

평행링크형 발가락을 갖는 4 족 보행로봇 발의 비평탄 지면 착지 성능

Landing Performance of a Quadruped Robot Foot Having Parallel Linked Toes on Uneven Surface

홍예선^{1,✉}, 윤승현¹, 김민규²
Yeh-Sun Hong^{1,✉}, Seung-Hyeon Yoon¹ and Min-Gyu Kim²

1 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과 (Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.)

2 한국항공대학교 KAU 로봇연구센터 (KAU Robot Research Center, Korea Aerospace Univ.)

✉ Corresponding author: yshong@kau.ac.kr, Tel: 02-300-0287

Manuscript received: 2008.12.16 / Revised: 2009.4.21 / Accepted: 2009.6.27

In this study, a robot foot having toes for firm stepping on uneven surface is proposed. The toes are connected to the lower leg by parallel links so that the lower leg can rotate in the rolling and pitching directions during stance phase without ankle joint. The landing performance of the foot on uneven surface was evaluated by relative comparison with that of the most common foot making point contact with the walking surface, since the test conditions considering real uneven surface could be hardly defined for its objective evaluation. Anti-slip margin(ASM) was defined in this study to express the slip resistance of a robot foot when it lands on a projection with half circular-, triangular- or rectangular cross section, assuming that uneven surface consists of projections having these kind of cross sections in different sizes. Based on the ASM analysis, the slip conditions for the two feet were experimentally confirmed. The results showed that the slip resistance of the new foot is not only higher than that of the conventional point contact type foot but also less sensitive to the surface friction coefficient.

Key Words: Quadruped Robot (4족 보행 로봇), Robot Foot (로봇 발), Toes (발가락), Parallel Link (평행 링크), Uneven Surface Landing (비평탄 지면 착지), Anti-slip Margin (미끄럼 억제 여유도)

기호설명

α =inclination angle of landing force

F, F_n, F_t =landing force, its normal and tangential components

$F_f = \mu F_n$ =friction force on toe

F_a, F_b =landing forces on rear and front toe, respectively

l_1, l_2 =lengths of rear and front link, respectively

μ =friction coefficient

M_a, M_b =moments acting on the tips of rear and front toe,

respectively

M_{AS} =anti-slip margin

r =radius of half-cylindrical projection

x =distance from origin to center of rotation

θ_p =base angle of triangular projection

1. 서론

4 족형 로봇이 비평탄 지면에서 안정된 보행을 유지하기 위해 고려해야 할 요소 중의 하나가 로

발의 구조와 기능이다. 4족 보행 로봇의 발은 보행 지면의 불규칙한 요철과 경도를 고려하여 설계되어야 한다. 로봇 발로서 원형이나 사각형의 평판,¹ 또는 발목 관절이 없는 점접촉형 발을 사용하면 비평탄 보행 지면에서 착지할 때 발바닥이 노면에 밀착되지 못할 뿐만 아니라, 노면과의 접촉이 불완전하여 슬립을 일으키기 쉽다. 만일, 발바닥이 노면에서 미끄러져 로봇의 동적 균형이 깨지면 신속한 자세 수정을 해야 하므로 순간적으로 높은 동력이 다리 구동관절들에 공급되어야 하며 이것이 충족되지 않으면 로봇은 전복될 수 있다.

따라서 힘로 보행용 로봇 발은 노면에 요철이 있더라도 착지 후에는 착지점이 확고하게 유지되는 구조를 갖춰야 한다. 그리고 무른 땅에서는 착지된 발이 지면 밑으로 빠지는 것을 방지할 수 있도록 충분한 접지 면적을 보장해야 한다. 이와 같이 로봇 발을 설계하기 위해서는 다양한 요구 조건을 동시에 고려해야 하는 어려움이 있다.

Raibert²의 로봇 발은 일자형 정강이 끝에 발목 관절 없이 반구형 고무를 부착한 것으로 지면과 점접촉을 이룬다. 보행제어기의 능력이 아무리 뛰어나더라도 접지력 부족으로 인해 자갈밭, 경사면에서 슬립이 발생하는 것을 구조적으로 피할 수 없다. 슬립이 많이 발생할수록 다리 구동 관절은 안정된 자세의 동적인 회복을 위해 높은 제어 동력을 소비하게 된다.

Hong³의 로봇 발은 평행 링크에 의해 연결된 전후 한 쌍 두 개의 발가락을 사용함으로써 발목 관절이 없이 평행 링크의 회전에 의해 정강이의 피치 회전이 가능하도록 하였다. 점접촉형 발을 사용할 때처럼 정강이의 피치 회전 중심이 지면 위에 놓이는 것은 동일하지만 지면 접촉은 두 개의 발가락에 의해 이루어진다. 이로 인해 힘로에서의 슬립 방지에 유리하다는 장점이 있다. 단, 이 로봇 발은 정강이의 좌우 롤 방향 회전에 대해서는 평행링크의 효과를 얻지 못하기 때문에 실제의 비평탄 지면에 적용하는 데에는 한계가 있었다.

