

가속도 센서를 이용한 전동기 구동시스템의 제어

■ 설승기 / 서울대 전기·컴퓨터공학부 교수

서론

최근 반도체 공정에 근거한 미세 기계 가공 기술 (Micro Electro Mechanical System; MEMS)의 발달로 인하여 종전에는 불가능했던 소형, 고정밀의 가속도 센서가 폭넓게 활용되고 있다. 이 글에서는 이러한 가속도 센서를 전동기 제어 시스템에 응용하여 어떻게 제어 성능을 향상시킬 수 있는가에 대하여 설명하고자 한다. 가속도는 물체가 힘을 받을 때 나타나는 직접적인 현상이고 가속도의 적분이 물체의 속도가 되며 또한 속도의 적분이 위치가 된다. 따라서 속도와 위치의 정밀한 제어를 위해서는 가속도의 제어가 필요하며 이러한 가속도의 제어는 적절한 가속도의 측정 또는 추정을 통해 가능하다. 통상 직선 운동 또는 회전 운동을 하는 물체의 직접적인 가속도 추정은 매우 어려우며 대개 시스템의 동적 모델에 근거하여 적절한 관측기를 구성한 후 이를 통하여 가속도를 추정하였다. 그러나 최근 MEMS 기술의 근거한 가속도 센서를 이용하면 직접적인 가속도의 측정이 가능하고 이를 통하여 다른 상태 변수 즉 물체에 작용하는 외란, 또는 속도, 위치의 추정이 가능하다. 또한 가속도 그 자체가 직접 제어 대상인 경우 직접적인 가속도 제어를 통하여 원하는 형태의 가속도를 얻을 수도 있게 되었다.

이 글에서는 저자가 최근에 연구한 2가지의 제어 시스템에 대하여 가속도 센서를 적용한 예를 설명하고 그를 통한 제어 성능 개선에 대하여 언급하고자 한다.

엘리베이터 시스템

오늘날 도시생활에서 언제나 쉽게 만날 수 있는 것이 수직 이동을 위한 교통 수단인 엘리베이터이다. 최근의 엘리베이터는 건물의 고층화에 따라 고속화 추세에 있으며 또한 승차감(Riding Comfort) 역시 급속도로 개선되고 있다. 엘리베이터의 고속화는 대형의 고풍력 전동기를 이용하면 가능하나 승차감의 개선은 정밀한 제어에 의해서만 가능하다. 특히 승차감은 사람이 타는 엘리베이터의 승강부(Car 또는 Cage) 부분의 가속도의 변화(가속도, Jerk)에 직접 반비례하므로 전동기를 잘 제어해서 어떻게 승강부 부분의 가속도 변화를 억제하는가가 제어의 관건이다.

엘리베이터의 기본 구조

그림1의 엘리베이터의 기본 구조가 나타내고 있다. 엘리베이터는 승객이 타는 부분인 승강부(Cage)와 승강부의 하중을 보상해 주는 대응추(Counterweight), 그리고 구동전동기로 이루어져 있다. 승강부는 철로 만든 로프에 연결되어 구동 전동기로부터 동력을 전달 받아서 레일을 따라 수직 운동을 한다. 엘리베이터 각 층에는 위치를 판별하는 센서가 있어 정확한 위치에 정지할 수 있도록 도와준다. 브레이크는 엘리베이터의 정지시에 시브(Sheave)를 붙잡아 승강부를 정지하게 한다. 엘리베이터의 최하층 아래 부분에는 완충기(Buffer)가 있어 엘리베이터가 추락하는 최악의 사고에 대해서도 승강부 안의 승객의 충격을 최소화 시킨다. 보상 로프

(Compensating Rope)는 엘리베이터의 상하 운행 시에 메인 로프(Main Rope)의 길이차에 따른 부하의 변동을 보상하기 위해 설치되어 있다.

