

행동 프리미티브 기반 휴머노이드 로봇의 행동 계획

Behavior Planning for Humanoid Robot Using Behavior Primitive

노수희* · 김용태**

Su-Hee Noh* and Yong-Tae Kim**

* 한경대학교 생물환경·정보통신전문대학원

** 한경대학교 정보제어공학과, 전자기술융합연구소

요 약

본 논문에서는 3차원 작업 환경에서 휴머노이드 로봇의 행동 프리미티브를 이용한 행동 계획 방법을 제안하였다. 또한 휴머노이드 로봇이 효과적으로 다양한 작업을 수행하기 위하여 행동 프리미티브를 정의하였다. 행동 프리미티브를 이용함으로써 다양한 장애물을 갖는 복잡한 작업 환경에서 로봇에 장착한 센서로 외부 환경 정보를 받아들이고 이를 이용하여 실시간 대응 및 작업이 가능하도록 하였다. 제안한 행동 계획방법은 임베디드 비전 시스템을 사용한 휴머노이드 로봇을 실제 제작하여 실험을 통해 성능을 검증하였다.

Abstract

In this paper, we presents a behavior planning for humanoid robots using behavior primitive in 3 dimensional workspace. Also, we define behavior primitives that humanoid robot accomplishes various tasks effectively. Humanoid robot obtains information of the outside environment and its inner information from various sensors in complex workspace with various obstacles. We verify our approach on a developed small humanoid robot using embedded vision and sensor system in a experimental environment. The experimental results show that the humanoid robot performs its tasks fast and effectively.

Key Words : Humanoid robot, Behavior planning, Footstep planning, Motion planning, Sensor fusion

1. 서 론

과거의 로봇은 공장이나 산업 현장에서 사람을 대신하여 단순 반복 작업만을 하였다. 그러나 인간의 존엄성과 가치에 대한 관심이 높아짐에 따라 다양한 작업현장에서 인간이 수행할 작업을 대신하거나 보조할 수 있는 로봇의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 현재의 로봇은 자기 스스로 상황을 판단하고 그에 따라 대처가 가능한 지능형 로봇으로 발전해 나가야 할 것이다. 지능형 로봇은 점차 사람이 접근하기 어려운 지형이나 재해 환경과 같은 열악한 조건에서 사람을 대신하여 작업을 수행해야 하고 그러기 위해서는 이동성과 작업 능력, 외부 환경 변화에 대한 대처 능력 등을 갖추어야 한다.

다양한 이동로봇들 중에서도 휴머노이드 로봇은 다른 형태의 이동 로봇에 비해 3차원의 복잡한 환경에서도 보행이 가능하다. 또한 양팔의 활용이 가능하기 때문에 작업 환경에 따른 제약이 적으며, 사용 범위가 폭넓어 다양한 작업 능력을 제공할 수 있다. 외형상으로도 휴머노이드 로봇은

인간으로 하여금 로봇에 대한 친근감을 줄 수 있으며, 더 나아가 인간과 협력 작업을 통해 인간을 보조할 수 있는 보조자의 역할을 하는데 많은 이점을 갖는다. 이와 같은 장점으로 휴머노이드 로봇의 개발 및 상용화 기대는 더욱 더 커져가고 있다.

로봇이 작업 환경에서 주어진 작업을 완수하기 위해서는 주변 상황에 알맞은 행동들을 선택해 나가는 행동 계획 (behavior planning)이 핵심 능력이다[1-3]. 현재 휴머노이드 로봇의 연구는 로봇의 이동성을 위해 자연스러운 걸음새 구현 및 안정화에 중점을 두고 있으며[4-8], 최근 들어 휴머노이드 로봇의 활용 범위를 넓히기 위한 행동 계획에 관한 연구들이 수행되고 있다[9].

전형적인 휴머노이드 로봇의 경우 하체에 12 자유도와 상체에 그 이상의 자유도를 가지며 이러한 고차원의 자유도는 휴머노이드 로봇에게 다양한 행동을 가능하게 한다. 그러나 휴머노이드 로봇이 갖는 고차원의 자유도와 그 구성 공간이 일반적으로 12차원 이상이기 때문에 실제로 휴머노이드 로봇의 행동 계획의 해를 구하는 것은 매우 어렵다고 알려져 있다[4-6]. 특히 다양한 종류의 장애물이 있는 복잡한 환경에서는 휴머노이드 로봇의 고차원의 자유도 때문에 로봇의 가능한 행동을 찾기는 더욱 어렵다. 또한 휴머노이드 로봇의 고차원의 구성 공간 역시 로봇의 행동 계획을 세우기 위해서 상당한 양의 계산량과 계산 시간을 필요로 한다[4]. 그렇기 때문에 휴머노이드 로봇이 외부 환경 변화를 감지하고 실시간으로 대응하여 작업을 수행하기 위한 행동

접수일자 : 2008년 5월 29일

완료일자 : 2009년 2월 10일

**교신저자

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF- 2007-521-D00304)

계획을 세우는 것은 고차원 구성공간의 복잡성과 안정성 조건 때문에 매우 어렵다.

