

수직다관절 로봇의 중력보상장치 개발 및 성능 분석

신응수* · 이용호**
(1999년 5월 25일 접수)

A Passive Gravity-Compensation System for Articulated Robots

Eung-Soo Shin and Yong-Ho Lee

Key Words: Articulated Robot(수직다관절 로봇), Gravity Compensation(중력 보상), Spring Balance(스프링 평형장치), Zero-Free-Length Spring(제로 자유길이 스프링), Motor Torque(모터 토크), Energy Consumption(에너지 소비)

Abstract

This paper presents a new passive gravity-compensating system for articulated robot manipulators. The system, which consists of linear zero-free-length springs, achieves exact counterbalancing of the gravitational loads throughout the entire range of the manipulator workspace. A basic concept is to design springs such that the total potential energy of the system including the manipulator and the springs should be maintained constant. A prototype has been developed for a direct-drive five-bar manipulator and its performances have been investigated. Results show that the gravity-induced motor torques have been reduced to less than 5% of those of uncompensated robots. Also, the gravity-compensating system simplifies the position control algorithm while maintaining the trajectory-tracking errors in a satisfactory level. In conclusion, the proposed system efficiently improves the manipulator performances by reducing the driving motor size and the energy consumption as well as by simplifying the control systems.

1. 서론

도장, 용접을 비롯하여 다양한 산업 분야에 활용되는 수직 다관절 형태의 로봇에서 구동 모터에 작용하는 하중 가운데 로봇 팔의 자중에 의한 토크 성분이 차지하는 비중은 매우 높으며 그 영향으로 구동모터의 크기가 증가하게 될 뿐 아니라 위치 제어 시에 발생하는 오차도 증가하게 된다. 이러한 정적 토크를 구동 모터로부터 제거 또는 감소시키기 위하여 기존 로봇에서는 평형장치를 사용하고 있는데 그 유형에 따라 분류하면 로봇 팔의 무게 중심이 회전 조인트에 접근되도록 그 위치를 조절하는 대응 질량 방식과 스프링의 탄성력을 이용하여 중력을 상쇄시킬 수 있

는 토크를 발생시키는 스프링 방식이 있다.

대응 질량 방식은 로봇 링크의 무게 중심 위치와 반대 방향에 집중 질량을 부착하거나^(1,2) 로봇 링크의 질량 분포를 변화시킴으로써 무게 중심의 위치를 조절하는 방법으로서,^(3,4) 개념적으로 간단하면서도 로봇 팔의 위치에 상관없이 항상 중력에 의한 토크를 완전 상쇄시킬 수 있는 장점이 있어 기존 로봇에 많이 활용되고 있다. 하지만 질량 추가에 따른 관성력의 증가로 인하여 구동 모터에 작용하는 동적 하중이 커지고 전력 소비가 증가할 뿐 아니라 로봇 팔의 고유진동수도 낮아지는 단점이 있다.

한편 스프링의 탄성력을 이용하여 중력을 보상하는 스프링 방식은 대응 질량 방식과 비교하여 구동 에너지의 소모가 적다는 장점을 갖고 있으나⁽⁵⁻⁷⁾ 로봇 팔의 위치에 따라 비선형적으로 변하는 중력 토크를 일반적인 선형 스프링으로 완

* 회원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : esshin@cubucc.chungbuk.ac.kr

TEL : (0431)261-3159 FAX : (0431)263-2448

** (주) 캄코

전 보상하는 것은 불가능하기 때문에 기존의 연구 결과들은 근사적으로 평형 상태에 도달할 수 있는 스프링 조건을 제시하는데 그쳤다.^(8,9) 따라서 스프링 평형 장치가 독립적으로 적용된 기존 로봇은 거의 없으며 대응 질량 방식과 병행하여 부분적으로 적용된 예가 있는데 불과하다.⁽¹⁰⁾

하지만 최근 들어 zero-free-length 스프링을⁽¹¹⁾ 이용한 새로운 형태의 평형 장치가 개발됨에 따라 이론적으로는 중력에 의한 회전 불균형이 발생하는 모든 기구에서 위치에 상관없이 스프링만으로 평형을 이루는 것이 가능하게 되었다. 그러나 스프링의 자유 길이가 0이 되어야 하는 zero-free-length 특성을 만족해야 하기 때문에 기존 로봇에 적용된 예는 아직 없으며 일부 의료용 기구의 중력 보상에 적용된 예가 있다.^(12,13)

따라서 본 논문에서는 zero-free-length 스프링을 이용한 정적 평형 장치를 설계, 제작하고 이를 적용한 수직다관절 로봇의 성능을 분석하여 새로운 형태의 중력 보상 장치를 제시하고자 한다.

