# 단일 홀센서 힘반영 조이스틱을 이용한 모바일 로봇 원격제어

# Tele-operation of a Mobile Robot Using Force Reflection Joystick with Single Hall Sensor

## 이 장 명<sup>†</sup>, 전 찬 성<sup>1</sup>, 조 승 근<sup>2</sup>

Jang myung Lee<sup> $\dagger$ </sup>, Chan sung Jeon<sup>1</sup>, Seung keun Cho<sup>2</sup>

Abstract Though the final goal of mobile robot navigation is to be autonomous, operators' intelligent and skillful decisions are necessary when there are many scattered obstacles. There are several limitations even in the camera-based tele-operation of a mobile robot, which is very popular for the mobile robot navigation. For examples, shadowed and curved areas cannot be viewed using a narrow view-angle camera, especially in bad weather such as on snowy or rainy days. Therefore, it is necessary to have other sensory information for reliable tele-operations. In this paper, sixteen ultrasonic sensors are attached around a mobile robot in a ring pattern to measure the distances to obstacles. A collision vector is introduced in this paper as a new tool for obstacle avoidance, which is defined as a normal vector from an obstacle to the mobile robot. Based on this collision vector, a virtual reflection force is generated to avoid the obstacles and then the reflection force is transferred to an operator who is holding a joystick to control the mobile robot. Relying on the reflection force, the operator can control the mobile robot more smoothly and safely. For this bi-directional tele-operation, a master joystick system using a hall sensor was designed to resolve the existence of nonlinear sections, which are usual for a general joystick with two motors and potentiometers. Finally, the efficiency of a force reflection joystick is verified through the comparison of two vision-based tele-operation experiments, with and without force reflection.

Keywords: Force Feedback, Hall Sensor, Potentiometer, Tele-operation, Collision Vector

#### 1.서론

수년 전까지 로봇은 주로 공장에서 사용되는 산업용 로봇으로 그 의미를 가졌다. 하지만, 로봇의 활용성이 점차 중대되면서, 또 센서와 컴퓨터의 발달로 인해 로봇 이라는 말이 나타내는 기술개념은 현시점에서 계속 변 화 확대되어 가고 있다. 기존 산업계에서 실용화 되고 있는 대부분의 모바일 로봇은 자계 센서나 적외선 센서 를 이용하여 작업장 바닥의 유도선 또는 광학 테이프 등으로 이루어진 고정 궤도를 따라서 움직이고 있다. 이러한 방식의 모바일 로봇은 항상 고정 궤도를 감지 하면서 주행하므로 지시된 경로를 정확히 주행할 수 있 다는 장점이 있다. 하지만 서비스 로봇, 탐사 로봇, 청소 로봇 등의 작업환경에는 고정궤도의 설치가 불가능하므 로 작업환경에 보다 높은 유연성을 가진 모바일 로봇의 주행 알고리즘 개발이 요구되어 많은 연구가 진행되고 있으나<sup>[1, 2, 3]</sup>, 위험상황 및 돌발 상황을 인지하여 대처하 는 능력에 있어서는 한계를 보이고 있다. 그 결과, 고도 의 지능적 판단이 요구되는 작업에서는 여전히 사람이 로봇을 직접 제어하여, 사람의 의도에 따라 로봇이 동작 하도록 하는 원격제어시스템을 사용하고 있다.

기존의 원격제어를 이용한 모바일 로봇 시스템에서는 조작자(Master)가 주로 카메라에 의존하여 슬레이브 (Slave) 로봇을 제어하고 있으므로 카메라의 좁은 시야 와 기상의 악화로 인해 많은 문제점들이 야기되고 있다. 따라서 영상 정보와 더불어 조작자의 작업환경에 대한

<sup>※</sup> 이 논문은 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업 (차세대 물류IT기술연구사업단)의 지원에 의하여 연구되었음.

