



巧みで素早い運動を支える脳内情報処理 ——視覚的な身体情報による伸張反射の調整

観客を惹きつけるアスリートのスーパープレーから、私たちが何気なく行っている日常の動作まで、人間の身体動作は反射に代表される無意識の感覚-運動プロセスに支えられています。その1つである伸張反射が、多感覚統合による身体表象を介して調整されることが、最新の研究成果より分かってきました。このことは、反射による運動制御が、従来考えられてきたより高度な脳内情報処理を経て行われている可能性を示唆します。

いとう しょう
伊藤 翔

ごみ ひろあき
五味 裕章

NTT コミュニケーション科学基礎研究所

人間の運動を支える反射

人間の身体動作は意識に上らないさまざまな脳の仕組みによって支えられています。その1つが「反射」と呼ばれる感覚-運動プロセスで、視覚や体性感覚*などによる外界からの刺激に対して、意識を介さずに運動応答を生成します。反射による運動制御は、随意運動（意識を介して行われる運動）よりも高速な応答を引き起こすため、例えばスポーツにおいて相手の動きに対応した瞬間的な反応を可能にすると考えられます。あるいは“歩く”“立ち上がる”“物に手を伸ばす”といった、日常生活の中で何気なく行っている動作も、反射による姿勢の制御に支えられて初めて実現されるといえます。NTTコミュニケー

ション科学基礎研究所では長年、反射がどのような脳内の情報処理を経て生成され、人間の運動実行に役立っているかを調べています^{(1)~(3)}。本稿では体性感覚情報によって引き起こされる反射の1つ「伸張反射」について概要を述べ、その情報処理に関する最近の研究成果⁽⁴⁾を解説します。

伸張反射の仕組みと機能

伸張反射は筋の受動的な伸展によって生じる反射で、主に姿勢を安定に保つうえで重要な役割を果たすと考えられています（図1）。障害物との接触などによって意図しない姿勢の変化が生じると、筋の長さの変化をとらえる受容器である筋紡錘が反応し、「筋が伸ばされた」という情報を上行性の感覚信号として脳・神経中枢に伝達します。この信号は随意運動とは異なる脳部位や神経経路で処理され、伸ばされた筋を収縮させる運動応答を生成します。伸張反射応答は脊髄レベルの神経

* 体性感覚：人間の感覚機能のうち、触覚および深部感覚を合わせて称する用語。皮膚や筋、腱、関節などの受容器からの入力によって生じる感覚を指します。体性感覚があることで、人間は視覚情報が得られない状況でも自己の姿勢や運動の様子を知覚することができます。

