

보행 모의 실험을 위한 발목 없는 하지 외골격 로봇의 지면 접촉 모델 최적화

Optimization of Ground Contact Model of Ankleless Lower Exoskeleton Robot for Gait Simulation

최기명¹·김상형¹·조창현[†]

Gimyeong Choi¹, Sanghyung Kim¹, Changhyun Cho[†]

Abstract: The purpose of this study is to optimize parameters of a contact model to obtain similar ground contact force of human walking. Dynamic walking simulation considering ground contact is performed to determine load specifications when developing walking assist robots. Large contact forces that are not observed in actual experimental data occur during the simulation at the initial contact (e.g., heel contact). The large contact force generates unrealistic large joint torques. A lower exoskeleton robot with no ankles is developed with the Matlab simscape and the nonlinear hyper volumetric contact model is applied. Parameters of the nonlinear hyper volumetric model were optimized using actual walking contact force data. As a result of optimization, it was possible to obtain a contact force pattern similar to actual walking by removing the large contact force generated during initial contact.

Keywords: Lower Exoskeleton Robot, Nonlinear Hyper Volumetric Model, Contact Force, Optimization

1. 서 론

휴머노이드 및 외골격 로봇에 대한 관심과 연구가 증가하였다^{1,2}. 외골격 로봇은 사람들이 신체적 한계를 극복할 수 있도록 도와주기 때문에 다양한 분야에서 수요가 증가하고 있다. 특히 고된 육체노동, 위험한 산업현장, 군사, 의료용으로 활용하는 것에 대한 관심이 높아지고 있다^{4,5}. 휴머노이드와 외골격 로봇과 같이 다리가 있는 로봇은 걷는 동안 지면과 상호작용하기 때문에 부하사양을 결정하기 위해 지면 접촉을 고려한 동적 보행 시뮬레이션이 필요하다.

발과 지면의 접촉 연구는 많이 이루어졌으며, 접촉하는 강체간의 다물체 동역학 해석의 대표적인 방법은 각 접촉 영역을 일련의 스프링-댐퍼 요소로 모델링 후 해석하는 방법이다⁶. Hooke와 Hertz는 탄성(스프링) 구성 요소만 고려한 접촉력 기반의 첫 해석 방법을 개발하였다^{7,8}. 이후에, Kelvin과 Voigt가

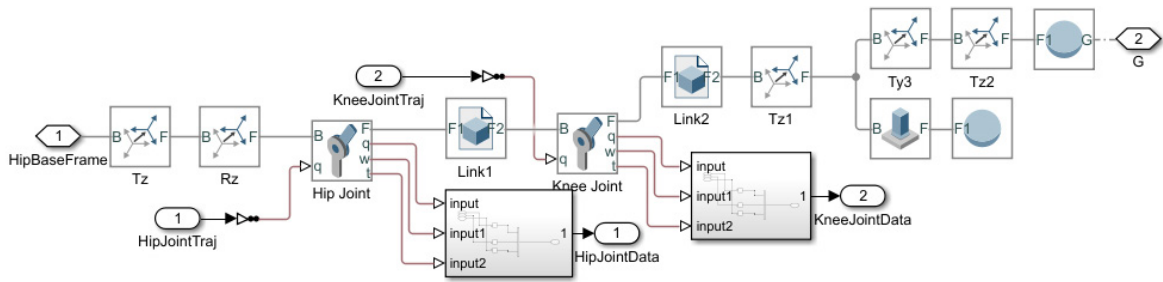
감쇠 항을 도입했고 Hunt와 Crossley가 최적화하였다^{9,10}. Hunt와 Crossley의 작업을 기반으로 다양한 해석 모델들이 개발되었다. M. Wojtyra는 점 접촉 모델을 이용하여 접촉력을 계산하였으나 날카로우면서 큰 접촉력을 초래하며 측정된 데이터와 계산된 데이터가 많이 어긋난 것을 볼 수 있다¹¹. Stephen H. Scott, David A. Winter는 접촉 요소의 수를 늘려 날카로운 접촉력에 대한 문제를 해결 할 수 있지만 접촉요소의 수가 많아질수록 매개변수 수도 많아지고 계산이 더 복잡해지는 것을 볼 수 있다¹². Petersen, W는 접촉할 때, 크게 변형되는 부드러운 지면에서의 비선형 하이퍼 체적 접촉모델을 제시하였다¹³. MS Shourijeh, J McPhee는 비선형 하이퍼 체적 접촉 모델을 사용하여 점접촉과 선형 체적 모델보다 비선형 하이퍼 체적 접촉 모델이 인간 보행 시뮬레이션 내에서 발 지면 상호작용 모델링이 가장 적합한 선택인 것을 밝혔다¹⁴.

