

힘 반향 기법을 이용한 전방향 이동 로봇의 원격 제어

Teleoperation Control of Omni-directional Mobile Robot with Force Feedback

이정형*, 이형직*, 정슬*

Jeong Hyeong Lee, Hyung Jik Lee, and Seul Jung

Abstract - This paper presents the implementation of teleoperation control of an omni-direction mobile robot. The master joystick robot has two degrees of freedom to control the movement of the slave mobile robot in the Cartesian space. In addition, the whole teleoperated control system is closed by the force feedback. The operator can feel the contact force as the slave robot makes contact with the environment. Experimental results show that the teleoperated control with force feedback has been successfully implemented.

Key Words Teleoperation, Force Feedback, Omni-directional Mobile Robot, Force reflection joystick

1장. 서론

로봇 시스템에 있어, 원격제어는 조작자가 작업하기 힘든 환경에서 로봇이 주어진 임무를 수행하기 위해 필요한 기술이다. 기존의 원격제어 방식은 비전 센서 등에 의해 로봇으로부터 전송된 주변 환경의 데이터, 즉 시각적인 정보에만 의존하여 조작자가 로봇을 제어하는 방식이 주를 이루었다. 하지만, 이러한 시각적인 정보에만 의존한다면, 물체와의 접촉에 의해 특정한 일을 수행하는 경우에 정밀성이 떨어지게 된다. 따라서, 최근에는 원격제어를 수행함에 있어 접촉힘을 고려하여 좀 더 정밀한 제어를 구현하는 힘반향 제어를 적용하고 있다. 힘 반향 기법은 초음파 센서나 힘 센서 등을 이용하여 물체와의 거리 혹은, 접촉 정도를 조작자가 조작하는 조이스틱에 전달하여 조작자로 하여금 로봇의 작업 환경을 느낄 수 있도록 가상의 환경을 제공함으로써, 더욱 정밀한 제어를 가능하게 해주는 방법이다.

최근에는 이러한 힘 반향 제어 기법을 우주 로봇이나 멀리 떨어진 곳에 있는 시스템과의 원격으로 확장하고, 그에 따른 통신 지연 시간을 보충하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다.^{[1]-[2]}

본 논문에서는 표준 플랫폼 기반의 이동 로봇 대신, 몸체 자체의 회전 없이도 360° 이동이 가능한 옴니 플랫폼 기반의 이동 로봇을 제작하였으며, 자체 제작한 힘 반향 조이스틱을 이용하여 이동 로봇의 움직임을 제어하였다.

본 논문은 통신 지연 시간을 고려하지 않은 상태에서 두 가지의 간단한 힘 반향 제어 알고리즘을 사용하고, 힘 반향 조이스틱을 통한 로봇과 물체의 접촉 인지 및 일정한 접촉힘

(Contact force) 유지 실험을 통해 두 알고리즘을 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 제작한 전방향 이동 로봇의 구동 관련 메커니즘 및 힘 반향 조이스틱과 전방향 이동 로봇의 좌표 설정에 대해 설명한다. 전체 시스템 구성과 사용된 알고리즘은 2장의 후반부에서 설명된다. 3장은 로봇과 물체의 접촉 인지 및 일정한 접촉힘 유지 실험에 대해 설명한다.

2장. 본론

2.1 전 방향 이동 로봇의 기구학 해석

그림 1은 본 논문에서 사용하는 모바일 로봇의 실제 바퀴 배치 형태이며, 이를 바탕으로 모바일 로봇과 각 바퀴들 간의 속도 관계를 기구학식 해석을 통해 유도하였다^[4].

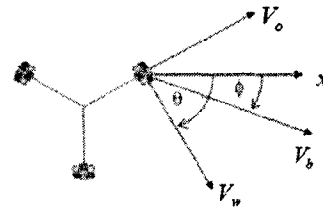


그림 1. Analysis of omni-wheel

그림2에서, 바퀴 축 선속도 V_w 와 물리 축 선속도 V_o 가 항상 수직이므로, 바퀴와 모바일 로봇의 속도 관계식은 (1)처럼 나타낼 수 있다.

$$V_w = V_o (\cos \theta \cos \phi + \sin \theta \sin \phi) \quad (1)$$

여기에, 모바일 로봇의 무게중심에서 각 바퀴까지의 거리를 R , 로봇의 회전 각도를 ψ 라 할 때, 식(1)에 모바일 로봇의 각속도를 추가시키게 되면, 바퀴와 모바일 로봇의 완전한 속도 관계식이 (2)와 같이 나오게 된다.

