

저가형 적외선 거리 센서를 이용한 선도-추종 로봇 시스템에서 선도로봇의 위치인식

Positioning of a Leader Robot in a Leader-Follower Robot Using Low-Cost Infrared(IR) Distance Sensors

바트토야*[★], 장 문 석**^{*}, 차 동 혁**

Battuya Sanjaakhand*[★], Moon-Suk Jang**^{*}, Dong-Hyuk Cha**

Abstract

A leader-follower robot system using low cost small mobile robots has been developed. Since the developed mobile robot is made of widely used low cost parts, it can be built easily and fastly. Characteristics of the developed sensor array composed of seven low-cost infrared(IR) distance sensors has been investigated, and a positioning algorithm of the reader robot is proposed. Through a series of experiments, it has been verified that the proposed algorithm can detect the position of the reader robot well.

요 약

본 연구에서는 저가형 소형 이동로봇을 이용한 선도-추종 로봇시스템을 개발하였다. 개발한 이동로봇은 시중에서 쉽게 구할 수 있는 저렴한 부품을 사용하여 학교나 실험실 등에서 쉽고 빠르게 제작할 수 있는 장점이 있다. 그리고 이 로봇에 장착된, 7개의 저가형 적외선 거리 센서로 구성된 센서 어레이의 위치인식 특성을 분석하고, 이를 기반으로 선도로봇의 위치인식 알고리즘을 제안하였다. 개발한 선도-추종 로봇을 이용한 정지 및 주행 실험을 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

Key words : Leader-Follower, Mobile Robot, Position, Low-Cost, Infrared(IR) Distance Sensor

1. 서론

두 대의 이동 로봇(Mobile Robot)으로 이루어지는 선도-추종 로봇(Leader-Follower Robot) 시스템에서, 한 대의 모바일 로봇은 선도로봇(Leader Robot), 또 한 대는 추종로봇(Follower Robot)으로 동작을 한다. 선도로봇은 사람이 조종을 하거나 또

는 자율주행을 하며, 추종로봇은 선도로봇과 일정한 거리, 각도를 유지하며 선도로봇을 따라가게 된다.

선도-추종 로봇시스템은 다수의 로봇이 군집을 이루어 협업을 하며 원하는 작업을 수행하는 군집 로봇(Swarm robot)의 가장 간단한 형태로서, 이에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다[1-5].

선도-추종 로봇에서 추종로봇이 선도로봇을 정확

* Major in Robotics and Intelligent control System, Korea Polytechnic University

** Dept. of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic University

★ Corresponding author

E-mail: battuya@mul.s.edu.mn, Tel: +82-31-8041-0454

※ Acknowledgment

Manuscript received Mar. 7, 2020; revised Mar. 21, 2020; accepted Mar. 25, 2020.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

히 따라가기 위해서는 선도로봇의 정확한 위치인식이 필수적이다. 그런데 이전의 연구들은 고가의 레이저 거리 센서를 사용하거나[2], 실험 없이 컴퓨터 시뮬레이션만 하는[1, 3] 경우가 많다. 한편 이 동로봇에서 환경인식을 위해 저가의 적외선 거리 센서를 이용하는 연구도 이루어져 왔다[6-8]. 그러나 선도-추종 로봇에서 저가의 적외선 거리 센서를 이용하여 선도로봇의 위치를 정확히 인식하는 방법에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 저가형 부품으로 구성된 이동로봇을 이용한 선도-추종 로봇시스템을 개발하고, 추종 로봇에 장착된 적외선 거리 센서를 이용한 선도로봇의 위치 인식 알고리즘을 제안하고, 실험을 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

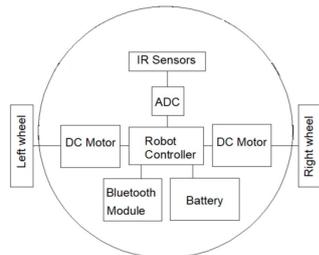
II. 저가형 적외선 거리 센서를 이용한 선도-추종 로봇 시스템

1. 선도 로봇 및 추종 로봇의 구성

본 연구에서는 동일한 구성을 가지는 2개의 모바일 로봇을 선도 로봇 및 추종로봇으로 사용하였다. 아래의 그림 1은 개발된 로봇의 형상과 구성도를, 표 1은 주요 제원을 나타낸다. 이 로봇은 제작의 편의성과 비용 절감을 위하여 주요 몸체 프레임을 모두 3D 프린터로 출력하여 제작하였다.



