

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.6.549>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

키넥트 센서를 이용한 동적 환경에서의 효율적인 이동로봇 반응경로계획 기법[§]

두팔람 툽신자갈* · 이 덕 진**

* 군산대학교 기계자동차공학부 스마트자율시스템연구실

Efficient Kinect Sensor-Based Reactive Path Planning Method for Autonomous Mobile Robots in Dynamic Environments

Doopalam Tuvshinjargal* and Deok Jin Lee**

* Smart Autonomous System Lab, School of Mechanical & Automotive Engineering, Kunsan Nat'l Univ.

(Received August 20, 2014 ; Revised April 8, 2015 ; Accepted April 8, 2015)

Key Words: Mobile Robot(이동로봇), Kinect Sensor(키넥트 센서), Reactive Path Planning(반응경로계획), Virtual Plane(가상평면), Collision Avoidance(충돌회피), Sensor Fusion(센서융합).

초록: 본 논문에서는 동적 움직임을 갖는 장애물이 위치한 주행환경에서 이동로봇의 충돌회피 기능을 포함하는 효율적인 반응경로계획 기법을 제안하고자 한다. 로봇의 동적 장애물과의 충돌회피 기능을 위해서 반응경로계획기법을 기반으로 키넥트센서를 이용한 센서융합기법의 보완을 통해서 자율주행의 강건성을 증대시키고자 하였다. 반응경로기법에서 사용된 접근방식은 동적장애물을 가상좌표평면에서 지역관측개념을 이용하여 정적장애물로 좌표변환을 가능하게하며, 생성된 가상평면에서의 로봇과 장애물의 충돌 발생 가능한 속도와 경로의 운동학적 정보추출이 가능하게 된다. 또한 키넥트 센서 정보를 융합하여 장애물의 방향과 위치 정보를 추정하여 동적 환경에서의 주행성능의 정밀도를 증대시키고자 하였다. 본 연구에서 제안 기술의 성능을 검증하기 위해서 임베디드 로봇플랫폼과 여러 개의 동적 장애물을 이용하여 시뮬레이션 해석 및 실험을 수행하였다.

Abstract: In this paper, an efficient dynamic reactive motion planning method for an autonomous vehicle in a dynamic environment is proposed. The purpose of the proposed method is to improve the robustness of autonomous robot motion planning capabilities within dynamic, uncertain environments by integrating a virtual plane-based reactive motion planning technique with a sensor fusion-based obstacle detection approach. The dynamic reactive motion planning method assumes a local observer in the virtual plane, which allows the effective transformation of complex dynamic planning problems into simple stationary ones proving the speed and orientation information between the robot and obstacles. In addition, the sensor fusion-based obstacle detection technique allows the pose estimation of moving obstacles using a Kinect sensor and sonar sensors, thus improving the accuracy and robustness of the reactive motion planning approach. The performance of the proposed method was demonstrated through not only simulation studies but also field experiments using multiple moving obstacles in hostile dynamic environments.

1. 서 론

최근 자율주행자동차와 자율주행이 가능한 무인

로봇의 활용성에 관심이 증대되고 있다. 자율주행 시스템 기능의 구현을 위해서는 정적 및 동적 장애물 인식과 회피기능이 포함되는 효율적인 경로 계획 및 제어시스템이 응용단계에 있어서 매우 중요한 역할을 수행 한다.⁽¹⁾ 현재까지 대부분의 이동 로봇의 자율주행 관련 연구들은 정적 또는 일정 범위 내에 장애물이 위치한 동적 환경에서 운동계

[§] 이 논문은 2014년도 대한기계학회 IT 융합부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 서울대) 발표논문임

[†] Corresponding Author, deokjlee@kunsan.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

획을 수행하고 분석하는데 초점이 맞춰져 있으며, 동적환경에서의 효율적이고 강건한 경로계획은 로봇 분야에 있어 여전히 해결되지 않은 난제를 포함하고 있다. 로봇의 자율주행 계획법으로는 크게 계획기반(plan based approach) 및 행동기반(behavior based approach) 접근법과 같은 단면적인 자율주행 방식으로 나눌 수 있다.⁽²⁾ 계획경로 주행법이라 불리는 계층적 접근방식은 로봇이 환경을 인식 후 동작을 결정하여 경로추종을 수행하는 직렬적 제어 아키텍처를 갖는다. 대표적으로 결정론적(deterministic), 확률적(probabilistic) 로드맵 방식과 포텐셜 필드는 가장 보편적으로 사용되는 방식이 있으며, 이 방식들은 로봇 주변의 환경인식과 주행운동 구현 간에 직접적인 연관이 없기 때문에 주로 정적 환경에서 사용된다.^(3~6) 동적환경의 경우는 장애물 충돌회피 인식률을 높이기 위해 최근 Haar-like 기법, Adaboost 기법, SVM 기법 등을 적용한 알고리즘이 검증되었다.⁽⁷⁾ 또 다른 방식으로 Stentz⁽⁸⁾에 의해 제시된 D* 알고리즘은 장애물이 일정 공간에 위치할 경우에만 활용이 제한되거나 단일카메라 사용으로 인한 정밀도의 발생한다. 이러한 계획 기반 접근법은 로봇이 경로를 주행하는 동안 실시간으로 변화하는 동적 외부환경에 대한 반응계획을 세우는데 일반적으로 어려움을 갖게 된다.

반면 위 방식들과는 다르게 행동기반 접근법(Behavior Based Path Planning Method)^(9~12)은 상대적으로 변화하는 환경과 지역적 변화를 감지하여 예상치 못한 장애물 환경변화에 대해 반응경로를 계획 가능하게 하는 장점을 가지고 있다. 행동기반 접근법 중에서도 반응적경로주행(Reactive Path Planning)은 경로를 미리 계획하지 않고 주어진 환경에 실시간으로 장애물과 주변 환경에 따라서 반응적으로 계획하게 되는데 변화하는 환경에 신속하게 대응할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반응적 경로 계획법의 주 개념은 사용된 개별 센서 단위의 유닛으로 분할하고 제어 알고리즘의 고속 연산을 위해 계층적 모듈 아키텍처로 구성하는 것이 특징이다.⁽¹³⁾ 반면, 운동학 및 동역학적 정보를 바탕으로 동적 환경 변화와 제한사항(Constraints)을 함께 고려하여 반응경로를 세우는 연구도 진행되고 있다.^(14~17) 대표적인 예로 Chakravarthy 와 Ghose⁽¹⁵⁾는 충돌구역(Collision Cone) 개념을 이용한 운동방정식을 기반으로 한 주행, 충돌감지 접근법이 제안되었으며, 속도장애물 개념의 도입은 장애물의 속도정보를 이용하여 이동로봇의 충돌구역

(collision cone) 경로를 계산하여 충돌회피 기능을 가능케한다. 이 방식은 주로 장애물의 선형운동을 고려하여 한정적으로 적용되기 때문에 Large 와 Sekhavat⁽¹⁸⁾는 비선형 속도성분을 갖는 장애물에 대한 솔루션을 제공하는 기법을 제안하였다. 속도장애물(Velocity Obstacle)의 주 개념은 동적장애물의 회피를 위해 동적 요소를 분할된 정적 상태로 변환하는 것이다.⁽¹⁹⁾ 행동기반 모션계획(Behavior Based Motion Planning) 기법 중 센서를 기반으로 한 운동계획은 동적환경에서 주행을 위해 쓰이는 효과적인 방식이며, 동적 장애물들의 움직임에 대한 인지 및 예측을 통해서 이루어진다.^(20~22) 센서 기반 로봇자율주행방법 또한 장애물의 속도 정보를 활용하기도 한다.

