탑승자의 안전을 고려한 지능형 휠체어의 단일 이동 장애물 충돌회피 알고리즘

Collision Avoidance Algorithm of an Intelligent Wheelchair Considering the User's Safety with a Moving Obstacle

김 용 휘, 윤 태 성, 박 진 배*

(Yong Hwi Kim¹, Tae Sung Yoon², and Jin Bae Park¹)

¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

²Department of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract: As the ageing population grows around the world, the demand for electric wheelchairs, an important mobility assistance device for the disabled and elderly, is gradually increasing. Therefore, a number of studies related to intelligent wheelchairs are actively underway to improve safety and comfort for wheelchair users. However, previous collision avoidance studies for intelligent wheelchairs have concentrated on collision avoidance methods with the shortest distance and by only changing either velocity or heading angle, rather than considering the forces exerted on the user. If a collision avoidance algorithm that does not consider these forces is applied to an intelligent wheelchair, there is a possibility of an accident due to falling as wheelchair users are generally disabled and elderly people. In this paper, we propose a collision avoidance algorithm which minimizes the forces exerted on a wheelchair user by minimizing the variation of the wheelchair's velocity and heading angle when the sizes, positions, velocities, and heading angles of a wheelchair and a moving obstacle are known.

Keywords: collision avoidance, intelligent wheelchair, moving obstacle, velocity obstacle

I. 서론

세계적으로 인구 고령화가 진행되고 있는 가운데, 노인과 장애인들을 위한 다양한 제품들이 등장하고 있으며 그 대표적인 것으로 전동 휠체어를 들 수 있다. 전동휠체어는 스스로의 힘으로 이동하기 어려운 노인이나 장애인을 위해 개발된 이동 보조 시스템으로 그들의 생활의 질을 대폭 향상시킬 수 있고, 재활에도 큰 도움을 줄 수 있다. 와병 생활을 해야만 했던 사람들 사이에서 높아지는 이동 수단에 대한 관심과, 선진국 정부의 의료보험 등의 보상 제도로 인해 전동 휠체어에 대한 수요는 갈수록 증가하고 있다.

그러나 일반적인 전동 휠체어는 탑승자의 세밀하고 정확한 수준의 제어를 필요로 하기 때문에 감각 능력이나 조작 능력이 부족한 사람에게는 사용이 제한될 수 밖에 없고, 사용자의 안전성, 편리성 등 계속 높아지는 요구수준을 만족시킬 수가 없다. 이러한 한계를 벗어나기 위하여 다양한 기능을 갖춘 진보된 지능형 휠체어(intelligent wheelchair)의 개발은 필수 불가결하다.

지능형 휠체어 개발에 있어 중요한 핵심 기술로 자율주행 기술을 들 수 있다. 자율주행 기술은 위치 정보 및 주변의 환경 정보를 바탕으로 이동경로를 결정하고 이동을 제어하는 기술을 통칭하는데, 로봇 분야 등 여러 분야에서 많은 연

구가 이루어져 이미 자율적인 충돌회피 및 경로계획을 통하여 원하는 작업을 수행하는 실용화 단계에 도달하였다.

자율주행에서 주변의 정지 및 이동 장애물을 파악하고 충돌을 회피하기 위하여 벡터장 히스토그램 VFH (Vector Field Histogram), 포텐셜 필드 방법 PFM (Potential Field Method), 속도장애물 VO (Velocity Obstacle), 벡터 극성 히스토그램 VPH (Vector Polar Histogram), 탄성력을 이용한 방법(elastic force) 등의 충돌회피 알고리즘들 [1-9]이 연구되어 왔지만, 충돌 회피 시 탑승자에게 가해지는 힘을 고려한 연구는 아직까지 없었다. 특히 휠체어의 탑승자는 몸이 불편한 노인이나 장애인들이기 때문에 이를 고려하지 않은 기존의 충돌회피 알고리즘을 그대로 지능형 휠체어에 적용한다면 낙상 사고를 유발할 가능성도 있다.

