

先進のデータ解析・情報数理を駆使したCT画像再構成法は新方式CT装置の実現を拓く

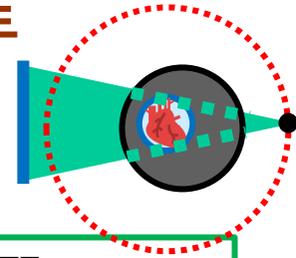
筑波大学 システム情報系
教授 工藤 博幸

2021年10月21日

発表する技術に関する知的財産権

(1) インテリアCT

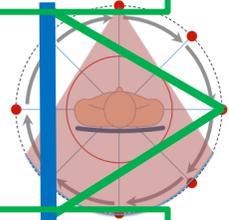
圧縮センシングを用いて少ない
方向数の投影データでCTを実現



- 『インテリアCTの画像再構成方法』発明人:工藤博幸, 根本拓也 出願人:筑波大学,特願2016-71935, PCT/JP2017/5515, 特願2018-508547, 登録6760611 (2016)
- 『Interior CT image generation method(インテリアCT画像生成方法)』発明人:Hiroyuki Kudo 出願人:University of Tsukuba,特願2017-061390, PCT/2018/4603, US,EP,CN,JP出願中 (2017)

(2) スパースビューCT

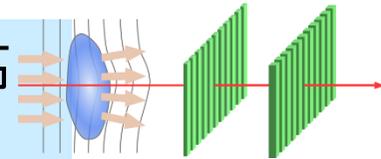
関心領域(ROI)のみにX線を
照射してCTを実現



- 『学習済モデル生成プログラム、画像生成プログラム、学習済モデル生成装置、画像生成装置、学習済モデル生成方法及び画像生成方法』発明人:工藤博幸, 森和希 出願人:筑波大学, 特願2020-042154, PCT/JP2021/6833 (2020)

(3) 干渉縞画像からの位相画像復元

1枚の干渉縞画像だけで高
精度の位相画像を復元



- 『Phase imaging method and phase imaging apparatus using phase imaging method(位相画像撮影方法とそれを利用した位相画像撮影装置)』発明人:Hiroyuki Kudo and Songzhe Lian 出願人:University of Tsukuba,特願2018-111563, PCT/JP2019/23266, US登録済,EP,JP出願中 (2018)

多くはERATO百生量子ビーム位相イメージングプロジェクト,
CREST『情報計測』領域の成果

テーマ1：インテリアCT(ローカルCT)の画像再構成

- (1) インテリアCTとは何か
- (2) インテリアCTの歴史と研究動向
- (3) 2件の特許の新技術

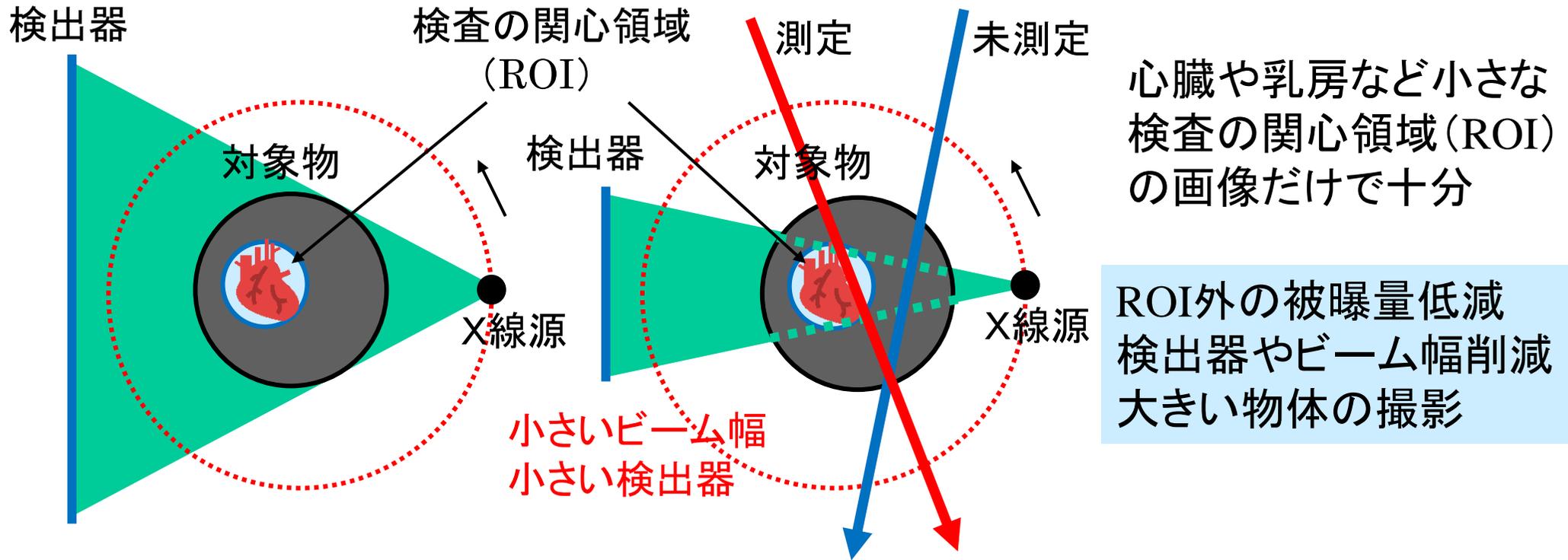


- 『インテリアCTの画像再構成方法』発明人：工藤博幸, 根本拓也 出願人：筑波大学, 特願2016-71935, PCT/JP2017/5515, 特願2018-508547, 登録6760611 (2016)
- 『Interior CT image generation method(インテリアCT画像生成方法)』発明人：Hiroyuki Kudo 出願人：University of Tsukuba, 特願2017-061390, PCT/2018/4603, US,EP,CN,JP出願中 (2017)

(1) インテリアCTとは何か

通常のCT

インテリアCT (ROIだけにX線照射)



☆ マイクロ(ナノ)CTなど小視野を拡大して撮影するCT装置に特に有効

大きな物体の一部拡大撮影, ビーム幅や検出器サイズ削減, 試料損傷低減など

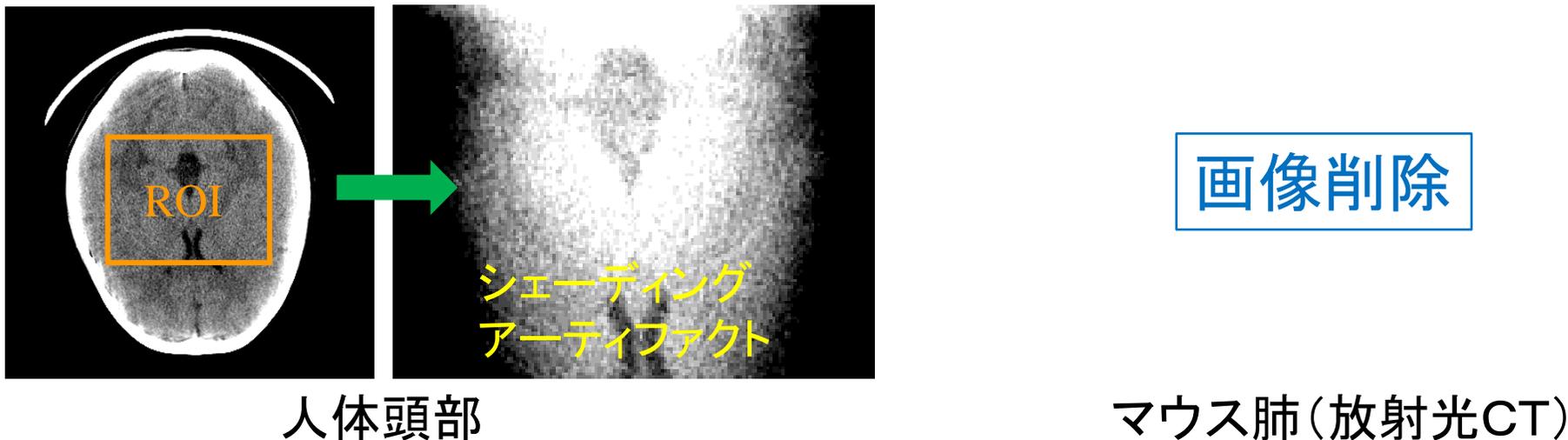
問題の正確な定義 (2007年までCT発明以来35年間の未解決問題だった)

赤線のROIを通過する投影データは全て測定し青線のROIを通過しない投影データは全く測定しない, このデータからROIの画像を厳密に再構成

(2) インテリアCTの歴史と研究動向

- ☆ Nattererの著書『The Mathematics of Computerized Tomography, 1985』にインテリアCTの画像再構成は解が一意に定まらない証明
- ☆ 長年近似解法が研究されてきたが、誤差が発生して実用にならない
欠損データを滑らかな関数で外挿, 逐次近似画像再構成法の適用など

典型的な画質劣化の例



- ☆ 2000年代後半に発表された以下の論文で厳密解法が発見され状況が一変
物体に関するごく僅かな先験情報を用いればインテリアCTの画像再構成は厳密にかつ安定に解けることを示し, その後インテリアCTの研究は厳密解法にシフト

キーである厳密な画像再構成を可能にする従来の先験情報

従来手法1: ROI内部の物体に関する先験情報を使用

Prof. Wangグループ
論文

Hindawi Publishing Corporation
International Journal of Biomedical Imaging
Volume 2007, Article ID 63634, 8 pages
doi:10.1155/2007/63634

Research Article
A General Local Reconstruction Approach Based on a Truncated Hilbert Transform

Yangbo Ye,¹ Hengyong Yu,² Yuchuan Wei,³ and Ge Wang^{2,3}

¹Department of Mathematics, University of Iowa, Iowa City, IA 52242, USA
²CT Laboratory, Biomedical Imaging Division, VT-WFU School of Biomedical Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, USA
³CT Laboratory, Biomedical Imaging Division, VT-WFU School of Biomedical Engineering, Wake Forest University, Winston-Salem, NC 27157, USA

Received 15 May 2007; Accepted 22 May 2007
Recommended by Lizhi Sun

Exact image reconstruction from limited projection data has been a central topic in the computed tomography (CT) field. In this paper, we present a general region-of-interest/volume-of-interest (ROI/VOI) reconstruction approach using a truly truncated Hilbert transform on a line-segment inside a compactly supported object aided by partial knowledge on one or both neighboring intervals of that segment. Our approach and associated new data sufficient condition allows the most flexible ROI/VOI image reconstruction from the minimum amount of data in both the fan-beam and cone-beam geometry. We also report primary numerical simulation results to demonstrate the correctness and merits of our finding. Our work has major theoretical potentials and innovative practical applications.

