

단순화된 동역학 모델을 가진 보행로봇을 위한 충돌 역전파를 활용한 장애물 회피 방법

Collision Backpropagation-based Obstacle Avoidance Method for a Legged Robot with Simplified Dynamics Model

김진원¹ · 신희찬² · 윤성의[†]

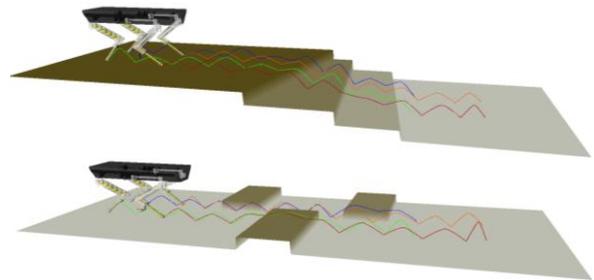
Jinwon Kim¹, Heechan Shin², Sung-Eui Yoon[†]

Abstract: This research suggests a method to perform collision avoidance for a simplified dynamic model. A legged robot motion planning generally uses simplified dynamics models due to its complex structure. Thus, in general, a center of mass and contact points, e.g., end-effector, are concerned without checking collision. Therefore, we propose a collision backpropagation-based obstacle avoidance method, which passes collision information to the contact points. The suggested method got a high success rate and few collisions in an experiment.

Keywords: Collision avoidance, Trajectory optimization, Legged robot

1. 서론

로봇이 단순 반복 작업을 넘어 지능적인 자율 행동을 하기 위해서는 로봇 모션 계획(robot motion planning)이 필수적이다. 특히 다족 보행 로봇(legged walking robot)의 경우 부유형 기저 로봇(floating base robot)이기 때문에 발착지점의 접촉(contact)과 동역학에 대한 고려가 필수적이다. 하지만 전신에 대한 강체(rigid-body) 동역학을 고려하는 것은 비효율적이기에 최신 다족 보행 연구들[1, 2]에서는 centroidal dynamics model, inverted pendulum dynamics model 등 단순화된 동역학 모델을 활용하고 있다. 그러나 이러한 단순화된 동역학 모델들의 경우 대체로 로봇 질량을 고려하기 위한 무게 중심(Center of Mass, CoM)과 contact를 고려하기 위한 말단 작용점(end-effector)만을 활용하여 모션 계획을 진행하기에 충돌 회피에 대한 고려는 생략하는 경우가 많다[1]. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 충돌 역전파(collision backpropagation)를 통해 단순화된 동역학 모델에서도 충돌 회피를 할 수 있는 방법을 제안한다.



[Fig. 1] The angles, widths, and heights of the stairs are random, and the heights of the huddles are random.

2. 충돌 역전파를 통한 충돌 회피

2.1 단순화된 동역학 모델에서의 충돌

다족 보행 로봇의 충돌은 특별한 경우를 제외하고 작업 공간(task space)에서 발생한다. 이때 일반적인 경우 공간 상의 장애물과 로봇 링크 사이의 충돌을 고려함으로써 장애물을 회피할 수 있다. 하지만 단순화된 동역학 모델의 경우 무게 중심, 말단 작용점 등 제한된 정보만을 활용하여 모션 계획을 진행하기에 장애물과 로봇 링크 사이의 충돌을 직접적으로 고려할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 작업 공간상의 장애물과 로봇 링크 사이의 충돌을 말단 작용점에 대한 정보로 치환함으로써 단순화된 동역학 모델을 활용한 모션 계획 방법에서도 충돌 회피를 고려하고자 한다.

* This work was supported by the Defense Challengeable Future Technology Program of Agency for Defense Development, Republic of Korea

1. MS Student, KAIST, Korea (mqjinwon@kaist.ac.kr)

2. Graduate Student, KAIST, Korea (shin_heechan@kaist.ac.kr)

†. Professor, KAIST, Korea, Corresponding author (sungeui@kaist.edu)

2.2 충돌 역전과

작업 공간 상에서의 충돌 정보를 말단 작용점에 대한 정보로 치환하기 위해 본 연구에서는 충돌 역전과를 통한 충돌 비용 변환 방법을 제안한다. 충돌 비용은 로봇으로부터 가장 가까운 장애물까지의 거리를 바탕으로 구한다. 이를 위해 CHOMP[3]등의 선행 연구들과 마찬가지로 *geometric primitives*를 활용하여 가상의 링크를 구성하고 Signed Distance Field(SDF)를 활용하여 장애물까지의 거리를 계산한다. 이때, 충돌에 대한 여유를 주기 위해 *penalty* 함수를 구성하여 안정적인 충돌회피를 도모하였다.

