



剪刀操作を実現する 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の提案

Proposal of a 7DOF Wire Driven Haptic Device for Scissors

赤羽 克仁

Katsuhito AKAHANE

東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所

(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, kakahane@hi.pi.titech.ac.jp)

概要：本研究では、剪刀操作を実現する 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の提案を行う。剪刀全体の並進と回転の 6 自由度の力覚提示のみならず、二つの刃の回転関係を 1 自由度として合計 7 自由度の剪刀操作を実現することを目的とする。提案手法を検証する為に、可動域における位置・姿勢の計測について計算機シミュレーションを行った。

キーワード：ハプティックデバイス、ヒューマンインタフェース、バーチャルリアリティ

1. はじめに

近年、計算機処理能力の飛躍的な発展により、比較的容易に 3 次元 VR 空間を構築できるようになってきた。3 次元空間での操作を行うためのヒューマンインタフェースとして、力のフィードバック機能を有する力覚提示装置の開発がされている[1][2][3][4][5]。VR 技術は様々な分野で応用されているが、本研究では剪刀操作に着目する。剪刀は、二つの刃で挟み込むことによって、物を切断するための道具である。本研究では 2 枚の刃と刃が合わさるように X 形の中心に支点があり、支点を中心に刃の反対側を握ることで、物を切断するローマ型の剪刀に着目する。また、一般的には洋鋏と呼ばれており、広く利用されている。一般的に広く利用されるが、剪刀操作は剪刀の持ち方や操作方法に慣れない者にとって困難な操作の一つである。例えば、幼児などは、自由に扱えるまでに苦勞するし、大人であっても剪刀の種類によって扱いにくさを感じる事が多々ある。また、医療用の剪刀にはさまざまな種類があり、用途に応じた操作の習得が必要である。正しい剪刀操作方法を身につけなければ、重大な医療事故が発生する可能性がある。しかしながら、訓練のために実際の剪刀や操作対象を用意するのは困難である。そこで、VR 空間で、剪刀操作が可能となれば、訓練やシミュレーション、遠隔操作など様々な応用が期待できる[6][7][8][9]。本論文では、剪刀操作を実現する 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の提案を行う。剪刀全体の位置・姿勢の 6 自由度の力覚提示のみならず、剪刀の二つの刃の回転関

係を 1 自由度として力覚提示することを目的とする。ワイヤ (糸) は押すことができないので、 n 自由度の力覚提示装置を構築する為には $n+1$ 以上の糸でエンドエフェクタを駆動する必要がある。本研究では 8 本の糸により、7 自由度の力覚提示を実現する。

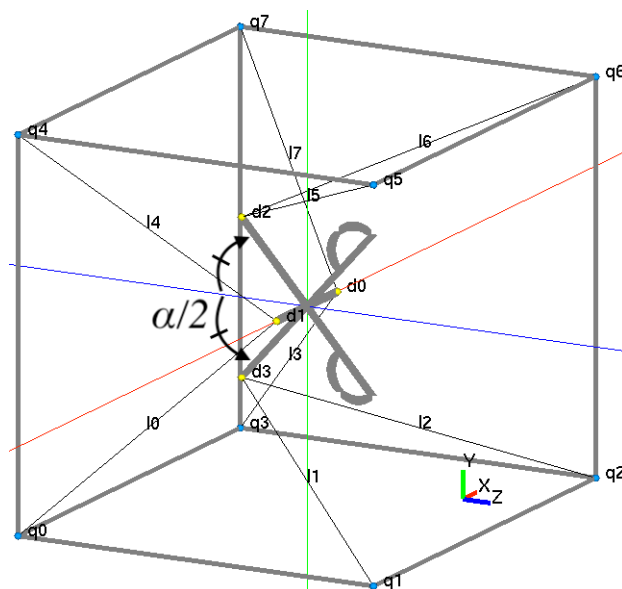


図 1 提案手法の外観図

一方、剪刀全体の位置・姿勢の 6 自由度と剪刀の二つの刃の回転を別々の駆動方式で実現することも可能である。例えば、剪刀全体に対してはワイヤで駆動し、剪刀内の刃

の回転はワイヤとは別のアクチュエータで駆動することなども可能である。しかしながら、エンドエフェクタの質量の増加や駆動や制御信号のための配線が必要になる。ワイヤ駆動型力覚提示装置はインピーダンス型の制御方法で駆動されているため、エンドエフェクタはできる限り軽量にするのが望ましい。エンドエフェクタの質量増加は力覚提示能力の低下を招き、軽量で剛性の高い特徴を持つワイヤ駆動型の利点を損ねる可能性がある。そこで、本研究では、エンドエフェクタ内にアクチュエータを配置せず、外部に固定されたフレームから8本の糸により、剪刀操作を実現する合計7自由度の力覚提示装置を提案する。そして、計算機シミュレーションにより、可操作性楕円体に基づく評価値 $1/k$ の検討を行った。

