

人間の力覚感覚特性を利用した 非接地型力覚呈示デバイスの開発

Development of Ungrounded Force Feedback Device based on Human Sensory Characteristics

研究代表者

独立行政法人産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門 主任研究員 中村則雄
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) , Norio NAKAMURA

和文アブストラクト

近年、バーチャルリアリティの分野において、力覚による情報提示の重要性が増してきている。従来のアームやワイヤーを用いた接地型力覚提示デバイスは、携帯利用に不便であったり、身体の動きを拘束したり、デバイス同士が干渉し合うなどの問題点があった。

本研究では、角運動量の変化を利用した小型・携帯性に優れた非接地型力覚提示デバイスの開発を行う。手法として、直交座標に固定された3組のツイン・ジャイロモーターを独立に制御することで、任意の方向・大きさに角運動量ベクトルを合成し、その時間微分によってトルクを発生させる。本手法は、制御が容易であり、変化に富んだ3次元力覚感覚を呈示できる。また、構造が単純で強い強度が得られ小型化が可能である。人の不用意な動きで生じるトルク擾乱を抑え、人間の感覚特性を利用してトルク感覚の向上を図る。

応用として、コンピュータゲーム、ヒューマンナビでの力覚提示デバイスなどが考えられる。

Abstract

The application and usability of haptic feedback display are becoming more important in the recent virtual reality technology. The conventional grounded haptic displays using arms and wires are not convenient because the arms and wires restrict the user's behavior and interfere each other.

In this research, a non-grounded haptic display for mobile use has been developed using torque control by appropriate angular momentum acceleration. As for the method, three pairs of twin motors are located so that two motors of the twin face each other respectively and three axes of the twins across each other orthogonally. The torque force can be generated in the arbitrary direction by controlling time-differentiation of resultant angular momentum vector. This method enables easy control, various patterns of torque force, and downsizing the display with simple and solid structure. Unexpected torque force caused by user's casual arm movement and the effective torque display were attempted to improve by utilizing the human's sense characteristics appropriately.

As for application, this torque display is applied for the human interfaces for computer video games and human navigation system.

1. 研究目的

従来の力覚提示デバイスは、従来の力覚感覚を提示するためにアームやワイヤが不可欠であり、これが身体の動きを拘束したり複数のデバイス間で干渉が生じるなどの課題があった。本研究で

は、角運動量の変化を利用した小型・携帯性に優れた非接地型の力覚感覚提示デバイスの開発を行う。手法として、直交座標に固定された3組のツイン・ジャイロモーターを独立に制御することで、任意の方向・大きさに角運動量ベクトルを合

成し、その時間微分によってトルクを発生させる。このため、接地用アームやワイヤが不要なためユーザの動作・行動への制限が少ない力覚感覚提示デバイスを可能とした。角運動量を利用する場合、人の不用意な動きで擾乱となるトルクが発生してしまうが、この擾乱トルクを抑える手法を考案し、また、人間の感覚特性を利用したトルク感覚の向上を図る。本手法は、制御が容易であり、変化に富んだ3次元力覚感覚を呈示できる。また、構造が単純で強い強度が得られ小型化が可能である。

2. 研究経過

2.1 開発コンセプト

開発コンセプトおよび開発手順を Fig.1 および以下にまとめる。

まず、過去の研究成果・知見をもとに、非接地型で力感覚を呈示することができる機械的機構原理の検討、小型化・慣性モーメントの軽減化にも関わらずトルク出力を維持しながらも、人の不用意な動きで生じる余計なジャイロ効果を軽減することができる機械的機構の検討、人間

の感覚特性を利用した効果的な機械的機構・制御方式の検討し、開発コンセプトにまとめた。

次に、非接地型でありながら力覚呈示を可能にする機械的機構を検証するための予備実験を行い、開発コンセプトを実現する機構を検討し、検討で得られた知見をもとに機械機構に適した制御方法・実験システムを考案した。考案したシステムを試作するためには現状の市販モータでは性能およびコストの面で実現が難しかった。そこで、開発コンセプトの主な2つの機能を別々に検証することとして、2つのプロトタイプ機を開発した。

