

# 유연 다리 구조를 가진 로봇의 에너지 효율적 주행 제어

## Energy Efficient Locomotion Control of Compliant Legged Robot

권 오 석<sup>†</sup>, 최 락 현<sup>1</sup>, 이 동 하<sup>2</sup>

Kwon Oh-Seok<sup>†</sup>, Choi RockHyun<sup>1</sup>, Lee Dong-Ha<sup>2</sup>

**Abstract** In this study, we aim to develop energy efficient walking and running robot with compliant leg. So, we propose the energy efficient locomotion control method. And, we experiment the proposed control method applying to the experimental robot with compliant leg. From the experiment, we look at whether the proposed control method can the robot walk and run energy efficiently.

**Keywords:** compliant legged robot, spring-mass model, self-stability, cost of transport

### 1. 서론

사람과 개와 같은 다리를 가진 동물의 걷기와 달리기는 에너지 저장 및 복원을 반복하는 거동으로 알려져 있다<sup>[1]</sup>.

걷기는 일반적으로 Inverted Pendulum으로 모델링하며, 달리기는 일반적으로 spring-mass model로 모델링하여 왔다<sup>[1]</sup>. 한편 참고문헌[2]에서는 걷기도 spring-mass model로 모델링하는 것이 적합함을 보였다.

본 연구에서는 다리를 가진 동물이 걷고 달릴 때 에너지를 저장하고 복원하는 방식을 모방하여 에너지 효율적 걷기와 달리기를 할 수 있는 로봇을 개발하고자 하였고, 로봇의 다리 구조는 spring-mass model과 같이 유연 다리 구조를 적용하였다.

유연 다리 구조를 가진 로봇이 에너지 효율적 걷기와 달리기를 할 수 있도록 하는 제어 방법에는 1) 주행 속도에 대한 self-stable 영역내에서 touch down angle을 생성하고<sup>[2,4]</sup>, 2) 유연 다리 구조를 가진 로봇의 단순 모델인 spring-mass model로부터 로봇의 원하는

경로를 생성하고, 이로부터 로봇 다리의 원하는 경로를 생성하여 적용한다. 이와 같이 함으로써, 등속 주행인 경우, 그리고 에너지 손실이 없는 경우에는, 로봇의 안정성을 유지하기 위한 에너지 소모가 없으며, 또한 이동에 필요한 에너지 소모가 없게 된다. 즉, 에너지 손실에 대한 에너지 보충과 가감속 주행에서의 에너지 소모만이 필요하게 된다. 따라서, 이와 같은 제어 방법을 적용하였을 때 유연 다리 구조를 가진 로봇은 에너지 효율적 걷기와 달리기를 수행할 수 있다.

다음장에서는 위에서 제시한 제어방법에 대하여 설명하고, 3장에서는 실험을 통하여 제시한 제어방법을 적용하였을 때 유연 다리 구조를 가진 로봇이 에너지 효율적 걷기와 달리기를 수행하는 지 살펴보고, 마지막 4장에서 결론을 다룬다.

본 저자가 이는 한 제시한 제어 방법을 적용하고, 실험한 연구결과는 본 저자가 학술대회를 통해 발표한 논문[8]을 제외하고는 새롭게 제시된 내용으로 알고 있다.

### 2. 에너지 효율적 제어 방법

유연 다리 구조를 가진 로봇의 걷기/달리기에 대한 단순 모델은 그림 1과 같다. 그림 1(a)에서  $m$ 은 질점 질량(point mass)으로서 유연 다리 구조를 가진 로봇의 질량을 나타낸다. 그리고,  $x$ ,  $y$ 는  $m$ 의 위치좌표

Received : Jan. 12. 2012; Reviewed : Feb. 15. 2012; Accepted : Apr. 25. 2012  
 ※ 본 연구는 교육과학기술부에서 지원하는 대구경북과학기술원 일반사업에 의해 수행되었습니다(12 BD 0101).

† 교신저자: 대구경북과학기술원 선임연구원(mesign@dgist.ac.kr)

