

高位頸髄損傷者用ペン型ポインティングデバイスの開発

伊藤英一 大橋正洋

神奈川県総合リハビリテーションセンター リハ工学研究室
〒243-01 神奈川県厚木市七沢516番地
e-ito@sfc.keio.ac.jp

頸髄損傷による四肢麻痺者は運動機能のみならず、上肢の感覚機能にも障害を有する。そのため、高い巧緻性を必要とするマウス操作が困難となる場合が多い。このような場合、感覚のない手指やスティックによりポインティング操作をおこなうためマウス代替装置を利用する。しかし、キーボードや押しボタンスイッチによるマウス代替装置では失われた感覚機能を視覚により代替することが必要となるため、マウスポインタに集中すべき視線を頻繁にキーボードへ移動させてしまう。そこで、キーボードなどによる選択や押替えの必要な方法ではなく、上肢の位置に影響されず、粗大な運動によって二次元の方向を示すことが可能なペン型ポインティングデバイスを試作し、2名の障害者による評価実験を行った。その結果、キーボードによるマウス代替装置やトラックボールに比べて視線移動の低減が認められた。

Development of a pen-type pointing device for high-level quadriplegia handicapped people

Eiichi Ito Masahiro Ohashi

Rehabilitation Engineering Department, Kanagawa Rehabilitation Center
516 Nanasawa, Atsugi, Kanagawa 243-01 JAPAN

Quadriplegics cannot operate a mouse because of paralyzed hand's motor and sensory function. When they use mouse emulators by keyboard operation or switch operation, they have to move own eye gaze from the display to the keyboard quite frequently. We developed a pen-type pointing device that is not influenced by position of the upper limb and can operate with limited motor function. This pen-type pointing device can reduce excessive eye gaze movement than key-type mouse emulator and trackball, when quadriplegics are accessing the computers.

1. はじめに

「人にやさしい」を掲げたマルチメディア環境も、コンピュータアクセスに際して様々な装置や工夫が必要となる身体障害者には障壁となる場面も多い。また、コンピュータを利用することで会話や書字の代替などコミュニケーション補助¹⁾²⁾や就労への可能性も高まるため、コンピュータインタフェースにおける身体障害者への配慮³⁾も検討され始めた。

GUI (Graphical User Interface) の普及により、コンピュータアクセスにはキーボード操作に追加して、マウスに代表されるポインティングデバイスの操作が必須となっている。このため、上肢に高い巧緻性を必要とするマウス操作を、大まかな運動や単純なスイッチにて代替する入力装置^{4)~11)}が開発されている。上肢にも重い障害を持つ四肢麻痺者の場合、彼らのコンピュータアクセス環境は多様な身体機能により個人差がかなり大きい。そのため、これらの代替入力装置の多くは限られた身体機能によりマウス操作を代替することにのみ注目し、開発されたものであった。

今回、頸髄損傷による四肢麻痺者のコンピュータ操作において、操作性の向上と疲労の軽減にも注目し、コンピュータ操作時の大きな視線移動を減少させる目的で新しいポインティングデバイスの試作を行った。

2. 研究の背景

頸髄損傷による四肢麻痺者（以下、頸損者）は、その残存する髄節レベルに応じた上肢の運動および知覚に麻痺を有する。例えば、事故などが原因となり頸部に過大な力が加わった場合、頸椎骨折による出血や過伸展により頸髄を損傷する。機能レベルC6と呼ばれている第6頸髄節までが健全な場合、肩関節<肘関節<手関節<手指の順に運動、および感覚の麻痺が重くなる。つま

