

사과 수확 로봇 관절의 서보 제어장치 개발⁺

Development of the Servo Control System for the Apple Harvesting Robot⁺

장익주*

정종인*

정희원

I. J. Jang

J. I. Jeong

1. 서론

생물 생산의 여러 과정 중에서도 자동화 기계의 개발과 제어 기술이 요구되는 부분은 이식이나 접목, 작물의 관리, 수확 등의 정밀한 반복 작업으로 볼 수 있다. 특히, 로봇에 의한 수확 작업중의 하나인 과실 수확 로봇은 각각의 대상물을 직접 다루어야 하면서도, 과실의 특성상 수확 작업에 의한 손상의 위험이 크기 때문에 정교한 제어가 요구된다. 과실 수확 로봇을 구동하기 위해서는 많은 변수가 고려되어야 하는데, 특히 각 관절의 운동은 로봇 전체의 정밀도를 좌우하는 중요한 요소로서, 기동과 정지 시 로봇 전체에 충격을 가하지 않도록 가속-정속-감속의 일정한 구동 패턴이 적용될 필요가 있다. 이와 같이, 관절의 운동 중에 발생할 수 있는 여러 가지 부하의 변동에 대처하고, 각 관절의 위치와 운동궤적에 따라 구동 패턴을 적용하기 위해서는 각 관절부 및 로봇 전체의 기계적인 정밀도뿐만 아니라, 부하량에 따라서 속도나 토크의 제어량을 자동으로 조절 할 수 있는 제어 시스템이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 사과 수확 로봇의 관절 구동에 사용되는 서보 모터를 제어함에 있어서, 각 매니플레이터에 걸리는 부하의 변동에도 요구되는 회전 속도를 일정하게 유지할 수 있는 제어 시스템을 설계·제작하여, 주요 지점에서의 출력 파형을 측정하고 속도 지령에 대한 회전수의 추종, 단위 스텝 입력에 대한 응답 시험을 통해 제어기의 성능을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 구성 및 설계사양

설계사양은 표 1과 같으며, 무부하 회전수 1400rpm을 출력하기 위한 스텝 응답은 모터의 기계적 시정수, 전기적 시정수, 가속정수, 마찰 손실 토크, 점성 계동 계수, 열저항 등을 고

+ 본 연구는 농림부 특정연구과제 연구비 지원에 의해 수행되었음

* 경북대학교 농업기계공학과

Table 1. Layout of the control mode

Load torque	22.3 kgf · cm
RPM	10~1400 rpm
Velocity control signal	-5~+5 V _{DC}
PWM frequency	≥ 16 kHz
Step-response time	≤ 250 ms

도제어신호는 0~+5V_{DC} 입력일 때 CW, -5~0V_{DC} 입력일 때 CCW로 하였고, 회전 방향은 모터의 축 정면을 기준으로 하였다.

기본적인 서보 모터 제어 시스템은 그림 1과 같이 오차검출기, 증폭기, 전력 변환기, 제어 대상인 서보 모터와 엔코더 등으로 구성되며, 제어계는 위치 제어루프, 속도 제어루프, 전류 제어루프가 있다.

위치 제어 루프는 상위 시스템의 지령을 받는 메인 루프로서 속도 제어 루프와 전류 제어 루프보다 우선 순위가 높아서, 위치 제어기의 출력신호가 속도지령이 되고 이것이 속도 제어루프에 입력된다. 속도 제어회로는 속도 제어기, 오차 검출기, 전류앰프, PWM 변조회로, dead time 부가회로, 구동회로, 전류센서, F-V 변환기 등으로 구성되며, 속도지령과 속도 피드백 신호의 차를 속도 앰프에 입력하여 회전속도가 일정하게 되도록 비례적분 제어를 행하고, 출력인 전류지령을 전류 제어기에 입력한다. 전류 앰프는 전류 센서로 검출한 전기자 전류를 피드백 받아 제어신호에 비례하는 토크를 발생시키는 전류제어를 행한다.

