

基礎論文

疑似力覚によるねじりトルク感覚の増強

吉田晃順^{*1} 矢野博明^{*2} 岩田洋夫^{*3}

Enhancement of the Sense of Torsional Torque

By Using a Haptic Interface with Pseudo-Haptic Rendering

Teruyuki YOSHIDA^{*1} Hiroaki YANO^{*2} and Hiroo IWATA^{*3}

Abstract --- This paper describes a Pseudo-Haptic rendering method for presenting torsional torques with a haptic interface. The pseudo-haptic torque is calculated based on a motion equation of a virtual object, which includes a viscous resistance when the virtual object is rotated. We have developed a one degree-of-freedom haptic interface equipped with a DC servomotor and a rotary encoder as a prototype system. Through experiments for comparing the pseudo-haptic rendering method, real haptic method, and, combination of these haptic rendering methods, effectiveness of the proposed method was verified.

Keywords: Pseudo-Haptic, Torsional Torque, Enhancement

1 はじめに

力覚提示装置の研究は近年盛んに行われ、現在では一部商品化に至っている。しかしながら、コスト、体積などが理由で世間一般にはあまり広まっていない。そこで、著者らは一般に受け入れやすいよう自由度を減じ、小型化、低コスト化されたマウス型 1 自由度力覚提示装置を開発した[1]。この装置の実験より、自由度を減じた装置であっても、映像を同時に提示することにより、バーチャル物体の形状をユーザに提示することが可能であることが示されている。しかし、自由度を減らした影響で、高自由度の力覚提示装置と比べると、バーチャル物体の知覚の際に、辺や角において違和感を覚える事が分かっている。

一方、ユーザインターフェースの操作量に対して、ポインタの移動量を意図的に変化させることにより力覚を

錯覚させる疑似力覚がある。筆者らは低自由度の力覚提示装置と疑似力覚を用いれば、小型、低コストの力覚提示装置であっても、減じた自由度を補うことが可能と考えている。

ところで、例えばステレオなどのポリウムやドアノブを回す際の抵抗など現実世界の力覚をよりリアルに再現するためには回転力も含めた 6 自由度が必要である。しかしながら、並進力の疑似力覚提示に関する研究は行われているが、回転力の疑似力覚提示に関する研究についてはほとんど行われていない。これらを疑似的に提示すること(図 1)が出来れば、PHANTOM OMNI[2]など並進の 3 自由度のみで、回転はセンサ入力のみで力覚提示装置でも 6 自由度の力覚を提示することが可能となる。また、HapticMaster[3]のような 6 自由度力覚提示装置も提示できる力覚強度に限りがある。これに疑似力覚を付加することで本来の提示能力を超えた力覚強度を提示できる可能性もある。

そこで、本研究では、1 自由度の力覚提示装置を力覚無し動作入力装置として用い、マグニチュード推定法および指先の圧力の変化の評価実験により、疑似力覚が生じることを検証した。さらに、実際の力覚提示に疑似力覚を付加することで本来の提示力よりも知覚される力覚強度を増強できると考え、その提示手法の可能性を検証した。

2 関連研究

疑似力覚(Pseudo-Haptic)は、体運動と相関性の高い視覚情報のみで力覚が生起する錯覚である。運動情報の視覚情報への反映を変化させることにより疑似的感覚を提示可能であることが知られている[4]。

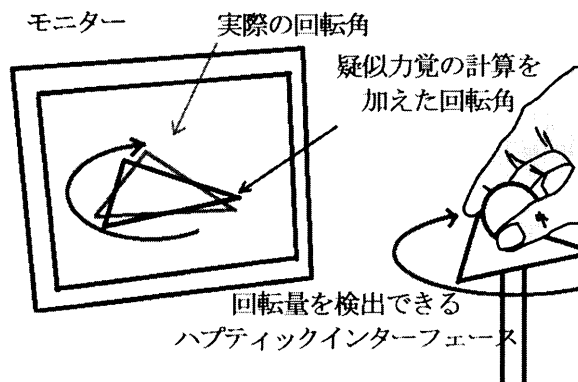


図1 ねじりトルクの疑似力覚表現

Fig.1 Representation of Pseudo-Haptic for torsional torque

*1*2*3 筑波大学

*1*2*3 Tsukuba University

疑似力覚には直接指示型と間接指示型がある。直接指示型はタッチパネルのように指示部を直接操作する方式である[5]。タッチパネルは操作部である指先と指示部であるポインタが完全に一致しているために操作部の移動量に対する指示部の移動量を変化させることはできない。そのため、力覚を提示するためには操作部の動きに遅延を加えたものを指示部として表示、もしくは操作部が動く先に先行して指示部を表示させる方法で行う。もう一方は、間接指示型はマウスのように操作部と指示部が一致していないインターフェースを使う方式である。こちらの方式では主にユーザの入力インターフェースの変位と、PC内画面上のポインタの変位の間の比率（C/D比：ユーザの入力インターフェースの変位（Control:C）/ PC内画面上ポインタの変位（Display:D）の比率）を変化させる方法（図2）などを使う[6]。C/D比を操作することにより摩擦力や質量を疑似的に提示可能となる。さらにPCの画面上に表示されるテクスチャに応じて、カーソルのサイズを変更する方法を加えることにより、テクスチャ上の山や谷の形状の特定がより効率的になったという実験結果も報告されている[7]。

紹介したいいずれの方法も、並進方向の疑似力覚提示方法について述べられているものばかりであり、回転方向については、記述されていない。そこで、著者らは回転方向疑似力覚提示手法として、3章で述べる手法を提案し、その手法の有用性及び、実際の力覚提示装置との組み合わせについて研究を行った。

3 ねじりトルクの疑似力覚計算

3.1 計算方針

本研究では疑似力覚を生起させる手法として、物理法則に基づいてC/D比を変化させる手法を提案する。これは、より現実に近い表現をする為、物理計算に基づいた方法が一般化しやすいと考えたからである。本研究では、研究の第一段階としてバーチャルな回転ボリュームの回転させるにくさを制御することを考えた。なお、物理法則として摩