2. 位置・姿勢計算

位置・姿勢計算は、糸の長さベクトル l からエンドエフェクタの並進・回転・および追加された自由度を表すベクトル r を取得する処理のことである。今、糸の総本数を m 本とし、糸の長さベクトル l を

$$l = (l_1 \quad \dots \quad l_m)^T \quad (1)$$

とする。力覚提示装置の次元数を n とし、エンドエフェクタ r を

$$r = (r_1 \quad \dots \quad r_n)^T \quad (1)$$

とする。本研究では $m = 8$ 、 $n = 7$ の場合を考える。

糸の長さ l_i に関して

$$l_i = \|q_i - p_i\| \quad (2)$$

が成り立つ。 q_i はモータ側の糸出口の位置、 p_i はエンドエフェクタ側の糸取り付け点の位置である。一方、エンドエフェクタ r の位置を x とし、姿勢を回転行列 R で表現するとエンドエフェクタ上の糸取り付け点 p_i は

$$p_i = x + R d_j(\theta) \quad (3)$$

と記述できる。ここで、 $d_j(\theta)$ は、エンドエフェクタに固定された座標系から見た糸取り付け点であることに注意されたい。提案するエンドエフェクタは1自由度の自由度 θ を有しているため、エンドエフェクタ上の糸取り付け点を $d_j(\theta)$ と表記する。以上から、糸の長さ l_i と並進の3自由度、回転の3自由度、とエンドエフェクタ内の1自由度の回転の計7自由度の関係が記述できる。糸の長さベクトル l とエンドエフェクタ r の関係は糸の張り方によって定まり、一般に非線形となる。

$$l = f_i(r) \quad (4)$$

複雑な非線形方程式を解く代わりにヤコビ行列を用いた線形近似による逐次計算法でエンドエフェクタ r を求める方法が知られている。

$$\Delta l = J(r) \Delta r \quad (5)$$

この方程式を解くことで糸の長さベクトルの変化量 Δl からエンドエフェクタの変化量 Δr を求めることができ、逐次的に r を更新することでエンドエフェクタの位置・姿勢

を求めることができる。

3. 力覚提示の計算

力覚提示の計算とは、デカルト座標系における提示力を各糸の張力に分配する処理のことである。提示したいカベクトルを f とし、糸による張力を張力ベクトル τ とすると

$$f = W\tau \quad (6)$$

$$\tau = (\tau_1 \quad \dots \quad \tau_m)^T$$

$$f = (f_1 \quad \dots \quad f_n)^T$$

が成り立つ。また、仮想仕事の原理より、ヤコビ行列 J を用いて

$$W = -J(r)^T \quad (7)$$

が成り立つ。与えられた提示したいカベクトルを各糸の張力に分配するために、精度と安定性を考慮した二次計画法による提示力分配計算が提案されている[10]。これは、精度と安定性のトレードオフを表す変数 λ_s を用いて、二次項を正定対称行列にしている。また、制約条件は各糸の最低張力と最大張力によるボックス条件となる。

$$U = \|W\tau - f\|^2 + \lambda_s \|\tau\|^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

$$\tau_{\min_i} \leq \tau_i \leq \tau_{\max_i}$$

この最適化問題を解くことで与えられた提示力を実現する最適な糸張力が求められることができる。

4. エンドエフェクタの設計

本研究では、剪刀操作を実現するエンドエフェクタの提案を行う。以下で詳しく特徴を述べる。また、モータ側の糸出口については直方体の頂点と辺の midpoint に対し図1の配置とした。

