

実世界情報システムプロジェクト ～ヒューマンインフォマティクス研究グループ～

高度胎児診断画像と手術ロボット開発に関する研究成果

土肥 健純, 波多 伸彦

情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻

平成 16 年度研究総括

我が研究担当班では胎児外科の代表的対象疾患である、水頭症、先天性横隔膜ヘルニア、仙尾部奇形腫、脊髄髄膜瘤を正確に診断し、内視鏡手術で治療するための、高度胎児診断画像と手術ロボットの開発を研究のメインテーマとした。具体的には、高度胎児診断の開発については胎児 MRI 流れイメージングによる血流イメージングと脳内髄液 (CSF) フローイメージングの実現を目指し、非心電同期方式と、心電同期方式による MRI 流れイメージングの撮像法を開発を行った。心電同期方式においては、MRI 内で使用可能な胎児心電モニタリング装置の開発を行った。胎児内視鏡手術を実現するための多節スライダ・リンク機構を用いた手術ロボットデバイス群の開発については、現状直径 10mm の多節スライダ・リンク機構部の直径 5mm へ細径化を行った。

まず、一点目のテーマは高度胎児診断 (特に MRI による流れの可視化法) の開発であり、胎児 MRI 流れイメージングによる血流イメージングと脳内髄液 (CSF) フローイメージングの実現を目指し、非心電同期方式と、心電同期方式による MRI 流れイメージングの撮像法を行った。心電同期方式においては、MRI 内で使用可能な胎児心電モニタリング装置の開発を行った。二点目のテーマとして、胎児内視鏡手術を実現するための多節スライダ・リンク機構を用いた手術ロボットデバイス群の開発を行った。ここでは、従来までに研究代表者らが開発してきた多節スライダ・リンク機構を応用した内視鏡及び切除器具の開発を行った。

高度胎児診断としての MRI による流れの

可視化法の開発

本研究では、心拍同期を行わない PCA 画像の撮影法と、胎児 MRI で使用可能な心拍同期装置を開発してこれを用いた PCA 画像撮影方法を提案し、胎児 CSF flow の有無を判別することを目的とした。

実験では、流れのアーチファクトが生じないように心電同期法を用い、1 心拍間における各時相の PC-MRA 画像を 23 枚取得した。解析結果と比較する評価画像としては、同一位置での T2 強調画像を用いた。胎児中脳水道における CSF flow を模擬した流れの実験系を製作し、その流れを本手法によって抽出可能であるかについて検討した。20mm/sec における DS-PCA 画像, $\alpha_T = 0.1$, $\alpha_B = 0.05$ と設定したときの解析結果を Fig. そこで、胎児において撮像を行うことを前提として、健常成人において MR 撮像条件を変化させたときに得られる DS-PCA 画像、および本手法の解析結果より胎児に最適と考えられる MR 撮像条件の導出を行った。水頭症胎児への臨床応用である。水頭症胎児の CSF flow だけではなく、無心体胎児の臍帯血流にも本手法を適用した。心拍同期による PC-MRA を用いなくとも、10-30mm/sec の胎児中脳水道における CSF を同定できることが示された。

胎児水頭症では、CSF flow の抽出は不完全であった。無心体胎児の臍帯血流では、ドップラー超音波では認められなかったが、本手法の解析結果では血流が認められた。このような結果から、心拍同期を用いなくとも CSF の抽出が可能であることが示された。

MR 対応超音波プローブによる胎児心拍同期を用いた PC-MRA 法

胎児期に発症する症例の 1 つとして胎児水頭症があげられる。胎児に PC-MRA 法を適用する

ためにはMR内で胎児の心拍同期を取る必要がある。

本研究では、MR内で使用可能な超音波ドップラ装置を製作し、超音波ドップラ波形から心拍同期を行う新しい胎児PC-MRA法を開発し、そのPC-MRA法の評価・検証を行う。

胎児の血流波形を超音波ドップラ装置で取得して、心拍同期信号を生成することにより、PC-MRA法を実現するためのシステム開発を行った。

胎児中脳水道におけるCSFの流れを模擬したファントムを用い、超音波ドップラによる心拍同期を用いたPC-MRA法により撮影した。MR対応超音波ドップラ装置による胎児心拍同期を用いたPC-MRA法のシステム開発を行った。胎児中脳水道のCSFの流れを模擬した実験で、超音波ドップラによる同期を用いたPC-MRA法の有効性が示され、輝度値の最大増加量は71%であった。

胎児内視鏡手術を実現するための多節ス

ライダ・リンク機構を用いた手術ロボッ

トデバイス群

複数のリンクで構成した多節スライダ・リンク機構を新たに提案し、広い屈曲範囲を実現する多自由度屈曲鉗子マニピュレータの開発を目的とする。

多節スライダ・リンク機構

より広い術野を確保するための1自由度当たり $\pm 90^\circ$ の屈曲範囲を持つ屈曲2自由度と、手術器具として最も基本的な把持1自由度の合計3自由度、繰り返し誤差 1.0° 以下の屈曲再現性、そして成人の胎児脊髄の1/3程度を持ち上げるための0.4kgfの屈曲発生力を目標とする。

1自由度屈曲機構

1自由度の屈曲機構は、円筒状の3つのフレーム、各フレームを連結し $\pm 45^\circ$ の回転を行なう2箇所ピンジョイント、そして3つのリンクから成る駆動用リンク節と2つのリンクから成る拘束用リンク節で構成される。

2自由度屈曲機構

先端側の自由度を水平面屈曲、根元側の自由度を垂直面屈曲とし、第3フレームにおいて水平

面屈曲用の駆動用リンク節を2軸周りに回転可能なジョイントと連結+する。水平面屈曲におけるリンク節のスライド変位量と屈曲角度の関係をまた、マニピュレータ先端側の垂直面屈曲においては、垂直面屈曲角度と水平面屈曲角度の両方から駆動用リンク節のスライド変位量が一意に定まる。

本システムは、多自由度エンドエフェクタ、直動ユニット、リンク連結機構、ダイヤル式インタフェース、そしてコントロールユニットの5つの部分から構成する。

多自由度エンドエフェクタ

多自由度鉗子のフレームの外径は10mmであり、リンク駆動式2自由度屈曲機構とワイヤ駆動式把持機構の合計3自由度を有する。

直動ユニット

リンク連結機構

結果

屈曲鉗子マニピュレータの再現性、発生力の性能を評価するため、2自由度屈曲機構における性能評価実験を行った。また、ダイヤル式インタフェースからの角度入力に対する2自由度屈曲機構の応答性についても評価を行った。本研究では、多節スライダ・リンク機構を用い、胎児外科手術用屈曲鉗子マニピュレータの開発を行なった。研究初年度の平成15年度は、高度胎児診断の開発については胎児MRI流れイメージングによる血流イメージングと脳内髄液(CSF)フローイメージングの実現を目指し、非心電同期方式と、心電同期方式によるMRI流れイメージングの撮像法の開発を行った。心電同期方式においては、MRI内で使用可能な胎児心電モニタリング装置の開発を行った。胎児内視鏡手術を実現するための多節スライダ・リンク機構を用いた手術ロボットデバイス群の開発については、現状直径10mmの多節スライダ・リンク機構部の直径5mmへ細径化へ向けての設計を行った。