

# Monopod 형 플랫폼을 이용한 보행로봇 다리모듈의 동적 거동 분석 Behavior Analysis of Leg Module of Walking Robot using Monopod-type Platform

\*유승남<sup>1</sup>, 고광진<sup>2</sup>, 김완수<sup>1</sup>, #한창수<sup>3</sup>

\*S. N. Yu<sup>1</sup>, K. J. Ko<sup>2</sup>, W. S. Kim<sup>1</sup>, #C. S. Han<sup>3</sup> (cshan@hanyang.ac.kr)

<sup>1</sup> 한양대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 한양대학교 메카트로닉스공학과, <sup>3</sup> 한양대학교 기계정보경영학부

Key words : Legged Robot, Monopod robot, Behavior Analysis, Dynamic Manipulability Ellipsoid(DME)

## 1. 서론

다족 보행 로봇의 보행알고리즘 및 동적 거동을 연구하는데 있어서, 다리 모듈을 분리하여 monopod 형 1-leg 실험플랫폼을 구성하여 지면에 대한 동적 거동 및 스윙궤적을 최적화하는 연구가 다양하게 시도되고 있다.[1-3] 본 논문에서는 이러한 Monopod 형 플랫폼 실험의 타당성을 검증하고, 보행로봇의 다리 스윙(Swing) 궤적을 에너지 최소화 측면에서 최적화하는 방안을 제시하였다.

## 2. 보행(4족)로봇을 이용한 험지 보행 실험

Fig.1은 4족 보행 로봇을 이용하여 모래, 자갈, 진흙과 같은 다양한 지형에서의 보행 실험을 수행한 것으로서 진흙 보행실험 시의 다리에 장착된 힘 센서를 통해 취득한 뒷다리의 지면 반력 값을 나타낸 것이다.

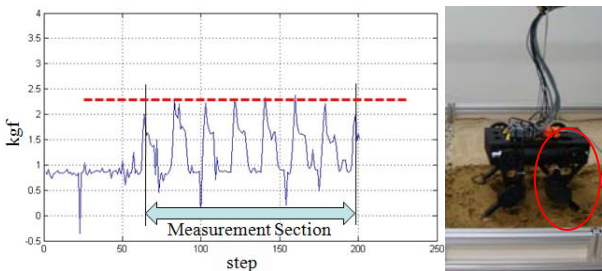


Fig. 1 Measured reaction force of 4-leg Platform (Mud)

실험결과 그래프에서 확인할 수 있듯이, 뒷다리는 몸체의 추진력을 발생시키는 역할로 인해 지표면에 평행한 방향으로 지면을 굽듯이 밟을 차는 동작이 두드러지게 나타나는데, 이러한 경향은 지면 반력이 거의 일정하게 나타나는 결과 그래프를 통해서도 확인이 가능하였다.

## 3. Monopod 형 플랫폼을 이용한 험지 보행 실험

본 절에서는 2 절에서 제시한 4족 보행 로봇이 아닌, 다리 모듈 하나를 분리하여 1-Leg 플랫폼을 구성하여 지면 반력을 실험하는 Monopod 형 실험 플랫폼의 타당성을 검증하고자 한다. 이는 4족 보행로봇의 경우, 험지 보행을 구현하기 위해 별도의 복잡한 자세 제어 알고리즘이나 보행 패턴 생성 알고리즘을 생성해야 하는 절차가 필요한 것과 달리, 지면 접촉 각도 및 보행 속도를 바꾸면서 지면 반력과 거동을 간단하게 측정할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

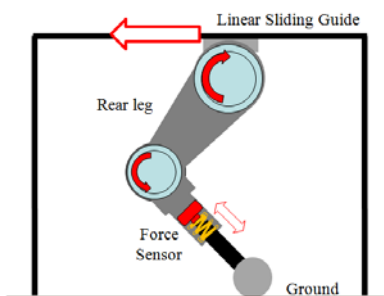


Fig. 2 Concept of monopod-type experiment platform



Fig. 3 Behavior tests of 1-leg platform for various terrains

Fig.2와 Fig.3은 각각 1-Leg 실험 플랫폼의 개념 및 지형 별 다리 모듈의 동작 실험을 도시하고 있다. 본 실험을 통하여 Fig.4와 같은 실험결과를 도출하였으며, 본 결과에서 주목할 점은 전 절의 실험결과(Fig.1)와 유사한 수치와 경향을 보였다는 점이다. 이를 통하여 뒷다리의 지면 반력 실험의 경우, 4-Leg가 아닌 1-Leg 플랫폼으로도 충분히 수행이 가능하다는 점을 확인할 수 있었다.

