

새로운 구조의 다관절 로봇 매니플레이터

최형식[†] · 김영식^{*} · 백창열^{**}
(2003년 6월 3일 접수, 2004년 4월 9일 심사완료)

A Revolute Robot Manipulator with a New Structure

Hyungsik Choi, Youngsik Kim and Chagngyul Baek

Key Words : Ball Screw Actuator(볼나사 구동기), Four Bar Link(사절링크), Revolute Robot Manipulator(다관절 로봇 매니플레이터)

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, a new type of the robot actuator based on the four-bar-link mechanism driven by the ball screw was proposed and constructed. Also, a new type of a revolute-jointed robot manipulator composed of the developed actuators was developed. The base axis is actuated by the motor with the conventional speed reducer, but the other axes are actuated by the proposed actuators. The kinematics and dynamics of the robot were analyzed, and the performance test of the robot was made. Through the test results, the performance of superior load capacity versus the robot weight is shown.

1. 서론

생산 공정에 많이 적용되는 로봇의 형태는 크게 저 부하, 단순 반복 작업에 속하는 조립작업에 적합한 스칼라 로봇 및 직교 로봇과 제품의 형상이 복잡하고 작업반경이 커질 경우 사용되는 다관절 로봇 매니플레이터로 나눌 수 있다.⁽¹⁾ 스칼라 및 다관절 로봇은 연쇄적인 구조로 개발되어왔고,^(2,3) 현재에도 산업용 로봇의 주류를 이루고 있다. 하지만, 스칼라, 직교 및 다관절 로봇은 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.

이러한 문제를 해결하기 위하여 강성을 매우 높이는 병렬구조로 Stewart Platform이 Stewart(1)에 의해 제안되었고,⁽⁴⁾ 이를 응용한 병렬구조의 6자유도 로봇 매니플레이터가 Ficher⁽⁵⁾에 의해 실용적인 구조와 해석이 수행 되었으며 Funabashi⁽⁶⁾는 공간상의 6자유도 병렬 구조의 매니플레이터를 개발하는 연구를 수행하였다. 그리고 Arai⁽⁷⁾는 Fixed linear Actuator를 이용하여 새로운 병렬구조의 매니플레이터를 제작하였다. 이외에도 Stewart Platform 구조를 가진 로봇 매니플레이터에 대한 연구가 많이 있었다. 하지만 이러한 로봇은 강성이 매우 높으나 기구메커니즘의 해석이 매우 복잡하고 작업 반경이 작은 것이 공통적인 단점으로 인식되었고 이러한 단점은 실용적인 적용을 어렵게 하는 주된 요인으로 작용하였다.

[†] 책임저자, 회원, 한국해양대학교 기계 정보공학부
E-mail : hchoi@hhu.ac.kr
TEL : (051)410-4297 FAX : (051)405-4790

^{*} 한국해양대학교 대학원

^{**} 한국해양대학교 대학원

본 논문에서는 소형이지만 고강성과 고 감속비를 갖는 볼나사 구동의 사절링크 구동기를 적용하여 기존 산업용 로봇보다 고토크 용량을 가지며 병렬로봇보다는 작업반경이 넓은 장점을 갖는 새로운 구조의 다관절 형태의 로봇 매니플레이터를 개발하여 이의 모델링을 수행하였다. 허리부는 기존 감속기를 사용하는 회전형이고 나머지 세 관절은 제안한 사절링크 구동기를 적용하였다. 사절링크 구동기의 기구 메커니즘의 해석과 이를 적용한 4 자유도 다관절 형태 매니플레이터의 기구 메커니즘 및 운동 방정식을 유도하고, 유도된 운동 방정식에서 볼나사의 직선운동 관절 공간과 매니플레이터의 회전관절 공간의 관계를 정의하였다. 또한, 제안한 로봇의 기구부 및 제어부를 직접 제작하여 이의 구조와 성능을 분석하였다.

