

位相限定相関法を用いたSPECT画像の動き補正

安藤, 龍佑 / ANDO, Ryusuke

(発行年 / Year)

2012-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2012-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

P 377.5

M34

2011-3

2011年度

修士論文

位相限定相関法を用いたSPECT画像の
動き補正

Correction of Patient Movement with a Phase-only
Correlation Method in a SPECT Study

指導教授

尾川浩一教授

法政大学大学院 工学研究科 情報電子工学専攻

10R4103 安藤龍佑



目次

Abstract	2
第1章 はじめに	4
第2章 SPECT 装置について	6
2.1 SPECT 装置について	6
2.2 SPECT 装置の撮影時の問題点	6
第3章 提案手法	8
3.1 位相限定相関法	8
3.1.1 フーリエ位相限定相関法	8
3.2 提案手法	9
3.2.1 ずれが起きている角度の推定	9
3.2.2 ずれの量の推定	13
3.2.3 ずれの補正	14
第4章 シミュレーション	15
4.1 シミュレーション条件	15
4.2 シミュレーション結果	17
4.2.1 180 投影、雑音なし	17
Shepp&Logan Phantom without noise	17
brain Phantom without noise	27
4.2.2 72 投影、雑音なし	37
Shepp&Logan Phantom without noise	37
brain Phantom without noise	47
4.2.3 180 投影 雑音あり	57
Shepp&Logan Phantom with 3M counts	57
brain Phantom with 5M counts	67
4.2.4 72 投影、雑音あり	77
Shepp&Logan Phantom with 1.5M counts	77
brain Phantom with 2M counts	87
4.2.5 雑音なし	97
180 投影	97
72 投影	97
4.2.6 雑音あり	98
180 投影	98
72 投影	98
第5章 考察	99

第6章	まとめ	101
	謝辞	102
	参考文献	103
	発表論文	105
付録A	画像再構成法	106
	A.1 ML-EM法	106
	A.2 ML-EM法の例	109

Abstract

Patient movement during SPECT data acquisition makes serious distortions in reconstructed images. This paper proposes a new correction method of patient movement. This method basically uses a phase-only correlation method. We applied the phase-only correlation method to both a sinogram space and image space. That is, we apply a one dimensional Fourier transform to a measured sinogram and detect an angle at which a movement occurs with the phase information. After we detect the angle at which a movement takes place, we split the sinogram into two angular regions and reconstruct images corresponding to these angular regions. We also apply a one-dimensional Fourier transform to these reconstructed images and estimate the extent of movement. Next we replace the wrong projection data with correct data that are calculated by forward projection of the image positioned correctly. By reconstructing an image with a corrected sinogram we could obtain a distortion free image. This paper showed the validity of our method with some simulations.

第1章 はじめに

近年、医療現場においてCT (Computed Tomography) は早期発見、治療が望まれる人体内部の組織や臓器の異常を発見するために用いられている。CTを用いることによって体外から非侵襲的に人体構造を画像化することができる。このためCT技術は、病気の早期発見や臨床診断などの医用分野で重要な役割を担っている。

医用画像を医療に用いる画像診断の歴史は、1895年にレントゲン博士がX線を発見することから始まる。X線を利用した技術であるX線撮影法は、人体に向けて放射されたX線の一部が人体の組織や臓器により吸収され、吸収されずに透過してきたX線量をフィルムや感光板で検出する方法である。しかし、X線量の吸収差の微小な組織は識別することが難しく、散乱X線により大きな影響を受けてしまうという欠点がある。その後、コンピュータ技術の向上とともにCTが出現した。CTは、多方向から人体を撮影することで体内を画像化するものである。CTの原理は、X線、 γ 線などの放射線をあらゆる角度から物体に放射し、物体を通過した後の放射線量(投影データ)を検出器で観測し、体内の構造をその投影データから再構成するというものである。このCTは放射型CT(emission CT)と透過型CT(transmission CT)の2つに大別することが出来る。後者の透過型CTは外部にある線源から発せられた放射線のうち、被検体を通過する量を計測し被検体内の吸収の違いを画像化するものである。透過型CTは臓器の形態を鮮明に画像化するものであり、臓器の形態変化の診断において有用である。しかし、放射型CTは放射性同位元素(radioisotope:RI)またはその標識化合物を体内に投与し、そのRIから放射される放射線を対外の検出器で計測し放射能分布を画像化するものであり、放射性医薬品を選ぶことにより特定の臓器の特定の状態を画像化することができ、機能異常の早期発見に役立つ。この放射型CTは、単光子線放出核種で標識された放射性医薬品を投与し、体外で単光子として測定し画像を得るSPECT(Single Photon Emission CT)と、陽電子放出核種で標識された化合物を投与し、2個の対向 γ 線(消滅光子)を同時測定し、画像を得るPET(Positron Emission CT)に大別される。本研究では、SPECTを用いた画像再構成について扱う。

SPECT装置を用いてデータの収集を行うと、非常に長い時間がかかってしまう。この長い収集時間中に患者が動いてしまうと、得られる投影データにずれがおき、その結果再構成画像がぼけてしまうという問題がある。この問題を解決するために、従来は得られた投影データに対し、補正を行っていた。しかし、患者が動いた角度によって、得られた投影データ上に現れるずれが変わってしまうという問題もある。そのため、得られた投影データに対して補正を行うと、角度によって補正ができる場合とできない場合がある。また、得られた投影データに対して補正を行う方法の他にも撮影時にモニタリングをすることによって補正を行う方法もあるが、得られた投影データだけでは補正を行うことができない。そこで、我々は得られた投影データに対してフーリエ位相相関法を適用し、ずれが起きている角度を推定した後に、ずれが起きるまでの区間とずれが起きた後の区間でそれぞれ再構成画像を作りだし、その再構成画像に対してフーリエ位相相関法を適用しずれの量を推定することで、ずれが起きている角度に依存せず、どの角度でずれが起きても得られた投影データだけを用いて補正が行える新たな方法を提案した。本論文では、我々の提案手法の有効性を示すために、投影数を減らした場合や、投影データに雑音があった場合など様々な条件下でシミュレーショ

ンを行い、MSE(Mean Square Error:平均二乗誤差)を用いて画像の定量的評価を行った。シミュレーション結果より、そのような条件下においても本提案手法が有効であることを示すことができた。

第2章 SPECT装置について

2.1 SPECT装置について

SPECT装置とはSingle Photon Emission Computed Tomographyの略で、RIと呼ばれる放射線同位元素を患者に投与して、患者の周りにある検出器を360°回転させ、患者の体内から放出される γ 線(光子)を検出することで画像を生成する。SPECTはX線CTとは異なり、生体機能の変化を画像にすることが可能である。RIは投与する種類によって体内で集積する箇所が変化する性質を持つ。SPECT画像装置をFig. 2.1に示す。

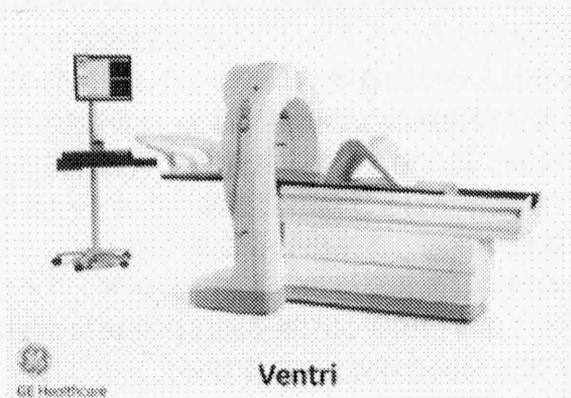


Fig. 2.1: 心臓検査専用 SPECT
GE 横河メディカルシステム

2.2 SPECT装置の撮影時の問題点

SPECT装置を用いて撮影を行うと、撮影には長い時間がかかってしまうという問題がある。長い撮影時間の間に患者が動いてしまうと、得られる投影データにずれが生じてしまい、再構成後の画像の画質が著しく劣化してしまう。

また、Fig. 2.2とFig. 2.3に示すように、患者が動いた角度によって、得られた投影データ上に現れるずれの量が違うという問題もある。

Fig. 2.2に示したように、検出器に対して垂直方向以外に患者が動いた場合は、得られた投影データ上に急峻な変化が起き、ずれが起きている角度の推定も容易に行うことができる。

しかし、Fig. 2.3に示したように、検出器に対して垂直方向に患者が動いた場合は、得られた投影データ上に急峻な変化が起きないため、ずれが起きている角度の推定は困難になってしまう。

そのため、得られた投影データに対して補正を行う方法では、Fig. 2.2に示したようなずれは補正することが可能であるが、Fig. 2.3に示したようなずれを補正することはできない。

また、撮影時と同時にモニタリングを行なって補正を行う方法も提案されているが、この方法では、得られた投影データだけでは補正ができない。

そこで、本書では、投影データ空間で位相相関法を用いて、ずれが起きている角度の推定を行った後に、画像を再構成し、再構成画像空間でずれの量の推定を行なって、その情報を用いて補正を行う方法を提案した。もし、投影データ空間で、ずれが起きている角度の推定が出来なかった場合は、検出器に対して垂直な角度でずれが起きていると仮定し、再構成画像空間上でずれの量の推定を行うことで、投影データ上にずれが現れなくても、投影データだけで補正を行うことが可能となる。

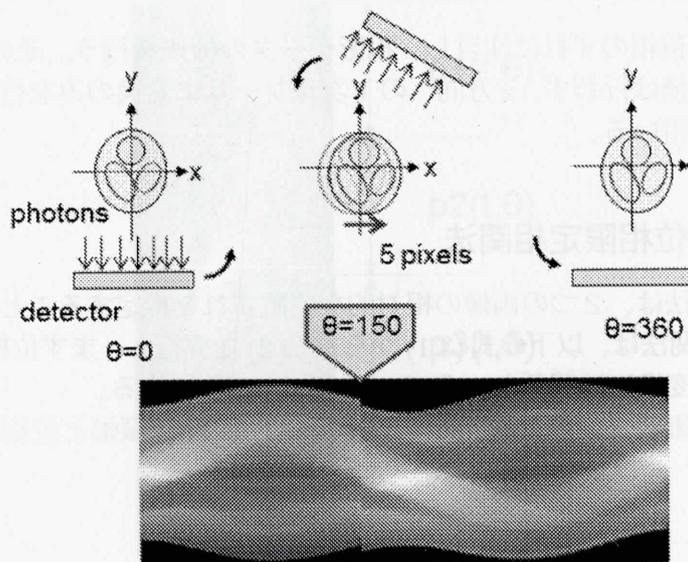


Fig. 2.2: 検出器に対して垂直方向以外の方向に患者が動いた場合

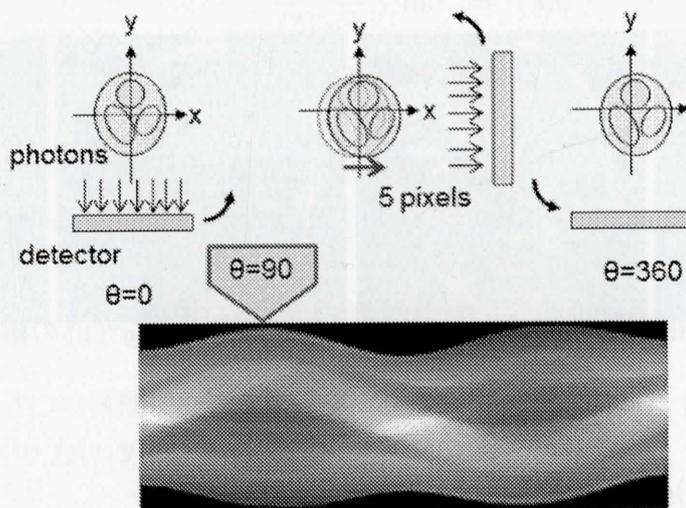


Fig. 2.3: 検出器に対して垂直方向に患者が動いた場合

第3章 提案手法

3.1 位相限定相関法

本提案手法では、位相のずれに注目し、投影データの補正を行う。そのため本研究では、2次元のフーリエ変換は行わず、x方向への1次元フーリエ変換のみを行い、位相画像を求め、その位相画像を用いる。

3.1.1 フーリエ位相限定相関法

フーリエ位相相関法は、2つの画像の相対的な位置ずれを推定することが出来るものである。フーリエ位相相関法は、以下の式(3.1)から式(3.3)を実行し、まず位相画像を作成する。ここで θ はフーリエ変換には関係ないので、考えないことにする。

まず、得られた投影データの1次元のフーリエ変換 $P(\xi)$ を振幅と位相を用いて以下のように表す。

$$P(\xi) = |P(\xi)| \exp [j\phi(\xi)] \quad (3.1)$$

ここで、 $|P(\xi)|$ は振幅、 $\phi(\xi)$ は位相である。さらに、 $P(\xi)$ の実部と虚部をそれぞれ $P_{Re}(\xi)$ 、 $P_{Im}(\xi)$ とすると、振幅と位相は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} |P(\xi)| &= \sqrt{\{P_{Re}(\xi)\}^2 + \{P_{Im}(\xi)\}^2} \\ \phi(\xi) &= \tan^{-1} \frac{P_{Im}(\xi)}{P_{Re}(\xi)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

さらに、逆フーリエ変換を \mathcal{F}^{-1} の記号で表すと、位相部分の逆フーリエ変換は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} f^\phi(x) &= \mathcal{F}^{-1} \exp [j\phi\xi] \\ &= \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{P(\xi)}{|P(\xi)|} \right\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

上式で求めた各位相画像を $f^\phi(x)$ と $g^\phi(x)$ とすると $f^\phi(x)$ と $g^\phi(x)$ の相互相関関数は以下のようになる。

$$\mathcal{F}^{-1} \{ f^\phi(x) g^{\phi*}(x) \} \quad (3.4)$$

ここで、 $g^{\phi*}(x)$ は $g^\phi(x)$ の複素共役を表す。

これは、画像をフーリエ変換し、画像の複素共役をとったものと掛け算し、その結果を逆フーリエ変換すれば相関関数となることを表している。

この相関関数は、実空間では以下のように表される。

$$R_{fg}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x') g(x+x') dx' \quad (3.5)$$

この求めた相関関数のピーク値が推定のずれ量となる。

3.2 提案手法

3.2.1 ずれが起きている角度の推定

本提案手法では、まず得られた投影データに対し、フーリエ位相限定相関法を用いてずれが起きている角度の推定を行う。そのためにまず Fig. 3.1 に示すように、投影データ $p(t, \theta)$ を4つの区間 ($p_1(t, \theta)0^\circ \sim 90^\circ$ 、 $p_2(t, \theta)90^\circ \sim 180^\circ$ 、 $p_3(t, \theta)180^\circ \sim 270^\circ$ 、 $p_4(t, \theta)270^\circ \sim 360^\circ$) にわけ、4つの再構成画像 ($f_1(x, y)$ 、 $f_2(x, y)$ 、 $f_3(x, y)$ 、 $f_4(x, y)$) を得る。

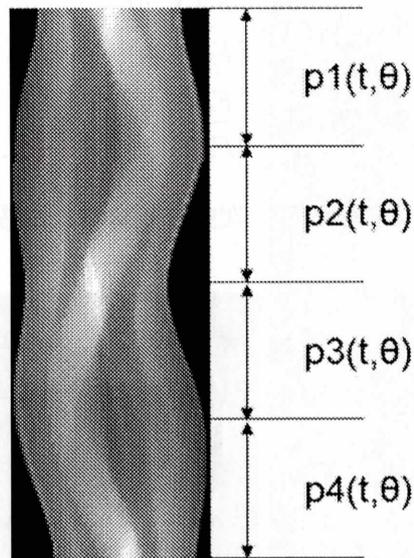


Fig. 3.1: 4つの区間にわけた投影データ

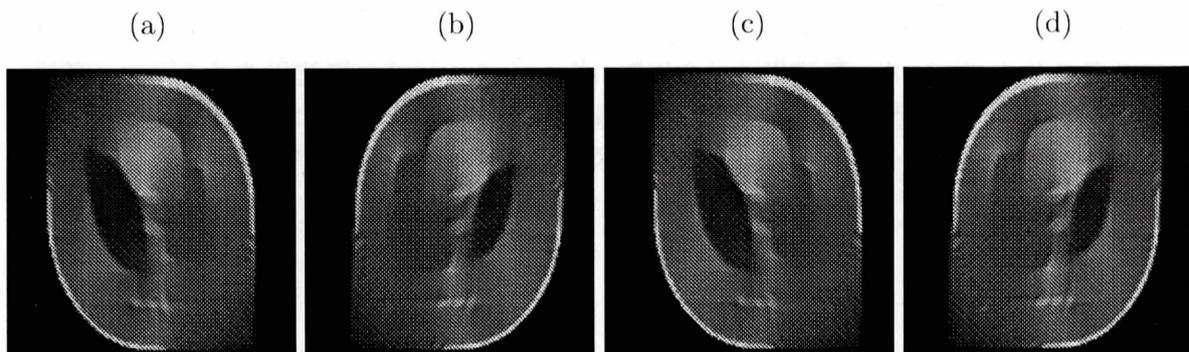


Fig. 3.2: 4つの区間にわけた投影データから得た再構成画像 (a) $f_1(x, y)$
(b) $f_2(x, y)$ (c) $f_3(x, y)$ (d) $f_4(x, y)$

4つの再構成画像を得たら、それぞれをフーリエ変換し、 $F_1(X, y), F_2(X, y), F_3(X, y), F_4(X, y)$ を得る。 $F_1(X, y), F_2(X, y), F_3(X, y), F_4(X, y)$ が得られたら、次式を使い、それぞれの画像の位相成分を求める。

$$\Phi_{F_1}(X, y) = \frac{F_1(X, y)}{|F_1(X, y)|}$$

$$\Phi_{F_2}(X, y) = \frac{F_2(X, y)}{|F_2(X, y)|}$$

$$\Phi_{F_3}(X, y) = \frac{F_3(X, y)}{|F_3(X, y)|}$$

$$\Phi_{F_4}(X, y) = \frac{F_4(X, y)}{|F_4(X, y)|}$$

それぞれの画像の位相成分が求まったら、次式を用いて、相関関数を求める。

$$Q_1(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \Phi_{F_1}^*(X, y) \cdot \Phi_{F_2}(X, y) \right\}$$

$$Q_2(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \Phi_{F_2}^*(X, y) \cdot \Phi_{F_3}(X, y) \right\}$$

$$Q_3(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \Phi_{F_3}^*(X, y) \cdot \Phi_{F_4}(X, y) \right\}$$

ここで、それぞれ $\Phi_{F_1}^*(X, y)$ は $\Phi_{F_1}(X, y)$ 、 $\Phi_{F_2}^*(X, y)$ は $\Phi_{F_2}(X, y)$ 、 $\Phi_{F_3}^*(X, y)$ は $\Phi_{F_3}(X, y)$ の複素共役である。

相関関数のピーク値が x_0 であれば、2つの画像はずれていないと判断し、そうでなければずれていると判断する。ずれが起きていないと判断した場合は、その区間を用いて、再構成画像 $f'(x, y)$ を得る。

Fig. 3.1に示した画像の例では、 90° で右方向に5pixelのずれが起きている。よって、 $Q_1(x, y)$ では5pixelずれているという推定結果が出るが、 $Q_2(x, y)$ 、 $Q_3(x, y)$ ではそれぞれずれは起きていないという推定結果が出る。

この結果から、 0° から 180° までのどこかの区間でずれが起きていて、 180° から 360° までの区間ではずれが起きていないということがわかる。ずれてないという情報が得られた区間 $p_3(t, \theta)$ と $p_4(t, \theta)$ を使って、再構成画像 $f'(x, y)$ を得て、 $f'(x, y)$ の投影データ $p'(t, \theta)$ を計算する。

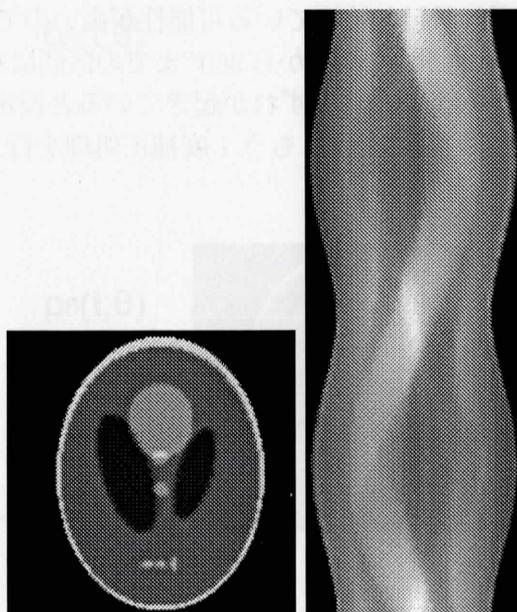


Fig. 3.3: 左: $p_3(t, \theta)$ と $p_4(t, \theta)$ を使って再構成した再構成画像 $f'(x, y)$
 右: $f'(x, y)$ の投影データ $p'(t, \theta)$

計算して得られた投影データ $p'(t, \theta)$ と、ずれて得られた投影データ $p(t, \theta)$ をそれぞれフーリエ変換し、 $P(\xi, \theta)$ と $P'(\xi, \theta)$ を得る。さらに、 $P(\xi, \theta)$ と $P'(\xi, \theta)$ を使って $P(\xi, \theta)$ の位相成分 $\Phi_P(\xi, \theta)$ と $P'(\xi, \theta)$ の位相成分 $\Phi_{P'}(\xi, \theta)$ を求める。

$$\Phi_P(\xi, \theta) = \frac{P(\xi, \theta)}{|P(\xi, \theta)|}$$

$$\Phi_{P'}(\xi, \theta) = \frac{P'(\xi, \theta)}{|P'(\xi, \theta)|}$$

$\Phi_P(\xi, \theta)$ と $\Phi_{P'}(\xi, \theta)$ が求まったら、逆フーリエ変換し、相関関数 $R(t, \theta)$ を求める。

$$R(t, \theta) = \mathcal{F}^{-1} \{ \Phi_P^*(\xi, \theta) \cdot \Phi_P(\xi, \theta) \}$$

ここで、 $\Phi_P^*(\xi, \theta)$ は $\Phi_P(\xi, \theta)$ の複素共役である。

もし、相関関数 $R(t, \theta)$ のピーク値が t_0 からずれていたら、その角度からずれが起きていると判断する。

もし、相関関数のピーク値が全て t_0 で、ずれが起き始めている角度の推定ができなかった場合は、 90° か 270° 付近でずれが起き始めている可能性が高いので、 90° でずれが起きていると仮定し、 0° から 90° までの区間と、 90° から 360° までの区間にわけ、補正を行う。もし、それでもずれが推定できなければ、 270° でずれが起きていると仮定し、 0° から 270° までの区間と、 270° から 360° までの区間にわけ、もう 1 度補正処理を行うことによって、ずれの補正を行う。

3.2.2 ずれの量の推定

サイノグラム空間で、ずれが起きている角度を推定することができたら、再構成画像空間で実際のずれの量の推定を行う。そのために、まず投影データ $p(t, \theta)$ を、ずれが起きる前までの区間 $p_5(t, \theta)$ とずれが起きた後の区間 $p_6(t, \theta)$ の2つにわけ、それぞれ再構成画像 $f_5(x, y)$ と $f_6(x, y)$ を得る。

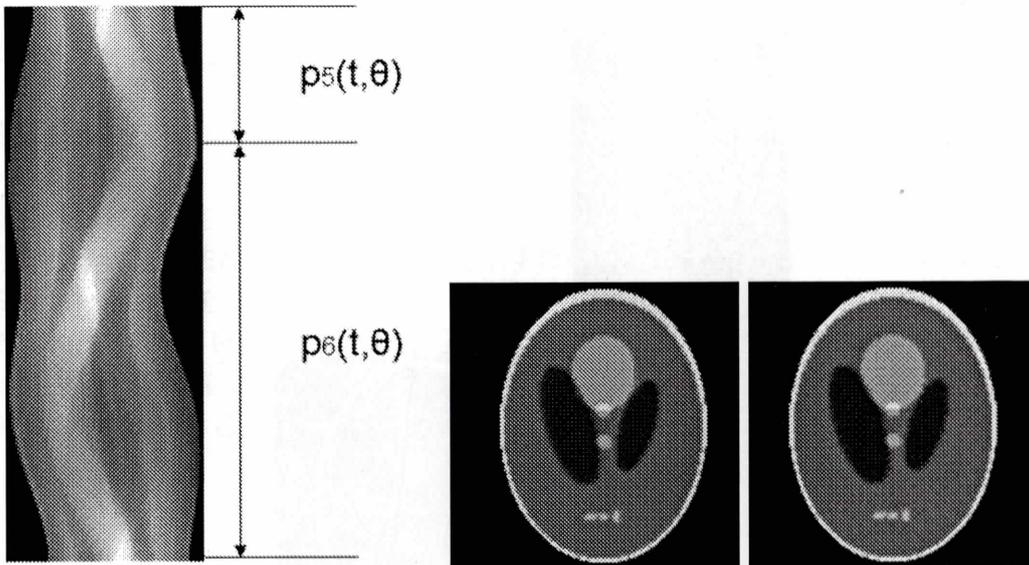


Fig. 3.4: 区間ごとにしたサイノグラムと、その再構成画像 左: $f_5(x, y)$
右: $f_6(x, y)$

再構成画像 $f_5(x, y)$ と $f_6(x, y)$ が得られたら、それぞれフーリエ変換し、 $F_5(X, y)$ と $F_6(X, y)$ を得る。 $F_5(X, y)$ と $F_6(X, y)$ が得られたら、次式を使い $\Phi_{F_5}(X, y)$ と $\Phi_{F_6}(X, y)$ を求める。

$$\Phi_{F_5}(X, y) = \frac{F_5(X, y)}{|F_5(X, y)|}$$

$$\Phi_{F_6}(X, y) = \frac{F_6(X, y)}{|F_6(X, y)|}$$

$\Phi_{F_5}(X, y)$ と $\Phi_{F_6}(X, y)$ が求まったら、相関関数 $Q(x, y)$ を求める。

$$Q(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{ \Phi_{F_5}^*(X, y) \cdot \Phi_{F_6}(X, y) \}$$

ここで、 $\Phi_{F_5}^*(X, y)$ は $\Phi_{F_5}(X, y)$ の複素共役である。 $Q(x, y)$ が最大値となる x がずれの量になるので、ずれの量 δ が推定できる。

3.2.3 ずれの補正

ずれの量 δ が推定できたら、 δ の分だけ、 $f_6(x, y)$ を元の方向へとずらし、正しい画像 $f'_6(x, y)$ を得る。正しい画像 $f'_6(x, y)$ が得られたら、 $f'_6(x, y)$ を使って $p_6(t, \theta)$ の区間で新しい投影データ $p'_6(t, \theta)$ を計算し、 $p_5(t, \theta)$ と合体させることによって、正しい投影データ $p''(t, \theta)$ を得る。この投影データ $p''(t, \theta)$ を再構成することによって、ずれの影響のない再構成画像 $f''(x, y)$ を得ることができる。

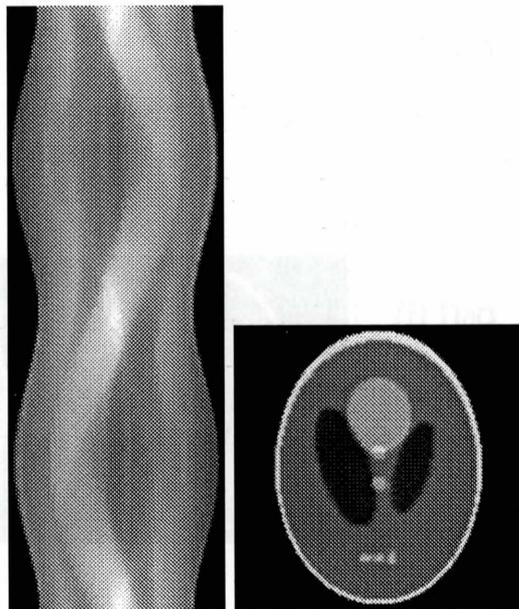


Fig. 3.5: 左:補正後のサイノグラム $p''(t, \theta)$ 右:補正後の再構成画像 $f''(x, y)$

第4章 シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

本提案手法の有効性を示すために Table. 4.1 に示すシミュレーション条件のもとシミュレーションを行った。

本提案手法の有効性を 180 投影、雑音なしという条件のもと確認したあとに、投影数が減った場合でも本提案手法が有効であることを示すために、72 投影、雑音なしという条件のもとでシミュレーションを行った。

また、本研究では再構成画像の画質の評価のために、MSE (平均2乗誤差) を用いる。MSE は値が低いほど原画像に近く誤差が小さくなる値である。 F_{ij} が原画像、 G_{ij} が再構成画像、サイズは $N \times M$ であるとする MSE は以下のようになる。

$$MSE = \frac{1}{N \times M} \sum_i^N \sum_j^M (F_{ij} - G_{ij})^2 \quad (4.1)$$

次に、本提案手法が雑音が付加された場合でも有効であることを示すために、Shepp&Logan ファントムと brain ファントムにそれぞれ雑音を付加し 180 投影、72 投影でシミュレーションを行った。

最後に、90° と 180° 以外でも補正が行えることを示すために、180 投影では 2° から 2° おきに、72 投影では 5° から 5° おきにずれを起こすシミュレーションを行った。

Table 4.1: シミュレーション条件

ファントム	Shepp&Logan ファントム brain ファントム
原画像サイズ	128×128
投影数	180,72
画像再構成手法	ML-EM 法
反復回数	100
ポアソンノイズ	なし 3M counts 5M counts 1.5M counts 2M counts
ずれ	90° と 180° で右方向に 1~5pixel 2° から 2° おきに 358° まで右方向に 5pixel 5° から 5° おきに 355° まで右方向に 5pixel

以下に、今回のシミュレーションで用いた原画像を示す。

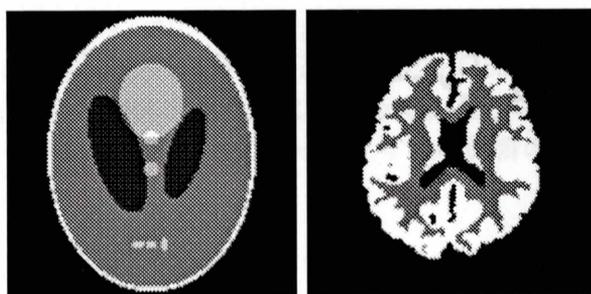


Fig. 4.1: 原画像 左:Shepp&Logan phantom 右:brain phantom

4.2 シミュレーション結果

4.2.1 180 投影、雑音なし

Shepp&Logan Phantom without noise

Fig. 4.2 に 90° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.3 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.2 と同様である。

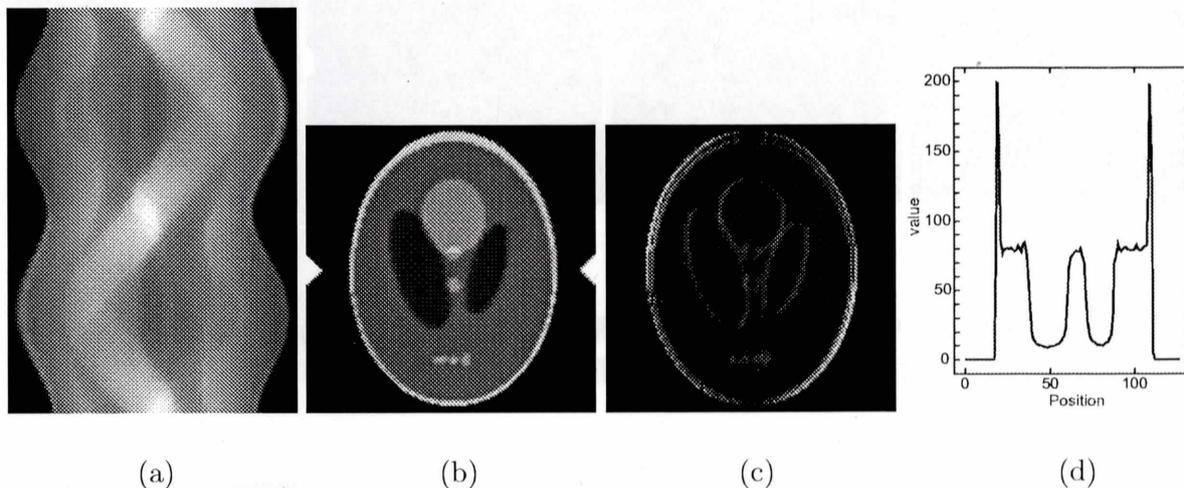


Fig. 4.2: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (381.41) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

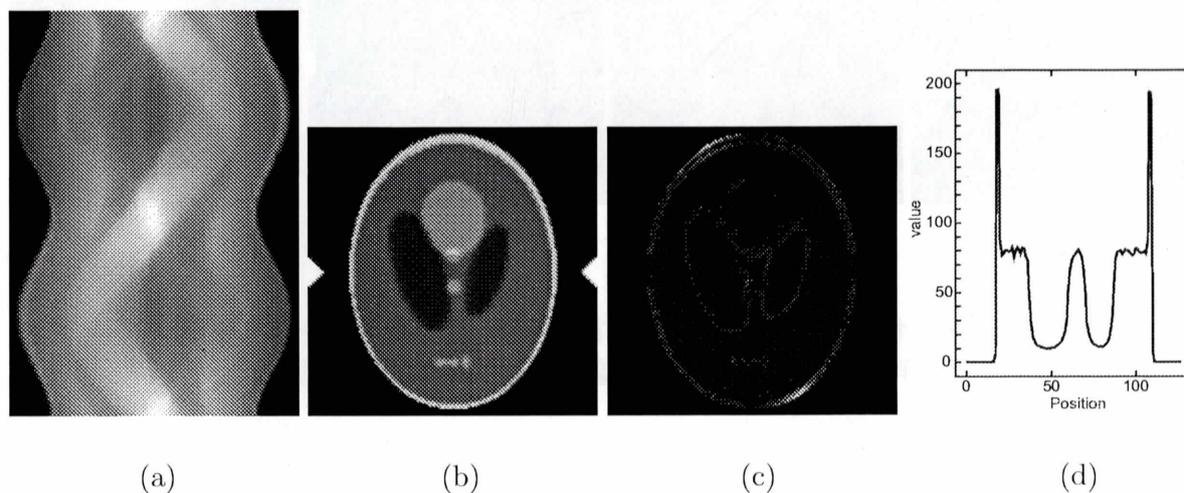


Fig. 4.3: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (14.61) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.4 に 90° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.5 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.4 と同様である。

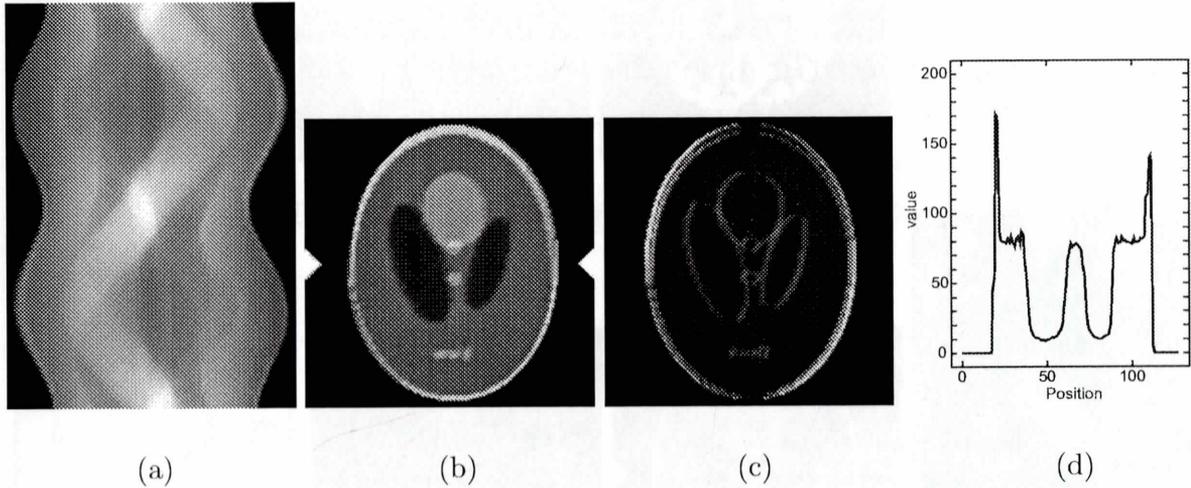


Fig. 4.4: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (890.42) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

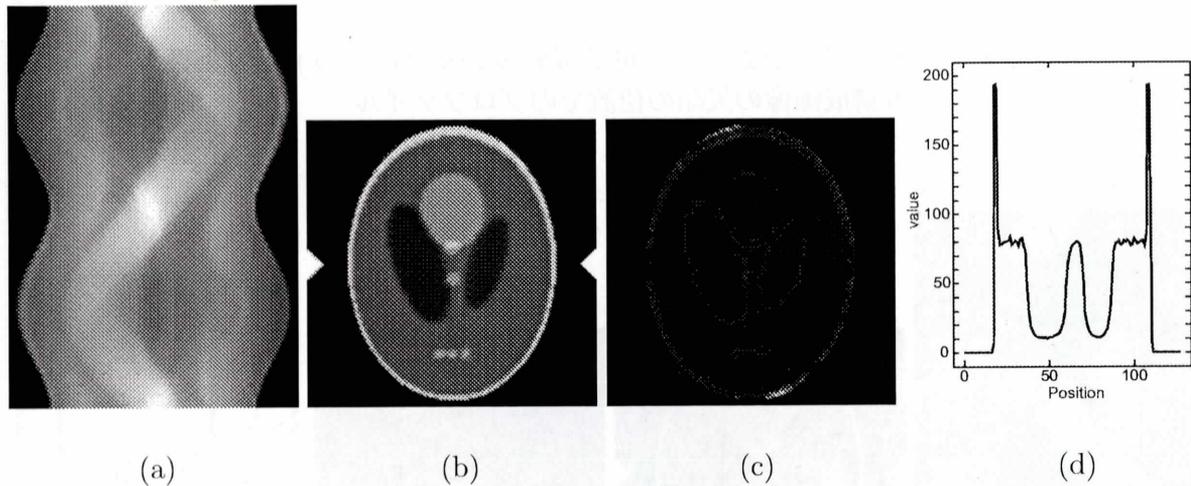


Fig. 4.5: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (12.64) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.6 に 90° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.7 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.6 と同様である。

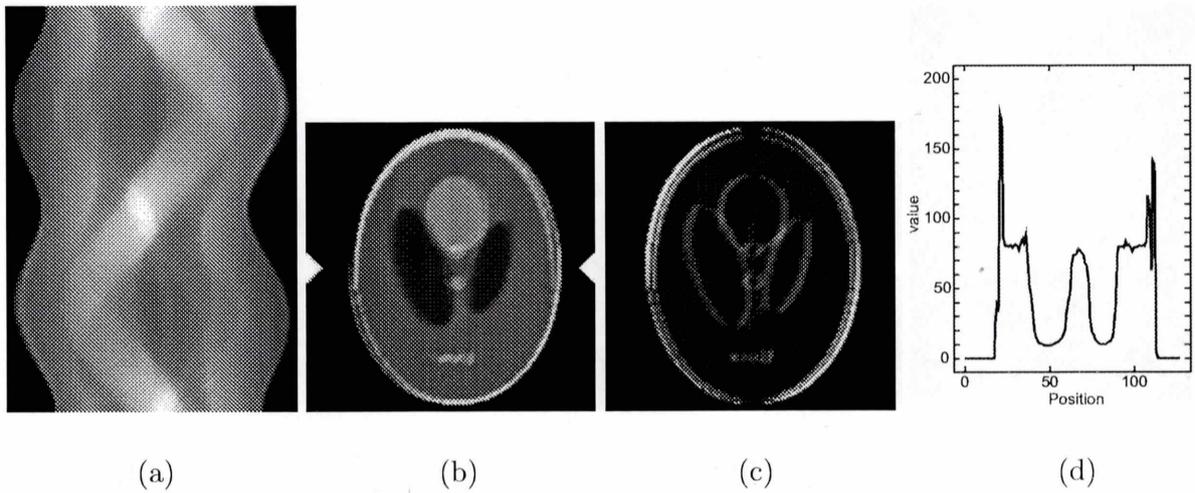


Fig. 4.6: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1187.16) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

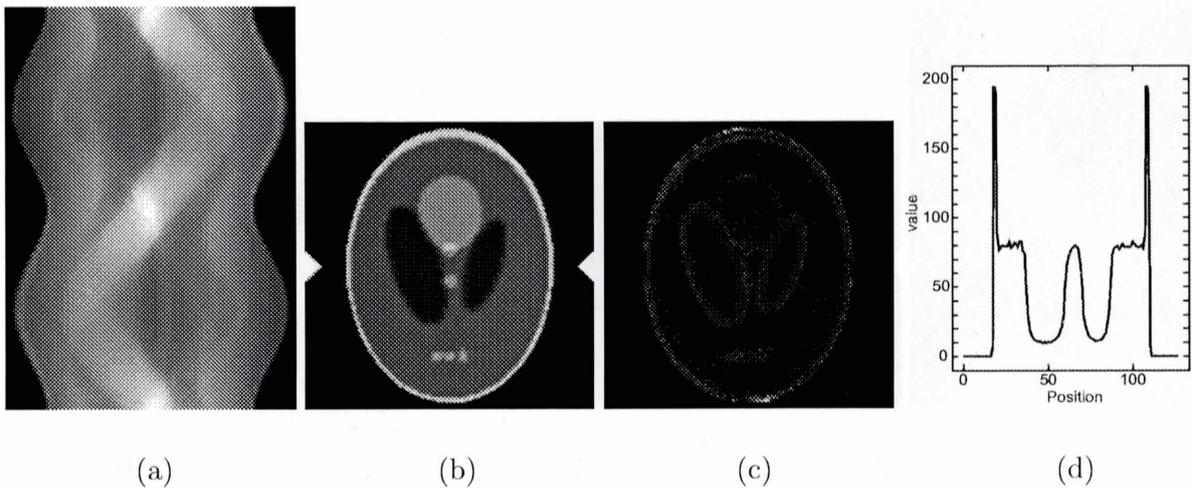


Fig. 4.7: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (7.01) (c) 差分画像 (d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.8に90°で右に4pixelずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに(b)の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の()内の値はMSEの値を示している。これに対して補正を行った結果をFig. 4.9に示す。(a)~(d)はFig. 4.8と同様である。

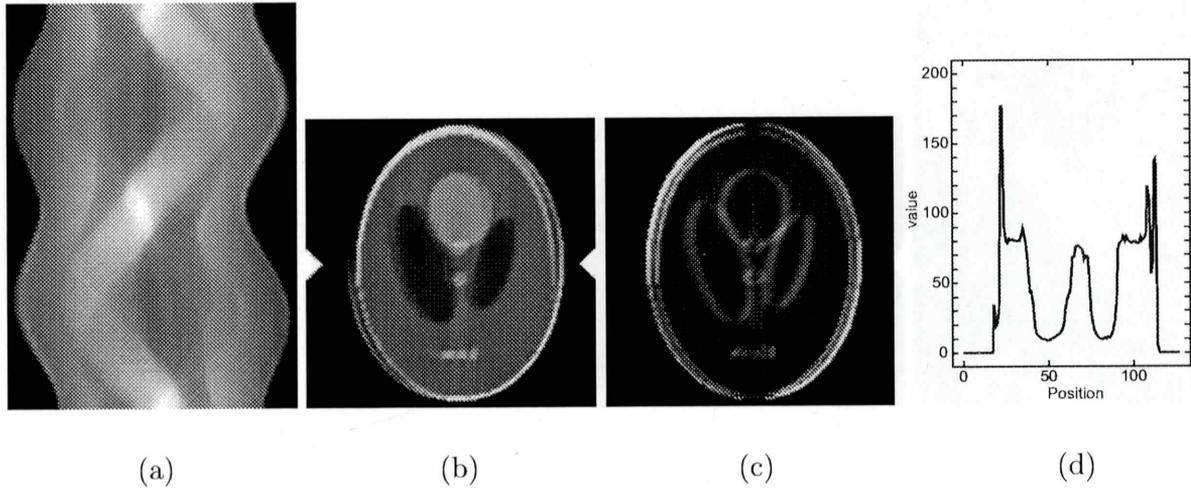


Fig. 4.8: (a) サイノグラム (b) 再構成画像(1388.88) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