본 논문에서는 가상공간(Virtual Plane)⁽¹³⁾에서의 반응경로계획기법과 센서기반 사물인식 및 회피기법의 결합을 통해서 강건성을 증대시키는 통합형 반응경로기법(Integrated Reactive Motion Planning Approach)을 제안하였다. IRMP 기법은 크게 두 가지의 특징으로 요약된다. 첫째, 반응경로계획기법⁽¹³⁾의 가상평면 기반 변환기법을 통하여 동적 장애물 운동을 정적 장애물화를 통해서 불확실한 주행환경에서의 동적 경로계획 문제를 단순화하였다. 둘째로, 반응경로계획기법의 충돌회피 기능의 강건성을 증대시키기 위해서 센서융합기법을 활용하여 로봇 주변의 동적환경을 인식할 뿐 아니라 장애물의 이동 속도와 방향을 추정하여 로봇의 충돌회피 제어의 효율성을 증대시켰다. 가상평면 방식은 동적 장애물과의 충돌회피를 위해 로봇의 방향과 속도를 센서정보를 활용하여 실시간으로 변화시킬 수 있다. 본 연구에서는 장애물의 인식 및 거리추정을 위해 RGB-D 센서가 내장된 Microsoft Kinect⁽²³⁾ 센서를 사용하였으며, 기존 단일카메라(monocular camera) 기반의 거리 계산 값 보다 높은 정확도의 데이터를 산출한다. Kinect 로 측정된 거리정보는 실제 실험 좌표상의 타겟 장애물의 좌표정보를 계산하는데 사용된다. 또한 가상평면과 센서기반 감지기능의 통합은 로봇이 동적 환경에서 충돌 없는 지역으로 이동하도록 속도와 방향에 대한 동적 윈도우를 제공하여 준다. 결과적으로 제안된 통합형반응경로계획은 충돌회피의 강건성과 주행에 있어서 정밀도가 뛰어난 기술이다. 제안 방법의 성능 검증을 위해 다중이동 물체들로 구성된 동적 환경에서의 자율주행에 대한 실제 실험을 통해 로봇 주행 및 충돌회피 성능을 확인하였다.

본 논문의 나머지 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 로봇의 운동학적 방정식과 기하학적 경로계획 방식이 기술되었으며, 3 장에서 가상평면 기법 기반 반응경로계획 개념을 설명하였다. 4 장에서는 키넥트 시스템에 대한 설명과, 키넥트를 이용한 장애물의 거리 및 방향 추정 기법 내용을 다루었으며, 마지막으로 5 장에서 제안된 기법의 성능을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였다.

2. 동적 모션플래닝 개념

이 장에서 동적 장애물이 존재하는 환경에서의 로봇의 상대속도 기반 충돌회피 기법을 소개한다.⁽¹³⁾ Fig. 1 은 동적환경에서 이동로봇의 경로주행에 있어서 요구되는 기하학적 파라미터들을 보여주며, 실제 주행필드는 고정좌표계 $\{W\}$ 와 원점 O 를 기준으로 표현되며, 모든 동적 장애물에는 지역좌표계가 적용된다. 본 장에서는 제안된 주행 방식은 로봇의 일정 반경 내(Coverage Area: CA)에 존재하는 정적 또는 동적 장애물을 회피하는 경로계획법의 기하학적 개념을 소개한다.

Fig. 1 에서 보여지듯이 로봇의 가시선 l_r 은 원점에서 시작하여 로봇(R)의 기준점까지 가상의 직선이다. 가시선 각 φ_r 은 l_r 을 기준으로 생성되며, 로봇(R)과 목표지점(G)의 거리 l_{gr} 은 다음과 같이 계산된다.

$$l_{gr} = \sqrt{(x_g - x_r)^2 + (y_g - y_r)^2} \quad (1)$$

위 식에서 (x_g, y_g) 은 전역좌표계에서 목표지점의 좌표이며, (x_r, y_r) 은 전역좌표계 $\{W\}$ 에서 로봇의

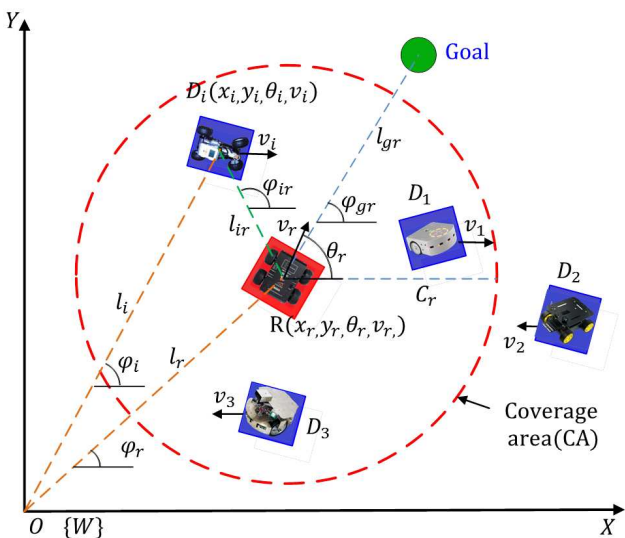


Fig. 1 Geometry of the reactive navigation problem. Illustration of the kinematic and geometric variables⁽¹²⁾

위치이다. 이동로봇은 차동구륜(differential drive) 메커니즘으로 작동하며 운동학적 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= v_r \cos \theta_r \\ \dot{y}_r &= v_r \sin \theta_r \\ \dot{v}_r &= a_r \\ \dot{\theta}_r &= w_r \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 a_r 은 로봇의 선형가속도, v_r 과 w_r 은 각각 선형속도 및 각속도를 나타낸다. (θ_r, v_r) 은 로봇의 제어입력이다. 가시선 l_{gr} 에 의해 발생한 가시선 각 φ_{gr} 은 다음과 같이 주어진다.

$$\tan \varphi_{gr} = \frac{y_g - y_r}{x_g - x_r} \quad (3)$$

i^{th} 동적장애물 D_i 의 운동방정식은 다음과 같이 가정된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i &= v_i \sin \theta_i \\ \dot{\theta}_i &= w_i \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서 장애물은 선형속도 v_i 및 각속도 w_i 를 가지며 θ_i 는 헤딩각을 나타낸다. 로봇과 i^{th} 번째 장애물까지의 유클라디안 거리 l_{ir} 는 다음과 같이 계산되며,

$$l_{ir} = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2} \quad (5)$$

가시선 각 φ_{ir} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\tan \varphi_{ir} = \frac{y_i - y_r}{x_i - x_r} \quad (6)$$

로봇과 장애물 간의 동적 충돌회피를 위한 범위 및 조향각의 변화는 다음과 같이 극좌표계에서 상대속도의 접선 및 직각성분의 속도에 의해 계산할 수 있다.

$$\dot{l}_{ir} = v_i \cos(\theta_i - \varphi_{ir}) - v_r \cos(\theta_r - \varphi_{ir}) \quad (7)$$

$$l_{ir} \dot{\varphi}_{ir} = v_i \sin(\theta_i - \varphi_{ir}) - v_r \sin(\theta_r - \varphi_{ir}) \quad (8)$$

위 수식으로부터 \dot{l}_{ir} 의 마이너스 기호($\dot{l}_{ir} < 0$)는 로봇과 장애물 D_i 사이의 거리가 가까워짐을 의미하고 0 ($\dot{l}_{ir} = 0$)인 경우에는 일정한 거리가 유지되고 있음을 나타낸다. 가시선 각 φ_{ir} 비율이 0 인 경우는 장애물 D_i 의 움직임이 수직선 상에 있음을 의미한다. 위와 같은 상대 극좌표 시스템은 간단하면서 로봇과 장애물간의 상대운동을 실시간으로 연산하여 표현하는 효율적인 방법이 된다.⁽¹³⁾

