

충돌 조건과 초기치 리셋을 이용한 컴퍼스 이족 로봇의 속도 추정

논문
58-11-29

Velocity Estimation of a Compass Gait Biped Robot by Using Impact Condition and Initial Condition Reset

손영익*
(Young-Ik Son)

Abstract - In this paper, a simple method of angle velocity estimation is presented for a passive dynamic biped robot. The estimation problem is not an easy task because its dynamic model is a hybrid system involved with an impact condition. Instead of designing a complex observer for hybrid systems we simply utilize the impact condition to reset the initial condition of the high-pass filter when the non-support leg hits the slope. The approach has been verified by simulation results.

Key Words : Compass Gait Biped, Passive Dynamic Walking, Velocity Estimation, Impact Condition

1. 서론

구동기 없이 중력에만 의존하여 경사 길을 보행하는 수동 보행 장치(passive dynamic walker)가 McGeer[1]에 의해 발표된 이래 다수의 연구자들이 컴퍼스 보행 로봇(compass gait biped; 그림 1)에 대한 연구를 진행하고 있다[2]. 또한, 이를 기반으로 최소한의 구동기를 추가하여 인간과 같이 적은 에너지로 자연스러운 보행 특성을 갖는 이족 로봇을 개발하고 있다[3]. 수동 보행 로봇을 연구하는 이유는 그 결과와 고성능 이족 로봇의 보행 패턴 생성, 제어 방법 개발 및 모터 선정 뿐 아니라 의공학 분야 등 다양한 적용 범위를 가지고 있기 때문이다[3]. 컴퍼스 보행 로봇은 다른 문제들로 쉽게 변형될 수 있는 간단한 모델이면서도, 혼돈 현상(chaos) 등 복잡한 동특성을 나타내고 있어 많은 관심을 받고 있다.

경사면에서 수동 로봇이 안정적인 보행을 유지하기 위해서는 경사각에 따른 로봇의 초기 상태(initial condition)가 매우 중요하다. 이는 주어진 경사면에 대해 안정적인 동작을 보장하는 초기 각도와 그 속도의 수렴 영역(Region of Attraction)이 매우 제한적이기 때문이다. 실제 제작된 수동 로봇을 위한 실험에서도 보행을 성공시키기 위해서는 많은 훈련이 필요하다. 따라서 이런 제한을 완화하고 경사면의 기울기에 상관없이 (평지 혹은 오르막에서도) 보행이 가능하도록 구동기를 추가하고 제어 알고리즘을 개발하는 연구가 진행되고 있다[4-6]. 이와 같은 제어 기법들은 각 관절각뿐만 아니라 속도 정보를 필요로 하는 경우가 대부분이다.

본 논문에서는 그림 1과 같은 대표적인 수동 보행 로봇 모델인 컴퍼스 보행 로봇의 속도 추정 문제를 고려한다. 이때, 간단한 제어 및 추정 알고리즘을 위해 1차 고주파 통과

필터를 사용한다. 로봇이 지면과 충돌할 때 발생하는 불연속성에 의한 과도현상을 개선하기 위해 로봇의 충돌조건(impact condition)을 필터의 초기치 지정에 이용함으로써 속도 추정 성능을 향상시킨다.

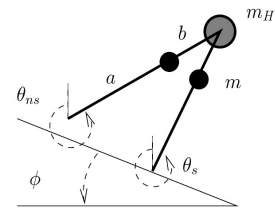


그림 1 컴퍼스 이족 로봇
Fig. 1 Compass Gait Biped

2. 컴퍼스 보행 로봇

그림 1의 로봇은 서로 번갈아 표현되는 두 각도 θ_s (support angle)와 θ_{ns} (nonsupport angle)로 특징지을 수 있으며 아래와 같이 간단하게 모델링 될 수 있다[2].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = Su \quad (1)$$

위에서 $q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{ns} \\ \theta_s \end{bmatrix}$; $S = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 이고, $u = \begin{bmatrix} u_H \\ u_s \end{bmatrix}$ 이다. 입력 u 는 엉덩이(u_H)와 지지 다리(support leg; u_s)에서의 토크이다. 식에서 행렬 $M(q)$, $C(q, \dot{q})$, $g(q)$ 는 다음과 같다. 아래 식에서 다리의 길이 $\ell = a + b$ 이고, g 는 중력가속도 상수이다.

$$M(q) = \begin{bmatrix} mb^2 & -mlb\cos(\theta_s - \theta_{ns}) \\ -mlb\cos(\theta_s - \theta_{ns}) & (m_H + m)\ell^2 + ma^2 \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & mlb\sin(\theta_s - \theta_{ns})\dot{\theta}_s \\ -mlb\sin(\theta_s - \theta_{ns})\dot{\theta}_{ns} & 0 \end{bmatrix}$$

$$g(q) = \begin{bmatrix} mbsin(\theta_{ns}) \\ -(m_H\ell + ma + m\ell)\sin(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot g$$

