

咬筋部筋電位計測における低気温環境下での出力特性とその評価

石川 佳歩 (鶴岡工業高等専門学校 創造工学科, c8916@edu.tsuruoka-nct.ac.jp)

小林 勇登 (鶴岡工業高等専門学校 生産システム工学専攻, s190007@edu.tsuruoka-nct.ac.jp)

松橋 将太 (鶴岡工業高等専門学校 創造工学科, matuhashi@tsuruoka-nct.ac.jp)

小野寺 良二 (鶴岡工業高等専門学校 創造工学科, r-onodera@tsuruoka-nct.ac.jp)

穴戸 道明 (鶴岡工業高等専門学校 創造工学科, m-shishido@tsuruoka-nct.ac.jp)

Evaluation of power output through masseter muscle potential measurement in low temperature environments

Kaho Ishikawa (Department of Information Engineering, Tsuruoka College, Japan)

Yuto Kobayashi (Department of Advanced Engineering, Tsuruoka College, Japan)

Shota Matsuhashi (Department of Creative Engineering, Tsuruoka College, Japan)

Ryoji Onodera (Department of Creative Engineering, Tsuruoka College, Japan)

Michiaki Shishido (Department of Creative Engineering, Tsuruoka College, Japan)

要約

近年、生産年齢人口の減少にともない、介護サービス分野における人的資源の不足が深刻化している。この問題の対策として、福祉機器の積極的な活用による介護サービスの質の維持が挙げられる。このような背景を分析し、著者らは頭部動作のみによって機器の制御が可能なポインティングデバイスを開発した。しかし、本デバイスは、低気温の環境下において筋電計の動作不良を引き起こす。この要因として、環境温度の低下による電氣的ノイズの増大が挙げられる。そこで、筋電位サンプリングのノイズ耐性を高めるため、筋電位の検出方法を双極誘導型にした。さらに、ノイズを含んだ筋電位波形であっても正確に咬合を判定するため、複数クリック検知機能を実装した。本研究では、低温（1～5℃）、中間温（9～13℃）および常温（23～24℃）におけるFPDの操作試験を実施した。そして、タスク成功率とタスクの成功に要する時間（タスク所要時間）によって、環境温度による動作信頼性を評価した。その結果、環境温度によらずタスク成功率は95%以上となり、タスク所要時間は0.5 sec程度であった。また、電氣的ノイズの重畳や誤動作は確認されなかった。一方で、環境温度によらず一部の被験者からは、「顎が疲れた」や「長時間の操作には向かない」といった自由意見を得た。この原因として、本デバイスの操作時に日常で使われる咬合より大きな力が必要であったことが考えられる。そのため、この咬合力と疲労度の関係を明らかにし、本デバイスのユーザビリティを改善することが求められる。

Abstract

Due to a decline in the productive-age population in Japan, the shortage of human resources in the field of nursing-care have been severe. As a measure for this problem, it is necessary to maintain the quality of nursing-care services by utilizing welfare equipments. Analysing this background, the authors developed a pointing device that controlled by voluntary head movement. However, this device malfunctions in low temperature environments. The factor is the increase in electrical noise due to the decrease in environmental temperature. Therefore, in order to improve the noise resistance of electromyography sampling, bipolar induction was adopted as the method of detecting electromyography. Furthermore, in order to accurately judge the occlusion even with electromyography containing noise, the function to detect multiple clicks was equipped with the pointing device. In this study, first, the operation was tested in low temperature environments (1-5 °C), middle temperature environments (9-13 °C) and warm temperature environments (23-24 °C). Next, the operation reliability influenced by environmental temperature was evaluated based on task success rate and required times. As a result, the task success rate was 95% or more regardless of the environmental temperature, and the required times was about 0.5 sec. In addition, the superimposition of electrical noise or malfunction was not confirmed. On the other hand, some participants commented that their jaws were tired and that they were not suitable for long-term operation, regardless of the environmental temperature. The reason is that the operation of the FPD required more force than the occlusion used in daily life. For this reason, it is indispensable to verify the relationship between the occlusal force and the fatigue of jaw and improve the usability of this device.

