[[1]](#footnote-1)

A Reactive Online Optimization Based Whole Body Contol for Quadruped Locomotion Over Challenging Terrain\*

First A. Author, Second B. Author, Jr., and Third C. Author, Member, IEEE

*Abstract*— This electronic document is a “live” template. The various components of your paper [title, text, heads, etc.] are already defined on the style sheet, as illustrated by the portions given in this document.

# INTRODUCTION

Civil engineering 분야에서, 접근이 제한되거나 위험한 상황에서의 대체제로 로봇이 제안되고 있다. 특히나 재난 환경과 같이 위험한 환경에서 그 중요성은 증대되어지고 있다. 인력을 대체하기 위해 현재까지 제시된 방법으로는 wheeled robot, UAV, legged robot 등이 있다.

재난 환경에서, 로봇은 밸브를 작동하거나, 레버를 당기고, 계단을 오르내리는 등 주변 환경과 interaction을 해야하는 경우가 많다. 또한, 잔해물들로 이루어진 비평탄지형, 큰 틈, 장애물 등의 물리적인 제한으로 인해 과거에 많이 사용되어 왔던 wheeled robot으로는 접근이 제한적이다. 비록 UAV는 이러한 문제점을 해결할 수 있지만, 안개가 짙거나 바람이 많이 부는 열악한 날씨, payload 능력, energy consumption 등의 문제들이 존재한다. Legged robot은 위에서 언급한 challenging한 terrain에 보다 적합하고, 사람의 팔과 유사한 형태의 매니퓰레이터를 통해 환경과 직접적인 interation이 가능하므로 다양한 종류의 task를 수행할 수 있는 잠재적인 능력을 갖추고 있다.

복잡한 환경과 안전하게 interaction을 하려면 robot이 기본적으로 갖춰야할 능력은 compliance이다. 전통적인 joint position control 방법으로 제어되는 로봇은 일반적으로 위치 정밀도를 유지하기 위해 high gain을 사용하고, 이로 인해 로봇의 joint 강성이 매우 높다. 위치 정밀도를 희생하지 않고 compliance를 유지하기 위해 많이 사용되는 방법은 model-based 방법중의 하나인 inverse dynamics control 방법이다.

최근에 inverse dynamics control 방법을 통해 legged robot을 제어하는 연구가 다수 진행되고 있다. 많은 연구들은 Khatib (1987)이 제시한 operational space control framework를 확장하여 floating base system에 적용시켰고, 이를 Quadratic Programming (QP) 방법으로 접근했다. 즉, task space의 desired motion이 주어진 상태에서, convex optimization을 이용하여 각종 constraints를 만족하는 동시에 desired motion을 가장 잘 추종하는 reference control을 계산하는 것이다. Hutter et al. (2014), Hearzog et al. (2014)은 hierarchical 방법을 이용하여 우선순위가 높은 tasks의 null space에 secondary tasks를 투영시킴으로써 높은 우선순위의 desired motion을 간섭하지 않은 상태에서 secondary tasks를 구현했다. 그러나 특수한 상황에서 feasible한 해가 존재하지 않거나 우선순위가 같은 desired motion을 동시에 구현하기 어렵다는 단점이 존재한다. Hard constraints 특색을 가진 hierarchical 접근법과는 달리, Feng et al. (2015)은 objective cost function에 weight를 가하는 soft constraints방식을 이용하여 hierarchical 방식의 단점을 보완했다.

Fixed base system과 달리, floating base system의 equation of motion에는 contact force term이 존재하기 때문에, 이를 측정할 수 있는 센서가 필요하다. 그러나 force/torque sensor의 특성상 sensor noise가 심하고, low-pass filter를 사용하게 되면 정도에 따라 phase delay가 커지므로 전체적인 control bandwidth가 떨어진다. 이러한 문제를 해결하기 위해, Sentis (2007), Aghili (2005) 및 Mistry et al. (2010)은 equation of motion을 support-consistent manifold에 mapping시킴으로써 contact force를 제외한 joint acceleration과 joint torque로 이루어진 최적화 변수로 QP 문제를 다뤘다. 그러나 reduced 최적화 변수를 사용하게 되면, contact force 의 관한 constraint를 explicitly하게 다루지 못한다는 단점이 있다. De Lasa et al. (2010), Bouyarmane et al. (2012), Feng et al. (2015)은 joint acceleration, joint torque 및 contact force를 최적화 변수를 사용함으로써 최적화 변수의 관한 모든 constraints를 고려할 수 있다. 비록 full 최적화 변수를 사용하게 되면 QP의 dimension이 커지므로 연산 속도에 영향을 미칠 수 있지만, Feng (2015)의 결과에 의하면 연산 속도는 real-time(3ms) 조건을 만족할 수 있다.

