

誤差フィードバックのモダリティの違いによる 運動学習効果の差異

角 友起^[1] 茨城県立医療大学医科学センター
高松 克守 植草学園大学保健医療学部
桑名 俊一^[2] 植草学園大学保健医療学部

随意運動学習の成立には実施した運動の誤差情報のフィードバックが不可欠であるが、フィードバックのモダリティ（感覚種）と学習効果との関連についての研究は少ない。本研究では指先で物をつまむ力（ピンチ力）を発揮する運動を用い、運動誤差フィードバックを視覚および聴覚を用いて与えた場合の運動学習効果の差異について調べた。運動学習課題中は視覚および聴覚のいずれのフィードバック群においてもピンチ力に有意な変化が観察された。視覚によるフィードバック群では、学習課題終了後もピンチ力の変化が残存するいわゆる after-effect が認められた。一方で聴覚フィードバック群では after-effect が見られず、運動学習が起っていないことがわかった。この結果より、随意運動の目標を示す情報と誤差をフィードバックする情報のモダリティの同一性が運動学習成立に必須であることが示唆された。

キーワード：運動学習，誤差フィードバック，モダリティ

1. はじめに

われわれは日常生活の中のあらゆる場面で、意識することなくスムーズに手足を動かすことができる。しかしそれらの運動の背景には、脳による緻密な情報処理が存在する。エレベータでボタンを押す動作を例にとると、目的とする階のボタンの空間配置を視覚情報をもとに計算するとともに、自らの手の位置とボタンとの位置関係を計算し、手を動かす距離・方向を決定して、それに見合った運動指令を作りだしている。このように外界の情報から運動指令を生み出す計算過程が適切であれば運動は正しく実行されるが、それはわれわれが初めから持って生まれたものではなく、成長・発達・経験に伴って獲得されたものである。すなわち多数の試行錯誤を通して、より正確な運動となるように“情報処理系の

較正”を繰り返してきた結果である。この較正のプロセスは一般に運動学習と呼ばれる。

運動学習を促す要因としてもっとも重要なものは、実行した運動の誤差の情報である¹⁾。目の前の物体を素早く手に取る、視線を動かすと言った軌道修正のきかない速い運動では、毎回の運動のたびにフィードバックされる誤差情報が運動学習を力強くガイドしている。これまでの研究によって、誤差フィードバックの至適タイミング、フィードバックの回数、誤差量などが運動学習の成否に関わることが、プリズム適応学習や眼球運動適応学習で明らかになっている^{2) 3) 4)}。しかしこれらの研究では誤差のフィードバックが視覚によっているものも多く、他のモダリティによる誤差情報が運動学習に及ぼす影響については知見が確立されているとは言えない。そこで本研究では指のピンチ力を発揮する

[1] 著者連絡先：角 友起

[2] 桑名 俊一

isometric force control課題を用いて、視覚および聴覚による誤差情報フィードバックと運動学習効果との関連を調べることを目的とした。

2. 方法

2.1 被験者

健康な若年成人36名（男15名，女21名，年齢20–22歳）が研究に参加した。被験者は事前に実験の目的および方法について十分な説明を受け，研究参加に同意をした後に参加した。

2.2 基本課題

被験者は利き手の示指と母指で握力計（MLT003, AD Instruments, USA）をつまみ，2本の指で握力計を瞬間的に挟む動作（ピンチ運動）を行った（図1）。握力計の信号はADコンバータ（PowerLab, AD Instruments, USA）によりサンプリングレート10kHzでコンピュータに取り込まれた。解析ソフトウェア（Lab Chart, AD Instruments, USA）によってピンチ力の時間的推移をディスプレイに表示し，被験者にはスケール上の“2”にピンチ力のピーク値を合わせることを基本課題として要求した（ $1 \div 0.833$ [N]）。動作開始はメトロノームの音を合図とし，1回/2秒のペースで課題を行った。ピンチ力は1試行毎（オーバーレイ無し）で表示され，現試行のひとつ前の試行結果のみ視認可能とした。

