

# 카디널스플라인을 이용한 자율이동로봇의 곡선경로 생성방법

논문
59-4-22

## Smooth Path Planning Method for Autonomous Mobile Robots Using Cardinal Spline

윤희상\* · 박태형†  
(Hee-Sang Yoon · Tae-Hyoung Park)

**Abstract** - We propose a smooth path planning method for autonomous mobile robots. Due to nonholonomic constraints by obstacle avoidance, the smooth path planning is a complicated one. We generate smooth path that is considered orientation of robot under nonholonomic constraints. The proposed smooth planning method consists of two steps. Firstly, the initial path composed of straight lines is obtained from V-graph by Dijkstra's algorithm. Then the initial path is transformed by changing the curve. We apply the cardinal spline into the stage of curve generation. Simulation results show a performance of proposed smooth path planning method.

**Key Words** : Smooth path planning, Autonomous mobile robots, Cardinal Spline.

### 1. 서론

경로계획은 현재위치에서 목표위치까지 주변 환경을 인지하여 장애물을 회피하는 경로를 생성하는 것이다. 특히 이동이 가능한 지능형 서비스로봇 및 산업용의 AGV같은 자율이동로봇의 경우 논홀로노믹(non-holonomic)시스템[1]으로 바퀴 구동 방식의 기구적 제한조건으로 인하여, 부드러운 곡선경로와 로봇의 진행 방향 즉 방위각을 고려한 경로생성이 필요하다[2].

곡선경로 생성을 위한 연구로는, 가시도 그래프(V-graph), 보르노이 다이어그램(voronoi diagram), 셀분해(cell-decomposition)등과 같이 직선으로 연결된 그래프 기반의 경로생성방법[1]을 기초로 직선으로 연결된 지점을 원호[3]나 클로소이드호[4] 등을 이용하여 부드럽게 생성한 연구가 있다. 또한 컴퓨터 그래픽에 많이 사용되는 3차 스플라인[5] 및 B-스플라인[6][7] 등을 이용하여 자율이동로봇의 곡선경로를 생성한 연구가 있다. 그러나 이러한 방법들은 로봇의 방위각을 고려하지 않고, 단지 부드러운 곡선경로를 생성한다. 곡선경로 생성 시 로봇의 방위각을 고려하지 않고, 경로를 생성하게 되면, 로봇의 시작점 및 목표점에서 경로와 방향을 맞추기 위해 제자리에서 회전하거나, 전·후진을 통해 일치 시켜야 한다. 이 경우 로봇이 전체 이동시간 늘어날 수 있으며, 방위각을 맞추기 위해 로봇의 추가적인 제어가 필요하다.

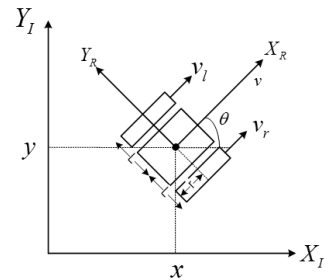


그림 1 기구학 모델  
Fig. 1 The kinematic model of AMR.

곡선 생성 방법 중 하나인 카디널스플라인[8]은 시작점 및 끝점에서의 접선벡터를 이용하여 두 점사이의 곡선을 생성하는 에르미트보간을 연결한 방법이다. B-스플라인은 곡선생성 시 조정점들이 변경되면 전체 곡선이 변경된다. 그러나 카디널스플라인은 지역적인 곡선 생성 방법으로 조정점이 변경되면 그 부분에 대해서만 곡선을 생성하면 된다. 이는 이웃 조정점들의 접선벡터를 같게 함으로써 가능하다.

본 논문은 논홀로노믹시스템인 자율이동로봇의 경로생성을 위해 카디널스플라인을 이용하여 로봇의 방위각을 고려한 부드러운 곡선경로를 생성하는 방법을 제안한다. 먼저 가시도 그래프를 이용하여 직선과 정점들로 구성된 그래프를 구성하고, 디스트라알고리즘으로 초기경로를 생성한다. 생성된 초기경로에 대해 카디널스플라인을 이용하여 시작점 및 목표점에서 방위각이 고려된 부드러운 곡선경로로 변경한다. 제안하는 곡선경로 생성방법은 기구학 및 동역학을 고려하며, 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션 결과를 제시한다.

