

4족 보행 로봇 발의 비평탄 지면 착지 성능 Landing performance of a quadruped robot foot on uneven surface

*홍예선¹, 윤승현¹, 김민규¹

*Y. S. Hong¹(yshong@kau.ac.kr), S. H. Yoon¹, M. G. Kim¹

¹ 한국항공대학교대학원 항공우주 및 기계공학과

Key words : Quadruped robot, Robot foot, Toes, Parallel link, Uneven surface landing, Anti-slip margin

1. 서론

4족형 로봇이 비평탄 험로에서 장애물을 승월하거나 통과함으로써 이동성을 높이려면 험로에서 안정된 보행을 유지할 수 있어야 하기 때문에, 로봇발의 형태는 험로에서의 안정된 보행에 지대한 영향을 주는 요소 중의 하나이다.

험로보행용 로봇 발은 보행 지면의 불규칙한 요철과 경도를 고려하여 설계되어야 한다. 노면의 요철에 착지 후에는 착지점이 확고하게 유지되는 구조를 띠어야 한다. 또한 무른 땅에서는 착지된 발이 땅속으로 빠지는 것을 방지하도록 충분한 접지 면적을 보장하면서 동시에 확고한 착지 지점을 제공해야 한다. 이러한 로봇 발을 설계하는 것은 상반된 특성을 동시에 만족시켜야 하는 어려운 과제이다.

Raibert *et al*^[1]의 로봇 발은 일자형 정강이 끝에 발목 관절 없이 반구형 고무를 부착한 것으로 지면과 점접촉을 이룬다. 따라서 험로보행시 접지력 부족으로 슬립이 발생하는 것을 구조적으로 피할 수 없다. 보행제어 능력을 높임으로써 단순한 구조의 발이 갖는 단점을 보상하였으나, 많은 제어 동력을 소비해야 한다. Hashimoto *et al*^[2]의 발은 네 개의 발가락이 비평탄면에서도 상하로 움직일 수 있어서 지형에 관계 없이 항상 지면에 접촉한다. 그러나 발가락의 위치를 구속하기 위한 복잡한 장치를 가지고 있고, 정적인 보행만 가능하다는 단점이 있다. Hong *et al*^[3]의 로봇 발은 평행 링크에 의해 연결된 전후 한 쌍 두 개의 발가락을 사용함으로써 발목 조인트가 없이 평행 링크의 회전에 의해 발목의 피치 회전이 가능하도록 하였다. 이 로봇 발의 발목의 피치 회전 중심이 지면 위에 놓이고, 지면 접촉은 두 개의 발가락에 의해 이루어지기 때문에 험로에서의 슬립 방지에 유리하다. 단, 발목의 롤 방향 회전에 대해서는 점접촉과 동일한 효과를 갖지 않았기 때문에 실제의 비평탄 노면에 적용하는 데에는 한계가 있었다.

본 논문에서는 종래 2차원 평행링크를 사용한 발을 개량하여 3차원 평행 링크로 발전시킨 로봇 발을 소개하고 이러한 구조적 특징을 분석하였다. 그리고 특정한 형상의 돌출물에 대한 역학적 분석을 통해 착지 안정도를 정의하여 발목이 없는 점접촉형 발과 본 논문의 발이 갖는 착지 성능을 정량적으로 비교하였다.

2. 평행 링크를 적용한 로봇 발의 작동 원리

본 논문의 로봇 발은 Fig. 1과 같이 로봇발의 운동 평면에 대해 좌우 2개의 Y 방향 평행 링크, 이 Y 방향 평행 링크들의 중간과 발목을 연결하는 X 방향 평행 링크, 그리고 X 방향 평행 링크 중 하부 링크에 고정되는 발바닥으로 구성된다. X 방향 평행 링크는 발가락 끝의 궤적이 원호를 형성하게 하고, 정강이의 피치(pitch)회전 중심이 노면 상에 위치하여 착지 후 정강이가 피치 방향 회전을 할 때 앞발가락과 뒷발가락의 착지점이 변하지 않도록 한다. 즉, 정강이의 피치 회전 중심이 노면 상에 위치하게 되고, 발목 조인트가 필요 없게 된다. 마찬가지로 Y 방향 평행 링크에 의

해 정강이의 롤(roll)회전 중심이 노면 상에 위치한다.

