

腕立て伏せ時の「カチカチ感」付与による運動感覚の拡張

栗原 洋輔^{*1} 國安 裕生^{*1} 蜂須 拓^{*1}

佐藤 未知^{*1 *2} 福嶋 政期^{*1 *2} 梶本 裕之^{*1 *3}

Augmentation of Kinesthetic Sensation by Adding “Rotary Switch Feeling” for Push-Ups

Yosuke Kurihara^{*1} Yuki Kuniyasu^{*1} Taku Hachisu^{*1}
Michi Sato^{*2} Shogo Fukushima^{*2} and Hiroyuki Kajimoto^{*1 *3}

Abstract — 筋力トレーニングにおいて効率良く筋力を増強させるためには、正しい姿勢で運動することが重要である。しかし自らの姿勢を詳細に把握することは困難である。そこで本研究では、運動に同期した新たな触覚の手がかりとしてロータリスイッチの触覚フィードバック「カチカチ感」を呈示することを提案する。実際に腕立て伏せを例にとり、カチカチ感呈示デバイスを肘部に装着することで肘部運動感覚の鮮明化および肘屈伸の教示を試みる。実験結果から、カチカチ感の呈示によって運動感覚が鮮明になるに従い、かえって運動量自体は減少する傾向があることが確認された。

Keywords : Haptic feedback , kinesthesia , push-up, rotary switch feeling

1. はじめに

筋力トレーニングはアスリートにとって競技力向上のために非常に重要である。また日常生活で運動する機会が減少している現代において、筋力トレーニングは健康づくり・老化防止・美容などのために盛んに行われている[1]。

筋力トレーニングでは、筋肉に過負荷をかけることで筋繊維を破壊し、その後栄養補給・休息によって超回復を促し、筋繊維を太くする。効率良く筋力を増強させるには、正しい姿勢で適切な負荷をかけ、適切な回数トレーニングを行う必要がある。特に姿勢に関して誤った方法でトレーニングを行うと、所望の部位の筋肥大は見込めず、逆に身体を損傷し怪我につながる可能性が高い[2]。

しかし、頭の中で思い描いた正しい姿勢と実際の姿勢を一致させることは難しい。例えば、十分に屈伸させなければならない身体部位が全く屈伸しておらず、固定されていない身体部位が運動してしまうということがしばしばある。これに対し、注目部位の直接あるいは鏡を介しての目視によって身体姿勢を確認し、所望の姿勢に一致させる方法が考えられる。しかし、頭部運動を伴うため姿勢を崩してしまうこともある。

一方で、ヒトは視覚が遮られた状態でも深部・

皮膚感覚といった触覚の手がかりにより身体の姿勢・動きといった運動感覚をある程度取得可能である[3]。しかし、触覚の手がかりのみではその詳細を把握するには不十分である。

そこで我々は身体運動に同期した新たな触覚の手がかりを付与することで、運動感覚をより鮮明にすることを考えた。本研究ではロータリスイッチのもつ触覚フィードバック「カチカチ感」に着目し、これを新たな触覚の手がかりとして身体運動に適用し運動感覚の鮮明化を試みる。本稿では腕立て伏せ腕屈伸（腕立て伏せ）における肘屈伸運動にカチカチ感を適用し、屈伸感覚の鮮明化を行う（図 1）。さらに被験者実験より、カチカチ感呈示によって正しい肘屈伸を教示できるかを検証する。



図 1. 腕立て伏せ時のカチカチ感呈示イメージ

*1: 電気通信大学, {kurihara, kuniyasu, hachisu, michi, shogo}@kaji-lab.jp, kajimoto@hc.ucc.ac.jp

*2: 日本学術振興会特別研究員,

*3: 科学技術振興機構さきがけ

*1: The University of Electro-Communications

*2: JSPS Research Fellow

*3: Japan Science and Technology Agency (JST)

2. 触覚による運動・姿勢教示

触覚を用いて身体の姿勢・動きを教示する手法としてこれまでに様々な提案がされてきた。Janetらはヴァイオリン演奏訓練者の肘・手首・腰に振動モータを装着し、訓練者が誤った姿勢をとったときその身体部位に振動刺激を呈示することで姿勢教示を行った[4]。しかし訓練者は振動を避けることに尽力し、演奏技能習得という本来の目的に集中できなくなった。そのため演奏動作はぎこちないものとなった。これは振動刺激を避けることが訓練者の身体運動の目的となっており、その結果訓練者は演奏の訓練を主体的に行えていなかったと考えられる。