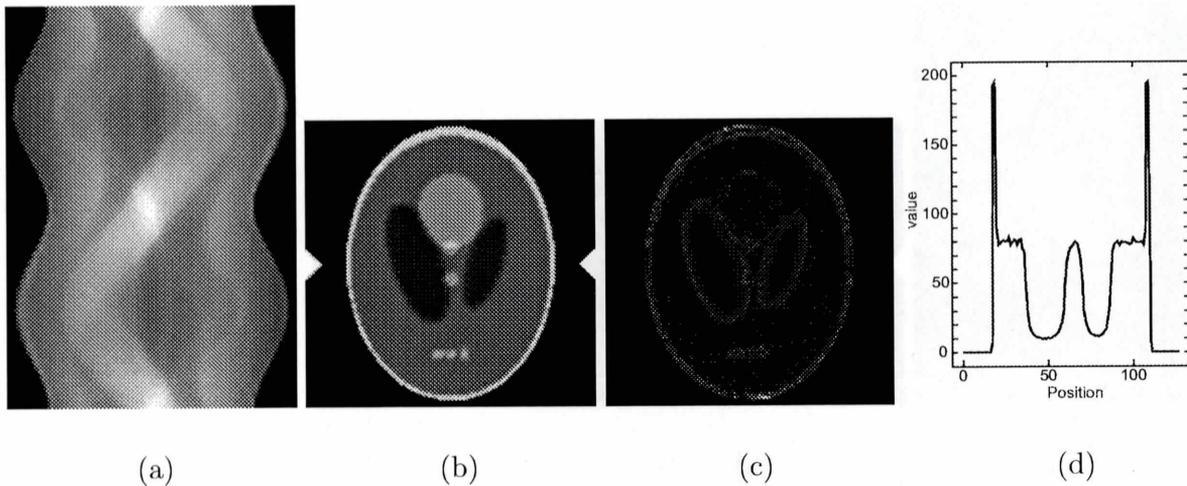


Fig. 4.9: (a) サイノグラム (b) 再構成画像(6.44) (c) 差分画像 (d) 再
構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.10 に 90° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.11 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.10 と同様である。

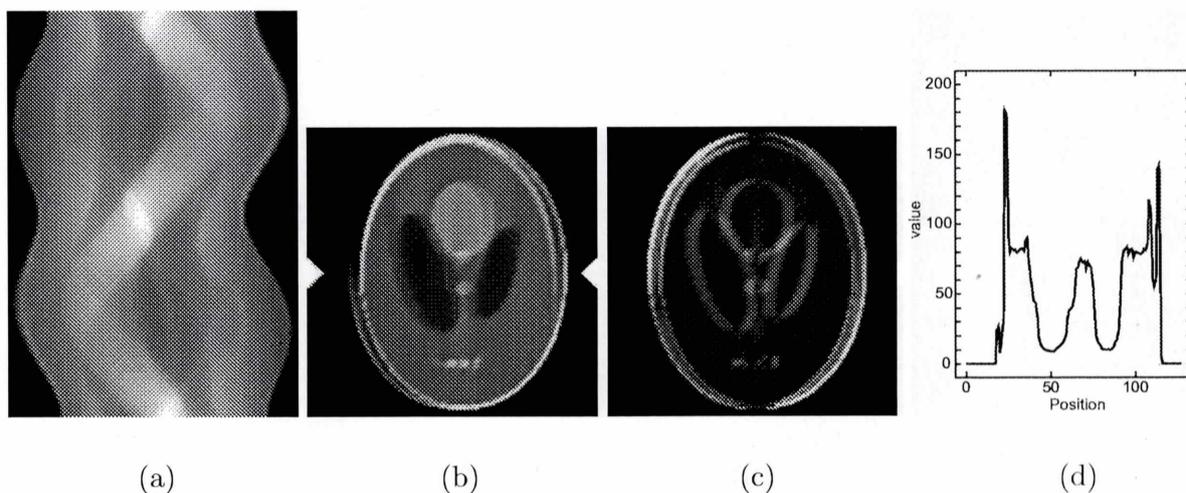


Fig. 4.10: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1558.27) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

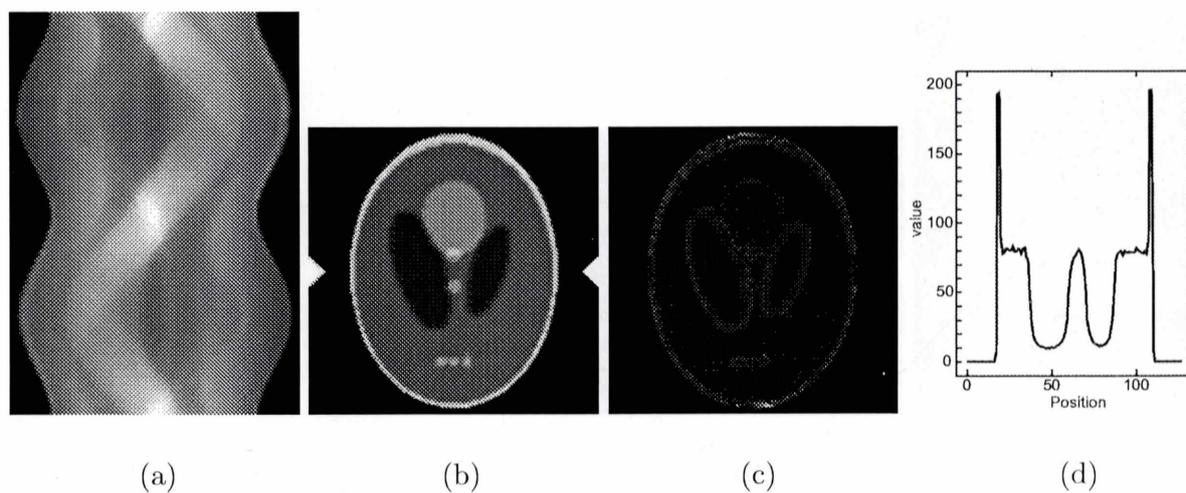


Fig. 4.11: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (7.19) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.12に 180° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.13 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.12 と同様である。

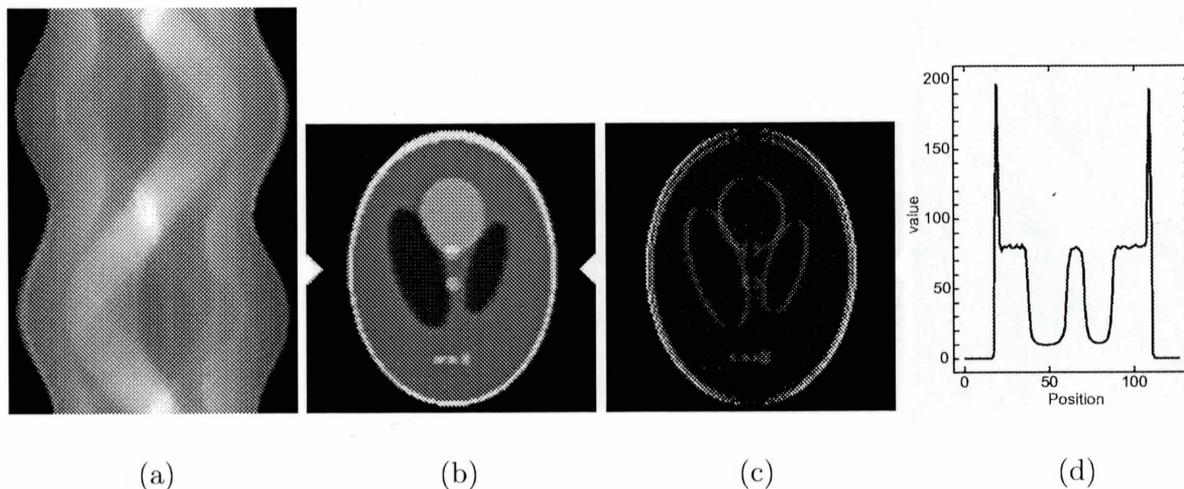


Fig. 4.12: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (158.75) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

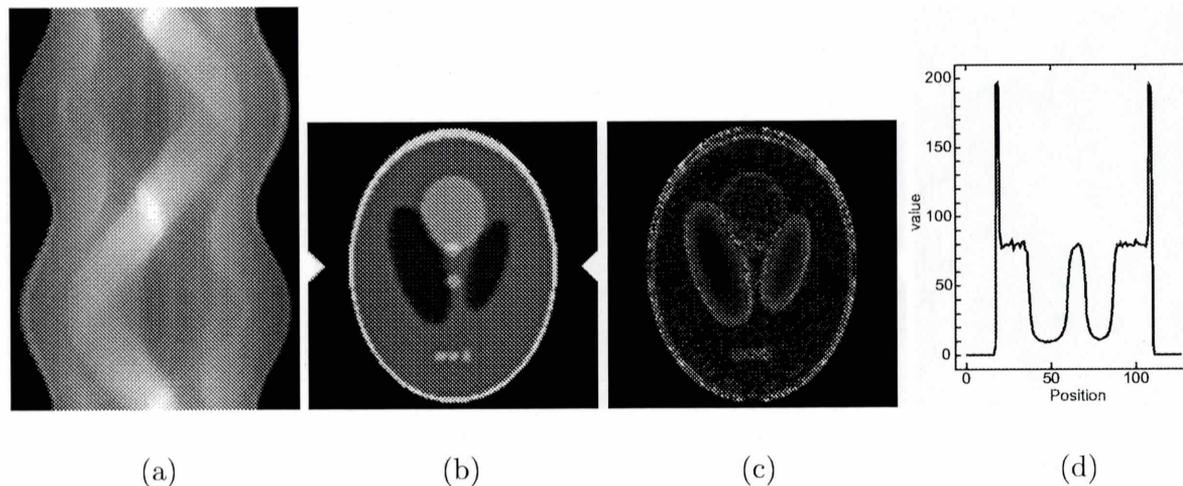


Fig. 4.13: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2.17) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.14 に 180° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.15 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.14 と同様である。

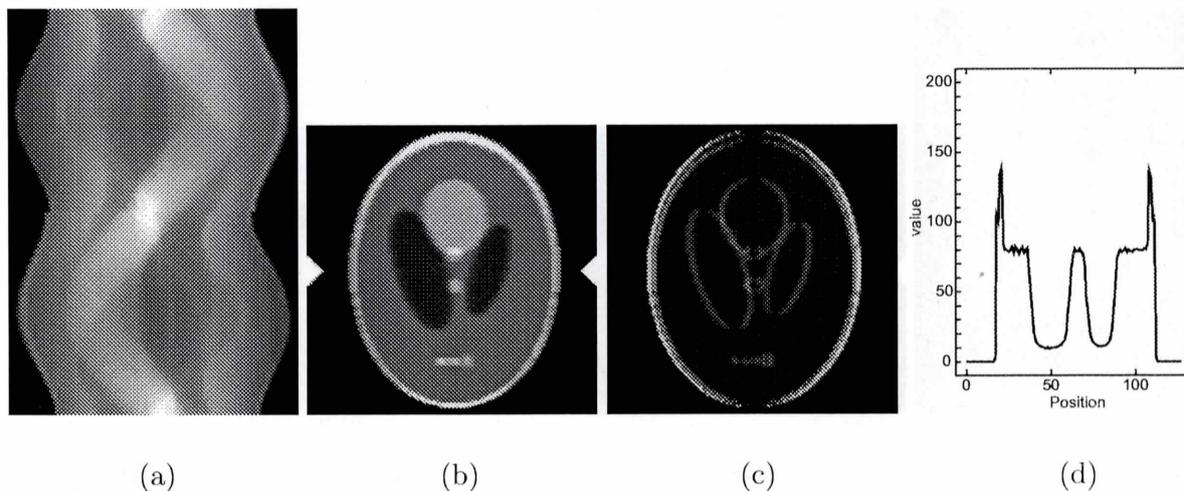


Fig. 4.14: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (367.54) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

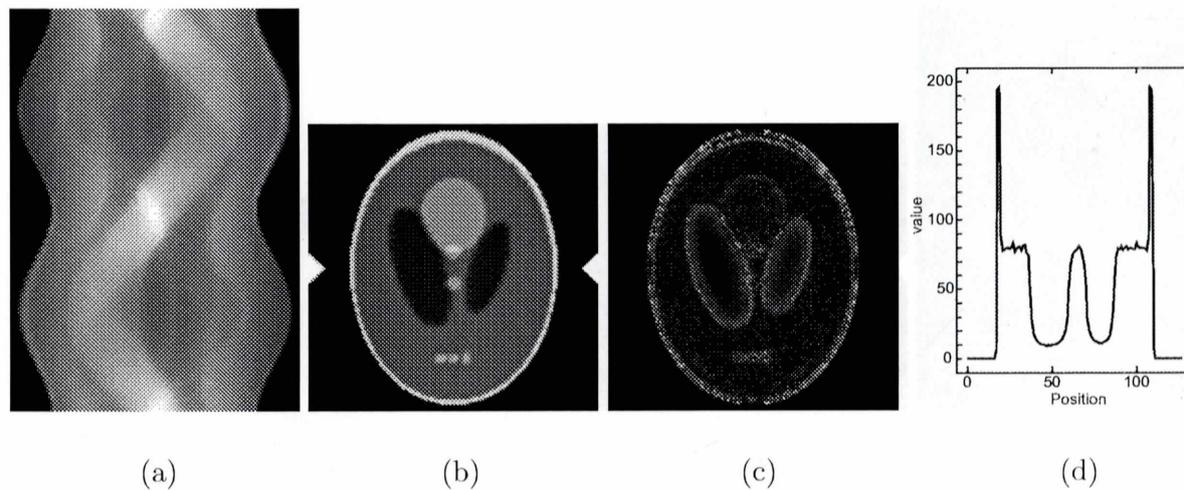


Fig. 4.15: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2.13) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.16 に 180° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.17 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.16 と同様である。

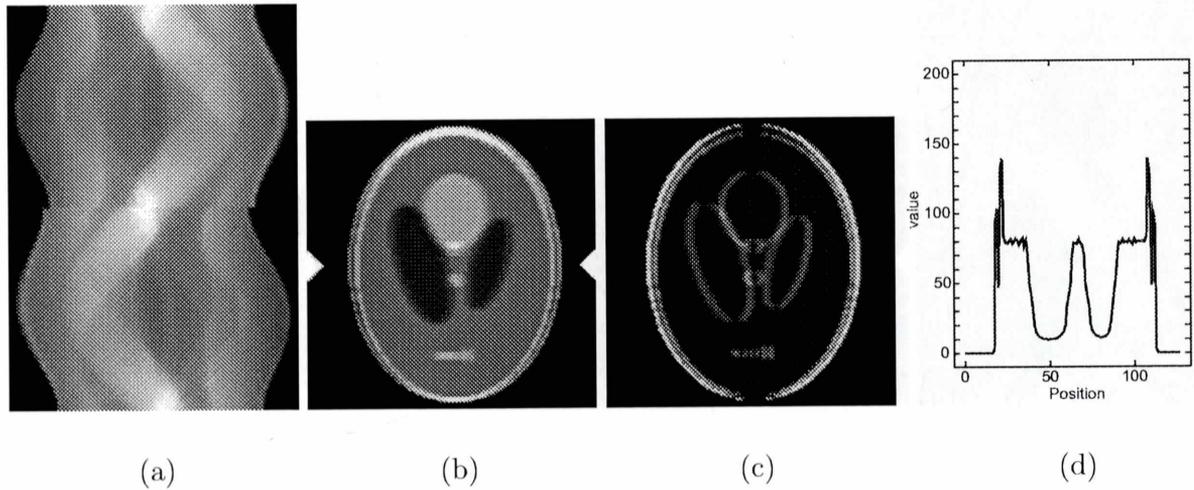


Fig. 4.16: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (488.14) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

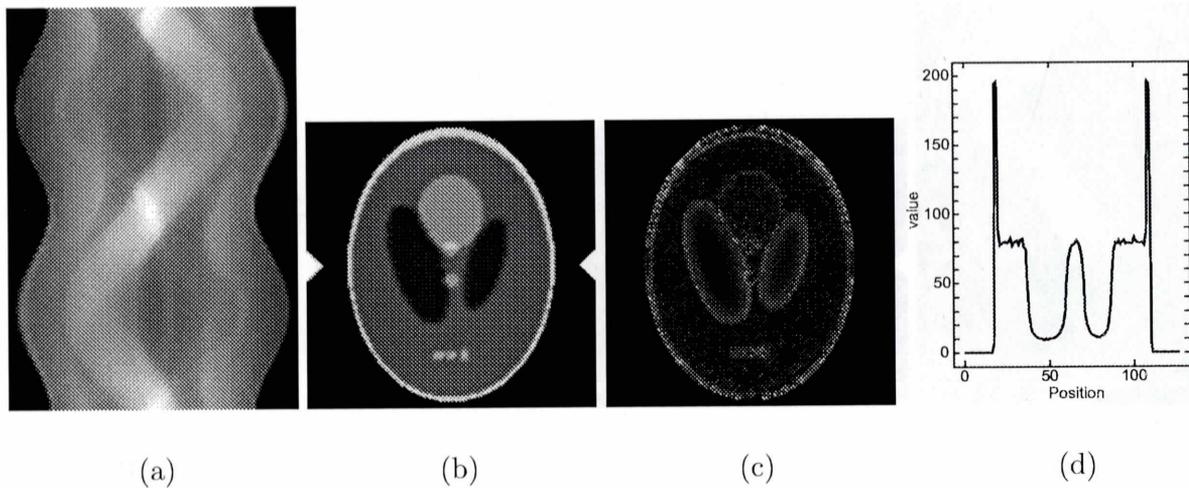


Fig. 4.17: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2.22) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.18 に 180° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.19 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.18 と同様である。

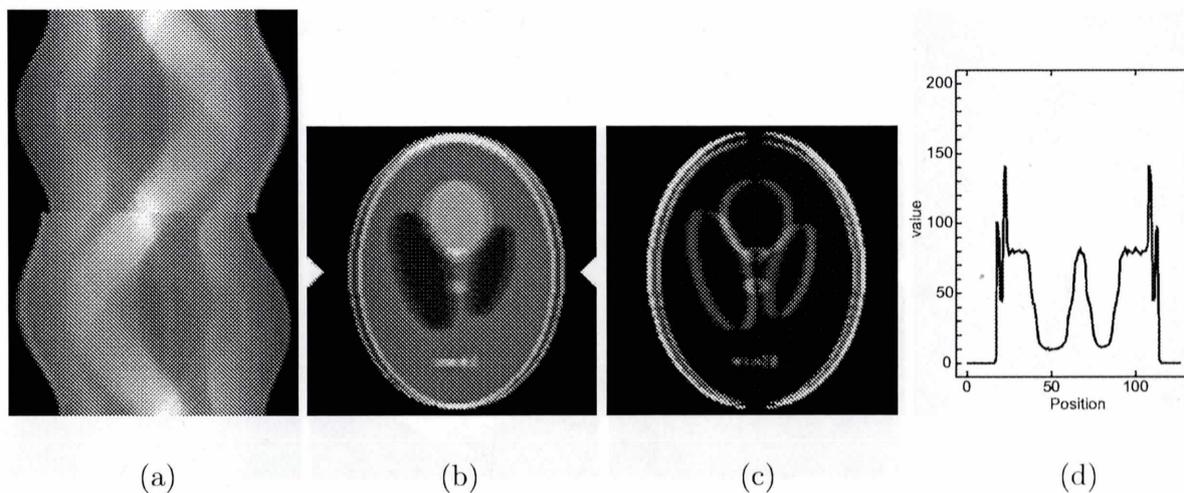


Fig. 4.18: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (569.75) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

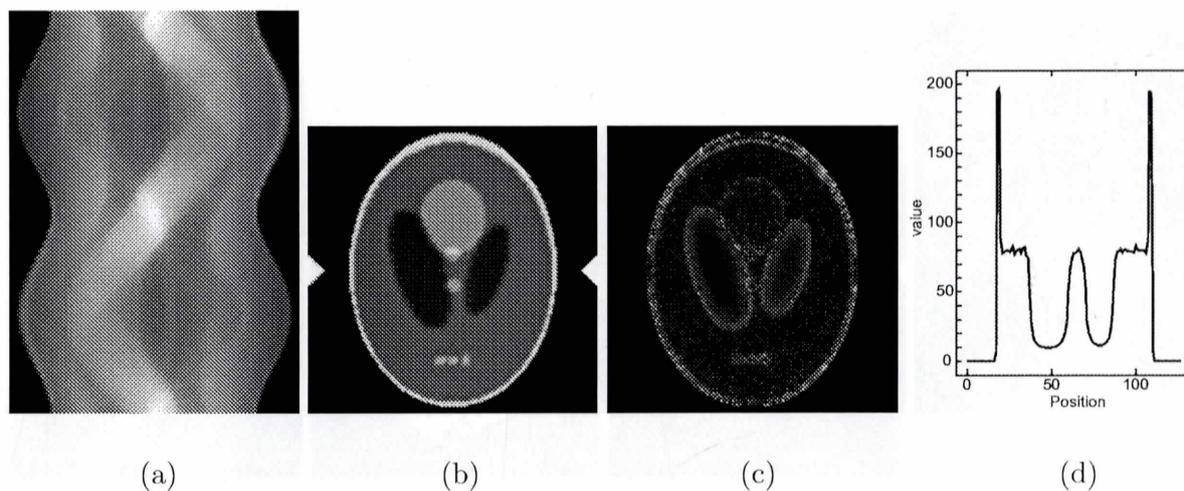


Fig. 4.19: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2.21) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.20 に 180° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.21 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.20 と同様である。

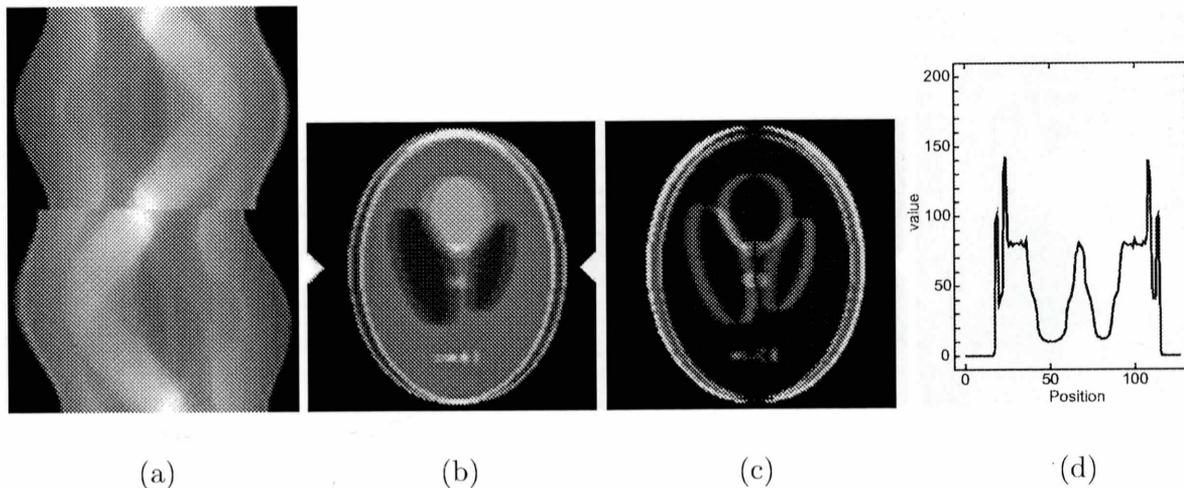


Fig. 4.20: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (639.39) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

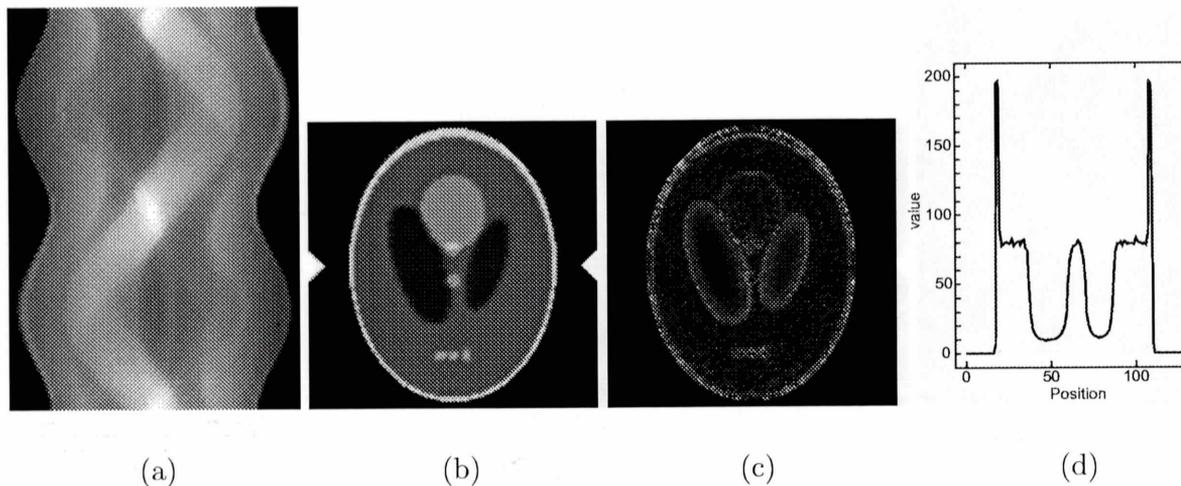


Fig. 4.21: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2.19) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

brain Phantom without noise

Fig. 4.22 に 90° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.23 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.22 と同様である。

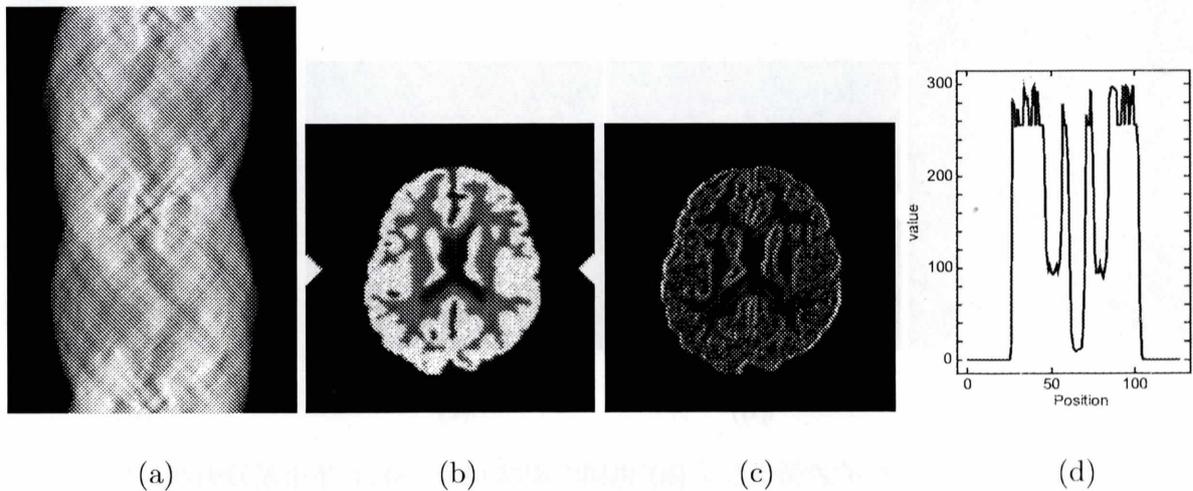


Fig. 4.22: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (772.55) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

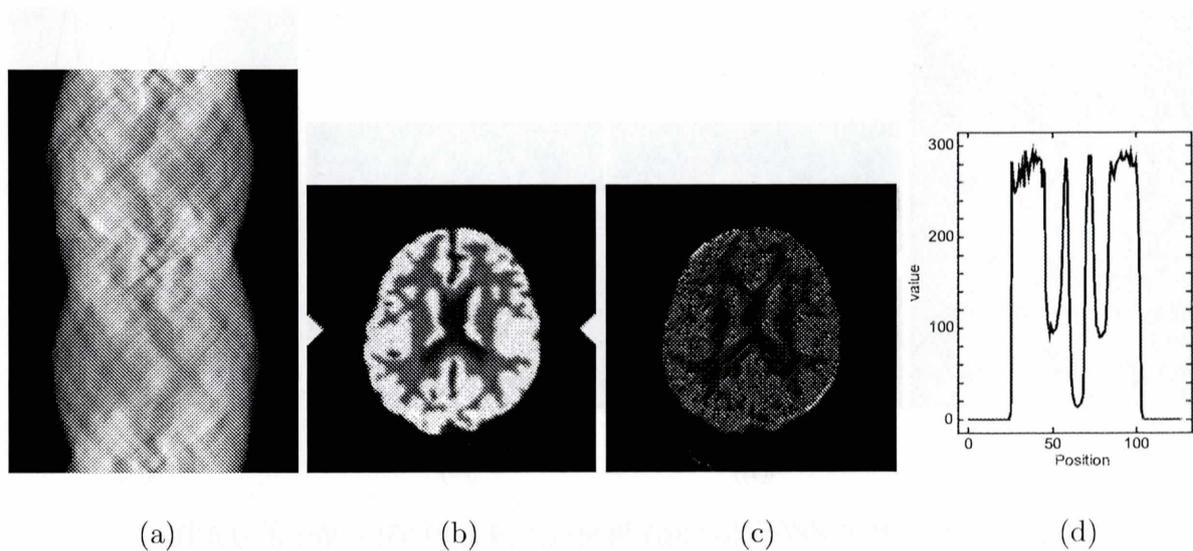


Fig. 4.23: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (150.27) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.24 に 90° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.25 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.24 と同様である。

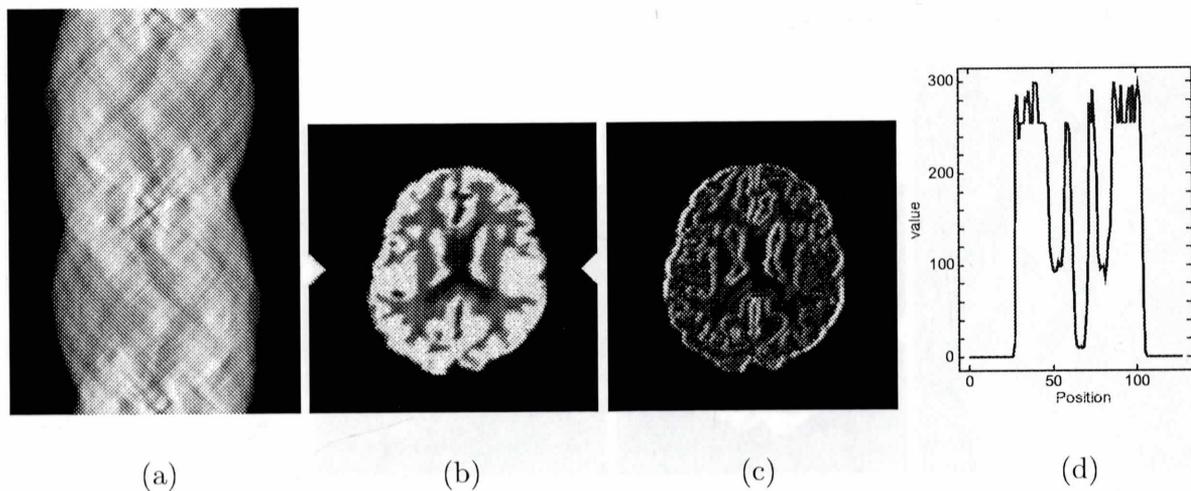


Fig. 4.24: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2017.81) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

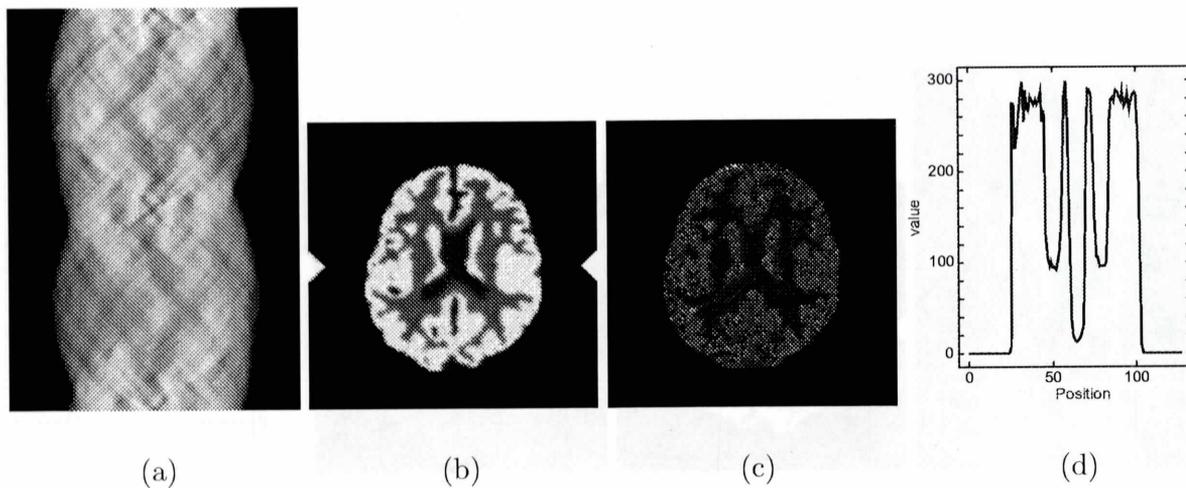


Fig. 4.25: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (119.05) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.26 に 90° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.27 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.26 と同様である。

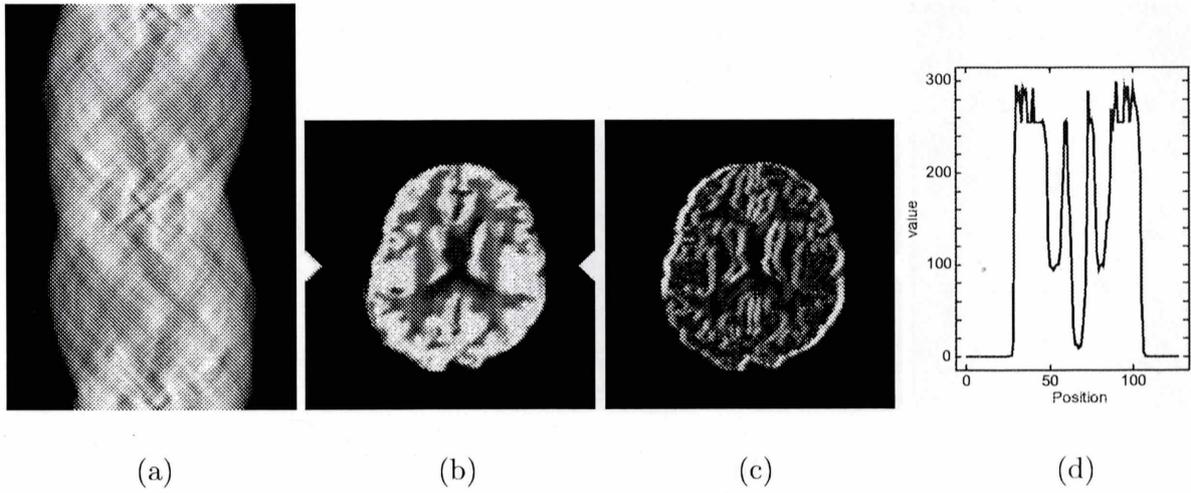


Fig. 4.26: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (3226.05) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

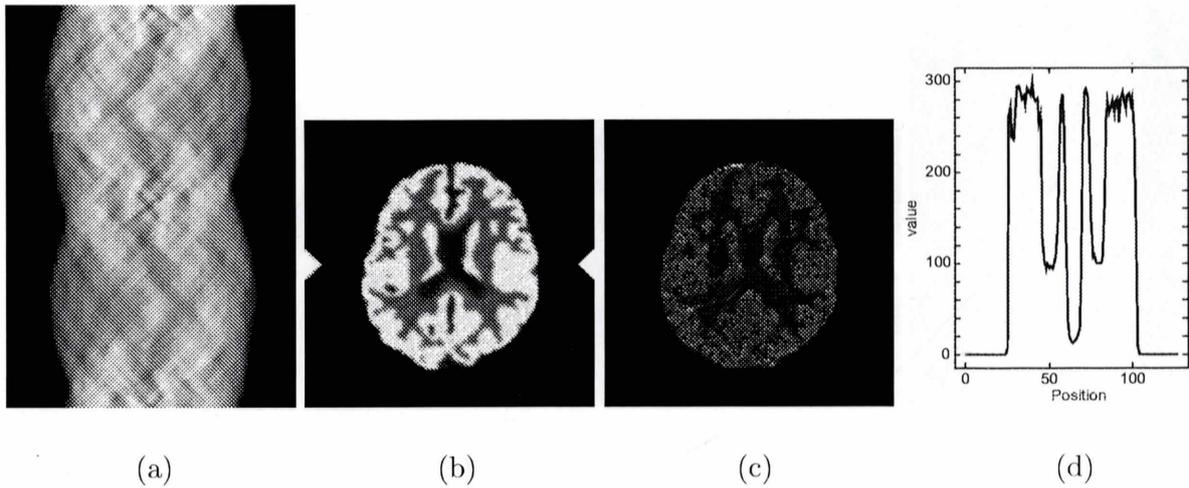
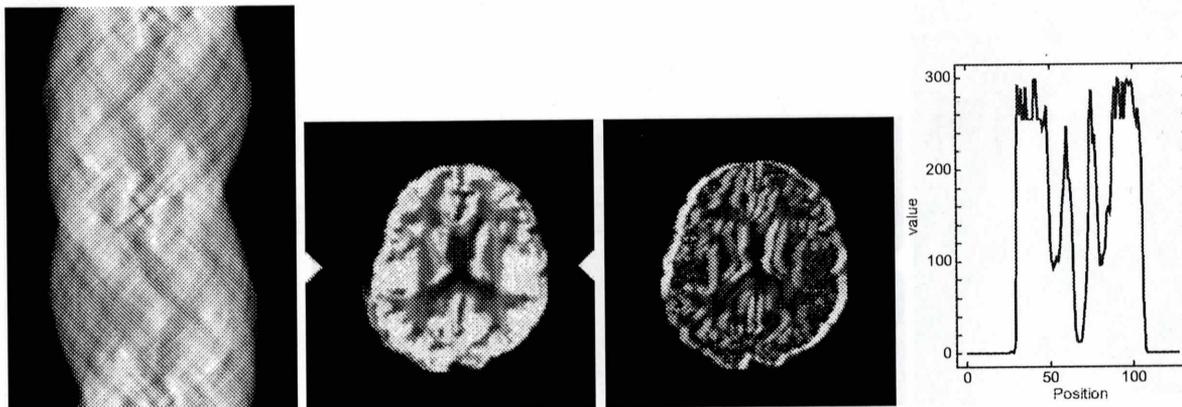


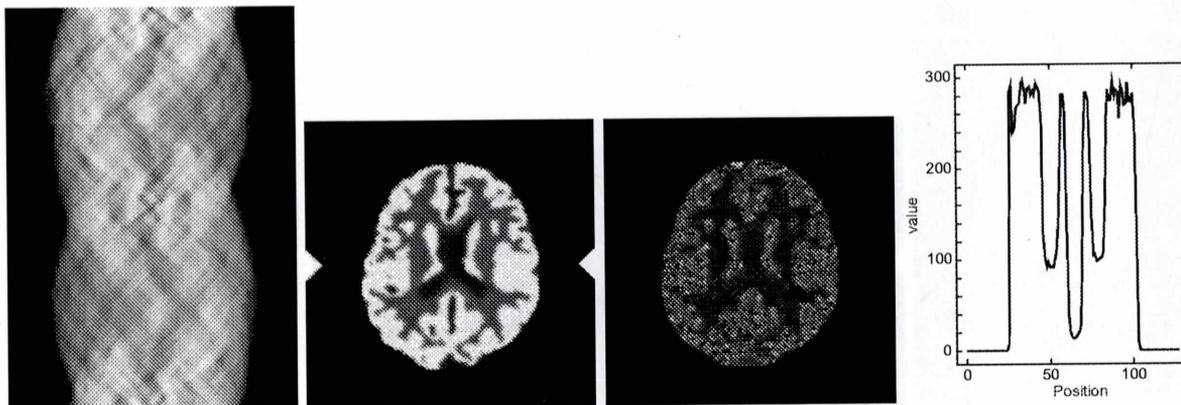
Fig. 4.27: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (125.17) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.28 に 90° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.29 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.28 と同様である。



(a) (b) (c) (d)

Fig. 4.28: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (4167.89) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル



(a) (b) (c) (d)

Fig. 4.29: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (114.59) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.30 に 90° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.31 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.30 と同様である。

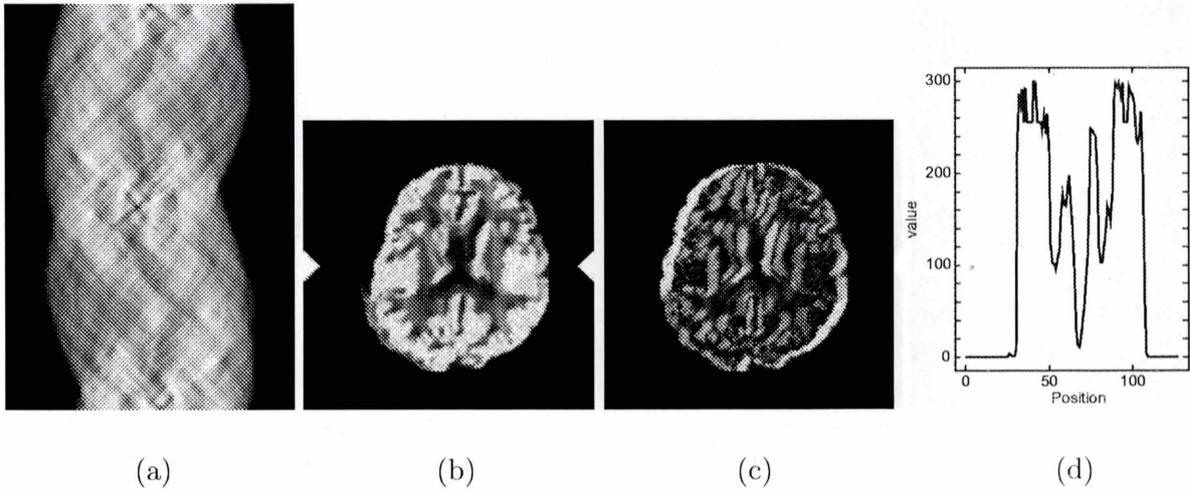


Fig. 4.30: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (4901.42) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

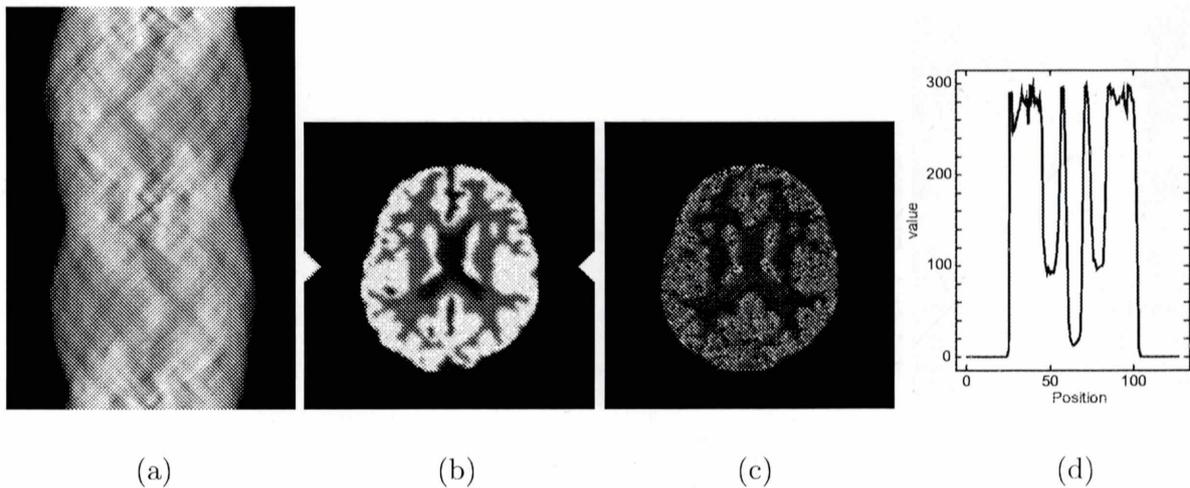


Fig. 4.31: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (117.03) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.32に180°で右に1pixelずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに(b)の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の()内の値はMSEの値を示している。これに対して補正を行った結果をFig. 4.33に示す。(a)~(d)はFig. 4.32と同様である。

