杖を把持した手掌部への振動重畳による打撃対象の距離錯誤

○岡崎 龍太（電気通信大学），梶本 裕之（電気通信大学，科学技術振興機構さきがけ）

Distance perception when hitting with hand-held stick is altered by adding vibration to palm

○Ryuta OKAZAKI (UEC) and Hiroyuki KAJIMOTO (UEC, JST PRESTO)

Abstract: In this paper, we focused on distance perception that perceived by hitting object using hand-held stick. The result shows that the distance perception between object and hand would be changed by overlapping additional vibration from actuators.

１．はじめに

本稿では杖を把持して物体を叩いた際，手掌部に振動刺激を重畳することで，打撃対象との距離を錯誤する現象について報告する．

例えば白杖を持つ視覚障がい者にとって，白杖に衝突した対象との距離を知ることは極めて重要である．この知覚を成立させる原因が明らかとなれば，距離センサと触覚提示装置から構成されたコンパクトな電子白杖の開発に応用出来ると考えられる．

杖に限らず把持した物体の力学特性を目視によらず知覚できることは広く知られている[1][2]．この探索行動はダイナミックタッチ[3]と呼ばれ，主に生態心理学において研究が進められている．近年では，触力覚提示装置を用いて物体の長さ，重さ，重心知覚に錯覚を生じさせる試みが VR 分野において行われている[4][5]．また特に棒の長さ知覚に関しては，棒の振り方，密度，直径，重心，把持の仕方など，様々な要素が影響を与えることが知られており[6][7][8][9]，例えばラケットでボールを打撃する際，一番効率よくボールを打ち返すことのできる“スイートスポット”の推定が可能であることも報告されている[10]．

しかしこうした研究の多くはあくまで把持した物体「自体」の力学情報を推定するものであり，手に把持した棒を用いて他の物体を打撃する際の距離知覚ではない．この打撃時の距離知覚に関しては，打撃瞬間のモーメントを知覚している等の考察が行われているが[11]，現在のところ明らかになっていない．

打撃の瞬間には力学的には回転モーメント，並進力が発生し，それらは皮膚感覚および力覚によって知覚される可能性がある．我々は本稿では，皮膚感覚が本現象の距離知覚に寄与しているかどうかを確認する．もし寄与しているなら，先にも述べたとおりコンパクトな電子白杖の開発がより容易になると考えられるためである．

２．皮膚感覚による打撃距離知覚の仮説

皮膚感覚によって打撃距離がわかるとすれば，そのメカニズムはどのようなものが考えられるだろうか．

Fig. 1 は手に把持した棒で物体を叩く際の，物体と手との力学的関係をモデル化したものである．図中の P_1 は物体の位置，P_2 及び P_3 は把持した手の親指側位置と小指側位置を示す．

実際には手は掌全体で棒を握りこむが，ここでは簡単な理解のために，手の親指側と小指側だけで接しているとする．F_1，F_2，F_3 は打撃時に生じる力の大きさと向きを，L_1，L_2 はそれぞれ P_1 から P_2，P_2 から P_3 までの距離を示す．

ここで物体打撃後に手に把持した棒が並進運動も回転運動も継続しないことから，並進力，回転モーメントの合計は 0 になる．すなわち

$$F_1 + F_2 + F_3 = 0$$
$$F_1 * L_1 = F_3 * L_2.$$

この 2 つの式から，物体の打撃位置 L_1 は次のように導くことができる．

$$L_1 = \frac{F_3 * L_2}{F_1} = \frac{-F_3 * L_2}{F_2 + F_3}.$$

すなわち，親指と小指の間の距離 L_2 は定数であるから物体との距離 L_1 は，棒を把持した手に生じる振動 F_2，F_3 の比率によって表されると考えられる．

