

확장 가이드 서클 방법을 이용한 비홀로노믹 이동로봇의 실시간 장애물 회피

Real-time Obstacle Avoidance of Non-holonomic Mobile Robots Using Expanded Guide Circle Method

심 영 보¹, 김 곤 우[†]

Young-Bo Shim¹, Gon-Woo Kim[†]

Abstract The Expanded Guide Circle (EGC) method has been originally proposed as the guidance navigation method for improving the efficiency of the remote operation using the sensory information. The previous algorithm is, however, concerned only for the omni-directional mobile robot, so it needs to suggest a suitable one for a mobile robot with non-holonomic constraints. The ego-kinematic transform is a method to map points of R^2 into the ego-kinematic space which implicitly represents non-holonomic constraints for admissible paths. Thus, robots with non-holonomic constraints in the ego-kinematic space can be considered as “free-flying object”. In this paper, we propose an effective obstacle avoidance method for mobile robots with non-holonomic constraints by applying EGC method in the ego-kinematic space using the ego-kinematic transformation. This proposed method shows that it works better for non-holonomic mobile robots such as differential-drive robot than the original one. The simulation results show its effectiveness of performance.

Keywords Mobile Robot Navigation, Obstacle Avoidance, Non-holonomic Robots

1. 서 론

이동로봇의 자율주행을 위한 많은 임무 중에서 주어진 환경에서 충돌없이 목적지까지 안전하게 주행하는 것이 최우선적인 임무이다. 자율주행 로봇 시스템은 현재 위치로부터 목적지까지 경로를 생성하고 경로를 추

종하기 위한 제어가 필요하다. 대부분의 전역 경로 생성 방법들은 주어진 환경에서 경로를 생성하기 때문에 예측하지 못한 장애물에 대해 대처하지 못하는 문제점이 있다. 또한 경로를 생성하는데 비교적 오랜 시간이 걸려 오프라인으로 경로를 생성한다. 이와 같은 실시간성과 예측하지 못한 장애물에 대처하기 위해서는 실시간성을 가지는 장애물 회피 방법이 필요하다^[1-8].

가장 널리 알려져 있는 장애물 회피 방법들은 리액티브 네비게이션 방법들로 각 제어주기마다 센서 정보를 이용하여 충돌없이 현재 로봇의 위치로부터 목적지까지 도달하게 하는 제어입력을 만들어내는 방법들이다. 이와 같은 방법들로는 Vector Field Histogram^[1], Dynamic Window Approach^[2], Curvature Velocity Method^[3] 등이 있다. 본 논문에서는 리액티브 네비게이션 방법으로 기

Received : Dec. 11. 2016; Revised : Jan. 24. 2017; Accepted : Jan. 31. 2017

※This work was supported in part by the research grant of Chungbuk National University in 2014 and Institute for Information & communications Technology Promotion(IITP) grant funded by the Korea government(MSIP) (No R7117-19-0164, Development of wide area driving environment awareness and cooperative driving technology which are based on V2X wireless communication)

[†]Corresponding author: School of Electronics Engineering, Chungbuk National University, 1, Chungdae-ro, Seowon-Gu, Cheongju, Korea (gwkim@chungbuk.ac.kr)

¹Control and Robot Engineering, Chungbuk National University (shim36145@gamil.com)

존의 확장 가이드 서클(Expanded Guide Circle, 이하 EGC) 방법^[8]을 기반으로 비홀로노믹 제약조건을 갖는 로봇에 적합한 장애물 회피 방법을 제시한다.

리액티브 네비게이션 방법을 다루는데 있어서 로봇의 형태와 기구학적인 제약조건 그리고 동역학적인 제약조건을 고려해야한다. 대부분의 리액티브 네비게이션 방법들은 로봇의 형태를 원으로 가정하여 고려해 왔으나 Configuration Space (C-Space)가 로봇공학에 도입된 이후로는 임의의 로봇의 형태를 C-Space 상에서 고려하여 단일 점 형태로 로봇을 표현하여 모션 계획을 하기 시작하였다. 로봇의 형태를 고려하지 않고 C-Space 상에서 하나의 점으로 로봇을 표현하여 모션 계획을 할 수 있다는 장점을 가지고 있는 반면에 작업공간(Workspace)을 C-Space로 변환하는 것은 계산 비용이 커서 실시간으로 모션 계획이나 장애물 회피방법등이 수행되기에는 어려움을 가지고 있다. 또한 기구학적으로 비홀로노믹 제약조건을 가진 로봇에 모션 계획이나 장애물 회피 방법등을 적용하기 위해 C-Space를 간소화하는 방법들이 제안되어왔다^[4-6]. 또한 기구학적인 제약조건과 동역학적인 제약조건을 대부분 홀로노믹으로 가정하여 문제를 해결한 리액티브 네비게이션 방법들은 비홀로노믹 제약조건을 가진 로봇에 직접 적용할 경우 효율성이 떨어질 수 있다. 이를 위해 Ego-Kinematic 공간^[7]과 같은 변환을 통하여 기존 홀로노믹으로 가정한 리액티브 네비게이션 방법들을 비홀로노믹 제약조건을 가진 로봇에 효율적으로 적용하는 방법들이 제안되어 왔다.

