

# ジョイント・アクション中の妨害はパフォーマンスを低下させるが相補的力発揮を促進する

乾 信之\*, 升本 絢也\*\*

(キーワード: 個人間協応, 妨害, 相補性)

## I 緒言

サッカーやバスケットでは、熟練したプレーヤーは動作目標を達成するためにチームメートと相互作用する。このように、「自分自身と他者が共通の目標を達成するために時空間的に相互作用するような社会的協応」はジョイント・アクションと呼ばれる (Sebanz et al., 2006)。さらに、実際のスポーツ場面では対戦するチームの選手に妨害されてもジョイント・アクションを成立させなければならない。

ジョイント・アクションには社会的文脈 (Manstead and Hewstone, 1996) によって協力 (cooperation) 関係と競争 (competition) 関係がある。これらの2つの社会的文脈はいくつかの研究によって比較され、協力関係と競争関係は2人の動作が異なる (Becchio et al., 2008; Braun and Wolpert, 2007; Georgiou et al., 2007; Ruys and Aarts, 2010)。さらに、機能的磁気共鳴断層撮影法によると、協力関係と競争関係で大脳皮質の活動が異なる (Decety et al., 2004; de Bruijin et al., 2009)。

現在までのジョイント・アクションの研究は競争関係より協力関係の方が多く検討されている。協力的文脈に関する研究の多くは個人間の動作の模倣 (Brass et al., 2001; Kilner et al., 2003) や同期 (Schmidt et al., 1990; Neda et al., 2004) を検討してきたが、動作の相補関係も検討している (Bosga and Meulenbroek, 2007; Newman-Norlund et al., 2007, 2008)。相補性に関する研究 (Masumoto and Inui, 2013, 2014) は2人の参加者が同時に力発揮し、その総和を目標値に一致させる課題を行った。その結果、2人の力発揮は負の相関関係になり、一方の力の誤差を他方が補正するような関係が観察された。その際、2人の力発揮の誤差を変動させ (2人の力発揮の配分を変動させ)、力の総和を補正していた。このような相補的力発揮は optimal feedback control theory (Todorov and Jordan, 2002) によって説明され、この理論は運動の誤差を生じた時だけ補正し、そうでない時は補正しないと推測している。

しかし、ボールゲームでは対戦相手に妨害されながら、チームメートと連携をとらなければならない。それにも関わらず、従来の研究は2つの異なる社会的文脈を動作や脳活動を個別に検討しただけで、競争関係と協力関係の相互作用を検討してこなかった。

したがって、本研究は社会的文脈の異なるジョイント・アクションを同時に検討するために、2人は同時に力発揮し、協力して力の総和を目標値に一致させるが、他の1人は協力関係にある2人の力発揮を妨害するような課題を工夫した。一般的に、第三者による妨害は協力関係にある2人の課題パフォーマンスを低下させると考えられる。しかし、optimal feedback control theory を考慮すると、第三者による妨害によって大きな誤差が生じ、この誤差を補正するために2人の相補関係を強めると予測される。したがって、本研究はこの仮説を確かめるために、2人がジョイント・アクションを行う時に第三者から妨害を受けると、2人の協力者は妨害を受けた時より強い相補関係を作ることかどうかを検討した。

