

---

# 로드셀을 이용한 4족 보행로봇의 자세제어 평가

엄한성\*

Estimation of Attitude Control for Quadruped Walking Robot Using Load Cell

Han-Sung Eom\*

## 요 약

본 논문에서는 4족 보행로봇 TITAN-VIII의 모든 관절각과 로봇 본체의 자세각을 측정하여 발바닥의 위치를 추정하고 각 관절의 구동모터를 제어하였다. 네 발바닥에 로드셀을 설치하여 주기, 한주기당 이동거리와 발바닥이 들어 올려지는 높이를 변경하여 8가지 서로 다른 조건에서 보행실험을 수행하고 보행 중 발바닥에 가해지는 힘과 각 관절을 구동하는 모터의 소비전력을 구한 후 비교 분석하여 자세제어의 타당성을 평가하였다. 분석결과 새로운 주기가 시작되는 구간에서 발바닥이 지면을 늦게 떠나는 슬립현상을 확인했는데 이것은 관절각과 본체의 자세각을 측정하여 발바닥의 위치를 추정하고 보행계획을 수립하여 제어하는 것만으로 보행 중 발생하는 로봇 본체의 기울어짐과 기계적인 에러를 완벽하게 극복하지 못함을 확인했다.

## ABSTRACT

In this paper, each driving motor for leg joints on a robot is controlled by estimating the direction of the legs measuring each joint angle and attitude angle of robot. We used quadruped working robot named TITAN-VIII in order to carry out this experimental study. 4 load cells are installed under the bottom of 4 legs to measure the pressed force on each leg while it's walking. The walking experiments of the robot were performed in 8 different conditions combined with duty factor, the length of a stride, the trajectory height of the foot and walking period of robot. The validity of attitude control for quadruped walking robot is evaluated by comparing the pressed force on a leg and the power consumption of joint driving motor. As a result, it was confirmed that the slip-condition of which the foot leave the ground late at the beginning of new period of the robot during walking process, which means the attitude control of the robot during walking process wasn't perfect only by measuring joint and attitude angle for estimating the direction of the foot.

## 키워드

4족 보행로봇, TITAN-VIII, 관절각, 자세각, 로드셀

## Key word

Quadruped working robot, TITAN-VIII, Joint angle, Attitude angle, Load cell

---

\* 정회원 : 바르질라코리아(주) (hansung.eom@wartsila.com)

접수일자 : 2012. 05. 29

심사완료일자 : 2012. 06. 07

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2012.16.6.1235>

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

평탄한 지형에서의 탐사, 물건 운반 및 군사적 목적의 감시등에 바퀴나 무한궤도를 장착한 로봇을 이용하는 것이 전도 위험 없이 신속하게 이동할 수 있고 에너지 효율도 우수하지만 균일하지 않은 지형이나 계단 등의 장애물을 만났을 때 이를 회피하거나 극복하는 능력이 부족하다. 반면 관절로 구동되는 보행로봇은 이동속도가 바퀴나 무한궤도를 장착한 로봇에 비해서 느리지만 평탄한 지형뿐만 아니라 장애물 지형에서도 이를 극복하고 작업을 계속할 수 있는 능력을 가지고 있다. 그러나 균일하지 않은 지형을 보행할 때 적절한 방법으로 로봇의 무게중심 이동이나 본체의 수평을 유지하는 자세제어가 이루어지지 않으면 로봇은 더 이상 전진하지 못하고 전도될 것이다. 또한 보행로봇은 이동 중 다수의 관절을 동시에 구동해야 하므로 바퀴구동 로봇보다 많은 에너지가 필요하고 제어도 복잡하다[1-5].

저자의 선행연구[6]에서는 연구목적으로 개발된 4족 보행로봇 TITAN-VIII의 가상모델을 설계한 후, 관절각도와 본체 자세각을 가상로봇에 입력하여 실제로본과 일치화 시켰다. 입력받은 각 관절의 각도와 본체 자세각을 바탕으로 발바닥의 위치를 추정하고 보행계획을 수립하여 구동모터를 제어하였다. 디듀티(Duty factor)가 0.5일 때 주기와 보폭을 다르게 하여 보행실험을 하고 로봇의 ZMP(Zero moment point)와 무게중심 이동경로를 구한 후 그 결과를 비교분석하여 제안된 로봇 자세제어의 타당성을 평가하였다. 선행연구에서는 보행 중 로봇의 발바닥 궤적이 항상 보행계획에 의한 목표 값을 잘 추종한다고 가정하였고, 기계적인 에러는 충분히 고려되지 못했다.

