

실시간 비전 시스템을 이용한 도립진자제어에 관한 연구

박종규*, 안태천*

* 원광대학교 공과대학 전기·전자공학부.

A Study on Control of Inverted Pendulum Using Real-Time Vision System

Jonggyu Park*, Taechon Ahn*

* School of Electrical & Electronics Eng. Wonkwang Univ..

Abstract - 본 논문에서는 컴퓨터의 정보처리 능력과 시각기능인 CCD 카메라의 영상처리 능력을 결합시켜 극한 상황에서도 실제 시스템을 효과적으로 제어할 수 있는 실시간 비전시각 제어시스템을 제안하고, 이를 대표적인 벤치마킹 시스템인 도립진자 시스템에 적용하여 실증하였다.

우선, 전용화 된 하드웨어를 사용하지 않고, 컴퓨터를 직접 사용하므로 영상처리 중에 발생하는 많은 데이터에서 필요한 정보를 신속하게 획득하고 처리할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하고, 이를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 또한, 실제 비전 제어시스템을 제작하고, 제안된 알고리즘을 비선형 도립진자의 제어에 적용하여 퍼지 제어를 설계하므로 컴퓨터를 이용한 실시간 비전시각 영상처리 제어의 가능성과 우수성을 입증하였다.

1. 서 론

생명체의 간단한 행동양식인 보고 생각하고 판단해서 움직임을 결정하는 것을 실제 제어시스템에서 구현하기가 어렵다는 것은 과학기술이 급속도로 발달한 지금에도 전체를 모방하기는 보다는 특별한 일부분을 간단히 모방 구현한다는 사실에서 충분히 알 수 있다. 특히 생명체가 어떤 주변의 상황에서 정보를 인식하는데 사용하고 있는 시각을 구현해 내기란 지금의 기술로는 거의 불가능하다. 그래서 실제 시스템에서는 이런 정보를 인식하기 위하여 많은 종류의 센서를 사용하고 있지만 이 센서들에서 얻어지는 정보는 생명체의 시각에서 얻어지는 정보보다 훨씬 미흡함을 알 수 있다. 이와 같은 이유로 실제 제어시스템에서 시각 기능의 비전 제어시스템을 통한 영상입력으로부터 완벽한 제어정보를 추출해 내는 방법에 대한 연구가 끊임없이 진행되고 있다. [1]

디지털 기술의 급격한 발달로 이제는 영상을 디지털화된 정보로 변형시켜서 이것을 분석하여 필요한 정보를 얻으려 하는 시도가 이루어지고 있지만 디지털화 된 영상 데이터 량이 방대하여 어려움을 겪고 있다. 즉, 일반적인 표준 TV의 경우에도 매초 수십 메가바이트(Mbyte)가 필요하지만, 하이비전(Hi-Vision)의 경우는 영상 데이터 량은 그보다 5-6배가 많은 실정기 때문이다. 이런 데이터를 처리하기 위해서는 고속의 하드웨어가 필요하게 되고 고속의 하드웨어를 구성하기 위해서 병렬처리가 불가피해져서 하드웨어의 부피가 커지게 된다. [2] 그래서 고가의 부피가 큰 하드웨어는 실제 제어기의 구성에서 상당한 부담으로 작용하여, 반듯이 필요한 곳이 아니면 비전시스템을 사용하지 않거나, 단지 감시의 용도로 사용되는 정도이다.

본 논문에서는 컴퓨터의 정보처리 능력과 시각기능인 CCD 카메라의 영상처리 능력을 결합시켜 극한 상황에서도 실제 시스템을 효과적으로 제어할 수 있는 실시간 비전시각 제어시스템을 제안하고, 이를 대표적인 벤치마킹 시스템인 도립진자 시스템에 적용하여 실증하였다. 구체적으로 기술하면, 우선 전용의 고속하드웨어를 사용하지 않고, 컴퓨터와 Grabber Board를 사용하여 영상