본 연구는 로봇의 실제 하드웨어 설계 시, 설계의 복잡성을 줄이고, 계산 단순화를 위해 발목을 제거한다. 비선형 하이퍼 체적 접촉 모델을 사용하여, 발목이 없는 하지 외골격 로봇의 초기 접지기(예, Heel Contact)에서 접촉력이 크게 튀는 값을 인간의 보행과 유사한 접촉력을 갖도록 최적화하는 것을 목표로 한다. 미시간 대학교에서 제공한 오픈소스 데이터 중 피실

Received : Jun. 29. 2023; Revised : Aug. 8. 2023; Accepted : Aug. 19. 2023

1. Graduate Student, Mechanical Engineering, Chosun University, Kwangju, Korea (superphon, shkim@chosun.kr)

† Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, Chosun University, Kwangju, Korea (chcho@chosun.ac.kr)



[Fig. 1] Simscape block diagram (right leg)

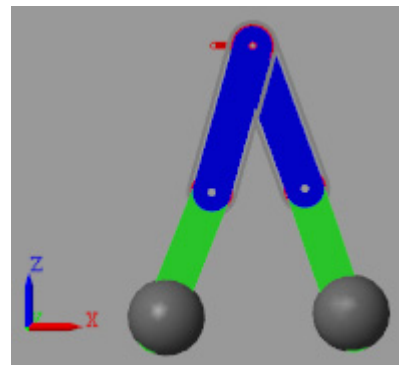
힘자의 신체정보 데이터를 바탕으로 하지 외골격 로봇을 모델링하였다¹⁵⁾. 오픈소스 데이터는 실험으로 측정된 각관절의 회전각도 및 지면 접촉력 등을 제공한다. 모델링 시, 비선형 하이퍼 체적 접촉 모델을 적용하기 위해 발목 부분에 가상의 구형상을 부착하였다. 모의실험으로 계산된 접촉력 데이터가 실험으로 측정된 접촉력과 최대한 유사하게 일치하도록 파라미터를 최적화하며, 목적함수는 MS Shourijeh, J McPhee가 제공한 목적함수 중 수직항력에 대한 식만을 사용하였다¹⁴⁾. 전체 보행주기에서 접촉력을 최적화할 경우, 유각기 구간(접촉력이 0인 구간)에 의해 최적화 진행에 방해받을 수 있다. 따라서, 데이터의 유각기 구간을 제거하고 입각기 구간에 대해서만 최적화를 진행하였다. Local Minimum에 도달하는 경우 초기값 변경을 수차례 반복하여 최적의 파라미터 값을 얻었다. 그 중 시뮬레이션 동작 시 인간의 보행 접촉력과 유사하지 않는 값을 나타내는 파라미터는 제거하였다. 모의실험 환경은 Matlab Simscape를 이용하여 구성하였다. 모의실험에서 지면 접촉 모델의 최적화를 통해서 하지 외골격 로봇이 인간의 보행과 유사한 접촉력을 가질 수 있음을 보였다.

2. 모의실험 환경 및 접촉모델

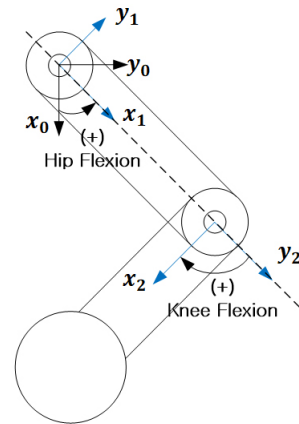
2.1 보행 데이터 및 Simscape 모델

본 연구는 사우스웨스턴 의료 센터 모션 캡처 실험실에서 공개한 오픈소스 데이터에서 나이 23세, 몸무게 77.4 kg, 키 1.63 m인 여성 데이터를 사용한다¹⁵⁾. 보행속도는 경찰청 교통 신호기 설치관리 매뉴얼의 교통약자 보행속도를 기준으로 하였으며, 교통신호기 설치관리 매뉴얼에 의하면 어린이 보호구역, 노인보호구역 등 교통약자를 위한 보행속도 기준은 0.7 m/s이다¹⁶⁾. 시뮬레이션 모델의 보행 속도는 공개한 오픈소스 데이터 중 교통약자 보행속도 기준과 가장 유사한 보행 속도인 0.8 m/s를 사용한다.

