

영상을 이용한 실시간 3차원 안구 운동 측정

연세대학교 의과대학 이비인후과학교실¹, 의학공학교실²

송미현¹, 김수찬², 남기창², 김덕원², 신유섭¹, 이원상¹

Real-Time Measurement of 3-Dimensional Eye Movements by Videoculography

Mee Hyun Song, M.D.¹, Soo Chan Kim, PhD.², Ki Chang Nam, PhD.², Deok Won Kim, PhD.², Yoo Sup Shin, M.D.¹, Won Sang Lee, M.D.¹

Department of Otorhinolaryngology¹, Department of Medical Engineering²,

Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

Background and Objectives : In order to analyze and understand the oculomotor system completely, it is essential to measure horizontal, vertical, and torsional eye movements. We developed a new system of 3-dimensional videoculography that can accurately estimate the pupil center and measure torsional eye movement in real time while minimizing the errors caused by upper eyelid droop, eyelashes, corneal reflection, and eye blinking.

Materials and Method : For accurate estimation of the center and diameter of the pupil, the edges of the pupil were searched by using a sector-form window and circle fitting was performed using the least square regression. Torsional eye movement was measured using polar cross-correlation technique with modification to lessen the errors produced by the change in pupil size. Calibrations were performed and to verify the proposed system, the linearity between the measured and actual eye movements was measured. Also, the results of the proposed system were compared with those of another commercialized system.

Results : The linearity between the measured and actual eye movements showed errors of less than 1%. The spatial resolutions of the system for horizontal, vertical, and torsional eye movements were 0.3, 0.4, and 0.2, respectively whereas the temporal resolution was 30 frames/sec. In comparison to the commercialized system, our system showed less artifact by eye blinking when measuring vertical eye movement.

Conclusion : We proposed an algorithm and a system for measuring horizontal, vertical, and torsional eye movements which minimized the influence of partial eyelid closure, eyelashes, corneal reflections, and change in pupil size.

Key Words : Eye movement Vestibulo ocular reflex, Measurement.

서 론

• 교신저자 : 이 원 상

120-752 서울특별시 서대문구 신촌동 134

연세대학교 의과대학 이비인후과학교실

Tel: 02-361-8477, Fax: 02-393-0580

E-mail: wsleemd@yumc.yonsei.ac.kr

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00384-0)지원으로 수행되었음

자발적 또는 유발 조작을 가함으로써 발생하는 안구 운동을 측정함으로써 전정계의 병적 상태에 대한 임상적 진단과 치료 계획의 수립, 치료의 평가, 생리기전의 연구 등이 이루어질 수 있다.^{1,2)} 안구운동의 측정을 위하여 1929년 Meyers에 의해 개발된 전기안진

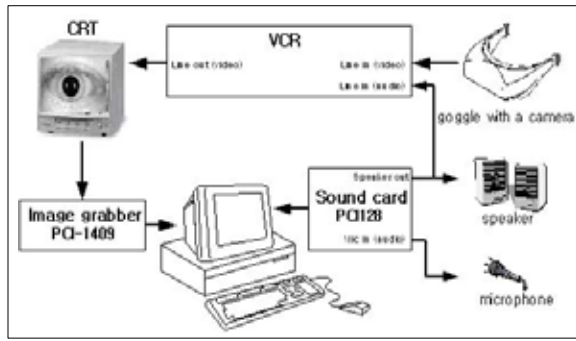


Fig. 1. 3-Dimensional VOG system description.

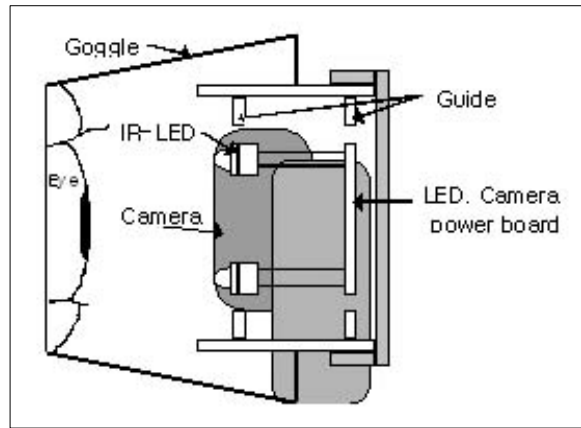


Fig. 2. Design of the goggle.

Table 1. The specifications of CCD camera

Items	Specifications
Total pixels	537 (H)×505 (W)
Cell size	7.15 m(H)×5.5 m(W)
Video out	IV p-p75 ohm
S/N ratio	46dB
Shutter speed	1/60 1/100,000 sec
Power source	DC 9V, 110 mA
Dimensions	28 mm×24 mm×14.8 mm
Focal length	3.8 mm
F point	2.0
Minimum illumination	0.8Lx
Weight	19 g

Table 2. The specifications of the goggle

Items	Specifications
Weight	183 g
IR Illumination power	<3 mW
IR Illumination wavelength	880 nm
Horizontal range	40
Vertical range	25

