

동공 움직임, 각막 반사광 및 Kalman Filter 기반 시선 추적에 관한 연구

고 유 진[†] · 이 의 철^{**} · 박 강 령^{***}

요 약

본 연구에서는 모니터, 카메라 및 눈동자 좌표계간의 복잡한 3차원 관계를 고려하지 않고, 동공의 중심 위치와 모니터의 구석에 설치된 적외선 조명에 의한 네 개의 조명 반사광 사이의 관계를 사용하여 2차원적인 변환 방법으로 사용자의 시선 위치를 파악한다. 동공중심과 조명 반사광을 정확하게 추출하고, 이를 통해 계산된 시선 위치 계산의 정확도에 영향을 줄 수 있는 오차 요소들을 보정하는 것이 본 연구의 목적이다. 이를 위하여, 동공 중심을 통해 계산된 시선위치와 실제 시선 축이 이루는 카파에러를 초기 1회의 사용자 캘리브레이션을 통해 보정하였다. 또한, 칼만 필터를 기반으로 눈의 급격한 움직임 변화에도 각막 조명 반사광을 안정적으로 추적하여 시선 위치를 정확하게 추적한다. 실험 결과, 제안한 연구방법의 시선 위치 추출 오차는 눈의 급격한 움직임 변화에 상관없이 약 1.0°를 나타냈다.

키워드 : 시선위치 추적, 칼만 필터, 눈의 급격한 움직임 변화

A Study on Gaze Tracking Based on Pupil Movement, Corneal Specular Reflections and Kalman Filter

You Jin Ko[†] · Eui Chul Lee^{**} · Kang Ryoung Park^{***}

ABSTRACT

In this paper, we could simply compute the user's gaze position based on 2D relations between the pupil center and four corneal specular reflections formed by four IR-illuminators attached on each corner of a monitor, without considering the complex 3D relations among the camera, the monitor, and the pupil coordinates. Therefore, the objectives of our paper are to detect the pupil center and four corneal specular reflections exactly and to compensate for error factors which affect the gaze accuracy. In our method, we compensated for the kappa error between the calculated gaze position through the pupil center and actual gaze vector. We performed one time user calibration to compensate when the system started. Also, we robustly detected four corneal specular reflections that were important to calculate gaze position based on Kalman filter irrespective of the abrupt change of eye movement.

Experimental results showed that the gaze detection error was about 1.0 degrees though there was the abrupt change of eye movement.

Keywords : Gaze Tracking, Kalman Filter, The Abrupt Change of Eye Movement

1. 서 론

시선 위치 추적은 카메라로부터 입력된 사용자의 눈이 포함된 영상을 이용하여, 사용자가 응시하는 방향을 추적하는 방법으로, 휴먼 컴퓨터 인터페이스(HCI), 가상현실(VR), 안과학, 정신분석학 등과 같은 많은 분야에서 활용되고 있는

연구 중의 하나이다[1-6].

기존의 시선 위치 추적 연구에서 Rikert는 신경망을 이용하여 모니터 상에 사용자가 응시하는 위치를 추정하였지만 [7], 사용자와 모니터 사이의 거리는 고정되고, 입력 영상 내에 얼굴 이외에는 복잡한 배경이 존재하지 않는다는 제약조건이 있었다. 하지만 이 방법은 사용자의 눈 움직임이 아닌 얼굴의 움직임을 추적하여 시선 위치를 계산하므로 정확도가 많이 떨어지는 결과를 나타냈다. 또 다른 연구에서는 카메라와 조명을 HMD(Head Mounted Display)에 설치하여 눈 영상을 입력받아 사용자의 눈동자의 움직임을 사용하여 시선 위치를 계산하였다[2]. 따라서 HMD 모니터와의 거리에 큰 영향을 받지 않고 사용자의 움직임이 자유롭다는 장

* 본 연구는 2008년도 지식경제부 실감형 디지털 엔터테인먼트 플랫폼 기술 개발 사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

† 정 회 원 : 엠텍비전 연구원

** 준 회 원 : 상명대학교 컴퓨터학과 박사과정

*** 정 회 원 : 동국대학교 전자공학과 부교수(주저자 및 교신저자)

논문접수 : 2008년 9월 5일

수정일 : 1차 2008년 12월 10일

심사완료 : 2008년 12월 11일

점이 있지만, 사용자 캘리브레이션 후 HMD가 초기 착용 위치를 기준으로 움직이게 되면, 계산된 시선 위치의 오차가 커지게 되는 단점이 있다.

얼굴 및 눈동자의 움직임을 모두 이용한 시선 추적 연구 중에서, 스테레오 카메라를 이용한 3차원적인 시선 위치 추적에 대한 연구[8]이 있다. 이 방법은 스테레오 카메라와 다수의 조명을 사용하여 사용자의 안구와 모니터의 3차원적인 위치관계를 계산하여 시선 위치를 판단하지만, 2개의 카메라와 다수의 조명을 사용해야 하기 때문에 비용이 많이 들고 시스템이 복잡하다는 문제점이 있게 된다.

그리고 유동현 등은 5개의 조명장치와 눈 영상을 취득할 수 있는 펜/틸트 협각 카메라, 그리고 별도의 광각 카메라를 사용하여 데스크톱 환경에서 시선 위치를 추적하였다[9]. 이 방법은 네 개의 적외선 조명을 모니터 네 구석에 설치하여 모니터, 카메라 및 눈동자 좌표계간의 복잡한 변환이 필요 없게 하였지만, 사용자의 얼굴 움직임이 발생하는 경우 각막에 발생하는 4개의 조명 반사광의 위치가 변화되어 시선 위치 추출의 정확도가 떨어지는 문제점이 있다. 나머지 한 개의 조명은 카메라 렌즈 중앙에 설치하고 모니터에 설치된 조명과 프레임을 번갈아가면서 키고 사용하였다. 이것은 각막의 조명 반사효과(red-eye effect)를 사용하여 동공영역 원활히 검출하기 위함이다.

이러한 시선 추적 연구에서는 사용자의 눈과 응시하는 물체(모니터 등)의 관계를 알아내기 위해 다수의 조명을 사용하는 경우가 많다[8-10]. 다수의 조명을 사용하지 않는 경우에는 복잡한 사용자 캘리브레이션 단계를 거치는 방법이 대부분이다[2, 11].

또한 기존 연구에서는 모니터의 4개 모서리에 4개의 적외선 조명을 설치하고 이를 머리 부착형(Head-mounted) 헬멧에 장착된 카메라로 관측하여 동공의 중심위치와 4개의 조명 반사광과의 상대적인 위치변화를 이용하여 시선위치를 파악하였다[10]. 하지만 이 연구에서도 얼굴움직임에 의해 조명 반사광의 위치가 변화되는 여러 요소를 고려하지 못했으며, 사용자의 동공시선 위치와 실제 시선위치사이의 차이인 카파 각을 고려하지 못했다. 이를 해결하기 위해 또 다른 연구[12]에서는 얼굴 움직임에 따른 4개의 조명 반사광의 위치 변화를 모델링 하여 얼굴 움직임에 따른 시선 위치 정확도를 향상하였으며, 사용자의 카파각을 보정하였다. 하지만 이 연구들[10, 12]에서는 사용자의 시선 추적 중 4개의 조명 반사광중 1개라도 가려져서(occlusion) 없어지거나 잘못 검출되는 경우 시선 추적 에러가 급격히 증가되는 문제점이 있었다. 이를 해결하기 위하여[13] 연구에서는 현재 프레임에서 사라진 조명 반사광의 위치를 이전 프레임에서의 위치 정보 및 Kalman filter를 기반으로 예측함으로써 이러한 문제점을 해결하였다.

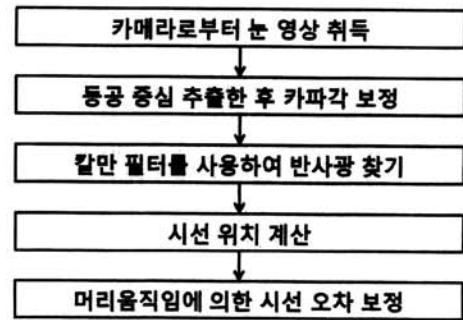
하지만 전술한 Kalman filter 방법[13]의 경우 눈의 급격한 움직임 변화가 발생하는 경우 조명 반사광의 위치를 놓치게 되는 문제점을 내포하고 있다. 이러한 경우 시선 위치 추출 에러가 급격히 증가된다. 이를 해결하기 위하여 본 연

구에서는 매 프레임마다 추출된 동공의 중심 위치를 기반으로 Kalman filter의 예측 윈도우의 크기 및 방향을 적응적으로 결정함으로써 눈의 급격한 방향 변화가 생기는 경우에도 안정적으로 4개의 조명 반사광 위치 및 결과적으로 정확한 시선 위치를 추적할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

2. 본 론

본 연구의 시선 추적 시스템의 개요도는 (그림 1)에서 보는 바와 같이 크게 5단계로 구성된다. 먼저, 시선 추적 카메라로부터 사용자의 눈 영상을 취득한 후, 영상에서 원형검출 알고리즘과 지역 이진화를 통해서 동공 중심을 구한다. 하지만 안구의 회전중심과 동공중심이 이루는 동공 축과 실제 시선 축에는 차이가 있으며, 이 차이를 카파 각(angle Kappa)이라고 한다. 따라서 본 연구에서는 카파각을 보정하기 위해서 시스템 시작 전에 1회 사용자 캘리브레이션을 시행하였다.