2족 보행 로봇을 위한 Kim⁴의 로봇 발도 비평탄 지면을 고려하여 앞꿈치와 뒷꿈치로 나뉜 점이 Hong의 발과 유사하나 두 개의 구동장치를 요구하며, Hashimoto⁵의 로봇 발은 네 개의 발가락이 각자 상하로 움직일 수 있어서 비평탄 지형에서도 발가락이 항상 지면에 접촉할 수 있다. 그러나 발가락의 위치를 구속하기 위한 구동장치가 필요하며 이로 인해 동적 보행에 적용하는데 불리하다.

로봇 다리의 구결면(sagittal plane)에 대해서만 지면 요철을 고려한 Hong의 평행 링크형 로봇 발을 관상면(coronal plane)에 대해서도 동일한 작용을 하도록 이중 평행 링크의 구조로 개량한다면, 구동장치를 전혀 사용하지 않는 장점을 유지하면서 4족 보행 로봇 발로서 비평탄 지면에 대응하는 능력이 향상될 것으로 기대된다. 그러나 평행 링크로 동작하는 로봇 발의 기본 특성이 정량적으로 평가된 바가 아직 없었기 때문에 이에 대한 연구가 요구된다. 본 논문에서는 그 첫 단계로서 구결면, 또는 관상면에 수직인 특정 형상의 2 차원적 돌출물에 로봇 발이 착지할 때의 소위 anti-slip margin을 수학적으로 정의하였고 이것을 기준으로 하여 공통적으로 발목 관절이 없는 점접촉형 발과 평행 링크형 발의 착지 슬립 특성을 비교하였다.

2. 이중 평행 링크형 로봇 발의 구조

이중 평행 링크형 로봇 발은 Fig. 1에서와 같이 로봇의 관상면과 평행인 $y-z$ 평면의 평행 링크, 이 평행 링크와 발목을 연결하며 로봇의 구결면과 평행을 이루는 $x-z$ 평면 평행 링크로 구성된다.

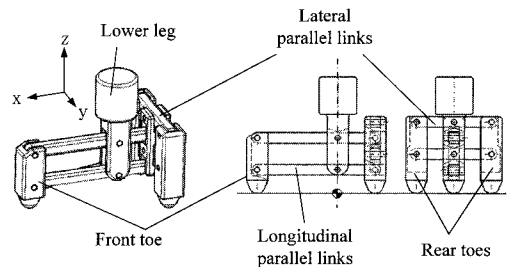
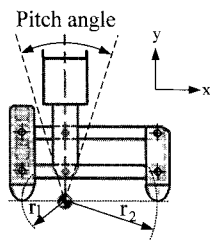


Fig. 1 Basic structure of double parallel linked robot foot

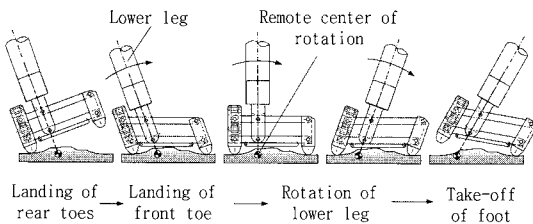
평행 링크에 의해 발가락 끝의 궤적은 Fig. 2a에서 보는 바와 같이 원호를 형성한다. 즉, 각 발가락 끝을 연결한 가상의 링크는 정강이의 중심선과 교차하는 점을 중심으로 회전한다. 이 점을 본 논문에서는 원격회전 중심으로 표현하였다. 따라서 Fig. 2b에서와 같이 로봇 발이 착지하여 몸체가 x -축 방향으로 전진하면서 정강이가 피치(pitch) 방향 회전을 할 때 xy 평면의 평행 링크는 정강이가 항상 이 원격회전 중심에 대해 회전하도록 작용하며, 이때 앞발가락과 뒷발가락의 착지점은 변하지 않고 단지 두 발가락의 경사각만 변한다. 즉, 정강이의 피치 회전을 위한 발목 관절이 필요없음

며, 그 역할을 평행 링크가 맡게 된다.

마찬가지로 로봇의 관상면 상에 존재하는 노면 요철에 대해서는 Fig. 3 과 같이 $y-z$ 평면의 평행 링크에 의해 정강이의 좌우 롤(roll) 방향 회전 중심이 좌우 발가락 끝의 연장선 상에 위치한 상태에서 좌우의 발가락이 지면과 밀착하게 된다.



(a) Tip trajectories of toes on x-y plane



(b) Operation of parallel links on saggital plane

Fig. 2 Working principle of double parallel linked robot foot on the saggital plane

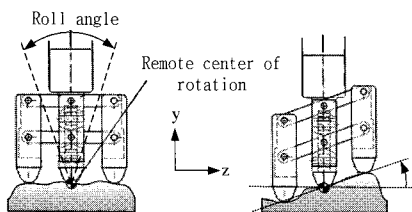


Fig. 3 Operation of robot foot on the coronal plane

3. Anti-slip margin 에 의한 착지 안정도 해석

실제 비평탄 지면에서 발이 착지할 때 고려해야 할 조건들을 크게 분류하면, 크고 작은 돌들이 박혀 있는 지면에서의 불규칙한 바닥 돌출물, 모래나 진흙 발과 같이 부드러운 노면에서의 낮은 지면 경도, 지면의 경사각, 작은 돌이 깔려 있거나 진흙으로 덮인 지면의 낮은 마찰계수 등이라고 할 수 있다.