瞬間的なピンチ力を発揮することで図2のような釣鐘型の曲線を描けるように，事前に十分な練習を行った。ピンチ運動開始からピークまでの時間は全試行で200ミリ秒未満であり，試行中における力の

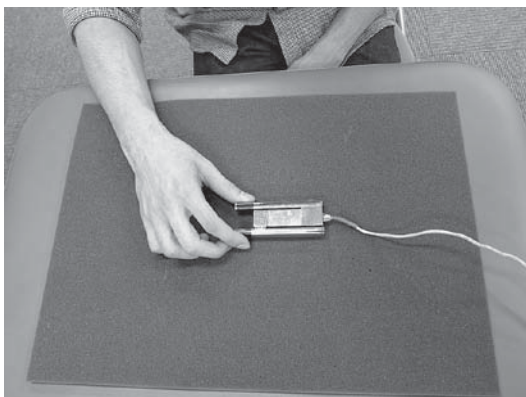


図1

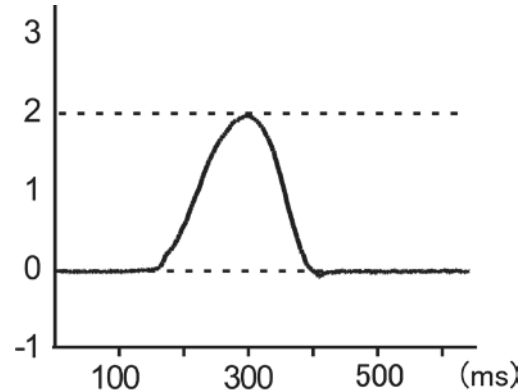


図2

オンラインコントロールは行うことはなかった。

2.3 実験デザイン

図3に実験デザインを示す。学習課題において視覚により誤差フィードバックを与える群（Vi群，Vd群）と聴覚により誤差フィードバックを与える群に（Ai群，Ad群，Ai2群）に分けて実験を行った。学習課題の前後にはプレテスト，ポストテストとして2.2で示した基本課題を実施した。

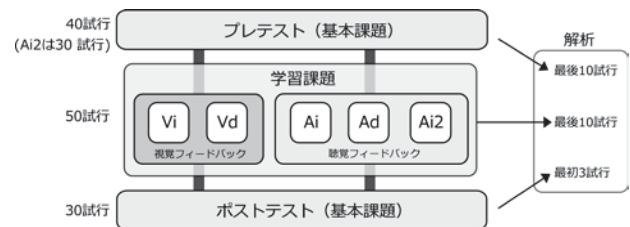


図3 実験デザイン

2.4 視覚性の誤差フィードバックによる学習課題

ピンチ力の表示倍率（表示される力/実際の力）を以下のように変更した状態で基本課題を実施し，ピンチ力の増加（Vi群，図4左）あるいは減少（Vd群，図4右）を誘導した。

Vi群：倍率0.7（実際の力 = 2 → 表示値 = 1.4）
 … ピンチ力増加を誘導

Vd群：倍率1.4（実際の力 = 2 → 表示値 = 2.8）
 … ピンチ力減少を誘導

なお画面上のスケール表記は基本課題時と同様に設定しているため，倍率の変化に気付く被験者はいなかった。

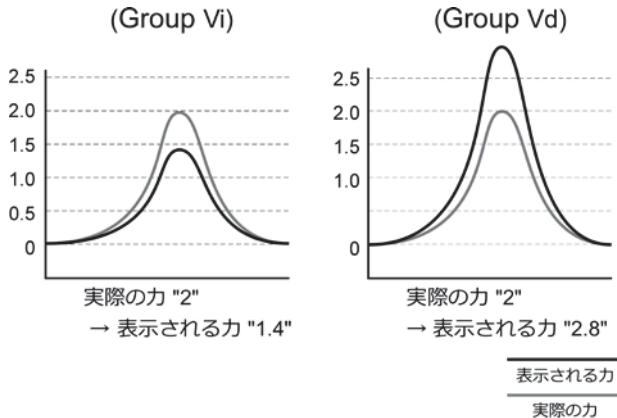


図4 視覚による誤差フィードバック課題

2.5 聴覚性の誤差フィードバックによる学習課題

被験者には“2を超えたら高いビープ音(600Hz), 下回ったら低いビープ音(150Hz)を1秒間鳴らします”と説明し、目隠しをした状態でビープ音を頼りに基本課題を行わせた。実際には以下に示すように3あるいは1を閾値として2種類の音によるフィードバックを与え、ピンチ力の増加(Ai群, 図5左)あるいは減少(Ad群, 図5右)を誘導した。