2. 로봇의 동역학 모델링

본 논문에서는 Photo. 1과 같은 사절링크를 이용한 새로운 폐쇄연(closed-chain) 구조의 다관절 로봇 매니플레이터를 제안하였다. 이의 구조는 Fig. 1과 같이 4축으로 구성된다. 기저 축은 수평 회전운동을 하도록 구성되고 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 사절 링크기구로 구성된 고강성을 갖는 새로운 형태의 구동기를 제안하고 이를 다관절 형태의 로봇 매니플레이터에 적용하였다. 구동기는 볼나사에 구동모터가 채용된 볼나사 시스템으로 볼나사의 직선운동은 사절 링크기구를 동작시켜 로봇 매니플레이터의 어깨, 팔꿈치 및 팔목의 회전관절을 구동한다. 제안된 시스템의 동역학 방정식을 유도하기 위하여 우선, 회전관절 공간에서의 동역학식을 유도한 후, 사절 기구의 운동방정식을 유도하여 볼나사의 직선운동 방정식으로 표현한다.

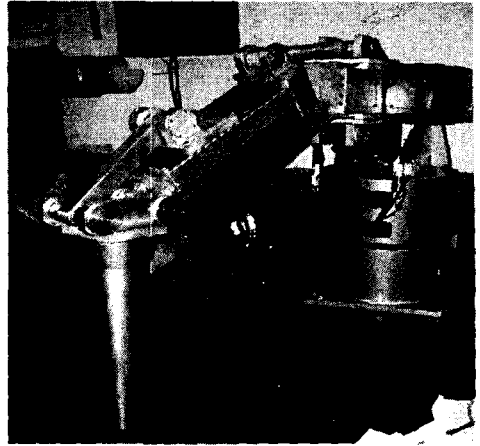


Photo. 1 Appearance of the manipulator

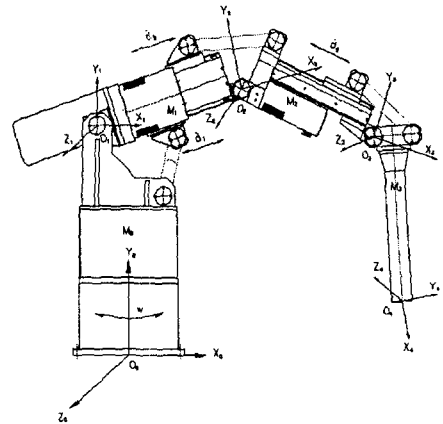


Fig. 1 Structure of the developed robot

2.1 회전관절 공간의 동역학 방정식

제안된 다관절 로봇 매니플레이터에 대한 회전관절 공간의 동역학 방정식은 일반적인 산업용 로봇의 방정식과 같다. 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 포함하는 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.

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

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

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

여기서

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

$$D_{22} = m_2 l_2^2 + m_3 (l_2^2 + l_3^2 + 2l_2 l_3 \overline{C_3}) + m_4 (l_2^2 + l_3^2 + l_4^2 + 2l_2 l_3 \overline{C_3} + 2l_3 l_4 \overline{C_4} + 2l_2 l_4 \overline{C_{34}}) + I_2 + I_3 + I_4$$

$$D_{23} = D_{32} = m_3 (l_2^2 + l_3^2 + 2l_2 l_3 \overline{C_3}) + m_4 (l_2^2 + l_3^2 + l_4^2 + l_2 l_3 \overline{C_3} + 2l_3 l_4 \overline{C_4} + l_2 l_4 \overline{C_{34}}) + I_3 + I_4$$

$$D_{24} = D_{42} = m_4 (l_2^2 + l_3^2 + l_4^2 + 2l_2 l_3 \overline{C_3} + 2l_3 l_4 \overline{C_4} + l_2 l_4 \overline{C_{34}}) + I_4$$

$$D_{33} = m_3 l_3^2 + m_4 (l_3^2 + l_4^2 + 2l_3 l_4 \overline{C_4}) + I_3 + I_4$$

$$D_{34} = D_{43} = m_4 (l_3^2 + l_4^2 + 2l_3 l_4 \overline{C_4}) + I_4$$

$$D_{44} = m_4 l_4^2 + I_4$$

이고, 각 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

l_2 : 어깨 좌표축 O_1 에서 팔꿈치 좌표축 O_2 까지의 길이

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

l_3 : 팔꿈치 좌표축 O_2 에서 손목좌표축 O_3 까지의 길이

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

l_4 : 손목 좌표축 O_3 에서 말단 좌표축 O_4 까지의 길이

l_{c4} : 손목 좌표축 O_3 에서 l_4 의 무게중심까지의 거리

I_i : 각 축에 대한 관성모멘트 ($i = 1, 2, 3, 4$)

위의 식에서 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 Christoffel 기호를 이용하여 다음과 같이 표현하였다.

