

RLSM을 이용한 안구운동의 저속도 측정방법에 대한 연구

김규겸*, 고종선*, 박병림**

원광대학교 전기전자정보공학부*, 원광대학교 의과대학 생리학교실**

A Method for Slow Component Velocity Measurement of Nystagmus Eye Movements using RLSM

Gyu-Gyeom Kim*, Jong-Sun Ko*, Byung-Rim Park**

Dept. of EE & Information Eng.*, Dept. of Physiology** Wonkwang Univ.

ABSTRACT

A control of the body posture and movement is maintained by the vestibular system, vision, and proprioceptors. Especially, vestibular system has a very important function that controls the eye movement through vestibuloocular reflex and contraction of skeletal muscles through vestibulospinal reflex. However, postural disturbance caused by loss of vestibular function results in nausea, vomiting, vertigo and loss of craving for life. Lose of vestibular function leads to abnormal reflex of eye movements named nystagmus. Analysis of the nystagmus is needed to diagnose the vertigo, which is performed by means of electronystagmography (ENG). The purpose of this study is to develop a computerized system for data processing and an algorithm for the automatic evaluation of the slow component velocity (SCV) of nystagmus induced by optokinetic (OKN) stimulation system. A new algorithm using recursive least square method (RLSM) to detect SCV of nystagmus is suggested in this paper. This method allows a fast and precise evaluation of the nystagmus, through artifact rejection techniques. The results are depicted in this paper.

1. 서 론

인체의 평형 기능은 인간의 생활을 유지하는 데 필수적인 요소이지만 너무 자연스럽게 작동하고, 주어진 상황에 얼마든지 다양하게 적응하는 능력 때

문에 그 중요성이 간혹 간과되기도 한다. 그러나 평형 또는 전정기능을 상실한 경우에는 나타나는 증상과 기능적인 손실 때문에 인간의 균형이나 보행 등 기초적인 생활을 유지하는 데서부터 운동, 레저 등의 고급행위까지 모든 생활을 영위할 수 없게 된다. 현기증을 진단할 수 있는 전정기능 평가시스템은 1907년 Barany의 의해 환자를 회전 의자에 앉히고 수동으로 충동적인 가속자극을 가하여 외측 반고리관의 안구반응을 검사하는 것으로 시작되었다. 최근 의용공학의 발전으로 전정기능 평가시스템은 많은 눈부신 발전을 가져왔으며 계속 연구되고 있다^[1]. 또한 회전 의자를 움직이는 모터의 발전과 전력전자 기술의 발전은 다양한 자극과 정밀제어가 가능해졌다^{[2][3]}. ENG와 컴퓨터 기술의 발전으로 안진의 분석에 대한 다양한 연구가 되고 있다^{[4][5]}.

본 연구에서는 제어분야에서 파라미터 추정에 널리 쓰이는 RLSM (recursive least square method)을 이용하여 직선의 기울기와 절편을 하나의 파라미터로 보고 추정하는 방법을 안진 분석의 새로운 방법으로 제안한다^[6]. 임의 개수의 구간마다 직선의 기울기를 RLSM을 이용하여 구하여 안구속도 신호를 얻을 수 있다. 원 신호와 에러가 최소가 되는 직선기울기를 구하므로, 고역노이즈 필터링 효과가 있으며, 이러한 이유로 눈 깜박임과 같은 아티팩트 (artifact)에 둔감한 성질을 갖는다. 임의 구간으로 얻어진 안구속도 신호를 부호판별을 이용하여 서상과 속상으로 구분하고, 다시 한번 RLSM을 통하여 서상신호 구간, 속상신호 구간별 평균 기울기 값을 구하게 된다. 안구운동의 최종 분석은 푸리에 급수 (fourier series)를 이용한 정현파 근사 곡선 (sine curve fitting)으로 이득 (gain), 위상 (phase), 대칭성 (symmetry)을 산출한다^[7]. 이 파라미터는 정상인 범위와 비교하여 질병의 진단에 사용된다. 이상의 결과를 실험을 통하여 논문에서 자세히 보인다.

