



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Automatic Joint Space Narrowing Quantification in Radiographic Images with Sub-pixel Accuracy for Rheumatoid Arthritis [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	欧, 亜非
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15536号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89701
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yafei_Ou_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 欧 亜非

審査担当者 主 査 教 授 富田 章久
副 査 教 授 浅井 哲也
副 査 教 授 本久 順一
副 査 教 授 神島 保 (北海道大学・大学院保健科学研究院)

学位論文題名

Automatic Joint Space Narrowing Quantification in Radiographic Images with Sub-pixel Accuracy for Rheumatoid Arthritis

(関節リウマチ診断に向けた X 線画像における関節狭小化の自動定量化)

本学位論文における研究目的は、関節リウマチの診断補助システムとなりうる関節破壊・関節間距離の高精度測定手法を確立することである。通常、長期間の経過観察が必要な関節リウマチにおいて、専門医の診療負担軽減/早期治療による患者負担軽減に寄与する。

本論文では、関節リウマチ (RA) 早期における関節腔狭窄 JSN の進行を自動的に定量化することを目指した、新規かつ高感度なフレームワークを提案している。本フレームワークは、RA における JSN 進行の完全自動定量化を実現するものであり、大きくは関節位置検出と JSN 進行の定量化の 2 つの部分に分けられる。前者では、機械学習に基づく関節位置検出法とキーポイント検出に基づく関節位置検出法の 2 つの方法を提案し、比較する。2 つの検出手法は、実験において異なる長所と短所を示した。関節空間の定量化については、位相限定相関法 (POC) に基づき関節空間の相対的な幅を算出することで、新たな枠組みを提案した。また、本論文では、FIPOC(Full Image Phase Only Correlation) に位相スペクトル分割のステップを追加し、複数領域の変位を同時に計測できるように改良した。この改良型 FIPOC アルゴリズムを Partial Image Phase Only Correlation (PIPOC) と命名した。PIPOC は画像レジストレーションアルゴリズムとして、JSN の進行度定量化に利用されている。PIPOC は FIPOC と比較して、セグメンテーションと欠損補間プロセスの影響を効果的に回避し、位相差スペクトルにおける位相分散を低減することが可能である。ファントム実験では、PIPOC は FIPOC よりもはるかに低い平均誤差を示した。本研究は、RA のコンピュータ支援モニタリングと診断を目的としている。本研究では、ベースラインとそのフォローアップの指関節画像間の JSN の進行を、周波数領域の位相スペクトルを用いて測定するものである。ファントム研究および臨床データセットを用いた実験において、我々のアルゴリズムは上下骨の変位をサブピクセル精度で測定することができる。本アルゴリズムの平均誤差は、X 線撮影ファントム・データを用いた手動測定と比較して 11.9% - 35.0%、トモシンセシス・ファントム・データを用いた場合は 6.0% - 16.1%、X 線撮影臨床データを用いた場合は標準偏差 (SD) が 0.0519 mm であった。従来の研究では、ピクセルレベルの精度しか達成できないことを考慮すると、広範な実験により、提案する画像登録に基づく JSN 進行の量子化フレームワークは、2 つの主要な関連研究、すなわち余白検出に基づく JSW 量子化フレームワークと画像分類に基づく SvdH スコアリングフレームワークと比較して、高精度なモニタリングを約束することが実証された。

これらの利点は、提案するフレームワークが、JSN の進行を高感度でモニタリングする際のギャップを埋めることができることを示している。そのため、関節リウマチのモニタリングに広く応用できる可能性がある。また、サブピクセル単位の精度は、通常の手動計測をはるかに超えており、JSN の進行を自動的に定量化するための有望な手法である。現在、機械学習 (ML) が医用画像解析の難解なタスクに適用されている。今後、この方向での研究が期待される。本研究の実験により、RA モニタリングにおける画像登録ベースの JSN 進行度定量化フレームワークが、現在最も普及している分類ベースの SvDH スコアリングフレームワーク、およびマージン検出ベースの JSW 定量化フレームワークと比較して優位であることが示された。これらの ML ベースの画像レジストレーションアルゴリズムは、RA における JSN の量子化に使用することができる。また、姿勢 (指の動き) に関連した制約や、不整合な登録になりやすい関節角度に対応するため、ML の利点を考えると、わずかな精度を犠牲にして、より高いロバスト性 (ミスマッチ比率の低減) を達成できる可能性がある。さらに、我々の研究で抽出した画像特徴を用いて ML による JSN を定量化することで、アルゴリズム全体の性能を向上させることができる。

以上を要するに、本論文は関節リウマチ診断に向けた X 線画像解析において、関節部位を自動検出し、指骨の関節部位の分離とサブピクセルレベルの高精度・関節間距離測定の手法を提案した。そして、ファントムを用いた画像と臨床画像を用いた解析評価により本手法が従来手法より優れていることを実証した。よって、本論文は、画像工学分野に大きく貢献するところであり、著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。