

RGB-D센서 기반의 경로 예측을 적용한 안전하고 효율적인 지역경로 계획

Planning of Safe and Efficient Local Path based on Path Prediction Using a RGB-D Sensor

문지영¹·채희원¹·송재복[†]

Ji-Young Moon¹, Hee-Won Chae¹, Jae-Bok Song[†]

Abstract: Obstacle avoidance is one of the most important parts of autonomous mobile robot. In this study, we proposed safe and efficient local path planning of robot for obstacle avoidance. The proposed method detects and tracks obstacles using the 3D depth information of an RGB-D sensor for path prediction. Based on the tracked information of obstacles, the paths of the obstacles are predicted with probability circle-based spatial search (PCSS) method and Gaussian modeling is performed to reduce uncertainty and to create the cost function of caution. The possibility of collision with the robot is considered through the predicted path of the obstacles, and a local path is generated. This enables safe and efficient navigation of the robot. The results in various experiments show that the proposed method enables robots to navigate safely and effectively.

Keywords: Obstacle avoidance, Mobile robot path planning, Path prediction, RGB-D Sensor

1. 서론

최근 자율주행 로봇은 다수의 동적 장애물이 존재하는 복잡한 환경에서의 활용이 요구되고 있다. 안정적이면서도 효율적으로 장애물을 피하기 위해서 레이저 센서, 초음파 센서, 스테레오 카메라, 키넥트 등의 센서 정보를 활용한 장애물 검출^[1], 그리고 장애물 회피경로 생성에 대한 다양한 연구가 제안되었다.

장애물 검출은 대체로 레이저 스캐너를 많이 이용하는데, 이 센서는 고가이며, 환경에 대한 3차원 정보를 제공하지 않는 단점이 있다. 따라서 환경 정보를 좀 더 효율적으로 활용하기 위하여 최근에는 영상센서를 기반으로 한 장애물 검출 기법이 다양하게 연구되고 있다. 영상센서를 이용한 장애물 검출방법

은 영상정보로부터 장애물의 윤곽선에 대한 특징을 추출하거나 학습된 특징을 정합하는 방식으로 수행된다^[2]. 그러나 이러한 기법들은 사전에 학습되지 않은 장애물을 검출하는 것이 어렵고, 환경의 영향을 많이 받는 단점이 있다.

검출된 장애물을 고려한 회피경로 생성 알고리즘은 artificial potential field (APF)^[3], dynamic window approach (DWA)^[4], vector field histogram (VFH)^[5] 등이 있다. 이 방법들은 범용적으로 사용되는 장애물 회피 기법이지만, 장애물의 현재 위치만을 이용하여 경로 계획을 수행하므로 동적 장애물의 이동 방향 및 속도가 고려되지 않은 회피경로를 생성한다. 이들 요소가 고려되지 않을 경우, 회피 동작이 장애물의 이동에 따라 시시각각 변화할 가능성이 있고, 이는 결과적으로 불필요한 모션을 생성시켜 로봇의 충돌 위험성을 증가시키는 것은 물론, 효율적인 주행을 어렵게 만든다. 이러한 동적 장애물의 이동을 고려하기 위해 BackgroundSubtractor^[6]와 같은 기법들을 적용한 연구가 제안되었지만, 자율주행 로봇에는 적용하기 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 기존 장애물 회피 방법의 문제점을 해결하기 위해 동적 장애물의 이동경로 예측을 적용한 새로운 접근 방법을 제안한다. 이 방법은 저가의 RGB-D 센서 하나만을 사

Received : Jun. 12. 2017; Revised : Apr. 21. 2018; Accepted : May. 9. 2018

※ This research was supported by the MOTIE under the Industrial Foundation Technology Development Program supervised by the KEIT (No. 10084589)

1. Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (younggod91@korea.ac.kr / anakin722@korea.ac.kr)

† Corresponding author: Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (jbsong@korea.ac.kr)

용하여 장애물의 검출과 추적을 수행하고, 추적된 장애물의 이동 경향 계산 및 **probability circle-based spatial search (PCSS)** 기법을 제안해 현 시점 이후 장애물의 이동경로를 예측한다. 장애물 예측경로는 로봇과의 충돌 가능성을 예상하는 데에 사용되며, 로봇과의 충돌이 예상되는 장애물의 이동경로는 확률 모델링을 통해 주의비용(**caution cost**) 함수를 형성한다. 주의 비용 함수는 구배법의 경로비용의 한 항으로 추가되어, 장애물의 이동성을 고려한 지역 경로 생성 및 **Kanayama** 제어를 통해 로봇의 무의미한 주행 및 보행자 위협을 최소화할 수 있다.

본 연구의 기여는 다음과 같다. 1) 고가의 레이저 센서를 사용하지 않고, 저가의 RGB-D 센서정보만을 활용하여 빠르고 정확한 장애물의 검출과 추적이 가능하다. 2) 동적 장애물의 현재 위치만을 고려하는 것이 아니라 경로과 더불어 PCSS 알고리즘을 적용해 장애물의 이동성을 고려한 경로계획으로 실제 주행 솔루션에 적합하다. 3) 장애물에 대한 주의비용 함수 형성으로 보행자에 대한 위협이 작고, 효율적인 경로를 생성하여 동적 장애물이 존재하는 복잡한 환경에서의 주행에 적합하다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 장애물의 이동성 파악을 위한 장애물 검출과 경로 추적 방법에 대해 설명한다. 3장에서는 예측을 통한 안전 경로계획 방법으로 PCSS 알고리즘을 적용한 장애물의 이동경로 예측과 장애물에 대한 주의비용 함수 생성에 대한 내용을 설명한다. 4장에서는 제안한 알고리즘을 평가하기 위한 다양한 실험이 수행되며, 5장에서는 결론을 도출한다.

