

# 서보 전동기 제어용 임베디드 시스템의 타이밍 분석을 위한 인터럽트 측정 소프트웨어의 구현

김희진, 박상수

이화여자대학교 컴퓨터공학과

E-mail :heejin.kim@ewhain.net, sangsoo.park@ewha.ac.kr

## Software Implementation of Interrupt Profiler on a Servo-Motor Controller for Timing Analysis

Hee-Jin Kim, Sangsoo Park

Dept. of Computer Science & Engineering, Ewha Womans University

### 요 약

서보 전동기는 탑재된 소프트웨어의 명령에 따라 제어되는 전동기로 다양한 임베디드 응용 분야에서 사용되고 있다. 여러 분야에서 사용되고 있는 만큼 각 응용 분야마다 시간, 부하에 따라 서보 전동기에 요구되는 응답성은 다양하다. 응답성에 민감한 서보 전동기의 소프트웨어를 효율적으로 구현하기 위해서는 다양한 요구사항에 대한 분석이 필수적이다. 본 논문에서는 시간 응답성이 요구되는 서보 전동기의 실제 임베디드 시스템을 위한 인터럽트 측정 소프트웨어를 구현하고, 이에 대한 결과를 제시한다.

### 1. 서론

일반적으로 서보(Servo) 시스템이란 주어진 명령에 의해 물체의 위치, 방위, 자세 등을 제어함으로써 임의의 목표치에 도달하도록 구성된 임베디드 시스템을 의미한다[1]. 서보 전동기는 이러한 서보 시스템의 원리가 적용된 것으로, 소프트웨어의 명령에 따라 위치, 속도, 토크가 마이크로프로세서에 의해 제어되는 전동기이다. 서보 전동기에 탑재된 임베디드 시스템(소프트웨어와 마이크로프로세서를 포함하는 하드웨어)은 시스템 제어를 위해 전동기 내부에서 발생하는 이벤트를 주어진 시간 내에 목표치에 도달하도록 처리해야 한다.

이벤트 처리 방식에서 인터럽트는 빠른 응답성을 보장하는데 쓰인다. 서보 전동기는 프린터, 캠코더와 같은 소형 전자제품이나 공장의 생산 설비, 국방 장비 등 매우 다양한 분야의 임베디드 기기에서 사용되며, 각 기기 별로 또는 각 기기 내에서 시간 및 부하에 따라 요구되는 응답성의 차이는 다양하다. 이러한 점을 고려했을 때, 서보 전동기를 사용하는 임베디드 시스템을 위한 소프트웨어를 좀 더 효율적으로 작성하기 위해서는 요구되는 부분에 대한 분석이 필수적이다. 응답시간에 민감한 서보 전동기는 인터럽트에 대한 분석이 필요하며, 이러한 분석을 하기 위해서는 서보 전동기의 동작 중에 실제로 발생하는 인터럽트

의 정보를 수집하고 분석할 수 있는 도구가 필요하다.

본 논문에서는 서보 전동기의 인터럽트 정보를 수집, 분석하는 소프트웨어를 설계하고 서보 전동기 제어용 임베디드 시스템이 탑재된 의료 장비인 H-VAD [2]에 실제로 적용한 실험 결과를 기술한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 H-VAD 를 소개하고, 3 장에서는 인터럽트 측정 소프트웨어의 설계 및 구현 과정을 보인다. 4 장에서는 구현한 소프트웨어를 이용한 H-VAD 의 인터럽트 측정 실험 결과를 제시하고, 마지막 5 장에서 결론을 맺는다.

### 2. H-VAD 의 서보 전동기 제어용 임베디드 시스템의 구조

H-VAD(Hybrid Ventricular Assist Devices)는 한국인공 장기센터에서 개발한 휴대형 양심실 보조장치이다. 양심실 보조장치란 심장 기능이 떨어져서 충분한 혈압을 유지하지 못하는 심장병 환자를 위한 의료장비로써 서보 전동기에 의해 작동하는 혈액 펌프와 이를 제어하는 제어용 임베디드 시스템으로 구성된다. 그림 2 와 같이 H-VAD 내부에는 상하 왕복 운동을 하는 펌프가 있으며, 제어용 임베디드 시스템은 펌프가 움직이는 중앙에 있는 센서로 펌프가 정상적으로 작동하고 있는지 확인한다. 또한, 펌프 내의 서보 전동기가 펌프를 움직이면, 제어용 임베디드 시스템은 서보 전동기 내부에 장착되어 있는 센서 3 개를 통해 펌프의 움직이는 속도와 방향을 측정한다. 그 외에 사용자가 펌프의 작동 속도 (PR, Pressure Rate)와 작동

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세계수준의 연구중심대학육성사업(WCU)으로부터 지원받아 수행되었습니다 (R33-10085).

