

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21700513

研究課題名(和文) 変形と温度分布の統合シミュレーションを用いたRFA治療支援ロボットシステムの開発

研究課題名(英文) Development of robotic system with deformable and thermal simulator

研究代表者

小林 洋 (KOBAYASHI YO)

早稲田大学・理工学術院・講師

研究者番号：50424817

研究成果の概要(和文)：肝臓の物理モデルを用いた数値シミュレーションとロボット技術を統合することで、正確な穿刺及び正確な焼灼領域の確保を実現する医療用システムの開発を目的として、主に、RFA時の温度分布を推定するシミュレータの開発を実施した。(1)肝臓熱物性値取得実験、(2)温度分布シミュレータの開発、(3)in vitroにおける温度分布シミュレータ精度評価実験、(4)in vivo環境下において血流が与える影響、の4項目に関して研究を実施し、開発を実施する共に、臨床応用へ向けて必要なデータを蓄積した。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study is to develop robotic system with both deformable and thermal simulator. We mainly addressed the development and evaluation of thermal simulator in this project. Specifically, we studied (1) Measurement and modeling of liver thermal properties, (2) Development of temperature distribution simulator, (3) In vitro evaluation of thermal simulator, (4) Consideration of effect of blood flow of in vivo situation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：医用システム

科研費の分科・細目：低侵襲治療システム

キーワード：ロボティクス、生体熱工学、構造力学、バイオメカニクス、制御システム

1. 研究開始当初の背景

現在、腫瘍に電極針を穿刺(針を刺すこと)し、熱を加えることで腫瘍を壊死させるラジオ波焼灼療法(RFA)が注目されている。RFAは目標患部のみを局所的に治療することが可能であり、患部以外の組織の損傷が少なく臓器機能の保全が可能であるため、現在すでに先進諸国において肝がんの治療における主流となっている。しかし一方で、その手技

には困難な点も多い。例えば、肝臓等の臓器は軟組織から構成されるため、針が肝臓表面を切断するまでの間に、針によって押込まれて肝臓が変形する。肝臓の変形に伴い目標とするがん部の位置も変化するため、針を精確に目標患部に到達させることが困難であり、熟練の技術を要する。また、診断画像下では焼灼領域が不明瞭であるため、術者が術前に想定した領域を焼灼することが困難である

という問題を有する。これらの問題により、治療上必要な焼灼領域を過不足なく確保することが困難になっているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、肝臓の物理モデルを用いた数値シミュレーションとロボット技術を統合することで、正確な穿刺及び正確な焼灼領域の確保を実現する医療用システムの開発を行なう。具体的には、穿刺に伴う肝臓の変形を予測するシミュレータを用いて、がん細胞に針の先端を正確に到達させることができる穿刺経路を選定する。さらに、温度分布シミュレーションにより、がん細胞の領域を過不足なく焼灼する熱量を決定する。これらの医療用システムは、がんのみを局所的に除去するという最小侵襲の治療を患者に提供すると共に、術中に生じる肝臓の変形や温度分布等の定量的な情報を医師に提供することが可能になると考えられる。

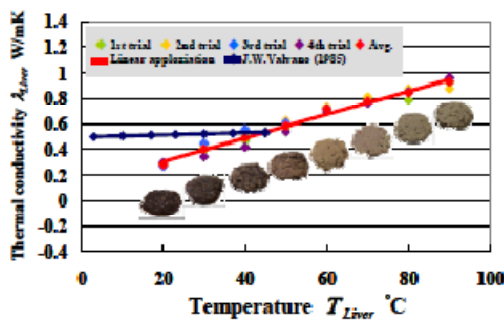
3. 研究の方法

温度分布の統合シミュレータの開発とその評価実験に関する研究を実施した。さらに、動物臨床により開発したシステムを評価した。各段階で専門家（工学者、医師）と連携することで、効果的に開発を進めた。

