

他者理解におけるミラーシステムの役割の検討

廣瀬 智士・羽倉 信宏・山川 義徳

1. はじめに

ヒトの社会生活は、相対する他者の心的状態を正しく理解し、適切な行動を選択できる能力によって支えられている。自分の目の前にいるヒトが、こちらに向かって手を挙げたときのことを考えてみたい。同じ「手を挙げる」という行為であっても、こちらがそれを挨拶としてとらえるのか、それとも攻撃の構えとしてとらえるのかによって、私たちが次にとる行為は大きく変わってくる。そして、誤った解釈に基づいた行為を選択してしまった場合は、大きなトラブルに巻き込まれてしまうこととなる。

これまでの心理学研究から、ヒトは自分の持っている行動のレパートリーを他者の行動を理解する際に用いていることが示唆されている。また、自己運動時にも、他者が同じ運動を行っているのを観察するときにも、共通に活動する脳領域（ミラーシステム）がその神経基盤としてあることが提唱されている。しかし、どのような状況でこの「行動のレパートリーを利用した他者理解」が行われるのかなど、未だ明らかになっていない点は多く残されている。

本研究開発コロキウムでは、私たちはテーマを「他者理解におけるミラーシステムの役割の検討」と設定し、1) シンポジウムの開催（以下、「シンポジウム報告」の項を参照）、2) 研究の実施（以下、「研究報告」の項を参照）、の2点をその柱とした。

シンポジウムでは、様々な階層（動物、幼児、健常者）の被験者（被験体）を対象として領域横断的（心理学、神経科学、工学）に行われている他者理解研究の現状を統合的に把握するべく、3回に分けて第一線で研究を行っている若手研究者を京都大学の内外から招聘し、講演をしていただいた。この報告書を作成している段階で第2回までが終了したが、2回とも30人近くの聴衆にお集まりいただき、講演者の方々と活発な議論を戦わせることでテーマについての理解を深めることができた。

また、研究では、「自己行動レパートリーを利用した他者理解には、ヒト身体の視覚情報は必要か」という問いを立て、実験を計画した。そして、精緻な実験環境の設定に成功し、無事に計画通りの実験を実施することができた。結果、ヒト身体の視覚情報が

なくても、他者の意図は自己運動実行と同一のモジュールで処理されることが示唆され、申請書内容に合致した成果をあげることができた。

よって、本研究開発コロキウムでは、申請内容に基づいた当初の目的を達成できたといえる。特にシンポジウムにおいて、1) 私たちの予想を上回る聴衆にお集まりいただいて熱気を帯びた講演会を実施できた点、2) 京都大学内外の他領域の若手研究者と交流を深めることできた点、は大きな収穫であった。

最後にこのような研究を実施する貴重な機会を与えていただいた、日本学術振興会グローバル COE プログラム、子安増生教授をはじめとするスタッフの皆様、私たちの指導教官である松村道一教授、シンポジウムの部屋の手配をしていただいた、総合人間学部事務の方々、そして、私たちの無理難題にこころよく対応して下さった島崎暁子さんをはじめとする教育学研究科事務の方々に感謝いたします。また、シンポジウムにご参加いただいた講演者の方々、聴衆としてご来席くださった方々にも厚く御礼申し上げます。

2. シンポジウム報告

下記の通り三回の講演会を企画した。各講演の概要については、本講演会紹介用の Web サイト (<http://n.hagura.googlepages.com/index.html>) に掲載した。

第一回 講演会「領域横断的な視点からのミラーシステム研究」

日時：2008年2月5日 14時～

場所：京都大学総合人間学部棟2階 1207号教室

講演内容

14時～ 「自己と他者の身体表象とミラーニューロン・システム」

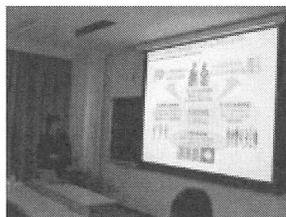
石田 裕昭 (近畿大学医学部 第一生理学講座)

