

이동로봇의 직접교시를 위한 가변 임피던스제어와 퍼지추론 기반 사용자 의도 파악

Variable Impedance Control and Fuzzy Inference Based Identification of User Intension for Direct Teaching of a Mobile Robot

고종현¹, 배장호¹, 홍대희^{1,✉}

Jong Hyeon Ko¹, Jang Ho Bae¹, and Daehie Hong^{1,✉}

¹ 고려대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea University)
✉ Corresponding author: dhhong@korea.ac.kr, Tel: +82-2-3290-3369

Manuscript received: 2015.12.14. / Revised: 2016.4.1. / Accepted: 2016.6.7.

Controlling a mobile robot using conventional control devices requires skill and experience, and is not intuitive, especially in complex environments. For human-mobile robot cooperation, the direct-teaching method with impedance control has been used most frequently in complex environments. This thesis proposes a new direct-teaching method for a mobile robot utilizing variable impedance control. This includes analysis of user intention, which is changed by force and moment. A fuzzy inference technique is proposed in this thesis for identification of user intension. The direct teaching of a mobile robot based on variable impedance control through fuzzy inference is experimentally verified by comparing its efficiency to that of the conventional impedance control-based direct teaching of a mobile robot. Experimental data, such as the total time consumed, path error time, and the total energy used by the user, were recorded. The results showed that the efficiency of variable impedance control was increased.

KEYWORDS: Fuzzy theory (퍼지이론), Impedance control (임피던스제어), Human-Robot cooperation (인간-로봇 협업), Mobile robot (이동로봇)

기호설명

$V(t)$ = Linear velocity of mobile robot
 $W(t)$ = Angular velocity of mobile robot
 v_r = Right wheel linear velocity of mobile robot
 v_l = Left wheel linear velocity of mobile robot
 R = Radius of curvature for mobile robot

$Rule_n$ = Number of rules
 MF_n = Number of Membership Functions
 LV_n = Number of Linguistic variables
 F_x = X-Axis force of force/toque sensor
 F_y = Y-Axis force of force/toque sensor
 M_g = Center of gravity moment of mobile robot
 M_z = Z-Axis moment of force/toque sensor

1. 서론

산업용 로봇의 연구 방향은 전문 인력의 노령화, 산업 환경의 위험 요소 등의 문제를 해결하고 인건비 절감, 품질 향상 등을 통한 채산성을 향상시키기 위하여 로봇 시스템의 완전 자동화를 향해 진행되고 있다. 하지만, 이러한 완전 자동화 기술을 건설 산업, 제조업, 물류이동, 선박업 등과 같이 비정형적인 환경이 대부분인 산업 현장에 바로 적용하기에는 아직 기술적으로 한계가 있다.¹ 특히, 비정형적인 환경에서의 이동로봇 자율주행 연구는 현재 기술적으로 많은 어려움이 존재한다. 또한, 조이스틱과 같은 컨트롤러를 통해 이동로봇을 조종하는 것은 직관성이 떨어지고 이동로봇에 대한 이해와 컨트롤러 사용에 대한 숙련이 필요하며 조종자가 로봇과 떨어져 있기 때문에 비정형적인 상황에서 갑작스러운 장애물에 즉각적으로 대처하는데 어려움이 있다.

이러한 비정형적인 환경에 이동로봇 시스템을 적용하기 위해서는 사람이 직관적으로 로봇을 조종하면서 로봇과 협업하는 인간-로봇 협업 기술이 필요하다. 인간-로봇 협업에서 사용자는 주로 직접교시를 통해 로봇을 조종한다.² 직접교시는 사용자가 로봇을 직접 잡고 원하는 경로를 교시하는 방법으로 사용자에게 복잡한 지식을 요구하지 않고 초보자도 손쉽게 로봇을 조종할 수 있다는 장점이 있다.³ 직접교시는 주로 임피던스제어 (Impedance Control)를 통해 실현될 수 있다.⁴ 직접교시를 위한 임피던스제어는 가상의 임피던스 상수(질량, 댐퍼)를 선택해야 하고 선택된 임피던스 상수 값에 따라 직접교시의 특성이 결정 된다. 따라서 작업의 특성 또는 사용자의 의도에 따라 임피던스 상수 값을 적절하게 선택하는 것은 매우 중요하다.

