

3차원 작업공간에서 보행 프리미티브를 이용한 다리형 로봇의 운동 계획

Motion Planning for Legged Robots Using Locomotion Primitives in the 3D Workspace

김 용 태[†] · 김 한 정[‡]

Yong-Tae Kim[†] · Hanjung Kim[‡]

Abstract This paper presents a motion planning strategy for legged robots using locomotion primitives in the complex 3D environments. First, we define configuration, motion primitives and locomotion primitives for legged robots. A hierarchical motion planning method based on a combination of 2.5 dimensional maps of the 3D workspace is proposed. A global navigation map is obtained using 2.5 dimensional maps such as an obstacle height map, a passage map, and a gradient map of obstacles to distinguish obstacles. A high-level path planner finds a global path from a 2D navigation map. A mid-level planner creates sub-goals that help the legged robot efficiently cope with various obstacles using only a small set of locomotion primitives that are useful for stable navigation of the robot. A local obstacle map that describes the edge or border of the obstacles is used to find the sub-goals along the global path. A low-level planner searches for a feasible sequence of locomotion primitives between sub-goals. We use heuristic algorithm in local motion planner. The proposed planning method is verified by both locomotion and soccer experiments on a small biped robot in a cluttered environment. Experiment results show an improvement in motion stability.

Keywords: Motion Planning, Legged Robots, Locomotion Primitive, Navigation Map

1. 서 론

인간의 존엄성과 가치에 대한 관심이 높아짐에 따라 다양한 작업현장에서 인간이 수행할 작업을 대신하거나 보조할 수 있는 자율이동로봇의 요구가 증가하고 있다. 특히 다양한 이동로봇들 중에 다리형 로봇은(legged robot)은 기술적으로 구현하기가 어렵지만, 작업 환경에 따른 제약이 적어 사용범위가 폭넓으며, 인간이 수행할 작업을 보조할 수 있기 때문에 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다. 현재 다리형 로봇의 연구는 자연스러운 걸음새 구현 및 안정화에 중점을 두고 있으며, 최근 들어 보행 계획에 관한 연구들이 수행되고 있다.

바퀴형 이동 로봇은 2차원 공간에서 주행하고, 대부분 3 자유도 또는 그 이하의 자유도를 가지므로 구성 공간(configuration space)이 확률적 샘플 기반의 운동 계획 방법들에 의해 효율적으로 검색될 수 있다. 2족, 4족, 6족 로봇 등의 다리형 로봇은 복잡한 3차원 작업공간에서 자유로운 보행이 가능하다. 전형적인 2족 로봇의 경우 하체에 12 자유도와 상체에 그 이상의 자유도를 가지며, 이러한 고차원의 자유도는 다리형 로봇에게 넓은 범위의 다양한 동작을 하며, 바퀴형 로봇과는 달리 장애물을 오르내리거나 건너서 넘어갈 수 있다. 다리형 로봇들은 앞뒤 직진 보행, 좌우 회전, 계단 오르내리기^[1-7], 경사면 오르기^[7], 장애물 넘어가기^[8,9], 작은 장애물 올라서기^[4,5,8,9], 사다리 오르기^[11], 좁은 통로 기어 통과하기^[12,13], 기어오르기^[14] 등이 가능하다. 또한 4족과 6족 로봇도 10자유도 이상의 움직임으로 2족 로봇과 유사한 보행 동작이 가능하다.

※ 이 논문은 정보통신부 IT분야 해외유학 지원사업의 지원에 의하여 연구되었음.

[†] 교신저자 : 한경대학교 정보제어공학과 부교수
(E-mail : ytkim@hknu.ac.kr)

[‡] 한경대학교 정보제어공학과 부교수
(E-mail : hjkim@hknu.ac.kr)

3차원 작업 공간에서의 다리형 로봇을 위한 운동 계획은 다리형 로봇이 고차원 자유도를 갖는다는 점과 그 구성 공간이 일반적으로 12차원 이상이기 때문에 실제로 다리형 로봇의 운동 계획의 해를 구하는 것은 매우 어렵다고 알려져 있다^[11,15]. 다양한 종류의 장애물이 있는 복잡한 환경에서는 다리형 로봇의 고차원의 자유도 때문에 로봇의 가능한 동작을 찾기는 더욱 어렵다고 알려져 있으며, 고차원의 구성 공간에서 경로를 찾는 것은 상당한 양의 계산량과 계산 시간을 필요로 한다. 또한, 구성 공간의 복잡성과 안정성 필요조건 때문에 3차원의 복잡한 환경을 통과하는 이동 경로와 장애물과의 충돌 확인도 어렵다.

