

回転作業用力覚提示システムの開発

曾根順治^{*1} 岩井秀樹, 山田勝実, 陳軍,
徳山喜政, 今野晃市^{*2}

Feasibility Study of Haptic Display for Rotation Tasks of Wrist Work

Junji Sone^{*1} Hideki Iwai, Katsumi Yamada, Jun Chen

Yoshimasa Tokuyama, Kouichi Konno^{*2}

Abstract – We have developed a haptic display for rotational tasks that involve functions of the human wrist. We represent the torque using a motor and a brake. Reference torque curves are obtained by the measuring torque required for each actual task using a torque sensor. The brake represents the stop condition. We have confirmed the effectiveness of the display by comparing the actual tasks with the haptic display experiment.

Keywords : Haptic display, Rotational work, Motor and brake, Torque curve.

1 はじめに

人間に力覚・触覚 [1] 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イスの多くは地球固定型が多く、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討しており、手の動的モデル構築に成功している [5]。そして、Swindellsらは、種々のノブの特性を慣性、粘性、摩擦、クリック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應用している。トルクは、速度依存と位置依存トルク (比例) で実験をしている [8]。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、ばねや壁のような簡易的な提示には成功している [7]。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]。これらの研究は、先駆的であり、リハビリテーションへの応用に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、その波形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。

本研究は、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、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。その力覚の目標値はトルクセンサーによる実作業のトルク測定値を用いる。その目標値をテーブルとして持ち、回転角度を検出しながら力覚を提示する方法を検討した。回転動作においては、ブレーキが重要であるため、モータとブレーキのハイブリッド型の力覚提示機構を採用している。モータだけによる停止動作は、モータの大型化やギアを用いる方法があるが、制御装置・方法が複雑化、高コスト化が生じる。ここで、精度の高い力覚提示は、遠隔操作や技能訓練の分野で必要と考えている。

2 力覚提示目標曲線の設計

本研究においては、「ドア開く」「バルブ開く」「バルブ閉じる」の動作を対象として、力覚提示システムを構成する。ここで、力覚は回転角度に依存するため、平行ばねを用いたトルクセンサーを用いて、実際の動作におけるトルクを計測した。図1は「ドア開く」、図2は「バルブ開く」、図3は「バルブ閉じる」のトルクと時間の関係を示す。図中には、ブレーキを働かすタイミングを示す。ここで、トルクはヒステリシス、速度の影響を受けるが、今回の研究は初期研究として、

^{*1}東京工芸大学 工学部

^{*2}岩手大学 工学部

^{*1}Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic Univ.

^{*2}Faculty of Engineering, Iwate Univ.

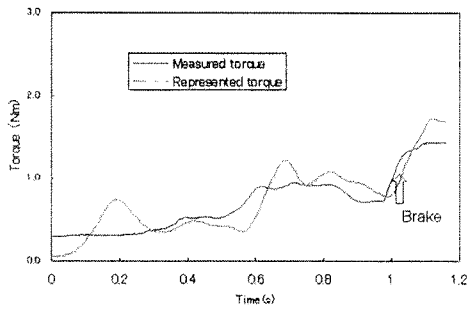


図1 「ドア開く」の作業トルク

Fig.1 Measuring torque of door knob rotation work

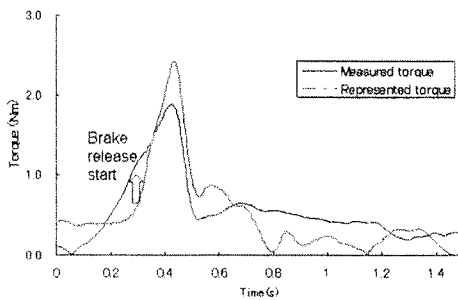


図2 「バルブ開く」の作業トルク

Fig.2 Measuring torque of valve open work

それらの影響の検討は次のステップとする。

3 力覚提示機構の開発

図4は開発した力覚提示機構を示す。中央に回転を支える主軸があり、それを背面の板に固定している。その主軸は、2重構造になっており、ベアリングを介してスムーズに回転する。その先端にはドアノブやバルブノブを付けて、力覚を被験者に提示する。力覚提示機構の構成を図5に示す。それは、内側軸と外側軸から構成され、その間には、2個のボールベア

