

シリンジ操作を実現する 7 自由度 ワイヤ駆動型力覚提示装置の試作

赤羽克仁^{†1} 松田仁^{†1} 山先小太郎^{†1}

概要：本研究では，シリンジ操作を実現する 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の試作を行なった．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，シリンジのプランジヤーの操作を並進の 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した．実際に試作機の製作を行い，剛体物理シミュレーションにより構築された VR 空間において，剛体操作を行う VR 環境を構築した．

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 (Virtual Reality) 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][6]．VR 技術は様々な分野で応用されているが，本研究ではシリンジを用いた操作に着目する．シリンジは，外筒と内筒からなる．正しい穿刺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シリンジや穿刺対象を用意するのは困難である．そこで，VR 空間で，シリンジ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[4][7][8][9]．本論文では，シリンジ操作を実現する 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の試作を行う．シリンジ全体の位置・姿勢の 6 自由度の力覚提示のみならず，外筒と内筒の関係を並進の 1 自由度として力覚提示することを目的とする．

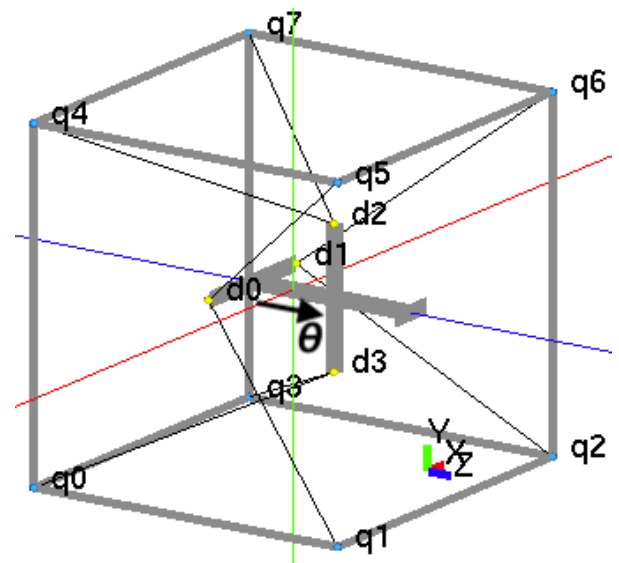


図 2 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置

2. エンドエフェクタの設計

本研究では，シリンジ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 q_i については直方体の頂点に対し図 2 の配置とした．

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 $d_j(\theta)$ とする．原点はシリンジ外筒の先端（針先）とし，シリンジの外筒に相当する部分は，長さ $(2a)$ が一定で y 軸方向に平行の線分 $d_2(\theta)d_3(\theta)$ の部分に持ち手があり，その線分の中点は原点から z 軸方向 b (外筒の長さに相当) の位置にある．また内筒に相当する部分は，長さ $(2a)$ が一定で x 軸方向に平行な線分 $d_0(\theta)d_1(\theta)$ があり，その線分の中点と線分 $d_2(\theta)d_3(\theta)$ の距離を θ とすると各糸の取り付け点 $d_j(\theta)$ の座標は

