

# ジャイロモーメントを用いた力覚呈示装置

吉江 将之<sup>\*1</sup> 矢野 博明<sup>\*2</sup> 岩田 洋夫<sup>\*2</sup>

## Development of Non-grounded Force Display Using Gyro Moment Effect

Masayuki Yoshie<sup>\*1</sup>, Hiroaki Yano<sup>\*2</sup> and Hiroo Iwata<sup>\*2</sup>

**Abstract** – In human-scale virtual reality environment or augmented reality environment, force feedback plays important roll, as well as visual feedback. In such situation, force display requires large working volume and the ability to move easily. To satisfy these requirements, we've developed a non-grounded force display using gyro-moment effect. We measured various characteristics, such as the threshold, the differential threshold. And we propose some techniques to indicate the information of territories or direction by using the force display. The effectiveness of this force display tested through some experiments and two applications.

**Keywords** : haptic interface, non-grounded force display, gyro moment

### 1. はじめに

ユーザの周囲を映像で覆う没入型ディスプレイによる等身大の VR 環境や、アウトドアなどにおける実世界指向インタフェースの研究が進んでいる [1]。これにより建物の壁や領域呈示など、机上では表現できない等身大の VR 物体の表現が可能になる。この広大な環境において力覚呈示を行うことで、VR 物体認識が容易になり直感的な操作が可能になる。

これまで開発されてきた力覚呈示装置は大きく「接地型」と「非接地型」の 2 つに分類できる。PHANTOM [2] や SPIDAR [3]、HapticMaster [4] など机等に接地して使用する「接地型」では正確な力の呈示ができるがその可動範囲が限られている。一方、「非接地型」は装置を身体の一部に接地することにより広範囲での力覚呈示が可能である。これまでに背中装着する HapticGEAR [5] や、腕に装着する WearableMaster [6] などが開発されている。しかし、装着が煩雑であったり、力覚の呈示方向に大きな制限がある。また装置を装着している部分に反作用が生じるために、物体から力を受けているという感覚が乏しい。

装着を必要としない装置として、角運動量の変化に着目したジャイロキューブ [7] が開発されている。リアクションホイールの原理を用いることで非装着で力覚（モーメント）を呈示する。しかし、1 方向のモー

メント出力に対し 1 つのフライホイールが必要で重量がかさむ。また、フライホイール回転用のモータで角運動量を変化させるので最大出力モーメントを大きくすると重量が大きくなる。

本研究では非接地型で可動範囲が限定されずに力覚を呈示する原理として、人工衛星の姿勢制御 [8] などに用いられているジャイロモーメントに着目した。すなわち、高速回転するフライホイールの回転軸を傾けた時に発生するモーメントを利用する。このため、小型軽量の装置で大きなモーメントを出力することができる。さらに身体に接地する必要が無いため、物体から力が作用したような感覚も期待できる。

そこで本研究ではジャイロモーメントを用いた小型の非接地型力覚呈示装置を開発した。また、ユーザの知覚特性、情報呈示および応用実験を通してその有効性を検証した。

### 2. ジャイロモーメントによる力覚呈示の原理

ジャイロスコープや地球ゴマなどに発生するジャイロ効果はよく知られている。一定の軸回りで回転する円盤に外部から異なる軸回りの角速度を与えると、その 2 軸と直交した方向にモーメントが発生する。

x、y、z 方向の基本ベクトルを図 1 のように  $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$  とし、ジンバル機構により支持された、慣性モーメント  $I$  を持つフライホイールを x 軸回りに一定角速度  $\omega$  で回転させる。このときフライホイールが持つ角運動量  $\mathbf{H}_0$  は

$$\mathbf{H}_0 = I\omega\mathbf{i} \quad (1)$$

で表せる。外部から与える y 軸回り（pitch 回転）の

\*1: 筑波大学大学院 理工学研究科

\*2: 筑波大学 機能工学系

\*1: Master's program in Science and Engineering at University of Tsukuba

\*2: Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba

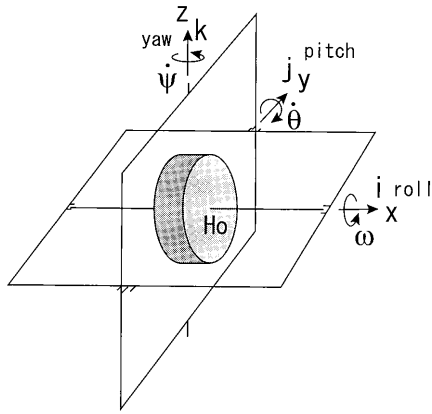


図1 ジャイロモーメントの発生の座標系  
Fig.1 Coordinates of gyro moment

角速度を  $\dot{\theta}$ 、z 軸回り (yaw 回転) の角速度を  $\dot{\psi}$  とすると外部からフライホイールに加わる角速度  $\omega_p$  は

$$\omega_p = \dot{\theta}j + \dot{\psi}k \quad (2)$$

となる。このとき角運動量保存の法則によりジャイロモーメント  $M$  として

$$\begin{aligned} -M &= H_o \times \omega_p \\ &= I\omega i \times (\dot{\theta}j + \dot{\psi}k) \\ &= I\omega\dot{\theta}k - I\omega\dot{\psi}j \end{aligned} \quad (3)$$

が生じる。[9]

