2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2000.7.17-20

실시간 비전 시스템을 이용한 도립진자의 퍼지제어에 관한 연구

최용선*, 박종규*, 임태우*, 안태천*
원광대학교 지능정보제어시스템 연구실

A Study on Fuzzy Control of Inverted Pendulum Using Real_Time Vision System

Yong-sun Choi* Jong-kyu Park* Tae-woo Lim* Tae-chon Ahn*
Departments of Electrical & Ectronics Eng. Wonkwang Uni.

Abstract - In this paper, real-time vision-eyed control system is proposed that combines the information handling capability of computer with the real-time image processing capability of CCD camera, and control effectively real system in the limited environment. The control system is applied to inverted pendulum system, namely, bench marking system. Feasibility of the system is shown in a viewpoint of simulations and experiments.

1. 서 론

기존에 기계적인 센서로 feedback하여 제어한 도립진자를 CCD 카메라에서 획득한 외부 비전을 개인용 컴퓨터를 통하여 퍼지 도립진자 시스템을 제어하고자 한다.

기존의 전용화 된 하드웨어에 의한 비전처리는 하드웨어 처리의 특성상 구현된 알고리듬이 비전처리 유닛의 일정영역에 저장되어 있어 알고리듬의 변형이 어렵고 확장이 불가능하다. 이를 보안하기 위한 연구로 개인용 컴퓨터의 유연성과 정보 처리능력을 이용하여 컴퓨터의 처리 속도의 한계를 극복하기 위한 새로운 비전 시스템과 알고리듬 설계하였다. 처리속도의 향상을 위하여 LUT 기법과 TW기법을 결합시킴으로써 새로운 알고리듬이 설계되었고 이를 실시간 비전 제어 시스템의 패치 추적 시스템에 적용하여 유용성을 확인하였다. 또한, 대표적인 벤치마킹 시스템인 비 선형 도립진자 시스템을 수학적으로 분석하여 동적 방정식을 해석하고, 이를 사용하여 PID 및 퍼지 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 수행하여 실제의 비 선형 도립진자 시스템의 PID 파라미터와 퍼지 제어기의 환산계수 및 퍼지 규칙을 실험을 통하여 추출하였다.

본 논문의 유용성을 위해서 CCD 카메라, 컴퓨터 및 Grabber 보드로 비전 궤환 제어 시스템을 구현하고 이를 실제의 비 선형 도립진자의 시스템에 적용함으로써 컴퓨터를 이용한 실시간 비전 궤환 제어의 가능성과 우수성을 입증하였다.

2. 비전 시스템

2.1 비전 시스템

생물체의 시각이든 컴퓨터에 의한 시각이든 시각 작용의 역할은 빛에 의한 영상으로부터 어떠한 정보를 얻어내는 일이다. 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 렌즈를 통하여 촬영한 영상을 CCD 촬상 소자에 의해서 아날로그 신호로 바뀌고 이 신호를 DSP를 이용하여 디지털화 하여 여러 포맷의 디지털 영상 포맷으로 혹은 아날로그 영상 포맷으로 변형한다.[1]

2.1.1 디지털 영상 처리

본 논문에서는 화상처리를 컴퓨터로 행할 수 있게 아래의 그림 1처럼 화상을 Grab해서 메인 메모리에 PIC 마스터 모드로 담아두고 이 메모리의 화상데이터를 컴퓨터가 읽어와서 최적의 알고리즘으로 짧은 시간에 원하는 데이터를 획득하고 이것을 제어기의 입력신호로 사용할 수 있도록 하였다.[1]

