

関節リウマチ画像診断のためのコンピュータ支援手法

Computer-aided Method for Imaging Diagnosis of Rheumatoid Arthritis

高橋 英治

要約 日本における関節リウマチの患者数は60万人を超えると推定され、その対策の社会的な重要性はますます増大している。優れた抗リウマチ薬や生物学的製剤の登場により、関節リウマチの早期診断、早期治療の意義が注目されている。関節破壊の進行は単純エックス線写真を用いたスコアリングによって検出可能であるが、読影に時間がかかることや再現性に欠けることが問題である。この問題の解決手段として、コンピュータを用いた画像診断支援システムの開発が期待されている。本研究では、手の単純エックス線画像から自動で骨格構造を認識し、2時点間の画像を用いて関節裂隙幅の経時変化を定量化して画像診断を支援するシステムの開発と実験を行い、良好な結果が得られた。

Abstract In Japan, the number of patients with rheumatoid arthritis is estimated to be over 600 thousand. And the social importance of counter measure for this disease is increasing. With the advent of excellent antirheumatic drugs and biologics, the significance of early diagnosis and early treatment of rheumatoid arthritis has attracted attention. Although the progress of joint destruction can be detected from the X-ray image by scoring, problem is that the interpretation takes time and lacks reproducibility. Development of a computer aided image diagnosis support system is expected as a means to solve these problems. In this study, we developed a system to support image diagnosis by automatically recognizing the skeletal structure from the hand X-ray image, then quantifying and presenting the temporal change of the joint space width using the images of two time points. Acceptable results were obtained in the initial validation study.

1. はじめに

関節リウマチ (Rheumatoid Arthritis) は、関節滑膜の炎症を主体とする慢性炎症性疾患であり、次第に関節破壊が進行し患者の生活の質 (Quality of Life : QOL) を著しく損なう自己免疫疾患の一つである。全国で患者数は60～100万人と推定されている^[1]。男女比は1対4と女性に多く、働き盛りの30～50歳代が発症のピークと考えられており、超高齢化社会を迎えるにあたり、その対策の社会的な重要性はますます増大している。近年、優れた抗リウマチ薬や生物学的製剤の登場と治療法の進歩により、早期に診断し治療を開始できれば病期の進行を最小限に食い止められるようになってきたことで、早期診断、早期治療の意義が注目されている。

関節リウマチの診断は、米国リウマチ学会 (American College of Rheumatology : ACR) と欧州リウマチ学会 (European League Against Rheumatism : EULAR) が合同で策定した分類基準に従い総合的に行われている^[2]。関節破壊の進行は手足の単純エックス線写真から、Larsen の分類^[3]やSharp 法^[4]、modified Total Sharp Score (mTSS)^[5]などの評価方法を用いれば検出は可能であるが、観察する関節数が多く、また軽微な病態変化を正確に読影すること

が難しいため、多くの時間と労力を要する。加えて、医師が主観的に評価するため、観察者内変動や観察者間変動が大きく再現性に欠けることも大きな問題である^[6]。これらの問題を解決する手段として、定量的且つ省労力であるコンピュータによる自動解析システムの開発が期待されている。

本研究では、観察者の読影経験に依存せず、観察者内変動や観察者間変動を最小限に抑えることを実現する、関節リウマチのコンピュータ診断支援システムの構築を目的とする。本稿で本研究についての詳細を記述する。2章に関節リウマチの画像検査について概要を記述し、3章で関節リウマチの画像診断支援手法としてコンピュータを用いた関節リウマチの画像診断支援手法について述べる。これは、14名の手の単純エックス線写真に適用し評価した。4章でその結果、5章で考察を述べる。

2. 関節リウマチの画像検査

関節リウマチの画像検査では、主に単純エックス線検査、MRI検査、超音波検査が用いられている。本章にそれらの特徴についてまとめる。

2.1 単純エックス線検査

関節炎から生じる構造破壊が主な病態である関節リウマチにおいて、この関節構造破壊の過程を評価するために重要な画像検査である。関節構造破壊の評価指標には、Larsen の分類などが用いられている。また、臨床研究などで使用される mTSS 法は、手指、手、足趾関節の構造的変化を、関節裂隙狭小と骨侵食スコアで評価する方法である。単純エックス線写真は、少なくとも数か月の累積した破壊がなければ変化をとらえることができない。構造的変化が出現する以前では異常の指摘ができず、早期診断において有用性は低い。ただし、炎症による関節構造変化の確認とその評価に有効であり、撮影法が標準化されていることから、機器に制約されず安定した画像が得られることで、世界共通の検査法となっている。臨床においては、外科的治療計画から寛解維持の確認まで広く利用されている^{[7][8]}。