다음으로는 모니터의 적외선 조명에 의해 눈에 비친 반사광을 찾는다. 이 때 빠르고 정확하게 찾기 위해서 칼만 필터를 사용한다. 이렇게 구해진 동공중심과 반사광들의 중심을 이용하여, 시선 위치를 계산한다. 또한 제안하는 방법에서는 사용자의 얼굴 움직임에 의한 시선위치 계산 오차가 존재하는데, 얼굴과 모니터, 조명의 위치관계를 고려한 모델링을 통해 이를 보정하였다.



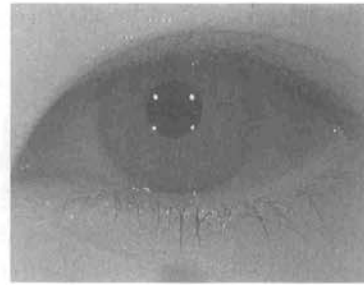
(그림 1) 본 연구의 시선 추적 시스템의 개요도

2.1 시선 위치 추적 장치

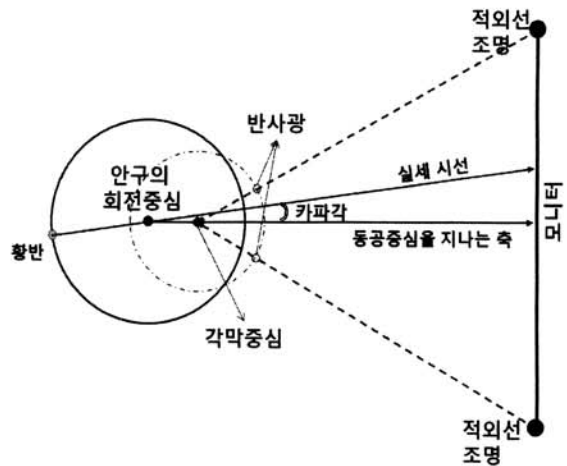
본 연구에서는 (그림 2)와 같이 사용자는 카메라가 부착된 머리 부착용 장치를 착용하고 모니터를 응시하게 된다 [10, 12, 13]. 모니터를 응시하는 동안 머리 부착용 장치에 고정되어 있는 카메라를 통해 실시간으로 눈 영상을 취득한다. 카메라는 머리 부착용 장치에 고정되어 있으므로, 사용자의 머리 움직임에 상관없이 일정한 위치의 눈 영상을 취득할 수 있다. 따라서 머리 움직임을 추적하기 위한 별도의 카메라 장치가 필요하지 않으므로 비용이 절감될 수 있다. 본 연구에서 사용한 USB(Universal Serial Bus)타입의 카메라에는 고배율의 단초점 렌즈를 장착하고 눈에서 최대한 먼 거리 약 15cm에 설치하여 사용자의 시야를 가리지 않도록 하였다.



(그림 2) 제안하는 시선 추적 시스템



(그림 3) 네 개의 반사광이 포함된 눈 영상[12, 13]



(그림 4) 모니터의 조명에 의해 각막면의 반사광이 형성되는 원리에 대한 모델[10][13]

그리고 눈 영상을 취득할 때 외부광의 영향을 받지 않도록 하기 위하여 일반적인 USB 카메라 내부에 있는 '적외선 차단필터'를 제거하고, 별도의 '적외선 투과(가시광선 차단) 필터'를 부착하였다. 모니터의 화면 해상도는 800픽셀(가로)×600픽셀(세로)(SVGA)로 설정하고 실험하였다. 카메라(CCD(Charge Coupled Device) 센서 방식)는 USB방식으로 별도의 프레임 그레버(Frame Grabber)가 필요하지 않다. 입력 영상 해상도는 640×480 픽셀이며, JPEG 5:1 압축을 적용하여 USB 1.0에서 초당 15프레임의 속도로 영상을 입력 받을 수 있다 [10, 12-14].

기존의 2차원적인 방법의 시선 위치 추적 방법에서는 사용자 캘리브레이션이 필수적으로 요구된다[2, 11]. 사용자 캘리브레이션이란, 눈 영상에서의 동공 중심과 모니터의 관계를 매핑하기 위해 모니터 상의 정해진 몇 개의 점을 미리 사용자가 응시하는 방법으로 시선 위치 추적의 전처리 단계이다. 사용자 캘리브레이션 단계가 복잡해질수록 시선 위치 시스템 사용자는 불편을 느낄 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 모니터의 네 구석에 850nm의 파장 대를 가진 적외선 조명 4개를 각각 설치[9]하여 사용자가 모니터를 응시하게 되면 조명이 사용자의 눈에 조사되어 (그림 3)과 같이 네 개의 반사광이 각막 면에 생기게 된다. 눈의 각막 면에 생기는 조명의 반사광(specular reflection)을 'glint' 또는 '1st purkinje image'라고 한다[15].

모니터의 각 모서리에 적외선 조명을 설치함으로써 눈 영

상에 발생하는 네 개의 반사광은 모니터라고 간주할 수 있다. 그 이유는 (그림 4)에서 보면 볼록거울모델(convex mirror model)[16]과 마찬가지로 조명과 눈 영상에서의 반사광을 잇는 직선은 각막 이 이루는 구의 중심으로 들어간다. 따라서 반사광은 모니터에서 해당하는 위치의 조명에 의한 것이라고 할 수 있다.

2.2 시선 위치 추적 방법

2.2.1 동공 검출 및 카파 각 보정

시선 위치 추적 방법에서는 정확한 시선 위치를 계산하기 위해서 영상에서의 정확하게 동공중심을 구하는 것이 중요하다[2, 9, 17, 18]. 본 시스템에서는 두 단계를 거쳐게 된다. 먼저, 머리 부착용 장치에 있는 카메라로부터 사용자의 눈 영상을 입력받은 후, 식 (1)의 원형 검출 알고리즘을 수행하여 영상에서의 동공영역을 찾는다[10, 12, 13, 19].

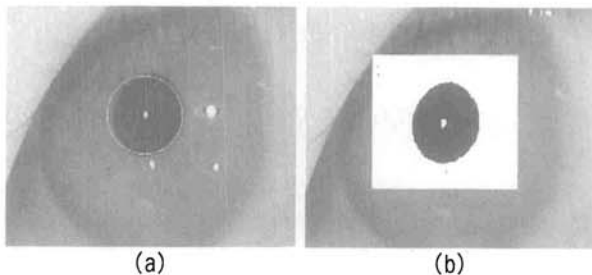
$$\max |G_{\sigma}(r) * \frac{\delta}{\delta r} \oint_{r, x_0, y_0} \frac{I(x, y)}{2\pi r} ds| \quad (1)$$

$I(x, y)$ 는 (x, y) 위치에서의 화소 값을, (x_0, y_0) 은 원의 중심을 의미하고 r 은 반지름을 나타낸다, 식 (1)은 원의 중심인 (x_0, y_0) 로부터 반지름 r 에 의해 $2\pi r$ 로 정규화 된 원의 둘레에 있는 모든 화소 값을 더한다. 그리고 안쪽과 바깥쪽의 원 둘레의 각각의 화소 값의 차가 가장 크게 났을

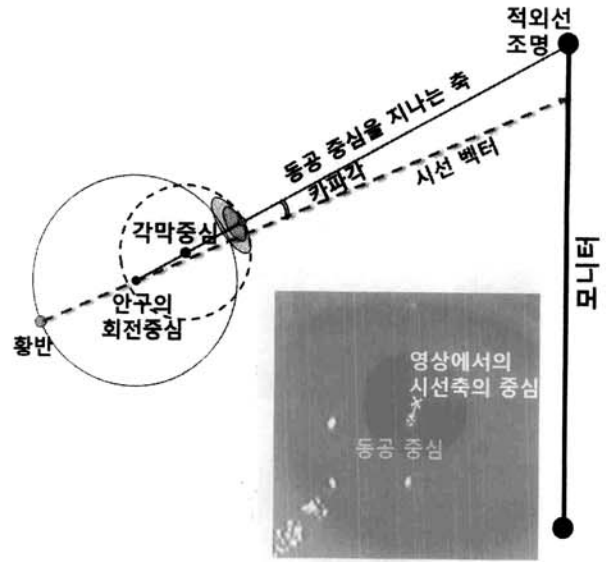
때, 동공영역으로 판단한다. 동공을 추출하는데 홍채 패턴과 같은 노이즈를 제거하기 위하여 반지름 r 의 방향으로 가우시안 함수를 수행한다. (그림 5)의 (a)와 같이 원형 검출 알고리즘으로 동공의 반지름과 중심을 구할 수 있었다. 원형 검출 알고리즘을 사용하여 검출된 동공영역의 정확도를 측정하기 위하여 50명의 사용자로부터 500장의 영상에 대해 성능을 실험하였다. 실험결과, RMS(Root Mean Square) 오차 약 2.3 픽셀(X축 1.5픽셀, Y축 1.7픽셀)이었다. RMS 오차는 검출된 동공의 중심과 영상에서 동공 중심을 수동으로 검출한 차이로 계산하였다[13].

