

운동감제시를 위한 시뮬레이터 연구

김 원 식, 박 세 진

한국표준과학연구원 인간공학그룹

ABSTRACT

인간에게 운동감을 적절히 제시해주기 위하여는 Newton에 의한 운동의 세가지 법칙뿐만 아니라 Einstein의 상대성이론이 첨가되어야 한다. 즉, Newton운동의 제1법칙에 의하여 피실험자가 외력을 받지 않으면 등속운동 또는 정지상태를 계속 유지하게 되어 자신이 등속좌표계에 고정되어있기 때문에 시각적인 정보가 없으면 어떠한 운동감도 못 느낀다. 이때 피실험자에게 정지해있는 기준좌표계에 대하여 등속으로 움직이는 것을 인식시켜주기 위하여 피실험자에 대한 기준좌표계의 상대속도를 시각정보로 제공해 주어야한다. 또한 Newton운동의 제2법칙에 의하여 똑같은 힘이 외력으로 작용하더라도 피실험자의 질량과 가속도는 서로 반비례하므로 화면이동속도변화를 피실험자의 질량에 반비례하도록 제시해 주어야한다(김 정흠, 1982). 본 연구에서는 이러한 개념에 근거하여, 체중이 다른 여섯 피실험자들로 구성된 시스템에 대해서 각 피실험자에게 서로 다른 변위를 주고자할 때, 여섯가지 외력에 요구되는 작용시간을 Jacobi Iteration 방법과 Gauss-Seidel Iteration 방법으로 구하는 알고리즘을 제시하였다(D. V. Griffiths and I. M. Smith, 1991).

1. 서 론

넓은 의미의 신체의 운동에 관련하여, 감각신경계는 외적 및 내적 환경의 변화에 대한 정보를 계속해서 중추로 전달하므로써 감각을 형성케하는 반면 운동신경계는 이를 통해 얻어진 감각정보를 중추신경계의 여러 부위에서 처리, 종합 분석하여 얻어진 명령을 최종적으로 근수축의 형태로 나타내도록 한다. 본 연구에서는 운동감이란 신체의 일부를 움직이는 골격근의 수축에서 느끼는 감성이라기보다는 신체를 하나의 강체(rigid body)로 보고 여기에 고정되어 있는 좌표계가 신체외부에 고정되어 있는 기준좌표계에 대하여 회전 및 병진운동을 할 때 인간이 느끼는 감성으로 가정한다.

이러한 가정에서의 운동감은 신체가 공간의 어떠한 위치에 놓여지더라도 자세를 바로잡고 평형을 유지하려는 여러 종류의 체방위반사(body orienting reflex)와 밀접한 관계가 있다. 체방위반사는 1) 내이(inner ear)의 전정기관(vestibular organ)에 있는 미로수용기, 2) 경부(neck)의 근육과 관절(joint) 및 체간과 사지에 위치하는 체세포 수용체(somatic proprioceptor), 3) 시각 수용기(visual receptor)등으로 부터 구심성정보가 복잡한 반사기전을 거쳐 나타나는데 이 반사작용들은 어느 하나만 특정하게 기여한다기보다는 서로 협동해서 나타난다(강 두희, 1988; J. G. Webster, 1993).

1-1 신체의 회전운동감

내이에는 청각을 담당하고 있는 달팽이관 이외에 인체의 평형감각기능을 담당하고 있는 전정기관이 있으며 전정기관은 삼반규관(semicircular canal)과 전정(vestibule)으로 구성되어있다(그림 1 참고). 삼반규관의 각 반규관 내부에는 수용기관(receptor organ)으로 크리스타(crista)가 있으며 여기에 수용세포(receptor cell)인 섬모세포(hair cell)가 있는데 이 세포의 상단에 섬모가 있다. 인체가 회전할 때, 즉 각 가속도(angular acceleration)를 받을 때, 삼반규관내 엔돌림프(endolymph)가 유동함에 따라 섬모가 구부러지면 전정섬유(vestibular fiber)가 자극을 받아서 흥분하게 된다. 그림 2에서와 같이 신체가 안정시에는 일정한 방전(discharge)을 보이다가, 우측수평방향으로 회전운동할 때 엔돌림프의 유동방향이 난형낭(utricle) 쪽으로 일어나 우측 전정섬유가 흥분되나(아랫그림) 좌측 전정섬유는 억제된다(윗그림). 운동이 끝나면 흥분되었던 우측 전정섬유는 억제되나 좌측 전정섬유는 사후방전(after discharge) 현상을 보인다. 한편 신체가 좌측 수평방향으로 회전할 때는 위의 현상과 반대로 나타난다.

