

폐체인 구조의 다관절 로봇 매니퓰레이터의 개발

오정민*, 백창열(한국해양대 대학원 기계공학과), 최형식(한국해양대 기계정보공학부),
김명훈(한국신발피혁연구소)

Development of Revolute joint Robot Manipulator with closed-chain structure

J. M. Oh, C. Y. Baek(Mech. Eng. Dept., KMU), H. S. Choi (Mechanical and Information Eng. Dept., KMU)
M. H. Kim(K.I.F.L.T)

ABSTRACT

Conventional robot manipulators actuated by motors with the speed reducer such as the harmonic drive have weakness in the load capacity, since the speed reducer does not have enough strength. To overcome this, we proposed and constructed a new type of the robot actuator which is four-bar-link mechanism driven by the ball screw. We developed a new type of a revolute-jointed robot manipulator composed of four axes. The base axis is actuated with conventional speed reducer, but the others are actuated by the proposed actuators. We analyzed the mechanism of the actuators of the robot joints, and developed the dynamics model. The dynamics are expressed in the joint coordinates, and then they are mapped into the sliding coordinates of the ball screw. The structure specifications of the manipulator shown.

Key Words : Revolute Robot Manipulator(다관절 로봇 매니퓰레이터), Ball Screw Actuator(볼나사 구동기), Four bar link(사질링크)

1. 서론

생산공정에 많이 적용되는 로봇의 형태는 크게 저부하, 단순 반복 작업에 속하는 조립작업에 적합한 스칼라 로봇 및 직교 로봇과 제품의 형상이 복잡하고 작업 반경이 커질 경우 사용되는 다관절 로봇 매니퓰레이터로 나눌 수 있다⁽¹⁾. 스칼라, 직교 및 다관절 로봇은 구조상 고 부하가 요구되는 작업을 하기 위해서는 모터와 감속기의 용량과 부피가 커지고 이는 로봇 자체의 누적 부하로 작용한다. 기존의 산업용 로봇 매니퓰레이터는 이러한 연쇄적인 구조로 상기와 같은 문제점에서 벗어날 수가 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 강성을 매우 높이는 병렬구조로 Stewart Platform이 제안되었고⁽²⁾, 이를 응용한 병렬구조의 6자유도 로봇 매니퓰레이터도 제작되었다⁽³⁻⁵⁾. 하지만 Stewart Platform 구조를 가진 로봇은 강성이 매우 높으나 기구메커니즘의 해석이 매우 복잡하고 작업 반경이 작은 단점이 있다.

본 논문에서는 소형이지만 고강성과 고 감속비를 갖는 볼나사 구동의 사질링크 구동기를 적용하여 기존 산업용 로봇보다 고토크용량을 가지며 작업반경이 넓은 장점을 갖는 새로운 구조의 다관절 형태 로봇 매니퓰레이터를 개발하였으며 이의 모델링을 수행하였다.

사질링크 구동기의 기구 메커니즘의 해석과 이를 적용한 4 자유도 다관절 형태 매니퓰레이터의 기구 메커니즘 및 운동 방정식을 유도하고, 유도된 운동 방정식에서 볼나사의 미끄럼 관절 공간과 매니퓰레이터의 회전 관절 공간의 관계를 정의하였다. 또한, 제안한 로봇을 직접 제작하여 이의 구조와 성능을 분석하였다.

2. 로봇의 동역학 모델링

본 논문에서는 고강성을 갖는 볼나사 구동 방식의 사질링크를 이용한 새로운 폐체인(closed -chain) 구조의 다관절 로봇 매니퓰레이터를 제안하였다. 이의 구조는 Fig. 1과 같이 4축으로 구성된다.

본 논문의 볼나사 채용의 4절 링크기구로 구성된 고강성을 갖는 새로운 형태의 구동기를 제안하고 이를 다관절형 로봇 매니퓰레이터에 적용하였다. 구동기는 볼나사에 구동모터가 채용된 볼나사 시스템으로 볼나사의 미끄럼 운동은 4절 링크기구를 동작시켜 궁극적으로 매니퓰레이터의 어깨, 팔꿈치 및 팔목의 회전관절을 구동한다. 제안된 시스템의 동역학 방정식을 유도하기 위하여 우선, 회전관절 공간에서의 동역학식을 유도한 후, 4절 기구의 운동방정식을 유도하여 궁극적으로

볼나사의 직선운동 방정식으로 표현한다.