15時30分～ 「ヒトの運動予測および他者模倣に関わる神経基盤」

小川 健二 (ERATO 浅田プロジェクト)

17時～ 「ヒューマノイドの運動学習」

松原 崇充 (奈良先端技術大学院大学)



参加者概要

参加人数 28名

参加者所属

京都大学文学研究科、教育学研究科、人間・環境学研究科、情報学研究科
奈良先端大、JST 等

第二回 講演会「社会的場面における他者理解」

日時：2008年2月15日（金） 14時～

場所：京都大学総合人間学部棟1階 1103号教室

講演内容

14時～ 「自己認知と他者理解の発達および神経基盤」

守田 知代 (JST/RISTEX)

15時30分～ 「社会的認知機能と前帯状回」

篠崎 淳 (大阪大学社会経済研究所)

17時～ 「表情譜：機械は人間の微妙な表情を読み取れるようになれるか？」

平山 高嗣 (京都大学大学院情報学研究科)



参加者概要

参加人数 25名

参加者所属

京都大学文学研究科、教育学研究科、人間・環境学研究科、情報学研究科
奈良先端大、JST 等

第三回 講演会「ミラーシステムを構成する運動／感覚処理機構」

日時：2008年2月29日（金） 14時～

場所：京都大学総合人間学部棟1階 1103号教室

講演内容

14 時～ 「運動制御の意図と最適化の研究」

大前 彰吾 (順天堂大学医学研究科)

15 時 30 分～ 「What is it like to be a human? 比較心理物理学のアプローチ」

松野 響 (京都大学文学研究科)

17 時～ 「大脳皮質視覚野における文脈処理 他者理解の礎としての視覚情報処理」

番 浩志 (京都大学こころの未来研究センター)

3. 研究報告

本稿では、本プロジェクト内で行った実験の報告および考察を行う。

(1) タイトル

ミラーシステムは操作する道具の動きからも他者の意図を理解するのか？

(2) 緒言

我々が日常、他者との相互作用を円滑に行うためには、他者の行為を観察し、そこから他者の意図を汲み取ることが重要である。この他者の意図理解の神経基盤として、ミラーシステムという機構の存在が提唱されている。ミラーシステムとは、自己の運動生成に関与する脳内運動領域（運動前野、下頭頂領域など）が、他者が同じ運動を行っているのを観察するときにも活動する、という神経活動現象を解釈する上で考案された概念で(Rizzolatti et al., 2004, Buccino et al., 2001, Gangitano et al., 2001)、自己の運動表象を利用して他者の運動を理解する機構のことである。行動学実験でも、他者の行う運動を観察しながらそれと似た運動を生成する際、その運動に干渉が生じることが報告されており(Kilner et al., 2003, Hirose et al., 2005)、これは他者運動の視覚情報がミラーシステム内の自己の運動生成に関わる情報処理を干渉することによって生じたと考えられている。また、脳内のミラーシステムに関連する領域は、観察している運動が、自己が実行可能なことを学習により知っている場合に、学習していない場合よりもより強く賦活することが知られている (Calvo-Merino et al., 2004)。

これまでのミラーシステムについての研究は、他者運動を直接観察する場合を主に扱ってきた。しかし、我々の日常では、他者が扱っている道具は見えるが、他者そのものは見えていない状況も存在する。例えば、車を運転している時、実際に運転している他者は見えなくても、他者が運転する車の動きを見てその車の運転者の意図を理解している。また、インターネットなどでも、カーソルが、直接は見えていない他者によって操作されている場面を観察し、その動きから他者の意図を理解することもある。

本研究では、このような他者の意図によって操作されている道具の運動観察にもミラーシステムが関与するかどうかを調査した。先行研究において、ミラーシステムは自己

が行った経験のある運動により強く応答することが知られているので (Calvo-Merino et al., 2004)、自己がその道具の操作を学習する前、道具操作を学習した後、のそれぞれで道具の運動観察におけるミラーシステムの影響を調査した。