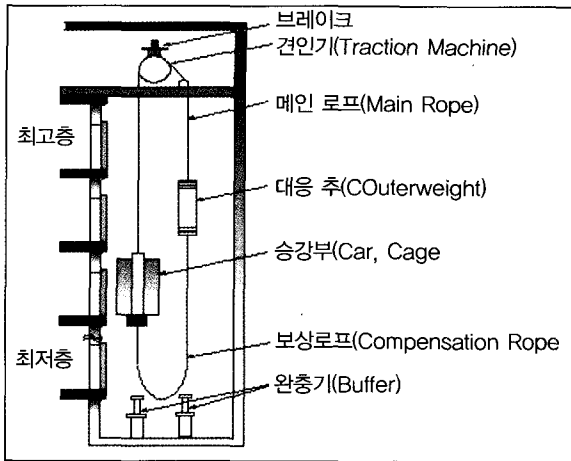


그림 1 엘리베이터의 기본 구조

그림1의 구조의 엘리베이터 시스템은 몇가지 가정하에 그림2와 같은 기계 시스템으로 표현될 수 있다. 여기서 엘리베이터의 로프와 승강부, 대응추의 무게는 스프링과 댐퍼(Damper), 질량으로 이루어지는 시스템으로 표시될 수 있고 이로 인하여 엘리베이터의 승강부는 승강부의 무게, 로프의 종류, 길이에 따라 고유한 진동 주파수를 갖는다.

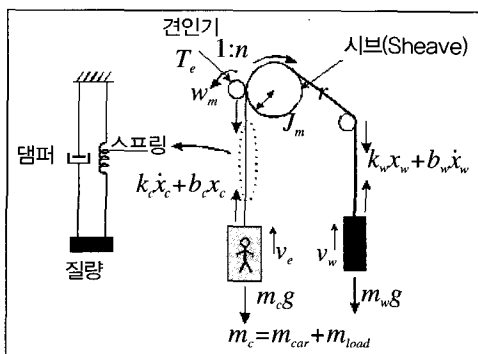


그림 2 엘리베이터의 등가모델

그림3은 1분당 105m씩(105m/min) 이동하는 엘리베이터의 승강부에 충격부하(승강

기 안의 승객이 점프하였을 때)가 가해졌을 때 승강부에서 발생하는 진동을 측정된 것이다. 이를 통해 엘리베이터 시스템이 충격에 따른 고유 진동이 있음을 알 수 있고 그 진동 주파수는 엘리베이터의 승강부가 위치하고 있는 층에 따라 그 주파수가 다르다는 것을 알 수 있다.

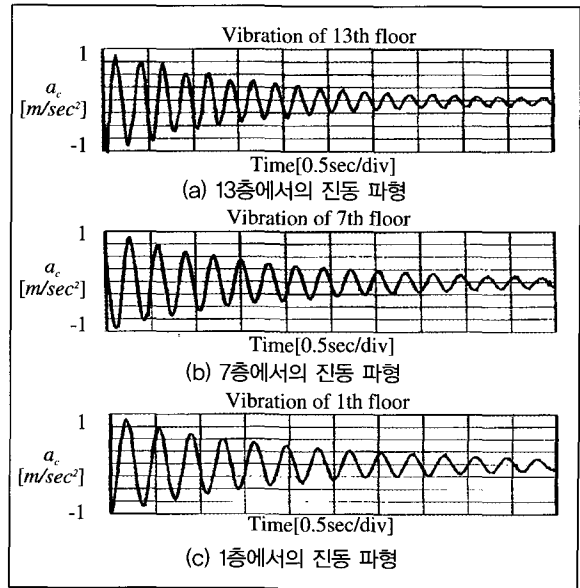


그림 3 각 층에서의 진동 파형

엘리베이터 제어 시스템

이러한 엘리베이터는 그림4와 같은 제어방법에 의해 제어된다. 속도 명령은 그림5와 같이 가가가속(가속도의 미분, Jerk)를 두 번 적분하여 구하고 속도 제어를 통하여 전동기의 실제 속도가 명령된 속도를 따라가도록 제어한다.