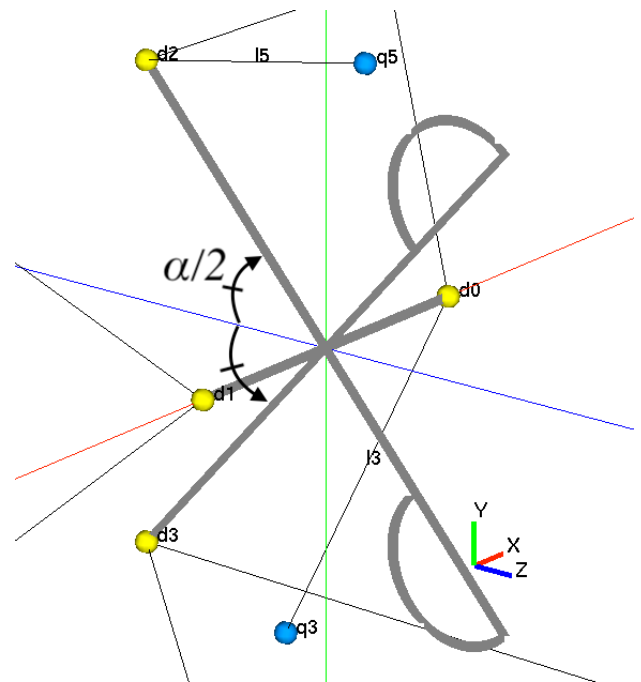


図2 提案型のエンドエフェクタ

エンドエフェクタに固定された座標系からみたエンドエフェクタ側の糸取り付け点の座標を $\mathbf{d}_j(\theta)$ とする。長さ(2b)が一定でx軸に平行な線分 $\mathbf{d}_0(\theta)\mathbf{d}_1(\theta)$ があり、その線分の中点は原点に一致している。また剪刀の刃に相当する部分として、長さ(a)が一定でyz平面に平行な線分 $\mathbf{d}_2(\theta)\mathbf{O}$ と $\mathbf{d}_3(\theta)\mathbf{O}$ があり、共に一方の端点は原点に固定されている。それぞれの線分がz軸となす角は共に $\alpha/2$ とし、線分 $\mathbf{d}_2(\theta)\mathbf{O}$ と線分 $\mathbf{d}_3(\theta)\mathbf{O}$ のなす角は α とする。線分 $\mathbf{d}_2(\theta)\mathbf{O}$ と $\mathbf{d}_3(\theta)\mathbf{O}$ にはそれぞれ原点を点対称として線分を延長した部分に持ち手に相当する部分を設ける。この持ち手の部分では、糸と手や剪刀との干渉を防ぐために、糸の接続は行わない。各糸の取り付け点 $\mathbf{d}_j(\theta)$ の座標は

$$\mathbf{d}_0(\theta) = (b \ 0 \ 0)^T \tag{9}$$

$$\mathbf{d}_1(\theta) = (-b \ 0 \ 0)^T \tag{10}$$

$$\mathbf{d}_2(\theta) = \left(0 \ a \sin \frac{1}{2} \alpha \ -a \cos \frac{1}{2} \alpha \right)^T \tag{11}$$

$$\mathbf{d}_3(\theta) = \left(0 \ -a \sin \frac{1}{2} \alpha \ -a \cos \frac{1}{2} \alpha \right)^T \tag{12}$$

となる(図2)。エンドエフェクタに接続される糸はそれぞれ図1のような配置となり、モータ側の糸出口を通り、モータ軸のプーリにより糸が巻き取られる。モータ側の糸出口座標とエンドエフェクタを構成するためのパラメータにより、力覚提示装置の幾何学的特性が決定する。このエンドエフェクタの特徴は、剪刀の回転軸上に線分 $\mathbf{d}_0(\theta)\mathbf{d}_1(\theta)$ を取り剪刀の回転軸周りを表し、剪刀の二つの刃先を線分 $\mathbf{d}_2(\theta)\mathbf{O}$ と $\mathbf{d}_3(\theta)\mathbf{O}$ で表している。また、持ち手に相当する部分に糸を接続する点を設けないことで、糸と手や剪刀との干渉を防ぐ点が挙げられる。8本の糸の張り方に関しては、剪刀操作において、操作の大部分が、握り込む方向の操作であることを考慮し、剪刀の二つの刃の提示回転力(トルク)のうち、操作者が持ち手を握り込む方向に対する反力に対応する回転力は生成可能だが、その逆方向の回転力は生成できない張り方になっている。この点については今後の課題とする。

5. 可操作性楕円体に基づく評価

$\|\dot{\mathbf{z}}\| \leq 1$ をみたく糸長の速度を用いて実現し得るエンドエフェクタの速度の集合を可操作性楕円体という[11]。本研究では可操作性楕円体は7次元ユークリッド空間の楕円体となる。楕円体の主軸半径の長い方向は大きな速度を出しやすい方向であり、短い方向は小さな速度しか出せない方向である。この楕円体が球に近ければ、等方向が高く、まんべんなくエンドエフェクタを動かすことが可能となる。本研究では、可操作性楕円体に基づく指標のうち、ヤコビ行列 \mathbf{J} の条件数 k の逆数 $1/k$ を用いた。これは、楕円体の最小半径と最大半径の比であり、常に1より小さい。これが、1に近いほど球に近い形をしており、等方向性を表す指標と言える。

