

-GyroTouch-

反動トルクを利用した指先装着ハプティックデバイス

木村 朝子*¹ 佐藤 宏介*¹

-Gyro Touch- A Fingertip Haptic Device with stimulation of Reaction Torque

Asako Kimura*¹ and Kosuke Sato*¹

Abstract - This paper proposes a new lightweight haptic finger interface -GyroTouch- which is able to represent a wearable human-computer-interface to actually "touch" computer-generated objects and experience realistic reaction feedback via inertia reaction motors. Unlike other vibrative finger interface, CyberTouch etc., GyroTouch can stimulate "touch" feeling to each finger by using reaction torque of a quickly reverse-operated coin motor. As GyroTouch has no desktop actuators, it is a suitable force feedback channel to users' fingers, who is immersed in a nomadic touchable VR environment with a wearable system.

Keywords : wearable computer, globe interface, haptic interface, inertia reaction

1. はじめに

本論文では、ウェアラブルVR用に開発した小型軽量の装着型ハプティックインタフェース -GyroTouch- を提案する。GyroTouchは、指先にコイン型モーターを装着し、この内部ローターの起動や反転から生じる反動トルクを仮想空間の操作反力としてユーザの指先に返すものである。操作反力の制御は、指先位置をリアルタイム計測する3次元位置検出カメラを光学シースルーHMDに搭載し、HMD上に呈示された仮想空間と指先との3次元位置関係に基づいて行う。この指先に対する操作反力のフィードバックは、仮想空間中に呈示されている入力インタフェースの仮想オブジェクト(メニューやボタンなど)の操作性を大きく向上させることが期待できる。本論文では、簡単なボタン型インタフェースによる入力作業を実験タスクとして設定し、本装着型ハプティックインタフェースのユーザビリティ評価実験を行ったので、最後に述べる。

2. ウェアラブルとフィードバックデバイス

携帯情報端末(PDA等)やインターネット接続機能付携帯電話(i-Mode等)など、パーソナルな電子機器の小型軽量化と高機能化が著しく進歩しつつある。バッテリー持続時間の問題が解決されれば、これらを常時携帯するという用途に利用するだけでなく、常時装着しユーザと一体化するウェアラブルコンピュータ(Wearable Computer)として利用することが技術的に可能となる。ウェアラブルコンピュータは、コンピュータの設置場所

にユーザを拘束せず、どこにおいてもコンピューティング環境にアクセスできるというノマディックコンピュータ(Nomadic Computer)^[11]の観点から開発されてきた。

このような技術展開と平行して、電子デバイスを駆使した感覚呈示装置を作り、ユーザが実世界で知覚する物理法則に従って感覚呈示を行うことで、ユーザにとって実質的な現実を体感できる技術として、仮想現実感(VR: Virtual Reality)が研究されてきた^[1-3]。もしVRデバイスをユーザに装着していることを意識させずに、常時ユーザに仮想空間を呈示することができれば、人間の感覚状態や記憶機能を補強する強調現実感(Augmented Reality)として、ウェアラブルコンピュータとVRは統合化されるべき相性のよい技術と言える。

VR世界構築の3条件、1) Autonomy (表示要素の自律性)、2) Interaction (働きかけへの応答)、3) Presence (自然な臨場感)の許において、ウェアラブルなVR世界を構築する際に最も重要な問題となるのは、2)のInteractionを取り交わすためのフィードバックデバイスに適切なものが入手できないことである。たとえば、ユーザの手指に反力をフィードバックするハプティックインタフェースは、仮想空間中の物体操作における操作性向上に極めて有効であり、これらの研究は活発に取り組まれている^{[2-5][9,10]}。しかしながら、現状でのハプティックインタフェースは、ロボットアーム式などいずれにおいても環境側に大きな駆動機器の設置を要するものである。ウェアラブルな装置として利用するためには自律した動作が必要であるため、これらはウェアラブル用途には適していない。

小型のハプティックインタフェースとして、指先に小型振動子を装着するCyberTouch^[6]があるが、これは反力で

*1: 大阪大学大学院 基礎工学研究科

*1: Graduate School of Engineering Science, Osaka University

はなく振動をフィードバックするものであり、反力の方向性など実際の物体操作を模倣したものとは異なった感触をユーザに与える。また、指先にリンク機構を配し、ワイヤーにより外部の制御装置から動力を伝えるCyberGrasp^[7]は、反力を返すことが可能ではあるが、大きな制御機構とワイヤーの引き回しが必要であり、ウェアラブルな利用に適しているとは言えない。