본 논문에서는 4족 보행로봇 TITAN-VIII의 네 발바닥에 로드셀을 설치하여 서로 다른 8가지 조건에서 보행실험을 수행하고 보행 중 컴퓨터가 계산한 발바닥의 궤적, 발바닥에 가해지는 힘과 각 관절을 구동하는 모터의 소비전력을 측정하여 구한 실제 발바닥의 궤적을 비교분석하여 선행연구에서 구현한 자세제어의 타당성을 평가하고 향후 필요한 후속 연구방향을 제시하였다.

II. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험 장치

그림 1은 본 논문의 실험에 사용된 4족 보행 로봇 TITAN-VIII을 그림 2는 각 관절과 링크, 발바닥에 부착된 로드셀을 나타낸 것이다. 각 다리는 3자유도로 구성되어 로봇 전체는 12자유도를 가지고 있으며 각 링크의 길이는  $Link0=0.045[m]$ ,  $Link1=0.155[m]$ ,  $Link2=0.242[m]$ 이고 로드셀 측정부의 높이는  $0.04[m]$ 이다. 각 관절은 DC 모터(정격전압 30[V], 정격전류 2.6[A], 정격회전수 500[rpm], 정격토크 7.8[kg·cm])에 의해서 구동되며 네 개의 로드셀을 포함한 로봇 전체 무게는 22.0[kg]이다.

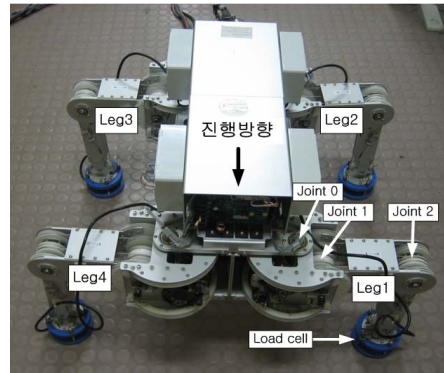


그림 1. 4족보행 로봇 TITAN-VIII의 사진  
Fig. 1 Photograph of quadruped walking robot TITAN-VIII

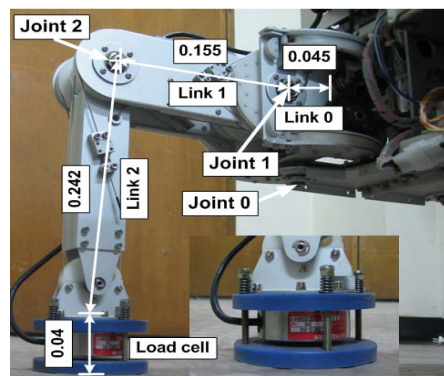


그림 2. 4족보행 로봇의 관절과 로드셀  
Fig. 2 Photograph of quadruped walking robot joint, link and load cell

표 1. 로드셀 사양  
Table. 1 Specifications of the load cell

Model	CBES(BONGSHIN)
Rated capacity	50[kgf]
Rated output	2.0[mV] $\pm$ 0.25[%]
Hysteresis	$\leq$ 0.1[%]Rated output
Zero balance	$\leq$ 1.0[%]Rated output
Signal transmitter input	2.0[mV]
Signal transmitter output	0~10[V]

표 2. 실험조건  
Table. 2 Experimental conditions

Walk environment	Plane
Transfer path	Straight
Gate	Trot
Duty factor	0.5
Period	1.5, 2.0[sec]
Stride length	0.2, 0.3[m]
Foot trajectory height	0.1, 0.15[m]

## 2.2. 실험 방법 및 조건

로봇의 이동속도가 일정하게 주기적으로 반복되는 주기 걸음새(Period gait) 형태의 Trot보행방법으로 보행 실험을 수행하고 로봇 본체의 자세각과 각 관절을 구동하는 모터의 소비전력 및 발바닥에 가해지는 힘을 측정하여 그 결과를 분석하였다.

