

이족보행 로봇의 무게중심 실시간 추정에 관한 연구

On the Estimation of the Center of Mass of an Autonomous Bipedal Robot

권 상 주*, 오 용 환

(SangJoo Kwon and Yonghwan Oh)

Abstract : In this paper, a closed-loop observer to extract the center of mass (CoM) of a bipedal robot is suggested. Comparing with the simple conversion method of just using joint angle measurements, it enables to get more reliable estimates by fusing both joint angle measurements and F/T sensor outputs at ankle joints. First, a nonlinear-type observer is constructed to estimate the flexible rotational motion of the biped in the extended Kalman filter framework. It adopts the flexible inverted pendulum model which is appropriate to address the flexible motion of bipeds, specifically in the single support phase. The predicted estimates of CoM in terms of the flexible motion observer are combined with measurements (that is, output of the CoM conversion equation with joint angles). Then, we have final CoM estimates depending on the weighting values which penalize the flexible motion model and the CoM conversion equation. Simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords : biped, humanoid, CoM(Center of Mass), ZMP, observer, Kalman filter

I. 서론

지난 10여 년에 걸쳐 이족보행 로봇은 가장 진보된 로봇 기술의 하나로서 국내외에 걸쳐 매우 활발한 연구가 진행되어 왔다. 이족보행 로봇 또는 인간형 로봇(휴머노이드)에 대한 독자적인 플랫폼을 개발하기 위해서는 메커니즘, 센서, 구동기, 비전, 제어, 지능 등 다방면에 걸친 기술적 통합이 요구되지만 가장 기본적인 성능 요구조건은 안정된 걸음새를 구현하는 것이라고 할 수 있다.

이족보행 로봇의 안정성 또는 성능을 나타내는 지표로써 일반적으로 ZMP를 사용하며[1,2] 보통 이족보행 제어기는 로봇이 안정된 자세를 유지하도록 생성된 ZMP 패턴을 추종하도록 설계된다[3-5]. 최근에는 보행 안정성 확보를 위한 ZMP 매니플레이션과 더불어 로봇이 임의의 제스처 동작을 하거나 특정 작업을 수행함에 있어 무게중심(CoM) 경로에 따라 팔다리 전체가 관여하는 전신협조(whole body coordination) 밸런싱 개념이 일반화되었다[6-9]. 또한 보행 안정성을 강화하기 위하여 ZMP 궤적 추종제어 루프와 CoM 궤적 추종 루프를 병행한 듀얼 루프 형태의 보행 제어기가 제안되었다[8,9].

이와 같이 휴머노이드의 모든 팔다리에 대한 전신협조 제어 또는 ZMP와 CoM을 동시에 매니플레이션하는 제어 동작을 구현하기 위해서는 ZMP와 CoM의 피드백 측정치가 요구된다. 이 때 ZMP는 로봇의 발목(ankle) 부위에 장착된 F/T 센서 출력값을 환산하여 비교적 정확히 결정할 수 있다. 그러나 현재로서는 로봇 전체의 CoM 위치를 실시간으로 측정하거나 알고리즘적으로 추정할 수 있는 마땅한 수단이 없는 실정이다.

한편, 로봇의 팔다리, 몸통, 머리 등 모든 구성 요소에 대한 CAD 파라미터 데이터와 조인트 센서(엔코더) 측정치를 이용함으로써 기준 좌표계에 대한 이족보행 로봇의 무게중심을 간접적으로 계산할 수 있다. 그러나 제작공차, 유격, 센서의 성능한계와 근본적인 오차요인과 수십 개의 조인트로 구성된 이족보행 로봇의 구조적 특성상 보행 중에는 불가피하게 유연운동(flexible motion)이 발생한다. 이러한 유연운동의 영향 때문에 CoM의 실제 궤적은 로봇 조인트 각도의 변화를 환산하여 얻어지는 예상 궤적과는 상당한 차이를 보일 수 있다. 따라서 CoM 매니플레이션[7,8]을 통해 전신협조 제어를 구현하고 ZMP/CoM 듀얼 궤적 제어[8,9]를 통해 CoM의 거동과 동역학적으로 연성된 ZMP 궤적의 안정성 여유를 확보하기 위해서는 보다 높은 신뢰성을 갖는 CoM 위치 추정 알고리즘을 구성하고 로봇 제어기에 통합하는 것이 요구된다고 할 수 있다.

이 논문에서는 매 샘플링마다 발목의 F/T 센서에서 산출되는 토크 측정치와 조인트 각 측정치들을 입력하여 이족보행 로봇의 CoM 위치를 실시간으로 추정할 수 있는 알고리즘을 설계한다. 먼저 이족보행 로봇의 유연 운동을 기술하기 위하여 CoM위치에 집중 질량을 갖는 유연 역진자 모델을 도입한다. 다음에 유연 역진자 방정식과 토크 측정치를 이용하여 로봇의 유연 회전 운동에 대한 비선형 관측기를 칼만필터 프레임에서 구성한다. 그리고 유연 역진자 모델에 기반한 CoM 예측치와 조인트 각 측정치를 환산하여 결정되는 강체 역진자의 CoM 위치를 조합함으로써 최종적인 CoM 추정치를 산출한다. 결과적으로 제안된 알고리즘은 강체 다물체 모델과 조인트 각도 측정치를 이용하는 개루프 방식의 무게중심 추출 방법에 비하여 실제값에 보다 가까운 추정치를 산출한다.

이 논문은 [10]에서 제시한 결과를 확장한 것으로서 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 주어진 CoM 궤적을 조인트 공간으로 분해(resolution)하여 조인트 궤적들을 산출하기 위한 기구학 방정식들을 간략히 요약한다. III장에서는 유연보행 역진자 모델을 도입한다. IV장에서는 로봇의 유연운동에 대

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 5. 15., 채택확정 : 2008. 6. 30.

