

触覚と聴覚を考慮したプッシュスイッチの操作感向上 Improvement of Operational Feeling for Push Switch in Consideration of Tactile and Auditory Sensation

精密工学専攻 23号 坂下 丈
Jo Sakashita

1. はじめに

近年、様々な電化製品などの低騒音化により静穏な環境が実現している。これは心身への疲労の軽減や生産性の向上などの利点をもたらす一方、従来気にならなかったプッシュスイッチなど部品レベルの音が顕在化し、操作感が低下する場合がある。従来のプッシュスイッチ開発では操作音まで十分に考慮した設計が行われておらず、人の感性に影響している要因と構造の因果関係が不明瞭である。

そこで本研究では、プッシュスイッチの操作感の把握に注目し実験を実施し、構造と人の感性を感触や操作音という物理量で結びつける操作感推定モデルの構築を目指す。なお、本研究では評価実験において、被験者のインフォームドコンセントを得ている。

2. プッシュスイッチにおける単刺激下での印象把握

本章ではプッシュスイッチにおける触覚と聴覚の各知覚情報と人の感性との結びつき把握を目的に、触覚情報である感触と聴覚情報である操作音それぞれにおける単刺激下での主観評価⁽¹⁾を実施する。

2.1 触覚情報に対する主観評価

本節では触覚情報である感触の主観評価を行う。プッシュスイッチの感触がどのように知覚されているか、また感触と感性との結びつきを主観評価に基づき把握を行う。

2.1.1 感触のみの評価実験条件

感触がどのように知覚されており、種類の違いを判別可能であるかを把握する目的として、感触の指標であるF-Sカー

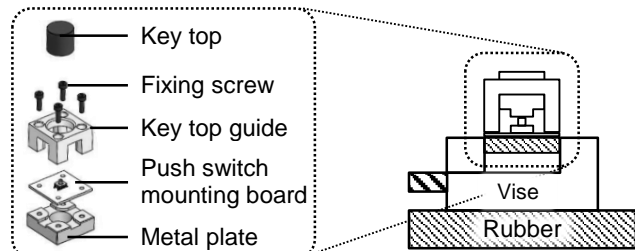


Fig. 1 Jig configuration of push switch

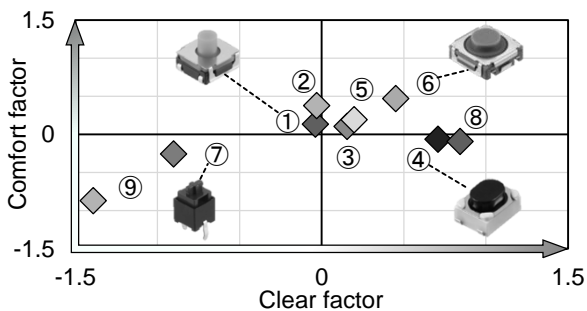


Fig. 2 Evaluation results of touch feeling by SD method

ブの異なるプッシュスイッチ9種類の選定を行い、評価手法として Semantic Differential 法(以下、SD法)の絶対評価を用いる。また、表面形状の違いや他の振動が主観評価に影響を与えないよう Fig. 1 に示す治具に固定後、ゴム板上の万力に固定する。加えて、被験者は操作時に発生する操作音が聴こえないよう、耳栓とイヤーマフを装着した状態にてプッシュスイッチの操作および評価を実施した。

評価に際して、被験者にはあらかじめプッシュスイッチの概要を説明する。被験者は自身が納得するまでプッシュスイッチの操作を行った後、20個の評価形容詞対が記載された評価シートに評価を行う。評価場所は防音室であり、被験者は20代から50代の32名である。

2.1.2 感触のみの評価実験結果と考察

因子分析より、感触は明瞭因子、快適因子、重厚因子の計3因子で表現され累積寄与率が70%を超えることを把握した。Fig. 2に因子分析に基づき、横軸に明瞭因子、縦軸に快適因子とした因子得点の散布図を示す。Fig. 2より、各プッシュスイッチの因子得点が異なることを把握し、被験者は各プッシュスイッチの感触の違いを知覚できており、異なる印象を持つと推察された。