Floating base system의 desired motion을 생성하는 방법 또한 활발하게 이루어지고 있다. Zero Moment Point (ZMP) (Vukobratović et al., 2004; Kajita et al., 2003) 기반의 방식은 로봇의 reference 발 위치를 통해 reference CoM trajectory를 생성하는 것이다. 그러나 이 방법은 사전에 정해진 발 위치를 토대로 로봇의 reference CoM motion을 생성하기 때문에 로봇의 움직임이 크게 제약되어 예기치 않은 외란에 대한 견고성이 떨어진다는 단점이 있다.

Capture Point (CP) (Pratt et al., 2006; Rebula et al., 2007) 기반의 방식은 로봇의 CoM 위치와 속도의 정보만으로 로봇을 멈추게 할 수 있는 발 위치의 근사치를 계산하는 것이다. 이 지점에 offset을 더하여 이동 속도를 조절할 수 있다. 이 방법은 ZMP 방법과 대조적으로 현재 CoM 정보를 feedback 받아 이를 이용하여 stability를 유지할 수 있는 로봇의 발 위치를 생성해줌으로 견고성이 높고 외란에 강인하다.

본 연구에서는 highly compliant (safe interaction with environment), 외란에 강인하고 (reactive) 에너지 효율적인 로봇 제어 framework를 제안하고자 한다. High-level controller formulates desired motion and reference foot positions for each control time step based on CP approach. In the low level controller, we formulate the floating base inverse dynamics as a QP problem, and we directly optimize a quadratic cost in terms of optimization variables consists of joint accelerations, joint torques, and contact forces.

~~Floating base system의 desired motion을 생성하는 방법 또한 활발하게 이루어지고 있다. Humanoid society에서 가장 많이 사용되고 있는 방법은 simplified model을 이용한 walking pattern 생성 방법이다. Zero Moment Point (ZMP) 기반의 walking pattern 생성 방법이다. Vukobratovi´c et al. (1972)이 처음으로 ZMP 기반의 walking pattern 생성을 제안했지만, real-time 연산이 어려우므로 이의 성능은 제한적이었다. Kajita et al. (2003)은 LQR 방식을 도입하여 real-time 연산이 가능한 walking pattern 생성 방법을 제안했다. 그러나 ZMP 기반의 방법은 사전에 정해진 발 위치를 토대로 로봇의 CoM motion을 생성하기 때문에 로봇의 움직임이 크게 제약되어 예기치 않은 외란에 대한 견고성이 떨어진다는 단점이 있다.~~

Aghili F (2005) A unified approach for inverse and direct dynamics of constrained multibody systems based on linear projection operator: Applications to control and simulation. IEEE Transactions on Robotics 21(5): 834–849.

Bouyarmane, K., Vaillant, J., Keith, F., & Kheddar, A. (2012). Exploring humanoid robots locomotion capabilities in virtual disaster response scenarios. In 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (pp. 337–342), Osaka, Japan.

De Lasa, M., Mordatch, I., & Hertzmann, A. (2010). Featurebased locomotion controllers. ACM Transactions on Graphics, 29(4), 131:1–131:10.

Khatib O (1987) A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation. *IEEE Journal of Robotics and Automation* 3(1): 43–53.

Herzog, A., Righetti, L., Grimminger, F., Pastor, P., & Schaal, S. (2014). Balancing experiments on a torque-controlled humanoid with hierarchical inverse dynamics. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Chicago.

Hutter, M., Sommer, H., Gehring, C., Hoepflinger, M., Bloesch, M., & Siegwart, R. (2014). Quadrupedal locomotion using hierarchical operational space control. The International Journal of Robotics Research, 33(8), 1047–1062.

Feng, S., Whitman, E., Xinjilefu, X., & Atkeson, C. G. (2015). Optimization‐based full body control for the DARPA Robotics Challenge. Journal of Field Robotics, 32(2), 293-312.

Mistry M, Buchli J and Schaal S (2010) Inverse dynamics control of floating base systems using orthogonal decomposition. In: Proceedings of International conference on robotics and automation (ICRA), Anchorage, AK, 3–8 May 2010, pp. 3406–3412.

Sentis L (2007) Synthesis and control of whole-body behaviors in humanoid systems. PhD Thesis, Stanford University.

Raibert, M. H. (1986). Legged robots that balance. MIT press.

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

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.

Rebula, J., Canas, F., Pratt, J., & Goswami, A. (2007, November). Learning capture points for humanoid push recovery. In Humanoid Robots, 2007 7th IEEE-RAS International Conference on (pp. 65-72). IEEE.

1. \*Resrach supported by ABC Foundation.

   F. A. Author is with the National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO 80305 USA (corresponding author to provide phone: 303-555-5555; fax: 303-555-5555; e-mail: author@ boulder.nist.gov).

   S. B. Author, Jr., was with Rice University, Houston, TX 77005 USA. He is now with the Department of Physics, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523 USA (e-mail: author@lamar. colostate.edu).

   T. C. Author is with the Electrical Engineering Department, University of Colorado, Boulder, CO 80309 USA, on leave from the National Research Institute for Metals, Tsukuba, Japan (e-mail: author@nrim.go.jp). [↑](#footnote-ref-1)