본체의 중심에 설치한 3D 모션 센서로부터 보행 중 로봇 본체의 자세각 변화를 구했고 각 관절을 구동하는 12개 DC 모터의 전압과 전류를 계측하여 소비전력을 구했으며 네발에 설치된 로드셀에서 각각의 발바닥에 가해지는 힘을 10[ms]마다 A/D보드를 통해 컴퓨터로 입력받아 분석할 데이터를 수집하였다.

표 2는 실험조건을 나타낸 것으로 디딤울은 0.5로 일정하게 하고 한주기당 이동거리 L이 0.2, 0.3[m], 발바닥이 들어 올려지는 높이 H가 0.1, 0.15[m]일 때 주기 T를 1.5, 2.0[sec]로 변경하여 서로 다른 8가지 조건으로 보행하면서 로봇 본체의 자세각, 구동모터의 소비전력과 발

바닥에 가해지는 힘을 측정하였다. 주기 T를 1.5, 2.0[sec]로 한 것은 저자의 선행연구[7]에서 에너지 효율이 가장 좋았기 때문이다.

## III. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 한주기당 이동거리 L이 0.2, 0.3[m], 발바닥이 들어 올려지는 높이 H가 0.1, 0.15[m]일 때 주기 T 1.5, 2.0[sec]에서 보행 중 한 주기 동안 Leg1의 각 관절을 구동하는 모터에서 계측된 소비전력 변화와 Leg1을 제어하기 위해서 컴퓨터가 계산한 발바닥 목표 높이(Target foot height)를 나타낸 것이다.

(a)는 주기 T=1.5[sec]에서 한주기당 이동거리 L=0.2[m], 발바닥 들어 올려지는 높이 H=0.1[m] 일 때를 나타낸 것으로 처음 반주기 0.75[sec]까지는 발을 들어 올려서 로봇 본체가 전진 이동하는 구간이며 다음 반주기 1.5[sec]까지는 발바닥이 지면을 접촉하며 로봇 본체의 수평을 유지하기 위해서 ZMP를 이동시키는 지지구간이다. 세 개의 관절은 연동 적으로 움직이지만 Joint 0은 본체를 전진 시키는 동작, Joint 1은 본체 전진을 위해서 발바닥을 들어 올린 후 지면을 지지하기 위해서 다시 내리는 동작, Joint 2는 ZMP를 이동시키는 동작에 직접적으로 기여한다. 계측된 관절구동 모터의 소비전력과 컴퓨터가 계산한 발바닥 목표 높이를 서로 비교한 결과 처음 반주기 동안 Leg1의 전진이동이 정확하게 이루어지고 있으며 0.75[sec]이전에 발바닥을 정확히 지면에 다시 접지시킨 후 다음 반주기 동안 ZMP를 이동시키는 동작을 위해서 Leg1의 모든 관절의 제어가 적절하게 수행된다고 평가할 수 있다.

(b)는 이동거리 L=0.3[m], 발바닥 높이 H=0.15[m]일 때를 나타낸 것으로 시간경과에 따른 각관절의 제어가 (a)와 같이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 특히, (a)와 비교해서 Joint 1의 전력소모가 많은 것은 발바닥을 0.05[m] 더 들어올리기 위함이다.

(c)와 (d)는 주기 T=2.0[sec]에서 한주기당 이동거리 L이 0.2, 0.3[m], 발바닥 들어 올려지는 높이 H가 0.1, 0.15[m]일 때를 나타낸 것이다. 처음 반주기 1.0[sec]까지는 전진이동 구간이고 다음 반주기 2.0[sec]까지가 지지구간이다. 1.0[sec] 이전에 발바닥을 다시 지면에 접지시키는 제어가 완료됨을 알 수 있다.

