

# 角運動量変化を利用した力覚提示デバイス

仲田謙太郎\*<sup>1</sup> 中村則雄\*<sup>2</sup> 山下樹里\*<sup>2</sup> 西原清一\*<sup>3</sup> 福井幸男\*<sup>3</sup>

## Torque-feedback Device using Angular Momentum Transition

NAKATA Kentaro \*<sup>1</sup> NAKAMURA Norio \*<sup>2</sup> YAMASHITA Juli \*<sup>2</sup> NISHIHARA Seiichi \*<sup>3</sup> FUKUI Yukio \*<sup>3</sup>

**Abstract** – This paper describes the development and evaluation of a mobile torque-feedback device, the GyroCube, not based on the earth ground support. Using three orthogonal motors, torque of any desired direction and magnitude is generated by controlling the acceleration of the rotation of the motors simultaneously. The effectiveness of the device as a wearable torque display is confirmed by two types of experiments: the objective measurement of the output torque, and the subjective measurement by twenty participants.

**Keywords** : torque-feedback device, angular momentum, perception

### 1. はじめに

人間は外界の情報を感覚情報(視覚, 聴覚, 触力覚等)によって知覚し, 外界への働きかけにより外界は状態を変え, またこの変化を感覚による情報から再び知覚することで行動している。

ヒューマンインタフェースにこの相互関係を取り入れる目的で, 計算機上に仮想作業空間と呼ばれる環境を構築する試みがなされている。人間はこの仮想作業空間をあたかも実空間であるかのように知覚し, またそれに対して働きかけることが出来る。より自然な仮想作業空間を実現するためには視覚情報ばかりではなく触力覚情報, 聴覚情報等の感覚を人間にフィードバックすることが有効であると考えられる [1]。

#### 1.1 先行研究

力覚提示は VR 出現当初から必要性が指摘されていた。力覚提示には機械的な装置が利用されており, 機構や力の伝達手段には様々なものが考えられる。比較的好く知られているものとして, エアシリンダによる握力提示を実現した Dexterous Master [2], ワイヤによる力の伝達を利用した SPIDAR [1], 3 自由度のアームでグリップの両端を支える構造を持つ 6 自由度ペン型ディスプレイ [3] などがある。3 次元形状を 2 自由度のジョイスティック型力覚デバイスで表現する Virtual Sandpaper [4] の試みも知られている。

没入型仮想空間の普及や, 実世界指向インタフェースの研究の活発化に伴い, 広範囲での力覚提示を可能とするデバイスの必要性が指摘されている。通常の力覚提示装置は据え置きでの使用を前提としているが, このような形態のデバイスの作業範囲は, 機構の稼動範囲により限定されたものとなっている。そこで, デバイスを操作者に装着することで操作者の移動に関わらず利用できるようにする手法として, 前述の SPIDAR に似たワイヤによる力覚提示機構を背負子に載せた Haptic GEAR [5], 腕に装着する力覚帰還ジョイスティック [6] などが提案されている [7]。

#### 1.2 本デバイスの特徴

従来の可搬型力覚提示デバイスは原理上, 力を支えるベースが必要で, 可搬であるためには身体にベースを設置して指先などにワイヤなどで力覚を与える構造が一般的である。ところが, この力覚は身体内で閉じた内力であるため, 外部の物体から力を受けた感覚が乏しいという問題点があった。本研究では, モータの加減速による角運動量の変化に伴う作用反作用を利用し, トルクによる外力を提示する可搬携帯型のデバイスを提案する。

表 1: 触力覚提示デバイスの分類 (文献 [6] に追加)

Table 1: Classification of haptic devices

	エグゾスケルトン型	道具把持型
接地型	SARCOS Master EXOS Arm Master 等	Haptic Master PHAMToM SPIDAR 等
携帯型	Rutgers Master CyberGrasp Cyber Touch 等	Haptic GEAR 力覚帰還 joystick 本デバイス'GyroCube'

\*1: 日本電気株式会社

\*2: 産業技術総合研究所

\*3: 筑波大学 電子・情報工学系

\*1: NEC Solutions, NEC Corporation

\*2: National Inst. of Advanced Industrial Sci. and Tech.