* 이정형, 이형직, 정슬 : BK21 메카트로닉스 그룹, 忠南大學 메카트로닉스 工學科, 지능 시스템 및 감성 공학 실험실

$$V_w = V_b(\cos \theta \cos \phi + \sin \theta \sin \phi) + R\dot{\psi} \quad (2)$$

즉, 로봇이 회전하지 않는 상태는 $\dot{\psi}$ 이 0인 상태가 되어 식(1)에 의해 속도가 조절되므로 회전 없이 원하는 각도로 방향 전환이 가능한 것이다. 식(2)를 각 바퀴에 대한 식으로 나타내면, (3)과 같이 각 바퀴와 모바일 로봇의 각속도가 포함된 속도 관계식을 유도해낼 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} (\text{Wheel1} : 0^\circ) \quad V_{w1} &= V_b \cos \phi + R\dot{\psi} \\ (\text{Wheel2} : 120^\circ) \quad V_{w2} &= V_b \left(-\frac{1}{2} \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \phi\right) + R\dot{\psi} \\ (\text{Wheel3} : 240^\circ) \quad V_{w3} &= V_b \left(-\frac{1}{2} \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \phi\right) + R\dot{\psi} \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 힘 반향 조이스틱

본 논문에서 제작한 힘 반향 조이스틱은 조이스틱의 조작 방향과 전 방향 이동 로봇의 이동 방향을 일치시키기 위해 그림 2와 같이 전진 방향을 0° , 후진 방향을 180° 로 채택하는 방식의 직교 좌표를 설정하였으며, X축, Y축에 대한 좌표 값은 각각의 축에 고정된 엔코더를 이용하였다.

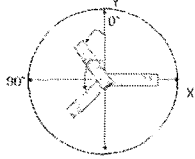


그림 2. 힘 반향 조이스틱의 좌표 설정

조이스틱으로부터 이동 로봇에 전달되는 속도 V_m 과 이동 로봇의 진행 방향에 대한 각도 θ_m 은 (4)와 같이 극좌표 공식을 이용하여 간단하게 계산된다.

$$\begin{aligned} V_m &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta_m &= \tan^{-1}(y/x) \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 좌표 변환

그림 3의 좌측은 조이스틱에서 사용하는 직교 좌표계이고, 우측은 전 방향 이동 로봇에서 사용하는 직교 좌표계를 나타내는 것으로, 조이스틱과 이동 로봇 좌표의 (+)방향이 서로 반대가 됨을 알 수 있다. 따라서, 두 시스템을 호환시키기 위해서는 별도의 좌표 변환이 필요하게 된다.

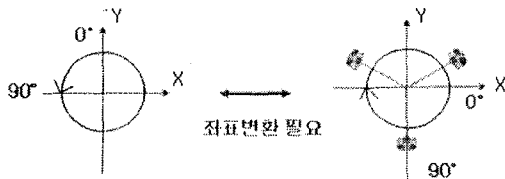


그림 3. 조이스틱과 모바일 로봇의 좌표계

두 시스템에서 사용하는 좌표는 270° 차이를 두고 서로 반대 방향으로 진행되므로 (5)와 같은 좌표 변환 식을 유도해 낼 수 있다.

$$D_m = 1.5\pi - D_j \quad (5)$$

여기서, D_m 은 이동 로봇의 이동 방향이고, D_j 는 조이스

틱의 각도를 나타내며, 단위는 라디안[radian]을 사용한다. 이러한 좌표변환은 힘 반향 조이스틱의 위치와 전방향 이동 로봇의 속도 및 이동 방향을 일치시킴으로써, 조이스틱을 조작하는 조작자의 편의를 도모할 수 있으며, 조이스틱의 위치와 이동 로봇 움직임의 불일치로 인한 조작 실수를 방지할 수 있다.

2.4 제어 알고리즘

조이스틱에 반향되는 힘(force reflection)의 계산은 다음과 같은 두 가지 방식을 고려하였다.

$$\begin{aligned} (a) \quad F_r &= F_s \times K_p' \\ (b) \quad F_r &= F_j + F_f \\ &= P_j \times K_p + F_s \times K_p' \end{aligned}$$

(a)는 로봇과 물체의 접촉시 감지되는 force 센서의 값을 그대로 조이스틱에 가해지는 힘으로 주는 것이고, 두 번째는 조이스틱의 이동량을 힘으로 환산하여 감지된 force 센서의 값과 합하여 조이스틱에 대한 반향 힘으로 전달되도록 하는 방식이다. 즉, 조이스틱으로부터 전달되는 이동 로봇의 속도가 클수록 이동로봇과 물체의 접촉시 조이스틱에 반향 되는 힘이 증가하게 되어 조작자가 물체와의 접촉 정도를 보다 잘 느낄 수 있도록 반향 힘의 계산 방식을 수정하였다. 수정된 반향 힘 계산 알고리즘은 그림 4와 같다.