비평탄 지면에 대한 로봇 발의 착지 성능을 일

관된 조건에서 시험하기 위해서는 다양한 조건의 지면을 표현할 수 있는 모델이 정의되어야 한다. 그러나 그 불규칙성을 취급하는 데에는 한계가 있고 그 결과를 객관화하는 것은 어려운 과제이다.

따라서 본 논문에서는 평행 링크를 응용한 로봇 발의 성능을 절대 평가하는 것이 아니라 보편적으로 사용되는 점접촉형 발과 비교 평가하는 데 초점을 맞췄다. 그리고 비평탄 지면의 형상을 표현함에 있어서 비평탄 지면은 Fig. 4 와 같이 반구, 삼각형, 사각형 돌출물들이 다양한 크기로 조합되며, 로봇 발은 이들 돌출물 중의 하나에 착지한다고 가정하였다. 그리고 지면이 딱딱하다고 가정하면, 착지 시에 슬립이 발생하는 조건을 수학적으로 표현할 수 있으며, 이것을 실험적으로 검증하는 것이 가능하게 된다.

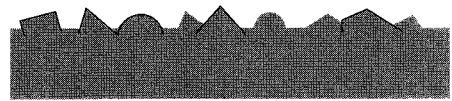


Fig. 4 Simplified model of uneven surface

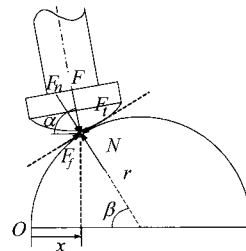


Fig. 5 Acting forces on point-contact type foot landing on half-cylindrical projection

로봇 발이 돌출물 위에 착지했을 때 미끄러지는 것을 방지하려는 힘의 여유를 anti-slip margin (ASM)으로 정의하고, Fig. 5 에서 보는 바와 같이, 반구형 돌출물에 점접촉형 발이 착지할 때의 평면 운동에 대해 ASM 을 유도하면 아래 식과 같다.

$$M_{AS} = \frac{F_f - F_t}{\mu F} = \frac{\mu F_n - F_t}{\mu F}$$

착지력의 접선성분 F_t 는 발이 접선방향으로 미끄러지도록 작용하며, 마찰력 F_f 는 그 반대 방향으로 작용한다. 따라서 F_f 와 F_t 의 차이는 발이 미

끄러지는 것을 방지하는 힘이며, 이 힘은 $\alpha = \beta$ 일 때 발생하는 최대 마찰력, μF 로 나눔으로써 무차원화할 수 있다. 즉, ASM 이 1 이면 F_t 성분이 영인 상태이고 ASM 이 0 이하이면 슬립을 유발하는 힘이 마찰력보다 큰 것을 의미한다.

반구형 돌출물에 대한 점접촉형 발의 ASM 은 발의 착지 위치 x 에 따라서 다음의 두 가지 경우로 구분된다.

1) Case 1; $0 < x < r$ (단, $\alpha \geq \beta$)

$$M_{AS} = \frac{\mu F \cos(\alpha - \beta) - F \sin(\alpha - \beta)}{\mu F}$$

2) Case 2; $r < x < 2r$ (단, $\alpha \leq \beta$)

$$M_{AS} = \frac{\mu F \cos(\beta - \alpha) - F \sin(\beta - \alpha)}{\mu F}$$

여기서, r = 반지름, $\beta = \cos^{-1}(1 - x/r)$

반구형 돌출물에 대한 평행링크 로봇 발의 ASM 은 착지 위치에 따라 Fig. 6 과 같이 6 가지의 조건으로 구분하여 아래와 같이 유도할 수 있다. 여기서 평행 링크 발의 위치 x 는 두 발가락 끝 사이의 원격회전 중심을 기준으로 표시하였다. 원격회전 중심에 α 의 각도로 작용하는 착지력 F 는 두 발가락 끝에 F_a 와 F_b 로 배분된다. 뒷발가락과 앞발가락에 작용하는 슬립 저항력을 $(F_{af} - F_{at})$ 와 $(F_{bf} - F_{bt})$ 로 표현하였고 그림에는 로봇 발이 뒤로 미끄러진다고 가정한 경우의 (+)값 방향으로 표시되었다. 여기서, F_{af} 와 F_{at} 는 뒷발가락에 작용하는 마찰력과 F_a 의 접선방향 성분, F_{bf} 와 F_{bt} 는 앞발가락에 작용하는 마찰력과 F_b 의 접선방향 성분이다. F_{at} 와 F_{bt} 는 로봇 발의 슬립 방향으로 작용할 때 (+)값을 갖는다.