そこで本論文では、指先に小型のコイン型モーターを装着し、その内部ローターの起動や反転によって生じる反動トルクを仮想空間の操作反力としてユーザの指先にフィードバックするデバイス-GyroTouch-を考案したので報告する。

これは小型軽量であり、ウェアラブルなVR世界の構築に適したハプティックインタフェースである。

このハプティックインタフェースのユーザビリティを評価するため、指先位置と仮想物体間との干渉をリアルタイムに観測し、操作反力を制御するシステムが不可欠となる。そこで、3次元位置検出カメラを光学シースルーHMDに搭載したウェアラブルVRシステムを構築した。

ウェアラブルなVR環境において、まだ標準機器と見な

されているハプティックインタフェースは存在しないため、仮想空間とのインタラクションの操作性に関する検討も不十分である。そこで、指先への操作反力のフィードバックを、特に仮想空間中に呈示されている入力インタフェースのボタン型仮想オブジェクトとの操作に関与させ、操作性が向上するかどうかを検証した。これについては5章に詳述する。

なお、本論文では、ウェアラブルなVR環境を構築するにあたり、1) 実世界の呈示品質を劣化させたくないため光学シースルー方式を採用する、2) 強い騒音の中で行われる工業作業等も想定し音響フィードバックは行わない、そして3) ウェアラブル独立装置として環境側に設置されているデバイスからの支援はいっさいない、という条件で問題設定している。

3. GyroTouch デバイス

今回指先に装着し、ローターの反動を応力として利用するモーターの外観を図1に示す。モーター（松下製KFM-26NMIC 26NMIC）は直径約26mm、厚さ約4mmのコイン型を有し、図2の写真に示すような人差し指先端の側部にベリクロバンドで装着する。モーターの起動トルクは3.3mNmである。本論文ではウェアラブルに適した簡易な機器構成を目指すため、回転数の連続制御は行わず、停止/回転/逆回転のオンオン制御で実装している。この場合、ある方向へ回転が起動する際、あるいは回転しているものを逆転する際に、起動・反動トルクが生じ、人差し指を回転させるように働く。しかし、指がモーターの直径に対して十分長い場合、回転トルクとしてではなく指先を上下させるような応力として知覚される。例えば、図3のように人差し指の右側面に装着したケースでは、モーター内のローター回転を時計方向から反時計方向に逆転させるときに、指先を持ち上げるような反動トルクが働き、これが物体に接触した際の反力として知覚される。

この反力は、ローター回転の慣性力を利用したものであるため、機械リンク式のようなハプティックインタフェースと異なり、静的に反力を与え続けることができない。しかし、仮想物体の表面に接触した際の接触感や、