\* 정회원 : 충북대 제어로봇공학과 박사과정  
† 교신저자, 정회원 : 충북대 제어로봇공학과  
(컴퓨터정보통신연구소) 교수

E-mail : taehpark@cbnu.ac.kr

접수일자 : 2009년 9월 29일

최종완료 : 2010년 2월 03일

## 2. 자율이동로봇 모델

본 논문에서는 차동구동방식(differential-drive)의 자율이동로봇을 대상으로 한다. 차동구동방식의 자율이동로봇은 두 개의 구동휠(drive-wheel)로 구성되어 있으며, 두 휠의 합성 속도에 의해 이동 궤적이 생성된다. 그림 1은 로봇의 기구학(kinematics) 모델을 나타낸다. 로봇의 무게중심의 위치는  $(x, y)$ , 방위각은  $\theta$ 로 정의하며, 휠의 반지름을  $r$ , 각 휠과 로봇의 무게중심과의 거리를  $L$ , 휠의 각속도를  $\dot{\phi}_r, \dot{\phi}_l$ 이라 할 때, 로봇의 휠이 미끄러짐(slip)이 없다고 가정하면, 차동형 로봇의 기구학은 다음과 같다[9].

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta = \frac{r}{2} \cos \theta (\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l) \\ \dot{y} = v \sin \theta = \frac{r}{2} \sin \theta (\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l) \\ \dot{\theta} = \frac{r}{2L} (\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l) \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $\dot{x}$ 은 로봇의  $x$ 축 속도,  $\dot{y}$ 은  $y$ 축 속도  $\dot{\theta}$ 은 회전속도를 나타낸다.

자율이동로봇은 모터출력 및 기구적인 한계로 인하여 최대속도에 제한을 가진다. 로봇의 최대 속도를  $v_{max}$ 라 할 때, 로봇은 다음과 같은 제약조건을 가진다.

$$|v_r|, |v_l| \leq v_{max} \quad (2)$$

따라서 자율이동로봇은 (1)을 만족하는 경로를 생성하고, (2)의 조건을 만족하도록 제어한다.

## 3. 카디널스플라인

점들이 주어진 경우 점들을 연결하는 곡선을 생성하는 방법으로는 점들을 지나도록 곡선을 생성하는 보간법(interpolation)과 점들을 중심으로 근사적으로 부드러운 곡선을 생성하는 근사법(approximation)이 있다. 보간 및 근사를 통한 곡선 생성 방법으로는 다양한 방법이 있다.

보간을 이용한 방법으로 두 점사이에 접선벡터가 주어졌을 때 곡선을 생성하는 에르미트보간이 있으며, 이를 다수의 점에 곡선으로 연결한 카디널스플라인(cardinal spline)이 있다. 카디널스플라인은 접선벡터를 곡선의 방위각을 고려할 수 있으며, 지역적인 곡선생성이 가능하여 컴퓨터 그래픽스에서 주로 사용되고 있다[8].

근사를 이용한 곡선생성방법으로는 베지어(Bezier) 및 B-스플라인이 있다. B-스플라인은 조정점(control point)을 조정하여 전체 곡선을 부드럽게 설정 가능하여 매니퓰레이터(manipulator) 및 자율이동로봇의 동작계획에 사용되었다. 베지어의 경우 에르미트보간과 유사하게 지역적인 곡선생성 방법이나 다수의 점을 연결하기 위해서는 추가적인 조정점들이 필요한 단점이 있다.