2. 장애물 감지 및 추적

2.1 장애물 감지

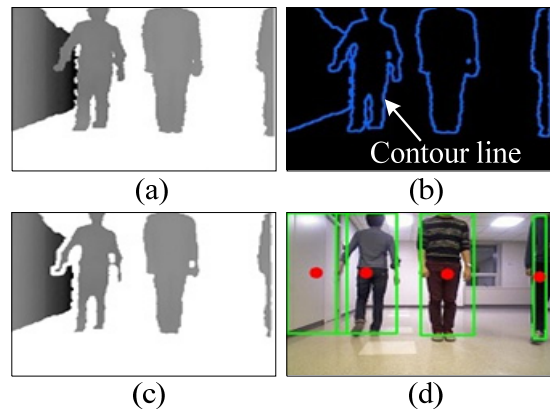
복잡한 환경에서의 장애물 검출은 환경과의 구분, 장애물 간의 구분이 중요하다. 본 논문에서 장애물의 검출은 RGB-D 센서로부터 얻은 거리정보를 그레이 스케일의 거리영상으로 변환하여 사용한다. 먼저 [Fig. 1]의 (a)와 같이 천장, 바닥 그리고 잡음을 제거한 거리영상에서 [Fig. 1]의 (b)와 같은 파란색 윤곽선을 얻는다. 이는 하얀색 선으로 적용되어 [Fig. 1]의 (c)와 같이 비슷한 거리를 가진 다른 환경 및 장애물과의 구분을 가능하게 한다. [Fig. 1]의 (c)에 Contour를 적용하여 장애물을 검출하고, 이를 영상 상에 나타낸 결과는 [Fig. 1]의 (d)와 같다. 녹색 사각형은 장애물이 존재하는 영역, 빨간 점은 장애물 영역의 중심을 나타낸다. 검출된 장애물의 위치정보는 거리정보를 통해 얻을 수 있으며, 이는 이동경로 추적에 사용된다.

2.2 장애물 추적

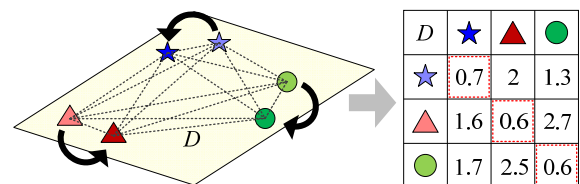
장애물의 이동성을 파악하기 위해서는 장애물 이동경로의 추적이 필요하다. 추적은 ID 정합 과정을 통해 이루어지며, 일반적으로 정합은 특정 서술자간의 비교를 통해 수행한다. 그러나 이 방법은 미지의 동적 장애물이 존재하는 환경에서는 사용하기에 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서 ID 정합은 장애물의 위치정보에 Hungarian 알고리즘⁷⁾과 Kalman filter⁸⁾를 적용해 수행하였다.

Hungarian 알고리즘은 비용행렬의 생성 및 비교를 통해 최적화된 정합을 하는 알고리즘이다. 본 논문에서는 관측된 장애물 간의 거리를 이용한 비용함수를 생성하여 ID 정합을 수행하고자 한다. 예를 들어, [Fig. 2]의 별, 세모, 동그라미로 표현된 동적 장애물이 일정 시간 동안 화살표 방향에 따라 위치가 변했을 경우, 각 위치 간의 거리(distance, D)를 계산하면 표와 같다. 이 과정은 매 순간 수행되므로 동적 장애물의 이동량은 크지 않다고 가정한다. 따라서, [Fig. 2]의 비용행렬상에서 최솟값을 가지는 성분끼리 동일한 동적장애물이라고 정의하고 이를 정합한다.

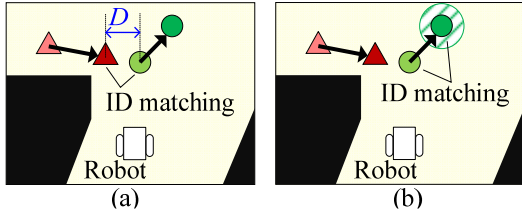
앞서 소개된 Hungarian 알고리즘에도 불구하고 여전히 존재할 수 있는 오정합을 방지하기 위해 본 연구에서 Kalman filter를 추가적으로 적용한다. 예를 들어, [Fig. 3]의 (a)의 세모,



[Fig. 1] (a) Depth image, (b) contour extraction, (c) separation by contour, and (d) detected obstacles



[Fig. 2] Concept of cost matrix



[Fig. 3] (a) False case of ID matching, (b) correct case of ID matching using kalman filter

동그라미로 표현된 동적 장애물이 일정 시간 동안 화살표 방향에 따라 위치가 변했을 경우, 로봇은 세모의 이전 위치를 관측하지 못한다. 그러나 거리 비용행렬에 의하면 현재 시점의 세모와 이전 시점의 동그라미가 한 물체라고 여겨져 둘의 ID가 정합된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 동적장애물의 속도를 고려하여 불확실성 영역을 Kalman filter의 상태벡터 계산을 통해 계산하였다. [Fig. 3]의 (b)의 빗금친 영역은 Kalman filter으로부터 계산된 불확실성 영역이다. 해당 영역 내에서 정합을 수행함으로써 이전 시점의 동그라미와 현재 시점의 동그라미 간의 올바른 정합이 가능하다.