例えば物体の打撃位置(P_1)が把持した手の親指側(P_2)に非常に近い場合，$L_1 \fallingdotseq 0$となり，棒を把持した手に生ずる振動は親指側(P_2)で大きく，小指側(P_3)で小さくなると考えられる(Fig. 2 左)．反対に物体の打撃位置が離れていた場合，$L_1 \to \infty$を実現する解は $F_2 = -F_3$ となることであり，つまり親指側と小指側に加わる振動は強度としてはほぼ等しくなると考えられる(Fig. 2 右)．

以上の単純なモデル化により，棒を把持した手に生じる振動 F_2，F_3 の比率によって物体の打撃位置 L_1 を推定可能であると考えられる．実際には掌全体で棒に接

しているため厳密な状況とは異なるが，掌中で感じる振動の「重心位置」知覚が実は打撃対象との距離知覚になっている可能性は十分に考えられる．実際，複数箇所に振動を与えた場合の重心知覚は Funneling としてよく知られる代表的な触知覚能力である[12].

この仮説を検証するため，4 章では棒の把持部の親指側と小指側に振動子を装着し，打撃によって生じる振動をリアルタイムに振動子に流すことによって振動の重心位置を変化させることで，物体の打撃位置を錯誤するかどうか検証する実験を行った．

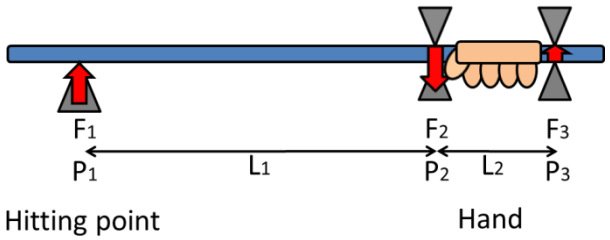

Fig. 1　Hypothetic model of distance perception of percussion with hand-held rod.

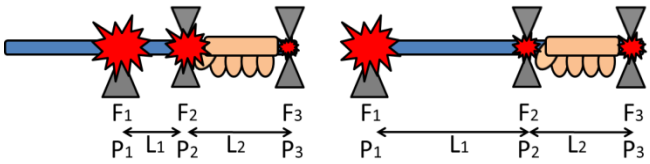

Fig. 2　Hypothesis of distance perception with cutaneous cue. Hitting closer point induces stronger vibration at thumb side (left). Hitting farther induces equally distributed vibrations (right).

３．検証用デバイス

前章で立てた仮説を検証するために，打撃時の振動に振動子からの振動を重畳可能な棒状のデバイスを製作した．

Fig. 3 に製作したデバイスを示す．デバイスはアルミパイプ(直径 15mm，長さ 1000mm，重量 110g)，1 軸加速度センサ(±250G，ADXL193, SparkFun Electronics)，アクリル製グリップ，振動子 2 個(Haptuator Mark II, TactileLabs)，プリアンプ回路，オーディオアンプ(RSDA202, Rasteme Systems Inc.)から構成される．加速度センサをアルミパイプ上端に取り付け，その出力をプリアンプ，オーディオアンプを介して振動子に接続した．2 つの振動子はアルミパイプ下方に取り付けたアクリル製グリップの親指側および小指側の付け根部分に固定した．これにより，グリップを把持した際，2 つの振動子が皮膚と直接接触するようにした(Fig. 4)．グリップ部に振動子を装着する際には，グリップに直接振動子を固定すると振動子と加速度センサの間でハウリングが発生する恐れがあったため，振動子とグリップの間にはスポンジを挟んだ．デバイスの総重量は約 250g であった．

本デバイスのグリップ部分を把持し，物体を打撃すると，打撃時の振動が加速度センサによって取得され，プリアンプ，オーディオアンプを経由してグリップ部の振動子より振動が提示される(Fig. 5)．この単純な実装により，実際の衝撃による振動と振動子による振動の時間差を極めて小さく，触知覚不可能なレベルに抑えることが出来た．2 つの振動子はそれぞれオーディオアンプの右チャンネルと左チャンネルに接続されているため，オーディオアンプの左右バランスを調整することで，2 つの振動子の振動の比率をコントロールすることが可能である．