この原理に基づいて、高速に回転するフライホイールをジンバルに取り付け、フライホイールに与える角速度の大きさと方向を制御することでフライホイールの軸に直交する任意のモーメントを発生させる装置を開発した。

### 3. システム構成

#### 3.1 力覚呈示装置の構造

力覚呈示装置は、フライホイールとそれを支持するジンバル機構に分けられる。ジャイロで発生するモーメントは式 (3) で示すようにフライホイールの角運動量とジンバルの回転角速度に比例している。そのため、大きなモーメントを出力するためにはフライホイールの半径と質量が大きく、高速で回転させたほうがよい。しかし装置全体の大きさと重量を考えるとフライホイールの大きさには限度がある。本装置では持ち歩いて使用できる大きさ、重さであることを考慮して、フライホイールは半径 30mm、厚さ 14mm、重量 100g のアルミ製とした。

フライホイールを支持するジンバル機構はアルミフレーム製で、pitch 回転と yaw 回転がそれぞれ  $\pm 50^\circ$  の範囲で可能である。ジンバルの回転軸にはそれぞれ回転検出用のポテンシオメータと回転用のギアヘッド

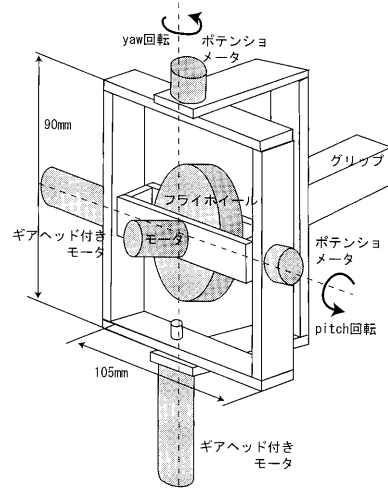


図2 装置外観図  
Fig.2 Basic configuration of the device

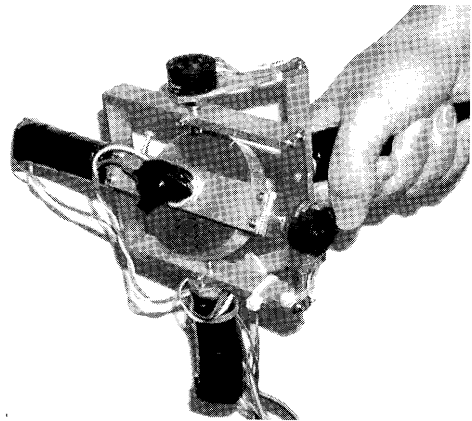


図3 装置外観写真  
Fig.3 Overall view of the device

付きのモータを対で取り付けた。モータ部を除くとジンバル部は約 100mm 四方の大きさである。ジンバルの外側には装置を片手で持つことができるようにグリップが付いており、ユーザはモーメントが発生する軸から 100mm の位置を持つ。図 2,3 に装置の外観図と使用時の様子を示す。

フライホイール用モータには maxon motor 製モータ (定格出力 2.0W 重量 21g 最大許容回転数 11900rpm) 1 台を、ジンバル用モータに maxon motor 製モータ (定格出力 6W 重量 53g、ギアヘッド 減速比 128:1 重量 68g) 2 台を使用した。アルミフレーム、配線等を含む装置全体の総重量は 650g である。

#### 3.2 全体のシステム構成

本システムは図 4 に示すように、力覚呈示装置、制御用 PC (EPSON DIRECT Endeavor MT-4000, Pentium III 800MHz) および、モータドライバによって構成されている。制御用 PC 上の D/A ボード (16bit,  $\pm 10V$  出力) を通してフライホイール用モータ

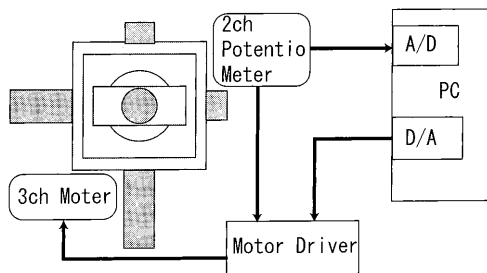


図4 システム構成

Fig.4 System configuration

タを 8000rpm で速度制御した。同時に、A/D ボードを通してジンバル機構の yaw、pitch 軸のポテンシオメータの値を読み込み、目標の回転速度および角度になるよう、各モータを制御する。モータドライバには岡崎産業製の TITECH DRIVER ver4 を使用した。

### 3.3 力覚計算

本装置は、フライホイールの半径  $R=30\text{mm}$ 、質量  $m=100\text{g}$  であるので、慣性モーメント  $I$  は

$$I = \frac{1}{2}mR^2 = 4.5 \times 10^{-5}(\text{Kg} \cdot \text{m}^2) \quad (4)$$

となる。すべての実験でフライホイールは 8000rpm で回転させた。このとき角速度  $\omega$  は

$$\omega = 2\pi f_\omega \cong 837.8(\text{rad/sec}) \quad (5)$$

で表せる。また、pitch 回転の角速度  $\dot{\theta}$ 、yaw 回転の角速度  $\dot{\psi}$  はそれぞれ最高で 300deg/sec(5.2rad/sec) 程度である。たとえば、ジンバルを pitch 方向に最大角速度  $\dot{\theta}_{max}$  で回転させたときを考えるとその最大出力は式 (3) より

$$\begin{aligned} -\mathbf{M}_{max} &= I\omega\dot{\theta}_{max}\mathbf{k} \\ &= \frac{1}{2}mR^2\omega\dot{\theta}_{max}\mathbf{k} \\ &= 1.96 \times 10^{-1}\mathbf{k}(\text{N} \cdot \text{m}) \\ &\cong 2.0 \times 10^3\mathbf{k}(\text{gf} \cdot \text{cm}) \end{aligned} \quad (6)$$