Copyright © 2007 Yangbo Ye et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

IOP Publishing
PHYSICS IN MEDICINE AND BIOLOGY
Phys. Med. Biol. 53 (2008) 2207-2231
doi:10.1088/0031-9155/53/9/001

Tiny *a priori* knowledge solves the interior problem in computed tomography

Hiroyuki Kudo¹, Matias Courdurier², Frédéric Noo³ and Michel Defrise⁴

¹ Department of Computer Science, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba 305-8573, Japan
² Department of Applied Physics and Applied Mathematics, Columbia University, NY, USA
³ Department of Radiology, University of Utah, UT, USA
⁴ Department of Nuclear Medicine, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium

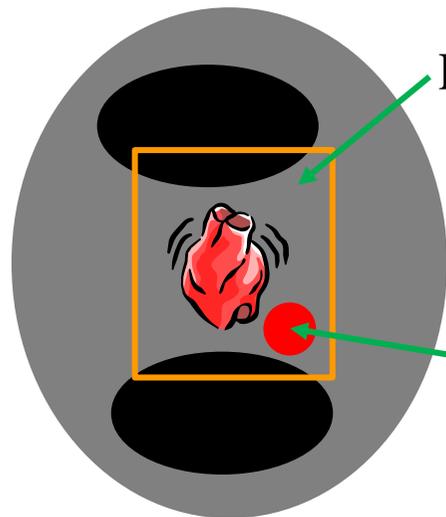
E-mail: kudo@cs.tsukuba.ac.jp

Received 6 February 2008, in final form 14 March 2008
Published 9 April 2008
Online at stacks.iop.org/PMB/53/2207

Abstract
Based on the concept of differentiated backprojection (DBP) (Noo et al 2004 Phys. Med. Biol. 49 3903, Pan et al 2005 Med. Phys. 32 673, Defrise et al 2006 Inverse Problems 22 1037), this paper shows that the solution to the interior problem in computed tomography is unique if a tiny *a priori* knowledge on the object $f(x, y)$ is available in the form that $f(x, y)$ is known on a small region located inside the region of interest. Furthermore, we advance the uniqueness result to obtain more general uniqueness results which can be applied to a wider class of imaging configurations. We also develop a reconstruction algorithm which can be considered an extension of the DBP-POCS (projection onto convex sets) method described by Defrise et al (2006 Inverse Problems 22 1037), where we not only extend this method to the interior problem but also introduce a new POCS algorithm to reduce computational cost. Finally, we present experimental results which show evidence that the inversion corresponding to each obtained uniqueness result is stable.

Kudoグループ
論文

Ye, Yu, Wei, Wang: “A general local reconstruction approach based on a truncated Hilbert transform”, International Journal of Biomedical Imaging, 2007
Kudo, Courdurier, Noo, Defrise: “Tiny *a priori* knowledge solves the interior problem in computed tomography”, Physics in Medicine and Biology, 2008



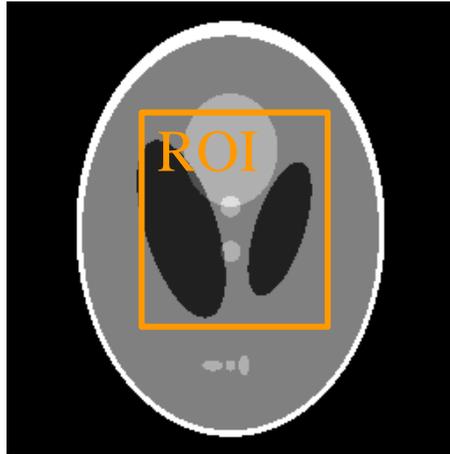
ROI ROI内部に画像の値が既知の先験情報領域(いくら小さくとも良い) B があればインテリアCTの画像再構成の解は一意 (unique) で安定 (stable)

画像の値が既知の先験情報領域 B

このぐらいの先験情報なら簡単に作れる

従来手法2: ROI全体が区分的に一様であることを使用

Yu, Wang: “Compressed sensing based interior tomography”, Physics in Medicine and Biology, 2009



区分的に一様な画像の例

有限個の一定値を持つ領域の組み合わせで構成されていること

ROI全体が区分的に一様 (piecewise constant) であることが既知であれば、インテリアCTの画像再構成の解は一意

画像再構成法

トータルバリエーション (TV, Total Variation) 正則化

$$\underset{\vec{x}}{\text{minimize}} \quad \|\vec{x}\|_{\text{TV on ROI}} \quad \text{subject to} \quad \underline{A} \vec{x} = \underline{\vec{y}}$$

TVノルム

画像 投影データ

区分的に一様な制約条件をかける

(3) 2件の特許の新技術

インテリアCT厳密解法の研究を進め3つの先駆的な画像再構成法を開発

新手法1 ROIの周辺部で区分的一様の先験情報を利用(特許出願,2016)

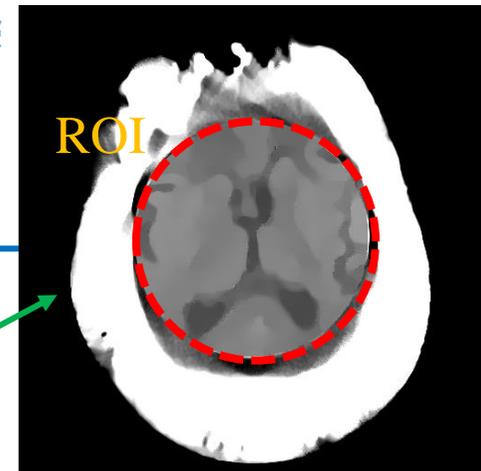
新手法2 部分的な完全投影データを利用する厳密解法(特許出願,2017)

新手法3 ハーフインテリアCT(インテリアCTを突破する新しい測定方法)

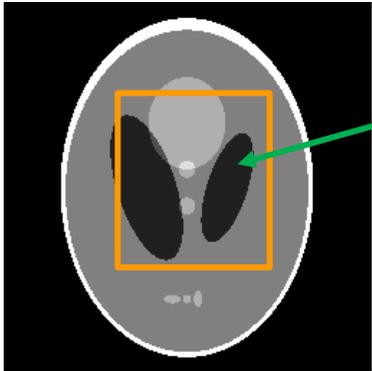
時間の制約から割愛

新手法1: ROIの縁のみが区分的に一様

YuのROI全体の区分的一様性を用いた手法の改良



Yu (2009) の手法



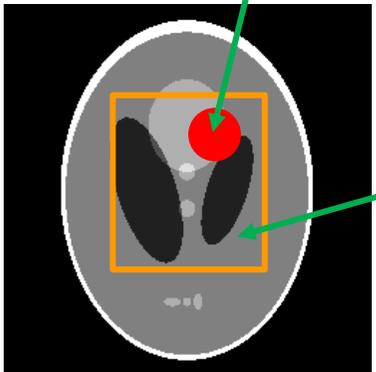
ROI全体が区分的に一様なことが必要
(滑らかな変化やテクスチャーが消滅)

ROI全体が区分的に一様 (piecewise constant) であればインテリアCTの画像再構成の解は一意

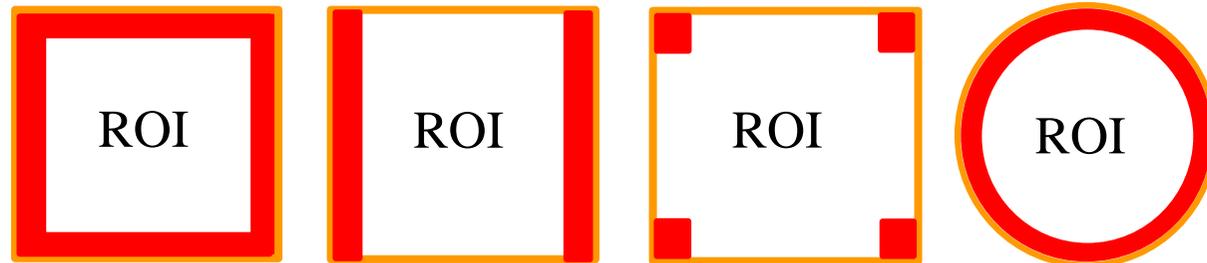
先験情報はもっと緩くなるはず?

新手法1

先験情報領域 B



ROI内の任意小領域 B で区分的一様であれば解は一意に決まることを証明して, ROIの縁のみに区分的一様な制約をかける

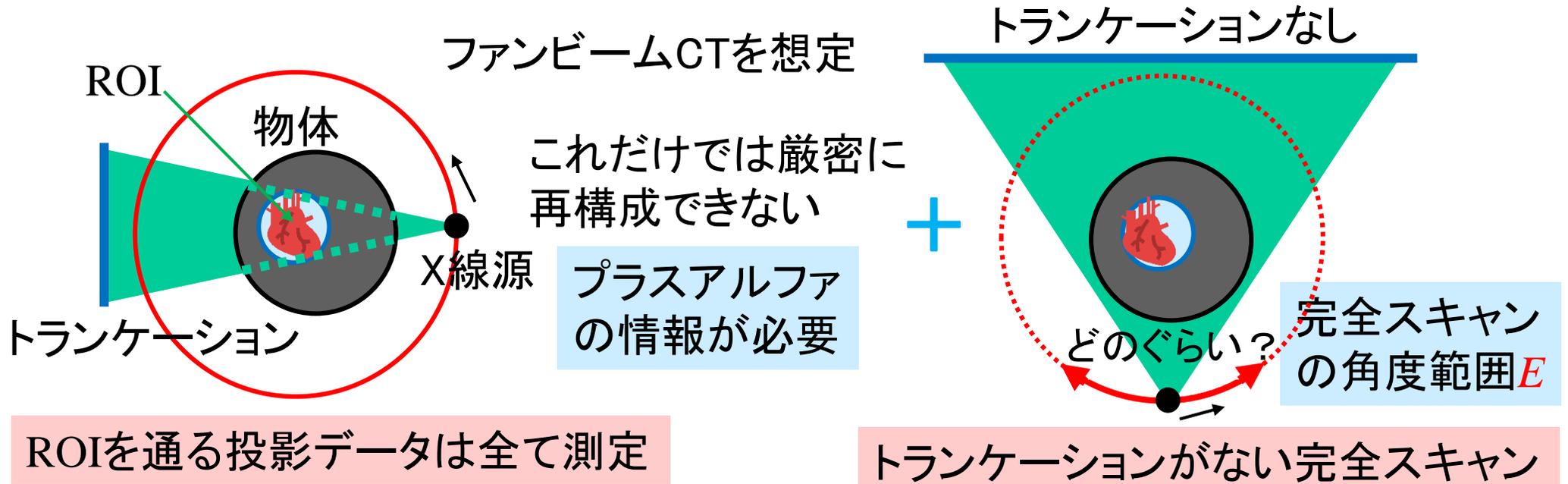


画像再構成は部分トータルバリエーション正則化

$$\underset{\vec{x}}{\text{minimize}} \quad \|\vec{x}\|_{\text{TV on } B} \quad \text{subject to} \quad \underline{A} \vec{x} = \underline{\vec{y}}$$