2.2 MRI 検査

関節リウマチ様関節炎は関節組織や骨内に炎症を起こし、不可逆的破壊を引き起こす。これらの炎症（滑膜炎）を詳細にとらえることが可能な検査であり、臨床において関節リウマチの早期診断、予後評価に有用であると考えられている。MRI 検査は、きわめて詳細な画像情報が得られる反面、一度に撮影できる部位の制限や、医療コスト、施行施設が限定されるなどの理由により反復検査が困難なため、治療途中の評価判定には不適切である^[7]。

2.3 超音波検査

超音波検査では、滑膜炎による構造異常や微細な骨侵食などを描出できる。リアルタイムに患部を観察でき、関節を屈伸させながら機能を評価することも可能であるなど、他の画像検査にない特徴を持っている。また、装置が比較的 low コストであり、特別な施設を必要としないことから急速に診療利用されるようになってきている^[7]。

3. 関節リウマチの画像診断支援手法

診断から外科的治療計画、寛解維持の確認まで広く利用されている単純エックス線写真を対象とした画像診断の支援手法について述べる。これまでに、コンピュータを用いて手の単純エックス線写真を画像解析し、関節リウマチの進行度を評価する手法がいくつか提案されている^{[9]~[12]}。これらの手法は、自動で手の構造を解析し、関節裂隙幅を計測する手法であるが、全て1時点のみでの画像で計測を行っているため、軽微な関節裂隙幅の変化を定量化することが難しいと考えられる。関節裂隙幅の変化の定量化手法として、市川等^[12]は、2時点間の画像の重ね合わせによって関節裂隙幅の経時変化を定量化することで、この微小変化を評価する手法を提案している。ただし、異なる時間や環境で取得された画像を用いて自動的に比較するためには、評価対象となる関節などの構造を高精度に抽出し、それらを正しく対応付けなければならない。そこで本研究では、市川等の提案する手法を基に、自動で単純エックス線画像から手の構造を解析し、2時点間の画像の関節裂隙幅の変化を定量化し提示することによって、関節リウマチの画像診断を支援する手法を提案する。本手法は、入力された手の単純エックス線画像から、自動で手掌、指、指中心線、関節の構造を識別し、2時点 (baseline と follow-up) 間の関節位置の対応付けを行い、関節の縁 (軟骨下骨) の差から関節裂隙の定量化を実現する。図1に本手法の流れを示す。3.1節では、入力対象である単純エックス線写真と評価対象である手指骨の解剖学的構造について記述する。図1(a)に示す手の構造解析手法として、3.2節にて手領域の抽出、3.3節にて指中心線の抽出、3.4節にて関節位置の検出、3.5節にて軟骨下骨の抽出についての詳細を述べる。図1(b)に示す関節裂隙の経時変化計測手法として、3.6節にて関節位置合わせ、3.7節にて関節裂隙の定量化についての詳細を述べる。

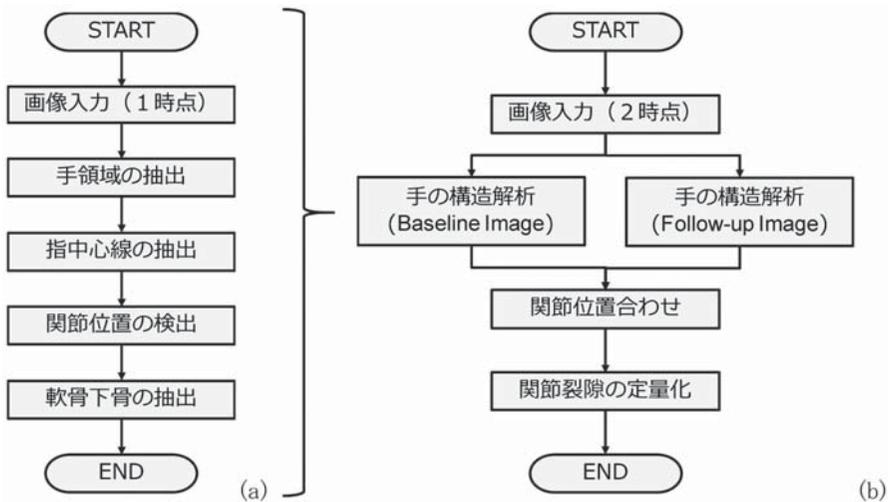


図1 関節リウマチの画像診断支援手法の流れ。(a)手の構造解析、(b)関節裂隙の経時変化計測

3.1 手の単純エックス線写真

今回実験に用いる手の単純エックス線写真と指骨の解剖学的名称を図2に示す。本手法では、図中に示す DIP 関節 (Distal interphalangeal joint), PIP 関節 (Proximal interphalangeal joint), MCP 関節 (Metacarpophalangeal joint) について検出を行うが、このうち関節リウマチの画像診断における対象は MCP 関節と PIP 関節である。