다리형 로봇의 고차원 운동 계획 문제를 단순화하여 접근 가능한 방법은 정적으로 안정된 자세로 시작하여 끝나는 미리 계획된 보행 기본자세를 사용하는 것이다. 현재 동적인 안정성 제약을 고려하여 다리형 로봇을 위한 안정적이고 효율적인 발걸음 생성에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다^[6]. 이러한 발걸음 패턴들은 보행에서 하나 또는 그이상의 미리 계획된 보행 패턴으로 바꾸어서 차례대로 재이용할 수 있는 장점이 있으며, 이렇게 미리 계획된 발걸음 패턴들은 다리형 로봇의 운동 계획을 위한 보행 프리미티브(locomotion primitives)로 사용할 수 있다. 만약 이러한 보행 프리미티브들이 미리 계획되어 최적화되어 구축된다면, 다리형 로봇은 보다 효율적이고 최적이며 강인한 보행을 할 수 있을 것이다. 또한 실제 보행을 실행할 때 최소한의 계산 비용만을 사용하여 움직일 수 있을 것이다.

단순하고 평평한 지면에서의 다리형 로봇의 운동 계획은 고차원의 구성 공간 검색보다는 단순하게 실행 가능한 보행 프리미티브의 순서를 찾는 것으로 생각될 수 있다. 그러나 문, 장애물, 계단, 경사면, 구멍과 벽 등으로 이루어진 3차원 작업공간에서는 다리형 로봇의 움직임은 보행 자세들의 선택이 제한되고, 여러 가지의 다양한 상황을 극복하기 위해서 많은 보행 프리미티브를 구현해야만 한다. 또한, 모든 고차원 구성 공간에서의 탐색이 필요하게 되어, 실행 가능한 보행 프리미티브 순서를 찾아내기가 어렵게 된다.

보행 프리미티브들을 사용하면 단순한 환경에서는 A* 알고리즘과 같은 기존의 인공지능 검색 알고리즘을 사용해 계획을 할 수 있지만, 작업 환경이 복잡하고 이동 경로가 길어지면 검색시간이 매우 길어지거나 메모리 용량이 커져 실제 적용 시에 문제점을 가지고 있다. 또한 3차원의 비평탄 지형을 가지는 작업환경에서는 전

체 구성공간의 검색 영역이 기하급수적으로 커져서 검색 알고리즘을 사용하여서는 해를 찾기가 더욱더 어려워진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 3차원 작업 공간을 2차원 공간 지도로 모델링하는 방법 등을 사용하여 검색영역의 차원을 축소할 필요가 있다. 먼저 가능한 주행경로를 탐색하고 탐색된 주행경로를 따라서 보행 프리미티브를 검색하면 다리형 로봇의 운동계획의 검색공간을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 보행 프리미티브를 사용하면서 이러한 문제점을 해결하는 새로운 구조의 다리형 로봇의 운동 계획 방법을 제안하였다. 먼저 다리형 로봇의 자세(pose), 구성(configuration), 상태를 정의하고, 운동계획을 위한 모션 프리미티브(motion primitive)와 보행 프리미티브를 정의하였다. 3차원 작업공간에서 2차원 전역 주행지도와 국부 장애물지도 생성하는 방법을 제안하였으며, 이러한 지도와 보행 프리미티브를 사용한 다리형 로봇의 운동계획 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 소형 휴머노이드를 사용하여 3차원 장애물 환경에서 실험을 통해 제안한 방법의 성능을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 다리형 로봇의 운동계획을 위하여 보행 프리미티브와 구성 변이함수를 수학적으로 모델링 하였으며, 3장에서는 3차원 작업공간에서의 운동계획 방법을 설명하였다. 4장에서는 제안한 방법의 가용성을 검증하기 위하여 실험 결과를 제시하였으며, 5장에서 결론을 맺었다.

