

생체모방 모바일 로봇용 Two Segment Leg에 대한 연구

A Study of Two Segment Leg for A Biologically Inspired Mobile Robot for Rugged Terrain

*#신동환¹, 김영식¹, 권오석¹, 공동욱¹, 안진웅¹

*#D.H. Shin(sdh77@dgist.ac.kr)¹, Y.S. Kim¹, O.S. Kwon¹, D.U. Kong¹, J.U. An¹

¹대구경북과학기술원 공공원천기술연구센터

Key words : Biologically Inspired, SLIP(Spring Loaded Inverted Pendulum), Two Segment Leg

1. Introduction

본 연구에서는 지상용 Mobile Platform[1] 구현의 일환으로, Two Segment Links + Passive Joint 구조를 가지는 Leg의 파라미터 설정에 대해 논의하고, Stiff한 Leg를 가지는 플랫폼과 Soft한 Leg를 가지는 플랫폼의 주행 거동에 대한 검토를 통해, Soft Stiffness Leg 구조의 효과에 대해 검증하고자 한다.

생체의 Leg를 단순화 시켜보면, 상박, 하박, Foot과 같은 세 개의 Link 요소(Three Segment Links)와 Joint(Knee Joint, Ankle Joint)들로 구성된다. 생체의 Leg는 근육, 힘줄 등 Spring 기능을 수행할 수 있는 구조로 되어 있고, 근육의 긴장도에 따라 Stiffness를 조절할 수 있어, Walking과 Running Gait를 수행할 수 있는 Variable Stiffness 구조를 가진다.

Farley[2]에 의해 수행된 생체들의 주행 실험 및 분석 연구에서, Leg Stiffness(K_{LEG})와 Midstance에서 발생하는 Vertical 방향 Peak Force(F)가, 무게를 매개변수로 가지는 함수관계를 가지며, 그 결과가 통계적으로 유의함에 대해 보고하였다.

대표적인 지상용 생체모방로봇으로 Big Dog[3], Rhex[4], Whegs[5]가 있으며, Leg 구성관점에서 보면, Big Dog[3]은 4족, Three Segment Links + Active Joint로 구성되고, Rhex[4]는 6족, One Segment Link를 가지며, Stiffness구현에 있어, 추가적인 기구 없이, 구조적으로 탄성거동을 가질 수 있는 C-Shape으로 설계되었다. Whegs[5] 역시 6족, One Segment Link를 가지며, 각각의 Leg Limb는 Stiff한 Bar 구조를 가진다.

구현하고자 하는 생체모방로봇에서는 구조적 단순화를 위해, Two Segment Links + Passive Joint 구조와 고정된 Stiffness를 가진 Leg로 구성한다. 2장에서는 Two Segment Links와 Torsional Stiffness Parameter 설정에 대해 논의하고, 3장에서는 다물체동역학 프로그램으로 Stiff한 Leg를 가지는 플랫폼과 Soft한 Leg를 가지는 플랫폼의 주행 거동에 대한 검토를 통해, Soft Stiffness Leg 구조의 효과에 대해 검증하고자 한다.

2. Two Segment Leg Parameter 설정 검토

여기에서는 생체의 주행분석결과[2]를 바탕으로 Two Segment Links와 Torsional Stiffness Parameter 설정에 대해 논의한다.

Fig. 1은 Two Segment Model과 SLIP Model의 Free State와 Compressed State를 나타내고, Fig. 2는 Knee Joint에서의 복원모멘트와 복원력을 나타낸다.

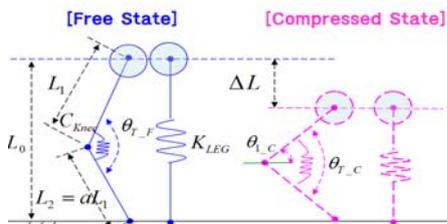


Fig. 1 Two Segment, SLIP Model @ Free, Compressed State

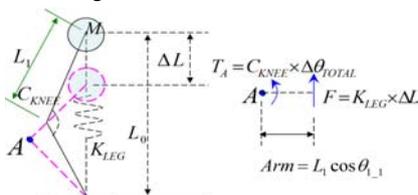


Fig. 2 Restoring Moment & Force @ Knee Joint

Fig. 2의 등가관계를 통해, 식(1)을 얻을 수 있으며,

$$C_{KNEE} = \frac{K_{LEG} \times \Delta L \times L_1 \times \cos \theta_{1,C}}{\theta_{T,F} - \theta_{T,C}} \quad (1)$$

