

논문 2019-14-37

다중 팔렛 시스템에 사용되는 서보 모터의 제어에 관한 연구

(A Study on Servo Motor Control in Multi Pallet System)

오 현 우*
(Hyun-Woo Oh)

Abstract : Multi-axis servo systems are widely used in various fields such as industrial systems for improving production efficiency, robotics and complex systems where many mechanical devices and sensor systems are connected. Such a servo system requires that the servo control technique to realize the synchronization of the drive shaft in the steady state and transient conditions and to control so as to follow the target track in order to improve product precision and production efficiency. In addition, embedded type hardware is required for smooth control of the entire multi-axis system. Therefore, this paper uses hardware based on FPGA which is widely used in digital signal processing field and various control system because hardware design change is easy and parallel processing is possible. In addition, Labview based servo motor control program was studied that can control the servo motor by ensuring the performance and flexibility of the FPGA and follow the target trajectory according to various speed processing and accurate timing synchronization.

Keywords : Labview, FPGA motor, Servo control, Synchronization

1. 서 론

자동화 생산 장비에 사용되는 서보 시스템은 공작물을 가공하기 위해서 가공물을 올려놓고 평면 운동을 행하는 x축, y축 모터, 공구의 절삭 위치를 조절하는 z축 모터, 공구를 고속으로 회전시키는 스피들모터, ATC (Automatic Tool Changer)모터로 크게 나눌 수 있다 [1]. 서보 시스템에 사용되는 모터는 전기에너지를 기계에너지로 바꾸는 기계를 말하며, 산업용 시스템, 가전제품, 로봇틱스 등 다양한 영역에 걸쳐 많이 사용되고 있다. 이러한 모터를 정밀하게 구동 및 제어하기 위해서는 별도의 드라이브 장치가 필요하며 드라이버 장치 구현을 위한 핵심 기술이 서보제어 기술이다 [2, 3]. 서보 제어 기술은

제품 정밀도 혹은 생산효율 향상을 위해 구동축간의 동기화를 실현하고 동기 상태를 계속 유지시키면서 목표 궤도에 추종하도록 제어할 필요가 있다 [4, 5]. 또한 시스템 전체를 제어하며 컨트롤러의 접속이 용이하고 원활한 제어를 위해서는 임베디드 타입의 하드웨어가 필요하다. 임베디드 타입의 하드웨어에 사용되는 FPGA (Field Programmable Gate Array)는 종래의 DSP (Digital Signal Processor)에 비해 하드웨어 설계 변경이 쉽고 병렬연산 처리가 가능하여 디지털 신호처리 분야를 비롯하여 각종 제어 시스템의 실시간 제어분야에 널리 사용되고 있다 [6]. 특히 서보 시스템은 생산자동화를 실현하는데 있어서 핵심설비인 머시닝센터에서 필요에 따라 공구를 교환하고 기계 가공이 자동적으로 이루어지도록 제어하는데 이용되고 있다. 기존의 머시닝 센터는 가공 대상물이 장착되는 팔렛의 회전 및 이동에 의한 다축 시스템을 이용하고 있으며, 주로 PLC (Programmable Logic controller)를 이용한 시퀀스 제어를 수행하고 있다. PLC 제어는 간단한 프로그램 방식으로 시퀀스 회로를 손쉽게 설계 및 수정 할 수 있기 때문에 취급의 용이성, 경제성 등의 장

*Corresponding Author (osj0805@naver.com)

Received: July 15, 2019, Revised: July 30, 2019, Accepted: Aug. 5, 2019.

H.W. Oh: SPS Corporation.

※ 본 논문은 중소기업융복합기술개발사업 연구비에서 지원하여 연구하였음.

