

복합 바퀴-다리 이동형 로봇의 저전력 보행 기반 장애물 회피 알고리즘

Obstacle Avoidance Algorithm of Hybrid Wheeled and Legged Mobile Robot Based on Low-Power Walking

정동혁* · 이보훈** · 김용태**

Dong-Hyuk Jeong, Bo-Hoon Lee, and Yong-Tae Kim[†]

*한경대학교 전기전자제어전공학과

**한경대학교 바이오·정보기술대학원

요 약

최근 다양한 환경에서 지능형 로봇의 안정된 이동방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 복합 바퀴-다리형 이동 로봇의 설계 방법을 제안하고, LRF(Laser Range Finder)센서를 이용한 복합 이동형 로봇의 저전력 보행 기반 장애물 회피 알고리즘을 제안하였다. 로봇의 자세 안정화와 소비에너지를 줄이기 위해 모터 전류값을 바탕으로 자세를 보정하여 저전력 보행 알고리즘을 구현하였고, 이를 기반으로 LRF센서를 이용한 장애물 회피 알고리즘을 제안하였다. 로봇의 각 다리에서 소비되는 전력을 고르게 분포시키게 자세를 보정하여 보행을 안정화시키고, 최단 경로로 장애물을 회피하여 이동함으로써 전체 소비 에너지를 감소시키며 보행 안정성을 향상하였다. 본 연구에서 제안한 방법들은 실제 복합 이동 로봇의 보행 및 장애물 회피 실험을 통해 성능을 검증하였다.

키워드 : 복합 이동형 로봇, 저전력 보행, 바퀴-다리 로봇, 장애물 회피

Abstract

There are many researches to develop robots that improve its mobility to adapt in various uneven environments. In the paper, a hybrid wheeled and legged mobile robot is designed and a obstacle avoidance algorithm is proposed based on low power walking using LRF(Laser Range Finder). In order to stabilize the robot's motion and reduce energy consumption, we implement a low-power walking algorithm through comparison of the current value of each motors and correction of posture balance. A low-power obstacle avoidance algorithm is proposed by using LRF sensor. We improve walking stability by distributing power consumption and reduce energy consumption by selecting a shortest navigation path of the robot. The proposed methods are verified through walking and navigation experiments with the developed hybrid robot.

Key words : Hybrid Mobile Robot, Low-Power Walking, Wheeled and Legged Robot, Obstacle Avoidance

1. 서 론

IT기술의 발달과 함께 지능로봇의 연구가 점차 증가하고 있다. 또한 응용 분야가 다양해져 서비스, 엔터테인먼트, 공장자동화, 의료, 교육, 군사 등의 분야로 확대

되고 있다. 다양한 분야 중에서도 특히 이동 로봇의 응용 연구가 많이 진행되고 있으며, 단순한 평지 이동에서 벗어나 계단 등의 비평탄 지형과 장애물 회피, 다양한 작업 수행을 위한 기능이 추가되어 이동성 향상을 위한 메커니즘과 효율을 높이는 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 이동성 향상 연구는 보행의 안정화 및 걸음새 방법에 대한 연구 [1-5], 다양한 장애물 극복에 대한 방법 [5-6], 경로 생성 및 결합 제어 [7-8], 에너지 효율성[9] 등의 연구가 중심적으로 수행되고 있다. 그 중에서도 미국의 국방용으로 개발되어 잘 알려진 4족 보행 로봇 빅독은 다양한 환경에서의 안정된 보행 능력과 탁월한 환경 적응 능력을 보여주고 있다. 하지만 많은 관심 속에서도 소비에너지 관리에 관한 측면이 다른 요소들에 비해 상대적으로 고려되지 않고 제한적인 부분에서만 연구되는 경우가 대부분이다.

복합 다리-바퀴 이동 로봇은 바퀴이동에서의 장점을

접수일자: 2012년 4월 20일

심사(수정)일자: 2012년 4월 20일

게재확정일자: 2012년 8월 8일

† 교신저자

본 논문은 2012년 한국지능시스템학회 춘계학술대회에서 우수 논문으로 선정된 논문입니다.