F-V 변환은 엔코더에서 출력되는 펄스의 주파수를 F-V 변환기를 통해 아날로그 신호인 전압신호로 바꾸는 방식으로, 회전속도에 비례하는 크기의 전압신호가 출력된다. 이 신호는 Gate Driver를 구동하여 파워 디바이스의 전원을 스위칭할 수 있도록 디지털 신호로 가공되는데, 그림 2의 펄스폭 변조(Pulse Width Modulation)는 대표적인 전류제어 방식으로, 아날로그 신호를 일정한 주기로 샘플링하고 그 값에 비례한 펄스

려하여 약 250ms이내로 제어하고자 하였다. 모터 구동부의 스위칭 작용으로 발생하는 노이즈가 제어회로에 간섭하는 현상을 막기 위해 구동부의 전원과 제어회로의 전원을 분리하여 설계하였으며, 모터의 용량을 고려하여 대용량의 트랜스와 콘덴서를 사용하였다. 속

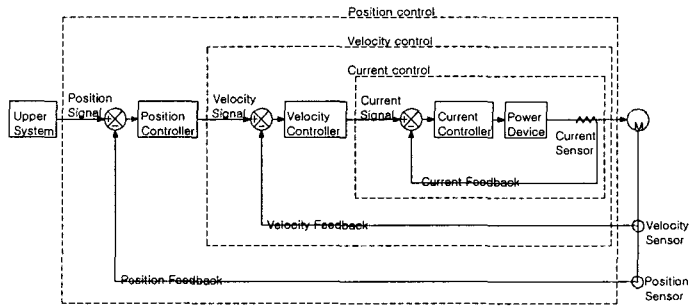


Fig. 1. Block diagram of a servo control system

도제어신호가 속도지령이 되고 이것이 속도 제어루프에 입력된다. 속도 제어회로는 속도 제어기, 오차 검출기, 전류앰프, PWM 변조회로, dead time 부가회로, 구동회로, 전류센서, F-V 변환기 등으로 구성되며, 속도지령과 속도 피드백 신호의 차를 속도 앰프에 입력하여 회전속도가 일정하게 되도록 비례적분 제어를 행하고, 출력인 전류지령을 전류 제어기에 입력한다. 전류 앰프는 전류 센서로 검출한 전기자 전류를 피드백 받아 제어신호에 비례하는 토크를 발생시키는 전류제어를 행한다.

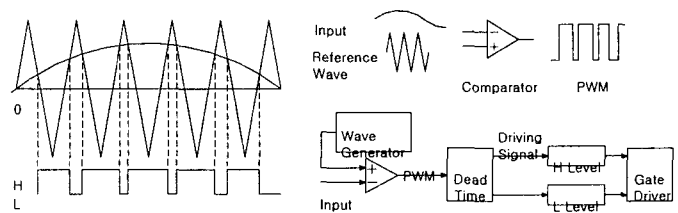


Fig. 2. PWM wave generation by a chop comparator

를 구동하여 파워 디바이스의 전원을 스위칭할 수 있도록 디지털 신호로 가공되는데, 그림 2의 펄스폭 변조(Pulse Width Modulation)는 대표적인 전류제어 방식으로, 아날로그 신호를 일정한 주기로 샘플링하고 그 값에 비례한 펄스

폭으로 변환함으로써 아날로그량을 디지털화한다.

PWM의 출력 신호는 그림 3과 같이 PWM 주기 (t_{pwm}) 별로 위상이 180° 반전되어 H레벨과 L레벨의 신호로서 H브리지에 입력된다. 여기서 Gate Driver와 각 파워 디바이스가 ON에서 OFF 또는 OFF에서 ON으로 될 때 스위칭이 지연될 경우 상하의 Tr이 동시에 ON되는 주기가 생길 수 있다. 이때 발생할 수 있는 short current를 방지하기 위해 단락 방지 시간 t_a (dead time)를 부가하였다.

