

각막 반사의 매핑을 이용한 비접촉식 눈의 응시점 추정 시스템

유동현, 정명진

한국과학기술원 전자전산학과 전기 및 전자공학전공

Non-contact Eye Gaze Point Estimation System by Mapping of Corneal Reflections

Dong Hyun Yoo and Myung Jin Chung

Div. of Electrical Engineering, Dept. of Electrical Engineering & Computer Science, KAIST

Abstract - 본 논문에서는 컴퓨터의 사용자가 모니터의 스크린 상의 어느 곳을 바라보고 있는지 추정하는 새로운 알고리즘을 제시한다. 적외선 LED와 CCD카메라를 이용하는 이 방법은 기존의 방법과 다르게 5개의 적외선 LED를 사용하는데 적외선의 반사에 의해 눈의 각막에는 네 개의 밝은 점들이 나타나고 이 점을 꼭지점으로 하는 사각형 안에서 동공의 중심이 움직인다는 사실을 이용한다. 이 방법은 눈의 3차원 위치, 카메라의 위치, 모니터의 위치에 따른 관계식을 구할 필요 없이 간단한 계산으로 눈의 응시점을 찾아낼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 여기서는 이 방법을 소개하고 실험결과를 보여준다.

2. 기존의 연구들

기존의 눈 응시 방향 추적기술은 대표적으로 적외선 LED의 반사를 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 적외선 LED의 각막 반사에 의한 밝은 점과 동공의 상대적인 위치를 이용하는 방법이다. 그리고 적외선 LED와 같은 특별한 장치 없이 CCD카메라로부터 얻은 눈의 영상만을 이용해서 추정하는 방법, EOG(Electro-oculography)와 같은 생체 신호를 이용하여 눈의 움직임을 측정하는 방법, 머리 주위에 전기자기장을 형성하도록 하는 특수한 콘택트 렌즈를 이용하는 방법 등이 있다. 이 중에서 적외선 LED의 반사를 이용하는 방법은 다른 방법에 비해 추정 알고리즘이 간단하면서도 가장 높은 정밀도를 나타내고 비접촉식이며 시스템을 비교적 저렴하게 구성할 수 있다는 장점이 있어서 가장 많은 연구가 진행되었다.

1. 서 론

눈 응시 방향 추정 시스템은 사람의 눈이 어디를 쳐다보고 있는지 측정하는 시스템으로 이 시스템에 대한 연구는 시각 시스템과 관련하여 사람의 뇌에서 일어나는 작용을 밝히려고 하는 사람들에게 의해서 처음 시작되었다. 하지만 최근에는 척수 손상과 같은 이유로 손을 사용할 수 없고 목 위로만 움직일 수 있는 장애인들을 위해 이 시스템이 개발되고 있다. 지금까지 이런 장애인들은 컴퓨터를 사용하기 위해서 막대를 입에 물고 키보드 자판을 두드렸는데 상당히 힘이 들고 마우스 포인터를 움직이는 작업은 할 수 없었다. 하지만 척수에 손상이 있는 장애인들의 상당수가 눈은 움직일 수 있다고 한다. 따라서 눈의 응시 방향을 추정해서 모니터의 스크린 상의 어느 점을 바라보고 있는지 알아내고 마우스의 포인터를 움직일 수 있는 시스템을 이용하면 장애인들도 더 편리하게 컴퓨터를 사용할 수 있을 것이다.

