

力覚フィードバックを与える パッシブ型力覚マウスの試作と性能評価

福中 謙一^{*1 *2} 木村 朝子^{*3} 佐藤 宏^{*1} 井口 征士^{*4}

A Prototype of Passive Force Feedback Mouse and its Performance Assessment

Ken'ichi Fukunaka^{*1 *2}, Asako Kimura^{*3}, Kosuke Sato^{*1} and Seiji Inokuchi^{*4}

Abstract – In this paper, we propose "Passive Force Feedback Mouse" providing the reaction force over mouse movement and mouse wheel rotation. We developed a prototype using magnetic force as the passive force. Various force feedbacks, such as STOP, TOUCH, and WEIGHT feedback to the user's hand on the mouse and STOP, NOTCH, and FRICTION feedback to the user's finger on the mouse wheel, are available by controlling drive time and magnitude of the force. We also developed prototype applications that use passive force feedbacks as desktop metaphors. For example, the STOP feedback to the mouse is presented when the mouse pointer hits a display frame. The result of evaluation using these applications shows that the force feedbacks of the Passive Force Feedback Mouse are intuitive and effective for users. We have also obtained suggestive user's observations about the relation between visual feedback and force feedback.

Keywords : Force Feedback Mouse, Passive Force, Reaction Force, Desktop Metaphor

1. はじめに

マウスは、今や人間がコンピュータを利用する上でもっとも重要でシンプルな対話デバイスとなっている。これを、単なるポインティングデバイスとして利用するだけでなく、フィードバック機能を持つ触力覚ディスプレイ・デバイスとしても利用できれば、ユーザがデスクトップ環境を直感的に知覚する上で大いに有用であると考えられる。

GUI (Graphical User Interface) は、フォルダ、ファイル、ゴミ箱など、オフィスの机上のメタファをビットマップ・ディスプレイ上に再現することで、直感的な操作を可能とした。しかし、例えば実世界では机の境界まで来ると手がエッジを感じるのに対して、仮想デスクトップではポインタはディスプレイの端で止まるのにマウスはそのまま動き続けるというように、提示される視覚と力覚が一致していない。マウスをもつユーザの手に、力覚を提示することができれば、視覚と合致した形でデスクトップ・メタファを利用することができると考えられる。

赤松らは、マウスを持つ人差し指に振動による触覚を提示し、視覚情報に触覚情報が加えられることで形状のなぞり動作の速度や加速度が大きくなり、形状に対する注視回数が減少するという結果を報告している^{[1],[2]}。また、Logicool社から、マウスを掴んでいる手全体に振動による触覚を提示する iFeelMouseMan が製品化されている^[3]。このマウスでは、アイコンのポインティングや、ホームページ閲覧中リンクの張られた文字列をポインティングする際に、ユーザの指にバイブレーションを提示する。また、渡辺らは面状に並んだ複数の触知ピンが上下することでコンピュータ画面上のグラフィカルな情報を触覚提示するマウスを構築している^[4]。しかし、これらのマウスは物の存在を振動や凹凸といった触覚刺激を利用して伝えており、聴覚におけるアラーム音のように、力覚へのフィードバックを一種のサインとして利用している。

よりリアルな力覚提示機能を付加したマウスとして、富士ゼロックス社の開発した 2 次元アクチュエータを用いた力覚フィードバックマウスがある^{[5],[6]}。マウス上部に位置する力覚提示部にユーザが指を配置し、ポインタの位置に応じて力覚提示部が 2 次元的に移動することで、傾きやうねりといった操作対象の 3 次元の形状情報を提示することができる。しかし、マウス自体の移動に対して力覚フィードバックを提示することは行っていない。

マウス自体の移動に対して力覚フィードバックを提示する方法としては、赤松らが電磁石と鉄製のマウスパッドを用いた触覚マウスを提案している^[7]。この

*1: 大阪大学大学院 基礎工学研究科

*2: 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

*3: 立命館大学 情報理工学部

*4: 広島国際大学 人間環境学部

*1: Graduate School of Engineering Science, Osaka University

*2: Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

*3: College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

*4: Department of Kansei Information, Hiroshima International University

マウスシステムでは、デスクトップ上のボタンの上をマウスカーソルが通過する際、マウスパッドにマウスが吸着し、この触感からボタンの存在を知覚することができる。しかし実世界では、ボタンに触れたときに指がボタンに吸着するというわけではない。本論文では、ユーザが実世界で知覚する触感と類似した力覚フィードバックを再現し、これをデスクトップ・メタファとして利用することを目的としている。