のモーメントが発生する。

また、任意の方向へモーメントを呈示するには、2つのジンバルを同時に動かせばよい。式 (3) より、そのモーメントの大きさは

$$|\mathbf{M}_o| = \sqrt{(I\omega\dot{\theta})^2 + (I\omega\dot{\psi})^2} \quad (7)$$

で表され、出力モーメント軸の方向  $\phi$  は、図 2、9 から y 軸負方向を  $0^\circ$ 、z 軸負方向を  $90^\circ$  とすると

$$\phi = \arctan \frac{-\dot{\theta}}{\dot{\psi}} \quad (8)$$

で求まる。

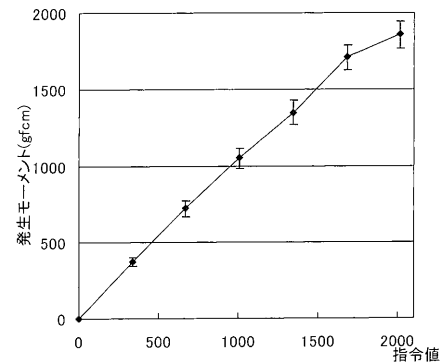


図5 出力モーメント強度 (yaw 軸)

Fig.5 Intensity of each moment(yaw axis)

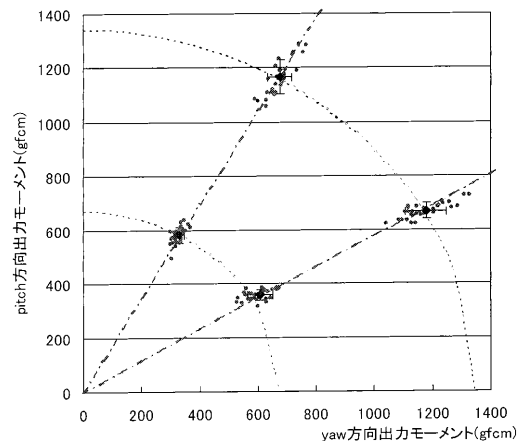


図6 任意の強度方向へのモーメント出力

Fig.6 Moment outputs for each direction and intensity

## 4. 機械特性評価

計算機からの出力命令と実際の出力モーメント強度との関係を調べた。実際にジンバルを回転させたときの角速度を測定し、式 (6) のように任意の角速度出力から発生するジャイロモーメントを換算した。

具体的には、ジンバルの yaw、pitch 回転のそれぞれについて、角速度指令値を 50、100、150、200、250、300deg/sec (出力モーメント換算：330、670、1000、1340、1680、2010gfcm) として出力角速度を 30 回測定し、出力角速度の精度を確かめた。

図 5 にジンバルを yaw 回転させたときの指令値と出力モーメントの関係を示す。目標の角速度が出力され、任意のモーメント出力が得られたことがわかる。また、pitch 回転についても同様の結果が得られた。ただし 2010gfcm では出力が飽和したため値が小さくなった。

次に、任意の方向へのモーメント出力を確認するためにジンバルを yaw、pitch 方向に同時に回転させたときの角速度を測定し出力モーメントと方向を求めた。

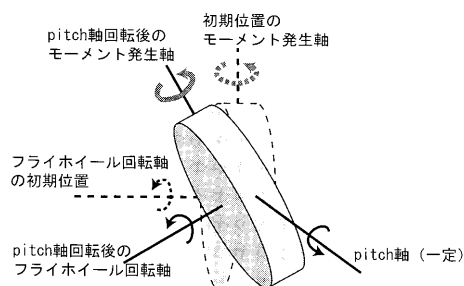


図7 モーメント発生軸の変化  
Fig.7 Transition of gyro moment axis

式(8)より、任意の方向 $\phi$ にモーメントを出力させるためには角速度 $\omega_p$ でジンバルを回転させ、pitch軸に $\omega_p \cos \phi$ 、yaw軸に $-\omega_p \sin \phi$ の角速度を与えればよい。ここでは $\phi$ を $30^\circ$ 、 $60^\circ$ とし、670gfc、1340gfc ( $\omega_p$ :100deg/sec、200deg/sec)のモーメント出力をさせた。

測定結果を図6に示す。グラフはそれぞれ30回ずつ測定した結果とその平均値を表している。任意の方向と強度のモーメントが出力できることがわかる。

ただし、図7のように、ジンバルを回転させることでフライホイールの回転軸の方向もジンバル回転にあわせて変化する。モーメントは式(3)のようにフライホイールの回転軸とジンバルの回転軸に直交する方向に発生するため、モーメントの発生軸方向もジンバル回転にあわせて変化する。ユーザの感想から、初期位置状態から発生する出力モーメントの方向を強く知覚することがわかった。しかしジンバルをあまり大きく回転させると方向の変化に違和感があると報告された。そこでジンバルの回転角を $40^\circ$ 以下にすることで違和感が出ないようにした。

また、連続して使用するためにはジンバルを回転させてモーメントを呈示したあと、ユーザに気づかれないように再びジンバルを初期位置に戻す必要がある。このため、復帰時のジンバル回転速度を5章で行った閾値実験より30deg/sec以下とした。

