

분산제어명령 기반의 비용함수 최소화를 이용한 장애물회피와 주행기법

Obstacle Avoidance and Planning using Optimization of Cost Fuction based Distributed Control Command

배동석^{1*}, 진태석²

Dongseog Bae^{1*}, Taeseok Jin²

〈Abstract〉

In this paper, we propose a homogeneous multisensor-based navigation algorithm for a mobile robot, which is intelligently searching the goal location in unknown dynamic environments with moving obstacles using multi-ultrasonic sensor. Instead of using “sensor fusion” method which generates the trajectory of a robot based upon the environment model and sensory data, “command fusion” method by fuzzy inference is used to govern the robot motions. The major factors for robot navigation are represented as a cost function. Using the data of the robot states and the environment, the weight value of each factor using fuzzy inference is determined for an optimal trajectory in dynamic environments. For the evaluation of the proposed algorithm, we performed simulations in PC as well as real experiments with mobile robot, AmigoBot. The results show that the proposed algorithm is apt to identify obstacles in unknown environments to guide the robot to the goal location safely.

Keywords : Mobile Robot, Navigation, Ultrasonic sensor, Distributed control

1* 정회원, 주저자, 한국폴리텍대학, 스마트전자제어과 교수 1* Dept. of Smart Electronics Control

E-mail: dongsbae@kopo.ac.kr

2 Corresponding Author, Professor Dept. of Mechatronics

2 정회원, 교신저자, 동서대학교, 메카트로닉스공학과 교수

E-mail: jints@dongseo.ac.kr

1. 서론

최근 이동로봇기반의 서비스 활용도가 폭넓게 적용되면서 지능적 주행을 위한 주위환경을 인식과 자율적 주행을 위한 영상카메라, 레이저, 적외선, 초음파 등의 센서융합을 이용한 응용이 폭넓게 응용되고 있다. 그 중에서 저가격의 초음파를 이용한 많은 연구가 진행되고 있고 많은 제품이 나와 있으나, 비전을 이용한 이동로봇은 입력된 영상으로부터 필요로 하는 정보를 얻기 위한 환경 인식 및 장애물 회피 등의 각 수행별 명령을 수행하기 위한 융합명령기반 알고리즘이 필요로 한다.

본 논문에서 제안한 이동로봇의 제어 알고리즘은 명령융합의 방법을 근거로 하여 이동로봇의 동작에 따른 행동명령을 수행하는데 있어서 비용함수의 형태로 나타내었고, 이들의 융합은 퍼지논리로 추론한 가중치를 각 명령에 인가하여 결합한 비용함수로 최선의 선택을 취하는 방법을 적용하였다. 명령융합의 과정에서 가중치를 추론하는 퍼지논리부의 입력으로는 이동로봇과 장애물과의 거리 및 이동로봇의 속도와 같은 환경과 로봇의 상태에 대한 변수로서, 주위환경과 로봇의 상태 조건에 따라서 각 비용함수의 가중치를 변화하여 행동을 결정함으로써 미지의 환경에 지능적으로 대처할 수 있도록 하였다.

2. 이동로봇의 기구학

그림 1은 자체 제작된 이동로봇 IRL-2002의 외형이다. 두 개의 DC 모터로 각 바퀴를 구동하며 보조바퀴로 볼캐스터를 사용하였다. 부착된 센서로는 모터의 엔코더 이외에 자이로센(Gyro-sensor, ENV-05D)와 초음파 센서가 있다. 자이로센서는

주행중에 발생하는 회전속도를 측정하여 로봇의 방향인지에 사용하고, 1개의 개방형 초음파센서 모듈은 41cm에서 최대 10m까지의 거리 검출이 가능하고 35° 정도의 방사각을 가지는 특성이 있다. 모의 실험에서는 로봇에서 6m이상의 거리에 벽이 있다고 측정될 경우에는 잘못된 정보라고 가정하고 6m이상 측정된 거리정보는 무시하였다.

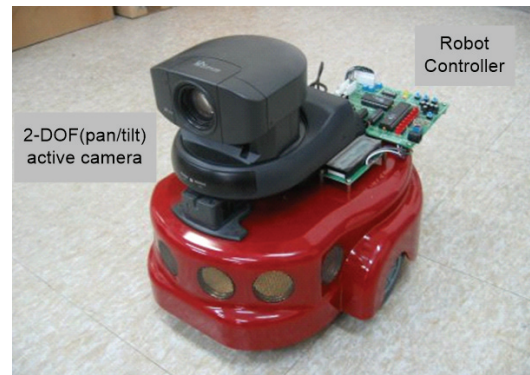


Fig. 1 Active camera system and AmigoBot mobile robot.

