



Title	発育性股関節形成不全の検診画像における骨形態計測基盤技術開発
Author(s)	清水, 寛和
Description	配架番号 : 2954
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(医学)
Dissertation Number	甲第16644号
Issue Date	2025-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16644
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98254
Type	doctoral thesis
File Information	SHIMIZU_Hirokazu_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（医 学） 氏 名 清水 寛和

学 位 論 文 題 名

発育性股関節形成不全の検診画像における骨形態計測基盤技術開発

(Development of fundamental technology for bone morphometry in the medical examination images for the developmental dysplasia of the hip)

【背景と目的】

整形外科において、病態の把握又は治療方針の決定のために骨形態の定量的評価が行われる。その中で、単純X線画像や超音波画像は疾患のスクリーニング時点において頻用される画像装置である。単純X線画像の場合、医療画像管理システム(Picture Archiving and Communication System: PACS)の普及により、解析者はパソコン画面上でマウス操作により定量評価を行う。問題点として、計測の習熟の差や機種により計測方法が異なることで計測誤差が生じる。また、健診等で使用頻度の高い単純X線画像の評価回数は多く、医療者が計測を行う時間自体の労力も小さくない。

超音波画像検査については、放射線被曝がないことや持ち運びができるという長所がある一方、PACSは普及しておらず、画像をプリントアウトし、手作業で骨形態計測を行う。そこでは超音波画像特有のアーチファクトが問題となり、特に骨は強い反射面として機能する。骨からの超音波反射が複数回生じ、本来の骨領域以外の周囲にも高エコー領域が出現、骨輪郭がぼやける現象(多重反射偽像)が散見される。その結果、撮影画像が診断に耐えうる標準的な質を有するかどうか、いわゆる診断適正画像か否か、という点においてまず医療関係者は判断を苦慮することがある。実際、超音波画像検査は計測において比較的検者間誤差の大きい検査モダリティであることで知られる。

これらの課題に対し、発育性股関節形成不全の検診時に施行された単純X線画像と超音波画像を用いた技術開発を行った。単純X線画像における骨輪郭の正確な検出と操作負担のない計測基盤技術の開発をテーマ①とした。また超音波画像において、多重反射偽像の影響を減弱させた技法にて骨形態を解析し、診断適正画像を自動抽出することで検者間誤差を小さくする基盤技術の開発をテーマ②とした。

【材料と方法】

テーマ①: 乳児股関節 X 線 813 画像を用いて、全自動臨床パラメーター算出モデル(automatic algorithm of Clinical Measurements : aaCM)を作製した。関心領域(Region of interests:ROI)の自動検出として、深層学習モデル (You Only Look Once v5: YOLO v5)を使用した。訓練時は1枚の画像あたり6つ(左右の各大腿、坐骨、寛骨臼)あるように設定した。ROI 検出の正確性を the mean Average Precision(mAP)にて評価した。次に ROI 内での骨形態解析として、軟部組織領域と骨領域に大別するために、適応的閾値処理を行い、ROI の二値化した。同定した骨領域を塊としてプロブ化し輪郭検出した。各プロブの特徴点を検出し、パラメーターを導出した。aaCM の臨床的評価として、治療介入が必要な症例に対する aaCM が有する判断能を評価した。乳児股関節画像にアノテーションされた股関節不安定性の有無(不安定性有りは治療介入群)を Ground truth(GT)とし、下記3つのモデルを作製した。Setting A: 乳児股関節画像に対する単純な深層学習モデル、Setting B: aaCM をインプットとする機械学習モデル、Setting C: Setting A と Setting B を統合したモデルとし、定量指標を Area under curve of Receiver Operating Curve(AUROC)とした。

テーマ②: 乳児股関節超音波画像 1100 画像を用いて、多重反射偽像の影響を減弱させた骨形態線の描出、診断適正画像抽出を行った。特徴点検出として、深層学習を用いて、画像上の特徴点の1つ(骨性臼蓋嚢)を推定した。学習方法として、訓練セットを770枚とし、試験セットを330枚にてその精度

を評価した。腸骨 ROI 作製として、骨性臼蓋嘴から自動的に pixel 数を設定(推定点を中点とした左右 10pixel、推定点より下 5pixel、上は制限なし)した領域を腸骨 ROI とし、自動描出した。

腸骨 ROI は骨と骨周囲の多重反射偽像を有することがあり、腸骨 ROI 以外の領域と比して高エコー領域である。それに対して 2D 画像を 3D image 化、信号不均一性検出を行い、局所的なピーク座標検出、その後座標の組み合わせによる骨形態線の描出を行った。乳児股関節超音波画像において、腸骨が画像に対して垂直であることが標準画像（診断適正画像）であると定義されている。そこで、試験セット内で腸骨の骨形態線が垂直に近い画像(診断適正画像)か否か（診断不適画像）に振り分け、検者間誤差を比較した。骨形態線を複数描出し、活用した骨形態角作製による診断能評価を行った。乳児股関節超音波画像における骨形態角(α 角)は發育性股関節形成不全を定義する。 α 角を自動算出、その診断能を試験セットの診断適正画像について評価した。

【結果】

テーマ①:ROI の検出について、mAP の平均(95%信頼区間)は YOLOv5 S: 0.978 (± 0.011)、YOLOv5 M: 0.987 (± 0.004)、YOLOv5 L: 0.990 (± 0.003) であった。ROI 内の骨形態角計測では算出した寛骨臼角の平均誤差は 2° 未満であった。その誤差は既報文献より小さく、整形外科専門医の計測値に比較した際も有意に誤差は小さかった。統合モデルの疾患診断能として、Setting C は、Setting A と Setting B より診断能が有意に高かった。AUROC の平均値(95%信頼区間)は Setting A が 0.840 (± 0.029)、Setting B が 0.789 (± 0.037) であり、Setting C は 0.885 (± 0.022) であった。

テーマ②:推定骨性臼蓋嘴の GT との誤差について、深層学習モデルは整形外科専攻医と比較し有意に小さかった(4.2 ± 0.12 vs 6.1 ± 0.17 , $p < 0.01$)。アーチファクトを有した画像において、骨形態線はアーチファクトの影響を低下させたと考えられる腸骨の描出を行った。実際、試験セット内で診断適正画像(骨形態線が垂直)か不適切画像に振り分けた際、検者間誤差について、診断適正画像は診断不適切画像に比して有意に小さかった(3.8 ± 0.21 vs 5.1 ± 0.22 , $P < 0.05$)。診断適正画像において、發育性股関節形成不全に対する AUROC は 91.8% であった。

【考察】

乳児股関節単純 X 線において骨形態の正確な計測値を算出する基盤技術を開発、機械学習を統合することで自動化した。撮影した X 線画像より、人の手が加わらずに臨床的に重要なパラメータを表示できることを示した技術は単純 X 線画像による骨形態の解析一般に汎用できることを示唆した。また、自動算出した複数パラメータを評価することで自動診断能を有することがわかった。同一の画像から得た臨床パラメータを統合することで、診断能が上昇することは重要な知見である。

乳児股関節超音波画像において、骨に特徴的なアーチファクトの影響を低下させた骨形態線技術を開発した。超音波画像において特に問題となっている診断適正画像か否かを自動判断した。また、骨形態線より自動算出された骨形態角による疾患の診断能も良好であった。

【結論】

乳児股関節 X 線画像については骨輪郭を正確に描出すること、超音波画像については骨周囲領域中の極大点を検出し骨形態線を描出することで基盤技術開発に至った。各基盤技術の特許出願は完了し、今後は企業導出と他の運動器疾患への応用を検討していく。