

## 비전 시스템의 에지 검출 방법을 이용한 도립 진자의 편차 각

\*류상문, 박종규, 한일석, 장성환, 안태천  
원광대학교 공과대학 전기전자공학부

### Deviation Angles of Inverted Pendulum by Edge Detection Method of Vision System

\*Snagmoon Ryu, Jonggyu Park, Ilsuck Han, Sungwhan Jang, Taechon Ahn  
School of Electrical & Electronics Engineering Wonkwang Univ.

**Abstract** - In this paper, the edge intensification and detection algorithm which is one of image processing operations is considered. Edge detection algorithm is the most useful and important method for image processing or image analysis. The vision system based on these processing and concerned in specific project is proposed and is applied to the inverted pendulum in order to automatically acquire the angles between the bar and the perpendicular reference line.

In this paper, the angles that are obtained from some images of computer vision system can offer useful informations for control of real inverted pendulum system. Next, the inverted pendulum will be controlled by the proposed method.

## 1. 서 론

일반적으로 시스템을 추적 동정하는 방법은 크게 두 가지가 있다. 하나는 모델(model)을 기반으로 하는 것이고 다른 하나는 이미지(image)를 기반으로 하는 것이다. 최근 몇 년 동안 이미지를 기반으로 하는 추적 알고리즘은 2차원 환경에서 효과적으로 작용하기 때문에 폭 넓게 이용되고 있다.

특히 머신 비전 시스템은 시각적 이미지를 디지털 표현 형태로 얻고, 데이터를 수정하고, 외부세계의 디지털 이미지의 데이터를 얻는 모든 과정의 요소를 포함하고 있어 다양한 응용을 보장받고 있다. 3D산업이나 사람의 접근이 곤란한 설비나 장비의 제어에 비전 시스템의 도입은 획기적인 발상이라 아니 할 수 없을 것이다.

이렇듯 비전 시스템은 임의의 시스템을 이미지라는 매개체를 통해 얻고 그것으로부터 유용한 정보를 추출, 분석하는 프로세싱을 통해 출력을 얻을 수 제어의 복잡성을 줄일 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 실제 제어 시스템에서 사용되는 제어기가 외란 또는 잡음의 영향으로부터 자유스럽게 만들기 위하여 비전 시스템을 도입한 제어 시스템을 구축하는데 필요한 기초 연구를 수행할 것이다. 이를 위하여 우선, 비전 도립진자 제어 시스템을 구축하고, 비전 시스템의 구성 요소인 카메라로부터 얻어진 이미지를 1차 및 2차 미분을 이용한 에지 검출 알고리즘을 통하여 에지 이미지를 얻어낸다. 다음으로, 이를 컴퓨터 처리하여, 도립진자의 제어 입력요소인 진자 막대와 기준선이 이루는 실제의 편차 각(deviation angles)에 대한 정보를 이미지로부터 자동으로 검출할 것이다.

이 방법은 간단히 편차각의 정보를 제어기에 줄 수 있어, 복잡한 제어 시스템도 비전의 에지 검출 방법을 잘 이용하면 보다 편리하게 제어에 활용될 수 있는 것이다.

## 2. 비전 시스템에 의한 에지 검출

### 2.1 비전 시스템

비전 즉, 시각이란 인간이 우리 주변 세계를 인식하고 이해할 수 있는 정보를 얻는 것이다. 특히 컴퓨터 비전은 이미지를 통해 인식하고 식별할 수 있는 인간의 시각과 같은 결과를 전기적으로 얻도록 하는 과정을 말한다. 다시 말해서 어떠한 임의의 영상이나 또는 특정한 목적에 적용되는 상황을 컴퓨터의 동작으로 연속적이거나 혹은 불연속적인 정보로써 얻어진다.

컴퓨터 비전 시스템은 실제 플랜트에 대한 유용한 정보가 자동으로 분석되고 추출 될 수 있도록 학문적인 측면에서 이론적이고 알고리즘(algorithm)적인 기초를 발전시키는 한 분야로 자리잡아오고 있다. 이것은 특별한 목적에 따라 그 시스템의 구조가 결정되어진다. 문자의 패턴인식이나 로봇의 이동에 필요한 정보인식, 인공 위성과 관련한 영상정보의 해석 등 다양한 목적으로 사용되고 있다.