이동로봇에 직접교시를 적용하는 연구는 재활 로봇 같은 연구에 많이 사용된다.⁵ 기존의 보조보행 기구나 이동로봇의 경우에는 외력의 변화에 대해 단순하게 임피던스 상수를 변경 해준다.⁶ 이러한 경우에는 사용자의 의도와는 다른 모션을 보여주거나 조작이 어려울 수가 있다. 매니플레이터에 대해 직접교시를 이용한 연구는 최근 지속적으로 진행이 되고 있으나 이동로봇에 대한 직접교시 적용은 연구 사례가 적다.⁷ 특히 이동로봇에서 사용자의 의도를 퍼지 추론을 이용해 파악을 하고 이를 질량과 댐퍼 상수 값을 변경하는 가변 임피던스 제어를 직접교시에 적용한 사례가 없다.

본 논문에서는 건설 현장과 같은 비정형적인 환경에서 사용자가 커튼월과 같은 중량물을 직관적으로 이송하기 위한 이동로봇의 가변 임피던스 컨트롤러를 통한 직접교시 기술을 제안하고자 한다. 퍼지 추론을 이용하여 사용자가 주는 힘과 모멘트의 변화에 따른 사용자의 의도를 파악하고 그 의도에 따라 임피던스 상수인 질량과 댐퍼를 지속적으로 변경하는 가변 임피던스제어 (Variable Impedance Control)를 제안한다. 또한, 본 논문에서 제안된 사용자 의도에 따른 이동로봇의 가변 임피던스제어 성능을 검증하기 위하여 실험자가 주어진 경로로 이동로봇을 왕복 이동시키는 실험을 진행한다. 각각의 제어 방법에 따라 왕복하는데 걸리는 시간과 경로 이탈 횟수 및 시간을 분석함으로써 가변 임피던스제어를 통한 직접교시 기법의 효용성을 검증한다.

2. 퍼지추론

2.1 사용자 의도 파악

사용자의 의도파악을 위한 방법은 다양하다. 기존의 의도 파악 방법으로서 로봇의 속도의 변화에 의한 방법, 사람이 로봇에 가하는 힘의 기울기에 의한 방법, 등과 같이 다양한 방법이 있다. 하지만 기존의 방법들은 사용자의 다양한 의도에 대처하기가 어렵다. 사람마다 느끼는 속도의 기준이 다르고 원하는 움직임의 기준이 애매모호하기 때문이다. 맘다니 퍼지추론 (Mamdani Fuzzy Inference)은 애매모호함을 수치로 보여주기ye 가장 좋은 방법이다.^{8,9} 본 연구에서는 사람의 기준이 애매하기 때문에 이를 해결하기 위해 사용자의 의도를 퍼지 추론을 이용하여 파악하였다.

2.2 퍼지추론 적용

힘/토크 센서를 통하여 얻는 F_x, M_g 의 데이터를 통하여 퍼지집합 (Fuzzy Set)을 만들었다. Figs. 1과 2와 같이 멤버십함수 (Membership Function (MF))을 정해준다. 힘/토크 센서를 통해 받는 데이터의 멤버십 함수의 범위는 실험을 통하여 최대 또는 최소 값을 기준으로 일정 마진을 주었다. 멤버십 함수에 해당하는 언어적변수 (Linguistic Variables (LV))에 대한 정의는 Table 1과 같다. 멤버십 함수에 각각 5개의 언어적 변수를 정해주었다. 식(1)에 의해 25개의 룰을 Table 2와 같이 정의하였다.

