

전신제어프레임워크를 활용한 4족 로봇의 동작 및 접촉반력 제어

황순욱¹, 박재흥^{1,2}

¹서울대학교, ²차세대융합기술연구원

Motion and Contact Reaction Force Control of a Quadruped Robot using Whole-body Control Framework

Hwang Soonwook¹, Park Jaeheung^{1,2}

¹Seoul National University, ²Advanced Institute of Convergence and Technology
e-mail: jbs4104@snu.ac.kr, park73@snu.ac.kr

요 약

다족형 로봇은 자동차와 같이 바퀴가 달린 이동 장치에 비해 불균일한 지형에서의 이동성이 우수하다는 장점을 가지고 있으며, 이를 극대화시켜 다양한 산업 분야에 적용하기 위한 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다. 특히 4족 로봇은 다족형 로봇 중에서 정적 보행과 동적 보행 사이의 전환을 쉽게 수행할 수 있기 때문에 다양한 지형에서 안정적이면서 빠른 이동이 가능하다. 본 논문에서는 상대적으로 낮은 제어 이득을 취하여 예측되지 않은 지형의 변화에 유연하게 대처할 수 있는 전신제어프레임워크를 4족 로봇에 적용하여 동작과 접촉반력 제어를 시뮬레이션을 통해 수행하고 그 결과를 확인하였다.

1. 서론

인간 및 동물을 모사한 다족형 로봇은 몸체와 발의 위치를 독립적으로 제어할 수 있는 기구적 특징을 가지고 있다[1]. 이러한 특징 때문에 자동차와 같이 바퀴가 달린 이동 장치가 접근하기 어려운 험지에서의 안정적인 이동이 가능하다는 장점이 있다. 최근 이러한 장점을 극대화시켜 다양한 산업 분야에 적용하기 위해, 다족형 로봇에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다.

다족형 로봇은 다리의 개수에 따라 분류할 수 있는데, 대표적으로 인간을 모사한 휴머노이드와 같은 2족 로봇, 포유류를 모사한 4족 로봇, 그리고 곤충의 형태와 유사한 6족 로봇이 있다. 이 중에서 4족 로봇은 다른 형태의 다족형 로봇에 비해 정적 및 동적 보행사이의 전환이 용이하기 때문에 지면의 형태에 쉽게 적응하며 보행할 수 있다[2].

본 논문에서는 4족 로봇이 다양한 형태의 지형을 보행할 수 있는 제어프레임워크를 구축하고 적용하는 데 초점을 맞추었다. 일반적으로 다족형 로봇의 제어를 쉽게 수행하기 위해 역기구학을 기반으로 한 위치 제어를 주로 사용한다[3]. 여기서 다족형 로봇과 같이 몸통이 지면에 고정되어 있지 않은 부유형 기저 시스템의 경우, 상대적으로 시스템에서 가장 많은 무게를 차지하는 기저를 지탱하기 위해 상당히 높은 값의 제어 이득을 취해야 한다. 이러한 경우

지형의 예측되지 않은 변화에 유연한 반응을 하지 못하여 시스템이 급격히 불안해지는 현상을 초래할 수 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해, 본고에서는 상대적으로 낮은 제어 이득을 취하는, 지면과의 접촉을 고려한 전신제어프레임워크를 사용하였다. 전신제어프레임워크는 낮은 제어 이득으로 인해 외부 환경에 대해 유연하게 목표된 경로를 추정할 수 있고, 발과 지면과의 접촉반력을 원하는 대로 제어할 수 있다는 장점을 가지고 있다[4].

본 논문에서는 전신제어프레임워크를 4족 로봇에 적용하여 간단한 동작 제어와 접촉반력의 제어를 수행하였다. 본고의 2절에서 전신제어프레임워크의 구성에 대해서, 3절에서 수행한 시뮬레이션의 결과를 나타내었으며, 4절에서 결론 및 향후 계획에 대해서 논의하였다.

