

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 20 日現在

機関番号：34416
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2011～2012
課題番号：23700154
研究課題名（和文）筋固有感覚に基づいたダイナミックタッチにおける知覚メカニズムの解明
研究課題名（英文） Understanding of Perceptual Mechanism of Rod's Dynamic Touch based on Proprioception

研究代表者
朝尾 隆文（ASAOKAKAFUMI）
関西大学・システム理工学部・助教
研究者番号：10454597

研究成果の概要（和文）：

ヒトは目で見えていなくても、手にした棒の長さを感じることができる。また、その棒を振れば、より正確にその長さを感じることができる。この感覚はダイナミックタッチと呼ばれており、棒を振るときに生じる筋の感覚が重要であると言われている。従来研究においては、ヒトは棒の振りにくさからその長さを感じていると言われてきた。しかしながら、本研究の結論として、棒が有する振動の特性からその長さを感じていることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

Humans can perceive the length of a rod by simply grasping or wielding it, in the absence of visual information. This perceptual subsystem is called dynamic touch, and it functions through a combination of proprioceptive information and cutaneous tactile sensation. The previous studies described that humans should perceive the length by accepting rotational inertia of the rod. However, this study concluded that humans should estimate the length by perceiving the eigen frequency of the rod.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| 交付決定額 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，メディア情報学・データベース

キーワード：ダイナミックタッチ，棒の長さ知覚，筋固有感覚，触覚，固有振動数

1. 研究開始当初の背景

近年の VR 技術の発展に伴い、視覚や聴覚だけではなく、触覚や力覚情報を提示するハプティックインタフェースの開発が盛んに行われている。ハプティックインタフェースの一つとして、ヒトに物体の仮想的な長さを提示する力覚生成装置が提案されている。そして、このようなハプティックインタフェースの高性能化には触覚や力覚に関する基礎的知見が必要不可欠である。

ヒトは視覚情報がなくとも、把持した棒を把持する、または振ることによってその長さを知覚することができる。皮膚感覚に加えて、特に筋活動の寄与が大きい運動性触感覚のことをダイナミックタッチと呼ぶ。従来研究においては、ヒトは棒の慣性モーメントを手がかりとして長さを知覚していると言われている。さらに、角加速度が大きい場合には、慣性モーメントを手がかりとしており、静止保持のように加速度が小さい場合には静止

トルク（一次モーメント）を手がかりとしていられると言われている。これらの研究はヒトの力覚に関して重要な知見をもたらしているが、知覚長さに影響を与える物理量の統計的な探索に留まっている。ダイナミックタッチの考え方が示された当初から、ダイナミックタッチには棒を振る時の筋固有感覚が重要であると言われているにも関わらず、これまで筋固有感覚を考慮した検討は行なわれていない。

図1に手首で棒を振る際のロボット工学モデルを示す。説明を容易にするため、手首関節の回転中心は棒の下端と同一としている。ただし、 m は棒の質量、 I は棒の重心回りの慣性モーメント、 g は重力加速度である。その他の変数については図を参照されたい。このモデルによると、手首の関節トルク τ は、慣性項と重力項から成ることが分かる。筋固有感覚にて間接的にトルクを知覚しているのならば、 τ に対する慣性項の比率の大きい方が棒の慣性モーメント I （または M ）を知覚しやすいはずである。しかしながら、従来研究においては M 、 I 、 m 、 l_g の共線性を議論することはあっても、それらの力学的な関係に立脚した十分な分析は行なわれていない。

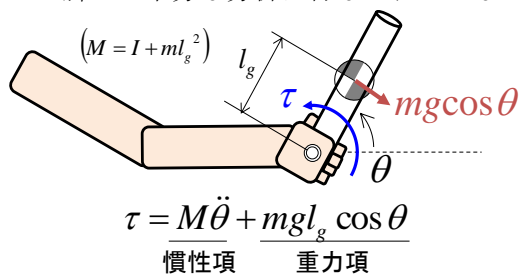


図1 棒を把持するヒトの腕のモデル

2. 研究の目的

本研究では、ヒューマンロボティクス、バイオメカニクスの考え方にに基づき、ダイナミックタッチに関して以下を達成することを目的とした。

- (1) 静止、振りに関わらず、関節トルクによって棒の長さを知覚していることを示す。
- (2) 慣性モーメントが小さい棒では、振る加速度を大きくすることにより、棒長さの知覚精度が良くなることを示す。
- (3) 慣性モーメントが大きい棒では、振る加速度を大きくせずとも、棒長さの知覚精度が良いことを示す。
- (4) 筋骨格モデルを構築し、ダイナミックタッチにおける筋固有感覚を推定する。
- (5) 筋固有感覚と知覚長さの関係を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 実験1：静止保持実験

