

Roll-pitch 중력 보상 기구 설계

Gravity Compensator for the Roll-pitch Rotation

조창현, 이우섭, 강성철*
(Changhyun Cho, Woosub Lee, and Sungchul Kang)

Abstract: This paper presents a gravity compensator for the manipulator of a service robot. The manipulator of a service robot is operated with low velocity for the safety reason in most cases. In this situation gravitational torques generated by the mass of links are often much greater than dynamic torques for motion. A gravity compensator can counterbalance the gravitational torques, thereby enabling to utilize relatively low power motors. In this paper the gravity compensation for the roll-pitch rotation is considered which is often used for the shoulder joints of the manipulator of a service robot or humanoid robot. A gimbals is implemented and two 1-dof gravity compensators are equipped at the base. One compensates the gravitational torque at the roll joint and another provides the compensational torque for the gimbals. Various analyses showed that the proposed compensator can counterbalance the gravitational torques of 87% at the pitch joint and 50% at the roll joint. It is verified from dynamic simulations that the proposed compensator effectively counterbalances the gravitational torques.

Keywords: static balancing, gravity compensation, manipulator, service robot

I. 서론

심부름을 위해 매니플레이터를 장착한 서비스 로봇이 활발히 연구되고 있다. 서비스 로봇 매니플레이터는 상대적으로 큰 작업공간이 필요하며 안전을 위해 많은 경우 저속으로 운전된다. 이러한 경우 링크 자중에 의한 중력 토크가 이동을 위한 동 토크보다 상당히 크다. 즉, 관절에 장착된 모터의 출력은 대부분 매니플레이터의 자중을 견디기 위한 토크로 소비된다.

완벽한 중력보상이란 매니플레이터의 모든 자세에서 링크 무게로 인해 어떠한 토크도 액츄에이터에 생성 또는 전달되지 않는 것을 의미한다. 따라서 중력보상 기구를 적용하면 매니플레이터는 거의 무중력 상태와 같이 운전할 수 있게 되어 매니플레이터에 상대적으로 작은 용량의 모터 사용이 가능해진다.

Ulrich와 Kumar는 와이어와 폴리를 적용한 1자유도 중력 보상기구를 설계 하였다[1]. 완벽한 중력보상을 위해 회전각에 따라 폴리의 형상을 보정하였다. Koser는 완벽한 1자유도 중력 보상을 위해 판 스프링을 채택한 내접 CAM 기구를 설계하였다[2]. 이를 5-bar 기구에 적용하여 3자유도 공간운동에 대한 중력보상이 가능함을 보였다. 유사하게 5-bar 기구에서 첫번째 yaw 관절을 제외한 2자유도 기구에 대한 중력보상 연구가 수행되었다[3]. 하지만 모두 5-bar 기구와 같은 특수한 구조에만 적용 가능하며 일반적인 서비스 로봇과 같은 회전 구조에 적용하기에는 문제가 있다.

다 자유도 링크 기구에 있어 모든 관절 회전은 로봇 자세에 영향을 줄 수 있어 중력보상 시 이에 대한 고려가 필요하다. 3자유도 roll-pitch-yaw 회전에 대한 완벽한 보상이 가능한

기구가 발표 되었다[4]. 하지만 서비스 로봇과 같이 동작 범위가 클 경우에는 실제 구현시 제약이 있다. 2자유도 로봇 팔에 대한 중력보상 연구에서 스프링을 베이스에 연결하지 않으려면 평행사변형 기구와 같은 보조 기구로 연결되어야 함이 설명되었다[5]. Agrawal과 Fattah는 다자유도 링크에 대한 완벽한 밸런싱이 가능한 기구를 설계 하였다[6]. 무게중심(COM)을 표현하는 평행사변형 기구와 베이스를 연결하는 주 스프링과 주변 링크에 연결된 부가 스프링으로 중력 보상을 수행하였다. 하지만 [4]와 같이 동작 범위가 클 경우에는 실제 구현시 제약이 있다. 제안된 설계 방법을 산업용 로봇에 적용하였다[7].

병렬운동 기구에 대한 중력 보상을 스프링과 counter mass를 사용하여 수행하였다[8,9]. 서비스 로봇 팔에 중력보상 기구를 장착한 연구가 수행되었다[10]. 어깨와 팔꿈치의 중력보상을 위해 각각의 스프링이 베이스에 장착되었다. 또한 부하에 대응할 수 있도록 부하조정 모터가 장착되었다.

본 논문에서는 서비스 로봇 어깨 관절에 많이 적용되는 roll-pitch 회전에 대한 중력 보상기구를 제안한다. 컴팩트한 설계를 위해 2개의 1자유도 중력 보상기구와 이들 상호간의 연결을 위한 짐벌 운동기구를 적용하였다. 2개의 1자유도 중력 보상기구는 베이스에 장착되어 하나는 roll 회전에만 대응하도록 구성하였고 나머지 하나는 짐벌기구 회전에 대응하도록 하였다. 제안된 중력 보상기구의 해석을 통해 pitch 관절에는 최대 87%의 중력토크, roll 관절에는 최대 50%의 중력토크를 상쇄시킬 수 있음을 보였다. 모의실험을 통해 제안된 중력보상기의 성능을 검증하였다.

II. 중력토크 계산

본 논문에서는 roll-pitch 회전 조인트로 구성된 2자유도 매니플레이터에 대해 고찰한다. 1, 2축의 회전을 그림 1에 정의한다. θ_1 은 z_0 방향의 회전을 나타내며 θ_2 는 y_1 방향의 회전이다. 본 논문에선 θ_1 방향 회전을 roll 회전으로 θ_2 방향 회전을 pitch 회전으로 간주한다. m 은 매니플레이터의 무게이고 무게

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 2. 18., 수정: 2010. 5. 3., 채택확정: 2010. 5. 29.