\*3: Inst. of Info. Sci. and Electro., Univ. of Tsukuba

## 2. システム構成

### 2.1 設計の方針

広範囲で使用可能な力覚提示デバイスは固定型ではなく、ユーザが自由に持ち歩けるような形態でなければならない。そこで可搬携帯型であり、かつ外力を提示できる力覚提示デバイスの開発を目的とする。これを実現するために、力覚の発生機構として角運動量の変化に伴う作用反作用を利用する。ここで、ユーザに提示する外力はトルクである。

角運動量の変化を用いた力覚発生機構を継続的に使用するためには、ある周期で初期状態に戻す必要がある。つまり、角運動量ベクトル $L$ は閉じた軌跡をとる必要がある。その場合、角運動量ベクトルの時間微分であるトルクベクトルは一定方向に長い間連続的に発生させ続けることが困難である。そこで、提示したい方向に強く短時間、逆の方向に弱く長時間トルクを発生させることで、人間の知覚特性により強い信号のみ感じさせることが出来ると考えられる。ここで知覚特性とは感覚の閾値(感じることの出来る力の最小値)があること、また、感覚の残効(強い刺激の直後の弱い刺激は感じにくいこと)を指す。

### 2.2 力覚提示実現法

著者らが開発したジャイロキューブ(図1)では、モータを加減速させることにより生じる角運動量の変化に伴う作用反作用を利用する。

モータの回転軸を回転させることなく、角運動量を空間内で任意に変化させるためにデバイスの立方体フレーム中にモータを各々直交するように3つ配置する。

これらの3つの各モータの回転を加減速させ角運動量を変化させることにより、それらを合成した角運動量ベクトルを空間内で任意に変化させることが出来る。すなわち、任意の方向にトルクを発生させることが出来る(図2)。また、より強いトルクを得るためにモータの回転軸には鉄製ホイールを取り付ける。

デバイス本体(モータとホイール3対、フレーム)の大きさは12cm立方、重さはおよそ2kgである。ドライバおよびDA変換ボードは外部に用意する。

トルクと角運動量の変化は次式で表される。

$$\tau = \frac{\Delta L}{\Delta t}, \quad \Delta L = I\Delta\omega,$$

ただし、

- $\tau$  : トルク [N·m]
- $\Delta L$  : 角運動量の変化分 [kg·m<sup>2</sup>/s]
- $\Delta t$  : 時間変化 [s]
- $I$  : 慣性モーメント [kg·m<sup>2</sup>]
- $\Delta\omega$  : 角速度変化 [1/s]