2. 이론 모델

2.1 스프링에 의한 중력 보상

Fig. 1은 본 논문에서 개발하고자 하는 스프링을 이용한 중력 보상 장치가 부착된 평행사변형(parallelogram) 구조의 수직다관절형 평면 로봇 팔의 개략도로서 링크각 θ_1 과 θ_2 의 2-자유도를 갖는다. 이때 각 자유도에 대응하는 구동 모터가 정적 평형 상태에서 받는 토크는 로봇의 위치에너지를 V 라 할 때 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_i = \left(\frac{\partial V}{\partial \theta_i} \right) \quad (1)$$

Fig. 1의 시스템에서 V 는 로봇 팔의 중력 위치 에너지(V_g)와 스프링 보상 장치의 탄성 위치 에너지(V_e)의 합으로 주어지는데 먼저 V_g 를 θ_1 및 θ_2 의 함수로 나타내면 아래 식 (2)와 같다.

$$V_g(\theta_1, \theta_2) = V_{g1} \sin \theta_1 - V_{g2} \sin \theta_2 \quad (2)$$

여기서,

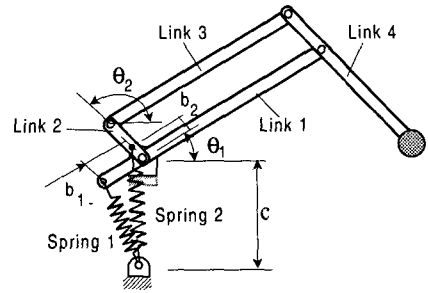


Fig. 1 Schematic of an articulated robot with gravity compensation system

$$V_{g1} = (m_1 d_1 + m_3 d_3 + m_4 l_3 + M_p l_3) g$$

$$V_{g2} = \{m_4 (d_4 - l_2) + M_p (l_4 - l_2) - m_3 l_2 - m_2 d_2\} g$$

위 식에서 m_i 는 링크 i 의 질량, l_i 는 링크 i 의 길이, d_i 는 링크 i 의 무게중심 위치이며 M_p 는 로봇 팔 끝단의 질량이다.

중력에 의해 구동 모터에 작용하는 회전 토크는 V_g 가 식 (2)와 같이 θ_1 및 θ_2 에 따라 변하기 때문에 발생하게 되는데 스프링을 이용한 중력 보상의 기본 원리는 식 (2)로 나타나는 V_g 의 변화를 스프링의 에너지 V_e 의 변화로 상쇄시키는데 있다. Fig. 1의 스프링에 대해 강성계수를 K , 변형량을 Δ , 스프링 길이를 δ , 자유 길이를 l^0 라 할 때 V_e 를 구하면 식 (3)과 같다.

$$V_e(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} K_1 \Delta_1^2 + \frac{1}{2} K_2 \Delta_2^2 \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Delta_1^2 &= (\delta_1 - l_1^0)^2 \\ &= b_1^2 + c^2 - 2b_1 c \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1\right) - 2\delta_1 l_1^0 + (l_1^0)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_2^2 &= (\delta_2 - l_2^0)^2 \\ &= b_2^2 + c^2 - 2b_2 c \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_2\right) - 2\delta_2 l_2^0 + (l_2^0)^2 \end{aligned}$$

따라서 식 (2), (3)으로부터 로봇 팔과 스프링 보상 장치를 포함한 시스템의 총 위치 에너지를 구하면 식 (4)와 같다.

$$V = (V_{g1} - K_1 b_1 c) \sin \theta_1 - K_1 \delta(\theta_1) l_1^0 \quad (4)$$

$$- (V_{g2} - K_2 b_2 c) \sin \theta_2 - K_2 \delta(\theta_2) l_2^0 + V_c$$

여기서 V_c 는 θ_1 또는 θ_2 의 함수가 아닌 상수 항을 나타낸다.

식 (1), (4)로부터 로봇 팔의 위치 θ_1 과 θ_2 에 상관없이 모터 토크 $\tau_i = 0$ 이 되기 위한 스프링의 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$K_1 b_1 c = V_{g1} ; K_2 b_2 c = V_{g2} \quad (5)$$

$$l_1^0 = 0 ; l_2^0 = 0 \quad (6)$$

따라서 식 (5), (6)을 만족하도록 스프링 강성, 로봇 링크 상의 설치 지점 및 스프링에 힘이 작용하지 않을 때의 자유 길이를 결정할 수 있다. 특히 식 (6)에서처럼 자유 길이가 0이 되는 특성을 갖는 스프링을 zero-free-length 스프링이라 한다.

