

# Compass-gait Walker 의 역학적 모델 및 제어 방법: 학부생들을 위한 운동방정식 유도, 시뮬레이션 방법 소개

## Dynamics and Control Methods for Compass-gait Walker: Tutorial of Defining EOM and Simulation Method for undergraduates

○차명주<sup>1</sup>, 문선웅<sup>2</sup>, 조권승<sup>3</sup>, 허필원<sup>4</sup>\*

<sup>1)</sup> GIST 기계공학과 (TEL: 010-6506-1053; E-mail: gistcmjgmj@gm.gist.ac.kr)

<sup>2)</sup> GIST 기계공학과 (TEL: 010-3371-7479; E-mail: smking0708@gm.gist.ac.kr)

<sup>3)</sup> GIST 기계공학과 (TEL: 010-6506-1053; E-mail: kwonseung93@gm.gist.ac.kr)

<sup>4)</sup> GIST 기계공학과 (TEL: 062-715-2408; E-mail: pilwonhur@gist.ac.kr)

**Abstract** Student majoring in engineering are interested in bipedal robot research. However, it is not easy to know what they need to study or understand, at first. For them we present contents by taking compass-gait walker as an example. To control the compass walker, we have to construct dynamic model using kinematics and kinetics. It is important to take a closer look at the event of a heel strike in detail. When a heel strike occurs, the walker gets the impulsive force from the ground that causes abrupt velocity changes. After constructing dynamic model, we make the trajectories for the walker to follow. We can use a PD controller for the tracking control. The results show that the compass-gait walker can walk resembling human walking.

**Keywords** Compass-gait Walker, Euler-Lagrange Equation, Robotic Equation, Simulation

### 1. 도입

최근, 이족보행로봇의 기술적 향상으로 인해 다양하고 민첩한 행동을 하는 로봇들을 언론을 통해서 많이 볼 수 있다. 특히 미국의 Boston Dynamics 사의 Atlas 로봇은 마치 사람이 행동하는 것과 비슷한 정도의 역동성, 민첩성, 능수능란함을 보여준다. 이러한 기술적 성과는 이족보행 로봇의 이론적 연구에 관심을 가지는 많은 기계공학 혹은 전기전자공학 학부생들의 관심을 끌기에 충분했다. 하지만, 막상 무엇부터 공부를 해야하며 어떤 이론적 배경을 이해해야 하는지 알기는 쉽지 않다. 본 논문에서는 간략하지만 체계적인 이족보행로봇 연구의 이론적 배경을 소개하고자 한다. 문제를 간소화하기 위해 Compass-gait Walker [1] 모델의 시뮬레이션을 예로 들고, 기계공학을 전공하는 학부생들이 이해할 수 있는 정도의 내용을 전개하였다.

그림 1에 Compass-gait Walker의 연구를 위한 순서도가 소개되어 있다. 본 논문에서는 Compass-gait Walker의 동역학 모델링, 제어, 및 시뮬레이션/분석 순으로 기술하고자 한다. 최적의 궤적 생성은 분량상, 별도의 논문에서 따로 소개한다.

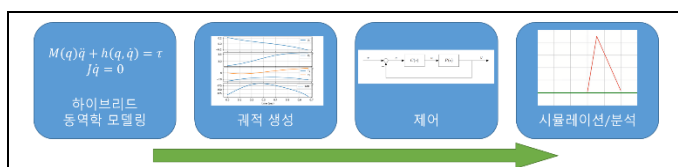


그림 1. Compass-gait Walker 연구를 위한 순서도

### 2. Compass-gait Walker의 동역학 모델링 [2]

Compass-gait Walker (CGW)는 2개의 곧은 막대를 가지고 사람이나 로봇의 이족보행을 직관적으로 설명해주는 단순화된 모델이다. CGW가 이족보행을 하기 위해서, 우선 CGW가 가지는 동역학 모델을 획득해야 한다. 동역학 모델을 얻기 위해서는 Kinematics와 Kinetics의 관계를 공부하여야 한다. Kinematics를 통해서 CGW의 운동을 기술하기 위해서 우선 기준틀(Reference Frame)과 일반화 좌표(Generalized Coordinate)를 그림 2와 같이 정의한다.