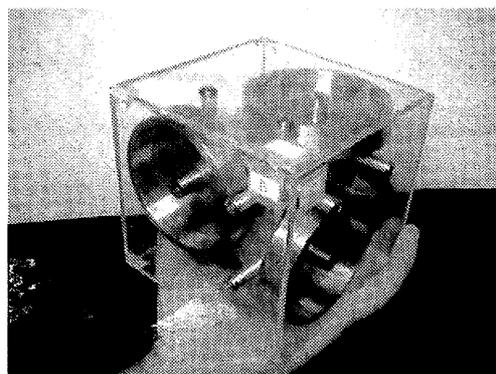


図1 ジャイロキューブ  
Fig.1 the GyroCube

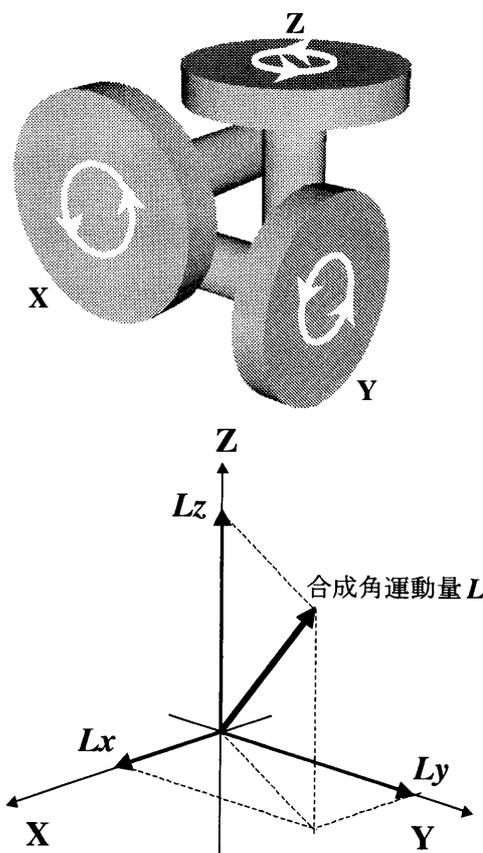


図2 角運動量合成  
Fig.2 Composition of angular momentum

ホイールの慣性モーメントは $2.317 \times 10^{-4}$  [kg·m<sup>2</sup>]である。例えば静止状態から1.0[s]間、トルク600[gf·cm]を加え続けると、1秒後にホイールの回転数はおよそ2440[rpm]に達する。注意点として、回転数を定格回転数以内にする必要がある。

作用反作用の法則により外部には大きさが等しく逆向きのトルクが出力される。

## 2.3 機器構成

計算機で制御するための構成は次のようになる (図 3 参照).

モータ : 千葉精密 (EAD-08D)

定格トルク : 600gfc<sub>m</sub>

定格出力 : 30W

D/A コンバータ : Interface(PCI-3310)

出力レンジ : ± 10V

分解能 : 16 ビット

チャンネル数 : 4 チャンネル

このデバイスは広範囲で使用できるが, 今回は実際の位置検出は行わず, ディスプレイ上で擬似的に位置検出を行い, デバイスの座標系と絶対座標系は同一とした. また, 位置検出のタイミングは, キー操作による (図 4 参照).

## 2.4 計算機環境

プログラミング言語は Visual C++, Microsoft Developer Studio を用いて開発を行う. 計算機環境は以下の通り.

O S : Microsoft Windows 98  
C P U : GenuineIntel Pentium(r) Processor  
メ モ リ : 64.0MB の RAM

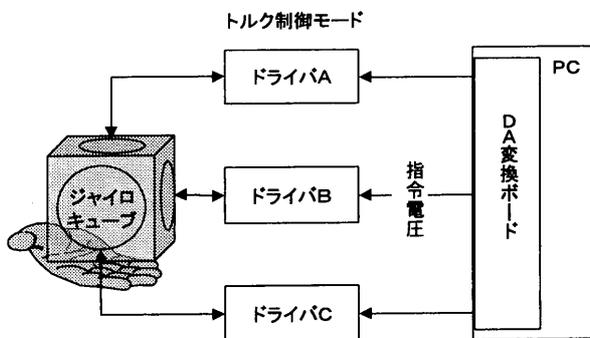


図 3 システム構成  
Fig. 3 System configuration

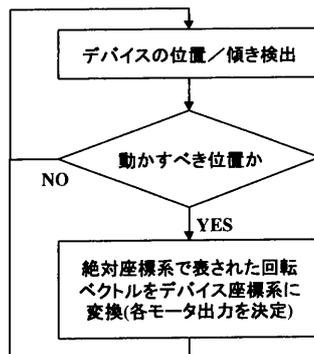


図 4 制御の流れ  
Fig. 4 Control flow

## 3. 評価実験

### 3.1 圧力センサによる出力測定実験

#### [目的]

デバイス内モータを加減速させることにより 3 次元空間内で期待する任意の方向にトルクを出力できることを圧力センサを用いて確認する.