3. 장애물의 경로 예측

장애물의 움직임을 고려하지 않고, 로봇과 장애물의 현재 위치만을 기반으로 한 경로계획은 충돌 위험성을 증가시키며, 주행 효율성을 감소시킨다. 따라서 안정적인 주행을 위해서는 장애물의 움직임을 고려하는 것이 필요하므로, 본 장에서는 장애물의 이동 위치를 예측하고, 사전에 충돌 지점을 찾아 우회하도록 유도하는 경로계획을 제안한다. PCSS 알고리즘은 예측 과정을 통해 장애물의 이동경로를 계산 및 예측하고, 이를 통해 얻어진 주의 비용함수를 이용하여 경로계획을 수행한다.

3.1 경로 예측

본 논문에서 경로 예측은 지나온 경로를 통해 알 수 있는 장애물의 진행각(θ_i) 및 이동거리(d_i) 정보를 활용한다. [Fig. 4]와 같이 예측에 적용될 진행각 및 이동거리에 대한 경향($\theta_{tendency}$, $d_{tendency}$)을 다음과 같이 구한다.

$$\theta_{tendency} = \sum_{i=1}^k \theta_i^* w_{\theta_i} \quad (1)$$

$$d_{tendency} = \sum_{i=1}^k d_i^* w_{d_i} \quad (2)$$

여기서 k 는 지나온 경로상의 경로점의 총 수를 의미하며,

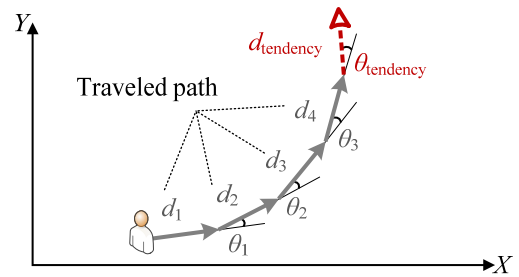
w_{θ_i} , w_{d_i} 는 진행각 및 이동거리에 대한 가중치를 의미한다. 이때, 지나온 경로의 효율적 사용을 위한 가중치(w_{θ_i} , w_{d_i})는 최근의 진행각 변화량($\theta_k - \theta_{k-1}$)과 이동거리 변화량($d_k - d_{k-1}$)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$w_{\theta_i} = \begin{cases} \frac{1}{k} & (\theta_k - \theta_{k-1} \leq 10^\circ) \\ 0.8 & (\theta_k - \theta_{k-1} > 10^\circ, i = k) \\ \frac{0.2}{k} & (\theta_k - \theta_{k-1} > 10^\circ, i \neq k) \end{cases} \quad (3)$$

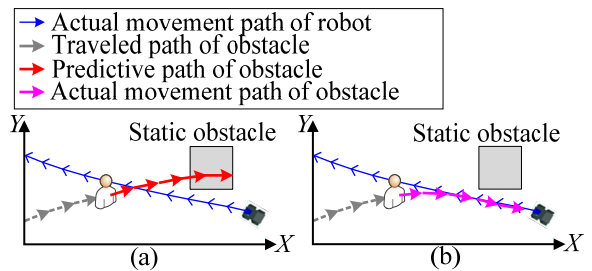
$$w_{d_i} = \begin{cases} \frac{1}{k} & (d_k - d_{k-1} \leq 0.3 \text{ m}) \\ 0.8 & (d_k - d_{k-1} > 0.3 \text{ m}, i = k) \\ \frac{0.2}{k} & (d_k - d_{k-1} > 0.3 \text{ m}, i \neq k) \end{cases} \quad (4)$$

이러한 가중치의 설정은 동적 장애물의 이동성이 기준(여기서는 10° , 0.3 m) 이상으로 변할 경우, 가장 최근의 변화에 큰 가중치를 두어 보다 정확한 예측을 하기 위해서이다. 위 식에 의해 장애물의 최근 진행각 변화량이 10° 이하일 경우 장애물의 진행 방향이 일관성을 가지므로 지나온 경로상의 모든 진행각에 같은 가중치를 부여한다. 또 다른 예로 장애물의 이동거리 변화량이 사람의 평균 보폭인 0.3 m 보다 커질 경우 가장 최근의 이동거리 d_k 에는 0.8 의 가중치가 부과된다. 따라서 이동거리가 커지는 경향을 반영한 예측이 가능하다.

