

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：32610

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K09069

研究課題名（和文）圧縮センシングを用いた新しいSPECT画像再構成法の開発

研究課題名（英文）Development of compressed sensing based iterative reconstruction for SPECT image

研究代表者

松友 紀和（Matsutomo, Norikazu）

杏林大学・保健学部・講師

研究者番号：90781237

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,200,000円

研究成果の概要（和文）：圧縮センシングは、不十分なサンプル数のデータから元の画像を復元する技術であり、放射線分野では撮像時間短縮や被ばく線量低減が期待されている。本研究では、SPECT画像再構成に圧縮センシングを応用した新しい画像再構成法を開発し、撮像時間の短縮が可能か検証した。その結果、理論上必要である投影データ数を1/3まで減少させることが可能であった。また今回開発した画像再構成法に非対称データを取得するオフセットサンプリング法を加えることで、投影データ数を限界であった1/3からさらに1/10にまで減少可能であり、この方法を応用することで超短時間SPECT撮像の可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

虚血性心疾患や認知症、パーキンソン病などの診断に広く用いられているSPECT画像は、非常に少ない信号量で構築されるため、診断に適した画像を得るために撮像時間が長くなるという欠点を持つ。撮像時間を短くすることは患者の利便性を向上させるが、その結果として画質が大きく劣化することになる。本研究で開発した画像再構成法は画質を低下させることなく撮像時間を1/10まで短縮することが可能であり、患者の利便性のみならず検査をより価値あるものにできたと考える。

研究成果の概要（英文）： Compressed sensing (CS) is a signal processing technique that was initially proposed for sparse signal recovery. We developed CS-based iterative reconstruction from under-sampled projection data in SPECT, and evaluated the quality and quantification of SPECT images obtained by CS-based iterative reconstruction (CS-IR) using digital mathematical and striatal numerical phantoms. As a result, CS-IR could allow a reduction in the number of projections without decreasing the image quality and quantification, could help to reduce overall acquisition time in SPECT imaging.

研究分野：放射線技術学

キーワード：圧縮センシング 画像再構成法 核医学 放射性同位元素 オフセットサンプリング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

虚血性心疾患や認知症、パーキンソン病などの診断に広く用いられている SPECT 画像は、被検者の周りを検出器(シンチカメラ)が回転して収集した投影データを画像再構成することで得られる。一般に投影データの数は、60 から 120 方向が用いられているが、SPECT 画像は非常に少ない信号量で構築されるため、投影データあたりの撮像時間を長く設定する必要がある。そのため、投影データ数が増えることで検査時間が長くなるという欠点を持つ。また、検査時間を短くするために投影データを少なくした場合は、得られる画像全体の信号量が低下するため、画像ノイズの増加やアーチファクトの発生を招くことが知られている。

撮像時間(検査時間)の短縮に関する研究は、統計学的に画像再構成を行う逐次近似画像再構成法を中心に進められてきたが、その効果は限定的であった。画質と撮像時間はトレードオフの関係にあり、これらを両立させるためには逐次近似画像再構成法に加え、更なる工夫が必要である。そこで画像圧縮技術の 1 つである圧縮センシングに着目した。

圧縮センシングは、不十分なサンプル数のデータから原信号を復元する技術であり、撮像時間の短縮や被ばく線量低減を目的に MRI や CT への応用が行われている。しかし、圧縮センシングを SPECT 画像再構成に応用した報告はない。この圧縮センシングを SPECT 画像再構成に応用できれば撮像時間の大幅な短縮が可能となり、患者の利便性のみならず核医学検査をより価値あるものにできると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、画像圧縮技術の 1 つである圧縮センシングを応用した新しい SPECT 画像再構成法を開発し、その有用性と可能性を明らかにすることである。

3. 研究の方法

(1)SPECT 画像再構成に対する圧縮センシングの適応

放射線技術における圧縮センシングの応用は、MR や CT で進められており、SPECT 画像への応用は報告されていない。そこで、圧縮センシングが SPECT 画像再構成に使用できるか検証した。対象はコンピュータシミュレーションにより作成した幾何学的デジタルファントムとした。圧縮センシングにはトータルバリエーションを用い、逐次近似画像再構成法のひとつである最尤推定-期待値最大化(ML-EM)法に組み込みことで圧縮センシング応用 SPECT 画像再構成アルゴリズム(TV-recon 法)を構築した。TV-recon 法の特性を評価するため、対象データの画像再構成を TV-recon 法と従来の画像再構成法であるフィルタ補正逆投影(FBP)法で行い、得られた画像から空間分解能(半値幅;FWHM)、均一性(変動係数;%CV)、濃度直線性を評価した。

