

폐체인 구조의 새로운 다관절 로봇 매니플레이터 개발

최 형 식[†] · 백 창 열^{*}

(원고접수일 : 2002년 7월 29일, 심사완료일 : 2002년 12월 27일)

Development of a New Robot Manipulator Driven by the Closed-chain Actuator

Hyeung-Sik Choi[†] · Chang-Yeol Back^{*}

Key words : Revolute Robot Manipulator(다관절 로봇 매니플레이터), Ball Screw Actuator(볼 나사 구동기), Four Bar Link(사절링크), Closed-chain(폐체인)

Abstract

To overcome the weakness in the load capacity of conventional robot manipulators actuated by motors with the speed reducer such as the harmonic driver, we proposed a new closed-chain type of the robot actuator which is composed of the four-bar-link mechanism driven by the ball screw. The robot manipulator is revolute-jointed and composed of four axes. The base axis is actuated by the linear actuator such as the ball screw, and 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. We performed fundamental tests on the structure of the robot.

1. 서 론

현재 생산공정에 많이 적용되는 로봇의 형태는 저 부하, 단순 반복 작업에 속하는 조립작업에 적합한 스칼라 로봇 및 직교 로봇과 제품의 형상이 복잡하고 작업반경이 커질 경우 사용되는 다관절 로봇 매니플레이터로 두 부류로 나눌 수 있다⁽¹⁾.

이와 같은 기존의 로봇들은 구조상 고 부하가 요구되는 작업을 하기 위해서는 모터와 감속기의 용량과 부피가 커지고 이는 자체 부하로 작용한다. 앞단 링크에 부착된 모터와 감속기는 다음 단 링크의 구동모터의 부하가 되고, 용량이 커질수록 부하가 증가하는 구조적인 단점을 갖는다. 기존의 산업용 로봇 매니플레이터는 이러한 연쇄적인 구조로 상기와 같은 문제점에서 벗어날 수가 없다. 이

[†] 책임저자(한국해양대학교 기계정보공학부) E-mail : hchok@hanara.kmaritime.ac.kr, T : 051)410-4297

^{*} 한국해양대학교 대학원 기계공학과(E-mail : wizardii@intizen.com)

러한 문제를 해결하기 위하여 강성을 매우 높이는 병렬구조로 Stewart Platform이 제안되었고⁽²⁾. 이를 응용한 병렬구조의 6자유도 로봇 매니플레이터도 제작되었다⁽³⁻⁵⁾. 하지만 Stewart Platform 구조를 가진 로봇은 강성이 매우 높으나 기구 메커니즘의 해석이 매우 복잡하고 작업 반경이 작은 단점이 있다.

본 논문에서는 볼나사 구동의 사절링크 구동기를 적용하여 기존 산업용 로봇보다 고토크 용량을 가지며 병렬로봇보다는 작업반경이 넓은 장점을 갖는 새로운 폐체인 구조의 4축 다관절 형태의 로봇 매니플레이터를 제안하고 이의 모델링을 수행하였다. 사절링크 구동기의 기구 메커니즘의 해석과 이를 적용한 4 자유도 다관절 형태 매니플레이터의 기구 메커니즘 및 운동 방정식을 유도하고, 유도된 운동 방정식에서 볼나사의 미끄럼 관절 공간과 매니플레이터의 회전관절 공간의 관계를 정의하였다. 또한, 제안한 로봇 구조 중에서 사절링크 구동기를 활용한 폐체인 구조를 갖는 로봇의 기구부를 직접 제작하여 이의 구조와 성능을 분석하였다.

2. 로봇의 동역학 모델링

사절링크를 이용한 새로운 폐체인(closed-chain) 구조의 다관절 로봇 매니플레이터의 구조는 Fig. 1과 같이 4축으로 구성된다. 기저 축은 래크 피니언이나 볼나사를 이용한 수평 운동 구조이고 나머지 관절들은 상하방향으로 회전운동을 하는 다관절 형태이다. 일반적인 산업용 다관절 로봇은 회전축에 하모닉 드라이버나 RV와 같은 감속기를 채용한다. 하지만 하모닉 드라이버는 기구적으로 강성이 약해서 매니플레이터의 상단 부에만 사용하고, RV는 기어를 대체한 고강성의 볼베어링을 이용하여 강성은 있으나 부피가 크고 중량이 무거워 하단 부에만 채용한다.