キーワード

ヒューマンインタフェース, 表面筋電位, 頭部姿勢角, 動作信頼性, 環境温度

なう労働生産性の低下が指摘されている。とりわけ介護福祉分野では、介護者不足と被介護者増加の需給ギャップ拡大により生ずると予想される介護サービスの質低下が懸念される。この課題に対し、将来に渡って必要とされる介護サービスを確保するため、介護サービスの質や生産性向上を図る介護機器やIT活用等の充実促進が示されている（経済産業省、

1. 緒言

昨今の社会問題のひとつとして、少子高齢化の加速にとも

2016；経済産業省，2018）。こうした背景を踏まえ、肢体不自由者の自立支援と介護負担軽減を図るアプローチとして、著者らは頸部より上の動作のみで機器制御可能とするポイントングデバイス（Face-input Pointing Device: FPD）の開発を行った（阿部他，2017）。

FPDは、咬筋の噛み締め動作により生ずる筋電位および頭部姿勢角といった2種類の生体信号を機器制御の出力信号に変換するヒューマンインターフェースであり、フィッツの法則に基づくThroughputによって応答性や操作性を評価し、実用に資する操作能力を具備することが確認されている。

図1にFPDのシステム構成を示す。FPDは3軸加速度センサ・3軸ジャイロセンサを搭載した傾斜モジュール（MPU-6050、InvenSense）、マイクロコンピュータ（Arduino Pro Mini、Arduino）、非侵襲・乾式電極型の筋電計で構成される。頭部の傾きは、傾斜モジュールによって取得される。また、咬合で生じる筋電位は、咬筋部に設置した電極によって検出される。一方で、咬筋筋電位計測には使用環境の違いにおける精度面の課題が確認されており、とりわけ低気温環境下で動作不良が発生するといった技術的課題を把握している。この支配的要因として、環境温度の低下による電氣的ノイズの影響が挙げられる。これは、隣接した筋肉のクロストークや熱雑音、電子機器による干渉等が一因となる（加納他，2002）。また、電極部の皮膚への接触インピーダンスや皮膚インピーダンスの影響も強く受ける。例えば、前者は皮膚の表面温度が10℃低下することで約20kΩの増加（小林他，1989）を、後者は環境温度が1℃低下することによって1.5～3.5%程度の増加（酒本，1995）などの傾向が指摘されている。したがって、電氣的ノイズ軽減は低気温環境下での動作不良改善効果が期待される。そこで、筋電位サンプリングのノイズ耐性を高めるため、筋電位の検出方法として双極誘導を採用した。さらに、ノイズを含んだ筋電位波形であっても正確に咬合を判定するため、複数クリック検知機能を実装した。この機能は、クリックの入力信号の間隔が0.5 sec以内の場合には、咬合に基づく操作を停止させ、ユーザーの意図しない連続クリックを防止するものである。

本研究では、双極誘導式筋電位検出と複数クリック検知によるFPDの低気温環境下における動作信頼性を評価した。と

くに、環境温度を低温（1～5℃）、中間温（9～13℃）、および常温（23～24℃）の使用環境下における出力特性について、タスク成功率とタスクの成功に要する時間（タスク所要時間）の指標で改善効果を分析した。

2. 実験方法

2.1 実験条件

環境温度を低温（Cold）、中間温（Middle）および常温（Warm）の3段階に設定し、各環境下においてFPDの操作試験を実施した。なお、“Cold”、“Middle”および“Warm”における環境温度は、それぞれ1～5℃、9～13℃、23～24℃の範囲とし、“Middle”、“Warm”、“Cold”の順に実施した。なお、実験日は表1に示す通りである。

表1：各環境温度における実験日

環境温度	実験日
中間温	2020年11月13日～11月24日
常温	2020年11月20日～11月25日
低温	2020年12月14日～12月16日

また、“Warm”の操作試験は室内（幅8.17m×奥行10.10m×高さ2.7m）で実施し、“Middle”と“Cold”は冬期間の体育館（幅33.2m×奥行24.4m×高さ7.5m）で実施した。

実験中における被験者の生体反応を把握するため、深部体温（前額部深部温）、咬筋部の表面温度および皮膚血流量を計測した。深部体温は5分毎、咬筋部の表面温度は2分毎に計測し、皮膚血流量はサンプリング周期1secの連続記録とした。それぞれの計測には非接触電子温度計（TMTM-01、東亜産業）、サーモグラフィ（Ti125、FLUKE）および研究用レーザー血流計（RBF-101、Pioneer）を使用した。なお、皮膚血流量は手背部より計測した。また、被験者は健常な学生6名（平均年齢20.3歳）とした。各被験者には防寒対策を十分に行うよう事前に指示した。低温において全被験者が厚手の防寒具を着用し、4名の被験者は手袋を着用した。

