

엔터테인먼트용 조류형 2족 보행 로봇의 설계 및 구현

김동진*, 유승환**, 신윤덕**, 장승익**, 기창두#

Design and Implementation of a Bird Type Biped Robot for Entertainment

Dong Jin Kim*, Seung Hwan Yu**, Yun De Shen**, Seung Ik Jang** and Chang Doo Kee#

ABSTRACT

In this paper, a bird type biped robot for entertainment controlled by R/C servo motors, is built using the embedded RTOS (Real Time Operating System). $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ V2.00 is used for RTOS and the board 80C196KC for main CPU. A control algorithm of R/C servo motors is proposed on $\mu\text{C}/\text{OS-II}$'s preemptive and deterministic property without any extra PWM module. The realized biped robot has 19DOF, that is, 12DOF for both legs, 6DOF for both arms and 1DOF for neck. To verify the proper walking process, ZMP(Zero Moment Point) theory is applied and the simulation has been done by ADAMS.

Key Words: Bird Type Biped Robot(조류형 2족 보행 로봇), Entertainment Robot(엔터테인먼트 로봇), RTOS(실시간 운영체제)

1. 서론

엔터테인먼트 로봇은 최근 들어 로봇 산업이 확대되어 가는 응용 분야로써, 일본을 중심으로 활발한 연구 개발이 이루어 지고 있다. 특히 인터넷 기술을 포함한 정보공학기술(IT)과 생명공학기술(BT)을 접목하여, 자연상태의 동물들을 모방함으로써 인간에게 기쁨을 주는 애완용 로봇 개발은 상당한 수준에 이르고 있다. 그러나 이러한 로봇을 보다 효과적으로 제작하기 위해서는 고도의 기술이 축적되어야 하고 여러 분야의 기술이 총체적으로 융화되어야 한다.¹

특히 2족 보행 로봇은 이러한 로봇의 대표적인 예라 할 수 있는데, 로봇의 운동방정식이 매우 복

잡할 뿐만 아니라, 강한 비선형 특성을 갖는다. 그래서 많은 연구에서 2족 보행 로봇의 제어를 위해 시스템을 간략화 하여 선형화된 모델로 변환하고,² 선형제어이론을 적용하여 구현하고자 하였다.

그러나 실제적으로 운동방정식을 유도하는데 있어서 접촉으로 인한 지면 반력, 기어의 백래쉬 등은 선형화가 어려울 뿐만 아니라, 시스템 모델링 과정에서 간략화 된 부분이나 시스템 파라미터들의 불확실성으로 인해 제어하는데 많은 제약을 받는다. 최근에는 컴퓨터의 발전에 힘입어 이런 문제점들을 극복하기 위해 많은 비선형 제어 기법들이 연구되고 있다. 이러한 방법 중에는 계산-토크 방법에 기초한 임피던스 제어, 힘/위치 혼합제어

*... 접수일: 2004년 5월 12일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

* 삼성전자

** 전남대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 전남대학교 기계공학과

E-mail cdkee@chonnam.ac.kr, Tel. (062) 530-1667.

기법 등이 있다. 그러나 이 방법들은 시스템의 파라미터들이 모두 규명되어야만 적용이 가능하다.

본 논문은 이러한 연구 현황을 고려하여 복잡한 수학적 접근을 피하고 학습지향적 2족 보행 로봇을 제작하고자 하였다. 이를 위해 3차원 CAD 툴인 CATIA V5를 이용하여 설계하고, 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 사용하여 걸음새 구현을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 RTOS(실시간 운영체제)로는 $\mu\text{C}/\text{OS-II}^{3,4}$ 를 채택하였고, 이의 선점형, 예측 가능성이라는 특성을 이용하여 다수의 R/C 서보 모터를 소프트웨어적으로 구동하는 알고리즘을 제안하고 이의 실용성을 검증하였다.

특히 2족 보행 로봇의 구현이 거의 불가능할 정도의 낮은 성능을 갖는 80C196KC CPU 보드에 이를 구현함으로써 RTOS의 가능성을 보였다.

