

両手の交互動作と同時動作における力とタイミングの制御

乾 信 之*

(キーワード: 両手動作, 力制御, タイミング)

I. 緒 言

片手による規則的な反復タッピングにおけるタップ間隔の変動は2の要因にモデル化されている(Wing and Kristofferson, 1973)。1つの要因はタップを引き起こす中枢のタイマーである。もう1つの要因はタップの誘発と実際のタップとの間に介在する運動遅延である。中枢のタイマーと運動遅延が独立していると仮定すれば、タップ間隔(ITI)の変動はタイマーの変動と運動遅延の変動を2倍したものとの合計となるという。この単一タイマーモデルは隣接するITIが負の相関を示すことを予測した。つまり、1つの運動遅延の変動はそれに隣接するITIを反対方向への変化を導き、平均より長い間隔の後には短い間隔が続く傾向を示すことになる。このような負の相関はWing and Kristoffersonによって実際に観察された。

Helmuth and Ivry (1996)は被験者に片手タッピングと両手同時タッピングを課し、両手によるタイミングの変動が片手によるそれよりも小さいことを見出した。このことはWing and Kristofferson (1973)のモデルに適用させて、左右の2つのタイマーの出力が結合されるためと考えられた。さらにIvry and Hazeltine (1999)は脳梁欠損患者に片手と両手同時タッピングを課してその際のタイミングを検討した。その結果、片手のタイミングの変動よりも両手のそれが小さかった。この結果は両半球からの運動指令が皮質下で統合されていることを示唆した。

Wing et al. (1989)は両手交互タッピングを検討し、手間ITIの変動は片手のITIよりも大きかった。さらに、短い手間ITI(100ms)では、隣接する手間ITIがWing and Kristofferson (1973)の単一タイマーモデルが予想した-0.5よりも高い負の相関を示した。長いITI(200と400ms)のその相関も片手タッピングよりも高い負の相関を示した。このことは単一のタイマーモデルでは説明できず、2つのタイマーが結合されたと考えられた。

一方、Henningsen et al. (1995)は両手の人差指を同時に等長性に屈曲した際の筋力を測定し、同一の力を出すように練習したにもかかわらず、利き手の筋力が非利き

手のそれよりを凌駕していた。この知見は手指の運動中の大脳皮質運動野および運動前野における解剖生理学的な非対称性を示唆した。さらに、Inui and Hatta (2002)は両手同時タッピングにおける力とタイミングの制御を検討した。その結果、利き手の筋力は非利き手のそれより大きかったが、ITIの左右差はみられなかった。

このように、両手同時動作のタイミングでは左右の手の運動系が結合して制御されているが、筋力では左右の運動系が別々に制御しているらしい。したがって、本研究では両手交互タッピングにおける力の非対称制御とタイミングの対称制御の仮説を検討する。

II. 方 法

1) 被験者

被験者は健康な右利きの男子大学生11名である(平均値:18.6歳,レンジ:18-19歳)。利き手はEdinburgh handedness inventoryを用いて検査された(Oldfield, 1971)。全ての被験者はこの検査の右利きの最高得点に達した。

2) 装置と測定

実験には2つのロードセルを用いた(共和電業, LUB-5KB, 定格出力:5kg)。各タップの力はロードセルからの最高出力電圧として測定された。ロードセルの出力は増幅器(共和電業, MCC-8A)によって増幅され、オシロスコープ(MD625BM-12, Leader)に掃引された。また、ロードセルの出力は増幅の後に100Hz以上の周波数を切り捨て、12ビットのA/D変換器によって1,000Hzの周波数でサンプリングされてデジタル化された。ITI, 最高出力, 圧持続時間, および最高出力までの時間は自動的に計測された(Inui and Hatta, 2002)。

3) 手続き

被験者はロードセルに向かって椅座位をとり、手掌を高さ6cmの支持台の上に置いた。被験者は中手指関節を支点に両手の人差指でロードセルをタップした。運動課題は左右の片手動作, 両手交互動作, 両手同時動作である。目標出力は2Nあり, 目標の手内ITIは500msで

