

## FPGA를 이용한 이족로봇의 설계

박경용, 서재관, 이성희, 오성남, 김갑일, 강환일  
 명지대학교 전기공학과

### Design of Biped Robot Using FPGA

Kyoung-Yong Park, Jae-Kwan Seo, Sung-Ui Lee, Sung-Nam Oh, Kab-Il Kim, Hwan-Il Kang  
 Department of Electrical Engineering, Myong Ji University

**Abstract** - 이족로봇이 stand-alone 형태를 가지기 위해서는 기계적인 구조가 중요할 뿐만 아니라 하드웨어 시스템이 간결하게 잘 설계되어야 한다. 이렇게 하드웨어 시스템이 가볍고 간결하여 설계되어야 쉽게 로봇에 장착할 수가 있다. 본 논문에서는 FPGA(Field Programmable Gate Array)를 이용해 모터제어기를 구성해서 이족로봇을 설계하는 방법을 다루고자 한다. 본 논문에서 구성하는 하드웨어 시스템은 메인 CPU로 AM186ES를 사용하며 FPGA는 Altera사의 FLEX EPF10K20TC144-3을 사용하였다. 이와 같이 FPGA를 사용하는 하드웨어시스템은 기본적으로 VHDL언어를 사용하여 유연하게 하드웨어를 구성 할 수 있으며, 이족로봇의 여러 가지 보행 알고리즘에 능동적으로 대처할 수 있다. 뿐만 아니라 하드웨어가 간단해 지면서 가볍고 전력소모가 적으며 신뢰성 있는 시스템을 구축할 수 있다.

**Keyword:** 이족로봇, FPGA, 하드웨어 시스템, 모터제어기, 보행알고리즘

## 1. 서 론

70년대 이후 로봇틱스 분야에서 이족 보행 로봇의 연구는 꾸준히 진행되고 있다. 그 이유로는 현재의 작업환경은 인간이 작업하기에 편리하게 구성되어 있기 때문에 인간과 유사한 이동성을 갖는 이족 로봇은 특별한 작업환경의 변화 없이도 인간을 대체할 수 있기 때문이다. 이족 로봇 연구는 대체로 이론 및 시뮬레이션에 관한 연구와 실제 제작 및 성능향상에 관한 연구 등의 두 분야로 이루어지고 있다. 본 논문은 후자의 경우로 로봇을 실제 설계, 제작, 그리고 보행에 대해 논하고자 한다.

로봇의 실제 제작에 관한 연구는 최초로 KATO의 이족 로봇인 WL-5를 제작하여 보행을 구현하였으며 최근에는 외부에서 들어오는 힘을 감지하여 적절한 걸음걸이를 선택하여 보행을 하는 WABIAN으로 발전시켰다.[3][5] 또한 Zheng은 SD-2라는 로봇으로 둔부에 4개의 관절 발목 부분에 4개의 관절을 사용하여 평지 보행, 계단 보행, 경사지 보행을 구현하였으며,[1][2][4] 최근 혼다에서는 ASIMO를 개발하여 인간과 거의 흡사한 걸음을 구현하였다.

본 연구실에서는 1999년 MBR-S1 (Myongji Biped Robot - Static Walking)을 이용하여 저전력 이족 로봇의 보행을 구현하였으며, 2000년 MBR-S1의 향상된 모델인 MBR-S2를 이용하여 계단보행을 구현하였고, 위와 다른 구조를 가진 MBR-F를 통해 빠른 걸음에 대한 문제점을 해결하였다.[6][7][8] 그러나 MBR-F는 동적 보행에 있어서는 균형추가 빠른 움직임을 보였을 때 과부하의 문제점일 발생하여 이 부하에 대한 감쇠 구조가 필요하다. 또한 다리가 빠르게 스윙할 때 거기서 생기는 모멘트 보상이 현재의 균형추만으로 완전한 보상이 이루어지지 않으며 균형추의 위쪽에 새로운 자유도를 부여하여

모멘트 보상에 대한 추가 설계가 필요하다.

