

論文審査の結果の要旨

氏名 長縄 美香

本論文は、8章から構成される。

第1章では、陽電子断層像(Positron Emission Tomography, PET)によって得られたPET画像列の動態解析における動脈採血の役割とその臨床上の問題点について述べている。動脈採血省略に関する既存手法を簡潔に説明し分類している。

第2章では、まずPETの測定原理と薬剤の種類について述べている。次に、コンパートメントモデルと動態解析の方法、特に脳グルコース代謝率と血液体積の推定方法について述べている。さらに、持続的動脈採血の手続き、及び、動脈採血の省略に関して既に提案されている方法の詳細を説明し、その問題点を指摘している。

第3章では、独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)とアンサンブル学習(Ensemble Learning, EL)のアルゴリズムを説明している。

第4章では、ICAに基づく血液成分の推定法(Extraction of the pTAC using ICA, EPICA)について詳述している。撮影で取得した画像列は、動脈血漿中の放射能濃度(plasma time-activity curve, pTAC)と組織中の放射能濃度との和から成ると考えられる。血液の占める割合を表す画像を血液体積画像、組織の占める割合を表す画像を組織画像と呼ぶ。EPICAは、血液体積画像と組織画像の確率分布の独立性を利用して推定を行う。ICAをそのまま適用してもpTACは正しく推定されないため、データの前処理とICAのコスト関数を工夫する。EPICAではデータの前処理として、分布を対称にする負画像の追加と、画像間の分布の差を強調する時間積分値による規格化を行う。EPICAのコスト関数は分布の裾を評価する項とボクセル値が零付近に集まるのを防ぐ罰則項から構成される。EPICAの評価のため、ノイズを重畳したシミュレーションデータと臨床データを用いた実験では、pTACは正しく抽出された。血液体積画像は負の値を含んだが、その空間分布は実測の画像に良く類似していた。また、臨床データに関心領域を張り、関心領域内で加算平均した時系列データについての動態解析では、実測pTACと推定pTACを用いて計算した局所脳グルコース代謝率は高い相関を示した。

第5章では、ELに基づく血液成分の推定法(Extraction of the PTAC using EL, EPEL)について詳述している。EPICAで推定した血液体積画像には負の値が含まれていた。この問題を解決するため、非負条件のもとで画像間の独立性を最大化するELを用いる。ELはまず、推定したい成分の性質を事前分布で仮定し、事後分布の近似分布を解析的に導く。

次に真の事後分布と近似事後分布の Kullback-Leibler ダイバージェンスを最小化することによって推定を行う。EPEL では、pTAC に切れた正規分布、血液体積画像に片側指数分布を事前分布として仮定する。これらの事前分布は pTAC と血液体積画像の非負性を保証する。第 4 章と同じデータを用いた実験の結果、pTAC と血液体積画像が正しく推定され、血液体積画像には負の値が含まれなかった。また、臨床データに設定した関心領域についての動態解析では、実測 pTAC と推定 pTAC で計算した局所脳グルコース代謝率は、EPICA と同様に高い相関を示した。

第 6 章では、既提案の因子分析法である FADS 及び NMF と提案手法の比較を行っている。FADS の推定した pTAC の波形は実測値と大きく異なり、NMF の推定した pTAC の尾部は実測値と大きく離れていた。EPICA と EPEL は実測値により類似した pTAC を推定した。

第 7 章では、EPICA と EPEL の推定 pTAC を用いて、動態パラメータのパラメトリック画像を生成し、実測 pTAC で生成した画像と比較を行っている。臨床的観点からは、推定 pTAC の形状が実測と似ているだけでなく、推定 pTAC を用いて動態パラメータを正しく計算することが重要である。実際の計算例を示すために、臨床データに対して動態解析を行ったところ、EPICA による推定 pTAC から生成した局所脳グルコース代謝率のパラメトリック画像は EPEL の場合と比較して、実測 pTAC から生成した画像とより一致した。

第 8 章では、提案手法を総括している。第 7 章までの結果より、EPICA と EPEL は pTAC 推定の実用的な方法であると言える。

以上のように、本論文は、PET 画像列を統計的信号処理手法によって解析し、医学的に重要な動態解析に必要な動脈血漿中の放射能濃度変化を抽出したものであり、複雑理工学上貢献するところが大きい。なお、本論文の第 4, 5, 7 章は、眞溪歩、木村裕一、石井賢二、織田圭一、石渡喜一との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析及び検討を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。