

博士学位論文審査結果要旨

平成 26 年 2 月 18 日

研究科、専攻名 バイオ・情報メディア研究科 バイオニクス専攻

学位申請者氏名 福嶋 勇太

論文題目 心嚢穿刺を支援するためのロボット工学的研究

審査結果の要旨

平成27年1月27日に東京工科大学において、学位申請者福嶋勇太の学位審査公開発表会が開催され、以下の要旨に示す博士論文に関する発表と関連する質疑応答が行われた。

医療行為の中で特に針を人体に刺す穿刺手技は、穿刺対象が人体の中心にあるほど難易度が高く、重篤な併発症が生じやすい。特に心臓と心臓を包む膜の間の心膜腔で針を止め、貯留液を排出する心嚢穿刺は、拍動を伴うことや重要な臓器が周囲に存在することから、手技を補助するシステムの需要は高いといえる。近年の研究では、針穿刺手技に対し画像誘導により手技の補助を行う研究が多く見受けられる。しかし画像による誘導だけでは、併発症を低減させることは難しい。これは、針に加わる摩擦力により針先端に加わる力が検知し難くなるためである。また穿刺対象の周囲に重要な臓器がある場合、鋭利部分が露出した針を用いることが、手技の難易度を上げる要因となっている。心嚢穿刺手技には、迅速な対応が求められる緊急の手技と、体液の採取を行う目的の待機的手技にわけられる。緊急的な心嚢穿刺手技では心膜腔内の貯留液が多く、心臓と心膜間の距離は長い、貯留液を迅速に排出しなければ命の危険を伴う。そのためエンドエフェクター等を挿入する時間がなく、従来通り針を用いた手技が理想的と言える。待機的手技では、緊急性はないものの、心膜腔内の貯留液が少なく、心臓と心膜間の距離が短いため、針を用いての手技は併発症が発生する可能性が高い。そこで、本研究では心嚢穿刺手技を対象とした、ロボットによる自動的な穿刺の実現を目指して、1) 緊急的な心嚢穿刺手技に対し、針先端の力、摩擦力、それらの和である総穿刺反力の関係の解明と、摩擦を補償し針先端力を推定するシステムの開発と、2) 待機的心嚢穿刺手技に対し、鋭利部分が露出せず、手技を安全に実施し得るエンドエフェクターの開発を目的とした。

穿刺中に針に加わる力の関係を明らかにするために、筋肉と脂肪組織から構成される層状組織としてブタバラ肉、膜状組織としてブタの心膜にそれぞれ穿刺を行なった。層状組織において、摩擦力は単調増加し、針先端力は増減を繰り返すか一定値を示す傾向を明らかにした。総穿刺反力には摩擦力と針先端力の双方の特徴が観察された。また針先端力の距離微分値を総穿刺反力の距離微分値で除算した値であるゲインKは、総穿刺反力の距離微分値が正方向の場合は0から1に50%以上が集中し、負方向の場合は0から3の間に80%以上が集中することを明らかにした。得られた結果より、入力を総穿刺反力の距離微分値、出力を針先端力の距離微分値とした場合、入出力の関係が比例定数で表すことができると仮定した。比例定数を実験によって得られたゲインKの範囲内で65個の条件に対して、シミュレーションによって、組織を貫通した際の距離誤差と最小二乗誤差率(RMSER)の変化を求めた。その結果、距離誤差は最小で 0.05 ± 5.34 mm、RMSERは 40.5 ± 13.5 %を得た。したがって、貯留液が多量で、心臓と心膜の間の距離が6mm以上となる緊急的な心嚢穿刺手技には、十分用いることが

可能であることを示した。

エンドエフェクターの設計に先立ち、先行研究と同形状のデバイスを作製し、その問題点について検討し、心膜表面の脂肪によって心膜腔内の貯留液を排出できない可能性を示した。次に、心膜を把持して穿刺空間を確保するエンドエフェクターと、その設計指針を提案した。エンドエフェクターの形状は、臓器や組織の採取などに用いられる鉗子と同様の形状を採用した。この鉗子型のエンドエフェクターを設計するために重要となる要素が、心膜の確実な把持を実現するための、心膜とエンドエフェクターの接触形状による最大静止摩擦力の関係である。エンドエフェクターの接触形状は、線接触と面接触に大別できる。合計7種類の異なる接触面積を作成し、接触面積と牽引方向による最大静止摩擦力の計測を行なった。その結果、線接触の場合は面接触に対し3倍以上の最大静止摩擦力が計測された。近年の摩擦力の研究では、剛体と軟性体の接触場合、最大静止摩擦力は真の接触部分における凝着をせん断する際に生じる抵抗力（凝着項）と、剛体のマイクロな突起が軟性体表面に入り込み、前方にある物体を押しのけるのに必要な力（掘り起こし項）の和によって表す説が示されている。面接触と線接触で異なるのは、組織への単位面積当たりに加わる圧力となる。そのため線接触では掘り起こし項が増大し、面接触よりも大きな最大静止摩擦力が得られた。提案するエンドエフェクターでは、心膜を把持後5 mm以上牽引することを目標としている。心膜を5mm牽引した場合、変形した心膜が戻ろうとする弾性力は0.88 Nであった。今回用いた線接触の心膜との最大静止摩擦力は 1.01 ± 0.36 Nであった。以上より、線接触が提案するエンドエフェクターに適していることを示した。

上記の研究に対する学位審査公开发表での発表および質疑応答は妥当なものであり、筆記試験の結果も合格と判定するに十分な点数で、あった。以上のことより、審査委員会は、本論文の著者に対して博士（工学）の学位を授与するに十分な学識左能力を有していることを認めるものである。

審査委員 主査

東京工科大学 准教授 苗村 潔 印