본 논문에서는 FPGA를 사용하여 보다 신뢰성 있는 하드웨어 시스템을 구축하고 MBR-F의 문제점을 해결하기 위하여, 새로운 이족 로봇 모델인 MBR-3를 설계하였다. MBR-3는 허리에 6개의 자유도를 주어 균형추 없이 전체의 균형을 보상해 줄 수 있게 설계하였으며 무릎에 2개, 양 발목에 4개의 총 12개의 자유도를 주어 MBR-S2와 MBR-F의 구조적인 문제점을 해결하여 보다 인간적인 보행을 구현할 수 있도록 설계하였다.

## 2. 시스템의 구성

### 2.1 전체시스템의 구성

각 관절은 내부적으로 위치제어를 할 수 있는 RC 서보 모터를 사용하였다. 그리고 모터의 제어를 위해서 AMD사의 Am186ES와 FPGA를 사용하여 제어기를 설계하였다. 이 컨트롤러는 컴퓨터로부터 모터의 위치값을 입력받아서 제어를 수행하며 FPGA는 모터를 제어하기 위한 PWM을 발생시킨다. 전체 시스템의 구조는 그림 1과 같다.

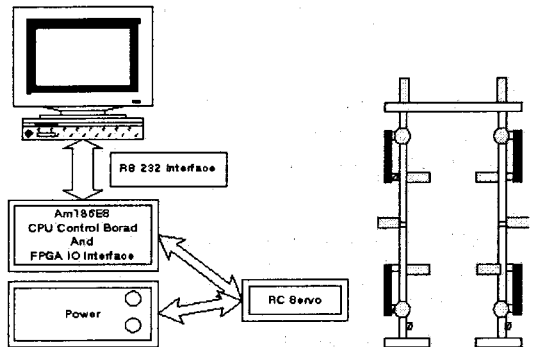


그림 1. 전체 시스템의 구성

Fig. 1 Configuration of the overall system

### 2.2 기계적 구조

#### 2.2.1 전체 링크의 구조

MBR-3(그림 2)는 8개의 관절과 9개의 링크로 구성되어 있으며 로봇의 높이는 38.25cm이고 총 무게는 kg이다. 전체적인 구조를 보면 허리와 무릎, 발목으로 구분할 수 있다. 허리에 6개, 무릎에 2개, 발목에 4개의 자유도를 가지고 있어 보다 인간에 가까운 보행을 할 수 있도록 설계하였다. 허리의 6개의 자유도는 전후, 좌우와 회전을 할 수 있도록 하였으며 이러한 구조는 균형추를 사용하지 않고 보행 중 전체의 균형을 보상해줄 수 있다.

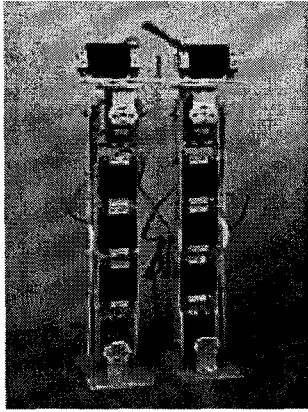


그림 2 MBR-3

Fig 2 MBR-3

허리의 전후, 좌우 2개의 자유도는 타이 벨트를 이용하여 하나의 관절에서 동작하며 발목 역시 타이벨트를 이용하여 2개의 자유도가 하나의 관절에서 동작하도록 하였다. 각각의 링크는 최소한의 무게를 만들기 위하여 위하여 FRP를 사용하였다. 링크의 구조는 그림 3과 같다.