H브리지를 구성하는 파워 디바이스는 구동 전압과 전류에 따라 여유 있는 선택을 할 필요가 있다. 또한 PWM의 주파수를 16kHz 이상의 가청영역 밖으로 고려하기 때문에 고속 스위칭이 가능한 소자여야 하므로, Bipolar Transistor와 MOSFET의 장점을 가진 IGBT를 사용하였다.

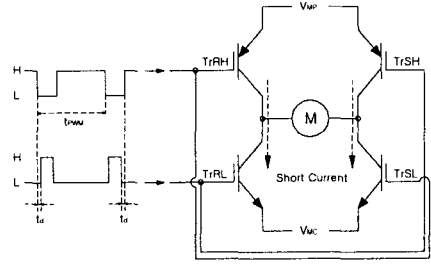


Fig. 3. Dead time addition

2.2 제어 시스템 설계

사용한 모터는 YASKAWA(Japan)사의 UGCMED-04-YR13으로서, 표 2에 모터의 제원을, 그림 4와 5에 제작한 제어회로와 전 회로에 대한 블록 선도를 각각 나타내었다.

Table 2. Specifications of the motor

Rated (Max) output	0.4 (2.0) kW
Rated (Max) current	8.2 (40.0) A
Rated (Max) torque	22.3 (112.0) kg _f · cm
Rated (Max) speed	1750 (2900) rpm
Torque constant	2.97 kg _f · cm/A
Acceleration constant	187 ms



Fig. 4. Control logic and power device

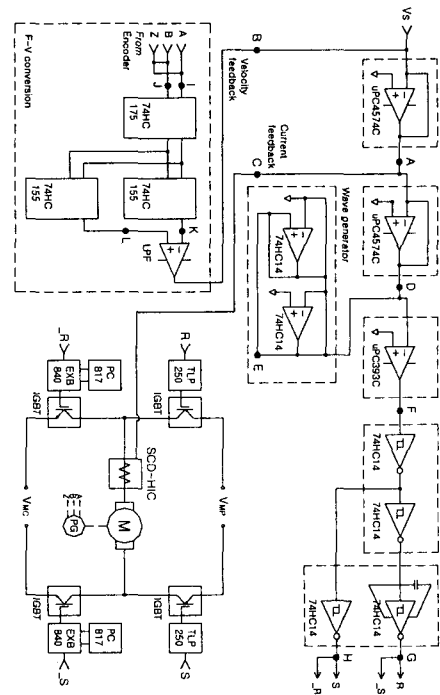


Fig. 5. Block diagram of the logic

모터 구동 선단의 파워 디바이스를 작동하기 위한 Gate Driver는 TLP250 및 PC817과 EXB840의 조합으로 H브리지를 구성하였다. H레벨 좌우의 TLP250과 L레벨 좌우의 EXB840은 각각 RH, SH, RL, SL 신호를 받아 4개의 IGBT로 구성된 H 브리지를 구동한다. TLP250과 EXB840은 고속 포토 커플러를 내장하고 있어서, 제어 회로부와 파워 라인을 절연함으로써 노이즈의 영향을 받지 않도록 한다. 또한 EXB840은 과전류 보호회로를 내장하고 있어서, 과부하시의 에러신호 처리를 위한 PC817과 함께 시스템의 안전성을 높이도록 하였다.

전류 앰프의 출력신호와 기준 삼각파가 컴퍼레이터에 입력되면, 내부에서는 이들의 크기를 비교하여 PWM 신호를 출력한다. 컴퍼레이터는 저전력형의 μ PC393C를 사용하였고, 이때 삼각파의 진폭은 약 9.0V, 주파수는 가청영역 밖인 16kHz 이상이 되도록 하였다. PWM 신호에 부가하는 단락 방지 시간 t_d 는 TLP250의 응답속도와 IGBT의 지연시간을 고려하여 2~3 μ s 정도가 적절한 것으로 판단되었다.

