

점핑이 가능한 4족 로봇 PongBot-Q 개발

안동현 · 이재순 · 조백규
국민대학교 로봇제어연구실

1. 서론

최근 4족 로봇의 기술은 눈에 띄게 발전하였다. 대표적인 4족 로봇인 Boston Dynamics의 Spot은 평지, 계단, 자갈밭 등 다양한 지면에서의 안정적인 보행이 가능하고, Flying trotting을 이용한 주행 또한 가능하다[1]. 고속, 고투크의 구동기로 설계된 MIT의 Cheetah3는 최적화를 통한 점핑 궤적을 통해 0.76 m 높이의 책상을 점프로 올라갔다[2]. 이러한 다이내믹한 모션을 수행하기 위해선 구동기가 충분한 속도와 토크를 가져야 하며, 외란에도 강인한 점핑 알고리즘이 구현되어야 한다. 본 기고문에서는 점핑과 달리기가 가능한 4족 로봇 PongBot-Q의 설계와 원하는 이동 속도를 갖는 점핑모션 생성과 자세 안정화 전략에 대해 기술하고자 한다. 그리고 최종적으로 점핑을 통한 줄넘기, flying trotting을 이용한 고속 이동 실험을 통해 로봇 설계와 점핑 알고리즘의 성능을 검증한다.

2. 4족 로봇의 연구동향

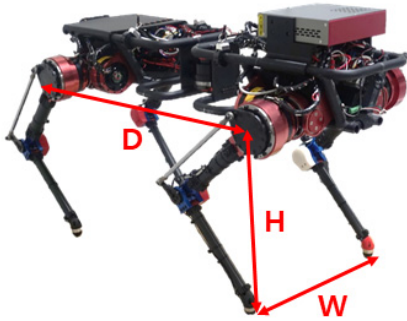
4족 로봇은 2족 로봇에 비해 무게중심이 낮고, support polygon이 넓어 안정성 측면에서 더 우수하다. 또한 고속, 고투크의 구동기들이 개발되고 있고, 컴퓨팅 성능이 올라가며 이전에는 생각하기 어려운 다양한 모션들이 구현되고 있다. 특히 MIT의 mini cheetah는 최적화기반의 모델예측제어기를 이용하여 Trotting, Bounding, Pacing, Galloping 등 다양한 걸음새와 공중제비가 가능하다[3]. [그림 1]과 같이 Boston Dynamics사에서 개발한 4족 로봇 Spot은 안정적인 보행 기술과 뛰어난 비전 기술을 통해 건설 현장, 석유 탐사 회사 등에 투입되어 인간을 대신한 다양한 미션들을 수행하고 있다. 취리히 연방 공과대학교(ETH)의 ANYmal은 실시간 비선형 모션 최적화를 통한 Pronking, flying trotting이 가능하다[4]. 하지만 이러한 4족 로봇들을 모두 국외에서 개발되어지고 있다. 우리나라 또한 4족 로봇 기술 발전에 더 많은 관심과 노력이 필요하다.



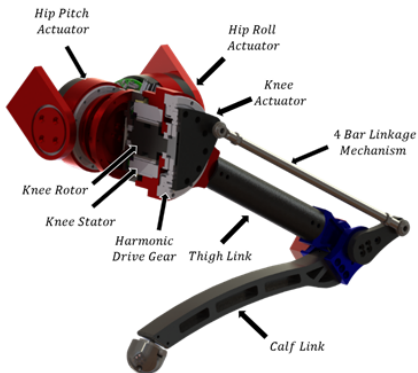
[그림 1] Boston Dynamics의 4족 로봇 Spot[1]

3. PongBot-Q 설계

[그림 2]는 국민대학교와 서울과학기술대학교에서 공동으로 설계한 4족 로봇 PongBot-Q이고 [그림 3]은 로봇의 다리부 설계를 보여준다. [표 1]은 전체적인 로봇의 스펙을 나타내고 PongBot-Q의 특징을 요약하면 다음과 같다.



