

# 눈으로 조종하는 인간/컴퓨터 인터페이스 (Eye as a Human/Computer Interface Device)

박 경 수†, 이 경 태 ‡

†한국과학기술원, ‡한국표준과학연구원

## Abstract

By integrating the eye and head-position monitoring devices, the present authors developed an eye-controlled human/computer interface based on the line-of-sight and an intentional blink to invoke commands. Also modified was an existing calibration method to reduce the visual angle between the target center and the intersection point of the derived line-of-sight. This modified calibration method allowed 108 or more command blocks to be displayed on the 14 inch monitor with the target acquisition probability(hit rate) of 98% when viewed at the distance of 500 mm apart. An active triggering method using an intentional blink was proposed and was shown to be a feasible and efficient alternative to invoke commands with total triggering time of 0.8 sec or less. The system could be used by the normal people as well as the handicapped individuals as a new human/computer interface.

## 1. 서 론

본 연구는 주시선과 의도적 눈깜박임을 이용한 인간/컴퓨터 인터페이스 시스템 EHCI(Eye-controlled Human/Computer Interface)를 개발하고 평가하는 것이다. 언어대신 눈을 사용한 eye-slaved nonverbal communicator의 기존 연구는 눈의 화상과 화면상의 응시점을 이용하였는데 정확도가 낮고, 머리의 움직임이 거의 보상하지 않았다.

Hutchinson 등(1989)은 컴퓨터지원 눈응시반응 인터페이스(Erica)라 불리는 보철기구를 개발하였다. 적외선이 얼굴에 비추면 눈에서 반사된 빛을 화상처리하여 눈동자 중심과 각막반사점의 상대적 위치로 눈의 주시점을 알아낸다. Erica시스템은 화면에서 3×3 형태로 동시에 9개의 메뉴를 화면에 표시할 수 있다. 미리 정해진 시간(2 - 3초)동안 메뉴를 응시하고 있으면 경고음과 함께 메뉴가 선택이 되어 강조되고 계속 응시하면 두번째 경고음과 함께 메뉴가 실행이 된다. 이와 같은 방식으로 컴퓨터와 상호작용을 하여 응용 프로그램을 실행할 수 있고 주변기기를 다룰 수 있다. 현재의 Erica의 응용 소프트웨어는 환경제어 및 비언어적인 의사소통을 포함한 제어, 문서편집 및 음성합성 등을 포함한 의사소통, 컴퓨터게임·컴퓨터음악·교육 프로그램 등의 레크리에이션, 책과 문서등의 읽기 등의 네가지 범위로 응용가능하다. Erica는 신체와 음성장애가 있는 장애인에게 의사소통 및 제어수단을 제공하기 위해 개발되었으나 그 유용성에도 불구하고 Hutchinson은 몇가지 제한점을 지적했다. 첫째, 사용자는 머리를 거의 움직이지 않아야 한다. 둘째, 주시점의 해상도가 제한되기 때문에 화면에 동시에 보여줄 수 있는 메뉴의 수가 9개이상은 어렵다. 따라서 문서입력작업을 하기 위해서는 여러단계 과정이 요구된다.

Frey 등[1990]은 Erica에 문맥 민감 노우드를 첨가함으로써 문자입력속도를 증가시켰다. 즉, 입력하려는 문자 이전에 입력된 2개의 문자의 문자전이확률에 근거해서 다음에 나타날 확률이 가장 높은 문자 6 개를 화면에 표시하여 선택횟수를 최소화하도록 유도함으로써 문자예측을 하지 않은 경우보다 25%의 입력속도를 증가시켰다.

Ebisawa 등[1991]은 줌 및 초점 제어가 가능한 카메라 회전 시스템을 사용하여 non-invasive한 주시점(eye-gaze point) 위치 감지 시스템을 개발하였다. 눈의 화상이 항상 같은 크기를 유지하고 초점거리를 맞추기 위해 카메라에 부착된 줌렌즈가 컴퓨터로 제어 된다. 머리의 좌우 움직임 때문에 눈의 화

상이 카메라 영역을 벗어나는 것을 막기 위해 자동제어장치인 카메라 회전 시스템을 구축하여 머리 움직임을 카메라의 수평방향으로 11도 허용하였다. 이 시스템은 수평과 수직 방향으로 10단계의 메뉴를 감지할 수 있지만 눈꺼풀과 속눈썹 등으로 인한 낮은 해상도와 비선형성때문에 식별가능한 메뉴는 9개 (3×3)이다.

본 연구에서는 눈과 머리 위치 및 자세를 추적하는 장비를 결합하여 머리의 움직임을 360° 완전히 자유롭게 하였으며 주시점과 동공중심점간의 관계로 주시점을 계산하는 기존의 calibration 기법을 수정하여 주시점의 정확도를 대폭 향상시켰다.

이 시스템의 장점은 다음과 같다.

(1) 주시선(line-of-sight)의 정확도를 높여 108개의 메뉴상자(즉, icon)을 동시에 컴퓨터 화면에 표시 가능하도록 하여 원하는 메뉴를 선택 및 실행을 할 수 있도록 하였다. 기존의 연구에서는 14인치 모니터에서 겨우 9개의 메뉴상자를 14인치 모니터에 동시에 표시할 수 있었다.

(2) 머리 움직임을 자유롭게 허용하였다. 기존의 연구에서는 거의 허용되지 않았고, 허용된 경우도 약간만 허용되었다.

(3) 의도적 눈깜박임을 이용하여 능동적으로 메뉴선택 및 실행을 할 수 있도록 하였다. 기존의 연구에서는 선택하려는 메뉴상자를 일정기간 이상 계속 주시하고 있으면 이를 컴퓨터가 인식해서 해당 메뉴상자를 선택하는 수동적인 방법을 사용하였다.

## 2. 시스템 구성

EHCI 시스템은 머리추적시스템, 안구추적시스템, 전과정을 제어하는 소프트웨어와 PC 등 세개의 주요부분으로 구성되어 있으며 Figure 1에 나타나 있다.