### 2.2 이미지 처리

이러한 컴퓨터 비전 시스템은 이미지를 생성하고, 처리하여 영상을 해석, 인식하는 영상과 관련된 이미지 처리의 모든 분야를 포함하고 있다. 이미지 처리의 주된 분야로서 잡음이 많은 영상을 개선하고 알아볼 수 없는 영상을 복원하는 영상 조작 분야, 임의의 매체에 인쇄되거나 필기된 글자를 식별, 카메라를 통해 부품의 치수를 측정하고 정밀도를 체크하는 영상 분석 분야가 있고 영상에 존재하는 물체의 종류와 개수 등을 인식하는 영상 인식 분야가 있다.

이미지 처리는 생물학뿐만 아니라 위성 사진을 분석하여 목표물이나 적의 공항, 함정, 미사일 발사 등 군사적 분야에도 적용되고 다양한 문서처리, 공장의 생산 현장에서 영상 처리 시스템은 자동화된 검사와 프로세스 감시에 이용하는 공장 자동화 등 아주 다양하게 응용되고 있다.

### 2.3 에지(Edge) 검출

이미지 분석에서 가장 일반적으로 사용되는 연산의 하나로 물체에 대해 에지를 강화 추출하는 알고리즘이다.

에지는 이미지의 밝기가 갑자기 변화하는 픽셀(pixel)을 나타낸다. 편차를 이용한 연속적인 함수의 변화로서 나타내는 계산법이 미분법이다. 에지란 픽셀의 값이 급격하게 변화하는 부분을 말하므로 함수의 변화량을 조사하는 미분 연산이 에지 추출에 이용한다. 이미지 함수의 경우 이미지 평면 좌표 두 변수에 대해 고려되어진다. 그래서 에지를 표시하는 연산자는 편미분을 사용함으로써 나타내어진다. 미분에는 1차 미분(gradient)과 2차 미분(Laplacian)이 있는데 이미지의 픽셀은 크기와 방향을 갖는 벡터 값으로  $g(x, y) = (fx, fy)$ 로 표현된다.

1차 미분의 크기  $|grad g(x, y)|$ 와 방향  $\phi$ 는 다음과 같다.

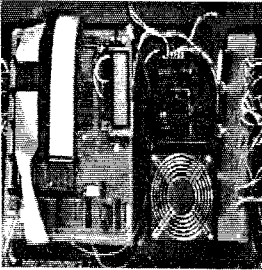
$$|grad g(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

$$\psi = \arg\left(-\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y}\right) \quad (2)$$

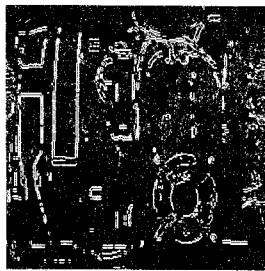
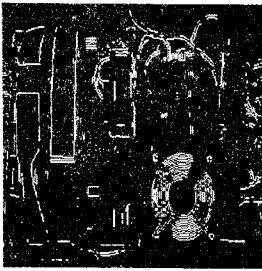
2차 미분은 1차 미분을 다시 미분한 것으로 윤곽의 강도만을 검출하는데 사용되며 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla^2 g(x, y) = \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y^2} \quad (3)$$

<그림 2>와 <그림 3>은 제어기 이미지 <그림 1>을 각각 1차 미분과 2차 미분을 이용하여 에지를 검출한 것이다.



<그림 1> 제어기 이미지

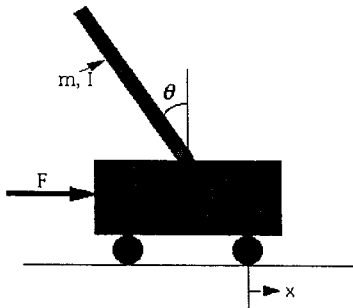


<그림 2> Gradient 결과 <그림 3> Laplacian 결과

### 3. 독립진자 분석

#### 3.1 시스템 방정식

지금까지 제안된 여러 가지 제어이론이 실제 제어에 효과적으로 적용되는가를 시험하기 위해 독립진자 시스템이 이용되어왔다. 독립진자 시스템은 인간과 닮은 보행로봇의 제어에 있어 가장 기본이 되고 있다. <그림 4>는 독립진자의 시스템 제어기로 이 시스템을 수학적으로 모델링하기 위해 다음 몇 가지 사항을 가정한다.