조창현: 조선대학교 제어계측로봇공학과(chcho@chosun.ac.kr)

이우섭, 강성철: 한국과학기술연구원 인지로봇사업단

(robot@kist.re.kr/kasch@kist.re.kr)

* 이 논문은 2009학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

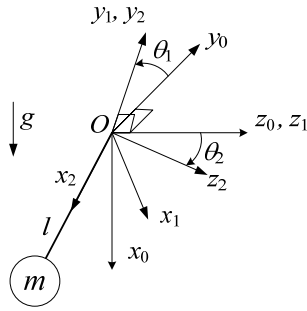


그림 1. Roll-pitch 회전.
Fig. 1. Two dofs rotation.

중심은 원점 O에서 길이 l만큼 떨어진 위치에 있다. 그림 1로부터 회전변환 행렬을 구하면

$${}^0R_2 = R_z(\theta_1)R_y(\theta_2) \quad (1)$$

2P 와 0P 는 각각 2번 좌표계와 0번 좌표계에서 바라본 무게중심의 위치라면 ${}^2P = [l, 0, 0]^T$ 이고 ${}^0P = {}^0R_2{}^2P = [l\cos\theta_1\cos\theta_2, l\sin\theta_1\cos\theta_2, -l\sin\theta_2]^T$. 0P 에 대한 자코비안 J_p 를 계산한다.

$$J_p = l \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 \cos\theta_2 & -\cos\theta_1 \sin\theta_2 \\ \cos\theta_1 \cos\theta_2 & -\sin\theta_1 \sin\theta_2 \\ 0 & -\cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

가상일의 정리로부터

$$\tau_m = J_p^T F_m \quad (3)$$

여기서, $F_m = [mg, 0, 0]^T$, $\tau_m = [\tau_1, \tau_2]^T$, g 는 중력 가속도이다. τ_m 은 중력에 의해 발생하는 각 조인트의 토크이다.

$$\tau_m = mgl[-\sin\theta_1 \cos\theta_2, -\cos\theta_1 \sin\theta_2]^T \quad (4)$$

III. 밸런스 토크 계산

1. 1자유도 중력 보상 기구

Roll-pitch 중력보상 기구에 적용할 1자유도 중력 보상기구를 설명한다. 그림 2는 [4]의 1자유도 중력보상 기구를 나타낸다. 스프링이 x축 상의 고정점 A와 링크 위의 점 B에 연결되었다. 점 A와 B는 각각 원점에서 h만큼 떨어진 위치로 한다. 여기서 스프링은 zero-length 스프링이라 가정한다. Zero-length 스프링은 초기 변위가 없는 상태에서 길이가 0인 스프링이다. Zero-length 스프링의 실제 구현은 A-B구간은 와이어로 연결하고 스프링을 베이스에 장착하는 방법 등이 가능하다. 그림 2에서 $q = \pi$ 일 때 스프링 길이가 0이다. 또한, q 회전의 +방향을 +z 방향 회전으로 가정한다.

1자유도 회전 링크의 무게가 m이고 질량 중심이 원점 O에서 l만큼 떨어진 위치에 있을 경우, potential energy function을 아래와 같이 만들 수 있다.

$$V(q) = kS^2(q)/2 - mgl\cos(q) \quad (5)$$

여기서 q 는 1자유도 링크의 회전각이다. 또한, k 는 스프링 상수, S 는 스프링 변위이다. 앞서 Zero-length 스프링으로 가정하였으므로 스프링의 변위 $S(q)$ 는 A-B 길이로 표현된다. 점 A

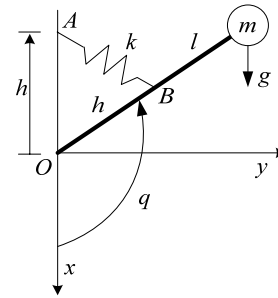


그림 2. 1자유도 중력보상 기구.
Fig. 2. 1 dof gravity compensator.

와 B의 위치는 각각 $A = [-h, 0, 0]^T$, $B = [h\cos(q), h\sin(q), 0]^T$ 이므로 $S^2(q)$ 는

$$S^2(q) = |BA|^2 = 2h^2\{1 + \cos(q)\} \quad (6)$$

(6)을 식(5)에 대입하여 정리하면

$$V(q) = kh^2 + (kh^2 - mgl)\cos(q) \quad (7)$$

완전한 중력보상을 하기 위해 위 식은 항상 상수여야 한다. 따라서 스프링 상수 k 는 아래의 조건으로 계산된다.