[그림 2] 4족 로봇 PongBot-Q



[그림 3] PongBot-Q의 다리부 설계. 다리당 3개(힙롤, 힙피치, 무릎)의 구동기를 갖음

[표 1] PongBot-Q 스펙

Item		Description
Overall size	Width (W)	440 mm
	Height (H)	450 mm
	Depth (D)	700 mm
Mass		46 kg
DOFs		Total 13 DOFs (12 DOFs Legs, 1DOF Waist)
Actuators		Kollmorgen BLDC motor, Harmonic gear
Sensors		Loadcell (Foot), IMU (Torso), Absolute & incremental encoder (All joints)
Power		74V, 12V

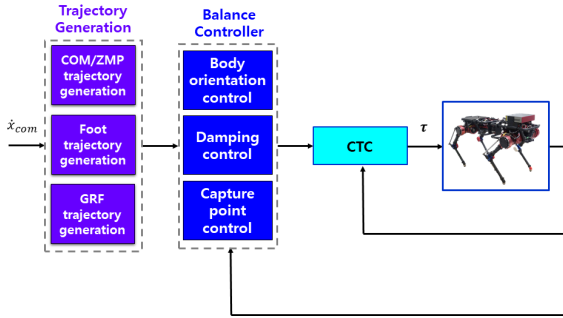
- 로봇의 허리에 Yaw 자유도 추가 : 이를 통한 다리의 활동 반경을 키울 수 있음.
- 고속, 고토크의 모터 선정 : 점핑을 위해 특히 무릎 관절의 속도와 토크가 커야 함. 따라서 콜모겐사의 TBMS-7631A 모델(최대토크 : 5.3 Nm, 최대속도 : 5200 rpm)을 무릎 관절의 모터로 선정함.
- 힙관절의 관성모멘트 최소화 : 무릎 관절을 힙으로 끌어올림. 이를 위해 4절링크 메커니즘을 활용함.

4. 점핑 알고리즘

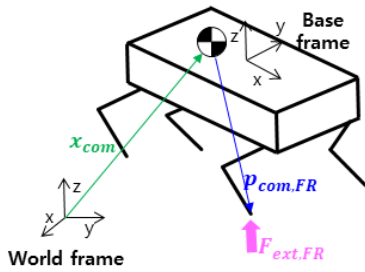
[그림 4]는 PongBot-Q의 제어 프레임워크를 나타낸다. 이 프레임워크는 로봇의 보행과 점핑에 모두 적용된다. 입력 \dot{x}_{com} 은 로봇의 목표 이동 속도이다. [그림 5]와 같은 Floating-base 시스템에서 우리는 질량중심(COM), 발, 지면반력의 총 3가지 궤적을 생성해주었다. 또한 외란에 대한 자세 안정화 전략으로 로봇 상체의 오리엔테이션 제어, 작은 외란에 대한 뎀핑 제어기, 큰 외란에 대한 착지점 변경 알고리즘이 사용된다. 그렇게 구해진 최종적인 궤적은 Computed torque control (CTC)을 통해 관절의 토크로 계산되어 로봇에 들어가게 된다.

4.1 궤적 생성

로봇의 수직방향 무게중심 궤적은 5차 보간법을 이용하여 연속적인 무게중심의 위치, 속도, 가속도를 만들어 원하는



[그림 4] PongBot-Q의 제어 프레임워크



[그림 5] World와 Base 좌표계 및 주요 벡터(무게중심, 발, 지면반력)

체공시간을 확보할 수 있도록 한다. 이때 궤적의 형태는 다음과 같다:

$$z_i = a_{i1} + a_{i2}t + a_{i3}t^2 + a_{i4}t^3 + a_{i5}t^4 + a_{i6}t^5, \quad (1)$$

여기서 z 는 수직방향 무게중심의 위치이고, i 는 궤적의 phase를 의미하며, a 는 궤적의 boundary condition에 의해 결정되는 계수이다. 수평방향 무게중심 궤적은 Marc Raibert가 개발한 한발 호핑 로봇에 적용된 제어기와 같이 목표한 이동 속도를 유지하며, 착지발을 기준으로 무게중심이 symmetric하게 이동하도록 하였다[5]. 발 궤적은 수직과 수평방향 모두 5차 보간법을 이용하여 생성하였고, 지면반력 궤적은 무게중심의 목표 가속도 궤적과 발의 상태(stance 또는 flight)에 따라 계산되었다.