$$Rule_n = LV_n^{MF_n} \quad (1)$$

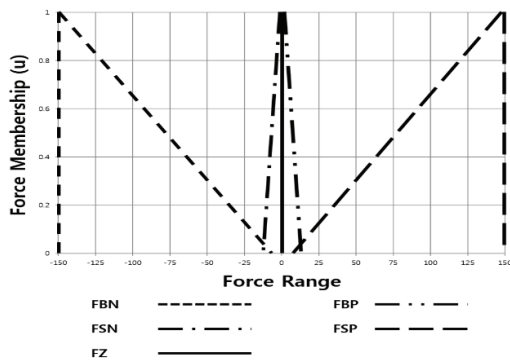


Fig. 1 Membership functions of force

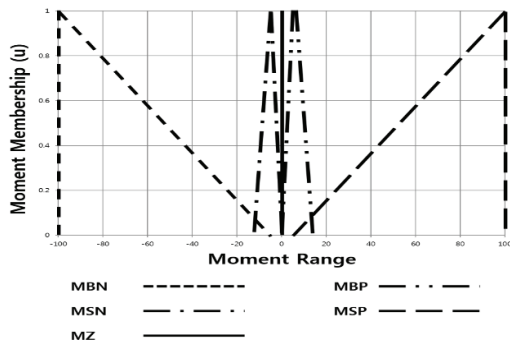


Fig. 2 Membership functions of moment

Table 1 Notation for linguistic variables

MBP	Moment big positive
MSP	Moment small positive
MZ	Moment zero
MSN	Moment small negative
MBN	Moment big negative
FBP	Force big positive
FSP	Force small positive
FZ	Force zero
FSN	Force small negative
FBN	Force big negative
R	Rotate
L	Longitudinal
S	Stop

Table 2 Fuzzy rules

AND	FBP	FSP	FZ	FSN	FBN
MBP	R	R	R	R	R
MSP	L	R	R	R	L
MZ	L	L	S	L	L
MSN	L	R	R	R	L
MBN	R	R	R	R	R

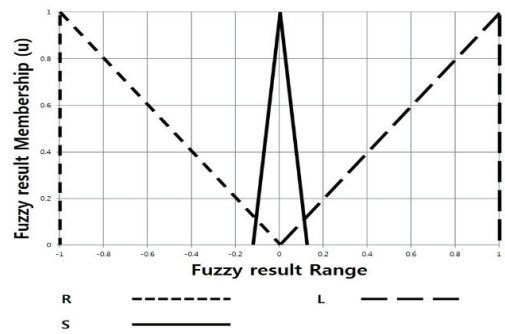


Fig. 3 Membership functions of result

Fig. 3과 같이 출력 멤버십 함수의 범위는 -1 부터 1까지 정해주었다. 값이 양수일 경우에는 사용자가 로봇을 움직이려는 의도가 종방향 (Longitudinal), 음수일 경우에는 회전 (Rotate)이라고 판단하고 1과 -1에 가까울수록 의도가 강하다는 것을 판단하도록 멤버십 함수를 정의 하였다. 비퍼지화 (Defuzzification)의 방법에는 여러 방법이 있다. 그 중 연속적인 데이터에 적합하고 폐루프 제어 (Closed-Loop Control)에 적용이 가능한 범위중심 방법 (Center of Area Method)을 이용 하여 결과값을 구 하였다. 범위중심 방법의 공식은 아래 식(2)와 같다.

$$CoA = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) \cdot x dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) dx} \quad (2)$$

3. 가변 임피던스 제어

3.1 임피던스 제어

이동로봇의 직접교시는 임피던스제어를 통해 구현할 수 있다.¹⁰ 사용자는 이동로봇을 마치 질량-댐퍼 시스템을 끄는 것처럼 거동시킬 수 있다. Fig. 4와 같은 알고리즘을 통해 직접교시를 제어 한다.

임피던스제어를 위한 식은 식(4)와 식(5)와 같다. $V(t)$ 와 $W(t)$ 를 구하기 위해서는 Fig. 7에서 표시 되어 있는 힘과 모멘트 같이 이동로봇의 진행 방향을 글로벌 좌표계에서 X-축으로 정의하였을 때 F_x , M_g 가 필요하다. 하지만 이를 위해 이동로봇의 중심에서의 모멘트가 필요하나 힘/토크 센서와 사람이 잡은 손잡이와의 거리 (r)를 구하기가 어렵다. 그래서 식(3)과 같이 F_y 와 힘/토크 센서와 이동로봇의 무게 중심까지의 거리 (r_G)를 이용하

여 M_g 를 구하였다. 임피던스 제어를 위한 공식에서 사용되는 질량 (m_v), 관성 (i_w), 댐퍼 (c_v, c_w) 는 가상으로 주는 상수이다.