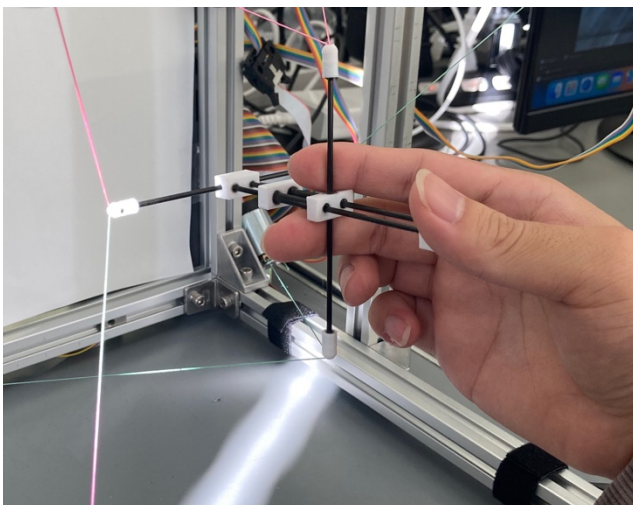


図 1 7 自由度のシリンジ型エンドエフェクタ

$$\mathbf{d}_0(\theta) = (-a \quad 0 \quad b + \theta - \theta_0)^T \quad (1)$$

$$\mathbf{d}_1(\theta) = (a \quad 0 \quad b + \theta - \theta_0)^T \quad (2)$$

$$\mathbf{d}_2(\theta) = (0 \quad a \quad b)^T \quad (3)$$

$$\mathbf{d}_3(\theta) = (0 \quad -a \quad b)^T \quad (4)$$

となる (θ_0 は θ の初期位置). 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. 本研究では $a=0.055$, $b=0.07$ とした. このエンドエフェクタの特徴は, シリンジの外筒を線分 $\mathbf{d}_2(\theta)\mathbf{d}_3(\theta)$ で表し, 内筒を線分 $\mathbf{d}_0(\theta)\mathbf{d}_1(\theta)$ で表しており, シリンジの外筒と内筒の関係を並進の 1 自由度で表現している点であり, 外筒と内筒が回転しない構造としている. また, 本研究の糸の張り方においては, シリンジを押す操作に対する反力は実現可能だが, シリンジを引く操作に対する反力は実現できない.

3. 試作機の製作

提案する合計 8 本の糸による 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の試作機を作成した. 我々がこれまで研究開発してきた高解像度力覚提示システム[10][11][12]に本研究による提案手法を実装することで実現した. VR 世界には剛体物理シミュレータ Open Dynamics Engine を用いて構築した. VR 物体とエンドエフェクタの接続には 6 自由度バーチャルカップリングを用いることで並進と回転の操作を可能にした. シリンジを使った VR 操作環境の例として, 評価実験のために作成した 3D パズルの VR 世界を構築した. 提案装置を用いた操作の様子を図 3 に示す. 剛体物理シミュレーションによる VR 空間内の 3D パズルのピースをシリンジを使い操作し, シリンジのプランジャーへの操作力を感じながら床面や薄紫色の固定物体, 物理則に従う剛体などとのインタラクションが可能である.

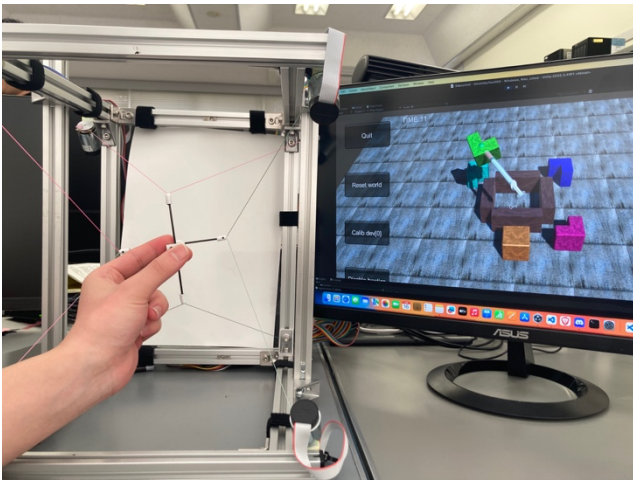


図 3 シリンジを使った VR 操作環境 (3D パズル)

4. まとめ

本研究では, シリンジ操作を実現する 7 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の提案を行った. シリンジの外筒と内筒の関係を並進の 1 自由度とした合計 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. 合計 8 本の糸で 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. 試作機の製作を行い剛体物理シミュレーションにより構築された VR 空間において, シリンジを使った剛体操作の VR 環境の構築を行った. 今後の課題として, シリンジを引く操作に対する反力を生成可能なエンドエフェクタの構造や糸の張り方などに取り組むことが考えられる.

謝辞 東京科学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] 赤羽克仁: シリンジ操作を可能にする対称性を考慮した 8 自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の提案; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 28 巻, 4 号, p.311-320 (2023)
- [5] P. Lambert and J. Herder: "A novel parallel haptic device with 7 degrees of freedom," 2015 IEEE WHC, Evanston, IL, p.183-188 (2015)
- [6] 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 Biomechanics, Tokyo, p.906-911 (2010)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [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] 赤羽克仁, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠, "10kHz の更新周波数による高解像度ハプティックレンダリング", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.9, no.3, pp.217-226 (2004)
- [12] 赤羽克仁, 小池康晴, 佐藤誠, "安定性と忠実性を両立させる高解像度力覚レンダリングの開発", 情報処理学会論文誌, vol.48, no.3, pp.1316-1325 (2007)