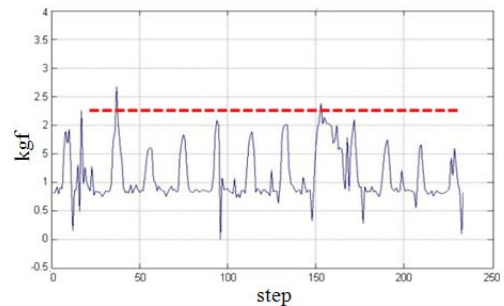


Fig. 4 Measured reaction force of 1-leg platform (Mud)

## 4. 1-Leg 스윙궤적 분석 및 보행 에너지 최소화

본 절은 전 절에서 제시된 Monopod 형 다리 플랫폼의 스윙궤적 최적화를 통하여 구동에너지를 최소화하는 방법을 제안하고자 한다. 1-Leg 모델에 대한 상태방정식은,

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta) \quad (1)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1(t) \\ \vdots \\ \theta_n(t) \end{bmatrix}, \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \vdots \\ \tau_n(t) \end{bmatrix}$$

여기서  $\theta_i$ 는 다리의 관절각,  $\tau_i$ 는 다리의 관절 토크,  $M$ 는 관성 행렬,  $V$ 는 원심력, 코리올리 항,  $G$ 는 중력항을 각각 의미한다. 다리 말단의 속도  $V$ 와 관절 각속도가

$$v = J(\Theta)\dot{\Theta} \quad (2)$$

의 관계 가지는데, 여기서  $J$ 는 자코비안(Jacobian) 행렬이다. 양변을 시간  $t$ 로 미분하면,

$$\dot{v} = J(\Theta)\ddot{\Theta} + \dot{J}(\Theta)\dot{\Theta} \quad (3)$$

(1), (3) 식에서  $\ddot{\Theta}$ 을 소거하고 유사 역행렬(Pseudo Inverse Matrix)  $J^+$ 을 적용하면 아래의 식과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{v} - (\dot{I} - J^+ J) \dot{J} \dot{\Theta} \\ = JM^{-1}(\Theta)[\tau - V(\Theta, \dot{\Theta}) - G(\Theta) + MJ^+ \dot{J} \dot{\Theta}] \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)의 좌항과 우항을 아래와 같이 가정하면,

$$\begin{aligned} \tilde{\tau} = \tau - V(\Theta, \dot{\Theta}) - G(\Theta) + MJ^+ \dot{J} \dot{\Theta} \quad (5) \\ \tilde{v} = \dot{v} - (\dot{I} - J^+ J) \dot{J} \dot{\Theta} \quad (6) \end{aligned}$$

식(4)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\tilde{v} = JM^{-1}(\Theta)\tilde{\tau} \quad (7)$$

여기서,  $i$  번째 관절의 최대 관절 토크를  $\tau_{i\max}$  라고 하면, 다리 말단부가 낼 수 있는 최대 가속도  $\dot{v}_{i\max}$ 의 지표를 DME(Dynamic Manipulability Ellipsoid)로 정의할 수 있다. 또한, 본 Ellipsoid의 장축이 지면과 평행에 가까울수록 다리의 추진력을 최대화하면서 에너지 손실을 최소화하여 뒷다리에 적합한 궤적을 얻을 수 있다.[4]

$\tilde{\tau}$ ,  $\tilde{v}$ 을  $\tilde{\tau}_{i\max}$ ,  $\tilde{v}_{i\max}$ 에 의해서 정규화하면,

$$\hat{\tau} = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{\tau}_1}{\tilde{\tau}_{1\max}} & \dots & \frac{\tilde{\tau}_n}{\tilde{\tau}_{n\max}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\hat{v} = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{v}_1}{\tilde{v}_{1\max}} & \dots & \frac{\tilde{v}_m}{\tilde{v}_{m\max}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(8), (9)를 이용하여 식(7)을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{v} = \hat{J}\hat{M}^{-1}(\Theta)\hat{\tau} \quad (10)$$

$$\hat{\tau} = \hat{M}(\Theta)\hat{J}^{-1}\hat{v} \quad (11)$$

여기서,

$$\hat{J} = T_a J \quad (12)$$

$$\hat{M}(\Theta) = T_r M(\Theta) \quad (13)$$

$$T_a = \text{diag} \left[ \frac{1}{\tilde{v}_{1\max}}, \frac{1}{\tilde{v}_{2\max}}, \dots, \frac{1}{\tilde{v}_{m\max}} \right] \quad (14)$$

$$T_r = \text{diag} \left[ \frac{1}{\tilde{\tau}_{1\max}}, \frac{1}{\tilde{\tau}_{2\max}}, \dots, \frac{1}{\tilde{\tau}_{m\max}} \right] \quad (15)$$

