

# 지체장애인을 위한 근전도기반의 컴퓨터 인터페이스 개발

Development of an EMG-based computer interface for the physically handicapped

최창목, Changmok Choi\*, 한효녕, Hyonyoung Han\*, 하성도, Sungdo Ha\*\*, 김정, Jung Kim\*

\*한국과학기술원 기계항공시스템학부, \*\*한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구센터

**요약** 본 논문에서는 지체장애인들이 유효한 말초신경신호를 이용하여 컴퓨터를 사용할 수 있는 인터페이스를 개발하였다. 손목의 움직임에 의해 아래팔 4 부분으로부터 근전도 (electromyogram, EMG) 신호를 추출하였고, 다중 인식 신경망을 사용하여 사용자의 의도를 추출하였다. 이를 통하여 마우스 커서의 움직임을 제어하고, 마우스 버튼을 클릭하는 동작을 할 수 있으며, 시각 디스플레이 장치에 표시된 핸드폰 자판과 같은 유저 인터페이스를 통해 컴퓨터에 글자를 입력할 수 있게 하였다. 추가적으로 Fitts' law 를 사용하여 본 인터페이스의 사용성을 평가하였고, 이를 기존연구와 비교함으로써 본 인터페이스의 효용성을 검증하였다.

**핵심어:** *Peripheral neural signal, Electromyogram (EMG), Human-computer interface, Artificial neural network*

## 1. 서론

2005년도 보건복지부 자료에 의하면 지체장애인 발생률은 인구 천명당 22.23건으로서 모든 장애유형 중 가장 큰 규모이며, 한국에서의 지체장애인 수는 1,038,392명으로 추정되고 있다 [1]. 이들은 타인의 도움 없이 일상생활을 하는데 큰 어려움을 겪고 있으며, 현재 이들을 위하여 마우스/키보드 장치를 사용하지 않고 컴퓨터를 사용할 수 있는 인터페이스 기술이 활발히 연구되고 있다. 이러한 목적을 위하여 생체신호를 사용할 경우 사람의 근육이 수축하기 이전에 신호를 얻기 때문에 활성화된 생체신호가 근육을 수축하는 데까지 걸리는 시간지연을 방지함으로써 매우 즉각적인 사용자의 의도를 반영할 수 있다는 장점이 있다.

사용자의 의도를 추출하는 방법으로는 중추신경신호를 획득하는 방법 [2]과 말초신경신호를 획득하는 방법 [3, 4]이 있다. 중추신경신호 중 대표적인 신호는 뇌전도 (electroencephalogram, EEG)인데, 이 신호를 비침습적으로 얻을 경우 잡음의 영향이 지배적이기 때문에 순수한 신호를 획득하기 어렵고, 침습적으로 얻기 위해서는 그 방법이 매우 복잡하고 위험하다는 단점이 있다. 말초신경신호 중 대표적인 신호는 신경전도 (electroneurogram, ENG)와 근전도 (electromyogram, EMG)가 있다. 이 중 신경전도를 얻기 위해 전극을 이식하는 경우 체내에서 발생하는 신경조직의 손상이나 전극의 움직임 등으로 인하여 체내의 원하는 신경신호 추출 위치로부터 장기적으로 신호를 추출하는 데에는 어려움이 있다. 이에 비하여 근전도신호의 획득은 비교적 간단하며, 비 침습적으로 가능하기 때문에 현재로서는 근전도신호가 지체장애인을 위한 컴퓨터 인터페이스 대체 기술로써

가장 현실성 있다고 할 수 있다.

