1. Introduction

Civil Engineering에서 로봇의 주된 역할은 인간의 접근이 제한되거나 위험한 상황에서 인간을 대신하여 각종 임무를 수행하는 것이다. 특히나 재난 환경과 같이 환경이 급격하게 변해 예측이 힘든 현장에서 그 중요성은 증대된다[1], [2]. 인력을 대체하기 위해 현재까지 제시되어온 방법으로는 UAV, wheeled robot, legged robot등이 있다[3]. UAV의 경우, 환경에 대한 접근성은 우수하지만, 환경에 직접적인 interaction을 할 수 없다는 한계를 가지고 있다. Wheeled robot은 평지와 같은 특수한 지형에서 기동성이 뛰어나지만, 지형 변화에 대한 적응력이 부족하다는 단점을 가지고 있다. 마지막으로 legged robot은 환경과 직접적인 interaction을 할 수 있을 뿐더러, wheeled robot에 비해 다양한 지형에서 우수한 보행 능력을 가진다. 또한, 재난 환경에서, 대다수 도구 및 장비들을 운용하는 방식이 사람을 기준으로 설계되었기 때문에, 사람과 유사한legged robot의 존재는 필수불가결이다. 그러나 legged robot은 그 보행 제어에 있어 복잡성을 가지고 있다. 재난 환경과 같은 복잡하고 거친 환경은, 그 자체가 내재한 위험 요소가 다분하기 때문에 사람이 직접 접근하는 것은 지양하여야 한다. 그러므로 외란에 강인하고, 에너지 효율적인 제어 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완할 수 있는 최적화 기반의 모션 제어 알고리즘을 제안하고자 한다.

1. Related Research

다리형 로봇의 제어는 크게 상위 제어기 및 하위 제어기로, 이 두 가지의 세분화 된 제어 문제로 분류할 수 있다. 상위 제어기는 Cartesian space에서의 desired motion을 생성하고, 하위 제어기는 상위 제어기에서 생성된 Cartesian space상의 motion을 Joint space 궤적으로 변환해주고 그 궤적을 잘 추종하도록 하는 것이다.

상위 제어기: 지금까지 많이 사용되고 있는 상위 제어기는 ZMP[4], [5], Foot placement[6] 및 Limit cycle[7]을 기반한 방법들이 존재한다. 이 세가지 방법들은 모두 로봇의 Full model을 사용하지 않고, 수식이 보다 간단한 model인 LIPM(Linear Inverted Pendulum) model을 사용하여 Equation of motion을 도출하여 x와 y좌표를 독립적인 선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

* ZMP[4], [5] 기반의 상위제어기는 목표 발 위치의 reference trajectory가 주어진 상태에서 LIPM의 동역학을 이용하여 로봇의 reference COM 위치와 속도를 출력한다.
* Limit cycle[7] 기반 방법은 하위 제어기를 이용하여 passive한 swing-leg dynamics를 제어함으로써 암묵적으로 디뎌야 할 발 위치를 산출한다.
* Foot placement[6] 기반의 상위제어기는 reference trajectory가 정해져 있지 않고, 로봇의 각 관절의 위치와 속도 state feedback 통해 Capture point (로봇의 COM 속도가 일정 시간 이후에 0이 되게 하는 발 위치) reference를 출력한다.

ZMP 기반의 방법은 사전에 정해진 발 위치를 토대로 로봇의 모션을 생성하기 때문에 로봇의 움직임이 크게 제약되어 예기치 않은 외란에 대한 견고성이 떨어진다. Limit cycle 기반의 방법은 산출 된 발 위치는 로봇의 state에 의해 조정되어 작은 외란을 극복할 수 있지만, 발을 디뎌야 할 정확한 위치와 시간이 주어지지 않기 때문에 큰 외란에 취약하다는 단점이 있다. Foot place 기반의 방식은 제어 주기마다 로봇의 실제 state feedback을 통해 안정적인 모션을 유지할 수 있는 발 위치를 계산 해주기 때문에 ZMP와 Limit cycle 기반의 방식보다 외란에 강인하다는 장점이 있다.

하위 제어기: Full body inverse dynamics를 이용하여 하위제어기를 구성하는 연구는 활발하게 이루어지고 있다. 대부분의 연구는 [9]~[15] Kahtib et al. [8]이 제시한 framework를 기반으로 제어기를 구성하였고, 컴퓨터 연산 시간을 줄이기 위해 full optimization vector가 아닌 reduced optimization vector를 사용하여 QP 문제를 다루었다.