## II 方法

### 1) 実験参加者

実験参加者は健康な右利きの男子大学生21名である (平均年齢: 21.6歳, 標準偏差: 1.8歳)。妨害実験は3人

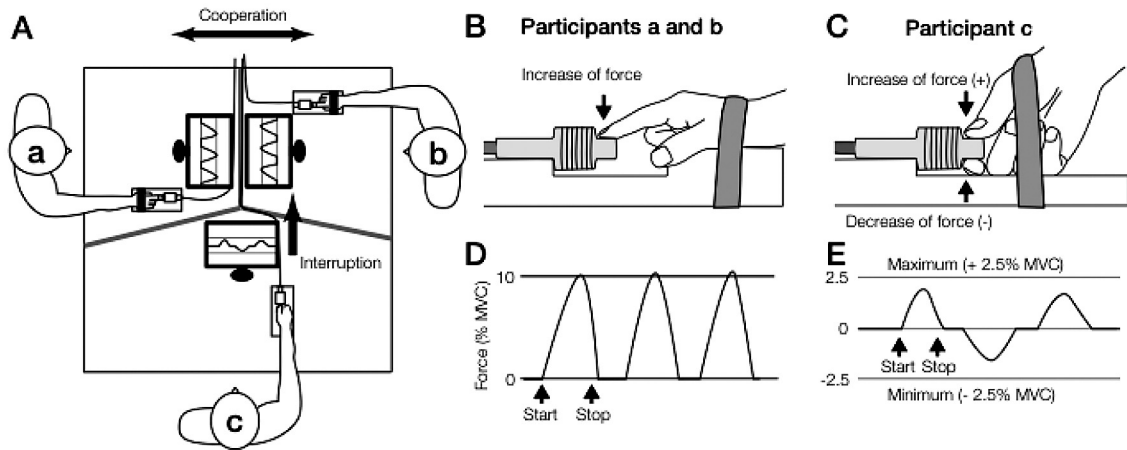
---

\*鳴門教育大学生生活・健康系コース

\*\*兵庫教育大学大学院研究生

1組の10組で行われ、2人（参加者 a, b）は初めてこの実験に参加する者であり、運動目標を共有していた。一方、残りの1人（参加者 c）はこの実験の経験者であり、参加者 b の出力を妨害した。力発揮の変動の大きな未経験者が妨害するとジョイント・アクションが成立しなくなるので、参加者 c は統制実験に参加者 a と b として参加した者から選出した。利き手は Edinburgh handedness inventory (Oldfield, 1971) によって検査され、一側優位性係数の平均得点は94.33（標準偏差：13.34）であった。すべての参加者からインフォームド・コンセントを得た。

## 2) 実験手続き



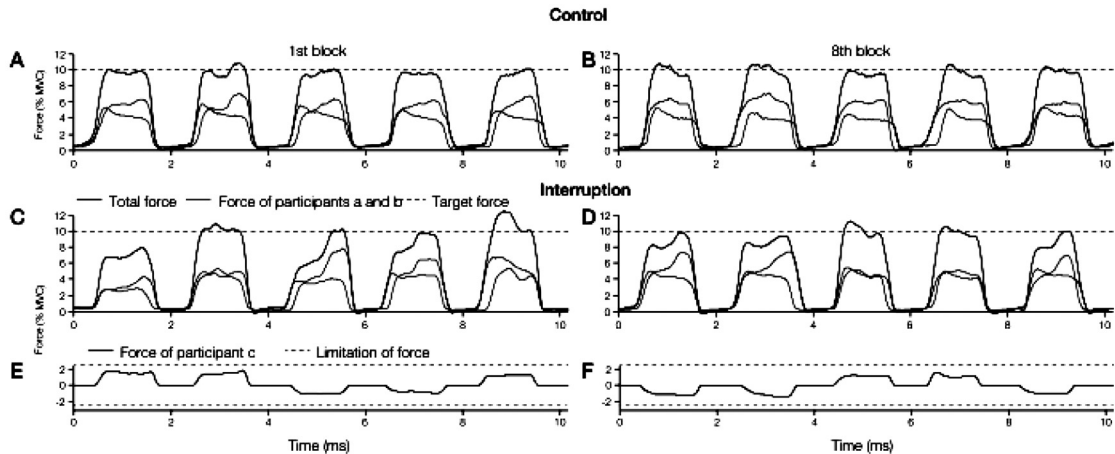
**Figure 1.** Experimental setup. **A**: The control experiment was conducted by two participants (a and b) using the upper half of the setup shown panel A, and the interruption experiment was conducted by three participants using the full setup shown in panel A. **B**: Participants a and b placed the distal pad of the index finger in contact with the load cell and produced an isometric force with the index finger. **C**: Participant c pinched the top or bottom of the load cell with the thumb or index finger. **D**: An example force trace produced by participants a and b in the control experiment. **E**: The force produced by the thumb or index finger of participant c decreased or increased, respectively, the force produced by participant b.