- Ai群：3以上→高音 3未満→低音
… ピンチ力増加を誘導
- Ad群：1以上→高音 1未満→低音
… ピンチ力減少を誘導

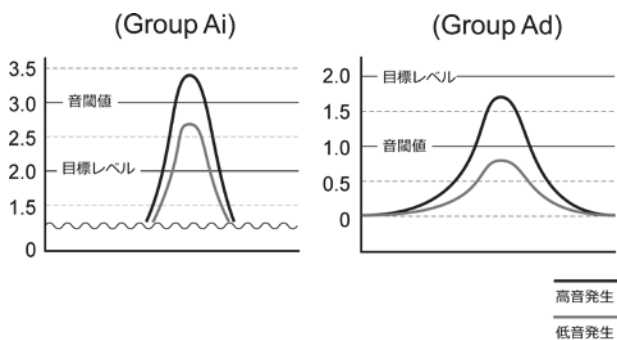


図5 聴覚による誤差フィードバック課題

2.6 聴覚性誤差フィードバックによる学習課題(2)

液晶シャッターゴーグル(竹井機器工業, 東京)を用い、ピンチ運動開始直後より視覚が遮蔽される条件で2.5と同様の聴覚性誤差フィードバックを与える学習課題を実施した(Ai2群, 図6)。

2.7 統計解析

それぞれの被験者において、プレテストにおける

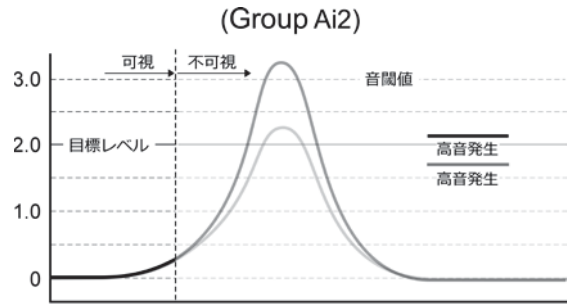


図6 聴覚による誤差フィードバック課題(2)

最後の10試行, 学習課題の最後の10試行, ポストテストの最初の3試行の平均値を解析に用いた。各実験群において、プレテスト, 学習課題, ポストテストの間で上記の平均に差が存在するかどうかをTukeyの多重比較により調べた。有意水準は5%とした。

3. 結果

3.1 視覚性の誤差フィードバックによる学習効果

図7に視覚による誤差フィードバックを与えた群のピンチ力の推移の例を示す。Vi群の学習課題における最後の値(最後の10試行の平均)はプレテスト最後における最後の値に比べて明らかに大きくなっており、視覚の誤差フィードバックによってピンチ力が増加したことが示された。同じくVd群でも学習課題における最後のピンチ力は明確に小さくなっていった。

Vi群(11実験)およびVd群(8実験)におけるピンチ力変化を図8に示す。図8では同一被験者のデータプロットを線で結んである。Vi群において、プレテスト(最後の10試行の平均)の値に比較して学習課題(最後の10試行平均)およびポストテスト(最初の3試行平均)より有意に高値となった。Vd群には学習課題, ポストテスト時のピンチ力はプレテストよりも有意に低い値を示した。