하지만 (그림 5)와 같이 사용자가 모니터의 주변부분을 응시하게 되면 영상에서의 동공형태가 타원으로 되는 경우가 많다. 또한 (그림 2)와 같이 카메라는 사용자의 눈보다 아래쪽에 있기 때문에, 동공은 타원 형태로 취득되는 경우가 많다. 이런 경우에 원형 검출 알고리즘만으로 정확한 동공 중심을 추출하기 어려우므로, 추가적으로 원형 검출 알고리즘으로 구한 동공의 중심을 기준으로 일정한 크기의 영역에 지역 이진화(local thresholding)과정을 수행하였다[20]. 위에서 언급했듯이 본 시스템에서 사용한 카메라 렌즈 전면 에 적외선 투과필터를 부착하고 적외선 차단필터를 제거하여 주변광에 영향을 받지 않고 항상 일정한 밝기를 유지할 수 있었다. 따라서 (그림 3과 5)의 (a)에서 보는 바와 같이 동공 영역은 주변 영역보다 밝으므로 Otsu 알고리즘을 사용하여 임계치를 쉽게 결정할 수 있었다[13, 21]. 이때 (그림 5)의 (b)와 같이 적외선 조명의 반사광에 의해 동공 부분이 흰 점이 표시되는 경우가 종종 발생하며 이러한 경우 단순 무게 중심을 이용하게 되면 동공 중심의 오차가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 이진화된 영역의 기하학적 무게중심으로 기준으로, 다시 한 번 동공 경계부근보다는 중심부근의 픽셀 위치들에 가중치를 부여한 기하학적 무게중심을 구하여 동공 중심의 위치 추출 정확도를 향상하였다.

본 시스템에서의 동공 검출 방법의 정확도를 측정하기 위해 역시 50명을 대상으로 각각 10장씩, 총 500장의 영상을 가지고 실험해 본 결과, 평균 RMS(Root Mean Square) 오차는 약 1.56픽셀(x축으로 1.1픽셀, y축으로 1.1픽셀)로 단순 원형 경계 검출 방법을 사용했을 때보다 성능이 향상됨을 알 수 있었다[13].



(그림 5) 동공 검출 예 : (a) 원형 검출 알고리즘을 수행한 결과를 확대한 그림 (b) (a)의 결과에 지역 이진화를 수행한 결과를 확대한 그림



(그림 6) 카파각의 개념도와 예 [22]

하지만 (그림 6)에서 보는 바와 같이 사람이 보는 실제 시선 벡터는 안구의 회전 중심에서 동공의 중심을 잇는 벡터가 아니라, 망막 뒤쪽의 황반중심과 안구의 회전 중심을 잇는 벡터이다. 이 두 중심 간의 각을 카파 각(Angle Kappa)이라고 한다[18, 22].

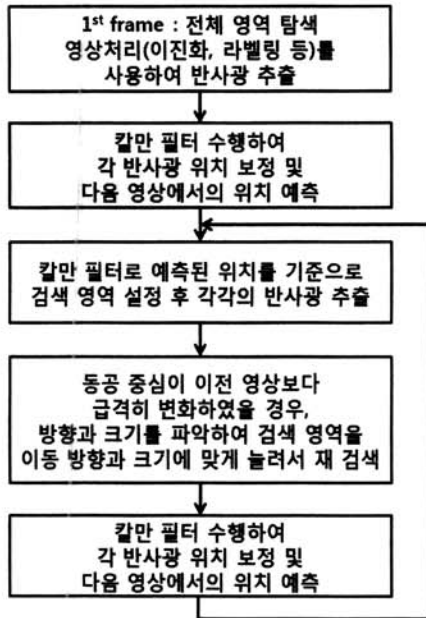
(그림 6)의 오른쪽 하단에 있는 그림은 사용자가 모니터 오른쪽 상단에 있는 조명을 응시했을 때를 취득한 영상이다. 사용자는 적외선 조명을 보고 있지만, 영상에서의 반사광은 동공중심과 일치하지 않는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 개인마다 카파 각이 다르기 때문에 본 연구에서는 초기에 사용자 캘리브레이션 시 모니터 중앙을 1회 쳐다보도록 하여 이를 보정하였다.

2.2.2 반사광 검출

위에서도 언급한 것처럼, (그림 4)와 같은 이유로 모니터에 설치된 적외선 조명에 의해 생기는 반사광은 모니터로 간주할 수 있다. 시선 위치 추적을 하기 위해서는 모니터와 동공 중심의 관계를 바탕으로 계산한다. 따라서 동공중심 뿐만 아니라, 반사광의 중심을 정확하게 추출하는 것도 중요하다. (그림 7)은 본 시스템의 반사광검출의 흐름도이다.

본 연구에서는 칼만 필터를 매 프레임에서 수행하여 반사광을 검출하였다. 칼만 필터는 관찰 과정만을 고려하는 것이 아니라 대상 변수가 변화하는 모델까지 고려하는 순환 함수이다. 따라서 객체를 추적하는데 널리 사용된다[23][24]. 칼만 필터를 수행하기 위해서는 반사광의 위치정보가 필요하기 때문에, 실시간으로 동작하는 시스템에서의 첫 번째 프레임에서는 전체 영역에 대해 영상처리방법(이진화, 라벨링 등)을 사용하여 네 개의 반사광중심을 추출한다[20]. 추출된 반사광의 중심을 다음 프레임에서의 해당 반사광을 찾는 데 필요한 정보로 사용된다.

본 시스템에서 사용된 칼만 필터는 식 2에서 보는 바와 같이 등속도 운동을 하여 네 개의 반사광을 찾게 된다. 이전

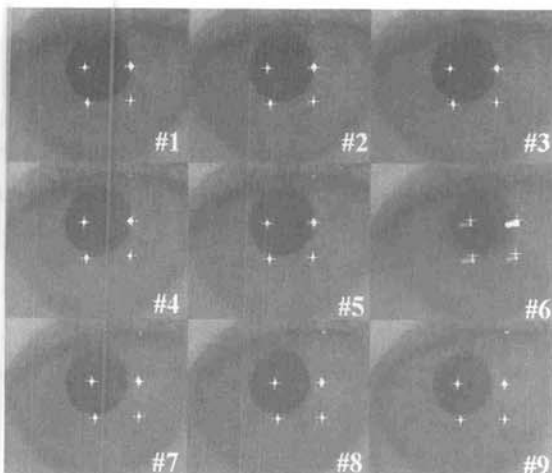


(그림 7) 칼만 필터 기반 반사광을 검출하는 흐름도

프레임에서의 반사광의 위치를 칼만 필터를 통해 다음 프레임에서의 위치를 예측하게 되면 예측된 위치를 중심으로 일정한 영역에서만 탐색을 한다. 따라서 전체 영역에서 반사광을 찾는 것보다 빠르게 찾을 수 있다. 또한 찾은 반사광의 위치는 칼만 필터를 통해 정확한 위치로 보정하였다[13].

$$\begin{bmatrix} y_k \\ y_k' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{k-1} \\ y_{k-1}' \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x_k \\ x_k' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ x_{k-1}' \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 x_k 와 y_k 는 k 프레임에서의 반사광의 위치이고, x_k' 와 y_k' 는 각각 x_k 와 y_k 의 속도를 나타낸다. 는 본 시스템에서 사용하는 카메라의 영상입력의 시간 간격인 66ms라고 간주할 수 있다. (그림 8)은 순차적인 영상에 대하여 칼만 필터를 사용하여 반사광을 찾은 예를 보여주고 있다.