근전도 신호로부터 사용자의 의도를 파악하기 위한 다양한 패턴인식 방법이 제안되고 있으며, 과거에는 주로 단순한 on/off 제어 방법 [5]을 사용한 반면, 최근에는 주목할만한 multifunctional myoelectric control 방법이 많이 발표되었다. Ajiboye *et al.* 은 heuristic fuzzy system을 사용하여 건강한 사람의 4개의 근육으로부터 5가지의 패턴을 구분하였고, 팔목이 절단된 장애자의 3개의 근육으로부터 4가지의 패턴을 구분하였다 [6]. Englehart *et al.* 은 wavelet 해석을 통해 패턴을 분석하였으며, "majority vote" 알고리즘을 사용하여 패턴인식의 안정성을 향상시켰다 [7]. Jingdong *et al.* 은 autoregressive (AR) model과 wavelet transform을 사용하여 패턴을 분석하였으며, variable learning rate (VLR) 기반의 신경회로망을 사용하여 learning 속도를 향상시켰고, 이를 이용하여 의수로봇을 제어하였다 [8]. 그러나 이들은 대부분 의수 로봇 제어를 위한 연구였으며, 본 연구팀의 조사 범위 내에서는 근전도 기반의 컴퓨터 인터페이스에 관한 연구가 매우 드물었다. 손목의 움직임을 통해 이와 같은 컴퓨터 인터페이스를 개발한 사례 [9, 10]가 있긴 하지만 이들의 연구는 마우스의 움직임을 제어하는 방법론에 초점을 맞추었고, 이의 사용성을 정량적으로 평가하지 않은 연구결과였다.

본 논문에서는 지체장애인들이 컴퓨터를 사용할 수 있도록 근전도 신호로부터 사용자의 의도를 추출하고, 마우스, 키보드 장치를 사용하지 않고 컴퓨터를 사용할 수 있는 방법을 개발하였다. 본 컴퓨터 인터페이스의 효용성을 검증하기 위해 Fitts' law를 사용하여 본 인터페이스의 사용성을 평가하였다.

## 2. 방법론

손목 이하가 절단되었거나 마비된 지체장애인들(C7-C8)이 컴퓨터를 원활하게 사용하기 위해 사용자 손목의 움직임을 이용하여 마우스 커서를 상/하/좌/우 4방향으로 제어하는 방법과 마우스 왼쪽버튼을 클릭하는 방법을 택하였다. 이 방법은 손목의 움직임이 가리키는 방향과 마우스가 움직이는 방향이 정확히 일치하기 때문에 사용자가 마우스 커서의 위치 제어를 직관적으로 할 수 있다는 장점이 있다. 컴퓨터 사용을 원활히 하기 위해서는 마우스 커서의 움직임을 제어하는 것뿐만 아니라 글자를 입력할 수 있는 인터페이스가 필요하며, 이를 위해 유저 인터페이스를 만들어 정상인이 핸드폰 자판을 이용하여 글자를 입력하듯 손목의 움직임으로 마우스 커서를 움직이고, 인터페이스 자판을 클릭함으로써 글자를 입력할 수 있도록 하였다.

### 2.1 시스템 개요

그림 1은 근전도 기반의 컴퓨터 인터페이스를 활용하기 위해 필요한 신호를 획득하고, 처리하는 일련의 과정을 나타내고 있다. 근전도 신호의 특성상 잡음의 영향이 심하기 때문에 저역 통과 필터링 (low pass filtering)은 필수적인 작업이다. 근전도 센서로부터 얻어진 신호를 저역 통과 필터를 거쳐 잡음의 영향을 줄이고, 신경망회로를 거치게 된다. 신경망회로에서는 얻어진 근전도 신호로부터 사용자의 의도를 파악하여 사용자의 의도대로 마우스 커서가 움직일 수 있도록 한다.