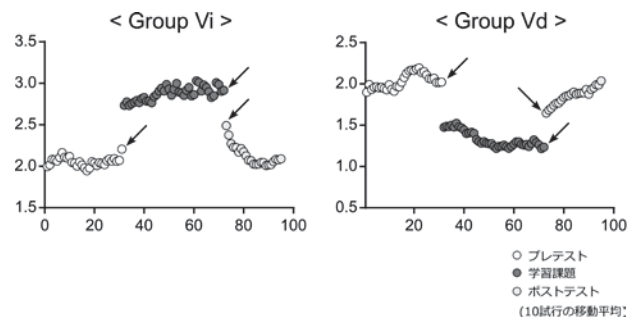


図7 視覚フィードバック群のピンチ力推移

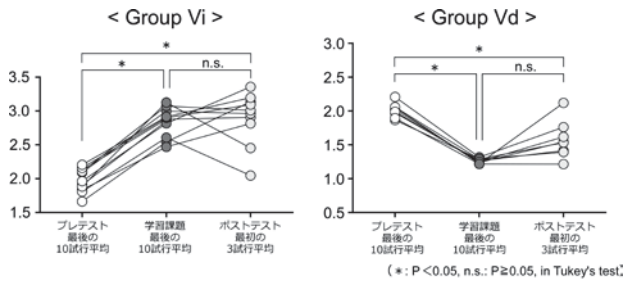


図8 視覚フィードバック群のピンチ力変化

3.2 聴覚性の誤差フィードバックによる学習効果

図9に聴覚による誤差フィードバックを与えた群のピンチ力の推移の例を示す。Ai群、Ai2群の学習課題における最後の値はプレテスト最後における最後の値に比べて明らかに高値となった。同じくAd群でも学習課題における最後のピンチ力は明確に小さな値を示した。すなわち聴覚の誤差フィードバックに誘導されてピンチ力が変化したことが示された。視覚によるフィードバック群の結果と異なり、3つの群いずれにおいてもポストテストの最初の値は学習課題の最後の値と大きく離れており、プレテストの最後の値あるいは目標値（即ち2）に近い値を示した。

Ai群、Ad群、Ai2群（各7実験）におけるピンチ力変化を図10に示す。図8と同様に同一被験者の

データプロットを線で結んである。Ai群、Ad群において、プレテストの値に比較して学習課題における値は有意に高値を示したものの、ポストテストではその値が大きく減少（Ai群）あるいは増加（Ad群）しており、プレテスト-ポストテスト間は差が見られなかった。Ai2群においても学習課題-ポストテスト間では有意な差が認められ、Ai群と同様の傾向を示した。

4. 考察

本研究ではオンライン制御のきかないballisticな運動である瞬間的なピンチ力発揮を課題に用い、運動誤差のフィードバックを2つの異なるモダリティで与えることで、運動学習効果の違いが生じるかどうかを調べた。

視覚による誤差フィードバックの実験では、誤差のフィードバックにより有意なピンチ力変化が誘導されるだけでなく、その変化がポストテスト時にも残存するいわゆるafter-effectが観察された。このことより、誤差フィードバックによってピンチ運動制御の神経回路における可塑性、すなわち運動学習が引き起こされたと考えられた。