$$k = mgl/h^2 \quad (8)$$

또한 스프링에 의해 원점 O에 작용하는 토크를 계산하고 (8)을 대입하면

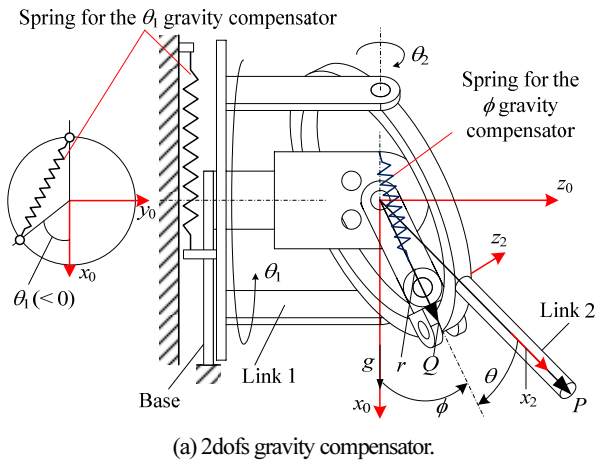
$$\tau_x = mgl\sin(q) \quad (9)$$

그림 2의 1자유도 중력보상기구는 x축을 중심으로 대칭이므로 $-\pi \leq q \leq \pi$ 영역에서 동작 가능하다. 또한 [4]에서 제안된 바와 같이, 3자유도 공간운동으로 적용 가능하다. 하지만 간섭 등과 같은 기구적 한계로 인해 실제 구현시 작업영역이 줄어드는 한계가 있다. 1자유도 회전기구의 완전한 중력보상을 위해 그림 2와 같은 구조 이외에 internal CAM[2] 또는 와이어-폴리[1]와 같은 구조도 가능하다.

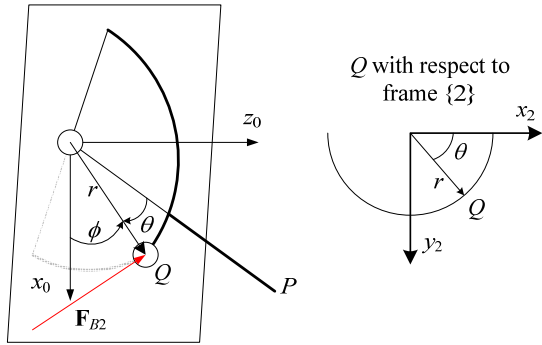
2. 2자유도 중력 보상 기구

집벌 구조를 채택한 2자유도 중력보상 기구를 그림 3에 나타내었다. 그림 1의 θ_1 과 θ_2 는 각각 집벌의 첫번째와 두번째 회전으로 표현된다. 그림에서 팔길이 r인 회전링크는 원점 O를 중심으로 x_0-z_0 평면상에서 회전하도록 집벌 내부에 구성되었다. 또한 회전링크는 두번째 링크의 반지름 r인 원형 슬라이드를 따라 움직이도록 구성되었다. θ_1 과 θ_2 회전에 따라 원형 슬라이드의 자세가 변화한다. 따라서 회전 링크의 끝점 Q는 x_0-z_0 평면 상에서 움직이며 동시에 반지름 r인 원형 슬라이드를 따라 움직인다. 그림 3(b)에서 x_0-z_0 평면 상의 각도 ϕ 는 Q가 x_0 와 이루는 각이며 θ 는 P와 Q가 이루는 각으로 원형 슬라이드 평면상에 표현된다.

그림 2의 1자유도 중력 보상기구를 각각 θ_1 과 ϕ 의 회전에 대응 하도록 장착한다. 본 논문에서는 이들을 각각 θ_1 중력 보상기구와 ϕ 중력 보상기구라 칭한다. θ_1 중력 보상기구와 ϕ 중력 보상기구는 각각 θ_1 과 ϕ 회전을 보상하도록 한다. 즉, 각각의 스프링상수는 식(8)로부터 $k_{\theta_1} = k_{\phi} = mgl/h^2$ 로 설정된다.



(a) 2dofs gravity compensator.



(b) Sliding motion.

그림 3. 2자유도 중력보상 기구.
Fig. 3. 2 dofs gravity compensator.

실제 구현시 그림 2의 1자유도 중력 보상기구가 θ_1 회전에 적용되면 기구 간섭에 의해 회전 각도가 제한된다. 하지만 앞 절에서 기술한 바와 같이 internal CAM[2] 또는 와이어-폴리[1]와 같은 구조도 적용 가능하다. 이 경우 식 (9)는 적용 가능하지만 식 (8)은 동일한 형태로 계산되진 않는다. 하지만 회전각도와 무관한 상수로 계산 또는 설정되어 이후 수식 전개에 영향을 주지 않는다. 따라서 본 논문에선 실제 구현시 각도 제한이 있지만 가장 단순한 형태인 그림 2 구조로 설명한다.

동작 예로서 $\phi = 0^\circ (\theta_2 = 0^\circ)$ 인 상태에서 θ 만 변화시킬 경우 (그림 4(b)), θ_1 중력 보상기구에 의해 완전한 중력 보상이 가능해진다. 유사하게 $\theta = 0^\circ$ 인 상태에서 ϕ 만 변화시킬 경우 (그림 4(c)), ϕ 중력 보상기구에 의해 완전한 중력 보상이 가능해진다. 하지만 그림 4(d)와 같은 자세인 경우 θ_1 중력 보상기구와 ϕ 중력 보상기구에 의한 효과를 모두 고려해야 한다.

(9)로부터 θ_1 중력 보상기구가 제공하는 토크는

$$\tau_{B1} = [\tau_{B1,1}, \tau_{B1,2}]^T = mgl[\sin\theta, 0]^T \quad (10)$$

여기서 τ_{B1} 은 θ_1 중력 보상기구에 의해 θ_1 과 θ_2 관절에 작용하는 토크벡터이다. ϕ 중력 보상기구에 의한 보상 토크를 계산한다. 그림 3에서 ϕ 중력 보상기구에 의한 보상 토크는 Q 점으로 전달된다. 그림 3(b)에서 링의 local 좌표계 ($\{2\}$ 좌표계)에서 Q 의 좌표는 ${}^2Q = [r\cos\theta, r\sin\theta, 0]^T$. 0R_2 로부터