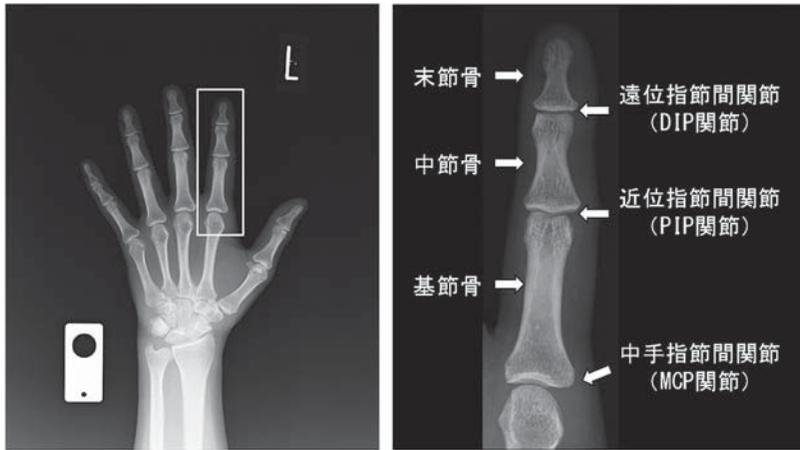


図2 手の単純エックス線写真と指骨の解剖学的名称

3.2 手領域の抽出

手領域の抽出例を図3に示す。本工程では、計算量削減のため、入力画像の画素サイズを縮小して統一した画像に対して処理を施す。海綿骨構造が目視で認識できる画素サイズとして0.63mm/pixelを採用した。これは、CT装置における撮影条件でFOV (Field of view) に320mmを用いた際の解像度と同等である。本手法では、画像の背景領域と手領域を識別し分類することで抽出する。単純エックス線画像の背景領域は、ほぼ様な画素値で分布していることから、次式で表される画像の平均情報量 E (エントロピー) を算出してエントロピー画像を生成し、この値を用いて領域を分類する。

$$E = -\sum_{i=1}^n p_i \cdot \log p_i / \log n = -\sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_n p_i \quad (1)$$

エントロピー画像は、直径5mmのフィルタを用いて画像内を走査し、算出したフィルタ内のエントロピーをフィルタ中心の画素値として生成する。フィルタの直径は、指を識別できるサイズで手の領域を抽出することから、平均的な指幅を約20mm^[13]として、この範囲にフィルタが収まる大きさを採用する。以降の処理において指幅の基準を20mmとして用いる。エントロピー画像の生成例を図3(a)に示す。生成されたエントロピー画像に対して、閾値 T_E を用いて領域を二つに分類する。ただし、ここで分類された手の領域候補には、同時に撮影された器具やマーカー類が含まれている可能性があるため、撮影基準 (エックス線の中心点は、水平ラインをMCP関節、垂直ラインを第2-3中手骨間とし、エックス線の入射は第3MCP関節に垂直とする)^[8]より、画像の中心座標に始点を設定し、領域拡張法を用いて連結成分を抽出することで、手以外の物体を除外する。最後に、モルフォロジー演算を用いたクロージング処理^[14]を適用することで、抽出された連結領域に内包する孤立領域を埋め、生成された閉領域を手領域とする。クロージング処理では、エントロピー画像生成時と同じ直径のフィルタを用いる。更に、抽出された手領域について、手掌と指の領域を分類する。手掌は手領域内の広い範囲を占める部分である。手領域にユークリッド距離変換^[15]を適用し距離変換画像を生成する。距離変換画像の生成例を図3(b)に示す。距離値の極大点を探索し、その極大点について逆距離変換した領域を手掌領域とする。手掌領域から上方向に延びる領域を領域拡張法によって抽

