

Nearness Diagram, Limit-Cycle 및 벡터장법을 이용한 이동로봇의 실시간 장애물 회피

A Real-Time Obstacle Avoidance of Mobile Robot Using Nearness Diagram, Limit-Cycle and Vector Field Method

김필겸*, 정운호*, 윤재호**, 지민석*, 이강웅***

Pil-Gyeom Kim*, Yoon-Ho Jung*, Jae-Ho Yoon**, Min-Seok Jie*, and Kang-Woong Lee***

요 약

본 논문에서는 동적인 환경에서 돌발 장애물을 회피하는 방법으로 Nearness Diagram, Limit-Cycle 및 벡터장법을 혼합한 새로운 방법을 제안한다. Limit-Cycle 방법은 정면장애물을 회피 하는데 사용되고, 벡터장법은 측면장애물을 회피 하는데 이용된다. 그리고 Nearness Diagram 방법은 로봇의 근접지역장애물을 회피하는데 사용된다. 제안된 방법은 시뮬레이션을 통해 그 성능을 증명하였다.

Abstract

In this paper, we propose a novel navigation method combined Nearness Diagram, Limit-Cycle method and the Vector Field Method for avoidance of unexpected obstacles in the dynamic environment. The Limit-Cycle method is used to obstacle avoidance in front of the robot and the Vector Field Method is used to obstacle avoidance in the side of robot. And the Nearness Diagram Navigation is used to obstacle avoidance in the nearness area of the robot. The performance of the proposed method is demonstrate by simulations.

Key words : Mobile Robot, Limit-Cycle, Nearness Diagram, Vector Field Method

I. 서 론

이동로봇의 행동기반 경로 계획의 방법에는 Deliberative기법과 Reactive기법 두 가지가 있다. 전자는 로봇이 센서를 이용하여 주변 환경에 대한 정보를 모아 모델을 만들거나 외부에서 주어진 모델을

이용하여 경로를 설계하는 기법이다[1]. 후자는 Deliberative 기법의 단점인 환경 변화에 대한 강인성 부족을 극복하기 위해 설계된 방법이다[2]. 최근 들어 이 두 가지 경로 계획의 장점을 결합한 기법들이 많이 나오고 있는데, 그 중 ND(Nearness Diagram) 방법과 2차비선형 함수를 이용한

* 한국항공대학교 전자공학과(School of Electronics Engineering, Hankuk Aviation University) 자동제어연구실

** 미즈로시스

*** 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부(School of Electronics and Telecommunication Engineering, Hankuk Aviation University)

· 제1저자 (First Author) : 김필겸

· 접수일자 : 2006년 2월 17일

Limit-Cycle 기법 그리고 벡터장법을 혼합한 항법을 본 논문에서 제안하고자 한다.

전방에 달린 8조의 초음파 센서를 이용하여 주변 환경을 인식하고 실시간으로 이동로봇이 목적지까지 형성한 경로를 주행하는 과정에서 발생하는 장애물을 실시간으로 회피하기 위하여 ND 항법, Limit-Cycle 기법과 벡터장법을 사용한다. 로봇이 장애물 지역을 주행 할 경우 정면장애물과 측면장애물을 각각 다르게 회피한다. 정면장애물의 경우 장애물 크기를 파악하고, 그에 따라 경로를 형성하여 추종하게 하는 2차 비선형 함수 Limit-Cycle 기법을 적용한다. 측면 장애물에 대해서는 장애물과 목적지 그리고 로봇 사이의 위치 관계에 따라 회피 각을 지정하여 장애물을 회피하는 벡터장법을 적용한다[3],[4]. Limit-Cycle과 벡터장법을 혼합으로 사용하였을 경우 장애물이 조밀하게 분포되어 있는 지역에서는 형성된 Limit-Cycle 궤도 내에 장애물이 존재할 수 있기 때문에 정확한 장애물 회피가 불가능하다. 이를 개선하기 위하여 로봇을 기준으로 1500[mm] 이내에 장애물이 조밀하게 분포되어 있는 지역에서는 ND 항법을 적용하려고 한다. ND 항법은 로봇을 중심으로 주변 환경을 n개의 Sector로 나누어 각 Sector에 감지되는 장애물의 거리정보 값을 이용하여 Diagram으로 나타내고, 이를 이용하여 장애물을 회피 할 경로를 형성하게 된다[5].

