

遠隔操作用スレーブ側カテーテルにかかる挿入力測定デバイス

○王 緯昊 (香川大学)、郭 書祥 (香川大学)、宋 大鵬 (香川大学)

Development of an Insertion Force Measuring Device for Teleoperating Catheter System

○Weihao Wang (Kagawa Unive.), Shuxiang Guo (Kagawa Univ.) and Dapeng Song (Kagawa Univ.)

Abstract: The relationship between the stress and deformation of a specific material was first worked out based on the Hooke's law in this paper. Then, based on determining the clamping method of the surgical catheter, an insertion force measuring device for the teleoperating catheter system has been designed and carried our characteristic evaluations.

1. はじめに

高齢化を迎えた社会において、高度な医療支援がますます必要となっている。カテーテルの手術を行う度、医師はX線により、自身の健康にも悪い影響を与えるというデメリットがあり、遠隔カテーテル操作支援システムが求められている。アメリカのような医療機械先進国では Sensei Robotic Catheter System などの遠隔カテーテル操作システムが開発され、高い成功率と数多くの手術実績がある。しかし、それらはカテーテルにかかる挿入力の測定機能を備えていない。遠隔カテーテル操作の安全性と汎用性をさらに高めるため、遠隔操作におけるスレーブ側カテーテルにかかる挿入力測定できるデバイスの開発が求められている。

2. 研究目的とアプローチ

本研究室では、遠隔カテーテル操作支援システムの研究を行ってきた。従来の遠隔カテーテル操作システムはスレーブ側の先端にあるカテーテル自体は剛体ではないため、変形しやすく、力の伝わりが悪いという特徴を持つので、実際の力覚情報をより正確に測定することがと難しいという問題点がある。これを解決するために、本研究はフックの法則に基づき、特定材料に関して力学的な量である〈応力〉と幾何学的な量である〈ひずみ〉の関係を求め、カテーテルの把持方法を検討した上で、遠隔操作におけるスレーブ側カテーテルにかかる挿入力の測定デバイスを設計・提案した。

3. 提案した新挿入力測定デバイス

これまでイメージセンサーとシリコンゴムでの挿入力測定案を検討し、測定評価実験も行ったがシリコンゴムが非常に柔らかいため繰り返し実験の中で元の形に戻り難くなり、力の測定に適し難く、実験に用いるイメージセンサーで微小変位を測定する時、ピクセルの変化値が小さく、変位を安定かつ精確に取得し難いことがわかった。問題を解決するために、Fig.1 に示す、新たなひずみゲージとアルミ起歪体での構造を検討し、挿入力の測定機能とグラスパー

としてのスイッチ機能を同時に実現できる 3DCAD デザインを設計した。上からコイル、滑り止め用シリコンゴム、強力小型マグネット、ひずみゲージ四つ、アルミ起歪体、及び固定機構で構成されている。コイルの電流方向を変えることにより、スイッチのオン・オフ（上げ下げ）機能を実現されている。

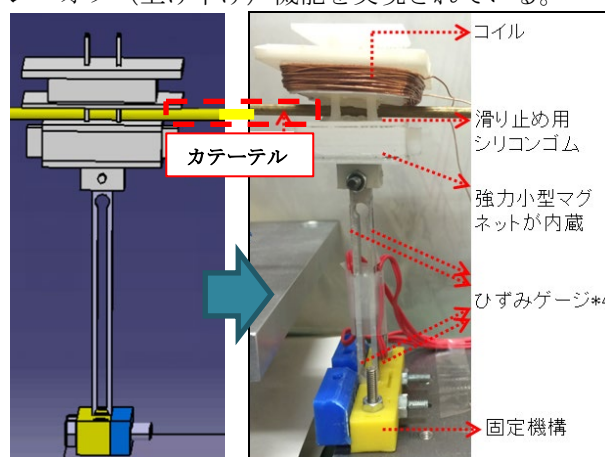


Fig.1 新挿入力測定デバイス

デバイスはホイートストンブリッジ回路を利用し、微小な抵抗変化を検出し、出力電圧 (Δe) はひずみ (ϵ) に比例直線関係が成り立つ範囲内で実験を行った。Fig.2 は新たなスレーブシステムを示す。

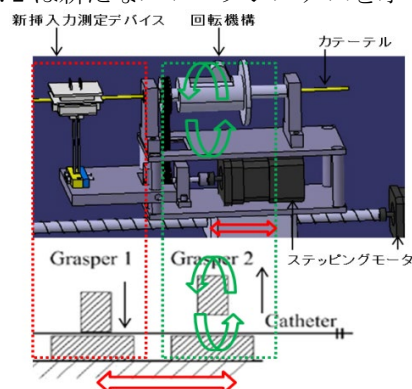
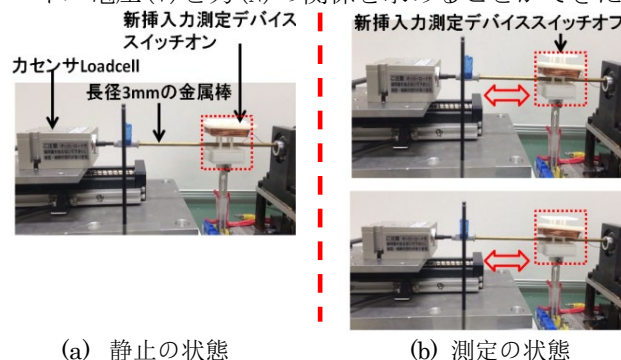