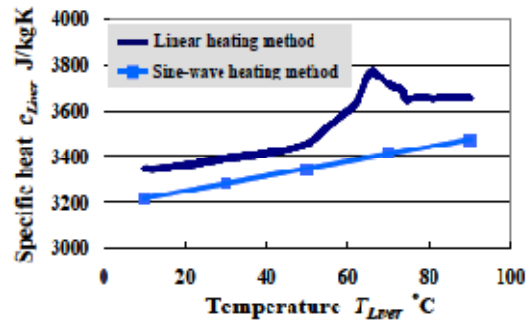
4. 研究成果

(1) 肝臓熱物性値取得実験

臨床に耐えうる高精度な温度分布シミュレータを開発するには、生体組織が有する熱物性値の複雑さをシミュレーションに反映する必要がある。特に生体組織は温度上昇に伴い組織の組成が変化し、熱物性値も変化することが知られている。そこで、ブタ肝臓を用いて、シミュレータ精度に大きく影響する熱伝導率および比熱の温度依存性をそれぞれ定常比較法、温度変調法により取得し、その関係性を定式化した。



(a) 熱伝導率

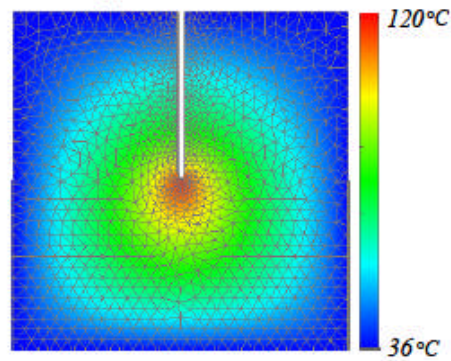


(b) 比熱

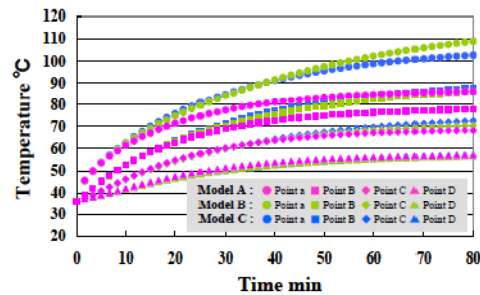
図1 肝臓の熱物性値の温度依存性

(2) 温度分布シミュレータの開発

取得した熱物性値に基づき、有限要素法により肝臓 RFA 用 2 次元温度分布シミュレータを開発した。シミュレーションでは、肝臓内部に形成される発熱量分布を算出後、温度分布を算出した。



(a) 温度分布



(b) 時系列データ

図2 シミュレーション結果

(3) In vitro における温度分布シミュレータ精度評価実験

開発したシミュレータの精度評価を行うため、摘出したブタ肝臓に対する RFA 焼灼実験を実施した。シミュレーションでは、正方形のブタ肝臓モデルを構築し、モデル上辺より中央まで穿刺した RFA 針先端 20[mm] から 50[V] を印加した際の温度分布を算出した。

この際、境界条件として、モデル周囲の温度を一定温度とする温度境界条件を設定した。一方、肝臓モデルと同様の寸法を有する実際の摘出ブタ肝臓を用意し、一定温度に保持した水を肝臓の周囲に還流させることで温度境界条件を再現した。焼灼中、RFA 針直下の組織の温度を熱電対により実測した。シミュレーション結果と In vitro 実験結果を比較すると、実測値と解析値の温度上昇傾向は類似しており RFA 中のシミュレーションによる温度の予測が可能であることが示唆された。