이러한 구조적인 문제를 해결하기 위해 볼나사 채용의 4절 링크기구로 구성된 고강성을 갖는 새로운 형태의 구동기를 제안하고 이를 다관절 형태의 로봇 매니플레이터에 적용한다. 구동기는 볼나

사 구동모터가 채용된 볼나사 시스템으로 볼나사의 미끄럼 운동은 4절 링크기구를 동작시켜 매니플레이터의 어깨, 팔꿈치 및 팔목의 회전관절을 구동한다. 제안된 시스템의 동역학 방정식을 유도하기 위하여 우선, 회전관절 공간에서의 동역학식을 유도한 후, 4절 기구의 운동방정식을 유도하여 볼나사의 직선운동 방정식으로 표현한다.

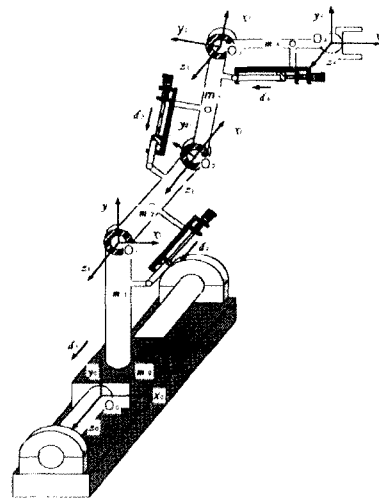


Fig. 1 Structure and coordinates of the robot.

2.1 회전관절 공간의 동역학 방정식

제안된 다관절 로봇 매니플레이터에 대한 회전관절 공간의 동역학 방정식은 일반적인 산업용 로봇의 방정식과 같다. 특히, 기저 축은 직선운동을 하므로 나머지 어깨, 팔목 및 손목 축의 운동과는 독립적이다. 이는 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)의 첫 번째 항은 관절각 좌표의 2차 미분을 포

함하는 양의 한정행렬인 관성행렬이다. 두 번째 항은 계수가 \dot{q} 의 1차 미분의 항들로서 원심력 및 코리올리 항으로 구성된다. 세 번째 항은 중력을 포함하는 항이다. 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.

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

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

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

여기서

$$D_{11} = m_0 + m_1 + m_2 + m_3 + m_4$$

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

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

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

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

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

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

이고, 각 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

l_2 : 어깨 좌표축 O_1 에서 팔꿈치까지의 길이

l_{c2} : 어깨 좌표축 O_1 에서 l_2 상의 무게중심까지 거리

l_3 : 팔꿈치 좌표축 O_2 에서 손목좌표 축 O_3 까지의 길이

의 길이

l_{c3} : 팔꿈치 좌표축 O_2 에서 l_3 상의 무게중심까지의 거리

l_{c4} : 손목 좌표축 O_3 에서 상단 방향으로의 무게중심까지의 거리

I_i : 각 축에 대한 관성모멘트

위의 식에서 간략화하기 위해 $i, j = 2, \dots, 4$ 에 대하여 $\overline{C_i} = \cos(q_i)$ 와 $\overline{C_{ij}} = \cos(q_i + q_j)$ 로 표현되고, 사인함수에 대해서도 유사하게 표현된다.