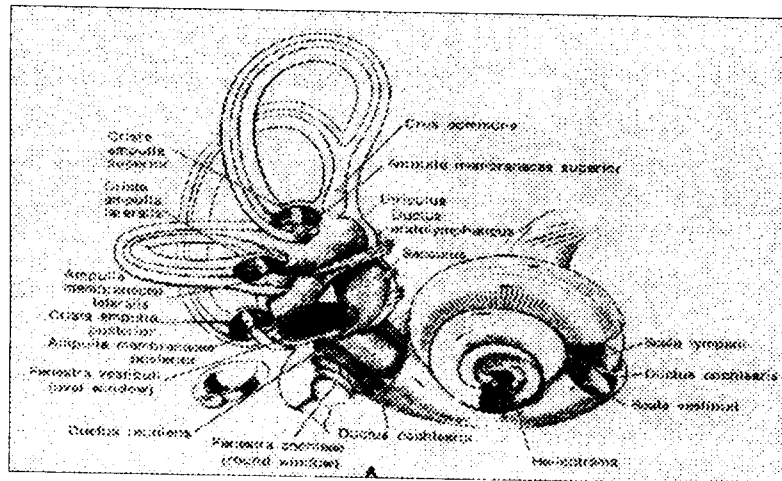


그림 1. 내이의 구조

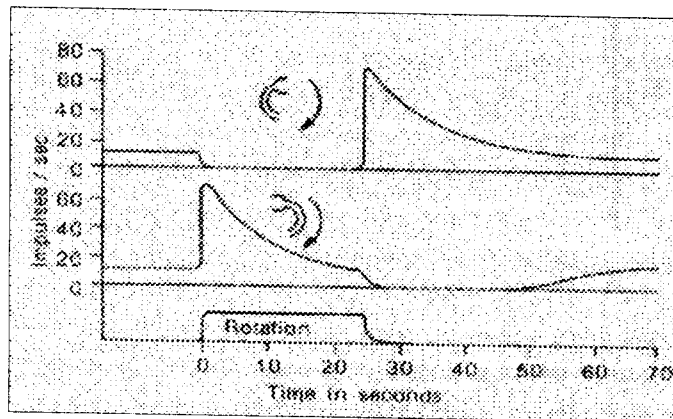


그림 2. 신체의 회전운동이 전정 신경섬유에 미치는 영향

1-2 신체의 직선운동감

전정내부에 있는 난형낭과 구형낭(sacculle)의 막성미로 안에는 감각 수용기로 반점(macule)이 있는데 이곳에도 역시 수용세포로서 섬모 세포가 있으며 섬모의 상부에 이석(ear stone 또는 otolith)이 놓여있다. 반점은 선형가속운동에 반응하는데, 이석이 엔돌립프 보다 더 무거우므로 가속도의 방향에 따라 이석은 그 반대방향으로 변위되어 이에 의해 섬모가 구부러져서 자극을 받는다.

1-3 안구진탕(nystagmus) 효과

전정기관이 관계되는 중요한 정동적인 반사(statokinetic reflex)중의 하나는 전정안구진탕(vestibular nystagmus)이다. 그림 3에서와 같이 신체의 회전운동시 눈은 지금까지 응시하고 있던 방향을 계속 유지할 수 있도록 회전방향과 반대방향으로 움직인다. 만일 이러한 안구의 대상작용이 일어날 수 있는 한계를 넘도록 신체의 회전운동이 일어나면 눈은 신속히 회전방향과 같은 방향으로 움직여(rapid eye movement) 새로운 응시 점을 구축한 다음 다시 서서히 반대방향으로 대상작용이 일어나는데(slow eye movement) 이와 같은 안구운동의 연속을 안구진탕 이라고 한다.

