



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提案

Proposal of a 7DOF Wire Driven Haptic Device for Natural Grasp Operation

赤羽克仁¹⁾, 中本高道¹⁾

Katsuhito AKAHANE, and Takamichi NAKAMOTO

1) 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、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提案を行う。合計 8 本のワイヤにより、エンドエフェクタの並進・回転の 6 自由度の力覚提示のみならず、把持操作を追加の 1 自由度として合計 7 自由度の力覚提示を実現することを目的とする。従来手法と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比較検討を行い、提案手法の有効性を示す。

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

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]。VR 技術は様々な分野で応用されているが、本研究では把持操作に着目する。力覚提示装置を用いて操作する対象物を操作する際に、現実世界で操作者が物体を多指で操作する際に行う把持を力覚提示装置において実現する。剛体などの操作には並進と回転の 6 自由度の力覚提示装置が必要であるが、この把持操作を実現するために、エンドエフェクタの自由度を上げ把持操作の 1 自由度を追加することで実現する。このようなエンドエフェクタの多自由度化の研究は、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[5][6][7]。

本論文では、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提案を行う。エンドエフェクタ全体の位置・姿勢の 6 自由度の力覚提示のみならず、物を掴む際に行う把持を 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。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

比較検討を行った。

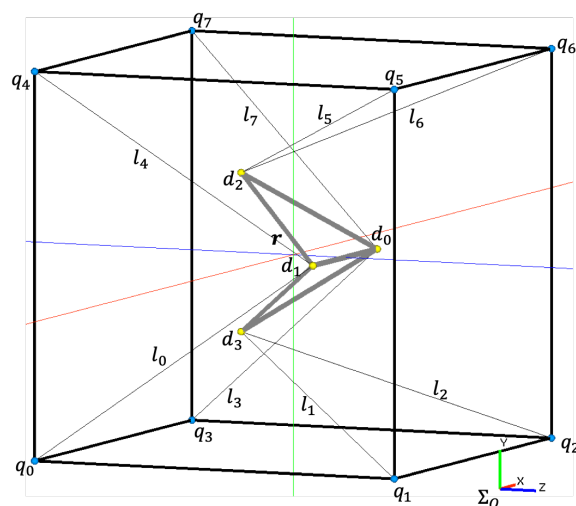


図 1: 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の外観

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、糸の長ベクトル l を

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

とし、エンドエフェクタの次元数を n とするとエンドエフェクタ \mathbf{r} を

$$\mathbf{r} = (r_1 \ \dots \ r_n)^T \quad (2)$$

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

$$l_i = \|\mathbf{q}_i - \mathbf{p}_i\| \quad (3)$$

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

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{x} + \mathbf{R}\mathbf{d}_j(\theta) \quad (4)$$

と記述できる。ここで、 $\mathbf{d}_j(\theta)$ 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を注意されたい。提案するエンドエフェクタは1自由度の自由度 θ を有しているので、エンドエフェクタ上の糸取り付け点を $\mathbf{d}_j(\theta)$ と表記する。以上から、糸の長さ l_i は並進の3自由度、回転の3自由度、とエンドエフェクタ内の1自由度の計7自由度で記述できる。糸の長さベクトル \mathbf{l} とエンドエフェクタ \mathbf{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。

$$\mathbf{l} = \mathbf{f}_i(\mathbf{r}) \quad (5)$$

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 \mathbf{r} を求める方法が知られている。

$$\Delta \mathbf{l} = \mathbf{J}(\mathbf{r})\Delta \mathbf{r} \quad (6)$$

この方程式を解くことで糸の長さベクトルの変化量 $\Delta \mathbf{l}$ からエンドエフェクタの変化量 $\Delta \mathbf{r}$ を求めることができ、逐次的に \mathbf{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。提示したい力ベクトルを \mathbf{f} とし、糸による張力を張力ベクトル $\boldsymbol{\tau}$ とすると

$$\mathbf{f} = \mathbf{W}\boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\tau} = (\tau_1 \ \dots \ \tau_m)^T$$

$$\mathbf{f} = (f_1 \ \dots \ f_n)^T$$

が成り立つ。また、仮想仕事の原理より、ヤコビ行列 \mathbf{J} を用いて

$$\mathbf{W} = -\mathbf{J}(\mathbf{r})^T \quad (8)$$

が成り立つ。与えられた提示したい力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。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。

$$U = \|\mathbf{W}\boldsymbol{\tau} - \mathbf{f}\|^2 + \lambda_s \|\boldsymbol{\tau}\|^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