(a) Configuration



(b) Block diagram

Fig. 1. Configuration of the leader and follower robot.
그림 1. 선도로봇 및 추종로봇의 형상

Table 1. Specification of the leader and follower robot.
표 1. 선도로봇 및 추종로봇의 주요 사양

Body	Height	140mm
	Radius	96mm
	Weight	0.52kg
Location of Infrared (IR) sensor	Height from bottom	116mm
Wheel	Radius	35mm

제어기는 32비트의 ARM Cortex-M4 프로세서를 내장한 ST(STMicroelectronics)사의 Nucleo-F411RE 보드를, DC 모터는 장난감 구동용 소형 DC 모터인 DFRobot사의 마이크로 DC 기어모터를, 모터 드라이버는 BA6208칩을 사용하였다. 그리고 CSR칩을 장착한 블루투스 모듈을 장착하여 외부의 PC 등과의 통신이 가능하다. 또한 로봇 몸체의 회전중심이 구동 바퀴 2개를 잇는 축상에 위치하도록 설계하여 회전 제어가 용이한 구조이다.

본 로봇은 주요 부품을 모두 시중에서 쉽게 구할 수 있는 저렴한 것을 사용하였고, 몸체 프레임을 3D 프린터로 제작하였으므로, 학교나 실험실 등에서 저가로 빠르고 쉽게 제작할 수 있는 장점이 있다.

2. 적외선 거리 센서 어레이

선도로봇의 위치인식을 위해서 그림 2와 같이 7개의 적외선 거리 센서 S1-S7을 추종로봇의 외면에 30°의 간격으로 배치하였다. 센서는 Sharp사의 저가형 적외선 거리 센서인 GP2Y0A51SK0F를 사용하였으며, 권장 측정범위는 2~15 cm이다[9].

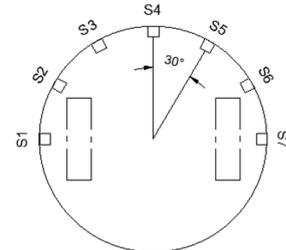


Fig. 2. Infrared distance sensor array.
그림 2. 적외선 거리 센서 어레이

Table 2. Angles of the sensor S1~S7.

표 2. 센서 S1~S7의 배치 각도

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
-90°	-60°	-30°	0°	+30°	+60°	+90°

3. 추종 로봇의 동작 목표

선도-추종 로봇에서 추종로봇이 선도로봇을 따라가는 방법은 여러 가지가 있을 수 있는데, 본 연구에서는 추종로봇이 선도로봇과 원하는 거리 d_{ref} 와 각도 ψ_{ref} 를 유지하며 따라가는 것을 목표로 한다. 이를 위해서는 적외선 거리센서를 이용하여 선도로봇과 추종로봇간의 실제 거리 d 와 각도 ψ 를 정확히 인식하는 것이 필요하다(그림 3).

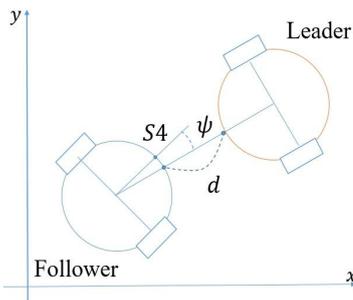


Fig. 3. Distance and angle between Leader and Follower.
그림 3. 선도로봇과 추종로봇의 거리 및 각도

III. 저가형 적외선 거리 센서를 이용한 선도로봇의 위치인식 알고리즘

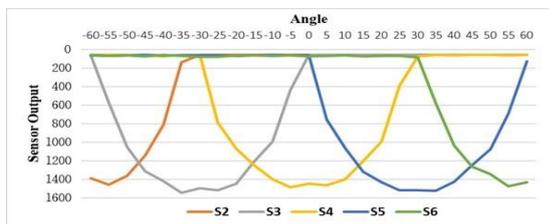
1. 선도로봇의 위치인식 특성 실험

가. 위치인식 특성 실험

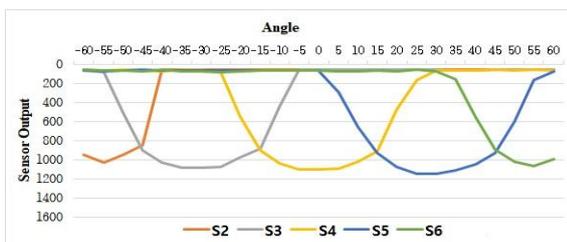
개발된 센서 어레이를 사용하여 위치인식을 하기 위한 기본 실험을 다음과 같이 하였다. 선도로봇과의 거리와 각도를 다음과 같이 변화시키며 각각의 경우 센서 S1 ~ S7의 출력 전압을 AD 변환시킨 값을 측정하였다.

- 선도와 추종로봇의 거리 (d) : 2 ~ 20cm까지 2cm 간격으로 변화시킴(총 10 단계로 변화)
- 선도와 추종로봇의 각도 (ψ) : $-60^\circ \sim +60^\circ$ 까지를 5° 간격으로 변화시킴(총 25 단계로 변화)

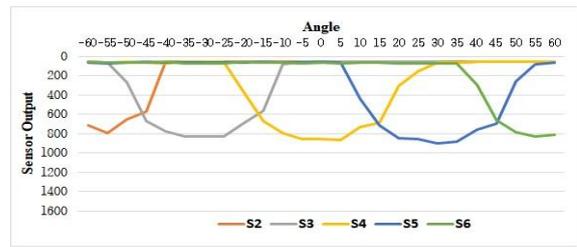
따라서 총 250개(10×25)의 점에 대하여 측정을 하였으며, 각 1개점마다 100번씩 측정하여 평균값을 구하였다. 그 중 4~18cm의 결과를 그림 4에 나타내었다.