2. 다리형 로봇의 구성 및 보행 프리미티브

m 개의 관절을 가지는 다리형 로봇의 자세, q 는 다음 식 1과 같이 정의된다.

$$q = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_m) \quad (1)$$

자세 q 는 작업공간에서의 위치와 방위에 관계없는 로봇의 자세를 의미한다.

다리형 로봇의 구성, γ_q 는 구성 공간내의 한 점으로 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_q = (x_r, y_r, z_r, \phi_r, \theta_r, \psi_r, q) \quad (2)$$

로봇의 구성은 위치, 방위, 자세로 구성되며, 위치와 방위는 작업공간의 기준 프레임(world reference frame)과 로봇의 기준프레임을 비교하여 나타낸다.

다리형 로봇의 현재 상태는 로봇의 구성 γ_q , 비용함수 C_q , 근사화 체적(bounding volume) V_q 로 다음의 식 3과 같다.

$$\chi = \{\gamma_q, C_q, V_q\} \quad (3)$$

근사화 체적 V_q 는 로봇의 자세 q 에서 로봇을 전체 감싸는 체적으로 단순하게는 실린더나 직육면체 형태로 나타낼 수 있으며, 장애물과 충돌을 조사하기 위하여 사용된다.

다리형 로봇은 고차원 자유도를 가지기 때문에 3차원의 복잡한 환경에서 보행 경로를 찾는 것과 장애물과의 충돌 확인이 매우 어렵다. 본 논문에서는 다리형 로봇의 운동 계획 문제를 단순화하여 풀기 위하여, 모션 프리미티브와 보행 프리미티브를 사용하였다. 다리형 로봇의 모션 프리미티브는 정적으로 안정된 자세로 시작하여 안정된 동작으로 연속된 동작들의 모션 패턴으로 생각될 수 있다. 이러한 모션 프리미티브는 식 4와 같이 로봇의 안정된 자세들의 순서적 집합(ordered set)으로 정의될 수 있다.

$$M_i = (q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}, \dots, q_{in_i}) \quad (4)$$

n_i 는 i 번째 모션 프리미티브의 자세 개수이며, q_{i1} 는 처음 자세, q_{in_i} 는 로봇의 최종 자세이다. 효율적이고 강인하며 자연스러운 모션 프리미티브들은 곤충과 동물들의 동작 모사 및 인간의 모션 캡처 등을 통하여 미리 다리형 로봇에 구현될 수 있다.

모션 프리미티브는 로봇 자세들의 순서적인 집합일 뿐이다. 이러한 모션 프리미티브의 각 자세들 간 변화 속도를 조절하여 로봇의 실제 보행 동작을 구현할 수 있다. 본 연구에서는 모션 프리미티브 M_i 를 사용한 다리형 로봇의 보행 동작을 다음 식 5와 같이 보행 프리미티브로 정의하였다.

$$P_i = (\Delta x_r, \Delta y_r, \Delta z_r, \Delta \phi_r, \Delta \theta_r, \Delta \psi_r, M_i, C_{p_i}, V_{p_i}) \quad (5)$$

$\Delta x_r, \Delta y_r, \Delta z_r$ 는 로봇에 모션 프리미티브 M_i 를 수행했을 때 작업공간에서 로봇 프레임 원점의 이동 변위 값이며, $\Delta \phi_r, \Delta \theta_r, \Delta \psi_r$ 은 로봇 기본 프레임의 회전 변위 값이다. C_{p_i} 는 로봇이 M_i 프리미티브를 실행할 때 수행 시간, 이동 거리, 소비 에너지, 동작의 불안정성 등을

고려한 전체적인 비용함수이다. V_{p_i} 는 로봇이 M_i 프리미티브를 수행하면서 생성한 보행체적상의 로봇 전체 이동 체적(swept volume), 즉 모든 보행 동작 중 로봇의 근사화 체적의 합으로 표현된다. V_{p_i} 는 운동 계획에서 장애물, 벽 등 물체와의 실시간 충돌 검사에 사용될 수 있다. 모션 프리미티브 M_i 는 로봇 내부의 구성 γ_q 의 순서적인 변화를 나타내는 반면, 보행 프리미티브 P_i 는 작업공간에서 다리형 로봇의 보행 동작 전체를 표현한다.