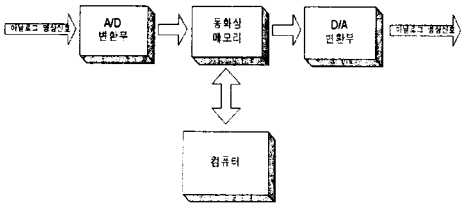

그림 1. 영상데이터 획득

2.1.2 칼라 추출

비전을 이용한 시스템에서는 획득된 화상을 칼라에 의해서 인식되어 필요한 정보를 얻게 됨으로 칼라를 추출하는 것이 제어에 응용된 비전시스템에 있어서는 가장 중요한 역할이다.[2][3] 만일 RGB혹은 YUV값에 대하여 일정한 범위를 갖는 값들을 모아 놓으면 이것은 3차원의 칼라 공간상에서 일정한 영역을 차지하는 직육면체를 구성한다.[4] 이 직육면체는 칼라 스페이스 상에서 원하는 칼라만을 분리해 내는 것으로 외부의 영향에 따라 칼라 값이 변화할지라도 그 값의 변화가 이 직육면체 안에 존재한다면 그것은 동일한 칼라로 취급될 것이고 우리가 원하는 대로 그 칼라를 분리해 낼 수 있을 것이다. 반면 이 직육면체 밖에 칼라 값이 존재한다면 이것은 다른 칼라로 인식될 것이다. 하지만 이는 조명의 영향에 따라 값이 변하게 되므로 여기에서는 HSI모델이나 Normalized RGB 모델을 사용할 경우 조명의 변화에도 비교적 강인하게 칼라를 분리해 낼 수 있다.[5]

2.1.3 Look-Up Table과 위치와 각도 계산

추출하고자하는 컬러를 Table 형태로 만들어 놓고 컬러를 추출함과 동시에 Table에서 컬러를 읽어오기 때문에 컴퓨터에서의 연산 량을 급격히 줄일 수 있어 빠르게 컬러를 추출할 수 있다. LUT을 이용하여 칼라 스페이스 상에서 원하는 칼라를 분리해 내었으면 분리해낸 칼라를 이용하여 진자의 위치와 각도에 관한 정보를 얻어내야 한다.

그림 2와 같은 경우는 양쪽 끝단에 칼라 패드를 부착한 후 LUT에서 가져온 칼라 값과 식(1)을 이용하여 위치와 각도를 계산한다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b+c}\right) \qquad (1)$$

여기서 $a = 2\sum_{i=1}^{n} x_i' y_i'$, $b = \sum_{i=1}^{n} x_i'^2 - \sum_{i=1}^{n} y_i'^2$,

$c = \sqrt{a^2 + b^2}$, $x_i' = x_i - \bar{x}$, $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$

$y_i' = y_i - \bar{y}$, $\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$ 이다.

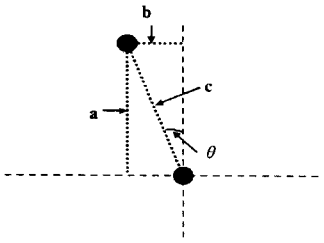

그림 2. 패치를 이용한 위치와 각도

2.2 퍼지 제어기

본 논문에서 퍼지 제어기의 구성은 PID제어 실험을 토대로 얻은 정보를 가지고 소속함수의 영역과 제어규칙 등을 구성하였다. 퍼지 제어기는 PID제어기와는 달리 패치의 위치 결정과 각도 계산 외에 퍼지추론을 위한 계산과정이 필요하다. 퍼지추론은 최대한 속도가 빠른 추론 방법을 사용하기 위해서 2입력 1출력의 퍼지 제어기를 설계한다. 전반부의 퍼지변수에 대한 소속함수는 계산이 간단한 삼각형 형태의 모양으로 정하고 후반부는 퍼지싱글톤을 사용한다. 그리고 무게 중심법으로 비퍼지화 수행한다.[6][7] 또한 퍼지 제어기의 입력으로는 비전을 사용하여 두 패치의 위치를 결정하여 각도로 환산하지 않고 이 두 패치의 거리 차(D_{Err})와 변화량(ΔD_{Err})를 정의하고 출력(U)는 사용된 모터 드라이브가 위치 제어형이므로 Cart의 위치를 이동할 수 있는 펄스의 개수로 정의하였다.