被験者は、手首の屈曲-伸展の周期運動をモニタ上に提示される円の拡大-縮小の周期に合わせて行った。この際被験者は、円の動きは、1)実験者が操作している、2)プログラムによって自動的に動いている、の2種類の事前知識を与えられた。もし、ミラーシステムが、他者が操作している物体の動きの視覚情報処理にも関与するのであれば、実験者が操作する条件のみで、円の動きから干渉を受ける効果が期待される。さらに、実験の途中で被験者に道具操作を学習する課題を行わせ、その前後でミラーシステムの影響が異なるかどうかを調べた。

(3) 方法

8名の被験者が実験に参加した。被験者はイスに座り、約50cm前に設置されたモニタ (EIZO FlexScan L550: (株) ナナオ、石川) 上に呈示される1.25Hzで周期的に縮小-拡大を繰り返す円を観察しながら、その円の運動に合わせて右手首の屈曲-伸展運動を行った。実験中、被験者の右手は覆いで隠されており、被験者からは見えなかった。

各試行は20秒間続き、被験者は25周期の円運動に試行が始まった後、できるだけ早く、予め教示された位相(円が拡大する際に伸展/円が縮小する際に屈曲、もしくは、円が拡大する際に屈曲/円が縮小する際に伸展)で、円運動に合わせた手首の屈曲-伸展の周期運動を生成することを求められた(図2b)。被験者の手首には、回転角度センサー(CP-2FB(b) 1kΩ: (株)



図1: 被験者の手首を計測する器具。被験者の屈曲-伸展を図中下の回転角度センサーで計測した。

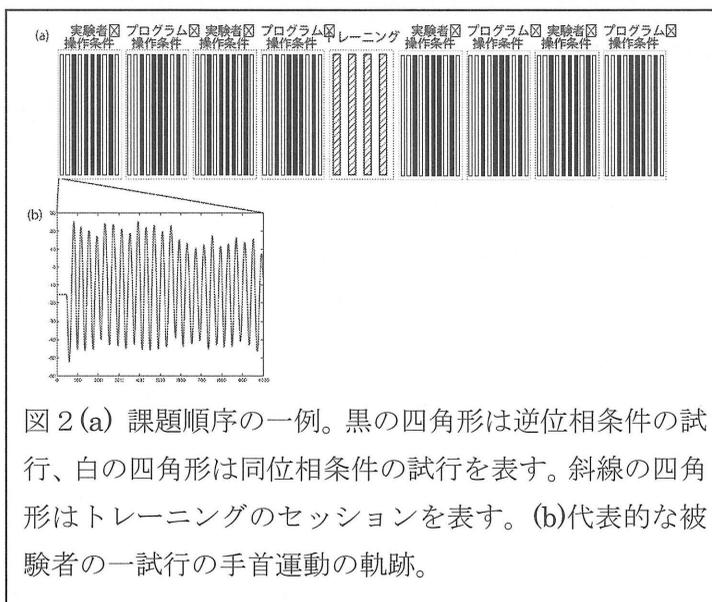


図2 (a) 課題順序の一例。黒の四角形は逆位相条件の試行、白の四角形は同位相条件の試行を表す。斜線の四角形はトレーニングのセッションを表す。(b) 代表的な被験者の一試行の手首運動の軌跡。

緑測器、東京)を取り付けた手首の動きを計測する装置を装着し、手首屈曲角度を計測

した (図 1)。被験者の手首関節の角度情報は、回転角度センサーから、計測用変換機 (RV-505-G: (株) 緑測器、東京) に送られた後、A/D 変換器 (NI USB-6215: (株) 日本ナショナルインスツルメンツ、東京) でデジタルデータに変換され、パーソナル・コンピュータ (Latitude D510: dell、神奈川) 上のプログラム (LabView8.2: (株) 日本ナショナルインスツルメンツ、東京) で記録された。