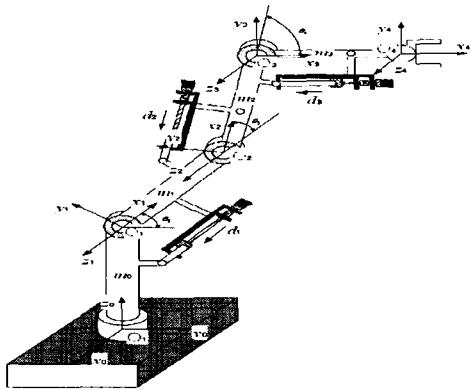


Fig. 1 Structure and Coordinates of the Robot Manipulator

2.1 회전관절 공간의 동역학 방정식

제안된 다관절 로봇 매니퓰레이터에 대한 회전관절 공간의 동역학 방정식은 Euler-Lagrange 방정식을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_j d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + h_k(q) = \tau_k \quad (1)$$

여기서 $k=1, \dots, 4$ 이며 각 축을 나타낸다. 식 (1)을 행렬식을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + \Phi(q) = \tau \quad (2)$$

여기서 각 항의 차원은 $D(q) \in R^{4 \times 4}$,

$C(q, \dot{q}) \in R^{4 \times 4}$, 및 $\Phi(q) \in R^{4 \times 1}$ 이다. 이들의 구성을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

$$\Phi = [0, h_2, h_3, h_4]^T$$

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ 0 & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ 0 & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ 0 & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ 0 & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix}$$

여기서

$$D_{11} = I_0 + I_1 + I_2 + I_3$$

$$D_{22} = m_2 l_{c2}^2 + m_3 (l_2^2 + l_{c3}^2 + 2l_2 l_{c3} \overline{C_3}) + m_4 (l_2^2 + l_3^2 + l_{c4}^2 + 2l_2 l_3 \overline{C_3} + 2l_3 l_{c4} \overline{C_4} + 2l_2 l_{c4} \overline{C_{34}}) + I_2 + I_3 + I_4$$

$$D_{23} = D_{32} = m_3 (l_{c3}^2 + l_2 l_{c3} \overline{C_3}) + m_4 (l_3^2 + l_{c4}^2 + l_2 l_3 \overline{C_3} + 2l_3 l_{c4} \overline{C_4} + l_2 l_{c4} \overline{C_{34}}) + I_3 + I_4$$

$$D_{24} = D_{42} = m_4 (l_{c4}^2 + l_3 l_{c4} \overline{C_4}) + l_2 l_{c4} \overline{C_{34}} + I_4$$

$$D_{33} = m_3 l_{c3}^2 + m_4 (l_3^2 + l_{c4}^2 + 2l_3 l_{c4} \overline{C_4}) + I_3 + I_4$$

$$D_{34} = D_{43} = m_4 (l_{c4}^2 + l_3 l_{c4} \overline{C_4}) + I_4$$

$$D_{44} = m_4 l_{c4}^2 + I_4$$

위의 식을 간략화하기 위해 $i, j = 2, \dots, 4$ 에 대하여 $\overline{C_i} = \cos(q_i)$ 과 $\overline{C_{ij}} = \cos(q_i + q_j)$ 로 표현하였고, 사인함수에 대해서도 유사하게 표현하였다.

식 (2)에서 원심력과 코리올리력을 포함하는 행렬 $C(q, \dot{q})$ 를 표현하기 위해서 Cristoffel 기호를 이용하여 다음과 같이 표현하였다.

$$C_{232} = C_{322} = C_{332} = h_1 = -\frac{m_3 l_2 l_{c3} \overline{S_3}}{m_4 l_2 l_3 \overline{S_3} + m_4 l_2 l_{c4} \overline{S_{34}}}$$

$$C_{242} = C_{422} = C_{342} = C_{432} = C_{442} = h_2 = -m_4 l_3 l_{c4} \overline{S_4} - m_4 l_2 l_{c4} \overline{S_{34}}$$

$$C_{243} = C_{423} = C_{343} = C_{433} = C_{443} = h_4 = C_{443} = -m_4 l_3 l_{c4} \overline{S_4}$$

