

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

阿部 尚熙 (鶴岡工業高等専門学校 制御情報工学科, i8120@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)

Development and evaluation of interface using masseter muscle potential and head posture

Naoki Abe (Department of Control and Information Engineering, National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)

Shota Matuhashi (Department of Creative Engineering, National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)

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

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

要約

IoT (Internet of Things) は近年になり急速な普及を迎えている。とくに、社会生活弱者を対象としたIoTの普及により、高度のソーシャルインクルージョンの実現が期待されている。しかし、肢体不自由者はIT端末の操作に支障をきたす場合が多い。本研究では、肢体不自由者へ向けたIT端末の操作装置として、肢体動作を要求しないポインティングデバイスを開発した。ポインティングデバイスに要求される機能である指示位置制御操作を頭部姿勢、指示の確定操作を表面筋電位で代替することで、既存製品における応答性の低い決定操作の改善を図った。さらに、ISO 9241-9に基づき、ポインティング性能の評価を行った。実験は若年健常者6名を対象に実施し、本装置とマウスについて、試験プログラムによりThroughput値、総クリック数、目標物通過回数および生体信号を用いることによる誤動作率を測定した。その結果、Throughput値はおおよそ1.5 bits/secであり、プレゼンテーション用遠隔マウスに準ずるポインティング性能を有していることが明らかとなった。総クリック数および目標物通過回数はマウスと比較し評価が劣るものの、回数を追うごとに改善される傾向がみられた。また、誤動作には個人差が顕著に現れることが明らかとなった。この原因は咬合の個人差によるものと推測され、訓練により誤動作の抑制が可能であると見込まれる。これらより、本装置は肢体不自由者用のポインティングデバイスとして有効であると期待される。

キーワード

ポインティングデバイス, 姿勢角, 表面筋電位, 頭部姿勢, 肢体不自由者

1. 緒言

スマートフォンをはじめとしたIT端末普及による社会の高度情報化にともない、日本政府ではIoTやAIの活用を促進する政策「世界最先端IT国家創造宣言」(首相官邸, 2013)を策定している。また、IT端末を媒介としたIoT家電のユーザーインターフェース一元化が構想されており、IT端末の重要性が再評価されている。とくに、社会生活弱者を対象としたIoTの普及により、高度のソーシャルインクルージョンの実現が期待されている(Nikhil et al., 2016)。しかし、高齢者を含む肢体不自由者はIT端末の操作に支障をきたす場合が多く、肢体不自由者へ向けたIT端末のバリアフリー化が思案されている。

肢体不自由者に扱えるポインティングデバイスとして、布下他(2003)は超音波反射により計測した頭部姿勢を利用し、肢体動作を要求しないポインティングデバイスを開発している。同様に、頭部姿勢を赤外線反射(NaturalPoint, 2009)や画像認識(伊藤・湯下, 2005)により計測する例もみられるが、これらの計測手法は、使用者の周囲に計測機器を設置する必要があるため、使用者の体勢が限定あるいは拘束を受ける。また、クリック操作を画面外照準や長時間照準などのポインティング操作に依存しているため操作の応答性が低い。

そこで著者らは、応答性の高いクリック操作手法として咬

合動作を利用することを提案した。咬合の検出方法として物理的変位計測法が考えられるが、スイッチの感度を高く定めなければならない、誤動作の要因となる。そのため、本研究では頭部の咬筋部分の表面筋電位を測定することで咬合動作の検出を行った。表面筋電位を利用することにより、従来の頭部姿勢に依存したクリック操作手法より大幅な応答性の改善が見込まれる。生体信号の信頼性の低さについては、閾値判別による1bitのスイッチ制御として使用することにより信頼性を確保した。

ポインティングには頭部姿勢を利用するが、前述の超音波反射方式などの既往研究と異なり、傾斜センサを使用者の頭頂部に設けることで、外部計測機器に依存せず、かつ使用者の体勢を限定しない頭部姿勢計測を実現した。

本研究で製作した装置は操作と装置が頭部完結であり、咬合で生じた筋電位によりクリック操作を行うことができるため、操作を短時間に効率よく行うことが可能である。

本稿では、応用例としてPCのマウス機能を本装置で再現するデバイス開発を行った。そして、ISO 9241-9に準拠し、ポインティング性能を評価した。

2. 装置

2.1 装置構成

図1に装置構成概略図を示す。本装置は3軸加速度センサ・3軸ジャイロセンサを搭載した傾斜センサモジュール(MPU-6050, InvenSense)、マイクロコンピュータ(ATmega328P,