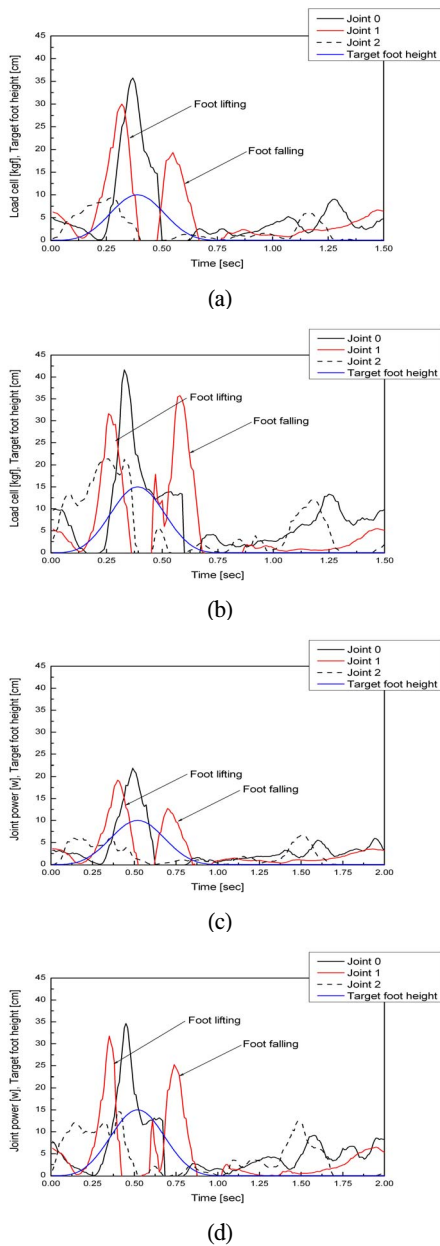


그림 3. Leg1의 각 관절 소모 전력과 발바닥 목표높이 (a)  $T=1.5[\text{sec}]$ ,  $L=0.2[\text{m}]$ ,  $H=0.1[\text{m}]$  (b)  $T=1.5[\text{sec}]$ ,  $L=0.3[\text{m}]$ ,  $H=0.15[\text{m}]$  (c)  $T=2.0[\text{sec}]$ ,  $L=0.2[\text{m}]$ ,  $H=0.1[\text{m}]$  (d)  $T=2.0[\text{sec}]$ ,  $L=0.3[\text{m}]$ ,  $H=0.15[\text{m}]$

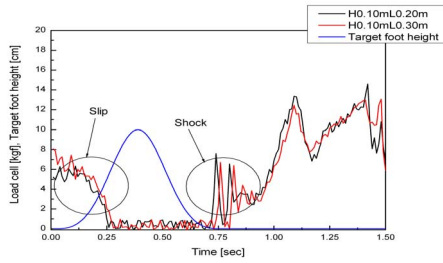
Fig. 3 Power consumption of each joints and foot target height of Leg1 (a)  $T=1.5[\text{sec}]$ ,  $L=0.2[\text{m}]$ ,  $H=0.1[\text{m}]$  (b)  $T=1.5[\text{sec}]$ ,  $L=0.3[\text{m}]$ ,  $H=0.15[\text{m}]$  (c)  $T=2.0[\text{sec}]$ ,  $L=0.2[\text{m}]$ ,  $H=0.1[\text{m}]$  (d)  $T=2.0[\text{sec}]$ ,  $L=0.3[\text{m}]$ ,  $H=0.15[\text{m}]$

그림 4는 주기  $T$ 가 1.5, 2.0[sec], 한주기당 이동거리  $L$ 이 0.2, 0.3[m], 발바닥이 들어 올려지는 높이  $H$ 가 0.1, 0.15[m]일 때 보행 중 Leg1의 발바닥에 부착한 로드셀에서 계측된 힘과 Leg1을 제어하기 위해서 컴퓨터가 계산한 발바닥 목표 높이(Target foot height)를 나타낸 것이다.