統制実験は先行研究 (Masumoto and Inui, 2013) を参考に、2人の参加者が椅座位をとり (図1Aの上半分)、机の上に配置されたロードセルに右手示指で力発揮し、その総和を目標値に一致させた (図1B)。統制実験の力の目標値は2人の参加者における最大随意収縮 (Maximum voluntary contraction: MVC) の合計値の10%である。モニターには2人の力発揮の合計値と目標値に関する水平線が提示され、力と目標値の差異が示された (図1D)。

妨害実験は3人1組で行われ、協力関係にある参加者 a と b は妨害に抵抗して力の総和を目標値に一致させた。参加者 c は椅座位をとり、机の上に配置されたロードセルの先端の上面と下面をつまんだ (図1C)。母指で上面を押すとその力に応じて参加者 b の力発揮が加算され、示指で下面を押すと減算された (図1E)。力の増減の最大値は協力関係にある参加者の目標値の4分の1 (MVCの $\pm 2.5\%$ ) とし、参加者 c はその限界値以内で自由な力発揮を行った。参加者 c の力発揮が限界値を越えた時でも、参加者 b に与える妨害は限界値以上にならないように設定された。しかし、参加者 c にはノイズのように急激な力発揮の変化をしないように教示した。参加者 c のモニター上には妨害としての力発揮の上限と下限を水平線で示し、その力発揮の時間系列を提示した (図2)。

実験は最初に右示指の MVC を3回測定し、その3回の平均値に基づいて課題の目標値を決定した。参加者は両実験において、50試行 $\times$ 8ブロックの練習を行った。1試行では、メトロノーム (Model SQ100-88, Seiko Holdings) による音刺激が1秒間隔で提示され、参加者 a, b, c は1度目の音刺激 (低いピッチ) で力発揮を開始し、2度目の音刺激 (高いピッチ) で力発揮を終了した。試行間隔は1秒であり、参加者が試行終了1秒後に次の試行を開始した。実験の順序による交互作用を避けるために、5組は最初に統制実験を行い、残りの5組は最初に妨害実験を行った。

### 3) 装置と測定



**Figure 2.** Example data showing the total force and the individual forces generated by participants a and b in the control and interruption experiments, and the forces generated by participant c in the interruption experiment. **A** : The force generated in the 1st block of the control experiment. **B** : The force generated in the 8th block of the control experiment. **C** : The force generated in the 1st block of the interruption experiment. **D** : The force generated in the 8th block of the interruption experiment. **E** : The force produced by the participant c in the 1st block of the interruption experiment. **F** : The force produced by participant c in the 8th block of the interruption experiment.

実験には3つのロードセルを用いて、分離的な等尺性力発揮がロードセルからの出力電圧として測定された。ロードセルの出力は増幅器 (Model MCC-8A Koyowa) によって増幅された後に、100Hz以上の周波数を切り捨て、16ビットのA/D変換器 (PowerLab/8sp, AD Instruments) によって、1000Hzの周波数でサンプリングしてデジタル化された。その出力信号はパーソナル・コンピュータ (Vostro200, Dell) のモニター (解像度: 1280×960ピクセル) に掃引して記録された (図2)。その記録された出力信号から、力の総和における peak force と力発揮の開始時間がエミール・ソフト開発製 (徳島) の力量解析ソフトによって自動的に計測された。図2は参加者 a, b (図2A, 2B, 2C, 2D), c (図2E, 2F) によるデータの実例である。力発揮の相補性は試行間データによって検討されるが、図2には参加者 a と b による試行内の力発揮の相補性が数箇所観察された。

### 4) データ解析

分析は各ブロックの50回の力発揮からなされた。力制御の正確さを検討するために peak force の絶対誤差と標準偏差を用いた。絶対誤差は正負を取り除いた誤差である。参加者 a と b の力発揮の関係は相関係数を算出して検討した。妨害実験では参加者 c が参加者 b を妨害し、参加者 c と参加者 b の力は合計され、その力と参加者 a の力との間の相関係数を算出した。参加者 c の妨害の一貫性を確認するために、参加者 c の力の標準偏差を求めた。