2. 전신제어프레임워크의 구성

2.1 부유형 기저 시스템의 동역학

관절 공간에서 지면과의 접촉을 고려한 시스템의 운동은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[5].

$$A\ddot{q} + b(q, \dot{q}) + g(q) + J_c^T F_c = \Gamma \quad (1)$$

시스템의 총 자유도가 n 이고, 지면과의 접촉으로 인해 구속된 자유도가 n_c 라고 할 때, A 는 관성 행

렬 ($n \times n$), b 는 코리올리/원심 벡터 ($n \times 1$), g 는 중력 보상 벡터 ($n \times 1$), J_c 는 지면과의 접촉 지점의 자코비안 ($n_c \times n$), F_c 는 시스템이 지면으로 가하는 접촉반력 ($n_c \times 1$), 그리고 Γ 는 시스템의 각 관절에 가해지는 토크 벡터 ($n \times 1$)이다. 관절 공간에서 형성된 동역학 관계식에 접촉 지점의 구속조건 ($\dot{x}_c = \ddot{x}_c = 0$)을 대입하고, 작업 공간으로 투영시키면 식 (2)와 같은 작업 공간에서의 운동방정식이 표현될 수 있다.

$$\Lambda \ddot{x} + \mu(q, \dot{q}) + p(q) = F \quad (2)$$

식 (2)에서의 Λ , μ , 그리고 p 는 모두 작업 공간에서 새로 정의된 성분이다. 즉 수행하고자 하는 작업의 자유도를 m 이라고 하였을 때, Λ 는 작업 공간에서의 관성 행렬 ($m \times m$), μ 는 작업 공간에서의 코리올리/원심 벡터 ($m \times 1$), p 는 작업 공간에서의 중력 보상 벡터 ($m \times 1$), 그리고 F 는 제어하고자 하는 지점에서 발생시키는 힘 벡터 ($m \times 1$)이다. 위의 관절 공간에서 작업 공간으로의 운동방정식의 투영 과정은 [5]에 자세하게 논의되어 있다.

본 논문에서 제어프레임워크를 적용하는 4족 로봇은 하나의 다리가 세 개의 회전 관절로 구성된 총 12 자유도이다. 그러나 부유형 기저이기 때문에 기저에 해당하는 로봇의 몸체의 위치와 방향을 표현하기 위한 여섯 개의 가상의 관절이 있다고 가정할 수 있으므로, 부유형 기저의 위치와 방향을 포함한 시스템의 총 자유도 n 은 18이다. 그리고 로봇의 발과 지면은 점접촉이 일어난다고 가정하였기 때문에, 접촉에 의해 발생하는 반력 모멘트가 존재하지 않게 되어 하나의 발이 지면과의 접촉에 의해 구속되는 자유도 n_c 는 3이라 할 수 있다.

2.2 동작과 접촉반력 제어

식 (2)에서 제어하고자 하는 지점이 발생시키는 힘은 다음의 관계들 통해서 각 관절에 토크가 인가된다.

$$\Gamma = (S^k)^T \Gamma^k \quad (3)$$

$$F = \overline{J^T} (S^k)^T \Gamma^k \quad (4)$$

$$\Gamma^k = \overline{J^T} (S^k)^T F \quad (5)$$

여기서 Γ^k 는 실제로 로봇의 관절에 인가되는 토크 벡터 ($(n-6) \times 1$)이고, S^k 는 $((n-6) \times n)$ 의 선택 행렬이다. 선택 행렬은 이는 실제로 존재하지 않은 여섯 개의 가상의 관절들에 토크를 인가시킬 수 없기 때문에 이와 관련된 해당 성분을 제거하는 역할을 한다. 또한, 식 (5)에서의 $\overline{J^T} (S^k)^T$ 를 구하는 과정에서 여러 가지 해가 발생하는데, 이 때 시스템

내의 모든 관절의 가속 에너지를 최소화하는 해를 구함으로써 로봇의 모든 관절을 가장 효과적으로 움직일 수 있다[6]. 식 (5)를 통해 제어하고자 지점이 발생시키는 힘 F 를 구성하는 식 (2) 내의 \ddot{x} 성분을 PD 제어를 통해 제어함으로써 원하는 동작을 생성할 수 있다[7].

위의 과정을 통해 4족 로봇의 동작을 제어함과 동시에, 지면과의 접촉에 의해 발생하는 접촉반력을 식 (6)을 통해 제어할 수 있다.

$$\Gamma_c^k = \overline{S_c J_c^T} (S^k)^T F_c \quad (6)$$

여기서 제어하고자 하는 접촉반력의 성분 수를 $n_{c,d}$ 라고 정의할 때, Γ_c 는 접촉반력을 제어하기 위한 토크 벡터 ($(n-6) \times 1$), S_c 는 제어하고자 하는 접촉반력의 성분을 선정하는 선택 행렬 ($n_{c,d} \times n_c$)이다. 그런데 접촉반력 제어 토크 Γ_c^k 는 실제 동작을 제어하기 위한 동작 제어 토크 Γ^k 에 영향을 미치게 되면 원하는 대로 로봇의 동작을 제어할 수 없다. 그러므로 Γ_c^k 는 영공간에서 제어함으로써 로봇의 동작 제어에의 간섭을 제거하도록 한다.