각각의 변수들은,

$$K_{LEG} [N/m] = \frac{F}{\Delta L} = 715 \times M^{0.67} \quad (2)$$

$$\Delta L [m] = \frac{F}{K_{LEG}} = \frac{30.1}{715} \times M^{0.3} \quad (3)$$

$$L_1 = \sqrt{\frac{L_0^2}{1 + a^2 - 2a \times \cos \theta_{T,F}}} \quad (4)$$

$$\theta_{T,C} = \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + a^2 L_1^2 - L_0^2 + 2L_0 \Delta L - \Delta L^2}{2aL_1^2} \right) \quad (5)$$

$$\theta_{1,C} = \cos^{-1} \left(\frac{a \times \sin \theta_{T,C}}{\sqrt{1 + a^2 - 2a \times \cos \theta_{T,C}}} \right) \quad (6)$$

이다.

여기에서 L_0 는 Leg 길이, L_1 는 상박링크 길이, L_2 는 하박링크 길이, 링크 길이 비(Link Ratio)인 a 는 L_2/L_1 를 나타낸다. 각도의 경우, 상박링크와 하박링크 간 사이각(Angle Between Links)은 $\theta_{T,n}$, Knee Joint에 배치된 지면과 평행한 가상의 선과 상박 Link와의 사이각은 $\theta_{1,n}$ 으로, 하박 Link와의 사이각은 $\theta_{2,n}$ 으로 정의하고, 하첨자 n 이 F일 때는 Free 상태를, 압축 상태는 C로 정의한다. ΔL 은 Midstance에서의 압축량을, K_{LEG} 는 SLIP 모델의 Stiffness값을, M 은 무게를 나타낸다.

(2)식과 (3)식은 생체의 주행실험 결과와 SLIP 모델의 파라미터와의 관계를 Fitting을 통해 산출된 관계식이며, 통계적으로 유의함에 대해 검증[2]이 되었다. Two Segment Leg의 주요 파라미터인 (4), (5), (6)식의 유도과정은 지면관계 상 생략한다. (1)식에 (2)식 ~ (6)식을 대입하면, 결과적으로 C_{KNEE} 는 $f(M, \theta_{T,F}, a, L_0)$ 의 함수로 정리될 수 있다.

Case Study :

여기에서 $M=12.11625kg$, $L_0 = 0.18m$ 로 Fix하였으며, 초기 설정치로 $a=1$, $\theta_{T,F} = 170deg$ 로 설정하였다. 결과적으로 C_{KNEE} 는 0.2412Nm/deg값을 얻을 수 있다.

3. Stiff Leg, Soft Leg Platform 응답 검토

여기에서는 Fig. 3의 플랫폼을 대상으로 2장 Case Study를 통해 검토된 Two Segment Leg Model의 Parameter를 적용한 Soft Leg를 가진 플랫폼의 거동과, Stiff Leg를 가진 플랫폼의 거동에 대해 논의한다.

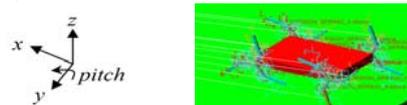


Fig. 3 Platform & 좌표

Treadmill과 Hoist가 설치된 주행 실험환경을 모사하기 위해, Body의 Roll과 Yaw의 자유도를 구속하였다. Fig. 4는 각각의 Hip Joint에 장착된 모터에 인가되는 속도 프로파일을 나타낸다.

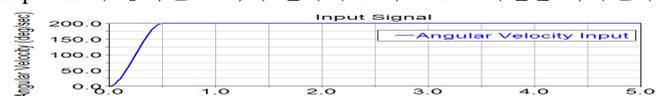


Fig. 4 각속도 Profile

동일한 주행 환경에서, Torsional Stiffness로 0.2412*10⁶ Nm/deg [Stiff Leg]와 0.2412 Nm/deg [Soft Leg]로 적용하였다.