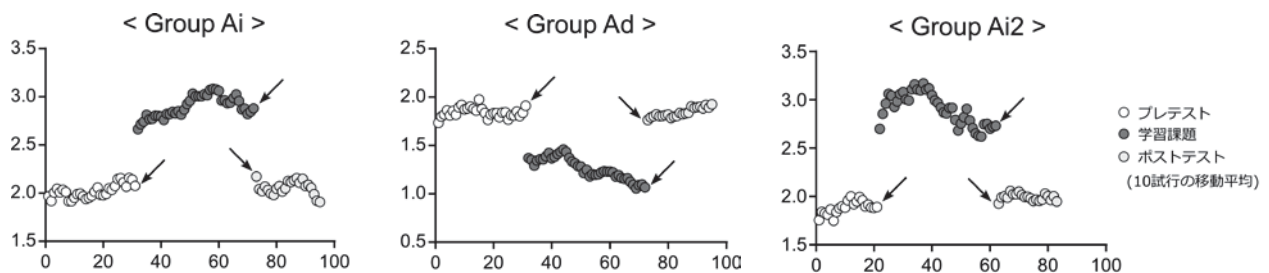


図9 聴覚フィードバック群のピンチ力推移

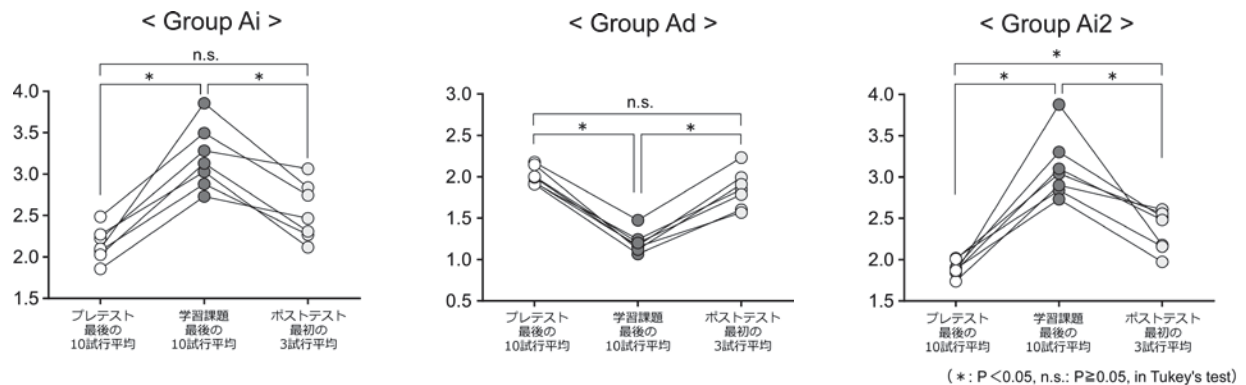


図10 聴覚フィードバック群のピンチ力変化

一方で聴覚によるフィードバックの実験では、学習課題中は視覚性フィードバック群と同様にピンチ力の変化が観察された。しかしポストテストにおけるピンチ力は学習課題時に比較して有意に低値 (Ai群) あるいは高値 (Ad群) を示しており、その値とプレテスト時の値では有意な差はみられなかった。つまり、聴覚性誤差フィードバックではフィードバックを付与している間は力の変化を誘導されるものの、視覚性フィードバック群で見られたような after-effect がなく、運動学習は起こらなかったと考えられる。

聴覚性フィードバックを与えた Ai および Ad では試行中は目隠しによりディスプレイを視認が出来ないため、そもそも目標値 (即ち “2” のライン) が確認できない。そのため視覚性フィードバック付与の Vi・Vd 群と比べて運動課題自体が質的に異なり、その差異が運動学習の成否に関連した可能性が考えられた。そこで液晶シャッターゴーグルによる視覚遮断を用いた Ai2 群の実験を実施した。Ai2 群ではピンチ運動を開始する時点まではディスプレイおよび目標値を視認可能であり、運動実行時までには視覚性フィードバック群との差異は無い。この実験においてもピンチ力変化は Ai 群と同様の傾向を示し、after-effect も観察されなかった。したがって本研究の運動課題において、聴覚による誤差フィードバックにより誘発される運動の変化は脳可塑性にもとづく運動学習とは異なり、単に感覚依存的な運動制御の結果と考えられた。

本研究の聴覚性フィードバック実験では運動の結果としての大・小の2つの情報のみが与えられている。一方視覚性フィードバック実験では、被験者は自己のピンチ力の推移を運動開始時から終了時まで連続して観察している。したがってピンチ力表示中のどの部分から誤差を判断し、運動学習に必要な情報として用いているかについては、外部からはもちろんのこと、被験者自身も判別することは難しいと考えられる。このことは、視覚性フィードバックでは誤差を抽出するための情報量が聴覚性実験よりも豊富であったことを示唆しているとも言える。Ishikawa らは投擲運動の学習課題において、ボールの着弾以前に視覚を遮断しても、途中の軌道が視認可能であれば学習が起こることを示している⁶⁾。本

研究の視覚性フィードバック実験でも、ピンチ力がピークに達する前の力線推移から誤差を見積もることは不可能ではない。したがって視覚性、聴覚性の各実験において、誤差の情報量の差が本実験における学習効果の差異に関連していた可能性が否定できない。ピンチ力のピークの値のみを呈示するなど誤差情報量を制限し、両実験の誤差呈示条件をより近づける必要があると考えられる。