검사법은 현재까지 보편적으로 사용되고 있는 방법으로 수평과 수직의 2차원적인 측정만이 가능하지만 실제 반고리관이나 이석기관을 비롯한 전정기능의 정량적인 평가를 위해서는 수평, 수직, 그리고 회전의 3차원적인 안구 운동의 측정이 필요하다.^{3,5)} 따라서 1960년대 이후 3차원적인 안구 운동 측정이 가능한 **photographic method**⁶⁾이나 **sclera search coil method**⁷⁾ 등이 개발되었으나 전자의 경우 실시간 처리가 어렵고 관찰자에 따라 결과가 달라질 수 있는 단점이 있었으며 후자의 경우 현재까지 알려진 방법 중 가장 공간적, 시간적 해상도가 뛰어나지만 렌즈를 안구와 직접 접촉시켜야 하는 침습성 때문에 안구의 감염, 각막의 손상의 가능성이 있고 환자의 불편을 초래하여 30분 이상의 검사가 불가능한 단점이 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 1980년대 후반에 비침습적이면서 정밀한 안구 운동 측정이 가능한 영상 안진기가 개발되어 상품화되기 시작하였다. 그러나 실제 임상 적용에

있어서 영상 안진기의 제한점은 눈꺼풀의 영향에 의해 동공 중점 추정의 오차가 발생 가능하고 회전 안구 운동 측정 시 동공 크기의 변화에 영향을 받으며 실시간 처리에 한계가 있다는 점들이다. 정확한 회전 안구 운동의 측정을 위해서는 정확한 동공 중점과 반경의 추정이 필수적이며 이를 위한 기존의 대표적인 동공 중점 추정 방법으로는 **center of gravity method**, **deformable template method**, **curvature method** 등이 있으나 대부분의 경우 눈꺼풀에 의해 동공이 가려지면 오차가 커지는 문제점이 있다.^{8,9)}

본 연구에서는 눈꺼풀과 속눈썹에 의한 오차를 최소화하고 동공의 크기 변화에 상관없이 회전 안구 운동을 정확히 측정하여 실시간으로 적용이 가능한 3차원 안구영상 안진 측정 시스템을 개발하고자 하였다.

방 법

1. 3차원 안구 운동 시스템의 하드웨어 구성

안구의 영상을 얻기 위하여 자체 제작한 고글에 카메라를 부착하였고, 카메라의 영상은 고글, VCR(SLV-

Table 3. Processing time for pupil center detection

Methods	Processing time (msec)
Proposed method (Sector method)	7
Center of gravity	7
Histogram	16
ModHist	16
Maximum likelihood method	22

Table 4. The specifications for three dimensional videoculography

	Horizontal	Vertical	Torsional
Spatial resolution	0.3	0.4	0.2
Temporal resolution	30Hz (60Hz*)	30Hz (60Hz*)	30Hz
Measurement range	35	25	18

*Without measurement of torsional eye movement

ED919KR, Sony, Japan), CRT(GBM-1009E, Honeywell, USA), 그리고 영상 획득 보드(PCI-1409, National Instruments, USA)를 통해 컴퓨터로 입력 받았으며, 녹화는 영상 뿐만 아니라 컴퓨터의 사운드 카드(Sound Blaster, PCI128, Singapore)의 출력을 이용하여 VCR에 음성도 함께 저장할 수 있도록 하여 환자의 정보, 임상 소견 등의 녹음도 가능하도록 하였다(Fig. 1). 고글에 부착한 카메라(Watec 660D, Watec, USA)는 아날로그 흑백 카메라로 주파수 대역이 가시광선에서 적외선 대역인 930 nm까지 가능한 것으로 홍채의 패턴을 선명하게 관찰할 수 있는 27만 화소(537×505)의 해상도를 가졌

으며(Table 1), 자체 제작한 고글에는 광원으로 880 nm의 적외선 다이오드 4개를 부착하였고 고글 앞에 덮개를 탈착할 수 있도록 하였다(Table 2, Fig. 2). 출력 화면은 4분할하여 양측의 안구 영상과 함께 검사자와 환자의 검사 모습도 동시에 볼 수 있게 하였으며, 영상은 실시간 안구 운동의 분석과 동시에 녹화가 가능하여 추후 재생 화면을 통하여 추가적인 안구 운동의 분석도 가능하도록 하였다(Fig. 3).

2. 3차원 안구운동 추정 소프트웨어

안구운동 추정을 위한 측정 및 분석 프로그램은 Window 2000 운영체제에서 LabVIEW 6i (National Instruments, USA)를 이용하여 구현하였다.

1) 동공 중심 추정 방법

눈꺼풀이나 속눈썹, 그리고 각막 반사에 의한 잡음에 덜 민감한 방법을 제안하고자, 동공의 경계를 찾는 방법으로 동공의 중심을 기준으로 하여 부채꼴 모양의 윈도우를 이용하여 부채꼴의 바깥 경계인 외부 반경에서 내부 경계로 좌표를 변경해 가며 동공의 경계를 찾는 방식을 고안하였다.¹⁰⁾ 동공의 경계 좌표를 이용하여 식 1)과 같이 최소 자승 오차(LSE, least-square error)를 최소가 되도록 circle fitting을 수행하여 원의 중심과 반경을 추정하였다.

$$\text{Least square error (LSE)} = \sum_{i=0}^{M-1} \{ \sqrt{(x_i - \hat{C}_x)^2 + (y_i - \hat{C}_y)^2} - r \}^2 \quad (1)$$