[Fig. 1]은 발목이 없는 하지 외골격 로봇에 대한 Simscape 블록 다이어그램으로, 오른쪽 다리를 기준으로 나타낸다.



[Fig. 2] Simscape model of lower exoskeleton robot with no ankles



[Fig. 3] Schematic of lower exoskeleton robot with no ankles

Link1과 Link2는 허벅지와 정강이를 나타내며, Hip Joint와 Knee Joint는 엉덩이와 무릎쪽의 관절을 나타낸다. 본 모델의 경우 발목이 없기 때문에 발목에 대한 관절은 나타내지 않았으며, 받은 비선형 하이퍼 체적 접촉 모델을 사용하기 위해 구형테로 제작하였다. 그림에서 Tz와 Ty는 z, y방향 병진을 의미하며, Rz는 z방향 회전을 의미한다. HipJointData와 KneeJointData는 Hip Joint와 Knee Joint의 각도, 각속도, 토크 값을 출력한다. HipJointTraj과 KneeJointTraj는 각각Hip과Knee 관절의 각도 입력이다. [Fig. 2]는 발목 없는 하지 외골격 로봇의 Sim-

scape 모델을 나타낸다. [Fig. 3]은 발목 없는 하지 외골격 로봇의 개략도를 나타내며, 각 관절의 조인트 프레임과 굽힘 방향을 나타낸다. 허벅지와 정강이의 링크길이는 여성 데이터의 오른쪽 다리길이를 동일하게 나누었으며, 지면과 접촉하는 발의 형상은 비선형 하이퍼 체적 접촉 모델을 적용하기 위해 구 형태로 구성하였다.

2.2 Nonlinear Volumetric contact model

발이 지면과 상호작용할 때, 발바닥과 지면 사이에 접촉력이 발생한다. 지면 접촉력은 운동의 안정성과 균형을 유지하는데 중요한 역할을 하며, 발이 지면과 접촉할 때, 지면 침투 깊이와 침투 속도에 따라 결정된다.

[Fig. 4]는 발과 지면이 접촉했을 때, 침투 부피에 대한 개략도를 나타내며, 침투 부피 V 에 대한 식은 식 (1)과 같이 접촉 패치의 변형량에 대한 함수로 나타낼 수 있다.

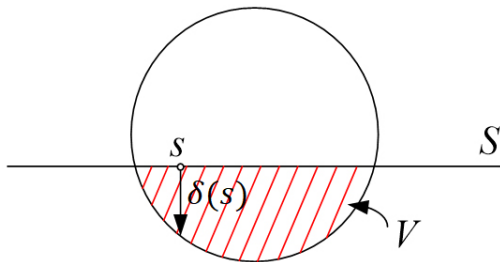
$$V = \int_s \delta(s) dS \quad (1)$$

여기서 S 는 접촉 패치의 면적을 나타내며, s 는 접촉 패치 S 에서의 접촉 위치, δ 는 위치 s 에서의 변형이다.

지면 접촉력은 크게 수직항력과 수평항력으로 나뉘는데, 이 중 본 연구에서는 수직항력에 대한 모델만을 고려하였다. 수직항력 모델은 MS Shourijeh, J McPhee가 제안한 것으로, 수직항력 F_{grf} 를 다음과 같이 정의한다^[14].

$$F_{grf} = k_h V^H + a_h V \nu_{cn} \quad (2)$$

여기서 H 는 체적 강성과 기하학적 특성 모두에 따라 달라지며 k_h 는 비선형 체적 스프링 강성, a_h 는 감쇠를 나타낸다. ν_{cn} 은 발이 지면에 닿을 때의 상대속도를 나타낸다. 구 형태 발의 하이퍼체적 V^H 는 식 (3)과 같이 발과 지면 사이의 깊이에 대해 표현할 수 있으며, 기하학적 특성상 잘린 구의 일부라고 판



