

回転体の回転に伴う摩擦力による力覚フィードバック Force Feedback by Friction with Rotation of Solid of Revolution

北村 嘉章†
Yoshiaki Kitamura

吉川 毅†
Takeshi Yoshikawa

野中 秀俊†
Hidetoshi Nonaka

1. はじめに

情報処理技術やコンピュータの処理能力の向上に伴い、視覚や聴覚だけでなく、力覚も用いてコンピュータとのインタラクションができるようになってきている。この力覚をコンピュータから人間に伝えるためのデバイスをハプティックインタフェース [1] という。力覚とは、生理学でいうところの体性感覚の深部感覚に相当し、体の各部の位置や運動状態、体にかかる抵抗などを感知する感覚である。ハプティックインタフェースを用いた研究は医療分野、工業分野、芸術分野、アミューズメント分野など様々な分野への応用が期待されている。

力覚分野の研究では主に、現在のハプティックインタフェースやソフトでは表現することが難しい感触や力を実現するための研究 [2] や、ハプティックインタフェースを用いてバーチャルリアリティやシミュレーション、ロボットの遠隔操作などをよりリアルにするための研究 [3]、力覚情報を広く普及させるために手軽さや使いやすさを向上するための研究 [4] などが行われている。

本研究では、回転体の回転、中でも指や手の平で扱うようにして行われる回転軸周りの回転に着目した。回転体の回転軸周りの回転は日常生活にも数多く見られる。しかし、この回転体の回転軸周りの回転は、ディスプレイなどを通してコンピュータグラフィクスによってユーザに提示しようとする回と回転しているかわからないという困難が生じる。これは回転体が無地である場合はもちろん、模様がある場合でも回転体が高速で回転している場合に生じる。これを解決するためにユーザに力覚によるフィードバックを与える。これにより、回転中の回転体に仮想的に触れることによって回転方向への力が加わり、回転の有無や程度を感じることができる。これを実現することによって、先にあげた研究の応用範囲も更に広がると考えられる。また、力覚フィードバックを用いた仮想的な回転やモーターなどの回転を直観的に把握できるインタフェースなどへの応用が期待できる。

現在までに、回転体の回転軸まわりの回転に伴う力覚フィードバックの実現を試みてきた [5]。しかし、この先行研究では、実際にどの程度リアルな反力を感じさせることができるのかを調べるという予備実験により、感じ方の個人差に応じて、回転させたときの回転速度や回転中の回転体に接触したときの反力を変更するという対処法にとどまっている。また、反力の生成も重さなどを考慮せず、回転速度のみから大きさを決定しているなど、現実の回転体の回転軸まわりの回転の挙動と異なっている部分があった。そのため評価実験の被験者からは、回転していることは理解できても反力に違和感がある、という意見もあった。

そこで、今回は回転速度や回転中の回転体からの反力の計算手法を物理的に忠実に再現するよう改善し、よりリアルな反力生成を目指す。

†北海道大学大学院情報科学研究科



図1 PHANTOM

本研究では、力覚インタフェースとして SensAble 社の PHANTOM [6] (図1)、またプログラムの開発には付属の OpenHaptics Toolkit [7] を使用している。PHANTOM では、スタイラスというペン状の部分を用いて対象とのインタラクションを行う。

2. 提案手法

本研究では、回転体の回転軸周りの回転を力覚によるフィードバックによって表現する。この回転は、まず、スタイラスによって回転体を回転させ、回転中の回転体に触れることによって受ける反力を生成し、回転体を停止させるといった流れで行われる。詳細について、以下の節で説明する。また、働いている摩擦が静摩擦か動摩擦かによって、回転体表面に滑りが無い状態と滑りがある状態が存在することを考慮する。ここでは、回転体と回転軸による摩擦や空気摩擦による減速は考えず、ユーザが回転体に接触しない限り等速で回転し続けるものとする。

2.1 回転体の回転

滑りが無い状態で回転体を回転させる場合、回転体はスタイラスの動きに追従して回転する (図2)。スタイラスが回転体から離れた時刻を t_1 、スタイラスが回転体から離れる直前の時刻を t_0 、その間に回転した角度を θ とすると、スタイラスが離れた後の回転速度 $\omega(t_1)$ は以下の式によって与えられる。

$$\omega(t_1) = \frac{\theta}{t_1 - t_0} \quad (1)$$

滑りがある状態で回転体を回転させる場合、回転体はスタイラスと回転体表面の間に発生する摩擦力を受けて回転する。回転体に対する摩擦力はスタイラスを動かした方向に発生し、その大きさは動摩擦係数を μ' 、垂直抗力 N を用いて、

$$F = \mu' N \quad (2)$$

と表すことができる。この時、垂直抗力 N は、スタイラスを回転体に押しつけた力を、接触点から回転体の中心

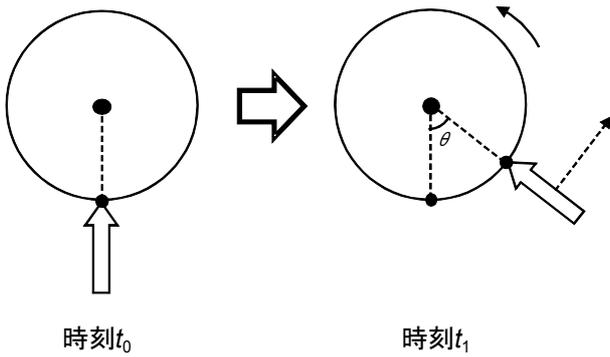


図2 滑りのない状態での回転

への方向に射影したものである。スタイラスで回転体を回転させている間のある時刻 t に、この摩擦力によって増加する回転体の回転速度 $\omega_0(t)$ は、回転体の慣性モーメントを I 、回転体の半径を r 、摩擦力を $F(t)$ とすると、