3. 시뮬레이션

2절에서 논의한 전신제어프레임워크를 바탕으로, 4족 로봇의 동작과 접촉반력을 제어하였다. 시뮬레이션 소프트웨어와 모델은 ㈜심랩의 RoboticsLab과 SQ1[8]을 사용하였다.

3.1 동작 제어

4족 로봇의 동작 제어 성능을 파악하기 위해 시도한 동작 명령은 [표 1]에 기술되어 있다. [표 1]에서의 제어 성분은 Cartesian 좌표계에서의 각 성분을 의미한다. 즉, 위치 제어 성분이 x 일 경우 Cartesian 좌표계의 x 축 방향으로의 위치 이동을 나타내고, 방향 제어 성분이 y 일 경우 동일 좌표계의 y 축 기준 회전인 피치 회전을 나타낸다. 본 논문에서의 동작 제어에서는, 제어 지점에 따라 가능한 모든 축을 기준으로 한 위치 및 방향을 제어하였다. 그리고 목표치의 단위로, 위치 제어의 경우 미터(m)가, 방향 제어의 경우 라디안(rad)이 사용되었다.

동작 제어의 성능을 파악하기 위해 계단함수 응답과 상승 시간을 확인하였다. 이론적으로 본 논문에서 사용한 전신제어프레임워크는 Cartesian 좌표계로 형성된 작업 공간에서의 관성 행렬인 Λ 의 영향으로 인하여 각 관절 또는 링크의 무게에 상관없이 모든 방향으로의 동작은 같은 계단함수 응답이 나타난다.

그리고 전체 시스템의 이론적인 상승 시간을 다음의 식 (7)을 통해 추정할 수 있다[9].

	제어 성분			목표치
	무게중심의 위치	왼쪽 앞발의 위치	몸체의 방향	
1	x, y, z	\times	x, y, z	0.010
2	\times	x, y, z	\times	0.010
3	x, y, z	x, y, z	x, y, z	0.005

[표 1] 4족 로봇의 동작 제어 시뮬레이션 수행

	제어 지점	제어 성분	목표치 [N]
1	왼쪽 앞발	x	0
2		y	0
3		z	10

[표 2] 4족 로봇의 접촉반력 제어 시뮬레이션 수행

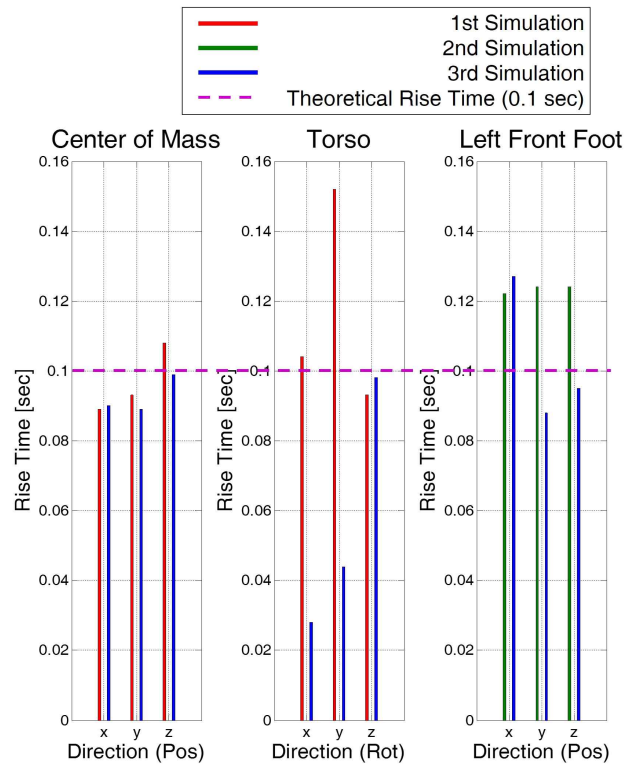
$$t_r = \frac{1 + 1.1\xi + 1.4\xi^2}{\omega_n} \quad (7)$$

여기서 t_r 이 상승 시간, ξ 는 감쇠비, 그리고 ω_n 은 고유 진동수를 의미한다. 임계 감쇠일 경우 ξ 는 1이 되고, ω_n 은 PD 제어기에서 사용된 제어 이득 값을 통해 얻을 수 있다.