본 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 연구재단의 지원을 받아 수행된 일반 연구자 지원사업 결과임.(No. 2010-0023291)

가지지만, 복합 이동형 로봇은 고차원 자유도를 가지므로 다른 이동형 로봇 보다 보행시 많은 에너지를 사용한다. 따라서 복합 이동형 로봇이 장기간 다양한 환경에서 작업을 수행하기 위해서는 소비 에너지 감소 기술과 에너지를 감소하는 장애물 극복 기술들의 연구가 요구되고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 복합 바퀴-다리 이동로봇을 위한 저전력 보행 기반 장애물 회피 알고리즘을 제안하였다. 로봇이 보행시 에너지 감소를 위해 보행 초기 자세에서 각 다리 관절의 소비 에너지를 비교하여 자세를 보정하고, 보행시 실시간으로 소비 에너지를 균일화함으로써 최적화된 자세로 저전력 보행을 구현하였다. 또한 저전력 보행 알고리즘을 기반으로 LRF센서를 사용한 저전력 보행 기반 장애물 회피 알고리즘을 제안한다. 먼저 로봇의 기본자세를 먼저 보정한 후에 각 다리의 전류값을 측정하여 자세 균형을 이루며, 제안한 알고리즘을 실제 이동형 로봇에 적용하여 보행 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 복합 이동형 로봇 시스템 구성과 로봇의 기구학 모델을 설명하고, 3장에서는 저전력 보행을 위한 보행 및 자세 보정 기법과 장애물을 회피 할 수 있는 주행 알고리즘을 제안하였다. 4장에서는 제안한 알고리즘의 성능을 실험을 통하여 검증하고, 5장에서는 결론을 맺었다.

2. 복합 바퀴-다리 이동형 로봇

2.1 복합 이동형 로봇시스템의 구성

복합 이동형 로봇의 전체 시스템 구성은 그림 1과 같이 주제어부, 모션제어부로 구성된다. 주제어부는 리눅스 기반 임베디드 보드를 사용하며, 복합 이동형 로봇의 보행을 위한 운동 계획, 영상 처리, LRF센서의 데이터 처리를 수행한다. 모션제어부는 ATmega2561 보드를 사용하며, 20개의 DC모터를 실시간으로 제어한다. 다리관절에 사용되는 모터는 전류센서가 자체 내장되어 있어 각 다리의 전류를 측정이 가능하다.

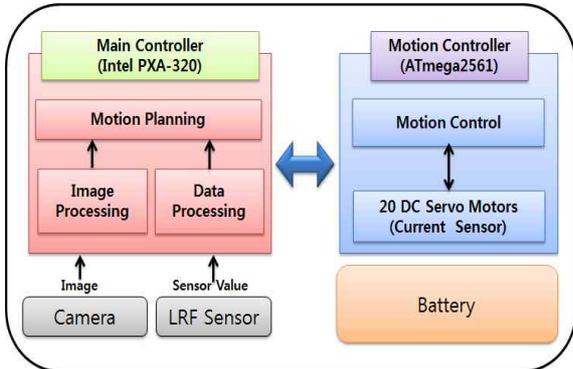


그림 1. 복합 이동형 로봇 시스템 구성
Fig. 1. Overall structure of a hybrid mobile robot

복합 이동형 로봇의 기구 구성은 그림 2와 같다. 전 방향 이동이 가능한 4개의 바퀴와 5자유도의 다리로 변환이 가능한 이동형 로봇을 설계하였다. 바퀴 및 다리

의 구동을 위하여 각각의 다리에 5개의 DC모터를 사용하고, 변화하는 주위환경을 실시간으로 인식하기 위하여 로봇의 전면에 LRF센서, PSD센서, CCD 카메라를 장착하였다. 전원 장치는 모터가 최대 토크를 낼 수 있도록 18.5V, 3,200mA의 리튬 폴리머 배터리를 사용하였다. 또한 각 다리의 관절모터는 M_{ij} 로 표현한다. i 는 다리의 번호, j 는 관절별 번호이다. 배터리를 포함한 로봇 본체의 무게는 6.8Kg이며, 로봇이 일어섰을 때의 높이 320mm, 폭은 60mm 로 설계하였다.

