

두 바퀴 모바일 로봇의 협조를 위한 힘 제어 연구

배영걸, 정슬

충남대학교 메카트로닉스공학과 지능시스템 및 감성공학 실험실

A Study of Force Control for Cooperation between Two Two-wheel Mobile Robots

Yeong-geol Bae and Seul Jung

Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

Abstract - 본 논문은 두 개의 바퀴로 구동되는 밸런싱 모바일 로봇을 이용한 힘 제어에 관한 연구이다. 밸런싱 모바일 로봇과 2개의 링크 구조의 베이스가 고정된 로봇 간의 상호 힘제어에 대하여 동역학을 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 두 대의 밸런싱 모바일 로봇을 이용하여 상호간의 힘 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 자세의 균형을 제어하기 위하여 PD 제어를 사용하였으며 위치 및 힘 제어는 하이브리드 제어 알고리즘을 적용하였다.

1. 서 론

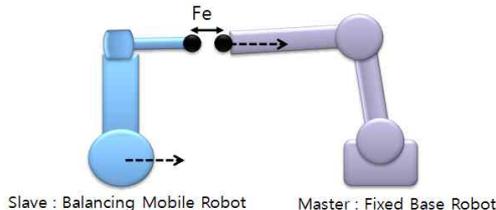
최근 두 바퀴로 구동되는 로봇에 대한 관심이 커지고 있으며, 다양한 형태의 로봇이 출시되고 있다. 특히 사람을 태울 수 있는 차량용 로봇에의 응용이 대표적이다. 세그웨이는 두 바퀴로 구동하는 이동용 로봇으로 널리 알려져 있다 [1]. 이러한 두 바퀴 구동용 로봇에 대한 관심이 커지면서 이동용으로 뿐만 아니라 작업용으로 사용가능성에 대한 연구가 시작되었다. 예컨대, 두 바퀴 구동 이동로봇과 인간과의 상호작용이나 두 바퀴 구동용 로봇 간의 상호작용과 같은 연구가 대두하기 시작했다[1,2].

본 논문에서는 두 바퀴로 구동되는 이동 로봇의 동역학을 유도하고 이를 이용하여 자세 제어, 위치 제어 및 힘 제어 알고리즘에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 밸런싱 모바일 로봇과 2 링크 구조 로봇의 경우와 두 대의 밸런싱 모바일 로봇의 경우로 나누어 상호간의 힘 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 밸런싱 모바일 로봇의 자세 제어에는 PD 제어를 사용하였으며 위치 및 힘 제어는 하이브리드 제어 알고리즘을 적용하였다.

2. 밸런싱 모바일 로봇을 이용한 힘 제어

2.1 밸런싱 모바일 로봇과 2축 고정형 로봇의 힘 제어

그림1은 밸런싱 모바일 로봇(slave)과 베이스가 고정된 2축 로봇(master)을 이용한 힘 추종 제어를 위한 시스템을 나타낸다. Master robot과 Slave robot은 서로 일정 힘을 유지하며 맞닿고 있는 상태에서 Master robot의 x 축 방향으로 발생하는 힘의 변화에 대하여 Slave Robot 은 자세와 위치를 변경하여 일정 힘을 추종하게 된다.



〈그림1〉 밸런싱 이동 로봇과 2축 로봇의 힘 제어

2축 로봇의 동역학 식은 다음과 같이 표현된다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

위 식에서 $D(q) \in R^{2 \times 2}$ 은 관성행렬, $C(q, \dot{q}) \in R^{2 \times 1}$ 는 콜리오리스와 원심력, $G \in R^{2 \times 1}$ 는 중력행렬이다.

밸런싱 이동로봇의 동역학은 위치에너지와 운동에너지의 관계에 의한 Lagrangian 방식에 의해 구할 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G = E\tau + A(q)^T\lambda \quad (2)$$

위 식에서 $M(q) \in R^{6 \times 6}$ 은 관성행렬, $H(q, \dot{q}) \in R^{6 \times 1}$ 는 콜리오리스와 and centrifugal force, $G \in R^{6 \times 1}$ 는 중력행렬, $E\tau \in R^{6 \times 2}$ 는 control torque, $A(q)$ 는 로봇의 제약 행렬, 그리고 λ 는 Lagrange multiplier 이다.