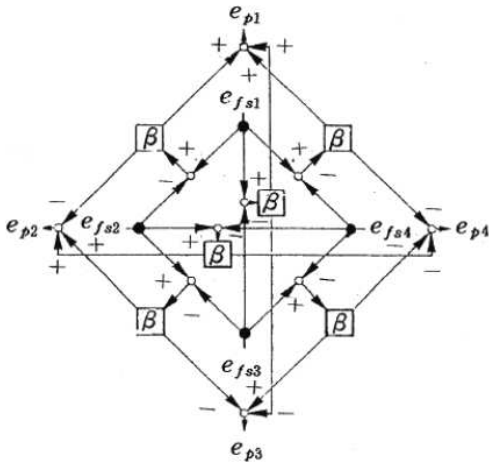


그림 1. 동기화 제어기
Fig. 1 Synchronizing controller

점이 있으나 PLC 제어에서 프로그램 전개는 입-출력 정보 및 내부 연결 신호를 이어주는 불리언 로직 (Boolean Logic)으로 표현되기 때문에 직관적 이해가 어렵고, 모델링 결과를 PLC 언어로 변환하는 과정에서 정보의 손실 및 오류가 발생하기 쉬운 단점이 있다 [7, 8]. 그러나 랩뷰 프로그램을 이용할 경우 직관적 이해가 쉽고, 코드 생성 및 변환이 용이하여 고유 드라이버를 개발할 수 있으며, 모션 제어를 수행할 경우 타겟 위치 및 모션 제어 파일을 지정하여 모터의 경로 및 방향/펄스 출력과 같은 기능의 수행이 용이하여 리얼타임 시스템에서 높은 신뢰성 및 안정성을 구현할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 랩뷰를 이용하여 FPGA 모듈과 타겟팅이 가능하고 FPGA의 성능과 유연성을 확보하여 서보모터를 제어하며, 여러 속도의 처리, 정확한 타이밍 및 동기화등 목표 궤도에 추종하도록 제어가 가능한 서보 모터 제어 방법을 연구하였다.

II. 관련연구

1. 다축 구동 속도 동기 제어 방법

다축 구동 속도 동기 제어 방법 [5]은 각 축으로 구성된 액추에이터와 부하계로 구성되며, 각각 파라미터가 다른 모델로 근사화된다. 각 축의 응답 특성을 개선하기 위해 각 축의 추종 오차로부터 동기상태를 판단하고 동기화 오차를 출력하는 제어기가 별도로 존재한다. 각 축을 동기화시키기 위해서

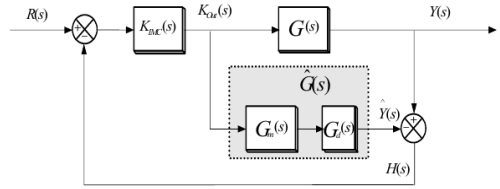


그림 2. IMC 제어기 구조
Fig. 2 Structure of IMC controller

는 동기화 오차를 출력하는 제어기 내에서 동기화 파라미터의 계인에 의존하게 되고 계인이 0이면 각 축은 독립된 다축 시스템이 된다.

그림 1에서 동기화 제어기는 4축 서보 모터에 대한 동기화 제어를 나타내었으며, 각 축의 추종 오차를 비교하여 각 축의 추종오차와의 차이를 구한 후 동기화 계인을 곱하여 동기 제어기로 피드백된다. 이 방법을 이용하여 모든 축 사이의 동기화를 실현하도록 제어기가 구성된다.

그러나 이와 같은 동기화 방법은 각 축에 대한 서보 모터의 동특성이 서로 다를 경우 모터 계인파시정수를 다르게 설정해야하며, 과도 상태에서 토크의 변화에 따라 동기화 특성이 달라질 수 있는 단점이 있다. 또한 각 축의 서보모터에 대한 속도, 위치, 토크, 모터 동특성, 마찰계수, 볼 스크류 피치 등에 따라 복합적으로 작용하여 설계 파라미터의 값들로 인하여 정상상태에서 적분 누적으로 인하여 위치 오차를 발생하게 된다.

2. IMC 구조의 PID 제어방법

그림 2에서 IMC 구조를 갖는 PID 제어 방법 [9]은 일반적인 PID 제어기에 내부모델 ($\hat{G}(s)$)이 추가된 형태이다.