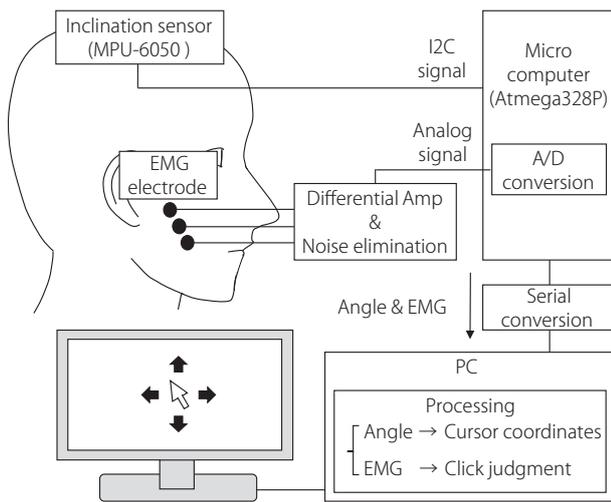


図1：装置構成概略図

Atmel)、シリアル変換器 (FT-232RQ, FTDI)、自主製作した非侵襲・乾式電極型の筋電計で構成される。

頭頂部に設置した傾斜センサモジュールの機能により、静的姿勢角と動的姿勢角を計測し、頭部姿勢角のyaw角とpitch角を算出する。同時に、左右の咬筋部に設置した電極より、咬合で生じる筋電位を検出する。これら頭部姿勢角および筋電位に関する情報は、マイクロコンピュータを介してPCのCOMポートに伝達される。PCでは、伝達された情報からカーソル座標への変換および左右クリックの判定を行う。マイクロコンピュータとPC間はUSBケーブルによる有線通信にてデータの通信を行った。

図2に本装置の外観を示す。頭頂部には表面筋電位の増幅回路とマイクロコンピュータ、傾斜センサを搭載した。電極は、咬合で生じる筋電位が検出できる咬筋部に設置した。各種センサ・回路はカチューシャに固定し、頭部揺動によるずれを抑制した。さらに、電極は、使用時の接触ノイズを抑えるため、ばねを使用して咬筋部への密着性を向上させた。また、頭部形状の個人差を考慮し、電極部をスライドさせる調節機構を搭載した。

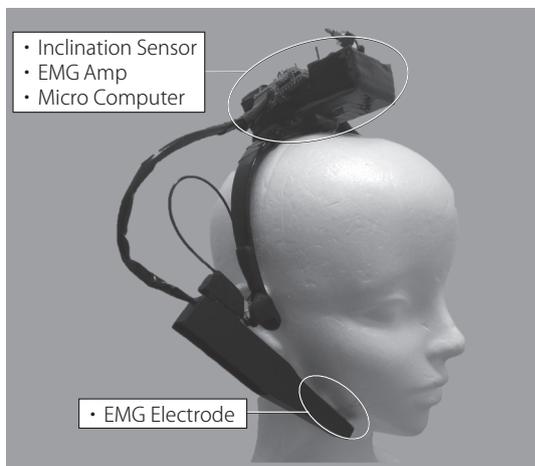


図2：装置外観

マイクロコンピュータ内におけるサンプリングレートは、頭部姿勢角が 100 Hz、筋電位が 2 kHzである。筋電位のA/D変換のビットレートは 10 bitである。PCへは毎秒 30回の頻度で最新のデータおよび処理結果が送信される。

2.2 筋電位計測

筋電位の増幅は、生体信号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。計装アンプの入力部には接触抵抗によるインピーダンスの不均衡および電極ペーストの使用を避けるためにボルテージフォロワを中継した。これにより、電極ペーストを使用せずに安定した計測を可能にした。

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。さらに、実生活での使用を想定し、商業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。

図3に本装置の筋電位電極部を示す。電極の配置は、図に示すように先端部からGND、IN-、IN+とした。電極の素材には、接触インピーダンスを低減させるため銀板を使用した。