出し、これを指領域とする。手掌領域と指領域の分類例を図3(c)に示す。

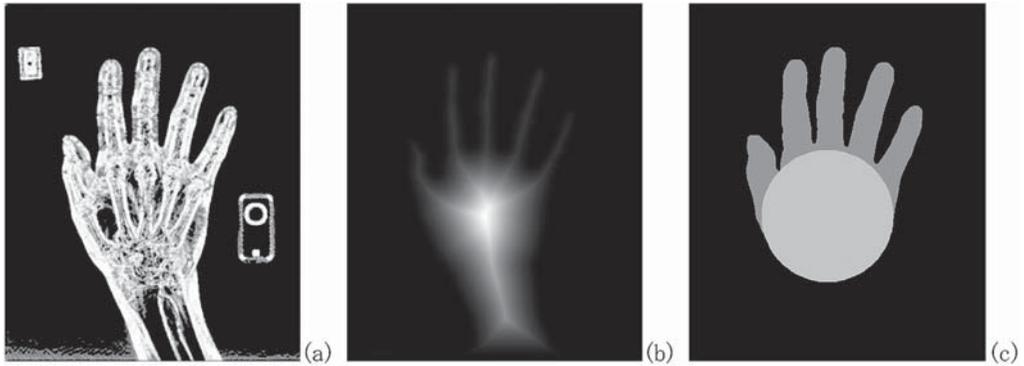


図3 手領域の抽出処理。(a)エントロピー画像、(b)距離変換画像、(c)手掌領域と指領域の分類

3.3 指中心線の抽出

指中心線の抽出例を図4に示す。手領域の抽出工程と同様に、計算量削減のため、前節の抽出結果の縮小画像に対して処理する。指領域について、骨格を芯とした連続する濃淡形状として表現する。画像全体にガウシアンフィルタを用いた平滑化を施す。このとき、指幅を基準として直径10mmのフィルタを適用する。平滑化適用例を図4(a)に示す。濃淡形状と凹凸の大きさを定量的に表現するために、画素値の輝度勾配を次式で表される平均曲率 H によって求め輝度勾配画像を生成する^[16]。生成例を図4(b)に示す。

$$H = \frac{h_{xx}(1+h_y^2) + h_{yy}(1+h_x^2) - 2h_x h_y h_{xy}}{2(1+h_x^2+h_y^2)^{3/2}} \quad (2)$$

$$h_x = \frac{\partial h}{\partial x}, \quad h_y = \frac{\partial h}{\partial y}, \quad h_{xx} = \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial x}, \quad h_{yy} = \frac{\partial^2 h}{\partial y \partial y}, \quad h_{xy} = \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y}$$

次に、画像の最上位から水平方向に走査し、曲率のピークを探索する。ピークが5箇所（片手の場合）出現する位置を検出し指の基準位置とする。水平方向に初めて5箇所出現する位置は、解剖学的な情報から母指の先端位置と推測できる。この位置を始点として、上下方向に等間隔でピーク位置の連結を探索して尾根線を追跡する。探索距離は指幅を基準として5mmとした。抽出された尾根線を指の中心線とし、入力画像のピクセルサイズに合わせ、スプライン関数を用いて拡大補間する。さらに、指中心線の蛇行の影響を軽減するため移動平均を用いて平滑化された指中心線を生成する。図4(c)に指中心線の抽出例を示す。

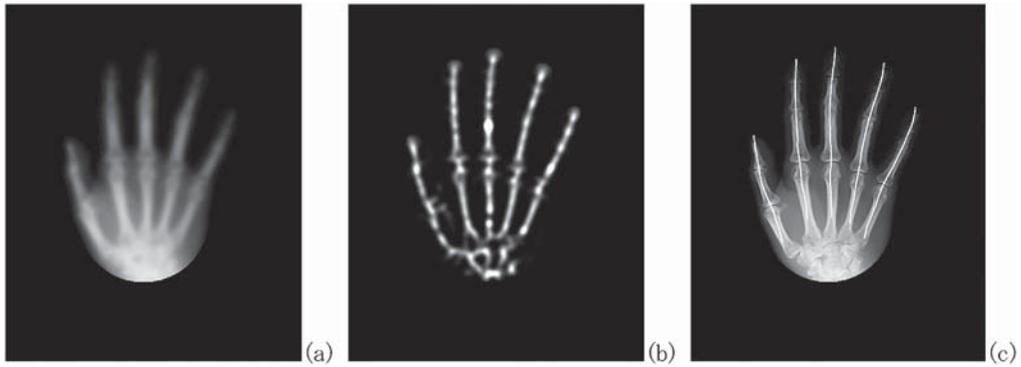


図4 指中心線の抽出処理. (a)平滑化画像, (b)輝度曲率画像, (c)指中心線抽出

3.4 関節位置の検出

関節位置の検出例を図5に示す. 指中心線上の画素値を確認すると, 関節位置において凹凸が存在している. この解剖学的特徴から, 手領域内の輝度勾配(グラディエント)を求め, その勾配の形状変化を用いて関節位置を検出する. 解剖学的特徴を用いた手の構造解析例を図5(a)に示す. 指中心線の傾きに沿って矩形領域を定義し, 矩形領域内の輝度勾配の平均値を特徴量として用いる. 矩形領域は, 指幅を基準として, 指内に収まる大きさ縦5mm, 横10mmで設置する. この時, 指中心線の接線方向の成分を強調するため, 指中心線の接線ベクトル v と輝度勾配ベクトル g とのなす角を重み w とし, 次式で表される重み付き輝度勾配として算出する.