<sup>1</sup> 대구경북과학기술원 연구원

<sup>2</sup> 대구경북과학기술원 책임연구원

(position coordinates),  $K$ 는 스프링 탄성계수,  $l_0$ 는 초기 다리 길이,  $l_1, l_2$ 는 압축된 다리 길이,  $\tau_1, \tau_2$ 는 제어입력토크,  $F_1, F_2$ 는 다리의 탄성력( $F_i=K(l_0-l_i), i=1,2$ ),  $\theta_1, \theta_2$ 는 수직 축으로부터의 다리각도,  $x_{g1}, y_{g1}, x_{g2}, y_{g2}$ 는 다리가 지면과 닿은 위치, 여기서 아래 첨자 1은 다리 1을 나타내고, 아래 첨자 2는 다리 2를 나타낸다. 그리고, 그림 1(b)의 기호는 그림 1(a)와 같으며, 아래 첨자가 붙지 않은 것은 다리 1 또는 2 중 어느 하나를 의미한다. 그리고, 그림 1(c)의  $\alpha_0$ 는 touch down angle(angle of attack),  $\alpha$ 는 변화된 지면과의 각도,  $y_{apex,p}(p=i,i+1,i+j,i+j+1)$ 는  $p$ 번째 정점 높이( $p^{\text{th}}$  apex height),  $V_{x,apex,p}(p=i,i+1,i+j,i+j+1)$ 는  $p$ 번째 정점에서의  $x$  방향 속도(velocity of  $x$  direction at  $p^{\text{th}}$  apex),  $g$ 는 중력 가속도( $g=9.81\text{m/s}^2$ )를 나타낸다. 그리고, 다리의 질량은 0으로 가정한다. 본 논문에서는 위의 기호를 공통적으로 사용한다.

그림 1의 운동방정식은 다음의 식 (1)과 같다. 식 (1)을 얻는 방법은 부록에 두었다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= F_1 \sin \theta_1 + F_2 \sin \theta_2 + \tau_1 \frac{\cos \theta_1}{l_1} + \tau_2 \frac{\cos \theta_2}{l_2} \\ m\ddot{y} &= F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2 - mg + \tau_1 \frac{-\sin \theta_1}{l_1} + \tau_2 \frac{-\sin \theta_2}{l_2} \end{aligned} \quad (1)$$

본 논문에서 제안하는 제어 방법은 그림 2와 같다.

그림 2의 plant는 유연 다리 구조를 가진 로봇이다. controller는 로봇 다리 각도에 대한 비례 제어를 한다. 그리고, plant model without control input 블록에서는

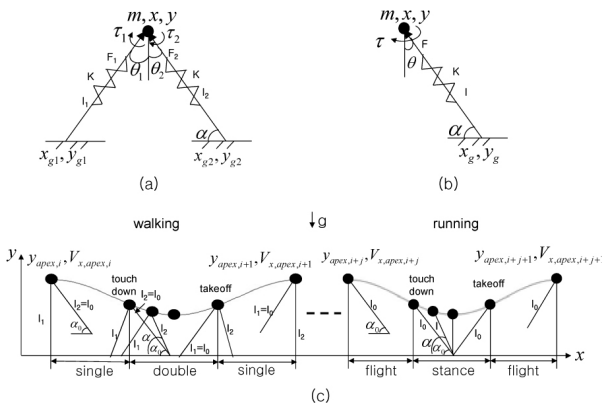


그림 1. (a) walking-double leg support spring-mass model, (b) running-single leg support spring-mass model, (c) walking/running model

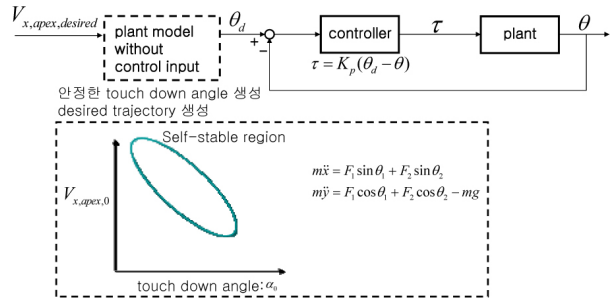


그림 2. energy efficient locomotion control method

$V_{x,apex,désired}$ (원하는 정점(apex)에서의  $x$ 방향 속도)를 받아 self-stable 영역내의  $V_{x,apex,désired}$ (그림 2의 self-stable region의  $V_{x,apex,0}$ (초기 정점에서의  $x$ 방향 속도))에 대한 안정한 touch down angle  $\alpha_0$ 를 생성한다. 이로부터, touch down시의 다리각도  $\theta_0 = -(90^\circ - \alpha_0)$ (그림 1에서  $\theta$ 가 수직 축으로부터 반시계 방향인 경우 음(-)의 부호로 정의하였음)를 생성한다. 그리고, 식 (1)에서  $\tau_1, \tau_2$ 가 0인 운동방정식을 수치적분(여기서 적용한 수치적분 방법은 4차 Runge-Kutta 방법)하여 로봇의 원하는 경로  $x_d, y_d$ 를 생성하고 이로부터 로봇 다리의 원하는 경로  $\theta_d(\theta_d = \tan^{-1}((x_d - x_{gi})/(y_d - y_{gi})), i=1,2)$ 를 생성한다.

