

고관절 구동 방식을 갖는 바퀴-다리형 로봇과 지면 간 접촉점에서의 마찰계수 추정

Estimation of the Frictional Coefficient of Contact Point between the Terrain and the Wheel-Legged Robot with Hip Joint Actuation

신 동 환¹, 안 진 웅⁺, 문 전 일¹

Dong-Hwan Shin¹, Jinung An⁺, Jeonil Moon¹

Abstract This paper presents the estimation of the frictional coefficient of the wheel-legged robot with hip joint actuation producing maximum tractive force. Slip behavior for wheel-legged robot is analytically explored and physically understood by identification of the non-slip condition and derivation of the torque limits satisfying it. Utilizing results of the analysis of slip behavior, the frictional coefficients of the wheel-legged robot during stance phase are numerically estimated and finally this paper suggests the pseudo-algorithm which can not only estimate the frictional coefficients of the wheel-legged robot, but also produce the candidate of the touch down angle for the next stance.

Keywords: Wheel-Legged Robot, Hip Joint Actuation, Frictional Coefficient, Tractive Force

1. 서론

구조적인 관점에서 지상용 로봇은 크게 바퀴형(wheel type), 트랙형(track type), 그리고 다리형(legged type) 로봇으로 나눌 수 있다. 바퀴형 로봇은 평지 주행에 유리하고, 트랙형 로봇은 험지 주行的 장점이 있다. 다리형 로봇은 동물의 이동보행(locomotion)을 모방한 것으로 진술한 두 가지 유형의 로봇에 비해 주행 안정성은 떨어지나 평지와 험지 주행 모두에 장점이 있다. 최근 들어 주행 안정성을 보장하면서 평지 주행과 험지 극복 성능을 모두 높일 수 있는 로봇 플랫폼에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 바퀴와 트랙을 결합한 형태의 바퀴-트랙형(wheel-track type) 로봇^[1,2]과 다리와 바퀴를 융합한 바퀴-다리형(wheel-leg type) 로봇^[3-8]등이 이에 해당한다.

본 연구는 그림 1과 같이, 바퀴의 회전축(hub)을 중심

으로 3개의 다리(spoke)가 등간격의 방사형으로 뻗어 나온 구조를 갖는 바퀴-다리형 로봇을 고려하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 이 다리-바퀴형 로봇은 고관절(hip joint)만 전기모터 등과 같은 능동형 구동기를 갖고, 무릎관절 또는 발목관절 등은 구동기 없이 스프링을 갖는 단일 구동형(single actuating)구조이다. 이는 지상용 다리-바퀴형 로봇의 임무 중 하나인 넓은 영역의 정찰을 위해 평지에서 에너지 소모를 줄임과 동시에 안정적인 고속 주행을 위한 선택이다.^[3-8] 또한 제어 및 운용 관점에서

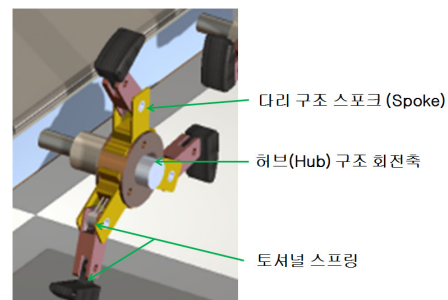


그림 1. 바퀴-다리형 로봇 개념도

Received : Apr. 30. 2011; Reviewed : Jul. 4. 2011; Accepted : Aug. 18. 2011

※ 본 연구는 교육과학기술부에서 지원하는 대구경북과학기술원 일반사업 (10-BD-0102)과 기관고유사업(11-RS-01)에 의해 수행되었습니다.

† 교신저자 : 대구경북과학기술원 실용로봇연구소 소장

¹ 대구경북과학기술원 로봇시스템연구부

주행 성능을 높이기 위한 큰 견인력(tractive force)의 생성은 중요한 이슈 중의 하나이다.

일반적으로 차량에서 널리 사용되는 TCS(Traction Control System)는 그림 2에 나타낸 바와 같이, 타이어력(tire forces) 즉 횡방향 조작성(manueverability)을 나타내는 측력(lateral force)과, 종방향 직진 운동 능력을 나타내는 견인력 모두 양호한 값을 가지는 이른바 최적의 주행 상태를 유지하도록 슬립율(slip ratio)을 조정한다. 다시 말해서, 그림 2의 빗금친 영역과 같이 비교적 우수한 견인력과 조작성을 가지도록 슬립율을 유지한다. 이는 타이어 형태의 바퀴형 로봇에 적용이 가능하다. 견인력이 최대인 지점을 지나게 되면, 슬립율이 커지고 측력 또한 감소하게 된다. 이 때 로봇의 조작성이 떨어져 목표로 하는 주행 방향을 이탈할 수 있으며, 모터 등으로부터 제공되는 구동력이 로봇의 진행방향 운동을 생성하는 데 충분히 사용되지 못하는 이른바 구동효율 감소가 발생하게 된다. 다리형 로봇은 물론 바퀴-다리형 로봇 역시, 지면과 접촉하는 착지점(foot point)에서 슬립이 발생하면 조작성능이 악화되어 이동보행(locomotion)능력을 훼손시킬 수 있다.