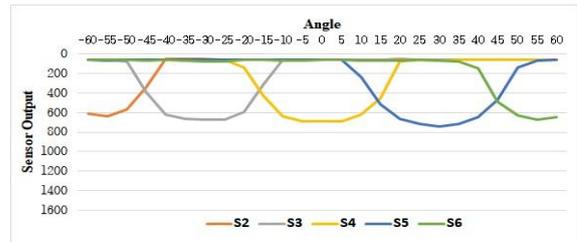
(a) $d = 4$ cm



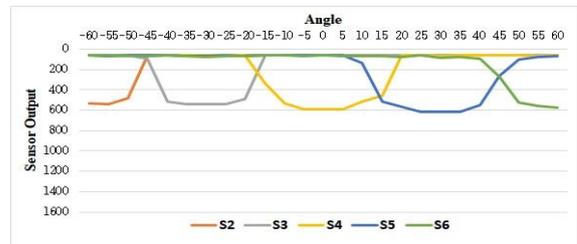
(b) $d = 6$ cm



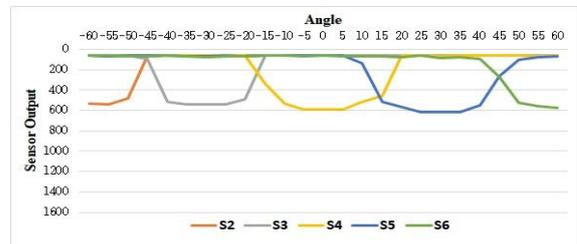
(c) $d = 8$ cm



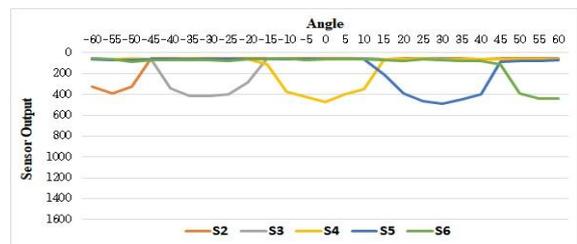
(d) $d = 10$ cm



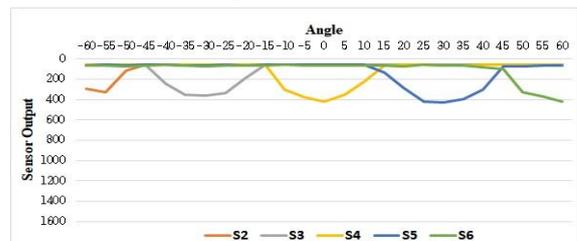
(e) $d = 12$ cm



(f) $d = 14$ cm



(g) $d = 16$ cm



(h) $d = 18$ cm

Fig. 4. Output of sensors with respect to distance & angle.
그림 4. 거리, 각도에 따른 적외선 거리 센서의 감지값

나. 실험 결과의 분석

(1) 실험 결과의 분석

위 실험의 결과를 보면 다음을 알 수 있다.

- 전체적으로 거리 d 가 작을수록 출력값이 커지고, d 가 커지면 값이 작아진다. 이것은 적외선 거리 센서의 일반적인 특성[9]에 부합된다.
- 거리 d 가 작을수록 각 센서의 감지영역이 많이 겹치며, d 가 커지면 감지영역이 겹치지 않는다. 예를 들면 $d > 14cm$ 이면 겹치는 영역이 전혀 없다.

[참고] 감지영역이 겹치는 각도에서는 2개의 센서에서 선도로봇이 감지된다는 것을 의미한다. 그리고 감지영역이 겹치지 않는 각도에서는 1개의 센서에서만 선도로봇이 감지된다.

(2) 적외선 광의 퍼짐각 분석

센서의 배치 간격이 30° 이므로, 센서에서 방출되는 적외선 광의 퍼짐이 없고, 선도로봇의 표면 형상이 완전한 원통형이라고 가정하면, 각도 ψ 가 $-90^\circ, -60^\circ, -30^\circ, \dots, 60^\circ, 90^\circ$ 인 경우에 1개의 센서에서만 선도로봇이 감지되어야 한다. 그런데 다른 각도에서도 감지가 되고, 특히 $d < 10cm$ 인 경우는 2개의 센서에서도 감지가 되는 것은 다음과 같이 해석할 수 있다. 첫째, 적외선 거리 센서에서 방사되는 적외선 광이 어느 정도의 퍼짐각을 가진다. 둘째, 적외선이 반사되는 선도로봇의 표면 형상이 완전한 원통형이 아니다. 실제로 로봇 몸통의 상반부는 원통형이나 3D 프린트로 제작되어 표면에 작은 요철이 존재하며, 센서가 부착된 부분에서는 형상이 상이하여 반사각이 달라진다. 그리고 로봇 몸체의 하반부는 모터, 바퀴, 제어기 등으로 인해 형상이 울퉁불퉁하여 빛의 반사각이 많이 달라진다.