2. 기구부 설계 및 검증

2.1 기구부 설계 및 제작

엔터테인먼트용 2족 보행 로봇을 설계하는 데는 다음과 같은 두 가지 측면을 고려해야 한다. 하나는 보행 가능한 구조가 되도록 설계해야 한다는 관점이고, 다른 하나는 인간의 호기심을 자극할 수 있는 디자인적인 측면이다.^{5,6}

따라서 본 논문에서 구현한 로봇의 설계 목표도 정보행이 가능한 기구학적 구조를 만족시키면서 인간의 호기심을 자극할 수 있게 하는 디자인으로 한다는 것이다. 그 설계상의 특징은 다음과 같다.

- 조류의 골격 구조를 갖는 다리(전방향으로 굽혀짐)를 구현함.
- 다리는 각각 6 자유도(Degree Of Freedom), 팔은 각각 3 자유도, 허리는 1 자유도로 총 19 자유도를 가짐.
- 유니버설 조인트와 링크구조를 이용하여 2 자유도의 발목을 구현함.
- RP(Rapid Prototyping: 3차원 쾌속조형기)를 이용하여 기구부를 사출 성형함

로봇에 사용된 모터는 Hitec사의 R/C 서보 모터로서 다리에 HS-5245MG(발목관절 4개), HS-5645MG(2개)를, 팔에는 HS-81MG를 사용하였으며 3차원 CAD 툴인 CATIA V5를 이용하여 설계

하였다.

설계 시 상체부분을 움직일 때 사용되는 서보 모터의 정격토크를 감안하여 정강이와 허벅지의 길이를 결정하였고, 발바닥 지지다각형의 안정 여유가 너무 작을 경우 보행이 불안정해지고, 발의 크기가 커질수록 에너지 손실이 증가된다는 점을 고려하여 발의 크기는 몸통부분의 투영면적보다 발바닥의 지지다각형이 작도록 하였다. Fig. 1에 2족 보행 로봇의 조립도가 나타나 있으며, 실제 제작된 각 부품은 Fig. 2에 제시되어 있다.

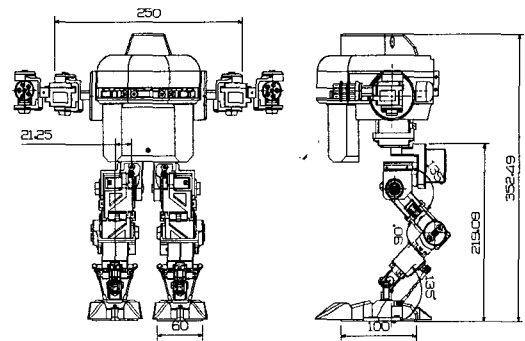


Fig. 1 Schematic of a entertainment biped robot



Fig. 2 Assembled parts of a biped robot

CAD를 이용하여 설계된 각 기구부의 부품은 Stratasys사의 RP system인 Dimension을 이용하여 제작하였다. 설계된 로봇의 데이터를 *.STL 파일로 변환하여 Dimension의 운용 소프트웨어인 Catalyst에 입력하고 조형을 하였다. RP를 이용하면 ABS 재료를 사용하여 견고하고 기능성이 좋은 모델을 만들 수 있으며, 추가적인 기계 가공이나 주형 등의 보완 작업이 가능하다는 장점이 있다.

2.2 동역학적 검증

제작된 2 족 보행 로봇의 안정성을 확보하기 위하여 ZMP(Zero Moment Point)를 응용하였으며, 발바닥 영역 내에서 안정 여유를 설정함으로써 안정적인 보행을 구현하였다.

특히 이동계획(biped trajectory planning)에서는 ZMP 안정성⁷을 응용하여 낮은 에너지 소모율, 착지 충격감소, 실시간 동작 생성, 실시간 적응보행 등이 고려된 걸음새를 구현해야 한다.