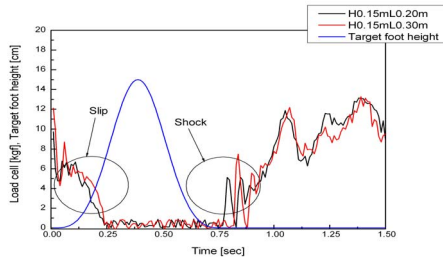
(a)와 (b)는 주기  $T=1.5[\text{sec}]$ 일 때의 실험 결과를 나타낸 것으로 로드셀에서 측정된 힘이 0[kgf] 일 때가 발바닥이 지면을 떠난 것이다. 그림 3에서 각 관절을 구동하는 모터의 소비전력을 계측한 결과는 0[sec]부터 발바닥이 들어 올려져 0.375[sec]에 최고점에 있다가 다시 내려져서 0.75[sec]에서 발바닥을 지면에 접촉시킨 후 다음 반주기동안 다리를 지지하는 것으로 관측되었다. 그러나 실제로 발바닥은 새로운 주기가 시작된 후에도 여전히 지면에 닿아서 로봇 본체의 무게를 지탱하다가 약 0.25[sec]후에서야 지면을 떠나는 슬립(Slip)이 발생함을 알 수 있다. 약 0.75[sec]에 발바닥은 지면에 접촉하여 ZMP를 이동시키는 동안 본체의 무게를 지탱하고 있으며 발바닥이 다시 접지하는 순간 충격(Shock) 형태로 힘이 전달됨을 알 수 있다.

(c)와 (d)는 주기  $T=2.0[\text{sec}]$ 일 때의 실험 결과이며 그림 3에서 각 관절을 구동하는 모터의 소비전력을 계측한 결과는 0[sec]부터 발바닥이 들어 올려져 0.5[sec]에 최고점에 있다가 다시 내려져서 1.0[sec]에서 발바닥을 접지시킨 후 다음 반주기 동안 다리를 지지하는 것으로 관측되었다. 그러나 새로운 주기가 시작된 후 약 0.3[sec]후에서야 발바닥이 지면을 떠나는 슬립현상과 1.0[sec]후 접지하는 순간 충격 형태로 힘이 전달되는 것은 주기  $T=1.5[\text{sec}]$ 에서와 동일하다.

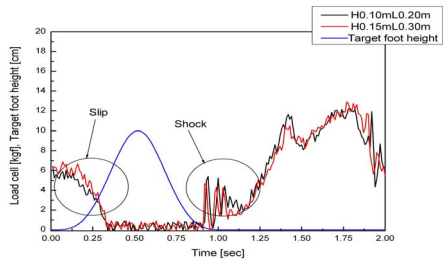
그림 3에서 관절 구동 모터의 소비전력으로 평가한 로봇 발바닥의 위치제어는 컴퓨터에서 계산된 목표위치를 잘 추종함을 확인한 것과 달리 그림 4에서 로드셀에 의해서 계측된 힘으로 평가한 실제 발바닥은 컴퓨터의 목표위치와 차이를 나타냈다. 특히, 새로운 주기가 시작되는 구간에서 발바닥이 지면을 늦게 떠나는 슬립현상을 확인했는데 이것은 관절의 각도를 피드백(Feedback)받아 발바닥의 위치를 추정하고 보행계획을 수립하여 로봇의 자세를 제어한 선행연구[6]가 지형변화 등에 적응하면서 기계적인 에러까지 완벽하게 극복하지는 못하고 있음으로 판단된다.



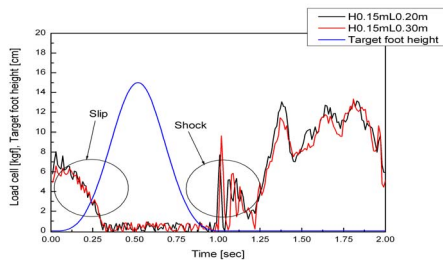
(a)



(b)

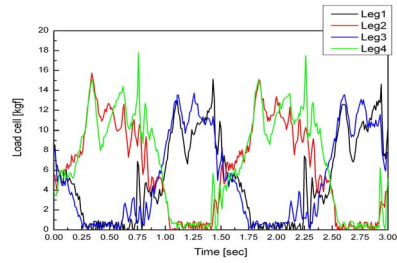


(c)