*生活・健康系(保健体育)教育講座

ある。各運動課題毎に練習試行が行われ、練習試行終了直後にテスト試行が行われた。練習試行では30秒間3回練習し、目標の力とITIを習得するように教示した。出力に関するフィードバック情報はオシロスコープ上に目標出力を輝線で示し、被験者による出力と目標出力の差を提示した。ITIに関するフィードバック情報はヘッドホンを介して音刺激を与えた。その後のテスト試行ではフィードバック情報を与えず、習得した力とITIを30秒間タップさせた。

4) データ解析

テスト試行における従属変数の分析には出力、ITI、最高出力までの時間、圧持続時間の平均値を用いた。その平均値は各被験者による各試行の60変数からなる。統計的分析は課題と効果器の主効果を検討するために、3(課題)×(効果器：右手と左手)の二要因の分散分析を行った。この際、左右の片手動作は1つの課題として分析さ

れた。変動係数についても2(課題)×(効果器)×(測度)の三要因の分散分析を行った。Post hocテストにはFisher's PLSD (protected least square difference)法を用いた。

III. 結 果

図1には3つの課題のテスト試行における出力とITIの平均値と標準偏差を示した。出力に関する分析は課題の主効果はみられなかったが、右手の出力は左手のそれよりも有意に大きく($F_{1,60} = 4.29, p < 0.05$)、交互作用はなかった。ITIに関する分析は主効果も交互作用もみられなかった。全ての課題に亘って、ITIの平均値は500msであった。このように、出力に比較して、ITIは正確に制御されていた。