FPDは頭部姿勢角および筋電位を連続記録とし、サンプリングレートは頭部姿勢角が200 Hz、咬筋部筋電位が2 kHzと

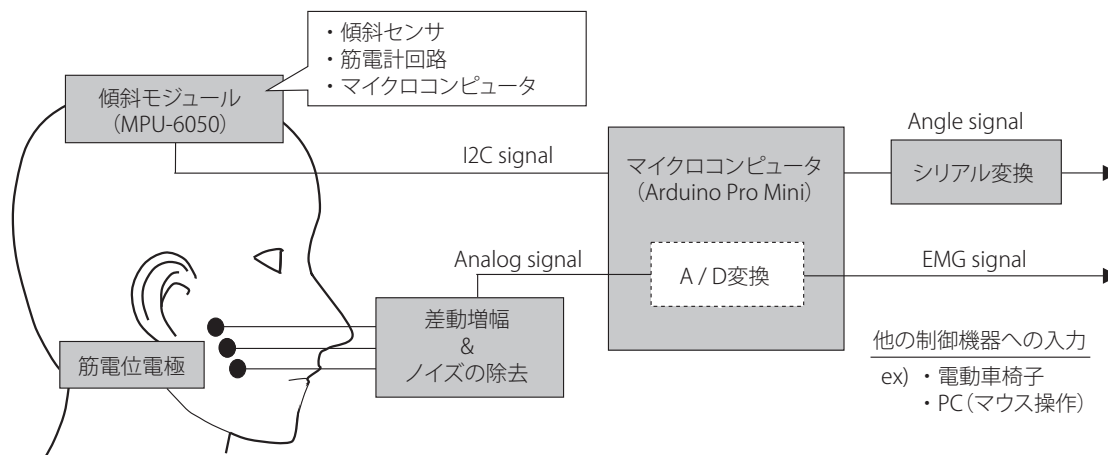


図1：FPDのシステム構成

した。頭部姿勢角および咬筋部筋電位は、それぞれ電動車椅子の進行方向と前進・停止の制御に用いられる。FPDの外装は装着性を考慮し、傾斜モジュール、筋電計回路およびマイクロコンピュータを頭頂部に固定することで、頭部揺動による装置のずれを軽減した。なお、電極には一辺が1 cmの正方形銀板を利用し、電極の配置は先端部からGND、IN-、IN+とした。また、各電極間の距離は1 cmとした。

2.2 筋電計回路

筋電位の増幅には、生体増幅アンプとして広く使用される高精度計装アンプIC (LT1167, Linear Technology) を使用した。ノイズフィルタは、随意収縮中の表面筋電位の周波数帯域に合わせ、5 Hz一次CRハイパスフィルタ、2 kHz一次RCローパスフィルタを搭載した。また、実生活での使用を想定し、商用交流ノイズを除去する50 Hzバンドエリミネーションフィルタを搭載した。これにより、シールドルーム外での計測を可能にした。なお、筋電位をマイクロコンピュータで読み込むために、筋電位の出力を0~5 Vに収める必要があるため、直流オフセットによって電圧を調整した。

2.3 操作試験

図2に実験環境を示す。本実験では、電動車椅子の操作を前提としたFPDの動作信頼性評価を実施した。FPDからの制御信号は、シリアル通信にてPC (CF-SX2, Panasonic, CPU: 2.60 GHz) に送信される。なお、PCディスプレイは、解像度1600 × 900 dot、サイズは12.1 inchとした。被験者には、このディスプレイに表示される電動車椅子の動作指示 (前進・停止) に従い、FPDの操作によって入力状態を一致させるタスクを与えた。

図3 にタスク試行の流れを示す。ディスプレイ画面上部には動作指示が表示され、下部には現在の入力状態が表示される。動作指示は実験管理者によって任意に変更可能である。動作指示が切り替わると、被験者は動作指示を目視により確認し、咬合動作によって現在の動作状態を一致させる。本実験では、状態一致に要する時間が2 sec以内であること、および次の動作指示まで安定であることをタスクの成功と定義した。

操作試験は実験直後と30分後に実施し、それぞれのタスク試行回数は100回 (総試行回数: 200回) とした。被験者はFPDの電極を咬筋部に固定して装着し、椅子座位で背もたれを利用していた。なお、各操作試験の前に、被験者にタスクおよびFPDの操作方法を説明し、咬合によって随意的に入力状態を変更できることを確認している。また、本実験では、

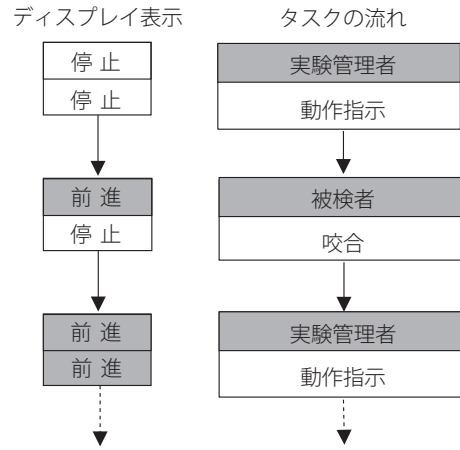


図3：タスク試行の流れ

個人差による影響を考慮するため、被験者それぞれにおいて閾値を設定した。

動作信頼性は、タスク成功率とタスクの成功に要した時間 (タスク所要時間) により評価した。タスク成功率は、タスクの総試行回数 N と成功数 S によって算出した。以下にタスク成功率の導出式を示す。

$$Success\ rate = \frac{S}{N} \times 100 \quad (1)$$

Friedmanの検定は、ノンパラメトリック検定であり、対応のある3群以上のデータの比較に有効であるとされる。そこで、有意差5%としたFriedmanの検定により、各環境温度におけるタスク成功率とタスク所要時間の有意差を検証した。