그림 1 컴퓨터 인터페이스를 위한 데이터 처리 과정

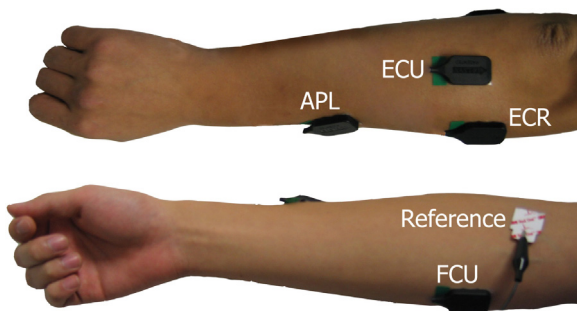


그림 2 근전도 신호를 획득하기 위한 표면전극 부착

### 2.2 사용근육 선정

손목의 움직임을 관장하는 근육은 아래팔 (forearm)에 위치하고 있다. 아래팔에 위치한 근육의 수는 약 20개지만 측진을 통해서 각 손목의 움직임 (radial deviation, ulnar deviation, wrist extension, wrist flexion)을 주도적으로 관장하고 표면전극을 통해 비교적 근육의 활동을 잘 관측할 수 있는 4개의 근육, flexor carpi ulnaris (FCU), extensor carpi radialis (ECR), extensor carpi ulnaris (ECU), abductor

pollicis longus (APL)을 선정하였고 [11], 이들의 근육신호를 획득하기 위해 그림 2와 같이 표면 전극을 부착하였다.

### 2.3 데이터 획득 및 처리

근전도 신호 획득을 위해 표면 전극 (Bagnoli-8, DelSys, Inc.)을 사용하였으며, 데이터 획득 보드 (PCI 6034e, National Instrument™)를 사용하여 데이터를 수집하였다. 각 채널에 사용된 증폭비는 1000배고, 신호는 1 kHz로 샘플링 하였다. 저역 통과 필터링을 위해 식 (1)과 같은 moving average 방법을 사용하였고, 이의 차단주파수는 윈도우 데이터 개수(N)에 의해  $w_c = w_s / (2N)$ 으로 정의된다. 여기서 윈도우 데이터 개수를 크게 하면 차단주파수가 낮아지게 되므로 저역 통과 필터의 효과가 큰 반면, 사용자의 의도가 시스템에 반영되는데 있어서 다소 긴 시간지연이 발생한다. 하지만 윈도우 데이터 개수를 작게 하면 사용자의 의도가 시스템에 빠르게 반영되지만, 차단주파수가 다소 커지게 되므로 낮은 저역 통과 필터 효과를 나타내게 된다. 사용자의 의도를 마우스커서의 움직임에 적용하는데 있어서 시간지연은 피할 수 없는 장애요인이지만, 약 300 ms 내에서는 사용자가 시간지연을 인식하지 못한다 [12]. 이 연구에서는 시행착오를 거쳐 윈도우 데이터 개수를 100개로 정하였으며, 이는 저역 통과 필터의 차단주파수가 5 Hz로써 충분히 효과적인 필터링 효과를 가져오는 동시에 사용자가 시간지연을 인식하지 못하며 자연스럽게 마우스 커서를 동작시킬 수 있는 조건을 충족시킨다 할 수 있다.

$$y[i] = \alpha \cdot \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x[i+j] \quad (1)$$

표 1 Backpropagation learning algorithm 적용을 위한 변수

Parameter	Number/Value
Input nodes	4
Output nodes	6
Hidden nodes at each layer	10
Learning rate	1.2
Momentum	0.8
Tolerance	0.00001

### 2.4 패턴 인식

사용자가 근전도를 이용하여 컴퓨터를 사용하기 위해서는 사용자의 의도를 마우스 커서의 움직임과 일치시켜야만 한다. 이를 위해 다층 인식 신경망을 사용하였으며, 훈련을 위한 학습방법은 backpropagation learning algorithm을 사용하였다. 신경회로망 구조 및 학습 알고리즘에 관한 변수는 표 1과 같다. 표 2는 신경망 회로 이용을 위한 target vector이며 6개의 각 패턴에 대하여 단 한 개의 말단뉴런만 활성화하도록 설계하였다. 추가적으로 신경망 회로의 말단뉴런에

maximum selector를 설계하여 가장 크게 활성화되어 있는 뉴런을 찾도록 하였으며, 가장 활성화되어 있는 뉴런과 사용자의 의도와 일치시킴으로써 사용자의 의도를 인식할 수 있도록 하였다 (그림 3).