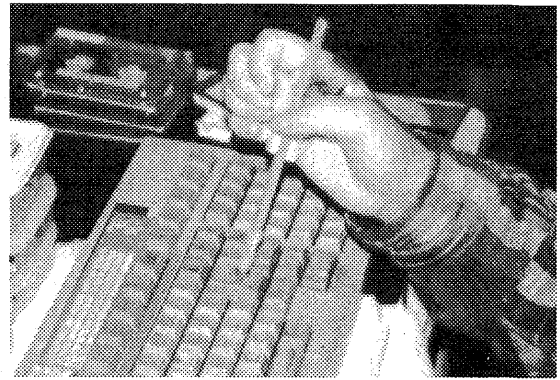


図1. スティックによるキーボード操作

り、手指と手首は動かず、肘関節の屈曲は可能であるが伸展は難しい。また、感覚においても手先部に重い麻痺があり、触覚や位置覚などはほとんど無い。このような場合、装具によりスティックを手先部（掌）に固定（図1参照）することで、キーボードなどの打鍵は可能となる。これは、標準キーボードのキー間隔が前後左右共に20mm程度と位置精度が粗いことと、麻痺により不可能となったタッチタイピングを、視覚により打鍵時の手先部位置を補正できることが理由である。

しかし、このような打鍵操作のみでは通常のマウスは操作できない。なぜならマウス操作とはマウス本体の移動により、ディスプレイ画面上に呈示されるマウスカーソルを確認しながら任意の位置（ターゲット）まで移動させることである。つまり、マウス操作には上肢の触覚や位置覚などの深部感覚を駆使し、机という二次元平面に拘束された空間での滑らかな運動制御を必要とする。そのため、上肢に麻痺のある障害者には操作困難な場合が多い⁵⁾。しかも、最も一般的な機械式マウスの場合、上下左右の移動に加えて、マウス自身に原点があることから常に一方向（前方）へ向けたまま移動させる必要がある。そのため、マウス本体を一方方向に直線移動させている時であっても本体を旋回させてしまうとマウスカーソルは移動方向が変化し、意図した直線にはならな

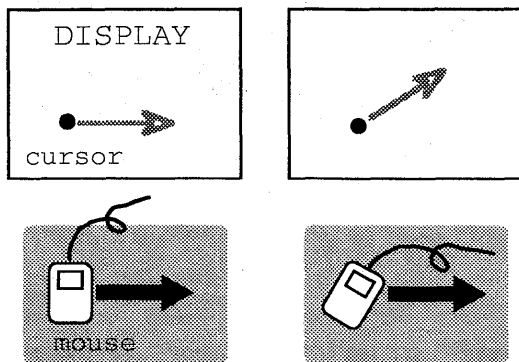


図2. マウスの傾きとマウスカーソルの動き

い。(図2参照)

さらに、通常マウス操作は上肢で本体を操作し、それに応じて移動するディスプレイ上のマウスカーソルを目で追いながら、さらに位置を修正するため本体を操作する。つまり、視覚フィードバックによりマウスカーソルとターゲットとの位置を短縮させている。そのため、同期を必要とする視覚により上肢の運動や位置覚(深部感覚)を代替することは操作性を大きく低減させる。しかも、分解能は200~400count/inchと細かく、キーボード打鍵時における位置の分解能と比べて高い精度が要求され、上下左右の二次元における位置覚を視覚により代替するのは困難である。

そのため、指やスティックなどによる打鍵操作でマウス操作を代替するマウスエミュレータ^{9),10)}(図3参照)やマウスキー(MouseKeys)¹²⁾が開発されている。これらを用いることにより、大まかな運動である打鍵操作のみで4方向もしくは8方向へマウスカーソルを移動させることができる。しかし、打鍵操作によるポインティング操作の場合には、マウスカーソルの移動方向を変更する毎に、ディスプレイ画面上から方向キーへ、視線を大きく移動させる必要がある。そのため、これらのマウスエミュレータでは視線移動(図4参照)が頻繁に発生する。さらに、インタラクションにおける実行と評価の淵¹³⁾における意味的距離と形状的