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |w| |g| \quad (3)$$

$$w = \frac{g \cdot v}{|g| |v|} \quad (4)$$

手指骨の解剖学的な構造を基に, 各関節の支配する区間を設定し, 各区間で特徴量が最大となる箇所を探索し関節位置とする. 関節位置の検出例を図5(b)に示す. 指中心線上的特徴量 S の遷移を図6に示す.

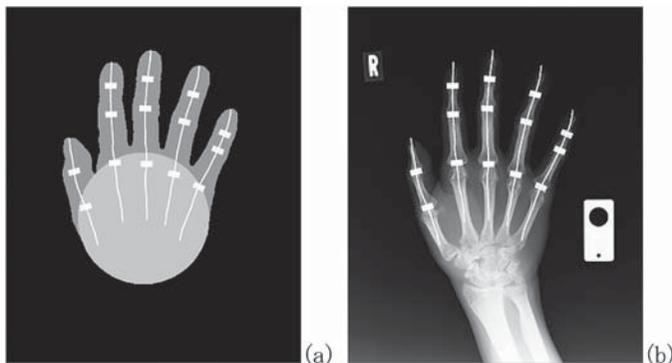


図5 関節位置の検出処理. (a)手の構造解析, (b)関節位置の検出

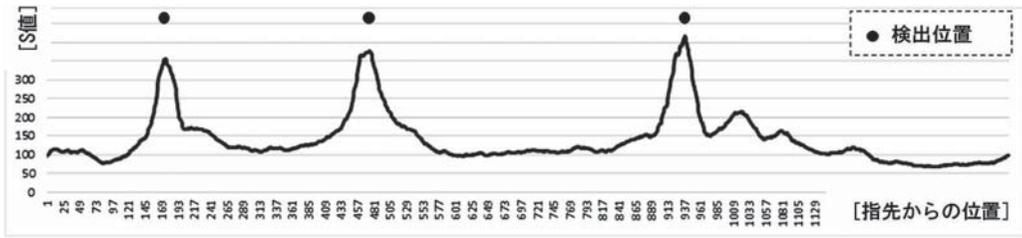


図6 指中心線上における特徴量の遷移

3.5 軟骨下骨の抽出

軟骨下骨の抽出は軟骨の下に位置する皮質骨の縁を抽出することで実現する。検出された関節位置を中心として矩形領域を設置する。指幅を基準として、関節が含まれる大きさ縦10mm、幅20mmの矩形を設定する。この矩形内を対象として骨の輪郭を抽出し、抽出された輪郭から軟骨下骨を分類する。輪郭の抽出にはCanny edge detector^[17]を用いる。以下にその手順を示す。

- 1) ノイズを除去するためにガウシアンフィルタを適用して画像を滑らかにする
- 2) 画像の輝度勾配を求める
- 3) 非極大値の勾配を制御してエッジ検出に関係のない勾配を除去する
- 4) 二重閾値を適用して可能性の高いエッジを決定する
- 5) ヒステリシス (Hysteresis) を用いたエッジの追跡：強いエッジに接続していない全ての弱いエッジを除去して終了する

骨の輪郭が途切れた場合においても、連続した一連の構造として抽出するために、手順1)において、通常はガウシアンフィルタが適用されるが、本手法ではCoherence-enhancing shock filter^[18]を適用することで、輪郭強調処理を付加したCanny edge detectorを独自に生成する。また、手順2)の輝度勾配の算出では、3.4節の関節位置の検出において式(3)で定義した重み付き輝度勾配を用いる。最後に、検出されたエッジ成分の内、輝度勾配の方向と指中心線の接線ベクトルの傾きによってエッジ成分を分類する。分類されたエッジ成分の内、手掌から指先の方向に分類されるエッジ成分を軟骨下骨として抽出する。

