

## 동작관찰 시 뇌졸중 환자의 뮤리듬 변화

윤태원 · 이문규

광주 씨티재활병원 재활센터

### The Change of Mu Rhythm during Action Observation in People with Stroke

Tae-Won Yun, PT, MSc, Moon-Kyu Lee, PT, PhD

*Department of Rehab Center, Gwangju City Rehabilitation Hospital*

#### <Abstract>

**Purpose** : The aims of this study was to identify the activation of the mirror neuron system during action observation in people with stroke and the difference between left hemisphere and right hemisphere and to provide possibility of the use of action observation as a clinical method for improving motor function after stroke.

**Methods** : Seventeen participants were asked to observe 3 different stimulation conditions for 80 seconds. A 30 second rest period was given between stimulations. Electroencephalogram(EEG) signals from electrodes on the participant's scalp were recorded during action observation. The activation of the mirror neuron system(MNS) between the picture observation condition and action observation condition was compared with a paired t-test. An independent t-test was used to compare difference between C3 and C4 on the activation of the mirror neuron system in the action observation condition.

**Results** : Result of paired t-test showed a significantly decreased log ratio in the activation of the mirror neuron system in the action observation condition compared to the picture observation condition. Result of the independent t-test indicated no significant differences in the activation of the mirror neuron system in the right and left hemisphere.

**Conclusion** : The mirror neuron system showed greater activation in the action observation condition than in the picture observation condition and activation in the both hemisphere during action observation. We conclude that these findings suggest that this may possibly be an efficient clinical intervention method for improving motor function.

**Key Words** : Action observation, Mirror neuron system, Mu rhythm, Stroke

## I. 서 론

동작관찰은 일반적으로 인간이 운동기술을 학습하기 위해 흔히 사용하는 방법이다(Blandin 등, 1999). 인간은 다른 사람이 수행하는 동작을 관찰함으로써 움직임을 이해하며 운동 수행능력을 향상시킨다(박상범과 김미현, 2005). 이렇게 동작을 관찰하여 새로운 기술을 습득하는 것을 모방학습이라 하며 이를 통해 인간은 학습한다(Rizzolatti과 Craighero, 2004). 또 동작관찰을 통해 주어진 환경 속에서 다른 사람의 동작과 의도를 이해하며, 자신의 행동에 대한 결과를 예측할 수 있다(Zentgraf 등, 2011).

이러한 동작관찰에 의한 학습을 설명하는데 제안되고 있는 신경학적 기전이 바로 거울신경세포 시스템(mirror neuron system; MNS)이다(Petrossini 등, 2003). 이 세포는 원숭이의 운동앞겉질인 F5 영역에서 처음 발견되었다. 이 세포들은 원숭이가 특정 동작을 직접 수행할 때나 유사한 동작을 하는 연구자나 다른 원숭이의 동작을 관찰할 때 모두 발화하는 특징이 있다(Rizzolatti 등, 1996). 관찰한 동작이 관찰자가 그 동작을 수행할 때 관여하는 운동 투사영역에 거울에서 비친 것처럼 투사되기에 이를 거울신경세포(mirror neuron; MN)라고 명명하였다(Buccino 등, 2006).

MNS가 인간에서도 존재한다는 근거들은 EEG (Muthukumaraswamy 등, 2004), fMRI(Buccino 등, 2004b), MEG(Cheng 등, 2006), PET(Grafton 등, 1996), TMS(Maeda 등, 2002) 등과 같은 장비를 사용한 연구들을 통해 입증되었다(Fabbri-Destro과 Rizzolatti, 2008; Schulte-Ruther 등, 2007). 인간에서 MNS의 위치를 규명한 연구들에 따르면, 인간의 MNS는 입쪽아래마루소엽 부분(rostral part of the inferior parietal lobule), 중심앞이랑의 아래쪽 부분(lower part of the precentral gyrus)에 존재한다(Rizzolatti과 Craighero, 2004).