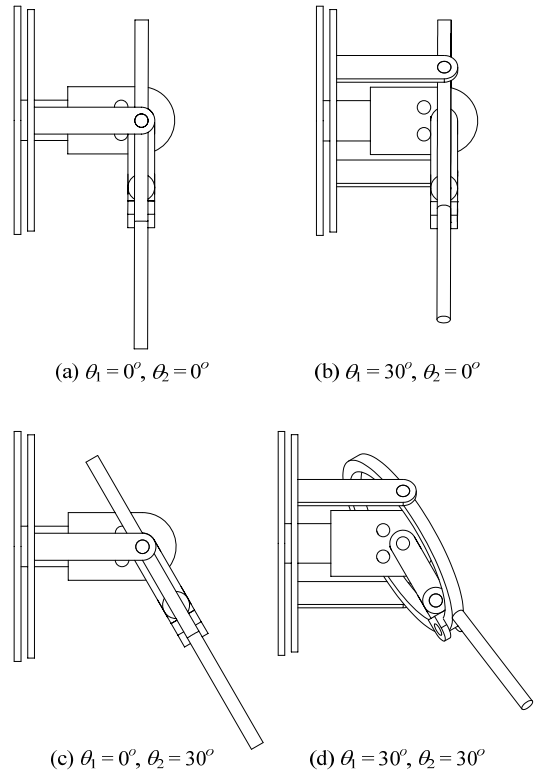


그림 4. 2자유도 중력보상 기구의 다양한 자세.
Fig. 4. Various poses of the 2-dofs gravity compensator.

$${}^0R_2 \cdot {}^2Q = {}^0Q = [{}^0Q_x, {}^0Q_y, {}^0Q_z]^T \quad (11)$$

Q 가 x_0-z_0 평면 상에서 이동하므로 ${}^0Q_y = 0$ 이고 이 조건으로 θ 를 계산한다.

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{1 \pm \sqrt{1 + \tan^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2}}{\tan \theta_1 \cos \theta_2} \right) \quad (12)$$

0Q 의 자코비안을 계산하기 위해 0Q 의 속도를 계산하면

$$\begin{aligned} {}^0\dot{Q} &= \left[\mathbf{V}_1 + \frac{\partial \theta}{\partial \theta_1} \mathbf{V}_3, \mathbf{V}_2 + \frac{\partial \theta}{\partial \theta_2} \mathbf{V}_3 \right] \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{Bmatrix} \\ &= \mathbf{J}_Q \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $\mathbf{V}_1 = r[-s_1c_2c_\theta - c_1s_\theta, c_1c_2c_\theta - s_1s_\theta, 0]^T$, $\mathbf{V}_2 = r[-c_1s_2c_\theta - s_1s_2c_\theta, 0]^T$, $\mathbf{V}_3 = r[-c_1c_2s_\theta - s_1c_\theta, -s_1c_2s_\theta + c_1c_\theta, s_2s_\theta]^T$ 이며 c_x 와 s_x 는 각각 $\cos(x)$ 와 $\sin(x)$ 를 의미한다. 또한 $\mathbf{J}_Q \in R^{3 \times 2}$.

θ_1 중력 보상기구가 제공하는 토크와 유사하게 ϕ 중력 보상기구가 생성하는 토크는

$$\tau_\phi = mgl \sin \phi \quad (14)$$

ϕ 중력 보상기구가 생성하는 힘은 팔길이 r 인 회전 링크를 통해 전달된다. (14)에 의해 생성되는 힘을 \mathbf{F}_{B2} 라 한다. \mathbf{F}_{B2} 는 x_0-z_0 평면 상에서 작용한다. 그림 3(b)에서 \mathbf{F}_{B2} 는

$$\mathbf{F}_{B2} = F(\phi) [-\sin \phi, 0, -\cos \phi]^T \quad (15)$$

여기서 $\phi = -\tan^{-1}({}^0Q_z / {}^0Q_x) = \tan^{-1}((c_1c_2c_\theta - s_1s_\theta) / s_2c_\theta)$. 또한, (14)에서

$$F(\phi) = mgl \sin \phi / r.$$

그림 3에서 회전링크는 원형 슬라이드 면을 따라 움직이므로 \mathbf{F}_{B2} 는 슬라이드 면으로 전달된다. 즉, z_2 방향으로 전달된다. \mathbf{F}_{B2} 의 z_2 방향으로 투영된 힘은

$$\mathbf{F}_{B2,z2} = ({}^0\mathbf{z}_2 \cdot \mathbf{F}_{B2}) {}^0\mathbf{z}_2 \quad (16)$$

여기서 ${}^0\mathbf{z}_2 = {}^0\mathbf{R}_2 {}^2\mathbf{z}_2 = [c_1s_2, s_1s_2, c_2]^T$ 이다. 정리하면

$$\mathbf{F}_{B2,z2} = -F(\phi)(c_1s_2s_\phi + c_2c_\phi) {}^0\mathbf{z}_2 \quad (17)$$

ϕ 중력 보상기구에 의해 각 조인트에 작용하는 보상 토크는

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{B2} &= \mathbf{J}_Q^T \mathbf{F}_{B2,z2} = [\tau_{B2,1}, \tau_{B2,2}]^T \\ &= rF(\phi)(c_1s_2s_\phi + c_2c_\phi)[s_2s_\theta, c_\theta]^T \end{aligned} \quad (18)$$

\mathbf{V}_3 는 θ 에 대한 편미분으로 θ 운동의 접선 성분을 의미한다. 따라서 θ 의 회전 방향인 \mathbf{z}_2 벡터와 \mathbf{V}_3 는 직교하며 내적은 영이다.