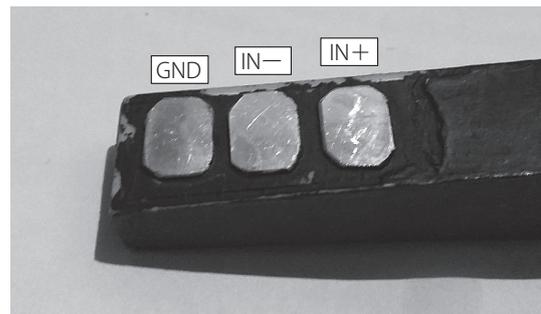


図3：装置の筋電位電極部

2.3 筋電位によるクリック判定

ポインティングデバイスに要求されるクリックの種類は、主にワンクリック・ダブルクリック・長押し of 3種類であり、さらに左右どちらの操作であるかに分類される。本装置では、左右クリックを左右それぞれの咬合によって発生した咬筋部分の表面筋電位により判定を行っている。

マウスは、OSによりボタンの押し動作から離し動作までの経過時間および次の押し動作までの経過時間により上記3種類のクリックを判別している。本装置では、①絶対値変換、②二段単純移動平均、③閾値判定の処理によりボタンの押し・離し動作を再現している。そのため、上記3種類のクリック判別は、マウス同様に経過時間により行われる。単純移動平均は、次式により求められる。

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

ここで、 $P_M, P_{(M-1)}, P_{(M-2)}, \dots$ は直近 n 個のデータであり、本装置では n を一段目は 80 個、二段目は 40 個に設定した。こ

の処理を適用後、閾値判定によりクリックの押す・離す動作へ反映する。このとき、波形がある一定以上の値であればクリックを押し、0Vになればクリックを離す動作とした。この処理方法は筋電位の振幅値情報を内包するため、振幅値による操作の多様化が可能である。なお、本装置では再現性を重視し、1 bitの操作に限定している。

2.4 頭部角度のカーソル座標変換

図4に頭部角度のカーソル座標変換イメージを示す。図に示す関係から、画面上のカーソル座標(x, y)は、頭部の姿勢角(yaw, pitch)を次式で一次変換することにより求められる。

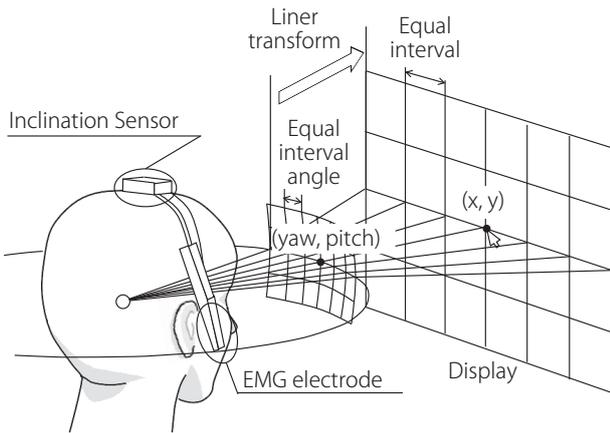


図4：頭部角度のカーソル座標変換イメージ

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} DPD & 0 \\ 0 & DPD \end{pmatrix} \begin{pmatrix} yaw \\ pitch \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、DPDはDots Per Degreeの略称であり、単位角度当たりの移動ドット数を示す。これは、マウスの感度にあたるDPI (Dots per Inch)と同様の役割であり、マウス同様、画面解像度や使用者の環境により適宜に設定を行う必要がある。本装置の傾斜センサは0.01度の分解能を持つため、実用性を考慮した適当なDPDが確保できる。

3. 実験方法

ポインティング性能の指標は、ISO 9241-9に準拠し、Throughput値を算出して評価した。Throughputは、一定時間に処理される仕事量であり、フィッツの法則に基づいたポインティング性能の代表的な評価指標である。この指標はポインティングデバイス全般に有効とされている。

目標までの距離(D)および目標の大きさ(W)に応じた操作の困難さ(ID)、移動に要した時間(MT)より、次式で求められる(Xuan and Scott, 2007)。

$$ID = \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (3)$$

$$Throughput = \frac{ID}{MT} \quad (4)$$

Throughput値が大きいくほどポインティング性能が高いと

評価でき、より小さく離れた目標へ短時間で移動すると値が大きくなる。

Throughput値による評価の他に、操作性の指標として目標物を通り過ぎた回数と総クリック数を計測した。さらに本装置については、筋電位信号のクロストークおよび左右咬合の混同が原因と考えられる左右クリックの誤動作が検出されることが判明しているため、クリックの誤動作率を同時に計測した。