そこで本論文では、まず力覚フィードバックをデスクトップ・メタファとして知覚するための力覚マウスデバイスの要件を整理する。次いで、その要件を満たすべく試作した「パッシブ型力覚マウス」の機能と構成を述べ、これをデスクトップ・メタファに適用するアプリケーションを提案する。また、「パッシブ型力覚マウス」の使い勝手や問題点を、ヒューマンインタフェースの視点から実験した結果について述べる。最後に、視覚提示との関わりで、力覚がどのように感じられるかに着目し検討を行う。

2. デスクトップ・メタファと力覚

日頃ユーザがオフィスの机の上で実際に経験している力覚感覚としては、「机の端で壁や障害物にあたり手が止まる感覚」「手探りで机の上のものに触れながら書類や本を探す感覚」などが考えられる。例えば手が壁に当たってそれより先に進めない状態では、人は手が壁に「ぶつかった」と感じる。また、机の上で指を滑らせてゆき、机の上の紙や本の上に移動するときのエッジの感覚を、人は手が紙や本に「触れた」と感じる。この他に、「書類のたくさん入ったファイルを持つとき」には、人は「重たい」と感じる。これらの感覚を、GUIにおける仮想デスクトップ環境で再現するために、これらの力覚感覚を以下の力学的現象として捕らえる。

- ・ ぶつかる感覚：物理的に障害物があって先に進めない状態。手・指に対して大きな抵抗力が存在し続け動かすことができない。
- ・ 触れる感覚：手を動かしながら物に触る状態。手・指に対して瞬間的な抵抗力が存在するが、手を動かし続けることができる。
- ・ 重たい感覚：手で物を持っている状態。対象を動かしている間、重量に応じた摩擦感が存在する。

一般的なマウスは、マウス本体を動かすことによるポインティングに加えて、マウスホイールを回転して書類をスクロールするという入力方法が存在するので、本研究ではマウス本体だけでなく、マウスホイールの動きについても力覚制御を行うこととする。実世界での手・指と物体の力学的な力関係は、仮想環境中ではマウス本体・ホイールと仮想物体との関係として、以

下のように置き換えることができる。

- (1) ぶつかる感覚：マウス本体、ホイールの動きに対して長時間大きな抵抗を提示する（停止感）
- (2) 触れる感覚：マウス本体の動きに対して短時間抵抗を提示する（タッチ感）、マウスホイールの動きに対して短時間抵抗を提示する（刻み感）
- (3) 重たい感覚：マウス本体の動きに対して一定時間弱い抵抗を提示する（重み感）、マウスホイールの動きに対して一定時間弱い抵抗を提示する（抵抗感）

以後、それぞれの感覚を「停止感」「タッチ感、刻み感」「重み感、抵抗感」と呼ぶこととする。マウスホイールにおける「刻み感」は、例えばキャビネットに分類されたたくさんの書類の表面を指先でなぞったときに、分類用の見出しタグのエッジが指先に触れる感覚に例えることができる。デスクトップ・メタファとしては、文章の章立ての切り替わりなどをタグとして力覚提示すると考えることができる。図1に、これらの感覚を実現するための抵抗力の大きさと力の提示時間の関係を示す。

一方、VR・MR技術が発達し、人間と実世界とのインタラクションにおいて力覚や触覚が重要であるように、仮想環境とのインタラクションにおいても力覚・触覚が有効であることが認識されるようになってきた。様々な力覚ディスプレイが研究、開発されてきているが、力覚・触覚発生部の機構に注目すると、アクチュエータの有無という観点からアクティブ型とパッシブ型の力覚ディスプレイに分類することができる^[8]。

アクティブ型の力覚ディスプレイは、アクチュエータとしてサーボモータなどが利用されている。PHANToM^[9]やSPIDAR^[10]、Haptic Master^[11]などVR、MR分野で利用されている多くの力覚ディスプレイがアクティブ型であり、物体に触れている感覚や、重さ、硬さ、粘り感など、様々な力覚を高い分解能で提示することができる。しかし、図1の停止感のような大きな力をアクチュエータで駆動させようとする