2.2 基本的動作原理

小型化を考慮した力覚提示デバイスの動作原理について検討した。

トルク感覚を発生させる方法として、慣性モーメントを持った回転体の回転数を加速・減速する方法と、回転体をその回転軸と直交する軸周りに回転させる方法がある。一見異なる動作原理であるがどちらも時間的に角運動量ベクトルを変化させることでトルクを発生させる方法であり、機

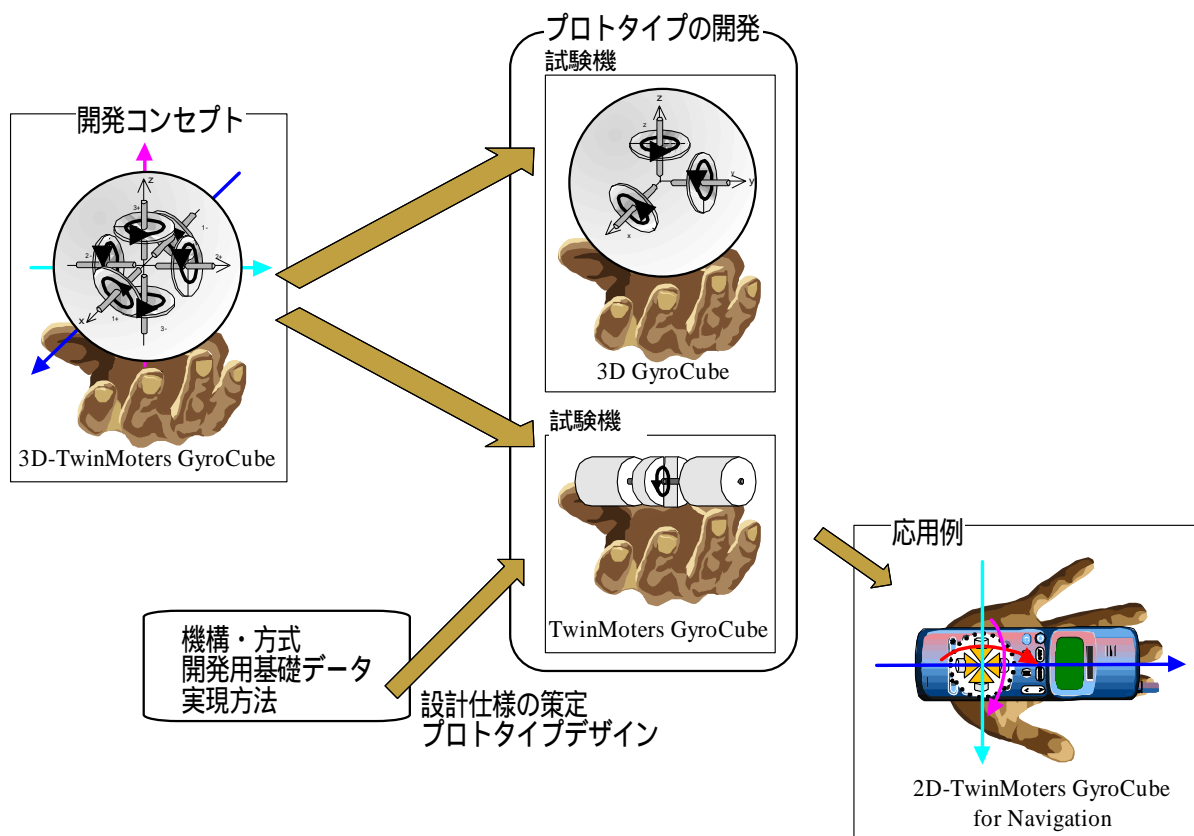


Fig.1 Concept design of GyroCube development

構学的見地から以下の回転子姿勢制御型（以降ジャイロ型と呼ぶ）と合成角運動量ベクトル微分型（以降本方式と呼ぶ）の2つに大きく分類される（Fig.2）。

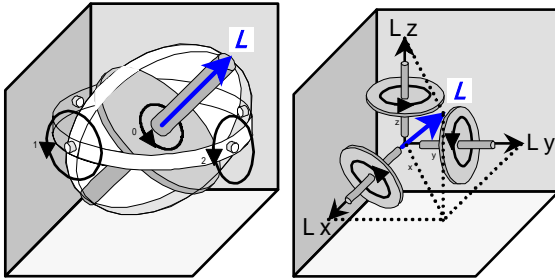


Fig.2 Torque generation mechanisms
 (Left) Orientation control of rotor axis,
 (Right) Orientation control of compound angular momenta

まず、ジャイロスコープを用いた回転子の姿勢を制御するジャイロ型を説明する。ジンバル構造を用いて一定角速度 ω_0 で回転する回転子の姿勢を2つのジンバル軸周りの回転角 θ_1, θ_2 を変化させてトルクを発生させることができる。慣性モーメント I の回転体を角速度 ω_0 で回転させた時の角運動量 L_0 は、

$$L_0 = I \omega_0$$

と表わされる。このとき、トルクが発生する方向を考慮して、角運動量ベクトル L を角速度 ω で回転させたとき発生するトルクベクトル T は

$$T = \dot{\omega} \times L, \text{ where } \dot{\omega} = d\omega / dt$$

で表わされる。

次に、先行研究において著者らが提案した合成角運動量ベクトルの時間変化を制御する本方式を説明する。x軸、y軸、z軸に固定された3つの回転子の回転数 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ を独立に制御して、それぞれの回転子が発生する角運動量を合成することで任意の方向に角運動量ベクトルを発生させることができる。これを適切に制御すれば任意の方向にトルクを発生させることができる。角運動量ベクトル L を変化させた時に発生するトルクは以下のように表される。