(3) 적외선 광의 유효 퍼짐각

(Effective beam divergence)

앞에서 보았듯이 모든 각도에서 선도로봇이 감지되고, 거리가 $d < 10cm$ 인 경우는 2개의 센서에서도 감지되는 이유는 방사되는 적외선의 퍼짐과 로봇 표면 형상의 불균일에 의한 반사라고 볼 수 있다.

따라서 향후의 효율적인 해석을 위해 다음과 같이 가정한다 : i) 센서의 적외선 광은 이 두가지 영향을 모두 포함하는 정도의 유효 퍼짐각을 가진다. ii) 로봇 몸체의 형상은 완전한 원통형이다.

2. 센서의 거리특성 함수

위의 그림 4의 결과에서 센서 S2~S6에 대해 각 거리별로 출력값의 최대치를 구하였다(표 3). 예를 들면, $d=4cm$ 일 때, $-60^\circ \sim 60^\circ$ 의 모든 각도에 대한 출력의 최대값을 구하면 1540가 된다.

Table 3. Maximum outputs of S2~S6 along distance.

표 3. 센서 S2~S6의 거리별 최대 출력값

$d(cm)$	S2	S3	S4	S5	S6
2	2263	2395	2342	2298	2210
4	1457	1540	1485	1518	1472
6	1022	1075	1101	1142	1061
8	792	825	866	899	831
10	639	669	686	746	675
12	536	541	594	617	575
14	457	487	517	542	512
16	390	411	468	485	442
18	330	363	416	428	420
20	296	336	375	363	395

위의 표 3의 값을 이용하여 각 센서의 출력값 x 과 선도로봇과의 거리 d_s 의 관계식(거리특성 함수)을 매트랩의 커브 피팅 툴(Curve fitting tool)을 이용하여 구하였으며, 그림 5 및 표 4는 그 결과를 나타낸다.

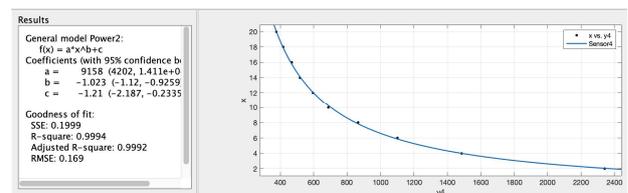


Fig. 5. Calculating distance functions (in the case of S4). 그림 5. 센서의 거리특성 함수 도출 (S4의 경우)

Table 4. Distance functions of the sensor S2~S6.

표 4. 센서 S2~S6의 거리특성 함수

Sensor	Distance function (d_s)
S2	$d_{S2} = 1483x^{-0.7299} - 3.728$
S3	$d_{S3} = 3877x^{-0.895} - 1.548$
S4	$d_{S4} = 9158x^{-1.023} - 1.21$
S5	$d_{S5} = 2242x^{-0.765} - 4.186$
S6	$d_{S6} = 3653^{-0.836} - 1.381$

[note] x : output of the IR sensor

이 거리 특성함수를 이용하면 임의의 센서 출력 값이 주어져도 이에 대응하는 선도로봇의 거리를 구할 수 있다.

3. 선도로봇의 위치인식 알고리즘

선도로봇의 위치(거리, 방향)은 다음의 2가지 경우로 나누어서 구한다.

가. 1개의 센서만 감지되는 경우

이 경우는 센서의 감지영역이 겹치지 않는 위치에 선도로봇이 있는 경우이다. 이때는 다음과 같이 거리와 각도를 구한다.

- 실제 거리 d : 거리특성 함수(표 4)를 이용하여 구한다.
- 각도 ψ : 감지된 센서의 각도로 한다.
(예: S5에서 감지된 경우, $\psi = 30^\circ$)

나. 2개의 센서가 감지되는 경우

이 경우는 센서의 감지영역이 겹치는 위치에 선도로봇이 있는 경우이다. 이때는 2개의 센서 값을 이용하여 선도로봇의 실제 거리와 방향을 구하는 알고리즘이 필요하며, 이는 다음과 같다.

