

매개화된 4차 B-Spline 을 이용한 편안한 경로 계획법

신희찬¹, 김동혁¹, 윤성의¹

¹한국과학기술원 전산학부

Parametrized quartic B-Spline based comfort path planning

Shin Hee-Chan¹, Kim Dong-Hyuk¹, Yoon Sung-Eui¹

¹KAIST School of Computing

e-mail: shin_heechan@kaist.ac.kr, sungeui@kaist.edu

요 약

로봇의 이동 경로를 생성하는 것은 무인 이동수단 분야에서 뿐만 아니라 로봇 사회로 가기 위한 필수 요소이다. 그렇기 때문에 지금까지 경로 생성 기법에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 하지만 드론을 이용한 물건 운반, 사람이 타는 무인 이동수단 등 단순히 경로를 따라가는 것 뿐 아니라 로봇이 경로를 따라 이동할 때 로봇 내부의 목표 대상이 받는 충격량을 최소화 함으로써 편안하게 이동해야 하는 경우가 존재한다. 하지만 이러한 경로를 생성하는 기법에 대한 연구는 거의 진행되지 않았다. 본 논문에서는 편안한 경로가 무엇인지 정의하고 편안한 경로를 생성하기 위한 알고리즘을 제시하였다.

1. 서론

1.1 Path planning

인공지능에 대한 대중들의 관심과, 여러 로봇 관련 분야들의 비약적인 성장 덕분에 무인 이동 수단과 관련된 연구 분야 역시 뜨거운 관심을 받고 있다. 로봇이 어떻게 움직여야 하는가에 대한 연구는 오래 전부터 이루어져 왔다. 그동안의 연구들이 목표지점까지 가장 단시간에 도착하는, 혹은 비용을 최소화하며 도착하는 경로를 찾는 데 집중되어 있었다면, 최근의 연구들은 실제 로봇을 고려했을 때 나타나는 문제점들에 대한 해결책을 찾는 데 무게를 싣고 있다.

1.2 B-Spline

B-Spline은 부드러운 곡선을 만들기 위한 방법들 중 하나이다. B-Spline을 이용하면 기존의 샘플링 기반 경로 생성 알고리즘이나, 이산화된 최적화 기반(Discretized optimization based) 경로 생성 알고리즘으로는 계산하기 어려웠던 정확한 곡률의 값을 계산할 수 있기 때문에 실제 로봇을 위한 부드러운 경로를 계획하는 연구에서 빈번하게 사용되어 왔다.

1.3 Comfortability

이미 존재하는 부드러운 경로를 생성하는 알고리즘들은 주로 ‘부드러운(smooth)’ 것에 초점을 맞췄다. 즉, 기하학적으로 로봇이 해당 경로를 지나갈 수 있는지(feasibility)만을 고려하고 있다. 하지만 실제 로봇이 경로를 따라감에 있어서 가행성(可行情) 외에도 중요한 것들이 있다. 그중 하나가 편안함(Comfortability)이다. 여기에서 말하고자 하는 편안함이란 사람의 감정이 아닌 로봇이 경로를 따라 이동할 때 로봇 내부의 목표 대상이 받게 되는 충격량에 반비례하는 물리량이다. 로봇 내부에 있는 목표 대상은 로봇 움직임의 반작용을 받게 되므로 충격량이 작을수록 편안하다고 할 수 있다.

본문에서는 편안함(Comfortability)의 정의와 B-Spline을 이용한 경로 계획에 대해 알아보하고자 한다.