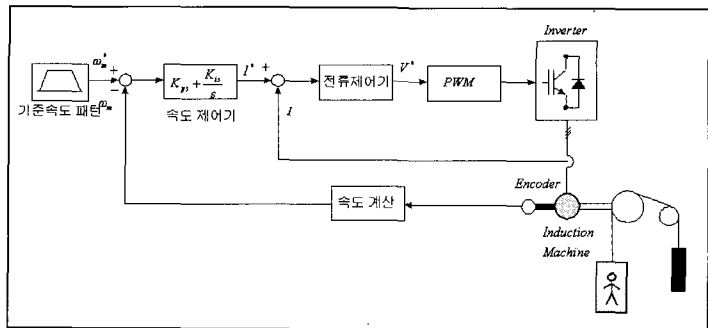


그림 4 속도 제어기만 있는 제어기

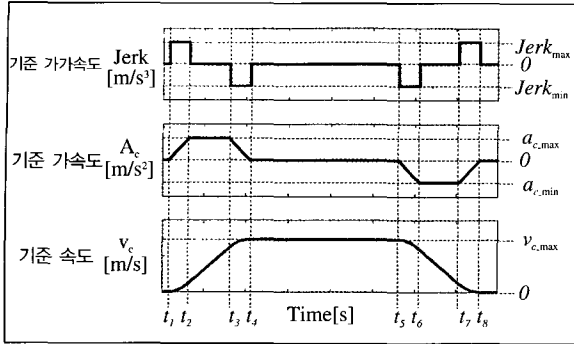


그림 5 가가속도에 의한 기준속도의 계산

그러나 앞에서 언급한 바와 같이 기계적 외란 등에 의하여 진동이 발생할 경우 속도 제어기만으로는 이를 능동적으로 억제할 수 없으며, 특히 승차감은 가속도의 미분에 반비례하므로 진동의 크기 그 자체가 승차감에 나쁜 영향을 주게 된다.

이 경우 그림6과 같이 가속도 제어를 부가하면 승차감은 대폭 개선될 수 있다. 이러한 가속도 제어 구현에 있어 가장 큰 걸림돌은 가속도의 측정이다. 최근 그림7과 같은 가속도 센서를 손쉽게 구할 수 있어 가속도 제어기의 구현이 매우 용이해졌다.

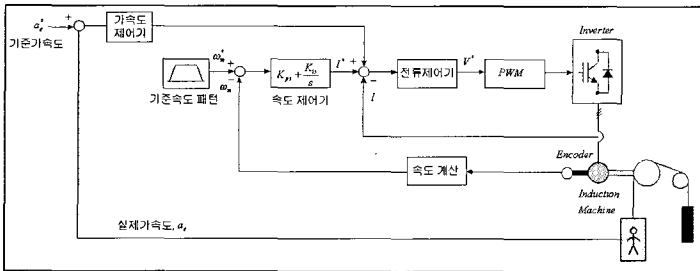


그림 6 가속도 제어를 부가한 전체 시스템

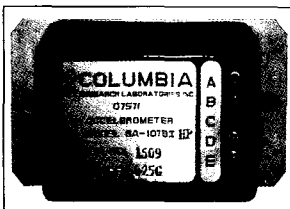


그림 7 가속도 센서의 외관과 제원

- 측정 범위 : 0.25G
- 공진 주파수 : 30Hz
- 정밀도 : 0.1% (=0.00025G)
- 반복도 : 0.03%
- 최대 진동 : 15Grms

이러한 가속도 제어를 부가하여 제어할 경우와 그렇지 않은 경우 엘리베이터 승강부 부분의 가속도 파형

과 이에 대한 주파수 분석 결과가 그림8에 나타나 있다.

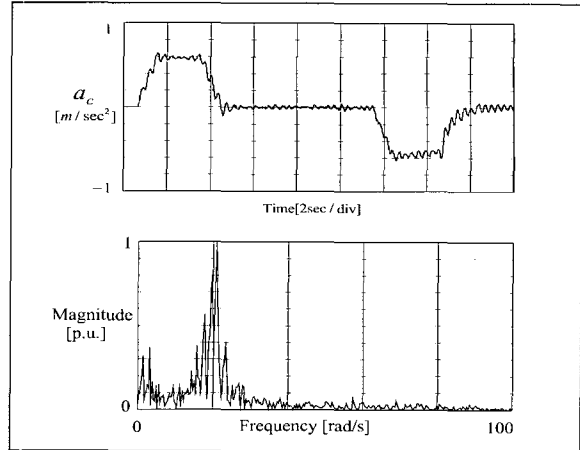


그림 8 (a) 가속도 제어가 없을 때

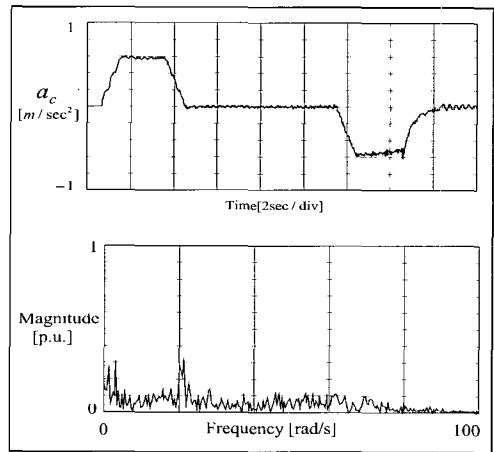


그림 8 (b) 가속도 제어가 있을 때

그림8에서 알 수 있듯이 가속도의 측정과 제어에 의해 승강부에 발생하는 진동의 크기를 1/3이하로 억제할 수 있다.