## 5. 刺激知覚特性評価

本装置による力覚呈示の目標パラメータとして強度、方向がある。ここでは、本装置のユーザの知覚特性として強度に関しては閾値、強度弁別閾を、方向に関しては方向別知覚強度特性、方向弁別閾を測定した。また、各実験とも測定前に装置に慣れてもらうために練習を行っている。

なお、実験の説明中にモーメントの方向を表す言葉として「出力方向」という言葉を用いることとする。本装置ではユーザはグリップ部を持つため、発生するモーメントによって図8のように装置が傾く。ユーザはグリップ部を通して、出力モーメントを一種の並進

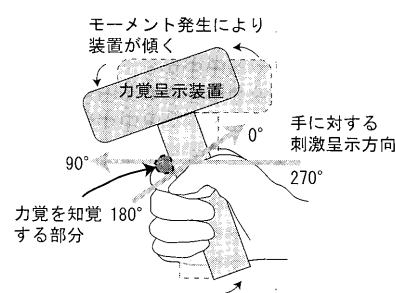


図8 本装置での力覚の知覚  
Fig.8 Perception of the moment

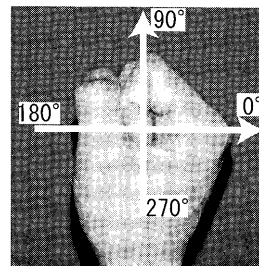


図9 手に対する刺激呈示方向の定義  
Fig.9 Coordinates of the output moment

力として知覚する。この傾く方向で出力方向を表すこととした。例えば、 $0^\circ$ 方向の刺激といった場合は $0^\circ$ 方向に装置が傾くような力覚が呈示されるということの意味する(図9)。

### 5.1 閾値

本装置による力覚の閾値を測定した。被験者は座って目を閉じた状態で装置を右手でフライホイールの回転軸が地面と水平になるように持ち、呈示刺激を感じたかどうか答える。実験は、出力刺激を400gfc程度から徐々に減少させていくもの(下降系列)、ほぼ0に近い状態から徐々に増加させていくもの(上昇系列)について上下法を用いて測定し、上限値と下限値の平均から閾値を算出した。なお、出力方向は標準的な方向として $0^\circ$ 方向について行った。被験者は21歳~25歳の男性3名。

実験結果を表1に示す。被験者が感じられた出力モーメントの閾値は146gfcであった。このときのジンバルの角速度は22deg/sec程度である。

このことから、ジンバルの復帰動作の角速度は22deg/sec以下が望ましいといえる。しかし、復帰動作に時間がかかり力覚呈示間隔が大きくなる。そこで、ユーザが使用したときの感想から、通常用いる上で気にならない強度かつ実用的な復帰時間が得られる角速度として、復帰動作角速度を30deg/secとした。

### 5.2 強度弁別閾

本装置の刺激強度の弁別閾を測定した。実験は標準刺激に対し上昇、下降系列の比較刺激をそれぞれ被

表 1 閾値

Table 1 Threshold of the device

(gfc <sub>m</sub> )	被験者 A	被験者 B	被験者 C	総平均
上限値平均	170	154	173	166
下限値平均	130	124	120	125
平均	150	139	147	146
標準偏差	23	18	30	23

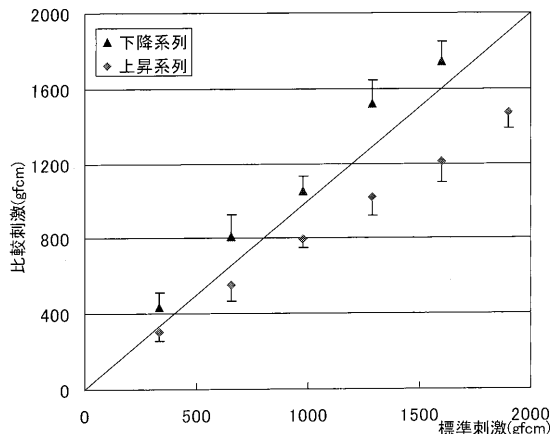


図 10 弁別閾

Fig. 10 Differential threshold

験者に呈示し、被験者が標準刺激と等しいと感じた値を測定した。標準刺激の出力モーメントは 330、660、980、1300、1600、1900gfc<sub>m</sub>（角速度：50、100、145、190、240、280deg/sec）の 6 段階で、各強度につき上昇系列、下降系列を 3 試行ずつ行った。呈示時間は 200msec、呈示方向は 0° 方向とした。被験者は 5 名（21 歳～27 歳、男 4 名、女 1 名）で目を閉じた状態で行った。

実験結果を図 10 に示す。本装置において被験者は 0 を含めて 6 段階以上の弁別が可能といえる。なお、標準刺激が 1900gfc<sub>m</sub> の下降系列は、この装置の最大出力モーメントが約 2000gfc<sub>m</sub> であり、刺激の弁別が不可能であったため、データはない。

