

琉球大学学術リポジトリ

反復法によるURAトモグラフィックイメージの画質改善

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2007-09-16 キーワード (Ja): キーワード (En): URA Coded aperture imaging, Tomographic imaging, Iterative algorithm 作成者: 北畠, 憲俊, 陳, 延偉, 仲尾, 善勝 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/1961

反復法によるURAトモグラフィックイメージの画質改善†

北畠 憲俊* 陳 延偉** 仲尾 善勝**

Improvement of URA Tomographic Images Based on an Iterative Algorithm †

Noritoshi KITABATAKE*, Yen-Wei CHEN**, and Zensho NAKAO**

Abstract

A single-pinhole camera is usually used for X-ray imaging. In URA coded aperture camera, the pinhole is replaced by multi-pinhole arrays arranged in m-sequences. Since the URA camera can view the object with a large solid angle, it can also provide some tomographic resolution for three-dimensional objects. But a reconstructed image is blurred by defocus artifact. In this paper, we propose a new iterative algorithm to remove the defocus artifact. We show that the reconstructed image can be improved by using the proposed iterative algorithm.

Key Words : URA Coded aperture imaging, Tomographic imaging, Iterative algorithm

1 はじめに

X線はエネルギーが高いので可視光線のように容易に屈折、回折あるいは反射させることが困難なため、光学系を用いた画像計測はできない。従来X線イメージングには、単一ピンホールカメラを用いてきた。ピンホールカメラの場合、高分解能を得るにはピンホール径を小さくする必要がある。しかしこれは、X線の補集効率を極めて小さくする欠点がある。

ピンホールの補集効率の欠点を克服するために提案されたのが符号化開口(CAI: Coded Aperture Imaging)である。符号化開口は空間分解能を保持したまま補集効率を桁違いに向上させたもので、とくに弱い線源の画像計測に有効である。CAIは1961年にMertsとYoung[1]によってその概念が紹介されて以来、X線天文学、核医学、核工学、レーザー核融合等の広い分野に応用されており、アパーチャの種類としてもFresnel zone plate (FZP)[2], Non-redundant array (NRA)[3], Uniformly redundant array (URA)[4], Single annular ring (SAR)[5]等数多く提案されている。特に、URAカメラ

は他のCAIに比べ、全くartifactのない再生像を得ることが可能である。URAカメラは、単一ピンホールの代わりにm-系列[6]に基づくマルチピンホールを用いるので高SN比、高分解能の画像を得ることができる。これまで、レーザー核融合実験等に應用されている[7, 8]。また、大きな立体角で物体を見込むことができるので、深さ方向のトモグラフィック(Tomographic)分解能を与えることができる[8-11]。

従来の医療用CTでは、360度方向に渡って投影を取得して、三次元物体を再構成しているが、多くの場合、観測方向が制限されている。本研究では、従来のCTと違って、一方向のみでトモグラフィックイメージングを行うことを目的とする。本論文では、一方向のみでトモグラフィックイメージングの可能性等について検討し、さらに、反復法による新しい再構成法を提案し、トモグラフィックイメージの画質改善をはかる。

2 URA 符号化開口

2.1 原理

URA符号化開口は、ハードウェアによるエンコーディング(encoding)とソフトウェアによるデコーディング(decoding)の2つのプロセスからなる。その基本概念を図1に示す。

受理：1999年6月7日

†本論文の一部は平成10年度電気学会・電子情報通信学会合同講演会にて発表済み

*大学院理工学研究科電気電子工学専攻
(Graduate Student, Dept. Electrical and Electronics Eng.)

**工学部電気電子工学科

(Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Fac. of Eng.)