#### [信号 (指令電圧波形)]

本デバイスでは, 連続して使用するためにひとつの信号の中で回転数を初期状態に戻す必要がある. つまり, トルクに比例する指令電圧波形の時間積分 (回転数) をゼロにすることが求められる.

そこで, 提示したい方向 (正) に強く短時間, 逆の方向 (負) に弱く長時間トルクを発生させる. そうすることで, 人間の知覚特性により強い信号のみ感じさせることが出来ると考える. ここで, 弱い信号の大きさを強い信号の 1/4 に設定する. また, トルクの変化を連続にするため cos カーブを用いる. (図 5)

$$f = \begin{cases} \alpha & (0 \leq t < \beta) \\ \alpha \left( \frac{3}{8} + \frac{5}{8} \cos \left( \frac{\pi}{2\beta} (-\beta + t) \right) \right) & (\beta \leq t < 3\beta) \\ -\frac{\alpha}{4} & (3\beta \leq t < 8\beta) \end{cases}$$

ただし, 機械的な遅延などの理由から試行錯誤を繰り返すことで終了時刻の微調整を行う. その結果, 終了時刻は  $8\beta$  とする.

#### [圧力センサ配置]

圧力センサ (共和電業:PS-10KA) をデバイス下面四隅に計 4 チャンネル配置する. (図 6) デバイスを載せた状態でモータが静止しているときの圧力センサの計測値を基準 (ゼロ) として測定を行う. サンプル周波数は 10[Hz] である.

#### [実験方法]

図 5 に示す信号を基準に, 最大指令電圧 ( $\alpha$ [V]), 提示時間 ( $\beta$ [s]), モータを変えながら下に示す合計 28 信号条件 ( $\alpha_X$ [V],  $\alpha_Y$ [V],  $\beta$ [s]) について測定する. ただし,  $\alpha_X, \alpha_Y$  はそれぞれ X 軸, Y 軸モータへの最大指令電圧であり, 提示時間  $\beta$  は各軸共通である.

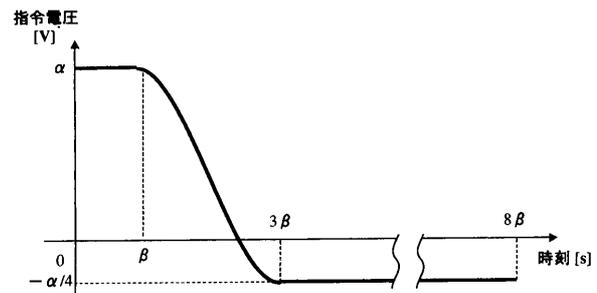
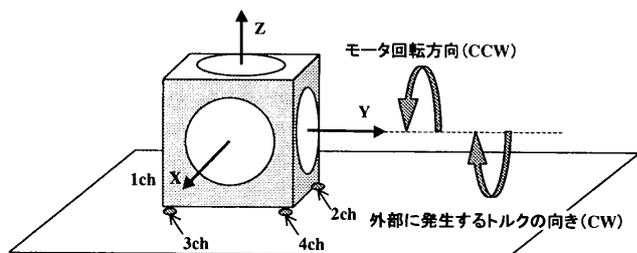


図 5 基本指令電圧波形  $f$   
Fig. 5 Basic signal wave form



注)CCW とは反時計回り, CW とは時計回り.

図 6 圧力センサ配置

Fig. 6 Arrangement of force sensors

### 【期待される出力】

仕様より, 指令電圧+10 [V] を加えると, 瞬時最大トルク (1800[ $\text{gf}\cdot\text{cm}$ ]) を発生させる.

例えば, 図 6 において  $(\alpha_X, \alpha_Y, \beta) = (0.0 \text{ [V]}, +4.0 \text{ [V]}, 0.4 \text{ [s]})$  の場合, 奥 (1,2ch 側) に下向きの, 手前 (3,4ch 側) に上向きの力が加わる. デバイス四隅に働く力は, トルクの作用点までの径がフレーム一辺 12[ $\text{cm}$ ] となるから, およそ  $720/12 = 60[\text{g}]$  となる.