2 족 보행에서 발바닥이 지면과 접촉할 때 외족 지지상태(SLSS: single leg support stage)와 2 족 지지상태(DLSS: double leg support stage)로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 초기 개발 단계로 기본 정보행을 위한 외족지지(single support) 상태만을 고려하여 검증하였다. 로봇의 기본구조와 좌표계는 Fig. 3와 같이 설정하였다.

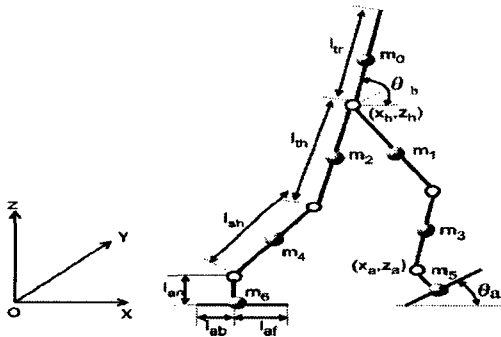


Fig. 3 Coordinate of a biped robot

X 방향과 Y 방향의 ZMP 계산과 안정도 평가는 다음 식(1)을 사용하였다.

$$X_{ZMP} = \frac{\sum_{k=1}^n m_k (\ddot{z}_k + g_z) x_k - \sum_{k=1}^n m_k (\ddot{x}_k + g_x) z_k}{\sum_{k=1}^n m_k (\ddot{z}_k + g_z)}$$

$$Y_{ZMP} = \frac{\sum_{k=1}^n m_k (\ddot{z}_k + g_z) y_k - \sum_{k=1}^n m_k (\ddot{y}_k + g_y) z_k}{\sum_{k=1}^n m_k (\ddot{z}_k + g_z)} \quad (1)$$

여기서, m_k : 각 질점의 질량
 x_k : 각 질점 위치의 X 방향 성분

y_k : 각 질점 위치의 Y 방향 성분
 z_k : 각 질점 위치의 Z 방향 성분
 g_z : 중력 가속도

이다.

각 관절의 기구부 링크 길이, 무게중심의 위치, 관성질량은 CAD 를 사용하여 계산하였고, 각 기구부의 무게는 측정 값을 사용하였다.

보행시 지면과의 접촉을 고려하여 보다 정확한 동적(dynamic) 안정성을 검증하기 위해 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS 를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

ADAMS 에 사용한 로봇의 모델은 기구부의 기구학적 구속조건을 고려하여 발목은 정강이 부분과 유니버설 조인트로 연결하였고, 서보혼과 링크로드는 구면조인트를, 그 외 모든 부분은 회전조인트로 구성하였다. 로봇 모델 역시 제작된 로봇과 같은 19 자유도로 구성하였다. 걸음새 구현은 Fig. 4 에 보인 바닥면과 로봇 발바닥면과의 접촉 현상을 동역학적으로 분석하여 구현하였다.

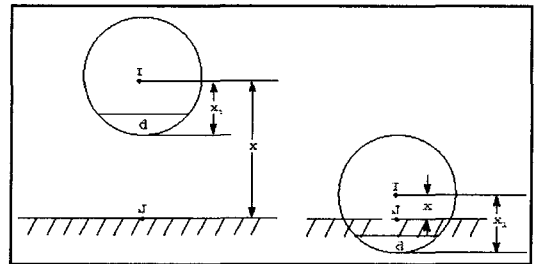


Fig.4 Surface contact model

수직방향의 접촉력은 페널티 알고리즘을 나타내는 식(2)를 사용하였다.

$$F = k(x_1 - x)^e, \quad x < x_1$$

$$F = 0, \quad x \geq x_1 \quad (2)$$

여기서, F : contact force in normal direction
 k : stiffness coefficient
 e : exponential coefficient

이다.

그리고 바닥면과 로봇 발바닥면과의 마찰력은 쿨롱마찰로 간주하여 식(3)를 사용하였다.

$$\begin{aligned} F_f &= \mu_s F, & -V_s < V < V_s \\ F_f &= \mu_d F, & V_s \leq |V| < V_d \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, F_f : friction force
 V : slip velocity at contact point
 V_s : stiction-translation velocity
 V_d : friction-transition velocity
 μ_s : static coefficient of friction
 μ_d : dynamic coefficient of friction

이다.