打撃を与える物体として縦 100mm，横 200mm，厚さ 5mm のアクリル板を用意した．アクリル板は万力を用いてリニアサーボモータ(F14-20-200-5L, Yamaha Motor Co., Ltd.) に垂直に固定し，打撃によって位置ずれが起こらないようにした．またアクリル板に直接打撃を与えるとアクリル板及び棒形デバイスが損傷する恐れがあったため，アクリル板の上部には 5mm 厚のゴムシートを貼り，打撃の衝撃を和らげた．ゴムシートには装置の損傷を防ぐとともに，打撃時に生じる打撃音を減少させ，聴覚による接触位置の推定を避ける役割がある．

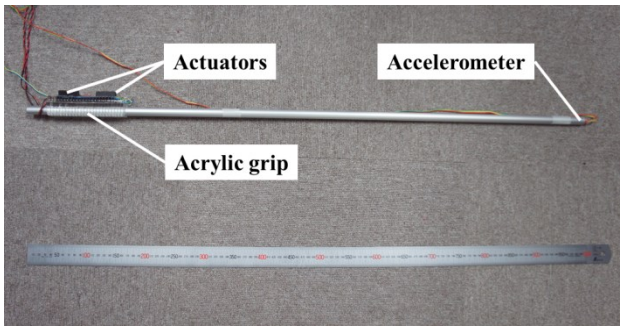

Fig. 3　Stick-type experimental device.

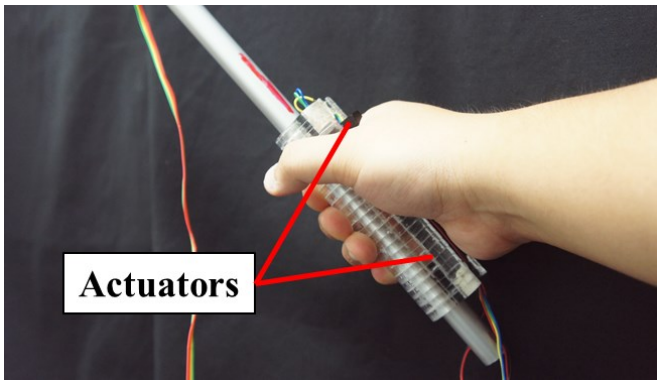

Fig. 4　Enlarged view of experimental device.

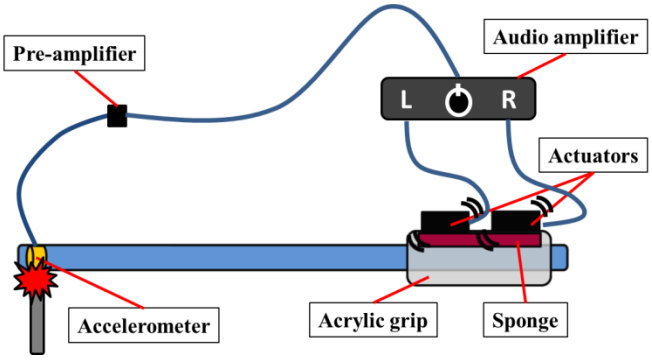

Fig. 5　System configuration.

4．実験

本章では，2 章で立てた衝突距離の知覚仮説を検証する実験を行った．もし掌で感じられる振動の重心知覚が衝突距離知覚に寄与しているなら，打撃時の実際の振動に振動子からの振動を重畳することで重心位置が変化し，衝突距離の錯誤が生じるはずである．

4.1. 実験条件

本実験では手に把持した棒に振動子からの振動を重畳する場合とそうでない場合で，衝突距離の知覚に錯誤が生じるかを検証する．実験は以下の 4 条件で行った．(a)親指側の振動子のみを打撃と同時に振動させる (b)親指側，小指側両方の振動子を打撃と同時に同じ強度で振動させる (c)小指側の振動子のみを打撃と同時に振動させる　(d)振動子を振動させず，棒の打撃によって生じる振動のみで衝突距離を判定させる．なお条件(b)では 2 つの振動子が駆動されるため，振動振幅を半分に設定した．