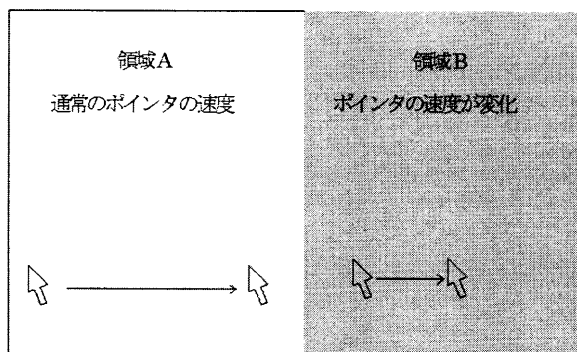


図2 摩擦の疑似力覚提示手法

Fig.2 Typical method of generating pseudo Friction

擦の導入も考えられるが、場所や時刻によって移動量を制限すると、前述のCとDの間に定常偏差が残る場合がある。その場合、把持部を初期位置に戻した時に、画面上のバーチャル物体は初期位置に戻らず、操作上不便である。そこで、映像としてバーチャルな円環とユーザの指先の間の粘弾性を慣性とバネ・ダンパを用いて表現し（図3）、操作後しばらくすると定常偏差がなくなるモデルを用いた。これよりユーザの動作に合わせてC/D比を動的に変化させることで、ねじりトルクの疑似力覚提示を実現した。

3.2 慣性計算

円環の運動の導出方法として、物体の慣性モーメント I 、角加速度 α 、力モーメント M の関係式(1)を使用する。円環の慣性モーメントは、円環の質量を m 、半径 r とすると式(2)で表される。バネ・ダンパを介して指先から円環の外周に加わる力を F とすると、力モーメント M は式(3)、 F は式(4)で与えられる。ただし、 K はバネ定数、 D はダンパ係数、 v は角速度、 β は装置把持部の回転角度、 β' はバーチャル物体の回転角度である。回転角度の初期状態は $\beta = \beta' = 0$ である。

式(1)から式(4)より α は式(5)となる。 α を積分することで、次時刻の角速度 v 及び、回転角度 β' を決定する。

実験ではバネ定数 1.0、ダンパ係数は質量に比例した値を使用した。（例：質量 0.2kg の時ダンパ係数 0.2、質量 1.0kg の時ダンパ係数 1.0）ダンパ係数を固定値にすると、高質量の円環モデルの時に振動が発生する為、個々に異

$$\begin{aligned} I \alpha &= M & (1) \\ I &= m r^2 & (2) \\ M &= r F & (3) \\ F &= K(\beta - \beta') + (vD) & (4) \\ \alpha &= \frac{K(\beta - \beta') + (vD)}{m r} & (5) \end{aligned}$$

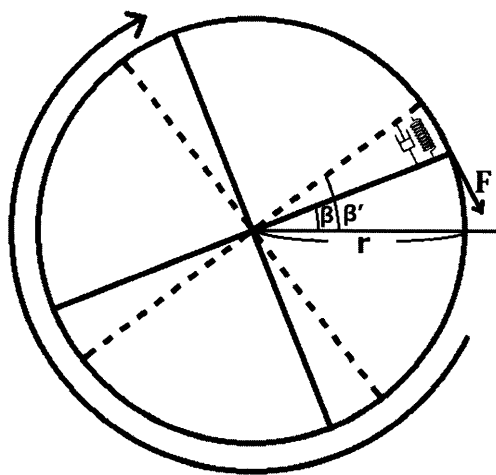


図3 円環モデル

Fig.3 Circumplex model

なる値とした。

4 システム構成

4.1 概略

本研究で使用したシステム(図 4)は、DC サーボモータによる力覚提示部、ロータリーエンコーダを用いた回転量検出部、把持部に加わる把持力を計測する圧力計測部、制御基板を用いた制御部、映像生成及び疑似力覚計算を行う PC(OS Windows7 Professional 64bit CPU IntelCorei7 950)から成る。映像提示は LG 製液晶ディスプレイ FLATRON W2363D を使い、ストロボ効果が起こりにくいリフレッシュレート 120fps で表示した。

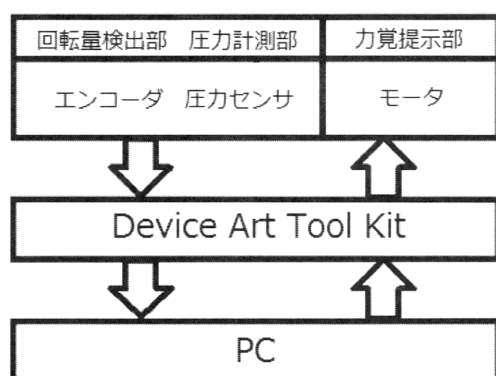


図4 システム構成

Fig.4 System configuration

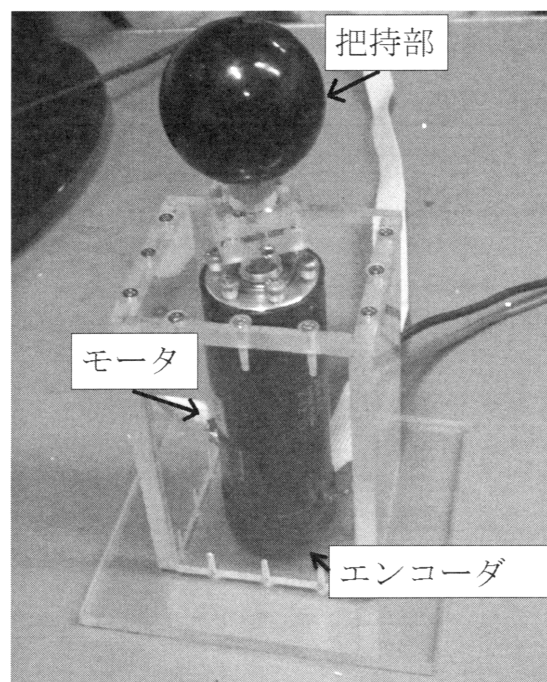


図5 力覚提示装置

Fig.5 Haptic interface

4.2 力覚提示及び角度検出部

力覚提示部(図 5)はモータを垂直に設置し、モータ軸に直径 33mm の球状の把持部を取り付けた。DC サーボモータには、maxon 製 DC motor RE30 シリーズ 268214(最大連続トルク 85.0 mNm)、回転角度計測用ロータリーエンコーダには 2 相インクリメンタル方式エンコーダ(maxon 製エンコーダ MR TypeL 228456 番 1000ppr)を用いた。

4.3 圧力計測部

疑似力覚の生起を定量的に計測するために、把持部に圧力センサを取り付けた。

圧力センサは、ニッタ株式会社製圧力センサ FlexiForce を用いた。3 つの FlexiForce を球状の把持部の赤道上の親指、人差し指、中指が接触する場所に貼り付け、各指と把持部の間に生じる圧力を測定した。なお、圧力センサの配線は、装置本体と干渉しない様、腕に紐で括り付けた(図 6)。

