

2次元空間(画像)から3次元空間(物体)を再構成する方法

河 田 聡*

1. はじめに

ホログラフィーの原理が提案されて早や35年, CT (Computed Tomography-体軸断層写真) が発表されて20年が経ち, 人間の3次元観察・表現への夢はいよいよ実現化しつつあるように思われる. 古典的なステレオ写真も再び脚光を浴びてきて, 映画の世界も昨今は3-D流行の兆しがある. もともと, 3次元の世界に住む人間にとって, 2次元平面の紙の上から3次元空間へその表現と観察の自由を克ち取することは, ガリレオの主張を例に出すまでもなく重要な課題であった.

2次元画像から3次元物体の回復としてすぐ思い浮かべるのは, 先程のホログラフィー, ステレオグラフィーや, モアレ・トポグラフィー, 光学干渉縞画像などであるが, もっと一般的には, 製図における第3角法や等高線図なども含むことができるかも知れない. これらに共通する問題としては, いずれも物体の表面の回復・再生であって, その内部断面の再生ではないという点である. ホログラフィー技術をもってしても, 観察位置は物体外部にあり, その内部構造をユニークに知ることはできない.

所謂トモグラフィーは, その目的を物体内部の観察としている点, 特異である. 観察位置が外側にありながら, その内部分布が再生できるのである. しかしながらCTにしる古典的なトモグラフィーにしる, 通常1回のスキャンによって記録・再生できるのは, 物体内のあるスライスの分布であり, 3次元物体全体ではない. これに対し, ボリューム全体の内部構造を知りたいという需要は大きい. 本稿ではこの目

的実現のためのわれわれの研究の例をいくつか述べたい.

2. 3次元構造の記録・再生

CTは3次元物体の特定断面を各方面から観察した投影像(1次元)のセットから, その2次元断面を再生する手法である. その意味において, 1次元分布から2次元への再構成といえるかも知れない. 真に3次元物体を再生したければ, 2次元投影分布のセットが必要となろう. ところが少し考えればわかるように, これは大変なことである. 検出器の素子数, 装置の大きさ, メモリ容量, 計算時間, コスト……, 何か工夫が必要となる.

ピンホールカメラの原理を発展させた Code-d Aperture Imaging (CAI——符号化開口結像法) は, 焦光効率の高いX線, γ 線等の結像法としてよく知られるが, これは3次元再生機能を潜在的に有しており, 主に医学応用を目的として研究が進められている. 図1にCAIの一例を示す¹⁾. 回転するX線源がX線吸収係数分布を3次元的にもつ物体を照射し, その投影像は背後のX線フィルムに記録される. 物体内部の各断面は, 異なる半径をもつX線源軌道のピンホール投影像とのコンボリューション積分

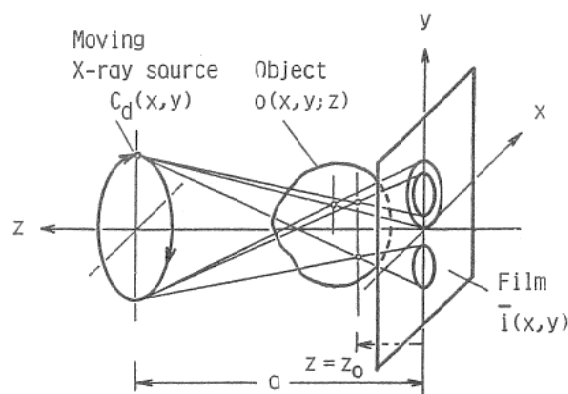


図1 Geometry of recording system

*河田 聡 (Satoshi KAWATA) 大阪大学, 工学部, 応用物理学科, 南研究室, 助手, 工学博士, 光学計測

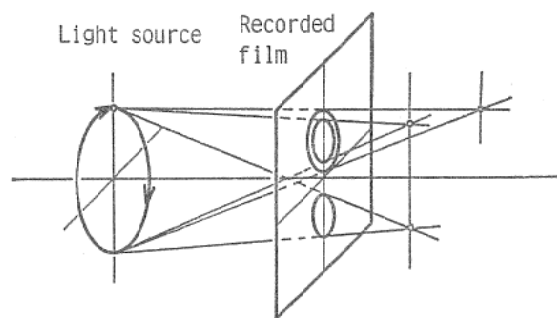


図2 Real-time reconstruction system by the lensless incoherent-optical correlator

の形で像に寄与する。マッチドフィルタリングの原理で、ある半径の円でコーディングされた像のみデコードしてやれば、対応する断面が再生される。光学的に実時間でこれを実現するのが図2の系である。回転する光源または円環光源によって記録フィルムは照射され、後ろにいたスクリーンを移動することによってその上に望む断面の分布が現われる。この方法は、3次元情報が1枚の2次元フィルムに符号化されて重畳記録されている点の特徴である。

符号化しないで3次元回復を行おうとすると、前述のように、物体を完全に囲む2次元投影像のセットが必要となり、これは現実には大変なことである。しかしながら3次元再生の需要は多く、鼓動を続ける心臓及び冠状動脈の瞬時瞬時の3次元構造再生等は緊急の研究課題となっている。通常、フラッシュ・トモグラフィーといって、複数のX線源で異なる方向の2次元投影像を瞬時に得て、後で再構成する方向がとられる。しかし、その投影像の枚数（線源の数）は、満足いく再生像を得るには全く不十分である。

