

画像処理を用いた内視鏡触覚センサー

高 嶋 一 登

Vision-Based Tactile Sensor for Endoscopy

Kazuto TAKASHIMA

Endoscopy would become more useful if the visual information obtained with it could be combined with tactile information. We therefore developed a new tactile sensor with this feature using image processing of an infrared cut pattern. As visible light can pass through the infrared cut pattern, this sensor does not degrade diagnostic images. It is possible to install this sensor on the tip of an endoscope easily because wires for power delivery and transmission of signals are unnecessary. This sensor can be used for the improvement of the safety of the endoscope, and a measurement of the stiffness of tissues.

Key words: endoscope, tactile sensor, image processing, low invasive surgery, stiffness sensing

内視鏡は視覚情報を得る医療機器であるが、触覚情報を組み合わせることにより、単一の視覚情報のみを用いる場合より、さらに周囲の環境の認識が確実になるであろう。医療の分野における触覚センサーの用途としては、①医療デバイスに取り付けて、先端の接触力を算出することによる手術の操作性・安全性の向上¹⁻⁵⁾、②対象物の剛性等の材料定数を測定すること⁵⁻⁷⁾がある。

患者の quality of life を重視して、外科治療は、できるだけ小さい皮膚切開で、あるいは全く皮膚切開なしで行う低侵襲治療に移行している。内視鏡は体内のさまざまな部分に応用され、低侵襲医療にはかかせない医療デバイスであるが、その適用される部分の隙間は狭く、操作は非常に難しい。例えば、近年、脳梗塞、脳動脈瘤などの治療前後の診断において血管内視鏡が使われはじめているが、頭蓋内の血管は複雑に屈曲したうえに分岐が多いため、操作の難易度は高い。

そのため、低侵襲医療デバイスと対象内壁との接触力を測定することは、安全で迅速な診断をするために有効であり、これまでも、さまざまな研究がなされている。それらの研究では、 piezo 抵抗効果、静電容量センサー、レーザー光の反射量変化等を利用してはいるが、これらのセンサーは、触覚情報を体外に取り出すための配線等を追加する

必要があるため、既存のものに取り付けるには多大な労力・スペースが必要になる。さらに、これらのセンサーは、軸方向の力しか測定できないものが多く、デバイスの横方向の力を考慮に入れたものは少ない。

一方、生体組織の検査のために表面の剛性を測定することは、非常に有用であり、体内のさまざまな部分の診断に応用されている。例えば、関節疾患の診断のために、関節鏡と併用してのフック状のプロープによる触診が広く行われ、生体内外でのインデンテーション装置もさまざまなものが開発されている。この結果、肉眼観察では検出できない初期の軟骨変性を捉えることが可能である。

そのため、筆者らは、従来の手法を用いず、既存のさまざまな内視鏡の先端に容易に取り付けられて、軸方向の力だけでなく横方向の力も検出できる触覚センサーを開発してきた⁸⁻¹⁰⁾。また、本触覚センサーは、アタッチメントを追加することにより、生体組織の剛性を測定することが可能である。本稿では、筆者らが開発してきた触覚センサーの原理、および、試作品を用いた実験結果を紹介する。

1. 触覚センサーの原理および利点

1.1 接触力の算出

本研究で開発した触覚センサーシステムの概要を図1に示す。触覚センサー部は、①赤外線（以下 IR）をカット

理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター（〒463-0003 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2271-130） E-mail: takasima@bmc.riken.jp

するパターンが取り付けられた透明窓部, ② 弾性体部, ③ 内視鏡とのアタッチメント部から構成される。ただし, 図中, 内視鏡の長軸方向を z 軸, 接触力がない場合の透明窓部の位置を原点としている。

このとき, 内視鏡を通して得られた画像により, 透明窓上のパターンの xy 平面上での位置, 倍率の情報を得ることができる。図2のように, 先端部に横方向の力が働いた場合はパターンの重心位置が, 先端部に軸方向の力が働いた場合は IR カットパターンの面積が変化する。これらの画像の変化量は弾性体部の変形と変位の関係に依存するので, IR カットパターンの重心位置および面積の変化の大きさから, 先端の横方向, 軸方向の接触力をそれぞれ算出することができる (式の導出方法は文献8を参照)。ただし, IR カットパターンが円形の場合は, パターンの直径