4.4 制御部

制御部には筆者らの研究室で開発された Device Art Tool Kit [8]の中から、モータトルク制御およびセンサ値読み取り用の MCD05 基板(マイクロコントローラはマイクロチップ社製 dsPIC30F4011、モータドライバは ST マイクロエレクトロニクス社製 L6201PS)と、PC の通信中継用にシリアル通信モジュール基板(SC02 基板:マイクロコントローラはマイクロチップ社製 dsPIC30F4011、USB インターフェース IC は FTDI 社製 FT245RL)を用いた。モータのトルク出力値は 2048 段階で制御可能である。力覚提示部の力覚データ更新周波数は約 2300Hz であった。

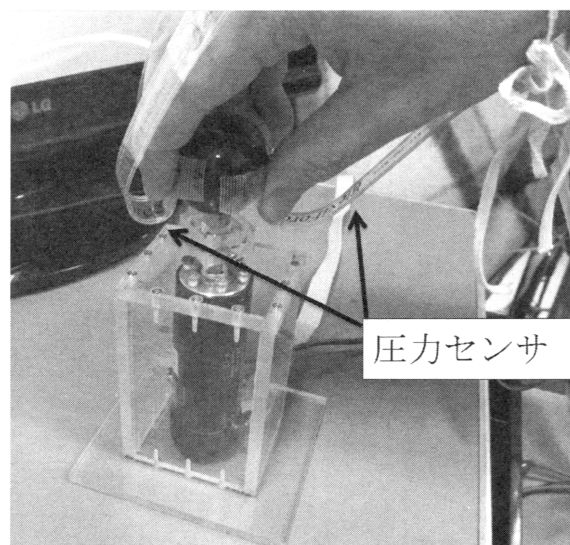


図6 圧力センサ取付方法

Fig.6 How to mount pressure sensor

5 予備実験

5.1 実験内容

本実験において使用するバーチャルな円環の質量を決定するための予備実験を行った。

22 歳から 24 歳までの平均年齢 23 歳の健康な成人男性 5 名の被験者に 0.1 kg, 0.2 kg, 0.5 kg, 0.7 kg, 1.0 kg の異なる質量の疑似力覚表現に触れさせ、感じる力覚の強度について、

「1, 全く感じない」から「5, かなり感じる」

の 5 段階主観評価を行った。この時、力覚提示装置はモータ出力を行わないものとした。提示する質量の順序はランダムとし、5 つの質量の疑似力覚表現に触れる試行を 3 セット行った。

また、適切な表示図形についての実験を行った。表示図形は十字、三角形、点を円状に配置したものの三種類を用意し、それぞれ同質量(0.5 kg)の疑似力覚表現について 5 人の被験者に触れさせ、感じる力覚の強度について

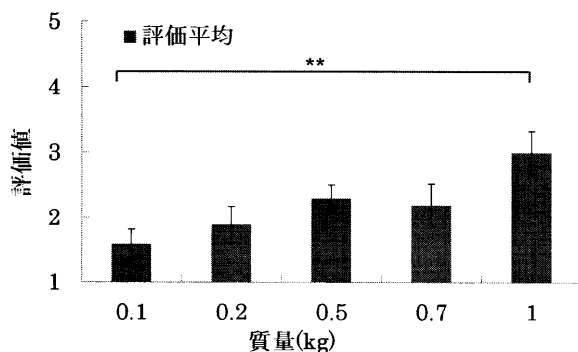


図7 予備実験の結果

Fig.7 Result of preliminary experiment

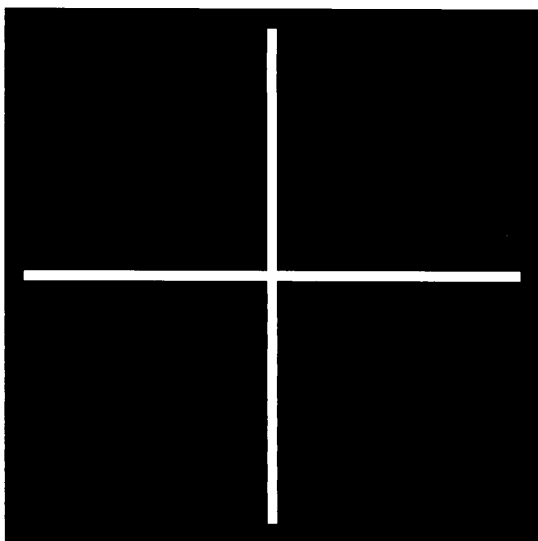


図8 十字の表示図形

Fig.8 Appearance of the cross on the display

「1, 全く感じない」から「5, かなり感じる」

の 5 段階主観評価を行った。力覚提示装置のモータ出力は行わないものとし、提示する図形の順序はランダムとした。3 つの図形の疑似力覚表現に触れる試行を 3 セット行った。

5.2 実験結果

統計解析ツールはエクセル統計 2007 を使用し、検定力分析ツールは G*Power3.1 を使用した。本論文の以降の解析においても同ツールを使用した。

異なる質量の疑似力覚表現の実験により求められた評価値を分散分析及び Scheffe 法による多重比較検定の結果を図 7 に示す($F(4,70)=3.535$, $MSe=0.7778$, $p<0.0136$) ($\eta^2=0.2391$, $p<0.050$, $ES:f=0.5606$, $1-\beta=0.8702$)。図 7 の実験時の表示図形は十字(図 8)である。横軸の質量の単位は kg であり、「**」は 1% 有意を表す。質量が増加するにつれて主観評価値も右肩上がりに増加したが、質量の間隔が大きい 0.1kg と 1.0kg の間だけに有意差があった。このことから、1.0kg までの質量間隔では実験のデータとして少ないことが考えられる。そこで、1.0kg 以上の 2.0kg, 3.0kg の質量についても本実験では行った。また、3 回の施行は休憩なしで行ったが、1 度目の施行に比べ 3 度目の施行は、疑似力覚を知覚しづらくなる傾向が見られた。手のマッサージ行為や、画面を注視しなくなる面が観測されたことから、疲労や集中量の低下が原因と考えられる。