2. 안구운동의 분석방법

2.1 RLSM의 수학적 모델

통계학이나 자연과학에서 측정되는 실험값을 가지고 그 실험값을 잘 대표할 수 있는 함수를 구해내는 방법중의 하나가 Lagrange에 의해서 고안되어 최소 자승법(least square method)으로 알려져 있다. 그림 1과 같이 안진 파형의 샘플된 데이터는 임의의 시간에 대하여 각각의 크기값을 갖는 톱니파형이다. 톱니파형의 서상 기울기가 우리가 알고자 하는 안진의 속도이므로 서상을 구성하는 점들을 가지고 기울기 경향을 잘 대표할 수 있는 직선 근사 함수를 추정하고자 한다. 근사 함수에 의한 곡선은 원 신호와 동일한 곡선을 구할 수는 없지만 구한 근사 곡선과 원 신호 데이터와의 오차가 가장 적은 곡선은 최소 자승법을 이용하여 구할 수 있다. 따라서 직선 근사 함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

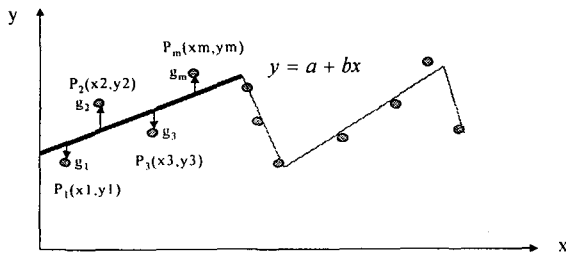


그림 1. RLSM에 의한 곡선의 근사

Fig. 1 Fitting curve by RLSM

$$y = G(x) = a + bx \quad (1)$$

여기서 a 는 직선 근사 함수의 절편이고 b 는 기울기이다. 그림에서와 같이 P_1, P_2, \dots, P_m 의 데이터와 근사 함수 $G(x)$ 와의 편차가 에러이며 다음과 식과 같다.

$$E_k = G(x_k) - y_k \quad (2)$$

x_k 에서 근사 함수와 데이터 y_k 와의 차이인 에러를 최소화 하기위한 방법으로 최소 자승법을 적용한다. 식 3의 편차가 최소가 될 때 가장 좋은 직선 curve fitting이 이루어진다.

$$E(g) = \sum_{k=1}^m [g(x_k) - y_k]^2 \quad (3)$$

P_1, \dots, P_m 의 데이터에 대하여 직선 근사의 에러가 최소가 되는 절편 a 와 기울기 b 파라미터를 구하고자 한다.

$$E(L) = \sum_{k=1}^m [a + bx_k - y_k]^2 \quad (4)$$

$$= [a + bx_1 - y_1]^2 + \dots + [a + bx_m - y_m]^2$$

따라서 위 식에서 필요 충분 조건은 $E(L)$ 을 파라

미터 a 와 b 에 대해서 각각 편미분을 했을 때 $E(L)$ 이 최소가 되기 때문에 편미분을 이용한다.

$$\frac{\partial E(L)}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial E(L)}{\partial b} = 0 \quad (5)$$

위 식을 풀어 정리하여 각각 a, b 파라미터에 대하여 정리하면 2×2 선형시스템 방정식이 된다.

$$ma + (\sum x_k)b = \sum y_k \quad (6a)$$

$$(\sum x_k)a + (\sum x_k^2)b = \sum x_k y_k \quad (6b)$$

행렬식으로 정리한 normal equation은 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} m & \sum x_k \\ \sum x_k & \sum x_k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_k \\ \sum x_k y_k \end{bmatrix} \quad (6c)$$

위 식에서 a, b 파라미터의 해를 구하기 위해서 좌변행렬의 역 행렬을 구해서 우변항에 곱한다. 구해진 a 와 b 파라미터는 최소 자승법에 의해 추정된 값이므로 연산자가 붙게 된다.