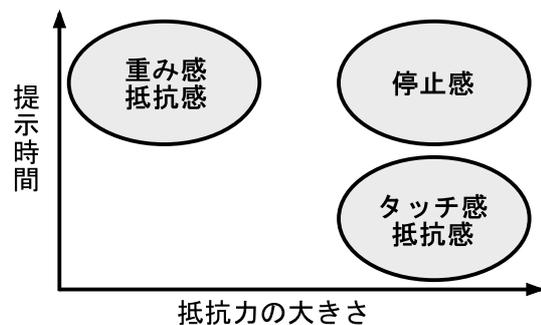


図1 抵抗力の大きさ・提示時間の関係と力覚感覚
Fig.1 Various force feedbacks controlled by drive time and magnitude of reaction force

と、力覚提示部分の機構が大きくなってしまい、マウスのようなシンプルなデバイスに実装することが難しくなる。

パッシブ型の力覚デバイスとしては、M. Peshkin や J. Colgate が提案する力覚ディスプレイ [12][13] や Delnondedieu や Troccaz らが提案する手術ロボット”PADyC” [14] などがある。これらのデバイスは摩擦力などのブレーキを用いることで力覚を提示している。アクティブ型のように高分解能で力覚提示を行うことは難しいが、パッシブ型は、ユーザが操作を行わない限りデバイスが自立的に動き出すことはなく安全である。このような特性は”PADyC”のような手術ロボットには必要不可欠であるといえる。また坂口らが提案する ER (Electric-Rheological) 流体を用いた力覚ディスプレイ [15][16] などがある。ER 流体は電圧をかけることで粘性が変化する流体で、これを力発生部に用いることで低慣性モーメントで大きな出力が得やすく、応答速度が速く、制御性に優れた力覚ディスプレイを実現している。マウスのようなシンプルかつ身近な入力デバイスの動きに対して力覚提示を行うことを考えると、ユーザ自らアクションを発生したときだけにその結果が反力として返り、安全であるという点は魅力的である。また、磁力を利用することで非常に小さな機構で大きな力覚提示を行うことができる。

そこで本研究では、電磁石を利用したパッシブ型力覚機構をマウス型デバイスに組み込むことにより、前述した (1) ~ (3) の力覚感覚を提示する。

3. パッシブ型力覚マウス

3.1 デバイスの構成

次に、試作した「パッシブ型力覚マウス」の構成について述べる。図 2 にパッシブ型力覚マウスの外観を示す。

マウス本体の移動に対する抵抗力は、赤松らの研究 [5] と同様、電磁石と机に固定した磁性板のマウスパッドにより実現しているが、本システムでは電磁石をマウスの左右に 2 つ装着している。これは、マウスパッドに吸着する点が 2 点存在することで、力覚提示中ユーザがマウスに力を加えたときに、マウスが安定に動くようにするためである (図 3)。電磁石に電圧をかけると、電磁石が磁性板に吸着する。これにより、電磁石に励磁する電圧が大きいと、マウスを移動するのに必要力が大きくなり (抵抗力大)、逆に電圧が小さいと、少ない力でマウスを移動することが可能になる (抵抗力小)。

図 4 にマウスホイールの力覚提示機構を示す。マウスホイールの回転操作に対する抵抗力は MR (Magneto-Rheological) 流体 (シグマハイケミカル社製) を用い