본 논문에서는 3차원 작업 환경에서 휴머노이드 로봇이 갖는 이러한 문제점을 해결하기 위해 휴머노이드 로봇의 고차원 행동 계획 문제를 단순화하여 접근하였다. 이를 위해 정적으로 안정된 자세로 시작하여 끝나는 미리 계획된 행동 프리미티브(behavior primitive)를 이용한 행동 계획 방법을 제안한다. 먼저 2장에서는 휴머노이드 로봇 시스템과 센서 구성, 행동 프리미티브의 정의에 관하여 서술하고, 3장에서는 작업에 따른 행동 프리미티브 기반의 휴머노이드 로봇의 행동 계획을 제안한다. 4절에서는 실제 휴머노이드 로봇을 제작하여 행동 계획 실험 결과를 통해 제안한 방법의 성능을 검증하고, 5절에서 결론에 대하여 서술한다.

2. 휴머노이드 로봇의 시스템

2.1 휴머노이드 로봇의 시스템 구성

휴머노이드 로봇은 그림 1과 같이 임베디드시스템 기반 주제어기, 로봇 제어를 위한 모션 제어기, 센서 모듈과 배터리로 구성하였다. 주제어기는 Intel PXA272 임베디드 보드로 구성하였으며, 영상 처리, 행동 계획, 모션 제어 기능을 수행한다. 휴머노이드 로봇의 주제어기는 리눅스 기반의 임베디드 시스템으로 별도의 호스트 컴퓨터 없이 로봇 스스로 영상처리 및 센서 데이터 처리를 함으로써 독립적이고 자율적인 행동들이 가능하도록 설계하였다. 모션 제어기는 마이크로 컨트롤러를 사용하였으며, 센서들을 이용하여 외부 환경을 감지하고, 휴머노이드 로봇의 관절의 24개 DC 서보모터를 실시간 제어한다. 외부 환경과의 상호작용을 위해 카메라를 포함하여 IR 센서, 스테레오 마이크, 기울기 센서, 가속도 센서, PSD 센서들을 로봇에 장착하였다

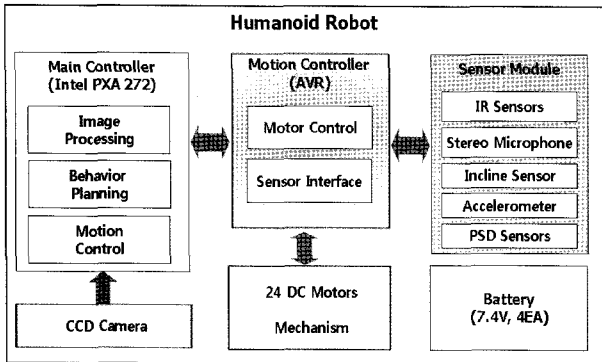


그림 1. 휴머노이드 로봇의 시스템 구성
Fig. 1. Overall structure of a humanoid robot

휴머노이드 로봇 기구부는 그림 2와 같이 인간과 유사한 구조로 설계하였다. 로봇의 크기는 길이 600mm, 무게는 6kg이며, 몸체는 알루미늄을 사용하고 각 관절은 24개의 모듈형 서보모터를 사용하여 구현하였다. 또한 인간과 유사하게 보행하기 위하여 발목과 골반 관절값이 주어지면 기구학적으로 무릎 관절의 위치와 방향을 결정할 수 있도록 구현하였다.

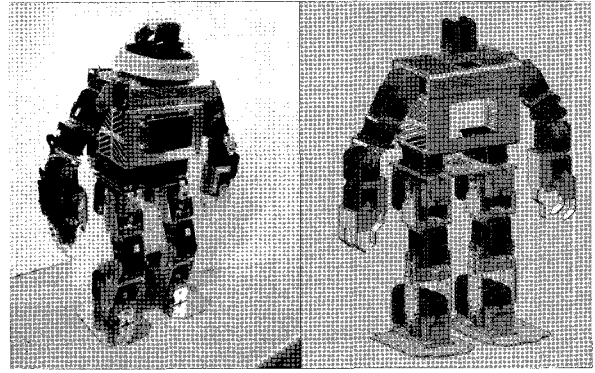


그림 2. 휴머노이드 로봇
Fig. 2. Humanoid robot

휴머노이드 로봇이 실시간으로 주어진 작업을 수행하기 위해서는 인간과 같이 현재의 환경 정보를 수집하고 분석하여 주변 상황을 인식하기 위한 센서들이 필요하다. 본 논문에서는 센서들의 활용을 최적화하기 위해 머리 부분에 CCD 카메라를 부착하였으며, 가슴 부분에는 기울기 센서와 가속도 센서를 장착하고, 양팔에는 적외선 센서와 스테레오 마이크를 달고 다리에는 PSD 센서를 장착하였다. 휴머노이드 로봇의 센서들의 구성은 그림 3과 같다. 자율 보행을 위해서는 카메라를 사용하며, 장애물 인식 및 회피를 위한 PSD 센서를 사용하며, 화재 등의 상황 판단을 위한 IR 센서, 음원 추적 및 소리 감지를 위한 스테레오 마이크를 이용하여 휴머노이드 로봇이 다양한 작업 수행을 하도록 구현하였다.