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} = \frac{1}{m \sum x_k^2 - (\sum x_k)^2} \begin{bmatrix} \sum x_k^2 - \sum x_k & \sum y_k \\ -\sum x_k & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum y_k \\ \sum x_k y_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 7을 통해 직선 근사 함수는 다음과 같다.

$$\hat{L}(x) = \hat{a} + \hat{b}x \quad (8)$$

최종적으로 최소 자승법에 의한 직선 근사 함수식은 안진의 파형을 예러가 최소가 되는 기울기와 절편으로 근사 추정하므로써, 정확한 안진의 속도 계산이 가능해진다. 본 논문에서는 순환 최소 자승법(recursive least square method)을 실시간 파라미터 추정에 사용하므로써 새로운 데이터가 들어올때마다 전체의 방정식을 모두 다루어야 하는 일반적인 최소 자승법의 불편을 없앴다. RLSM은 이전까지의 데이터에 의한 최소자승법의 결과와 새로 들어온 데이터를 이용해서 이 데이터까지 포함한 새로운 최소 자승법에 의한 결과를 구한다.

$$P(k+1) = P(k) - \frac{P(k)a(k+1)a^T(k+1)P(k)}{1 + a^T(k+1)P(k)a(k+1)} \quad (9)$$

이식을 살펴보면 k 개까지의 최소 자승법의 결과 값을 새로운 데이터에 의한 항에 의해서 변화시킨다는 것을 알 수 있다.

2.2 분석 알고리즘

RLSM에 의한 SCV 분석 알고리즘은 오프라인에 의한 처리이며 기본적으로 4단계로 나뉘어 단계적으로 처리된다. 처리과정은 (1) RLSM process (2) zero-crossing detection (3) SCV identification (4) artifact rejection 이다.

처음단계에서는 임의의 개수에 대하여 RLSM에 의한 직선 기울기를 구하는 것을 현재의 위치를 1씩 증가하며 마지막 데이터까지 반복한다. 다음 두 번째 과정에서는 기울기의 부호판별을 통해 톱니파

의 최대값과 최소값 지점을 찾고 두 지점간 구간에 대하여 RLSM에 의한 평균 기울기를 구한다. 세 번째 과정에서는 기울기 값을 모니터링 해가면서 기울기 크기와 기간을 비교하여 서상을 인식한다. 마지막 과정에서는 눈 깜박임과 같은 인공산물로 생긴 아티팩트를 제거한다. 자극에 대한 안구반응 최저 속도는 2 °/s로 하여 그미만의 값도 제거된다.

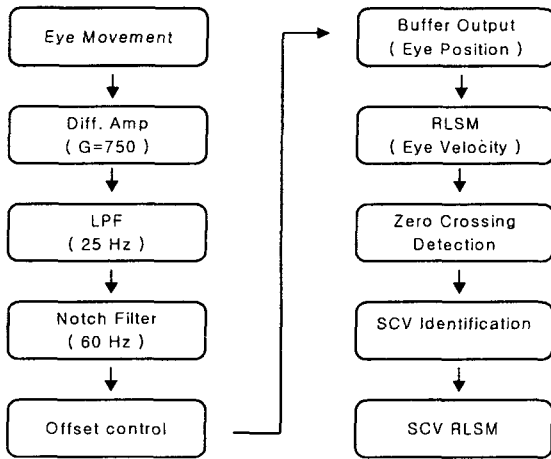


그림 2. RLSM 처리과정 블록도
Fig. 2 Block diagram of RLSM processing

그림 3은 RLSM에 의한 처리과정을 보이고 있다. (a)의 안진 원 신호를 RLSM에 의한 기울기를 구한 파형은 (b)이며, 다음 단계를 차례대로 처리한 마지막 SCV 파형은 (c)이다. 노이즈에 무관하게 서상 속도만을 인식함을 보인다.

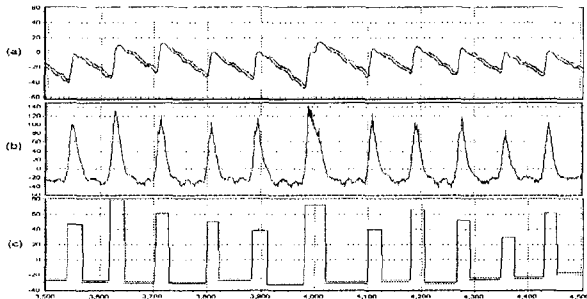


그림 3. RLSM에 의한 신호처리 과정
Fig. 3 The process of RLSM algorithm.
(a) The eye signal of eye movement by OKN system.
(b) The output of RLSM with signal (a).
(c) The SCV found.