TVノルム (先験情報領域 B だけにかける) 画像 投影データ

新手法2: 部分的な完全投影データを利用する厳密解法



画像再構成の解を一意かつ安定にするには、完全スキャンの角度範囲 E はどれぐらい必要か？

インテリアCTの投影データに加えて有限角度範囲 E (いくら小さくても良い)の完全スキャン(トランケーションなし)投影データがあれば、インテリアCTの画像再構成の解は一意かつ安定

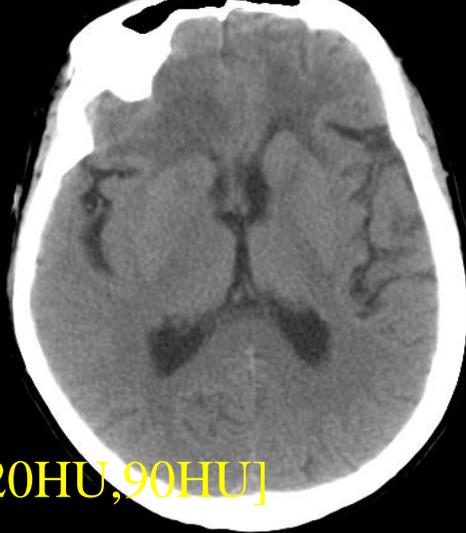
びっくり

物体に関する先験情報を使用しないインテリアCT厳密解法(世界初)

医療用X線CT(頭部)

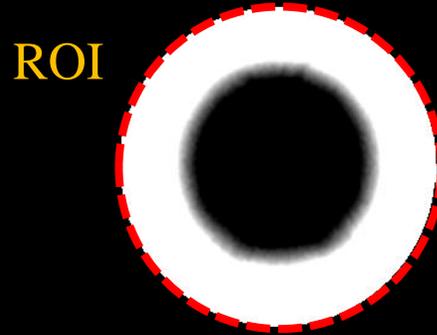
滑らかな濃度変化消失

完全データから再構成

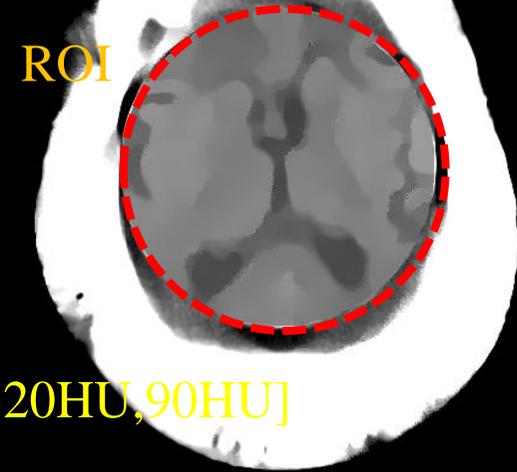


[-20HU,90HU]

従来手法(ローカルFBP法) Yuら(2009)のTV正則化



ROI

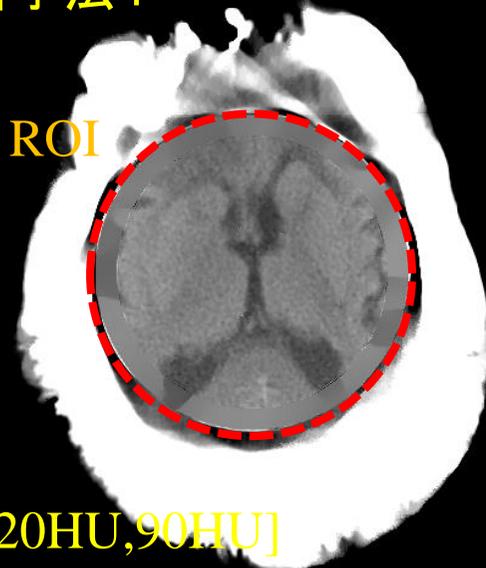


ROI

[-100HU,300HU] DCシフト

[-20HU,90HU]

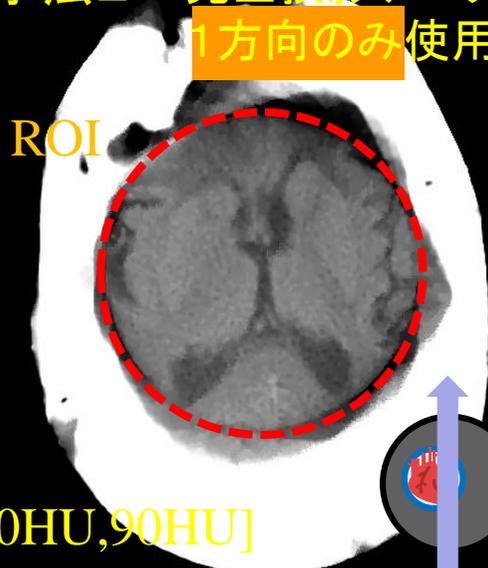
新手法1



ROI

[-20HU,90HU]

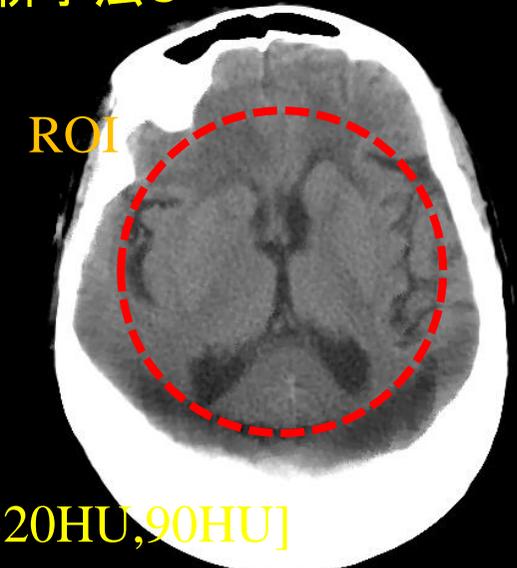
新手法2 完全投影データは1方向のみ使用



ROI

[-20HU,90HU]

新手法3



ROI

[-20HU,90HU]

X線位相CT実データ(ポリマーブレンド試料)

元データ提供:
矢代航准教授
(東北大)

画像削除

腹部CT(ROIが小さい難しい設定)

完全データから再構成



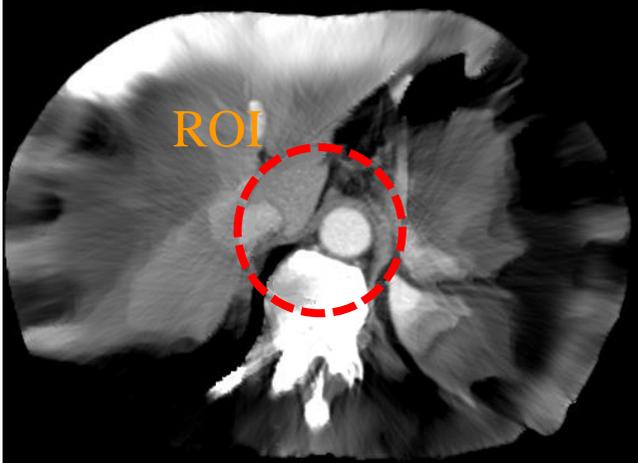
[-100HU,300HU]

従来手法(ローカルFBP法)



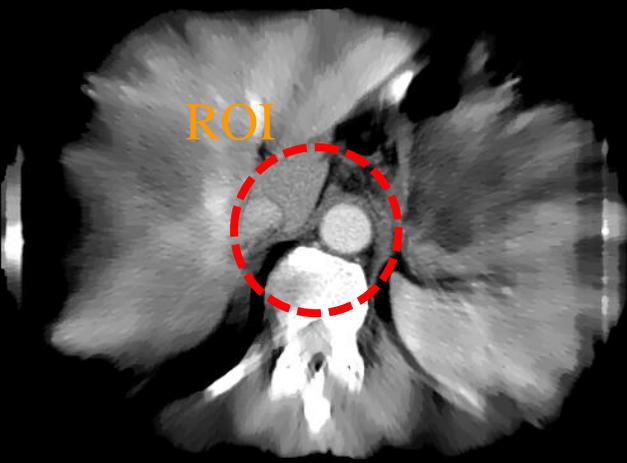
[1800HU,2200HU] DCシフト

新手法1(改良型)



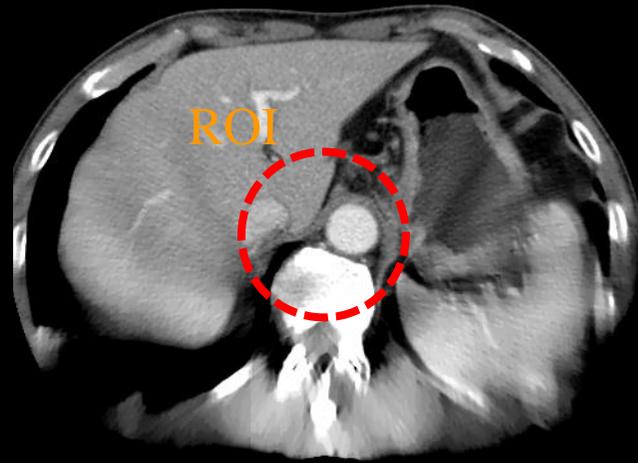
[-100HU,300HU]

新手法2



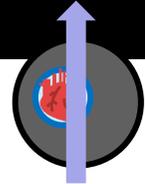
[-100HU,300HU]

新手法3



[-100HU,300HU]

