Check for updates

Journal of KIIT. Vol. 22, No. 2, pp. 129-139, Feb. 28, 2024. pISSN 1598-8619, eISSN 2093-7571 **129** http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2024.22.2.129

주행 안정성을 위해 향상된 비용 함수 기반의 전 방향 벡터 극 히스토그램 기법

이병욱*, 이승환**

An Improved Cost Function based Omni-directional Vector Polar Histogram Method for Safe Navigation

Byung-Uk Lee*, Seung-Hwan Lee**

This research was supported by Kumoh National Institute of Technology(2022, 2023)

요 약

본 논문은 주행 안정성이 향상된 비용 함수 기반의 전 방향 벡터 극 히스토그램 기법을 제안한다. 실제 환 경에서, 기존의 전 방향 벡터 극 히스토그램 방법은 장애물 회피 반경과 로봇의 교착상태 문제로 인해 주행 안정성이 저하될 수 있다. 따라서 기존 방법의 로봇의 주행 안정성을 향상시키기 위해, 점군 집단 중점 정보와 이동 방향 가중치 함수가 추가된 향상된 비용 함수가 제안되었다. 점군 집단 중점 정보는 장애물 회피 반경을 개선하는 역할을 하고, 이동 방향 가중치 함수는 로봇의 교착상태 문제를 해결한다. 주행 안정성을 위한 실험 을 통해 제안한 방법은 기존 방법보다 넓은 회피 반경을 보였으며 동시에 교착상태 문제도 해결하였다. 또한, 추가된 파라미터들의 변화에 따른 제안한 방법의 성능도 분석되었다. 향후에는 다양한 환경에서 파라미터들 간의 영향 및 최적 파라미터 선정에 관한 연구를 진행할 계획이다.

Abstract

In this study, we propose an improved cost function based omni-directional vector polar histogram method for safe navigation(EVPH). In an actual environment, the navigation safety of the conventional EVPH method may be compromised due to problems with the avoidance radius and deadlock problems. To enhance navigation safety, this study introduces an improved cost function that incorporates the midpoint information of the point cloud group and a movement direction weight function. The inclusion of midpoint information can improve the avoidance radius, while the movement direction weight function is capable of addressing deadlock issues. Experiments demonstrated that the navigation safety of the proposed method was superior to that of the conventional method in terms of the avoidance radius and the deadlock problem. Furthermore, the performance of the proposed method regarding its parameters, was thoroughly analyzed. Future research will explore the relationship between parameters and the selection of optimal parameters in various environments.

Keywords

extended vector polar histogram, cost function, mobile robot navigation, autonomous driving

* 국립금오공과대학교 전자공학과 석사과정	· Received: Jan. 14, 2024, Revised: Feb. 13, 2024, Accepted: Feb. 16, 2024
- ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1230-8135	· Corresponding Author: Seung-Hwan Lee
** 국립금오공과대학교 전자공학부 부교수(교신저자)	Dept. of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology,
- ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8426-975X	61 Daehak-ro (yangho-dong), Gumi, Gyeongbuk, Korea

Tel.: +82-54-478-7458, Email: leesh@kumoh.ac.kr

I.서 론

센서와 임베디드 연산 능력의 발전으로 다양한 분야에서 이동 로봇 연구가 진행되고 있다[1]-[3]. 특히, 이동 로봇의 핵심 기술인 주행 기법에 대한 관심과 연구들이 증가하고 있다[4][5]. 대표적인 주 행 방법으로 라이다(LiDAR)와 같은 광학 센서로부 터 얻은 방향에 대한 거리 정보를 이용하는 향상된 벡터 극 히스토그램 기법(VPH+, Enhanced Vector Polar Histogram)이 있다[6].

VPH+ 방법은 센서 정보로부터 극 좌표계에서 방 향과 거릿값으로 구성된 극 히스토그램을 구성한다. 구성된 극 히스토그램을 이용하여 이진 히스토그램 인 상징 함수(Symbol function)와 임계 함수 (Threshold function)가 생성된다. 극 히스토그램과 이 진 히스토그램을 이용하여 목표 방향에 대한 비용 함수(Cost function)를 만든다. 비용 함수의 최댓값을 만드는 방향이 로봇의 이동 방향으로 최종 선택된 다. 로봇은 매 주기 이 방향을 계산하며 이동한다.

하지만, 이 방법은 광학 센서의 제한된 FOV (Field of View) 등에 의해 생성된 로봇의 이동 가능 한 범위가 제한되는 문제가 있다. 우리의 이전 연구 [7]에서 이러한 문제를 해결하기 위해 확장된 벡터 극 히스토그램 기법(EVPH, Extended Vector Polar Histogram)이 제안되었다. EVPH는 다중 라이다 센 서 정보로 전 방향(Omni-Direction)에 대한 벡터 극 히스토그램을 표현하였고, 전 방향 정보로부터 후진 이동도 가능한 효율적 주행 벡터를 생성하였다. 하 지만 주행의 안정성과 특수한 상황에서의 교착 문 제가 충분히 고려되지 않았다. 따라서 본 논문에서 는 주행 안정성을 위해 향상된 비용 함수 기반의 전 방향 벡터 극 히스토그램 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 관련 연구 로 벡터 극 히스토그램 기법의 연구 변천을 논한 다. 3장에서는 기존 방법의 문제점이 정의되었고, 이 문제를 해결하기 위한 제안점이 상세히 설명된 다. 4장에서는 기존 방법과 제안한 방법을 비교하 기 위한 실험을 진행하고, 파라미터에 따른 제안한 방법의 성능도 분석한다. 5장에서는 논문 내용을 요약한다.

