

治療期間中の腫瘍及び周辺臓器の変形に対応した 照射システム構築のための基礎研究

理工学部; 蓑原伸一、森慎一郎、熊谷始紀、兼松伸幸、松藤成弘、古川卓司、
土橋卓、稲庭拓、大野由美子
病院部; 馬場雅行、加藤真吾、加藤博敏、今田浩史、辻比呂志、山田滋
東工大; 平澤宏祐、久保田佳樹、三宅美博、長橋宏

【研究の概要】 本研究がめざす「腫瘍及び周辺臓器の変形に対応した照射システム」とは、事前の治療計画機器パラメータを忠実に再現するのではなく、照射室での患者標的状态に応じて、患者位置決め作業の中で照射野形成機器のパラメータを最適にチューニングし、照射を実施しようというものである(オンデマンド治療照射)。そのための基礎的な研究として、臓器の変位や変形のモデル化・定量化を試みている。過去 10 年ほどの間に放射線治療の分野では Image Guided Radio-Therapy(IGRT)をキーワードに世界的に多くのプロジェクト研究が進められてきた。それらは、① Inter-fraction organ motion や Intra-fraction organ motion に代表される臓器の運動・位置再現性といった解剖学的な位置関係を扱った研究、② PET 等を利用した分子イメージングに基づく腫瘍の放射線感受性等に応じた線量分布の研究(Biological Imaging)、の2つに分類される。本研究は①に着目し、これらを実際の治療に取り込んだより高精度な炭素線治療を目指そうとするものである。①については4次元CT装置や多列CT装置に代表されるように、現在、広範囲で臓器の運動や変形の画像情報が短時間で取得できるようになりつつあり、多くの論文が報告されている。しかしながら現状では、少数の金属マーカの変動解析やその統計的な検討、及びレトロスペクティブな臨床解析にとどまっている。オンデマンド治療照射を実現するには、治療計画の段階で変位を定量的に評価・予測するとともに、その後の分割照射の段階で変位の再現性等をモニタリングし、オンタイムで評価できなければならない。臓器の運動・変形に対して、CT では高精度のボリュームデータを取得できるが、観測時間は 1 呼吸(4~8 秒)程度に限られる。一方、超音波画像は対象範囲が限られるものの放射線被ばくがないので長時間の観察が可能である。

このような観点から本研究では 19 年度までに、①「治療照射による子宮頸がんの形状変化のモデル化」、②「呼吸による肺野内の運動ベクトルマップ推定」、③「呼吸性運動による標的の線量分布変動のシミュレーション」、④「超音波画像による肝臓の呼吸性運動の安定性評価に関する検討」を行ってきた。20 年度はこれらに対する事後評価コメント等を参考に、②を展開した表示法の検討、及び④に関連して超音波画像と複数の関連データを同時収集する装置の開発をおこなった。

【4DCT に基づく肺の呼吸性運動の表示法の検討】

これまでに、4DCT 画像から肺内部の特徴点を抽出し(気管支に沿った血管の分岐点を用いる手法、及び画像輝度を用いて解剖学的情報を必要としない方法)、それらを追跡することで、肺の動態を定量化する研究をおこなってきた。これらの手法では、肺野内で数百点の特徴点を追跡できたが、個々の特徴点の軌跡を調べるとバラつきが多く、かつ臨床的にはそれらをどう表現するかが問題であった。そこで肺野を複数の領域に分割し、その領域内にある特徴点の変位ベクトルの平均量をその領域の変位として表示することを試みた。まず CT 画像から解剖学的に右肺を上葉・中葉・

下葉、左肺を上葉・下葉に分割し、さらに各葉を幾何学的に中心部・胸側・体側側・背側・縦隔側の5領域に、合計 25 領域にセミオートマチックに分割した。それらの各領域で、特徴点の3D ベクトル量を平均化し、求めた。その解析表示例を下記に示す。現在、4 つの臨床例について、解析表示の妥当性と特徴点追跡の精度の両面から検討を進めている。