評価試験は、伊藤(2007)を参考に統合開発環境であるProcessing-3.0.1で作成した評価プログラムを使用した。試験環境は、解像度1920×1080 dotの15.6 inchディスプレイを使用し、プログラムのウィンドウサイズを1000×750 dotとした。また、装置の移動感度を各被験者共通とし、カーソル操作時にカーソルが視野外に達しないよう、本装置のDPDを20 dots/degとした。なお、リファレンスとして、マウス(M-XG3DLBK, ELECOM)を利き手で使用した場合について同様の試験を行った。

図5にプログラムウィンドウ内の目標物の配置を示す。ウィンドウ内に一つのみ目標物を表示させ、左クリックをすると次の目標物が表示される。目標物は、画面中心とその周辺30箇所の位置に交互に表示させる。また、周辺30箇所の目標は、ランダムかつ重複のないように表示し、一回の試験ですべての目標がクリックされる仕様とした。目標のサイズは、直径26 dotとし、ウィンドウの「閉じる・最大化・最小化」ボタンとほぼ同サイズに設定した。また、逐次に目標間の距離および各タスクの処理時間を計測した。

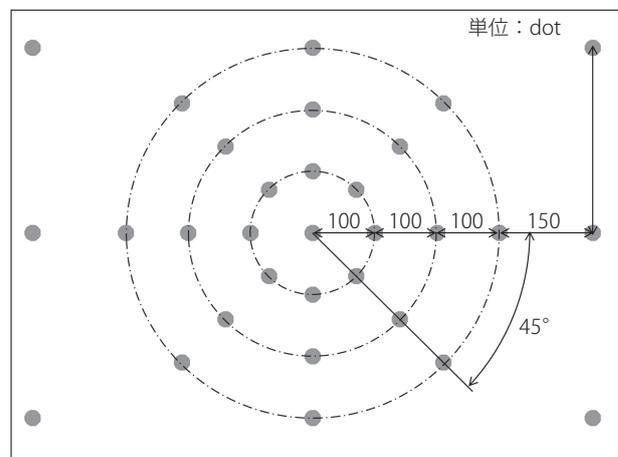


図5：プログラムウィンドウ内の目標物の配置

被験者は、実験の協力を同意を得た健常な学生6名(男性、年齢20歳)とし、試験について十分な理解を得た上で、上記の評価試験をマウスと本装置について各3回を連続して実施した。被験者は着座姿勢とし、机上のディスプレイのカーソルを操作する形とした。ディスプレイとの視距離は使用状況を考慮し、マウスの試験時は任意の一定距離、本装置の試験時は操作性の観点から着座姿勢の維持のみを義務付けた。また、着座する椅子は任意に調節するように指示した。

すべての被験者は日常的にマウスを使用しており、試験後

のThroughput値より熟練度に大きな差異がないことを確認している。また、本装置の使用は初めてであり、試験前に被験者が右クリックおよびカーソル移動操作が随意に可能であることのみ確認している。

4. 実験結果及び考察

4.1 Throughput 値

図6に本装置の被験者別Throughput値を示す。本装置においては、被験者Eを除いて全被験者のThroughput値が試験毎に増加した。これは、被験者に頭部姿勢によるポインティング操作の経験がなく、本装置の熟練度が低かったためだと考えられる。なお、被験者Eについては、初回の試験でもっとも高いThroughput値を示したのに対し、以降の試験では他被験者ほどの変化はみられなかった。この原因として、被験者Eは初回時よりThroughput値が高く、習熟に伸びしろがなかったためだと考えられる。