이를 그림 1(c)를 통해서 살펴보면,  $y_{apex,i}$ 에서  $V_{x,apex,i}$ 를 받아  $V_{x,apex,i}$ 에 대한 안정한 touch down angle  $\alpha_0$ 를 생성하고, 이로부터  $\theta = -(90^\circ - \alpha_0)$ 를 생성한다. 이로서, 다리 2(b)에 대한 touch down시의 다리각도가 결정되었으며, apex에서부터 touch down시까지의 다리 각도에 대한 원하는 경로는

$$\theta_{2d} = \frac{(\theta_0 - \theta_{apex})}{T_{sw}}(t - t_{apex}) + \theta_{apex}$$

와 같이 생성한다. 여기서,  $\theta_{2d}$ 는 다리 2의 다리 각도에 대한 원하는 경로,  $\theta_{apex}$ 는 apex에서의 다리각도로서  $-\pi/3$ 로 두었다. 그리고,  $T_{sw}$ 은  $\theta_{apex}$ 에서  $\theta$ 까지 다리를 회전하는 시간으로서  $V_{x,apex,désired}$ 에 따라 tuning하여 얻는다. 그리고,  $t_{apex}$ 는 apex에서의 시간을 나타내고,  $t$ 는 주행시간을 나타낸다. 이와 같이 그림 1(c)의 walking영역에서 apex부터 touch down까지 지면에 닿아 있지 않은 다리 2의 원하는 경로를 생성한다. 그리고, 지면에 닿아 있는 다리 1( $l_1$ )의 다리 각도에 대한 원하는 경로는 앞에서 설명한 바와 같이 식 (1)에서  $\tau_1, \tau_2$ 가 0인 운동방정식을 수치적분하여 로봇의 원하

는 경로  $x_d, y_d$ 를 생성하고 이로부터 로봇 다리의 원하는 경로  $\theta_{1d} = \tan^{-1}((x_d - x_{g1}) / (y_d - y_{g1}))$ 를 생성한다. 여기서는 다리 2가 지면에 닿아 있지 않기 때문에 식 (1)의  $F_2$ 는 0가 된다. 그리고, 그림 1(c)의 double 구간 즉, 두다리가 지면과 닿아 있는 경우는 마찬가지로 식 (1)에서  $\tau_1, \tau_2$ 가 0인 운동방정식을 수치적분하여 로봇의 원하는 경로  $x_d, y_d$ 를 생성하고 이로부터 로봇 다리의 원하는 경로  $\theta_i (\theta_i = \tan^{-1}((x_d - x_{gi}) / (y_d - y_{gi})), i = 1, 2)$ 를 생성한다. 여기서, 다리 2가 지면과 닿는 지점은  $x_{g2} = x_d - l \sin \theta$ 와 같이 얻을 수 있으며,  $y_{g2}$ 는 로봇이 평지에서 주행하는 것으로 가정하여 0로 둔다. 그리고, Take off부터 apex,i+1까지는 지면에 닿아 있지 않은 다리 1의 다리 각도에 대한 원하는 경로는 apex,i에서 touch down까지의 다리 2에 대한 경우와 유사하게  $\theta_{1d} = \frac{(\theta_{apex} - \theta_{TO})}{T_{sw}}(t - t_{TO}) + \theta_{TO}$ 와 같이 생성한다. 여기서,  $\theta_{TO}$ 와  $t_{TO}$ 는 Take off시의 다리 각도와 시간을 각각 나타낸다. 마찬가지로  $T_{sw}$ 은  $\theta_{TO}$ 에서  $\theta_{apex}$ 까지 다리를 회전하는 시간으로서  $V_{x,apex,desired}$ 에 따라 tuning하여 얻는다. 그리고, 지면과 닿아 있는 다리 2의 다리각도에 대한 원하는 경로는 앞에서 설명한 것과 같이 식 (1)에서  $\tau_1, \tau_2$ 가 0인 운동방정식을 수치적분하여 로봇의 원하는 경로  $x_d, y_d$ 를 생성하고 이로부터 로봇 다리의 원하는 경로  $\theta_{2d} = \tan^{-1}((x_d - x_{g2}) / (y_d - y_{g2}))$ 를 생성한다. 여기서는 다리 1이 지면에 닿아 있지 않기 때문에 식 (1)의  $F_1$ 는 0가 된다. 이와 같은 방식으로 walking을 수행한다. 그리고, running의 경우도 유사하게  $y_{apex,i+j}$ 에서  $V_{x,apex,i+j}$ 를 받아  $V_{x,apex,i+j}$ 에 대한 안정한 touch down angle  $\alpha_0$ 를 생성하고, 이로부터  $\theta = -(90^\circ - \alpha_0)$ 를 생성한다. 그리고, apex에서부터 touch down시까지의 다리 각도에 대한 원하는 경로는 마찬가지로  $\theta_d = \frac{(\theta_0 - \theta_{apex})}{T_{sw}}(t - t_{apex}) + \theta_{apex}$ 와 같이 생성한다. 그리고, stance구간에서는 마찬가지로 방법으로 식 (1)에서  $\tau_1, \tau_2$ 가 0인 운동방정식을 수치적분하여 로봇의 원하는 경로  $x_d, y_d$ 를 생성하고 이로부터 로봇 다리의 원하는 경로  $\theta_i = \tan^{-1}((x_d - x_g) / (y_d - y_g))$ 를 생성한다. 그리고, Take off부터 apex,i+j+1까지의 다리각도에 대한 원하는

경로도 앞과 같이  $\theta_d = \frac{(\theta_{apex} - \theta_{TO})}{T_{sw}}(t - t_{TO}) + \theta_{TO}$ 와 같이 얻는다.