### 5.3 方向弁別閾

本装置による出力方向の弁別閾を測定する実験を行った。実験は一定出力方向の標準刺激に対して出力方向の異なる比較刺激を呈示し、両者の方向を比較することで弁別閾を測定した。標準刺激は 0、90、180、270° の 4 方向で、出力モーメントは 1000gfc<sub>m</sub>（角速度：160deg/sec）、ジンの回転角度を 30° 程度とするため呈示時間は 200msec とした。比較刺激方向は標準刺激方向に対し ± 40° の方向から始まり、被験者が PC のキーボードを操作することで徐々に標準刺激方向に近づいていく。被験者が標準と比較の方向が同一であると知覚した値を測定した。1 つの標準方向に対し ± 40° から近づく 2 方向それぞれ 3 試行ずつランダムな順番で、10 人の被験者（22 歳～25 歳、男

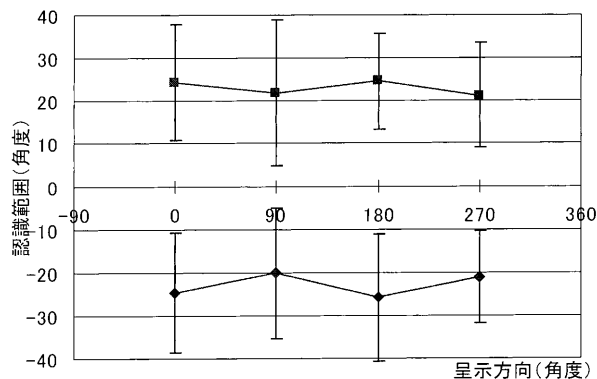


図 11 方向弁別閾

Fig. 11 Differential threshold of direction

8 名、女 2 名）に行った。装置は右手でフライホイールの回転軸が地面と鉛直になるように持ち、装置の動作が被験者から見えないように板で遮蔽した。また、動作音が聞こえないようにヘッドホンによりホワイトノイズを聞かせた。

結果を図 11 に示す。横軸は標準刺激の方向、縦軸はそれぞれの方向に対しての方向弁別閾である。いずれの方向も標準刺激方向に対し平均で ± 20° 程度であり、方向呈示平面において平均で 8 方向程度の弁別ができた。また、正規分布を仮定すると ± 40° の精度であれば正答率約 84 % と推定できる。

### 5.4 方向別知覚強度特性

実際に本装置を用いて力覚を呈示すると、手や手首の機構の違いから出力方向毎にユーザが知覚する強度が異なることが考えられる。そこで呈示方向による刺激感度の違いを調べる実験を行った。

実験は標準刺激として 0° 方向に一定強度の刺激を与える。標準刺激の出力モーメントは 1000gfc<sub>m</sub>（角速度：160deg/sec）、呈示時間は 200msec とした。比較刺激として 45、90、135、180、225、270、315° 方向にそれぞれ刺激を呈示し、標準と比較の刺激強度が同じと知覚するように被験者が PC のキーボードで調節した。各方向の強度につき上昇系列（始点 200gfc<sub>m</sub>）、下降系列（始点 1500gfc<sub>m</sub>）をそれぞれ 2 試行ずつ行い比較刺激の大きさを記録した。比較刺激の呈示順は被験者によりランダムな順番で行った。被験者は 5 名（22 歳～25 歳、男）である。装置は右手でフライホイールの回転軸が地面と鉛直になるように持ち、装置の動作が被験者から見えないように板で遮蔽した。また、動作音が聞こえないようにヘッドホンによりホワイトノイズを聞かせた。

結果を図 12 に示す。グラフは標準刺激強度に対して被験者が等しい強度と認識した比較刺激強度の比率を表している。出力方向に関わらずユーザにある一定

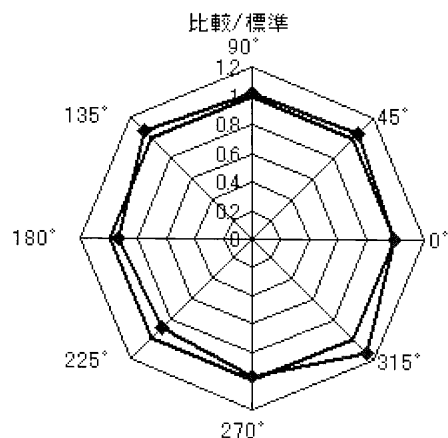


図 12 方向による知覚強度差

Fig. 12 Perceptive ratio of the intensity of moment

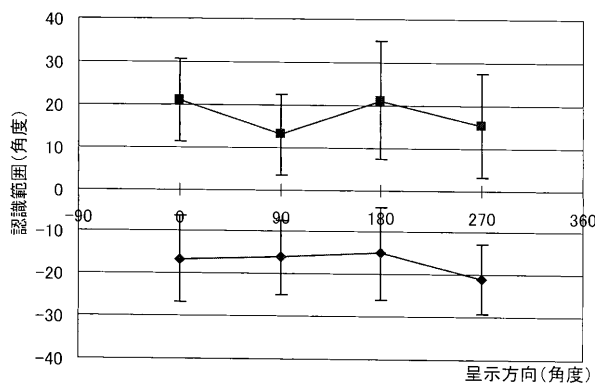


図 13 強度補正後の方向弁別閾

Fig. 13 Differential threshold of direction with the compensation

量の大きさの力覚を呈示したいときには、このような方向別の知覚強度特性に基づいて強度を補正することで、呈示方向による強度認識誤差を減らすことができると考えられる。

ここで、前節の方向弁別実験に呈示強度の補正を加えて実験を行い、呈示方向によって強度を補正することで方向弁別閾に変化が見られるか調べた。実験方法は前節と同様であるが、呈示刺激は方向別の知覚強度特性により出力モーメントの大きさを補正した。