* 정 회 원 : 명지대학교 전기공학과 부교수 · 공박

E-mail : sonyi@mju.ac.kr

접수일자 : 2009년 7월 8일

최종완료 : 2009년 9월 18일

로봇의 움직임은 스윙(swing)과 충돌(impact)의 반복으로 나타나며 충돌로 인해 소모되는 운동 에너지는 경사면이 제공하는 위치 에너지에 의해 충당된다[3]. 적절한 가정 하에서 충돌 시 두 각의 교번은 연속적이며 각속도 변화는 다음과 같은 충돌 조건을 만족시킨다[2,4].

$$Q^+(\alpha)\dot{q}^+ = Q^-(\alpha)\dot{q}^- \quad (2)$$

$$Q^-(\alpha) = \begin{bmatrix} (m_H l^2 + 2ml^2)\cos(2\alpha) - mab & -mab \\ -2mbl\cos(2\alpha) & 0 \\ -mab & 0 \end{bmatrix},$$

$$Q^+(\alpha) = \begin{bmatrix} mb^2 - mbl^2\cos(2\alpha) & (ml^2 + ma^2 + m_H l^2) \\ -mbl\cos(2\alpha) & -mbl\cos(2\alpha) \\ -mb^2 & -mbl\cos(2\alpha) \end{bmatrix}.$$

단, $\alpha = \frac{q_1 - q_2}{2}$ 이다.

입력이 0인 수동 보행의 경우 식 (2)를 고려한 식 (1)의 궤적은 그림 2 및 3과 같다. 그림 2는 두 다리 각의 궤적이며 위치와 속도를 위상 평면 (Phase Plane)에 나타낸 것이고, 그림 3은 한 쪽 다리의 궤적만 그린 것이다. 이들은 표 1의 값을 이용한 결과이며, 경사면의 기울기 $\phi = 3^\circ$ 이고 초기치는 아래와 같다[4].

$$X = [\theta_{ns}(0), \theta_n(0), \dot{\theta}_{ns}(0), \dot{\theta}_n(0)]^T$$

$$= [-0.323389 \quad 0.218669 \quad -0.377184 \quad -1.091827]^T$$

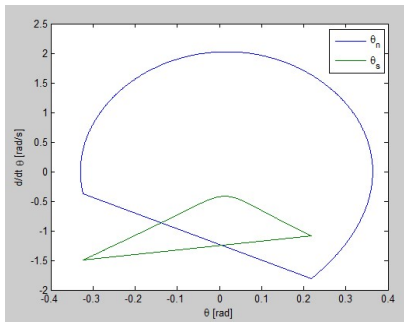


그림 2 두 관절각의 위상 평면
Fig. 2 Phase Planes of Two Angles

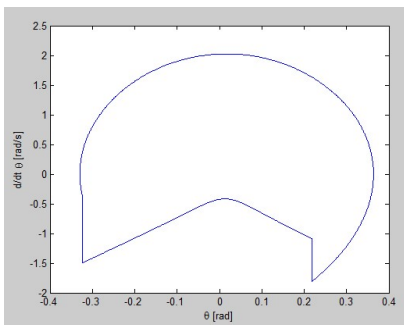


그림 3 한쪽 다리 각의 위상 평면
Fig. 3 Phase Plane of one leg angle

수동 보행 로봇의 초기치 수렴 영역에 대한 제한을 완화하고 경사면의 기울기에 상관없이 보행이 가능하도록 하려면 구동기의 추가와 적절한 제어 알고리즘이 필요하다. 예를 들어 한 기울기에 대해 수렴하는 초기치가 주어진다면 제어를 통해 다른

기울기에 대해서 안정한 보행을 얻을 수 있도록 초기치를 결정할 수 있다. 참고문헌 [4,5]에서는 추가적인 제어 입력을 통해 로봇의 초기치가 보다 넓은 수렴 범위를 갖고 수렴 속도 또한 향상될 수 있음을 보였다. 다음 절에서는 이와 같은 제어기 구현을 위한 속도 추정 알고리즘을 제안한다. 이는 컴퍼스 보행 로봇의 속도 추정에 대한 첫 결과이다. 간단한 필터에 대해 식 (2)를 이용하여 초기치를 조정함으로써 과도 상태를 개선시킬 수 있음을 보인다.