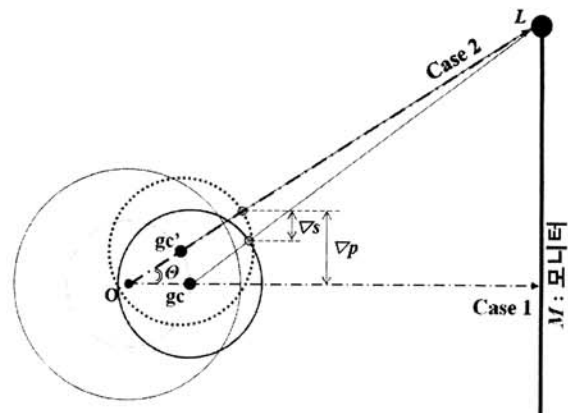
(그림 8) 연속영상에 대하여 칼만 필터로 검출된 반사광의 위치

하지만 모니터 구석에 달려있는 적외선 조명이 카메라에 의해 가려질 경우 해당하는 반사광이 영상에서는 없어진다. 이러한 경우에는 모니터를 나타내는 반사광이 3개밖에 없으므로 시선 위치를 파악할 수 없다. 따라서 이런 경우를 해결하기 위하여, 본 연구에서는 이전 프레임에서 칼만 필터로 예측한 위치를 없어진 반사광의 위치로 대체하였다[13].

일반적으로 칼만 필터는 등속도 혹은 등가속도 운동을 기반으로 하는 필터이기 때문에, 추적하는 객체의 속도가 갑자기 바뀌거나 방향 전환 시 잘 찾지 못하는 문제점이 있다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 기존에 반복적 칼만 필터 (Iterative Kalman filter)등을 사용하는 방법들이 있으나 이 역시 처리 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다[25]. 본 시스템에서 사용하는 USB 카메라는 매 프레임 당 영상 입력 시간 간격이 66ms이기 때문에 영상 한 프레임에 반복적으로 칼만 필터를 수행한다면 처리시간이 지연되어 본 시스템에서는 적용하기 어렵다.

기존 연구[13]처럼, 본 연구에서도 등속도 운동을 하는 칼만 필터를 그대로 사용하였을 경우 사용자가 시선의 방향을 전환하여 응시하거나, 빠르게 다른 곳을 응시했을 때 예측된 반사광을 가지고 현재 프레임에서의 해당 반사광을 찾지 못하였다. 따라서 이런 문제점을 해결하기 위해서, 본 연구에서는 시선 방향은 동공이 이동하는 방향으로 간주할 수 있으므로 동공의 이동방향에 따라 반사광의 검색영역을 늘려서 재탐색하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 사용자의 시선 움직임 방향을 동공의 위치를 사용하여 알 수 있다. 이전 영상에서의 동공의 위치와 현재 영상에서의 위치의 차이로 이동 방향과 크기를 파악할 수 있다. 만약, 갑자기 사용자가 다른 곳을 응시하여 동공의 중심 이동이 클 경우, 반사광도 안구가 회전함에 따라 위치가 바뀌게 된다.

(그림 9)의 Case 1에서 보는 바와 같이, 사용자가 모니터의 중심을 응시했을 때, L (적외선 조명)에 의해 눈에 조사되는 빛은 gc (중앙을 응시했을 때의 각막의 중심)로 들어간다. 하지만 Case 2와 같이 사용자가 안구를 회전하여 L (적외선 조명)을 응시를 하면, 조명에서 눈으로 조사되는 빛은 gc' 로 들어가게 된다. 따라서 안구가 θ 만큼 회전하면 동



(그림 9) 안구의 회전에 의한 동공의 움직임 량과 반사광의 움직임 량의 차이를 분석하기 위한 모델

공은 ∇p 만큼, 반사광은 ∇s 만큼 이동한다. 동공과 반사광의 움직임 량이 차이가 나는 이유는 동공은 반경이 13.5mm를 갖는 안구의 회전 중심을 기준으로 회전하고, 반사광은 조명에서 나오는 빛이 7.7mm의 반경을 갖는 각막 구의 중심으로 들어오게 된다[15, 26]. 따라서 모니터에서부터 중심까지의 거리가 동공과 반사광이 서로 다르기 때문에 움직임 량도 서로 차이가 난다.

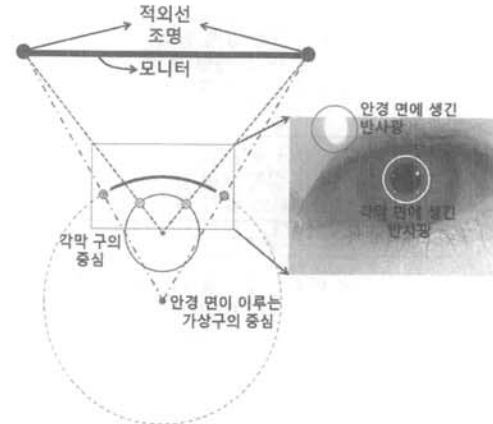
사용자가 안구를 회전하여 생기는 동공과 반사광의 움직임 량을 정확하게 파악하기 위해서는 모니터와 사용자간의 z거리를 알아야 한다. 본 연구는 2차원적인 방법으로 접근하기 때문에 z거리를 파악하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 동공의 움직임 량에 대한 반사광의 대략적인 움직임 량을 사전에 학습을 통해 미리 구하고, 이를 LUT(Look Up Table)로 정의한 후 이를 Kalman filtering 하는 단계에 적용하였다.

본 연구에서는 눈의 깜빡임을 고려하기 위해, 반사광을 검출하기 전 동공영역의 픽셀의 개수를 측정한다. 이 픽셀 개수가 이전 프레임에서의 동공영역의 픽셀 개수의 1/2 이하가 됐을 경우, 사용자가 눈을 감았다고 판단하고 다음과 정인 반사광 검출 및 시선 위치 계산을 수행하지 않는다.

또한 본 연구에서는 칼만 필터 이외에 condensation tracker[29]와 파티클 필터(particle filter)[30]를 적용하여 반사광을 검출하고 검출 정확도를 비교하였다. 실험 결과, <표 1>에서와 같이 condensation tracker와 파티클 필터보다 본 연구에서 적용한 칼만 필터를 적용한 방법의 정확도가 가장 높은 것으로 측정되었다. 측정한 RMS 오차는 검출된 반사광의 중심과 영상에서 반사광의 중심을 수동으로 검출한 차이로 계산하였다 [13].

특히 파티클 필터는 눈이 많이 회전됨에 따라 영상에서 반사광이 없어지거나, 동공이 급격하게 움직였을 경우, 파티클들이 해당 반사광을 검출하지 못하고 다른 반사광으로 파티클들이 이동하여 오검출 하거나 영상 밖으로 사라지는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 Condensation tracker는 눈이 많이 회전됨에 따라 반사광이 없어졌을 경우 검출 정확도가 급격하게 떨어지는 것으로 관찰되었다. 따라서 반사광을 검출하는데 있어서 칼만 필터를 사용하는 것이 가장 적절하다고 판단된다.

앞서 서론에서 언급했듯이, 기존 논문[9]에서는 동공 영역을 찾기 위해 한 개의 적외선 조명을 협각 카메라 렌즈 중앙에 부착하여 사용하였다. 하지만 사용자가 안경을 착용하였을 때, 안경에 의한 반사광이 눈 영역에 쉽게 생길 수 있다. 본 연구에서는 카메라 렌즈 중앙에 적외선 조명을 부착하지 않았다. 따라서 (그림 10)에서 보는 바와 같이 사용자가 안경을 착용하였을 경우, 안경에 의한 반사광은 '각막에



(그림 10) 안경 반사광의 위치 분석을 위한 모델

생긴 반사광보다 바깥쪽에 위치하게 된다. 따라서 사용자가 안구를 회전하여 적외선 조명을 보지 않은 한, 기존 시스템 [9]에서의 문제를 해결할 수 있었다.

2.2.3 시선 위치 계산

앞서 구한 카파 각이 보정된 동공 중심과 네 개의 반사광의 중심을 가지고 시선 위치를 계산할 수 있다. 영상에서의 각각의 반사광은 모니터의 네 구석에 설치된 적외선 조명에 의해 생긴 것이므로, 네 개의 반사광을 연결한 사각형은 실제 모니터의 직사각형으로 매핑 할 수 있다. 그런데 (그림 11)의 반사광 영역에서 보면 네 개의 반사광 위치는 안구의 형태가 곡면이고, 카메라의 위치가 비스듬하기 때문에 왜곡된 형태의 사각형이 나타날 수 있다. 그리고 사용자의 시선이 모니터를 벗어나지 않는 한 동공의 중심은 이 네 개의 반사광의 영역 안에 위치하게 된다. 이를 통하여 반사광이 이루는 사각형 안에 사용자의 시선이 모니터 면의 어느 위치에 해당하는지를 판단하는 매핑(mapping) 과정이 필요하다.