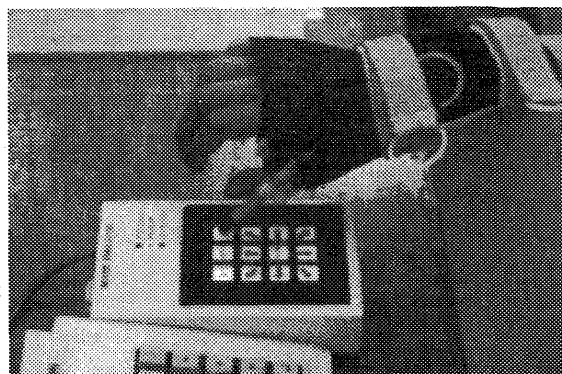


図3. 押しボタンによるマウスエミュレータ

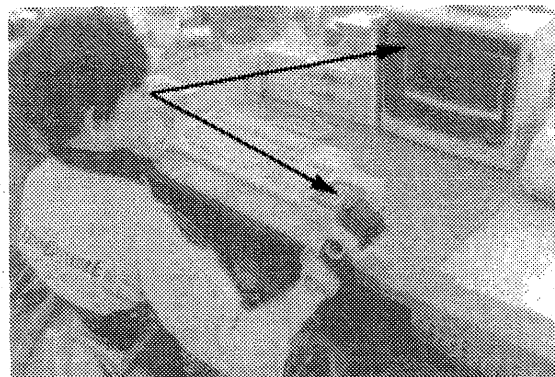


図4. ポインティング時の視線移動

距離のうち、形状的距離(articulatory distance)はマウスやトラックボールなどに比べて長くなるため、操作がもどかしく感じる^{13),14)}。

疲労の低減や操作性の向上を考慮したマウス操作の代替には、上肢感覚を代行する目的での視覚フィードバックを用いず、直接感の高いポインティングデバイスが必要となる。既存のものでは、頭部に超音波や赤外線発信素子を装着し、頸部の運動を検出することによりポインティングをおこなうヘッドポインティングシステム¹⁵⁾がある。

しかしながら、これらは上肢に残存機能が全くない場合には有効であるが、固定されたディスプレイを凝視しながら頸部を細かく旋回する必要があるため、頸部と眼球への負担が大きい。また、今回対象としているような上肢にある程度の残存機能がある場合には操作性の点においても自由度の高い運動機能を選択するべきであろう。

3. ペン型ポインティングデバイス

健常者の場合、肘関節伸展状態でマウスを操作した場合、つまり肩関節による手先部のコントロールは精度が低い¹⁶⁾。また、マウスやペンのポインティングで操作性や正確さは手首の回転運動が因子となっているとの報告^{17),18)}もある。今回対象としているC6レベルの頸損者は肩関節と肘関節の一部にしか運動機能も感覚機能も残存していない。つまり、通常のポインティングデバイスに求められている上肢の巧緻な動きを用いているのではなく、限られた大まかな運動をモダリティ変換によって解決する必要がある。さらに、視覚フィードバックに頼らないポインティング操作、つまり上肢の絶対位置に影響されない手段が求められている。

上肢の大まかな動きで、絶対位置にも影響されないポインティング操作には、力の大きさとその加えられた方向を、上肢の位置に依存しない方法で検出できればマウスの代替手段と成り得ると予測される。

そこで、キーボード打鍵に使うスティック(図1)の先端に前後左右4方向のせん断力を検出するセンサーを設け、上肢の粗大な運動のみによるポインティングデバイスを試作した。このせん断力から力の向きと大きさを算出し、それに応じたマウスカーソルの移動方向と移動速度に変換する。スティック自身をポインティングデバイスとすることにより、机上に限らずスティック先端に力を架けることでマウスカーソルが移動するものである。システムとしてはスティック先端のせん断力を検出するセンサー部と、その信号をマウスカーソルの移動方向と速度に変換し、マウス信号を生成するプロセッサ部とで構成される。

一般的にせん断力などのモーメントを計測するには歪みゲージを利用した方法が用いられる。しかし、ここで検出するべきせん断力に高精度は不要であり、高価な歪みア

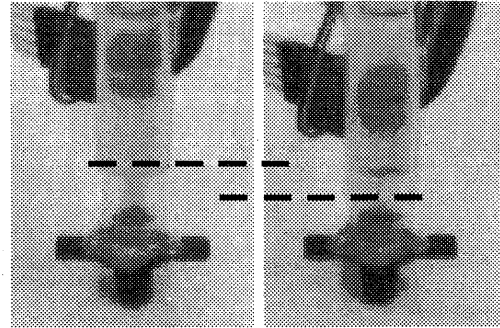


図5. ペンの押し込みによるクリック操作

ンプなどの不要な小型軽量の感圧抵抗素子(FSR)を用いたバーサポイントマイクロジョイスティック(インターリンク社製)を加工した。これはノートパソコンのポインティングデバイス(例えば、IBM社ThinkPadのTrackPointなど)として利用されているものである。ただし、今回利用したものは指先での利用を目的としたTrackPointとは異なり、加えられた力に対して線型なカーソル移動特性を持つものである。また、スティックを軸方向に押し込むことによりクリック操作(左クリックのみ)となる機能(図5参照)を付加した。