권상주 : 한국항공대학교 항공우주기계공학부(sjkwon@kau.ac.kr)

오용환 : 한국과학기술연구원 인지로봇연구센터(oyh@kist.re.kr)

※ 이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-331-D00025).

한 비선형 관측기를 설계하고, 이에 기반한 무게중심 추정 알고리즘을 구성한다. V장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하며 VI장에서 결론을 맺는다.

II. 이족보행 로봇의 기구학

이족보행 로봇이 ZMP 궤적 및 이에 대응되는 CoM 궤적을 실시간으로 추종하기 위해서는 매 샘플링 시간마다 특정 CoM 위치와 기구학적으로 매칭되는 모든 조인트의 회전각을 산출하고 이들을 조인트 제어기에 인가해야 한다. 본 절에서는 [7] 또는 [8]에서 제시된 CoM 자코비안 분해 방법을 통해 조인트 궤적을 산출하는 방법을 요약한다.

이족보행 로봇은 팔다리를 이루는 링크와 상체, 머리 등이 수십 개의 관절들로 상호 연결된 다물체 시스템이며, 또한 보행 동작에 따라서 로봇 좌표계(BCS)의 원점이 이동하는 플로우팅(floating) 시스템이다. 그림 1에서 고정된 기준 좌표계(WCS)에 대한 CoM의 위치 벡터와 각 limb의 말단부(end-point)의 위치 벡터는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$c = r_0 + R_0^0 c \quad (1)$$

$$r_i = r_0 + R_0^0 r_i \quad (2)$$

여기서 r_0 는 BCS의 원점의 위치, 0c 와 0r_i 는 각각 BCS 원점에 대한 CoM과 각 limb 말단부의 위치, R_0 는 BCS에서 WCS로의 변환행렬이다. BCS 원점에 대한 각 limb 말단부 속도 $\dot{x}_i = [\dot{r}_i, \omega_i]^T$ 의 자코비안을 J_i 라고 하면 BCS 원점의 속도 $\dot{x}_0 = [\dot{r}_0, \omega_0]^T$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_0 = X_i(\dot{x}_i - J_i \dot{q}_i) \quad (3)$$

단, 위에서 $X_i = \begin{bmatrix} I_3 & [R_0^0 r_i \times] \\ 0_3 & I_3 \end{bmatrix}$ 는 변환행렬이다.

한편, [8]의 결과에 의하면 (1)의 CoM 방정식을 속도 차원에서 다음과 같이 재구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{c} &= \dot{r}_0 + \omega_0 \times (c - r_0) + \sum_i J_{ci} \dot{q}_i \\ &= \dot{r}_1 + \omega_1 \times (c - r_1) - J_{v1} \dot{q}_1 + (c - r_0) \times \omega_1 + J_{c1} \dot{q}_1 \\ &\quad + \sum_{i=2}^n J_{ci} J_i^+ (\dot{x}_i - X_{i1} \dot{x}_1) + \sum_{i=2}^n J_{ci} J_i^+ X_{i1} J_{i1} \dot{q}_1, \end{aligned} \quad (4)$$

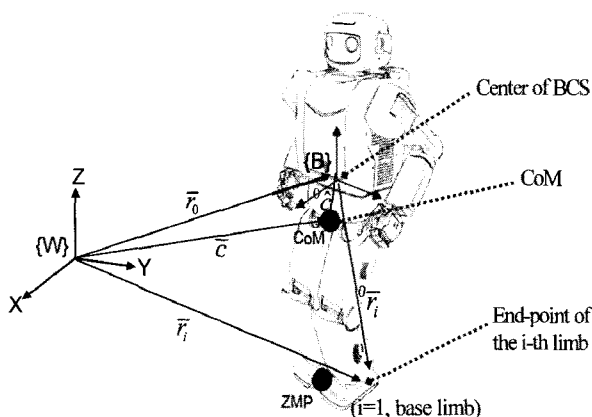


그림 1. 로봇 좌표계(BCS)의 원점, 무게중심, 말단부.

Fig. 1. Position of BCS origin, CoM, and end-point of the i-th limb.

위 식에서 $X_{i1} = X_i^{-1} X_1$ 은 변환행렬이고 J_{ci} 는 CoM에 대한 i번째 limb의 자코비안, $i=1$ 은 연속적인 보행 동작에서 지지다리(supporting limb)를 의미한다. 따라서 r_1 은 지지다리 디딤발의 말단 위치, J_{c1} 는 CoM에 대한 디딤발 말단부의 자코비안, $J_1 = [J_{v1} J_{\omega 1}]^T$ 은 BCS 원점에 대한 디딤발 말단부의 자코비안이다. 또한 ω_0 는 BCS의 각속도, ω_1 은 지지다리 말단부의 각속도, \dot{q}_i 와 \dot{q}_1 는 각각 i번째 limb와 지지다리의 조인트 각속도 벡터, \dot{x}_i 와 \dot{x}_1 은 각각 i-th limb와 지지다리 말단부의 속도이다.

보행 중에 지지다리의 말단부가 정지 상태를 유지한다면 $\dot{r}_1 = \omega_1 = 0$, 즉 $\dot{x}_1 = 0$ 이므로 (4)를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{c} - \underbrace{\sum_{i=2}^n J_{ci} J_i^+ \dot{x}_i}_{\dot{c}_{fsem}} &= \underbrace{(-J_{v1} + (c - r_0) \times \omega_1 + J_{c1} + \sum_{i=2}^n J_{ci} J_i^+ X_{i1} J_{i1}) \dot{q}_1}_{J_{fsem}} \quad (5) \\ \rightarrow \dot{c}_{fsem} &= J_{fsem} \dot{q}_1 \end{aligned}$$

그리고 디딤발의 각속도가 $\omega_1 = 0$ 이면 BCS 원점의 각속도는 $\omega_0 = -J_{\omega 1} \dot{q}_1$ 과 같다. 따라서 (5)와 함께 다음 식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \dot{c}_{fsem} \\ \omega_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{fsem} \\ -J_{\omega 1} \end{bmatrix} \dot{q}_1 \quad (6)$$

