

## CVT機構を用いた2次元力覚提示システムの検討

曾根順治<sup>\*1</sup> 河村 博行 衣川 弘二  
徳山喜政 今野晃市<sup>\*2</sup>

Feasibility Study of a 2 Dimensional Haptic Display using a CVT Mechanism

Junji Sone<sup>\*1</sup> Hiroyuki Kawamura Koji Kinukawa

Yoshimasa Tokuyama Kouichi Konno<sup>\*2</sup>

**Abstract** – Two haptic displays for virtual reality have recently been developed: one is an earth-grounded type, and the other a body-grounded type. There is now a great deal of research in this field, including work on a body-grounded type of device, a GyroCube, a moment-type display using a mechanical brake and a force display using a gyro moment. We have developed another kind of moment-type force display using a half-toroidal CVT (continuously variable transmission). In this paper, we report improvement the display weight and investigation of two dimensional display. And the human perception ability of direction has been confirmed by experiment.

**Keywords** : Haptic display, CVT, Torque, Moment, Two dimensional, Virtual reality,

## 1 はじめに

人間に力覚や触覚を提示するインターフェイスは、仮想世界において臨場感を増すための目的やインタラクティブな意志伝達、操作性の向上、認識能力の向上には重要であり、多くの研究が進められている。最近では、多くの触・力覚提示装置 [1] が開発されている。ひとつは、Phantom[2], Spidar[3], HapticMaster[4] のような地球固定型デバイスを用いる方法である。これらは、提示する位置の制約を持つ。さらに、柔軟性を向上させるために、装着可能なデバイス [5, 6] も多く研究されている。ひとつは、慣性ローラとジンバルを用いて、ジャイロモーメントにより力を生成する方法 [7] である。この方法はジンバルの回転角度制御に制限があると報告されている。2つめは、筑波大学のGyroCube[8]がある。これは、3方向にモータと慣性の大きなホイールを配置して、その角速度を変えることにより、トルクを生成して力覚を提示するものである。このシステムは自由に3次元方向に力覚を提示可能である。この方法では、速度を制御するためには、モータの電流制御が必要となる。3つめは、ブレーキを用いて、角速度を急激に変える方法 [9] もある。これは、2個のモータと慣性ホイールから構成され、それにブレーキを有する構造となる。通常の状態において、2個の慣性ホイールは同じ回転数で回転している

が、片側にブレーキをかけることによりトルクを生成する方法である。このシステムは、1自由度の力の生成に2個のモータ、慣性ホイールと2個のブレーキが必要となる。4つめとして、安藤らはピストン型のリンクメカニズム [10] の開発を進めている。この装置は、往復型の重りをリンク機能でモータに接続し、重りの往復において速度を変え、その差から方向を提示するものである。この方法は、サーボモータによる精密な制御が必要であり、かつ提示時間がパルスの的に形成される。

また、近年日本精工により、回転伝達効率が高くまた、スムーズな加減速が可能なハーフトロイダルCVT (continuously variable transmission)[11]が自動車の変速機として実用化されている。これは、2個のホイールをパワーローラを介して回転を伝達する方法である。ここで、パワーローラの角度を変更することにより、接触距離が2個のホイール間で変わるために、速度を自在に変更することが可能となる。

そこで本研究は、トロイダルCVT機構を用いて、装着可能でかつ多くの方向に力覚を提示可能なディスプレイを開発している。ここで、本力覚提示システムはCVT機構の入力ホイールがモータに直結しており、モータは等速で回転している。そして、CVTの機能を用いて、出力ホイールはパワーローラの動きにより、加速および減速されることになり、その角速度の変化により力覚が生成される。この方式の利点は、パワーローラをステッピングモータにより回転角度を変化させるだけであるため制御が簡単である。また、入力回

<sup>\*1</sup>東京工芸大学 工学部

<sup>\*2</sup>岩手大学 工学部

<sup>\*1</sup>Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic Univ.

<sup>\*2</sup>Faculty of Engineering, Iwate Univ.

転数が一定であるため、1方向に力覚と提示後、逆方向にも、すぐに力覚を提示可能である。前報では、片手に1方向ずつ提示する方法(両手で2方向)や基礎的な力覚提示特性について検討した[12]。本報告では、提示機構の軽量化を図り、片手で2次元方向を提示できるような構成とし、かつモータも内蔵する形式に改善して、力覚提示実験を実施した結果について報告する。

2 開発機構

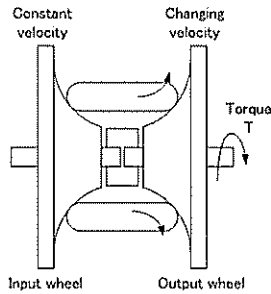


図1 動作原理の概要  
Fig.1 Scheme of the working principle.