2.2 聴覚情報に対する主観評価

本節では聴覚情報である操作音の主観評価を行う。プッシュスイッチの操作音がどのように知覚されているか、また操作音と感性との結びつきを主観評価に基づき把握を行う。

2.2.1 操作音のみの評価実験条件

操作音がどのように知覚されており、種類の違いを判別可能であるかを把握する目的として、2.1節にて選定した9種

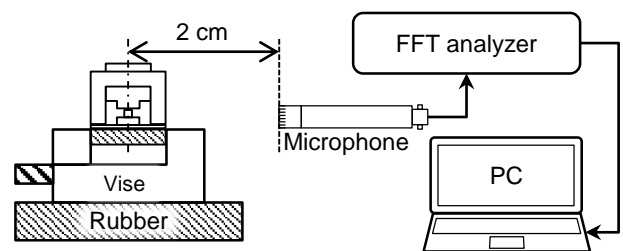


Fig. 3 Recording setup

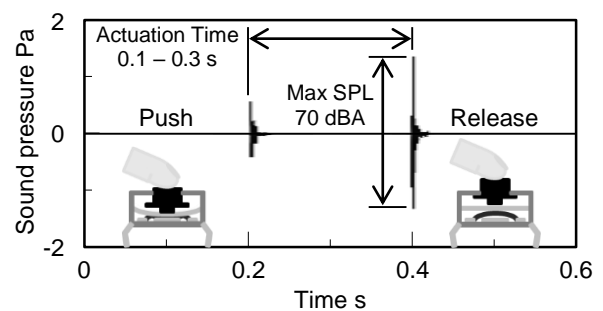


Fig. 4 Time waveform of operation sound for evaluation

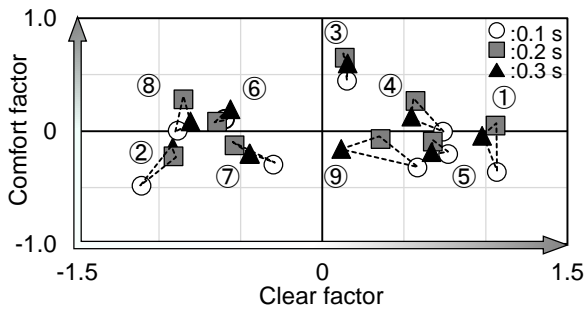


Fig. 5 Evaluation results of operation sound by SD method

類のプッシュスイッチにおける評価用音源を作成する。評価用音源ははじめに無響室にて Fig. 3 に示すように各プッシュスイッチの操作音の録音を行う。しかし録音音源の状態では周波数、最大音圧、押した際と離れた際のピーク音の時間間隔などの様々な変化項目が存在しており、評価に用いた場合どの項目が結果に影響していたのか判別ができない。そこで本実験では、周波数以外の項目に対し加工を施し統一を行うことで各プッシュスイッチの操作音における周波数の変化が評価に与える影響を把握する⁽²⁾。最大音圧は録音音源の音圧と人の聴感特性を考慮し、70 dBA とする。また、押した際と離れた際のピーク音の時間間隔は、プッシュスイッチ操作時にばらつきが大きく生じ、印象が変化する可能性があるため、本実験では実際の操作を想定し、各プッシュスイッチにつき 0.1 s, 0.2 s, 0.3 s と変更した 3 種類を作成する。Fig. 4 に上記条件にて作成を行った評価用音源の時間軸波形を示す。

評価手法は 2.1 節と同様に SD 法の絶対評価を用い、被験者は操作音提示用のヘッドフォンを装着し評価を実施した。被験者は自身が納得するまで操作音の聴き取りを行った後、2.1 節と同様に評価を行う。評価場所は防音室であり、被験者は 20 代から 50 代の 32 名である。

2.2.2 操作音のみの評価実験結果と考察

因子分析より、操作音も感触同様に明瞭因子、快適因子、重厚因子の計 3 因子で表現され累積寄与率が 70% を超えることを把握した。Fig. 5 に因子分析に基づき、横軸に明瞭因子、縦軸に快適因子とした因子得点の散布図を示す。Fig. 5 より、同一のプッシュスイッチにおけるピーク音の時間間隔の違いによる因子得点の差異は小さく、異なる種類のプッシュスイッチの因子得点の差異は大きくなる傾向を把握した。これより、被験者はピーク音の時間間隔の違いを知覚はしているが大きな印象の変化は生じず、種類の違いは知覚した上でそれぞれに対し異なる印象を持つと推察された。

3. プッシュスイッチにおける複合刺激下での印象把握

本章では、より現実のプッシュスイッチ操作を想定し、触覚および聴覚情報である感触と操作音が同時に提示される複合刺激下における主観評価⁽³⁾、および客観評価を行う。

3.1 触覚情報および聴覚情報の水準の設定

本節では、複合刺激下での評価実験において使用するプッシュスイッチの選定および、各知覚情報の詳細を記載する。

3.1.1 触覚情報の水準の設定

本章にて取り扱うプッシュスイッチを 2 章にて用いた 9 種類のプッシュスイッチの中から、構造変更への発展性を考慮し、操作時に発生する操作音の周波数が印象に寄与する 1 種類に選定する。