그림 6은 센서 S4, S5에 선도로봇이 감지된 경우를 나타낸다. 센서가 방사하는 적외선 광의 퍼짐이 없다면, d_{S4} , d_{S5} 의 방향으로 나간 적외선은 센서로 다시 반사되지 않는다. 그러나 센서가 유효 퍼짐각을 가진다고 가정하였으므로, 센서에서 나간 적외

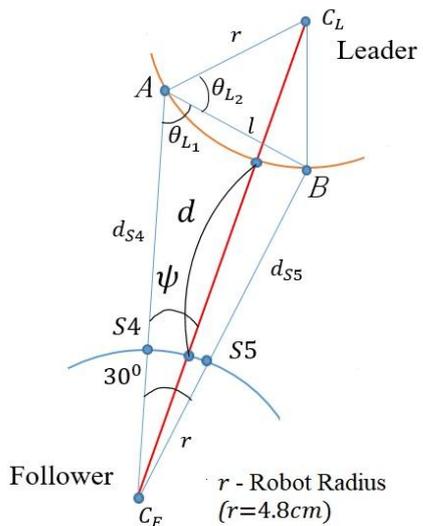


Fig. 6. Distance d and orientation ψ of leader robot.
그림 6. 선도로봇의 거리 d 와 방향 ψ

선이 다시 반사되어 센서로 들어올 수 있음을 유의하자. 따라서 센서에서 측정된 거리가 각각 d_{S4} , d_{S5} 라고 하자.

A, B, C_F 로 이루어지는 삼각형에서, A 와 B 사이의 거리 l 은 다음과 같다.

$$l = \sqrt{(d_{S4}+r)^2 + (d_{S5}+r)^2 - 2(d_{S4}+r)(d_{S5}+r)\cos 30^\circ} \quad (1)$$

역시 이 삼각형에서 $(d_{S4}+r)$ 과 l 사이의 각도는

$$\theta_{L1} = \cos^{-1} \frac{(d_{S4}+r)^2 + l^2 - (d_{S5}+r)^2}{2(d_{S4}+r)l} \quad (2)$$

로 주어진다. 그리고 A, B, C_L 로 이루어지는 삼각형에서 l 과 r 사이의 각도는 다음과 같다.

$$\theta_{L2} = \cos^{-1} \frac{l}{2r} \quad (3)$$

그러면 C_F, A, C_L 로 이루어지는 삼각형에서 d_{S4} 과 r 사이의 각도 θ_L 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_L = \theta_{L1} + \theta_{L2} \quad (4)$$

그리고 역시 C_F, A, C_L 로 이루어지는 삼각형에서

$$d+2r = \sqrt{(d_{S4}+r)^2 + r^2 - 2d_{S4}r\cos(\theta_L)} \quad (5)$$

이므로, 선도로봇까지의 거리 d 는 다음과 같다.

$$d = \sqrt{(d_{S4}+r)^2 + r^2 - 2d_{S4}r\cos(\theta_L)} - 2r \quad (6)$$

그리고 선도로봇의 각도 ψ 는 다음과 같다.

$$\psi = \cos^{-1} \frac{(d_{S4}+r)^2 + (d+2r)^2 - r^2}{2(d_{S4}+r)(d+2r)} \quad (7)$$

따라서, 2개의 센서값이 감지되는 경우는 식 (6), (7)을 이용하면 선도로봇의 거리 d 와 각도 ψ 를 구할 수 있다.

4. 추종 로봇의 동작 전략

센서 어레이의 특성 실험결과, 거리 d 가 10cm 이상인 경우는 대부분 1개의 센서만 감지된다. 이때는 감지된 센서의 각도가 방향값으로 계산되므로, 방향인식의 해상도가 비교적 큰 값인 30° 가 된다. 이는 30° 간격의 센서 7개로 구성된 센서 어레이의

구조상 불가피한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에 사용된 선도-추종 로봇시스템에서 추종로봇은 선도로봇과의 거리 목표값 d_{ref} 를 4cm ~ 10cm의 범위내에서 설정하는 것이 적합하다고 판단된다. 그리고 각도 목표값 ψ_{ref} 는 센서 S2~S6의 감지범위(약 $-60^\circ \sim 60^\circ$) 내에서는 임의의 값으로 설정이 가능하다.

IV. 선도로봇의 위치인식 실험 및 결과

1. 선도-추종로봇이 정지상태일 때

위에서 구한 위치인식 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 임의의 위치에 선도로봇을 두고 위치인식 실험을 하였다.

표 5는 임의의 17개의 점(P1~P16)을 대상으로한 실험결과를 나타낸다. 각 점의 위치는 표 5에서 d_{real} 과 ψ_{real} 로 주어지는 위치가 된다.

Table 5. Result of positioning of the leader robot.