**머리추적:** 머리의 위치와 방향을 추적하기 위해 자기장을 이용하는 FASTRAK을 사용하였다. FASTRAK은 본체, 송신기, 수신기로 구성되었다. FSATRAK은 송신기를 기준점으로 하여 수신기의 위치와 방향을 계산한다. 위치벡터(x,y,z)와 방향벡터(roll, pitch, yaw)의 6개 데이터를 얻을 수 있다. 데이터는 119.5 kbps의 전송속도로 RS232 포트를 통해 PC로 전달되도록 하였다.

**안구추적:** 안구추적시스템은 전외선 필터가 장착된 소형카메라, 적외선 광원, 분기반사경(dichroic mirror), 화상처리기 등으로 구성되었다. 적외선 광원, 분기반사경, 소형카메라는 머리밴드에 부착한다. 적외선 광원(파장 880nm)은 눈앞쪽에 위치한 분기반사경을 통해 피실험자의 눈에 비춘다. 소형카메라(16 mm 렌즈, 초점거리 80-90mm)는 분기반사경에서 반사된 눈의 화상을 잡는다. 눈앞에 고정된 반사경은 파장 750-1200 nm의 빛을 반사하고 400-700 nm의 빛을 70% 투과한다. Eye camera의 NTSC 화상신호를 화상처리기로 보내 화상카메라의 2차원좌표상에서의 안구와 각막반사점의 위치를 얻는다. 화상처리기(RK-426)는 동공중심점과 각막반사점의 위치를 나타내는 아날로그 신호를 발생시킨다(±10 VDC). 평활화를 하기위해 이 아날로그 신호를 저대역 필터( $f_c = 30$ )를 통과시켰다. 다시 이 신호는 12비트의 해상도를 갖는 A/D 컨버터로 보내어 지고 486컴퓨터에서 DMA를 통해 1000Hz로 샘플링 하였다. 동공중심점과 각막반사점의 수평차이가 머리에 대한 눈의 yaw(오른쪽 왼쪽 회전)이고, 수직차이가 머리에 대한 눈의 pitch(위 아래 회전)이다.

**눈깜박임과 눈깜박임 감지 :** 눈깜박임은 내생적 눈깜박임(endogenous eye blink), 반사적 눈깜박임, 자의적 눈깜박임으로 분류할 수 있다. 내생적인 눈깜박임은 외피에서 조절되는 반응인데 인식할 수 없는 자극에 의한 깜박임이다. 반사작용 눈깜박임은 눈에 상해를 입힐지도 모르는 자극에 대한 방어 반응이다. 자의적 눈깜박임은 스스로에 의해 또는 실험자의 요구에 의해 등 인식할 수 자극에 대한 반응으로

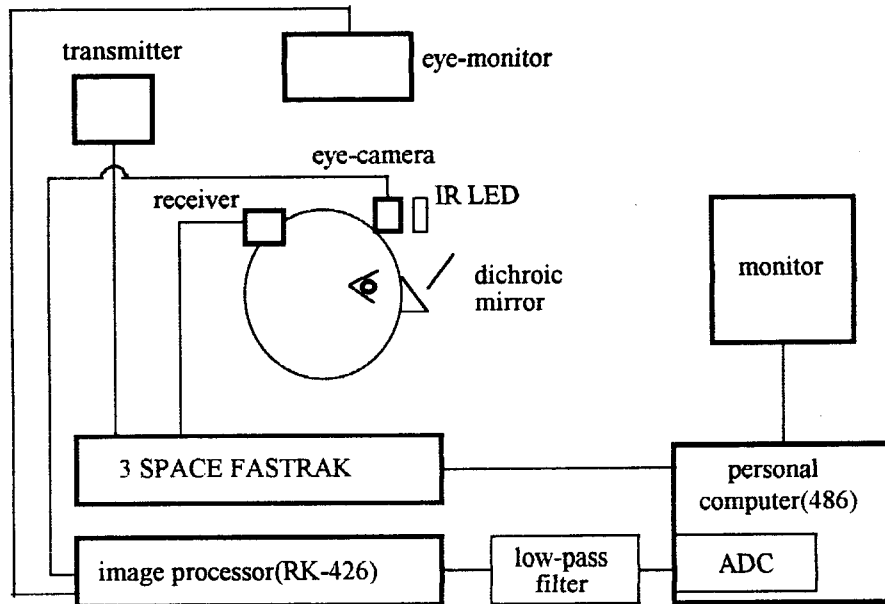
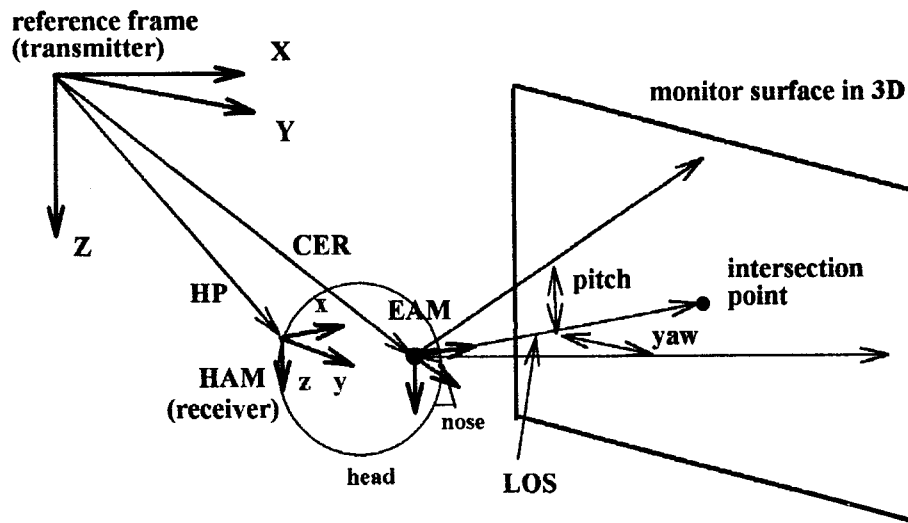


Figure 1. Schematic diagram of the system



HP : Head Position                      HAM : Head Attitude Matrix  
 CER : Center of Eye Rotation      EAM : Eye Attitude Matrix

Figure 2. Relationship among transmitter, receiver, and monitor.