IV. 효과 분석

기구를 구동하는 모터의 영향을 배제한 상황에서 조인트에 작용하는 토크는 중력 토크와 모든 보상 토크의 합으로 표현된다.

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_m + \boldsymbol{\tau}_{B1} + \boldsymbol{\tau}_{B2} \quad (19)$$

계산을 위해 표 1과 같이 파라미터를 가정하였다. 그림 3

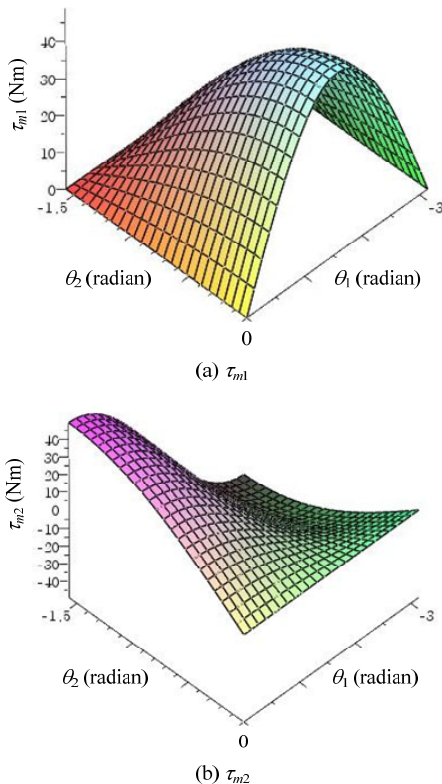


그림 5. 중력 토크.
Fig. 5. Gravitational torque.

의 기구가 원팔 어깨부분에 장착된다 가정하여 θ_1 과 θ_2 의 범위는 각각 $-\pi \leq \theta_1 \leq 0$ 과 $-\pi/2 \leq \theta_2 \leq 0$ 로 설정하였다. 하지만 $0 \leq \theta_1 \leq \pi$ 영역이 $-\pi \leq \theta_1 \leq 0$ 영역과 대칭인 점을 고려하면 반구 영역에서 움직이는 것을 의미한다. 또한 θ_1 과 θ_2 각도 범위로부터 ϕ 는 $-\pi \leq \phi \leq 0$ 영역에서 변화하므로 (12)의 θ 는 $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ 범위로 제한된다. 모든 중력보상기구의 스프링 상수값은 (8)로부터 4905N/m로 계산되었다.

그림 5는 중력에 의해 발생하는 각 조인트 토크를 나타낸다. 주어진 조건에서 τ_{m1} 과 τ_{m2} 모두 최대 49.05Nm의 토크가 작용하는 것으로 계산되었다. $\theta_2 = -\pi/2$ 인 경우 τ_{m1} 는 모든 θ_1 에 대해 영 값을 갖는다(팔을 옆으로 든 경우로 무게중심이 θ_1 회전축 상에 있다). τ_{m2} 그래프에선 $\theta_2 = -\pi/2$ 인 경우 τ_{m2} 은 $\theta_1 = 0$ 에서 최댓값(49.05Nm), $\theta_1 = -\pi/2$ 에서 0Nm, $\theta_1 = -\pi$ 에서 최솟값(-49.05Nm)을 갖는다.

θ_1 중력 보상기구가 제공하는 토크를 그림 6에 나타내었다. (10)을 참조하면 모든 θ_1 에 대해 $\tau_{B1,2} = 0$ 임을 알 수 있다. θ_1 에 대한 중력 보상만을 고려 하였으므로 $\tau_{B1,1}$ 은 그림 6과 같이 θ_2 변화에는 무관하고 θ_1 에 따라 변화한다. $\tau_{B1,1}$ 의 최댓값은 0Nm이고 최솟값은 -49.05Nm이다.

그림 7은 ϕ 중력 보상기구가 제공하는 토크를 나타낸다. 그림 3의 짐벌 구조로 인해 (18)과 같이 $\tau_{B2,1}$ 과 $\tau_{B2,2}$ 가 동시에 발생한다. $\tau_{B2,1}$ 의 최댓값은 12.226Nm이고 최솟값은 0Nm이다. 또한, $\tau_{B2,2}$ 의 최댓값은 49.05Nm 이고 최솟값은 -49.05Nm 이다. θ_1 이 $-\pi/2$ 인 경우 $\tau_{B2,1}$ 과 $\tau_{B2,2}$ 는 모든 θ_2 에 대해 0Nm의 값을 갖는다. 예를 들면 그림 3에서 $\theta_1 = -\pi/2, \theta_2 = 0$ 인 경우는 팔을 앞으로 든 것(점 P가 $-y_0$ 방향으로 향한다)으로 θ_2 축 방향은 중력방향과 일치한다. 또한, 팔길이 r인 회전 링크의 방향은 원형 슬라이드의 회전축(θ_2 축) 방향과 일치하게 되며 ϕ 중력 보상기구에 의해 전달되는 힘((15))은 θ_2 축과 교차한다. 이 경우 ϕ 중력 보상기구는 모든 조인트에 어떠한 토크도 제공할 수 없는 것을 의미한다. 기구학적 특이점과 유사하게 입력

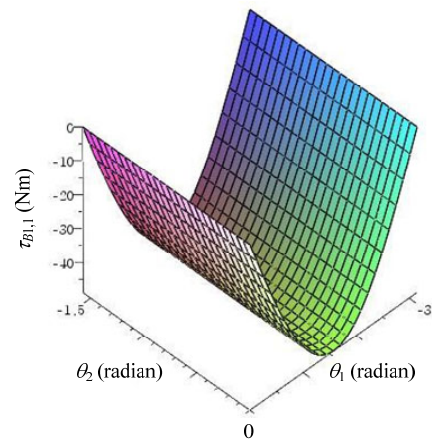


그림 6. θ_1 중력 보상기구가 제공하는 토크.
Fig. 6. Balancing torque by the θ_1 gravity compensator.