본 논문에서는 원격 조종의 편의성과 안전성을 증대시키기 위해 고안된 사용자 원격 조작 방법인 확장 가이드 서클 방법^[8]을 이동로봇의 자율주행에 적용하기 위한 방법을 제시한다. 또한 차륜 구동형이나 애커맨 조향기구를 가진 차량 형태의 이동로봇등이 기구학적으로 가지는 비홀로노믹 제약조건을 고려하기 위해 Ego-kinematic 공간에서의 수정된 확장 가이드 서클 방법을 제시한다. 먼저 본 연구의 배경이 되는 연구들에 대해 2장에서 소개를 하고 3장에서는 이를 개선한 방법들에 대해 소개한다. 4장에서는 기존 연구와의 비교실험을 통해 제안된 방법에 대한 타당성을 검증한다.

2. 배경 연구

2.1 이동로봇의 기구학

휠을 기반으로 움직이는 이동로봇의 기구학적 해석은 동체에 부착된 바퀴의 움직임에 의하여 동체의 움직임을 이해하는 데에서 출발한다^[9]. 이동로봇은 동일한 휠에 대해 부착 형태나 종류, 갯수 등에 따라 다양한 움직임을 갖는다. 이를 위해 먼저 로봇이 움직이는 공간인 작업공간과 로봇의 자세 공간에 대해 정의가 필요하며 평면운동을 가정할 때 각각의 공간과 로봇의 자세는 다음과 같이 작업공간: $W = \mathbb{R}^2$, 자세공간: $C = \mathbb{R}^2 \times S^1$, 로봇자세: $q = (x, y, \theta)^T \in C$ 등으로 표현할 수 있다. 로봇 자세는 평면상의 위치인 (x, y) 와 진행 방향인 θ 로 구성된다.

본 논문에서는 여러 형태와 기구적인 특성을 가진 로봇들 중에서 비홀로노믹 제약조건을 갖는 이동로봇을 대상으로 하며, 이동로봇에 대한 기구학은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 v 와 w 는 선속도와 각속도를 나타낸다. Fig. 1에 제시된 다른 두 형태의 로봇은 모두 진행 방향과 수직 한 축으로의 운동이 불가능한 비홀로노믹 제약조건을 가지며 이는 다음과 같다.

$$-x \cdot \sin\theta + y \cdot \cos\theta = 0 \quad (2)$$

2.2 Ego-Kinematic 공간

앞서 소개한 선속도와 각속도를 조작 입력으로 받아 움직이는 로봇들은 한 제어 주기에 하나의 조작 입력 명령이 주어진다. 식 (1)에서와 같이 각각 0이 아닌 선속도와 각속도가 주어지면 로봇은 등속원운동을 한다. 이때 회전 반경 R 은 $R = \frac{v}{w}$ 의 관계를 가진다. 하나의 제어 입력으로 로봇이 움직인 변위는 R 을 회전 반경으로 하는 원 상에 호 형태의 경로를 따라 움직인다.