3. 센서융합 기반 반응경로계획 기법

3.1 가상평면기반 반응경로계획 기법

본 장에서는 가상평면 공간을 기반으로 지역관측기(local observer) 개념을 통하여 동적 장애물을 정적 장애물로 변환하는 방법에 대해 간략히 정리한다.⁽¹³⁾ 실좌표(real plane) 공간상의 장애물의 가상평면으로의 변환은 극부관측기(local observer)의 도입을 통해 충돌 가능성이 없는 경로로 주행하는 속도와 방향을 찾는 동적 충돌윈도우(collision window)를 제공함으로써 가능해진다. 이 변환을 거쳐 로봇 R 과 i^{th} 번째 장애물 사이의 충돌 경로는 가상로봇(virtual robot) R^v 과 장애물의 초기위치 $D_i(t_0)$ 간의 충돌회피 문제로 축소되며, 가시선 변화율 \dot{i}_{ir} 과 회전속도 $\dot{\phi}_{ir}$ 는 가상로봇 R^v 과 초기 장애물 $D_i(t_0)$ 사이의 상대속도 성분, 즉, 가상로봇 속도 v_r^v 와 가상로봇의 회전각 θ_r^v 을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{i}_{ir} = -v_r^v \cos(\theta_r^v - \phi_{ir}) \quad (9)$$

$$l_{ir} \dot{\phi}_{ir} = -v_r^v \sin(\theta_r^v - \phi_{ir}) \quad (10)$$

위 식에서 가상로봇 R^v 의 선속 v_r^v 과 방향 θ_r^v 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_r^v = \sqrt{(\dot{x}_i - \dot{x}_r)^2 + (\dot{y}_i - \dot{y}_r)^2} \quad (11)$$

$$\tan \theta_r^v = \frac{\dot{y}_i - \dot{y}_r}{\dot{x}_i - \dot{x}_r} \quad (12)$$

식 (7)과 (8)에 주어진 동적 운동계획을 위한 접선 및 수직방향 성분 수식은 지역관측기(local observer)인 가상로봇(virtual robot)의 관점에서 재 표현되며, 동적 충돌회피 문제가 정적 운동계획 문제로 변환된다.⁽¹³⁾

충돌감지는 가상평면(virtual plane) 상에서 표현되지만, 로봇이 존재하는 실제평면(real plane) 상에서 충돌회피 및 목표지점을 추종하는 것을 목적으로 하며, 실제 로봇의 속도 및 heading 각 제어 입력은 가상로봇과 장애물의 속도로부터 다음과 같이 계산된다.

$$v_r = \sqrt{(\dot{x}_r^v + \dot{x}_i)^2 + (\dot{y}_r^v + \dot{y}_i)^2} \quad (13)$$

$$\tan \theta_r = \frac{\dot{y}_r^v + \dot{y}_i}{\dot{x}_r^v + \dot{x}_i} \quad (14)$$

3.2 로봇 주행법칙(Navigation Laws)

가상평면 상의 장애물 $D_i(t_0)$ 에 대한 충돌 경로

(collision course)는 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_r^v \in CCVP_i \quad (15)$$

가상평면상 충돌범위(collision course in virtual plane, CCVP)는 다음과 같이 계산된다.

$$CCVP_i = [\phi_{ir} - \beta_i, \phi_{ir} + \beta_i] \quad (16)$$

위 식에서 β_i 는 장애물 $D_i(t_0)$ 의 상, 하 접선성분 직선에 대한 각이다. R 과 $D_i(t_0)$ 사이의 충돌 경로는 다음과 같이 표현된다.

$$\tan \theta_r^v = [\tan(\phi_{ir} - \beta_i), \tan(\phi_{ir} + \beta_i)] \quad (17)$$

가상 로봇의 heading 각 θ_r^v 은 실제공간상에서 로봇의 선형속도 v_r 과 heading 각 θ_r 제어입력값을 산출하는데 이용되며, 계산된 가상공간상의 heading 각 θ_r^v 으로부터 로봇의 실제 선형속도와 heading 각 제어입력값은 아래와 같이 계산된다.

$$v_r = \frac{v_r^v (\tan \theta_r^v \cos \theta_r - \sin \theta_r)}{\tan \theta_r^v \cos \theta_r - \sin \theta_r} \quad (18)$$

$$\theta_r = \theta_r^v - \arcsin \left[\frac{v_r^v \sin(\theta_r^v - \theta_r)}{v_r} \right] \quad (19)$$

제안된 반응경로계획기법 기반 로봇 자율주행 및 충돌회피 기능이 외부환경 변화에서도 강건하게 적용되기 위해서는 순간적으로 변화하는 동적 장애물을 인식하고 장애물의 거리와 방향을 추정하는 기법을 필요로 하게 되며, 이를 위해서 본 연구에서는 센서기반 경로계획 기법의 통합을 통해서 반응경로기법을 보완하고자 한다. 아래 장에서 상세히 소개하고자 한다.

3.2 센서기반 장애물 인식 및 추정기법

본 장에서는 반응경로계획기법 기반 로봇의 자율주행 기능의 강건성을 증대하기 위한 센서기반 장애물 인식 및 추정기법을 소개 한다. 이를위해 본 장에서 제안하는 센서기반 장애물 인식 및 추정을 위해서 실시간으로 효율적인 장애물과의 거리와 방향 추정을 동시에 가능하게 하는 마이크로소프트에서 제작한 키넥트(Kinect)⁽²³⁾ 센서를 활용한다. 사용된 Microsoft Kinect⁽²²⁾는 IR 센서와 IR 카메라, RGB 카메라, 멀티 어레이 마이크로폰이 내장되어 있는 통합모듈센서 타입 집합장비이며, 장비 바디 부분에 틸트기능을 제공하는 서보모터 구동으로 장비사용의 편리성을 더해준다(Fig. 2 참조). 키넥트 센서는 깊이정보 뿐 아니라 칼라 이미지를 최대 30fps 의 속도로 처리 가능하고, RGB 비디오

Table 1 Kinect's focal length and field of view⁽²⁴⁾

Camera	Focal length (pixel)	Field of View (degrees)	
		Horizontally	Vertically
RGB	525	63	50
IR	580	57	43

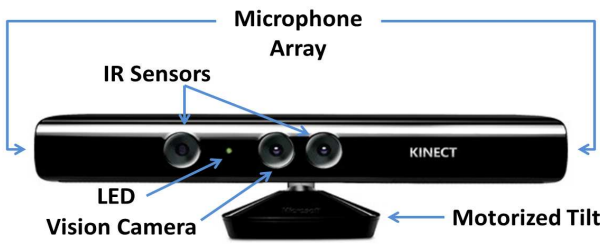


Fig. 2 Architecture of Microsoft Kinect sensor

스트림은 Bayer color filter 가 내장된 30Hz 의 프레임율과 8 비트 VGA 화질(640x480 pixels)을 내장하고 있다.⁽²⁴⁾ 깊이 측정을 이용한 거리 센서 정보는 흑백으로 2048 단계의 민감도를 제공하며 11-bit 기반 VGA(640x480 pixels) 정밀도 및 화질을 갖는다. 깊이 데이터는 IR 프로젝터와 IR 카메라로부터 취득되며, 4 개의 마이크로폰 각 채널은 16-bit audio 로 16kHz 샘플링으로 처리된다. 마지막으로 모터로 구동되는 피봇은 센서를 최대 27° 까지 상하 구동이 가능하게 하여 로봇이 장애물을 인식하는데 유연한 기능을 가능하게 한다. Kinect 에는 깊이센서가 내장되어 있어 단일카메라 기반의 거리 측정 방식에 비해 높은 정확도를 제공하며, 스테레오 카메라 시스템에 비해 낮은 계산용량을 필요로 한다. 또한 일반 RGB 영상센서에 비해 6 배 이상의 높은 해상도를 제공하여 보다 넓은 필드 상에서 경로계획이 가능해지는 장점이 있다.