표 1. 계산 조건.

Table 1. Parameters.

l (m)	m (kg)	r (m)	g (m/s ²)
1.0	5.0	0.1	9.81

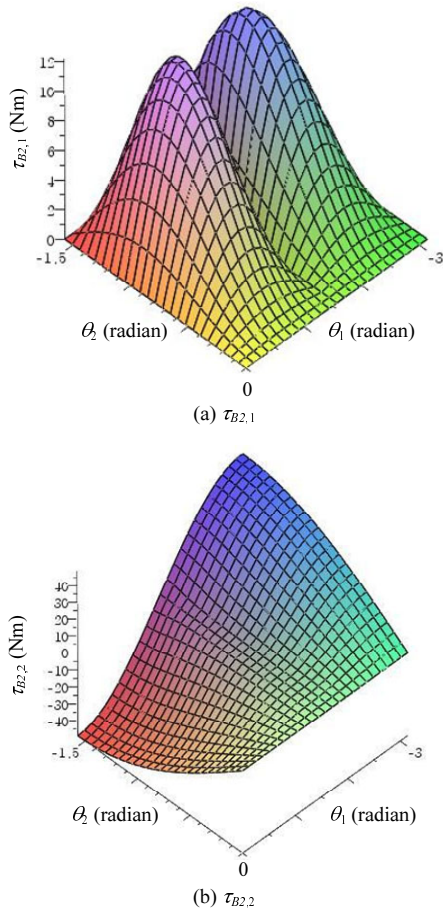


그림 7. ϕ 중력 보상기구가 제공하는 토크.
Fig. 7. Balancing torque by the ϕ gravity compensator.

변화에 출력이 변화하지 않으므로 $\theta_1 = -\pi/2$ 는 τ_{B2} 에 대한 특이점으로 볼 수 있다.

그림 8은 (19)로 계산된 전체 토크를 나타낸다. 그림 8(b)의 τ_2 는 $\pm 6.605\text{Nm}$ 범위에서 변화 하였다. 순수하게 ϕ 중력 보상기구에 의한 보상효과이며 그림 5의 중력 토크와 비교하면 약 87%의 중력 토크가 상쇄되었음을 보인다. 그림 8(a)의 τ_1 최댓값은 1.541Nm 이고 최솟값은 -49.05Nm 으로 계산되었다. $\theta_1 = \theta_2 = -\pi/2$ 인 경우 최솟값이 관찰되었는데 이 경우 그림 3의 P 가 z_0 방향으로 향한다. 질량에 의해 발생하는 힘이 θ_1 회전축(z_0) 방향으로 작용하여 $\tau_{m1} = 0$ 이 되고 ϕ 중력 보상기구는 특이점에 있다. 따라서 그림 8(a)에서 $\theta_1 = \theta_2 = -\pi/2$ 인 경우 최솟값은 순수하게 θ_1 중력 보상기구가 제공하는 토크이다.

만약 θ_1 과 θ_2 에 대해 완전한 중력 보상이 가능하다면 그림 8은 θ_1 과 θ_2 에 대해 항상 0이어야 한다. 그림 5(a)와 그림 6, 그림 7(a)을 고려하면 그림 8(a)에서 +토크는 중력 토크가 큰 경우이고 -토크는 보상토크가 큰 것을 의미한다. 따라서 그림 8(a)는 과도한 중력보상이 되었음을 의미한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 θ_1 중력 보상기구가 제공하는 토크를 조절한다. 그림 8(a)에서 최댓값은 최솟값에 비해 미미하다 가정하면 τ_{B1} 을 절반으로 줄여 최댓값과 최솟값을 거의 균일하게 맞출 수 있다. 기구적으로 (8)로 계산된 θ_1 중력 보상기구의 스프링 상수 값을 절반으로 줄이는 것으로 구현 가능하다.

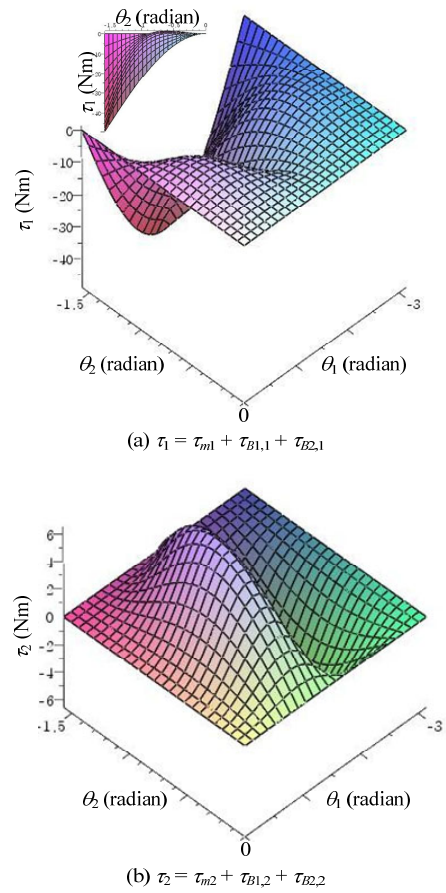


그림 8. 전체토크.
Fig. 8. Total torque.