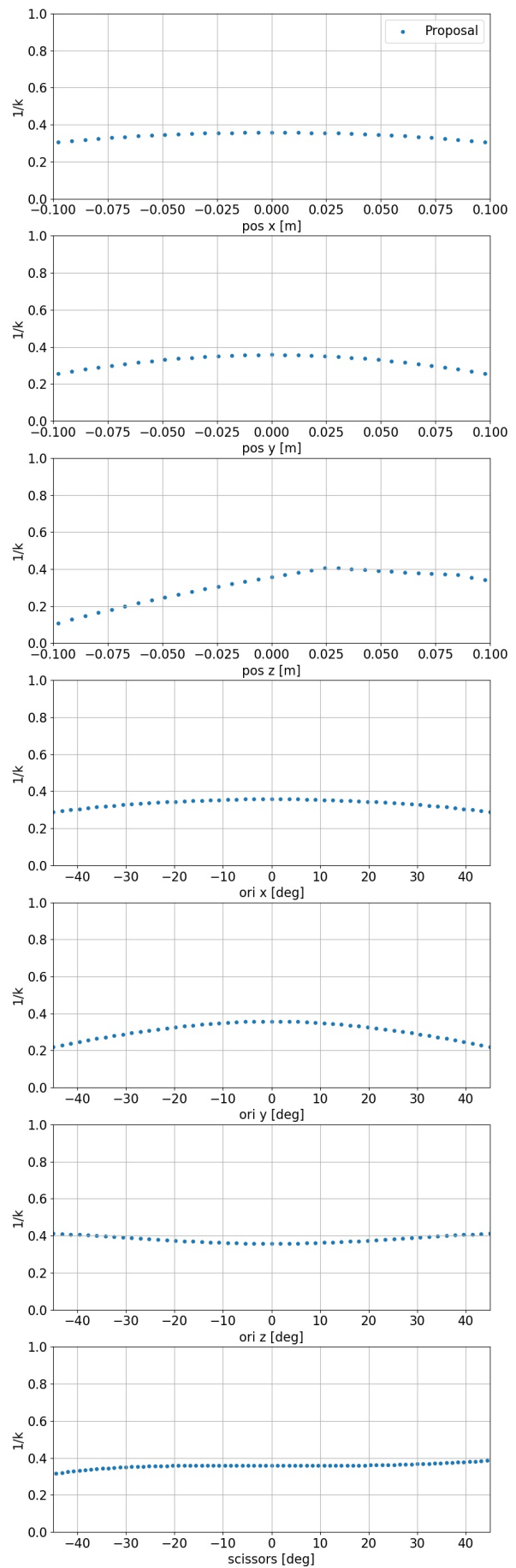


図3 可操作性楕円体に基づく評価値

評価を行うため、本研究で用いた装置の幾何学的パラメータを示す。モータ側の糸の出口を固定するフレームには、デスクトップ上で利用することを想定し、一辺0.288mの立方体を用い、図1の配置とした。また、エンドエフェクタ上のパラメータ a は可動域を考慮し、線分 $d_2(\theta)\mathbf{O}$ と、線分 $d_3(\theta)\mathbf{O}$ の長さがモータ側の糸出口の立方体の辺の長さの1/4になるように設定した。すなわち、 $a = 0.072\text{m}$ とした。またパラメータ b は対称性を考慮して点 $d_0(\theta)$ 、点 $d_1(\theta)$ 、点 $d_2(\theta)$ および、点 $d_0(\theta)$ 、点 $d_1(\theta)$ 、点 $d_2(\theta)$ で作る三角形が正三角形になるように設定した。すなわち、 $b = 0.042\text{m}$ とした。 α の初期値 α_0 として点 $d_0(\theta)$ 、点 $d_1(\theta)$ 、点 $d_2(\theta)$ 、点 $d_3(\theta)$ で作る四面体が正四面体になる角度に設定した。すなわち、 $\cos \alpha_0 = 1/3$ となる角度とした。

