

스텝모터를 이용한 미세전극 이동기

정수영 · 이춘길

서울대학교 심리학과

스텝 모터를 제어하여 미세 전극을 구동하는 저렴한 시스템을 소개하였다. 스텝 모터의 회전이 직진형 마이크로미터 머리에서 직선 운동으로 변환되었다. 모터의 회전은 비틀림 탄성계수가 큰 피아노용 강선에 의해 전달됨으로써 두 회전축의 편심과 편각이 간단히 흡수되었다. 스텝 모터를 구동하기 위한 회로와 스텝 모터의 누적 회전량, 즉 전극의 진행 거리를 표시하는 회로가 설계, 제작되었다. 회로의 핵심은 IC 칩으로 초파 구동을 저렴하게 수행하는 것이다. 개발된 미세 전극 이동 시스템의 정밀도는 $1.25\mu\text{m}$ 이었다. 시스템의 시험은 약 1년 동안 네 마리의 교양이에서 유리로 절연된 텅스텐 전극으로 이루어졌다. 뇌간 구조나 대뇌 피질 구조를 목표로 70회 이상 전극의 진행이 있었다. 이 실험들을 통해서 개발된 미세 전극 구동 시스템의 기계적, 전기/전자적 성능들은 상업적으로 비슷하게 제작된 것들에 비교하여 떨어지지 않았다.

본 연구는 스텝 모터를 사용하는 미세 전극 구동 장치의 한 설계와 이에 기초하여 제작한 장치의 성능에 관한 것이다. 본 연구에서 소개하는 설계는 상업적으로 제작되어 있는 미세 구동 장치의 성능을 유지하면서 동시에 제작이 간편하고 저렴한 것이 특징이며, "신경활동의 컴퓨터 분석을 위한 '윈도우 변별기'의 설계와 제작"(이춘길과 박정현, 1991)에 이어서 신경생리 실험설비를 저렴하게 제작하는 기법을 소개하는 두 번째에 해당한다.

방법

스텝 모터를 사용하여 전극을 미세 이동하는 장치의 원리는 스텝 모터에 의해 제공되는 회전 운동을 직진형 나사를 사용하여 직선 운동으로 변

역하는 것이다. 스텝 모터를 사용할 때의 이점은 모터의 회전 각도가 제어 회로에서 오는 입력 펄스의 수에 비례하기 때문에 모터 회전을 용이하게 제어할 수 있고 되먹임(feedback)이 필요하지 않아서 고정밀도를 쉽게 유지할 수 있으며 오차가 누적되지 않는 점 등이다. 본 연구에서 사용한 직진형 나사는 25mm 직진형 마이크로미터 머리(micrometer head, Mitutoyo 153-202 MHK-25VR)로서 본 연구에서 소개하는 설계의 핵심이다. 이 마이크로미터 머리가 360도 회전하면 마이크로미터 심은 $500\mu\text{m}$ 직진하게 된다. 직진하는 마이크로미터 심에 전극이 기계적으로 부착되고 마이크로미터의 머리를 스텝모터가 회전시키게 된다. 사용된 스텝모터는 PM 복합형(Janome, 4SQ-240BP)이었다. 이 모터는 한 스텝 당 1.8도의 축 회전을 유지하는 바 360도

회전이 200 스텝으로 분할된다.

스텝 모터의 축 회전력을 마이크로미터 머리에 연결하면 회전 방향에 따라 마이크로미터 심은 직진 혹은 후진을 할 것이다. 마이크로미터 심의 이동에 따라 마이크로미터 머리도 이동하기 때문에 스텝 모터의 회전 축에 마이크로미터 심이 직접 연결될 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 두 가지의 기법이 시도되었다. 초기에는 스텝 모터 회전 축과 마이크로미터 머리 사이에凹凸 형의 슬라이드 암수 부품을 삽입한 방식을 사용하였다. 요철이 포개지는 깊이를 25mm 보다 크게 함으로써 마이크로미터 심이 움직이는 모든 범위에 걸쳐 직선적 변역이 가능하게 하였다. 여기서 추가로 고려한 것은 스텝 모터의 회전 축과 마이크로미터 머리의 회전 축이 일직선 상에 위치하지 않고 어긋날 때를 대비한 것이었다. 두 축심을 일직선 상에 정렬시키는 것은 어려울 뿐 아니라 의외로 많은 비용이 소요된다.