이를 위한 방법으로 복비(cross ratio)를 이용한 방법이 있다[9, 10, 13]. 하지만 이와 같은 복비를 이용하여 매핑 할 때, 두 개의 마주보는 직선이 각각 평행이 될 경우, 소점이 생기지 않는 경우가 생기기 때문에 예외 처리가 필요하다. 실제로 이와 같은 경우는 자주 발생하기 때문에 복비를 이용한 매핑 방법은 사용하기 어렵다. 이런 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 기하학적 변형 (Geometric transform) [10, 12, 13, 20, 23, 24]를 사용하여 카파각을 보정한 동공중심과 모니터상의 시선위치를 매핑하였다. 기하학적 변형은 4개의 적외선 조명이 형성하는 왜곡된 형태의 사각형과 모니터 직사각형 사이의 기하학적 관계를 정의하는 방법으로 식 (3)과 식 (4)으로 표현 가능하다.

$$M_{xn} = aC_{xn} + bC_{yn} + cC_{xn}C_{yn} + d \quad (3)$$

$$M_{yn} = eC_{xn} + fC_{yn} + gC_{xn}C_{yn} + h \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서 M_{xn} 과 M_{yn} 은 모니터 상의 4개의 모서리 위치 위치이고, C_{xn} 과 C_{yn} 은 4개의 조명 반사광의 위치이다.

<표 1> 반사광 검출 정확도 비교

검출 정확도 (단위: pixel)		
Kalman filter	Condensation tracker	Particle Filter
2.55	8.14	11.63

또한 n 의 범위는 1~4이다. (그림 11)과 같이 반사광 영역과 모니터의 해상도를 매핑해주기 위해 식 (3)과 식(4)을 사용한다. 이 때, 변수($a \sim h$)를 쉽게 구하기 위해 위의 식을 행렬로 표현해보면 식 (5)과 같다.

$$M = I \cdot D, \quad I(\text{glint}) = \begin{bmatrix} c_{x1} & c_{y1} & c_{x1}c_{y1} & 1 \\ c_{x2} & c_{y2} & c_{x2}c_{y2} & 1 \\ c_{x3} & c_{y3} & c_{x3}c_{y3} & 1 \\ c_{x4} & c_{y4} & c_{x4}c_{y4} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

M 은 모니터가 이루는 직사각형(M_{xn} 과 M_{yn} , $n=1, 2, 3, 4$, 4×2 행렬), D 는 변수($a \sim h$, 4×2 행렬), I 는 앞서 구한 반사광 영역의 각 좌표(C_{xn} 과 C_{yn} , $n=1, 2, 3, 4$, 4×4 행렬)를 나타낸다.

식 (6)과 같이 행렬 D (변수)를 구한 다음 추출된 동공의 중심 (P)을 이용하여 사용자의 실제 시선 위치(G)를 계산하게 된다.

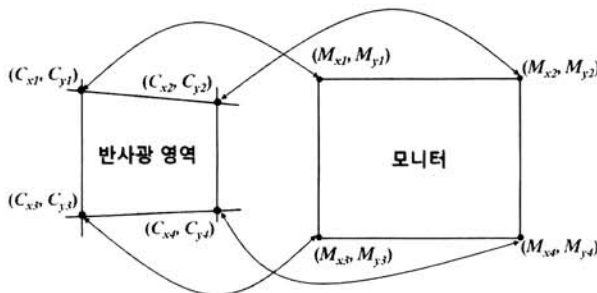
$$D = I^{-1} \cdot M$$

$$\begin{bmatrix} a & e \\ b & f \\ c & g \\ d & h \end{bmatrix} = I^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M_x & 0 \\ 0 & M_y \\ M_x & M_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

즉, 사용자의 동공 중심 좌표를 (P_x, P_y)라고 하면, 행렬 식 (7)을 사용하여 최종적으로 구하게 될 시선 위치(X_{gaze} , Y_{gaze})를 알 수 있게 된다[10, 12, 13, 23, 24].

$$G = P \cdot D$$

$$(X_{gaze}, Y_{gaze}) = [P_x \ P_y \ P_x P_y \ 1] \cdot \begin{bmatrix} a & e \\ b & f \\ c & g \\ d & h \end{bmatrix} \quad (7)$$



(그림 11) 기하학적 변형 (Geometric transform)의 개념도 [2, 10, 13, 27]

2.2.4 시선 오차 보정

사용자가 모니터 중앙에 위치하여 얼굴의 이동이 없다고 가정하고 모니터를 응시하였을 경우, 전술한 식 (7)의 기하학적 변형(geometric transform)에 의해 시선 위치를 계산할 수 있다. 하지만 (그림 12)의 Case 2와 같이 사용자의 얼굴이 이동하였을 때, 동공중심을 지나는 사용자 시선벡터와 적외선 조명(A_1, A_2) 및 안구중심(O, O')을 지나는 벡터간의 사이 각($\theta_1, \theta_2, \theta'_1, \theta'_2$)이 바뀌게 되고 이는 결과적으로 입

력 영상에서 동공의 중심을 기준으로 네 개의 조명 반사광의 위치가 바뀌게 되는 결과를 낳게 된다. 이러한 경우, 동일한 지점을 응시하더라도 얼굴의 움직임에 따라 동공중심 대비 네 개의 조명 반사광의 위치가 바뀌게 되어, 식 (7)에 의해 시선 위치를 구하는 경우 오차가 발생하게 된다.

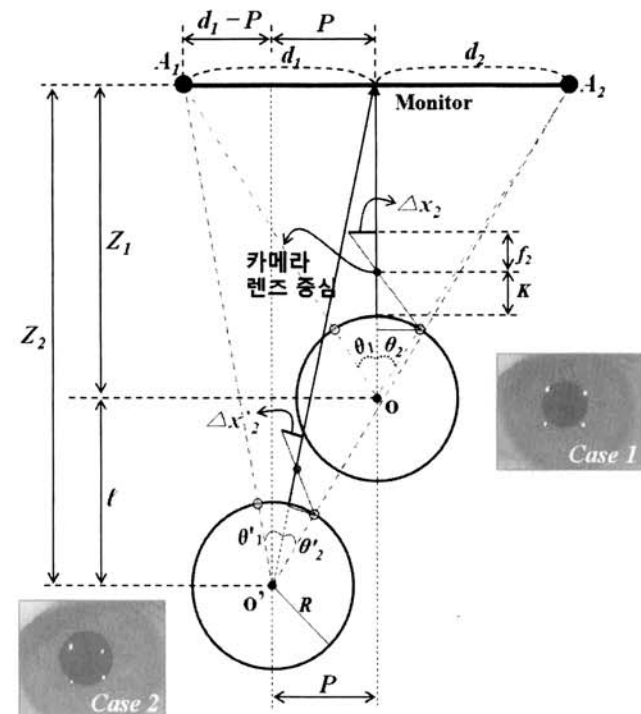
(그림 12)에서 보는 바와 같이 Case 1의 경우, 사용자의 얼굴이 모니터 중앙에 위치해 있고, 이동하지 않은 상태에서 모니터의 중앙을 응시하게 되면 모니터에 설치된 적외선 조명(A_1, A_2)과 반사광을 잇는 직선은 각막 면이 이루는 구의 중심(O)으로 연결된다. 이 때, 구의 중심에서 생기는 각 (θ_1, θ_2)은 시선 방향을 나타내는 직선에 의해 이등분 된다. 식 (8)을 사용하여 계산해 보면 d_1 과 d_2 가 같기 때문에 이등분된 각 θ_1, θ_2 가 동일하다는 것을 알 수 있다[13].

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{d_1}{Z_1}\right), \quad \theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{d_2}{Z_1}\right) \quad (8)$$

하지만 (그림 12)의 Case 2의 경우, 사용자의 얼굴이 p (상, 하, 좌, 우의 이동 량)와 ℓ (모니터와의 Z방향 이동 량)만큼 움직이게 되면, 조명(A_1, A_2)에 의해 생기는 직선이 각막 구의 중심으로 들어와 생기는 각 (θ'_1, θ'_2)이 사용자가 얼굴을 움직이지 않았을 때의 이루는 각 (θ_1, θ_2)과 달라진다.

$$\theta'_1 = \tan^{-1}\left(\frac{d_1 - p}{Z_2}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{p}{Z_2}\right),$$

$$\theta'_2 = \tan^{-1}\left(\frac{d_1 + p}{Z_2}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{p}{Z_2}\right) \quad (9)$$



(그림 12) 얼굴 움직임에 따른 반사광의 위치 변화 분석을 위한 모델 [12, 13]

식 (9)를 보면, 이동 량에 의해 각(θ_1, θ_2)이 서로 다르다는 것을 알 수 있다.