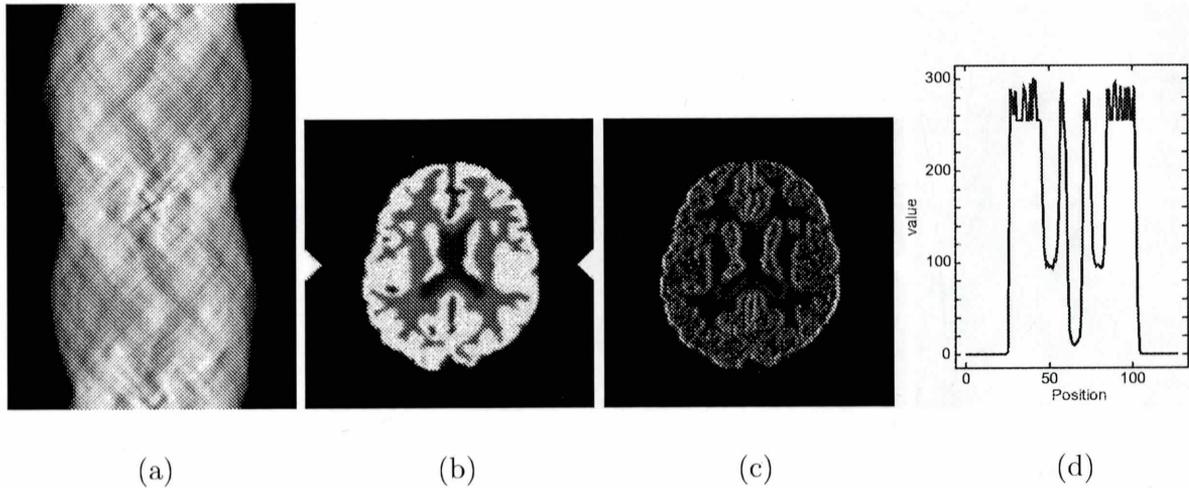


Fig. 4.32: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (371.57) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

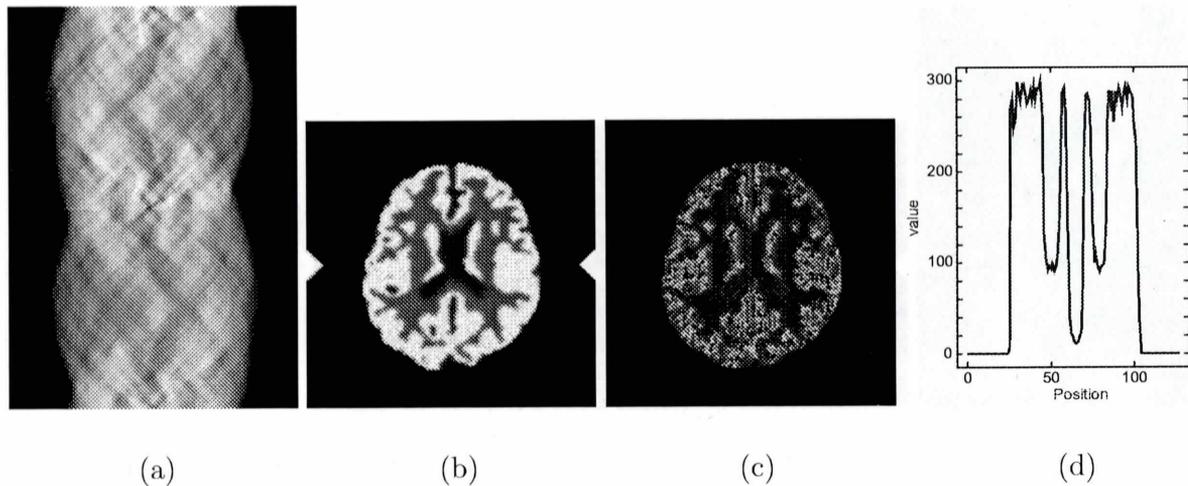


Fig. 4.33: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (103.22) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.34 に 180° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.35 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.34 と同様である。

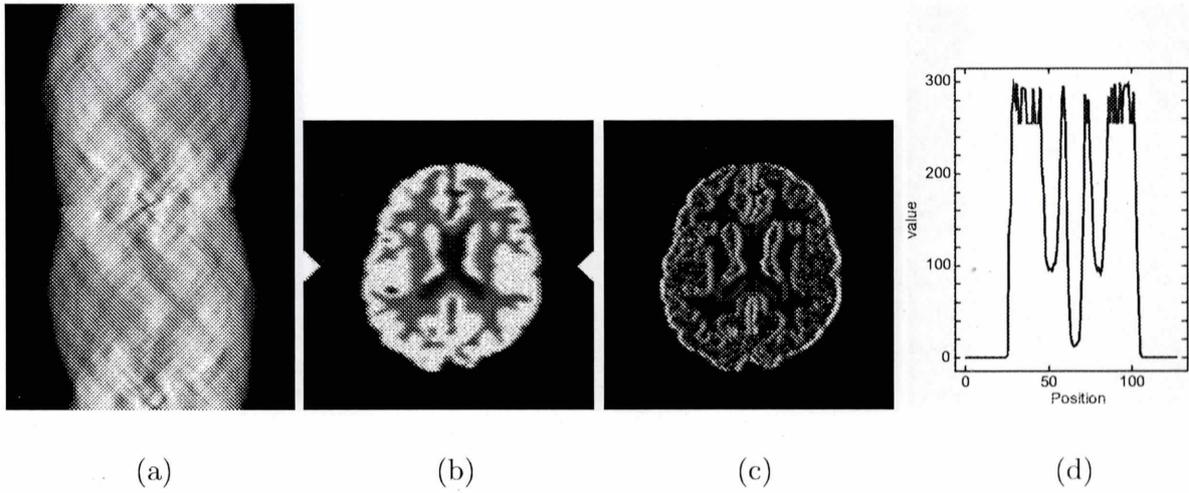


Fig. 4.34: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (843.45) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

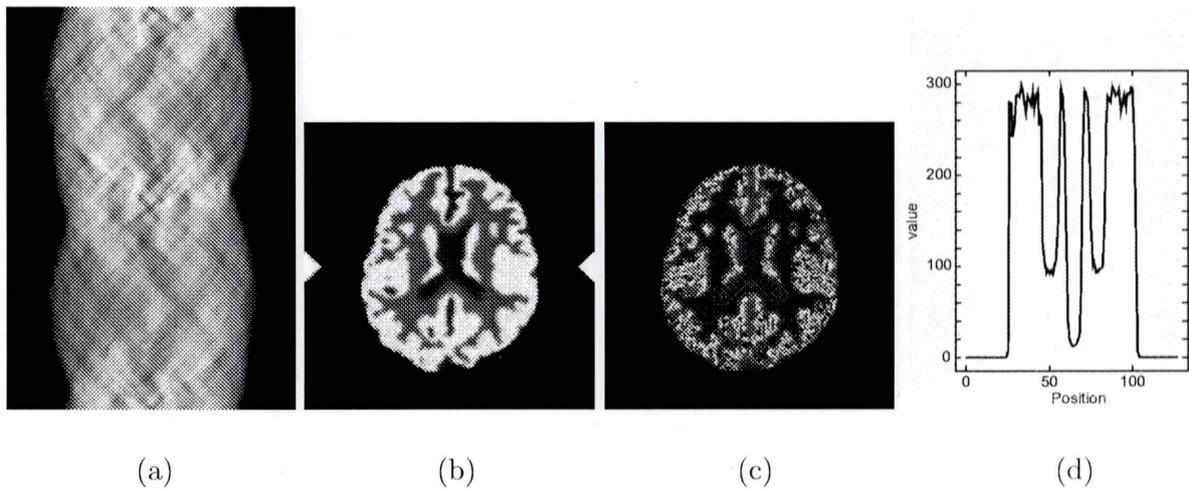


Fig. 4.35: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (96.79) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.36 に 180° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.37 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.36 と同様である。

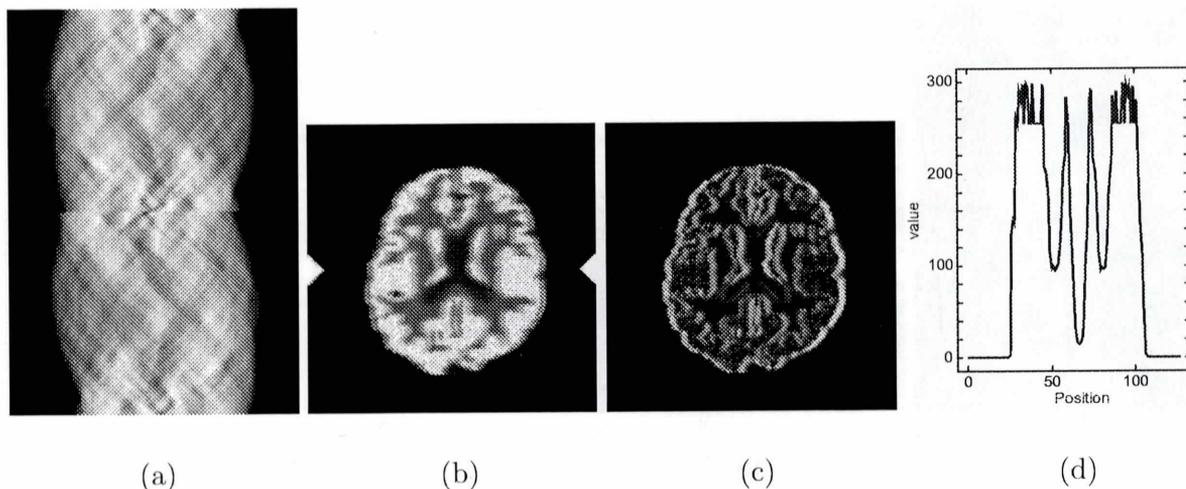


Fig. 4.36: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1286.24) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

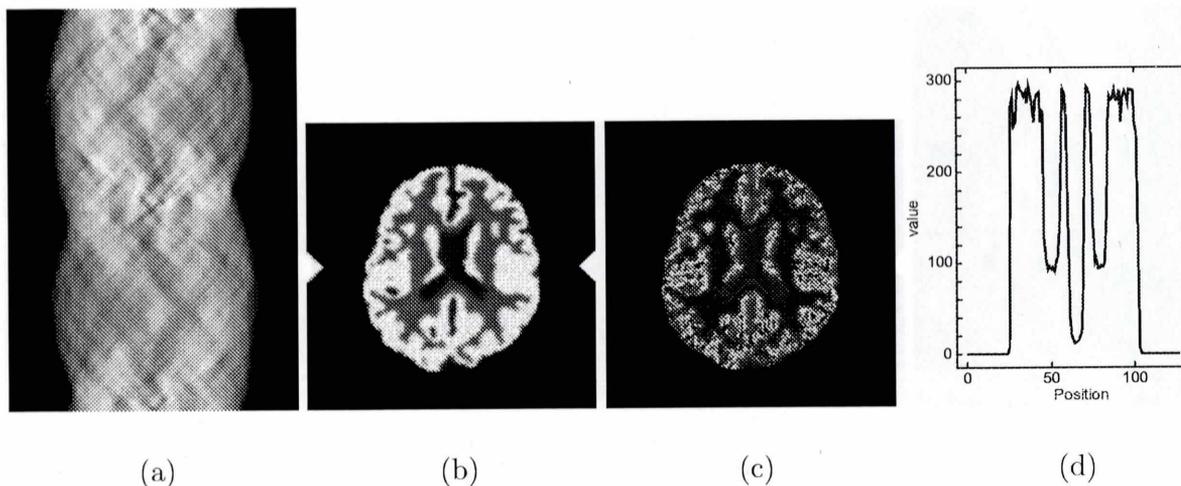


Fig. 4.37: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (97.51) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.38 に 180° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.39 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.38 と同様である。

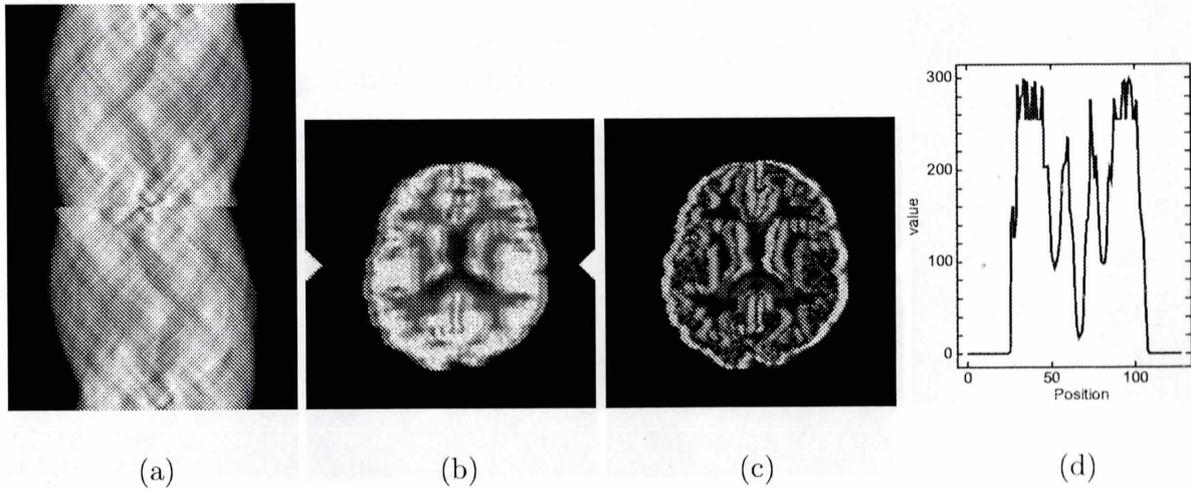


Fig. 4.38: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1646.94) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

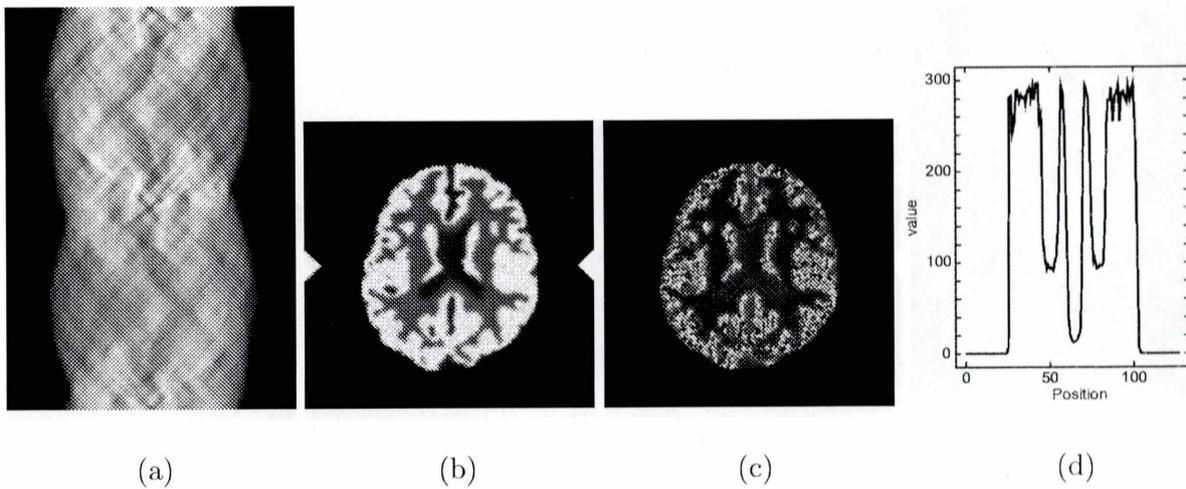


Fig. 4.39: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (96.69) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.40 に 180° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.41 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.40 と同様である。

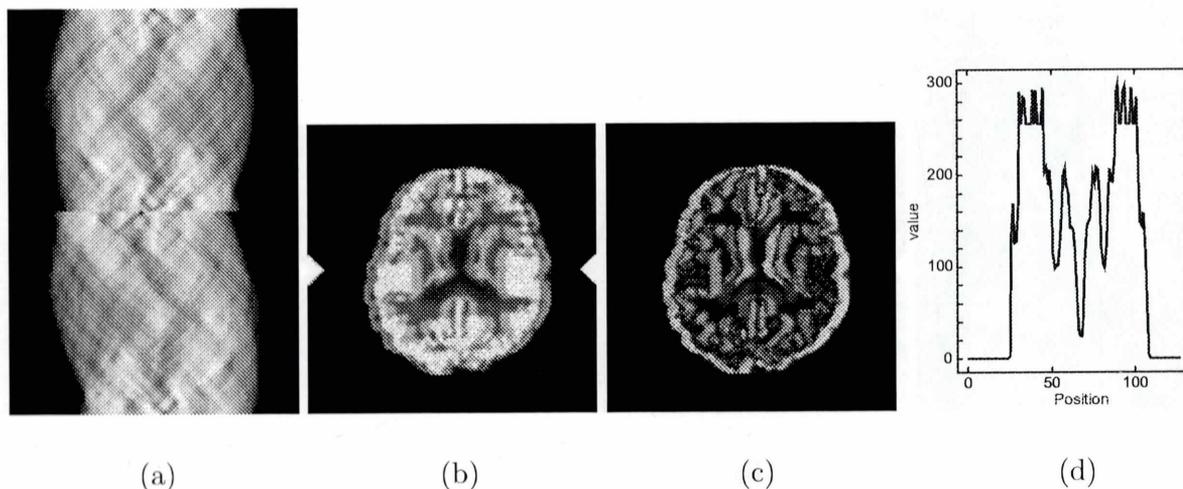


Fig. 4.40: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1928.97) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

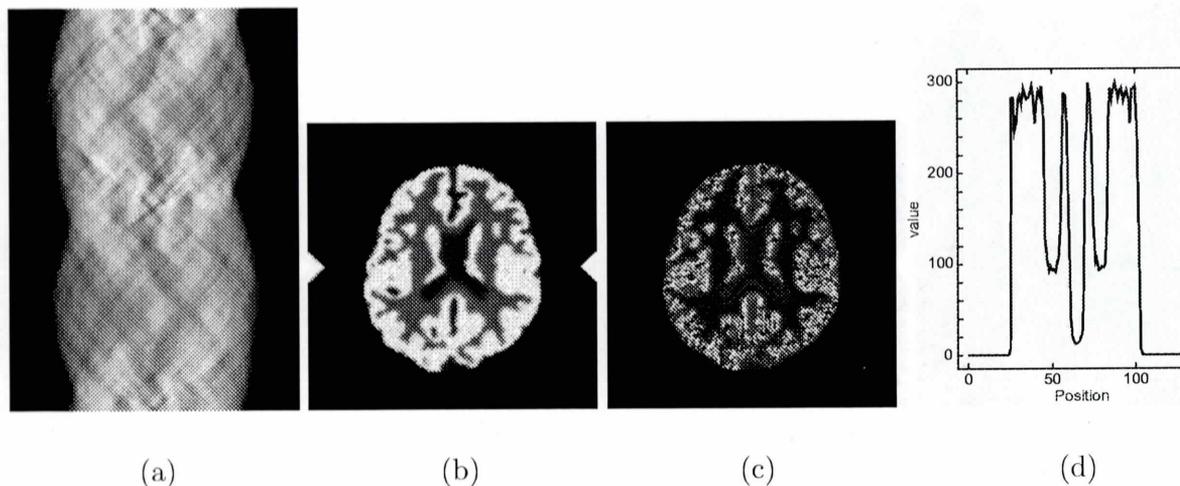


Fig. 4.41: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (95.56) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

4.2.2 72 投影、雑音なし

Shepp&Logan Phantom without noise

Fig. 4.42 に 90° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.43 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.42 と同様である。

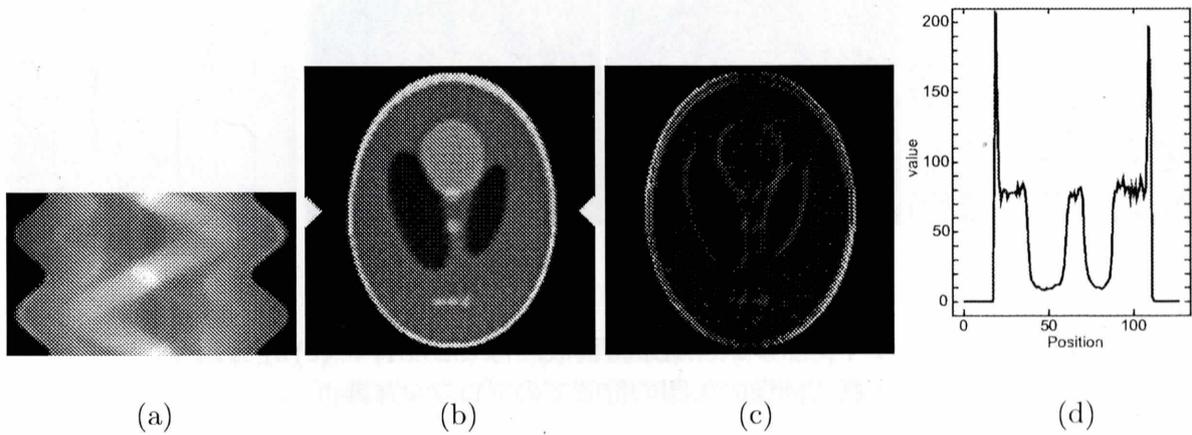


Fig. 4.42: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (211.96) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

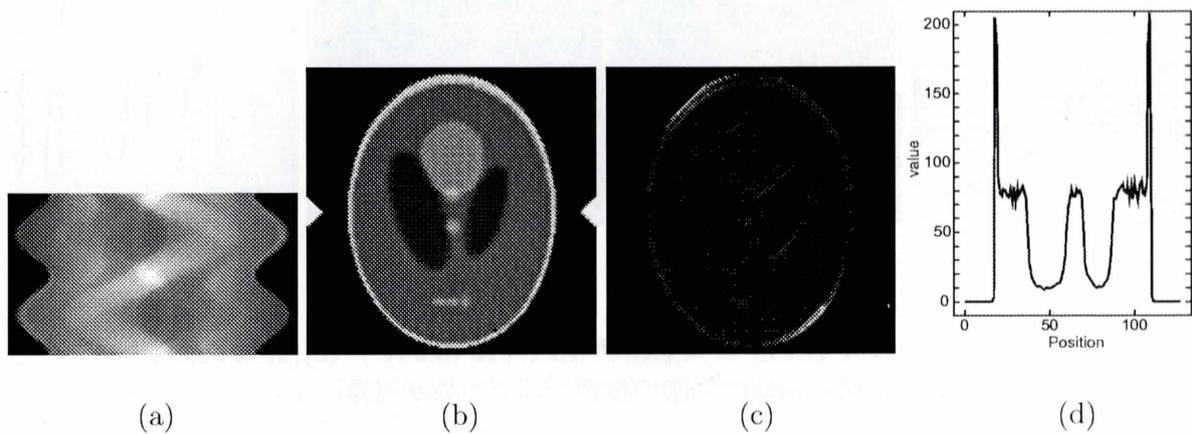


Fig. 4.43: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (16.52) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.44 に 90° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.45 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.44 と同様である。

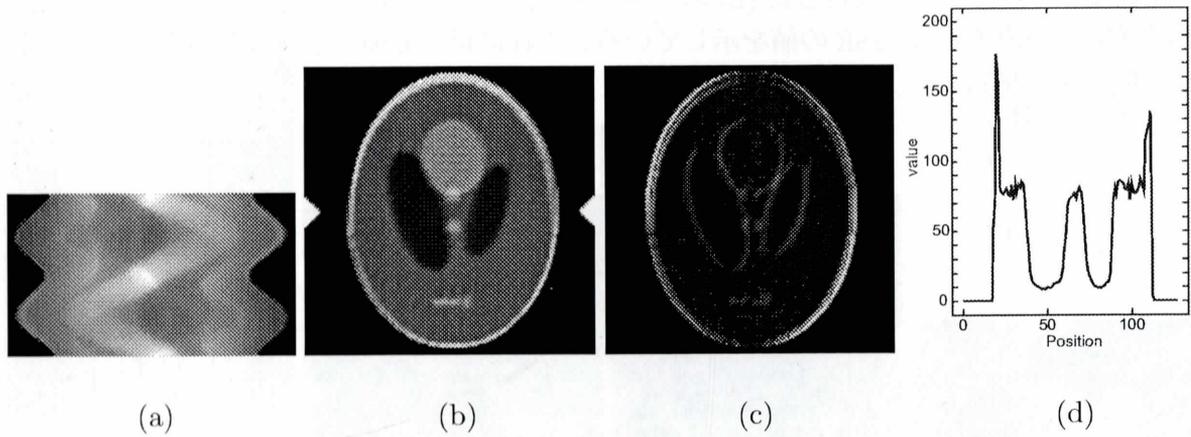


Fig. 4.44: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (528.01) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

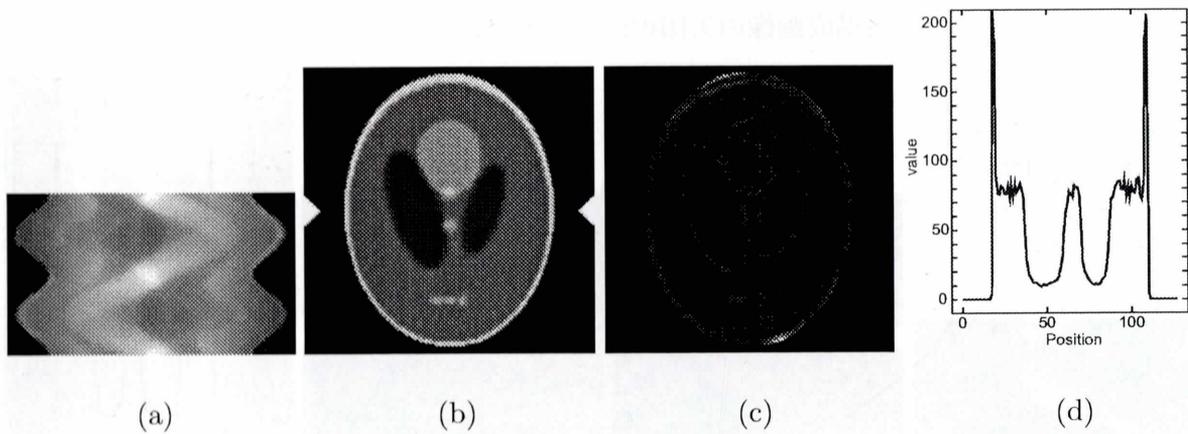


Fig. 4.45: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (6.94) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.46 に 90° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.47 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.46 と同様である。

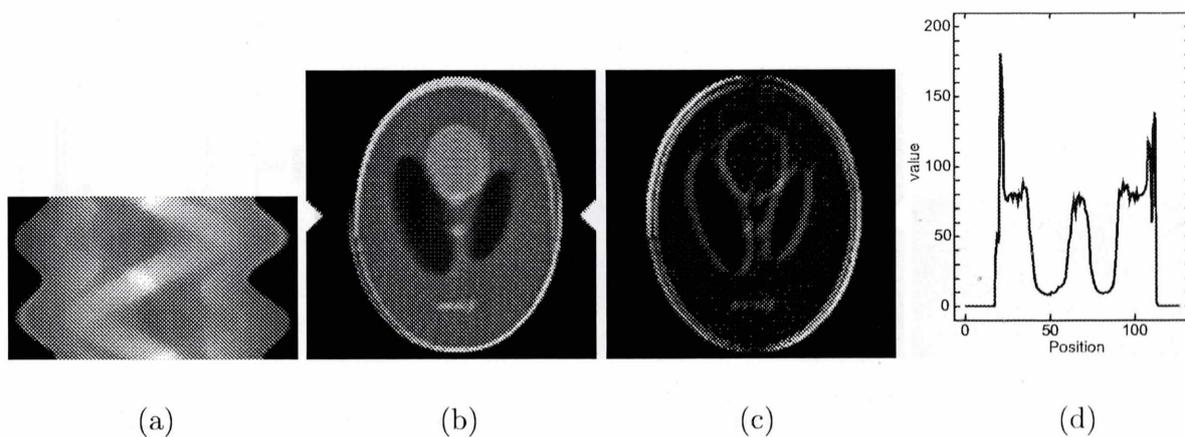


Fig. 4.46: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (745.49) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

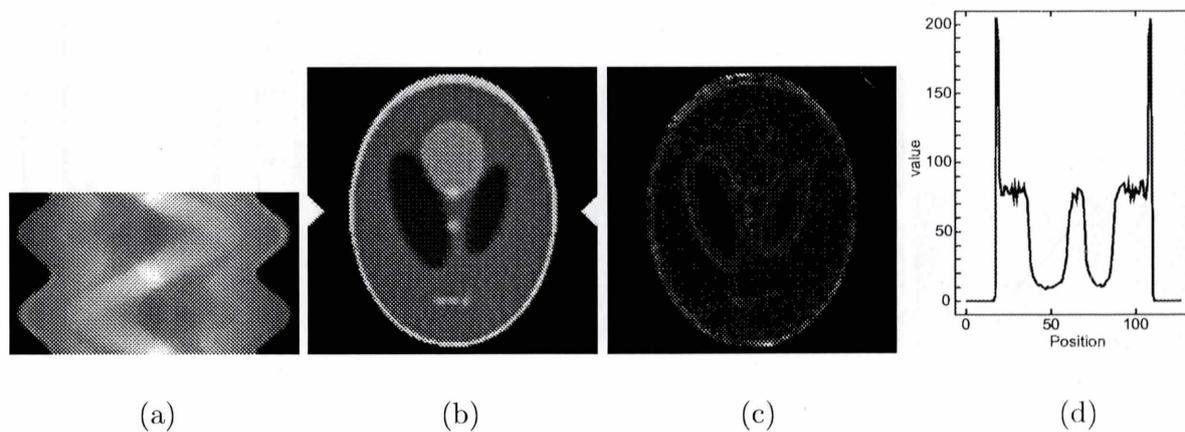


Fig. 4.47: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (3.73) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.48 に 90° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.49 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.48 と同様である。

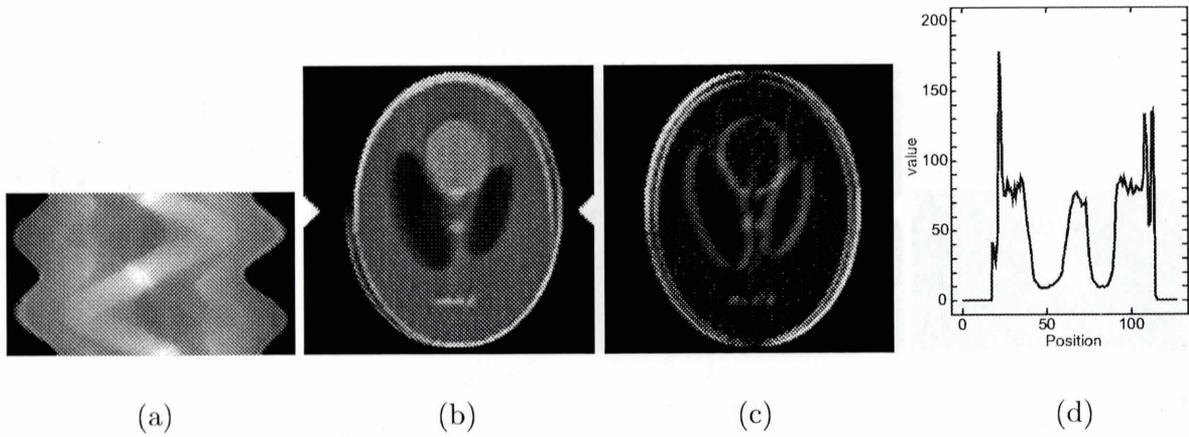


Fig. 4.48: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (899.99) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

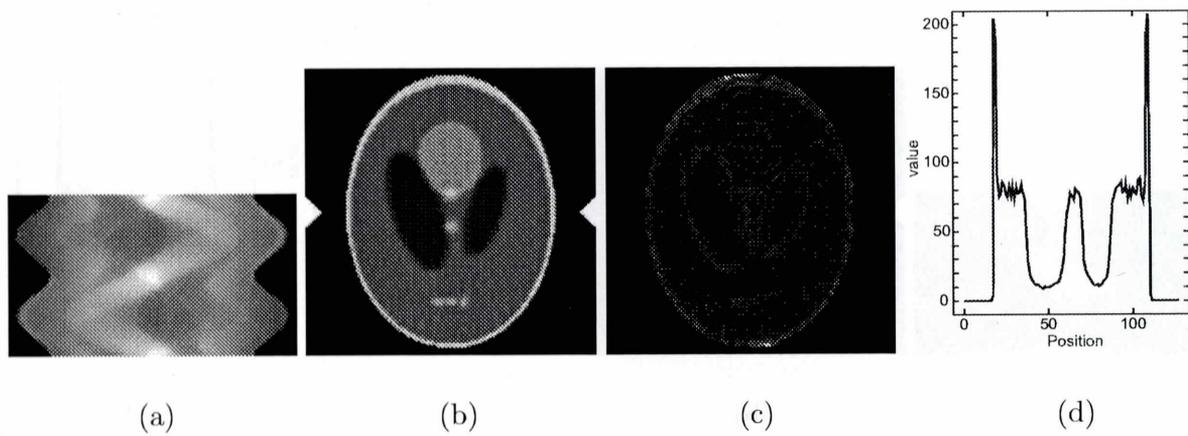


Fig. 4.49: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (4.11) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.50 に 90° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.51 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.50 と同様である。

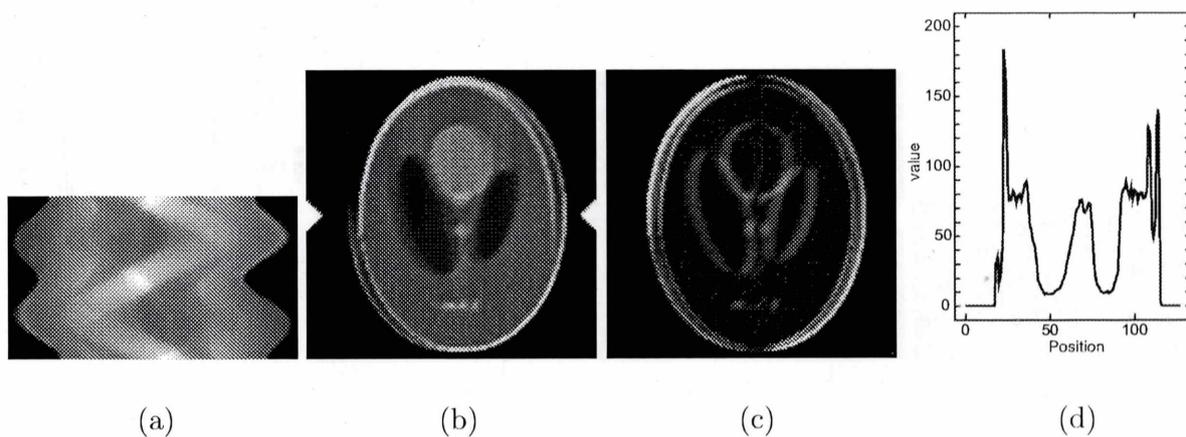


Fig. 4.50: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1028.85) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

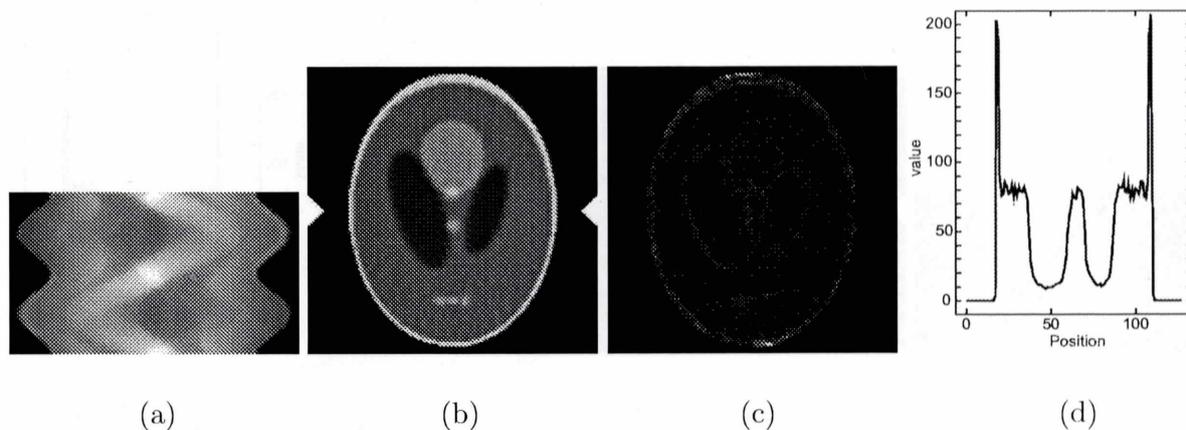


Fig. 4.51: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (4.47) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.52に180°で右に1pixelずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに(b)の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の()内の値はMSEの値を示している。これに対して補正を行った結果をFig. 4.53に示す。(a)~(d)はFig. 4.52と同様である。

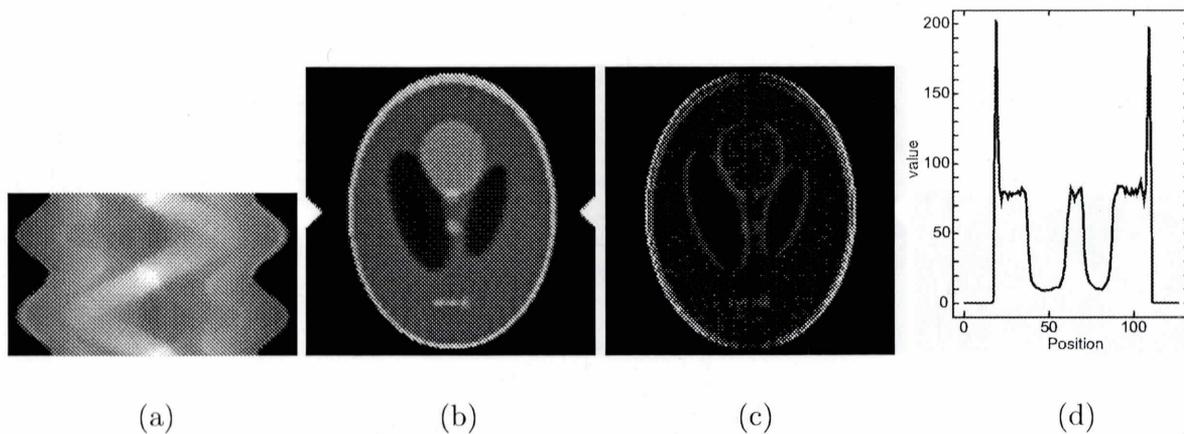


Fig. 4.52: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (93.47) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

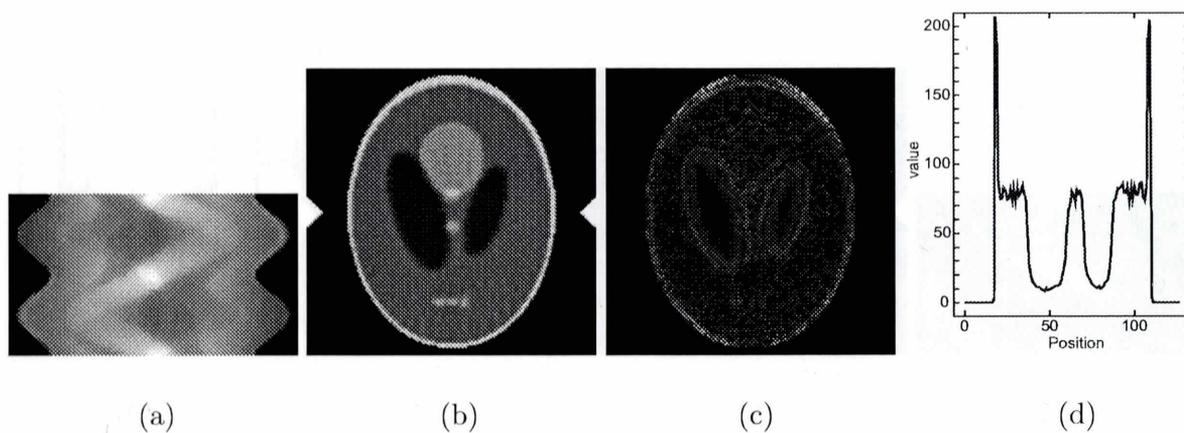


Fig. 4.53: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1.46) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.54 に 180° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.55 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.54 と同様である。

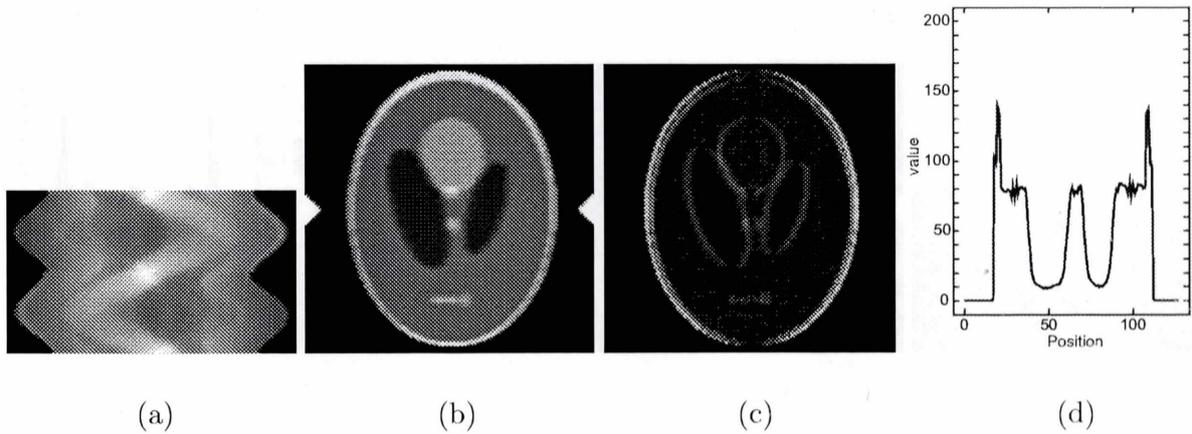


Fig. 4.54: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (224.12) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

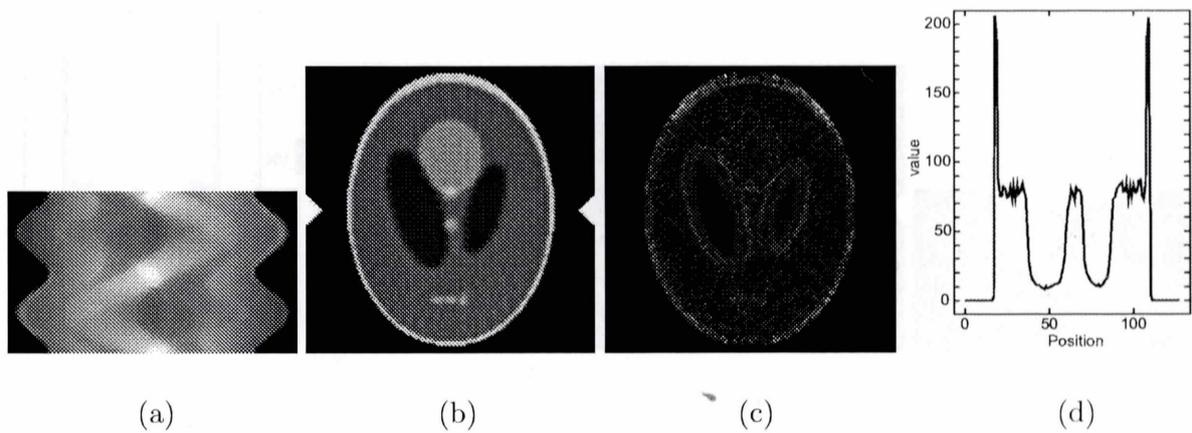


Fig. 4.55: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1.45) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.56 に 180° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.57 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.56 と同様である。

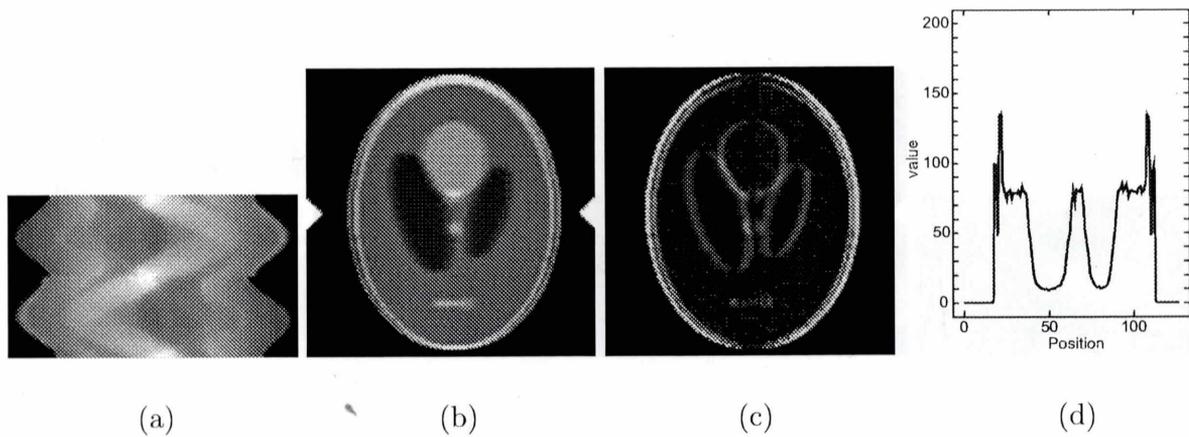


Fig. 4.56: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (311.93) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