嵯峨らは、運動学習においては訓練者の主体性が重要であると主張している[5]。これに基づき、所望の運動方向とは反対の方向に力を呈示し、訓練者がそれを打ち消すように力を加えて運動することで主体的な運動学習の実現を試みた。しかし力が「呈示された後」に訓練者がそれを打ち消す力を加えるので、運動をするきっかけは未だ主体的であったとはいえない。

そこで我々は、「運動した後」に感覚呈示を行うことで完全な主体性が実現されると考えた[6]。運動後に感覚呈示することで、呈示された感覚は訓練者にとって身体を動かすきっかけではなく、身体がどのように動いているか、あるいはどのように動いたかを知覚するためのフィードバックとなる。視点を変えると、ヒトの運動感覚はすべて運動した「後」に生じるものであるから、運動後の感覚呈示は訓練者の運動感覚を拡張する試みとも捉えることができる。

3. 提案手法

3.1. ロータリスイッチ的触覚「カチカチ感」

ロータリスイッチを手で回すと、カチカチとした周期的な触覚が手に返される。このカチカチ感は、周期的な抵抗感の変化と衝撃感で構成されており[7]、ダイヤル型スイッチなどの操作性向上に応用されている。例えば自動車内のダッシュボードに取り付けられたロータリスイッチによって、運転者は手元を見ることなくダイヤルを所望の位置に調整することができる。

このカチカチ感は運動の結果を伝える触覚的手がかりであり、運動感覚の拡張であるといえる。さらに運動後の感覚呈示であるために主体性を損なっていない。我々はヒトの関節部屈伸運動にカチカチ感を適用することで、関節部の運動感覚を鮮明にできるのではないかと考えた。

3.2. 腕立て伏せへの応用

腕立て伏せは自重を利用して上腕三頭筋や大胸筋を鍛えることにおいて有効であり、専用のトレーニング器具を必要としないことから、誰でも気軽に行える筋力トレーニングである。腕立て伏せの正しい姿勢には諸説あるが、本稿では[1]を参考に、腕を完全に伸展させた状態から胸が床につく直前まで可能な限り大きく肘を屈曲させることを正しい姿勢とする。

第1章でも述べたように腕立て伏せにおいても所望の姿勢を保つことは難しい。また複数回行って負荷がかかっている筋肉に疲労が蓄積すると、無意識に他の筋肉に負荷を逃がそうとして肘を屈伸せずに肩や腰を動かすといった誤った姿勢になることが多い。

そこで肘関節にカチカチ感を付与し肘の屈伸状態を鮮明に知覚させることを試みる。これにより訓練者は自己姿勢を把握しやすくなり、十分に肘を屈伸できるようになると考えられる。

4. カチカチ感呈示装置

本章では我々が開発した肘部屈伸運動に同期してロータリスイッチ的触覚を呈示する装置、カチカチ感呈示装置の構造について述べる。

図2に示すように、本装置は円形のジョイント部、上腕リンクおよび前腕リンクから構成される。ジョイント部はABS樹脂製、リンク部はアクリル製である。装置の全長は205mm、重さは105gである。

ジョイント部の内部構造を図3に示す。ジョイント部はジョイントA(図3青色部)とその内部のジョイントB(図3赤色部)、ステンレス製押しばねおよび2つのステンレス球から構成されている。ジョイントA・ジョイントBはそれぞれ上腕リンク・前腕リンクに接続されており、互いに独立して最大約150度回転する。ジョイントAの内径は50mmで、内径上には最大高さ3mmのなめらかな凸が20度ごとに合計18個ある。ジョイントBは押しばねとその両端に2つの球を内蔵しており、ジョイントAに格納されている。本装置を腕部に装着したときの様子を図4に示す。2つのリンクにはABS樹脂製の腕部装着用アタッチメントが固定されており、皮膚接触面にはウレタンシートが貼付されている。アタッチメントはマジックテープ式バンドで前腕・上腕に固定されている。

