



白杖を用いた間接的なタッピングによって発生する 振動・打撃音・反力と硬さ知覚の関係

Analytical Study of Hardness Perception and Physical Factors during Indirect Tapping using White Cane

田辺健¹⁾, 布川清彦²⁾, 土井幸輝³⁾, 井野秀一^{1),4)}

Takeshi TANABE, Kiyohiko NUNOKAWA, Kouki DOI, and Shuichi INO

1) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 (〒 305-8566 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 6, t-tanabe@aist.go.jp)

2) 東京国際大学 (〒 350-1198 埼玉県川越市の場 2509, nunokawa@tiu.ac.jp)

3) 国立特別支援教育総合研究所 (〒 239-8585 神奈川県横須賀市野比 5-1-1, doi@nise.go.jp)

4) 大阪大学 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, ino@mech.eng.osaka-u.ac.jp)

概要: 白杖は視覚障害者が単独で移動する際に最も広く利用される補助具であり、白杖の主な役割の一つに情報の収集が挙げられる。本研究では、現状の白杖が伝える情報を明らかにするために、視覚障害者が白杖を介して判断した対象物の主観的な硬さと白杖と対象物が接触することで発生する振動・打撃音・反力との関係を多変量解析によって明らかにした。解析の結果、振動よりも打撃音と反力が硬さ知覚への寄与が大きいことが示された。

キーワード: 白杖, タッピング, 硬さ知覚, 視覚障害者

1. はじめに

白杖は視覚障害者が単独で移動する際に最も広く利用される道具の一つであり、白杖の役割は「情報の収集」、「安全性の確保」、「視覚障害者のシンボル」が挙げられる [1]。白杖の役割に情報の収集が挙げられるように、視覚障害者は白杖を自身の身体の一部として見立てて、視覚の代わりに周辺の路面の状況や変化を白杖を介して取得している。このとき、白杖という機械的なフィルタを通して間接的に情報を取得しているため、視覚障害者が周辺の情報をどのように取得しているかを理解するには、ヒトの感覚特性だけではなく、白杖の機械特性を理解する必要がある。現状の白杖がどのような情報を伝えているのかを明らかにすることで、ユーザビリティを考慮した白杖の設計につながるとともに、視覚障害者の移動環境の設計にも役立つと考えられる。

視覚障害者が安全に歩行するには、硬い路面を歩く必要がある。そのため、視覚障害者が白杖を介して取得しなければならない重要な情報の一つに路面の硬さが挙げられる。通常、視覚障害者は適切とされている白杖の操作技術を用いて周辺環境の情報を収集する必要があり、代表的な操作としてタッチテクニックが用いられる。タッチテクニックは 2 歩程度前方の路面の状況を白杖で叩いて取得するものであり、視覚障害者は叩くことで路面の硬さをはじめとする周辺環境の情報を収集する。叩いて硬さを判断する行為は手指での触察動作でも用いられ、この動作はタッピングと呼ばれる。タッピングは指腹より硬い対象物の硬さの判断に有効とされている触察動作である。手指でのタッピングで

は、叩いたときに発生する減衰振動の周波数や減衰比から硬さを推定している可能性が報告されており [2], 減衰振動の情報は主に皮膚感覚を介して取得されていると考えられる。また、タッピング時の対象物からの反力のピーク値と力積が硬さ知覚に相関関数にあることから [3], 反力も硬さ知覚に寄与する要因の一つであると言える。反力の情報は主に深部感覚を介して取得されていると考えられる。さらに、タッピング時に発生した打撃音の高周波成分が大きいとき、ヒトは硬いと知覚することが報告されている [4]。そのため、聴覚を介して取得される打撃音の情報も硬さ知覚において重要な手がかりである。一方で、白杖を介した間接的なタッピングでは、白杖が機械的なフィルタの役割を果たすため、タッピングによって発生したこれらの物理的な情報を正確に伝えていない可能性がある。

白杖を用いた間接的なタッピングによる硬さ弁別に関する先行研究では、振動や反力に加えて打撃音の情報が加わることで硬さの感度が上昇することが報告されている [5, 6]。一方で、以下の理由で振動の情報が不足していると考えられる。白杖でタッピングするという行為は白杖側から見ればインパルス信号が入力されていると見なすことができる。一般的に、物体はインパルス信号が入力されると固有振動数で振動することが知られており、タッピング時には白杖は特定のパターンでしか振動しないと予想される。また、Rodgers et al. は白杖のシャフトの柔軟性を変化させることで、皮膚感覚特性に適した固有振動数に設計できると述べており [7], これは白杖が固有振動数でしか振動しないことを示唆する。