위의 과정과 같이 지나온 경로만을 활용한 동적 장애물의 경로 예측은 [Fig. 5]의 (a)와 같이 경로 상에 존재하는 정적 장



[Fig. 4] Calculation of $\theta_{tendency}$, $d_{tendency}$ using traveled path



[Fig. 5] False case of path prediction

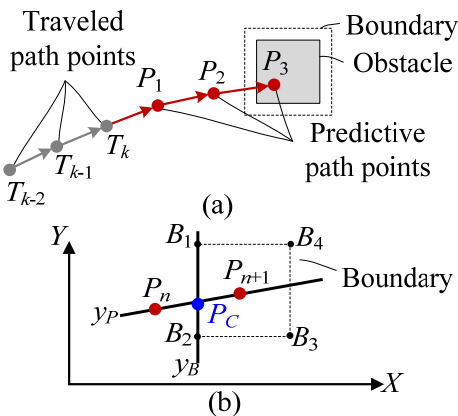
애물을 가로지르는 경로를 생성할 수 있다. 그러나 이러한 환경에서 사람과 같은 동적 장애물은 회피경로를 생성하므로 실제 이동하는 경로는 [Fig. 5]의 (b)와 같다. 이 경우, 로봇은 단순한 예측과는 다른 경로를 통해 다가오는 동적 장애물과 충돌이 발생할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 동적 장애물의 회피를 고려하여 경로 예측을 하는 확률 원 기반의 공간탐색(probability circle-based spatial search; PCSS) 기법을 제안한다. 이 기법은 원형 확률 영역을 기반으로 한 공간탐색을 통해 사람과 같은 동적 장애물의 회피경로를 예측하는 방법이다. 로봇은 센서를 통해 경로상의 장애물을 인식하지만, 동적 장애물의 예측경로를 모델링할 경우에는 경로상에 존재하는 정적 장애물을 함께 고려해야 한다. PCSS는 [Fig. 6]의 (a)에 나타난 동적 장애물의 지나온 경로점들 T_i 를 통해 구한 예측 경로점 P_i 와 안전 영역을 고려한 정적 장애물의 경계를 사용한다. 동적 장애물의 예측 경로상에 존재하는 정적 장애물은 [Fig. 6]의 (b)의 직선 $y_B y_P$ 의 교차점 $P_C(P_{Cx}, P_{Cy})$ 의 존재 여부로 감지하는데, 여기서 직선 y_P 는 n 번째 및 $(n+1)$ 번째 예측 경로점으로 구성된 직선이고, 직선 y_B 는 경계 영역의 $B_1(B_{1x}, B_{1y})$ 과 $B_2(B_{2x}, B_{2y})$ 로 구성된 직선이다.

만약 정적 장애물이 위치하는 곳에 동적 장애물의 예측경로가 겹쳐져서 두 장애물 간의 충돌이 예상될 경우, 동적 장애물은 회피를 위해 경로를 변경하므로 이를 사전에 감지해야 한다. 우선, P_C 가 다음 조건을 만족할 경우, 동적 장애물과 정적 장애물과의 충돌을 예측할 수 있다.

$$P_{nx} \leq P_{cx} \leq P_{(n+1)x} \tag{5}$$

$$P_{ny} \leq P_{cy} \leq P_{(n+1)y} \tag{6}$$

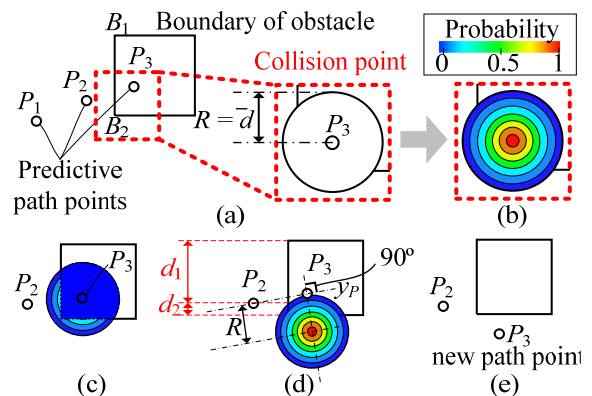


[Fig. 6] Detection of static obstacle on predictive path of dynamic obstacle

로봇과 장애물 간의 충돌이 예상되는 경우, 동적 장애물의 경로 변경을 고려하여 예측경로 재생성이 필요하다. PCSS는 [Fig. 7]의 (a)와 같이 충돌이 예상되는 예측 경로점 P_3 를 중심으로 동적 장애물의 지나온 경로를 이용해 구한 평균 이동거리를 반지름으로 하는 원을 생성한다. 생성 후, [Fig. 7]의 (b)와 같이 원의 중심에는 1의 확률을, 중심에서 멀어질수록 0에 가까운 확률을 부여한다. 여기서 확률은 동적 장애물이 해당 위치에 실제로 존재할 확률을 나타낸다. 그러므로 [Fig. 7]의 (c)와 같이 다른 정적 장애물에 의해 점유된 영역은 0의 확률이 부여되어, 예측 경로점 P_3 의 현재 위치는 0의 확률을 가지게 된다. 예측 경로점 P_3 을 재생성하기 위해 확률 원에서 가장 높은 확률을 갖는 영역 중 이전 경로점 P_2 와 가장 가까운 위치를 새로운 예측 경로점으로 지정한다. 만약 [Fig. 7]의 (c)와 같이 확률이 0.3 이상이 되는 영역이 존재하지 않을 경우, 해당 영역은 동적 장애물의 이동과는 무관한 영역으로 판단하고, 장애물이 이동할 영역을 재탐색하기 위해 원의 위치를 이동시킨다. 원의 위치 이동을 위해 우선 [Fig. 7]의 (d)와 같이 P_2 와 B_1 및 B_2 간의 거리 d_1, d_2 를 계산한다. 직선 y_P 와 수직인 직선 상에서 d_1, d_2 중 더 작은 값을 가지는 방향으로 반지름 R 만큼 원을 이동시킨다.

이동시킨 후, 원에서 확률이 가장 높은 영역과 이전 경로점과 가장 가까운 거리를 가지는 위치를 새로운 예측 경로점으로 지정하며, 그 결과는 [Fig. 7]의 (e)와 같다.