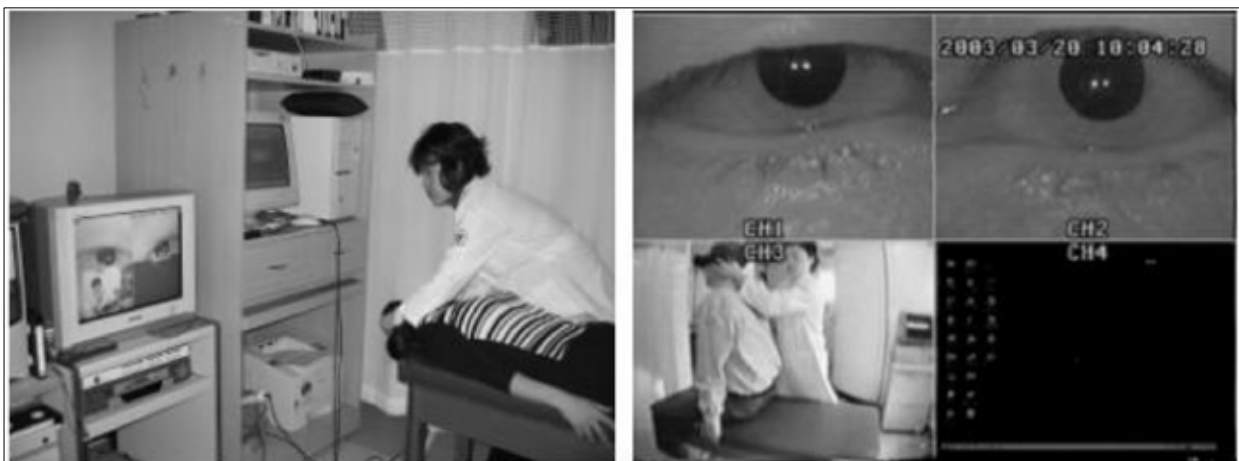


Fig. 3. 3-Dimensional VOG measurement.

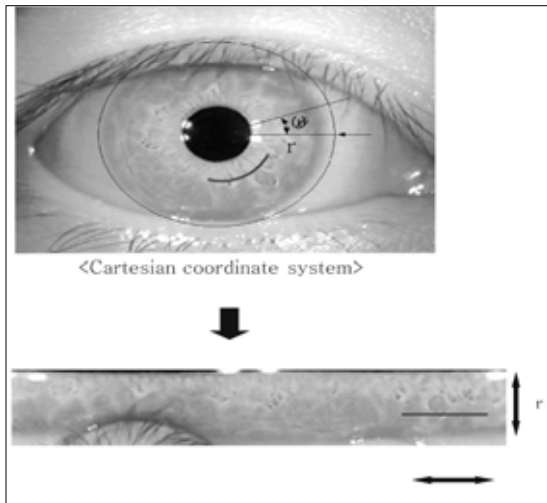


Fig. 4. Cartesian and polar coordinate systems in polar cross-correlation technique.
(r: radius, ω : rotation angle)

여기서 x_i, y_i 는 각각 이진화 된 영상에서 동공의 경계로 판단된 좌표이고, C_x, C_y , 은 각각 동공의 중점과 반지름으로 추정된 좌표이며, 그리고 N 은 동공의 경계로 판단된 좌표들의 개수이다. 이때, 눈꺼풀에 의하여 동공의 일부가 가려져서 동공의 모양이 원에서 많이 벗어나게 되면 LSE값이 증가될 것이고, 특정 역치 이상 LSE값이 커지면 동공이 원이라는 가정하에서만 적용이 가능한 circle fitting 방법을 사용하여 동공의 중점과 반경을 추정하는데 모순이 발생하므로 변형된 히스토그램(modified histogram) 방법을 이용하여 동공의 중점을 추정하였다¹¹⁾.

2) 회전 안구 운동 측정 방법

기존의 회전 안구 운동 측정 방법으로는 홍채의 특정 패턴을 인식하여 회전을 측정하는 방법(iris pattern method)과 홍채의 표식기를 부착하는 방법(landmark method), 그리고 홍채의 극좌표 방향에서의 상호 상관 계수를 이용하는 방법(polar cross-correlation method) 등이 있다. 본 연구에서 이용한 polar cross-correlation 방법⁶⁾은 기존의 다른 방법에 비하여 상대적으로 계산 시간이 적어 실시간 처리가 가능한 방법으로 우선, 안구 영상의 홍채 부분만을 직각 좌표계(cartesian coordinate system)에서 반경(r)과 회전각도(ω)를 축으로 하는 극좌표계(polar coordinate system)로 전환시킨 후

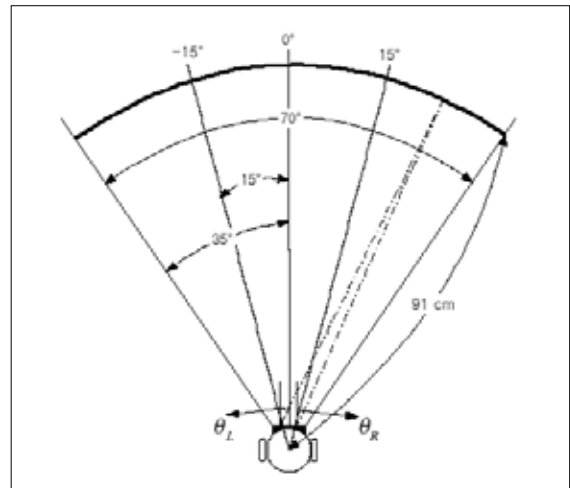


Fig. 5. System calibration.

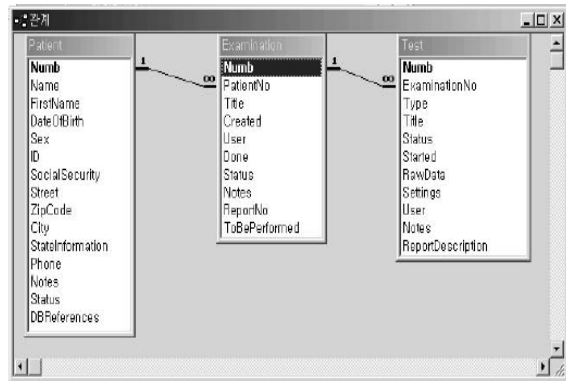


Fig. 6. Relational database used in the proposed system for data storage.