두 축심이 어긋나는 거리를 나타내는 편심(eccentricity)과 두 축심이 이루는 각도가 일직선에서 이탈하는 정도를 나타내는 편각(deviation angle)은 축심이 어긋나도록 하는 두 가지 원인이다. 극히 작은 편심이나 편각에도 회전력 전달 과정에서 진동과 소음이 발생하는데, 전극을 구동할 때 발생하는 이러한 진동이나 소음은 실험의 내용에 따라 큰 불편이 될 수 있다. 따라서 편심과 편각을 기계적으로 흡수하는 것이 유리하며 본 연구의 초기 단계에서는 풀무식 주름 원통을 채택한 커플러(coupler, Sansei BC0505)를 사용하였다. 연구의 후기 단계에서 사용하여 최종적으로 정착된 두 번째 방식은 피아노의 고음용 강선(직경 0.09mm)으로 스텝 모터의 회전력을 마이크로미터 머리에 기계적으로 전달하는 것이었다. 피아노 강선을 곡선 형으로 배치함으로써 스텝 모터의 축과 마이크로미터 심 사이의 가변적인 거리에 적응시킬 수 있었을 뿐 아니라 커플링 부품 없이도 편심과 편각을 흡수할 수 있었다. 또한 비틀림 탄성계수(torsional stiffness)가 큰 강선인 바 회전력이 충실히 전달되고 회전 방향을 바꿀 때, 즉 전극의 진행 방향을 바꿀 때 발생하는 오차(backlash 혹은 hysteresis)를 극소화할 수 있었다.

스텝 모터의 회전 축과 마이크로미터 머리를 위에서 기술한 방식으로 접속한 후 스텝 모터의 회전을 제어하기 위해서 [그림 1]의 회로가 설계되고 이에 기초하여 제어기가 제작되었다.

스텝 모터를 구동하는 방식으로 정전류 구동, 이중 전원 구동 등 여러 가지가 사용되고 있다. 본 연구에서 채택한 방식은 초퍼 구동(chopper drive) 방식이었다. 초퍼 구동은 모터의 정격 전압보다 높은 전압을 초퍼(ON/OFF의 교대로 이루어지는 사각파)로 제어하여 모터에 인가하는 방식으로서 코일에 흐르는 전류의 상승이 빨라져서 빠른 반응을 얻을 수 있는 장점이 있다. [그림 1]을 상하로 양분했을 때, L297, 555, MC-5280을 포함하는 아래 부분은 초퍼 구동 전용 칩인 MC-5280(Janome)을 사용하여 스텝 모터를 양극 구동(bipolar excitation)하기 위한 회로이며 위 부분은 모터의 회전 속도와 개시/종료를 제어하는 주변 회로이다.

[그림 1]의 MC-5280의 핀 2, 14에는 절편 구동에 필요한 경사 신호(ramp signal)가 555와 주변 회로에 의해 생성되어 입력된다. 제작사(Janome)는 1K Ω 및 10K Ω 가변 저항을 조절하여 입력 경사 신호의 크기를 100mV, 20kHz가 되도록 예시하였다. MC-5280으로 1/2 혹은 1/4 스텝 구동이 가능한데 여기서는 1/2 스텝 구동으로 설계하였다. 따라서 모터 축의 360도 회전이 400 단계로 분할되어 한 회전에 500 m 진행하는 마이크로미터 머리에 연결되었을 때 마이크로미터 심의 최소 이동 거리는 1.25 μ m으로서 미세 전극 이동용으로 충분한 정밀도를 제공한다.