$$A(q) = \begin{bmatrix} \sin \phi_m - \cos \phi_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \phi_m & \sin \phi_m & L/2 & 0 & -r_w & 0 \\ \cos \phi_m & \sin \phi_m & -L/2 & 0 & -r_w & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

한편 $A(q)$ 와 $A(q)S(q)=0$ 이 만족하는 즉 null space 관계인 행렬을 $S(q)$ 라 하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos \phi_m & 0 & 0 \\ \sin \phi_m & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{r_w} & \frac{L}{2r_w} & 0 \\ \frac{1}{r_w} & -\frac{L}{2r_w} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

만약 \dot{q} 이 null space에서 항상 존재하고, 새로운 속도벡터를 $v = [v_m, \phi_m, \psi]^T$ 라 하면 다음과 같이 식이 존재하게 된다.

$$\dot{q} = S(q)v \quad (5)$$

$$\ddot{q} = \dot{S}(q)v + S(q)\dot{v} \quad (6)$$

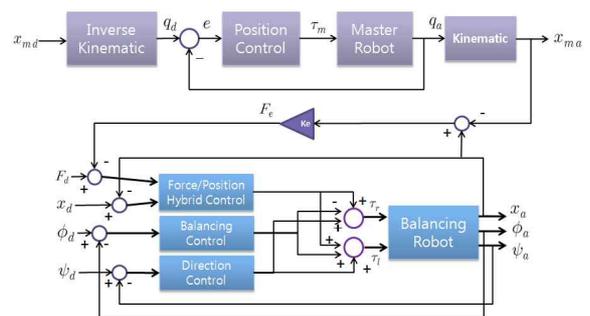
앞의 식 (2)에 $S(q)^T$ 를 곱하고 식(5),식(6)를 대입하면 다음과 같은 식이 성립되게 된다.

$$\hat{M}\dot{v} + \hat{H}(v, v) + \hat{G} = \hat{E}\tau \quad (7)$$

여기에서, $\hat{M} = S(q)^T M(q) S(q)$, $\hat{H} = S(q)^T [M(q)\dot{S}(q)v + H(q, \dot{q})]$, $\hat{G} = S(q)^T G$, $\hat{E} = S(q)^T E$ 이다.

위에서 구한 동역학 식을 이용하여 PD제어로 로봇을 제어하였다. 2링크 구조를 갖는 로봇은 원하는 위치로 이동하기 위해 역기구학을 이용해 각 조인트의 각도로 변환해주었으며 제어기는 실질적으로 변환된 조인트의 각을 제어하였다. 제어의 결과로 출력되는 각 조인트의 각도를 순기구학을 이용해 다시 현재 위치 값으로 변환한다.

밸런싱 로봇인 Slave robot은 각도 밸런싱 제어에 PD제어기, 이동로봇의 헤딩각 제어에 PID제어기를 사용하였다. 힘 추종을 위해 하이브리드 힘 제어 알고리즘을 적용하였다. 하이브리드 힘 제어에서 로봇의 위치 제어를 하는 경우에는 PD 제어기를 적용하였으며 힘 제어기는 PID 방식을 사용하였다. 그림2는 밸런싱 이동 로봇과 베이스 고정형 2축 로봇의 힘 추종 제어를 위해 본 연구에서 사용된 제어 알고리즘의 블록도이다.



〈그림2〉 밸런싱 이동 로봇과 이축로봇과의 힘 제어블록도

2축 로봇을 제어하기 위해 적용된 제어법칙은 다음과 같다.

$$\text{PD control law : } \tau_M = K_p(q_d - q) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) \quad (8)$$

$q_d (n \times 1)$ 는 지시된 기준 경로이고, K_D 와 K_P 는 $n \times n$ 제어기 이득이다. 위 식(8)를 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$\tau = K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q) = D\ddot{q} + C\dot{q} + G \quad (9)$$

위 식(3)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\ddot{q} = D^{-1}(K_p e + K_d \dot{e} - C\dot{q} - G) \quad (10)$$

여기에서 $e = q_d - q, \dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$

힘 제어를 포함하는 밸런싱 로봇의 제어 법칙을 정리하면 다음과 같다.