4. 評価実験

ペン型ポインティングデバイスの開発目的である視線移動の低減について、ポインティングと文字入力との複合作業による課題を設定し、押しボタン式マウスとトラックボールとの比較実験を行った。

4.1 被験者

被験者は、パソコン歴3年程度の頸損者A(C6、男性26歳)と同B(C6、男性46歳)、日常的にパソコンを利用している健常者C(男性36歳)の3名である。被験者A、Bの2名はスティック付き装具によりキーボード打鍵が可能であり、ポインティングデバイスとしてはトラックボールを使用している。屋内移動は手動車いすを、屋外では電動車いすを利用しており、日常生活の多くの場面で介助が必要となる。

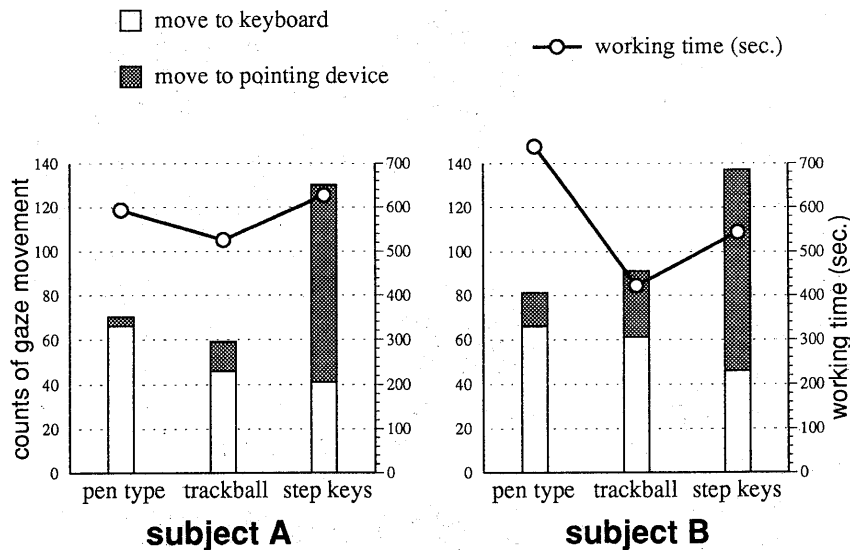


図6. 頸損被験者A、Bの視線移動回数と課題遂行時間

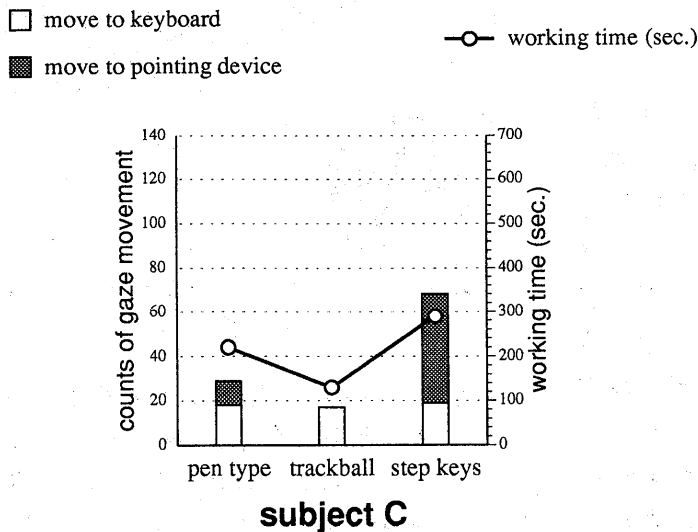


図7. 被験者Cの視線移動回数と課題遂行時間

4.2 実験課題

課題はあらかじめ用意しておいたテキスト文章を指示書 (A4サイズ、1435文字/頁、1枚) に従いワープロで修正するという校正作業である。校正箇所は15箇所 (削除10文字、挿入15文字) であり、赤鉛筆で指示されている。ポインティングと文字入力の複合作業を遂行させるために、通常は矢印キーでカーソルを移動させる場面においてもポインティングデバイスを使用することとした。

