

医用画像における圧縮センシングの現状と課題

岡田 知久* 藤本 晃司* 伏見 育崇*
山本 憲* 富樫 かおり*

* 京都大学大学院医学研究科 画像診断学・核医学

概要. 医用画像分野での技術進歩は多岐にわたるが、サンプリングそのものを短縮する技術は応用範囲が広く、その波及効果には多大である。データ収集時間が短縮されることで異なる多様なデータが収集可能となる。さらにそれらを統合することにより、画像から生理や病態への新たなアプローチも可能となりうる。圧縮センシングという新たな技術に加えて、他のデータ処理手法との相乗効果により開拓しうる医用画像技術の今後の発展と社会的影響は多大である。現状を解説するとともに今後の展望に関する私見を提示する。これを端緒として、医用画像分野における研究が進展することを期待する。

Compressed sensing in medical imaging: Current status and its future

Tomohisa Okada* Koji Fujimoto* Yasutaka Fushimi*

Akira Yamamoto* Kaori Togashi*

Diagnostic Imaging and Nuclear Medicine,
Kyoto University Graduate School of Medicine.

Abstract. Rapid sampling enabled by compressed sensing can be applied to virtually any data sampling. Even limited to the field of medical imaging, there are many sorts of modalities and contrasts that are clinically useful. Data acquisition time or imaging scan is usually very long, and available information is often limited. Therefore, reduction of the sampling time enable to image with higher resolution and various contrasts. It would contribute more accurate and detailed analysis that includes collaboration with different types of data processing methods. It would lead to a new diagnostic method, which may invoke large impacts on medicine and social welfare. Current status of compressed sensing in medical imaging is reviewed, and future prospective would be presented and discussed.

1. 医用画像の現状

ヒトを対象とした医用画像では、少しでも高い解像度とより明瞭な病変コントラストが必要となる。しかし通常解像度はミリメートル単位であり、病変や病態を強調する多様なコントラスト画像は得られない場合が多い。診断が確定される病理画像ではミクロン単位で組織が観察可能であり、画像と病理とには大きな差がある。例えば脳血管一つをとってみても、0.1mm 程度の直径の血管画像を正しく描出できれば、脳血管障害発症予備群の今後を予測して発症を防止・遅延させる治療や生活習慣改善の指導を行うことが可能となる。

しかし医用画像診断の現状は大きく異なり、解像度 0.5mm の脳血管画像を撮像するために、MRI では 10 分以上必要である。他の画像化手法でもそうであることが多いが、この間に一つの画像データを連続して収集している。カメラで言えば、シャッターを開いたままである。そのため少しでも動けば、画像がブレてしまい診断に耐えないものとなることが多い。高解像度になり、撮像時間も長くなるほど、これが大きな問題となる。安臥しているとはいえ、健常者でも 10 分間全く動かないでいるのは必ずしも容易ではなく、患者ではより困難となる。

その一方で医用画像工学の進歩は著しく、特に MRI では装置の高磁場化(診療では3テスラ、研究用

では7テスラ以上)とアレイコイルによる感度向上、新たな撮像法の開発があり、高解像度化とともに様々なコントラストの画像が撮像可能となってきた。多様なコントラストは病態解明へとより近づける可能性を意味するが、高解像度化と同様の問題が生じる。一つのコントラスト画像の撮像時間を5分としても、これを6種類撮像すればそれだけで30分となる。でもなぜそれほど多くの種類を撮像するのかと言えば、多様な角度から病態を強調した画像が得られ、その特徴が把握しやすいからである。現在活用可能な全てのコントラスト画像を収集して、総合的な画像診断を行うことは理想的だが、現状では困難である。さらに短時間での撮像が可能となれば、健康診断の如くより多くの方により安価に画像検査を提供できるようになり、その社会的影響はより広範囲となりうる。