Fig. 5 에는 시뮬레이션에 사용된 미끄럼속도에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다.

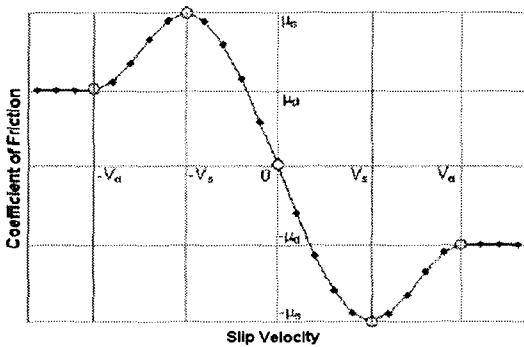


Fig. 5 Friction coefficient vs slip velocity

2 축 보행 로봇의 정보행을 위한 ADAMS 시뮬레이션 결과는 Fig. 6 과 Fig. 7 에 나타냈으며, Fig. 7 에서는 하중이동(Weight Transfer)의 관점에서 과도응답의 수렴특성을 확인할 수 있다. 즉, 한발을 들기 위한 각 조인트들의 동작은 Fig. 7(b)에서 0.5 초 후 정지된 상태에서 외력이 작용하지 않으므로 1 초 정도 지난 후 지면과 접촉한 발바닥의 접촉력은 로봇의 좌우 방향인 Y-방향, 전후 방향인 X-방향에서 0 으로 안정한 상태로 수렴함을 알 수 있고, 위아래 방향인 Z-방향에서도 일정한 값에 수렴하는 것으로 보아 충분히 정보행을 수행할 수 있는 구조라고 판단하였다.

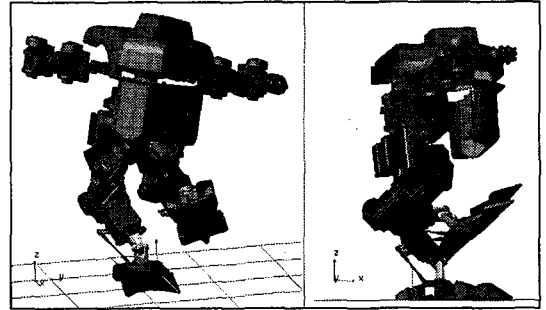
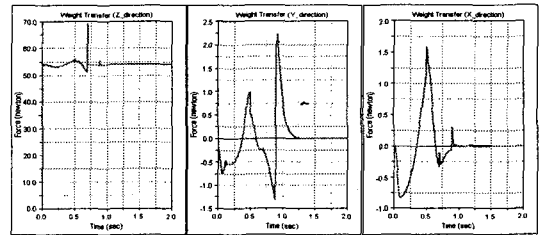
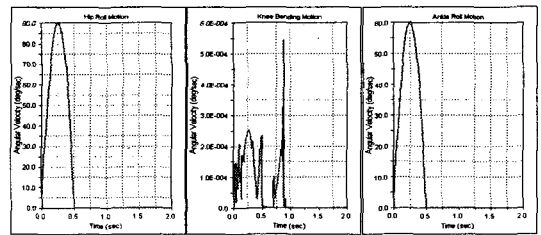


Fig. 6 Isometric view and side view of ADAMS simulation result



(a) Weight transfer of robot feet (from DLSS to SLSS)



(b) Angular velocity of each joint (swing leg)

Fig. 7 Weight transfer and angular velocity from ADAMS simulation result

Fig. 8 과 Fig. 9 는 ZMP 관점에서 안정성을 판정한 결과를 나타낸다. Fig. 9 는 외족 지지상태(single leg support stage)를 보여주는 것으로 양쪽 다리로 지지하다가 오른쪽 다리만으로 지지하는 상태이며, ZMP 의 위치가 M7940, M7941, M7942, M7943 으로 이루는 지지다각형 바깥쪽에서 안쪽으로 들어오는 것을 확인할 수 있다. ZMP 의 안정성 여유가 좌우방향에 비해서 전후 방향으로 더 많은 것을 알 수 있다. 이와 같은 검증 결과를 바

탕으로 본 연구에서 제작한 로봇이 정보행이 가능함을 확인하였다.