인간의 MNS는 물체와 관련된 동작을 관찰하고

(Grafton 등, 1996; Muthukumaraswamy 등, 2004), 관찰한 동작을 이해하고(Rizzolatti 등, 2009), 동작의 의도를 파악하고(Iacoboni 등, 2005), 동작과 관련된 소리에 반응(Tettamanti 등, 2005)한다는 점에서 원숭이 MN의 특성과 유사하다. 추가적으로, 인간의 MNS는 흉내내기 동작에 반응하는 것으로 알려져 있으나(Buccino 등, 2001), 원숭이의 MN는 손가락 집기와 같은 물체기반 동작(object-directed action)을 관찰하는 동안 발화하는 반면, 물체없이 흉내내기만 하는 동작을 관찰하는 동안에는 발화하지 않는다고 하였다(Gallese 등, 1996).

인간의 MNS에 대한 신경생리학적 근거는 뇌전도(electroencephalogram; EEG)를 사용한 연구에서 처음 제시되었으며(Bernier 등, 2007), 이후 연구들에서는 감각운동겉질에서 발생하는 뮤리듬(Mu rhythm)을 통해 MNS 활성화를 알아보았다(Bernier 등, 2007; Perry과 Bentin, 2009).

뮤리듬은 감각운동겉질 위의 두피에 전극을 부착하여 전기적 신호를 기록한 8-13Hz 사이의 파형으로(Bernier 등, 2007), 대상자가 움직이거나 타인의 움직임을 관찰할 때 감소하는 특징이 있다(Muthukumaraswamy 등, 2004). 뮤리듬이 감소되는 현상을 뮤억제(Mu suppression)라고 한다.

거울신경세포가 존재하는 곳으로 추정되는 배쪽 운동앞겉질과 뮤리듬이 발생하는 일차감각운동겉질은 서로 연결되어 있다는 해부학적 근거와 생리학적 근거가 제시되고 있어(Nishitani과 Hari, 2000), 일차감각운동겉질에서 수집한 뮤리듬을 MNS의 활성화 지표로 사용할 수 있다는 근거를 뒷받침하고 있다.

최근 Buccino 등(2004a)의 연구에서는 일반인이 기타치는 동작을 관찰하는 동안 MNS가 활성화되었으며, Maeda 등(2002)의 연구에서도 동작관찰동안 MNS가 활성화되었으며 관찰한 동작에서 사용한 부위에 상응하는 겉질척수로의 흥분성이 증가된 것으로 나타났다. 이 결과들은 동작관찰이 MNS을 활성화

화시키고 실제 움직임 시 관여하는 근육의 흥분성을 변화시킨 것으로 해석할 수 있다.

또한 이 근거들은 동작관찰훈련이 MNS의 활성을 기반으로 뇌졸중 환자의 운동 기능에 변화를 줄 수 있는 가능성을 제시하는 것이며(Buccino 등, 2006), 뇌졸중 환자를 위한 유용한 재활 방법으로 이용될 수 있음을 제안한다(Franceschini 등, 2010).

지금까지 무리듬을 통해 뇌졸중 환자를 대상으로 하여 동작관찰 시 MNS 활성화를 알아본 연구는 없었다. 본 연구의 목적은 뇌졸중 환자들도 일반인들 처럼 동작관찰을 할 때 MNS가 활성화되는가를 무리듬 억제제를 통해 알아보는 것이다. 또한 동작관찰 시 양쪽 대뇌반구의 MNS 활성화 차이도 알아볼 것이다. 이 연구결과를 통해 MNS에 기반을 둔 동작관찰훈련을 뇌졸중 재활에서 대안적 중재로 사용할 수 있는 이론적 기초를 마련하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 연구대상자

본 연구는 광주광역시 소재 C 병원에 내원한 만성 뇌졸중 환자들을 대상으로 하였다. 대상자는 뇌졸중으로 진단 받은 지 6개월 이상이 경과한 자, 상지에 정형외과적 질환이 없는 자, 두개골 적출 수술을 받지 않은 자, 자발적으로 실험에 동의한 자로 하였다. 심각한 우울증이 있는 자와 MMSE-K(Mini-Mental Status Examination-Korean) 점수가 23점 이하로 인지장애가 있는 자는 대상자에서 제외하였다.