<sup>\*</sup>교신저자:부산대학교 전자공학과 정교수(jmlee@pusan.ac.kr)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 부산대학교 전자공학과 석사과정(csjeon@pusan.ac.kr)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 부산대학교 전자공학과 석사과정(rlrkcka@hotmail.com)

물리적 정보가 조작자에게 제공된다면 어떤 상황에서도 강인하게 제어할 수 있을 것이다<sup>[4]</sup>.

본 연구에서는 조작자의 명령을 추종하는 슬레이브 로봇에 조이스틱을 통해 명령을 전달함과 동시에 슬레 이브 로봇에서 조작자로 환경정보를 피드백 해주는 양 방향 원격제어 시스템(bi-directional motion control system) 에 대해 제안한다. 모바일 로봇과 주위 물체와 의 관계를 모델링하고 장애물로부터의 충돌벡터를 검출 하여 가상의 척력을 발생시켜 이를 마스터 측으로 피드 백 시켜서 2자유도의 조이스틱에 의해 힘을 느끼게 하 는 양방향 제어시스템의 효율성을 높이는 것이다[5]. 특 히 전자 조이스틱의 위치 측정을 위하여 두개의 potentiometer 대신에 단일 hall sensor를 이용한다. 이를 통하여 접촉식 조이스틱의 문제점인 트랙마모에 의한 성능저하 문제를 해결하며, 기존의 dual 구조 전자조이 스틱을 사용할 때 나타나는 비선형성 문제와 기구적 설 계의 상대적 복잡성을 해결하였다.

2절에서는 단일 홀센서 조이스틱의 구조를 설명하며, 3절에서는 전체적인 원격제어시스템에 대해 기술하며, 4 절에서는 본 논문에서 제시한 충돌벡터와 가상 임피던 스 알고리즘에 대해 설명한다. 그리고 5절에서 모바일 로봇의 자율주행 및 원격제어 실험을 통해 제안한 알고 리즘의 효율성을 보여주며, 6절에서 결론을 맺는다.

#### 2. 단일 hall sensor 조이스틱

기존의 dual 구조 조이스틱의 비선형성 문제와 트랙 마모 현상을 보완하기 위해 본 논문에서는 모바일 로봇 의 원격제어를 위해 단일 hall sensor를 이용한 비접촉식 전자 조이스틱을 제안한다<sup>16</sup>.



그림 1. 조이스틱의 기구구조

단일 홀센서를 이용한 조이스틱의 기구학적 모델은 그림 1과 같다. 그림 1에서 영구자석의 자력선 방향은 조이스틱의 회전중심을 향하게 된다. 영구자석이 θ°만 큼 기울어 졌을 때 자기감응 세기 B의 수평벡터 *B*<sub>h</sub>는 hall sensor에 의하여 감지되고 X 및 Y축 방향에서 *B*<sub>x</sub> 및 *B*<sub>y</sub>성분으로 분해될 수 있다.

Hall sensor는 이 두 성분에 대응하여 위상차가 90° 인 전압신호를 출력하게 된다. 자계의 세기 B와 측정되 는 수평 자기장 *B*<sub>h</sub>의 관계를 다음 식으로 표현한다.

$$B_{h} = \lambda\left(\theta\right) B \sin\left(\theta\right) \tag{1}$$

이 식에는 영구자석 자력선의 분포특성에 의하여  $\lambda(\theta)$ 라는 비선형성분이 존재하게 된다. 만약 자력선의 방향이 조이스틱 봉의 방향과 평행되면  $\lambda(\theta) = 1$ 을 만족하게 될 것이다. 그러나 회전각  $\theta$ 의 증가에 따라 수 평 자기장  $B_h$ 는 선형으로 증가하는 것이 아니라 특정한 회전범위를 초과하면 오히려 감소하게 된다.

이를 보상하기 위하여 비선형 함수  $\lambda(\theta)$ 를 회전각  $\theta^2$ 에 대한 함수로 다음과 같이 정의하다.

$$\lambda\left(\theta\right) = \frac{1}{1+k\theta^2} \tag{2}$$

여기서 *k*는 조이스틱 기구 및 영구자석의 기하학적 특 징, 자기감응 세기와 관련되는 고유상수 값이다. Hall sensor의 출력 전압은 수평 자기장의 세기와 선형관계를 가지므로 X축 및 Y축 각각으로의 자계의 세기는 다음 과 같이 표시된다.