### 【結果および考察】

図 7 上 ( $\alpha_X = 0.0, \alpha_Y = -4.0, \beta = 0.4$ ) では, 信号入力時 (1.0[s]) から約 0.9[s] 間 3,4ch に下向きの正の力およそ 50[g] が, 逆に 1,2ch には大きさがほぼ等しい負の力が加わっている. そして, 2.0[s] 付近から約 2[s] 間 3,4ch に負の力 20[g], 1,2ch に大きさが等しい正の力が加わっている. 力の大きさについては設計値に近い. よって, 期待通り ( $f$  と同じ波形) の出力を確認できる.

図 7 下 ( $\alpha_X = -8.0, \alpha_Y = -8.0, \beta = 0.2$ ) では, 2 軸の合成により強い力が出力されている. また方向については,  $\alpha_X$  のみが負の場合 1,3ch 側に下向きの力が加わり,  $\alpha_Y$  のみが負の場合には 3,4ch 側に下向きの力が加わることから  $(\alpha_X, \alpha_Y) = (\text{負}, \text{負})$  の場合, 3ch に下向き正の力が加わるはずであり, その通りの出力を確認できる.

他の軸に関しても同様の結果が得られた.

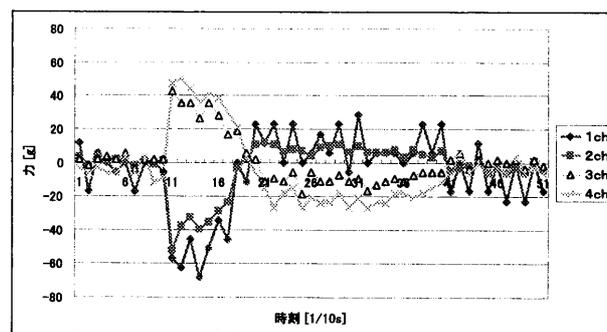
以上より, デバイス内のモータを加減速させることにより 3 次元空間内で期待する任意の方向にトルクを出力することができることを確認した.

## 3.2 人を対象とした知覚実験

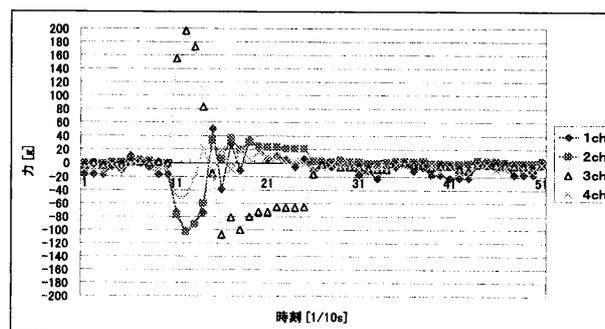
### 【目的】

手で持つ携帯ナビゲーションのような応用では, 手で持ったときの知覚特性が必要となる. 手は場所により感覚受容器の分布が異なることが知られている. そこで, デバイスから出力されるトルクの強さの違いの感度を求める目的で, 次の 3 点について本デバイスを用いて実験を行なった.

- どの程度の一定トルクを感じられるか
- どの程度の提示時間でトルクを感じられるか
- 掌の場合, 方向による感じ方の違いはあるか



$$(\alpha_X, \alpha_Y, \beta) = (0[\text{V}], -4.0[\text{V}], 0.4[\text{s}])$$



$$(\alpha_X, \alpha_Y, \beta) = (-8.0[\text{V}], -8.0[\text{V}], 0.2[\text{s}])$$

図 7 圧力測定実験結果

Fig. 7 Results of experiments

### 【環境】

被験者は椅子に座った状態で右腕をテーブルに載せデバイスを右手掌で手首を自由に動かせるように下から持つ. 視覚情報を遮断し力覚に集中するため目隠しをする. 本実験では 20 ~ 30 歳までの男性 20 人を対象として実験を行う.