質量の間隔が小さい 0.1kg, 0.2kg の間では有意差が現れなかった原因として、単純に知覚強度に差が無かった事、力覚強度を 5 段階に制限した事などが考えられる。6, 7 章の本実験ではマグニチュード推定法により力覚強度の段階を制限しない手法を使う為、知覚強度の差の有無を調べる事が可能と考えられる。しかし、試行回数が多いと疲労や集中力の低下が予想される為、質量の間隔の最低値は 0.1kg ではなく 0.2kg とした。また、試行回数を減らす為、1.0kg 以上の値は質量の間隔を 1.0kg とした。

異なる表示図形の疑似力覚表現の実験より、評価の平均値は十字が最も高い数値となったが、分散分析及び Scheffe 法による多重比較検定の結果、有意差は現れなかった($F(2,41)=0.7648$, $MSe=1.874$, $p<0.4752$) ($\eta^2=0.0757$, $p<0.050$, $ES:f=0.2861$, $1-\beta=0.2446$)。これにより、表示図形による差異は無いと考えられる。そこで 6, 7 章の実験で使用する図形を、平均値が一番高かった十字の図形(図 8)とした。

6 疑似力覚生起の評価

6.1 マグニチュード推定法による評価実験

慣性の計算による疑似力覚表現で疑似力覚による、刺激と感覚量の関係を明らかにするために、マグニチュード推定法による実験を行った。

本実験の疑似力覚提示刺激としては、単純化のため画面

法線方向を Z 軸としたときのヨー回転のみを 2 次元 CG(図 8)で表示した。入力デバイスは力覚提示装置であるが、モータのトルク出力命令は常時ゼロとした。

実機での提示疑似力覚の刺激条件としては、バーチャル円環の質量をゼロとした把持部の回転角度と同じ回転角度となる「力覚なし」と、式(5)の各パラメータとして半径を 0.2m, 質量を 0.2kg, 0.4kg, 0.6kg, 0.8kg, 1.0kg, 2.0kg, 3.0kg とした 7 種類の「疑似力覚」、計 8 条件とした。

実験では、被験者が 0.2kg の質量で回転動作をしている状況から、ランダムなタイミングで他の 7 種類の状態に変化させた。この時、0.2kg の質量表現での抵抗力を 200 として、変化後の強度を 0 から上限なしの数値で被験者に回答させた。なお、各試行における回転動作は表示図形がおおよそ 90° 回転する毎に回転方向を反転させる動作とし、被験者に各試行を 10 秒間ずつ行わせた。回転速度の制限は特に行わなかった。予備実験より、疲労や集中力の低下が実験に影響を及ぼす可能性があったこと、比較的日常的に行う動作であることから、実験を短時間で終了させる為に習熟は行わず、実験内容を説明付きで一度体験させた後、すぐ本実験を行った。

被験者は 22 歳から 24 歳までの平均年齢 23 歳の健康な成人男性 6 名である。球状の把持部を親指、人差し指、中指で握ませ、各試行が 3 回ずつになるようにランダムな順序で実験を行った。なお、実験中はなるべく疲労が実験結果に影響しないようにするため、腕を肘掛に置かせた。

6.2 実験結果

マグニチュード推定法による結果を元に円環の質量と疑似力覚強度の関係式を求めた。近似式のフィッティングは、1.スティーヴンスのべき法則の式、2.対数関数、3.指数関数、4.シグモイド曲線、5.1 次関数の 5 種類である。5 種類の関数に対して残差の二乗和が最小になる方程式を Rosenbrock 法により求め、その 5 つの関数の中でも残

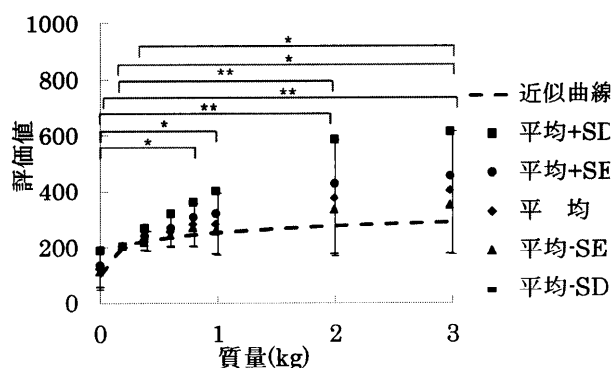


図9 マグニチュード推定法での評価値の分散分析と近似曲線

Fig.9 Approximation curves and Analysis of variance of the evaluation value in magnitude estimation

差の二乗和が最も小さいものを近似式とした。最適方程式は、 x を質量[kg], y を評価値としたときに

$$y = 34.08 \times \log(x + 11.06) + 17.57$$

となった(図 9 近似関数)。近似関数が対数関数であることから、質量が小さい時は知覚強度が大きく変化するが、質量が大きくなると変化が知覚しにくくなると言える。質量が大きくなると、把持部を回しているときに、把持部角度と表示されている角度の差が大きくなる。この差が大きすぎると回しているときに空転している感じがすると、実験後にコメントをした被験者がいた。差が一定以上になると把持部と映像上の物体とが一体である感じがしなくなったことが原因であると考えられる。

また、図 9 にマグニチュード推定法により得られた評価値で分散分析及び Scheffe 法による多重比較検定を行った結果を示す。8 種類の質量間で「 $F(7,136)=9.606$, $MSe=1.478 \times 10^4$, $p<1.451 \times 10^{-9}$ 」となる事が比較検定よりわかった($\eta^2=0.3444$, $p<0.050$, $ES:f=0.7248$, $1-\beta=0.9999$)。なお、図 9 の「*」は 5%有意,「**」は 1%有意差の組み合わせである。有意差が多数出たことから、慣性計算時の質量を操作することで、ユーザに異なる力覚強度が提示可能と言える。小質量帯である 0 kg と 0.8 kg の間では、質量差が 0.8 kg で有意差が見られたが、大質量帯である 1.0 kg, 2.0 kg, 3.0 kg の各間では、有意差はなかった。分散分析の結果からも、質量が小さい時は弁別閾が小さく、知覚強度が大きく変化した。質量が大きくなると弁別閾が大きくなり知覚しにくくなったと考えられる。

以上より、円環の質量を変化させることより、ユーザは疑似力覚の強度の差異を知覚できたと言える。ただし、把持部角度と表示されている角度の差を一定以下に抑えることが重要と言える。また、個人毎の知覚強度のばらつきにより標準偏差が大きくなったと考えられる。

6.3 把持力による評価実験

異なる質量の円環モデルによるねじりトルク表現で、疑似力覚強度の差異を知覚可能か客観的に評価する為、把持部に加える垂直抗力の計測による評価を行った。垂直抗力はトルク負荷に対して比例的に増加する[9]ので、疑似力覚により物体の慣性が見かけ上大きくなった場合に把持力が増加すると予測したからである。