표 5. 선도로봇 위치인식 실험 결과 (정지 상태일 때)

Point	$d_{real}(cm)$	$d_{sen}(cm)$	Err1	$\psi_{real}(^\circ)$	$\psi_{sen}(^\circ)$	Err2
P1	3.5	3.3	0.2	+14	14.65	-0.65
P2	3.7	4.1	-0.4	+18.4	18.1	0.3
P3	5	4.9	0.1	-45	-46	1
P4	5.6	5.65	-0.05	+17	16.55	0.45
P5	6	5.5	0.5	-20	-18	2
P6	6.3	6.5	-0.2	+14	14.7	-0.7
P7	6.9	6.8	0.1	+15	15.22	-0.22
P8	7.4	7.6	-0.2	+22	+30	-8
P9	7.7	7.6	0.1	+16	+16.1	-0.1
P10	8	7.8	0.2	0	0	0
P11	8	7.9	0.1	+15	+14.7	0.3
P12	8.9	8.8	0.1	+3	0	3
P13	10	9.8	0.2	-35	-30	-5
P14	11.3	11.2	0.1	+30	+30	0
P15	12	11.7	0.3	-15	0	-15
P16	12.4	12.7	-0.3	+24	+30	-6

[Note] $Err1=d_{real}-d_{sen}$, $Err2=\psi_{real}-\psi_{sen}$

실험 결과를 살펴보면 다음과 같다.

i) 1개의 센서만 감지되는 경우(P8, P10, P12~P16의 경우) : 인식한 거리 d 는 거의 정확하게 나

오지만, 각도 ψ 는 30° 의 배수로 주어짐을 알 수 있다. 이것은 1개의 센서만 감지되는 경우는 각도 ψ 를 감지된 센서의 각도로 하기 때문이다(“3.3절. 선도로봇의 위치인식 알고리즘” 참고).

ii) 2개의 센서가 감지되는 경우(그외 점의 경우) : 이 경우 거리 d 와 각도 ψ 는 식 (6), (7)을 이용하여 구하게 되며, 이 값이 실제값과 크게 오차가 없음을 알 수 있다.

따라서 제안한 위치인식 알고리즘이 정확하게 작동함을 알 수 있다.

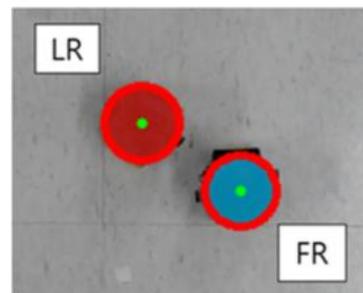
2. 선도-추종로봇이 이동상태일 때

이번에는 선도-추종로봇이 이동상태일 때 위치인식 실험을 하였다. 2.1절에서 설명한 로봇 2대를 선도로봇과 추종로봇으로 사용하였다. 선도로봇의 이동속도와 이동방향은 사용자가 스마트 폰의 앱을 이용하여 임의로 지령하여 주었다. 추종로봇은 본 논문에서 제안된 알고리즘을 이용하여 선도로봇의 거리 d 와 각도 ψ 를 인식하였다.

선도로봇과의 원하는 거리 $d_{ref}=8cm$, 각도 $\psi_{ref}=0^\circ$ 으로 주었으며, 센서에서 측정된 거리 d , 각도 ψ 가 각각 d_{ref} , ψ_{ref} 를 쫓아가도록 추종로봇의 움직임을 간단한 비례제어기를 구성하여 제어하였다.

로봇의 위치와 각도를 실시간으로 측정하기 위해 천장에 CMOS 카메라(Logitech C922, 해상도 960×480)를 부착하여 영상을 얻고, 이것을 PC에서 Open CV를 이용하여 영상처리를 하여 선도로봇의 중심과 추종로봇의 중심 및 방향을 구하여, 거리 d_{cam} 과 각도 ψ_{cam} 를 구하였고, 이것을 적외선 거리 센서에서 구한 거리 d , 각도 ψ 와 비교하였다.

CMOS 카메라의 FOV(Field of View)는 $200cm \times 100cm$ 이며, 픽셀당 해상도는 $0.208cm$ 이다.



(LR : Leader robot, FR : Follower Robot)

Fig. 7. Image processing of reader-follower robot.

그림 7. 선도-추종 로봇의 영상처리 화면

선도 로봇과 추종 로봇의 이동 경로는 그림 8과 같다. 선도 로봇(검은 선)은 $S_L \rightarrow E_L$ 의 경로로 움직였고, 추종 로봇(빨간 선)은 $S_F \rightarrow E_F$ 의 경로로 따라갔다. 이 이동 경로에서 임의의 10개의 위치를 선택하여 그때의 영상처리 결과인 거리 d_{cam} 과 각도 ψ_{cam} 을 구하고, 이것을 적외선 거리 센서에서 구한 거리 d , 각도 ψ 와 비교하였다(표 6).

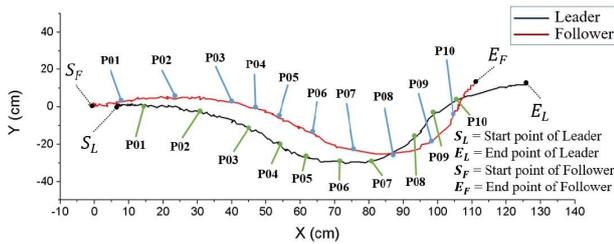


Fig. 8. Trajectory of the leader robot and follower robot. 그림 8. 선도 로봇과 추종 로봇의 이동 경로

Table 5. Result of the IR sensor and camera image.

