

学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	Study on umbilical artery blood signal analysis and classification (臍帯動脈血流信号解析と分類に関する研究)
氏名(Name)	Yu Kaijun(ユ カイクン)

中国では、2000万人の新生児のうち約80万人に先天性疾患があり、そのうち20万人近くの胎児に深刻な欠陥や病気がある。こうした病気の胎児の誕生は、家族、さらには社会に深刻な経済的負担と社会問題をもたらす。したがって、胎児の異常や病気をできるだけ早期に発見するために、早期に胎児モニタリングを実施することが特に重要である。臍帯動脈血信号には胎児の成長と発育に関する重要な情報が含まれており、子宮内発育遅延（IUGR）、低酸素症、母体の高血圧など妊娠中の様々な問題を臍帯動脈血信号によって判断することができる。したがって、臍帯血信号の分析は、出生前のモニタリングと胎児の健康状態の診断にとって重要である。

超音波を用いた音響スペクトルパラメータ法は、臍帯動脈の血液信号を分析するための従来手法であり、臨床診断基準となる3つのパラメータ、すなわち抵抗指数（RI）、脈動指数（PI）、および収縮期/拡張期臍帯血流速の最大値（S/D）から構成される。しかし、これらのパラメータは、位相遅延、位相周波数、位相モードといった信号の位相特性を無視し、最大値、最小値、平均値といった血流速度の基本的な統計パラメータのみに焦点を当てている。臨床的な誤診につながる可能性がある。

臍帯動脈の血液信号には、信号の振幅揺らぎに加えて、信号の複雑な構造と非線形特性も含まれている。本研究では、これらの信号の複雑な構造と非線形特性に着目し、フラクタル理論とカオス理論を用いて臍帯動脈血信号を包括的に分析することにより診断精度の向上を目指す。

本研究の目的は、診断の精度を向上させるために、胎児臍帯動脈血の測定信号に対して特徴抽出および分類を包括的に行う新しい方法を提案することである。まず、臍帯動脈の血液信号のフラクタル特徴とフラクタル次元を調べる。次に、定性的および定量的に臍帯動脈血液時系列のカオスの特徴の識別を行う。最後に、人工知能アルゴリズムに基づく臍帯動脈血液信号分類および診断モデルが提案されています。

本研究の目的は、胎児臍帯血の計測信号に対して特徴抽出と分類を行い、診断精度を向上させることである。まず、臍帯血信号のフラクタル特徴とフラクタル次元を調査し、次に臍帯血液時系列のカオス特徴同定を定性的・定量的観点から行い、最後に人工知能アルゴリズムに基づく臍帯血液信号分類・診断モデルを提案する。

この博士論文は6章からなる。

第1章では、臍帯血研究の背景と方法を紹介するとともに、現在の研究状況と本論文の概要について述べる。

第2章では、胎児血行動態の基礎知識を説明し、臍帯動脈の血液信号パラメータの臨床的意義と正常基準値、臍帯動脈信号収集装置、データ分類と収集プロセスの詳細を概説する。

第3章では、フラクタル理論に基づき、フラクタル次元ボックスカウント法と相関次元(CD)を使用して臍帯動脈血液信号の非線形特性を研究する。まず、臍帯血信号のボックス次元を計算し、その信号のフラクタル特性を解析する。結果として、臍帯動脈の血流信号のフラクタル次元と妊娠週数との間に正の相関があることが示された。次に、異常な臍帯動脈信号と正常な臍帯動脈信号を異常群と対照群に分類した。Grassberg-procaccia アルゴリズム(GP アルゴリズム)を用いて、2つのグループのCDを計算分析する。正常臍帯血流信号のCDは異常信号のCDよりも全体的に大きい。CDは、臍帯血流信号の正常性を区別する上で、従来を検出パラメータよりも有意に優れている。臍帯血流信号のハースト指数をLo法により計算し解析する。その結果、臍帯血信号は非定常信号に属し、明らかな「1/fゆらぎ」特性を示すことがわかった。

第4章では、カオス位相空間図法と最大リアプノフ指数(MLE)を用いて、臍帯血信号のカオス特性を定性的・定量的に決定する。臍帯動脈血流信号のアトラクター再構成を3次元(3D)および2次元(2D)位相空間で行う。その結果、異常な臍帯動脈信号の時系列のカオス位相図は、「毛糸玉」のようなごちゃごちゃした状態を示し、カオスの「形」は収束するように見えることがわかった。臍帯血信号の正常群のMLEと臍帯血信号の異常群のMLEを計算し、正常と異常な臍帯血信号を定量的に判別することができる。MLEのROC曲線から、臍帯血流信号の正常性を識別する率が、従来を検出パラメータよりも有意に優れていることが示された。