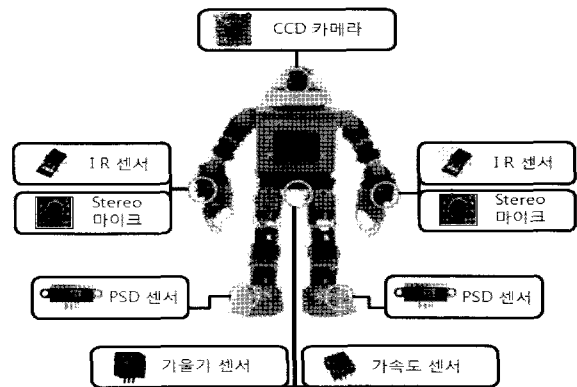


그림 3. 휴머노이드 로봇 센서 구성
Fig. 3. Sensors of humanoid robot

휴머노이드 로봇은 센서 정보와 카메라 영상을 바탕으로 주변 환경 감지와 인식을 통해 주변 환경 상태를 판단하고, 환경 상태를 기반으로 수행할 작업을 결정한다. 인간과 마찬가지로 휴머노이드 로봇이 외부 환경 정보를 수집하는 데 있어서 카메라 영상은 매우 중요한 역할을 한다. 주제어기로 사용된 HBE-KROBO 임베디드 보드는 콤포지트 비디오 입력, 영상 전처리를 위한 FPGA, 아날로그 비디오를 디지털 비디오로 변환시키는 컨버터, 모니터 VGA 포트 등으로 구성되어 있다. 비디오 디코더는 NTSC 비디오 입력을 ITU-656 YUV 4:2:2 표준디지털 영상으로 변환하며, FPGA에서는 영상 전처리, 영상 서브 샘플링, 영상 변환 등을 담당하는 기능을 가진다. 입력 영상은 보드에서의 영상

처리 시간을 감소시키기 위해 160x120 RGB 5:6:5 영상으로 변환되고, 변환된 RGB 영상은 영상 인식과 경로 계획 및 장애물 회피에 사용되어 진다. RGB 컬러 영상은 조명의 영향을 최소화하기 위하여 HSI 컬러 영상으로 변환되며, 휴머노이드 로봇의 작업 수행을 위하여 윤곽선 탐지, 물체의 중심점 추출, 컬러 기반의 물체 인지, 마커 및 숫자 인식 등의 영상 처리 알고리즘들을 구현하였다.

2.2 휴머노이드 로봇의 행동 프리미티브

휴머노이드 로봇은 고차원 자유도를 가지기 때문에 3차원의 환경에서 작업을 달성하기 위한 행동 순서를 구하는 것은 매우 어렵다. 본 논문에서는 휴머노이드 로봇의 행동 계획을 위해 미리 계획된 행동 패턴인 행동 프리미티브를 정의하여 사용하였다. 행동 프리미티브를 사용하면 휴머노이드 로봇의 행동 계획 문제를 고차원의 구성 공간 탐색에서 실행 가능한 행동 프리미티브의 순서를 찾는 문제로 바꿀 수 있다. m 개의 관절을 가진 휴머노이드 로봇의 자세는 $q = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_m)$ 로 나타낼 수 있다[8]. 자세 q 는 작업공간에서의 위치와 방위에 관계없는 로봇의 자세를 의미한다. 휴머노이드 로봇의 구성, γ 는 구성 공간 $Q = SE(3) \times T$ 에서 다음과 식 1과 같이 표현된다[8].

$$\gamma = (x, y, z, \phi, \theta, \psi, q) \quad (1)$$

로봇의 구성은 위치, 방위, 자세로 구성되며, 위치와 방위는 작업공간의 기준 프레임과 로봇의 기준프레임을 비교하여 나타낸다.

휴머노이드 로봇의 모션 프리미티브는 정적으로 안정된 연속 자세들의 동작 패턴으로 정의된다[8]. 이러한 모션 프리미티브는 식 2와 같이 로봇의 안정된 자세들의 순서적 집합으로 정의될 수 있다.

$$M = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_f) \quad (2)$$

여기서 f 는 모션 프리미티브의 자세 전체 개수다. 로봇은 모션 프리미티브의 각 자세들 간 변화 속도를 제어하여 다양한 실제 행동들을 구현할 수 있다. 본 논문에서는 모션 프리미티브를 기반으로 휴머노이드 로봇의 행동을 다음 식 3과 같이 행동 프리미티브로 정의하였다.

$$P = (\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \phi, \Delta \theta, \Delta \psi, q_1, q_f, \tau, C, V) \quad (3)$$

여기서 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 는 모션 프리미티브 M 을 수행할 때 3차원 작업공간에서 로봇 기준 프레임 원점의 이동 변위 값이며, $(\Delta \phi, \Delta \theta, \Delta \psi)$ 은 로봇 기본 프레임의 회전 변위 값이다. q_1 은 로봇의 처음 자세이며, q_f 는 로봇이 행동프리미티브를 수행한 후 최종 자세이다. τ 는 로봇이 처음 자세 q_1 부터 최종 자세 q_f 까지 수행하는 데 걸린 시간이다. C 는 로봇이 모션 프리미티브 M 을 실행할 때 이동 거리, 소비 에너지, 동작의 불안정성 등을 고려한 전체적인 비용 함수이다. V 는 로봇이 프리미티브 M 을 수행하면서 생성한 전체 이동 체적으로 동작한 모든 자세의 근사화 체적들의 합으로 표현된다. 행동 프리미티브 P 는 작업공간에서 휴머노이드 로봇이 모션프리미티브를 수행하여 발생하는 로봇의 상태 변화를 표현한다. 그림 4는 실제 휴머노이드 로봇이 다양한 행동 프리미티브를 수행하는 모습을 보여준다. 로봇은 외부 환경 변화에 맞추어 손들기, 손 흔들기, 전진, 후진, 인사 등의 다양한 행동 프리미티브에 따라 행동하게 된다.

