

각 운동량 최소를 통한 Compass-gait Walker 에서의 더 강인한 보행 궤적 산출

Minimizing Angular Momentum Yield More Robust Walking Trajectories in a Compass-gait Walker

○조 권 승¹, Christian Debuys², 허 필 원^{3*}

¹⁾ 광주과학기술원 기계공학부 (TEL: 010-7150-4010; E-mail: kwonseung93@gm.gist.ac.kr)

²⁾ Mechanical Engineering, Texas A&M University (E-mail: cldebuys@tamu.edu)

³⁾ 광주과학기술원 기계공학부 (TEL:062-715-2408 ; E-mail: pilwonhur@gist.ac.kr)

Abstract In the field of humanoid robots, bipedal walking control requires the following steps: dynamic modeling, calculating optimal trajectory based on robotics dynamics, controlling the biped using the trajectory. We usually expect the bipeds to walk similar to human walking to ensure that robots have robustness and flexibility in tracking the trajectory. In this paper, we sought to minimize the angular momentum H along with control effort on two degree of freedom Compass-gait Walker for human's robustness. Euler-Lagrange formulation to calculate robotics dynamics and the trajectory optimization via trapezoidal direct collocation method were used to generate desired joint trajectories for a 2 DOF Compass-gait Walker. Results showed that the inclusion of angular momentum in the cost function can help enhance the walking robustness to perturbation.

Keywords Compass-gait Walker, Angular momentum, Phase Variable, Direct Collocation, Robust Trajectory

1. Introduction

보행로봇의 걷는 동작은 보행로봇에 대한 로봇 모델의 계산, 걷는 동작을 위한 보행운동 경로 생성, 그리고 제어기를 이용한 보행로봇의 정확한 경로 추종의 과정을 통해 이루어진다. 실제 사람의 보행에 있어 외부로부터 힘이 가해지게 되면 사람은 그 충격을 흡수하며 자연스러운 보행으로 회복하게 된다. 하지만 보행로봇의 경우 걷는 운동 과정에서 외부로부터 운동방향에 반대되는 힘이 가해졌을 경우 운동 경로를 추종하는 제어기가 우수하더라도 그 경로가 최적의 경로가 아니게 되면 제어가 제대로 이루어지지 않게 된다. 따라서 로봇의 보행에 있어서 최적화된 운동 경로를 제시 해 주는 것은 제어 안정성을 위해 필수적이다.

이번 연구에서는 경로 최적화 방법 중 하나인 Direct Collocation[1]을 이용, 2 자유도를 지닌 Compass-gait Walker 의 한 걸음의 주기동안의 원하는 운동경로를 산출 하였고, 운동 경로 추종의 과정에서 강인성과 예기치 못한 외부의 간섭에 대응하기 위해 Forward 시뮬레이션을 진행 하였다. 사람의 걷는 운동은 외부 간섭에 대한 강인성을 지니고 몸 전체의 Center of Mass (COM) 와 연관된 매우 작은 Angular Momentum, H 를 가진다는 이전 연구[2]를 토대로 최적해의 계산을 위한 cost function 에 H 의 항을 추가하여 H 가 작을수록 보행로봇의 강인

성은 증가함을 보고자 한다.

2. Methods

시뮬레이션에 사용된 보행로봇은 그림 2 의 Compass-gait Walker 모델이다. Compass-gait Walker 의 경우 질량(m)과 관성 모멘텀(I)을 지닌 관절이 없는 Stance Leg, Swing Leg 와 질량 (m_h) 를 지닌 Hip 조인트로 구성되어 있다.

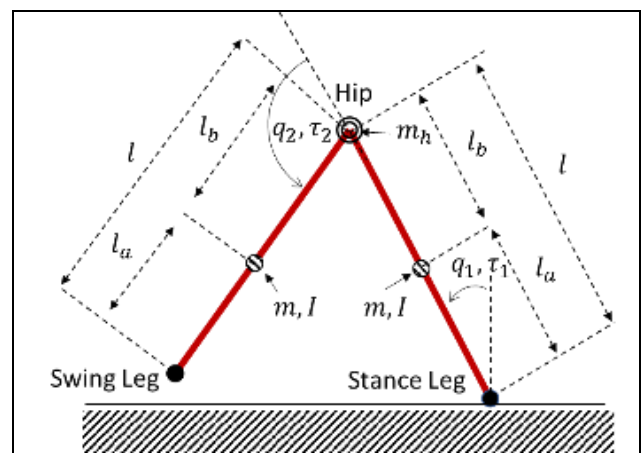


그림 1. Compass-gait Walker Model

Compass-gait Walker 의 로봇 운동방정식은 Euler-Lagrange 방법을 기반으로 한 로봇방정식 (1) 을 사용하여 구하였으며, 기호 연산 (Symbolic Calculaiton)을 위해서 본 연구실에서 개발한 HurToolbox for Mathematica (v2.5.1) 을 사용하였다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \cdots (1)$$