따라서 DME는 식(16)과 같이 구할 수 있고, Fig.5는 이를 이용하여 뒷 다리의 모든 가능한 스윙궤적 중, 지면과 평행한 Ellipsoid를 가지는 궤적을 선정한 것이다.

$$\hat{\tau}^T \hat{\tau} = 1 \quad (16)$$

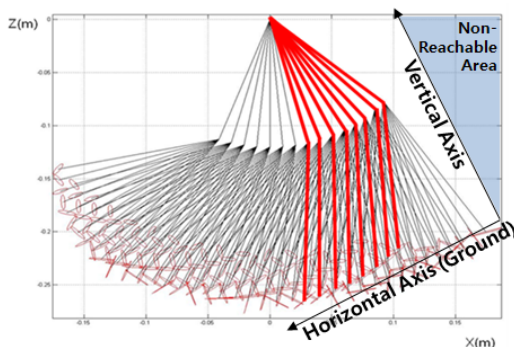


Fig. 5 Adequate swing trajectory selection based on DME

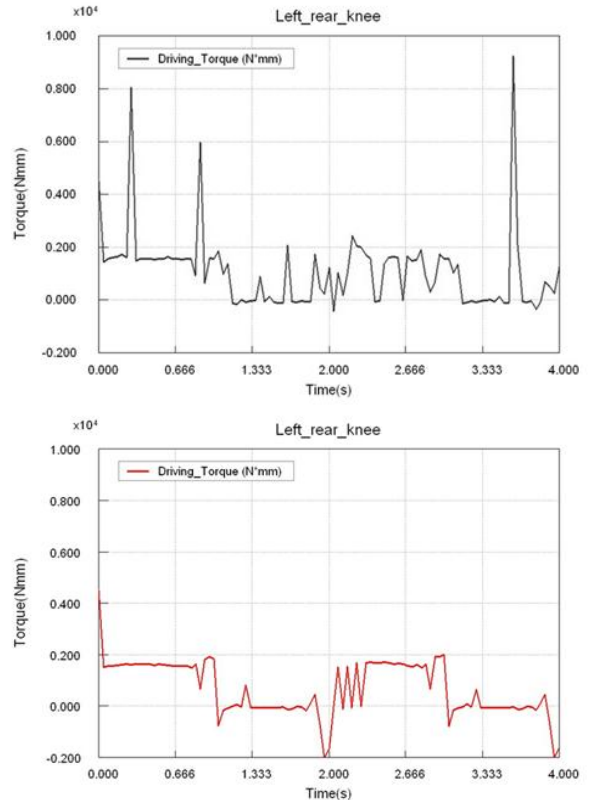


Fig. 6 Measured torque of knee joint of 1-leg platform before (Upper Image) and after (Lower Image) DME treatment

### 5. 결론

Fig.6은 DME를 적용하기 전과 후의 보행시 무릎관절의 토크 변화를 도시한 것이다. DME를 적용할 경우, 급격한 토크 변화를 최소화하면서 전체적으로 적은 토크로 운용이 가능함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 다족 보행로봇의 각 다리 별 동적 거동 및 지면 반력 특성을 실험하기 위한 Monopod형 1-Leg 플랫폼을 제안하고 타당성을 검증하였다. 또한, 해당 다리의 스윙궤적을 DME 기법을 사용하여 최적화함으로써 각 관절에 걸리는 토크를 최소화하는 기법을 함께 제안하였다. 본 연구 내용은 보행 로봇의 다양한 지형에서의 지면 반력 특성 분석과, 보행시 에너지 최소화라는 관점에서 보행 알고리즘을 연구하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 후기

이 논문은 2009년 HYU 연구특성화사업으로 지원받아 연구되었음"(HYU-2009-T)

### 참고문헌

1. Juergen Rummel, Fumiya Iida and Andre Seyfarth, "One-Legged Locomotion with a Compliant Passive Joint", Intelligent Autonomous Systems, IOS Press, pp.566-573, 2006
2. Tomas A. Guardabrazo, Maria A. Jimenez, Pablo Gonzalez de Santos, "Analyzing and solving body misplacement problems in walking robots with round rigid feet", Robotics and Autonomous Systems, pp.256-264, 2006
3. Andre Seyfarth, Hartmut Geyer and Hugh Herr, "Influence of swing leg movement on running stability". Human Movement Science, Vol.24, pp.532-543, 2005
4. Schmiedeler, James Patrick, "The Mechanics of and the Robotic Design for Quadrupedal Galloping". Thesis of the Ohio State University, 2001