위 식으로부터 CoM 궤적, 각 limb 말단부 궤적, 및 BCS 원점의 각속도 궤적이 주어질 경우, 지지다리 각 조인트의 각속도 궤적을 다음 식으로 결정할 수 있다.

$$\dot{q}_{1d} = \begin{bmatrix} J_{fsem} \\ -J_{\omega 1} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \dot{c}_{fsem,d} \\ \omega_{0,d} \end{bmatrix} \quad (7)$$

BCS 원점의 속도는 모든 limb에 대하여 동일하므로 (3)으로부터 $\dot{x}_0 = X_i(\dot{x}_i - J_i \dot{q}_i) = X_1(\dot{x}_1 - J_1 \dot{q}_1)$ 임을 알 수 있다. $\dot{x}_1 = 0$ 이므로 지지 다리($i=1$) 외에 다른 모든 limb($i=2-n$)의 조인트 속도는 주어진 말단부의 기준 궤적에 대하여 다음과 같이 결정된다.

$$\dot{q}_{id} = J_i^+ (\dot{x}_{id} - X_{i1} J_{i1} \dot{q}_{1d}) \quad (8)$$

5절에서는 위 (7), (8)의 역기구학 방정식을 이용하여 특정 ZMP와 CoM 패턴을 추종하기 위한 모든 조인트들의 기준 궤적을 생성하고 보행 시뮬레이션을 수행한다.

III. 이족보행 로봇의 운동 방정식 모델링

1. 강체 역진자 모델

이족보행 로봇의 보행 패턴을 생성하기 위하여 그림 2와 같이 로봇의 총 질량이 CoM에 집중되어 있고 Z-축 방향의 CoM 위치가 고정되어 진자 길이가 변화하는 역진자 모델을 도입하는 것이 일반적이다[3-8]. 한편, 로봇 발이 접촉하는 보행 평면에서 로봇의 XY축에 대한 모멘트가 영이 되는 점을 ZMP(zero moment point)로 정의한다. 로봇이 안정된 보행을 위해서는 ZMP가 로봇 발 표면(footprint)의 외곽선으로 이루

어진 다각형 안에 존재해야 한다. 그림 2에서 CoM의 Z-방향 위치가 고정되어 있다면 ZMP $\hat{p} = (p_x, p_y)$ 와 CoM $\hat{c} = (c_x, c_y, c_z)$ 사이에는 다음 식이 성립한다[8].

$$p_x(t) = c_x(t) - \frac{c_z}{g} \ddot{c}_x(t) \rightarrow \ddot{c}_x(t) - \omega_n^2 c_x(t) = -\omega_n^2 p_x(t) \quad (9a)$$

$$p_y(t) = c_y(t) - \frac{c_z}{g} \ddot{c}_y(t) \rightarrow \ddot{c}_y(t) - \omega_n^2 c_y(t) = -\omega_n^2 p_y(t) \quad (9b)$$

위 식에서 $\omega_n^2 = g/c_z$ 이고 XY 방향의 ZMP 위치는 로봇 발목(ankle)의 토크 센서 측정치를 환산하여 실시간으로 산출할 수 있다. 위 방정식을 이용하여 주어진 ZMP 궤적 $\{p_x(t), p_y(t)\}$ 에 대한 CoM 궤적 $\{c_x(t), c_y(t)\}$ 을 산출하여 보행제어 또는 전신협조 제어에 이용할 수 있다.

한편, 조인트 센서값을 이용하면 각 링크의 CoM 위치 (${}^o\bar{c}_{ik}$)를 계산할 수 있으며, BCS원점에 대한 로봇 전체의 CoM 위치(${}^o\bar{c}$)는 다음 식에 의해 산출된다.

$${}^o\bar{c} = \sum_i \sum_k \mu_{ik} {}^o\bar{c}_{ik} \quad (\mu_{ik} = \frac{m_{ik}}{m}) \quad (10)$$

위에서 m_{ik} , ${}^o\bar{c}_{ik}$ 는 각각 i번째 limb의 k번째 링크의 질량과 무게중심을 의미하고 벡터 ${}^o\bar{c}_{ik}$ 는 각 링크의 형상에 관련된 파라미터와 조인트 각의 함수로 주어진다. 따라서 고정된 기준 좌표계에 대한 전체 CoM의 위치는 (1)에 의거하여 다음과 같다.

$$\bar{c} = \bar{r}_0 + R_0 \sum_i \sum_k \mu_{ik} {}^o\bar{c}_{ik} \quad (11)$$

위 식은 조인트 센서를 이용하여 다관절 로봇의 CoM을 계산할 수 있는 현실적인 방법이며 강체로 이루어진 다물체 시스템에 대하여 모든 조인트의 변위가 주어질 경우에는 완전한 식이 된다. 그러나 위 식을 이용한 무게중심 계산 값은 로봇 조인트 및 트랜스미션의 유격과 링크의 유연 효과 때문에 실제 값과는 상당한 오차가 발생할 수 있다. 기준 좌표계에 대한 BCS 원점의 위치(\bar{r}_0) 또한 로봇의 내부 센서에만 의존하여 계산할 경우 오차를 포함하게 된다.

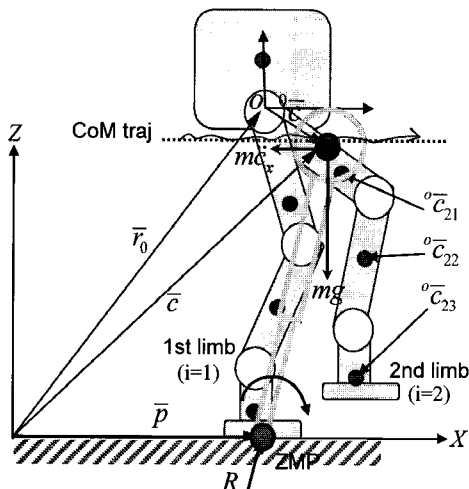


그림 2. 이족보행 로봇의 강체 역진자 모델.