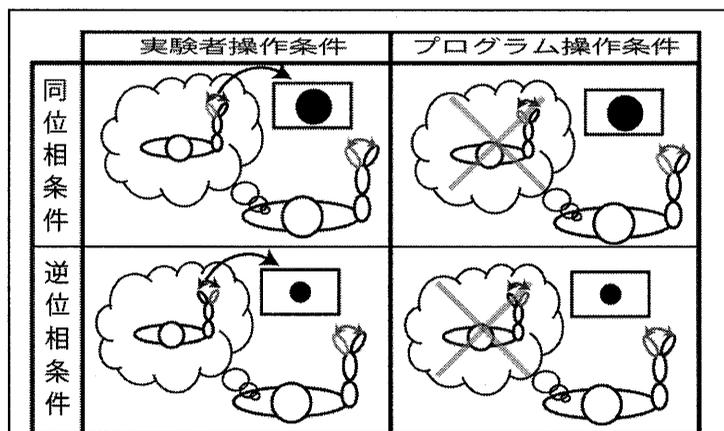
被験者は、各試行の直前に実験者がモニタ上の円を制御する様を観察するか、モニタ上のプログラムで自動的に動いている様を観察することで、円の運動を実験者が右手首の屈曲 - 伸展で制御している (実験者制御条件)、プログラムにより自動的に動いている (プログラム制御条件) のどちらかの事前知識を与えられた (図 3)。実際には、どちらもプログラムで円の運動を制御しており、両条件で実験者が観察している円の動きに差はなかった。また、実験者制御条件の試行中には、実験者は、被験者から見えない位置に座った。

実験者制御条件において、実験者と同じ動き (i.e. 実験者が屈曲している際に屈曲/実験者が伸展している際に伸展) を行うものを同位相条件、逆の動きを行う (i.e. 実験者が屈曲している際に伸展/実験者が伸展している際に屈曲) ものを逆位相条件とした。

また、プログラム制御条件においても、円の運動と被験者の運動の関係性 (e.g. 円が拡大している時に屈曲/縮小しているときに伸展) が実験者制御条件の同位相条件と同一になる条件を同位相条件、実験者制御条件の逆位相条件と同一になる条件を逆位相条件とした (図 3)。

実験者制御条件もしくはプログラム制御条件を、10 試行 (同位相条件 5 試行、逆位相条件 5 試行) 連続して行い、これを 1 セッションとした。それぞれの被験者は、両条件 4 セッション、計 8 セッションに参加した (図 2 a)。

セッション内で、同位相



4 条件をトレーニング前、トレーニング後の両方で行った。

図 3 : 条件の説明。被験者は、実験者操作条件では、実験者が円を制御している、プログラム操作条件では、実験者が制御していないという事前知識を持っていた。実験者操作条件の同位相条件では、被験者は実験者と同じ動きを行い、逆位相条件では、被験者は実験者と逆の動きを行った。プログラム操作条件では、被験者と円の動きの関係性が実験者操作条件の同位相条件と同一になるものを同位相条件、逆になるものを逆位相条件とした。

条件、逆位相条件の順序はセッションごとにランダムに設定した。また、セッションの順序は被験者間でランダムに設定した。

4セッションが終了した時点で、被験者には、呈示した円と同一の円を被験者自身が制御する課題（トレーニング）をおこなった(図 2a)。この課題では、円の半径は被験者の右手首の屈曲角度に応じて変化した。まず被験者の手首屈曲角度 0 度に対応する青色の円がモニタ上に呈示され、

被験者は被験者自身が制御する円をその円の大きさに合わせた。その後、被験者の手首屈曲角度 15 度、30 度、45 度、-15 度、-30 度、-45 度のいずれかの手首角度に対応する大きさの赤色の円が呈示され、被験者は制御している円をその大きさにできるだけ早く、弾道運動により合わせる課題を行った (図 4)。被験者は、この課題を 30 試行繰り返すセッションを、合計 4 セッション(120 試行)行った。トレーニング終了後、被験者は再度手首周期運動を行う課題を 4 セッション行った。