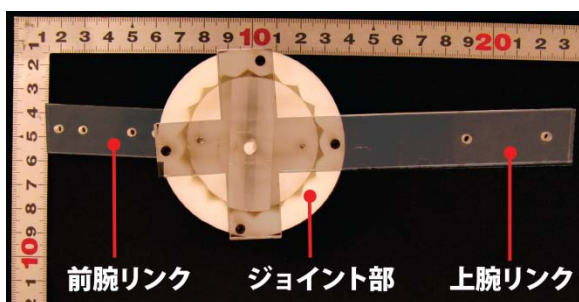


図 2. カチカチ感呈示装置

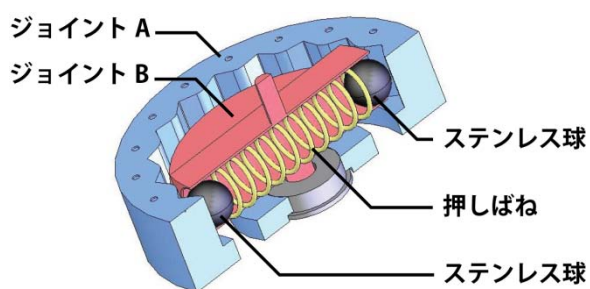


図 3. ジョイント部の内部構造



図 4. 装置を腕部に装着したときの様子

4.1. 動作原理

本装置のカチカチ感呈示原理を図 5 に示す。初期状態で球はジョイント A の凸間の谷にある (図 5-1)。ジョイント B を肘屈伸により回転させると、ジョイント A の凸によってばねが押し縮められる (図 5-2)。その際ばねの弾性力に応じて球に遠心方向の力が加えられ、球と凸の間に回転方向と反対の方向に力が生じる。この反力によって肘屈伸を続けると、球は凸の頂点を乗り越える。このとき縮んでいたばねの弾性エネルギーが解放され、球を遠心方向に押し出す (図 5-3)。このとき瞬時に反力が反転し、押し出された球は隣接する凸間の谷に衝突し、「カチッ」という衝撃が生じる。

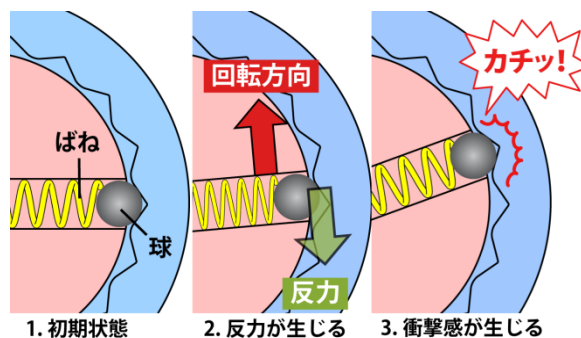


図 5. カチカチ感呈示原理

5. 腕立て伏せ時における肘屈伸角度測定実験

本実験では、前章で述べたカチカチ感呈示装置を用いて、腕立て伏せ時の肘部屈伸運動にカチカチ感を適用することで肘の屈伸範囲が大きくなるかを検証した。

5.1. 実験被験者

本実験は被験者の運動能力が大きく影響すると思われる。そこで運動能力に偏りが出ないように、普段の運動頻度をもとにほぼ毎日運動を行う者から減多に運動を行わない者まで偏りなく選定した。被験者は21~22歳の男性6名であり、全員本研究の趣旨については知らされていなかった。

5.2. 実験設備構成

実験設備の模式図を図 6 に示す。肘屈伸角度の測定には、ロータリセンサ (アルプス電子, RDC506002A, 抵抗式) および AD ボード (Interface 社製, PCI-3523A, 電圧変換レンジ±10V, 解像度 12bit) を用いた。ロータリセンサをカチカチ感呈示装置に固定して 5.0V の電圧を印加し、出力電圧をサンプリングレート 1ksps(samples/sec) で AD 変換し、PC に記録した。

本実験ではカチカチ感の有無が肘の屈伸角度に及ぼす影響を検証するために、カチカチ感呈示装置と、同装置からばねと球を取り除いたカチカチ感を呈示しない装置の 2 つを用いた。また本装置はカチカチ感を呈示する際に音が生じるため、被験者は触覚ではなく聴覚からカチカチ感を知覚する可能性がある。そこで我々は触覚的カチカチ感の効果を検証するために、ヘッドホンを通して聴覚遮断用のホワイトノイズを呈示した。したがって被験者に呈示される感覚は、「カチカチ感」、「カチカチ感 (聴覚遮断)」、および「非カチカチ感 (呈示なし)」の 3 種類であった。