次に触覚情報に対する水準を感触の物理量である作動力および移動量に対し定める。作動力は一般に家電製品や自動車などに使用されているプッシュスイッチの作動力を参考に、3 N を基準とし基準に対し上下 1 N に変更した 3 種類とする。一方、移動量は作動力と異なり構造的な制約が存在するため、大きな変更が困難である。そこでステムの材質がラバーであることを利用し、作動力に変化がない範囲でステムを治具により僅かに圧縮させ、0.5 mm を基準に上下に 0.15 mm に変更した 3 種類とする。

3.1.2 聴覚情報の水準の設定

聴覚情報に対する水準を操作音の物理量である音圧および周波数に対し定める。音圧は本実験にて選定を行ったプッシュスイッチを実際に操作した際の操作音の音圧を参考に、A 特性ピーク音圧レベル 70 dBA を基準に上下に 5 dBA 変更した 3 種類とする。周波数は構造変更を行う際にどの周波数帯の成分が印象の変化に影響するかを把握するため、本プッシュスイッチの操作音において人の聴感特性を考慮する場合、主に聴こえている周波数帯が 3-12k Hz 程度であることから、本周波数帯を 3 分割し、各周波数帯の音圧バランス変更を行う。バランス変更は該当周波数帯におけるフィルタを用い -10 dB 変化させた後、最大音圧を上記音圧の基準である 70 dBA に統一を行った。これにより、周波数の水準は基準に対し変更を施す 3 種類を加えた 4 種類とする。

3.2 触覚情報および聴覚情報に対する主観評価・客観評価

本節では触覚情報と聴覚情報である感触と操作音の主観評価および客観評価を行う。これにより、感触と操作音の複合刺激と感性との結びつきの把握を行う。

3.2.1 感触と操作音の評価実験条件

本実験では、感触と操作音を同時に被験者に提示と共に感触と操作音の各物理量を任意に変更可能なシステムが必要となる。そのため、プッシュスイッチの押した際と離れた際の各操作に対し任意の操作音をヘッドフォンより提示可能なシステムを構築した。本システムを用い感触と操作音の各物理量を 3.1 節にて定めた各水準を基準に対し、1 つずつ変更した計 9 種類の評価実験を行う。

本実験では 2 章で行った異なる種類のプッシュスイッチではなく同一種類における各物理量の僅かな変化を明確化するため基準に対する相対評価を行い、複合刺激時における操作感を把握する。加えて、感触と操作音の複合刺激においてどちらが主観的に印象に残ったのか把握するため、2 択の簡易的なアンケート評価も同時に行う。また、ひずみゲージとロードセルを用いることで指先が物体に触れる際の接触力を計測可能なセンサを使用し、計測した接触力を客観評価の指標として用いる。

評価実験は防音室にて行い、被験者は前述のシステムを利用し、ヘッドフォンを装着した状態にて 10 秒間に 10 回のプッシュスイッチ操作を行い、評価シートに記入する。なお、被験者は 20 代から 60 代の 46 名である。

3.2.2 感触と操作音の評価実験結果と考察

因子分析より、2 章にて実施した単刺激下の評価同様に明瞭因子、快適因子、重厚因子の計 3 因子を抽出した。Fig. 6 に横軸を因子得点とした、各物理量変更に伴う各因子得点の推移を示す。Fig. 6 より明瞭因子においては操作音の物理量変化の影響が大きく、重厚因子においては感触の物理量変化の影響が大きく、快適因子には各物理量変化が同程度影響する傾向がみられた。この傾向は 2 章にて実施した感触と操作音の単刺激下の評価実験と同様の傾向であり、本実験の妥当性があると考えられる。また、快適因子は明瞭因子、重厚因子に比べて変化が小さい傾向が確認された。このことから快