$$D_{Err} = P_{Pendulum}[nT] - P_{Cart}[nT] \quad (2)$$

$$\Delta D_{Err} = D_{Err}[(n-1)T] - D_{Err}[nT] \quad (3)$$

여기서

$$\begin{pmatrix} D_{Err} & : & \text{두패치사이의거리} \\ \Delta D_{Err} & : & \text{거리의변화량} \\ P_{Pendulm} & : & \text{진자쪽패치의위치} \\ P_{Cart} & : & \text{대차쪽패치의위치} \\ T & : & \text{샘플링시간} \end{pmatrix} \text{ 이다.}$$

식(2)와 (3)의 D_{Err}와 ΔD_{Err}을 입력변수로 정하고, 3개의 삼각형 멤버쉽 함수로 전반부를 구성하고 후반부는 퍼지 싱글톤을 사용하여 구성함으로써 추론속도를 향상시킬 수 있다.

2.3 비전 Control 시스템 구성

하드웨어는 그림3과 같이 비전 시스템과 도립진자의 cart를 움직이는 DC Servo Drive와 이것을 제어하는 80C196칩으로 구성된 원칩제어기와 비전 시스템에서 처리하여 얻어진 각도와 위치데이터를 RF통신으로 원칩 제어기에 전달되기 위한 RF통신 묘듈로 이루어졌다.

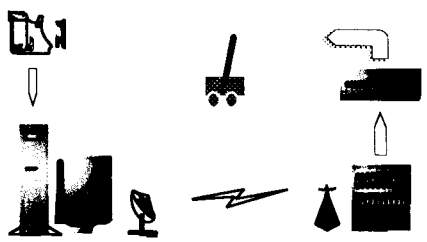

그림 3. 비전 시스템

비전시스템에서 캡쳐보드를 제어하기 위하여 제공하는 vfw(video for window)를 이용하는 방법[8]은 초당 처리할 수 있는 양이 2프레임 정도로 미약해서 그림4와 같이 PCI Local Bus를 사용하여 시스템 메모리에 직접 뿌림으로써 디지털 화상 데이터를 입력받는 시간을 대폭 감소시켜서 초당 30프레임 필드단위로는 60필드를 전송 받을 수 있게 하였다.

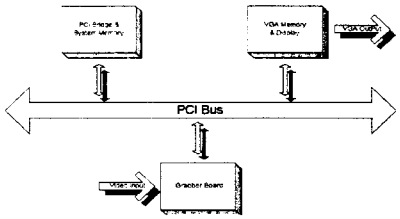

그림 4. PC와 Grabber 보드의 Interface

2.3.1 패치의 인식

빠른 비전처리를 요구하는 시스템에서는 칼라데이터 값을 그대로 쓰는 것 보다 2진 화상을 쓰는 것이 더욱 유리하다. 먼저 칼라에 대한 값들을 임계값 처리를 해서 그 값 내에 들어오면 1, 아니면 0으로 처리한다. 이 것은 앞에서 설명한 LUT에 의해서 이루어지고, 이 값들을 이용해서 기하학적인 정보를 얻어낼 수 있다. 즉 찾고자 하는 물체에 대한 크기와 위치, 각도에 대한 정보를 얻어낼 수 있다. 각각의 물체를 구분하기 위하여 화소들이 서로 연결되어 있는가 또는 떨어져 있는가를 알아야 한다. 일반적으로, 화상 배열에서 서로 이웃하여 있는 화소들의 집합을 연결성분이라고 부른다. 한 연결성분에 같은 라벨(정수 값)을 붙이고, 다른 연결성분에는 다른 번호를 붙이는 처리를 라벨링 이라고 한다. 이런 라벨링 과정을 거친 후에 화소들에 대해 크기 필터링을 한다. 크기 필터링은 잡음이 생긴 2진 화상에서 어느 화소 미만의 연결 성분들을 제거하는 것이다. 크기 필터링을 한 후에 각 그룹에 대해 무게 중심법을 이용해서 그 위치들을 구한다.

