

자동판별 알고리즘에 의한 동안계의 정량적인 해석

오창인호, 이세현, 이용진, 박상희

연세대학교 전기공학과

Quantitative Analysis of Oculomotor System
by Automatic Identification Algorithm

I.H.Chang, S.H.Rhee, Y.C.Rhee, S.H.Park
Dept. of Electrical Eng. Yonsei Univ.

ABSTRACT

The design and use of a micro-computer-based system for quantitative study of ocular kinetics are described. An algorithm for microcomputer analysis of electro-oculographically recorded saccadic eye movement is presented. From a brief, 4-min recording session detailed statistical information about saccade amplitude, duration, and velocity can be obtained. Since this data is not significantly altered by practice of motivational factors, it provides a sensitive functional test of the oculomotor system and its brain control system.

이와같은 saccade 운동은 주어진 각변위(amplitude)에 대하여 최대속도(peak velocity)와 지속시간(duration)으로 그 특성을 나타내며, 이는 수적으로 변화시킬 수 없다. [6] 따라서 saccade의 최대속도와 지속시간 및 시표에 대한 안구운동의 정확도를 측정하는 것은 동안계와 중추신경계에 대한 기능검사로써 사용될 수 있을 뿐만 아니라 임상적으로는 신경기전의 질병진단에 이용될 수 있다.

Saccade 안구운동의 특성을 Dodge 와 Cline (1901)이 정의한 이래 여러 분야에서 이의 특성에 관한 연구가 이루어졌다. 그러나 saccade 운동의 주요 파라미터를 측정하여 처리하는 방법은 서로 다르므로 각각의 연구결과를 비교할 수가 없었다.

1981년 Bahill[1]은 안구운동을 정량적으로 측정하기 위해서, 그리고 각 실험환경에 의한 결과를 비교하기 위한 7개의 일반법칙을 제안하였으며, 이에따라 표준적인 데이터베이스를 제시하였다. 그러나 이 일반법칙은 항상 만족시킬 수 없다.

본 연구에서는 안구운동을 측정하기 위한 일반법칙을 보완하고, 빠르고 정확한 정량적인 해석을 위해 마이크로 컴퓨터를 이용한 측정 시스템을 설계 구성하고 saccade운동의 주요 파라미터를 측정하는 자동판별 알고리즘 및 속도계산 알고리즘을 제시하며, 측정된 데이터에 대한 가) 샘플링 주파수, 나) 속도계산 알고리즘, 다) saccade 판별법 등 신호처리기술을 적용하여 해석하고 주요 파라미터의 특성곡선에 대한 근사식을 제시하고자 한다.

2. 본론

(1) 안구운동 측정의 일반법칙

Bahill[1]은 광전행렬법으로(photoelectric) 안구운동의 정량적인 데이터를 얻었으며, 각 실험환경 간의 결과를 비교하기 위한 일반법칙을 다음과 같이 제안하였다.

- 가) 동일연령의 정상인 지검자
- 나) 지로한 지검자의 안구운동은 해석에서 제외
- 다) Saccade각변위의 함수로써 최대속도와 지속시간을 계산
- 라) 속도 문턱값을 이용하여 속도파형에 의한 saccade의 판별
- 마) 속도를 계산하기 위해 영위상(zero-phase) 디지털 필터와 알고리즘 적용

1. 서론

안구는 시계안에서 한 시표로부터 다른 시표까지 가능한 짧은 시간 내에 움직이기 위하여 saccade라 불리는 이동이 일어난다. (그림. 1)

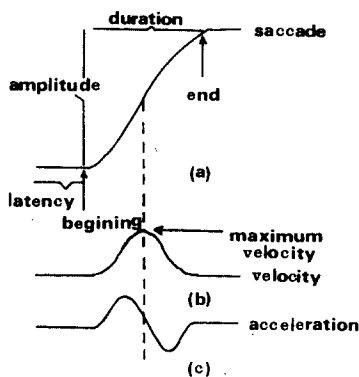


그림 1. Saccade의 주요 파라미터
Fig.1 The saccade with its main parameters.

바) 기록장치는 전체 측정범위에서 선형성을 유지
이와 더불어 주요 파라미터를 lms 단위로 측정하기 위해서
안구운동을 1000Hz로 샘플링할 것을 제안하였다.