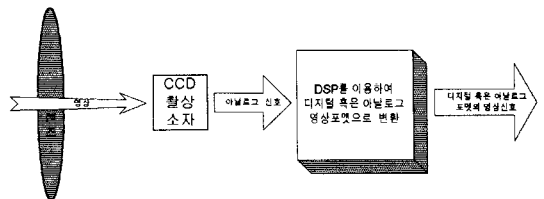
을 획득하고 영상처리 데이터로부터 필요한 정보를 신속하게 추출할 수 있는 새로운 영상처리 알고리즘을 개발하고, 이를 시뮬레이션을 통하여 검증한다. 그리고 실제 비전시각 제어시스템을 실제 도립진자 시스템에 결합시켜 영상처리 비전시각 제어시스템을 제작한다. 제안된 알고리즘을 제작 시스템에 적용하여 제어에 필요한 정보를 영상으로부터 구해내는 알고리즘을 실증한다. 특히, 전문 영상처리보드를 사용하지 않고, 실시간에 많은 영상 데이터를 처리하는 관계로 LUT(Look-Up Table), Tracking Window기법 및 무게 중심법을 도입하여 짧은 시간에 도립진자의 위치와 각도를 효과적으로 추출하고 실시간 처리할 수 있는 새로운 알고리즘을 개발한다. 또한 외란의 영향을 충분히 고려하고 Cart의 비선형성을 극대화한 도립진자 시스템을 사용함으로써 비전시각 제어시스템을 응용한 제어가 강인성을 가지게 설계한다.

이상의 과정을 기존의 PID 제어기에 적용하여 성능평가 실험을 실행하고 제안된 실시간 비전시각 영상처리 제어방법이 우수성과 가능성을 가지고 있음을 입증한다.

2. 본 론

2.1 디지털 영상처리

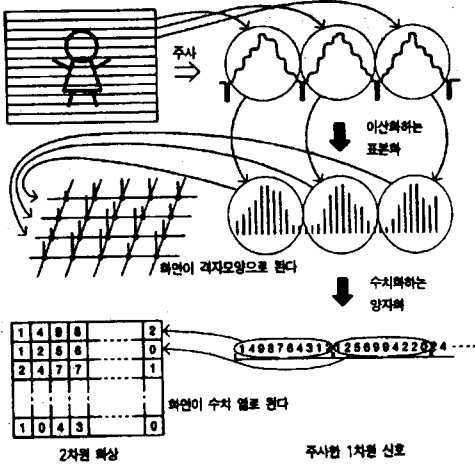
생물체의 시각이든 컴퓨터에 의한 시각이든 시각 작용의 역할은 빛에 의한 영상으로부터 어떠한 정보(Information)를 얻어내는 일이다. [3] 이 빛에 의한 영상은 색의 R(빨강), G(초록), B(파랑)의 삼원색을 여러 비율로 섞음으로써 표현할 수 있다. 영상처리에서 이렇게 생명체의 눈이 하는 일과 같이 빛을 받아들여서 영상을 만들어 내는 일을 하는 장치인 CCD 카메라는 아래의 [그림 1]과 같이 렌즈를 통하여 촬영한 풍경을 CCD 촬상소자에 의해서 아날로그 신호로 바꾸고 이 신호를 DSP를 이용하여 디지털화 하여 여러 포맷의 디지털 영상 포맷으로 혹은 아날로그 영상 포맷으로 변형한다. [4]



[그림 1] CCD카메라의 구조

이와 같이 CCD 촬상소자에서 얻어진 아날로그 영상은 AD 변환부에서 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한다. 디지털 변환과정은 아래의 [그림 2]에서 나타난 것과 같이 표본화와 양자화로 분류된다. 표본화는 신호를 시간적으로 불연속이 되게 하는 것을 말하며 양자화는

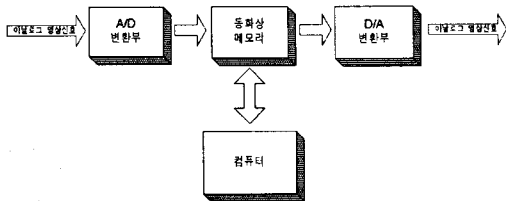
진폭(농도) 방향으로 불연속이 되게 하는 것을 말한다.