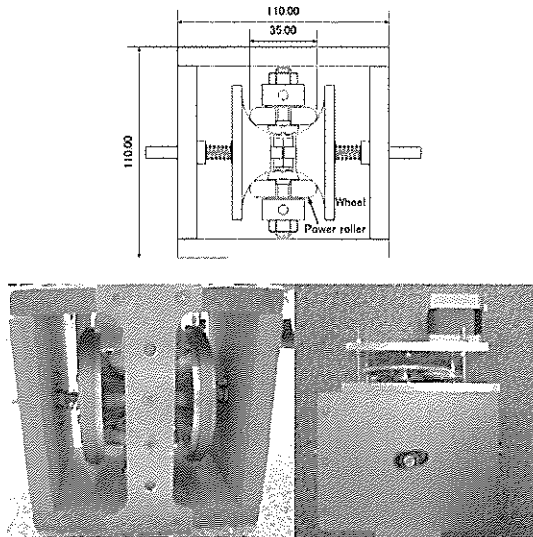


図2 前報で開発した力覚提示デバイスの構成  
Fig.2 Configuration of a previous developed haptic device.

動作原理を図1に示す。入力ホイールの回転を一定とすれば、パワーローラの角度を変化させると出力ホイールの速度が変化する。ここで、出力ホイールは慣性モーメント  $J[kg \cdot m^2]$  を有し、ホイールの角速度が  $d\omega$  [rad/s] 変化する(変化時間は  $dt$ ) ことにより、生成されるトルク  $T[N \cdot m]$  は次式で示される。

$$T = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

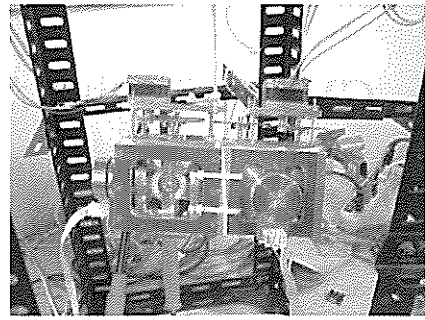


図3 開発した力覚提示デバイスの構成  
Fig.3 Configuration of a developed haptic device.

ここで、本機構は通常のDCモータ(回転速度一定)とステッピングモータから構成できるために、制御が簡単となる利点がある。

また、前報告で開発した力覚提示システムの概略を図2に示す。ここで、ホイールはR21.5の凹面を持ち、また、R17.5のパワーローラで連結されている。そして、パワーローラの角度はステッピングモータにより制御されている。動力用のモータは、日本サーボ製のDME60BB(最大トルク:59mNm)を使い、モータとCVT間にはフレキシブルシャフトで結んでいる。この構成において、モータ、フレキシブルシャフトなしでも、1.9Kgの重量である。さらにモータとフレキシブルシャフトも含めると3.4Kgの重量である。

本報告のCVT機構を図3に示す。内部の機構部品や外側フレームをジュラルミン(A2017)に材質を変更し、外側フレームは薄肉化と中抜きを図る。そして、パワーローラを駆動するステッピングモータを小型化(100g軽量化)し、また、ホイールの駆動モータにブラシレスECフラットモータ(Maxon製、最大トルク81mNm)を採用したため、モータ重量を含めても、CVT力覚提示システムの単体は、1.6Kgに軽量化を図ることができている。開発した力覚提示システムの入力回転数は、5000rpmであり、パワーローラを+20度回転させた時の、出力ディスクの回転は2666rpmである。また、パワーローラを-20度回転させた時の、出力ディスクの回転数は9376rpmであり、トルクは、角速度の変化に比例するために、実際は、パワーローラを-20度回転した方が、+20度の場合より1.87倍トルクが大きくなることになる。

このシステムの特徴は、回転が連続的であり、かつ入力ディスクの回転が一定であるために、1方向にトルクを出しても、その状態からパワーローラを逆転させれば、逆方向のトルク提示が行える利点がある。パワーローラの回転を戻す時において、パワーローラを戻す速度を遅くすることにより、力覚提示システムの



図 4 人への方向提示実験の構成  
Fig. 4 Configuration of the human perception experiment.

