

속도 프로파일 기반의 가감속제어를 통한 DC 모터의 토크제어

Torque Control of DC Motor Using Velocity Profile Based Acceleration/Deceleration Control

이종연 · 현창호*

Jong-Yeon Lee and Chang-Ho Hyun

국립공주대학교 공과대학 전기전자제어공학과 지능로봇시스템연구실

요 약

본 논문에서는 자동물류운반시스템(AGV)에 사용되는 가감속 제어를 위한 속도 프로파일 기반의 가감속 위치제어를 DC 모터 실험을 통한 토크변화에 대해서 고찰한다. 속도 프로파일을 이용한 모터의 가감속 제어는 모터에 걸리는 부하를 줄임으로써 시스템의 무리한 구동을 방지하고 수명을 연장 시키는 장점을 가지고 있다. 체계적인 설계 구조를 갖는 상태 피드백 제어기를 이용하여 속도 프로파일을 이용한 가감속 제어 기반의 DC 모터의 위치제어와 단순 위치제어를 모의실험을 통하여 비교함으로써 토크 크기를 비교 관찰한다. 또한 CEM-IP-01의 카트 위치 제어 실험을 통하여 이를 검증한다.

키워드 : 속도 프로파일, 가감속 제어, 토크제어, 위치제어, 상태 피드백 제어기

Abstract

This paper presents torque control of DC motor using the velocity profile based acceleration/deceleration controller for automatic guided vehicles (AGVs). This technique has some advantage; to reduce the damage of motors and to extend the life time of motors. First, we generate velocity profiles for three cases and design the state feedback controller using the generated velocity profile as a reference. The state feedback controller has servo system for solving regulation problem. For the verification, we apply the proposed method to control a cart position and shows some simulation result.

Key Words : Velocity Profile, Acceleration/Deceleration Control, Torque Control, Position Control, State Feedback Control

1. 서 론

산업현장에서 공장 자동화, 기계화가 가속됨에 따라 자동물류운반시스템인 이동로봇형태의 AGV가 많이 사용되고 있다. 자동물류운반시스템은 다수의 AGV가 모여서 작업을 수행하기 때문에 기본적인 AGV의 위치 및 속도제어 뿐만 아니라, 경로생성 및 운영알고리즘 등 다양한 제어 기술을 필요로 한다. 그 중에서 AGV의 위치 제어는 하드웨어 방식에서 소프트웨어 방식으로 변화 하고 있다. 가장 큰 이유로는, 하드웨어방식은 부하변동에 신속하게 대응하지 못하며, 모터 구동 시

가속과 등속 사이 또는 등속과 감속 사이에서 속도의 번곡이 발생하여 부하변동에 의한 진동과 소음이 발생하기 때문이다. 그렇기 때문에 소프트웨어 방식에서는 AGV의 구동요소인 DC모터의 가감속제어를 이용한 위치제어 기법이 널리 사용되고 있다. 이러한 DC 모터의 가감속 제어는 모터의 가속, 감속 시 급 변하는 속도를 줄이고 최대 토크를 설정하여 모터에 부하를 줄임으로써 모터에 무리가가지 않도록 하면서 원하는 위치와 시간에 도달할 수 있도록 하는 제어 방법이다.

본 논문에서는 효율적인 DC모터의 가감속 제어를 구현하기 위한 사다리꼴 모양의 속도 프로파일을 생성한다. 일정한 가속도로 속도를 증가하여 이동 하다가 목적지에 도착하기 전에 일정한 가속도로 속도를 감속하여 목적지에 도착한 순간 속도와 가속도가 0이 되도록 사다리꼴 모양의 속도 프로파일속을 생성하기 위해서 최고속도와 가속도 전체 이동거리를 설정하면, 가속, 등속 구간별 속도와 가속도 및 시간이 설정되어 어떠한 변화에도 모터에 부하를 줄여주면서 목표 값에 도달이 가능하도록 할 수 있다. 또한, 생성된 속도 프로파일을 이용하여 AGV의 위치제어를 보여주기 위하여 DC모터의 위치제어 실험 결과를 보인다. 또한 생성된

접수일자: 2011년 11월 19일

심사(수정)일자: 2011년 11월 19일

게재확정일자: 2012년 2월 9일

* 교신저자

감사의 글 :본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 이공계전문기술지원서포터즈 사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2011-C7210-1101-0001)

본 논문은 본 학회 2011년도 추계학술대회에서 선정된 우수논문입니다.