이렇게 구해진 충돌 비용을 말단 작용점에 대한 정보로 치환하기 위해서는 충돌 비용에서부터 말단 작용점으로까지의 역전과가 이루어져야 한다. 이때, 작업 공간상의 충돌 정보를 곧바로 말단 작용점에 적용하지 않는 이유는, 실제 다족 보행 로봇이 움직일 때 조인트의 변화를 통해 동작하기 때문이다. 그러므로 충돌 정보를 링크에 대한 정보로, 링크에 대한 정보를 조인트에 대한 정보로, 그리고 말단 작용점에 대한 정보로 전파시킴으로써 충돌에 대한 정보를 작용점에 대한 정보로 치환할 수 있는 것이다. 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\delta P(x)}{\delta x} = \left(\frac{\delta P(f)}{\delta f}\right) \left(\frac{\delta f}{\delta s}\right) \left(\frac{\delta s}{\delta \theta}\right) \left(\frac{\delta \theta}{\delta x}\right) = \left(\frac{\delta P(f)}{\delta f}\right) f'(s) J_s J_x^{-1} \quad (1)$$

이때, $P(f)$ 는 *penalty* 함수, f 는 SDF를 통해 구한 장애물까지의 거리 정보, s 는 로봇 링크에 대한 정보, θ 는 조인트에 대한 정보, x 는 말단 작용점에 대한 정보이다. 링크의 변화량에 대한 조인트의 변화량은 *jacobian* J_s 이고, 조인트 변화량에 대한 말단 작용점에 대한 변화량은 *jacobian inverse* J_x^{-1} 이다.

3. 실험

3.1 실험 환경 및 비교 방법

실험은 [Fig. 1]과 같은 환경에서 진행하였다. 비교군으로는 단순화된 동역학 모델을 활용한 보행 로봇 경로 최적화 알고리즘인 TOWR[1]와 TOWR 알고리즘을 발전시켜 *heuristic*한 장애물 회피 기법을 추가한 방법[2]을 선정하였다. TOWR 알고리즘에서는 충돌 회피에 대한 고려를 하고 있지 않으며, 장애물 회피 기법을 추가한 방법[2]에서는 충돌 회피를 위해 발착 지점과 가장 가까운 모서리까지의 수직거리(d)를 변수로 가지는 가우스 함수 $\sum e^{-d^2/2\sigma^2}$ 로 충돌 비용을 정의하였다.

[Table 1] Motion planning result: collision checking is performed every 0.01 second along the trajectory.

Terrain	Method	Success rate (%) ↑	Stance collision ↓	Total collision ↓
Stair	[1]	18.18	37.77	46.47
	[2]	25.45	1.96	4.91
	Ours	38.18	0	2.26
Huddle	[1]	2.15	47.06	62.79
	[2]	5.49	17.48	27
	Ours	23.66	0.64	3.78

3.2 실험 분석

각 환경에서 비교군과 제안한 방법의 성공률 및 *stance phase*에서의 링크의 충돌 횟수는 [Table 1]과 같다.

실험 결과 모든 환경에서 제안한 방법의 성공률이 다른 방법보다 높은 것을 알 수 있다. 또한 충돌이 발생하더라도, 그 수가 가장 적다. 실험 결과를 통해 제안한 방법의 충돌 회피 성능이 기존의 방법을 상회함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 작업 공간에서의 충돌을 말단 작용점으로 역전과 시킴으로써 단순화된 동역학 모델에서도 충돌 회피가 가능하도록 하는 알고리즘을 제안하였다. 실험 결과 두 가지 비교군 대비 높은 충돌 회피 성공률을 보였고, 충돌시에도 더 적은 수의 충돌이 일어남을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 *stance phase*에서의 충돌 회피만을 고려하였지만, 후속 연구를 통해 *swing phase*에서의 충돌 회피에 대한 고려도 필요할 것이다.

References

- [1] A. W. Winkler, C. D. Bellicoso, M. Hutter, and J. Buchli, "Gait and trajectory optimization for legged systems through phase-based end-effector parameterization," *IEEE RA-L*, vol. 3, no. 3, pp. 1560–1567, 2018.
- [2] O. Melon, M. Geisert, D. Surovik, I. Havoutis, and M. Fallon, "Reliable trajectories for dynamic quadrupeds using analytical costs and learned initializations," 2020 IEEE ICRA, 2020.
- [3] N. Ratliff, M. Zucker, J. A. Bagnell, and S. Srinivasa, "Chomp: Gradient optimization techniques for efficient motion planning," 2009 IEEE ICRA, 2009.