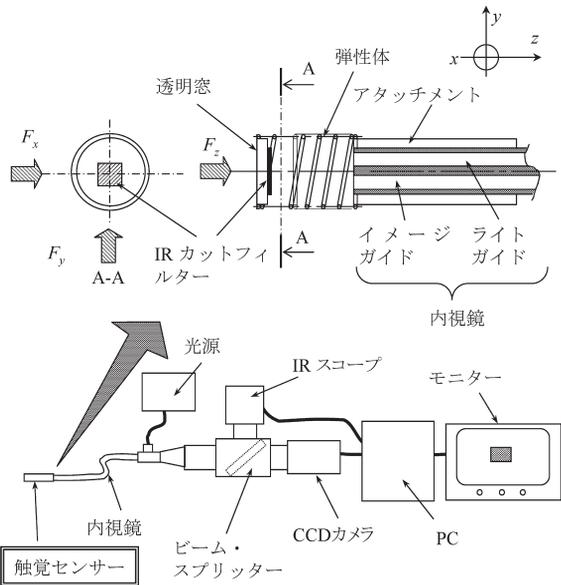


図1 画像処理を用いた内視鏡用触覚センサー。

	初期位置	軸方向の力が働いた場合	横方向の力が働いた場合
センサーに働く力	弾性体 アタッチメント IRカット フィルター 内視鏡	軸方向の力	横方向の力
画像の変化			

図2 接触力算出の原理 (軸方向の力が働くと IR カットパターンの面積が変化し, 横方向の力が働くと IR カットパターンの位置が変化する)。

の最大値を用いて, 軸方向の力を求めてもよい。

1.2 本触覚センサーの利点

ロボット工学の分野では, 画像処理を用いた触覚センサーがいくつか提案されている¹¹⁻¹⁴⁾。しかし, これらのセンサーの画像処理に必要なパターンは通常の画像の障害になるので, 本触覚センサーでは, IR カットパターンを使用する。近赤外光は, 体内のおもな光吸収物質であるヘモグロビン・水による吸収が少なく, 生体組織に対して比較的高い透過特性を示すので¹⁵⁾, パターンを血管内で認識する場合に外乱の影響を受けにくいと考えられる。また, IR カットパターンは可視光を透過するため, 従来の診断に用いられる可視光による画像を損なわない。本研究で利用した IR カットフィルター (1.5×1.5 mm) を貼り付けたサファイア光学ウィンドウ ($\phi 2.5 \times 0.5$ mm) を文字の上に置き, (a) 通常の CCD カメラ, (b) 赤外線カメラを通して撮影した画像を図3に示す。CCD カメラでは見えない IR カットフィルター (図中の中心右側付近の文字上) が, 赤外線カメラでは黒く見えるのがわかる。以上の利点を表1にまとめて示す。

2. 本触覚センサーの試作例

筆者らはこれまで, 試作した触覚センサーを用いて, 基礎実験を行ってきた。工業用ファイバースコープ (画素数: 7000, 外径: 2.4 mm, 長さ: 935 mm) の先端に試作した触覚センサーを取り付け, IR カットパターンの画像変化を内視鏡を通してカメラで取り込む。内視鏡に取り付けたカメラによる画像は, パソコンに取り込まれ, 粒子荒れ等の誤差成分をなくした後に, 二値化処理を行い, IR カットパターンの面積, 直径, 重心位置等が計算される。

試作した触覚センサーでは, 透明窓部には前記の IR カットフィルターを貼り付けた光学ウィンドウを用いた。また, 弾性体部としては, 圧縮ばね (線径: 0.18 mm, コイル径: 3.32 mm, 長さ: 6.5 mm, 軸方向のばね定数: 0.062 N/mm) を用いた。さらに, アタッチメント部としては光通信に用いられる内径 $\phi 2.5$ mm の割スリーブを用い, 3つの部分はお互いに接着した。試作した触覚センサ

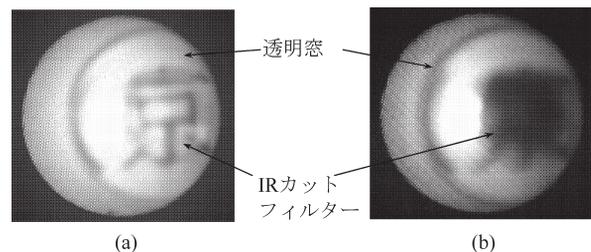


図3 内視鏡を通しての画像。(a) 通常の CCD カメラによる画像, (b) IR スコープによる画像。

表1 本触覚センサーの利点.

特徴	効果
IR カットパターンを使用	<ul style="list-style-type: none"> ・外乱の影響を受けにくい ・診断画像を損なわない
内視鏡の画像を利用	配線等のスペースが不要
内視鏡と併用可能	内視鏡下で目標とする部位の剛性測定が容易
アタッチメントのみで取り付け可能	既存の内視鏡をそのまま使用することが可能

一のセンサー部の外観を図4に示す。本試作品を用いたこれまでのおもな実験結果は以下の通りである。

- ・センサー先端に働く接触力と画像処理によって得られた面積・重心位置には相関関係が得られた。また、画像処理結果は、外乱の影響を受けるが画像処理で補正することができた（詳細は文献8参照）。
- ・弾性体の変形特性を有限要素解析することにより、力の加わる方向の影響を受けることがわかった。この結果を用いて、3方向の力を同時に精度よく測定することが可能になった。さらに血管モデルに挿入したときの接触力を測定すると、センサーの横の部分が接触したときは横方向の力が、軸方向に接触したときは軸方向の力が検出できた（詳細は文献10参照）。