### 2. 연구도구

#### 1) 동작 관찰 동영상

대상자들은 각 조건의 화면을 조용한 공간에서 25인치 화면을 통해 관찰하였다. 기초선 조건은 흰색 바탕이었으며, 사진관찰조건은 물통과 3개의 컵이 나오는 사진이었다. 동작관찰조건은 물통으로 3개의 컵에 물을 따르는 장면이 나오는 동영상이었다. 동영상 관찰 조건에 따른 순서 효과를 배제하기 위해 모든 대상자들은 순서를 무작위로 하여 동영

상을 관찰하였다.

#### 2) 뇌파 측정장비

동작관찰 시 뇌파는 QEEG-8(LXE3208, LAXTHA Inc., 한국) 장비를 사용하여 측정하였다. 뇌파 자료는 두피에 부착한 8개의 전극을 통해 수집하였다. 각 대상자들의 뇌파는 256 Hz 샘플링 주파수, 0.5-50 Hz의 통과필터, 12-bit AD변환을 통해 컴퓨터에 저장되었다.

뇌파 측정을 위한 전극은 국제 10-20 전극 배치법(International 10-20 method of electrode placement)에 따라 부착하였다(Fig 1). 먼저 대상자들의 두피를 알코올 솜으로 닦아냈다. 닦은 부위의 알코올이 충분히 날아가도록 한 후 Ag/AgCl 전극용 겔을 이용하여 F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2에 자료 수집용 전극을 부착하였고 접지전극은 양쪽 귀 뒤쪽에 부착하였다.

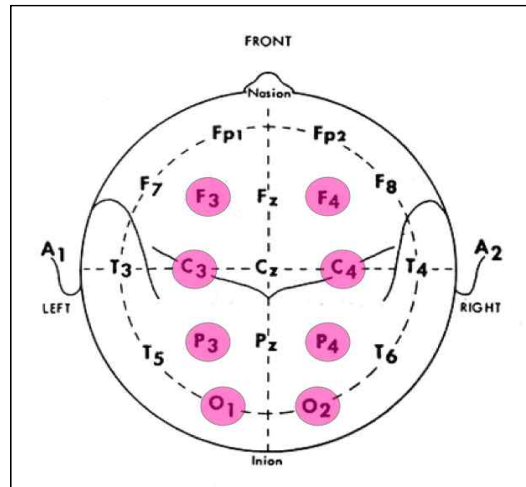


Figure 1. International 10-20 method of electrode placement for acquiring the EEG data

각 조건별로 80초 동안 뇌파 신호를 수집하였으며 시작 부분과 끝 부분의 10초를 제거하고 각 조건당 60초의 뇌파 자료를 만들었다. 컴퓨터에 전송된 자료는 동일 회사의 소프트웨어인 TeleScan을 이용하여 분석하였다.

무억제는 하얀 배경을 관찰하는 조건의 무파위에

대한 각 실험 조건의 절대 뮤파워 비(absolute mu power ratio)로 계산하여 일차적으로 변환하였다. 그러나 절대 뮤파워 비는 값들이 적고 정규적(normal)이지 않기 때문에 이를 로그변환(log transform)하여 로그 비(log ratio)를 계산하였다. 이러한 과정으로 계산된 로그 비가 0보다 적으면 뮤억제를, 0보다 크면 뮤증가를, 0이면 억제가 없음을 나타낸다.

3) 측정 절차

조용한 공간에 대상자들이 편안하게 앉도록 하였고, 주의사항 및 절차에 대해 충분히 설명한 후 자료 수집을 위한 전극을 두피에 부착하였다. 대상자들에게 측정동안 최대한 움직이지 않도록 설명한 후 측정을 실시하였다.

측정 시 하얀 배경, 물통과 3개의 컵이 나오는 사진, 물통을 잡아 컵에 물을 따르는 동영상을 대상자에게 무작위로 제시하여 관찰하도록 하였다. 3개 조건의 화면을 관찰하는 동안 뇌졸중 환자들의 두피에 부착한 전극으로부터 EEG 자료를 수집하였다.

3. 자료분석

국제 10-20 전극 배치법에 따른 C3와 C4 영역은 감각운동결절에 해당하는 부위로써 이 부위에서 발생한 뮤억제를 MNS의 활성화 지표로 사용된다(Oberman 등, 2007). 따라서 본 연구에서는 사진관찰조건과 동작관찰조건의 뮤억제를 비교하기 위해 C3와 C4 영역 위의 전극에서 수집한 EEG 신호만을 분석하였다.