일어난다[Stern, Walrath, and Goldstein,1984]. 자생적 눈깜박임, 반사작용 눈깜박임, 자의적 눈깜박임에서 최대 눈감고 있는 시간은 270-300 msec 로 추정된다[Miles,1931]. 메뉴를 선택하고 실행시키는 방법(triggering)으로 눈깜박임을 이용하기 위해 본 논문에서는 의도적 눈깜박임을 정의하였는데, 이는 눈을 감고 있는 시간이 미리 정해진 최소시간과 최대시간 사이에 있으면 의도적 눈깜박임으로 간주하였다. 눈을 감고 있는 시간이 이 조건을 만족한다면 triggering을 위한 의도적 눈깜박임이라 할 수 있다.

눈깜박임을 감지하기 위해 각막반사점을 이용하였다. 눈을 감으면 눈꺼풀에서 눈카메라에 감지될만큼 충분한 적외선을 반사시키지 못하기 때문에 눈영상 모니터에서 각막반사점이 사라진다. 각막 반사점의 수직값이 정해진 값보다 크면 눈을 감은 것으로 간주하였다. 이 방법은 눈깜박임을 감지하기 위해 추가적인 장비를 사용하지 않기 때문에 유용하다. 눈감은 시간을 486 컴퓨터로 1/1000초의 정확도로 측정하였다.

주시선 계산 : 송신기(기준점), 수신기(머리위치와 자세), 모니터의 도시적 관계가 Figure 2에 나타나 있다. 기준점에 대한 머리의 회전은 azimuth, elevation, roll이다. 기준점에 대한 머리(수신기)의 회전을 자세행렬로 나타낸다. 머리의 자세행렬은 3×3행렬인데 첫번째 열은 수신기 x축의 코사인 방향, 두번째 열은 수신기 y축의 코사인 방향, 세번째 열은 수신기 z축의 코사인 방향이다. 머리자세행렬(HAM)은 다음과 같다.

$$HAM = \begin{bmatrix} CA * CE & CA * SE * SR - SA * CR & CA * SE * CR + SA * SR \\ SA * CE & CA * CR + SA * SE * SR & SA * SE * CR - CA * SR \\ -SE & CE * SR & CE * CR \end{bmatrix}$$

where,      SA=sin(azimuth),      CA=cos(azimuth),  
                  SE=sin(elevation),      CE=cos(elevation),  
                  SR=sin(roll),              CR=cos(roll).

머리에 대한 눈의 회전도 자세행렬로 나타낼 수 있다. 눈의 자세행렬은 머리의 자세행렬에서 azimuth대신에 yaw(눈의 좌우방향 회전)를, elevation 대신에 pitch(눈의 위아래방향 회전)로 치환하면 된다. 다음 순서에 의해 주시선을 구한다.

1) 눈의 회전중심점(CER)을 구한다 : 머리자세에 대한 눈회전의 중심은 머리가 움직이는 것과는 상관없이 없다. 머리자세에 대한 눈회전의 중심을 일단 알기만 하면 머리가 움직인 후에도 그 값을 쓸수가 있다. 눈꺼풀(눈을 감았을때)상의 동공중심에 해당하는 점에서 눈안쪽으로 13mm 들어간 점을 측정함으로써 안구회전 중심점을 구할 수 있다. 안구회전 중심점과 각막의 앞 표면의 거리는 13mm이다[Fry,1965]. 눈꺼풀상의 안구중심점의 위치를 측정하기 위해 FASTRAK의 스타일러스를 사용한다. 스타일러스의 위치는 기준점(송신기)에 대해 3차원 좌표로 나타난다.

2) 머리자세에 대한 눈의 회전각(i.e., roll, pitch, yaw) 을 구한다 : 안구중심과 각막반사점의 수평차이는 yaw의 변화를 의미하고, 수직차이는 pitch의 변화를 의미한다. 눈의 roll 변화는 의미가 없기 때문에 0이라 가정한다. 기존의 연구되었던 영점조절 방법으로는 이 시스템에서 필요한 정확도를 제공하지 못하기 때문에 영점조절 방법을 개량시켰다.

3) 눈의 회전각을 구한다[Appendix] 머리에 대한 눈의 자세행렬(EAM)을 계산한다. EAM의 x축을 EAMx라고 하자.

4) LOS = CER + [EAMx][HAM] : 머리 움직임을 보정하기 위해 EAMx와 HAM을 곱한값이 필요하다. 모니터 표면과 LOS의 교점을 계산하고 모니터상의 2차원 좌표로 변환한다.

### 3. 영점조정 방법개량

#### 3.1 기존의 영점조정방법

동공중심과 각막반사점 기법의 기본적인 가정은 각막 반사점이 pupil 영역안에 있을 때, 동공중심과 각막반사점의 차이는 눈의 움직임과 선형적인 관계에 있다는 것이다.

기존의 영점조정 방법에서는 동공중심(PC)과 각막반사점(CRC) 으로 구성하는 영점조정표를 구하기 위해 피실험자가 순차적으로 5개의 점(중심, 우상, 우하, 좌상, 좌하)을 바라보았다. PC 는  $(PC_h, PC_v)$  로 구성되고 CRC 는  $(CRC_h, CRC_v)$ 로 구성된다.  $\Delta h$ 와  $\Delta v$  를  $(PC_h - CRC_h)$  와  $(PC_v - CRC_v)$  라 하자(Figure 3). 왼쪽 그림의 점은 눈의 yaw와 pitch를 통해 얻은 영점조정점이다. 오른쪽 그림의 점은 왼쪽의 영점조정점에서 얻은  $(\Delta h, \Delta v)$ 이다.  $UL'$  과  $UR'$  에 대한  $\Delta v$ 는  $UL$  과  $UR$  에서와 같지 않다. 영점 조정의 요소인  $(\Delta h, \Delta v)$ 는 각사분면에서 독립적으로 영점조정각(yaw and pitch)을 유발시킨다. 이것은 사분면 경계에서 큰 오차를 유발한다. 특히  $U', R', Le', L'$ 에서 심하다. 이것은 다음과 같은 이유때문이라고 생각된다. (1) 눈화상카메라의 수평축과 눈의 수평회전축(yaw)의 불일치, (2)불규칙한 곡면의 각막표면 (3)A/D 변환기등과 같은 장비의 비선형성 등이다.

