

氏 名 しょうず かんと
生水 貫人

学位の種類 博士 (医学)

学位記番号 富医薬博甲第 394 号

学位授与年月日 令和 4 年 3 月 23 日

学位授与の要件 富山大学学位規則第 3 条第 3 項該当

教育部名 富山大学大学院医学薬学教育部 博士課程
東西統合医学 専攻

学位論文題目 深層学習を用いた胎児超音波動画における胎児胸壁に対する
セグメンテーションを行うためのModel-Agnosticな新手法の確立
(Model-Agnostic new method for thoracic wall segmentation using
deep learning in fetal ultrasound videos)

論文審査委員

(主査)	教授	野口 京
(副査)	教授	高村 昭輝
(副査)	教授	高岡 裕
(副査)	教授	足立 雄一
(指導教員)	教授	中島 彰俊

論 文 要 旨

論 文 題 目

深層学習を用いた胎児超音波動画における
胎児胸壁に対するセグメンテーションを行うための
Model-Agnosticな新手法の確立

富山大学大学院
医学薬学教育部（博士課程）東西統合医学専攻
産科婦人科学講座

氏 名 _____ 生水 貫人 _____

② A4 判とする。

〔目的〕

近年、人工知能 (artificial intelligence: AI) はその技術革新とともに医学分野を含め幅広い分野で目覚ましい成果を上げている。強力な機械学習の一つである深層学習を用いて、ピクセル単位でラベルを付与できる画像セグメンテーション手法を医用画像に応用することは、AIを用いた診断支援モデルを構築するための有効な戦略となっている。胎児超音波スクリーニングにおいてもAIを用いた診断支援モデルにより、先天性疾患の検出率の向上が期待できると考える。しかしながら現状として、超音波画像は対象物と背景のコントラストが低く曖昧であるため、解剖学的構造を正確にセグメンテーションすることは依然として難しい課題となっている。また、胎児の超音波診断では、先天性疾患の検出や新生児の予後の評価に重要な要素である心臓と肺を含む胸部の評価、特に四腔断面 (four-chamber-view: 4CV) による評価が不可欠である。そして胸壁は4CVを評価する上で重要な構造であり、検査者は胸壁を確認することで胸郭内の構造物の相対的な向きや大きさを認識することができる。そのため胸壁のセグメンテーション性能を向上させることは診断支援モデルを開発する上で重要と考える。本研究では胎児超音波動画における胸壁のセグメンテーション性能を向上させるために、深層学習技術を用いたmodel-agnosticな (モデルに依存しない) 手法であるMulti-Frame + Cylinder法 (MFCY) を新しく提案した。Multi-Frame法 (MF) は超音波動画の時系列情報を利用し、Cylinder法 (CY) は胸壁の形状の特性を利用した手法である。今回の提案手法であるMFCYを適用した際の胎児超音波動画における胸壁セグメンテーション性能について、臨床データを利用して検討した。

〔方法並びに成績〕


MF は、対象となる画像とその前後フレームに対して各々胸壁のセグメンテーションを行い、それらの予測ラベルを統合することにより予測結果を得る。これは高フレームレートの超音波動画を構成する連続した時系列画像の中で、前後するフレーム間の類似性を利用することにより予測結果を補完することが期待できる。また、CYは、胸壁に加え、胸腔と胸郭全体の3つの予測ラベルを独立した学習済みモデルから取得しこれらを統合することにより予測結果を得る。胸壁は常に円筒形であるという事前知識を利用し、統合時には胸郭全体のラベルから胸腔ラベルを差し引きし、胸壁ラベルを足し合わせることで、お互いの情報を補完することが期待できる。そして、MFとCYを組み合わせた手法がMFCYとなる。本研究では提案手法の性能評価を臨床データで行うために、2018年4月から2019年5月の間に、昭和大学の4病院で妊娠中期に胎児超音波スクリーニングを受けた正常胎児を妊娠する妊婦を対象とし、超音波動画を取得した。結果、妊娠18週から28週 (中央値: 20週) の妊婦256例から538 枚の 4CV 画像を得ることができた。この4CV画像に対して胸壁のアノテーションラベルを付与し、これを利用してMFCYに必要な教師あり学習を行った。その際には、畳み込みニューラルネットワーク (convolutional neural network: CNN) としてU-netとDeepLabv3+を使用した。今回、セグメンテーション性能を評価

するために5-foldクロスバリデーションを行った。MFCYを使用すると、平均 intersection over union (mIoU) は0.448 (U-net) vs. 0.493 (U-net + MFCY) , 0.417 (DeepLabv3+) vs. 0.470 (DeepLabv3+ + MFCY) であり、既存モデルよりも優れた結果を得ることができた。また、平均再現率でも、0.568 (U-net) vs. 0.738 (U-net+MFCY) , 0.525 (DeepLabv3+) vs. 0.729 (DeepLabv3++MFCY) と、既存モデルよりも高かった。

〔総括〕

本研究では、2つのmodel-agnosticな手法を組み合わせることで、胎児超音波動画における新規のセグメンテーション手法であるMFCYを提案した。MFCYは、2つの手法の独立した予測結果のアンサンブル学習に基づいており、超音波動画の時系列情報と胸壁の形状情報を相互に補完することができる。また、臨床データを用いて行った胸壁セグメンテーションにおいて、MFCYは既存モデルよりも優れた性能を示した。MFCYは、既存のCNNの予測結果をそのまま利用し、各動画のターゲット画像とその前後フレームの予測結果を統合することで機能する。データセットが限られた中で、ネットワークに修正を加えることなく、またより多くの追加のアノテーションを行わずとも、セグメンテーション性能を向上させることができた。MFCYはこのようにネットワーク構造に依存しないため、他のネットワークにも広く適用できる。このことは、model-agnosticな手法の大きな利点である。4CVの評価を支援するAIベースのモデルを構築するためには、胎児の胸壁の正確なセグメンテーションが不可欠である。MFCYが、胎児超音波の自動診断支援技術の開発につながることに期待する。