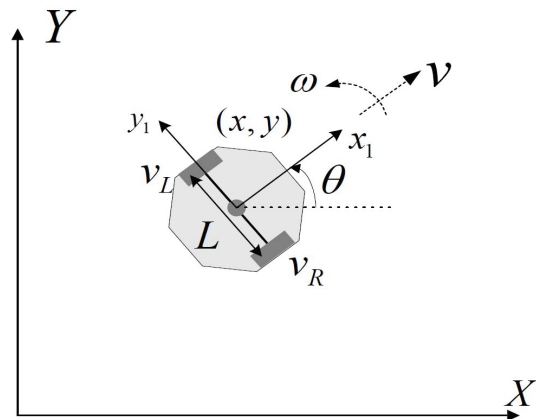


Fig. 2 Coordinate system for mobile robot.

그림 2와 같이 좌표계를 설정하면 이동로봇의 Jacobian 식, 진행방향 속도, 회전각속도는 4월 논문에서 발표한 기구학식과 동일하게 적용하였다[8].

3. 분산구조의 로봇주행명령

3.1 목적지의 방향결정 명령

목적지로의 도착을 고려하는 명령으로서 이동로봇의 방향에 대한 명령이 목적지와 가장 가까운 결과로 나타난다. 명령결과는 식 (1)과 같이 로봇의 현재위치에서 θ 의 방향으로 v 의 속도로 이동했을 때의 목적지와의 거리로서, θ 와 v 에 대한 비용함수로서 정의한다. 그림 3는 목적지 위치를 (5, 4)로 하여 (x,y) 공간에서 비용에 대한 평면을 나타낸다. 여기서 x_d, y_d 는 목적지 좌표, x_c, y_c, θ_c 는 현재 로봇의 위치와 방향을 나타내며 v 는 로봇의 속도로서 $v = v_{max} - k * |\theta_c - \theta|$ 이다. 동일한 입력에 대해서 이동로봇의 회전운동이 클수록 진행방향에 대한 운동은 작게 나타난다[11]. 따라서 속도에 대한 명령은 회전운동에 대해서 반비례관계로 최고속도 v_{max} 에서 회전운동에 대한 감속비 k 의 감속관계로 설정하였다.

$$E_d(\theta) = \{x_c + v * \Delta t * \cos(\theta_c + \theta) - x_d + \{y_c + v * \Delta t * \sin(\theta_c + \theta) - y_d \quad (1)$$

따라서 명령으로 표현되는 비용함수는 그림 3과 같이 방향 θ 에 따라 v 의 크기로 이동했을 때의 비용평면에서의 값들이 된다.

3.2 장애물 회피 명령

이동로봇의 장애물 회피를 위한 비용함수로서 센서정보에 기반한 주위 장애물 거리를 히스토그램 형태로 나타내는 방법을 사용한다. 장애물에 대한 거리 정보를 식(2)와 같이 2차 함수 형태의

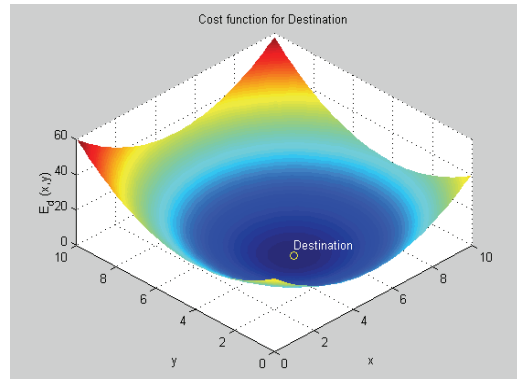


Fig. 3 Surface of cost function which direct to destination.