不完全情報から元の信号を回復する問題は、最近各分野で議論されている。いまわれわれの問題に対しても、何らかの先験情報が得られるならば、それでもって解を拘束することにより3次元分布の回復が可能な場合がある。もし物体がインパルスな分布をもつならば、例えば最大エントロピー法（MEM）が利用できる²⁾。物体外形の形状がわかっているならば、所謂超解像法が応用できよう。超解像法は回折限界光学、特に光学的天文学応用において最近特に積極的に研究が進められている。この手法

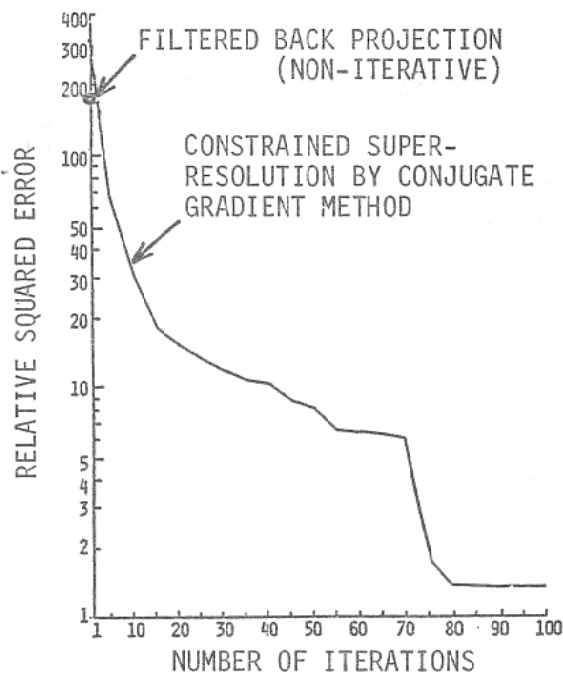


図3 Comparison of the error energy between the original phantom and the estimated one.

を用いれば、単純に言って、10枚の断面を得るには10枚の独立な投影像が得られればよいことになる。図3に不完全投影像から、一般的なFiltered Back Projection法によって再生した場合と、物体外形の掘りで拘束した超解像法（共役勾配法で反復回復させる）によって再生した場合³⁾との真値との自乗誤差和を示す。超解像法の優位性は明らかである。

3. 応 用

3次元構造再生の今後の応用といえば、やはりメディカルを想像される方が多いと思われるが、その応用範囲は意外に広いのではなからうか。CTに関するノーベル賞は、メディカル応用でCormackらが受賞したが、彼の論文（1963）の7年前に、Bracewellが地球の自転を利用して電波天文像再生を提案しているのは周知のことである。CAIにおいても最初の研究は、おそらくYoungによるFresnel Zone Plateをcodeとして用いたX線星座の観察であろう。炎・燃烧過程の内部観察、プラズマ診断、空気・流体の実時間解析、光ファイバの屈折率分布検査等はホログラフィー技術を組み合わせられて3次元再生が実現されていく分野かも

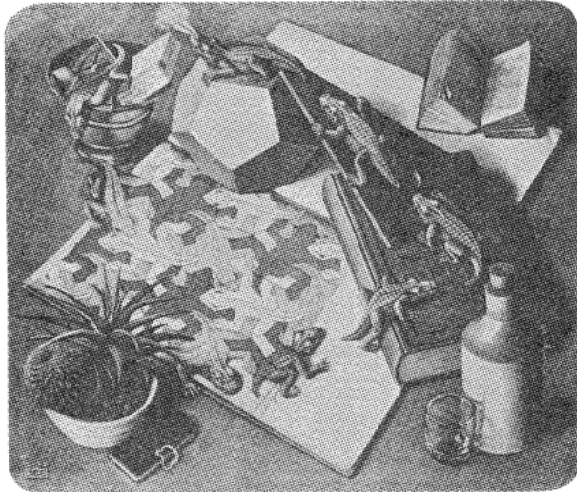


図4 Escher 石版画「爬虫類」

知れない。われわれは光学顕微鏡にトモグラフィを持ち込もうとしているし、電子顕微鏡には比較的早くその技術が応用された。3次元物体内部のディスプレイ法と相まって、その観察

・回復法も広くその応用が期待されているようである。なお紙面が余ったようなので、全くの座興としてお馴染み Escher の石版画、爬虫類のコピーを図4に掲げる。平面上に描かれた爬虫類は3次元空間に飛び出し、3次元空間中のそれは再び2次元平面内に閉じ込められる。彼の版画コピーは New York は SOHO の Vorpal 美術館に常時展示してある。

参考文献

- 1) S. Kawata and J. Sklansky, "Circularly coded x-ray tomography," *Appl. Opt.*, 23, 1632 (1984).
- 2) S. Kawata, K. Minami and S. Minami, "Superresolution of Fourier transform spectroscopy data by maximum entropy method," *Appl. Opt.*, 22 3593 (1983).
- 3) S. Kawata and O. Nalcioglu, "Constrained iterative reconstruction by conjugate gradient method," *IEEE Trans. Medical Imag.* (submitted).