Ⅱ. 관련 연구

벡터 극 히스토그램 기법(VPH, Vector Polar Histogram)[8]은 포텐셜 필드(Potential field) 방법[9] 과 벡터장 히스토그램(Vector field histogram) 방법 [10]을 융합하여 고안되었다. VPH는 광학 센서로부 터 얻은 각 방향의 거릿값을 극 히스토그램으로 나 타낸다. 극 히스토그램과 로봇의 현재 방향, 선속도, 크기로 계산된 임계 거리를 비교하여 이진 히스토 그램인 임계 함수를 생성한다. 생성된 극 히스토그 램과 이진 히스토그램, 방향 가중치를 이용하여 비 용 함수를 계산한다. 비용 함수의 방향 가중치는 목 표 방향에 대한 가중치와 현재 로봇 방향에 대한 가중치로 구성된다. 각 방향에 대한 비용 함수의 결 과를 이용하여 가장 큰 값을 가지는 방향을 로봇의 이동 방향으로 선정한다.

VPH는 임계 함수만을 이용하여 로봇의 이동 방 향을 계산한다. 이러한 VPH의 특성에서 착안하여, 혼잡 환경에서 장애물 회피와 주행을 수행할 수 있 는 향상된 VPH(VPH+)가 제안되었다[6]. VPH+는 수 정된 극 히스토그램과 상징 함수를 추가하여 비용 함수를 구성한다. 수정된 극 히스토그램은 한 방향 에 대한 거리 정보를 명확하게 나타내기 위해 인접 방향의 거릿값과 로봇의 크기를 반하여 구성한다. 수정된 극 히스토그램을 이용하여 개별적인 점군 정보를 집단으로 구성한다. 상징 함수는 구성된 점 군 집단의 오목(Concave) 여부를 판단하여 이진 히 스토그램을 구성한다. 또한, VPH+는 임계 함수도 생성한다. 구성된 두 이진 히스토그램은 로봇과 각 방향의 환경과의 기하학적 관계를 나타낸다. 이후, 비용 함수는 수정된 극 히스토그램, 상징 함수 및 임계 함수의 결과로 구성된 이진 히스토그램을 이 용하여 계산된다. 비용 함수의 계산 결과, 함수의 최댓값을 가지는 방향으로 로봇은 이동한다.

은닉 마르코프 모델(HMM, Hidden Markov Model) 과 확장 칼만 필터(EKF, Extended Kalman Filter)를 이용한 시각적으로 확장된 VPH(VVPH)가 제안되었 다[11]. VVPH는 이미지 센서를 이용한 시각적 히스 토그램과 광학 센서를 이용한 거리 히스토그램을 융합한 히스토그램을 구성한다.

시각적 히스토그램을 구성하기 위해 취득된 이미 지로부터 소실점(Vanishing point)과 각 방향에 대한 선 특징점 정보(Line feature)를 구성한다. 계산된 소 실점과 선 정보는 거리 함수를 통해 방향에 대한 시각적 히스토그램으로 구성된다. 시각적 히스토그 램 구성 과정에서, 정확도를 향상하기 위해 HMM과 EKF를 이용한다. HMM의 은닉 상태는 구성된 각 방향에 대한 선 정보의 존재 여부로 정의된다. 이러 한 은닉 상태를 추정하기 위해 비터비 알고리즘 (Viterbi algorithm)이 수행된다. 만약, 특정 방향에 대한 선 정보가 존재하는 경우, EKF는 각 방향에 대한 선 정보과 로봇 사이의 거리를 추정하여 시각 적 히스토그램을 새롭게 구성한다. VVPH는 각 방 향에 대한 시각적 히스토그램과 거리 히스토그램의 최솟값으로 구성된 융합 히스토그램을 이용하여 비 용 함수를 계산한다.

극 스캔 매칭(Polar scan matching)과 속도 장애물 (Velocity obstacle)을 이용하는 VPH 기반 방법도 제 안되었다[12]. 이 방법은 동적 객체를 추정하기 위 해 이전 시점의 극 히스토그램을 이용하여 추정된 극 히스토그램과 광학 센서를 이용하여 현재 시점 에 측정된 극 히스토그램을 비교한다. 각 극 히스토 그램은 장애물 점군 집단과 장애물이 아닌 점군 집 단으로 분류된다. 두 개의 극 히스토그램에서 장애 물 점군 집단을 서로 매칭하고, 매칭된 집단의 이동 량을 비교하여 동적 장애물을 추정한다. 추정된 동 적 장애물의 충돌 영역은 속도 장애물를 이용하여 추정되고 이를 반영한 속도 장애물 히스토그램이 구성된다. 혼합 히스토그램은 고정 장애물이 반영된 극 히스토그램과 동적 장애물이 반영된 속도 장애 물 히스토그램을 융합하여 생성되고 이를 이용하여 동적 환경에서 장애물 회피가 가능해진다.