본 논문에서 Kinect 센서는 동적 장애물에 대한 장애물 거리 측정과 운동계획을 위한 컬러 기반 장애물 및 목표지점 검색에 활용되며, 깊이센서는 최대 800mm 에서 4000mm 까지의 측정 가능하다. 키넥트 센서에 사용된 카메라 파라미터 값들은 Table 1 에 정리된다. Fig. 3 은 사물의 좌표(x_w, y_w)를 찾기 위한 기하학적 접근법이 제시되었다. 일반적으로 카메라 및 깊이센서의 내부 및 외부 파라미터 값들은 디폴트로 설정되어 있으므로 정밀한 실험을 위해 센서 교정(calibration) 단계를 거쳐야 하며, 센서 교정은 깊이측정에 대한 수학적 모델과 체스보드 배경을 이용 센서로부터 오프셋

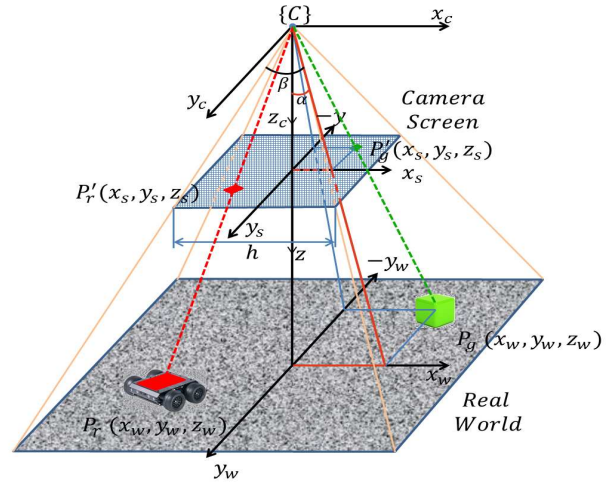


Fig. 3 Robot and obstacle localization using Kinect sensor for ranging and positioning computation

시킴으로서 물리적 방법을 통해 캘리브레이션을 수행할 수 있다.^(25,26)

주어진 키넥트 센서의 좌표시스템(Fig. 3)에서 h 는 스크린의 픽셀단위 높이(focal length)를 나타내며, β 는 카메라의 FOV(field of view)이다. 장애물의 거리는 IR 카메라를 통해 mm 단위로 측정되며 타겟 장애물의 픽셀위의 좌표 (x_s, y_s) 는 컬러 또는 마커기반 검출방식을 통해 검출된다. 키넥트 센서의 거리측정 정보와 칼라기반 픽셀좌표 정보를 사용하여 사물의 정확한 수평, 수직 좌표값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

(1) Horizontal Coordinate:

$$\alpha = \arctan(x_s / f) \tag{20}$$

$$x_w = z_w \sin \alpha \tag{21}$$

(2) Vertical Coordinate:

$$\alpha = \arctan(y_s / f) \tag{22}$$

$$y_w = z_w \sin \alpha \tag{23}$$

위 식에서 z_w 는 Kinect 센서에서 획득된 장애물까지의 거리이다. 이제 고정된 관성좌표계에서 추정된 사물의 위치정보를 이용 충돌회피를 포함한 반응경로계획 단계에 적용이 가능해진다.

이전 부분에서 언급된 것처럼 가상공간상의 상대속도를 이용하는 반응경로계획 기반 동적 운동계획은 장애물과의 정확한 거리와 방향 측정값이 충돌회피에 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 컬러감지 기반으로 로봇의 heading정보를 예측하는 방법에 대해 제시하였으며, Fig. 4 와 같이 녹색과 빨간색의 컬러 감지 방식⁽²⁴⁾을 통해 로봇의 중심점 계산 후 heading 각 $\hat{\theta}$ 값의 계산이 가능하게 된다.

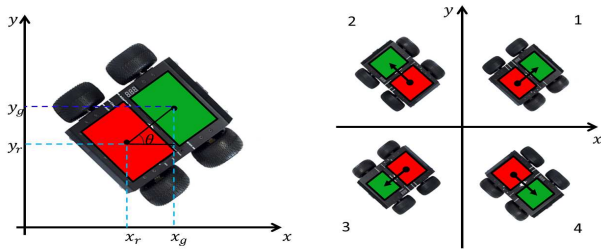


Fig. 4 Robot heading angle calculation

좀더 정밀한 방향 제어를 위해 추정된 헤딩값 $\hat{\theta}$ 를 이용하여 아래 수식을 통해 각 4 분면 상의 헤딩각 $\hat{\theta}_j, (j=1,2,3,4)$ 계산이 이루어진다. Fig. 4 에서 (x_g, y_g) 는 로봇 상부 부분의 녹색(green)의 중심 좌표를 나타내고 있으며, (x_r, y_r) 은 적색(red) 중심 좌표를 나타낸다. 그리고 각 녹색과 적색의 중심 좌표를 연결하는 직선이 X 축과 이루는 각을 이용하여 헤딩값 $\hat{\theta}$ 를 추정할 수 있으며 식 (24)를 이용하여 계산되며, 추정된 헤딩값은 각 사분면에 따라서 식 (25)를 사용하여 새로운 추정값으로 계산되어 로봇의 제어 입력값으로 사용된다.

$$\hat{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{x_g - x_r}{y_g - y_r} \right) \quad (24)$$

여기서 $\hat{\theta}$ 는 추정된 헤딩값을 나타내며, 각 사분면에서의 로봇 제어 입력 헤딩값 $\hat{\theta}_j, (j=1,2,3,4)$ 은 아래와 같이 계산 된다.

$$\begin{aligned} I: x_g > x_r \ \& \ y_g > y_r \\ \hat{\theta}_j &= \hat{\theta} + 0, \quad j = 1 \\ II: x_g < x_r \ \& \ y_g > y_r \\ \hat{\theta}_j &= 3.14 - \hat{\theta}, \quad j = 2 \\ III: x_g < x_r \ \& \ y_g < y_r \\ \hat{\theta}_j &= 3.14 + \hat{\theta}, \quad j = 3 \\ IV: x_g > x_r \ \& \ y_g < y_r \\ \hat{\theta}_j &= 2 \times 3.14 - \hat{\theta}, \quad j = 4 \end{aligned} \quad (25)$$

3.3 확장형 반응경로계획 기법

본 연구에서는 불확실성이 존재하는 주행환경에서도 강건하게 동적 장애물 회피 및 자율주행이 가능하도록, 반응경로계획기법에서 제시된 방향 및 속도제어 알고리즘과 센서기반 사물 인식 및 추정기법을 결합하여 최종적으로 확장형 반응경로 계획 기법을 제시하였으며 다음과 같이 정리된다.

Reactive Dynamic Navigation Algorithm:

input: Coordinate of obstacle 1, obstacle 2 and goal

output: Speed of robot's right and left wheels.

while $l_{gr} > 0$ do

 Calculate l_{gr} and ϕ_{gr} .

 Send robot speed.

 if All D_i in CA (Coverage Area)

 Calculate \dot{l}_{ir} .

 if All $\dot{l}_{ir} > 0$ then

 There is no collision risk, keep sending robot speed.

 else

 Construct the virtual plane.