(2)圧縮センシング応用 SPECT 画像再構成による短時間撮像

短時間撮像を目的に投影データ数を 30, 45, 60, 90, および 120 と変化させたファントムデータを作成し、TV-recon 法の有効性を評価した。対象データは、幾何学的デジタルファントムとドパミントランスポータシンチグラフィを模した線条体デジタルファントムで、線条体デジタルファントムは、正常と異常パターンを想定するため線条体のデジタル値を 800 と 400 に設定した(脳実質は 100 に設定)。投影データ数を変化させたデジタルファントムの画像再構成を TV-recon 法と FBP 法で行い、画質の指標である空間分解能(半値幅;FWHM)と均一性(変動係数;%CV)とドパミントランスポータシンチグラフィの定量指標である特異的結合比(specific binding ratio: SBR)を比較した。

(3)非対称データサンプリング(オフセットサンプリング)を用いた超高速 SPECT 撮像

一般に SPECT 撮像では、投影データを 360 度で等間隔に取得するため、対向するデータが存在することになる。オフセットサンプリング法は、対向データが存在しないように間隔をずらして投影データを取得するため見かけの投影データ数が増加し、画質が向上するとされている。この特性とこれまでに開発した圧縮センシング応用逐次近似画像再構成法を組み合わせることで、さらに少ない投影データ数で SPECT 画像の構築ができる可能性がある。そこで、圧縮センシング応用逐次近似画像再構成法に投影データを非対称に取得するオフセットサンプリング法を加えたプログラムを構築して、その有用性を検証した。

対象はシミュレーションにより作成した線条体ファントムで、投影データ数 360、ピクセルサイズ 3.33 mm、低中エネルギー汎用型コリメータ、散乱線と減弱なしの条件で投影データを作成した。次に、投影データ数が 8, 15, 30, 45, 60, 90 となるように等間隔に間引いたデータ(on-set)と投影データが対向位置に存在しないように間引いたデータ(off-set)を作成した。画像再構成は TV-recon 法で行い、得られた再構成画像から均一性(%CV)、線条体の特異的結合比(specific binding ratio: SBR)を算出して比較した。

4. 研究成果

(1)SPECT 画像再構成に対する圧縮センシングの適応

表 1 に FWHM, %CV, および濃度直線性の結果を示す。投影データ数は画像再構成の理論上必要な 120 とした。FWHM は FBP 法で 10.6 mm, TV-recon 法で 11.6 mm と両法間に有意差は見られなかった。一方、%CV は FBP 法で 10.2%, TV-recon 法で 4.3% となり、TV-recon 法を用いること

で均一性は大きく向上した。

一般に空間分解能と均一性は相反する関係にあるため、画像技術では両者のバランスが重要となる。TV-recon 法では FBP 法に比較して空間分解能を保持したまま、均一性が向上していることから理想的な手法であると言える。また本結果は先行研究と同様の傾向であり、本研究で構築した画像再構成アルゴリズムの妥当性が示されたと考える。また、濃度直線性についても良好な結果が示された。濃度直線性は、シミュレーションで設定したデジタル値と画像再構成後の画素値の関係を示しており、画像を構築する上で重要な要素となる。TV-recon 法を用いた場合の濃度直線性は、解析的手法である FBP 法と同じ結果を示したことから圧縮センシングを SPECT 画像再構成に使用しても問題はないと考える。空間分解能と均一性の結果と合わせて、逐次近似画像再構成法に圧縮センシングを組み込む手法は、SPECT 画像再構成に適応可能であり、さらに SPECT の画質と定量性を向上させると結論付けた。

表 FWHM, %CV, および濃度直線性

	空間分解能	均一性	濃度直線性	
	FWHM(mm)	%CV(%)	傾き	相関係数
FBP法	10.6	10.2	0.90	1.0000
TV-recon法	11.6	4.3	0.92	0.9997

(2) 圧縮センシング応用 SPECT 画像再構成による短時間撮像

投影データ数を変化させた場合の FWHM, %CV, および SBR をそれぞれ図 1, 図 2, 図 3 に示す。FBP 法の FWHM は投影データ数を減少させることで変動し、緩やかな上昇傾向を示した。一方、TV-recon 法では投影データ数を減少させても FWHM に変化は認められなかったが、FBP 法よりも高値を示した。均一性の指標である %CV は、投影データ数を減少させることで増加した。しかし、TV-recon 法による %CV の変化は FBP 法に比較してゆるやかであり、すべての投影データ数で TV-recon 法が FBP 法よりも低値を示した。投影データ数 120 (理論的な理想数) に対して FBP 法を使用した場合と同等の %CV を示した投影データ数は 40 から 60 であり、TV-recon 法を用いることで投影データ数を半分にしても均一性を保持できることが明らかになった。

