통하여 이동 로봇의 동작 및 작업 로봇의 동작이 본 논문에서 설계한 전체 다기능 다관절 로봇의 동작에 어떻게 작용하는가를 보여주고 있다. 수식에서 사용된 위치 벡터 P는 전체적인 로봇시스템의 구성에서 상단에 부착된 작업로봇의 자세가 결정되면 바로 얻어지는 것으로서 이 값에 의하여 이동 로봇의 회전 운동이 전체 로봇의 End-effector에 어떠한 선형 운동을 유발할 것인가가 결정되는 것이다.

2.2. 다관절 로봇의 동역학 해석

기본적으로 Newton-Euler 동역학에 의해 작업 로봇의 작업에 의해 발생하는 힘/토크는 작업 로봇의 기저 프레임으로 전달되어져 표시되어지고, 이는 6차원의 벡터 F_r 로 나타낼 수 있다. 이 힘/토크가 이동 로봇에는 외적인 힘으로 작용함으로 이동 로봇의 동적방정식은 식(5)와 같이 표시된다.

$$(D(\theta_m) + J)\ddot{\theta}_m + C(\theta_m, \dot{\theta}_m) + B\dot{\theta}_m + g(\theta_m) = u + {}^0J_t^T F_r \quad (5)$$

여기서, $D(\theta_m)$ 는 이너시아(Inertia) 행렬이고, $C(\theta_m, \dot{\theta}_m)$ 는 Centrifugal 및 Coriolis 힘을 나타내는 행렬이다. 그리고 $g(\theta_m)$ 는 중력 항을 나타내는 벡터이고, J는 로봇의 관절에 사용된 모터 및 기어의 이너시아를 나타내는 벡터, B는 모터 및 기어의 점

성마찰을 나타내는 벡터이다.

이동 로봇을 고속으로 제어하기 위해서 일반적으로 사용하는 역 동적제어를 본 논문에서 사용한다고 가정하였을 때, 이 역동적 제어를 위한 제어시스템의 구성은 다음 그림 3과 같은 블록도로 표시된다.

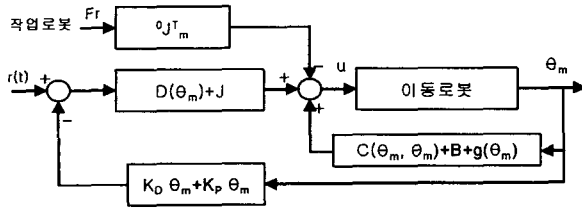


그림 3. 역동적 제어시스템이 구조

이 명목상의 선형 시스템에 PD제어기를 부착하고 입력 $r(t)$ 를 식(6)과 같이 인가해 주었을 때 그에 따른 오차 방정식은 식(7)과 같이 주어진다.

$$r(t) = \ddot{\theta}_m^d(t) + K_D \dot{\theta}_m^d(t) + K_P \theta_m^d(t) \quad (6)$$

$$\ddot{e}(t) + K_D \dot{e}(t) + K_P e(t) = 0 \quad (7)$$

식(7)에서 $e = \theta_m^d - \theta_m$ 을 나타내며, 요구한 위치 θ_m^d 와 실제 위치 θ_m 과의 차로 주어진다.

K_D 와 K_P 를 Diagonal 행렬로 적절히 정해주면 이동 로봇은 조인트별로 완전히 재결합된 선형제어 시스템으로 우수한 추종 특성을 갖는 시스템으로 된다. 따라서 본 연구에서 설계한 다기능 다관절 로봇 제어시스템의 경우는 (i) 작업 로봇의 경우 그 제어기 법으로 동적 제어를 필요로 하는 경우일지라도 이동 로봇의 기구학 정보만 활용하면 작업 로봇의 동역학 방정식이 구해지므로 그 제어시스템을 이동 로봇의 동적 제어시스템과는 별개로 설계할 수 있을 것이다. 그리고 (ii) 이동 로봇의 제어에 동적 제어를 필요로 하는 경우에 작업 로봇의 작업에 의한 동적 결합을 외적인 힘으로 해석하여 처리해 주면 되므로 독립적인 제어기의 설계가 가능하다.

