

臓器内部の腫瘍探査を目的としたセンサ付スコープの開発

(第2報)感圧インデントと校正系

東京工業大学 機械系 ○田野 直輝, 未来研* 初澤 毅

Tokyo Institute of Technology, Mechanical Engineering Course, *FIRST

Naoki Tano and *Takeshi Hatsuzawa

1. はじめに

近年, CT スキャン技術等の発展により肺における微小腫瘍を発見できるようになっている。微小腫瘍の摘出には内視鏡を用いた胸腔鏡手術が行われており, この手法では手術時間と切開範囲を減らすことで患者への負担を大幅に減らすことが可能である。一方で, 切除範囲は従来執刀医の触診により決定されて来たが, 腫瘍が胸腔の奥に位置する場合や患者の胸腔が狭い場合などは執刀医の指が届かないため, 触診が不能である¹⁾。

本研究では執刀医の指に代わって手術範囲を決定するデバイスとして感圧センサ付きのスコープを開発し, おもりを用いた校正系により圧子脚長と感度について検討した。

2. スコープ

2-1. 動作原理

一般的に腫瘍部位は通常組織と比べて硬いことが知られており, 医師は触診により硬い部分を特定し, 手術範囲の決定を行っている。そこで本研究におけるスコープでは組織の硬さの違いを圧力により検出することを目指した。スコープは Fig. 1 のように部品を組み合わせることで感圧部圧子を構成し, 底面に圧電センサを敷いている。腫瘍部にスコープを当てると Fig. 2 に示すように圧子中央部分のみ押し込まれ, 圧子の脚が底部の圧電センサを押し込んで腫瘍を検出する仕組みになっている。また, 腫瘍が存在しないときは圧子全般で圧力が一様となり周辺部にも力が分散されるため, 圧電センサが反応することはない。本研究では圧子脚長とばねについてのパラメータを実験的に調整することで腫瘍を高確度で発見できるようにする。

2-2. 構造

前節で述べたようにスコープ圧子は複数の部品からなる。本研究では各部の寸法を細かく調節する必要があるため, ばねと圧電センサ以外は3Dプリンタ (anycubic 社製 photon) で部品を作製した。

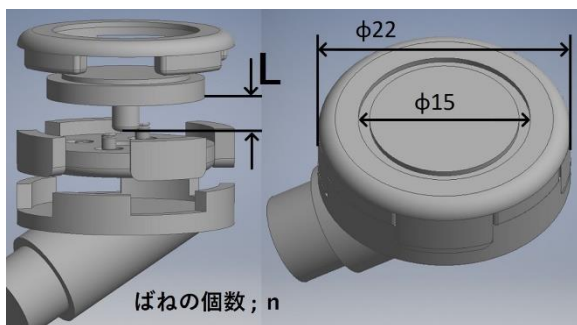


Fig. 1 スコープの図。左は組み立て前のスコープの図。右は組立図。

- 1) 表面カバー：圧子の周りの部分で中央に圧子が入る穴が開いている。
- 2) 圧子：腫瘍に当たることによって押し込まれる部分。脚部が圧電センサに接触して圧力を伝え, 圧子脚長 L で感度を調整。
- 3) ばね：アキュレイト社製 DC141 (外径 1.5 mm; 自由高さ 2.4 mm; ばね定数 5.8 N/mm) を使用。圧子とベースの間に n 個入れる。
- 4) ベース：表面カバーと底面カバーの間の部品。ばねを抑える役割を担う。
- 5) 圧電センサ：Interlink Electronics 社製 FSR 402 を使用。ベースとカバーの間に挟む。
- 6) 底面カバー：1) と反対側のカバー。

