

한다리 로봇의 뒹뛰기 패턴 생성에 관한 실험적 접근

Experimental Approach to Hopping Pattern Generation for One-legged Robot

조 백 규*
(Baek Kyu Cho¹)
¹Kookmin University

Abstract: We introduce a pattern generation method for a hopping one-legged robot and verify it experimentally. The pattern is derived from the linear and angular momentum of a COM (Center of Mass), which are pre-scheduled. Because of the relation between angular velocities of joints and momentums of the COM, joint angle trajectories are easily obtained. In addition, the landing impact force is reduced by only adjusting the landing timing. In the experiment, the one-legged robot hops in place with 0.06 s of flying time, and makes continuous hopping. Based on our experimental results, the proposed method can be applied to hopping and running of biped humanoid robots.

Keywords: one-legged robot, hopping, pattern generation, resolved momentum control, landing impact

I. 서론

휴머노이드 로봇의 이족 보행에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. Honda의 ASIMO [1], KAIST의 HUBO 시리즈 [2-4], 그리고 AIST의 HRP 시리즈 [5,6]가 그 대표적인 휴머노이드 로봇이다. 휴머노이드 로봇의 안정적인 보행이 가능해짐에 따라 휴머노이드 로봇의 더 빠른 운동성에 대해 연구가 대두되었다. 로봇의 보폭(stride)이나 보행 주파수(walking frequency)를 증가시킴으로써 더 빠른 이동을 구현할 수 있다. 그러나 두 가지 이유로 이런 방법은 불가능하다. 첫째, 로봇의 하드웨어의 구조적인 이유로 보폭을 늘리는데 한계가 있다. 둘째, 구동기의 구동 능력에도 한계가 있다. 반면, 휴머노이드의 주행은 로봇의 하드웨어적인 제약에도 불구하고 공중동작 영역을 가지고 있기 때문에 더 빠른 이동성을 구현할 수 있다. 이런 이유로 휴머노이드 로봇의 주행에 대한 관심이 커지고 있다.

주행은 공중동작 영역을 갖는다. 이 영역은 로봇의 빠른 이동성에 중요한 역할을 하지만 로봇의 자세 안정화에 부정적인 영향을 갖는다. 공중동작 동안 로봇은 지면으로부터의 구속력이 없기 때문에 로봇의 회전 운동량에 의해 몸체가 회전을 할 수 있다. 이 회전은 공중동작 후 로봇이 지면에 착지할 때 불안정한 착지를 야기시킨다. 이와 더불어 로봇이 지면에 착지하는 순간 충격력이 발생한다. 이 충격력은 로봇 하드웨어의 손상을 야기시키며 로봇의 자세 안정화에도 부정적인 영향을 끼친다. 따라서 로봇의 주행에 관한 연구를 진행하기에 앞서 로봇의 주행 혹은 뒹뛰기의 공중동작 구간에서 발생하는 문제점에 대한 선행 연구가 필요하다.

로봇의 주행이나 뒹뛰기에 대해 다음과 같은 연구가 이루어졌다. M. Raibert et al.은 1980년도와 1990년도에 걸쳐 로봇의

뒹뛰기와 주행에 대해 연구를 하였다[7,8]. “3D one-leg hopper”는 다양한 방향으로의 안정적인 뒹뛰기 구현이 가능하며, “3D biped”는 두 다리로 주행 및 카트 끌기가 가능하다. 또한, M. Ahmadi et. al는 “AML Monopod”를 통해 에너지 효율적인 Passive Dynamic 주행을 구현하였다[13,14]. E. Papadopoulos et. al는 SLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum) 모델을 이용하여 한 다리 로봇의 passive 뒹뛰기 궤적에 대해 연구하였다[15]. 그러나 앞의 연구들은 상체 질량 대비 다리 질량이 작기 때문에, ‘massless’ 다리로 가정하였다. 따라서 동역학 해석과 제어기 설계가 상대적으로 쉽다.

일반적인 휴머노이드 로봇의 다리는 상체 대비 작지 않은 질량을 차지하며 각 파트에 잘 분포되어 있다. 휴머노이드 로봇을 이용한 뒹뛰기와 주행을 구현하기 위해서 다리의 각 파트의 질량을 고려하여 동역학 해석을 해야 한다. Tajima et al.는 2006년 뒹뛰기가 가능한 “One-legged robot” 발표하였다 [9]. 이 로봇은 휴머노이드 로봇의 다리 형태를 갖는 대표적인 로봇이며 조이스틱 조종을 통해 원하는 방향으로의 뒹뛰기가 가능하다. 또한, 이 로봇의 주목할 만한 점은 일반적인 휴머노이드 로봇들의 구조와는 달리 발가락 관절을 추가적으로 장착한 점이다. 발가락 관절은 로봇 시스템의 뒹뛰기에 필요한 파워량을 감소시키는 역할을 하지만 이로 인해 시스템의 동역학적 해석은 더욱 복잡해지게 되었다. 그리고 발가락 관절을 위한 추가적인 모터와 감속기를 장착하기 때문에 전체적인 비용 증가와 시스템의 질량 증가를 야기시킨다.

공중동작 구간을 갖는 로봇의 뒹뛰기와 주행에서 착지 시 발생하는 충격력은 피할 수 없다. 이 충격력은 로봇의 하드웨어의 손상시키고 시스템의 불안정성을 증가시킨다. 따라서 충격력을 최소화시키는 것이 필수적이다. 이를 해결하기 위해, Yamaguchi et al.은 충격흡수 재료를 이용한 발바닥을 설계하였다[10]. 그러나 충격흡수를 이용한 기구적 장치는 시스템의 구조를 더 복잡하게 만들고 시스템의 질량을 증가시키는 단점을 수반한다. 이런 이유로 대부분의 휴머노이드 로봇들

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 3. 1., 수정: 2012. 4. 24., 채택확정: 2012. 7. 26.
조백규: 국민대학교기계시스템공학부(BaekKyuCho@kookmin.ac.kr)