2.3 정현파 근사 곡선에 의한 분석

개체에 회전자극이나 시각자극에 따른 정현파 자극이 주어질 때 안진의 속도곡선은 자극과 유사한 정현파곡선을 갖게 된다. 자극에 대한 반응의 입력과 출력은 이득 (gain)과 위상 (phase), 대칭성

(symmetry) 으로 나타난다. 그림 4는 자극속도와 안구운동의 느린성분 관계를 나타낸 것으로 y축의 상방 파형은 우측으로 향하는 회전자극 속도(d/s)를 나타내고, 하방 파형은 좌측으로 회전하는 속도를 나타낸다. x축은 시간에 따른 회전각도를 나타내며 주기를 갖는다. 실선은 자극속도를 점선은 보상적인 안구운동을 표시한다.

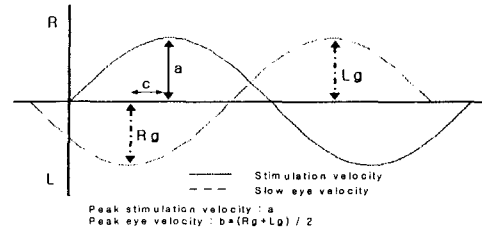


그림 4. 자극속도와 보상적인 느린 안구속도에서 분석
Fig. 4 The analysis between stimulation velocity and slow eye velocity

보상적인 느린 안구운동은 푸리에 급수(fourier series)에 의한 정현파 근사 추정을 한다. $0 < t < T$ 에서의 함수 $f(t)$ 를 표시하는 데는 $(2k+1)$ 항까지의 푸리에 급수의 합은 다음 식으로 근사 한다.

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^k C_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n) \quad (10)$$

이때의 각 계수들은 다음과 같고, C_n 은 고조파의 진폭을 의미하며, θ_n 은 위상각을 나타낸다.

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (11d)$$

$$\theta_n = \tan^{-1}(b_n/a_n) \quad (11e)$$

본 연구에서는 제1 고조파인 기본파 성분을 이용하여 안진의 서상을 정현파 근사 곡선(sine curve fitting)한다. 이때, 이득, 위상, 대칭성 세 가지 파라미터를 구하며, 이는 전정기관의 질병유무 판단에 중요한 인자가 된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험방법

이학적이고 신경학적 소견상 이상이 없으며, 특히 귀의 병력이 없으며 최근 진정제 등의 신경성 약물을 복용한 경험이 없는 24.9±3.5세의 건강한 대학생 105명 (남 68명, 여 37명)을 대상으로 회전 자극, 시운동자극에 대한 안구반응을 측정하였다. 안구신호 검출용 전극은 Ag-AgCl 표면전극을 사용하였으며, 피검자의 머리를 앞쪽으로 30도 가량 숙여 수평 반구관이 수평면과 수평상태를 유지하도록 더욱 강한 자극을 얻을 수 있도록 하였다. 또 약 10분 동안 암실상태에서 적응시킨 후 검사하고,

검사시간 동안 간단한 숫자계산이나 질문에 대한 답변 등으로 맑은 의식상태를 유지하도록 하였다.

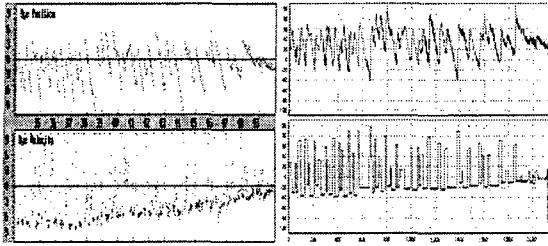


그림 5. 선행 알고리즘과 제안된 알고리즘의 결과 비교
Fig. 5 Comparison between the conventional and proposed algorithm.

그림5는 선행연구와 제안된 알고리즘의 결과를 비교 한 것으로, 제안된 알고리즘이 노이즈에 대한 영향이 더욱 작고 정확한 SCV의 속도계산이 이루어짐을 알 수 있다.