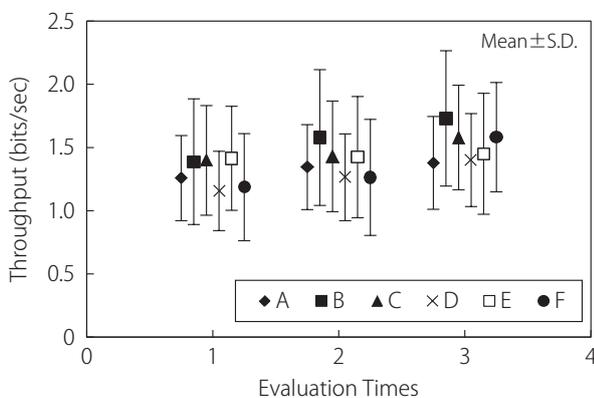


図6：本装置の被験者別Throughput値

図7に本装置(Device)とマウス(Mouse)のThroughput値($n = 6$)を示す。試験3回目では、マウスのThroughput値が低下しているのに対し、本装置は増加していることがわかる。この結果から、使用歴の長いマウスと比較し、本装置の熟練度が低いことが推測される。

本装置のThroughput値は全試験回を通してマウスより劣る結果となった。しかし、既往研究におけるプレゼンテーショ

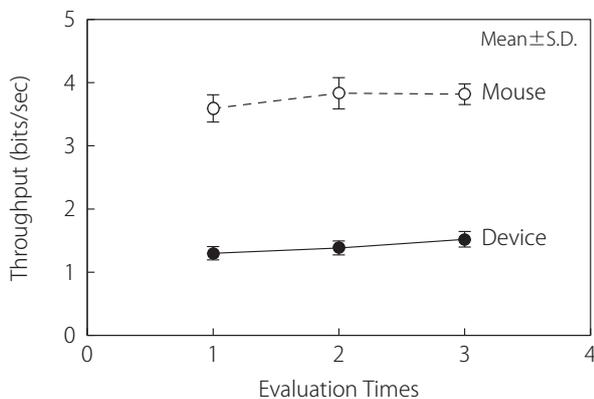


図7：本装置とマウスのThroughput値($n = 6$)

ン用遠隔マウス、ジョイスティックマウスが本装置と同等のThroughput値を示していることから、本装置は実用的なポインティング性能を有していることが確認された (Scott and Shaidah, 2001; Daniel et al., 2009)。

図8に本装置とマウスの往路/復路別Throughput値を示す。中心の目標からその他の目標へ向かう場合を往路とし、中心以外の目標から中心の目標に向かう場合を復路とした。往路は目標の位置が予測できないが、復路は中心に戻る操作のため、目標の位置が予測可能である。

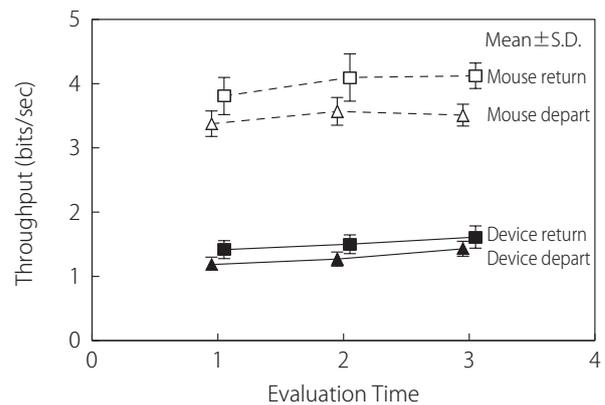


図8：本装置とマウスの往路/復路別Throughput値 ($n = 6$)

評価プログラムによる試験の結果、マウス・本装置ともにThroughput値は復路の方が高い傾向となった。これは、復路の場合は次の目標が事前に予測できるため、即座に次の動作へ移行可能であることが要因と考えられる。

4.2 総クリック数

図9に本装置とマウスの総クリック回数 ($n = 6$) を示す。評価試験は、中心とその周辺30箇所の目標を交互にクリックするため、最低クリック数は60回となる。

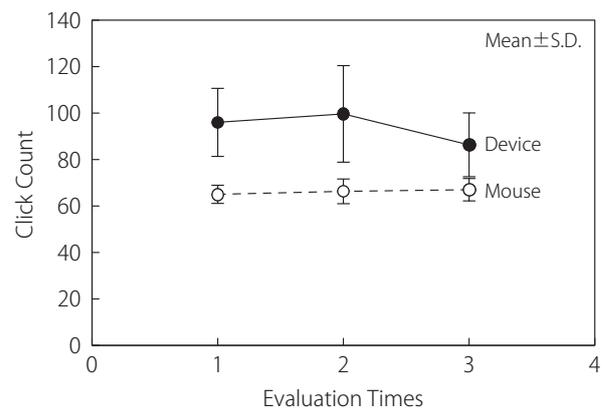


図9：本装置とマウスの総クリック数 ($n = 6$)