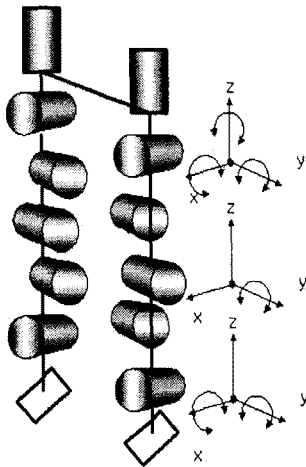


그림 3 MBR-3의 링크 구조

Fig 3 Link structure of MBR-3

### 2.2.2. 관절의 구조

로봇의 설계할 때 가장 중요한 부분이 관절 부분이다. 그림 4는 MBR-3의 허리와 발목 관절을 나타낸다. 허리는 회전, 전후, 좌우의 동작이 모두 하나의 관절을 이루고 있다. 좌우로 움직이는 상단의 모터는 링크들이 서로 직접 연결되어 있으며 전후로 움직이는 하단의 모터는 모터축이 타이 풀리와 연결되어 있어 타이 벨트를 사용하여 동력을 전달함으로써 실제로는 상단의 모터와 동일한 지점에서 동작하게 된다. 발목 관절은 허리와 반대의 구조를 가지고 있다. 상단과 하단의 모터는 모두 하단의 축에서 동작한다. 이런 관절의 구조는 관절의 동작 위치를 일치시킴으로서 인간에 가까운 보행을 구현할 수 있으며 MBR-S2와 MBR-F에서 수행할 수 없었던 회전 에 관한 보행까지 수행할 수 있다. 또한 구조 해석적 측

면에서 최대한 해석의 간결화를 실현할 수 있으며 균형 추를 사용하지 않고 보다 안정적인 걸음을 구현할 수 있도록 하였다.

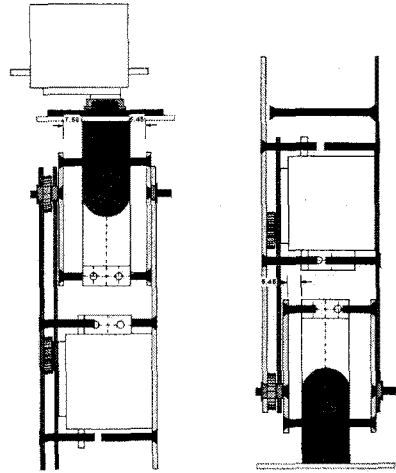


그림 4 관절의 구조

Fig. 4 Joint structure of MBR-3

## 3 이족 보행 로봇의 제어

### 3.1 제어기 및 I/O 설계

제어기의 CPU로는 AMD사의 Am186ES를 사용하였다. Am186ES는 인텔의 마이크로 프로세서와 호환되기 때문에 인텔사의 프로세서를 이용한 시스템과 소프트웨어적인 면에서 완전히 호환된다. 또한 많은 사용으로 검증된 컴파일러를 사용하여 안정된 프로그래밍이 가능하다. 하지만 Am186ES는 X86계열 CPU로 모터를 제어하기 위한 신호에 대한 I/O를 가지고 있지 않다. 모터를 제어하기 위해서는 펄스 신호가 필요하다. 이러한 문제점을 FPGA의 설계로 해결하여 PWM에 대한 로직을 첨가하였다. FPGA 칩은 ALTERA EPF10K 시리즈를 사용하였다.

#### 3.1.1 FPGA를 이용한 PWM 신호 구현

로봇관절제어기의 컨트롤러는 규모가 작아야하고 구조가 간단해야하며 빠른 처리속도를 가지고 있어야 한다. 또한 모터의 제어를 위한 신호의 I/O와 드라이버로 보내지는 PWM신호가 필요하다. RC 서보에 사용되는 펄스는 일반적인 PWM신호와와는 많은 차이가 있다.

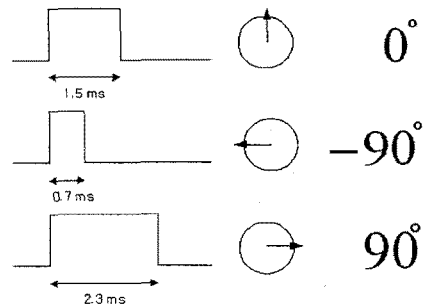


그림 5 RC-Servo에 사용되는 PWM

Fig 5. Used PWM to RC-Servo

RC서보의 동작 범위 +90도 -90도로 180도의 동작범위를 가진다. 제어 신호는 주기적인 0.7-2.3msec 펄스로 공급해야 하며 펄스를 인가하면 공급되는 펄스 폭에 따라서 서보가 정해진 각도로 움직여 정지된다. 그림 5는 RC서보에 사용되는 펄스를 나타낸다. 컨트롤러가 그림 5와 같은 12개의 펄스를 출력하여 동시에 모든 서보 모터를 제어하는 것은 매우 힘든 일이다. 따라서 FPGA를 사용하여 이런 문제들을 해결하였다. 그림 6은 설계한 FPGA의 내부구조이다.