SBR はパーキンソン症候群の診断やレビー小体型認知症とアルツハイマー型認知症の鑑別に用いられる指標であり、臨床的に重要な意味を持つ。投影データ数を減少させても SBR に明らかな変化は認められなかった。また、FBP 法と TV-recon 法の SBR に有意差は認められなかった。前述した空間分解能の評価では FBP 法の空間分解能がわずかに優れていたが、その差は 1.0 mm 程度であった。今回シミュレーションした線条体のサイズは 30 × 10 mm で、サンプリング定理を考慮すると 1.0 mm 程度の差は無視できると考えられる。また、SBR は線条体と脳実質の比 (コントラスト) として算出される。そのため FBP 法と TV-recon 法の SBR に有意差がなかったと考える。以上のことから、TV-recon 法を用いることで、画質と定量精度を保持したまま投影データ数を従来の 1/3 まで減少

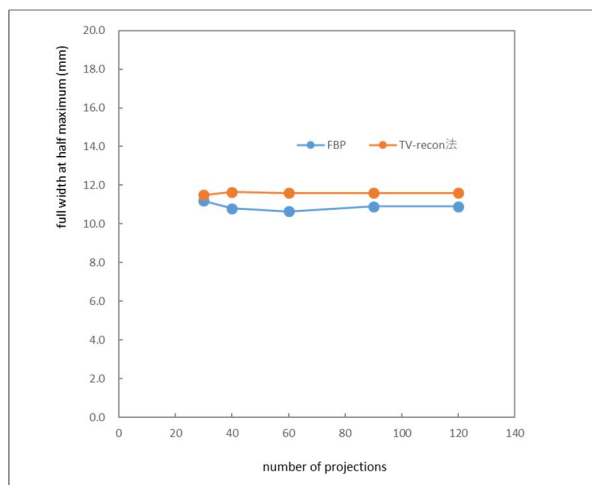


図 1 FWHMの変化

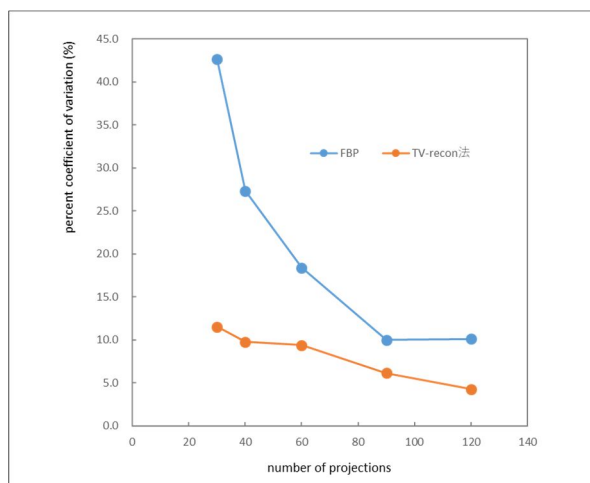


図 2 %CVの変化

させることが可能であると判断した。

図4にFBP法とTV-recon法を用いたSPECT画像を示す。FBP法(上段)では投影データ数を減少させることで線状のアーチファクト(ストリークアーチファクト)が発生し、画像の均一性も低下していることがわかる。しかし、TV-recon法(下段)を用いることでストリークアーチファクトは消失し、均一性も改善していた。視覚的にもTV-recon法の画像が優れており、少数投影データに対する画像再構成としてTV-recon法は有効な手法であると考えられる。