 $V_{x} = PB_{h}\cos\left(\alpha\right) = P\lambda\left(\theta\right)B\sin\left(\theta\right)\cos\left(\alpha\right)$ (3-a)

$$V_{y} = PB_{h}sin(\alpha) = P\lambda(\theta)Bsin(\theta)sin(\alpha)$$
(3-b)

여기서 P는 비례상수 값을 나타낸다.

Hall sensor의 출력전압은 A/D변환을 통하여 프로세 서 내부에서 처리되므로 (3)식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$AD_{x} = \zeta \times \frac{\sin\left(\theta\right)}{1 + k\theta^{2}} \times \cos\left(\alpha\right)$$
(4-a)

$$AD_{y} = \zeta \times \frac{\sin\left(\theta\right)}{1 + k\theta^{2}} \times \sin\left(\alpha\right)$$
(4-b)

여기서 (는 sensor 출력에 대한 신호변환 회로의 증 폭계수와 관련되는 상수 값이 된다. (2)식과 (4)식에서 상수 k와 ζ는 조이스틱 시스템의 고유특성을 나타내므 로 설계사양이 변경되면 k와 ζ도 따라서 변경된다.





(c) 조이스틱 기구부 그림 2. 마스터 조이스틱 시스템

조이스틱의 기구부 및 제어부의 모습은 그림 2와 같 다. 조이스틱에 사용된 영구자석은 Alnico 재질이며 자 계의 세기는 1800~2000 Gauss이다. 그리고 hall sensor 는 스위스 Sentron 회사의 2SA-10을 사용하여 실험하였 다[7]. 영구자석과 hall sensor까지의 수직거리는 13 mm 이며, 영구자석을 포함한 봉의 길이는 31 mm이다. 그리 고 potentiometer는 100KΩ을 이용하였고 조이스틱의 각 축의 모터에 부착되어 있다.



그림 3. 조이스틱 블록도

그림 3은 조이스틱의 블록도를 보여주며, 조이스틱의 제어기는 PIC를 사용하여 구현되었으며, 이 제어기를 통하여 작업자에게 모바일 로봇에서 보내온 힘 정보

 $(F_x, F_y)$ 를 느끼게 하기 위해서  $(F_x, F_y)$ 에 해당하는 PWM 출력전압을 내어 각 축의 DC 모터를 구동한다. DC 모터구동을 위하여 L6203가 사용되었다.



그림 4는 dual potentiometer를 사용하였을 경우와 단 일 hall sensor를 이용하였을 경우에 대한 성능비교를 위해 각각 50회 이상의 회전운동에 대한 궤적을 나타낸 다. 그림 4(b)에서 보듯이 dual sensor 구조는 회전각과 2차원 좌표 사이의 비선형 관계로 인하여 봉의 움직임 을 정확히 나타내지 못함을 알 수 있다. 특히 각 회전축 부근에서 불감대 즉, 비선형구간이 존재함을 알 수 있 다. 반면에 단일 hall sensor 구조는 회전운동에 대한 궤 적을 깨끗한 원으로 나타냄을 확인하였다.

#### 3. 원격제어시스템

#### 3.1. 원격제어

본 논문에서 제시한 원격제어시스템은 마스터 측의 조이스틱과 슬레이브 측의 모바일 로봇, 그리고 블루투 스와 무선 영상 송수신기를 이용한 통신 part로 나뉜다 (그림 5).



그림 5. 전체 시스템 블록도

조작자가 조이스틱을 움직이면 이에 비례하여 변위가 일어나고, hall sensor 또는 potentiometer를 통해 움직인 변위를 아날로그 값으로 읽어서 제어부에서 A/D 변환 을 통해 변위에 비례하는 속도 명령을 모바일 로봇에 전달하게 된다. 모바일 로봇은 PWM전압으로 모터를 구동하여 이동하게 되며, 초음파 센서를 통해 주위 장애 물과의 거리에 해당되는 척력을 구하여 조이스틱의 모 티 드라이버에 전달함으로써 조작자는 그 힘을 느끼게 된다.