 Test the collision in the virtual plane.

 if there is a collision risk then

 Construct the θ -window.

 Choose the appropriate values for θ_r .

 Send robot speed command.

 end if

 end if

end if

end while

Fig. 5 Algorithms for integrated reactive dynamic motion planning approach

본 제안 기법은 가상공간(Virtual Plane)⁽¹³⁾에서의 반응경로계획기법과 센서기반 사물인식 및 회피기법의 결합을 통해서 강건성을 증대시키는 통합형 반응경로기법(Integrated Reactive Motion Planning Approach)이며, IRMP 기법은 크게 두 가지의 특징으로 요약된다. 첫째, 가상평면 기반 변환기법을 통하여 동적 장애물 운동을 정적 장애물화를 통해서 불확실한 주행환경에서의 동적 경로계획 문제를 단순화하였다. 둘째로, 반응경로계획기법의 충돌회피 기능의 강건성을 증대시키기 위해서 센서 융합기법을 활용하여 로봇 주변의 동적환경을 인식할 뿐 아니라 장애물의 이동 속도와 방향을 추정하여 로봇의 충돌회피 제어 효율성을 증대시켰다.

4. 실험 결과

4.1 실험 환경 및 시나리오

동적 실험 환경 구성을 위해 두 개의 로봇이 동적 장애물 역할을 수행하게 되고 나머지 하나의 로봇은 확장형 반응경로계획법을 기반으로 충돌회피

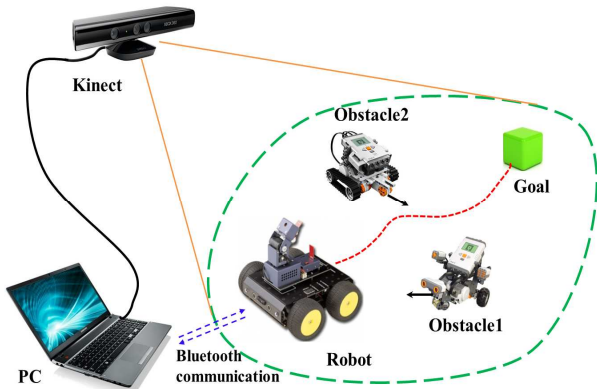


Fig. 6 Architecture for the experimental setup



Fig. 7 Mobile robot hardware and sensor (RoboCAR²⁸)

피 및 자율주행을 수행하게 된다(Fig. 6 참조).

본 실험에서 NXT Mindstorm⁽²⁷⁾으로 제작된 2 개의 동적장애물은 임의의 방향 또는 지정된 경로를 따라서 이동하게 된다. 초음파 센서와 엔코더가 장착된 HBE-RoboCAR⁽²⁸⁾는 마스터 로봇으로 자율주행의 역할을 수행한다. Kinect 센서는 컬러 기반 검출 알고리즘^(29,30)을 통해 최종 목표지점과 장애물을 감지하게 되며, 각 장애물까지의 거리가 Kinect 센서로 측정된 후 블루투스 통신으로 마스터 로봇에 전송되고 전송된 데이터는 반응 경로계획 알고리즘에 입력된다. 실험환경에 대한 자세한 사항은 Fig. 6 에서 설명되어 있다.

주행 알고리즘은 로봇 플랫폼인 RoboCAR 에 장착된 임베디드 8 비트 AVR ATmega128L 기반 프로세서를 통해서 실시간으로 성능테스트가 수행되었다(Fig. 7 참조). 초음파센서와 IR 센서로부터 장애물 감지와 가속도 센서와 엔코더를 통하여 모션 컨트롤이 가능해지고, 블루투스 모듈로 ISP, UART 방식 기반 통신이 이루어진다. 이 실험에서 사용된 로봇카(RoboCAR)는 블루투스를 통해 지상 통제 시스템과 연결된다. 반응경로계획기반 동적 장애물 회피 및 충돌 감지에 대한 정밀도 향상을 위해 키넥트 센서로 획득되는 거리정보와 RoboCar 의 초음파 센서를 융합하였다. 키넥트 센서는 매

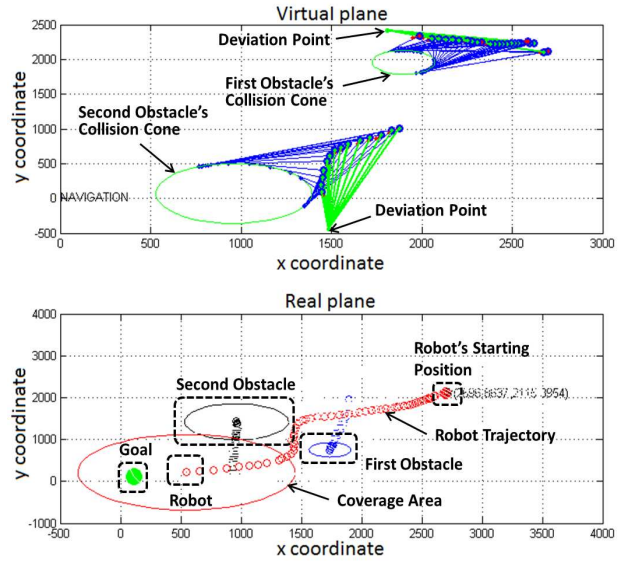


Fig. 8 Simulation results on virtual plane and real plane

우 근접된 물체의 거리 추정에서 오차를 포함하기 때문에 동적 장애물과의 거리가 특정값 이내로 근접하게 될 때 초음파 센서를 통해서 근거리 정보를 융합함으로써 근거리에서의 거리정보 정밀도를 높지게 된다.

4.2 시뮬레이션 결과

Fig. 8 은 가상평면 및 실제평면상에서의 반응 경로계획의 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 8 의 가상공간상의 시뮬레이션에서 2 개의 동적 장애물의 초기 위치를 기반으로 생성되는 충돌영역은 녹색의 타원형으로 표기되어 있으며, 가상로봇의 궤적과 반경범위는 파랑색으로 표기된다. 실좌평면에서 보여지듯이 첫번째 장애물의 초기 위치는 (1000 mm, 50 mm) 좌표 부근에 위치하며, 두 번째 장애물의 초기 위치는 (1900 mm, 2000 mm) 좌표 부근에 위치하고 있으며, 주행로봇의 초기 위치는 원점근처에서 출발하게 되며, 최종 목표 지점의 위치는 (2590 mm, 2000 mm) 좌표에 놓여있다. 그리고 로봇의 주행경로는 Fig. 8 의 아래쪽에서 빨간색으로 표시되었다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 마스터 로봇은 접근하는 두 개의 동적 장애물을 모두 피하였으며, 특히 두 번째 장애물을 회피하기 위해서 급기동 이후 완벽히 장애물을 회피하고 목표지점까지 선형 경로주행을 통해 임무를 완료하였음을 알 수 있다.

Fig. 9 는 위에서 실시간 모션주행 시뮬레이션 결과에서 사용된 센서 및 로봇 주행 정보를 보여준다. 맨 위의 첫번째 그림은 실좌표평면 상에서 최종목표 지점과 로봇의 선속도 사이의 각도를 보

여주며, 두번째 결과는 경로주행 제어명령 수행에 따른 로봇의 헤딩각 정보를 보여주고 있으며, 세 번째는 목표 지점과 선속도 사이의 각도와 로봇의 주행시 생성되는 헤딩각(Heading) 사이의 차를 보여준다. 예측되듯이 경로주행의 마지막 부분은 명령된 방향 각과 타겟 각의 크기가 같아지게 된다. 장애물 회피를 위해서 로봇의 헤딩각을 제어 위해서 마스터 로봇의 양쪽 바퀴의 속도를 제어함으로써 주행 목적을 수행하게 된다.