자율이동로봇은 기구적 제약조건을 가진 논홀로노믹 시스템으로 시작점 및 목표점에서의 방위각을 고려하여 곡선경로를 생성해야한다. 카디널스플라인은 그림 2(b)와 같이 주어진 직선경로에 대해 접선벡터를 통해 시작점 및 목표점의 방위각이 고려된 곡선경로를 생성할 수 있다. 그러나

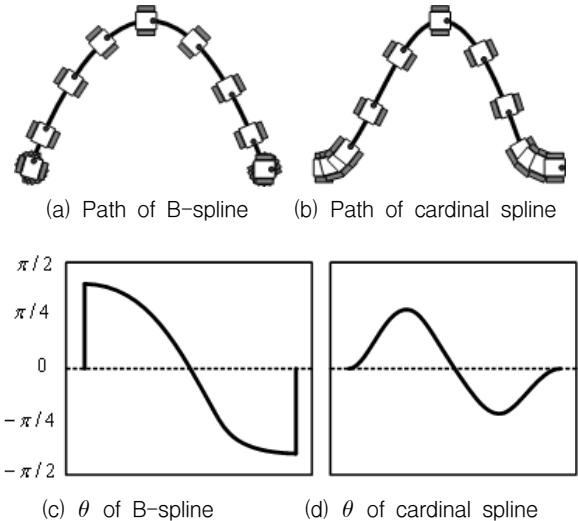


그림 2 곡선 비교.

Fig. 2 Comparison of Curve.

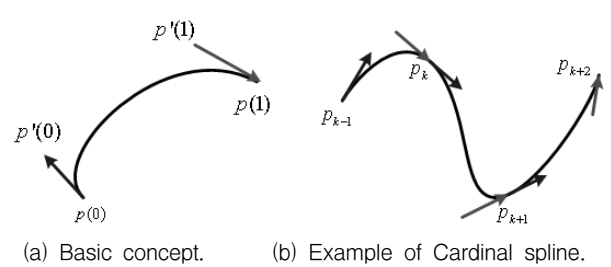


그림 3 카디널스플라인

Fig. 3 The cardinal spline.

B-스플라인의 경우 그림 2(a)와 같이 전체적으로 매우 부드러운 곡선 생성하지만 시작점 및 목표점에서의 방위각을 설정할 수 없다. 특히 그림 2(d)에서 카디널스플라인으로 생성된 곡선경로는 방위각이 부드럽게 변화하는 것을 볼 수 있으며, 그림 2(c)의 B-스플라인의 경우 시작점 및 끝점에서 방위각을 맞추기 위해 제자리에서 회전하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 시작점 및 목표점에서의 방위각 설정이 가능하고, 지역적인 곡선생성이 가능한 카디널스플라인을 이용하여 곡선경로를 생성한다.

2차원 공간에서 곡선은 파라미터  $u$ 로 표현 할 수 있으며, 다음과 같이 정의한다.

$$p(u) = [x(u) \ y(u)] \quad (3)$$

파라미터로 표현된 곡선  $p(u)$ 는 다음과 같이 3차 다항식으로 표현할 수 있다.

$$p(u) = a_3 u^3 + a_2 u^2 + a_1 u + a_0 \quad \text{단, } 0 < u \leq 1 \quad (4)$$

여기서 (4)는 곡선 생성을 위한 기본 형태로 (4)의 상수  $a_1, a_2, a_3, a_4$ 의 값에 따라 곡선의 특징이 나타난다. 에르미트보간은 그림 3(a)와 같이 시작점  $p(0)$ 와 끝점  $p(1)$ 에서 접선

벡터  $p'(0), p'(1)$ 이 존재하며, 이를 이용하여 (4)에 대입하여 정리하면, 다음과 같이  $a_1, a_2, a_3, a_4$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{cases} p(0) = a_0 \\ p'(0) = a_1 \\ p(1) = a_3 + a_2 + a_1 + a_0 \\ p'(1) = 3a_3 + 2a_2 + a_1 \end{cases} \quad (5)$$

(5)를 정리하여  $p(u)$ 에 대해 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$p(u) = [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(0) \\ p(1) \\ p'(0) \\ p'(1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

에르미트보간은 두 점에 대해 위치  $p(0), p(1)$ 와 접선벡터  $p'(0), p'(1)$ 이 주어지면 (6)을 이용하여 곡선을 생성한다.