2.4 アンケート

表2にアンケートの質問概要を示す。実験中における被験者の状態や本デバイスの操作性について明らかにするため、

表2：アンケートの質問概要

- Q1. 実験中に寒さを感じたか?
- Q2. 寒さによって咬合動作がしづらくなったか?
- Q3. 寒さによって四肢動作がしづらくなったか?
- Q4. 入力状態を即座に切り替えられたか?
- Q5. 入力状態が連続して切り替わることは無かったか?
- Q6. 痛みやかゆみは感じずに操作できたか?
- Q7. 顎の疲労を感じずに操作できたか?
- Q8. 長時間の操作が可能であると感じたか?

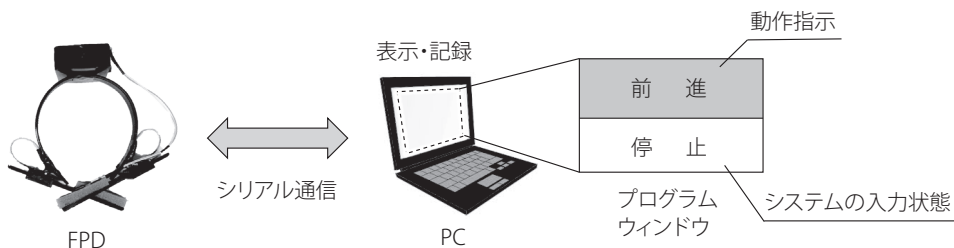


図2：実験環境

各操作試験の後にアンケートを実施した。Q1～8に対する回答方式は単一回答方式とし、選択肢は、リッカート尺度に統一して、「5：そう思う」、「4：どちらかといえばそう思う」、「3：どちらともいえない」、「2：どちらかといえばそう思わない」、「1：そう思わない」とした。また、アンケートの末尾に自由回答欄を設定し、被験者個人の所感や感想を求めた。

2.5 倫理的配慮

本実験は、計測機器の使用によって人体への影響がないことを確認している。また、連結不可能匿名化したデータのみを用いているため、個人情報の保護は十分になされている。さらに実験への参加・中止は、本人の意思に委ねられており、実験参加者の心理的苦痛をもたらさないものと想定される。被験者には、予め実験の趣旨、目的や方法およびデータは統計として情報を扱うために個人が特定されることが無い点について説明し、協力の理解を得た。さらに、実験現場(体育館)にて再度説明を行い、書面による同意を得た。

3. 実験結果および考察

3.1 筋電位処理と咬合判定の方法

主な筋電位の処理方法として、絶対値変換、RMS処理、平均振幅、積分値などが挙げられる。FPDでは、処理速度を考慮し、筋電位処理に絶対値変換と平均振幅を利用した。

はじめに、マイクロコンピュータに入力された咬筋部筋電位を絶対値変換により振幅値に変換する。筋電位のサンプリングレートは2 kHzとし、A/D変換のビットレートは10 bitとした。次に、二段の単純移動平均によって波形の平滑化を行う。以下に単純移動平均の式を示す。

$$SMA_M = \frac{P_M + P_{M-1} + \dots + P_{M-n}}{n} \quad (2)$$

ここで、 P_M 、 P_{M-1} 、 \dots は直近 n 個のデータであり、FPDでは一段目の n を80個、二段目の n を40個に設定した。1段目の単純移動平均化では0.04 sec (= 80 × 0.0005)、2段目では1.6 sec (= (80 × 0.0005) × 40)の区間における平均を求める。この処理後に、閾値判定によってある一定以上の値であるときに「咬合」、その値未満の場合は「咬合無し」と判定する。なお、複数クリックを防止するため、0.5 sec以内に連続して「咬合」と判定された場合、咬合による操作を停止する。

3.2 被験者の生体反応

3.2.1 前額部深部温

図4に各環境温度における前額部深部温を示す。“Warm”、“Middle”、“Cold”の各環境温度において前額部深部温の変動は僅かであった。しかし、“Cold”における前額部深部温は、“Warm”と“Middle”の場合と比較して平均0.4～0.5℃低下した。深部体温の低下は、筋線維伝導速度(MFCV)や筋電位の振幅などの特性に影響を与えることが解明されている(増田他, 1992; 村上, 2009)。とくに、深部体温が1℃低下すると筋線維伝導速度は $0.58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 低下するとされる。そのため、低気温の環境下では、筋線維伝導速度や筋電位の振幅が低下し、閾値による咬合の判定結果に影響を及ぼす可能性がある。