図1には3つの課題のテスト試行における出力とITIの変動係数も示した。出力の変動係数に関する分析は課

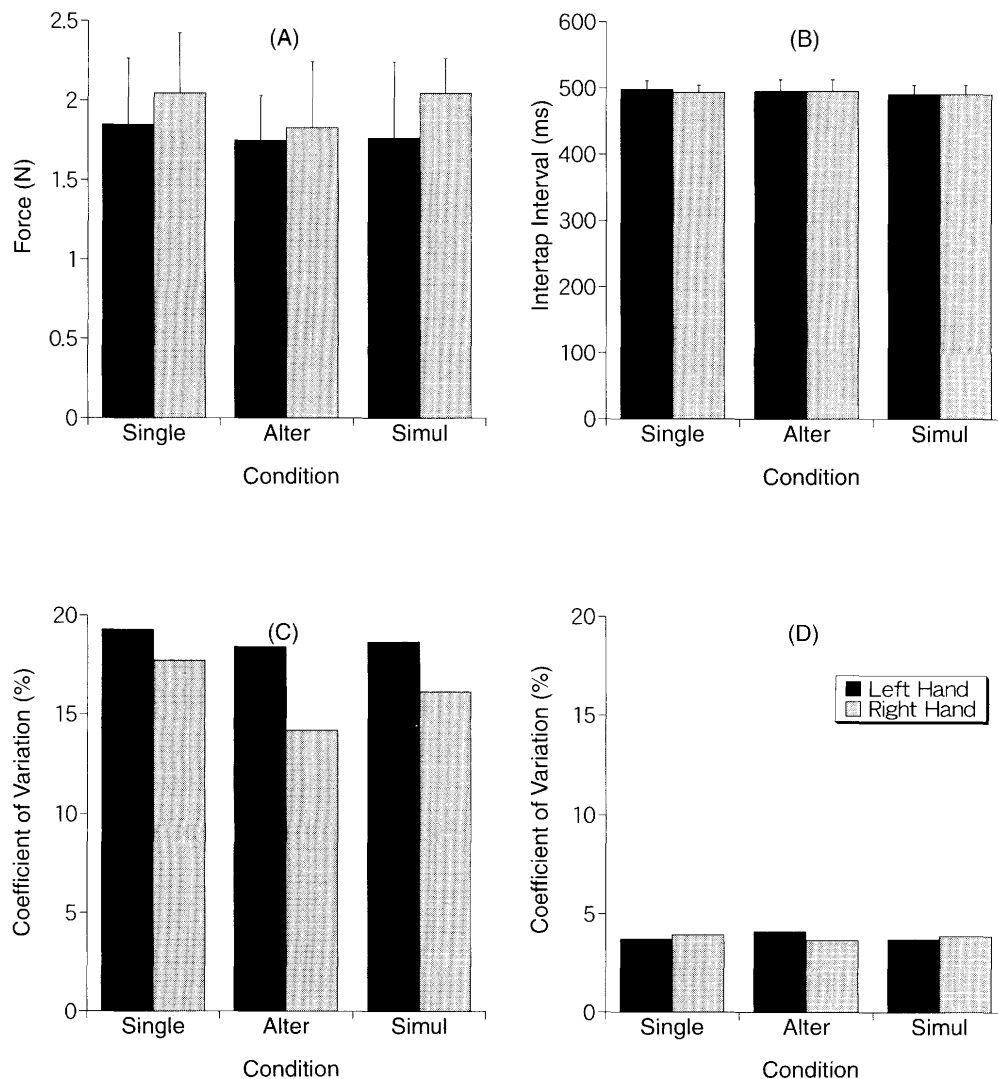


Fig. 1. Means and standard deviations of peak force (A), intertap interval (B) and coefficient of variations of peak force (C) and intertap interval (D) under three conditions. The two columns within each task correspond to forces of the left hand and the right hand. Abbreviations. Single: unimanual condition, Alter: alternating condition, Simul: simultaneous condition.

題の主効果はみられなかったが、左手のそれは右手のそれよりも有意に大きく ($F_{1,60} = 6.11, \rho < 0.05$), 交互作用はなかった。ITIの変動係数に関する分析は主効果も交互作用もみられなかった。全ての課題に亘って、ITIの変動係数は3.6%から4.0%であった。このように、出力の変動係数はITIのそれよりも著しく大きかった ($F_{1,120} = 581.36, \rho < 0.0001$)。

図2には最高出力までの時間(上)と圧持続時間(下)の平均値と標準偏差を示した。最高出力までの時間に関する分析は効果器の主効果はみられなかったが、課題の主効果が有意であり ($F_{1,60} = 8.17, \rho < 0.0001$), 交互作用はなかった。Post hoc testは交互課題が他の課題よりも長い時間を呈した。同様に、圧持続時間に関する分析は効果器の主効果はみられなかったが、課題の主効果が有