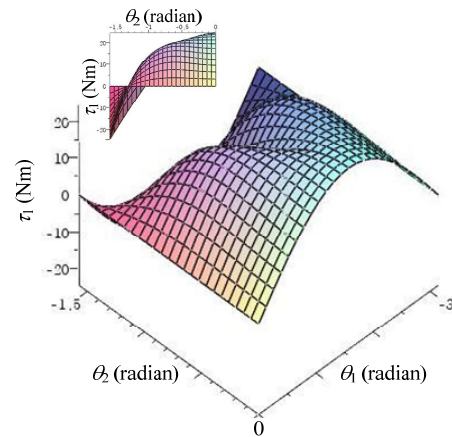


그림 9. (20)에 의한 전체토크.
Fig. 9. Total torque computed by (20).

이 경우 θ_1 중력보상기구는 완벽한 중력보상을 수행할 수 없게 되지만 τ_1 의 최댓값과 최솟값을 거의 균일하게 맞출 수 있게 되어 추후 모터로 재 보상이 유리하다. (19)는 아래와 같이 변경되고 계산 결과를 그림 9에 나타내었다.

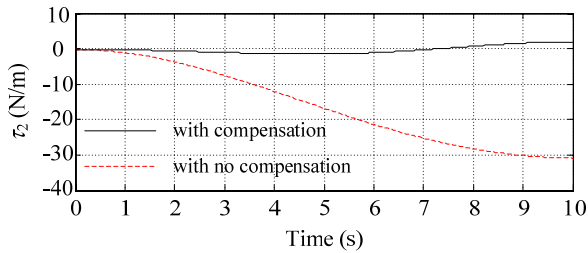
$$\tau = \tau_m + \tau_{B1}/2 + \tau_{B2} \tag{20}$$

여기서 모든 θ_1 과 θ_2 에 대해 $\tau_{B1,2} = 0$ 이므로 τ_2 에 대한 (20)의 계산 결과는 그림 8(b)와 동일하다.

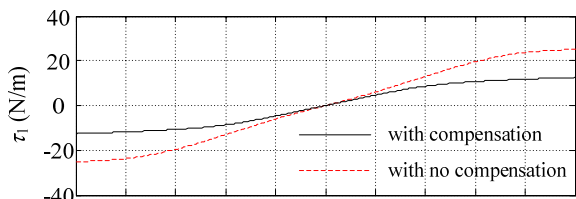
그림 9에서 τ_1 의 최댓값은 24.525Nm이고 최솟값은 -24.525 Nm으로 계산되었다. 따라서, (20)을 적용하면 θ_1 회전에 대해 중력 토크의 50%를, θ_2 회전에 대해 중력 토크의 87%를 상쇄시킬 수 있다. 만약 자중만을 고려하여 모터를 선정한다면, 일반적인 경우 자중토크를 100% 보상하는 모터를 선정해야 한다. 하지만 제안된 중력 보상장치를 적용할 경우 θ_1 에 대해 중력토크의 50%, θ_2 에 대해 중력토크의 13%에 해당하는 출력을 내는 모터를 선정할 수 있게 된다.

V. 모의실험

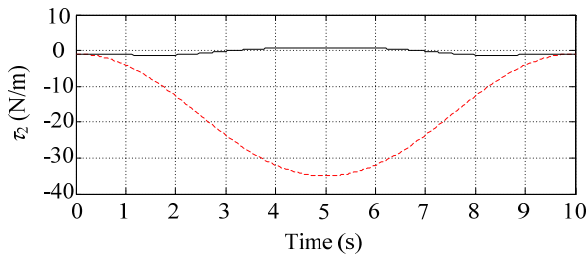
모의실험 결과를 그림 10에 나타내었다. 표1의 조건으로 모의실험을 수행하였다. 그림 10(a) 결과는 θ_1 은 -30° 로 고정



(a) Case 1: $\theta_1 = -30^\circ, \theta_2 = 0^\circ - 45^\circ$



(b) Case 2: $\theta_1 = -30^\circ - 30^\circ, \theta_2 = 0^\circ - 45^\circ$



(c) Case 3: $\theta_1 = -30^\circ - 90^\circ, \theta_2 = 0^\circ - 45^\circ - 0^\circ$

그림 10. 모의실험 결과.

Fig. 10. Results of dynamic simulations.

시키고 10초 동안 θ_2 를 0° 에서 -45° 까지 이동시킬 때 필요한 구동토크이다. θ_1 이 고정되었으므로 τ_1 은 거의 일정한 값을 갖기 때문에 그래프를 나타내지 않았다. 그림 10(a)의 결과는 이동을 위한 동 토크(최대 0.272Nm)가 포함되어 있다. 점선과 실선은 각각 중력보상이 없는 경우와 있는 경우 θ_2 축에 작용하는 구동토크 값을 나타내었다. 중력보상이 없는 경우 최대 31.089Nm의 토크가 작용하였으며 중력보상이 있는 경우 최대 1.975Nm의 토크가 작용하였다. 또한 주어진 자세($\theta_1 = -30^\circ, \theta_2 = -45^\circ$)에서 정역학 해석을 수행하였다. 중력보상이 없는 경우 31.033Nm, 중력보상을 수행한 경우 1.674Nm의 토크가 자세를 유지하기 위해 작용하였다.