두 발가락의 순간 회전 중심을 기준으로 각 발가락 끝에 작용하는 슬립저항력의 모멘트 M_a 와 M_b 를 비교했을 때 이 모멘트가 큰 발가락 끝을 기준으로 ASM 을 유도하였다. 여기서, M_a 와 M_b 의 부호는 로봇 발이 미끄러지는 방향과 반대일 때 (+)값을 갖는다. 그리고 기준 발가락이 미끄러지는 방향과 반대로 작용하는 힘은 슬립에 대해 저항하는 힘이고 미끄러지는 방향으로 작용하는 힘은 슬립을 유발하는 힘이므로 그 차이로부터 ASM 을

유도하였다.

Case 1 을 예로 들어 ASM 의 유도과정을 상세히 설명하면, 로봇 발이 뒤로 미끄러진다고 가정할 때 발가락 끝에 작용하는 각각의 모멘트는

$$M_a = (F_{af} - F_{at}) \times r_a, M_b = (F_{bf} - F_{bt}) \times r_b$$

이다. 여기서, r_a 와 r_b 는 순간회전 중심으로부터 각 발가락 끝까지의 거리이다. M_a 가 M_b 보다 크면 뒷발가락이 주된 슬립 저항을 발생시킨다고 볼 수 있다. 따라서 뒷발가락에 작용하는 슬립 저항력은

$$(F_{af} - F_{at}) + \mu(F_{bf} - F_{bt}) \sin \gamma - (F_{bf} - F_{bt}) \cos \gamma$$

이다. 여기서, 둘째 항과 셋째 항은 앞발가락에 작용하는 접선력 $(F_{bf} - F_{bt})$ 이 뒷발가락에 가하는 마찰력과 접선력에 해당된다. 그리고 교각 γ 는 $(F_{af} - F_{at})$ 벡터의 방향을 기준으로 $(F_{bf} - F_{bt})$ 벡터의 방향을 반시계 방향으로 측정된 값이다.

반대로 M_b 가 M_a 보다 크면 앞발가락이 주된 슬립 저항을 발생시키므로 뒷발가락에 작용하는 접선력 $(F_{af} - F_{at})$ 이 앞발가락에 가하는 마찰력과 접선력을 중첩시키면 슬립저항력은

$$(F_{bf} - F_{bt}) + \mu(F_{af} - F_{at}) \sin \gamma - (F_{af} - F_{at}) \cos \gamma$$

이다. 여기서, 교각 γ 는 $(F_{bf} - F_{bt})$ 벡터의 방향을 기준으로 $(F_{af} - F_{at})$ 벡터의 방향을 반시계 방향으로 측정된 값이다.

위 식은 로봇 발이 앞으로 미끄러진다고 가정할 때에도 동일하게 유도된다. 그리고 다른 착지 조건에 대해서 동일하게 사용될 수 있다. 따라서 평행 링크형 발에 대한 ASM 을 표현하면 다음과 같다. 즉,

$M_a \geq M_b$ 인 경우

$$M_{AS} = \frac{\mu(F_{bf} - F_{bt}) \sin \gamma - (F_{bf} - F_{bt}) \cos \gamma + F_{af} - F_{at}}{\mu F}$$

$M_a < M_b$ 인 경우

$$M_{AS} = \frac{\mu(F_{af} - F_{at}) \sin \gamma - (F_{af} - F_{at}) \cos \gamma + F_{bf} - F_{bt}}{\mu F}$$

단, 6 가지 착지 조건에 대한 교차각의 기하학적인 크기는 다음과 같다.

- 1) Case 1; 앞 발가락만 돌출물 위에 착지

$$\gamma = \pi/2 - (\theta_1 + \theta_2)$$
- 2) Case 2; 두 발가락의 착지점 위치 $\leq r$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(1 - (l_1 + l_2)^2 / 2r^2 \right)$$
- 3) Case 3; 앞 발가락의 착지점 위치 $\geq r$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(1 - (l_1 + l_2)^2 / 2r^2 \right)$$
- 4) Case 4; 원궤회전 중심의 위치 $\geq r$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(1 - (l_1 + l_2)^2 / 2r^2 \right)$$
- 5) Case 5; 뒷 발가락의 착지점 위치 $\geq r$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(1 - (l_1 + l_2)^2 / 2r^2 \right)$$
- 6) Case 6; 뒷 발가락만 돌출물 위에 착지