疑似力覚提示刺激は、6 章 1 節の実験と同様に、画面法線方向を Z 軸としたときのヨー回転のみを 2 次元 CG(図 8)で表示した。

提示疑似力覚も 6 章 1 節の実験と同様、把持部の回転角度と表示物体の回転角度が全く同じ「力覚なし」と、半径が 0.2m で、質量はそれぞれ 0.2kg, 0.4kg, 0.6kg, 0.8kg, 1.0kg, 2.0kg, 3.0 kg である 7 種類の「疑似力覚」の、合計 8 種類とした。

計 8 種類の条件をランダムな順序とタイミングで提示

し、それぞれ把持部を握る力を圧力センサにより計測した。このとき把持部は親指、人差し指、中指で把持することとし、被験者には表示図形がおおよそ 90° 回転する毎に回転方向を反転させる動作を、各試行 10 秒間ずつ行わせた。なお、説明付きで実験内容を 1 回だけ体験させた後、本実験を行った。

被験者は 22 歳から 24 歳までの平均年齢 23 歳の健康な成人男性 6 名である。圧力計測のタスクを各提示条件の試行回数が 3 回ずつランダムな順序で行った。なお、なる

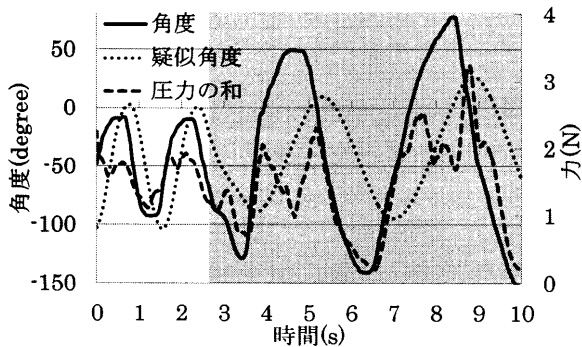


図10 回転角度および圧力の時間変化例

Fig.10 A typical time variations of rotational angle and pressure

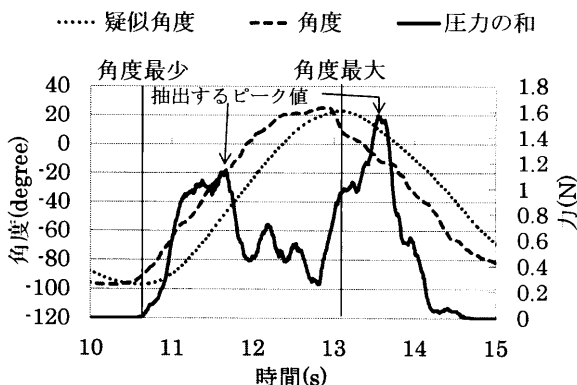


図11 1回転分におけるデータの抽出方法

Fig.11 Data extraction method from one motion.

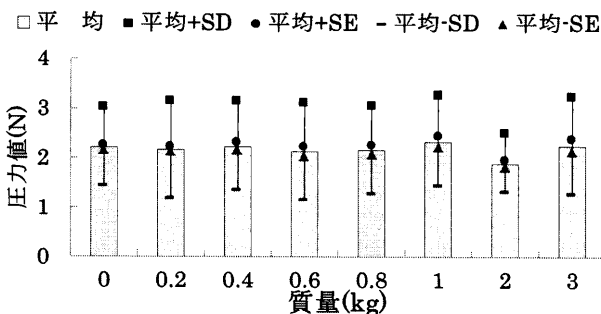


図12 各質量の平均圧力値及び有意差

Fig.12 Average pressure value and significance of each mass

べく疲労がしないようにするため、腕を肘掛に置かせて実験を行なった。

6.4 結果

図 10 に把持部の実際の角度 (図 10: 角度), ディスプレイに表示されている角度 (図 10: 疑似角度), 圧力値 (図 10: 圧力の和) の典型例を示す。図 10 の灰色背景の部分は質量変化後 (図 10 では 0.8kg) の状態を表す。図 10 の圧力の和は、親指、人差し指、中指の圧力値を移動平均によりノイズ除去を行い、3 つの圧力値を加算した。図 10 より、圧力値は表示図形の回転角度 (疑似角度) の増減方向が反転する時及びその直後に大きくなる傾向があった。これは、回転方向を制御するときに疑似力覚による慣性を打ち消すために、被験者が把持部を強く把持したと考えられる。そこで、圧力のピーク値を 8 つの質量別に抽出 (図 11) し、それぞれの質量でのグリップ力の変化を比較した。

抽出したデータについて分散分析及び Scheffe 法による多重比較検定を行った (図 12)。8 つの質量間で「 $F(7,1376) = 1.9079$, $MSe = 2.345 \times 10^3$, $p < 0.0647$ 」となる事が多重比較検定よりわかった ($\eta^2 = 0.0096$, $p < 0.050$, $ES: f = 0.0985$, $1-\beta = 0.7653$)。圧力データによる解析結果から、把持力は各質量ともに有意差無しの結果となった。

7 疑似力覚と力覚提示装置の組み合わせ

力覚提示装置の出力に疑似力覚を付加することで、力覚提示装置単体の出力を超えた出力を実現できる可能性がある [10]。本研究では力覚提示装置の出力に、円環モデルによるねじりトルク表現を組み合わせた環境で、前章と同様の実験を行った。なお、ここでは疑似力覚の効果を検証するために、力覚提示は一定質量で提案モデルを用いた力覚提示 (ベース力覚) とし、疑似力覚提示を上乗せ力覚として視覚提示する方法で比較評価した。

7.1 マグニチュード推定法による評価実験

ねじりトルクの疑似力覚提示とモータ出力を同時に行った際のマグニチュード推定法による力覚強度評価実験を行った。提示映像は、図 8 と同じである。

提示疑似力覚の計算モデルは、半径 0.2m、質量を 0.0kg, 0.2kg, 0.4kg, 0.6kg, 0.8kg, 1.0kg, 2.0kg, 3.0kg とした状態の 8 種類である。

なお、すべての試行におけるベース力覚は質量を 0.2 kg とした力覚モデルに基づくモータ出力を加えた。モータに出力する具体的なトルク $T[mNm]$ は、円環の外周に加わる力 F' は、式 (6) を用いて、回転の中心から力が掛かる位置までの距離 r から式 (7) とした。