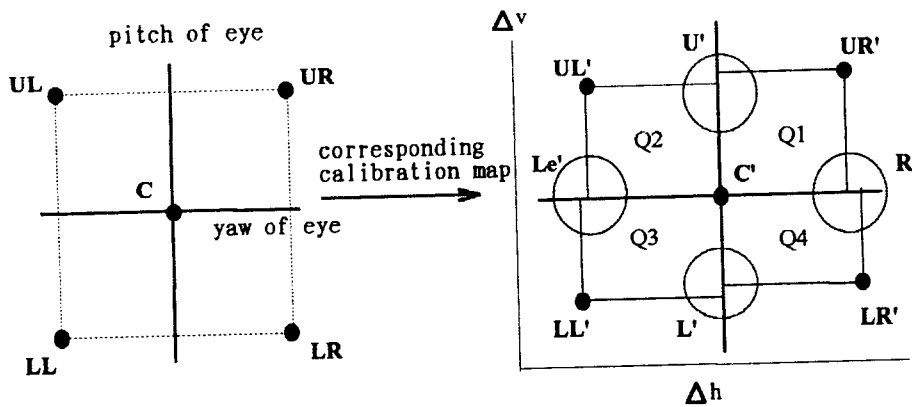


Figure 3. Relationship between the calibration points(left) and the calibration map(right) in the previous calibration method

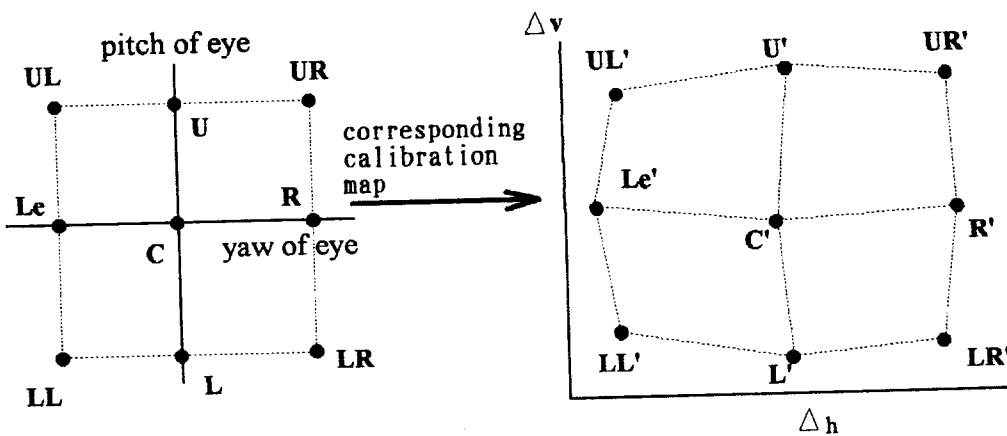


Figure 4. Relationship between the calibration points(left) and the calibration map(right) in the modified calibration method

### 3.2 개량된 영점조절 방법

기존의 영점조절 방법의 단점을 극복하기 위해 영점조절을 할때 9개의 점(중심점, 네개의 코너점과 그 중간점)을 사용하였다(Figure 4). 이 경우 ( $\Delta h$ ,  $\Delta v$ ) 로 생기는 사변형은 직사각형이 아니고 사변형이다. ( $\Delta h$ ,  $\Delta v$ ) 를 대응하는 눈의 yaw 와 pitch로 변환 시킨다.

기존의 영점조절 방법에서는 머리를 고정시키고 영점조절점을 모니터에 고정시켰다. 개량된 영점조절 방법에서는 영점조절점이 모니터에 고정되지 않는다. 머리 움직임을 보정을 하면서 눈의 중심을 기준으로 하는 9개의 벡터(3×3 영점조절점의 경우)와 모니터의 교점으로 영점조절을 하기 때문이다. 즉, 영점조절점은 머리움직임과 같이 움직인다. 두 영점조절 방법간의 차이를 알기 위해 기존의 방법과 개량된 방법에 이 원리를 적용시켰다. 그러므로 기존의 영점조절 방법에서는 머리를 고정시키는 것이 필수적이었는데, 이제는 더이상 머리를 고정시킬 필요가 없다. 이것은 기존의 연구에서, 영점조절할때 머리가 흔들림으로써 생기는 오차를 없앨수 있다. 영점조절 범위는 yaw와 pitch에 대해 30 deg.이고, 소요시간은 30초 정도 걸린다. 486 컴퓨터에서 LOS의 refresh rate는 60Hz이다.

### 3.3 영점조절방법 비교실험

여섯명의 피실험자(나이 24-35)가 실험에 참여하였다. 이 시스템의 주요 사용자가 장애자를 위한 것이지만 피실험자는 모두 정상인이다. 두 방법으로 각각 영점조절을 한 후 영점조절각 내의 전 범위에 걸쳐 50개의 목표점(지름 3mm)이 순차적으로 임의의 위치에 생긴다. 피실험자는 이 점을 응시하면서 스페이스바를 누른다. 종속변수는 이 목표점과 각 영점조절방법을 통해 계산된 주시선과 모니터 간의 교차점사이의 픽셀수로 계산한 시각(visual angle)이다. 6명의 피실험자는 두 영점조절방법에 대해 실험을 하였다. 학습 효과를 알기위해 다음날 동일한 실험을 반복했다(session). 두 영점조절방법, 6명의 피실험자, 두 session조합에 대해 각각 50번의 반복을 했다.