2. 본론

2.1 Parametrized quartic B-Spline

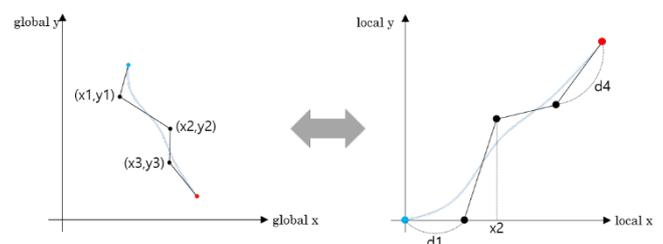
2.1.1 B-Spline

Spline이란 주어진 두 점 사이를 다항식의 꼴로 근사하는 부드러운 곡선이다. Quartic B-Spline은 4차 다항식을 활용한 곡선으로 Cox-de Boor 함수를 기저함수(basis function)로 갖는다. 일반적인 B-Spline은 다음의 식을 계산함으로써 구할 수 있다.

$$B(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,k}(u)P_i \quad (1)$$

2.1.2 Parametrized quartic B-Spline

기본적으로 quartic B-Spline은 5개의 제어점(control point)을 가지므로 2차원에서 quartic B-Spline은 주어진 두 점을 제외하고, 6개의 값(시작점과 도착점을 제외한 각 제어점 별 x, y 값)에 의해 정의된다. 하지만 [1]에서 제안하고 있는 quartic Bezier 곡선을 매개화(parametrize)하는 방법을 quartic B-Spline에 적용하면 3개의 매개변수만으로 B-Spline을 정의할 수 있다. 이때, 계산을 쉽게 하기 위하여 좌표 변환을 통해 시작점이 중점에 오도록 하면 아래의 그림과 같이 d1, d4, x2 세 가지 값만으로 곡선을 정의할 수 있다.



[그림 1] Parametrized quartic B-Spline curve

2.2 Comfortability의 정의

본 연구에서 중점적으로 다루고 있는 편안한 경로의 생성을 위하여 편안한 경로 라는 새로운 개념을 제안하였다. 편안한 경로란 목표 대상이 받는 충격량이 최소인 경로를 의미한다. 본 연구에서는 로봇이 경로를 따라 움직이면서 받는 충격량의 크기를 불편함 정도(Uncomfortability)라고 명명하고, 불편함 정도를 다음과 같이 정의 하였다.

$$Uncomfortability = \int_0^T \tilde{F}_{tangent} + \tilde{F}_{centre} dt$$

$$= \int_0^T (a_r^2(t) + \kappa_p^2(t)v_r^4(t))^{\frac{1}{2}} dt \quad (2)$$

(이때, a_r, v_r 로봇의 움직임에 대한 값이고, κ_p 는 경로에 대한 값, \tilde{F} 는 로봇의 운동에 대한 반작용 값이다. 질량은 불변이므로 무시)

즉, 경로를 이동하며 받는 충격량으로 나타낼 수 있고, 충격량이 작을수록 편안하다고 정의한다. 이때, 편안한 경로는 다음과 같이 정의 한다.

Comfortable trajectory $\xi : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}_p^2 \times \mathbb{S} \times \mathbb{R}_v$

$$s. t. \xi = \underset{\xi}{\operatorname{argmin}} \int_0^T (a_r^2(t) + \kappa_p^2(t)v_r^4(t))^{\frac{1}{2}} dt \quad (3)$$

편안한 경로 ξ 는 위치(\mathbb{R}_p), 방향(\mathbb{S}), 속도(\mathbb{R}_v)로 이루어진 4차원 상에서 정의되며 시간에 따른 로봇의 상태 값을 갖는다. 물리적인 의미는 경로를 따라 이동하면서 받는 충격량이 가장 작은 경로를 의미한다.

2.3 Iterative optimization을 활용한 경로 계획

2.3.1 경로 및 로봇 움직임 최적화 방법

편안함을 고려한 경로를 계획하기 위해서는 로봇이 어떻게 움직여야 하는가에 대한 논의가 경로를 계획하는 단계에서부터 이루어 져야 한다.

식 (2)를 보면 불편함 정도를 이루고 있는 요소를 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 째로, 경로의 기하적 특징을 담고 있는 곡률(κ_p)과 둘 째로, 로봇의 역학적 특징을 담고 있는 가속도, 속도 그리고 이동 시간(a_r, v_r, T)이다. 경로의 기하학적 특징과 로봇의 역학적 특징은 서로 독립이기 때문에 효과적으로 최적화하기 위하여 반복 최적화(iterative optimization) 기법을 사용하였다.