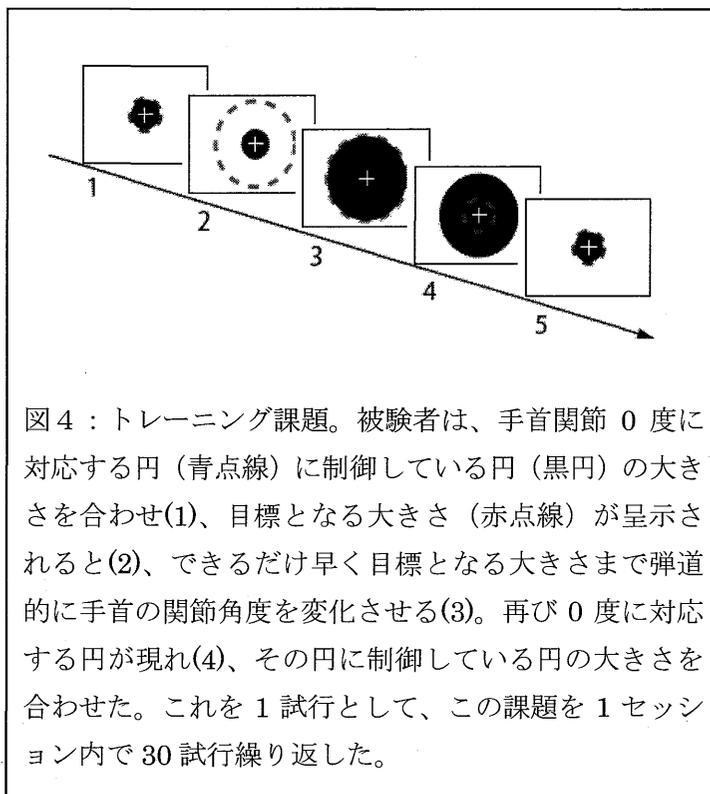


図 4：トレーニング課題。被験者は、手首関節 0 度に対応する円（青点線）に制御している円（黒円）の大きさを合わせ(1)、目標となる大きさ（赤点線）が呈示されると(2)、できるだけ早く目標となる大きさまで弾道的に手首の関節角度を変化させる(3)。再び 0 度に対応する円が現れ(4)、その円に制御している円の大きさを合わせた。これを 1 試行として、この課題を 1 セッション内で 30 試行繰り返した。

トレーニングも含めた全ての課題において、視覚刺激の呈示、および被験者の手首の角度データの取得は同一のプログラム(LabView8.2: (株)日本ナショナルインスツルメンツ、東京)内で行われた。呈示およびデータ取得は共に 50Hz のサンプリングレートで行われた。

モニタ上の円の動きに合わせて周期運動を行う課題中の、被験者の手首運動の時系列データから、被験者の屈曲角度が最大になる時点の、完全に教示通りの運動をした場合(1.25Hz の周期運動)に屈曲角度が最大になる時点との時間差を各周期で求め、その値の試行内での標準偏差をその試行の運動のばらつきを表す指標として算出した。この際、被験者が周期運動を十分に始められる以前の、試行開始から 4 秒間(5 周期)のデータは除外した。このばらつきの指標をトレーニング以前に行われた試行(学習前条件)であるか、トレーニング以後に行われた試行(学習後条件)であるかも要因として含めた 8 条件で、条件ごとに平均し、その値を用いて 3 要因(学習[学習前条件、学習後条件]×操作者[実験者操作条件、プログラム操作条件]×位相[同位相条件、逆位相条件])