ANOVA 결과에서 두 영점조절 방법의 정확도의 차이가 유의하게 나왔다. Duncan's multiple range test 도 같은 결과를 보였다( $\alpha=0.05$ ). 피실험자간의 정확도 차이는 유의하지 않았다. 방법과 피실험자간의 교호작용, 피실험자와 session의 교호작용은 유의하지 않았다( $\alpha=0.05$ ). 이 논문의 목적은 EHCI(eye-controlled human/computer interface)를 사용하는 사람들의 일반적인 특성을 연구하는 것이 아니라 EHCI가 인터페이스로서 가능한지를 평가하는 것이다. 목표점과 LOS의 교점간의 평균 시각(visual angle)은 기존의 영점조절 방법에서는 1.02도[9]이다. 개량된 영점조절 방법을 이용하면 0.5도이다. 이는 개량된 영점조절 방법에서는 은 목표메뉴(target)의 크기를 1/4이하로 줄일 수 있다는 것을 의미한다..

Table 1. ANOVA on the two calibration methods

Source	DF	Mean Square	F value	Pr > F
Method	1	50053.08333	419.95	0.0001
Subject	5	331.56400	2.76	0.0175
Session	1	330.75000	2.75	0.0976

### 3.4 개량된 영점조절 방법에서 영점조절점의 증가효과

기존의 영점조절 방법으로는 수평, 수직의 두 영점조절요소가 각 사분면에서 독립적으로 사용되어, 영점조절점을 증가시키기가 어려웠다. 하지만 EHCI 시스템에서는 영점조절 영역의 사각형을 해당되는 사변형으로 대응시키면 되므로 영점조절을 증가시키는 것이 어렵지 않다. 5×5개의 영점조절점의 예가 Figure 5에 나와있다. 중심근처에는 사각형이고 주변에는 사변형인것은 중심근처에서 선형성이 잘 유지된다는 것을 보여준다. 영점조절점의 증가는 계산시간을 증가시키지만, 5×5개의 영점조절점을 사용할 경우 약 30초 걸리므로 3×3 경우와 큰차이는 없다.

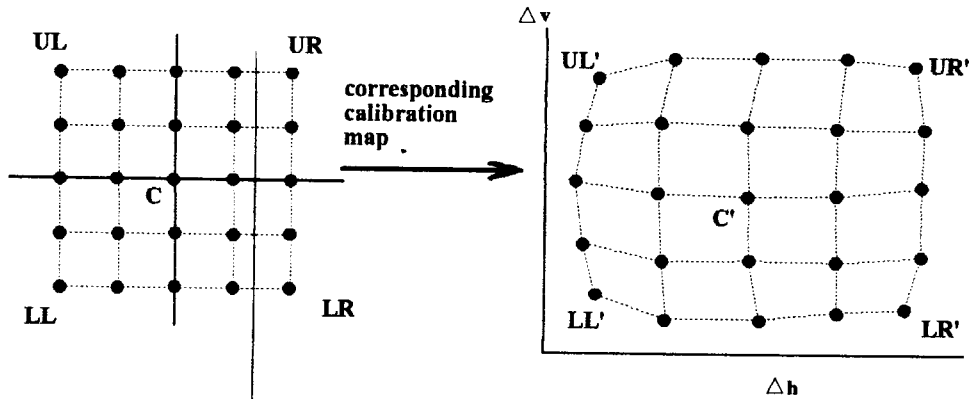


Figure 5. An example for 5x5 calibration points in the proposed calibration method.

Table 2. ANOVA on the calibration methods with various calibration points

Source	DF	Mean Square	F value	Pr > F
Method	2	1029.417778	514.708889	0.0004
Subject	5	88.174222	1.33	0.2484
Session	1	68.835556	1.04	0.3083

개량된 영점조정 방법에서 3×3, 4×4, 5×5 영점조정점을 사용하여 앞 실험과 동일한 피실험자로 실험하였다. 3×6×2(방법×피실험자×세션)에 50번 반복한 것에 대한 ANOVA결과는 방법들간의 차이가 유의있음을 나타낸다(Table 2). LOS의 교점과 목표점사이의 시각(visual angle)의 평균과 표준편차가 Table 3에 나와있다. Duncan's multiple range test는 3×3 과 4×4사이와, 3×3 과 5×5 사이의 차이가 유의하다( $\alpha=0.05$ ). 수평축과 수직축의 표준편차는 타겟의 크기(the size of command block)를 정하는 기준이 된다. 예를 들어 타겟을 맞추는 확률이 0.98%이고 시각(visual angle)이 1.42deg.( $\pm 2.3\sigma$ )라고 하자. 이 경우 모니터에서 눈이 500mm 떨어져 있다고 할때 모니터상의 타겟의 크기는 15 x 15 mm이다. 이것은 14 인치 모니터인 경우 100개 이상의 타겟을 가능하게 한다. 실험 2에서는 108개의 타겟(명령블락, 12x9 mm)을 이용하였다

#### 4. 능동적 메뉴선택

##### 4.1 메뉴선택법

언어나 마우스를 사용할 수 없는 장애인들을 위하여 메뉴를 선택할 수 있는 방법중의 하나는 미리 정해진 시간 보다 길게 메뉴를 응시하고 있으면 해당 메뉴가 선택되도록 하는 방법이다. 이는 컴퓨터가 인식할때까지 해당 메뉴를 일정시간동안 계속 주시하고 있어야 한다는 점에서 수동적 선택방법이다.