こうした背景から、現状でも撮像を高速化する様々な方法が活用されているが、圧縮センシングはその多くとは異なる手法であり、今後の発展が大いに期待されている。

2. 圧縮センシングの医用画像への応用

自然画像の多くが適切な処理により疎表現が可能であることが分かっている。例えば風景写真をウェーブレット処理すると上位10%程度のデータのみで、元画像と比較して劣化の非常に少ない画像が表現できることが知られている。圧縮センシングはこの観測対象の疎表現できる性質を利用して、間引き収集したデータから観測対象を推定する枠組みであり、本来の画質を保ちながら撮像時間の短縮(間引き収集)が可能になる(Lustig M, et al. 2007)。疎にサンプリングしたデータに対して、欠損部分に0を挿入してそのまま逆フーリエ変換すると、様々なアーチファクトが生じる。それに対して圧縮センシングでは下記のように、観測データ(b)との整合性を保ちつつ元画像(Y)の疎性を利用した推定を逐次的に行う。

$$Y = \arg \min_Y (\|F_0(X) - b\|_2^2 + \lambda_1 \|X\|_1 + \lambda_2 \|TV(X)\|_1 + \lambda_3 \|W(X)\|_1)$$

(Xが再構成画像、 F_0 が部分逆Fourier変換行列、TVがtotal variation、Wがwavelet変換)

特殊な場合を除き、現実的には画像を完全に再現(復元)することは困難である。ゆえに再構成される画像は正則化項とその重みづけパラメータにより影響を受ける。そこで対象となる画像の特徴や解像度などに合わせたパラメータ最適化、および画質の検証が必要である。

MRIのデータ収集は画像をフーリエ変換した空間(k空間と呼ばれる)上で行われる。等間隔に並んだ格子状の各点に相当するデータを収集するケースが多いが、特定の1方向への収集は早く、疎に収集する必要はない(この方向をKxとする)。3次元で考えると残る2つのKy、Kz平面でのデータ収集を疎にすることで撮像の高速化が可能となる。

データサンプリングは必ずしも格子点に沿ったサンプリングである必要はない。例えば3次元のk空間をランダムに収集したものから、格子点のデータを補間してデータを作成して高速逆フーリエ変換を行うことでより効率的にランダムかつ疎に収集できる可能性がある。このように収集法が装置の構造に依存しないMRIではデータ収集の自由度が最も高いが、検出器が円筒状に配列されたCT装置やPET/CT装置やSPECT装置でも同様のサンプリングが可能と考えられる。特にPET/CT装置やSPECT装置では検出器で捉えられる放射線はランダムな現象であり、圧縮センシングに適していると考えられる。

3. 圧縮センシングを中心とした医用画像技術の今後の展開

JPEGをはじめとして、自然画像でもかなりの圧縮・疎表現が可能であることは広く知られているが、疎表現が可能な医用画像の代表に血管画像がある。これは血管内の血液が示す高信号の有無を見ているものであり、極端な例では背景信号はゼロとみなすことができる。造影剤を急速に注入して血管やガンを高信号で示すダイナミック造影と言われる撮像も多用されるが、これも同様である。こうした分野での研究は現在盛んに実施されている。背景に対する血管信号のコントラスト比が高い主要な血管ではデータ収集量が10-20%程度でもフルサンプリングされた画像と遜色ない場合も多い。しかしこれとは異なり、微細なコントラスト変化が重要な医用画像も多い。例えば臨床で頻回に撮像されるT1強調もしくはT2強調のMRI画像では、内部にグレースケールで表される多段階のコントラストが存在する。今後は大幅に疎なデータ収集でありながらも、本来のコントラストを再現可能なデータ再構成法の研究・開発が期待されている。

MRIでは他にも拡散強調画像や血流画像、磁化率強調画像、磁化率移動コントラスト画像、代謝物画像など様々なコントラスト画像が撮像可能である。従来はこうした画像を全て撮像することは困難であったが、疎収集による撮像の短時間化によりそうした状況が実現する可能性が見えてきた。多様なコントラストを包括的に捉えて画像を診断し、病態を把握することは圧縮センシングから派生する新たな課題ではあ