표 2 신경망 회로 이용을 위한 target vector

Mouse movement	Desired network's response					
Stop	1	0	0	0	0	0
Left movement	0	1	0	0	0	0
Right movement	0	0	1	0	0	0
Up movement	0	0	0	1	0	0
Down movement	0	0	0	0	1	0
Click	0	0	0	0	0	1

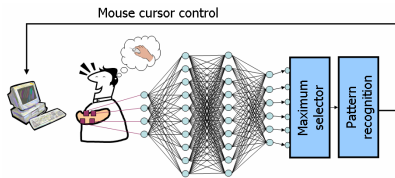


그림 3 컴퓨터 인터페이스를 위한 신경망회로의 구조

## 2.5 글자입력 인터페이스

추가적으로 근전도 신호를 이용하여 컴퓨터상에 글자를 입력할 수 있는 글자입력 인터페이스를 개발하였다. 이 인터페이스는 삼성전자 휴대폰의 '천지인'을 모방한 사용자 인터페이스이며 각 버튼들을 마우스 제어를 통하여 클릭함으로써 정상인이 핸드폰 자판을 이용하여 글자를 입력하는 것과 동일한 효과를 가지도록 하였다. 그림 4는 본 연구에서 제안하는 컴퓨터 인터페이스이며, 이 인터페이스 사용시에는 사용자의 편의성을 위하여 마우스 커서의 움직임을 각 버튼 위에서만 움직이도록 제한하였다.

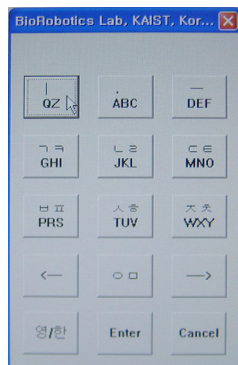


그림 4 글자입력을 위한 사용자 인터페이스

## 2.6 사용성 평가

본 논문에서 제시한 근전도 기반의 컴퓨터 인터페이스 방법의 사용성을 평가하고자 Fitts' law를 사용하였다. Fitts' law는 과제의 난이도에 따른 동작시간을 정량적으로 평가할 수 있는 지표로써, 컴퓨터상의 커서를 이동하고 클릭하는 일을 수행을 평가하는데 강력한 도구로 사용할 수 있다 [13]. 본 실험은 각 단계마다 사용자가 커서를 움직여서 표적을 클릭하면 그 단계의 임무를 성공하는 것으로 이루어진다. 이를 위해 그림 5와 같은 시험대를 만들었으며, 과제의 난이도는 커서와 표적간의 거리 (D), 표적의 넓이 (W), 두 가지 요소로 결정된다. 따라서 D값이 클수록, W값이 작을수록 과제의 난이도는 어려운 것으로 판단할 수 있다. Fitts는 과제의 난이도 (index of difficulty, ID)와 수행시간 (movement time, MT)이 선형적으로 비례한다고 하였다. Fitts' law를 사용하는데 있어서 그 목적에 따라 다양한 방법으로 ID를 정의할 수 있다. 본 연구에서는 컴퓨터상의 커서가 미리 지정된 두 위치 사이를 이동하고 클릭하는 일을 평가하고자 하였고, 이 목적을 가장 적절하게 평가할 수 있는 동시에 가장 널리 사용되는 식 (2)을 선정하여 사용하였다 [14, 15]. 또한 객관적인 평가를 위해 커서와 표적의 거리와 표적의 넓이의 값, 즉 각 단계의 난이도는 타 연구의 난이도와 동일하게 구성하였다 [16]. 식 (2)에서 1/b는 index of performance (IP), 또는 bandwidth라 불리며, 단위는 bits/sec로써 단위시간당 얼마나 많은 정보를 전송하느냐를 나타내는 지표를 나타낸다.