카디널스플라인은 에르미트보간을 다수의 점들에 적용하는 것으로 중간 경유점들에서의 접선벡터는 이웃한 점들과의 관계를 통해 접선벡터를 구한다. 시작점과 끝점의 접선벡터는 주어져야하며, 임의의  $k$ 번째 지점에서의 접선벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p'_k = (1-\alpha)(p_{k+1} - p_{k-1}) \quad \text{단 } , 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (7)$$

여기서  $\alpha$ 는 곡선의 장력을 나타내는 상수이다. 카디널스플라인은 (7)을 이용하여 중간점들의 접선벡터를 구하여  $k$ 지점에서의 끝점에서의 접선벡터  $p'_k(1)$ 와  $k+1$ 지점에서의 시작점에서의 접선벡터  $p'_{k+1}(0)$ 은 동일하게 하여 에르미트보간을 적용하여 곡선의 연결을 부드럽게 한다. 그림 3(b)는 에르미트보간을 다수의 점에 적용한 카디널스플라인의 예를 보여준다.

#### 4. 경로계획

자율이동로봇의 기구학을 고려하여 곡선생성방법을 이용하여 부드러운 경로를 생성하기 위해서는 먼저 주어진 맵에 대한 초기전역경로가 필요하다. 본 논문에서는 자율이동로봇의 경로계획을 초기경로생성단계와 곡선경로생성단계로 나누어 접근한다. 초기경로생성단계에서는 장애물과 충돌하지 않고 이동거리가 짧은 직선으로 연결된 초기경로를 생성한다. 곡선경로생성단계에서는 초기경로에 대해 카디널스플라인을 이용하여 부드러운 곡선경로를 생성한다. 생성된 곡선경로는 알려진 궤적계획 알고리즘을 통해 동력학을 고려하여 속도프로파일을 생성하고 로봇의 이동시간을 구한다.

##### 4.1. 초기경로생성

카디널스플라인을 이용하여 곡선경로를 생성하기 위해서는 곡선이 연결되는 경유점들이 필요하다. 따라서 곡선경로를 생성하기 위해 경유점들로 구성된 전역경로가 필요하다. 전역경로생성방법 중 하나인 가시도 그래프는 그림 4와 같이 장애물의 꼭지점을 정점으로 하여 가시성이 확보

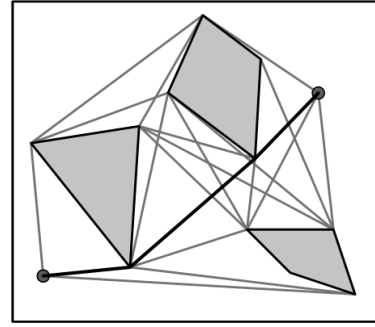


그림 4 가시도 그래프 방법.

Fig. 4 V-graph method.

된 정점들을 서로 연결하여 그래프를 구성하고, 탐색알고리즘인 디스트라알고리즘(Dijkstra's algorithm)[10]을 이용하여 경로를 탐색한다. 가시도 그래프로 생성된 직선경로는 거리상 최단거리를 보장한다. 가시도 그래프와 디스트라알고리즘으로 생성된 초기경로에서 시작점을  $p_0$ , 목표점을  $p_N$ 이라 할 때, 경유점들로 구성된 초기 경로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \{p_0, p_1, \dots, p_N\} \quad (8)$$