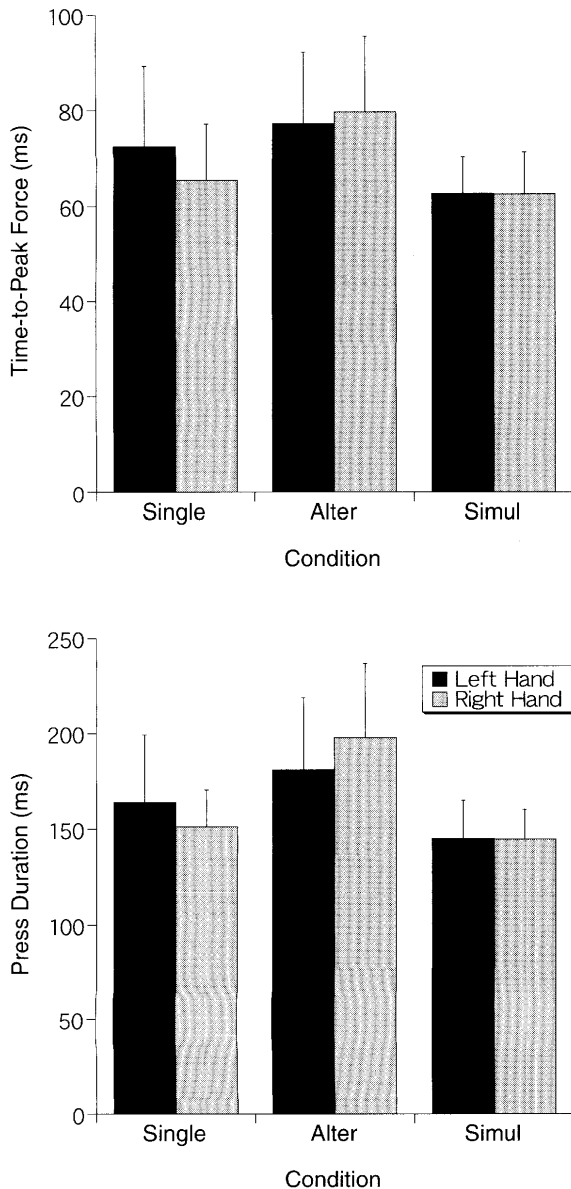


Fig. 2. Means and standard deviations of times-to-peak force (top) and press duration (bottom) under three conditions. Conventions and abbreviations as in Fig. 1.

意であり ($F_{1,60} = 13.13, \rho < 0.0001$), 交互作用はなかった。Post hoc testは交互課題が他の課題よりも長い圧持続時間を呈した。

図3には圧持続時間に対する最高出力までの時間の比率を示した。この比率に関する分析は主効果も交互作用もなかった。この比率の平均値は40%と45%の間に分布した。つまり、圧持続時間と最高出力までの時間共に、交互課題のみが他の課題よりも長い時間であり、比率としては3課題が類似していた。

IV. 考 察

タッピングを用いたタイミングの先行研究では、両手同時課題のITIは片手課題のそれよりも小さな変動を呈した。さらに、両手交互課題のITIは片手課題のそれよりも大きな変動を示したが、隣接するITIの相関関係では両手課題が片手課題よりも高い負の相関を示した。したがって、片手課題は単一タイマーモデルに適応しているが、両手課題は2つのタイマーが結合していると考えられた。

それに反して、本研究の3課題におけるITIのタイミング制御の違いはみられなかった。一方、3課題に亘って、右手の出力は左手のそれより大きかった。したがって、片手課題と両手同時課題で証明したように (Inui and Hatta, 2002; Inui and Hatta, 2003), 両手交互課題でも力の非対称制御とタイミングの対称制御が明らかになった。

力制御の非対称性は運動系の形態的および機能的非対称性に起因していると考えられる。例えば、右利きの錐体路では左半球から交差する線維は右半球からのそれよ

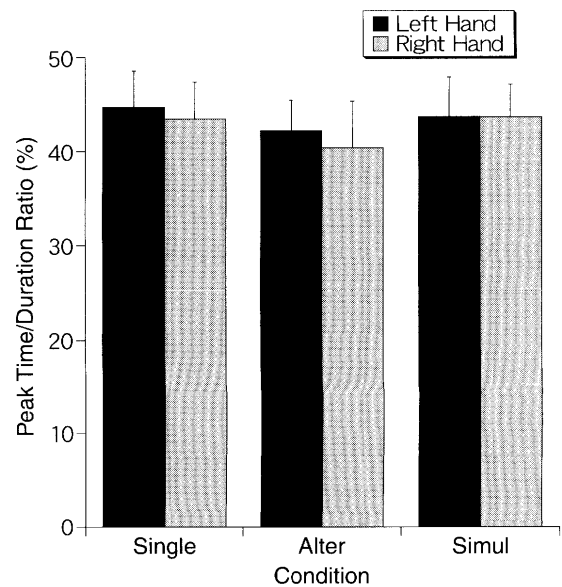


Fig. 3. Means and standard deviations of ratio of times-to-peak force to press duration under three conditions. Conventions and abbreviations as in Fig. 1.