聴覚による誤差フィードバックの学習効果については、両手動作の協調運動課題⁷⁾、上肢の3次元運動学習課題⁸⁾でその効果に否定的な報告がされている。一方、本研究と同じく手指を用いた運動の適応課題において、視覚、固有感覚、言語による誤差フィードバックのいずれも同等に学習効果をもたらすという報告⁹⁾も存在する。Sigrist らは聴覚フィードバックは速い運動におけるオンライン誤差を修正する上では有効であり、フィードフォワード型の運動における学習には影響が少ないと述べており¹⁰⁾、本研究のようにオンライン制御の介在しない ballistic movement においては、聴覚による運動学習は起こりづらいのかもしれない。本研究は2本の指のみを用い、等尺性収縮をごく短時間実施する単純な運動課題であったが、同じ ballistic movement であってもその自由度、運動持続時間、強度などが異なれば、誤差フィードバックのモダリティの影響が異なる可能性は十分に考えられる。その際、異なるモダリティで呈示される誤差情報の質・量を出来るだけ近似させて比較することが、様々な身体運動の制御系に共通する可塑性の原理を解明する上で最も重要であると考えられる。

本研究は運動学習における誤差フィードバックのモダリティの影響を behavioral に検討しているものであり、その背景にある脳内メカニズムについてアプローチしていない。したがって本研究で用いた課題における運動学習の神経機構を論理の飛躍なく考察することは容易ではないが、敢えて考えるとすれば、本実験のようにオンラインフィードバック制御がなくごく短時間で行われる運動の制御に関しては、小脳が何らかの役割を担っている可能性が想定できる。小脳は反射性眼球運動¹¹⁾、随意眼球運動^{12) 13)}、上肢の急速なリーチング運動¹⁴⁾などの適応学習に関わることが示されている。小脳皮質プル

キンエ細胞には2系統のシナプス接続, すなわち平行線維および登上線維の2つの入力があるが, 平行線維入力と登上線維入力のタイミングにより平行線維-プルキンエ細胞間シナプスに可塑性が起こることがよく知られており, 前記した運動学習課題についても, 運動の誤差情報が登上線維信号としてプルキンエ細胞に入力されることが示されている。さらにリーチング運動, 随意性眼球運動において, 登上線維のoriginである下オリーブ核と連絡する神経核において目標や誤差についての視覚情報が表象されていることが示されている^{15) 16) 17)}。一方で聴覚信号と下オリーブ核との機能的関連については連続する音刺激のインターバルのズレに反応すること¹⁸⁾などは知られているが, 聴覚信号そのものが同神経核に表象されているという報告はみられない。したがって小脳性運動学習における誤差呈示に関しては視覚情報の優位性が高いと考えられ, 本研究の結果がこのことに関連している可能性も考えられるが, その証明のためには本実験課題中における神経活動の計測実験など, ヒトおよび動物を用いた電気生理学的な検討が必要であると考えられる。