ゲインを G とし、実験で使用した具体的な値は式 (8) である。また、力覚提示時のトルクは疑似力覚と連動させず、別途定義した 0.2 kg の円環モデルから算出された角度 β'' を使った。モータ出力による実際の力覚強度の影響を調べる為、ゲイン G は、0.5, 1.0, 1.5 の三種類について

で実験した。実際の出力トルクは、回し方により変わるが、ゲイン $G=0.5$ の時 $0.0 \sim 5.0 \text{mNm}$ 、ゲイン $G=1.0$ の時 $0.0 \sim 10.0 \text{mNm}$ 、ゲイン $G=1.5$ の時 $0.0 \sim 15.0 \text{mNm}$ 程度であった。実験中は把持部を親指、人差し指、中指で掴ませ回転させた。実験は、 0.2kg の疑似力覚表現を行っている状態からランダムなタイミングで他の 7 種類の状態に変化させた。この時、 0.2kg の質量表現を行っている状態の抵抗力を 200 としたとき、変化後の強度を 0 から上限なしの数値で 22 歳から 24 歳までの平均年齢 23 歳の健康な成人男性 6 名の被験者に回答させた。実験は各タスクを各ゲイン毎に 3 回合計 63 試行をランダムな順序で被験者に行わせた。なお、疲労が実験結果に影響しないように、装置を使用中は腕を肘掛に置いて行った。

$$F' = K(\beta - \beta'') \quad (6)$$

$$T = r F' \quad (7)$$

$$T = G \times 200[\text{mm}] \times 1.0[\text{N/mm}] \times (\beta[\text{rad}] - \beta''[\text{rad}]) \quad (8)$$

7.2 実験結果

マグニチュード推定法による結果を元に円環の質量と疑似力覚強度の関係式を 6 章と同じ 5 種類の関数から同じ手法で近似式を求めた。最適方程式は、 x を質量(kg)、 y を評価値としたときに

$$y = 56.19 \times \log(x + 132.0) - 126.2 (G = 0.5)$$

$$y = 136.9 \times \log(x + 705.3) - 732.3 (G = 1.0)$$

$$y = 270.8 \times \log(x + 2.233 \times 10^3) - 1.911 \times 10^3 (G = 1.5)$$

となった。すべて質量に比例して増加する関数となり、さらにゲインに応じて傾きも増加したことから、モータによる力覚と疑似力覚を同時に提示することで、モータのみの力覚を増強することが出来たと言える。図 13、図 14、図 15 の近似曲線を見比べると、ゲインが高まるにつれ近似曲線の形状が直線に近づいていることが分かる。近似曲線の形状比較から、ゲインが弱い時は小質量帯での力覚強度の差異が知覚しやすいが、大質量帯では力覚強度の差異が知覚しにくいと言える。

マグニチュード推定法により得られた評価値を用いて分散分析及び Scheffe 法による多重比較検定を行った。8 種類の質量間で各パラメータは、表 1 のようになった。

表1 圧力データの統計データ

Table 1 Statistical data of the pressure values

G	F	MSe	p	η^2	ES:f	1- β
0.5	F(7,136)= 5.532	2.179 $\times 10^4$	< 1.403 $\times 10^{-5}$	0.2322	0.5500	0.9990
1.0	F(7,136)= 5.666	3.103 $\times 10^4$	< 1.022 $\times 10^{-5}$	0.2365	0.5566	0.9992
1.5	F(7,136)= 6.124	2.274 $\times 10^4$	<3.487 $\times 10^{-6}$	0.2509	0.5787	0.9996

図 13 から図 15 に有意差があったペアを示す。「*」が 5%有意、「**」は 1%有意である。有意差が多数出たことにより、慣性計算時の質量を操作することで、ユーザに異な

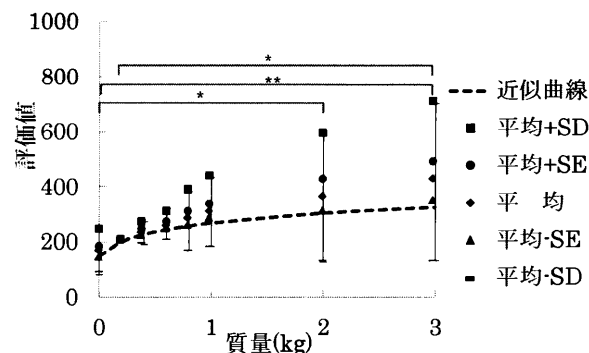


図13 マグニチュード推定法での評価値の分散分析と近似曲線(ゲイン 0.5)

Fig.13 Approximation curves and Analysis of variance of the evaluation value in magnitude estimation (gain 0.5)

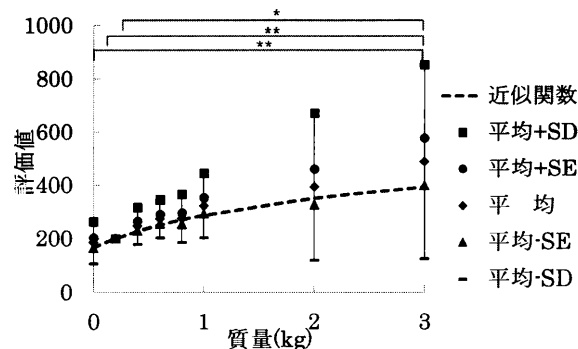


図14 マグニチュード推定法での評価値の分散分析と近似曲線(ゲイン 1.0)

Fig.14 Approximation curves and Analysis of variance of the evaluation value in magnitude estimation (gain 1.0)

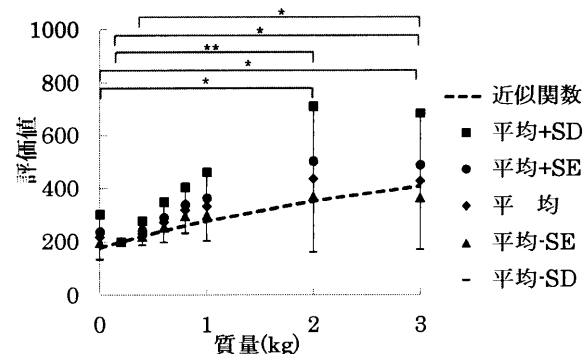


図15 マグニチュード推定法での評価値の分散分析と近似曲線(ゲイン 1.5)

Fig.15 Approximation curves and Analysis of variance of the evaluation value in magnitude estimation (gain 1.5)