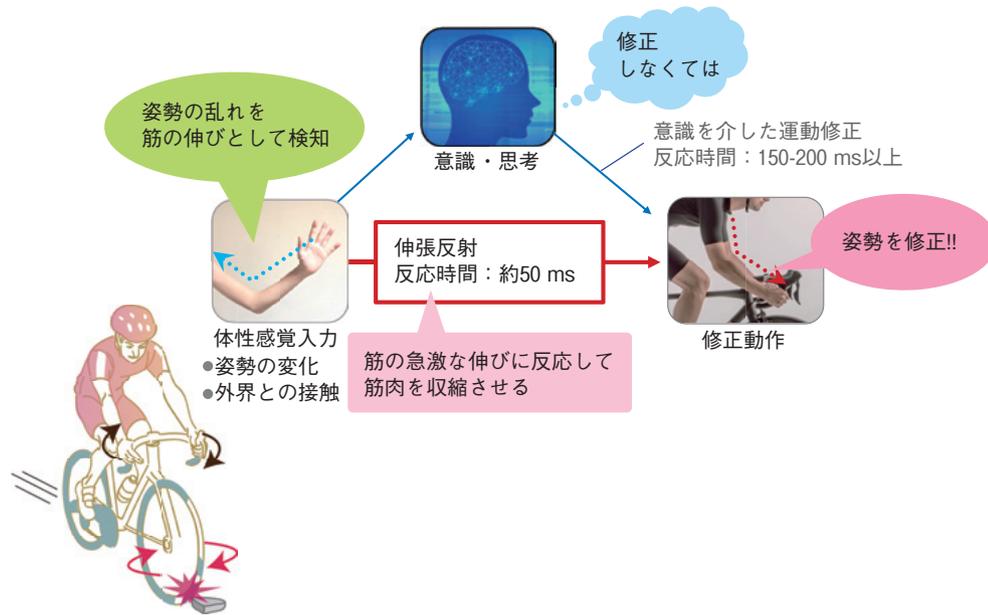


図1 伸張反射のはたらき

経路によって生じる短潜時成分と、大脳皮質運動野まで含む神経経路を経て生成される長潜時成分とを含むことが明らかになっています⁽²⁾。そのうち、比較的応答の遅い長潜時の伸張反射でさえ、刺激の入力から約50 msという極めて短い反応時間で筋活動が発生するため、反応に100~150 ms以上かかる随意運動と比較して素早く姿勢の変化を補償することができると考えられます。

伸張反射は入力刺激に対して常に一定の応答が生じるわけではなく、課題や環境の変化に依存して応答の調整がみられることが種々の先行研究で示されています⁽³⁾、⁽⁵⁾。脳はこのような反射系の調整を通して、状況に応じた柔軟な運動制御を行っていると考えられます。一方で、その調整計算のために脳内でどのような情報処理が行われているかについて

は、詳細には分かっていません。一例として、伸張反射の調整が体性感覚情報のみに基づくのか、あるいは視覚情報など他のモダリティにおける感覚情報も統合した身体表象を利用して行われているのかについてはこれまで未解明でした。本研究ではこの点を検証するため、運動実行中の自己位置を示す視覚情報を操作し、伸張反射に影響がみられるかを調べました。

反射調整における多感覚統合の関与

身体状態に応じた伸張反射の調整の仕組みについて、2つの仮説が考えられます(図2)。1つは、伸張反射は体性感覚入力によって生じる応答であることから、その調整も体性感覚に依存して行われるという考え方で、これに対してもう1つは、体性感覚情報