은 충격흡수 장치 대신 고무패드 등의 재료를 사용하고 있다. 반면, Y. Sato et al.은 선형구동기로 이루어진 모델을 통해 뽀뽀기 로봇의 충격감소에 대한 연구를 하였다[16]. 착지 직후 위치제어와 토크제어를 적절하게 전환하여 충격력을 감소시켰다. 그러나 단순한 모델을 통한 시뮬레이션 검증만 하였기 때문에 실제 로봇에 대한 타당성은 확인하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 그림 1과 같이 휴머노이드 로봇의 다리 형태를 갖는 로봇에 대해 공중동작 구간의 문제점을 해결할 수 있는 뽀뽀기 궤적 생성방법을 제안한다. 뽀뽀기를 궤적 생성을 위해 RMC (Resolved Momentum Control)을 사용한다[11]. RMC는 로봇의 whole body motion과 걸음걸이 궤적 생성에 사용되는 방법이다. 본 논문에서는 RMC를 로봇의 뽀뽀기에 적용하여, 공중동작 시 로봇의 회전 회전을 방지하고 착지시 발생하는 충격력을 감소시키는 방법을 제안한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. II 장은 연구에 사용된 한 다리 로봇에 대해 설명하고, III 장은 한 다리 로봇의 뽀뽀기를 위한 궤적 생성 방법에 대해 설명한다. IV 장은 III 장에서 제안한 방법을 검증하기 위한 실험과 그 결과에 대해 설명한다. 마지막으로 V 장에서 이 논문에 대한 결론을 짓고 향후 연구 방향에 대해 언급한다.

II. 한 다리 로봇

그림 1은 연구에 사용된 한 다리 로봇이다. 이 로봇은 총 다섯 개의 자유도를 갖는다. 로봇의 발목과 고관절은 피치(pitch)와 롤(roll) 관절로 이루어져 각각 두 개의 자유도를 갖으며, 무릎은 한 개의 자유도를 갖는다.

다리를 완전히 폈을때 로봇의 길이는 0.98 m이며, 전체 질량은 35 kg이다. 로봇의 상체부 질량은 23 kg이고 다리부 질량은 12 kg이다. 로봇의 사양은 표 1에서 자세히 나타나있다.

각 관절의 구동기는 MAXON DC 모터 (150W와 90W)와 Harmonic Drive 감속기 (160:1과 100:1)를 조합하여 사용한다. 또한, 발바닥 위에는 지면에 가해지는 힘과 토크를 측정할 수 있는 힘/토크 센서 (-50 kgf ~ 200 kgf)가 장착되어 있으며, 이를 통해 로봇의 공중동작 구간을 확인한다.

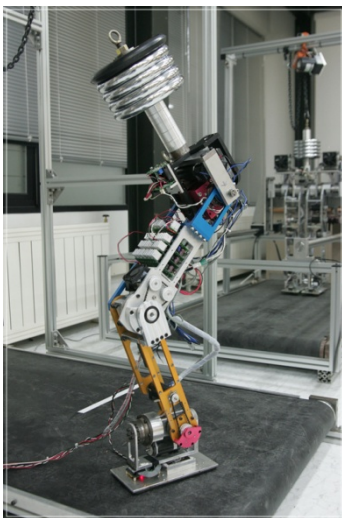


그림 1. 한 다리 로봇.
Fig. 1. A one-legged robot.

표 1. 한다리 로봇의 사양.

Table 1. Specification of the one-legged robot.

Size	Upper Body Length	0.250 m
	Upper Leg Length	0.340 m
	Lower Leg Length	0.300 m
	Total	0.890 m
Weight	Upper Body Mass	23 kg
	Hip Mass	4 kg
	Knee Mass	4 kg
	Ankle Mass	4 kg
	Total	35 kg
DOF	Hip	2 DOF
	Knee	1 DOF
	Ankle	2 DOF
	Total	5 DOF

III. 뽀뽀기 궤적 생성

한다리 로봇의 한 주기의 뽀뽀기는 세 구간으로 구분한다. 첫 번째는 뽀뽀기를 시작해서 공중에 뜨기 직전까지의 도움닫기 구간이다. 이 구간에서 로봇의 뛰는 높이와 수평방향의 이동속도가 정해진다. 두 번째는 공중동작 구간이고 세 번째는 착지동작 구간이다. 이 두 구간동안 로봇은 착지와 다음 단계의 뽀뽀기를 준비한다. 다리의 길이를 원상태로 복귀시키는 시점을 조절하여 착지 시 발생하는 충격력을 감소시키도록 한다.

뽀뽀기를 위한 로봇 관절의 궤적을 생성하기 위해, 직교 좌표계(cartesian coordinates)에서 질량중심(center of mass)의 뽀뽀기 목표 궤적을 생성하고 RMC 이용하여 질량중심의 목표 궤적에 대한 각 관절의 목표 궤적을 얻는다. 직교 좌표계에서 질량중심의 목표 궤적은 질량중심의 선형운동량과 각운동량의 목표 궤적을 설정하여 생성한다. 3차원 공간에서 총 6개의 운동량 목표 궤적을 설정할 수 있다. 본 논문의 로봇은 Yaw 방향에 대한 회전 설정이 불가능하기 때문에 총 5개의 운동량 목표 궤적을 설정한다. 식 (1)은 질량중심의 운동량 목표 궤적과 각 관절의 각속도 목표 궤적의 관계식을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{ap}^D(t) \\ \dot{\theta}_{ar}^D(t) \\ \dot{\theta}_{knee}^D(t) \\ \dot{\theta}_{hp}^D(t) \\ \dot{\theta}_{hr}^D(t) \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} L_x^D(t) \\ L_y^D(t) \\ L_z^D(t) \\ H_x^D(t) \\ H_y^D(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 x, y, z 축은 각각 로봇의 전진방향, 측면방향, 수직방향을 의미한다. 또한, L_x, L_y, L_z 는 선형운동량을, H_x 와 H_y 는 각운동량을 의미한다. $\dot{\theta}_{ap}, \dot{\theta}_{ar}, \dot{\theta}_{knee}, \dot{\theta}_{hp}, \dot{\theta}_{hr}$ 은 각각 발목 피치 관절, 발목 롤 관절, 무릎 관절, 힙 피치 관절, 힙 롤 관절의 각속도를 나타낸다. 그리고 윗첨자 D는 목표궤적을 의미한다. 마지막으로 M은 운동량과 관절의 각속도의 관계를 나타내는 행렬이다. 이에 대한 자세한 내용은 Appendix에서 언급한다.

역기구학을 통한 관절의 각도 궤적의 계산은 복잡하고 계산량이 많은 단점이 있다. 하지만, 식 (1)을 통한 운동량과 관절의 각속도 궤적의 계산은 역행렬 연산을 통해 쉽고 빠르게 계산할 수 있다. 최종적으로 식 (1)의 각속도 궤적을 적분하여 각 관절의 목표 각도 궤적을 생성한다.