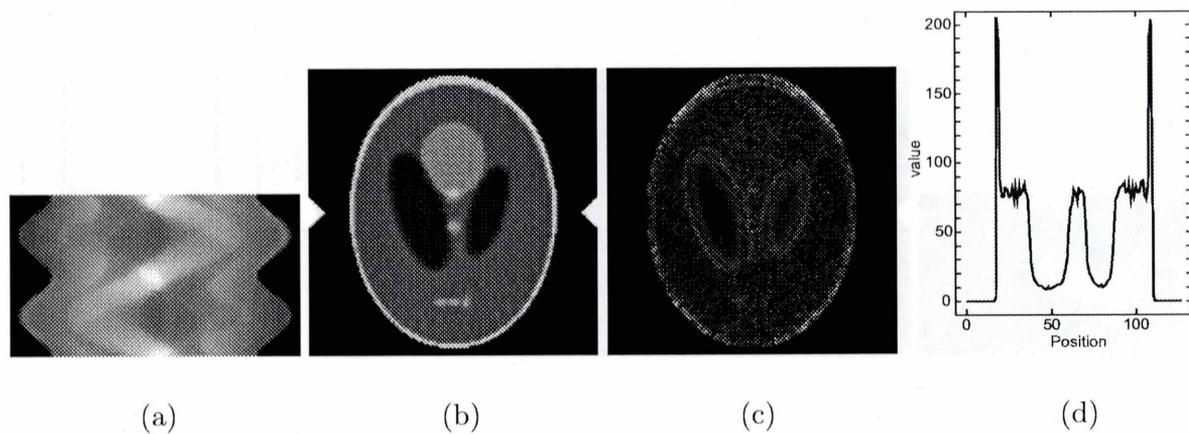


Fig. 4.57: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1.44) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.58に 180° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.59 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.58 と同様である。

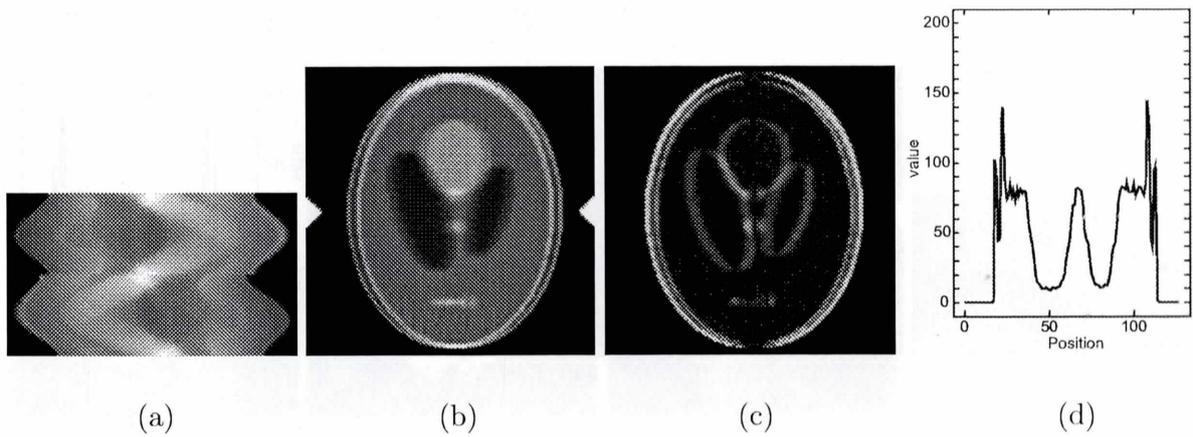


Fig. 4.58: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (373.36) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

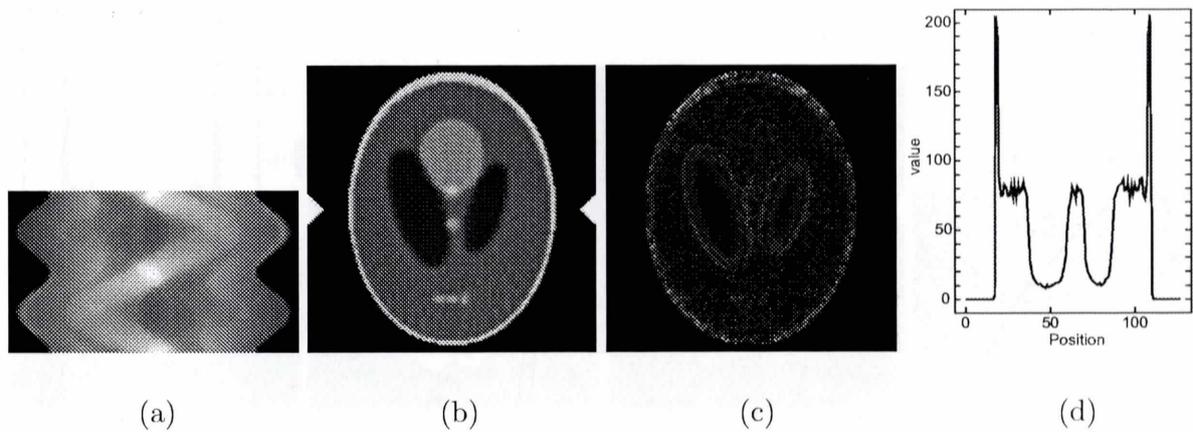


Fig. 4.59: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1.28) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.60 に 180° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.61 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.60 と同様である。

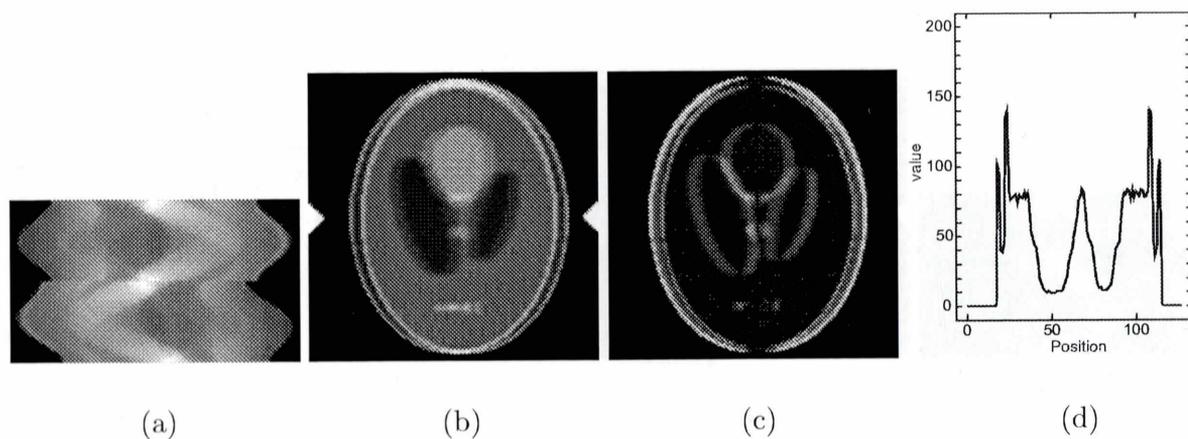


Fig. 4.60: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (423.87) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

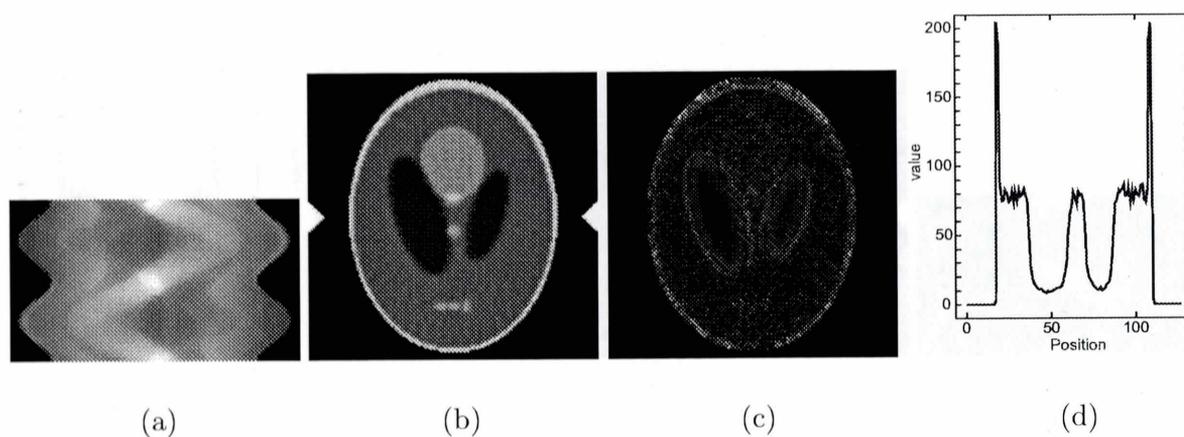


Fig. 4.61: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1.28) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

brain Phantom without noise

Fig. 4.62 に 90° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.63 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.62 と同様である。

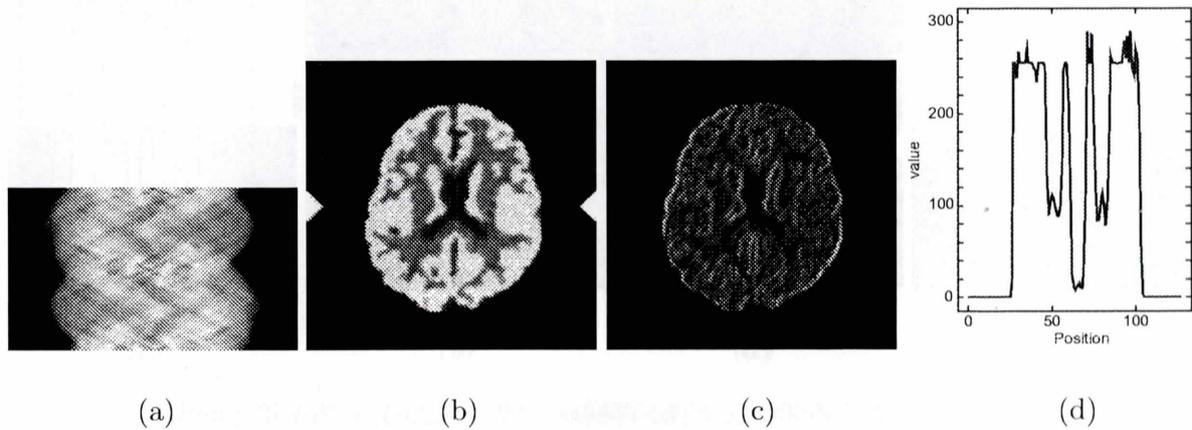


Fig. 4.62: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (416.64) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

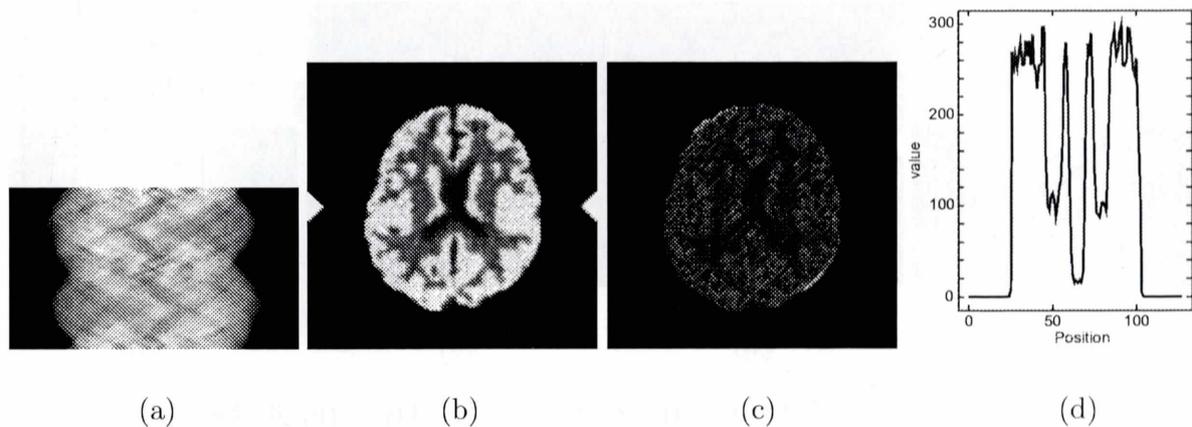


Fig. 4.63: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (68.13) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.64 に 90° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.65 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.64 と同様である。

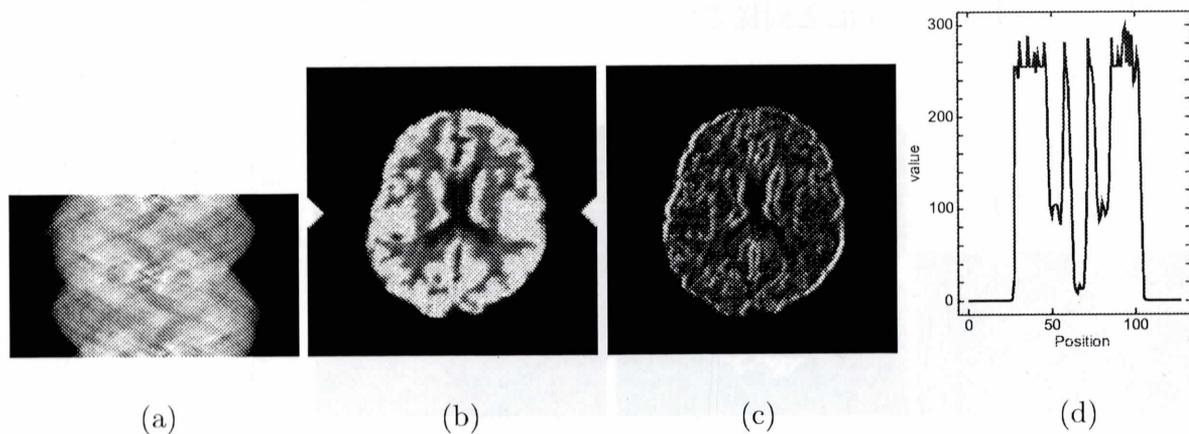


Fig. 4.64: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1152.64) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

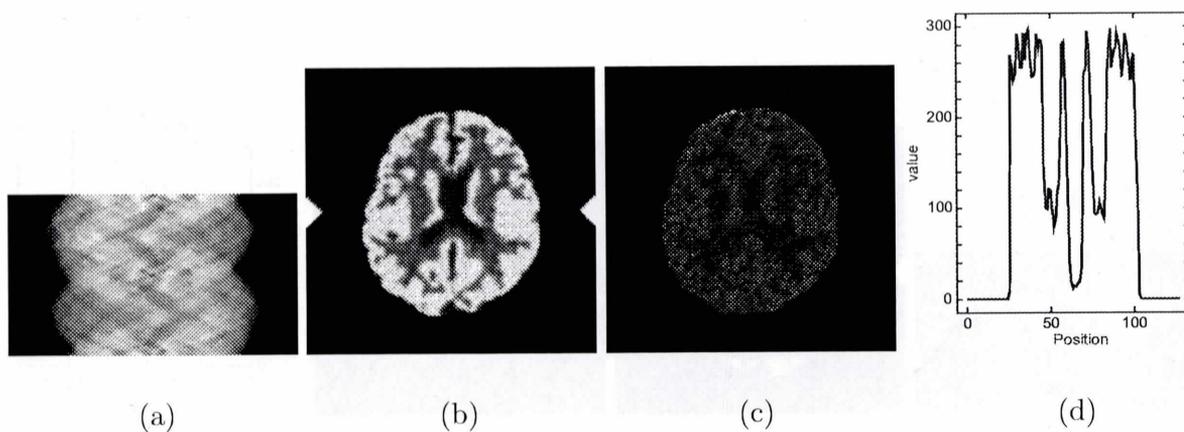


Fig. 4.65: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (60.11) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.66 に 90° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.67 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.66 と同様である。

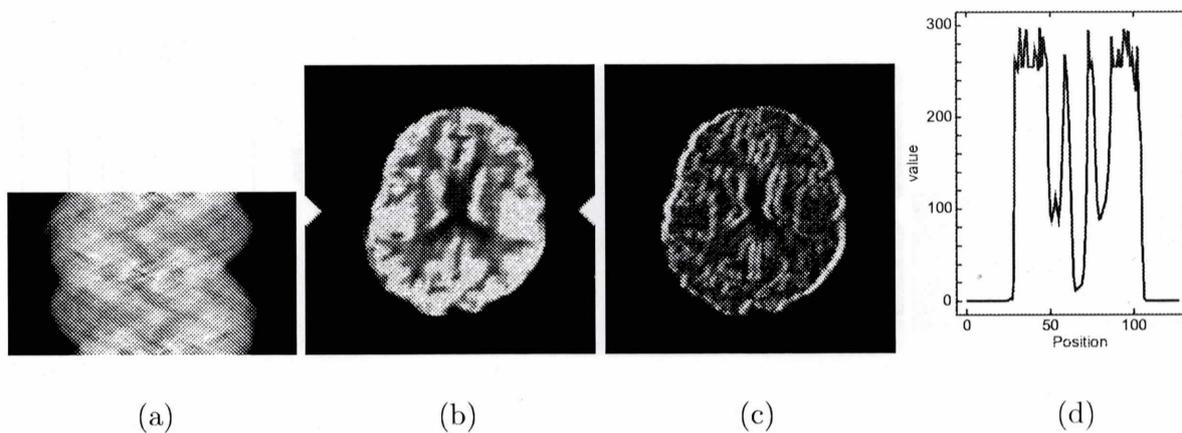


Fig. 4.66: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1895.86) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

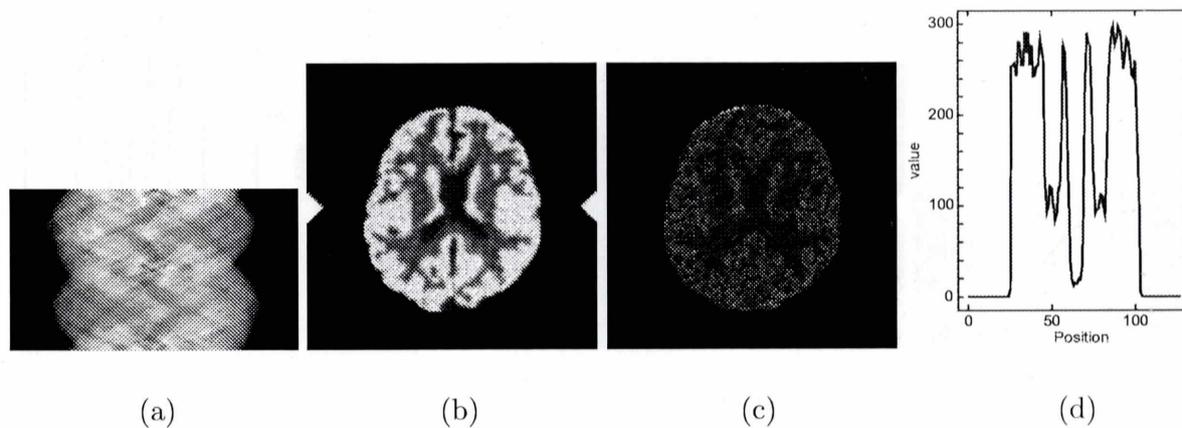


Fig. 4.67: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (59.47) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.68 に 90° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.69 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.68 と同様である。

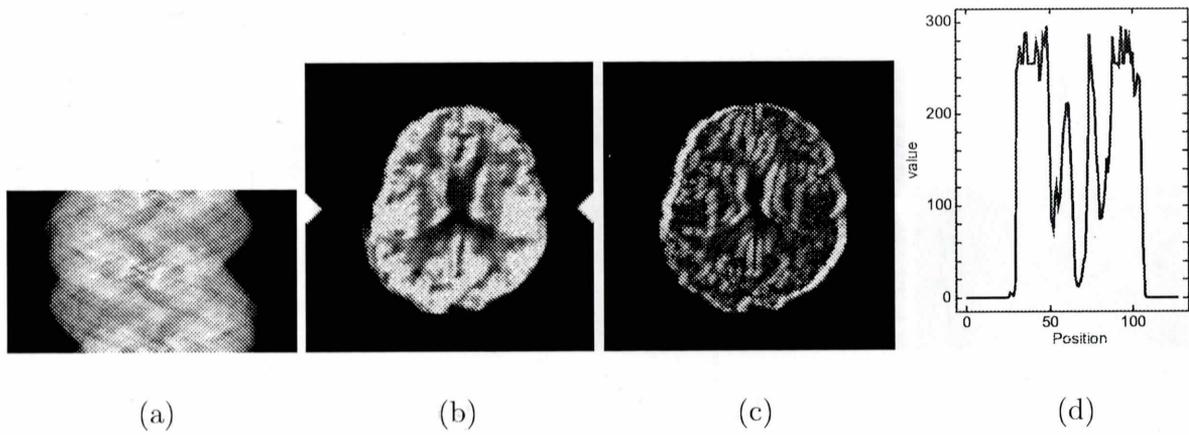


Fig. 4.68: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2499.33) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

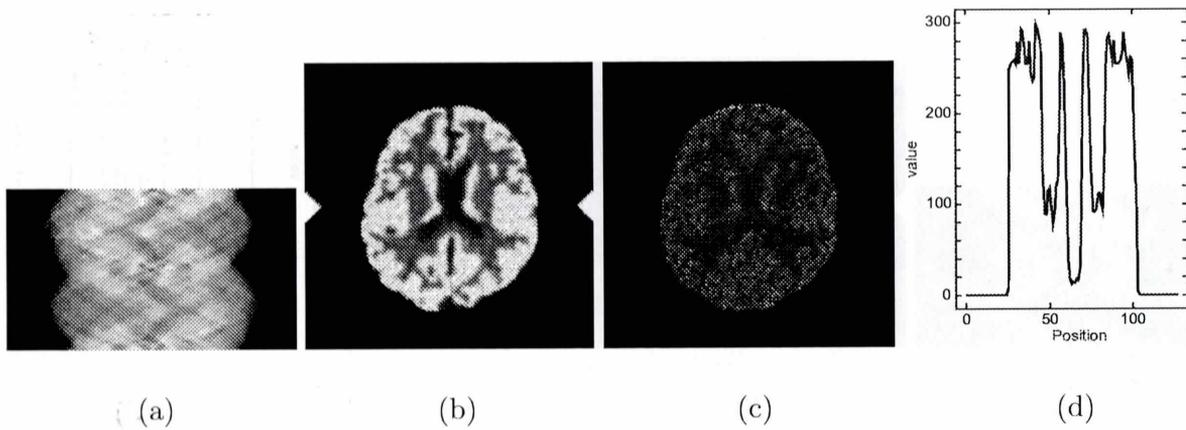


Fig. 4.69: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (57.79) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.70 に 90° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.71 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.70 と同様である。

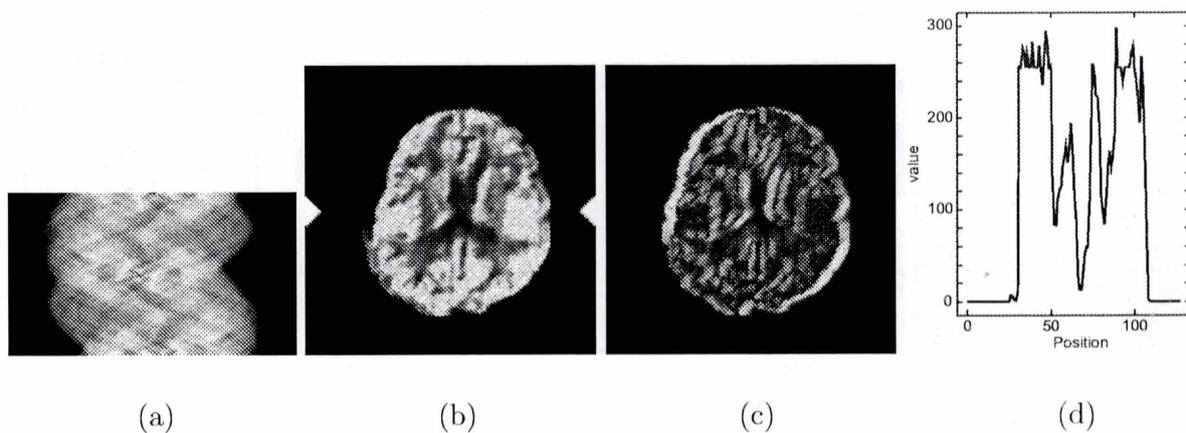


Fig. 4.70: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2988.34) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

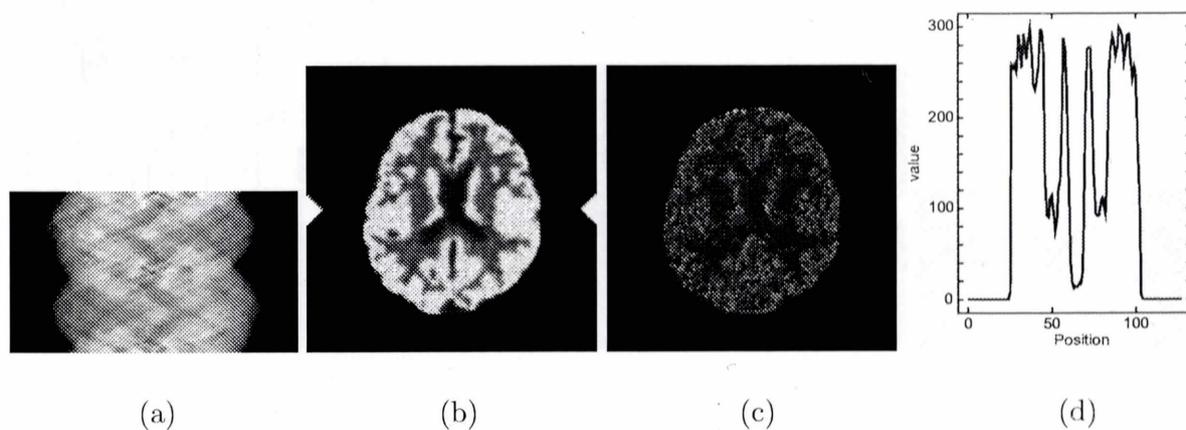


Fig. 4.71: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (56.54) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.72 に 180° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.73 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.72 と同様である。

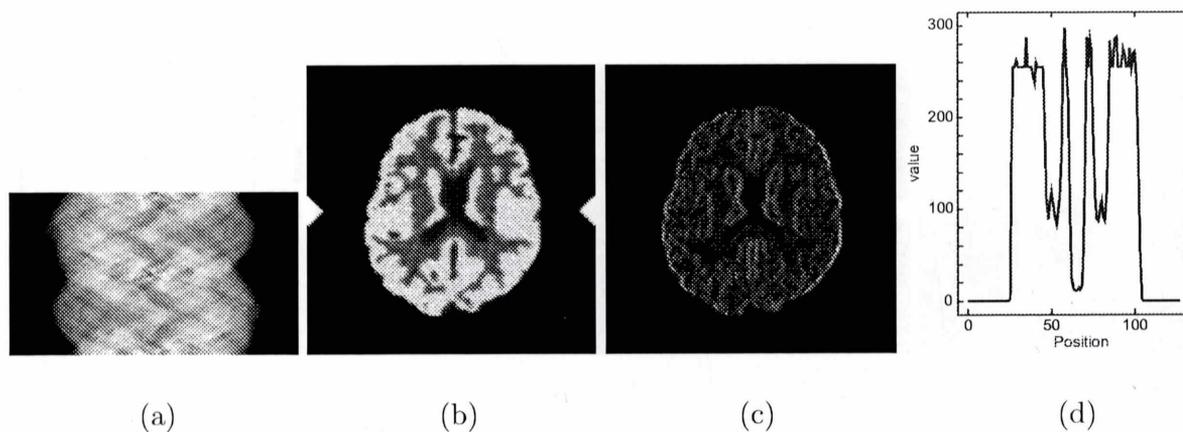


Fig. 4.72: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (185.21) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

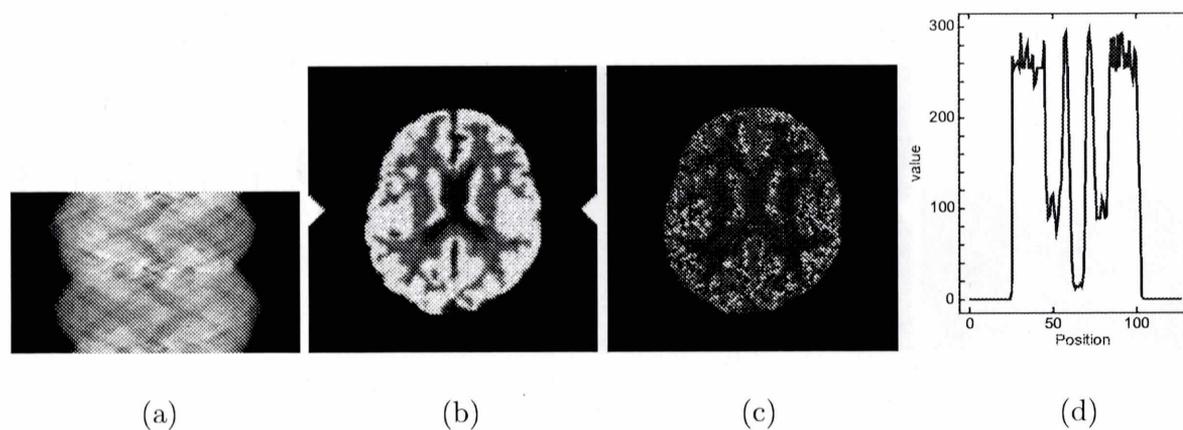


Fig. 4.73: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (36.24) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.74 に 180° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.75 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.74 と同様である。

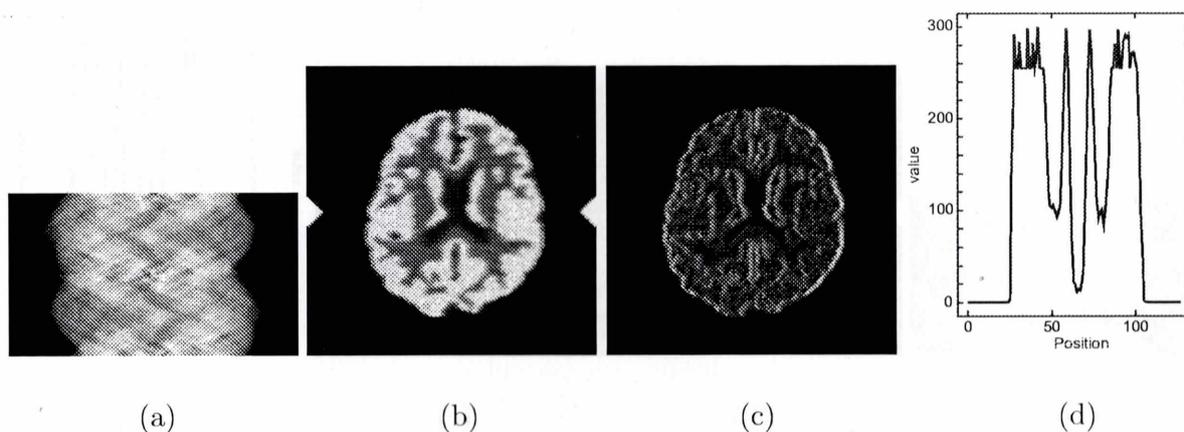


Fig. 4.74: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (474.53) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

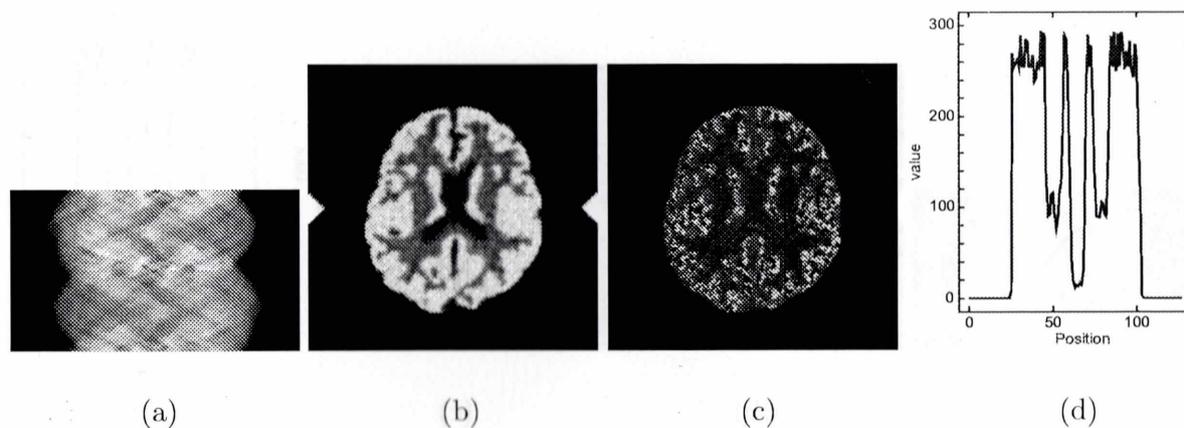


Fig. 4.75: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (35.93) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.76 に 180° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.77 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.76 と同様である。

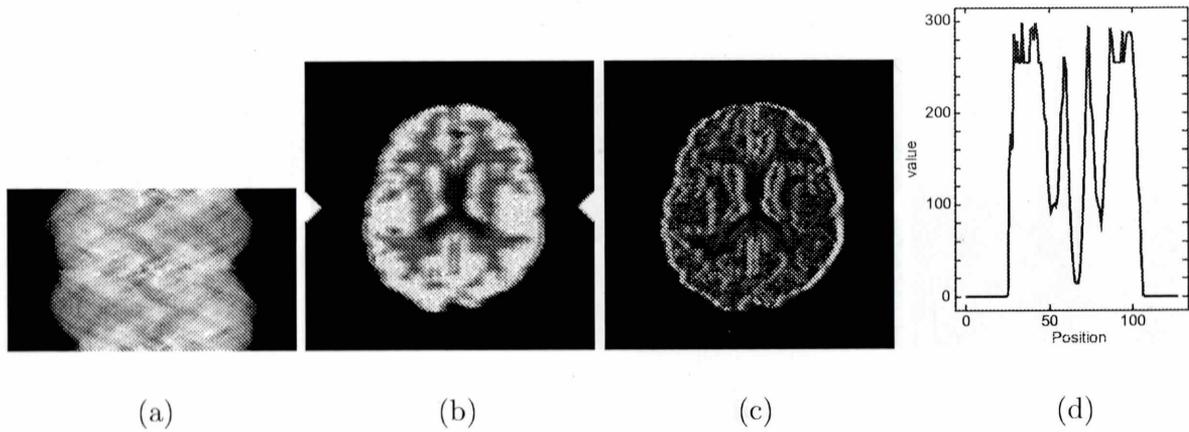


Fig. 4.76: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (744.31) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

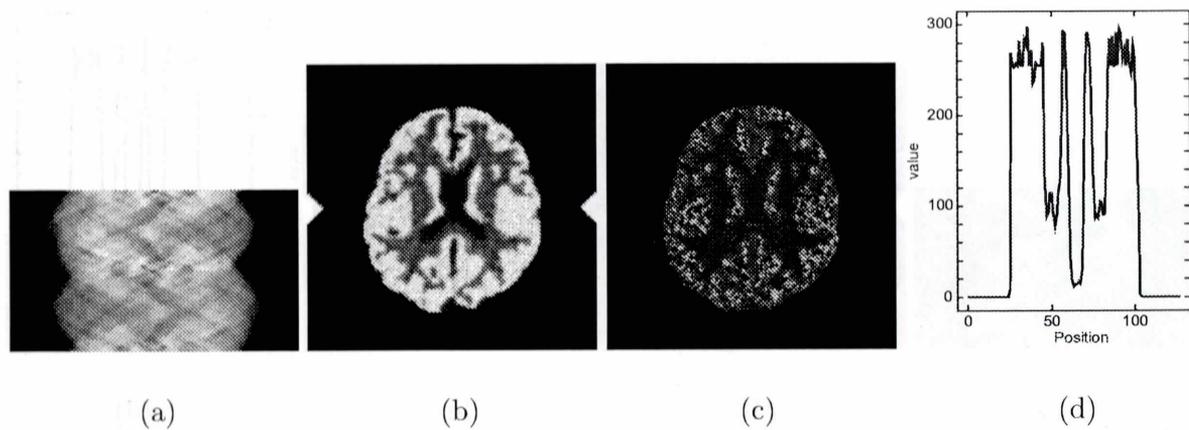


Fig. 4.77: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (35.48) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.78 に 180° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.79 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.78 と同様である。

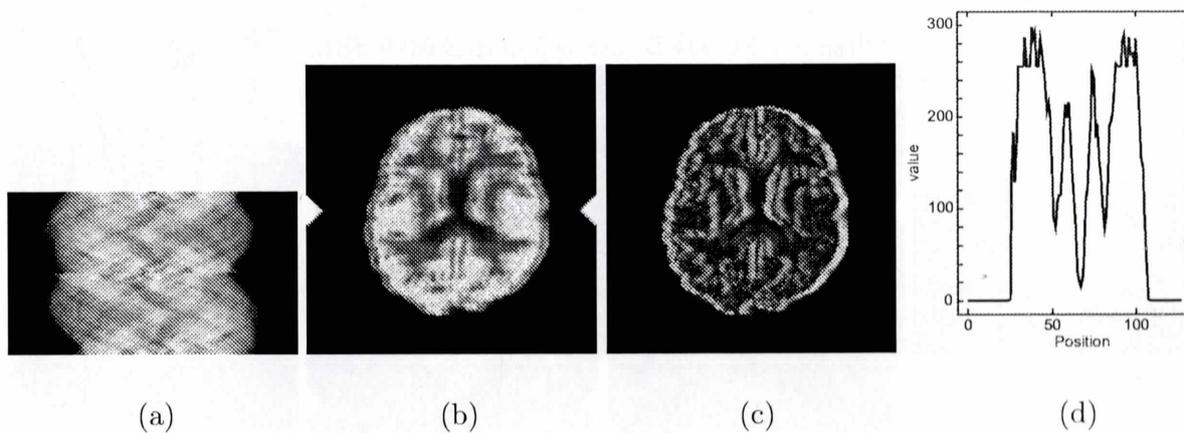


Fig. 4.78: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (966.31) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

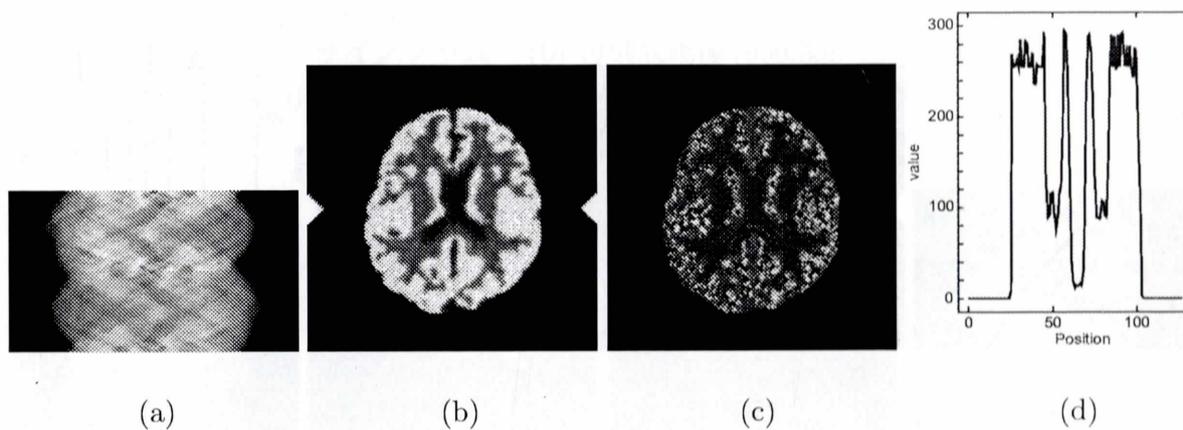


Fig. 4.79: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (35.28) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.80 に 180° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.81 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.80 と同様である。

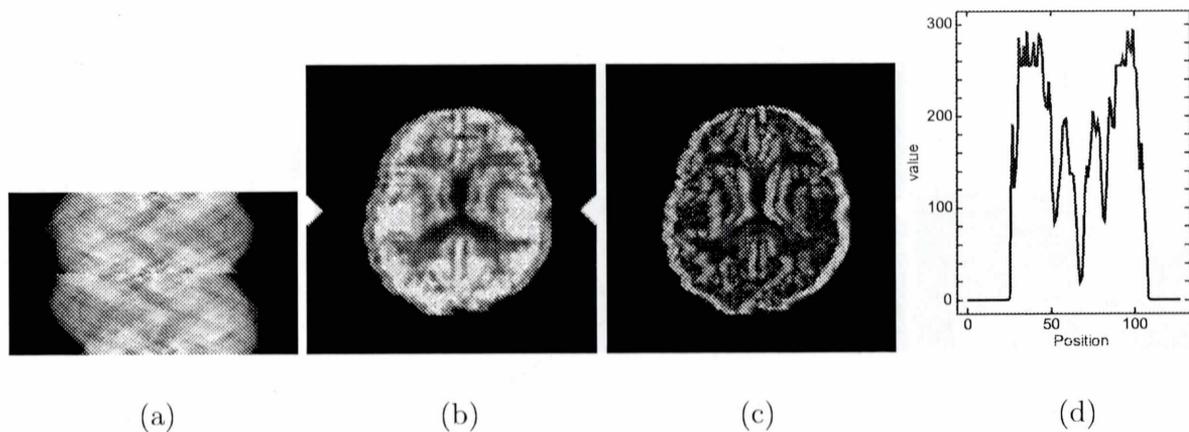


Fig. 4.80: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1143.16) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

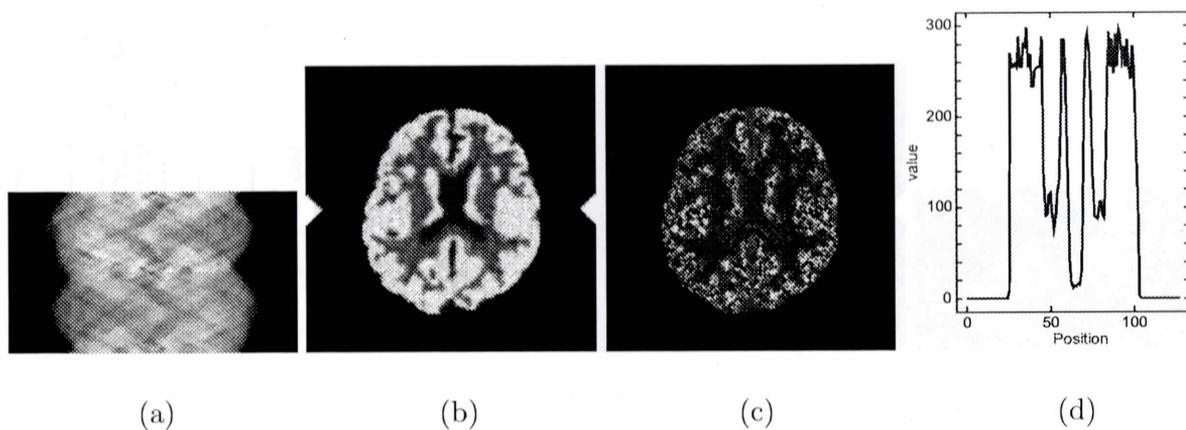


Fig. 4.81: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (35.83) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

4.2.3 180投影 雑音あり

Shepp&Logan Phantom with 3M counts

Fig. 4.82に90°で右に1pixelずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに(b)の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の()内の値はMSEの値を示している。これに対して補正を行った結果をFig. 4.83に示す。(a)~(d)はFig. 4.82と同様である。