표 5. 적외선 센서의 위치인식 결과(d , ψ)와 영상처리 결과(d_{cam} , ψ_{cam})의 비교

Point	d	d_{cam}	$d - d_{cam}$	ψ	ψ_{cam}	$\psi - \psi_{cam}$
P01	5.2	5.97	-0.77	15.4	15.03	0.37
P02	6.7	6.19	0.51	16.2	21.64	-5.44
P03	7.5	7.84	-0.34	45.9	44.83	1.07
P04	9.5	9.34	0.16	30	45.17	-15.17
P05	14.0	13.76	0.24	30	32.28	-2.28
P06	11.4	11.40	0.00	30	20.76	9.24
P07	6.7	7.21	-0.51	17.2	10.24	6.96
P08	7.8	8.77	-0.97	-46.4	-52.70	6.30
P09	9.8	10.67	-0.87	-30	-42.65	12.65
P10	7.2	8.60	-1.40	-13.5	-14.12	0.62

[note] unit : d (cm), ψ (°)

이 결과를 보면 다음을 알 수 있다.

i) 1개의 적외선 거리 센서만 감지되는 경우 : 센서에서 구한 각도 ψ 가 30°의 배수로 주어지는 경우이며, P04, P05, P06, P09가 이에 해당한다. 적외선 거리 센서에서 구한 거리 d 와 카메라에서 구한 거리 d_{cam} 은 거의 비슷한 값($|d - d_{cam}|$ 의 평균값이 0.32cm)임을 알 수 있다. 그리고 적외선 거리 센서에서 구한 각도는 모두 30°를 나타낸다. 참고로 이 경우는 카메라에서 구한 각도 ψ_{cam} 이 실제값에 가깝다고 볼 수 있다.

ii) 2개의 적외선 거리 센서가 감지되는 경우 : 그 외의 경우이며, P01~P03, P07~P08, P10가 이에 해당한다. 이 경우 거리 d 와 각도 ψ 는 식 (4), (5)를 이용하여 구하게 된다. 적외선 거리 센서에서 구한 거리 d 와, 카메라에서 구한 거리 d_{cam} 은 거의 비슷한 값($|d - d_{cam}|$ 의 평균값이 0.75cm)임을 알 수 있다. 그리고 적외선 거리 센서에서 구한 각도 ψ 와, 카메라에서 구한 거리 ψ_{cam} 은 거의 비슷한 값($|\psi - \psi_{cam}|$ 의 평균값이 3.46°)임을 알 수 있다.

따라서 제안한 위치인식 알고리즘이 정확하게 작동함을 알 수 있다.

표 6은 1개의 적외선 센서가 감지된 경우와, 2개의 센서가 감지된 경우, 적외선 센서와 카메라 값의 차이의 절대값의 평균값($|d - d_{cam}|$ 와, $|\psi - \psi_{cam}|$)를 나타낸 것이다.

Table 6. Comparison of infrared sensor and camera.

표 6. 적외선 센서와 카메라의 위치인식 결과의 비교

	Detected 1 Infrared sensor	Detected 2 Infrared sensors
Point	P04, P05, P06, P09	P01~P03, P07~P08, P10
Average of $ d - d_{cam} $	0.32cm	0.75cm
Average of $ \psi - \psi_{cam} $	9.84°	3.46°

영상처리의 오차를 2~3픽셀(약 0.4~0.6cm) 정도라고 본다면, 표 5와 표 6의 결과에서 적외선 센서의 위치인식 결과(d , ψ)와 영상처리 결과(d_{cam} , ψ_{cam})는 거의 비슷한 값을 보여줌을 알 수 있으며, 따라서 선도-추종 로봇이 이동상태일 때도 제안한 알고리즘의 선도 로봇의 위치인식이 정확함을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 저가형 소형 이동 로봇을 이용한 선도-추종 로봇 시스템을 개발하였다. 개발한 이동 로봇은 시중에서 쉽게 구할 수 있는 저렴한 부품을 사용하여 학교나 실험실 등에서 쉽고 빠르게 제작할 수 있는 장점이 있다. 그리고 이 로봇에 장착된, 7개의 저가형 적외선 거리 센서로 구성된 센서 어레이의 위치인식 특성을 분석하고, 이를 기반으로 선도 로봇의 위치인식 알고리즘을 제안하였다. 개발한 선도-추종 로봇을 이용한 정지 및 주행 실험을

통해 제안된 알고리즘의 선도로봇의 위치를 잘 인식함을 알 수 있었다.