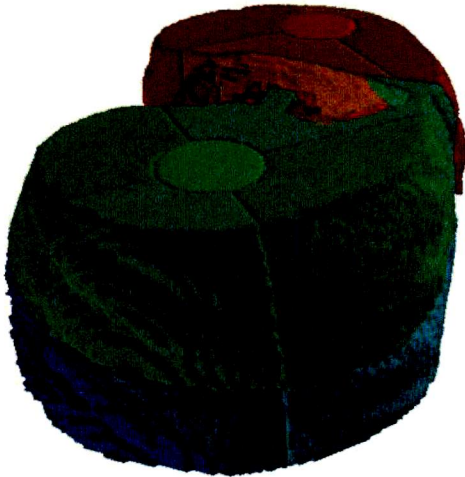
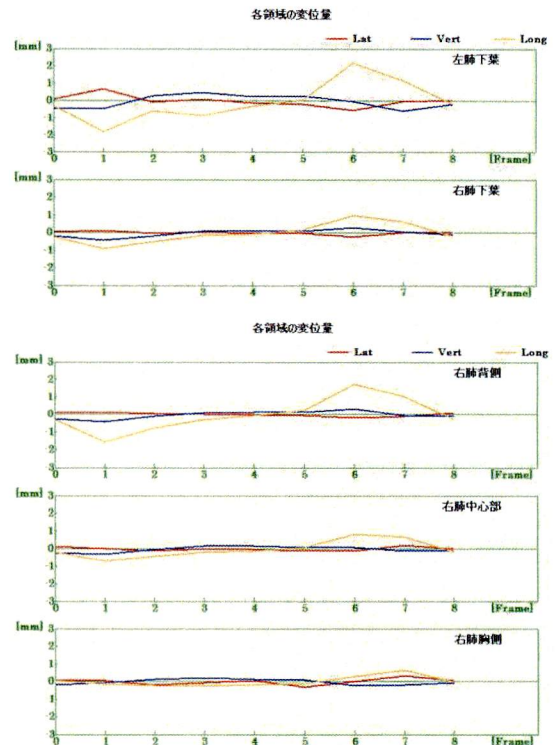


図1 (a) 肺野の分割の臨床例



分割領域における呼吸 1 周期の運動; 体軸上下、前後、左右の変位成分に分けて表示。

横軸が時間、縦軸が変位量[mm]

(b; 上段) 左肺下葉と右肺下葉

(c; 下段) 右肺の背側、中心部、胸側

【超音波画像による臓器運動の長時間モニタリングのための同時計測装置の開発】

放射線被ばくが無く、マーカレスで無侵襲な方法による直接的な臓器運動モニタリング法として超音波画像を用いた方法の開発を進めている。これまでに4次元超音波画像で観測される腹部(主に肝臓)の呼吸性運動と、体表面の呼吸センサー出力の相関等について、長時間(5分程度≒炭素線での治療照射時間を想定)での変化について研究をおこなってきた⁽¹⁾。しかしその際に観測されるドリフト的な変動が、呼吸自体の変動か、被験者の体位変化か、或いは超音波探触子の体表でのズレなのかの区別がつかないという問題があった。そこで今年度、これらを同時に計測する装置の開発をおこなった。その構成図を下記に示す。

超音波画像診断装置(Philips, iU22)でボリュームデータの取得は可能であるが製品の仕様上、実時間で外部出力できないので、ここでは直交2断面の画像をビデオ信号として取得する。また探触子につけた赤外マーカからその3次元位置を三角測量の原理で取得し、かつ探触子を固定するハンドフリーアームの先端部に組み込んだ圧力センサ