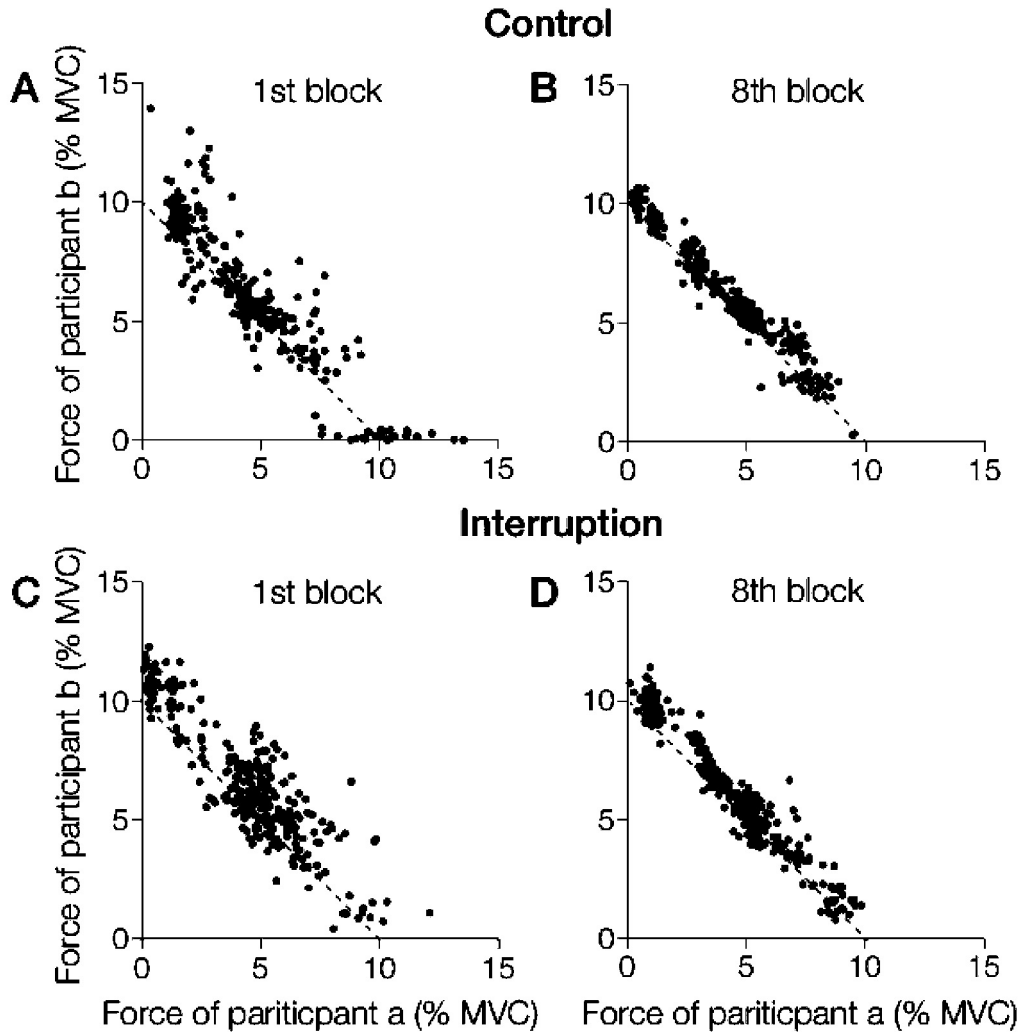
### 5) 統計処理

2人の peak force の相関係数は Fisher の Z 変換を行ってから統計分析に用いた。従属変数の統計的分析は2 (統制実験, 妨害実験) × 8 (ブロック) の二要因分散分析を行った。全ての統計で交互作用の有意差が認められた時には Tukey の HSD (honestly significant difference) による多重比較検定を行った。

## III 結果

### 1) 力発揮の相補性

相補的力発揮を検討するために、図3には統制実験と妨害実験の第1ブロックと第8ブロックにおける2人の力発揮の散布図を示した。その結果、両実験の第1ブロックと第8ブロックでは2人の力が負の相関関係になった。図4には2つの実験の8ブロックにわたる2人の力発揮の相関係数を示した。分散分析の結果、実験 ( $F(1, 144) = 9.38, p < 0.005$ ) と練習ブロック ( $F(7, 144) = 4.34, p < 0.001$ ) の間に有意な主効果が観察された。多重比較の結果、妨害実験は統制実験より負の相関係数が著しく強かった。したがって、本研究の最も重要な結



**Figure 3.** Distribution of forces produced by 10 pairs. Dashed lines represent the target force. **A**: Distribution of forces produced by 10 pairs in the 1st block of the control experiment. **B**: Distribution of forces produced by 10 pairs in the 8th block of the control experiment. **C**: Distribution of forces produced by 10 pairs in the 1st block of the interruption experiment. **D**: Distribution of forces produced by 10 pairs in the 8th block of the interruption experiment.