이에 따라 카메라의 CCD에 투영되는 영상을 분석해 보면, Case 1에서 실제 사용자의 눈에 조사된 반사광 사이의 거리와 CCD 면과의 관계를 식 (10)에 대입하여 계산하면 영상에서의 반사광 사이의 거리가 계산된다[13]. 같은 방법으로 Case 2의 CCD 면에 생기는 변형 된 반사광의 거리도 식(10)을 이용하면 계산할 수 있다. Δx_2 는 카메라 CCD 면에 생기는 반사광의 거리이고, $\Delta x'_2$ 는 변형된 반사광의 거리이다. f_2 는 카메라 초점 값이고 R 은 안구의 반지름, K 는 안구와 카메라 렌즈와의 거리를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \Delta x_2 : f_2 &= (R \cdot \sin\theta_2) : (K + (R - R \cdot \cos\theta_2)) \\ \therefore \Delta x_2 &= \frac{f_2 \cdot R \cdot \sin\theta_2}{K + R(1 - \cos\theta_2)}, \\ \Delta x'_2 : f_2 &= (R \cdot \sin\theta'_2) : (K + (R - R \cdot \cos\theta'_2)) \\ \therefore \Delta x'_2 &= \frac{f_2 \cdot R \cdot \sin\theta'_2}{K + R(1 - \cos\theta'_2)} \end{aligned} \quad (10)$$

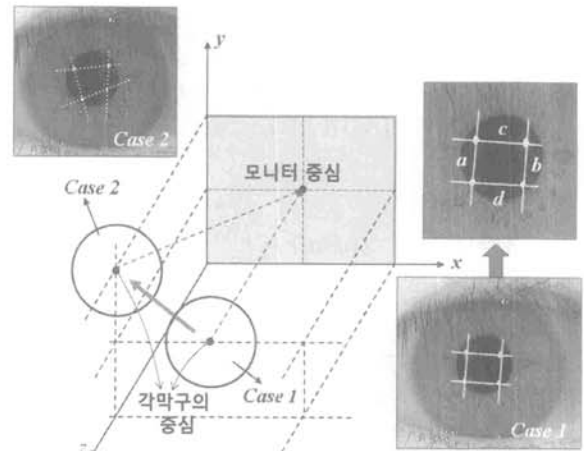
따라서 움직이지 않았을 때의 Δx_2 와 사용자가 머리를 움직였을 때의 $\Delta x'_2$ 의 값이 서로 다르기 때문에 시선 위치의 오차가 발생하게 된다. 이 오차는 식 (11)을 이용하면 보정이 가능하다. 하지만 이 경우를 알아야하는데, 이를 위해서는 식 (10)과 같이 사용자 얼굴의 3차원 이동 량(p)과 모니터에서 얼굴까지의 Z거리(Z_1, Z_2)를 알아야한다[13].

$$\begin{aligned} \Delta x'_2 - \Delta x_2 &= \frac{f_2 \cdot R \cdot \sin\theta'_2}{K + R(1 - \cos\theta'_2)} - \frac{f_2 \cdot R \cdot \sin\theta_2}{K + R(1 - \cos\theta_2)} \\ &= f(p, Z_2, Z_1) \\ \therefore \Delta x'_2 - f(p, Z_2, Z_1) &= \Delta x_2 \end{aligned} \quad (11)$$

$f(p, Z_2, Z_1)$ 를 구하여 머리 움직임을 보정하기 위해서는 움직임 량(p, Z_2, Z_1)을 알아야만 한다. 하지만 이를 위해서는 2개 이상의 고가 스테레오 카메라나 별도의 위치추적 장치들을 사용해야하는 문제점이 있다. 그러므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 각막에 발생하는 4개의 조명 반사광이 형성하는 기하학적 모양의 변화량을 이용하여 얼굴의 움직임을 보정하는 방법을 사용하였다[13].

(그림 13)의 Case 2와 같이 머리 움직임에 의해 각 반사광을 이은 변의 길이(a, b, c, d)가 변화된 것을 볼 수 있다. (그림 13)의 Case 1에서 보면 사용자가 머리를 이동하지 않고, 모니터 중심을 응시했을 때, b/a와 d/c는 거의 1에 가깝다. 만약, 사용자의 머리가 왼쪽 위로 이동하여 모니터의 중심을 응시했을 경우, 영상에서 a는 b보다 길고, c도 d보다 길게 된다.

이와 같이 얼굴이 움직일 수 있는 모든 범위에서는 얼굴이 이동하게 되면 변의 비율 변화가 나타나므로 이러한 경우에 오차 보정을 하기 위한 과정을 수행한다. (그림 14)는 사용자의 이동 방향에 따른 반사광의 변화를 나타낸 것이다.

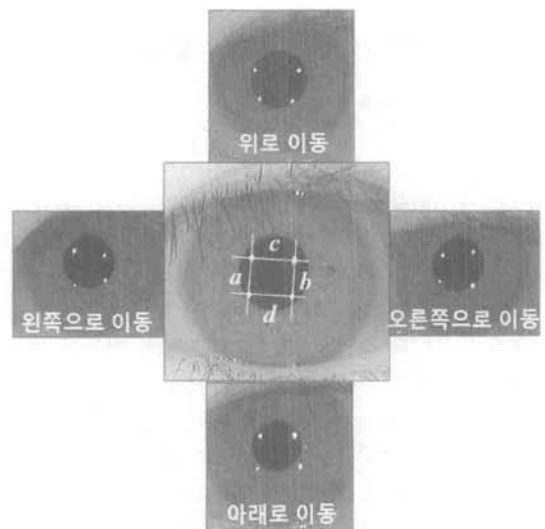


(그림 13) 머리 움직임에 따라 위치가 변화되는 네 개의 반사광들이 이루는 변의 길이(a, b, c, d)의 변화[13]

먼저 각 변의 비율(b/a 및 b/c)을 판단하여 사용자의 이동 방향을 추정하고 해당하는 경우로 이동한다. 사용자가 움직일 수 있는 범위는 모든 영역이지만 시선 추적을 위해서는 모니터를 응시해야 하므로 움직일 수 있는 범위를 모니터의 크기로 제한하였다.

결과적으로, 머리움직임에 따른 시선 위치의 오차를 1차식, 2차식, log함수식을 사용하여 각 변의 비율의 차((b/a-b'/a')와 (d/c-d'/c'))를 이용하여 보정하였다. 각 변의 비율의 차와 보정할 양을 구하기 위하여, 50명의 사용자를 대상으로 모니터의 중심을 포함한 8개의 위치에서 모니터를 응시하게 하였다. 그리고 이 때, 모니터로부터 사용자까지 거리는 50 ~ 60cm 이었다.

실험 결과, 얼굴 움직임 량에 따른 시선 위치 오차를 1차식인 식 (12), (13)이 가장 정확하게 모델링 하는 것을 알 수 있었다. 수식은 LMS(Least Mean Square) 알고리즘에 의하여 구하였으며, 이 때, 구해진 최종적인 상수 값은 a_1 이 -248.7, a_2 는 -0.23, β_1 은 170.12, β_2 는 -0.15 이다.



(그림 14) 사용자의 얼굴 이동방향에 따른 반사광의 변화[13]

$$X_{rc} = X_c + (\alpha_1(\frac{b}{a} - \frac{b'}{a'}) + \alpha_2) \quad (12)$$

$$Y_{rc} = Y_c + (\beta_1(\frac{d}{c} - \frac{d'}{c'}) + \beta_2) \quad (13)$$

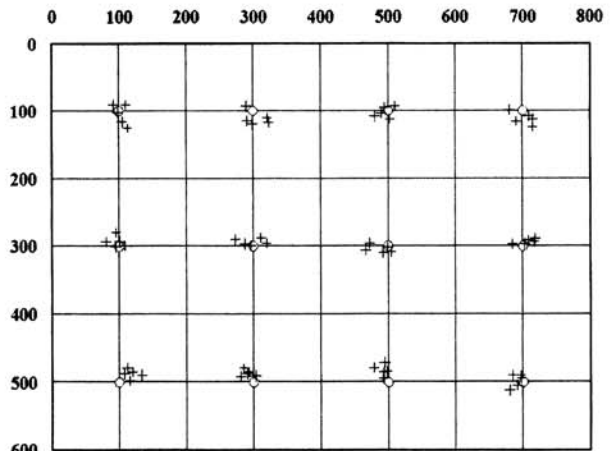
식 (12)에서 X_c 와 Y_c 는 사용자가 이동했을 때, 측정된 시선 위치이고, X_{rc} 와 Y_{rc} 는 얼굴 움직임 량에 따라 보정한 시선 위치이다. $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 는 LMS(Least Mean Square)에 의해 구해진 상수 값을 나타낸다[13].