4.2 자세 제어기

상체 오리엔테이션 제어기는 상체에 부착된 IMU로부터

상체의 기울어진 각도를 피드백받아 원하는 각도를 유지도록 비례-적분(PI) 제어기로 설계되었다. 이 제어기의 출력은 로봇의 수직방향 발 위치로 들어가게 된다:

$$\delta L_{z,i} = K_{pb,i}(\theta_j^{des} - \theta_j) + K_{ib,i} \int (\theta_j^{des} - \theta_j) dt, \quad (2)$$

여기서 δL_z 는 수직방향 발의 위치 변화량이고, i 는 발을, j 는 롤 또는 피치를 나타낸다. θ^{des} , θ 는 목표 상체 각도와 실제 상체 각도이고, K_{pb} , K_{ib} 는 PI 제어기의 게인들이다.

댐핑 제어기는 로봇에 작은 외란이 들어왔을 때 충격을 흡수할 수 있도록 로봇의 댐핑 효과를 주는 것으로 이 제어기는 y방향에 대해서만 적용이 되었다. 댐핑 효과를 위해, 로봇의 힌들관절 제어게인을 줄여주었다. 여기서 힌들관절 제어게인이라ں Chapter 4.3에서 설명될 Computed torque control에서 관절마다 정해주는 비례-미분(PD) 제어기의 게인을 의미한다. 하지만 이 게인을 줄이게 되면 좌우 다리의 발끝이 모이게 되는 문제가 발생한다. 이 문제를 해결하기 위해, 양발 간의 거리를 유지하도록 하는 비례-미분(PD) 제어기가 다음과 같이 설계되었다:

$$e_{hr}^{des} = q_{hr,l}^{des} - q_{hr,r}^{des}, \quad (3)$$

$$e_{hr} = q_{hr,l} - q_{hr,r}, \quad (4)$$

$$q_{hr,l}^{des} = q_{hr,l}^{ref} + K_{p,dp}(e_{hr}^{des} - e_{hr}) + K_{d,dp}(\dot{e}_{hr}^{des} - \dot{e}_{hr}), \quad (5)$$

여기서 e_{hr}^{des} 는 목표 좌우 힌들관절의 각도에러이고, $q_{hr,l}^{des}$, $q_{hr,r}^{des}$ 는 좌우 힌들관절의 목표관절 각도이다. e_{hr} 는 실제 좌우 힌들관절의 각도에러이고, $q_{hr,l}$, $q_{hr,r}$ 은 엔코더로 측정된 실제 좌우 힌들관절의 각도이다. $q_{hr,l}^{des}$ 은 댐핑 제어가 추가된 목표 왼쪽 힌들관절 각도이고, $q_{hr,l}^{ref}$ 는 댐핑 제어가 추가되기 전의 목표 왼쪽 힌들관절 각도이고, $K_{p,dp}$, $K_{d,dp}$ 는 PD 제어기의 게인들이다.

로봇에게 큰 외란이 들어오는 경우 로봇은 다리를 뺀어 자세를 유지해야 한다. 우리가 사용한 착지점 제어기는 로봇을 선형 역진자 모델로 가정하고, 심플한 다이나믹스를 풀어 로봇이 넘어지지 않는 착지점을 찾고 이 착지점으로 다리를 이동시키는 제어기이다. 착지점은 다음과 같이 구해진다:

$$x_{cp} = x_{com} + \sqrt{\frac{z_{com}}{g}} \dot{x}_{com} \quad (6)$$

여기서 x_{cp} 는 계산된 착지점이고, x_{com}, \dot{x}_{com} 은 무게중심의 수평방향 위치와 속도이고, z_{com} 은 수직방향 무게중심의 위치이며, g 는 중력가속도이다. PongBot-Q는 이 3가지의 심플한 제어 방법을 통해 점핑시 안정한 자세를 유지할 수 있도록 하였다.

4.3 Computed torque control

Computed torque control(CTC)은 시스템의 비선형 항들을 지우고 PID 피드백 제어를 통해 reference 입력을 트래킹 하도록 하는 방법이다. 이 때 시스템은 joint space 또는 task space로 표현이 가능하다. PongBot-Q의 경우 inverse kinematics를 풀어 다음과 같이 joint space에서 CTC를 수행하였다:

$$S^T \tau = \tau_{ff} + \tau_{fb}, \quad (7)$$

$$\tau_{ff} = C(q, \dot{q}) + G(q) - J^T F_{ext}, \quad (8)$$

$$\tau_{fb} = K_p(q^{des} - q) + K_d(\dot{q}^{des} - \dot{q}), \quad (9)$$

여기서 S 는 selection 행렬, τ 는 계산된 토크, τ_{ff} 는 피드포워드 토크, τ_{fb} 는 피드백 토크, $C(q, \dot{q})$ 는 코리올리 및 구심력 벡터, $G(q)$ 는 중력벡터, J 는 자코비안 행렬, q, \dot{q} 은 관절의 실제 각도, 각속도이고, q^{des}, \dot{q}^{des} 은 목표하는 관절의 각도와 각속도이다. K_p 와 K_d 는 관절의 각도, 각속도 오차에 대한 비

례-미분(PD) 제어기의 게인이다.