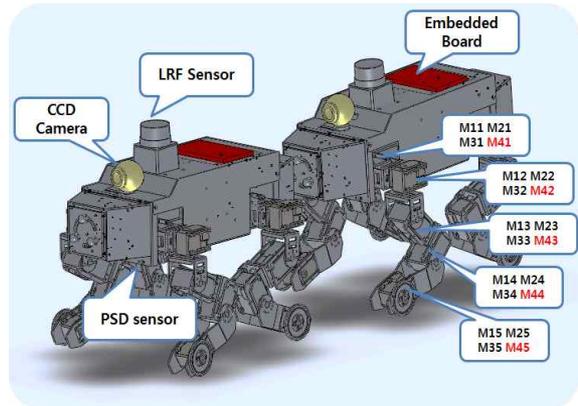


그림 2. 복합 이동형 로봇의 기구 설계
Fig. 2. Mechanical design of hybrid mobile robot

2.2 로봇 주행 기구학과 보행 패턴

로봇의 이동속도 향상을 위해 바퀴를 사용한 주행이 필요하다. 복합 이동형 로봇의 주행 제어를 위한 기구학 모델은 그림 3과 같다[6]. 로봇의 중심점 좌표는 (x_c, y_c) 이고, v 는 로봇 중심의 이동 속도이다. 로봇 양 바퀴의 선속도는 V_l 와 V_r 이고, 로봇의 방향각은 θ 이다. 주행 기구학 모델을 얻기 위하여 이동형 로봇의 바퀴가 미끄러지지 않는다는 조건을 만족한다고 가정하면, 다음의 식 (1)과 식 (2)와 같은 속도 방정식을 얻을 수 있다. 여기서 w 는 반시계 방향으로서 로봇의 각속도를 나타내며, w_r 과 w_l 은 로봇의 오른쪽과 왼쪽바퀴의 각속도를 나타낸다. l_1 은 로봇 양쪽 바퀴의 사이의 길이를 나타내며, r 은 로봇의 바퀴 반지름을 나타낸다.

$$w = \frac{V_r - V_l}{l_1} = r \frac{w_r - w_l}{l_1} \tag{1}$$

$$v = \frac{V_r + V_l}{2} = r \frac{w_r + w_l}{2} \tag{2}$$

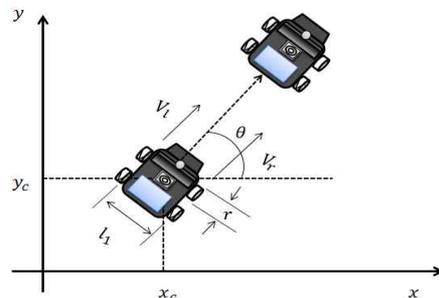


그림 3. 바퀴 이동형 로봇의 기구학 모델
Fig. 3. Kinematic model of wheeled mobile robot

4족 보행 로봇은 비평탄지형과 계단 같은 다양한 종류의 지면에서 뛰어난 적응력과 다족 로봇과 2족 로봇 보다는 균형 유지와 보행이 효율적이다. 본 논문에서는 그림 4와 같은 4족 로봇의 기구학적 모델을 사용해 보행 로봇의 다리를 해석하였다 [4].