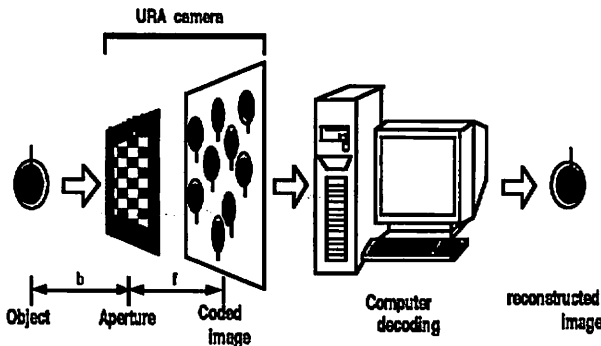


図1 URAカメラの基本概念

もし物体がアパーチャーに並行する二次元物体とし、ノイズも無視できるとすると、コードド・イメージ P は次式のようなになる。

$$P(k, l) = O * A \\ = \sum_i \sum_j \alpha(i, j) \cdot A(\text{mod}[i+k, r], \text{mod}[j+l, s]) \quad (1)$$

ここで、 O は物体の分布、 A は Encoding operator のアパーチャー関数であり、 r と s はそれぞれ A の配列の行と列の数とする。* は相関演算子を示す。相関法では再生像 \hat{O} は記録像 P と Decoding operator G との相関をとることにより次式で得られる。

$$\hat{O}(i, j) = P * G \\ = \sum_k \sum_l P(k, l) \cdot G(\text{mod}[k+i, r], \text{mod}[l+j, s]) \quad (2) \\ = (O * A) * G = O * (A * G)$$

ここで G は $A * G$ がデルタ関数になるように選ばれる。 $A * G$ がデルタ関数であれば、完全な再生像が得られることになる。

2.2 URA と m -系列 (m -sequence)

m -系列は長さ $n = 2^m - 1$ (長さとは数列の要素の数をさす) の 2 進数列でその要素は 1 と 0 である。 m -系列は $S_0 S_1 S_2 \dots S_{n-1}$ の数列としてその周期的自己相関関数を考えると

$$\rho_i = \sum_{j=0}^{n-1} S_j S_{i+j} \quad (0 \leq i \leq n-1) \\ = \begin{cases} (n+1)/2; & \text{mod}(i, n-1) = 0 \\ (n+1)/4; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

(3)式より、 m -系列は、自己相関関数がデルタ関数型に近い形となる。次に 2 次元配列にした m -系列の伝達関数 A の自己相関関数を ρ とすると、

$$\rho = A * A \\ = \begin{cases} (r \times s + 1)/2; & \text{mod}(i, r) = 0 \text{ and } \text{mod}(j, s) = 0 \\ (r \times s + 1)/4; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)より、伝達関数 A の自己相関関数は中心ピークとゼロでない一様なバックグラウンドからなる。次に、ゼロでない一様なバックグラウンドを取り除くために、平衡相関法に基づき、 G を次式のように定義する。

$$\begin{cases} G(i, j) = 1; & \text{if } A(i, j) = 1 \\ G(i, j) = -1; & \text{if } A(i, j) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

この G と A との相関を式(6)に示す。中心ピークのみとなりバックグラウンドは完全に除去される。

$$\hat{\rho} = A * G \\ = \begin{cases} (r \times s + 1)/2; & \text{mod}(i, r) = 0 \text{ and } \text{mod}(j, s) = 0 \\ 0; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$\hat{O} = O * (A * G) = \frac{(r \times s + 1)}{2} \cdot O \quad (7)$$

式(6)は完全なデルタ関数を示している。なお、ピーク値は $(r \times s) / 2$ となる。式(6)を式(2)に代入すると、再生画像は式(7)となる。すなわち、画像の信号を $(r \times s) / 2$ 倍強め、完全に再構成することを示す。

3 トモグラフィックイメージング [11], [13]