結果を図 13 に示す。強度知覚の補正なしの実験結果と比べると認識誤差範囲は小さくなっているが、呈示強度を補正したことによる方向弁別閾の明確な変化は見られなかった。「方向知覚は装置が手のひらのどこに当たるかで判断した」という被験者の感想から、強度知覚は手の深部感覚によるものであり、方向知覚は図 8 のように装置からの力覚呈示を手のひらのどこで感じるかという皮膚感覚によるものであると考えられる。

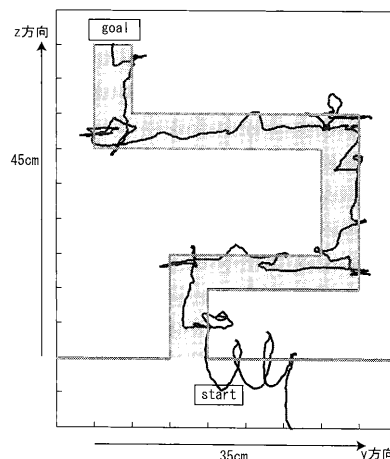


図 14 探索経路と軌跡例

Fig. 14 A course and a trajectory of the device

## 6. 情報呈示実験

本装置は呈示できるモーメントの強度、方向のパラメータの組み合わせで 2 次元方向であるが、様々な情報呈示が可能である。本研究では、経路探索実験と受動的目標探索実験を行った。

なお、装置の位置・姿勢を計測するセンサとして、磁気センサ (Polhemus 社製 3SPACE FASTRACK) を使用した。

### 6.1 経路探索

本装置は VR 物体への侵入量および方向に応じた反力によってバーチャルな壁を呈示することができる。この機能を用いて壁をたたいて進んでいく要領で経路探索が行える環境を実現した。装置が経路の壁に接触すると、反力として最近傍の壁の表面方向で、侵入量に 800gfc/cm の比例係数をかけた強度の刺激を出力した。映像などは用いず、被験者は壁からの反力だけをたよりに経路を探索する。

評価実験では空間中にバーチャルな壁に囲まれた経路を呈示し、その経路を壁からの接触情報を頼りに手腕を動かして探索させる。被験者に正対する平面上に経路を呈示し、通路の幅は 5cm、全長 95cm とした。経路と被験者の軌跡の一例を図 14 に示す。被験者に対し z 座標は上下方向、y 座標は左右方向である。被験者は装置は右手でフライホイールの回転軸が地面と水平になるように持ち、目を閉じて試行した。被験者は 5 名 (22 歳～25 歳、男 4 名、女 1 名) で、スタートからゴールまでの時間、壁に接触した回数を測定した。

結果は、壁に接触した回数の平均が 25.4 回、平均時間が 59.4 秒であった。図 14 より被験者には経路は見えていないが、壁からの反力を頼りに空間中の経路を見つけ進んでいることがわかる。特に、曲がり角では壁と何回か接触しながら経路を探索している。壁の

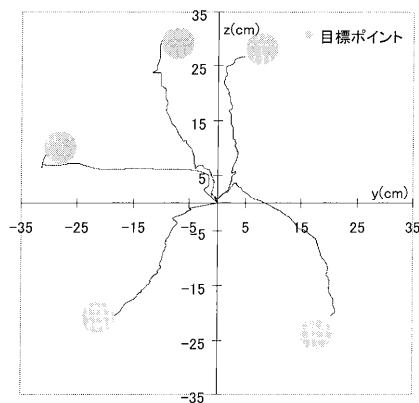


図 15 ポイント探索の軌跡例

Fig. 15 A trajectory of the device in point search mode

中に侵入すると経路に戻るよう刺激が出力されたことが軌跡からも確認できる。被験者からも壁がよく認識でき、経路を辿れたという感想が得られた。

## 6.2 受動的目標探索

本装置はユーザの手をある方向に押すようなモーメントを発生させることが可能である。これにより、空間中に存在する視覚情報に現れないポイントへ力覚呈示を用いてユーザの手を誘導する手法を実現し、評価を行った。

具体的にはそのポイントへ向かい間欠的にモーメントを出力することで、図 8 のように装置が傾き、その結果手を押し進めるように誘導する。実験は目標ポイントを半径 3cm の円形とし、被験者に正対する平面上においてスタート地点から半径 30cm の円周上のランダムな位置に試行毎に 1 つ設定する。呈示強度は目標ポイントからの距離に 160g/cm/cm の比例係数をかけた強度の刺激を出力した。出力時間は 100msec、出力間隔は 700msec である。被験者は 5 人（22 歳～27 歳、男）で、目を閉じて 1 人 5 回ずつ試行した。

表 2 ポイント探索の結果

Table 2 Results of the device in point search mode

	平均時間 (sec)	平均移動距離 (cm)
被験者 A	11.6	47.8
被験者 B	11.9	55.1
被験者 C	20.9	58.2
被験者 D	24.0	43.9
被験者 E	26.8	40.1
平均	19.0	49.0
標準偏差	8.6	12.0

表 2 に各被験者の平均の結果と図 15 に移動軌跡の例を示す。軌跡はモーメントの出力周期と同じ 0.8sec ほどの平均箇所である。その軌跡から移動距離を求めたところ、スタートからポイントまでの最短距離は