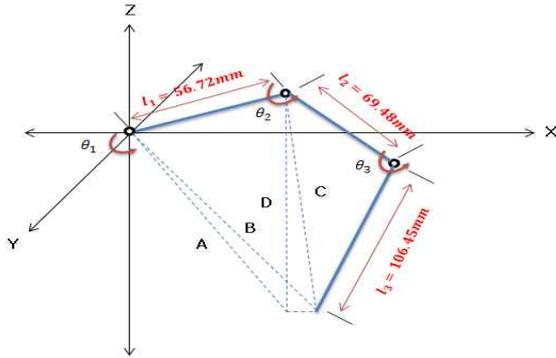


그림 4. 다리 이동형 로봇의 기구학 모델
Fig. 4. Kinematic model of legged mobile robot

4족 로봇의 기구학적 모델은 로봇 다리의 관절에 따라 링크에 맞는 회전행렬을 곱하게 된다. 4족 보행 로봇은 다리의 자유도가 y-x-x축에 대한 회전에 구성되고, 다음과 같이 발목좌표 값이 표현된다.

$$x = l_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_1 (l_3 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + l_3 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + l_2 \sin \theta_2) \quad (3)$$

$$y = l_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2 - l_3 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \quad (4)$$

$$z = l_3 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + l_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \quad (5)$$

또한 다음과 같이 역기구학을 통해 관절각을 계산하여 4족 로봇에 적용하였다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{z}{x} - \cos^{-1} \frac{l_1^2 + A^2 - D^2}{2l_1 A} \quad (6)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{l_2^2 + C^2 - l_3^2}{2l_2 C} + \tan^{-1} \frac{y}{D} \quad (7)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \frac{l_2^2 + l_3^2 - C^2}{2l_2 l_3} \quad (8)$$

로봇이 보행을 하기 위해서는 보행 패턴을 생성해야 한다. 본 논문에서는 그림 5와 같이 3개의 다리가 땅에 접촉하도록 하여 RR(후방 우측), FR(전방 우측), RL(후방 좌측), FL(전방 좌측) 순서대로 발을 이동하면서 안정적인 기본 걸음새를 수행하도록 보행 패턴을 구현하였다.

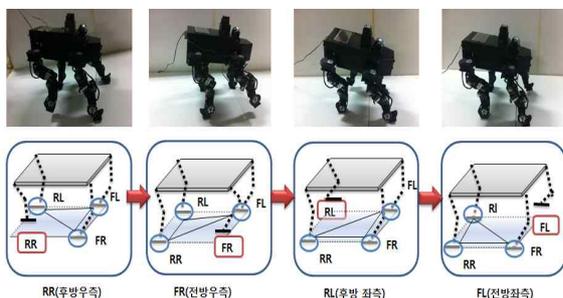


그림 5. 복합 이동형 로봇의 보행 패턴
Fig. 5. Walking pattern of hybrid mobile robot

3. 저전력 보행 및 장애물 회피

3.1 복합형 이동로봇의 저전력 보행

최근 이동형 로봇의 장애물 회피에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 하지만 에너지의 효율성에 관한 연구는 많이 진행되고 있지 않다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 저전력 보행 기반 장애물 회피 알고리즘을 구현하였다.

저전력 보행 구현 절차는 다음의 그림 6과 같다. 로봇이 보행하기 위해서는 먼저 초기의 보행 준비 자세를 취하게 된다. 보행 초기 자세는 각 모터관절의 각도를 순기구학과 역기구학을 통해 계산하여 구현되어 이상적으로는 대칭적인 자세이지만, 실제 로봇의 본체 무게는 비대칭적으로 분포되어 있다. 로봇 각 다리에 걸리는 무게가 비대칭적인 상태로 보행하게 되면, 단순 바퀴주행을 하는 경우에 비해 상대적으로 에너지의 사용이 많아지며, 불균형으로 인해 일부 모터에 토크가 많이 필요하다. 따라서 보행 준비 자세에서 모터의 전류 값을 측정하여 각 다리의 전류 값이 균일하도록 자세를 보정하였다. 각 다리의 전류 값이 균일화 되면 무게중심이 로봇의 중심으로 평형상태가 되고, 자세가 안정한 상태가 된다. 초기 보행 자세가 확보가 되면 선택된 경로에 맞게 무게 중심을 이동하며 로봇이 앞으로 이동하는 자세를 구현하였다. 또한 보행 중에도 지속적으로 안정성을 유지하기 위해서는 ZMP(Zero Moment Point)를 지지 다각형 내부로 가도록 보행 패턴을 생성해야 한다.