3. 実験系

3-1. 実験装置

実験系の各要素を以下に示す。

- 1) ファントム組織：軟質シリコン樹脂 (エクシール社製 人肌のゲル) を用いて作製した。通常組織にあたる部分。下に敷く高さ 16 mm のものと腫瘍モデルの上に被せる高さ 8 mm のものを用意した。
- 2) 腫瘍モデル：硬質シリコン樹脂 (ウェーブ社製 ウェーブ・シリコンゴム) を用いて作製。直径の異なる六種類の球を高さ 5 mm で切断した形状。
- 3) スコープカバー：スコープの上から押し込み力を負荷できるように圧力センサを挟むカバーの部分を実験用に作製した。
- 4) 支柱：重りを載せる支柱。質量 100 g。
- 5) 重り：ドーナツ型で質量 100 g, 200 g, 400 g の三枚。

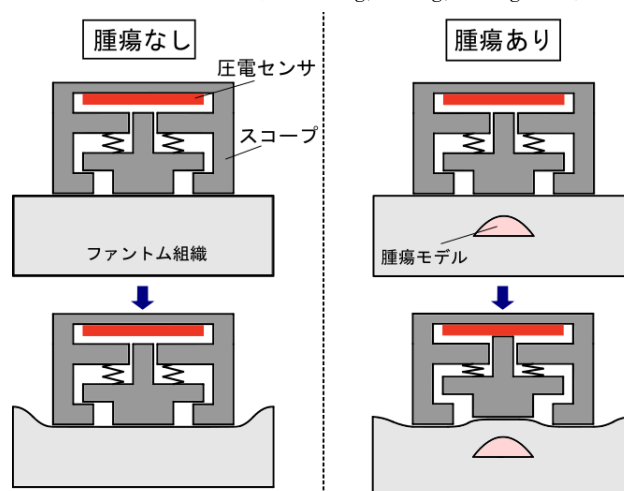


Fig. 2 スコープ圧子の動作原理

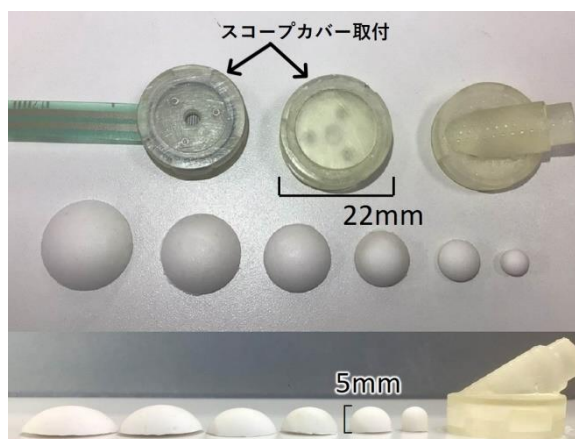


Fig. 3 腫瘍モデルとスコープ圧子の外観。腫瘍モデルの直径は左から 20, 17, 14, 11, 8, 5 mm。

3-2. 実験の流れ

Fig. 4 のような実験系を考慮した。腫瘍モデルの上にスコープを置き、押し込んでいくときのセンサの反応を測定した。各パラメータについて3つのスコープを用意し、各プローブについて初期押し込み力 0.98 N (100 gf) から押し込み力を 0.98 N ずつ増やして測定した。各押し込み力についてサンプリングタイム 0.2 sec で 3.0 sec にわたって測定を行った。一回の測定の流れをまとめると、以下のようなものである。

- 1) スコープをファントム組織の上に置き、上に 100 g の支柱を設置。
- 2) 3.0 sec 静止して圧電センサの抵抗を測定。
- 3) 100 g 分の重りを増加。
- 4) 2) と 3) を 500 g になるまで繰り返す。

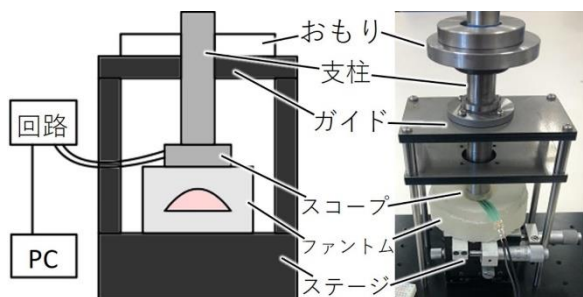


Fig. 5 校正装置の概略図。

4. 実験結果

実験結果は ROC 曲線 (Receiver Operating Characteristic; 縦軸を真陽性率, 横軸を偽陽性率としたグラフ。グラフ中の各点ではデータに対する閾値を変化させており, その時の真陽性率と偽陽性率をプロット²⁾。) の AUC (the area under the ROC curve; ROC 曲線の曲線より下の