에너지로 표현하고 이를 모든 θ 에 대하여 조사하여 비용으로 나타낸다. 초음파 센서는 자체적으로 상당히 불확실성을 가지는데 Wai와 Liu는 이러한 불확실성을 가우시안 분포의 확률함수로 모델링할 수 있음을 보였다[5][9]. 따라서 센서정보의 불확실성 문제를 보완하기 위하여 측정된 값에 확률밀도함수를 곱하고 식(3)의 형태의 가중합 (Weighted Sum)을 취하여 각 방향에서의 장애물 에너지의 기대값을 구하면 Borenstein과 Koren이 제안한 VFH (Vector Field Histogram)의 형태의 장애물 회피를 위한 비용함수를 얻는다[9].

$$E_o(\theta) = d_{sensor}^2(\theta) \quad (2)$$

$$E_o'(\theta_k) = \sum_{i=k-l+1}^{k+l-1} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{i-k}{\sigma})^2} E_o(\theta_i) \quad (3)$$

동적인 환경에서 이동로봇이 작업하기 위해서는 동적인 변화를 인식하고 그에 대한 동작이 필요하다. 즉 이전시점에서 구성된 주위 환경과 현재의 주위환경의 모델에서 변화를 검출한다. 로봇의 위치는 계속 이동하므로 이전의 좌표계와 현재의 좌표계 사이의 변환관계가 정의되어야 한다.

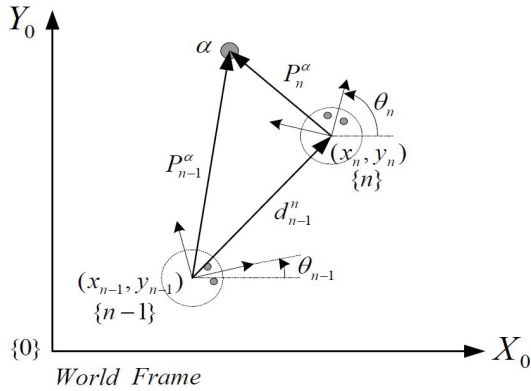


Fig. 4 Transformation of frame for mobile robot.

그림 4에서 이동로봇이 n-1 시점에서의 위치, 즉 {n-1} 좌표계를 기준으로 α 를 향한 벡터를 P_{n-1}^α 이라고 정의하고, n 시점에서의 {n} 좌표계를 기준으로 α 를 향한 벡터를 P_n^α 이라고 하면 P_{n-1}^α 과 P_n^α 의 관계는 식 (4)로 얻어진다.

$$P_n^\alpha = R_{n-1}^n (P_{n-1}^\alpha - d_{n-1}^n) \quad (4)$$

여기서 R_{n-1}^n 은 {n-1} 좌표계에서 {n} 좌표계의 회전으로 식 (5)의 형태이며 d_{n-1}^n 은 {n-1} 좌표계를 기준으로 {n} 좌표계로의 이동을 나타내며

식 (6)으로 정의한다.

$$R_{n-1}^n = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) & \sin(\Delta\theta) \\ -\sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

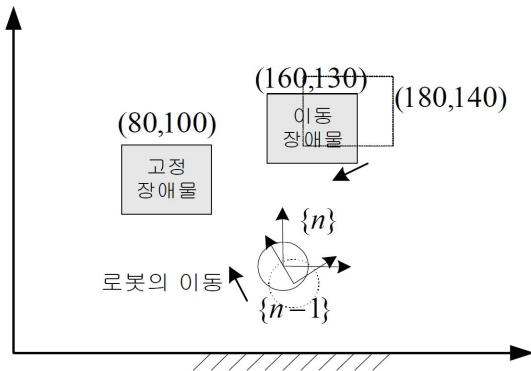
$$\Delta\theta = \theta_n - \theta_{n-1}$$

$$d_{n-1}^n = \begin{bmatrix} \cos\theta_{n-1} & \sin\theta_{n-1} \\ -\sin\theta_{n-1} & \cos\theta_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n - x_{n-1} \\ y_n - y_{n-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

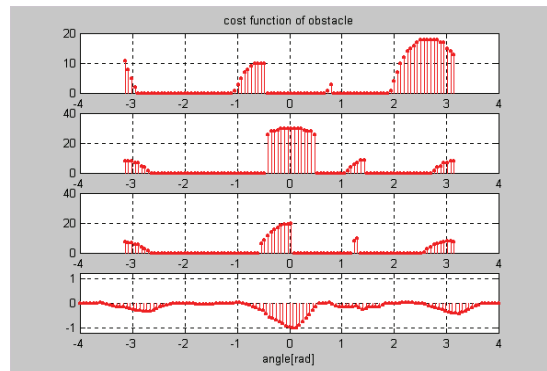
식 (4)에 의해서 {n-1} 좌표계에서 n-1 시점에 측정된 환경정보는 {n} 좌표계를 기준으로 다시 나타낼 수 있다. 따라서 W_{n-1} , W_n 을 각각 n-1 과 n의 시점에서 측정된 극좌표계의 환경정보라고 하면 W_{n-1} 을 {n}좌표계로 기준을 일치시키고 식 (7)에 의해 움직이는 물체를 검출할 수 있다[10].