りも多い (Nathan et al., 1990)。サルでは左の運動皮質が右のそれよりも広く、手指の筋が右よりも左の運動皮質に広く再現されている (Nudo et al., 1992)。さらに、脳のイメージング研究でも手指の運動中の運動皮質の非対称性が報告されている。陽電子断層撮影法を用いて、Kawashima et al. (1993) は両手動作における優位半球の運動野と運動前野における血流の増加を報告している。また、磁気共鳴断層撮影法を用いて、Kim et al. (1993) は手指のタッピングにおける運動野の非対称な活動を報告している。このように、錐体路と手の皮質再現領域の非対称性と同様に、運動野と運動前野に非対称な活動が非利き手よりも利き手の筋力を大きく誘発しているらしい。

一方、両手動作におけるタイミングの対称制御は Keele 一派の研究によって支持され、等長性の反復出力課題と反復タッピング課題では中枢の同一タイマーが異なる効果器を制御しているという (Keele and Hawkins, 1982; Keele et al., 1987; Keele et al., 1985)。例えば、Keele and Hawkins (1982) は手指、手首、前腕、足のタッピングの間に高い相関を見出した。また、1つの効果器で規則的にタイミング制御できるヒトは他の効果器でも規則的にタイミング制御できると報告した (Keele et al., 1985)。これらの知見は本研究の結果と軌を一にしており、両手動作におけるタイミングの対称な制御を支持している。

一方、最近の生理学的研究では両手同時動作と両手交互動作における大脳半球間の結合の程度が異なることを報告している。例えば、Chen et al. (published online) は片手と両手交互・同時のタッピングにおける経頭蓋磁気刺激の影響を検討した。その結果、両手同時課題では両手の運動が磁気刺激によって同時にリセットされたが、その効果は刺激に対する対側の手よりも同側の手の方が片手課題に比べて大きかった。両手交互課題は両手同時課題よりもこの効果が少なかった。このように、片手動作に比較して、両手同時動作における大きな同側刺激の効果は半球間の結合を示唆しているという。また、Serrien and Brown (2002) は両手の交互動作と同時動作における左右の第一次運動皮質の同期活動を検討した。その結果、運動速度が増加すると、パフォーマンスと脳波の β 周波数帯域における感覚運動皮質間の結合が低下し、この効果は同時動作よりも交互動作の方が顕著であった。つまり、両手同時動作は両手交互動作よりも運動野の皮質間結合が強いという。同様な結果はサルの運動皮質におけるフィールド電位によっても報告されている (Cardoso de Oliveira et al., 2001)。

図2の最高出力までの時間と圧持続時間では同様な出力を発揮していたにもかかわらず、交互課題が同時課題よりも長い時間を呈した。これらの2つの時間は力を出すための時間であり、出力のタイミングを示している。

したがって、上述の生理学的知見と考え合わせると、両手同時動作は両手交互動作よりも運動野の皮質間結合が強いから、最高出力までの時間と圧持続時間では同時課題が交互課題よりも短い時間であったと考えられる。

V. 要 約

本研究は両手交互タッピングと両手同時タッピングにおける筋力とタイミングの制御の類似点と相違点を検討した。運動課題は左右の片手タッピング、両手交互タッピング、両手同時タッピングである。目標出力は2 Nであり、目標の手内タップ間隔は500msである。被験者は右利きの男子大学生11名である。練習試行では出力の視覚的フィードバックが与えられた。テスト試行ではフィードバックなしに運動課題が遂行された。その結果、3課題共に右手の出力が左手の出力を凌駕していた。さらに、3課題共に、右手の出力は左手の出力よりも小さい変動を呈した。それに反して、3課題のタップ間隔には左右差が認められなかった。一方、両手交互課題は他の課題よりも最高出力までの時間と圧持続時間が長かった。このように、両手課題ではタイミングは力制御よりも運動系において強く結合されていた。

文 献

- Cardoso de Oliveira, S., Gribova, A., Donchin, O., Bergman, H., and Vaadia, E. (2001) Neural interactions between motor cortical hemispheres during bimanual and unimanual arm movements. *European Journal of Neuroscience*, 14, 1881 - 1896.
- Chen, J.-T., Lin, Y.-Y., Shan, D.-E., Wu, Z.-A., Hallett, M., and Liao, K.-K. The effect of transcranial magnetic stimulation on bimanual movements. *Journal of Neurophysiology*, published online.
- Helmuth, L. L., and Ivry, R. B. (1996) When two hands are better than one: reduced timing variability during bimanual movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 278 - 293.
- Henningens, H., Ende-Henningens, B., and Gordon, A. M. (1995) Asymmetric control of bilateral isometric finger forces. *Experimental Brain Research*, 105, 304 - 311.
- Inui, N., and Hatta, H. (2002) Asymmetric control of force and symmetric control timing in bimanual finger tapping. *Human Movement Science*, 21, 131 - 146.
- Inui, N., and Hatta, H. (2003) Effect of practice on force control and timing in bimanual finger tapping. *Journal of Human Movement Studies*, 44, 79 - 91.