完全投影データは
1方向のみ使用



画像削除

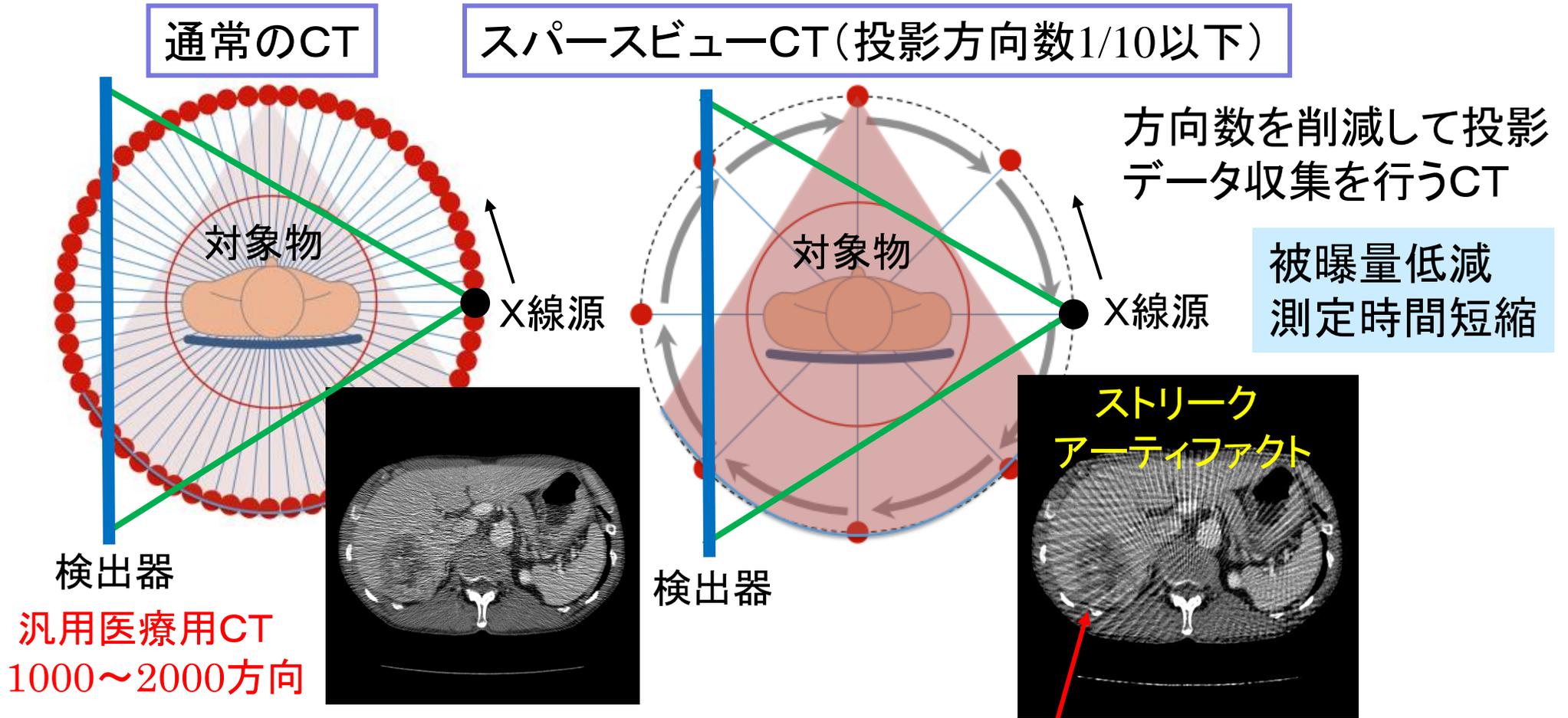
テーマ2: スパースビューCTの画像再構成

- (1) スパースビューCTとは何か
- (2) スパースビューCTの歴史と研究動向
- (3) 特許の新技术: 深層学習を用いた圧縮センシング
画像再構成の画質改善



- 『学習済モデル生成プログラム、画像生成プログラム、学習済モデル生成装置、画像生成装置、学習済モデル生成方法及び画像生成方法』発明人: 工藤博幸, 森和希 出願人: 筑波大学, 特願 2020-042154, PCT/JP2021/6833 (2020)

(1) スパースビューCTとは何か



☆ 投影データ収集に時間がかかる以下のようなCT装置必要性が高い技術

非医療用：マイクロ(ナノ)CT, 放射光CT, 電子線CT, 非破壊検査用CT
医療用：心臓CT, 歯科用CT, アンジオグラフィー他多数

☆ 少ない方向数の投影データから十分な画質の画像を再構成する画像再構成法の開発がキー(フィルタ補正逆投影(FBP)法だとストリークアーティファクト)

(2) スパースビューCTの歴史と研究動向

- ☆ 古くから、有限の投影方向数の画像再構成問題は零空間が存在し解が一意に定まらないことが知られる

Louis: “Ghosts in tomography - the null space of the Radon transform”, Math.Meth.Appl.Sci., 1981

- ☆ 2000年代中盤まで様々な画像再構成法で試みられてきたが、実用化は無理というのが結論

補間して投影方向数を増加，逐次近似画像再構成法の適用など

- ☆ 2000年代中盤にDonohoとCandesらが『圧縮センシング』と呼ばれる不足した測定データから高精度で信号復元を行う逆問題の新解法を発見して、実用できる見通しが出てきた

Donoho: “Compressed sensing”, IEEE Transactions on Information Theory, 2006

Candes, Romberg, Tao: “Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information”, IEEE Transactions on Information Theory, 2006

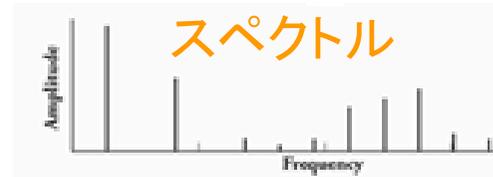
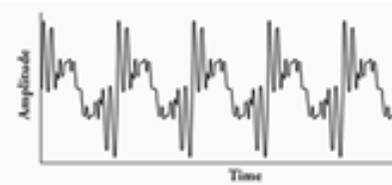
次ページ以降で圧縮センシングの説明

- ☆ その後、圧縮センシングを応用したスパースビューCTの画像再構成に関する膨大な数の研究が行われ、今後多様な分野で実用化・製品化が進む状況

圧縮センシングとは

正則化に信号のスパース性を用いる逆問題解法

楽器音



疎でない信号



sparsify変換 ϕ



疎な信号

自然画像

ゼロ成分が多くなる

信号にsparsify変換 ϕ を施すとゼロ成分が多い
(sparsify変換の後に $L1$ ノルムをとり評価)

最適化問題に定式化

$$\underset{\vec{x}}{\text{minimize}} \quad \underbrace{\|\vec{y} - A\vec{x}\|^2}_{\text{投影データ}} + \beta \underbrace{\|\phi(\vec{x})\|_1}_{\text{画像 } L1\text{ノルム}}$$

- Sparsify変換 ϕ の例
- 天体の画像
恒等変換
 - 自然画像
勾配変換
Total Variation (TV)
 - 楽器音
フーリエ変換

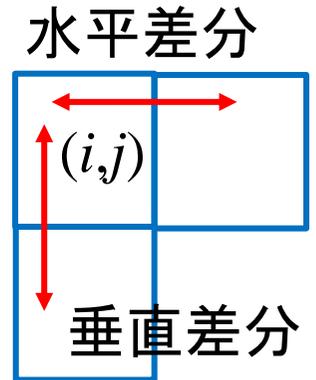
トータルバリエーション (TV, Total Variation)

画像処理に最も良く用いられる

正則化項に、先験情報として画像の **Total Variation (TV) ノルム** を利用

$$\| \vec{x} \|_{\text{TV}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sqrt{\underbrace{(x_{ij} - x_{i+1,j})^2}_{\text{水平方向差分}} + \underbrace{(x_{ij} - x_{i,j+1})^2}_{\text{垂直方向差分}}}$$

エッジを強力に保存しながら画像を滑らかにする効果



TVの画質性能を向上させた我々オリジナルの圧縮センシング手法

非局所 (Non-local) TV

Y.Kim and H.Kudo: “ Nonlocal total variation using the first and second order derivatives and its application to CT image reconstruction ”, Sensors, 2020

第2世代圧縮センシング

Dong, Kudo: “Proposal of compressed sensing using nonlinear sparsify transform for CT image reconstruction”, Medical Imaging Technology, 2016

- ・ テクスチャーや滑らかな濃度変化の再現性
- ・ Staircase (階段状) アーティファクトの低減
- ・ より少ない方向数の投影データで高画質

SPIE Medical Imaging 2017, Honorable
Mention Poster Award 受賞

平成29年度日本医用画像工学会
会田中栄一記念賞 (論文賞)

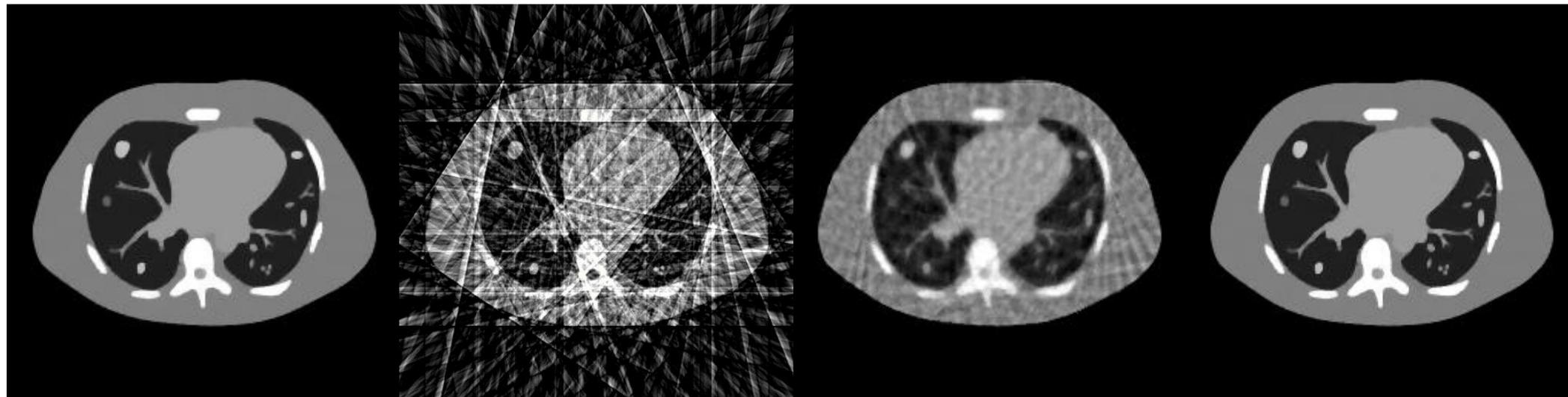
胸部CTシミュレーション(16方向)

原画像

FBP法

ART法

Total Variation



X線位相CT実データ(40方向)

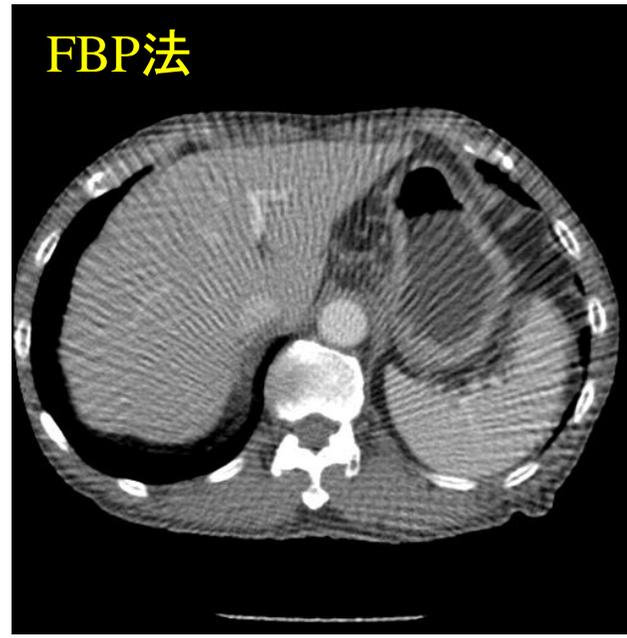
マウス耳小骨標本

元データ提供: 松尾光一教授(慶応大),
百生敦教授・矢代航准教授(東北大)