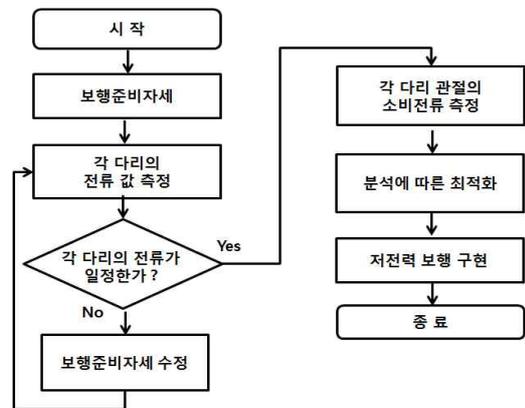


그림 6. 저전력 보행 알고리즘
Fig. 6. Low-power walking algorithm

3.2 저전력 보행기반 장애물 회피 알고리즘

복합 바퀴-다리 로봇은 주변 환경에 따라 몸체를 변형하여 장애물을 피해 이동하는 메커니즘으로 구성되어 있다. 저전력 보행 절차를 적용한 장애물 회피 알고리즘은 다음 그림 7과 같다. 로봇이 저전력으로 자율 이동을 하기 위해서는 최적 경로를 생성하여야 한다. LRF 센서로부터 주변 환경을 스캔하여 최단의 경로를 계산하고, 제안한 저전력 보행 절차를 수행한다. 또한 최단 경로를 선택함으로써 로봇의 이동거리가 줄어들기 때문에 배터리의 사용 시간을 최대화 하였다.

4. 실험 및 고찰

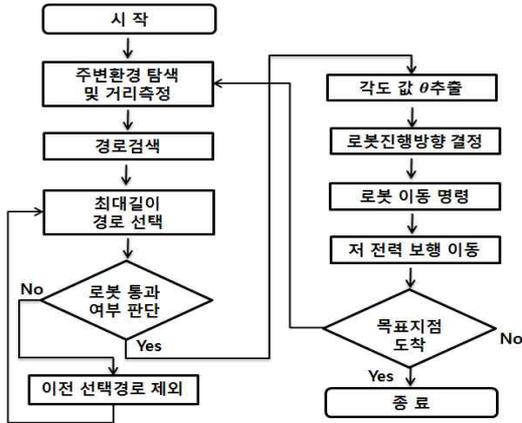


그림 7. 저전력 장애물 회피 알고리즘
Fig 7. Low-power obstacle avoidance algorithm

로봇이 선택한 경로를 통과 할 수 있는지 판단하는 방법은 다음의 그림 8과 같다. 본 연구에서는 로봇이 지나갈 수 있는 경로가 적어도 1개는 존재한다고 가정하였다. 로봇의 통과 경로를 찾기 위해 먼저 측정된 최대 길이 l_{maxi} 값을 사용하여 좌우로 주변을 검사하여 LRF 센서의 오차 범위가 벗어나기 전까지의 길이들만을 모아 호를 만든다. 여기서 i 는 스캔방향으로부터 순차적으로 선택된 최대의 경로의 순서이다. 이때 만들어진 호의 현 길이인 W_a 가 로봇이 통과가 가능 할 정도로 충분한지를 조사한다. 통과가 가능하다고 판단되면, 선택한 경로 l_{maxi} 의 위치에 따른 방향을 결정하고, 저전력 보행 구현 절차에 따라 자율 보행을 한다. 만약 W_a 의 길이가 만족하는 방향이 여러 지점이 생긴다면, 로봇의 현재 진행 방향과 가장 차이가 적은 방향을 선택한다. l_{max1} 과 l_{max2} 는 통과할 수 있는 경로이지만 상대적으로 이동방향을 조금만 바꾸어도 되는 l_{max2} 를 선택한다. 제안한 알고리즘에 의해 이동 경로가 선택되면 로봇은 경로를 따라서 보행하게 되며, 목표지점에 도착할 때까지 이와 같은 과정을 반복하게 된다.