実験に用いた棒は、比重の異なる3種類の

材質、3種類の長さの組み合わせからなる9種類の棒とした。すなわち、それぞれの棒は質量、一次モーメント、慣性モーメントが異なった。材質は、ラミン材(密度0.66 g/cm²)、ポリアセタール(1.4 g/cm²)、アルミニウム(2.7 g/cm²)であった。長さは400、500、600 mmであった。棒の外径は20 mmであった。棒の触感や比熱の違いによって材質が特定されないように、スポンジグリップ(外径27 mm, 質量23 g)を棒の片端に取り付けた。また、一次モーメント、慣性モーメントを変えずに関節トルクを変化させるため、地面に対する棒の角度を20、40、60 degの3水準設定した。

複数の関節が同時に動くとき、どの関節に関する筋固有感覚が影響しているのかが分からなくなる。そこで、肘関節、肩関節を動かさず、手首関節のみで棒が振れるように、アームレストに被験者の右上腕、右前腕を固定した。アームレストの前腕部は、地面との角度が30 degとなるようにした。知覚長さを報告するための装置は、右手首および把持する棒と左右対称となる位置に配置された。被験者は左手で矢印の付いたゴムベルトを引くことにより、知覚した棒の先端位置を矢印位置で報告した。矢印、ゴムベルトが付いた支柱は、右手で把持する棒の角度と同じ傾きになるように設置された。棒の知覚長さは、右手で把持する棒の下端と対称な位置から矢印位置までの長さとして測定された。

被験者は椅子に座り、右前腕、右上腕をアームレストに固定された。その後、被験者から自身の右腕および把持した棒が見えないように、カーテンで右腕を隠した。棒の先端位置報告装置の傾きを、被験者に把持させる棒の角度と同じとなるように設定した。次に、実験者は無作為に選んだ棒のグリップ部下端を被験者の手掌部に押し付けた。被験者には、手掌部とグリップの間に隙間ができないようにしっかりと握ることを要求し、手首および棒を動かさないように教示した。棒を把持しつづける時間に制限は設けず、十分に長さを知覚できるまで棒を把持させた。被験者は先端位置報告装置を左手で操作し、知覚した棒の先端位置を報告した。各条件はランダムな順序で6回の反復試行をおこなった。実験は2日に分けて実施し、1日あたり81試行の実験をおこなった。なお、被験者の腕の疲労を考慮し、18試行ごとに5分程度の休憩をとった。被験者は、インフォームド・コンセントを得た右手利きの健常な男子大学生5名(全員21歳)であった。

(2) 実験2：ダイナミックタッチ実験

実験に用いた棒は6種類であった。すなわち、材質はラミン材とアルミの2種類、長さは400、500、600 mmであり、実験1で用いたものと同じであった。棒を振るタイミング

はメトロノームで統制した。設定したメトロノームの周波数は 0.5, 1.0 Hz の 2 水準であった。さらに、棒を振り下ろしきるときの関節角加速度を変化させるために、緩やかに振るか (softly wielded 条件)、強く振るか (strongly wielded 条件) の 2 水準を設けた。

前腕が水平となるように、被験者の右前腕、右上腕をアームレストに固定した。手首にはゴニオメータ (M110, P&G) を装着し、手首の橈尺屈の関節角度を 200 Hz で計測した。知覚長さを報告する装置は実験 1 と同様である。

Strongly wielded 条件では、棒を振り下ろす手首の関節角加速度が大きくなるように、力強く振るように教示した。Softly wielded 条件では、棒を振り下ろしたときに衝撃を感じないように、滑らかに振るように教示した。実験前には、教示したとおりに棒が振れるように、十分に振り方の練習を行なった。

被験者は椅子に座り、アームレストに右前腕と上腕を固定した。その後、右手背部側にゴニオメータを装着した。さらに、棒とそれを把持する腕が見えないように、カーテンにより右腕を隠した。メトロノームの周波数を 0.5 Hz または 1.0 Hz にセットし、音を鳴らした。次に、実験者が無作為に選んだ棒を被験者の手掌部に押し付けた。棒を振ったときに手の中で棒が動かないように、被験者には手掌と棒の間に隙間ができないようにしっかりと棒を握ることを要求した。被験者には、指示した strongly または softly のいずれかの振り方で棒を振り、メトロノームが鳴ったときに棒が最も振り下がっているように、タイミングを合わせて棒を振るように教示した。棒を振る回数、時間に制限は設けず、十分に長さを知覚できたと判断した時点で知覚した棒の先端位置を報告してもらった。各条件はランダムな順番で 6 回の反復試行を行なった。実験は 3 日に分けて行ない、1 日あたり 48 試行の実験を行なった。また、12 試行毎に 5 分程度の休憩を取った。被験者は、インフォームド・コンセントを得た健常な男子大学生・大学院生 5 名 (平均年齢 22.4 歳) であった。被験者の利き腕は、右利きが 3 名、左利きが 2 名であった。

