

## 항공기 시뮬레이터용 조종 반력 시스템 실시간 제어기 개발

박준호, 김태규, 박승규, 윤대성  
 창원대학교 전기공학과

### Development of the Real-time Controller for Control Loading System in Aircraft Simulator

Joon-Ho Park, Tae-Kue Kim, Seung-Gyu Park, Tae-Sung Yoon  
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University

**Abstract** - In this study, we developed the real-time controller for control loading system (CLS) of aircraft simulator. The CLS is given the forces as inputs: the exerted force by a pilot, which is determined according to the position of the control stick, and the calculated force by the host computer. And then CLS makes the pilot feel the back loading force by supplying the motor drive with the actuator signal. The developed real-time controller for CLS is organized into the five parts which are the position sensing part including an encoder, the A/D converter part for the analog load cell signal, the communication interface part to communicate with the host, the D/A converter for the actuator signal, and the CPU DSP2812 to carry out a control algorithm. We constructed the test control loading system and carried out the experiment with the developed real-time controller. The experimental results showed that the real-time controller generates the back loading forces similar to the desired back loading force graph.

#### 1. 서 론

현재 민수부문과 군수부문에 다수의 항공기 시뮬레이터가 설치 운영되고 있다. 민수부문의 시뮬레이터는 민간 항공기 특성상 전량 수입되고, 군수부문의 항공기는 다수의 수입 시뮬레이터와 최근 몇 년간 국산 시뮬레이터가 개발 운영되고 있다. 그러나 이들 국산 시뮬레이터 제작에서도 조종반력 시스템(control loading system : CLS)은 전량 수입되어 장착되고 있다. 그러므로 이러한 시뮬레이터 수요에 대응할 수 있는 조종 반력 시스템의 개발이 요구된다. 조종반력 시스템은 크게 조종간(control stick)을 제어하는 액추에이터(actuator) 및 액추에이터의 위치와 토크 신호를 센싱할 수 있는 엔코더 및 로드셀 등으로 구성된 부분과 이 신호에 대한 연산처리 및 액추에이터 구동에 필요한 제어 신호를 발생시키는 상위 제어부분으로 나눌 수 있다. 조종반력 시스템에서 조종간의 움직임에 따른 반력을 생성시키는 액추에이터는 조종반력 시스템의 중요한 구성요소의 하나로 빠른 응답특성과 정밀한 제어가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 다양한 신호처리 및 고속연산 능력을 가진 DSP2812 모듈을 이용하여 항공기 시뮬레이터용 조종 반력시스템의 액추에이터를 제어하는 제어기를 개발하고자 한다.

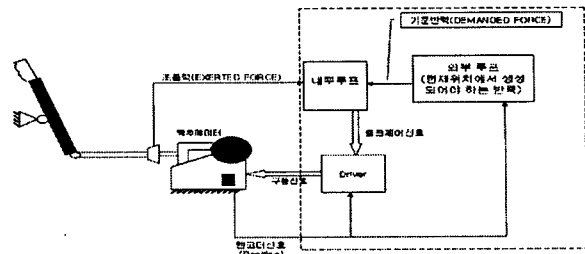
#### 2. 본 론

##### 2.1 조종 반력 시스템의 정의

항공기에서 비행 조종 계통은 주 조종 계통과 부 조종 계통으로 나눌 수 있으며 주 조종 계통은 엘리베이터(elevator), 에일러론(aileron)과 러더(rudder) 등을 구동하는 조종간과 페달을 말한다. 부 조종 계통은 추력레버(thrust force Lever), 앞바퀴의 조향 장치, 플랩레버(flap lever), 속도 브레이크 등을 포함한다. 일반적인 항공기의 비행 제어는 엘리베이터와 에일러론 및 러더가 담당하고 있으며 조종사는 실제 비행시에 조종간과 페달을 통해서 비행 상황에 따른 조종감을 받는다. 조종 반력 시스템은 항공기 시뮬레이터에서 조종사가 훈련하는 중에 실비행기 조종시의 조종사가 느끼는 것과 동일하도록 전기, 전자, 유압 등이 이용된 인위적인 장치를 통하여 항공기 제어 느낌이 역으로 제공되도록 해주는 장치이다.[1]