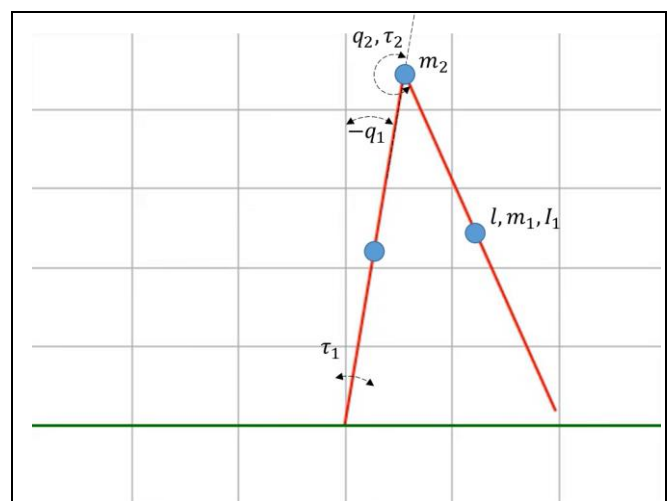


그림 2. Compass-gait Walker 구성 요소

Kinetics 를 얻기 위해서 학부에서 배우는 Newton-Euler 방법을 사용할 수 있지만, 해석적 표현과 분석이 용이한 Euler-Lagrange 방법을 사용하였다. Euler-Lagrange 방법은 에너지 기법으로, 운동에너지와 위치에너지의 차이인 Lagrangian 과 힘의 관계가 식 1 을 만족시킨다.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = F \quad (1)$$

여기서  $L$  은 Lagrangian 이고,  $F$  는 외력, 마찰력 등과 같은 비보존력이다. 식 1 을 CGW 에 적용하면 운동방정식은 식 2 의 로봇방정식 형태로 나타난다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = F \quad (2)$$

여기서  $M(q)$  은 관성행렬,  $C(q, \dot{q})$  는 Coriolis 행렬,  $g(q)$  는 중력벡터다. 로봇방정식을 구하는 과정은 단순하지만, 그 결과로 얻는 방정식의 해석적 표현은 복잡하고 방대하다. 그러므로, 로봇방정식을 구하기 위해, 본 연구실에서 개발한 기호 연산 (symbolic calculation) 이 가능한 HurToolbox for Mathematica (v2.51)를 사용하였다.

보행 시 중요한 이벤트는 힐 착지(heel strike)에 의한 충돌이다. 힐 착지는 보행 중 무게중심의 하강으로 인한 불안정상태를 안정화하고 다음 걸음으로 넘어가게 한다. 본 논문에서는 힐 착지가 순간적으로 일어나며, 비탄성충돌이라고 가정한다. 그렇게 하면 힐 착지가 일어날 때 디딤발은 땅과 접촉을 유지하게 되고, 항상 단순 지지를(single support) 하게 된다. 특히, 순간적 비탄성충돌로 인하여 관절각은 유지되나, 관절속도는 불연속적인 점프가 일어난다. 그 관계는 아래의 충격동역학식(impact dynamics)으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} M & -J^T \\ J & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}^+ \\ \delta f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{q}^- \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$\dot{q}^-$  는 충돌직전 관절속도,  $J$  는 자코비언행렬,  $\delta f$  는 디딤발이 지면으로부터 받는 충격량이다. 식 3 은 Full Rank 이므로, 항상  $\dot{q}^+$ 를 계산할 수 있다.

