논문 2011-48SC-4-5

비평탄 지형에서 이족로봇의 강인한 보행 알고리즘

(Robust Walking Algorithm of Biped Robot on Uneven Terrain)

이 보 훈*, 박 종 한*, 이 창 석*, 김 용 태**

(Bo-Hoon Lee, Jong-Han Park, Chang-Seok Lee, and Yong-Tae Kim)

요 약

이족로봇은 높은 자유도로 인하여 기구적인 불안정성을 내포하고 있기 때문에 보행 시 자세 안정성의 확보가 중요하다. 일반적으로 평지에서는 안정적인 정적 보행이 가능하지만 평지가 아닌 비평탄 지형에서는 보행의 안정성이 현저하게 떨어진다. 본 논문에서는 비평탄 지형에서 이족로봇의 자세 안정화를 포함한 강인한 보행 방법을 제안하였다. 이족로봇의 중앙에 장착된 자이로 센서와 가속도 센서 값을 기반으로 보행 순간마다 센서 값을 감지하여 로봇 몸체의 기울어진 각도를 인식하여 보행 자세를 안정화하는 강인 보행 알고리즘을 설계하였다. 비평탄 지형 보행은 로봇의 기울어진 각도를 인식하여 그 상황에 맞게 관절 각도를 변화시켜 이족로봇 상체의 각도가 평지보행에서와 같도록 하체관절의 각도를 보정하여 보행에서의 안정성을 높였다. 제안된 보행알고리즘은 실제 제작된 이족로봇을 사용하여 비평탄 지형에서 실험하여 제안된 보행 알고리즘의 성능을 검증하였다.

Abstract

Biped robot with high DOF has instability in mechanism. Therefore, it is important to guarantee walking stability of biped robot. Biped robot can stably walk on the flat ground using static walking patterns. However, walking stability of robot becomes increasingly worse on the uneven terrain. In the paper, we propose a robust walking algorithm of biped robot with motion stabilization to solve the problem The proposed algorithm was designed to stabilize walking motions based on the inclination of robot body using a gyro sensor and a accelerometer equipped in the center of the upper body. If unstable motions are recognized, angles of each joints are modified to increase stability by using compensation of angles of lower legs. The experimental results show that biped robot performs stable walking on the uneven terrain.

Keywords : Robust biped walking, biped robot, motion stabilization, uneven terrain, gyro, acceleration sensor

Ⅰ. 서 론

산업현장 뿐만 아니라 가정 및 노동, 서비스 등에서 환경에 제약이 없고 다양한 작업을 수행 할 수 있는 이동로봇에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그동안 주로 주행을 중심으로 연구가 이루어졌으나 일본의 선도적인 연구로 인간형 로봇분야 역시 많은 연구가 이루어지고 있다.[1~5]

이족로봇은 인간과 유사한 로봇으로, 친숙한 외모뿐만 아니라 실제 생활환경에 쉽게 적용이 가능하기 때문에 인간에 의해 이루어져 왔던 노동이나 서비스 등을 이족로봇이 대체 할 수 있다는 가능성을 지녔다. 현재 이족로봇의 연구는 주로 인간과 비슷한 기구학적 메커니즘을 바탕으로 보행 안정화와 다양한 센서를 사용한 인식 및 인지 기능 구현이 중점적으로 수행되고 있다. 안정된 보행을 바탕으로 장애물을 극복하는 이족로봇의 이동 방법,[6] 이족로봇의 빠른 보행을 위한 메커니즘을 설계하는 방법,[7] 에너지 절감을 위한 저전력

* 정회원, 한경대학교 바이오·정보기술대학원
(Graduate School of Bio and Information Tech, Hankyong National University)
** 정회원-교신저자, 한경대학교 정보제어공학과, IT융합 기술연구소
(Department of Information and Control Engineering Hankyong National University)
※ 이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 연구재단의 지원을 받아 수행된 일반연구자 지원사업 결과임. (No.2010-0023291)
접수일자: 2011년4월22일, 수정완료일: 2011년7월6일

보행 보정 기법[8] 등 이족로봇의 보행에 관한 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 이족로봇을 좀 더 다양한 상황에서 적용하기 위해서는 장애물, 계단, 비평탄면, 경사면에서의 보행 및 자세 안정화가 반드시 필요하다. 보행 및 자세 안정화는 이족로봇이 다양한 상황에서도 스스로 균형을 유지하면서 안정적으로 보행하도록 하는 것이다. 비평탄면에서 보행의 안정성 확보가 우선적으로 갖춰져야 하는 이유는 안정적인 자세 제어와 보행이 가능해야만 다른 서비스와 작업 등이 가능하기 때문이다.