엔코더에서 발생하는 2개의 펄스 신호(A, B상)를 F-V Conversion 방식의 속도 검출 회로에 입력하여 모터의 회전 방향과 회전속도에 해당하는 검출신호를 얻도록 하였다. 검출신호는 회전방향에 따라 전압 극성이 바뀌며, 회전수에 비례하는 크기로 출력되었다.

그림 6은 속도 검출회로의 동작 구성과 출력 파형이다. 정방향 및 역방향 회전에 의한 A상과 B상의 출력 펄스열에 대하여, 안정된 검출 신호를 얻기 위해 각 상의 펄스신호의 상승 및 하강 edge에서 두 개의 불안정 멀티 바이브레이터를 트리거하여 MM_A , MM_B 와 같이 출력 펄스수를 4배로 하였다.

한편, 회전 방향 검출회로에서는 A상과 B상의 위상차를 이용하여 방향 신호를 얻어낸다. 방향 신호와 MM_A , MM_B 를 AND 연산하여 방향에 따른 펄스열 만들 추출하고, 저역 통과 필터(Low Pass Filter)에 입력하여 직류의 속도 검출 신호를 얻을 수 있었다. LPF는 차단 주파수의 저역 부분만을 통과시키고 고역 부분은 감쇠시킴으로서 잡음의 발생을 억제하기 위한 회로이다

전류의 검출에는 홀 전류 센서를 사용하였다. 이는 홀소자를 이용하여 전류자계의 강도를 전압으로 변환하는 전류센서로서, 0~ \pm 50A의 전류 범위에서 직선성이 매우 우수한 0~ \pm 4V의 전압을 출력한다. 또한 제어 회로에는 5V_{DC} 및 15V_{DC}를 공급하고, 파워 디바이스용으로 20V_{DC}를 사용하였다. 구동부는 제어계와 절연된 별도의 전원을 사용하여 67V_{DC}를 공급하였다.

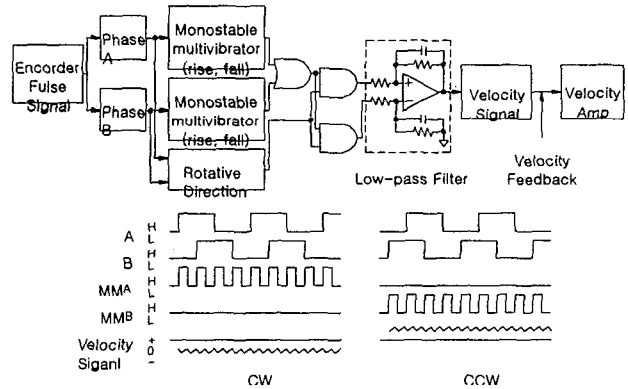


Fig. 6. Velocity detection and waveform output

3. 결과 및 고찰

제어기의 출력을 평가하기 위해 12곳의 주요 지점에서 파형을 측정하였다.