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

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、自然な把持操作を実現するエンドエフェクタの提案を行う。把持操作を実現する従来型のエンドエフェクタ[2]と提案型の比較を行った。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8つの頂点とし(図1)、全てのエンドエフェクタの設計において共通の糸出口座標とした。

4.1 従来型

まず、比較のために従来型のエンドエフェクタを図2に示す。エンドエフェクタに固定された座標系からみたエン

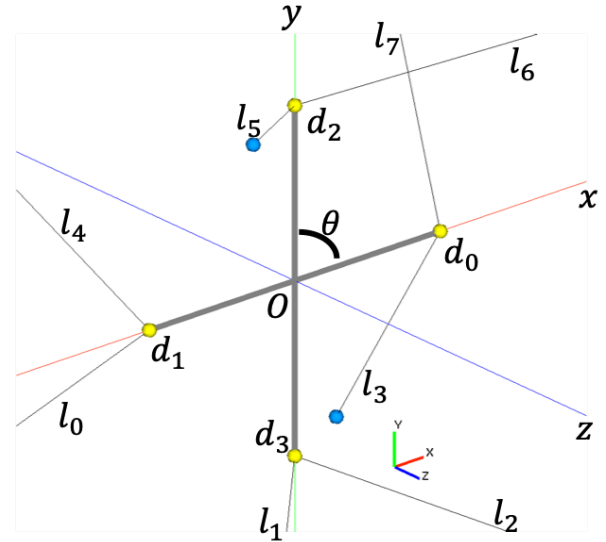


図 2: 従来型のエンドエフェクタ [2]

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。

長さがともに $2a$ の線分 $\mathbf{d}_0(\theta)\mathbf{d}_1(\theta)$ と線分 $\mathbf{d}_2(\theta)\mathbf{d}_3(\theta)$ が同一平面上(xy 平面上)にある。次に、それぞれの線分の中点を回転中心として原点にとる。そして、それぞれの線分に直行する回転軸(z 軸)を有する。これが、従来型の把持型エンドエフェクタである。

線分の回転角を θ とすると、各糸の取り付け点 $\mathbf{d}_j(\theta)$ の座標は

$$\mathbf{d}_0(\theta) = (a \ 0 \ 0)^T \quad (10)$$

$$\mathbf{d}_1(\theta) = (-a \ 0 \ 0)^T \quad (11)$$

$$\mathbf{d}_2(\theta) = (a \cos \theta \ a \sin \theta \ 0)^T \quad (12)$$

$$\mathbf{d}_3(\theta) = (-a \cos \theta \ -a \sin \theta \ 0)^T \quad (13)$$

となる。

エンドエフェクタに接続される糸はそれぞれ図2のよ

うな配置となり、モータ側の糸出口を通り、モータ軸のプーリー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、把持の1自由度に対し正負の両方向に対して力覚提示可能である点がある。しかしながら、ユーザの把持の方向とエンドエフェクタの1自由度の回転の関係が自然でなく、糸の干渉なども起こり、把持するのが困難であった。そこで、先行研究ではエンドエフェクタ内に回転を把持方向に変換する機構が別途必要であり、エンドエフェクタが複雑になり、軽量なエンドエフェクタの実現が困難であった。