$$\gamma = \pi/2 - (\theta_1 + \theta_2)$$

여기서, $l_1, l_2 =$ 뒷발가락과 앞발가락 링크의 길이

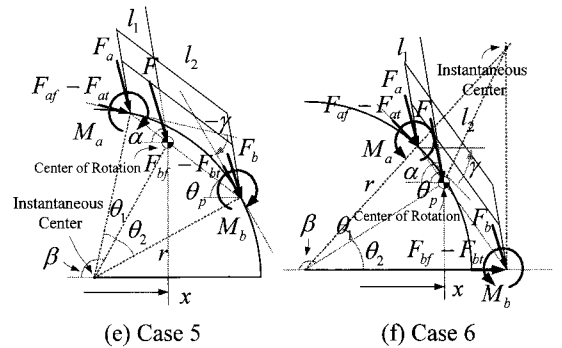
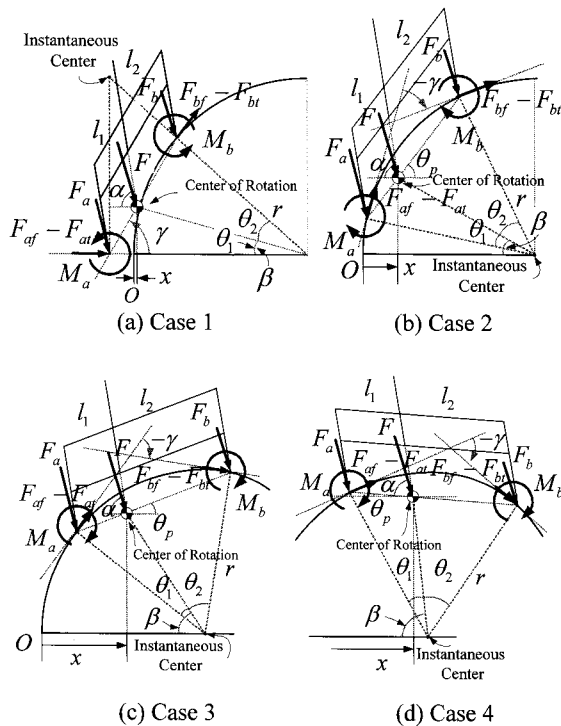


Fig. 6 Acting forces on parallel linked foot according to landing position on half-cylindrical projection

위에서 유도한 ASM 식에 따르면, 돌출물의 크기가 정해지면, 점접촉형 로봇 발의 경우 지면의 마찰계수, 착지 위치, 착지력의 방향에 따라 미끄러짐의 여부가 결정된다. 반면에 평행링크 로봇 발의 경우는 평행링크의 길이 l_1 과 l_2 에 의해서도 ASM을 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

삼각형 돌출물은 반구형 돌출물의 특수한 형태에 해당된다. 즉, Fig. 7 과 같이 착지점의 구간 별로 접선력의 방향이 일정한 값을 띠는 것이 반구형 돌출물과 다른 점이다. 그리고 삼각형 돌출물에 대한 평행링크 로봇 발의 ASM은 반구형 돌출물에서 두 접촉점의 접선의 기울기가 이루는 각도 γ 를 삼각형 돌출물의 양 밑각 θ_{p1} 과 θ_{p2} 에 대한 식으로 대체함으로써 구할 수 있다. 마찬가지로, 사각형 돌출물도 반구형 돌출물의 단순화된 변형으로 간주할 수 있으며 유사한 방법으로 각 로봇 발의 형태에 대해 ASM을 유도할 수 있다. 상세한 유도 과정의 설명은 생략하였다.

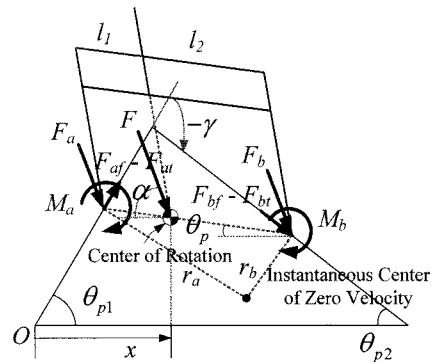
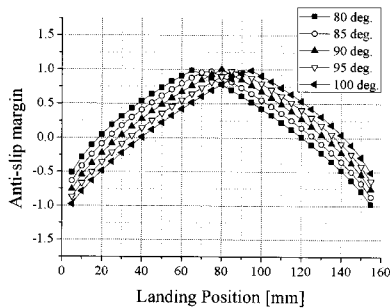


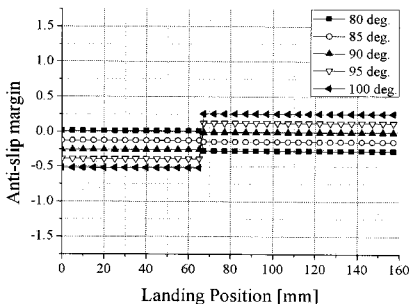
Fig. 7 Acting forces on parallel linked robot foot landing on triangular projection

반구형과 삼각형 돌출물에 대해서 ASM 을 계산한 결과를 예시하면 다음과 같다. Fig. 8 은 돌출물의 밀변의 길이가 160mm, 마찰계수가 0.85 일 때, 착지 각도 α 를 80° 에서 100° 까지 변화시키며 점 접촉형 발의 ASM을 반구형($r=80\text{mm}$)과 삼각형 모델 ($\theta_{p1} = 50^\circ, \theta_{p2} = 40.74^\circ$)에 대해 계산한 결과이다. 반구형 돌출물의 경우 α 에 따라 미끄러지지 않는 구간(즉, $M_{AS} > 0$ 인 구간)이 변하며, 삼각형의 경우 오르막에 착지하면 무조건 슬립이 발생하였고, 내리막에서는 α 가 95° 이상 되어야 슬립이 없는 것으로 나타났다.