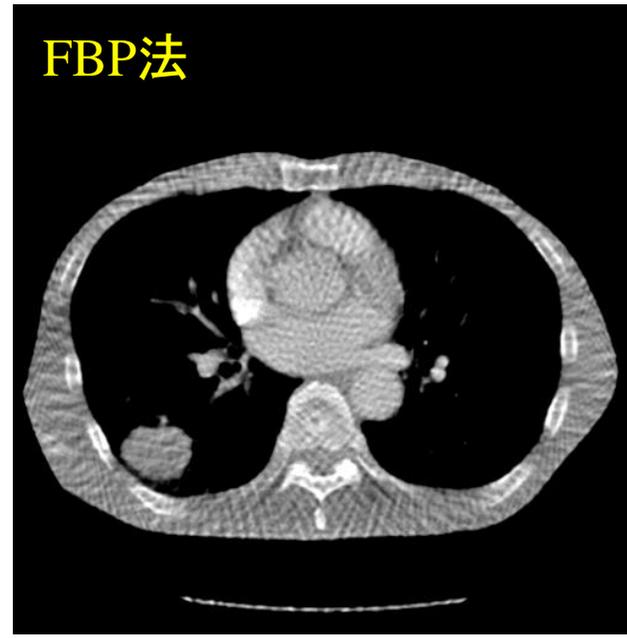
画像削除

医療用CTへの適用例

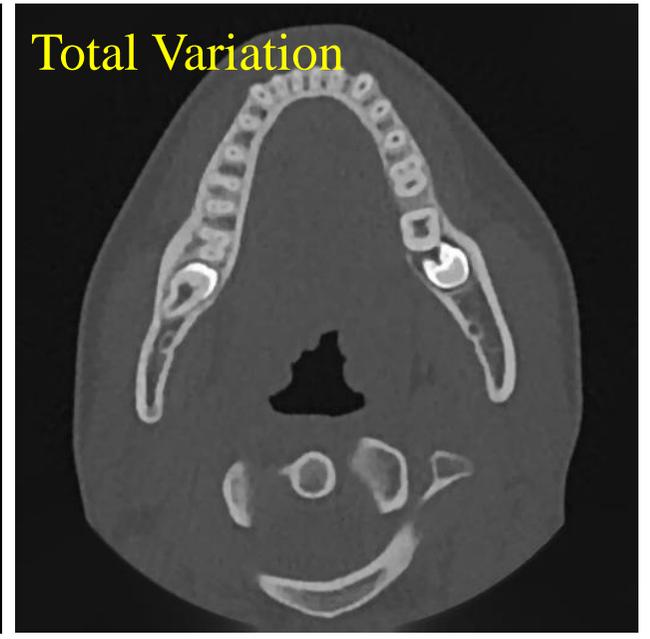
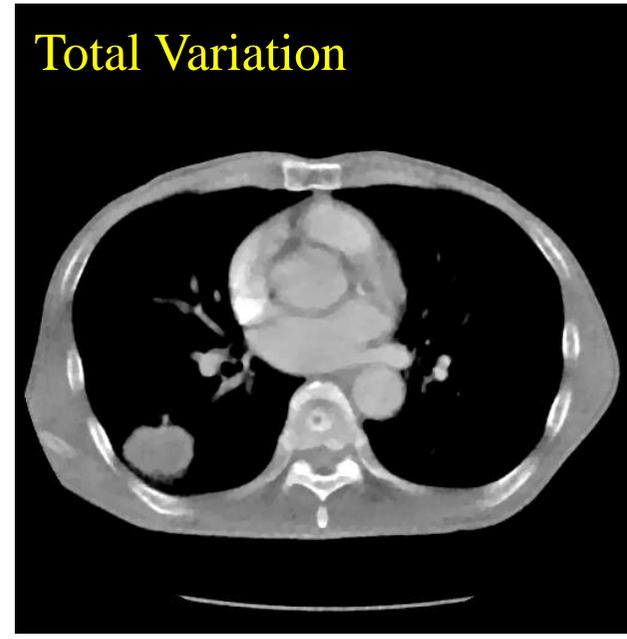
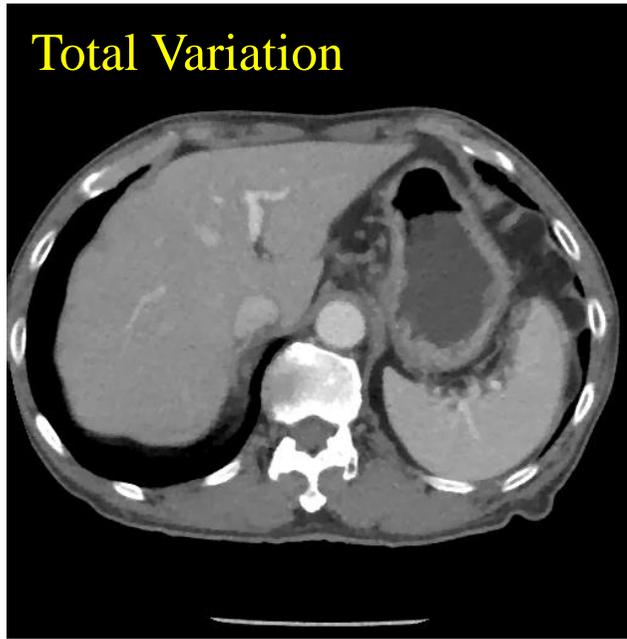
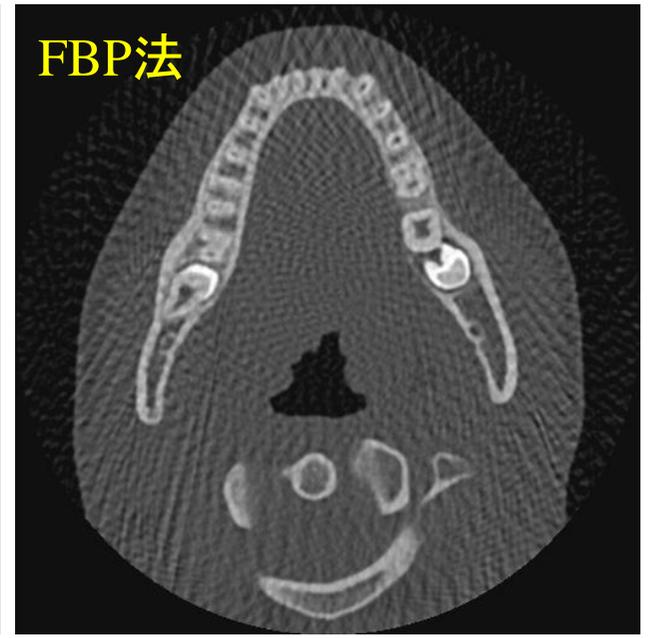
80方向投影データ



64方向投影データ



64方向投影データ



X線位相CT実測投影データの例(ポリマーブレンド試料)

僅か23方向の投影データ

画像削除

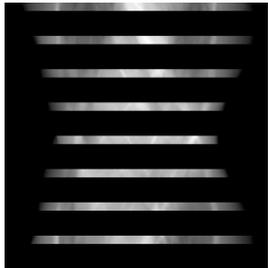
(3) 特許の新技术：深層学習を用いた圧縮センシング画像再構成の画質改善

概要

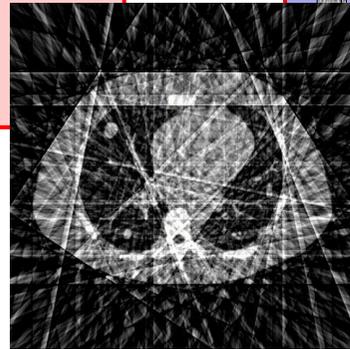
圧縮センシング画像再構成には、Staircase Artifactが発生しやすい、滑らかな濃度変化が消失しやすい、などの問題点がある。深層学習を用いて圧縮センシング画像再構成の画質性能をBoostする手法を考案して、スパースビューCT・低線量CTの画像再構成について劇的な画質改善を得た。

基礎知識：従来の深層学習を用いた低線量CT・スパースビューCTの画像再構成

低線量
投影データ
スパース
投影データ

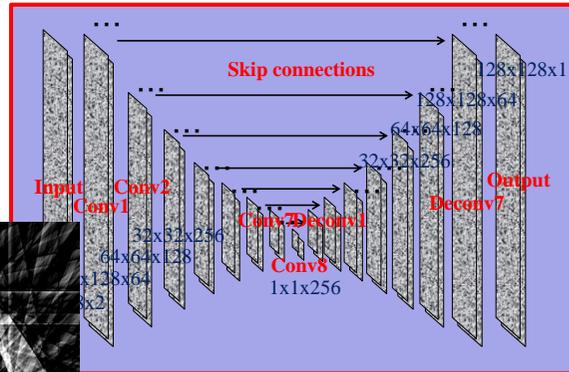


フィルタ補正逆
投影 (FBP) 法
or
逆投影

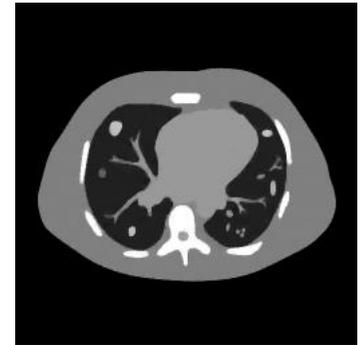


アーティファクトや
雑音があばれた
劣化画像 \vec{y}

畳み込みニューラル
ネットワーク (CNN)



再構成画像 \vec{x}



- U-Net
 - ResNet
 - pix2pix (GAN)
- 画像変換のCNN

☆ CNNの学習

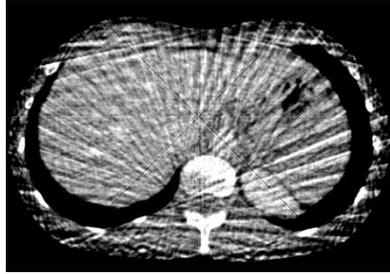
多数の劣化画像 (低画質画像) と正解画像 (高画質画像) のペアが必要 -> **ない**

(多くの研究では) 多数の高画質画像だけを準備して、低画質画像はイメージング過程を計算でシミュレーションして利用

特許の提案手法1

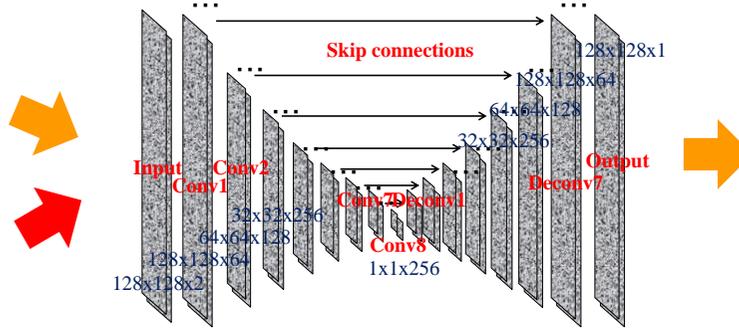
フィルタ補正逆
投影(FBP)法

\vec{y}



2入力・1出力の画像変換CNN

再構成画像 \vec{x}



U-Net, ResNet, pix2pix (GAN)