##### 2.2 조종 반력 시스템의 구성

조종 반력 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 크게 보면 외부루프, 내부루프, 그리고 액추에이터 제어기, 액추에이터 이렇게 4가지로 구성된다. 외부루프는 조종력 제어 장치의 일부로서 조종사가 조종간변화에 따라 느껴야 할 힘의 크기를 결정한다. 조종 변위(control position)를 입력받아 현재 변위에서 요구되는 힘(기준 반력)을 계산하여 데이터를 내부루프로 전달한다. 이 힘이 특정 조종 변위에서 조종사가 느끼게 되는 힘이다. 기준 반력은 비록 비행 조종 변위가 빠르게 변경되지만 정확하게 연산 되어져야 한다. 내부루프는

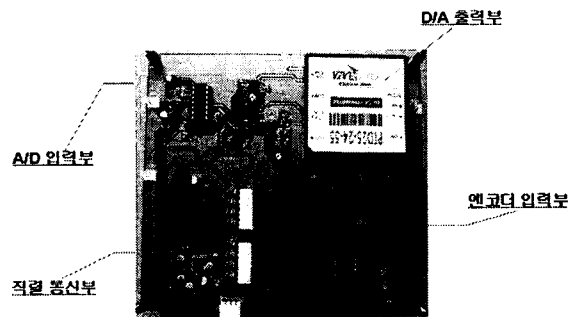


〈그림 1〉 조종 반력 시스템

모터의 구동신호를 직접 발생시키는 조종력 제어 장치의 일부이다. 내부루프는 초기 입력 값으로 힘을 사용한다. 조종력 제어장치는 조종사가 가하는 힘(조종력)을 측정하고, 기준반력과 비교하여 조종력이 기준반력을 따라가도록 토크신호를 액추에이터 제어기에 인가한다. 그러므로 조종력이 기준반력을 계속하여 따라가게 되고 조종사는 조종 반력을 느끼게 된다.

##### 2.3 조종반력시스템 제어기 구성

제어기 개발은 하드웨어 부분과 소프트웨어 부분으로 나눌 수 있다. 하드웨어 부분은 위치센서 부(엔코더 입력 부), 토크센서 부, A/D변환 부, 통신 부, D/A출력부, CPU와 기타 하드웨어간의 인터페이스부분으로 나뉜다. 위치 센서 부는 액추에이터 외부에 설치된 엔코더를 통해 조종간의 위치를 파악한다. 토크센서 부는 로드셀을 통해 조종사가 조종간에 인가한 힘을 측정하며, 이 신호는 A/D변환 부를 통해 입력된다. A/D변환 부는 로드셀 신호를 DSP의 A/D입력단 범위에 맞도록 조정하며, 로드셀 신호의 노이즈제거를 위해 Level Shift회로 및 Analog LPF(Low Pass Filter)가 구성되어 있다. 그리고 통신부는 외부 기상 조건 및 항공기체 상태에 대한 정보를 호스트로부터 직렬통신을 통해 내부루프의 반력생성 연산알고리즘에 데이터를 전송한다. 위치신호, 토크신호 및 외부 조건에 대한 데이터를 받아 생성되어야 할 반력을 계산하여 드라이버로 신호를 전송하기 위한 D/A출력부로 구성되며 제어기 전반적인 구성은 그림 2와 같다.

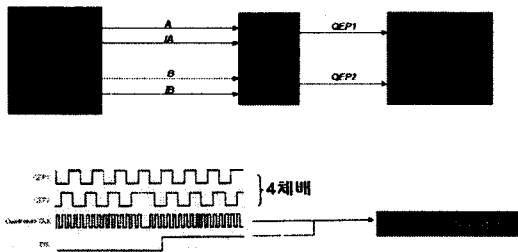


〈그림 2〉 제어기 구성

소프트웨어 부분은 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) 서보 제어 시뮬레이션, DSP보드 초기화 및 활성화 코드, 상대치 엔코더를 통한 조종간의 중심점초기화, 그리고 DSP2812를 이용한 액추에이터 제어 알고리즘으로 구성된다.

##### 2.3.1 제어 시스템

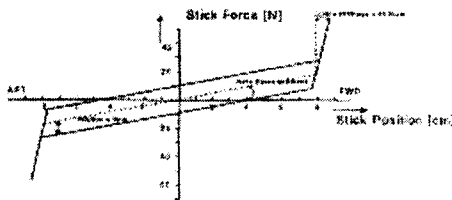
위치센서 부는 그림 3과 같이 동작되며, 엔코더를 통해 조종간의 위치 신호를 전송받는다. 엔코더는 라인리시버를 통해 A, B 상의 신호를 DSP의 QEP회로로 전송한다. QEP회로에서는 QEP1 과 QEP2 신호의 위상차를 이용하여 클럭 신호를 4배배하여 만들어진 펄스신호를 DSP의 Timer2CNT 레지스터에 저장하게 된다.[4]



〈그림 3〉 엔코더 신호처리

A/D변환부의 DSP 입력단 범위는 0~3.3V이며, 아날로그 필터와 Level Shift 회로를 통해 DSP A/D 입력단에 연결된다. 필터는 Op 앰프를 사용하여 능동저역필터를 구성하였다.