第5章では、臍帯血信号の4つの状態(正常、羊水過少、首周りの臍帯、胎児位置異常)を分類する方法を提案する。従来を検出パラメータであるS/D、PI、RIに対してサポートベクターマシン(SVM)による分類器を構築する。第3章と第4章で導出したボックス次元、相関次元、MLEを特徴パラメータに対して、非線形特性-粒子群最適化-サポートベクターマシン分類器を構築する。分類試験の結果、非線形パラメータを用いたPSO-SVM分類器の方が精度高いことから、提案した分類法の有用性と有効性が確認された。

第6章では、本論文のまとめと今後の課題について述べる。

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目

(Dissertation Title)

Study on umbilical artery blood signal analysis and classification

氏 名(Name)

Yu Kaijun

In China, there are about 800,000 congenital diseases among 20 million newborns, among which nearly 200,000 fetuses have serious defects and diseases. The birth of these sick fetuses brings serious economic burden and social problems to the family and even the society. Therefore, it is particularly important to carry out early fetal monitoring to detect fetal defects and diseases as early as possible. Umbilical artery blood signals contain important information about fetal growth and development, reflecting various problems during pregnancy, such as Intrauterine Growth Retardation(IUGR), hypoxia and maternal hypertension, which can be judged by umbilical artery blood signals. Therefore, the analysis of umbilical artery blood signals is important for prenatal monitoring and fetal health status diagnosis.

The acoustic spectral parameter method is a conventional technique for analyzing the umbilical artery blood signals. It comprises three parameters that are clinical diagnostic criteria: the resistance index (RI), the pulsatility index (PI), and the maximum systolic/end-diastolic umbilical flow velocity (S/D). However, these parameters neglect the phase properties of the signal, such as phase delay, phase frequency, and phase mode, and only concentrate on the fundamental statistical parameters of blood flow velocity, such as maximum, minimum, and mean values. This leads to clinical misdiagnosis.

The umbilical artery blood signals, in addition to its amplitude fluctuation, also includes the signal's complex structure and nonlinear properties. In this study, the signal's complex structure and nonlinear properties are focused on and comprehensively analyzed by using fractal theory and chaos theory for improving diagnostic accuracy.

The aim of this study is to propose a new method to perform feature extraction and classification on measured signals of fetal umbilical artery blood for improving the accuracy of diagnosis. Firstly, the fractal features and fractal dimensions of umbilical artery blood signals are investigated; next, chaotic feature identification of umbilical artery blood time series is carried out from both qualitative and quantitative perspectives; and lastly, an umbilical artery blood signal classification and diagnostic model based on artificial intelligence algorithms is proposed.

This doctoral dissertation consists of 6 chapters.

Chapter 1 introduces the background and means of umbilical artery blood study as well as reviewing the current research situation. The outline of this thesis is also given.

In chapter 2, the fundamentals of fetal hemodynamics are described. The clinical significance and normal reference values for umbilical artery blood signal parameters are outlined. Details of the umbilical artery signal acquisition equipment, data classification, acquisition process are explained.

In chapter 3, according to the fractal theory, the nonlinear characteristics of the umbilical artery blood signals are studied using the fractal dimension box-counting method and correlation dimension(CD). Firstly, the box dimension of

the umbilical artery blood signals is calculated, and the fractal characteristics of those signals are analyzed. The results indicate that there is a positive correlation between the fractal dimension of umbilical artery blood signals and gestational weeks. Secondly, abnormal umbilical artery signals and normal umbilical artery signals are composed into the abnormal group and the normal group. Grassberg-procaccia algorithm (GP algorithm) is used to calculate and analyze the CD of the two groups. The overall CD of normal umbilical artery blood flow signals is greater than that of abnormal signals. CD is significantly superior to traditional detection parameters in distinguishing the normality of umbilical artery blood signals. The Hurst exponent of umbilical artery blood signals is calculated and analyzed by Lo method. The results show that umbilical artery blood signal belonged to non-stationary signal and show obvious “1/f fluctuation” characteristic.

In chapter 4, Chaotic phase space diagram method and Maximum Lyapunov Exponents (MLE) are used to determine the chaotic characteristics of umbilical artery blood signals from qualitative and quantitative perspectives. The attractor reconstruction of umbilical artery blood signals has been performed in Three-Dimension (3D) and Two-Dimension (2D) phase space. The results indicate that the chaotic phase diagram of the time series of abnormal umbilical artery signals show a jumbled “ball of wool” state, and the chaotic “shape” appears to converge. MLE of normal group for umbilical artery blood signals and MLE of abnormal group for umbilical artery blood signals are calculated, which can quantitatively distinguish between normal and abnormal umbilical artery blood signals. Receiver Operating Characteristic Curve (ROC) of MLE shows that MLE is significantly superior to traditional detection parameters in distinguishing the normality of umbilical artery blood flow signals.