2.2 중력 보상 로봇의 구동계

평행사변형 구조의 로봇 팔은 구동 모터를 베이스에 위치시킬 수 있을 뿐 아니라 링크 특성을 조절함으로써 링크 사이의 관성력에 의한 상호 간섭(coupling)을 제거할 수 있으며⁽¹⁴⁾ 여기에 식 (5), (6)으로 정의되는 중력 보상 장치를 설치하면 중력의 영향까지 제거할 수 있다. 따라서 로봇 팔에 작용하는 구동 토크는 라그랑지 방법에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial \theta_i} \right) \quad (7)$$

Fig. 1에서 링크 i 의 질량 관성 모멘트를 I_i , 무게중심에서의 속도를 v_i , 각속도를 $\dot{\theta}_i$ 라 하고 로봇 팔 끝단 질량에서의 속도를 v_P 로 정의하면 운동에너지 T 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_i \dot{\theta}_i^2 \right) + \frac{1}{2} M_P v_P^2 \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2} I_{11} \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_{22} \dot{\theta}_2^2 + I_{12} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)$$

여기서,

$$I_{11} = I_1 + I_3 + m_1 d_1^2 + m_3 d_3^2 + (m_4 + M_p) l_3^2$$

$$I_{22} = I_2 + I_4 + m_2 d_2^2 + m_3 l_2^2 + m_4 d_{42}^2 + M_p l_{42}^2$$

$$I_{12} = -M_p l_1 l_{42}$$

$$d_{42} \equiv d_4 - l_2 ; l_{42} \equiv l_4 - l_2$$

따라서 식 (7), (8)로부터 로봇 팔의 구동 토크를 구하면 다음과 같다.

$$\tau_1 = I_{11} \ddot{\theta}_1 + I_{12} c_{12} \ddot{\theta}_2 - I_{12} s_{12} \dot{\theta}_2^2 \quad (9)$$

$$\tau_2 = I_{12} c_{12} \ddot{\theta}_1 + I_{22} \ddot{\theta}_2 + I_{12} s_{12} \dot{\theta}_1^2$$

단, $c_{12} \equiv \cos(\theta_1 - \theta_2)$ 이고 $s_{12} \equiv \sin(\theta_1 - \theta_2)$ 이다.

한편 DC 모터를 이용한 직접구동 방식으로 로봇 팔을 구동할 때 모터의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_m \ddot{\theta}_i + B_m \dot{\theta}_i = \tau_{mi} - \tau_i \quad (10)$$

여기서 J_m 은 모터의 질량관성모멘트, B_m 은 마찰에 의한 감쇠계수이고 τ_{mi} 는 모터에 공급되는 입력 토크로서 제어 방식에 따라 결정된다. 일반적인 수직다관절 로봇에서는 위치 제어를 할 때 자중에 의한 토크 성분이 오차를 발생시키는 주요 원인이 되기 때문에 이를 해결하기 위한 제어기의 설계로서 PD 알고리즘에 추가하여 비선형 중력항을 보정하는 방식을 널리 사용한다.⁽¹⁵⁾ 하지만 본 논문에서는 스프링 보상 장치를 이용하여 식 (9)에 유도된 바와 같이 중력항을 제거할 수 있으므로 제어 입력 τ_{mi} 는 PD제어 방식을 적용하여 아래와 같이 설정할 수 있다.

$$\tau_{mi} = \frac{K_m}{R} \{ K_{pi} e_i + K_{di} \dot{e}_i \} - \frac{K_m K_b}{R} \dot{\theta}_i \quad (11)$$

여기서 K_m , K_b , R 은 모터 구동계의 특성 상수 들이고 K_{pi} , K_{di} 는 PD 제어계의 제어 이득에 해당하며 e_i 는 링크각 θ_i 의 목표 값과 실제 값 사이의 오차이다. Fig. 2는 식 (9), (10) 및 (11)에 근거하여 θ_i 에 대해 각각 독립적으로 PD제어를