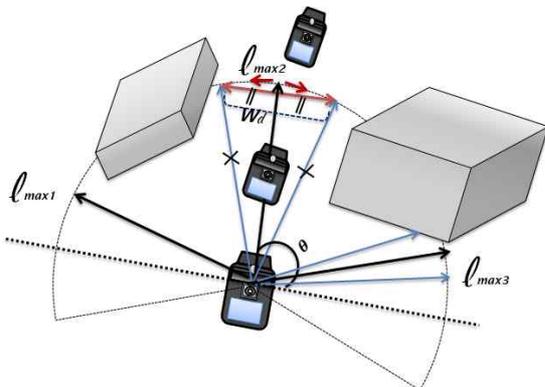


그림 8. 로봇의 통과 여부 판단
Fig. 8. Decision on passing possibility of robot

본 논문에서 제안한 저전력 보행 방법의 성능을 확인하기 위해 실제 환경에서의 자율주행이 가능한 복합 이동형 로봇을 제작하여, 다양한 환경에서 실험을 통해 성능을 검증하였다. 그림 9는 복합 이동형 로봇이 바퀴 주행 자세에서 보행 준비 자세를 취하는 과정을 보여준다.

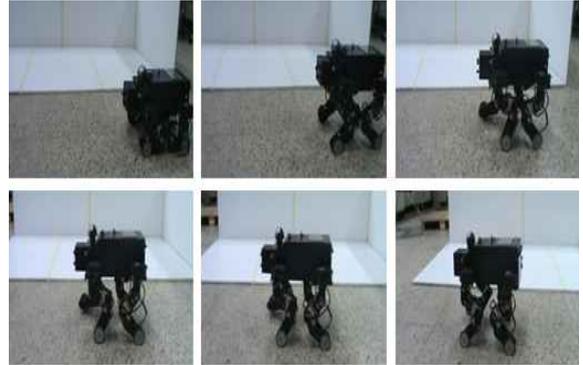


그림 9. 보행 자세로 변환
Fig. 9. Transformation to walking posture

다음의 그림 10은 저전력 기반 장애물 회피 알고리즘을 사용해 로봇 주변의 임의의 장애물들을 회피하는 실험 장면을 보여준다. 여러 회피경로 중 최단의 경로를 선택함으로써 이동 경로를 최소화 하는 것을 확인하였다.

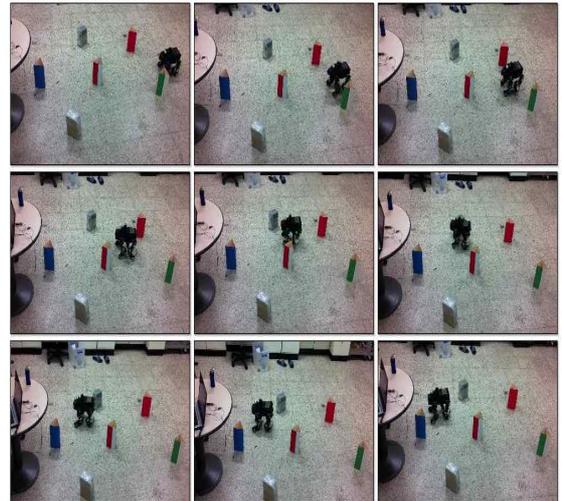


그림 10. 저전력 장애물 회피 장면
Fig. 10. Snapshots of experiment for low-power obstacle avoidance

본 논문에서 제안한 최단 경로수립 알고리즘을 실제 실험으로 성능을 검증하였다. 그림 11은 바퀴 주행시와 4족 보행시 LRF 센서 값을 사용해 주변 환경을 탐색하고, 지형에 따라 이동 가능한 로봇으로 형태를 변환하여 해당 지형을 극복하는 것을 보여준다. 다양한 환경에서 이동성 향상과 소비 에너지의 최소화 실험을 통해 성능을 확인하였다.