내부 모델 제어기 $K_{IMC}(s)$ 의 입력은 내부 모델 출력 $\hat{Y}(s)$ 과 실제 출력 $Y(s)$ 의 차이 $H(s)$ 와 설정치인 $R(s)$ 의 차가 사용된다. 내부 모델 제어기 $K_{IMC}(s)$ 는 식 1과 같고, 전체 폐루프 시스템의 저역 통과 필터는 식 2와 같으며, 실제 제어기의 전달함수는 식 3과 같다.

$$K_{IMC}(s) = \frac{F(s)}{G_m(s)}, \tag{1}$$

$$F(s) = \frac{1}{(\tau_f s + 1)^r} \tag{2}$$

식 2에서 τ_f 는 페루프의 시상수이며, r 은 차수이다.

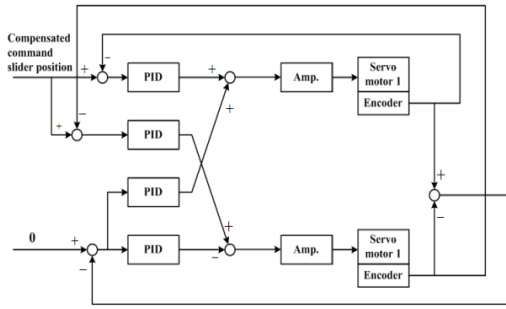


그림 3. 연동 제어 루프

Fig. 3 Cross-coupling control loop

$$K(s) = K_p(s) + \frac{K_I(s)}{s} + K_D s$$

$$= \frac{K_{IMC}(s)}{1 - K_{IMC}(s)G(s)} = \frac{F(s)}{G_m(s) - F(s)G_d(s)} \quad (3)$$

식 1에서 PID 제어기의 파라미터 값은 내부 모델 값과 1차 저역통과 필터의 파라미터 τ_f 의 값으로 구성되었다. 기존의 PID 제어기는 외부로부터 외란 및 센서 변화 등의 영향에서 만족할 만한 제어 성능을 얻을 수 없으나 IMC 구조를 갖는 PID 제어기는 폐루프 제어 시스템의 내부에 동정된 모델을 포함하여 실제 플랜트의 출력과 동정된 모델의 출력의 차를 이용하는 구조로 되어 있다. IMC 구조를 갖는 PID 제어 방법은 기존의 PID 제어기와 비교하여 강인성 및 안정성에 대한 성능의 향상은 가져왔으나 다음과 같은 문제점을 갖고 있다.

실제 모델에 대하여 정확한 내부 모델과 저역통과 필터의 τ_f 값을 결정하는 것은 어려우며, PID 제어기의 설계에 있어서 내부 모델에 대한 2차의 지연시간을 갖는 내부 공정에 대한 추가 알고리즘이 필요한 것이다.

3. 서보모터 연동 제어 방법

서보 모터의 연동 제어 방법 [10]은 서보 시스템의 동기화 오차를 최소화하기 위하여 위치와 속도 정보를 서로 다른 서보 시스템으로 전달하여 모터간의 동기화 오차를 감소시키게 되며, 구조는 그림 3과 같다.

서보 모터의 연동 제어 방법은 마스터와 슬레이브 시스템으로 구분하여 위치 편차를 저감시키기 위한 방법이며, 기존의 단일 제어 방법보다 빠른 수렴성을 갖게 되어 오차를 줄여주게 된다. 그러나 이러한 방법은 제어 응답에 외란이 적용되기 까지 일

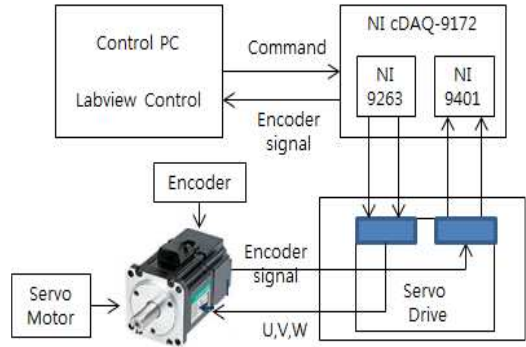


그림 4. 피드백 제어루프 배선도

Fig. 4 Feedback control loop wiring diagram

정 시간이 소요되고, 마스터와 슬레이브 시스템에 외란이 적용된 시점부터 동기화 오차가 크게 발생할 수 있으며, 이에 따라 마스터와 슬레이브 시스템간의 제어응답에 차이점이 발생할 수 있는 단점이 존재한다.