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

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

$$C_{223} = h_3$$

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

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

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

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

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

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

$$C_{11} = \frac{1}{2} \dot{I}_1 \dot{q}_1^2,$$

$$C_{22} = C_{232} \dot{q}_3 + C_{242} \dot{q}_4$$

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

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

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

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

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

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

$$C_{43} = C_{324} \dot{q}_2 + C_{334} \dot{q}_3,$$

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

$$h_2 = m_2 g l_{c2} + m_2 g l_2 + \frac{m_3 g l_3}{2} \overline{C_2} + (m_3 g l_{c3} + m_4 g l_3) \overline{C_{23}} + m_4 g l_{c4} \overline{C_{234}}$$

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

$$h_4 = m_4 g l_{c4} \overline{C_{234}}$$

3. 직선운동 공간에서의 동역학식

본 논문에서 제안한 매니플레이터의 2,3 및 4 축 관절의 운동은 각각의 관절에 부착된 사절링크의 볼나사 구동에 의해 이루어진다. 로봇의 운동에 사절 링크의 질량 및 관성 모멘트의 영향이 있으나 구조상 중량의 대부분을 차지하는 볼나사와 가이드가 로봇 링크에 부착되고 사절 링크의 한 링크만이 영향을 미치나 이것의 질량과

관성 모멘트는 로봇 링크의 그것에 비하여 무시할 정도로 작다. 볼나사에는 엔코더가 부착된 서보모터가 직접 연결되어 있어 볼나사의 직선운동은 변위 d 만이 계측되므로 매니퓰레이터의 운동 방정식을 d 와 직선운동 방향의 구동력 F 의 관계로 표현한다. 이를 위하여 각 관절을 구동하는 사절링크 구조를 살펴보면 다음과 같다.

3.1 사절 링크기구를 이용한 어깨 관절의 운동방정식

직선운동을 회전운동으로 변환하는 사절링크를 이용하여 어깨관절의 회전각 q_1 을 구동하는 구조를 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 a_3 는 어깨관절과 팔꿈치관절을 연결하는 부분이다. 운동 형태는 사절기구에서 d_1 부분이 직선 운동을 하면 α_1 을 제외한 나머지 내부 각들과 함께 어깨관절이 회전하는 구조이다. 볼나사를 구동하여 제어하는 직선 이동거리 d_1 과 회전각 q_1 의 관계는 다음과 같다.

$$d_1^2 = a_3^2 + a_4^2 - a_2^2 - 2a_3a_4 \cos \beta_1 + 2d_1a_2 \cos \alpha_1 = A_1 + B_1 \cos \beta_1 + C_1 d_1 \quad (3)$$

여기서

$$A_1 = a_3^2 + a_4^2 - a_2^2 \quad B_1 = -2a_3a_4 \quad C_1 = 2a_2 \cos \alpha_1$$

식 (3)에서 a_2, a_3 및 a_4 는 고정된 링크길이이다. 식 (3)을 볼나사의 직선운동 변위 d_1 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

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

식 (4)의 근의 공식에서

$$\begin{aligned} & C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos \beta_1) \\ &= 2a_2^2 \cos^2 \alpha_1 + 4(a_3^2 + a_4^2 - a_2^2 - 2a_3a_4 \cos \beta_1) \\ &= 2a_2^2 \cos^2 \alpha_1 + 4(l_1^2 - a_2^2) \\ &= 2a_2^2 \cos^2 \alpha_1 + 4(l_1 - a_2)(l_1 + a_2) \end{aligned}$$

여기서, 설계변수에서

$$l_1 > a_2$$

또한, l_1, a_2 는 상수 이므로

$$C_1^2 + 4(A_1 + B_1 \cos \beta_1) > 0$$

이다.