3. 실험결과

본 논문에서의 실험 환경은 Pentium-4 3.0 GHz의 하드웨어 환경에서 구현하였다. 일반적으로 USB 카메라의 영상 입력 속도가 초당 15프레임 (640×480 픽셀)이므로, 매 프레임 당 영상 입력 시간 간격은 66ms이다. 본 연구에서 1 프레임에 대한 수행 시간은 약 55ms (= 35ms(동공추출) + 5ms(반사광 추출) + 15ms(시선 위치 계산 및 보정))로 영상 한 장의 입력 시간 66ms안에 처리하여 지연 없이 수행할 수 있었다[13]. 또한 본 논문에서는 기존의 방법[13]에서 반사광 추출했을 때의 시선 위치 정확도와 본 연구에서 제안한 동공움직임 기반 칼만 필터를 사용하여 반사광을 추출 방법을 사용했을 때의 시선 위치 정확도를 비교하였다. 각각의 방법에서의 정확도를 측정하기 위하여, 50명의 사용자가 모니터 상의 12개의 참조점을 자유롭게 응시하도록 하고 이를 연속적인 영상으로 취득하였다. 측정된 영상은 (그림 8)의 #6과 같이 사용자의 시선의 방향이 전환된 경우를 많이 포함하고 있다.

실험 결과, 기존의 방법[13]에서의 시선 위치 정확도는 약 1.34° (RMS 오차 약 39픽셀, X축으로 31픽셀, Y축으로 24픽셀)로 측정되었으며, 본 연구에서 제안한 방법을 사용한 시선 위치 정확도는 약 1.09° (RMS 오차 약 22픽셀, X축으로 18픽셀, Y축으로 13픽셀)로 측정되었다. 이는 기존 방법의 경우 눈동자의 급격한 회전 방향 변화가 생기는 경우 추적하던 조명 반사광을 놓치고 결과적으로 시선 추적 오차가 증가되었기 때문이다. 따라서 본 연구에서 제안한 동공 움직임 기반 칼만 필터를 사용한 반사광 추출 방법이 기존의 방법보다 정확도가 향상된 것을 알 수 있었다.

본 시선위치 추적 시스템의 정확도를 측정하기 위해서, 50명의 사용자를 대상으로 기존의 연구[12, 13]처럼 (그림 15)와 같이 모니터상의 12개의 참조점을 응시하도록 하였다. 실험 결과, 평균 시선위치 오차는 약 1.0° (화면 해상도 800×600을 기준으로 RMS 오차 약 21픽셀, X축으로 16픽셀, Y축으로 13픽셀)이었다. 그리고 이 오차는 17인치 모니터 기준으로 모니터에서 사용자까지 Z거리는 50~60cm일 때 측정하였다. 본 시선위치 추적 시스템의 정확도는 Shih의 방법[8]의 시선 위치 정확도(약 1°)와 거의 비슷하다. 하지만 Shih 방법[8]에서는 스테레오 방법으로 두 대의 카메라와 여러 개의 조명을 사용하였다. 따라서 이 방법은 가격이 비



(그림 15) 시선 위치 정확도 측정 결과 예(5명) (0는 참조점, +는 실제 시선 위치)

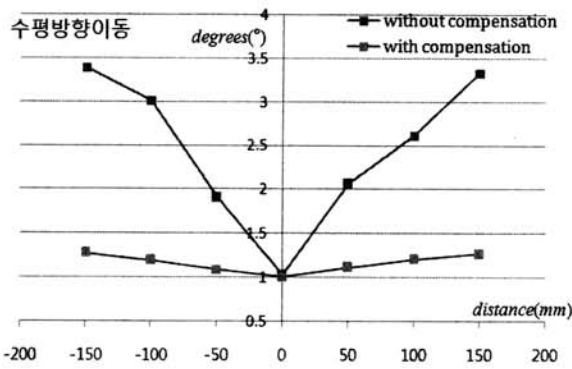
싸고, 계산 량이 많이 요구되며, 두 대의 카메라 간의 관계를 매핑해야 하는 카메라 캘리브레이션 과정이 필요하다.

다음으로 기존의 연구[13]에서처럼 머리 움직임에 따른 오차를 보정했을 때와 보정하지 않았을 때의 정확도를 측정하였다. (그림 16, 17)은 머리가 수직, 수평으로 움직였을 때의 시선 위치 정확도를 나타낸다. 또한 (그림 18)은 Z거리에 따른 시선 위치 정확도이다. 얼굴의 움직임 량은 위치 추적 센서(Polhemus Patriot) [28]을 이용하여 측정하였다.

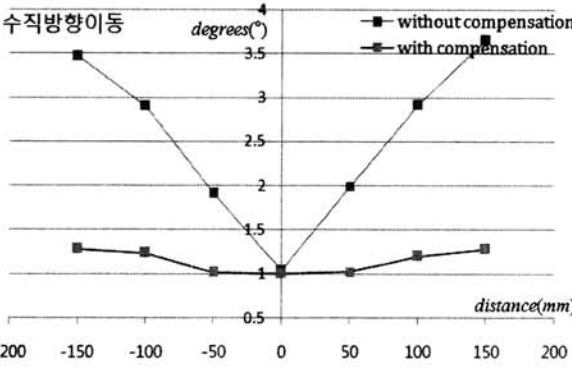
(그림 16, 17)에서 알 수 있듯이 모니터기준으로 수평방향 및 상하방향 얼굴 움직임이 있을 때, 제안한 방법의 한 시선위치 정확도가 보정하지 않았을 때보다 상대적으로 높음을 알 수 있다. 또한 (그림 18)에서 Z방향으로 이동하였을 경우, 시선위치 정확도가 보정하기 전 후가 별로 차이가 없다. 이것은 Z거리는 각 반사광을 이은 변들의 비율과 상관없고, 크기에 영향을 주는 요소이기 때문이다.

다음은 카파 각(2.2.1절)을 보정하기 전 후의 시선위치 정확도를 50명의 사용자의 실험 데이터로부터 측정하였다. 그 결과, 카파각을 보정하기 전의 시선위치 정확도는 약 4° 이상이었다. 하지만 이를 보정하였을 경우, 위에서 언급했듯이 약 1.0°의 정확도로 오차를 감소시켰다.

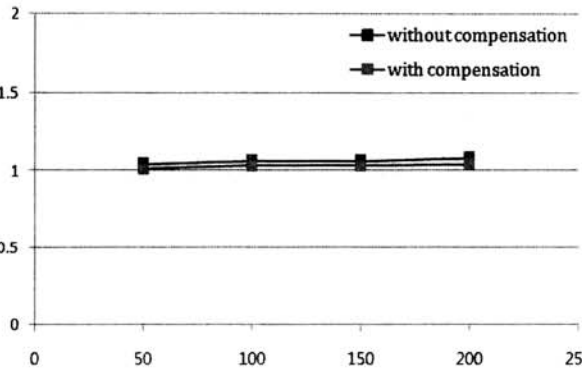
마지막으로 [13]의 방법과 성능을 비교하였다. 눈동자의 급격한 방향 변화가 생기지 않는 경우에는 본 연구에서의 시선 위치 정확도는 [13]의 결과와 유사하였다. 하지만 눈동자의 급격한 방향변화가 생기는 데이터에 대해서는 [13]의 방법의 경우 Kalman filter를 사용하더라도 등속도 운동 가정에 의해 각막의 조명 반사광을 놓치는 경우가 빈번히 발생하였다. 이러한 경우 이전 프레임에서의 각막 조명 반사광 위치를 그대로 적용하는 경우 평균시선 위치 추적이 평균 3.1° 정도로 높아졌다. 하지만 본 연구의 방법에서는 검출된 동공위치를 기반으로 조명 반사광을 추적하기 위한 Kalman filter의 탐색영역 위치 및 크기를 적응적으로 조정함으로써, 이러한 경우에도 안정적으로 시선위치를 추적하여 평균 에러는 약 1.0° 정도를 유지할 수 있었다.