それに対して、タッピングされた対象物も同様に固有振動数で振動するが、対象物の剛性によって固有振動数が変化するため、対象物から発生する打撃音は硬さに依存する。間接的なタッピングでは、打撃音の情報が重要であると考えられるが、感度は低下するものの聴覚を遮断しても硬さを視覚障害者は判断することができる [6]。Higashi et al. は対象物の粘弾性によって反力の特徴が変化することから、反力を手がかりに硬さを推定していることを議論した [3]。そのため、聴覚が遮断された場合では、反力を手がかりに硬さを判断している可能性がある。

以上の先行研究をもとに、白杖を用いた間接的なタッピングにおける硬さ知覚と振動・打撃音・反力の物理的要因の関係の以下の仮説を考えた。振動は対象物の硬さに依存することなく白杖の固有振動数で振動するため硬さ知覚への寄与は小さく、打撃音と反力は対象物の硬さに依存するため硬さへの寄与は大きいと考えられる。そこで、本研究では、この仮説を明らかにするために、主観的な硬さに対する振動・打撃音・反力のそれぞれの寄与を多変量解析によって明らかにした。

2. 方法

硬さ知覚に対する振動・打撃音・反力の寄与の大きさを明らかにするために、主観的な硬さ J を目的変数、振動(振動加速度) A 、打撃音(音圧) P 、反力 F を説明変数とする次の回帰モデルを考案した。

$$J = w_a A + w_p P + w_f F \quad (1)$$

$w_{a,p,f}$ はそれぞれの要因が硬さ知覚に対する寄与の大きさを表す。本研究では、この回帰モデルを同定することで間接的なタッピングにおける硬さ知覚に寄与する物理的要因を明らかにした。

2.1 材料

タッピングの対象物として、厚みが 12 mm で、硬さが異なるゴム板 (Showa Rubber Co., Ltd.) を使用した。ゴム板の硬度は硬度計 (ADM-A, Niigata seiki Co., Ltd.) で計測され、18, 26, 45, 56, 65, 73, 80, 89 度 (単位: JIS K 6253 Type-A) の計 8 種類が使用された。白杖はアルミ製の直杖が使用され、長さは 1200 mm、重量は 220 g であった。

2.2 主観的な硬さのデータセット

主観的な硬さは我々のこれまでの研究で取得したデータを使用した [6]。7 名の視覚障害者が前述のゴム板をタッピングし、そのときの主観的な硬さをマグニチュード推定法 (モジュラスなし) によって評価した。取得した主観的な硬さのスコアは幾何平均化され、 z 値に変換された。実験の手続きは東京国際大学研究倫理委員会によって承認された (承認番号: TKD No.2-55)。