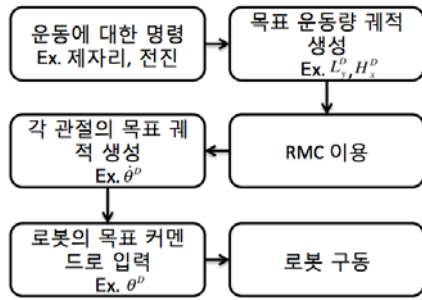


그림 2. 뿔뿔기 궤적 생성에 대한 흐름도.
Fig. 2. Flow chart for generating hopping pattern.

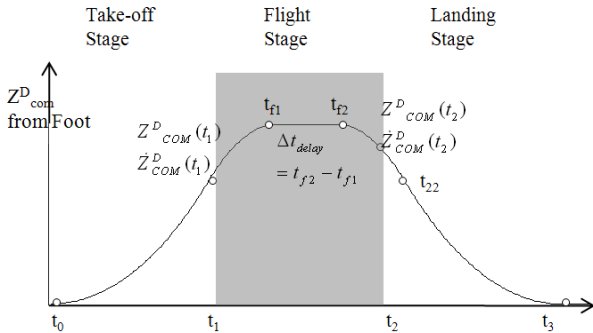


그림 3. 한주기 동안 질량중심의 수직방향 궤적.
Fig. 3. z-directional trajectory of CoM during a period.

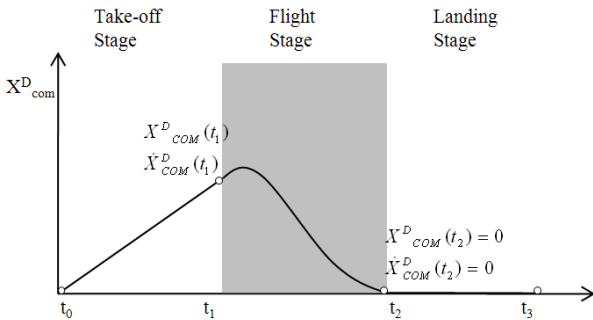


그림 4. 한주기 동안 질량중심의 전진방향 궤적.
Fig. 4. x-directional trajectory of CoM during a period.

도움닫기, 공중동작, 그리고 착지동작 과정에서 질량중심에 대한 각운동량과 선운동량 목표 궤적 생성방법에 대해 다음절에 자세히 설명할 것이다. 그림 3과 그림 4는 본 연구에서 제안한 방법을 통해 생성한 한주기 동안의 로봇 뿔뿔기를 위한 질량중심의 목표 궤적을 나타낸다. 그림 3은 z축에 대한 궤적을 나타내며 그림 4는 x축에 대한 궤적을 나타낸다. 각 그림의 기호와 설명은 다음절에 자세히 설명할 것이다.

1. 목표 운동량 궤적: 도움닫기 구간

도움닫기 구간은 뿔뿔기를 시작하는 시점부터 로봇이 공중에 뛰어오르기 직전까지의 구간이며, 공중동작 구간에서의 로봇의 움직임에 영향을 미친다.

공중동작 구간의 질량중심의 각운동량은 로봇의 회전을 유발한다. 이 회전은 로봇이 지면에 대해 기울어진 상태로 착지하도록 하여 시스템을 불안정하게 한다. 따라서 도움닫기 구간동안 질량중심에 대한 각운동량 목표 궤적을 항상 0

이 되도록 설정한다.

$$\begin{aligned} H_x^D(t) &= 0 \\ H_y^D(t) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

질량중심에 대한 선형 운동량은 로봇의 선형 움직임에 영향을 미친다. 뛰어오르는 순간의 z축 방향의 속도는 로봇의 공중동작 시간을 결정하며, 수평방향 (x축, y축)의 속도는 수평방향의 이동거리를 결정한다.

z축 방향의 질량중심의 궤적은 편의상 2차 다항식으로 구성한다. 이 함수는 위치와 속도의 연속성을 보장하며 뛰어오르는 시점의 가속도를 원하는 값으로 설정할 수 있다. 로봇의 도움닫기 구간을 시간 t_0 부터 t_1 사이라고 정의하고, 도움닫기 동안의 가속도는 $a_{takeoff}$, 로봇이 뛰어오르는 순간의 속도는 $v_{z,takeoff}$ 로 정의하면, z축 방향의 질량중심의 궤적은 다음과 같다.

- 도움닫기 구간 ($t_0 \leq t < t_1$)

$$Z_{COM}^D(t) = \frac{1}{2} a_{takeoff} t^2 + Z_{COM}^{init} \quad (3)$$

$$\dot{Z}_{COM}^D(t) = a_{takeoff} t \quad (4)$$

도움닫기 동안의 가속도와 뛰어오르는 순간의 속도를 독립변수로 설정하면, t_1 은 그에 대한 종속변수가 되며 그 값은 다음과 같다.

$$t_1 = \frac{v_{z,takeoff}}{a_{takeoff}} + t_0$$

$a_{takeoff}$ 을 조절하여 로봇의 도움닫기 시간을 조절할 수 있다. 도움닫기 시간이 짧으면 로봇의 구동기에 걸리는 부하가 크기때문에 상황에 맞게 $a_{takeoff}$ 를 설정해야한다.

식 (4)를 이용하여, z축 방향의 질량중심의 목표 선형운동량 궤적을 다음과 같이 계산한다.

- 도움닫기 구간 ($t_0 \leq t < t_1$)

$$L_z^D(t) = m_{total} \dot{Z}_{COM}^D(t) \quad (5)$$

여기서 m_{total} 은 로봇의 전체 질량을 나타낸다.

마찬가지로 수평방향에 대한 목표 선형운동량 궤적을 생성하여 로봇의 수평운동을 구현할 수 있다. 다양한 형태의 선형운동량 궤적을 만들수 있으나 수평방향의 속도를 상수로 고정하여 간단한 형태의 선형운동량 궤적을 생성한다.

