표면 근전도 신호를 이용한 실시간 상지부 동작 예측을 통한 인간-기계 상호작용

Human-Machine Interaction based on a Real-time Upper Limb Motion Prediction using Surface Electromyography

권순철, Suncheol Kwon*, 김정, Jung Kim***

요약 본 논문은 표면 근전도 신호(sEMG)를 이용해 상지부의 동작을 실시간으로 예측하고 이를 기반으로 한 인간-기계 상호작용(Human-machine interaction)에 관한 것이다. 사용자의 상지부에 위치한 5 곳의 근육에서 수집하는 근전도 신호와 인공신경회로망(arfiticial neural network) 알고리즘을 이용하여 상지부 동작을 실시간으로 예측하였고, 기계팔(manipulator)이 예측된 동작을 좇아 움직이도록 제어되었다. 이때, 사용자가 기계팔의 끝단(end-effector)과 접촉해 있는 상태에서 상지부 동작은 2 차원 평면 위에서 이루어지도록 제한된다. 본 논문이 제안하는 동작 예측 방법과 인체 각도계(goniometer)를 이용한 경우의 상호 작용 실험을 통해, 동작 예측을 통한 인간-기계 상호 작용의 성능을 알아보았다. 실험 결과로부터, 제안된 실시간 동작 예측 방법을 이용하여 사용자와 기계의 상호 작용 시스템을 구현할 수 있음을 알 수 있다.

Abstract This paper presents a human-machine interaction based on a real-time upper limb motion prediction method using surface electromyography (sEMG). The motions were predicted using an artificial neural network algorithm and sEMG signals which are acquired from five muscles, and then a manipulator was controlled to follow after the predicted motions. Upper limb motions were restricted to 2D vertical plane with the contact condition between a user and an end-effector of manipulator. In order to demonstrate the feasibility of the proposed method, experiments using developed method and using a goniometer were performed. The results showed that the proposed real-time motion prediction method can be implemented a human-machine interaction system.

핵심어: Surface electromyography, Motion prediction, Human-machine interaction

본 논문은 2008 년 한국과학기술연구원 노인 및 장애인의 기능재활을 위한 인체-기기 연계기술 개발 과제의 지원에 의하여 연구되었음.

*권순철 : 한국과학기술원 기계공학과 e-mail: norierup@kaist.ac.kr

***김정 : 한국과학기술원 기계공학과 교수 e-mail: jungkim@kaist.ac.kr

1. 서론

로봇 등의 기계 인터페이스는 앞으로 점점 더 인간과 가까운 환경에서 작동하게 될 것으로 기대되고 있다 [1]. 인간과 가까운 환경 속에서 물리적으로 접촉해야 하는 기계는, 인간의 생활에 위험하지 않아야 하고, 인간과 마찬가지로 다른 인간의 대화나 동작, 눈빛 등을 인식하고 그 의도를 파악하면서 상호작용(interaction) 해야 한다 [2]. 이를 위해 인간의 음성인식이나 동작인식에 관한 연구가 진행되어 왔고, 특히 동작 인식을 위해서는 힘센서, 비전센서 등이 이용되고 있다. 그러나 이런 센서들은 인간이 움직이고 나서야 그 움직임을 인식할 수 있기 때문에, 기계 인터페이스의 반응 시간이 지연되는 문제가 발생할 수 있다.

이러한 시간 지연을 줄이기 위해, 생체 신호를 사용하는 연구가 진행되고 있다. 생체 신호는 움직임 이전에 발생하기 시작하므로, 이런 특성을 기계 인터페이스의 제어에 이용한다면 인터페이스의 반응 시간을 줄일 수 있고, 이를 통해 인간의 동작과 동시에 반응할 수 있어 이른바 밀착된 상호작용(seamless interaction)이 가능할 수 있다 [3, 4]. 생체 신호들 중에서 널리 쓰이고 있는 것은 표면 근전도 신호(surface electromyography, sEMG)이다. 표면 근전도 신호는 비침습적으로 간편하게 수집할 수 있기 때문에 다수의 연구에 사용되어 왔으며 [5], 근육의 수축보다 30~130ms 앞서 신호가 발생하기 시작하는 특성이 있다.

본 논문은 이러한 밀착된 인간-기계 상호작용을 위해 표면 근전도 신호를 이용한 실시간 동작 예측 방법을 제안한다. 사람의 손으로 기계팔(manipulator)의 끝단을 잡고 있는 상태에서의 상호작용을 연구 대상으로 하였으며, 이를 위해 상지부(팔)에 위치한 5 곳의 근육에서 수집한 표면 근전도 신호와 인공 신경망 (artificial neural network) 알고리즘을 이용하여 동작을 예측하였고, 이 정보를 기계팔의 제어에 이용하여 상호 작용이 이루어 지도록 하였다. 표면 근전도를 이용한 동작 예측이 상호 작용에 실제로 적용할 수 있는 지를 평가하기 위해, 인체 각도계 (goniometer)를 이용한 상호 작용과 비교 실험을 진행하였다.