(3) 実験 3: 触覚情報の違いが棒の知覚長さに及ぼす影響の検証 (静止保持)

棒の材質はポリアセタールのみとし、長さは 300, 400, 500, 600, 700 mm の 5 水準とした。触覚情報を変化させるため、実験 1・2 で使用したスポンジグリップの条件と、そのスポンジグリップに健康サンダルのインソールを巻きつけた凹凸グリップの条件を設定した。被験者は、インフォームド・コンセントを得た右腕利きの健常男子大学生 4 名であった。

(4) 実験 4: 触覚情報の違いと棒の揺れ具合が棒の知覚長さに及ぼす影響の検証 (静止保

持)

棒の材質はポリアセタール、アルミニウムの 2 水準、長さとグリップは実験 3 と同様とした。また、棒の揺れ具合を評価するため、棒の先端に 3 軸の加速度センサ (ddkit0515, ダイセン電子工業) を取り付け付けた。被験者は、インフォームド・コンセントを得た右腕利きの健常な男子大学生 4 名であった。

4. 研究成果

(1) 実験 1 の結果

ヒトの知覚量は与えた物理量のべき乗で表される。したがって、ダイナミックタッチの従来研究では、対数変換した値で議論をおこなっている。そこで本研究もそれに倣い、対数化した値を元に統計的な分析をおこなった。

Log 知覚長さを従属変数とした一元配置の分散分析をおこなった。独立変数はそれぞれ、棒の角度、材質、長さ、質量である。材質 ($F(2, 807) = 62.37, p < 0.001$)、実長さ ($F(2, 807) = 27.82, p < 0.001$)、質量 ($F(8, 801) = 25.06, p < 0.001$) の主効果は優位であったが、棒を把持する角度の主効果 ($F(2, 807) = 0.09, p = 0.915$) は優位ではなかった。

次に、Log 知覚長さの平均値と Log 一次モーメントの平均値、Log 慣性モーメントの平均値の単回帰分析をおこなった。Log 一次モーメントに対する寄与率は 0.979、Log 慣性モーメントに対する寄与率は 0.981 であった。わずかながら慣性モーメントの寄与率の方が高かった。

棒の知覚長さに対して、棒を把持する角度の主効果がみられなかったことから、ヒトは関節にかかるトルクから棒の長さを推測していないことが示された。静止保持においては一次モーメントを手掛かりとして棒の長さを推定していると考えられる。すなわち、知覚長さに対して一次モーメントの寄与率が大きいと予想した。しかしながら、実験結果では、一次モーメントよりも慣性モーメントの寄与率の方がわずかに大きかった。この結果は被験者全員の平均値に対する回帰分析の結果であり、個人差が含まれている。そこで、個人ごとに単回帰分析をおこなった。被験者 A1, B1 は一次モーメントの寄与率が大きい、被験者 C1, D1, E1 では慣性モーメントの寄与率が大きかった。実験では、棒を把持する手を動かさないように教示をしたものの、完全に静止させることは難しい。手首が動いていたならば関節角加速度が生じるため、慣性モーメントを手掛かりとして長さを推測した可能性がある。このような可能性を排除するためには、加速度センサ等で棒の動きを計測しておく必要がある。

(2) 実験 2 の結果

計測した手首関節の角度、角加速度の結果

より、条件が異なっても関節角度の振幅は大きく変わらないことが分かった。最も尺屈させたときに角加速度がピークを示し、その値は softly wielded 条件より strongly wielded 条件の方が大きく、0.5Hz より 1.0Hz の方が大きかった。そこで、尺屈時の角加速度のピークの平均値を算出し、これを従属変数、振り方およびメトロノームの周波数を独立変数とした 2 元配置分散分析をおこなった。その結果、振り方の主効果 ($F(1, 716) = 487.81, p < 0.001$) とメトロノームの周波数の主効果 ($F(1, 716) = 20.99, p < 0.001$) は優位であった。ただし、交互作用は認められなかった ($F(1, 716) = 17.84, p = 0.35$)。以上のことから、振り方およびメトロノームの周波数により関節角加速度の最大値が変化していたことが分かった。

Log 知覚長さを従属変数とした一元配置の分散分析をおこなった。独立変数は、メトロノームの周波数、振り方、棒の材質、長さ、質量である。その結果、メトロノームの周波数 ($F(1, 862) = 0.32, p = 0.569$)、振り方 ($F(1, 862) = 1.28, p = 0.259$) の主効果はいずれも有意ではなかった。材質 ($F(1, 862) = 116.84, p < 0.001$)、長さ ($F(2, 861) = 50.70, p < 0.001$)、質量 ($F(5, 714) = 40.89, p < 0.001$) の主効果はいずれも有意であった。