る力覚強度が提示可能と言える。

7.3 把持力による評価実験

異なる質量の円環モデルによるねじりトルクの疑似力覚の差異の知覚特性を客観的に評価する為、把持部に加える垂直抗力の計測による評価を行った。

実験は22歳から24歳までの平均年齢23歳の健康な成人男性6名の被験者に、把持部を親指、人差し指、中指で掴ませて、回転動作を行わせた。提示映像は、6章の図8と同一、力覚提示モード、モータに出力するトルクは、7章1節の実験と同一とした。タスクは、はじめに0.2kgの質量表現を行っている状態から、ランダムなタイミングで他の7種類の状態に質量を変化させた。実験中の把持部を握る力を圧力センサにより計測した。7種類のタスクを3つのゲイン（式（8）の $G=0.5, 1.0, 1.5$ ）について3セット、ランダムな順序で行った。なお、疲労が実験結果に影響しないように、装置使用中は腕を肘掛に置いて行った。

7.4 実験結果

図16に把持部の実際の角度（図16:角度）、ディスプレイに表示されているバーチャルな円環の角度（図16:疑似角度）、圧力値（図16:圧力の和）の典型的なグラフを示す。図16の灰色背景部分は質量変化後（図16では0.6kg）の状態を表す。図16より、圧力値は疑似角度の回転方向が反転する時及びその直後に大きくなる傾向があった。これは、回転方向を制御するときに疑似力覚による慣性を打ち消

表2 圧力データの統計データ

Table 2 Statistical data of the pressure values

G	F	MSe	p	η^2	ES:f	1- β
0.5	F(7,1301) =3.471	2.866 $\times 10^3$	<0.0010	0.018	0.1366	0.9701
1.0	F(7,1240) =2.423	4.486 $\times 10^3$	<0.0181	0.0134	0.1169	0.8729
1.5	F(7,1215) =5.969	5.141 $\times 10^3$	<7.507 $\times 10^{-7}$	0.0332	0.1854	0.9995

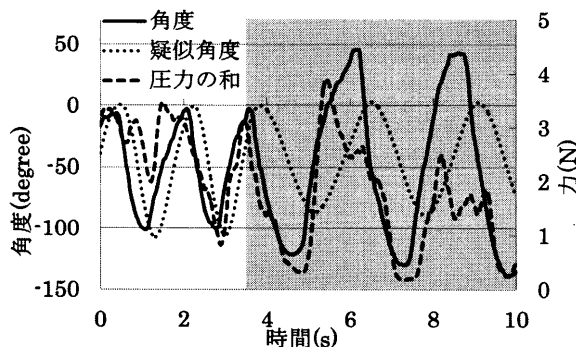


図16 グラフの典型例

Fig.16 A typical example of the graph

するため、強く把持したと考えられる。

そこで圧力データを解析するために、6章と同様にピーク値を抽出した。抽出したデータを用いて分散分析及びScheffe法による多重比較検定を行った。8種類の質量間で各パラメータは、表2のようになった。

それぞれのゲイン毎のタスク間の有意差を図17, 図18, 図19に示す。「*」が5%有意, 「**」は1%有意である。図17の疑似力覚なしの0kgの時と疑似力覚表現を行った

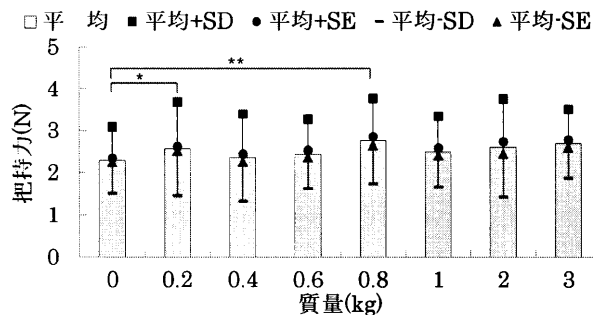


図17 各質量の平均圧力値及び有意差(ゲイン 0.5)

Fig.17 Average pressure value and significance of each mass (gain 0.5)

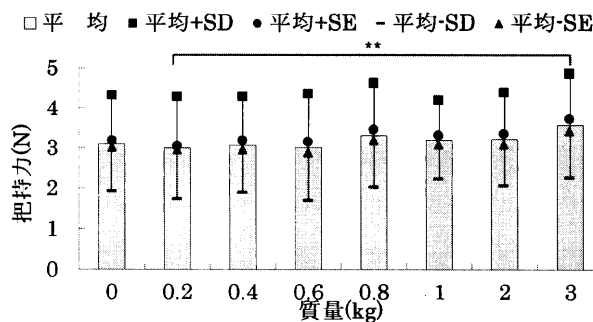


図18 各質量の平均圧力値及び有意差(ゲイン 1.0)

Fig.18 Average pressure value and significance of each mass(gain 1.0)

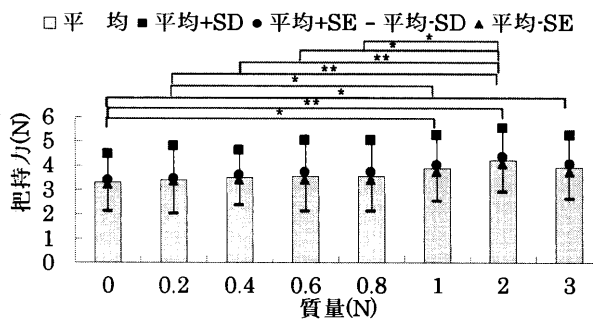


図19 各質量の平均圧力値及び有意差(ゲイン 1.5)

Fig.19 Average pressure value and significance of each mass(gain 1.5)

0.2 kg, 0.8 kg の間に有意差があったことから、異なる質量の円環モデルによる疑似力覚表現を加えたことにより、被験者の力覚知覚強度が変化したと言える。また、ゲインが最も大きい条件(図 19)では、低質量間では有意差が無いものの、質量の間隔が大きいところでは有意差が現れた。これは、7 章 1 節の実験結果、ゲインを大きくすることにより大質量帯では力覚強度の差異が知覚しやすくなったことと一致する。

出力トルクの時間的変化の典型例を図 20 に示す。図 20 の条件は図 19 にて、他の質量と最も有意差が多い質量 2.0kg の時のデータとした。図 20 の背景が白い部分が質量 0.2kg の疑似力覚表現の状態であり、灰色の部分は質量 2.0kg の疑似力覚表現の状態である。各実験条件での最大出力トルクを比較すると、ほぼ同等の値であった。出力トルクが同等であるにも拘らず圧力値に有意差があったことから、疑似力覚により被験者の知覚強度の変化を客観的に捉えることが出来たと言える。