따라서 주행성능을 훼손하지 않는 범위에서 최적의 견인력을 제공할 수 있는 바퀴-다리형 로봇의 슬립 발생 조건을 도출하고 이에 부합하는 마찰계수와 착지각(touch down angle)를 결정하는 것은 중요하다. 본 논문은 고관절에 구동기를 갖는 바퀴-다리형 로봇의 슬립 발생 조건과 이 때 구동기의 구동 토크(torque)의 범위를 찾아내고, 이를 활용하여 최적 견인력 생성을 위한 마찰계수와 착지각(touch down angle)를 추정하고자 한다. 이를 위

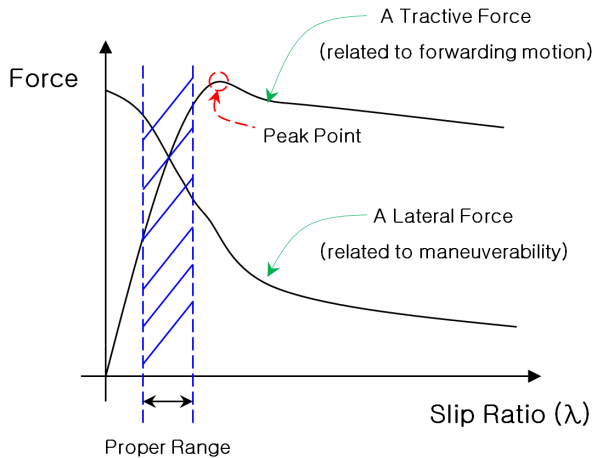


그림 2. TCS의 슬립율과 타이어력(측력과 견인력)의 관계

해 대상으로 단일다리모형(Inverted Pendulum model, IP Model)과 Spring Loaded Inverted Pendulum model, SLIP Model)과 2분절다리모형(2 segment model)을 고려한다.

2. 바퀴-다리형 로봇의 슬립 발생 조건

바퀴-다리형 로봇의 슬립 특성을 일반적인 관점에서 접근함으로써 바퀴-다리형 로봇의 슬립 발생 조건을 검토하여 구동 토크의 범위를 도출하고, 이를 단일다리모형 사례를 통해 물리적으로 고찰한다.

2.1 바퀴-다리형 로봇의 슬립이 발생하지 않는 조건

그림 3은 바퀴-다리형 로봇이 지면과 접촉할 때 바퀴와 다리의 속도와 구동 토크를 표시한 것이다. T 는 구동 토크, V 는 직진 방향의 속도, ω 는 각속도를 나타내며, 바퀴형 로봇은 바퀴의 회전 중심에서의 각속도이고, 다리형 로봇은 지면과 닿고 있는 착지점을 중심으로 다리가 회전하는 속도를 의미한다. 지면과 닿는 접촉점(contact point)을 C 로 표시한다. 바퀴의 경우, 접촉점에서 구름 운동(rolling motion)과 미끄러짐 운동(sliding motion)이 있다. 다리형 로봇의 다리는 바퀴와 달리 구름 운동 대신에 스위프 운동(sweep motion)이 있다. 스위프 운동은 입각기(stance phase, 발이 지면에 닿아 있는 시기) - 즉, 다리가 지면에 닿는 순간(touch down state)부터 떨어지는 순간(take off state)까지의 시기 - 에 착지점을 중심으로 다리가 회전하는 운동을 말한다. 따라서 바퀴-다리형 로봇에서 C 는 착지점이라 한다.