이 외에도 VPH+는 수중 무인 잠수정[13], 다관절 로봇[14], 무인 지상 차량(Unmanned ground vehicle) [15] 등 다양한 로봇에도 적용되었다. 수중 무인 잠 수정에 적용된 VPH+는 초음파 센서를 이용하여 벡 터 극 히스토그램을 구성되었다. 마찬가지로, 다관 절 로봇에 적용된 제약 강화 VPH(CVPH+)는 초음 파 센서를 이용하여 벡터 극 히스토그램을 생성해 적용하였다. 무인 지상 차량의 장애물 회피를 위해 모델 예측 제어(Model predict control)와 결합된 VPH+가 활용되었다.

III. 주행 안정성을 위해 향상된 비용 함수기반의 전 방향 벡터 극 히스토그램 기법

앞서 서술된 다양한 방법들은 로봇의 이동 가능 한 범위가 180°로 제한되어 있다. 제한된 회전 범위 로 인해, 로봇은 이동할 수 있는 범위 내부에서 이 동 방향을 택한다. 제한된 회전 범위에서 나타난 이 동 방향은 최적의 경로를 선택하지 못하는 한계점 을 가진다. 이러한 한계점을 극복할 수 있는 EVPH 가 제안되었다. EVPH는 기존 VPH+의 제한된 이동 가능한 방향을 전 방향으로 확장하였다. EVPH는 가려졌거나(Occluded data) 사라진(Missing data) 거리 정보에 대해 선형 보간법을 이용하여 전 방향 거리 정보를 재구성한다. 재구성된 전 방향 거리 정보는 예상되는 장애물 정보와 로봇의 크기를 반영하여 수정된 전 방향 극 히스토그램(Omni-Directional polar histogram)을 구성한다. 수정된 전 방향 극 히 스토그램을 이용하여 점군 집단이 구성된다. 구성된 점군 집단 정보는 상징 함수를 이용하여 점군 집단 의 오목 여부에 따른 이진 히스토그램을 구성한다. 동시에, 임계 함수는 전 방향 극 히스토그램을 이용 하여 임계 거리에 따른 이진 히스토그램을 구성한 다. 식 (1)은 EVPH의 비용 함수이다.

$$C(i) = \frac{B(i)H(i)OD_i}{k_1hg + k_2h_o + k_3}, \quad i = 1, \cdots, 360$$
(1)

여기서 EVPH의 비용 함수는 상징 함수 B(i), 임계 함수의 결과로 나타난 이진 히스토그램H(i), 수정 된 전 방향 극 히스토그램 OD_i 와 몇 가지 방향 가 중치를 이용하여 계산된다. 방향 가중치에는 h_g 와 h_o 가 있다. h_g 는 목표 지점의 방향과 i번째 각도의 차 정보, h_o 는 현재 로봇과 i번째 각도의 차 정보 를 의미한다. k_1 , k_2 , k_3 은 비용 함수에서의 각 차 정보 가중치의 크기이다. k_1 은 로봇의 이동 방향을 목표 지점 방향으로 유도할 수 있으며, k_2 는 로봇 의 이동 방향을 로봇의 현재 방향으로 유도할 수 있다. EVPH의 비용 함수는 로봇이 이동할 수 있는 모든 방향에 대해서 그 값을 가지며, 최댓값을 가지 는 방향 각도 *i*를 로봇의 이동 방향으로 선정한다.

하지만, 이 방법은 두 가지의 문제점으로 인해 로봇의 주행 안정성을 저하할 수 있다. 첫 번째는 목표 지점, 로봇 그리고 장애물이 같은 선상에 있을 때, 로봇은 최소한의 회피 반경을 이용하여 장애물 의 끝을 따라 이동한다. 만약 해당 장애물이 동적 장애물이라면 약간의 이동만으로도 로봇과 동적 장 애물의 충돌을 초래할 수 있다. 두 번째는 로봇의 전방과 후방이 동일한 가중치이기 때문에 목표 지 점, 로봇 그리고 장애물의 위치 관계에 따라 전진 및 후진 방향이 반복적으로 선택되어 결국 로봇이 목표 지점으로 이동할 수 없는 교착상태(Deadlock) 에 이르는 문제이다.

3.1장에서는 이러한 두 가지 문제를 해결하여 로 봇의 주행 안정성을 향상시킬 수 있는 향상된 비용 함수를 제안한다. 또한, 3.2장과 3.3장에서 향상된 비용 함수로부터 이 두 가지 문제가 어떻게 해결될 수 있는지에 대하여 상세히 다룬다.

3.1 향상된 비용 함수

제시된 문제를 풀기 위한 제안한 방법의 향상된 비용 함수는 식 (2)와 같다.

$$C_E(i) = \frac{B(i)H(i)W_g(i)OD_i}{k_1h_g + k_2h_o + k_4h_b + k_3}, i = 1, \cdots, 360 \quad (2)$$

여기서 h_b 는 구성된 점군 집단의 중점과 그 집단에 속하는 방향 간 차 정보이다. k_4 는 h_b 의 가중치이 다. $W_g(i)$ 는 이동 방향 가중치 함수를 의미한다. 향상된 비용 함수의 핵심이 되는 h_b 와 $W_g(i)$ 는 다 음 장에서 상세히 다룬다.