### 【手順】

- ① 図 5 に示す波形  $f$  を元に  
 最大指令電圧: (4.0, 2.8, 2.0, 1.4)[V]4 通り  
 提示時間: (0.40, 0.20, 0.10, 0.05)[s]4 通り  
 提示方向: 右掌前後左右, 時計回, 反時計回計 6 通り (図 8 参照)  
 の組み合わせから直交系 80 刺激信号を決定し, ランダム刺激信号列を作成する.
- ② 各軸方向について次に示す基準となる刺激信号 (各方向 3 つ計 18) を提示する.  
 $\alpha = (\text{強い}:4.0, \text{ふつう}:2.8, \text{弱い}:2.0)[\text{V}], \beta = 0.4[\text{s}]$
- ③ ランダム刺激信号列を提示しその方向 (6 方向限定) と強さ (3 段階) を聞く.
- ④ 感想を求める.

### 【正答率結果解析】

縦:最大指令電圧  $\alpha[\text{V}]$ , 横:提示時間  $\beta[\text{s}]$  として (以下の表はこれに同じ) 方向別の正答率 [%] を表 2a に, 全ての方向を加味した正答率 [%] を表 2b に示す. Z 軸方向は直交系により省略したためデータに不足がある.

なお, 80%未満, 80%以上 90%未満, 90%以上の 3 つに色分けをした.

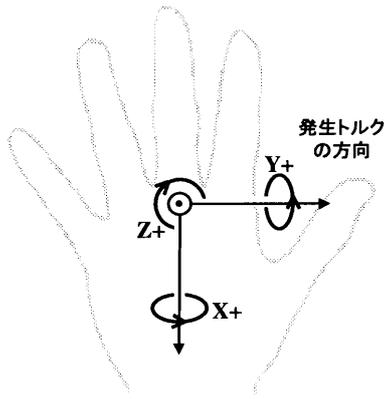


図8 提示方向右掌前 (Y+) 後 (Y-) 左 (X-) 右 (X+) 時計回り (Z+) 反時計回り (Z-)

Fig. 8 Coordinate assignment

表 2a: 各方向別正答率 [%] (縦: $\alpha$ [V], 横: $\beta$ [s])

Table 2a: Correct answer ratio classified by directions

X+正当率	0.05	0.10	0.20	0.40
4.0	100	100	100	90
2.8	90	90	70	100
2.0	65	100	90	80
1.4	60	75	80	70
X-正当率	0.05	0.10	0.20	0.40
4.0	80	90	90	100
2.8	90	70	85	70
2.0	60	80	70	70
1.4	40	60	70	40
Y+正当率	0.05	0.10	0.20	0.40
4.0	90	100	100	100
2.8	80	95	90	90
2.0	60	70	80	90
1.4	60	70	60	45
Y-正当率	0.05	0.10	0.20	0.40
4.0	90	95	100	100
2.8	30	80	90	100
2.0	60	80	90	65
1.4	50	70	25	70
Z+正当率	0.05	0.10	0.20	0.40
4.0	-	95	-	100
2.8	95	-	95	-
2.0	-	95	-	80
1.4	50	-	65	-
Z-正当率	0.05	0.10	0.20	0.40
4.0	95	-	90	-
2.8	-	100	-	100
2.0	75	-	90	-
1.4	-	75	-	45

表 2b: 全ての方向を加味した正答率 [%]

Table 2b: Correct answer ratio for all directions

ALL正当率	0.05	0.10	0.20	0.40
4.0	91.4	95.7	95.7	98.6
2.8	72.9	90.0	87.1	94.3
2.0	65.7	85.7	84.3	75.7
1.4	50.0	71.4	55.7	51.4

表 3: 方向別有意差判定

Table 3: T-test results

有意水準: 0.10		有意水準: 0.25	
X-	< X+	X-	< X+
Y+	< X+	Y+	< X+
Y-	< X+	Y-	< X+
X-	= Y+	X-	< Y+
Y-	= X-	Y-	= X-
Y-	= Y+	Y-	< Y+

例えば, 表 2a より Y+方向において信号 (最大指令電圧, 提示時間)=(2.8[V], 0.10[s]) では, 95%の被験者が方向を正しく判断しているということが分かる.