조류나 포유류 등의 동물들이 걷기(walking) 시의 걸음새(gait)는 다리 길이를 유지하는 형태(stiff leg)로 역진자(inverted pendulum)와 유사한 동적 거동을 하는 것으

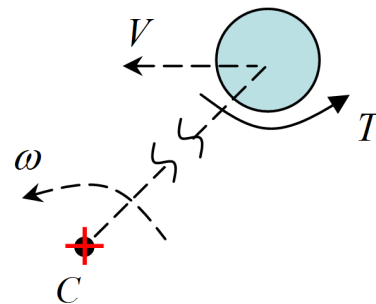
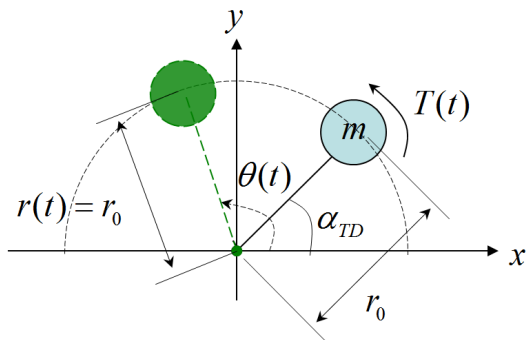


그림 3. 바퀴-다리형 로봇의 운동을 나타낸 개념도

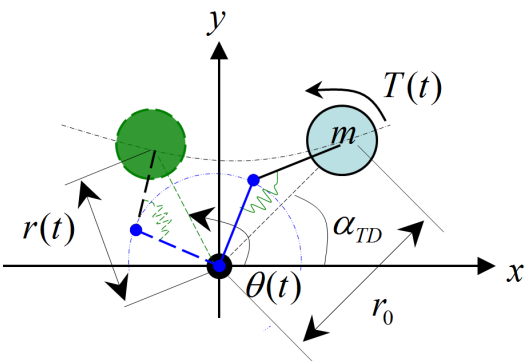
로 알려져 있다.^[10]

마찬가지로, 뛰기(running) 시의 걸음새는 마치 스카이 쿵쿵(pogoing)처럼 스프링이 달린 역진자(spring loaded inverted pendulum)와 동적 거동이 비슷한 것으로 알려져 있다.^[11] 이와 같이 생체들의 주행 거동 분석을 통해 도출된 역진자(inverted pendulum) 및 스프링이 달린 역진자(spring loaded inverted pendulum) 모형들은 고관절부에서 접촉점까지 한 개의 링크를 가지는 단일 다리 모형(1 segment model)이며, 실제 지상용 생체모방 로봇의 다리 컨셉 도출, 설계 및 제작에 활용되고 있다.^{[12][13]} 이러한 모형들과 더불어 연구되는 2분절 다리 모형(2 segment leg model), 3분절 다리 모형(3 segment leg model) 등은 스프링이 달린 역진자 모형에 비해 더 안정적인 걸음새를 갖는 것으로 알려져 있다.^[14] 2분절 다리 모형은 상박과 하박의 2개의 링크(link)를 무릎 관절(knee joint)로 연결한 구조이다.

그림 4는 역진자 모형과 2분절 다리 모형의 입각기를 도시한다. $\theta(t)$ 는 스위프(sweep) 각도를 나타내며, 부호는 반시계방향인 양의 값을 갖도록 표시한다. α_{TD} 는 착지각



(a) 역진자 모형의 입각기



(b) 2분절 다리 모형의 입각기

그림 4. 다리 모형 별 입각기

도, r_0 는 초기 다리 길이, $r(t)$ 는 스위프 운동 시의 다리 길이, $T(t)$ 는 구동 토크를 나타낸다. 그림에서와 같이, 스위프 운동 하는 동안 다리 길이 $r(t)$ 는 2분절 다리 모형의 경우 시간에 따라 변하지만, 역진자 모형에서는 변하지 않고 일정한 값, $r(t) = r_0$ 을 갖는다. 스위프 운동 시, 다리 모형에 작용하는 힘들을 그림 5에 나타낸다. 이는 고관절부에만 구동 토크가 작동하는 다리 모형의 경우, 다리 모형에 상관없이 동일하게 해석 및 적용할 수 있다. 그림 5로부터 지면에 수직인 방향으로 작용하는 수직력은 다음과 같이 산출된다.

$$F_N = mg + \frac{T(t)}{r(t)} \cos \theta(t) \quad (1)$$

따라서 마찰력과 견인력을 각각 식 (2)과 (3)로 쓸 수 있다.

$$F_{\text{FRICTIONAL}} = \mu \times F_N = \mu \left(mg + \frac{T(t)}{r(t)} \cos \theta(t) \right) \quad (2)$$

$$F_{\text{TRACTIVE}} = \frac{T(t)}{r(t)} \sin \theta(t) \quad (3)$$

식 (3)을 통해 큰 견인력을 갖기 위해서는 큰 구동 토크와 큰 스위프 각도가 필요하고, 반면에 짧은 다리 길이가 요구됨을 알 수 있다. 따라서 2분절 다리 모형은 스위프 운동 시 다리 길이를 짧게 유지하도록 컴플라이언스(compliance)가 큰 스프링을 장착하는 것이 유리함을 알 수 있다.