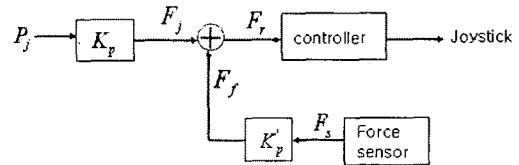


그림 4. 수정된 반향 힘의 계산 알고리즘

여기서, P_j 는 조이스틱이 y축 방향으로 이동한 양으로, 이동 로봇의 속도가 된다. K_p 는 조이스틱의 이동량 P_j 를 힘으로 환산하기 위한 상수값이고, 이 두 변수들의 곱으로 조이스틱의 움직임에 관련되어 발생하는 반향 힘 F_j 가 생성된다. K_p' 은 로봇과 물체의 접촉시 발생하는 힘 센서(force sensor) 값 F_s 와 곱해져, 본 시스템에 적절한 범위의 힘을 가질 수 있도록 하는 상수값이다. 이렇게 생성된 F_j 와 F_f 의 합에 의해 조이스틱에 반향되는 전체 힘 F_r 이 생성되어 조작자에게 전달되는 것이다.

2.5 전체 시스템 구성

본 논문에서 구성한 시스템은 그림 5와 같다.

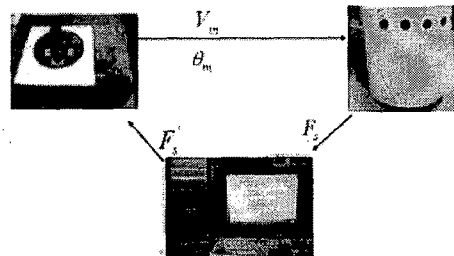


그림 5. 전체 시스템 구성

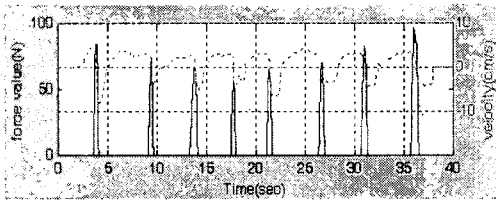
힘 반향 조이스틱으로부터 계산된 전 방향 이동 로봇의 이동 속도 V_m 과 각도 θ_m 은, 블루투스 통신에 의해 무선으로 이동 로봇으로 전달되어 이동 로봇을 구동하게 되고, 구동시 발생하는 힘 센서(Force sensor)값은 시리얼 통신을 통해 호스트 컴퓨터로 전송되어 계산된다. 이 값은 다시 힘 반향 조이스틱으로 전송되어 새로운 V_m 과 θ_m 을 구성하는 반향 힘으로 작용하여 모바일 로봇을 제어하게 되는 것이다.

3장. 실험 및 결론

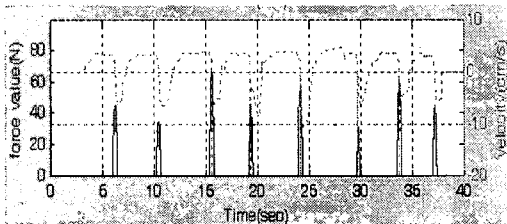
3.1 실험

본 논문에서는 다음의 두 가지 실험을 통해, 직접 제작한 힘 반향 조이스틱과 전 방향 이동 로봇 간 원격 제어성을 테스트했으며, 앞서 언급한 알고리즘의 적용성을 검증하였다. 첫 번째 실험은 모바일 로봇과 물체의 접촉을 조작자가 인지하자마자 모바일 로봇을 뒤로 이동시키는 반응성을 테스트한 실험이고, 두 번째는 모바일 로봇과 물체의 접촉을 조작자가 인지한 후, 일정한 힘을 유지하면서 물체와의 접촉을 유지하는 실험이다.