3.1 原理

図2に URA カメラを用いたトモグラフィックイメージングの原理を示す。

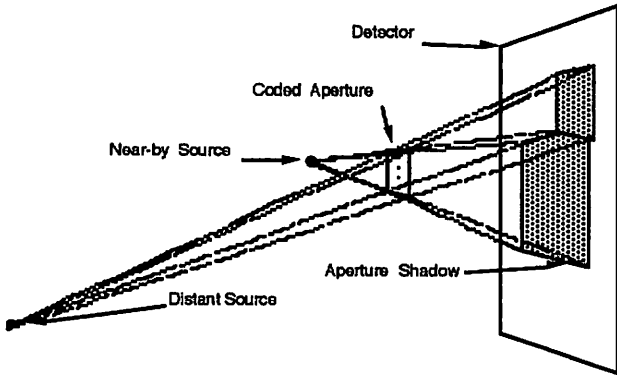


図2 URAカメラを用いたトモグラフィックイメージングの原理

URAカメラのようなCAIの場合、物体を大きな立体角で見込むことができるために、カメラ自身がトモグラフィック分解能を持つ。光源の位置は検出器上のアパーチャーの影が中央からどれだけズレているかで決定する。また、遠くの光源によってできるアパーチャーの影は小さく、近くの光源のつくる影は大きくなるので、影の大きさより距離が決定する。次に、トモグラフィックイメージングの原理を数学的に表す。三次元の物体はapertureに平衡する一連の二次元の物体からなると考える。したがって、コーデドイメージPは

$$P(x, y) = \sum_{z=1}^N [O_z(x, y) * A_z(x, y)] \quad (8)$$

再生像 \hat{O}_z は距離に対応したデコーディング関数 G_z で再生を行うと、

$$\begin{aligned} \hat{O}_z(x, y) &= \sum_{z'=1}^N [O_{z'}(x, y) * A_{z'}(x, y)] * G_z(x, y) \\ &= O_z(x, y) + \Delta\hat{O}_z \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、

$$\Delta\hat{O}_z = \sum_{z'=1}^{z-1} O_{z'}(x, y) * [A_{z'}(x, y) * G_z(x, y)] + \sum_{z'=z+1}^N O_{z'}(x, y) * [A_{z'}(x, y) * G_z(x, y)] \quad (10)$$

明らかに、もし式(9)の第2項がゼロとなれば、距離zのところの断層が完全に再生されるが、実際に、式(10)に

示すように $A_z(x, y) * G_z(x, y)$ がデルタ関数とならないため、 $\Delta\hat{O}_z$ は defocus artifact として、第z番目の断層像に現れてくる。アパーチャーを物体に近づけることによって、倍率による各断層像の差が大きくなり、他の断層からのボケは軽減され、トモグラフィックな情報を得ることができる。これは、URAカメラがピンホールカメラより優れたもう一つの点である。

3.2 シミュレーション結果

URAカメラを用いたトモグラフィックイメージングについてコンピュータシミュレーションを行った。apertureに平行する3つの物体平面 O_1, O_2, O_3 を設け、それぞれの物体面に図3に示すような光源を配置した。図3で倍率は物体 O_1 で $M_1=f/z_1=5$ とし、物体 O_2 で $M_2=f/z_2=4$ 、物体 O_3 で $M_3=f/z_3=3$ とした。検出器上で写っているCoded imageはそれぞれの倍率で写っている3つの物体によるCoded imageの重なりである。

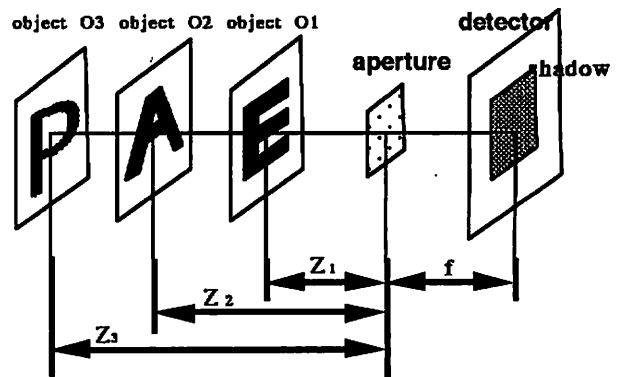


図3 シミュレーションで設定したカメラの配置

デコーディング (decoding)の手順は以下に示す。

- 1). それぞれの倍率に相当する一周期分の Coded imageを切り出す。
 - 2). 切り出されたそれぞれの一周期分のCoded imageをDecoding operator Gで decodingを行う。
- シミュレーション結果を図4に示す。