文 献

- 1) Schmidt RA, Lee TD. Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis, 4th ed, IL: Human Kinetics 2005; 302-304.
- 2) Kitazawa S, Kohno T, Uka T. Effects of delayed visual information on the rate and amount of prism adaptation in the human. *J Neurosci.* 1995, 15(11): 7644-7652
- 3) Yin PB, Kitazawa S. Long-lasting aftereffects of prism adaptation in the monkey. *Exp Brain Res.* 2001, 141(2): 250-253
- 4) Kitazawa S, Yin PB. Prism adaptation with delayed visual error signals in the monkey. *Exp Brain Res.* 2002, 144(2): 258-261
- 5) Hopp JJ, Fuchs AF. The characteristics and neuronal substrate of saccadic eye movement plasticity. *Prog Neurobiol.* 2004, 72(1): 27-53.
- 6) Ishikawa T, Sakaguchi, Y. Both movement-end and task-end are critical for error feedback in visuomotor adaptation: A behavioral experiment. *PLoS ONE* 2013, 8(2). e55801. doi:10.1371/journal.pone.0055801
- 7) Ronsse R, Puttemans V, Coxon JP, et al. Motor learning with augmented feedback: modality-dependent behavioral and neural consequences. *Cereb Cortex* 2011, 21(6): 1283-1294.
- 8) Sigrist R, Rauter G, Riener R, et al. Terminal feedback outperforms concurrent visual, auditory, and haptic feedback in learning a complex rowing-type task. *J Mot Behav.* 2013, 45(6): 455-472.
- 9) Sarlegna FR, Gauthier GM, Blouin J. Influence of Feedback Modality on Sensorimotor Adaptation: Contribution of Visual, Kinesthetic and Verbal Cues. *J Mot Behav.* 2007, 39(4): 247-258.
- 10) Sigrist R, Rauter G, Riener R, et al. Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: a review. *Psychon Bull Rev.* 2013, 20(1): 21-53.
- 11) Blazquez PM, Hirata Y, Highstein SM. The vestibulo-ocular reflex as a model system for motor learning: what is the role of the cerebellum? *Cerebellum.* 2004; 3(3): 188-192.
- 12) Robinson FR, Fuchs AF, Noto CT. Cerebellar influences on saccade plasticity. *Ann NY Acad Sci.* 2002. 956: 155-163.
- 13) Kahlon M, Lisberger SG. Changes in the responses of Purkinje cells in the floccular complex of monkeys after motor learning in smooth pursuit eye movements. *J Neurophysiol.* 2000, 84(6): 2945-2960.
- 14) Kitazawa S, Kimura T, Yin PB. Cerebellar complex spikes encode both destinations and errors in arm movements. *Nature.* 1998, 392(6675): 494-497.
- 15) Stuphorn V, Bauswein E, Hoffmann KP. Neurons in the primate superior colliculus coding for arm movements in gaze-related coordinates. *J Neurophysiol.* 2000, 83(3): 1283-1299.
- 16) Kaku Y, Yoshida K, Iwamoto Y. Learning signals from the superior colliculus for adaptation of saccadic eye movements in the monkey. *J Neurosci.* 2009, 29(16): 5266-5275
- 17) Ono S, Mustari MJ. Visual error signals from the pretectal nucleus of the optic tract guide motor learning for smooth pursuit. *J Neurophysiol.* 2010, 103(5): 2889-2899.
- 18) Teki S, Grube M, Kumar S, et al. Distinct Neural Substrates of Duration-Based and Beat-Based Auditory Timing. *J Neurosci.* 2011, 31(10): 3805-3812.

The Influence of Feedback Modality of Error Information on Motor Learning

Yuki KAKU^[1]

Katsumori TAKAMATSU

Shun-ichi KUWANA^[2]

Center for Medical Sciences, Ibaraki Prefectural University of Health Sciences

Faculty of Health Sciences, Uekusa Gakuen University

Faculty of Health Sciences, Uekusa Gakuen University

Learning in voluntary movements is guided by sensory feedback that indicates movement error. In previous studies, many researchers have investigated the effects of timing, relative frequency and accuracy of feedback information about error on the efficiency of motor learning. However, less attention has been paid to the relationship between the modality of sensory feedback and learning success. In this study, we examined the influence of the feedback modality (visual or auditory) on learning in an isometric force control task. Subjects were instructed to rapidly pinch an isometric force transducer using their thumb and index fingers. In pre and post-learning phase, the pinching force and the target value were displayed on a PC screen for both visual feedback (VF) and auditory feedback (AF) groups. In the learning phase for the VF group, the display gain (displayed value / actual value) of the force was surreptitiously changed. For the AF group, subjects were blindfolded and received deceptive auditory feedback about their force. The subjects in both groups significantly altered their pinching force to reduce false movement error during the learning phase. In the post-learning phase, the force change remained in the VF group (after-effect). By contrast, no clear after-effect was observed in the AF group, which indicated that motor learning was not induced. These results may suggest that the plasticity in the neural system of the visually guided movement as in this study only could be induced by visual information about movement error.

Keywords: motor learning, error feedback, modality

[1] Yuki KAKU

[2] Shun-ichi KUWANA