로봇의 구성은 운동 계획기(motion planner)에 의해서 선택되는 보행 프리미티브의 적용에 의해 바뀌게 된다. 한 개의 보행 프리미티브 P_i 또는 일련의 프리미티브들, $\pi = (P_1, P_2, \dots, P_K)$ 는 로봇의 현재 구성 γ 에 적용되어 로봇을 새로운 구성 γ' 으로 변화시킨다. 구성 변이 함수(configuration transition function)는 다음과 같이 정의된다.

$$f : (\gamma, \pi) \mapsto \gamma' \quad (6)$$

다리형 로봇의 운동 계획은 작업 공간의 시작지점에서 로봇의 초기 구성에서 목표지점의 로봇의 최종 구성까지 장애물, 벽 등의 물체와의 충돌을 일으키지 않고 전체 비용을 최소화하는 일련의 보행 프리미티브들을 찾아내는 것으로 표현될 수 있다.

3. 3차원 작업공간에서의 다리형 로봇의 운동 계획

다리형 로봇이 바닥, 문, 장애물, 계단, 경사면, 구멍과 벽 등으로 구성된 3차원 작업 공간에서 자유롭게 움직이기 위해서는 실시간의 운동계획 방법이 필요하다. 3차원 작업공간에서 고차원 다리형 로봇의 운동계획은 해를 구하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 먼저 그림 1과 같이 생성된 2차원 주행 및 장애물 지도를 이용하여 3차원 작업공간을 2차원으로 변환하여 문제를 접근하였다.

주행 경로 지도 작성을 위하여 먼저 3차원 모델을 2.5차원의 장애물 높이지도, 장애물 경사지도, 천정 높

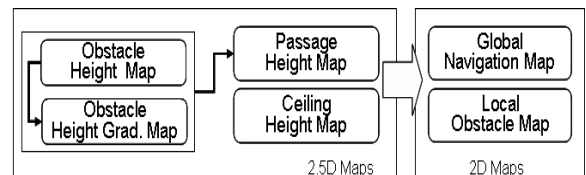


그림 1. 전역주행지도 및 지역 장애물지도 생성

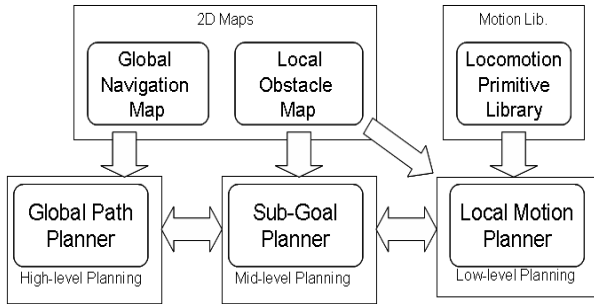


그림 2. 다리형 로봇의 계층적인 운동 계획 방법

이지도 및 통로 높이 지도를 사용하여 표현하였으며, 이를 바탕으로 2차원의 전역 주행 지도와 지역 장애물 지도를 생성하였다. 지역 장애물 지도는 모든 장애물들의 경계 정보를 포함하도록 구성하며, 이들 정보를 바탕으로 로봇은 안정된 보행을 할 수 있다.

2차원의 주행지도와 장애물 지도를 사용하더라도 다리형 로봇의 고차원 운동 계획은 아직까지도 많은 계산량과 수행시간이 요구된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 2와 같이 다리형 로봇의 보행 프리미티브를 사용한 계층적인 운동 계획 방법을 설계하였다. 2차원 작업공간에서 로봇의 전역 주행 경로를 생성하고 이를 바탕으로 주행경로를 추종하는 보행 계획을 수행하였다. 또한 주행 경로에 중간 목표점을 설정하여 다양한 장애물들의 특성에 따른 보행 프리미티브 적용을 용이하게 하였으며, 이를 통해 운동 계획의 계산량과 수행시간을 줄이도록 설계하였다.