各 x, y, z 軸周りに角速度 ω_i で回転する角運動量 L_i は、各軸周りの慣性モーメントを I_i とすると、

$$L_i = I_i \omega_i, \quad i = x, y, z$$

と表わされる。これらの各軸周りの角運動量から構成される合成角運動量ベクトルは、 x, y, z 軸方向の基本ベクトルを i, j, k とすると、

$$L = L_x i + L_y j + L_z k$$

Table 1 特徴比較

	合成角運動量ベクトル微分型（提案方式）	回転子姿勢制御型
動作原理	3つ以上のモータによる合成角運動量ベクトルの時間微分 $T = dL / dt$ $L_i = I_i \omega_i, \quad i = x, y, z$	回転子の姿勢制御 $T = \dot{\omega} \times L, \text{ where } \dot{\omega} = d\omega / dt$ $L_0 = I \omega_0$
構造	直交3軸に配置された固定モータによって実現できるため、可動部分および部品数が少なく、小型化が可能である。 点対称構造に配置することができるため、デバイスの中心と重心が一致し、質量バランスは固定されている。	モータの回転姿勢を制御するジンバル構造が必要のため、ジンバルの可動部分の加工や部品数が多くなる。 また、回転子の姿勢を変化させるためのジンバルの動き自身が慣性力を持っているため、ジンバルの回転による擾乱トルクは発生する。
発生トルク	各モータ毎の回転数の比を制御することで、任意の方向にトルクを提示することができる。 モータの最大回転速度に依存し、一定方向に連続でトルク提示できる時間に制限がある。	基本的に、回転子の軸と姿勢回転方向に直交する方向にトルクが発生するため、任意の方向にトルクを提示できない。 回転子の姿勢制御に加えて回転子自身の回転数を可変にすれば直行方向以外にもトルク提示が可能だが、制御が複雑・難しい。
制御	提示したいトルクに必要な回転の制御が容易に計算できるため、制御が容易である。	回転子の姿勢をモニタしながら、提示したいトルクを発生させる制御パラメータを推定する方法が難しい。
加工	モータなどの回転体を固定配置するだけであり、部品数も少なく加工が容易である。	ジンバルの可動部分の加工が必要であり、部品数もGyroCubeに比較すると多くなる。
強度	モータを固定するだけなので強固な構造体になる。	可動部分が多く、強度がやや落ちる。
騒音	モータ回転音	モータ回転音、ジンバル回転音