힘/토크 센서에서 측정된 데이터를 임피던스 식에 적용하여 최종적으로 이동로봇의 모션을 결정하는 v_r 과 v_l 을 구할 수 있다. 즉, 사용자의 의도가 힘/토크 센서로 전달되어 그에 대응되는 이동로봇 모션을 유도할 수 있게 되고 그를 통해 이동로봇의 직접교시가 가능해진다.

$$M_g = M_z + F_y \cdot r_g \quad (3)$$

$$F_x = m_v \cdot \dot{V}(t) + c_v \cdot V(t) \quad (4)$$

$$M_g = i_w \cdot \dot{W}(t) + c_w \cdot W(t) \quad (5)$$

3.2 가변 임피던스 제어

질량-댐퍼가 고정되어있는 임피던스제어는 사용자가 상황에 따라 로봇을 정밀하게 제어 하는데 한계가 있다.¹¹ 고정된 댐퍼 값을 가질 때 댐퍼가 높을 때는 사람의 명령에 빠르게 반응하지 못하나 정확한 위치로 이동시키기 쉽다. 하지만 댐퍼 값이 낮다면 사람의 명령에 빠르게 반응하나 정확한 위치로 이동시키기 어렵다. 질량, 관성 또한 댐퍼와 같이 고정되어 있다면 값이 높고 낮음에 따라 사람이 로봇을 상황에 따라 정밀하게 제어 하기가 어렵다. 또한 상황에 맞는 질량, 댐퍼, 관성과 같은 값을 명확하게 정해줄 수가 어렵다.

본 연구에서는 이를 해결하기 위해 우선 퍼지 추론을 이용하여 사람의 의도를 1부터 -1까지의 값으로 파악한다. 그리고 사람의 의도에 따라 임피던스의 상수 값을 가변 하여 정밀하게 움직이게 한다. Fig. 5의 흐름도와 같이 사용자의 의도를 받아 이동로봇에 가변 임피던스제어를 적용했는지 볼 수 있다. 식(4)와 식(5)의 m_v , i_w , c_v , c_w 의 최대 최소 값을 일정 경로를 반복하여 움직이는 실험을 통하여 사람이 주는 힘이 최대 최소 값일 때 이동로봇의 속도가 최대 최소 값일 때 각 상수의 값의 평균값으로 Table 3과 같이 구하였다. 퍼지추론의 결과 값으로 임피던스 상수를 구하는 방법은 식(6) - 식(9)까지 이들 최대최소값의 선형 내삽함수로써 나타낼 수가 있다.