- 도움닫기 구간 ($t_0 \leq t < t_1$)

$$L_x^D(t) = m_{total} \dot{X}_{COM}^D \text{ (상수)} \quad (6)$$

$$L_y^D(t) = m_{total} \dot{Y}_{COM}^D \text{ (상수)} \quad (7)$$

전체질량과 속도궤적을 이용하여 선형운동량의 궤적을 쉽게 계산할 수 있기 때문에, 공중동작구간과 착지동작구간에서는 편의상 속도궤적만을 언급할 것이다.

2. 목표 운동량 궤적: 공중동작 구간

반복적인 뿔뿔기 동작을 위해 한주기의 운동이 끝날 때의 로봇의 질량중심은 초기의 상태와 동일한 값을 갖아야 한다. 로봇의 수평방향 뿔뿔기를 구현하기 위해 뛰어오르는 순간

수평방향의 속도가 필요하였다. 이를 위해 도움닫기 구간동안 질량중심의 수평방향으로의 움직임은 불가피하다. 따라서, 반복적인 궤적을 위해 공중동작 구간동안 로봇의 질량중심이 수평방향에서 초기상태에 위치하도록 궤적을 생성한다. 공중동작 구간에서 로봇의 선형운동량은 변화가 없으므로 이 구간동안 질량중심을 수평방향으로 원위치 시킨다.

도움닫기 구간이 끝나는 순간의 질량중심의 위치와 속도를 알고 있고 공중동작 구간이 끝나는 순간의 위치와 속도를 알고 있기 때문에, 수평방향 궤적은 3차 이상의 다항식으로 표현이 가능하다. 편의상 3차 다항식으로 수평방향 궤적, X_{COM}^D 과 Y_{COM}^D ,을 생성한다. 로봇의 공중동작 구간을 시간 t_1 부터 t_2 사이라고 정의한다.

- 공중동작 구간 ($t_1 \leq t < t_2$)

$$X_{COM}^D(t) = b_1(t - t_1)^3 + b_2(t - t_1)^2 + b_3(t - t_1) + b_4 \quad (8)$$

$$\dot{X}_{COM}^D(t) = 3b_1(t - t_1)^2 + 2b_2(t - t_1) + b_3 \quad (9)$$

$$Y_{COM}^D(t) = c_1(t - t_1)^3 + c_2(t - t_1)^2 + c_3(t - t_1) + c_4 \quad (10)$$

$$\dot{Y}_{COM}^D(t) = 3c_1(t - t_1)^2 + 2c_2(t - t_1) + c_3 \quad (11)$$

여기서

$$b_4 = X_{COM}^D(t_1)$$

$$b_3 = \dot{X}_{COM}^D(t_1)$$

$$b_1 = \frac{b_3(t_2 - t_1) + 2b_4}{(t_2 - t_1)^3}$$

$$b_2 = \frac{-(3b_1(t_2 - t_1)^2 + b_3)}{2(t_2 - t_1)}$$

$$c_4 = Y_{COM}^D(t_1)$$

$$c_3 = \dot{Y}_{COM}^D(t_1)$$

$$c_1 = \frac{c_3(t_2 - t_1) + 2c_4}{(t_2 - t_1)^3}$$

$$c_2 = \frac{-(3c_1(t_2 - t_1)^2 + c_3)}{2(t_2 - t_1)}$$

그리고 t_2 는 $v_{z_takeoff}$ 에 종속되는 값이며, 그 값은 다음과 같다.

$$t_2 = \frac{2v_{z_takeoff}}{g} + t_1$$

도움닫기 구간동안 로봇의 다리 길이는 늘어나며, 이는 공중동작과 착지동작을 거쳐 원상태로 줄어든다. 공중동작 구간 중 다리가 최대로 늘어났을 때의 시간을 t_{st} 라고 정의한다. 공중동작 시작 후 t_{st} 까지의 z축에 대한 질량중심의 궤적은 다음과 같이 2차 다항식으로 생성한다.

- 공중동작 구간 ($t_1 \leq t < t_{st} = t_{f1}$)

$$Z_{COM}^D(t) = -\frac{1}{2}a_{fly}(t - t_1)^2 + v_{z_takeoff}(t - t_1) + Z_{COM}^D(t_1) \quad (12)$$

$$\dot{Z}_{COM}^D(t) = -a_{fly}(t - t_1) + v_{z_takeoff} \quad (13)$$

여기서 t_{st} 는 종속변수이며 그 값은 다음과 같다.

$$t_{st} = \frac{v_{z_takeoff}}{a_{fly}} + t_1$$

로봇이 지면에 착지해 있을 때 로봇에 의해 지면에 가해지는 힘은 0보다 크므로, 로봇이 공중에 뜨는 순간 질량중심의 z축에 대한 가속도와 중력가속도는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$m_{total}\ddot{Z}_{COM} + m_{total}g = F_z \leq 0 \\ \therefore \ddot{Z}_{COM} \leq -g = -9.81 \quad (14)$$

따라서 a_{fly} 는 식 (14)에 의해 다음 조건을 만족해야 한다.

$$a_{fly} \geq g$$

편의상 도움닫기를 위해 다리를 펴는 궤적과 다리를 원상태로 돌리기 위해 다리를 오므리는 궤적이 대칭이 되도록 한다. 이에 대한 설명은 착지동작 궤적생성에서 자세히 설명한다.

한편, z축의 목표 궤적만을 이용하여 착지시 발생하는 충격력을 줄일 수 있다. 직관적으로, 로봇이 지면에 착지하는 순간 다리가 오므라들면 충격력이 감소된다. 다리를 펴는 궤적과 다리를 오므리는 궤적이 대칭이 되도록 설정하였으므로, 다리를 펴고 오므리는 궤적 사이에 다리의 길이를 일정하게 유지하는 시간(Δt_{delay})을 조절하여 착지하는 순간의 충격력을 감소시킨다. 실험적으로 적절한 Δt_{delay} 를 찾는다. Δt_{delay} 구간 동안 z축의 목표 궤적은 다음과 같다.

- 공중동작 구간 ($t_{st} \leq t < t_{st} + \Delta t_{delay} = t_{f2}$)

$$\dot{Z}_{COM}^D(t) = 0 \quad (15)$$

질량중심에 대한 목표 각운동량 궤적은 도움닫기 구간과 동일하게 식 (2)를 이용한다.

3. 목표 운동량 궤적: 착지동작 구간

착지동작 구간의 역할은 반복적인 뒹꾸기를 위해 질량중심을 초기상태로 원위치 시키는 것이다. 다리를 펴는 궤적과 다리를 오므리는 궤적을 대칭으로 설정하였으므로 착지동작 구간의 z축에 대한 질량중심의 목표 궤적은 다음과 같다.