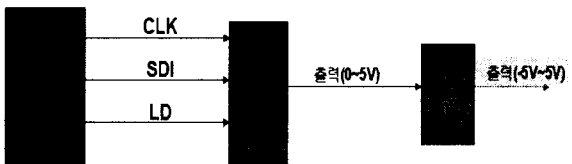
호스트로부터 외부 환경 조건에 대한 데이터를 직렬통신을 통해 전송받게 되는 통신부는 115200bps의 통신 속도로 데이터 통신을 한다. 시물레이션에 사용되어질 외부 환경에 대한 정보를 직렬통신을 통해 전송받고, 엔코더에 의한 위치신호와 로드 셀로부터의 토크신호를 모두 받아, DSP에서 제어 알고리즘을 통해 생성되어야 할 반력을 계산해낸다. 기준이 되는 반력 생성에 대한 그래프는 액추에이터의 조종간의 위치와 관련되어 있으며, 그래프는 그림 4와 같다.



〈그림 4〉 기준 반력 생성 그래프

외부 환경에 대한 정보와 로드셀로부터의 토크신호에 대한 정보를 종합하여 기준 반력 곡선으로부터 생성되어야할 반력을 DSP의 내부 알고리즘을 통해 생성한다. DSP는 최고 150MHz(6.67ns)로 구동되므로 아주 빠르게 연산을 수행하게 된다. 위치, 토크, 외부에 대한 정보를 가지고 생성되어야 할 반력을 빠르게 계산함으로써 실시간 제어를 구현하게 된다.

모든 정보를 통해 DSP의 제어 알고리즘에 의해 계산된 토크 생성 신호는 D/A변환을 통해 모터 드라이버에 아날로그 신호로 전송된다. D/A 컨버터로는 Analog Device 社의 DAC8512 칩이 사용되었으며, DSP와 D/A컨버터 간의 통신은 SPI통신을 사용하였다. D/A출력부 동작과정은 그림 5와 같다. SPI(Serial Peripheral Interface)통신은 Motorola 사에서 제안한 동기식 시리얼 통신 방식이며, 3개의 선만으로 다수의 주변 장치들과의 데이터 통신이 가능하며, Master/Slave 방식으로 송/수신이 동시에 가능한 특징을 가지고 있다.

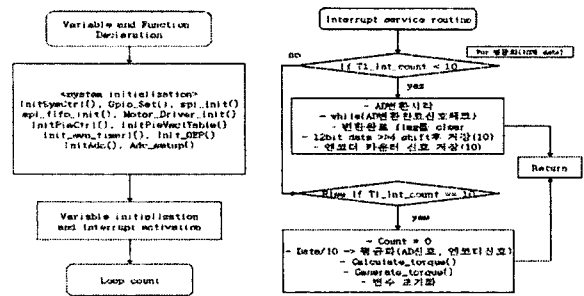


〈그림 5〉 D/A 출력부 동작 과정

### 2.3.2 제어 알고리즘

DSP 제어를 통하여 조종 반력 시스템을 제어하기 위해서 가장 우선되어야 할 부분은 시스템의 초기화이다. DSP 보드를 사용목적에 맞추어 초기화하고, 시스템을 구동하기 전에 상대치 엔코더의 특성을 고려하여 중심점을 잡는다. 이를 위해 조종간의 max-min를 계산하여 중심점 값을 계산해내고, 시스템 구동 전에 조종간을 정중앙에 위치하도록 동작시킨다. 이후 시스템 구동은 메인 루프를 통해 타이머 인터럽트를 통해 일정시간 간격으로 생성해야할 반력을 계산을 통해 생성하게 된다. 조종 반력 시스템의 가장 중요한 부분은 조종사가 조종간에 가하는 힘에 반하는 반력을 생성하여, 조종사가 그 반력을 자연스럽게 느낄 수 있도록 하는 것이다. 따라서 DSP의 빠른 연산처리 속도를 이용하여 최소 1KHz(1ms) 이상으로 조종 반력 시스템을 구현함으로써 자연스러운 반력을 느끼도록 한다. 아래 그림 6은 시스템 초기화 및 인터럽트 제어 알고리즘을 나타낸다.