[그림 2] 아날로그화상의 디지털화

이렇게 하면 영상신호는 디지털 수치 열이 되므로 디지털 회로에서 처리 가능하게 된다.

본 논문에서는 화상처리를 컴퓨터로 행할 수 있게 아래의 [그림 3]처럼 화상을 Grab해서 화상처리메모리에 담아두고 이 메모리의 화상데이터를 컴퓨터가 읽어와서 최적의 알고리즘으로 짧은 시간에 원하는 데이터를 획득하고 이것을 제어기의 입력신호로 사용할 수 있도록 하였다. [2]



[그림 3] 컴퓨터를 이용한 화상처리

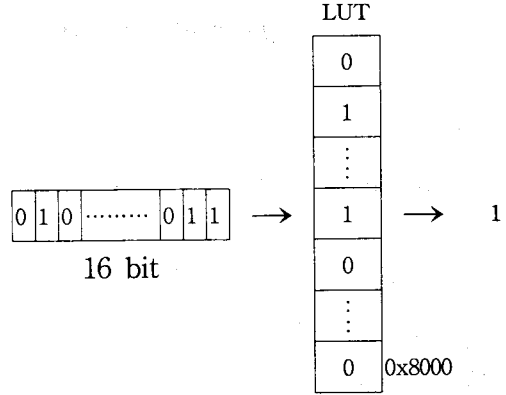
2.2 Look-Up Table

RGB스페이스 상에서 바로 원하는 칼라만을 추출할 수 있는 방법중의 하나가 LUT(Look-Up Table)을 이용하는 방법이다. 본 논문에서 사용하는 칼라 포맷은 16bit RGB로 R,G,B가 각각 5,5,5로 구성되어 있다. (최상위 비트는 사용하지 않는다.) [4]

16bit로 표현될 수 있는 칼라의 수는 $2^{16} = 0xFFFF$ 이고 최상위 비트가 빠지므로 실제의 칼라의 수는 $2^{15} = 0x8000$ 까지로 32K이므로 모든 칼라 값에 대하여 테이블을 만들려면 32K의 테이블이 필요하다. 만들어진 테이블 안에는 아래의 [그림 4]와 같이 그 칼라 값이 칼라 스페이스 상에서 분리되어질 칼라인지 아닌지가 표시되어 있으며 이 테이블은 메모리를 이용하여 쉽게 구현할 수 있다.

LUT을 사용하게 되면 칼라 스페이스 상에서 원하는 칼라를 분리해 내는 모양이 반드시 직육면체일 필요가 없다. LUT을 이용하는 것은 칼라 스페이스 상에서 원하는 임의의 모양으로 칼라를 분리해 낼 수 있다는 것을 의미한다.

따라서 조명에 따라 변화하는 칼라에 대하여 변화하는 각각의 점들을 모두 LUT을 이용한다는 이야기는 칼라 스페이스 상에 나타나는 점들만 분리해 낸다는 이야기는



[그림 4] Look-Up Table

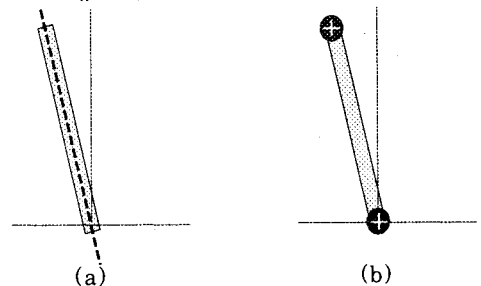
다. 이것은 변화하는 칼라의 최소 영역만을 선택하는 것이므로 다른 칼라와 섞이는 부분을 최소화 할 수 있다. 따라서 이 부분의 칼라 스페이스를 직육면체로 분리하는 것과 비교하여 보면 칼라 스페이스를 직육면체로 분리해 내는 것이 얼마나 많은 빈 공간을 지니고 있는지를 알 수 있게 될 것이다. 그러므로 칼라의 인식에서 빼 놓을 수 없는 전처리 단계를 거치지 않고도 색간의 간섭을 최소화 할 수 있다.