전역 경로 계획기(global path planner)는 전역 주행 지도를 바탕으로 로봇의 전역 주행 경로를 생성한다. 바퀴형 이동로봇을 위하여 기존에 연구된 주행 경로 생성 방법들이 적용 가능하지만 다리형 로봇의 보행 프리미티브를 이용하기 때문에 경로가 순탄하고 장애물과 거리가 유지되는 최단 경로를 선택하는 것이 필요하다. 또한 다리형 로봇은 계단, 작은 구멍, 낮은 높이의 장애물 등은 통과할 수 있기 때문에 이러한 점을 고려한 주행 경로 생성이 요구된다.

중간레벨의 부목표점 계획기(sub-goal planner)는 지역 장애물 지도를 이용하여 3차원 장애물 환경에서 다리형 로봇이 장애물 대처하기에 용이하도록 전역 주행 경로에서 중간 부목표점을 생성한다. 다리형 로봇은 계단, 낮은 장애물을 통과할 때 불안정한 보행을 하기가 쉽기 때문에 적절한 부목표점을 선정하면 로봇의 안정

적인 보행을 구현할 수 있다. 또한 부목표점을 이용하여 장애물, 계단, 경사면, 구멍과 벽 등의 다양한 장애물을 대처하기 위해 요구되는 로봇의 보행 프리미티브들의 전체 개수를 현격하게 줄일 수 있으며, 이는 운동계획에서 검색공간을 축소하게 되어 알고리즘 수행시간을 줄일 수 있다.

지역 운동 계획기(local motion planner)는 주행 경로를 따라 부목표점들 사이의 운동 계획을 한다. 즉, 부목표점들 사이의 주행 경로를 따라 모션 라이브러리에 등록된 보행 프리미티브들 중에서 최적의 프리미티브를 선정하여 일련의 순서를 찾아낸다. 앞선 부목표점에서의 다리형 로봇의 최초 구성을 γ_{init} 이라 하고, 도달할 목표점에서의 구성을 γ_{goal} 이라고 하면, 국소 운동 계획기의 목적은 다음 수식 7과 같이 작업 공간 W 에서 주행 경로 τ_l 을 따라 로봇의 최초 구성 γ_{init} 으로부터 목표 구성 γ_{goal} 까지 보행 프리미티브들의 최적의 나열 π^* 를 구하는 것이다.

$$Local\ Planner(\gamma_{init}, \gamma_{goal}, \tau_l, W) \mapsto \pi^* \quad (7)$$

여기에서 부목표점들 사이의 보행 프리미티브들의 최적 나열을 $\pi^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_K^*)$ 라고 하면 다음의 식 8과 같이 표현된다.

$$\gamma_{goal} = f(\gamma_{init}, \pi^*) \quad (8)$$

로봇의 최초의 구성 γ_{init} 은 처음 프리미티브 P_1^* 의 초기 자세와 같아야 하며, P_i^* 프리미티브의 마지막 자세는 P_{i+1}^* 프리미티브의 초기자세와 일치해야 한다. 운동 계획기는 $\gamma_{goal} \approx f(\gamma_{init}, \pi_i)$, $i = 1, 2, \dots, K_N$ 을 만족하는 K_N 개의 가능한 보행 프리미티브들의 나열 $\pi_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iK_i})$ 들 중에 다음 식 9의 비용 함수 C 를 최소로 하는 최적의 나열 π^* 를 선택한다.

$$\pi^* = \operatorname{argmin}_{\pi_i} C(\gamma_{init}, \tau_l, \pi_i) \quad (9)$$

비용 함수 C 는 선택된 보행 프리미티브들의 비용 값들과 현재 구성과 주행 경로간의 최소 유클리디안 거리 등을 고려하여 구성할 수 있다. 최적의 보행 프리미티브 나열은 휴리스틱 방법, A* 알고리즘, 퍼지 알고리즘, 진화 알고리즘 등 다양한 검색기법들을 사용하여 찾을 수 있다.