사다리꼴 속도 프로파일을 오차없이 추종하게 하여 원하는 위치까지 원하는 속도로 도달하는 것이 목적이므로 위치제어를 위한 제어기로써 상태 피드백 제어를 사용하며 또한 생성된 사다리꼴 속도 프로파일을 추종하기 위해서 속도프로파일을 입력으로 하고 이를 출력과 비교하여 앞먹임경로에 적분기를 추가하게 되는 1형 서보시스템을 사용하였다. 제안한 속도프로파일과 제어기의 성능 검증을 위하여 먼저 Matlab을 통하여 모의실험을 하였으며 실제 시스템에 대한 적용성을 확인하기 위하여 CEM-IP-01에 적용하여 그 성능을 검증하였다.

2. 속도 프로파일 구현

속도 프로파일은 기본적으로 위치, 속도, 가속도와 시간과의 관계에서 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 속도 프로파일은 위치, 속도, 가속도에 관한 그래프도 한눈에 볼 수 있다. 본 논문에서는 사다리꼴 속도 프로파일을 얻기 위해서는 다음과 같이 두 경우에 대해서 고려할 수 있다. 현재 속도 v 가 v 의 최고 제한속도인 v_{max} 보다 작을 때와 v_{max} 보다 클 경우이다. 이에 따라 속도 프로파일의 모습은 달라지게 된다. 그 이유는 v_{max} 에 도달하기 위한 최소 거리가 존재하게 되는데, 만약 그 최소거리 이하로 움직이게 되면 AGV의 이동 속도는 v_{max} 에 도달하지 못하게 되며 원하는 거리에 도달했을 때의 속도가 0이 아니게되는 현상이 발생하게 된다. 이러한 경우를 고려하지 않을 경우, 감속없이 갑자기 멈추는 현상이 발생하며 이러한 현상은 시스템에 큰 무리를 주게 된다.

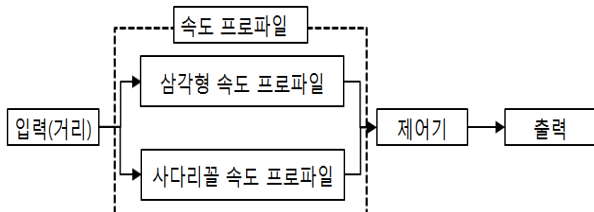


그림 1. 속도 프로파일 생성 알고리즘
Fig. 1. Velocity Profile Generation Algorithm

본 논문에서는 최고속도 v_{max} 와 가속도 a 를 임의의 값으로 정한 후 목표거리만을 입력으로 받아 속도프로파일을 생성하도록 하였다.

표 1. 파라미터
Table 1. Parameter

파라미터	
이동거리	x
가속시간	t_r
도달시간	t_f
가속구간	S_r

$$\text{가속시간 } t_r = \frac{v_{max}}{a} \quad (1)$$

$$\text{도달시간 } t_f = \frac{x}{v_{max}} + t_r \quad (2)$$

$$\text{가속구간 } S_r = \frac{(v_{max})^2}{2a} \quad (3)$$

본 논문에서는 속도 프로파일을 생성하기 위해서 전체이동거리와 가감속구간의 거리에 전체이동거리가 가감속구간보다 클 때, 전체이동거리가 가감속구간보다 작을 때, 마지막으로 전체이동거리와 가감속구간이 같을 때 이렇게 세가지 Case로 분류하여 각각 삼각형 모양의 속도 프로파일과 사다리꼴 모양의 속도프로파일을 생성하였다.[6][9]