(a) 바퀴 주행 모드

(a) Wheeled navigation mode



(b) 4족 보행 모드

(b) Quadruped walking mode

그림 11 복합 주행로봇의 주행 실험 장면

Fig. 11. Snapshots of navigation experiments of the hybrid mobile robot

복합 다리-바퀴 이동형 로봇에 사용한 다리 관절모터는 18.5V 전압에서 106kgf·cm의 토크를 낼 수 있는 DC 서보모터로 내장되어 있는 전류센서로 전류 측정이 가능하다. 제안된 알고리즘을 적용한 저전력 자세 보정 및 주행 실험의 결과는 다음의 그림 12와 그림 13과 같다. 소비 전력 측정 방법은 모터 전류센서를 이용하여 5.11A까지 측정이 가능하도록 구성하였다. 전류 센서의 측정값은 10비트 A/D변환되어 얻어지며, 이 값을 다시 전류 값으로 변환하여 사용하였다. 전류 변환은 다음의 식 (9)와 같다.

$$|\alpha - 512 \times 10| = \beta \quad (9)$$

여기에서 α 는 측정 데이터 값을 나타내며, β 는 계산된 전류 값을 나타내며 단위는 mA이다. 그림 12는 로봇 각축의 주요 모터의 소비 에너지를 보정전과 보정후의 전류 값을 보여주며, 그림 13(a)와 그림 13(b)는 실제 실험 환경에서 바퀴주행과 보행시 소비 에너지 비교 결과이다. 자세 보정을 통해 전체 전력이 바퀴주행에서는 3.05W, 보행에서는 8.694W 감소하였다. 또한, 배터리의 사용시간이 증가함을 실험을 통하여 확인하였다.

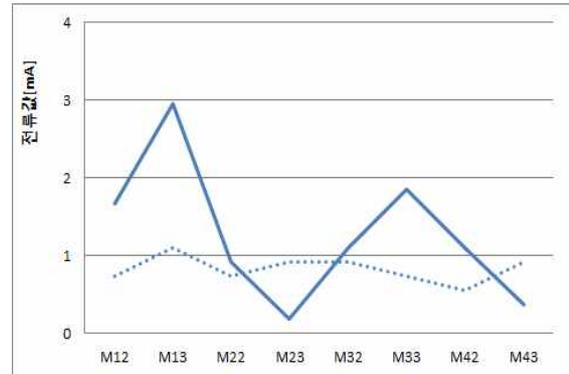
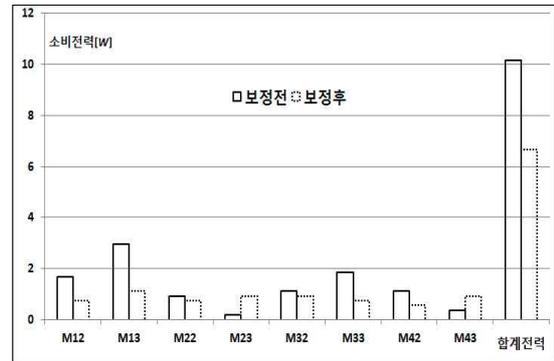