항만용 크레인의 흔들림 억제 (Anti Sway) 제어 시스템

항만용 크레인의 구조

그림9와 같은 항만용 크레인에서 컨테이너 박스의 이송 시간은 하역 작업의 생산성을 결정한다. 통상 선

박에서 컨테이너를 트럭으로 옮길 때 또는 트럭에서 선박으로 옮길 때 빠른 이송 운동은 크레인의 줄로 인하여 컨테이너에 진동(Sway)이 생기게 한다.



그림 9 항만용 크레인의 구조

이러한 진동이 지속될 경우 정확한 위치에 컨테이너를 내려놓는 것이 어려워지므로 이러한 진동의 효과적 억제에 필요하다. 그림10과 같이 간략히 모델링된 크레인 시스템에서 트롤리(Trolley)를 이동시킴으로써 컨테이너를 이송하게 되는데 이로 인하여 생기는 진동은 트롤리를 제어함으로써 억제할 수 있다. 이러한 진동의 억제를 위해서 진동 제어를 트롤리 제어기에 부가하여 설치함으로써 효과적으로 진동을 억제할 수 있다. 통상의 진동 제어기는 진동각의 측정을 위하여 카메라를 이용하는 비전(Vision) 시스템을 사용한다. 이러한 진동각 측정 시스템은 그림11과 같이 발광부의 적외선 발광 소자로 나오는 빛을 카메라로 감지하여 이를 측정함으로써 진동각을 측정한다. 따라서 비전 시스템은 기상 조건에 영향을 받으며 지속적인 유지보수가 필요하고 고가이다. 그러나 최근의 MEMS기술에 기반을 둔 가속도계를 이용하여 각을 측정할 수 있는 경사계(Inclinometer)를 손쉽게 얻을 수 있다. 이러한 경사계의 원리는 기울어진 각에 따라 센서가 느끼는 중력가속도가 달라짐을 이용하여 각을 측정하는 것이다. 만약 이러한 각도계를 그림10의 발광부 대신 부착할 경우 카메라 없이 기울어진 각 δ 를 측정할 수 있고 이로부터 계산을 통해 진동각 θ 를 계산할 수 있다.

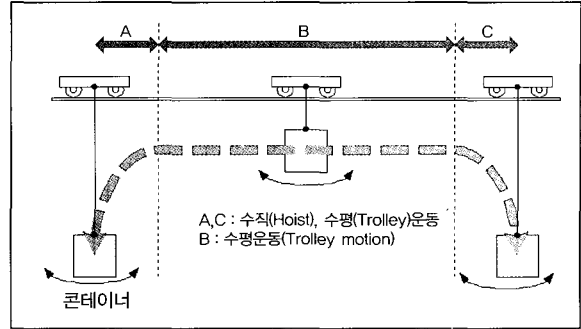


그림 10 트롤리에 의한 컨테이너 이동의 개념도

이와 같은 측정 시스템을 이용할 경우 종래의 카메라를 이용하는 비전 시스템에 비해 1/10정도의 가격으로 유지보수가 거의 필요

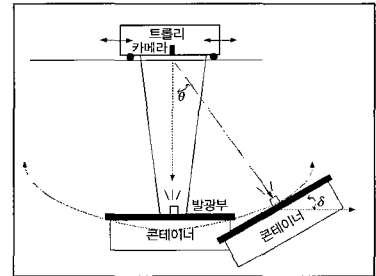


그림 11 비전 시스템에 의한 진동각의 측정

없으며 기상 조건에 강인한 진동 억제 시스템을 구현할 수 있다. 그림12는 이러한 진동을 비전 시스템을 이용하여 측정하였을 때와 경사각도계를 통해 측정하였을 때를 비교한 것이다. 두 측정값의 차이는 0.005rad의 범위에서도 관찰할 수 없을 정도로 일치하였다.

