

論 文 概 要

○論文題目

機械学習を利用した

サイバーナイフ動体追尾照射の追尾誤差予測システムの開発

○指導教員

人間総合科学研究科 生命システム医学専攻 榮 武二 教授

(所属) 筑波大学大学院 人間総合科学研究科 生命システム医学専攻

(氏名) 大川 浩平

目的

サイバーナイフは小型の直線加速器をロボットアームに搭載した放射線治療装置であり、その特徴を活かして、呼吸性移動を伴う標的に対しては動体追尾照射を行う。動体追尾照射の照射位置精度は患者呼吸に依存するため、患者個々に追尾誤差を評価し、その誤差は治療計画時にマージンとして設定する必要がある。追尾誤差の評価法は幾つか報告があるが、これらの方法は煩雑で時間がかかる事が問題であった。そこで、追尾誤差評価をより簡単に短時間で評価するために、機械学習に着目した。本研究の目的は機械学習を利用したサイバーナイフの動体追尾照射における追尾誤差評価システムを開発する事である。

方法

機械学習アルゴリズムはサポートベクター回帰 (Support Vector Regression; SVR) を使用した。SVR は不感帯(ε)を設定し、その外側にある説明変数と目的変数の関係を示したインスタンスとの距離(ξ)を最適化することでモデルを構築する。つまり、モデルの形状は不感帯の外側にあるインスタンスのみに影響を受けるため、SVR はデータセットが限られた場合でも汎化能力の高いアルゴリズムとして知られている。本研究に用いたデータセットの数は 200 に満たないため、SVR は最適なアルゴリズムである。

学習モデル構築のためのデータセットは横浜サイバーナイフセンターにおいて動体追尾照射による放射線治療を行うにあたって追尾誤差の評価が行われた 169 の呼吸波形データから得た。説明変数は呼吸振幅の標準偏差、頭尾方向、前後方向それぞれの標的の平均速度、標的と体表の位相差の 4 項目とし、目的変数は追尾誤差とした。

SVR にはモデル構築にあたって重要なパラメータとして ε 、 C 、 γ がある。 ε は不感帯の幅を決めるパラメータであり、 C は ξ を最適化するための罰則パラメータである。さらに、 γ はカーネルに関する係数である。カーネルの種類に関しては放射基底関数 (radial basis function; RBF) カーネルが一般的に用いられている事から RBF カーネルを使用した。これらのパラメータはグリッドサーチにより求めた。

得られた学習パラメータを使用して学習モデルを構築し、性能評価を行なった。性能評価はデータセットを学習データセットとテストデータセットに 9:1 の割合でランダムに分け、交差検証により行なった。本システムが予測した追尾誤差と実際の追尾誤差の差 (予測誤差 Δ) を評価した。また、予測した追尾誤差と実際の追尾誤差の関係について、相関係数と決定係数の評価も行なった。さらに、臨床使用を考慮して“本システムにより予測された追尾誤差が実

際の追尾誤差を下回らない精度”を得るために、仮想データセットを用いたデータセットの拡張や、安全側に目的変数を修正したデータセットの利用など、データセットの調整を行なった。

結果

学習パラメータは $\varepsilon:1$, $C:1000$, $\gamma:0.001$ であった。

データセット調整前に性能評価を行なった結果、予測誤差 Δ の平均値、最大値、最小値はそれぞれ -0.1mm , 1.7mm , -2.4mm であり、相関係数と決定係数は 0.773 と 0.597 であった。予測誤差 Δ の平均は、ほぼ 0 であり、 -2mm から 2mm の範囲で追尾誤差を予測できており、大きな予測誤差 Δ は認められなかった。しかし、臨床使用を想定した場合、本システムで予測した追尾誤差は治療計画時にマージンとして付与される事になる。そのため、マージンを過小評価してしまうと治療成績に影響を与える可能性が考えられる。従って、本システムによって予測された追尾誤差が実際の追尾誤差を下回る事は避けたいと考えた。そこで、データセットの調整を行なった。

データセット調整後の性能評価の結果は、予測誤差 Δ の平均値、最大値、最小値はそれぞれ 0.7mm , 2.2mm , -0.4mm であった。また、相関係数と決定係数は 0.823 と 0.677 であった。データセット調整前の結果と比較しマイナスの予測誤差 Δ は見られなかった。また、相関係数と決定係数も改善された結果が得られた。

データセットの調整を行うことで、 $0\sim 2\text{mm}$ の誤差範囲で追尾誤差を評価でき、“本システムにより予測された追尾誤差が実際の追尾誤差を下回らない精度”を持ったシステムを構築する事ができた。

考察

本研究ではサイバーナイフの追尾誤差評価に機械学習を利用するという新しい試みを提案し、さらには幾つかの工夫を加える事により、 $0\sim 2\text{mm}$ の誤差範囲で追尾誤差を評価できる精度のシステムを構築する事ができた。データセットの拡張は機械学習の分野でも一般的に行われている事であるが、目的変数を修正したデータセットの使用は、機械学習の分野において、一般的な手法ではなく、新しい試みであった。しかしながら、本システムのように許容できる誤差の方向が決まっている場合には有用な工夫であると考えている。また、この方法は他の回帰問題にも応用できると考える。

従来の追尾誤差評価法では時間がかかり、専用の機器やソフトウェアが必要であったが、本システムを使用することで数分のうちに追尾誤差の評価が可能となり、必要な機器も一般的な処理速度を有するコンピュータのみである。こ

の様に本システムを使用する事により、装置、時間、人員、いずれも削減が可能であり、これが本システムを利用する最大の利点であると考えます。

本システムはデータが少なかった追尾誤差 5mm と 6mm のデータセットについて追加生成を行なっている。そのため、追尾誤差が 5mm と 6mm については予測の不確かさが残る可能性が考えられる。さらに、当施設での経験上、5mm や 6mm の追尾誤差が得られた場合には頭尾方向とそれ以外の方向で、追尾誤差が異なる傾向が見られるが、本システムでは方向別の追尾誤差の評価はできない。これらの事から、5mm や 6mm の追尾誤差が得られた場合には、従来の方法での評価が望ましいと考える。方向別の追尾誤差の予測については深層学習の利用により行える様になることを期待しているが、今後の課題である。

結論

SVR を利用したサイバーナイフの動体追尾照射における追尾誤差を予測するシステムを開発した。本システムの予測誤差 Δ は 0~2mm であり、“本システムにより予測された追尾誤差が実際の追尾誤差を下回らない精度”で予測可能である。さらに、本システムの利用により、追尾誤差評価において従来の煩雑な過程は省かれ、より短時間で簡単に評価が可能である。