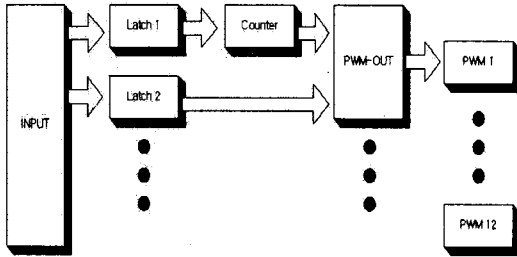


그림 6 FPGA의 내부 구조  
Fig. 6 The inside structure of FPGA

Input Controller는 Latch 1에 펄스에서 필요한 전체주기(T)를 입력하며 Latch 2에는 High Level Time( $T_h$ )을 입력한다.  $T_h$ 는 모터가 실제로 동작해야 하는 각도를 나타낸다. PWM-OUT은 비교기로 Counter의 값과  $T_h$ 의 값이 같아지는 순간 펄스를 0으로 만들어 준다. 이와 같은 과정을 통하여 그림 5와 같이 우리가 원하는 펄스를 만들 수 있으며 12개의 펄스를 동시에 출력하여 하나의 제어기로 모든 서보모터를 제어할 수 있다. 그림 7은 설계한 FPGA Logic을 통하여 만들어낸 펄스의 시물레이션 결과를 보여준다. FPGA 내부의 각 UNIT들은 VHDL로 구현했으며 MAXPLUS II 9.23을 이용해 이 각각의 UNIT들을 Graphic editor로 합성하는 Schematic Method를 사용하여 시물레이션 하였다.

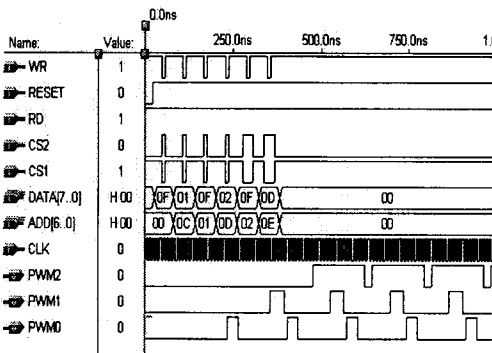


그림 7 FPGA 출력 시물레이션  
Fig 7 Simulation reset of FPGA output

### 3.2 제어방식

그림 4는 계층적인 제어기의 구성을 나타낸다. 계층적인 제어기 구조에서 최상위 PC는 안정도를 고려한 걸음걸이 데이터를 계산하여 RS-232통신을 사용하여 제어기로 다운로드 한다. 이 값을 기준 값으로 제어기는 각각의 관절에 대한 기준

을 병렬 연산하고 FPGA를 이용하여 각각의 모터로 제어 신호를 보내는 계층구조를 가지고 있다.

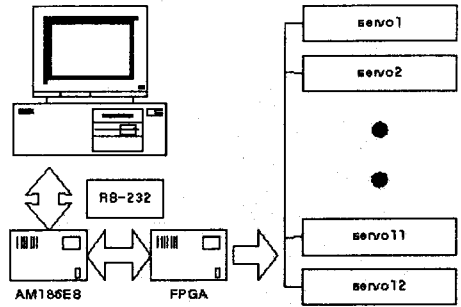


그림 8. 이족보행로봇 제어시스템의 계층적 구조  
Fig6 Hierarchical Structure of Biped Control System

### 3.2.1 제어 알고리즘

일반적으로 정확한 위치 제어 및 안정한 제어기 출력을 얻기 위해 PID 제어기를 사용하지만, 본 논문에서는 이족로봇 시스템이 갖는 특성, 즉 한 발 지지상태에서 누적된 위치 오차가 시스템을 불안정하게 만들 수 있기 때문에 PD 제어기를 사용하였다. 제어기 시스템 구성은 그림 5과 같다. 입력으로 12개의 모터에 대한 기준에 대해서 입력받아 그것을 PD 병렬연산처리 하여 각각에 맞는 시스템으로 입력이 되는 제어기로 설계 되었다.