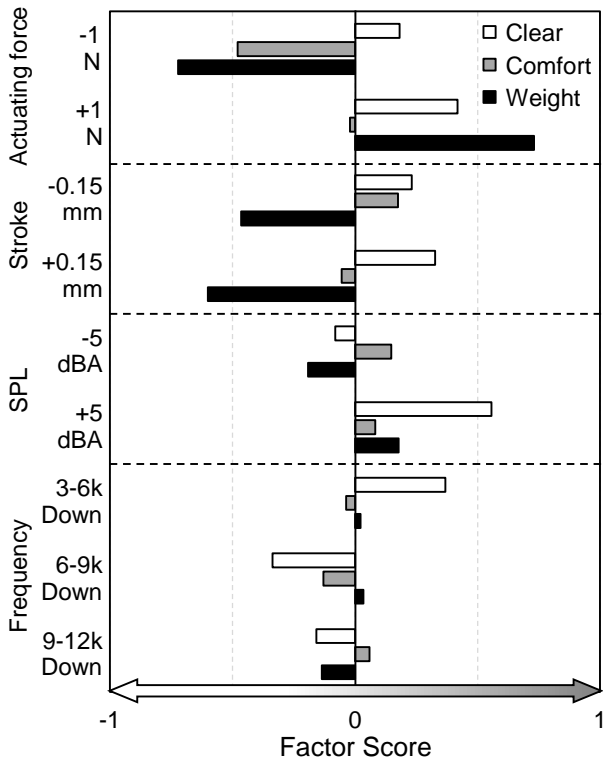


Fig. 6 Evaluation results of complex stimuli by SD method

適因子を大きく変化させるには、本実験で行った1つの物理量の変化ではなく、複数の物理量をバランス良く変化させる必要があると示唆される。

Fig. 7 に感触と操作音のどちらが印象に残ったかのアンケート結果を示す。Fig. 7 より、多くの条件においては操作音が主観的に印象に残る傾向がみられたが、+1 N 作動力が上昇した場合、-5 dBA 音圧が低下した場合においては感触が印象に残る傾向を把握した。このことから複合刺激時の感触と操作音は深く関係していると推察される。

加えて、Fig. 8 に各被験者のプッシュスイッチ操作時の平均接触力の分布図を示す。今回評価対象としたプッシュスイッチの平均作動力が3 Nであることから過剰な力を加えていない場合、平均接触力も3 Nとなる。しかし、Fig. 8 より被験者の多くは僅かに大きめな力を加えた5 N程度の接触力であることを把握した。また詳細な分析を行うと2-4 Nの間の被験者が17名、4-6 Nの間が22名、6 N以上が7名と分布していることを把握した。

4. プッシュスイッチの操作感推定モデルの構築

本章では、3章にて実施した評価実験をもとに複合刺激時の操作感推定モデルの構築⁽⁴⁾を行う。

4.1 クラスターを考慮した操作感推定モデルの検討

本研究では操作感推定モデルの構築に重回帰分析を用いる。重回帰分析は、目的変数の予測や目的変数と説明変数との定量的な関係の把握を行うものである。本章では、目的変数を各因子得点の値とし、説明変数に作動力、移動量、音圧、シャープネスに加え、操作音の押した際と離れた際のピーク音の違いに着目した、音圧の前後差分、シャープネスの前後差分の計6個を用いる。また、説明変数増減は総当り法による重回帰分析を行った際に算出される自由度修正済み決定係数や構造変更を行う際の実現性を考慮し実施した。