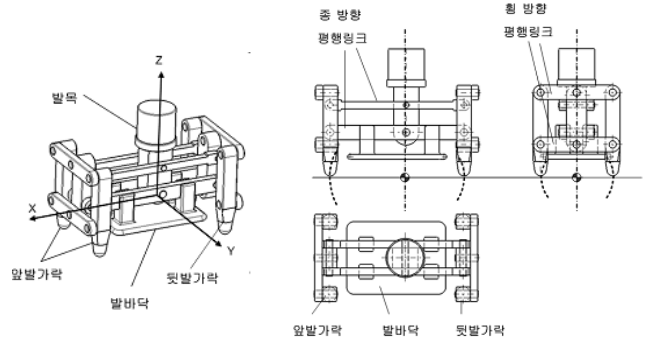


Fig. 1 Basic structure of parallel linked robot foot

이 로봇 발이 종 방향 수직 평면상에서 동작하는 원리는 Fig. 2와 같다. 발이 지면에 착지될 때 스프링을 이용해 하강되어 있던 뒷발가락이 지면과 먼저 접촉한다(착지개시). 발이 하강하여 뒷발가락이 상승하면서 앞발가락도 지면에 착지되면 착지가 완료된다(착지완료). 정강이가 전진 방향으로 피치 회전을 함에 따라서 정강이는 노면 상에 위치한 회전 중심을 기준으로 회전할 수 있다(발목회전). 이때 몸체의 하중은 두 발가락에 배분된다. 발이 다시 상승하면 스프링에 의해 뒷발가락이 하강한다(이륙개시).

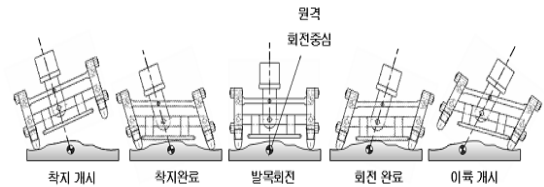


Fig. 2 Longitudinal working principle of parallel linked robot foot

로봇의 횡 방향 수직 평면 상의 노면 요철에 대해서도 Fig. 3과 같이 Y 방향 평행 링크들의 기울기가 변하여 좌우의 발가락을 이용한 안정된 착지가 가능하다.

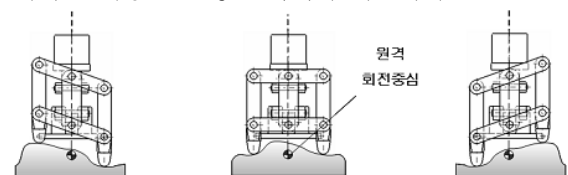
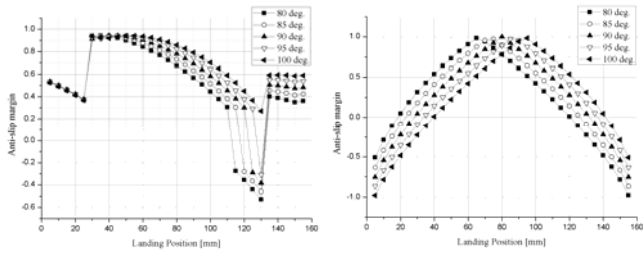


Fig. 3 Transversal working principle of parallel linked robot foot

3. Anti-slip margin에 의한 착지 안정도 해석

본 논문에서는 불규칙한 지면 형상의 모델링의 한계와 객관적 결과 도출의 어려움 때문에 평행 링크를 응용한 로봇 발과 보편적으로 사용되는 점접촉형 발과 비교 평가하였다. 본 논문에서는 로봇 발이 돌출물 위에 착지했을 때 미끄러지는 것을 방지하려는 힘의 여유도를 anti-slip margin(ASM)으로 정의하고, 이것을 점접촉형 발과 평행링크 발에 대해 유도하였다. ASM은 마찰력과 착지력의 접선 성분 차이를 최대마찰력으로 나눔으로써 정의하였다. 즉,

ASM 이 1 이면 착지력의 접선성분이 영인 것을 의미하고 ASM 이 0 이면 착지력의 법선성분이 영인 것을 의미한다. 반구형돌출물에 대한 평행링크 로봇 발과 점접촉형 로봇 발의 ASM 해석 결과는 Fig. 4 에 나타내었다.



(a) Parallel linked robot foot (b) Point-contact type robot foot
Fig. 4 Anti-slip margin analysis results for half cylindrical protrusion

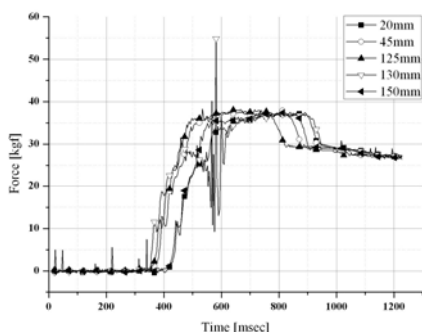
평행링크 발이 돌출물상에서 미끄러지지 않는 영역은 약 0~115mm, 130~160mm 이고, 점접촉형 로봇 발이 미끄러지지 않는 영역은 약 40~120mm 로 나타났다.