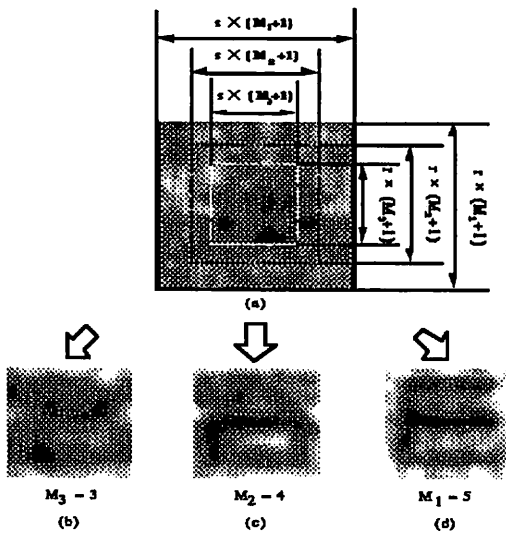


図4 トモグラフィックイメージングの再生結果

図4(a)は検出器で記録されるコードド・イメージである。枠で示しているのはそれぞれの倍率の相当する一周期分のコードド・イメージである。それぞれの枠は、 $M_1 = 5, M_2 = 4, M_3 = 3$ に相当するものであり、それらのコードドイメージを用いて再生した結果を図4(b),(c),(d)に示す。それらの再生像にdefocus artifact があるが、イメージの識別に十分なコントラストがあった。また、これらのdefocus artifact は次に提案する反復法により軽減される。

4 反復法による再生像の改善

4.1 反復法の原理[13]

トモグラフィックイメージングの原理で述べたようにコードドイメージ P は式(8)となり、その再生像は式(9)で表わされる。式(9)の第2項 $\Delta\hat{O}_z$ をいかに小さくしていくかが重要である。

ここで式(9)を式(11)のように書き換えると

$$\hat{O}_z^{(0)}(x, y) = O_z(x, y) + \Delta\hat{O}_z^{(0)} \quad (11)$$

と表わせる。(0)は後述の反復解法の初期画像を表わしている。これらの再生像をもう一回apertureに通す捜査をすると、再生像のCoded imageは

$$\begin{aligned} \hat{P}^{(0)}(x, y) &= \sum_z [\hat{O}_z^{(0)}(x, y) * A_z(x, y)] \\ &= P(x, y) + \sum_{z=1}^{z-1} [\Delta\hat{O}_z^{(0)}(x, y) * A_z(x, y)] \\ &\quad + \sum_{z'=z+1}^N [\Delta\hat{O}_{z'}^{(0)}(x, y) * A_{z'}(x, y)] \end{aligned} \quad (12)$$

となり

$$P(x, y) - \hat{P}^{(0)}(x, y) = - \left\{ \begin{aligned} &\sum_{z=1}^{z-1} [\Delta\hat{O}_z^{(0)}(x, y) * A_z(x, y)] \\ &+ \sum_{z'=z+1}^N [\Delta\hat{O}_{z'}^{(0)}(x, y) * A_{z'}(x, y)] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

となる。ここで式(13)は、再生像のCoded imageと得られたCoded imageとの誤差を表わしている。

この誤差を以下の反復式で最小化していく

$$\begin{aligned} \hat{O}_z^{(k+1)}(x, y) &= \hat{O}_z^{(k)}(x, y) + G_z * [P(x, y) - \hat{P}^{(k)}(x, y)] \\ &= O_z(x, y) + \Delta\hat{O}_z^{(k)}(x, y) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Delta\hat{O}_z^{(0)}(x, y) &= \sum_{z'=1}^{z-1} O_{z'}(x, y) * [A_z(x, y) * G_z(x, y)] \\ &\quad + \sum_{z'=z+1}^N O_{z'}(x, y) * [A_z(x, y) * G_z(x, y)] \\ \Delta\hat{O}_z^{(1)}(x, y) &= - \left\{ \begin{aligned} &\sum_{z'=1}^{z-1} \Delta\hat{O}_{z'}^{(0)}(x, y) * [A_z(x, y) * G_z(x, y)] \\ &+ \sum_{z'=z+1}^N \Delta\hat{O}_{z'}^{(0)}(x, y) * [A_z(x, y) * G_z(x, y)] \end{aligned} \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

⋮

$$\Delta\hat{O}_z^{(k)}(x, y) = - \left\{ \begin{aligned} &\sum_{z'=1}^{z-1} \Delta\hat{O}_{z'}^{(k-1)}(x, y) * [A_z(x, y) * G_z(x, y)] \\ &+ \sum_{z'=z+1}^N \Delta\hat{O}_{z'}^{(k-1)}(x, y) * [A_z(x, y) * G_z(x, y)] \end{aligned} \right\}$$