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

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

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

$$C_{223} = h_3$$

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

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

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

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

$$C_{234} = C_{324} = m_4 l_3 l_{c4} \overline{S_4}.$$

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

$$C_{22} = C_{232} \dot{q}_3 + C_{1242} \dot{q}_4$$

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

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

$$C_{32} = C_{223} \dot{q}_2 + C_{243} \dot{q}_4$$

$$C_{33} = C_{343} \dot{q}_4$$

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

$$C_{42} = C_{224} \dot{q}_2 + C_{234} \dot{q}_3$$

$$C_{43} = C_{324} \dot{q}_2 + C_{344} \dot{q}_3.$$

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

$$\begin{aligned} h_1 &= 0 \\ h_2 &= m_2 g l_{c2} + m_2 g l_2 - m_3 g l_3 \overline{C_2} \\ &\quad + (m_3 g l_{c3} + m_4 g l_3) \overline{C_{23}} + m_4 g l_4 \overline{C_{234}} \\ h_3 &= (m_3 g l_{c3} + m_4 g l_3) \overline{C_{23}} + m_4 g l_4 \overline{C_{234}} \\ h_4 &= m_4 g l_{c4} \overline{C_{234}} . \end{aligned}$$

3. 미끄럼 공간에서의 동역학식

본 논문에서 제안한 매니퓰레이터의 2,3 및 4축 관절의 운동은 각각의 관절에 부착된 사절링크의 볼나사 구동에 의해 이루어진다. 로봇의 운동에 4절 링크의 질량 및 관성 모멘트의 영향이 있으나 구조상 중량의 대부분을 차지하는 볼나사와 가이더가 로봇 링크에 부착되고 4절 링크의 한 링크만이 영향을 미치나 이것의 질량과 관성 모멘트는 로봇 링크의 그것에 비하여 무시할 정도로 작다. 볼나사에는 엔코더가 부착된 서보모터가 직접 연결되어 있어 볼나사의 미끄럼 운동은 변위 d 만이 계측되므로 매니퓰레이터의 운동방정식을 d 와 미끄럼운동 방향의 구동력 F 의 관계로 표현한다. 이를 위하여 각 관절을 구동하는 사절링크 구조를 살펴보면 다음과 같다.

3.1 4절 링크기구를 이용한 손목관절의 운동방정식

직선운동을 회전운동으로 변환하는 사절링크를 이용하여 손목관절의 회전각 q_1 으로 구동하는 구조를 Fig. 2에서 나타낸 것이다. 여기서 a_3 는 손목관절과 팔목관절을 연결하는 부분이다. 운동 형태는 사절기구에서 d_1 부분이 미끄럼 운동을 하면 α_1 을 제외한 나머지 내부 각들과 함께 손목관절이 회전하는 구조이다. 볼나사를 구동하여 제어하는 직선 이동거리 d_1 과 회전각 q_1 의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d_1^2 &= a_3^2 + a_4^2 - a_2^2 - 2a_3 a_4 \cos \beta_1 + 2d_1 a_2 \cos \alpha_1 \\ &= A_1 + B_1 \cos \beta_1 + C_1 d_1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

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

이다. 식 (3)에서 a_2, a_3 및 a_4 는 고정된 링크길이다. 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.

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

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

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

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

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

여기서

$$\begin{aligned} R_{11} &= -\frac{[C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos \beta_1)]^{-0.5}}{B_1 \sin \beta_1} \\ R_{12} &= \frac{-2}{B_1 \sin \beta_1} + \frac{\cos \beta_1}{\sin \beta_1} R_{11}^2 \\ R_{13} &= -\frac{[C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos \beta_1)]^{0.5}}{B_1 \sin \beta_1} . \end{aligned}$$

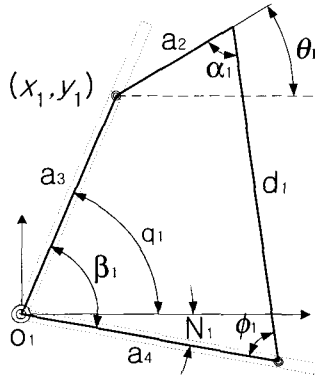


Fig. 2 Four bar link structure for wrist joint.