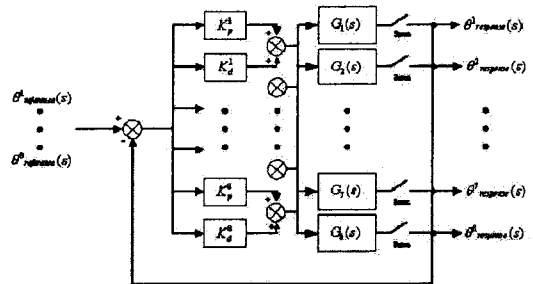


그림 8. PD제어기의 블록다이어그램  
Fig. 8 Block diagram of PD controller

## 4. 이족 보행 방식

이족 보행 로봇의 걸음걸이는 정적인 걸음걸이와 동적인 걸음걸이로 나눌 수 있다. 정적인 걸음걸이는 로봇이 보행할 때 로봇 전체의 무게중심이 안정영역 내부에 항상 존재하는 보행방식이다. 즉, 보행중 동작을 정지할 경우에도 로봇이 넘어지지 않고 안정하게 자세를 유지해야 한다. 이렇게 되기 위해서는 로봇의 무게 중심의 수직 투영점(VPCG: Vertically projected Point of the Center of Gravity)이 로봇의 지지영역 내에 존재해야 한다. 반면, 동적인 걸음걸이는 보행중에 무게중심의 지지영역 이탈을 허용하는 걸음걸이이다. 무게중심이 지지영역을 이탈할 경우 쓰러짐을 방지하기 위해서는 보행 자세가 빨라져야한다. 이 경우 로봇의 무게중심이 아닌 ZMP(Zero Moment Point)가 지지영역에 위치해야 한다.

### 4.1 안정도 판별

이족로봇이 두 발 또는 한 발로 서있을 경우, 로봇 전체의 무게 중심을 지표면으로 수직 투영한 지점

(Vertically projected Point of the Center of Gravity :  $V_{PCG}$ )이, 지지하고 있는 발로 이루어진 지지영역 안에 있으면 로봇은 쓰러지지 않고 안정하게 서있을 수 있다는 이론이 정적 안정도 판별법이다. 이 안정도의 척도로서 안정여유(Stability Margin)는  $V_{PCG}$ 의 위치에서 지지영역 경계까지의 최소 거리로 정의 된다. 로봇 전체의  $V_{PCG}$ 는 각 링크의  $V_{PCG}$ 를 이용하여 표현 할 수 있으며 이것은 다음 식(3)과 같다.

$$V_{PCG}(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i V_{PCG,i}(t) \quad (3)$$

여기서  $M$ 은 이족보행로봇의 전체 무게이며,  $m_i$ 는 모터의 무게를 포함한  $i$ 번째 링크의 무게이다. 또한  $V_{PCG,i}(t)$ 는  $i$ 번째 링크의  $V_{PCG}$ 이다.