그러나 EOG법을 사용할 경우, 데이터에 잡음이 많이 섞
인 경우, 속도 계산시간과 데이터를 기록할 floppy disk
의 용량이 적은 경우 등에는 위의 일반법칙을 적용할 수 없는
제한점이 있다.

그러므로 본 연구에서는 각변위가 큰 범위에서 선형성을 가
지며, 신뢰성이 높은 데이터를 얻을 수 있는 EOG법으로 안구
운동을 측정하고, 안구운동 해석에 대한 최소 주파수인 200Hz
[4][5]로 샘플링하여 위의 제한점을 보완하고자 한다.

(2) 속도계산 알고리즘

Saccade의 각변위 데이터로부터 속도를 구하기 위해서
미분 알고리즘이 사용된다. [3]

1983년 Bahill과 McDonald[2]는 1000Hz로
샘플링된 안구운동 데이터를 저역통과 필터와 직렬로 연결한 이
상적인 미분기로 동작되는 모델링에 의한 속도계산 알고리즘에
대한 주파수 제한 특성과 최적의 스텝크기를 연구하였다. 그들
은 알고리즘과 데이터 내에 포함된 오차가 최소가 되는 스텝크
기를 3ms로 구하고, 이에따라 이 알고리즘의 차단 주파수
(cutoff frequency)는 74Hz라 결론지었다. 이들이 사
용한 속도계산 알고리즘은 two-point central
difference derivative 알고리즘으로서

$$V_y(i) = 0.5[y(i+3) - y(i-3)] / 6T \quad (1)$$

이것. 전달함수는

$$\frac{V_y}{Y} = j\omega \frac{\sin(\omega h)}{\omega h} \quad (2)$$

로써, 이의 주파수 응답은 그림 2.(a)와 같다.

본 연구에서는 200Hz로 샘플링된 데이터에 적용하는 속
도계산 알고리즘을 구했다. 이는 1000Hz로 샘플링된 데이터
에 (1)식을 적용하여 얻은 결과와 비교하기 위해서 (1)식
의 알고리즘과 동일한 차단주파수를 갖는 eight-point
central difference derivative 알고리즘으로서

$$V_y(i) = fs \sum_{n=1}^4 a_n [y(i+n) - y(i-n)] \quad (3)$$

여기서, $a_1 = 0.8024$, $a_2 = -0.2022$, $a_3 = 0.03904$,
 $a_4 = -0.003732$ 이다. 전달함수는

$$\frac{V_y}{Y} = j\omega \sum_{n=1}^4 \frac{2a_n \sin(n\omega/fs)}{\omega/fs} \quad (4)$$

이며, 이의 주파수응답은 그림 2.(b)와 같다.

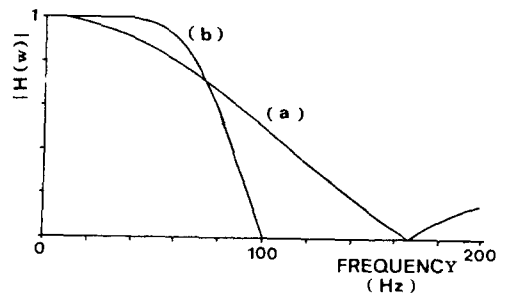


그림 2. 미분 알고리즘의 주파수 응답

- (a) two-point 알고리즘
- (b) eight-point 알고리즘

Fig.2 Frequency responses of derivative algorithm.
(a) two-point algorithm.
(b) eight-point algorithm.

(3) 자동판별 알고리즘

Saccade 안구운동의 지속시간과 속도를 측정하기 위해서
saccade의 발생여부를 판별하여야 한다. Saccade는
속도 분력값과 지속시간 분력값을 이용하여 마이크로 컴퓨터에
의해 자동적으로 판별된다. 이 알고리즘의 흐름도는 그림 3과
같다.

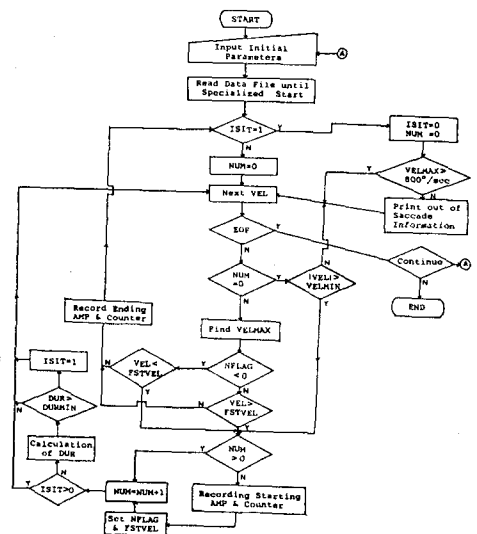


그림 3. 자동판별 알고리즘의 흐름도

Fig.3 Flow chart of automatic identification algorithm.