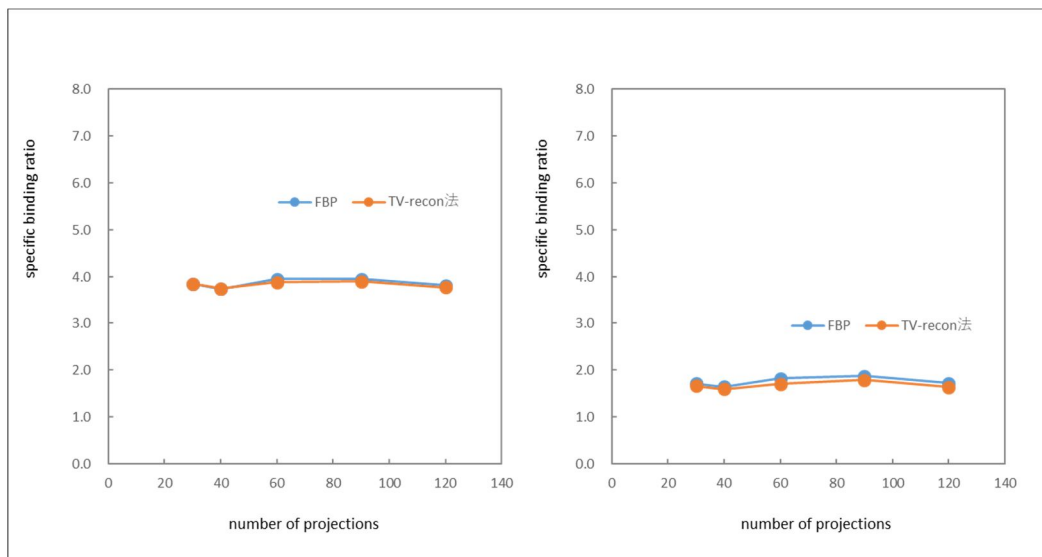


図3 SBRの変化(左:右線条体、右:左線条体)

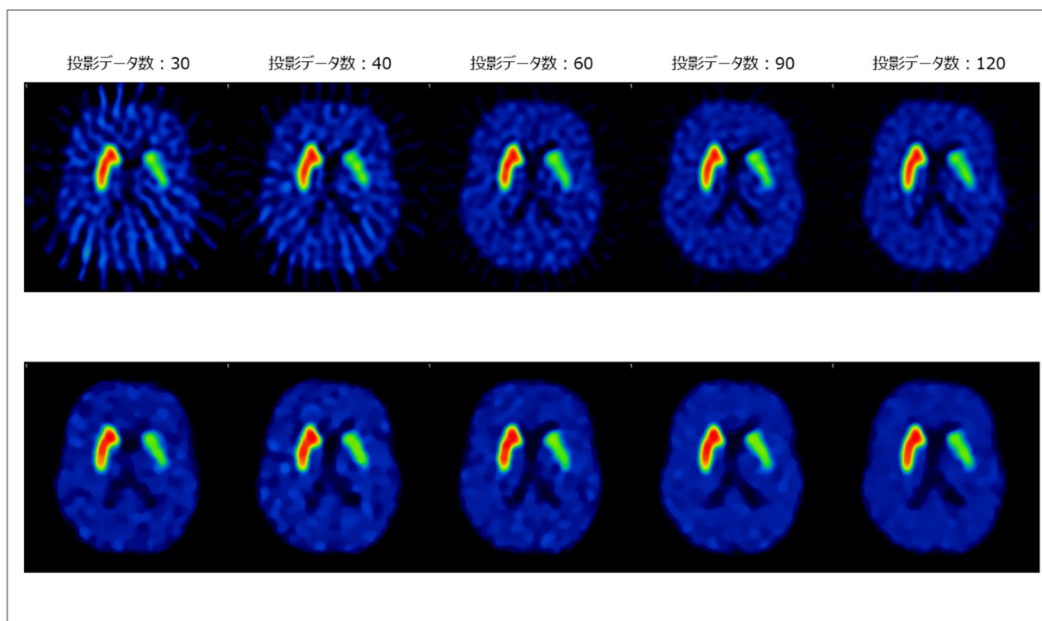


図4 再構成画像の比較(上段:FBP法、下段:TV-recon法)

(3)非対称データサンプリング(オフセットサンプリング)を用いた超高速SPECT撮像

投影データ数を減少させたときの%CVは、すべての投影データ数でoff-setがon-setよりも低値を示し、投影データ数60で9.6%(on-set), 5.7%(off-set), 投影データ数8で25.7%(on-set), 11.6%(off-set)となった。on-setのSBRは投影データ数を少なくすることで低下したが、off-setでは明らかな変化を認めなかった。図5にon-setとoff-setを行った場合のSPECT画像を示す。投影データ数が十分な場合、on-setとoff-setのSPECT画像に明らかな違いは見られなかった。しかし、投影データ数を少なくすることでon-setではアーチファクトが発生し、線条体や形状や輪郭が変化していた。一方、off-setではモアレ状のアーチファクトがみられるものの、わずか8投影でも線条体の形状や輪郭は明瞭に描出されていた。

本研究からSPECT画像再構成に逐次近似画像再構成法に圧縮センシングとオフセットサンプリングを導入することで、画像構築に必要な投影データ数を大幅に減少させることができた。投影データ数を減少させることは総撮像時間の短縮につながる。例えば投影データあたりの撮像時