이는 2분절 다리 모형이 역진자 모형에 비해 더 큰 견인력을 만들 수 있음을 의미한다.

견인력이 마찰력보다 크면 슬립이 발생하므로, 슬립이

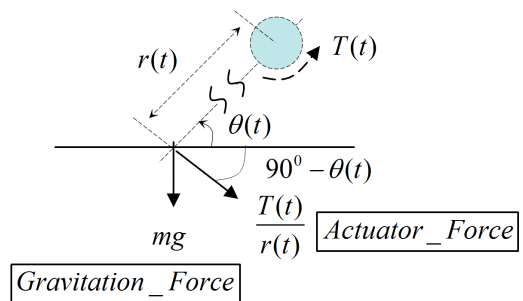


그림 5. 다리 모형의 자유 물체도

발생하지 않을 조건은 다음과 같다.

$$\mu[mg + \frac{T(t)}{r(t)} \cos \theta(t)] > \frac{T(t)}{r(t)} \sin \theta(t) \quad (4)$$

식 (4)를 구동 토크에 대해 정리하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T(t) < \frac{\mu mgr(t)}{\sin \theta(t) - \mu \cos \theta(t)} = T_{MAX_LIMIT_LEG}(r(t), \theta(t)) \quad (5)$$

여기에서, $T_{MAX_LIMIT_LEG}$ 는 슬립이 일어나지 않는 최대 구동 토크이며, 일반적인 마찰 거동에서와 같이 마찰계수는 $\tan \theta(t) > \mu$ 의 제약 조건을 갖는다.

$$\theta(t) > \tan^{-1}(\mu) = \theta_{MIN_LIMIT_LEG} \quad (6)$$

따라서 고관절 부에만 구동부가 장착된 로봇의 다리 모형에서 슬립이 일어나지 않는 최대 견인력은 식 (7)과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} F_{TRACTIVE_LIMIT_@LEGGED} &= \mu \times F_N(T_{LIMIT}, r(t), \theta(t)) = \frac{T_{LIMIT}}{r(t)} \sin \theta(t) \\ &= \frac{\mu mg \sin \theta(t)}{\sin \theta(t) - \mu \cos \theta(t)} = f(\theta(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

결과적으로, 주어진 마찰계수(μ)와 무게(m)을 가지는 다리형 로봇에서, 슬립이 발생시키지 않는 견인력의 한계치는 식 (7)과 같이 $\theta(t)$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

2.2 역진자 다리 모형 사례를 통한 슬립 거동 이해

단일 다리 모형 중 다리 길이가 변하지 않는 역진자모형(IP model)에서 스윙 각도에 따른 슬립이 발생하지 않는 고관절 구동 토크는 식 (5)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T(t) < \frac{\mu mgr_0}{\sin \theta(t) - \mu \cos \theta(t)} = T_{LIMIT_IP}(\theta(t)) \quad (8)$$

역진자 모형은 다리길이, $r(t) = r_0$ 이므로, 구동 토크의 임계치는 스윙 각도에만 의존한다. 그림 6은 착지점에

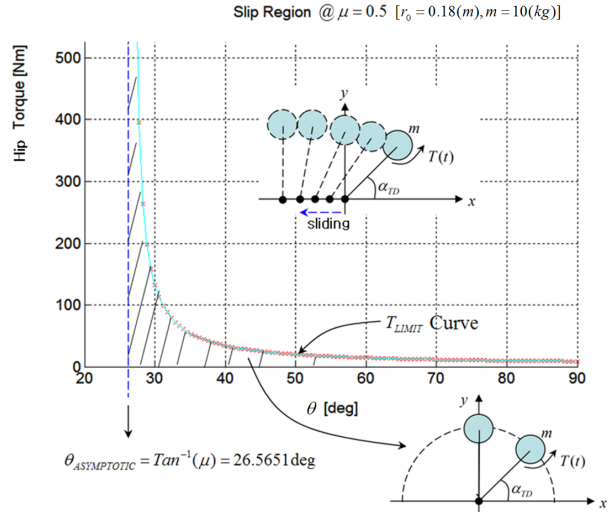


그림 6. 역진자 모형의 슬립 거동($\mu = 0.5$)