알고리즘은 지속시간 분턱값 (30ms) 보다 큰 지속시간을 갖고며, 속도 분턱값 ($10^\circ/s$) 을 초과하는 안구운동을 saccade 라 판별한다. 여기서 안구운동 측정시 발생하는 눈깜박임 (eye blink)나 결함 (artifact)는 이의 지속시간이 분턱값보다 작으며, 또한 saccade 의 최대속도의 절댓값은 $800^\circ/s$ 를 초과하지 않지만 눈깜박임이나 결함은 이 값을 초과하는 경우가 발생되므로 이러한 운동은 saccade 로 판별되지 않도록 하였다.

속도파형에서 속도 분턱값을 처음 넘는 점을 saccade 의 개시점으로 잡고 다시 이 분턱값과 교차하는 점을 종료점으로 잡아서, saccade 의 각변위와 개시점과 종료점 사이의 지속시간을 계산하고 최대속도를 이 알고리즘의 출력으로 한다.

3. 실험 및 결과

본 연구에서 일반법칙에 따라서 EOG 법으로 수평 saccade 안구운동을 측정하기 위한 시스템의 블록선도는 그림 4와 같다.

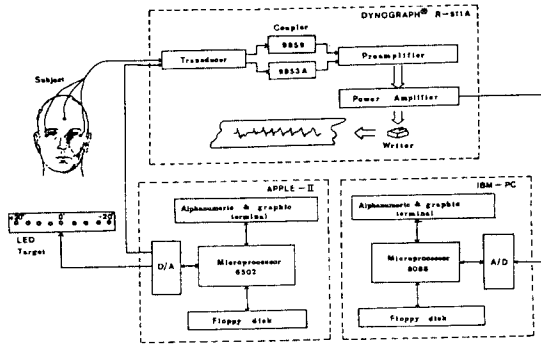


그림 4. 측정 시스템의 블록선도

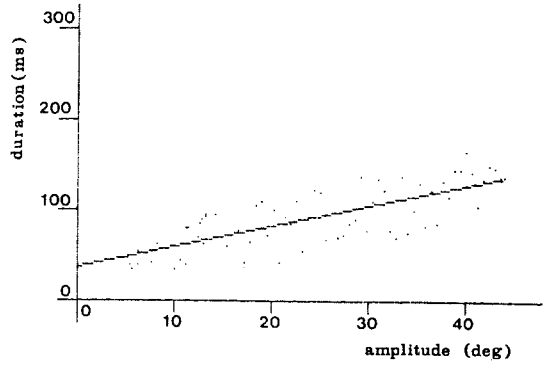
Fig.4 Block diagram of experimental system

암실에 있는 피검자는 APPLE-II 컴퓨터에 의해서 랜덤(random) 하게 변위하는 $\pm 20^\circ$ 의 적색 LED 시표를 따라서 안구운동을 하게된다. 피검자의 건국으로 입력된 안구운동 출력은 Dynograph R-511A 의 커를러를 통해서 기록지에 시표변위와 함께 기록하며, 피로한 안구운동 데이터 또는 교정(calibration) 과정에서 발생한 선형성이 없는 데이터는 해석에서 제외한다.

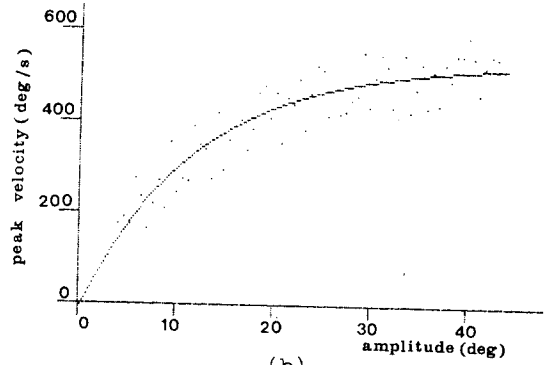
또한 안구운동의 출력은 IBM-PC 컴퓨터에서 설계한 10-bit A/D 변환기에 의해 1000Hz 로 샘플링 하여 디지털 신호로 바뀌어 floppy disk 에 기록된다.

