[[1]](#footnote-1)

A Reactive Online Optimization Based Full 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 UAV, Wheeled robot, Legged robot 등이 있다.

재난 환경에서, 로봇은 밸브를 작동하거나, 레버를 당기고, 계단을 오르내리는 등 주변 환경과 interaction을 해야하는 경우가 많다. UAV의 경우, 하늘을 날아다닌다는 특징 덕분에 특정 위치에 도달하는 성능은 뛰어난 편이다. 하지만 payload가 크지 않아 환경과 직접적인 interaction에 한계를 가진다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 비교적 사람과 유사한 형태의 매니퓰레이터를 사용할 수 있는 로봇의 존재는 필수불가결이다.

Wheeled robot은 평지와 같은 특수한 환경에서 높은 기동성을 보인다. 때문에 서비스 로봇과 같이, 로봇이 지면 조건을 선택할 수 있는 환경에서 많이 활용된다. 달리 말하면 지면에 따라 그 성능이 크게 달라진다는 것으로, 이는 wheeled robot이 해결해야할 가장 큰 과제 중 하나이다.

앞에서 설명했듯이, legged robot은 사람의 팔과 유사한 형태의 매니퓰레이터를 통해 환경과 직접적인 interaction이 가능하고, 계단과 같은 지면 변화에 안정적이기 때문에 재난 환경에서의legged robot에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.[] 재난 환경과 같이 복잡하고 거친 환경은 그 자체가 내재한 위험 요소가 다분하기 때문에 사람이 환경 뿐만 아니라 로봇에 직접 접근하는 것 또한 지양해야한다는 특징을 가지고 있다. 그러므로 외란에 강인하고, 에너지 효율적인 알고리즘을 통해 legged robot을 제어하려는 연구가 다수 진행되고 있다. [],[],[]

Legged robot의 제어는 크게 high-level controller와 low-level controller, 이 두 가지의 세분화된 제어 문제로 분류해 접근하는 방식이 많이 쓰이고 있다. High-level controller는 Cartesian/task space상에서 로봇의 desired motion을 생성한다. 그리고 low-level controller는 high-level controller에서 생성된 motion을, 각 joint의 motion으로 변환하고 그 trajectory를 잘 추종하도록 하는 것이다.

로봇의 desired motion을 정하기 위해, 다양한 접근의 high-level controller가 제안되어왔다. ZMP를 기반으로 하는 방식은 로봇의 발 위치가 사전에 미리 주어진 상태에서 로봇의 reference COM 위치와 속도를 구하는 방식이다.[] Limit cycle 방식은 low level controller를 통해 로봇의 passive dynamics를 변화시키면서 로봇 발 위치를 계산하는 방식이다.[] Foot placement 방식은 로봇의 현재 state를 반영하여, stability를 유지할 수 있는 로봇의 다음 발 위치를 계산하는 방식이다.[]

이렇게 High-level controller가 로봇의 desired motion을 생성한 후에, low-level controller는 이를 reference로 삼아 각 joint의 motion을 계산한다. 로봇의 workspace를 최대한 이용하고 외란에 강인한 control을 위해, full body inverse dynamics를 고려한 low-level controller가 제시되었다.

과거에는 다관절 legged robot에 full optimization vector를 적용한 full body inverse dynamics를 low-level controller에 적용하는 것은 computing power의 부족으로 실시간성이 보장되지 않는다는 주장이 제기되어왔다. 이에 대한 대안으로, reduced optimization vector를 통해 계산량을 줄이는 방법이 제시되었다.[] 이와 별개로, desired motion 간에 우선순위를 고려하는 방법 또한 제시되었다.[]

하지만 최근에는 computation system의 발달로, full optimization vector가 적용된 full body inverse dynamics를 low-level controller에 사용해도 실시간성이 유지된다는 것이 제안되기도 했다.[]

본 연구에서는 로봇이 재난 환경과 같은 극한의 환경에서도 외란에 강인하며, 에너지 효율적인 상태를 유지하면서 다양한 임무를 수행[]하기 위한4족 legged robot의 controller를 제안하고자 한다. 다양한 지형에서의 안정적인 보행과 넘어졌을 때의 복귀를 위해 목표 로봇을 2족이 아닌 4족으로 가정했다. 또한, 예측되지 않은 외란에도 충분히 반응하기 위해, foot plancement 기반의 high-level controller를 사용했다. Low-level controller는 full optimization vector를 적용한 full body inverse dynamics를 사용함으로써, 더욱 세세한 control을 노렸다.

In the field of Civil Engineering, robots are being come up with as alternatives for disaster relief, inspection, and surveillance tasks in restricted or hazardous environments. Mobile machines such as drones, wheeled or tracked robots, and legged robots have been proposed to replace the workforce.

In the disaster environment, robots should interacts continuously with its surroundings like activate valves, pull the lever, and go up and down the uneven platform. Drones, thus its feature that can float in the air, it has a superb performance to reach the specific target point. However, since the payload is not large enough, there is a limitation on direct interaction with the environment. Therefore, the robot which has a similar manipulator with the human is necessary.

Wheeled or tracked robots show high maneuverability (mobility) in appropriate environments such as a flat terrain. Thus, like a service robot, it is generally used in an environment where robots can select ground conditions. In other words, the performance varies greatly depending on the surface condition, which is one of the challenges that wheeled robots have to overcome.

Unlike drones, and wheeled or tracked robots, legged robots are able to interact directly with its surrounding, and its performance is stable regardless to surface condition such as stairs. Thus, there are various researches produced on the legged robot in disaster environments. A complex and tough environment, such as a disaster environment, due to its inherent risk considerations, thus human operator should refrain from direct interaction with the environment as well as the robot. Therefore, there are various researches have been conducted about robustness against the disturbances, and energy effective legged robot control.

Legged robot control architecture, in general, is composed of two sub-controllers. A high-level controller and a low-level controller. The former one generates desired motion objectives in task space, and the latter one maps the task space motion onto the joint space and keeps track of the joint signals.

Various high-level controllers have been proposed to generate the desired motion objectives. The ZMP based method is that when the foot position of the robot is given in advance, it then calculates the reference COM position and velocity trajectories of the robot. The limit cycle method calculates the robot foot position while changing the passive dynamics of the robot through the low level controller. The foot placement method calculates the next foot position of the robot which can maintain the stability by reflecting the current state of the robot.

~~While our previous inverse dynamics approach relied on an estimation of contact forces to compute an approximate inverse dynamics solution, here we present an analytically correct solution by using an orthogonal decomposition to project the robot dynamics onto a reduced dimensional space, independent of contact forces. We demonstrate the feasibility and robustness of our approach on a simulated floating base bipedal humanoid robot and an actual robot dog locomoting over rough terrain. [Inverse Dynamics Control of Floating Base Systems Using Orthogonal Decomposition]~~

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)