

カテーテル遠隔操作速度と安全性の研究

○内尾 茉香 (香川大学), 郭 書祥 (香川大学), 宋 大鵬 (香川大学)

Study on Catheter Remote Control Speed and Safety

○Mako Uchio (Kagawa University), and Shuxing Guo (Kagawa University),

Dapeng Song (Kagawa University)

Abstract: In this paper, we focus on the problem of safety by catheter remote control for catheter remote surgery support system which is composed master slave system, and propose catheter remote control speed to improve the safety of the system. We measure the force applied to the blood vessel wall during insertion and removal by the pressure sensor of the slave system, and also examine the safety operation of slave system.

1. はじめに

近年、急速な高齢化や生活様式の欧米化に伴い、心筋梗塞や狭心症などの冠動脈疾患が増加している。この問題に対し、患者の身体をできるだけ切開せずに治療・診断を行う低侵襲医療が注目されている。低侵襲医療の一つとしてカテーテル治療が挙げられ、循環器内科をはじめ様々な領域で進められている。しかしながら、治療時におけるカテーテルの挿入・抜去に起因する血管損傷は時に重大な合併症を招く。本研究では、カテーテル遠隔手術支援システムを用い、より血管への負荷が少ないシステム開発を目指す。

2. 研究の目的とアプローチ

本研究室では、カテーテル遠隔手術支援システムの開発を行ってきた[1][2]。従来のカテーテル遠隔手術支援システムは、マスターシステムとスレーブシステムで構成されている。システムの安全性を高めるためにもカテーテルの挿入・抜去する際に先端にかかる力を把握することは重要である。

また、心筋梗塞などの冠動脈疾患の診断には、最も信頼できる検査方法として心臓カテーテルが用いられる。心臓カテーテル検査では、手首または足の付け根の動脈などからカテーテルを挿入し、その先端を冠動脈の入り口まで進め、造影剤を体内に流しX線で冠動脈の情報を得る。この際、X線透視下のために患者はX線に晒される。そのため、検査時間を短縮しなければならない。本研究では、スレーブシステムの圧力センサーを用いて、カテーテル先端に負荷する力を計測する。すなわち挿入・抜去時に血管壁にかかる力を計測し、最も安全性の高い操作速度を検討することが本研究の目的である。

3. 提案するシステムの構成

カテーテル遠隔手術支援システムの概念を Fig.1 に示す。術者は、マスター側のマスターコンピュータを操作し、スレーブ側を制御する事で、ガイドワイヤーおよびカテーテルを操作する。この際ガイドワイヤーとカテーテルの力情報がスレーブシステムの圧力センサーによって検出されるこ

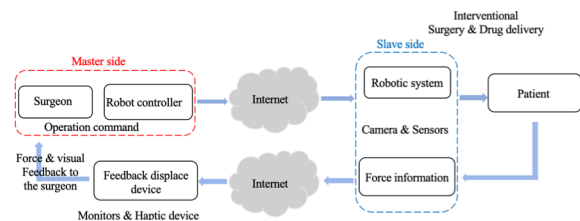


Fig.1 Concept of catheter remote surgery support system

とで、マスター側に力覚情報のフィードバックを実現する。スレーブ側の力は主に接触力、摩擦力、粘性力の3つに分類される。これらの合力をスレーブシステムの圧力センサーで測定することで、最も安全性の高い操作を検討する。

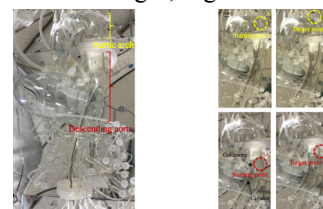
4. 本研究の採用手法

スレーブシステムのステップモータを用い、挿入・抜去時の操作速度を制御した。また、スレーブシステムに圧力センサーを取り付け、挿入・抜去時に血管壁に負荷する合力をマスターシステム側にフィードバック制御を行った。

血管壁にかかる壁張力は血管の直径の大きさと血圧に伴って強くなる。よって、カテーテル先端が血管に負荷する力は最も直径が大きく、血圧が高い胸部大動脈で最大になると考え胸部大動脈を調べた。胸部大動脈は上行・弓部・下行の部分でなるが本実験では、弓部・下行で行い血管が湾曲している部分、直行している部分で血管壁に負荷する力の違いを調べた。なお、本稿で用いたカテーテルは5Frであり作動流体は水を用いた。

5. 実験結果

各々の挿入・抜去の測定位置を Fig.2 に示す。また、カテーテルをそれぞれ A から B まで挿入・抜去する際、計測された力を Fig.3, Fig.4 に示す。



(a) Thoracic aorta (b) Measurement position
Fig.2 Measurement position of thoracic aorta