본 논문에서는 이족로봇을 이용하여 비평탄면을 감지하여 강인한 보행을 할 수 있는 방법에 대하여 제안하였다. 보행 시 자세 안정화를 통한 평지 및 비평탄면 보행이 가능한 통합된 알고리즘으로 구현하였다. 구현된 알고리즘은 자이로센서와 가속도센서를 이용하여 자세 안정화와 비평탄 지형에서의 안정적인 보행을 실험을 통해 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 Ⅱ장에서 이족로봇의 시스템 구성과 비평탄면 보행 구현을 위한 보행 주기 및 패턴에 대하여 설명하고, Ⅲ장에서는 자이로센서와 가속도센서를 이용한 자세안정화 및 강인 보행 알고리즘을 제안하였다. Ⅳ장에서는 실제 이족로봇을 제작하여 실험을 통해 제안한 방법의 성능을 검증하고, Ⅴ장에서는 결론을 맺었다.

Ⅱ. 이족 로봇 구성 및 보행 패턴

1. 이족로봇의 시스템

이족로봇의 전체 구성은 그림 1과 같이 주제어부, 모션 제어부, 센서 제어부, 21개의 DC 모터, 배터리로 구성된다. 주제어부는 리눅스 기반의 임베디드 시스템으로 구성하였고, 로봇의 운동 계획과 영상처리를 수행한다. 모션 제어부는 마이크로 컨트롤러 보드를 사용하며, 21개 모터의 제어를 실시간으로 수행한다. 센서 제어부는 자이로 센서, 가속도 센서, PSD 등으로 구성하였다. 구성된 센서를 통해 장애물과 지형의 변화를 확인하고 장애물의 형태에 따라 장애물을 회피하거나, 비평탄면과 경사면을 인식하여 자율보행을 실행한다. 모터와 제어기에 전원을 공급하기 위해 14.8V 배터리를 사용하였다.

이족로봇의 기구부는 그림 2와 같이 기구학적으로 사람과 유사한 관절 구조로 설계하였다. 이족로봇의 관절에는 DC 서보모터를 사용하고, 로봇의 하체는 인간과 같은 자연스러운 보행을 위해 골반 3자유도, 무릎 1자유도, 발목 2자유도의 다리를 설계하여 총 12자유도이며, x축의 이동을 담당하는 관절을 M3, M4, M5, M13, M14, M15로 설정하고 y축의 이동을 담당하는 관절 모터를 M2, M6, M12, M16로 설정하였다. 또한 로봇의 자세 안정화 및 비평탄면 보행 방법을 구현하고자 몸체 기울기를 알 수 있도록 2축 자이로 센서, 3축 가속도 센서를 사용하였다. 센서는 몸체의 기울어진 각도를 측정 할 수 있는 로봇의 몸체 중앙에 배치하였다. 로봇의 전체 크기는 길이 60cm, 배터리를 포함한 전체의 무게는 6kg이다.

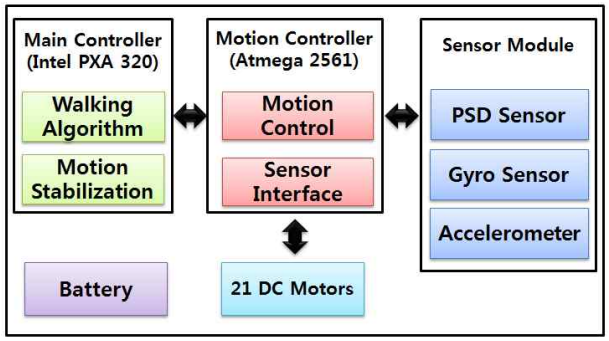


그림 1. 이족로봇 전체 시스템 구성
Fig. 1. Overall structure of Biped robot.