- 착지동작 구간 ($t_{f2} \leq t < t_{22}$)

$$Z_{COM}^D(t) = -\frac{1}{2}a_{fly}(t - t_{f2})^2 + Z_{COM}^D(t_{f2}) \quad (16)$$

$$\dot{Z}_{COM}^D(t) = -a_{fly}(t - t_{f2}) \quad (17)$$

- 착지동작 구간 ($t_{22} \leq t < t_3$)

$$Z_{COM}^D(t) = \frac{1}{2}a_{takeoff}(t - t_{22})^2 - \dot{Z}_{COM}^D(t_{22})(t - t_{22}) + Z_{COM}^D(t_{22}) \quad (18)$$

$$\dot{Z}_{COM}^D(t) = a_{takeoff}(t - t_{22}) - \dot{Z}_{COM}^D(t_{22}) \quad (19)$$

또한, 수평방향의 움직임에 대해 공중동작 구간동안 질량중심을 원위치 하였으므로 착지동작 구간은 다음과 같이 움직임이 없도록한다.

- 착지동작 구간 ($t_2 \leq t < t_3$)

$$\dot{X}_{COM}^D(t) = 0 \quad (20)$$

$$\dot{Y}_{COM}^D(t) = 0 \quad (21)$$

앞과 마찬가지로 질량중심에 대한 목표 각운동량 궤적은 식 (2)로 설정한다.

IV. 실험

앞에서 설명한 뽀뽀기 궤적과 실제 로봇을 통해 실험을 수행하였다. Z축 방향의 궤적을 생성하기 위해 $a_{takeoff}$ 는 4 m/s^2 , a_{fly} 는 9.8 m/s^2 , 그리고 $v_{z,takeoff}$ 는 0.3 m/s 로 설정하였다. 로봇의 제자리 뽀뽀기를 위해 수평방향으로의 선형운동량, L_x^D 와 L_y^D 은 0으로 설정하였다. 그림 5는 이에 대한 실험 결과를 나타낸다. 법선방향의 힘이 0이면 로봇이 공중동작 중임을 의미한다.

$v_{z,takeoff}$ 가 0.3 m/s 이므로 이론적으로 공중동작 시간은 약 61 msec 가 되어야 하며, 그림 5에 보여지듯이 로봇은 실제로도 약 60 msec 동안 공중동작을 하였다. 로봇 구동기의 하드웨어 성능상 더 오랜시간의 공중동작을 구현하지 못했다. 이는 지속적인 연구를 통해 해결해야할 부분이다.

Δt_{delay} 를 40 msec 로 설정하였을 때, 충격력이 효과적으로 감소되었다. Δt_{delay} 가 0을 경우, 착지 직후의 충격력은 약 950 N 이며 이는 자체 하중의 2.78배 정도 된다. 그러나 Δt_{delay} 를 40 msec 로 설정하면 충격력은 약 700 N 으로 감소되었다. 이는 충격력이 약 36% 정도 감소된 효과이다. 실험에서도 확인하였듯이, 로봇의 뽀뽀기 궤적을 조절함으로써 착지시 발생하는 충격력을 감소시켰다.

앞에서 설정한 변수들을 통해, 로봇의 연속적인 뽀뽀기를 구현할 수 있었다. 그림 6은 그에 대한 실험 결과를 나타낸다. 뽀뽀기의 주기는 0.33 초 이다. 로봇이 뛰는 동안 지면에 작용하는 힘은 균일한 모습의 그래프를 보이며, 로봇의 공중동작 시간 또한 일정하게 나타난다. 제안한 궤적 생성방법을 통해 로봇의 연속적인 뽀뽀기 구현이 가능함을 확인할 수 있다.

그림 7은 로봇의 제자리 뽀뽀기의 연속적인 사진들이다. 세번째 그림에서 로봇이 공중에 뜬 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 8은 로봇의 전진방향 뽀뽀기의 연속적인 사진을 보여준다. 각 사진은 연속적인 뽀뽀기가 이루어질 때 뽀뽀기 한주기가 끝났을 때 로봇의 발의 위치를 보여준다. 매 뽀뽀기 마다 로봇의 착지점이 앞으로 이동함을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서 한다리 로봇의 뽀뽀기 궤적 생성 방법에 대해 제안하였다. 한 주기동안의 궤적은 미리 설정된 질량중심의 선형운동량과 각운동량 궤적을 통해 생성된다. 각 관절의 궤적은 식 (1)의 RMC를 이용하여 계산하였다.

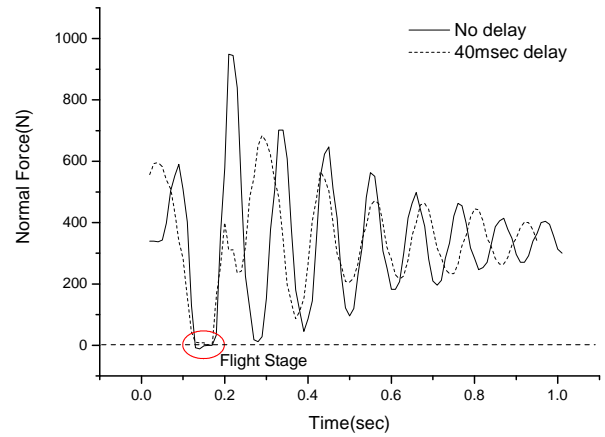


그림 5. 충격력 감소에 대한 실험 결과. 충격력이 약 36% 정도 감소됨.

Fig. 5. Experimental result for reducing impact force: the impact force is reduced about 36%.

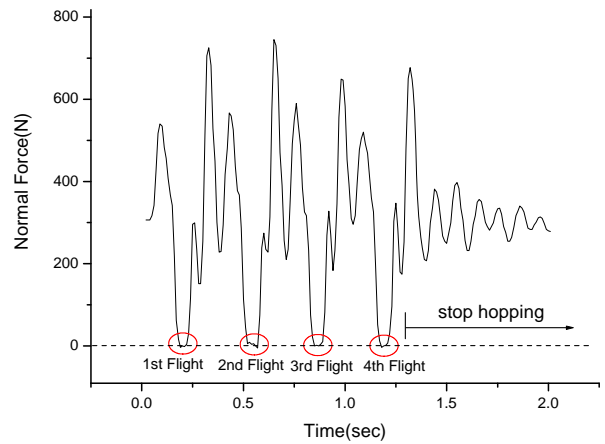


그림 6. 연속적인 뽀뽀기의 실험결과.