동공 중점에서 일정거리 떨어진 arch-shape의 sample window에서 홍채 패턴을 매 frame마다 측정한다(Fig. 4). 초기에 안구 회전이 없는 상태에서 iral reference signature를 측정하고 특정 순간의 홍채 패턴을 같은 위치의 sample window에서 매 frame마다 측정하여 이 두 패턴간의 상관 관계 함수를 식을 이용하여 구한 후 이 함수의 최대치가 되는 peak index를 구하여 안구 회전 각도를 측정하게 된다. 이러한 polar cross-correlation 방법에 있어서의 문제점은 동공의 크기가 변하게 되면 홍채의 패턴도 바뀌게 되어 회전 안구 운동 측정에 오차가 발생하는 것이고 이를 최소화하기 위하여 과거에는 pilocarpine등을 이용하여 동공의 크기를 고정하는 방법을 사용하기도 하였다. 본 연구에서는 동공의 크기 변화에 따른 오차를 줄이고자 동공

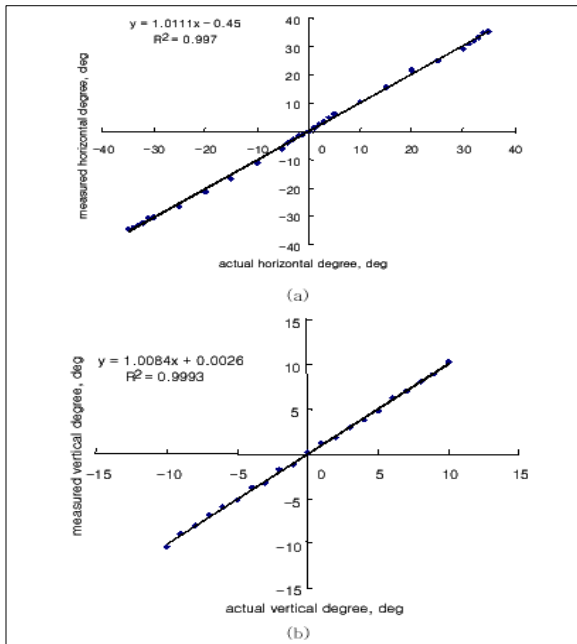


Fig. 7. Linearity of horizontal (a) and vertical (b) eye movements using the calibrated system.

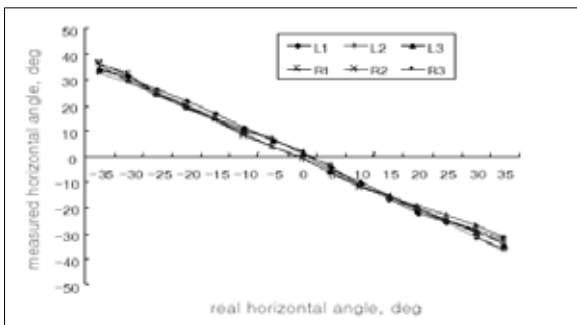


Fig. 8. Comparison of measurement on right and left eyes by the calibrated system. The measurement was performed 3 times for right (R1, R2, R3) and left (L1, L2, L3) eyes.

의 중심에서 고정된 반경의 홍채 패턴을 이용하는 것이 아니라 동공의 경계에서 일정한 거리의 홍채 패턴을 이용하여 안구 운동을 측정하였다.

2. 시스템의 보정(System Calibration)

영상 안진기에서 얻어진 화소(pixel) 단위의 좌표 값을 안구의 회전 각도 값으로 환산하기 위하여 시각 자극기(Nystarplus, Nicolet, USA)를 이용하였으며 피검자와 자극기 간의 거리는 91cm으로 하고, 수평과 수

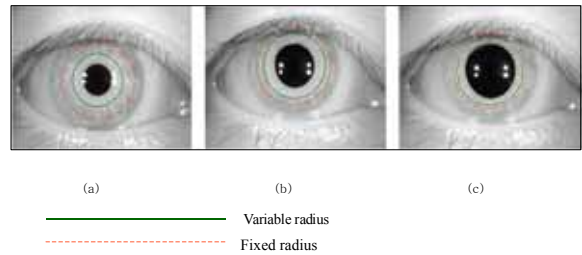


Fig. 9. Eye images of different pupil sizes.(Pupil diameter (a) 55 pixels (b) 86 pixels (c) 107 pixels)

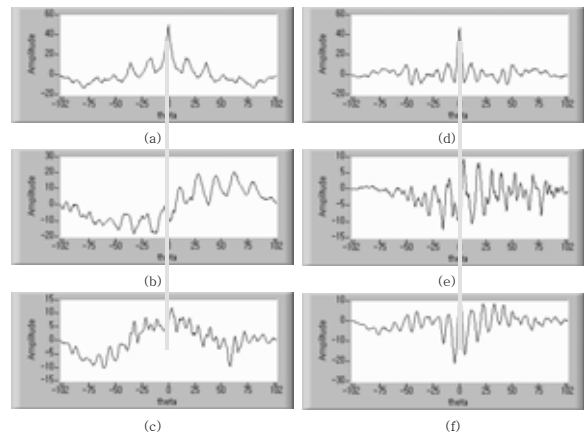


Fig. 10. Cross-correlation functions for measurement of torsional eye movement using iral pattern of fixed radius ((a)~(c)) and of constant distance from pupil margin ((d)~(f)).