Table. 1 実験結果の例。

n	L	100gf	200gf	300gf	400gf	500gf
2	3.2	0.500	0.500	0.500	0.528	0.635
	3.4	0.667	0.791	0.928	0.949	0.937
	3.6	0.866	0.819	0.800	0.801	0.789
3	3.4	0.507	0.524	0.502	0.565	0.788
	3.6	0.552	0.675	0.771	0.916	0.920
	3.8	0.906	0.878	0.916	0.935	0.924

部分の面積。ROC 曲線において, 一般的な評価指標として使用²⁾。) の値で評価した。結果を Table1 に示す。ばねの数と圧子脚長を変えて実験を行った。この表から, ばねが二つ・圧子脚部が 3.4 mm のスコープに 3.92 N (400 gf) の荷重をかけたときが最も優れていることが分かる。このときの ROC 曲線を Fig.5 に示す。偽陽性率が低く, 真陽性率が高い左上の点のときの閾値で判定が最も正確になる。

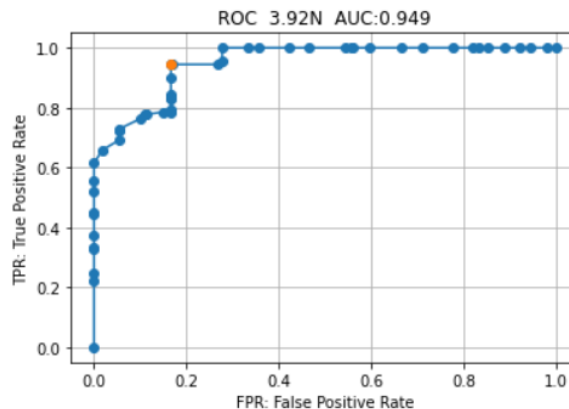


Fig. 4 n = 2, L = 3.4 のときの ROC 曲線。

5. 結論と今後の課題

5-1. 結論

本研究では以下のような成果が得られた。

- ・最も高い確度を示したのは, n = 2, L = 3.4 mm のスコープ圧子に 3.92 N (400 gf) の荷重を加えたときであった。
- ・AUC が 0.900 以上を評価基準とすると, 三種類のスコープ ([n, L] = [2, 3.4] [3, 3.6] [3, 3.8]) が基準を満たしていた。

5-2. 今後の課題

今後の課題を以下にまとめる。

- ・二種類のスコープ ([n, L] = [2, 3.4] [3, 3.6]) については 2.94 N (300 gf) 以上の荷重でないと AUC 0.900 以上の基準を満たせず, 実際の触診で臓器に直接当てることを考えると, より小さい荷重で腫瘍の判定を行えるように, 寸法を更に調整する必要がある。
- ・実際に使うスコープは生体適合性の高い材料で作られる必要がある。今後は材料を生体適合性の高い, 実用的なものに変更する。
- ・本実験は腫瘍がスコープの中心に来た時を対象とした。今後はスコープの端部に腫瘍が接触するケースなど, 腫瘍の位置によるスコープの応答の変化も実験する。
- ・本研究では一つの寸法に対して三つのスコープ圧子を用意することで部品ごとの特異性が結果に反映されないようにしていたが, 再現性の評価は行っていない。今後の実験ではスコープ圧子の再現性と反復性の評価も行っていく。

6. 参考文献

- 1) Mogi A, Yajima T, Tomizawa K, Onozato R, Tanaka S, Kuwano H, Video-Assisted Thoracoscopic Surgery after Preoperative CT-Guided Lipiodol Marking of Small or Impalpable Pulmonary Nodules, Ann Thorac Cardiovasc Surg, 2015, 21(5), 435-9
- 2) Margaret Sullivan Pepe, Receiver Operating Characteristic Methodology, Journal of the American Statistical Association, 2000, 95:449, 308-311