따라서 본 논문은 휠체어 탑승자들의 안전을 위하여 단일 이동 장애물에 대한 충돌회피 시 주행 속도 및 주행 각도 변화를 최소화하여 탑승자에게 가해지는 힘을 최소로 하는 실시간 충돌회피 알고리즘을 제안한다. 본 논문의 II 장에서 전동 휠체어의 구조를 간략히 기술하였고, III 장에서는 제안한 알고리즘에 적용되는 충돌회피 알고리즘을 설명한다. 그리고 IV 장과 V 장에서는 충돌회피 시 탑승자에게 미치는 힘에 관한 연구와 최적화 이론을 이용하여 그 힘을 최소화하는 속력과 heading각도의 변화량 계산 방법을 소개하였다. 또한 모의 실험을 통한 제안한 알고리즘의 성능 검증은 VI 장에 기술하였으며, VII 장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 전동 휠체어의 구조

본 논문에서 다루고자 하는 휠체어는 논홀로노믹(non-

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received April 3, 2013 / revised June 3, 2013 / accepted July 18, 2013

김용휘, 박진배: 연세대학교 전기전자공학부

(yonghwikim@yonsei.ac.kr/jbpark@yonsei.ac.kr)

윤태성: 창원대학교 전기공학부(tsyoon@changwon.ac.kr)

※ 본 연구는 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구과제임(No.201280655).

그림 4. MVO 설정: VO를 이용하여 RV 및 RAV 설정.

Fig. 4. Setting up MVO: Setting up RV and RAV by using VO.

수 있다.

충돌회피에서 CC를 이용하지 않고 VO를 계산하는 이유는 장애물의 속도에 따라 변하는 상대속도 벡터 $v_t - v_i$ 가 CC에 들어가는지를 보는 것보다, 실제로 제어하는 휠체어의 속도 벡터 v_i 가 VO 영역에 들어가는지를 보는 것이 더 편리하기 때문이다.

4. MVO 설정

충돌회피를 하기 위해 휠체어의 속력과 방향을 변화시켜야 하지만 휠체어는 단위시간 동안 도달 가능한 최대속도와 회전각도에 제한이 있기 때문에 충돌회피 알고리즘에는 이러한 휠체어의 성능 고려가 필요하다. 이를 위해, 부채꼴 모양의 휠체어 가능속도 영역 RV (Reachable Velocity)를 설정하여 VO와 함께 나타내면 다음의 그림 4와 같이 충돌회피가 가능한 영역인 RAV (Reachable Avoidance Velocity)를 얻을 수 있으며 이러한 접근 방법을 MVO라고 한다.

또한, 휠체어의 속도 벡터 v_i 를 RV 영역을 지나는 VO 외곽선 위의 한 점으로 변화시킬 때 충돌회피 시 탑승자에게 미치는 힘이 가장 적게 발생하며, 본 논문에서는 최적화 이론을 이용하여 그 점을 찾는다.

IV. 충돌회피 시 탑승자에게 미치는 힘

충돌회피 시 탑승자에게 미치는 힘은 지능형 휠체어의 속력과 heading 각도를 변화시켜 속도 벡터가 RAV로 가도록 변환시킬 때 생기는 각각의 힘을 합한 것으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f_{ca} = f_v + f_h$$

$$= m \frac{\|v_i\| - \|v_t\|}{\Delta t} + m \sqrt{l_2^2 + \left(\frac{d}{2} + \frac{l_1 + l_2}{\tan(\Delta\theta)}\right)^2} \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)^2 \quad (2)$$

여기서 속력 변화 시 생기는 힘(f_v)과 heading각도 변화 시 생기는 힘(f_h)은 다음과 같이 정의된다.

1. 속력 변화 시 생기는 힘 (f_v)

$$f_v = m \frac{|\Delta v|}{\Delta t}$$

$$= m \frac{\|v_i\| - \|v_t\|}{\Delta t} \quad (3)$$

여기서 v_i '는 휠체어의 속도 벡터를 RAV 영역으로 변환시킨 후의 휠체어 속도 벡터를 의미하며, Δv 는 속력 변화량을 의미하는 스칼라 값이다.

2. heading각도 변화 시 생기는 힘 (f_h)

$$f_h = mR \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)^2$$

$$= m \sqrt{l_2^2 + \left(\frac{d}{2} + \frac{l_1 + l_2}{\tan(\Delta\theta)}\right)^2} \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right)^2 \quad (4)$$

여기서 R 은 그림 1에 나타난 것과 같이 휠체어의 회전 반지름을 의미하며 피타고라스 정리에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$R = \sqrt{l_2^2 + \left\{\frac{d}{2} + \frac{(l_1 + l_2)}{\tan \theta}\right\}^2}$$

V. 충돌회피를 위한 속력 및 heading각도 변화

본 논문에서는 충돌회피 시 탑승자에게 미치는 힘을 최소화하는 주행 속력과 주행 각도를 찾기 위해 최적화 이론을 이용한다.