Fig. 9 는 동일한 조건에서 l_1 과 l_2 가 각각 45mm 인 평행링크 발을 사용하였을 경우, 각 돌출물 형태에 대해 ASM 을 계산한 결과이다. 점접촉형 발보다 미끄러지지 않는 구간이 훨씬 넓고 삼각형의 경우 ASM 이 훨씬 크며 착지각도 α 가 변하더라도 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 정강이가 피치 회전을 하는 동안에도 점접촉형 발과 달리 슬립이 발생하지 않고 안정된 착지를 유지하게 된다.

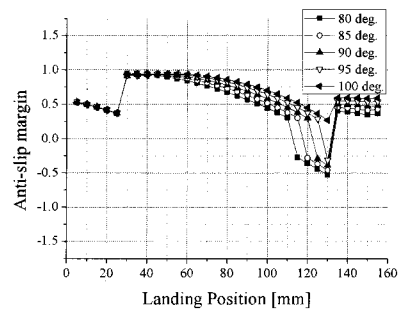


(a) Half-cylindrical projection

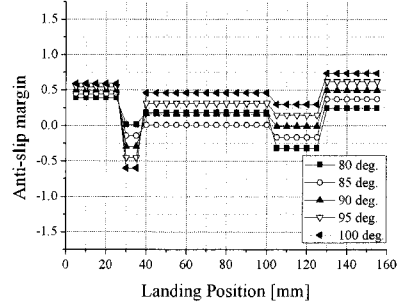


(b) Triangular projection

Fig. 8 ASM analysis results for point-contact type robot foot ($\mu=0.85$)

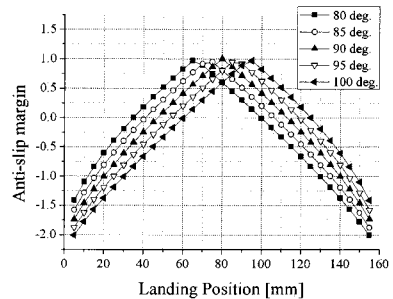


(a) Half-cylindrical projection

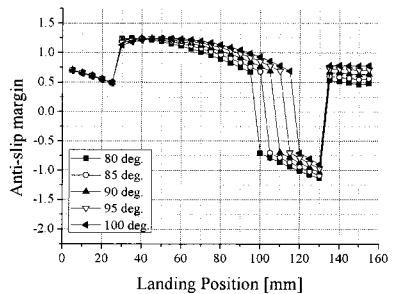


(b) Triangular projection

Fig. 9 ASM analysis results for parallel linked robot foot ($\mu=0.85$)



(a) Point-contact type robot foot



(b) Parallel linked robot foot

Fig. 10 Comparison of ASM results for half-cylindrical projection ($\mu=0.45$)

평행링크형 발의 장점은 마찰계수가 낮을 때 잘 나타난다. Fig. 10 은 반구형 돌출물의 마찰계수가 0.45 일 때, 점접촉형 발은 $M_{AS} > 0$ 인 구간이 약 40mm 에 불과하여 $\mu = 0.85$ 일 때보다 40mm 정도 감소한다는 것을 보인다. 그러나, 평행링크 발의 경우에는 약 10mm 만 감소하는 것으로 나타난다.

이와 같이 돌출물에 착지했을 때 점접촉형 발의 슬립 발생 여부는 전적으로 마찰력에 의해 결정되지만, 평행링크 발은 두 발가락이 돌출물의 요철과 맞물리면서 발가락에 작용하는 접선력에 의해서도 영향을 받는 것을 알 수 있다.

4. 실험 및 결과

ASM 해석을 통해 예측한 조건에서 로봇 발이 미끄러지지 않는 지를 확인하기 위해 실험 장치를 제작하였으며, 이 장치는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 지면 돌출물에 대해 임의의 각도로 로봇 발을 착지시키면서 일정한 힘을 가할 수 있는 공압실린더와 다리의 각도를 제어해 주는 관절 모터, 착지 후 정강이를 피치방향으로 회전시키며 몸체를 전진시키는 직선 구동장치와 이 때 정강이가 자유롭게 회전할 수 있도록 관절 모터와의 연결을 풀어주는 클러치로 구성된다. 몸체가 전진하였다가 다시 후진할 때에는 공압실린더를 후진시킨 상태에서 클러치를 체결하여 관절 모터에 의해 정강이가 원점 위치로 복귀하게 된다. 로봇 발에 작용하는 힘을 측정하기 위해 공압실린더와 정강이 사이에는 로드 셀을 설치하였다. 로봇 발과 지면 돌출물은 실험 조건에 따라 교체함으로써 상호 비교가 가능하도록 하였다. 실험 조건은 ASM 해석과 동일하게 반구형 돌출물의 반지름 = 80mm, 착지력 = 30kgf, 삼각형 돌출물의 밑변의 길이 = 160mm, $\theta_{p1} = 50^\circ$, $\theta_{p2} = 40.74^\circ$, $\mu = 0.85$ 으로 통일하였다. 평행 링크 로봇 발의 $l_1 = l_2 = 45mm$, pitch 와 roll 방향 회전각은 각각 $\pm 30^\circ$ 이며, 점접촉형 로봇 발은 발 끝이 40mm 의 반경을 갖도록 제작하였다(Fig. 5 참조). 여기서, 평행 링크 발의 pitch 와 roll 방향 최대 회전각은 클수록 좋으나 실험에 사용된 로봇 발과 돌출물의 크기, 착지각 α 의 조절범위 ($80^\circ \sim 100^\circ$)를 고려하여 결정되었다.