결국 모바일 로봇은 조작자에 의한 속도 명령을 추종 해 가며 장애물을 감지하여 조작자에게 장애물에 대한 정보를 전달하게 되며, 조작자는 모바일 로봇과 장애물 사이의 거리와 접근속도에 따른 힘을 피드백 받아 원격 존재감을 실현할 수 있다<sup>[8]</sup>.

#### 3.2. 슬레이브 모바일 로봇

모바일 로봇의 운동을 해석하기 위하여 그림 6과 같 이 좌표계를 설정하고 2차원 평면으로 구성된 전역좌표 계에서 모바일 로봇의 상태를 위치와 방향을 갖는 벡터  $P = [x y θ]^T$ 로 표현한다. 일반적으로 모바일 로봇의 운동은 두 제어 입력인 선형속도 u 와 각속도 ω 에 의 해 제어되는 시스템으로 모델링 된다<sup>[9]</sup>.



그림 6. Mobile robot model

선형속도 *u* 는 로봇의 중심에서의 진행방향 속도이 므로 식(5)로 나타낼 수 있으며 각속도 *w* 는 로봇의 중 심에서의 회전 각속도이므로 다음과 같이 표시된다.

$$u = \frac{1}{2} \left( v_R + v_L \right) \tag{5}$$

$$\omega = \frac{1}{L} (v_R - v_L) \tag{6}$$

입력변수 q 에 대한 전역좌표계에서의 속도 P 는 자 코비안 행렬 J(P)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{P} = J(P)\dot{q} \tag{7}$$

여기에서  $P = [\dot{x} \dot{y} \dot{\theta}]^T \in R^n$ 은 전역좌표 벡터이며  $\dot{q} = [u \omega]^T \in R^m$ 은 시스템 입력벡터로 n > m인 관계 를 만족한다. 또한,  $J(P) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0\\ \sin \theta & 0\\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 이다.

전역좌표계에서의 위치벡터 P는 식(7)을 적분하여 다음과 같이 주어진다.

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int u(\tau)\cos(\theta(\tau))d\tau \\ \int u(\tau)\sin(\theta(\tau))d\tau \\ \int \omega(\tau)d\tau \end{bmatrix}$$
(8)

이러한 기구학적 관계로부터 로봇은 매 제어주기마다 위치벡터를 계산하며,  $u \downarrow \omega$ 는 각 바퀴의 인코더 값 의 변화량으로 계산된다.

실험에 사용된 모바일 로봇은 CCD 카메라와 인코더 그리고 초음파 센서와 두개의 DC 모터로 이루어져 있 다. 모바일 로봇은 두 개의 DC 모터로 각 바퀴를 구동 시키며, 앞뒤에 두 개의 수동바퀴가 있다. 이 수동바퀴 는 완충기능을 지니고 있어 각 구동 바퀴가 노면에 뜨 는 현상을 제거하여 노면과 바퀴의 마찰력을 증대시켜 미끌림 현상을 최소화한다. 각 구동 바퀴에 사용된 모터 는 24V, 40W, 0.8A, 300rpm (10:1 감속기어), 80kgf-cm 토크 출력 특성 (SPC Inc. S8D40-24A)을 가진다. 그리 고 각 모터에 부착된 인코더를 통하여 정속제어와 모바 일 로봇의 위치계산에 사용하였다.



그림 7. 모바일 로봇의 외형

로봇의 외형은 그림 7과 같다. 초음파 센서(SRF04)가 22.5° 간격으로 16개의 링 구조로 배치되어 있으며, 센 서의 감지거리는 최소 3Cm에서 최대 3m이다. 그리고 서로간의 간섭 현상을 줄이기 위해 센서 번호순으로 한 개씩 할당된 시간에서만 동작하도록 decoder와 multiplexor를 사용하여 구현하였다. 인코더는 두 바퀴의 속 도제어를 위해 사용되며 모바일 로봇이 주행한 위치를 계산하기 위해 모바일 로봇의 기구학적 관계로부터 로 봇은 매 제어주기마다 위치벡터를 계산해 낼 수 있다. LS7166을 이용한 전용 인코더 카운터 칩을 이용하여 모바일 로봇에 장착된 360 [pulse / rev]의 인코더 신호 를 4 체배 하여 실제 1440 [pulse / rev]의 정밀도로 제 어하였다.