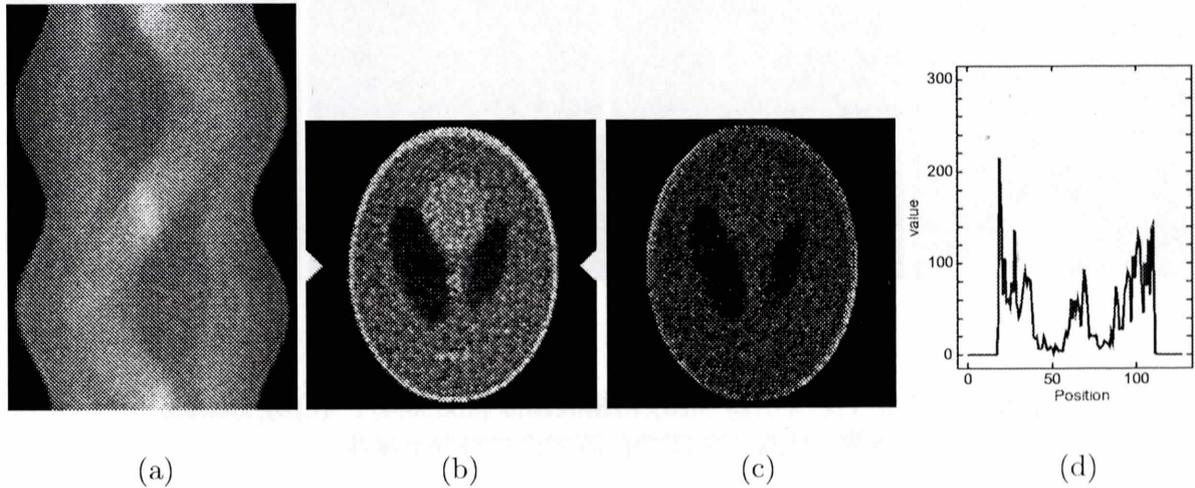


Fig. 4.82: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (900.35) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

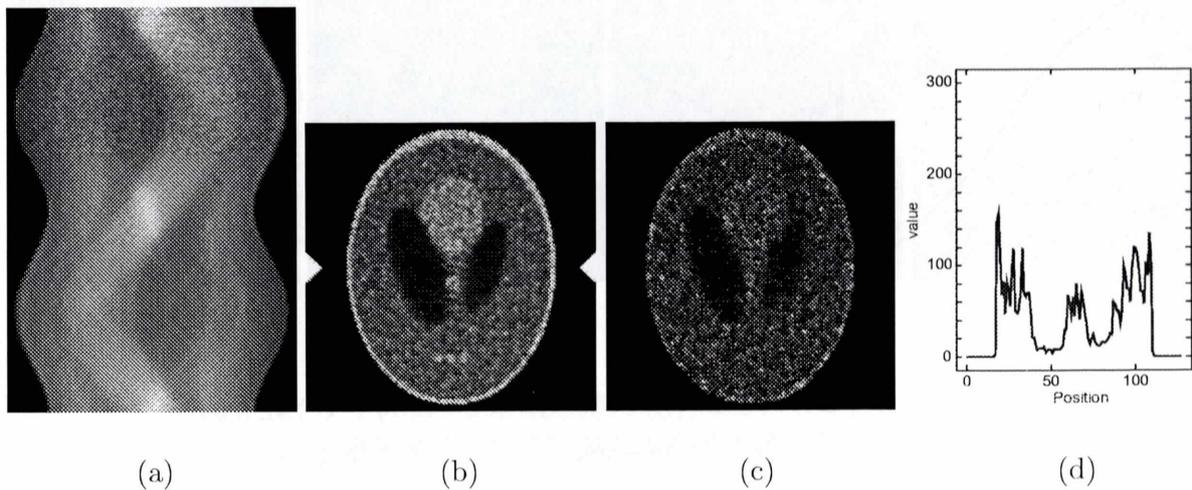


Fig. 4.83: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (342.88) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.84 に 90° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.85 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.84 と同様である。

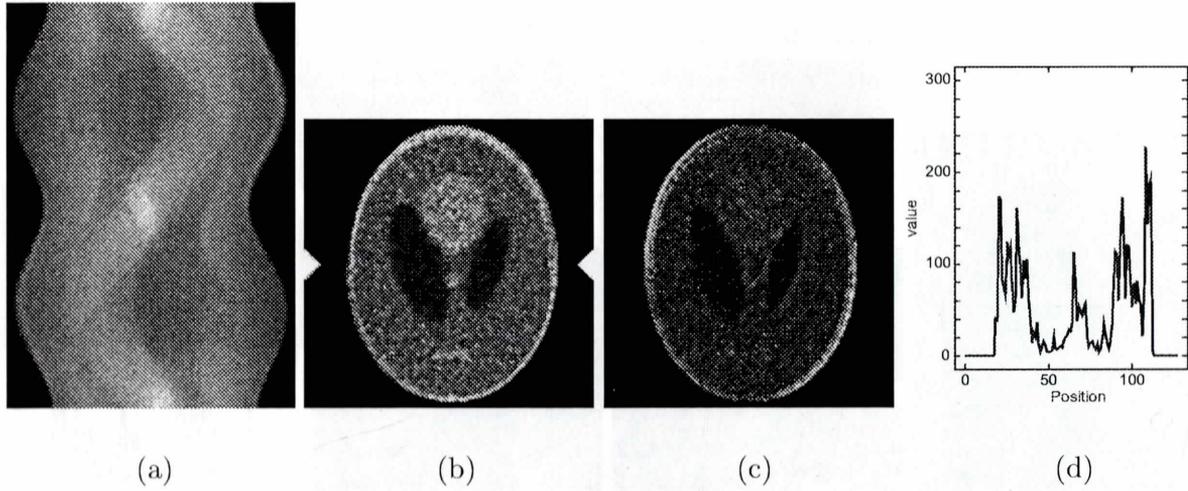


Fig. 4.84: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1399.44) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

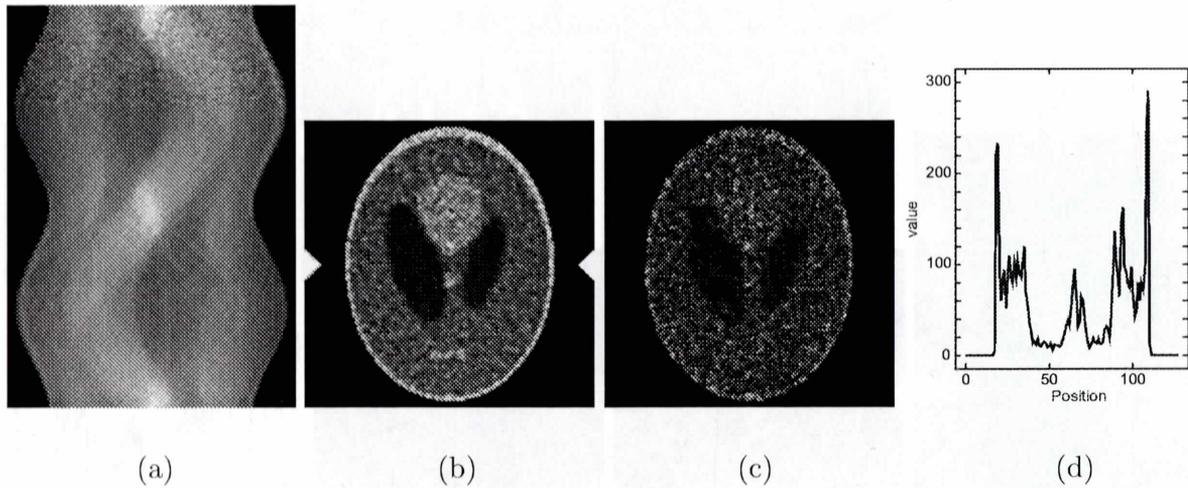


Fig. 4.85: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (304.57) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.86 に 90° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.87 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.86 と同様である。

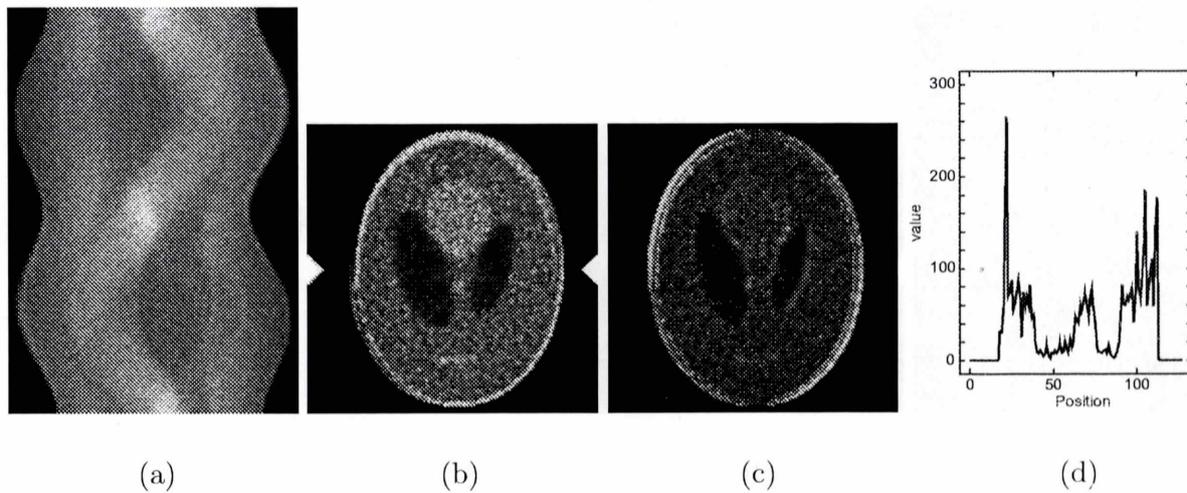


Fig. 4.86: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1704.71) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

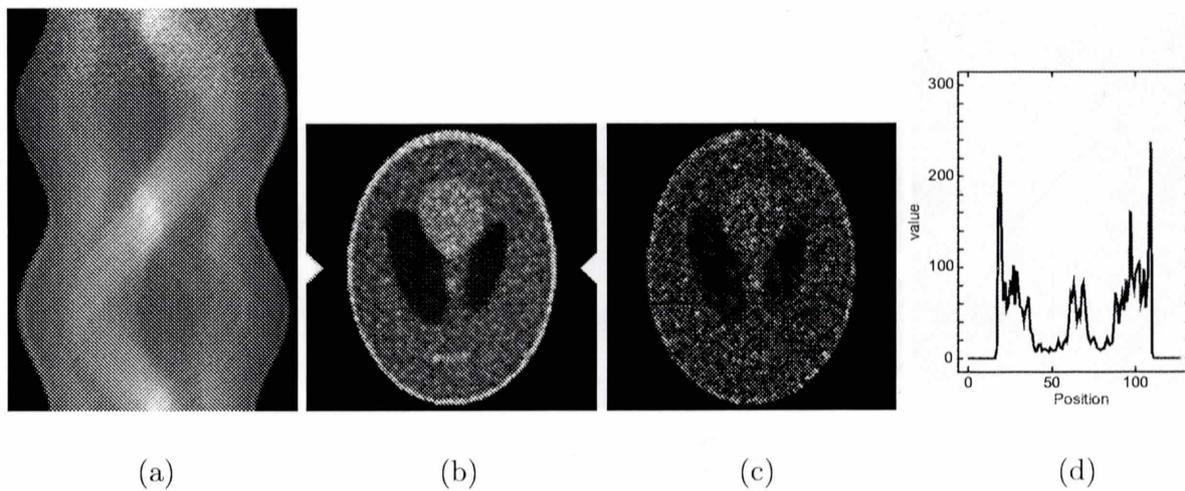


Fig. 4.87: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (277.59) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.88 に 90° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.89 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.88 と同様である。

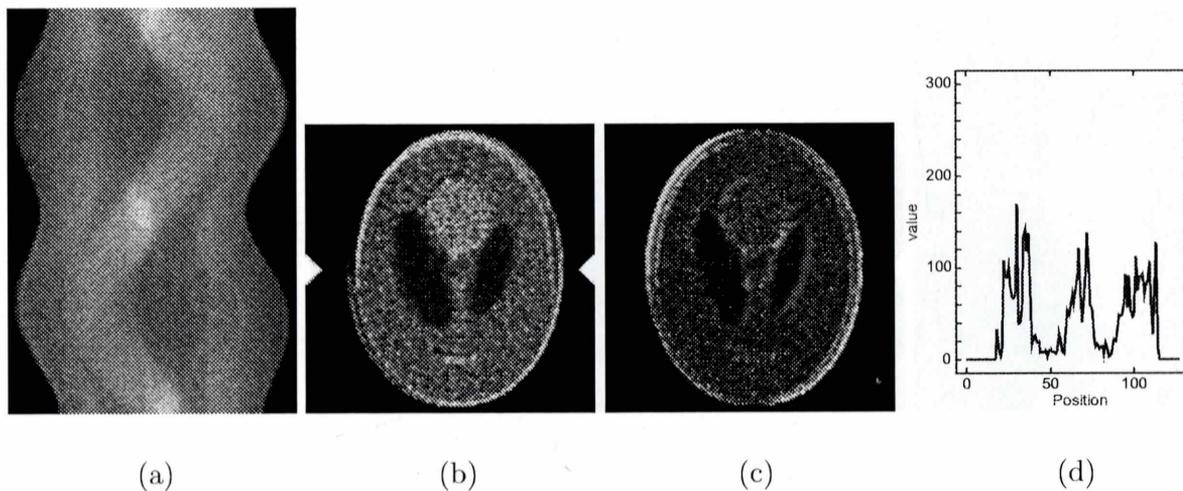


Fig. 4.88: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1935.99) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

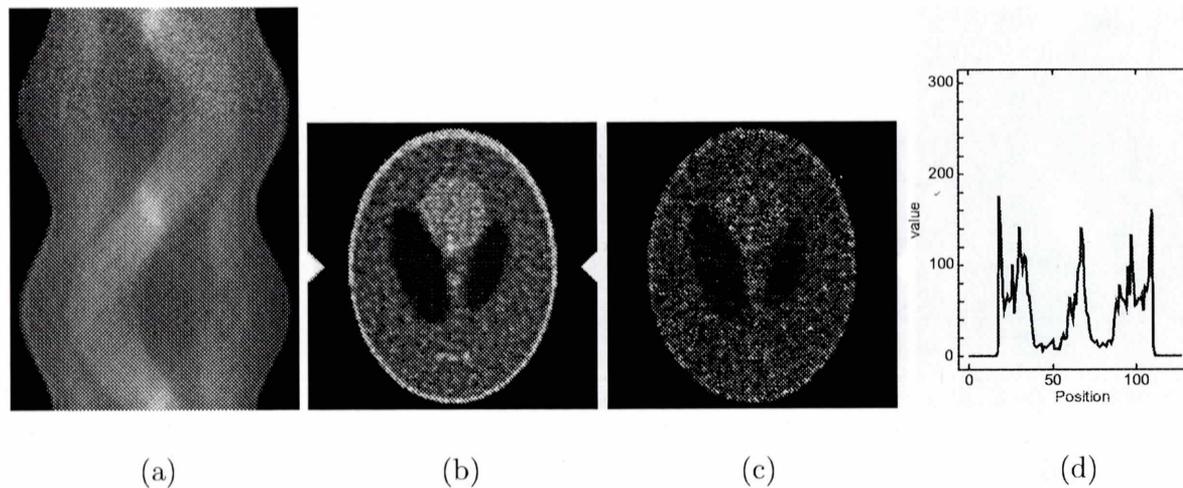


Fig. 4.89: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (325.98) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.90 に 90° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.91 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.90 と同様である。

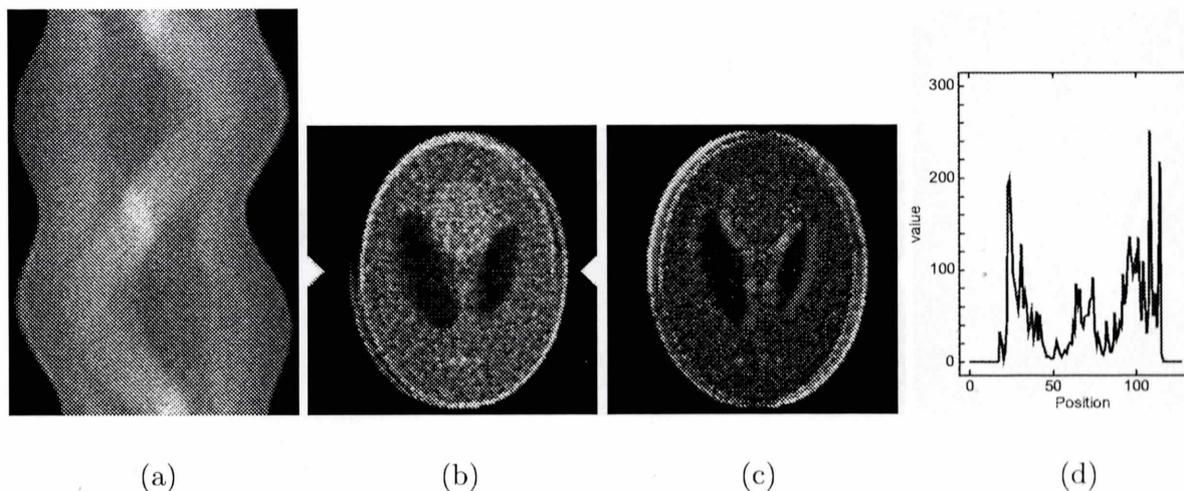


Fig. 4.90: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2060.64) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

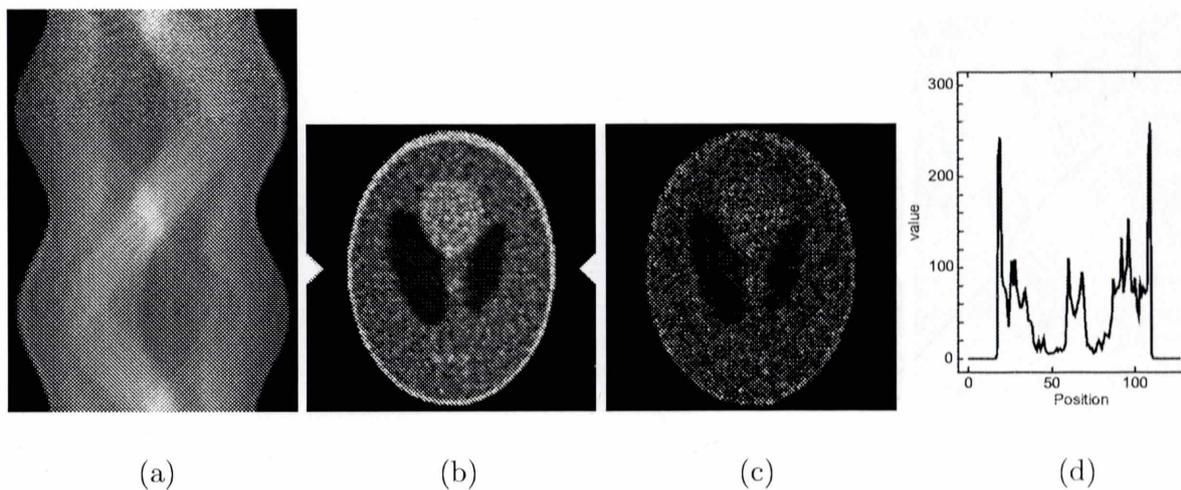


Fig. 4.91: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (313.17) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.92に180°で右に1pixelずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに(b)の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の()内の値はMSEの値を示している。これに対して補正を行った結果をFig. 4.93に示す。(a)~(d)はFig. 4.92と同様である。

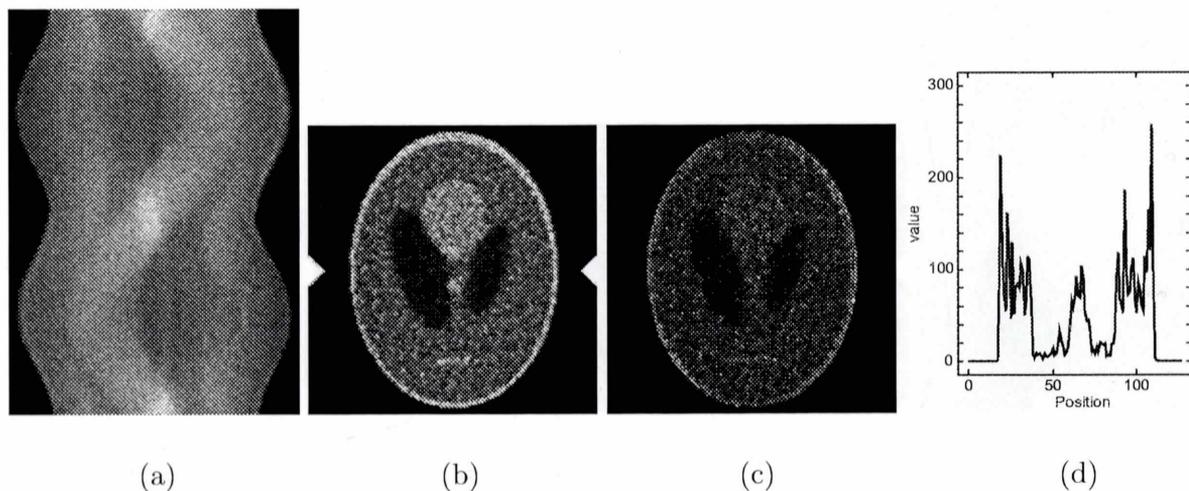


Fig. 4.92: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (664.39) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

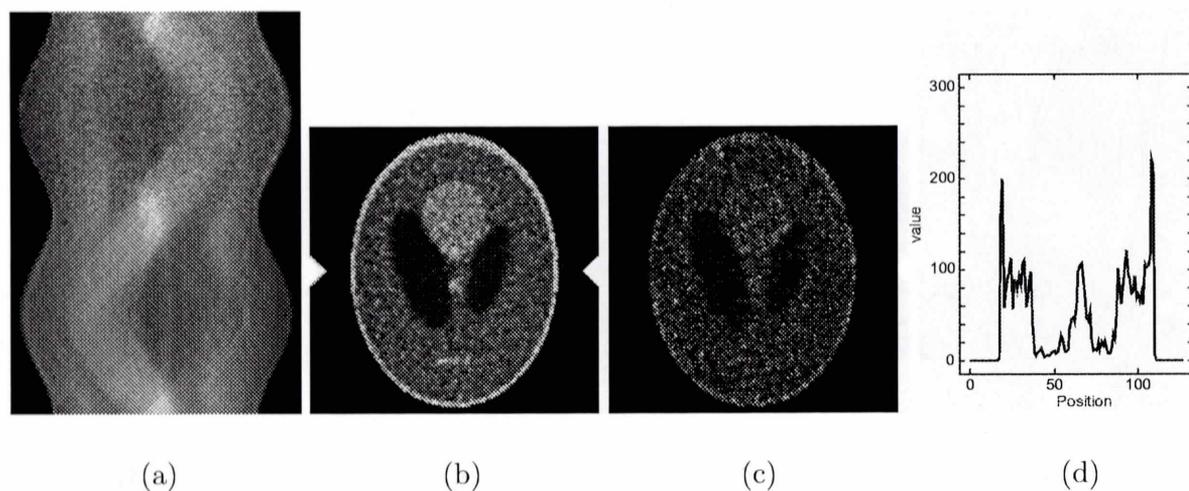


Fig. 4.93: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (353.06) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.94 に 180° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.95 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.94 と同様である。

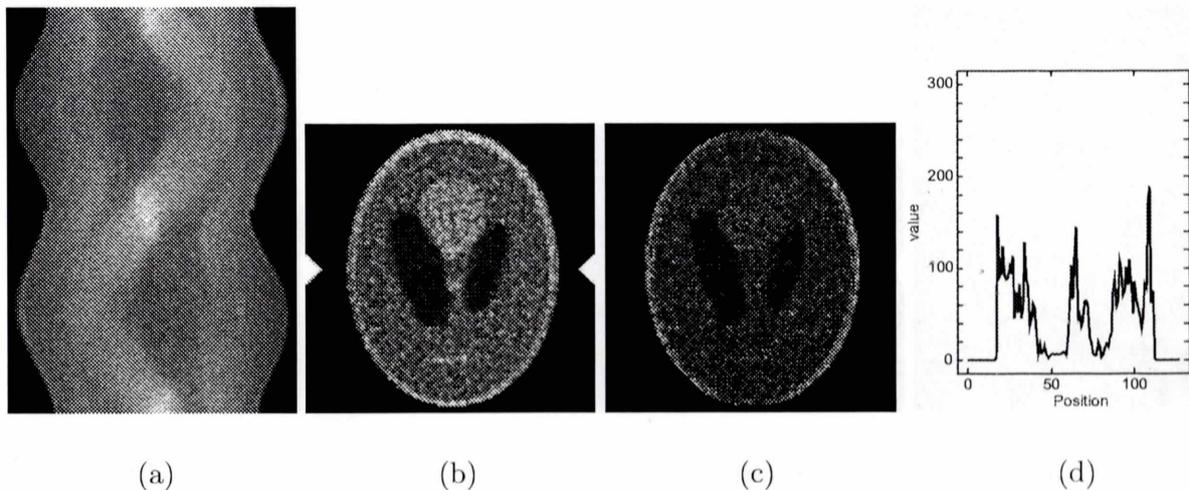


Fig. 4.94: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (901.04) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

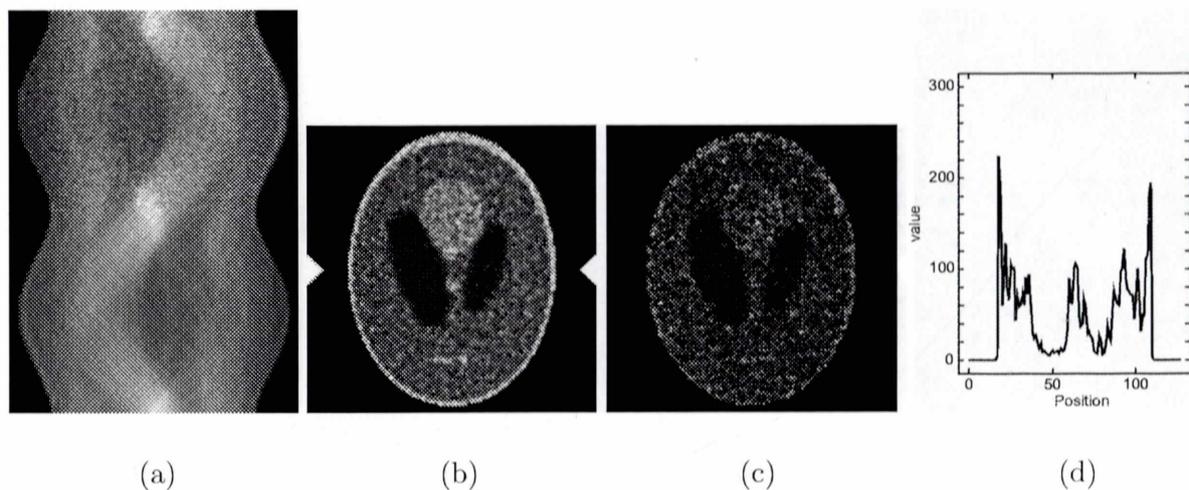


Fig. 4.95: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (383.17) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.96 に 180° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.97 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.96 と同様である。

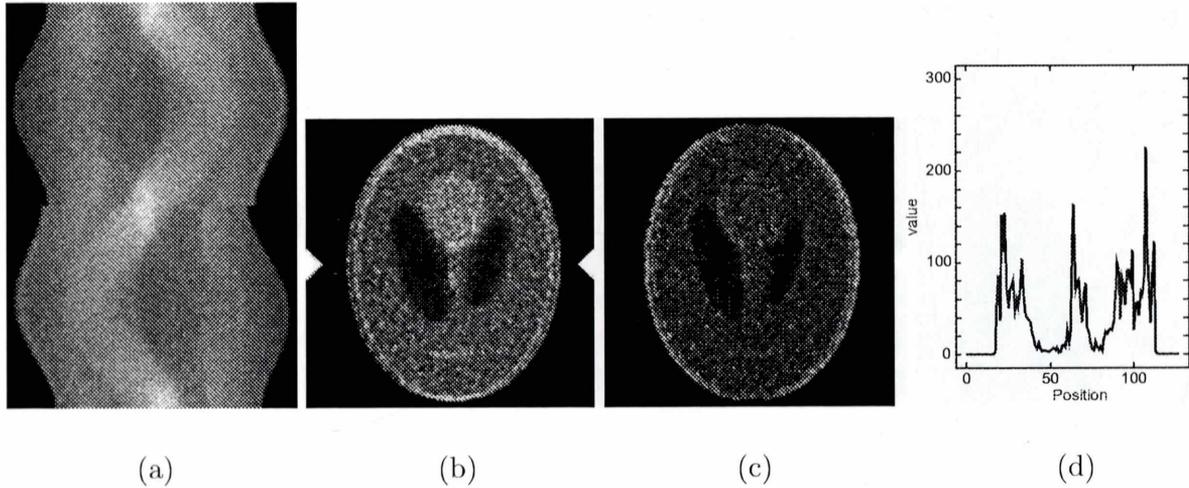


Fig. 4.96: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1020.69) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

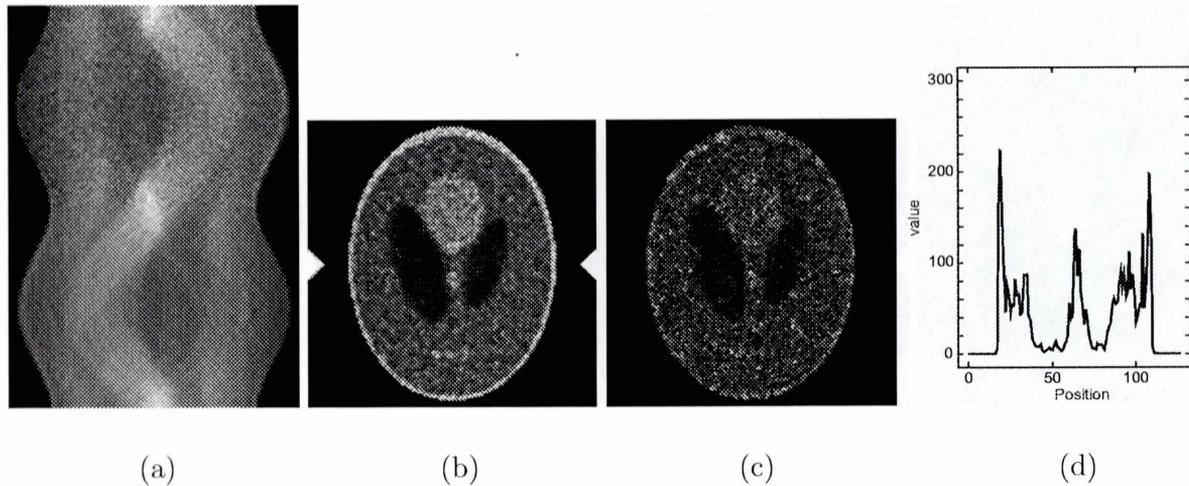


Fig. 4.97: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (367.82) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.98 に 180° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.99 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.98 と同様である。

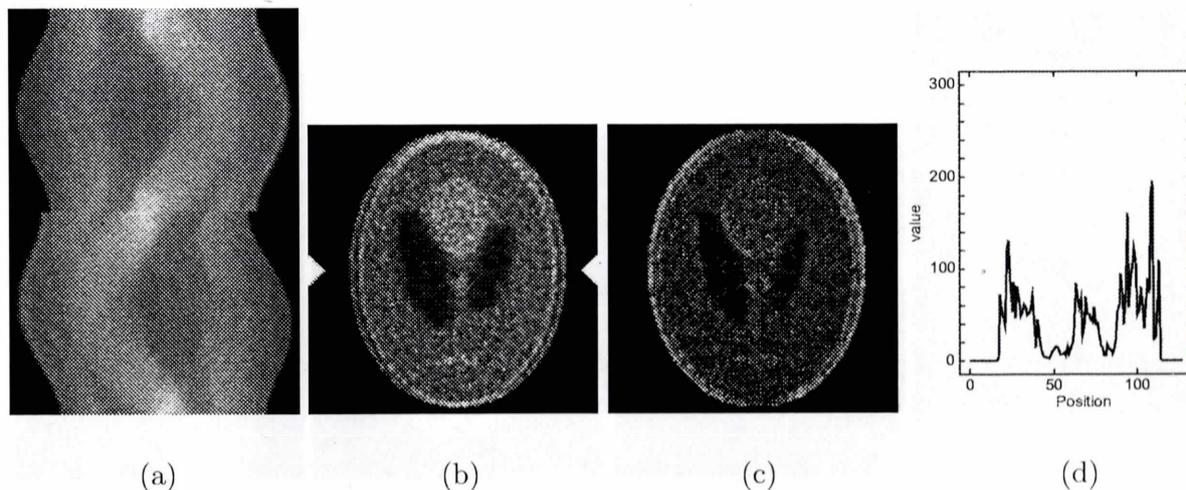


Fig. 4.98: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1090.92) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

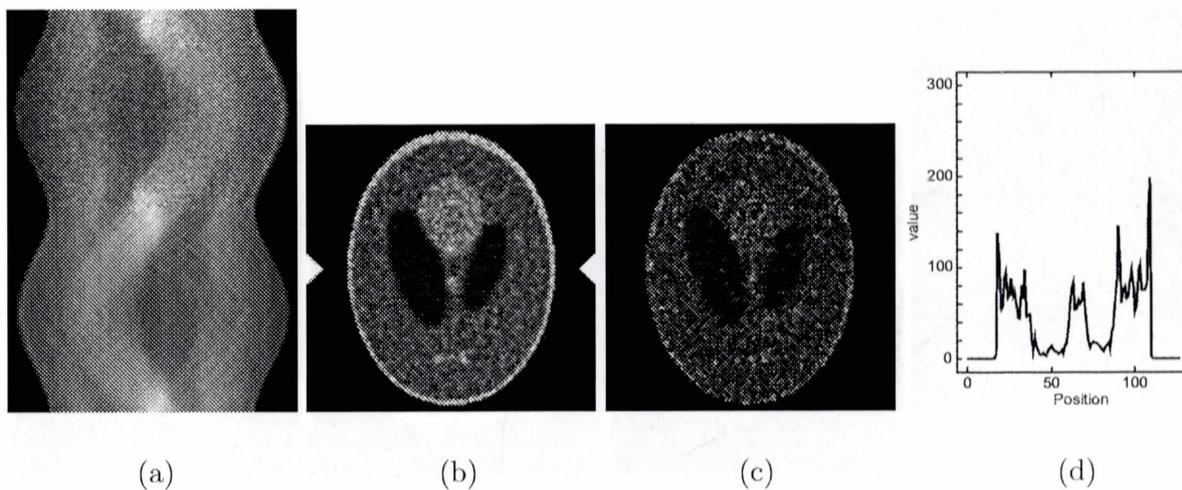


Fig. 4.99: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (357.54) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.100 に 180° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.101 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.100 と同様である。

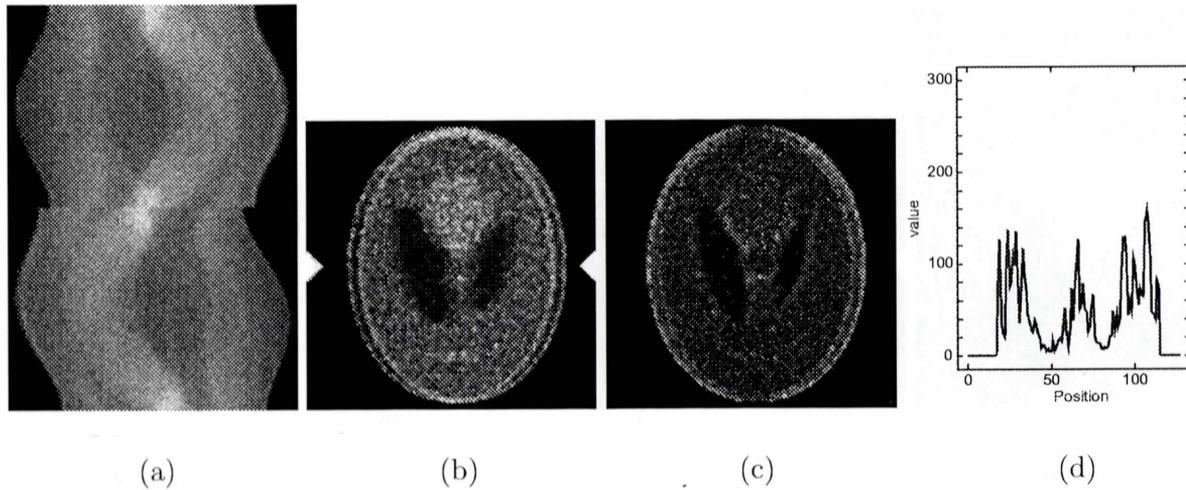


Fig. 4.100: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1165.19) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

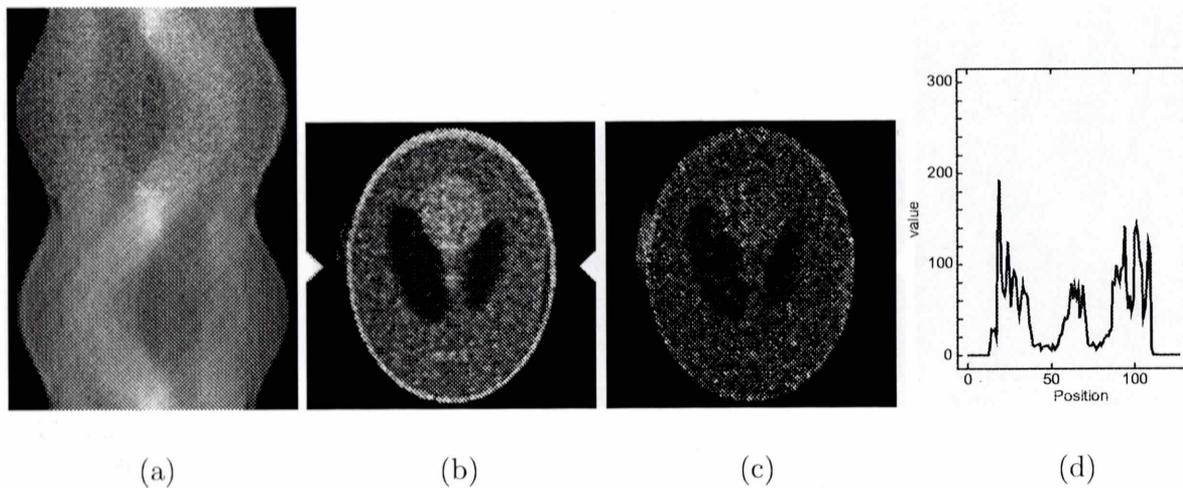


Fig. 4.101: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (403.29) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

brain Phantom with 5M counts

Fig. 4.102 に 90° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.103 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.102 と同様である。

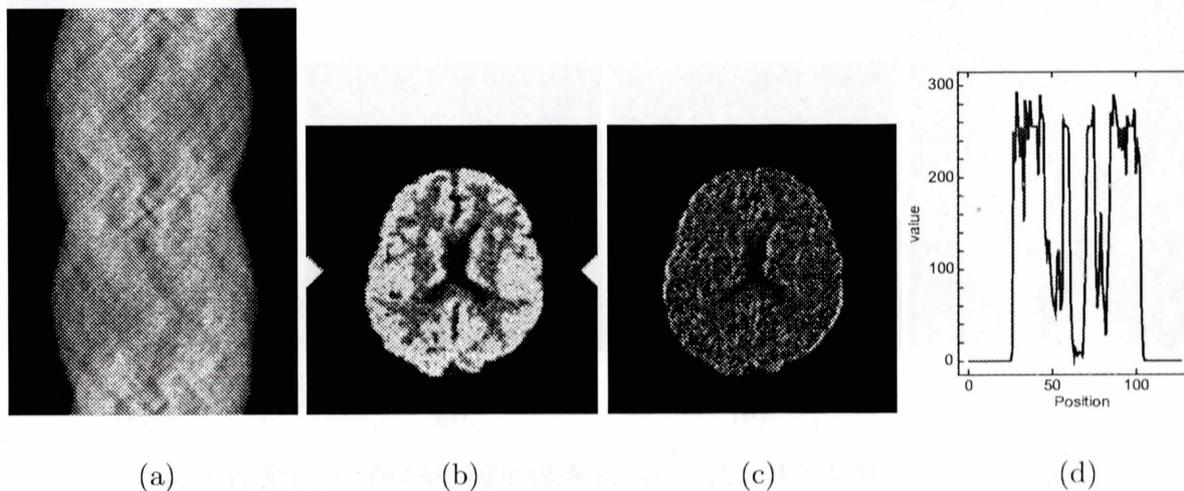


Fig. 4.102: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1253.93) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

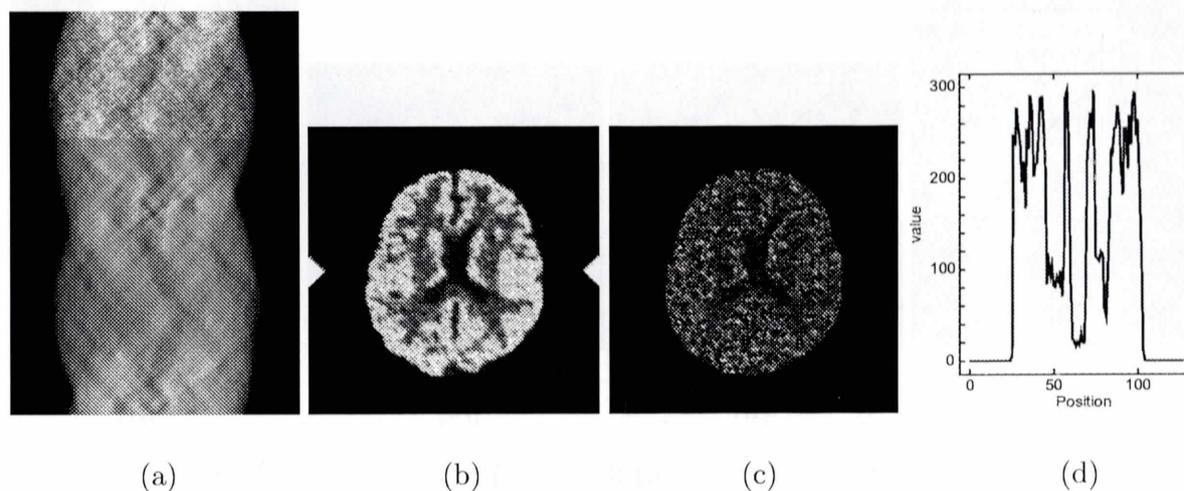


Fig. 4.103: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (539.56) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.104 に 90° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.105 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.104 と同様である。

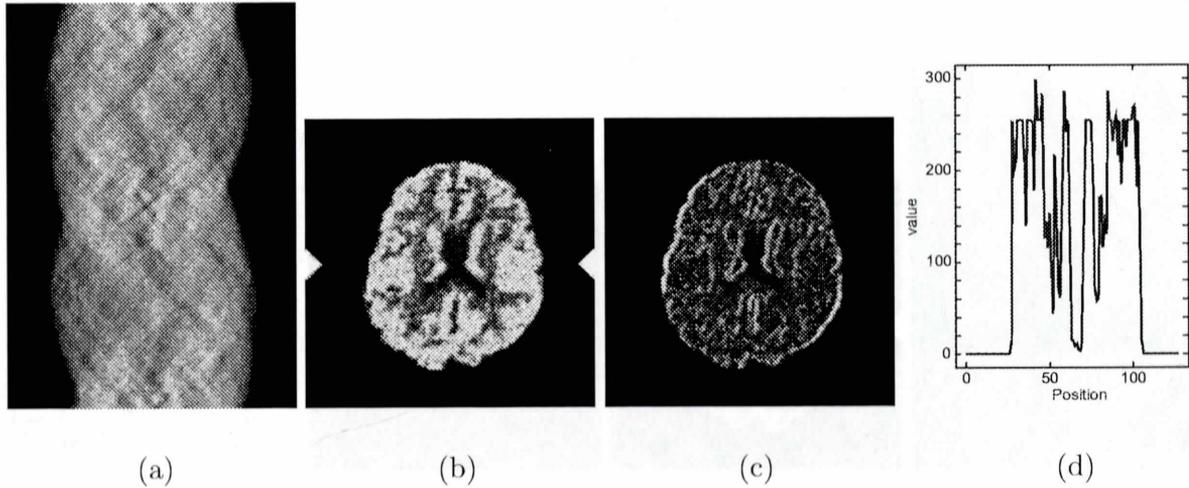


Fig. 4.104: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2366.8) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