제안된 기법을 이용하여 장애물을 회피하는 성능을 모의실험을 통하여 증명하고자 한다.

II. Nearness Diagram (ND) 항법

로봇을 중심으로 전면 180°의 주변 환경을 원점을 기준으로 n개의 Sector로 나눈다[5]. Sector의 수는 센서의 수와 위치에 따라 다르게 적용한다. 각 Sector에 해당하는 실제 각은 다음 식에 의해 계산할 수 있다.

$$\Theta = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{n} s \tag{1}$$

s는 Sector번호를 나타낸다. 로봇의 초음파 센서에

의해서 각 Sector에 감지된 장애물의 거리 값을 회피해야 할 방향정보를 나타내 주는 PND(ND from the central Point)와 현재 로봇의 상태를 나타내 주는 RND(ND from the Robot bounds)로 나타낼 수 있다. PND는 로봇의 중점으로부터 장애물의 근접정보를 나타내며, PND값은 식 (2)로 구할 수 있다.

$$PND: \{0, \dots, n-1\} \rightarrow R_0^+, i \rightarrow PND_i$$

$$\text{if } \delta_i(L) > 0, PND_i = d_{\max} + 2R - \delta_i(L) \tag{2}$$

$$\text{else } PND_i = 0$$

여기서 R은 로봇의 반경을 나타내며, $\delta_i(L)$ 는 Sector i에서 장애물까지의 최소거리이고, 장애물이 없을 때에는 $\delta_i(L) = 0$ 이 된다. d_{\max} 는 초음파센서의 최대범위이다. RND는 로봇의 경계로부터 장애물의 근접정보를 나타낸다. RND값은 식 (3)으로 구한다.

$$RND: \{0, \dots, n-1\} \rightarrow R_0^+, i \rightarrow RND_i$$

$$\text{if } \delta_i(L) > 0, RND_i = d_{\max} + E_i - \delta_i(L) \tag{3}$$

$$\text{else } RND_i = 0$$

E_i 는 로봇의 반경 R과 같다.

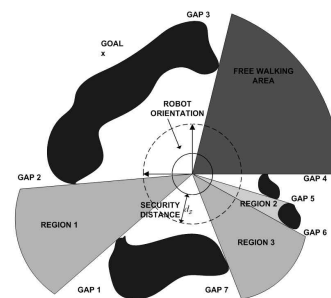
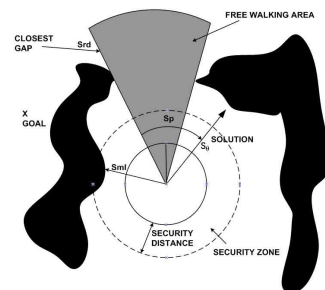


그림 1. Gap, Region, Free Walking Area를 표시
Fig. 1. Gaps, Regions, Free Walking Area.



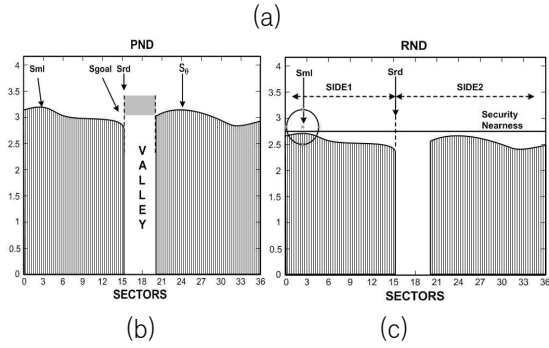


그림 2. Low Safety 1
Fig. 2. Low Safety 1.