#### 4. 가상의 힘 복원

가상 임피던스 방법은 일반적인 임피던스 알고리즘을 이동로봇의 주행 및 충돌 회피 분야에 적용한 것이다<sup>10,</sup> <sup>11]</sup>. 그림 8과 같이 가상 임피던스 방법은 로봇과 목표점, 그리고 로봇과 장애물과의 관계를 스프링과 댐퍼로 모 델링하여, 거리 및 속도 정보에 따라 가상의 힘을 생성 시키는 방법이다.



그림 8. 가상 임피던스 방법

조종자에게 피드백 되어질 가상의 힘  $F_b$ 는 다음 식과 같이 동적 장애물과 정적 장애물에 대한 척력의 합으로 나타난다.

$$F_{b} = \{\sum_{i_{od}=0}^{n_{od}} F_{od}(s) + \sum_{i_{os}=0}^{n_{os}} F_{os}(s)\}$$
(9)

여기서  $F_{od}$ 와  $F_{os}$ 는 다음 수식에 의해 구해진다.

$$\begin{split} F_{o}(s) &= K_{s,o}(X_{s,o}(s)) + D_{s,o}(\vec{X}_{s,o}(s)) \\ &= \begin{cases} \sum_{i=0}^{n} K_{s,o}(\rho_{0} - \parallel \vec{C} \parallel) \vec{C}_{unit} - D_{s,o}(\parallel \Delta \vec{C} \parallel) \vec{C}_{unit} , when \parallel \vec{C} \parallel < \rho_{0} \\ 0 , otherwise \end{cases}$$

$$(10)$$

여기서  $ho_0$ 는 충돌회피를 고려해야 하는 임계 거리 값 을 나타내며  $\overrightarrow{C}$ 는 충돌벡터로 로봇과 장애물과의 수직 벡터이며  $\overrightarrow{C}_{unit}$  은 단위벡터를 의미한다. 그리고  $K_{s,o}$ 는 스프링 계수를  $D_{s,o}$ 는 댐퍼 계수를 각각 나타낸다. 식(10)과 같이 본 논문에서는 로봇과 장애물과의 관 계를 스프링과 댐퍼로 모델링하여, 거리 및 속도 정보에 따라 가상의 힘을 생성시키는 임피던스 방법을 이용하 였으며, 일반적인 임피던스 방법과는 달리 충돌벡터를 정의하고 이 충돌벡터의 변화분(접근속도)을 댐퍼로 정 의하는 새로운 가상 임피던스 방법을 제안하였다.

일반적인 임피던스 방법을 이용하였을 시는 댐퍼에 의해 장애물과 충돌 위험시 로봇의 진행속도가 감소하 게 되어 충돌 회피에 성공할 수 있지만, 장애물 주위에 서 멈추기도 하고 시간 지연이 길어진다. 충돌벡터를 사용한 새로운 가상 임피던스 방법을 이용하였을 때는 빠른 속도로 접근되는 장애물에 대하여 충돌 이전에 모 바일 로봇의 감속과 함께 경로변경을 야기 시키며, 회피 후에는 로봇이 주어진 궤적에서 멀어지는 것을 방지하 는 역할을 한다.

식(10)에서  $\rho_0$ 는 초음파 센서의 거리측정 가능범위인 최대 3m 보다 작은 값으로 설정해야 하며  $\Delta \vec{C} = \vec{C}_i[n] - \vec{C}_i[n-1]$ 이다.