그림 3. 소형 이족보행로봇 운동 계획 실험 결과

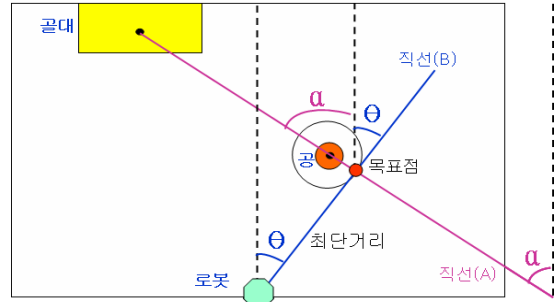


그림 5. 이족보행로봇 축구 주행 경로 생성

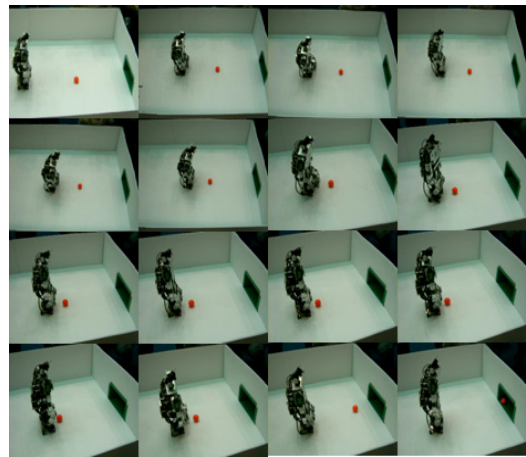


그림 6. 이족보행로봇 축구 실험 결과



그림 4. 부목표점을 이용한 계단 보행 실험 결과

4. 실험 결과

본 논문에서 제안된 보행 프러미티브를 사용한 운동 계획 방법은 실제 소형 이족보행로봇을 사용하여 다양한 장애물을 포함한 환경에서 실험하여 검증하였다. 본 실험에서는 상체 9자유도와 하체 12자유도로 전체 21자유도를 가지도록 21개의 서보모터로 구성된 소형 이족

보행로봇을 사용하였으며, 직진 보행, 좌우 회전, 좌우 옆걸음, 대각선 보행, 계단 오르기, 경사면 오르기 등 12가지 보행 프러미티브를 구현하여 사용하였다. 작업환경 지도정보들은 미리 주어진 것으로 가정하였으며, 지역 운동 계획은 단순한 휴리스틱 알고리즘을 사용하였다. 그림 3은 계단, 경사면, 낮은 장애물을 포함한 3차원 작업환경에서 이족보행로봇의 운동 계획의 실험 결과를 보여주며, 시작점에서 목표점까지 안정적인 보행을 하는 것을 보였다.

계단 앞부분과 낮은 장애물 앞부분에 부목표점을 설정하여 보행 프러미티브를 효율적으로 사용하면서 목표점까지 보행하는 것을 실험으로 확인하였다. 그림 4는 계단 앞의 부목표점을 이용하여 경사면부터 시작하여 계단을 안정적으로 오르는 실험 결과를 보여준다. 계단 앞의 부목표점의 위치는 구현된 계단 오르기 프러미티브를 고려하여 선정하였다.

보행 프러미티브를 이용한 운동 계획 방법은 이족보행로봇 축구구현에도 쉽게 적용이 될 수 있다. 천정 카

메리를 사용해 로봇, 공, 골대 등 작업공간의 지도를 구축하면 그림 5와 같이 로봇의 이동 목표점을 구하고, 이를 바탕으로 최적의 보행 프리미티브의 수행 순서를 결정할 수 있다. 로봇은 먼저 이동방향으로 회전하고, 주행 경로를 따라서 보행 프리미티브를 적용하여 목표점까지 이동한 뒤에 다시 골대방향으로 회전하는 휴리스틱 알고리즘을 사용하여 그림 6과 같이 로봇의 목표 구성을 달성하였다. 그림 6은 이족보행로봇의 축구 실험 장면을 보여준다.

5. 결 론

본 논문에서는 3차원 작업공간에서 다리형 로봇의 종류에 관계없이 적용 가능한 운동 계획 방법을 제안하였다. 복잡한 환경에서 많은 자유도를 갖는 다리형 로봇의 운동 계획 문제를 해결하기 위해 다리형 로봇의 보행 프리미티브 기반의 운동 계획기를 설계하고, 운동 계획의 검색 공간을 줄이기 위해서 주행지도를 사용하는 방법을 제안하였다. 또한 주행 경로에 부목표점을 이용하여 보행 프리미티브의 개수를 감소시키고, 다양한 종류의 장애물에 효과적으로 대처 가능하도록 설계하였다. 3차원 장애물 환경에서 소형 이족보행로봇의 보행 실험과 축구 실험을 통해 제안한 방법의 성능을 검증하였다.