- (a) Self cross correlation function of Fig. 9 (a) using iral pattern of fixed radius (peak = 0°)
- (b) Cross correlation function of Fig. 9 (a) and 9 (b) using iral pattern of fixed radius (peak = 63°)
- (c) Cross correlation function of Fig. 9 (a) and 9 (c) using iral pattern of fixed radius (peak = 4°)
- (d) Self cross correlation function of Fig. 9 (a) using iral pattern of constant distance from pupil margin (peak = 0°)
- (e) Cross correlation function of Fig. 9 (a) and 9 (b) using iral pattern of constant distance from pupil margin (peak = 3°)
- (f) Cross correlation function of Fig. 9 (a) and 9 (c) using iral pattern of constant distance from pupil margin (peak = 0°)

직 방향의 자극 범위는 각각 $\pm 35^\circ$, $\pm 20^\circ$ 로 하여 측정하였다(Fig. 5). 보정된 시스템을 이용하여 수평과 수직 안구 운동에 대하여 정상인 1명을 대상으로 실험하여 선형성을 확인하고 좌측(L)과 우측(R) 안구 운동의 측정이 동일한 결과를 보이는가를 비교하였다.

3. 측정 결과의 저장 및 관리

관계형 데이터 베이스(relational database)를 사용하

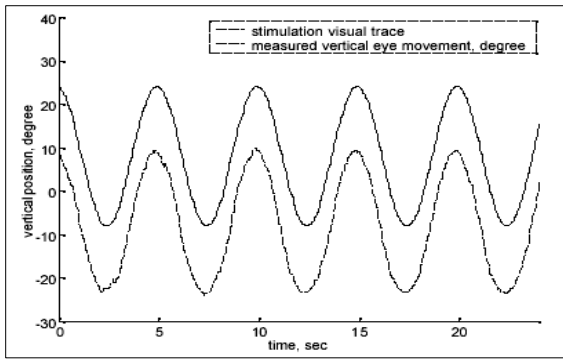


Fig. 11. Measurement of vertical smooth pursuit eye movement. For displaying purposes, offset by +8° and -8° has been applied to stimulation visual trace and measured vertical eye movement, respectively.

여 환자의 정보(patient), 검사 항목(examination), 실험 항목(test)과 같이 3개의 테이블로 구성하였고 실험 항목에는 실험 방법과 안구 운동 좌표(수평, 수직, 회전), 그리고 동공의 크기에 대한 정보를 시간 축과 함께 기록하여 느린 성분(slow phase velocity, SPV)과 빠른 성분(fast phase velocity, FPV)의 안구 운동 속도를 분석할 수 있도록 하였다(Fig. 6).

4. 신뢰성 평가

개발한 시스템의 회전 안구 운동 측정 시 동공의 크기가 변하게 될 때 고정된 반경에서 홍채 패턴을 측정하는 경우와 동공의 경계에서 일정 거리만큼 떨어져 있는 부위에서 측정하는 경우에 각각 상호 상관 계수를 계산하여 그 오차를 비교해 보았다. 또한, 정상인 1명을 대상으로 시추적 자극과 자연스런 수직 안구 운동을 시행하여 안구의 수평, 수직, 그리고 회전 운동을 측정해보고, 측정 결과를 상용화된 영상 안진기 중 하나인 2D VOG(SMI 2D, SensoMotoric Instruments, Germany)의 측정 결과와 비교하였다.

결 과

1. 구현된 시스템의 사양

본 연구에서 개발한 시스템의 수평 및 수직 해상도는 0.3과 0.4이고, 회전 운동의 해상도는 0.2였다. 시간 해상도는 초당 30 frames/sec 였으며 최대 60 fields/sec 까지 가능하였다(Table 4).

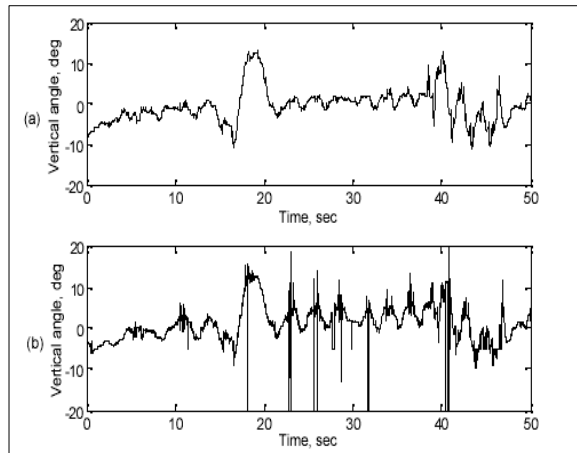


Fig. 12. Measurement of vertical eye movement in a normal subject with proposed method (a) and 2-D SM (b).

2. 수평 및 수직 안구 운동 측정의 선형성 평가

보정된 시스템으로 수평과 수직 안구 운동에 대하여 정상인 1명을 대상으로 측정한 결과, 선형 오차는 수평과 수직 모두 1%를 초과하지 않는 것으로 나타났다(Fig. 7). 또한, 동일인에 대하여 좌측과 우측 안구를 각각 3회씩 5° 간격으로 수평 안구 운동을 측정한 결과, 좌우측의 안구 중 어느 측을 선택하더라도 거의 동일한 결과가 나오는 것을 알 수 있었다(Fig. 8).