최적화 이론을 적용하기 위해 식 (2)에서 정의한 충돌회피 시 탑승자에게 미치는 힘 f_{ca} 를 표 1을 이용하여 x 에 관한 단일 변수 함수로 다음과 같이 표현한다.

$$f_{ca}(x) = m \frac{\sqrt{x^2 + (ax+b)^2} / \Delta t - \|v_i\|}{\Delta t}$$

$$+ m \sqrt{l_2^2 + \left(\frac{d}{2} + \frac{l_1 + l_2}{(ax+b)/x}\right)^2} \left(\frac{\arctan\{(ax+b)/x\}}{\Delta t}\right)^2 \quad (5)$$

여기서 a, b 는 RV영역을 지나는 VO 외곽선의 직선 방정식 계수들을 의미한다.

본 논문의 목표인 탑승자의 안전을 고려한 충돌회피를 달성하기 위해서는 탑승자가 받는 힘 $f_{ca}(x)$ 가 최소가 되어야 하며, 식 (5)로부터 황금분할 탐색법(golden section search method)과 포물선 보간법(parabolic interpolation) 기반의 최적화 기법 [12]을 이용하여 $f_{ca}(x)$ 가 최소가 될 때의 x 값을 찾는 것이 가능하다. 여기서, $\hat{x}$ 를 단일 변수 함수 $f_{ca}(x)$ 가 최소 값일 때의 x 로 정의한다.

$$\hat{x} = \arg \min_x f_{ca}(x)$$

그러면 다음의 (6), (7)과 같이 충돌회피를 위한 속력 변화량 (Δv)과 heading각도 변화량 ($\Delta\theta$)을 얻을 수 있다.

표 1. 변수 y 와 $\Delta\theta$ 를 x 에 관한 식으로 변환 표.

Table 1. The transformation table for the y and $\Delta\theta$ into x .

(1) RV 영역을 지나는 VO 선의 방정식	$y = ax + b$
(2) (1)을 이용한 $\Delta\theta$	$\Delta\theta = \arctan(y/x)$ $= \arctan\{(ax+b)/x\}$

$$\Delta v = \left\| \sqrt{x^2 + (ax+b)^2} / \Delta t \right\| - \|v_i\| \quad (6)$$

$$\Delta \theta = \arctan \{ (a\hat{x} + b) / \hat{x} \} \quad (7)$$

VI. 모의실험

제안한 알고리즘의 성능 평가를 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 모의실험을 하였으며, 실험 조건은 다음의 표 2에 나타내었다. 휠체어와 이동 장애물의 크기는 원형으로 가정하였을 경우 지름의 길이를 의미하고, 휠체어의 가능 최대 속도와 최대 회전각도는 실제 휠체어의 성능을 고려하여 각각 3.0(m/s)와 좌우 30°로 설정하였다.

표 2와 같이 휠체어와 이동 장애물을 설정하면 그림 5의 MVO에서 볼 수 있듯이 벡터변환 전의 휠체어의 속도 벡터가 충돌가능영역인 VO에 들어가 있기 때문에 충돌이 일어난다. 따라서 휠체어는 본 논문에서 제안한 알고리즘에 따라 충돌회피 시 탑승자에게 가해지는 힘을 최소로 하도록 휠체어의 속력과 헤딩각도 변화를 하고, 속도 벡터는 RAV로 들어가게 됨으로써 충돌회피를 수행한다.

그림 6과 그림 7은 각각 휠체어의 속도 벡터를 RV 영역을 지나는 VO 외곽선 A, B 위로 변화시켰을 경우 휠체어 탑승자에게 가해지는 힘의 분포를 보여준다. f_v 는 속력 변화에 따른 힘, f_h 는 헤딩각도 변화에 따른 힘, f_{ca} 는 두 힘의 합을 의미하며, 두 힘의 합이 최소가 되는 지점을 화살표로 표시하였다.

두 힘의 분포를 비교해본 결과, A선을 따라 속도 벡터를 움직였을 경우의 힘의 최소값은 30.6920, B선을 따라 속도 벡터를 움직였을 경우의 힘의 최소값은 39.3129 였다. 따라서

표 2. 휠체어와 이동 장애물의 실험조건.

Table 2. The experimental condition of wheelchair and moving obstacle.

	휠체어	이동 장애물
크기 (m)	1.0	1.2
위치 (m)	(0.0, 0.0)	(2.0, -5.0)
속도 (m/s)	1.6	1.5
헤딩각도 (degree)	0°	30°

그림 5. MVO와 벡터 변환 전·후의 휠체어 속도 벡터.

Fig. 5. MVO and the velocity vectors of the wheelchair before and after conversion.

그림 6. VO 외곽선 A를 따라 벡터 변환 시 힘의 분포.

Fig. 6. The distribution of the forces when vector changes along the line A of VO.