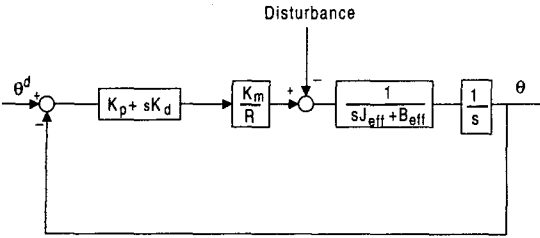


Fig. 2 Block diagram for independent joint control with a PD controller

Table 1 Mechanical properties of the robot arm

| Link | Mass (kg) | Length (cm) | C.G. (cm) | Inertia (kg-cm ²) |
|------|-----------|-------------|-----------|-------------------------------|
| 1 | 0.459 | 35.0 | 16.2 | 47.315 |
| 2 | 0.156 | 12.0 | 5.1 | 1.966 |
| 3 | 0.106 | 35.0 | 17.5 | 10.821 |
| 4 | 0.398 | 34.0 | 13.6 | 40.641 |
| Mp | 0.224 | 36.0 | - | - |

Table 2 DC servomotor properties

| Properties | Value |
|--|-------|
| Inertia, J_m (kg-cm ²) | 0.507 |
| Damping, B_m (kg-cm ² /s) | 187.0 |
| Torque constant, K_m (N-m/s) | 0.280 |
| Back-emf constant, K_b (N-m/s) | 0.055 |
| Resistance, R (Ω) | 3.78 |

적용할 때 로봇 구동계의 블록선도이다. 여기서 외란은 식 (9)에서 상호 간섭에 해당하는 I_{12} 를 포함하는 항이다.

3. 설계 및 제작

3.1 로봇 팔

이론 모델에 근거하여 스프링 보상 장치가 부착된 2-자유도의 로봇 팔을 Fig. 3에 보이는 바와 같이 제작하였다. 듀랄루민으로 만들어진 로봇 링크의 특성치는 Table 1에 정리되어 있는데 총 중량은 1.34 kg이고 식 (5)에서 링크각 θ_1 에 대응하는 중력 토크 V_{g1} 의 크기는 304.7 N-cm이고 θ_2 에 대응하는 토크 V_{g2} 는 38.7 N-cm이다.

한편 구동 DC 모터에 대한 사양은 Table 2에 나타난 바와 같다.

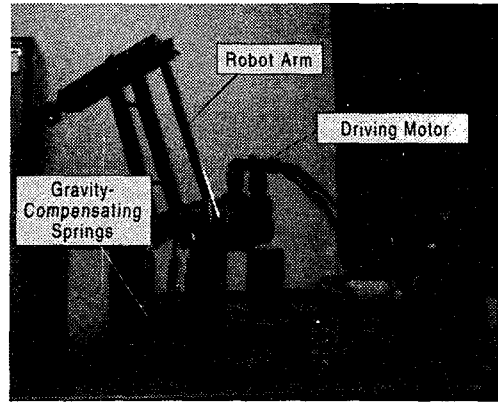


Fig. 3 A prototype of the developed robot

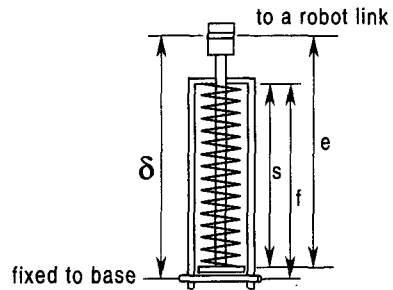


Fig. 4 A gravity-compensating spring system

3.2 중력 보상 장치

중력 보상을 스프링은 식 (6)으로 정의되는 zero-free-length 특성을 가져야 한다. 일반적으로 선형 스프링을 제작할 때 자유 길이가 0이 되도록 하는 것은 불가능하지만 본 논문에서는 Fig. 4에 보이는 바와 같이 압축 스프링을 이용하여 등가 시스템을 설계하였다.

Fig. 4에서 스프링 변형량을 Δ , 스프링의 자유 길이를 l^0 , 스프링 실제 길이를 s , 스프링 양단 길이를 δ 라 하면 스프링에 발생하는 힘은 아래 식으로 표현할 수 있다.

$$F = K\Delta = K(l^0 - s) = K\{l^0 - (e + f - \delta)\} \quad (12)$$

이때 스프링의 변형량이 스프링의 양단 길이와 같아진다면 이는 곧 스프링에 힘이 작용하지 않아 변형이 발생하지 않은 상태에서 스프링의 길

이가 0이 됨을 의미한다. 즉, $\Delta = \delta$ 라면 등가적으로 스프링의 자유 길이가 0인 zero-free-length 조건을 만족한다고 할 수 있으며 Fig. 4의 스프링 장치에 대해서 이를 유도하면 다음과 같다.