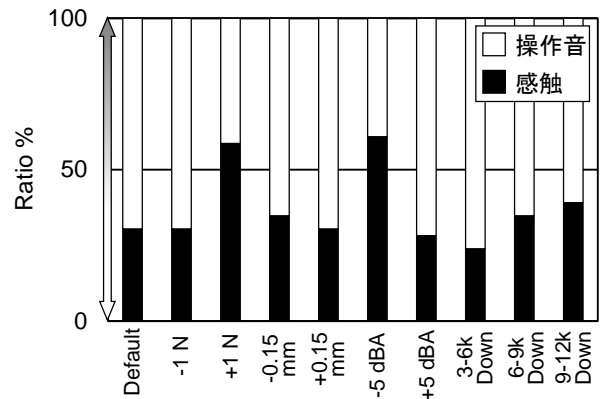


Fig. 7 Questionnaire results

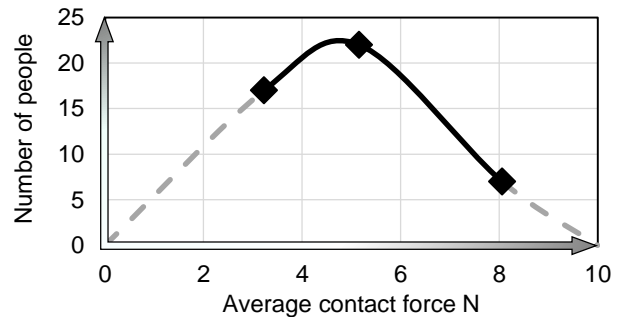


Fig. 8 Distribution of average contact force

重回帰分析より構築した操作感推定モデルは、3章の Fig. 6 より把握した各物理量と感性の関係と概ね一致しており、感触の物理量は重厚因子、快適因子に影響し、操作音の物理量は明瞭因子に影響することを把握した。また3章の Fig. 8 より得られた分布を用い、平均接触力に応じた3つのクラスター分けを行い、各クラスターにおける操作感推定モデルを構築し全体との比較を実施した。その結果クラスターごとに僅かに説明変数が異なるが、重厚因子における作動力や明瞭因子における音圧など、全てに共通する説明変数も存在することを確認した。このことから、各因子において影響の大きな物理量は特定のクラスターに依存せず一致すると推定された。

また、構築した操作感推定モデルの精度を確認する。確認方法として構築した操作感推定モデルより算出される因子得点の推定値と実際に評価にて得られた因子得点との相関分析を用いた。相関分析より、全体および6 N以下2つのクラスターの明瞭因子、重厚因子についてのモデルは相関係数0.8程度、快適因子についてのモデルは相関係数0.6程度であることから、これらのモデルは概ね因子得点の推定が行えていると考えられる。

一方、6 N以上のクラスターのみ相関係数が0.2程であり精度が不十分であることがわかった。このことから、プッシュスイッチ操作において基準の2倍以上の過剰な力を加えるクラスターは、他の被験者と比べて異なる傾向にあることを把握した。

4.2 クラスターを考慮した操作感推定モデルの構築

4.1節における検討および平均接触力の分布を考慮し、6 N以上のクラスターは本研究における外れ値として除外し、再構築を実施した全体での操作感推定モデルを式(1)、(2)、(3)に示す。

$$\text{Clear} = a_1x_3 + a_2x_4 - b_1 \quad (1)$$

$$\text{Comfort} = a_3x_1 - a_4x_2 - b_2 \quad (2)$$

$$\text{Weight} = a_5x_1 + a_6x_3 - a_7x_5 - b_3 \quad (3)$$

x_1 :作動力, x_2 :移動量, x_3 :音圧,
 x_4 :シャープネス, x_5 :音圧の前後差分,
 $a_{1,...,7}$:偏回帰係数, $b_{1,...,3}$:定数項

5. 操作感推定モデルの検証

本章では, 3, 4 章にて得られた操作感推定モデルの検証実験⁽⁵⁾を行う。

5.1 操作感推定モデルの検証実験条件

3 章の評価実験と同様のシステムを用い, 4 章にて構築した操作感推定モデルをもとに感触と操作音の各物理量を基準に対し複数変更した計 8 種類の評価実験を行う。

評価手法は 3 章同様であり, 被験者は 20 代 8 名である。

5.2 操作感推定モデルの検証実験結果と考察

3 章にて実施した因子分析は因子に含まれる評価形容詞対が僅かに異なり, 単純比較が行えないため, 3 章の因子分析にて得られた各因子に含まれる評価形容詞対が基準(Default)に対しどのように推移したかを確認することで操作感推定モデルの検証を行う。

上記検証方法に伴い, 始めに SD 法の相対評価の各評価形容詞対における点数を物理量変更条件ごとに全被験者の平均値を算出する。次に, 算出した値と基準を比較することで, 基準に対しどのように推移したかを把握する。本検証では各評価形容詞対の点数が基準に対し, 最大(All Max)の場合は正の方向, 最小(All Min)の場合は負の方向に推移するよう推定している。Fig. 9 に本検証結果の 1 つとして, 3 因子の合計点数を最大最小となる物理量に変更した際のプロフィール図を示す。

Fig. 9 より, 3 因子の合計点数は概ね推定通り基準に対して正負の両側に評価点数が推移していることを把握した。また, 軽快な-鈍重なという評価形容詞対のみ基準に対し正負に分かれていないが, これは本評価形容詞対が明瞭因子および重厚因子の複数因子に対し寄与しているためと考えられる。加えて, 明瞭因子, 重厚因子についても同様に推定通りに評価得点が推移することを把握した。

一方, 快適因子についてのみ最大および最小のどちらも基準に対し正の方向に推移することが確認された。これは嗜好性の高い因子のため, 被験者によってばらつきが生じた結果発生したものと考えられる。しかしながら, 最小の場合の評価得点に対して最大の評価得点が上回っていることから相対的な関係は崩れておらず, 簡易的な推定として活用できる可能性が示唆された。

