에너지 효율적인 인간 크기 4족 보행 로봇의 설계와 검증

Design Principles and Validation of a Human-sized Quadruped Robot Leg for High Energy Efficiency

염 호 연¹·Dang Xuan Ba²·배 준 법[†] Hoyeon Yeom¹, Dang Xuan Ba², Joonbum Bae[†]

Abstract: This paper presents about design efforts of a human-sized quadruped robot leg for high energy efficiency, and verifications. One of the representative index of the energy efficiency is the Cost of Transport (*COT*), but increased in the energy or work done is not calculated in *COT*. In this reason, the input to the output energy efficiency should be also considered as a very important term. By designing the robot with customized motor housing, small rotational inertia, and low gear ratio to reduce friction, high energy efficiency was achieved. Squatting motion of one leg was performed and simulation results were compared to the experimental results for validation. The developed 50 kg robot can lift the weight up to 200 kg, and during squatting, it showed high energy efficiency. The robot showed 71% input to output energy efficiency in positive work. Peak current during squatting only appears to be 0.3 A.

Keywords: Quadruped robot, Design of the robot, Energy efficiency

1.서 론

인간이 직접 가기 힘든 곳이나 신체적인 한계로 수행할 수 없는 일들을 대신할 수 있는 로봇들은 최근 많은 관심을 받고 있다. 이러한 기대에 부응하여 [Fig. 1]과 같은 많은 수의 로봇 들이 험지에서 보행 안정성과 속도를 증가시키는 것에 초점을 두고 개발되었다^[14]. 그러나, 이동형 로봇의 특성상 제한된 배 터리 용량으로 최대한 많은 일을 해 내야 하는 것을 고려한다 면, 에너지 효율 또한 매우 중요한 요소이다. 에너지 효율적인 로봇들이 많이 존재하지만^[5,6], 이들 대부분은 사람의 역할을 대 신할 수 있을 만큼의 다재 다능함이 부족하다. 그러므로 사람을 대신하여 여러 역할을 수행할 수 있을 만한 역량을 가지면서도 에너지 효율적인 로봇은 그 수가 아직 부족하다고 할 수 있다.

생체역학과 이동형 로봇 등에서 가장 널리 쓰이는 에너 지 효율의 지표는 Cost of Transport (COT) 인데, 이는 특정 무게가 특정 속도로 갈 때의 에너지 소모를 나타낸 것이다 (COT=P/mgV, P는 입력 파워, m은 시스템의 총 질량, g는 중력 가속도, V는 시스템의 속력). COT는 특정 거리를 주행할 때에

Received : Mar. 19. 2018; Revised : Apr. 24. 2018; Accepted : May. 15. 2018

1. UNIST, Ulsan, Korea (hoyahoyean@unist.ac.kr)

2. UNIST, Ulsan, Korea (dang.xuanba@gmail.com)

Copyright©KROS

필요한 일의 양을 계산하기에 매우 유용한 지표이다. 그러나 COT만으로 에너지 효율을 비교하기에는 큰 어려움이 있는데, COT는 단지 총 에너지 사용량만을 측정하기 때문에, 이동 중 에 발생한 위치에너지 증가나 보행 중 한 일 등은 고려되지 않 는다는 것이다. 이로 인해서 같은 COT를 가지고 있는 로봇 사 이에서도 험지에서는 서로 다른 결과가 나올 수 있다. 따라서, 다양한지형을 이동해야하는 로봇은 잘 통제되어 있는 실험실 환경에서 측정한 COT만이 아닌, 입력과 출력 사이의 에너지 효율 또한 고려되어야 한다. MIT Cheetah는 동물과 비견될 만 큼 낮은 COT를 가지고 있으나, 높은 전류가 필요한 모터로 인 해 발생하는 Joule heating으로 손실되는 에너지가 많다³³. StarlETH은 Series Elastic Actuator (SEA)의 사용으로 스프링의 특성을 이용해, 다리에 가해진 충격 에너지를 재사용하여 효율 이 높다[4]. 하지만, 높은 기어비로 인한 마찰 등의 손실과, 스프 링의 고정된 기계적 특성 때문에 넓은 범위의 속도에서 최적화 된 스프링을 찾을 수 없다는 점이 단점이다. 본 연구에서는 이 러한 기존 로봇들의 단점을 극복하고자 낮은 기어비를 통해 얻 어지는 적은 마찰 등의 장점과, 최적화된 모터의 overhang을 찾 아내어 모터에서 비롯된 손실을 최대한 줄이고자 하였다.