앞으로 실제 환경에서 효율적으로 주행경로와 장애물 지도를 생성하는 방법과 실시간 국소 운동계획 방법에 관한 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] J.J. Kuffner, S. Kagami, K. Nishiwaki, M. Inaba, and H. Inoue, "Dynamically-stable motion planning for humanoid robots", *Autonomous Robots*, Vol. 12, No. 1, pp. 105-118, 2002.
- [2] J.-S. Gutmann, M. Fukuchi, and M. Fujita, "Stair climbing for hu-manoid robots using stereo vision", In *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, 2004.
- [3] J.-S. Gutmann, M. Fukuchi, and M. Fujita, "Real-time path planning for humanoid robot navigation", In *Int. Joint Conference on Artificial Intelligence*, Scotland, 2005.
- [4] J. Chestnutt and J.J. Kuffner, "A tiered planning strategy for biped navigation.", *Int. Conf. on Humanoid Robotics*, 2004.
- [5] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, "The Development of Honda humanoid robot", In *Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1321-1326, May 1998.
- [6] O. Lorch, A. Albert, J. Denk, M. Gerecke, R. Cupec, J. Seara, W. Gerth, G. Schmidt, "Experiments in vision- guided biped walking", In *Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 2002.
- [7] 김용태, 노수희, 이희진, "이족보행로봇의 비평탄지형 보행 및 자세 안정화 알고리즘," *퍼지 및 지능 시스템학회 논문지*, 제15권 1호, pp. 907-913, 2005.
- [8] 김용태, 이은선, 이희영, "이족보행로봇의 장애물 극복 보행알고리즘에 관한 연구", *한국 퍼지 및 지능 시스템학회 논문지*, 제13권 6호, pp. 686- 691, 2003
- [9] K. Okada, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue, "Plane segment finder: Algorithm, implementation, and applications", *Int. Conf. on Robotics and Automation*, Korea, 2001
- [10] Y. Guan, K. Yokoi, N.E. Sian, and K. Tanie, "Feasibility of humanoid robots stepping over obstacles", In *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, 2004.
- [11] K. Hauser, T. Bretl, J.-C. Latombe, "Using Motion Primitives in Proba-bilistic Sample-Based Planning for Humanoid Robots", In *proceedings of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR)*, 2006.
- [12] F. Kanehiro, T. Yoshimi, S. Kajita, M. Morisawa K. Fujiwara, K. Harada, K. Kaneko, H. Hirukawa, and F. Tomita, "Whole body locomotion planning of humanoid robots based on a 3D grid map", *Int. Conf. on Robotics and Automation*, Spain, 2005.
- [13] Z. Shiller, K. Yamane, and Y. Nakamura, "Planning motion patterns of human figures using a multi-layered grid and the dynamics filter", In *Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Seoul, Korea, 2001.
- [14] T. Bretl, S. Lall, J.-C. Latombe and S. Rock, "Multi-Step Motion Planning for Free-Climbing Robots", In *proceedings of the Sixth Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR)*, 2004.
- [15] J. Kuffner, K. Nishiwaki, S. Kagami, M. Inaba,

and H. Inoue, "Motion planning for humanoid robots", In Int. Symp. Rob. Res., Siena, Italy, 2003.

- [16] K. Nagasaka, M. Inaba, and H. Inoue, "Walking pattern generation for a humanoid robot based on optimal gradient method", In Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, 1999.



김용태

- 1991 연세대학교 전자공학과(공학사)
- 1993 KAIST 전기 및 전자공학(공학석사)
- 1998 KAIST 전기 및 전자공학(공학박사)

2002~현재 한경대학교 정보제어공학과 부교수
관심분야: 지능로봇, 지능시스템, 지능제어



김한정

- 1980 서울대학교 물리교육학과(이학학사)
- 1989 Auburn University 물리전공(이학석사)
- 1994 Auburn University 물리전공(이학박사)

1995~1996 한국플라즈마연구협회 연구원
1996~현재 한경대학교 정보제어공학과 부교수
관심분야: 센서응용, 계측