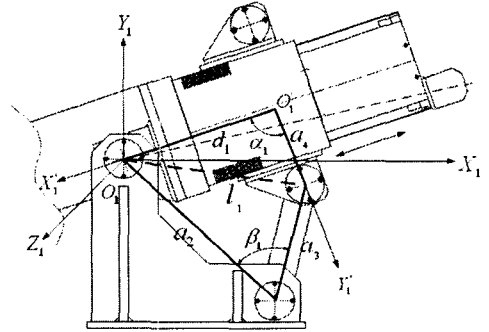


Fig. 2 Four bar link structure for shoulder joint

따라서, 식 (4)에서 근의 공식에 의한 해는 존재한다.

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

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

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

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

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

3.2 사절 링크기구를 이용한 팔꿈치 관절의 운동방정식

팔목관절 부분에 적용된 사절기구는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 어깨관절의 구조와 유사하다. Fig. 3에서 b_3 는 팔꿈치 관절과 손목 관절을 연결하는 부분이며 볼나사 구동의 직선운동 변위는 d_2 이다. 팔목관절의 각을 결정하는 β_2 와 직선운동 변위 d_2 의 관계식은 다음과 같다.

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

여기서

$$A_2 = b_3^2 + b_4^2 - b_2^2$$

$$B_2 = -2 b_3 b_4, \quad C_2 = 2 b_2 \cos \alpha_2$$

식 (9)에서 b_2, b_3 및 b_4 는 고정된 링크길이이고 α_2 와 N_2 는 고정된 각이다. 팔꿈치 관절의 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

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

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

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

3.3 사절 링크기구를 이용한 손목 관절의 운동방정식

손목 관절 부분에 적용된 사절기구도 Fig. 4에 나타난 바와 같이 다른 관절의 구조들과 유사하다. q_3 와 d_3 의 관계식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

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

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

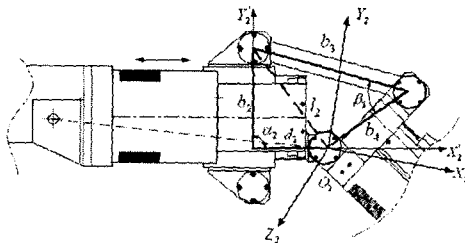


Fig. 3 Four bar link structure for elbow joint

여기서

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

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

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

각 관절들의 회전각과 사절기구에 대한 직선운동 변위 사이의 위치, 속도 및 가속도 관계식을 구하였다. 이 관계식들을 이용하여 식 (1)의 각 가속도를 사절기구의 직선운동 변위로 표현하면 회전관절 공간으로 표현된 로봇의 동역학 식을 직선운동 관절 공간의 동역학 식으로 표현할 수 있다.

4. 직선운동관절 공간에서의 로봇 운동방정식

매니플레이터의 관절 각 q 를 직선운동 변위 d 로 변환함으로써 식 (2)의 관절 공간 로봇 운동방정식이 다음과 같이 표현된다.

4.1 직선운동관절 공간에서의 각 관절의 제어입력

회전관절공간의 토크 τ 와 직선운동 방향의 구동력 F 의 관계식을 유도하기 위해 각 관절 공간상의 점 O_1, O_2, O_3 에서 각각의 볼나사의 직선운동 방향에 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.

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

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

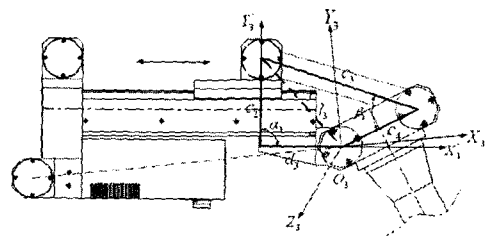


Fig. 4 Four bar link structure for wrist joint

$$x_i : d_i \cos(\psi_i + N_j) + l_2 \cos \theta_i = l_4 \cos N_j - l_3 \cos(\beta_i - N_j) \quad (15)$$

$$y_i : d_i \sin(\psi_i + N_j) - l_2 \sin \theta_i = l_4 \sin N_j + l_3 \sin(\beta_i - N_j) \quad (16)$$

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 손목관절에서 어깨관절로 이어지는 순서이다. 식 (15)의 x_i 에서 관계식을 정리하면 다음과 같다.