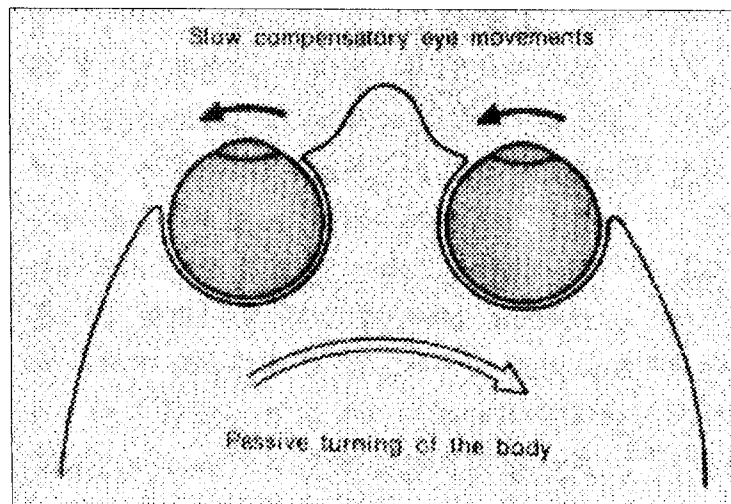


그림 3. 전정 안구진탕 때의 눈운동(slow compensatory)

2. 시뮬레이터 설계

본 연구에서는 체중이 w_1, w_2, \dots, w_6 으로 서로 다른 6명의 피험자가 고립계(isolated system) 내부에 있을 때, 여섯가지의 서로 다른 종류의 외력 f_1, f_2, \dots, f_6 이 이러한 고립계에 작용할 때 6명의 피실험자를 각각 여섯가지의 서로 다른 주어진 변위 X_1, X_2, \dots, X_6 를 갖도록 힘이 가해져야하는 시간 t_1, t_2, \dots, t_6 를 구하기 위하여 Jacobi Iteration 방법과 Guss-seidel Iteration 방법을 이용하여 다음과

같이 구성하였다. 이때 피험자들간의 거리는 고정되어 있지 않고 외력의 크기와 방향에 따라 표1과 같은 속도 성분을 갖는다고 가정한다.

표 1. 체중이 w_1, w_2, \dots, w_6 인 피험자들로 구성된 고립계에 외력 f_1, f_2, \dots, f_6 가 각각 작용할 때 각 피험자들이 갖는 속도 성분들

외력 무게	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
W_1	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}	V_{15}	V_{16}
W_2	V_{21}	V_{22}	V_{23}	V_{24}	V_{25}	V_{26}
W_3	V_{31}	V_{32}	V_{33}	V_{34}	V_{35}	V_{36}
W_4	V_{41}	V_{42}	V_{43}	V_{44}	V_{45}	V_{46}
W_5	V_{51}	V_{52}	V_{53}	V_{54}	V_{55}	V_{56}
W_6	V_{61}	V_{62}	V_{63}	V_{64}	V_{65}	V_{66}

위의 관계를 연립방정식으로 나타내면

$$\begin{aligned}
 V_{11}t_1 + V_{12}t_2 + V_{13}t_3 + V_{14}t_4 + V_{15}t_5 + V_{16}t_6 &= X_1 \\
 V_{21}t_1 + V_{22}t_2 + V_{23}t_3 + V_{24}t_4 + V_{25}t_5 + V_{26}t_6 &= X_2 \\
 V_{31}t_1 + V_{32}t_2 + V_{33}t_3 + V_{34}t_4 + V_{35}t_5 + V_{36}t_6 &= X_3 \\
 V_{41}t_1 + V_{42}t_2 + V_{43}t_3 + V_{44}t_4 + V_{45}t_5 + V_{46}t_6 &= X_4 \\
 V_{51}t_1 + V_{52}t_2 + V_{53}t_3 + V_{54}t_4 + V_{55}t_5 + V_{56}t_6 &= X_5 \\
 V_{61}t_1 + V_{62}t_2 + V_{63}t_3 + V_{64}t_4 + V_{65}t_5 + V_{66}t_6 &= X_6
 \end{aligned}$$