Fig. 10 과 11 은 장애물의 헤딩각, 선속, 경로 결과를 보여준다. 동적 경로계획 실험을 위해 장애물의 속도 및 헤딩각에 변화를 주어 불확실한 장애물 밀집 지역을 구현하였다.

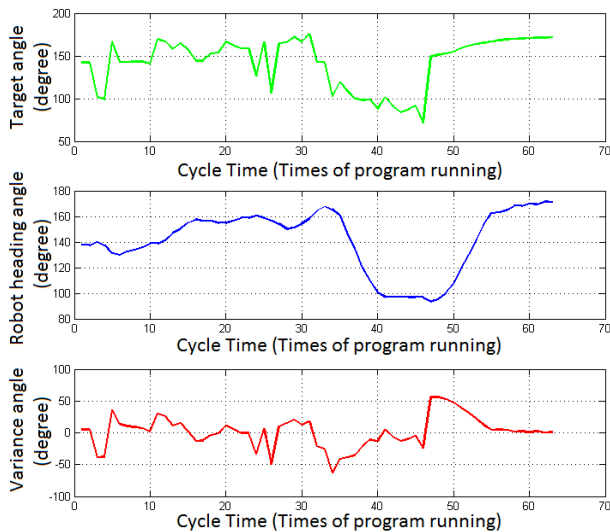


Fig. 9 Simulation results of angles: target angle, robot heading angle, variance angle

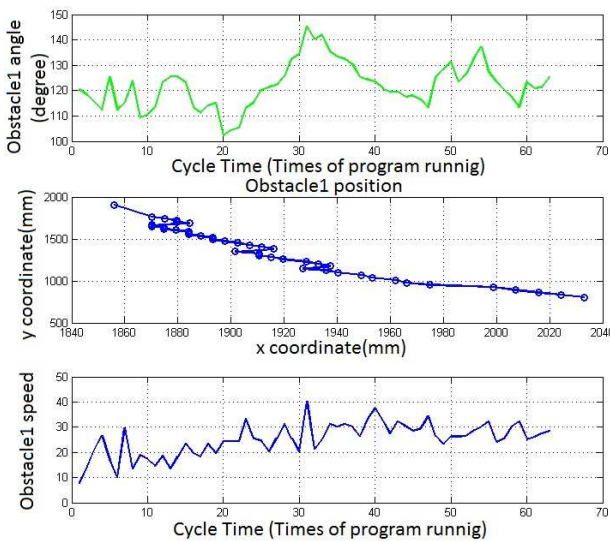


Fig. 10 Results of first moving obstacle's orientation angle, speed and position in x-y coordinates

Fig. 12 첫번째는 출발지점부터 목표지점까지 로봇의 충돌회피와 자율주행 경로를 보여주고 있으며, 두 번째는 로봇의 주행시 전방속도 값을 나타내며, 세번째와 네번째 그림은 주행로봇의 엔코더로부터 측정된 양쪽 휠의 속도값을 보여준다. 결과에서 볼 수 있듯이 주행 로봇은 궤적은 35 초 근처에 실좌표평면 (1500 mm, 1000 mm) 지점의 두 번째 장애물과의 충돌 회피를 위해서 급기동을 하고 있으며, 이에 대한 양쪽 휠의 속도 차이가 크게 기록된 것을 관측할 수 있다. 이 때 좌·우 휠의 회전속도는 시간 축에 기준하여 대칭됨을 볼 수 있으며 이에 따른 헤딩각의 변화 또한 휠 속도 차에 비교하여 쉽게 확인할 수 있다.

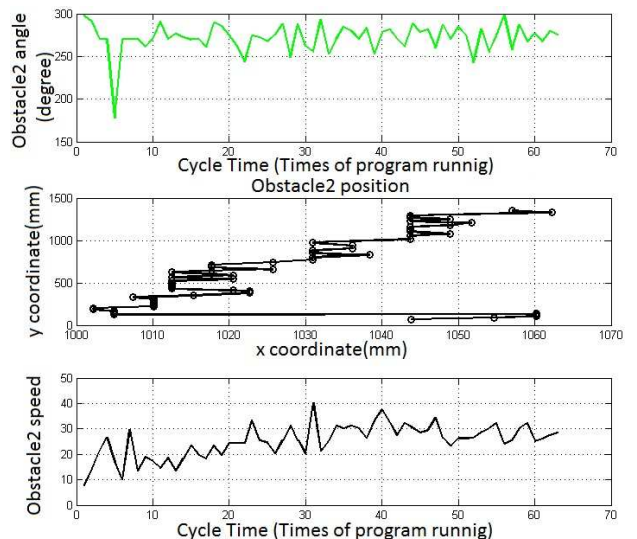


Fig. 11 Results of second moving obstacle's orientation angle, speed and position in x-y coordinates

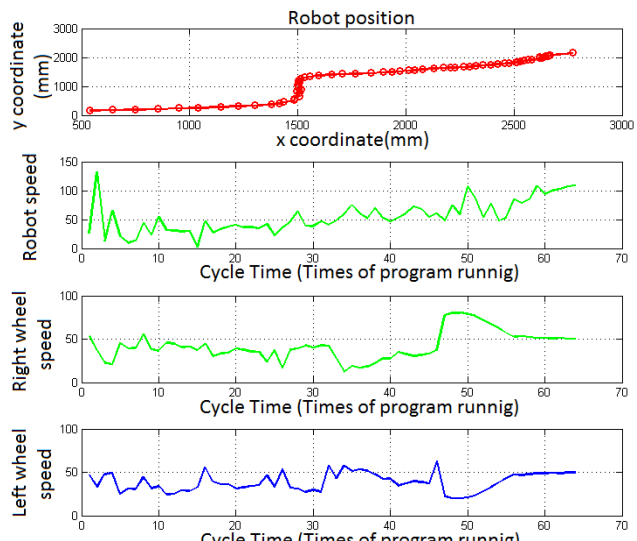


Fig. 12 Simulation results of robot's trajectory, speed, right and left wheels speed

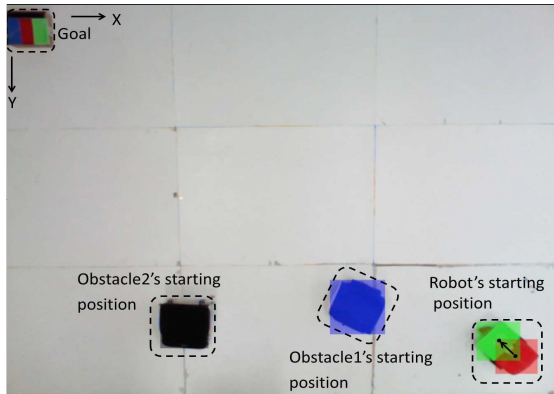


Fig. 13 Experiment Environment (Initial Stage)

4.3 실시간 실험 결과

제안된 확장형 반응경로계획 기법의 실제 동적 환경에서의 성능을 실험을 통하여 검증하였다. Fig. 13 에서 보여 지듯이 본 실험을 위해서 검정색과 파란색으로 이루어진 두 대의 로봇이 동적 장애물로 이용 되었고, 녹색과 빨간색 커버로 이루어진 다른 하나의 로봇은 주행을 위한 이동로봇으로 이용된다.