Case 1. 전체이동거리 > 가감속구간

$$v = \begin{cases} at & 0 \leq t < t_1 \\ v_{max} & t_1 \leq t < t_2 \\ v_{max} - a(t-t_2) & t_2 \leq t < t_f \end{cases} \quad (4)$$

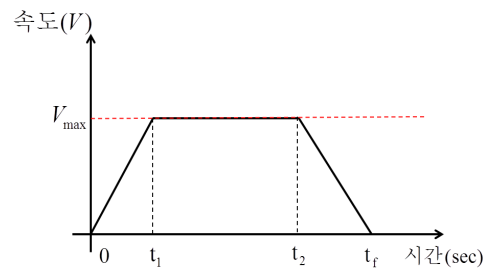


그림 2. Case 1의 속도 프로파일
Fig 2. Velocity Profile of Case 1

Case 2. 전체이동거리 = 가감속구간

$$v = \begin{cases} at & 0 \leq t < t_1 \\ a(t_f - t) & t_1 \leq t < t_f \end{cases} \quad (5)$$

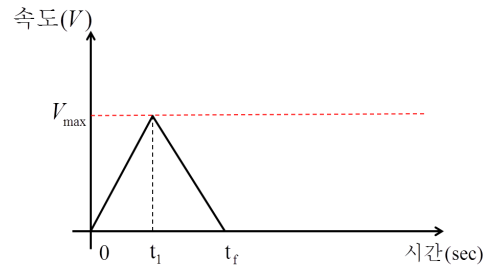


그림 3. Case 2의 속도 프로파일
Fig 3. Velocity Profile of Case 2

Case 3. 전체이동거리 < 가감속구간

$$v = \begin{cases} at & 0 \leq t < t_1 \\ a(t_f - t) & t_1 \leq t < t_f \end{cases} \quad (6)$$

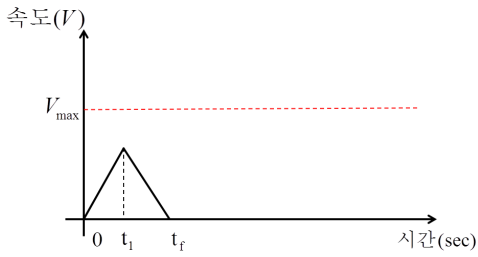


그림 4. Case 3의 속도 프로파일
Fig 4. Velocity Profile of Case 3

Case 1은 전체이동거리가 가속 구간보다 큰 경우 v_{max} 에 도달하여 일정하게 그 속도가 유지되는 등속구간이 생기기 때문에 가속구간, 등속구간, 감속구간으로 나타내며 사다리꼴 모양의 속도 프로파일이 생성된다.

Case 2는 전체이동거리와 가속구간의 거리가 같을 경우 v_{max} 에 도달했다가 바로 감속을 다시 시작하므로 Case 1과는 다르게 등속구간이 없어 가속구간과 감속구간만으로 삼각형 모양의 속도 프로파일이 생성된다.

마지막으로 Case 3는 전체이동거리가 가속구간보다 짧아 v_{max} 에 도달하지 못하고 가속과 감속만을 갖는 삼각형 모양의 속도 프로파일이 생성된다.

그림 5와 같이 위치만을 입력받아 생성된 속도 프로파일은 시스템에 전달되고 시스템은 이를 추종하여 속도 프로파일과 같은 속도로 입력받은 목표거리를 움직이게 된다. 그림 5는 가속도 $a=2$, 최고속도 $v_{max}=10$ 으로 정하고 이동거리 $x=130$ 으로 생성한 속도 프로파일과 그에 따른 위치와 가속도 그래프이다.