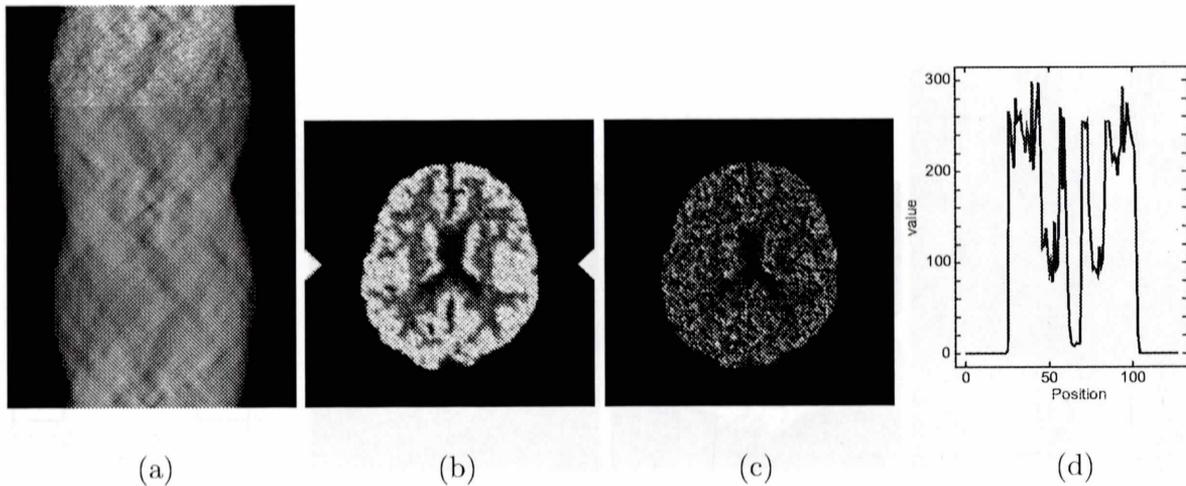


Fig. 4.105: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (505.47) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.106 に 90° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.107 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.106 と同様である。

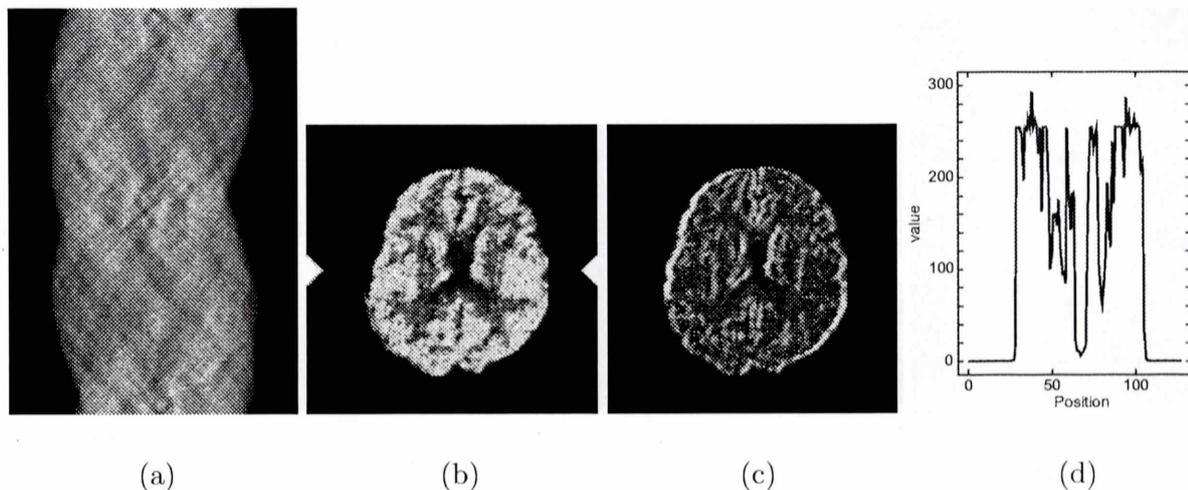


Fig. 4.106: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (3482.73) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

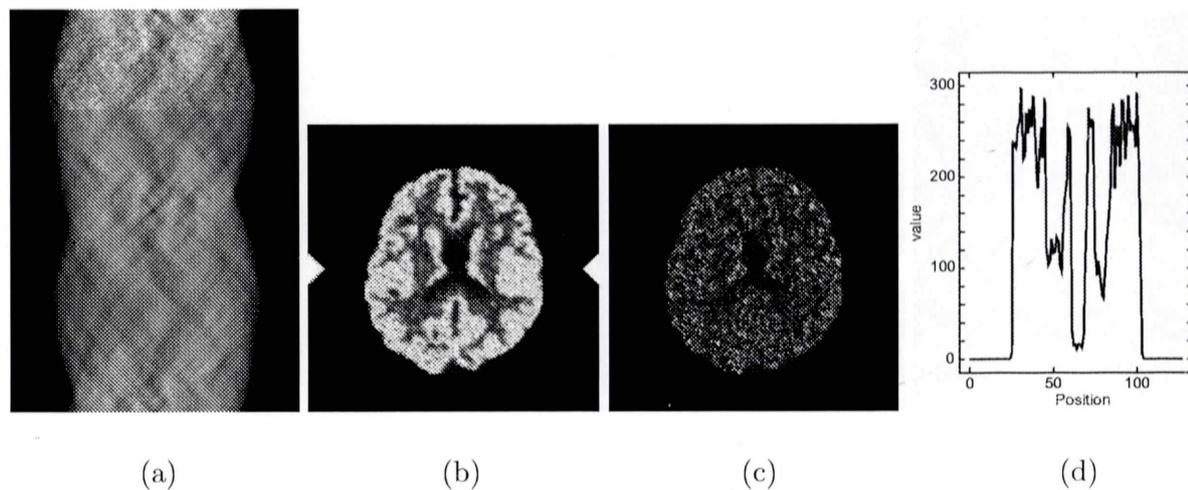


Fig. 4.107: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (497.68) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.108 に 90° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.109 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.108 と同様である。

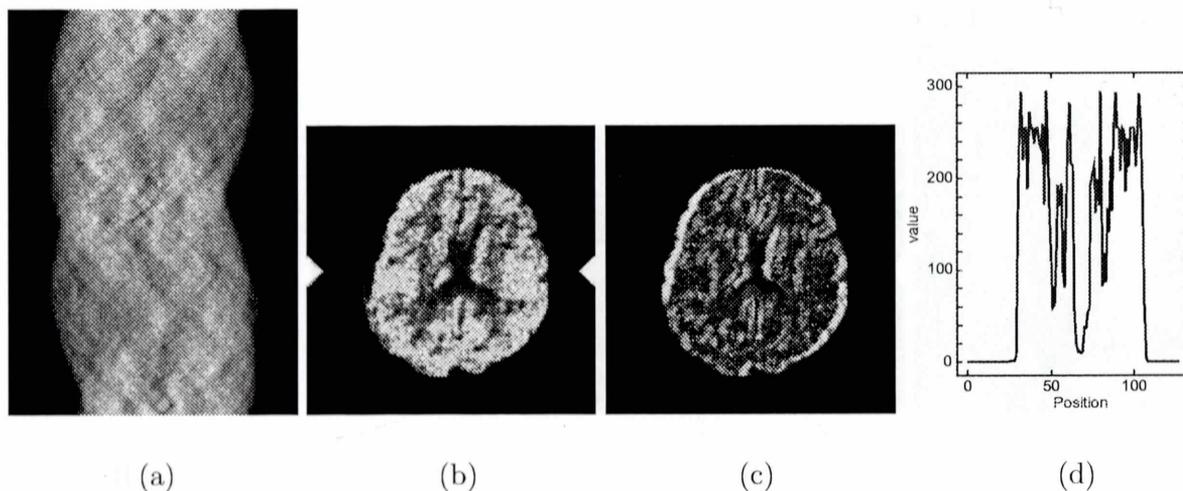


Fig. 4.108: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (4349.35) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

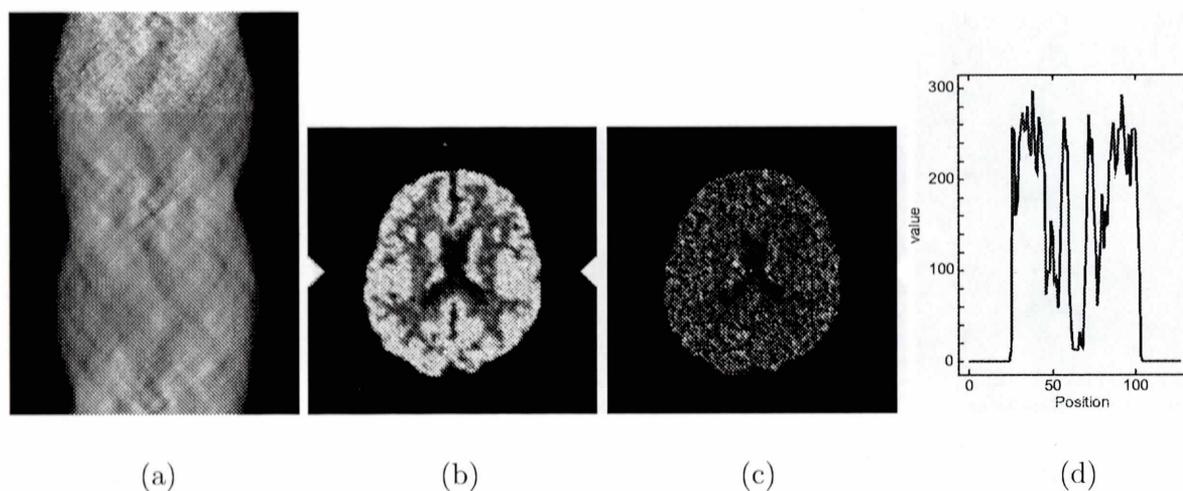


Fig. 4.109: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (505.38) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.110 に 90° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.111 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.110 と同様である。

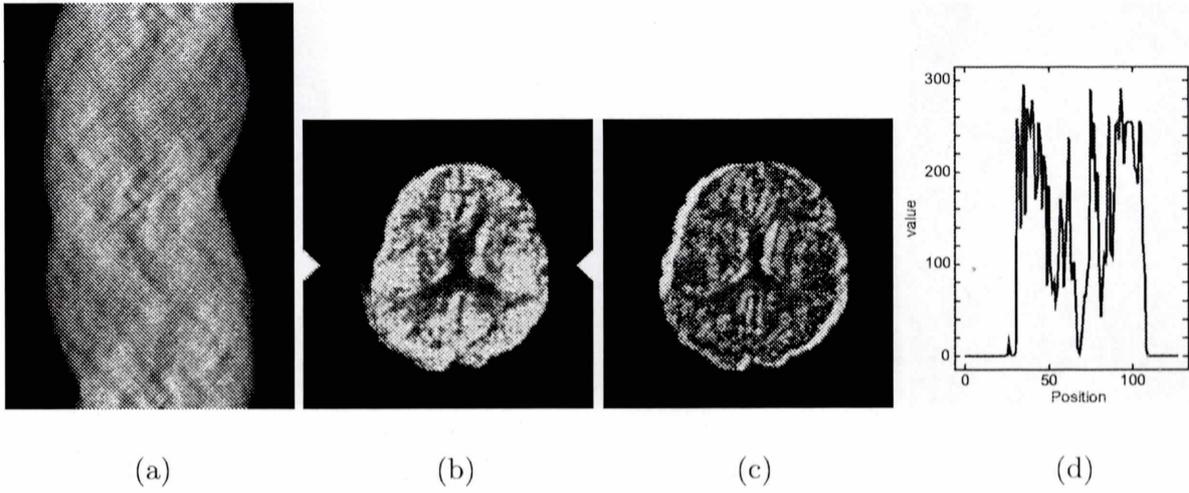


Fig. 4.110: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (5052.38) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

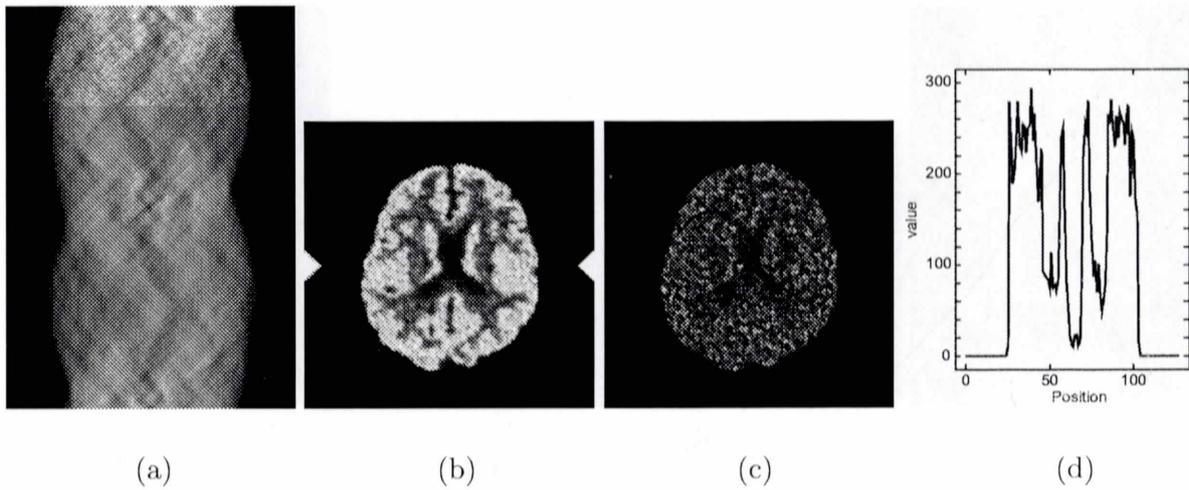


Fig. 4.111: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (518.88) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.112 に 180° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.113 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.112 と同様である。

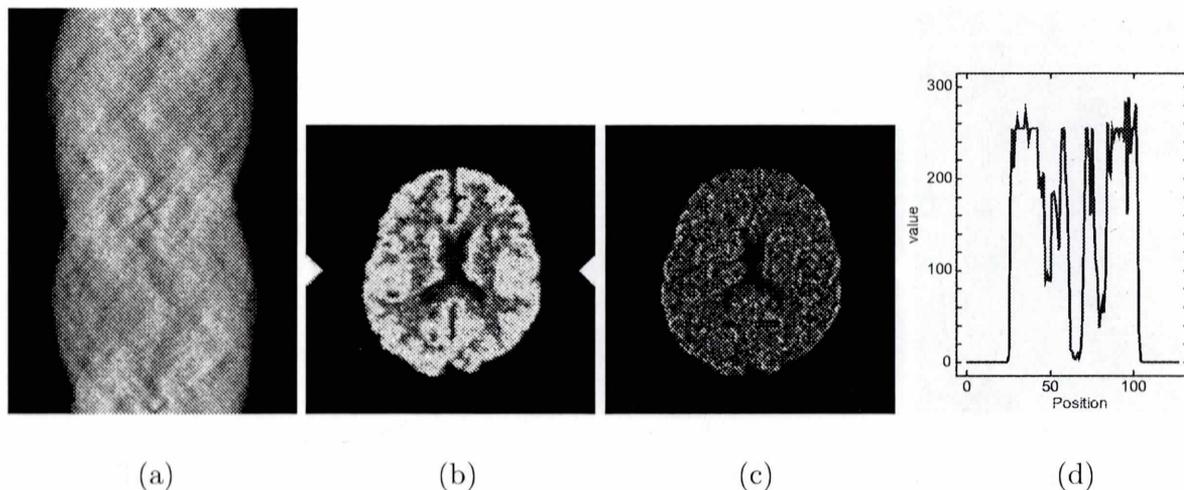


Fig. 4.112: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (907.07) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

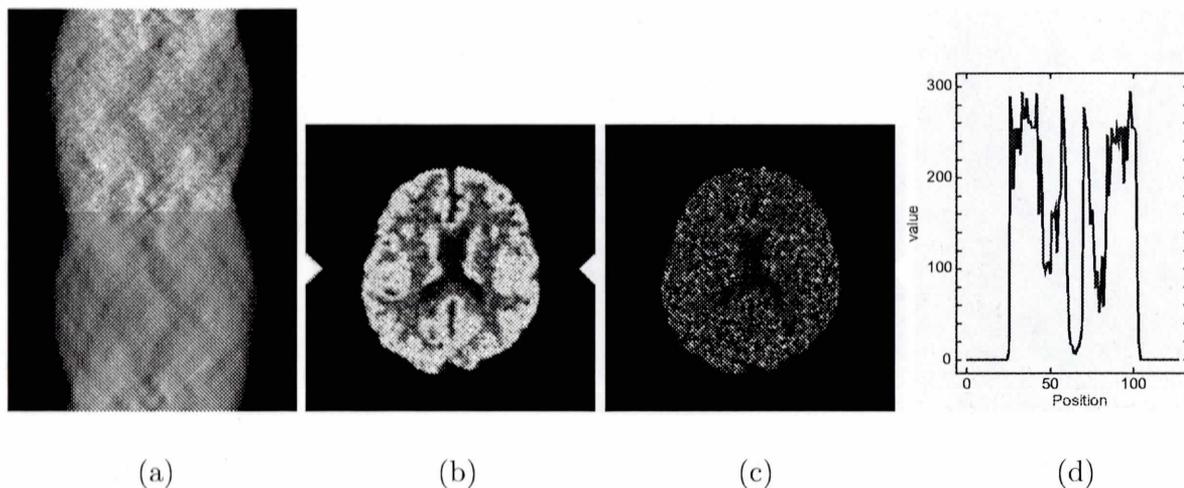


Fig. 4.113: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (600.55) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.114 に 180° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.115 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.114 と同様である。

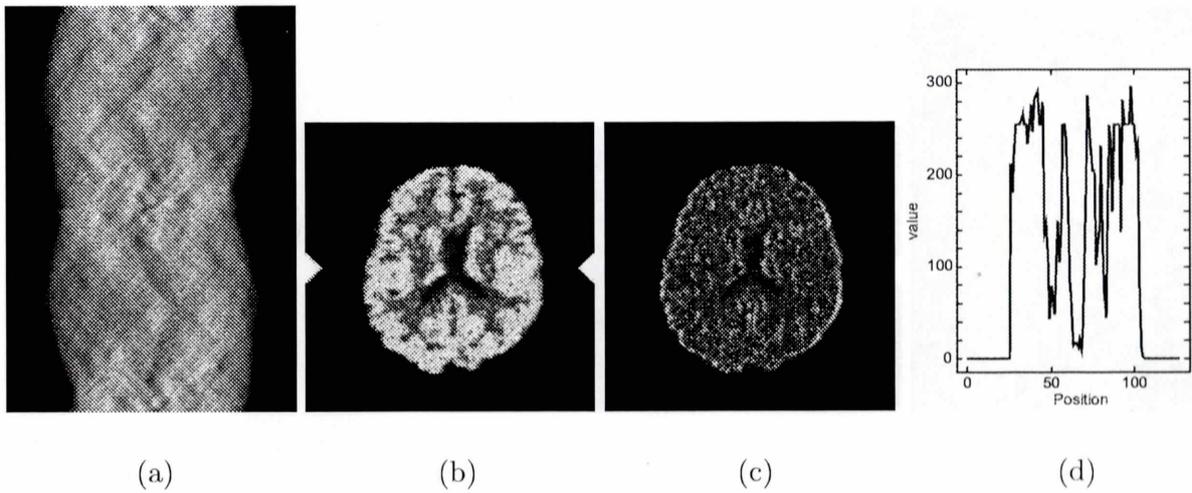


Fig. 4.114: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1391.22) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

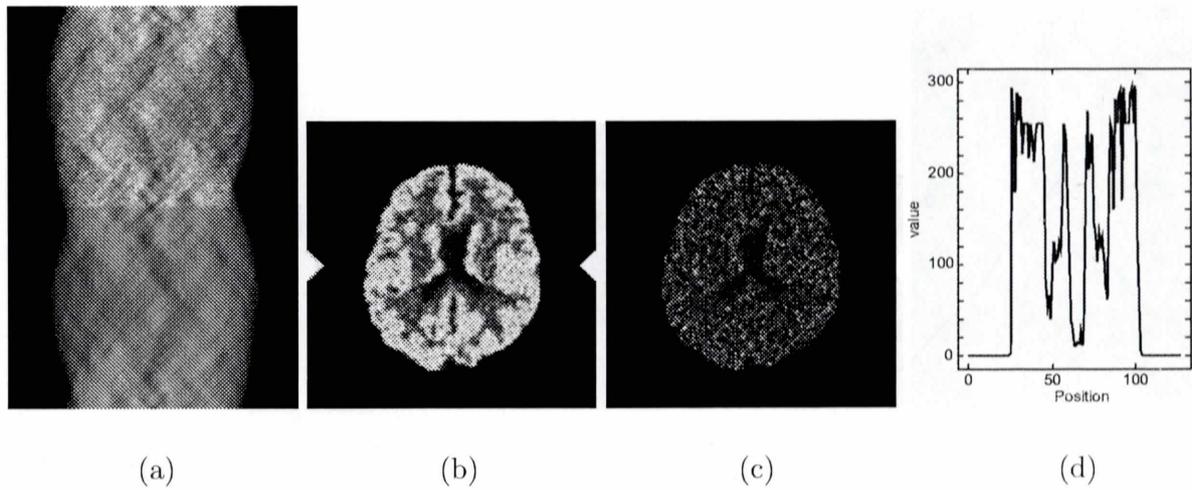


Fig. 4.115: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (553.33) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.116 に 180° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.117 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.116 と同様である。

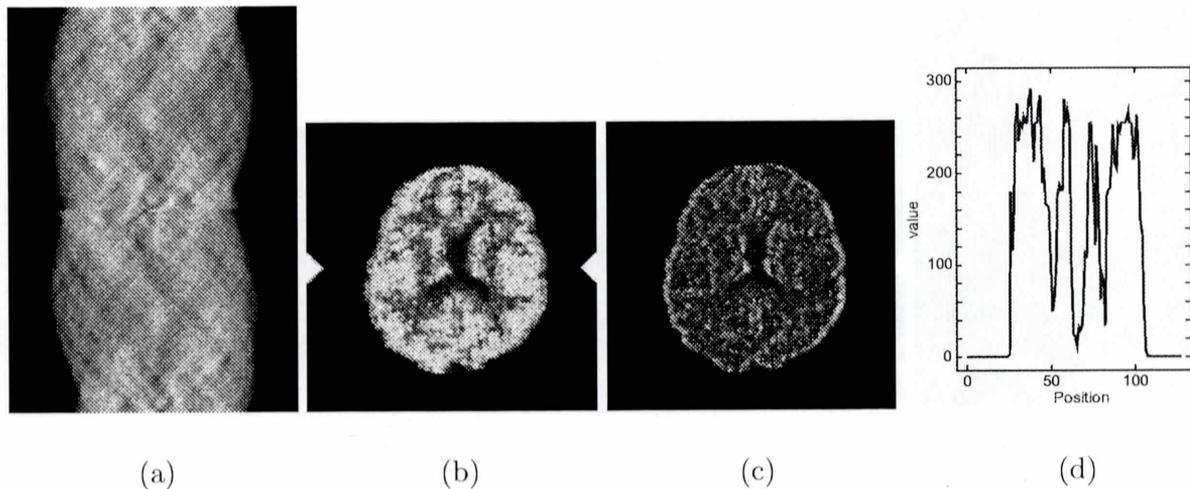


Fig. 4.116: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1896.74) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

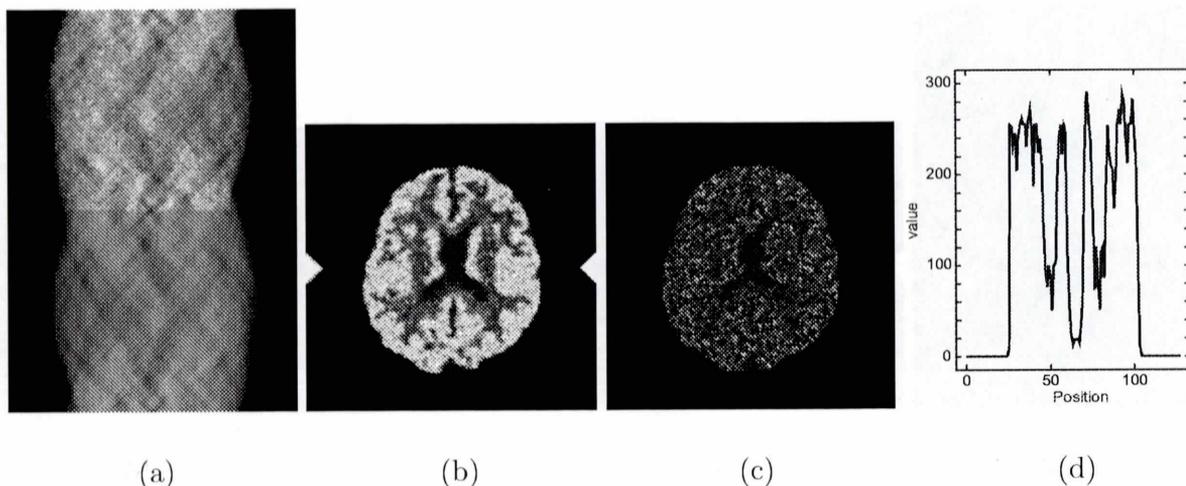


Fig. 4.117: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (560.68) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.118 に 180° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.119 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.118 と同様である。

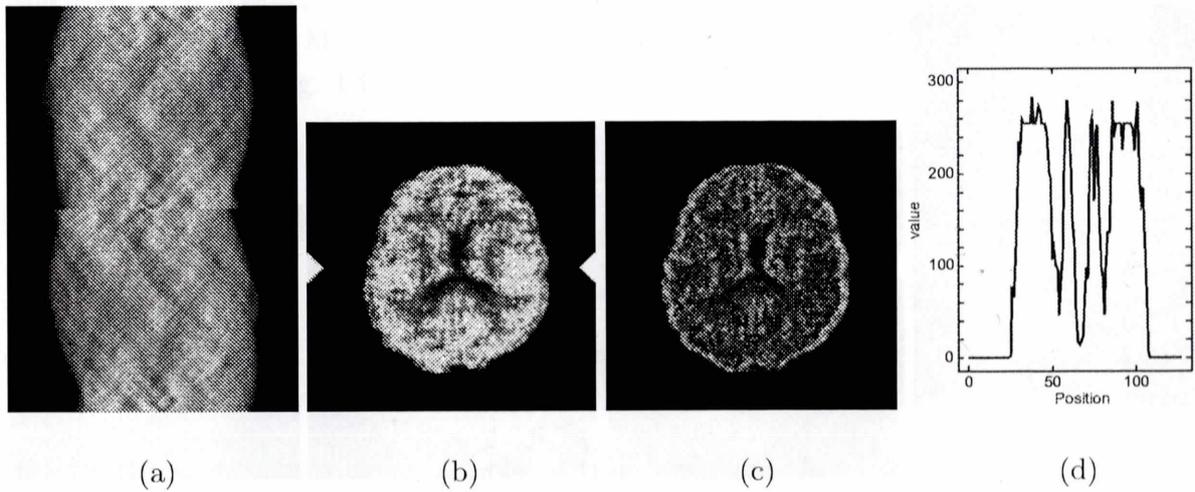


Fig. 4.118: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2338.62) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

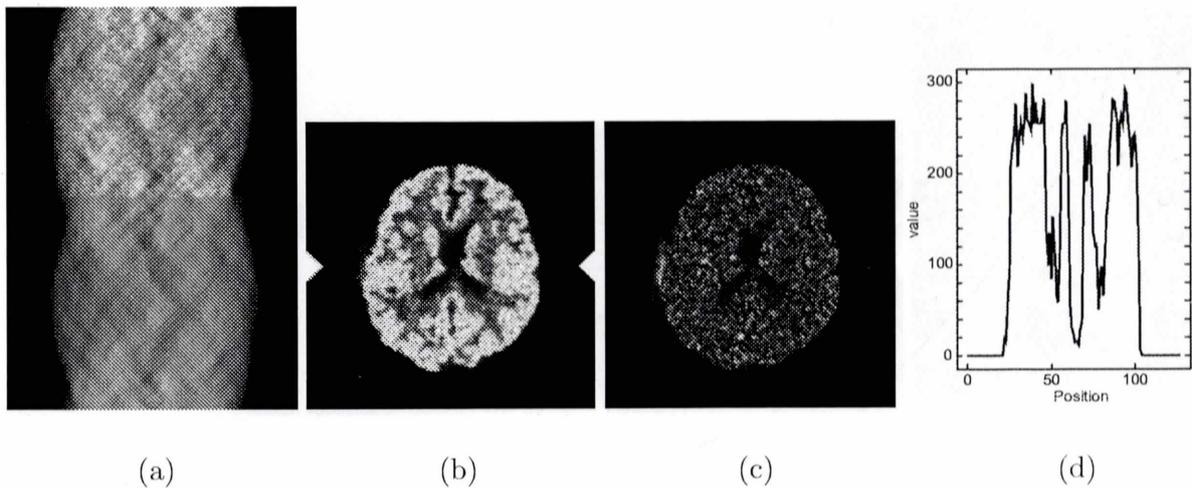


Fig. 4.119: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (653.77) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.120 に 180° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.121 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.120 と同様である。

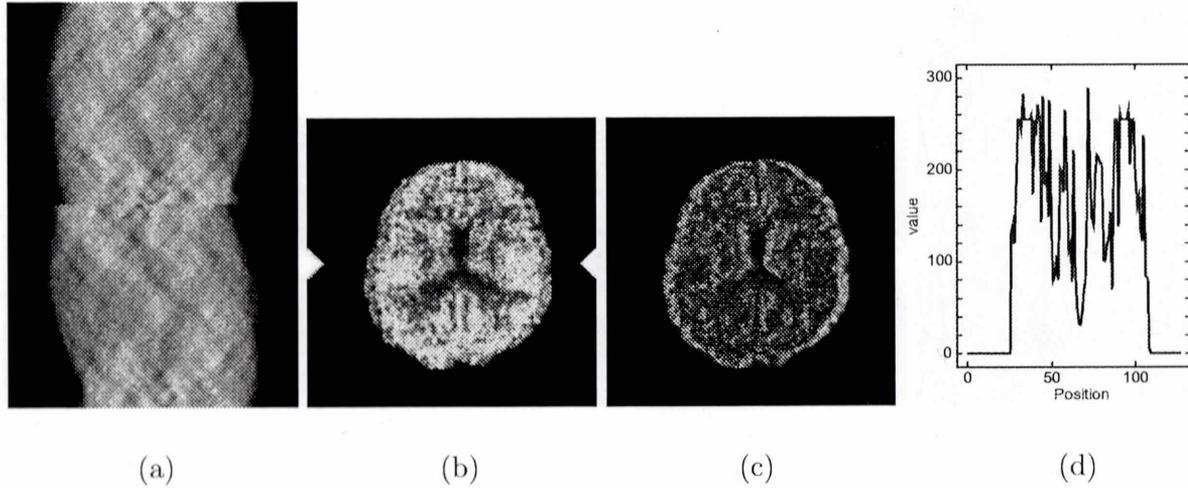


Fig. 4.120: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2631.45) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

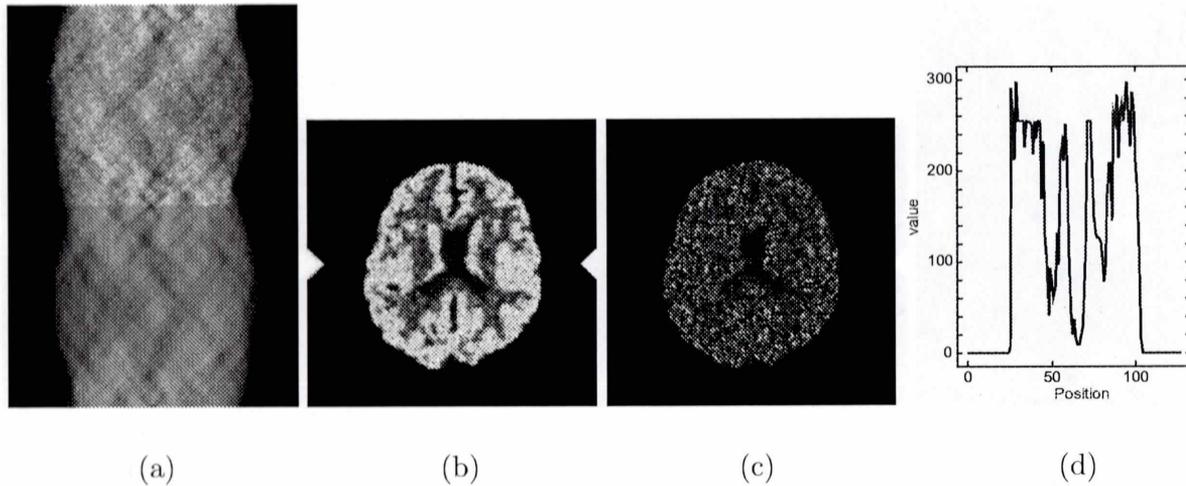


Fig. 4.121: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (562.18) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

4.2.4 72 投影、雑音あり

Shepp&Logan Phantom with 1.5M counts

Fig. 4.122 に 90° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.123 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.122 と同様である。

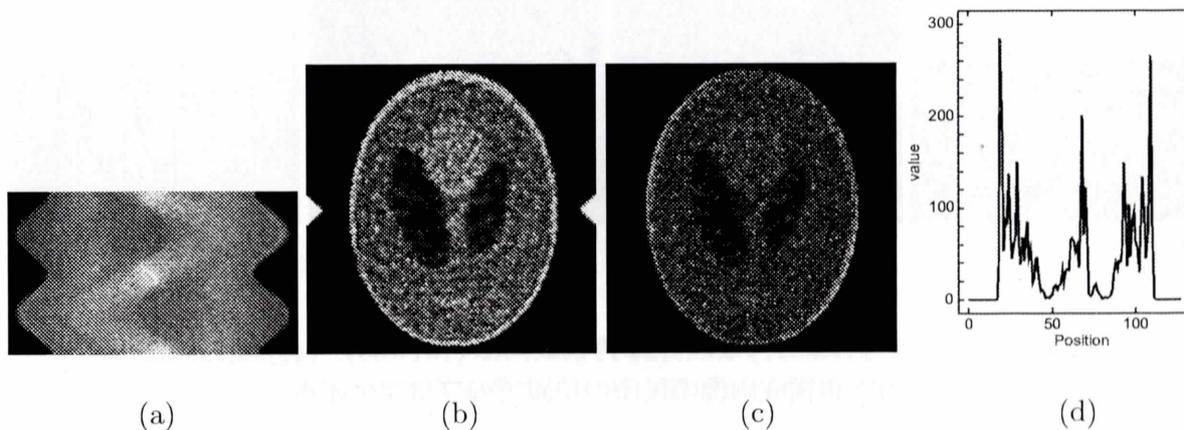


Fig. 4.122: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (724.34) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

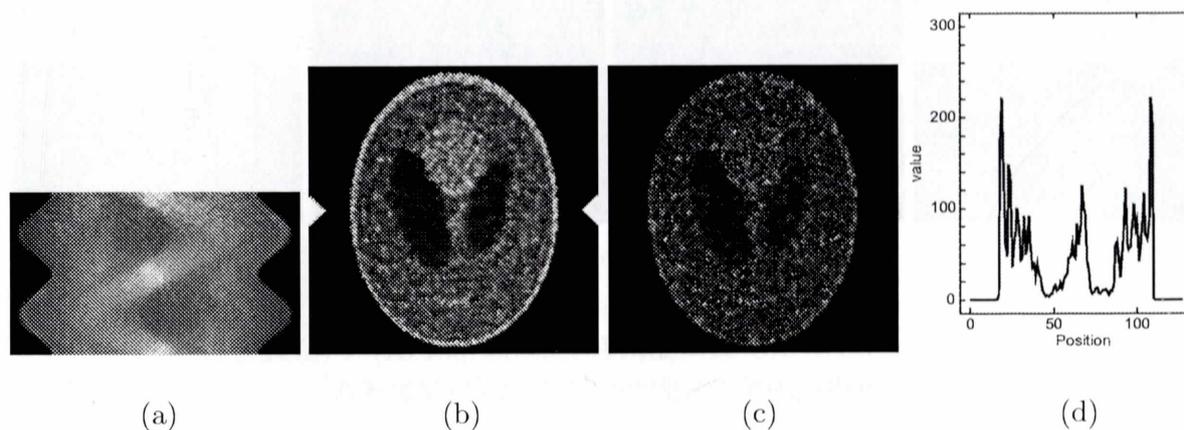


Fig. 4.123: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (348.34) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.124 に 90° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.125 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.124 と同様である。

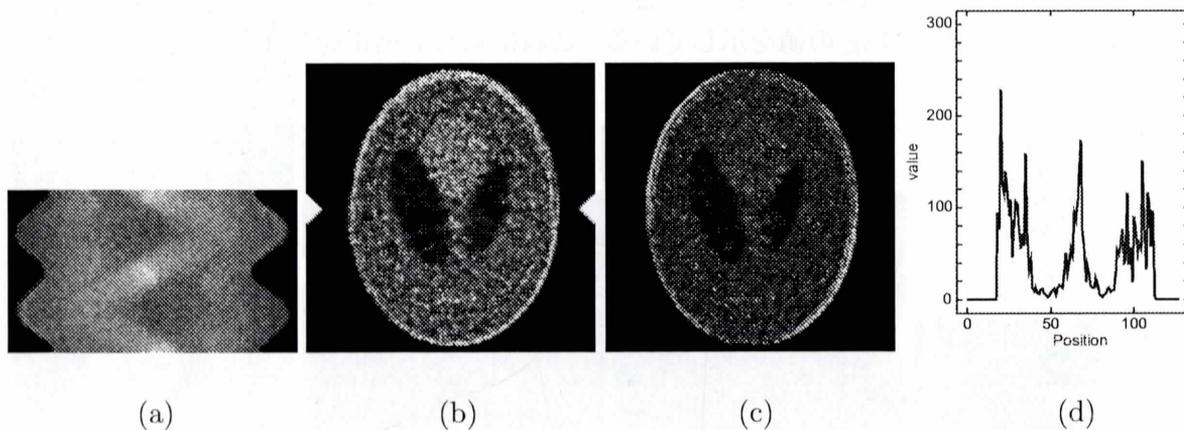


Fig. 4.124: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1017.85) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

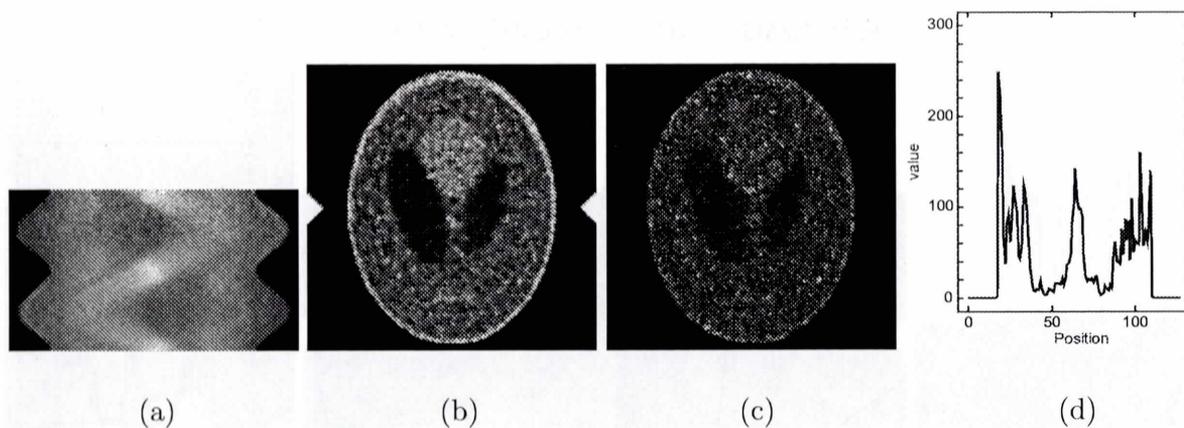


Fig. 4.125: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (381.54) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.126 に 90° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.127 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.126 と同様である。

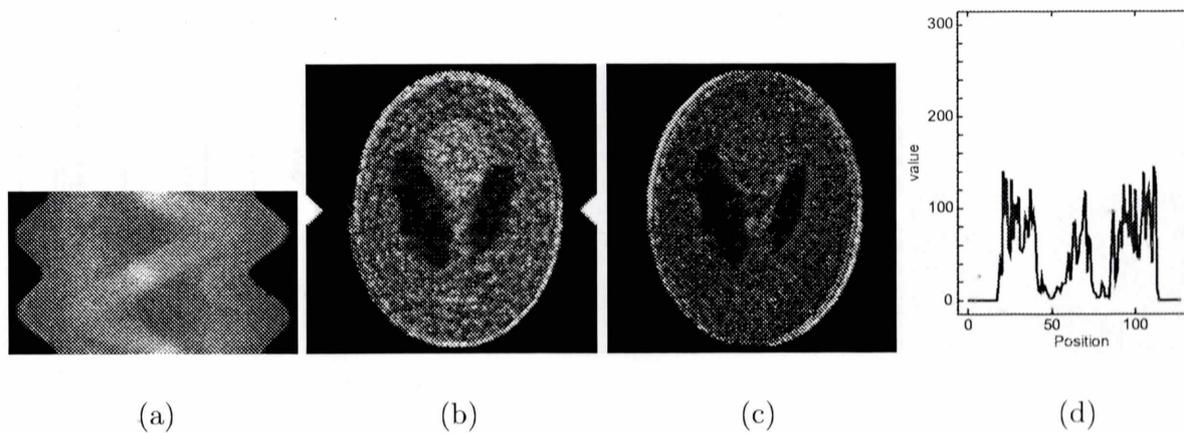


Fig. 4.126: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1265.47) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

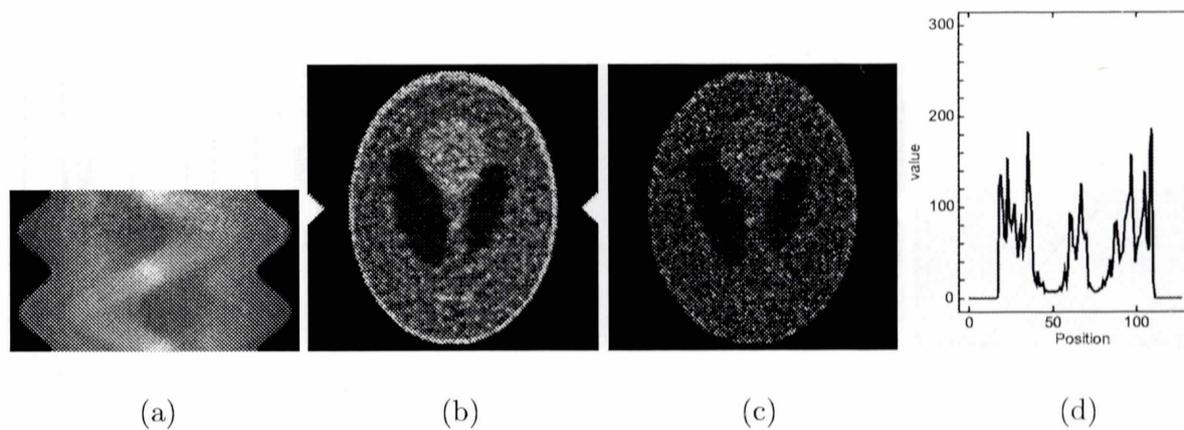


Fig. 4.127: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (373.57) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.128 に 90° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.129 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.128 と同様である。

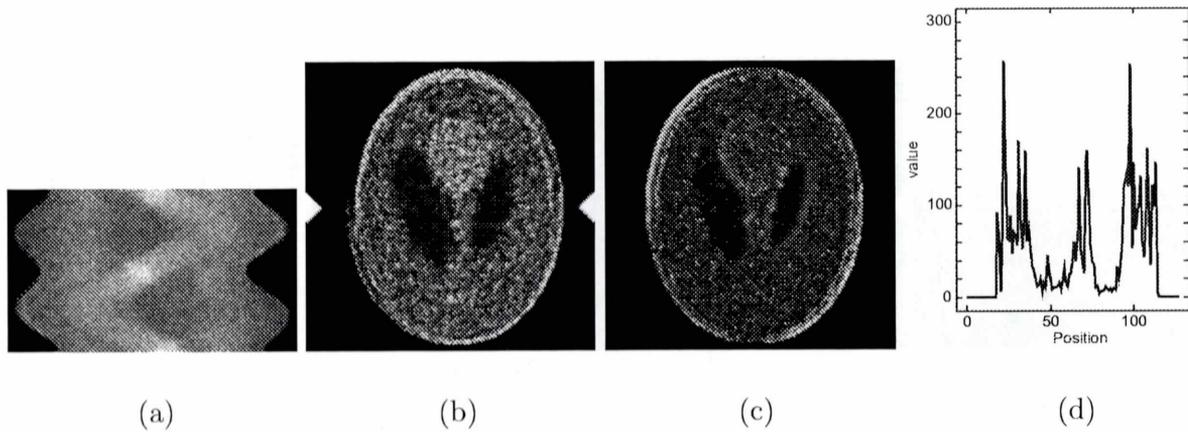


Fig. 4.128: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1396.21) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