* Workspace를 충분히 이용하고, 각종 외란에 강인하려면 Full body dynamics를 고려한 하위제어기를 사용해야 함.
* Operational space상의 desired motion들의 우선순위를 고려하여, 낮은 순위의 motion을 높은 순위 motion의 Null space에서 생성함으로써 높은 순위의 motion을 구현하는 동시에 이 motion을 위배하지않는 선에서 낮은 순위의 motion을 구현하는 것이다.

비록 reduced optimization vector를 통해 QP 문제를 접근하면 계산시간을 줄일 수 있다는 장점이 존재하지만, Slip (발의 지면에서 미끄러지는 현상) constraints를 고려하지 못한다는 단점이 있다. 아울러 Slip이 발생하면 Equation of motion 또한 위배되기 때문에 feasible 한 QP 솔루션을 얻지 못한다.

따라서 본 연구에서는 Foot placement 기반의 high-level controller과, Full optimization vector를 기반한 full body inverse dynamics controller를 low-level controller를 사용하여 외란에 강인하고 에너지 효율적인 로봇 제어 framework를 제안하고자 한다.

[1] Kangari, R. (1991, June). Advanced robotics in civil engineering and construction. In Advanced Robotics, 1991.'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on (pp. 375-378). IEEE.

[2] Haas, C., Skibniewski, M., & Budny, E. (1995). Robotics in civil engineering. Computer‐Aided Civil and Infrastructure Engineering, 10(5), 371-381.

[3] Liu, P., Chen, A. Y., Huang, Y. N., Han, J. Y., Lai, J. S., Kang, S. C., ... & Tsai, M. (2014). A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. Smart Struct. Syst, 13(6), 1065-1094.

[4] Vukobratović, M., & Borovac, B. (2004). Zero-moment point—thirty five years of its life. International journal of humanoid robotics, 1(01), 157-173.

[5] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2003, September). Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In ICRA (Vol. 3, pp. 1620-1626).

[6] Pratt, J., Carff, J., Drakunov, S., & Goswami, A. (2006, December). Capture point: A step toward humanoid push recovery. In Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on (pp. 200-207). IEEE.

[7] Hobbelen, D. G., & Wisse, M. (2007). Limit cycle walking. In Humanoid Robots, Human-like Machines. InTech.

[8] O. Khatib, “A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation,” Robotics and Automation, IEEE Journal of, vol. 3, no. 1, pp. 43–53, February 1987.

[9] M. Hutter, M. A. Hoepflinger, C. Gehring, M. Bloesch, C. D. Remy, and R. Siegwart, “Hybrid operational space control for compliant legged systems,” in Robotics: Science and Systems (RSS), Sydney, NSW, Australia, July 2012.

[10] M. Hutter, H. Sommer, C. Gehring, M. Hoepflinger, M. Bloesch, and R. Siegwart, “Quadrupedal locomotion using hierarchical operational space control,” The International Journal of Robotics Research, vol. 33, no. 8, pp. 1047–1062, 2014.

[11] A. Herzog, L. Righetti, F. Grimminger, P. Pastor, and S. Schaal, “Balancing experiments on a torque-controlled humanoid with hierarchical inverse dynamics,” in Intelligent Robots and Systems (IROS), 2014 IEEE/RSJ International Conference on, Chicago, IL, USA, Sept 2014.

[12] L. Saab, O. Ramos, F. Keith, N. Mansard, P. Soueres, and J. Fourquet, “Dynamic whole-body motion generation under rigid contacts and other unilateral constraints,” Robotics, IEEE Transactions on, vol. 29, no. 2, pp. 346–362, April 2013.

[13] M. de Lasa, I. Mordatch, and A. Hertzmann, “Feature-based locomotion controllers,” ACM Trans. Graph., vol. 29, no. 4, pp. 131:1–131:10, Jul. 2010.

[14] P. Wensing and D. Orin, “Generation of dynamic humanoid behaviors through task-space control with conic optimization,” in Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on, Karlsruhe, Germany, May 2013, pp. 3103–3109.

[15] L. Sentis and O. Khatib, “A whole-body control framework for humanoids operating in human environments,” in Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on, Orlando, FL, USA, May 2006, pp. 2641–2648.