기록된 데이터에 대해서 샘플링 주파수의 영향을 비교하기 위해 1:5 의 비율로 줄여 200Hz 의 데이터를 얻는다. 각각의 데이터에 대해서 식 (1)과 (3)의 속도계산 알고리즘을 적용하여 속도를 계산하고, 자동판별 알고리즘에 의해서 saccade 안구운동의 각변위에 대한 지속시간과 최대속도를 계산한다.

이상과 같은 실험절차에 따라 saccade 안구운동의 주요 파라미터에 대한 특성곡선은 그림 5와 같다.



(a)



(b)

그림 5 Saccade 특성곡선

(a) 각변위-지속시간

(b) 각변위-최대속도

Fig.5 Plot of saccade characteristics. (a) amplitude-duration (b) amplitude-peak velocity

그림 5.(a) 는 각변위-지속시간의 특성곡선으로 근사식은

$$D = D_1 A + D_0$$

이다. 이는 기울기 D_1 ($ms/^\circ$)와 종속과의 교차점 D_0 (ms)으로 각변위 A 와 지속시간 D 사이의 선형관계를 나타낸다. 그림에서 D_0 는 각변위가 0인 saccade 의 이론적인 지속시간 으로서 실제적으로는 5° 이하의 saccade 는 위 식에 따르지 않으며, 각변위가 0으로 근접할 때는 선형식에 의해서 나타나는 지속시간보다 더 빨리 감소한다.

그림 5.(b) 는 각변위-최대속도의 특성곡선으로 근사식은

$$V_p = 1/(\alpha + \beta / A)$$

이며, 최대속도 V_p 는 $A \rightarrow \infty$ 일 때 $V_{p_{max}} = 1/\alpha$ ($^\circ/s$) 로 포화(saturation) 되고, $A \rightarrow 0$ 일 때는 $1/\beta$ ($1/ms$)로 감소한다. 위 식은 선형 연구자들에 [1][4] 의해 사용된 지수함수식보다 더 데이터를 정확히 근사시킴을 알 수 있다.

1000Hz로 샘플링된 데이터에서 얻은 결과와 200Hz로 샘플링된 안구운동에서 얻은 결과의 차는 $\pm 10\%$ 이내이며, saccade 자동판별 알고리즘에 의한 시표에 대한 안구운동은 약 92%의 정확도를 갖는다.

그러므로 saccade의 자동판별 알고리즘에 의한 동안계의 정량적인 해석은 200Hz 샘플링과 eight-point 미분 알고리즘으로서 Bahill이 제안한 일반법칙의 제한점을 보완할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 정량적인 데이터를 얻기 위해서 Bahill이 제시한 일반법칙을 보완하였으며, 마이크로 컴퓨터에 의한 측정 시스템을 설계하고, saccade 자동판별 알고리즘을 이용하여 200Hz로 샘플링한 안구운동 데이터에 의한 주요 파라메타의 특성곡선을 얻었다.

5. REFERENCE

- [1] A.T.Bahill, A.Brockenbrough, and B.T.Troost, "Variability and development of a normative data base for saccadic eye movements," Invest. Ophthalmol. Vis. Sci., vol.21, pp.116-125, 1981.
- [2] A.T.Bahill and J.D.McDonald, "Frequency limitations and optimal step size for the two-point central difference derivative algorithm with applications to human eye movement data," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.BME-30, pp.191-194, 1983.
- [3] D.M.Young and K.T.Gregory, A Survey of Numerical Mathematics, vol I, Reading, MA: Addison-wesly, pp.350-361, 1972.
- [4] R.W.Baloh, W.E.Kumley, and V.Honrubia, "Algorithm for analysis of saccadic eye movements using a digital computer," Aviat. Space Environ. Med., vol.47, pp.523-527, 1976.
- [5] M.Juhola, V.Jantti, and I.Pyykko, "Effect of sampling frequencies on computation the maximum velocity of saccadic eye movements," Biol. Cybern., vol.53, pp.67-72, 1985.
- [6] 남본현. "인간의 saccade 안구운동계에 대한 정보처리 특성". 연세대학교 대학원 박사학위 논문. 서울. 1975.