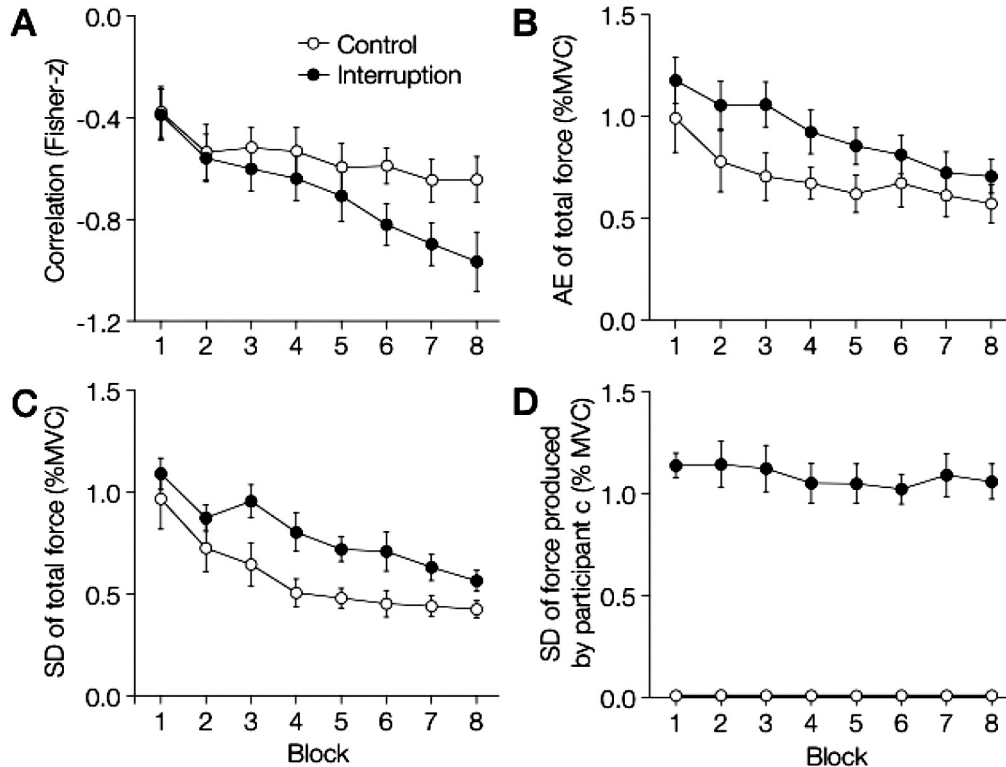
果として、2人の参加者は妨害された時の方がそうでなかった時より強く相補的力発揮を行っており、他者による妨害が2人の相補関係を強化した。また第8ブロックは第1ブロックよりも負の相関係数が強く、練習の進行に伴って相補的力発揮は強くなった。

## 2) 力発揮の正確性

妨害が力制御の正確さに与える影響を検討するために、図4Bには統制実験と妨害実験の8ブロックにわたる力の絶対誤差を示した。その結果、実験 ( $F(1, 144) = 14.40, p < 0.001$ ) と練習ブロック ( $F(7, 144) = 3.49, p < 0.005$ ) に有意な主効果が観察された。多重比較の結果、妨害実験は統制実験より力の絶対誤差が大きく、妨害は協力関係にある2人の力制御の正確さを低下させた。第5、第7、第8ブロックは第1ブロックより力の誤差が小さく ( $p < 0.05$ )、妨害の有無に関わらず練習の進行に伴って力制御の正確さは改善された。