스텝 모터의 구동을 위해서 필요한 각 코일에 가해지는 순차적인 입력의 패턴은 L297(SGS)에 의해 편리하게 제공된다. L297(SGS)의 4, 6, 7, 9 출력이 MC-5280의 입력 핀으로 연결되는데 이 입력이 1/2 스텝 구동을 위해서 요구되는 PA0-3의 입력을 구성하며 1/4 스텝 구동은 MC-5280의 3, 18 핀을 추가적으로 제어함으로써 가능하다. L297의 핀 18에 입력되는 펄스(CLOCK)에 동기화되어 PA0-3의 논리 패턴이 순차적으로 변하여 진행하는데 이 진행의 방향은 L297의 핀 17의 논리에 의해 결정된다. 핀 17이 HI이면 축심에서 모터를 보았을 때 모터는 시계

방향으로 회전하고 LO이면 그 반대 방향으로 회전한다. [그림 1]에서 핀 17에 추가된 74279 논리는 스위치 잡음을 흡수하는 회로(switch debouncer, Horowitz & Hill, 1980)이다. 여기에 연결된 두 단자(동심원) 가운데 GND 전위가 어디에 연결되는지에 따라 핀 17의 논리 상태가 결정된다. 모터의 회전 방향 즉 전극의 진행 방향은 UP/DOWN 스위치(2회로 2접점)에 의해 결정되고 스위치 잡음을 흡수하는 회로를 삽입하였다.

[그림 1]의 위 부분은 L297의 입력 신호를 제어하는 주변 회로이다. L297이 PA0-3의 패턴을 순차적으로 변화시키는 동기 신호는 핀 18에 제공되는 펄스이다. 한 개의 펄스에 반응하여 PA0-3 패턴이 한 단계 변화하고 1/2 스텝의 모터 회전을 일으킨다. 스텝 모터의 회전 속도는 핀 18에 입력되는 펄스의 주파수를 조절함으로써 이루어진다. 전극의 전진 속도는 흔히 실험의 진행에 따라 달라지는데 이에 적용하기 위해서 여기서는 모터의 구동 속도를 세 가지 방식으로 설계하였다. 단일 스텝(SINGLE), 저속(SLOW), 고속(FAST) 모드가 그것이다. 단일 스텝 모드에서는 74121 단발 생성기(one-shot pulse generator)의 출력이 L297에 입력된다. 미세 전극을 단일 스텝 모드로 진행시킬 때는 실험자가 손으로 원거리에서 제어하는 것이 편리하기 때문에 단발 생성을 제어하는 스위치는 흔히 패널에 부착하기 보다는 원거리 제어기에 부착하는 것이 유리하다. [그림 1]의 상단에 표시된 회로는 바로 원거리 제어기의 내부 회로 가운데 단발 생성을 일으키는 부분을 보인다. 'REMOTE SINGLE STEP' 부분에 표시된 스위치는 단발 스위치(momentary switch)로 GND 전위를 순간적으로 인가하면 4093 CMOS 슈미트 트리거(Schmitt trigger)의 출력은 스위치 잡음이 흡수되어(Horowitz & Hill, 1980) LO-HI의 전환이 깨끗하도록 설계하였다.

저속 및 고속 모드에서는 555가 생성하는 펄스의 주파수가 조절되어 L297의 동기 신호(clock bar)로 전달된다. 주파수의 조절 방식은 우선 74393 이진 계수기의 출력을 선택함으로써 저속 및 고속이 결정되고 출력 주파수의 미세 조절은

원거리 제어기에 부착된 가변 저항을 조절하여 555의 출력 주파수를 변화시킴으로써 이루어진다.

모터의 구동을 개시하고 종료하는 신호는 L297의 핀 10에 전달되는 입력이다. 여기에 +5V가 입력되면 모터는 구동을 개시(ENABLE)하고 GND 전위가 입력되면 모터의 전류를 0으로 만들어 구동을 종료(DISABLE)시킨다. 모터의 구동 개시/종료를 제어하는 스위치는 패널과 원거리 제어기에 각각 부착되어 AND 논리를 통과함으로써 두 스위치 출력이 ENABLE 상태일 때만 구동이 가능하도록 설계하였다. 패널에 추가로 부착한 개시/종료 스위치는, 원거리 제어기 쪽에서 발생하는 사고에 의해 원하지 않는 작동을 시작하거나 혹은 고장에 의한 작동 이상에 대비한 안전 장치이다. 따라서 모터의 실제적인 구동은 패널 및 원거리 제어기 모두가 구동을 허가한 상태(ENABLE)에서 입력되는 동기 신호에 의해서이다. 이 신호는 L297에 연결되어 모터를 구동할 뿐 아니라 모터 구동의 누적치를 표시하는 숫자 표시 회로([그림 2])에도 공급된다.