서 발생 가능한 슬립에 따른 역진자 모형을 갖는 다리의 동적 거동을 나타낸다. 마찰계수가 $\mu = 0.5$ 일 때, 역진자 모형의 설계 상수의 값들을 $r_0 = 0.18[m]$, $m = 10[kg]$ 로 한 예를 표시한다. T_{LIMIT} 곡선은 입각기에 있는 역진자 모형의 다리가 스윙 운동하는 동안 슬립 여부를 확인할 수 있는 고관절 구동 토크의 경계치라 할 수 있다. 빗금을 친 영역이 슬립이 발생하지 않는 영역이며, 세로축 점근선 $\theta_{ASYMPTOTIC}$ 은 식 (6)로부터 $\tan^{-1}(0.5)$ 인 값을 갖는다. 그림 6으로부터 점근선에 가까울수록 큰 구동 토크를 가질 가능성이 높아짐을 알 수 있고, 이 때 큰 착지각도를 갖도록 하는 것이 필요하다. 그림 7은 지면과 착지점 사이의 마찰계수, μ 의 변화에 따른 T_{LIMIT} 곡선의 추이를 나타내고 있다. 마찰계수가 클수록 점근선이 우측으로 이동하여 가능 구동 토크의 영역이 커짐을 알 수 있다.

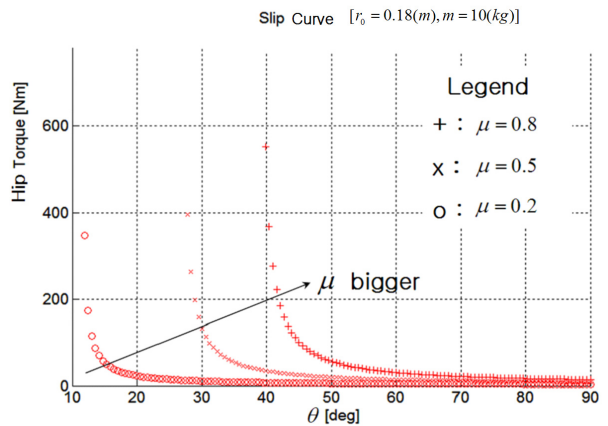


그림 7. 마찰계수의 변화에 따른 슬립 곡선

3. 바퀴-다리형 로봇의 마찰계수 추정

로봇 발이 착지하는 동안 슬립이 발생할 때, 로봇 발과 지면 간의 마찰계수를 실험을 통해 추정할 수 있는 방법을 제안하고, 2분절 다리 모형을 대상으로 사례 분석을 고찰하고자 한다.

3.1 실험적 마찰 계수 추정 방법

마찰계수를 실험적으로 추정하기 위해서는 슬립이 발생하지 않는 조건인 식 (5)의 각 변수들을 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 다리 길이, $r(t)$ 와 스윙각도, $\theta(t)$ 는 각 관절에 장착된 각도 센서나 높이 센서(엔코더, 포텐시오미터, PSD 등)로부터 측정되거나 계산될 수 있다. 또한 구동 토크는 고관절에 토크 센서를 장착하여 바로 측정하는 것이 최선의 방법이나 각도 센서에 비해 고가인 토크 센서를 장착하는 것은 본 연구가 목표로 하는 로봇의 취지에 맞지 않는 것으로 다른 방식의 접근이 필요하다. 즉 구동기의 토크-전류 특성을 이용하여 슬립이 일어나는 순간에 인가된 전류를 모터 드라이버를 통해 측정함으로써 슬립이 일어나지 않는 최대 구동 토크를 계산할 수 있다. 따라서 위에 언급한 각 변수들을 측정함으로써 식 (5)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{SLIP} = \frac{\tilde{\mu}_{EST} mgr_{SLIP}}{\sin \theta_{SLIP} - \tilde{\mu}_{EST} \cos \theta_{SLIP}} \quad (9)$$

$$\tilde{\mu}_{EST} = \frac{T_{SLIP} \sin \theta_{SLIP}}{mgr_{SLIP} + T_{SLIP} \cos \theta_{SLIP}}$$

결과적으로 추정된 마찰계수, $\tilde{\mu}_{EST}$ 는 슬립이 일어나는 순간의 구동 토크, T_{SLIP} , 스윙 각도, θ_{SLIP} , 다리 길이, r_{SLIP} 의 함수이며, 이 세 가지 정보를 알면, 고관절부에만 구동부가 장착된 경우, 다리 모형에 관계없이 마찰계수를 산출할 수 있다.