ペン型ポインティングデバイス、トラックボール、押しボタン式マウス (マウスエミュレータ) の順により同一課題を遂行させ、課題遂行時間の計測と視線移動の計数、操作状況の調査のためにビデオ撮影を行った。

4.3 実験環境

パソコンは一体型PCAT機 (IBM PS/55z)、アプリケーションソフトは被験者A、Bが使い慣れているワープロソフト (一太郎) を利用した。マウスドライバは標準のものを初期状態 (ゲインや加速度などの設定はしない) で使用した。被験者は坐位にてパソコンと対面し、キーボードと押しボタン式マウス、トラックボールの設置位置は被験者の操作しやすい位置とした。被験者A、Bはペン型ポインティングデバイスの利用が未経験であったため、事前に2時間程度の操作訓練を行った。

5. 実験結果

ペン型ポインティングデバイス (ペン型)、トラックボール (ボール式)、押しボタン式マウス (ボタン式) の3種類のポインティングデバイスにおける視線移動の頻度を、文字入力のためのキーボードへの移動と、ポインティングのためのポインティングデバイスへの移動に分けて計数した。

図6は頸損者の被験者A、Bのそれぞれの視線移動回数と課題遂行時間である。A、

B共にキーボードへの視線移動回数はペン型>ボール式>ボタン式と実験した順に減少している。しかしながら、ポインティングデバイスへの視線移動回数はペン型<ボール式<ボタン式と実験した順に増加している。課題遂行時間はボール式が最も短時間で完了している。このように頸損者の2例は共に同じような傾向を示している。

図7のグラフは健常者の被験者Cである。キーボードへの視線移動回数は全て20回弱程度と一定である。ポインティングデバイスへの視線移動はボール式<ペン型<ボタン式と増加しており、課題遂行時間も同様にボール式<ペン型<ボタン式と増加している。

6. 考察

トラックボール、押しボタン式マウスとの比較実験では、頸損者の被験者A、B共にペン型ポインティングデバイスを利用した課題でポインティングデバイスへの視線移動(図8参照)が減少している。キーボードへの視線移動(図9参照)は文字を入力するための代替手段であり、ペン型>ボール式>ボタン式と減少しているのは、ポインティングデバイスによる影響というよりは課題に対する文字入力の学習効果が表れているものと考えられる。被験者A、B共に課題遂行時間の最も短かったトラックボールは、日常的に利用しているものであり習熟度が高い事の影響と考えられる。しかしながら作業を観察してみると、ボール上にスティックや掌を接触したまま回転できる狭い範囲であれば視線移動は発生していないが、大きな動きや速い動きの場面では掌の位置がボールから離れてしまい、位置を修正することが原因となり視線移動が生じている。