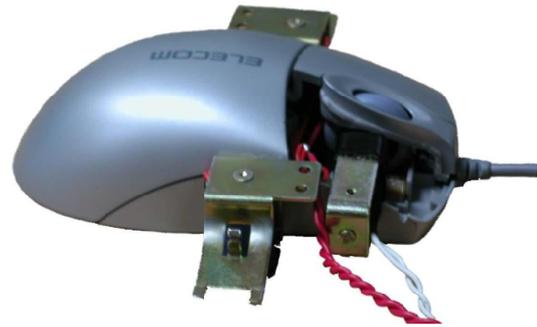


図 2 パッシブ型力覚マウス
Fig. 2 Passive Force Feedback Mouse

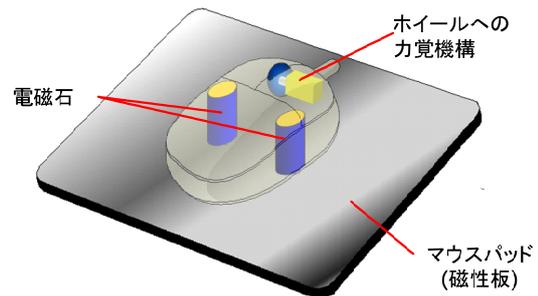


図 3 パッシブ型力覚マウスの構造
Fig. 3 Architecture of Passive Force Feedback Mouse

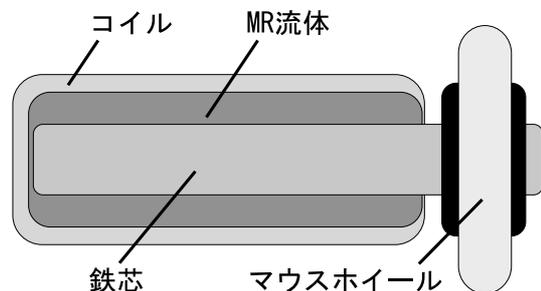


図 4 マウスホイールへの力覚提示機構
Fig. 4 Reaction force architecture over mouse wheel rotation

ることで実現している。MR 流体は磁場をかけることで粘性が増加する性質を持ち、比較的弱い磁場でも粘度が大幅に増加する。そのため高電圧が必要な ER 流体よりも容易に力覚提示機構を作ることが可能である。マウスホイールの回転軸として鉄芯を用いこれを MR 流体の入った筒の中に入れる。この筒にコイルを巻くことで MR 流体に自在に磁場をかけることを可能とする。以上の機構により、コイルへ励磁する電流が大きいとホイールの回転に大きな力が必要となり (抵抗力大)、逆に電流が小さいと、少ない力で回転することが可能となる (抵抗力小)。

試作したパッシブ型力覚マウスでは、各力覚提示機構にける電圧値をコンピュータ制御することにより、抵抗力の大きさを段階的に変化させる。電圧値の制御

は、1~255 段階の電圧制御コマンドをコンピュータから RS232C 経由で電圧コントローラ (SOLUTION CUBED 製 Motor MindB) へ送り、電圧を最大 12V まで調整する。最大電圧をかけたときに提示される力覚は、マウス本体で 3.9N (電流 0.26A)、マウスホイールで 1.1N (電流 0.16A) である。また、励磁を ON/OFF することにより、抵抗力の提示時間を制御する。また、励磁を ON/OFF することにより、抵抗力の提示時間を制御する。

3.2 力覚フィードバックの評価

試作した力覚マウスに対して「大きな抵抗力をかけ続ける」「大きな抵抗力を瞬間的にかける」「小さな抵抗力をかけ続ける」という 3 種類の制御を行うことで、図 1 に示した異なる力覚感覚を提示することができるかどうか確認する実験を行った。被験者は、20 歳代の男性 10 人である。

マウス本体、マウスホイールそれぞれについて、3 種類の力覚をどのように感じたか自由回答してもらったところ、以下のようなコメントが得られた。

- ・ 「大きな抵抗をかけ続ける」場合には「動かせなくなった感じ」や「張り付いた感じ」
- ・ 「大きな抵抗を瞬間的にかける」場合には「そこに何かがある感じ」「何かに引っかかった感じ」「つまずいた感じ」
- ・ 「小さな抵抗をかけ続ける」場合には「抵抗が増した感じ」「何かに入り込んだような感じ」

これらのコメントより、3 種類の力覚がそれぞれ「停止感」「タッチ感、刻み感」「重み感、抵抗感」として知覚されていることが分かる。

次に、本力覚マウスが提示可能な抵抗力 (マウス本体 0.0~3.9N, マウスホイール 0.0~1.1N) に対して、どの程度の抵抗力のときに「停止感」「重み感、抵抗感」として知覚されるのか、またどの程度の提示時間のときに「タッチ感、刻み感」として知覚されるのか

を調べるために、上記の被験者に対して以下の実験を行った。実験では、まず抵抗力を徐々に変化させ「停止感」と感じる抵抗力の大きさの範囲と「重み感、抵抗感」と感じる抵抗力の大きさの範囲を調べた。また、抵抗力を最大にした状態で、提示時間を変化させ「タッチ感、刻み感」として知覚される最大提示時間を調べた。それぞれの感覚として知覚されるための抵抗力の大きさおよび力覚提示時間の長さは、表 1 に示す通りであった。