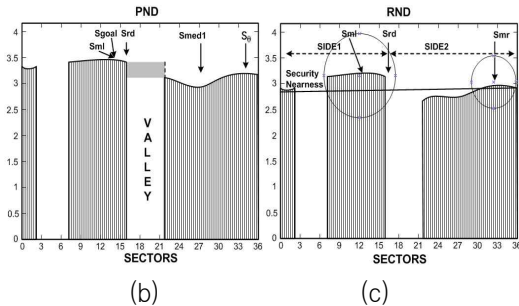
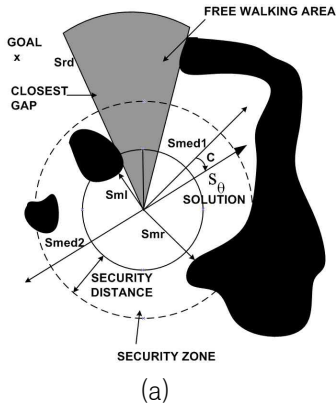


그림 3. Low Safety 2
Fig. 3. Low Safety 2.

그림 1에서 Gap은 로봇을 중심으로 장애물의 거리 값이 변화하는 부분이다. 인접한 두 개의 Gap사이를 Region이라 하는데, 로봇 주행이 가능한 부분으로 장애물이 존재하지 않는다. Free Walking Area는 목적지에 가장 가까이 있는 주행 가능한 Region을 말한다. S_{goal} 은 목적지를 포함하고 있는 Sector를 말하며, S_{rd} 는 Free Walking Area에서 S_{goal} 과 가장 가까운 Sector, S_{od} 는 가장 먼 Sector를 말한다.

LS1(Low Safety 1)은 로봇정면을 기준으로 Security Zone에서 S_{rd} 의 왼쪽과 오른쪽 중 어느 한 쪽에만 장애물이 존재하는 경우이며, LS2(Low

Safety 2)는 양쪽모두에 장애물이 존재하는 경우를 말한다. 이 때 그림 2와 그림 3에 나타나 있는 것과 같이, S_{rd} 를 기준으로 왼쪽과 오른쪽에서 로봇과 가장 가까운 장애물 거리를 각각 S_{ml} 과 S_{mr} 라고 한다. 장애물을 회피하기 위한 로봇의 이동방향을 S_{θ} 라고 한다.

III. Limit-cycle 경로 계획

다음의 두 식은 Limit-Cycle을 형성하기 위한 2차 비선형 함수이다[6].

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + x_1(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ \dot{x}_2 &= -x_1 + x_2(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \end{aligned} \quad (4)$$

안정성 검증을 위해 Lyapunov 후보함수를 다음과 같이 정한다.

$$V(x) = x_1^2 + x_2^2 \quad (5)$$

식(5)를 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= 2x_1\dot{x}_1 + 2x_2\dot{x}_2 \\ &= 2x_1x_2 + 2x_1^2(r^2 - x_1^2 - x_2^2) - 2x_1x_2 \\ &\quad + 2x_1x_2(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ &= 2V(x)(r^2 - V(x)) \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서, $V(x) < r^2$ 인 경우에는 \dot{V} 의 값이 양(Positive Definite)이 되고, $V(x) > r^2$ 인 경우에는 \dot{V} 의 값이 음(Negative Definite)이 된다.

따라서 $0 < c_1 < r^2$ 일 때, $V(x) = c_1$ 에 있는 모든 점들은 바깥쪽으로 향하고, $c_2 > r^2$ 일 때는, $V(x) = c_2$ 에 있는 모든 점들은 안쪽으로 향하게 된다.

로봇의 전방에 있는 장애물의 단면 길이와 중점을 검출하기 위해 로봇을 중심으로 하는 좌표에 점유박스들을 설정한다. 점유박스는 각각 가로 50[mm]와 세로 1500[mm]의 크기를 가지고, 그림 4와 같이 로봇의 왼쪽과 오른쪽 평면에 위치한다. 각각의 점

유박스에 점유된 초음파 값들 중 로봇의 Y축과 가장 가까운 초음파 값을 로봇과 장애물 사이의 거리로 취한다. 설정된 점유박스 안에 장애물이 감지되면 세 가지 경우로 나누어 장애물의 단면 길이와 중점을 계산하고, 계산 결과 값을 이용하여 Limit-Cycle 경로계획 방법을 적용한다. 초음파 센서의 특성상 측정값에 대한 오차의 가능성이 있다.