Fig. 5는 Soft Leg를 가지는 플랫폼의 응답을 나타낸다.

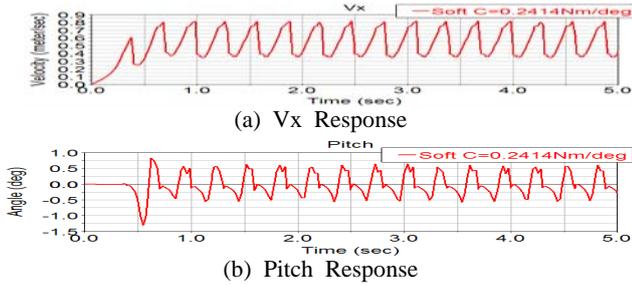


Fig. 5 Soft Leg Platform Response

Velocity는 Max 0.8205m/s, Avg 0.5248m/s, Pitch는 Min -1.3121deg, Max 0.8273deg, Avg -0.0125deg의 응답을 가진다. Fig. 6은 Stiff Leg를 가지는 플랫폼의 응답을 나타낸다.

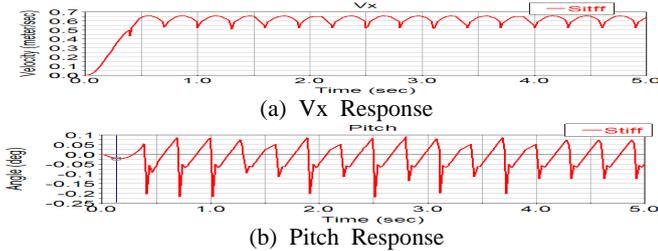


Fig. 6 Stiff Leg Platform Response

Velocity는 Max 0.6562m/s, Avg 0.5849m/s, Pitch는 Min -0.2189deg, Max 0.0906deg, Avg -0.0139deg의 응답을 가진다. Fig. 5, 6을 통해, Soft Leg의 초기 설정치인 Link Ratio가 1, Angle Between Links가 170deg인 경우는 Stiff Leg에 비해 장점이 없는 것으로 파악된다.

다음으로 Link Ratio 및 Angle Between Links를 조정하여, 해당 Parameter들의 변화에 따른 플랫폼 응답의 영향에 대해 검토한다. Fig. 7은 Link Ratio의 변화(Table 1)에 따른 플랫폼의 응답을 나타낸다.

Table 1. Trial List (Link Ratio Variable)

Trial	Link Ratio
1	Trial 1 0.92
2	Trial 2 0.94
3	Trial 3 0.96
4	Trial 4 0.98
5	Trial 5 1
6	Trial 6 1.02
7	Trial 7 1.04
8	Trial 8 1.06
9	Trial 9 1.08

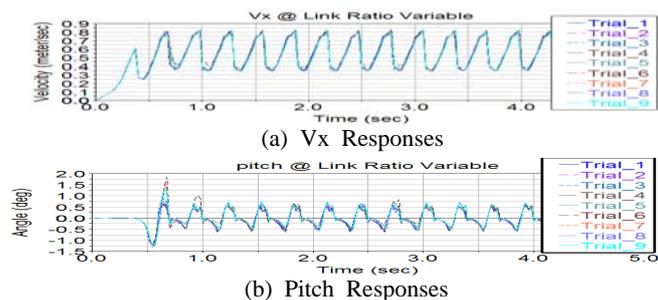
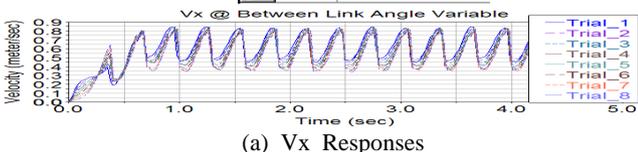


Fig. 7 Soft Leg Platform Responses with Link Ratio Variable
Fig. 7(a)에 나타난 것처럼, Vx는 링크 길이에 크게 영향을 받지 않는다.