Fig. 12 는 반구형 돌출물에 로봇 발이 $\alpha = 80^\circ$ 의 각도로 착지하여 $\alpha = 90^\circ$ 가 될 때까지 몸체가 전진하는 동안 로드 셀의 신호를 측정한 결과이다.

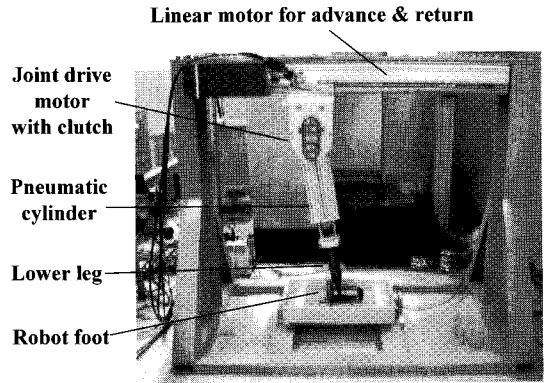
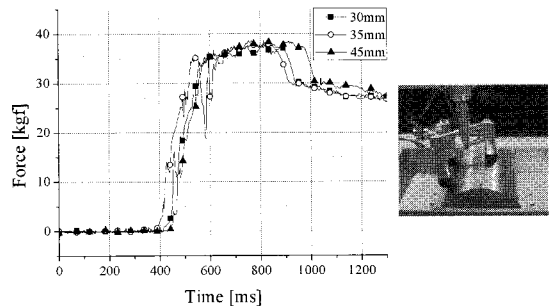
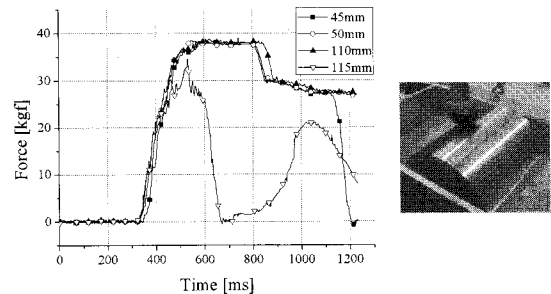


Fig. 11 Experimental apparatus

로봇 발에 슬립이 발생하면 돌출물과의 접촉력이 30kgf 을 유지하지 못하고 급격히 감소하게 된다. 평행링크 발은 $x = 20mm \sim 125mm$ 와 $x = 150mm \sim 160mm$ 의 영역에서 이런 슬립이 발생하지 않았다. 그러나 점접촉형 로봇발은 $x = 45mm \sim 110mm$ 의 영역을 벗어나면 Fig. 12(b)에서 $x = 115mm$ 일 때와 같이 슬립이 발생하였다. 이 결과는 ASM 해석 결과와 잘 일치하였다.



(a) Parallel linked robot foot



(b) Point-contact type robot foot

Fig. 12 Loadcell signal according to landing position on half-cylindrical projection

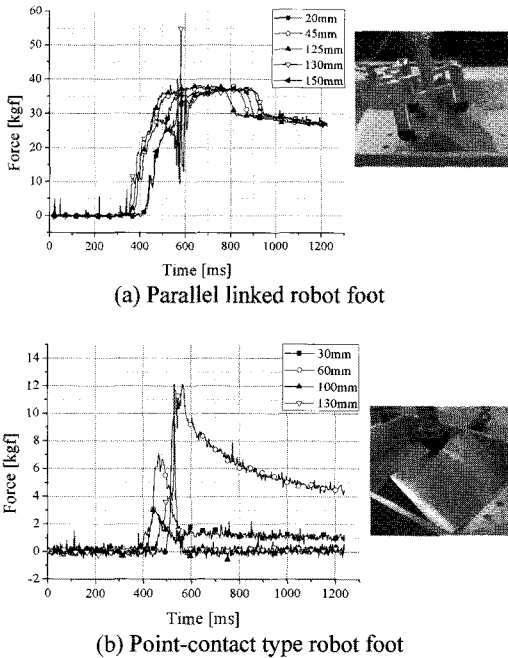


Fig. 13 Loadcell signal according to landing position on triangular projection

Fig. 13 은 삼각형 돌출물에 로봇 발이 착지할 경우의 실험 결과이다. 평행링크 로봇발의 경우, Fig. 9(b)와 같이 $x=0\text{mm}\sim 30\text{mm}$, $x=45\text{mm}\sim 115\text{mm}$, $x=135\text{mm}\sim 160\text{mm}$ 의 영역에서 슬립이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 점접촉형 로봇발은 $\alpha=80^\circ\sim 90^\circ$ 인 실험 조건에서는 Fig. 8(b)에서와 같이 어느 위치에 발이 착지하더라도 슬립이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