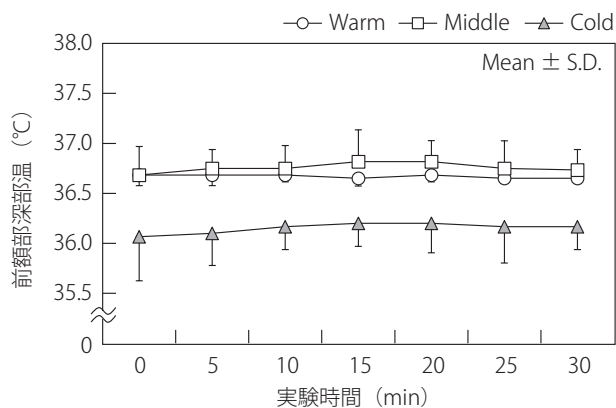


図4：各環境温度における前額部深部温

3.2.2 咬筋部の表面温度

図5に各環境温度における咬筋部の表面温度を示す。“Warm”と“Middle”において、咬筋部の表面温度の変動は僅かであったが、“Cold”では減少傾向が確認された。とくに、“Cold”における実験30分後の咬筋部の表面温度は、“Middle”と比較して5.1℃低下し、“Warm”と比較して11.0℃低下した。既往研究より、電極部の接触インピーダンスは皮膚の表面温度が10℃低下することにより約20 kΩ増加することが解明されている(小林他, 1989)。そのため、“Cold”では、“Warm”と比較して電気ノイズが増大するといえる。

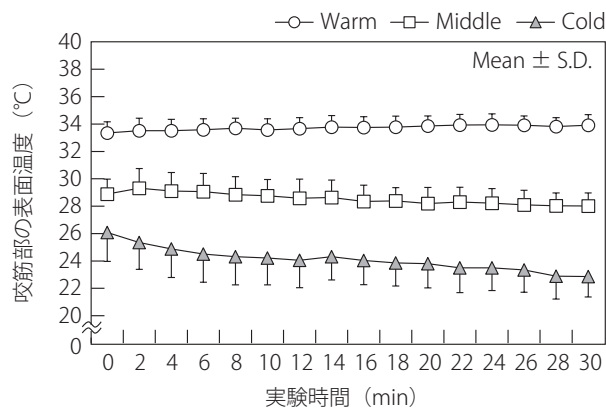


図5：各環境温度における咬筋部の表面温度

3.2.3 皮膚血流量

図6に各環境温度における皮膚血流量(平均値)を示す。なお、被験者の体動による影響を考慮するため、30 ml/min以上の血流量は除外して平均値を算出している。“Cold”の皮膚血流量は、“Warm”と“Cold”と比較して約1.9 ml/min低下した。既往研究より、環境温度の低下により寒冷刺激が加わると、体熱バランスを調整し深部体温を維持するため、皮膚血流量が低下することが明らかにされている(濱田他, 2017)。したがって、“Cold”における皮膚血流量の低下は、深部体温を維持するための動静脈吻合(AVA)血管反応だといえる。