る。診療では多様なコントラスト画像から病態を最もよく表現していると考えられる一つもしくは少数の画像コントラストに注目して診断を行うことも多い。最新の医用画像技術が提供する多くのコントラスト・パラメータの全体像をヒトによる視覚認識では把握しきれない場合も多いと考えられ、客観的かつ包括的な画像診断は重要な課題である。さらに最近 MRI による多様なコントラストを一度に収集して解析しようとする MR finger printing (Ma D, et al. 2013) というデータ収集に CS を適用して、短時間で多くの情報を得る研究も行われ始めている。

3. 構造・動態・機能画像から病態の解明へ

生体内の病理変化は必ずしも明らかな画像変化として検出されるとは限らない。その典型は認知症であろう。脳を構成する皮質や白質の信号自体は健常者と比較して、大きな異常がない場合でも、脳容積は大きく低下している場合が多い。そうした萎縮は軽度ながら広範囲に及ぶ場合もあれば、特定の構造のみが萎縮する場合もある。脳では小さな構造も重要であり、その変性や萎縮を検出することで病態変化を把握出来る場合もある。さらにコントラストに関しても従来のものに加えて、撮像時間が長くデータ収集が困難であった T1 値や T2 値、見かけ上の拡散定数、拡散異方性度などの定量値を含む新たなコントラストが圧縮センシングにより診療でも活用できる可能性が見えてきた。とくに定量値では、ヒトの目では捉えにくい軽微な病理変化が有意な異常として検出される可能性がある。今後は人体という3次元空間でのサイズ変化に対して、コントラスト毎に新たな次元を加えた多次元データをマイニングして病態を解明する新たな方法が期待されている。

変性や萎縮を実用的な時間内で、客観的かつ明瞭に検出できれば、その社会的意義は非常に大きい。それはヒトによる検出の失敗を防ぐとともに、ソフトウェアによる自動検出 (CAD: computer aided detection) の可能性を広げるものである。また正常臓器をそれぞれ同定して抽出 (セグメンテーション) することが可能となれば、臓器の形状モデルからの偏位や容積からの機能推定により、病変検出だけではなく、肝臓や膵臓、腎臓など特定臓器の機能推定への展開が期待される。さらに外科手術のシミュレーションと術後機能の推定と保存にも貢献しうる。

4. まとめ

医用画像の分野でも圧縮センシング技術の可能性は多大である。臨床の視点から提示される問題意識や課題・展望に対して、多角的な視点からの課題や解決策の提案や他の技術との統合、さらにはより発展的な展開が大いに期待される。

謝辞 本発表にあたり、京都大学大学院情報学研究科 田中 利幸 教授、同 佐野 圭 氏に多大なご協力を頂きました。この場をお借りして、感謝の意を表します。

参考文献

- Lustig M, Donoho D, Pauly JM. Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging. *Magn Reson Med*. 2007 Dec;58(6):1182-95.
 Ma D, Gulani V, Seiberlich N, Liu K, Sunshine JL, Duerk JL, Griswold MA. Magnetic resonance fingerprinting. *Nature*. 2013 Mar 14;495(7440):187-92.

参考 URL

- <http://www.eecs.berkeley.edu/~mlustig/CS.html>
http://ranger.uta.edu/~huang/R_CSMRI.htm

著者所属・連絡先

京都大学大学院医学研究科 画像診断学・核医学講座 〒606-8507 京都市左京区聖護院川原町 54
 岡田 知久: tomokada@kuhp.kyoto-u.ac.jp
 藤本 晃司: kfb@kuhp.kyoto-u.ac.jp
 伏見 育崇: yfushimi@kuhp.kyoto-u.ac.jp
 山本 憲: yakira@kuhp.kyoto-u.ac.jp
 富樫 かおり: ktogashi@kuhp.kyoto-u.ac.jp