$$m_v = 22.5 \cdot Fuzzy_{result} + 27.5 \quad (6)$$

Table 3 Variable impedance constants

	Max	Mid	Min
m_v	50	27.5	5
i_w	1	0.505	0.01
c_v	15	10	5
c_w	2.5	1.5	0.5

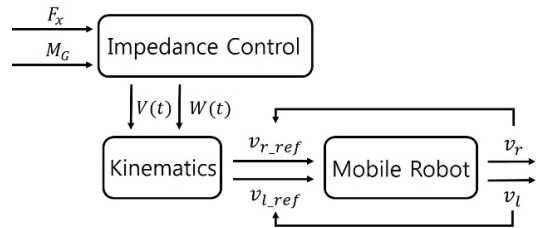


Fig. 4 Block diagram of direct teaching algorithm

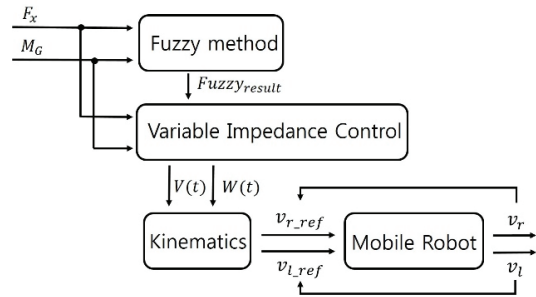


Fig. 5 Block diagram of variable impedance control with fuzzy method algorithm

$$i_w = 0.495 \cdot Fuzzy_{result} + 0.505 \quad (7)$$

$$c_v = 5 \cdot Fuzzy_{result} + 10 \quad (8)$$

$$c_w = 1 \cdot Fuzzy_{result} + 1.5 \quad (9)$$

4. 하드웨어

4.1 이동로봇

Fig. 6은 실험에 사용한 이동로봇의 하드웨어를 보여준다. 이동로봇은 2개의 DC모터를 통해 구동되고 각각의 모터는 좌우 각각 바퀴에 연결되어 있다. 또한 좌우의 앞 바퀴와 뒷바퀴는 체인으로 결속되어 있어 함께 회전한다. 따라서 본 연구에서 사용한 이동로봇은 두 개의 바퀴로 이동하는 이동로봇으로 가정할 수 있고, 좌측 바퀴와 우측 바퀴의 회전 속도를 다르게 하거나 반대로 함으로



Fig. 6 Mobile robot hardware

써 이동로봇을 회전 시킬 수 있다. 모터가 연결되어 있는 각각의 바퀴에 엔코더를 설치하여 이동로봇 바퀴의 회전 수를 측정하였고 측정값의 미분을 통해 이동로봇의 속도를 계산하였다. 이동로봇의 모터 제어와 각종 센서 계측 및 데이터 수집을 위해서 NI사의 Compact-Rio를 사용하였다. 사용자의 직접교시를 위한 손잡이에는 힘/토크 센서를 장착하여 사용자의 교시력을 측정하였고, 이동로봇의 네 모서리와 전방 중앙에는 실험 도중에 바퀴가 경로를 벗어났는지를 확인하기 위한 적외선 센서 4개와 실험의 시작과 끝을 체크하기 위한 적외선 센서 1개를 부착하였다. 마지막으로 실험 참가자에게 경로 이탈을 알려주기 위하여 네 개의 적외선 센서 근처에 부저 센서를 설치하였다.

4.2 이동로봇 기구학

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 이동로봇의 움직임은 이동로봇의 선속도 $V(t)$ 와 회전 속도 $W(t)$ 에 의해서 결정된다. 또한, 이동로봇의 선속도와 회전속도는 바퀴의 선속도와 식(10) - 식(13)과 같은 관계가 있다.

$$V(t) = W(t) \cdot R = (v_r + v_l) \div 2 \tag{10}$$

$$W(t) = (v_r - v_l) \div b \tag{11}$$

$$R = \frac{b \cdot (v_r + v_l)}{2 \cdot (v_r - v_l)} \tag{12}$$

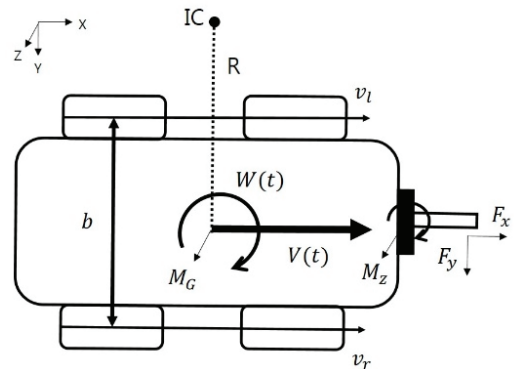


Fig. 7 Schematic diagram of mobile robot

$$\omega(t) \cdot r = v(t) \tag{13}$$

여기에서 $V(t)$, $W(t)$, R 그리고 b 는 각각 이동로봇의 선속도, 각속도, 로봇궤도의 순간 곡률 반지름, 그리고 바퀴간의 거리이다. 힘/토크 센서를 통해 $V(t)$, $W(t)$ 를 도출하고 이를 바탕으로 v_r 과 v_l 을 구한다. v_r 과 v_l 은 각각 오른쪽 바퀴의 속도, 왼쪽 바퀴의 속도를 의미한다.