본 논문은 다음과 같은 구성으로 작성되었다. 2절에서는 로봇 설계를 위한 성능 요구사항이 설명되어 있으며, 3절에서는 설계 원리가 서술되어 있다. 4절은 4족 보행 로봇의 제어 알고리즘을

[†] Corresponding author: Mechanical Engineering, UNIST, Ulsan, Korea (jbbae@unist.ac.kr)





다른 로봇들과 비교하였으며, 5절에서는 실제로 제작된 다리를 통해 에너지 효율의 실험적 검증을 한 결과와 분석을 하였다.

2. 설계 요구사항

인간의 역할을 대신하는 로봇을 개발하기 위해서는 작업 공간이 인간과 비슷해야 한다. 이에 따라서 로봇의 다리 크기 는 인간의 하반신과 비슷한 700 mm로 설계되었다. 또한, 인간 의 역할을 대신하기 위해 [7,8]과 같은 다양한 매니퓰레이터 중, 직관적이고 빠른 로봇의 작업을 위해 [9]에서 개발된 인간의 움직임을 따라 움직이는 약20 kg 의 매니퓰레이터를 장착하고 자 하였다. 목표한 크기의 프레임과 컨트롤러, 모터의 무게를 고 려하여 로봇이 가질 수 있는 최대 무게를 80 kg으로 제한하였다. 4족 보행 동물들은 에너지 효율을 늘리기 위해 속도에 따라 서 보행 패턴을 바꾼다^{10]}. 개발하고자 하는 4족 보행 로봇 또 한속도에 따라서 보행 패턴을 최소 trot까지 바꿀 수 있는 것을 목표로 하고 있다. 개가 trot 할 때, 몸무게의 약 두 배의 충격력 이 각 다리에 전해지는데^[11], 이 연구를 바탕으로, 80 kg 로봇이 trot할 때, 엉덩이와 무릎 관절에 필요한 토크를 약 150 Nm로 계산하였다. 또한, 빠르고 안정적인 trot을 위해서 6 rad/s의 각 속도를 목표로 설계하였다. [Fig 2a] 는 3D 설계 모델과, 설계 원리를 보여준다.

3. 설계 원리

3.1 모터의 설계와 제작

대부분의 크기가 큰 로봇들은 큰 기어비를 사용하고 있다. 많은 수의 휴머노이드 로봇들과 4족 보행 로봇들이 50:1 에서 100:1 가까이 되는 기어비를 사용하고 있다^[12,13]. 하지만 이는 기어의 무게로 인해 회전 관성을 증가시킬 뿐 아니라, 에너지



[Fig. 2] 3D designs of the leg. (a) Design of the leg and proposed design principles. (b) Overhang of the motor

손실을 가져오는 마찰 또한 증가시킨다. 반면에, MIT Cheetah ^[14]는 낮은 기어비를 가지고 있음에도 불구하고 큰 힘을 낼 수 있 는데, 이는 MIT Cheetah가 상용모터가 아닌, 토크 밀도를 높이 기 위해 gap radius가 큰 모터를 직접 제작하였기 때문이다^[15].

본 연구에서는, 4족 보행 로봇의 다리를 frameless BLDC 모 터 (MF0150010, Alliedmotion^[16]) 를 사용하여 제작하였다. 해 당 모터는 최대 17.8 Nm의 토크와 1287 rpm의 속도를 가지고 있다. 이 모터를 사용하여 기어비가 10:1로 매우 작지만, 큰 힘 을 낼 수 있으며 마찰이 매우 작은 다리를 제작할 수 있었다.