LUT을 이용하여 얻을 수 있는 또 다른 장점은 속도의 향상을 얻을 수 있다는 점이다. 하드웨어적으로는 메모리를 사용하여 참조하게 되겠지만 실제 코딩에서는 배열을 사용하여 한번의 참조만으로 모든 결정이 이루어진다. 반면 Min-Max Threshold를 이용하는 경우는 각각의 축에 대하여 최대, 최소 두 번의 비교로 3축에 대하여 이루어지므로 모두 6번의 비교가 발생한다. 이러한 비교는 매 픽셀마다 이루어지므로 LUT를 사용하면 전체적으로 얼마나 많은 처리가 생략될 수 있는지 알 수 있다.

2.3 Vision을 이용한 Inverted Pendulum제어

LUT을 이용하여 칼라 스페이스 상에서 원하는 칼라를 분리해 내었으면 분리해낸 칼라를 이용하여 Pendulum의 위치와 각도에 관한 정보를 얻어내야 한다.

원래의 Inverted Pendulum제어 문제에서는 Inverted Pendulum과 Cart와의 연결부위에 포텐쇼메터나 인코더를 달아서 각도를 측정하고 이 각도를 0이 되게 하는 것이 목적이었다. 하지만 비전 시스템을 사용하게 되면 Pendulum의 정보를 얻어내는 방법은 2가지정도로 생각할 수 있는데 첫 번째 방법은 아래 [그림 5] (a)처럼 Pendulum의 전체의 칼라를 추출해서 각 점들로부터 가장 근사한 직선을 유추하여 직선의 기울기를 구하는 방법이다. 두 번째 방법은 [그림 5] (b)처럼 Pendulum의 양단에 패치를 붙이고 이 패치의 무게중심을 구해서 $\tan^{-1}()$ 을 구하여 기울기를 구하는 방법이다.



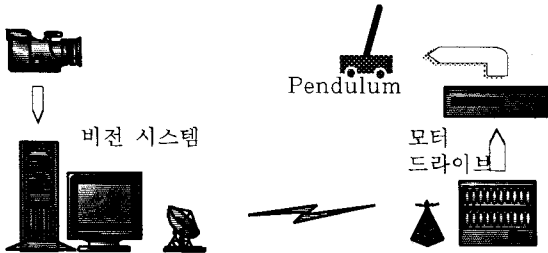
[그림 5] Inverted Pendulum의 각도와 위치

[그림 5] (a)의 방법은 하드웨어적으로 빠른 처리를 할 수 있는 시스템의 경우에 적합하다. 하지만 앞서서 말했듯이 본 논문에서는 화상데이터를 컴퓨터를 사용하여 처리하고자 했으므로 1 프레임당 처리 데이터 양이 많은 이 방법은 적합하지 않다.

본 논문에서는 Vision을 사용하여 Inverted Pendulum의 양단에 달린 다른 색의 Patch의 두 무게 중심을 찾아내어 이 두 점이 수직으로 일직선이 되는 것을 목적으로 하는 위치제어 문제로 변형시켰다. 이 변형으로 복잡하던 Inverted Pendulum의 제어문제는 한 점을 추종해가는 간단한 위치제어 문제로 바뀌게 된다.

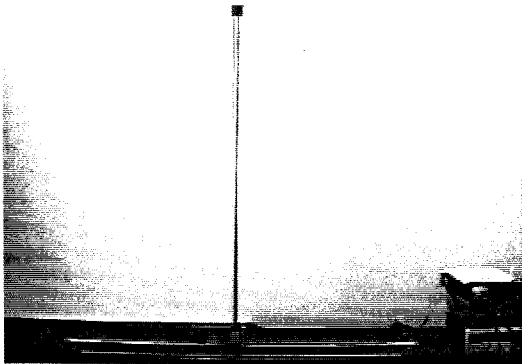
2.4 하드웨어 구성과 실험 결과

하드웨어는 [그림 6]과 같이 크게 3부분으로 나누어진다. 먼저 비전을 처리하기 위한 CCD카메라와 컴퓨터로 구성된 비전시스템과 모터를 제어하기 위해서 Intel사의 제어용 원칩인 80C196KC를 사용한 Motor Drive Board 그리고 Inverted Pendulum 하드웨어로 구성된다.