바퀴의 선속도 (v_r, v_l) 와 회전속도 (ω_r, ω_l) 는 식(13)와 같은 관계가 있으므로 이동로봇의 선속도와 회전속도에 대한 각 바퀴의 회전속도를 구할 수 있다.

5. 임피던스 제어, 가변 임피던스 제어 비교 실험

5.1 실험 계획

실험을 위해 나이가 25부터 29까지의 총 10명의 사람들이 실험에 참가하였다. 그룹의 구성은 9명의 남자와 1명의 여자이고 모두 오른손 잡이다. Fig. 8과 같이 실험 경로를 U-Turn 구역, Curve 구역, Rotate 구역과 좁아지는 구역을 만들어 다양한 상황을 구성하였다. 실험 참가자들은 이동로봇을 직접 교시를 하면서 라인을 벗어나지 않도록 왕복을 최대한 빠르고 정확하게 하도록 지시 하였다. 실험 참가자를 5명씩 A팀, B팀으로 나누어 A팀은 일반적인 임피던스제어 기법을 이용한 직접교시 실험을 먼저 하고 B팀은 퍼지추론을 통한 가변 임피던스제어 기법을 이용한 직접교시 실험을 먼저 행하였다. 실험 후 24시간 후에 실험 방법을 바꿔 실험을 하였다. 한 명당 실험은 10번씩 이루어졌고 총 200번의 실험이 진행되었다.

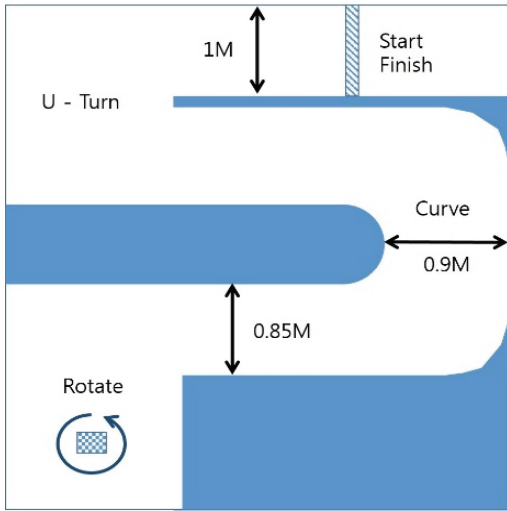


Fig. 8 Experiment course

5.2 실험 결과

Figs. 9와 10에 보여지는 점들은 각각 1명의 실험자가 10번씩 실험한 데이터의 평균값이다. 임피던스제어를 통해 직접교시 실험을 하였을 때의 상수 값은 Table 3의 Mid값으로 고정하고 실험하였다. Fig. 9는 로봇을 왕복하였을 때 걸린 시간 (Clear Time)과 이동 중 라인을 벗어난 횟수 (Over)를 비교한 그래프이다. 모든 실험 참가자들의 평균을 비교하면 왕복하는데 걸린 시간과 라인을 벗어난 횟수가 임피던스제어를 할 때 보다 퍼지추론을 이용한 가변 임피던스제어를 통하여 직접교시를 하였을 때 16.65% 빨라지고 10.03% 라인을 덜 벗어났다. 또한 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 왕복을 하는 동안 라인을 벗어나서 다시 복귀하는데 걸린 시간의 값을 비교하여도 퍼지이론을 이용한 가변 임피던스제어를 사용하였을 때 16.51% 더 빨리 복귀하는 모습을 보여주었다. 이와 같은 향상에 대해 유의미한지는 검정통계량 (t-Test)을 통하여 왕복시간에 대해 분석하면 $\alpha = 0.05$ 일 때 $p\text{-Value} = 0.0001215$, $t\text{-Statistic} = 5.8521$ 의 값을 가진다. $p\text{-Value}$ 가 α 보다 작기 때문에 임피던스제어와 가변 임피던스제어를 비교하였을 때 왕복 시간에 대한 두 집단의 평균이 통계적으로 유의한 차이가 있다고 판단할 수 있다. 또한 경로를 벗어났을 때 복귀하는 시간에 대한 검정통계량 (t-Test)를 시행하면 $\alpha = 0.05$ 일 때 $p\text{-value} = 0.0025$, $t\text{-statistic} = 3.6892$ 의 값을 가진다. 복귀 하는 시간에 대한 통계도 유의한 차이가 있다.