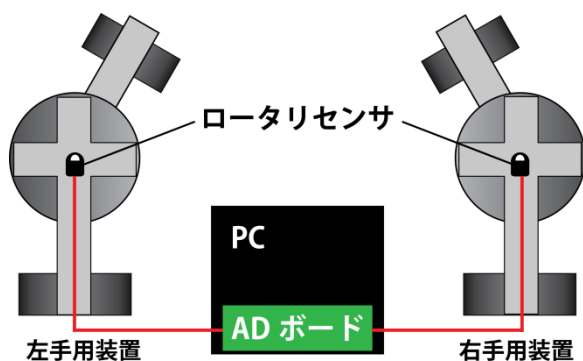


図 6. 実験設備の模式図

5.3. 実験手続き

本実験を行う前に被験者に本実験の意図を悟られないようにするために、被験者には事前に「筋活動の計測に関する実験」と伝えた。

まず実験者は被験者の両腕にカチカチ感呈示装置を装着させた。この時痛みがなく肘がスムーズに屈伸することを確認した。次に被験者に肘を自由に屈伸させて、しばらくカチカチ感を体感させた。装置を一度取り外した際も同じ位置に再装着できるように、被験者の腕に水性ペンで印をつけた。

実験者から被験者には、「正しい腕立て伏せの姿勢とは腕を完全に伸展させた状態から胸が床につく直前まで可能な限り大きく肘を屈曲させ、その後元の位置に戻すことである」と説明した。説明後被験者に腕立て伏せの姿勢をとらせた。両手の位置は、肘を完全に伸展させた状態で肩幅程度に開き、胸が延長上に並ぶようにした。また両足は約 15cm 開くようにした。この状態を基本姿勢とし、実験者は被験者の両手足が置かれている位置にテープで印をつけた。印をつけた後、被験者に楽な姿勢をとらせ、装置を取り外した。

被験者は実験者が指示した装置を装着し基本姿勢をとった。実験者は被験者の目の前に Apple 社製 iPhone3GS を置き、画面上に 30bpm (1 往復 4 秒) の周期で往復する無音のメトロノーム[8]を表示した。被験者にこのメトロノームを注視するように指示し、リズムに合わせて 2 秒で肘を屈曲させ、次の 2 秒で伸展させるように指示した。図 7 に示すように被験者は実験者の合図で肘の屈曲を開始し、正しい腕立て伏せの姿勢を心がけて 3 回連続で肘屈伸を行った。腕立て伏せ終了後被験者は楽な姿勢をとり装置を取り外した。これを 1 試行とし、その後再び被験者は実験者の指示した装置を装着し、同様の手順で腕立て伏せを行った。

3 種類の感覚呈示に対して 2 試行ずつ、合計 6 試行を行った。感覚呈示の順序や腕立て伏せに対する順応・疲労の影響を考慮し、被験者ごとに感覚呈示の順序を変更した。

実験者は腕立て伏せ開始の合図と同時にロータリセンサの出力電圧の測定を開始し、腕立て伏せ終了と共に測定を終了した。なお肘が完全に伸展した状態を 0 度とし、肘が屈曲するにつれ角度が増していくものとした。



図 7. 実験の様子

5.4. 実験結果

被験者 6 名のうち 2 名は腕立て伏せを正常に行うことができなかったため、実験結果から除いた。

実験結果を分析するために、まず各試行約 12 秒間のうち被験者の腕立て伏せの挙動が不安定になりがちであった最初の 3 秒と最後の 3 秒を除外した。次に肘の屈伸範囲を検証するために、肘が最も屈曲した時の角度と肘が最も伸展した時の角度の差を肘の屈伸範囲とした。

図 8 に実験結果を示す。グラフの横軸は 3 種類の呈示感覚と各呈示感覚における左肘・右肘を示し、縦軸は肘の屈伸範囲を示す。エラーバーは被験者間の標準偏差である。