수집된 자료의 정규성 검정을 위해 Kolmogorov-Smirnov 검정을 시행하였다. 검정결과, 정규성 가정을 만족한 것으로 나타나 모든 검정은 모수검정방법을 사용하여 분석하였다. 각 조건에서 얻은 뮤리듬으로 로그 비를 구한 후 짝비교 t검정으로 비교하였다. 동작관찰 시, 좌뇌반구와 우뇌반구의 MNS 활성화 차이를 비교하기 위해 C3와 C4 영역에서 얻은 자료의 로그 비를 독립 t검정으로 분석하였다. 모든 분석은 통계 분석 프로그램인 SPSS for Window 17.0을 이용하여 분석하였고, 통계학적 유의수준은  $\alpha=.01$ 로 정하였다.

III. 결 과

1. 연구 대상자의 일반적 특성

연구 대상자는 만성 뇌졸중 환자 17명(남자 10명, 여자 7명)이었다. 평균 나이는 62.41세였으며, 평균 유병기간은 15.29개월이었다. 뇌졸중 유형은 뇌출혈이 6명, 뇌경색이 11명이었고, 마비부위는 오른쪽이 7명, 왼쪽이 10명이었다. 본 연구대상자의 일반적 특성은 Table 1과 같다.

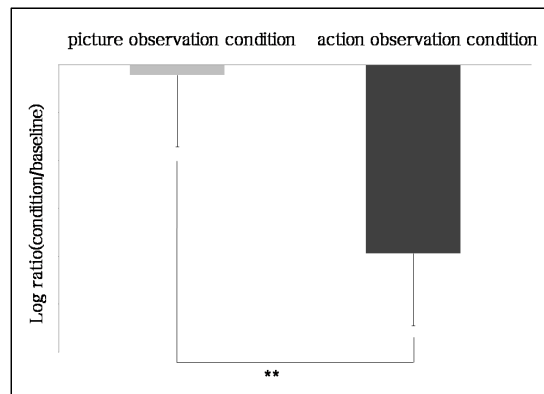
Table 1. The general characteristics of subjects (N=17)

characteristics	subject	
gender	male	10
	female	7
lesion area	right	7
	left	10
precalence period(months)	<sup>a</sup> 15.29±17.27	
age(years)	<sup>a</sup> 62.41±8.83	

<sup>a</sup>: mean±SD

2. 조건간 뮤리듬 차이

사진관찰조건에서 로그 비는  $-.00±.11$ 이었고, 동작관찰조건에서 로그 비는  $-.08±.11$ 이었다. 사진관찰



\*\* P<.01

Figure 2. The difference of mu rhythm between the picture observation condition and the action observation condition

조건과 동작관찰조건 사이의 뮤리듬 차이를 비교한 결과, 두 조건의 로그 비는 동작관찰조건이 사진관찰조건보다 유의하게 작았다( $p < .01$ )(Fig 2).

### 3. 동작 관찰 시 C3와 C4 영역의 뮤리듬 차이

물따르기 동작을 관찰하는 동안 C3의 뮤 로그 비는  $-.08 \pm .12$ 였고, C4의 뮤 로그 비는  $-.08 \pm .12$ 였다. 동작관찰조건에서 동작관찰 시 좌뇌반구와 우뇌반구의 차이를 비교하기 위한 검정 결과, 두 영역에서 얻은 로그 비는 유의한 차이가 없었다( $p > .01$ )(Fig 3).