대부분의 기존 로봇들은 간편함과 안정성을 위해서 상용모 터를 구매하여 사용하는데, 이로 인해서 모터의 housing을 직 접 제작할 일이 없다. 하지만 housing을 직접 제작하는 것은 매 우 중요한데, 잘못 제작된 housing은 모터의 성능을 크게 감소 시키기 때문이다. 산업용 모터는 높은 안정성과 지속성을 위 해서 높은 안전계수를 사용한다. 모터의 지속성을 높이기 위 해서 안전계수는 중요하지만, 이것은 모터를 무겁게 할 뿐 아 니라 회전 관성의 증가로 토크 전달률까지 감소시킨다. 이러 한 이유로 본 연구에서는 모터 housing을 직접 제작하여 모터 효율의 감소를 최소화하였다. 보행 로봇의 설계에서 모터의 위치를 고려하였을 때, 지면에서의 충격이 모터의 축 방향의 충격보다 반경 방향으로 더 크게 전해지기 때문에, 9 개의 다 리가 고정자로부터 회전자를 일정한 틈을 유지하며 잡아주는 역할을 하도록 하였다. Housing의 무게를 최소화하기 위해 3D 프린터를 사용하여 제작하였다.

Housing을 설계할 때, 충격 뿐 아니라 신중하게 고려되어야 할 점은, 모터의 overhang이다. Overhang은 [Fig. 2b]와 같이 회 전자의 영구자석이 고정자 보다 모터의 축 방향으로 길게 나 온 길이를 의미하는데, 이 길이에 따라서 유출되는 magnetic flux를 10% 가까이 감소시킬 수 있다^[17]. 그러나 대부분의 로 봇들이 상용모터를 사용하기 때문에 overhang을 고려하지 않 거나, frameless 모터를 제작하는 회사 또한 이것에 대한 최적 값을 제공하지 않아서 대부분 upper overhang과 lower overhang 이 같도록 제작하게 된다. 그러나 최적의 overhang 값은 모터마 다 다르며, upper overhang과 lower overhang이 비대칭일 때 더 욱 효율적이라는 연구 결과가 있기 때문에^[18], 이것을 결정하는 것에 신중을 기해야 한다. 비록 FEM 등의 시뮬레이션 분석을 통하여 최적의 overhang 값을 결정하는 것이 가능하나¹¹⁹, 실제 시스템과시뮬레이션사이의차이가 존재한다. 무엇보다 3D 프 린터 분해능의 한계로, 제작된 housing이 0.2 mm 이하의 단위 로 정밀하지 않기 때문에, 여러 가지 overhang으로 제작된 프레 임을 토대로 최적의 overhang을 실험적으로 구하였다.

모터가 움직이기 시작하는 구동 토크(본 실험에서는 정격 토크의 0.7%) 를 진폭으로 하여, 다양한 주기의 sinusoidal 입 력을 주었을 때, 100 번의 주기동안 모터가 구동에 실패한 횟 수를 측정하였다. 실험의 결과는 [Table 1]에 정리되어 있다. 여러 길이의 upper overhang으로 제작된 프레임 중, 모터의 구 동 실패 횟수가 가장 최소인 2.8 mm의 upper overhang을 가지 는 프레임을 선택하여 다리를 제작하였다.

3.2 회전식 구동 전달

최근에 개발된 대부분의 로봇들은 다리의 회전 관성을 줄 이기 위해서 구동기를 엉덩이 관절에 위치시키며, 무릎 관절 의 동력 전달로 4 bar linkage, 체인 등을 사용하고 있다. 그러나 4 bar linkage나, 선형 구동기를 통한 동력전달은 스트로크 길 이에 따라서 움직임이 제한된다. 반면에 회전식 구동 전달은 움직임에 제약이 적어, 엔드이펙터의 작업 반경이 넓어지게 된다. 이는 보행시 장애물 회피를 하거나, 작업의 다양성을 증 가시키는 등의 장점이 있다.

