

次世代がん治療ロボットの開発研究

—組織の形状を考慮した極細針穿刺におけるたわみ推定—

研究代表者 岩田 浩康
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

近年、開腹手術や放射線治療、抗がん剤等の化学治療に加え、穿刺技術を用いた低侵襲ながん治療法に期待が高まっている。穿刺とは体内に存在するがん腫瘍などの対象に対して針を挿入する治療行為であり、針に対して熱を加える RFA 焼灼術や、がんへの免疫力を回復させるために自家の樹状細胞を注入するがんワクチン療法など様々な治療法に対して用いられる。ここで治療に用いる針の径が細い（以下、極細針）ほど、患者への侵襲性が下がる一方、針が容易にたわむため正確な穿刺が困難になる（図 1 a）。特に、身体深部への穿刺では、複数の組織や臓器を通過することから針のたわみは一層複雑となる。これに対し、穿刺中に CT などの医用画像モダリティを用いて、針先や腫瘍の位置を適宜確認する方法が採られているが、CT は鮮明な画像の取得を可能とする一方で、何度も刺し直した場合、CT の撮像回数が増え、患者や医師への被ばく量の増加ひいては健康被害へのリスク増につながる。以上の課題を解決するためには、遠隔操作で極細針を用いた穿刺治療が可能なロボット技術を構築する必要がある。

2015 年度までに、針に回転や振動を加える制御を行うことによって針のたわみを低減できることを実験的に検証してきた。そこで得られた課題を踏まえ、本年度は、組織の形状によるたわみへの影響の機序分析を行うとともに、力学モデルを規範としたたわみの推定手法を提案する。

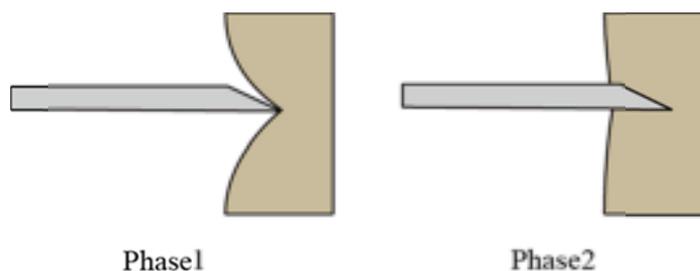


Fig. 1 Needle insertion flow

2. 主な研究成果

2.1 組織形状によるたわみへの影響の機序分析

一般的な穿刺針の針先形状は円筒を斜めにカットしたベベル形状である（図 1）。軟組織に対して穿刺を行う場合、大きく二つのフェーズに大別することができる。Phase1 は、針先が組織の表面または境界面に接触してから始まる。針先から組織に一定以上の力がかけると表面は破

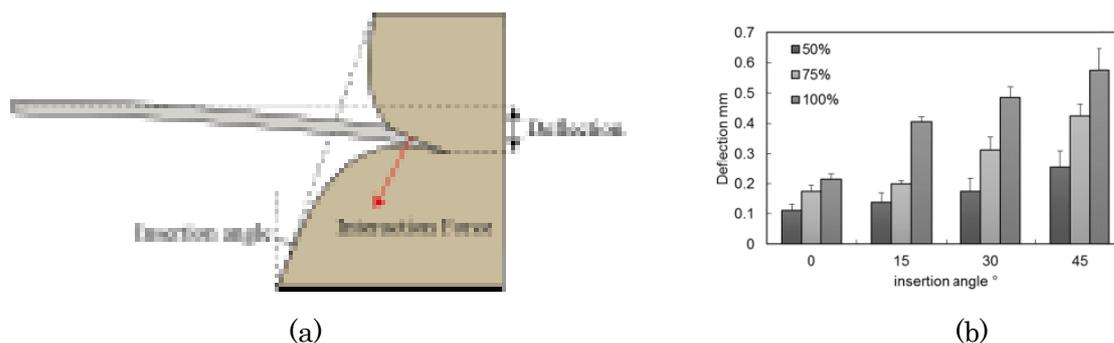


Fig. 2 Needle deflection due to insertion angles to Polyvinyl chloride phantoms
 (a) interaction force between needle tip and tissue surface (b) experimental results

断し、Phase 2 が始まり、次の境界面に接触するまで続く。Phase 1 及び Phase 2 ではそれぞれ針のたわむ原因が考えられる。Phase 1 では表面を破断するまでの間に組織は大きく変形し、その方向によって針先の軌道がずれてしまう可能性がある。Phase 2 では針先は組織内を切断していくが、針先に生じる力及びシャフト部にかかる摩擦力によって針がたわむことが考えられる。これまでの結果から、組織の形状によってたわみが増えることが分かっている。そこで、組織に対して複数の角度から穿刺を行ったところ、Phase 1 において組織表面の法線方向と穿刺方向にずれ（以下、穿刺角度）があると針のたわみが大きくなることが実験的にわかった（図 2）。この原因として、組織表面破断までの組織変形の影響が考えられる。