본 논문에서는 로봇과 장애물의 충돌을 예측하기 위해 로봇에 대한 예측경로도 생성한다. 로봇에 대한 예측경로 계산은 위치추정을 통해 얻은 위치정보를 이용하며, 이때 로봇의 예측경로는 일반적으로 사용되는 구배법 (gradient method)^[10]를 사용한다. 충돌 예측을 위한 과정이므로 실제 주행을 수행하기 위한 경로생성으로는 사용되지 않는다. 충돌 예측은 단순히 예측된 이동경로를 바탕으로 교차지점을 계산하는 것이 아니라, 로봇과 장애물의 이동속도를 함께 고려하여 동일한



[Fig. 7] New path point generated by PCSS

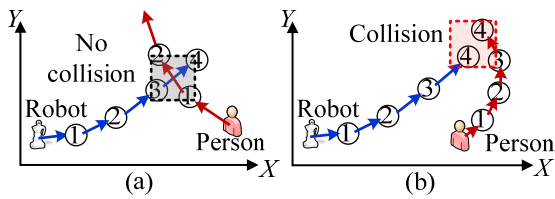
시점에서 로봇과 동적 장애물의 예측된 위치를 비교함으로써 수행된다. [Fig. 8]의 (a)는 장애물과 로봇 간의 충돌이 예상되는 지점이 존재하지 않으므로 회피경로 생성 없이 원래의 경로를 따라 주행하게 된다. 반면에, 그림 [Fig. 8]의 (b)는 충돌이 예상되는 지점이 존재하며 예상 정보를 바탕으로 사전에 회피하는 경로를 생성할 수 있어 안정적인 주행이 가능하다.

3.2 주의비용의 생성

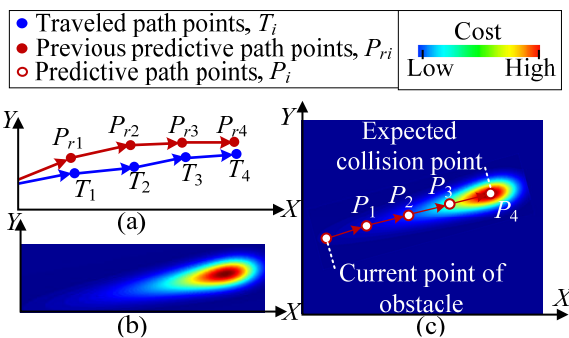
예측경로는 이전 위치정보를 기반으로 생성되므로 불확실성을 가진다. 본 연구에서는 이러한 불확실성을 감소시키고 충돌이 예상되는 장애물의 예측경로를 고려하기 위해 가우시안 혼합 모델(Gaussian Mixture Model)^[9]을 적용하여 주의비용(caution cost)을 생성하였다. 제안한 방법은 다음과 같이 장애물에 대한 실제 위치의 확률로 주의비용을 생성한다.

$$c(x, y) = \sum_{i=1}^k w^{k-i} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(T_{ix} - P_{rix})^2 - (T_{iy} - P_{riy})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

여기서 k 는 동적 장애물이 지나온 경로점의 총 수, w 는 가중치이다. w 에 $(k-i)$ 승을 적용한 것은 장애물의 이동 지점에 따른 시점을 고려하기 위함이며, $w = 1/\sigma$ 로 사용한다. 이는 실제 값과 예측 값의 차이가 작은 경우의 분포에 높은 가중치를 두어 반영하기 위함이다. $T_i(T_{ix}, T_{iy})$ 와 $P_{ri}(P_{rix}, P_{riy})$ 는 [Fig. 9]의



[Fig. 8] Path prediction and detection of a collision between a robot and an obstacle



[Fig. 9] Generation of caution cost

(a)와 같이 장애물의 지나온 경로점과 장애물의 이동을 예측했던 점을 의미한다. 이를 위 식에 의해 계산한 비용 분포는 [Fig. 9]의 (b)와 같으며, 이는 T_1, T_2, T_3 점을 거쳐 T_4 점에 장애물이 위치할 확률이다. 이 분포는 스케일 변경을 통해 [Fig. 9]의 (c)와 같이 장애물의 현재 위치와 충돌 예상 지점 P_4 사이의 주의비용으로 적용된다.

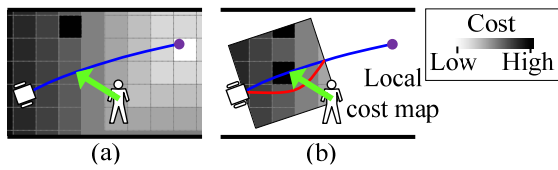
3.3 안전 지역경로 계획

기존의 자율주행을 위한 경로계획으로 많이 사용되는 구매법은 고유비용(intrinsic cost)과 근접비용(adjacency cost)이라는 두 가지 비용을 이용하여 경로를 생성한다. 고유비용은 지도상에 존재하는 정적장애물 및 벽 등을 반영한 비용이고 근접비용은 도착지점까지의 거리에 비례하는 비용이다. 이는 정적인 환경에서는 최적의 경로를 생성하지만 동적장애물이 존재하는 경우 이를 고려하지 못하고 매 순간 변화하는 불안정한 경로를 생성한다. 본 논문에서는 제안한 PCSS기반의 주의비용을 적용하여 동적장애물을 고려한 안전지역경로를 생성한다. 이를 통하여 고정된 환경에 대한 특징 외에도 동적 장애물의 위치를 예측하여 비용지도를 생성해 효과적으로 동적 장애물을 회피하는 지역 경로계획이 가능하다. PCSS를 이용한 지역 경로계획은 로봇을 기준으로 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 의 지역지도를 생성하여 기존의 비용함수에 주의비용 함수가 더해진 지역비용지도를 생성하고 이를 적용한 구매법에 의해 경로를 생성한다. 구매법에 적용되는 비용함수를 식으로 나타내면 다음과 같다.