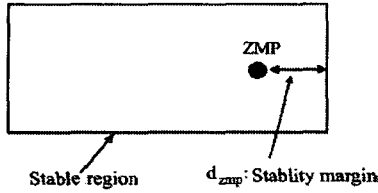


Fig. 8 Stable region and stability margin

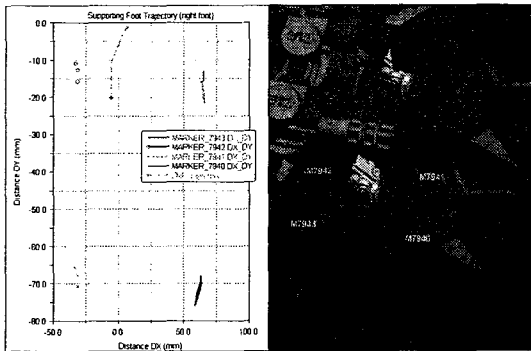


Fig. 9 Stable region and stability margin within ADAMS simulation result

3. 시스템 설계 및 소프트웨어 구조

3.1 시스템 설계

로봇의 최종 설계 목표는 RTOS의 효율성을 검증할 수 있는 제어부, 로봇의 진행 방향과 장애물들을 검출할 수 있는 센서, 그리고 PC와 무선 통신이 가능한 시스템으로 구성하는 것이다.

이를 위해 Main CPU로는 80C196KC-20를, 센서는 3조의 적외선 거리 측정기와 1조의 전자 나침반을 장착하였고, 무선 통신은 블루투스 무선 통신 모듈을 채택하였다.

그 외에 로봇의 상태를 나타내는 LCD 표시기를 장착하였다.

로봇에 장착된 모든 시스템은 RTOS(μC/OS-II)에 의해 관리되며, 전체 하드웨어 구성도는 Fig. 10에 나타냈다.

3.2 소프트웨어 구조

소프트웨어 구조는 크게 50 Hz (20msec)의 클럭으로 동작하는 RTOS, 디바이스 드라이버, 어플리케이션 프로그램 등 세 가지 영역으로 나눌 수 있다.

시스템에 장착된 모든 하드웨어는 디바이스 드라이버 프로그램에 의해 구동되며, 본 시스템은 LCD, RS-232, A/D, I2C, R/C 서보 모터 디바이스 드라이버 등 총 5개로 구현하였다.

어플리케이션 프로그램은 총 9개의 Task가 돌아가며, Fig. 11는 각 Task의 우선 순위와 Task들 간의 동기화에 대한 정보를 보여주고 있다.

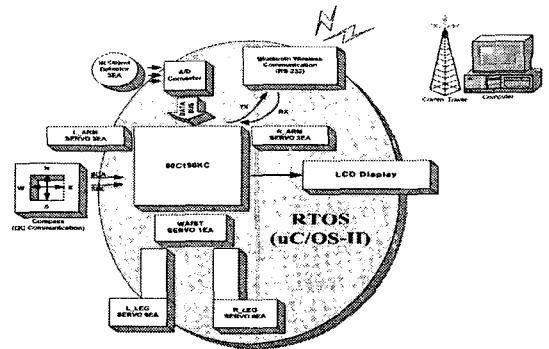


Fig. 10 System configuration

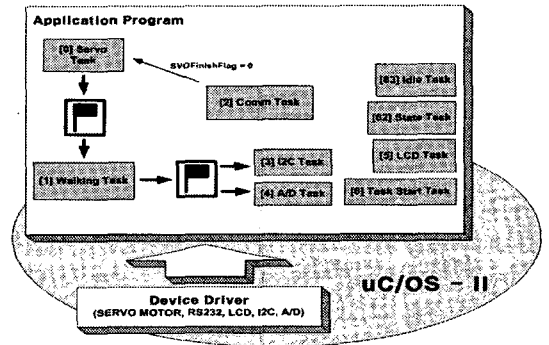


Fig. 11 Software architecture

4. 다수의 R/C 서보 모터 제어 알고리즘

R/C 서보 모터는 저가의 2축 보행 로봇 제작에 많이 사용된다. R/C 서보 모터의 일반적인 특징은 20msec의 리프레시 주기와 0.9 ~ 2.1msec의 펄

스 on 타임을 갖는 PWM(Pulse Width Modulation) 펄스 신호에 의해 각이 결정된다는 것이다.