3.2 2분절 다리 모형의 마찰계수 추정

2분절 다리 모형의 변수들을 그림 8에 도시한다. L_1 은 상박의 길이, L_2 는 하박의 길이, θ_{KNEE} 는 무릎 각도, $h(t)$ 는 고관절의 지면에 대한 높이, 그리고 $r(t)$ 는 다리 길이, 즉 착지점으로부터 고관절 중심까지의 길이를 나타낸다.

2분절 다리모형의 마찰계수 추정을 위해 필요한 센서들은 다음과 같다. 발바닥에는 지면과 닿는지 여부를 확

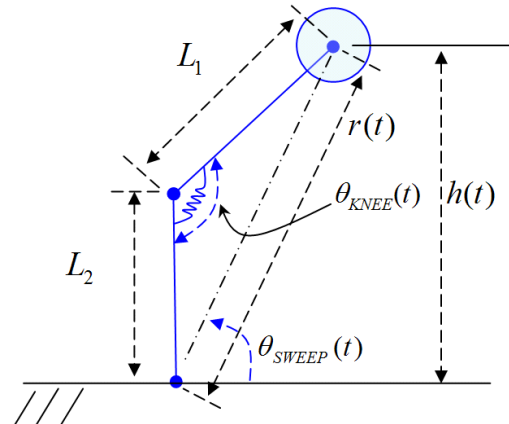


그림 8. 2분절 다리 모형의 변수

인하는 접촉 센서와 착지점에서 슬립이 일어나는지를 판단하는 다리모형의 주행방향(지면과 수평한 방향)의 변위센서를 발에 장착한다. 무릎 각도를 측정하기 위해 무릎 관절에 각도 센서를 장착한다. 그리고, 고관절의 높이 $h(t)$ 를 측정하기 위해 높이 센서를 고관절에 장착하고, 고관절 구동 토크는 모터 드라이버의 전류를 측정하여 계산한다. 이들 센서 정보들로부터 2분절 다리 모형의 마찰계수를 실험적으로 측정할 수 있는 방법을 그림 9에 제시한다.

발바닥에 장착된 접촉 센서를 통해 다리의 발이 지면에 닿은 상태인지, 닿지 않은 상태인지 식별한다. 지면에 닿은 경우, 고관절에 장착된 높이 센서를 이용하여 고관절의 높이, $h(t)$ 를 측정하고, 무릎 관절에 장착된 각도 센서를 통해 무릎 각도, $\theta_{KNEE}(t)$ 를 측정한다. 무릎 각도와 다리의 설계상수인 상박과 하박의 길이를 함께 써서 다리 길이, $r(t)$ 를 삼각법으로 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$r^2(t) = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos \theta_{KNEE}(t) \quad (10)$$

또한 산출된 $r(t)$ 와 높이 센서로 측정된 고관절의 높이, $h(t)$ 를 함께 사용해 스윙 각도를 계산한다.