III. 제어 시스템 설계

1. AC 서보 모터의 제어 방법

AC 서보 모터는 속도 제어 범위가 넓고 토크 특성이 고속 운전시와 저속 운전시에 일정하며 최대토크가 크고, 모터 관성 모멘트가 작기 때문에 급속한 가속속이 생기는 특징을 갖고 있기 때문에 제어하기 위해서는 제어 구조상 별도의 구동 드라이버가 필요하다 [11]. 따라서 AC 서보 모터의 위치와 속도에 대한 정보를 습득하기 위해 NI사의 DAQ (Data Acquisition) 플랫폼을 이용하여 아날로그 및 디지털 I/O 신호를 처리하였으며, 설계한 AC 서보 모터 제어를 위한 테스트 블록도는 그림 4와 같다.

2. 제어시스템 구조 설계

제어시스템에서 FPGA는 하드웨어 병렬성을 활용하여 순차적인 실행의 패러다임을 분리하고 클럭 주기당 더 많은 작업을 수행할 수 있기 때문에 종래의 DSP에 비해 더 많은 연산을 처리할 수 있다. 또한 기존의 프로세서 기반의 시스템은 여러 프로세스간 태스크 스케줄링 및 리소스를 공유하므로 시간 결정적 태스크의 위험상태의 문제점을 갖고 있으나, FPGA는 병렬 실행 및 모든 태스크에 전용인 결정성 있는 하드웨어로 설계하여 제어하기 때문에 안정성 문제를 최소로 줄일 수 있다. 이에 따라 설계한 FPGA기반 서보 모터 제어 시스템의 개념도는 그림 5와 같다.

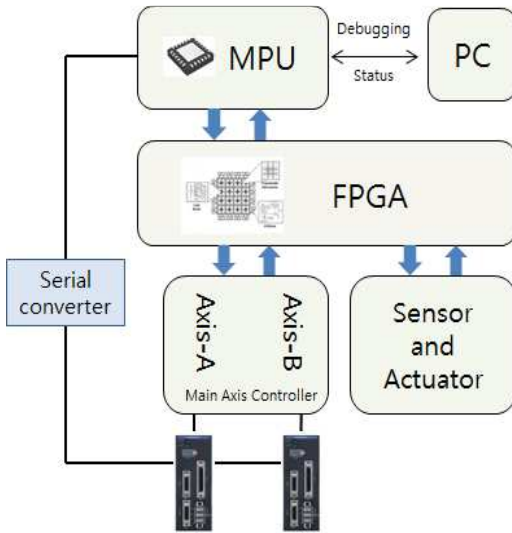


그림 5. FPGA기반 서보 제어 시스템 개념도
 Fig. 5 Block diagram of FPGA-based servo control system

표 1. AC 서보 모터의 주요 성능
 Table 1. Main performance of AC servo motor

Item	Linear Axis	Rotary Axis
power (kw)	0.4	2.0
cont.torque (N·m)	1.3	7.16
max.torque (N·m)	3.8	21.6
cont.speed (rpm)	3,000	2,000
max.speed (rpm)	6,000	3,000
cont.current (A)	2.7	9.9
max.current (A)	8.1	30

FPGA기반 서보 제어 시스템의 제어를 위한 하드웨어 시스템에서 MPU는 Atmega128을 사용하였으며, 제어를 위한 서보시스템의 주요 사양은 표 1과 같다.

모터의 회전체에 따른 직선축 부하 토크는 식 4와 같이 계산한다.

$$T = \frac{9.81}{2\pi} P(uW)S [Nm] \quad (4)$$

T: 부하토크, P: 볼 스크류 피치 (m), W: 대상물의 질량, u: 마찰계수, S: 안전율

본 논문에서 사용한 직선축의 최대 부하 허용량은 2,400kg, 볼 스크류 피치는 0.01m, 슬라이드 가이드면의 마찰계수는 0.05, 안전율은 2로 계산하였

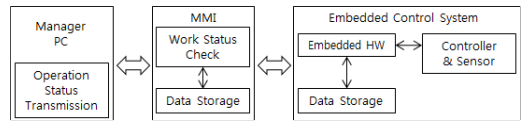


그림 6. 소프트웨어 구조 설계
 Fig. 6 Design of software structure

으며, 이에 따라 계산된 직선축의 최대 허용 토크는 3.75 [N·m]이다. 또한 모터의 회전체에 따른 회전축의 부하 토크 (T)에 대한 계산 수식은 식 5와 같다.