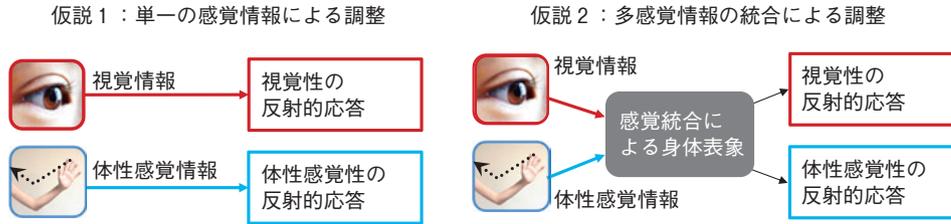


図2 反射調整の情報処理についての仮説

実験装置

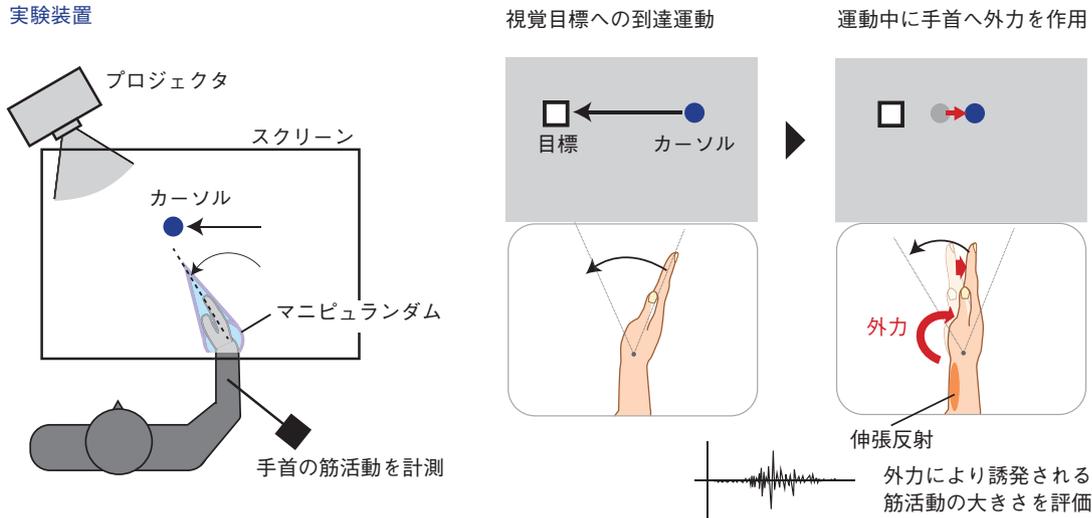


図3 実験設定

に加えて視覚情報など他のモダリティの感覚情報も統合した身体表象を介して、より精度良く身体状態を推定し、反射応答の調整に使用しているという考え方は、本研究では、これらの仮説のどちらがより確からしいかを検証するため、視覚情報を実験的に操作し、それにより伸張反射が影響を受けるかを調べました。

実験として、**図3**左に示すような実験装置を用いて、手首の屈曲運動による視覚目標への到達課題（**図3**中央）を行いました。試行

を繰り返し行う中で、一定の確率で到達運動の最中に瞬間的な外力を作用させ、手首の急激な伸展を引き起こしました（**図3**右）。この操作によって手首の屈筋に伸張反射を誘発することができ、その大きさを皮膚に張った電極によって計測しました。ここで実験条件として、手の位置を表すカーソルの移動方向に回転変換を加えることで、視覚による身体情報と実際の運動の間に不一致を生じさせました（**図4**左）。ただし、目標位置や運動開始位置も同じ回転変換により移動させること

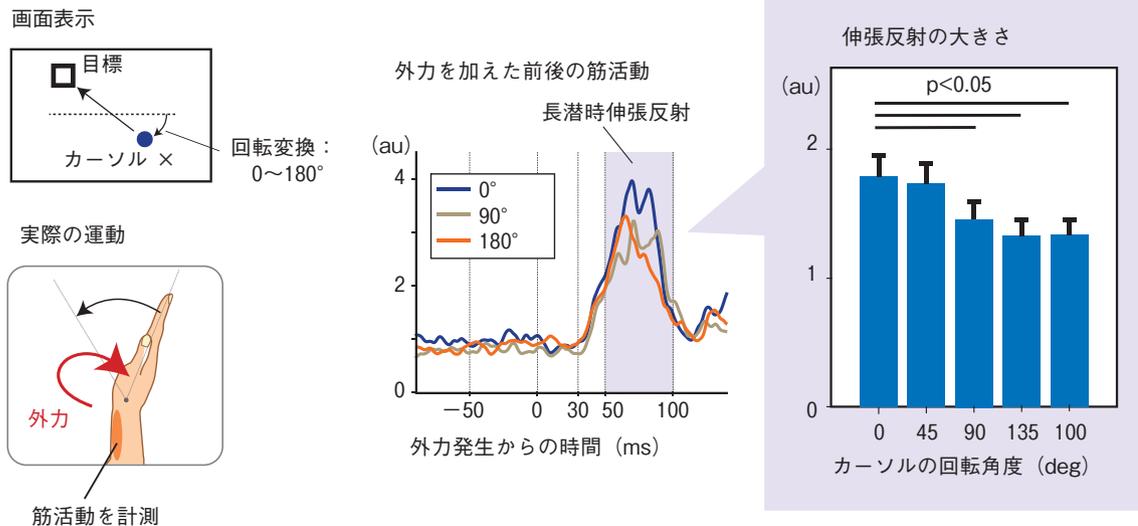


図4 視覚情報の不一致（回転変換）が伸張反射に与える影響

で、行われる運動は常に同一になるようにしました。この条件下で伸張反射応答の大きさを比較することで、視覚情報の伸張反射への影響を調べました。その結果、図4右に示すように、カーソルの回転変換が大きくなるほど、長潜時の伸張反射応答が小さくなることが分かりました。このことは、伸張反射応答の調整に視覚情報を含む多感覚統合による身体表象が関与している、という仮説を支持する結果といえます。反射系の調整の基盤となる身体表象も、随意運動と同様、複数の感覚情報を統合することによって状態推定の精度を高めていると考えられます。