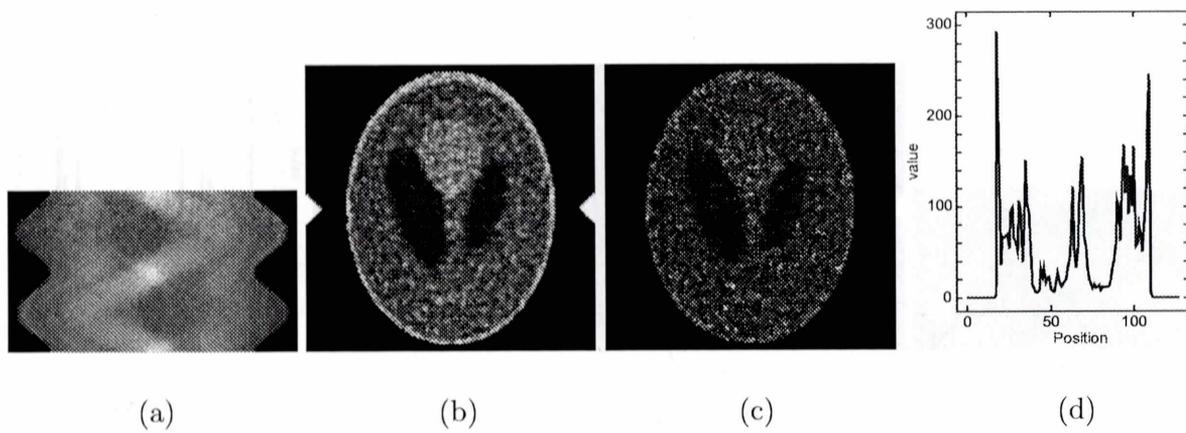
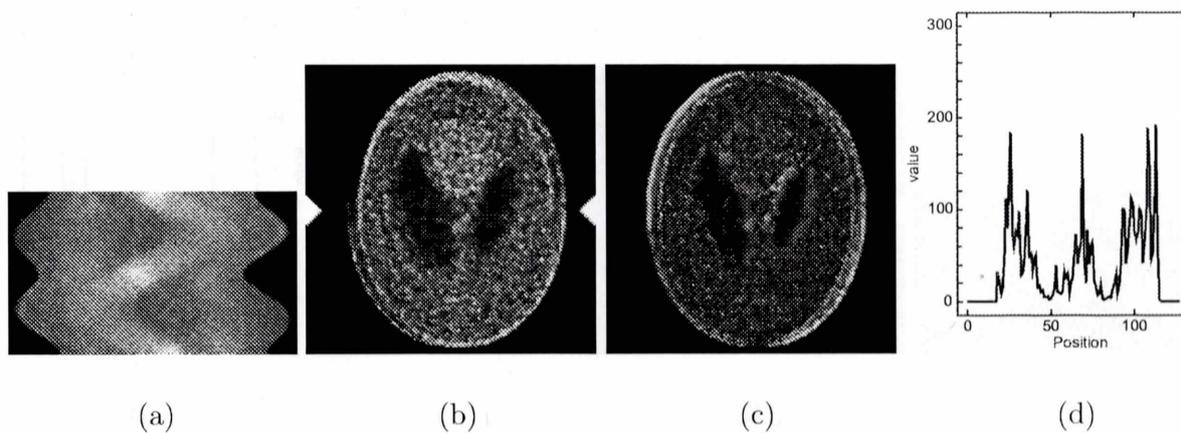


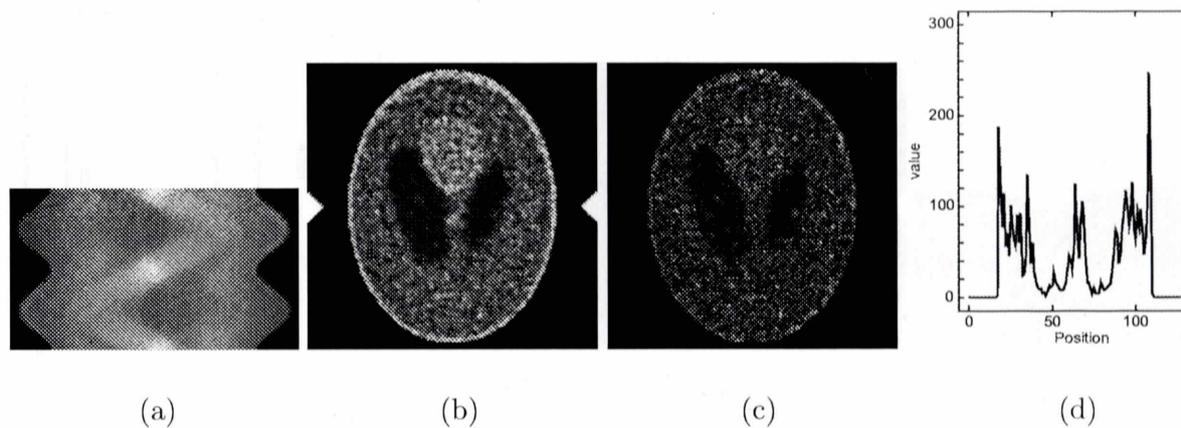
Fig. 4.129: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (359.83) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.130 に 90° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.131 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.130 と同様である。



(a) (b) (c) (d)

Fig. 4.130: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1558.57) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル



(a) (b) (c) (d)

Fig. 4.131: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (366.35) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.132 に 180° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.133 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.132 と同様である。

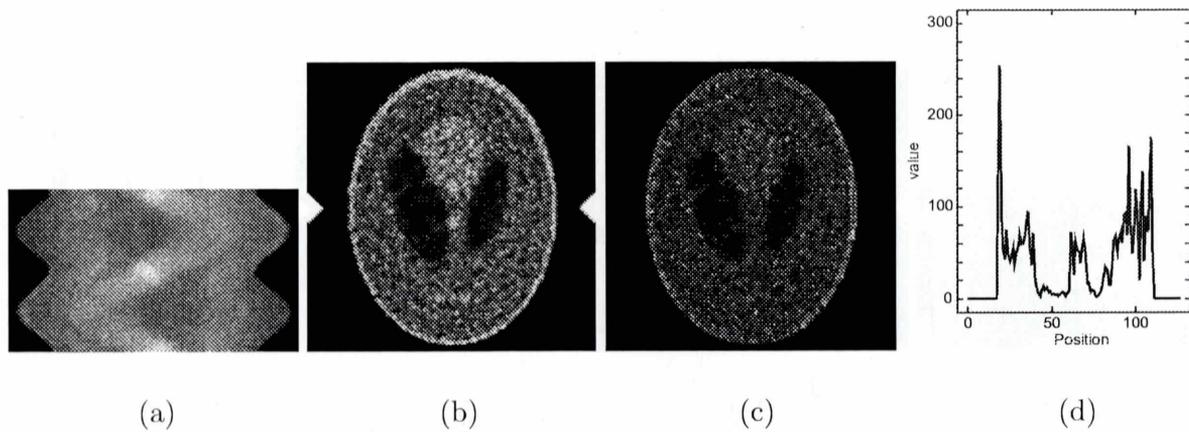


Fig. 4.132: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (622.82) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

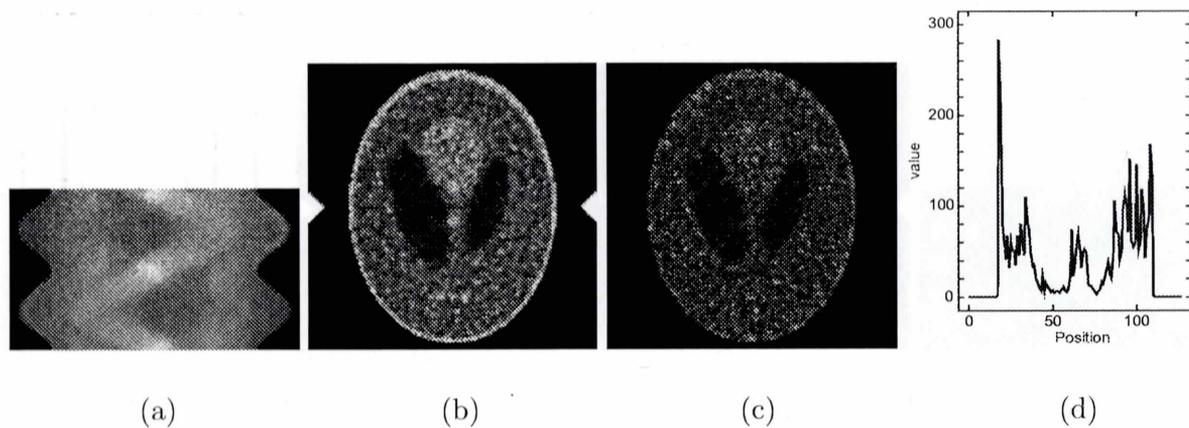


Fig. 4.133: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (387.32) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.134 に 180° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.135 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.134 と同様である。

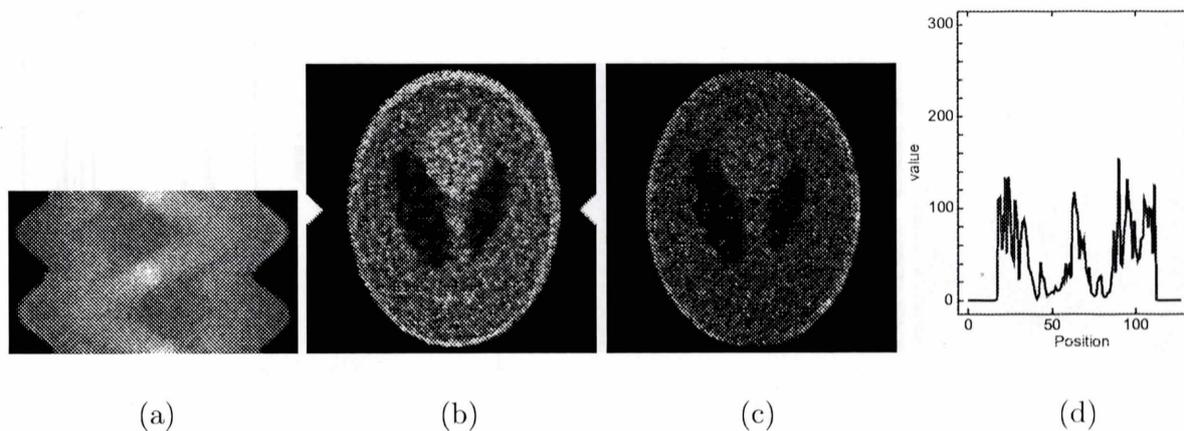


Fig. 4.134: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (721.36) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

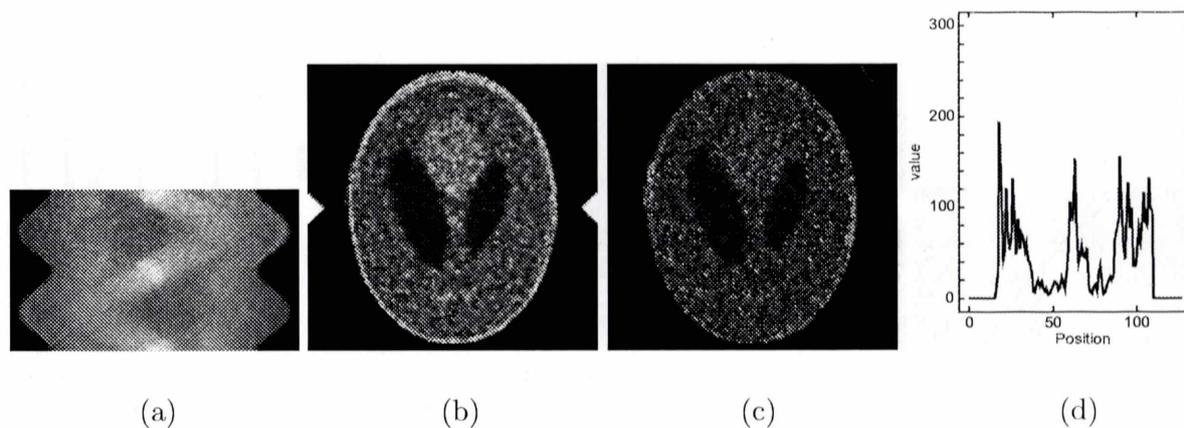


Fig. 4.135: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (384.17) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.136 に 180° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.137 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.136 と同様である。

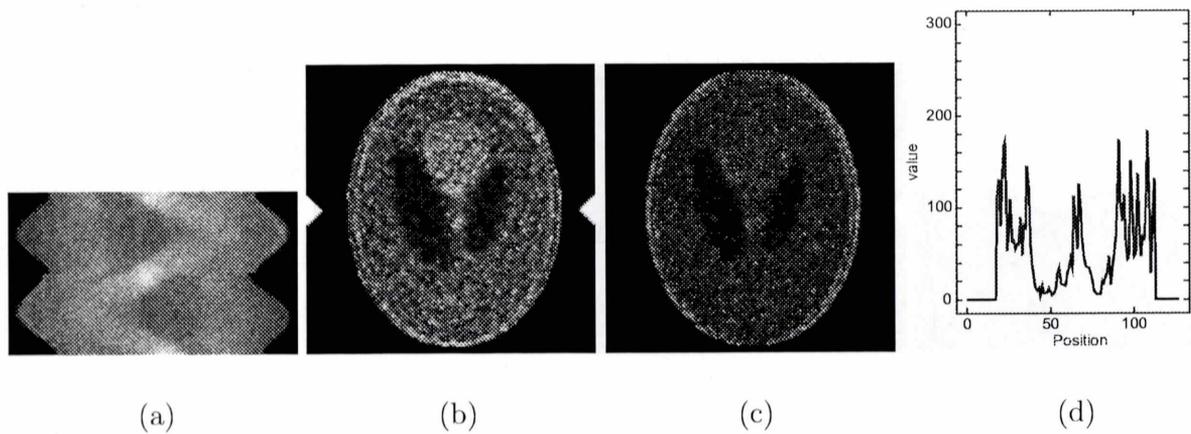


Fig. 4.136: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (848.36) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

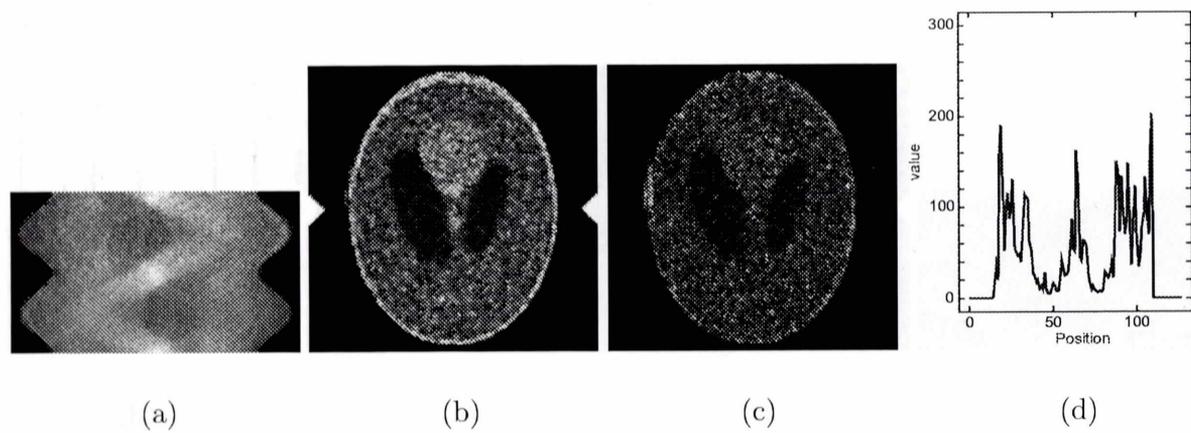


Fig. 4.137: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (405.64) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.138 に 180° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.139 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.138 と同様である。

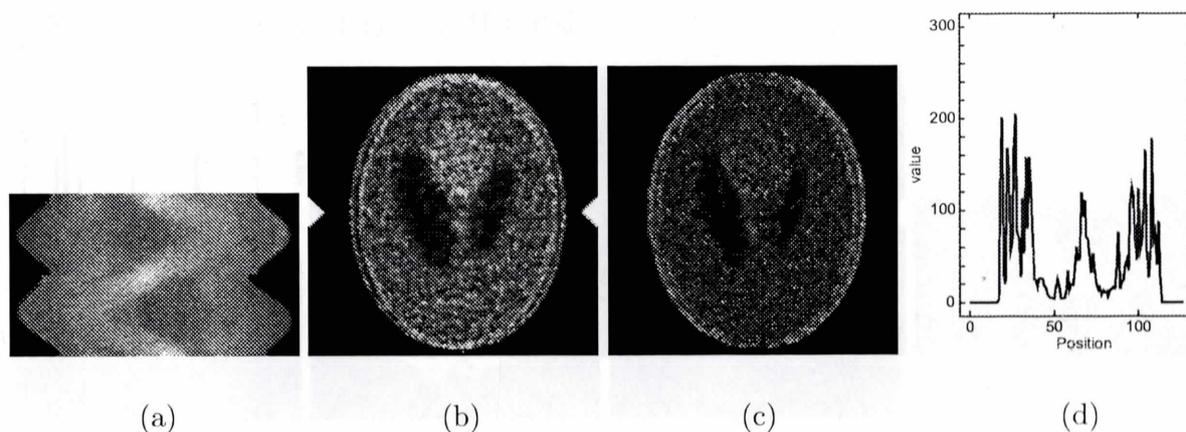


Fig. 4.138: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (921.85) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

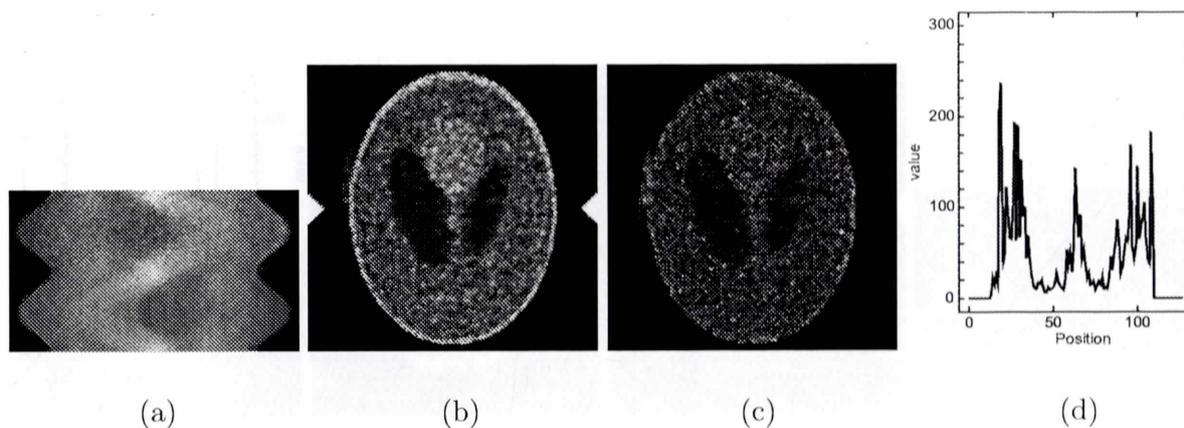


Fig. 4.139: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (418.15) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.140 に 180° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.141 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.140 と同様である。

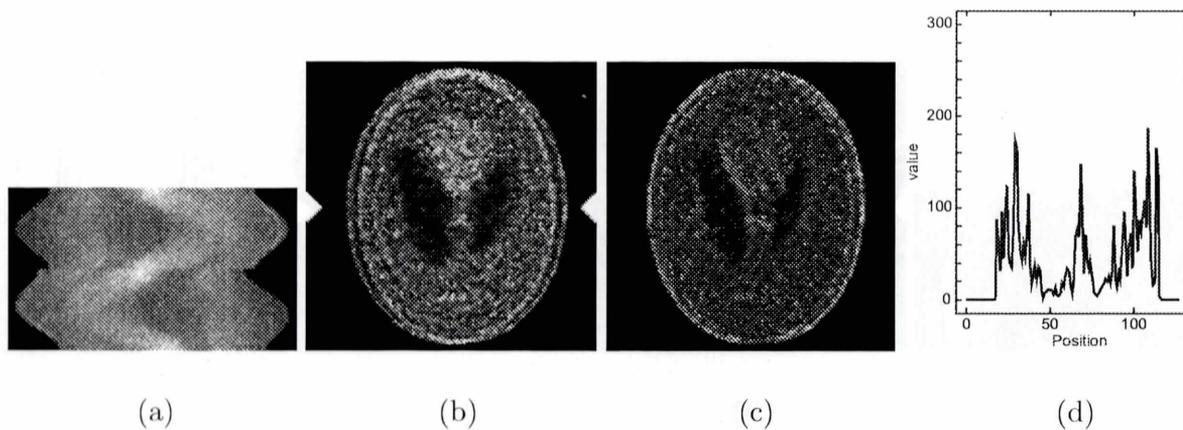


Fig. 4.140: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (968.73) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

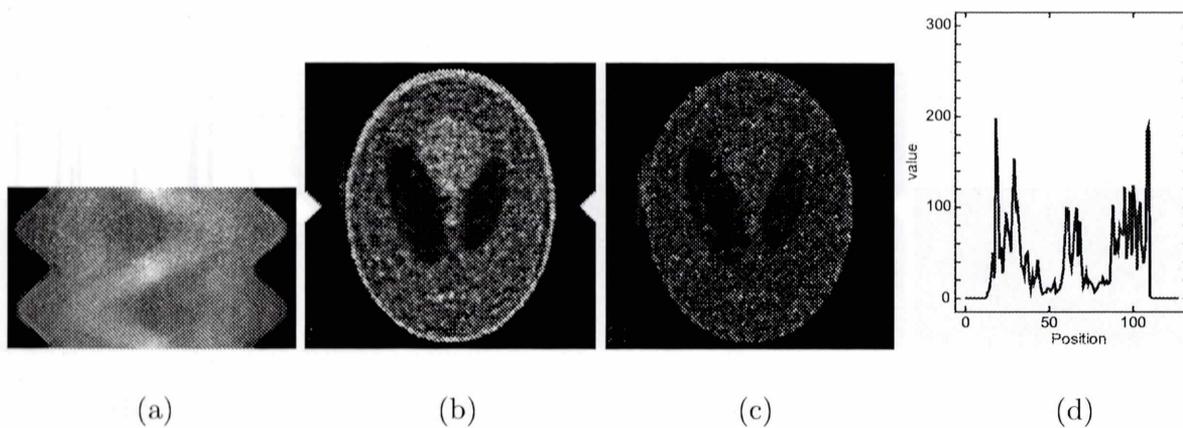


Fig. 4.141: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (408.35) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

brain Phantom with 2M counts

Fig. 4.142 に 90° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.143 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.142 と同様である。

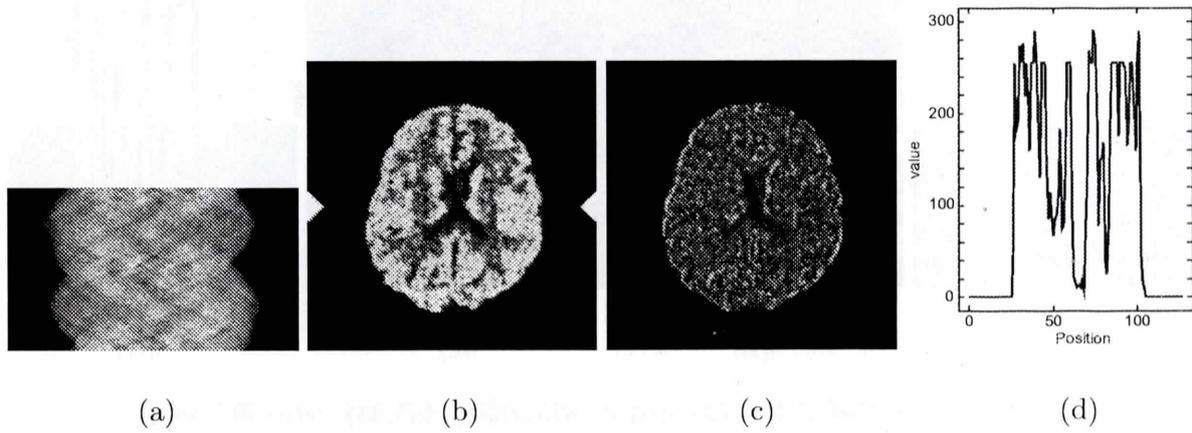


Fig. 4.142: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (850.01) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

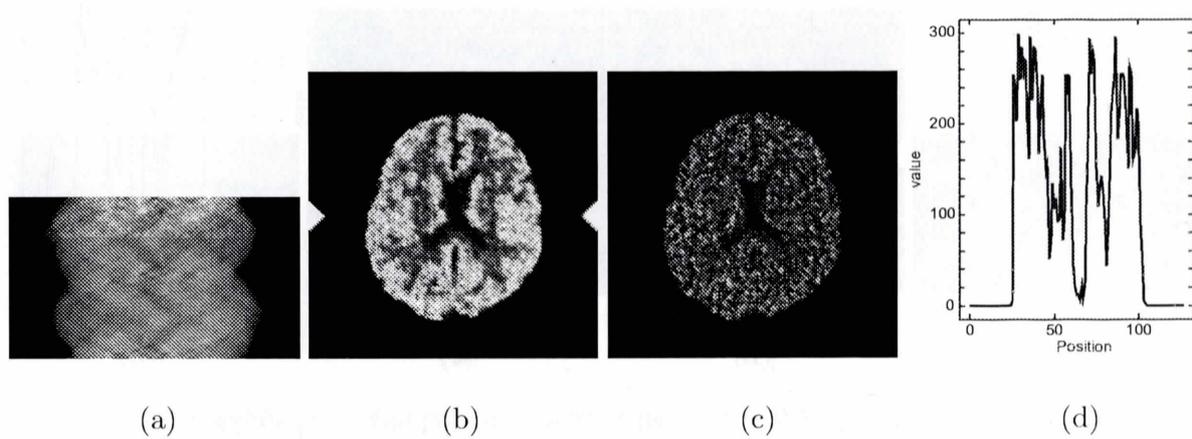


Fig. 4.143: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (430.95) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.144 に 90° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.145 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.144 と同様である。

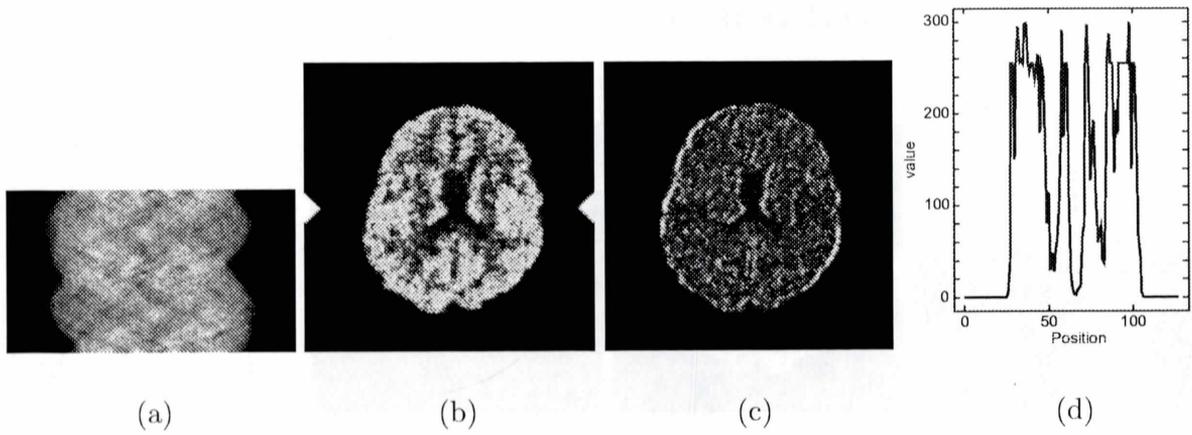


Fig. 4.144: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1485.93) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

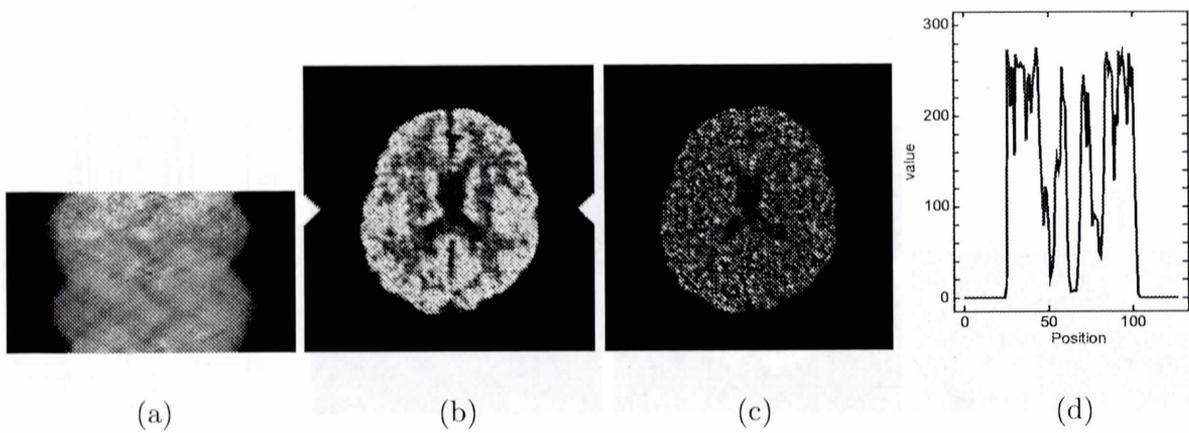


Fig. 4.145: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (463.68) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.146 に 90° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.147 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.146 と同様である。

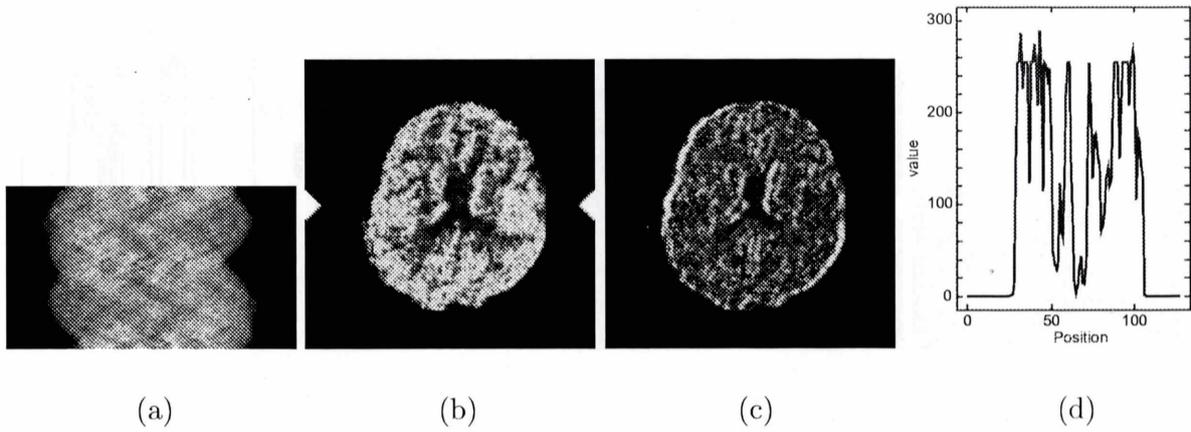


Fig. 4.146: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2181.19) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

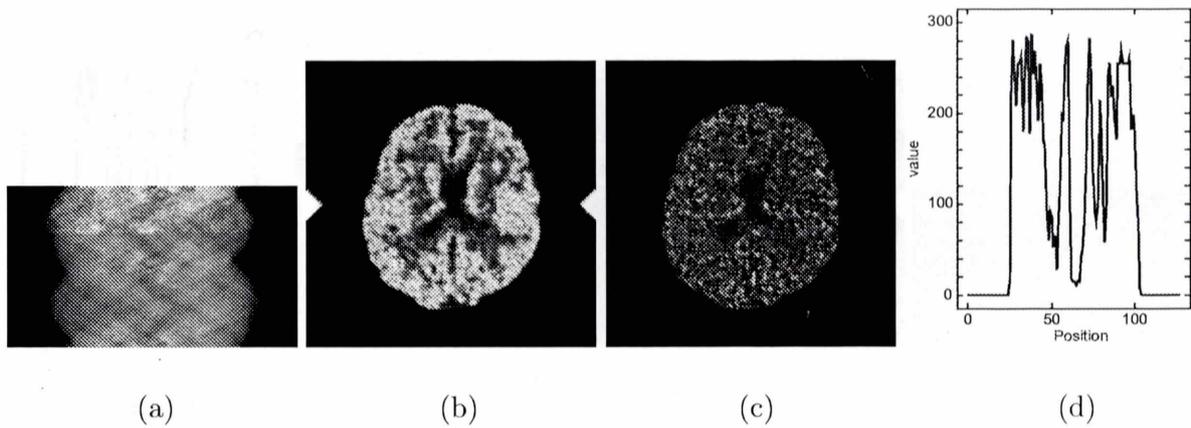


Fig. 4.147: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (474.76) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.148 に 90° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.149 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.148 と同様である。

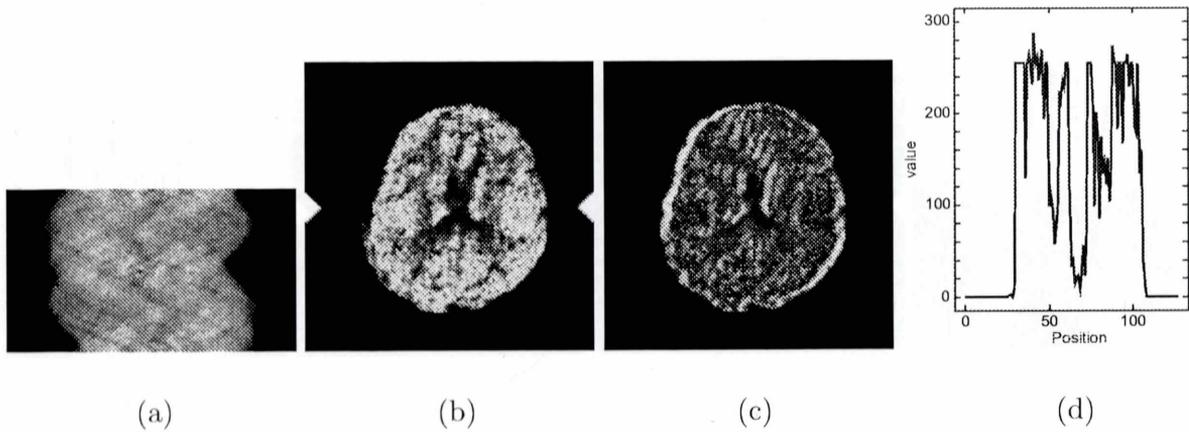


Fig. 4.148: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (2728.35) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

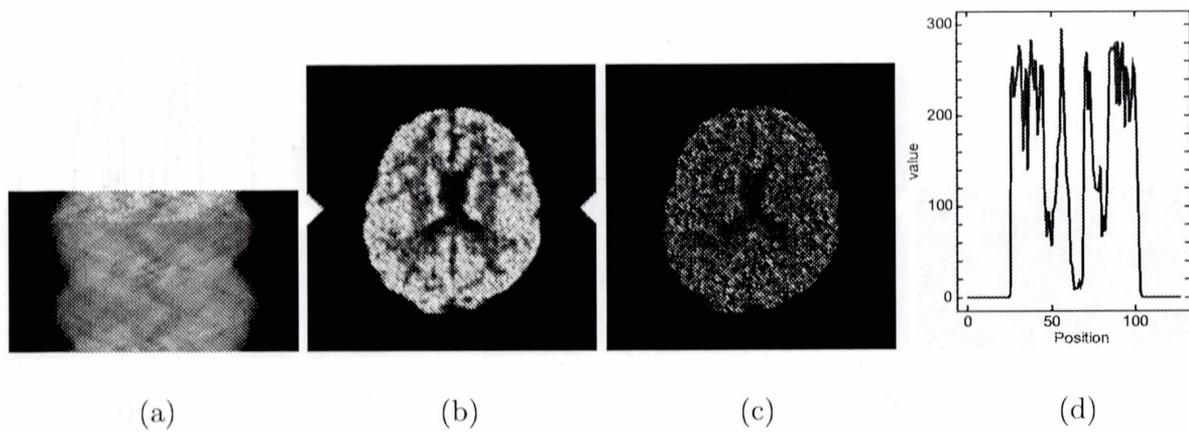


Fig. 4.149: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (453.73) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.150 に 90° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.151 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.150 と同様である。

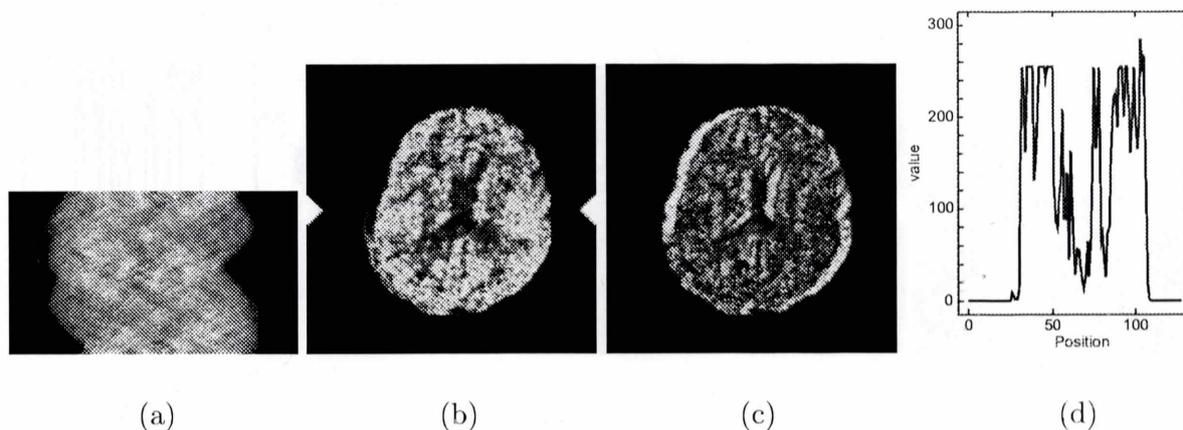


Fig. 4.150: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (3216.29) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

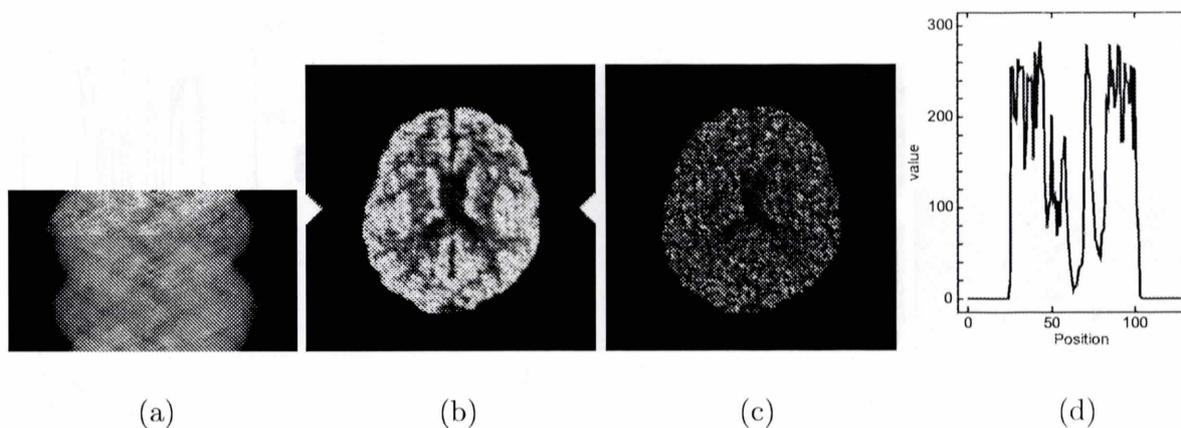


Fig. 4.151: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (452.36) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.152 に 180° で右に 1pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.153 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.152 と同様である。

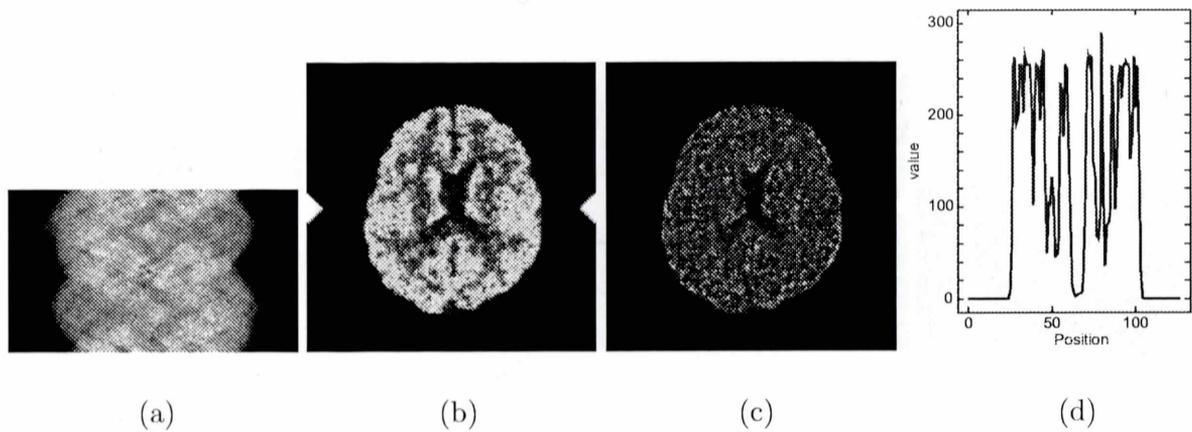


Fig. 4.152: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (712.95) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

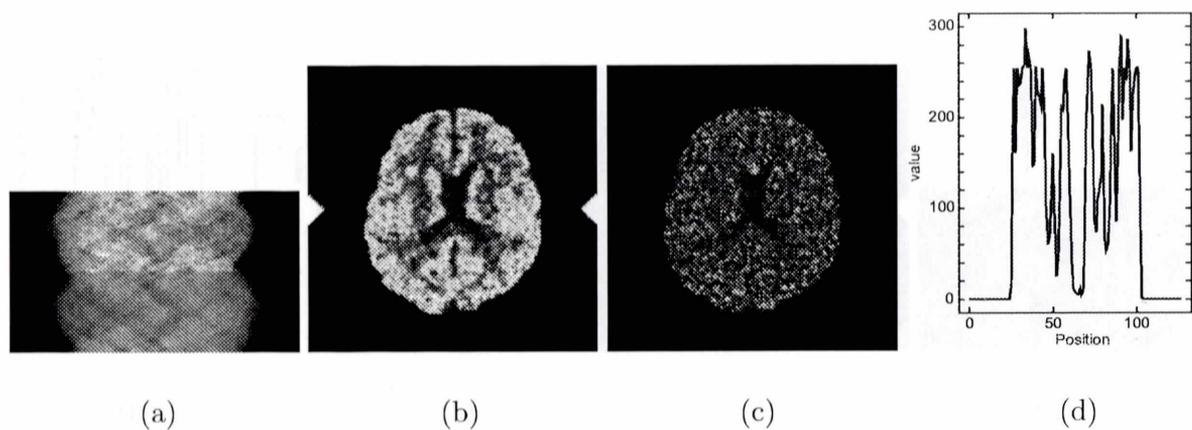


Fig. 4.153: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (509.26) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.154 に 180° で右に 2pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.155 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.154 と同様である。

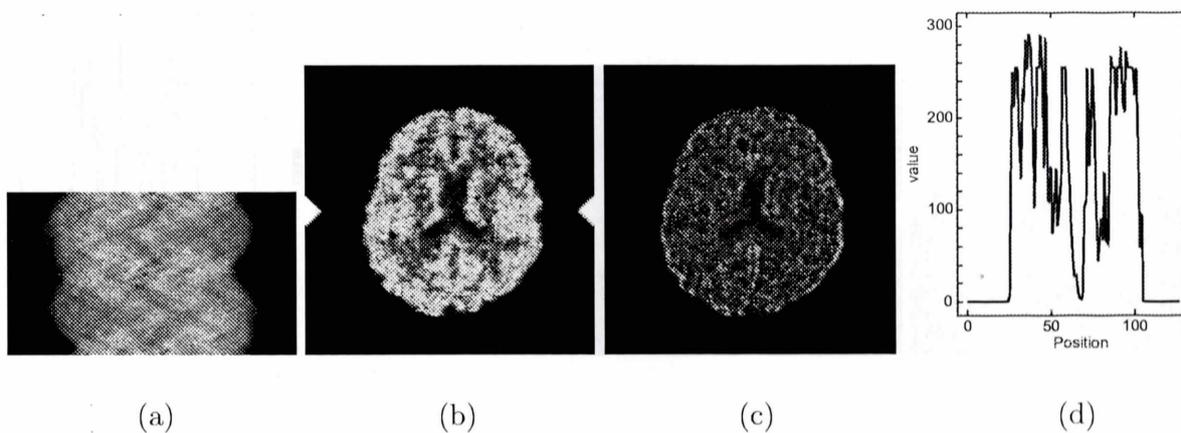


Fig. 4.154: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (933.63) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