적외선 LED를 이용하여 눈의 움직임을 관찰하는 방법은 Mason[1]에 의해 처음 시도되었다. 한 개의 적외선 LED를 이용하여 눈의 각막에서 반사가 일어나도록 하고 카메라로 관찰한다. 카메라로부터 얻은 영상에는 적외선 LED에 의한 밝은 점이 나타나고 동공의 중심 위치를 찾아내어 두 점의 상대적인 위치가 눈의 응시 방향에 따라 변하는 성질을 이용해서 응시 방향을 추정하였다. 이와 같은 방법은 영상에서 동공의 위치와 각막 반사의 위치의 정확도가 중요하는데 동공의 경우 동공의 색이나 주변의 검은자위의 색과 유사하기 때문에 동공의 위치를 찾기가 어렵다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 Hutchinson[2]은 적외선 LED가 카메라의 광축에 가까이 있을 때 눈의 동공이 밝게 빛나는 현상(Bright-eye)을 이용하여 동공을 더 정밀하게 찾아내는 방법을 제시하였다. Cleveland[3]은 동공의 중심과 각막 반사에 의한 밝은 점의 상대적인 위치와 눈의 응시 방향사이의 관계를 수식적으로 정형화하고 캘리브레이션을 통해 수식의 계수를 구하였다. 하지만 이 방법에서는 눈의 응시 방향을 정확히 알아내기 위해서 카메라로부터 눈까지의 거리를 필요로 하게 되는데 거리를 구하기 어렵기 때문에 식을 근사화하여 사용하였다. 따라서 머리의 움직임이 큰 경우에는 오차가 커지는 단점이 있다. Sugioka 등[4]은 이러한 문제를 해결하기 위해서 초음파 센서를 이용해 카메라로부터 눈의 거리를 측정하고 응시 방향 추정에 이용하였다. 하지만 이러한 방법들의 문제는 눈의 기하학적인 형태와 카메라의 위치, 적외선 LED의 위치 사이의 관계를 정확히 모델링하기 어렵다는 것이다.

눈의 응시 방향을 구하기 위한 방법으로는 적외선 LED와 CCD 카메라, 생체 신호, 특수 콘택트 렌즈 등을 사용하는 방법들이 있다. 이 중에서 적외선 LED와 CCD 카메라를 이용하는 방법이 다른 방법에 비해 많이 연구되었는데 이 방법에서는 눈과 카메라, 모니터간의 기하학적인 관계를 유도하고 이를 이용해서 눈의 응시점을 추정하려고 하였다. 하지만 이 관계를 정확히 유도하고 구현하는데 한계가 있어 머리의 움직임이 큰 경우에는 큰 오차를 나타내는 단점이 있었다.

3. 추정 방법

본 논문에서는 컴퓨터의 사용자가 바라보고 있는 모니터의 스크린 상의 점(이하 응시점)을 추정하는 새로운 방법을 제시한다. 이 방법은 비접촉식으로 모니터의 네 모서리에 적외선 LED를 부착하여 적외선이 각막에서 반사(corneal reflection)가 되도록 하고 이를 카메라를 통해서 관찰한다. 카메라로 들어온 영상에는 네 개의 밝은 점(glint)가 있는데 이 네 개의 점을 꼭지점으로 하는 사각형과 눈의 동공의 중심점의 위치 정보를 이용하여 눈동자가 바라보는 점을 추정한다.

2.1 전체 시스템

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의 눈 응시방향 추적 방법에 대해 소개하고 3장에서는 본 논문에서 제시하는 방법을 구체적으로 다루고 4장에서 실험결과를, 5장에서는 결론을 내고 끝맺는다.

전체 시스템은 한 개의 CCD카메라와 5개의 적외선 LED로 구성된다(그림1). CCD카메라는 모니터의 아래 부분에 장착되어 있고 4개의 적외선 LED는 컴퓨터 모니터의 각 모서리에 설치되고 그림에는 나타나있지 않

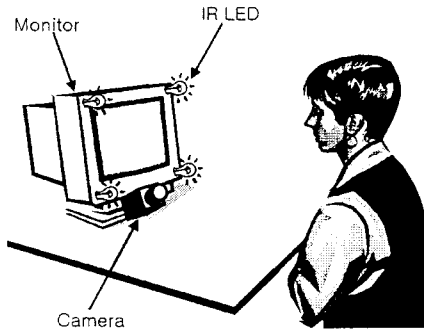


그림 1. 전체 시스템

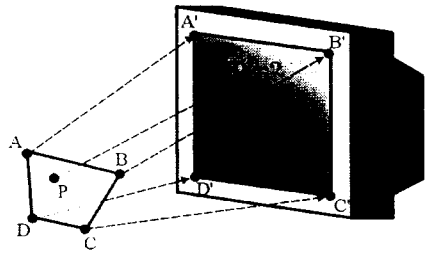
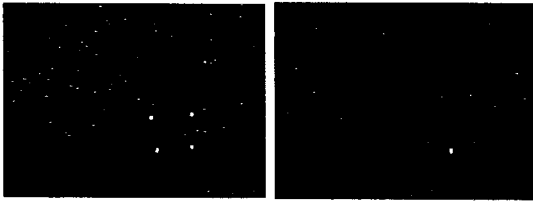


