

터빈 블레이드의 구조동역학해석에 근거한 시스템 인자들의 고 사이클 피로수명에 대한 영향도분석

Study on the Effects of System Parameters on the High Cycle Fatigue Life Based on Structural Dynamic Analysis of a Turbine Blade System

권성훈*·송필곤**·박종현***·유흥희†

Sung Hun Kwon, Pil Gon Song, Jong Hyun Park and Hong Hee Yoo

Key Words : Quadruped robot(4 족 로봇), Galloping(갈러핑), Multi-body dynamics(다물체 동역학), Statistical method(통계 기법), Contact modeling(접촉 모델링)

ABSTRACT

The effects of the statistical properties of the Coulomb friction coefficients on the dynamic responses of a galloping quadruped robot are investigated in this paper. In general, the Coulomb friction coefficients are assumed to be deterministic for a controller design to achieve required motion characteristics. However, the friction coefficients between the ground and the robot legs are not constant in reality. Therefore, statistical characteristics of the friction coefficients need to be considered for a multi-body modeling of the robot galloping on the ground. The effects of the statistical properties on the dynamic responses of the quadruped robots are investigated.

1. 서 론

실제 로봇을 제작하기 이전 제어가 요구되는 움직임을 구현할 수 있는지를 검증하기 위한 시뮬레이터가 필요하다. 이러한 시뮬레이터는 대부분 다물체 동역학 기법을 사용하여 제작되며 로봇이 주행을 할 때 발생하는 각 조인트의 반력과 로봇과 지면 사이에서 생기는 접촉에 의한 수직반력 및 마찰력을 계산하여 제어기에 피드백해주는 역할을 한다. 이 때 대부분의 경우 수직반력 및 마찰력을 계산하기 위한 접촉 모델의 파라미터들은 일정하다고 가정한다. 참고문헌 (1-4)와 같이 평탄하지 않거나 곡면을 이루는 지면과 로봇의 다리 사이에서 일어나는 접촉에 관한 연구도 진행되었지만, 이는 지면의 기하학적인 불규칙성을 고려한 연구로 접촉하는 지점마다 물성치가 서로 다르기 때문에 실제 지면과의 접촉에서 매번 발생하는 수직반력 및 마찰력의 차이를 고려해줄 수 없다. 로봇이 보행하는 경우와 같이 주행 속도가 느린 경우는 이러한 차이의 영향이 크지 않으나, 로봇의

이동속도가 높은 경우 제어기에 피드백되는 힘의 크기의 변화가 커질 수 있으므로, 이를 고려할 수 있는 새로운 지면 모델링에서 제어를 검증할 필요가 있다.

본 논문에서는 실제 지면의 특성을 고려하기 위해 참고문헌 (6)의 방법을 사용하여 쿨롱 마찰 계수의 통계적 특성을 고려할 수 있는 접촉 모델을 구현하였다. 이후 참고문헌(5)에서 제작한 갈러핑을 하는 4 족 로봇의 2 차원 다물체 동역학 시뮬레이터에 이를 적용하여 설계된 제어가 적절하게 작동하는지를 검증하였다. 또한 시뮬레이터의 결과를 통해 접촉 파라미터의 공차가 몸체의 이동거리와 각변위, 접촉이 발생할 때의 수직 반력과 토크 등에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 접촉 모델링

상용 다물체 동역학 해석 프로그램

참고문헌 (5)의 시뮬레이터는 상용 다물체 동역학 프로그램인 RecurDyn 을 사용하여 제작하였다. 여기에 적용된 접촉 모델은 다음 식을 사용하여 수직 반력을 계산한다.⁽⁷⁾

$$f_n = k\delta^{m1} + c \frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|} |\delta|^{m2} \delta^{m3} \quad (1)$$

† 책임저자 ; 정회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : hhyoo@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2220-0446, Fax : (02) 2293-5070