3.2 팔목관절의 운동방정식

팔목관절 부분에 적용된 사절기구도 Fig. 3에 나타난 바와 같이 손목관절의 구조와 유사하다. Fig. 3에서 b_3 는 손목관절과 어깨관절을 연결하는 부분이며 볼나사 구동의 미끄럼 변위는 d_2 이다. 팔목관절의 각을 결정하는 β_2 와 미끄럼 변위 d_2 의 관계식은 다음과 같다.

$$d_2^2 = A_2 + B_2 \cos \beta_2 + C_2 d_2 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A_2 &= b_3^2 + b_4^2 - b_2^2 \\ B_2 &= -2 b_3 b_4 \\ C_2 &= 2 b_2 \cos \alpha_2 \end{aligned}$$

식 (9)에서 b_2, b_3 및 b_4 는 고정된 링크길이이고 α_2 와 N_2 는 고정된 각이다. 팔목관절의 식과 유사하게 식 (9)의 d_2 를 시간에 관해 미분하면 \dot{q}_2 와 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\beta}_2 = -\dot{q}_2 = R_{21} \dot{d}_2 \quad (10)$$

$$\ddot{\beta}_2 = -\ddot{q}_2 = -R_{22} \dot{d}_2^2 - R_{23} \ddot{d}_2 \quad (11)$$

여기서

$$R_{21} = -\frac{[C_2^2 + 4(A_2 + B_2 \cos \beta_2)]^{-0.5}}{B_2 \sin \beta_2}$$

$$R_{22} = \frac{-2}{B_2 \sin \beta_2} + \frac{\cos \beta_2}{\sin \beta_2} R_{21}^2$$

$$R_{23} = -\frac{[C_2^2 + 4(A_2 + B_2 \cos \beta_2)]^{0.5}}{B_2 \sin \beta_2}$$

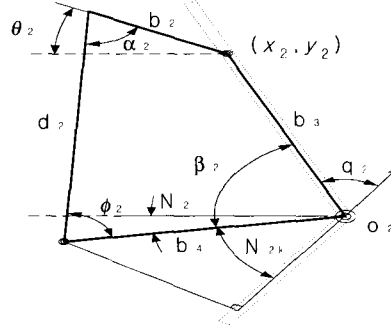


Fig. 3 Four bar link structure for knee joint.

3.3 어깨 관절의 운동방정식

어깨 관절 부분에 적용된 사절기구도 Fig. 4에 나타난 바와 같이 다른 관절의 구조들과 유사하다. q_3 와 d_3 의 관계식을 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\beta}_3 = \dot{q}_3 = R_{31} \dot{d}_3 \quad (12)$$

$$\ddot{\beta}_3 = \ddot{q}_3 = R_{32} \dot{d}_3^2 + R_{33} \ddot{d}_3 \quad (13)$$

여기서

$$R_{31} = \frac{[C_3^2 + 4(A_3 + B_3 \cos \beta_3)]^{-0.5}}{B_3 \sin \beta_3}$$

$$R_{32} = \frac{-2}{B_3 \sin \beta_3} + \frac{\cos \beta_3}{\sin \beta_3} R_{31}^2$$

$$R_{33} = -\frac{[C_3^2 + 4(A_3 + B_3 \cos \beta_3)]^{0.5}}{B_3 \sin \beta_3}$$

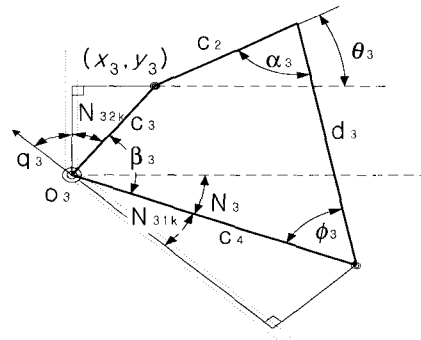


Fig. 4 Four bar link structure for pelvis joint.

4. 미끄럼관절 공간에서의 로봇 운동방정식

각 관절들의 회전각과 사절기구에 대한 미끄럼 변위 사이의 위치, 속도 및 가속도 관계식을 구하였다. 이 관계식들을 이용하여 매니퓰레이터의 관절 각 q 를 미끄럼 변위 d 로 변환함으로써 식 (2)의 관절공간 로봇 운동방정식이 미끄럼 관절공간의 방정식으로 표현된다.