Fig. 6. Experimental result for successive hopping.

본 논문에서 제안한 궤적 생성방법을 통해 로봇은 제자리 뽀뽀기 뿐만 아니라 원하는 방향으로의 연속적인 뽀뽀기 구현이 가능함을 확인하였다. 하지만, 하드웨어의 한계로 인해 뛰는 높이나 수평방향으로의 이동속도의 제한은 앞으로 해결해야할 문제이다.

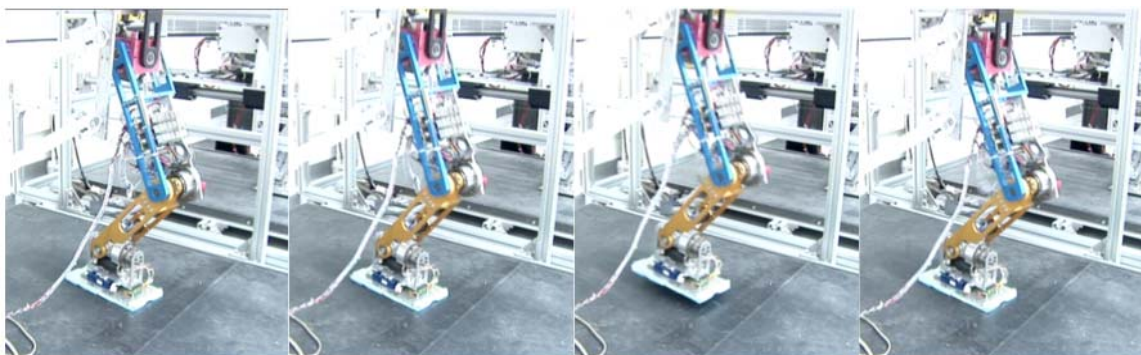


그림 7. 로봇의 제자리 뛰기의 연속사진. 세번째 그림에서 로봇의 공중동작을 확인할 수 있다.

Fig. 7. Snap shot of hopping. The robot is flying in the third picture.

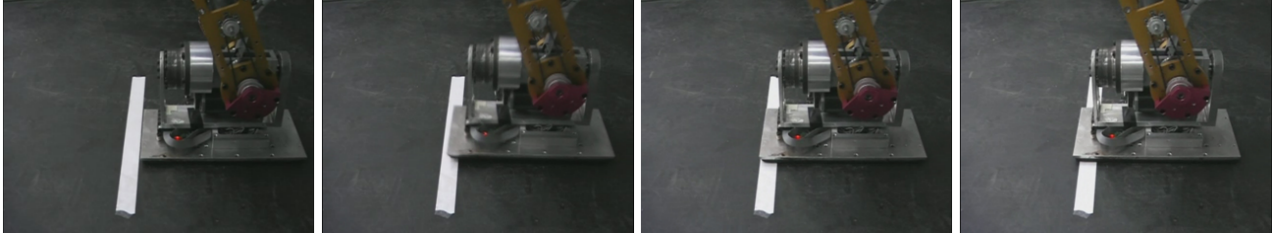


그림 8. 로봇의 전진방향 뿔뛰기: 각 그림은 연속적인 뿔뛰기가 이루어질때 뿔뛰기 한주기가 끝났을때 로봇 발의 위치를 나타낸다. 전진함을 확인할 수 있다.

Fig. 8. Hopping forward: Each picture shows the final position of each hopping. The foot moves forward.

또한, 제안한 방법을 통해 착지시 발생하는 충격력을 흡수하는 하드웨어 장치를 사용하지 않고 뿔뛰기 궤적만을 이용하여 로봇의 충격력을 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 뿔뛰기 궤적 생성 방법은 한 다리 로봇의 뿔뛰기 운동 뿐만 아니라 이족 휴머노이드 로봇의 달리기 운동에도 적용 가능할 것이다. 또한, 더 효율적이고 성능이 향상된 뿔뛰기 구현을 위해, 로봇의 하드웨어 성능 향상과 높이 및 수평방향의 위치 제어 알고리즘 개발이 필요하다.

APPENDIX

식 (1)의 M 은 다음과 같은 관계식에 의해 구해진다.

$$\begin{bmatrix} L_x^D(t) \\ L_y^D(t) \\ L_z^D(t) \\ H_x^D(t) \\ H_y^D(t) \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{ankle,pitch}^D(t) \\ \dot{\theta}_{ankle,roll}^D(t) \\ \dot{\theta}_{knee}^D(t) \\ \dot{\theta}_{hip,pitch}^D(t) \\ \dot{\theta}_{hip,roll}^D(t) \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

식 (A.1)의 좌변의 목표 운동량 항은 다음과 같이 발목, 무릎, 고관절, 그리고 상체 부분의 목표 속도값으로 표현된다.

$$\begin{aligned} L_x^D(t) &= m_{ankle}v_{x,ankle}^D + m_{knee}v_{x,knee}^D + m_{hip}v_{x,hip}^D \\ &\quad + m_{upper}v_{x,upper}^D \\ L_y^D(t) &= m_{ankle}v_{y,ankle}^D + m_{knee}v_{y,knee}^D + m_{hip}v_{y,hip}^D \\ &\quad + m_{upper}v_{y,upper}^D \\ L_z^D(t) &= m_{ankle}v_{z,ankle}^D + m_{knee}v_{z,knee}^D + m_{hip}v_{z,hip}^D \\ &\quad + m_{upper}v_{z,upper}^D \\ H_x^D(t) &= m_{ankle}(rc_{y,ankle}v_{z,ankle}^D - rc_{z,ankle}v_{y,ankle}^D) \\ &\quad + m_{knee}(rc_{y,knee}v_{z,knee}^D - rc_{z,knee}v_{y,knee}^D) \\ &\quad + m_{hip}(rc_{y,hip}v_{z,hip}^D - rc_{z,hip}v_{y,hip}^D) \\ &\quad + m_{upper}(rc_{y,upper}v_{z,upper}^D - rc_{z,upper}v_{y,upper}^D) \\ H_y^D(t) &= m_{ankle}(rc_{x,ankle}v_{z,ankle}^D - rc_{z,ankle}v_{x,ankle}^D) \\ &\quad + m_{knee}(rc_{x,knee}v_{z,knee}^D - rc_{z,knee}v_{x,knee}^D) \\ &\quad + m_{hip}(rc_{x,hip}v_{z,hip}^D - rc_{z,hip}v_{x,hip}^D) \\ &\quad + m_{upper}(rc_{x,upper}v_{z,upper}^D - rc_{z,upper}v_{x,upper}^D) \end{aligned} \quad (A.2)$$