<그림 4> 독립진자

- M : 수레의 질량
- m : 독립진자의 질량
- b : 수레의 마찰
- l : 독립진자 질량 중심까지의 길이
- I : 독립진자의 관성
- F : 수레에 인가되는 힘(force)
- x : 수레의 위치 좌표(coordinate)
- θ : 수직과 이루는 진자 사이의 각

도립진자 시스템의 상태공간 표현식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(I+ml^2)b}{I(M+m)+Mml^2} & \frac{m^2gl^2}{I(M+m)+Mml^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mlb}{I(M+m)+Mml^2} & \frac{mg(M+m)}{I(M+m)+Mml^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x \\ \phi \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I+ml^2}{I(M+m)+Mml^2} \\ 0 \\ \frac{ml}{I(M+m)+Mml^2} \end{bmatrix} u \quad (4)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x \\ \phi \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (5)$$

몇 단계의 대수 과정을 거친 후 선형화된 시스템 방정식은 위의 식(4), (5)와 같은 상태 공간 형태로 나타낼 수 있다. 식(5)는 수레의 위치와 독립진자의 위치를 출력으로 나타내기 때문에 2×4 행렬식으로 나타낸다.

상태 공간 설계 문제에 있어서 다중 출력 시스템을 제어할 수 있을 것이다. 그래서 출력의 첫 번째 열(row)로부터 수레의 위치를 관측할 수 있고 역시 두 번째 열(row)로부터 독립진자의 위치정보를 알 수 있는 것이다.

#### 3.2 이미지 처리

도립진자의 제어를 실행하기 위해 비전 시스템을 이용하였다. 디지털 카메라로부터 독립진자의 이미지를 얻어 1차 미분을 이용한 에지 검출 방법을 적용한 후 그것으로부터 수직 축과 이루는 각 θ를 추출하기 위해 에지 이미지 처리 알고리즘을 사용하였다.

여기에서 θ의 범위는 -90° ~ +90°로 나타내었고 독립진자의 기울기 방향과 θ의 부호는 다음과 같이 정의했다.

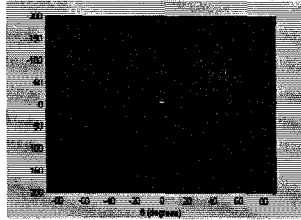
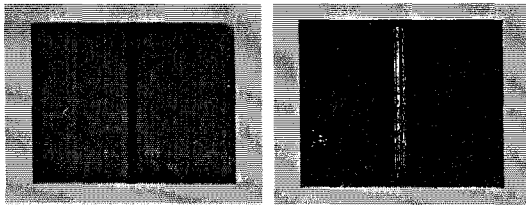
| Invert Pendulum | Left deviation | Right deviation |
|-----------------|----------------|-----------------|
| angle(θ)        | positive value | negative value  |
| 수레이동방향(x)       | negative       | positive        |

<표 1> 독립진자의 편차 값

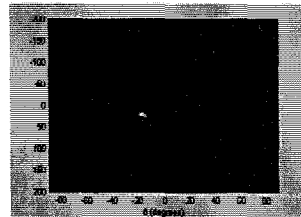
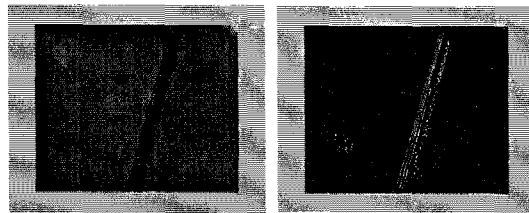
#### 4. 실험적 결과 및 고찰

다음의 그림5-8은 각각 실제 디지털 카메라로 얻은 독립진자 이미지, 에지 추출된 이미지 그리고 에지 추출 이미지로부터 얻어진 각도 정보를 나타내는 이미지들을 보여주고 있다.