身体状態推定の不確かさの影響

第一の実験では、視覚フィードバックの回転変換に応じて伸張反射応答が小さくなることを示しました。この現象の説明として、回

転変換によって運動中の身体状態推定が不確かになり、そのことが伸張反射応答の減衰につながった可能性が考えられます。この仮説を検証するため、運動中に自分の手の位置を示すカーソルを消去する実験を行いました(図5左上)。このとき身体状態を表す視覚情報に不確かさを与えるため、カーソルの提示時間を4段階に変化させ、運動への影響を調べました。その結果、図5右上に示すように、カーソルの提示時間が短いほど運動到達位置のばらつきは大きくなり、運動中の身体状態推定がより不確かになることが確認されました。一方、伸張反射応答を計測したところ、カーソルの提示時間が短いほど長潜時の伸張反射応答が小さくなることが分かりました(図5下)。この実験の結果から、運動中の身体状態の不確かさに応じて伸張反射が調整されていることが示唆されました。身体状態が曖

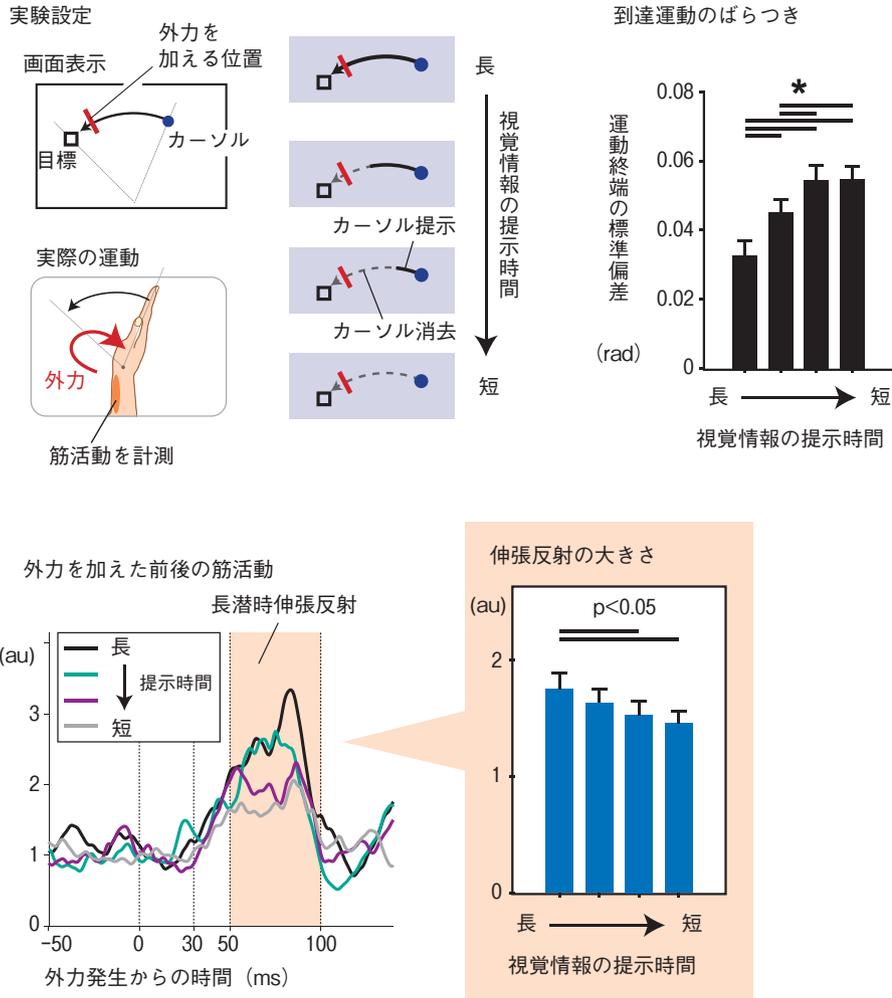


図5 身体情報の不確かさが伸張反射に与える影響

味な状況では誤った方向に大きな運動修正を行ってしまう危険性があるため、脳は反射応答を小さくすることでリスクを回避する調整を行っている」と解釈できます。

まとめと今後の展望

本研究では、伸張反射が視覚による身体情報に依存して調整されることを明らかにしました。実験により、視覚目標への到達運動中

の伸張反射が①身体運動の視覚フィードバックと実際の運動の不一致、②身体運動の視覚フィードバックの消去、という条件下で通常時より小さくなることを示しました。これらの結果から、伸張反射の調整には体性感覚情報だけでなく、「視覚情報も統合した身体表象」が利用されていると考えられます。さらに、視覚情報の提示時間に応じて変化する反射応答と運動到達位置のばらつきが逆相関す

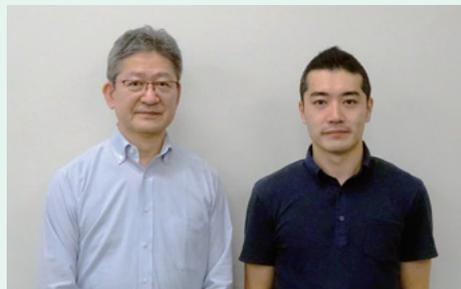
ることを見出しました。このことから、運動中の身体状態推定がどのくらい不確かかということによって伸張反射の調整が行われている、ということが示唆されます。これらの発見は、反射応答の調整計算が、従来考えられていたより複雑な脳内情報処理を経て行われていることを示唆しています。

今後、本研究で得られた知見を基に、反射系調節のために行われている脳内情報処理のさらなる解明をめざします。特に、調整計算にかかわる神経基盤を明らかにすることや、情報処理の理論的側面を詳細に調べることがこれからの課題です。このような検討を通して人間の身体制御の仕組みをより深く理解していくことで、将来的には、アスリートの能力の解析や、科学的なトレーニング方法の開発などに発展していくことが期待されます。また、本成果によって、人間の運動実行において多感覚情報が統合・利用される脳内情報処理過程の一端が明らかになりました。運動時の感覚統合メカニズムは、身体動作を伴うインタフェースのデザインを検討するうえで重要であり、将来的にはVR (Virtual Reality) システムの設計開発などに応用できるよう、知見を積み重ねていきます。