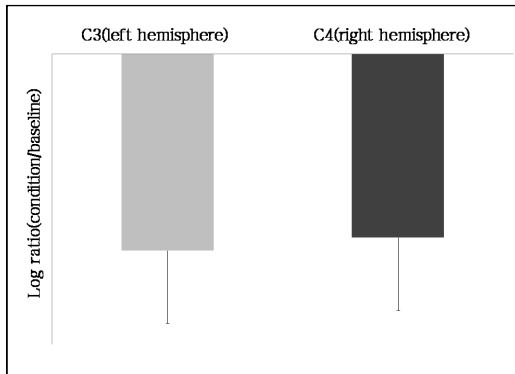


Figure 3. The difference of mu rhythm between C3 and C4 during the action observation condition

## IV. 고 찰

본 연구는 뮤리듬 억제를 통해 뇌졸중 환자에서 동작관찰 시 MNS 활성화 차이를 알아보려고 하였고, 또한 동작관찰 시 양쪽 대뇌반구의 MNS 활성화 차이를 알아보려고 하였다. 연구 결과, 동작을 관찰하는 조건에서 뮤 로그 비가 가장 많이 감소한 것으로 나타났다. 이는 인간의 MNS가 정적인 사진을 관찰할 때보다 동작을 관찰하는 동안 더 강하게 활성화되는 것으로 볼 수 있다. 또한 동작을 관찰하는 동안 좌뇌반구와 우뇌반구의 MNS 활성화 차이는 없는 것으로 나타났으며, 이는 동작관찰 시 좌뇌반구와 우뇌반구의 MNS가 모두 활성화된 것으로 볼 수 있다.

Holmes(2011)는 뇌졸중 환자를 대상으로 흰색 배

경, 움직이지 않는 손, 공잡는 손동작을 관찰하는 동안 대상자의 손가락에서 운동유발전위와 뮤리듬을 측정하여 조건간 차이를 비교하였다. 그 결과 공잡는 손동작을 관찰하는 동안 운동유발전위 진폭이 다른 조건의 운동유발전위 진폭보다 더 크게 증가하였고, 뮤리듬은 다른 조건에 비해 더 강하게 억제되었다고 보고하였다. 이 연구는 정적인 사진을 관찰할 때 보다 동적인 동작을 관찰할 때 MNS가 더 강하게 활성화함을 입증하는 연구로써, 사진을 관찰할 때 보다 동작을 관찰할 때 MNS가 더 강하게 활성화된 것으로 나타난 본 연구의 결과와 일치하였다.

최근 연구에서 인간의 MNS는 생물학적 효과기의 영향을 받지 않는다고 하였다(Oberman 등, 2007). 이 연구에서는 일반인 20명을 대상으로 로봇손으로 수행하는 동작과 인간의 손으로 수행하는 동작을 관찰할 때 MNS의 활성을 비교한 결과, 로봇손이나 인간의 손동작 관찰 시 모두 MNS가 활성화되었으며 두 조건 사이의 차이는 없었다고 밝혔다. 이는 인간의 MNS는 원숭이와는 달리 생물학적 효과가 아닐지라도 물체 지향적 동작을 관찰하는 동안 활성화되는 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서 동작관찰 동안 양쪽 대뇌반구 사이의 변화를 알아본 결과, 동작을 관찰하는 동안 좌뇌반구와 우뇌반구 사이에서 MNS 활성화 차이는 없는 것으로 나타났으며, 이는 뇌졸중 환자에서 MNS가 동작관찰 시 양쪽 대뇌반구에서 동일하게 활성화하는 것으로 해석할 수 있다.

이에 반해, Kilner 등(2009)은 일반인을 대상으로 화면에서 오른손이 움직이는 영상을 관찰하는 동안 화면에서 움직이는 손과 같은 쪽 대뇌겉질이 반대쪽 대뇌반구보다 강하게 활성화된다고 보고하였다. 이 결과는 손 동작관찰에 의해 양쪽 대뇌반구가 활성화되는 것이 아니라 화면에서 보이는 손의 움직임에 따라 관찰한 손과 같은 쪽 대뇌반구가 활성화되는 것으로 볼 수 있다.

하지만 Buccino 등(2001)의 연구에서는 우세손이 오른손인 정상인을 대상으로 물체 관련 입, 손, 팔 동작을 관찰하는 동안 MNS의 활성화 부위를 알아 보았다. 연구 결과, 물체 관련 입, 손, 팔 동작을 관찰하는 동안 각각의 조건에 따라 활성화 부위가 각기

달랐으나 모든 조건들에서 양측 대뇌반구가 활성화된 것으로 나타났다. 이 중 물체 관련 손동작을 관찰하는 동안 양측 대뇌반구의 운동앞겉질은 모두 활성화된 것으로 나타났다. 이는 동작을 관찰하는 동안 양쪽 감각운동겉질의 MNS가 모두 활성화된 본 연구의 결과와도 동일한 결과이다.