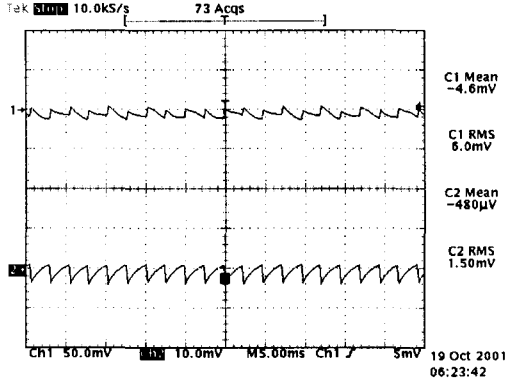


Fig. 7. Current signal and output of F-V conversion

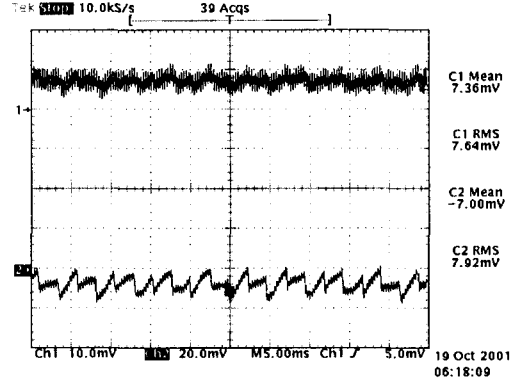


Fig. 8. Detected current and output of current amplifier

그림 7은 전류지령(Ch 1)과 속도 피드백 신호인 F-V 변환 출력(Ch 2)으로, 전류 지령은 기준 전압에서 CCW일 때 상향, CW일 때 하향이다. 그림 8은 전류 피드백 신호인 모터 전류(Ch 1)와 전류 앰프의 출력(Ch 2)으로, 전류 지령과 모터 전류의 오차가 증폭되어 출력으로 나타나고 있다.

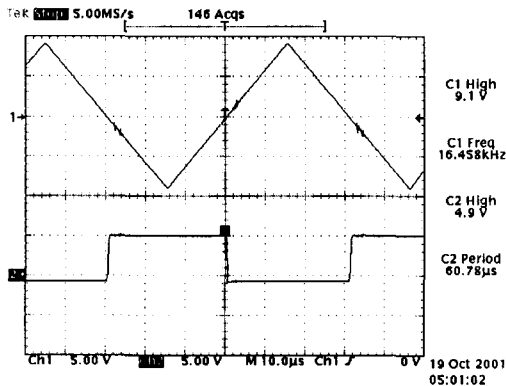


Fig. 9. Output of the wave generator and PWM

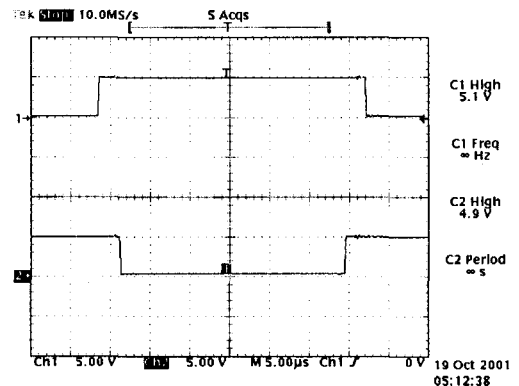


Fig. 10. Dead time synchronized with PWM

그림 9는 삼각파 발진기의 출력(Ch 1)과 기준 전압에 대응하는 PWM 변조 신호의 출력(Ch 2)으로, 기준 파형은 매우 규칙적이며, PWM의 주파수를 가청영역 밖인 16kHz 이상으로 설정한 바와 같이 $f_{PWM} \geq 16.4\text{kHz}$ 이고, 이때 진폭은 약 9V이다. 그림 10은 PWM 출력에 dead

time을 부가한 R 신호(Ch 1) 및 S 신호(Ch 2)를 나타내고 있다. 결정한 바와 같이 R 신호에는 PWM의 상승에 동기하여, S 신호에는 PWM의 하강에 동기하여 약 $3\mu\text{s}$ 의 t_d 를 부여하고 있다.

