

## 装着型回転力覚提示システムの試作

曾根 順治<sup>\*1</sup> 岩井 秀樹<sup>\*2</sup> 金子 格<sup>\*3</sup> 藤田 欣也<sup>\*4</sup>

## Prototyping of wearable mechanism with sense of rotational haptics

Junji Sone<sup>\*1</sup> Hideki Iwai<sup>\*2</sup> Itaru Kaneko<sup>\*3</sup> Kinya Fujita<sup>\*4</sup>

**Abstract** Flexible human interface systems is more needed for more small size and varieties of sensing according to level up of smart phone function and increasing requests of robotics application. Sense of rotational movement is important for human activity and craftsmanship of industrial assembling of mechanism. We are trying to develop the wearable mechanism of sense of rotational haptics. Important points of this system are compact, light weight and accuracy of haptic sensation. We built of prototyping of mechanism.

## 1. はじめに

人間に力覚・触覚[1]を提示するインターフェースは、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思伝達には重要であり、多くの研究が進められている。これらのインターフェースの多くは接地型が多く Phantom[2]、Spidar[3]、HapticMaster[4]などがあるが、指先もしくは局部的に力覚を生成するものである。

Hasser らは、Haptic knob のシステム同定を検証しており、手の動作モデル構築に成功している[5]。そして、Swindells らは、種々なノブの特性を慣性、粘性、摩擦、クリップ特性などのパラメータを取得し、2次形式のトルク提示モデルを提案し、ボリュームやロータリースイッチのノブに対するトルク提示を、モーターを用いた提示機構で成功している[6]。しかし、バルブのように、急激にトルクが上昇する系までは検討していない。Lambercy らは、手の握りと回転の2自由度つまみ機構を開発し、握りと回転のリハビリに応用している。トルクは、速度依存と位置依存トルク(比例)で実験している[7]。また、Chapuis らは、モーター、ブレーキとクラッチを含む haptic knob 提示機構を開発し、バネや壁のような簡易的な提示には成功している[8]。また、回転動作を電気粘性流体により生成される抵抗で制御する方法も研究[9]されており、さらに、アクチュエータとの複合化も検討されている[10]。それらの研究は、先駆的であり、リハビリテーションへの応用で成果をあげているが、手首の回転動作は対象としていない。

データを用いて、力覚を補正する方法としては、event based haptic rendering[11]があり、物体の硬さの表現に成功している。また、Dellon らの軌跡制御[12]や筋電位を測定しておいて、その波長を力覚生成の目標値として、持ち上げ動作を対象として手首に力覚を提示する研究[13]も行われており、目標値のテーブルを持ち、それを力覚提示に活用することが検討されている。著者らも、固定型の回転力

覚提示システムを開発し[14]、様々な力覚提示が可能であることを報告しているが、大型でかつ固定型である。

本研究は、腕に装着可能な軽量かつコンパクトなハプティックデバイスを検討する。そして、急激に停止する動作を含めた手首の回転動作を対象として、提示力覚目標値をテーブルとして持つ力覚提示システムを検討した。この動作においては、ブレーキが重要であるため、ブレーキ機構を開発した。本論文は、そのコンセプトと試作について述べる。

## 2. 装着型ハプティックシステム

## 2. 1 システムの概要

図1に装着型ハプティックシステムの概要を示す。事前にトルクセンサーにより、バルブ閉開く、ドアノブを回すなどの動作を計測した力曲線を、PC内でデータテーブルとして保持する。実験時には、腕の回転角度を糸を通じて、エンコーダの回転より計測し、それに対応する力値を計算する。そして、ソレノイドドライバーを介して、ブレーキにより、力覚を提示する。ブレーキは、糸巻きに連結しており、糸が連結されている手首の回転のブレーキとして作用する。実験データをエンコーダでPC内へ読み込み、計測した数値をグラフ化する仕組みとなっている。また、力覚提示機構は、洗濯ばさみにより、上腕部に固定されているが、スポンジを介することにより、ソフトかつ柔軟に対応し、腕の動作を妨げないように設定されている。