表 1 で示される範囲の中で抵抗力を提示した場合でも「停止感」では、実際にマウス本体やマウスホイールが動かさなくなるほど強い抵抗を利用しなくても、抵抗力がまったくない時とギャップが大きいことから、あたかもマウス本体やマウスホイールが完全に停止したかのように感じられることが分かった。「重み感・抵抗感」の抵抗力については、あまり大きすぎると操作が行いにくく、あまり小さいと分かりにくいといったことが確認できた。また、「タッチ感・刻み感」の抵抗力の大きさについては提示時間が短いことから、抵抗力が小さいと触覚として認識できないことがわかった。

3.3 パッシブ型力覚マウスの問題点

本機構ではウィンドウ端で停止感を提示した場合に、ウィンドウ端からのスムーズな離脱を行うことが難しいため、カーソルがウィンドウ端に来ると数秒「停止感」を提示し、その後自動的に力覚を解除するよう実装している。しかし、この方法では、ウィンドウの端をマウスでなぞるといった力覚を提示することができないという問題点が残る。

4. アプリケーション

次に、パッシブ型力覚マウスによる力覚を、デスクトップ・メタファとして応用するアプリケーションを構築した。

4.1 マウス本体への力覚

既存のマウスではポインタがディスプレイの右端で止まっても、マウス本体は右へ動き続ける。しかし、視覚と合致した形で力覚を提示するためには、ポインタが止まる場所で、マウスも止まる必要がある。また、ポインタがアイコンやウィンドウなどのオブジェクトに触れるときやそれらを移動するときにも、実世界では力覚感覚が存在するはずである。そこでマウス本体の移動に対する力覚フィードバックを、以下に示すようなデスクトップ・メタファとして利用するアプリケーションを構築した (図 5)。

- ・ 操作対象のウィンドウの輪郭がアプリケーションの表示部の境界に重なるとき「停止感」を提示する
- ・ アイコンをポインティングしたときに「タッチ感」を提示する
- ・ ウィンドウを移動・拡大縮小するときやファイルを移

表 1 「停止感」「タッチ感、刻み感」「重み感、抵抗感」として知覚されるための抵抗力とその提示時間

Table 1 Effective magnitude of reaction force and its drive time to show "STOP", "TOUCH and NOTCH", and "WEIGHT and FRICTION" feedback.

(a) マウス本体の移動に対する力覚提示

	停止感	タッチ感	重み感
抵抗力 (N)	3.6~3.9	3.9	1.7~2.5
提示時間 (sec)	0.7 以上	0.5~0.7	0.7 以上

(b) マウス本体の移動に対する力覚提示

	停止感	タッチ感	重み感
抵抗力 (N)	3.6~3.9	3.9	1.7~2.5
提示時間 (sec)	0.7 以上	0.5~0.7	0.7 以上

動するときに、ウィンドウの大きさ、ファイルの容量などに応じて「重み感」を提示する

4.2 マウスホイールへの力覚

マウスホイールの回転に対する力覚フィードバックを、文書などのファイル閲覧時のメタファとして利用するアプリケーションを構築した(図6)。文書の構造や重要箇所などの情報をマウスホイールから力覚的に得ることで文書の閲覧をより効果的に行うことが可能になると考えられる。ここでは、力覚フィードバックを以下に示すようなデスクトップ・メタファとして利用する。

- ・ ウィンドウスクロールの終了時に「停止感」を提示し、視覚的にスクロールバーが止まるのと同時に、マウスホイールの回転を止めそれ以上文章が存在しないことを示す
- ・ 注目すべき検索語、段落の区切り、ページの切り替わりといったポイントを「刻み感」を利用して提示する
- ・ 注目すべき段落や図といった領域を「抵抗感」を利用して提示する。また、検索語が密集して存在している場合、「刻み感」を頻繁に発生させるのではなく、検索語が密集している領域であるという情報を「抵抗感」で提示する。