$$\omega_0(t) = \frac{r F(t)}{I} \quad (3)$$

となる。また、それまで回転体が回転していた場合、直前の回転体の回転速度に摩擦力によって発生した回転速度を加える必要がある。よって、ある連続した時刻 t_0, t_1 において、それまでの回転速度を $\omega_0(t_0)$ 、 t_0 から t_1 の間に増加する回転速度を $\omega_0(t_1)$ とすると、回転速度 $\omega(t_1)$ は以下ようになる。

$$\omega(t_1) = \omega(t_0) + \omega_0(t_1) \cdot (t_1 - t_0) \quad (4)$$

2.2 回転体からの反力生成

滑りが無い状態で回転している回転体に接触した場合、スタイラスは回転体に接触した状態で回転体の回転に追従して動かされる (図3)。ある連続した時刻 t_0, t_1 において、回転体の半径を r 、回転速度を $\omega(t_0)$ 、 t_0 から t_1 の間に回転する角度を θ とすると、 t_0 から t_1 の間に移動させなければならないスタイラスの距離 $d(t_0)$ は、

$$d(t_0) = \theta r = \omega(t_0) \cdot (t_1 - t_0) r \quad (5)$$

となる。さらに、スタイラスの質量を M 、時刻 t_0 までのスタイラスの速度を $v(t_0)$ とすると、 t_0 から t_1 の間にスタイラスを距離 $d(t_0)$ だけ移動させるための力 $F(t_0)$ は以下の式によって求められる。

$$F(t_0) = M \frac{2(d(t_0) - v(t_0) \cdot (t_1 - t_0))}{(t_1 - t_0)^2} \quad (6)$$

滑りがある状態で回転している回転体に接触した場合、スタイラスは回転体から摩擦力を受け、はじかれるような力を感じる。ある時刻 t において、動摩擦係数を μ' 、スタイラスを回転体に押しつけた力を垂直抗力 $N(t)$ とすると、スタイラスが回転体から受ける摩擦力 $F(t)$ は以下の式によって求められる。

$$F(t) = \mu' N(t) \quad (7)$$

2.3 回転体の停止

滑りが無い状態で回転体を停止させようとした場合、回転体の回転はスタイラスの動きに追従するため、即座に止まる。

滑りがある状態で回転体を停止させようとした場合、

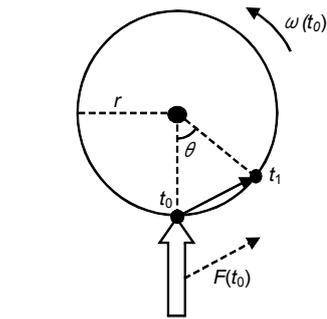


図3 滑りの無い状態での反力

回転体の回転は動摩擦力によって減速した後には止まる。回転体を回転させる場合と同様に、ある連続した時刻 t_0, t_1 において、回転体の慣性モーメントを I 、回転体の半径を r 、動摩擦係数を μ' 、垂直抗力を $N(t_0)$ 、それまでの回転速度を $\omega(t_0)$ 、 t_0 から t_1 の間に減少する回転速度を $\omega_0(t_1)$ とすると、回転速度 $\omega(t_1)$ は以下ようになる。

$$F(t_0) = \mu' N(t_0) \quad (8)$$

$$\omega_0(t_1) = \frac{r F(t_0)}{I} \quad (9)$$

$$\omega(t_1) = \omega(t_0) - \omega_0(t_1) \cdot (t_1 - t_0) \quad (10)$$

2.4 滑りの有無の判定

これまで、回転体の挙動を、滑りの有無によって区別してきた。この滑りの有無は、スタイラスと回転体との間に発生する摩擦が、静止摩擦か動摩擦かによって区別することとした。これは、スタイラスと回転体の角速度を比較することによって判定する。2つの角速度の差が最大静止摩擦力による角速度より小さい場合は静止摩擦とし、大きい場合は動摩擦とする。

3. おわりに

本研究では、回転体の回転軸周りの回転から受ける摩擦力による力覚フィードバックを物理的に計算する手法を提案した。

今後は、計算式の微調整、実験による評価、本手法を利用したアプリケーションの開発などを行っていきたい。

参考文献

- [1] 岩田洋夫. “ハプティックインタフェース”, 計測と制御, Vol. 38, No. 6, pp. 391-396, 1999.
- [2] 田川和義, 広田光一, 廣瀬通孝. “力覚インタラクションのための動的変形モデル”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J90 - D, No. 9, pp. 2615 - 2623, 2007.
- [3] 川口泰弘, 中口俊哉, 津村徳道, 三宅洋一. “切開手技トレーニングのための6自由度反力生成モデル”, Medical Imaging Technology, Vol. 24, No. 4, pp. 277 - 284, 2006.
- [4] 牧野真緒, 吉田俊介, 安藤広志, 井ノ上直己. “力覚情報作成インタフェース”, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, 10(3), pp. 15 - 18, 2008.
- [5] 北村嘉章, 野中秀俊, 吉川毅. “回転体からの力覚フィードバック生成手法”, 電子・情報関係学会北海道支部連合大会, 2009.
- [6] Massie, Thomas H, and J. K. Salisbury. “The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects”, Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 1994.
- [7] SensAble. “OpenHaptics Toolkit”. <http://www.sensable.com/productsopenhaptics-toolkit.htm>