4.1 4절 링크기구를 이용한 각 관절의 제어 입력

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

$$\tau_i = F_i l_i \sin \phi_i . \quad (14)$$

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

$$x_i : \begin{aligned} & d_i \cos(\phi_i + N_j) + l_2 \cos \theta_i \\ & = l_4 \cos N_j - l_3 \cos(\beta_i - N_j) . \end{aligned} \quad (15)$$

$$y_i : \begin{aligned} & d_i \sin(\phi_i + N_j) - l_2 \sin \theta_i \\ & = l_4 \sin N_j + l_3 \sin(\beta_i - N_j) . \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, $i = 2, 3$ 에 대해 $j = ik$ 이나, $i=1$ 일 때 $j=i$ 이다. 또한, $i = 1, 2, 3$ 각각에 대해 $l_i = a_i, b_i, c_i$ 로 순복관절에서 어깨관절로 이어지는 순서이다. 식 (16)의 x_i 에서 관계식을 정리하면 다음과 같다.

$$\phi_i = \text{atan} \left(\frac{S y_i - T_i x_i}{S x_i + T_i y_i} \right) \quad (17)$$

여기서

$$x_i = S_i \cos \phi_i - T_i \sin \phi_i$$

$$y_i = T_i \cos \phi_i + S_i \sin \phi_i .$$

또한,

$$\alpha_i = d_i \cos N_j, \quad \beta_i = d_i \sin N_j$$

$$\gamma_i = l_2 \cos(\pi - N_j), \quad \delta_i = l_2 \sin(\pi - N_j)$$

$$S_i = \alpha_i + \gamma_i \cos \alpha_i + \delta_i \sin \alpha_i ,$$

$$T_i = \beta_i + \gamma_i \sin \alpha_i - \delta_i \cos \alpha_i .$$

4.2 미끄럼공간의 운동방정식

앞 절에서의 관절공간에서의 운동방정식을 미끄럼 관절공간의 식으로 표현하고 미끄럼 공간의 입력을 유도하였다. 이를 이용하여 관절공간의 식 (2)을 다음과 같이 미끄럼 관절공간에서 표현할 수 있다.

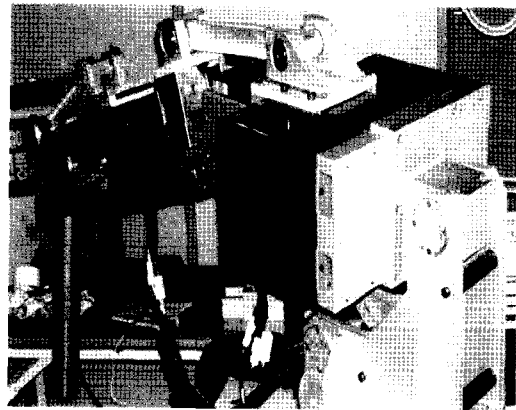


Photo. 1 Appearance of the manipulator.

$$H(d) \ddot{d} + K(d, \dot{d}) \dot{d} + h_f(d) = F \quad (18)$$

여기서

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

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

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

$$R(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{33} \end{bmatrix}.$$

$$R_d(d) = \begin{bmatrix} 0 \\ R_{12} \dot{d}_1^2 \\ -R_{22} \dot{d}_2^2 \\ R_{32} \dot{d}_3^2 \end{bmatrix}.$$

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

식 (18)에서 $D(d)$, $C(d, \dot{d})$ 및 $h(d)$ 는 $D(q)$, $C(q, \dot{q})$ 및 $h(q)$ 의 관절 각이 미끄럼 변위로 표현되었고 관절공간의 입력 τ 도 미끄럼 공간의 힘 F 로 표현되었다.

5. 로봇 제작 및 고찰

앞 장에서 제안한 4 자유도 수직 다관절 매니플레이터의 구동 축 중에서 사절링크를 적용하는 어깨, 팔목 및 손목의 회전 3축을 직접 제작하였고 이는 Photo 1에 나타나 있다. 시작품으로 제작하여 제어부는 상용 모션 제어기를 사용하는데, 구체적인 성능과 제원은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Specification of manipulator.