注目すべき点は, 全方向に共通する傾向としてトルクが弱い (最大指令電圧が小さい) 場合, 提示時間の比較的短いほうが判別できることである. これは被験者からも同様の意見が得られた.

また, 表 2b より, 色をつけた信号 (正答率 80%以上) とそうでない信号との境界付近では正答率が著しく (15%程度) 変化することが確認できる. つまり, 人のトルクに対する知覚ではある領域を越えると急激に判別しにくくなるということが推測される.

表 2a(各方向別正答率) において, 最大指令電圧  $\alpha$  が大きく提示時間  $\beta$  が長いところでは方向による差が見られないと判断したため, 最大指令電圧が小さく提示時間が短い左下から斜めに 10 個のデータ

(縦: $\alpha$ [V], 横: $\beta$ [s]) =

- (4.0, 0.05), (2.8, 0.05), (2.0, 0.05), (1.4, 0.05),
- (2.8, 0.10), (2.0, 0.10), (1.4, 0.10), (2.0, 0.20),
- (1.4, 0.20), (1.4, 0.40).

について, 方向による違いがあるか各々の方向について t 検定 (片側検定) を行ない, 導き出される結論を表 3 に示す.

表 3 より, 有意水準 0.1 の場合は次のことが言える.

$$(Y-方向) = (Y+方向) = (X-方向) < (X+方向)$$

同様に, 有意水準 0.25 の場合は次のことが言える.

$$(Y-方向) = (X-方向) < (Y+方向) < (X+方向)$$

これらの結論が導き出される要因を次に考察する.

1. X+方向が最も正答率が良い:

右手掌を上向きにしてデバイスを支えた場合, 主に母指丘付近でデバイスの動きの変化を知覚すると考えられるため.

2. Y+方向も比較的正答率が良い:

親指と小指以外の 3 本の指で支えているため.

**[個人毎の回答再現性]**

同一被験者の複数回 (3 回) のデータを元に, 各個人が各刺激信号に対してどれだけ一貫した (再現性のある) 判定感覚を有しているか調べる. 複数回実験を行ったのは 5 人, 提示した刺激信号は 32 通りである.

表 4: 全ての方向を加味した個人毎再現性 (最大 10)

ALL再現性	0.05	0.10	0.20	0.40
4.0	7	9	8	10
2.8	6	10	9	10
2.0	4	9	7	5
1.4	3	4	5	5

表 5: 全方向を加味した平均得点 [点]

Table 5: Mean of confidence score

ALL平均点	0.05	0.10	0.20	0.40
4.0	1.896	1.957	2.286	2.500
2.8	1.043	1.486	1.314	1.896
2.0	0.757	1.000	1.171	1.171
1.4	0.500	0.729	0.557	0.629

各刺激信号について、複数回実験を行なった中で毎回正答あるいは毎回不正答である場合の再現性を”1”, いずれかの回に他の回と異なった回答をした場合の再現性を”0”としてカウントし、表4に示す。

再現性の値が小さい刺激信号ほど各個人の中で曖昧さを含む回答が多いことを示し、逆にその値が大きい刺激信号ほど表2aおよび表2bにおいて示した正答率は信頼できることを示す。また、表4は、正答率を示した表(表2b)とほぼ類似した傾向が確認できる。すなわち、正答率が比較的低い刺激信号においては個人毎に再現性のない回答を多く含んでいることが分かる。