本装置はマウスと比較しクリック数が多い傾向となった。これは、ポインティング操作が頭部姿勢のため、カーソルを完全に停止することができず、クリック時にカーソルを目標物に留められなかったことが要因として考えられる。しかし、

推移に着目するとマウスのクリック数が試験回数を追うことに増加しているのに対し、本装置は試験3回目大きく減少していることがわかる。この結果より、頭部姿勢を利用したポインティングの操作性は、訓練に応じて大きく向上することが期待される。また、以上の点を踏まえると、Throughput値による評価結果と同様に本装置の熟練度が低かったことが示唆される。

4.3 目標通過回数

図10に本装置とマウスの目標通過回数 ($n=6$) を示す。マウスの目標通過回数が試験初回より減少していないのに対し、本装置は、試験回数を追うことに目標通過回数が大幅に減少した。

表1に各被験者における本装置とマウスの目標通過回数を

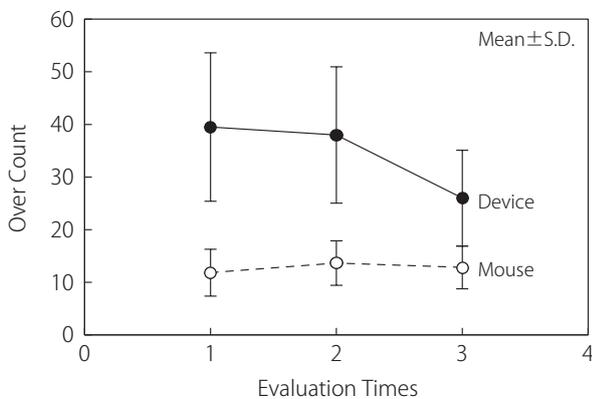


図10：本装置とマウスの目標通過回数 ($n=6$)

表1：各被験者における本装置とマウスの目標通過回数(回)

Tester	Evaluation Times [time]					
	1		2		3	
	Mouse	Device	Mouse	Device	Mouse	Device
A	13	38	12	24	15	26
B	14	37	15	34	18	17
C	3	31	8	42	9	32
D	14	40	11	26	8	13
E	15	25	20	43	16	34
F	12	66	16	59	11	34
Mean	11.83	39.50	13.67	38.00	12.83	26.00

表2：各被験者の右クリック誤動作率 (%)

Tester	Evaluation Times [time]			Mean \pm S.D.	
	1	2	3		
A	29.41	26.85	32.17	29.48	\pm 2.17
B	33.33	40.18	33.33	35.62	\pm 3.22
C	15.00	20.48	13.04	16.18	\pm 3.14
D	21.62	8.64	16.25	15.50	\pm 5.32
E	7.21	19.67	10.00	12.29	\pm 5.34
F	1.74	9.09	0.00	3.61	\pm 3.94

示す。試験3回目においては本装置の最低通過回数がマウスの平均通過回数とほぼ同値であった。本装置の使用経験が少ないことを考慮すると、本装置は訓練によりマウスと同程度の評価を示すことが期待できる。

4.4 右クリックの誤動作率

表2に各被験者の右クリック誤動作率を示す。誤動作率は全試験回において最大が被験者Bの40.18%、最小が被験者Fの誤動作なしであった。また、誤動作率は被験者別に傾向がみられたことから、誤動作率の差は個体差を要因としていと考えられる。被験者からは「自分は右のほうが噛みやすい」、「自分は噛み合わせが良くない」などといった意見があり、個体差の要素には咬合が大きく関与していると考えられる。したがって、右クリックの誤動作は噛み合わせなどを要因とした咬合の個人差が大きく影響していると推測される。

4.5 本装置の長期間使用者による評価結果

表3に本装置の長期間使用者による評価結果を示す。被験者は本装置初使用の被験者と同様20歳の男性健常者であり、開発過程からの試験使用者である。また、評価試験においても、マウス・本装置ともに数時間程度経験している。なお、長期間使用者の確保が困難であるため、被験者は1名である。そのため、本稿では参考値として記載する。