Ego-Kinematic Transformation (EKT)은 하나의 제어 입

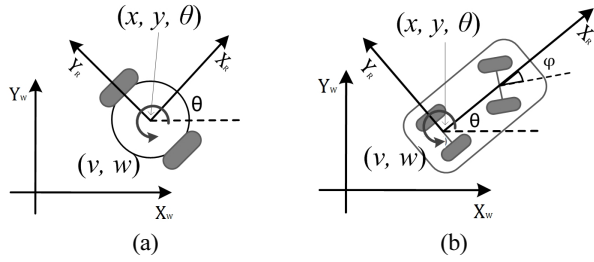


Fig. 1. Coordinate systems of mobile robots: (a) differential type robot (b) car-like robot

력으로 로봇이 움직일 수 있는 호 형태의 경로를 직선 형태의 경로로 변환하여 나타낸다. 또한 Ego-Kinematic 공간은 2차원 실수공간인 작업공간에서 EKT를 통해 맵핑된 공간을 의미한다. EKT를 통해 변환된 공간은 실수 중에서 양의 값들인 \mathbb{R}^+ 와 로봇의 자세 공간에서 로봇의 진행 방향을 표현하는 공간인 S^1 이고 아래와 같이 정의 된다^[7].

$$EKT : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^+ \times S^1$$

$$(x, y) \rightarrow (\rho, \alpha) = (f_\rho(x, y), f_\alpha(x, y)) \quad (3)$$

위 식 (3)에서 ρ 는 호 형태의 경로 길이이며 (x, y) 는 로봇 좌표계를 기준으로 하는 임의의 점을 나타낸다. 회전 반경은 $R = (x^2 + y^2) / 2y$ 로 정의하고 $y < 0$ 일 때 R 은 음수로 계산될 수 있다. 또한, EKT는 ρ 와 α 를 구하기 위해 각각의 변환 함수를 정의하여 변환한다. 먼저 ρ 를 구하기 위해 다음과 같이 $f_\rho(x, y)$ 를 정의 한다^[7].

$$f_\rho : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^+$$

$$(x, y) \rightarrow \rho = f_\rho(x, y) = \begin{cases} \left| R \cos \frac{(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)} \right| & y \neq 0 \\ |x| & y = 0 \end{cases} \quad (4)$$

임의의 점이 x 축 상에 있다면 로봇이 이동하는 경로는 호 형태의 경로가 아닌 직선 형태의 경로가 되므로 식 (4)와 같이 두 경우로 나누어 정의한다. 임의의 각속도로 일정한 시간 동안 주행했을 경우 회전 중심축을 기준으로 로봇이 회전한 각도를 나타내는 α 는 변환 함수인 $f_\alpha(x, y)$ 를 통해 구할 수 있으며 아래와 같이 정의한다.

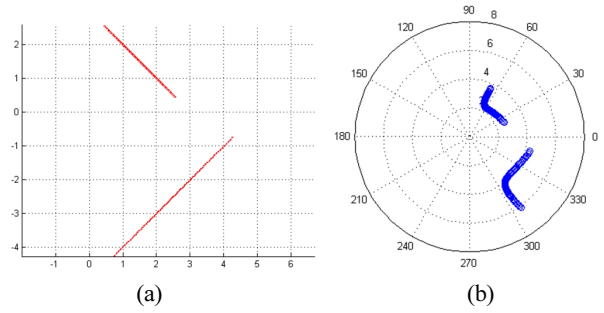


Fig. 2. Scanned sensor data in robot coordinate system: (a) original scan data in Cartesian coordinate system (b) transformed scan data produced by the Ego-Kinematic Transformation in polar coordinate system

$$f_\alpha : \mathbb{R}^2 \rightarrow [-\pi, \pi] \quad (5)$$

$$(x, y) \rightarrow \alpha = f_\alpha(x, y) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{|R|}{r_p} \right) & x \geq 0 \\ -\frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{|R|}{r_p} \right) & x < 0 \end{cases}$$

여기서 r_p 는 변환된 공간의 반지름이다. Ego-Kinematic 공간은 극좌표계로 표현되며 로봇의 전방만을 고려하여 공간 변화를 수행하므로 ρ 와 α 는 각각 $[0, \infty]$ 와 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ 를 범위로 가진다. 만약 R 의 값이 무한대 값을 가진다면 α 의 값은 0으로 수렴하여 등속원운동이 아닌 직진만 하는 로봇의 운동을 표현한다.

Fig. 2에서 (a)와 같은 로봇좌표계에서의 스캔 데이터를 EKT를 통해 변환을 하면 (b)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 2차원 실수공간인 작업공간에서 비홀로노믹 제약을 가진 로봇을 제약조건으로 인해 직접적으로 이동할 수 없는 자세가 존재하는 반면 Ego-Kinematic 공간 상에서 임의의 점은 로봇이 진행 가능한 위치이자 방향이 될 수 있다.