学位論文審査の要旨

報告番号	富医薬博甲第 号 富医薬博乙第 号	氏 名	生水 貫人
論文審査委員	職 名	氏 名	
	(主査) 教授	野 口 京	
	(副査) 教授	高 村 昭 輝	
	(副査) 教授	高 岡 裕	
(副査) 教授	足 立 雄 一		
指導教員	教授	中 島 彰 俊	
(論文題目) 深層学習を用いた胎児超音波動画における胎児胸壁に対するセグメンテーションを行うためのModel-Agnosticな新手法の確立(Model-Agnostic new method for thoracic wall segmentation using deep learning in fetal ultrasound videos)			(判定) 合格
(論文審査の要旨) 【背景と目的】 人工知能(artificial intelligence : AI)は医学分野を含め幅広い分野で目覚ましい成果を上げている。胎児超音波スクリーニングにおいてもAIを用いた診断支援モデルにより検出率の向上が期待できるが、超音波画像は対象物と背景のコントラストが低く曖昧であるため、解剖学的構造を正確にセグメンテーションすることは難しい。超音波による胎児の先天性疾患の検出や新生児の予後の評価には、四腔断面による心臓と肺を含む胸部の評価が不可欠であり、胸壁はその四腔断面を評価する上で重要な構造である。胸壁を確認することで胸郭内の構造物の相対的な向きや大きさを認識することができるため、胸壁のセグメンテーション性能を向上させることは、診断支援モデルを開発する上で非常に重要と考えられる。本研究では、胎児超音波動画における胸壁のセグメンテーション性能を向上させるために、深層学習のモデルに依存しないmodel-agnosticな手法であるMulti-Frame (MF) 法とCylinder (CY) 法を独自に開発した。このMF法とCY法を組み合わせた手法がMFCY法であり、深層学習で処理された出力画像に対して、MFCY法を後処理として適用した際の胎児超音波動画における胸壁セグメンテーション性能について検討した。 【対象と方法】 2018年4月から2019年5月の間に、昭和大学の4病院で妊娠中期に胎児超音波スクリーニングを			

【対象と方法の続き】

受けた正常胎児を妊娠する妊婦を対象として超音波動画を取得した。妊娠 18 週から 28 週（中央値：20 週）の妊婦 256 例から 538 枚の四腔断面画像を得ることができ、この四腔断面画像に対して胸壁のアノテーションラベルを付与して、深層学習の教師あり学習を行った。深層学習には、既存モデルである U-net および DeepLabv3+を使用した。

独自に開発した MF 法は、対象となる画像とその前後フレームに対して各々胸壁のセグメンテーションを行い、それらの予測ラベルを統合することにより予測結果を得る方法であり、高フレームレートの超音波動画を構成する連続した時系列画像の中で、前後するフレーム間の類似性を利用することにより予測結果を補完することができる。CY 法も独自に開発した手法であり、胸壁は常に円筒形であるという事前知識を利用して、胸壁、胸腔、胸郭全体の 3 つの予測ラベルを独立した深層学習済みモデルから取得してこれらを統合・差し引きすることにより予測結果を得る方法である。MF 法と CY 法を組み合わせた手法が MFCY 法であり、深層学習で処理された出力画像に対して、MFCY 法を後処理として適用した際の胎児超音波動画における胸壁セグメンテーション性能について、5-fold クロスバリデーションにてセグメンテーション性能を評価した。

【結果】

既存の深層学習モデルの U-net を使用すると、mean intersection over union (mIoU) は、0.448 であったが、MFCY 法にて後処理することで、0.493 となった。既存の深層学習モデルの DeepLabv3+ では、0.417 であったが、MFCY 法にて後処理することで、0.470 となり、既存モデルよりも優れた結果を得ることができた。平均再現率 (mean Recall) も、U-net では、0.568 であったが、MFCY 法にて後処理することで、0.738 となった。DeepLabv3+ では、0.525 であったが、MFCY 法にて後処理することで、0.729 と、いずれも既存モデルよりも高くなった。

【総括】

本研究にて、胎児超音波動画における胸壁のセグメンテーション性能を向上させるための新手法である Multi-Frame (MF) 法と Cylinder (CY) 法を独自に開発した点は、新規性がある。この MF 法と CY 法を組み合わせたものが MFCY 法であり、MFCY 法では、超音波動画の時系列情報と胸壁の形状情報を相互に補完することができる。臨床データを用いて行った胎児胸壁セグメンテーションにて、既存の深層学習モデルと比較して、深層学習モデルに MFCY 法を加えた方が優れた性能を示した。この MFCY 法は、深層学習で処理された出力画像に対して後処理として適用する手法であるため、深層学習のネットワークモデルに依存せず（つまり model-agnostic であり）他のネットワークモデルにも広く利用できるという利点があり、医学における学術的重要性が高い。胎児の四腔断面の評価を支援する AI ベースのモデルを構築するためには、胎児胸壁の正確なセグメンテーションが不可欠である。MFCY 法は、将来的に胎児超音波の自動診断支援技術の開発につながる可能性があり、臨床的な発展性が期待される。以上より本審査会は本論文を博士（医学）の学位に十分値すると判断した。