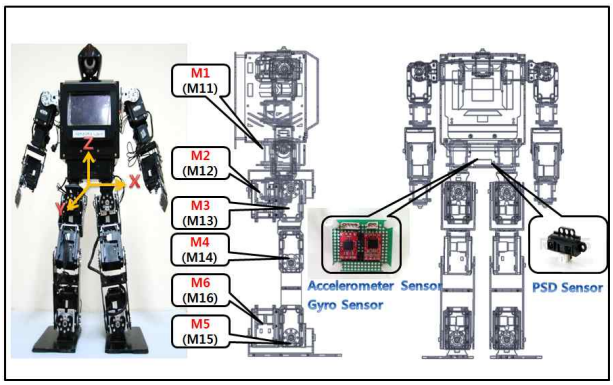


그림 2. 이족로봇 기구설계
Fig. 2. Mechanical design of biped robot.

2. 이족로봇의 역기구학

제작된 이족로봇은 각 관절의 각도를 계산하고 미리 입력된 보행 패턴에서 관절의 각도 값들을 변화 시켜 자세 안정화 및 경사면 보행이 가능하도록 설계하였다. 이족로봇이 보행하기 위한 기본 이동은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

실제로 제작된 이족로봇은 그림 3-(a)와 같이 하체

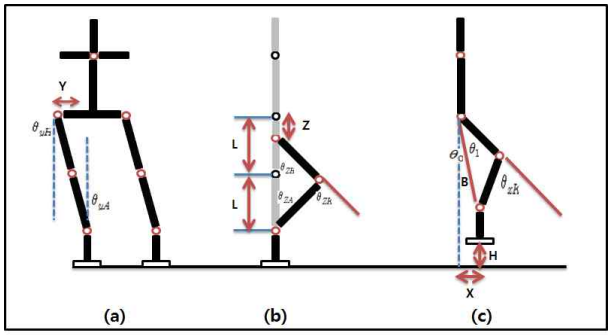


그림 3. 이족로봇 역기구학
Fig. 3. Inverse kinematics of biped robot

관절 M2, M6, M12, M16 모터 관절을 이용하여 Y값 크기만큼 중심이동을 하며, 이때 모터 회전 각도는 식 (1)과 같이 표현된다. 그림 3-(b)는 로봇의 기본자세로서 다리를 굽혀 자세를 낮추어 주면 보행 시 안정성을 높여준다. 이때 M3, M4. M5, M13, M14, M15 모터를 사용해 Z값만큼 몸을 낮추며, 모터 회전 각도는 식 (2)로 표현된다. 그림 3-(c)는 로봇의 보폭 X와 다리 높이 H에 따라 움직인 모션이며, 식 (3)으로 로봇의 모터 회전 각도들을 표현한다. B는 골반과 발목 사이의 길이로 식 (4)와 같이 표현하여 실제 로봇에 적용하였다.

$$\theta_Y = asin(Y/2L)$$

$$\theta_z = acos(2L - Z/2L)$$

$$\theta_0 = acos(B/2L), \theta_1 = asin(X/B)$$

$$B = \sqrt{X^2 + (2L - H)^2}$$

3. 이족로봇의 보행주기 및 패턴

이족로봇이 보행을 하기 위해서는 다리의 이동 궤적을 바탕으로 보행 패턴을 생성해야 한다. 그림 4는 보행 패턴 실행 시 이족 보행 로봇의 무게중심 이동을 나타낸다. 이족로봇의 보행은 주기적인 패턴으로 한 주기를 왼발과 오른발이 각각 한 번씩 내딛는 것으로, 즉 두 걸음으로 정의하고 총 4개의 보행 주기로 구성하였다. 이 과정은 각각의 발이 지면과 접촉하는 상태를 기준으로 유각기(swing phase)와 입각기(stance phase)로 나눌 수 있다. 유각기는 발이 지면에서 떨어져 공중에 있는 시기이고, 입각기는 발이 지면에 닿아 있는 시기를 말한다. 입각기는 다시 두발이 모두 지면에 있는 동시 입각기(DSP, double stance phase)와 한발만 닿아 있는 단독 입각기(SSP, single stance phase)로 나눌 수 있다.[9]

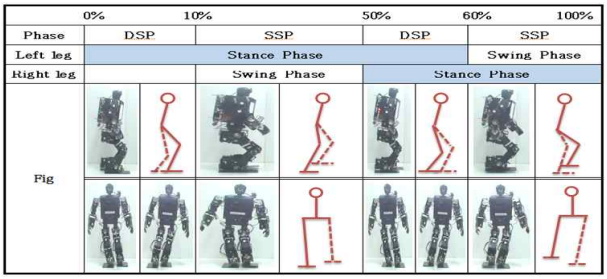


그림 4. 이족로봇의 보행 주기
Fig. 4. Walking cycle of biped robot.