각 조인트의 경로는 Direct Collocation 방법을 이용한 Trajectory Optimization 을 통해 생성하였다. 최적해의 계산을 위해서 Julia (v1.5.4) 프로그램의 JuMP 와 IPOPT 가 사용되었다. Trapezoidal Collocation Method[2]를 사용하였으며, 최적해 계산을 위한 기본 Cost Function 은 조인트 토크 제공의 합으로 표현된다. 기본 Cost Function 에 Spin Angular Momentum 의 제공 H_{spin}^2 ($a=1, b=0$), 과 Orbital Angular Momentum 의 제공 H_{orb}^2 ($a=0, b=1$) 또는 두 Angular Momentum 제공의 합이 추가가 되어 최소의 Angular Momentum 의 계산을 위한 Cost Function 을 구하게 된다.

$$\min \sum \tau^2 + aH_{spin}^2 + bH_{orb}^2 \cdots (2)$$

(subject to: Dynamics, Path, Energy, StepLength, StepHight)

최적해 계산의 과정에서는 걸음에 있어 반복성, 조인트 각도의 제한 등을 만족시키기 위해 (Euler-Lagrange) dynamics (식 1), 최소 보폭 (0.2m), 최대토크 등의 constraints 을 두었다.

Forward 시뮬레이션 과정에서 시뮬레이션이 1.0 초가 되는 시점에 Hip 조인트의 운동방향에 반대되는 수평방향으로 외부에서 힘을 가해주어 Compass-gait Walker 가 외부의 힘으로부터 불안정한 상태가 되었다가 안정된 상태로 변화하는 모습을 추가하였다. 시뮬레이션은 Compass-gait Walker 가 10 번을 걷는 시간 동안 실행되었으며, 모든 시뮬레이션 시간 동안 PD 제어를 경로 추종을 위한 제어기로 사용하였다. 충격 상황에서 제어기에 부담되는 오차를 줄이기 위해 COM 의 Forward Progression 을 Phase Variable 로 사용한 시뮬레이션이 실시되었다.

3. Results and Discussion

Compass-gait Walker 의 Cost Function 을 Angular Momentum 항을 바꾸어 가며 각 Cost Function 을 통한 최적 경로를 얻었을 때, 외부에서 가해지는 힘에 대해서 넘어지지 않고 버틸 수 있는 최대 외부 힘의 결과를 표 1 에 작성하였다.

표 1. Step Length 와 cost function 에 따라 넘어지지 않고 버틸 수 있는 외부에서 가해지는 최대 힘(N)

Step Length [m]	τ^2	$\tau^2 + H_{spin}^2$	$\tau^2 + H_{orb}^2$	$\tau^2 + H_{spin}^2 + H_{orb}^2$
0.200	203	205	210	210
0.230	300	300	305	306
0.250	373	375	375	378
0.400	380	385	389	390

Compass-gait Walker 의 Cost Function 에 Angular Momentum 항을 더해 더 강인한 운동 경로를 산출해 보았던 이번 실험은 강인한 운동 경로에 대한 극명한 변화를 보여주었던 이전의 Five-link Biped 를 이용한 실험[3] 과는 달리 버틸 수 있는 최대 힘에 대한 약간의 증가를 보여줌으로써 강인한 운동 경로에 대한 미세한 변화를 보여주었다. 5 자유도를 지닌 Five-link Biped 의 경우 상대적 높은 자유도를 바탕으로 추종경로의 강인성에 대한 극명한 향상을 보였던 반면, 2 자유도를 지는 Compass-gait Walker 의 경우 상대적 낮은 자유도를 바탕으로 미세한 변화를 보여주는데 그쳤다고 해석 할 수 있다.

4. Conclusion

이족보행로봇의 최적경로를 산출할 때, Cost Function 을 어떻게 지정하는지에 따라 생성되는 최적경로는 이족보행로봇의 보행능력에 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 Cost Function 으로 토크와 Angular Momentum 의 3 가지 조합을 사용하였고, 각각에 대해서 생성되는 최적경로가 외부에서 작용하는 힘에 대해서 얼마나 강인한지를 살펴보았다. 실험 결과, Cost Function 에 Angular Momentum 을 고려할 경우, 최적경로는 외부 힘에 대해 더 강인함을 볼 수 있었다. 하지만, 2 자유도만 가지는 Compass-gait Walker 는 외부힘을 수용할 수 있는 정도가 상대적으로 부족하기 때문에, 5 자유도를 가지는 Biped 보다 그 강인성의 증가가 작음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] C. Chao and P Hur, "Generalized Contact Constraints of Hybrid Trajectory Optimization for Different Terrains and Analysis of Sensitivity to Randomized Initial Guesses," IROS, pp1435-1440, 2019.
- [2] M. Popovic, A. Hofmann, and H. Herr. Angular momentum regulation during human walking: Biomechanics and control, IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 3, pp. 2405–2411, 2004.
- [3] Christian DeBuys and Pilwon Hur, "Minimizing Angular Momentum Yields More Robust Walking Trajectories in Five-Link Biped," ASB 2020