間を 20 秒とした場合、従来の投影データ数（120）では、総撮像時間が 40 分になる。今回開発した画像再構成法は、投影データ数を 1/10 にすることができるため、総撮像時間を 4 分程度にすることが可能である。総撮像時間の短縮は、患者の拘束時間を短くし、また撮像中の体動による画像の劣化を防ぐことにもつながるため、本手法は臨床的にも価値ある手法と考える。

本研究は挑戦的研究であったため、患者画像は使用せず、シミュレーション画像を対象とした。そのため今後は、臨床データを対象とした検証が必要である。また、今回開発した画像再構成法は脳血流シンチグラフィや心筋血流シンチグラフィなどすべての SPECT 画像に適用可能である。今後は対象（臓器）を広げて検討を行っていく。

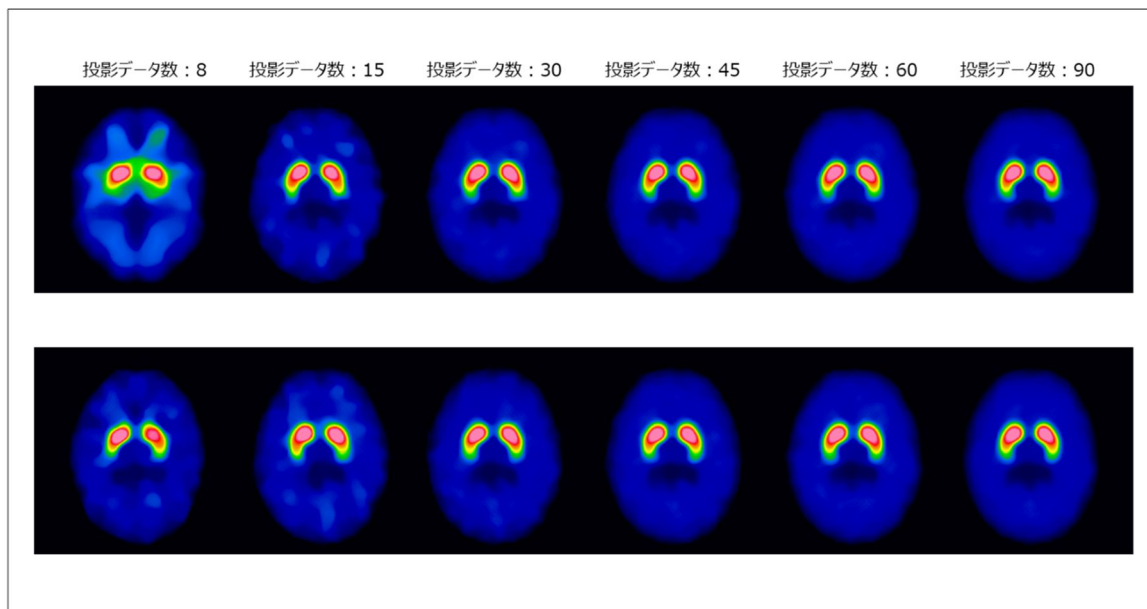


図5 再構成画像の比較（上段：FBP法、下段：TV-recon法）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsutomo Norikazu, Fukaya Kaoru, Hashimoto Takeyuki, Yamamoto Tomoaki, Sato Eisuke	4. 巻 40
2. 論文標題 Performance of compressed sensing-based iterative reconstruction for single-photon emission computed tomography from undersampled projection data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Medicine Communications	6. 最初と最後の頁 106 ~ 114
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1097/MNM.0000000000000938	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Norikazu Matsutomo, Takeyuki Hashimoto, Tomoaki Yamamoto
2. 発表標題 Reduced acquisition time or activity does for 123I-FP-CIT SPECT with compressed sensing-based iterative reconstruction
3. 学会等名 SNMMI 2018 Annual Meeting（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松友紀和
2. 発表標題 Validation of compressed sensing-based iterative reconstruction algorithm in dopamine transporter SPECT
3. 学会等名 26th Digital Image Scientific Research Meeting in Mihara
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松友紀和, 橋本雄幸, 山本智朗
2. 発表標題 オフセットサンプリングと圧縮センシングを用いた少数投影データからのSPECT画像再構成
3. 学会等名 第76回日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	橋本 雄幸 (Hashimoto Takeyuki) (30269542)	杏林大学・保健学部・教授 (32610)	
研究 分担者	山本 智朗 (Yamamoto Tomoaki) (30433600)	杏林大学・保健学部・教授 (32610)	