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

여기서

$$x_i = S_i \cos \psi_i - T_i \sin \psi_i, \quad y_i = T_i \cos \psi_i + S_i \sin \psi_i$$

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 직선운동공간의 운동방정식

앞 절에서 관절공간에서의 운동방정식을 직선운동 관절공간의 식으로 표현하고 직선운동 공간의 입력을 유도하였다. 이를 이용하여 관절공간의 식 (2)를 다음과 같이 직선운동 관절공간에서 표현할 수 있다.

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

여기서

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

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

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

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

$$R_d(d) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{12} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_{22} d_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{32} d_3 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_4 \cos \psi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_4 \cos \psi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_4 \cos \psi_3 \end{bmatrix}$$

식 (18)에서 $D(d)$, $C(d, \dot{d})$ 및 $h(d)$ 는 $D(q)$, $C(q, \dot{q})$ 및 $h(q)$ 의 관절각이 직선운동 변위로

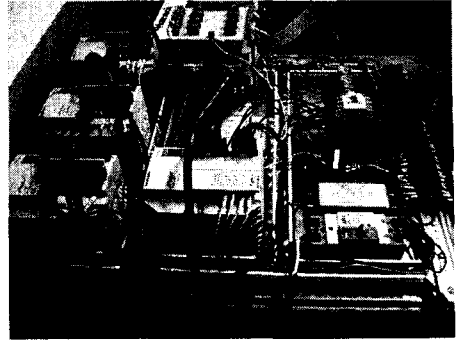


Photo. 2 Outlook of the control system

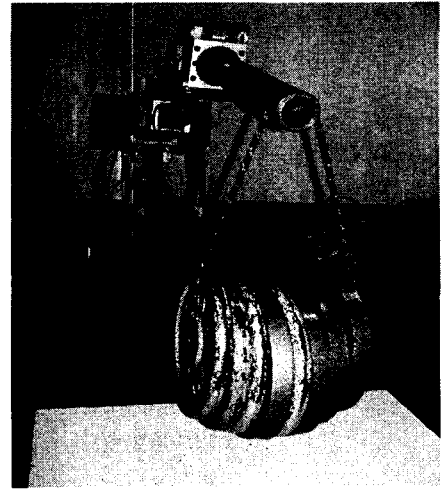


Photo. 3 Test of the manipulator

표현되었고 관절공간의 입력 τ 도 직선운동 공간의 힘 F 로 표현되었다.

5. 수직 다관절 로봇의 제작 및 성능시험

앞 장에서 제안한 4 자유도 수직 다관절 매니플레이터를 직접 제작하였고 이의 구동 실험 사진은 Photo. 3에 나타나 있다. 시작품으로 제작하여 제어부는 상용 모션 제어기를 사용하는데, 구체적인 제원은 Table 1에 나타나 있다.

5.1 다관절 로봇의 사양 및 작업 공간 해석

제작한 로봇 기구부의 치수를 Fig. 5에 도시하였다. 길게 폈을 때 팔의 총길이는 1.6m로 산업용 로봇의 사양과 유사하게 제작되었다. 제작된 로봇 팔의 치수를 근거로 한 작업 공간 해석에서 불나사의 최대 이동거리 내에서 로봇의 작업공간

을 Autocad2002로 Fig. 6과 같이 도시하여 해석하였다. 기존의 산업용 다관절 로봇보다 작업공간은 작으나 볼나사 이동거리의 개선과 기구구조의 개선을 통하여 작업공간을 향상시킬 수 있다. 반면 사절링크 구조로 제작되어 기존의 다관절 로봇이 회전축에 모터와 감속기를 직결하여 구동토크의 제약을 받는 반면 개발된 로봇은 사절링