4.2. 実験手続き

実験には 6 名の被験者が参加した(男性 5 名，女性 1 名，20-21 歳，自己申告による触覚の障害無し)．被験者は椅子に座り，前述の棒形デバイスを右手で把持した．

視覚による接触位置の推定を避けるため，被験者の右側には壁を設置し，棒形デバイスとアクリル板の接触位置を目視できないようにした(Fig. 6)．同様に聴覚による接触位置の推定を避けるため[13]，被験者にアクティブノイズキャンセリングヘッドホン(QuietComfort, BOSE)を装着し，不快に感じない程度に音量を調節したホワイトノイズを提示した．被験者の正面には長さ 1000mm の定規が配置され，被験者は触覚によって推定した接触位置を目の前の定規の目盛りを用いて口頭で回答した(Fig. 7)．

実験開始とともに被験者は(a)-(d)のいずれかの条件下で壁越しに棒型デバイスでアクリル板を打撃した．打撃の回数や回答時間に特に制限は設けていないが，打撃時の棒形デバイスの傾きから接触位置を推定するのを避けるため，右手をアクリル板と同じ高さに保つよう指示し，打撃時に棒形デバイスが水平になるよう統制した．同じく棒形デバイスの手前端と定規の手前端が同じ位置になるよう指示し，接触位置を常に棒形デバイスの手前端から 600mm の距離になるようにした．被験者にはアクリル板の位置が試行ごとに変化すると教示したが，実際には全試行を通じてアクリル板の位置は一定であった．打撃後，被験者は棒形デバイスとアクリル板の推定接触位置を定規の目盛りを用いて口頭で回答した．これを 1 試行とし，各条件 10 試行ずつ，計 40 試行をランダムに提示した．打撃による疲労を防ぐため，最低でも 5 試行毎に 30 秒程度の休憩を挟んだ．被験者 6 名の総試行数は 240 回であった．

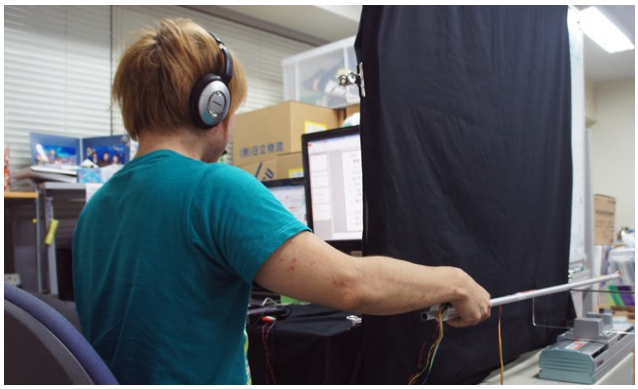

Fig. 6　Appearance of the experiment.

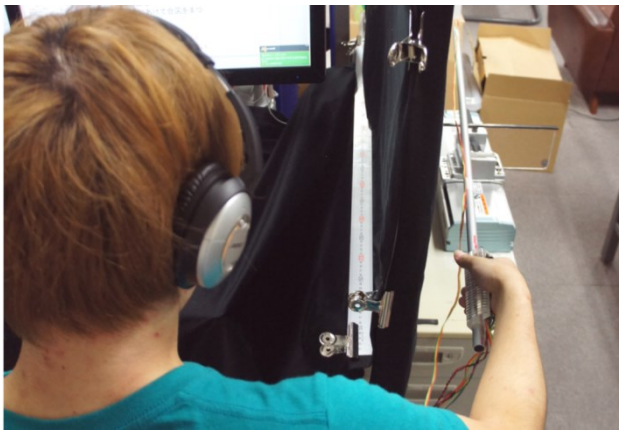

Fig. 7　A ruler is placed in front of the participant.