StarlETH^[4]가 사용한 체인 구조 역시 회전식 구동 전달 방 법 중에 하나로, 위의 장점들을 가지고 있으나, 체인의 큰 backlash로 인한 부정확한 제어와 소음 등으로 인한 손실이 생 기는 부작용이 있다. 반면에 타이밍 벨트는 매우 가볍고 가격 이 저렴하여 쉽게 교체가 가능하며, 이론적으로 backlash가 존 재하지 않아서 정밀한 위치 제어가 가능하다. 일반적인 타이 밍 벨트는 체인에 비하여 토크 전달률이 높지 않지만, 고토크 구동을 위해 유리섬유로 제작된 타이밍 벨트를 사용하여 높은 힘 전달에도 타이밍벨트가 쉽게 손상되지 않도록 하였다. 이 러한 방법을 통해 제작된 다리 움직임의 범위는 엉덩이와 무릎 관절 각각 [-76.7; 76.7]°, [-90; 80]°이다. 제작된 로봇의 관절 움 직임의 범위는 보행 중인 고양이과의 동물들(엉덩이와 무릎 관절 각각 약 140°, 130°) 보다 넓은 범위를 가지고 있다^[20].

3.3 작은 회전 관성을 위한 다리

에너지의 손실을 최소화하는 것도 중요하지만, 특정 동작 을 수행할 때에 필요한 일의 양을 감소시키는 것 또한 에너지 소비를 줄이기 위한 방법이다. 이를 위해서 많은 로봇들은 경 량화에 신경을 쓰고 있는데, 본 연구에서는 다리 구조의 경량 화 뿐 아니라 모터를 모두 엉덩이 관절에 위치시켜서 회전 관 성을 감소시켰다. 무릎 관절의 동력 전달은 타이밍 벨트를 통 해서 이루어진다. 질량을 최대한 엉덩이 관절에 집중시키기 위한 노력으로, 실제로 제작된 로봇의 무게 중심은 엉덩이 관 절로부터 단 2.5 cm 아래에 위치하고 있다. [Fig. 2a]는 제작된 로봇의 3D 설계와 함께 설계 원리를 보여주고 있다.

4. 로봇 다리의 제어

보행 로봇은 앞으로 딛는 힘을 내기 위해서 알맞은 지면 반 작용을 만들 수 있어야 하는데, [21] 에서는 다리가 땅에 닿는 순간을 스위치로 하여, 위치 제어와 힘 제어를 바꾸어 가며 사 용한다. 반면에, [4] 에서는 series elastic actuator를 사용 하여 위치 제어를 통해서 힘 제어가 가능하도록 설계하였으며, [3] 에서는 작은 마찰 등으로 제어의 투명성이 장점인 것을 살려, PD 제어만을 이용하여 가상의 스프링처럼 다리를 제어하였다.

본 연구에서는 Self-learning Robust Neural network based nonlinear controller (SRNN)^[22] 를 사용하여 로봇 다리를 위치

[Table 1]	Percentage of	failures when	starting torqu	e is applied
	r ereenauge or	iunui es vinen	starting torqu	e is applied

Frequency	Measured upper overhang length (mm)				
(Hz)	2.6	2.8	3.0	3.2	
0.5	4%	1%	6%	18%	
1.0	8%	2%	4%	2%	
1.5	4%	2%	10%	4%	
2.0	0%	4%	0%	2%	
2.5	2%	0%	0%	0%	
3.0	0%	0%	0%	0%	
3.5	0%	0%	0%	0%	
4.0	0%	0%	0%	0%	
mean	2.25%	1.13%	2.50%	3.25%	



[Fig. 3] Control results of the system with respect to the end-effector positions $^{\left[20\right]}$

제어하였다. SRNN은 실시간으로 gain을 수정해 가며 환경 변 화를 인지하면서도 강인한 성능을 보여줄 수 있다. [Fig. 3]에 나타나듯이, SRNN은 PID, Robust Linear Sliding Mode controller (RLSM) 에 비교하여 제어 오차가 매우 작다. 제어 오차는 엉덩이와 무릎 관절 각각 0.1°, 0.7°이다. SRNN를 통해 다리가 점프를 하는 등의 급격한 환경 변화에도 정밀한 제어 가 가능하며, 가속도 제어를 통해 force control 또한 가능하다. 더욱 다양한 결과와 증명은 [22] 에 설명되어 있다.