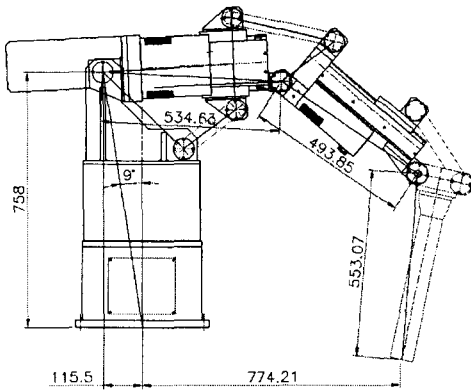


Fig. 5 Specification of the robot

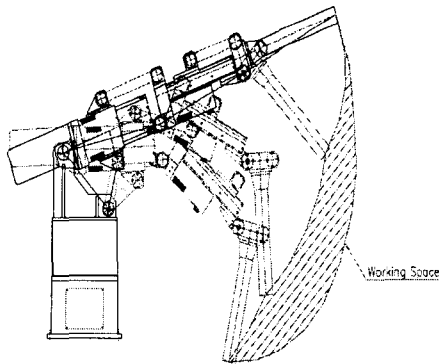


Fig. 6 Working space of the robot

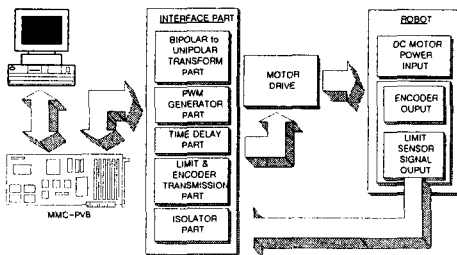


Fig. 7 Block diagram of the control system

크 구조로 로봇의 회전관절에 대해 직선운동 방향의 구동력으로 큰 모멘트를 발생시켜 구동토크를 크게 하는 장점이 있다.

5.2 로봇의 제어기 구성

로봇의 모션 제어기는 MMC 제어기를 사용하는데, 이는 자체 Memory를 1kByte 내장하고 있어 상위제어기와 빠른 고속통신을 할 수 있고, DSP 프로세서를 내장하여 고속연산이 가능하다. 본 연구에서 제어 알고리즘은 다음과 같은 Proportional-Integral-Derivative-Feedforward(PIDF) 제어 Loop를 구현한다.

$$Y_{in} = K_R [K_{\rho P} \times PE_n + K_{\rho I} \times PS_n + K_{\rho D} \times (PE_n - PE_{n-1}) + K_{\rho F} \times V_n] \quad (19)$$

모션 제어기를 사용하여 개발한 로봇의 가반하중/자체중량의 성능을 검증하고자 한다. 제어의 목적은 로봇 팔을 수평으로 펴서 90kg의 작업체를 다양한 위치와 속도로 이동시키는 것이다.

Table 1 Specification of manipulator

Spec	Full Length (mm)	Load (kg)	Voltage (kV)	D.O.F	Weight (kg)
Product					
Developed	1600	90	3.2	4	300
ABB(IBR4400)	2432	60	6.7	6	1000

Table 2 Design specification of the manipulator

Specifications		Units
Ball screw(2, 3Axis)		Φ15 , lead 5mm
Power		3.2 kw
Servo Motor (AC)	0Axis	1.0 kw, 3000 rpm
	1Axis	800 w, 3000 rpm
	2Axis	800 w
MAX. Velocity	3Axis	600 w
	0Axis	3.14 rad/s
	1Axis	0.28 rad/s
Link Length	2Axis	0.75 rad/s
	3Axis	1.08 rad/s
	1Axis	534.62 mm
	2Axis	493.85 mm
	3Axis	553.07 mm

Fig. 7과 같은 제어 시스템을 구성하고 로봇의 구동 시험을 수행하였다. 제어시스템의 Hardware 구성은 다음과 같다.