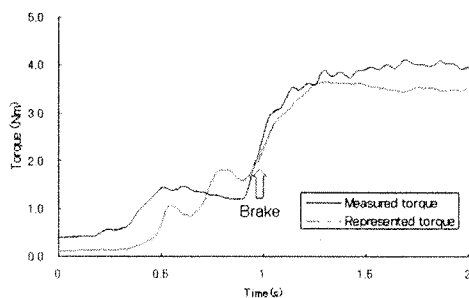


図3 「バルブ閉じる」の作業トルク

Fig.3 Measuring torque of valve close work

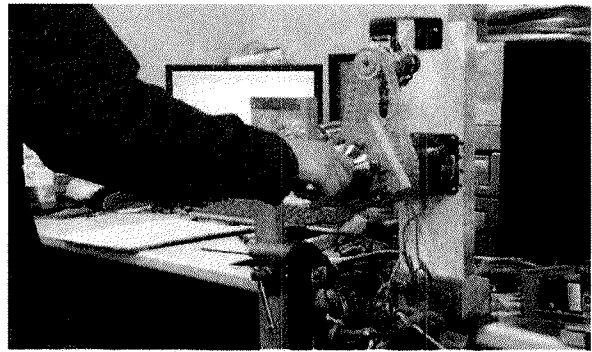


図4 実験システムの全体構成

Fig.4 Configuration of haptic display and experiment

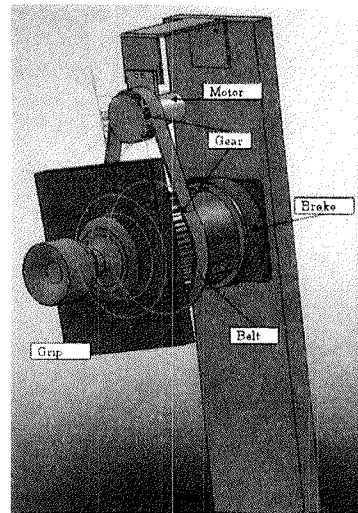


図5 力覚提示機構の構成

Fig.5 Mechanism of haptic display

リングが支える。内側の軸は外部の背面板に固定されている。そして、乾式の電磁ブレーキ本体が背面板に固定され、ブレーキ板は、外側軸に固定されている。ブレーキ本体とブレーキ板の隙間は0.3mm程度になるように、ベアリングの位置を固定して組み立てている。そのため、電圧を加えるとブレーキをかけることができる。また、主軸の接続部には、歯車がありベルトを介してモータに接続しており、モータの力を伝えることができる。今回の駆動モータには、RE-max 29を用いた。モータ駆動部と力覚提示部のギア比は、1:3である。ブレーキは、小倉クラッチ製のVBE-1.2を用いた。

4 力覚提示方法の有効性の検討

実際の回転操作に近い力覚を提示するために、実際の各3種類の作業を行ったときのトルク計測値をモータを介して被験者に提示する。しかし、急激に止まる

ような力覚は、小型のモータでは提示が困難である。使用したモータの最大提示トルクは、2Nm程度であった（10V 最大値の A/D コンバータと自作のモータアンプによる）。そのため、急激に止まる場合や、静止摩擦により固定されている状態から回転し始める場合は、必要トルクが、2Nm を超えるため、ブレーキを用いる必要がある。ここで、「ドア開く」「バルブ閉じる」は、回転を止める時にブレーキを用い、「バルブ開く」の場合は、静止摩擦で固定されている状態から回転し始めるまでにブレーキを用いた。そのタイミングを図 1-3 中に示す。また、トルク目標値は時間との関係であるが、ブレーキ動作時以外の回転速度は、ほぼ一定と仮定し、最終回転目標角度を決め、回転角度と時間を 1 対 1 に対応させる。提示力覚は回転角度をモータのエンコーダより検出してそれに対応する目標値をテーブルから求めて行っている。