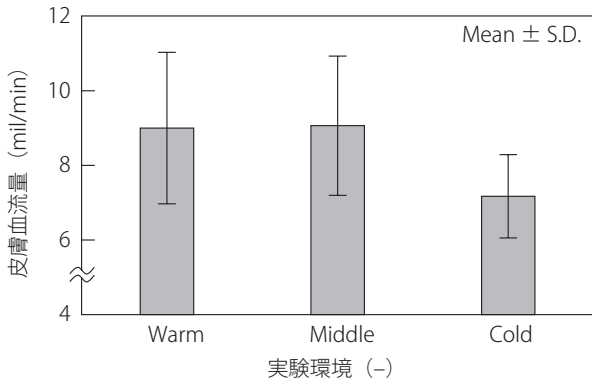


図6：各環境温度における皮膚血流量

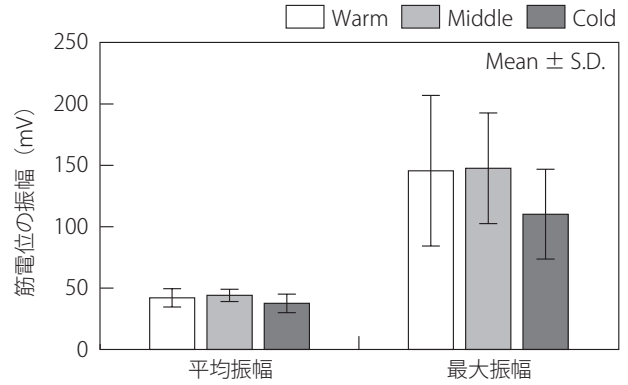


図8：各環境温度における平均振幅と最大振幅

3.3 タスク成功率とタスク所要時間

図7に各環境温度におけるタスク成功率分布を示す。“Warm”、“Middle”、“Cold”におけるタスク成功率の平均値はそれぞれ、99%、98.3%、100%となっており、高値を示した。また、Friedmanの検定においてP値が0.582となったため、各環境温度におけるタスク成功率に有意差は認められなかった。したがって、FPDは環境温度によらず高い動作信頼性を有する。さらに、電気的ノイズの重畳や誤動作は確認されなかった。以上より、筋電位サンプリングの耐ノイズ化と複数クリック検知機能の実装によって、低気温の環境下における動作不良は改善された。一方、いずれの箱ひげ図においても、タスク成功率の最大値、最小値および平均値は、全て四分位範囲に収まっている。そのため、タスク成功率は被験者間の差が小さい。なお、本実験におけるタスクの失敗は、咬合の未検出により制限時間内に動作指示とFPDの入力状態を一致できないために発生した。

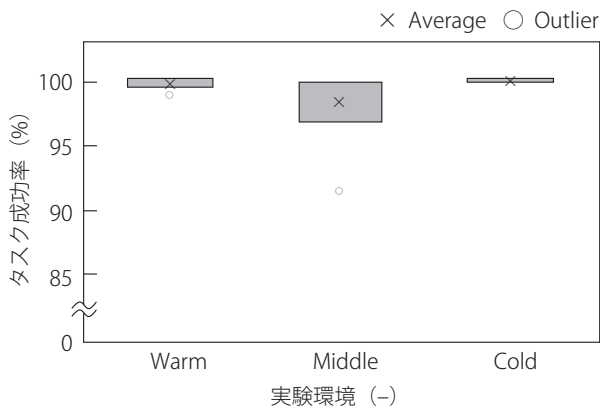


図7：各環境温度におけるタスク成功率分布

図8に各環境温度における平均振幅と最大振幅を示す。“Cold”における平均振幅と最大振幅は、その他と比較してそれぞれ8 mV、35 mV低下した。これは、環境温度の低下によって、深部体温と咬筋部の表面温度が低下したためである。しかし、その場合においても単純移動平均化後の筋電位の振幅値が設定した閾値を大きく超えていたため、咬合の判定結果に影響を及ぼさなかった。したがって、FPDの筋電位計測に

おいて、環境温度の与える影響は小さいといえる。

図9に各環境温度におけるタスク所要時間分布を示す。各環境温度におけるタスク所要時間の平均値は、0.5～0.6 secであった。FPDと類似した頭部の随意動作を利用した入力装置として、視線の動きを利用したものが開発されている(阿部他, 2006; 高野他, 2014)。この視線を利用した入力装置(以下、視線入力装置)におけるクリック時間は、2.0～3.0 sec程度である。そのため、FPDは既存の視線入力装置と比較して高い応答性能を有しているといえる。その一方で、Friedman検定ではP値が0.115となり、各環境温度におけるタスク所要時間に有意差は認められなかった。このことから、FPDの応答性は環境温度による影響を受けにくい。

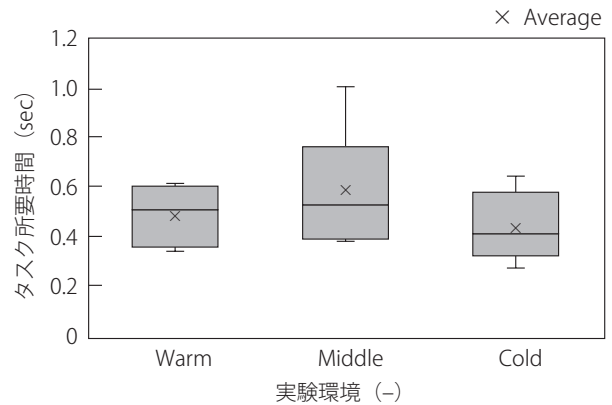
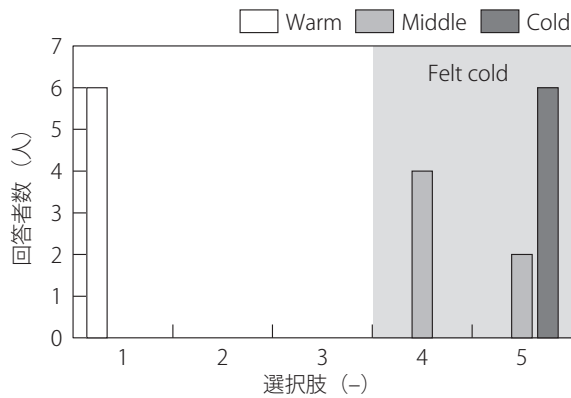