[Fig. 4] Schematic diagram of penetration volume between two bodies in contact

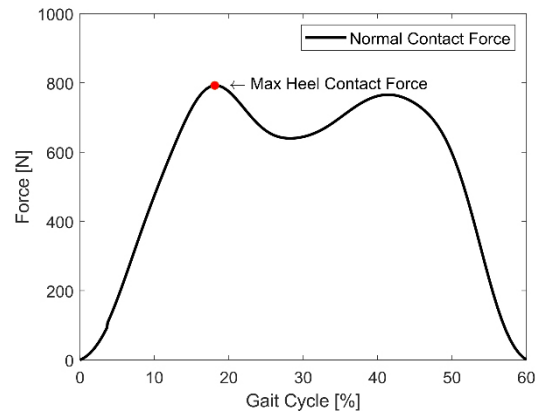
단하여 구형 캡 공식을 사용하였다^[17].

$$V^H = \frac{\pi}{3} \int_s \delta(s)^2 (3r - \delta(s)) dS \quad (3)$$

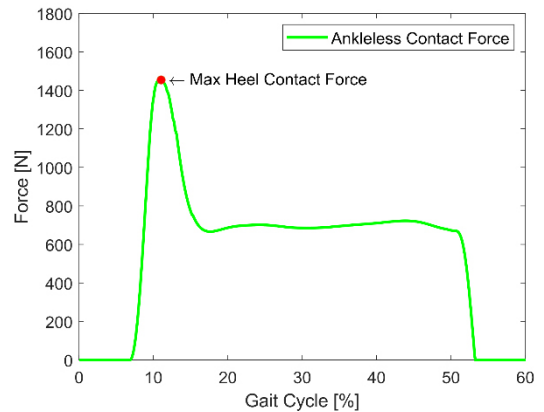
여기서 s 는 발과 지면이 접촉했을 때 접촉 위치이며, δ 는 접촉 위치 s 에서의 변형량이다. r 은 구의 반지름이다.

인간의 보행주기 중 입각기는 다리가 지면에 닿는 시기이며, 보행주기의 약 60%를 차지한다. 개인의 보행속도에 따라 입각기 주기가 줄어들거나 늘어날 수 있다. 입각기의 핵심 기능은 체중을 수용하고 한 다리로 버티는 능력이다. 발이 처음 지면에 닿기 시작하는 초기 접지기 직후와 발가락 들림 직전에 지면반발력은 최대이며, 신체가 지면과 거의 수직이 되는 중간 자세에선 신체가 발생시키는 힘이 최소화된다^[18]. [Fig. 5(a)]는 몸무게 77.4 kg 여성의 입각기 구간의 접촉력을 나타낸 것이며, 최대 뒤꿈치 접촉력은 몸무게와 유사하다.

Simscape 모델에 오픈소스 데이터의 고관절 및 슬관절 각도 값을 입력하여 보행 모의실험을 수행하였다. [Fig. 5(b)]는 모의실험으로부터 얻어진 지면 접촉력 그래프이다. 비선형 하



(a) Measured ground contact forces with experiments



(b) Computed ground contact forces with simulations

[Fig. 5] Ground contact forces

이퍼 체적 접촉 모델을 적용하였으나 초기 접지기 구간에서 사람의 몸무게보다 약 83% 이상 큰 접촉력이 계산되었다. 실제 측정된 지면 접촉력과 달리 모의실험 시 발생하는 큰 지면 접촉력으로 인해 로봇 관제에 비정상적으로 큰 부하가 계산되어 로봇 액츄에이터 선정 시 문제가 될 수 있다. 따라서 이를 최소화하여 일반 보행과 유사한 지면 접촉력을 갖도록 하는 것이 필요하다.

3. 발-지면 접촉 모델 최적화

모의실험 모델의 접촉력을 계산하기 위해서 발 지면 상호 작용 모델링에 가장 적합한 비선형 하이퍼 체적 접촉 모델 공식을 사용하였다. 모의실험 모델의 발-지면 접촉력이 인간의 보행과 유사한 접촉력을 갖기 위해, 접촉 모델의 매개변수(k_h , a_h 그리고 H)들을 최적화한다. 피실험자와 모의실험 모델의 지면 접촉력 오차를 최소화할 목적함수는 식 (4)과 같이 작성된다^[4].

$$J = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{F_{grf}^m - F_{grf}^e}{\sigma(F_{grf}^e)} \right)^2 dt \quad (4)$$