식 (A.2)의 각 부분의 목표 속도값은 각 관절의 각도와 각 속도로 표현된다.

$$\begin{aligned} v_{x,ankle}^D &= 0 \\ v_{y,ankle}^D &= 0 \\ v_{z,ankle}^D &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{x,knee}^D &= l_1 \cos\theta_1 \dot{\theta}_{ap}^D \\ v_{y,knee}^D &= l_1 (\sin\theta_{ap} \sin\theta_{ar} \dot{\theta}_{ap}^D - \cos\theta_{ap} \cos\theta_{ar} \dot{\theta}_{ar}^D) \\ v_{z,knee}^D &= -l_1 (\sin\theta_{ap} \cos\theta_{ar} \dot{\theta}_{ap}^D + \cos\theta_{ap} \sin\theta_{ar} \dot{\theta}_{ar}^D) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{x,hip}^D &= l_1 \cos\theta_1 \dot{\theta}_{ap}^D + l_2 \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee}) (\dot{\theta}_{ap}^D + \dot{\theta}_{knee}^D) \\ v_{y,hip}^D &= l_1 (\sin\theta_{ap} \sin\theta_{ar} \dot{\theta}_{ap}^D - \cos\theta_{ap} \cos\theta_{ar} \dot{\theta}_{ar}^D) \\ &\quad - l_2 (\cos\theta_{ar} \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee}) \dot{\theta}_{ar}^D \\ &\quad - \sin\theta_{ar} \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee}) (\dot{\theta}_{ap}^D + \dot{\theta}_{knee}^D)) \\ v_{z,hip}^D &= -l_1 (\sin\theta_{ap} \cos\theta_{ar} \dot{\theta}_{ap}^D + \cos\theta_{ap} \sin\theta_{ar} \dot{\theta}_{ar}^D) \\ &\quad - l_2 (\sin\theta_{ar} \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee}) \dot{\theta}_{ar}^D \\ &\quad - \cos\theta_{ar} \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee}) (\dot{\theta}_{ap}^D + \dot{\theta}_{knee}^D)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{x,upper}^D &= l_1 \cos\theta_1 \dot{\theta}_{ap}^D + l_2 \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee}) (\dot{\theta}_{ap}^D + \dot{\theta}_{knee}^D) \\ &\quad + l_3 \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee} \\ &\quad + \theta_{hp}) (\cos\theta_{hr}) (\dot{\theta}_{ap}^D + \dot{\theta}_{knee}^D + \dot{\theta}_{hp}^D) \\ &\quad - l_3 \sin\theta_{hr} \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee} + \theta_{hp}) \dot{\theta}_{hr}^D \\ v_{y,upper}^D &= l_1 (\sin\theta_{ap} \sin\theta_{ar} \dot{\theta}_{ap}^D - \cos\theta_{ap} \cos\theta_{ar} \dot{\theta}_{ar}^D) \\ &\quad - l_2 (\cos\theta_{ar} \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee}) \dot{\theta}_{ar}^D \\ &\quad - \sin\theta_{ar} \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee}) (\dot{\theta}_{ap}^D + \dot{\theta}_{knee}^D)) \\ &\quad + l_3 \sin\theta_{ar} \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee} \\ &\quad + \theta_{hp}) (\cos\theta_{hr}) (\dot{\theta}_{ap}^D + \dot{\theta}_{knee}^D + \dot{\theta}_{hp}^D) \\ &\quad + \sin\theta_{hr} \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee} + \theta_{hp}) \dot{\theta}_{hr}^D \\ &\quad - l_3 (\cos\theta_{ar} \cos\theta_{hr} \\ &\quad - \sin\theta_{ar} \sin\theta_{hr} \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee} + \theta_{hp})) (\dot{\theta}_{hr}^D \\ &\quad + \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee} + \theta_{hp}) \dot{\theta}_{ar}^D) \\ v_{z,upper}^D &= -l_1 (\sin\theta_{ap} \cos\theta_{ar} \dot{\theta}_{ap}^D + \cos\theta_{ap} \sin\theta_{ar} \dot{\theta}_{ar}^D) \\ &\quad - l_2 (\sin\theta_{ar} \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee}) \dot{\theta}_{ar}^D \\ &\quad - \cos\theta_{ar} \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee}) (\dot{\theta}_{ap}^D + \dot{\theta}_{knee}^D)) \\ &\quad - l_3 \cos\theta_{ar} \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee} \\ &\quad + \theta_{hp}) (\cos\theta_{hr}) (\dot{\theta}_{ap}^D + \dot{\theta}_{knee}^D + \dot{\theta}_{hp}^D) \\ &\quad + \sin\theta_{hr} \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee} + \theta_{hp}) \dot{\theta}_{hr}^D \\ &\quad - l_3 (\sin\theta_{ar} \cos\theta_{hr} \\ &\quad + \cos\theta_{ar} \sin\theta_{hr} \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee} + \theta_{hp})) (\dot{\theta}_{hr}^D \\ &\quad + \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee} + \theta_{hp}) \dot{\theta}_{ar}^D) \end{aligned}$$