$$\tau = \tau_h + \tau_\psi + \tau_\phi \quad (11)$$

τ_h : Hybrid force control input
 τ_ψ : Heading angle control input
 τ_ϕ : Angle control input

$$\tau_\phi = k_{\phi p}(\phi_d - \phi_a) + k_{\phi d}(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}_a) + k_{\phi i} \int (\phi_d - \phi_a)$$

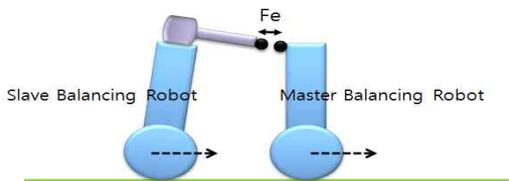
$$\tau_\psi = k_{\psi p}(\psi_d - \psi_a) + k_{\psi d}(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}_a)$$

$$\tau_h = \begin{cases} k_p(x_d - x) + k_d(\dot{x}_d - \dot{x}) & \text{Position} \\ k_p e_f + k_i \int e_f + k_d \dot{e}_f & \text{Force} \end{cases}$$

x_d : Desired position, x : actual position
 ϕ_d : desired Heading angle, ϕ_a : actual Heading angle
 ψ_d : desired angle, ψ_a : actual angle

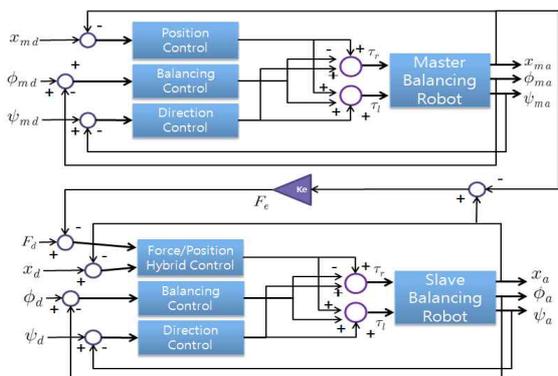
2.2 두 대의 밸런싱 모바일 로봇을 이용한 힘 제어

그림3은 두 대의 밸런싱 모바일 로봇을 이용한 힘 제어를 수행하기 위한 시스템을 나타낸다. Master robot과 Slave robot은 서로 일정 힘을 유지하며 맞닿고 있는 상태에서 Master robot이 밸런싱 제어를 통해 균형을 유지하며 x축 방향으로 이동하게 되면 Slave Robot은 두 로봇 사이에 발생하는 힘의 변화에 대응하기 위하여 Master Robot이 움직이는 방향으로 추종하게 된다.



<그림3> 밸런싱 이동 로봇 두 대를 이용한 힘 제어

그림 4는 밸런싱 이동 로봇 두 대를 이용한 힘 제어 블록도이다.



<그림4> 밸런싱 이동 로봇 두 대를 이용한 힘 제어 블록도

Master robot이 밸런싱 모바일 로봇이므로 제어는 2축 로봇과는 달리 다음과 같이 각도제어에 PD제어기, 이동 로봇의 헤딩각 제어와 위치 제어에 각각 PID제어기를 이용하였다. 제어 법칙을 정리하면 다음과 같다.

$$\tau = \tau_p + \tau_\phi + \tau_\psi \quad (12)$$

τ_p : Position control input
 τ_ψ : Heading \angle control input
 τ_ϕ : \angle control input

$$\tau_h = k_p(x_d - x) + k_d(\dot{x}_d - \dot{x})$$

$$\tau_\phi = k_{\phi p}(\phi_d - \phi_a) + k_{\phi d}(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}_a) + k_{\phi i} \int (\phi_d - \phi_a)$$

$$\tau_\psi = k_{\psi p}(\psi_d - \psi_a) + k_{\psi d}(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}_a)$$

x_d : Desired position, x : actual position
 ϕ_d : desired Heading angle, ϕ_a : actual Heading angle
 ψ_d : desired angle, ψ_a : actual angle

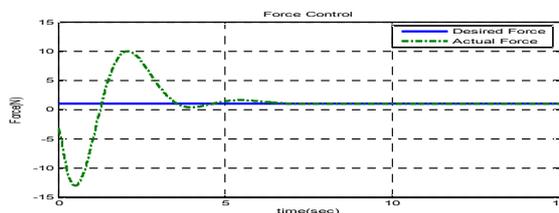
Slave Robot의 제어 법칙은 식(11)과 동일하다.