図3に、提案手法のエンドエフェクタにおいて、各軸方向にエンドエフェクタを移動した時の指標 $1/k$ の値を示す。この時、移動に関係ない軸方向においては、エンドエフェクタの位置・姿勢は原点に固定した状態とした。上から、X軸方向並進、Y軸方向並進、Z軸方向並進、X軸方向回転、Y軸方向回転、Z軸方向回転、第7軸方向（二つの刃の回転方向）を表す。並進方向の単位はメートル、第7軸方向と、回転方向の単位は度数である。操作域の中央付近の値に対し各軸方向の移動においてZ軸方向負の並進を除いて評価値の変動がそれほど大きくなく、等方性の変化が穏やかであることがわかる。評価値はおおよそ0.35近辺でありZ軸方向負の並進を除いて ± 0.1 程度の変動がある。Z軸方向負の並進はエンドエフェクタ上の糸取り付け点がフレーム側の糸出口に近づくため、評価値が下がる傾向にある。しかしながら、操作域においては特異姿勢もみられない。

6. まとめと今後の課題

本論文では、剪刀操作を実現する7自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の提案を行った。剪刀の二つの刃の関係を回転の1自由度とし、合計7自由度の力覚提示を可能にするエンドエフェクタの提案を行った。本研究では8本のワイヤにより、7自由度の力覚提示を実現するエンドエフェクタを設計した。提案手法を検証する為に、可動域における位置・姿勢の計測について計算機シミュレーションを行った。特に可操作楕円体に基づく評価値において検討を行い、提案手法の実現可能性と有効性を示した。今後の課題として、提示力に関する評価を行う予定である。特に、本研究での糸の貼り方において、剪刀の二つの刃の提示回転力（トルク）のうち、操作者が持ち手を握り込む方向に対する反力に対応する回転力は生成可能だが、その逆向きの回転力は生成できない。そこで、エンドエフェクタの回転軸に軽量な定荷重バネなどにより一定の回転力を予め提示し、糸の駆動による回転力との合力により

最終的な回転力を提示する機構を導入する予定である。そして、実機の試作を行い、剪刀操作環境の構築を行う予定である。

謝辞 本研究は科研費JP20K11916の助成を受けたものです。東京工業大学名誉教授佐藤誠先生に感謝する。

参考文献

- [1] 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘: "空間インタフェース装置 SPIDAR の提案", 電子情報通信学会論文誌 Vol.J74-D-2, o.7, p.887-894 (1991)
- [2] 金 時学, 長谷川 晶一, 小池 康晴, 佐藤 誠: "7 自由度力覚ディスプレイ SPIDAR-G の提案", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 7巻, 3号, p.403-412 (2002)
- [3] 赤羽克仁: "自然な把持操作を実現する 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の開発", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 25 巻, 4 号, p.356-365 (2020)
- [4] P. Lambert and J. Herder: "A novel parallel haptic device with 7 degrees of freedom," 2015 IEEE WHC, Evanston, IL, p.183-188 (2015)
- [5] S. Perreault, A. Talasaz, A. L. Trejos, C. D. W. Ward, R. V. Patel and B. Kiaii: "A 7-DOF haptics-enabled teleoperated robotic system: Kinematic modeling and experimental verification," 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, Tokyo, p.906-911 (2010)
- [6] A. M. Okamura, R. J. Webster, J. T. Nolin, K. W. Johnson and H. Jafry, "The haptic scissors: cutting in virtual environments," 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 828-833 vol.1 (2003)
- [7] H. KAWASAKI, T. MOURI, S. IKENOHATA, Y. OHTSUKA and T. ENDO, "Multi-Fingered Haptic Interface Robot Handling Plural Tool Devices," *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 397-402 (2007)
- [8] 藤野 翔平, 小林 輝, 佐藤 大祐, 内山 勝, 生体軟組織の切断操作感覚を提示するマイクロ剪刀型ハプティックデバイスの開発, 日本ロボット学会誌, 26 巻, 1 号, p. 82-89 (2008)
- [9] Waga, M.; Aita, Y.; Noma, J.; Kikuchi, T.; Nonomura, Y. Scissors-Type Haptic Device Using Magnetorheological Fluid Containing Iron Nanoparticles. *Technologies* 2019, 7, 26 (2019)
- [10] 長谷川晶一, 井上雅晴, 金時学, 佐藤誠, "張力型力覚提示装置のための張力計算法", 日本ロボット学会誌 Vol.22, No.5, pp.68-73 (2004)
- [11] 吉川恒夫, "ロボット制御基礎論" 株式会社コロナ社 (1988)