2. 시스템 구성

동작예측 방법은 신경회로망 학습과 실시간 동작예측 과정으로 구성된다. (그림 1) 상지부를 움직이는 동안, 관련 근육의 표면 근전도 신호를 수집하고, 이때 인체 각도계를 사용해 상지부 동작의 참조 데이터를 수집하여 신경 회로망에 입력, 학습시키면 표면 근전도-동작간의 관계 모델을 만들 수 있다. 실시간으로 수집되는 근전도 신호를 관계 모델에 입력시켜 동작을 예측하면, 기계팔이 예측된 동작을 좇아 움직이도록 제어하였다.

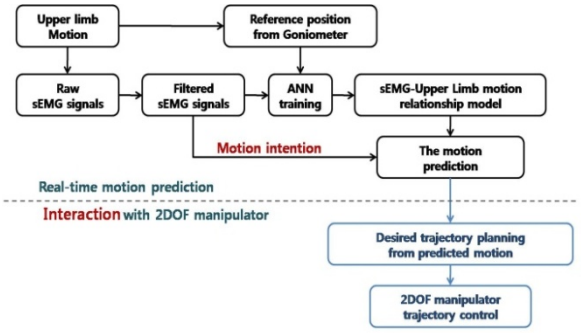


그림 1 Real-time motion prediction process

상지부는 2 차원 수직 평면(sagittal plane)에서 굽힘-폄 동작을 하도록 제한하였다. 상지부의 굽힘-폄 움직임에 관련된 근육은 이두근(Biceps Brachii), 삼두근(Triceps Brachii), 상완요골근(Brachioradialis), 그리고 삼각근 전후근 (Anterior and Posterior Deltoid)으로, 이 5 곳의 근육 표면에 근전도 전극(DE-2.1, Delsys)을 부착하였다. (그림 2) 수집되는 근전도 신호는 데이터 수집 보드(PCI-6034e, National Instruments)를 통해 1KHz 샘플링하였고, 근전도 신호의 특징 추출과 저역 통과 필터링을 위하여 이동창(moving window) 알고리즘을 통해 200ms 크기 RMS 값을 계산하였다.

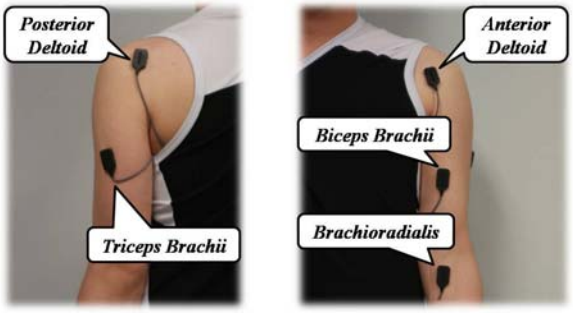
표면 근전도 신호와 상지부 동작 간의 관계를 모델링하기 위해 사용한 인공 신경회로망 알고리즘은, 복잡한 인체 근골격 구조로부터 기구학 동역학적 계산을 풀어내지 않아도 두 데이터 사이의 관계 모델을 만들 수 있다는 장점이 있다. 신경망은 전방향 모델로, 1 개의 입력층, 25 개의 은닉노드를 가지는 1 개의 은닉층과 1 개의 출력층으로 이루어져 있다. 인체각도계에서 측정되는 참조값은 어깨와 팔꿈치의 각도이고, 신경망의 출력층도 이에 대응하는 2 개의 노드를 가진다.

신경망을 통해 예측되는 어깨와 팔꿈치 각도로부터 기계팔과 접촉하고 있는 손의 위치 점 P 라고 한다면, 식(1), (2)와 같이 P 의 위치를 계산할 수 있다.

$$P_x = l_{shoulder}\cos\theta_{shoulder} + l_{elbow}\cos(\theta_{shoulder} - \theta_{elbow}) \quad (1)$$

$$P_y = l_{shoulder}\sin\theta_{shoulder} + l_{elbow}\sin(\theta_{shoulder} - \theta_{elbow}) \quad (2)$$

이 손의 위치를 기계팔 끝단이 움직여야 할 목표 위치로 하여, 역기구학을 통해 기계팔의 궤적을 제어하였다. 시스템 구성에 사용된 기계팔은 2 자유도를 가지므로, 목표 궤적을 계산할 수 있다.