다수의 R/C 서보 모터를 구동하는 일반적인 방법으로는 타이머 1 개 당 8 개의 서보 모터를 구동하는 방법과, VHDL(Very high speed integrated circuit Hardware Description Language)과 CPLD (Complex Programmable Logic Devices), 또는 FPGA (Field-Programmable Gate Arrays) 칩을 사용하여 R/C 서보 모터 구동에 필요한 PWM 펄스 발생기 모듈을 직접 구현하는 방법 등이 있다.⁵

그러나 이러한 방법들은 일반적으로 16 자유도 이상의 자유도를 갖는 2 축 보행 로봇에서 타이머가 3 개 이하 내장된 CPU 를 사용한다면, 여전히 부가적인 CPU 나 타이머를 필요로 하기 때문에, CPU 에 부담이 적은 장점을 갖는 반면에 비용이 상승한다는 단점이 있다.

본 논문에서는 RTOS 가 탑재된 시스템에서, $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 의 특징인 선점형, 예측가능성과 더불어 정렬 알고리즘을 이용하여, 다수의 R/C 서보 모터를 소프트웨어적인 방법으로 구동하는 알고리즘을 제안하였다.

본 알고리즘의 내용은 크게 두 부분으로 나누어진다.

첫째, R/C 서보 모터의 리프레시 주기를 위해 서보 모터 Task 의 우선순위를 가장 높게 하고, Task 의 한 주기가 끝나면 커널에서 제공하는 딜레이(delay) 함수를 이용하여 20msec 를 지연시킨다.

둘째, 각 R/C 서보 모터의 각을 결정하는 펄스 on 타임을 위해 딜레이 값을 오름차순으로 정렬한 후 모든 포트를 on 시키며, 식(4)에서 계산된 시간 t_n 이 지나면 각각에 대응되는 물리적인 포트를 off 시킨다.

$$t_n = \sum_{i=0}^n \Delta t_i \quad (4)$$

데이터를 정렬하는데 주의할 점은 각 딜레이 값과 그 값에 대응되는 물리적인 포트 값을 함께 정렬해야 한다는 점이다.

대부분의 2 축 보행 로봇의 자유도는 30 자유도 미만이므로, 적은 양의 데이터를 정렬하는데 소스 코드가 간략하고 정렬 속도가 빠른 버블정렬(Bubble sort) 알고리즘을 사용하였다. 버블정렬의

총 비교 연산 회수는 식(5)와 같다.

$$\sum_{i=0}^{n-1} i = \frac{n(n-1)}{2} \quad (5)$$

여기에서 n 은 정렬할 데이터의 개수이다.

다음은 n 개의 데이터 정렬을 위한 Pseudo 코드이다.

```
for (i=0; i<n-1; i++)
  for (j=n-1; j>i; j--){
    if(dly[j-1] <= dly[j]) continue;
    swap (dly[j-1], dly[j]);
    swap (port[j-1], port[j]); }
```

여기에서 dly[]는 펄스 on 타임 값, port[]는 펄스 on 타임에 대응되는 출력포트를 나타낸다.