* 정회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한양대학교 대학원 기계공학과

*** 한양대학교 기계공학부

여기서

k : Spring Coefficient

c : Damping Coefficient

δ : Penetration

$m1$: Stiffness Exponent

$m2$: Damping Exponent

$m3$: Indentation Exponent

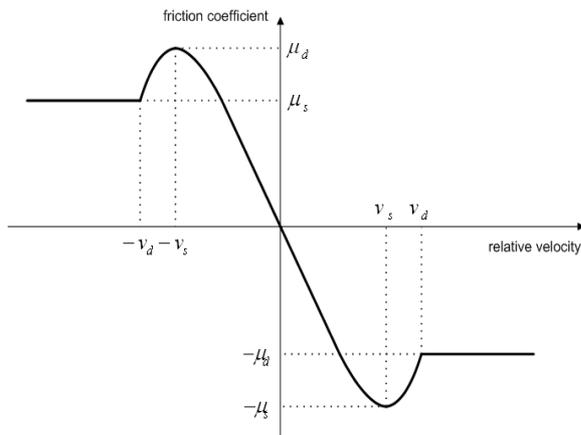


Fig. 1 Relationship between relative velocity and friction coefficient in commercial codes

마찰력 계산을 위해 사용하는 쿨롱 마찰 모델은 힘의 크기가 0 에 가까운 영역에서 수치적 에러를 발생시킬 수 있으므로, RecurDyn 이나 ADAMS 와 같은 상용 프로그램은 Fig.1 과 같은 형태의 곡선으로 마찰계수를 상대속도의 함수로 정의하여 사용한다. 이러한 마찰계수 함수와 식 (1)에서 계산한 수직 반력을 사용하여 다음과 같이 마찰력을 계산한다.⁽⁷⁾

$$F_f = \mu(v)F_n \quad (2)$$

여기서 $\mu(v)$ 는 Fig.1 과 같은 형태의 곡선이며 F_n 은 식 (1)에서 계산한 수직 반력이며 F_f 는 마찰력이다.

3. 통계적 기법의 적용

접촉 파라미터의 선정

실제 지면의 물성치는 특정한 평균과 표준편차를 가지는 통계적인 수치들의 집합으로 생각할

수 있다. 따라서 접촉할 때마다 지면의 물성치가 바뀌므로 다물체 동역학 시뮬레이터의 접촉 모델에서 매 접촉시마다 수직 반력과 마찰력의 크기가 달라지게 된다. 본 연구에서는 접촉 수직 반력을 구하기 위한 식 (1)의 k 와 $\mu(v)$ 에 대한 Fig.2 에서 μ_d 값을 주요 접촉 파라미터로 간주하여 정규분포를 가지는 가진다고 가정한다. 몬테카를로법을 이용하였으며 해석의 정확성을 얻기 위해 1,000 개의 표본(sample)을 사용하여 지면의 공차에 따른 해석을 수행하였다. 이를 위해 우선 정규 분포를 가지는 난수를 발생시킨 후 이를 접촉 파라미터에 적용하였다.

알고리즘

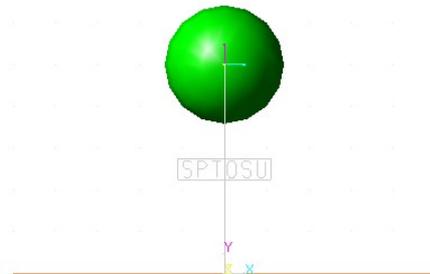


Fig. 2 Falling ball with contact

접촉 파라미터는 접촉이 일어날 때마다 그 크기가 통계적으로 바뀌어야 하나 접촉이 일어나는 도중에는 일정해야 한다. Fig.2 는 지면에 떨어지는 구를 RecurDyn 을 사용하여 모델링한 것이다. 이 때 점 P 와 접촉 지면 사이의 거리는 Fig.3 과 같은 형태를 나타낸다. 여기서 T_i 는 접촉이 시작되는 시간, T_f 는 점 P 와 지면간의 상대속도의 부호가 음수에서 양수로 바뀌는 시간, T_j 는 접촉이 끝나는 시간, n 은 접촉이 일어난 횟수를 가리킨다. 따라서 접촉 파라미터를 바꾸는 시간은 $(T_f)_n$ 과 $(T_i)_{n+1}$ 사이가 되어야 하므로 상대속도의 부호가 바뀌는 시점 T_i 에서 T_f 에서 T_i 를 빼준 시간보다 큰 임의의 지연시간 T_{delay} 를 더하여 식 (3) 과 같이 결정할 수 있다.