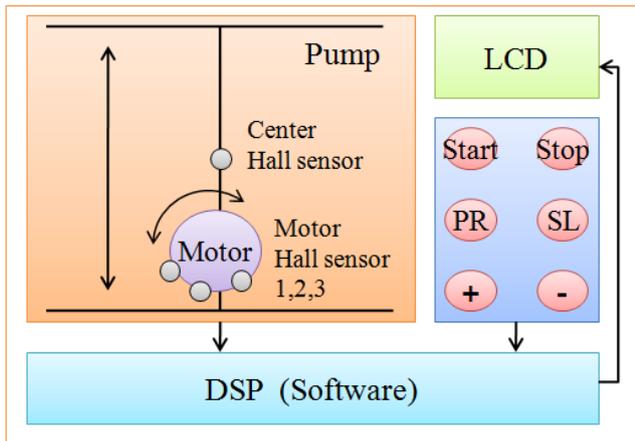
범위 (SL, Stroke Length)를 버튼으로 조작할 수 있으며, 이는 LCD 화면으로 확인할 수 있다.

H-VAD 에 탑재된 임베디드 시스템은 TI (Texas Instrument)사의 TMS320F2810 DSP [3]를 이용하여 전동기를 제어하고 있으며, 이에 내장된 소프트웨어는 이벤트 처리 방식으로 구현되어 있다.

TMS320F2810 DSP 는 고성능의 32 비트 프로세서로, CPU 의 동작속도는 150MHz 이고 표 1 과 같은 용량의 내부 메모리로 구성된다.



(그림 1) 송아지에 이식된 H-VAD [4]



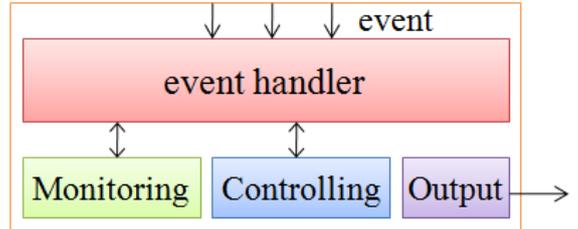
(그림 2) H-VAD 제어기 개략도

<표 1> TMS320F2810 DSP 의 메모리 구성

메모리	용량	용도	
ROM/ Flash	Flash	128k*16	프로그램 코드 저장
	OTP ROM	1k*16	부트 코드, 중요 시스템 상수 저장
SARAM (Single- Access RAM)	L0, L1	4k*16	데이터 저장
	M0, M1	1k*16	다른 계열 코드 호환
	H0	8k*16	코드 저장

DSP 에 내장된 제어 소프트웨어는 이벤트 처리 방식으로 인터럽트가 발생하면 그 인터럽트를 처리해주는 방식으로 구현되어 있다. H-VAD 에는 펌프의 센서와 전동기의 홀 센서에서 발생하는 인터럽트, 사용자가 버튼을 눌렀을 때 발생하는 인터럽트, 그리고 1ms 마다 발생하여 펌프와 전동기 관련 함수들을 호

출하는 타이머 인터럽트가 있다. 이 소프트웨어는 그림 3 과 같이 크게 전동기와 펌프가 제어대로 작동하고 있는 지 확인하는 모듈과 전동기와 펌프의 움직임에 변화가 있을 때 이를 제어하는 모듈, 그리고 LCD 화면에 HVAD 의 상태 정보를 출력하는 모듈로 구성되어 있다.



(그림 3) H-VAD 제어 소프트웨어의 구조 개략도

### 3. 인터럽트 측정 소프트웨어의 설계 및 구현

#### 3.1 소프트웨어의 설계

인터럽트의 타이밍 분석을 위해 인터럽트가 발생하면 인터럽트의 발생 시간 정보를 수집하는 함수와 이의 분석을 위해 수집된 여러 데이터를 시리얼 통신으로 PC 에 보내는 함수를 추가 하였다.

이를 위해서는 2 가지 제한 조건을 고려해야 한다. 첫째, 표 1 에서 볼 수 있는 것과 같이 수집된 데이터 정보를 저장하는 메모리의 용량에는 제한이 있다. 둘째, 수집된 데이터를 송신하는 시리얼 통신의 속도 또한 제한이 있다.