## 3) 力発揮の変動性

力制御の安定性を検討するために、図4Cには統制実験と妨害実験の8ブロックにわたる力の標準偏差を示した。その結果、実験 ( $F(1, 144) = 26.89, p < 0.001$ ) と練習ブロック ( $F(7, 144) = 9.37, p < 0.001$ ) に有意な主効果が観察された。多重比較の結果、力の絶対誤差と同様に、妨害実験は統制実験より力の標準偏差が大きかった。両実験共に、第4～8ブロックは第1ブロックより力の標準偏差が小さく ( $p < 0.001$ )、妨害の有無に関



**Figure 4.** Changes in correlation coefficient, absolute error (AE), and standard deviation (SD) in each experiment. **A:** The mean correlation coefficient between the peak forces produced by participants a and b across the eight blocks in each experiment. **B:** The AE of the total force produced by participants a and b across the eight blocks in each experiment. **C:** The SD of the total force produced by participants a and b across the eight blocks in each experiment. **D:** The SD of the force produced by participant c across the eight blocks in the interruption experiment.

わず練習の進行に伴って力制御の正確さは改善された。

#### 4) 妨害の力発揮の一貫性

妨害の有無によって、参加者 a と b の相関関係を比較する際、妨害の一貫性が保証されなければならない。したがって、妨害の強さがブロックの進行に伴って変化していないことを確認するために、図 4D には妨害実験における妨害者の力の標準偏差を示した。その結果、ブロックに有意な主効果が認められず、すべてのブロックにわたって妨害の強さが変化せず、一定の強さの妨害が行われていた。

## IV 考察

本研究では、2人が同時に力発揮し、その総和を目標値に一致させる課題を用い、第三者による力発揮の妨害が協力関係にある2人の相補的力発揮に与える影響を検討した。妨害の有無に関わらず、すべての練習ブロックで、両者の力発揮は負の相関関係であり、両者は相補的力発揮を行っていた(Masumoto and Inui, 2013, 2014)。我々が予想したように、本研究の新たな知見は他者によって妨害された時はそうでない時より2人の力の負の相関関係が強く、相補的力発揮が強かったことである。したがって、協力関係にある2人は妨害によって生じた大きな誤差を補完するために、より強い相補関係を作り出した。

誤差検出から相補的力発揮の出力に関して、個人間の相補性の制御方略は *optimal feedback control theory* (Todorov and Jordan, 2002) で理解できる。この理論によると、神経系は課題の誤差が生じた時のみ補正し、課題に関連しない誤差は補正しないと推測している。つまり2人の個々の力を変動させ、パフォーマンスに関連する2人の力の総和を補正した (Scholz and Schöner, 1999)。そのため、参加者は誤差が小さいときには少ない補正しかしない。しかし、本研究では妨害によって大きな誤差を与えたので、大きく補正する必要がある、そのため個人間の誤差補正を強めたと考えられる。

従来、ミラー・ニューロン・システムを用いて (Rizzolatti and Craighero, 2004), ジョイント・アクションを解釈する傾向があった。しかし、このシステムのように、他者との運動を一致させるだけでは、柔軟な相補的な力発揮を必要とする制御方略は説明できない。機能的磁気共鳴断層撮影法を用いた研究は自分自身の運動の誤差を検出し、その適応動作を行った時に、前補足運動野 pre-supplementary motor area と帯状皮質吻側 rostral cingulate zone を含む前頭後内側皮質 posterior medial frontal cortex の活動が生じることを見出した (Ridderinkhof et al., 2004)。同様に、脳電図の研究でも自分自身の運動の誤差が生じると負の電位を生じ、これは error-related negativity と呼ばれる (Falkenstein et al., 1991; Gehring et al., 1993)。

さらに、機能的磁気共鳴断層撮影法を用いて、前頭後内側皮質の活動が他者の誤差の観察時に大きくなり、他者の誤差の検出に関わることを示した (de Bruijn et al., 2009; Newman-Norlund et al., 2009)。このことは事象関連電位でも観察され (Miltner et al., 2004; van Schie et al., 2004)、他者の運動の誤差を観察した時に error-related negativity が生じ、他者と自分自身の誤差を検出する機構は重なっているらしい。本研究では個人の力の目標値はなく、個々人の誤差は生じないが、力の総和の誤差が生じた。妨害によって大きな誤差が力の総和に生じて、2人の参加者はそれを検出し、相補的に力を発揮した。これらの結果は、2人が共有した課題の誤差を検出でき、自分自身の誤差を検出する神経機構と他者の誤差を検出する神経機構が同じであるらしい。