Fig. 14 는 실험에 사용된 장애물과 로봇의 위치를 보여주고 있으며, 주행로봇의 초기 위치는 빨간 점으로 표기되며 좌표 (2750 mm, 2126 mm)에 위치하고 있고, 최종 목표지점의 좌표는 녹색점으로 표기되면 원점 근처 좌표 (90 mm, 30 mm)에 위치하고 있다. 첫 번째 이동로봇의 초기 시작 지점은 파란색 점으로 표기 되어있으며 위치 (2050 mm, 1900 mm)에 놓여 있고, 두번째 동적장애물의 초기 위치는 좌표 (1050 mm, 2000 mm)에 검정색 점으로 표기되어진다. 가상평면 상에서 첫번째 이동로봇과의 충돌구역(collision cone)은 Fig. 14 의 첫번째 그림의 녹색 타원형으로 표기되어졌으며, 충돌구역의 위치는 아래 실좌표의 위치를 통해서 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 15 는 첫번째 동적 장애물에 대한 충돌회피 및 자율주행 실험 결과를 보여준다. 첫번째 맨 위 그림에서는 가상평면상에서의 로봇의 충돌구역을 인식하고 로봇이 왼쪽 방향으로 방향을 제어하고 있음을 보여주고 있으며, 실좌표 평면에서의 주행로봇의 경로는 Fig. 15 의 두 번째 그림에서 보여지고 있다. 그림에서 보여지듯이 첫번째 장애물은 초기 위치에서 우측 아래 방향으로 경로를 이동하고 있으며, 주행로봇과 (2300 mm, 1700 mm) 근처에서 충돌가능성이 있음을 확연히 보여주고 있다. 주행로봇은 첫 번째 장애물과의 충돌 회피를 위해서 우선 위쪽으로 방향 선회 후 좌회전 하는 경로

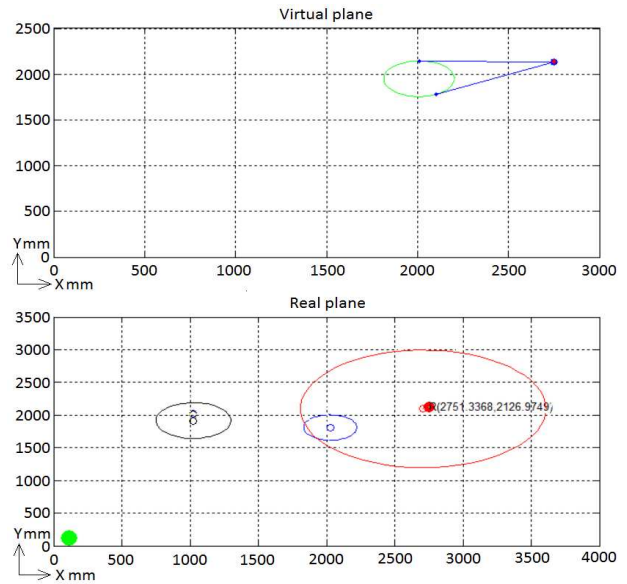


Fig. 14 Results of the experimented data at initial stage

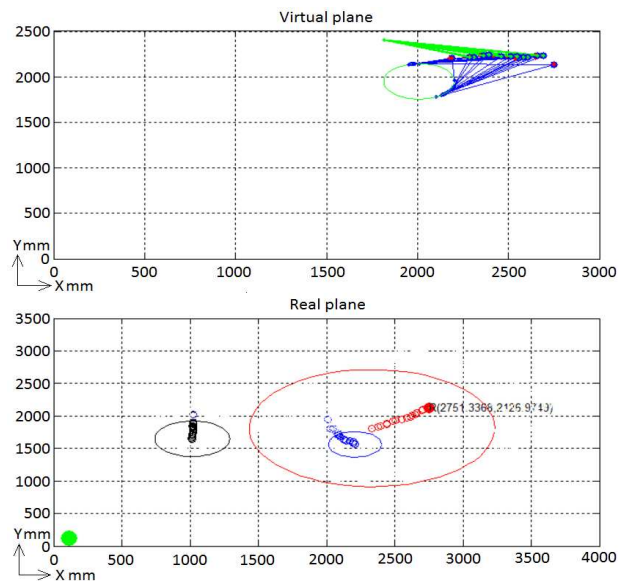


Fig. 15 Results of the trajectories of the robot and the obstacles in the virtual and real planes during the collision avoidance with the first moving obstacle

가 예상되어진다. 그림에서 보여 지듯이 예상과 같은 경로로 주행로봇은 첫 번째 이동 장애물과의 충돌회피를 위해서 위쪽으로 방향을 선회 이후 좌측으로 이동 최종 목표를 향해서 이동하고 있음을 쉽게 할 수 있다.

두 번째 장애물과의 충돌회피는 Fig. 16 에서 보여 주고 있으며, 이동로봇은 모든 장애물을 회피 후 마지막 단계에서 모션제어를 통해 목표지점을 향해 직선주행을 하고 있음을 알 수 있다. 이동로봇의 출발점에서 최종 목표지점까지의 전체적 이

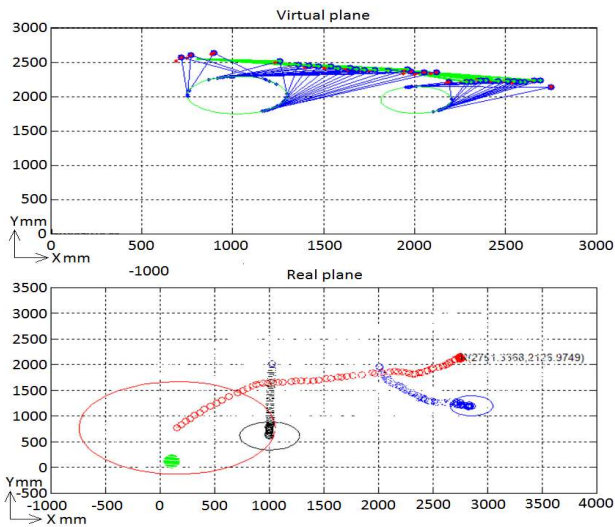


Fig. 16 Results of the trajectories of the robot and the obstacles in the virtual and real planes during the collision avoidance with all the moving obstacles

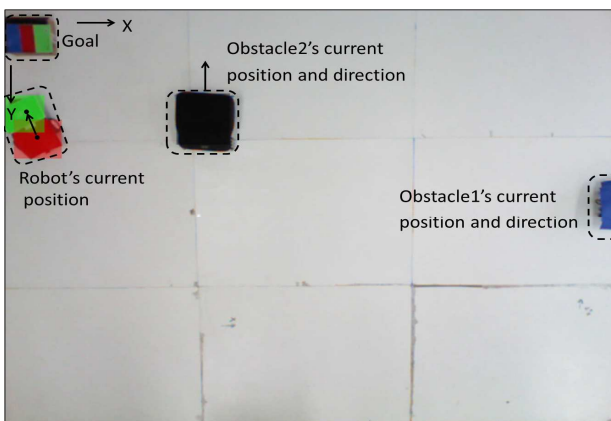


Fig. 17 Experiment result after the collision avoidance with all obstacles

동 궤적은 Fig. 16 두 번째 그림에서 보여지고 있다. 그림에서 보여지듯이 가상평면의 로봇과 장애물의 상대 위치는 Fig. 16의 상부 첫 번째에서 보여주고 있으며, 로봇의 실제평면상에서의 절대좌표는 두 번째 그림에서 표시되고 있다. 위의 각각 그림에서 로봇 위치의 궤적 형태는 다르게 나타나어지고 있지만, 충돌회피를 위한 방향전환에 있어서는 장애물의 속도를 고려하여 목표 지점으로의 직선주행 대신 곡선 형태의 회피기동을 동일하게 수행하고 있음을 확인할 수 있다. 로봇이 모든 장애물과의 충돌회피 이후 최종 목적지를 향해 이동한 실험 결과는 Fig. 17에서 보여주고 있다. 부드러운 경로궤적을 생성하기 위해서 선형 주행법칙을 통해 생성 및 적용하였으며, 향후 최소 거리주행을 위한 최적제어 기법의 적용도 가능할 것으

로 예상된다.