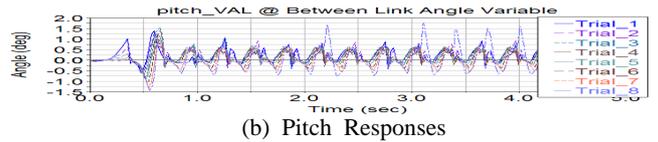
Fig. 8은 Angle Between Links 변화(Table 2)에 따른 플랫폼의 응답을 나타낸다.

Table 2. Trial List (Angle Between Links Variable)

Trial	Between Link Angle
1	Trial 1 140
2	Trial 2 145
3	Trial 3 150
4	Trial 4 155
5	Trial 5 160
6	Trial 6 165
7	Trial 7 170
8	Trial 8 175



(a) Vx Responses



(b) Pitch Responses

Fig. 8. Soft Leg Platform Responses with Angle Between Links Variable

Fig. 8(a)에 나타난 것처럼, Vx는 링크간 사이각에 영향을 받으며, 링크 사이각이 작을 수록 빠른 속도를 가짐을 알 수 있다. 결과적으로 Torsional Stiffness가 0.2412Nm/deg일 때, Stiff한 Leg를 가지는 경우보다 더 바람직한 응답을 가지는 경우는 링크간 사이각이 140deg임을 알 수 있다.

Fig. 9는 Angle Between Links(ABL)가 140deg, Link Ratio(LR)가 1일 때의 시스템 응답을 나타낸다.

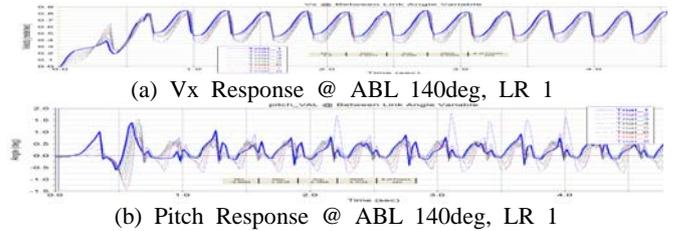


Fig. 9 Soft Leg Platform Response @ ABL 140deg, LR 1

4. Conclusion

1. 생체의 주행 실험을 통해 파악된 선행연구의 결과를 바탕으로 Two Segment Leg의 주요 파라미터들에 대한 검토 및 Torsional Stiffness의 관계를 산출하였다.
2. 산출된 Torsional Stiffness를 바탕으로 Two Segment Leg의 Link Ratio 및 링크 각도를 독립변수로 두고 플랫폼의 Response에 대해 검토하였으며, 결과적으로 Two Segment Links + Torsional Stiffness 구조의 Soft한 Leg를 가지는 플랫폼에서 링크간 각도가 Response에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다.
3. Vx Response 관점에서 보면, Stiff한 Leg를 가지는 경우보다 Soft한 Stiffness를 가지는 경우가 더 우수한 성능을 가질 수 있음에 대해 확인하였다.

후기

본 연구는 교육과학기술부 일반사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

Further Work

1. Foot 최적화 설계 : Leg의 Link들은 회전중심으로부터 멀어질수록, 회전관성을 작게 하기 위해 경량화 하는 것이 바람직하며, 지면과 접촉하는 Foot의 경우, 충분한 Traction을 발생시키기 위해 표면적을 넓게 가지는 게 바람직함.
2. Two Segment Leg 플랫폼 시제품 제작 및 실험을 통한 검증
3. Three Segment Leg의 파라미터 설정 검토 및 Two Segment Leg와의 비교

참고문헌

1. 권오석, 신동환, 안진웅, "복합지형 주행을 위한 생체 모방 로봇 개념 연구", KSPE 추계학술대회, 2009
2. Farley, C. T., J. Glasheen, and T. A. McMahon. "Running springs: speed and animal size". J. Exp. Biol. 185: 71-86, 1993.
3. M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter, and the Big-Dog Team, "'Bigdog, the rough-terrain quadruped robot,'" Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control, 2008.
4. Galloway, K., Clark, J., and Koditschek, D., "Design of a multi-directional variable stiffness leg for dynamic runnings" In ASME Int. Mech. Eng. Congress and Exposition. 2007.
5. Schroer, R.T., Boggess, M.J., Bachmann, R.J., Quinn, R.D., and Ritzmann, R.E. "Comparing Cockroach and Whegs Robot Body Motions," IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA '04), 2004