このように、ジョイント・アクションを行う時、当然妨害によって課題パフォーマンスは低下するが、驚くべきことに相補関係は妨害によって強まった。本研究では妨害の力の振幅の限界値を目標発揮筋力の  $1/2$  に設定したが、妨害の強弱によって力の相補関係の強弱が変化すると予測される。したがって、次の研究課題はどのような強さの妨害が力の相補関係を高めるのかを検討することである。

## V 要約

人間はジョイント・アクションを行う時、一方の誤差を他方が補正するような相補関係を作ることができる。ここで我々はジョイント・アクションを行う時に他者から妨害を受けると、その誤差を補正するために協力者は強い相補関係を作るかどうかを検討した。妨害実験は3人1組で行われ、協力関係にある2人の参加者は同時に力発揮し、その総和を目標値に一致させた。残りの一人は母指あるいは示指で力発揮し、協力関係にある2人の力を加算あるいは減算して妨害した。その結果、妨害の有無に関わらず、協力関係にある2人の力発揮は負の相補関係を示し、2人は相補的に力発揮を行っていた。さらに、新しい知見として、妨害が有る時は無い時より2人の力の負の相補関係が強く、妨害は相補的力発揮を強化した。

## 文献

- Becchio, C., Satrtori, L., Bulgheroni, M. and Castiello, U. (2008) Both your intention and mine are reflected in the kinematics of my reach-to-grasp movement. *Cognition*, 106, 894–912.
- Bosga, J. and Meulenbroek, R. G. (2007) Joint-action coordination of redundant force contributions in a virtual lifting task. *Mot. Control* 11, 235–258.
- Braun, D. A., Ortega, P. A., and Wolpert, D. M. (2009) Nash equilibria in multi-agent motor interactions. *PLoS Comp. Biol.* 5, e 1000468.
- de Bruijn, E. R. A., de Lange, F. P., von, Cramon, D. Y., and Ullsperger, M. (2009) When errors are rewarding. *J. Neurosci.* 29, 12183–12186.
- Debener, S., Ullsperger, M., Siegel, M., Fiehler, K., von Cramon, D. Y., and Enge, A. K. (2005) Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring. *J. Neurosci.* 25, 11730–11737.
- Decety, J., Jackson, P. L., Sommerville, J. A., Chaminade, T., and Meltzoff, A. N. (2004) The neural bases of cooperation and competition: an fMRI investigation. *Neuroimage* 23, 744–751.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., and Blanke, L. (1991) Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 78, 447–455.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., and Donchin, E. (1993) A neural system for er-