$$movement = W_{n-1}^* (W_{n-1} - W_n) \quad (7)$$

그림 5(a)는 로봇의 좌표가 {n-1}에서 (155, 40, 120o), {n}에서 (150, 50, 90o)로 변화할 때 이동하는 장애물의 검출을 나타낸 것이다. 장애물 1은 고정하였으며 장애물 2는 {n-1}에서 (180, 140)이며, {n}에서 (160, 130)으로 로봇에 접근하는 방향으로 변화를 주었다.



(a) Movement of robot and environment.



(b) Environment data and movement data.

Fig. 5 Moving obstacle detection.

그림 5(b)의 첫 번째 그래프는 {n-1}에서 검출한 극좌표계의 환경정보이며, 두 번째는 {n}에서 검출한 정보를 나타낸다. 세 번째 그래프는 {n-1} 정보를 {n} 좌표계로 변환한 정보로서 식 (7)의 움직임 검출의 결과는 네 번째 그래프이다. {n} 좌표계를 기준으로 방향 0° 근처에서 거리정보가 음으로 큰 값이 나타나므로 다가오는 물체가 있음을 나타낸다. 움직이는 장애물이 검출되면 로봇은 동작을 중지하고 장애물의 이동 방향을 검출한 후, 진행할 방향을 판단한다. 로봇의 속도를 20 [cm/sec]로 설정하고 움직이는 장애물에 대하여 시뮬레이션한 결과, 장애물의 속도가 40[cm/sec] 이하에서는 검출가능 하였다.

3.3 회전운동의 최소화 명령

회전운동을 최소화하는 명령은 급격한 회전운동을 억제하여 바퀴회전의 최소화와 로봇의 부드러운 동작을 목적으로 한다. 회전운동의 비용함수는 현재방향에서 최소값을 가지며 회전각 θ 의 증가에 따라 2차 함수 형태의 함수로 식 (8)로 정의하였다.

$$E_r(\theta) = (\theta_c - \theta)^2, \theta_c : \text{현재 로봇각도} \quad (8)$$

3.4 가중치를 이용한 명령들의 융합

위에서 정의한 3가지 결과로 나타나는 비용함수 형태의 명령은 각 목적에 맞도록 분산적으로 구한 것이다. 이들 비용함수는 상반된 목적을 가질 수 있으며 모든 목적을 동시에 만족시키는 결과를 찾을 수는 없다. 따라서 이들 비용함수에 식 (9)와 같이 가중치를 부여하여 결합함으로써 최종결과에서 각 명령의 기여도를 다르게 할 수 있다.

$$E(\theta) = w_1 * E_d(\theta) + w_2 * E_o(\theta) + w_3 * E_r(\theta) \quad (9)$$

4. 실험 및 고찰

선행연구[4]를 바탕으로 제안된 경로계획 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 다양한 환경에서 주행 시뮬레이션을 수행하고, 임의의 장애물 및 벽을 배치하여 이동로봇이 목적지까지 충돌없이 안전하게 경로를 계획하여 주행하는지를 실험하였다.