인터럽트 제어 알고리즘에서 최대한 균일한 인터럽트 샘플링 주파수를 얻고, 또한 제어에 필요한 시간을 확보하고, 구조적인 독립성을 얻기 위하여 독립적인 DSP를 사용하였다. 만약 짧은 순간이라도 균일한 인터럽트 샘플링 주파수가 보장되지 못하면, controllability가 깨져버리고 여러가 큰 폭으로 증가하게 된다.

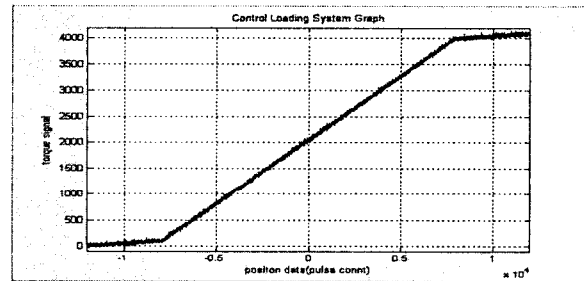


〈그림 6〉 시스템 초기화 및 인터럽트 알고리즘

또한, CPU를 이용하여 제어를 하는 경우 인터럽트 처리에서 발생하는 지터(jitter) 때문에 고성능의 제어를 기대하기 힘들다. 지터(jitter)란 인터럽트 신호를 발생하는 신호원과 실제 인터럽트가 수행되는 시간의 차이가 변하는 것을 말한다.[2] 속도 제어 루프의 경우 인터럽트에 지터가 발생하면, 진동을 발생시키고 성능도 현저하게 떨어지게 된다. 고성능의 시스템은 수 kHz 이상의 제어 주파수를 사용하는 경우도 있으므로 이러한 경우 지터의 크기는 더욱 더 중요하게 된다. 지터의 발생 원인은 주로 CPU가 제어루틴만 처리하지 않고, 여러 가지 task를 수행하기 때문에 생기는 현상이므로 가능한 범위 내에서 제어루틴의 우선순위를 가장 높게 잡는다. 지터를 최소화 하기위해 지터 방지 알고리즘을 사용하였다.

### 2.4 실험 결과

제어의 테스트를 위하여 조종 반력시스템을 구성하였으며, 액추에이터로는 삼성 CSMH-1.5kw PMSM, 서보드라이버는 삼성 CSDP-15bk1를 사용하였다. 개발된 제어를 이용한 실제 실험을 통해 위치비피데이터와 토크비피데이터의 출력력을 그래프로 나타낸 결과, 그림 7과 같이 생성하고자 하였던 기준 반력 생성 그래프와 거의 유사하게 위치에 대한 반력을 생성하는 것을 볼 수 있었다.



〈그림 7〉 생성된 반력 그래프

### 3. 결 론

항공기 시물레이터용 조종반력시스템의 액추에이터 제어를 빠른 연산과 실시간 제어가 가능한 DSP2812 모듈을 이용하여 개발하였다. 모터 드라이버와의 인터페이스 회로, 모터드라이버의 토크제어를 위한 D/A모듈, 모터의 로드셀 신호를 입력 받기 위한 signal conditioning과 A/D 변환모듈 및 호스트로부터의 외부 환경 정보 데이터 전송이 가능한 통신부 회로를 설계하여 DSP2812 모듈을 탑재한 단일 제어기 보드를 자체 제작하였다.

또한, 제어를 통하여 조종 반력 시스템의 궁극적인 목표인 조종사가 조종간을 조종할 때 느껴야할 반력을 빠른 속도(최소1ms이상)의 연산을 통해 생성하는 제어 알고리즘을 개발함으로써 조종 반력 시스템을 구현하였다. 내부 알고리즘으로는 Force Feedback Control, Real-time Control, Control Algorithm 등이 구현되었으며, 위치 신호, 토크 신호, 외부 환경 정보를 받아 연산을 통해 생성되어야 할 반력을 구하는 전체적인 과정을 개발하였다.

본 연구는 산업자원부 지역산업진흥사업 지원으로 수행되었음.

### [참고 문헌]

- [1] 방정호, "항공기 시물레이터 조종력 제어시스템의 건설 및 제어기 설계", 대우중공업 항공지상 연구소, 1998.
- [2] 김정환, "DSP로 리니어 모터 제어하기". 동일출판사, P130~ P150, 2003.
- [3] 이은희, "AC서보모터와 마이컴", 동일 출판사, 2000.
- [4] TMS320x2812 DSP User Manual, TEXAS INSTRUMENTS, 2003.
- [5] 김도윤, "예제로 배우는 제어용 DSP", 성안당, 2005