눈깜박임을 메뉴를 선택하고 실행시키는 도구로 쓰기 위하여 본 연구에서는 의도적 눈깜박임(intentional eye blink)을 정의하였고 이는 순간적 눈깜박임(내생적 눈깜박임, 반사적 눈깜박임)과 구분되어야 한다. 순간적 눈깜박임에 대해서는 많은 연구가 되었다. 눈깜박일때 눈을 감은 시간은 최대 270-300msec로 추정된다되며 순간적 눈깜박임에서는 150msec 이내이다[Reideman and Stern,1977]. 의도적 눈깜박임은 눈을 감은 시간이 미리 정해진 최소치와 최대치안에 있어야 된다고 정의하였고 다음과 같은 두조건을 만족시킬때 메뉴가 선택되어 실행된다고 가정한다.

(a)목표메뉴 인식을 위해서는 미리 정해진 최소시간 이상으로 주시선이 해당 메뉴안에 머물러야 한

다.

(b) 의도적 눈깜박임이 일어나야 한다. 의도적 눈 깜박임이란 눈을 감고 있는 기간이 미리설정된 최소시간과 최대시간사이에 있는 경우이다.

조건 (a)는 saccade 때 메뉴선택이 일어나지 않도록 하기 위해 필요하며 최소 시간은 본 실험에서는 50msec로 하였다. 조건 (b)에서 최소시간은 순간적 눈깜박임을 피하기 위해, 최대 시간은 피곤할 경우 발생하는 마이크로 수면을 피하기 위해서이다. 예비실험에서는 각각 200msec와 1500msec로 하였다.

개량된 영점조절법을 사용한 본 EHCI시스템은 14인치모니터에서 크기가 15mm × 15mm인 메뉴 108개(가로 12개 × 세로 8개)를 구성할 수 있다. 피실험자는 앞 실험과 동일하다.

의도적 눈깜박임을 이용하여 메뉴를 선택하는 실험절차는 다음과 같다. 모니터 상에 108개의 메뉴가 표시된다. 5초에서 10초사이의 임의의 시간에 임의로 하나의 메뉴가 5초동안 반전(하이라이트)된다. 피 실험자는 그 메뉴를 찾아 눈으로 응시하고(이때 어떤 메뉴안에 주시선이 머무르는 시간이 50msec이상 이면 그 메뉴는 노란사각형으로 강조된다) 의도적 눈깜박임을 하여 선택조건이 만족되면 해당메뉴가 선택실행된다. 피이드 백을 위해 주시선이 모니터에 교차하는 점을 연속적으로 조그만 십자선으로 표시 하였다. 한번의 실험에서 목표메뉴가 임의의 위치에 100번 나타난다. 주시선의 refresh rate는 60Hz이다 (486 컴퓨터). eye-메뉴선택과정의 도식적 절차가 Figure 6에 나타나 있다. D1 은 목표메뉴가 나타나고 주시선이 그 메뉴를 찾을때까지의 시간이다. D2 는 주시선이 메뉴를 찾은 시각에서 눈을 감을때까지의 시간이다. D3 는 눈을 감은 시각에서 눈을 뜰때까지의 시간이다. 눈을 감은 후 의도적 눈깜박임으로 간주 될 수 있는 최소시간이 경과하면 경고음을 발생시켜 해당메뉴가 선택될 준비가 되었음을 피 실험자에게 알려 준다. D1 시간은 목표메뉴(타겟)의 난이도와 관련이 있는데 본 연구에서는 관심 대상 이 아니다. D2 에서는 화면에 표시된 교점을 이용하여 명령을 수행하기 위해 눈깜박임을 시작한다. D3 에서는 눈깜박임이 수행된다.

실험은 세개의 session으로 구성되어 있다. 첫번째 session은 예비실험(훈련)이고 나머지 두 session은 학습효과를 알아보기 위해 반복을 한 것이다. 각 피실험자에 대해 각 session에서 100번의 눈깜박임을 실험하였다. 한 session을 수행하는데 30분이 소요된다. D1, D2, D3 동안 commission error 와 omission error 가 발생이 되었다. 목표메뉴가 나타난 후 5초가 경과할때 까지 선택하지 않으면 omission error로 간주한다. 첫번째 session은 연습이므로 분석에서 제외시켰다.

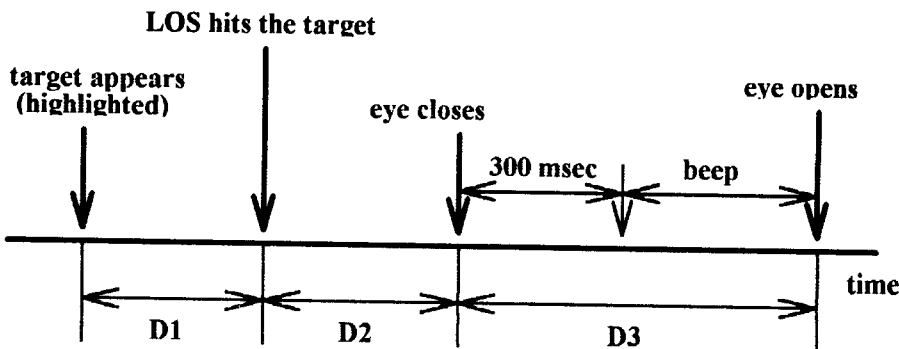


Figure 6. Schematic diagram of eye triggering

#### 4.2 실험결과

결과가 Figure 7과 Table 4에 나와 있다. D1 의 평균과 표준편차는 625msec와 257 msec이다. D2 의 평균과 표준편차는 440msec와 168msec이다. D3 의 평균과 표준편차는 339msec와 65 msec이다.그림 9에서, D2+D3 가 순수하게 메뉴선택하는데 소요되는 시간이다. D1 은 타겟의 난이도에 비례한다. D2+D3



의 평균과 표준편차는 780.3 msec 와 233.8 msec 이다. 이시간은 minimal closure duration (현재 200msec) 과 minimal stay duration (현재 50msec)을 줄이면 짧아질 수 있다.

본 시스템에서는 98%의 적중률을 보장하도록 메뉴의 크기가 설계되었지만, 실험결과 적중률은 98%이상이었다. 이는 목표요메뉴를 바라보아도 해당메뉴가 노란사각형으로 강조되지 않을 경우에(주시 선의 오차때문) 시선을 의도적으로 목표메뉴 주위로 조정하여 목표메뉴가 선택되도록 하기 때문인 것으로 관찰 되었다. Omission error 는 나타나지 않았는데 이것은 5초가 목표를 선택하는 데 충분한 시간 이기 때문인 것으로 생각된다.