[Table 1] Optimized parameters

Parameter	Initial value	Lower Bound	Upper Bound	Optimal value
k_h [N/m^2]	1e4	1e4	1e10	2.7209e4
a_h [Ns/m^4]	1e4	1e4	1e10	2.5247e6
H	0.1	0.1	3	0.4310

[Table 2] 10 parameters with the smallest objective function values

Param	k_h [N/m^2]	a_h [Ns/m^4]	H	Objective function value
1	1.0000e4	1.0002e4	0.3133	0.1709
2	1.1053e6	1.1059e4	0.3250	0.1711
3	2.7209e4	2.5247e6	0.4310	0.1789
4	2.7207e4	2.5248e6	0.4310	0.1789
5	3.0336e6	3.0336e6	0.7750	0.1860
6	5.0050e6	5.0050e6	0.8347	0.1899
7	5.0050e6	5.0050e6	0.9602	0.1902
8	5.0050e6	5.0050e6	0.9602	0.1902
9	5.0050e6	5.0050e6	0.9602	0.1902
10	5.0050e6	5.0050e6	0.9602	0.1902

여기서 J 는 목적함수, T 는 보행주기, F_{grf} 는 수직력, σ 는 표준편차, 위첨자 m 과 e 는 각각 모델과 실험에 해당한다.

Matlab 최적화 도구 중 하나인 Fmincon 함수를 사용하여 식 (4)의 목적함수의 최소값을 찾기 위한 최적화를 수행한다. 여기에서, Fmincon 함수 알고리즘은 기울기 하강법을 기반으로 최소값을 찾아낸다. 최적화 시 국소 최솟값 문제를 해결하기 위해서, 초기값을 변경하여 반복적으로 최적화를 진행하였다. 파라미터에 대한 제한 조건은 [Table 1]에 나타내었으며, F_{grf}^m 의 최대값이 1000 N을 넘지 않게 설정하였다.

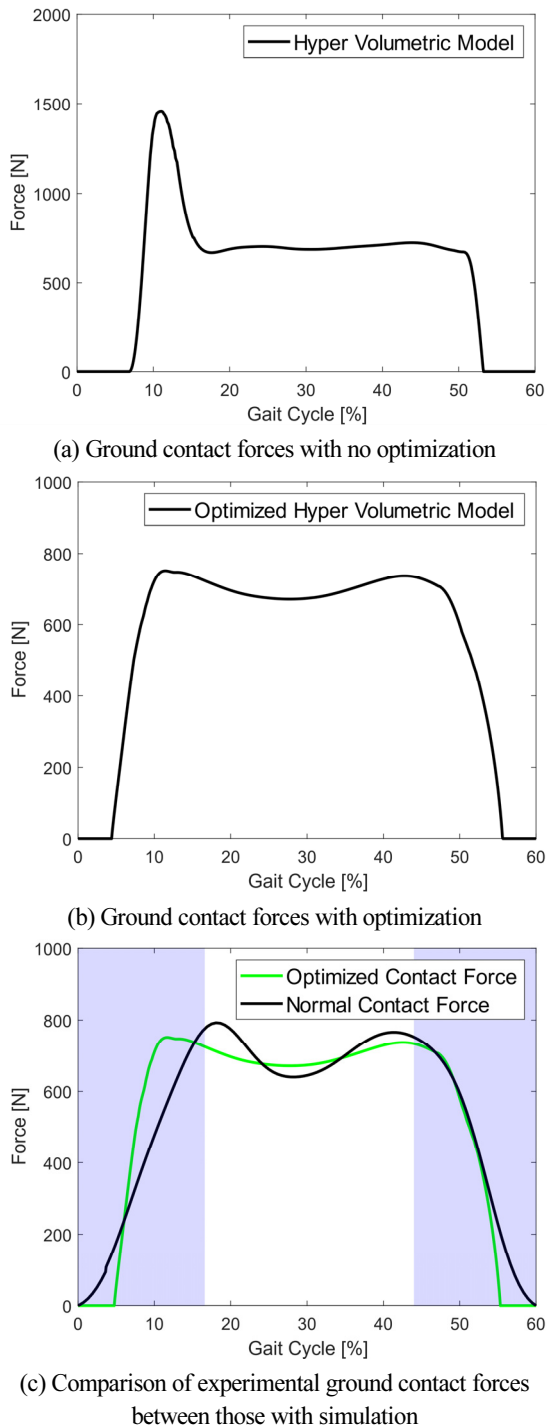
목적함수가 최소값인 파라미터를 시뮬레이션 하였을 때, 사람의 접촉력과 유사하지 않은 결과가 나왔으며, 이를 해결하기 위해 [Table 2]와 같이 목적함수 값이 최소인 10개의 파라미터를 선정하였다.