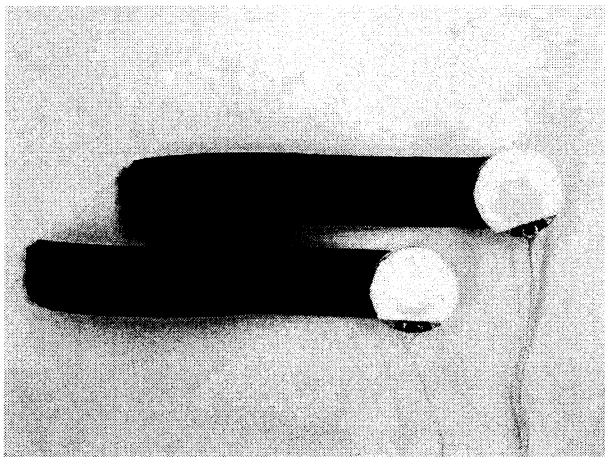


図1 コイン型モーター

Fig.1 Coin motors

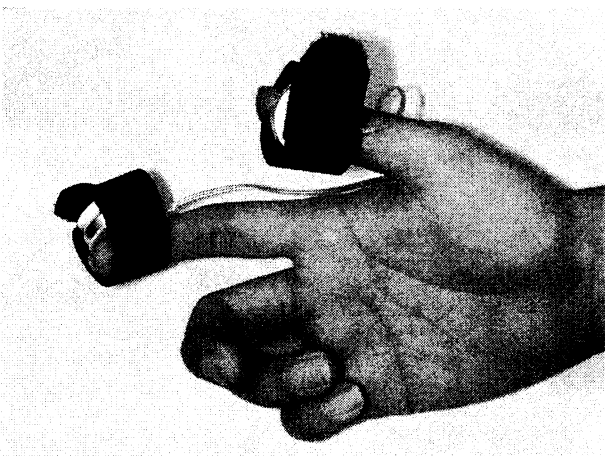


図2 コイン型モーターを装着した様子

Fig.2 Wearing coin motors

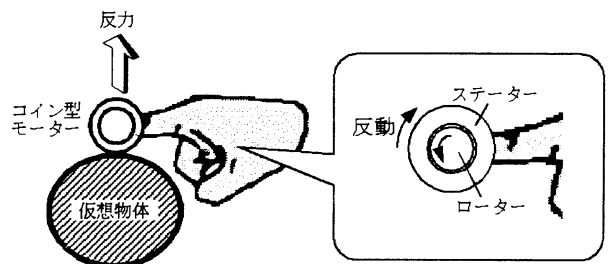


図3 回転反動から指先が反力を受ける様子

Fig.3 A finger forced by reaction torque of reverse-operation

空間中にある仮想的な膜や領域の結界の存在感等、動的な仮想物体との相互作用の結果をユーザに呈示することは可能である。

従来、ウェアラブルVR環境においてハプティックインタフェースを利用することは稀であり、仮想物体に対する接触感の呈示は有効な活用法となると考える。例えば、複合現実感システムとして、実空間がシースルーで見えている際に、重畳された仮想のユーザインタフェースオブジェクトを操作する状況に適している。多くのウェアラブルVRシステムでは、ユーザが仮想メニューを選択しようとメニューの存在領域内に手を差し伸べても反力フィードバックはなされない。このため、メニューを選択したという体感を得ることはできず、他のモードからのフィードバックとして、仮想オブジェクトのハイライト表示や色変化あるいはビープ音により代替されるのみである。本論文で提案するGyroTouchのウェアラブルVRに対する適用として、実装部を次章で、インタフェース部とユーザビリティ評価実験について5章で詳述する。

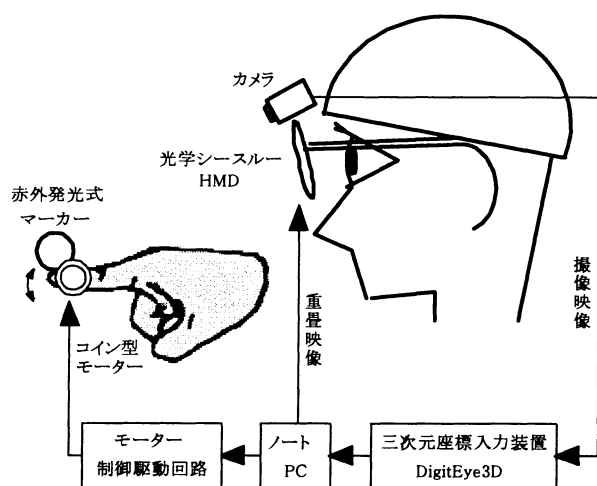


図4 システム構成

Fig.4 System architecture



図5 頭部装着部 (HMDと3次元座標入力装置)

Fig.5 Wearting HMD and 3D positioning camera

4. ウェアラブルVRシステム

4.1 システム構成

試作したウェアラブルVRのシステム構成を図4に示し、頭部に装着する機器の外観を図5に示す。VGA分解能の光学シースルーHMD (ソニー製PC Glasstron) をノートPCに接続し、仮想オブジェクトを光学重畳する。ユーザにはHMDとともに、光学式3次元座標計測の入力センサとなる小型CCDカメラが設置されているヘルメットを装着する。光学式3次元座標入力装置には、指先に装着した赤外線発光マーカーの画像中の位置と、マーカーの画像中の面積(マーカーの遠近で投影面積が大小する)による奥行き情報からマーカーの3次元座標を計測する関西新技術研究所製DigitEye3D^[8]を用いた。

ノートPCは、今回はPentiumIII 500MHzのThinkPad1157をWindows 98環境で利用した。PCと3次元座標入力装置並びにモーター制御駆動回路とはシリアル接続している。