(그림 16) 모니터기준 수평방향으로 이동했을 경우, 얼굴 움직임에 따른 시선 위치 오차



(그림 17) 모니터기준 수직방향으로 이동했을 경우, 얼굴 움직임에 따른 시선 위치 오차



(그림 18) 모니터기준 Z 방향으로 이동했을 경우, 얼굴 움직임에 따른 시선 위치 오차

4. 결 론

본 연구에서는 칼만 필터를 사용하여 반사광을 좀 더 정확하고 빠르게 찾을 수 있었다. 특히 매 프레임마다 추출된 동공의 중심위치를 기반으로 눈동자의 빠른 시선 방향 변화가 생기는 경우에도 안정적으로 조명 반사광의 위치를 칼만 필터로 추적할 수 있었으며, 이를 바탕으로 시선위치를 계산할 수 있었다. 또한 사용자의 얼굴이 이동하였을 경우, 사용자의 안구와 위치, 모니터의 관계를 모델링을 통하여 보정함으로써 시선 추출의 정확도를 향상하였다.

향후, 보다 많은 사용자들을 대상으로 성능을 평가하여 시선 위치의 정확도를 향상시켜야 하고, 태양광등의 외부 광이 영향을 미치는 환경에서의 성능을 측정하여 개선해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] M. Yamato, A. Monden, K. Matsumoto, K. Inoue and K. Torii, "Quick Button Selection with Eye Gazing for General GUI Environments," International Conference on Software: Theory and Practice. pp.712-719, 2000.
- [2] 이의철, 박강령, "눈동자 시선 추적에 의한 3차원 1인칭 슈팅 게임", 한국정보처리학회 논문지, 제12-B권 제4호, pp.465-472, 2005.
- [3] L. E. Sibert and R. J. K. Jacob, "Evaluation of Eye Gaze Interaction," Proc. of the CHI'00, pp.281-288, ACM in New York, 2000.
- [4] C. H. G. Wright, R. D. Ferguson, S. F. Barrett, H. G. Rylander III, and A. J. Welch, "Hybrid Eye Tracking for Computer-aided Retinal Surgery," ISA Biomedical Sciences Instrumentation, Vol.32, pp.225-245, 1996.
- [5] Richard S. E. Keefe, Larry J. siever, Richard C. Mohs, Ann E. Peterson, Theresa R. Mahon, R. Lindsey Bergman and Kenneth L. Davis, "Eye Tracking, Schizophrenic Symptoms, and Schizotypal Personality Disorder," European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience, Vol.239, No.1, pp.39-42, 1989.
- [6] A. Azarbajani, "Visual Controlled Graphics," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.15, No.6, pp.602-605, 1993.
- [7] T. D. Rikert and M. J. Jones, "Gaze Estimation Using Morphable Models," Proc of the 3rd International Conference on Face and Gesture Recognition, pp.436-441, Nara, Japan, 1998.
- [8] S. W. Shih *et al.*, "A Novel Approach to 3-D Gaze Tracking Using Stereo Cameras," IEEE Trans. on SMC, Part B, pp.234-245, 2004.
- [9] D. H. Yoo and M. J. Chung, "Non-Intrusive Eye Gaze Estimation without Knowledge of Eye Pose," Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, pp.785-790, Seoul, Korea, May 17-19, 2004.
- [10] 고유진, 이의철, 박강령, "적외선 환경에서 얼굴 및 눈동자 움직임이 자유로운 시선 위치 추적에 대한 연구", 2006년 한국차세대 컴퓨팅 학회 논문 발표회, 일산 KINTEX, 2006년.
- [11] R. N. Aslin and B. McMurray, "Automated Corneal-Reflection Eye Tracking in Infancy: Methodological Developments and Applications to Cognition," Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Infancy, Vol.6, No.2, pp.155-163, 2004.

[12] You Jin Ko, Eui Chul Lee, Kang Ryoung Park, "A Study on Robust Eye Gaze Tracking System Allowing the Natural Facial Movements," ACCV'07 Workshop on Multi-dimensional and Multi-view Image Processing, Tokyo, 2007.

[13] Y. J. Ko, E. C. Lee and K. R. Park, "A Robust Gaze Detection Method by Compensating for Facial Movements Based on Corneal specular reflections," Pattern Recognition Letters, Vol.29, Issue10, pp.1474-1485, 15 July, 2008.

[14] http://www.logitech.com/index.cfm/webcam_communications/webcams/&cl=kr,ko (accessed on 2008. 12 .9)

[15] E. C. Lee, K. R. Park, J. Kim, "Fake Iris Detection By Using the Purkinje Image," Lecture Notes in Computer Science (ICB'06), Vol.3832, pp.397-403, Hong Kong, China, January 5-7, 2006.

[16] F. A. Jenkins and H. E. White, "Fundamentals of Optics Fourth edition," McGraw-Hill, 1981.

[17] J. Zhu and J. Yang, "Subpixel Eye Gaze Tracking," in Proc. Fifth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, pp.124-129, Washington, D.C, 2002.

[18] E. C. Lee and K. R. Park, "A Study on Eye Gaze Estimation Method Based on Cornea Model of Human Eye," Lecture Notes in Computer Science (MIRAGE 2007), pp.307-317, INRIA Rocquencourt, France, 2007.

[19] D. H. Cho, K. R. Park and D. W. Rhee, "A Study on Robust Iris Detection for User Authentication in Mobile Phone," 4th International Conference on Asian Language Processing and Information Technology (ALPIT 2005), pp.61-66, Bangkok, Thailand, 2005.

[20] G. A. Baxes, "Digital Image Processing-Principles and Application," Wiley, 1994.

[21] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-9, No.1, pp.62-66, 1979.

[22] P. Artal, A. Benito and J. Taberner, "The Human Eye is An Example of Robust Optical Design," Journal of Vision, Vol.6, No.1, pp.1-7, 2006.

[23] Zhiwei Zhu, Qiang Ji, and Kikuo Fujimura, "Combining Kalman Filtering and Mean Shift for Real Time Eye Tracking Under Active IR Illumination," Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition, Vol.4, p.40318, 2002.

[24] 김수찬, 유재하, 김덕원, "Kalman Filter를 이용한 비접촉식 응시점 추정 시스템에서의 빠른 머리 이동의 보정", 대한전자공학회 논문지, 제44권, 제10호, pp.35-41, 2007.

[25] Hua Yang, Greg Welch, "Model-Based 3D Object Tracking Using an Extended-Extended Kalman Filter and Graphics

Rendered Measurements", CVIII '05: Proceedings of the Computer Vision for Interactive and Intelligent Environment, pp.85-96, Washington, DC, USA, 2005.

[26] A. Gullstrand, "Helmholz's physiological optics," Optical Society of America, pp.350-358, 1924.

[27] 이의철, 박강령, "HMD (Head Mounted Display)에서 시선 추적을 통한 3차원 게임 조작 방법 연구", 대한전자공학회 논문지, 제45권 2호 sp편, pp.49-64, 2008.

[28] http://www.polhemus.com/?page=Motion_Patriot (accessed on 2008. 12 .9)

[29] http://safari.oreilly.com/9780596516130/the_condensation_algorithm (accessed on 2008. 12 .9)

[30] Sukwon Choi, Daijin Kim, "Robust Head Tracking Using 3D Ellipsoid Head Model in Particle Filter Pattern Recognition," Pattern Recognition, Vol.41, No.9, 2008, accepted for publication.



고 유 진

e-mail : dhwfl@smu.ac.kr
 2007년 상명대학교 미디어학부(학사)
 2007년~2009.2 상명대학교 컴퓨터과학과 석사과정
 2009.1~현 재 엠텍비전 연구원
 관심분야 : 영상처리, 패턴인식, 컴퓨터 비전, HCI



이 의 철

e-mail : oryong@smu.ac.kr
 2005년 상명대학교 소프트웨어학부(학사)
 2007년 상명대학교 컴퓨터과학과(석사)
 2007년~현 재 상명대학교 컴퓨터과학과 박사과정
 관심분야 : 영상처리, 패턴인식, 컴퓨터 비전, HCI



박 강 령

e-mail : parkgr@dongguk.edu

1994년 연세대학교 전자공학과 졸업

1996년 연세대학교 전자공학과(석사)

2000년 연세대학교 전기·컴퓨터공학과
(박사)

2000년~2003년 LG 전자 기술원 Digital
Vision Group 선임연구원

2003년~2008년 상명대학교 소프트웨어대학 디지털미디어학부
전임장사/조교수

2008년~현 재 동국대학교 전자공학과 조교수/부교수

2003년~현 재 생체인식연구센터 총괄과제책임자

관심분야 : Biometric 영상처리, 패턴인식, 컴퓨터 vision, 컴퓨터
그래픽스