위와 같이 함으로써 로봇을 원하는 이동속도에 대한 self-stable 영역내에서 지면과 닿도록(touch down)하고, 지면과 닿아 있을 때에는 제어입력값이 0인 운동방정식으로부터 로봇의 원하는 경로와 로봇 다리의 원하는 경로를 생성하여 제어하기 때문에 로봇은 안정성을 유지하고, 제어입력값을 최소화할 수 있다.

### 3. 실험

이번 장에서는 2장에서 제시한 제어 방법을 적용하여 실험한 결과를 통하여, 2장에서 제시한 제어 방법이 유연 다리 구조를 가진 로봇이 에너지 효율적 걷기와 달리기를 할 수 있게 하는지 살펴보고자 한다.

실험용 로봇과 실험조건은 다음의 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는 바와 같이 실험조건은 구속 주행 실험이다. 로봇의 유연 다리 부분을 좀 더 자세히 살펴보면 그림 4와 같다.

그림 4와 같이 원으로 표시된 부분이 스프링으로 되어 있다. 그림과 같이 120도 간격으로 스프링이 되

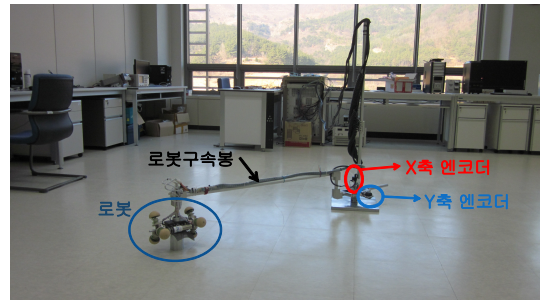


그림 3. experimental robot and condition

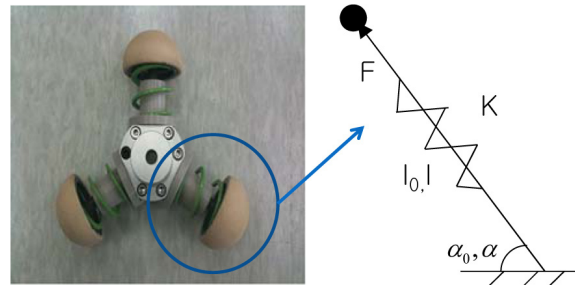


그림 4. compliant leg

어 있는 이유는 다리를 한 방향으로 계속 회전하면서 걷고 달리는 운동을 하기 위해서 이다. 다리를 정역 회전하면서 걷고 달리려면 회전하는 다리가 지면과 닿기 때문에 다리를 굽혀주거나 다리 길이를 조절해주는 구동기가 더 필요로 하게 된다. 본 로봇의 개발에는 구동기 수를 최소화하고자 하였다. 그리고, 본 로봇에 적용한 구동기는 모터는 maxon EC-4pole 30(200W, 24V, nominal speed: 16200rpm, nominal torque: 114mNm)[10]이고, 감속기는 maxon Planetary Gearhead GP 32 HP 33:1[10]을 적용하였고, 양쪽 다리에 각각 적용하였다.

로봇의 주요 파라미터는 다음의 표 1과 같다.

설계치 기준으로 얻은 걷기와 달리기의 self-stable 영역은 다음의 그림 5와 같다.

그림 5에서 ‘\*’는 해당  $V_{x,apex,0}$ 에 대한 안정한 최소 touch down angle을 나타내고, ‘x’는 안정한 최대 touch down angle을, 그리고 ‘+’는 안정한 touch down angle 범위의 중간값을 나타낸다. 그리고 그림상의

표 1. key parameters of robot

	설계치	제작치
질량 m(kg)	3	3.45
강성 K(N/m)	11772	12070
무차원 기준강성 (dimensionless reference stiffness) <sup>[4]</sup>	40	35.66
다리 초기 길이 $l_0$ (m)	0.1	0.1

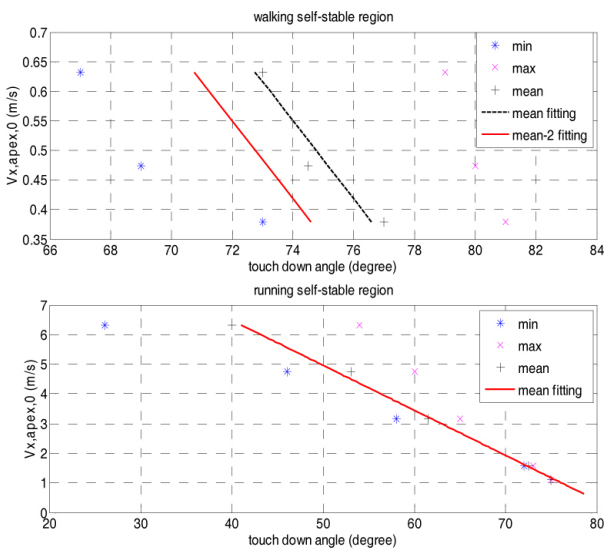


그림 5. walking and running self-stable region

mean fitting은 중간값을 선형 fitting한 결과이다. 그리고 걷기에 대한 self-stable 영역에서 실선은 mean fitting에서 -2 degree한 결과이다.