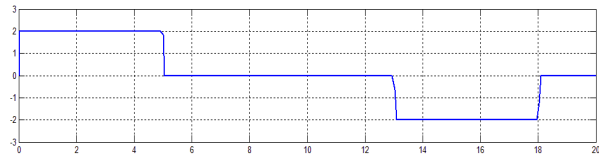
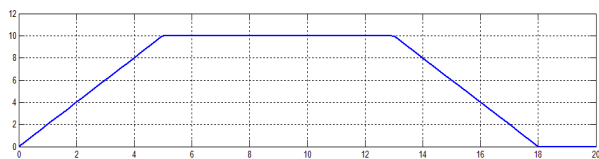
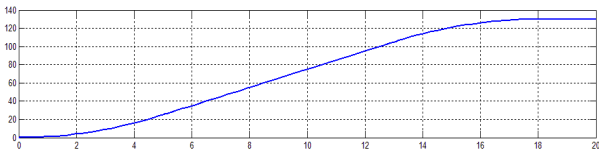


그림 5. 생성된 속도 프로파일
Fig 5. Generated Velocity Profile

3. 제어기 설계

생성된 속도 프로파일을 추종하기 위한 제어기로써 서보시스템이 추가된 상태 제한 제어를 사용한다. 적

분기는 입력과 출력의 오차를 적분하여 정상상태오차를 줄이는 역할을 하여 보다 정확한 추종제어를 할 수 있도록 한다. 시스템 동역학은 다음과 같이 나타낸다.[1-5]

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (7)$$

여기서 $\dot{\xi} = r - y$ 이며 r 은 기준입력 신호이고 입력 u 는 다음과 같다.

$$u = -Kx(t) + k_1\xi(t) \quad (8)$$

여기서 K 는 이득행렬, k_1 은 적분이득이 되고 다음과 같이 \hat{K} 이 정의 된다.

$$\hat{K} = [K \quad -k_1] \quad (9)$$

4. 모의실험

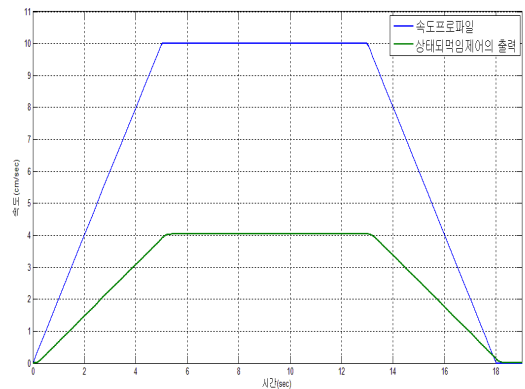


그림 6. 상태피드백제어의 출력 비교
Fig 6. Output Comparison of State Feedback Control

그림 6은 상태피드백제어의 출력을 나타낸 것으로 생성된 사다리꼴 모양의 속도프로파일을 정확하게 추종하지 못하고 최고속도에 도달하지 못하게 된다. 이는 정상상태오차가 발생하여 정확하게 추종하지 못하는 형태가 되므로 앞먹임경로에 적분기를 추가하는 1형 서보 시스템을 사용하는 원인이 된다.[4]

본 논문에서는 모의실험을 위하여 matlab을 사용하였다. 모의실험은 목표 이동 거리의 변화를 주어가면서 그 결과를 측정하였으며 목표 이동 거리는 10cm, 30cm, 50cm, 70cm, 90cm, 100cm, 120cm, 150cm 이다. 그리고 본 실험에서는 위치의 변화에 따른 결과를 확인하기 위해서 다음과 같이 가속도(a)를 2cm/sec^2 최고속도를 $v_{max} = 10\text{cm/sec}$ 로 설정하였다. 그림 6에서 보듯, v_{max} 에 도달하는 시간은 5초이며 그 동안 이동한 거리는 25cm이다. 그렇기 때문에 목표 이동거리 50cm까지는 가속구간과 감속구간만을 갖는 삼각형 모양의 속도 프로파일이 생성되고 추종하는 것을 알 수 있다.[7-10]