수집된 데이터가 저장되는 곳은 표 1 의 L0 또는 L1 메모리 영역으로 그 용량은 4k\*16 워드이다. 수집되는 각각의 데이터가 2 바이트인 것과 끊임없이 계속 빠른 속도로 발생하는 인터럽트로 인해 급증하는 그 데이터의 수를 감안하면 상당히 부족한 메모리 용량을 알 수 있다. 또한, 급증하는 데이터 수로 인하여 시리얼 통신 [5]을 이용해서 수집된 데이터를 송신하는 데도 속도 차이로 인한 제한이 있다. H-VAD 에서 수집된 데이터를 수신하고 처리할 호스트 PC 로 시리얼 통신을 통해 보낼 때의 속도는 최대 113200bps (비트/초)로 이론상으로 DSP 의 CPU 를 최대한 사용했을 때 1 초에 7200 개의 데이터를 보낼 수 있다. 이때 지속적인 인터럽트 발생으로 송신에만 CPU 시간의 전체를 사용할 수 없으므로 실제로는 훨씬 더 적은 데이터만을 보낼 수 있는 한계가 있다. 따라서, 인터럽트로 인해 발생하는 데이터의 속도와 시리얼 통신 속도의 차이로 병목 현상이 발생하며, 이는 시스템 전체의 효율을 저하시킬 수 있다.

이러한 제한 조건들로 인해 발생할 수 있는 문제점들을 극복하기 위하여 본 인터럽트 측정 소프트웨어에서는 시스템에 발생한 데이터를 수집하는 모드와 수집한 데이터를 PC 로 송신만 하는 모드를 두도록 설계하였다. 즉, 제한된 데이터 용량을 고려하여 최대 로 저장할 수 있는 데이터의 수를 지정하고, 수집된 데이터의 수가 최대한 저장할 수 있는 수와 같으면 데이터 수집 모드에서 송신모드로 바꾸어 데이터를 송신하도록 하였다. 그리고, 데이터 송신이 끝나면 다시 데이터 수집 모드로 바꾸어 데이터를 수집하도록

하였다. 데이터 송신 모드인 동안에는 데이터 수집이 이루어지지 않아 데이터 분실이 발생하나, H-VAD 의 서보 전동기의 경우에는 같은 부하와 같은 동작환경에서의 측정값의 변화가 크지 않으므로 이 때 분실되는 데이터는 여러 차례의 반복적인 측정을 통해 해당 데이터를 보정할 수 있다.

수집되는 데이터 정보에는 인터럽트 핸들러가 호출된 시간과 발생한 인터럽트의 번호, 그리고 이 정보가 인터럽트가 발생했을 때의 정보인지 아니면 실행되고 종료되었을 때의 정보인지를 구분해주는 변수 정보가 있다. 시간 값에는 DSP 에 내장되어 있는 타이머 카운터 중 하나인 GP (General Purpose) Timer2 의 카운터 값을 저장한다. 이 타이머는 97650Hz 로 정밀한 시간 값을 나타낼 수 있어, 빠른 속도로 발생하는 인터럽트의 시간 정보를 저장하는데 적합하다.

### 3.2 구현

구현 언어는 C 이며, 윈도우 XP 기반에서 Code Composer Studio 3.1 을 이용하여 개발하였다. 인터럽트 측정을 위해 부가적인 함수들을 구현하였으며, 그 중 핵심적인 역할을 하는 중요 함수는 <표 2>와 같다.

<표 2> 구현한 중요 함수의 요약

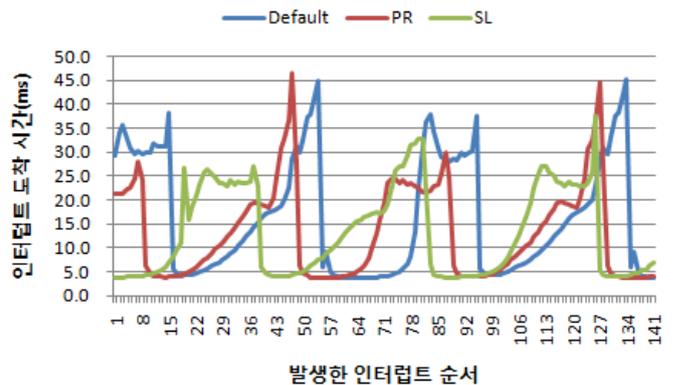
함수	중요 기능
data_Collect()	인터럽트 번호와 인터럽트가 발생했을 때의 정보인지 실행되고 종료될 때의 정보인지를 인자로 받아 각각의 값과 시간 정보를 정해진 변수에 저장한다.
data_Construction()	data_Collect() 함수에서 수집한 데이터들을 버퍼에 넣어 시리얼 통신으로 호스트 컴퓨터에 보낸다.