圧縮センシング再構成

- ・ TV
- ・ 非局所TV
- ・ 非線形フィルタ
正則化

\vec{z}



FBP画像と圧縮センシング画像を組み合
わせてCNNで高画質の画像を合成

学習

$$\underset{\vec{z}}{\text{minimize}} \left\| \vec{p} - A\vec{z} \right\|^2 + \beta \left\| \vec{z} \right\|_{TV} \quad \text{MSE}(\vec{w}, \vec{b}, \beta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\| \vec{x}_i - \text{CNN} \left(\vec{w}, \vec{b} \right) \begin{bmatrix} \vec{y}_i \\ \vec{z}_i(\beta) \end{bmatrix} \right\|^2$$

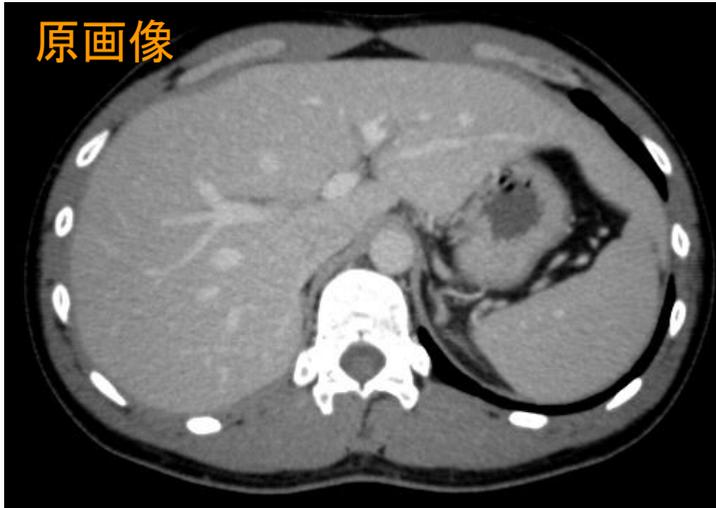
投影データ 画像

CNNパラメータ(重みwとバイアスb)と圧縮センシング再構成の正則化パラメータ β は学習データを用いて損失関数を最小化して自動決定

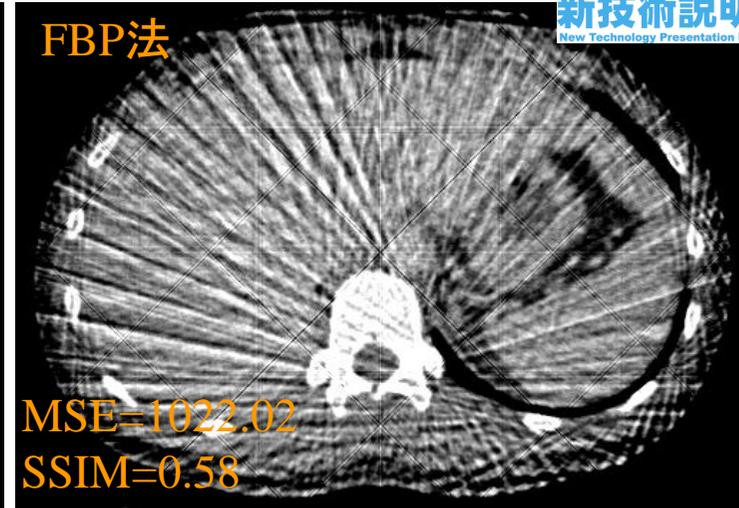
パラメータ決定の問題はほぼ解決(自動推定)

スパーズビューCT
の再構成例1 (64方
向投影データ)

原画像

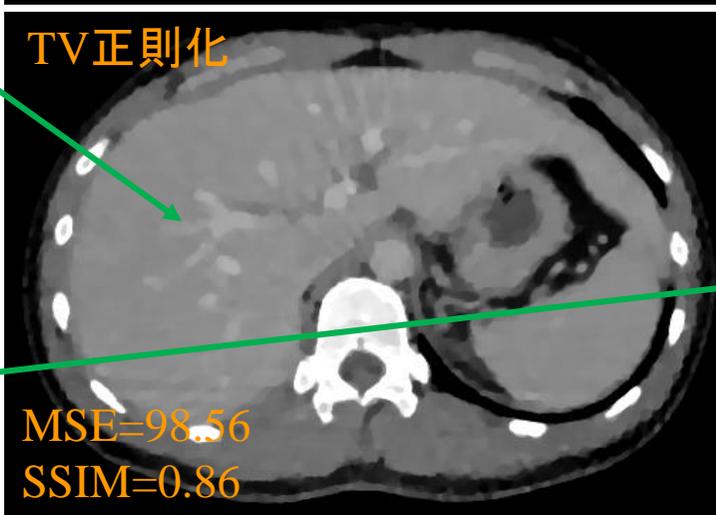


FBP法

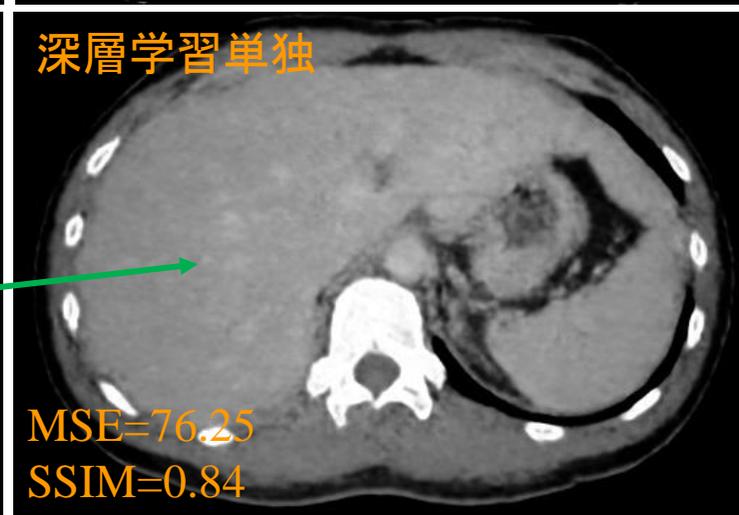


Staircaseアーティファクト
滑らかな濃度変化消失

TV正則化



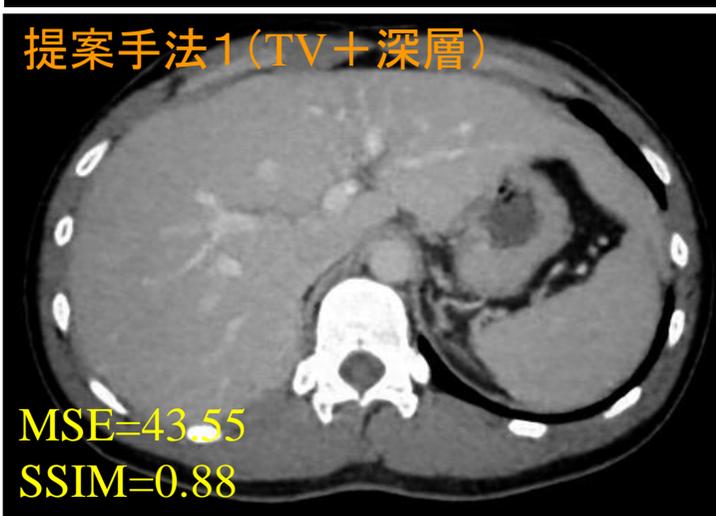
深層学習単独



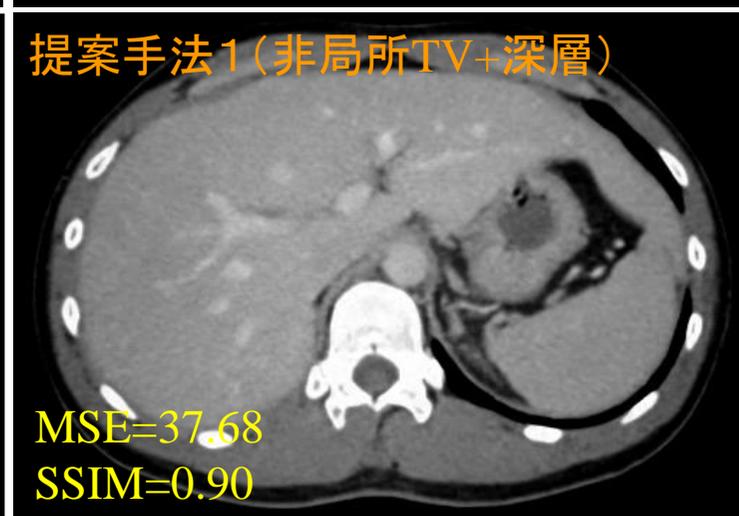
学習データに合わない
低コントラスト構造物消失

提案手法により圧縮セン
シング画像再構成の
高画質性能がBoostさ
れている
(Staircaseアーティファ
クト除去, 滑らかな濃
度変化の保存, 数値指
標向上)

提案手法1 (TV+深層)



提案手法1 (非局所TV+深層)

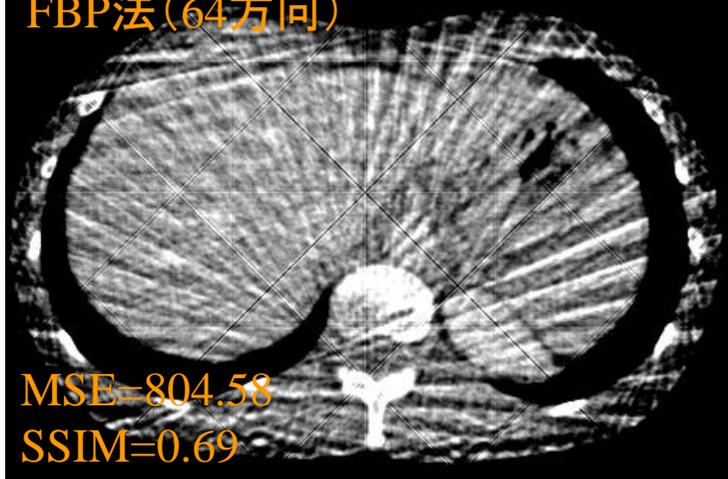


別の例

原画像

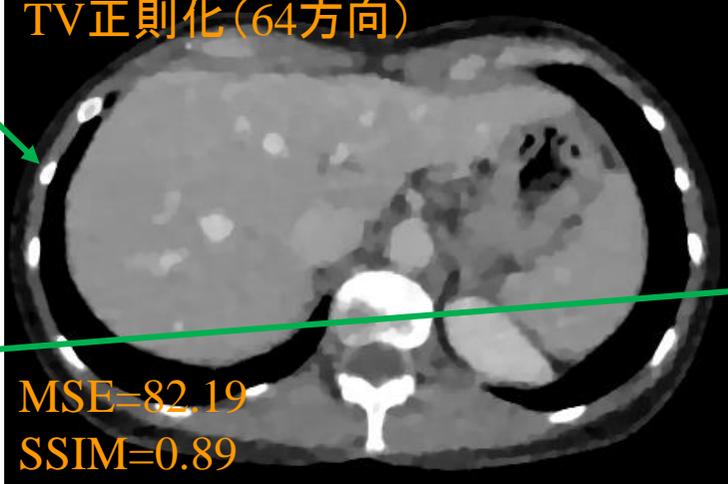


FBP法(64方向)