2.3 확장 가이드 서클(Expanded Guide Circle) 방법

본 절에서는 기존 확장 가이드 서클 방법을 기반으로 하여 비홀로노믹 제약조건을 갖는 로봇에 대해 효율적으로 장애물을 회피할 수 있는 방법을 제안한다. 확장 가이드 서클 방법은 원격 조작에 편의성과 안전성을 증대시키기 위해 고안된 사용자 조작 유도 방법이다. 제안된 방법은 조작기를 통해 생성된 조작 입력이 보다 안전

한 영역으로 주행 가능하도록 유도 하기 위해 가이드 서클의 개념을 도입하였다. 제한된 방법을 통해 조작자의 조작 입력을 기반으로 안전한 영역으로 유도될 수 있도록 가이드 서클을 확장하여 충돌을 효율적으로 회피할 수 있는 변형된 조작 입력을 생성한다.

2.3.1 초기 가이드 서클(Initial Guide Circle) 정의

속도 제어 입력 (v, w)가 주어질 때 일정 시간 이후 도달 가능한 로봇의 위치를 추정할 수 있다. 이를 주어진 제어 입력으로 도달 가능한 모든 영역을 의미하는 RC (Reachable Circle)라 정의하며 이는 원의 형태로 나타난다. 다음으로 조작 입력 (v, w)에 의해 kT 시간 후에 도달한 위치를 추정하는데 이는 RC상의 한 점으로 표현되며, 이 점을 중심으로 최단거리 장애물까지 원을 확장하는데 이를 초기 가이드 서클이라 하며 초기 가이드 서클의 원점이자 추정된 위치는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{IGC} = \begin{pmatrix} x_{IGC} \\ y_{IGC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cdot kT \cos(w \cdot kT/2) \\ v \cdot kT \sin(w \cdot kT/2) \end{pmatrix} \quad (6)$$

위 식에서 T 는 제어 주기를 의미하며 k 는 RC의 범위를 설정하기 위한 scale parameter로 양의 정수로 정의한다.

2.3.2 보조 가이드 서클(Auxiliary Guide Circle) 정의

현재 제어 입력으로 제어 주기 동안 주행한 로봇의 안전한 정도를 초기 가이드 서클로 추정할 수 있다. 이때 로봇이 안전하지 않은 영역으로 주행할 가능성이 있다면 안전한 영역으로의 유도가 필요하다. 안전한 영역 방향을 선택하기 위해 로봇의 원점과 초기 가이드 서클의 원점 사이를 이은 기준 선을 중심으로 방향을 선택한다. 가이드 서클은 최단거리 장애물과 만날 경우 확장을 중단하며 기준 선을 중심으로 최단거리 장애물의 위치의 반대 방향이 충돌 위험이 낮은 방향이며 그 방향이 선택되는 방향이 된다. 따라서 초기 가이드 서클과 RC의 교점 중에서 선택된 방향의 교점으로 보조 가이드 서클의 중점을 정의한다^[8].

2.3.2 확장 가이드 서클(Expanded Guide Circle) 정의

확장 가이드 서클은 주어진 제어 입력으로 생성된 초

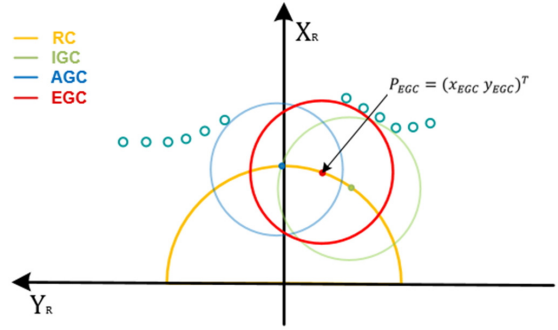


Fig. 3. Expanded Guide Circle (EGC) in robot reference frame defined by EGC method^[8]

기 가이드 서클과 좀 더 안전한 영역으로 주행하기 위해 생성된 보조 가이드 서클을 결합하여 안전한 영역으로 주행하는 동시에 목적지로 향하는 제어 입력 또한 무시되지 않도록 한다. 확장 가이드 서클의 중심은 다음과 같이 정의된다^[8].

$$P_{EGC} = \frac{r_{IGC} \cdot P_{IGC} + r_{AGC} \cdot P_{AGC}}{r_{IGC} + r_{AGC}} \quad (7)$$

위 식에서 r_{IGC} 와 r_{AGC} 는 각각 초기 가이드 서클과 보조 가이드 서클의 반지름을 나타낸다.