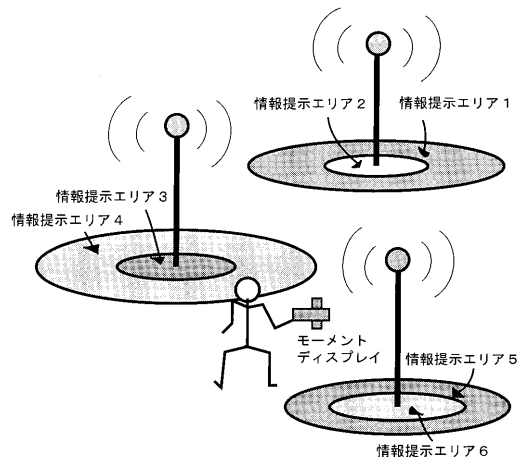


図 16 領域呈示システム

Fig. 16 Area presentation system

27.0cm であるが、被験者の平均は 49.0cm で最短で 32.0cm であった。平均時間は 19.0 秒、最短で 8.8 秒であった。軌跡はほぼ正確に目標ポイントへ向かい進んでいる。この実験から、ジャイロモーメントによる刺激強度と方向情報により空間中で誘導することが可能であることがわかる。

## 7. 応用実験

本装置は持ち運ぶことができる装置でありながら、方向情報や刺激強度を力覚により呈示できることが確認できた。ここではより実際に近い状態での有効性を確かめるための応用実験として、領域呈示実験と VR 迷路探索実験を行った。

### 7.1 領域呈示実験

本装置による力覚呈示により、危険領域などへの侵入を知らせるような領域呈示を広範囲で行うことができる（図 16）。6 章では位置センサとして磁気センサを用いたがここではより広範囲での使用を考え距離センサとして赤外線強度計を用い、領域への侵入情報を力覚により呈示する。赤外線 LED を取り付けした投光機を地面から 1m の高さに配置し、その赤外線を力覚呈示装置に取り付けたフォトランジスタで受光し、その強度より投光機からの距離を計測する。赤外線の投光範囲は約 300cm である。投光機の精度による測定誤差範囲は、100cm で  $\pm 1$ cm、200cm で  $\pm 3$ cm、300cm で  $\pm 8$ cm となっている。フォトランジスタからの信号は A/D ボードを通し PC に入力される。

このシステムを用いて、領域の認識実験を行った。投光機から 100cm、200cm、300cm の距離の位置を通過したときに領域侵入としてモーメントを呈示した。被験者には領域を感じた場所を申告させ、領域を呈示した場所との誤差距離を比較した。被験者は 6 名（22 歳～25 歳、男 5 名、女 1 名）。結果を図 17 に示す。誤差

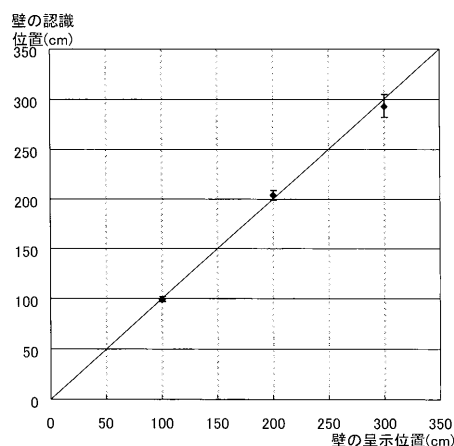


図 17 被験者が認識した壁の位置  
Fig. 17 Recognized position of walls

距離は 100cm では平均値 0.5cm、標準偏差が 2.2cm、200cm では平均 4cm、標準偏差が 4.6cm、300cm では平均 6.5cm、標準偏差 11.4cm であった。

100cm、200cm の地点では、ほぼ呈示通りに領域が認識できた。赤外線投光機のパフォーマンス上 300cm の距離では、誤差が大きくなったが、複数の投光機や強度の高い投光機の使用により、より広範囲での呈示も可能といえる。

このように危険領域侵入などを力覚呈示によって、直感的に認識することができる。また、強度や方向呈示により、領域内での位置認識も可能になると考えられる。

## 7.2 VR 迷路探索実験

力覚による方向呈示は、屋外の明るい場所や霧中などの視覚ディスプレイの視認性が悪い環境でも効果が期待できる。そこで、力覚による方向呈示について、CRT 画面に CG の迷路を表示し、力覚のナビゲーションにより迷路を進む実験を行った。

実験で使用した迷路の経路図の例を図 18 に、実際の CRT 画面上での迷路の様子を図 19 に示す。被験者はこの図のような映像を見ながら操作する。迷路の大きさは CG の座標系で 1600 四方 (実空間換算で 16m 四方) である。実際に使用した迷路は、4 種類で、力覚あり、力覚なしの計 8 試行をランダムな順序で被験者 5 名 (22 歳～25 歳、男) に対し行った。移動入力操作は、装置に取り付けた磁気センサを用いた。被験者に対し 20cm 以上前方に出すと前進、20cm 以上左右に出すと左右方向に回転する。移動速度は CG の座標系において毎秒 30 で一定とした。力覚呈示は、装置を前方 20cm よりも手前に引き寄せた時に現在地に対して正解のルートへ本装置により誘導した。