また、トラックボールと若干異なるが頸損者のジョイスティック操作における視点

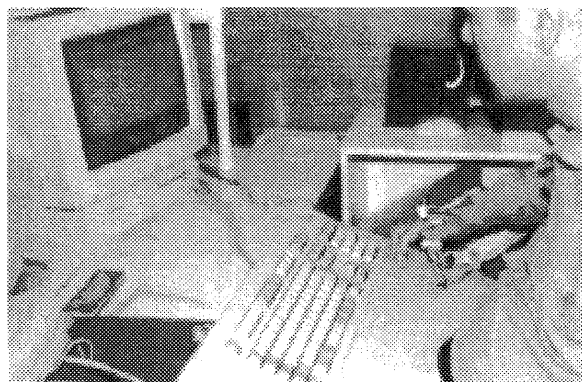


図8. ペン型ポインティングデバイスによるポインティング操作

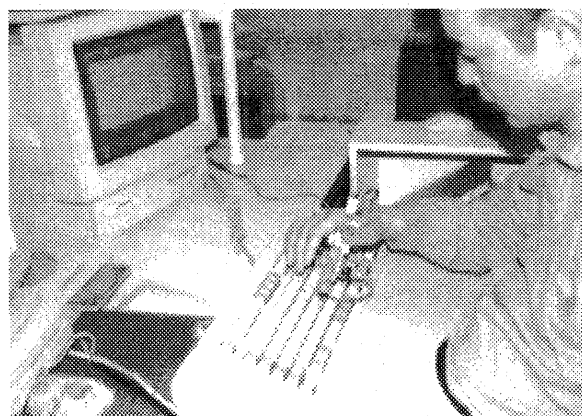


図9. ペン型ポインティングデバイスによるキーボード操作

移動について、習熟により視覚フィードバックを利用しなくなる¹⁹⁾との報告がある。しかし、この報告はポインティング操作のみの状況であり、キーボードとの複合作業では上肢の可動範囲が広がり、わずかな感覚機能と習熟だけでは代償できないのではないかと考える。

健常者の被験者Cの場合、習熟度の高いトラックボールではポインティングデバイスへの視線移動が全く無く、しかも課題遂行時間が最も短い。タッチタイピングが不完全であるため、文字入力においてキーボードへの視線移動が生じている。キーボードへのアクセスは基本的に両上肢で打鍵しているため、ポインティング毎に右上肢をホームポジションから外し、ポインティングデバイスに移動する。

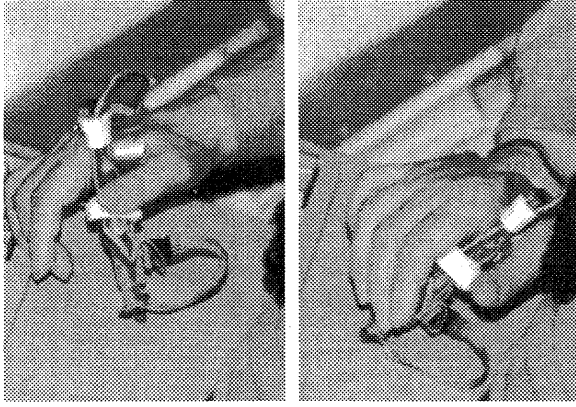


図10. ペン型ポインティングデバイスの装着

ペン型ポインティングデバイスは機構上、本体に座標軸が存在するため、利用の際には定められた方向で把持する必要がある。そのため、被験者Cではキーボード操作からポインティング操作へ作業が移行する段階において、把持動作と握り位置の確認のための視線移動が生じている。しかし、頸損者の被験者A、Bにおいては作業開始時にペン型ポインティングデバイスを装具へ固定してしまう(図10参照)ため、握り替えなどの必要が無く視線移動は少ない。

ペン型ポインティングデバイスの利用により視線移動は減少したが、頸損者の被験者Bにおいて上肢運動機能の非対象性により特定方向における操作の遅れが認められた。これは頸損者固有の肘関節の屈曲方向と伸展方向における筋力の差によるものであり、方向毎の感度調整機能を設けることで解消できると考えられる。

また、今回はポインティングデバイスの機能に必須のクリック操作として、スティックを軸方向に押し込む1種類の操作で代替した。通常クリック操作は2つ以上のボタンを用意しているが、今回のように1種類の操作であっても、一般的なアプリケーションソフトでは特に支障無く利用可能であった。

以上より、ペン先のせん断力を検出するペン型ポインティングデバイスは頸損者の

視線移動を軽減し、操作性が向上する効果的なポインティングデバイスのひとつであることが明らかになった。

7. まとめ

機能レベルC6の頸損者がキーボード操作を行う際に利用するスティックを用いて、ポインティングをも可能にするペン型ポインティングデバイスを考案・試作し、評価実験を行った。これは、ポインティング操作時の上肢の機能障害を視覚により補うために起こる視線移動を低減させることにより、パソコン操作時の疲労軽減と操作効率の向上を目指したものである。