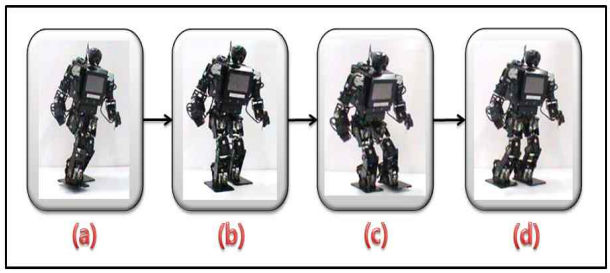


그림 5. 이족로봇 보행 패턴
Fig. 5. Walking patten of biped robot.

인간의 동적 보행에서 보행 한주기인 두 걸음을 걸을 때 동시 입각기의 비율이 20~25%이지만, 이족 보행 로봇의 일반적인 정적 보행에서는 동시 입각기의 비율이 60%이다.[9] 본 논문에서는 빠른 보행을 위해 동시 입각기와 단독 입각기 비율을 50:50으로 설정하여 구현하였다. 자세안정화를 위해 그림 5와 같은 보행 패턴을 구현하였다. 그림 5-(a)는 초기 위치에서 좌측 설정된 위치로 무게 중심 이동 및 오른쪽 다리를 들어 올리는 그림이며. 그림 5-(b)는 무게 중심이 좌측 설정 위치에 도달하고 오른쪽 다리를 내리는 모습이다. 그림 5-(c)는 우측 설정 위치로 무게 중심 이동 및 왼쪽 다리를 들어 올리는 모습이다. 그림 5-(d)는 무게 중심이 우측 설정 위치에 도달하고 왼쪽 다리를 내리는 그림이다.

Ⅲ. 센서를 이용한 비평탄 지형 강인보행 알고리즘

1. 이족로봇의 강인 보행 알고리즘

이족로봇이 인간을 대신하여 작업을 수행하려면 다양한 환경에서의 안정적인 보행은 필수적인 요구 조건이다. 이러한 조건을 만족시키기 위해 본 논문에서는 여러 환경에서의 안정적인 보행을 위해 비평탄면에서의 안정적인 강인 보행 방법을 제안하였다.

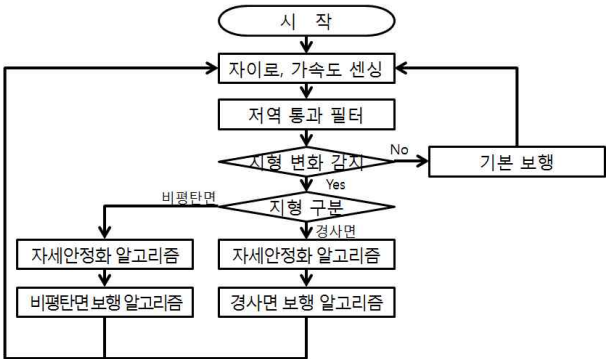


그림 6. 이족로봇 보행 알고리즘
Fig. 6. Walking algorithm of biped robot.

전체 보행 알고리즘은 다음 그림 6과 같다. 먼저 자이로 및 가속도 센서 값을 저역통과필터링을 수행하여 잡음이 제거된 값으로 정확한 각도 값을 구한다. 여기서 획득된 각도 값을 이용하여 현재 서있는 곳의 지형이 변화했는지 변화했다면 어떠한 지형인지 판단한다. 만약 지형의 변화를 감지하지 못했다면 기본보행을 수행하고, 지형의 변화가 감지되면 지형의 종류를 구분하고 자세안정화 알고리즘 후에 상황에 알맞은 보행알고리즘을 수행한다.