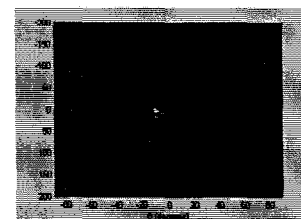
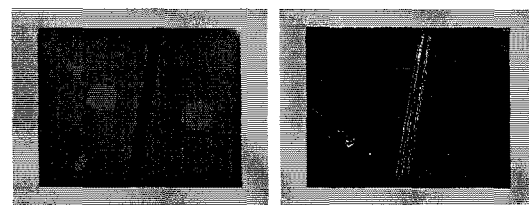
비전 시스템을 이용한 이미지의 각도 추출을 보여주기 위해 4개의 이미지를 컴퓨터 시뮬레이션으로 분석하였다. 그 결과를 요약하면 표 2와 같다. 이 데이터들은 독립진자 제어 시스템의 입력으로 퍼지 변환되어 사용될 것이다.



에지 편차 각 : 0.0도  
< 그림 5 >



에지 편차 각 : -18.16도  
< 그림 6 >

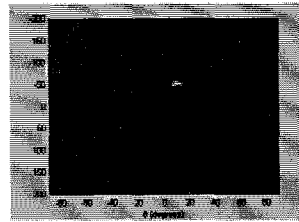
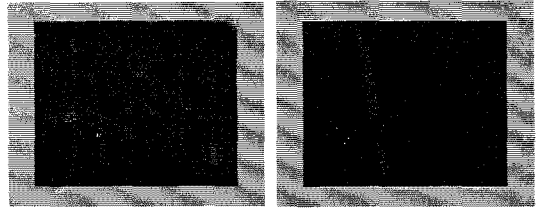


에지 편차 각 : -10.15도  
< 그림 7 >

## 5. 결 론

본 논문에서는 실제 제어 시스템에서 사용되는 제어기가 외란 또는 잡음의 영향으로부터 자유스럽게 만들기

위하여 비전 시스템을 도입한 제어 시스템을 구축하는데 필요한 기초 연구를 수행하였다. 이를 위하여 독립진자 제어 시스템을 구축하고, 독립 진자의 제어 입력요소인 진자 막대와 수직선이 이루는 편차 각의 정보를 이미지로부터 분석하였다.



에지 편차 각 : 11.81도  
< 그림 8 >

|     | deviation angle( $\theta$ ) |
|-----|-----------------------------|
| 그림5 | 0.0°                        |
| 그림6 | -18.16°                     |
| 그림7 | -10.15°                     |
| 그림8 | 11.81°                      |

< 표 2 > 편차각

분석 방법은 비전 시스템의 구성 요소인 카메라로부터 얻어진 이미지를 1차 비분을 이용한 에지 검출 알고리즘을 통해 에지 이미지를 얻었고, 그 이미지를 분석함으로써 실제 각의 크기를 자동으로 측정하였다.

이 방법을 사용함으로써 간단히 각의 정보를 제어기에 줄 수 있어 복잡한 제어 시스템을 비전의 에지 검출 방법으로 보다 편리하게 제어할 수 있는 것이다.

향후 연구과제로는 제어기 시스템에 이미지를 분석하는 알고리즘의 하드웨어를 추가 설계하여 이미지 처리 시간을 단축시켜 실시간 제어를 수행할 것이다.

## [참 고 문 헌]

- (1)Y.Y.Dong, H.Whag and K.V.Lin "Real-Time Image-based Tracking for balancing of Pendulum rod", International Conference on Control, Vol.2, pp.1266-1269, 1998
- (2)R.Deriche and O.Faugeras, "Tracking Line Segment", Image and Vision Computing, Vol.8, No.4, pp.261-270, 1990
- (3)J.H.Duncan and T.C.Chou, "On the Detection of Motion and Computation of Optical flow", IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.PAMI-14(3), pp.346-352, 1992
- (4)Milan Sonka, Vaclav Hlavac and Roger Boyle, "Image Processing, Analysis, and Machine Vision", PWS, Second edition, pp.77-88, 1998
- (5)Ogata, "Discrete -Time Control System", Prentice Hall, Second edition, pp.596-632, 1996