ここで、乾式単板電磁ブレーキの動作は高速に動作するために、バルブの締め代や、バルブを開く時の、静止摩擦が徐々に減少するような動作は、単純な電圧付加では難しい。そのため、ブレーキの動作時には、別のスレッドを生成し、PWM 制御による力の加わり具合を調整できるようにした。「ドア開く」「バルブ閉じる」の動作は、10 回の動作をブレーキ ON とブレーキ開放を等時間間隔で繰り返し、最後にブレーキを ON にした。その時間は、最初を 10msec として、回数ごとに、1msec 減らす方法を用いた。これは、ブレーキが徐々に強くなることを意図している。また、「バルブ開く」においては、ブレーキ ON を 50msec、ブレーキ開放を 6msec と交互に指定回転位置まで繰り返し、最後にはブレーキを開放する方法を用いた。これは、閉まった状態から徐々に滑りながら回転する感覚を出すことを意図している。これらの力覚提示は、5msec の割り込み処理でモーターを制御し、さらに、割り込み動作中に別のスレッドを生成してブレーキ制御を行った。

このシステムは、モータとブレーキを併用しているが、ブレーキの最大トルクは、12Nm であるため、ブレーキの動作中は、ブレーキのトルク制御が優勢となる。図 1-3 中には、トルクセンサーで計測した実際の提示トルクも示し、ブレーキ時に加えるトルクが目標値に近い場合は、目標曲線に近いトルクを提示することができている。ブレーキを用いることにより、特に 2Nm 以上のトルクも正確に表現できている。

回転力覚提示システムを用いての被験実験を行った。実験は被験者 11 人（20-40 歳の男子）に、「ドア開く」「バルブ開く」「バルブ閉じる」の 3 パターンについて、実作業と力覚提示を比較してもらい、評価を毎回行ってもらった。評価項目は、「力を認識できたか」、「動き

は合致していたか」の 2 項目である。各作業に対して 5 回ずつ、計 15 回の評価を利き腕で行った。アンケートは 5 段階評価で行う。「力を認識できたか」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。「動きは合致していたか」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 6 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 4.65 点、バルブ開くが 4.29 点、バルブ閉めるが 4.55 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 4.21 点、バルブ開くが 4.1 点、バルブ閉めるが 4.6 点であり、力覚提示精度は高い結果となった。以前の実験において、モータだけでトルク制御した場合は、停止動作が行えず、被験者の評価値は 3 程度であった。今回は、それよりも点数を改善することができた。

また、自由アンケートから、「ドア開く」の場合はブレーキ動作時のバネの反力が若干異なるとの意見もあった。これは、毎回実作業と比較したため、回転停止後、実験終了時におけるドアノブ内のばねによる微妙な反力まで被験者が捕らえていたと考える。

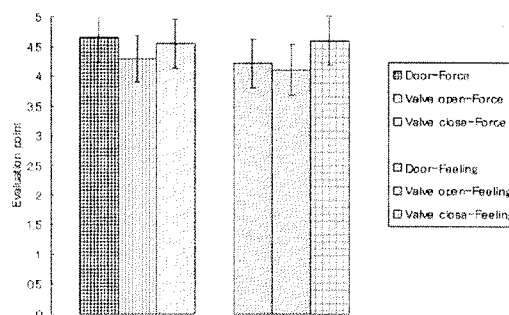


図 6 アンケート結果
Fig.6 Result of questionnaire

5 まとめ

回転動作に特化した力覚提示機構を開発した。それは、安価かつ簡単に制御するために、モータとブレーキを併用してトルクを制御する方法を用いた。そして、実際の動作のトルクを計測し、そのトルク値をテーブルに持ち、力覚を提示した。その結果、実際の作業に対して、近い力覚を提示することが可能となった。

