

컴퓨터 화상인식 기법을 이용한 눈 운동의 기록

한승한¹ · 김승갑¹ · 이종복¹ · 정 훈²

연세대학교 의과대학 안과학교실, 시기능 개발 연구소¹, 하우(주)²

목적 : 기존 아나로그 방식에 비하여 우리 눈의 운동을 좀더 정밀하고 정확하게 기록하고 환자의 불편이 적게 하기 위하여 컴퓨터 화상인식 기법을 제작하여 그 효능을 알고자 하였다.

대상과 방법 : 환자의 미간에 적외선을 흡수하는 표지를 부착하고, 얼굴의 전면 아래에서 적외선을 조사하면서, 동공의 움직임을 디지털 비디오 카메라로 촬영한 후 컴퓨터에 입력되는 화상 프레임에서 동공과 홍채의 명암도 차이를 이용하여 동공 영역을 분리하고, 경계검출법과 동공의 타원체 근사화를 적용하여 동공의 중심을 찾았다.

결과 : 위치와 속도를 환산하는 후처리 과정에서 디지털 필터를 적용, 해상도 및 샘플링 속도 제한에 의한 잡음을 제거한 후 눈의 움직임을 수평 수직으로 동시에 분리하여 실 시간대별 눈의 이동을 기록하였다. 안구 위치 추적 해상도는 0.2밀리미터 수준이었으며, 30 Hz 이하의 안구 운동을 실시간 자동으로 추적이 가능한 것으로 판단된다.

결론 : 안진 및 눈 운동장애 환자의 수평 및 수직 눈 운동을 보다 정밀하고 정확하게 실시간으로 기록할 수 있었다.
<한안지 44(10):2410-2416, 2003>

안운동이상 질환(사시, 안진, 외안근마비)이 있는 환자들에 있어서 안운동이상의 확진 및 교정수술의 양을 결정하기 위해서 안운동을 시간대별로 도식화 하여 분석하는 것이 필요하다. 이러한 안운동의 기록 방법에는 전기안진도(electro-nystagmography), 자기탐색코일 방법(magnetic search coil method), 적외선 각막윤부 추적방법(irfrared limbus tracking method), 각막반사방법(corneal reflection method) 등이 있다. 전기안진도는 안운동기록과 안운동이상의 진단 방법으로 널리 사용되고 있는데, 눈 주위 피부에 전극을 부착시킨 후 안운동시 발생하는 탈분극현상을 전기적 신호로 증폭하여 안운동의 진폭을 시간대별로 그래프화 하는 방식이다.¹⁻³ 아나로그 신호를 사용하기 때문에, 외부 잡신호(noise)에 영향을 받으며 피부의

전극 위치 및 부착 상태에 따라 전기저항 치가 변하여 오차가 발생할 수 있는 단점이 있다.³ 이런 아나로그 신호에 의한 외부 잡신호(noise)를 줄이기 위하여 여러 장치가 개발되었으나 인체에서 발생되는 전기신호 발생장치가 아나로그방식이며 자료 처리는 컴퓨터를 이용한 디지털방식을 사용하고 있다.^{4,5} 전기안진도는 안운동기록에 일반적으로 사용하는 가장 보편화된 방법이나 수직안운동 측정 시 상하안검거근에서 나오는 전기신호와 상하직근에서 나오는 신호가 중복되어, 두 가지 안운동을 구별하는 데 어려움이 있다.¹ 자기탐색코일 방법은 공막에 전극이 붙은 콘택트 렌즈를 사용하여 안운동시 나오는 근육의 자기장의 변화를 3차원적으로 그래프화 하는 방식으로 아나로그 방식을 채택한 것은 전기안진도와 같으나 근육의 가장 가까이서 신호를 받음으로 인하여 정확하며, 또한 수직안운동시 상하안검거근의 신호를 배제하여 눈의 상하 움직임을 안검의 움직임과 분리시켜 선별적으로 나타낼 수 있다. 그러나 이 방법은 콘택트 렌즈를 사용하여야 하므로 접촉성이며 특히 협조가 잘 안되는 소아에 있어서 사용이 제한된다.^{6,7} 환자에게 부담을 적게 주면서 정확한 안운동 기록 방법을 개발할 필요가 절실하다고 하겠다. 최근 들어 개인용 컴퓨터의 용량이 증가하고 처리속도가 빨라지고 있으며, 기존의 아나로그방식의 신호들이 컴퓨터의 2진법을 사용하는 디지털방식으로 바뀌고 있다. 이에 저자는 환자에게 부담을 적게 주면서 정확한 안운동 기록 및 안운동각도 측정방식을 개발하고자 하였다.