또한, 식 (A.2)의 rc 항은 다음의 식에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} rc_{x,ankle} &= r_{x,ankle} - r_{x,com} \\ rc_{y,ankle} &= r_{y,ankle} - r_{y,com} \end{aligned}$$

$$r_{Cz,ankle} = r_{z,ankle} - r_{z,com}$$

$$r_{Cx,knee} = r_{x,knee} - r_{x,com}$$

$$r_{Cy,knee} = r_{y,knee} - r_{y,com}$$

$$r_{Cz,knee} = r_{z,knee} - r_{z,com}$$

$$r_{Cx,hip} = r_{x,hip} - r_{x,com}$$

$$r_{Cy,hip} = r_{y,hip} - r_{y,com}$$

$$r_{Cz,hip} = r_{z,hip} - r_{z,com}$$

$$r_{Cx,upper} = r_{x,upper} - r_{x,com}$$

$$r_{Cy,upper} = r_{y,upper} - r_{y,com}$$

$$r_{Cz,upper} = r_{z,upper} - r_{z,com}$$

$$r_{x,ankle} = 0$$

$$r_{y,ankle} = 0$$

$$r_{z,ankle} = 0$$

$$r_{x,knee} = l_1 \sin \theta_{ap}$$

$$r_{y,knee} = -l_1 \cos \theta_{ap} \sin \theta_{ar}$$

$$r_{z,knee} = l_1 \cos \theta_{ap} \cos \theta_{ar}$$

$$r_{x,ankle} = l_1 \sin \theta_{ap} + l_2 \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee})$$

$$r_{y,ankle} = -l_1 \cos \theta_{ap} \sin \theta_{ar} - l_2 \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee}) \sin \theta_{ar}$$

$$r_{z,ankle} = l_1 \cos \theta_{ap} \cos \theta_{ar} + l_2 \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee}) \cos \theta_{ar}$$

$$r_{x,ankle} = l_1 \sin \theta_{ap} + l_2 \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee}) + l_3 \sin(\theta_{ap} + \theta_{knee} + \theta_{hp})$$

$$r_{y,ankle} = -l_1 \cos \theta_{ap} \sin \theta_{ar} - l_2 \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee}) \sin \theta_{ar} - l_3 \cos \theta_{ar} \sin \theta_{hr}$$

$$r_{z,ankle} = l_1 \cos \theta_{ap} \cos \theta_{ar} + l_2 \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee}) \cos \theta_{ar} - l_3 \sin \theta_{ar} \sin \theta_{hr} + l_3 \cos \theta_{ar} \cos \theta_{hr} \cos(\theta_{ap} + \theta_{knee} + \theta_{hp})$$

$$r_{x,com} = \frac{m_{ankle} r_{Cx,ankle} + m_{knee} r_{Cx,knee} + m_{hip} r_{Cx,hip} + m_{upper} r_{Cx,upper}}{m_{ankle} + m_{knee} + m_{hip} + m_{upper}}$$

$$r_{y,com} = \frac{m_{ankle} r_{Cy,ankle} + m_{knee} r_{Cy,knee} + m_{hip} r_{Cy,hip} + m_{upper} r_{Cy,upper}}{m_{ankle} + m_{knee} + m_{hip} + m_{upper}}$$

$$r_{z,com} = \frac{m_{ankle} r_{Cz,ankle} + m_{knee} r_{Cz,knee} + m_{hip} r_{Cz,hip} + m_{upper} r_{Cz,upper}}{m_{ankle} + m_{knee} + m_{hip} + m_{upper}}$$

따라서 앞의 식들을 정리하면 식 (A.1)과 같이 목표 운동량과 목표 각속도값의 관계식을 구할 수 있다.

참고문헌

- [1] "The Honda humanoid robot ASIMO," [Online]. Available: <http://world.honda.com/ASIMO/>
- [2] J. Kim and J. Oh, "Walking control of the humanoid platform KHR-1 based on torque feedback control," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 623-628, Apr. 2004.
- [3] J. Kim, S. Park, I. Park, and J. Oh, "Development of humanoid robot platform KHR-2 (KAIST Humanoid Robot-2)," *Proc. of*

IEEE International Conference on Humanoid Robots, vol. 1, pp. 292-310, Nov. 2004.

- [4] J. Kim, I. Park, J. Lee, M. Kim, B.-K. Cho, and J. Oh, "System design and dynamic walking of humanoid robot KHR-2," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1431-1436, Apr. 2005.
- [5] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujowara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1620-1626, Sep. 2003.
- [6] T. Nagasaka, S. Kajita, K. Kaneko, K. Yokoi, and K. Tanie, "A running experiment of humanoid biped," *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pp.136-141, Sep. 2004.
- [7] M. H. Raibert, "Legged Robot that Balance," MIT Press, Cambridge, 1986.
- [8] M. Raibert, M. Chepponis, and H. Brown, "Experiments in balance with a 3d one-legged hopping machine," *International Journal of Robotics Research*, vol. 3, pp. 75-92, 1984.
- [9] R. Tajima and K. Suga, "Motion having a flight phase: experiments involving a one-legged robot," *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1726-1731, Oct. 2006.
- [10] J. Yamaguchi and A. Takamishi, "Multisensorfoot mechanism with shock absorbing material for dynamic biped walking adapting to unknown uneven surfaces," *Proc. of the IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System*, pp. 233-240, Dec. 1996.
- [11] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Resolved momentum control: Humanoid motion planning based on the linear and angular momentum," *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 1644-1650, Oct. 2003.
- [12] S. H. Hyon, T. Emura, and T. Mita, "Dynamics-based control of one-legged hopping robot," *Journal of Systems and Control Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 1, pp. 83-98, 2003.
- [13] M. Ahmadi and M. Buehler, "Stable control of a simulated one-legged running robot with hip and leg compliance," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 1, pp. 96-104, 1997.
- [14] M. Ahmadi and M. Buehler, "The ARL monopod II running robot: control and energetics," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 1689-1694, 1999.
- [15] E. Papadopoulos and N. Cherouvim, "On increasing energy autonomy for a one-legged hopping robot," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 5, pp. 4645-4650, Apr. 2004.
- [16] Y. Sato, E. Ohashi, and K. Ohnishi, "Impact force reduction for hopping robot," *Proc. of the IEEE 31st Annual Conference of IECON'2005*, pp. 1821-1826, Nov. 2005.
- [17] N. Fujii and K. Ohnishi, "Smooth transition method from compliance control to position control for one legged hopping robot," *Proc. of the IEEE International Conference on Industrial*

Technology, pp. 164-169, Dec. 2006.



조백규

한국과학기술원(KAIST) 기계공학과에서 2002년, 2004년, 2009년 학사, 석사, 박사. 2009년 일본 ATR (Advanced Telecommunications Research Institute International)에서 박사 후 과정. 2011년 미국 카네기 멜론 대학 Robotics Institute에서 박사 후 과정. 2011년 9월~현재 국민대학교 기계시스템공학부 조교수로 재직중. 관심분야는 로봇 설계 및 제어, 휴머노이드 로봇, 엑소스켈레톤.