[그림 2]는 스텝 모터의 누적 회전량 즉 전극의 누적 이동 거리를 표시하는 숫자 표시를 제어하는 회로이다. 본 연구에서 사용한 직진형 나사의 최대 이동 거리는 25mm이다. 이를 표시하기 위해 필요한 숫자는 5개로서 상위 2개는 mm단위를 표시하고 하위 3개는 μm 단위를 표시한다. [그림 2]의 가장 아래 쪽의 숫자 표시(Hewlett Packard, HDSP-3601)가 10mm 단위를 표시하고 그 위의 숫자 표시는 1mm 단위로서 핀 9가 GND로 단락 소수점을 표시하게 된다. 그 위 방향으로 나열된 HDSP-3601은 순차적으로 100, 10 μm 단위를 표시한다.

사용된 스텝 모터와 직진형 나사의 특성에 의해 제어 가능한 최소 이동 거리는 위에서 설명한 바대로 1.25 μm 이다. 따라서 8개의 펄스가 L297에 입력되면 전극은 10 μm 진행하게 된다. 모터를 구동하는 CLOCK 신호는 [그림 2]의 위 부분의 숫자 표시 구동 회로에 입력된다. 위에 위치한 숫자 표시(HP, 5082-7731)는 아래 숫자들과 구별되는 적색을 띠고 신호의 입력에 따라 8에서 순차적으로 1씩 감소되도록 설계하였고 0에