$$l^0 = e + f \quad (13)$$

스프링 설계 시에 추가적으로 고려해야 할 사항은 로봇 링크의 회전이 360° 가능하도록 스프링의 기하학적 조건이 결정되어야 한다는 점이다. Fig. 1에서 스프링의 길이가 최소가 되는 경우는 스프링이 수직선 상에 위치할 경우인데 Fig. 3에서 이 때의 스프링 길이는 다음과 같다.

$$s_{\min} = e + f - (b + c) > s_{\text{solid}} \quad (14)$$

여기서 s_{solid} 는 스프링이 최대로 압축되었을 때의 길이이다.

이상을 요약하면 중력보상장치의 설계는 식 (5), (13) 및 (14)를 만족하도록 스프링 변수 K , l^0 와 스프링 지지부의 기하학적 변수 b , c , e , f 를 정하는 것인데 3개의 조건을 만족하는 6개의 변수를 결정해야 하므로 다수의 해가 존재할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 스프링 자료집에⁽¹⁶⁾ 나와 있는 규격 스프링 중에서 K 와 l^0 값을 변화시키면서 식 (5), (13), (14)를 만족하는 b , c , e , f 의 값을 결정할 수 있는 스프링을 찾고 그 중에서 보상장치의 크기가 최소가 되는 경우를 최종 설계 결과로 정하였는데 Table 3에 나타난 바와 같다. 단, 중력 토크 V_{g1} 의 보상을 위해서는 2개의 스프링을 병렬로 연결하였으며 이때 각 스프링에 대해서는 식 (5)의 K_1 대신 $0.5 \cdot K_1$ 을 적용하였다.

4. 성능 실험

4.1 실험 장치

앞 절에서 제작한 스프링 보상 장치가 로봇 팔의 위치에 상관없이 중력에 의한 회전 토크를 상쇄하는지를 검증하고 로봇의 제어 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 5에 보이는 바와 같이 로봇 팔, 구동 모터 및 모터 드라이버, PC 제어기로 실험 장치를 구성하였다.

Table 3 Properties for gravity-compensating spring system

| Properties | | Spring 1 | Spring 2 |
|--|----------------------|------------|------------|
| Stiffness, K (N/cm) | | 5.441 | 1.536 |
| Location of the attachment points | b (cm) | 2.0 | 1.8 |
| | c (cm) | 14.0 | 14.0 |
| Distance between the attachment points | δ_{\min} (cm) | 12.0 | 12.2 |
| | δ_{\max} (cm) | 16.0 | 15.8 |
| Distance between the spring endpoints | e (cm) | 11.25 | 11.45 |
| | f (cm) | 10.75 | 10.95 |
| Free length, l^0 (cm) | | 22.0 | 22.4 |
| Minimum length, s_{\min} (cm) | | 6.0 | 6.6 |
| Wire diameter, d (cm) | | 0.10 | 0.09 |
| Outer diameter, D (cm) | | 0.72 | 0.96 |
| Number of turns, n | | 51 | 50 |
| Material | | music wire | music wire |

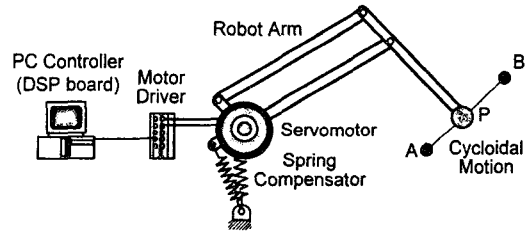


Fig. 5 Experimental set-up

모터 드라이버는 제어기로부터 받은 제어 입력 신호를 모터에 전달하는 한편 구동 모터로부터는 엔코더 신호를 비롯하여 회전 속도 및 출력 전류에 관한 신호를 받아 PC로 전달한다. DSP 보드가 내장된 PC에서는 PD 제어 법칙에 의해 계산한 제어 신호를 모터 드라이버로 전달함과 동시에 드라이버에서 받은 신호로부터 모터에 걸리는 구동 토크 및 구동 에너지를 구하게 된다.