$$(T_c)_n = (T_i)_n + (T_{delay})_n \quad (3)$$

T_{delay} 에 대한 조건은 다음과 같다.

$$(T_{delay})_n \geq (T_f)_n - (T_t)_n \quad (4)$$

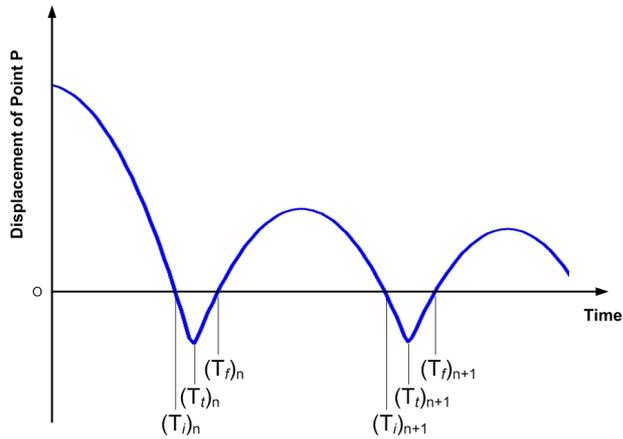


Fig.3 Displacement of Point P

상용 다물체 동역학 해석 프로그램에서 접촉이 일어날 때 서브루틴을 호출하여 수직 반력과 접촉력을 계산한다. 본 연구에서는 유저 서브루틴에 Fig. 4 와 같은 알고리즘을 적용하여 접촉이 일어날 때마다 접촉 파라미터를 바꾸고 있다.

우선 접촉파라미터를 바꾸기 위해서는 접촉 파라미터를 바꾸는 시간을 결정해야 한다. 이를 위해 2.2.1 에서 설명한 방법을 통해 이전 스텝과 비교하여 상대속도가 음수에서 양수로 바뀌면 여기에 지연시간 $Time_{delay}$ 를 더하여 접촉 파라미터를 바꾸는 시간 $Time_c$ 를 결정하고 또다른 파라미터 M 에 '0'이 아닌 값을 대입한다. 여기서는 '1'을 선택하였다. 이후 시간 $Time$ 이 $Time_c$ 보다 크고 M 이 '1' 인 경우 $Random(N)$ 의 값을 Temp 에 넣은 후 만일 접촉 파라미터가 '0'이면 초기값을 대입하고 아니면 앞서 구한 Temp 로 변환한다. 이와 같은 과정을 통해 접촉 파라미터들을 매 접촉시마다 바꿀 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

다물체 동역학 시뮬레이터

본 연구에 쓰인 다물체 동역학 시뮬레이터는 참고 문헌 (5)를 바탕으로 제작되었으며 그 기하학적 체원은 Table 1 과 같다. Table 2 는 접촉 모델에 쓰인 접촉 파라미터들의 값을 나타내며 여기서 통계적 특성을 고려하기 위해 Spring Coefficient 와 Dynamic Friction Coefficient 의 값에 공차를 고려하

였다.