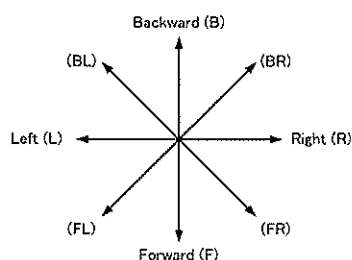


図 5 提示した 8 方向  
Fig. 5 Directions of presentation.

トルク変動を人間の感覚の閾値以下に抑えれば、意図しないトルク出力を防ぐことが可能である。

### 3 方向提示実験

改良した提示機構の有効性を検討するために、4 方向の提示、8 方向の提示実験を行う。

#### 3.1 4 方向の提示実験

図 4 に示すように、2 個の提示装置を連結して、片方の手に 2 次元方向を提示できるデバイスを作成して実験を行う。実験姿勢は、被験者がデバイスの前に立ち、デバイスを下から手のひらで持ち上げる方法である。ここで、ホイールは厚さ 5mm の真鍮製の重りをつけて慣性モーメントを  $0.00014 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  としている。これは、前報告で実験により求めた提示に適した条件である。出力ディスクの回転数の変化は、パワーローラ角度が +20 で 2666rpm である。また -20 度で 9376rpm である。力覚の提示時間は 1 秒、戻り時間は 2 秒である。この戻り条件は、次の力覚を提示を早くするための最小時間であり、前報の実験により求めている。また、この時の提示トルクは、 $0.15 \text{ Nm}$  である。まずは、この構成において、前後方向と左右方向を提示して、正答率を評価する。実験は、20 代 4 人、40 代 1 人の計 5 人の被験者に対して、目隠し、ヘッドホン

表 1 4 方向提示実験の正答率  
Table 1 Correct answer rate of 4-direction

Direction	Forward	Back	Left	Right
Correct rate [%]	100	100	96	92

を着用してもらい、各条件を 5 回 (4 方向で計 20 回) をランダムに提示して、回答を得る実験を行う。ヘッドホンにはホワイトノイズを流して外部音が聞こえないようにしている。

実験結果を表 3.1 に示す。表より、前後、左右方向の正答率は 90% 以上であることがわかる。ここで、左右提示装置の組み立て精度が少し劣っていたこと、提示時間と戻り時間の差が少ないことが、左右方向の正答率が 100% には至っていない原因と推測する。

#### 3.2 8 方向の提示実験

2 次元方向提示デバイスを 2 個連結させ、前後の提示機構と左右方向の提示機構を同時に駆動して 8 方向を利き手に提示し、正答率を評価する実験を行う。提示した 8 方向を図 5 に示す。慣性モーメント、出力ディスクの回転数の変化、提示方法は、前項と同じ値を用いる。被験者は 20 代 4 人、40 代 1 人の計 5 人であり、全方向を 3 回ずつランダムに提示し、その実験を休憩をはさみ、3 セット (全 72 条件) 行い、その正答率を評価する。実験に慣れるために、各被験者は試行を 10 回行っている。また、目隠し、ヘッドホン (ホワイトノイズ) を着用して実験を行っている。

その結果を図 6 に示す。図より、1 方向を除いて 70% 以上の正答率を得られている。これは、方向 BR の場合、前後方向提示装置の後ろ (B) 方向の提示トルクは強いが、左右方向提示装置の右 (R) 方向の提示トルクは弱いため、感覚的に混乱した可能性がある。また、提示時間と戻り時間の差が少ないこと、左右提示装置の組み立て精度が少し劣っていたことも要因と考える。

### 4 まとめ

CVT 機構を用いた力覚ディスプレイの改良を行った。その結果、力覚提示機構はモータを含めて 1.6Kg に軽量化することができた。これは、前報の力覚提示機構 3.4Kg から半分以下にすることができたため、身体の背部から重量を補正する機構を設ければ、持ち歩ける範囲になったと考える。また、2 個の力覚提示機構を連結させることにより、2 次元方向を 1 箇所提示するシステムが開発できた。提示実験結果より、最悪の条件でも 55% 以上、他の条件では 70% 以上の正答率を得ることができ、本力覚提示システムは、方向提示に応用可能であることがわかった。

現在の入出力ディスクの曲率の設計においては、パ

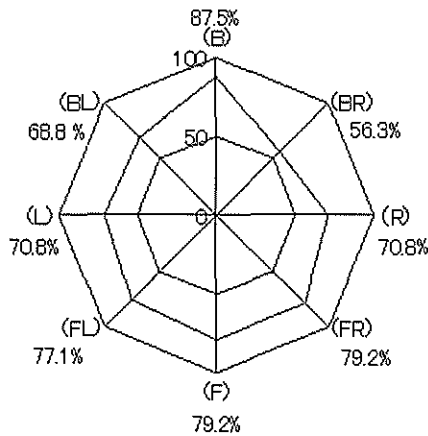


図6 各提示方向の正答率  
Fig.6 Correct answer ratio of each direction.