5. 에너지 효율적인 로봇 다리의 실험적 검증

5.1 스쿼트 실험

제작된 로봇 다리는 [Fig. 4a]와 같이 실험 플랫폼 위에 아무 무게도 올려놓지 않은 것부터 15 kg의 무게까지 다양한 무게 를 얹은 채로 스쿼트 실험을 하였다. 스쿼트는 20 mm 높이를 0.5 Hz의 속도로 시행하였다. 실험 중의 각 모터의 출력 토크, 각 관절의 각도, 각 모터의 전류 입력 등이 측정되었다.

5.2 시뮬레이션과 실험의 비교 검증

실험 결과의 검증을 위해 시뮬레이션의 결과와 비교하였 다. 이 때, 시뮬레이션 [Fig. 4b]의 모델은 다음과 같은 가정을 기반으로 구성되었다:

- 모든 질량은 엉덩이 관절에 집중되어 있다.
- 마찰이나 열 등으로 인한 에너지 손실은 없다.
- 다리는 오차 없이 원하는 궤적을 따라 움직인다.

위의 세 가지 가정은 다음과 같은 이유로 타당하다. 첫째로, 실제 제작된 로봇 다리의 무게 중심은 엉덩이 관절에서 단 2.5 cm 떨어져 있다. 둘째로, 다리는 정격 토크의 단 1.5% (2.8 Nm)



[Fig. 4] Squatting experiment was performed on (a) the experimental platform and (b) a simulation model of the leg was set

만의 토크로 움직일 수 있는데, 모터의 구동 토크가 0.7% 인 것 을 고려한다면, 이는 다리의 마찰이 매우 작음을 의미한다. 마 지막으로, 강인 제어를 통해 제어 오차는 [Fig. 3]와 같이 단 0.7°로 매우 작다. 위의 세 가지 가정을 기반으로 식 (1)을 사용 하여 스쿼트 동안 각 관절이 필요한 토크를 계산하였다. τ_1 은 엉덩이 관절, τ_2 는 무릎 관절에 필요한 반시계방향 토크를 의 미하며, θ_1 과 θ_2 는 각각 수직면을 기준으로 한 허벅지의 반시 계방향 각도와, 허벅지를 기준으로 한 종아리의 반시계방향 각도를 의미한다. 허벅지 관절의 가속도 a는 주어진 desired trajectory를 통하여 계산 가능하다.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= -m(g+a)l_1 \sin(\theta_1) \\ \tau_2 &= -m(g+a)l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \tag{1}$$

[Fig. 5]에는 실제 시스템의 토크 출력과 시뮬레이션 결과가 비교되어 있다. No load 상태의 두 값의 Root Mean Square 에러 는 엉덩이 관절의 경우 2.6 Nm, 무릎 관절은 2.1 Nm 이다. 실제 시스템과 시뮬레이션 사이의 오차가 작은 것은 실제 시스템이 시뮬레이션 모델과 닮아 있음을 의미한다. 이러한 결과는 실 제 시스템의 무게 중심이 엉덩이 관절에 잘 집중되어 있으며 회전 관성이 작고, 스쿼트 동작 도중의 에너지 손실이 매우 작 다는 것을 의미한다. 모터와 모터 드라이버의 최대 허용 전류 를 고려한 엉덩이와 무릎 관절이 낼 수 있는 최대 토크는 각각 218.1 Nm, 186.9 Nm이며, 시뮬레이션 모델을 통해 추정한 4족 보행 로봇이 들어올릴 수 있는 최대 무게는 약 200 kg 이다.

[Fig. 6]는 스쿼트 동작 도중 각 모터로 유입된 전류이다. [Fig. 6]의 위쪽 그래프는 엉덩이 모터, 아래쪽 그래프는 무릎 모터로 유입된 전류를 나타낸다. 시스템의 전압은 약 48V로 고정되어 있으며, 외부 전원에서 시스템으로 유입된 총 전류를 측정하여 식(2)과 같이 시스템의 효율을 계산할 수 있었다. 이 때, 로봇이 준 토크인 t와 각 관절의 각속도 w는 서로 같은 방향일 경우만 고려하여 양의 일만을 계산하였다. 이를 바탕으로 계산된 4족 보행 로봇 다리의 에너지 효율은 약 71% 이다. [Fig. 7]은 스쿼



[Fig. 5] Simulation results with various payloads were compared to the experimental results. Left sides are results of the hip joint, while right sides are the knee joints. Horizontal axis of the graph indicates time in seconds



[Fig. 6] Current flow to the motors during squatting motion

트 동작 중 각 모터에 입력된 전류를 기반으로 측정된 일률과, 로봇이 수행한 일률을 output으로 하여 비교한 그래프이다.