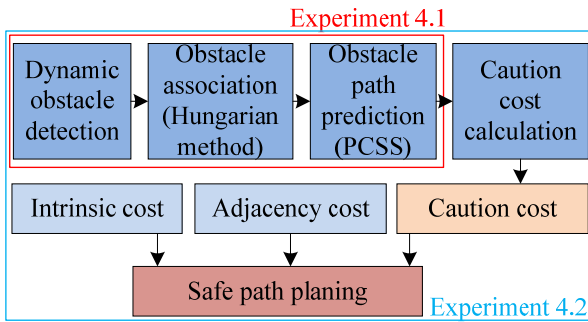
$$N(P) = \sum_{i=1}^N [I(p_i) + A(p_i, p_{i+1}) + C(p_i)] \quad (8)$$

여기서 $I(p_i)$ 는 점 p_i 에서의 고유비용, $A(p_i, p_{i+1})$ 는 점 p_i 에서 p_{i+1} 까지의 이동에 대한 근접비용, $C(p_i)$ 는 p_i 에서의 로봇과 장애물 간의 충돌과 관련되는 주의비용을 나타낸다. $N(P)$ 는 지도의 각 격자에 부여되는 비용으로 가장 낮은 비용들을 따라 경로가 생성된다. 장애물의 현재 위치와 충돌 예상 지점 사이에 부여된 주의비용은 충돌 가능성이 높은 지점일수록 큰 값을 가지게 된다. [Fig. 10]의 (a)는 기존의 구매법 기반의 경로 계획, [Fig. 10]의 (b)는 PCSS 기반의 주의비용을 고려한 구매법의 경로계획을 보여준다.

[Fig. 11]는 본 논문에서 제안한 안전경로계획 기법의 전반적인 흐름을 보여준다.



[Fig. 10] (a) Path planning using a cost map, and (b) local path planning using a local cost map



[Fig. 11] Overall flowchart of efficient and safe path planning

4. 실험

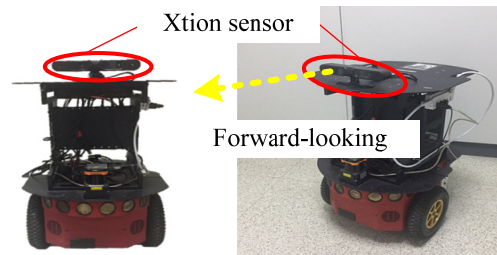
본 연구에서 제안한 RGB-D 센서를 이용한 장애물 검출 및 장애물 회피를 위한 지역경로 계획을 일련의 실험을 통해 검증하였다. 실험에 사용된 로봇은 Pioneer-3DX이며, [Fig. 12]와 같이 전방 지향의 Xtion 센서를 장착하였다.

실험은 [Fig. 13]의 (a)와 같이 동적 장애물인 다수의 사람이 존재하는 대학 건물의 로비 환경에서 얻은 실제 주행 데이터를 바탕으로 작성되었으며, 환경 지도는 [Fig. 13]의 (b)와 같다.

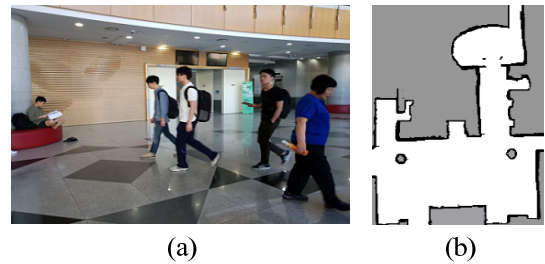
4.1 PCSS를 이용한 예측경로 검증

PCSS를 적용한 경로 예측 성능을 검증하기 위해 [Fig. 13]의 (b)의 환경에 임의의 정적 장애물 영역을 설정하여 실험을 수행한 결과를 [Fig. 14]에 나타내었다. 본 실험에서 검증하고자 하는 기법은 [Fig. 11]에 나타나 있는 것과 같다.

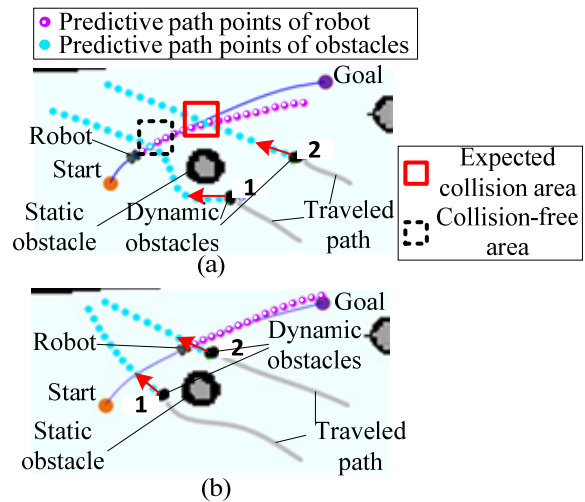
[Fig. 14]의 하늘색 점은 동적 장애물이 이동하게 될 경로를 예측한 것이고, 보라색 점은 로봇의 경로를 예측한 것이다. 동적 장애물의 예측경로는 지나온 이동경로를 바탕으로 추후 지나갈 경로를 현 시점에서 예측한 것을 볼 수 있다. 또한, 1번 동적 장애물의 경우, PCSS 기법을 적용하여 예측경로상에 존재하는 정적 장애물을 회피하는 경로를 예측한 것을 알 수 있다. 이동경로 예측은 로봇과 동적 장애물의 위치 및 주행 방향과 속도를 고려하여 수행하므로, 조건이 시시각각 변화하면 예측도 그에 맞게 재생성된다. 이러한 예측된 경로를 통해 로봇과



[Fig. 12] Experimental setup



[Fig. 13] (a) Test environment and (b) the grid map



[Fig. 14] Results of predictive path (a) at time t , and (b) at time $(t+n)$

장애물간 충돌 예상 시점 및 위치를 파악할 수 있었다.