## 2. 2 力覚提示機構

力覚提示機構の概要を図2に示す。この装着型回転力覚提示システムは、前腕部の左右および前後の4カ所に、ディスクブレーキを設置している。これは、手首の回転力覚に加え、手首の上下の力覚を提示できるように設計されている。各ブレーキは、糸巻きを有し、そこに巻かれた糸は、

\*1 東京工芸大学工学部コンピュータ応用学科教授 \*2 東京工芸大学工学部電子情報工学専攻

\*3 東京工芸大学工学部コンピュータ応用学科准教授 \*4 東京農工大学工学部情報工学科

手首の回転機構に連結している。ディスクブレーキは、力覚提示の指示に従い、ソレノイドで鉄柱を押し出すことにより、ブレーキを動作させる。ここでは、ブレーキ力を柔軟に制御するために、PWM 制御を用いている。これは、2～10msec を1周期として、その間を2から8分割して、パルス幅を制御することにより、ブレーキ力を制御するものである。この場合、パルス ON 幅が広いほど強いブレーキ力が提示できる。ここでは、数 msec ではソレノイドが明示的に On-Off することができないが、擬似的に電圧を制御したと同様な効果を生み出すことができる。これは、モータの速度制御と同様な効果をもたらす。このように、力覚提示の目標値に従い、ブレーキ力を与えることにより、手首の種々の動作の抵抗を再現する仕組みである。このことにより、ドアを開ける、ドアノブの回転やバルブを開くなどの、手首を回した動作に伴う動作を仮想再現させるシステムである。また、被験者は先端にある把持部を握って、実験を行う。

この提示機構は、フレーム部をカーボン材料、ブレーキ部はアルミ材で製作して、軽量化を図っている。手首回転部は、通常のベアリングを使用するとこの大きさでは、重量増となるために、自己潤滑性のある樹脂とアルミ材を組み合わせ、軽量の構造に配慮した。

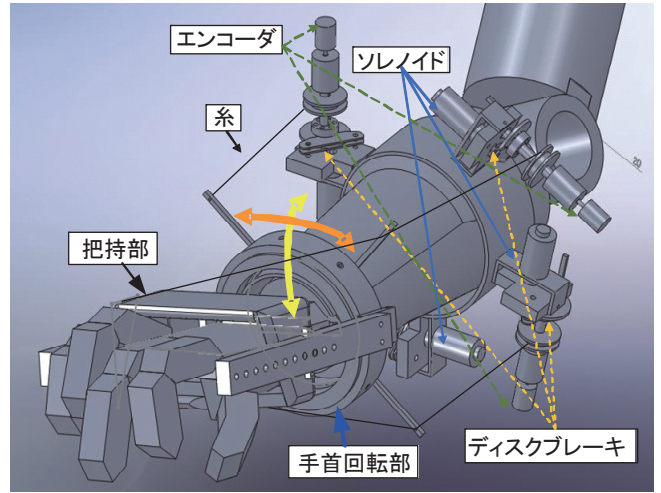


図2. 力覚提示機構

### 2.3 ブレーキ機構

図3は、ブレーキ機構を示す。ブレーキ機構はディスク円盤、ブレーキキャリパー、ソレノイド、シャフト、エンコーダ、糸巻き、主軸、連結部で構成されている。主軸を中心としてベアリング、円盤、糸巻き、エンコーダが同軸に配置され、回転する。糸巻きに糸を巻き、糸と手首が連結しているため、手首を動かせば糸車、エンコーダが同時に回転し、距離を計測する仕組みである。また、糸巻きと円盤は連結されており、ブレーキ力が糸巻きに加わる。さらに、定荷重バネを用いて、糸巻きに常に弱い巻き取り力を加えることにより、糸のたるみを防止している。本体連結部には、ベアリングが設置されており、回転の摩擦を防いでいる。ブレーキは、ブレーキキャリパー内に設置した摩擦板により、ソレノイドに連結したシャフトが移動すると、摩擦板が円盤を挟む構造となっており、摩擦力を生成する。そのことにより、糸巻きに巻かれた糸にブレーキ力を提示することができる。