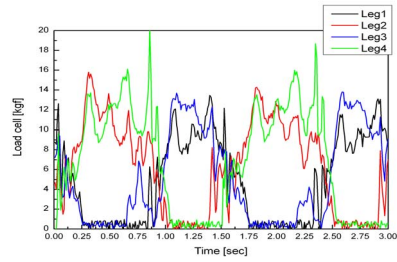


(d)

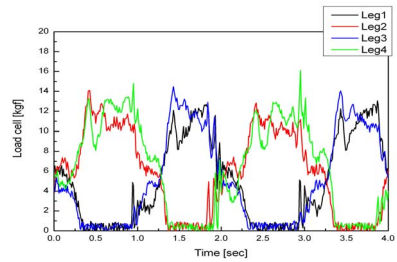
그림 4. 주기  $T=1.5$ 와  $T=2.0$ [sec]에서 Leg1 발바닥에 가해지는 힘과 목표 높이 (a)  $T=1.5$ [sec],  $H=0.1$ [m] (b)  $T=1.5$ [sec],  $H=0.15$ [m] (c)  $T=2.0$ [sec],  $H=0.1$ [m] (d)  $T=2.0$ [sec],  $H=0.15$ [m]  
 Fig. 4 Foot force and target height of Leg1 at period  $T=1.5$  and  $T=2.0$  [sec] (a)  $T=1.5$ [sec],  $H=0.1$ [m] (b)  $T=1.5$ [sec],  $H=0.15$ [m] (c)  $T=2.0$ [sec],  $H=0.1$ [m] (d)  $T=2.0$ [sec],  $H=0.15$ [m]



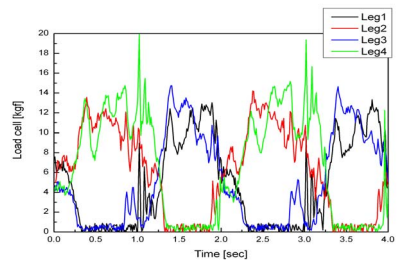
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5. 주기  $T=1.5$ 와  $T=2.0$ [sec]일 때 각 발바닥에 가해지는 힘 (a)  $T=1.5$ [sec],  $L=0.2$ [m],  $H=0.1$ [m] (b)  $T=1.5$ [sec],  $L=0.3$ [m],  $H=0.15$ [m] (c)  $T=2.0$ [sec],  $L=0.2$ [m],  $H=0.1$ [m] (d)  $T=2.0$ [sec],  $L=0.3$ [m],  $H=0.15$ [m]  
 Fig. 5 Foot force of each legs at period  $T=1.5$  and  $T=2.0$  [sec] (a)  $T=1.5$ [sec],  $L=0.2$ [m],  $H=0.1$ [m] (b)  $T=1.5$ [sec],  $L=0.3$ [m],  $H=0.15$ [m] (c)  $T=2.0$ [sec],  $L=0.2$ [m],  $H=0.1$ [m] (d)  $T=2.0$ [sec],  $L=0.3$ [m],  $H=0.15$ [m]

그림 5는 주기  $T$ 가 1.5, 2.0[sec], 한주기당 이동거리  $L$ 이 0.2, 0.3[m], 발바닥이 들어 올려지는 높이  $H$ 가 0.1, 0.15[m]일 때 보행 중 2주기 동안 네 발바닥에 부착한 로드셀에서 측정된 힘을 나타낸 것이다. 본 연구에서 디딤돌이 0.5인 Trot 보행방법으로 보행실험을 수행하였으므로 처음 반주기 동안은 Leg2와 Leg4가 지면에 접촉하고 다음 반주기 동안은 Leg1과 Leg3이 지면에 접촉한다.

(a), (b), (c), (d)의 모든 실험 조건에서 전진 방향의 뒤쪽에 위치한 Leg2와 Leg3은 지지구간 초기에 많은 힘이 가해지고 앞쪽에 위치한 Leg1과 Leg4는 지지구간 중기 이후에 힘이 많이 가해짐을 알 수 있다. 이것은 바닥면에 접촉하는 지지구간 초기에는 본체 전진을 위해서 뒷다리의 킥(Kick)이 필요하고 중기 이후에는 앞으로 전진된 본체의 무게를 지지하기 위해서 앞다리에 보다 많이 힘이 가해지기 때문이다.