4.2 중력 보상 실험

로봇 링크각 θ_1 , θ_2 의 각도를 0° 에서 180° 까지 5° 간격으로 변화시키면서 정적 상태에서 모터의 출력 전류를 측정함으로써 중력에 의해 모터에 걸리는 토크를 구했다. Fig. 6은 그 결과를 도시한 것으로 중력 보상이 되지 않았을 경우의 모터 토크와 비교하였다. Fig. 6(a)를 보면 모터 1에 걸리는 최대 중력 토크는 3.05 N-m에서 0.16 N-m로 94.8% 감소하였으며 Fig. 6(b)의 모터 2의 경우 최대 토크가 0.39 N-m에서 0.02 N-m로

94.9% 감소하였다. 따라서 본 논문에서 개발한 등가의 zero-free-length 스프링이 로봇의 위치에 상관없이 효과적으로 중력을 보상함을 확인할 수 있다.

이론 결과와 비교하여 약간의 중력 토크가 남아있는 것은 식 (13)으로 정의되는 등가의 zero-free-length 조건에서 스프링의 자유 길이에 오차가 발생했기 때문인 것으로 추정된다. 즉 Table 3에 정리된 바와 같이 스프링 1의 경우 자유 길이가 22.0 cm인 상태에서 최대로 압축되었을 때 6.0 cm까지 줄어들게 되는데 약간의 소성 변형이 발생하여 자유 길이가 본래보다 줄어들면서 스프링에서 발생시키는 힘이 작아졌기 때문이다. 이러한 문제는 스프링의 제작 공정을 개선함으로써 해결할 수 있을 것으로 보인다.

4.3 경로 추종 실험

Fig. 5에 보이는 바와 같이 중력 보상 로봇의 끝단 경로를 사이클로이드 직선으로 정의하였다.

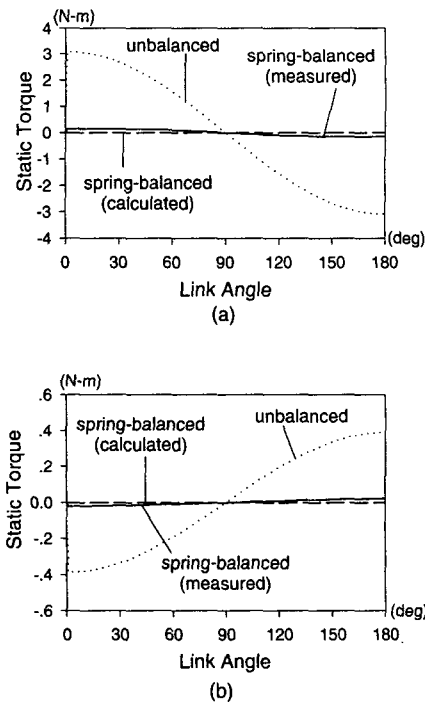


Fig. 6 Static torque (a) Motor 1 (b) Motor 2

$$x_P = x_A + \left(t - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi t\right)(x_B - x_A) \tag{15}$$

$$y_P = y_A + \left(t - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi t\right)(y_B - y_A)$$

여기서 (x_A, y_A) 및 (x_B, y_B) 는 미터 단위로 (0.25, 0) 및 (0.4, 0.35)이며 간단한 역기구학에 의해 임의 위치에서의 링크각 θ_1 및 θ_2 를 구할 수 있다. 그 결과를 이용하여 Fig. 2의 블록선도에 나타난 바와 같이 θ_1 및 θ_2 에 각각 독립적으로 PD제어를 적용하였는데 제어 이득 K_p 및 K_d 는 페루프 제어계가 임계 감쇠 특성을 갖도록 정했다. Fig. 7은 이에 대한 응답을 나타낸 것으로서 링크각의 위치 제어 오차는 2.5° 를 넘지 않는 것을 확인할 수 있다.