- ror detection and compensation. *Psychol. Sci.* 4385–4390.
- Georgiou, I., Becchio, C., Glover, S., and Castiello, U. (2007) Different action patterns for cooperative and competitive behavior. *Cognition* 102, 415–433.
- Kilner, J. M., Paulignan, Y., and Blakemore, S. J. (2003) An interference effect of observed biological movement on action. *Curr. Biol.* 13, 522–525.
- Manstead, A. S. R., and Hewstone, M. (1996) *The Blackwell encyclopedia of social psychology*. Wiley, New Jersey.
- Masumoto, J. and Inui, N. (2013) Two heads are better than one : both complementary and synchronous strategies facilitate joint action. *J. Neurophysiol.* 109, 1307–1314.
- Masumoto, J. and Inui, N. (2014) Effects of speech on both complementary and synchronous strategies in joint action. *Exp. Brain Res.* 232, 2421–2429.
- Miltner, W. H., Brauer, J., Hecht, H., Trippe, R., and Coles, M. G. (2004) Parallel brain activity for self-generated and observed errors. In Ullsperger M. and Falkenstein M. (eds) *Errors, conflicts, and the brain. Current opinions on performance monitoring, MPI for Human Cognitive and Brain Sciences, Leipzig*, pp. 124–129.
- Neda, Z., Ravasz, E. E., Brechte, Y., Vicsek, T., and Barabasi, A. -L. (2000) The sound of many hands clapping. *Nature* 403, 849–850.
- Newman-Norlund, R. D., Bosga, J., Meulenbroek, R. G., and Bekkering, H. (2008) Anatomical substrates of cooperative joint-action in a continuous motor task : virtual lifting and balancing. *Neuroimage* 41, 169–177.
- Newman-Norlund, R. D., van Schie, H. T., van Zuijlen A. M. J., and Bekkering H. (2007) The mirror neuron system is more active during complementary compared with imitative action. *Nat. Neurosci.* 10 : 817–818.
- Newman-Norlund, R. D., Ganesh, S., van Schie, M. T., de Bruijn, E. R. A., and Bekkering, H. (2009) Self-identification and empathy modulate error-related brain activity during the observation of penalty shots between friend and foe. *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 4, 10–22.
- Oldfield, R. C. (1971) The assessment and analysis of handedness : the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9, 97–113.
- Ridderinkhof, K. R., Ullsperger, M., Crone, E. A., and Nieuwenhuis, S. (2004) The role of the medial frontal cortex in cognitive control. *Science* 306, 443–437.
- Rizzolatti, G. and Craighero, L. (2004) The mirror-neuron system. *Annu. Rev. Neurosci.* 27, 169–192.
- Ruys, K. I. and Aarts, H. (2010) When competition merges people’s behavior : Interdependency activates shared action representations. *J. Exp. Soc. Psychol.* 46, 1130–1133.
- Schmidt, R. C., Carello, C., and Turvey, M. T. (1990) Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *J. Exp. Hum. Percept. Perform.* 16, 227–247.
- Scholz JP, and Schöner G. (1999) The uncontrolled manifold concept : Identifying control variables for a functional tasks. *Exp. Brain Res.* 126, 289–306.
- Sebanz, N, Bekkering, H, and Knoblich, G. (2006) Joint action : bodies and minds moving together. *Trends Cogn. Sci.* 10, 70–76.
- Todorov, E., Jordan, M. I. (2002) Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nat. Neurosci.* 5, 1226–1235.
- Van Schie, H. T., Mars, R. B., Coles, M. G. H., and Bekkering, H. (2004) Modulation of activity in medial frontal and motor cortices during error observation. *Nature Neurosci.* 5, 1089–1092.

# Interruption Negatively Impacts Performance during Joint Action but Facilitates Complementary Force Production

INUI Nobuyuki\* and MASUMOTO Junya\*\*

(Keywords : interpersonal coordination, interruption, complementarity)

In soccer or basketball, a player often passes a ball to a teammate. This is an example of coordination between individuals with a common goal in a motor task. Such coordination may occur intentionally and has recently been termed “joint action”. In practical events such as ball games, players have to pass a ball to a teammate even if opposing players interrupt the passing of the ball.

In our previous studies on joint action we found that the force produced by two people is complementary. The optimal feedback control theory predicts that as the error produced by the participants increases, error compensation also increases. The present study thus tested the hypothesis that an interruption facilitates complementary force production but negatively influences performance during joint action. Twenty-one students performed both control and interruption experiments. In the control experiment, two participants produced a target force such that the sum of the discrete peak forces produced by their right index fingers was 10% of maximum voluntary contraction. In the interruption experiment, two cooperative participants (participants a and b) produced the same target force as the control experiment, and another participant (participant c) interrupted the peak forces produced by participant b. The force produced by the index finger or thumb of participant c decreased or increased the force produced by participant b. Both experiments consisted of eight blocks, with 50 trials in each block. The interruption was constant across blocks. The correlation between the forces produced by two cooperative participants was more negative in the interruption experiment than in the control experiment. The magnitude of the absolute error and standard deviation of force was greater in the interruption experiment than in the control experiment. These new findings indicate that interruption caused performance to deteriorate during joint action, but facilitated complementary force production.

---

\*School of Arts and Health Education, Naruto University of Education

\*\*The Joint Graduate in Science of School Education, Hyogo University of Teacher Education