Iacoboni 등(1999)은 일반인을 대상으로 손가락 움직임 관찰, 모방, 시각적 자극 조건에서 인지적 과제를 수행하라고 요구하고 MNS 활성화 부위를 확인하였다. 그 결과, 관찰 조건과 실행 조건에서 활성화 부위가 서로 유사하다는 점을 확인하였다. 또 다른 연구에서는 MNS를 활성화시키는 동작관찰은 동작을 직접 실행할 때 사용하는 운동시스템과 유사한 운동시스템을 활성화시킨다고 하였다(Rizzolatti과 Craighero, 2004). 이는 동작관찰이 뇌졸중 재활의 목표가 되는 동작의 내적 투사를 형성하는데 도움이 된다고 볼 수 있으며, 목표 지향적 행동과 관련된 있는 신경 구조들을 동원함으로써 뇌졸중 환자들의 회복을 촉진한다고 해석할 수 있다.

김종만 등(2010)은 동작관찰훈련을 신경계 재활 분야의 대안적 중재로 사용이 가능한 가를 확인하였다. 이 연구에서는 뇌졸중 환자를 대상으로 동작관찰훈련을 실시하기 전과 실시한 후 손가락 근육에서 운동유발전위를 측정하고 손조작 능력을 비교하였다. 연구 결과, 동작을 관찰하지 않은 채 신체 훈련을 한 조건보다 동작관찰훈련을 실시한 조건에서 운동유발전위와 손조작 능력이 유의하게 증가한 것으로 나타났다. 이 결과는 동작관찰훈련이 뇌졸중 환자를 위한 중재방법으로 활용될 수 있다는 가능성을 입증한 결과이다.

본 연구에서 사용한 EEG 장비의 낮은 해상도 때문에 명확한 MNS 활성화 영역을 알아보는 것은 어려웠다. 또한 대조 조건으로 연구 상황과 연구 동영상을 이용한 추가적 연구도 필요하다.

일반인과 마찬가지로 뇌졸중 환자들도 동작관찰 시에 MNS가 활성화된다는 것을 입증한 본 연구의 결과를 토대로, 동작관찰은 뇌졸중 환자의 신경학적 회복과 기능적 회복을 촉진할 수 있는 신경 시스템을 동원시킬 수 있다고 사료된다.

## V. 결 론

본 연구에서는 무리듬을 통해 동작관찰 시 뇌졸중 환자의 MNS 활성화를 알아보았다. 연구 결과, 사진관찰조건에 비해 동작관찰조건에서 MNS가 강하게 활성화되었으며, 동작관찰 시 양측 대뇌반구의 MNS 활성화에는 차이가 없었다. 본 연구를 통해 뇌졸중 환자도 일반인처럼 정적인 사진을 관찰할 때 보다는 동적인 동작을 관찰할 때 MNS가 더 강하게 활성화되는 것을 확인하였다. 뇌졸중 재활에서 동작관찰을 이용한 중재를 사용하면 움직임과 관련된 신경 시스템을 동원할 수 있으며, 동작관찰은 운동 기술을 학습시키는 유용한 도구가 될 수 있다.

## 참 고 문 헌

- 김종만, 양병일, 이문규. 동작관찰훈련이 뇌졸중 환자의 손 조작능력에 미치는 영향. 한국전문물리치료학회지. 2010;17(2):17-24.
- 박상범, 김미현. 뇌졸중 환자의 재활을 위한 인지적 중재전략으로서의 운동심상과 활동관찰. 한국특수체육학회지. 2005;13(2):109-20.
- Bernier R, Dawson G, Webb S et al. EEG mu rhythm and imitation impairments in individuals with autism spectrum disorder. *Brain Cogn*. 2007; 64(3):228-37.
- Blandin Y, Lhuisset Ln, Proteau L. Cognitive Processes Underlying Observational Learning of Motor Skills. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*. 1999;52(4):957-79.
- Buccino G, Binkofski F, Fink GR et al. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *Eur J Neurosci*. 2001;13(2):400-4.
- Buccino G, Lui F, Canessa N et al. Neural circuits involved in the recognition of actions performed by nonconspicuous: an FMRI study. *J Cogn Neurosci*. 2004;16(1):114-26.
- Buccino G, Solodkin A, Small SL. Functions of the