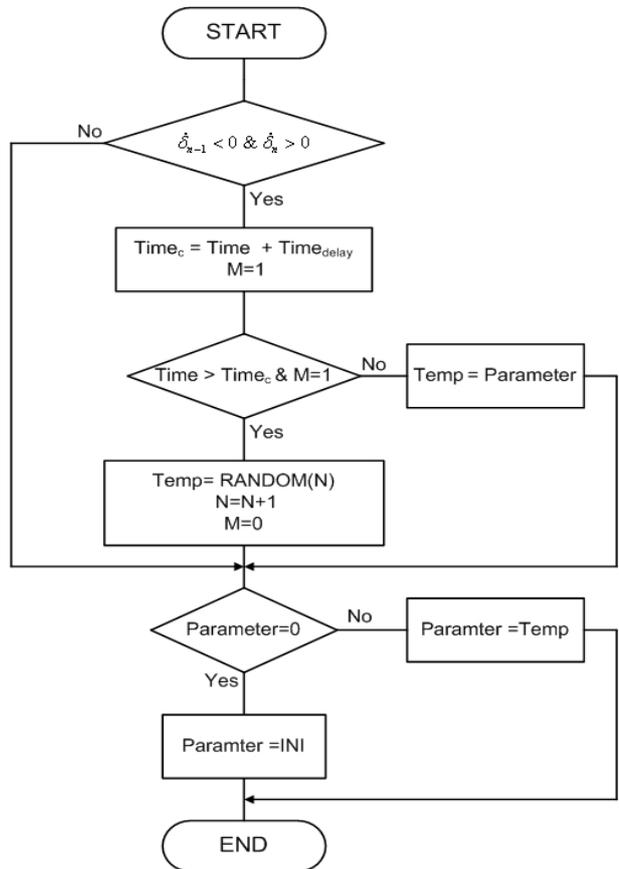


Fig.4 Algorithm to change the contact parameter

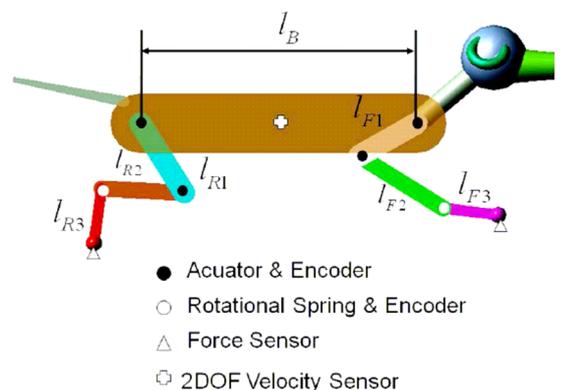


Fig.5 2D Multibody dynamic simulator

몬테카를로법은 해석의 정확성을 얻기 위해 1,000 개의 표본(sample)을 사용하여 접촉이 1,000 번 일어났을 때까지 해석을 수행하였으며 지면의 접촉 파라미터에 대한 공차는 10%, 30%, 50%인 경우를 고려하였다. 로봇의 몸체는 0.3m 의 높이에서 2.5m/s 의 속도를 가지고 출발하여 1001 번째 접촉이 일어나면 해석을 종료한다. Table 3 은 접촉 파라미터의 Spring coefficient 와 Dynamic friction

coefficient 가 정규분포를 따르며 99.73% 의 신뢰도를 가질 때 지면의 접촉 파라미터에 대한 공차에 따라 로봇의 몸체가 이동한 거리와 그때까지 걸린 시간을 나타낸다.

Table 3, 4, 5 와 6 은 Spring coefficient 와 Dynamic friction coefficient 가 각각 변할 때 각 관절에 걸리는 파워 값을 구한 것이다. 공차가 늘어남에 따라 특별한 경향은 보여주지 않고 있다.