표 1 컴퍼스 이족 로봇 파라미터 [4]
Table 1 Parameters for the Compass Gait Biped [4]

변수	값	단위	정의
m	5	kg	Leg mass
m_H	10	kg	Hip mass
a	0.5	m	Length: m to ground
b	0.5	m	Length: hip to m
$l = a + b$	1.0	m	Leg total length
g	9.8	m/s^2	Accel. of gravity

3. 충돌 조건과 초기치 지정을 이용한 속도 추정

수동 로봇의 보행 안정성을 개선시키기 위한 제어입력을 구현하기 위해서는 속도의 측정이나 추정이 필요하며[4-6], 위치 값으로부터 속도를 추정하는 것이 선호된다. 한편 모델 식 (1)에 근거한 관측기 설계는 준 시스템과 같이 연속 구간과 충돌 조건이 결합된 시스템의 경우 해석 및 수렴성 보장이 쉽지 않으며 제어 시스템을 복잡하게 만들 수 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저 간단한 고주파 통과 필터를 사용하되 전달함수(초기치=0) 형태가 아닌 상태 공간 방정식으로 필터를 설계한다. 따라서 필터의 초기치를 지정할 수 있고, 충돌 조건을 결합하여 속도 추정 성능을 개선시킬 수 있다.

본 논문에서 고려한 필터는 아래와 같다. 상수 A 가 클수록 추정 성능은 향상되고 잡음에는 취약하다.

$$\hat{\omega}(s) = \frac{As}{s+A}q(s) = \left(A + \frac{-A^2}{s+A} \right) q(s) \quad (3)$$

위 식을 상태공간 방정식으로 아래처럼 표현할 수 있다. 추정해야 할 상태가 두 개이므로 $\eta \in \mathbb{R}^2$ 이다.

$$\dot{\eta} = -A\eta - A^2q, \quad \eta_0 = \eta(0) \quad (4)$$

$$\hat{\omega} = \eta + Aq$$

로봇에 대한 속도 추정에 앞서 아래와 같은 간단한 신호에 대해 필터 (4)의 응답 $\hat{\omega}$ 을 살펴본다.

$$q(t) = \alpha t + \beta \quad (5)$$

위 신호에 대한 응답 $\hat{\omega}$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\hat{\omega}(t) = (\eta_0 - \alpha + A\beta)e^{-At} + \alpha \quad (6)$$

위 식에서 η_0 와 $\hat{\omega}$ 의 과도상태 사이의 관계를 확인할 수 있다.

이제 로봇의 속도 추정에서 η_0 에 따른 수렴 성능 차이를 아래 모의실험 결과로 확인한다. 충돌 순간 마다 필터의 초기치를 0으로 리셋하는 경우(즉, $\eta_0 = [0 \ 0]^T$)에 대한 실험 결과는 과도 상태가 너무 나빠서 나타내지 않았다.

그림 4는 처음 시작에서만 $\eta_0 = [0 \ 0]^T$ 이고 첫 충돌 시간부

터는 두 다리가 바뀌는 것에 착안하여 아래 식 (7)과 같이 리셋하는 알고리즘을 사용한 결과이다. 초기 오차가 매우 큰 것을 확인할 수 있다. (단, $A=100$ 이고, t_{impact}^+ 는 충돌 직후의 시간을 의미한다.)

$$\eta(t_{impact}^+) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \eta(t_{impact}^-) \quad (7)$$

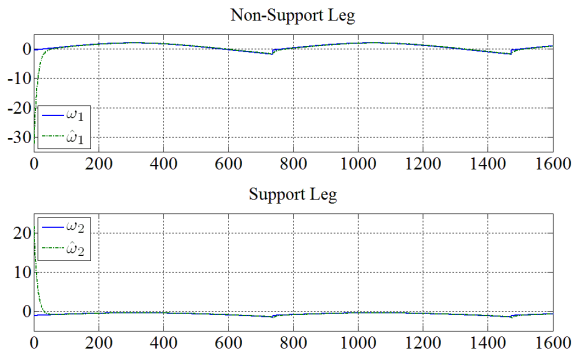


그림 4 결과 1: $\eta_0 = [0 \ 0]^T$ 및 식 (7)의 사용
 Fig. 4 Result 1: Using $\eta_0 = [0 \ 0]^T$ and Eq. (7)

두 번째 그림 5는 처음 시작에서 $\eta_0 = -Aq(0)$ (즉, $\hat{\omega}(0)=0$)이고 첫 충돌 이후부터는 앞과 같이 식 (7)로 리셋하는 알고리즘을 사용한 결과이다. 이것은 초기 속도가 크지 않은 경우에 유용한 방법이지만[6] 그림 5의 지지 다리(support leg)에 대해서는 개선의 여지가 있음을 알 수 있다.