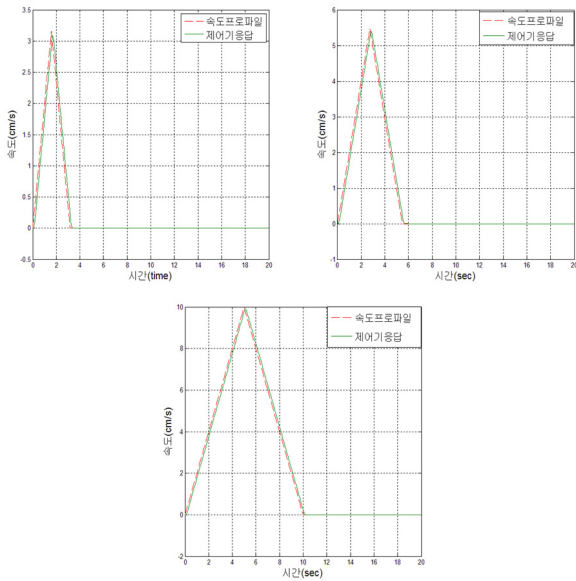


그림 7. 10cm~50cm 까지 생성된 속도 프로파일
Fig 7. Velocity Profile Results for 10cm~50cm Desired Distance

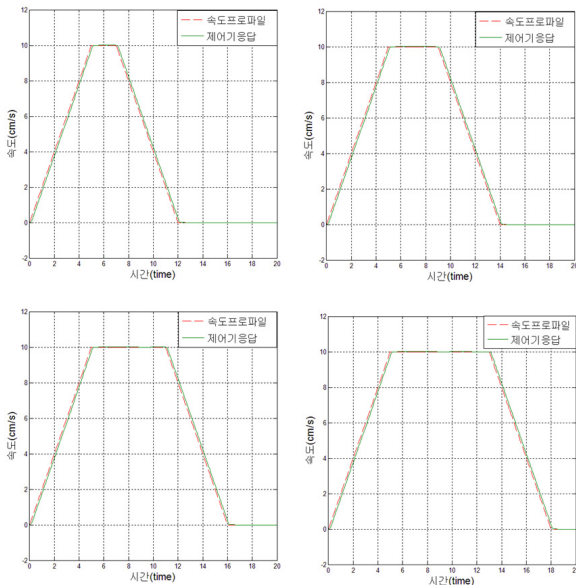


그림 8. 70cm~150cm까지 생성된 속도 프로파일
Fig. 8. Velocity Profile Results for 70cm~150cm Desired Distance

그림 8에서는 이동거리 50cm 이상에서는 v_{max} 에 도달하기 때문에 가속구간과 감속구간 사이에 등속구간이 나타나 사다리꼴 모양의 속도프로파일이 생성됨을 알 수 있다.

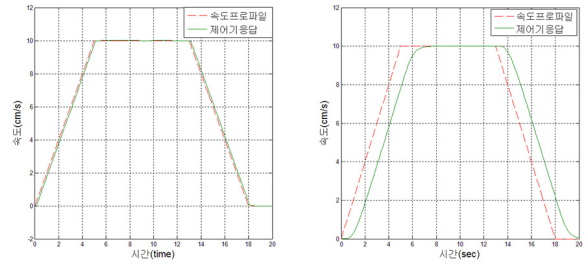


그림 9. 제어기 이득에 따른 추종 성능 비교

Fig. 9. Performanc Comparison by Control Gains

그림 9은 제어 이득에 변화를 주어 모의실험을 하였다. 제어기의 이득이 클수록 더 빠르게 속도 프로파일을 추종하는 그래프로 성능이 뛰어난을 알 수 있다.

5. 알고리즘을 적용한 카트 위치 제어 실험

본 논문의 실험을 위하여 (주)CEMWARE의 실험장비인 CEM-IP-01을 사용하였다. CEM-IP-01에서 총 카트가 이동할 수 있는 거리는 75cm가 되며 이를 이동할 수 있는 최대 거리 x_{max} 로 놓고 눈으로 잘 확인할 수 있도록 늦지도 빠르지도 않은 적당한 속도인 $5cm/sec^2$ 을 가속도 a 로 정하였으며 최고속도를 $15cm/sec$ 로 고정하고 목표거리를 조정하여 Case 1일 때의 사다리꼴 모양의 속도 프로파일을 입력으로 하여 실험을 하고 그 후에 Case 2와 Case 3와 같이 삼각형 모양의 속도 프로파일을 입력으로 하는 시험의 순서로 만들어진 속도 프로파일을 잘 추종하도록 실험하였다. 또한 일반적인 상태 되먹임제어의 출력을 확인하여 1형 서보시스템과의 성능을 비교한다.