また、本稿では詳細な説明は割愛するが、本触覚センサーはアタッチメントを追加することにより、簡易的に対象物の剛性を測定することを検討しており、試作品を用いて、いくつかの工業材料、ブタ関節軟骨の測定を行ってきた（詳細は文献9参照）。もし対象物の剛性の測定が可能になれば、内視鏡を見ながら測定したい部分を特定して、剛性を測定することができる。一方、剛性を測定する場合も、可視光による診断画像を損なわないため、内視鏡を見ながら測定したい部分を特定して、測定ができる。

本稿では、筆者らが開発しているIRカットパターンの画像処理を用いた触覚センサーについて紹介した。本触覚センサーは、生体組織に対し比較的高い透過特性を示すIRを使用することにより、外乱の影響を受けにくいセンサーが構成できる。また、従来の診断に用いられる可視光による画像を損なわない。そのため、本触覚センサーは、①内視鏡の安全性向上、②内視鏡下での対象物の剛性測定に適していると考えられる。

従来の血管内手術においては、最初カテーテル/ガイドワイヤーを挿入し、それをガイドとして内視鏡等、他の医療機器の挿入を行うが、このまま内視鏡が細径化し、本触

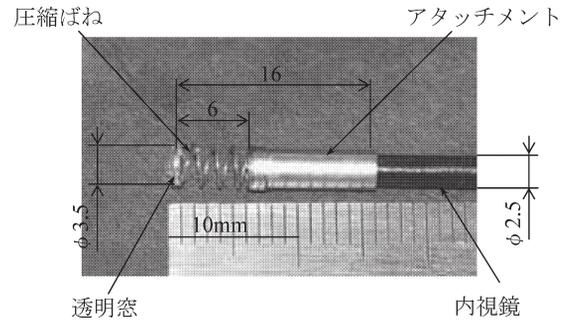


図4 本触覚センサーの試作例.

覚センサーを取り付けることができれば、最初から多機能化した内視鏡を挿入することが可能になるかもしれない。

文 献

- 1) 谷本充隆ほか：“低侵襲治療のためのマイクロ力覚センサに関する研究”，日本機械学会論文集，**64-C** (1998) 1266-1271.
- 2) B. L. Gray and R. S. Fearing: “A surface micromachined microtactile sensor array,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1 (1996) pp. 1-6.
- 3) M. Ito *et al.*: “Compound-cavity tactile sensor using surface-emitting laser [for endoscope/catheter tips],” *Proceedings of the IEEE MHS '95* (1995) pp. 83-88.
- 4) S. Maeda *et al.*: “KrF excimer laser induced selective non-planar metallization,” *Proceedings of the IEEE MEMS '94* (1994) pp. 75-80.
- 5) 尾股定夫, 村山嘉延：“2.4.7 触診を定量化する触覚センサの開発”，超五感センサの開発最前線（エヌ・ティー・エス，2005）pp. 321-330.
- 6) 大橋俊朗ほか：“矩形断面ピペットを使った生体軟組織弾性率の測定に関する解析と実験”，日本機械学会論文集，**63-C** (1997) 867-874.
- 7) 田中真美：“皮膚性状計測用触覚センサ”，*トライボロジスト*，**48** (2003) 536-540.
- 8) K. Takashima *et al.*: “An endoscopic tactile sensor for low invasive surgery,” *Sens. Actuators A*, **119** (2005) 372-383.
- 9) 高嶋一登ほか：“内視鏡用光学式触覚センサに関する研究”，*日本臨床バイオメカニクス学会誌*，**26** (2005) 447-456.
- 10) K. Takashima *et al.*: “Vision-based tactile sensor for endoscopy,” *Complex Medical Engineering*, eds. J. L. Wu *et al.* (Springer, Tokyo, 2006) (in press).
- 11) M. Kaneko *et al.*: “Vision-based active sensor using a flexible beam,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, **6**, No. 1 (2001) 7-16.
- 12) 神山和人ほか：“触覚カメラ—弾性を持った光学式3次元触覚センサの作成—”，*電気学会論文誌*，**123-E**, No. 1 (2003) 16-22.
- 13) 大岡昌博ほか：“光学式マイクロ三軸触覚センサの試作”，*日本機械学会論文集*，**66-C** (2000) 3344-3351.
- 14) 前川 仁ほか：“半球面光導波路を用いた指先搭載型触覚センサの開発”，*計測自動制御学会論文集*，**30** (1994) 499-507.
- 15) 山田幸生：“光と生体—生体分光学への招待”，*光による医学診断*，田村守編（共立出版，2001）pp. 19-36.

(2006年5月11日受理)