3. 로봇 시스템의 최적화

3.1. 기능별 다기능 다관절 로봇 시스템이 최적화

일반적으로 주어진 일들은 6축의 자유도를 갖는 로봇에 의하여 수행될 수 있다. 그러나 로봇의 자세에 따라 그 동작을 수행함에 있어서 작업의 효율성이 달라진다. 즉, 동일한 작업 일지라도 로봇의 작업 자세에 따라 작업 결과가 달라질 수 있다. 이는 Manipulability[2]로 대별되어져 로봇의 설계 및 경로계획 등에 널리 활용되고 있다. 이 Manipulability는 단위 조인트 움직임에 의하여 얼마만큼의 일을

위한 움직임이 이루어질 수 있는가를 보여주는 것으로 다음과 같이 m차의 Hyper-ellipsoid로 정의된다.

$$\dot{X}^T (JJ^T)^{-1} \dot{X} \leq 1 \quad (8)$$

이 Ellipsoid의 모양은 그림 4에서 보듯이 로봇이 어떤 방향으로든 효율적으로 또 다른 방향으로든 비효율적으로 동작을 발생시켜 줌을 알 수 있다.

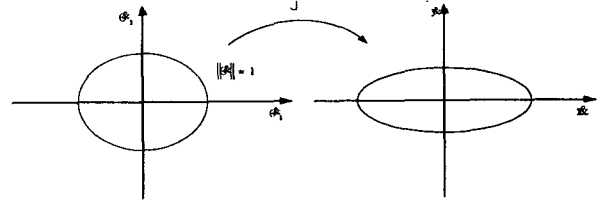


그림 4. 조인트 공간에서 작업공간으로의 맵핑 따라서 작업 로봇이 특정한 방향으로 이동하는 작업이 요구될 때 그 방향으로 Ellipsoid의 최장축이 놓일 수 있도록 하는 것이 바람직할 것이다[3]. 본 연구에서 사용되는 이동로봇은 구조상의 특성으로 인하여 작업자세에 따라 평면 운동 성분에 대해서는 다양한 형태의 Ellipsoid를 가질 것이며, 상하 운동에 대해서는 일정한 크기를 갖는다[1]. 현 시점에서는 이동로봇을 순수히 작업 로봇의 제한된 작업공간 제약을 풀어주는 목적으로 사용하기 때문에 이동로봇의 효율성에 대한 고려는 보류한다.

3.2. 작업로봇 자세의 최적화

로봇이 작업을 하기 위해서 제어 되어져야할 자유도는 실제 1또는 2자유도에 불과하다. 작업용 로봇이 5자유도를 가지고 있으므로, 그 로봇의 Manipulability를 나타내는 Ellipsoid의 차수는 5차의 차원을 갖는다. 이중에 3차의 차원에 해당되는 값들은 작업에 무관한 값들이므로 이 값들이 임의로 바뀌도록 하면서 원하는 2차의 Ellipsoid 모양을 만들 수 있다. 그러나 일반적인 작업공간이 6차원이므로 작업로봇 스스로만의 자세의 수정에 의해서는 임의의 2차의 Ellipsoid 모양을 만들 수 없다. 그래서 3자유도를 갖는 이동로봇이 작업로봇의 자세를 최적화하는데 가담하게 된다. 본 연구에서 사용된 작업 로봇의 경우에 (8)식에 의한 Ellipsoid를 2차원(X-Y 평면)상에 그려보면 그림5와 같다.

(8)식에서 $(JJ^T)^{-1}$ 은 J 가 6×5의 차원을 갖는 경우에 그 해가 존재하지 않는다. 그러나 X-Y 평면상의 움직임만을 고려하고 있으므로, ${}^0J_4(2 \times 5)$ 를 만들어 대입하면 2차원의 Ellipsoid가 그려진다.

$$= \begin{bmatrix} v_t \\ \omega_t \end{bmatrix} \quad (9)$$

9)에서 v_t 와 ω_t 는 다음식과 같이 정의된다.

$$v_t = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{15} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{25} \\ v_{31} & v_{32} & \dots & v_{35} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\omega_t = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{15} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{25} \\ w_{31} & w_{32} & \dots & w_{35} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서,

$$v_{11} = d_6 C_{234} [C_1 S_{234} (S_5 C_5 - S_5^2) - S_1 (S_5 C_5 + S_5^2)] - a_2 C_1 C_3 + a_3 C_1 C_{23}$$

$$v_{12} = (-a_2 S_2 - a_3 S_{23}) C_1 + d_6 C_1 S_{234} S_{245} + d_6 S_1 C_{245}$$