##### 4.2. 곡선경로생성

가시도 그래프와 디스트라알고리즘으로 생성한 초기 직선 경로에 대해 카디널스플라인을 이용하여 곡선경로로 변경한다. 초기직선경로의 경유점  $V$ 에 대해 카디널스플라인을 적용하기 위해, 시작점 및 목표점을 제외한 나머지 중간 경유점  $p_1 \dots p_{N-1}$ 에 대해 (7)을 이용하여 각 경유점에서의 접선벡터  $p'_1 \dots p'_{N-1}$ 을 각 경유점에서의 접선벡터를 계산한다. 시작점 및 끝점의 접선벡터는 로봇의 방위각 즉 자세를 통해 접선벡터를 구한다. 시작점에서의 방위각을  $\theta_0$ , 끝점에서의 방위각을  $\theta_N$ 이라 정의하면, 시작점 및 끝점에서의 접선벡터  $p'_0, p'_N$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p'_0 &= [\beta \cos \theta_0 \ \beta \sin \theta_0] \\ p'_N &= [\gamma \cos \theta_N \ \gamma \sin \theta_N] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $\beta, \gamma$ 는 시작점 및 끝점에서의 장력을 나타낸다.

경유점  $V$ 에 대한 접선 벡터를 계산 후  $k=1 \dots N-1$ 의 구간에 대해  $u$ 를  $0 < u \leq 1$ 로 설정하여 구간별 곡선  $p_k(u)$ 를 계산한다.

$$p_k(u) = [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_k \\ p_{k+1} \\ p'_k \\ p'_{k+1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

최종 곡선경로를  $P$ 라 정의 할 때,  $P$ 는 다음과 같이 구간별 곡선  $p_k(u)$ 의 집합으로 나타낼 수 있다.

$$P = \{p_0(u), p_1(u) \dots p_{N-1}(u)\} \quad (11)$$

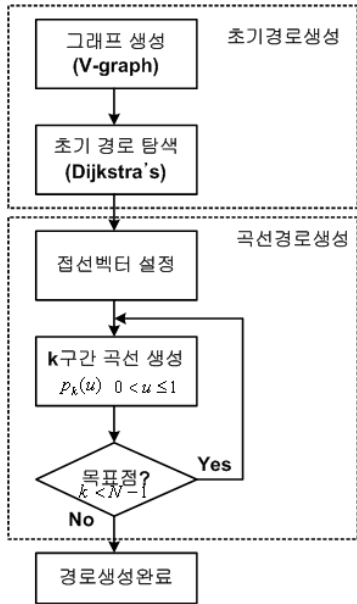


그림 5 경로계획 알고리즘.  
Fig. 5 Path planning algorithm.

제안하는 경로계획 방법의 전체 흐름도를 그림 5에 나타내었다.

### 5. 시뮬레이션

가시도 그래프로 생성된 자율이동로봇의 경로에 대해 제안한 곡선경로 생성 방법의 성능 평가를 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 알고리즘은 IBM-PC 기반에서 Matlab을 이용하여 구현하였다.

로봇의 크기, 무게, 휠 관성과 같은 물리적인 변수들과 토크 및 속도에 대한 제약조건을 표 1에 나타내었다. 시뮬레이션은 20[m]×20[m] 평면에 장애물이 배치된 지도를 사용하였다. 초기 직선경로는 가시도 그래프와 디스트라알고리즘을 이용하여 생성하였으며, 직선경로에 대해 카디널스플라인으로 곡선경로로 변환하였다. 또한 생성된 곡선경로의 성능 비교를 위해 주어진 경로에 대해 최적의 속도프로파일을 생성하는 [6]의 궤적계획알고리즘을 적용하여 로봇의 이동시간을 계산하여 비교하였다.

먼저 그림 6과 그림 7은 가시도그래프로 생성된 초기 직선경로와 B-스플라인 그리고 제안한 카디널스플라인을 이용하여 생성한 경로를 보여준다. 그림 6의 경우 시작점 및 목표점의 방위각이 0도 이며, 그림 7의 경우 시작점의 방위각은 π 목표점의 방위각은 π/2이다. 제안한 카디널스플라

표 1 시뮬레이션 모델 변수.