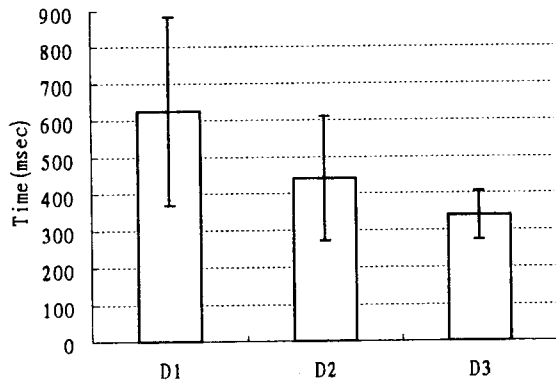


Figure 7. Triggering time(bar=mean, error bar=s.d.).

Table 3. The mean and the standard deviation of the visual angle between the target point and the calculated intersection point of LOS(unit : degree).

variables	calibration method	mean	s.d.
X	9 points(3x3)	0.0436	0.4028
Y		-0.0325	0.5046
d		0.5556	0.3102
X	16 points(4x4)	0.0812	0.3798
Y		-0.0142	0.4665
d		0.5196	0.2892
X	25 points(5x5)	0.0620	0.3816
Y		0.0885	0.4135
d		0.4893	0.2753

X : angle deviation on horizontal axis      Y : angle deviation on vertical axis

$$d = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

Table 4. Target acquisition rate(sessions were pooled).

	correct hits /trials	commission errors /trials	omission errors /trials
subject 1	199/200	1/200	0/200
subject 2	197/200	3/200	0/200
subject 3	198/200	1/200	1/200
subject 4	198/200	2/200	0/200
subject 5	198/200	2/200	0/200
subject 6	199/200	1/200	0/200

## 5. 결론

본 연구에서는 머리추적장치와 안구운동 추적장치, 이를 실시간으로 판장하는 응용 소프트웨어를 개발·통합하여 눈으로 조종하는 인간/컴퓨터 인터페이스(EHCI)를 개발하였다. 또한, 기존의 눈-카메라 보정방법을 개선하여 시스템의 정확도를 대폭 향상시켰다. EHCI는 주시선과 의도적 눈깜박임을 사용하여 컴퓨터 화면상의 목표가 되는 아이콘이나 명령어를 능동적으로 선택한다.

주시선의 정확도를 높이기 위하여 개선한 눈-카메라 보정방법을 기존의 보정방법과 실험을 통하여 비교하였다. 주시선은 개선된 보정방법을 사용하였을 때 더 정확하였으며 이 정확도를 기초로 화면상에서 98% 이상 목표 획득 확률을 보장할 수 있는 아이콘의 크기를 설계하였다. 또, 주시선으로 지시되고 있는 아이콘을 의도적인 눈깜박임을 이용하여 능동적으로 선택하는 방법을 제안하였으며, 실험을 통하여 그 가능성과 속도를 조사하였다.

이 논문의 장점은 다음과 같다. 첫째, 주시선의 정확도가 향상되어 108개의 목표(아이콘)를 14인치 컴퓨터 화면에 동시에 표시가 가능하며 이때의 주시선의 정확도는 98%이다. 기존 연구에서는 단지 9개의 목표만을 화면에 표시할 수 있었다. 둘째, 기존의 연구에서는 머리의 움직임을 보정해 주지 못하거나 제한적인 움직임만을 허용했는데, 본 연구에서는 머리의 움직임을 완전히 자유롭게 허용하였다. 셋째, 이전의 연구에서는 주시점에 의해 지시된 목표를 선택하려면 그 목표를 일정시간 이상 바라보고 있어야 하는 일종의 수동적인 선택방법이었지만, 본 시스템에서는 의도적인 눈깜박거림으로 능동적인 선택이 가능하게 하였다.

인간/컴퓨터 인터페이스로 이용하는데에 주시선은 직감적이고 빠르기 때문에, EHCI는 장애인은 물론 정상인들도 이용할 수 있다고 하겠다. EHCI는 훈련, 교육, 외부기기조종, 재활, 가상현실 등 그 응용범위가 다양하다고 생각된다.

## REFERENCE

1. L. R. Beideman and J. A. Stern. Aspects of the eye blink during simulated driving as a function of alcohol. *Human Factors*, 19, 73-77 (1977).
2. Y. Ebisawa, K. Kaneko, S. Kojima, T. Ushikubo, and T. Miyakawa. Non-invasive eye-gaze position detecting method used on man/machine interface for the disabled. *Proceedings of the 4th Annual Symposium on Computer Based Medical System*, 374-380 (1991).
3. L. A. Frey, K. P. White, and T. E. Hutchinson. Eye-Gaze Word Processing. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 20, 944-950 (1990).
4. G. A. Fry. The eye and vision. In R. Kingslake(Ed.), *Appl. optics and optical engng.* Vol. II, New York, Academic press (1965).
5. T. E. Hutchinson, K. P. White, W. N. Martin, K. C. Reichert, and L. A. Frey. Human-computer interaction using eye-gaze input. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 19, 1527-1534 (1989).
6. J. R. LaCourse, and F. C. Hludik. An eye movement communication-control system for the disabled. *IEEE Trans. Biomedical Engng.* 37, 1215-1220 (1990).
7. W. R. Miles. Elevation of eye-balls in winking. *J. Exptl. Psych.* 14, 311-332 (1931).
8. J. A. Stern, L. C. Walrath, and R. Goldstein. The endogenous eyeblink. *Psychophysiology*, 21, 22-33 (1984).
9. L. R. Young and D. Sheena. Survey of eye movement recording methods. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 7, 397-429 (1975).
10. 이 경 태, 눈으로 조종하는 인간/컴퓨터 인터페이스에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1996

## APPENDIX : 눈회전각 계산절차

안구중심(PC)과 각막반사점(CRC)의 차를 이용해서 머리에 대한 눈의 각도의 (raw and pitch) 회전을 계산한다. 영점조절하기 위한 점은  $n \times n$  개이다.

notations :  $i = 1, \dots, n$ , 영점조절점의 수평지수, 1이 맨왼쪽  
 $j = 1, \dots, n$ , 영점조절점의 수직지수, 1이 맨위쪽  
 $PC_{i,j}$  = 영점조절점( $i, j$ )의 안구중심  
 $CRC_{i,j}$  = 영점조절점 ( $i, j$ )의 각막반사점중심  
 $Di,j = PC_{i,j} - CRC_{i,j}$ .