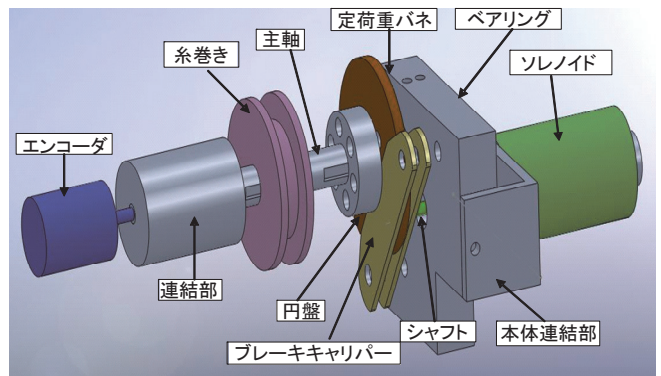


図3. ブレーキ機構

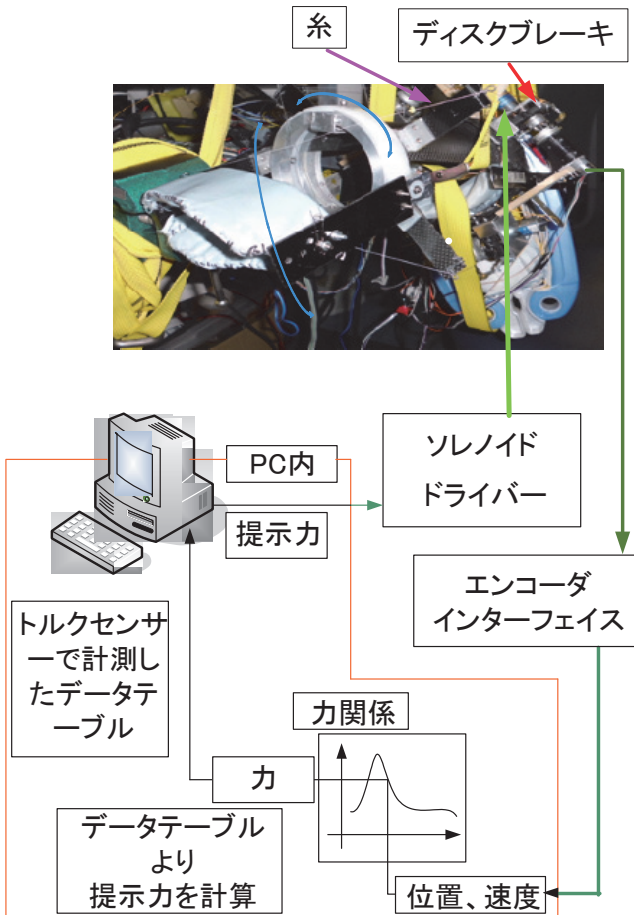


図1. 回転力覚提示システムの概要

ブレーキ部はミニ四駆の部品、エンコーダは日本電産コパルト電子社製のセンサ用ロータリーエンコーダ RE12D300、ソレノイドは新電元メカトロニクス社製 s-50 チューブラソレノイド (プッシュ型)、定荷重バネはタカ