Fig. 2. Rigid inverted pendulum model.

2. 유연 역진자 모델

다관절 메커니즘으로 구성되는 이족보행 로봇의 구조적 특성상, 보행 중에는 불가피하게 유연 운동이 발생한다. CoM 위치 결정에 대한 불확실성의 대부분은 사실상 조인트 센서를 통해서만 검출되지 않는 로봇의 유연운동 효과에 기인한다고 볼 수 있다. 이족보행 로봇의 유연운동은 양 발이 고정된 이중 지지(double support) 단계보다는 한쪽 다리가 스윙 동작을 하는 단일 지지(single support) 단계에서, 정면(frontal plane) 운동 평면보다는 측면(sagittal plane) 운동 평면에서 심하게 나타난다. 그리고 로봇의 구조적 특성상 잔류 진동이 비교적 오래 유지되는 경감쇠 모드를 나타낸다.

로봇 보행 동작을 발목 관절(ankle)에 대한 회전운동으로 가정하면 그림 3과 같이 CoM에 집중질량을 갖고 질량 없는 유연보(massless flexible beam)로 연결된 역진자로 모델링할 수 있다. 측면 운동의 경우, 토크센서 좌표계 원점에 대한 모멘트의 합을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum M_s &= mgl \sin \theta - c(\ddot{\theta} - \ddot{u}) - k(\theta - u) = ml^2 \ddot{\theta} \\ \rightarrow ml^2 \ddot{\theta}(t) + c\ddot{\theta}(t) + k\theta(t) - mgl \sin \theta(t) &= ku(t) + c\ddot{u}(t) \end{aligned} \quad (12)$$

위에서 $u(t), \theta(t)$ 는 각각 강체 역진자와 유연 역진자의 회전 각, k 와 c 는 각각 유연보 회전운동에 대한 강성 및 댐핑 계수이다. 위 식은 CoM의 강체 회전운동 입력에 대한 유연 회전운동 출력 관계를 표현한다. 그리고 토크 센서는 중력 포함 외력의 합과 관성력의 차이를 감지하며, 이것은 그림 3에서 강체 보와 유연 보의 상대운동에 의해 발생하는 스프링 힘과 댐핑 힘의 합과 같다. 즉,

$$\tau_s = k(\theta - u) + c(\ddot{\theta} - \ddot{u}) \quad (13)$$

(12)에서 크기가 미소한 댐핑 항을 무시하면 로봇의 유연 운동에 대한 비선형 모델이 다음과 같이 주어진다.

$$ml^2 \ddot{\theta}(t) + k\theta(t) - mgl \sin \theta(t) = ku(t) \quad (14)$$

위 유연 역진자 모델은 다음 절의 CoM 추정 알고리즘 설계에 적용하며 강체 역진자 모델 (9)는 5절 보행 시뮬레이션에서 CoM 궤적 생성을 위해 이용된다.

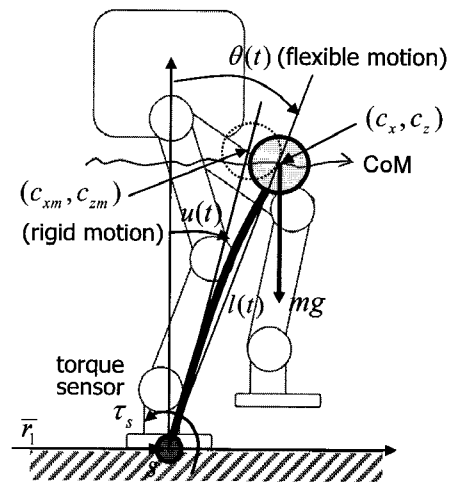


그림 3. 이족보행 로봇의 유연 역진자 모델.

Fig. 3. Flexible inverted pendulum model.

IV. 유연운동 관측기 기반 CoM 추정 알고리즘

본 절에서는 로봇 보행 동작에 따른 CoM의 위치 변화를 실시간으로 추정하기 위한 알고리즘을 제안한다. 먼저 앞 절에서 도입한 유연보 역진자 운동 모델 (14)과 토크 센서 측정 모델 (13)를 기반으로 로봇의 회전운동에 대한 비선형 관측기를 칼만 필터를 이용하여 설계하고 그림 3에 나타난 기하적 관계를 이용하여 CoM 위치를 예측한다. 그리고 유연운동 관측기에 의거한 CoM 예측치를 조인트 센서를 이용한 CoM 측정치 (11)과 가중치 게인 값에 따라 조합함으로써 최종적인 CoM 추정값을 산출한다.

1. 유연운동 관측기

상태변수 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T = [\theta \ \dot{\theta}]^T$ 를 정의하고 (14)를 상태 방정식 형태로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{g}{l} \sin x_1 - \frac{k}{ml^2} x_1 \end{bmatrix} + \frac{k}{ml^2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \mathbf{w}(t) \quad (15)$$

단, $\mathbf{w}(t)$ 는 외란 등에 의한 모델의 불확실성을 나타낸다. 알고리즘 구현을 고려하여 위 식에 대한 적절한 근사화 과정을 통해 다음과 같은 이산시간 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k) + h \left(\frac{g}{l} \sin x_1(k) - \frac{k}{ml^2} x_1(k) \right) \end{bmatrix} \quad (16a)$$

$$+ \frac{k}{ml^2} \begin{bmatrix} 0 \\ h \end{bmatrix} u(k) + \mathbf{w}(k) \\ \rightarrow \mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k) + G u_k + \mathbf{w}_k \quad (16b)$$

단, h 는 샘플링 시간이다.

토크센서 모델 (13)에서 미소한 크기의 댐핑 항을 무시하면 유연 운동에 대한 측정 모델이 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_m(k) = \frac{1}{k} \tau_s(k) + u(k) + v(k) \quad (17)$$

단, $v(k)$ 센서 잡음을 포함한 모델의 불확실성을 나타낸다.