4. 실험 및 결과

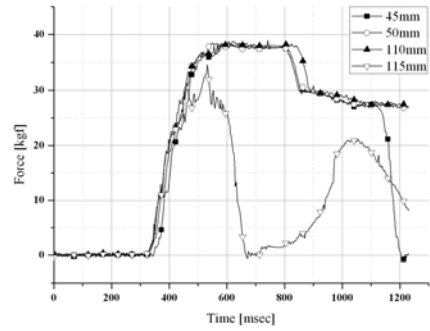
본 논문의 착지보행 성능 시험 장치는 로봇 발이 장착된 1 자유도 로봇 다리, 로봇 다리의 회전 구동을 위한 BLDC 모터, 로봇 다리의 회전관절을 구속하는 클러치, 착지력을 가하는 공압 실린더, 로봇다리의 진진 운동을 위한 LM Actuator, 로봇 발의 회전각을 측정하는 포텐시옴터, 정강이에 가해지는 반력을 측정하는 로드셀로 구성되어 있다. 로봇 다리가 진진을 하면서 클러치의 구속이 풀리고 공압 실린더에 의해 로봇 발은 지면에 착지력을 가한다. 이 때, 정강이에 가해지는 반력의 변화로 미끄러짐을 관찰할 수 있다. 로봇 발의 착지와 이륙이 모두 완료된 후에 공압 실린더와 LM Actuator 는 초기위치로 복귀하고, 클러치로 로봇 다리의 회전관절을 다시 구속시킨다. 이와 같은 실험과정을 반복하여 나온 결과를 반구형 돌출물에 대한 ASM 해석결과와 비교하였다.

실험은 반구형 돌출물에 대하여 평행링크 로봇 발과 점접촉형 로봇발에 대하여 미끄러지는 영역을 확인하기 위하여 정강이에 가해지는 반력의 변화를 측정하였다. 실험 조건은 ASM 해석과 동일하게 평행링크 발길이 90mm, 반구형 돌출물의 반지름 80mm, 하중 30kgf, 마찰계수 0.85 이다.

Fig. 5 의 실험 결과에 의하면 반구형 돌출물에서 평행링크 로봇발의 미끄러지지 않는 영역은 약 0~125mm, 150~160mm 로 나타났다. 반면에 점접촉 로봇발의 미끄러지지 않는 영역은 50~110mm 로 나타났다. 이 결과는 ASM 해석 결과에서 나타난 미끄러지지 않는 영역과 거의 비슷한 영역을 보여주는 것을 알 수 있다.



(a) Parallel linked robot foot



(b) Point-contact type robot foot

Fig. 5 Reaction forces acting on robot leg according to landing position for half cylindrical protrusion

5. 결론

본 논문에서는 제안된 평행 링크 로봇 발의 성능 평가 기준을 정하기 위하여 미끄러짐 억제 여유도(ASM)를 정의하였다. 정의된 ASM 을 해석하고 실험으로 해석결과와 타당성을 제시함으로써, 보편적으로 사용되는 점접촉형 발에 대하여 성능을 비교 평가하였다. 평행링크 로봇 발은 점접촉형 발에 비하여 험로에서 슬립에 대하여 강인한 구조를 가진다는 것을 증명하였다.

후기

본 논문은 생산기술연구원에서 주관하는 다족형 건마로봇 플랫폼 기술개발 사업의 지원을 받아 수행한 연구 결과임

참고문헌

1. M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter, and the BigDog Team, "BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot", Proc. of the 17th World Congress, IFAC, 2008.
2. Hashimoto, K. Sugahara, Y. Hayashi, A. Kawase, M. Sawato, T. Endo, N. Ohta, A. Tanaka, C. Takaniishi, A., "New Foot System Adaptable to Convex and Concave Surface", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1869-1874, 2007.
3. Y.S. Hong, H.K. Lee, S.Y. Yi, C.W. Lee, "The design and control of a jointed-leg type of a quadrupedal robot for locomotion on irregular ground" Robotica, 383-389, 1999.
4. Reula, J.R., Neuhaus, P.D., Bonnlander, B.V., Johnson, M.J., and Pratt, J.E., "A controller for the LittleDog quadruped walking on rough terrain", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1474-1479, 2007.
5. Mitchell, B., Hofmann, A.G., Williams, B.C., "Search-based foot placement for quadrupedal traversal of challenging terrain", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1461-1466, 2007.
6. Galvez J.A., Estremera J., Gonzalez D.S.P., "A new legged-robot configuration for research in force distribution", Mechatronics, 907-932, 2003.