5．結果・考察

5.1. 被験者ごとの実験結果

Fig. 8 に被験者ごとの実験結果を示す．縦軸は被験者が回答した衝突距離の平均値を，横軸は被験者と条件を表す．なお被験者 6 名のうち 1 名については振動子を振動させない自然な状態での打撃でも回答位置のばらつきが大きく，衝突距離を認識しているとは考えられなかったためデータから除外した．

グラフの(d)条件（振動子を振動させない）の結果から，すべての被験者が実際の接触物体の位置(600mm)よりも衝突距離を短く知覚する傾向にあった．さらに，振動子による重畳振動有りの条件(a)-(c)については，1 名の被験者を除きさらに接触位置を短く回答することが判明した．

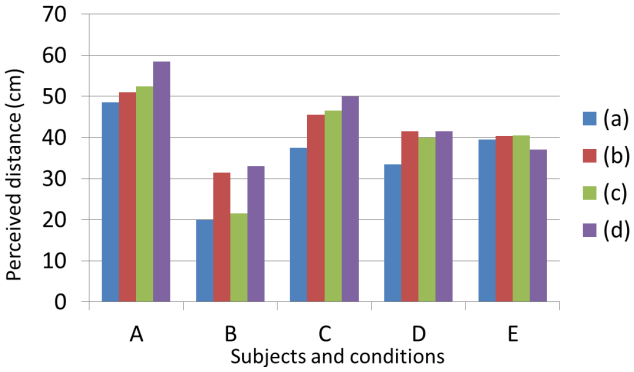

Fig. 8　Results compared among participants.

5.2. 条件間の比較

重畳する振動刺激の組み合わせによって差があるかを検証するため，各条件を要因とした分散分析(ANOVA)及び多重比較(Bonferroni 法)を行った．多重比較の結果を Fig. 9 に示す. 多重比較の結果, 条件(a)と(b), (a)と(c)，(a)と(d)の間で有意差が認められた($p<0.05$). また条件(c)と(d)の間には優位傾向($p<0.1$)が認められた

これらの分析結果を 2 章で述べた提案モデルと比較する．物体の接触位置の推定において手の親指側に伝わる振動の比率を増やした(a)と手の小指側に伝わる振動の比率を増やした(c)との間で有意差があったことから，親指側への刺激は小指側への刺激よりも衝突距離を短く感じさせる働きがあることが分かる．これは仮説で述べた距離知覚モデルでの予想と一致している．

一方で振動刺激を重畳しない(d)との比較では，手の親指側に伝わる振動を増加させた条件(a)も，手の小指側に伝わる振動の比率を増やした条件(c)も共に (d)よりも有意に知覚距離が短くなっている．提案モデルのように掌の中の振動位置の重心のみを知覚しているのであれば，(a)は(d)よりも短く，(c)は(d)よりも長く知覚されるはずであり，(c)の結果はこの仮説とは必ずしも一致していない．今回の実験で用いたデバイスは長さが 1000mm，重量が 250g あり，重量が重く回転モーメントも大きいため，力覚のほうが皮膚感覚よりも重要な手がかりとなった可能性がある．この点については力覚の寄与も含めたモデルを再検討する必要がある．

ただし今回，手の小指側，親指側に与える振動の比率で距離知覚を改変できること，および（直感とは逆に）手先側の振動を強めたほうが手元側の振動を強めるよりも近くに感じることを確認したことは，将来のコンパクトな電子白杖の開発に役立つ知見であるといえる．

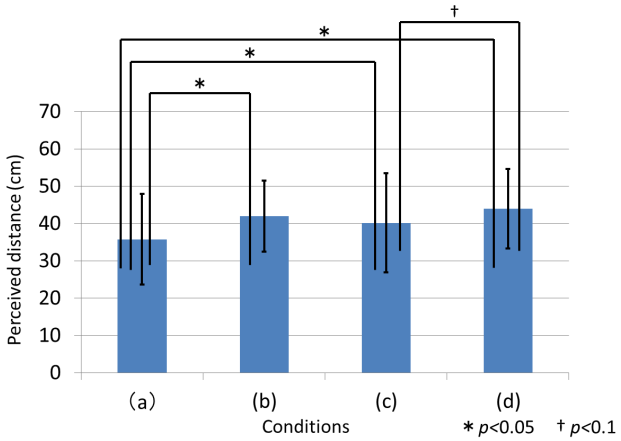

Fig. 9　Results compared among conditions.