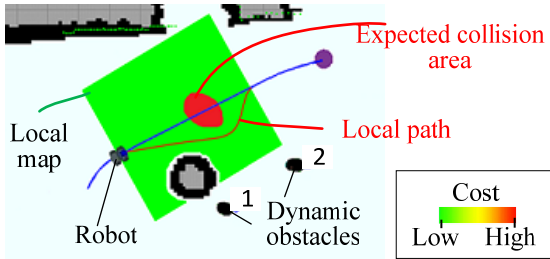
4.2 주의비용을 포함한 경로계획 실험

본 논문에서는 PCSS와 주의비용 함수가 적용된 지역 비용 지도 기반의 경로생성 기법을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 실험은 [Fig. 13]와 같은 환경에서 수행하였다. [Fig. 14]에서 확인할 수 있듯이 본 실험은 제안한 PCSS 기반의 주의비용을 이용하여 생성한 안전경로의 전반적인 기법을 검증한다.

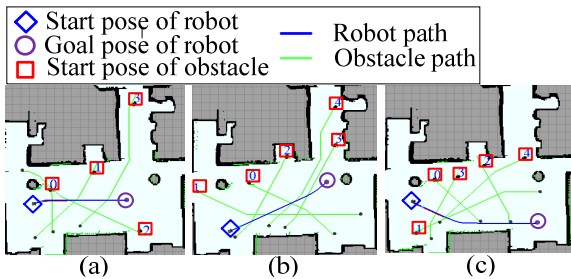
[Fig. 15]와 같이 생성된 사각형 지역지도는 녹색에 가까울수록 낮은 비용을, 적색에 가까울수록 높은 비용을 가진다. 즉, 적색 영역은 로봇과 장애물 간의 충돌이 발생할 확률이 높을 것으로 예측되는 영역이다. 이는 주의비용에 의해 높은 비용이 지역지도에 부과된 영역으로, 이 지역지도를 기반으로 구배법을 수행한 결과 동적장애물을 회피하는 안전하면서 효율적인 지역경로가 생성됨을 알 수 있다.

4.3 안전성과 효율성에 대한 실험

본 논문에서는 PCSS의 안전성 및 효율성을 검증하기 위해 기존의 가장 많이 사용되는 구배법 기반의 지역경로생성(local path planning)기법과 비교하여 실험하였다. 기존의 구배법은 고유비용과 근접비용만을 사용하므로 동적 장애물이 추후 이동하게 될 예측경로를 고려하지 않고 단순히 현재 관측된 장애물의 위치를 기반으로 경로를 생성하여 회피한다. 반면에, 본 논문에서 제안한 PCSS 기반의 주의비용을 고려한 경로생



[Fig. 15] Results of local path planning



[Fig. 16] Scenarios for safety experiments

[Table 1] Experimental results of safety experiments

Cases	No. of safety distance violation		Improvement rate (%)
	Conventional method	PCSS	
Fig. 16(a)	41	31	24.39
Fig. 16(b)	13	8	38.46
Fig. 16(c)	50	37	26.00

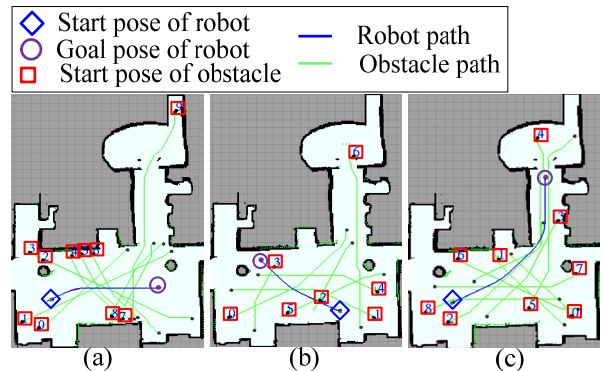
성 기법은 동적 장애물이 이동할 예측경로를 사전에 파악하고 장애물의 회피까지 고려하여 경로계획을 하므로 두 방법의 비교를 통해 로봇의 주행 안전성 및 업무 효율성을 평가할 수 있다.

본 논문에서 안전성 실험은 [Fig. 16]과 같이 동적 장애물이 존재하는 세 가지 시나리오를 바탕으로 수행되었으며, 이는 [Fig. 13]과 같은 환경에서 얻은 실제 주행 데이터를 바탕으로 작성되었다. 안전성 실험은 사람의 심리적, 육체적 안전거리를 고려하여 출발점과 도착점을 10번 왕복 주행 시에 로봇이 사람의 안전거리를 침범하는 횟수를 체크해 평가하였다. 이 때, 사람의 안전거리는 로봇 반경의 3배로 정의한다.

PCSS 알고리즘의 안전거리 침범 횟수는 [Table 1]과 같이 기존 기술과 비교해 평균 29% 이상 감소하였다. 따라서 PCSS 알고리즘을 이용한 주행은 사람들의 심리적 육체적 안전성을 증가시킬 것으로 예상된다.