앞서 정의한 가이드 서클과 마찬가지로 가장 가까운 장애물까지 확장하고 확장된 가이드 서클을 이용하여 수정된 제어 입력을 다음과 같이 계산하여 로봇을 안전한 영역으로 주행시킬 수 있다.

$$a = \begin{cases} 1, & \text{if } r_{EGC} > r_{max} \\ r_{EGC}/r_{max}, & \text{if } r_{min} < r_{EGC} < r_{max} \\ 0, & \text{if } r_{EGC} < r_{min} \end{cases} \quad (8)$$

$$v_{mod} = a \frac{\text{sign}(x_{EGC})}{kT} \sqrt{x_{EGC}^2 + y_{EGC}^2} \quad (9)$$

$$w_{mod} = a \frac{2}{kT} \tan^{-1}\left(\frac{y_{EGC}}{x_{EGC}}\right) \quad (10)$$

위 식에서 a 는 이동의 안전도를 나타내는 scale parameter로 확장 가이드 서클의 반지름이 안전하다고 판단할 수 있는 최대 이동 거리인 r_{max} 보다 작을 경우 로봇의 이동

속도를 제한하여 안전한 주행을 가능하게 하였다. 또한 로봇의 크기를 고려하여 충돌이 예상되는 최소 거리를 r_{min} 으로 정의하여 이 보다 작을 경우 로봇의 이동을 제한하도록 정의하였다. 식 (9), (10)에서 제시된 수정된 제어 입력을 이용하여 로봇을 안전한 영역으로 주행시킬 수 있다.

3. Ego-Kinematic 공간에서의 비홀로노믹 이동로봇의 실시간 장애물 회피

본 장에서는 비홀로노믹 이동로봇의 실시간 장애물 회피 방법인 확장 가이드 서클을 Ego-Kinematic 공간에서 적용하기 위한 방법을 다룬다.

확장 가이드 서클 방법은 2차원 평면 공간에서 간단한 방법으로 실시간 장애물 회피가 가능하다. 하지만 비홀로노믹 제약을 가진 이동로봇을 고려하지 않아 차륜구동형이나 애커맨 조향기구를 가진 차량 형태의 이동로봇에 적용하기에는 어려움이 있다.

EKT는 기존에 비홀로노믹 제약을 고려하지 않은 리액티브 네비게이션 방법들을 비홀로노믹 이동로봇에 효율적으로 적용하기 위해 제안된 공간 변환 방법이다. 기구학적인 제약을 포함한 Ego-Kinematic 공간에서 확장 가이드 서클을 적용하여 장애물 회피를 위해 적합한 제어입력을 계산하는 방법의 순서는 다음과 같다.

1) 2차원 공간상에 표현된 센서를 통해 취득한 장애물 정보를 EKT를 통해 변환하고 초기 가이드 서클의 중심점 $P_{IGC} = (x_{IGC}, y_{IGC})^T$ 또한 변환한다. 변환된 공간에서 장애물을 나타내는 점들의 집합은 $M = \{m_i : i^{th} \text{scan data on the point } {}^E P_{m_i} = (\rho_i, \alpha_i) \text{ for } i = 1, \dots, n\}$ 으로 표현된다.

2) Ego-Kinematic 공간에 맵핑된 초기 가이드 서클의 반지름을 구하기 위해 가장 가까운 장애물까지 확장한다. 만약 반지름이 r_{max} 를 초과한다면 확장을 멈추고 반지름은 r_{max} 로 결정한다.

$${}^E r_{IGC} = \min \sqrt{\rho_{IGC}^2 + \rho_i^2 - 2\rho_{IGC}\rho_i \cdot \cos(\alpha_{IGC} - \alpha_i)} \quad (11)$$

만약 ${}^E r_{IGC}$ 가 r_{max} 와 같다면 주어진 제어 입력이 로봇을 안전한 영역으로 주행시킨다는 것을 의미한다. 그러므로 보조 가이드 서클과 확장 가이드 서클을 구할 필요가 없고 로봇은 원래 주어진 제어 입력대로 주행한다. 하지만 ${}^E r_{IGC}$ 가 r_{max} 보다 작다면 확장 가이드 서클을 통해 안전한 영역으로 유도하는 제어 입력으로 로봇은 주행하게 된다.