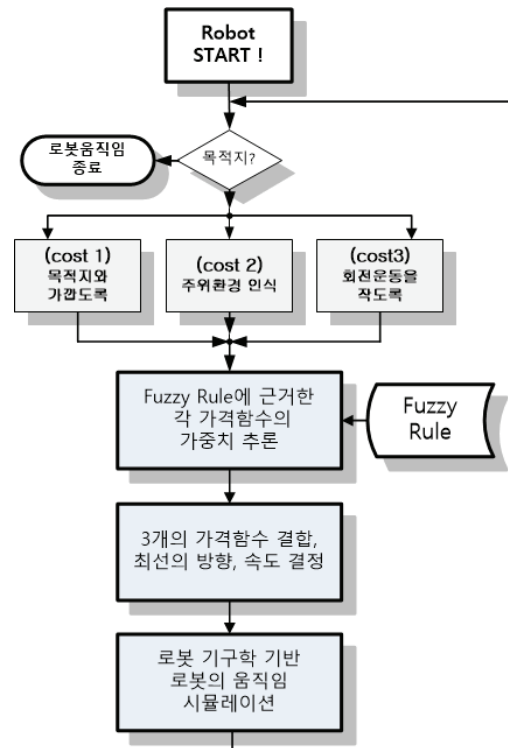
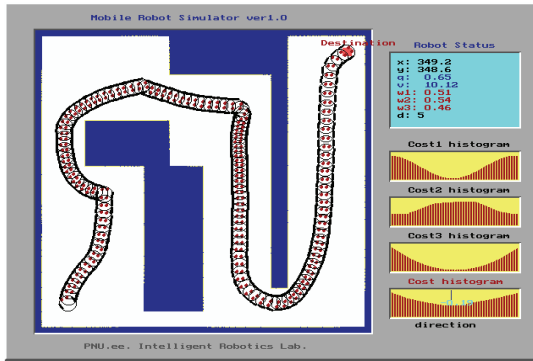
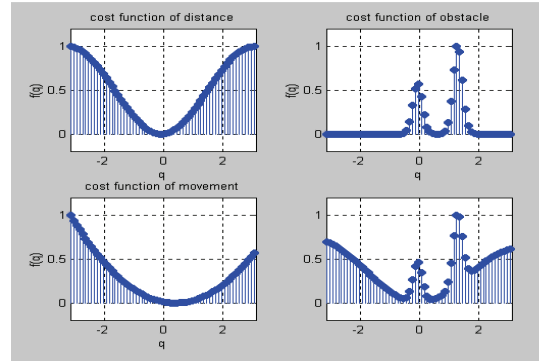


Fig. 6 Flowchart of mobile robot navigation.

실험을 위한 알고리즘 체계는 그림 6과 같다. 이때 로봇이 목적지를 확인하고 주행을 위한 3가지 비용함수에 맞는 값을 찾아가면서 식 (9)의 최



(a) Navigation in static environment.



(b) Cost functions and combined function.

Fig. 7 Commands and result for weight value $\omega_1=0.5$, $\omega_2=0.8$, $\omega_3=0.3$.

적화 방향으로 진행하게 된다.

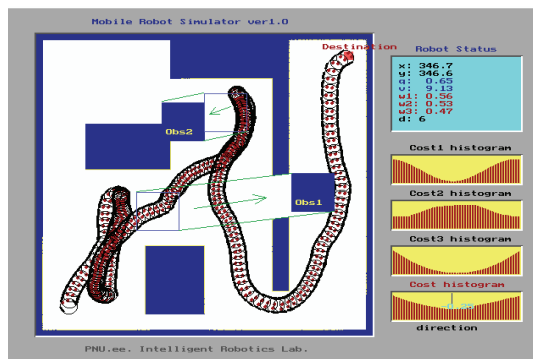
그림 7은 고정된 벽이 있는 환경에서 이동로봇의 주행을 시뮬레이션한 결과이다. 이때 그림 7(a)은 이동로봇에 대한 3가지의 비용함수와 $\omega_1=0.5$, $\omega_2=0.8$, $\omega_3=0.2$ 로 설정하였을 때의 전체 비용함수이고, 이 결과로 구해진 θ 는 첫 번째 장애물 회피 각도(26.26°)를 그림 7(b)와 같이 나타낸 것이다.

실험경로를 표시한 프로그램의 오른쪽 상단에는 로봇의 상태와 추론된 각 비용함수의 가중치를 나타내었으며 하단에는 3가지 비용함수의 히스토그램과 가중치가 인가되어 결합된 전체 비용함수를

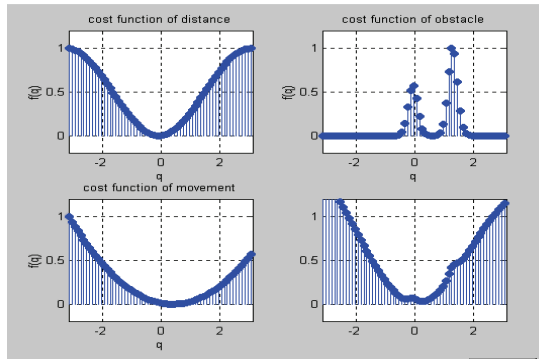
각각 나타내었다.

그림 8은 벽과 고정된 장애물 및 움직이는 장애물이 있는 환경에서의 이동로봇의 주행을 시뮬레이션한 결과이다. 이때 그림 8(a)은 이동로봇에 대한 3가지의 비용함수와 $\omega_1=0.7$, $\omega_2=0.1$, $\omega_3=0.8$ 로 설정하였을 때의 전체 비용함수이고, 이 결과로 구해진 θ 는 첫 번째 장애물에 대한 회피 각도(14.8°)를 그림 8(b)와 같이 나타낸 것이다.