3. 동공의 크기 변화시 측정한 회전 안구 운동

동일한 사람에 대하여 외부 조명의 조절로 동공의 크기만 변화시킨 후 각각 고정된 반경과 동공의 경계에서 일정 거리만큼 떨어져 있는 반경에서 홍채 패턴을 측정하였다(Fig. 9). 동공의 중심에서 반경 120화소 떨어진 곳의 홍채 패턴(Fig. 9(a))을 기준 홍채 패턴으로 하여 동공의 크기가 달라지는 경우(Fig. 9(b)와 Fig. 9(c))의 홍채 패턴에 대하여 상호 상관 계수를 계산해 보았다. 그 결과, 동공 중심에서 고정된 반경에서의 홍채 패턴을 이용할 경우 Fig. 10(b)와 Fig. 10(c)에서 보듯이 동공의 크기 변화에 의해 회전 운동의 측정에 오차가 크게 발생하는 것으로 나타났으나 동공의 경계를 기준으로 일정 거리에 있는 홍채 패턴을 이용할 경우 Fig. 10(e)와 Fig. 10(f)에서처럼 동공의 크기 변화에 의한 홍채 패턴의 영향을 적게 받는 것을 알 수 있었다.

4. 2D VOG(SMI)와의 안구 운동 측정 결과 비교

Fig. 11은 정상인을 대상으로 수직 방향으로 40°/sec의 각속도와 ±16°의 자극 각도의 크기로 시각 자극을 가하고 우측 눈의 안구 운동을 측정한 결과이다. Fig. 12는 정상인에서의 자연스런 수직 안구 운동을 개발된 영상 안진기와 기존의 상품화된 2D VOG 시스템을 이용하여 측정한 결과이다. 본 연구에서 구현된 시스템이 속눈썹이나 눈 깜박임에 대한 영향을 적게 받음을 알 수 있었다.

고찰

머리의 움직임 시 망막의 영상을 안정화시키기 위하여 시운동과 전정계의 정보를 이용하여 수평, 수직, 그리고 회전의 3가지 성분을 가진 보상적 안구 운동이 일어나게 된다. 따라서 3차원적인 안구 운동이 측정 가능하여야만 여러 자극에 따른 복잡한 안구운동을 분석할 수 있으나 최근까지 기술적인 문제로 인하여 2차원적인 안구운동에 대한 연구만이 이루어져 왔다.⁴⁾ 현재 3차원 영상 안진기가 상품화되어 보급되고 있으나 대부분의 경우 사유의 기술(proprietary technique)을 사용하므로 하드웨어나 소프트웨어에 대한 자세한 정보를 알기 힘들고 각각의 시스템 자체도 자주 바뀌게 되며 사용자의 편의에 따라 조절이 불가능한 문제점들이 있어 3차원 영상 안진기에서 발생 가능한 오차를 최소화할 수 있는 시스템을 자체 개발하고자 하였다.

3차원 영상 안진기의 정확도를 객관적으로 평가하기 위해서는 현재까지 gold standard로 받아들여지고 있는 scleral search coil 방법과 안구 운동 측정 결과를 비교해보는 것이 한가지 방법이 될 수 있을 것이다. Teiwes 등¹²⁾은 수평, 수직, 회전 안진에 대하여 각각 영상 안진기와 search coil 방법으로 동시에 측정한 안구 운동 기록을 비교한 결과 두 방법간에 큰 차이가 없었다고 보고하였다. 또한, Geest 등¹³⁾은 단속 안구 운동(saccadic eye movement)의 특성에 대하여 2차원 영상 안진기(Eyelink system, SMI, Germany)와 search coil 방법의 측정 결과를 비교하였고 saccadic amplitude, duration, peak velocities 등의 변수에 있어서 선형성의 높은 상관 관계를 나타내는 것으로 보고하였으나 현재까지 가능한 sampling rate으로는 3차원 안구 운동의

측정이나 단속 안구 운동 특성의 정확한 계산에 대하여는 한계가 있을 수 있음을 지적하였다.

영상 안진기의 개발 이래 많은 발전이 있었지만 아직 풀어나가야 할 한계점들이 존재한다.³⁾ 첫째로 위에서 언급한 바와 같이 가장 큰 문제점은 낮은 sampling rate이다. 현재까지 가능한 60 Hz의 시간적 해상도로는 빠른 안구 운동의 측정에는 한계가 있으며 본 연구에서 개발한 시스템으로는 회전 안구 운동 측정을 포함하는 경우 30 Hz의 sampling rate를 보여 문제점을 나타냈다. 둘째로 영상을 이용한 안진기이기 때문에 영상의 질에 의해 결과가 크게 영향을 받는다는 것이다. 특히 본 연구에서와 같이 회전 안구 운동 측정시 표식기를 사용하지 않고 고유 홍채 패턴을 이용할 때, 조명이나 초점이 적합하지 않거나 고유 홍채 패턴의 선명도가 떨어지는 경우 정확도가 떨어질 수밖에 없다. 셋째로 안구 운동의 3차원적 kinematics와 안구가 카메라의 영상 평면으로 투영될 때의 기하학적 왜곡 현상(geometric distortion)등이 정확한 안구 운동 측정에 있어서 오차의 원인이 될 수 있다.¹⁴⁾ Haslwanter 등¹⁴⁾은 이러한 기하학적 왜곡 현상에 대하여 보상할 수 있는 알고리즘을 고안하였으며 그 외의 오차를 유발하는 요인으로 안구의 translation, 각막의 광학적 특성(optical properties), 안구의 optical axis와 visual axis간의 각도 차이 등을 지적하였다.