마지막으로, CGW 가 연속적으로 걸을 수 있도록 Swing Leg 과 Stance Leg 을 바꿔주는 Relabeling 단계를 거친다. 앞에서 얻은 연속모델, 충돌이벤트, 그리고 Relabeling 을 하이브리드 모델(hybrid model)이라 한다.

### 3. 최적 궤적 생성

CGW 가 따라 걷는 궤적(trajecory)를 생성하여야 한다. 이는 실험이나 최적화과정을 통해서 얻을 수 있다. 본 논문에서는 최적화과정으로 구하였으나, 분량상 [3]을 참고하기 바란다.

### 4. 제어 및 시뮬레이션

앞에서 얻은 CGW 하이브리드 모델이 최적의 궤적

을 따라가도록 제어하는 과정이 필수적이다. Full actuation(즉, hip과 ankle 제어가능) 이나 Underactuation (즉, hip만 제어가능) 두 경우 모두 제어가능하다. PD제어, Feedback Linearization제어, Feedforward + PD제어등, 다양한 제어를 사용할 수 있다. 본 논문에서는 Full actuation을 가정하고, PD제어를 사용하였다. 시뮬레이션은 Julia (v1.5.4)와 DifferentialEquations.jl 패키지를 사용했다. 그림 3은 생성된 최적궤적을 PD제어를 통해 걷는 CGW의 보행스냅샷과 phase portrait 을 보여준다.

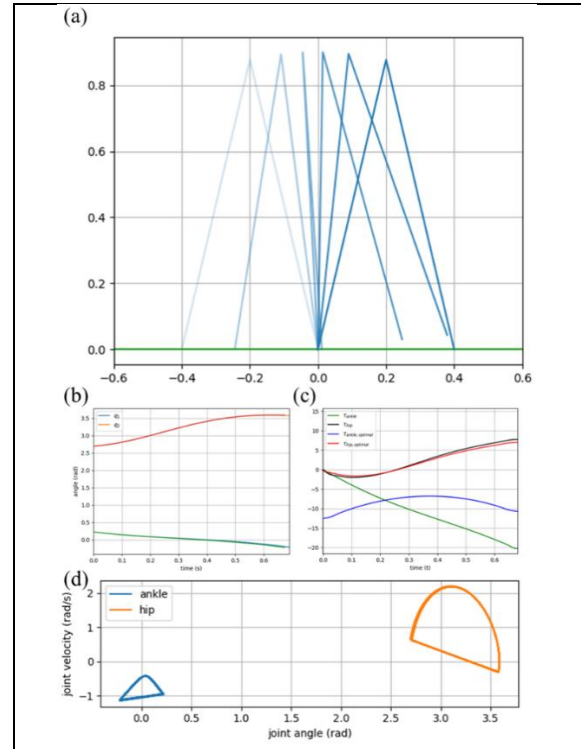


그림 3. (a) CGW 보행 스냅샷, (b) 궤적, (c) 최적제어와 PD 제어, (d) phase portrait

### 5. 결론

우리는 kinematics 와 kinetics 를 사용하여 CGW 의 동역학 모델을 획득했다. 특히 보행 시 CGW 의 동작에 큰 변화를 주는 사건을 자세히 다루며 그때 동역학 모델에 어떠한 변화가 이루어지는지 알아냈다. 구해낸 동역학 모델과 최적화 기법을 사용해 CGW 가 보행하는 최적의 경로를 알수 있고, 이 경로를 잘 따라갈 수 있도록 제어기를 사용했다. 그 결과 시각적으로 결과를 볼 수 있는 시뮬레이션 상에서 CGW 가 실제 땅 위에서 걸어가는 것처럼 시뮬레이션을 수행할 수 있었다. 이렇게 시뮬레이션 까지 도달하는 과정을 통해, 이족보행 로봇 연구의 기본적인 배경은 어느정도 이해할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- [1] McGeer, T., IJRR, 9(2):pp62-82, 1990
- [2] Chao et al., IROS, pp1435-1440, 2019.
- [3] 문선웅 외, ICROS, 2021