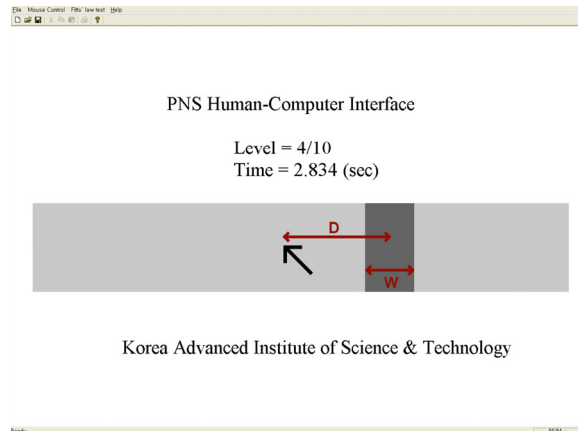


그림 5 Fitts' law 실험을 위한 시험대

$$MT = a + b \cdot ID, \quad \text{where } ID = \log_2 \left( \frac{D}{W} + 1 \right) \quad (2)$$

과제의 난이도는 총 9단계로 이루어져 있으며, 커서와 표적의 거리는 각 150, 300, 450 픽셀, 표적의 넓이는 각 30, 70, 110 픽셀로 구성되어 있다 [16]. 각 단계마다 커서의 위치는 무작위로 결정되기 때문에 사용자는 커서의 다음 단계 위치를 예측할 수 없으며, 표적의 위치 및 크기는 각 단계의 난이도에 따라서 커서의 좌/우 방향으로 적절하게 결정된다. 총 9단계의 난이도가 시행되기 앞서서 한 개의 dummy target을 클릭하도록 하고, 각 단계 사이의 수행시간을 측정하였다. 이의 사용성을 평가하기 위하여 일반적인 마우스 장치를 사용하여 똑같은 실험을 반복하였으며, 각 실험은 10번씩 반복하여 실험결과를 얻어내었다.

### 3. 결과

사용자 의도에 따른 손목의 움직임으로부터 발생하는 근전도 신호를 미리 선정한 근육 FCU, ECR, ECU, APL에서 각각 추출하였으며, 이의 각 근육의 시간에 따른 활성화도는 그림 6과 같다.

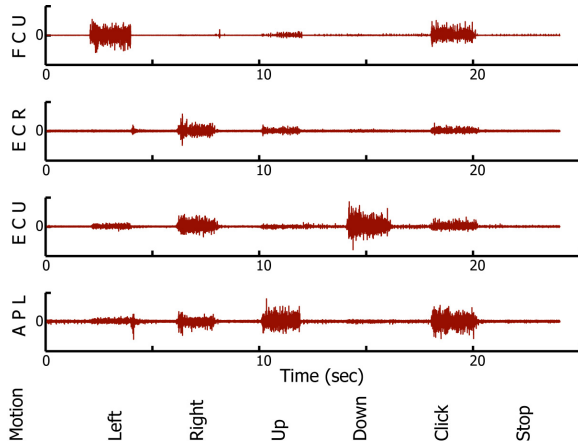
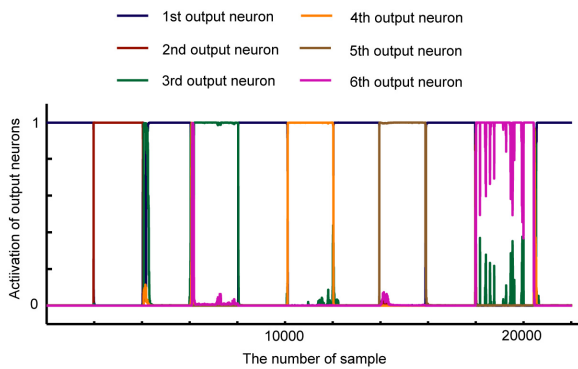
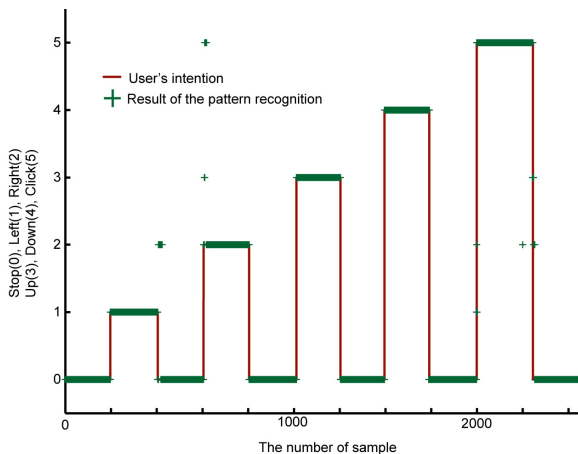