今回は、実際の操作の測定トルク値を、そのまま目標値として使用したが、細かいトルク変動は不要であるかもしれないため、目標値の設計については、さらなる検討が必要と考える。さらに、目標トルクについては、ヒステリシス、速度の影響の検討、ブレーキの

PWM 制御によるモデル化および、新しい力制御 [14] について検討していきたい。また、本システムは、軸とブレーキ機構が頑丈かつ重いいため、実際にウェアラブル型として使用することは難しい。そのため、提示機構を見直して、外骨格型もしくはウェアラブル型の力覚提示システムに使用できるように改善をしていく予定である。

6 謝辞

議論頂きました、東京農工大学大学院 藤田教授に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Grigore C. Burdea: Force and touch feedback for virtual reality, John Wiley & Sons, Inc.,(1996)
- [2] T. 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, pp.295-301,(1994).
- [3] M. Sato: Development of string-based force display :Spidar. Proc. The Eighth International Conference on Virtual Systems and Multi Media VSMM 2002, pp.1034-1039,(2002).
- [4] T. Asano, H. Yano, and H. 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, pp.95-98,(1996).
- [5] C. J. Hasser, M. R. Cutkosky, System Identification of the Human Hand Grasping a Haptic Knob, Proceedings 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 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 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Envir. and Teleope. Syst., 2007.
- [8] O. Lamercy, et al., A Haptic Knob for Rehabilitation of Hand Function, IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING, VOL.15, NO.3, pp.356-366,2007.
- [9] T. Kikuchi, J. Furusho, K. Oda, Y. Jin, C Li, T. Morita, N. Shichi,Y. Ohyama, A. Inoue Development 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.1306-1309 (2007).
- [10] T. Kikuchi, Y. Jin, K. Fukushima, H. Akai and J. Furusho, "Hybrid-PEMO", Rehabilitation system for upper limbs with Active / Passive Force Feedback mode, 30th Annual International IEEE EMBS Conference, pp.1973-1976,(2008).
- [11] K.J. Kuchenbecke, J. Fiene, G. Niemeyer, "Improving Contact Realism through Event-Based Haptic Feedback", IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER 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, Takanori Nagae, Kinya Fujita, Makoto 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] E. B. V. POORTEN, Y. YOKOKOHI, Feeling a rigid virtual world through an impulsive haptic display, Advanced Robotics, Vol. 21, No. 12, pp. 1411-1440.2007.

(2010年11月18日受付)

[著者紹介]

曾根 順治 (正会員)



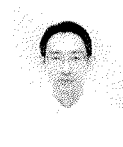
1985年、豊橋技術科学大学大学院修士過程修了。(株)東芝、慶應義塾大学 SFC 研究所訪問所員を経て、現在、東京工芸大学准教授。VR および製造システムの研究開発に従事。博士(工学)。正会員。

岩井 秀樹 (学生会員)



2009年東京工芸大学工学部卒業、現在、東京工芸大学大学院修士課程、バーチャルリアリティの研究に従事。学生会員

山田 勝実



東京工芸大学工学部写真工学科卒業、千葉大学大学院、東京工芸大学助手、講師を経て、東京工芸大学工学部准教授、現在に至る。ディスプレイに関する研究に従事。博士(工学)。

陳軍



中国浙江大学工学部電気工学科を卒業、北海道大学大学院、科学技術振興事業機構の研究員を経て、現在、東京工芸大学工学部教授。画像や光工学の研究に従事。工学博士。

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。力覚提示方法、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)。

今野 晃市 (正会員)



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、現在岩手大学教授。力覚提示のための干渉計算、並列処理、自由曲面生成の研究に従事。博士(工学)。正会員。