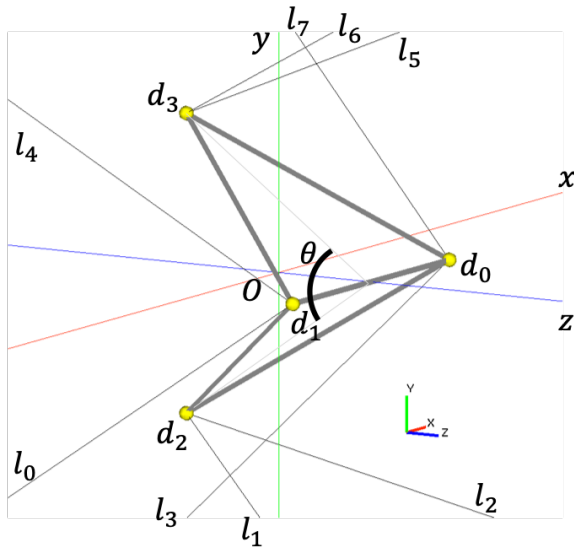


図 3: 提案型のエンドエフェクタ

4.2 提案型

提案するエンドエフェクタを図3に示す。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 $\mathbf{d}_j(\theta)$ とする。辺の長さ a の正四面体を考える。正四面体の1辺を取り除き、取り除いた辺の対辺を回転軸とするエンドエフェクタを考える。

四面体の重心を原点にとり、回転角を θ とすると、各糸の取り付け点 $\mathbf{d}_j(\theta)$ の座標は

$$\mathbf{d}_0(\theta) = \left(\frac{a}{2} \quad 0 \quad \frac{b}{2} \cos \theta \right)^T \quad (14)$$

$$\mathbf{d}_1(\theta) = \left(-\frac{a}{2} \quad 0 \quad \frac{b}{2} \cos \theta \right)^T \quad (15)$$

$$\mathbf{d}_2(\theta) = \left(0 \quad b \sin \theta \quad -\frac{b}{2} \cos \theta \right)^T \quad (16)$$

$$\mathbf{d}_3(\theta) = \left(0 \quad -b \sin \theta \quad -\frac{b}{2} \cos \theta \right)^T \quad (17)$$

となる。ただし、 $b = \frac{\sqrt{3}}{2}a$ である。

エンドエフェクタに接続される糸はそれぞれ図3のような配置となり、モータ側の糸出口を通り、モータ軸のプーリー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。全体像は図1を参照。このエンドエフェクタの特徴は、四面体の辺を操作者が把持することで、糸の干渉を抑え、自然にエンドエフェクタを操作することが可能な点にある。把持の方向とエンドエフェクタ内の回転が一致しており、シンプルで軽量なエンドエフェクタの実現が可能である。しかしながら、欠点として把持する方向（正方向）への力覚提示（把持力）は可能であるが、その逆方向への力覚提示が困難である点がある。しかしながら、多くの操作は物体を把持し操作する把持の正方向の力覚提示であり、把持の負方向の力覚提示はほとんど必要がない操作であると考えられる。

5. 可操作性楕円体に基づく評価

$\| \dot{\mathbf{l}} \| \leq 1$ をみたま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。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、等方性が高く、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、等方性を表す指標と言える。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として、一辺0.2mの立方体の8つの頂点とし座標軸の原点を立方体の中心とした。また、エンドエフェクタ上のパラメータは可動域を考慮し、エンドエフェクタの糸取り付け点と原点の距離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、従来手法において、 $a = 0.05\text{m}$ とし、提案手法において $a = 0.0408\text{m}$ とした。また、 θ の初期値 θ_0 として、従来手法では2つの線分が直行する角度 $\theta_0 = \pi/2$ とした。また、提案手法では正四面体の時の角度 $\theta_0 = \cos^{-1}(1/3)/2$ を初期値とした。図4に、従来手法と提案手法の双方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・姿勢は固定した状態とした。図において、従来手法はオレンジ色で表される点線、提案手法は青色で表される点線である。上から、X軸方向並進、Y軸方向並進、Z軸方向並進、第7軸方向、X軸方向回転、Y軸方向回転、Z軸方向回転を表す。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。従来手法に比べ提案手法の評価値が操作域の中央付近でより高いことがわかる。並進方向ではy軸方向において中心から ± 0.06 付近