これらの結果より, 4 章にて構築したプッシュスイッチ操作時に人に伝わる感触と操作音の複合刺激に対する操作感推定モデルは概ねの評価傾向を推定可能であり, 妥当であることが確認された。

6. 研究成果

プッシュスイッチ操作時に人に伝わる触覚情報である感触と聴覚情報である操作音の複合刺激に対する評価実験を実施し, 複合刺激時の操作感の把握を行った。

主観評価としては 2 章にて実施した, 感触と操作音それぞれの単刺激下における主観評価と同様の傾向である感触と重厚因子, 操作音と明瞭因子の相関関係が確認されたことから本実験の妥当性が確認された。また, アンケート結果より感触と操作音は複合的に結びついており, 感触および操作音の各刺激の変化に伴い印象に対する寄与が変化することが明確になった。

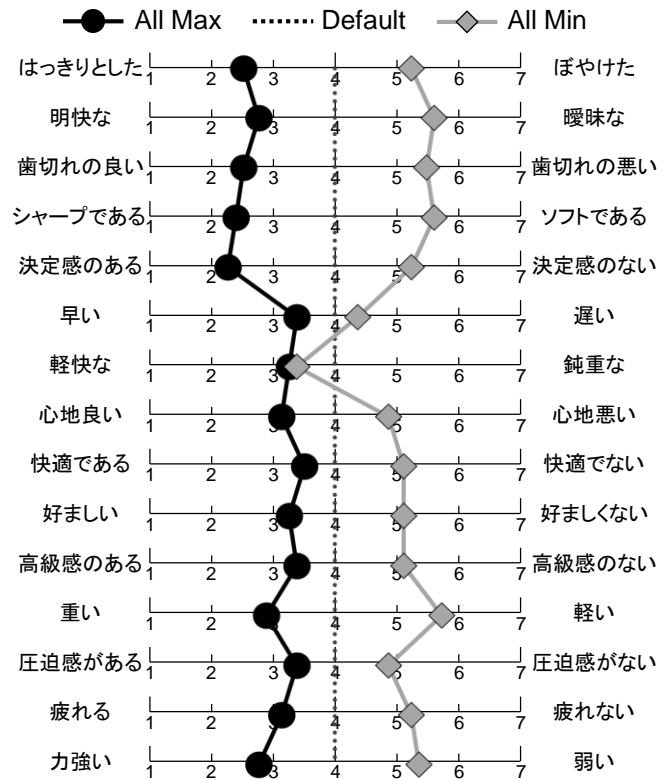


Fig. 9 Profile diagram of each evaluation result

客観評価としては各被験者の平均接触力は異なり, 分布を確認したところ作動力に対し 2 N 程過剰に力を加えたところを中心とする正規分布の傾向が見られた。

上記の主観と客観評価結果を用い, 重回帰分析を行うことでプッシュスイッチの複合刺激時における操作感推定モデルを構築した。

最後に, 構築した操作感推定モデルに基づき各因子を最大および最小に変化させる場合の物理量の組み合わせを算出し, 評価を行い精度の検証を行った。快適因子のみ絶対値としては僅かに誤差があったものの概ね推定通りの結果となり, 本モデルの妥当性が確認された。

参考文献

- (1) 坂下丈, 濱透, 白坂剛, 齊藤克哉, 下村尚登, 戸井武司, タクトスイッチの感触と操作音を考慮した動作時間による操作感覚の把握, 日本音響学会講演論文集(春), (2019) pp.1461-1462.
- (2) 戸井武司, 風早聡志, 機構設計によるカメラシャッター作動音の音質改善, 日本音響学会論文集, 58-7 (2002) pp.406-413.
- (3) 有光哲彦, 渡辺大貴, 戸井武司, ゴルフクラブの打振動を考慮した打球音の快音化評価, 日本機械学会論文集, 82-844 (2016) pp.1-12.
- (4) 坂下丈, 濱透, 白坂剛, 齊藤克哉, 下村尚登, 戸井武司, タクトスイッチの感触と操作音を考慮した操作感覚モデルの構築, 日本音響学会講演論文集(春), (2019) pp.1463-1464.
- (5) 坂下丈, 白坂剛, 下村尚登, 戸井武司, プッシュスイッチの感触と操作音を考慮した複合刺激時の操作感覚推定モデルの構築, 日本音響学会講演論文集(春), (2020) 1-11-11.