이제 운동 모델 (16)과 측정 모델 (17)을 바탕으로 로봇의 유연 운동에 대한 관측기를 설계한다. 결론적으로 비선형 시스템에 대한 확장 칼만 필터(extended Kalman filter)[12] 알고리즘을 적용하면 표 1과 같이 매 샘플링 시간에 대하여 순환적인 추정 알고리즘을 구성할 수 있다. 칼만 필터 이론에 근거하여 표 1의 비선형 관측기는 유연 역진자 모델에 의한 선추정치(prior estimate)와 토크센서 모델에 기반한 측정치(measurement)를 퓨전함으로써 최소 분산(minimum variance) 관점에서 최적의 추정치를 산출한다.

표 1의 알고리즘을 구현하기 위해서는 그림 3에 표시한 토크 센서값(τ_k), 강체 역진자의 회전각(u_k) 그리고 진자 길이(l_k)가 매 샘플링 시간마다 갱신되어야 하며, 별도의 식별 과정을 통해 유연 역진자 모델의 질량(m) 및 강성계수(k)가 주어져야 한다. 초기 공분산(covariance) (Q, R)은 관측기의 게인을 결정하는 파라미터로서 알고리즘 구현시 추정성능 조정 과정을 통하여 결정해야 한다.

이 논문에서는 일단 측면(sagittal plane) 보행의 경우만 고려한다. 만일 토크센서 좌표계의 원점이 지지 다리의 말단 위

표 1. 유연운동 관측기.

Table 1. Flexible motion observer.

- 운동모델 : $\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k) + G u_k + \mathbf{w}_k, \mathbf{w}_k \sim N(0, Q)$
- 측정모델 : $z_k = \frac{1}{k} \tau_{s,k} + u_k + v_k, v_k \sim N(0, R)$
Predictor : $\hat{\mathbf{x}}_k^- = f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+) + G u_{k-1}$
선추정오차 공분산 전파식 : $P_k^- = A_{k-1} P_{k-1}^+ A_{k-1}^T + Q$
후추정오차 공분산 전파식 : $P_k^+ = (I - K_k H) P_k^-$
Kalman gain : $K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$
Corrector : $\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + K_k \left(\frac{1}{k} \tau_k + u_k - \hat{x}_{l,k} \right)$
시스템 자코비안 : $A_k = \begin{bmatrix} 1 & h \\ h \left(\frac{g}{l_k} \cos \hat{x}_{1,k-1} - \frac{k}{ml_k^2} \right) & 1 \end{bmatrix}$
측정 자코비안 : $H = [1 \ 0]$

치(end-point) $r_1 = (r_{1x}, r_{1z})$ 에 있다면, 강체 역진자의 회전각은 (11)로 계산되는 무게중심 위치 $\mathbf{c}_m = (c_{xm}, c_{zm})$ 을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$u(k) = \tan^{-1} \left(\frac{c_{xm}(k) - r_{1x}(k)}{c_{zm}(k) - r_{1z}(k)} \right) \quad (18)$$

보행 중 CoM의 거동에 따라 변화하는 진자 길이는 직전 샘플링 시간에서의 CoM 추정 위치 $\hat{\mathbf{c}} = (\hat{c}_x, \hat{c}_z)$ 를 이용하여 다음 식으로 결정한다.

$$l(k) = \sqrt{(\hat{c}_x(k) - r_{1x}(k))^2 + (\hat{c}_z(k) - r_{1z}(k))^2} \quad (19)$$

표 1의 유연운동 관측 알고리즘의 효과는 유연 역진자 모델 파라미터의 신뢰성에 크게 의존한다. 먼저 로봇의 질량(m)은 저울로 거의 정확히 측정할 수 있다. 그리고 진자의 가변 길이는 (11)에 의한 CoM 위치를 이용하거나 (19)를 이용하면 비교적 정확하게 산출된다. 그러나 강성계수(k)는 양발의 지지 형태, 운동 평면, 그리고 로봇의 자세의 따라 다양한 값을 가질 수 있다. 이와 관련하여 [11]에서는 휴머노이드 운동을 발목(ankle)에 연성(compliant) 조인트를 갖는 역진자로 모델링하고 각 파라미터를 식별하기 위한 효과적인 방법을 제시하였다. 또한 역진자의 회전운동에 대한 선형 관측기를 설계하여 각속도 추정치를 댐핑 제어에 이용하였다.

2. CoM 추정 알고리즘

본 논문에서 제안하는 이족보행 로봇에 대한 무게중심 추정 알고리즘의 전체 구조는 그림 4와 같다. 먼저 CoM predictor는 그림 3의 기하적 관계에 의하여 기준 좌표계에 대한 CoM 예측치($\hat{\mathbf{c}}_k^-$)를 다음 식으로 계산한다.

$$\hat{\mathbf{c}}_k^- = \begin{bmatrix} \hat{c}_x^-(k) \\ \hat{c}_z^-(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l(k) \sin \hat{\theta}(k) + r_{1x}(k) \\ l(k) \cos \hat{\theta}(k) + r_{1z}(k) \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서 유연 역진자의 회전각 추정치($\hat{\theta}_k$)는 표 1의 유연운동 관측기로부터 실시간으로 산출된다.