$$\sin \theta_{SWEEP}(t) = \frac{h(t)}{r(t)} \quad (11)$$

스윙 각도는 접촉이 끝나는 순간까지 매 샘플링마다 측정한다. 또한 착지하는 순간(여기에서는 $t=0$)에서 스윙

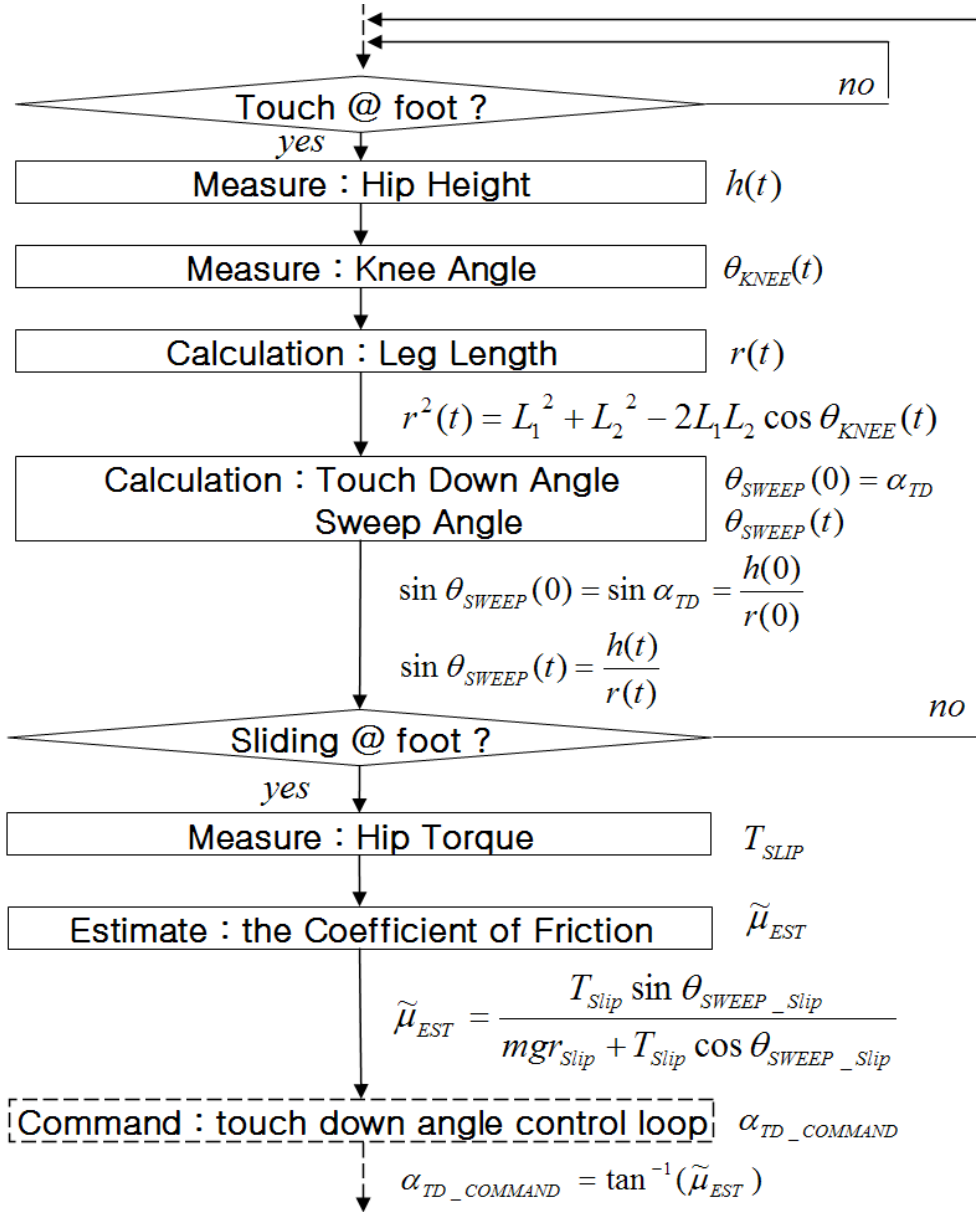


그림 9. 2분절 다리 모형의 마찰계수 추정 의사 알고리즘

각도인 착지 각도(touch down angle)를 쉽게 계산할 수 있다.

$$\sin \alpha_{TD} = \sin \theta_{SWEEP}(0) = \frac{h(0)}{r(0)} \quad (12)$$

다음으로 마찰계수 추정을 위해 지면과 닿은 발바닥에서 슬립발생 여부를 판단하는 단계가 필요하다. 슬립이 발생하면 구동 토크, T_{SLIP} 을 모터 드라이버로부터 측정함으로써 슬립 발생 바로 이전에 계산된 다리 길이를

r_{SLIP} , 스윙 각도를 θ_{SLIP} 로 하여 최종적으로 마찰계수를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\tilde{\mu}_{EST} = \frac{T_{SLIP} \sin \theta_{SWEEP_SLIP}}{m g r_{SLIP} + T_{SLIP} \cos \theta_{SWEEP_SLIP}} \quad (13)$$

추정된 마찰 계수는 다음 착지 순간의 착지 각도 명령으로 사용할 수 있다.

$$\alpha_{TD_for_NEXT_STANCE} = \tan^{-1}(\tilde{\mu}_{EST}) \quad (14)$$

4. 결론

- 1) 고관절 구동방식을 갖는 바퀴-다리형 로봇의 슬립 현상을 고찰함으로써 바퀴-다리형 로봇의 일반적인 슬립 조건을 도출하였다. 특히 단일 다리 모형 사례를 통해 슬립 상황에서 로봇의 동적 거동을 물리적으로 이해하고자 하였다.
- 2) 고관절 구동방식을 갖는 바퀴-다리형 로봇의 다리 모형에 상관없이 로봇의 저가형 센서 정보를 통해 마찰계수를 실험적으로 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 특히 2분절 다리 모형 사례를 통해 마찰계수를 추정할 수 있는 의사 알고리즘을 제안하고, 추정된 마찰계수를 활용해 다음 주기의 착지 각도 명령을 도출하였다.
- 3) 상기의 1)과 2)는 고관절에만 구동기가 장착된 다리를 갖는 바퀴-다리형 로봇이 입각기에 평편한 지면과의 균일한 접촉이 유지되는 것을 전제로 한 것이다. 따라서 실험을 통해 이들을 검증하고, 입각기에 지면과 접촉되는 부위가 달라지는 3 분절 다리 모형 - 발목관절과 발바닥을 갖는 다리 모형 - 이 최적의 주행을 하기 위한 발바닥 설계를 향후에 진행하고자 한다.