그림 6 사용자 의도에 따른 근육 활성화 테스트



(a)



(b)

그림 7 (a) 신경망회로에 의한 각 말단뉴런의 활성화도와 (b) 이에 따른 maximum selector의 패턴인식 결과

근전도 센서로부터 얻어진 신호에서 잡음을 제거하기 위해 저역 통과 필터를 적용하고, 다층인식 신경망을 사용하여

사용자의 의도를 인식하도록 하였다. 그림 7은 시간에 따라 사용자가 다른 의도를 나타내게 하여 다층인식 신경망이 어떻게 패턴을 인식하고 있는지를 나타낸 그래프이다. 그림 7(a)는 다층인식 신경망의 말단 6개의 뉴런의 활성화도를 측정 한 것인데, 표 2에서 의도된 설계대로 각 패턴에 따라 각 말 단 뉴런들이 적절히 활성화되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 그림 7(a)의 결과에서 얻어진 신호를 토대로 maximum selector를 거쳐 가장 활성화된 뉴런을 찾아 사용자의 의도를 적절히 인식하고 있음을 보여주고 있다. 여기서 사용자의 6가지 의도를 각각 0~5의 숫자로 분류하여 나타내었으며, 빨간색 실선은 사용자의 의도이며, 초록색 십자가 표 시는 신경망 회로를 통하여 분류된 패턴인식 결과이다. 표 3 은 그림 7에서 분류된 패턴이 얼마나 사용자의 의도대로 적 절히 분류되었는지 나타내는 성공도이며, 본 논문에서 제안 한 근전도 기반의 컴퓨터 인터페이스 방법은 6가지 모든 패 턴을 97%이상의 높은 성공률로 인식함을 확인 할 수 있다. 그림 7에서 패턴 인식이 실패되는 시점을 살펴보면 패턴이 변환될 때 주로 패턴인식이 실패한다는 것을 알 수 있다.

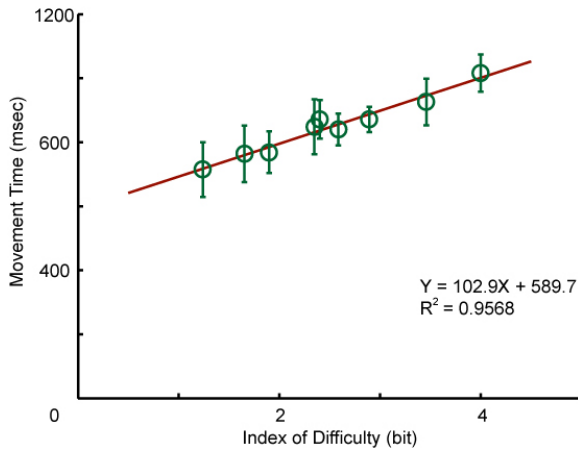
표 3 신경망회로에 의한 패턴인식 결과의 성공도

Pattern	Classification success rate (%)
Stop	97.45
Left movement	97.28
Right movement	98.47
Up movement	99.48
Down movement	99.69
Click	99.47