또한 CoM corrector는 CoM 예측치와 측정치((11)의 조인트

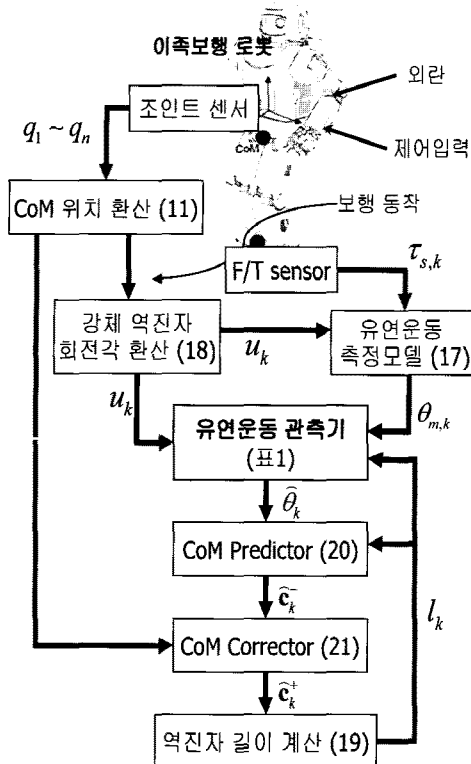


그림 4. 실시간 CoM 추정 알고리즘의 흐름도.

Fig. 4. Algorithm flow for the real-time estimation of a biped CoM.

각도 환산값)를 가중치에 해당하는 계인 값에 따라서 다음 식과 같이 조합함으로써 최종적인 CoM 추정치를 산출한다.

$$\hat{\mathbf{c}}_k^+ = \hat{\mathbf{c}}_k + K_g (\mathbf{c}_m - \hat{\mathbf{c}}_k) \quad (21)$$

여기서 CoM 예측치와 측정치의 불확실성에 해당하는 분산 값을 각각 σ_1^2 , σ_2^2 라고 가정하면 계인 행렬을 다음 형태로 결정할 수 있다.

$$K_g = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

표 1의 유연운동 관측기에서 칼만필터 계인은 주어진 자코비안 행렬과 노이즈 공분산(covariance)의 초기치 (Q , R)에 대하여 동적인 거동을 보이며, 공칭 모델에 대하여 최적의 추정 성능을 보장한다. 반면에 (22)에 제시된 CoM 추정 계인은 초기 분산값에 의하여 결정되는 정적 계인(static gain)이라고 할 수 있다.

결국 본 절에서 제안된 CoM 추정 알고리즘은 매 샘플링 시간마다 조인트 센서와 토크 센서의 측정값을 보행 운동 모델과 측정모델을 통해 퓨전함으로써 조인트 센서 값에만 의존하는 (11)의 무계중심 환산식과 비해 보다 신뢰성 높은 CoM 궤적을 추출하는 것을 목적으로 한다.

V. 시뮬레이션

1. 보행 패턴 생성

그림 2와 같은 6자유도 이족 로봇에서 상체의 질량과 길이는 $m_{ub}=10$ kg, $l_{ub}=0.5$ m, 양 다리를 구성하는 각 링크의 질량과 길이는 $m_{11}=m_{21}=4$ kg, $m_{12}=m_{22}=3$ kg, $m_{13}=m_{23}=1$ kg

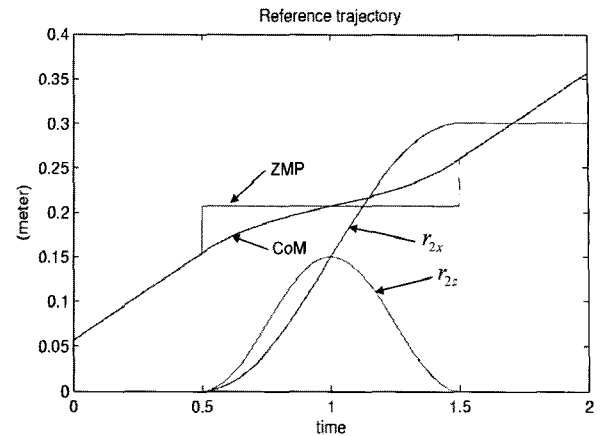


그림 5. 한 걸음 주기에 대한 ZMP, CoM, 스윙 다리(swing leg) 말단부의 기준궤적.

Fig. 5. Reference trajectory of ZMP, CoM, and the end-point of swing leg during a stride.

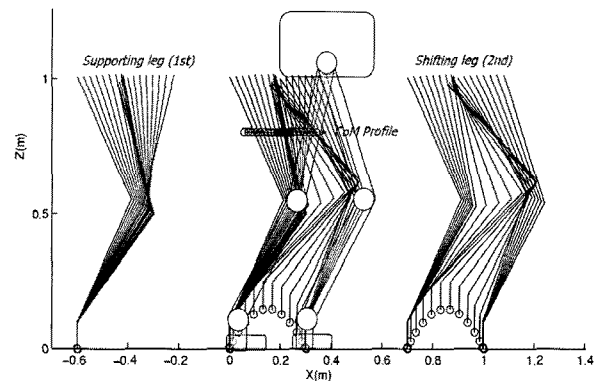


그림 6. 한 보폭의 걸음에 대한 조인트 각도 형상의 변화.

Fig. 6. Joint angle configurations during a stride.

$l_{11}=l_{21}=0.5$ m, $l_{12}=l_{22}=0.5$ m, $l_{13}=l_{23}=0.1$ m로 설정하였고 각 링크의 무계중심은 중앙에 위치한다고 가정하였다.

그리고 측면 운동(sagittal motion)에 대한 보행 패턴을 그림 5와 같이 생성하였다. 그림 5는 보폭 30 cm인 한 걸음 주기 2초에 대한 X-방향의 ZMP 궤적(p_x), CoM 궤적(c_x), 그리고 스윙 다리 말단부의 궤적(r_{2x}, r_{2z})을 나타낸다. 이 때 X-방향 CoM 궤적은 Z-방향의 CoM 위치를 고정시키고 주어진 ZMP 궤적에 대한 강체 역진자 방정식 (9)의 해를 이용하여 산출된 것이다. 그림 5에서 한 주기 동안 지지 형태의 변화는 양발 지지(0~0.5초), 단일 지지(0.5~1.5초), 다시 양발 지지(1.5~2초)의 순서로 변화한다. 실제로 보행 운동을 발생시키기 위하여 요구되는 각 조인트의 기준 궤적은 (7), (8)에 주어진 CoM 자코비안 분해 방법을 이용하여 생성하였다. 결과적으로 한 보폭의 걸음새 동안 지지 다리와 스윙 다리의 각 조인트의 각도 변화는 그림 6과 같은 형상을 보인다.