3. 시뮬레이션 결과

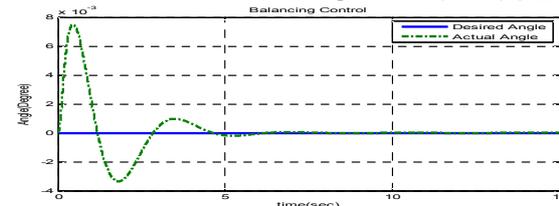
3.1 밸런싱 모바일 로봇과 2축 고정형 로봇의 힘 제어 결과

그림5와 그림6은 Sampling time은 0.001sec, master robot의 경로는

0.05(m) * time, Slave robot의 desired Force를 1N으로 설정하고 Master robot의 움직임에 의해 발생하는 힘을 추종하는 시뮬레이션의 결과를 나타낸 것이다. 처음에 균형을 유지하기 위해 불안정한 부분에서는 힘의 값도 불안정하나 시스템이 안정화되면서 원하는 힘의 값으로 추종하고 있음을 확인할 수 있다.



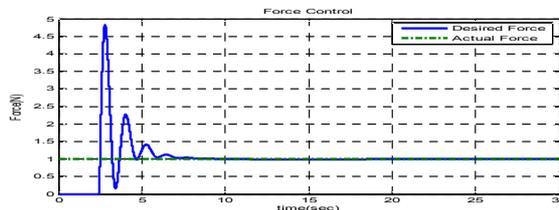
<그림5> Slave Robot(Balancing Robot)의 힘 제어 결과



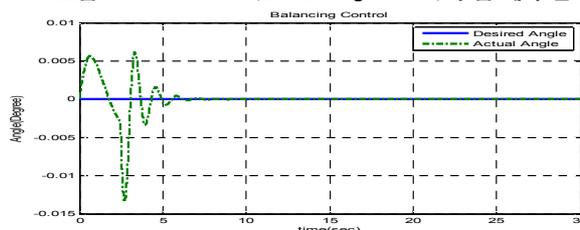
<그림6> Slave Robot(Balancing Robot)의 밸런싱 제어 결과

3.2 두 밸런싱 로봇 간의 힘 추종 제어 결과

그림7과 그림8은 Sampling time은 0.001 sec, master robot의 경로는 0.01 * time, Slave robot의 desired Force를 1(N)으로 설정된 상태에서 Master robot의 움직임에 의해 발생하는 힘을 추종하는 시뮬레이션의 결과를 나타낸다. 2축 로봇에 비해 움직임이 많기 때문에 Slave robot의 힘 제어 결과나 균형 제어의 결과 모두 오차가 크고 수렴 시간이 긴 차이가 있으나 원하는 힘으로 추종함과 동시에 균형을 제어하는 모습을 확인할 수 있다.



<그림7> Slave robot(Balancing Robot)의 힘 제어 결과



<그림8> Slave robot(Balancing Robot)의 밸런싱 제어 결과

4. 결 론

본 논문에서는 두 바퀴로 구동되는 밸런싱 모바일 이동 로봇의 힘 제어를 위하여 밸런싱 모바일 로봇과 2축 로봇의 경우, 두 대의 밸런싱 모바일 로봇의 경우에 대한 하이브리드 힘 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 힘의 변화가 일어나는 순간에만 불안정한 모습을 보였으나 두 가지 경우 모두 원하는 힘의 값으로 수렴하는 것을 확인하였다. 위치제어 뿐만 아니라 자세를 제어해야하는 시스템의 특이성을 갖고 있는 밸런싱 로봇에도 기존의 힘 제어 알고리즘이 적용 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 지식 경제부 융복합형 로봇인력양성 서비스로봇용 자율지능형 매니퓰레이션 센터(AIM)의 연구(NIPA-2012-H1502-12-1002)지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] S. J. Lee and S. Jung, "Experimental studies of balancing control of a two-wheel mobile robot for human interaction by angle modification", The Journal of Korea Robotics Society, pp. 67-74, 2013
 [2] S. J. Lee and S. Jung "Object handling control among two-wheel robots and a human operator 'an empirical approach", INTERNATIONAL JOURNAL OF CONTROL AUTOMATION AND SYSTEMS, pp. 346-353, 2013