3.2 검사 결과 및 판독

회전검사는 회전자극이 일상 생활에서 겪는 것과 같이 자연적이고 생리적인 자극이며, 회전자극 주파수를 여러 단계에 걸쳐 정확히 조절 할 수 있다는 점과 단기간 내에 다수의 자극이 가능하다는 점 등의 여러 잇점 때문에 가장 많이 이용된다. 시각 자극에 의한 검사는 중추성 어지러움과 말초성 어지러움을 감별하는데 유용하기 때문에 이용된다. 본 연구에서는 회전자극과 시각자극에 의한 검사를 정상 성인 105명에 대하여 실시하고 그림 6과 같은 정상인의 $mean \pm 2SD$ 에 의한 범위를 구하였다. 각 검사에 따른 분석결과는 이득, 위상, 대칭성의 파라미터에 의한다. 이와 같은 결과를 바탕으로 피검자를 검사하였을 때 분석된 파라미터가 정상범위를 벗어날 경우 전정기관의 이상을 진단할 수 있게 된다.

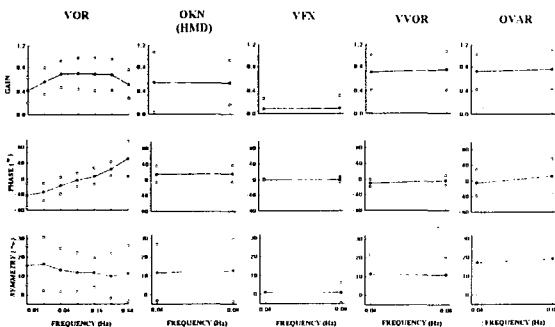


그림 6. 정상 성인에서 검사에 따른 안구반응 결과
Fig. 6 The result of eye movement induced by various test in healthy adult

4. 결 론

본 연구에서는 제어분야에서 파라미터 추정에 널리 쓰이는 RLSM을 이용하여 서상의 기울기를 원 신호와 에터가 최소가 되는 직선을 추정하는 방법으로 구하였다. 원 신호를 임의 개수에 대하여 매번 에터가 최소가 되는 직선의 기울기를 구하므로, 고역노이즈 필터링 효과가 있으며, 이러한 이유로는 깜박임과 같은 아티팩트에 둔감한 성질을 갖는다. 또한 이전에 구한 기울기와 현재의 원 신호를 가지고 새로운 기울기를 구하게 되므로 적응성 (adaptive)을 갖는다. 정현파 자극에 의한 안구운동의 최종 분석은 푸리에 급수를 이용한 정현파 근사 곡선이다. 주어진 자극속도와 비교하여 이득, 위상, 대칭성을 산출하였으며, 정상성인 105명에 대하여 회전자극과 시각자극에 따른 이 세가지 파라미터를 구하였다. $mean \pm 2SD$ 표준편차를 갖는 범위는 피검자 측정시 질병의 진단에 사용된다. RLSM에 의한 안진 분석은 노이즈에 영향이 적고 신뢰도가 높은 결과를 보이며 질병 진단에 유용함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Lim SK, Jeon HC, Kim GK, Jin DB, Kim MS, Lee MY, Park BR, "Development of the sinusoidal rotatory chair system for evaluation of the vestibular function.", *Korean J Sci Emot Sensibil*, No. 1, pp. 181-197, 1998.
- [2] 고종선, 이태호, 박병림, 전철환, "전정기관 자극용 회전자극기를 위한 PMSM의 정밀 속도제어", *KIPE*, Vol. 5, No. 5, pp. 459-466, Oct., 2000.
- [3] 김규겸, 고종선, 박병림, 김인동, "전정기능 평가를 위한 탈수직축 회전자극 시스템 및 HMD시스템의 개발", *KIPE*, Vol. 6, No. 4, pp. 325-332, Aug., 2001.
- [4] CONRAD WALL F. OWEN BLACK, "Algorithms for the clinical analysis of nystagmus eye movements", *IEEE Trans Biomed Eng*. Vol. BME-28, No. 9, pp. 638-646, 1981.
- [5] M. H. Costa, "Adaptive Algorithm for Automatic Analysis of Electronystamographic Signals", 18th Annual Int. Conf. of the IEEE Eng. in Medicine and Biology Society, Amsterdam, pp. 962-963, 1996.
- [6] Melvin J. Maron, "Numerical analysis: a practical approach", Macmillan Publishing Co., Inc. New York, pp. 187-190, 1982.
- [7] 김규겸, 정호춘, 박병림, "평형감각 측정을 위한 안구운동 분석 프로그램의 구현", *한국감성과학회*, 1998.