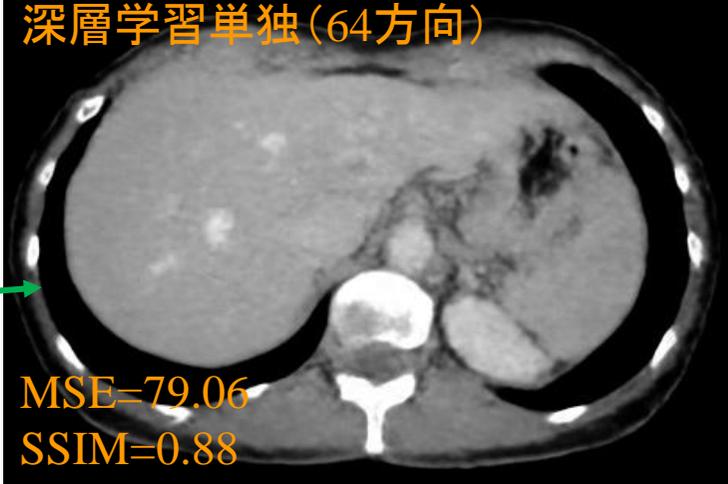
Staircaseアーティファクト
滑らかな濃度変化消失

TV正則化(64方向)

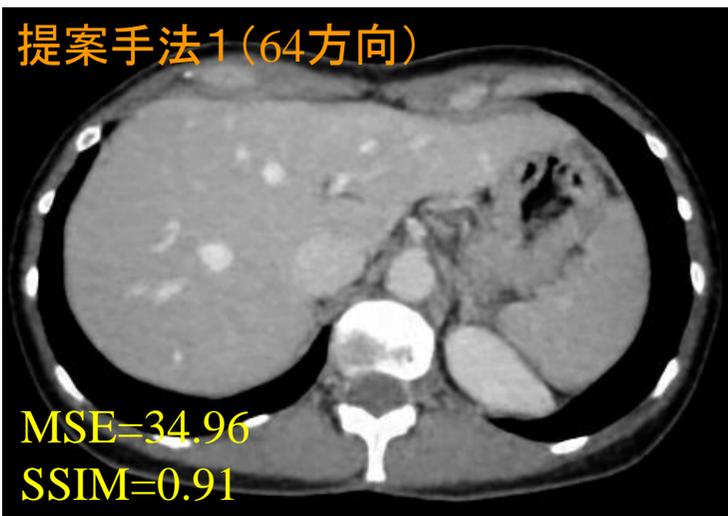


学習データに合わない
低コントラスト構造物消失

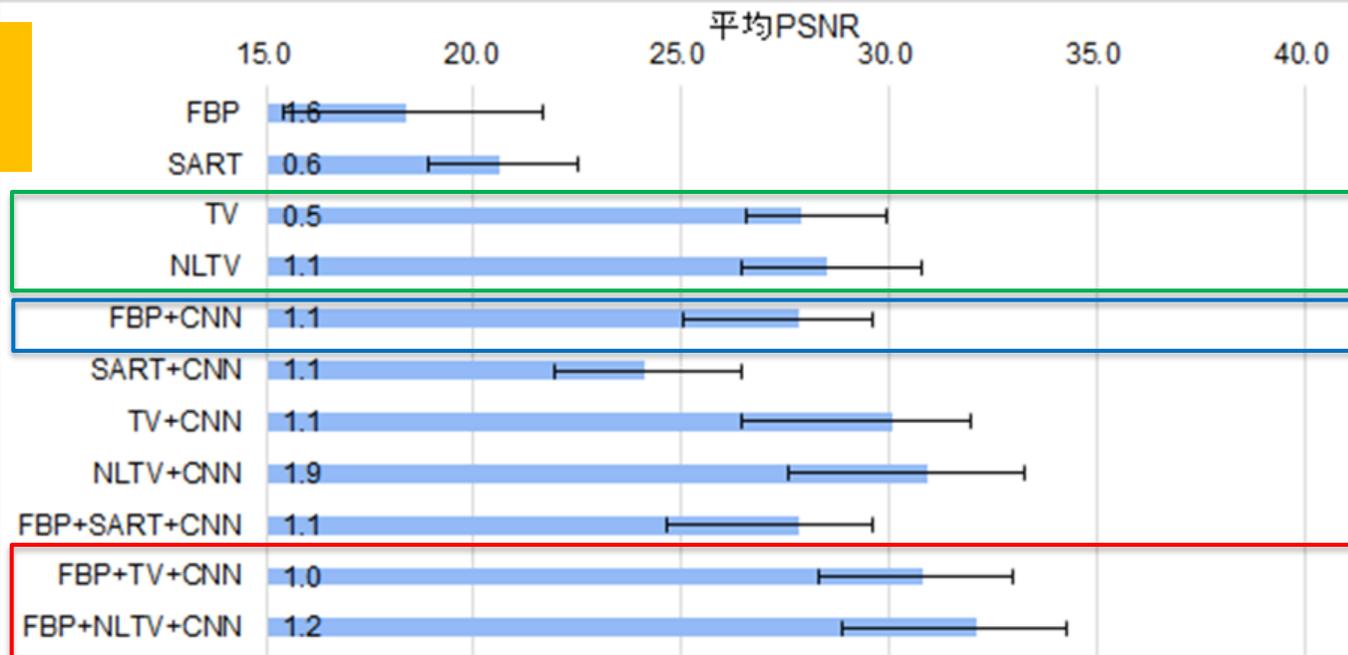
深層学習単独(64方向)



提案手法1(64方向)