3.6 関節位置合わせ

関節の位置合わせは計算量の削減を考慮し、大まかな位置合わせと詳細な位置合わせの2段階で行う。2時点の各画像について、それぞれ検出した関節位置を底辺とした矩形領域を設定する。矩形の大きさは、指幅を基準として関節を内包する大きさを仮定して縦30mm、横20mmとした。位置合わせの評価は、画像の相互情報量を用いて行う^[19]。2時点間の画像(baseline画像A, follow-up画像B)の相互情報量 $I(A; B)$ は、AとBの同時確率分布 $p(a, b)$ と周辺確率分布 $p(a)$ と $p(b)$ を用いて次式で定義される。

$$I(A; B) = \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} p(a, b) \log \left(\frac{p(a, b)}{p(a)p(b)} \right) \quad (5)$$

大まかな位置合わせは、関節位置の検出で得られた座標を初期位置として、矩形内の画素値について、2時点間の平均相互情報量が最大となる位置を求める。その時、baseline画像を固

定した状態で，follow-up 画像の中心座標を基準とし，平行移動 ± 10 pixel，回転角度 $\pm 3^\circ$ 変形させる．この操作を相互情報量の変化量が0になるまで繰り返す．詳細な位置合わせは，大まかな位置合わせの結果座標を初期位置として，大まかな位置合わせと同様に，baseline 画像を固定した状態で，移動量，回転角度をパラメータとし，相互情報量の逆数について Downhill simplex method を用いて最適位置を探索する^[19]．

3.7 関節裂隙の定量化

関節の変化量は，抽出された軟骨下骨において，2時点間で共通して抽出された範囲の軟骨下骨間の距離を算出し，その平均値を関節裂隙の評価値として出力する．関節裂隙幅の計測位置は関節腔（Joint span）の60%を基準とした^[11]．計測位置を図7に示す．

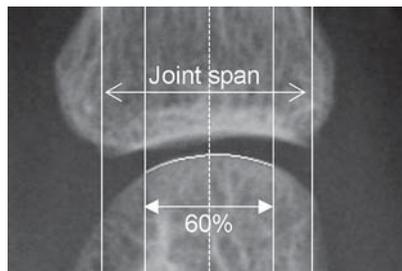


図7 関節裂隙幅の計測位置

4. 結果

本手法を実装した図8に示す評価用ソフトウェアを作成し，北海道大学大学院保健科学研究所の神島保教授よりご提供頂いた14名の2時点で撮影された両手の単純エックス線写真（56手，784関節）を用いて，手領域の抽出，指中心線の抽出，手指関節の検出について適用した．本実験に用いた画像は，指の湾曲や関節裂隙の進行が軽微な症例である．3.2節における閾値 T_E は，判別分析法^[20]などを用いて決定する方法も有効であるが，本実験データの適用において，エントロピー画像内の最大値の50%を採用した場合に，手領域の抽出での成功率が100%であった．そのため，閾値の推定は実施せず固定値として計算量の削減を行った．

本手法の適用結果は，手領域の抽出率100%（56/56），指中心線の抽出率100%（280/280），関節位置の検出率99.7%（782/784）という良好なものであった．関節位置検出の失敗例を図9に示す．軟骨下骨の抽出および関節位置合わせについては，北海道大学にて評価を実施した．これは同じ14名の単純エックス線写真を使用したMCP関節（140組）についての評価で，結果は成功率が66.4%（93/140）と課題の残るものであった．失敗の内訳は，軟骨下骨の抽出が31.4%（44/140），関節位置合わせが0.02%（3/140）であった．