ワーローラの回転角度が同じ場合、+方向と-方向の角速度変化量が異なる。そのために、正答率の方向依存性が出現していると考えられる。そこで、ディスクの曲率中心や回転量を見直して、角速度変化の均一化を図れば、方向依存性は、改善されることが考えられる。また、部品の組み立て精度も影響するので、精度向上を図れるように設計も改善する必要がある。

さらに、装着型の力覚提示機構として、応用方法を検討し、実用化を進めていきたい。

参考文献

- [1] Grigore C. Burdea: "Force and touch feedback for virtual reality", John Wiley & Sons, Inc.,(1996).
- [2] Thomas H. Massie and J. K. Salisbury. "The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects". *Proceeding of 3rd Annual Symp. Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 295-301, 1994.
- [3] Makoto Sato: "Development of string-based force display :spidar". *Proc. The Eighth International Conference on Virtual Systems and Multi Media VSM 2002*, pages 1034-1039, 2002.
- [4] Takeo Asano, Hiroaki Yano, and Hiroo Iwata. "Basic technology of simulation system for laparoscopic surgery in virtual environment with force display". *Proceeding of the Virtual Reality Society of Japan Annual Conference*, pages 95-98, 1996.
- [5] M. Hirose, T. Ogi and H. Yano : "Development of wearable Force Display(HapticGear) for Immersive Projection Display", *Proc. IEEE Virtual Reality*,79,(1999).
- [6] H. Iwata and H. Nakagawa: "Wearable Force Feedback Joystick", *Human Interface N&R*,13,2,pp135-138,(1998).
- [7] M. Yoshie, H. Yano and H. Iwata: , "Development of Non-grounded Force Display Using Gyro Moment Effect", *TVRSJ*, 7,3,pp329-338,(2002).
- [8] Y. Tanaka, M. Sakai, Y. Kohno, Y. Fukui, J. Yamashita and N. Nakamura : "Mobile Torque Display and Haptic Characteristics of Human Palm",

ICAT 2001,(2001).

- [9] H. Ando, K. Obana, J. Watanabe, M. Sugimoto and T. Maeda: "Development of a rotation moment-type force display using mechanical breaks", *Journal of Human Interface Society*, 5,2,pp181-188,(2003).
- [10] T. Amemiya, H. Ando and T. Maeda, : "Virtual Force Display: Direction Guidance using Asymmetric Acceleration via Periodic Translational Motion", *Proc. of IEEE World Haptics Conference 2005*, pp619-622,(2005).
- [11] T. Imanishi and H. Machida: "Development of POWER TOROS UNIT Half Toroidal CVT(2)", *NSK Technical Journal*,670,(2000).
- [12] J. Sone, H. Kawamura, N. Natusi, T. Hasebe, Y. Tokuyama, K. Konno, "Development of a haptic display using a CVT mechanism", *HAPTEX '05 - VR Workshop On Haptic and Tactile Perception of Deformable Objects*, (2005).
- [13] Y. Hatamura, K. Matsumoto, H. Morishita: A Miniature 6-axis Force Sensor of Multilayer Parallel Plate Structure, *Proceedings of IMEKO, Houston, USA*, pp621-636,(1988).

(2006年7月6日受付)

[著者紹介]

曾根 順治

(正会員)



1985年、豊橋技術科学大学大学院修士過程修了。(株)東芝、慶應義塾大学SFC研究所訪問所員を経て、現在、東京工芸大学助教授。コンピュータグラフィックス、VRおよび製造システムの研究に従事。博士(工学)。正会員。

河村 博行



2005年、東京工芸大学工学部光工学科卒業。在学中、バーチャルリアリティの研究に従事。

衣川 弘二



2005年、東京工芸大学工学部光工学科卒業。在学中、バーチャルリアリティの研究に従事。

徳山 喜政



1986年、東京大学工学部産業機械工学科修士課程修了。(株)リコーを経て、現在、東京工芸大学教授。CAD,CGにおける自由曲面生成手法、形状制御手法の研究に従事。博士(工学)。正会員。

今野 晃市



1985年、筑波大学第三学群情報学類卒業。(株)リコー、ラティス・テクノロジー(株)を経て、現在岩手大学助教授。計算機科学、自由曲面生成、レンダリングアルゴリズム、並列処理の研究に従事。博士(工学)。正会員。