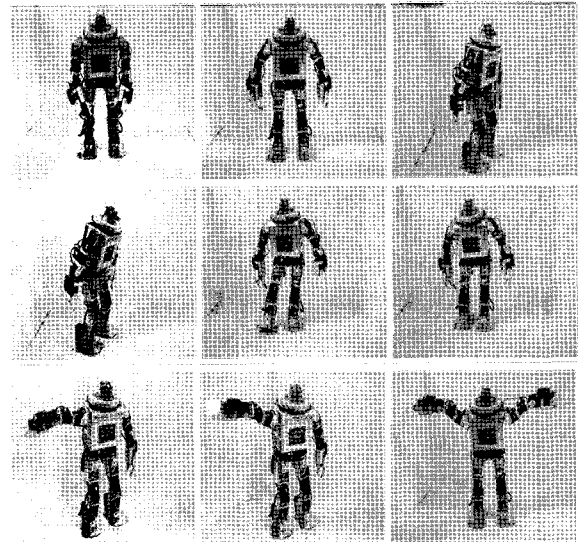


그림 4. 휴머노이드 로봇의 행동 프리미티브
Fig. 4. Behavior primitives of humanoid robot

휴머노이드 로봇의 구성은 행동 계획기에 의해서 선택되는 행동 프리미티브의 적용에 의해 구성이 새롭게 바뀌게 된다. 행동 프리미티브 P 는 로봇의 현재 구성 γ 에 적용되어 로봇을 새로운 구성 γ' 으로 변화 시킨다. 로봇의 행동 구성 변이는 다음과 식 4와 같이 표현된다.

$$\gamma' = f(\gamma, P) \quad (4)$$

휴머노이드 로봇의 행동 계획은 주어진 작업을 수행하기 위해 로봇의 현재 구성 γ_{init} 에서 목표 달성을 위한 로봇의 최종 구성 γ_f 까지 최적의 행동 프리미티브들의 순서 $\pi = (P_1, P_2, \dots, P_K)$ 를 찾아내는 것으로 다음의 식 5와 같이 표현될 수 있다.

$$\gamma_f = f(\gamma_{init}, \pi) \quad (5)$$

휴머노이드 로봇은 외부 환경과 내부 정보를 수집하고 사용자가 명령한 작업이나 로봇 스스로 선택한 작업을 수행하기 위하여 필요한 행동 프리미티브들을 선택하고 그 순서를 조합함으로써 작업에 필요한 행동 계획이 이루어진다. 작업 수행을 하기 위해 필요한 행동 프리미티브는 로봇의 행동 프리미티브 라이브러리에서 검색되어 진다. 행동 프리미티브 라이브러리는 휴머노이드 로봇의 작업 수행에 필요한 다양한 행동 프리미티브들을 미리 구현하여 모아 둔 것으로 행동 프리미티브가 다양할수록 로봇이 수행 가능한 작업역시 다양해진다.

휴머노이드 로봇의 행동 프리미티브 라이브러리는 로봇의 보행 및 정지 상태에 따라 그림 5와 같은 프리미티브들을 갖는다. 로봇의 보행을 위해 앞걸음, 뒷걸음, 좌우옆 걸음, 좌우 대각선 걸음, 좌우 회전, 오르내리기 등의 프리미티브를 구현하였으며, 정지 상태에서 로봇의 다양한 동작을 위하여 손 흔들기, 손들기, 머리 돌리기, 끄덕이기, 머리 흔들기, 손잡기, 허리 틀기 등 주로 손과 목, 머리, 몸체를 이용한 자세들로 행동 프리미티브를 구현하였다. 또한 휴머노이드 로봇은 장착된 각각의 센서 용도에 따라 외부 환경 및 로봇 내부 정보를 수집하기 위해 장애물, 마커, 소리 인지 등의 기능을 수행한다.