5. 결 론

본 논문에서 불확실한 동적환경에서도 강건한 자율주행이 가능한 기법을 제안하였다. 새롭게 제안된 확장형 반응경로계획기법은 동적장애물에 대한 정보를 제공하는 센서기반 주행기법과 동적 장애물을 정적 장애물로 전환하여 효율적으로 충돌회피가 가능하도록 하는 반응경로계획방식을 통합한 기법이다. 제안된 방식의 특징중 하나는 가상평면을 사용함으로써 복잡한 동적 계획문제를 정적 문제로 변환함에 있고, 두번째로는 장애물의 이동감지 및 자세 예측을 위해서 거리 정보와 컬러감지가 가능한 키넥트 센서를 모션계획에 적용하는데 있다. 센서기반 접근법은 장애물과 주행환경에 대한 정보를 제공함으로써 반응경로 계획법의 정확성과 강인성을 향상시키게 된다. 제안된 확장형 반응경로계획 기법의 성능은 시뮬레이션과 실험을 통해서 검증하였으며, 결과에서 보여지듯이 불확실한 동적 장애물이 밀집된 환경에서의 로봇의 충돌회피 기능을 포함한 자율주행 응용에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안된 확장형 반응경로 계획기법은 이동로봇뿐만 아니라 무인항공과 자율주행차량을 포함한 자율무인시스템 등 다양한 로봇의 자율주행에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 2014년 교육부와 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업(NRF-2014H1C1A1066733), 한국 연구재단 일반연구(No. 2014-017630), 모험연구(No.2014-063396)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌 (References)

- (1) Litman, T., 2014, "Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning," *Traffic Technology International*, Victoria, Canada, pp. 36~42.
- (2) Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R. and Scaramuzza, D., 2011, "Introduction to Autonomous Mobile Robots," 2nd Ed., *The MIT Press*, London, England.
- (3) van den Berg, J. P. and Overmars, M. H., 2005, "Roadmap-based Motion Planning in Dynamic Environments," *IEEE Trans. Robot.*, Vol. 21, No. 5, pp. 885~897.

- (4) Hsu, D., Kindel, R., Latombe, J.-C. and Rock, S., 2002, "Randomized Kinodynamic Motion Planning with Moving Obstacles," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 21, No. 3, pp. 233~255.
- (5) Ge, S. S. and Cui, S. S., 2002, "Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method," *Autonomous. Robots*, Vol. 13, No. 3, pp. 207~233.
- (6) Valavanis, K. P., Hebert, T., Kolluru, R. and Tsurveloudis, N., 2000, "Mobile Robot Navigation in 2-d Dynamic Environments Using an Electrostatic Potential Field," *IEEE Trans. System, Systems and Humans*, Vol. 30, No. 2, pp. 187~196.
- (7) Kim, S. K. Lee, H. J. Kim, K. S. Bae, W. M. and Lee D. J., 2015, "Image Tracking Based Lane Departure Warning and Forward Collision Warning Methods for Commercial Automotive Vehicle," *Transaction on Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 39, No. 2, pp. 235~240.
- (8) Stentz, A., 1994, "Optimal and Efficient Path Planning for Partially-known Environments," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3310~3317.
- (9) Larsson, J., 2007, "Reactive Navigation of an Autonomous Vehicle in Underground Mines," *Örebro University*, Sweden.
- (10) Seder, M. and Petrovic, I., 2007, "Dynamic Window Based Approach to Mobile Robot Motion Control in the Presence of Moving Obstacles," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1986~1992.
- (11) Fox, D., Burgard, W. and Thrun, S., 1997, "The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 4, No. 1, pp. 23-33.
- (12) Minguez, J. and Montano, L., 2004, "Nearness Diagram Navigation: Collision Avoidance in Troublesome Scenarios". *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 20, No. 1. pp. 45~59.
- (13) Belkhouche, F., 2009, "Reactive Path Planning in a Dynamic Environment," *IEEE Transactions On Robotics*, Vol. 25, No. 4, pp. 902~911.
- (14) Simmons, R., 1996, "The Curvature-Velocity Method for Local Obstacle Avoidance," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3375~3382.
- (15) Owen, E. and Montano, L., 2005, "Motion Planning in Dynamic Environments Using the Velocity Space," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2833~2838.
- (16) Chakravarthy, A. and Ghose, D., 1998, "Obstacle Avoidance in Dynamic Environment: A Collision Cone Approach," *IEEE Trans. on Systems, Man Cybernetics. Part A, System and, Humans*, Vol. 28, No. 5, pp. 562~574.
- (17) Fiorini, P. and Shiller, Z., 1995, "Robot Motion Planning in Dynamic Environments," *International Symposium of Robotic Research*, pp. 237~248.
- (18) Shiller, Z. Large, F. and Sekhavat, S., 2001, Motion Planning in Dynamic Environments: Obstacles Moving Along Arbitrary Trajectories. *IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 4, pages 3716~3721.
- (19) Fiorini, P. and Shiller, Z., 1998, "Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles," *Int. Journal of Roboics Research.*, Vol. 17, No. 7, pp. 760~772.
- (20) Byambaa Dorj, Doopalam Tuvshinjargal, Chong, K. T., Hong, D. P. and Lee, D. J., 2014, "Multi-Sensor Fusion Based Effective Obstacle Avoidance and Path-Following Technology," *Advanced Science Letters*, Vol. 20, pp.1751~1756.
- (21) Philippsen, R., Jensen, B. and Siegwart, R., 2007, "Towards Real-time Sensor Based Path Planning in Highly Dynamic Environments," *Autonomous Navigation in Dynamic Environments*, Vol. 35, Springer, Berlin, Germany, pp. 135~148.
- (22) Song, K. -T. and Chang, C., 1999, "Reactive Navigation in Dynamic Environment Using a Multisensor Predictor," *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics, Part B*, Vol. 29, No. 6, pp. 912~925.
- (23) Khoshelham, K. and Elberink, S. O., 2012, "Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications," *Sensors 2012*, pp. 1437~1454.
- (24) Han, J., Shao, L., Xu, D. and Shotton, J., 2013, "Enhanced Computer Vision with Microsoft Kinect Sensor: A Review," *IEEE Trans. cybernetics*, Vol. 43, No. 5, pp. 1318~1334.
- (25) Microsoft Kinect for X-BXO 360, Available Online: <http://www.xbox.com/en-us/kinect/> (accessed on 07 July 2014).
- (26) Kronolige, K. and Mihelich, P., Technical Description of Kinect Calibration. http://www.ros.org/wiki/kinect_calibration/technical (accessed on 07 July 2014).
- (27) Lego Mindstorms NXT, Available Online: <http://www.lego.com/en-us/mindstorms/> (accessed on 07 July 2014).
- (28) Choe, T. W. Son, H. S., Song, J. H. and Park, J.H., 2012, Intelligent Robot System HBE-Robocar, *HanBack Electronics*, Seoul, Korea.
- (29) Shashank, Gaurav, Sharma, M. and Shukla, A., 2012, "Robot Navigation Using Image Processing and Isolated Word Recognition," *International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSSE)*, Vol. 4, No. 5, pp. 769~778.
- (30) Chandak, A., Gosavi, K., Giri, S., Agrawal, S. and Kulkarni, P., 2013, "Path Planning for Mobile Robot Navigation Using Image Processing," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 4, No. 6, pp. 1490~1495.