초음파 센서를 사용하여 이동로봇과 주위 물체와의 거리를 측정하는 경우, 장애물의 표면에 수직인 벡터와 초음파 센서의 빔이 이루는 각이 30° 이상일 때는 신뢰 할 수 있는 거리정보를 얻지 못한다는 사실에 근거를 두고, 초음파로 인식하는 장애물의 종류를 3가지로 나 누었다. 첫 번째는 사람 또는 작은 원통형 장애물로 초 음파 1개에 의해 인식되는 경우이고, 두 번째는 조금 큰 장애물로 초음파 2개에 의해 인식되는 경우이며, 마지 막으로 벽과 같이 긴 물체로 초음파 3개로 인식되는 경 우이다 (그림 9(a), (b), 및 (c) 참조).

1. 첫 번째 경우, 충돌벡터는 그림 9의 (a)에서 보듯 이 측정된 센서의 거리정보로 부터 직접 얻을 수 있다.

$$\vec{C} = \vec{L}_{\min} \tag{11}$$

2. 두 번째 경우, 측정된 2개의 거리 벡터 중 크기가 작은 것을  $\overrightarrow{L_1}$ 이라 두고 나머지 벡터를  $\overrightarrow{L_2}$ 라 하자. 초 음파에 의해 검출된 점들을 잇는 선분을 구하고 이 선 분의 법선 벡터 중 로봇의 중심을 향하는 선분을 충돌 벡터로 정의한다. (그림 9의 (b) 참조)

 $P_1 = (x_1, y_1) = (d_1 \cos \theta_1, d_1 \sin \theta_1)$ (12)

$$P_{2} = (x_{2}, y_{2}) = (d_{2} \cos \theta_{2}, d_{2} \sin \theta_{2})$$
(13)

$$P_{o} = (x_{o}, y_{o}) = \left(\frac{V \cdot x_{1} - y_{1}}{V + \frac{1}{V}}, -\frac{-x_{1} + \frac{1}{V} \cdot y_{1}}{V + \frac{1}{V}}\right) \quad (14)$$
$$\overrightarrow{C} = \overrightarrow{P_{o}P_{s}} \quad (15)$$

여기서 $V = rac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ 이고,  $P_s$ 는 로봇의 현 위치를 나 타내며, heta는 로봇의 진행방향인  $X_R$ 과 각 초음파 센서



3. 세 번째 경우, 3개의 거리 벡터 중 가장 작은 벡 터를  $\vec{L}_{\min}$ 이라 두고, 그 왼쪽에 위치한 벡터를  $\vec{L}_{1}$ , 나 머지 벡터를  $\vec{L}_{2}$ 라 정의하여 두 번째 경우와 동일한 방 법으로 충돌벡터를 정의한다.  $\vec{L_{e}} \in \vec{C}$  와의 각이 30° 보다 크므로 무시된다.

슬레이브 측의 모바일 로봇에서 발생되어진  $F_b$ 는 식 (16)에 의해서 조종자에게 전해지게 된다.

$$\tau_b(s) = sat\left(K_b \cdot F_b(s)\right) \tag{16}$$

여기서,  $sat(x) = \begin{cases} x & , \text{if } |x| \le x_{\max} \\ sgn(x) \bullet x_{\max}, otherwise \end{cases}$  로 정의되며  $K_b$ 는 힘 귀환 이득상수이다.

조작자는 영상정보의 한계상황에서도 조이스틱을 통 해 느껴지는 *T*<sub>b</sub>에 의해서 주행하는 로봇과 영상에 보이 지 않는 물체들과의 거리를 인지할 수 있게 된다.

#### 5. 실험 및 결과

실험은 연구실에서 행해졌으며 힘 반영 조이스틱의 성능 Test를 위해 실내를 어둡게 함으로써 CCD 카메라 를 통해 얻어지는 비전정보에 제한을 두었다. 장애물 회 피에 있어서의 효율성을 검증하기 위하여 이동 로봇의 초기궤적은 최단거리로 최단시간에 목표지로 향하도록 설정하였다. 그리고 자율주행, 원격제어 실험은 모두 초 음파 센서 한 개, 두 개, 혹은 세 개에 의해 감지되는 크 기의 장애물 7개가 존재하는 상황에서 행해졌다.