Motion Status	Walking	Standing Action
Behavior Primitives	<ul style="list-style-type: none"> - step forward - step backward - step left - step right - tum left - tum right - step up - step down - step left diagonal - step right diagonal 	<ul style="list-style-type: none"> - grasp left hand - grasp right hand - lift hand - wave hand - shake hand - turn left head - turn right head - nod head - shake head - twist left waist - twist right waist

그림 5. 행동 프리미티브 라이브러리
Fig. 5. Behavior primitive library

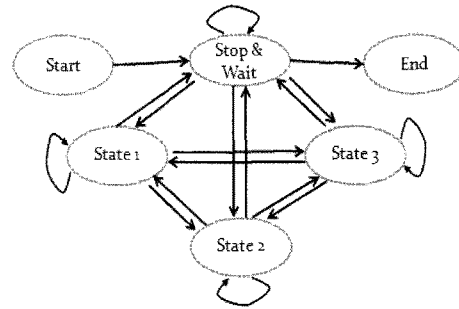


그림 7. 작업 구성 공간의 상태 천이
Fig. 7. State transition of task configuration

3. 휴머노이드 로봇의 행동 계획

휴머노이드 로봇의 행동 계획 시스템은 그림 6과 같이 로봇이 수행해야 할 작업(task)에 따라 이루어지게 된다. 로봇의 작업은 장애물 인식 및 회피, 경로 계획에 의한 보행, 센서 정보에 따른 행위, 마커 인식에 따른 행위 등 사용자의 명령에 따라 주어진다. 작업이 주어지면 로봇에 장착된 다양한 센서를 통해 외부 환경 정보 또는 로봇 내부 정보를 수집하게 되고 이 정보를 바탕으로 로봇의 작업이 선택되면 실행 가능한 행동들을 탐색하게 된다. 선택된 작업을 수행하기 위해 필요한 행동 프리미티브를 행동 프리미티브 라이브러리에서 탐색하고 선택된 행동 프리미티브들의 순서를 조합함으로써 작업에 따른 행동 계획이 이루어진다. 휴머노이드 로봇은 조합된 행동 프리미티브를 실행함으로써 주어진 작업을 완수하게 된다.

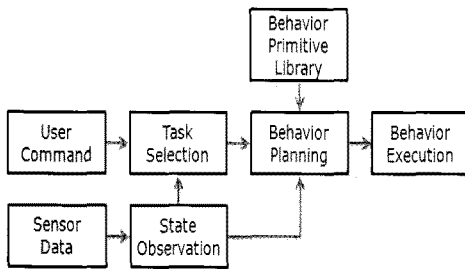


그림 6. 휴머노이드 로봇의 전체 행동 계획
Fig. 6. Behavior planning of humanoid robot

휴머노이드 로봇의 행동 계획을 위한 작업 구성 공간의 상태 천이는 그림 7과 같다. 로봇의 작업 상태는 자율 보행을 수행하는 상태(State 1), 센서를 통해 주변 환경 정보를 얻고 그에 따른 행동을 수행하는 상태(State 2), 마커 인식에 따른 행동을 수행하는 상태(State 3)로 구분하였다. 휴머노이드 로봇의 상태에 따라 수행 가능한 작업이 달라지므로 로봇의 상태는 로봇의 주요 기능을 나타낸다. 로봇의 행동이 시작되면 대기 및 정지 상태(Stop & Wait)에서 작업에 따라 로봇의 상태를 선택하게 되고 선택된 작업을 위한 행동을 수행하게 된다. 하나의 작업이 끝나면 다시 정지 및 대기 상태로 돌아오게 되고 각각의 상태에서 상호 이동이 가능하다.

휴머노이드 로봇의 전체 행동 계획 알고리즘은 그림 8과 같다. 로봇이 초기화를 끝내면 작업에 따라 로봇의 상태를 선택하도록 한다. 이를 위해 스테레오 마이크 센서를 이용하여 박수 횟수를 감지하고 그에 따른 상태를 선택한다. 소리 감지를 이용한 까닭은 앞으로 인간-로봇 상호작용에 음성이 가장 중요한 방법이 될 것이기 때문이다. 사용자에게 의해 상태가 선택되면 보행 계획 및 행동 계획에 따라 실행 가능한 행동 프리미티브를 실행함으로써 하나의 작업이 종료된다. 작업이 종료되면 현재 상태의 재 선택 또는 다른 상태로 천이를 위해 상태 전환을 판단한다. 상태 전환도 박수 횟수를 감지하여 판단하도록 하였다. 초기 선택된 작업이 끝나면 상태 전환을 통해 각각의 상태에서 작업을 재실행 하거나 다른 상태로 전환이 가능하다.

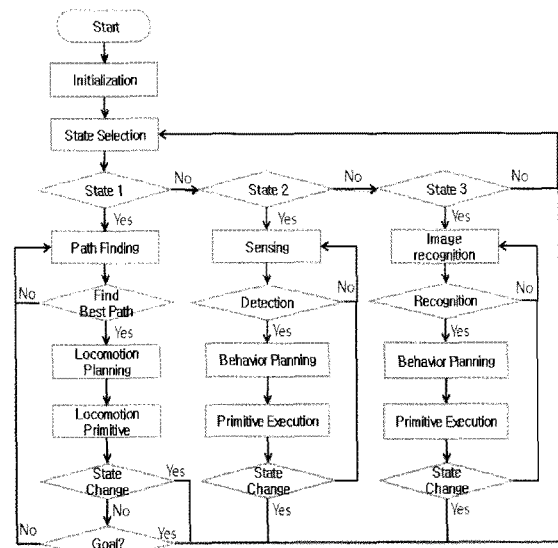


그림 8. 행동 선택 알고리즘
Fig. 8. Behavior selection algorithm

상태 1에서는 로봇이 자율보행을 수행한다. 로봇이 목적지까지 도착하기위해서 경로 탐색을 통해 최적의 경로를 찾은 후 최적의 경로로 이동하기 위해 보행 계획을 한다. 보행 계획에 따라 행동 프리미티브 라이브러리에서 앞걸음, 뒷걸음, 좌우 회전, 좌우 대각선 보행등 실행 가능한 최적의 보행 프리미티브들을 선택하여 수행한다. 하나의 보행 프리미티브가 실행되는 것을 하나의 하위 작업 완료로 생각하고 자율 보행의 경우에는 목적지에 도착하는 것을 상위 작업

완료로 간주한다. 따라서 상태 전환이 이루어지지 않을 경우 로봇은 목적지에 도착할 때까지 계속해서 경로를 탐색하여 최적의 경로를 찾고 그에 따라 보행 계획을 세워 행동 프리미티브를 수행한다.