HMDを除いた機器一式を市販の背負いバッグに入れ、そのまま背負うことでウェアラブルVRシステムとなる。いずれの機器も大電力を消費するものではなくバッテリー駆動が可能であるが、実験の利便性のために、商用電源を主とし、ACコードを引き回すような形態の実装を行った。

4.2 キャリブレーション

本手法では光学シースルーHMDを利用し、ユーザはシースルーの自分の指先とHMDにより重畳された仮想物体の両方を見ながら作業する。このため実空間とHMDの座標系との間でキャリブレーションが必要である。本システムでは、指先位置は頭部に装着している3次元位置検出カメラで計測するので、指先の3次元位置はこのカメラに固定した座標系で求める。キャリブレーションは、3次元位置検出カメラとHMDを装着した状態で、以下の手順により行う。

- (1) HMD上に表示された9つの点各々に対し、順次HMDを通して見える指先が重なるように、指先の奥行きを変えながら各点につき5回(計45回)、指先の3次元座標と、HMD上に表示された点の2次元座標データを取り込む(図6)。
- (2) 奥行きを変えつつ得られた5個の3次元座標は一本の視直線をなし、9本の視直線の交点としてカメラ座

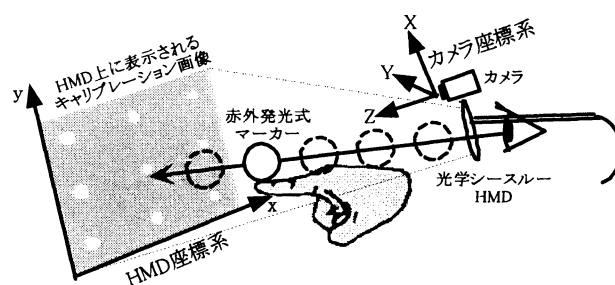


図6 座標キャリブレーション

Fig.6 Coordinates caribration

標系の原点が求まる．次にマーカー中心座標から視線方向が求まる．任意の座標系に対する画像上の点の対応関係は，カメラパラメータを用いて（式1）のように表現することができる^[12]．

$$h \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (式1)$$

カメラパラメータはそれを整数倍しても効果は同じであるため c_{34} を1とし，また（式1）から得られる3つの方程式から h を消去することで（式2）が得られる．

$$\begin{aligned} c_{11}X + c_{12}Y + c_{13}Z + c_{14} - c_{31}X - c_{32}Y - c_{33}Z &= x \\ c_{21}X + c_{22}Y + c_{23}Z + c_{24} - c_{31}X - c_{32}Y - c_{33}Z &= y \end{aligned} \quad (式2)$$

この方程式の未知数が11個であるので， (x, y) ， (X, Y, Z) の対応付けが6点以上について得られれば，（式3）のような方程式を解くことによりカメラパラメータ $c_{11} \sim c_{33}$ を求めることができる．ここでは，精度向上のため45個のデータを対応付けとして利用した．

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1x_1 & -Y_1y_1 & -Z_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1x_1 & -Y_1y_1 & -Z_1z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_nx_n & -Y_ny_n & -Z_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_nx_n & -Y_ny_n & -Z_nz_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ c_{13} \\ c_{14} \\ c_{21} \\ c_{22} \\ c_{23} \\ c_{24} \\ c_{31} \\ c_{32} \\ c_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (式3)$$

ただし，（式1）において h は媒介変数， (X, Y, Z) はカメラ座標上の指先位置， (x, y) はHMD上の2次元位置， $c_{11} \sim c_{34}$ は中心投影カメラパラメータ，（式3）において $n=45$ ， (X_n, Y_n, Z_n) は（1）で取り込んだ45個のカメラ座標上の指先位置， (x_n, y_n) はそれらに対応するHMD上での2次元位置である．

（3）（式2）を， $Au=v$ とおくと， $u=(A^T A)^{-1} A^T v$ の計算（最小二乗法）でカメラパラメータを求めることができる．ここまでは，事前に行う処理である．