ラトミー社製の玩具 QZM-04 を使用している。

ブレーキ力は、式(1)の減衰係数  $C$  と PWM パラメータの関係、重りを用いた自由落下から求める。

$$T = I\alpha + C\omega + K\theta \quad \text{式 (1)}$$

ここで、 $T$ : トルク(Nm),  $C$ : 減衰係数,  $\alpha$ : 角加速度,  $\omega$ : 角速度,  $\theta$ : 角度, 回転系の慣性モーメント  $I$ :  $0.0000019\text{kgm}^2$ , 定荷重バネ定数  $K: 6.35 \times 10^9 \text{N/m}$  である。実験より、PWM パラメータと生成トルクを求めて、トルク生成時のソレノイド制御に用いる。表1は、重り 300g を用いた時に求めた減衰係数と On-Off 比の関係の一例を示す。この関係は、角速度との関係であり、角速度と提示トルクより、これらのテーブルから On-Off の比を選定して、力覚を提示する。

表1. 300g 時の減衰係数  $C$  と On-Off の比(msec)の関係

	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
<b>C</b>	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01

### 3. 有効性確認実験

図4は、装着型回転力覚提示システムを用いた実験概要を示す。実験は、6人の被験者がデバイスを回転する時に、「ドアノブを回す」、「バルブを開ける」、「バルブを閉める」の3パターンの力を提示し、「力を認識できたか」、「動きと合致していたか」のアンケートをとった。この実験は各5回ずつ、計15回行った。