2. 관성센서를 이용한 자세안정화 알고리즘

센서를 이용하여 자세가 불안정 할 경우 스스로 자세를 안정화하는 알고리즘은 다음 그림 7과 같다. 걷는 매 순간마다 자이로 센서와 가속도 센서를 통해 센서 값을 획득하고 저역 통과 필터를 통해 필터링하여 몸체의 기울어진 정도를 감지한다. 이족로봇의 몸체가 앞뒤로 기울어진 정도를 x축의 기울기, 좌우로 기울어진 정도를 y축의 기울기로 한다. 센서 값을 통해 획득한 센서 값이 임의로 정한 기준 값 θ_{rx}, θ_{ry}보다 클 경우 로봇의 자세가 기울어진 것으로 인식하고, x축과 y축으로 기울어진 각도 값을 통해 기울어진 방향의 반대방향으로 몸을 기울이기 위한 θ_x와 θ_y을 연산한다. 연산 후 x축 회전모터에 θ_x을 빼줌으로서 반대로 이동시키고, y축 회전모터에도 동일한 연산을 수행한다.

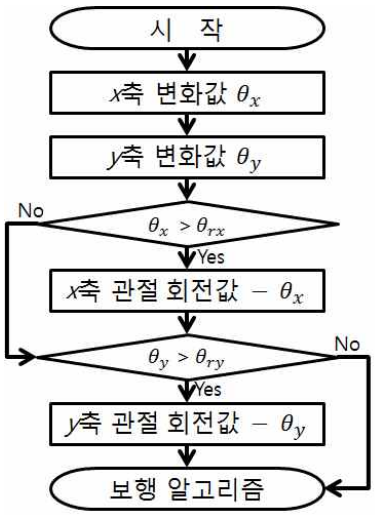


그림 7. 자세 안정화 알고리즘
Fig. 7. Motion stabilizing algorithm.

3. 이족로봇의 비평탄면 보행 알고리즘

비평탄 지형에 따른 이족로봇의 안정화 향상 알고리즘은 다음 그림 8와 같다. 자세안정화 알고리즘을 통해 보행 시 로봇 중앙에 장착된 자이로 센서와 가속도 센서를 통해 로봇의 몸체각도가 큰 출력 값을 갖는 각도일 경우 경사면을 인식한다. 보행마다 자이로 센서와 가속도 센서의 x축 값을 측정하고 가속도 센서 값을 이용하여 로봇의 기울어짐을 인식한다. 로봇 몸체의 기울어짐을 인식 후 가속도센서의 x축 값을 이용하여 발목 모터의 오프셋 값에 변화를 주어 상체의 각도가 자세안정화 보행과 같도록 보정하고, 경사면을 통과하기 위해 경사면 보행을 수행한다. 경사면 보행은 오르막에서는 더 큰 보행 궤적을 생성하고 내리막에서는 평지에서의 보행 궤적보다 작은 보행 궤적을 생성한다.

그림 9는 이족로봇의 비평탄 지형 보행 알고리즘을 나타낸다. 자이로 센서와 가속도 센서를 통해 로봇의 몸체각도를 감지하고 그 값의 변화로 바닥 지형을 인식

```
Algorithm: Slope walking algorithm
acquisition of accelerometer value A_χ
acquisition of gyro sensor value G_χ
calculate tilt angle using (A_χ, G_χ )
adjust θx
if ( recognized terrain = slope ) then
    repeat
        modify offset value of ankle joint using θx
        if( slope = uphill ) then
            adjust long step
        else( slope = downhill ) then
            adjust short step
        endif
    until recognized terrain = flat
endif
```

그림 8. 경사면 보행 알고리즘
Fig. 8. Slope walking algorithm.

```
Algorithm: Walking algorithm on uneven terrain
acquisition of accelerometer value A_x, A_y
acquisition of gyro sensor value G_x, G_y
calculate tilt angle using (A_x, G_x)
adjust θ_x
calculate roll angle using (A_y, G_y)
adjust θ_y
if ( recognized terrain = uneven ground ) then
    repeat
        if( θ_x > θ_rx ) then
            modify offset value of x-axis joint using θ_x
        endif
        if( θ_y > θ_ry ) then
            modify offset value of y-axis joint using θ_y
        endif
    until recognized terrain = flat
endif
```