5. 評価実験

5.1 実験の目的

評価実験では、まず振動型の触覚マウスと提案するパッシブ型力覚マウスをヒューマンインタフェースの視点から比較する評価実験を行った。次に、「停止感」

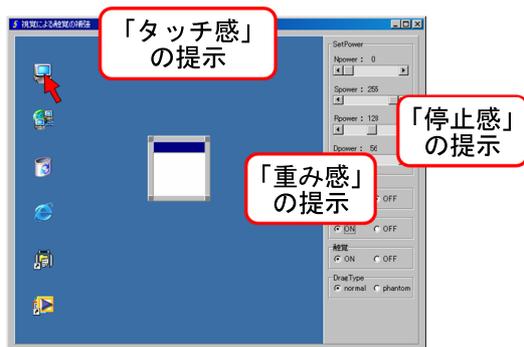


図5 GUI環境への利用
Fig.5 Application of GUI

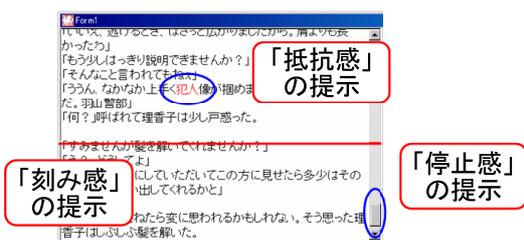


図6 テキスト閲覧への利用
Fig.6 Application of text viewer

「タッチ感、刻み感」「重み感、抵抗感」といった力覚フィードバックをデスクトップ・メタファとして利用することの有用性を評価する実験を行ったので、その結果について述べる。

5.2 振動型力覚マウスとの比較

振動型触覚マウスとの比較検討を行うために、既存の振動型触覚マウスと提案するパッシブ型力覚マウスをそれぞれ用いて、アイコンのポインティング操作を行ってもらった。

振動型触覚マウスとして、Logicool社のiFeelMouseManを用いた。iFeelMouseManでは、マウスポインタがアイコンと重なるとマウス本体が振動する。振動は1秒間に3~4回マウスが小さく揺れるものである。被験者には振動型・停止型の順で続けて使ってもらった。それぞれのマウスについて、ウィンドウ左側に縦一列に6個並んだアイコンを上から順にポインティングしてもらい力覚・触覚提示のない通常のマウスと比較してアイコンのポインティングが行いやすかったかどうかを5段階評価してもらった。被験者は、3.2の実験と同一の10名で行った。

主観評価結果を図7に示す。図より、振動型触覚マウスと提案するパッシブ型力覚マウスとでは、提案マウスの方が使いやすいと回答する被験者が多かった。

実験中の被験者の様子の観察および被験者によるコメントでは、振動型触覚マウスでは、ユーザが振動を認識してからマウス操作を止めるまでの間に時間差があり、マウスポインタがアイコンからずれやすいのに対して、パッシブ型力覚マウスではアイコンをポインティングした瞬間、マウスを動かしにくくなるため、アイコンを確実にポインティングすることができるという意見が得られた。また、振動型触覚マウスではアイコンをポインティングしている間継続的に振動が提

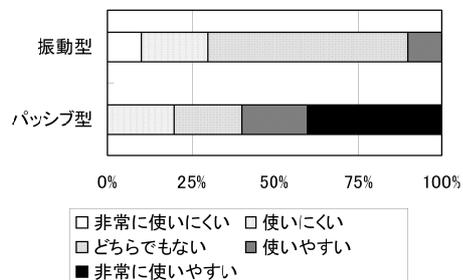


図7 振動型触覚マウスとパッシブ型力覚マウスを利用したアイコンポインティング操作の主観評価結果

Fig.7 Results of subjective experiment on icon pointing operations using the vibration feedback mouse and the passive force feedback mouse

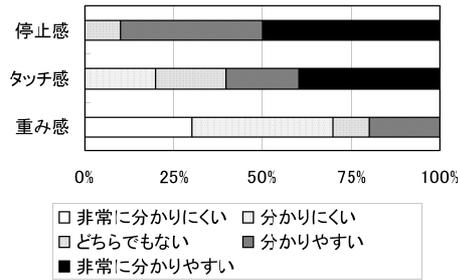


図8 マウス本体への力覚フィードバックに対するユーザ主観評価

Fig.8 Subjective evaluation of the reaction force over mouse movement

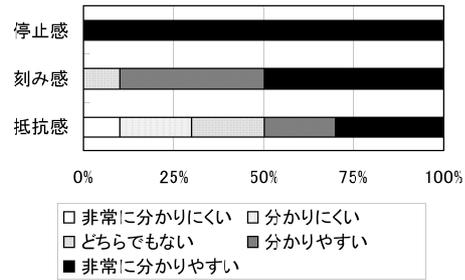


図9 マウスホイールへの力覚フィードバックに対するユーザ主観評価

Fig.9 Subjective evaluation of the reaction force over mouse wheel rotation

示されるのに対して、パッシブ型力覚マウスではマウスポインタの動きをとめると力覚提示もなくなるため、手への負担が少なく、良いという意見もあった。これらのことから、ユーザがマウス本体およびマウスホイールを動かしたときにのみ力覚が提示されるというパッシブ型の性質が、マウスによるポインティング操作のフィードバックとして有効であることが分かる。