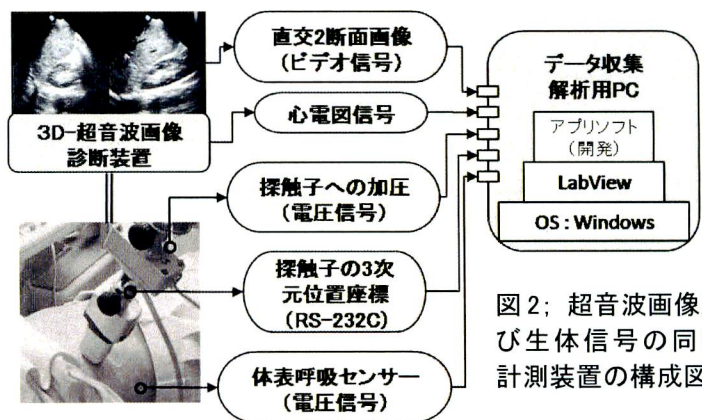


図2; 超音波画像及び生体信号の同時計測装置の構成図

一を通して体表面を押す力を計測する。また HIMAC での呼吸同期用に用いている体表面の変位センサー(PSD)の信号も取得する。さらに超音波画像診断装置が有する心電図計を通して心電図情報も記録する。これらは AVI 形式のファイルとしてリアルタイムで保存されるが、計測値(テキストデータ)は動画データの各フレームに連動して、フレーム(33 ミリ秒)単位で AVI ファイルに記録できる。なおこれらの記録データをフルに利用した被験者超音波画像データの解析は今後であるが、事前評価としておこなった超音波画像からの呼吸性運動解析の例を下記に示す。ここでは超音波画像上の血管位置を特徴点として追跡し、その際の変位の水平成分と呼吸センサーの相関を示してある。このような解析手法をもとに、呼吸波形のドリフトと実際の臓器運動の関係を被験者単位で評価していく予定である。

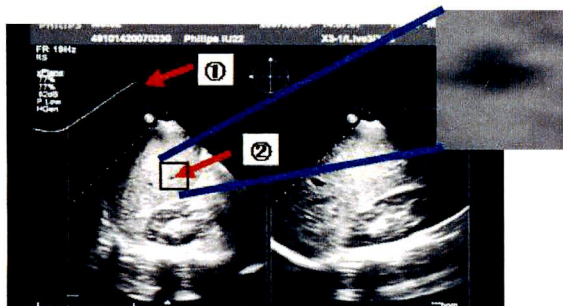


図 3; 3次元超音波探触子で計測した肝臓付近のボリュームデータの直交2断面の画像の例。②が解析に用いた特徴点で、これをパターンマッチング方で自動追跡して時間変位を計測した。

【その他】

- (1) 平澤、蓑原、他;DTW(Dynamic Time Warping)を用いた呼吸波形と超音波画像計測の対応付け、生体医工学 46(5)505-513(2008)
- (2) 蓑原、他;2008 年度双葉電子記念財団助成金「4次元超音波画像を用いた腹部臓器運動のリアルタイム追跡による放射線治療の高精度化」

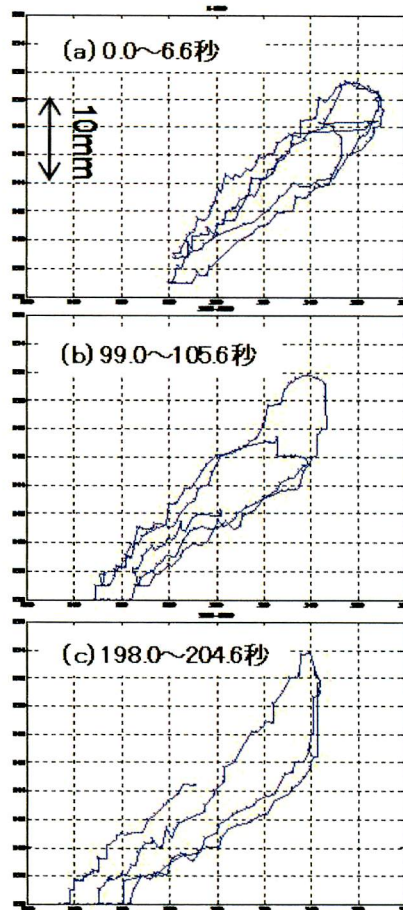


図 4; 超音波画像計測による臓器の変位量(縦軸)と体表面呼吸センサーの出力(横軸)の相関の時間的な変化。99 秒毎に、6.6 秒の呼吸を抽出した時の相関。