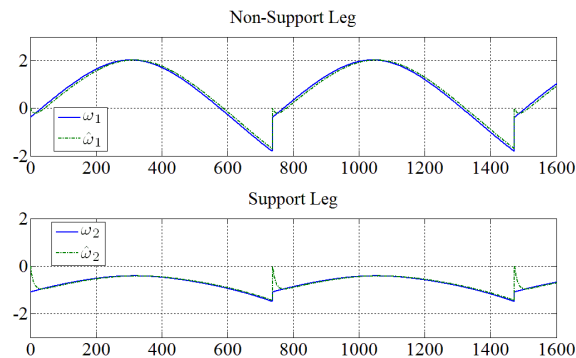


그림 5 결과 2: $\eta_0 = -Aq(0)$ 및 식 (7)의 사용
 Fig. 5 Result 2: Using $\eta_0 = -Aq(0)$ and Eq. (7)

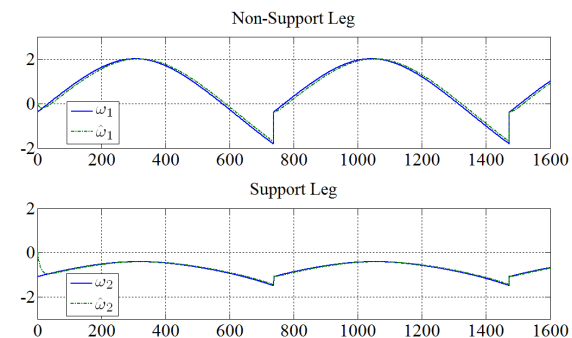


그림 6 결과 3: $\eta_0 = -Aq(0)$ 및 식 (2)식 사용
 Fig. 6 Result 3: Using $\eta_0 = -Aq(0)$ and Eq. (2)

마지막 그림 6은 처음 시작에서 $\eta_0 = -Aq(0)$ (즉, $\hat{\omega}(0)=0$)으로 정하고, 첫 번째 충돌부터는 식 (2)의 충돌조건이 성립함을 이용한다. 즉, 아래 수식이 만족하도록 $\hat{\omega}(t_{impact}^+)$ 및 $\eta(t_{impact}^+)$ 를 지정한다.

$$Q^+(\alpha)\hat{\omega}(t_{impact}^+) = Q^-(\alpha)\hat{\omega}(t_{impact}^-) \quad (8)$$

$$\eta(t_{impact}^+) = \hat{\omega}(t_{impact}^+) - Aq(t_{impact}^+) \quad (9)$$

본 논문에서 제안하는 식 (9)의 방법을 통해 만족스러운 추정 성능을 얻을 수 있음을 그림 6에서 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 수동 로봇에 기반한 이족 로봇 연구와 관련하여 컴퍼스 보행 로봇의 속도 추정 문제를 다루었다. 모의실험을 통해 필터의 초기치 조정이 과도성능을 개선할 수 있음을 확인하였고, 충돌조건과 같은 동특성을 활용함으로써 간단한 구조를 지니면서 만족할 만한 성능을 지닌 속도 추정 알고리즘을 얻을 수 있었다. 제안된 알고리즘의 실제 구현을 위해서는 측정 잡음에 대한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-611-D00013)

참 고 문 헌

- [1] T. McGeer, "Passive Dynamic Walking," International Journal of Robotics Research. 9(2), pp. 68-82, 1990.
- [2] A. Goswami, B. Espiau, A. Keramane, "Limit Cycles in a Passive Compass Gait Biped and Passivity-Mimicking Control Laws," Auton. Robots, 4(3), pp. 273-286, 1997.
- [3] S.H. Collins, A.L. Ruina, R. Tedrake, M. Wisse, "Efficient Bipedal Robots Based on Passive Dynamic Walkers," Science, 307, pp. 1082-1085, 2005.
- [4] M.W. Spong, J.K. Holm, and D. Lee, "Passivity-Based Control of Bipedal Locomotion," IEEE Robots and Automation Magazine, vol. 14, no. 2, pp. 30-40, June, 2007
- [5] M.W. Spong, and G. Bhatia, "Further Results on Control of the Compass Gait Biped," Proc. of IEEE/RSJ, pp. 1933-1938, Oct., 2003
- [6] J. Holm and M.W. Spong, "Kinetic Energy Shaping for Gait Regulation of Underactuated Biped," Proc. of IEEE Int. Conf. on Contr. App., pp. 1232-1238, Sep., 2008
- [7] Y.I. Son, H. Shim, and J.H. Seo, "A Dynamic Output Feedback Control Law for Elastic Joint Robots via Feedback-Passivity Approach", Journal of the Franklin Institute, Vol. 341, No. 6, pp. 477-490, 2004.