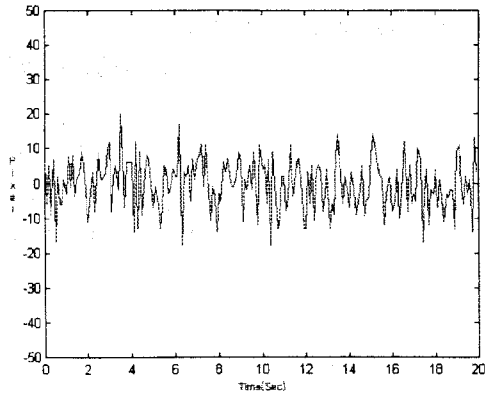
[그림 6] 실제 System 구성도

실제 하드웨어의 구성은 아래의 [그림 7]과 같이 제작되었으며 이 이미지를 Vision System에서 처리하여 Pendulum과 Cart의 끝에 달려 있는 Patch의 중심점을 인식하고 이 Data를 제어 보드에 RF-232통신을 사용하여 전송하여 모터의 이동 위치를 결정하여 Inverted Pendulum를 안정시키게 된다.



[그림 7] Inverted Pendulum

비전시스템을 사용한 Inverted Pendulum에서는 Pendulum끝의 점을 Cart가 따라가는 형태의 제어가 설계되어야 한다. 이 제어기는 간단한 위치제어의 형태이므로 최적화 되지는 않았지만 PID제어기를 사용하여 실제 실험한 결과가 [그림 8]에 나타나있다.



[그림 8] 실험결과

위의 결과는 20초간 두 점 사이의 거리를 Pixel단위로 나타낸 것인데 CCD카메라와 Pendulum사이의 거리에 따라 다르지만 본 실험에서는 1pixel당 약 0.27Cm 정도의 거리의 차이가 나고 제어가 최적화 되지 않은 점을 감안 할 때 상당히 우수한 제어 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

비전시스템은 현재까지 개발되어진 수많은 Sensor중에서 가장 많은 데이터를 획득할 수 있는 시스템이다. 또한 이런 많은 데이터를 쓸모 있는 데이터로 가공하여 시스템에 사용하기 위해서는 많은 시간이 걸리는 것이 사실이지만 하드웨어가 나날이 발전되어 가는 현재는 이 결점이 어느 정도 해소되어 가고 있다. 특히 생명체의 학습, 진화, 판단방법 등이 제어의 중요한 분야로 자리 잡아 가고 있는 지금 생명체의 중요한 인식방법인 시각을 사용한 제어는 좀더 심도 있게 연구되어야 할 것이라고 판단된다. 향후에는 이 비전 시스템을 신경망이나 퍼지 혹은 두 가지를 결합한 제어기에 응용할 수 있는 연구가 계속될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.R.Parker, "Algorithms For Image Processing and Computer Vision", John Wiley & Sons, 1997
- [2] 이상길, "C언어에 의한 디지털 영상 처리", 성안당, 1998
- [3] Dana H.Ballard & Christopher M.Brown, "Computer Vision", PRENTICE-HALL, 1982
- [4] MuTech Corporation, "M-Vision500 Software Development Guide", MuTech Corporation, 1998
- [5] Robert M. Haralick & Linda G. Shapiro, "Computer and Robot Vision", Addison Wesley, 1992
- [6] Milan Sonka & Vaclav Hlavac & Roger Boyle, "Image Processing Analysis, and Machine Vision", Brooks/Cole Publishing Company, Second Edition, 1999