従って、式(14)と(15)に示すように反復ごとに再生像と原画像の誤差である $\Delta\hat{O}_z^{(k)}$ は小さくなり、再生像は原画像に近づいていくことがわかる。この原理を簡略化した図を図5に示す。

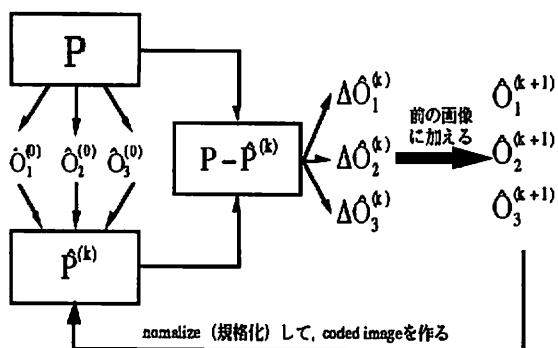


図5 反復法の概念図

4.2 シミュレーション結果

この節では第4.1節で説明した原理をもとにシミュレーション結果を示し、比較実験を行う。それぞれの再生像を定量的に評価するために、誤差率を式(16)のように定義した。

$$I_e = \frac{\|\alpha(x,y) - \hat{\alpha}(x,y)\|^2}{\|\alpha(x,y)\|^2} \quad (16)$$

この式 I_e (ImageError) は原画像と再生像をそれぞれ対応する画素の誤差を計算する式である。ここで、 $\alpha(x,y)$ は原画像の画素値を表わし、 $\hat{\alpha}(x,y)$ は再構成画像の画素値 $\alpha(x,y)$ を表わしている。また、 $\|\ \|^2$ はノルムの2乗を表わしている。

図6は本節で提案した方法を適用した結果である。反復を繰り返すほど画像がシャープになり画質が改善されているのがわかる。また、図7にはどのように Defocus artifact が軽減されるかをみるために反復3回目までのプロファイルの例である。再生像に若干に artifact は残っているが反復0回目画像 (初期画像) に比べるとかなり画像がシャープになっていることがわかる。

反復回数と誤差率の関係を図8に示す。開口に近く (=倍率が高い) なるほど画像の誤差率は低く、画像がシャープになっていくことがわかる。これは、開口に近いほど開口の立体角が大きくなり、トモグラフィック分解能が良くなっていくことを意味する。