그림 3. 각막 반사에 의한 사각형 (ABCD)으로부터 모니터 스크린 사각형 (A'B'C'D')으로의 매핑



(a) 각막 반사와 Dark eye (b) 동공 반사와 Bright eye 현상



(c) (a)와(b)의 차영상 (d) 추출된 동공 영역과 중심 위치

그림 2. 각막 반사와 동공 반사

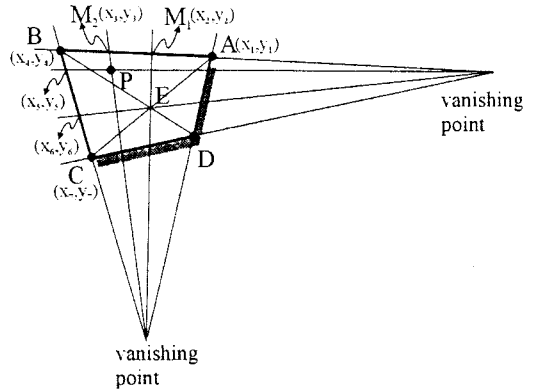


그림 4. 각막에 나타나는 밝은 점들을 꼭지점으로 하는 사각형과 소실점

2.2.1 특징점 추출

응시점의 추정을 위해 사용하게 되는 특징점은 동공의 중심의 위치와 각막 반사에 의한 네 개의 밝은 점들이다. 각막의 밝은 점들은 비교적 큰 밝기값(intensity)을 가지기 때문에 임계값에 의한 영역 분할(segmentation)을 하고 각 영역의 중심을 찾아서 구할 수 있다. 반면 동공의 중심 위치는 동공의 색이 그 주변과 유사하기 때문에 분할하기 어렵다. 본 논문에서는 이 문제점을 해결하기 위해 Ebisawa[5]의 방법을 사용하였다. 카메라의 중심에 위치한 적외선 LED를 켜고 모니터 모서리의 적외선 LED들은 끈 상태에서 영상을 받아들이면 동공이 밝게 빛나는 그림2(b)와 같은 영상(Bright eye)을 얻게 된다. 그리고 카메라의 중심에 위치한 적외선 LED는 끄고 모니터 모서리의 적외선 LED들을 모두 켜면 각막 반사가 일어나면서 이번에는 동공이 오히려 어둡게 나타나는 현상(Dark eye)을 볼 수 있다(그림2(a)). 따라서 짧은 순간에 모니터 모서리의 적외선 LED와 카메라 중심의 적외선 LED를 번갈아 켜면서 연속적으로 두 영상을 얻게 되면(시간차가 충분히 작다면) 눈의 동공을 제외하고 나머지 부분들은 유사한 밝기값을 가지고 동공 부분의 값은 차이가 크게 된다. 이 두 영상의 차를 구하면 동공 부분에 해당하는 픽셀들은 큰 값을 가지고 다른 픽셀들은 작은 값을 갖는다(그림2(c)). 그러므로 임계값에 의한 영역분할을 한 후 영역의 중심을 구하여 동공의 중심 위치를 찾는다(그림2(d)).

2.2.2 Cross ratio를 이용한 응시점 추정

그림4와 같이 각막에 나타나는 밝은 점들을 꼭지점으로 하는 사각형(ABCD)과 모니터의 스크린에 해당하는 직사각형(A'B'C'D')이 있을 때 동공의 중심 위치(P)에 해당하는 모니터 스크린 상의 점(P')을 추정하기 위해 cross ratio를 사용한다. 그림에서 점E는 사각형의 두 대각선의 교점이고 점P는 동공의 중심 위치이다.