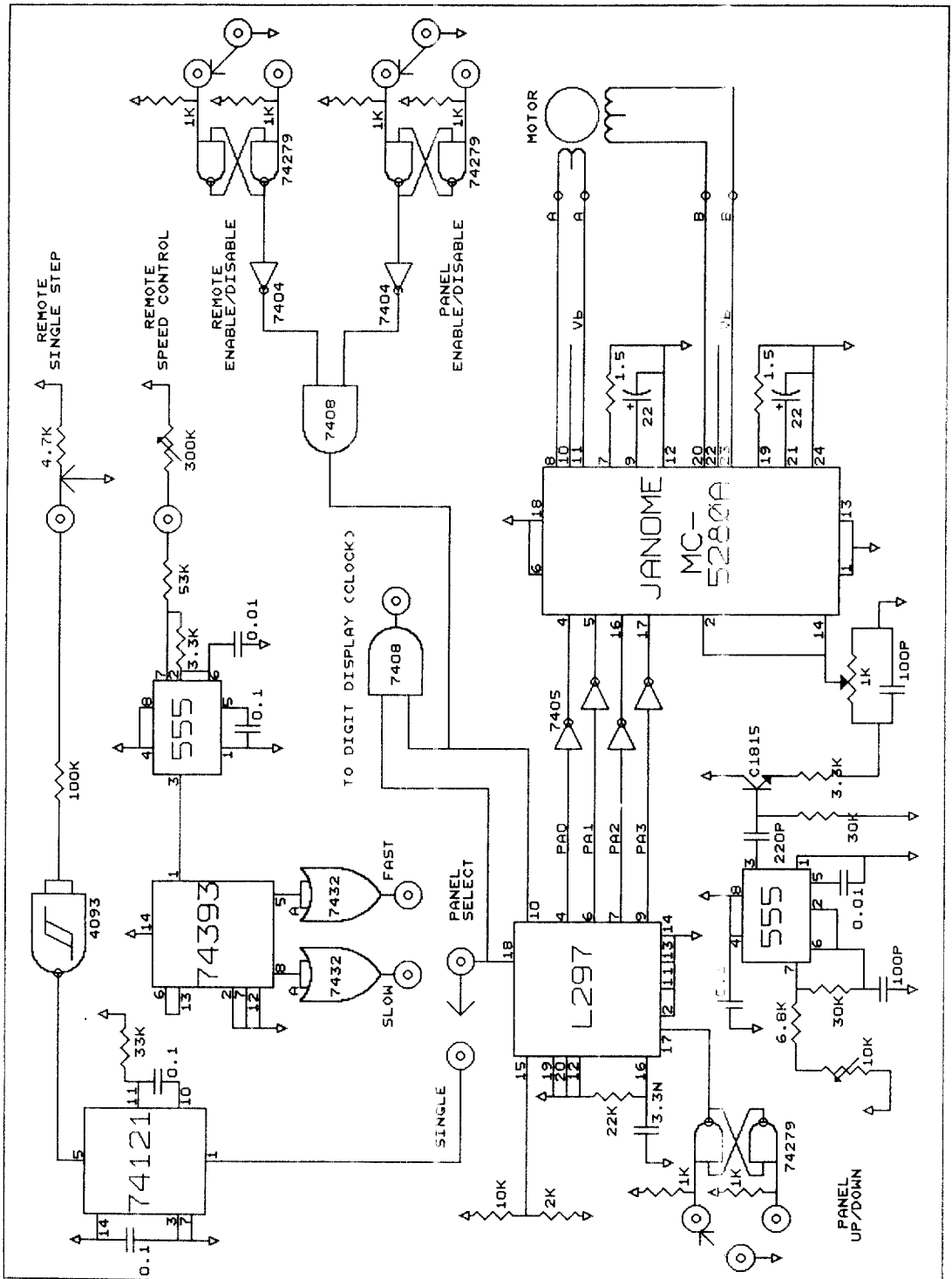


그림 1. 스텝 모터의 절편 구동 회로와 속도 제어 논리. 위로 향한 화살 머리는 +5V, 아래로 향한 화살 머리는 그라운드를 나타낸다. 두 개의 중심원으로 표시된 것들은 기관의 접속 단자에 연결되는 위치를 나타낸다. 콘덴서의 단위는 별도로 표시하지 않는 경우는 μF 임. Vb는 모터 구동 전압으로서 여기서는 24VDC를 사용하였다.