本研究の一部は、平成28～令和2年度文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「人工知能と脳科学の対照と融合 潜在的運動における学習適応メカニズムの解明と計算モデル構築 (JP16H06566)」の助成を受けて行われました。

■参考文献

- (1) N. Saijo, I. Murakami, S. Nishida, and H. Gomi: "Large-field visual motion directly induces an involuntary rapid manual following response," *Journal of Neuroscience*, Vol. 25, No. 20, pp. 4941-4951, 2005.
- (2) T. Kimura, P. Haggard, and H. Gomi: "Transcranial magnetic stimulation over sensorimotor cortex disrupts anticipatory reflex gain modulation for skilled action," *Journal of Neuroscience*, Vol. 26, No. 36, pp. 9272-9281, 2006.
- (3) T. Kimura and H. Gomi: "Temporal development of anticipatory reflex modulation to dynamical interactions during arm movement," *Journal of Neurophysiology*, Vol. 102, No. 4, pp. 2220-2231, 2009.
- (4) S. Ito and H. Gomi: "Visually-updated hand state estimates modulate the proprioceptive reflex independently of motor task requirements," *Elife*, Vol. 9, e52380, 2020.
- (5) J.A.Pruszynski and S.H.Scott: "Optimal feedback control and the long-latency stretch response," *Exp. Brain Res.*, Vol. 218, No. 3, pp. 341-359, 2012.



(左から) 五味 裕章 / 伊藤 翔

無意識の運動応答は一見、単純にみえますが、調べるといろいろと興味深い点が見えてきます。反射をはじめとする運動の仕組みを通して、私たちの脳が行っている巧みな情報処理を探っていきたいと思います。

◆問い合わせ先

NTTコミュニケーション科学基礎研究所
人間情報研究部
TEL 0774-93-5020
FAX 0774-93-5026
E-mail cs-liaison-ml@hco.ntt.co.jp