〈접수일 : 2002년 5월 27일, 심사통과일 : 2003년 9월 17일〉

통신저자 : 한 승 한
서울시 강남구 도곡동 146-92
영동세브란스병원 안과
Tel: 02-3497-3440, Fax: 02-3463-1049
E-mail: shhan222@yumc.yonsei.ac.kr

* 본 논문은 2001년 Turkey,Istanbul에서 열린 13회 Congress of the European society of ophthalmology에 포스터로 발표되었음.

* 2001년 연세대학교 의과대학 안과학 교실, 시기능 개발 연구소 연구비 지원을 받았음.



Figure 1. Digitalized Nystagmography.



Figure 3. Screen Layout.

본 연구에서 동공의 움직임을 디지털 비디오 카메라로 촬영한 후 컴퓨터에 입력되는 화상 프레임에서, 동공과 홍채의 명암도 차이를 이용하여 동공 영역을 분리하고, 경계검출법과 동공의 타원체 근사화를 적용하여 동공의 중심좌표를 설정하여 이를 시간대별로 나타내어 눈운동을 도식화하였다.

대상과 방법

검사과정은 안구 운동 유발, 영상 획득 단계, 영상 저장 단계, 동공 영역의 분리 및 위치 획득, 검사 후 처리 과정을 거치게 되고 이를 위해 CCD 카메라, image processor인 컴퓨터, target generator(작은 점멸 전구)를 설치하였다. 이상의 장비들을 그림과 사진으로 나타내었다(Fig. 1-4).

대상은 3명의 환자를 대상으로 하였고 첫번째 환자는 좌측 진동안진과 좌측 턱돌림을 보이는 26세 남자였다 (Fig. 5). 두번째 환자는 눈운동 장해의 병력이 없으며

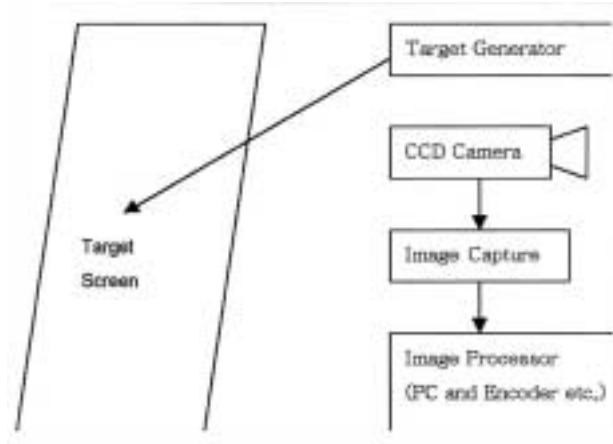


Figure 2. System Setup.

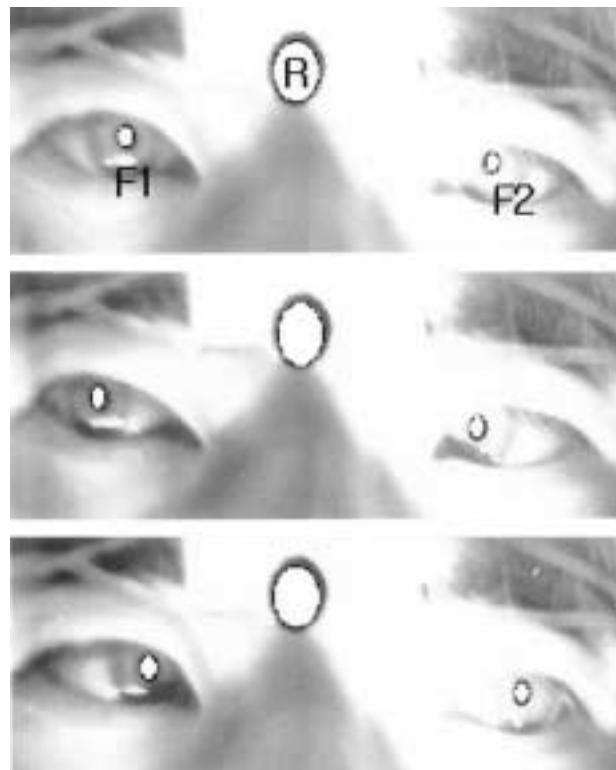


Figure 4. R: Reference Target

F1 : Following Point, Rt

F2 : Following Point, Lt

양안 및 단안 운동 장해 없는 25세 성인 남자로 수평신속운동, OKN(Optokinetic nystagmus)반응, 신속운동속도를 측정하였다(Fig. 6-8). 세번째 환자는 좌측 외향신경 마비를 보이는 30세 여자환자로 수평 신속운동을 측정하였다(Fig. 9).