선정된 10개의 파라미터를 순차적으로 시뮬레이션에 적용하여 사람의 접촉력과 유사하지 않는 불안정한 파라미터 값을 제외하는 반복작업을 수행하였다. [Table 1]은 최적화 파라미터인 k_h , a_h , 그리고 H 의 초기값, 최적화 범위와 최종적인 결과값을 나타낸다.

최종적인 결과값을 시뮬레이션 하였을 때 얻은 접촉력 결과 그래프는 [Fig. 6(b)]와 같다. [Fig. 6(a)]는 발목이 없는 하지 외골격 로봇의 모의실험 시, 지면-발 접촉모델링 방법으로 하이퍼 볼륨 매트릭 모델을 사용하여 얻은 접촉력 결과 그래프이다. [Fig. 6(a)]와 [Fig. 6(b)]를 비교하였을 때, [Fig. 6(b)]에서 초기 접지기 구간의 큰 접촉력이 제거되어 상대적으로 안정적인 패턴임을 볼 수 있다. [Fig. 6(c)]는 사람의 보행 시 측정된 접촉력 패턴과 [Fig. 6(b)]의 최적화된 접촉력 패턴의 입각기 구간에서의 비교 그래프이다. 초기 접지기 구간에서 최대 접촉력 오차가 83.45%에서 5.18%까지 줄었다. 발목이 없는 모델의 경우 실제 사람 측정 데이터보다 입각기 구간이 짧은 것을 확인할 수 있다. 즉, 발목을 제거함으로써 double support구간이 줄었고 [Fig. 6(c)]와 같이 초기 지면 접촉이 gait cycle 5% 이후에 발생하는 것이 관찰되었다. 또한, 매우 급하게 접촉력이 증가하는 양상이 관찰되었다.

4. 결 론

발목이 없는 하지 외골격 로봇의 보행 모의실험을 수행 시, 실험 데이터에선 관찰되지 않는 큰 접촉력이 발생한다. 이 문제를 해결하기 위해서, 본 연구는 모의실험 모델에 가상의 발 형상을 부착하여, 지면과 가상의 발 사이의 접촉을 비선형 하이퍼 체적으로 모델링한다. 실제 보행 접촉력 데이터를 기준으로 접촉 모델 파라미터에 대한 최적화를 수행하였으며, 모의실험 시 인간과 유사한 보행 접촉력을 얻을 수 있는 최적화



[Fig. 6] Comparisons of Ground contact forces

된 접촉 모델 파라미터를 얻을 수 있었다. 발목이 없는 하지 외골격 로봇에 최적화된 접촉 파라미터를 적용하였을 경우, 초기 접지기 구간에서 최대 접촉력 오차가 83.45%에서 5.18%까지 줄어든 것을 보였다.

이번 연구는 가상 환경에서 평지에 대한 접촉력을 측정하였지만, 실제로 로봇을 설계하기 위해서는 경사, 계단에 대한

환경뿐만 아니라 보행 속도에 따른 접촉력도 측정하여야 한다. 추가 연구로 다양한 지면 조건에 대한 최적의 접촉력을 갖는 파라미터를 찾는 것이 필요하다.