- 상용화되어 있는 MMC Motion제어기
- 제작된 인터페이스 부분(Interface Part)
- AC Servo Motor/Driver
- Limit Sensor

5.3 로봇의 성능시험

개발한 로봇의 성능 시험을 수행하였고 이의 성능 및 설계사양은 Table 1과 2에 나타나 있다. 여기에서 다양한 다관절 로봇 모델 중에서 가반 중량이나 전장의 길이가 가장 유사한 스웨덴 ABB사 로봇을 택하여 성능 비교를 하였다. 4축 및 5축 로봇에서는 유사 사양을 선택하기가 어려워 ABB 회사의 6축 로봇을 택하였다. ABB사 로봇은 가반 중량 60Kg이고 구동 모터 사용전력은 약 6.7 KW이며 로봇의 본체 중량은 1000Kg이다. 로봇에서 가장 취약한 부분은 4,5,6축이 집적되어있는 손목부위로 정확한 비교는 어려울 수 있으나, 6축 로봇의 마지막 손목부위의 축들의 구동 모터들이 3축 링크에 부착되어 어깨나 팔목관절에 큰 부하로 작용하지 않아서 이로 인한 자체부하는 이전 축들에 비하여 현저히 적다. 이러한 관점에서 6축 로봇과의 사양비교가 가능하다. 본 연구에서 개발한 로봇의 본체 중량이 300kg이고 구동전력이 3.2kW로 개발 로봇의 구동 모터 용량은 약 반이고 가반 중량은 ABB 로봇이 6축임을 고려하면 사양은 유사하지만 구동전력이 반이므로 구동 토크는 개발 로봇이 2배 가량이 됨을 추정할 수 있다.

개발한 로봇의 구동 전력 대 가반하중의 비는 30%로 일반 산업용 로봇이 10%인 것을 고려하면 본체중량 대비 고가반 하중을 가져서 구동토크의 성능이 우수함을 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 구동방식을 적용함으로써 가능하다. 또한, lead가 크거나 정밀한 불나사를 교환함으로써 로봇의 속도와 정밀도를 바꿀 수 있는 매우 유연한 특성을 구비하고 있다. 다만, Fig. 6에 나타난 것과 같이 작업 반경이

일반 산업용 로봇보다 작은 단점이 있으나 고강성을 요구하는 병렬 로봇보다는 작업공간이 현저히 크고, 로봇의 기구부 개선으로 작업공간을 향상시킬 수 있다.

6. 결 론

사절 링크기구를 관절구동기로 적용한 새로운 구조의 4자유도 다관절 로봇을 제안하였고 이의 운동방정식을 유도하였다. 운동방정식은 회전관절공간에서 사절링크기구를 구동하는 불나사의 직선운동 관절공간으로 변환하였다. 본 논문에서 제안한 로봇을 직접 제작하여 기초 구동 실험을 통하여 이의 구조와 성능을 분석하였다. 개발한 로봇은 기존의 산업용 다관절 로봇에 비해서 상대적으로 경량이나 로봇중량 대비 고토크를 갖는 우수한 성능을 가짐을 실험을 통해서 알 수 있었다. 또한, 불나사를 교환함으로써 속도나 정밀도를 변화할 수 있는 유연성을 가짐으로써 다양한 작업에 유연하게 적용할 수 있는 장점을 갖는다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-01029-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Spong, M. W. and Vidyasagar, M., 1989, Robot Dynamics and Control, John Wiley & Sons.
- (2) Richard, P. Paul, 1982, Robot Manipulator: Mathematic, Programming, And Control, MIT Press, Cambridge, MA.
- (3) Craig, J. J., 1985, Introduction to Robotics: Mechanic & Control, Addison-Wesley, Reading, MA.
- (4) Stewart, D, 1965, "A platform with Six Degree of Freedom," *Proc. Instn. Mech. Engrs, london*, Vol. 180 No. 15, pp.371-386.
- (5) Ficher, E. F., 1986, "A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 5, pp. 157-182.
- (6) Funabashi, H. H. and al., 1991, "Development of Spatial Parallel Manipulators with 6 d.o.f.," *JSME Int. J., Serie III, Vibration*, Vol. 34, No. 3, pp. 387-393.
- (7) Arai, T., Tanikawa, T., Merlet, J. P., and Sendai, T, 1996, "Development of a New Parallel Manipulator with Fixed Linear Actuator," *In Japan-USA Symp. on Flexible Automation*, pp. 145-149.