（4）本システム操作時には，（式1）を用い指先位置を仮想空間（HMD）座標に変換し，ユーザインタフェースオブジェクトとの干渉を計算する．

5. 仮想メニュー選択のユーザビリティ評価

5.1 実験目的

HMD上に表示された仮想ボタンを操作するためのアプリケーションを用いてユーザテストを行い，GyroTouchの評価実験を行った．一対比較法を用いて，ボタンを押したことをボタンの色変化のみによってフィードバックする（反力によるフィードバックがない）場合，およびGyroTouchによりさまざまな触覚フィードバックを提供する場合をそれぞれ比較することにより，トルクによるフィードバックの有効性およびトルクによるフィードバックの種類に対する人の知覚の違いや特性を調査した．実験では，仮想ボタン操作に関する4つの評価項目（Q1～Q4）について，GyroTouchのモーター回転との対応付けを変えながら評価した．

Q1: ボタンの存在感の大きさ

Q2: ボタンを押したという感覚の強さ

Q3: ボタンを押せたかどうかの信頼感

Q4: ボタンを押したときの硬さ

5.2 仮想ボタン操作とモーター回転の対応付け

GyroTouchでは，ある操作に対するモーター回転の“向き”と“有無”を組み合わせた計4種類のフィードバックを，表1に示すような仮想ボタン操作とモーター回転と対応付けることができる．各フィードバックについて視点から人差し指までの距離とモーター回転制御の関係を図7に示す．

5.3 手順

図8に評価実験で用いた呈示画面を示す．実験では，ボ

表1 仮想ボタンとモータ回転の対応付け

Table 1 Reaction patterns on virtual button

	FB0	FB1	FB2	FB3	FB4
ボタンを押す手前 ($z < z_{TH}$)	なし	なし	なし	上向回転	下向回転
ボタンを押し込む ($z \geq z_{TH}$)	なし	下向回転	上向回転	下向回転	上向回転
反動トルク	なし	下向	上向	下向	上向
反力持続時間	なし	短い	短い	長い	長い

z : 視点からユーザの人差し指までの距離

z_{TH} : 視点から仮想ボタンまでの距離

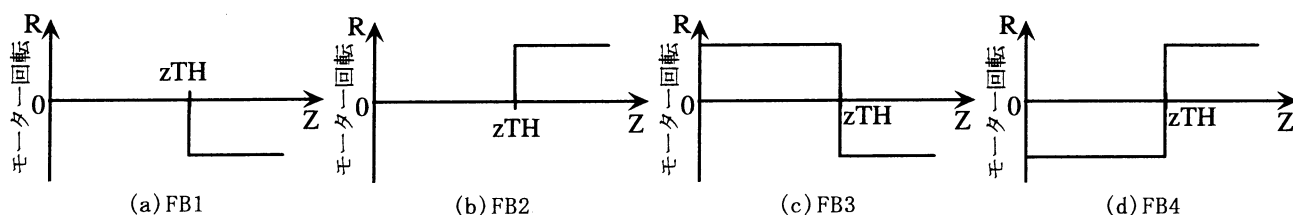


図7 ボタン押下とモーター回転制御

Fig. 7 Pushing button and inertia reaction of coin motor

タンを押した際のボタンの色変化によるビジュアルフィードバックも呈示する。ビジュアルフィードバックについては、実験中ディスプレイ上の仮想ボタンは、

(視点から人差し指までの距離) $\geq$

(視点から仮想ボタンまでの距離: z_{TH})

となったときに色を変化させる。

トルクによるフィードバックがなく仮想ボタンの色変化のみ呈示する仮想ボタンFB0とFB1～FB4のトルクフィードバックがある仮想ボタンの計5種類を二つずつ対にしてユーザに呈示した後、自由に操作してもらい、どちらの仮想ボタンの操作がQ1～Q4の評価項目によく当てはまるか回答してもらった。また実験後、二つの仮想ボタン操作感の違いについて自由回答してもらった。

5.4 結果

22～32歳、8名の被験者に対して行った各評価項目の実験結果を一对比較法により解析した結果を図9に示す。

実験結果より、トルクによるフィードバックがある場合の方が、トルクによるフィードバックがない場合よりも、すべての項目について著しくよい評価結果が得られており、特にトルクによるフィードバックは「存在感(Q1)」を強く感じさせていることが分かる。次に、4種類のフィードバックを比較すると、ボタンの接触面の前にあらかじめモーターを回転させておき、それを急逆転させる場合(FB3, FB4)に、より存在感・信頼感・ボタンの硬さを強く感じていることが分かる。被験者からの自由回答でも、「トルクが切り替わるときに得られる指への感覚が、実際にボタンを押すときの感覚と似ている」「特に目をつぶったときには、仮想物体の存在とそのボリューム感がこの反力によってしっかり体感できる」「コマの向きが切り替わる場合に最もボタンの硬さを感じる」など、仮想ボタンの存在感を感じたという意見が得られている。またボタンを押し込むときのフィードバックとして上向きのトルクを返す場合(FB2, FB4)には、ボタンの接触面の抵抗を感じ、下向きの反力を返す場合(FB1, FB3)には、ボタンを