만 나머지 한 개의 적외선 LED가 카메라의 렌즈 중심 부분에 위치하고 있다. 카메라의 중심에 위치한 적외선 LED와 모니터 모서리의 적외선 LED를 독립적으로 구동하기 위해서 컴퓨터의 병렬포트를 통해 제어신호를 전달한다.

2.2 응시점 추정 방법

본 논문의 방법은 기존의 방법에서처럼 눈의 응시 방향을 먼저 구하고 눈의 위치와 모니터의 위치에 따라 모니터 스크린의 어느 점을 보고 있는지 다시 계산하지 않는다. 눈의 응시 방향을 구하지 않고 바로 모니터의 스크린의 바라보고 있는 점(이하 응시점)을 직접 추정한다.

모니터의 각 모서리에 위치한 적외선 LED들을 켜고 카메라에 부착된 적외선 LED는 꺼졌을 때 눈의 각막에서 적외선이 반사되어 4개의 밝게 빛나는 점(glint)으로 나타내게 된다(그림2(a)). 이와 같은 반사를 각막 반사(corneal reflection)라고 한다. 적외선 LED가 모니터의 각 모서리에 붙어있기 때문에 각막 반사에 의한 밝은 점들을 꼭지점으로 하는 사각형은 그림3처럼 모니터의 스크린이 투영된 사각형이라고 생각할 수 있다. 그러면 사용자가 모니터를 바라보고 있을 경우에 동공의 중심(그림3의 P점)은 이 사각형 안에서 움직이게 된다. 따라서 사각형A'B'C'D'는 사각형ABCD가 투영된 것이라 할 때 P점으로 투영되기 위한 P'의 좌표를 계산할 수 있고 이 점이 추정된 응시점이 된다.

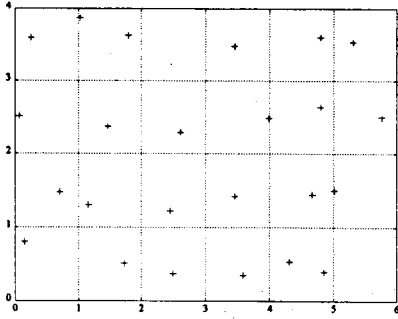


그림 5. 추정된 응시점들의 결과(모니터의 스크린을 6×4의 블록으로 나눈 상태. +표시가 추정된 응시점의 위치를 나타낸다.)

(x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, 7$)는 영상에서의 좌표이다.

(\hat{x}, \hat{y}) 를 추정된 응시점의 스크린 상의 좌표라고 할 때 x 좌표값은 다음과 같이 구한다. 먼저 직선 \overline{AB} 와 직선 \overline{BC} 를 이용해서 소실점을 구하고 두 점 M_1, M_2 의 좌표를 구한다. M_1 은 소실점과 E점을 잇는 직선이 \overline{AB} 와 만나는 점이고 M_2 는 소실점과 P점을 잇는 직선이 \overline{AB} 와 만나는 점이다.

네 점 A, M_1, M_2, B 에 의한 cross ratio는 다음과 같다.

$$CR_x = \frac{(x_1y_2 - x_2y_1)(x_3y_4 - x_4y_3)}{(x_1y_3 - x_3y_1)(x_2y_4 - x_4y_2)} \quad (6)$$

이 cross ratio는 스크린 좌표계 상에서도 같은 값으로 유지되기 때문에 응시점의 x 좌표는 다음과 같다.

$$\hat{x} = \frac{w \cdot CR_x}{1 + CR_x} \quad (7)$$

이 때, w 는 스크린의 가로 길이이다.

같은 방법으로 응시점의 y 좌표를 구해보면

$$CR_y = \frac{(x_4y_5 - x_5y_4)(x_6y_7 - x_7y_6)}{(x_4y_6 - x_6y_4)(x_5y_7 - x_7y_5)} \quad (8)$$

$$\hat{y} = \frac{h \cdot CR_y}{1 + CR_y} \quad (9)$$

이 된다. 이 때, h 는 스크린의 세로 길이이다.