1. 동공 중심 추정에 대한 고려

정확한 3차원적 안구 운동의 측정을 위해서는 정확하고 빠른 동공 중심의 추정이 필수적이다. 현재까지 개발된 동공 중심 추정 방법들 중 가장 보편적으로 사용되고 있는 방법은 영상의 무게 중심을 이용한 방법(center of gravity, COG)^{6, 15)}으로 동공의 회색 영상을 이진화하여 동공 영역을 1, 그 외의 영역을 0으로 가정한 후 화소 값(pixel value)이 1인 좌표 값들의 평균 값을 구함으로써 중점의(x,y)좌표를 얻게 된다. 이 방법은 hot & pepper noise에 강하고 간단하며 빠른 장점이 있지만, 눈꺼풀이나 속눈썹에 의한 잡음이 발생할 경우 오차가 크게 발생할 수 있는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하고자 속눈썹에 의한 동공의 일부가 가려지거나 잡음이 있어도 정확하게 동공의 중점을 찾기 위하여 deformable template model¹⁶⁾이나 curvature를 이용한 방법¹⁷⁾ 등이 제안되었으나 전자의

경우 계산량이 많아 실시간 적용에는 적합하지 않았고 후자의 경우 동공의 크기에 의해 *curvature* 역치를 교정해야 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 동공 중점을 찾는 데 가장 큰 영향을 미치는 눈꺼풀이나 속눈썹 그리고 각막 반사 등의 잡음에 의한 오차를 최소화하고자 동공의 모양이 거의 원에 가까운 형태를 갖는다는 가정하에 부채꼴 모양의 윈도우를 이용한 동공 경계 추정 방식을 고안하였다. 만약 눈꺼풀에 의하여 동공의 상당 부분이 가려지게 되어 LSE값이 역치값 이상이 되면 중점의 y좌표값을 보정하기 위하여 변형된 히스토그램 방법을 이용하도록 알고리즘을 정하였다.

2. 회전 안구 운동 측정에 대한 고려

현재까지의 회전 안구 운동 측정 방법으로는 홍채에 표식기(landmark)를 부착하는 방법, 홍채의 특정 패턴을 이용하는 방법, 그리고 홍채의 극좌표 방향에서의 상호 상관 계수(cross correlation)를 이용하는 방법 등이 있다.^{5, 14, 18)} 표식기를 이용한 방법은 홍채의 미세한 패턴을 분석할 필요가 없기 때문에 영상을 얻는데 높은 해상도가 요구되지 않고 표식기의 위치 추적도 간단하지만, 눈에 직접 표식기를 부착해야 하기 때문에 관혈적이고 환자로 하여금 거부감과 불편감을 느끼게 할 수 있으며, 표식기가 눈의 깜박임이나 안구 운동으로 인하여 이동될 때 오차가 발생할 수 있는 단점이 있다.¹⁸⁾ 다음으로, 표식기 대신 사람이 가지고 있는 고유의 홍채 패턴을 사용하는 방법이 있는데 이 방법은 홍채 패턴의 선명도가 낮거나 동공 크기에 따라 홍채 패턴이 변하게 되면 회전 운동 측정시 정확성이 떨어질 수 있으며 실시간으로 처리하기에는 계산량이 많다는 단점이 있다.⁵⁾ 또 다른 방법으로 홍채의 극좌표 방향에서의 상호 상관 계수(cross correlation)를 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 안구 회전에 대한 정보를 얻기 위해서는 홍채 패턴의 회전 방향의 정보가 반경 방향의 정보보다 더 중요하고 의미 있다는 사실을 기초로 하여 홍채 패턴을 직각 좌표계에서 극 좌표계로 변환시킨 후 중점으로부터 일정 거리 떨어진 부위에서의 1차원적 circular sampling window의 홍채 패턴을 이용하는 방법이다. 그러나 실제적으로 원형의 윈도우를 사용하게 되면 눈꺼풀이나 아래쪽의 눈물에 의해 홍채 패턴을 구할 수 없는 부위

가 생기게 되므로 이러한 부위를 피하여 원의 일부만을 사용하는 arc-shape의 sampling window를 이용할 수 있다.¹⁴⁾

본 연구에서는 실시간 처리를 위하여 상대적으로 계산 시간이 적은 polar cross-correlation 방법을 이용하여 회전 안구 운동을 측정하였으며, 특히 동공의 크기가 바뀔 때 홍채의 패턴도 변하게 되어 오차의 원인이 되는 것을 최소화하고자 하였다. 현재까지는 이러한 오차를 줄이기 위해서 pilocarpine을 이용하여 동공의 크기를 작게 고정시킨 후 안구의 회전 운동을 관찰하는 방법을 사용하였으나 이 방법을 사용시 동공 크기의 고정으로 인하여 검사 중 피검자의 시력을 저하시켜 편안한 상태에서의 안구 운동 측정을 방해하는 요인이 될 수 있다.¹⁹⁾ 따라서 pilocarpine을 사용하지 않고 동공의 크기 변화에 따른 오차를 최소화하기 위하여 동공 중점으로부터 고정된 반경에서의 홍채 패턴을 이용하는 대신 동공의 경계로부터 일정한 거리의 홍채 패턴을 이용하였다. 또한 눈꺼풀에 의해 홍채의 일부가 가려질 수 있으므로 홍채 전체가 아닌 홍채의 특정 arc 부분의 정보만을 선택하여 사용하였고 적절한 특정 영역의 결정을 위하여 실험을 통하여 그 최적의 조건을 결정하였다.