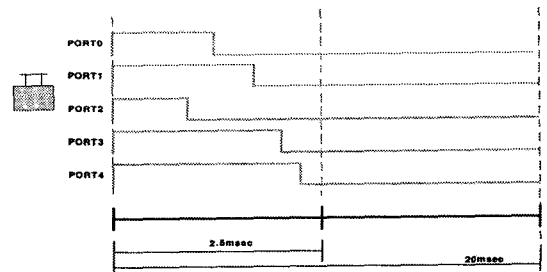


Fig. 12 PWM signal and the number of output port before sorting

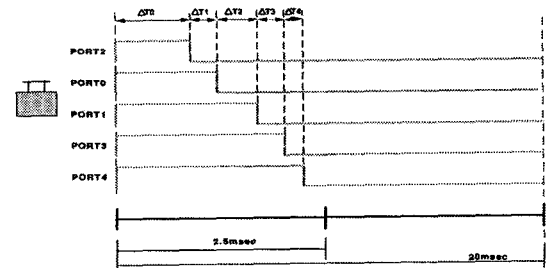


Fig. 13 PWM signal and the number of output port after sorting

Fig. 12 는 펄스 값에 의해 구동되는 임의의 5 개의 R/C 서보 모터가 제안된 알고리즘을 수행하기 이전의 상태를 나타내고 있는데, PORT0~PORT4

는 R/C 서보 모터와 직접 연결된 물리적인 포트 번호이고, 펄스 on 타임은 각각의 R/C 서보 모터가 회전해야 할 절대 각을 의미한다. Fig. 13 은 알고리즘을 수행한 후 오름차순으로 정렬된 각 모터의 펄스 값과 그에 대응되는 물리적 포트를 보여주고 있다.

5. 실험 및 토의

본 논문에서는 제작된 로봇에 대해 제안한 구동 알고리즘의 성능에 대한 평가와 한 발을 들었을 때 정적 밸런스를 유지할 수 있는 기구 구조로 제작되었는가에 대한 실험을 하였다.

로봇의 걸음새구현은 모션 캡처(motion capture)와 유사한 방법으로, 서보 모터의 움직임 값을 피드백 받아 컴퓨터상에서 안정적인 걸음새를 구현하고 그 데이터를 저장하여 사용하였다. 즉, 외측 지지상태에서 이동다리(swing leg)에 대해 전진운동이 가능한 최대한의 값을 실험적으로 구한 후 각각의 보행패턴을 패킷(Packet) 데이터로 데이터 베이스화하여 저장하고 사용하였다.

서보 모터 Task 의 우선순위가 가장 높으므로 다른 Task 에 의해 선점 당하지 않고, 클럭 틱은 20msec 로 동작하므로 서보 모터 Task 에 1 틱의 딜레이 함수 호출을 통해 아래 Fig. 14 와 같이 20msec 의 리프레시 주기를 갖는 파형이 만들어진다.

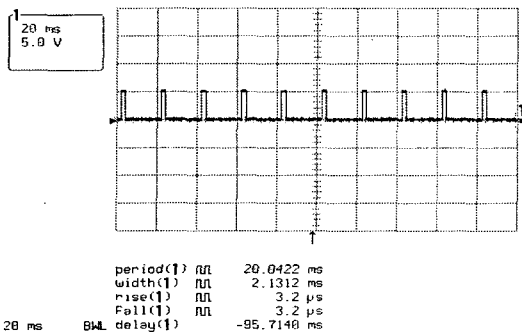


Fig. 14 Refresh cycle (20msec)

다음으로 펄스 on 타임을 측정해 보았다. 아래 Fig. 15 와 같이 중립 각에 대한 파형은 1.5msec 가 나왔으며 $\pm 60^\circ$ 에서는 약 3° 의 누적 오차를 보였다. 이는 알고리즘의 오류가 아닌 CPU 보드의 성능이

낮아 딜레이 함수의 분해능이 뒷받침 해주지 못해 생긴 결과이다.