$$C_{224} = h_5 = m_4 l_2 l_{c4} \overline{S_{34}} + m_4 l_3 l_{c4} \overline{S_4}$$

$$C_{243} = C_{312} = C_{343} = C_{433} = C_{443} = -m_4 l_3 l_{c4} \overline{S_4}$$

$$C_{224} = m_4 l_2 l_{c4} \overline{S_{34}} + m_4 l_3 l_{c4} \overline{S_4}$$

$$C_{234} = C_{324} = m_4 l_3 l_{c4} \overline{S_4}, \quad C_{223} = h_3$$

위의 식들을 이용하면 $C(q, \dot{q})$ 의 각 요소는 다음과 같이 표현된다.

$$C_{11} = \frac{1}{2} I_1 \ddot{q}_1^2, \quad C_{22} = C_{232} \dot{q}_3 + C_{1242} \dot{q}_4$$

$$C_{23} = C_{322} \dot{q}_2 + C_{332} \dot{q}_3 + C_{342} \dot{q}_4$$

$$C_{24} = C_{422} \dot{q}_2 + C_{432} \dot{q}_3 + C_{442} \dot{q}_4$$

$$C_{32} = C_{223} \dot{q}_2 + C_{243} \dot{q}_4, \quad C_{33} = C_{343} \dot{q}_4$$

$$C_{34} = C_{423} \dot{q}_2 + C_{433} \dot{q}_3 + C_{443} \dot{q}_4$$

$$C_{42} = C_{224} \dot{q}_2 + C_{234} \dot{q}_3, \quad C_{43} = C_{324} \dot{q}_2 + C_{334} \dot{q}_3$$

이 외의 $C_{ij} = 0$ for $i, j = 1..4$ 이다. 또한, 중력 향ベ터 $h(q)$ 의 구성요소는 다음과 같다.

$$h_2 = m_2 g l_{c2} + m_2 g l_2 + m_3 g l_3 \overline{C_2} + (m_3 g l_{c3} + m_4 g l_3) \overline{C_{23}} + m_4 g l_{c4} \overline{C_{234}}$$

$$h_3 = (m_3 g l_{c3} + m_4 g l_3) \overline{C_{23}} + m_4 g l_{c4} \overline{C_{234}}$$

$$h_4 = m_4 g l_{c4} \overline{C_{234}}, \quad h_1 = 0$$

3. 미끄럼 공간에서의 동역학식

본 논문에서 제안한 매니퓰레이터의 2, 3 및 4축 관절의 운동은 각각의 관절에 부착된 사질링크의 볼나사 구동에 의해 이루어진다. 각 관절을 구동하는 사질링크 구조를 살펴보면 다음과 같다.

3.1 4절 링크기구를 이용한 손목관절의 운동 방정식

직선운동을 회전운동으로 변환하는 사절링크를 이용하여 손목관절의 회전각 q_1 을 구동하는 구조를 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 a_3 는 손목관절과 팔목관절을 연결하는 부분이다. 운동 형태는 사절기구에서 d_1 부분이 미끄럼 운동을 하면 a_1 을 제외한 나머지 내부 각들과 함께 손목관절이 회전하는 구조이다. 볼사나를 구동하여 제어하는 직선 이동 거리 d_1 과 회전각 q_1 의 관계는 다음과 같다.

$$d_1^2 = a_3^2 + a_4^2 - a_2^2 - 2a_3a_4\cos\beta_1 + 2d_1a_2\cos\alpha_1 \\ = A_1 + B_1\cos\beta_1 + C_1d_1 \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} A_1 &= a_3^2 + a_4^2 - a_2^2 \\ B_1 &= -2a_3a_4, \quad C_1 = 2a_2\cos\alpha_1 \end{aligned}$$

식 (3)에서 a_2 , a_3 및 a_4 는 고정된 링크길이며, α_1 , N_{2K} , N_{31K} , N_{32K} 및 N_1 은 고정된 각이다. 식 (3)을 볼나사의 미끄럼 변위 d_1 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$d_1 = \frac{C_1 + [C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{0.5}}{2} \quad (4)$$

미끄럼 변위를 시간에 관해 미분하면 다음과 같이 속도 및 가속도를 구할 수 있다.