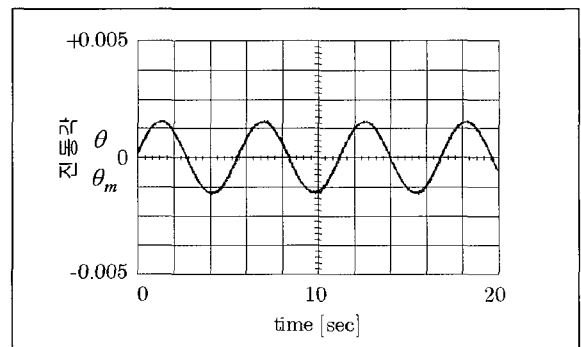



그림 12 비전 시스템(θ_v)과 경사각도계(θ_m)에 의한 진동각 측정치의 비교

진동각의 제어

이러한 각도계에서 계산한 각과 크레인 시스템의 동적 모델을 결합하여 관측기(Observer)를 구성할 경우

진동각 뿐만 아니라 진동각의 속도까지 추정할 수 있어 훨씬 용이하게 진동 억제 제어를 실행할 수 있다. 그림 13은 경사각도계와 크레인의 동적 모델을 고려한 관측기에서 추정된 각과, 두각의 차이, 추정각의 미분 즉 각속도를 나타내고 있다. 그림 14에는 이러한 정보를 근거로 상태궤환 제어를 통하여 진동 억제와 트롤리의 위치 제어를 동시에 수행한 경우 얻은 제어 성능을 표시하였다.



측정범위 : 5 Degree
 공진 주파수 : 30Hz
 비선형성 : 0.02% of full range
 (=0.001 Degree)
 반복도 : 0.0001875 Degree
 해상도 : 0.000125 Degree

그림 15 경사각도계의 외관과 제원

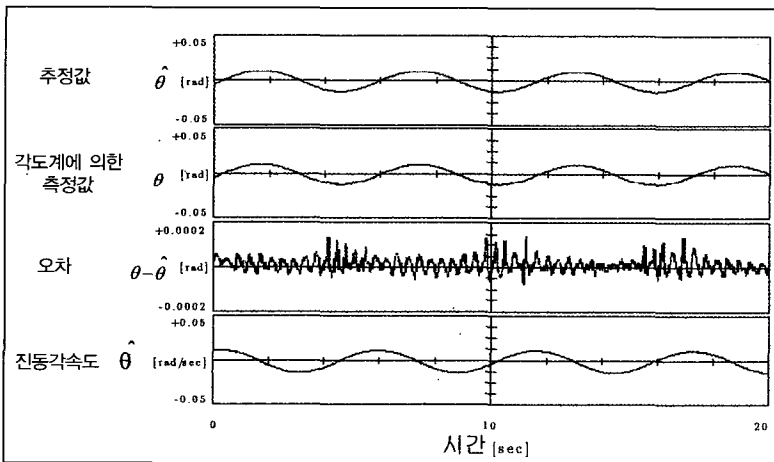


그림 13 진동시 관측기의 성능

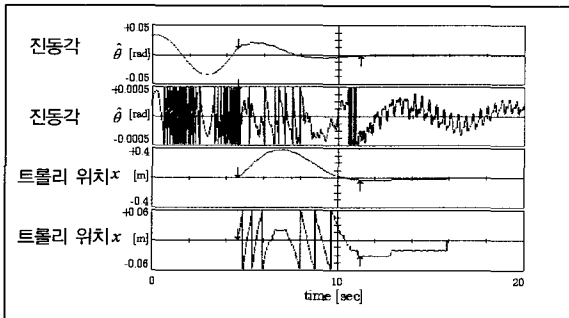


그림 14 경사각계를 이용한 진동 억제 및 트롤리 제어

이때 트롤리로부터 컨테이너까지의 줄길이는 10m이다. 제어를 시작한 후 7초 이내에 진동이 0.0005rad 이

내로 억제되고 위치는 초기 위치로부터 3cm 이내에 접근하였다. 실험에 사용한 각도계의 외관과 제원은 그림 15에 표시하였다.

결론

이상의 두가지 예로부터 알 수 있듯이 MEMS 기술에 근거한 가속도 센서를 잘 활용할 경우 전동기를 이용하는 기계 제어시스템의 성능을 대폭 개선할 수 있으며 또한 내환경 성능을 향상시킬 수 있고 원가를 줄일 수 있다. 이러한 제어방법은 MEMS

기술을 이용한 센서의 발달로 인하여 기계 제어 시스템에 더욱 폭넓게 이용될 수 있으리라 기대된다.

[참고문헌]

- [1] 이영민, "가속도 피드백을 이용한 엘리베이터 진동 억제 제어," 서울대학교 공학석사학위논문, 1999년 2월.
- [2] 김용석, "매달린 부하의 흔들림 억제를 위한 비전 시스템을 사용하지 않는 제어 시스템," 서울대학교 공학박사학위논문, 2002년 8월.