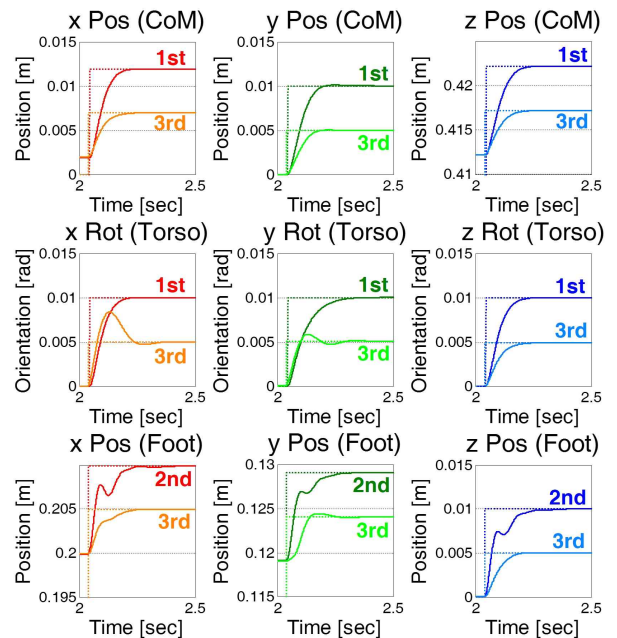
본 시뮬레이션에서 사용된 고유 주파수는 35.0이며, 이 값을 통해 얻어진 이론적인 상승 시간의 값은 0.1초이다. 위의 내용을 통해 얻어진 계단함수 응답에서의 상승 시간이 [그림 1]에 나타나 있고, 계단함수 응답은 [그림 2]에서 확인할 수 있다. 상승 시간 및 계단함수 응답에 대한 결과를 각각의 제어 성분 별로 확인하기 위해, 무게 중심의 위치와 몸체의 방향 제어는 첫 번째와 세 번째 시뮬레이션을, 왼쪽 앞발의 위치 제어는 두 번째와 세 번째 시뮬레이션을 함께 나타내었다.

[그림 1]에서의 상승 시간에 대한 결과를 보면, 첫 번째와 두 번째 시뮬레이션에서 몸체의 y 축 방향 회전을 제외한 다른 제어 성분의 상승 시간과, 식 (7)에서 구한 이론적인 상승 시간의 값을 비교하였을 때 큰 오차가 나지 않음을 확인할 수 있다. 다만 무게중심, 몸체, 그리고 발을 동시에 제어한 세 번째 시뮬레이션의 경우, 갑작스러운 지면과의 접촉 상황의 변화로, 일시적인 몸체의 회전이 발생하면서 일부 방향으로의 계단함수 응답이 다소 흔들린 결과가 나타났다.

이론적인 상승 시간과 오차가 다소 크게 발생하는 제어 성분이 나타나는 이유로, 갑작스럽게 제어 목표치가 변하는 계단함수 경로에 의해 야기되었다고 예상할 수 있다. 또한 발을 지면에서 떼면서 무게중심을 동시에 움직이는 제어를 하는 경우, 순간적인



[그림 1] 동작 제어에서의 상승 시간

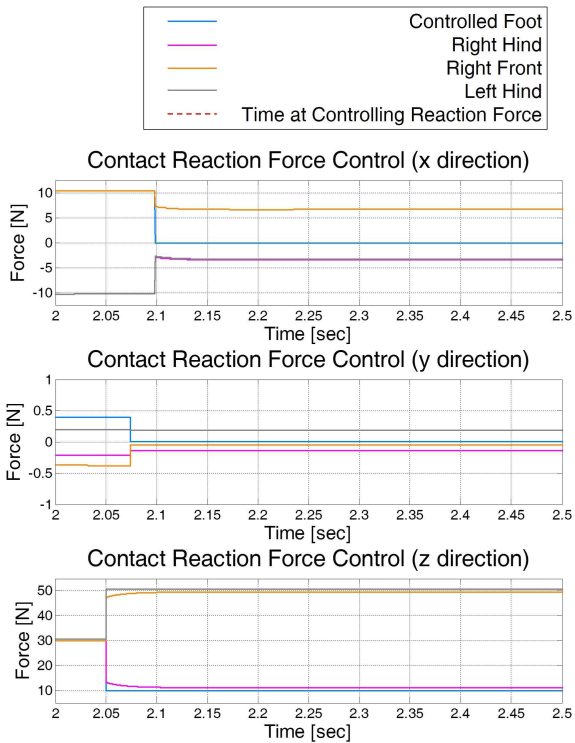


[그림 2] 동작 제어에서의 계단함수 응답

접촉 상황 변화가 발생하므로 이로 인해 상승 시간에서의 오차가 발생한다고 예상할 수 있다.