図9：各環境温度におけるタスク所要時間分布

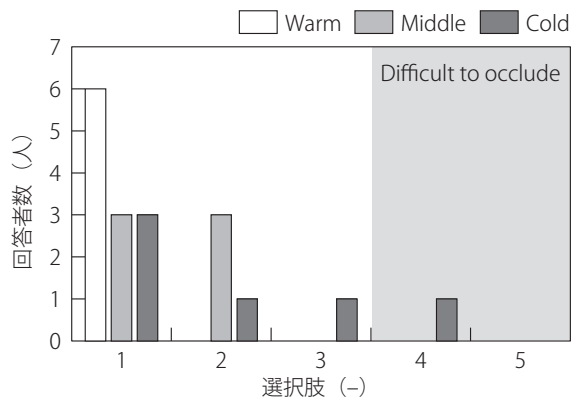
しかし、“Middle”におけるタスク所要時間の最大値は、その他の箱ひげと比較して大きく、一部の被験者においてタスクの成功に時間を要していた。この要因として、咬合を判定する閾値が適切に設定されていなかったことが挙げられる。タスク所要時間が大きかった被験者は、実験後のアンケートにおいて「装置の反応が悪く、強い力で噛んだ」と回答していた。したがって、咬合判定の閾値が高値に設定されていたため、閾値を超えるために大きな力が必要となったといえる。これは実験前の咬合判定の閾値を適切に設定することで改善が可能である。

3.4 アンケート結果

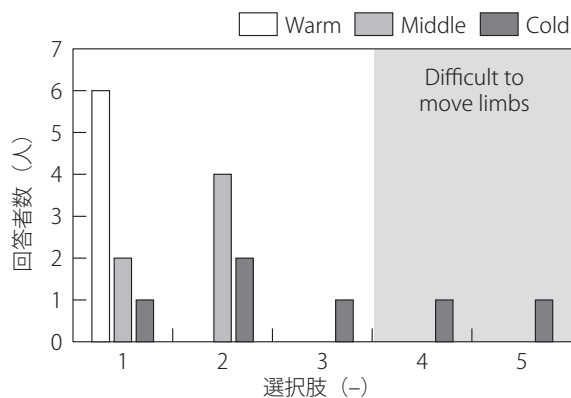
図10に各環境温度におけるアンケートの回答分布(Q1～Q3)を示す。Q1のアンケート結果では、“Warm”において全被験者が「1：そう思わない」と回答し、実験中に寒さを感じていなかった。一方で、“Middle”と“Cold”では、全被験者が「4：どちらかといえばそう思う」、「5：そう思う」と回答し、実験中において寒さを感じていた。とくに、“Cold”では、全被験者が実験開始直後に強く寒さを感じていた。



(a) Q1のアンケート結果



(b) Q2のアンケート結果



(c) Q3のアンケート結果

図10：各環境温度におけるアンケートの回答分布(Q1～Q3)

Q2のアンケート結果では、“Warm”と“Middle”において全被験者が選択肢1、2と回答し、咬合に支障はきたさなかった。一方で、“Cold”において1名の被験者が選択肢4と回答し、寒さによって咬合に支障をきたした。

Q3のアンケート結果では、“Warm”と“Middle”において全被験者が選択肢1、2と回答し、四肢の動作についても支障をきたさなかった。一方で、“Cold”では2名の被験者が選択肢4、5と回答し、四肢の動作に支障をきたした。なお、動作に支障をきたした体の部位は、手先や腕、足先であった。

図11にアンケートの回答分布(Q4～Q8)を示す。Q4のアンケート結果では、ほとんどの被験者が選択肢4、5と回答し、FPDの応答性について高い満足度を示した。その一方で、一部の被験者は「3：どちらともいえない」と回答した。

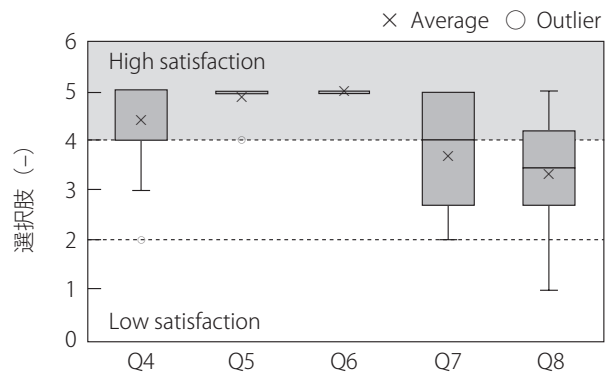


図11：アンケートの回答分布(Q4～Q8)

Q5のアンケート結果では、“Cold”において1名の被験者が選択肢4と回答したが、その他の被験者は選択肢5と回答した。そのため、多くの被験者において正確な操作ができた。