대상자들의 안운동을 정확히 기록하기 위하여 머리가 움직이지 않도록 이마와 턱을 밀착할수 있게 만든

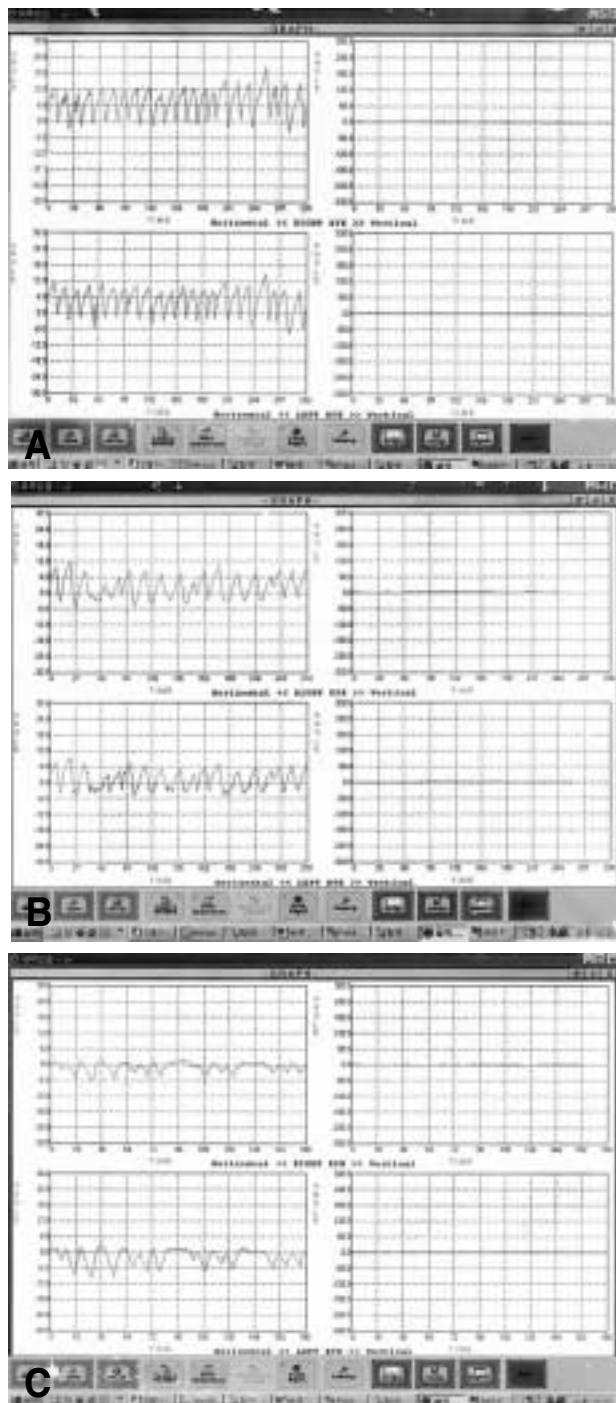


Figure 5. (A) The graph shows left beat jerk whose amplitude was 2-3 Hz with symmetric movement of both eyes. It had decreasing phase. (B) Gaze Lt 30, (C) Gaze Rt 30, Neutral Zone.

틀에 고정시키고 환자의 전방 150 cm에 위치된 작은 점멸 전구를 따라 보게 하였다. 환자의 미간에 적외선을 흡수하는 표지를 부착하고 얼굴의 전면 아래에서 적외선을 조사하면서, 동공의 움직임을 디지털 비디오 카