3.2 점군 집단 중점 정보

광학 센서를 이용하여 구성한 수정된 전 방향 극 히스토그램은 로봇 좌표계에서 로봇의 크기를 고려하 여 로봇 주변 환경의 거리 정보를 나타낸다. 점군 집 단은 수정된 전 방향 극 히스토그램을 이용하여 구성 된다. 구성된 점군 집단은 길이 정보를 이용하여 오목 한(Concave) 점군 집단과 오목하지 않은 (Non-concave) 점군 집단으로 분류한다. 그림 1은 주어진 환경의 점 군 집단 구성 및 분류 결과를 나타낸다.



그림 1. 주어진 환경의 점군 집단 구성 및 분류 결과. 점군 집단 C, G는 오목한 점군 집단으로 분류된다. Fig. 1. Result of grouping process. The Group C and G are defined as concave blocks.

기존의 비용 함수는 로봇의 이동 방향을 비용 함 수의 최댓값을 가지는 방향으로 선정한다. 비용 함 수 계산 과정에서, 부족한 점군 집단 간의 관계 정 보는 로봇의 이동 방향을 두 점군 집단의 경계점으 로 나타낸다. 로봇의 이동 방향이 두 점군 집단의 경계점으로 나타나기 때문에, 로봇은 최소한의 회피 반경으로 장애물에 인접하여 이동하게 된다. 장애물 에 인접하여 이동하는 로봇은 해당 장애물과 충돌 할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문은 구성 된 점군 집단의 중점 정보를 이용하는 파라미터인 h_b 를 향상된 비용 함수에 추가한다. h_b 는 오목하지 않은 점군 집단의 중점을 기준으로, 해당 점군 집단 의 각 방향과 그 중점의 상대적인 각도 차이를 계 산하여 구성한다. 그림 2는 주어진 환경의 h_b 계산 결과를 나타낸다. 점군 집단 C와 G는 상징 함수의 오목한 점군 집단에 포함되어 비용 함수가 0이 되 므로 h_b 계산에서 제외된다.



그림 2. 예시의 환경에서 h_b 연산 결과. h_b 는 점군 집단의 중점에서 그 값이 최소가 된다. Fig. 2. Result of h_b calculation in this example. h_b represents minimum values at the midpoints of the point cloud groups.

오목하지 않은 점군 집단 A, B, D, E, F, H의 h_b 는 각 집단의 중점을 기준으로 좌우 대칭의 형태로 그 값이 증가한다. 이는 각 집단 내에서 비용 함수 의 최댓값을 가지는 방향을 점군 집단의 중점으로 유도하기 위함이다.

향상된 비용 함수는 점군 집단의 중점 정보 h_b 와 그것의 가중치 k_4 를 이용하여 최댓값을 가지는 방 향을 두 점군 집단의 경계점이 아닌 점군 집단의 중점으로 나타낼 수 있다. 이는 로봇의 장애물 회피 반경을 증가시킴으로써 최소한의 회피 반경을 가지 는 기존 방법 대비 로봇의 주행 안정성을 향상시킬 수 있다.

3.3 이동 방향 가중치 함수

EVPH의 비용 함수는 전 방향에 대하여 계산된 다. 비용 함수의 방향 가중치 h_g 와 h_o 는 목표 지점 의 방향과 각 방향 간 차 정보, 로봇과 각 방향의 차 정보를 의미하고 그 값이 작을수록 비용 함수의 값을 증가시킨다. 그림 3은 현재 로봇의 좌표계(0° 방향이 로봇 방향)에서 목표 지점의 방향이 0°일 때, 두 파라미터의 연산 결과를 나타낸다.

그림 3에 나타난 것처럼, h_g 는 한 개의 최솟값을 가지며, 이는 목표 지점의 방향인 0°를 의미한다. 목표 지점의 방향을 기준으로, h_g 는 목표 지점의 방향과 각 방향의 차를 계산한다. 반면, h_o 의 최솟 값은 0°와 180°이다. 0°는 로봇의 전방, 180°는 로봇 의 후방을 의미한다. 이는 로봇의 전, 후진 이동이 가능한 EVPH의 특성에 따라 나타나는 결과이다. h_o 는 0°와 180°를 기준으로 각 방향 간 차를 계산 하기 때문에 두 개의 최솟값을 기준으로 대칭의 형 태가 나타난다.

그림 4는 로봇의 목표 지점 방향에 장애물이 존 재하는 한 예이다. 목표 지점 방향의 빨간색 장애 물은 오목한 점군 집단에 분류된다. 상징 함수는 해당 방향의 이진 히스토그램을 0으로 할당한다. 마찬가지로 장애물이 위치한 방향의 비용 함수도 상징 함수의 이진 히스토그램에 의해 그 값이 0으 로 나타난다.



minimum value at 0 degree.



그림 4. h_g =90°이고, 목표 지점 방향에 있는 장애물이 오목한 점군 집단으로 분류되는 한 예.



