

INVERSE MODEL ANALYSIS OF CONTROLLER SIGNALS FOR FAST HEAD MOVEMENTS

이 상 표 .
남 현 현* .

광운대 전자공학과
건국대 전기공학과

1. 서론

머리의 운동은 팔의 운동과 그 동특성이 유사하며, 안구운동, 자세, 지각등과 상호작용이 관심의 대상이 되어 왔다. Stark와 Zangemeister (11) 등은 머리의 수평회전운동을 시간최적제어의 문제로 보아서, 회전운동의 변위, 속도, 가속도의 첨두치와 동특성의 상관관계를 main sequence diagram법 또는 감도법등으로서 정량적으로 해석하고 머리운동의 모델을 수립하였다.

본 연구에서는 근전신호(electromyographic signal)의 제어 기능을 조사하기 위하여, 머리의 재빠른 회전운동 특성과 목의 근육에서 발생한 근전(EMG)신호를 측정하였다. 그리고 측정된 운동데이터를 머리운동에 대한 역모델(inverse model)에 인가하여 제어신호를 출력으로 구하고, 측정된 근전신호와 비교하였다.

머리운동 계통은 Zangemeister, Lehman, Stark 등이 제안한 6차 비선형 모델을 사용하였다.

2. 머리의 수평운동계 모델

Stark등이 제안한 머리의 수평회전계의 모델은 그림1과 같다.

머리 회전운동에 관여하는 목의 근육은 2개의 동가 근육으로 집중하여 표현한다. 즉, 작용을 담당하는 동근(agonist)과 이에 대응하는 길항근(antagonist)으로 구성하고, 이들 근육의 힘을 발생하게하는 신경신호 계통이 부가된다. 운동계의 부하는 머리및 그것을 지지하는 부위로 한다.

머리운동계에는 2개의 신경신호 agonist와 antagonist가 입력신호로 들어가 시상수 T_a 와 T_d 를 가진 1차 지연블록을 거쳐 근육(muscle force) H_{tl} 과 H_{tr} 을 발생한다. 여기서, 1차 지연요소는 근육의 Ca 구동과정(calcium activation process)을 나타내는 모델이다.

구동토크 H_{tl} (H_{tr})은 직렬탄성요소 K_{sl} (K_{sr}) 그리고 Hill의 힘-속도(Hill's force-velocity) 관계에 의한 비선형 마찰계수 B_l (B_r)과 B_r (V_r)를 통하여 부하로 전달된다.

부하에는 두계급의 관성 모멘트 J , 그리고 이를 지지하는 목 부위의 병렬 탄성계수 K_p 와 점성 마찰계수 B_p 가 포함된다. 이들 요소에 대한 계통의 상태 방정식과 B_l 과 B_r 에 대한 보조 방정식은 표1과 같다.

표1. 머리의 수평회전운동의 6차 비선형 상태방정식

$$\begin{aligned}
 & \text{State equations} \\
 & \dot{V} = V \\
 & \dot{V}_L = \frac{HT_L - K_s(x_L - x)}{B_L} \\
 & \dot{V}_R = \frac{-HT_R - K_s(x_R - x)}{B_R} \\
 & \dot{a} = \frac{-K_p x - B_p v + K_s(x_L - x) + K_s(x_R - x)}{J} \\
 & dh_{t1} = \frac{cx_{a1} - HT_L}{T_d} \\
 & dh_{t2} = \frac{cx_{a2} - HT_R}{T_d}
 \end{aligned}$$

Ancillary equations

$$B_L = \begin{cases} \frac{1.25HT_L}{b_h + v_L}, & v_L > 0 \\ \frac{1.25HT_L}{b_h}, & v_L < 0 \end{cases}$$

$$B_R = \begin{cases} \frac{1.25HT_R}{b_h + v_R}, & v_R < 0 \\ \frac{1.25HT_R}{b_h}, & v_R > 0 \end{cases}$$

운동계의 출력 변수 X 는 머리의 회전 각도이고, 그 각속도는 $X=V$ 이다. $Ksl(Ksr)$ 에 연결된 마디의 회전 각도는 변수 $Xl(Xr)$ 이고, 그 각속도는 $Xl=Vl$, $Xr=Vr$ 이다. $X=V=a$ 의 각 각속도에 관한 1차 미분 방정식을 포함하여 각속도, 각가속도에 관하여 4개의 상태 방정식이 성립된다.