로봇이 안전한 영역으로 주행하기 위해 확장 가이드 서클 확장할 필요가 있다면 기존 보조 가이드 서클과 확장 가이드 서클을 구하는 방법과 유사하게 중심점과 반지름을 구해 확장할 수 있다. 유사한 방법으로 구해진 확장 가이드 서클의 중심점과 반지름을 통해 수정된 제어 입력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a = \begin{cases} 1, & \text{if } {}^E r_{EGC} > {}^E r_{max} \\ {}^E r_{EGC} / {}^E r_{max}, & \text{if } {}^E r_{min} < {}^E r_{EGC} \leq {}^E r_{max} \\ 0, & \text{if } {}^E r_{EGC} \leq {}^E r_{min} \end{cases} \quad (12)$$

$${}^E P^* = (a \cdot \rho_{EGC}, a \cdot \alpha_{EGC})^T \quad (13)$$

여기서 ${}^E P^*$ 는 Ego-Kinematic 공간에서 확장 가이드 서클의 중심점에 가중치 a 를 곱해서 장애물을 회피하기 위한 제어 명령을 생성할 수 있다.

3) 마지막으로 Ego-Kinematic 공간에서 확장 가이드 서클 방법을 통해 구해진 ${}^E P^*$ 의 $a \cdot \rho_{EGC}$ 는 선속도와 같으므로 그대로 선속도가 되고 $a \cdot \alpha_{EGC}$ 는 다시 작업공간으로 역변환하면 회전 반경 R 을 구할 수 있다. 구해진 회전 반경 R 과 선속도 v 는 $R = \frac{v}{w}$ 관계에 따라 각속도 w 를 구해 제어 명령 (v, w) 를 생성할 수 있다.

이와 같은 순서로 Ego-Kinematic 공간에서 확장 가이드 서클을 도입하였다. 확장 가이드 서클 방법을 통해 로봇의 비홀로노믹 제약 조건을 고려하며 성능이 개선됨을 입증하기 위해 차륜구동형 이동로봇에 제안한 방법을 적용한 시뮬레이션 결과를 다음 장에서 보인다.