그림 9. 비평탄면 보행 알고리즘
Fig. 9. Walking algorithm on the uneven terrain

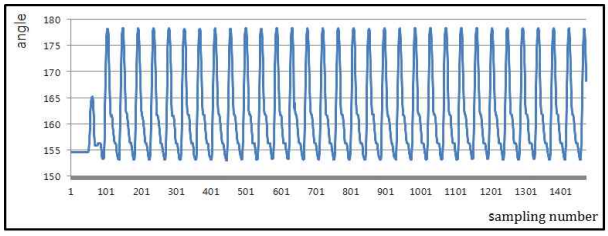
한다. x축의 기울어진 크기와 y축의 기울어진 정도를 계산하여 저장하고, 임의로 정한 기준 값보다 x축 및 y축의 값이 크게 변화하였을 경우에 x축 및 y축 관절들의 오프셋 값을 계속적으로 보정하여 비평탄면에서의 안정성을 향상시켰다.

Ⅳ. 실 험

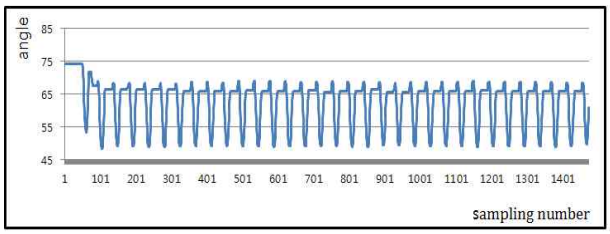
본 논문에서 비평탄 지형에서의 보행 성능 확인을 위해 실제 환경에서 제작된 이족로봇을 사용하여 실험을 하였다.

제안한 자세 안정화 알고리즘을 통해 적용하여 평지에서와 비평탄 지형에서의 다른 변화를 확인하기 위해 각 관절의 각도 변화를 그림 10과 같이 그래프로 나타냈다. 그림 10-(a)는 골반의 관절 각도변화를 나타내고, 그림 10-(b)는 무릎의 관절 각도변화를 나타낸다. 그림 10-(c)평지와 비평탄 지형에서 가장 많은 관절각도가 변화하는 발목관절을 나타낸다. 보행순간마다 자이로 센서와 가속도 센서의 출력 값을 획득하여 자세안정화를 위해 관절의 각도가 변화되는 것을 그래프를 통해 확인하였다. 좌우측 관절각도는 같은 형태의 파형을 보였다.

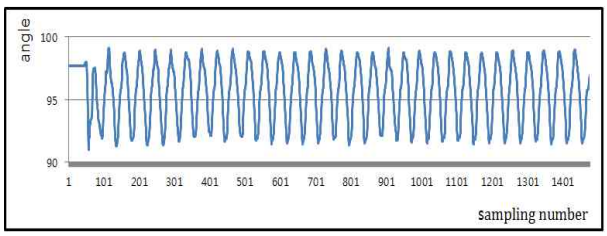
그림 11은 자이로 센서와 가속도 센서의 실시간 출력 값을 기반으로 비평탄면 환경 정보를 얻고, 로봇의 하체관절 변화를 통해 안정적인 보행을 수행하는 실험 결



(a) M3 모터의 각도
(a) Angle of motor M3



(b) M4 모터의 각도
(b) Angle of motor M4



(c) M5 모터의 각도
(c) Angle of motor M5

그림 10. 이족로봇의 평지보행 시 관절각도
Fig. 10. Joint angles of a biped robot on flat surface.

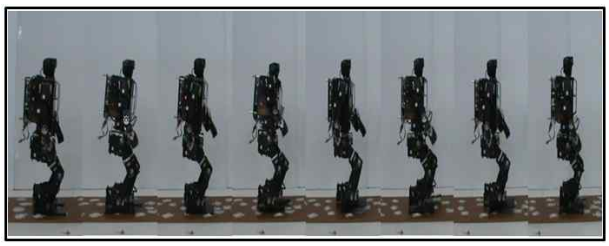
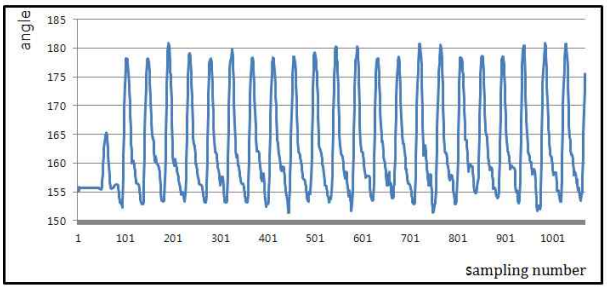