Table 1 Variables of the simulation model.

r	0.1 [m]	m <sub>1</sub>	50.0 [kg]
L	0.75 [m]	m <sub>2</sub>	1.0 [kg]
I	27.17[kg·m <sup>2</sup> ]	I <sub>y</sub>	0.005 [kg·m <sup>2</sup> ]
τ <sub>max</sub>	≤ 1.0 [N·m]	v <sub>max</sub>	≤ 1.0 [m/s]

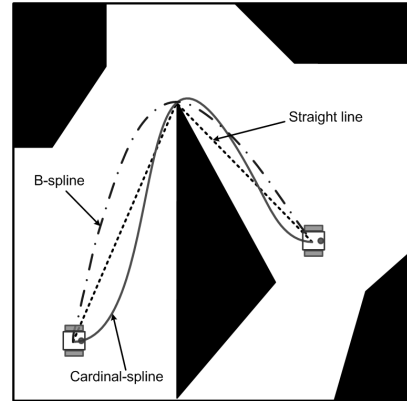


그림 6 시뮬레이션 결과.  
Fig. 6 Results of simulation.

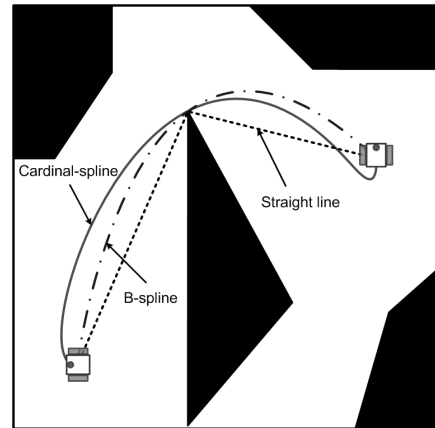


그림 7 시뮬레이션 결과.  
Fig. 7 Results of simulation.

인은 로봇의 방위각을 고려하여 곡선경로를 생성한 것을 확인할 수 있다. B-스플라인의 경우 부드러운 곡선경로를 생성하지만, 방위각 설정을 하지 않아 로봇이 실제 이동하기 위해서는 시작점과 끝점에서 제자리에서 회전해서 출발 또는 정지해야한다. 이는 이동시간을 증가시킬 수 있다.

그림 6에서의 경로들에 대해 궤적계획 알고리즘을 적용하여 속도 프로파일을 구하여 이동시간을 비교하였다. 그림 6의 초기 직선경로, B-스플라인으로 생성한 경로, 제안한 카디널스플라인으로 생성한 경로에 대한 로봇의 좌우 휠에 대한 토크 및 속도 그래프는 그림 9와 같다. 그림 9(a~c)를 보면, 카디널스플라인을 이용한 그림 9(c)가 좌우 휠 모두 음의 값, 즉 역회전 없이 속도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 9(d~f)의 토크 곡선을 나타내며, 제안한 방법이 다른 방법에 비해 시작점 및 목표점에서 좌우 휠이 토크 차이로 각 휠의 역회전 없이 가속과 회전이 가능하도록 토크가 형성된 것을 볼 수 있다. 또한 각 방법에 따른 이동시간을 비교해 보면, 먼저 가시도 방법으로 구한 직선경로의 이동시간은 37.38초, B-스플라인으로 생성한 곡선경로의 이동시간은 33.96초이며 제안한 방법의 이동시간은 31.10초가 나왔다. 이는 방위각을 고려하여 부드러운 곡선경로를 생성한 제안 방법이 이동 시간이 짧을 것을 확인할 수 있다.

표 2 시뮬레이션 순서.

Table 2 Simulation sequence.

No.	시작점 ( $x_s, y_s, \theta_s$ )	경유점 ( $x_c, y_c$ )	목표점 ( $x_t, y_t, \theta_t$ )
1	(1,1, $\pi/2$ )	(6,1)	(5,4, $\pi$ )
2	(3,8, $\pi/4$ )	(15,6)	(4,2,- $\pi/2$ )
3	(1,1,0)	(20,10)	(1,20, $\pi/2$ )
4	(1,1,0)	(10,10)	(1,10, $\pi$ )
5	(12,2,0)	(10,15)	(3,3, $3\pi/4$ )

표 3 총 이동시간 비교.