한편 중력 보상이 되지 않은 로봇에 대해 동일한 PD제어 법칙을 적용하여 위치 제어를 수행하

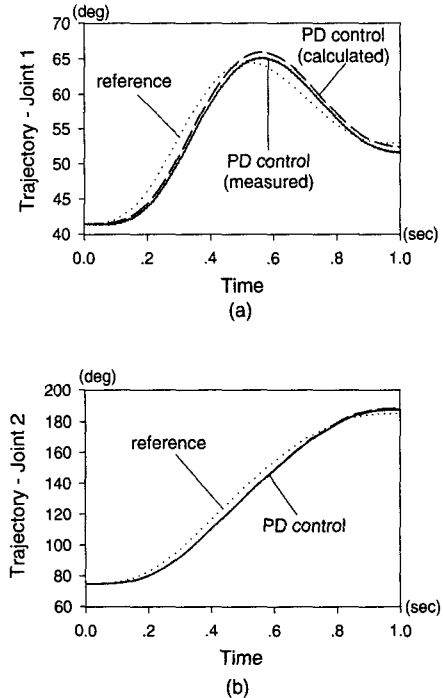


Fig. 7 Joint trajectories of the robot with the spring-compensation system

면 Fig. 8(a)에 보이는 것처럼 큰 오차가 발생한다. 따라서 이를 해결하기 위한 방법으로 식 (11)의 모터 입력 토크에 $V_{gi} \cos(\theta_i^d)$ 를 추가하여 제어 입력을 결정함으로써 제어기에서 중력을 보상해 주는 방식이 일반적으로 적용되는데 Fig. 8은 이 경우의 제어 응답을 시뮬레이션으로 구한 결과이다. Fig. 7과 Fig. 8의 결과를 비교해볼 때 중력 때문에 발생하는 위치 오차는 스프링을 이용한 수동 보상 방식이나 제어기에 의한 능동 보상 방식에 의해 모두 효과적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 하지만 후자의 경우 중력에 의한 토크를 모터에서 직접 부담해야 하기 때문에 Fig. 9에 나타난 것처럼 모터 토크 및 전력 소모량이 전자에 비해 매우 증가하게 된다. 모터 1의 경우 최대 토크가 수동 보상일 때는 0.669 N-m인 반면 능동 보상일 때는 2.688 N-m로 약 4배 가량 크며 에너지 소모량의 경우도 수동일 때 0.437 J에 비해 능동일 때는 1.633 J로 3.7배가 증가하게 된다.

이상을 종합해 볼 때 본 논문에서 개발한 수동형 중력 보상 장치는 간단한 제어 알고리즘으로 효과적인 위치 제어를 가능하게 할 뿐 아니라 구동 모터의 전력 소모를 줄이는데 큰 효과가 있다. 따라서 수직다관절 형태의 산업용 로봇 뿐 아니라 에너지 효율의 향상이 요구되는 보행 로봇 분야에도 효과적인 적용이 기대된다.

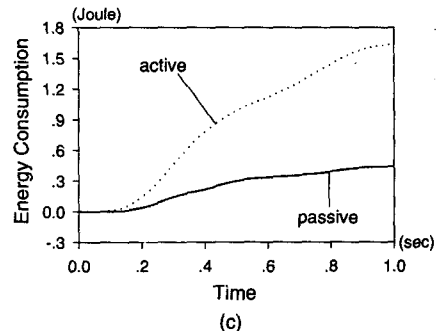
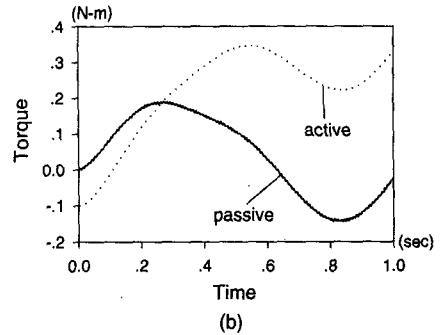
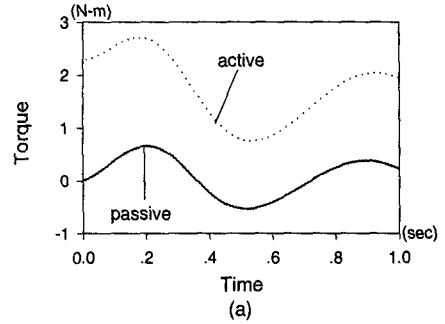
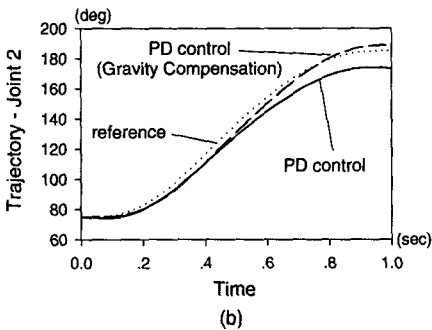
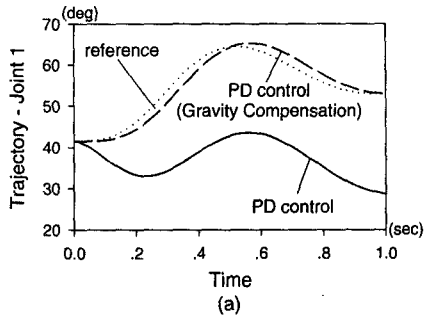


Fig. 8 Joint trajectories of a robot without the gravity-compensation system

Fig. 9 Comparison between the passive and active gravity compensation (a) Motor torque 1 (b) Motor torque 2 (c) Energy consumption

5. 결 론

본 연구에서는 2-자유도의 수직다관절 로봇에 적용할 수 있는 새로운 형태의 수동형 중력 보상 장치를 zero-free-length 스프링을 이용하여 설계, 제작하고 그 성능을 분석하였다. 그로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 등가의 zero-free-length 스프링을 이용한 중력 보상 장치는 로봇 팔의 위치에 상관없이 중력에 의한 토크를 효과적으로 상쇄할 수 있다.