$$GD^2 = W(\frac{1}{2}D^2 + 4d^2), \quad (5)$$

$$T = \frac{GD^2}{375} \frac{R}{t} 9.81 [Nm]$$

GD2: fly wheel효과, W: 대상물의 질량, D: 회전체의 지름, d: 관성체의 지름, R: rpm, t: sec

회전축은 부하무게에 따른 관성 질량을 고려해야 하며, 회전대상이 되는 회전체와 회전의 중심이 되는 관성체를 기준으로 산정하였다. 회전축의 최대 부하 허용량은 3,000kg, 회전체의 지름은 0.7m, 관성체의 지름은 0.14m, 감속비에 따른 관성체의 분당회전수는 75rpm, 회전체와 관성체의 기어비는 4:1, 안전율은 2로 계산하였으며, 이에 따라 계산된 회전축의 최대 허용 토크는 21.17 [N·m]이다.

기존의 산업현장에서는 안정성을 이유로 PLC를 사용하여 제어를 수행하였다. 그러나 PLC의 래더 다이어그램 (ladder diagram)방식의 프로그램이 가진 복잡성과 프로그램의 거대화에 대한 문제점이 있으며, 머시닝 센터의 가공 시 가공물의 종류나 조건이 달라질 수 있기 때문에 환경에 적절한 대응을 위하여 안정성이 높고, 변경사항에 대한 적용이 용이하며, 프로그램의 수정 및 보완이 편리한 랩뷰 기반의 FPGA 임베디드 디바이스를 적용하였다.

3. AC 서보 모터 제어를 위한 프로그램 설계

제어 시스템의 소프트웨어 구조 설계는 그림 6과 같으며, 어플리케이션 개발 단계를 통해 시스템 요구사항을 분석한 후 요구사항의 상황에 맞는 아키텍처를 디자인하였다.

그림 7에서 서보모터 제어 시스템 구성 시 제어프로그램은 FPGA파트와 시스템 동작 시 Real-Time 기반으로 동작시키기 위한 부분, 실행정보 및 데이터 취득을 위한 통신부분으로 구분된다.

프로그램 내에서 루프 실행의 피드백 및 동적으로 변환하는 타이밍 특성에 맞추어 시간을 추적하기 위해

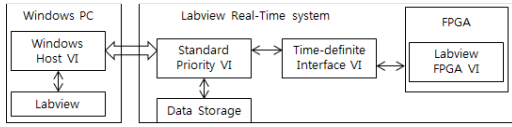


그림 7. 제어 프로그램 시스템 구성도
Fig. 7 Configuration diagram of control program system

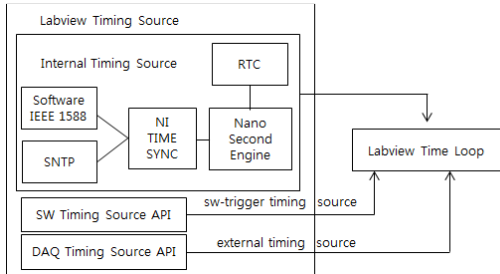


그림 8. 타이밍 동기화 메커니즘
Fig. 8 Mechanism of timing synchronization

나노초 엔진 타이밍 동기화 방법을 이용하여 그림 8에서의 타이밍 동기화 메커니즘의 타임 루프 내부 구조에서 주기, 우선순위, 오프셋의 타이밍 속성에 따라 루프 실행의 피드백, 정확한 타이밍 동기화가 가능하도록 설계하였다.