그림 5는 해당 환경의 비용 함수 계산 결과를 보 여준다. 목표 지점 방향인 90° 근처의 비용 함수의 값은 모두 0이다. 또한, 60°와 120°에서는 그 값이 최대가 된다. 이 비용 함수의 결과를 이용하여 로봇 의 이동 벡터인 선속도(v_{n+1})와 각속도(ω_{n+1})는 식 (3)과 (4)를 이용하여 계산한다.



그림 5. 최대치가 두 개인 비용 함수 계산 결과 Fig. 5. Cost function with two maximum values

$$v_{n+1} = \begin{cases} -v_{n+1}, \text{ if } 90^{\circ} < |\theta_{m,\text{deg}}| \\ v_{n+1} &, \text{ otherwise} \end{cases}$$
(3)

$$\omega_{n+1} = \begin{cases} \theta_{m, \text{rad}} + \pi \,, -180 \,^{\circ} \leq \theta_{m, \text{deg}} < -90 \,^{\circ} \\ \theta_{m, \text{rad}} - \pi \,, 90 \,^{\circ} < \theta_{m, \text{deg}} \leq 180 \,^{\circ} \\ \theta_{m, \text{rad}} \,, \text{ otherwise.} \end{cases}$$
(4)

여기서 n은 현재의 이산 시간을 의미한다. θ_{m,deg}은 비용 함수 최댓값의 각도이고, θ_{m,rad}은 비용 함수 최댓값의 라디안 값을 의미한다. 그림 5에 나타난 비용 함수의 θ_{m,deg}은 60°와 120° 2개이므로, 이때의 선속도와 각속도는 표 1과 같이 나타난다.

표 1. 비용 함수 최대치에서의 로봇의 이동 속도 벡터 Table 1. Velocity vector of the robot calculated at the maximum values of the cost function

$\theta_{m, \deg}$ [°]	$v_{n+1} $ [m/s]	ω_{n+1} [rad/s]
60	v_{n+1}	$\pi/3$ (1.047)
120	$-v_{n+1}$	$-\pi/3$ (-1.047)

대칭되어 나타난 비용 함수는 로봇의 선속도와 각속도를 대칭되어 나타나게 한다. 이러한 결과는 로봇이 두 방향을 교대로 선택하며 이동하지 못하 는 교착상태를 발생시킬 수 있다. 로봇의 교착상태 는 전방 이동과 후방 이동에 대한 동일한 가중치로 인해 발생되며, 로봇을 목표 지점으로 주행할 수 없 도록 하여 주행 안정성을 저해시킨다.

본 논문은 로봇의 이동 방향에 가중치를 할당하는 이동 방향 가중치 함수 $W_g(i)$ 를 제안하여 주행 안정성을 향상하고자 한다. 식 (5)는 이동 방향 가중치 함수의 정의이다.

$$W_g(i) = \begin{cases} \alpha, \text{if } i \in \text{movement direction} \\ 1, \text{ otherwise} \end{cases}$$
(5)

여기서 이동 방향 가중치 함수는 비용 함수 결과에 현재 로봇의 실제 이동 방향을 기준으로 ±90° 범 위에 대해 1보다 큰 이동 가중치 α를 부여한다.

앞선 예시에 제안된 이동 방향 가중치 함수가 적 용되면 60°와 120°를 반복적으로 선택하며 생성한 서로 다른 로봇 속도 벡터에 의한 교착상태 문제도 해결할 수 있다. 이 예시에서 로봇이 전방으로 이동 중인 경우, 제안된 이동 방향 가중치 함수에 의해 로봇의 전방 영역에 이동 가중치가 부여된다. 이는 60° 방향을 일관되게 선택하며 장애물을 회피하고 목표 지점까지 도달할 수 있게 된다. 마찬가지로, 로봇이 후방으로 이동 중인 경우, 이동 가중치에 의 해 120° 방향을 일관되게 선택한다.

IV.실 험

본 장에서는 로봇의 장애물 회피 반경과 교착상 태 문제의 해결 여부를 비교하여 향상된 비용 함수 의 주행 안전성을 입증하기 위한 두 가지 실험이 진행되었다. 또한, 파라미터 변화에 따른 기존 방법 과 제안한 방법의 성능 비교 및 분석을 수행한다.

4.1 실험 구성

그림 6은 실험에 사용된 로봇을 보여준다.



그림 6. 실험에 사용된 두 개의 라이다 센서를 탑재한 로봇 Fig. 6. Designed robot equipped with two LiDAR sensors

실험에 사용된 로봇은 6개의 구동 모터로 구성된 차동 구동 로봇에 RPLiDAR A3 모델의 라이다 2개가 로봇의 전면과 후면에 장착되었다. 로봇의 위치 추정 은 3차원 모션 캡쳐 시스템[16]을 이용하여 구성한다.