모든 실험 조건에서 전진 이동구간과 지지구간이 전환되는 시점에서 네 개의 발바닥이 모두 지면에 접촉하여 바닥에 끌리는 현상을 보였는데 이것은 로봇의 유연한 움직임을 위해서 각관절의 운동방향이 전환되는 부분에서 구동모터의 가속과 감속제어를 하고 있는데 이것이 전진 이동구간과 지지구간이 새롭게 시작되는 시점에서 발바닥을 천천히 조금씩 들어 올리고 내리게 한다. 이를 위해서 로봇 본체의 자세각과 관절각을 측정하고 발바닥의 위치를 추정하여 제어하고 있으나 본체의 기울어짐, 기계적인 에러 등에 대해서 완벽하게 대응하지 못하고 있으며 또, 각 발바닥에 추가로 부착된 로드셀의 측정부위 무게 0.5[kg]에 의해서 본체의 기울어짐이 더욱 커졌기 때문에 사료된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 4족 보행로봇 TITAN-VIII의 네 발바닥에 로드셀을 설치하여 서로 다른 8가지 조건에서 보행 실험을 수행하고 보행 중 발바닥에 가해지는 힘과 각 관절을 구동하는 모터의 소비전력을 측정하여 로봇의 실제 발바닥의 위치를 추정하고 비교 분석하여 선행연구 [6]의 자세제어 타당성을 평가하였다.

각 관절 구동 모터에서 측정된 소비전력으로 평가한 로봇 발바닥의 위치제어는 컴퓨터에서 계산된 목표위

치를 잘 추종함을 확인했다.

로드셀에서 측정된 힘으로 평가한 실제 발바닥의 위치는 컴퓨터에서 계산된 목표위치와 차이를 나타냈다. 특히 새로운 주기가 시작되는 구간에서 발바닥이 지면을 늦게 떠나는 슬립현상을 확인했는데 이것은 관절의 각도와 본체의 자세각을 피드백 받아 발바닥의 위치를 추정하고 보행계획을 수립하여 제어하는 것만으로 보행 중 발생하는 로봇 본체의 기울어짐과 기계적인 에러를 완벽하게 극복하지 못함을 확인하였다.

향후 연구방향은 로드셀이 아닌 소형의 힘 센서를 선정하여 보행 중 발바닥에 가해지는 힘을 측정하고 지면 접촉 힘과 반발력을 고려하여 보행 중 발생하는 기계적인 에러를 충분히 극복할 수 있는 자세제어 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- [1] H. Kimura, Y. Fukuoka, and A.H. Cohen, "Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts", Int. J. of Robotics Research, vol. 26, no.5, pp.475-490, 2007.
- [2] B. -H Kim, "Analysis on effective walking pattern for multi-legged robots", Jour. of Korean Institute of Intelligent Systems, vol. 19, no.5, pp.622-628, 2009.
- [3] R. Kurazume, K. Yoneda and S. Hirose, "3D Sway Compensation Trajectory for Quadruped walking Robot", RSJ, vol. 19, no.5, pp.632-637, 2001.
- [4] R. Kurazume, K. Yoneda, and S. Hirose, "Feed-forward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle", Robotics and Automation, vol. 12, no.5, pp.157-172, 2002.
- [5] 임승철, 김광한, "건형 4족 로봇의 위치 이동건기 및 속도", 한국시물레이션학회논문지, vol. 20, no.1, pp.51-59, 2011.
- [6] 엄한성, "4족 보행로봇의 자세각 제어에 관한 연구", 한국정보통신학회논문지, 제9권, 제8호, pp.1722-1729, 2005.
- [7] 엄한성, "4족 로봇의 에너지 소모량 분석", 한국마린엔지니어링학회지, 제30권, 제1호, pp.134-139, 2006.

## 저자소개



### 엄한성(Han-Sung Eom)

1997년 목포해양대학교  
기관공학과(학사)

2003년 목포해양대학교  
기관공학과(석사)

2006년 목포해양대학교 기관시스템공학과(박사)

2006년~현재 바르질라코리아(주)

※관심분야: 로봇제어, 시스템 프로그래밍