모션 컨트롤 방법은 어플리케이션 소프트웨어를 이용하여 타겟 위치 및 모션 컨트롤 프로파일을 먼저 지정하고, 모터의 경로생성 및 서보 모터를 위한 신호출력과 방향 그리고 펄스를 출력한다. 증폭기는 컨트롤러에서 명령을 받고 모터 구동에 필요한 전류를 생성하여 모터를 구동하기 위해 필요한 토크를 생성하게 된다. 모터의 위치 관련 피드백 디바이스는 모터의 위치를 감지하고 그 결과를 컨트롤러에 전송하여 모션 컨트롤러 폐루프를 구성하여 피드백 받아 제어하게 된다. 서보모터 제어를 위한 피드백 제어는 센서에서 검출한 측정치를 제어기로 인가하고 제어기 내부에 설정된 기준 입력과 비교한 후, 그 차이에 해당하는 제어오차에 해당하는 게인을 곱한 만큼 제어 입력을 구동기로 출력하며, 구동기 출력 값을 센서에서 다시 측정하여 제어기에서 기준값과 다시 비교를 수행한다. 이에 따라 설계한 피드백 제어 시스템은 그림 9와 같다. 그림 9에서 R은 기준 명령, e는 제어 오차, U는 게인과 오차의 곱으로 출력되는 제어 명령, W는 외란, Sn는 센서 노이즈, Y는 출력을 각각 나타낸다.

그림 9에서의 폐 루프 피드백 제어 시스템에서 설계한 제어기는 구조가 간단하고, 제어성능이 우수하여 파

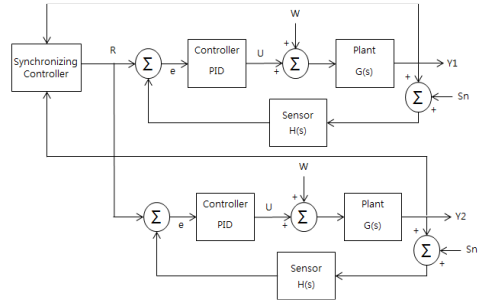


그림 9. 폐 루프 피드백 제어 시스템 블록도
Fig. 9 Block diagram of closed loop feedback control system

라미터 조정을 비교적 쉽게 할 수 있는 PID제어기를 이용하였다 [10]. 피드백 제어 시스템에서 오차는 기준 입력 값과 출력 값 사이의 차이로 입력되고, 입력된 오차 신호의 계산은 식 6과 같다.

$$u(t) = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (6)$$

모터 축의 회전 각도에 대한 현재의 각도 산출은 비례 제어기를 이용하였다. 제어 입력은 기준 입력 값과 엔코더에서 검출된 현재 각도의 차이에 해당하는 위치 오차 ($e_p = r - \theta$)에 K_p 를 곱하여 산출하게 되며, 비례 제어에 따른 제어 입력의 계산은 식 7과 같다.

$$u_p(i) = K_p e_p(i) = K_p (r(i) - \theta(i)) \quad (7)$$

r: 기준 입력, i:현재시간 (루프의 반복 횟수)

미분 제어기에 입력되는 위치 오차는 한 루프의 샘플링 시간으로 나누어 속도 오차를 계산할 수 있으며, 산출 수식은 식 8과 같다.

$$e_d(i) = (e_p(i) - e_p(i-1))/h \quad (8)$$

또한 속도 오차에 미분 게인을 곱하여 미분 제어 입력을 계산하며 제어 입력 산출 수식은 식 9와 같다.

$$u_{pd}(i) = u_p(i) + u_d(i) = K_p e_p(i) + K_d e_d(i) \quad (9)$$

e_d : 속도 오차, e_p : 위치 오차, I: 현재시간 (루프의 반복 횟수), h: 루프의 샘플링 시간

IV. 실험

본 논문에서는 머시닝 센터용 자동 펠릿 교환장치에 사용되는 서보 시스템의 제품 정밀도와 생산 효율을 향

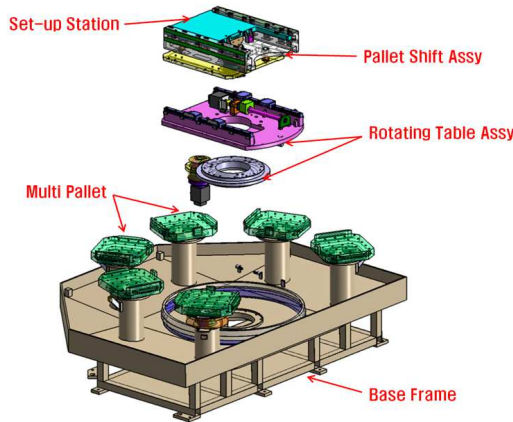


그림 10. 서보 모터 제어 시스템
Fig. 10 Servo motor control system

표 2. 속도 측정 결과

Table 2. Result of speed measurement

Measurements	Feedrate (mm/s)	Revolutions per second (mm/s)	Error rate (%)
1	193.94	193.65	0.15
2	193.35	193.08	0.14
3	193.14	193.09	0.03
4	193.35	193.28	0.04
5	193.17	192.84	0.18
Average	193.39	193.19	0.11