2.3.2 Tracking 윈도우 기법

각 패치의 위치를 찾기 위해서 화상의 전체 영역에 대한 조사를 수행하면 초당 한 프레임의 처리시간이 1/30초를 넘을 수가 있다. 그러므로 처음에 전체 프레임을 처리해서 물체의 중심 위치가 정해지면 각 중심 위치를 중심으로 갖는 정사각형의 작은 윈도우 영역(tracking window)을 정의하고 매 프레임마다 그 윈도우 영역 내의 화소들만을 검사한다. 이 Tracking Window기법에 보다 안정성을 기하기 위해서 이전 프레임들에서 계산된 물체의 위치 정보들을 이용해 움직이는 물체의 운동 속도를 추정하고 다음 프레임에서의 물체의 위치를 예측한다.

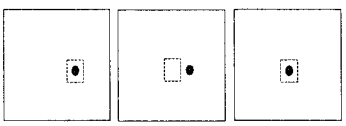

그림 5. Tracking 윈도우 기법

2.3.3 소프트웨어 구성

시스템을 제어하기 위한 소프트웨어는 3부분으로 구성되어 있다. 첫 번째 부분은 두 패치의 색을 추출하여 LUT에 저장하고 패치의 색을 추출하는 부분으로 CCD로 부터의 영상을 Grab해서 화면에 뿌려주면 필요한 패치의 중앙을 Click함으로써 패치의 색분포를 자동으로 LUT에 저장하게 된다. 저장된 LUT가 영상에서 패치의

색을 잘 분리해 내는가 하는 것은 Test Button을 누르므로써 색의 분포로 확인 할 수 있다. 만일 색의 분포가 넓게 나타나면 새로이 색을 추출해야 한다. 두 번째 부분은 그림 7과 같이 각종 설정상태를 조절하고 현재의 시스템의 상태를 모니터링하는 모든 부분이 포함된 메인 창이다. 두 패치의 위치와 각종 상태를 확인하는 모니터링 기능을 가지고 있다. 또한 PID제어기에서 시스템 동작중에도 파라메터를 트랙바의 형태로 미세하게 조정할 수 있게 하였으며 Fuzzy 제어기에서 퍼지 싱글톤의 위치 역시 시스템 동작중에 미세하게 조정할 수 있게 구성되어 있다. 세 번째 부분은 제어기 부분으로 퍼지제어기와 PID제어기를 함수의 형태로 프로그램이 되어 있어 적용하고 싶은 제어기를 선택하여 시스템에 적용할 수 있도록 하였다.

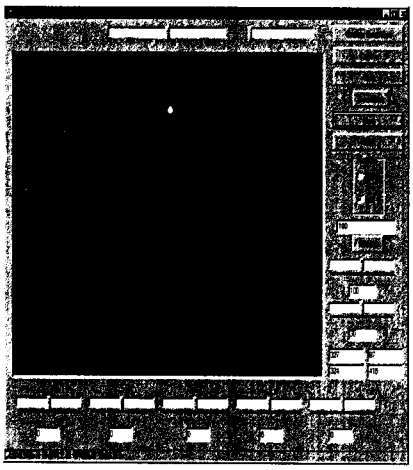

그림 7. Delphi로 구성된 제어화면

2.4 실험 결과

구성된 실시간 비전 시스템을 가진 도립진자 실험장치에서 얻은 결과를 그림 8-11에 나타내었다. 즉, PID제어기와 Fuzzy제어기의 두 패드의 위치 차와 Cart의 위치 변환을 도시하였다. 이상의 실험에서 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