그림 10. 카트 시스템
Fig 10. Cart System

그림 11은 앞먹임 경로에 적분기를 추가하지 않은 일반적인 극점배치방식인 상태되먹임제어만을 이용한 출력응답이다. 사다리꼴 모양의 속도프로파일이 만들어 지고 60cm의 거리를 가도록 속도와 거리가 주어지고 있지만 실제 카트시스템이 움직이는 곡선을 확인하면 입력거리 60cm를 도달하지 못하고 16cm의 거리밖에 움직이지 못하는 것으로 정상상태에서 오차를 확인 할 수 있다.

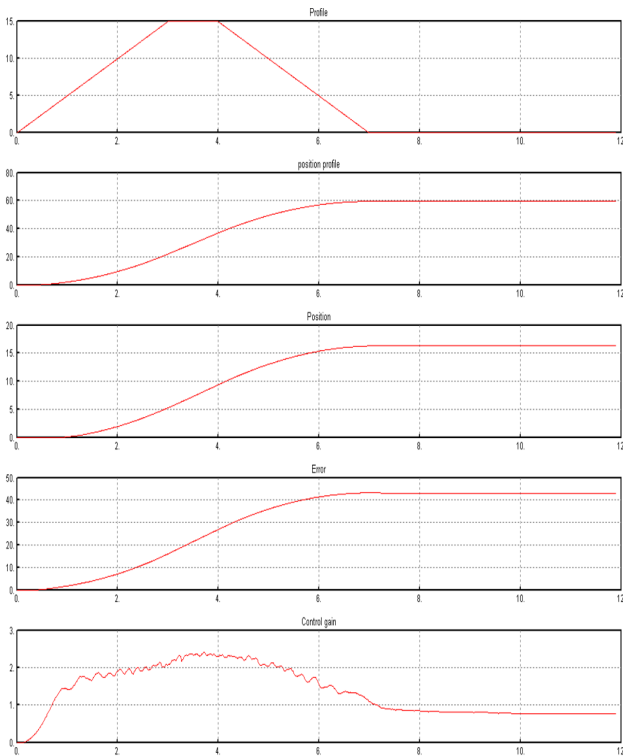


그림 11. 상태피드백제어에 대한 출력 응답
Fig 11. Output Response about State Feedback Control

그림 12에서는 Case 1과 같이 전체이동거리가 가감속 구간보다 길게 설정하여 사다리꼴 모양의 프로파일이 형성하고 이 속도 프로파일을 입력으로 받아 위치 그래프를 그리고 실제 카트가 움직이는 거리를 엔코더로 받아 비교해본 결과 속도 프로파일에 의해 그려진 그래프와 카트가 실제 움직이는 거리와 시간이 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

그림 13은 Case 2와 같이 전체이동거리가 가감속 구간과 같으면 삼각형 모양의 속도 프로파일이 형성되고 이 그래프에서는 최고속도인 v_{max} 를 15cm/sec로 설정하였기 때문에 카트의 속도는 15cm/sec까지 가속하였다가 최고속도에 도달하게 되면 다시 감속하는 형태로 이 속도 프로파일 또한 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 14는 Case 3와 같이 전체이동거리가 가감속 구간보다 짧을 경우로 Case 2와 같이 삼각형 모양의 속도 프로파일을 형성하지만 v_{max} 인 15cm/sec까지는 도달하지 않고 v_{max} 를 향해 가속하다가 도중에 감속하는 형태의 속도 프로파일이며 그림 12에서 알 수 있듯이 이 또한 생성된 입력을 추종하여 이동거리가 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

이와 같이 본 논문에서는 전체이동거리가 가감속 구간보다 길거나 같거나 혹은 짧아도 속도 프로파일이 삼각형이나 사다리꼴 모양으로 잘 생성되고 이를 설계된 1형 서보시스템에 의해 추종하는 것을 검증 그리고 상태피드백제어와 1형 서보시스템의 차이도 확인하였다.