계단함수에 대한 모든 제어 성분에서의 응답은 [그림 2]에서 알 수 있듯이, 단위 함수의 목표치로 실제 제어 지점의 위치가 안정적으로 수렴하여 정상 상태 오차가 거의 없음을 확인할 수 있다.

3.2 접촉반력 제어



[그림 3] 왼쪽 앞발에서의 접촉반력 제어

2.2절의 식 (6)을 사용하여 발과 지면 사이의 접촉 반력을 제어할 수 있다. 임의의 일정한 크기의 힘을 제어하고자 하는 지점(발)을 통해 지면에 가했을 때, 원하는 대로 힘이 올바르게 작용하는지, 그리고 제어하지 않은 다른 발에서의 접촉반력이 올바르게 변하는지 확인하기 위해 [표 2]에 기술된 순서로 시뮬레이션을 진행하였다.

접촉반력을 제어하는 시뮬레이션 결과는 [그림 3]에서 확인할 수 있다. [그림 3]에서 볼 수 있듯이, 제어 지점에서의 접촉 반력이 목표치로 수렴함을 확인할 수 있고, 힘 및 모멘트 평형을 유지하기 위해 다른 접촉 지점에서 발생하는 힘의 크기가 변한 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 외부 지형의 변화에 유연하게 대처할 수 있는 전신제어프레임워크를 4족 로봇에 적용하여 제어를 수행하였고, 제어 성능을 계단함수 응답을 통해 확인하였다.

계단함수의 형태로 목표 경로가 설정되었던 동작 제어에서는 이론적인 상승 시간과 비교했을 때 유사한 결과가 나왔고, 제어 지점의 위치가 목표치에 안정적으로 수렴하였다. 다만 무게중심과 발을 동시에 제어할 때 몸체의 회전 등과 같이 일부분의 제어 성분에 오차가 발생하였는데, 이는 순간적으로 목표치의 값이 상승하는 계단함수 명령에 의한 갑작스러

운 몸체의 회전에 의해 발생하는 것이라 예상된다. 실제로 로봇의 다양한 동작을 제어하는 경우 순간적으로 명령을 가하는 계단함수보다는 3차 보간 곡선 등이 목표 경로로 설정되기 때문에, 이것이 제어에 큰 영향을 미치는 문제점이라고 할 수 없다.

또한 특정 접촉 지점 및 성분의 접촉반력을 0로 제어하였던 접촉반력 제어에서는, 기존 동작의 제어에 간섭하지 않으면서 접촉반력의 제어가 성공적으로 수행됨을 확인할 수 있었다.

향후 상대적으로 낮은 제어 이득을 활용하여 외란에 대해 유연한 제어가 가능하고, 원하는 만큼 접촉반력을 제어할 수 있는 전신제어프레임워크의 특성을 활용하여, 적절한 접촉반력을 이용한 4족 로봇의 정적 및 동적 보행 제어를 진행할 계획이다.

참고문헌

- [1] M. H. Raibert, Legged Robots that Balance, MIT press, 1986.
- [2] S. Hirose, Y. Fukuda, H. Kikuchi, "The gait control system of a quadruped walking vehicle," Advanced Robotics, vol. 1, no. 4, pp. 289-323, 1986.
- [3] M. Mistry, J. Nakanishi, G. Cheng, S. Schaal, "Inverse kinematics with floating base and constraints for full body humanoid robot control," Proc. of the IEEE/RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, pp. 22-27, 2008.
- [4] L. Righetti, J. Buchli, M. Mistry, M. Kalakrishnan, S. Schaal, "Optimal distribution of contact forces with inverse-dynamics control," The International Journal of Robotics Research, vol. 32, no. 3, pp. 280-298, 2013.
- [5] J. Park, O. Khatib, "Contact consistent control framework for humanoid robots," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1963-1969, 2006.
- [6] H. Bruyninckx, O. Khatib, "Gauss' principle and the dynamics of redundant and constrained manipulators," Proc. of the Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 470-475, 2000.
- [7] O. Khatib, "A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 3, no. 1, pp. 43-53, 1987.
- [8] <http://www.simlab.co.kr>

- [9] B. C. Kuo, M. F. Golnaraghi, Automatic Control Systems, John Wiley & Sons, 2003.