軽く押せるように感じるという意見が得られた。図9からFB2, FB4のフィードバックを用いる場合の方がボタンを硬く感じていること、反力持続時間が長い場合により硬く感じる事が分かる。

5.5 考察

5.4の実験結果から、GyroTouchを用いることで仮想ボタン操作の“存在感”、“信頼感”、“ボタンを押す感覚”、“ボタンの硬さ”のいずれの感覚も良好に与えることができることが分かった。接触面の前後でモーターがオフの状態からオンにするよりも、接触面の前にあらかじめモーターを回転させておき、接触面で逆転させる方がトルクを与える時間が長くなり、存在感や信頼感、ボタンの硬さなどを強く感じる事が分かった。ボタンを押し込む際に与えるトルクの向きにより、上向きの場合はボタン面に触れる触覚やボタンの硬さ、逆に下向きの場合はボタンの押し込みやすさや軽さを感じる事、指にかかるトルクの大きさが大きいほどこの感覚が大きいことを確認した。ただし実験では、トルクの向きの違いを感じるユーザと感じないユーザに分かれた。トルク変化が大きい場合(FB1とFB2を比較)8人中4人の被験者が、トルク変化が小さい場合(FB1とFB2を比較)6人の被験者がトルクの向きの違いは気づきにくいと答えた。

また本実験では主にボタンを押す感覚について調査したが、ユーザの自由回答では「ボタンから指を離す場合についての検討も重要である」という指摘があった。

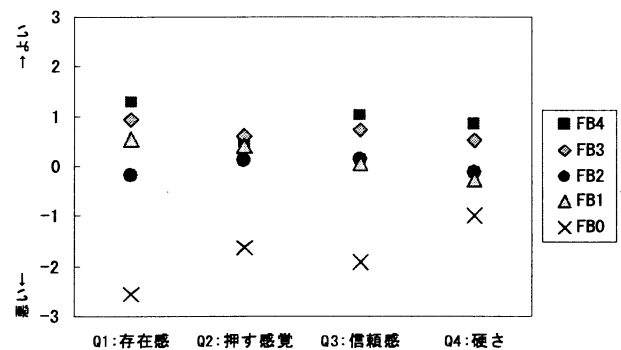


図9 一对比較法による評価結果

Fig.9 SD method result of experiment

表2 自由回答結果

Table 2 Result of free answer

トルクが切り替わるときに得られる指への感覚が、実際にボタンを押すときの感覚と似ている	2人
特に目をつぶったときに、仮想物体の存在を感じる	2人
ボタンから指を離す場合についての検討も重要である	2人
上向きのトルクを返す場合(FB2, FB4)には、ボタンの接触面の抵抗を感じ、下向きの反力を返す場合(FB1, FB3)には、ボタンを軽く押せるように感じる	2人
モーターによるフィードバックがあるとわかりやすかった	1人
コマの向きが切り替わる場合に最もボタンの硬さを感じる	1人