評価実験により、(1) マウスやトラックボールなどのポインティングデバイスと等価な自由度があり、視線移動が低減されること、(2) キーボードとの複合作業においても作業の中断などが無いことが確認された。また、クリックボタンの機能をペンの押し込みにより可能としたことから、ポインティング操作時、およびポインティング操作からクリック操作へ、またはその逆において、操作姿勢の変化はほとんど無く頸損者には適していることが認められた。

また、このペン型ポインティングデバイスの一般への応用としては手書き文字入力なども考えられ、多方面からのアドバイスを頂ければ幸いである。

今後は、ペン型ポインティングデバイスの操作を習熟した場合の評価、およびトラックボールなどに慣れていないユーザーにおける実験を行っていく予定である。

謝辞 日頃から適切なアドバイスを、また本論文作成にあたりご指導を頂いた慶応義塾大学環境情報学部の安村通見教授に深く感謝いたします。さらに実験にご協力頂いた被験者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 伊藤英一：身体障害者を支援するコンピュータテクノロジー, bit, Vol.25, No.9, pp.14-21 (1993)
- 2) 太田 茂：日本における障害者支援用機器の現状, コンピュータと人間の共生, コロナ社, pp.103-120 (1994)
- 3) Fraser Shein : Access Considerations Of Human-Computer Interface For People With Physical Disabilities, Proc.HCI'95, Vol.20A, pp.143-148 (1995)
- 4) 伊藤英一、藤井直人、藺藤全孝、沖川悦三：押しボタン式マウスの試作, 第4回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp.275-278 (1989)
- 5) 伊藤英一、藤井直人、藺藤全孝、沖川悦三：押しボタン式マウスの実用化, 第5回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp.227-230 (1990)
- 6) 土肥徳秀、河村 洋、大島 徹：ジョイスティック型マウスの試作, 第5回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp.231-232 (1990)
- 7) 河村 洋、土肥徳秀、大島 徹：PSD素子を用いた「光マウス」の試作, 第5回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp.233-236 (1990)
- 8) 畠山卓朗、田中 理、轟木敏秀、政木憲司：重度筋ジストロフィー患者のパソコン操作支援に対する試み, 第8回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp.299-304 (1993)
- 9) 伊藤英一、大橋正洋、玉垣 努、松本琢磨、北村 啓、加藤 朗、前角典男、飯塚慎司：1入力スイッチによるマウス・エミュレータの開発, 第8回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp.305-308 (1993)
- 10) 伊藤英一、藤井直人、藺藤全孝、沖川悦三、宮本 晃：押しボタン式マウスの実用化II, 第9回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp.463-466 (1994)
- 11) 石原建己、藤沢正一郎、土井智晴、金田忠裕、西 高志：手入力を伴わないヒューマン・インタフェースの基礎的研究, 第10回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp.467-470 (1995)
- 12) AccessDOS User's Guide Version 1.00, The Trace Research and Development Center UWM (1991)
- 13) 宮田美郎：ユーザーのためのシステム設計, 古川・溝口共編インタフェースの科学, 共立出版 (1987)
- 14) 黒川隆夫：ノンバーバルインタフェース, オーム社 (1994)
- 15) 伊藤英一：肢体不自由児者用コミュニケーション機器～コンピュータ入力装置とソフトウェア～, 総合リハビリテーション, Vol.23, No.2, pp.163-166 (1995)
- 16) 藤田欣也、深澤勝巳、鈴木 郁：上肢の運動特性とマウスの関係について, 計測自動制御学会第6回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.341-344 (1991)
- 17) 加藤直樹、福田奈津子、中川正樹：手書き対話インタフェースの可能性, 計測自動制御学会第10回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.471-478 (1994)
- 18) 橋本美奈子、長嶋雲兵、富樫雅文、細谷治夫：ペン入力のための楕円形仮想キーボードとベクトル入力法, 情報処理学会論文集, Vol.37, No.11, pp.2105-2115 (1996)
- 19) 井手将文、黒須顕二：頸髄損傷社のジョイスティック操作における視点移動, 計測自動制御学会ヒューマン・インタフェース部会 News&Report, Vol.10, No.4, pp.459-466 (1995)