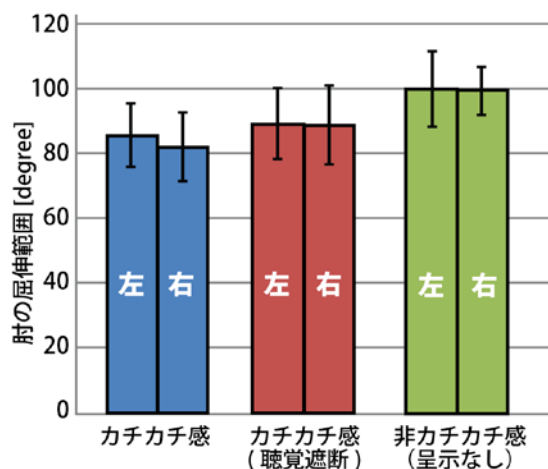


図 8. 3 種類の呈示感覚における肘屈伸範囲

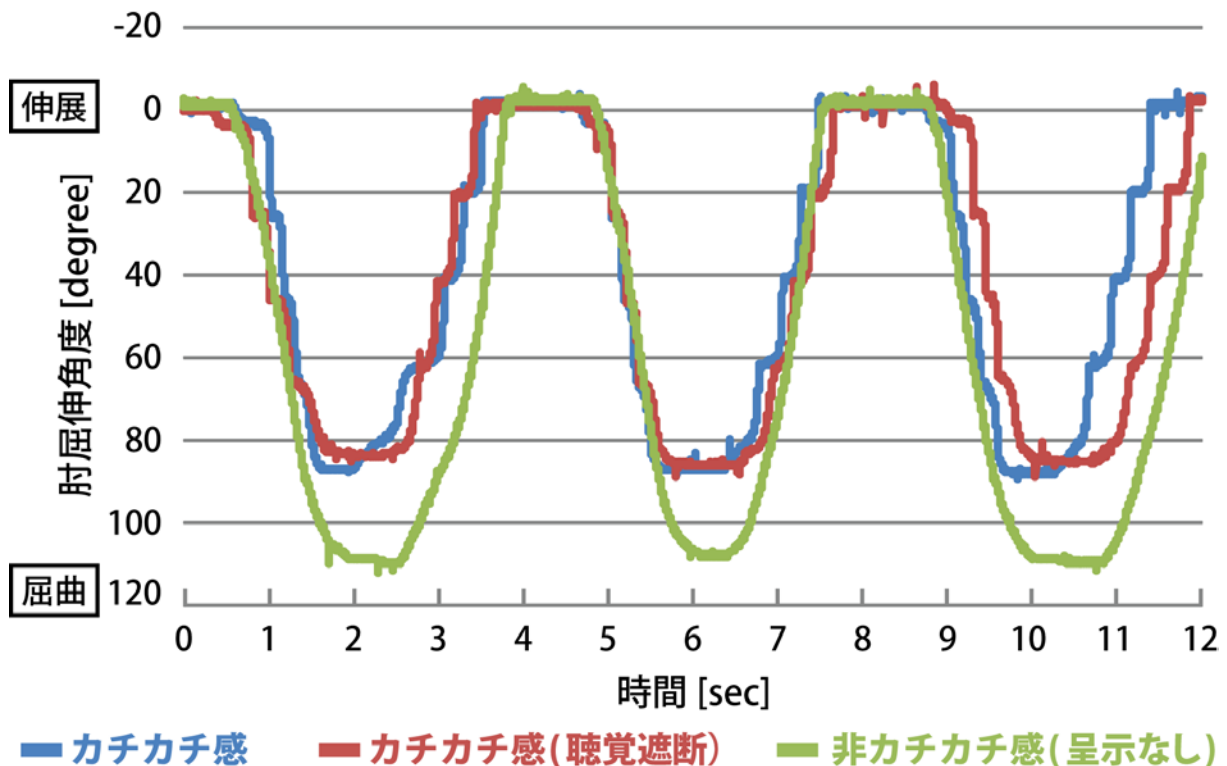


図 9. 3種類の呈示感覚における肘屈伸角度の時間的変化

本実験結果に対して呈示感覚条件および左肘・右肘の2要因(3×2)被験者内計画とみなし分散分析を行った。その結果、左肘・右肘の単純主効果 ($F(1,3)=0.27, n.s$) および要因間での交互作用 ($F(2,6)=0.27, n.s$) は認められなかった。一方で、呈示感覚条件の単純主効果では有意差が認められた($F(2,6)=19.84, p<0.01$)。LSD法を用いた多重比較の結果、各呈示感覚条件における屈伸範囲では「カチカチ感<非カチカチ感」、および「カチカチ感(聴覚遮断)<非カチカチ感」において有意差が認められた ($MSe=27.537, 5\%$ 水準)。この結果から、左肘・右肘およびカチカチ感呈示時の聴覚の手がかりの有無による屈伸範囲の有意差はなかったことが明らかとなった。

図 9 に 1 名の被験者の左肘における 3 種類の呈示感覚各 1 試行分の代表的な肘屈伸角度の時間的変化を示す。グラフの横軸は時間を、縦軸は屈伸角度を示す。図 9 からカチカチ感を呈示した場合の方がカチカチ感を呈示しなかった場合に比べ屈伸範囲が小さかったことが観察できる。