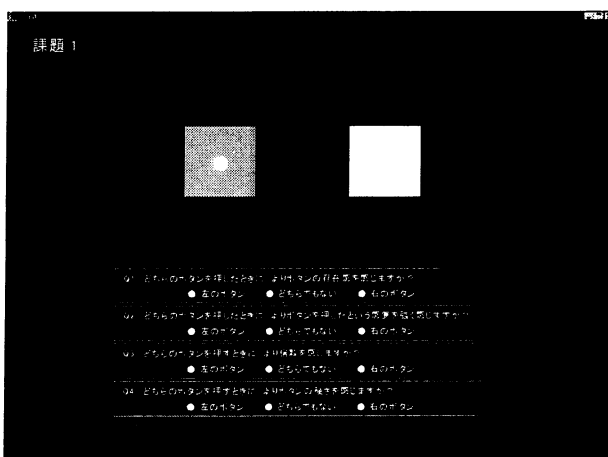


図8 実験画面

Fig.8 Display of experiment

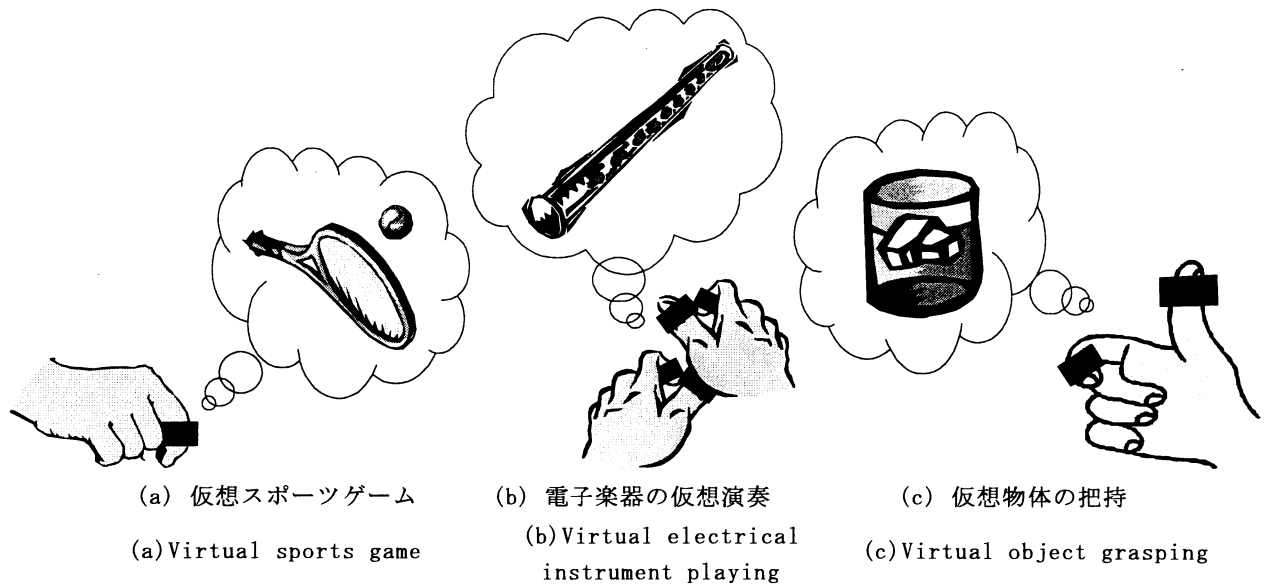


図10 GyroTouchの応用例

Fig.10 Promising applications of GyroTouch

6. 本システムの応用

GyroTouchには以下のような特徴がある。

- ・指に瞬間的な反力を加えることができる
- ・小型軽量であり，携帯・装着が容易である
- ・コインモーターに流す電流の向き，すなわち反力フィードバックを簡単な電流アンプで実装できる

よって，環境側に機器を必要とせず小型かつ自立的に反力フィードバックを指先に施せる点がGyroTouchの最大の特長であり，反力フィードバックがウェアラブルな環境で必要となるケースが最も有効な応用先と考えられる。例えば，以下のような動作及びアプリケーション例がGyroTouchに適していると想定することができる。

(a) 仮想物体の打撃操作（図10(a)）

仮想のテニスやピンポンゲームなどにおいて，飛んできた仮想物体をはね返す際に反力フィードバックを与える。トルクのオンオフにより，球を受けたときの衝撃を，またコインモーターに流す電流量を変化させることで球速感も指に呈示することが期待できる。

(b) 仮想物体の押し下げ操作（図10(b)）

簡単な電子楽器の演奏における反力フィードバックとして利用することが考えられる。すべての指にコインモーターを装着し，ユーザが仮想のボタンやキーを押し下げたときに，その指を押し返す方向にトルクを返すことで，簡単な電子楽器のボタンやキーを押す感覚を指に呈示することができる。

(c) 仮想物体の把持操作（図10(c)）

GyroTouchを親指と人差し指の2本の指に装着することにより，仮想物体を把持する瞬間の物体表面への接触感を呈示する反力フィードバックとして利用することが考えられる。ただし，GyroTouchは，物体を持つ瞬間の触覚