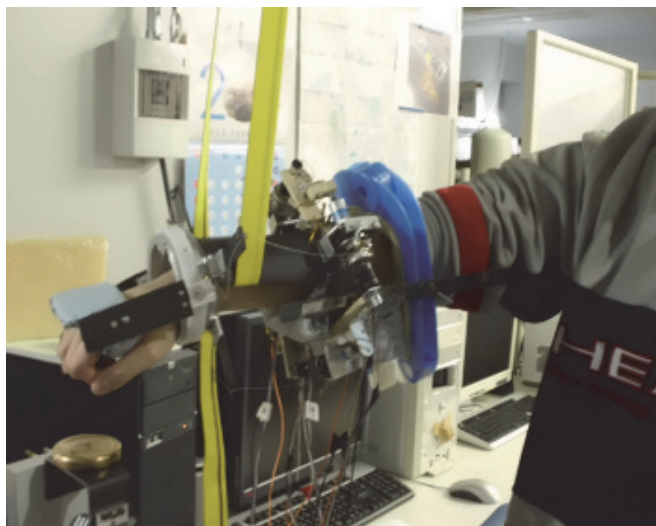


図4. 実験概要

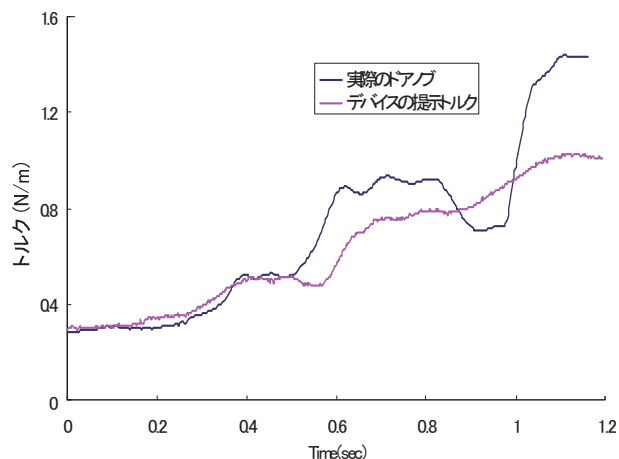


図5. 「ドアノブを回す」のトルク比較

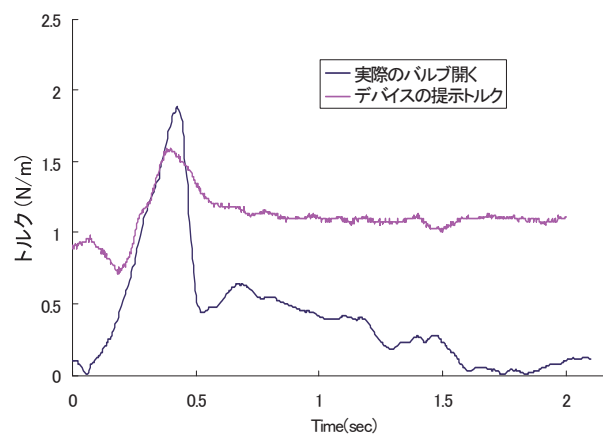


図6. 「バルブを開く」のトルク比較

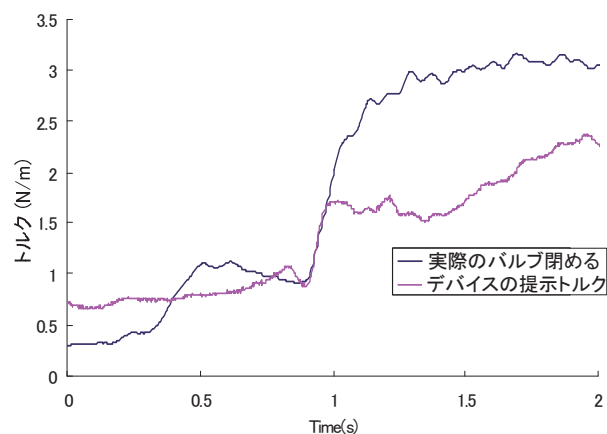


図7. 「バルブを閉める」のトルク比較

図5～7は、「ドアノブを回す」「バルブを開く」「バルブを閉める」の各作業の提示トルク曲線と目標トルクを示す。ブレーキの力が若干弱いため、提示トルクは、目標トルクの半分程度となっている。

アンケートは力覚と感覚の2種類について行った。これは、力覚で力の度合いを、感覚で実際の動作との合致度を



評価するものである。そして、評価は5段階で実施した。力覚は「認識できた」「ほぼ認識できた」「少し認識できた」「ほとんど認識できない」「全く認識できない」の5つである。合致度は「合致」「かなり合致」「ほぼ合致」「少しずれていた」「まったくずれていた」の5つである。

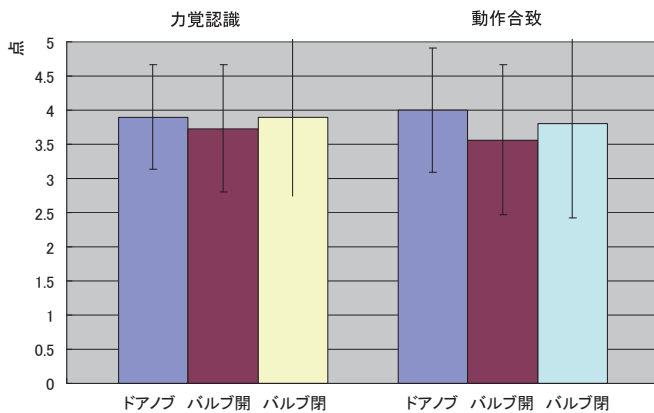


図8. 力覚提示のアンケート結果

図8は、各動作中のアンケート結果を示す。力覚認識のアンケート結果は、ドアノブは3.9点、バルブ開くが3.73点、バルブ閉めるが3.9点であった。また、動作合致のアンケート結果は、ドアノブは4点、バルブ開くが3.57点、バルブ閉めるが3.8点であった。

#### 4. まとめ

人間の重要な動作である手首回転による「開ける」「閉める」などの操作を対象として、力覚を提示するシステムを開発し、その有効性を検証した。その内容は、装着型の回転力覚提示システムの力覚提示機構を設計開発し、制御システムを開発した。そしてその有効性を確認する実験を行った。

有効性実験結果は、実際の操作と力覚提示のトルク値を比較した結果、似たようなトルクを提示していることが分かった。しかし、提示トルクが不足しており、ディスクブレーキの停止力不足が原因であった。そして、装着型回転力覚提示システムの被験者実験で行ったアンケート結果を見ると全体が5点満点中4点近くであった。この力覚提示精度は以前の研究の固定型[14]より低かった。これは、ブレーキの停止力が低いため動作が完全に停止できなかったことが原因と考える。また、本体全重量が約1kgあり被験者に不自然な負担をかけたり、手首回転部が、スムーズに回転しない領域があったことによる。