Q6のアンケート結果では、全被験者が選択肢5と回答し、FPDの操作によって、痛みやかゆみを感じた被験者は確認されなかった。その一方で、Q7のアンケート結果では、3名の被験者が選択肢2と回答し、本デバイスの操作によって顎が疲れたと評価していた。さらに、Q8の結果においても、2名の被験者が選択肢1、2と回答し、長時間の操作は困難であるとした。この原因として、FPDを操作する際に日常で使われる咬合より大きな力が必要とされたことが考えられる。一般的に食事では、最大で200N程度の咬合力が使われる(高橋他, 1989)。この値は、人間の最大咬合力の30%程度である(永田他, 2007)。本デバイスはこれより大きな力によって咬合する必要があり、疲労につながったと考えられる。しかし、操作時における咬合力と疲労度の関係は解明されていない。くわえて、この咬合力は、残存歯の状態や顎の形状などの個人差による影響を受けるとされている(中村他, 2018)。したがって、FPDの長時間の操作を実現するためには、個人因子による影響の評価が必要不可欠である。また、本実験では、環境温度による影響の検証を目的としているため、6名の健常者を対象とした。今回、統計学的にも有意な結果が得られたが、一般化した情報を得るためには、実際の使用対象者である肢体不自由者や高齢者を対象に実験が必要である。

4. 結言

本研究では、低温(1～5℃)、中間温(9～13℃)および常温(23～24℃)における操作試験を実施し、環境温度による動作信頼性を評価した。得られた結果の要約を以下に示す。

- ・ 環境温度によらずタスク成功率は95 %以上であり、電氣的ノイズの重畳や誤動作は確認されなかった。そのため、環境温度が与える影響は小さく、1～24℃までの範囲では正常に動作した。
 - ・ 筋電位の平均振幅や最大振幅は、低温においてそれぞれ8 mV、35 mV低下したが、咬合の判定結果には影響を及ぼさなかった。
 - ・ タスク所要時間は0.5～0.6 secであったため、既存の視線入力装置のクリック時間と比較して短時間である。
 - ・ 一部の被験者は顎の疲労を訴えたため、咬合力と顎の疲労度との関係や個人差の影響が求められる。
 - ・ 6名の健常者を対象とした実験であるため、一般化した情報とは言い難い。したがって、環境温度による影響を解明するためには、肢体不自由者や高齢者を対象とした臨床評価が求められる。
- 速度. バイオメカニズム, Vol. 11, 205-211.
村上賢一 (2009). 筋線維伝導速度の基礎. 理学療法の歩み, Vol. 20, No. 1, 21-26.
- (受稿：2021年5月27日 受理：2021年7月14日)

引用文献

- 阿部清彦・佐藤寛修・大山実・大井尚一 (2006). 視線による重度肢体不自由者向けコンピュータ操作支援システム. 映像情報メディア学会誌, Vol. 60, No. 12, 1971-1979.
- 阿部尚熙・松橋将太・小野寺良二・穴戸道明 (2017). 咬筋部筋電位および頭部姿勢を利用したポインティングデバイスの性能評価. 科学・技術研究, Vol. 6, No. 1, 35-40.
- 加納慎一郎・中谷裕教・大庭茂男・星宮望 (2002). 生体信号の計測と信号処理. 電気学会論文誌C, Vol. 122, No. 9, 1403-1411.
- 経済産業省 (2016). 将来の介護需要に即した介護サービス提供に関する研究会 報告書.
- 経済産業省 (2018). 将来の需給に対する高齢者ケアシステムに関する研究会 報告書.
- 小林茂・西本勝夫・西本東彦・幸田利敬 (1989). 温冷刺激による筋活動の変化—筋電図積分値における分析—. 理学療法学, Vol. 16, No. 1, 23-28.
- 酒本勝之 (1995). インピーダンスCTによる生体内部温度イメージング. Medical Imaging Technology, Vol. 13, No. 5, 696-702.
- 高野博史・大藪勇希・中村清実 (2014). 瞳孔の相対的な位置情報を用いた眼球運動のみによる非接触型入力装置の開発. 知能と情報, Vol. 26, No. 2, 573-580.
- 高橋淳子・中沢文子 (1989). 咀嚼パターンによる食品テクスチャーの評価 (第3報). 日本家政学会誌, Vol. 40, No. 6, 489-495.
- 永田雄己・井上美香・蓮舎寛樹・長屋和也・神原 敏之 (2007). 咀嚼能力および咬合力と顎顔面形態との関連について. 歯科医学, Vol. 70, Nos. 3/4, 193-203.
- 中村太志・守下昌輝・臼井通彦・中島啓介 (2018). 咬合力の測定方法とその大きさに影響を与える因子. 日本歯周病学会誌, Vol. 60, No. 4, 155-159.
- 濱田恭子・平田耕造 (2017). 室温25, 20, 15℃における毛細血管血流速度と血流量の変化. 繊維製品消費科学, Vol. 58, No. 1, 115-123.
- 増田正・佐渡山亜兵・白石恵 (1992). 筋収縮力と筋線維伝導