구동 로오트 발생기 부분에 대하여서도 출력 $Htl(Htr)$ 에 대한 1차 미분 방정식 $dHtl(dHtr)$ 로서 상태 방정식 2개가 얻어지므로, 계통은 6차 비선형으로 된다.

보조 방정식은 Hill의 비 선형 방정식이다. 상태 방정식과 보조 방정식에 사용한 계통 정수의 값은 Stark등(11)의 추정치와 Winters등(10)이 보정한 추정치를 사용하였다(표 2 참조).

$$\left. \begin{aligned} ex_{ag} &= ex_{min} + ex_{net} \\ ex_{at} &= ex_{min} \end{aligned} \right\} ex_{net} > 0$$

$$\left. \begin{aligned} ex_{ag} &= ex_{min} \\ ex_{at} &= ex_{min} + ex_{net} \end{aligned} \right\} ex_{net} \leq 0$$

여기서, ex_{min} 은 수치해석의 안정도를 보장하기 위하여 최소치로 잡는다. 역모델의 출력 ex_{net} 를 얻는 조건은 볼록선도에서 $E=Vh(t)-Vm(t,net)=0, 0 < t < t_{max}$ 가 된다. 여기서, $Vh(t)$ 는 지검자로부터 실측한 머리의 회전각속도, 그리고 $Vm(t,net)$ 는 ex_{net} 즉, ex_{ag}, ex_{at} 에 의한 모델의 출력이다. ex_{net} 의 계산은 Newton-Raphson법을 써서

$$ex_{net,j+1} = \frac{E_j - ex_{net,j} - E_j ex_{net,j-1}}{E_{j-1} - E_j}$$

여기서, j : 반복회수

가 추정치에 수렴하게 하였다.

표 2. 모델의 정수

Name	Symbol	Value	Units
<i>Muscle model</i>			
Activation time constant	T_a	50.0	milliseconds
Hill's constant; b	b_h	350.0	deg sec ⁻¹
Series elasticity	K_s	350.0	gf deg ⁻¹
<i>2nd order plant</i>			
Rotational inertia	J	0.18	gf deg ⁻¹ sec ²
Parallel elasticity	K_p	2.0	gf deg ⁻¹
Parallel viscosity	B_p	2.0	gf deg ⁻¹ sec
<i>Control signals</i>			
Agonist excitation	ex_{ag}	—	Dimensionless
Antagonist excitation	ex_{at}	—	Dimensionless

3. 운동계 모델의 역변

위에서 제시한 모델의 입력 ex_{ag} 와 ex_{at} 가 실측에서 얻은 근전신호(EMG)에 상당하는가를 조사하기 위하여, 본 연구에서는 운동계의 모델을 역변시켜 역모델(inverse model)을 만들었다. 이 역모델에 머리의 회전 각도(각 속도)를 입력으로 넣어, 이 입력에 대한 함수로서 제어신호를 얻는다. 모델과 역모델에 의한 계통의 구성은 그림 2와 같다.

역모델법은 반복 알고리즘을 사용하여 순방향의 6차 비선형모델의 출력을, 실험에서 기록한 머리의 회전 각속도와 정확하게 일치시킨다. 그러나 순방향 운동계 모델의 입력이 2개이나 그 출력은 1개이므로 역모델의 단일 입력에서는 1개의 제어신호 ex_{net} 만을 얻을 수 있다. 여기서 2개의 제어신호를 구하기 위하여 상호신경지배(reciprocal innervation)의 제한 조건을 이용하여 다음과 같이 동근 자극신호 ex_{ag} 와 길항근자극신호 ex_{at} 를 얻는다.

4. 결과 및 검토

인간 지검자로부터 실측한 자료를 역 모델에 이용하기 위하여, 운동 측정치의 앙상블평균(ensemble average)를 구하였다. 측정에 사용한 시표(target)는 20, 40, 및 60도의 계단변위이고, 각각에 대하여 5개의 계단응답을 앙상블평균하였으며, 그 결과는 그림 3과같이 각도, 각속도, 각가속도로 나타내었다.