상시키기 위하여 구동축간의 동기화를 실현하고 목표 레도에 추종하도록 제어하는 제어 시스템을 연구하였으며, 최종 적용된 설계한 제어 시스템은 그림 10과 같다.

그림 10에서의 Multi Pallet은 고정된 장치이며, 실제 움직이는 서보 시스템은 Pallet Shift Assy와 Rotating Table Assy에 적용되었다. 머시닝 센터용 자동 팔렛 교환 장치의 신뢰성 평가 기준 (RS-KIMM-2011-0119)에서 ISO 10791에 따른 자동 팔렛 교환 장치의 최대 이송속도 및 회전속도를 측정하였으며, KSB ISO 230-2에 따른 자동 팔렛 교환장치의 캐리어 직선 운동 축이 원점에서 최대 Stroke까지 반복 운동 시 정밀도를 측정하였다. 각 축의 서보 모터의 속도 측정은 레이저 트래커 장비를 활용하여 측정하였으며, Pallet Shift Assy위에 놓여진 가공물을 고정된 Multi Pallet위로 움직이기 위하여 모터의 회전에 따른 직선운동을 수행해야 하기 때문에 회전속도에 따른 이송속도를 측정하였으며 측정결과는 표 2와 같다.

표 2에서의 속도 측정 결과는 모터의 회전에 따른 회전속도와 모터 회전에 따른 캐리어의 직선 운동 방향

표 3. 회전 방향에 대한 속도 측정 결과

Table 3. Speed measurement result according to rotation direction

Measurements	Revolutions per second Direction: CW (rad/min)	Revolutions per second Direction: CCW (rad/min)	Error rate (%)
1	25.79	25.92	0.51
2	25.72	25.80	0.32
3	25.58	25.59	0.04
4	25.48	25.50	0.08
5	25.53	25.56	0.12
Average	25.62	25.68	0.20

표 4. 위치 반복 정밀도 측정 결과

Table 4. Measurement result of position iteration accuracy

Item	Positioning accuracy(mm)		
	Forward	Reverse	Travel back and forth
Linear Axis	0.0084	0.0089	0.0089
	Repeatability(mm)		
	Forward	Reverse	Travel back and forth
	0.0040	0.0056	0.0056

에 대한 이송속도를 측정하였으며, 모터의 회전 운동을 직선운동으로 바꾸고, 볼 스크류와 LM가이드를 적용한 전·후진 이송 메커니즘으로 서보 구동을 수행하기 때문에 측정 결과 평균 오차율 0.11%를 보였다.

또한 Rotating Table Assy의 회전에 따라 가공물을 고정된 Multi Pallet의 위치와 정확히 일치시키기 위한 모터의 회전 방향에 대한 회전 속도 측정 결과는 표 3과 같다.

표 3에서의 회전 방향에 대한 속도 측정 결과는 각 회전 방향에 따른 회전 속도의 오차율을 비교하였으며, Rotating Table Assy는 회전을 위한 장치의 핵심 부품으로 링 기어 및 감속기 등으로 이루어져있기 때문에 이에 따라 CW 및 CCW 회전 방향에 대한 평균 오차율 0.20%를 보였다.

표 2, 3에서의 모터 회전 속도에 따른 캐리어 이송 속도와 회전 방향에 따른 오차율에 따라 모터 회전에 따른 시스템의 캐리어 직선 운동 축이 직선 이송의 원점에서 최대 Stroke까지 반복 운동 시 위치 반복 정밀도를 측정한 결과는 표 4와 같으며, 왕복 운동 시 기준 운동 거리에 대한 위치 정밀도는 KSB ISO 230기준 0.01mm 이내인 0.0089mm, 반복정밀도는 0.0056mm로 높은 정밀도를 산출하였다.