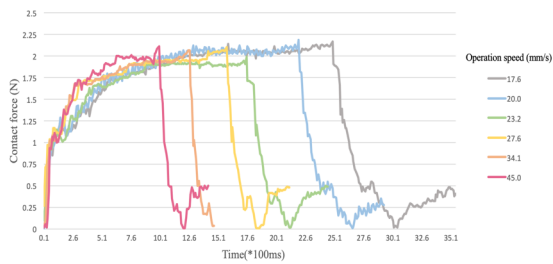


Fig.3 Measurement result of aortic arch

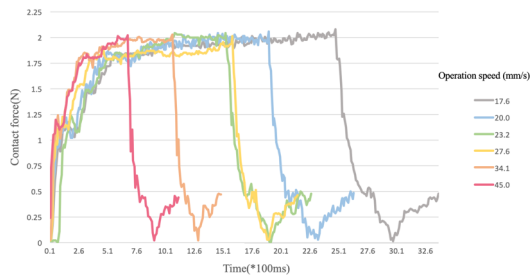


Fig.4 Measurement result of descending aorta

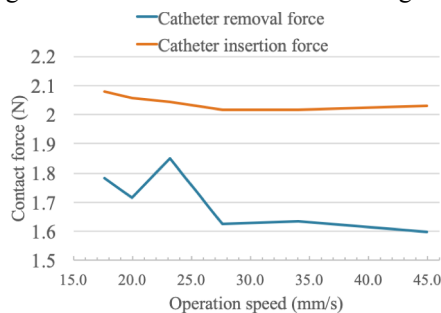


Fig.5 Maximum force on the vessel wall in the descending aorta

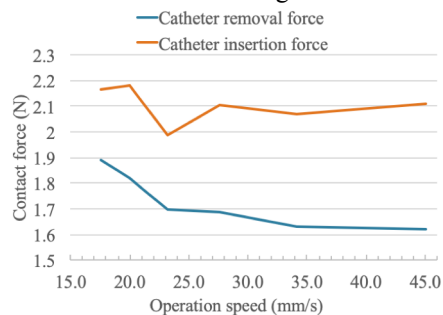


Fig.6 Maximum force on the vessel wall in the aortic arch

各操作速度による下行大動脈の血管壁に負荷した最大の力を Fig.5 に、弓部大動脈の血管壁に負荷した最大の力を Fig.6 に示す。Fig.5 から、下行大動脈では挿入時、27.6[mm/s]で最小、17.6[mm/s]で最大となっており、差は 0.067[N]である。抜去時は、27.6[mm/s]で最小、23.2[mm/s]で最大となっている。その差は 0.255[N]であり、抜去時と挿入時で力の挙動が異なることが分かる。また、Fig.6 から挿入時において弓部大動脈では23.2[mm/s]で血管壁に負荷する力は最小、20.0[mm/s]で最大となり、その差は 0.194[N]である。抜去時は 45.0[mm/s]で最小、17.6[mm/s]で最大となりその差は 0.271[N]である。弓部大動脈において挿入時の力の挙動は下行大動脈と異なることが分かる。

6. 結論

心臓や血管で構成される閉鎖循環系の抵抗のある管腔内を、血圧を駆動力として血液が流れると血管壁にはずり応力と圧力の 2 つの力が作用する。Fig.7 に血管壁に作用する力を示す。

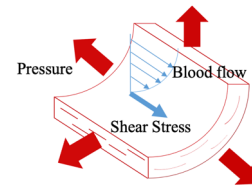


Fig.7 Force acting on the blood vessel wall

近似的に血管をまっすぐな円管とし流れが層流であるとすると、流速分布は放物線上となりずり速度は壁面で最大となる。下行大動脈ではレイノズル数は 1200~1500 をとり管壁における剪断速度は 0~120[s⁻¹]であることが知られている[3]。よって下行大動脈における壁ずり応力は、式(1)で求められる。

$$\tau = \mu \times \gamma_{wall} = 0.000697 \times 120 = 0.0836 [Pa] \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{l} \tau: \text{壁ずり応力} \\ \mu: \text{水の粘性係数}(36.5^\circ\text{C}) \\ \gamma_{wall}: \text{管壁における剪断速度} \end{array} \right)$$

挿入時において下行大動脈で操作速度による力の変化が小さかったのは壁ずり応力が反力として負荷していたためであると考ええる。一方、抜去時は血流と同じ方向にカテーテルを動かしているため、壁ずり応力が加わり操作速度による力の変化が大きくなったと考えられる。また本研究で用いた血管モデルの摩擦係数は 0.042 であり、操作速度が遅いほど負荷する力が大きくなったのは、血管壁とカテーテル先端が接触している時間が長くなり摩擦力が負荷したと考える。

一方、弓部大動脈では上行大動脈からの流れが大動脈弓壁に衝突することによって渦が発生するため流れは複雑であると考ええる。この渦は下行大動脈の先端部まで広がっており、これによって弓部大動脈で挿入・抜去時の力は大きく変化したと考える。

参考文献

- [1] Yuxin Wang, Shuxiang Guo, Yan Zhao, et al. "A CNNs-based of Force and Torque Identification Model for Vascular Interventional Surgery Robot". Proceedings of 2019 IEEE international Conference on Mechatronics and Automation, pp.2291-2296, August 4-7, Tianjin, China, 2019.
- [2] Shuxiang Guo, Yu Song, Xuanchun Yin, 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.
- [3] 杉晴夫, 宮崎俊一, 他 : 人体機能生理学, 株式会社南江堂, 東京, 2003.