結果は、力覚呈示なしの場合の経路ミス平均 5.1 回に対し力覚呈示ありでは 0.3 回であった。また、探索

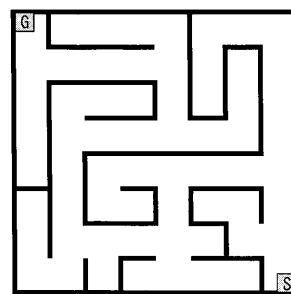


図 18 迷路経路図例  
Fig. 18 Example of maze

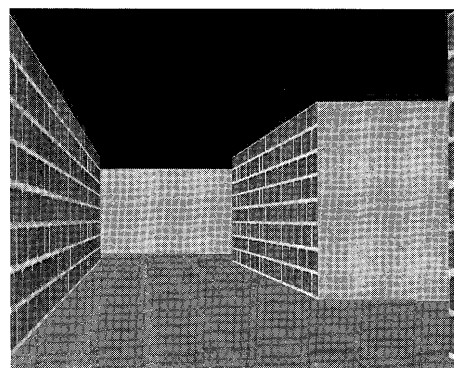


図 19 CRT 上の迷路の様子  
Fig. 19 Overview of maze on CRT

時間や移動距離においても呈示なしの場合の 5 割程度で本手法の有効性が確認された。本実験では磁気センサを用いたが、GPS などの位置センサを用いることで実空間においての方向指示も可能といえる。

## 8. 考察

本研究ではジャイロモーメントを用いることで、手で持ち運びができる新しい形態の力覚呈示装置を開発した。装置は電源や配線などの工夫やフライホイールの回転数の増加により、小型軽量化が可能であり拘束感や空間的制約もなくすることができる。また情報呈示実験により、本装置での VR 物体の認識や力覚による方向情報呈示が可能であることを確認した。

現状の問題点としては刺激呈示時間が短いことやジンパルの引き戻し動作のために呈示間隔に限度があること、2次元方向しか力覚呈示できないことが挙げられる。しかしながら、力覚による情報呈示を目的とする場合には致命的な問題ではない。また、より複雑な力覚呈示や VR 物体認識などを行う際には複数のフライホイールを組み合わせることが考えられる。

本装置の応用としては広大な空間での VR 物体の呈示や、実際の原子炉内における危険領域呈示などがある。また、視覚情報を用いない方向ナビゲーションでは、霧中や暗闇などの視界の悪条件下での誘導装置や視覚障害者の杖の役割としても有効と考えられる。

また、本研究ではジンバルを強制的に回転させモーメントを発生させたが、装置を使用するユーザの動作（腕振りや体の回転など）で生じる角速度をモーメントの発生に利用することもできる。装置を手や足につけて歩き方や体の動かし方を強制するなどの応用が考えられる。これにはより精密な位置姿勢計測や制御が必要のため今後の課題としたい。

## 9. まとめ

本研究ではジャイロモーメントを用いた非接地型の力覚呈示装置を開発した。また、非接地非装着であり手に持って使用するという面から、本装置のユーザの知覚特性として閾値、強度弁別閾、方向弁別閾、方向別知覚強度特性を調べた。さらに、VR 物体の認識や方向呈示における有効性を実験を通して確認した。

今後の課題として、装置の小型軽量化とともに実際のアウトドアでの使用や、ユーザの体の動きを利用した力覚呈示手法の開発が挙げられる。

## 参考文献

- [1] 穴吹、佐藤、山本、田村：屋外装着型複合現実感システムの開発と応用、日本 VR 学会第 6 回大会論文集、pp.277-280(2001)
- [2] Thomas H.Massie：Virtual Touch Through Point Interaction, International Conference on Artificial Reality and Teler-existence, pp.19-38(1996)
- [3] L.Buoguilu,Y.Cai,M.Sato：New Haptic Device For Human Scale Virtual Environment Scaleable-SPIDAR, ICAT'97,pp.93-98(1997)
- [4] 浅野、矢野、岩田：フォースディスプレイを用いた仮想環境における手術シミュレーションの要素技術開発、日本 VR 学会第 1 回大会論文集、pp.95-98(1996)
- [5] 箕、矢野、齊藤、小木、廣瀬：没入型仮想空間における力覚呈示デバイス HapticGEAR の開発とその評価、日本 VR 学会論文誌、Vol.5,No.4,pp.1113-1120(2000)
- [6] 岩田、中川：着用型力覚帰還ジョイスティック、Human Interface N&R,Vol.13,No2,pp.135-138(1998)
- [7] 仲田、中村、山下、西原、福井：角運動量変化を利用した力覚呈示デバイス、日本 VR 学会論文誌、Vol.6,No.2,pp.115-120(2001)
- [8] 黒河、矢島：コントロール・モーメント・ジャイロ(CMG)の研究、機械技術研究所報告第 140 号(1987)
- [9] 中川憲治：工科のための一般力学、森北出版(1977)
- [10] 吉江、中泉、矢野、岩田：ジャイロモーメントを用いた力覚呈示装置による空間探索、日本 VR 学会第 6 回大会論文集、pp.95-98(2001)

(2002 年 5 月 3 日受付)

## [著者紹介]

### 吉江 将之 (学生会員)



2001 年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。同年筑波大学大学院修士課程理工学研究科入学、現在に至る。

### 矢野 博明 (正会員)



1997 年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD)、99 年筑波大学機能工学系講師、現在に至る。力覚呈示、移動感覚呈示に関する研究に従事。博士(工学)。

### 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、88 年同講師、93 年同助教授、99 年同大学機能工学系助教授、2002 年同教授、現在に至る。人工現実感に関する研究に従事(工学博士)。