본 연구에서 개발된 휴머노이드 로봇에는 PSD 센서, IR 센서, 가속도 센서, 기울기 센서, 스테레오 마이크, 카메라 등 6종류의 센서를 장착하여 외부 환경 변화 및 로봇 내부 변화를 감지하도록 하였다. 상태 2에서는 카메라를 제외한 5종류의 센서 입력값에 따라 행동 프리미티브를 실행하게 된다. 그림 9는 상태 2에서의 행동 선택을 나타낸다.

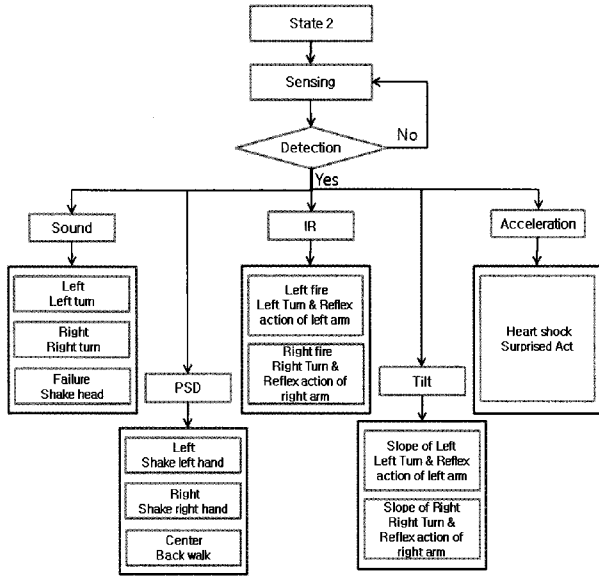


그림 9. 센서 입력에 따른 행동 선택
Fig. 9. Behavior Selection based on sensor input

스테레오 마이크는 박수 횟수에 따라 상태 선택 및 상태 전환, 소리가 나는 방향에 따라 행동 프리미티브 수행을 위해 사용된다. 소리를 이용한 상황 판단은 단순할 뿐만 아니라 소리의 횟수, 방향, 길이 등에 따라 더욱더 다양한 행동 구현이 가능하다. PSD 센서는 물체까지 거리를 측정하는데 사용되며, 장애물 회피 작업을 위해 이용되었다. 측정된 센서값을 통해 장애물의 유무와 장애물이 있는 경우 거리에 따라 보다 효과적으로 회피할 수 있다. 휴머노이드 로봇이 복잡한 장애물을 갖는 3차원 작업공간에서 작업을 수행하기 위해서는 필수적인 기능이다.

IR 센서는 화기를 감지하여 그 결과값에 따라 행동 프리미티브를 실행한다. IR 센서의 이용은 로봇이 화재를 예방하거나 화재시 이를 극복하기 위한 행동으로 확대가 가능할 것이다. 센서를 통해 주변 환경 정보를 얻는 것 외에도 기울기 센서를 이용하여 로봇 자체의 기울어짐 또는 기울어진 정도를 알 수 있다. 로봇 내부 정보를 얻을 수 있기 때문에 로봇 자체 상태를 파악할 수 있다. 작업 구성 공간을 만족하여도 로봇 자체 상태가 작업을 수행할 수 없으면 작업이 불가능하기 때문에 로봇 내부 변화를 아는 것도 중요하다.

그림 10은 휴머노이드 로봇의 상태 3에서 영상 인식 결과에 따른 행동 선택을 나타낸다. 로봇 머리에 장착된 카메라로 영상을 입력받으면 RGB 컬러를 HSI 컬러로 변환시킨 후 특징 추출 및 노이즈를 제거하는 과정을 통해 마커 인식을 높였다. 휴머노이드 로봇이 인식할 마커는 숫자, 문자,

도형 세 가지로 구분하였고 각각의 마커 인식 결과에 따라 선택된 행동 프리미티브를 실행한다. 로봇이 마커 인식이 실패할 경우에는 계속하여 마커 인식을 시도한다.

