

関節裂隙間距離測定アプリケーションに用いる超解像拡大の有用性の検討 A study on Super-Resolution Image Resolution and Its Application for Patient's Joint Space Distance Measurement

佐野 工起† 森 拓馬† 後藤 富朗† 平野 智† 舟橋 康治‡
Yoshiki Sano Takuma Mori Tomio Goto Satoshi Hirano Koji Funahashi

1. はじめに

関節リウマチは日本で約 5 万 6 千人の人が発症している病気である。症状が進行すると、炎症による関節破壊が引き起こされ、関節裂隙間距離(JSD:Joint Space Distance)が狭くなる傾向がみられる。しかし正確な JSD の測定方法が確立されていないため、目視で確認できるほど狭くならないと病気を発見することができない。そこで、JSD をレントゲン画像から測定できるアプリケーションを開発し関節リウマチの病状を把握することを目指した。本稿では、この関節裂隙間距離測定アプリケーションの測定精度向上のための提案として、超解像拡大手法を用いることを検討する。具体的には、レントゲン画像を超解像拡大法によって高精細に拡大した画像と線形拡大した画像の両方に JSD 測定アプリケーションを用い比較を行う。また比較を行うため、今回は 3D プリンタにより測定用のモデルを作成し、レントゲン撮影を行った画像に対し検証を行う。実験結果より、提案手法である超解像拡大を用いた測定結果が最良の結果となることを確認した。

2. 関節リウマチの概要

関節リウマチとは、骨および軟骨が破壊されることによる関節の破壊変形と身体機能障害をきたす炎症性疾患である。以前は寛解、すなわち一時的もしくは永続的に症状が改善・回復することは難しいとされていたが、発症早期に適切な治療を施すことで寛解が可能であることが昨今の研究によって明らかになっている。そのため、関節リウマチの治療には病状の早期発見が非常に重要となる。関節破壊が進行すると関節裂隙間の距離が狭くなっていくため、関節裂隙間距離を数値として測定することで病状の進行状況を把握することができ、早期発見につなげることが可能となる。

3. アプリケーションのアルゴリズム

本アプリケーションは拡大処理と距離測定処理の 2 つによって構成される。拡大処理において超解像拡大を用いる。本項では超解像拡大と距離測定処理について説明する。

3.1 超解像拡大

超解像拡大処理のアルゴリズムを図 1 に示す。まず Chambolle の射影法を用いた TV 正則化を行うことで原画像を骨格成分とテクスチャ成分に分離する。骨格成分については、Bicubic 法によって 2×2 倍拡大した後に Shock Filter[5] をかける、という処理を 2 回行うことによって 4×4 倍に拡大する。テクスチャ成分については、Lanczos3 法によって 4×4 倍に拡大する。最後にそれぞれの成分の拡大画像を合成することで最終的な拡大画像を得る。実際に超解像拡大を行った結果を図 2 に示す。

†名古屋工業大学 工業研究科 情報工学専攻

‡刈谷豊田総合病院 整形外科

現在、医療現場で主に使用されているレントゲン画像は、一画素が一辺 0.15mm の正方形である、これに対して、関節裂隙間距離はおよそ 1.0 ~ 1.5mm である。これより、仮に測定結果が一画素だけずれた場合、その誤差は関節裂隙間距離全体のおよそ 10 ~ 15% を占めるため、測定精度を上げる必要がある。測定精度を上げるには画像の解像度を上げなければならないが、レントゲン画像は被検者が受ける放射線量の影響を考慮しなければならない、結果として解像度が低くなってしまふ。したがって、高精細に拡大が行える超解像拡大は必要な技術となる。

3.2 Shock Filter

超解像拡大のエッジ強調には Shock Filter を用いる。Shock Filter とは、反復計算により信号のエッジの強調を行うフィルタである。Shock Filter は式 (1) の偏微分方程式に基づき、式 (2) の繰り返し演算によって表せる。

$$u_t = -\text{sign}(\Delta u)|\Delta u| \quad (1)$$

$$u_{i,j}^{(t+1)} = u_{i,j}^{(t)} - \text{sign}(\Delta u_{i,j}^{(t)})|\nabla u_{i,j}^{(t)}|dt \quad (2)$$

ここで u は演算出力画像、 u_t は時刻 t での u の t による偏微分、 dt は Shock Filter の更新演算のステップ幅である。 $|\Delta u|$ は u の勾配強度、 $\nabla u = u_{xx}(u_x)^2 + 2u_{xy}u_xu_y + u_{yy}(u_y)^2$ は u のラプラシアン、 $\text{sign}(x)$ は符号関数で式(3)のように定義される。

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & (x < 0) \\ 0 & (x = 0) \\ -1 & (x > 0) \end{cases} \quad (3)$$

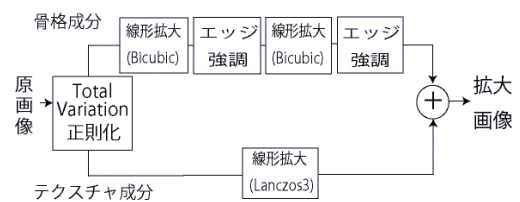


図 1 超解像拡大処理のアルゴリズム



(a) 原画像 (b) 超解像拡大画像

図 2 超解像拡大画像

3.3 距離測定アルゴリズム

距離測定処理では、超解像拡大処理によって鮮明に拡大された画像を入力画像として使用する。測定アルゴリズムを以下に示す。

- I. 関節における上部の骨のエッジ上をマウスによって複数点選択
- II. 選択した画素から関節に応じた座標軸を自動設定
- III. 設定した座標軸を基に選択した画素の座標値をそれぞれ算出
- IV. 算出した座標値を用いて最小二乗法によってフィッティング関数を算出
- V. 補助線に従って下部の骨のエッジに対しても同様に複数点選択後、フィッティング関数を算出
- VI. フィッティング関数の法線および積分演算によって関節裂隙間距離を測定