그림 6의 (a)는 첫 번째 방식과 같이 force sensor만을 조이스틱에 반향되는 힘에 고려한 경우의 실험 결과이며, (b)는 첫 번째 방식을 수정한 형태로, 조이스틱의 이동량과 force sensor값을 조합하여 조이스틱의 반향 힘으로 사용한 경우의 실험 결과이다. 이 실험에서는 K_f 값을 1로 주었으며, K_v 은 0.2로 설정하였다. 그래프의 실선은 힘 센서의 변화량을, 점선은 이동 로봇의 속도값을 나타낸다.



(a)



(b)

그림 6. 물체 접촉시 반응성 실험. (a) 힘 센서만을 고려한 경우, (b) 로봇 속도와 힘 센서를 동시에 고려한 경우

실험 결과는 force sensor만을 이용한 경우보다 조이스틱 이동량, 즉 전방향 이동 로봇의 현재 속도와 force sensor를 모두 조이스틱의 반향 힘으로 고려했을 경우에, 접촉시 발생하는 force sensor의 평균값 및 조작자의 반응성에 있어서 더욱 향상된 결과를 보여주었다. 즉, 수정된 알고리즘의 사용으로 인해, 전 방향 이동 로봇과 물체와의 접촉시 발생하는 force sensor의 평균값이 약 50N으로 줄어들었으며, 이는 순

간적인 접촉 감지시 조작자의 반응성 또한 빨라졌음을 나타낸다.

그림 7은 물체 접촉시 어느 일정 수준의 힘을 유지하도록 한 실험으로써, 두 번째 알고리즘만을 테스트한 결과를 보여준다.

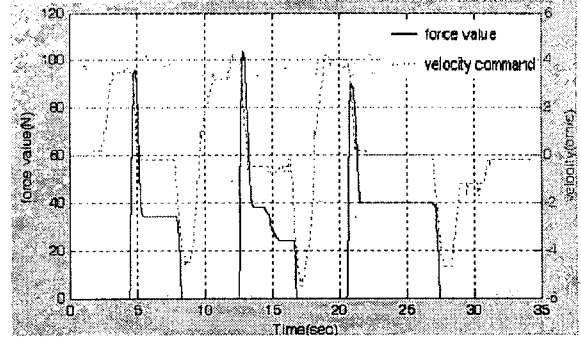


그림 7. 물체 접촉 유지 실험

이 실험의 목적은 앞선 실험과는 달리, 조작자가 물체 접촉을 감지하게 되면, 어느 정도의 접촉 상태를 유지하고 있도록 하는데 있다. 실험 결과는 그림7과 같이 물체 접촉시 조작자가 약 40N의 힘을 유지하면서 이동 로봇을 제어하고 있음을 보여준다.

3.2 결론

본 논문에서는 자체 제작한 힘 반향 조이스틱과 전 방향 이동 로봇을 이용하여 원격 제어를 수행하였으며, 두 가지 제어 알고리즘을 비교하여 두 번째 알고리즘의 성능을 실험으로 입증하였다. 즉, 힘 센서 값만을 피드백 받아서 제어하는 경우보다는 모바일 로봇의 현재 속도를 조이스틱에 반영되는 힘에 추가하는 것이 물체 접촉시 조작자의 반응성을 빠르게 하며, 모바일 로봇을 더욱 안정성 있게 제어할 수 있게 한다.

본 논문에서는 원거리 통신시 생기는 Time delay를 제어 알고리즘에 고려하지 않았지만, 앞으로 연구하고 해결해야 할 문제이다. 또한, 현재 사용 중인 제어 알고리즘보다 좀 더 효율적인 제어 알고리즘의 개발이 필요하다.

참고 문헌

- [1] Masahiro Nohmi, Thomas Bock, "Contact Task by Force Feedback Teleoperation Under Communication Time Delay" International Conference on Robotics and Biomimetics, 2006 IEEE(Dec.17-20)
- [2] Oscar Martinez-Palafox, Dongjun Lee, Mark W.Spon, Lopez, C.T.Abdallah, "Bilateral Teleoperation of Mobile Robot over Delayed Communication Network:Implementation", International Conference on Intelligent Robots and System, 2006 IEEE/RSJ(Oct.9-15)
- [3] Olaf Diegel, Aparna Badve, Glen Bright, Johan Potgieter, Sylvester Tlale, "Improved Mecanum Wheel Design for Omni-direction Robots", 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation(Nov.27-29)
- [4] Mark Ashmore, Nick Barnes, "Omni-drive Robot Motion on Curved Paths: The fastest Path between Two Points is not a Straight-Line"