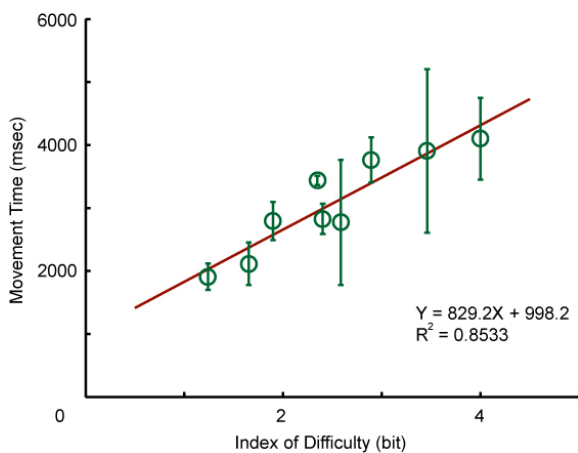
표 3은 Fitts' law를 사용하여 마우스를 사용하였을 때와 근전도 기반의 컴퓨터 인터페이스를 사용하였을 때의 사용성 을 평가한 결과이다. 이 측정된 값을 바탕으로 그림 8에 표 시한 결과, 두 경우 모두 측정된 ID값과 MT값이 선형적으로 잘 분포되어있음을 확인할 수 있다. 먼저 그림 8(a)는 일반적 인 마우스를 사용했을 때의 결과이며, IP는 9.718 bits/sec ( $R^2=0.9568$ )로 측정되었다. 그림 8(b)는 본 연구에서 제안한 근전도 기반의 컴퓨터 인터페이스를 사용했을 때의 결과이며, IP는 1.256 bits/sec ( $R^2=0.8533$ )로 측정되었다. 기존 연구에 따르면, Brainfingers™ BCI system (Brain Actuated Technologies)을 사용하여 동일한 실험을 하였을 때, IP는 0.386 bits/sec ( $R^2=0.6814$ )로 보고된 바 있다 [16]. 따라서 본 연구에서 제안한 근전도 기반의 컴퓨터 인터페이스의 성 능은 실험결과와 IP 수치만 고려한다면, 마우스의 성능에 비 하여 크게 저하되지만 마우스의 대체접근법으로써는 상용 장 비 성능보다 우수함을 확인하였다.

표 4 근전도 기반의 컴퓨터 인터페이스와 마우스의 사용성 평가를 위한 실험 결과

D	W	ID (bits)	Mouse	EMG-HCI
			MT (msec)	MT (msec)
150	110	1.2410	714.8	1909.5
300	110	1.8981	768.8	2792.0
450	110	2.3479	848.3	3437.9
150	70	1.6521	763.5	2115.9
300	70	2.4021	871.3	2826.5
450	70	2.8931	871.3	3762.6
150	30	2.5850	839.7	2771.6
300	30	3.4594	926.1	3904.5
450	30	4.0000	1016.3	4102.0



(a)



(b)

그림 8 커서동작 수행시간과 난이도의 관계 그래프:  
(a) 마우스, (b) EMG interface

본 연구에서 제안한 근전도 기반의 컴퓨터 인터페이스의 실용성을 검증하기 위해 본 인터페이스를 이용하여 상용 인

터넷 검색 서비스를 이용하여 정보를 검색하는 작업을 수행하였다 (그림 9). 그 결과 사용자가 원하는 정보를 얻기 위해 손목을 움직여서 마우스커서를 이동시켜 클릭하는 작업과 더불어 인터넷 검색 서비스 검색창에 검색어를 입력하고 정보를 찾는 작업을 무리 없이 수행할 수 있음을 확인하였다.



그림 9 손목의 움직임을 이용한 컴퓨터 사용 예제

#### 4. 결론

본 논문에서는 지체장애인을 위해 손목의 움직임으로부터 발생하는 근전도 신호를 추출하여 마우스와 키보드를 대체한 접근방법으로 컴퓨터를 사용할 수 있는 컴퓨터 인터페이스를 개발하였다. 상기의 인터페이스를 이용하여 실험해 본 결과 컴퓨터상의 마우스 커서를 제어하기 위한 6가지 패턴을 4가지의 근육을 사용하여 각각 97% 이상의 높은 성공률로 분류하고 있음을 확인하였다. 또한 본 인터페이스의 사용성을 평가하기 위해 Fitts' law를 사용하여 수행한 결과 측정된 IP값만을 고려하였을 때, 비록 일반적인 마우스 장치의 성능에는 뒤처지지만, 기존의 인터페이스 장치의 성능에 비해 좋은 성과를 나타냄을 확인하였다. 하지만 본 인터페이스를 사용할 때, 마우스의 커서가 상/하/좌/우 4방향으로 고정된 있다는 것과 마우스 커서의 이동 속도가 일정하다는 단점이 있다. 또한 각 패턴이 바뀔 때마다 다소 낮은 성공률이 발생하는 점등은 앞으로 해결해야 하는 과제이며, 실제 지체장애인을 대상으로 본 인터페이스의 실용성을 검증해야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 논문은 정보통신부 IT성장동력기술개발사업의 일환인 한국과학기술연구원의 과제 '신체 장애인을 위한 착용형 단말 인터페이스 기술 개발'과 한국과학기술원 2단계 BK21 사업의 지원에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