画質性能指標
の統計的評価



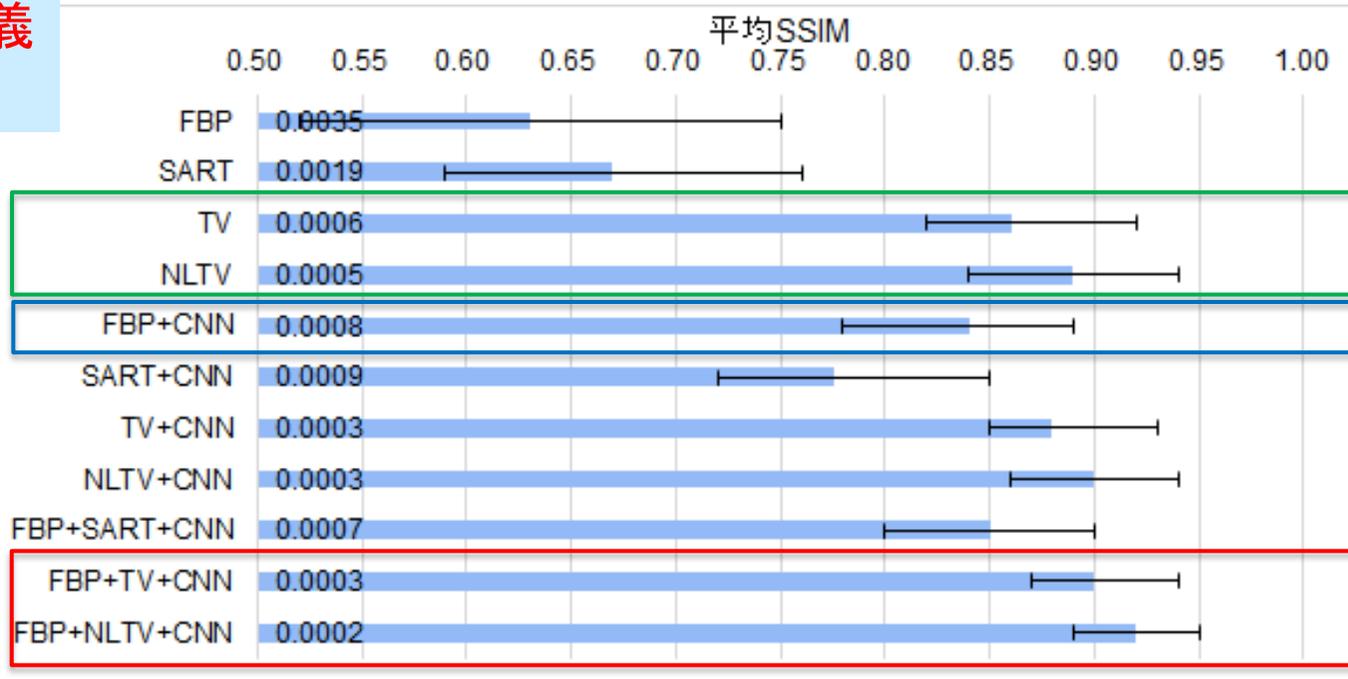
圧縮センシング単独

深層学習単独

提案手法1

実線はエラー
バー

明らかに有意義
な差がある



圧縮センシング単独

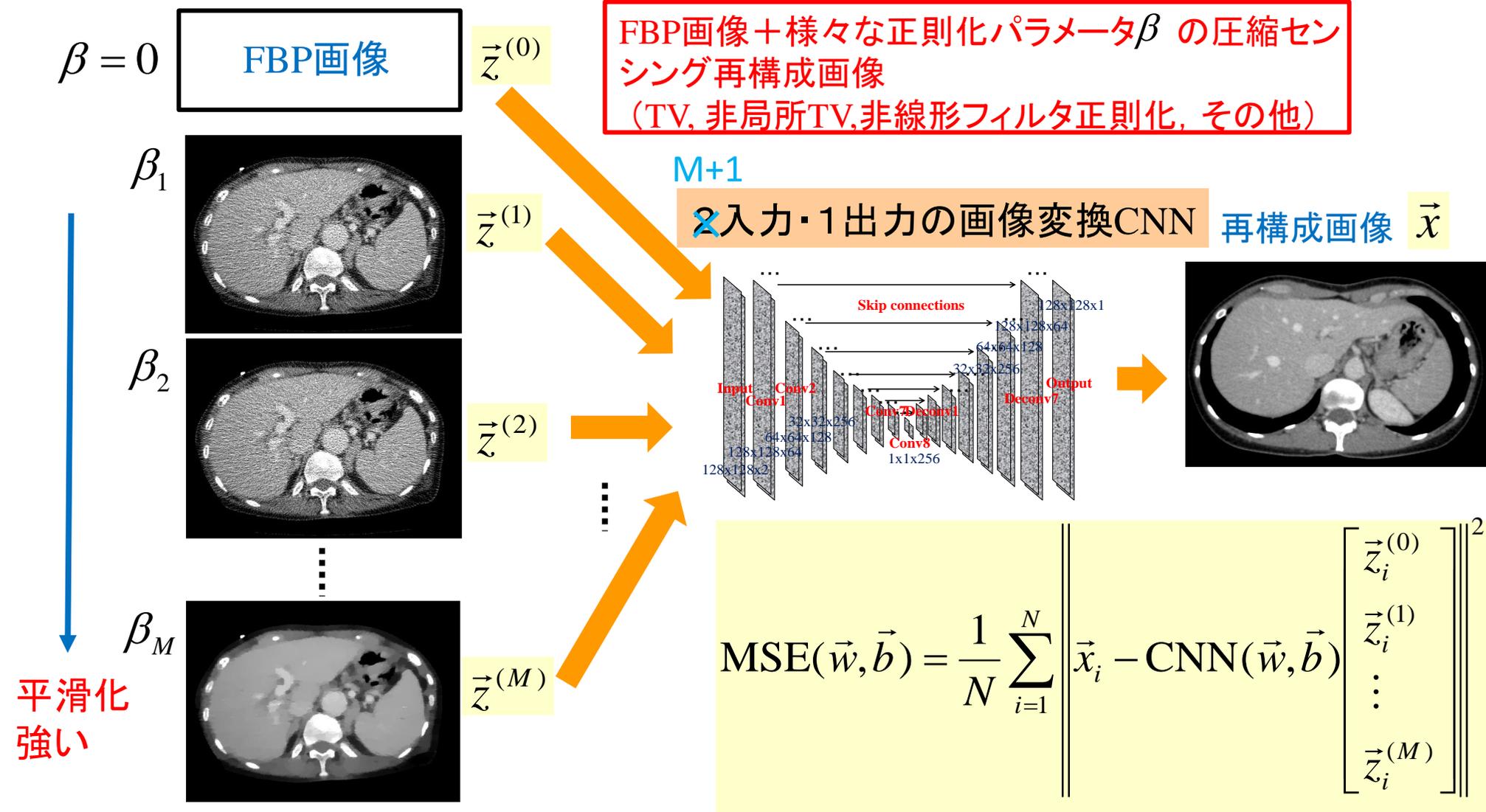
深層学習単独

提案手法1

FBP -> FBP法, TV -> TV再構成, NLTV -> 非局所TV再構成, FBP + CNN -> 深層学習単独
 TV+CNN -> TV入力的手法2, NLTV+CNN -> 非局所TV入力的手法2,
 FBP+TV+CNN -> FBPとTV入力的手法1, FBP+NLTV+CNN -> FBPと非局所TV入力的手法1

特許の提案手法2

拡張版(様々な圧縮センシングの平滑化パラメータ β の画像を入力)



$$\underset{\vec{z}^{(m)}}{\text{minimize}} \left\| \vec{p} - A \vec{z}^{(m)} \right\|^2 + \beta_m \left\| \vec{z}^{(m)} \right\|_{\text{TV}} \quad (m = 0, 1, \dots, M)$$

投影データ 画像

正則化パラメータ β 推定の必要ない

提案手法2の例

低線量CTの再構成例

原画像



FBP法



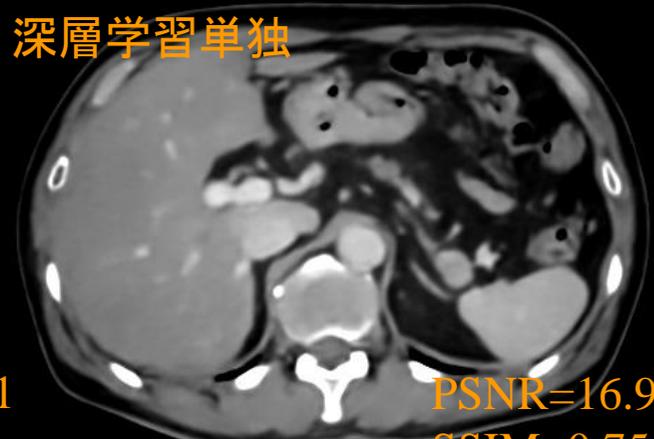
PSNR=13.29
SSIM=0.72

TV正則化



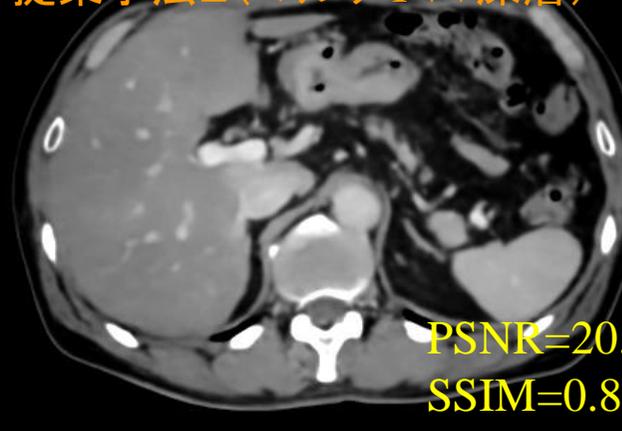
PSNR=17.11
SSIM=0.75

深層学習単独



PSNR=16.99
SSIM=0.75

提案手法2(マルチTV+深層)



PSNR=20.68
SSIM=0.85

テーマ3: 干渉縞画像からの位相画像復元

- 『Phase imaging method and phase imaging apparatus using phase imaging method (位相画像撮影方法とそれを利用した位相画像撮影装置)』発明人: Hiroyuki Kudo and Songzhe Lian 出願人: University of Tsukuba, 特願2018-111563, PCT/JP2019/23266, US登録済, EP, JP出願中 (2018)

干渉縞画像からの位相復元

$$I_k(x, y) = a_0(x, y) + a_1(x, y) \cos(\phi(x, y) + 2\pi f_0 x + \frac{2\pi k}{N}) \quad (k = 0, 1, \dots, N-1)$$

位相 モデル式

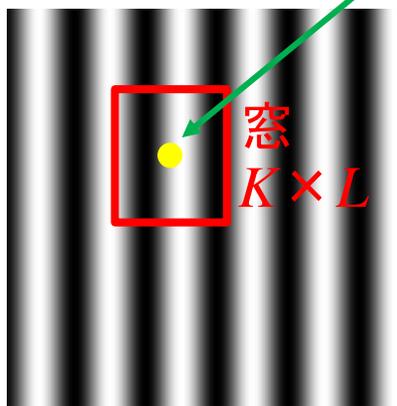
干渉縞画像

各画素 (x, y) 当たり3つの未知量(吸収・ビジビリティ・位相)を求める必要があり、縞走査法では回折格子の位置を移動させて撮影した $N \geq 3$ 枚以上の画像を使用

1枚の干渉縞画像でも高精度で位相復元が可能な手法を考案

方法A

位相を復元する画素 (x, y)



復元する画素 (x, y) の周囲に窓を設定して、窓内で物理量 (a_0, a_1, ϕ) は同じと仮定して最小2乗法で推定

方法B(方法Aの構造物境界や細部の保存性を高めた手法)

Step 1

Step 2

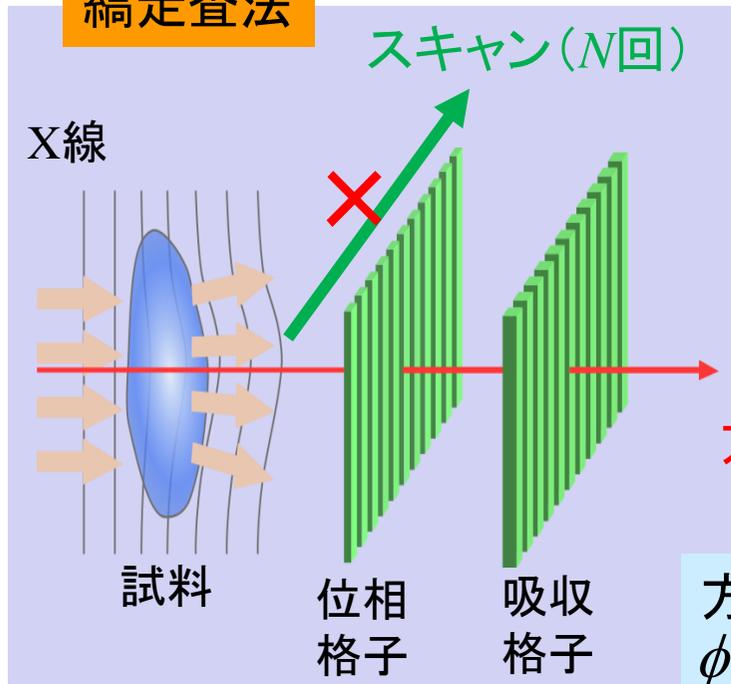
方法Aで位相画像 $\phi(x, y)$ を復元



復元した位相 $\phi(x, y)$ 値の類似性で窓中の (x, y) と異なる領域のデータに小さい重みをつけ重み付き最小2乗法で再推定

構造物境界や $\phi(x, y)$ 細部はぼける

縞走査法



タルボ型干渉計

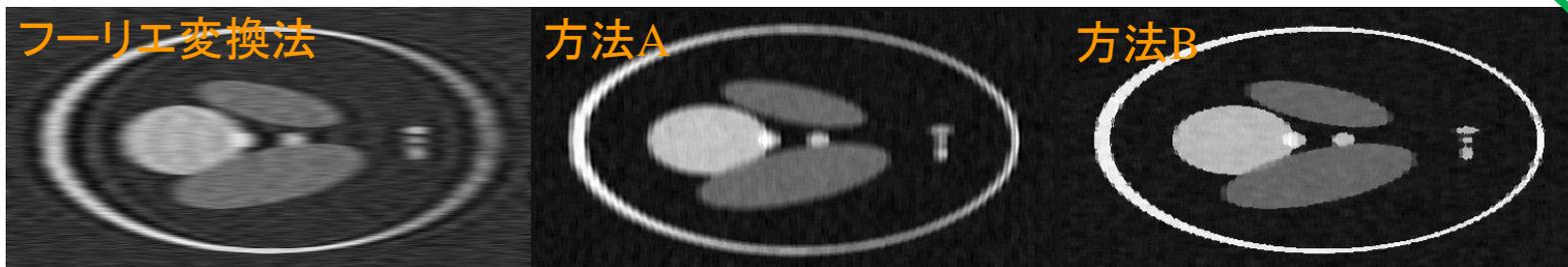
位相復元例

大きな画質改善に成功

一つの方向から撮影した干渉縞画像の復元

元データ提供:
東北大Gr

数値ファントム



ポリマー球試料

シミュレーション

画像削除

マウス頸骨
試料

実データ

位相CT

画像削除

ポリマー試料

実用化に向けた課題

- 方法には十分な自信を持っている(今まで企業様から提供を受けた実データで失敗したことは希少)が, 装置毎の癖(計測誤差の入り方)が様々あり実データでの有効性検証は個別の装置毎に行う必要がある.

企業への期待

- 最近の計測技術は単に計ることに止まらず, 世界的に最先端の情報技術やデータ解析技術をどのように用いるかがキーになっている場合が非常に多い. その意識を持って欲しい.
- 我々の方法を自社の装置に組み込み新方式CTを世界に先駆けて製品化する意欲を持っている企業と一緒に取り組みたい.

お問い合わせ先

筑波大学 国際産学連携本部
技術移転マネージャー 後藤秀利

TEL 029-859-1497

FAX 029-859-1693

e-mail goto.hidetoshi.fw@un.tsukuba.ac.jp