2.3 振動・打撃音・反力の計測

2.3.1 実験装置

多変量解析のために、タッピング時に発生する振動・打撃音・反力を計測した。図 1 に実験装置の構成を示す。反力

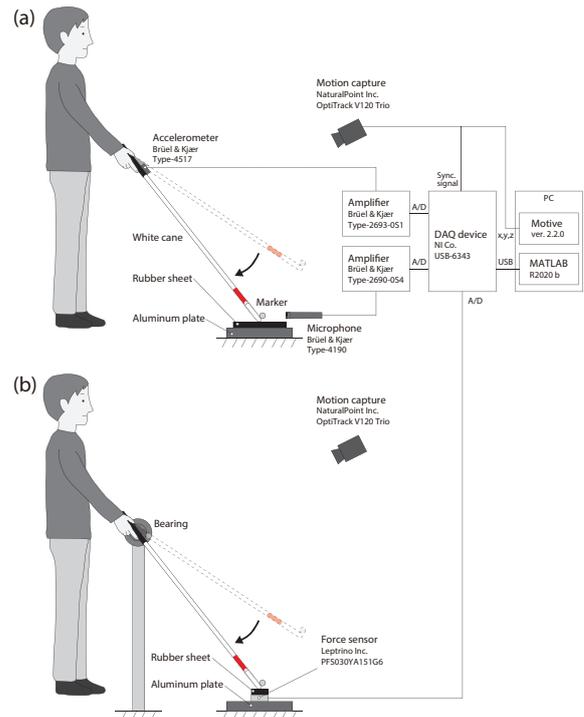


図 1: 実験装置: (a) 振動・打撃音計測セットアップ, (b) 反力計測セットアップ

を計測するための計測器が振動や打撃音に干渉することが予備実験で確認されたため、振動・打撃音計測セットアップと反力計測セットアップの二つに分けて計測が実施された。タッピング時に手掌に伝える振動を計測するために、加速度計 (Brüel & Kjær, Type-4517) とアンプ (Brüel & Kjær, Type-2693-0S1) を使用した。加速度計は白杖のグリップの先端側に取り付けた。打撃音の音圧を計測するためにマイクロフォン (Brüel & Kjær, Type-4190) とアンプ (Brüel & Kjær, Type-2690-0S4) を使用した。反力を計測するために、力センサ (Leptrino Inc., PFS030YA151G6) を使用した。これらの計測器の信号は 50 kHz のサンプリングで DAQ (Data acquisition) デバイス (National Instruments Co., USB-6343) を用いて収集した。また、白杖の先端の速度を計測するために光学式モーションキャプチャ (NaturalPoint Inc., OptiTrack V120 Trio) を使用した (フレームレート: 120 fps)。DAQ デバイスとモーションキャプチャはトリガ信号によって時間同期された。

2.3.2 手続き

実験者が一定の高さから白杖を軽く振り下ろすことでタッピングした。実験者のタッピングのばらつきを抑制するためにモーションキャプチャで計測した白杖の先端の速度から解析に使用するデータを選定した。具体的には、各ゴム板につき 100 回以上のタッピングを行い、最高速度の平均値から近い 30 回分のデータを解析に使用した。

2.4 解析方法

2.4.1 基本処理

計測に使用した加速度計とマイクロフォンは比較的フラットな周波数特性であるのに対して、ヒトの皮膚感覚や聴覚

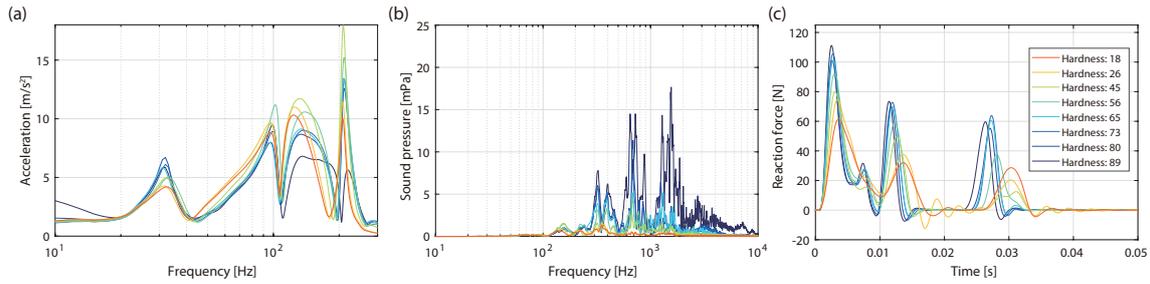


図 2: 計測結果: (a) 振動の周波数スペクトル, (b) 打撃音の周波数スペクトル, (c) 反力の時系列データ

は周波数によって感度が異なることが知られている。そこで、ヒトが感じるような振動や打撃音を求めるために感覚特性で重み付けした。具体的な方法は文献 [8] で報告したため割愛する。

各物理的要因の代表値を決定した。振動と打撃音に関しては、人体への影響の指標に用いられる実効値を使用した [9, 10]。反力はピーク値と力積が主観的な硬さと相関があることが報告されており [3]、本実験で使用したゴム板ではピーク値と力積に相関 ($r = -0.81$) があることを予備実験で確認された。そのため、反力の代表値はピーク値を使用した。これらの代表値は Weber–Fechner の法則に従い対数変換し [11]、物理的要因間で単位が異なるため z 値に変換された。