Efficiency (%) =
$$\frac{\text{Output work}}{\text{Input work}} \times 100 = \frac{\int \tau \cdot \omega dt}{\int VI dt} \times 100$$
 (2)

6. 결 론

개발된 로봇이 에너지 효율이 높게 나온 이유로는 첫째로, 모터 housing을 직접 제작한 것이다. 최적화된 overhang 값을 실험적으로 찾음으로써 일반적인 상용모터에 비하여 좋은 성 능을 가지고 있다. 두번째로, 작은 기어비를 사용하여 마찰로 인한 손실을 크게 감소시켰다. 마지막으로, 회전 관성이 매우 작도록 엉덩이와 무릎 모터를 모두 엉덩이 관절에 위치시킨 것이다. 이러한 작은 회전 관성은 다리를 쉽게 움직일 수 있도



[Fig. 7] Current flow to the motors during squatting motion



[Fig. 8] The developed quadruped robot with the proposed legs

록 한다. 이를 통해 개발된 로봇의 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였으며, 그 결과는 로봇이 에너지 효율적인 것을 나타내고 있다. 계산된 에너지 효율은 약71% 이며, 개발된 다리를 바탕으로 [Fig. 8]의 4족 보행 로봇을 제작할 수 있었다.

사 사

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재 단-글로벌 박사 펠로우십사업(No. 2016-H1A2A1908777) 과 2018년도 UNIST(울산과학기술원) 연구비(1.180013.01) 의지 원을 받아 수행된 연구임.

References

- M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, and R. Playter, "Bigdog, the rough-terrain quadruped robot," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 10 822-10 825, 2008.
- [2] C. Semini, N. G. Tsagarakis, E. Guglielmino, M. Focchi, F. Cannella, and D. G. Caldwell, "Design of hyq-a hydraulically and electrically actuated quadruped robot," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 225, no. 6, pp. 831-849, 2011.
- [3] S. Seok, A. Wang, M. Y. Chuah, D. Otten, J. Lang, and S. Kim, "Design

principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the mit cheetah robot," in *Robotics and Automation (ICRA)*, 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013, pp. 3307-3312.