위의 알고리즘을 적용하는데 있어 몇 가지 주의할 사항은 다음과 같다. 첫째, 서보 모터 Task 의 우선순위가 가장 높아 다른 Task 에 의해 선점 당하지는 않지만, 인터럽트 서비스 루틴에 의해 발생된 지연이 펄스 on 타임 구간에 영향을 받지 않도록 적절히 처리해 주어야 한다. 둘째, 80C196KC CPU 를 사용 할 때 24 자유도 이상에서는 CPU 사용율이 80%를 상회하므로 가급적 23 자유도 이하에서만 사용하고, 효율적 구동을 위해서는 20 자유도 이하에서 사용하는 것이 바람직하다

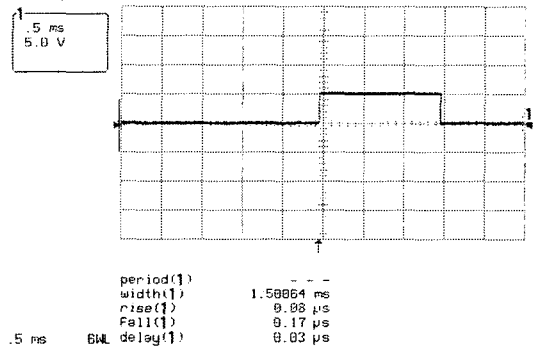


Fig. 15 Pulse on time at 0 degree (1.5msec)

다음으로 한발을 들었을 때 정적 밸런스를 유지하는 가에 대한 실험은 보행 패턴을 입력하여 정보행을 구현함으로써 이를 검증하였으며 Fig. 16 에 그 일부를 나타냈다.

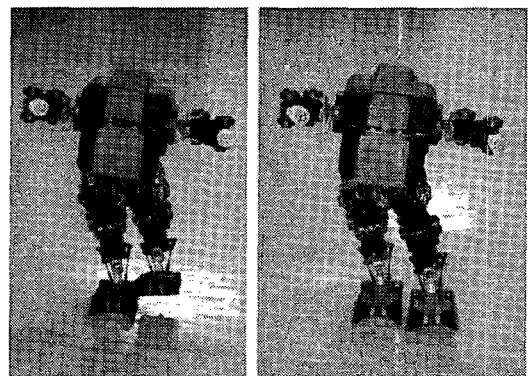


Fig. 16 under static walking

6. 결론

본 논문은 엔터테인먼트용 2족 보행 로봇을 설계 제작하는데 있어서 3차원 CAD 툴인 CATIA V5를 이용하여 설계하였고, 걸음새 구현과 안정성은 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 사용하여 보행가능성을 확인함으로써 로봇제작 비용을 절감하고 제작시간을 단축하였다. 또한, 버블정렬 알고리즘을 이용한 다수의 R/C 서보 모터를 구동하는 새로운 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 제안된 알고리즘의 실용성을 검증하였다.

RTOS 시스템을 탑재하고, 이를 이용해 소프트웨어적으로 다수의 R/C 서보 모터를 구동함으로써, 낮은 성능의 CPU 보드를 로봇제작에 효율적으로 사용할 수 있음을 실험적으로 보여주었다.

후 기

본 연구는 2003년도 전남대학교 BK21 사업지원에 의해 수행되었으며, 본 지면을 빌어 그 동안의 연구지원에 대해 깊은 사의를 표합니다.

참고문헌

1. Oh, Sang-Rok, "RoboSapience: Impending Community of Human and Robots," Proceedings of the KSPE Spring Annual Meeting, KSPE 03S072, 2003.
2. Park, In-Gyu, Kim, Jin-Geol, "Dynamic Walking Planning and Inverse Dynamic Analysis of Biped Robot," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 9, pp. 133-144, 2000.
3. Labrosse, Jean J., "MicroC/OS-II The Real-Time Kernel," R&D BOOKS, USA, 1999.
4. Labrosse, Jean J., "Embedded System Building Block, R&D BOOKS," USA, 2000.
5. Miyashita, F., Matsui, T., Kitano, T., "PINO, The humanoid that walk," Proc. of The First IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, MIT, 2000.
6. ROBO-ONE committee, "Mechanical Session," ROBO-ONE Technical Conference, 2002.
7. Hiai, Kazuo, Hirose, Masato, Haikawa, Yuji, Takenaka, Toru, "The Development of Honda Humanoid Robot," Proceedings of the 1998 IEEE

International Conference on Robotics & Automation, 1998.

8. <http://www.atmel.com/>