#### [方向別平均得点解析]

方向別の平均得点[点]を表5に示す。得点とは、方向を正答した場合にのみ与えられ、その回答された強さによって付けられる。得点の付け方は「強い」が3点、「ふつう」が2点「弱い」が1点とする。色分けは表2bのそれを重ねる。

色分けから分かる通り、正答率と平均得点は必ずしも一致しない。ただし、正答率の場合と同様、トルクが弱い(最大指令電圧が小さい)場合、提示時間の比較的短い(0.1[s]付近)ほうが判別しやすいということを確認できる。

方向毎の顕著な相違点は確認できない。

#### [被験者感想]

2名以上、同一もしくは類似した感想を次に挙げる。

- ◇ 知覚に集中することが必要。
- ◇ 反動は少ない。
- ◇  $X > Y > Z$  の順に感じやすい。

本実験においては、視覚情報などを遮断し触力覚に集中するように指示した。そのため、例えばトルクによって人に注意を促すようなことが求められる際には、より大きなトルクを提示する必要があるだろう。

反動とは、刺激信号において信号後半にあり、信号前半の提示トルク(最大指令電圧)と逆向きで大き

さが1/4のトルクのことを指す。(回転数を初期状態に戻すために必要)これは、原理を理解している被験者の感想である。

Z方向が知覚しにくいのは、Z軸は掌から垂直の方向であり、その周りのトルクは皮膚の法線方向ではなく、接線方向に作用しているためと推測される。

#### 4. まとめ

本研究では、外力を発生させる可搬携帯型の力覚提示デバイスを提案し、実験により人間に対する以下の知覚効果が確認された。

1. 弱いトルク刺激を提示する場合、その提示時間は適度に短いほうが判別しやすい。今回の実験では、提示時間が0.1秒程度のとき最も正答率が高い。
2. トルクの大きさとその提示時間の組み合わせにおいて、正答率が著しく変化する境界が存在する。
3. 右手掌を上に向けてデバイスを把持した場合、親指側(右側)に下向きの力が加わる刺激信号の正答率が最も高く、続いて中指側(前方)に下向きの力が加わる刺激信号の正答率が高い。

このデバイスの用途として携帯型であり小型化が容易である特徴を有効に活用できる環境、例えば力覚提示ナビなどが考えられる。また、「方向を提示できる振動」としてゲームなどのアミューズメントにも利用できる。実用化に向けては、以下に挙げる課題がある。

- 位置検出機構と連動させたシステムを構築する。
- 制御部分をフレーム内に収め携帯性を実現する。
- よりデバイス重心近くを把持できる機構にする。
- 人間のトルク知覚特性を詳細に調べる。

#### 参考文献

- [1] 猿渡基裕, 水口武尚, 平田幸広, 佐藤誠: 空間インタフェース装置による仮想物体の pick-and-place 作業; 1992年第23回画像工学コンファレンス (pp243-246)
- [2] Burdea, G., Zhuang, J., Roskos, E., Selver D., Lagrana, N.: A Portable Dextrus Master with Force Feedback; Presence, Vol.1, No.1, MIT Press 1992 (pp18-28)
- [3] Iwata, H.: Pen-based Haptic Virtual Environment; Proc. of VRAIS'93, 1993 (pp287-292)
- [4] Minsky, M., Ouh-yong, M., Steel, O., Brooks, F.P., Behensky, M.: Feeling and Seeing: Issues in Force Display; Computer Graphics, Vol.24, No.2, 1990 (pp235-243)
- [5] 廣瀬通孝, 小木哲朗, 笥直之, 斎藤允, 山田俊郎: 力覚提示を用いた空間型インタフェース; ヒューマンインタフェース学会研究報告集 Vol.1, No.4, 1999 (pp33-36)
- [6] 岩田洋夫, 中川博憲: 着用型力覚帰還ジョイスティック; Human Interface N&R Vol.13, 1998 (pp135-138)
- [7] 広田光一: 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, 1999 (pp19-23)

(2001年2月9日受付)