今後はブレーキ機構を4つから2つに減らし本体の軽量化を行う。さらに、ブレーキの停止力を増強するために、ディスクブレーキを改良するか電磁ブレーキなど別のブレーキに変更し停止力の増強を図る必要がある。そして、手首回転部をスムーズに回転させ、さらに軽量化を進める必要がある。

#### 参考文献

- 1) Grigore C. Burdea: Force and touch feedleedlack for virtual reality, John Wiley & Sons , Inc.,(1996).
- 2) T. Massic and J.K. Salisbury. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. Proceeding of 3rd Annual Symp. Haptic Interfaces for Vitual Environment and Teleoperator Systems, pp.295-301, (1994).
- 3) M.Sato: Development of string-based force display: Sapidar. Proc. The Eighth International Conference on Virtual Systems and Multi Media VSMM 2002,pp.1034-1039(2002).
- 4) T. Asano, H. Yano, and H. Iwai.: Basic technology of simulation system for laparoscopic surgery in virtual environment with force display, Proceeding of the Virtual Reality Society of Japan Annual Conference, pp.95-98 (1996).
- 5) C.J.Hasser, M.R.Cutkosky, System Identification of the Human Hand Grasoing a Hatiup Knob,Pricceedings of the 10th Symp. On Haptic Interfaces For Virtual Envir. & Teleop.Syst.,(2002).
- 6) C.Swindells,Karon E.Maclean,K.S.Booth,Designing for Feel:Contrasts between Human and Automated Parametric Captasts between Human and Automated Parametri Capture of Knob Physics, IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS, VOL.2, NO.4, pp200-211, (2009).
- 7) D.Chapuis, et al. A haptic Knob with a Hybrid Ultrasonic Motor and Powder Clutch Actuator,Second Joint EuroHaptics Conference and Sysposium on Haptic Interfaces for Virtual Envir.andTeleope.Svst.,(2007).
- 8) O.Lambercy,et al.,A Haptic Knob for Rehabilitation of Hand Function, IEEE TRANSACTIONSON NEURRAL SYSTEMS ANDS REHABILITATION ENGINEERING, VOL.15, NO.3, pp.356-366, (2007).
- 9) T.Kikuchi, J.Furusho, K,Oda, Y. Jinm, C. Li, T,Morita, N. Shichi, Y. Ohyama, A. Inoue, Developmebt of a 6-DOF Rehabilitation Robot and its Software for Clinical Evaluation Based on Virtual Reality IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering -CME2007,pp.1306-1307 (2007).
- 10) T. Kikuchi, Y. Jin, K. Fukushima, H. Akai and J. Furusho, "Hebr-PLEMO".Rehabilitation system for upper limbs with Actic/Passive ForceFeedback mode, 30th Annual International IEEE EMBS Conference, pp.1973-1976, (2008).
- 11) K.J. Kuchenbecke, J.Fiene, G. Niemeyer, "Improving Contact Realism through Event-Bvet-Based Haptic Feedback", IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTR, GRAPHICS,12(2),pp.219-230,(2006).
- 12) B. Dellon, Y. Matsuoka, Path Guidance Control for a Safer Large Scale Dissipative Haptic Display, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2008).
- 13) J. Sone, R. Inoue, K. Yamada, T. Nagae, K. Fujita, M. Sato, Development of a wearable exoskeleton haptic interface

device, Journal of Computing and Information Science in Engineering, Volume 8, Issue 4, pp.041009-1-12, (2008).

- 14) 曾根順治, 岩井秀樹, 山田勝実, 陳軍, 徳山善政, 今野晃市, “回転作業用力覚提示システムの開発” TVRSJ Vol.16 No.2 pp.279-282,(2011).