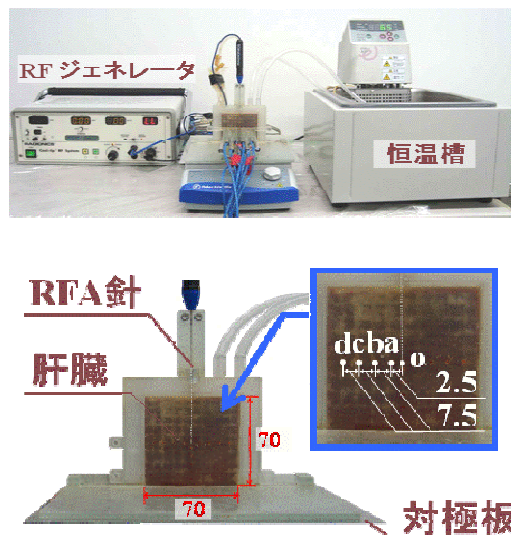
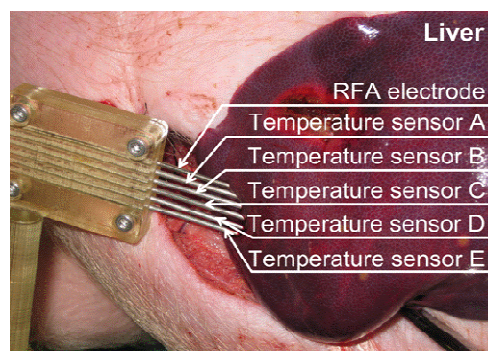


図3 精度検証実験

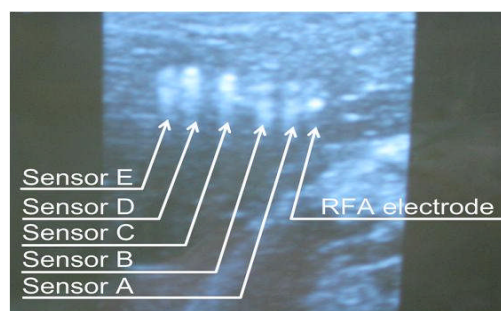
(4) in vivo 環境下における検討

in vivo 環境化において問題となる、血流の存在が血流に与える影響に関して調査を実施した。肝臓内の細径血管内の血流の存在が RFA 施行中の熱伝導現象に及ぼす影響について検討するため、in vivo にて生存ブタを用いた実験を行った。実験では(1)門脈、胆管、肝動脈を糸で縛り毛細血管内の血流を無くした場合、(2)門脈、胆管、肝動脈を開放し毛細血管内に血流を流した場合の 2 通りについて、それぞれ(a)肝臓実質と血流を纏めたみかけの熱伝導率の測定、および(b)RFA 施行中の RFA 針周辺組織の温度測定を行った。熱伝導率測定実験の結果、有血流下の熱伝導率は無血流下の約 1.2 倍となった。これは、有血流下では血流の存在により熱が周囲に散逸しやすくなり、組織全体としての熱伝導率が上昇したためと考えられる。また、温度測定実験の結果、有血流下より無血流下の温度が高く、焼灼 5 分後には、RFA 針最近点 A で有血流下と無血流下で 20℃の温度差が認められた。以上の結果より、有血流下では熱が血流に乗って流れやすくなるため、実質と血液を纏めた組織全体としてのみかけの熱伝導率は高くなるが、加温部の熱

が周囲に散逸しやすくなるため温度上昇が抑制されることが分かった。



(a) 実験外観



(b) 超音波画像

図4 in vivo実験

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Hiroki Watanabe, Nozomu Yamazaki, Yo Kobayashi, Tomoyuki Miyashita, Makoto Hashizume, Masakatsu G. Fujie, "Temperature Dependence of Thermal Conductivity of Liver Based on Various Experiments and a Numerical Simulation for RF Ablation", in Proceeding of the 32nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 3222-3228, 2010, 2010年9月1日, Buenos Aires, Argentina (査読あり)
- ② Yo Kobayashi, Yu Tomono, Yuta Sekiguchi, Hiroki Watanabe, Kazutaka Toyoda, Kozo Konishi, Morimasa Tomikawa, Satoshi Ieiri, Kazuo Tanoue, Makoto Hashizume, Masakatsu G. Fujie, "Design of a Surgical Robot with Dynamic Vision Field Control for Single Port Endoscopic Surgery", in Proceeding of the 32nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology

Society, pp.979-983, 2010, 2010年9月1日, Buenos Aires, Argentina (査読あり)