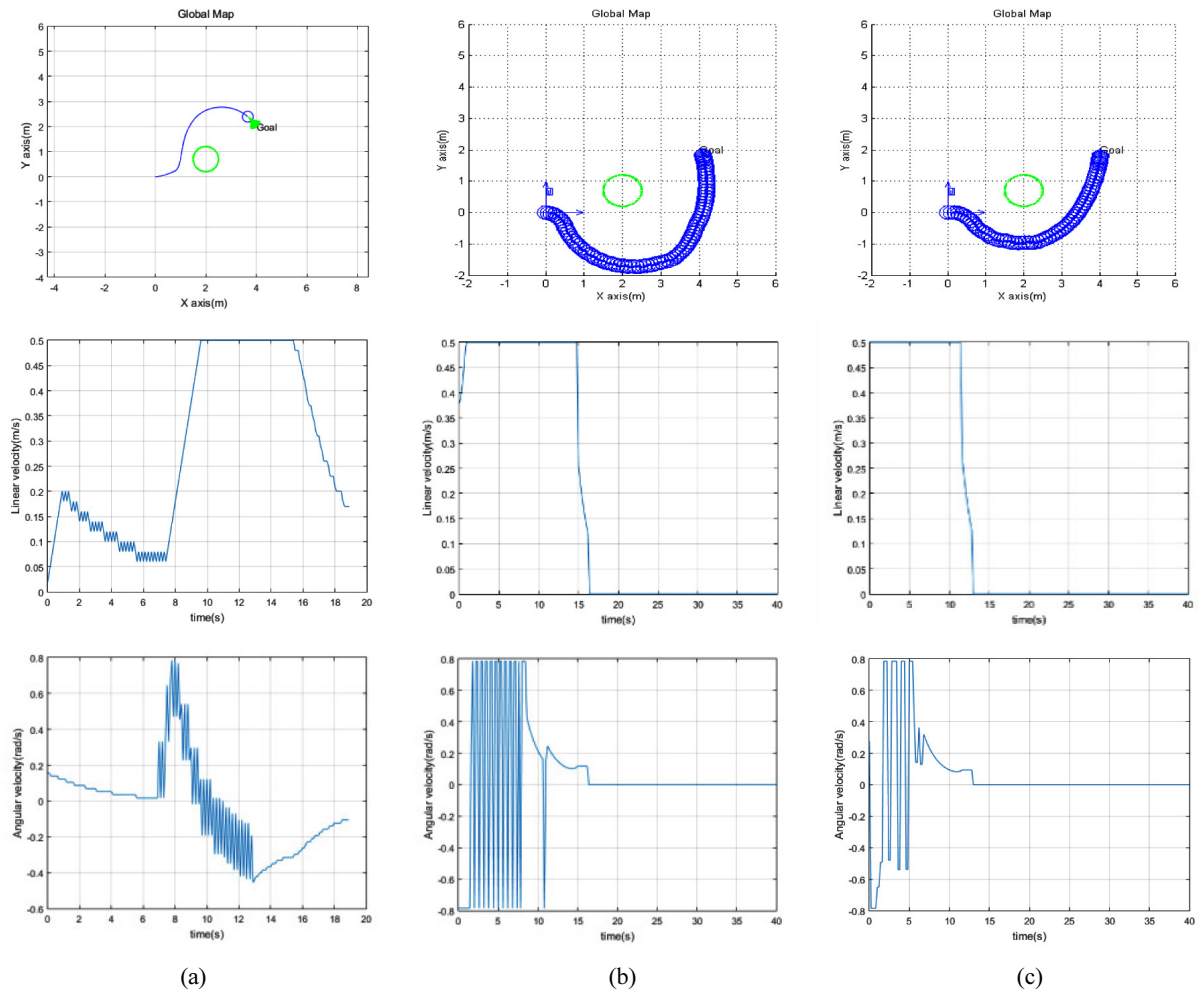


Fig. 4. Experimental results for avoiding the obstacles using (a) Dynamic Window Approach, (b) the original EGC method and (c) the proposed EGC method in Ego-kinematic space: trajectory of robots, linear and angular velocities

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 방법을 검증하기 위해 기존 확장 가이드 서클 방법과 제안한 방법의 장애물 회피 성능을 비교하였다. 이전 연구^[10]에서 확장 가이드 서클 방법을 실제 환경에서 실험한 결과를 통해 제안된 방법에 대한 성능을 검증하였으며, 본 논문에서는 제안하는 방법의 성능 비교를 위해 기존에 두 가지 방법과 동일한 환경에서 시뮬레이션을 진행하였다.

Fig. 4에서 (a)는 잘 알려진 장애물 회피 방법인 Dynamic Window Approach (DWA)의 시뮬레이션 결과이고 (b)는 기존 확장 가이드 서클 방법의 시뮬레이션 결과이다. 또

한 (c)는 본 논문에서 제안한 방법의 시뮬레이션 결과이다. 각각의 방법으로 목적지까지 도달하는 장애물을 회피하는 로봇의 궤적, 선속도와 각속도를 나타내었다. 확장 가이드 서클과 제안하는 방법 모두 서클의 최소, 최대 값 등의 파라미터는 같지만 기존 방법보다 회피 성능이 개선된 것을 볼 수 있다. 총 이동 거리는 DWA가 가장 짧지만 총 걸린 시간은 본 논문에서 제안하는 방법이 가장 적게 걸렸다. 이는 제어적인 측면에서 효율적으로 제어 입력을 생성하여 보다 빠르게 목적지로 도달하였다고 할 수 있다. 또한, Fig. 4 (b)와 (c)의 가장 아래 표현된 시간에 따른 각속도 그래프를 보면 기존 확장 가이드 서클 방법보다 제안하는 방법에서 미세하게 나타나는

Table1. Comparison of the performance

	Distance (m)	Time (s)
Dynamic Window Approach	5.425	18.9
The original EGC	7.68	16.4
The proposed EGC	6.07	13

지그재그 모션이 개선되었음을 보여준다. 여기서 각속도가 초반에 크게 출렁이는 이유는 목적지로 도달하려는 조작 입력과 장애물을 회피하려는 제어 입력의 충돌에 의해 발생하는 현상에 의해 발생한다. 제안된 방법으로 장애물 회피를 하게 되면 로봇의 진행방향이 변경되어 정면에 장애물이 인식되지 않게 되어 다음 조작 주기에는 목적지를 향해 조작이 된다. 이를 통해 다시 로봇의 좌측에 장애물이 인식되어 회피 조작이 이루어지며, 이러한 과정의 반복으로 각속도의 심한 변화가 발생하게 된다. 이는 확장 가이드 서클 알고리즘이 갖는 특성이지만 제안한 방법을 통해 비홀로노믹 특성을 고려하여 이러한 현상을 줄일 수 있었으며, 기존 방법과 비교해 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1은 기존 확장 가이드 서클과 제안한 방법으로 주행한 결과의 수치적인 분석이다. 표에서의 Distance는 로봇이 목적지까지 주행한 총 거리를 말하며 Time은 로봇이 목적지까지 주행한 총 시간을 말한다.