8 考察

実験結果から、慣性モデルに基づいたねじりトルクの疑似力覚表現では、慣性モデルの質量を変化させることでユーザの力覚知覚強度を変化可能であることが示された。さらにマグニチュード推定法から、質量と評価値の関係式が示された。この式の逆関数を求める事で、被験者に与えたい知覚強度から、必要な円環の質量を逆算することが可能となった。しかしながら、慣性計算時の質量を 2 倍すると被験者の知覚強度も 2 倍になる様な比例の関係ではなく、対数関数のような増加になり、大質量帯では力覚強度の変化が起りにくい事が分かった。実験後の被験者の感想には質量が増大して把持部角度と表示されている角度の差が大きくなったときに、空転している感じがした、というものがあった。これは慣性の疑似力覚表現の際に、注意する必要がある。

また、モータ出力に疑似力覚を加えることで力覚強度が増加し、質量の違いに関しても表現可能であることが示さ

れた。モータ出力のゲインが弱い時では、小質量帯での力覚強度の差異が知覚しやすいが、大質量帯では力覚強度の差異が知覚しにくい。ゲインを強くすることにより、小質量帯での力覚強度の差異が知覚しにくくなるが、大質量帯では力覚強度の差異が知覚しやすくなった。この現象は、一般に刺激量が大きくなると弁別閾が大きくなる事と一致し、妥当と考えられる。

6 章で述べた疑似力覚のみでの圧力値による解析では質量間で有意差が出なかったことから、実世界の質量をもつ円環の力覚表現と全く同じ力覚表現を疑似力覚のみで行うことは難しい事が示唆された。7 章の実験結果よりモータ出力を加えた場合では圧力値に有意差が表れていることから、実世界の力覚表現に近づける為には、実際の力覚を追加することが効果的であると考えられる。

まとめ

本研究では、回転方向に 1 自由度を有する力覚提示装置を使用して、慣性モデルによる疑似力覚提示における力覚強度の差異の知覚可能性及び、モータ出力と疑似力覚の組み合わせによる知覚強度の増加量について、把持部の垂直抗力計測とマグニチュード推定法を用いた評価実験を行った。実験の結果、慣性モデルによる疑似力覚提示により、異なる力覚強度が知覚可能であったが、慣性モデルの質量と被験者の知覚強度が対数関数的関係となっており、大質量の弁別は困難であることが明らかとなった。また、モータの出力トルクに疑似力覚を加えることで、実際の出力トルク以上の力覚を被験者に知覚させることが可能であることが明らかとなった。

本手法は PHANTOM Omni など、6 自由度の位置姿勢が測れるが、力覚提示は並進方向 3 自由度しか行えない力覚提示装置や回転運動を計測するセンサを内蔵したマウスなど、回転方向の力覚提示が行えない装置への適用や、タッチパネルでダイヤルを回す動作へのフィードバックなどのアプリケーションへの適用が期待できる。今後は、表現可能な質量の最大値を求めるほか、重くなる映像表現だけでなく軽くなる映像表現の検討や、回転を 3 自由度に拡張したときの影響などを調べていきたい。

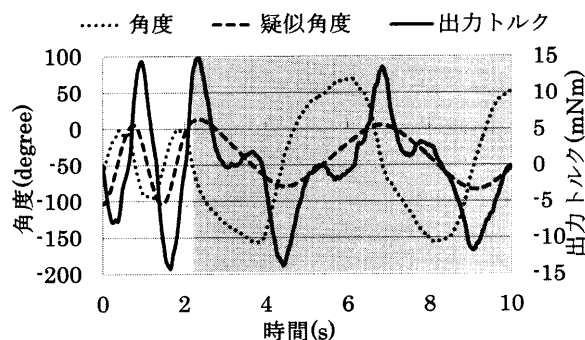


図20 出力トルクの典型例(ゲイン 1.5, 質量 2.0kg)

Fig.20 A typical example of the output torque(gain 1.5, 2.0kg)

参考文献

- [1] 鈴木, 矢野, 岩田: 直接指示環境における 1 自由度力覚提示に関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告 Vol. 16, No.HDC06, pp. 15-18, 2011
- [2] <http://www.sensable.com/haptic-phantom-omni.htm> 2013/3/18 アクセス
- [3] http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/hapticmaster/hapticmaster_j.html 2013/3/18 アクセス
- [4] Anatole Lécuyer : Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 18, No. 1, pp 39-53, 2009
- [5] 米村, 大野, 岡本, 川崎, 安藤, 前田: Pseudo-Haptics 生起における運動時間と方向の影響, 日本基礎心理学会第 27 回大会: 東北大学: 2007/12/7_2-50
- [6] Dominjon, L., Le'cuyer, A., Burkhardt, J.M., Richard, P., & Richir, S. Influence of control/display ratio on perception of mass of manipulated objects in virtual environments. Virtual Reality, 2005. Proceedings. VR 2005. IEEE pp19-25, 2005
- [7] Le'cuyer, A., Burkhardt, J. M., & Tan, C. H. (2008). A study of the modification of the speed and size of the cursor for simulating pseudo-haptic bumps and holes. ACM Transactions on Applied Perception, No.5, Vol.3,, pp.1-21, 2008.
- [8] 圓崎, 佐藤, 矢野, 岩田: デバイスアート・ツールキットの開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol. 15 No. 3, pp.417-426, 2010.
- [9] 三田純義; 佐藤裕介. つまみ力による円筒形状のつまみの直径の評価. 小山工業高等専門学校研究紀要, Vol38, pp31-36, 2006
- [10] 吉田, 矢野, 岩田: 疑似力覚と力覚提示装置の組み合わせによるねじりトルク感覚の増強, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告 Vol. 17, No.GN53, pp. 49-52, 2012

[著者紹介]

吉田 晃順 (学生会員)

現在 筑波大学大学院 システム情報工学
研究科・知能機能システム専攻 学生



矢野 博明 (正会員)

1997 年筑波大学大学院工学研究科修了,
博士 (工学). 同年日本学術振興会 特別研
究員 (PD) 東京大学総合試験所, 1999 年筑
波大学講師, 現在 筑波大学大学院システ
ム情報系・知能機能工学域 准教授.



岩田 洋夫 (正会員)

1986 年 東京大学大学院工学系研究科修
了, 同年筑波大学構造工学系助手. 現在 筑
波大学システム情報工学研究科教授. 日本
バーチャルリアリティ学会 副会長



(2012 年 12 月 18 日受付)