図8 関節リウマチの画像診断支援評価用ソフトウェア

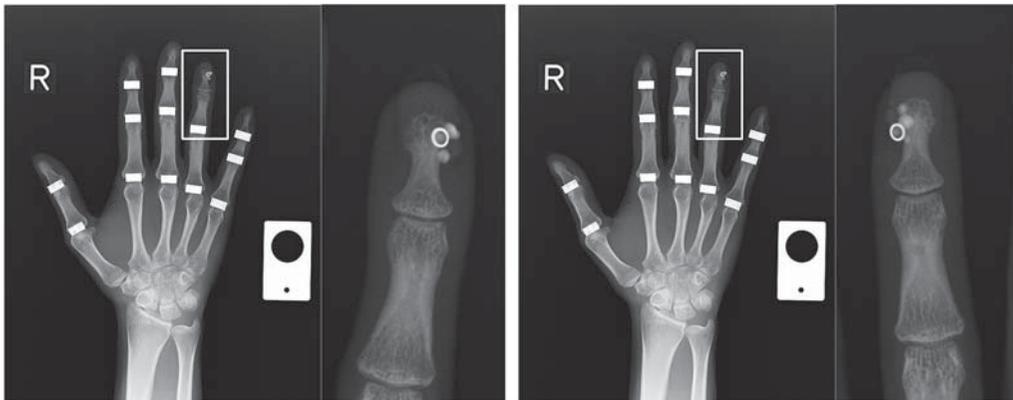


図9 関節位置の検出結果（失敗例）

5. 考 察

本実験の結果から、提案手法を用いることで良好な結果が得られることを示した。手の単純エックス線画像から自動で構造を認識する過程において、失敗した2例は、爪に装飾が施された症例であった。本実験で用いた関節抽出の特徴量は矩形内の輝度勾配の大きさの平均値によって判定されており、装飾の影響によって矩形内の輝度勾配の平均値が関節周辺で緩やかに変化したためと考えられる。これは輝度勾配が矩形内全体で平均化されてしまったことで形状的特徴が評価に反映されていないことが問題であり、例えばHOG^[21]に代表されるような周囲の輝度勾配も含めた特徴量を利用することで改善できると予想される。軟骨下骨の抽出では68.6%の成功率であり、更なる抽出精度の向上が課題である。失敗の主な原因としては、骨輪郭が不鮮明な症例や関節縁に重なりのある症例で正しく輪郭が検出できていないことが挙げられる。また、位置合わせでは、主に母指で失敗が多く、2時点間のねじれ方向の移動に対応できていないことが考えられる。これらの精度向上のためには、周囲の形状や解剖学的な骨の形状を特徴として数値化し、更に、欠損した輪郭情報を補間する手法を検討すべきである。今回の実験で、統一された撮影条件で取得された変化量が小さい症例に対しては、基本的な画像処

理技術の組み合わせで構築された本手法においても、良好な結果が得られることを示した。

今回の実験には含まれなかった、指が湾曲した症例について適用した結果を図10に示す。今後、このような多症例への適用を進め、ロバスト性の高いアルゴリズムの構築を目指す上では、機械学習を取り入れるのが得策であることは言うまでもない。また、本報告では、単純エックス線画像を用いた手法を提案したが、3次元の構造を観察できるCT画像との特徴比較や、早期診断が目的であれば、炎症を観察できるMRI画像や超音波画像との特徴比較など、複数のモダリティ間で比較検証を行うことで、単純エックス線画像を用いた診断支援手法においても新たな指標の提示が可能になると考えている。

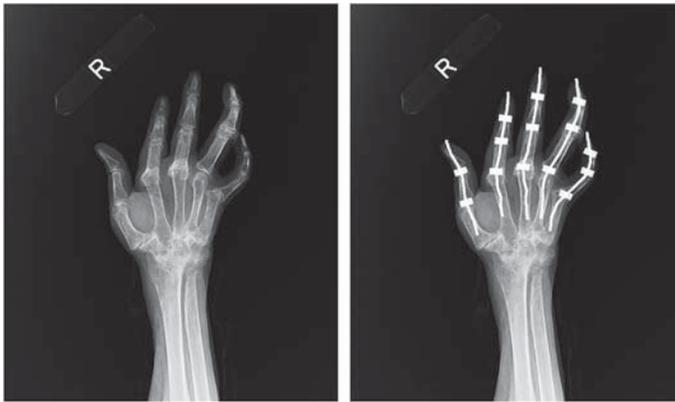


図10 変形を有する症例への適用結果。(左)原画像、(右)結果画像

6. おわりに

本研究は、北海道大学が提案する関節リウマチの関節裂隙評価手法^[12]を基に、利用者が解剖学的な状態や変化を観察できる手法を用いて、関節リウマチの診断や治療の効果を定量的に評価できるシステムの構築を目的としている。本手法を適用したシステムの実現と普及によって、画像診断の質の向上と、治験における効果の定量的な評価の利用に期待している。また、本システムが臨床現場で利用され、より多くの診療情報が蓄積されることによって、新たな評価方法や治療法の発見につながることも期待できる。色情報を持たず、画素に厚みの情報を持つ放射線画像など、一般的な画像とは異なる特性を持ったデータを用いて、対象物の内部構造を認識し状態を評価する技術は、医療情報の利活用のみならず、非破壊検査等様々な分野で活用する技術であり、今後登場する新たなイメージング技術へ迅速に対応するための資産である。

本研究を実施するにあたり、実験のご協力及びご教授頂きました北海道大学大学院保健科学研究院の神島保教授、執筆指導を頂きました日本ユニシス株式会社総合技術研究所の宮村佳典 上席研究員に心より感謝の意を表します。

- 参考文献 [1] Yamanaka H, Sugiyama N, Inoue E, Taniguchi A, Momohara S, “Estimates of the prevalence of and current treatment practices for rheumatoid arthritis in Japan using reimbursement data from health insurance societies and the IORRA cohort (I).”, *Mod Rheumatol*, 24(1), 2014.1, 33-40
- [2] Aletaha D, Neogi T, Silman AJ et al, “2010 Rheumatoid arthritis classification criteria: an American College of Rheumatology/European League against Rheumatism