그림 5의 self-stable 영역은 설계치 무차원 기준강성 40인 경우로서 제작치 무차원 기준강성 35.66인 경우는 그림 5의 영역에서 좌하측으로 조금 변화된다(이와 같은 경향의 결과는 참고문헌 [4]의 Figure 5에서도 확인할 수 있다).

그리고, 실험에서 적용한  $V_{x,apex,desired}$ 는 그림 6과 같다. 이로서 걷기 영역에 해당하는 속도, 걷기에서 달리기로의 전이(전이속도는 후술), 가속(66초에서 71초까지), 그리고, 달리기 영역에 해당하는 속도를 지령속도로 준다.

그리고 실험에서 적용한  $V_{x,apex,desired}$ 에 대한 안정한 touch down angle 생성은 위에서 언급한 제작치 무차원 기준강성이 설계치 무차원 기준강성보다 작은 이유와 그리고 약간의 튜닝으로 걷기와 달리기의 경우 각각 그림 5의 실선상에서 선정 생성한다. 여기서, 걷기와 달리기를 구분하는 전이 속도(transition speed)는  $V_{x,apex,desired}$ 를 기준으로 하여  $V_{x,apex,desired} = 0.6325m/s$ 로 설정하였다. 이와 같이 설정한 이유는 사람의 경우 다리 길이가 1m인 경우 전이 속도가 대략  $2m/s$ [4]으로 알려진 바에 따르면, 이로부터 Froude number[9]  $Fr = v^2/gl_0 = 2^2/(9.81 \times 1)$ 를 이용하여 실험에 적용한 로봇의 다리 초기 길이  $l_0=0.1m$ 로부터  $v = \sqrt{Fr \times g \times 0.1} = 0.6325m/s$ 을 얻은 결과이다.

그리고 로봇의 원하는 경로 및 로봇 다리의 원하는 경로는 표 1의 제작치 파라미터를  $\tau_1, \tau_2$ 가 0인 식 (1)에 적용하여 수치적분을 통하여 로봇의 원하는 경로  $x_d, y_d$ 를 생성하고, 이로부터 로봇 다리의 원하는 경로  $\theta_d(\theta_{id} = \tan^{-1}((x_d - x_{gi})/(y_d - y_{gi})), i = 1,2)$ 를 생성한다. 정지상태에서부터 걷기에 대한 self-stable 영역내의 속도

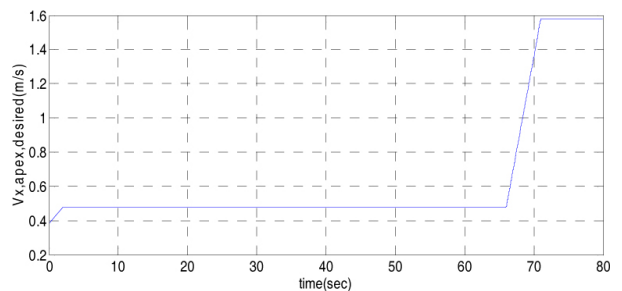


그림 6.  $V_{x,apex,desired}$

에 이르기까지는 원하는 경로 생성을 제어 샘플링 시간 간격( $t_s=0.001\text{sec}$ ) 보다 짧은 시간 간격( $t_s/\text{scale}$ ,  $\text{scale} \geq 1$ , 그림 7 참조)으로 경로 생성을 한다. 즉, 제어 샘플링 시간 간격보다 짧은 시간 간격으로 생성한 경로를 제어 루프에 지령치로 줌으로써 실제 지령 속도를 낮추는 것과 같이 된다. 그리고 이때 그림 2의 controller 게인  $K_p$ 를 게인 스케줄링 한다(그림 7 참조). 이와 같이 하는 이유는 정지에서부터 걷기에 대한 self-stable 영역내의 속도로 곧바로 지령치를 주었을 때 구동기가 포화(saturation) 되는 것을 피하기 위해서이고, 또한 게인  $K_p$ 를 그림 7과 같이 scale값이 클 때 크게 하는 이유는 정지 및 임의로 낮춘 지령 속도에서 다리의 지탱력을 크게 하기 위해서이고(이는 사람이 임의로 slow motion으로 걸을 때 다리에 힘이 많이 드는 경우와 같다고 할 수 있다.), 그리고 게인  $K_p$ 를 scale값이 작아질 때 작게 하는 이유는 scale값이 작아질 때  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ 가 0인 식 (1)의 운동방정식에 가까워지기 때문에  $K_p$ 를 작게 할 수 있고, 또한 용량이 제한된 구동기로 고속 주행까지 할 수 있게 하기 위해 게인  $K_p$ 를 작게 한다. 위의 scale과 게인  $K_p$ 의 시간에 대한 변화 값은 그림 7과 같다.