- [4] M. Hutter, C. Gehring, M. A. H'opflinger, M. Bl'osch, and R. Siegwart, "Toward combining speed, efficiency, versatility, and robustness in an autonomous quadruped," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 6, pp. 1427-1440, 2014.
- [5] P. A. Bhounsule, J. Cortell, and A. Ruina, "Design and control of ranger: an energy-efficient, dynamic walking robot," *in Adaptive Mobile Robotics*. World Scientific, 2012, pp. 441-448.
- [6] M. Ahmadi and M. Buehler, "Controlled passive dynamic running experiments with the arl-monopod ii," *IEEE Transactions* on *Robotics*, vol. 22, no. 5, pp. 974-986, 2006.
- [7] D. Park, C. Park, D. Kim, and J. Kyung, "Analysis and Design of the Dual Arm Manipulator for Rescue Robot," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 11, no. 4, pp. 235-241, 2016.
- [8] H. Kim, D. Park, T. Choi, H. Do, D. Kim, J. Kyung, and C. Park, "Design of High Payload Dual Arm Robot with Replaceable Forearm Module for Multiple Tasks: Human Rescue and object Handling," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 12, no. 4, pp. 441-447, 2017.
- [9] S. Park, Y. Jung, and J. Bae, "Interactive and intuitive control interface for a tele-operated robot (avatar) system," in Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2017 IEEE International Conference on. IEEE, 2017, pp. 241-246.
- [10] S. J. Wickler, D. F. Hoyt, E. A. Cogger, and G. Myers, "The energetics of the trot-gallop transition," *Journal of Experimental Biology*, vol. 206, no. 9, pp. 1557-1564, 2003.
- [11] R. M. Walter and D. R. Carrier, "Ground forces applied by galloping dogs," *Journal of Experimental Biology*, vol. 210, no. 2, pp. 208-216, 2007.
- [12] I.-W. Park, J.-Y. Kim, J. Lee, and J.-H. Oh, "Mechanical design of humanoid robot platform khr-3 (kaist humanoid robot 3: Hubo)," in *Humanoid Robots, 2005 5th IEEE-RAS International Conference on.* IEEE, 2005, pp. 321-326.
- [13] A. Spr`owitz, A. Tuleu, M. Vespignani, M. Ajallooeian, E. Badri, and A. J. Ijspeert, "Towards dynamic trot gait locomotion: Design, control, and experiments with cheetah-cub, a compliant quadruped robot," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 32, no. 8, pp. 932-950, 2013.
- [14] S. Seok, A. Wang, M. Y. M. Chuah, D. J. Hyun, J. Lee, D. M. Otten, J. H. Lang, and S. Kim, "Design principles for energy efficient legged locomotion and implementation on the mit cheetah robot," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 3, pp. 1117-1129, 2015.
- [15] S. Seok, A. Wang, D. Otten, and S. Kim, "Actuator design for high force proprioceptive control in fast legged locomotion," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on.* IEEE, 2012, pp. 1970-1975.
- [16] Alliedmotion. (2018) MF0150010A. [Online]. Available: https://www.alliedmotion.com
- [17] J. Wang, D. Lieu, W. Lorimer, and A. Hartman, "Influence of the permanent magnet overhang on the performance of the brushless dc motor," *Journal of applied physics*, vol. 83, no. 11, pp. 6362-6364, 1998.
- [18] Y. D. Chun, S. Wakao, and J. Lee, "Magnetic force characteristics

according to the variation of asymmetric overhang ratio in brushless direct current motor," *Journal of applied physics*, vol. 93, no. 10, pp. 8775-8777, 2003.

- [19] I.-S. Jung, J. Hur, and D.-S. Hyun, "3-d analysis of permanent magnet linear synchronous motor with magnet arrangement using equivalent magnetic circuit network method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 5, pp. 3736-3738, 1999.
- [20] L. M. Day and B. C. Jayne, "Interspecific scaling of the morphology and posture of the limbs during the locomotion of cats (felidae)," *Journal of Experimental Biology*, vol. 210, no. 4, pp. 642-654, 2007.
- [21] M. H. Raibert, "Trotting, pacing and bounding by a quadruped robot," *Journal of biomechanics*, vol. 23, pp. 79–98, 1990.
- [22] D. X. Ba, D. T. Tran, and J. Bae, "Self-learning robust neural-network-based nonlinear control of a 2-dof robot," in *The* 21st International Conference on Mechatronics Technology, T. T. Nguyen, P. H. A. Ho, M. T. N. Bui, and N. N. C. Doan, Eds. Eastern Publishing House, Oct. 2017, pp. 389-394.



염 호 연 2015 울산과학기술원 기계공학과(학사) 2015~현재 울산과학기술원 석박통합과정

관심분야: 4족 보행 로봇



Dang Xuan Ba

- 2008 Electrical and Electronics Engineering, HCM City University of Technology, Viet Nam (학자)
- 2012 Electrical and Electronics Engineering, HCM City University of Technology, Viet Nam (석사) 2016 울산대학교 기계공학과(박사)
- 2016~현재 울산과학기술원 Post Doctoral Researcher

관심분야: 제어, 4족 보행 로봇



배 준 범

- 2006 서울대학교 기계항공공학부(학사) 2008 Mechanical Engineering, University of California, Berkeley (석사)
- 2010 Statics, University of California, Berkeley (석사)
- 2011 Mechanical Engineering, University of California, Berkeley (빅사))

2012~현재 울산과학기술원 부교수

관심분야: Modeling, design, and control of human-robot interaction systems, Soft robotics, Biologically inspired robots