메라(VX-1, Sony, JAPAN)로 촬영하였다. 카메라 출력 영상을 Image Capture Board를 이용하여 컴퓨터에 저장 시켰다. 저장된 각 이미지 프레임에서 무게중심법, 경계법 등의 알고리즘을 적용하여 동공 영역 및 좌표를 획득하고 각 고정점(R) 및 이동점(F1, F2)의 좌표를 획득하여 눈 모델을 이용하여 눈운동 거리를 수직 및 수평 운동으로 분리계산 하여 시간대별로 도표화 했다. 위치와 속도를 환산하는 후처리 과정에서 디지털 필터를 적용, 해상도 및 샘플링 속도 제한에 의한 잡음을 제거한 후 눈의 움직임을 수평 수직으로 동시에 분리하여 실 시간대별 눈의 이동을 기록하였다. 이 때 잡음제거를 위한 알고리듬으로는 Inverse Fast Fourier Transformation과 digital filtering algorithm을 사용하였다. 이런 모든 과정은 컴퓨터 프로그래밍화 하여 실시간 자동으로 눈운동 기록 및 신속운동속도 계산을 시행하였다(Fig. 2-4).

결 과

본 시스템의 안구 위치 추적 해상도는 0.2밀리미터 수준이었으며, 30Hz 이하의 안구 운동을 실시간 자동으로 추적이 가능한 것으로 판단되며 동일 화면의 눈운동을 100% 재현할 수 있었다.

1. 대상1

26세 남자 환자의 좌측 눈의 안진을 기록하였다. 수평 운동에서 2-3Hz 좌측 진동안진을 보이며 좌우측의 진폭은 대칭적이었다. 중심외 신속운동(extra-foveation saccade)을 보여주며 저속기의 형태는 감속형이었다 (Fig. 5A, 5B). 또한 우측 30도 방향을 주시할 때 안진의 진폭과 진동수가 감소하며, 따라서 이 환자의 안진의 중화점이 우측 30도에 있음을 알 수 있었다 (Fig. 5C).

2. 대상2

눈운동 장애의 병력이 없었으며 양안 및 단안 운동 장애 없었던 25세 성인 남자의 수평신속운동, OKN반응, 신속운동속도를 측정하였다. 신속 운동에서 미세한 진자안진이 중복되어 있음을 알 수 있었다. 수직 운동에서는 신속 운동은 없으나 미세한 안 운동이 있음을 알 수 있었다(Fig. 6-8). 사전에 이러한 미세한 안운동은 다른 검사에서는 나타나지 않아서 대상선정시 특별한 문제가 없는 것으로 분류되었던 환자로 본 검사에서만 진자안진이 감지된 경우였다.

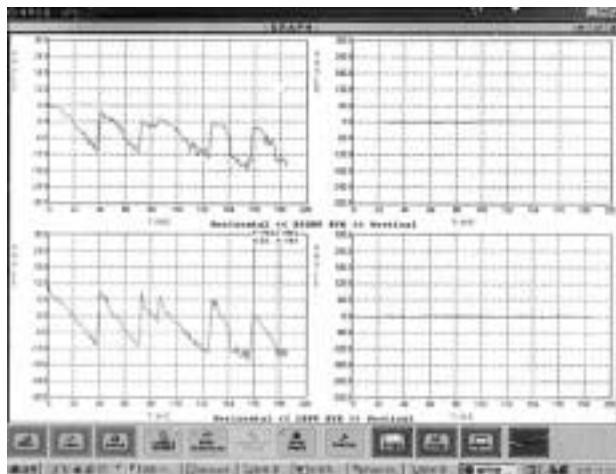


Figure 6-1. Measurement of Saccadic Velocity : Selected two points.

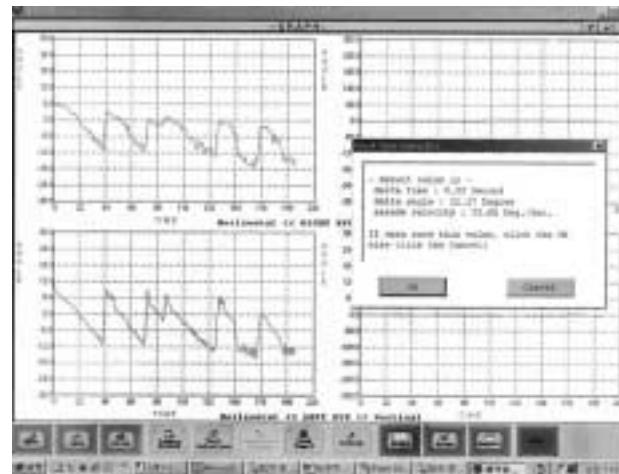


Figure 6-2. Measurement of Saccadic Velocity : Selected two points.