2.4.2 主成分分析と重回帰分析

式 (1) を同定するために、重回帰分析 (後方ステップワイズ法) を行った。多重共線性を確認するために、物理的要因間の相関関係を調べたところ、打撃音と反力に相関があることが認められた ($r = 0.97$)。多重共線性を回避するために、重回帰分析の前に主成分分析を行った。主成分 z と各要因との関係は

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ P \\ F \end{pmatrix} \quad (2)$$

となり、 \mathbf{a} は主成分に変換するための固有ベクトルを表す。次に、主成分を用いて重回帰分析を行った。主成分と主観的な硬さの関係は

$$J = (\beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3) \begin{pmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix}^T + e \quad (3)$$

となり、 β は偏回帰係数、 e は誤差を表す。

最後に、回帰モデルの妥当性を検証した。計測した各物理的要因の 30 個のデータのうち、ランダムに選択された 20 個を回帰モデルの同定に使用し、残り 10 個のデータを用いて主観的な硬さの推定値を求めた。推定された主観的な硬さとマグニチュード推定法によって計測した主観的な硬さを比較することでモデルの妥当性を検証した。

3. 結果

図 2 にタッピング時の振動・打撃音・反力の結果を示す。皮膚感覚や聴覚は周波数領域で議論されるため振動と打撃

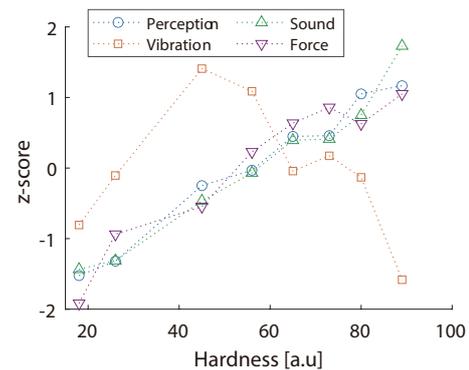


図 3: z 値に変換された主観的な硬さと物理的要因の代表値

音は周波数スペクトルによって表され、インパルス力を表示するために反力は時系列データによって表された。振動に関しては、対象物の硬度が変化しても特定のパターンで振動していることが確認された。それに対して、打撃音は対象物の硬さの上昇にともない数 kHz 帯の音圧が上昇することが確認された。また、反力は対象物の硬さにともないピーク値が変化することが確認された。

図 3 に z 値に変換された主観的な硬さと物理的要因の代表値を表す。表 1 に各主成分ごとの固有ベクトルと累積寄与率を表す。重回帰分析の結果、第一主成分のみが有意であり ($t(6) = 8.32, p < 0.001$)、第一主成分に対する偏回帰係数 β_1 は 0.65 であった。また誤差は非常に小さいため ($e = 1.57 \times 10^{-16}$)、無視することができる。式 (2) と式 (3) に基づくと硬さ知覚の回帰モデルは

$$J = -0.14A + 0.46P + 0.44F \quad (4)$$

となり、各要因の係数が硬さ知覚への寄与の大きさを表す。打撃音と反力の寄与の大きさが同程度であり、この二つは振動の寄与より大きかった。図 4 にマグニチュード推定法によって計測した主観的な硬さと回帰モデルで推定した主観的な硬さを表す。推定値が対角線上にあり、また決定係数が高いことが確認された ($R^2 = 0.91$)。よって、本回帰モデルの妥当性が高いことが示唆された。

4. 考察

同定された回帰モデルでは、主観的な硬さに対する振動の寄与が最も小さかった。これは 1 章で述べた通り、間接

表 1: 主成分ごとの固有値と累積寄与率

	PC1	PC2	PC3
Vibration	-0.22	0.96	0.20
Tapping sound	0.71	0.01	0.70
Reaction force	0.67	0.30	-0.68
Cumulative contributing rate	0.70	0.98	1.00

的なタッピングでは白杖の固有振動数が支配的であることが影響したと考えられる。タッピング時のグリップ部の振動の周波数スペクトルを確認したところ、硬さ間でわずかな違いは確認されたものの、対象物の硬さに依存することなく、おおむね一定の振動モードであることが確認された。Higashi et al は手指でタッピングしたときに発生する減衰振動の周波数が高いほど硬いと知覚することを報告している [2]。よって、間接的なタッピングの場合では、白杖は一定の周波数で振動していたことから振動は硬さ知覚への手がかりになりにくいと考えられる。