- [1] 변용찬, 김성희, 윤상용, 최미영, 계훈방, 권선진, and 이선우, "2005 년 장애인실태조사," 한국보건사회연구원 2006.
- [2] J. Wessberg, C. R. Stambaugh, J. D. Kralik, P. D. Beck, M. Laubach, J. K. Chapin, J. Kim, J. Biggs,

- M. A. Srinivasan, and M. A. L. Nicoletis, "Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates," *Nature*, vol. 408, pp. 361-365, 2000.
- [3] 정혁, 김종석, 손욱호, and 김영훈, "사지마비 장애인을 위한 HCI 기술 및 그 응용," in *HCI 학술대회*, 2006, pp. 40-45.
- [4] E. Cavallaro, S. Micera, P. Dario, W. Jensen, and T. Sinkjaer, "On the intersubject generalization ability in extracting kinematic information from afferent nervous signals," *Ieee Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 50, pp. 1063-1073, 2003.
- [5] D. S. Childress, "An approach to powered grasp," in *4th International Symposium External Control Human Extremities: Advances in External Control of Human Extremities*. Dubrovnik, Yugoslavia, 1972.
- [6] A. B. Ajiboye and R. F. Weir, "A heuristic fuzzy logic approach to EMG pattern recognition for multifunctional prosthesis control," *Ieee Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 13, pp. 280-291, 2005.
- [7] K. Englehart, B. Hudgins, and P. A. Parker, "A wavelet-based continuous classification scheme for multifunction myoelectric control," *Ieee Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 48, pp. 302-311, 2001.
- [8] Z. Jingdong, X. Zongwu, J. Li, C. Hegao, L. Hong, and G. Hirzinger, "A Five-fingered Underactuated Prosthetic Hand Control Scheme," presented at *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 2006.
- [9] O. Fukuda, T. Tsuji, and M. Kaneko, "An EMG controlled pointing device using a neural network," in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 4, 1999, pp. 63-68.
- [10] H. Jeong and J. H. Choi, "An EMG-controlled Graphic Interface Considering Wearability," in *Human-Computer Interaction INTERACT' 03*, 2003, pp. 958-961.
- [11] A. O. Perotto, *anatomical guide for the electromyographer*, 3rd ed. IL: Charles C. Thomas, 2005.
- [12] K. Englehart and B. Hudgins, "A robust, real-time control scheme for multifunction myoelectric control," *Ieee Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 50, pp. 848-854, 2003.
- [13] I. S. MacKenzie, "Movement time prediction in human-computer interfaces," in *Proceedings of Graphics Interface*, 1992, pp. 140-150.
- [14] J. Accot and S. Zhai, "Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks," in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. Atlanta, Georgia, U.S., 1997, pp. 295-302.
- [15] I. S. MacKenzie, "Fitts' law as a performance model in human-computer interaction," vol. Doctoral dissertation. Toronto, Ontario, Canada: University of Toronto, 1991.
- [16] A. Pino, E. Kalogeros, E. Salemis, and G. Kouroupetroglou, "Brain Computer Interface Cursor Measures for Motion-impaired and Able-bodied Users," in *Proceedings of HCI International 2003: The 10th International conference on Human-Computer Interaction*. Crete, Greece, 2003, pp. 1462-1466.