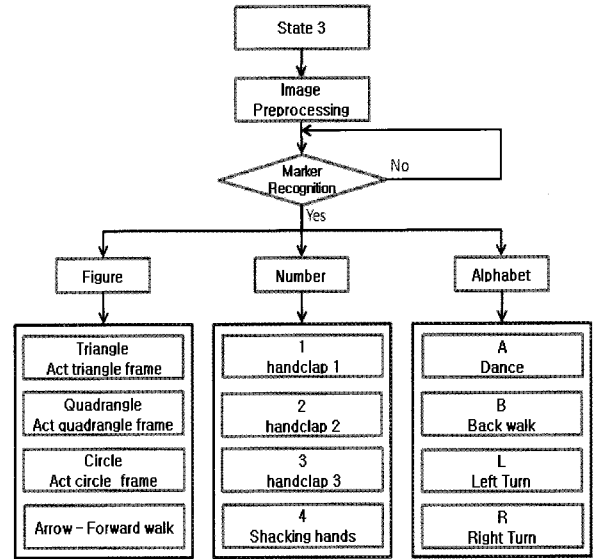


그림 10. 영상 인식 결과에 따른 행동 선택
Fig. 10. Behavior Selection based on image recognition results

4. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안된 행동 계획 방법의 실제 환경에서의 적용 가능성을 검증하기 위하여 소형 휴머노이드 로봇을 사용하여 실험을 수행하였다. 그림 11은 상태 1에서 휴머노이드 로봇의 자율 보행 실험 결과를 보여준다. 로봇은 목적지까지 도착하기 위해서 경로 및 보행계획을 수행하여 행동 프리미티브들을 선택하여 이동하게 된다. 로봇이 다양한 색과 모양의 장애물을 인식하고 이를 회피하면서 빠르고 안정하게 목적지에 도착하는 것을 실험에서 확인하였다. 그러나 휴머노이드 로봇에 구현된 행동 프리미티브들의 실제 실험 값들은 현재 로봇의 구성 상태, 바닥면 상태와 보행 프리미티브 수행시 각 관절들의 외란에 의해 초기 측정된 프리미티브 계수 값들과의 오차가 존재하였다. 목표점이 멀리 있는 경우와 방향 회전이 많은 경우에는 오차 값들의 누적에 의해 목표점 도달 성공률이 낮아지는 결과를 보였다.

그림 12는 센서를 통해 주변 환경 정보를 얻고 그에 따른 행동을 수행하는 상태 2에 대한 실험 결과를 보여 준다. 실험에서 각각의 센서 용도에 따라 다양한 행동을 구현하였다. 스테레오 마이크는 박수 횟수와 방향을 감지하여 로봇의 상태를 선택하거나 소리가 나는 방향으로 행동을 함으로써 하위 작업을 성공적으로 완료하였다. 그러나 스테레오 마이크 센서의 민감도가 높기 때문에 필터 설계를 통해 보정이 필요하다. PSD 센서로는 장애물을 감지하여 뒤걸음을 수행하거나 손을 내밀었을 때 악수를 하는 행동을 구현하였다. 또한 기울기 센서를 이용하여 로봇 자체의 기울어짐을 감지하여 다시 균형을 이루도록 하였고, IR 센서로는 화기를 감지하여 화재를 알리는 행동을 수행하도록 구현하였다. 이는 향후 화재 예방 및 대처 작업에 적용될 수 있을 것이

다. 가속도 센서를 사용하여 순간적인 외부 충격을 감지하여 놀라는 행동을 실험하였고, 이런 행동을 통한 로봇의 감정 표현이 가능함을 보였다.