효율성 실험은 [Fig. 17]과 같이 동적 장애물이 존재하는 3 가지 시나리오 하에 수행되었으며, 이는 [Fig. 13]과 같은 환경에서 얻은 실제 주행 데이터를 바탕으로 작성되었다. 효율성 실험은 출발점과 도착점을 10번 왕복 주행 시 1회 주행시간(총 주행시간/왕복 횟수)을 계산하여 평가하였다.

제안한 알고리즘의 1회 주행시간은 [Table 2]와 같이 기존 기술과 비교해 평균 10% 이상 감소하였다. 따라서 제안한 알고리즘을 통한 주행 방식이 더 효율적이다. PCSS 알고리즘을 이용한 주행은 충돌 위험성이 낮아질 뿐만 아니라, 작업을 신속히 수행할 수 있을 것으로 예상된다.



[Fig. 17] Scenarios for efficiency experiments

[Table 2] Experimental results of efficiency experiments

Cases	Traveling time per path (s)		Improvement rate (%)
	Conventional method	PCSS	
Fig. 17(a)	42.2	35.5	15.8
Fig. 17(b)	36.7	31.3	14.7
Fig. 17(c)	68.4	59.3	13.4

5. 결 론

본 논문에서는 RGB-D 센서를 이용하여 장애물을 검출하고, 지나온 궤적과 제한한 공간탐색 알고리즘을 이용한 경로예측 및 주의비용 함수를 통한 지역 경로계획 방법을 제안하였다. 안전성과 효율성 높은 주행을 위해 제안된 경로계획 방법은 실험을 통하여 입증하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. PCSS를 통해 동적 장애물의 예측경로를 생성하여 장애물과의 충돌 가능 지역을 예상하고 사전에 회피함으로써 동적 장애물을 보다 안전하게 회피할 수 있는 경로 생성이 가능하다.
2. 동적 장애물이 지나온 궤적과 정적 장애물의 위치를 고려한 PCSS는 동적 장애물의 회피까지 고려한 예측을 수행하여 효과적인 충돌 발생 여부 확인이 가능하다.
3. 장애물의 현재 위치만을 고려하여 충돌 예상지역이 시시각각 변하는 기존 기법과 달리 PCSS는 불필요한 회피를 하지 않고 예상되는 충돌만을 회피하므로 효율적인 경로를 생성한다.

추후에는 장애물의 지나온 궤적과 학습을 통한 장애물의 이동 패턴 정보를 융합하여 다수의 장애물이 존재하는 공간에서 효율적 주행이 가능한 지역 경로계획 방법에 대한 연구를 수행하고자 한다.

References

- [1] T. F. Wu, P. S. Tsai, N. T. Hu, and J. Y. Chen, "Use of Ultrasonic Sensors to Enable Wheeled Mobile Robots to Avoid Obstacles," *International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, Kitakyushu, Japan, pp. 958-961, 2014.
- [2] A. Chayeb, N. Ouadah, Z. Tobal, M. Lakrouf and O. Azouaoui, "HOG Based Multi-object Detection for Urban Navigation," *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Qingdao, China, pp. 2962-2967, 2014.
- [3] L. Zhou and W. Li, "Adaptive artificial potential field approach for obstacle avoidance path planning," *International Symposium on Computational Intelligence and Design*, Hangzhou, China, pp. 429-432, 2014.
- [4] P. Saranrittichai, N. Niparnan, and A. Sudsang, "Robust Local Obstacle Avoidance for Mobile Robot based on Dynamic Window Approach," *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Krabi, Thailand, 2013, doi: 10.1109/ECTICon.2013.6559615.
- [5] W. J. Yim and J. B. Park "Analysis of Mobile Robot Navigation using Vector Field Histogram According to the Number of Sectors, the Robot Speed and the Width of the Path," *International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, South Korea, pp. 1037-1040, 2014.

- [6] P. KaewTraKulPong and R. Bowden, "An Improved Adaptive Background Mixture Model for Real-time Tracking with Shadow Detection," *Video-Based Surveillance Systems*, pp. 135-144, 2002.
- [7] R. Jonker and T. Volgenant, "Improving Hungarian assignment algorithm," *Journal of Operations Research Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 171-175, Oct., 1986.
- [8] Z. Wang, X. Jiang, B. Xu, and K. Hong, "An online multi-object tracking approach by adaptive labeling and kalman filter," *Conference on research in adaptive and convergent systems*, Prague, Czech Republic, pp. 146-151, 2015.
- [9] J. Zhu, Y. Guo, J. Hao, J. Li, and D. Chen "Gaussian Mixture Model Based Prediction Method of Movie Rating," *IEEE International Conference on Computer and Communications*, Chengdu, China, pp. 2114-2118, 2016.
- [10] K. Konolige, "A gradient method for realtime robot control," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, Japan, 2000, doi: 10.1109/IROS.2000.894676.



문 지 영

2015 국민대학교 기계시스템공학부(공학사)
2017 고려대학교 일반대학원 기계공학과 석사

관심분야: 이동로봇의 주행 및 지능 로봇 시스템



채 희 원

2013 고려대학교 기계공학부(공학사)
2013~현재 고려대학교 일반대학원 기계공학과 박사과정 재학중

관심분야: 이동로봇의 주행 및 지능 로봇 시스템



송 재 복

1983 서울대학교 기계공학과(공학사)
1986 서울대학교 기계공설계학과(공학석사)
1992 MIT 기계공학과(공학박사)
1993~현재 고려대학교 기계공학부 교수

관심분야: 다양한 머니플레이터의 개발, 이동로봇의 주행, 지능로봇 시스템의 설계 및 제어