실험 결과에 따르면 ASM 해석을 통해 돌출물의 형상에 따라서 로봇 발이 착지할 때 미끄러지는 구간과 미끄럼 방지력의 여유를 정확히 예측하는 것이 가능함을 확인할 수 있다. 그리고 ASM 해석 결과와 동일하게 평행링크 발은 착지점이 서로 다른 복수의 발가락들이 돌출물의 요철과 맞물림으로써 미끄러짐 없이 확실하게 비평탄 지면에 착지할 수 있는 영역이 점접촉형 발에 비해 현저히 넓은 것을 알 수 있다.

구결면에 대한 위와 같은 해석 결과는 Fig. 14와 같이 로봇 다리의 관상면에 대해서도 적용될 수 있다. 단, 앞발가락이 점접촉형이므로 앞발가락과 뒷발가락에 작용하는 착지력 F_a 와 F_b 의 배분 비율에 따라 점접촉형 발의 ASM과 평행링크형 발의 ASM(Fig. 8과 Fig. 9 참조)을 중첩하여 전체 ASM

을 구해야 한다. 즉,

$$M_{AS} = M_{AS|point\ contact\ type} \times \frac{F_b}{F} + M_{AS|parallel\ link\ type} \times \frac{F_a}{F}$$

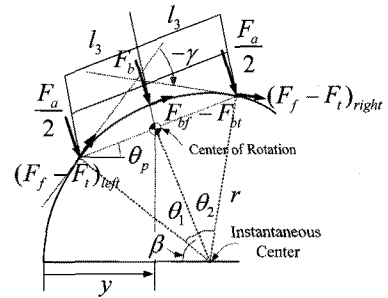


Fig. 14 Acting forces on robot foot on coronal plane

이러한 방법으로 구해진 로봇 발의 ASM은 평행 링크형 뒷발가락의 특성이 주도적으로 반영되어 Fig. 9와 유사하게 나타난다. 즉, ASM의 크기는 다소 차이가 있으나 ASM이 영보다 큰 착지 구간은 거의 일치한다. 이것을 실험적으로 검증하는 것은 Fig. 11의 실험 장치에서 다리 관절을 설계할 때 로봇 발이 좌우 방향으로도 슬립을 일으킬 수 있도록 미리 고려하지 않은 이유로 불가능하였다.

5. 결론

본 논문에서 정의한 anti-slip margin(ASM)을 이용하여 평행링크형 로봇 발과 점접촉형 로봇 발이 구결면 상에서 반구형, 삼각형 돌출물에 착지할 경우의 특성을 비교한 결과, 평행링크형 로봇 발이 미끄러지지 않고 착지할 수 있는 영역이 월등히 넓고 특히 마찰계수의 변화에 거의 영향을 받지 않는 것을 해석적으로 확인하였으며, 실험을 통해서 입증하였다. 이러한 결과는 로봇 다리의 관상면에 정의된 돌출 형상에 대해서도 적용될 수 있다.

향후 과제로서 이중 평행 링크형 발의 구결면이나 관상면에 대한 2차원적 ASM 해석을 3차원형상의 돌출물에 대한 해석으로 확장하고, 실험적으로 다양한 조건에서 검증하는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원에서 주관하는

견마형 4족 보행 로봇 플랫폼 개발 과제의 연구비 지원을 받아 수행된 것임.

참고문헌

1. Lee, W. and Raibert, M., "Control of Hoof Rolling in an Articulated Leg," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1386-1390, 1991.
2. Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R. and The Big Dog Team, "Big Dog, the Rough-Terrain Quadruped Robot," Proc. of the 17th World Congress, IFAC, pp. 10822-10825, 2008.
3. Hong, Y. S., Lee, H. K., Yi, S. Y. and Lee, C. W., "The design and control of a jointed-leg type of a quadrupedal robot for locomotion on irregular ground," Robotica, Vol. 17, No. 4, pp. 383-389, 1999.
4. Kim, G. S., Kim, H. M., Shin, H. J., Huh, D. C., Kim, C. K. and Yoon, J. W., "Development of a humanoid robot's intelligent foot," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 197-198, 2008.
5. Hashimoto, K., Sugahara, Y., Hayashi, A., Kawase, M., Sawato, T., Endo, N., Ohta, A., Tanaka, C. and Takanishi, A., "New Foot System Adaptable to Convex and Concave Surface," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1869-1874, 2007.