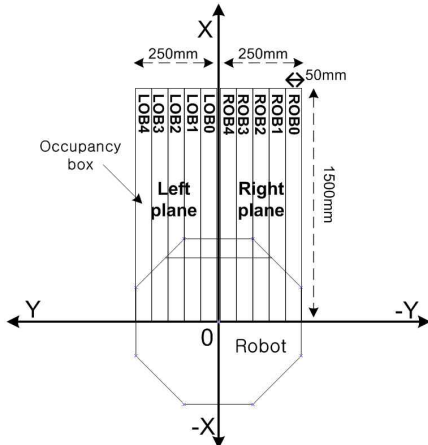


그림 4. 점유박스 설정
Fig. 4. Occupancy Box Setting.

로봇 왼쪽 평면의 점유박스에서만 장애물이 점유될 경우, X축과 가장 가까이 있는 점유박스와 가장 멀리 있는 초음파 좌표 값을 얻어 이를 연결하는 직선의 중심좌표를 식 (7)을 이용하여 계산하고, 그 값을 장애물의 단면 길이로 한다.

$$C_{x,y} = \frac{LOB_{min}(x,y) + LOB_{max}(x,y)}{2} \quad (7)$$

오른쪽 평면의 경우도 왼쪽과 동일한 방법으로 식 (8)을 이용하여 계산한다.

$$C_{x,y} = \frac{ROB_{min}(x,y) + ROB_{max}(x,y)}{2} \quad (8)$$

로봇 좌우평면의 점유박스에 장애물이 점유될 경우, X축과 가장 멀리 있는 초음파 좌표 값을 각각 얻고, 두 좌표의 중심좌표를 식 (9)로 계산하며, 이를 장애물의 단면 길이로 한다.

$$C_x = \frac{LOB_{max}(x,y) + ROB_{max}(x,y)}{2} \quad (9)$$

$$C_y = LOB_{max}(y) - \frac{|LOB_{max}(y)| + |ROB_{max}(y)|}{2}$$

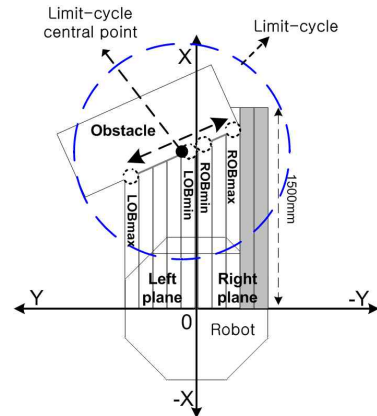


그림 5. Limit-Cycle 경로 생성
Fig. 5. Limit-Cycle Path Planning.

그림 5와 같이 점유박스를 이용하여 점유박스 범위 안에서 장애물의 가장자리를 검출하여 단면 길이를 계산하고, 식 (7),(8),(9)를 이용하여 장애물 단면의 중심좌표 (C_x, C_y)를 구하여, 식 (4)의 Limit-Cycle에 대한 원점으로 사용한다. 반지름은 장애물 단면 길이의 1/2과 로봇 크기의 1/2을 더한 값을 적용한다. 이 값을 이용하여 Limit-Cycle 경로를 형성한다.

로봇이 Limit-Cycle을 형성하고, 그 경로를 따라 회전 할 때, $\sum_{i=0}^3 S_i > \sum_{i=4}^7 S_i$ 는 시계방향으로, $\sum_{i=0}^3 S_i < \sum_{i=4}^7 S_i$ 는 반시계방향으로 회전한다. S_i 는 그림 6에서 각각 초음파센서들의 거리 값이다.

IV. 벡터장(Vector field) 경로 계획

로봇의 측면에서 감지된 장애물은 초음파 배열 구조상 Limit-Cycle 경로를 형성하기 어렵고, 안정성을 보장할 수 없으므로 이를 보완하기 위하여 벡터장법을 이용하여 장애물을 회피하게 한다. 8조의 초음파센서에서 얻은 장애물 거리정보 중 최소값만 얻어 로봇이 회피해야 할 각도를 표 1에 정리한 것과 같이 미리 설정 한다.

표 1. 로봇의 회피 각 설정 표

Table 1. Decision Table of Avoidance Angle.