2.2 たわみ推定手法

上記の機序分析をもとに Phase 1 における針のたわみを推定する力学モデルを案出した。構築したモデルは、片持ち梁の先端がばねで支持されているという構成を採っている。針を片持ち梁とみなし、針と組織間に働く相互作用の剛性を仮想的なばねとみなして、ばねで支持された片持ち梁として構成されている（図 3）。針先の水平方向に作用する力 ($F_{t,y}$) は針先のたわみに起因する。このモデルは組織刺入前から表面破断までの間を連続した n 回の穿刺ステップに離散化し、各ステップを i として定義している。針のたわみを推定する手法として、Rayleigh-Ritz 法を用いた。たわみは系全体の内部エネルギーが最小となるように推定される。上記の仮想的なばねのばね定数 (K_e) を、複数の硬さの PVC フェントムを用いて複数の穿刺角度から穿刺を行った際のたわみの実験値を基にモデル化したところ最大誤差 0.1mm 以下の精度で推定が可能となった。このモデルから穿刺角度によるたわみへの影響を定量的に評価可能となる。

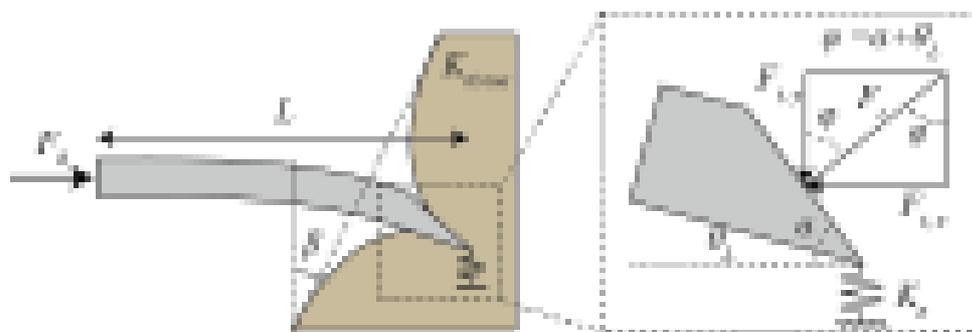


Fig. 3 The proposed estimation model is a cantilever beam supported by virtual springs that represent the interaction forces between the needle tip and tissue surface

3. 共同研究者

宮下 朋之 (理工学術院・教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- [1] 瀧下 雄介, 津村 遼介, 福嶋 勇太, 岩田 浩康, “回転・振動を付与した穿刺による組織損傷の組織学的分析”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2016年6月
- [2] Ryosuke Tsumura, Hiroyasu Iwata, “Experimental Analysis of Needle Tip Deflection until Breaching Tissue Surface”, 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, USA, 2016.8
- [3] Ryosuke Tsumura, Yusuke Takishita, Yuta Fukushima, Hiroyasu Iwata, “Histological Evaluation of Tissue Damage due to Needle Insertion with Axial Rotation”, 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.5120-5123, USA, 2016.8
- [4] 津村 遼介, 下島 海, 福嶋 勇太, 岩田 浩康, “下腹部穿刺における極細針を用いた穿刺パスプランニングの構築”, 第25回日本コンピュータ外科学会, 2016年11月
- [5] 津村 遼介, 岩田 浩康, “組織表面穿刺における極細針のたわみ推定モデル”, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 1E2-5, 2016年12月
- [6] 下島 海, 津村 遼介, 岩田 浩康, “極細針を用いた腸管穿刺におけるたわみの実験分析”, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 3K4-1, 2016年12月
- [7] Ryosuke Tsumura, Hiroyasu Iwata, “Methods of Control for Minimizing Extra-Thin Needle Deflection with a Combination of Vibration and Rotation in the Lower Abdomen”, Journal of Biomechanical Science and Engineering, vol. 12(3), No.16-00468, 2017.1

4.2 総説・著書

該当なし

4.3 招待講演

岩田浩康, “最先端研究: 医療支援ロボット ~妊婦検診/次世代がん治療の支援~”, 早稲田大学オブソクルジ「最新! 早稲田のロボット学」, 早稲田大学エクステンションセンター早稲田校, 東京, 2016年9月9日

岩田浩康, “がん免疫細胞療法を支援する腫瘍内穿刺ロボットの開発研究”, 早稲田大学・がん研究会研究交流会, がん研究会 有明病院レセプションルーム, 東京, 2016年7月13日

4.4 受賞・表彰

岩田浩康, 部門貢献表彰, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門, 2016年6月

4.5 学会および社会的活動

岩田浩康, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門医工融合システム部会 主査

5. 研究活動の課題と展望

これらの結果から穿刺角度によるたわみの影響を確認した。課題として, 生体組織への適用及び組織境界面への拡張があげられる。また次年度は, 2016年度の分析に基づき, 針のたわみが最小化される穿刺パスプランニングを構築する。組織や臓器の表面, 境界面における穿刺角度を考慮した穿刺パスプランニングを構築する予定である。