- collaborative initiative.”, *Ann Rheum Dis*, 69(9), 2010.9, 1580-1588
- [3] Larsen A, “How to apply Larsen score in evaluating radiographs of rheumatoid arthritis in long-term studies.”, *J Rheumatol*, 22(10), 1995.10, 1974-1975
- [4] Sharp JT, Lidsky MD, Collins LC, Moreland J, “Methods of scoring the progression of radiologic changes in rheumatoid arthritis. Correlation of radiologic, clinical and laboratory abnormalities.”, *Arthritis Rheum*, 14(6), 1971.11-12, 706-720
- [5] van der Heijde D, “How to read radiographs according to the Sharp/van der Heijde method.”, *J Rheumatol*, 26(3), 1999.3, 743-745
- [6] Sharp JT, Wolfe F, Lassere M, Boers M, Van Der Heijde D, Larsen A, Paulus H, Rau R, Strand V, “Variability of precision in scoring radiographic abnormalities in rheumatoid arthritis by experienced readers.”, *J Rheumatol*, 31(6), 2004.1, 1062-1072
- [7] 神島保, 深江淳, 「関節リウマチの臨床と画像」, 画像診断, 秀潤社, Vol. 38 No. 7, 2018年5月, 626-629
- [8] 寺沢岳, 山口晋平, 青木隆敏, 「関節リウマチの関節病変」, 画像診断, 秀潤社, Vol. 38 No. 7, 2018年5月, 631-640
- [9] Zielinski B, “Hand Radiograph Analysis and Joint Space Location Improvement for Image Interpretation”, *Schedae Informaticae*, vol. 17/18, 2009.12, 45-61
- [10] Duryea J, Jiang Y, Zakharevich M, Genant HK, “Neural network based algorithm to quantify joint space width in joints of the hand for arthritis assessment.”, *Medical Physics*, 27(5), 2000.3, 1185-1194
- [11] Huo Y, Vincken KL, van der Heijde D, De Hair MJ, Lafeber FP, Viergever MA, “Automatic Quantification of Radiographic Finger Joint Space Width of Patients With Early Rheumatoid Arthritis.”, *IEEE Trans Biomed Eng.*, 63(10), 2016.10, 2177-2186
- [12] Ichikawa S, Kamishima T, Sutherland K, Fukae J, Katayama K, Aoki Y, Okubo T, Okino T, Kaneda T, Takagi S, Tanimura K, “Computer-Based Radiographic Quantification of Joint Space Narrowing Progression Using Sequential Hand Radiographs: Validation Study in Rheumatoid Arthritis Patients from Multiple Institutions.”, *J Digit Imaging*, 30(5), 2017.10, 648-656
- [13] 河内まき子, “AIST 日本人の手の寸法データ”, 産業技術総合研究所, 2012, <https://unit.aist.go.jp/hiri/dhrg/ja/dhdb/hand/index.html> (2019年2月20日確認)
- [14] 小畑秀文, 「モルフロジー」, コロナ社, 1996.11, 12-90
- [15] 加藤敏洋, 平田富夫, 斉藤豊文, 吉瀬謙二, 「ユークリッド距離変換アルゴリズムの効率化」, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J78 D-II No. 12, 1995.12, 1750-1757
- [16] 西田顕郎, 小橋澄治, 水山高久, “数値地形モデルに基づく地震時山腹崩壊斜面の地形解析小橋澄治”, 砂防学会誌, 49巻6号, 1997年3月, 9-16
- [17] John Canny, “A Computational Approach To Edge Detection”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), 1986.11, 679-698
- [18] Joachim Weickert, “Coherence-Enhancing Shock Filters”, *Lecture notes in computer science*, vol. 2781, Springer, 2003, 1-8
- [19] 篠原広行, 伊藤猛, 橋本雄幸, 「医用画像位置合わせの基礎」, 医療科学社, 2011.9, 123-160
- [20] 大津展之, “判別および最小2乗規準に基づく自動閾値選定法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J63-D No. 4, 1980, 349-356
- [21] N Dalal, B Triggs, “Histograms of Oriented Gradients for Human Detection”, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005.7, 886-893

執筆者紹介 高橋 英治 (Eiji Takahashi)

2013年日本ユニシス(株)入社。総合技術研究所にて医用画像を用いた診断支援技術、3次元可視化に関する研究開発に従事。電子情報通信学会(正員)、博士(工学)