$$\dot{d}_1 = -[C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{-0.5}B_1\sin\beta_1\dot{\beta}_1 \quad (5)$$

$$\ddot{d}_1 = -2[C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{-1.5}B_1^2\sin^2\beta_1\dot{\beta}_1^2 \\ - [C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{-0.5}(B_1\cos\beta_1\ddot{\beta}_1^2 \\ + B_1\sin\beta_1\ddot{\beta}_1) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 이용하면 q_1 과 d_1 의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\beta}_1 = \dot{q}_1 = R_{11}\dot{d}_1 \quad (7)$$

$$\ddot{\beta}_1 = \ddot{q}_1 = R_{12}\ddot{d}_1^2 + R_{13}\ddot{d}_1 \quad (8)$$

여기서

$$R_{11} = \frac{[C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{-0.5}}{B_1\sin\beta_1}$$

$$R_{13} = -\frac{[C_1^2 + 4(A_1 + B_1\cos\beta_1)]^{0.5}}{B_1\sin\beta_1}$$

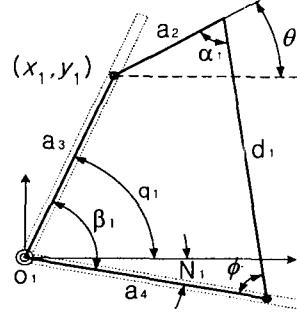


Fig. 2 Four bar link structure for wrist joint

4절 링크기구를 이용한 팔목관절과 어깨 관절의 구조와 운동방정식은 팔목관절 부분의 구조와 운동방정식과 유사하다.

위에서 구한 관계식들을 이용하여 식 (1)의 각 가속도를 사절기구의 미끄럼 변위로 표현하면 회전관절 공간으로 표현된 로봇의 동역학 식을 미끄럼 관절 공간의 동역학 식으로 표현할 수 있다.

4. 미끄럼관절 공간에서의 로봇 운동방정식

매니퓰레이터의 관절 각 q 를 미끄럼 변위 d 로 변환함으로써 식 (2)의 관절공간 로봇 운동방정식이 다음과 같이 표현된다.

4.1 4절 링크기구를 이용한 각 관절의 제어입력

회전관절공간의 토크 τ 와 직선운동 방향의 구동력 F 의 관계식을 유도하기 위해 각 관절공간 상의 점 O_1 , O_2 , O_3 에서 각각의 볼나사의 미끄럼 방향에 수직인 법선을 그렸을 때, 이 법선 길이와 볼나사에 가해지는 구동력 F_i 의 곱이 각 관절에서 발생하는 토크 τ_i 가 되며 이의 관계식은 다음과 같다.

$$\tau_i = F_i l_i \sin\psi_i \quad (9)$$

여기서 ψ_i 는 Fig. 2에 표시된 바와 같이 4절 링크의 회전부분에 임의의 좌표 x_i 와 y_i 를 설정하고 다음의 관계식을 이용하여 구한다.

$$x_i : d_i \cos(\phi_i + N_i) + l_2 \cos\theta_i = l_4 \cos N_i - l_3 \cos(\beta_i - N_i) \quad (10)$$

$$y_i : d_i \sin(\phi_i + N_i) - l_2 \sin\theta_i = l_4 \sin N_i + l_3 \sin(\beta_i - N_i) \quad (11)$$

$$\phi_i = \text{atan}\left(\frac{S_i y_i - T_i x_i}{S_i x_i + T_i y_i}\right) \quad (12)$$

4.2 미끄럼공간의 운동방정식

앞 절에서 관절공간의 식 (2)를 다음과 같이 미끄럼 관절공간에서 표현할 수 있다.

$$H(d)\ddot{d} + K(d, \dot{d})\dot{d} + h_r(d) = F \quad (13)$$

여기서

$$H(d) = L^{-1}D(d)R(d),$$

$$K(d, \dot{d}) = L^{-1}(C(d, \dot{d})\dot{d} + H(d)R_d(d)),$$

$$h_r(d) = L^{-1}h(d), \quad F = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4]^T$$

$$R(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{33} \end{bmatrix}, \quad R_d(d) = \begin{bmatrix} 0 \\ R_{12}\dot{d}_1^2 \\ -R_{22}\dot{d}_2^2 \\ R_{32}\dot{d}_3^2 \end{bmatrix}$$