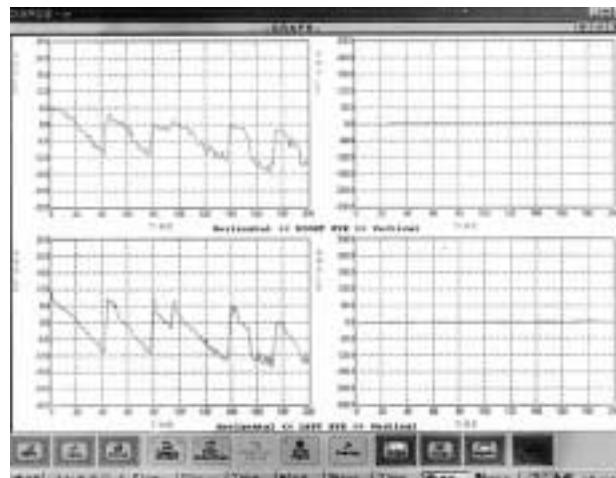


Figure 7. Optokinetic Nystagmus.

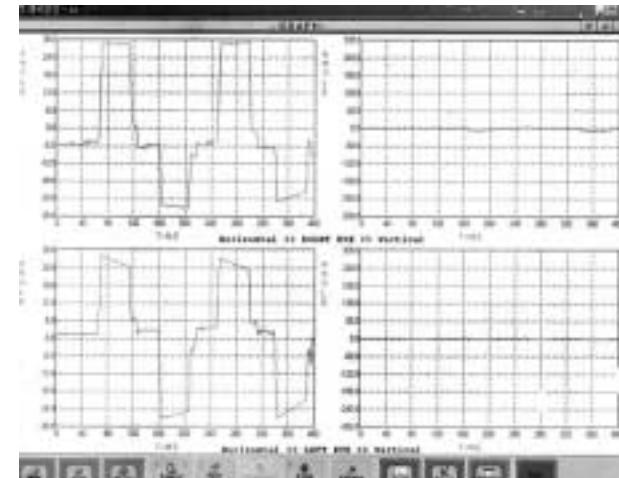


Figure 8. Infrared recording of horizontal Saccades.

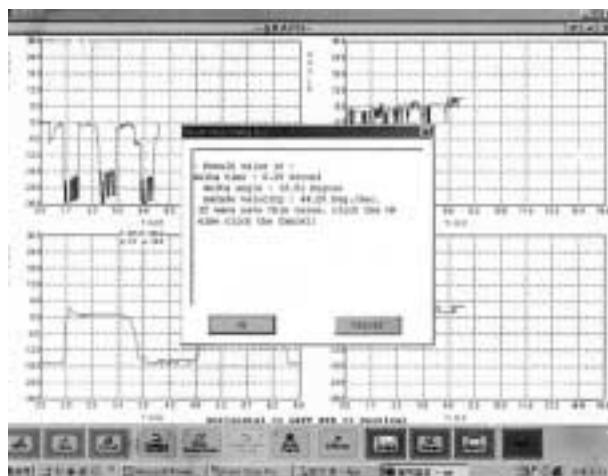


Figure 9. Lt 6th Nerve Palsy, Saccadic Velocity.

3. 대상3

좌측 외향신경 마비를 보이는 30세 여자환자의 수평 신속운동을 측정하였다. 좌측안으로 마비된 방향인 좌측 주시시에 신속운동속도가 감소된 양상의 그래프 소견을 보였으며, 이를 두 점에서 측정한 결과 44.20 deg/sec로 신속운동 속도가 정상 200~550 deg/sec에 비해 현저하게 감소되어 있었다(Fig. 9)^{8,9}

고 찰

안진을 정확하게 진단하여 치료하기 위해서 안진의 세기 및 방향성을 측정하여 기록할 수 있는 안운동 기록장치가 필요하게 되었다. 마비사시와 핵상 안운동장

해를 기타 견인성 사시와 감별하고 확진 하기 위해서는 신속운동을 기록하여 신속운동속도를 측정하는 방법이 필수적이다.¹⁰⁻¹² 따라서 안운동장애의 진단에 필수적인 안운동기록을 위하여 여러 가지 진단장치 및 방법이 고안되어 사용되고 있다.