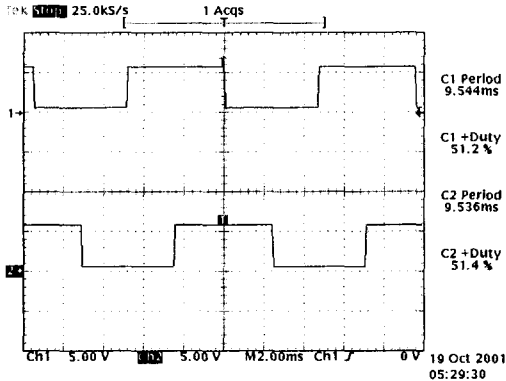


Fig. 11. Output of the encoder

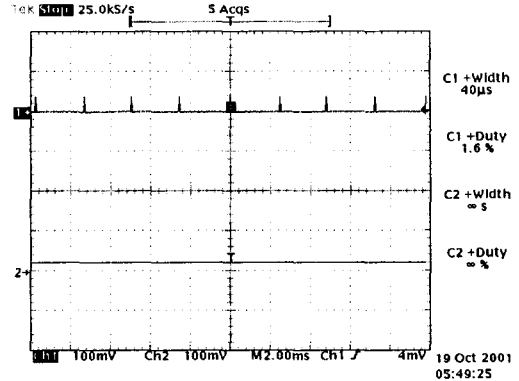


Fig. 12. Quadruplicated waveform

그림 11은 엔코더의 A상 출력(Ch 1)과 B상 출력(Ch 2)을 비교한 것으로, 모터의 정회전에 따라 A상이 B상보다 90° 선행하고 있으며, 그림 12에서는 A상과 B상의 펄스열이 디코더를 통과한 후 각 상의 상승 및 하강에 동기하여 4배로 출력되고 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 고정밀도의 작업이 가능한 사과 수확 로봇의 개발을 목표로 하여, 관절의 구동에 사용되는 모터의 서보 제어 시스템을 개발하기 위한 것이다. 제어 시스템은 다른 매니플레이터의 운동 등 다양한 부하의 변동이 있어도 회전 속도를 일정하게 유지함으로써 정확한 제어가 가능하여야 한다. 이를 위해 속도제어와 토크제어에 초점을 두고 시스템을 설계 제작하여 과형 출력 시험, 속도 입력 추종 시험 및 스텝 응답 시험을 수행하였으며, 이들의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 모터는 정격토크 $22.3\text{kgf}\cdot\text{cm}$, 순간 기동토크 $112.0\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 인 400W급 컵 모터를 사용하였으며, 제어 가능한 회전수는 10-1400rpm으로 하고, $22.3\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 까지의 부하 변동에도 일정 속도를 유지할 수 있도록 시스템을 설계하였다.
2. 구동 회로의 스위칭 작용이 제어 회로에 간섭하는 현상을 막기 위해 구동부와 제어 회로부의 전원을 분리하고, 모터의 용량을 감안하여 별도의 구동부 전원을 제작하였다.
3. 속도와 토크의 정확한 제어를 위해 속도 검출신호와 전류 검출신호를 피드백 하는 폐루프 시스템을 구성하였으며, 속도 제어루프에 토크 제어루프를 삼입하여 응답성과 안정성

을 높이도록 하였다.

4. Gate driver는 포토 커플러를 사용하여 구동부와 절연하였으며, 순간 최대 전류에 대하여 70% 이상의 여유 용량을 가진 IGBT를 사용하여 과전류 보호기능을 가진 H 브리지를 구성하였다.

5. 참고문헌

1. 팽정수 : 1999, 수직 다관절 사과 수확로봇의 메뉴퍼레이터 개발, 경북대학교 대학원
2. YASKAWA : 1996, 메카트로닉스를 위한 서보기술 입문, 세운
3. 세운 : 1996, DC 모터의 制御回路 設計, 세운
4. 유경선 : 1998, 화상처리에 의한 사과의 인식 알고리즘 개발, 경북대학교 대학원
5. 권기영 : 2000, 시설원예용 작업자 추종 운반로봇 개발, 경북대학교 대학원
6. 손재룡 : 2000, 토마토 수확로봇 개발, 농업기계학회지 제25권 제5호. pp. 415-420
7. 加勝一 : 1995, 小型 모터 制御用 IC, 機電研究社
8. 谷腰欣司 : 1994, 모-타 應用回路 101選, 世和
9. 世和編輯部 : 1992, 모-타 制御用 IC 技術, 世和