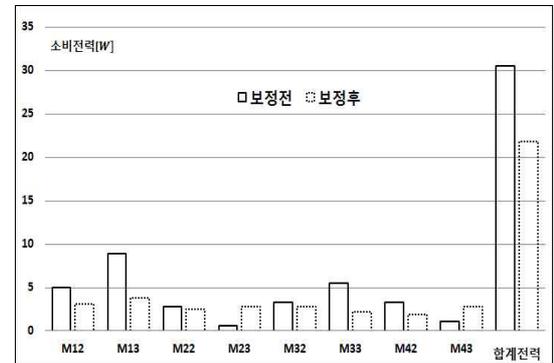
그림 12. 보행 준비 자세 보정

Fig. 12. Correction of ready posture for walking



(a) 바퀴 주행 모드

(a) Wheeled navigation mode



(b) 4족 보행 모드

(b) Quadruped walking mode

그림 13. 저전력 주행 실험 결과

Fig. 13. Experimental results of low-power navigation

5. 결론 및 추후 과제

본 논문에서는 다양한 지형에서 이동가능한 복합 바퀴-다리 이동형 로봇을 설계하고, 저전력 보행 알고리즘을 제안하고 적용하여 실제 소비에너지가 감소하는 것을 실험을 통하여 검증하였다. 또한 장애물 회피 경로의 거리를 단축시키는 방법을 제안하여 전체적으로 소비되는 에너지가 감소되는 것을 보여 주었다. 본 논문에서 제안한 방법은 고정되고 정적인 환경에서의 소비 에너지를 감소하는 기법이므로, 앞으로 다양한 지형의 환경에서 지형 인식을 통한 소비에너지를 감소하는 보행 생성 방법 및 지형 극복 방법을 연구할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] H. Igarashi, T. Machida, F. Harashima and M. Kakikura, "Free Gait for Quadruped Robot with Posture Control," *2006 9th IEEE International Workshop Advanced Motion Control*, pp. 433-438, 2006.
- [2] 정학상, 박상수, 최윤희, 박진배, "4족 보행 로봇의 모델링 및 시뮬레이션," *2009 대한전기학회 하계 학술대회*, pp. 1839-1840, 2009.
- [3] 이수영, 홍예선, "4족 보행 로봇의 걸음새 안정화를 위한 몸체 임피던스 제어," *대한전기학회 논문지*, 제49권, 5호, pp. 257-263, 2000.
- [4] 김병호, "다족 로봇을 위한 효과적인 보행 패턴 분석," *한국지능시스템학회 논문지*, 제19권, 5호, pp. 622-628, 2009.
- [5] 이보훈, 박종한, 이창석, 김용태, "결합 가능한 복합 바퀴-다리 이동형 로봇에 관한 연구," *한국지능시스템학회 논문지*, 제21권, 6호, pp. 692-697, 2012.
- [6] 나두영, 노수희, 문형필, 정진우, 김용태, "모듈형 로봇의 자가 결합을 위한 퍼지 주행 제어 및 장애물 회피 제어," *한국지능시스템학회 논문지*, 제19권, 4호, pp. 470-477, 2009.
- [7] L. Parker, "ALLIANCE: An architecture for fault tolerant multi-robot cooperation," *IEEE transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, pp. 220-240, 1988.
- [8] A. Deshpande and J. Luntz, "Behaviors for physical cooperation between robots for mobility improvement," *Autonomous Robots*, vol. 23, pp. 259-274, 2007.
- [9] 이창석, 나두영, 김용태, "소비 에너지 분석을 통한 이족로봇의 저전력 보행 보정 기법," *한국지능시스템학회 논문지*, 제20권, 6호, pp. 793-798, 2010.

저 자 소 개



정동혁(Dong-Hyuk Jeong)

2012년 : 한경대학교 정보제어공학과
졸업(학사)

2012년 : 한경대학교 대학원 석사과정

관심분야 : 지능로봇, 지능시스템

E-mail : dong_hyuk87@hanmail.net



이보훈(Bo-Hoon Lee)

2011년 : 한경대학교 정보제어공학과
졸업(학사)

2012년 : 한경대학교 대학원 석사과정

관심분야 : 지능로봇, 지능시스템

E-mail : h0812s@hanmail.net



김용태(Yong-Tae Kim)

1991년 : 연세대학교 전자공학과 졸업
(공학사)

1993년 : KAIST 전기 및 전자공학과
졸업(공학석사)

1998년 : KAIST 전기 및 전자공학과
졸업(공학박사)

1998년~2000년 : (주)삼성전자

2006년 : Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문연구

2002년~현재 : 국립 한경대학교 전기전자제어공학과 교수

관심분야 : 지능로봇, 지능시스템, 지능제어, 물류 자동화

Phone : 031-670-5292

E-mail : ytkim@hknu.ac.kr