(a) Posterior side (b) Anterior side

그림 2 Surface electrode sites

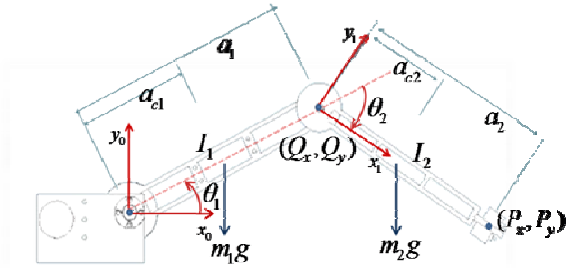


그림 3 2DOF manipulator coordinates

그림 3 과 같이 기계팔이 설계, 제작되었고, 접촉점 P 에 대한 기계팔의 목표궤적은 식 (3), (4)와 같다. 이때 a_n 은 n 번째 링크의 길이를, θ_n 은 n 번째 링크의 각도를 나타낸다.

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{P_x^2 + P_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}\right) \tag{3}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{P_x a_2 \sin\theta_2 + P_y(a_1 - a_2\cos\theta_2)}{P_x(a_1 - a_2\cos\theta_2) - P_y a_2 \sin\theta_2}\right) \tag{4}$$

목표 궤적이 계산되면 모션보드(PCI-7354, National Instruments)를 이용한 PD 제어로 기계팔은 피실험자의 손을 좇아 움직이게 된다.

3. 실험 결과 및 고찰

실험은 기계팔 끝단을 잡은 상태에서 이루어 졌다. 본 논문에서 제안하는 표면 근전도로부터 손의 위치를 예측하는 방법과 인체각도계에서 측정된 각도로부터 손의 위치를 계산하는 방법에 대하여, 동작 예측 모델 생성을 위한 데이터 수집 및 신경망 훈련 파트와 상호작용 테스트 파트로 이루어진 실험을 수행하였다. 신경회로망 훈련 용 데이터 수집은 피실험자가 170 초 동안 정해진 2 자유도 동작을 따라 하는 것으로

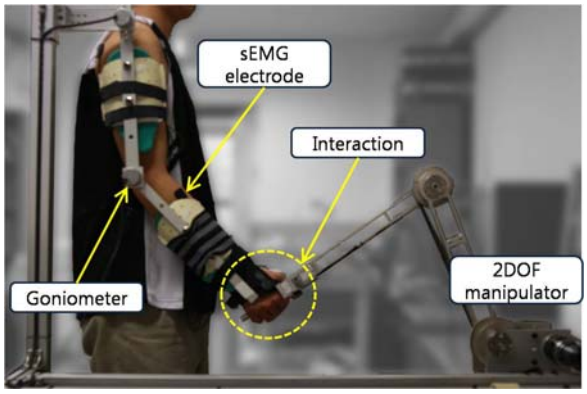


그림 4 Overall experimental setup

이루어졌고, 신경망 훈련을 거친 후 다시 60 초 동안 실시간 상호작용 실험을 수행하였다. 상호작용 실험 태스크는 30 초 간 정해진 동작을 따라한 후 30 초간 피실험자가 자유롭게 상지부를 움직이는 것을 5 회 반복하는 것으로 이루어졌다.

실험에서는 기계팔의 끝단 위치와 손의 위치 사이의 제곱평균오차(root-mean-squared error, RMSE)와 상관관계(correlation, CORR)을 통해 동작 예측 방법의 성능을 분석해 보았다. 다음에 도시되는 표 1 은 실험 결과로부터 계산된 두가지 방법의 성능을 보여준다.

표 1 Experiemental results

	RMSE	CORR
인체각도계	0.0053±0.0006	0.9982±0.0003
근전도 동작 예측	0.1037±0.0268	0.6470±0.0360

RMSE 와 CORR 의 크기로부터, 인체 각도계로부터 정확히 측정된 동작 정보로 제어되는 기계팔의 경우가 표면 근전도 신호로부터 예측되는 동작 정보를 이용했을 때에 비해 우수한 성능을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이 결과는, 수집된 표면 근전도 신호의 잡음 때문에 정확한 동작 예측이 어려웠던 반면 인체 각도계는 잡음이 거의 없는 깨끗한 동작 인식이 가능했기 때문으로 해석된다. 표면 근전도를 통한 동작예측의 경우 실험 데이터(그림 5)를 살펴보면, 근전도 신호의 잡음이 예측된 동작 데이터에 반영되어 예측 데이터 역시도 심한 잡음이 있음을 알 수 있다. 그러나 관련 연구와 비교했을 때 동작을 비교적 적절히 예측하고 있음을 알 수 있었으며 [6], 이 결과는 제안된 방법이 인간-기계 상호작용에 적용될 수 있음을 말해준다.