4.2 h_b의 가중치 k₄에 따른 로봇의 장애물 회피
반경 실험 (안정 주행 테스트)

그림 7은 첫 번째 실험의 실험 환경을 나타낸다. 로봇의 출발 지점은 (1.5, 1.5)이고, 로봇의 목표 지 점은 (-1.5, -1.5)이다. 원점(0, 0)에는 1080mm× 350mm×700mm 크기의 고정 장애물이 배치되었다. 로봇은 목표 지점을 바라보는 상태에서 주행을 시 작한다. 주행 과정에서, h_b 의 가중치인 k_4 에 따른 로봇의 장애물 회피 반경을 비교하여 제안하는 방 법의 안정성 성능을 입증하고, 파라미터 변화에 따 른 분석을 진행한다.



그림 7 첫 번째 실험 환경 Fig. 7. Environment of the first experiment

표 2는 첫 번째 실험에 사용된 향상된 비용 함수 의 파라미터들을 나타낸다. 파라미터에는 향상된 비 용 함수의 h_b 가중치 k_4 를 0으로 둔 기존 방법, k_4 를 다른 요소의 가중치인 k_1 , k_2 , k_3 와 같은 값으로 하는 방법, k_4 를 3500으로 큰 비중을 두는 방법을 비교 및 분석한다.

k₄에 따른 로봇의 이동 경로 차이는 그림 8에 나 타난다. 경로 궤적을 보았을 때, k₄가 증가할수록 고 정 장애물을 회피할 때 회피 반경이 증가함을 알수 있다. 대신 비용 함수는 k₄에 의한 h_b의 영향이 타 가중치와 결합 되어 비(Ratio)의 형태로 반영되므로 반경 크기가 k₄에 선형적으로 증가하지 않는다.

그림 9는 시간에 따른 로봇과 고정 장애물의 상 대적 거리 그래프이다. k_4 가 0인 기존 방법에 비해 k_4 를 증가시킬수록 로봇과 고정 장애물 사이의 간 격이 전반적으로 증가한 채로 유지되고 있다. 이는 제안된 k_4 의 조절을 통해 로봇의 안정적인 주행을 조절할 수 있음을 의미한다.

표 2. 첫 번째 실험에 사용된 비용 함수의 파라미터 Table 2. Designed parameters in the first experiment

Parameters	Value					
k_1	2500					
k_2	100					
k_3	1					
k_4	0, 1, 100, 2500, 3500					
α	1					



그림 8. k_4 에 따른 로봇의 이동 경로 Fig. 8. Trajectory of the robot according to k_4





표 3은 그림 9에 나타난 로봇과 장애물 사이 상 대 거리의 최솟값을 나타낸다. k_4 를 0으로 두는 기 존 방법의 상대 거리 최솟값은 0.867m로 나타났다. 이는 로봇과 장애물 사이의 최소거리가 0.327m로 로봇이 장애물에 인접하여 회피하였음을 의미한다. 반면, k_4 의 증가에 따라 상대 거리 최솟값은 증가 하는 것으로 나타났다. 특히, k_4 가 3500 만큼 증가 되었을 때, 제안한 방법의 로봇과 장애물 사이 상 대 거리의 최솟값은 1.077m로 나타났다. 이는 로봇 과 장애물 사이의 최소거리가 0.537m로 나타났으 며, 기존 방법 대비 최소거리가 0.21m만큼 증가하 여 나타났다.

점군 집단의 중점 정보 h_b 는 차 정보 가중치 k_4 에 따라 장애물 회피 반경을 증가시켜 로봇의 주행 안정성을 향상시킬 수 있었다.

표 3. k_4 에 따른 로봇과 장애물 사이 상대 거리의 최솟값 Table 3. Minimum value of the relative distance between the robot and the obstacle according to k_4

Methods	[7]	Proposed method				
k_4	0	1 100		2500	3500	
Minimum distance [m]	0.867	0.901	0.981	1.003	1.077	

4.3 $W_g(i)$ 의 방향 가중치 α 에 따른 로봇의 교착상태 실험

그림 10은 두 번째 실험의 실험 환경을 보여준 다. 로봇의 출발 지점은 (-1.5, -1.5), 로봇의 목표 지 점은 (1.5, 1.5)로 두었다. 원점(0, 0)에는 1800mm× 350mm×700mm 크기의 고정 장애물이 배치되었고, (-1.7, 1.7), (-1.7, -1.7)에는 1080mm×350mm×700mm 크기의 고정 장애물이 배치되었다. 로봇은 (-1.7, 1.7) 지점에 있는 고정 장애물을 바라보는 상태에서 주행을 시작한다. 이는 h_g 를 -90°로 설정하여 교착 상태가 발생할 수 있는 상황을 가정하기 위함이다.

주행 과정에서 α에 따른 로봇의 교착상태 해결 여부를 비교하여 성능을 입증하고, 최적 파라미터 를 도출한다. 표 4는 두 번째 실험에 사용된 향상된 비용 함수 의 파라미터를 나타낸다. α가 1인 기존 방법(식 (5) 에 의해 W_g(i)는 항상 1)과 비교하기 위해 α를 2 에서 4까지 변화시키며 실험을 진행하였다.