感を呈示することはできるが，物体を持ち続けているというような静的な把持感覚を呈示することはできない。

7. まとめ

本論文では，ウェアラブルなハプティックインタフェースとして開発したGyroTouchについて述べた。指先に小型のコイン型モーターを装着し，従来にはみられなかった指先への反力フィードバックを実現した。GyroTouchはモーターの反動トルクを利用したものであるため，ロボットアーム式のように静的な反力を与え続けることは難しいが，仮想物体の表面に接触した際の接触感をユーザに呈示することができた。

並びに，GyroTouchの有効性を示すために，ウェアラブルVRシステムを構築し，光学シースルーにおける仮想メニューの選択性を評価した。GyroTouchの利用により，ユーザインタフェースのパフォーマンス指数が大きく向上しており，有効性が確認できた。しかしこの定量的な結果よりも，「特に目をつぶったときには，仮想物体の存在とそのボリューム感がこの反力によってしっかり体感できる」というユーザのインタビュー結果こそ，体感デバイスとしての評価として有効と考える。

現在モータードライバの簡略化のため回転のオンオフ制御しか行っておらず，反力の強さを2レベルでしか与えていないが，回転数制御とモーターの起動特性を把握することができれば，反力のレベル制御が可能と思われる。

今後は，コイン型モーターを直交に据え，任意方向への反力呈示を試みたい。

謝辞

本研究は，日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業

(JSPS-RFTF99P01404)の補助を受けた。

参考文献

- [1] 矢野, 小木, 廣瀬: 振動子を用いた全身触覚提示デバイスの開発; VR論, Vol. 3, No. 3, pp. 141-147 (1998).
- [2] 横小路, 河合, 吉川: 振動と教師視覚提示を用いた運動技能伝達法の提案と基礎実験; VR論, Vol. 4, No. 2, pp. 431-438 (1999).
- [3] 吉川, 菊植: 陣原から人間への技能伝達のための指先圧迫帰納を付加した力覚提示装置; VR論, Vol. 5, No. 1, pp. 803-809 (2000).
- [4] 金川, 清川, 竹村, 横矢: 手の動作計測遅延が仮想物体の操作性に与える影響; VR論, Vol. 4, No. 3, pp. 563-572 (1999).
- [5] 北村, 野間, 宮里, 岸野: 視覚と力覚のフィードバックを利用した仮想物体操作補助; 信学論, Vol. J80-D-II, No. 1, pp. 256-266 (1997).
- [6] Virtual Technologies, Inc., CyberTouch, <http://www.immersion.com/products/3d/interaction/cybertouch.shtml>
- [7] Virtual Technologies, Inc., CyberGrasp, <http://www.immersion.com/products/3d/interaction/cybergrasp.shtml>
- [8] 金森, 片寄, 井口, 戸島, 西山: モーションキャプチャ「DigitEye3D」の実装; 信学論, Vol. J81-D-II, No. 5, pp. 804-809 (1998).
- [9] 広田: 仮想空間における触力覚提示技術; ヒューマンインタフェース学会論文誌 Vol. 1, No. 4, pp. 19-23 (1999).
- [10] 佐藤, 猿渡, 石井, 平田, 河原田: 仮想作業空間における力覚提示の有効性; 信学論, Vol. J77-D-II, No. 8, pp. 1656-1662 (1994).
- [11] 岩山: ビル・ジョイの冒険—ネットワークをコンピュータにした人々; コンピュータ・エージ社 (2001).
- [12] 井口, 佐藤: 三次元画像計測; 昭晃堂 (1990).

(2001年7月31日受付, 2002年1月9日再受付)

著者紹介

木村 朝子 (正会員)



平成10年大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。現在、同大学基礎工学研究科助手。ヒューマンインタフェース, ハプティックインタフェース, 適応型インタフェースの研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, ACM各会員。

佐藤 宏介



昭和60年大阪大学基礎工学部修士課程修了。同大学の助手, 講師, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授を経て, 現在, 大阪大学大学院基礎工学研究科助教授。仮想現実感, 三次元画像計測, イメージ情報処理の研究に従事。昭和63年-平成2年カーネギーメロン大学ロボット工学研究所客員研究員。昭64篠原記念学術奨励賞受賞。電子情報通信学会, VR学会, IEEE他各会員。工学博士。