위와 같이 적용하여 얻은 실험결과는 그림 8과 같다.

그림 8(a)는 로봇 이동 거리 결과이다. 대략 50초까지는 원하는 이동거리( $x_d$ )와 실제 이동거리( $x$ )가 거의 같으나, 50초에서 대략 66초 사이에서는 실제 이동 속도가 지령 속도보다 빨라(그림 8(a)의 실제 이동 거리 기울기가 더 큼) 실제 이동 거리가 더 길어짐을 볼 수

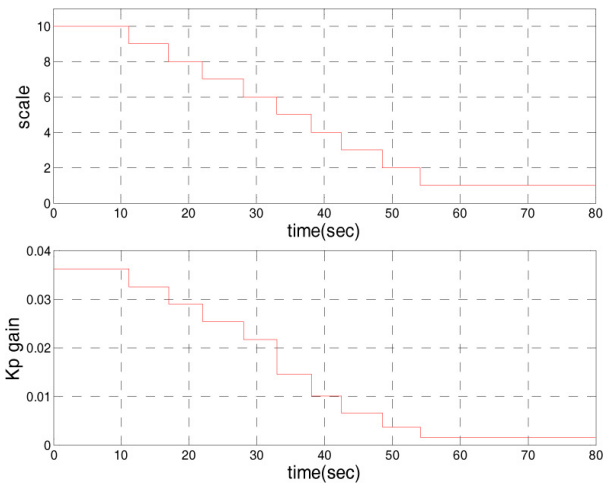
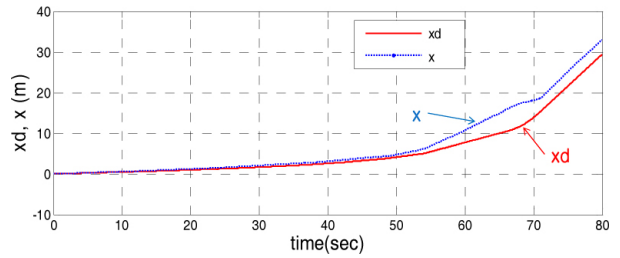
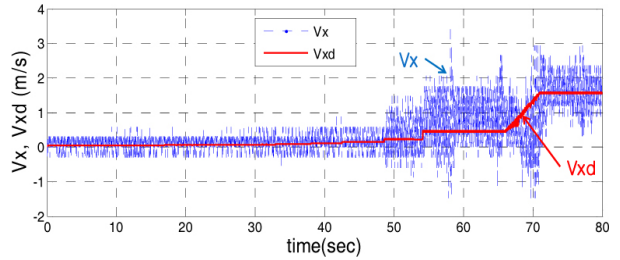


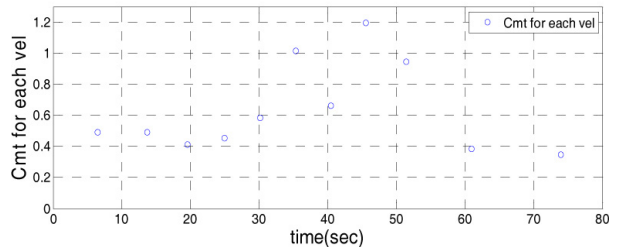
그림 7. scale and Kp gain



(a) 로봇 이동 거리



(b) 로봇 이동 속도



(c) Cmt(mechanical Cost of transport)

그림 8. experiment results

있다. 그림 8(b)는 로봇 이동 속도 결과이다. 그림의  $V_{xd}$ 는 앞에서 언급한 원하는 경로 생성에  $t_s/\text{scale}$ ,  $\text{scale} \geq 1$ (그림 7 참조)을 적용한 실제 지령 속도를 나타낸다. 그리고,  $V_x$ 는 로봇의 실제 이동 속도를 나타낸다. 여기서,  $V_x$ 가 그림과 같이 변동이 큰 이유는,  $V_x$ 를 측정하는 방식이 그림 3의 x축 엔코더 값( $\theta_x$ )을 이용하여 로봇 실제 이동 거리  $x=R\theta_x$ (R: 로봇 회전축 중심에서 로봇 질량 중심까지의 거리, 본 실험에서 R은 1.5m 임)를 얻고, 이로부터  $V_x=R\dot{\theta}_x$ 으로  $V_x$ 를 얻는데, 그림 3의 로봇구속봉이 유연하고, 로봇이 걷고 달릴 때 로봇 다리가 지면과 닿을 때 충격에 의한 진동으로 그림과 같이  $V_x$ 가 변동이 큰 것으로 추정된다. 그림 8(b)로부터 대략 50초까지는  $V_{xd}$ 와  $V_x$ 의 평균값이 거의 같으며(이는 그림 8(a)의 이동 거리 기울기로도 알 수 있다.), 50초에서 55초 사이에서는  $V_x$ 의 평균값이  $V_{xd}$ 보다 조금 크며, 55초에서 대략 66초 사이