Table 3 Comparison of traveling time.

No.	총 이동시간 [sec]			개선율 [%]	
	① 직선경로	② B-스플라인	③ 제안 방법	① 대비	② 대비
1	20.98	17.97	15.85	24.45	11.80
2	39.37	35.91	32.98	16.23	8.16
3	58.50	53.53	51.29	12.32	4.18
4	39.11	33.44	28.56	26.98	14.59
5	43.83	40.74	38.14	12.98	6.38
평균			18.59	9.02	

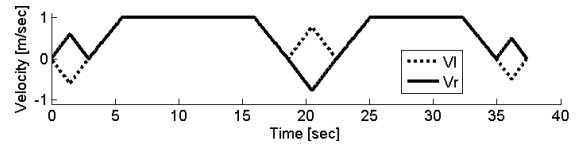
다음으로 다양한 환경에서 제안 방법의 성능을 시뮬레이션하기 위해, 자유공간에서 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 자유공간 상에 표 2와 같이 시작점 및 목표점과 경유점을 두어 직선경로, B-스플라인 및 카디널스플라인의 이동시간을 비교하여 표 3에 나타내었다. 각 방법에 대해 제안 방법의 개선율을 보면 직선경로 대비 평균 18.59% 정도 이동시간이 단축되었다. 또한 B스플라인에 대해서는 약 9.02% 정도 단축된 것을 볼 수 있다.

실험결과를 통해 방위각을 고려한 카디널스플라인이 생성한 곡선경로가 직선경로 및 B-스플라인으로 생성한 곡선경로보다 총 이동시간이 더 빠른 것을 확인할 수 있다.

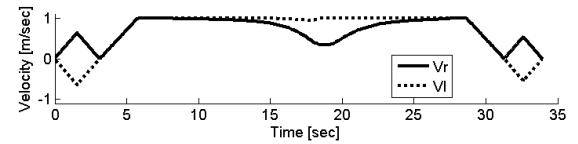
### 6. 결론

논홀로노믹 시스템인 자율이동로봇의 부드러운 곡선경로 생성을 위한 경로계획방법을 제안하였다. 경로계획은 초기 경로생성단계와 곡선경로생성단계로 구성된다. 초기경로생성단계에서는 가시도 그래프와 디스트라알고리즘을 이용하여 이동 거리가 최소인 직선경로를 생성하고, 곡선생성단계에서 카디널스플라인으로 곡선경로로 변경하였다. 카디널스플라인은 접선벡터를 통해 로봇의 방위각을 고려할 수 있으며, 다양한 종류의 자율이동로봇에 적용가능하다. 제안한 경로계획방법으로 생성된 경로는 직선경로 및 B-스플라인으로 생성된 곡선경로에 대해 궤적계획알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 비교를 통해 이동시간이 단축된 것을 확인하였다.

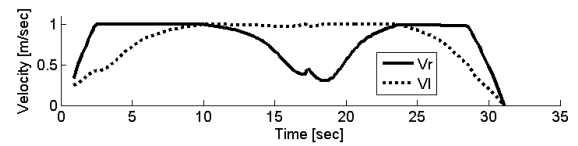
제안한 방법은 온라인 경로계획과 오프라인 경로계획의 중간 단계로서, 가시도 그래프와 같이 오프라인을 통해 전역 경로를 생성한 후 카디널스플라인으로 온라인 접근을 할 수 있다. 이는 부드럽고 빠르게 이동하는 로봇에 효과적으



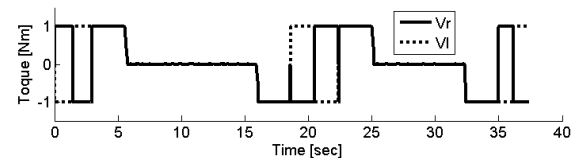
(a) Velocity of initial path.