5.3 マウス本体への力覚

4.1 のアプリケーションのうち

- (a) ウィンドウの端がディスプレイの境界領域にぶつかったときに「停止感」を提示
- (b) アイコンをポインティングしたときに「タッチ感」を提示
- (c) ウィンドウを移動・拡大縮小するときに、ウィンドウの大きさに応じて「重み感」を提示

の操作を被験者に実際に行ってもらい、それぞれの操作について、力覚を提示することで操作がやりやすくなったかを5段階で評価してもらった。実験は5.1と同じ被験者に対して行った。

主観評価結果を図8に示す。図より「停止感」「タッチ感」に対しては、操作がやりやすかったという回答が多いのに対して、「重み感」に対しては操作がやりにくかったという意見が多いことが分かる。被験者のコメントからは、「『重み感』は操作中抵抗力が継続的に発生するため、操作に負担がかかる」「ウィンドウの大きさは視覚情報で十分分かるため、力覚を通じて知らせる必要性が低い」といった意見が得られた。ウィンドウの移動というタスクに対しては、重さという継続的で強い力覚フィードバックを付加する意義は小さかったと考えられる。逆に、提示が短時間で、操作時に大きな負担とならない「停止感」や「タッチ感」は、視覚的に明らかな対象に対して力覚を付加する場合でも高い評価を得ている。特に「停止感」については、「とても自然」というコメントが多く得られた。

5.4 マウスホイールへの力覚

4.2 のアプリケーションのうち

- (d) ウィンドウスクロールの終了時に「停止感」を提示
- (e) 検索語が画面中の特定の位置を通過したときに「刻み感」を提示
- (f) 複数の検索語が密集して存在する領域が画面の特定の位置を通過している間に「抵抗感」を提示

の操作を被験者に実際に行ってもらい、それぞれの操作について、力覚を提示することで操作がやりやすくなったかを5段階評価してもらった。実験は5.1と同じ被験者に対して行った。

主観評価結果を図9に示す。図より「停止感」「刻み感」の提示については、ほぼ全被験者から操作がやりやすかったという評価が得られた。特に「停止感」については、マウス本体の結果と同様「自然である」というコメントが多かった。「抵抗感」についても半数の被験者はやりやすいと答えたが30

6. 検討

実験結果から、視覚提示との関わりで、力覚がどのように感じられるのかについて検討する。提示が短時間で、操作時に大きな負担とならない力覚フィードバックについては、主観評価、コメントともに非常に高い評価が得られた。これは、視覚的に分かりやすい情報に対して、短時間の力覚を提示する場合、それぞれの認識がほぼ同時に行えることから、お互いの効果を高めあっていたと考えられる。

一方、強い力覚フィードバックを継続的に提示した場合は、主観評価、コメントともに評価が下がった。これらのことから、視覚的に明らかな情報や視覚と力覚が短時間提示されただけで十分分かる情報に対して、長時間力覚を付加するとユーザの手、指に対して負担となり、あまり好まれないという知見が得られた。

また「ファイルを移動するときファイルの容量に応じて重みがあるといいと思った」と言った意見があっ

たことから、「重み感」「抵抗感」といった一定時間の力覚提示は、視覚的に分かりにくい情報に対して利用すると有効ではないかと考えられる。

7. まとめ

本論文では、マウスの移動およびマウスホイールの回転に対して力覚フィードバックを提示するパッシブ型力覚マウスを提案し、そのデバイス構成を説明した。また、マウス本体の移動に対して「停止感」「タッチ感」「重み感」、マウスホイールの回転に対して「停止感」「刻み感」「抵抗感」という、それぞれ3種類の力覚を提示することが可能であることを示した。