에서는  $V_{xd}$ 보다  $V_x$ 의 평균값이 좀 더 크다. 그리고, 66초에서 71초 사이는 가속을 하는 구간이며,  $V_{x,apex,desired}$  기준으로 걷기에서 달리기로 전이하는 전이 속도가 설정된 구간이 포함되는 구간이다. 이때  $V_x$ 는  $V_{xd}$ 를 잘 추종하지 못하다가 71초 근방에서  $V_{xd}$ 를 추종하고, 71초 이상에서는  $V_x$ 의 평균값이  $V_{xd}$ 와 유사한 결과를 얻었다.

그리고 그림 8(c)의  $Cmt$ (mechanical Cost of transport)<sup>[5,6]</sup>는 일반적으로 사용되는 에너지 효율성 정도를 나타내는 지수로서  $Cmt=P/mgV$ 로 정의되며,  $P$ 는 외부에서 인가한 일률(Power)이고,  $mg$ 는 로봇의 중량, 그리고  $V$ 는 로봇 이동 속도를 의미한다.  $Cmt$ 는 정의와 같이 무차원 값이며, 작은 값일수록 에너지 효율성이 높음을 의미한다.

그림 8(c)에서 대략 55초까지는 앞에서 언급한 바와 같이 원하는 경로 생성을 제어 샘플링 시간 간격( $ts=0.001sec$ )보다 짧은 시간 간격( $ts/scale, scale>1$ , 그림 7 참조)으로 한 경우이다. 그리고, 55초 이상에서는 원하는 경로 생성 시간 간격과 제어 샘플링 시간 간격을 같게 한 경우이다( $ts/scale, scale=1$ , 그림 7 참조). 앞에서 언급한 바와 같이 원하는 경로 생성을 제어 샘플링 시간 간격보다 짧은 시간 간격으로 하는 것은 임의로 지령 속도를 낮추는 것이며, 이는 사람의 경우 slow motion과 같이 걷는 부자연스러운 걸기를 지령하는 것과 같다 할 수 있다. 따라서, 이 경우는 에너지 효율적 걸기를 하고 있지 않다고 볼 수 있을 것이며, 이는 그림 8(c)의  $Cmt$  값이 55초 이하인 경우가 55초 이상의 경우보다 큰 것으로부터도 확인할 수 있다. 원하는 경로 생성과 제어 샘플링 시간 간격이 같은 55초 이상인 경우의  $Cmt$ 를 그림 8(c)로부터 살펴보면,  $V_{x,apex,desired}$  기준 전이속도 이하의 걸기에서는  $Cmt \approx 0.3852$ 이고, 전이속도 이상의 달리기에서는  $Cmt \approx 0.3481$ 이다. 이를 다른 로봇과 비교하여보면, Honda의 ASIMO는  $Cmt \approx 1.6[5]$ 이고, Cornell biped는 걸기에서  $Cmt \approx 0.055[5]$ , 그리고 ARL monopod II는 달리기에서  $Cmt \approx 0.22[6]$ 이다. ASIMO 로봇은 상대적으로 에너지 효율성은 떨어지지만 다양한 복잡한 움직임이 가능하고, Cornell biped는 에너지 효율성이 매우 높지만, 특정 걸음 속도에서만 동작할 수 있으며<sup>[7]</sup>, ARL monopod II는 달리는 로봇 중 에너지 효율이 매우 높은 것으로 알려져 있으나, 이 로봇은 걸기를 할 수는

없다. 본 저자들이 개발 중인 로봇은 현재 구속 주행 조건에서 그리고, 제어기 및 배터리가 로봇에 탑재되어 있지 않은 상태에서 측정된  $Cmt$ 이지만 에너지 효율성이 높은 다른 로봇과 비교할 만하며, 또한 개발 중인 로봇은 정지상태에서부터 걷기와 걷기에서 달리기로의 전이, 그리고 달리기를 수행할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 유연 다리 구조를 가진 로봇이 에너지 효율적 걷기 및 달리기를 할 수 있는 제어방법을 제안하였고, 제안한 제어방법을 실험용 로봇에 적용하여 실험을 수행하였다.