6．おわりに

本研究は，手に把持した棒を用いて他の物体を打撃することで距離が分かるという単純な現象に潜む知覚メカニズムの解明を目的とし，モデルによる仮説を立て実験により検証した．

皮膚感覚に着目すると，打撃の際に手掌部に加わる衝撃の重心位置は，打撃対象が近いほど親指側に，遠いほど小指側に寄ると考えられる．もしこの重心位置移動を距離知覚に用いているなら，打撃する際に生じ

る振動に振動子からの振動を重畳し，手掌部に伝わる振動の比率を変化させることで物体の接触位置を錯誤させることができると考えられる．2 つの振動子を親指側，小指側に装着した棒デバイスを開発し，打撃によって生じる振動にリアルタイムに重畳する形で振動提示を行うシステムを構築，実験した結果，確かに親指側の振動を強調した場合に比べ，小指側の振動を強調した場合のほうが打撃位置をより「遠く」に感じられることがわかった．今回は本物の衝突による振動に対して人工的な振動を重畳する形であったが，今後は腕の振り動作に伴う人工的な振動提示のみで衝突感が生じるか，また衝突距離の認識が成立するかを検証する．

参考文献

［1］ B. Gregory, M. T. Turvey, and H. Yosef Solomon. "Can shape be perceived by dynamic touch?." *Perception & Psychophysics,* 48(5): 477-487, 1990

［2］ S. H. Yosef, and M. T. Turvey. "Haptically perceiving the distances reachable with hand-held objects." *Journal of experimental psychology: Human perception and performance,* 14(3): 404-427, 1988.

［3］ G. J. Jerome. "The senses considered as perceptual systems" Houghton Mifflin, Oxford, England, 1966.

［4］ Y. Hsin-yun, and V. Hayward. "An experiment on length perception with a virtual rolling stone." *Proceedings of Eurohaptics2006* (Paris, France, July 3-6, 2006.) 325-330, 2006.

［5］ K. Minamizawa, S. Fukamachi, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi. "Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation." *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007* (California, USA, August 5-9, 2007.) 2007.

［6］ C. Tin-cheung. "The effect of density and diameter on haptic perception of rod length." *Perception & Psychophysics*, 57(6): 778-786, 1995.

［7］ C. Carello, P. Fitzpatrick, I. Flascher, and M. T. Turvey. "Inertial eigenvalues, rod density, and rod diameter in length perception by dynamic touch." *Perception & Psychophysics*, 60(1): 89-100, 1998.

［8］ K. Idsart, R. Langenberg, and P. J. Beek. "Which mechanical invariants are associated with the perception of length and heaviness of a nonvisible handheld rod? Testing the inertia tensor hypothesis." Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 30(2): 346, 2004.

［9］ 清水，根ケ山. "棒の長さ知覚課題におけるダイナミックタッチの発達的研究." 発達心理学研究, 14(2): 113-123, 2003.

［10］ C. Carello, S. Thuot, K. L. Anderson, and M. T. Turvey. "Perceiving the sweet spot." *Perception*, 28(3): 307-320, 1999.

［11］ W. Felicia, and J. S. Zelek. "Tactile & Inertial Patterns from a Long White Cane." *Proceedings of IEEE Biomedical Robotics and Biomechatronics 2006*. (Pisa, Italy, February 20-22, 2006.) 519 – 524, 2006.

［12］ B. György. "Neural Funneling along the Skin and between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea." *Journal of the Acoustical Society of America*, 31(9): 1236-1249, 1959.

［13］ C. Claudia, K. L. Anderson, and A. J. Kunkler-Peck. "Perception of object length by sound." *Psychological science,* 9(3): 211-214, 1998.