그림 4는 그림 3에 대응하여, 동근과 길항근의 EMG를 앙상블평균하여 보인것이다. EMG파형의 두드러진 특징은 3상 파열 유형(triphasic burst pattern)으로서, 각각 PA, PB, 및 PC로

나타내었다. PA는 동근의 첫 EMG파열을, PB는 EMG파열을, PC는 동근의 둘째 EMG파열을 각각 나타낸다. EMG의 3유형과 운동사이에는 EMG의 진폭이 지배적으로 관계하나, PA, PB, 및 PC의 지속시간의 변화폭은 대체로 진폭의 변화보다 큰것으로 관찰되었다.

역모델법으로 얻은 제어신호의 파형은 그림 5와 같으며, 그림 4의 EMG 측정파형과 대비된다.

역모델의 출력에서도 3상파열의 유형을 관찰할 수 있으나, 이 제어신호는 측정된 EMG 신호보다 약 30(ms)의 지연이 있는데, 이는 역모델법에서 전산의 편위를 위하여, 운동계의 지연 요소 특성을 포함시키지 않고 알고리즘을 구성하였기 때문이다.

REFERENCES

- 11 R. W. Angel, Myoelectric patterns associated with ballistic movement: Effect of unexpected changes in load, J. Human Stud. 1:96-103 (1975).
- 21 M. Clark and L. Stark, Time optimal behavior of human saccadic eye movements, IEEE Trans. Automat. Control AC-20:345-348 (1975).
- 31 G. Cook and L. Stark, The human eye movement mechanism: Experiments, modeling, and model testing, Arch. Ophthalmol. 79: 428-436 (1968).
- 41 E. Hannaford, R. Maduel, M. H. Nam, V. Lakshminarayanan, and L. Stark, effects of loads on time-optimal head movements: EMG, oblique, and main sequence relationships, in Proceedings of the 19th Annual Conference on Manual Control, MIT, June 1983.
- 51 E. Hannaford, and M. H. Nam, V. Lakshminarayanan, and L. Stark, EMG as controller signal with viscous load, J. Motor Behavior 16(3):255-274 (1984).
- 61 A. V. Hill, The heat of shortening and dynamic constraints of muscle, Proc. Roy. Soc. London 126:136-195 (1938).
- 71 W. S. Kim, S. H. Lee, B. Hannaford, and L. Stark, Inverse modeling to obtain head movement control signal, in Proceedings of the 20th Annual Conference on Manual Control, Sunnyvale, Calif., 1984.
- 81 S. L. Lehman and L. Stark, Perturbation analysis applied to eye, head, and arm movement models, IEEE Trans. Systems Man Cybernet. SMC-13:972-979 (1983).
- 91 K. Wachholder & H. Altenburger, Beitrage zur Physiologie der willkurlichen Bewegung, 10 Einzelbewegungen Pflugers arch. Ges. Physiol. 214:642-661 (1926).
- 101 J. M. Winters and L. Stark, New uses for sensitivity analysis: How different movement tasks affect limb model parameter sensitivity, in Proceeding of the 20th Annual Conference on Manual Control, Sunnyvale, Calif., 1984.

- 111 W. H. Zangemeister, S. Lehman, and L. stark, Sensitivity analysis and optimization for a head movement model, Biol. Cybernet., 41:33-45 (1981).