の分散分析を行った。分散分析および下位検定には統計計算ソフトウェア SPSS(SPSS16.0: SPSS Japan、東京)を用いた

(4) 結果

同位相条件と逆位相条件の平均値を比較すると、同位相条件(2.02)の方が逆位相条件(1.86)よりも位相の乱れは大きい事が分かった。また、同位相条件と逆位相条件の位相の乱れの差が最も大きくなるのは学習後実験者操作条件(同位相条件 - 逆位相条件 = 0.47)で、次いで学習前実験者操作条件(同位相条件 - 逆位相条件 = 0.22)であり、プログラム操作条件では同位相条件と逆位相条件に大きな差は見られなかった(同位相条件 - 逆位相条件 = 0.04[学習前], -0.06[学習後])。

3 要因分散分析の結果、操作者の要因と位相の要因の間に有意な交互作用が見られた($F(1,7) = 4.34, p < 0.05$)。有意な他の要因間の1次の交互作用および2次の交互作用、主効果は見られなかった(図5)。

下位検定として、4条件([実験者操作条件、プログラム操作条件]×[同位相条件、逆位相条件])のそれぞれで、学習前後の各被験者の代表値を平均し、実験操作条件内、プログラム操作条件内で同位相条件と逆位相条件とを比較する t 検定を行ったところ、実験者操作条件内でのみ同位相条件が、逆位相条件より有意に大きかった ($t(7) = 2.49, p < 0.05$)。

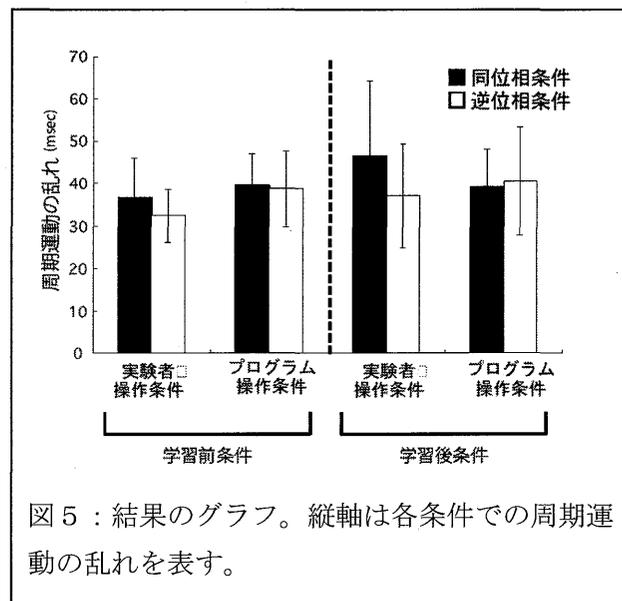


図5：結果のグラフ。縦軸は各条件での周期運動の乱れを表す。

(5) 考察

本研究では、同じ物体の運動を観察している場合でも、その運動を他者が制御しているという事前知識を持つ場合にのみ、その視覚情報が自己の運動生成に干渉することが分かった。また、その干渉効果は、他者と逆の運動を行っている場合よりも、同じ運動を行っている場合の方が大きくなることが分かった。しかし我々の仮説と異なり、道具を自己が操作した経験の有無による自己運動への干渉効果の違いは見られず、自己が操作したことの無い物体を他者が操作する場合でも、操作を学習した後に他者が操作する場合でも変わらず運動への影響が見られた。

他者の効果器の運動情報は自己の生成する運動に干渉を与えることが知られており (Kilner et al., 2003; Hirose et al., 2005)、これは他者運動の視覚情報処理と、自己運

動生成のための情報処理が一部、処理機構を共有している（ミラーシステム）ために起こると考えられている。実際、サル脳の神経生理学研究において、他者運動観察時と、自己運動生成時に同様の発火パターンを示す神経細胞の存在が、下頭頂領域および運動前野で発見されている（Rizzolatti et al., 1988; Gentilucci et al., 1988）。また、ヒト脳イメージング研究においても、前頭-頭頂領域に自己運動生成、他者運動観察の両方に関与する領域が報告されている（Rizzolatti et al., 2004、Buccino et al., 2001、Gangitano et al., 2001）。

本研究において、これまで他者の効果器そのものの運動の視覚情報処理に関わるとされてきたミラーシステムが、他者が操作する効果器ではない物体の動き（i.e. 実験者操作条件）の情報処理にも関わる可能性が示唆された。