$$v_{13} = -a_3 C_1 S_{23} + d_6 C_1 S_{234} S_{245} + d_6 S_1 C_{245}$$

$$v_{14} = d_6 C_1 S_{234} S_{245} + d_6 S_1 C_{245}$$

$$v_{15} = 0$$

$$v_{21} = d_6 C_{234} [S_1 S_{234} (S_5 C_5 - S_5^2) + C_1 (S_5 C_5 + S_5^2)] + a_2 S_1 S_3 - a_3 S_1 C_{23}$$

$$v_{22} = (-a_2 S_2 - a_3 S_{23}) S_1 + d_6 S_1 S_{234} S_{245} - d_6 C_1 C_{245}$$

$$v_{23} = -a_3 S_1 S_{23} + d_6 S_1 S_{234} S_{245} - d_6 C_1 C_{245}$$

$$v_{24} = d_6 S_1 S_{234} S_{245} - d_6 C_1 C_{245}$$

$$v_{25} = 0$$

위 식들의 표기에서 C는 cos, S는 sin 을 나타내고, 우측이 아래첨자로 표기된 숫자들은 구성된 로봇의 각 관절들을 나타낸다. 기타의 것들은 표기를 생략한다.

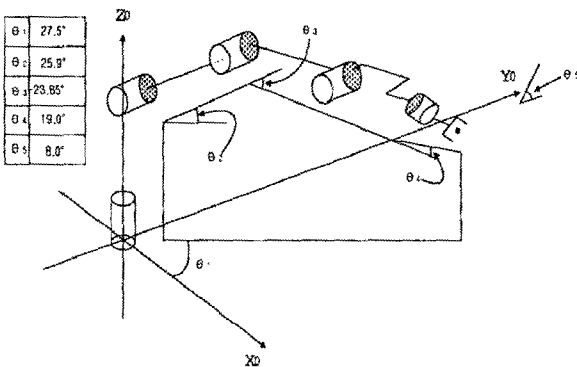


그림 5. 작업로봇의 자세

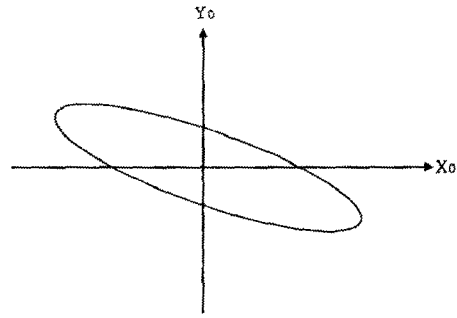


그림 6. 작업로봇의 Manipulability Ellipsoid

4. 결론

본 논문에서는 두개의 독립제어 시스템을 갖는 로봇을 묶어서 하나의 잉여 다관절 로봇을 설계하는 과정을 살펴보았다. 잉여 다관절 로봇이 작업공간의 제약으로부터 벗어나 다양한 일들을 연속적으로 수행할 수 있도록 하기 위하여 하부의 로봇은 작업 공간적 제약이 거의 없는 이동 로봇으로 설계하였으며, 상부의 로봇은 기존의 5축의 교육용 로봇을 사용하였다. 두 개의 로봇이 직렬로 연결되어져서 사용될 때, 하나의 공통의 일을 수행하기 위하여서는 협동적으로 두 로봇이 제어되어야 하므로, 이들의 키네마틱 및 다이내믹 간섭을 제어 알고리즘의 일례와 더불어 분석하였다.

향후 연구과제로는 본 논문의 이론적 바탕을 실험에 의해 증명해 나가는 것이다.

참고문헌

- [1] T.Yoshikawa, "Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy," The 1st Int. Symp. of Robotics Research, MIT Press, pp.735-748.
- [2] S.L.Chiu. "Kinematic Characterization of Manipulators : An Approach to defining and Automation, pp.828-833, April 1988.
- [3] S. Lee and Jang M. Lee, " Task-Oriented Dual-Arm Manipulability and Its Application to Configuration Optimization," Proc. 27th IEEE Int. Conf. on Decision and Control, Austin, TX, Dec. 1988.
- [4] Luh, J. Y. S., Walker, M., and Paul, R.P "On-line Computational Schemes for Mechanic Manipulators," J. Dyn. Sys. Meas, and Contr Vol. 102, pp.69-76, 1980.
- [5] Spong, M.W., and Vidyasagar, M., " Rot Linear Compensation Design for Nonlinear Rot Control,"IEEE Journal of Robotics and Autom: Vol. RA-3, No.4, pp.345-351, Aug. 1987.