행렬로 나타내면

$$Vt = X \text{ 또는,}$$

$$\begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} & V_{14} & V_{15} & V_{16} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} & V_{24} & V_{25} & V_{26} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} & V_{34} & V_{35} & V_{36} \\ V_{41} & V_{42} & V_{43} & V_{44} & V_{45} & V_{46} \\ V_{51} & V_{52} & V_{53} & V_{54} & V_{55} & V_{56} \\ V_{61} & V_{62} & V_{63} & V_{64} & V_{65} & V_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{pmatrix}$$

행렬 V 의 diagonal 성분을 모두 1이 되도록 V 와 X 의 요소들을 계산하면

$$V =$$

$$\begin{pmatrix} 1 & V'_{12} & V'_{13} & V'_{14} & V'_{15} & V'_{16} \\ V'_{21} & 1 & V'_{23} & V'_{24} & V'_{25} & V'_{26} \\ V'_{31} & V'_{32} & 1 & V'_{34} & V'_{35} & V'_{36} \\ V'_{41} & V'_{42} & V'_{43} & 1 & V'_{45} & V'_{46} \\ V'_{51} & V'_{52} & V'_{53} & V'_{54} & 1 & V'_{56} \\ V'_{61} & V'_{62} & V'_{63} & V'_{64} & V'_{65} & 1 \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} X'_1 \\ X'_2 \\ X'_3 \\ X'_4 \\ X'_5 \\ X'_6 \end{pmatrix}$$

$V=I-L-U$ 로하면, 여기에서

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -V'_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & 0 & 0 \\ -V'_{61} & \dots & \dots & \dots & -V'_{65} & 0 \end{pmatrix}$$

$$U = \begin{pmatrix} 0 & -V'_{12} & \dots & \dots & -V'_{16} \\ 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -V'_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

행렬을 식으로 다시 나타내면

$$(I-L-U)t = X \quad \text{또는,} \quad t = X + (L + U)t \quad \dots (1)$$

이것을 Jacobi Iteration 방법으로 표현하면

$$t^{k+1} = X + (L + U)t^k \quad \dots (2)$$

이 계산을 tolerance ϵ_s 까지 수행한다.

$$\epsilon_k = |(t^k - t^{k-1}) / t^k| < \epsilon_s$$

(1) 식을 Gauss-seidel Iteration 방법으로 나타내면

$$(I - L)t^{k+1} = X + U*t^k \quad \dots (3)$$

가된다.

3. 결론

인체에 운동감을 주려면 전정기관의 기능을 이용해야하므로 인체를 강제로 취급하여 이곳에 고정되어 있는 좌표계를 회전 또는 병진운동을 시킬 수 있는 구동장치(actuator)가 필요하다. 즉, 신체의 일부를 움직이는 골격근의 수축 운동으로는 운동감을 일으키기에 불충분하다. 그런데 인체가 등속직선운동을 할 때는 Newton의 운동 제1법칙에 의하여 외력이 존재하지 않으므로 전정기관내의 엔돌림프의 유동이 없을 뿐만 아니라, 이것에 대한 이석의 변위도 없으므로 감각섬모가 구부러지지 않아 결과적으로 전정 신경섬유를 흥분시키지 못하므로 인체는 운동감을 느끼지 못하게 된다. 그러나 등속운동에 도달하기 전과 등속운동 다음에서 정지할 때까지 각각 인체에 가속과 감속을 주도록 외력을 작용시키고, Einstein의 상대성이론을 이용하여 안구진탕효과를 유도하도록 피험자에게 인체외부의 기준좌표계에 대한 인체의 상대(가, 감, 등)속도를 시각적으로 제시하면 적절한 운동감을 느끼게 된다.

참고 문헌

- [1] 강 두희, 생리학, 신광출판사, 서울, 1988.
- [2] 김 정흠 등, 일반물리학, 고려대학교출판부, 서울, 1982.
- [3] D. V. Griffiths and I.M. Smith, Numerical Methods for Engineers, Blackwell, England, 1991.
- [4] John G. Webster 원저, 의용공학교육연구회 역편, 의용계측공학, 麗文閣, 서울, 1993.