③ Takeharu Hoshi, Yo Kobayashi and Masakatsu G. Fujie, “Method to Generate Distribution Maps of the Material Parameters of the Human Body Using Robotic and Dynamic Simulation Systems”, in Proceedings of 2009, November 29 Tokyo, Japan IEEE/SICE International symposium on system integration, pp.60-66, 2009, November 29 Tokyo, Japan (査読あり)

④ Hiroki Watanabe, Yo Kobayashi, Takeharu Hoshi, Kazuya Kawamura, Masakatsu G. Fujie and Makoto Hashizume, “Integrated System for RFA Therapy with Biomechanical Simulation and Needle Insertion Robot”, in Proceedings of 2009 IEEE/SICE International symposium on system integration, pp.54-59, 2009, November 29 Tokyo, Japan (査読あり)

⑤ Yo Kobayashi, Atsushi Kato, Takeharu Hoshi, Kazuya Kawamura and Masakatsu G. Fujie, “Parameter Setting Method considering Variation of Organ Stiffness for the Control Method to Prevent Overload at Fragile Tissue”, in Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2155-2161, 2009, October 11 St. Louis, USA (査読あり)

⑥ Yo Kobayashi, Makiko Suzuki, Atsushi Kato, Kozo Konishi, Makoto Hashizume and Masakatsu G. Fujie, “A Robotic Palpation-Based Needle Insertion Method for Diagnostic Biopsy and Treatment of Breast Cancer”, in Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5534-5539, 2009, October 11 St. Louis, USA (査読あり)

⑦ Hiroki Watanabe, Yo Kobayashi, Makoto Hashizume, and Masakatsu G. Fujie, “Modeling the Temperature Dependence of Thermophysical Properties: Study on the Effect of Temperature Dependence for RFA” in Proceeding of the 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.5100-5105, 2009, September 2, Minneapolis, Minnesota, USA (査読あり)

あり)

⑧ Yo Kobayashi, Takahiro Sato and Masakatsu G. Fujie, “Modeling of Friction Force based on Relative Velocity between Liver Tissue and Needle for Needle Insertion Simulation”, in Proceeding of the 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.5274-5278, 2009, September 2, Minneapolis, Minnesota, USA (査読あり)

⑨ Yo Kobayashi, Akinori Onishi, Hiroki Watanabe, Takeharu Hoshi, Kazuya Kawamura and Masakatsu G. Fujie, “Developing a Planning Method for Straight Needle Insertion using Probability-Based Condition where a Puncture Occurs”, in Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3482-3489, 2009, May 12, Kobe, Japan (査読あり)

[学会発表] (計4件)

① 山崎 望, 渡辺 広樹, 関 雅俊, 小林 洋, 宮下 朋之, 藤江 正克, “肺の熱伝導率の内部圧力依存性の測定”, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 WWLS (Welfare, Wellbeing, Life Support), pp. 459-460, 2010, 2010年12月06日, Aichi, Japan,

② 山崎 望, 渡辺 広樹, 関 雅俊, 小林 洋, 宮下 朋之, 藤江 正克, “肺臓のラジオ波施工中における電極針近傍の温度測定”, 第19回日本コンピュータ外科学会大会, pp. 302-303, 2010, 2010年09月18日, 大阪, 日本

③ 渡辺 広樹, 山崎 望, 小林 洋, 大平 猛, 橋爪 誠, 藤江 正克, “血流の存在を考慮した肝臓RFA用温度分布シミュレータの開発”, 第19回日本コンピュータ外科学会大会, pp. 296-297, 2010, 2010年11月2日, 福岡, 日本

④ 渡辺 広樹, 山崎 望, 小林 洋, 大平 猛,

橋爪 誠, 藤江 正克, “肝臓 RFA 用温度分布推定シミュレータの開発～血流が温度分布に及ぼす影響についての基礎的検討～”, 第 11 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 (11th SICE System Integration Division Annual Conference), pp. 1158-1160, 2010, 2010 年 12 月 23, 仙台, 日本

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 洋 (YO KOBAYASHI)

早稲田大学・理工学術院・講師

研究者番号 : 5 0 4 2 4 8 1 7