주행할 궤적에 이동하는 장애물이 가로막고 있는 경우 먼저 다른 경로를 탐색하고 이후에 다시 장애물이 가로막던 경로를 조사하였다. 이때 장애물의 속도가 느려서 경로를 계속 가로막고 있으면



(a) Navigation in dynamic environment.



(b) Cost functions and combined function.

Fig. 8 Commands and result for weight value $\omega_1=0.7$, $\omega_2=0.1$, $\omega_3=0.8$.

다른 길로 우회하고, 경로가 생성되면 그 경로로 진행하였다. 이동로봇의 궤적을 살펴보면 움직이는 장애물로 인하여 여러번 경로를 수정했음을 알 수 있으며 이동 장애물에 대해서도 지능적으로 최적의 경로를 선택함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 미지의 동적장애물 환경에서 이동로봇이 목적지까지 자율적으로 이동할 수 있도록 명령융합 기반의 알고리즘을 이용한 장애물 회피 및 경로 계획 방법을 실험을 통하여 타당성을 검증하였다. 이동로봇이 장애물 인식, 목적지 추종, 최소 회전이라는 비용함수를 정의하여 비용함수가 최소가 되는 방향으로 진행할 수 있도록 가중치를 조절하여 동적 장애물의 상황에 따라 지능적으로 주행할 수 있도록 하였다. 제안한 명령융합형 알고리즘에 의해 시스템은 다중 초음파센서만을 사용하므로 구조적으로 간단하면서 높은 제어 성능을 가지며, 요구되는 목적을 유연하게 부가할 수 있어 퍼지규칙에 의해 언어와 같은 쉬운 방법으로 이들을 결합할 수 있는 장점이 있다. 시뮬레이션 및 실험 결과에서 이동로봇은 미지의 동적 환경에서 주위 이동 장애물에 적응하면서 목적지를 최적의 경로로 주행하는 것을 확인하였다.

사 사

본 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1D1A1B04932124).

참고문헌

- [1] Y. Arai, T. Fujii, H. Asama and Y. Kataoka, "Adaptive behavior acquisition of collision avoidance among multiple autonomous mobile robots," Proc. IROS, pp. 1762-1767, (1997).
- [2] J. Borenstein and Y. Koren, "Potential field methods and their inherent for mobile robot navigation," In Proc. IEEE Int Conf. Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1398-1404, (1991).
- [3] T. Hessburg and M. Tomizuka, "Fuzzy logic control for lane change maneuvers in lateral vehicle Guidance," IEEE Control Systems, vol. 14, no. 4, pp. 55-63, (1994).
- [4] T.S. Jin, "Fuzzy Inference Based Collision Free Navigation of a Mobile Robot using Sensor Fusion," The Korean Society of Industry Convergence, vol.21, no.2, pp.95-101, (2018).
- [5] H. Liu, N. Stoll, S. Junginger, and K. Thurow, "Mobile robot for life science automation," Int. J. Adv. Robot. Syst., vol. 10, pp.1-14, (2013).
- [6] J. Miura and Y. Shirai, "Vision and Motion Planning for a Mobile Robot under Uncertainty," The International Journal of Robotics Research, Vol. 16, No. 6, pp. 806-825, (1997).
- [7] A. Al-Mayyahi, W. Wang, P. Birch, "Adaptive Neuro-Fuzzy Technique for Autonomous Ground Vehicle Navigation," Robotics, Vol. 3, pp. 349-370, (2014).
- [8] C. Chen, P. Richardson, "Mobile robot obstacle avoidance using short memory: A dynamic recurrent neuro-fuzzy approach," Trans. Inst. Measur. Control, Vol. 34, pp.148-164, (2012).
- [9] R. Wai, C. Liu, and W. Lin, "Design of switching path-planning control for obstacle avoidance of mobile robot," Journal of the Franklin Institute, Vol. 348, No.4, pp.718-737, (2011).
- [10] T.S. Jin, "Control and Calibration for Robot Navigation based on Light's Panel Landmark," Journal of the Korean Society of Industry Convergence, Vol. 20, No. 2, pp.89-95, (2017).

(접수: 2018.05.16. 수정: 2018.06.12. 게재확정: 2018.06.21.)