#### 4.2 기구학

이족 로봇의 보행은 어떤 특정한 걸음걸이 형태의 반복으로 구성된다. 따라서, 반복되는 특정 걸음걸이 형태를 여러 개의 작은 부분동작으로 구분하고 각각의 부분동작에 대한 액추에이터의 위치 값을 구하여 걸음걸이를 구현한다. MBR-3에서의 보행은 실제 12개의 액추에이터로 형성되며 따라서 기구학의 해석이 매우 복잡하게 된다. 본 연구에서는 보다 간단한 해석을 위하여 작은 부분동작으로 걸음으로 구현되는 이족로봇의 특성을 이용하였다. 실제 구분동작에서 이족 로봇은 12개의 관절을 모두 사용하지 않는다. 따라서 고정된 관절부를 하나의 링크로 본다면 전체 관절을 8축으로 만들어 줄 수 있다. 이렇게 만들어진 로봇의 구조를 통하여 보다 간단히 시스템의 해석을 수행할 수 있다. 그림 9는 오른발을 기준으로 왼발을 앞으로 뻗을 때 8축으로 간략화된 로봇의 구조를 보여 준다.

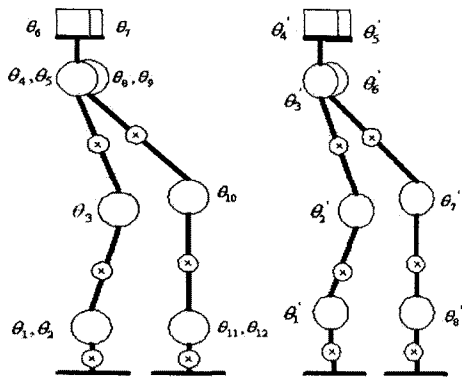


그림 9 간략화된 로봇 모델  
Fig. 9 Simplified robot model

#### 5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 FPGA(Field Programmable Gate Array)를 이용하여 하나의 제어기로 12개의 모터를 제어하는 시스템을 구성하였다. 또 구조적인 개선을 통하여 MBR-F의 동적 보행에 있어서 균형추가 빠른 움직임을 보였을 때 과부하의 문제점과 다리가 빠르게 스윙할 때 거기서 생기는 모멘트 보상이 완전한 이루어지지 않는 문제점을 동시에 해결하였다. 또 허리의 관절을 이용하여 회전에 대한 보행을 수행할 수 있도록 설계하였다. 향후로는 자이로, 비전 등 여러 가지 센서를 이용하여

다양한 환경에서 보행을 수행할 수 있어야하며 안정적인 걸음을 위하여 로봇의 상체를 구현하여야 한다.

#### [참고 문헌]

- [1] Y.F. Zheng and J. Shen, "Gait Synthesis for the SD-2 Biped Robot to Climb Sloping Surface," *IEEE Trans. on R & A*, vol. RA-6, no.1, pp.86-96, Feb. 1990.
- [2] Ralph E. Goddard, Y.F. Zheng, Hooshang Hemami, "Control of the Heel-Off to Toe-Off Motion of a Dynamic Biped Gait," *IEEE Trans. on Systems, Man, And Cybernetics*, vol. 22, no. 1, pp.92-102, Jan. 1992.
- [3] Jin-ichi Yamaguchi, Atsuo Takanishi, and Ichiro Kato, "Development of a Biped Walking Robot Compensating for Three-Axis Moment By Trunk Motion," *Proc. of the 1993 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp561-566, Jul. 1993
- [4] K.Y. Yi and Y.F. Zheng, "Biped Locomotion by Reduced Ankle Power," *Proc. of the 1996 IEEE International Conference on R & A*, pp.584-589, April 1996.
- [5] Jin-ichi Yamaguchi, Eiji Soga, Sadatoshi Inoue and Atsuo Takanishi, "Development of a Bipedal Humanoid Robot-Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking-," *Proc. of the 1999 IEEE International Conference on R & A*, pp.368-374, May. 1999.
- [6] D.J. Kim and K.I. Kim, "Design of Small Power Biped by Load Sharing of Walking Gait," *Proc. of the 2000 IEEE International Conference on R & A*, Apr. 2000.
- [7] J.H. Bae "A study on the Stair Walking of Low Power Biped Robot", 2001 KIEE/IEEK/ICASE Journal of Joint Conference, pp.105-109, 2001
- [8] M.G. Kang, "Design of Biped Robot for Fast Walking", 2001 KIEE/IEEK/ICASE Journal of Joint Conference, pp.58-62, 2001