위치 추종에 관한 성능 분석 이외에도, 표면 근전도 신호 이용 시 예상되는 장점인 기계팔 이 동작할 때의

시간 지연 감소 효과를 살펴보았다. 아래에 도시된 표 2를 보면, 인체 각도계를 사용했을 때에는 피실험자의

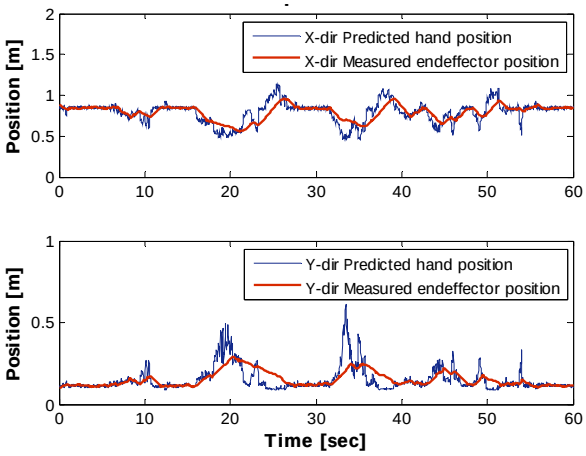


그림 5 Experimental results using sEMG signals

팔을 움직이고 80ms 후에 기계팔이 움직이기 시작했으며, 표면 근전도 신호를 이용했을 때에는 실제로 팔을 움직이기 약 32ms 이전부터 기계팔이 움직이기 시작하였다. 이 결과는, 본 실험 시스템에 인위적인 30ms 가량의 시간 지연을 더해주면, 사람이 실제로 팔을 움직이는 것과 동시에 기계팔이 움직이기 시작할 수 있다는 것을 의미한다. 이로부터, 표면 근전도 신호로부터 제안된 방법으로 동작을 예측했을 때 시간지연 현상을 줄이고 밀착된 상호작용을 이루어 낼 수 있음을 알 수 있다.

표 2 Time delay during experiments

	지연 시간
인체각도계	80±0ms
근전도 동작 예측	-32±17.9ms

그러나 앞서 언급한 것처럼 표면 근전도를 통해 예측되는 동작의 잡음을 제거하기 위한 연구가 앞으로 필요하며, 이는 표면 근전도 신호를 최대한 잡음이 적은 상태로 수집할 수 있는 계측 기술의 발전과도 연관이 있다. 또한 기계팔과 사람의 접촉으로 인해 생길 수 있는 문제점이나 예측 오차의 흡수 능력에 대한 연구가 미비하여, 이러한 연구들을 통해 개선된 성능을 가지는 밀착된 상호작용이 가능할 것으로 생각된다.

4. 결론

본 논문에서는 인간-기계 상호작용을 위해 표면 근전도 신호를 이용한 실시간 동작 예측 방법이 개발되었다. 표면 근전도 신호를 사용하여 실시간으로 예측되는 동작 정보를 이용하는 상호작용 실험을 통해, 사용자와 기계간의 밀착된 상호 작용 시스템을 구현할 수 있음을 확인하였다.

향후에는 표면 근전도로부터의 동작 예측 방법을 상호작용에 적용할 때의 성능 향상에 관한 연구와 사람과 기계팔이 접촉해 있지 않은 상태에서의 상호작용에 관한 연구를 진행할 것이다. 본 연구 결과는 인간과 상호작용하는 협업 기계이나 휴머노이드 로봇 등의 자연스럽고 직관적인 인터페이스 개발에 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] A. De Santis, B. Siciliano, A. De Luca, and A. Bicchi, "An atlas of physical human-robot interaction," Mechanism and Machine Theory, vol. 43, pp. 253-270, 2008.

[2] T. Sato, Y. Nishida, J. Ichikawa, Y. Hatamura, and H. Mizoguchi, "Active understanding of human intention by a robot through monitoring of human behavior," in Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1994, pp. 405-414

[3] J. Rosen, M. Brand, M. B. Fuchs, and M. Arcan, "A myosignal-based powered exoskeleton system," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 31, pp. 210-222, 2001.

[4] E. E. Cavallaro, J. Rosen, J. C. Perry, and S. Burns, "Real-Time Myoprocessors for a Neural Controlled Powered Exoskeleton Arm," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 53, pp. 2387-2396, 2006.

[5] B. Dellon and Y. Matsuoka, "Prosthetics, exo-skeletons, and rehabilitation [Grand Challenges of Robotics]," IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 14, pp. 30-34, 2007.

[6] L. Dipietro, A. Sabatini, and P. Dario, "Artificial neural network model of the mapping between electromyographic activation and trajectory patterns in free-arm movements," Medical and Biological Engineering and Computing, vol. 41, pp. 124-132, 2003.