と表わされる。この合成角運動量ベクトルの時間微分が発生するトルクベクトルである。

$$= dL / dt$$

x、y、z軸方向の角速度の比 $x : y : z$ を変えることで任意の方向に角運動量ベクトルの発生方向を制御することができる。本手法は制御が容易であり、変化に富んだ3次元力覚感覚を呈示できる利点がある。

ジャイロ型は回転体の姿勢を変化させる事による方法であり、発生トルクは基本的に回転体の軸と姿勢の回転軸と直交する方向にしか発生できない。これに対して、本方式は、回転体の状態に依ることはなく、任意の方向にトルクを発生することができる。

2.3 特徴比較

特徴を Table 1 にまとめた。

GyroCube では3つの直交座標に固定された慣性質量を持った3つのモータが Fig.1 (Right) のようにねじれの位置に配置させていたが、質量バランスや慣性モーメントの向上を図るために Fig.2 のコンセプト図に示されるように慣性質量部分を重心近くで対峙させた3組のツイン・モータ方式を考え出した。慣性質量を重心に集中させることで、人の動きで生じる余計な慣性力の低減を図っている。また、モータ固定用のフレーム形状も、フレーム自体の慣性モーメントが小さくなるように、立方体形状から点対称構造である球形に近づけた。

もしジャイロ型を用いた場合、角運動量を生成する回転子の姿勢を制御するためにはジンバル構造が不可欠であるが、ジンバル自身が余計な慣性モーメントを持ち、これ自身が回転するために擾乱トルクを発生する。また、ジンバルのフレームが回転することで質量バランスが変化してしまう問題点もある。加えて、構造的にもジンバルの可動部分が煩雑となる。これに対して、本方式ではモータが固定されているために質量バランスが変化することはなく、単純な構造となり力学的に強い強度が得られる。また、小型化した場合にも構造が単純なため加工が容易である。

3. 研究成果

開発した 3D-GyroCube および TwinMotors

GyroCube を Fig 3. に示す。



Fig 3. (Left) Developed 3D-GyroCube, and (Right) TwinMotors GyroCube.

左図は、人間の感覚特性を考慮して軽量・小型化して開発した非接地型トルク提示デバイス 3D-GyroCube であり、右図は対向したツイン・モータを利用してトルク感覚と力感覚の両方を1つのデバイスで呈示することができる力・トルクハイブリッド型力覚呈示デバイス TwinMotors GyroCube である。

以上の検討および研究成果を、関連する他の研究成果と合わせて特許として出願した。

4. 今後の課題と発展

今回の開発では、開発期間およびコストの課題で本開発目的に沿った性能仕様のモータが見つからず、提案原理を確認するために主に2つの仕様に分けて、市販のモータを活用して2つのプロトタイプ機を開発した。今後の課題として、これらを1つのデバイスで実現するために、小型でありながら高トルクを提示することができる専用モータ機構を設計し、実際に試作する必要がある。

本デバイスの応用としては、ヒューマンナビゲーションシステムがあげられる。現状の携帯電話機によるヒューマンナビゲーションシステムは歩きながらの地図の視認性や屋外・雑踏における音声ガイド聴取の問題などがあり、視覚・聴覚情報に頼ったナビでは十分でない。そこで、本デバイスを応用することで、従来の視覚・聴覚情報に加えて、進行すべき方向を力覚感覚で提示するマルチモーダル・ヒューマンナビゲーションシステムが実現できる。

5. 出願特許リスト

1. 特願 2003-390802
2. 特願 2003-402892