그림 10(b)는 θ_1 과 θ_2 를 각각 -30° 에서 30° 로, 0° 에서 -45° 를 거쳐 다시 0° 로 10초 동안 이동시킬 때 필요한 구동토크를 나타내었다. τ_1 그래프에서 중력 보상이 있는 경우 구동토크 절대값은 중력 보상이 없는 경우에 비해 항상 작아 중력보상 효과가 있음을 파악할 수 있다. 하지만 τ_2 와 같이 두 값의 차이가 그리 크지 않다. 이것은 과도한 중력보상을 방지하기 위한 (20)의 효과로 판단된다(중력보상 크기를 줄였기 때문이다).

그림 10(c)는 θ_1 과 θ_2 를 각각 -30° 에서 -90° 로, 0° 에서 -45° 를 거쳐 다시 0° 로 10초 동안 이동시킬 때 필요한 구동토크를 나타내었다. 중력보상이 없는 경우 τ_1 의 최솟값은 -50.683Nm 이고 중력보상이 있는 경우 최솟값은 -25.374Nm로 계산되었다. 즉, 최대 50% 구동토크 감소 효과를 나타남을 보인다. 이는 과도한 중력보상 방지하기 위한 (20)이 적용된 그림 9의 결과와 일치한다.

VI. 결론

본 논문에서는 서비스 로봇 어깨 관절에 많이 적용되는 roll-pitch 회전에 대한 중력 보상기구를 제안하였다. 2개의 1자유도 중력 보상기구와 이들 상호간의 연결을 위한 짐벌 운동기구를 적용하였다. 2개의 1자유도 중력 보상기구는 베이스에 장착되어 하나는 roll 회전에만 대응하도록 구성하였고 나머지 하나는 짐벌기구 회전에 대응하도록 하였다. 이로 인해 어깨 관절과 유사한 회전에 적용 가능한 컴팩트한 기구를 얻었다. 제안된 중력 보상기구의 해석을 통해 다음을 확인하였다.

- θ_2 관절에는 최대 87%의 중력토크, θ_1 관절에는 최대 50%의 중력토크를 상쇄시킬 수 있음을 보였다.
- 제안된 중력 보상 기구는 $\theta_1 = -\pi/2$ 에서 특이성을 보인다.
- 제안된 중력 보상기구에서 과도한 중력 보상 토크 생성을 피하기 위해 θ_1 중력보상기구의 보상토크를 수정할 필요가 있다.

모의실험을 통해 제안된 중력보상기의 성능을 검증하였다. 보완 연구로 모든 자세에서 완벽한 중력 보상이 가능한 기구에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

[1] N. Ulrich and V. Kumar, "Passive mechanical gravity compensation for robot manipulator," *Proc. of the 1991 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1536-1541, 1991.
 [2] K. Koser, "A cam mechanism for gravity-balancing,"

Mechanics Research Communications, vol. 36, no. 4, pp. 523-530, June 2009.

- [3] 신응수, 이용호, “수직다관절 로봇의 중력보상장치 개발 및 성능 분석,” 대한기계학회논문집 A권, 제24권 제2호, pp. 481-488, 2000.
- [4] T. Morita, F. Kuribara, Y. Shiozawa, and S. Sugano, “A novel mechanism design for gravity compensation in three dimensional space,” *Proc. of the 2003 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 163-168, 2003.
- [5] T. Wongratanaphisan and M. Chew, “Gravity compensation of spatial two-DOF serial manipulators,” *Journal of Robotic Systems*, vol. 19, no. 7, pp. 329-347, 2002.
- [6] S. K. Agrawal and A. Fattah, “Gravity-balancing of spatial robotic manipulators,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 39, no. 12, pp. 1331-1344, Dec. 2004.
- [7] A. Fattah and S. K. Agrawal, “Gravity-balancing of classes of industrial robots,” *Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2872-2877, 2006.
- [8] C. M. Gosselin and J. Wang, “On the design of gravity-compensated six-degree-of-freedom parallel mechanisms,” *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2287-2294, 1998.
- [9] A. Russo, R. Sinatra, and F. Xi, “Static balancing of parallel robots,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, no. 2, pp. 191-202, Feb. 2005.
- [10] K. A. Wyrobek, E. H. Berger, H. F. M. V. Loos, and J. K. Salisbury, “Towards a personal robotics development platform: Rationale and design of an intrinsically safe personal robot,” *Proc. of the 2009 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2165-2170, 2009.



조창현

1997년 경희대학교 기계공학과(공학사). 1999년 경희대학교 기계공학과(공학석사). 2005년 고려대학교 기계공학과(공학박사). 2005년~2007년 프린티어 지능로봇 사업단(연구원). 2007년~2008년 프린티어 지능로봇 사업단(선임연구원). 2008년~현재 조선대학교 제어계측로봇공학과 조교수. 관심분야는 햅틱스, 신뢰성 있는 핸드/매니퓰레이터 개발.



이우섭

1999년 서강대학교 기계공학과(공학사). 2004년 연세대학교 전자공학과(공학석사). 2004년~2010년 KIST 인지로봇연구단 연구원. 2010년~현재 일본 동경 공업대학교 우주항공기계공학과 박사과정. 관심분야는 필드로봇 설계 및 제어 시스템 개발과 신뢰성 있는 Manipulator 개발.



강성철

1989년 서울대학교 기계설계학과(공학사). 1991년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1998년 서울대학교 기계설계학과(공학박사). 1991년~1999년 KIST 휴먼로봇연구센터 연구원. 1999년~2000년 일본 기계기술연구소(MEL) 박사후 연구원. 1999년~2005년 KIST 지능로봇연구센터 선임연구원. 2005년~현재 KIST 인지로봇센터 책임연구원. 2007년 스탠포드대 방문연구원. 관심분야는 지능형 dependable 매니플레이션, 위험작업용 필드 서비스로봇, Haptic Interface.