2. CoM 추정 성능 시뮬레이션

유연 역진자의 실제 모델로서 (12)를 사용하였으며, 이 때 사용된 파라미터 값은 $m = 26$ kg, $k = 1000$ Nm/rad, $c = 7$ Nm/rad, 진자 길이는 $l = 0.8$ m이다. 먼저 CoM 추정 알고리즘의 기반이 되는 표 1의 유연운동 관측기에 대한 성능 시뮬레이션을 먼저 수행한다. 관측기 설계를 위한 운동방정식 모델

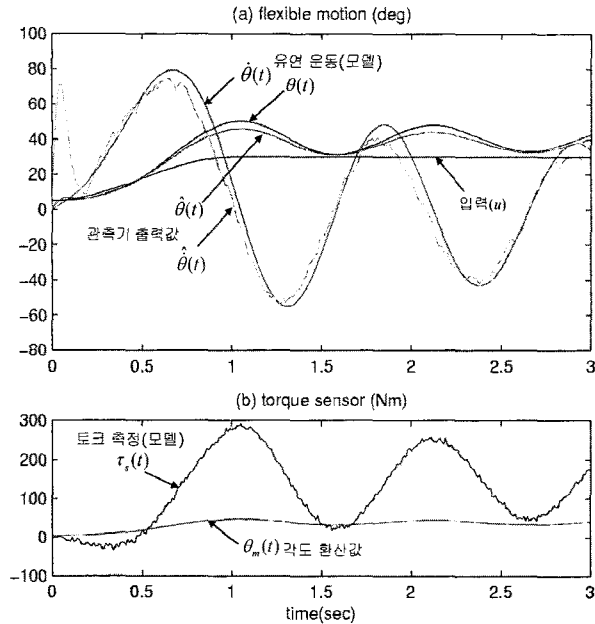


그림 7. 유연운동 관측기 시뮬레이션. (a) 역진자의 유연 운동 및 관측기에 의한 추정치, (b) 발목 토크 및 각도 환산값.

Fig. 7. Performance simulation of the flexible motion observer.

(16)에서 각 파라미터 값들이 실제 모델과 15%의 오차를 갖도록 입력하였다. 그림 7은 그림에 나타난 강체 역진자의 회전운동(u) 입력에 대하여 유연운동 모델의 응답과 관측기의 추정치를 비교한다. 그림에서 속도 추정치의 초기 오차가 크게 나타나는 것은 관측기와 실제 운동 모델의 초기값이 불일치하기 때문이다.

그림 8은 그림 5의 기준 궤적에 대한 CoM 추정 알고리즘 시뮬레이션 결과이다. 그림 8(c)에서 보듯이 제안된 알고리즘('estimator')은 조인트 각을 환산한 CoM 위치('encoder')보다 추정 오차를 감소시킨다는 것을 알 수 있다. 물론 (22)의 계인을 어떤 값으로 선정하느냐에 따라 추정 오차의 크기는 달라질 수 있지만 결과적으로 제안된 알고리즘은 조인트 각 측정치에만 의존하는 개루프 방식의 환산식에 비해 보다 정확하게 무게중심 위치를 산출할 수 있다는 것을 알 수 있다.

한편, 본 시뮬레이션에서는 그림 5의 한 걸음 주기 동안 동일한 유연 역진자 모델을 사용하였다. 그러나 보행중 로봇 양발의 지지 형태 변화에 따라 또한 운동 평면(측면, 정면)에 따라 로봇 구조물의 강성이 크게 변화하고 역진자 모델의 회전축에 해당하는 지지점이 이동한다. 따라서 CoM 추정치의 신뢰성을 높이기 위해서는 보다 엄격한 모델링과 더불어 실제 로봇의 강성을 각 지지 형태 별로 또한 운동 평면에 따라서 식별해야 한다.

VI. 결론

이족보행 로봇이 안정된 보행 동작을 유지하고 전신협조 제어에 의한 원활한 작업 기능을 수행하기 위해서는 로봇 제어기에서 요구되는 무게중심(CoM) 위치를 정확하게 추정하는 것이 매우 중요한 문제이다. CoM의 거동은 ZMP와 동역학적으로 연성되어(coupled) 있기 때문에 제어기에서 부정확한 CoM을 사용하면 ZMP 궤적에 왜곡이 발생할 수 밖에 없다. 이 논문에서는 유연 역진자 모델을 도입하여 이족보행 로봇이 무게중심을 실시간으로 추정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 CoM 추정 알고리즘을 실제 로봇에 적용하기 위해서는 i) 유연 역진자 모델의 각 파라미