4. 実験結果

今回、実験として線形拡大を行った画像と超解像拡大を行った画像のそれぞれにおいて JSD 測定アプリケーションを適用し、比較を行った。比較検証を行うための測定画像として、予め設定した距離の幅を持つ関節を模した 3D モデルを設計し、3D プリンタを用いて製作した。そしてその模型をレントゲン撮影し、入力画像とした。製作した 3D モデルを図 3、測定結果を図 4 に示す。

測定結果から、線形拡大画像を用いた測定結果より超解像拡大画像を用いた測定結果の方の精度が高いことが確認できる。また拡大率を大きくすることで測定精度の向上も確認できる。拡大率を 8 倍まで行った理由としては、ディスプレイの解像度を超える画像を表示できないためである。

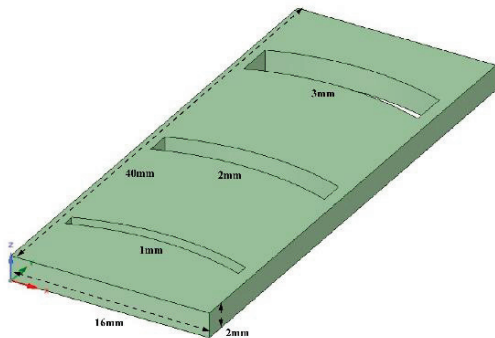


図 3 3D モデル

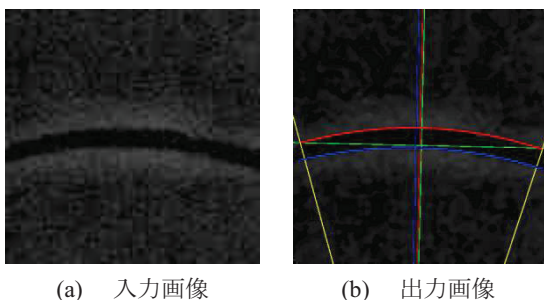


図 4 測定結果画像

5. むすび

本稿では関節リウマチの進行状況を判断する指標の一つとして用いられている関節裂隙間距離を測定するアルゴリズムとそのアプリケーションを提案し、その測定精度に関する検証を行った。本アプリケーションでは、Chamolle の射影法および Shock Filter からなる超解像手法を用いることで、低解像度のレントゲン画像を鮮明に拡大した。また、この拡大画像を用いて関節裂隙間距離を測定するアルゴリズムを Matlab を用いて実装した。関節裂隙間距離測定アルゴリズムは、関節のエッジ曲線上をマウスによって複数点選択し、その選択した画素の情報からエッジ曲線を関数で表現し、さらに曲線の頂点における法線を算出するものである。実験において線形拡大画像と超解像拡大画像の両方にアプリケーションを用い距離を測定した。予め距離を測定した 3D モデルのレントゲン画像を測定することにより、超解像拡大の有用性を検証した。その結果、超解像拡大による距離測定精度の向上を確認した。また、拡大率として 8 倍による測定が最も高精度であることを確認した。

今後の課題としては、本稿で提案したアルゴリズムでは、エッジ検出の際、関節の曲線上を数点マウスによって手動選択する必要があるため、ユーザ側の操作が必要であるため、ユーザによって測定結果に誤差が生じる可能性がある。そのため関節のエッジの自動認識による関節裂隙間距離測定アルゴリズムの自動化が求められる。また、本アプリケーションの病院などでの診断の使用を視野に入れ、医師がより直感的に操作できるユーザインターフェースの開発が必要である。

参考文献

- [1] 竹内勤, 関節リウマチ治療実践バイブル, 南江堂, 2013.
- [2] 山前邦臣, リウマチの知識と治療法, 日東書院, 2007.
- [3] A. Chambolle, "Total Variation Minimization and a Class of Binary MRF Models", *In Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.136-152, 2005.
- [4] L.L.Rubin, S.Osher and E.Fetami, "Nolinear Total Variation Based Noise Removal Algorithm", *Physica D*, Vol.60, pp.259-268, Nov.1992.
- [5] S. J. Osher and L. I. Rudin, "Feature-Oriented Image Enhancement Using Shock Filters", *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol. 27, pp. 310-340, 1990.

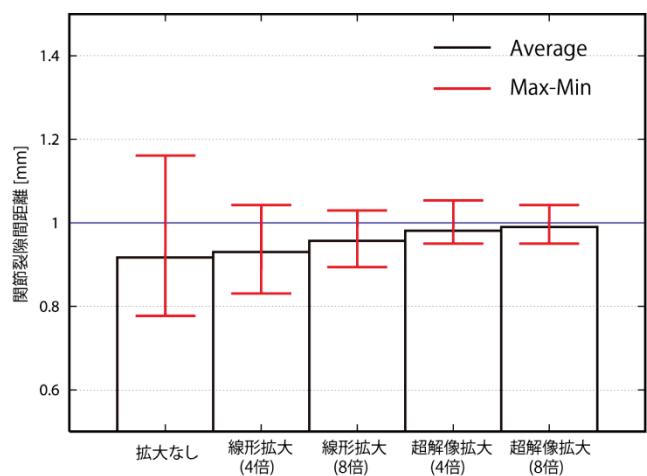


図 5 測定結果