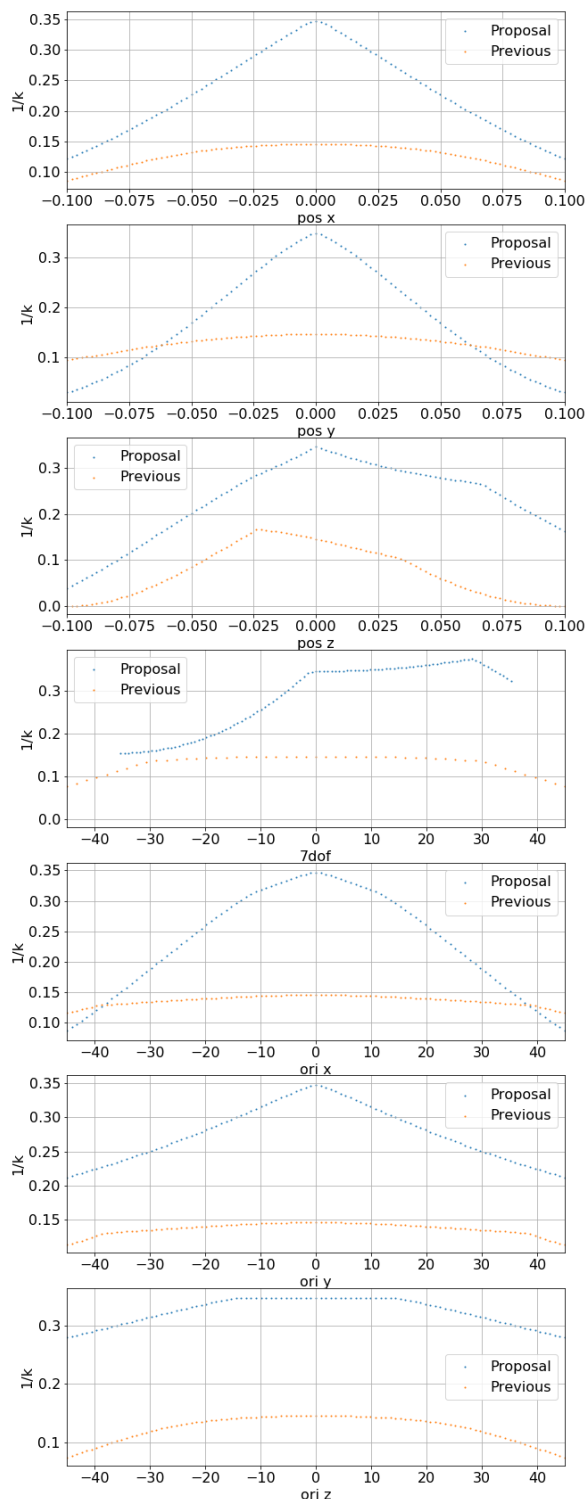


図 4: 可操作性楕円体に基づく評価値

で従来手法よりも評価値が高く、その他の軸方向においてはモータ糸出口で作る域内で常に提案手法の評価値が高い。回転方向については、 x 軸方向において中心から ± 35 度付近で従来手法よりも評価値が高く、その他の軸方向においては常用する角度域 (± 45 度付近) において常に提案手法の評価値が高い。また、従来手法は並進方向の z 軸において、モータの糸出口の z 座標値になると評価値がゼロ

になり、特異姿勢が存在することがわかる。

6. まとめ

本論文では、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提案を行った。正四面体に基づく把持の 1 自由度を実現するエンドエフェクタの提案を行った。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 $N+1$ 以上のワイヤ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。従来型との性能比較として、可操作性楕円体に基づく評価値 $1/k$ の比較検討を行なった。今後の課題として、糸の貼り方の最適化、エンドエフェクタのパラメータの最適化、タスクに応じた最適設計が考えられる。

謝辞 本研究は科研費 JP17H00754 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] P. Lambert and J. Herder:"A novel parallel haptic device with 7 degrees of freedom," 2015 IEEE WHC, Evanston, IL, p.183-188 (2015)
- [4] S. Perreault, A. Talasz, 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)
- [5] Dongjin Huang, Pengbin Tang, Xianglong Wang, Tao Ruan Wan, Wen Tang:"New haptic syringe device for virtual angiography training," Computers & Graphics, Volume 80, P.97-103 (2019)
- [6] B. Gonenc and H. Gurocak:"Haptic interface with hybrid actuator for virtual needle insertion and tissue cutting," 2012 IEEE Haptics Symposium, Vancouver, BC, p.451-455 (2012)
- [7] Pepley DF, Yovanoff MA, Mirkin KA, Miller SR, Han DC, Moore JZ:"Integrating Cadaver Needle Forces Into a Haptic Robotic Simulator." ASME. J. Med. Devices. (2017)