また、従来の研究ではミラーシステムは、視覚情報内の他者の効果器(e.g. 手)の視覚的特徴を手がかりに動員されると考えられてきた(Perani et al., 2001)が、本研究ではプログラム操作条件、実験者操作条件で被験者が観察する視覚刺激は全く同一であった。また、視覚情報から要求された運動を生成するための視覚-運動変換も全く同一であったと考えられる。しかし、実験者操作条件においてプログラム操作条件では見られなかった干渉効果が見られた。このことは、他者が操作しているという事前知識があるだけで、物体の動きがミラーシステムを動員したと考えられる。

本研究では、自己が物体の操作を学習した場合と、学習しなかった場合では有意な差は見られなかった。観察している運動を既に学習している場合に、学習していない場合よりも強く脳内のミラーシステム関連領域が動員されることが知られており（Calvo-Merino et al., 2004）、また近年ミラーシステムのモデルとして、自己の運動生成で学習された運動指令とその結果の関係性を用いて、他者運動の結果から他者の運動指令を予測しているというモデルが考えられ、検証されつつある(Kawato et al., 2006)。これらの研究から、他者の操作する道具の運動を観察する場合その道具の操作を学習する前後で干渉効果に差が見られると考えられる。本研究において、トレーニング前後で差が見られなかった原因としては、用いた課題が単純な手首の屈曲-伸展運動であったため、実験者が制御している様子を観察するだけで、被験者は十分に操作ができるようになっていた可能性が考えられる。道具使用の運動学習と、他者の操作する道具の運動観察との関係性については、より詳細な検討が必要である。

本研究では、物体の運動を観察している場合でも、その物体を他者が操作しているという事前知識がある場合、その物体の動きの情報処理がミラーシステムを動員し、自己の運動生成に影響を与える事を示した。これは、ミラーシステムが単なる他者の体部位の運動情報を処理するのみならず、他者の意図を理解する機能を持つことを示唆する。

引用文献

- Buccino G, Binkofski F, Fink GR, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Seitz RJ, Zilles K, Rizzolatti G, Freund HJ (2001) Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *Eur J Neurosci* 13:400-404.
- Calvo-Merino B, Glaser DE, Grèzes J, Passingham RE, Haggard P. (2005) Action observation and acquired motor skills: an FMRI study with expert dancers. *Cereb Cortex*. 15(8):1243-9.
- Gangitano M, Mottaghy FM, Pascual-Leone A. (2001) Phase-specific modulation of cortical motor output during movement observation. *Neuroreport*. 25:12(7):1489-92.
- Gentilucci M, Fogassi L, Luppino G, Matelli M, Camarda R, Rizzolatti G (1988) Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey. I. Somatotopy and the control of proximal movements. *Exp Brain Res* 71:475-490.
- Hirose S, Hashimoto T, Oouchida Y, Naito E, Matsumura M (2005) Viewing muscular contraction of hand enhances grip-force in a finger precision-grip task. *Neuroscience* 2005 P2-180.
- Oztop E, Kawato M, Arbib M (2006) Mirror neurons and imitation: A computationally guided review. *Neural Networks* 19(3), 254-271
- Kilner JM, Paulignan Y, Blakemore SJ (2003) An interference effect of observed biological movement on action. *Curr Biol* 13:522-525.
- Perani D, Fazio F, Borghese NA, Tettamanti M, Ferrari S, Decety J, Gilardi MC (2001) Different brain correlates for watching real and virtual hand actions. *Neuroimage*. 14(3):749-58.
- Rizzolatti G, Camarda R, Fogassi L, Gentilucci M, Luppino G, Matelli M (1988) Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey. II. Area F5 and the control of distal movements. *Exp Brain Res* 71: 491-507.
- Rizzolatti G, Craighero L (2004) The mirror-neuron system. *Annu Rev Neurosci* 27:169-192.