1. 영점조절 후에 임의의 점을 볼때 PC-CRC 벡터의 화상에서 표현하는 점을 P라 하자. P'는 P에서 변환된 yaw와 pitch이다.

2. 다음과 같은 절차로 P를 포함하는 사변형을 구한다.

2.1) P에 가장 가까운  $Di,j$  를  $D_{s,t}$ 라 하자.  $D_{s,t}$ 에서 다음과 같이 5개의 단위벡터를 계산한다.(Figure A-1)

$$\begin{aligned} Pu &= (Pux, Puy), \\ Uu &= (Uux, Uuy), \\ Ru &= (Rux, Ruy), \\ Du &= (Dux, Duy), \\ Lu &= (Lux, Luy). \end{aligned}$$

2.2)  $D_{s,t}$  주위의 4개의 사변형 중에서 P 가 있는 사변형을 구하기 위해 다음과 같이 분류한다.

If  $((Pux \geq Uux) \text{ and } (Puy \geq Ruy))$ ,  
then P falls in the upper-right quadrilateral from  $D_{s,t}$ .

If  $((Pux \leq Uux) \text{ and } (Puy \geq Luy))$ ,  
then P falls in the upper-left quadrilateral from  $D_{s,t}$ .

If  $((Pux \leq Dux) \text{ and } (Puy \leq Luy))$ ,  
then P falls in the lower-left quadrilateral from  $D_{s,t}$ .

If  $((Pux \geq Dux) \text{ and } (Puy \leq Ruy))$ ,  
then P falls in the lower-right quadrilateral from  $D_{s,t}$ .

Let the upper-left corner index of the quadrilateral obtained above be  $(a,b)$ .

3. 사변형을 직사각형으로 변환을 한다. 사변형의 각변은 끝점의 선형관계로 표현할 수 있다.(Figure A-2)

$$\begin{aligned} \text{upper side} &= u \times Da+1,b + (1-u) \times Da,b, \\ \text{lower side} &= u \times Da+1,b+1 + (1-u) \times Da,b+1, \end{aligned}$$

Find u and v by letting  $v \times \text{lower side} + (1-v) \times \text{upper side} = P$ ,

$u \in [0,1]$  는 사변형의 윗변과 아랫변의 비,  $v \in [0,1]$  는 사변형의 왼쪽변과 오른쪽변의 비

4. 수평 및 수직의 영점조절 범위를 HCR 과 VCR 라 하자. P'에 해당하는 눈의 yaw와 pitch는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{yaw} &= -HCR/2 + (a+u) \times (HCR/n), \\ \text{pitch} &= VCR/2 - (b+v) \times (VCR/n). \end{aligned}$$

영점조절 범위의 좌상끝에 LOS에 대해 HCR/2 의 yaw와 VCR/2 의 pitch가 있기 때문에 HCR/2 을 빼고 VCR/2를 더한다. 플러스와 마이너스 부호는 좌표중심의 관례때문에 생긴 것이다. 눈의 roll은 LOS에 영향을 주지 않기 때문에 0이라 가정한다.

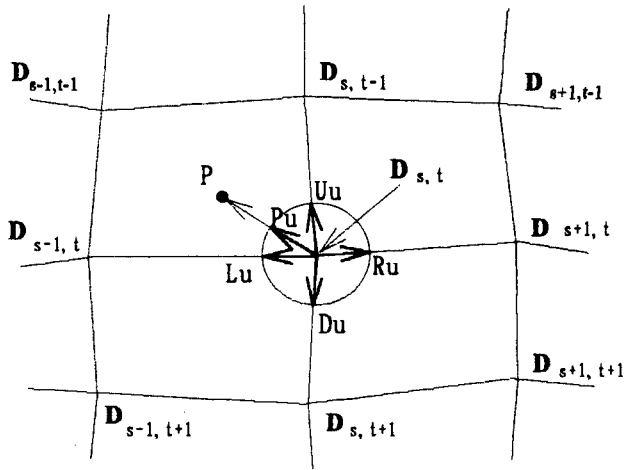


Figure A-1. Calibration map around the quadrilateral in which P falls.

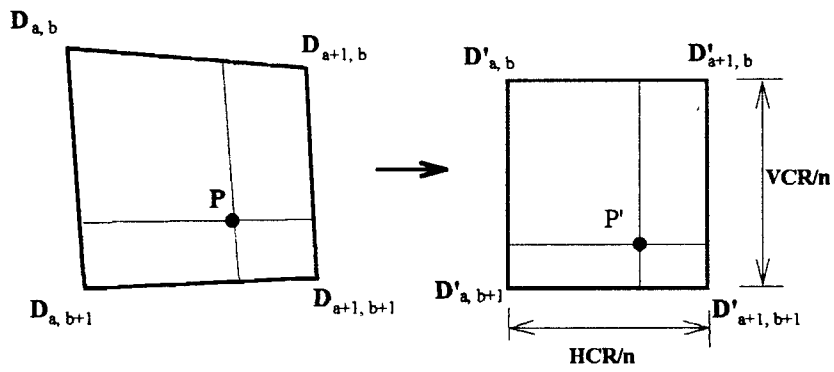


Figure A-2. Transforming a quadrilateral into a rectangle.