5. 결 론

본 논문에서는 비홀로노믹 제약 조건을 가진 로봇을 고려하는 장애물 회피 방법에 대해 다뤘다.

확장 가이드 서클 방법은 원격 조작의 편의성과 안전성을 증대시키기 위한 방법이지만 알고리즘의 간단하고 효율적인 면을 살려 자율주행을 위한 이동로봇에 적용하였다. 또한, 이동로봇의 기구학적인 제약조건을 고려하지 않은 문제를 해결하기 위해 Ego-Kinematic 공간을 도입하고 이 공간 상에서의 수정된 확장 가이드 서클 방법을 제안하였다.

지금까지 제안된 장애물 회피 방법들은 대부분 홀로노믹 로봇이라 가정하고 장애물 회피 문제를 풀었기 때

문에 알고리즘의 결과로 나온 제어 입력으로 비홀로노믹 제약조건을 가진 로봇이 주행 불가능한 제어 입력이 생성될 수 있다. 또한, 몇몇 장애물 회피 방법들은 알고리즘적 파라미터에 따라 성능이 민감하게 반응한다. 하지만 본 논문에서 제안 하는 방법은 공간 변환을 도입하여 위와 같은 문제에 있어 강인한 방법을 제안하였다.

향후 실험 결과에서 발생한 지그재그 모션을 해결하며 전역 경로 계획과 경로 추종 그리고 제안한 방법을 융합하여 이동로봇의 네비게이션 시스템을 구축할 것이다. 그리고 다른 장애물 회피 방법들과의 비교를 통해 제안하고자 하는 방법의 우수성을 검증할 것이다.

References

- [1] I. Ulrich and J. Borenstein, "VFH+: Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots," IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp. 1572-1577, 1998.
- [2] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 4.1, pp. 23-33, 1997.
- [3] R. Simmons, "The curvature-velocity method for local obstacle avoidance," IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp. 3375-3382, 1996.
- [4] J. Minguez, and L. Montano, "The ego-kinodynamic space: Collision avoidance for any shape mobile robots with kinematic and dynamic constraints," IEEE/RSJ Int'l Conf. Intelligent Robots and Systems, pp. 637-643, 2003.
- [5] J. Blanco, J. Gonz'alez, and J. Fern'andez-Madriral, "Extending obstacle avoidance methods through multiple parameter-space transformations," Autonomous Robots, vol. 24, no. 1, pp. 29-48, 2008.
- [6] M. Khatib, H. Jaouni, R. Chatila, and J. P. Laumond, "Dynamic path modification for car-like nonholonomic mobile robots," IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp. 2920-2925, 1997.
- [7] F. Lamiraux, D. Bonnafous, and O. Lefebvre, "Reactive path deformation for nonholonomic mobile robots," IEEE Trans. Robotics, vol. 20, no. 6, pp. 967-977, 2004.
- [8] Seunghwan Park and Gon-Woo Kim, "Expanded Guide Circle based Obstacle Avoidance for the Remotely Operated Mobile Robot," J. Electrical Engineering & Technology, vol. 9, no. 3, pp. 1034-1042, 2014.
- [9] Han-Soo Choi, Dong-Il Kim, and Jae-Bok Song, "Sim-

ultaneous path tracking and orientation control for three-wheeled omni-directional robots,” Journal of Korea Robotics Society, vol. 10, no. 3, pp. 323-325, 2015.

- [10] Youngbo Shim and Gon-Woo Kim, “Online Path Planning Tracking with Efficient Obstacle Avoidance using the Expanded Guide Circle Method,” Korea Robotics Society Annual Conference (KRoC 2015), pp. 323-325, 2015.



심 영 보

2014 충북대학교 전자공학부(공학사)

2016 충북대학교 제어로봇공학과(공학석사)

관심분야: Safe Navigation, Autonomous Robots



김 곤 우

2006 서울대학교 전기컴퓨터공학부(공학박사)

2006 ~ 2008 한국생산기술연구원 로봇기술
본부위촉연구원

2008 ~ 2012 원광대학교 전기전자 및 정보공
학부 조교수

2012 ~ 현재 충북대학교 전자공학부 부교수

관심분야: Mobile Robot Navigation, Sensor Fusion, Map Building
and Localization, Remote Operation