참고문헌

- [1] 김윤구, 김진옥, 광정환, 홍대한, 이기동, 안진웅, “도심지형 최적주행을 위한 휠-무한궤도 하이브리드형 모바일 로봇 플랫폼 및 메커니즘”, 로봇학회 논문지, 제5권 3호, pp.270-277, 2010.
- [2] 김윤구, 안진웅, 광정환, 문전일, “휠-트랙 하이브리드 모바일 로봇 플랫폼의 지형 적응성 및 사용자 친화성 향상을 위한 원격 조종기 설계와 개발”, 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제17권 6호, pp.558-565, 2011.
- [3] 신동환, 김영식, 권오석, 공동욱, 안진웅, “생체모방 모바일 로봇용 Two Segment Leg에 대한 연구”, 정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp.1271-1272, 2010.
- [4] 권오석, 신동환, 안진웅, “복합지형 주행을 위한 생체 모방 로봇 개념 연구”, 정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.139-140, 2009.
- [5] D.-H. Shin, Y. Kim, and J. An, “Effects of torsional stiffness, knee angle, and link ratio on the design of a biologically inspired mobile robot with two-segment legs”, Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems, pp.1835-1838, 2010.
- [6] D.-H. Shin, Y. Kim, S. Jeong, and J. An, “Design of a biologically inspired robot using CAD/CAE/RP”, Proc. of International Conference on Computer-Aided Manufacturing and Design, pp.467-470, 2010.
- [7] Y. Kim, D.-H. Shin, O.S. Kwon, and J. An, “Running model for a compliant wheel-Leg hybrid mobile robot by using a mass-spring model”, Proc. of International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Technologies, pp.289-292, 2011.
- [8] D.-H. Shin, J. An, S. Jeong, and Y. Kim, “The mechanical analysis of a legged field robot for the reduction of longitudinal mass-drift amounts”, Proc. of International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.1417-1418, 2011.
- [9] Y. Hori, Y. Toyoda, and Y. Tsuruoka, “Traction control of electric vehicle based on the estimation of road surface condition, basic experimental results using the test ev UOTMarch”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 34, pp.1131-1138, 1998.
- [10] G.A. Cavagna, N.C. Heglund, and C.R. Taylor, “Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure.” Am. J. Physiol. 233, pp.243-261, 1977.
- [11] R. Blickhan, “The spring-mass model for running and hopping”, Journal of Biomechanics 22 (11-12), pp 1217-1227, 1989.
- [12] RT, Schroer, Boggess, MJ, Bachmann, RJ, Quinn, RD, and Ritzmann, RE “Comparing Cockroach and Whegs Robot Body Motions”, Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation, 2004.
- [13] K. Galloway, J. Clark, and D. Koditschek, “Design of a multi-directional variable stiffness

leg for dynamic runnings", In ASME Int. Mech. Eng. Congress and Exposition. 2007.

- [14] J. Rummel and A. Seyfarth, "Stable running with segmented legs", International Journal of Robotics Research, 27:919-934, 2008.



신 동 환

2000 경북대학교 기계공학과 (학사)
2002 경북대학교 기계공학과 (석사)
2011 경북대학교 기계공학과 (박사 수료)

2006~현재 대구경북과학기술원 연구원
관심분야: 전문서비스로봇, CAE, 메커니즘해석
Email : sdh77@dgist.ac.kr



문 전 일

1984 서울대학교 기계공학과 (학사)
1986 KAIST 기계공학과(석사)
1998 시라큐스대학 (박사)
2004~2006 LS산전 중앙 연구 소장

2007~2010 호서대학교 로봇공학과 교수
2011~현재 대구경북과학기술원 로봇시스템연구부장
관심분야: 임베디드시스템, 의료서비스로봇, 원격 조작

Email : jimoon@dgist.ac.kr



안 진 용

1997 KAIST 기계공학과(석사)
2005 KAIST 로봇공학과(박사)
2005~2008 광운대학교 정보제어공학과 교수
2008~현재 대구경북과학기술원 실용로봇연구소장

관심분야: 군집지능, 진화알고리즘, 재활로봇, HRI, 군집로봇, 뇌기계인터페이스
Email : robot@dgist.ac.kr