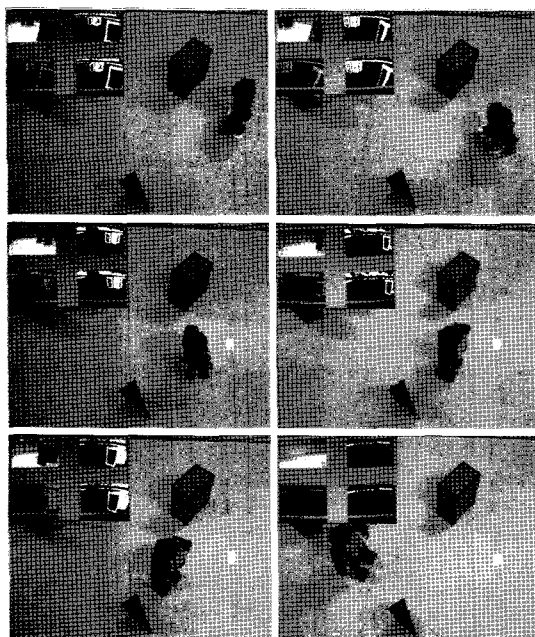


그림 11. 자율 보행 계획 실험
Fig. 11. Autonomous walking planning experiment

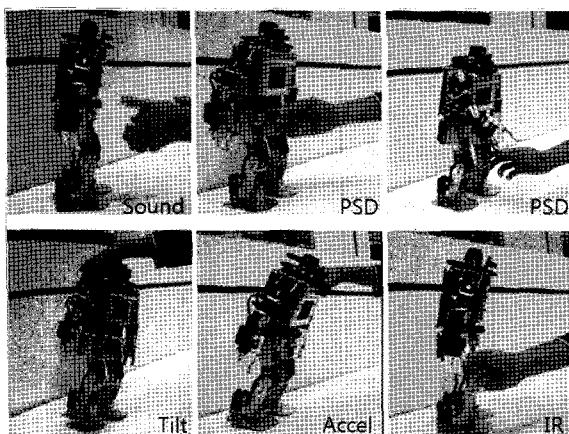


그림 12. 센서기반 행동 계획 실험
Fig. 12. Sensor-based behavior planning experiment

로봇이 성공적으로 표식을 인식하기 위해서 색변환, 윤곽선 추출, 노이즈 제거 등의 영상 전처리 과정을 통해 표식 인식률을 높이도록 하였다. 로봇이 숫자, 문자, 도형 표식을 인식하도록 구현하였으며, 인식 결과에 따른 행동 계획 실험 결과는 그림 13과 같다. 로봇이 삼각형을 인식할 경우에는 팔로 삼각형을 만드는 행동을 하고, 사각형을 인식할 경우 양팔로 사각형 형태를 만드는 행동을 구현하였다. 앞으로 얼굴이나 지문 등 더욱더 다양한 패턴 또는 표식 인식을 통해 로봇의 다양한 행동을 수행하도록 구현할 수 있을 것으로 예상된다.

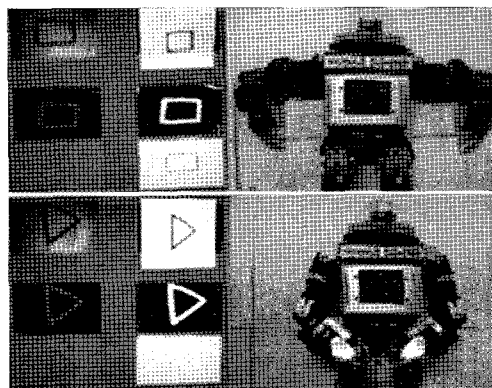


그림 13. 영상 인식기반 행동 계획 실험
Fig. 13. Behavior planning experiment using image recognition

5. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 휴머노이드 로봇이 작업 환경과 사용자 상호 작용하며 작업을 수행하기 위한 행동 프리미티브 기반의 행동 계획 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 통해 휴머노이드 로봇이 갖는 고차원의 자유도와 구성공간의 복잡성 및 안정성 필요조건을 해결하고, 다양한 센서 기반의 실시간 행동 계획을 구현할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 행동 계획은 상태에 따른 작업을 바탕으로 이루어지고 작업 수행 완료를 우선으로 하기 때문에 작업 수행중일 때 발생하는 외부 환경 변화를 고려하지 않고 있다. 앞으로 이를 보완해줄 추가적인 행동 계획 방법을 연구할 예정이다. 또한 행동 프리미티브의 수가 적어 실행 가능한 작업에 제한이 있기 때문에 앞으로 이를 보완하여 보다 다양한 환경에서 강인한 행동 계획 방법과 행동 학습 방법을 연구할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김용휘, 이형욱, 김현희, 박광현, 변증남, "상태 분할 기법을 이용한 집사 로봇의 작업 계획 시스템", *로봇공학회 논문지*, 제 3권 1호, pp 23-32, 2008.
- [2] 이상형, 이상훈, 서일홍, "이동 로봇의 강인 행동 계획 방법", *로봇 공학회 논문지*, 제 2권 3호, pp107~115, 2007.
- [3] 박영빈, 서일홍, 최병욱, "월드 엘리먼트와 오퍼레이터의 추상화에 기반한 효율적인 계층적 작업계획", *로봇 공학회 논문지*, 제2권 3호, pp262-269, 2007.
- [4] J. Kuffner, K. Nishiwaki, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue, "Motion planning for humanoid robots", *International Symposium on Robotic Research*, pp. 1-9, Siena, Italy, 2003.
- [5] 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", *International Conference on Robotics*

- and Automation*, pp. 1072-1078 Spain, 2005.
- [6] K. Hauser, T. Bretl, J.-C. Latombe, "Using Motion Primitives in Probabilistic Sample-Based Planning for Humanoid Robots", *Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR)*, pp. 1-16, 2006.
- [7] 김용태, 노수희, 이희진, "이족보행로봇의 비평탄지형 보행 및 자세 안정화 알고리즘," *퍼지 및 지능시스템학회 논문지*, 제15권 1호, pp. 907-913, 2005.
- [8] 김용태, 김한정, "3차원 작업공간에서 보행 프리미티브를 이용한 다리형 로봇의 운동 계획", *로봇공학회논문지*, 제2권 3호, pp. 275-281, 2007.
- [9] Manfred Lau, James J. Kuffner, "Behavior Planning for Character Animation" *Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on computer Animation*, pp. 271-280, 2005.
-

저 자 소 개



노수희(Su-Hee Noh)
2004년: 한경대학교 정보제어공학과 졸업 (학사)
2006년: 한경대학교 대학원 졸업(석사)
2006년~현재: 동 대학원 박사과정

관심분야 : 지능로봇, 지능시스템
E-mail : neety@hanmail.net



김용태(Yong-Tae Kim)
1991년: 연세대학교 전자공학과(학사)
1993년: KAIST 전기및전자공학과 졸업 (공학석사)
1998년: KAIST 전기및전자공학과 졸업 (공학박사)
1998년~2000년: (주)삼성전자
2006년: Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문연구

2002년~현재: 국립 한경대학교 정보제어공학과 부교수

관심분야 : 지능로봇, 지능시스템, 지능제어, 기계학습
E-mail : ytkim@hknu.ac.kr