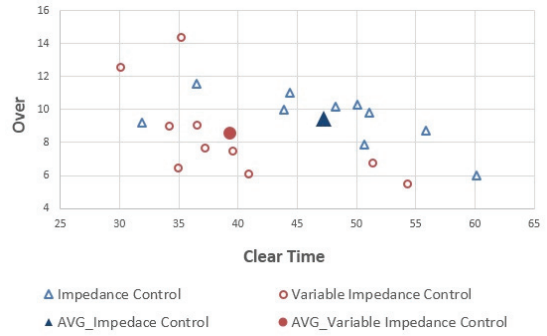


Fig. 9 Over-Clear time graph transferred to the robot for complete task

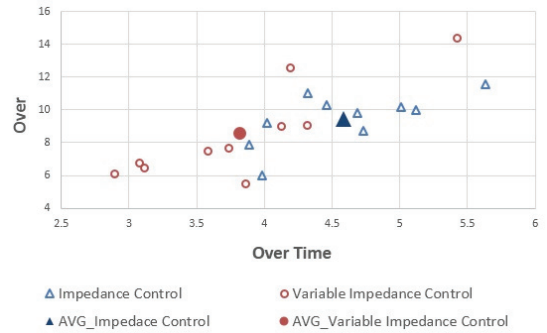


Fig. 10 Over-Over time graph transferred to the robot for complete task

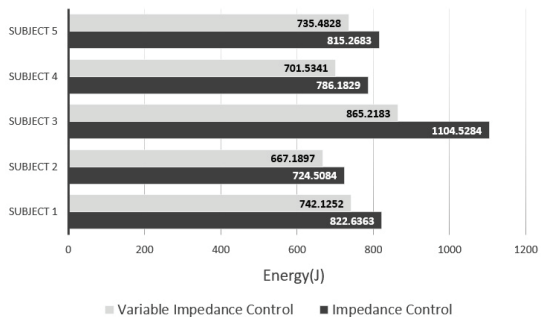


Fig. 11 Energy (J) transferred to the robot for complete task

실험 참가자가 임피던스제어와 가변 임피던스제어를 통하여 이동로봇을 직접교시를 하여 경로를 따라 왕복 실험을 하는 동안의 에너지 (J)를 측정하였다. Fig. 11와 같이 200번의 실험 중 5번의 실험을 통계를 내었는데 임피던스제어를 적용하였을 때는 에너지가 850.62의 평균값이 나왔는데

Table 4 Qualitative appreciation of the controllers during the experiment

Subject	Impedance control	Variable impedance control
1	4	7
2	7	9
3	7	5
4	5	8
5	8	7
6	4	8
7	7	9
8	4	7
9	2	7
10	5	8
AVG	5.3	7.5

가변 임피던스제어를 하였을 때 742.31의 에너지가 필요로 하였다. 이는 12.73%의 에너지가 덜 필요했다. 이는 가변 임피던스제어를 통한 직접교시를 할 때 사용자가 더 쉽게 이동을 하게 해줌을 검증하였다. 사용된 에너지에 대해 검정통계량(t-test)를 시행하면 $\alpha = 0.05$ 일 때 $p\text{-value} = 0.0153$, $t\text{-statistic} = 3.2727$ 의 값을 가진다. 왕복을 할 때 사용된 에너지에 대한 통계도 유의한 차이가 있다.

5.3 실험 설문조사

실험 후 임피던스제어와 가변 임피던스제어를 사용하여 직접교시를 하였을 때 만족 정도를 1이 ‘가장 어려움’, 10이 ‘가장 쉬움’으로 1부터 10까지의 정수로 설문조사를 하였다. 조사 결과 Table 4와 같이 실험자의 대부분이 가변 임피던스제어의 만족도가 높았다.