Table 1 Specification of 2D multibody dynamic simulator of the contact parameters

Component	Value	Component	Value
Front link1	0.12m 0.475kg	Rear link1	0.15m 0.569kg
Front link2	0.18m 0.479kg	Rear link2	0.15m 0.306kg
Front link3	0.10m 0.182kg	Rear link3	0.10m 0.182kg
Base link	0.25m 17.71kg	Total mass	20.01kg
Head and Neck	0kg	Tail	0kg
Front spring coefficient	80N/rad	Rear spring coefficient	80N/rad

Table 2 Values of the contact parameters

Contact Parameter	Value
Spring Coefficient	1.0E6
Damping Coefficient	1.0E3
Stiffness Exponent	1.3
Damping Exponent	1
Indentation Exponent	2
Static Friction Coefficient	1.0
Dynamic Friction Coefficient	0.4
Static Threshold Velocity	0.01
Dynamic Threshold Velocity	0.015

Table 3 Power of Each Joint ($\mu_d = 0.4, MW$)

Joint	Tolerance of μ_d			
	0%	10%	30%	50%
Front1	16.26	16.29	16.29	16.42
Front2	21.10	21.07	21.10	21.10
Rear1	26.85	27.02	26.97	26.95
Rear2	14.16	14.13	14.16	14.13

Table 4 Power of Each Joint ($\mu_d = 0.8, MW$)

Joint	Tolerance of μ_d			
	0%	10%	30%	50%
Front1	16.27	16.30	16.30	16.43
Front2	21.11	21.08	21.11	21.11
Rear1	26.86	27.03	26.98	26.96
Rear2	14.17	14.14	14.17	14.14

Table 5 Power of Each Joint ($k = 1.0 \times 10^6, MW$)

Joint	Tolerance of k			
	0%	10%	30%	50%
Front1	16.26	16.26	16.29	16.31
Front2	21.10	21.12	21.12	21.12
Rear1	26.85	26.87	26.92	26.96
Rear2	14.16	14.16	14.16	14.17

Table 6 Power of Each Joint ($k = 2.0 \times 10^6, MW$)

Joint	Tolerance of k			
	0%	10%	30%	50%
Front1	173.0	18.12	19.09	22.74
Front2	22.76	23.16	23.77	27.13
Rear1	28.04	28.49	28.94	32.28
Rear2	15.08	15.30	15.40	16.66

5. 결론

본 논문에서는 통계적인 특성을 가진 지면 모델링을 다물체 동역학 시뮬레이터에 적용한 후 이를 캘러핑을 하는 4 족 로봇을 위한 제어기의 유효성을 검증하였다. 접촉 파라미터의 공차가 증가하더라도 각 관절에 걸리는 파워는 크게 늘어나지 않고 있다. 이러한 결과로 보아 제어기는 50%의 공차를 가진 지면에 대해서도 정상적인 캘러핑 운동을 구현할 수 있다는 것을 검증하여 제어기가 실제 환경에서도 적절하게 요구되는 움직임을 구현할 수 있는 것으로 판단된다.

향후 이러한 지면의 접촉 모델링은 제어기가 실제 지면에 대해서 적절히 작동하는지에 대해 검증할 수 있는 유효한 수단이 될 것이다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 특정기초연구사업과 한국과학재단 지정 한양대학교 최적설계 신기술센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Mills, J. and Lawryshyn, Y., 1997, "Robot link and contact surface dynamic interaction: an experimental study of contact task instability," *Journal of robotic systems*, Vol. 14, No. 3, pp.213-227.
- (2) Natale, C. and Villani, L., 1999, "Adaptive control of a robot manipulator in contact with a curved compliant surface," *American Control Conference*, Vol.1, pp.288-292.
- (3) Kim, E. S., 2005, "Locomotion Control of Biped Robots on Irregularly Protruded Uneven Surface," Hanyang University, M.S. Dissertation.
- (4) Ahn, Y. M., 2006, "A Study on Walking Algorithm of Quadruped Robot Used Stroke Control Method in the Irregular Terrain," *Journal of IEEK*, Vol.43, No. 4, pp.52~59.
- (5) Kim, K. Y., 2006, "Online Elliptic Trajectory Generation for Stable Galloping of Quadruped Robots," Hanyang University, M.S. Dissertation.
- (6) Choi, D. H., 2005, "Statistical Tolerance Aalysis and Modal Analysis of Multibody Systems," Hanyang University, Ph. D. Thesis
- (7) *RecurDyn User's Manual*, FunctionBay Inc, 2005