## 4. 실험 결과

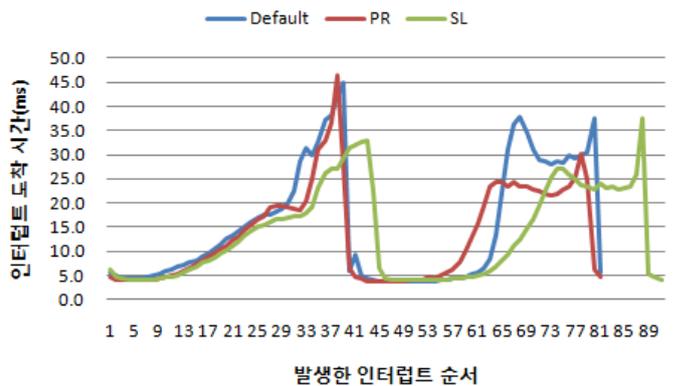
실험을 위해 H-VAD 에 설정되어 있는 작동 속도 (PR)와 작동 범위 (SL)의 기본값에서 실험을 진행하고, PR 과 SL 값을 각각 증가시킨 뒤 같은 실험을 반복하였다. 기기에 설정되어 있는 기본값은 PR 은 50, SL 은 60 이며, PR 과 SL 을 각각 10 씩 따로 증가시킨 실험을 추가로 진행하였다. 실험에서는 각각의 조건 하에 발생하는 인터럽트의 시간 관련 데이터를 수집하였으며, 수집한 인터럽트 데이터 중 가장 많이 발생하고 변화에 민감한 전동기 홀 센서의 인터럽트 데이터를 아래 그래프로 나타내었다. 각 데이터는 두 번째 데이터 수집 모드 이후에 측정된 값들을 사용했다. 그래프의 x 축은 몇 번째에 발생한 데이터인지 알려주는 인덱스 값이며, y 축은 동일한 인터럽트에서 이전에 발생한 시간과 현재 발생한 시간의 차를 알려주는 인터벌 타임 (단위: ms)값이다.

그림 4 는 한 데이터 수집 모드 기간 동안 수집된 각 실험 데이터의 그래프 중 일부를 합쳐놓은 것이며, 그림 5 는 그 중 한 주기를 따로 분리해 놓은 것이다.

그림 4 를 보면 각 실험의 데이터가 그 모양은 비슷하지만 조금씩 다른 것을 확인할 수 있는데, PR 을 기준으로 x 축의 8 에서 92 까지가 한 주기의 그래프라고 볼 수 있다. 실험 결과로 나오는 그래프들은 이 모양이 반복되는 것이며 그 높낮이나 길이 등은 SL, PR 값에 따라 달라진다. 기본값 실험일 때를 기준으로 PR 값 실험, SL 값 실험의 그래프는 왼쪽으로 치우쳐져 있는데, 이는 전동기의 움직임에 변화를 줄 때 펌프가 더 빨리 반응할 수 있음을 의미한다. PR 값과 SL 값을 높여준 것은 각각 작동 속도와 작동 범위를 높여준 것으로, 다른 종류의 값을 높인 것이지만, 그 효과는 같음을 그래프를 통해서 확인할 수 있다. 다만 차이가 있다면, 그림 5 에서 확인할 수 있듯이 SL 은 작동 범위에 변화를 준 것이기 때문에 PR 실험이나 기본값 실험에서 나온 그래프보다 길이가 길어지고 높이는 낮아짐을 확인할 수 있다. 그래프의 길이 (혹은 주기)가 길어진다는 의미는 혈압 펌프가 이동하는 길이가 길어짐을 의미하며 높이가 낮아진다는 의미는 혈압 펌프가 이동하는 시간이 줄어든다는 의미이다.



(그림 4) 조건 별 인터럽트 인터벌 타임



(그림 5) 한 주기의 조건 별 인터럽트 인터벌 타임

## 5. 결론

서보 전동기가 사용된 제어용 임베디드 시스템 중 민감한 시간 응답성이 요구되는 기기의 타이밍 분석을 위해 인터럽트 측정 소프트웨어를 설계 및 구현하고, 이를 H-VAD 라는 실제 의료 장비에 적용해보았다. 시스템의 시간 응답에 민감한 제어 기기의 소프트

웨어를 보다 효율적으로 구현하기 위해서는 기기에서 발생하는 인터럽트의 시간 정보 수집과 그에 따른 분석은 항상 필수적이다. 따라서, 본 논문의 연구는 인터럽트 기반으로 구현된 여러 임베디드 시스템의 효율적인 제어 소프트웨어를 구현하는 데 도움을 줄 것이라고 예상된다.

#### 참고문헌

- [1] 김민희, 정장식, “서보시스템 제어와 실습”, 보성각
- [2] 한국인공장기센터. Korea Artificial Organ Center.  
<http://www.kaoc.or.kr/>
- [3] TI, “TMS320F2810 32-Bit Digital Signal Controller with Flash Datasheet”
- [4] 국민일보, “인공 심장 송아지 90 일 생존...상용화 전기 마련”, 2007년 9월.
- [5] Electronic Industries Association, "EIA Standard RS-232-C Interface Between Data Terminal Equipment and Data Communication Equipment Employing Serial Data Interchange"