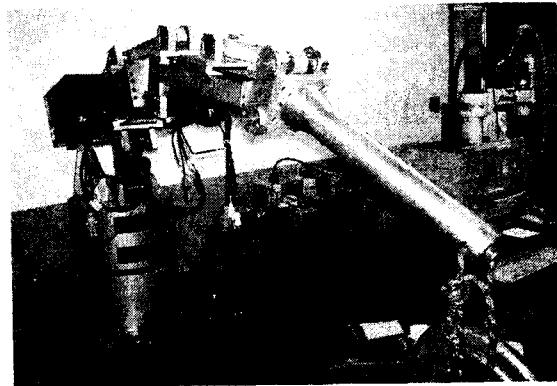
$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_4 \cos \phi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_4 \cos \phi_1 F_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_4 \cos \phi_3 \end{bmatrix}$$

5. 수직 다관절 로봇의 제작

앞 장에서 제안한 4 자유도 수직 다관절 매니퓰레이터를 직접 제작하였고 이는 Pic 1에 나타나 있다. 시작으로 제작하여 제어부는 상용 모션 제어기를 사용하는데, 구체적인 성능과 제원은 Table 1에 나타나 있고, 여기에 일본 ABB사의 임의의 다관절 매니퓰레이터 모델 중에서 가반 중량이나 전장의 길이가 가장 유사한 로봇을 택하여 성능 비교를 하였다. 이 회사의 제품이 6축임을 고려해도 로봇의 마지막 축들의 구동 모터 용량이 이전 축들에 비하여 현저히 적은 것을 고려하면 본 연구에서 개발한 로봇이 구동 전압에 비하여 고가반하중을 가짐을 알 수 있다. 또한, 로봇의 본체 중량도 상대적으로 가벼운데 있는 구동기의 중량이 자체부하가 되는 연쇄적 구조의 로봇에서 개발한 로봇의 구동 관절이 자체 중량에 비하여 고토크를 구현할 수 있어서 부하를 줄일 수 있는 구조를 갖기 때문이다. 이는 기존의 로봇 구조와는 달리 고강성의 불나사를 활용한 폐체인 구조의 관절 구동방식을 적용함으로써 가능하다. 또한, lead가 크거나 정밀한 불나사를 교환함으로써 로봇의 속도와 정밀도를 바꿀 수 있는 매우 유연한 특성을 구비하고 있다.

Table 1. Specification of manipulator

제품 사양	전장 (mm)	가반 중량 (Kg)	구동 전압 (KVA)	자유도	본체 중 량(Kg)
개발로봇	1600	90	3.2	4	300
ABB사 (IRB4400)	2432	60	6.7	6	1000



Pic. 1 Appearance of the manipulator

6. 결론

사결 링크기구를 관절구동기로 적용한 새로운 구조의 4자유도 다관절 로봇을 제안하였고 이의 운동 방정식을 유도하였다. 운동방정식은 회전관절공간에서 사결링크기구를 구동하는 불나사의 미끄럼 관절공간으로 변환하였다. 본 논문에서 제안한 로봇을 직접 제작하여 간략한 구동 실험을 통하여 이의 구조와 성능을 분석하였다. 개발한 로봇은 상대적으로 경량이나 고강성을 가진다. 또한, 불나사를 교환함으로써 속도나 정밀도를 변화할 수 있는 유연성을 가짐으로서 다양한 작업에 유연하게 적용할 수 있는 장점을 갖는다.

참고문헌

- (1) spong, M. W., and Vidyasagar, M., "Robot Dynamics and Control" John Wiley & Sons., 1989.
- (2) Stewart, D "A platform with Six Degree of Freedom", *Proc. Instn. Mech. Engrs, London*, Vol. 180 No. 15, pp.371-386, 1965.
- (3) Fischer, E.F., "A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction", *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 5, pp. 157-182, 1986.
- (4) Funabashi, H and al., "Development of spatial parallel manipulators with 6 d.o.f.", *JSME Int. J., Serie III, Vibration*, Vol. 34, No. 3, pp. 387-393, 1991.
- (5) Arai, T., a.c Tanikawa, T., Merlet, J.P., and Sendai, T., "Development of a new parallel manipulator with fixed linear actuator", In Japan-USA Symp. on Flexible Automation, pp. 145-149, July, 1996.