가장 초기에 사용된 방법으로 눈의 잔상효과(after image)를 이용한 방법이다. 눈에 규칙적인 광 자극을 준 후 남은 잔상을 말로서 표현하는 방법으로 기록 보전이 어려워서 사용되지 않았다. 눈에 mechanical transducer를 부착 시킨 후에 안운동을 기록하는 방법이 고안되었다. 이는 최초로 눈의 움직임을 객관적으로 기록할 수 있는 방법이었으나 기구 자체가 정상적인 안운동을 방해하여 현재는 사용되지 않는다.² 무비 카메라를 이용하여 눈의 움직임을 촬영한 후 안운동을 분석하는 방법이 사용되었다. 이 방법은 필름을 현상하는데 소요되는 시간이 너무 길고 촬영된 필름을 정량적으로 분석하는 방법에 한계를 느껴서 임상적으로 사용되지 못하였다.² 각막에 광 자극을 준 후 각막에서 반사된 빛을 비디오 카메라에 녹화하여 분석하는 방법이 소개되었다. 이 방법은 미세한 안운동기록도 가능하였으나 오차를 줄이기 위해서 머리를 고정시켜야 하고, 당시의 기술 수준으로 촬영된 비디오를 정량적으로 분석하는 방법이 미숙하여 임상적으로 사용되지 못하였다. 각막에 거울이 부착된 콘택트렌즈를 착용한 후 거울에서 반사된 빛을 분석하는 방법이 고안되어 사용되었으며 10 초 미만의 미세한 안운동의 기록이 가능하여 안전 연구에 사용되었다.²

현재 임상적으로 가장 많이 쓰이는 안운동기록 방법인 전기안진도(electronystagmography)는 각막과 망막의 서로 다른 대사율(metabolic rate)로 인하여 발생되는 전기장을 눈 주위 피부에 부착된 전극을 통하여 기록하는 방식이다. 이 방식은 직접적으로 외안근에서 나오는 신호를 포착하는 방식이 아니기 때문에 정확한 안구 위치에 관한 정보를 제공한다고 할 수 없다. 또한 환자의 움직임에 따른 전극 부착 상태의 변화 그리고 땀 등에 의한 피부저항치의 변화에 민감하여 자주 calibration을 하여야 하는 단점이 있다. 여러 가닥의 전극을 얼굴에 부착시켜야 하므로 소아나 협조가 잘 되지 않는 환자에 있어서 검사에 어려움이 따른다.² 전기안진도는 수직안운동의 측정 시 안검거근에서 나오는 전기신호와 상하직근에서 나오는 신호가 중복되어 두 가지 안운동을 구분하는데 문제가 있다.¹ 전기안진도는 아나로그신호를 사용하기 때문에 외부의 잡신호에 영향을 받을 수 있는 단점이 있다.³ 이런 아나로그신호에 의한 오차를 줄이기 위하여 전기안진도를 사용하여 얻은 전기장을 컴퓨터에 연결하여 Fourier transform을

이용하여 분석하였으나, 이 역시 전기신호 발생 장치가 아나로그방식이어서 이 방식의 단점을 모두 없앴다고 보기 힘들다.^{4,5} 현재 사용되는 대부분의 전기안진도는 신호 발생은 아나로그식을 자료 처리는 디지털 방식을 사용하고 있다. 환자의 안운동을 비디오에 녹화한 후 비디오 화면에 전기안진도의 그래프를 삽입함으로써 시간대별 안운동에서 실제 움직임과 그래프를 동시에 관찰하였다.¹³

자기탐색코일 방법(magnetic search coil method)은 콘택트렌즈 내에 전선이 내장된 형태의 기구로 안운동시 나오는 근육의 자기장의 세기 변화를 그래프화하는 방식으로 아나로그 방식을 채택한 것은 전기안진도와 같으나 근육의 근처에서 신호를 처리하여 비교적 정확하며 미세한 안구 움직임도 포착 가능하다. 또한 수평 및 수직 안운동을 동시에 기록할 수 있으며 수직안운동시 안검거근의 신호를 배제하여 눈의 상하 움직임을 선별적으로 나타낼 수 있다. 그러나 이 방법은 콘택트렌즈를 사용하여야 하므로 접촉성이어서 협조가 잘 안되는 소아에 있어서 사용이 제한되는 단점이 있다.^{6,7}

Infrared limbus tracking method, corneal reflection method는 각막에 적외선을 조사한 후 반사되는 빛을 각막과 각막윤에서 반사된 빛으로 선별하여 안운동의 진폭을 도해하는 방법이다. 안운동의 기록과 자료의 분석이 디지털 방식이나 안운동을 추적하는 센서의 부착을 위하여 헬멧이나 고정틀에 얼굴을 고정하여야 하는 단점이 있다.¹⁴