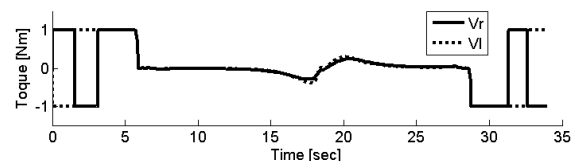
(b) Velocity of B-spline path.



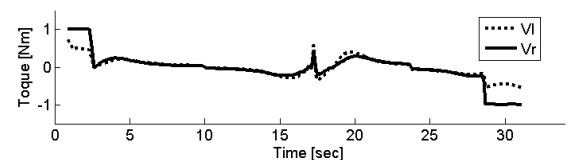
(c) Velocity of cardinal path(proposed).



(d) Torque of initial path



(e) Torque of B-spline path



(f) Torque of cardinal path(proposed).

그림 9 궤적계획 결과.

Fig. 9 Result of trajectory planning.

로 적용 될 수 있으리라 기대되며, 추후연구를 통해 이동시간을 줄이는 경로계획 방법의 해를 제시하고자 한다.

### 감사의 글

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

### 참고 문헌

[1] H. Choset, K. M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. E. Kavrak, S. Thrun, Principles of

Robot Motion, The MIT Press, 2005.

- [2] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots, The MIT Press, 2004.
- [3] T. Kito, J. Ota, R. Katsuki, T. Mizuta, T. Arai, T. Ueyama, T. Nishiyama, "Smooth path planning by using visibility graph-like method," IEEE Int. Conf. On Robotics & Automation, vol. 3, pp. 3770-3775, 2003.
- [4] T. Fraichard, A. Scheuer, "From Reeds and Shepp's to Continuous-Curvature Paths," IEEE Trans. on Robotics, vol. 20, no. 6, pp. 1025-1035, 2004.
- [5] M. Lepetic, G. Klancar, I. Skrjanc, D. Matko, B. Potocnik, "Time optimal path planning considering acceleration limits," Robotics and Autonomous Systems, vol. 45, no. 3, pp. 199-210, 2003.
- [6] W. Wu, H. Chen, P.Y. Woo, "Time optimal path planning for a wheeled mobile robot," Journal of Robotic Systems, vol. 17, no. 11, pp. 585-591, 2000.
- [7] M. Haddad, T. Chettibi, S. Hanchi, H. E. Lehtihe, "A random-profile approach for trajectory planning of wheeled mobile robots," European Journal of Mechanics A/Solids, vol. 26, no. 3, pp. 519-540, 2007.
- [8] V. B. Anand, computer graphics & geometric modeling for engineers, J. Wiley, 1993.
- [9] M. Yamamoto, M. Iwamura, A. Mohri, "Quasi-time-optimal motion planning of mobile platforms in the presence of obstacles," IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robot and Systems, vol. 4, pp. 2958-2963, 1999.
- [10] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, et al, Introduction to Algorithms, 2nd Ed., The MIT Press, 2001.

## 저 자 소 개



### 윤 희 상 (尹 熙 相)

2004년 충북대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2006년 동 대학원 제어계측공학과(석사). 2006년~2007년 충북대 부설 유비쿼터스 바이오정보기술 연구센터 주임연구원. 2007년~현재 충북대 제어계측공학과 박사과정. 관심분야는 로보틱스, 영상처리, 임베디드시스템 등.



### 박 태 형 (尹 熙 相)

1988년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1992년 동 대학원 제어계측공학과(석사). 1994년 동 대학원 제어계측공학과(박사). 1994년~1997년 삼성 테크윈(주) 정밀기기 연구소 선임 연구원. 1997년~현재 충북대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 2000년~2001년 Univ. of Toronto 방문교수. 관심분야는 로보틱스 및 자동화, 전자조립 및 검사 시스템 등.