그러나, 선도로봇이 2개의 센서에서 감지되는 경우(즉, 비교적 선도로봇이 가까이 있는 경우)는 거리와 방향을 정확히 인식할 수 있으나, 1개에서만 감지되는 경우(선도로봇이 멀리 있는 경우)는 거리의 정확한 인식은 가능하나 방향은 해상도는 30° 밖에 되지 않아 정확한 값을 구할 수 없는 단점이 있다. 하지만 이것은 30° 간격의 센서 7개로 구성된 센서 어레이의 구조상 불가피한 것으로 판단된다.

그렇지만 추종로봇의 동작제어기를 잘 설계하여 추종오차를 최대한 줄이고, 추종오차가 커지는 경우(즉, 2개의 센서가 감지되다가 1개의 센서가 감지되는 경우)는 센서의 감지 각도 ψ 를 바로 직전의 2개 센서에서 감지된 각도 값으로 사용하면, 각도의 해상도를 향상시키는 효과를 줄 수 있으므로 현재의 센서 어레이의 구조에서도 추종로봇의 동작 정밀도를 충분히 높일 수 있을 것으로 판단된다.

그리고 부가적으로 향후 방향의 해상도를 높이기 위한 연구가 더 필요하다고 판단된다. 가능한 방법으로는 센서 어레이의 구조를 개선하여 센서의 배치간격을 더 줄이거나, 또는 센서 어레이에 별도의 동작 메카니즘을 부착하여 로봇 몸체에 대해 상대적인 회전이 가능하도록 하는 방법, 또는 다른 종류의 센서를 추가하여 사용하는 방법 등을 고려할 수 있다.

References

[1] A. Loria, J. Dasdemir, and N. A. Jarquin, "Leader-Follower Formation and Tracking Control of Mobile Robots Along Straight Paths," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.24, No.2, pp.727-732, 2016.
DOI: 10.1109/TCST.2015.2437328

[2] H. Xiao, Z. Li, S.Member, "Formation Control of Leader-Follower Mobile Robots' Systems Using Model Predictive Control Based on Neural-Dynamic

Optimization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.63, No.9, pp.5752-5762, 2016.

DOI: 10.1109/TIE.2016.2542788

[3] Bong Seok Park, "Leader-Follower Based Formation Control of Multiple Mobile Robots Using the Measurements of the Follower Robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol.19, No.5, pp.385-389, 2013.

DOI: 10.5302/J.ICROS.2013.13.9001

[4] Jin-Hyun Park, Young-Kiu Choi, "Formation Control of Mobile Robots using Adaptive PID Controller," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol.19, No.11, pp.2554-2561, 2015.

DOI: 10.6109/jkiice.2015.19.11.2554

[5] X. Liang, Y. Liu, etc. "Leader-Following Formation Tracking Control of Mobile Robots without Direct Position Measurements," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.61, No.12, pp.4121-4137, 2016. DOI: 10.1109/TAC.2016.25478772

[6] Kwon Tae-Bum, Song Jae-Bok, "Grid Map Building and Sample-based Data Association for Mobile Robot Equipped with Low-Cost IR Sensors," *The journal of Korea Robotics Society*, Vol.4, No.3, pp.169-176, pp.1975-6291, 2009.

[7] Byoung-Ho Kim, "Design and Analysis of Collision Alarm Using Infrared Distance Sensor" *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol.24, No.6, pp.634-639, 2014.

DOI: 10.5391/JKIIS.2014.24.6.634

[8] G. Ruey Yu, P. Yen Liu, Y. Kai Leu, "Design and Implementation of a Wheel Mobile Robot with Infrared-Based Algorithms," *Advanced Robotics and Intelligent Systems*, 2016.

DOI: 10.1109/ARIS.2016.7886625

[9] Sharp, "infrared(IR) distance sensors GP2Y0 A51SK0Fmanual," https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a51sk_e.pdf

BIOGRAPHY

Battuya Sanjaakhand (Member)



2001 : B.S. in Dept. of Agricultural Engineering, Mongolian University of Life Sciences

2004 : M.S. in Dept. of Agricultural Engineering, Mongolian University of Life Sciences

2010~current : Lecturer, Dept. of Agricultural Engineering, Mongolian University of Life Sciences

2015~current : Ph.D Candidate in Major in Robotics and Intelligent control System, Korea Polytechnic University

Field of Interest : Robotics, Distance Sensor, Agricultural Equipments

Moon-Suk Jang (Member)



2018 : B.S. in Dept. of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic University

2018~current : M.S. Candidate in Dept. of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic University

Field of Interest : Robotics, Embeded System, IoT

Dong-Hyuk Cha (Member)



1984 : B.S. in Mechanical Design, Seoul National University

1986 : M.S. in Production Eng. KAIST

1995 : Ph.D. in Mechanical Eng. KAIST

1986~1998 : Researcher, Production Engineering R&D Center, Samsung Electronics

1998~current : Professor, Dept. of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic University

Field of Interest : Robotics, Artificial Intelligence, Manufacturing Equipments