次に、デスクトップ表示部のフレームにマウスポインタがぶつかると「停止感」を提示する、テキストビューアで検索語を発見すると「刻み感」を提示するなど、パッシブ型力覚マウスをデスクトップ・メタファとして利用するアプリケーションを試作した。このアプリケーションを用いて提案マウスを評価したところ、実世界での力覚感覚と同様ユーザがアクションを起こしたときのみ力覚が提示されるというパッシブ型の性質が、力覚マウスにおいて有効であることが分かった。「停止感」については、マウス本体、マウスホイールともに「非常に自然である」というコメントが多く、パッシブ型力覚マウスによる力覚の中でも特に自然で直感的と評価された感覚であった。

視覚提示との関わりで、力覚がどのように感じられるかに着目し検討を行ったところ、手、指に対する長時間の力覚・触覚提示はユーザにあまり好まれず、視覚的に明らかな情報や視覚と力覚が短時間提示されただけで分かる情報に対しては、短時間の力覚提示が適しているという知見が得られた。また、一定時間力覚提示を行う「重み感」「抵抗感」については、視覚だけでは分かりにくい情報に対して利用すると有効であるという示唆が得られたので、この点について今後より深く検討したいと考えている。

現状では各力覚提示機構の装着に伴いマウスが左右に大型化するが、各力覚提示機構を小型化しマウス内部の空洞に納めることでこの点は解決できると考えている。また、電力供給や信号伝達にそれぞれ独立したラインを必要としているがマウスのUSBインタフェースを利用することで1本のラインにまとめることが可能であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業 (JSPS-RFT99P01404) の補助を受けた。

参考文献

- [1] M. Akamatsu, S. I. MacKenzie: Movement characteristics using a mouse with tactile and force feedback, *International Journal of Human-Computer Studies*, 45, pp.483-493 (1996)
- [2] 赤松幹之: ポインティング操作におけるマルチモーダルインタフェースの効果, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol.J77-D-II, No.8, pp.1457-1464 (1994)
- [3] Logitech: iFeel-Mouse, iFeel MouseMan, <http://www.logitech.com/cfindex.cfm>
- [4] 渡辺哲也: 触覚マウスを用いた図形情報の識別 視覚障害者に図形情報を伝えるための一方策, *画像ラボ*, Vol.12, No.6, pp.13-17 (2001)
- [5] 坂巻克己, 塚本一之, 竹内伸: 指先誘導方式による触覚マウス, *情報処理学会インタラクシオン 2001 予稿集* (2001)
- [6] 富士ゼロックス: 触覚マウスホームページ, http://www.fujixerox.co.jp/tangible_mouse
- [7] M. Akamatsu, S. Sato, S. I. MacKenzie, Multi-Modal Mouse: a mouse type device with tactile and force display, *PRESENCE*, 3 巻 1 号, pp.73-80, 1994
- [8] L. Rosenberg, S. Brave: Using force feedback to enhance human performance in graphical user interfaces, *Proc. of CHI96*, pp.291-292 (1996)
- [9] SensAble Technologies: PHANToM, <http://www.sensable.com/haptics/products/phantom.html>
- [10] 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, *電子情報通信学会論文誌, D-II*, Vol.J74-D-II No.7, pp.887-894 (1991)
- [11] HapticMaster: http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/vr/lab_web/hapticmaster/hapticmaster-j.html
- [12] J. E. Colgate, M. A. Peshkin, W. Wannasupphoprasit: Nonholonomic Haptic Display, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp.539-544 (1996)
- [13] J. E. Colgate, W. Wannasupphoprasit, M. A. Peshkin: COBOTS: Robots for collaboration with human operators. *Proc. of the International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, DSC- Vol. 58, pp.433-39 (1996)
- [14] Y. Delnondedieu, J. Troccaz: PADyC: a Passive arm with dynamic constraints; a prototype with two degrees of freedom, *Proc. of the IEEE Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, pp.173-180 (1995)
- [15] 坂口正道, 古荘純次: ER ブレーキを用いたパッシブ型力覚提示システムに関する基礎研究, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.5, No.4, pp.1121-1128 (2000)
- [16] 坂口正道, 古荘純次, 元田: ER アクチュエータを用いたリハビリテーション訓練システムの開発に関する基礎研究, *日本ロボット学会誌*, Vol.19, No.5, pp.612-619 (2001)

(2003年12月3日受付)