5. 실 험

[그림 6]는 PongBot-Q의 제자리 점프 모션을 통해 줄넘기 실험 모습을 보여준다. 이 때 로봇은 0.25초의 체공시간을 갖



[그림 6] PongBot-Q의 점핑을 통한 줄넘기



[그림 7] PongBot-Q의 1.3 m/s 속도 달리기

는 안정적인 점핑 모션을 수행하였다. 점핑 타이밍은 사람의 매뉴얼로 정하였다.

[그림 7]은 PongBot-Q가 트레드밀 위에서 flying trot을 통해 달리는 모습을 보여준다. 달리는 이동 속도는 조이스틱으로 전달되고, 최대 1.3 m/s의 속도로 로봇이 달리는 것을 확인하였다. 더 빠른 달리기는 로봇의 힙 피치 구동기의 용량을 초과하여 구현하지 못하였다.

6. 결 론

본 기고문에서는 국민대학교와 서울과학기술대학교에서 함께 개발한 4족 로봇 PongBot-Q를 소개하고 이 로봇이 점핑과 달리기를 하기 위한 점핑 알고리즘을 기술하였다. 이 알고리즘을 통해 줄넘기와 최대 1.3 m/s의 달리기가 가능함을 보였다. 앞으로 우리는 이 로봇에 Quadratic programming (QP)를 이용한 최적의 지면반력 궤적을 생성할 것이며, 로봇의 힙 피치 구동기 용량을 더 키워 더 빠른 달리기가 가능하도록 할 것이다.

참고문헌

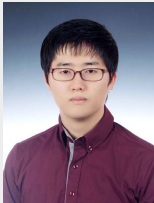
- [1] <https://www.bostondynamics.com/spot>
- [2] Q. Nguyen, M. J. Powell, B. Katz, J. D. Carlo and S. Kim, "Optimized Jumping on the MIT Cheetah 3 Robot," 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 7448-7454.
- [3] B. Katz, J. D. Carlo and S. Kim, "Mini Cheetah: A Platform for Pushing the Limits of Dynamic Quadruped Control," 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 6295-6301.
- [4] C. D. Bellicoso, F. Jenelten, C. Gehring and M. Hutter, "Dynamic Locomotion Through Online Nonlinear Motion Optimization for Quadrupedal Robots," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 3, pp. 2261-2268, July 2018.
- [5] Raibert, M. H., Brown, H. B., & Chepponis, M. (1984). Experiments in Balance with a 3D One-Legged Hop-

ping Machine. The International Journal of Robotics Research, 3(2), 75-92.



안동현

2013 국민대학교 전자공학부(공학사)
2014~현재 국민대학교 기계설계학과 석박통합
과정
관심분야: 다리형 로봇, 고속이동 알고리즘, 최적
제어
E-mail : ahndong8571@gmail.com



이재순

2014 국민대학교 기계시스템공학부(공학사)
2016 국민대학교 기계설계학과(공학석사)
2017~현재 국민대학교 기계설계학과 박사과정
관심분야: Wearable Robot, Manipulator, Tele-
operation
E-mail : flswlrhkd1@gmail.com



조백규

2002 KAIST 기계공학과(공학사)
2004 KAIST 기계공학과(공학석사)
2009 KAIST 기계공학과(공학박사)
2009~2010 ATR, Japan 박사후연구원
2011 IHMC, USA Research consultant
2011 CMU, USA 박사후연구원
2018~2019 IHMC, USA Visiting scholar
2011~현재 국민대학교 기계공학부 부교수
관심분야: 휴머노이드 로봇의 설계 및 제어, 보행과
주행 패턴 생성, 외골격 로봇
E-mail : swan0421@gmail.com