개인용 컴퓨터의 처리속도 및 용량이 증가함에 따라 안구의 회선운동을 비디오와 컴퓨터의 pattern recognition 기법을 이용하여 기록하려는 시도들과 레이저광을 눈에 조사한 후 반사되는 광선을 computer vision system을 이용하여 눈의 깜박거림의 횟수 및 정도를 측정하려는 시도가 보고되었다.¹⁵⁻¹⁷ 눈운동을 비디오로 촬영한 뒤 컴퓨터를 이용하여 눈의 이동점 및 고정점의 좌표를 획득하여 눈의 운동을 시간대별로 수직 수평운동을 동시에 기록하는 방법이 있었으며 이 방법은 컴퓨터 용량과 속도의 한계로 실시간 계산이 불가하였다.¹⁸⁻²¹

저자는 본 연구에서 이 방법을 기초로 하여 동공영역분리 알고리듬을 적용하여 실시간 눈운동 추적 장치를 개발하고자 하였다. 위에서 언급했듯이 안운동의 기록 방법은 환자에 통증이나 불편함을 적게 주고, 작은 미세 운동까지 기록할 수 있으며, 직접 눈의 움직임을 기록하고, 외부의 잡신호에 영향을 적게 주며, 동시에 3 가지 축의 운동을 기록할 수 있는 방법을 찾아 발전해왔다.²⁰ 최근 들어 사회 전반에 걸쳐서 아나로그 신호는 컴퓨터의 디지털 부호로 대체되고 있다. 디지털신호를

이용하여 이상에 열거한 장점들을 충족할 수 있는 검사 방법을 개발하여, 본 연구에서 실시간으로 눈의 운동을 수직 수평 모두 분해능 0.2밀리미터 수준의 30 Hz이 하의 안진을 기록할 수 있었다. 임상에서 가장 많이 사용되는 전기안진도와 같은 그래프를 얻기 위해서 각 화면상 1개 고정점을 위해 이마에 적외선 흡수 표지를 부착하였으며, 각각의 이동점으로 동공 중심을 취하였다. 본 연구 결과는 분해능 0.2밀리미터로 비교적 정밀하다고 생각되며 아래와 같은 이점이 있다고 하겠다. 첫째, 비접촉성이며 따라서 협조가 잘 안되는 환자의 경우도 검사가 용이하다. 둘째, 디지털신호를 사용하므로 외부 잡신호가 끼여들 소지가 없으며, 언제라도 재구성이 가능하며, 안근육에서 나오리라 추정되는 전기 신호를 간접적으로 포착하는 방법과는 달리 눈의 움직임을 직접 측정한다. 셋째, 주변의 안검거근 영향을 받지 않는다. 넷째, 수평 수직운동을 동시에 측정 가능하다. 어떤 머리 위치에서도 기록이 가능하다. 다섯째, 작은 안운동의 기록이 가능하여 향후 미세안진의 연구에 응용할 수 있으리라 생각된다. 반면에 해결해야 할 문제점으로는 눈을 감은 경우 측정이 불가능 하다는 것이다. 이 문제점은 고도의 프로그램 기술과 하드웨어의 기능 향상으로 삼차원 그래프을 이용하면 해결되리라 본다. 현재 여러 분야에서 각광을 받고 있는 pattern recognition기법을 활용하면 좀더 정밀하고, 회선안운동을 동시에 실시간으로 기록할 수 있으리라 생각된다.