- Ivry, R. B., and Hazeltine, E. (1999) Subcortical locus of temporal coupling in the bimanual movements of a callosotomy patient. *Human Movement Science*, 18, 345 - 375.
- Kawashima, R., Yamada, K., Kinomura, S., Yamaguchi, T., Matsui, H., Yoshioka, S., and Fukuda, H. (1993) Regional blood flow changes of cortical motor areas and prefrontal areas in humans related to ipsilateral and contralateral hand movement. *Brain Research*, 623, 33 - 40.
- Kim, S. G., Ashe, J., Hendrich, K., Ellermann, J. M., Merkle, H., Ugurbill, K., and Georgopoulos, A. P. (1993) Functional magnetic resonance imaging of motor cortex: hemispheric asymmetry and handedness. *Science*, 261, 615 - 617.
- Keele, S. W., and Hawkins, H. L. (1982) Explorations of individual differences relevant to high level skill. *Journal of Motor Behavior*, 14, 3 - 23.
- Keele, S. W., Ivry, R. B., and Pokorny, R. A. (1987) Force control and its relation to timing. *Journal of Motor Behavior*, 19, 96 - 114.
- Keele, S. W., Pokorny, R. A., Corcos, D. M., and Ivry, R. (1985) Do perception and motor production share common timing mechanisms: a correlational analysis. *Acta Psychologica*, 60, 173 - 191.
- Nathan, P.W., Smith, M.C., and Deacon, P. (1990) The corticospinal tracts in man: course and location of fibers at different segmental levels. *Brain*, 113, 303 - 324.
- Nudo, R.J., Jenkins, W.M., Merzenich, M.M., Prejean, T., and Grenda, R. (1992) Neurophysiological correlates of hand preference in primary motor cortex of adult squirrel monkey. *Journal of Neuroscience*, 12, 2918 - 2947.
- Oldfield, R. C. (1971) The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97 - 113.
- Serrien, D. J., and Brown, P. (2002) The functional role of interhemispheric synchronization in the control of bimanual timing tasks. *Experimental Brain Research*, 147, 268 - 272.
- Wing, A. M., Church, R. M., and Gentner, D. R. (1989) Variability in the timing of responses during repetitive tapping with alternate hands. *Psychological Research*, 51, 28 - 37.
- Wing, A. M., and Kristofferson, A. B. (1973) Response delays and the timing of discrete motor responses. *Perception & Psychophysics*, 14, 5 - 12.

(提出日 2004年9月29日)

Differences and similarities between alternating and simultaneous bimanual tapping movements in the control of force and timing

Nobuyuki Inui*

(Key words: bimanual tapping, force control, movement timing)

Summary - An experiment was conducted to examine differences and similarities between alternating and simultaneous bimanual finger tapping in the control of force and timing. Participants were trained to produce both unimanual (left or right hand) tapping tasks and alternating and simultaneous bimanual tapping tasks with a peak force of 2 N and a within-hand intertap interval of 500 ms. During practice, visual force feedback was provided pertaining to the hand performing the tapping sequences. After practice, the participants produced the learned unimanual and bimanual tapping sequences in the absence of feedback. In those trials, the force produced by the dominant (right) hand was larger than that produced by the nondominant (left) hand. Furthermore, the force output of the dominant hand was less variable than that of the nondominant hand, in the absence of a difference between the intertap intervals produced by each hand. The alternating task used longer press duration and time-to-peak force than the two other tasks. These results were discussed in the light of both neurophysiological and anatomical findings, and were interpreted to imply that in bimanual tasks, the control of timing may be more tightly coupled in the motor system than the control of force.

* Faculty of Health and Living Science, Naruto University of Education