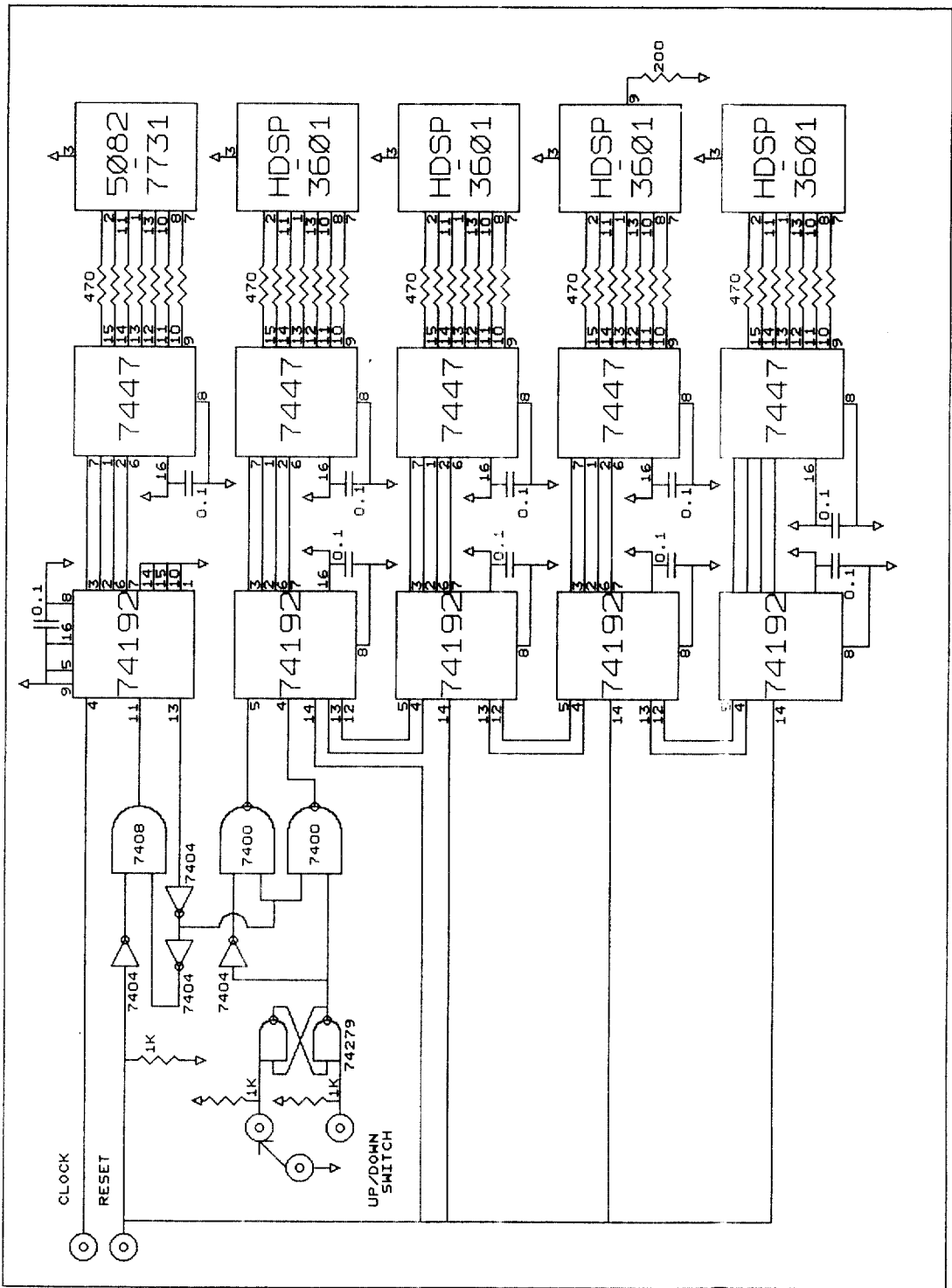


그림 2. 모터의 누적 회전량 표시를 제어하기 위한 회로. 표시의 양상인 (그림 1)과 동일

이르면 74192 핀 13. BORROW 출력이 숫자를 다시 8로 초기화하고 감산을 계속한다. 이 BORROW 출력은 10 μ m 표시 회로에도 전달되어 사용된 모터와 직진형 나사의 특성에 적용하여 나사의 누적 진행량의 표시에 있어서 오차가 없도록 설계하였다.

RESET 스위치는 단발 (momentary) 스위치로서 LO \rightarrow HI의 전환을 이들 표시 장치 구동 회로에 인가하여 5082-7731이 표시하는 숫자는 '8'을, 그외는 '0'의 수를 표시하게 한다. 즉 00.008을 패널에서 표시한다. 이후 표시되는 숫자는 RESET 후에 입력되는 동기 신호의 누적 계수를 나타낸다.

결과 및 논의

[그림 1]과 [그림 2]에 제시된 회로가 구현되어 전원부와 함께 19인치 패널용으로 제작되었다. 숫자 표시 제어 회로는 필스에 의해 구동되는 바스스위치 등에서 기인하는 잡음에 영향 받기 쉽다. 실제 [그림 1]과 [그림 2]에서 보인 스위치 잡음 흡수 회로는 실험을 거쳐 필요한 곳에 삽입한 것이다. [그림 1]과 [그림 2]에서 보이듯이 모든 스위치에 잡음 흡수의 필요가 있었음을 알 수 있다.

패널 전면에 부착된 숫자 표시들을 통해 읽은 모터의 누적 회전량과 마이크로미터 심의 실제 누적 진행량 간의 일치성이 수차례에 걸쳐 확인되었다.

스텝 모터의 구동에 따른 잡음이 신경 활동 증폭 장치를 통하여 소음으로 간섭하였으나 적절한 접지 연결로 모터의 구동에 따른 잡음은 신경활동 측정 회로에서 완전히 사라졌다. 연구의 후기 단계에서 피아노 강선으로 모터 회전을 전달하도록 하면서 모터와 전극 부착 장치를 기계적으로 분리한 이후에는 모터 구동에 의한 진동 또한 전극 부착부로부터 차단되었다. 이것이 피아노 강선을 채택한 이유였다.

전극의 진행 방향을 바꿀 때 발생하는 기계적 느슨함(backlash 혹은 hysteresis)의 대부분은 마이크로미터 머리에서 기인하는 것이며 약 50 μ m이었다. 비틀림 탄성계수가 큰 피아노 강선은

이 점에서 유리하였다. 그러나 피아노 선의 길이가 길어지면 비틀림이 누적되어 기계적 느슨함을 일으키는 원인으로 된다. 본 실험실에서는 현재 75cm 길이의 피아노 선으로 회전력을 전달하고 있어서 회전력 전달이 다소 느슨하나 전극의 진행 방향은 실험의 종료 시에 바뀌지기 때문에 마이크로미터 머리 혹은 피아노 선에서 기인하는 느슨함은 실제 문제로 부상하지 않았다.