그림 7. VO 외곽선 B를 따라 벡터 변환 시 힘의 분포.

Fig. 7. The distribution of the forces when vector changes along the line B of VO.

그림 5에서 보여지듯이 속도 벡터는 더 적은 힘을 받는 A선 방향인 위쪽으로 변환되었고, 최종적인 속력 변화량과 헤딩각도 변화량 각각 1.4596×10^{-5} (m/s), 12.3194° 로 계산되었다.

VII. 결론

본 논문에서는 휠체어의 단일 이동장애물 환경에서 탑승자의 안전을 우선적으로 고려하여 탑승자에게 가해지는 힘을 최소로 하는 충돌회피 알고리즘을 제시하였다. 제시된 충돌회피 알고리즘은 등속 직선 운동 중인 휠체어와 장애물의 크기, 위치, 속도, 헤딩방향이 주어졌을 경우 최적화 이론을 이용하여 단일 변수 함수로 정의한 탑승자에게 가해지는 힘을 최소로 하는 속력 변화량과 헤딩각도 변화량을 찾는다. 또한 모의실험을 통하여 휠체어의 속력 변화 및 헤딩각도 변화에 따른 탑승자에게 가해지는 힘의 분포 및 최소점을 확인하였으며, 그 때의 속력 변화량과 헤딩각도 변화량 또한 확인하였다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 실제 휠체어에 적용될 경우 휠체어 탑승자는 최소한의 힘을 느끼면서 충돌회피를 할 수 있으며, 낙상사고를 줄이는 등 안전성을 높일 것으로 기대된다. 또한 휠체어뿐 아니라 여러 이동기기의 안전성을 높이는 충돌회피에 적용 가능할 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [1] J. Boernstein and Y. Koren, "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, Jun. 1991.
- [2] H. Seraji and B. Bon, "Real-time collision avoidance for position-controlled manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 4, pp. 670-677, Aug. 1999.
- [3] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *International Journal of Robotics Research*, vol. 5, no. 1, pp. 90-99, Mar. 1986.
- [4] P. Fiorini and Z. Shiller, "Motion planning in dynamic environments using the relative velocity paradigm," *Proc. of IEEE International Conference on Automation and Robotics*, vol. 1, pp. 560-566, May 1993.
- [5] P. Fiorini and Z. Shiller, "Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles," *International Journal of Robotics Research*, vol. 17, no. 7, pp. 760-772, Jul. 1998.
- [6] A. Dong and W. Hong, "VPH: a new laser radar based obstacle avoidance method for intelligent mobile robots," *Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Control and Automation*, vol. 5, pp. 4681-4685, 2004.
- [7] O. Brock and O. Khatib, "Elastic strips : a framework for motion generation in human environments," *International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 12, pp. 1031-1052, Dec. 2002.
- [8] S.-B. Hong, Y. J. Shin, and W. J. Chung, "Motion control of an outdoor patrol robot using a single laser range finder," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 4, pp. 361-367, Apr. 2011.
- [9] J.-J. Park, H.-S. Kim, and J.-B. Song, "Collision-free path planning for a redundant manipulator based on PRM and potential field methods," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 4, pp. 362-367, Apr. 2010.
- [10] H. Choset, K. M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. E. Kavrak, and S. Thrun, *Principles of Robot Motion*, The MIT Press, Cambridge, 2005.
- [11] P. Megda, B. Esteves, and M. Becker, "Determining forbidden steering directions for a passenger car in urban environments based on the velocity obstacle approach and use of trackers," *Proc. of Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC)*, Bogota, Colombia, pp. 1-6, Oct. 2011.
- [12] G. E. Forsythe, M. A. Malcolm, and C. B. Moler, *Computer Methods for Mathematical Computations*, Prentice-Hall, New Jersey, 1977.

김 용 휘

2010년 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 졸업(공학사). 2010년~현재 동 대학원 전기전자공학과 석박통합과정. 관심분야는 추정이론, 측위이론, 자율주행 알고리즘.

윤 태 성

1978년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년 3월~1995년 2월 미국 Vanderbilt 대학교 전기공학과 객원교수. 1989년~현재 창원 대학교 전기공학과 교수. 관심분야는 자기위치추정, 자율주행 제어, 필터링 알고리즘, 신호처리.

박 진 배

1977년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1990년 Kansas State University 공과대학 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업(공학박). 1990년~1991년 Kansas State University 전기 및 컴퓨터 공학과 조교수. 1992년~현재 연세대학교 전기공학과 교수. 관심분야는 제어이론, 지능제어, 지능형 로봇, 신재생에너지.