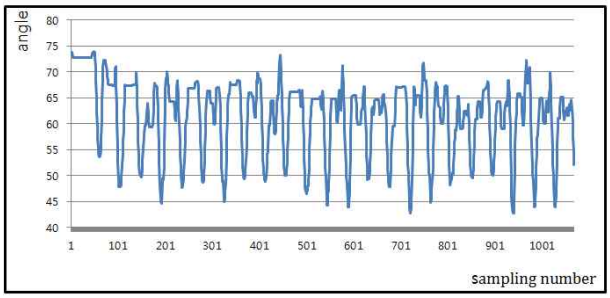
그림 11. 이족로봇의 비평탄면 보행 모습
Fig. 11. Snapshots of biped walking on uneven terrain

과를 보여준다. 그림 12-(a)는 비평탄면에서의 골반 관절의 각도 변화를 나타내며, 그림 12-(b)는 무릎관절에 각도 변화를 나타낸다. 그림 12-(c)는 발목관절의 각도 변화를 나타내었다. 평지보행과 많은 차이가 나타나지 않았지만 지형지물을 인식하여 하체관절 각도 변화를 확인하였고, 관절을 변화를 통해 상체 각도가 평지보행에서의 각도와 유사하게 관절의 각도가 보정되는 것을 확인하였다.

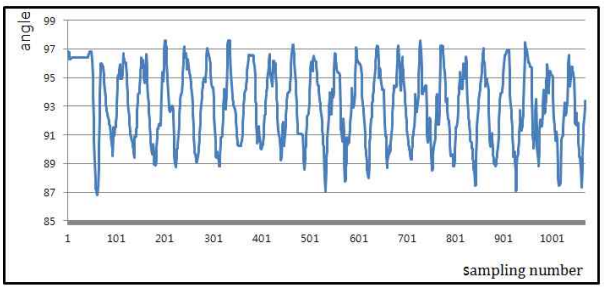
그림 13은 경사면을 인식하고 그 상황에 따른 알고리



(a) M3 모터의 각도
(a) Angle of motor M3



(b) M4 모터의 각도
(b) Angle of motor M4



(c) M5 모터의 각도
(c) Angle of motor M5

그림 12. 이족로봇의 비평탄면 보행 실험
Fig 12. Walking experiment of biped robot on uneven terrain.

즘을 수행한 결과를 보여준다. 오르막과 내리막에서 상체의 기울기를 기본 보행에서의 각도와 맞추기 위하여 발목관절이 점차 변화하는 것을 볼 수 있었다. 그림 15와 같이 그래프를 통해 각 관절각도 변화의 결과를 보여준다. 그림 14-(a)는 경사면에서의 보행 시 골반관절 각도 변화를 나타내고, 그림 14-(b)는 무릎관절 각도 변화를 나타낸다. 그림 14-(c)는 평지에서와 같이 가장 많은 발목관절 변화를 나타낸다. 실험 결과 오르막에서는 관절의 각도를 크게 하고, 내리막에서는 적게 하여, 안정된 자세로 경사면을 통과 하는 것을 확인하였다. 또한 평지보행에서와 경사면보행에서의 발목 관절각도 변화가 가장 많은 변화가 나타나는 것을 확인하였다.

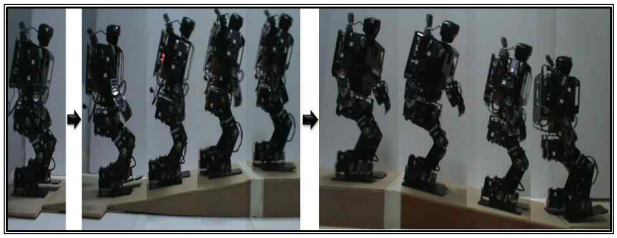
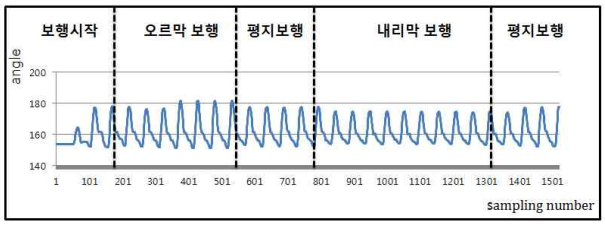
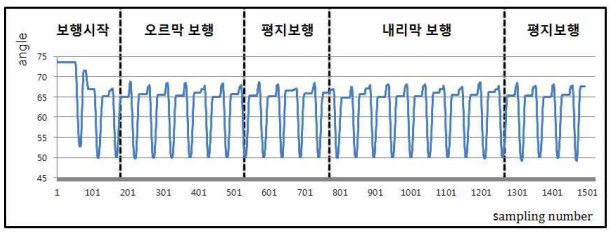