우선 경로를 최적화 하기 위하여 속도를 고정 시킨 후 불편함 정도가 최소가 되도록 하는 곡률을 찾는다. 이때, 장애물에 대한 회피, 경로의 최대 곡률 등을 고려해야 한다. 비선형 최적화(Non-linear optimization) 기법을 이용하여 다음의 문제를 풀면 최적 곡률을 구할 수 있다.

$$\text{Minimize } \int_0^T (\bar{a}^2(t) + \kappa^2(t)\bar{v}^4(t))^{\frac{1}{2}} dt$$

Subject to

$$\begin{aligned} \kappa_{max} &< K_{max} \\ 0 &< d1 < \text{distToObstacle}(P_0) \\ 0 &< d4 < \text{distToObstacle}(P_4) \end{aligned} \quad (4)$$

(이때, \bar{a}, \bar{v} 는 고정된 값이다.)

마찬가지로 로봇의 움직임을 최적화 하기 위하여 곡률을 고정시킨 후 최적 속도를 찾는다. 이때, 이동 시간, 미끄러짐을 피하기 위한 속도 제한 등을 고려해야 한다.

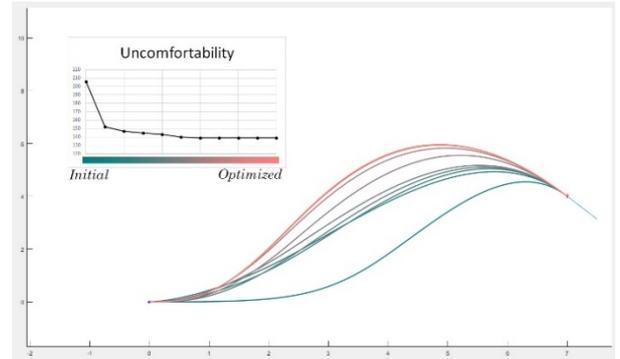
$$\text{Minimize } \int_0^T (a^2(t) + \bar{\kappa}^2(t)v^4(t))^{\frac{1}{2}} dt$$

Subject to

$$\begin{aligned} T &< T_{upper} \\ v &< v_{max} \end{aligned} \quad (5)$$

불편함 정도의 차이가 ϵ 보다 작을 때까지 앞의 두 최적화 과정을 반복하여 최적의 경로와 속도를 계산할 수 있다.

2.3.2 경로 최적화 결과



[그림 2] 장애물이 없는 상황에서 두 점 $\{(0,0,0,2), \{7,4,-\frac{\pi}{3},5\}$ 을 잇는 편안한 경로 생성 결과. 청록색에서 붉은색 방향으로 최적화

3. 결론

본 논문은 편안한 경로(Comfortable trajectory)라는 새로운 개념과, 시작점과 도착점이 주어졌을 때 매개화된 B-Spline을 이용하여 편안한 경로를 생성하는 알고리즘을 제시하였다.

본 연구를 통하여 로봇의 이동성 뿐 아니라 로봇 내부의 목표 대상이 받는 충격량을 고려한 경로를 생성할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 현재 로봇의 움직임을 최적화해 불편함 정도를 낮추는 연구가 진행중에 있다. 추후에 기존 경로 생성 알고리즘들과의 성능 비교를 통해 연구를 개선할 것이다.

후기

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 SW컴퓨팅산업원천기술개발사업(SW스타랩)의 연구결과로 수행되었음. (IITP-2015-0-00199-003)

참고문헌

[1] C. Chen, Y. He, C. Bu, J. Han, X. Zhang. "Quartic bezier curve based trajectory generation for autonomous vehicles with curvature and velocity constraints." Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on.

[2] P. Bevilacqua, M. Frego, E. Bertolazzi, D. Fontanelli, L. Palopoli, F. Biral. "Path planning maximising human comfort for assistive robots." Control Applications (CCA), 2016 IEEE Conference on.