- mirror neuron system: implications for neurorehabilitation. *Cogn Behav Neurol.* 2006;19(1):55-63.
- Buccino G, Vogt S, Ritzl A et al. Neural circuits underlying imitation learning of hand actions: an event-related fMRI study. *Neuron.* 2004;42(2):323-34.
- Cheng YW, Tzeng OJ, Decety J et al. Gender differences in the human mirror system: a magnetoencephalography study. *Neuroreport.* 2006;17(11):1115-9.
- Fabbri-Destro M, Rizzolatti G. Mirror neurons and mirror systems in monkeys and humans. *Physiology (Bethesda).* 2008;23:171-9.
- Franceschini M, Agosti M, Cantagallo A et al. Mirror neurons: action observation treatment as a tool in stroke rehabilitation. *Eur J Phys Rehabil Med.* 2010;46(4):517-23.
- Gallese V, Fadiga L, Fogassi L et al. Action recognition in the premotor cortex. *Brain.* 1996;119:593-609.
- Grafton ST, Arbib MA, Fadiga L et al. Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. 2. Observation compared with imagination. *Exp Brain Res.* 1996;112(1):103-11.
- Holmes P. Evidence from cognitive neuroscience supports action observation as part of an integrated approach to stroke rehabilitation. *Man Ther.* 2011;16(1):40-1.
- Iacoboni M, Molnar-Szakacs I, Gallese V et al. Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. *PLoS Biol.* 2005;3(3):e79.
- Iacoboni M, Woods RP, Brass M et al. Cortical mechanisms of human imitation. *Science.* 1999;286(5449):2526-8.
- Kilner JM, Marchant JL, Frith CD. Relationship between Activity in Human Primary Motor Cortex during Action Observation and the Mirror Neuron System. *PLoS One.* 2009;4(3):e4925.
- Maeda F, Mazziotta J, Iacoboni M. Transcranial magnetic stimulation studies of the human mirror neuron system. *International Congress Series.* 2002;1232:889-94.
- Muthukumaraswamy SD, Johnson BW, McNair NA. Mu rhythm modulation during observation of an object-directed grasp. *Brain Res Cogn Brain Res.* 2004;19(2):195-201.
- Nishitani N, Hari R. Temporal dynamics of cortical representation for action. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2000;97(2):913-8.
- Oberman LM, McCleery JP, Ramachandran VS et al. EEG evidence for mirror neuron activity during the observation of human and robot actions: Toward an analysis of the human qualities of interactive robots. *Neurocomputing.* 2007;70(13-15):2194-203.
- Perry A, Bentin S. Mirror activity in the human brain while observing hand movements: a comparison between EEG desynchronization in the mu-range and previous fMRI results. *Brain Res.* 2009;1282:126-32.
- Petrosini L, Graziano A, Mandolesi L et al. Watch how to do it! New advances in learning by observation. *Brain Res Brain Res Rev.* 2003;42(3):252-64.
- Rizzolatti G, Craighero L. The mirror-neuron system. *Annu Rev Neurosci.* 2004;27:169-92.
- Rizzolatti G, Fabbri-Destro MCattaneo L. Mirror neurons and their clinical relevance. *Nature Clinical Practice Neurology.* 2009;5(1):24-34.
- Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V et al. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Res Cogn Brain Res.* 1996;3(2):131-41.
- Schulte-Ruther M, Markowitsch HJ, Fink GR et al. Mirror neuron and theory of mind mechanisms involved in face-to-face interactions: a functional magnetic resonance imaging approach to empathy. *J Cogn Neurosci.* 2007;19(8):1354-72.
- Tettamanti M, Buccino G, Saccuman MC et al. Listening to action-related sentences activates

fronto-parietal motor circuits. J Cogn Neurosci.  
2005;17(2):273-81.  
Zentgraf K, Munzert J, Bischoff M et al. Simulation

during observation of human actions - Theories,  
empirical studies, applications. Vision Res. 2011;  
51(8):827-35.