그림 13. 이족로봇의 경사면 보행 모습
Fig. 13. Snapshots of slope walking of biped robot.



(a) M3 모터의 각도
(a) Angle of motor M3



(b) M4 모터의 각도
(b) Angle of motor M4

(c) M5 모터의 각도
(c) Angle of motor M5

그림 14. 이족로봇의 경사면 보행 실험
Fig. 14. Walking experiment of biped robot on slope surface.

V. 결 론

본 논문에서는 비평탄 지형에서 자이로센서와 가속도센서를 이용하여 자세 안정화 및 강인한 보행방법을 제안하였다. 제안된 보행 방법은 소형 이족로봇을 실제 제작하여 비평탄 지형에서의 자세안정화 및 안정적인 보행을 실험을 통해 성능을 검증하였다. 실제 실험결과

제안한 비평탄 지형 보행 알고리즘을 적용하여 상황을 인식하고 하체관절 모터 각도를 변화시켜 로봇의 상체 각도가 평지에서의 각도와 같도록 보정하여 안정적인 보행을 하는 것을 확인하였다. 앞으로 여러 환경에서의 보행 방법과 여러 상황을 인식하여 극복할 수 있는 방법을 연구할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] Kazuo Hirak, "The Development of Honda Humanoid Robot," Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1321-1326, 1998.

[2] Y. Kuroki, M. Fujita, T. Ishida, K. I. Nagasaka and J. I. Yamaguchi, "The intelligent ASIMO: System overview and integration," Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2478-2483, 2002.

[3] Joel Chestnutt, "Footstep Planning for Honda ASIMO humanoid," Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 629-634, 2005.

[4] Y. Kuroki, M. Fujita, T. Ishida, K. I.Nagasaka and J. I. Yamaguchi, "A Small Biped Entertainment Robot Exploring Attractive Applications," Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 471-476, 2003.

[5] I. W. Park, "Online Free Walking Trajectory Generation for Biped Humanoid Robot KHR-3(HUBO)," Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1231-1236, 2006.

[6] 김용태, 이은선, 이희영,"이족보행로봇의 장애물 극복보행알고리즘에 관한 연구", 한국 퍼지 및 지능 시스템학회 논문지, Vol. 13, No. 6, pp. 686-691, 2003.

[7] 강민구, 배지훈, 박경용, 김갑일, "빠른 보행을 위한이족 로봇의 설계", Joumal of Research Institute ofIndustrial Technology, Vol. 20, 2001.

[8] 이창석, 나두영, 김용태, "소비 에너지 분석을 통한 이족보행로봇의 저전력 보행 보정 기법", 한국지능 시스템학회 논문지, Vol. 20, No. 6, pp. 793-798, 2010.

[9] Jan-mark Seewald, "Investigation of Prosthetic Ankle Design," Monash University Research Report, 1998.

저 자 소 개

이 보 훈(정회원)
2011년 한경대학교 정보제어 공학과 졸업
2011년~현재 동 대학원 석사과정
<주관심분야 : 지능 로봇, 지능 시스템>

박 종 한(정회원)
2011년 한경대학교 정보제어 공학과 졸업
2011년~현재 동 대학원 석사과정
<주관심분야 : 지능 로봇, 지능 시스템>

이 창 석(정회원)
2010년 한경대학교 정보제어 공학과 졸업
2010년~현재 동 대학원 석사과정
<주관심분야 : 지능 로봇, 지능 시스템>

김 용 태(정회원)-교신저자
1991년 연세대학교 전자공학과 졸업
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 교수
<주관심분야 : 지능 로봇, 지능시스템, 지능제어>