(2) 스프링을 이용한 중력 보상 장치는 간단한 제어기의 설계로 효과적인 위치 제어를 가능하게 할 뿐 아니라 구동 모터의 전력 소모를 감소시킴으로써 에너지 효율을 증가시킬 수 있다.

(3) 제작된 스프링은 로봇 운동 중에 발생한 과도한 압축 변형에 의해 스프링의 자유 길이가 약간 감소하였다. 그로인해 중력에 의한 토크를 완전 보상하지 못하고 약 5% 정도의 토크가 모터에 작용하였다. 이러한 문제는 스프링의 제작 공정을 개선함으로써 해결할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Chung, W. K. and Cho, H. S., 1988, "On the Dynamic Characteristics of a Balanced PUMA-760 Robot," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, IE35, No. 2, pp. 222~230.
- (2) Arakelian, V., 1998, "Equilibrage des Manipulateurs Manuels," *Mechanisms and Machine Theory*, Vol. 33, No. 4, pp. 437~442.
- (3) Kolarski, M., Vukobratovic, M. and Borovac, B., 1994, "Dynamic Analysis of Balanced Robot Mechanisms," *Mechanisms and Machine Theory*, Vol. 29, No. 3, pp. 427~454.
- (4) Diken H, 1995, "Effect of Mass Balancing on the Actuator Torques of a Manipulator," *Mechanisms and Machine Theory*, Vol. 30, No. 4, pp. 495~500.
- (5) Ulrich, N. and Kumar, V., 1991, "Passive Mechanical Gravity Compensation for Robot Manipulators," *Proc. of the IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1536~1541.
- (6) Huissoon, J. P. and Wang, D., 1991, "On the Design of a Direct Drive 5-bar Linkage Manipulator," *Robotica*, Vol. 9, pp. 441~446.
- (7) 신재균, 1988, "스프링특성의 근사법과 입력 토크 평형문제에의 응용," *대한기계학회 논문집*, 제12권, 5호, pp. 1026~1034.
- (8) Pons, J., Ceres, R. and Jimenez, A., 1998, "Quasi-Exact Linear Spring Countergravity System for Robotic Manipulators," *Mechanisms and Machine Theory*, Vol. 33, No. 1, pp. 59~70.
- (9) Selga, S. Kalker-Kalman, C. and Schwab, A., 1998, "Statical Balancing of a Robot Mechanism with the Aid of a Genetic Algorithm," *Mechanisms and Machine Theory*, Vol. 33, No. 2, pp. 163~174.
- (10) Feedback Instruments Ltd, 1996, *Catalogue A51 - Robotics, CNC, CAD/CAM and CIM*, pp. 14~15.
- (11) Streit, D., 1993, "Zero-Free-Length Spring Design Theory," *Applied Mechanisms and Robotics Conf. AMR-93-016*.
- (12) Smith, M., Casalena, J. Streit, D. and Cavanaugh, P., 1995, "Variable Gravity Rehabilitation System: Design and Implementation of a Full Scale Prototype," *J. of Applied Mechanisms and Robotics*, Vol. 2, No. 3, pp. 7~16.
- (13) Rahman, T., Ramanathan, R., Seliktar, T. and Harwin, W., 1995, "A Simple Technique to Passively Gravity-Balance Articulated Mechanisms," *ASME J. Mechanical Design*, Vol. 117, No. 4, pp. 655~657.
- (14) Asada, H. and Youcef-Toumi, K., 1984, "Analysis and Design of a Direct Drive Arm with Five-Bar Parallel Drive Mechanism," *Proc. of 84 American Control Conf.* Vol. 106, pp. 1224~1230.
- (15) Kelly, R., 1997, "PD Control with Desired Gravity Compensation of Robotic Manipulators: A Review," *Int. J. of Robotics and Research*, Vol. 16, No. 5, pp. 660~672.
- (16) Century Spring Co. Inc., 1997, *Century Spring 1997 Buyers Guide*, pp. 4~90.