그림 10. 두 번째 실험 환경 Fig. 10. Environment of the second experiment

표 4.	누	번쌔	실임	날에	사용된	비경	명 임	주의	파라미티	-1	
Table	4.	Desig	ned	par	ameter	s for	the	cost	function	in	the
secon	de	experir	nent								

Parameters	Value
k_1	2500
k_2	100
k_3	1
k_4	3500
α	1, 2, 3, 4

그림 11은 α에 따른 로봇의 이동 경로를 누적한 결과이다. α가 1인 기존 방법(파란색)을 포함해 α 가 2와 3인 경우(주황색 및 노란색)는 로봇의 이동 경로가 시작 위치 부근에만 나타난다. 이는 교착상 태를 해결하지 못해 로봇이 목표 지점으로 도달하 는 것에 실패했음을 의미한다. 하지만 α가 4가 되 었을 때, 로봇은 교착상태를 해결하여 목표 지점까 지 성공적으로 도달하였다(보라색).

교착상태 해결 결과에 대해 정리하면 표 5와 같 다. 앞서 확인한 바와 같이 α가 가장 큰 값인 4일 때, 교착상태가 해결되었다. 이는 이동 방향 가중치 함수 $W_g(i)$ 의 영향이 커질수록 교착상태 문제가 해결될 수 있음을 의미한다.



그림 11. α 에 따른 로봇의 이동 경로 Fig. 11. Trajectory of the robot according to α in the second experiment

표 5. α 에 따른 교착상태 탈출 결과

Table 5. Result of escaping the deadlock situation based on $\boldsymbol{\alpha}$

Methods	[7]	Proposed method			
α	1	2	3	4	
Deadlock resolved	No	No	No	Yes	

α에 따라 교착상태가 해결되는 과정을 상세히 알아보기 위해 그림 12와 그림 13과 같이 시간에 따른 로봇의 방향각 변화와 목표 지점까지의 상대 적 이동 거리량을 나타내었다. α가 1인 기존 방법 은 펄스파와 유사하며 급격한 방향 변화를 보인다. 이때, 이동 방향 변화량은 최대 166°로 나타났다. 이는 교착상태에서 탈출하지 못하고 같은 공간을 반복적으로 횡단하고 있음을 의미한다. 이로 인해 로봇과 목표 지점 간 상대 거리는 약 3.16m 부근에 서 줄어들지 않는다. α가 2와 3인 경우에도 로봇은 급격한 이동 방향 변화를 보이며 각각 최대 162°와 161°로 나타났다. 교착상태를 탈출하지 못하며 로봇 과 목표 지점 간 상대 거리도 각각 약 3.14m, 3.10m를 유지하였다. 이는 앞선 기존 방법과 마찬 가지로 교착상태가 지속되어 목표 지점에 도달하지 못하는 것을 나타낸다. 반면, α를 4로 두는 제안한 방법은 진행 방향의 적절한 가중치로 인해 비용 함 수의 결과가 달라져 급격한 방향 변화 없이 교착상 태를 탈출하였다. 탈출 과정 중 이동 방향 변화량은 최대 69°로 나타났다. 최종적으로 로봇은 일관된 진 행 방향 선택을 통해 교착상태를 해결하였으며 목 표 지점에 성공적으로 도착할 수 있었다.



그림 12. 시간에 따른 로봇의 이동 방향 변화 Fig. 12. Change of the robot heading direction over time in the second experiment



그림 13. 시간에 따른 로봇과 목표 지점 간 상대 거리 변화 Fig. 13. Relative distance between the robot and the goal point over time in the second experiment

향상된 비용 함수의 이동 방향 가중치 함수 $W_g(i)$ 는 이동 가중치 α를 적절히 조절(해당 실험 에서는 α=4)하여 비용 함수의 결과에 영향을 줄 수 있었고 이를 통해 교착상태 문제를 해결할 수 있었다. 또한, 이 실험의 결과는 로봇이 장애물로 둘러쌓인 공간에서 안정적 주행을 하여 목표 지점 에 도달할 수 있음을 의미한다.

V. 결론 및 향후 과제

본 논문은 주행 안정성을 위해 향상된 비용 함수 기반의 전 방향 벡터 극 히스토그램 기법을 제안하 였다. 제안하는 방법의 향상된 비용 함수는 점군 집 단의 중점 정보와 이동 방향 가중치 함수를 추가하 여 구성되었다. 점군 집단의 중점 정보는 로봇의 이동 방향을 점 군 집단의 중점으로 유도하여 장애물 회피 반경을 증가시킬 수 있다. 또한, 이동 방향 가중치 함수는 로봇의 이동 방향에 가중치를 부여하여 로봇이 이 동하지 못하는 교착상태 문제를 해결하고, 로봇이 목표 지점에 도착할 수 있도록 한다. 이러한 두 가 지 요소를 추가한 향상된 비용 함수는 로봇의 주행 안정성을 향상시킬 수 있다.

두 가지 실험을 통해 제안하는 방법의 성능을 비 교 및 분석하여 로봇의 주행 안정성을 입증하였다. 제안하는 방법은 장애물 회피 과정에서, 로봇과 장 애물 간 상대 거리를 기존 방법 대비 0.21m만큼 증 가시켰다. 또한, 일관된 주행 방향을 선택함으로써 교착상태 문제를 해결하여 로봇을 목표 지점으로 성공적으로 이동시켰다. 또한, 파라미터에 따른 제 안한 방법의 성능 변화를 분석하였다. 향후, 다양한 환경에서 각 파라미터 간의 영향 및 최적 파라미터 선정에 대한 연구를 진행할 계획이다.