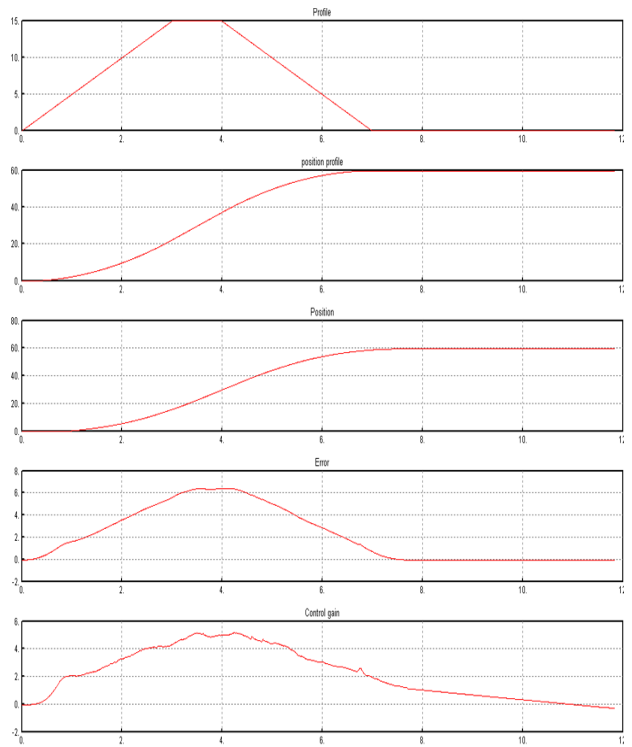


그림 12. Case 1에 대한 출력 응답
Fig 12. Output Response about Case 1

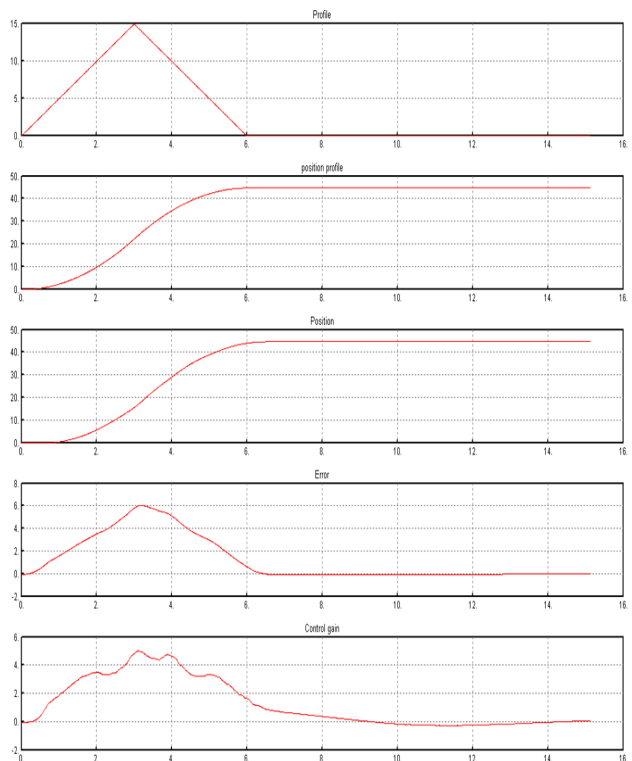


그림 13. Case 2에 대한 출력 응답
Fig 13. Output Response about Case 2

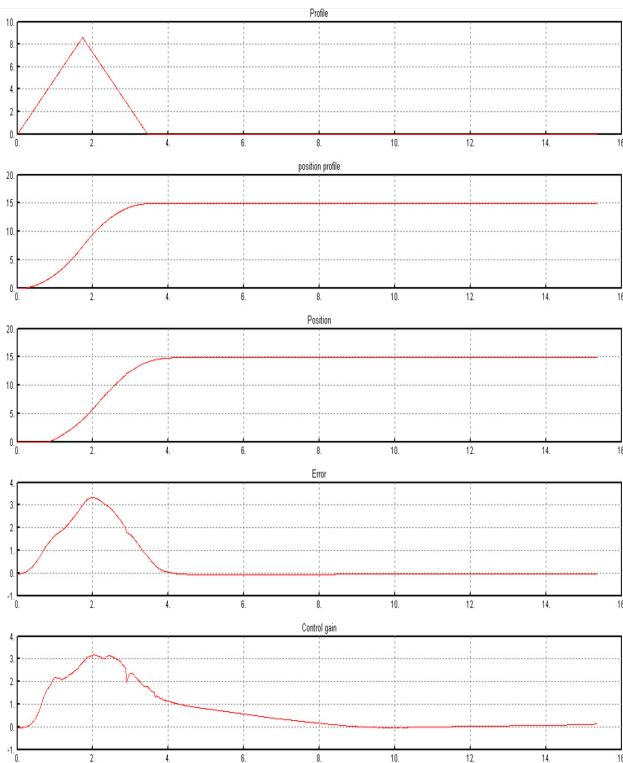


그림 14. Case 3에 대한 출력 응답
Fig 14. Output Response about Case 3

6. 결론 및 고찰

본 논문에서는 AGV 시스템의 가감속 위치제어를 위한 가감속 프로파일 기반의 위치제어에 대해서 DC 모터 실험을 수행하였다. 제안한 속도 프로파일은 최고 속도와 가속도, 전체 거리를 설정하여 구성하였으며, 목표 거리 변화에 따른 속도 프로파일 변화를 통하여 동작하는데 있어서 발생하는 DC모터의 부하를 줄이도록 하였다. 또한 서보시스템이 추가된 상태 제한 제어를 사용하여 생성된 속도 프로파일을 추종함으로써 위치제어를 하도록 하였다. 제안된 방법은 Matlab 모의실험을 통하여 검증하였고 이를 Case 1, Case 2, Case 3와 같이 속도 프로파일의 형태에 따라 그를 입력으로 (주)CEMWARE의 CEM-IP-01에 적용한 결과 각각의 속도 프로파일에 대하여 사다리꼴 모양의 속도프로파일 혹은 삼각형 모양의 속도프로파일을 잘 추종하여 원하는 위치에 원하는 속도로 도달 하는 것을 확인하므로 제어기의 성능을 검증 할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 아경산업 자동화연구소, “서보모터 제어이론과 실습”, 성안당 2002.