참고문헌

- 1) Yee RD, Schiller VL, Lim V, et al. Velocities of vertical saccades with different eye movement recording methods. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1985;26:938-44.
- 2) Dell'Osso LF, Daroff RB. Eye movement characteristics and recording techniques. In : Tasman W, eds. *Duane's Clinical Ophthalmology*, revised ed. Philadelphia : JB. Lippincott, 1991; 14-6.
- 3) Dell'Osso LF, Daroff RB, Troost BT. Nystagmus and saccadic intrusions and oscillations. In : Tasman W, eds. *Duane's Clinical Ophthalmology*, revised ed. Philadelphia : JB. Lippincott, 1991;1-3.
- 4) Baloh RW, Sills AW, Kumley WE, Honrubia V. Quantitative measurement of saccade amplitude, duration, and velocity. *Neurology* 1975;25:1065-70.
- 5) Baloh RW, Langhofer L, Honrubia V, Yee RD. On-line Analysis of Eye Movements Using a Digital Computer. *Aviation Space Environ Med* 1980;51:563-7.
- 6) Stathacopoulos RA, Yee RD, Bateman JB . Vertical Saccades in Superior Oblique Palsy. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1991; 32:1938-43.
- 7) Collewijn H, van der Mark F, Jansen TC. Precise recording of human eye movements. *Vision Res* 1975;15:447-50.
- 8) Metz HS. Quantitative evaluation of the strabismus patient. *Int Ophthalmol Clin* 1985;25:13.
- 9) Yee RD, Whitcup SM, Williams IM. Saccadic eye movements in myasthenia gravis. *Ophthalmology* 1987;94:219.
- 10) Wright KW. *Strabismus and Pediatric ophthalmology*, 1st ed. St. Louis : Mosby - Year Book, 1995;753-5.
- 11) Metz HS. Restrictive Factors in Strabismus. *Surv Ophthalmol* 1983;28:71-83.
- 12) Metz HS. Saccadic velocity measurements in strabismus. In : Tasman W, eds. *Duane's Clinical Ophthalmology*. 2nd ed. Philadelphia, J.B. Lippincott, 1991:1-13.
- 13) Longridge NS, Pilley SF. Superimposition of ENG Recording on Video Eye Movements (Congenital Nystagmus).*Adv Otorhinolaryngol* 1988;42:85-9.
- 14) Jones R. Two dimensional eye movement recording using a photo-electric matrix method. *Vision Res* 1973;13:425-31.
- 15) Yamanobe S, Taira S, Morizono T, et al. Eye movement analysis system using computerized image recognition. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 1990;116:338-41.
- 16) Curthoys IS, Moore ST, McCoy SG, et al. VTM-a new method of measuring ocular torsion using image processing techniques. *Annals New York Academy of Sciences* 1992;22: 826-8.
- 17) Brown CM, Terzopoulos D, eds. *Real time computer vision*. 1st ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1994;71-89.
- 18) 한승한. 컴퓨터를 이용한 디지털방식의 눈의 신속운동속도 측정. *한안지* 1995; 36:1199-06.
- 19) 한승한, 김홍복, 이종복 등. 디지털 방식의 안운동기록과 정치의 재현성. *한안지* 1999;40:197-210.
- 20) 한승한, 유태환, 이종복. 디지털 방식을 이용한 사시각의 측정. *한안지* 1998;39:740-5.
- 21) 한승한, 김상길, 이종복. 디지털 방식의 안구회전각도 측정 및 재현성. *한안지* 1998;39:1571-77.

=ABSTRACT=

Eye Movement Recording using Computer Image Recognition Technique

Seung han Han, M.D.¹, Seung kab Kim, M.D.¹,
Jong bok Lee, M.D.¹ Hoon Jung, M.D.²

*Department of Ophthalmology, Yonsei University College of Medicine and Institute of Vision Research¹
HOW Corporation²*

Purpose: To describe that Computer image recognition technique is more accurately and less invasive than other methods, which using contact lens with a search probe or electrodes for record of eye movements

Methods : A reference marker which was infrared was attached to the center of the forehead of the patients and the infrared light was illuminated to both eyes. Video image sequences were recorded using digital CCD camera and the captured image frames (640×480) were processed using a image analysis program. From which each image frame captured, pupil area was saperated using difference of brightness in pupil and iris. And then the pupil center was determined by calculating the center-of-mass of black pixels to meet the pupil threshold criteria.

Results: In a post-processing process, we could acquire horizontal and vertical eye position and velocity data. Inverse fast fourier transformation(FFT) and digital filtering algorithm were applied to filter out noise due to limited resolution of the CCD camera and sampling rates. Experimental result showed that the system could detect about 0.2mm positional location and 30Hz horizontal and vertical eye movements simultaneously.

Conclusions: We could accurately measure and record two dimensional eye movements of patients (horizontal and vertical simultaneously) in real time with some head movements.

J Korean Ophthalmol Soc 44(10):2410-2416, 2003

Key Words: Captured image frames, Digital CCD camera, Two dimensional eye movements, Vision-based method

Address reprint requests to **Seung han Han, M.D.**

Department of Ophthalmology, Yonsei University College of Medicine, Yongdong Severance Hospital
#146-92 Dogok-dong, Kangnam-gu, Seoul 135-270, Korea
Tel: 82-2-3497-3440, Fax: 82-2-3463-1049, E-mail: shhan222@yumc.yonsei.ac.kr