次に、実験 1 と同様に、Log 知覚長さの平均値と Log 一次モーメントの平均値、Log 慣性モーメントの平均値の単回帰分析をおこなった。全員の平均、被験者別のすべてについて、Log 一次モーメントよりも Log 慣性モーメントの寄与率の方が高かった。Log 知覚長さを従属変数、利き腕を独立変数とした一元配置分散分析の結果、利き腕 ($F(1, 718) = 239.80, p < 0.001$) の主効果は優位であった。しかしながら、被験者数が少ないことから、本報告では利き腕の効果についての議論はしない。

すべての被験者において一次モーメントの寄与率よりも慣性モーメントの寄与率の方が大きかったことから、棒の長さの次数が大きい慣性モーメントに基づいて棒の長さを推測したと考えられる。さらに、ダイナミックタッチでは、関節角加速度の大きさの影響を受けずに慣性項と重力項の弁別ができたため、正しく慣性モーメントを同定できたと考えられる。

関節角加速度が小さくなると慣性モーメントが知覚できないと考え、2 水準のメトロノームの周波数と 2 水準の振り方を設定した。しかしながら、最大の関節角加速度は知覚長さに影響を及ぼさなかった。今回設定した条件よりも早く振ったり、よりゆっくりと滑らかに振ったりすれば、より広い範囲で最大関節角加速度を変化させることができる。そし

て、関節角加速度が知覚長さに影響しないのかをより詳細に調べることができる。しかしながら、静止保持実験において、一次モーメントよりも慣性モーメントの寄与率が大きい被験者がいたことから、わずかでも棒が揺れれば、ヒトは棒の長さを感じることができないのではないかと考えられる。わずかな棒の揺れを元に棒の長さを知覚しているのであれば、筋固有感覚よりも触覚情報を利用していると考えられる。

(3) 実験 3 の結果

Log 知覚長さを従属変数、被験者、棒の実長さ、グリップの種類を独立変数とした一元配置分散分析を実施した。その結果、被験者 ($F(3, 76) = 13.30, p < 0.001$)、実長さ ($F(4, 75) = 20.74, p < 0.001$) の主効果は優位であったが、グリップ ($F(1, 78) = 0.13, 0.716$) の主効果は優位ではなかった。

次に、Log 知覚長さを従属変数とした単回帰分析をおこなった。独立変数は、Log 一次モーメント、Log 慣性モーメント、Log 棒の縦振動における一次モードの固有振動数、Log 棒の横振動における一次モードの固有振動数である。その結果、被験者 B3, C3, D3 においては、一次モーメント、慣性モーメントよりも、2 つの固有振動数の寄与率の方が大きかった。以上のことから、棒の固有振動数を知覚することで、棒の長さを推測していることが示された。

(4) 実験 4 の結果

知覚長さを従属変数、被験者、実長さ、材質、グリップを独立変数とした一元配置の分散分析を実施した。その結果、被験者 ($F(3, 636) = 48.99, p < 0.001$)、実長さ ($F(4, 635) = 112.78, p < 0.001$)、材質 ($F(1, 638) = 14.81, p < 0.001$)、グリップ ($F(1, 638) = 3.99, p = 0.046$) の主効果は優位であった。

実験 3 と同様に、単回帰分析をおこなった結果、3 名の被験者において、固有振動数と知覚長さの寄与率が最も高かった。

これまでは、静止保持では棒の一次モーメントを手掛かりとしており、ダイナミックタッチでは棒の慣性モーメントを手掛かりとしているというのが通説であった。本研究の成果より、静止保持、ダイナミックタッチに関わらず、棒の固有振動数を手掛かりとして棒の長さを知覚していることが示された。この事実は、ダイナミックタッチに関する研究を行っている分野に対して大きな衝撃をもたらすものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① Takafumi Asao, Satoshi Suzuki, Kentaro Kotani, Mechanism of Length Perception by Dynamic Touch - Proposal of Identification-perception Model Considering Proprioception -, The 2012 ICME, International Conference on Complex Medical Engineering, 2012. 7. 4, Kobe.
- ② Takafumi Asao, Yuta Kumazaki, Kentaro Kotani, Effects of Joint Acceleration on Rod's Length Perception by Dynamic Touch, The 14th International

Conference on Human-Computer Interaction, 2011. 7. 12 , Orlando, Florida, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

朝尾 隆文 (ASAO TAKAFUMI)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号：10454597