Fig.2 提案したスレーブシステム

4. 新挿入力測定デバイスの特性評価実験

Fig. 3 (a)が静止の状態であり、Fig. 3 (b)は測定の状態である。実験中直動アクチュエータに力センサロードセルを載せ、長径 3mm の金属棒を繰り返し前進・後退運動をさせる。すると力センサロードセルで取得した力データと新挿入力測定デバイスで取得した電圧のデータを同時に取得し、フィルター処理後、二つのデータを利用し、式(1)新挿入力測定デバイス電圧(V)と力(N)の関係を求めることができた。



(a) 静止の状態

(b) 測定の状態

Fig.3 挿入力測定デバイスの測定評価実験

$$Force = Voltage * 0.5792 - 0.003859 \quad (1)$$

式(1)を利用し、新挿入力測定デバイスで取得した電圧データを全て力(N)に転換し、Fig. 4 新挿入力測定の検証データを求めた。赤い線は実際に力センサのデータ、青い線は推定した力データになる。データにより、新挿入力測定デバイスの測定範囲は 0.000N~0.0880N であり、隣二つ力データ間最大の差は 0.0032N であることがわかった。

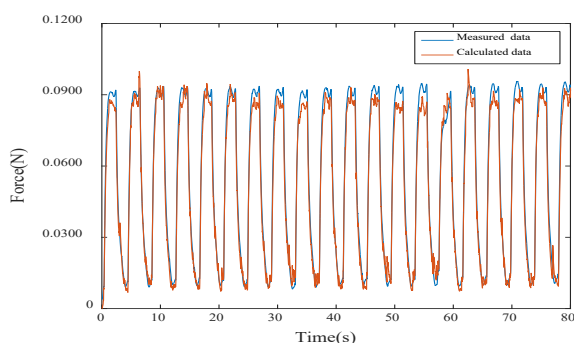
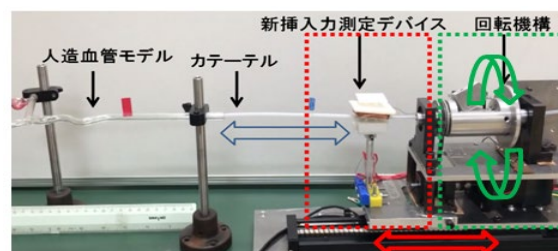


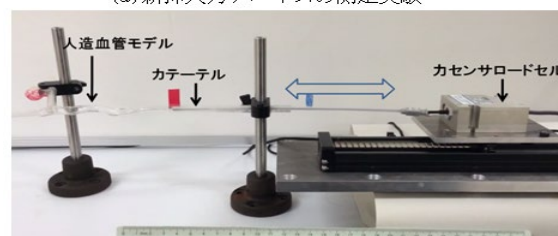
Fig.4 新挿入力測定の検証結果

5. 人造血管モデル内挿入力測定評価実験

Fig. 5 には造血管モデル内の評価実験を示す。なるべく同じ環境(人造血管モデル)で、同じ目的地(赤いテープで示す)まで、新挿入力測定デバイスと力センサロードセルでのカテーテルの挿入・後退繰り返し実験を行い、AD からデータ取得し、フィルター処理を重ね、新デバイスの電圧データと力からセンサロードセルの力データを求めることができた。新デバイス電圧変化のデータを式(1)に代入し力(N)に転換する。そして、二つの力データの差を算出し、Fig. 6 に示す測定誤差を求めた。



(a)新挿入力デバイスの測定実験



(b)カセンサロードセルの測定実験

Fig.5 人造血管モデル内の評価実験

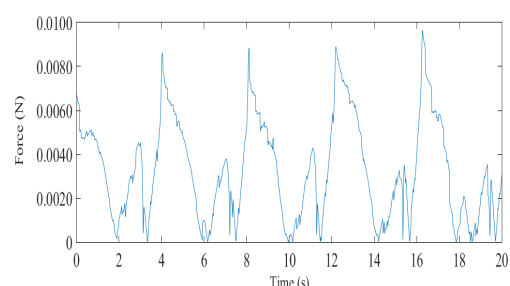


Fig.6 測定誤差

6. 結論

一般的カテーテル誘導用スレーブ側力検出機構の設計標準は力検出の分解能 0.1N 以下、検出最大値は 1.0N である。データにより新提案したデバイス連続かつより正確なデータを取得でき、検出最大値はおよそ 1N であり、測定の最大誤差も 0.01N 以下までに抑えられることを実現し、カテーテルにかかる挿入力測定能力を実証した。誤差の原因は主に二つと考えられる。一つ目はカテーテル自体の変形が生じた誤差；二つ目は異なる環境で生じた摩擦力抵抗などの影響で生じた誤差も考えられる。

参考文献

- [1]. X. Yin, S. Guo and Y. Song, "Magnetorheological fluids actuated haptic-based teleoperated catheter operating system" *Micromachines*, 9, 465; doi:10.3390/mi9090465, 2018.
- [2]. 宋 大鵬、郭 書祥、宋 雨、張 林帥、"遠隔カテーテル操作システムに用いる医師の指運動計測システムに関する研究"、SI2018 計測自動制御学会, 1A2-06.
- [3]. S. Guo, Y. Song, X. Yin, L. Zhang, et.al, "A Novel Robot-Assisted Endovascular Catheterization System with Haptic Force Feedback" *The IEEE Transactions on Robotics*, DOI: 10.1109/TRO.2019.2896763, Vol.35, No.3, pp.685-696, 2019.