사양 제품	전장 (mm)	가반중량 (Kg)	구동전압 (KVA)	자유도	본체 중량 (Kg)
개발로봇	1600	90	3.2	4	300
ABB사 (IBR4400)	2432	60	6.7	6	1000

또한, 개당 10 Kg의 Load를 9개 이동시키는 가반중량의 성능 시험을 수행하였고 이의 사진을 Photo 2에 나타내었다. 가반중량 시험은 로봇 매니플레이터를 수평으로 최대한 퍼서 상하 회전운동을 수행하는 최악의 조건에서 수행하였다. 구동 모터의 제어이득을 세심하게 튜닝하지 않고도 Table 1의 성능을 얻을 수 있었다. 성능 비교에

서는 Table 1에서 일본 ABB사의 임의의 다관절 매니플레이터 모델 중에서 가반 중량이나 전장의 길이가 가장 유사한 로봇을 택하여 성능 비교를 한 것이다. 일본 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 이는 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 구동 방식을 적용함으로써 가능하다. 또한, lead가 크거나 정밀한 불나사를 교환함으로써 로봇의 속도와 정밀도를 바꿀 수 있는 매우 유연한 특성을 구비하고 있다.

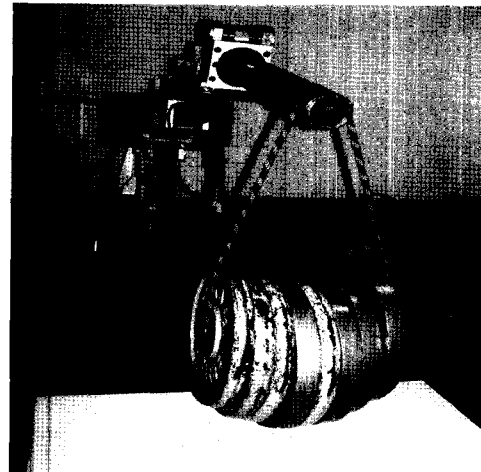


Photo 2. Test of load capacity.

6. 결 론

직선운동과 사절 링크기구를 이용한 폐체인 구조의 관절구동기로 적용한 새로운 4자유도 다관절 로봇을 제안하였고 이의 운동 방정식을 유도하였다. 운동방정식은 회전관절공간에서 사절링크기구를 구동하는 불나사의 미끄럼 관절공간으로 변환

하였다. 본 논문에서 제안한 로봇의 일부를 직접 제작하여 간략한 구동 실험을 통하여 이의 구조와 성능을 분석하였다. 개발한 로봇은 상대적으로 경량이나 고강성을 가진다. 또한, 볼나사를 교환함으로써 속도나 정밀도를 변화할 수 있는 유연성을 가짐으로서 다양한 작업에 유연하게 적용할 수 있는 장점을 갖는다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구(R05-2002-01029-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

[1] M. W. Spong and M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control" John Wiley & Sons, 1989.
 [2] D. Stewart, "A platform with Six Degree of Freedom", *Proc. Instn. Mech. Engrs. london*, Vol. 180 No. 15, pp.371-386, 1965.
 [3] E. F. Fischer, "A Stewart Platform -Based Manipulator: General Theory and Practical Construction", *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 5, pp. 157-182, 1986.

[4] H. Funabashi, 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] T. Arai, T. Tanikawa, J. P. Merlet, and T. Sendai, "Development of a new parallel manipulator with fixed linear actuator", *In Japan-USA Symp. on Flexible Automation*, pp. 145-149, July, 1996.

저 자 소 개



최형식 (崔炯植)

1961년 2월 6일생. 1983년 3월 고려대학교 기계공학과 졸업. 1989년 5월 University of South Carolina(공학석사). 1993년 2월 North Carolina State University(공학박사). 현재 한국해양대학교 · 냉동 · 자동차공학부 부교수.



백창열 (白昌烈)

1977년 11월생. 2002년 한국해양대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 2002년~현재 당 대학원 기계공학과 재학중