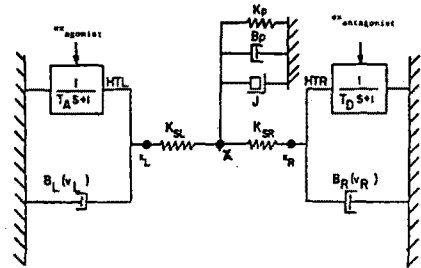


그림 1. 머리회전운동의 6차비선형 모델

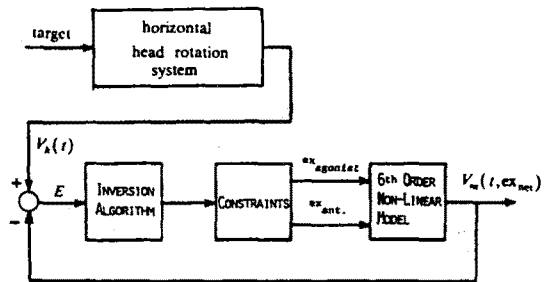


그림 2. 반복법에 의한 역모델의 블록선도

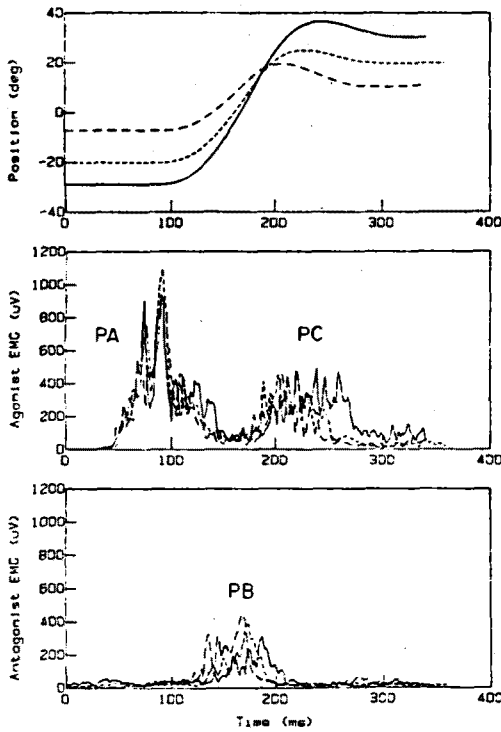


그림 4. 측정된 EMG신호의 앙상블 평균

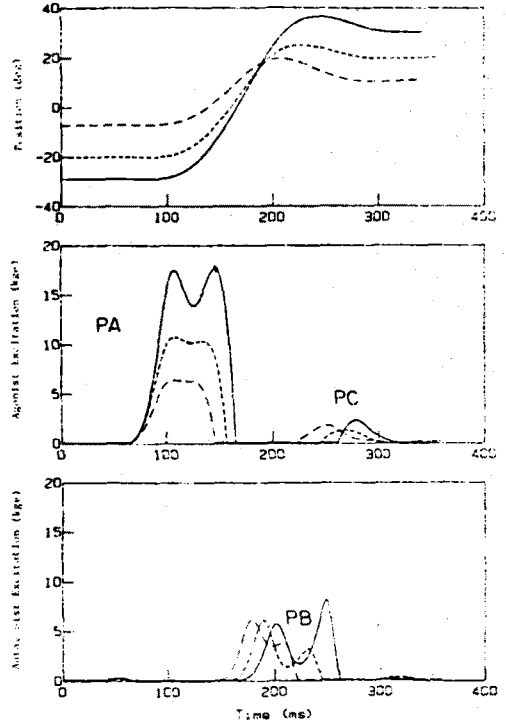


그림 5. 역모델에서 얻은 제어신호 파형

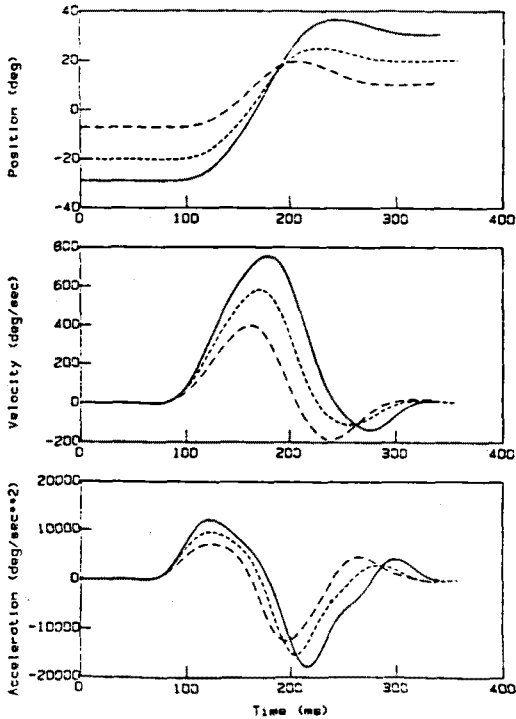


그림 3. 머리의 시간회적 수평회전운동의 앙상블 평균 각변위, 각속도, 각가속도