실험결과 걷기 및 달리기에서 에너지 효율성이 현재 발표된 세계 최고 수준의 다른 로봇과 비교하였을 때 Cornell biped와는 아직 큰 차이가 있고, ARL monopod II에는 근접한 수준이다. 하지만, 3장에서도 언급한 바와 같이 Cornell biped는 특정 걸음 속도에서만 동작 가능하고, ARL monopod II는 달릴 수만 있고 걷기는 할 수 없는 제약을 가지고 있다. 이런 측면에서 볼 때, 본 저자들이 개발 중인 로봇은 정지상태에서부터 걷기, 걷기에서 달리기로의 전이, 그리고 달리기를 수행할 수 있는 로봇으로서 주행에 제약이 없으며, 또한 걷기 및 달리기에서 에너지 효율성 또한 높은 수준에 있다.

#### 부록

그림 1(a)에 대한 자유물체도를 그리면 그림 A1과 같다.

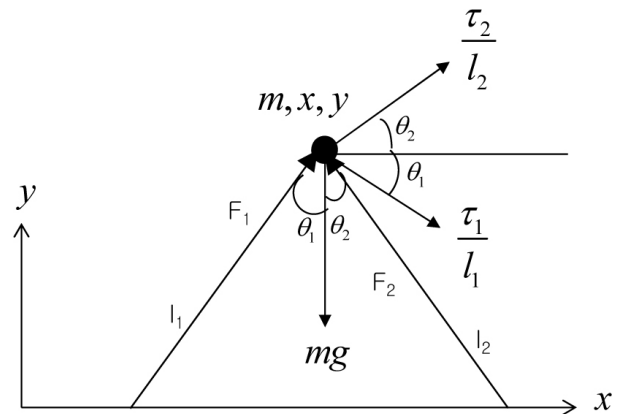


그림 A1. free body diagram for figure 1(a)

이로부터 식 (1)과 같이 식 (A1)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= F_1 \sin \theta_1 + F_2 \sin \theta_2 + \tau_1 \frac{\cos \theta_1}{l_1} + \tau_2 \frac{\cos \theta_2}{l_2} \\ m\ddot{y} &= F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2 - mg + \tau_1 \frac{-\sin \theta_1}{l_1} + \tau_2 \frac{-\sin \theta_2}{l_2} \end{aligned} \quad (A1)$$

여기서,  $\theta$  부호는 수직축에서 시계방향은 ‘+’부호이고, 반시계방향은 ‘-’부호로 정의하였다.

### 참고문헌

- [1] M. H. Dickinson, C. T. Farley, R. J. Full, M. A. R. Koehl, R. Kram and S. Lehman, "How Animals Move: An Integrative View", Science, Vol. 288, no. 5463, pp. 100-106, 2000.
- [2] Geyer, H., Seyfarth, A., Blickhan, R., "Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running," Proc. R. Soc. B, 273, pp.2861-2867, 2006.
- [3] Seyfarth, A., Geyer, H., Günther, M., Blickhan, R., "A movement criterion for running," J.Biomech., 35, pp.649-655, 2002.
- [4] J. Rummel and A. Seyfarth, "Stable Running with Segmented Legs", The International Journal of Robotics Research, vol. 27, no.8, pp. 919-934, 2008.
- [5] S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake, M. Wisse, "Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers", Science, Vol. 307, no. 5712, pp. 1082-1085, 2005.
- [6] M. Ahmadi and M. Buehler, "The ARL Monopod 11 Running Robot: Control and Energetics", IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 1689-1694, 1999.
- [7] A. Seyfarth, F. Iida, R. Tausch, M. Stelzer, O. von Stryk and A. Karguth, "Towards Bipedal Jogging as a Natural Result of Optimizing Walking Speed for Passively Compliant Three-Segmented Legs", The International Journal of Robotics Research, Vol. 28, No. 2, pp. 257-265, 2009.
- [8] 권오석, 이동하, “유연 다리 구조를 가진 로봇의

에너지 효율적 걷기와 달리기”, 2011 대한임베디드공학회 추계학술대회, pp. 85-88, 2011.

- [9] J. Rummel, F. Iida, J. A. Smith and A. Seyfarth, "Enlarging Regions of Stable Running with Segmented Legs", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.367-372, 2008.
- [10] maxon motor 2010/11



#### 권 오 석

2001 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)  
2001~2005 LG생산기술원 주임연구원  
2005~현재 대구경북과학기술원 선임연구원

관심분야: 로봇 설계 및 제어



#### 최 락 현

2010 대구대학교 통신공학과(공학사)  
2012 대구대학교 정보통신공학과(공학석사)  
2012~현재 대구경북과학기술원 연구원

관심분야: 로봇 제어, WNCS(Wireless Networked Control System), CPS(Cyber Physical System)



#### 이 동 하

2005 경북대학교 전자공학과(공학박사)  
1987~2005 LG전자 연구실장/책임연구원  
2005~2008 대구경북과학기술원 연구부장

2009~2010 대구경북과학기술원 선임연구부장  
2010~2011 대구경북과학기술원 차세대융복합연구센터장  
2011~현재 대구경북과학기술원 산학협력단장  
관심분야: CPS(Cyber Physical System), 영상 및 신호처리, 임베디드소프트웨어