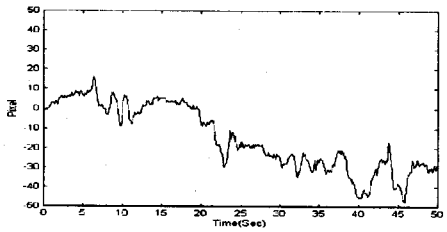

그림 8. PID 제어에서 Cart의 위치변화

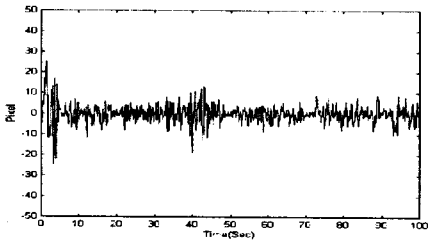

그림 9. PID 제어에서 두 패치의 위치 차

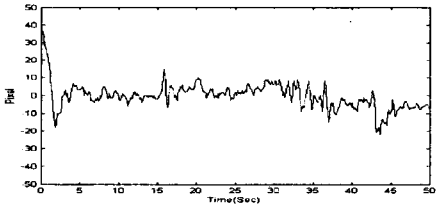

그림 10. 퍼지 제어기에서 Cart의 위치변화

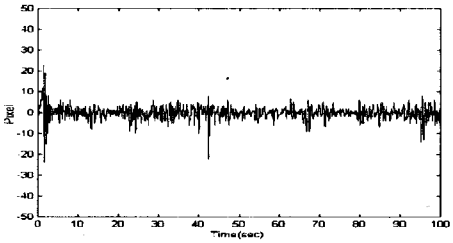

그림 11. 퍼지 제어기에서 두 패치의 위치 차

3. 결 론

본 논문에서는 전문적인 영상처리 제어보드를 사용하지 않고 CCD 카메라로부터 획득한 영상에서 필요한 정보를 프로그램에 의해서 획득하고, 제어시스템에서 가장 일반적으로 이용되는 PID 제어기와 퍼지 제어기를 사용한 도립진자 제어시스템을 구성하여 비전시스템의 가능성과 실용성을 점검하였다. 또한, 본 논문에서는 전용화된 영상처리보드를 사용하지 않고 Grabber 보드와 컴퓨터만으로 영상처리를 하고자 실제 프로그램 코딩에서 최적화된 코드를 생성하는 방법과 보다 빠르고 안정적인 영상처리를 할 수 있게 하는 LUT와 Tracking Window 기법도 제안하였다.

[참 고 문 헌]

[1]MuTech Corporation., "M-Vision 500 Software Development Guide.", MuTech Corporation, 1999.

[2]Milan Sonka, Vaclav Hlavac, and Roger Boyle., "Image Processing, analysis and Machine Vision." Second Edition., Brooks/Cole Publishing Company, 1999.

[3]Shekhar C, Moisan S, Vincent R, Burlina P, Chellappa R., "Knowledge-based control of vision systems.", Image & Vision Computing , V.17 N.9 , 667-683 , 1999/07/01

[4]J. R. Parker., "Algorithms for Image Processing and Computer Vission.", John Wiley & sons, 1997.

[5]Stieber ME, McKay M, Vukovich G, Petriu E.,"Vision-based sensing and control for space robotics applications.", IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement , V.48 N.4 , 807-812 , 1999/08/01

[6]Bart Kosko. " Fuzzy Engineering ". Prentice Hall International , 1997

[7]박종규, 안태천, 윤양웅, " 새로운 합성 추론법에서 DNA 코딩을 이용한 국소 퍼지 규칙의 자동획득", 한국조명·전기학회, 1999/11/30

[8]오성권, "퍼지모델 및 제어이론과 프로그램", 技多利 , 1999

[9]Katsuhiko Ogata., "Discrete-Time Control Systems 2/e.", Jin Young Publishing Co., 1995

[10]채석, 오영석, "퍼지이론과 제어", 청문각, 1997