それに対して、対象物の硬さが上昇するとともに数 kHz 帯の音圧が上昇した。また、主観的な硬さに対する打撃音の寄与は振動よりも大きかった。打撃音の高周波成分が大ききとき、対象物が硬いと知覚されることが報告されており [4]、また打撃音だけでも対象物の硬さを判断できることが報告されている [12]。そのため、間接的なタッピングにおける打撃音は硬さを判断するための手がかりになると考えられ、本研究の結果は、打撃音を聞くことで硬さの感度が上昇した先行研究の結果を支持する [5, 6]。

また、反力も主観的な硬さに対する寄与が大きく、打撃音と同程度であることが確認された。そのため、間接的なタッピングでは反力も硬さを判断するための重要な手がかりであると言える。我々は、硬さの感度は低下するものの聴覚が遮断されても硬さを判断できた先行研究の知見 [6] を同定された回帰モデルを用いて説明することができる。式 (4) において、聴覚を遮断した場合 ($P = 0$)、主観的な硬さの推定値の直線は聴覚ありの条件に比べてフラットになる。これは、判断できる硬さの範囲が狭くなっていること表し、硬さの感度の低下を意味する。そのため、視覚障害者は間接的なタッピングでは打撃音と反力の両方を使って硬さを判断していると考えられ、聴覚が遮断された場合は反力を手がかりにしていると考えられる。

謝辞 有益な議論をいただいた名古屋工業大学 酒向慎司准教授に深く感謝する。本研究は JSPS 科研費 (18K18698, 16H03753) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 芝田, “視覚障害児・者の歩行指導,” 北大路書房, 2010.
- [2] K. Higashi et al., “Perceived hardness through actual and virtual damped natural vibrations,” *IEEE Trans. Haptics*, vol.11, no.4, pp.646–615, 2018.

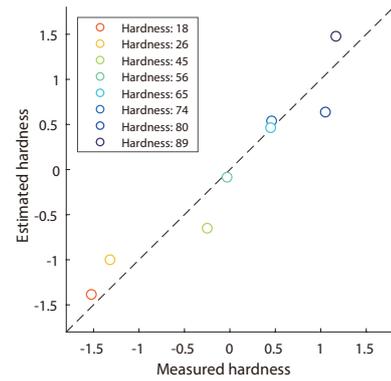


図 4: 主観的な硬さの計測値と推定値

- [3] K. Higashi et al., “Hardness perception through tapping: Peak and impulse of the reaction force reflect the subjective hardness,” *Haptics: Sci., Technol., and Appl.*, LNCS, vol.10893, pp.366–372, 2018.
- [4] J. Liu and H. Ando, “Metal sounds stiffer than drums for ears, but not always for hands: Low-level auditory features affect multisensory stiffness perception more than high-level categorical information,” *PLoS ONE*, vol.11, no.1, e0167023, 2016.
- [5] B. N. Schenkman, “Identification of ground materials with the aid of tapping sounds and vibrations of long canes for the blind,” *Ergonomics*, vol.29, no.8, pp.985–998, 1986.
- [6] K. Nunokawa et al., “Basic study of the influence of the manner of grasping, number of contacts, and auditory information on recognition of hardness of objects by visually impaired persons using white canes,” *J. Adv. Comput. Intell. Intell. Inform.*, vol.22, no.1, pp.121–123, 2018.
- [7] M. D. Rodgers and R. W. Emerson, “Materials testing in long cane design: Sensitivity, flexibility, and transmission of vibration,” *J. Vis. Impair. Blind.*, vol.99, no.11, pp.87–94, 2008.
- [8] T. Tanabe et al., “Identification of physical factors contributing to hardness perception of objects during indirect tapping using white canes,” in: *Proc. IEEE World Haptics Conf.2021*, pp.451–456, 2021.
- [9] International Organization for Standardization, “Mechanical vibration — Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration — Part 1: General requirements ISO 5349-1,” 2001.
- [10] JIS C 1509, “電気音響—サウンドレベルメータ (騒音計),” 2005.
- [11] G. T. Fechner, “Elemente der Psychophysik,” Breitkopf und Härtel, 1860.
- [12] K. Nunokawa et al., “Judging hardness of an object from the sounds of tapping created by a white cane,” in: *Proc. Annu. Int. Conf. of the IEEE Eng. in Med. Bio. Soc.*, pp.5876–5879, 2014.