Throughput値は平均2.17 bits/secであり、操作に対する熟練度が反映されていることがうかがえる。また、総クリック数や目標物通過回数の場合、マウスの評価に近い値を示しており、本装置の操作性が高いことが示唆される。

右クリックの誤動作は本装置においても発生していないこ

表3：本装置の長期間使用者による評価結果

Test Subject	Evaluation Times [time]					
	1		2		3	
	Mouse	Device	Mouse	Device	Mouse	Device
Throughput [bit/sec]	4.14	2.13	3.96	2.2	4.1	2.17
Click Count [times]	62	73	63	66	61	70
Over Count [times]	6	16	12	13	4	11
Malfunction Count [times]	0	0	0	0	0	0

とが確認された。なお、被験者は使用初期においては、ほかの被験者と同様に誤動作が発生していることを確認している。本試験において誤動作が発生しなかった要因として、被験者は試用期間に誤動作を抑制する訓練をしており、誤動作の発生しにくい咬合動作を習得したためだと推測される。咬合動作による誤動作の抑制方法として、左右咬合の分離化や左右の咬合が相互に影響しにくい強さで咬合することが考えられる。

5. 結言

本研究では肢体不自由者に向けたIT端末の操作装置として、肢体動作を要求しないポインティングデバイスを開発した。さらに、ISO 9241-9に準拠したポインティング性能の評価およびクリック数、目標物通過回数、表面筋電位を利用することによる誤動作率を計測し、評価検討を行った。得られた結果の要約を以下に示す。

- 本装置はプレゼンテーション用遠隔マウスやジョイスティックマウスと同等のThroughput値を示し、実用的なポインティング性能を有していることが確認された。
- 評価試験において、評価値が改善方向に向かっていることから、本装置は訓練により高いポインティング性能を発揮することが期待される。

問題点として、咬筋部の表面筋電位によるクリック操作は左右のクリックが混合する誤動作が発生することが確認されている。しかし、この誤動作は、訓練や筋電処理の適応化により抑制が可能であると考えられる。

本装置は残存率の高い頭部機能で操作できることから、頸髄損傷者を筆頭とした各種肢体不自由者に操作が可能である。しかし、本研究は若年健常者を対象とした評価であるため、一般化した情報とはいえない。さらに、長期間使用による評価の変化など検証すべき点は多い。また、筋肉の衰えている高齢者においては咬筋部の筋電位を検出できないことが想定される。そのため、今後は頸髄損傷者など各種の肢体不自由者や高齢者を対象とした臨床評価を行い、適応対象を調査・拡大することが必要である。

引用文献

Daniel, N., Steven, C., and Scott, M. (2009), ISO 9241-9 evaluation of video game controllers. *Proceedings of Graphics*

Interface Conference 2009, 223-230.

伊藤和幸・湯下和雄 (2005). 画像処理を利用したマウスポインティングデバイスの開発. 信学技報, WIT2005-30, 39-43.

伊藤和幸 (2007). レーザ光線を利用した頸髄損傷者向けマウスポインティングデバイス. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J90-D, No. 3, 771-779.

NaturalPoint (2009). TrackIR. <https://naturalpoint.com/trackir/>. (閲覧日 2016/12/3)

Nikhil, C., Akash, G., and Srikanta, R. (2016). ALED system to provide mobile IoT assistance for elderly and disabled. *International Journal of Smart Home*, Vol. 10, No. 8, 35-50.

布下正意・海老澤嘉伸・石間大典 (2003). 超音波位置計測に基づく頭部運動によるポインティングシステム. 映像情報メディア学会誌, Vol. 57, No. 3, 403-408.

Scott, M. and Shaidah, J. (2001). An evaluation of two input devices for remote pointing. *Proceedings of the Eighth IFIP International Conference on Engineering for Human-Computer Interaction-EHCI 2001*, 235-250.

首相官邸 (2016). 高度情報通信ネットワーク社会推進戦本部決定事項. <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/decision.html>. (閲覧日 2017/01/26)

Xuan, Z. and Scott, M. (2007). Evaluating eye tracking with ISO 9241-Part 9. *Human-Computer Interaction, Part III, HCI 2007*, LNCS 4552, 779-788.

(受稿：2017年3月31日 受理：2017年5月17日)