초음파번호	0	1	2	3	4	5	6	7
S_{ideg} (deg)	0	-30	-50	-80	80	50	30	0

로봇의 회피벡터 좌표 값은 그림 6에서 $Min(S_i) \leq I_i$ 인 경우에는 식 (10)을 이용하고, 그림 7에서 $I_1 < Min(S_i) \leq I_2$ 인 경우에는 식 (11)을 이용하여 계산한다. 여기에서 $Min(S_i)$ 는 각 초음파센서에서 얻은 장애물 거리 값들 중 최소값이며, I_1 과 I_2 는 장애물에 의해 영향을 받는 장애물과 로봇 사이의 절대 거리이며 실험을 통해 설정한다.

$$\begin{aligned} T_x &= K \cos(S_{ideg} \pm \alpha) \\ T_y &= K \sin(S_{ideg} \pm \alpha) \end{aligned} \quad (10)$$

$$(11)$$

$$\begin{aligned} T_x &= K \cos(S_{ideg}) + K \cos(\phi) \\ T_y &= K \sin(S_{ideg}) + K \sin(\phi) \end{aligned}$$

여기에서 K는 회피 벡터의 크기를 결정하는 상수이고, S_{ideg} 는 $Min(S_i)$ 에 대한 회피각도로 표 1에 정리되어 있다. α 는 $[(I_2 - S_i)(90^\circ / I_1)]$ 으로, I_1 의 거리에 반비례하는 값으로 설정한다. 즉, $Min(S_i) \leq I_1$ 인 범위 내에서 로봇이 장애물에 근접해 있을 때에는 α 값이 커지고, 장애물에 떨어져 있을 때에는 α 값이 작다. $Min(S_i)$ 의 값이 왼쪽 좌표평면의 초음파들에 의해 감지된 값이면 음의 부호를 가지고, 오른쪽 좌표평면의 초음파들에 의해 감지된 값이면 양의 부호를 가진다.

여기에서 ϕ 는 로봇의 X축과 로봇의 중점으로부터 목적좌표로 향하는 벡터 사이에 생기는 각도이고, X축을 중심으로 반시계방향이면 양의 값을 가지고, 시계방향이면 음의 값을 가진다.

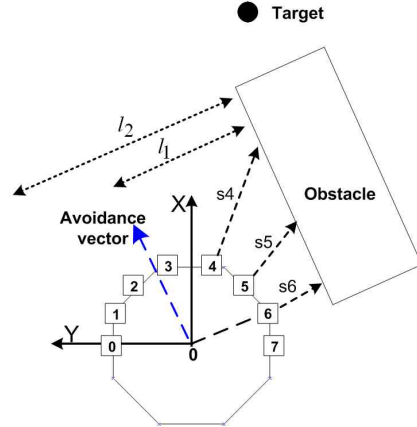


그림 6. $Min(S_i) \leq I_1$ 인 경우
Fig. 6. Case for $Min(S_i) \leq I_1$.

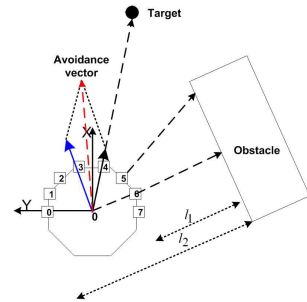


그림 7. $I_1 < Min(S_i) \leq I_2$ 인 경우
Fig. 7. Case for $I_1 < Min(S_i) \leq I_2$.

V. 모의실험

제안한 방법을 이동로봇에 적용하여 목적지까지 주행하는데 좁은 지역의 장애물도 효율적으로 회피할 수 있는지를 모의실험을 통해 확인하였다. Sector의 개수 n은 36이고, Security Distance d_s 는 800[mm], Security Nearness n_s 는 초음파 센서의 최대 감지 거리에서 d_s 를 제외한 부분을 말하는데, 이 때 최대감지 거리 d_{max} 는 ND방법 최대 적용범위인 1500[mm]이다. 알고리즘은 Visual C++을 사용하여 구현하였고, Saphira ver. 6.2 Simulator를 이용하여 모의실험을 하였다.