- [2] Chi-Tsong Chen's, “Linear System Theory and Design 3rd ed”, Oxford University Press, 1999

- [3] 김종식 외 3명 공저, “제어시스템설계”, 청문각, 2006.
- [4] Katsuhiko Ogata, “현대제어공학”, 사이텍미디어, 2002.
- [5] N. S. Nise, “Control Systems Engineering”, Wiley, 2008.
- [6] 이춘우 외 3명 공저, “공대생을 위한 일반 물리학”, 성안당, 2008.
- [7] 정현술 저자, “MATLAB 제어시스템 해석 및 설계”, 아진, 2008.
- [8] 한태환 한수희 공저, “CEMTool 활용 제어시스템 해석 및 설계”, 기전연구소, 2006.
- [9] 문승빈 외 5명 공저, “지능형 로봇공학”, 사이텍미디어, 2010.
- [10] 신춘식. 외 2명 공저, “MATLAB과 함께한 제어시스템 해석 및 설계”, 동일, 1999.

저 자 소 개



이종연 (Jong-Yeon Lee)

2011년: 국립공주대학교
전기전자제어공학부 공학사
2011년 3월~현재: 동 대학원 석사과정

관심분야: 자동제어, 최적제어,
강인제어, 비선형제어
E-mail: leejy@kongju.ac.kr



현창호(Chang-Ho Hyun)

1999년: 광운대학교 제어계측공학과 공학사
2002년: 연세대학교 전기전자공학과 공학석사
2008년: 연세대학교 전기전자공학과 공학박사
2008년 3월~2009년 8월: 삼성전자 책임연구원
2009년~현재: 국립공주대학교 전기전자제어공학부 교수

관심분야: 지능제어, 비선형제어, 로봇제어, 로봇공학
E-mail: hyunch@kongju.ac.kr