References

- [1] I. S. Lee, J. S. Kim, S. H. Kim, J. E. Lee, M. G. Kim, and J. H. Park, "Research Trends of Humanoid Robots," *Robot and Human*, vol. 16, no. 3, pp. 3-11, Jul., 2019, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09277430>.
- [2] J. H. Jang and U. G. Song, "Research Trends of Wearable Robot," *Journal of the KSME*, vol. 56, no. 2, pp. 42-46, Feb., 2016, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06599543>.
- [3] H. S. Uh and K. C. Kong, "Research Trends and Prospects of Wearable Robot," *Journal of the ICROS*, vol. 25, no. 1, pp. 24-33, Mar., 2019, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07993373>.
- [4] Robot News, *Leading Top Five Exoskeleton Robots*, [Online], <http://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=5871>, Accessed: Nov. 14, 2022.
- [5] Robot News, *[Special Issue for RoboWorld 2022] Humanoid Robots are rising up*, [Online], <https://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=29871>, Accessed: Nov. 14, 2022.
- [6] E. Corral, R. G. Moreno, M. G. García, and C. Castejón, "Nonlinear phenomena of contact in multibody systems dynamics: a review," *Nonlinear Dynamics*, vol. 104, pp. 1269-1295, Mar., 2021, DOI: 10.1007/s11071-021-06344-z.
- [7] P. Flores and H. M. Lankarani, "Solid Mechanics and Its Applications," *Contact Force Models for Multibody Dynamics*, Springer Cham, 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-30897-5.
- [8] H. Hertz, "About the Touch of Solid Elastic Bodies," *Journal for pure and applied mathematics*, vol. 1882, no. 92, pp. 156-171, 1882, DOI: 10.1515/crll.1882.92.156.
- [9] K. H. Griffin, "Impact: The Theory and Physical Behavior of Colliding Solids," *The Aeronautical Journal*, vol. 65, no. 606, pp. 443-443, 1960, DOI: 10.1017/S0368393100074861.
- [10] K. H. Hunt and F. R. E. Crossley, "Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 42, no. 2, pp. 440-445, Jun., 1975, DOI: 10.1115/1.3423596.
- [11] M. Wojtyra, "Multibody simulation model of human walking," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 31, no. 3, pp. 357-379, Feb., 2007, DOI: 10.1081/SME-120022855.
- [12] S. H. Scott and A. W. David, "Biomechanical model of the human foot: kinematics and kinetics during the stance phase of walking," *Journal of biomechanics*, vol. 26, no. 9, pp. 1091-1104, Sept., 1993, DOI: 10.1016/S0021-9290(05)80008-9.
- [13] W. Petersen and J. Mcphee, "A Nonlinear Volumetric Contact Model for Planetary Rover Wheel/Soil Interaction," *ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and*

Computers and Information in Engineering Conference, Portland, USA, 2014, DOI: 10.1115/DETC2013-13483.

- [14] M. S. Shourijeh and J. McPhee, "Foot-ground contact modeling within human gait simulations: from Kelvin-Voigt to hyper-volumetric models," *Multibody System Dynamics*, vol. 35, no. 4, pp. 393-407, Jun., 2015, DOI: 10.1007/s11044-015-9467-6.
- [15] E. Reznick, K. Embry, R. Neuman, E. Bolívar-Nieto, N. P. Fey, and R. D. Gregg, "Metadata record for: Lower-limb kinematics and kinetics during continuously varying human locomotion," *Scientific Data*, vol. 8, no. 1, Oct., 2021, DOI: 10.1038/s41597-021-01057-9.
- [16] Korean National Police Agency, *Manual for Implementation and Maintenance of Traffic Signal*, [Online], https://www.police.go.kr/user/bbs/BD_selectBbs.do?q_bbsCode=1001&q_bbscttSn=20201201084730717, Accessed: Jan. 23, 2023.
- [17] WIKIPEDIA, *Spherical cap*, [Online], https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_cap, Accessed: Dec. 05, 2022.
- [18] D. H. Lee, H. W. Park, H. W. Kim, and S. B. Han, "Kinematics of Normal and Pathologic Gait," *Journal of Korean Orthopaedic Research Society*, vol. 7, no. 2, pp. 169-177, Oct., 2004, [Online], <https://ir.ymlib.yonsei.ac.kr/handle/22282913/11226>.



최 기 명

2022 조선대학교 기계공학과(학사)
2022~현재 조선대학교 기계공학과(석사과정)

관심분야: 로봇틱스, 재활로봇



김 상 형

2015 조선대학교 기계공학과(학사)
2017 조선대학교 제어계측공학과(석사)
2018~현재 조선대학교 기계시스템미래
자동차공학과(박사과정)

관심분야: 로봇틱스, 중력보상, 재활로봇



조 창 현

1997 경희대학교 기계공학과(학사)
1999 경희대학교 기계공학과(석사, 제어계측)
2005 고려대학교 기계공학과(박사, 동역학
및 제어)
2008~현재 조선대학교 교수

관심분야: 기구설계, 중력보상, 재활로봇, 햅틱스