그림 8은 크기가 다양한 장애물을 배치하고, 로봇이 장애물을 회피하는 모의 실험한 결과이다. 짙은 색 경로는 Limit-Cycle과 벡터장법을 이용한 알고리즘을 적용한 경우로 장애물 사이의 좁은 공간을 통과 할 수 없어 장애물을 우회하는 경로를 형성하고

주행하였다. 반면, ND항법을 추가한 흐린색 경로의 경우, 조밀하게 분포되어 있는 장애물들을 구분하고, 좁은 공간을 통과하여, 보다 짧은 경로를 목적지까지 형성하고, 주행하였다.

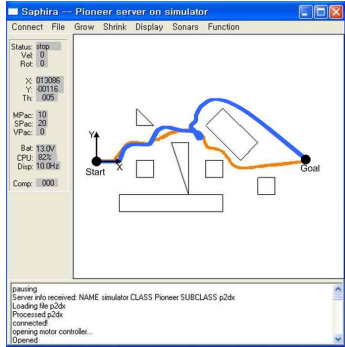


그림 8. 장애물 회피 모의실험
Fig. 8. Obstacle Avoidance Simulation.

VI. 결 론

본 논문에서는 Limit-Cycle과 벡터장법을 이용한 알고리즘에 ND항법을 추가로 적용하여 이동로봇 주행 알고리즘을 제안하였다. Limit-Cycle과 벡터장법을 이용한 알고리즘에서는 장애물이 조밀하게 분포되어 있는 지역에서 형성된 Limit-Cycle 궤도 내에 장애물이 존재할 수 있기 때문에 정확한 장애물 회피가 불가능하여 효과적인 주행경로를 형성 할 수 없었다. 따라서 조밀하게 분포되어 있는 장애물을 정확하게 인식하고 구분하여 주행경로를 보다 효율적으로 형성하고 주행하기 위하여 ND 항법을 추가로 적용하는 방법을 제안하였다. 모의실험을 통하여 로봇이 목적지까지 주행하는데 ND항법을 적용하는 것이 보다 효과적임을 확인하였다. 차기연구에서는 초음파 센서의 특성상 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위한 방법을 추가할 것이다.

참 고 문 헌

[1] D. Lefebvre and G. Saridis, "A computer Architecture for Intelligent Machines," *Proceedings of the IEEE international Conference on Robotics and Automation*, pp.2245-2250, France, May , 1992.
[2] R. Brook, "A Robust Layered Control System for

a Mobile Robot," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-2, no. 1, pp. 14-23, 1986.
[3] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 5, pp. 90-98, 1986.
[4] R. B. Tilove, "Local obstacle avoidance for mobile robots based on the method of artificial potentials," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 566-571, Cincinnati, OH, 1990.
[5] J. Minguz and L. Montano, "Nearness Diagram (ND) Navigation: Collision Avoidance in Troublesome Scenarios," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 20, no. 1, February, 2004.
[6] D.H. Kim and J.H. Kim, "A real-time limit-cycle navigation method for fast mobile robots and its application to robot soccer," in *the Robotics and Autonomous Systems*, January 2003.

김 필 겸 (金必謙)



2005년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학사)
2005년 2월~현재 : 한국항공대학교 전자공학과(석사과정)
관심분야 : 이동로봇, 로봇비전

정 윤 호 (鄭允皓)



2004년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학사)
2004년 2월~현재 : 한국항공대학교 전자공학과(석사과정)
관심분야 : 이동로봇

윤 재 호 (尹載皓)



2002년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학사)
2004년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학석사)
2004년 2월~현재 : 비즈로시스
관심분야 : 이동로봇, 로봇제어

지 민 석 (池旻錫)



1995년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학사)
1997년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학석사)
1997년 2월~2000년 : (주)한국레이컴 기술연구소
2000년~2002년 : (주)휴니드테크

놀러지스 기술연구소

2002년~현재 : 한국항공대학교 전자공학과(박사과정)

관심분야 : 로봇비전, 로봇제어, 모터제어, 이동로봇

이 강 웅 (李康熊)



1980년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학사)
1982년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학석사)
1983년~1984년 : 삼성전자 컴퓨터 개발부

1984년~1989년 : 서울대학교 전자공학과 (공학박사)

1994년~1995년 : 미시간주립대학교 방문교수

1989년~현재 : 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수

관심분야 : 로봇제어, 비선형제어