#### 5.1. 자율주행

본 논문에서 제시한 collision vector를 이용하여 식 (10)에 대입한 후 로봇을 자율주행 시켰을 때 출발지부 터 목표지까지 걸린 시간은 약 58초 정도가 소요되었으 며, 두 바퀴에 부착된 인코더를 이용하여 이동궤적을 나 타내면 그림 10과 같다. 목표지까지 장애물과 충돌을 야 기함이 없이 주행함을 알 수 있었다.

자율주행 동안 조이스틱의 handle은 Scorbot ER-VII의 gripper를 이용하여 home position에 정지시켜 두고 gripper에 부착된 ATI - FT3186 force torque sensor를 이용하여 반력 힘을 측정하였다. 로봇은 자율주행 상태 이므로 조이스틱의 지령은 받지 않고 주행 중에 collision vector를 사용한 가상임피던스에 의해 구해진 반력 힘은 전달받게 된다. 이 반력 힘 F를 force torque sensor로 측정하여 생성된 가상의 반력과의 선형관계를 보여주는 것이 자율주행 실험의 목표이다. 수식 (10)에 서 K의 값은 6.5, D의 값은 2.2로 실험을 통하여 최적 으로 선정하였다.







그림 13. 힘 귀환을 이용하지 않은 원격제어 주행 궤적

#### 6. 결 론

본 논문에서는 장애물에 수직인 벡터를 충돌벡터로 정의하고, 이를 이용한 가상 임피던스 알고리즘을 원격 제어와 자율주행에 적용하여 모바일 로봇의 장애물 회 피 성능을 향상시켰다. 조종자에게 알고리즘에 의해 계 산된 반력이 정확하게 전달되는지 확인하기 위해, F/T Sensor로 측정하여 비교 검토하였다. 실험에서 완전히 일치하지 않는 이유는, 조이스틱의 각 축에 사용된 모터 의 비선형적인 특성으로 인해 PWM 값을 증감시켰을 때 비선형적으로 모터가 반응하기 때문으로 분석되었고 모터의 오차보정을 통하여 그 오차를 5% 이내로 줄일 수 있었다. 또한 두 번째 실험에서는 두 명의 조종자에 게 각각 로봇에 부착된 카메라의 비전 정보와 함께 힘



그림 11. 자율주행 실험결과 (K: 6.5, D: 2.2)

그림 11의(a)는 가상 임피던스 알고리즘에 의해 계산 된 data를 나타내며 (b)는 F/T sensor에 의해 측정된 data를 나타낸다. (c)는 (a), (b) 둘 사이의 오차를 나타 낸다.

(a), (b) 두 data가 (c)와 같은 오차를 나타내는 이유는 조이스틱에 부착된 모터의 제어를 위해 PWM의 duty비 를 증가시켰을 때 모터에 흐르는 전류가 비선형 특성을 갖는 것으로 인한 것임을 확인할 수 있었다. 모터의 비 선형적인 특성과 force torque sensor 자체의 offset을 보 정해 줌으로써 5% 이내로 오차를 줄일 수 있었다.

#### 5.2. 원격제어

자율주행과 동일한 장애물이 놓인 환경에서 두 명의 조작자에 의해 각각 두 가지의 원격제어 실험을 하였다. 첫 번째 실험은 힘 반영 기능과 로봇에 부착된 CCD 카메라를 이용한 실험이다. 두 사람 모두 자율 주행 보 다 10초 이상 빠르게 이동로봇을 목표지로 도달하게 하 였다.

(조작자 A: 46초, 조작자 B: 48초, 자율주행: 58초)

그 주행 궤적은 그림 12와 같다. 실험을 통하여 비전 정보와 힘 정보를 바탕으로 조정자의 판단이 추가되므 로 자율주행 궤적보다 단거리로 목표지까지 갈 수 있다 는 사실을 보였다.