3. 실험

실험에서는 칼라CCD카메라를 사용하였고 영상의 크기는 640×480픽셀이다. 적외선LED는 875nm 파장의 HDSL-4400을 사용하였고 펜티엄II-400MHz 컴퓨터와 17인치 모니터에서 실험하였다.

모니터의 스크린을 6×4의 블록으로 나누고 사용자가 모니터로부터 30cm~40cm정도 떨어진 일반적인 상황을 가정하고 실험하였다. 사용자가 각 블록의 중심을 바라본 상태에서 영상을 얻고 앞에서 설명한 알고리즘에 따라 눈의 응시점을 추정하였다. 알고리즘의 성능을 분석하기 위한 정확한 실제 응시점과 추정된 응시점의 거리 오차를 구할 수는 없었고 추정된 응시점이 실제로 바



그림 6. 부정확한 동공 영역 추출

라보고 있는 블록 안에 들어오는지 확인하였다. 그 결과는 그림5와 같고 성공률은 91.6%이다.

오차가 생긴 원인은 몇 가지로 분석할 수 있다. 첫째는 특징점 추출에서 발생하는 오차이다. 이와 같은 시스템의 성능은 결국 영상에서 동공의 중심 위치와 각막의 밝은 점들의 위치를 얼마나 정확하게 찾아가에 달렸다. 각막 반사의 경우 비교적 찾기가 쉽지만 동공의 중심 위치의 경우는 주변 조명의 변화 등의 원인에 의해서 부정확한 결과를 얻는 경우가 발생한다. 그림6과 같은 경우가 그런 경우이다. 그림은 임계값에 의해 동공의 영역을 분할하여 이진 영상을 만든 결과인데 이런 경우 중심의 위치에 오차가 많이 포함되게 된다. 두 번째 문제점은 모니터, 카메라, 사용자의 눈의 위치에 따라 각막 반사에 의한 밝은 점의 위치가 달라진다는 것이다. 세 번째, 우리는 눈동자의 표면을 평면이라고 가정하였다. 하지만 실제로는 굴곡이 있기 때문에 정밀한 결과를 얻어야 할 경우에는 눈동자의 굴곡을 무시할 수 없을 것이다. 그리고 마지막으로 실험할 때 사용자가 가능한 블록의 가운데를 쳐다보려고 하였지만 눈은 무의식적으로 계속 움직이기 때문에 중심이 아닌 다른 곳을 쳐다봤을 가능성도 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 컴퓨터 사용자의 응시점을 추정하는 새로운 알고리즘을 제시하였다. 이 방법은 기존의 연구들과 다르게 적외선 LED를 4개를 사용하여 얻은 각막 반사의 사각형이 모니터의 스크린의 투영된 것이라는 사실에 따라 응시점을 간단한 계산으로 추정하였다. 이 방법은 기존의 방법과 같이 눈의 위치, 카메라의 위치, 모니터의 위치에 따른 복잡한 계산식을 필요로 하지 않고 특히 카메라로부터 눈까지의 거리를 필요로 하지 않는다.

하지만, 정밀한 결과를 얻기 위해서는 눈의 굴곡을 고려하고 모니터, 카메라, 사용자의 눈의 위치를 고려하도록 알고리즘을 개선할 필요가 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] K. A. Mason, "Control Apparatus Sensitive to Eye Movement", U.S. Patent 3,462,604, August, 1969.
- [2] T. E. Hutchinson, "Human-Computer Interaction Using Eye-Gaze Input", IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics, Vol. 19, No. 6, pp. 1527-1533, 1989.
- [3] D. Cleveland, "Method and Apparatus for Locating Image Features", U.S. Patent 5,231,674, July, 1993.
- [4] A. Sugioka, Y. Ebisawa, and M. Ohtani, "Noncontact Video-based Eye-gaze Detection Method Allowing Large Head Displacements", IEEE Int. Conf. on Medicine and Biology Society, pp.526-528, 1996.
- [5] Y. Ebisawa, "Improved Video-Based Eye-Gaze Detection Method", IEEE Trans. on Instrument and Measurement, Vol. 47, No. 4, pp.948-955, 1998.