V. 결론

본 논문에서는 자동화 생산 장비에서 서보 시스템에 사용되는 AC 서보 모터의 정밀한 구동 및 제어를 위해 랩뷰를 이용한 FPGA기반의 모터를 제어하며, 정확한 타이밍 및 동기화에 따라 목표 궤도에 추종하도록 제어 가능한 연구 및 그 결과를 서술하였다. 표 4에서 위치 및 반복 정밀도 측정결과에서 목표 위치 대비 정밀한 이동이 이루어졌음을 확인하여 그 성능을 검증하였다. 그러나 본 논문에서 연구한 랩뷰를 이용한 FPGA기반의 제어에서 모터의 회전 방향에 따른 회전 속도와 직선 운동 방향에 대한 캐리어 이송속도 및 회전 속도의 오차가 발생하여 각 회전 방향에 대한 오차가 존재함을 보였다. 이러한 회전 방향의 오차는 머시닝 센터용 자동 팸릿 교환장치에서 누적 오차 발생 시 위치 정밀도에 큰 문제가 발생할 수 있기 때문에 향후 모터의 회전 방향에 따른 위치 및 반복 정밀도 향상을 위한 추가 제어 알고리즘에 대한 연구를 수행해야 한다.

References

- [1] J.H. Kim, Y.S. Eun, D.I. Cho, "Variable Structure Control of AC Servo Motors for High Performance," *Journal of Control Automation and Systems Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 351-361, 1996 (in Korean).
- [2] Y.S. Moon, S.H. Roh, K.H. Jo, Y.P. Lee, Y.C. Bae, "A Study on the Development of Servo Motor Control IP Core Based on FPGA," *Journal of the Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 20, No. 4, pp. 562-569, 2010 (in Korean).
- [3] D.S. Sim, J.K. Choi, "Design of a BLED Servo Motor Control System for the Auto Process of Assembly and Supply," *Journal of Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 351-361, 1996 (in Korean).
- [4] M. Tomizuka, J.S. Hu, T.C. Chiu, T. Kamano, "Synchronization of Two Motion Control Axes Under Adaptive Feedforward Control," *Journal of Transactions on American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 114, No. 2, pp. 196-203, 1992.
- [5] Y.S. Jon, K. Jung, J.H. Choi, h. Ahn, H.C. Lee, Y.S. Kim, S.H. Hong, S.H. Cho, "Multiple-axes Celocity-synchronizing Control of AC-servomotor Load System for Injection Process," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 32, No. 8, pp. 719-726, 2015 (in Korean).
- [6] B.G. Lim, M.H. Kang, "A Design of a Full FPGA-based DC-motor Control and Monitoring System," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 51, No. 11, pp. 211-220, 2014 (in Korean).
- [7] W.J. Woo, J.B. You, "A Study on Prediction of Axis Unblancing of Motor by PLC Control System," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 54, No. 10, pp. 1494-1499, 2017 (in Korean).
- [8] M.S. Ko, J.G. Kwak, G.N. Wang, S.C. Park, "Control Level Process Modeling Methodology Based on PLC," *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol. 18, No. 4, pp. 67-79, 2009 (in Korean).
- [9] J.H. Cho, H.S. Hwang, "Auto-tuning of PID Controllers with IMC Structure," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 46, No. 3, pp. 181-187, 2009 (in Korean).
- [10] S.G. Na, O.S. Kwon, J.H. Kang, H. Heo, "A Study on Synchronization Control Technique of Dual-servo Press System," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 22, No. 2, pp. 206-215, 2013 (in Korean).
- [11] Y.J. Kim, Y.C. Bae, K.H. Kim, "Implementation of Motor Driver for Control of AC Servo Motor of Robot," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 7, No. 3, pp. 533-539, 2012 (in Korean).

Hyun-Woo Oh (오 현 우)

He received the Ph.D. degree in Electronics Engineering from Kwangwoon University in 2018.

He is currently a researcher at SPS corporation.

His research interests include embedded system and control system

Email: osj0805@naver.com