3. 실시간 분석을 위한 처리 시간의 고려

실시간으로 영상을 얻어 안구의 움직임을 측정하고 이를 저장하기 위해서는 한 프레임의 영상을 처리하는데 33 msec 이상 소비되어서는 안 된다. 처리 시간에 영향을 미치는 인자들은 처리하고자 하는 영상의 크기, 알고리즘, 처리 결과를 보여주는 화면의 크기 등이 있는데 본 연구에서는 안구 중점을 찾을 때 모니터 화면 전체에서 찾는 것이 아니라 이전의 찾아진 중점에서 동공의 크기보다 조금 더 큰 윈도우 내에서 동공의 중점을 찾도록 하여 처리해야 하는 데이터 수를 줄였고 결과 출력 화면의 크기는 5.2 msec의 시간이 소비되는 화면 크기인 128×96 화소를 사용하였다. 중점 추정 방법에 있어서의 소요 시간은 본 연구를 통해 제안한 방법의 평균 처리 시간이 무게 중심을 이용한 방법, 히스토그램 방법, 변형된 히스토그램 방법, 그리고 maximum likelihood 방법과 비교하였을 때, 속도면에서 가장 빠른 무게 중심을 이용한 방법과 거의 동일한 성능을 보였다.

결 론

전정 안구운동 반사의 경로를 충분히 이해할 수 있기 위해서는 반드시 3차원적인 안구 운동의 분석이 필수적이며, 본 연구에서는 비침습적이고 시간적 제한이 없으며 데이터를 저장할 수 있어 추후에 추가적인 분석이나 연구 및 교육 목적으로 사용이 가능한 안구 운동 측정 방법으로 3차원 영상 안진기를 소개하였다. 본 연구에서 자체 개발된 영상 안진기는 시간, 공간적인 해상도 면에서 현재 급속한 속도로 개발되고 상품화되고 있는 영상 안진기에 현재로서는 못미칠 수 있으나 앞으로 추가적인 데이터 수집과 분석을 통하여 시스템을 보완, 수정한다면 사용자 편의에 따라 조절이 가능하고, 연구 및 교육 목적 등 다방면으로 응용이 가능한 시스템으로 발전할 수 있으리라 사료된다.

REFERENCES

- 1) Leigh RJ, Zee DS. *The Neurology of Eye Movements*. 2nd ed. Philadelphia: F.A. Davis; 1991. p.1-9.
- 2) 한규철. *Recording Methods of Eye Movements, in Vestibular Function Test*, 이승철, 이원상 역음. 2003, 서울: 중앙문화사. p. 40-48.
- 3) Merfeld DM, Black FO, Wade S. *Clinical use of three-dimensional video measurements of eye movements. Otolaryngol Head Neck Surg* 1998;118:35-8.
- 4) Fetter M, Haslwanter T. *3D eye movements-basics and clinical applications. J Vestib Res* 1999;9:181-7.
- 5) Bos JE, Graaf BD. *Ocular torsion quantification with video images. IEEE Trans Biomed Eng* 1994;41(4):351-7.
- 6) Hatamian M, Anderson DJ. *Design consideration for a real-time ocular counter roll instrument. IEEE Trans Biomed Eng* 1983;30(5):278-88.
- 7) Robinson D. *A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field. IEEE Trans Biomed Eng* 1963;10:137-45.
- 8) Ivins JP, Porrill J, Frisby JP. *Deformable model of the human iris for measuring ocular torsion from video images. IEEE Proceedings-Vision Image and Signal Processing* 1998;145(3):213-20.
- 9) Zhu D, Moore ST, Raphan T. *Robust pupil center detection using a curvature algorithm. Comput Methods Programs Biomed* 1999;59(3):145-57.
- 10) Kim SC, Nam KC, Lee WS, Kim DW. *Development of videoculograph for vestibular function test. J Inst Electronics Engineers Korea*, 2003; 40-SC(3): 189-98.
- 11) Kim SC, Kim DW, Nam KC, Lee WS. *Minimization of influence by the partial eyelid closure in measuring 3-D eye movements. 2nd Joint Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society and the Biomedical Engineering Society, Houston, Texas USA 2002 Oct*; 23-6.
- 12) Teiwes W, Clarke A, Merfeld D, et al. *Comparison of the sclera search coil and video-oculography techniques for three dimensional eye movement measurement. In: Fetter M, Misslisch H, Tweed D, et al., editors. Three dimensional kinematics of eye, head, and limb movements. Amsterdam: Harwood Academic Publishers gmbh, 1997:431-45.*
- 13) Geest JN, Frens MA. *Recording eye movements with video-oculography and scleral search coils: a direct comparison of two methods. J Neurosci Methods* 2002;114:185-95.
- 14) Haslwanter T, Moore ST. *A theoretical analysis of three-dimensional eye position measurement using polar cross-correlation. IEEE Trans Biomed Eng* 1995; 42(11): 1053-61.
- 15) Kingma H, Gullikers H. *Real time binocular detection of horizontal vertical and torsional eye movements by an infra red video-eye tracker. Acta Otolaryngol* 1995; *Supple* 520: 9-15.
- 16) Ivins JP, Porrill J, Frisby JP. *Deformable model of the human iris for measuring ocular torsion from video images. IEE Proceedings-Vision Image and Signal Processing* 1998; 145(3): 213-20.
- 17) Zhu D, Moore ST, Raphan T. *Robust pupil center detection using a curvature algorithm. Comput Methods Programs Biomed* 1999; 59(3): 145-57.
- 18) Edelman ER. *Video based monitoring of torsional eye movements. 1979, Massachusetts Inst. Technol.: Cambridge.*
- 19) Curthoys IS. *Video procedures for the measurement and display of the three dimensions of eye movements, in Eye movements in reading. Lennerstrand G, Editor. 1994, Pergamon; New York: 20-38.*