In chapter 5, an artificial intelligent classifying method is proposed to categorize the four states of umbilical artery blood signals, which are: normal, Oligohydramnios, umbilical cord around neck and fetal malposition. The Support Vector Machine (SVM) classifying method is constructed based on the conventional parameters, S/D, PI and RI. The particle swarm optimization (PSO)-SVM classification of umbilical artery blood with conventional parameters was constructed. The box dimension, correlation dimension and MLE derived from Chapter 3 and Chapter 4 are used as feature parameters to construct nonlinear characteristic PSO-SVM classifying method. The results of the classification tests show that the PSO-SVM with nonlinear parameters classifying method has higher accuracy, which is confirmed that the proposed classifying method is useful and effective.

In Chapter 6, summary of this thesis and future work are described.

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	Yu Kaijun
審査委員	主 査：江 鐘偉
	副 査：陳 獻
	副 査：大木 順司
	副 査：小柴満美子
	副 査：森田 実
論文題目	Study on umbilical artery blood signal analysis and classification (臍帯動脈血流信号解析と分類に関する研究)

【論文審査の結果及び最終試験の結果】

中国では、2000万人の新生児のうち約80万人に先天性疾患があり、そのうち20万人近くの胎児に深刻な欠陥や病気がある。これらの病気の胎児の誕生は、家族、さらには社会に深刻な経済的負担と社会問題をもたらす。したがって、胎児の欠陥や病気をできるだけ早期に発見するために、早期胎児モニタリングを実施することが重要である。臍帯動脈血信号には胎児の成長と発育に関する重要な情報が含まれており、子宮内発育遅延 (IUGR)、低酸素症、母体の高血圧など妊娠中の様々な問題を、臍帯動脈血信号によって判断することができる。したがって、臍帯血信号の分析は、出生前のモニタリングと胎児の健康状態の診断にとって重要である。

超音波を用いた音響スペクトルパラメータ法は、臍帯動脈の血液信号を分析するための従来の手法であり、臨床診断基準となる3つのパラメータ、抵抗指数 (RI)、脈動指数 (PI)、および収縮期/拡張期臍帯血流速の最大値 (S/D) から構成される。しかし、これらのパラメータは、位相遅延、位相周波数、位相モードといった信号の位相特性を無視し、最大値、最小値、平均値といった血流速度の基本的な統計パラメータのみに焦点を当てている。これは臨床的な誤診をもたらすことがある。

臍帯動脈の血液信号には、信号の振幅揺らぎに加えて、信号の複雑な構造と非線形特性も含まれている。本研究では、これらの信号の複雑な構造と非線形特性に着目し、フラクタル理論とカオス理論を用いて、胎児臍帯動脈血の測定信号に対して特徴パラメータの抽出および分類を包括的に行う新しい方法を提案した。まず、臍帯血信号のフラクタル特徴に着目し、フラクタル次元(BD)と相関次元(CD)を求め、BDは妊娠週数と正の相関があり、CDは正常と異常の判別に有効であることを検証した。次に、臍帯血時系列のカオス的特徴に対して、最大リャプノフ指数(MLE)を求め、同様に正常と異常判別への有効性を確認した。最

(様式 9 号)

後に、従来の特徴パラメータ(RI, PI, S/D)と新たに得られたパラメータ(BD,CD, MLE)に対して粒子群最適化・サポートベクターマシン(PSO-SVM)を適用し、4つの状態(正常、羊水過少、首周りの臍帯、胎児位置異常)における臍帯血信号の分類・診断モデルを提案し、本研究で提案した非線形特性パラメータ(BD,CD, MLE)を適用したほうがより高い識別精度を有することを比較検証した。

本審査会ならびに公聴会において、本検査手法が適用できる妊娠週数は何週からであるか、フラクタルとカオスの特徴に何が違い、それぞれから求めたパラメータ間にどうい関係があるか、粒子群最適化・サポートベクターマシン(PSO-SVM)分類器を選んだ理由は何か、相関係数(CD)の結果の見方や、本研究の今後展開などについて活発な質問があった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計4編)

- 1) Kaijun Yu, Zhongwei Jiang, R/S Analysis on Hurst Exponent of Umbilical Artery Blood Flow Time Series, International Journal of Engineering Science Invention, 11(6), 7-11, 2022.
- 2) Kaijun Yu, Zhongwei Jiang, Fractal Characteristic Analysis of Umbilical Artery Blood Flow Using Box Dimension, International Journal of Engineering Innovation and Management, 12(2), 19-26, 2022.
- 3) YU Kai-jun, JIANG Zhong-wei, Analysis of Correlation Dimensions of Umbilical Artery Blood Flow Signal, International Conference on Innovative Application Research and Education 2021, 35-38, 2021.
- 4) Kaijun Yu, Zhongwei Jiang, Diagnostic Model of Umbilical Artery Blood Flow Using NC-PSO-SVM, 2023 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Computer Information Technology (AICIT), Yichang, China, 2023. Pp.1-5, doi:10.1109/AICIT59054.2023.10277868.