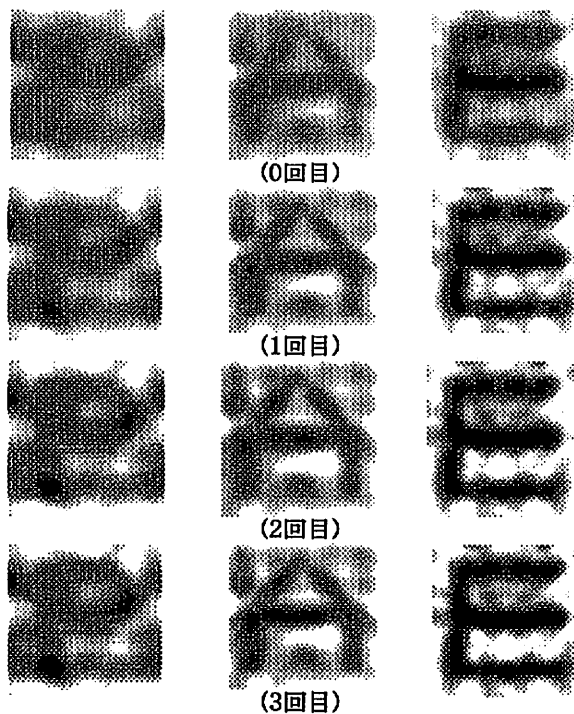


図6 再生像P,A,Eの反復ごとの評価

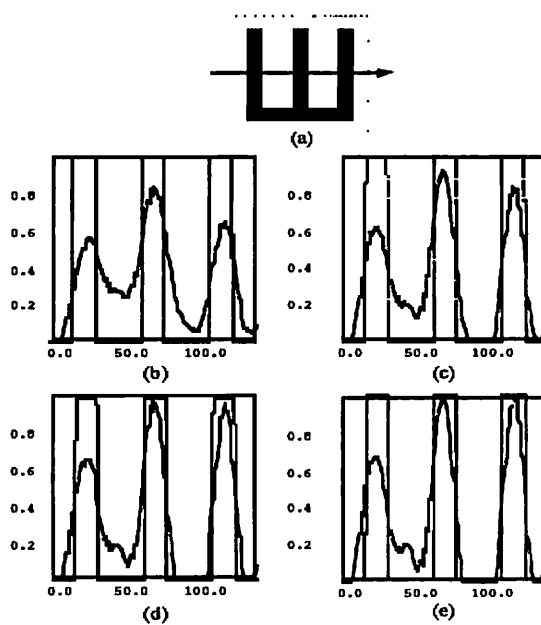


図7 再生像(E)のプロファイル (点線は原画像, 実線は再生像)
(a)原画像, (b)反復回数=0, (c)反復回数=1, (d)反復回数=2, (e)反復回数=3

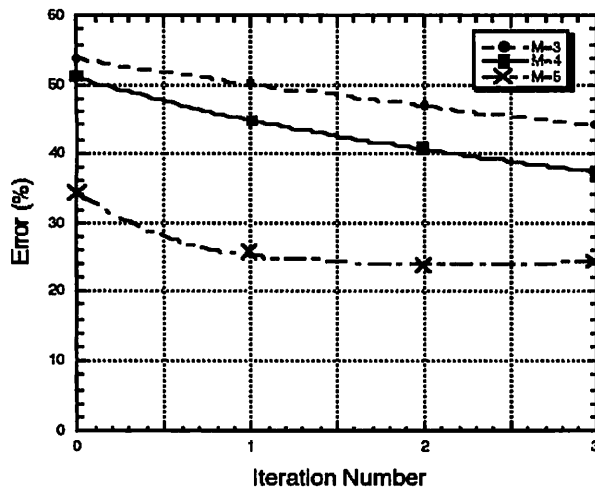


図8 反復回数と誤差率の関係

5 まとめと今後の課題

URAカメラは、トモグラフィック分解能を有しているが、Defocus artifactによって再生像は大きくぼけていた。そのDefocus artifactを軽減するために新たに反復法を提案し、本提案法を適用した結果、若干にartifactが残っているが本手法を適用しない場合に比べるとかなり画像がシャープになった。また、倍率が大きいほど、画質の改善度が大きいことがわかった。ゆえに、本提案法の有効性を検証することができた。残りのartifactをいかに軽減していくかが今後の課題である。

参考文献

- [1] L. Merts and N. O. Young: in *Proc. Int. Conf. On Optical Instruments and Techniques* (Chapman and Hall, London, 1961) P.305
- [2] L. Mertz: *Transformations in Optics* (Wiley, New York, 1965) ch.3
- [3] J. G. Ables: *Proc. Astron. Soc. Aust.*, 4(1972).
- [4] E. E. Fenimore and T. M. Cannon : *Appl. Opt.*, 17 (1978) 337.
- [5] P. W. Alton: *J. Nucl. Med.*, 14 (1973) 861.
- [6] M. Harwit and N. J. A. Sloane, *Hadamard Transform Optics*, (Academic Press, New York, 1979).
- [7] 山田 淳, 大阪大学修士論文, (1982)
- [8] Y. W. Chen et al, *Opt. Commun.*, 71(1989)249.
- [9] E. E. Fenimore and T. M. Cannon, *Appl. Opt.*, 18(1979)1052.
- [10] K. Kishimoto, Y. W. Chen et al., *Proc. ITC-CSCC'96*, 1(1996)237.
- [11] 岸本 啓作, 琉球大学修士論文, (1998)
- [12] A. Rosenfeld and A. C kak, *Digital Picture Processing*, 2nd Edition, (Academic Press, New York, 1982).
- [13] 北島 憲俊, 陳 延偉, "URA符号化開口を用いたトモグラフィックイメージングの改善", 平成10年度電気学会電子情報通信学会合同講演会論文集p87-91, (1998)