6. 考察

6.1. カチカチ感による運動量錯誤効果

本結果は腕立て伏せ中にカチカチ感を呈示すると肘の屈伸範囲が小さくなるというもので、

我々の予想とは逆の結果であった。一方で全被験者の内観報告において、カチカチ感が呈示された際肘を屈伸しにくくなったなどの回答は得られなかった。また事前の説明で可能な限り肘を屈伸するように指示したことから、カチカチ感によって被験者は肘の屈伸角度を実際よりも大きく見積もったと考えられる。つまりカチカチ感によって自身の運動量を実際よりも大きく錯誤した可能性がある。

実際に運動量を錯誤したかについてはさらなる調査が必要であるが、錯誤が生じた原因として、カチカチ感が訓練者の認識上の運動量を増幅させたことが考えられる。通常ヒトは一定量以上運動しなければ自身の身体が運動したことを明確に知覚できない[3]。一方でカチカチ感呈示により屈伸状態の変化が鮮明になったことで、微小な屈伸状態の変化でも肘の運動を知覚できたと考えられる。その結果、被験者は通常よりも小さい屈伸量で限界まで屈伸したように感じていたと考察できる。

6.2. 運動量錯誤効果による達成感拡張への応用

本実験結果より、カチカチ感を呈示することで訓練者は少ない運動量でも実際よりも大きく運動したという擬似的な達成感が得られる可能性が

示された。筋力トレーニングにおいて鍛錬部位に意識を向けることはトレーニング効果の向上に寄与することが知られている[2]。訓練者に鍛錬部位をより大きく動かした達成感を与えることで、鍛錬部位を意識させることができると考えられる。これによりトレーニング効果の向上が期待できる。

また運動能力の面で肘を十分に屈伸することが難しい訓練者に対して少ない運動量で達成感を与えることができる。これによりモチベーションの維持に貢献できると考えられる。

6.3. カチカチ感による時間的運動感覚拡張効果

実験終了後、被験者より「疲れて自身の腕立て伏せのテンポが速くなっていくのがカチカチ感によりよくわかった」「カチカチ感により腕立て伏せのリズムがとりやすくなった」といった内観報告があった。この内観報告よりカチカチ感が運動時の時間的な手がかりの鮮明化になりうるということが示唆された。本実験では肘の屈伸状態をより鮮明に知覚させるといった運動における空間的な側面に焦点を当てていたが、タイミングやリズムなど時間的な感覚を掴むことも運動学習においては重要である。今後はこの時間的な運動感覚拡張効果についても調査を行う必要がある。

7. おわりに

本稿では、身体姿勢・運動の状態を把握するための新たな触覚の手がかりとしてカチカチ感を肘関節に呈示し、運動感覚を強調することを試みた。腕立て伏せ時の肘屈伸運動にカチカチ感を呈示することで、正しい肘屈伸、すなわち屈伸範囲が大きくなることを期待して、これを検証する実

験を行った。実験結果はカチカチ感を呈示すると屈伸範囲が小さくなるというものであった。結果は我々の予想とは逆であったが、カチカチ感呈示は自身の運動量を実際より大きく見積もる運動量錯誤効果を生起させる可能性が示唆された。本効果の生起に関してはさらなる検証が必要であるが、筋力トレーニングの効率向上のための手段として依然期待できる。

今後は、運動量錯誤効果についてさらなる調査を行うとともに、筋力トレーニング効率向上への応用を試みる。また筋力トレーニングに限らずカチカチ感呈示の応用可能性を検討していく予定である。

参考文献

- [1] Frederic DELAVIER : 目でみる筋力トレーニングの解剖学, 白木仁, 今井純子訳, 大修館書店, 2002.
- [2] 谷本道哉: 筋トレまるわかり大辞典, ベースボール・マガジン社, 2010.
- [3] 岩村吉晃: タッチ, 医学書院, 2001.
- [4] Janet, Rose, Jon, Yvonne, Erwin : Buzzing to Play: Lessons Learned From an In the Wild Study of Real-time Vibrotactile Feedback, CHI 2011, 2011.
- [5] 嵯峨, 川上, 館: 力覚の主体性を活用した教示手法に関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.3, pp.363-370, 2005.
- [6] 蜂須, 梶本: 運動後に感覚呈示を行う触力覚運動教示システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2010.
- [7] 佐藤, 橋本, 梶本: カメラ回転時の「カチカチ感」付与による操作感向上, インタラクション 2008, 2008.
- [8] MarketWall.com, Metronome.
<http://itunes.apple.com/app/metronome/id287965434>