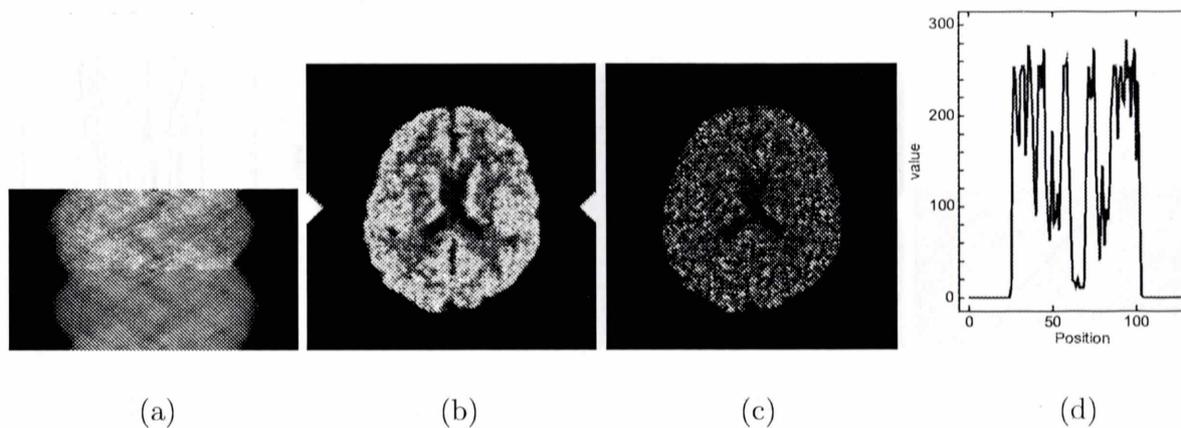


Fig. 4.155: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (490.32) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.156 に 180° で右に 3pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロファイルを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.157 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.156 と同様である。

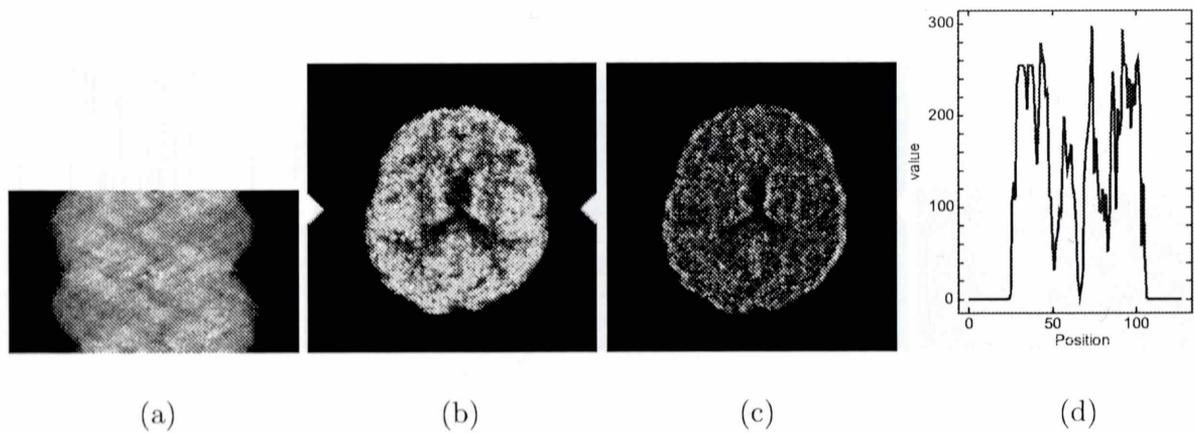


Fig. 4.156: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1258.73) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

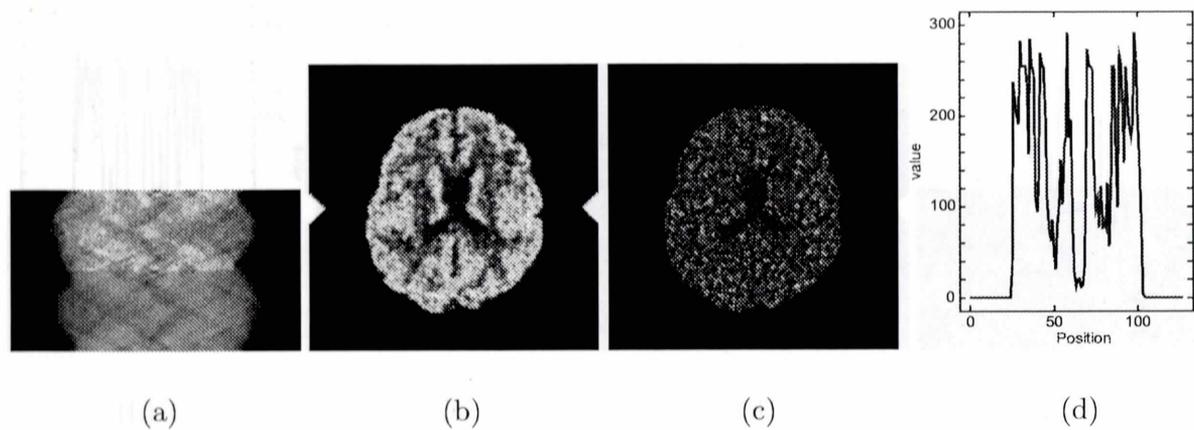


Fig. 4.157: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (495.97) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロファイル

Fig. 4.158 に 180° で右に 4pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.159 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.158 と同様である。

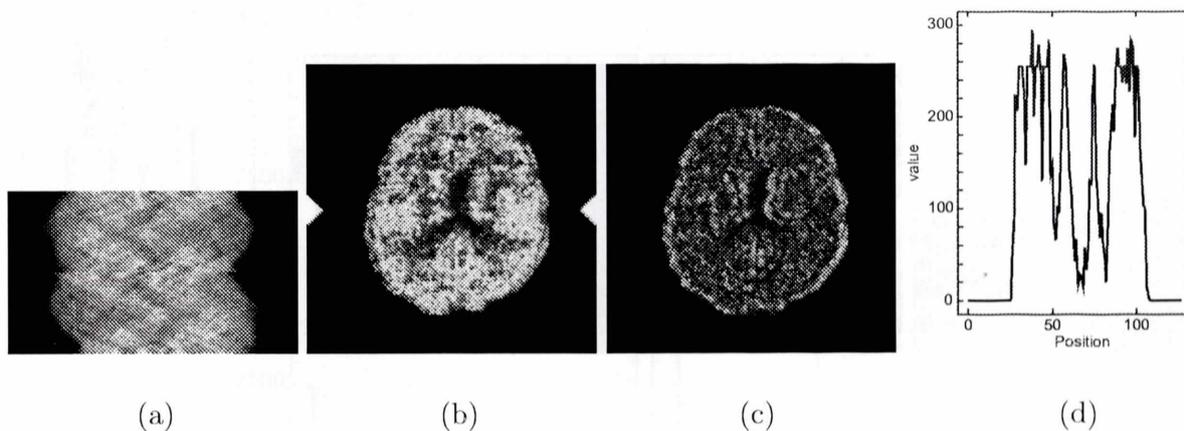


Fig. 4.158: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1443.27) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

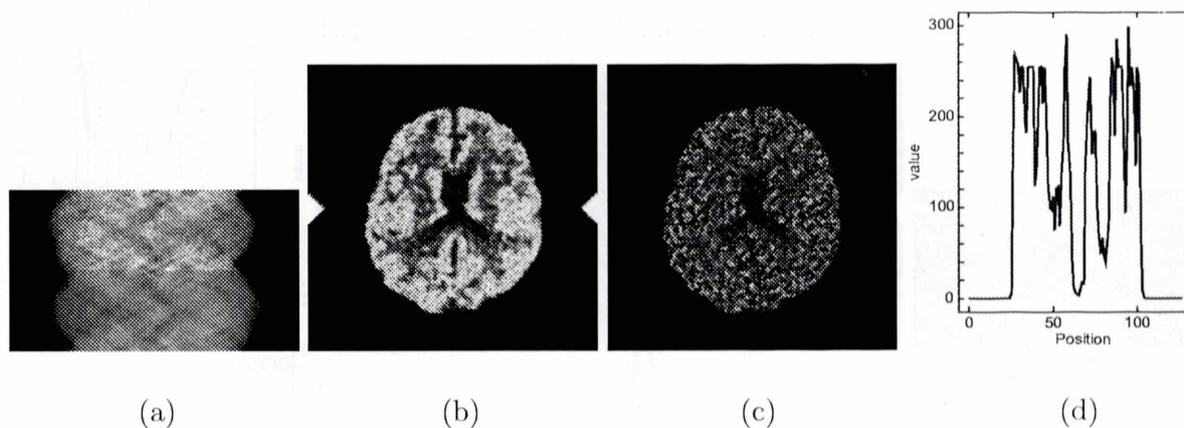


Fig. 4.159: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (480.66) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

Fig. 4.160 に 180° で右に 5 pixel ずらした場合のサイノグラムと再構成画像、及び理想的な再構成画像との差分画像、ならびに (b) の矢印で示した位置におけるプロフィールを示す。再構成画像の () 内の値は MSE の値を示している。これに対して補正を行った結果を Fig. 4.161 に示す。(a)~(d) は Fig. 4.160 と同様である。

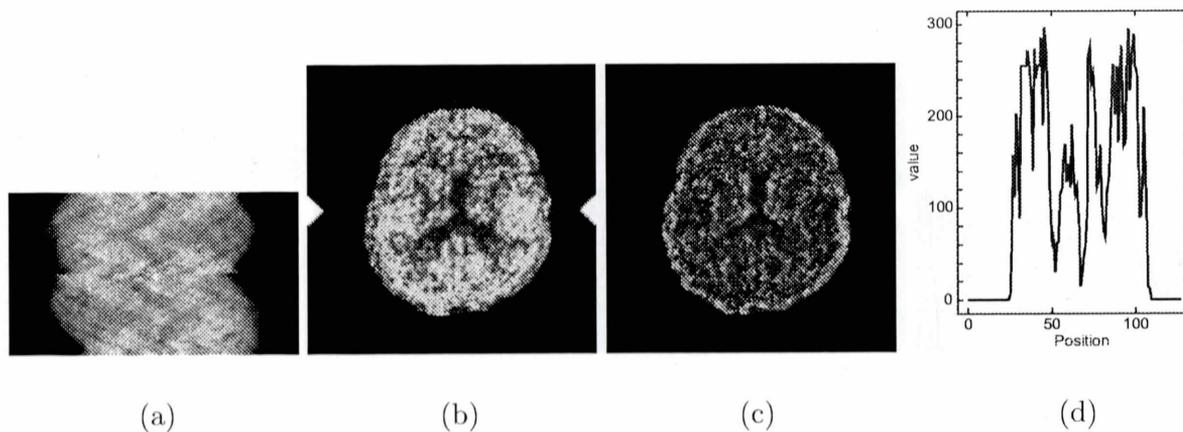


Fig. 4.160: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (1732.55) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

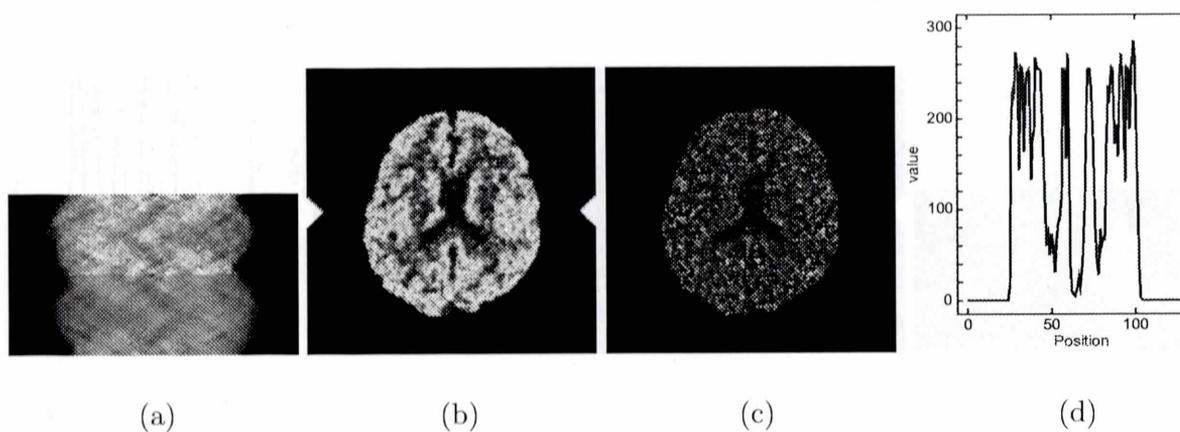


Fig. 4.161: (a) サイノグラム (b) 再構成画像 (493.43) (c) 差分画像
(d) 再構成画像の矢印の位置でのプロフィール

4.2.5 雑音なし

180 投影

Fig. 4.162 に 180 投影、雑音なしで 2° から 2° おきに右方向に 5pixel ずらした場合のシミュレーション結果の MSE を図として示す。

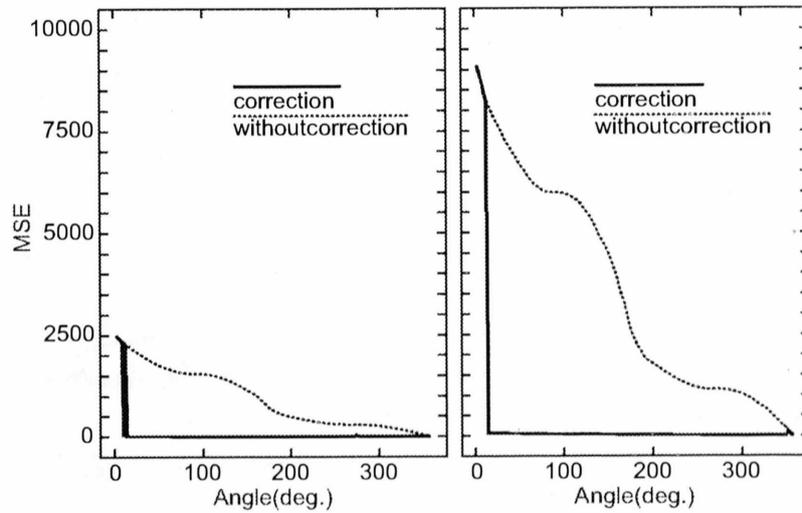


Fig. 4.162: 左:Shepp&Logan Phantom 右:brain Phantom

72 投影

Fig. 4.163 に 72 投影、雑音なしで 5° から 5° おきに右方向に 5pixel ずらした場合のシミュレーション結果の MSE を図として示す。

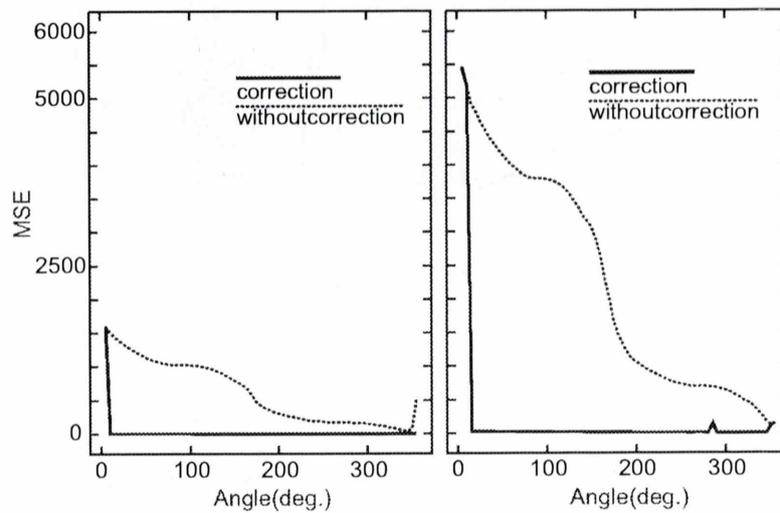


Fig. 4.163: 左:Shepp&Logan Phantom 右:brain Phantom

4.2.6 雑音あり

180 投影

Fig. 4.164 に 180 投影、雑音ありで 2° から 2° おきに右方向に 5pixel ずらした場合のシミュレーション結果の MSE を図として示す。

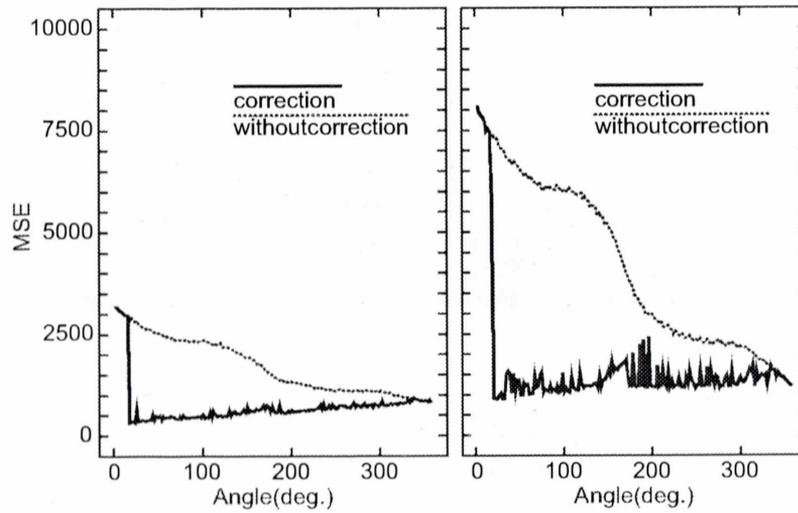


Fig. 4.164: 左:Shepp&Logan Phantom 右:brain Phantom

72 投影

Fig. 4.165 に 72 投影、雑音ありで 5° から 5° おきに右方向に 5pixel ずらした場合のシミュレーション結果の MSE を図として示す。

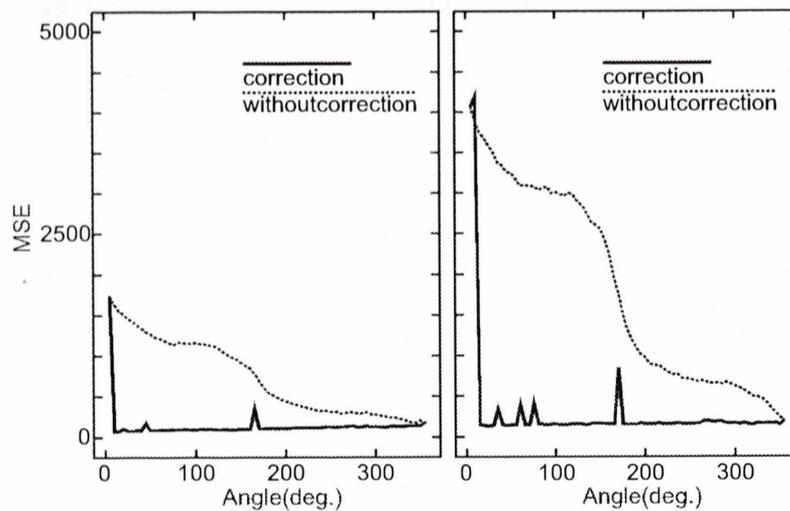


Fig. 4.165: 左:Shepp&Logan Phantom 右:brain Phantom

第5章 考察

雑音の影響がない場合

今回のシミュレーションでは、検出器に対して垂直方向に患者が動いた場合として 90° 、検出器に対して垂直方向以外に患者が動いた場合として 180° でシミュレーションを行ったが、 180° 投影でも、 72° 投影でも補正が行えていることが各シミュレーション結果画像からわかる。また、各シミュレーション結果のMSEの値を見ても、補正後のMSEが補正前のMSEより低くなっている、提案手法により補正が行えていることがわかる。

さらに、Fig. 4.162とFig. 4.163から、撮影を開始した角度に近い角度以外では補正が行えていることがわかる。撮影を開始した角度に近い角度でずれが起きた場合は、サイノグラムを4つの区間にわけ、4つの再構成画像を用いてずれが起きている角度の推定を行うさいに、その4つの画像全てが重なってしまい、どの区間でずれが起きているかの情報を得ることができない。そのため、検出器に対して垂直方向にずれが起きたと仮定した場合と同じ手順で補正を行っているが、 0° から 90° までの画像と、 90° から 360° までの画像も重なってしまうため、結果補正ができていない。しかし、撮影を開始した角度に近い角度でずれが起きた場合は、Fig. 5.1に示したように、補正前の画像にも補正後の画像にも大きな画質劣化は起きない。よって、撮影を開始した角度に近い角度でずれが起きた場合は、あまり大きな問題にならないので、得られたサイノグラムに対して補正を行うときに問題となるのは、大きくわけて、Fig. 2.3に示したように検出器に対して垂直方向に患者が動いた場合と、ずれが起きているがずれの量が少なくサイノグラム上にずれが現れないことである。

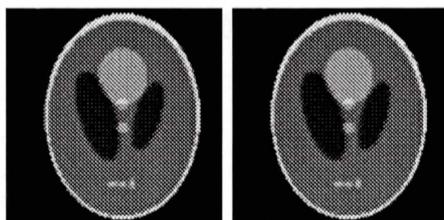


Fig. 5.1: 180° 投影で 2° でずれが起きた場合のシミュレーション結果 左：補正前 右：補正後

検出器に対して垂直方向に患者が動いた場合

今回のシミュレーションでは、検出器に対して垂直の方向に患者が動いた場合として 90° でシミュレーションを行った。

シミュレーション結果から 90° でずれが起きた場合、サイノグラム上でずれが起きている角度の推定はできていないが、 90° または 270° でずれが起きていると仮定し、補正を行うことで補正が行えていることがわかる。もし、 270° でずれが起きた場合は、まず、 90° でずれが

起きていると仮定し補正を行うが、うまく補正を行うことができない。そのため、次に 270° でずれが起きていると仮定し、もう1度補正処理を行うことによって、補正を行うことができる。

ずれが起きているがずれの量が少なくサイノグラム上にずれが現れない場合

今回のシミュレーションでは 180° で、患者が動いたことを想定したので、1pixelのずれでも補正が行えている。 180° でずれが起きた場合は、サイノグラムに1番影響が出やすいのでずれの検出が容易であるが、角度によっては1pixelや2pixelといったずれが起きても、サイノグラムにはずれが現れず、検出を行うことができない。しかし、このようにずれが起きているがずれの量が少なくサイノグラム上にずれが現れない場合でも、 90° または 270° でずれが起きていると仮定し、補正を行うことによって、ずれが起きている角度を正しく推定することができなくても、ずれている区間の全体に対する割合を減らすことで画質を向上させることができる。

雑音の影響がある場合

雑音が付加された場合でも、シミュレーション結果から補正が行えていることがわかる。また、Fig. 4.164 と Fig. 4.165 から雑音が付加された場合でも、撮影を開始した角度に近い角度以外では補正が行えていることがわかる。

雑音が付加されたシミュレーションの補正後のサイノグラムを見ると、補正の過程で投影データの再計算を行った区間では、若干ではあるがノイズの影響が少なくなっていることがわかる。これは、本提案手法では補正を行うさいに1回投影データをML-EM法を用いて再構成しているからである。ML-EM法は、ポアソンノイズを考慮した再構成式のためノイズを付加した場合でも原画像に近い画像が得られる。ML-EM法を用いて得られた再構成画像を使ってサイノグラムの再計算を行なって、補正後の投影データを得ているため、補正を行った区間では雑音の影響が少なくなっていると考えられる。

第6章 まとめ

本論文では、SPECT を使用してデータ収集中に患者が動いてしまっても、位相相関法をサイノグラム空間と再構成画像空間の両方の空間に適用して補正を行うことで、得られた投影データのみで補正が行える新たな方法を提案した。シミュレーション結果より、サイノグラム上でずれの検出が容易に行える検出器に対して垂直方向以外に患者が動いた場合でも、検出ができない垂直方向に患者が動いた場合でも補正が行えることを示すことができた。また、180 投影の雑音の影響のない状況だけでなく、投影数が減った場合や雑音が付加された場合でも本提案手法によって、補正が行えることを示すことができた。

謝辞

本研究にあたり、全般に渡りご指導を頂きました尾川浩一教授、様々な面でお世話になりました彌富仁准教授、草柳達也氏、飯田浩一氏、五明和也氏、宝珠山祐亮氏および尾川研究室の方々に感謝致します。

参考文献

- [1] M. E. Daube-Witherspoon, Y. C. Yan, M. V. Green, R. E. Carson, K. M. Kempner, P. Herscovitch, "Correction for motion distortion in PET by dynamic monitoring of patient position," *J. Nucl. Med.*, vol. 31, p. 816 (abs), 1990.
- [2] Y. Picard and C. J. Thompson, "Digitized video subject positioning and surveillance system for PET," *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol. 16, pp. 137-144, 1997.
- [3] B. J. Lopresti, A. Russo, W. F. Jones, T. Fisher, D. G. Crouch, D. A. Altenburger, and D. W. Townsend, "Implementation and performance of an optical motion tracking system for high resolution brain PET imaging," in *Conf. Rec. IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imag. Conf.*, vol. 2, pp. 1127-1131, Oct. 1998.
- [4] S. R. Goldstein, M. E. Daube-Witherspoon, M. V. Green, A. Eidsath, "A head motion measurement system suitable for emission computed tomography," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 16, pp. 17-27, 1997.
- [5] R. R. Fulton, S. R. Meikle, S. Eberl, J. Pfeiffer, C. J. Constable, M. J. Fulham, "Correction for Head Movements in Positron Emission Tomography Using an Optical Motion-Tracking System," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 49, no. 1, pp. 116-123, Feb. 2002.
- [6] R. R. Fulton, S. Eberl, S. R. Meikle, B. F. Hutton, M. Braun, "A practical 3D tomographic method for correcting patient head motion in clinical SPECT," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 46, pp. 667-672, 1999.
- [7] P. P. Bruyant, M. A. Gennert, G. C. Speckert, R. D. Beach, J. D. Morgenstern, N. Kumar, S. Nadella, M. A. King, "A Robust Visual Tracking System for Patient Motion Detection in SPECT: Hardware Solutions," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 52, no. 5, pp. 1288-1294, Oct. 2005.
- [8] K. Tamagawa, K. Ogawa, M. Nakajima, "Detection of Respiratory Movement During SPECT/PET Data Acquisition," in *Conf. Rec. IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imag. Conf.*, pp. 1571-1574, Oct. 2003.
- [9] R. L. Eisner, T. Noever, D. Nowak, W. Carlson, D. Dunn, J. Oates, K. Cloninger, H. A. Liberman, R. E. Patterson, "Use of cross correlation function to detect patient motion during SPECT imaging," *J. Nucl. Med.*, vol. 28, pp. 97-101, 1987.
- [10] Q. S. Chen, P. R. Franken, M. Defrise, M. H. Jonckheer, F. Deconinck, "Detection and correction of patient motion in SPECT imaging," *J. Nucl. Med. Technol.*, vol. 21, no. 4, pp. 198-205, 1993.

- [11] S. Sarkar, M. A. Oghabian, I. Mohammadi, A. Mohammadpour, A. Rahmim, "A linogram/sinogram cross-correlation method for motion correction in planar and SPECT imaging," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 54, pp. 71-79, 2007
- [12] W. J. Geckle, T. L. Frank, J. M. Links, L. C. Becker, "Correction for patient and organ movement in SPECT: Application to exercise thallium-201 cardiac imaging," *J. Nucl. Med.*, vol. 29, pp. 441-450, 1988.
- [13] J. A. Cooper, P. H. Neumann, B. K. McCandless, "Effect of patient motion on tomographic myocardial perfusion imaging," *J Nucl Med*, vol. 33, pp.1566-1571, 1992
- [14] S. C. Huang, D. C. Yu, "Capability evaluation of a sinogram error detection and correction method in computed tomography," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 39, no. 4, pp. 1106-1110, 1992
- [15] N. Matsumoto, D. S. Berman, P. B. Kavanagh, J. Gerlach, S. W. Hayes, H. C. Lewin, "Quantitative assessment of motion artifacts and validation of a new motion-correction program for myocardial perfusion SPECT," *J. Nucl. Med.*, vol. 42, pp. 687-694, 2001
- [16] C. Bai, J. Maddahi, J. Kindem, R. Conwell, M. Gurley, R. Old, "Development and evaluation of a new fully automatic motion detection and correction technique in cardiac SPECT imaging," *J. Nucl. Cardiol.*, vol. 16, no. 4, pp. 580-589, 2009
- [17] J. L. Homer and P. D. Gianino, "Phase-only matched filtering," *Applied Optics*. vol. 23, no. 6, pp. 812-816, 1984.
- [18] Q. Chen, M. Defrise, F. Deconinck, "Symmetric Phase-Only Matched Filtering of Fourier-Mellin Transforms for Image Registration and Recognition," *IEEE Trans. Pattern. Anal. Mach. Intel.*, vol. 16, no. 12, pp. 1156-1168, Dec 1994

発表論文

国際会議での発表

Ryusuke Ando, Koichi Ogawa "Correction of Patient Movement with a Phase-only Correlation Method in a SPECT Study"

Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC), 2010 IEEE pp2298 - 2302, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Nov 1-6,2010, Knoxville(USA),

国内会議での発表

安藤龍佑、尾川浩一 "位相相関法を用いた SPECT 画像の動き補正"

第 100 回日本医学物理学会学術大会, 医学物理第 30 巻 Sup5,273-274 9.24-25,2010, 東京

付録A 画像再構成法

SPECT で用いられる画像再構成法には大きく分けて解析的手法と逐次近似的手法の2通りがある。逐次近似的手法は、繰り返し反復計算を行うため、計算量が増えてしまい、再構成に膨大な時間が必要となってしまう。しかし、少ない投影角度で再構成画像を作り出すことが可能である。本研究ではずれの推定に再構成画像を用いているため画像を再構成するために必要な角度が少ないことが望ましい。よって本研究では、ML-EM法を用いて画像の再構成を行う。

A.1 ML-EM法

ML-EM法とは、Maximum Likelihood-Expectation Maximizationの略であり、逐次近似的手法の1つで最尤推定を用いた方法である。最尤推定による画像再構成では、任意の画像 λ が与えられたときに、投影データ Y が得られる条件付き確率 $g(Y|\lambda)$ を最大にするように画像 λ を推定し、確率的に最も確からしい画像を得る。

光子の放出はポアソン分布に従う確率過程にあるので、その積分値としての投影データ Y_i もポアソン分布

$$P_k = \exp\{-\lambda\} \frac{\lambda^k}{k!} \quad (\text{A.1})$$

に従う。また、投影データ Y_i は期待値

$$\sum_{j \in I_i} c_{ij} \lambda_j \quad (\text{A.2})$$

を有するので、条件付き確率は

$$g(Y|\lambda) = \prod_i \left\{ \exp\left(-\sum_{j \in I_i} c_{ij} \lambda_j\right) \frac{\left(\sum_{j \in I_i} c_{ij} \lambda_j\right)^{Y_i}}{Y_i!} \right\} \quad (\text{A.3})$$

となる。これを解くためにEMアルゴリズムを使用する。 Y は投影データであり画素の値の積分値である。積分値の取り扱いが難しく Y から各画素の画素値を推定するのは困難である。そこで画素 j から放出された光子が投影 i で検出される仮想的データである X を用いて各画素の画素値を推定する。つまり可観測不完全データである Y を非可観測完全データ X で置き換えるのである。また、 X_{ij} は期待値 $c_{ij} \lambda_j$ を有するので Y と X の関係は

$$Y_i = \sum_{j \in I_i} X_{ij} \quad (\text{A.4})$$

$$g(Y|\lambda) = \sum_{j \in I_i} f(X|\lambda) \quad (\text{A.5})$$

となるので、式 (A.3) は以下のように変形できる。

$$f(X|\lambda) = \prod_i \prod_{j \in I_i} \left\{ \exp(-c_{ij}\lambda_j) \frac{(c_{ij}\lambda_j)^{X_{ij}}}{X_{ij}!} \right\} \quad (\text{A.6})$$

ML-EM 法では尤度関数を λ に関して最大にし、確率的に最も確かな画像を得るわけであるが、このまま最大にするのは困難である。ここで、尤度関数 $f(X|\lambda)$ を最大にすることと対数尤度関数 $\ln f(X|\lambda)$ を最大にすることは等価であるので、式 (A.6) の対数を取り

$$f(X|\lambda) = \prod_i \prod_{j \in I_i} \{(-c_{ij}\lambda_j) + X_{ij} \ln(c_{ij}\lambda_j) - \ln X_{ij}!\} \quad (\text{A.7})$$

について最大となる λ を求める。

Expectation-Step

E ステップでは、投影データ Y と n 次の推定値 λ_n が与えられたときの $\ln f(X|\lambda)$ の条件付き期待値 $E\{\ln f(X|\lambda)|y, \lambda^n\}$ を求める。

$$\begin{aligned} E(\ln f(X|\lambda)|Y, \lambda^n) &= \int \ln f(X|\lambda) f(X|Y, \lambda) dX \\ &= \int \left\{ \sum_i \sum_{j \in I_i} \{-c_{ij}\lambda_j + X_{ij} \ln(c_{ij}\lambda_j) - \ln X_{ij}!\} \right\} \times f(X_{ij}|Y_i, \lambda_j^n) dX \\ &= \sum_i \sum_{j \in I_i} \{-c_{ij}\lambda_j \int f(X_{ij}|Y_i, \lambda_j^n) dX + \ln(c_{ij}\lambda_j) \int X_{ij} f(X_{ij}|Y_i, \lambda_j^n) dX\} + R \\ &= \sum_i \sum_{j \in I_i} \{-c_{ij}\lambda_j + N_{ij} \ln(c_{ij}\lambda_j)\} + R \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

ここで R は λ に依存しない定数項であり、 N_{ij} は

$$\begin{aligned} N_{ij} &= \int X_{ij} f(X_{ij}|Y_i, \lambda_j^n) dX \\ &= \int X_{ij} \frac{f(X_{ij}|\lambda_j^n)}{f(Y_i|\lambda_j^n)} dX \\ &= \int X_{ij} \frac{c_{ij}\lambda_j^n}{\sum_{k \in I_i} c_{ik}\lambda_k^n} dX \\ &= \frac{c_{ij}\lambda_j^n Y_i}{\sum_{k \in I_i} c_{ik}\lambda_k^n} \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

である。

Maximization-Step

M ステップでは、 E ステップで求めた条件付き期待値を λ に関して最大化する。

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_j} E\{\ln f(X|\lambda)|Y, \lambda^n\} = - \sum_{i \in J_j} c_{ij} + \sum_{i \in J_j} N_{ij} \lambda_j^{-1} = 0 \quad (\text{A.10})$$

ここで λ_j を新しい $(n+1)$ を次の次の推定値とし、 λ_j^{n+1} と表記すると ML-EM の推定式は以下のようなになる。

$$\lambda_j^{n+1} = \frac{\sum_{i \in J_j} N_{ij}}{\sum_{i \in J_j} c_{ij}} = \frac{\lambda_j^n}{\sum_{i \in J_j} c_{ij}} \sum_{i \in J_i} \frac{c_{ij} Y_i}{\sum_{k \in I_i} c_{ik} \lambda_k^n} \quad (\text{A.11})$$

また、各再構成法共通の変数で書き直すと

$$\lambda_j^{n+1} = \frac{\lambda_j^n}{\sum_{i \in J_i} c_{ij}} \sum_{i \in J_i} \frac{c_{ij} P_i}{R_i^n} \quad (\text{A.12})$$

となる。

A.2 ML-EM法の例

以下にML-EMのアルゴリズムを簡単な例を用いて示す。画像サイズは 2×2 とし、投影は0度、45度、90度で収集したものとする。Fig.A.1の左図に原画像、右に0度、45度、90度の投影データを示す。この場合における検出確率をFig.A.2に示す。

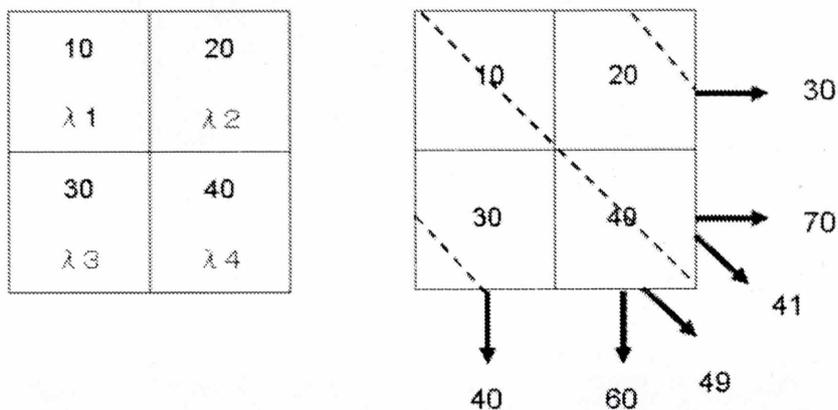


Fig. A.1: 左：原画像、右：投影データ

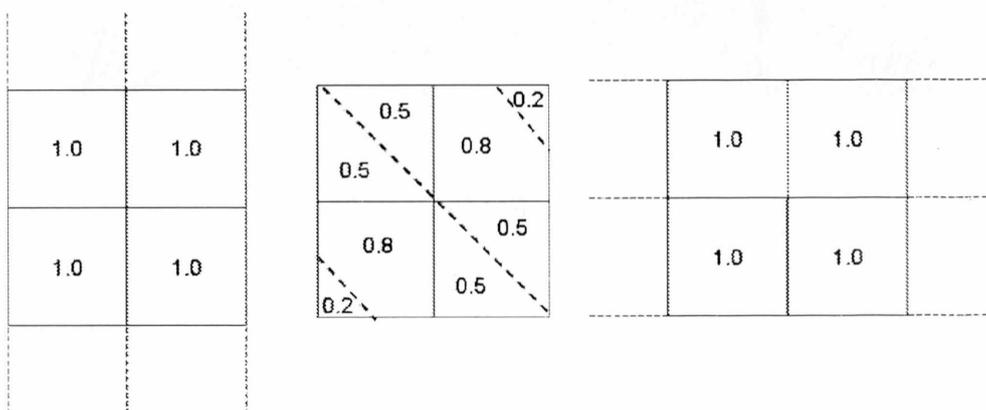


Fig. A.2: 検出確率 c_{ij} (左：0度、中央：45度、右：90度)

1. 実測投影データ P から以下の式より画素値を一定にした初期画像を求める。

$$\lambda_j^0 = \frac{\sum_k P_0 k}{N^2} = \frac{40 + 60}{2^2} = 25$$

2. 現状の推定値における計算投影データ R を全角度について求める。

3. 各画素について式 (A.12) より画素値を修正する。これを反復計算 1 回とする。 λ_1 についての計算を以下に示す。

$$\begin{aligned} \lambda_1^1 &= \frac{\lambda_1^0}{\sum_{i \in J_i} c_{i1}} \sum_{i \in J_j} \frac{c_{i1} P_i}{R_i^0} \\ &= \frac{25}{1.0 + (0.5 + 0.5) + 1.0} \times \left\{ \frac{40 \times 1.0}{50} + \left(\frac{49 \times 0.5}{45} + \frac{41 \times 0.5}{45} \right) + \frac{30 \times 1.0}{50} \right\} \\ &= 20 \end{aligned}$$

4. 繰り返し計算を行い、原画像に近づけていく。

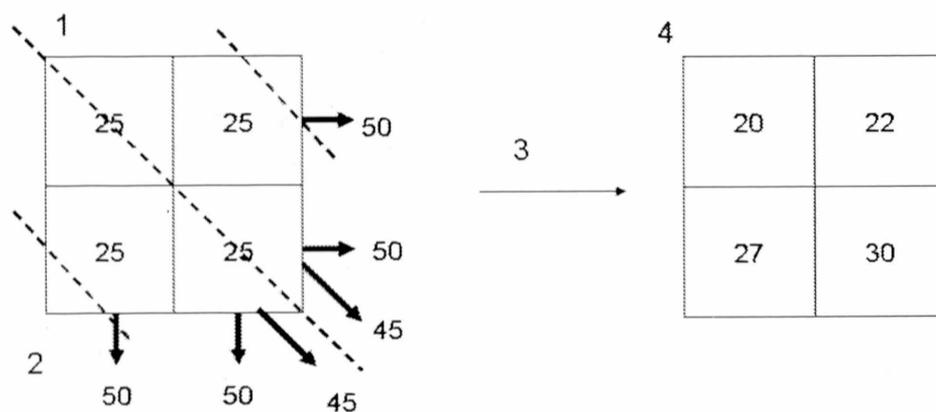


Fig. A.3: ML-EM 法の計算例

以下に実際に Shepp ファントムを用いて ML-EM 法で画像再構成を行った結果を示す。原画像のサイズは 128×128 であり、反復回数はそれぞれ 10 回、50 回、100 回である。

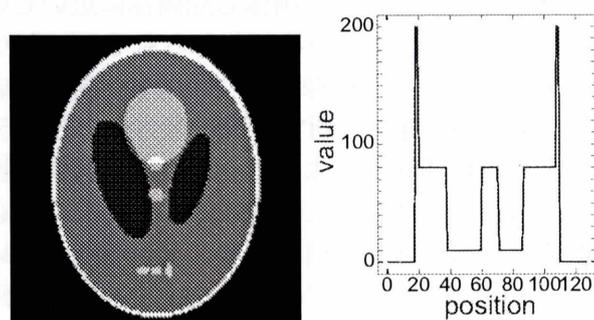


Fig. A.4: 左: Shepp ファントム 右: 高さ 64 でのプロファイル

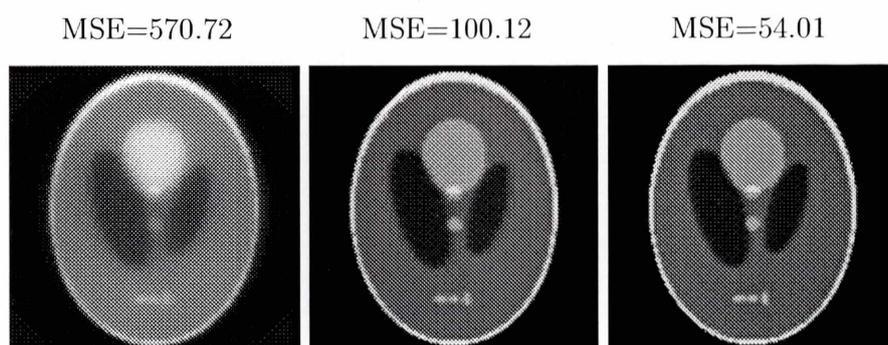


Fig. A.5: シミュレーション結果

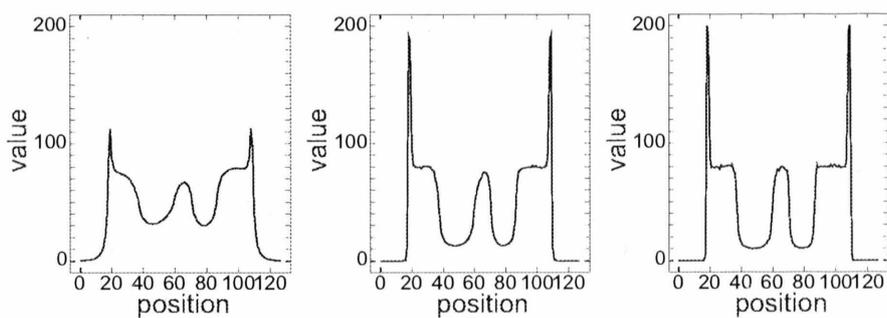


Fig. A.6: 高さ 64 でのプロファイル

ML-EM法は逐次的に画像を更新し、再構成画像を作り出すものである。よって、一般的に更新回数が増えれば増えるほど再構成画像は原画像に近いものとなる。ML-EM法での実際のシミュレーションでは反復回数が増えれば画像も原画像に近いものとなり、反復回数が増えるとともにMSEの値も低い値になっていることからそのことがわかる。また、プロファイルを見ると、低周波成分においては画像の戻りが早く、高周波成分では画像の戻りが遅いこともわかる。これは、1つの画像を更新する際に全方向の投影データを用いるために周波数成分が平均化されるのが原因である。よって、よりよい再構成画像を得るためには反復回数を増やせばよいが、反復回数を増やすと再構成画像を得るのに必要な時間も増えてしまう。しかし、少ない投影角度でも画像を再構成することが可能なため、本研究で区間ごとの再構成画像を作成することが可能になるため、ML-EM法を用いて画像再構成を行う。