전극의 진행 속도를 결정하는 곳은 [그림 1]의 555 주변 저항과 콘덴서들이다. [그림 1]에 제시한 회로에 따라 제작된 장치는 FAST 모드에서의 속도의 범위는 초당 60-350 μ m 진행이었고 SLOW 모드에서의 범위는 초당 2-10 μ m의 진행이었다. 물론 555 주변의 저항과 콘덴서의 값들을 바꿈으로서 이 속도의 범위들은 변화 가능하다.

본 연구에서 제작된 전극 구동 시스템을 사용하여 네 마리의 성장한 고양이에서 뇌간 구조와 대뇌 피질의 신경생리적 측정이 시도되었다. 유리로 절연된 텅스텐 전극이 직진형 마이크로미터심에 부착되었다. 전극을 부착하기 위해서 25mm 가운데 5mm의 마이크로미터심이 사용되어 전극의 최대 이동 거리는 20mm로 한정되었다. 마이크로미터의 머리가 기계적으로 스텝 모터에 연결되어 마취/마비된 고양이 혹은 완전 각성 상태의 고양이의 상구(superior colliculus) 혹은 시각 피질 영역을 향하여 진행되었다. 전극을 부착한 마이크로미터는 미세이동장치(Narishige)에 기계적으로 부착되어 전극이 향하는 최종 위치가 조절되었다. 상구 세포의 측정을 위해 약 15mm의 진행이 두 차례에 걸쳐 이루어지는 동안 기계적 혹은 전기/전자적 문제를 포함한 어떠한 주의할 만한 점도 발생하지 않았다. 이후 약 70회에 걸쳐 시각 피질을 향한 진행이 약 1년에 이르는 기간 동안에 이루어졌는데 이들 가운데 두 차례에 걸쳐서 전극 구동 시스템의 문제로 인하여 실험이 중단되었다. 문제의 원인은 전극이 부착되는 마이크로미터 심은 노출된 뇌 가까이에 위치하는 바, 매 실험마다 뇌로 관개되는 식염수가 마이크로미터 심의 일부를 부식하여 모터 회전이 마이크로미터 심의 직/후진으로 전달되지 않았기 때문이었다. 부식의 제거와 이후의 적절한 유지에 의해

이러한 문제는 더 이상 발생하지 않았다. 이것으로 미세전극 이동을 위한 신뢰할 만한 스텝 모터 제어기가 저렴하게 제작되었다.

Horowitz, P. & Hill, W. (1980).
The art of electronics. Cambridge Univ. Press, New York.

참 고 문 헌

이춘길과 박정현(1991). 신경활동의 컴퓨터 분석을 위한 '윈도우 변별기'의 설계와 제작. 한국심리학회지: 생물 및 생리, 3, 150-155.

사 의

본 연구에 사용된 부품들을 선택하는데 도움을 주었으며 사용된 용어를 교정한 방영봉에 감사한다. 본 연구는 한국과학재단 91-01-0004의 지원으로 이루어졌다.

韓國心理學會誌 : 生物 및 生理

Korean Journal of Biological and Physiological Psychology

1992. Vol. 4, 7-13

A Design of Step Motor Controller for Positioning Microelectrodes

Sooyoung Chung & Choongkil Lee

Dept. of Psychology Seoul National University

A design of an inexpensive micropositioner using a step motor controller is described. The rotation of the motor is translated into linear movement by a micrometer head. The rotation is transmitted through a piano wire with a high torsional stiffness, conveniently absorbing the eccentricity and deviation angle of the two rotating axes, common mechanical problems which can be expensive to correct. Two circuits were developed to control the step motor and to display cumulative rotation, i.e. linear movement. The control circuit was designed around a hybrid IC chip for an inexpensive chopper drive. The resolution of the micropositioning system, thus developed, was $1.25\mu\text{m}$. More than 70 penetrations of tungsten-in-glass micro electrodes into deep and shallow brain structures, such as the superior colliculus or the visual cortex, were made in 4 cats, using the developed micropositioner. From these experiments the system was found to be reliable and satisfactory.