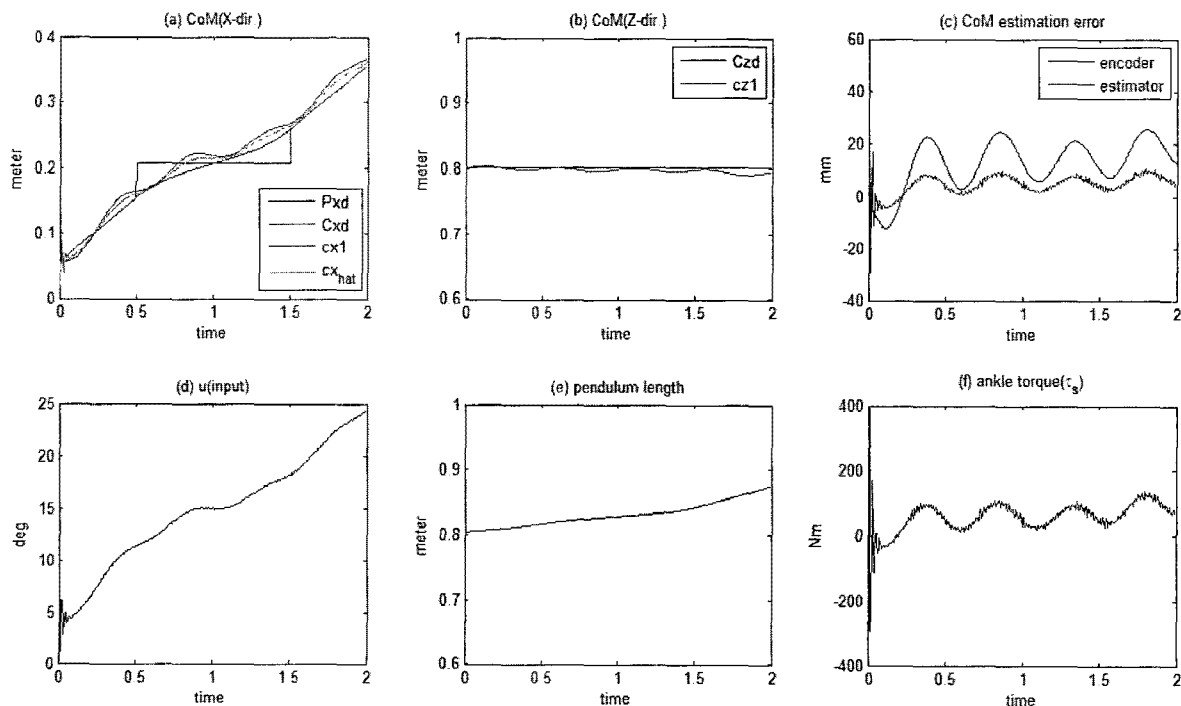


그림 8. CoM 추정 알고리즘 시뮬레이션 결과: (a), (b)에서 P_{xd} 는 X-방향 ZMP 기준 궤적, (C_{xd} , C_{zd})는 CoM 기준 궤적, ($cx1$, $cz1$)은 유연 운동에 의한 실제 CoM 궤적, cx_{hat} 는 추정된 궤적.

Fig. 8. Simulation results of the proposed CoM estimation algorithm.

터 오차가 추정오차에 미치는 민감도 분석, ii) 각 보행 단계별로 차별화된 보행 모델 개발, iii) 실제 로봇의 파라미터를 효과적으로 식별할 수 있는 방법 등이 뒤따라야 한다.

참고문헌

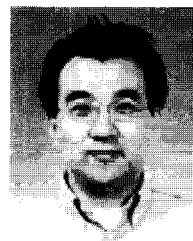
- [1] B. Popovic, A. Goswami, and H. Herr, "Ground reference points in legged locomotion: definitions, biological trajectories and control implications, *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 24, no. 12, pp. 1013-1032, 2005.
- [2] M. Vukobratovic, "Zero-moment point-thirty five years of its use," *Int. Journal of Humanoid Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 157-173, 2004.
- [3] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, and K. Tanie, "Planning walking patterns for a biped robot," *IEEE Trans. Robotics and automation*, pp. 280-289, Jun. 2001.
- [4] H. Hukukawa, S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, and T. Isozumi, "The human-size humanoid robot that can walk, lie down and get up," *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 24, no. 9, pp. 755-769, 2005.
- [5] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Biped walking pattern generation by using preview control of zero moment point," *Proc. of the 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1620-1626, 2003.
- [6] A. Goswami and V. Kallen, "Rate of change of angular momentum and balance maintenance of biped robots," *Proc. of the 2004 IEEE Int. conf. on Robotics and Automation*, pp. 3785-3790, 2004.
- [7] T. Sugihara and Y. Nakamura, "Whole body cooperative balancing of humanoid robot using COG jacobian," *Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems*, pp. 2575-2580, 2002.
- [8] Y. Choi, D. Kim, Y. Oh, and B. J. You, "Posture/walking control for humanoid robot based on kinematic resolution of CoM Jacobian with embedded motion," *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 23, no. 6, pp. 1285-1293, Dec. 2007.
- [9] K.-H. Ahn and Y. Oh, "Walking control of a humanoid robot via explicit and stable CoM manipulation with the angular Momentum Resolution," *Proc. of the 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2478-2483.
- [10] S. J. Kwon and Y. Oh, "Estimation of the center of mass of humanoid robot," *Proc. of the 2007 Int. Conf. on Control, Automation and Systems (ICCAS 2007)*, pp. 2705-2709.
- [11] J.-H. Kim and J.-H. Oh, "Walking control of the humanoid platform KHR-1 based on torque feedback control," *Proc. of the 2004 IEEE Int. conf. on Robotics and Automation*, pp. 623-628, 2004.
- [12] M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering: Theory and Practice*, Prentice-Hall, 1993.



권 상 주

1966년 5월 28일생(음). 1989년 서울대학교 조선공학과(공학사). 1991년 POSTECH (포항공대) 기계공학과(공학석사). 1991년~1997년 국방과학연구소 연구원. 2002년 POSTECH (포항공대) 기계공학과(공학박사). 2003년~2004년 한국과학기술연구원,

한국생산기술연구원 선임연구원. 2004년 9월~현재 한국항공대학교 항공우주기계공학부 조교수. 관심분야는 강인제어 및 추정이론, 센서 퓨전, 초정밀 로봇, 휴머노이드, 비행 로봇.



오 용 환

1991년 포항공과대학교(POSTECH) 기계공학과 공학사. 1993년 동 대학원 기계공학과 공학석사. 1999년 동 대학원 기계공학과 공학박사. 1999년~2000년 JSPS Post Doc. Fellow(일본 와세다대 Takanishi Lab). 2001년~현재 한국과학기술연구원(KIST) 인지로봇연구센터 선임연구원. 관심분야는

인간형 로봇 플랫폼 및 메커니즘 디자인, 센서기반 강인 동적 보행, 로봇 매니퓰레이터의 컴플라이언스 제어, 시각 및 촉각 기반 로봇 매니퓰레이터의 제어.