두 번째 실험은 힘 반영 기능을 제거하고 비전 정보 만을 이용한 원격제어를 했을 경우이다. 피드백 기능을 사용하였을 때와 힘 피드백 기능을 사용 하지 않았을 때의 모바일 로봇을 원격제어 하는 실험결 과에서 알 수 있듯이 로봇의 힘 반영을 통한 원격제어 가 보다 빠르고 안정적으로 이동로봇을 목표지까지 인 도할 수 있음을 확인하였다. 또한 본 논문에서는 단일 hall sensor를 이용하여 보다 정확한 조이스틱 봉의 변 위를 측정할 수 있음을 dual 구조의 potentiometer와 비 교하여 보였으며, 앞으로 모바일 로봇이나 정밀 원격제 어분야에 힘 반영 기능과 함께 널리 활용할 것을 기대 한다. 향후과제로 모터 및 조작자의 정밀한 모델링을 통 하여 환경정보를 조작자에게 정확하고 신속하게 전달하 는 연구가 남아있다.

#### ------참고문헌 =

- S.Maeyama, S. Yuta and A.Garada, "Experiment on a remote application robot in an art museum," Proc, of IEEE/RSJ Int. Conf.IROS, pp.1008-1013, 2000.
- [2] D. Schulz, W. Burgard, D. Fox, S. Thrun and A.B. Cremers, "Web interfaces for mobile robots in public places," IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 7, no. 1, pp.48-56, 2000.
- [3] Wagner, C. R and Perrin D.P, "Force Feedback in a Three-Dimension Ultrasound Guided Surgical Task," 14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.43-48, 2006.
- [4] S. S. Lee and J. M. Lee, "Haptic interface design for the tele-surgery," Proc. of the CIDAM Workshop on Service Automation and Robotics, pp.81-91, HongKong, 2000.
- [5] S. K. An, S. J. Han, H. R. Hur, and J. M. Lee, "Implementation of a Remote Peg-in-Hole Operation Using a Two Degrees of Freedom Force-Reflective Joystick," J. of Electrical Engineering and Information Science, vol. 4, no. 3, pp.315-322, 1999.
- [6] H. C. Kim, D. H. Kang, and J. M. Lee,"Development of a Non-contact electronic Joystick using Single Hall Sensor," CASS of ICASE, pp.68-73, 2005.
- [7] "Integrated 2-axis Hall Sensor" Sentron Data sheet for 2SA-10 ICs. November 10, 2004.
- [8] Nohmi. M, Ando. A, and Bock. T "Contact Task by Space Teleoperation Using Force Reflection of Communication Time Delay," IEEE International Symposium on CIRA, pp.193-198, 2005.
- [9] D. K. Roh, I. M. Kim, B. H. Kim, and J. M. Lee, "Localization of a Mobile Robot Using the Information of a Moving Object", J. of Control, Automation and Systems Engineering Vol. 7, No. 11,

Nov., 2001.

- [10] T. Arai, H. Ogata, and T. Suzuki, "Collision Avoidance Among Multiple Robots Using Virtual Impedance", Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.479-485, Sep., 1989.
- [11] J. Ota, T. Arai, E. Yoshida, D. Kurabayashi, and T. Mori, "Real Time Planning Method for Multiple Mobile Robots", Proc. of IEEE Int. Symposium on, Assembly and Task Planning, pp.406-411, 1995.



#### **이 장 명** 1980 서울대학교

전자공학과(학사) 1982 서울대학교 전자공학과(석사) 1990 Univ. of Southern

California Ph. D

1992~현재 부산대학교 교수 현재 부산대학교 전자공학과 정교수 관심분야:지능로봇시스템의 설계 및 제어, 마이크 로프로세서 응용, 시스템설계, 모터구동 제어



#### 전 찬 성

2006 한남대학교 전자정보통신공학과 (학사) 2006~현 재 부산대학교 전자공학과 석사과정 재학중

관심분야: 마이크로프로세서 응용 제어, 지능제어 시스템, 모터제어



## 조 승 근

2004 부경대학교 제어계측공학과(학사) 2004~현재 부산대학교 전자공학과 석사과정 재학중 관심분야:임피던스제어,하이 브리드제어