6. 결론

본 논문에서는 사용자가 직관적으로 중량물을 이송하기 위한 이동로봇에 퍼지추론을 이용하여 사용자의 의도를 파악하고 임피던스 제어를 위한 질량-댐퍼 상수를 사용자의 의도에 따라 가변해주는 인간-로봇 협업 기술을 제안했다. 또한 이동로봇에 적용한 퍼지이론을 적용한 가변 임피던스제어가 기존의 임피던스제어를 이용한 직접교시 보다 향상 되었음을 검증하기 위해 실험을 통해 비교하였다. 지정된 경로를 이동하는데 걸린 시간, 경로를 벗어났다가 복귀 하는 시간, 사용자가 쓴 에너지에 대해 향상 되었고 설문조사를 통해 실험

참가자의 만족도도 높아졌다는 결론을 도출하였다. 추후 연구로는 실험 실제 현장에서의 실험을 통하여 향상 정도를 증명하는 것이다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2013R1A1A2059192).

본 연구는 산업통상자원부 (MOTIE, Korea) 산업핵심기술개발사업지원의 연구결과로 수행되었음 (10052965, 독립 구동 및 자세제어가 가능한 협지주행시스템 개발)

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20144010200770)

REFERENCES

1. Park, S., "A Study on Navigation Strategy for Autonomous Mobile Robot using RFID in a Static Environment," Ph.D. Thesis, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, 2010.
2. Park, C., Kyung, J. H., and Park, D. I., "Development of an Industrial Robot Manipulator for the Easy and Safe Human-Robot Cooperation," Proc. of International Conference on Control Automation and Systems, pp. 478-681, 2010.
3. Kim, H.-J., Back, J.-H., and Song, J.-B., "Direct Teaching and Playback Algorithm for Peg-in-hole Task using Impedance Control," Journal Institute of Control, Robotics and System, Vol. 15, No. 5, pp. 538-542, 2009.
4. Fujisawa, Y., Fukuda, T., Kosuge, K., Arai, F., Muro, E., et al., "Control of Manipulator/Vehicle System for Man-Robot Cooperation Based on Human Intention," Proc. of IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 188-193, 1992.
5. Hirata, Y., Hara, A., and Kosuge, K., "Motion Control of Passive Intelligent Walker Using Servo Brakes," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 23, No. 5, pp. 981-990, 2007.
6. Lim, S.-H., Kim, T.-K., Kim, D. Y., Hwang, J.-H., Kim, B.-S., et al., "Development of In-Wheel

- Actuator for Active Walking Aids Equipped with Torque Sensor for User Intention Recognition,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 12, pp. 1141-1145, 2014.
7. Tsumugiwa, T., Sakamoto, A., Yokogawa, R., and Hara, K., “Switching Control of Position/Torque Control for Human-Robot Cooperative Task-Human-Robot Cooperative Carrying and Peg-in-Hole Task,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1933-1939, 2003.
 8. Wang, Y. and Wang, S., “Identification of Directional Intention for a Wheelchair Robot Using a Distance Fuzzy Reasoning Algorithm,” Proc. of IEEE International Conference on Advanced Mechatronic Systems, pp. 260-263, 2014.
 9. Jiang, Y., Wang, S., Ishida, K., Kobayashi, Y., and Fujie, M. G., “Directional Control of an Omnidirectional Walking Support Walker: Adaptation to Individual Differences with Fuzzy Learning,” Advanced Robotics, Vol. 28, No. 7, pp. 479-485, 2014.
 10. Duchaine, V., St-Onge, B. M., Gao, D., and Gosselin, C., “Stable and Intuitive Control of an Intelligent Assist Device,” IEEE Transactions on Haptics, Vol. 5, No. 2, pp. 148-159, 2012.
 11. Tsumugiwa, T., Yokogawa, R., and Hara, K., “Variable Impedance Control Based on Estimation of Human Arm Stiffness for Human-Robot Cooperative Calligraphic Task,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 644-650, 2002.