References

- [1] E. S. Woo, T. H. Kim, and D. H. Lee, "Design of an Indoor Security Robot System based on Autonomous Navigation and Object Detection", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 21, No. 8, pp. 19-25, Aug. 2023. https://doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.8.19.
- [2] D. G. Lee, G. R. Kang, B. S. Kim, and D. H. C. Shim, "Assistive Delivery Robot Application for Real-World Postal Services", IEEE Access, Vol. 9, pp. 141981-141998, Oct. 2021. https://doi.org/10.11 09/ACCESS.2021.3120618.
- [3] J. Holland, L. Kingston, C. McCarthy, E. Armstrong, P. O'Dwyer, F. Merz, and M. McConnell, "Service Robots in the Healthcare Sector", Robotics, Vol. 10, No. 1, pp. 47, Mar. 2021. https://doi.org/10.3390/robotics10010047.
- [4] G. Chen, S. Wu, M. Shi, W. Dong, H. Zhu, and J. Alonso-Mora, "RAST: Risk-Aware Spatio-Temporal Safety Corridors for MAV

Navigation in Dynamic Uncertain Environments", IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 8, No. 2, pp. 808-815, Feb. 2023. https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3231832.

- [5] P. T. Singamaneni, A. Favier, and R. Alami, "Human-Aware Navigation Planner for Diverse Human-Robot Interaction Contexts", 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Prague, Czech Republic, pp. 5827-5824, Dec. 2021. https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636613.
- [6] J. Gong, Y. Duan, Y. Man, and G. Xiong, "VPH+: An Enhanced Vector Polar Histogram Method for Mobile Robot Obstacle Avoidance", 2007 International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, pp. 2784-2788, Aug. 2007. https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4304000.
- [7] B. U. Lee, W. H. Kim, and S. H. Lee, "An Extended Vector Polar Histogram Method Using Omni-Directional LiDAR Information", Symmetry, Vol. 15, No. 8, pp. 1545, Aug. 2023. https://doi.org/10.3390/sym15081545.
- [8] D. An and H. Wang, "VPH: a new laser radar based obstacle avoidance method for intelligent robots", Fifth World Congress mobile on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No.04EX788), Hangzhou, China, Vol. 5, pp. 4681-4685, Jun. 2004. https://doi.org/10.1109/ WCICA.2004.1342407.
- [9] Y Koren and J Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation", Icra, Vol. 2, No. 1991, pp. 1398-1404, Apr. 1991. https://doi.org/10.1109/RO BOT.1991.131810.
- [10] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp. 278-288, Jun. 1991. https://doi.org/10.1109/70.88137.
- [11] S. H. Lee, H. C. Lee, and B. H. Lee,

"Visually-extended vector polar histogram applied to robot route navigation", International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 9, pp. 726-736, Aug. 2011. https://doi.org/10.1007/s12555-011-0414-x.

- [12] S. H. Lee, G. H. Eoh, and B. H. Lee, "Robust Robot Navigation using Polar Coordinates in Dynamic Environments", Journal of Industrial and Intelligent Information, Vol. 2, No. 1, pp. 6-10, Mar. 2014. https://doi.org/10.12720/JIII.2.1.6-10.
- [13] H. Wang, L. Wang, J. Li, and L. Pan, "A vector polar histogram method based obstacle avoidance planning for AUV", 2013 MTS/IEEE OCEANS – Bergen, pp. 1-5, Jun. 2013. https://doi.org/10.1109/ OCEANS-Bergen.2013.6608088.
- [14] A. Rao, M. R. Elara, and K. Elangovan, "Constrained VPH+: a local path planning algorithm for a bio-inspired crawling robot with customized ultrasonic scanning sensor", Robotics and biomimetics, Vol. 3, pp. 1-13, Jul. 2016. https://doi.org/10.1186/s40638-016-0043-1.
- [15] K. Liu, J. Gong, and H. Chen, "VPH+ and MPC Combined Collision Avoidance for Unmanned Ground Vehicle in Unknown Environment", arXiv preprint arXiv:1805.08089, May 2018. https://doi. org/10.48550/arXiv.1805.08089.
- [16] J. W. Kim, D. H. Kim, and S. H. Lee, "A Vicon based SLAM Performance Evaluation System", The 38th ICROS Annual Conference (ICROS 2023), pp. 248-249, Jun. 2023.

저자소개

이 병 욱 (Byung-Uk Lee)



2023년 : 국립금오공과대학교 전자공학부(공학사) 2023년 ~ 현재 : 국립금오공과대학교 전자공학과 석사과정 관심분야 : 모바일 로봇, 자율 주행

이 승 환 (Seung-Hwan Lee)



2015년 : 서울대학교 전기컴퓨터학부(공학박사) 2015년 ~ 2018년 : 삼성전자 생산기술연구소 책임연구원 2018년 ~ 2023년 : 국립금오공과대학교 전자공학부 조교수

2023년 ~ 현재 : 국립금오공과대학교 전자공학부 부교수 관심분야 : 다중 로봇 SLAM, 다중 로봇 커버리지 경로 계획