

## 連続講座

断層映像法の基礎 第12回  
MRIにおけるモーションアーチファクト篠原 広行<sup>1)</sup>橋本 雄幸<sup>2)</sup>杉本 英治<sup>3)</sup><sup>1)</sup> 東京都立保健科学大学 放射線学科<sup>2)</sup> 横浜創英短期大学 情報処理科<sup>3)</sup> 昭和大学藤が丘病院 放射線科

## はじめに

第11回までに、MRIにおける画像再構成を具体的な計算機シミュレーションで示してきた。これまでの計算機シミュレーションでは、仮定したファントムをきれいに再構成することができたが、実際の装置における再構成像には、得られるべき画像ではないアーチファクトと呼ばれる虚像が、様々な理由で混入してくる。

今回は、再構成像に混入するアーチファクトから、計測中に被写体が動いたときに生じるモーションアーチファクトを取り上げる。データを収集しているときに被写体が動く、計測データにどのような影響が出るか、また、再構成像にどのようなアーチファクトとして出るのであるかを、フーリエ変換法で計測した場合について、数式と計算機シミュレーションで示す。

1. モーションアーチファクトの影響
2. 1点画像のシミュレーション
3. ファントムにおけるモーションアーチファクト

## 1. モーションアーチファクトの影響

2次元フーリエ変換法で計測しているときに、被写体が動いたと仮定する。その際に計測データには、どのような影響が出るかを考える。2次元フーリエ変換法の計測は、以下のように実部の値と虚部の値に分けて計測する。 $(x_0, y_0)$ に水素原子が強度 $S_0$ に相当する量だけ存在する場合、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(G_x x_0 + G_y y_0 t)] \quad (1)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(G_x x_0 + G_y y_0 t)] \quad (2)$$

となる。ここで、 $s_{re}(t)$ は実部の計測データで、 $s_{im}(t)$ は虚部の計測データである。また、 $\gamma$ は磁気回転比、 $G_x$ および

$G_y$ は、それぞれx方向およびy方向へ印加する線形勾配磁場の強度を表している。 $t_y$ は、y方向(位相エンコード方向)へ線形勾配磁場を印加する時間を表している。この式では、前回に述べた緩和を考慮していない。今回のモーションアーチファクトでは、それ自体を検証するために、緩和を考慮せずにその影響を見ていくことにする。また、被写体の動きは、読み出し方向であるx方向と、位相エンコード方向であるy方向に分けて考えることにする。

まずはx方向の動きについて考える。通常の計測に用いられるスピンエコー法では、計測時間に対して繰り返し時間は長いので、短時間の動きは1つの位相における計測にのみ影響を与えることが多い。そこで、被写体の動きが1つの位相エンコードにおいて信号を計測している間のみ起こったと仮定する。被写体の動きが起こる位相エンコード以前では、計測データは(1)、(2)式ようになる。被写体の動きが起こった位相エンコードにおいては、速度 $v_x$ で動いたとすると、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma G_x (x_0 + v_x t) + \gamma G_y y_0 t] \quad (3)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma G_x (x_0 + v_x t) + \gamma G_y y_0 t] \quad (4)$$

となる。この場合、被写体の動きはこの位相の計測の最初から最後まで動いていたと仮定する。また、その計測において被写体が速度 $v_x$ で時間 $\Delta t$ の間動いたとすると、それ以降の位相エンコードにおける計測は、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma G_x (x_0 + v_x \Delta t) + \gamma G_y y_0 t] \quad (5)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma G_x (x_0 + v_x \Delta t) + \gamma G_y y_0 t] \quad (6)$$

となる。ここで、時間 $\Delta t$ は、1つの位相エンコードにおける計測時間に等しいかそれ以上であると仮定する。

このように、読み出し方向であるx方向の動きは、計測中に動いている間の影響と、その前後における位相のずれの影響とに分けられる。

次に、同様の動きがy方向に起こった場合について考える。y方向の動きに影響が出るのはy方向の勾配磁場を掛けているときであり、計測中にはy方向の勾配磁場が掛かっていないので動きの影響が出ない。y方向の勾配磁場を掛けている時間は無視できると考えると、計測中にy方向の動きがある位相エンコードの計測までは、(1)、(2)式と同様の結果になる。それ以降の計測においては、被写体が速度 $v_y$ で時間 $\Delta t$ の間動いたとすると、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma G_x x_0 t + \gamma G_y (y_0 + v_y \Delta t) t_y] \quad (7)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma G_x x_0 t + \gamma G_y (y_0 + v_y \Delta t) t_y] \quad (8)$$

となる。このように、位相エンコード方向であるy方向の動きは、動きの前後に位相のずれという形で影響が出ることになる。

以上、1つの位相エンコードの計測中にのみ動きがある場合について述べたが、次に複数の繰り返し計測に渡って動きがある場合について考える。繰り返し時間をTRとしてx方向へ速度 $v_x$ で $n_0$ 回の繰り返し回数だけ動いていたとする。被写体が動き出す前までの計測は、(1)、(2)式になる。動いている間の計測は、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma G_x (x_0 + v_x t + n v_x TR) t + \gamma G_y y_0 t_y] \quad (9)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma G_x (x_0 + v_x t + n v_x TR) t + \gamma G_y y_0 t_y] \quad (10)$$

となる。ここで、nは被写体が動き出してからの繰り返し回数で、 $0 \sim n_0 - 1$ の値になる。被写体の動きが止まってからの計測は、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma G_x (x_0 + n_0 v_x TR) t + \gamma G_y y_0 t_y] \quad (11)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma G_x (x_0 + n_0 v_x TR) t + \gamma G_y y_0 t_y] \quad (12)$$

となる。

また、同様にy方向に速度 $v_y$ で $n_0$ 回の繰り返し回数だけ動いていたとすると、被写体が動き出す位相エンコードの計測までは、(1)、(2)式となる。動き出した次の位相エンコードの計測から、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma G_x x_0 t + \gamma G_y (y_0 + n v_y TR) t_y] \quad (13)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma G_x x_0 t + \gamma G_y (y_0 + n v_y TR) t_y] \quad (14)$$

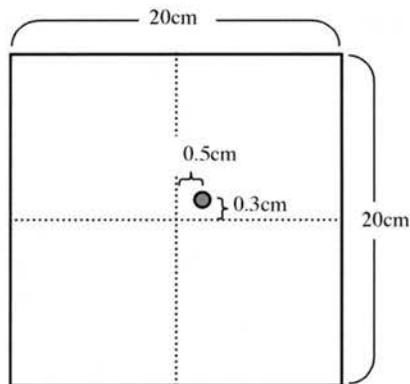


図1 画像上で、水素原子が存在する点を示している。画像の大きさは20cm正方形で、水素原子は、(0.5cm, 0.3cm)の位置にある。

となる。ここで、nは被写体が動き出した次からの繰り返し回数で、 $1 \sim n_0 - 1$ の値になる。被写体の動きが止まってからの計測は、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma G_x x_0 t + \gamma G_y (y_0 + n_0 v_y TR) t_y] \quad (15)$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma G_x x_0 t + \gamma G_y (y_0 + n_0 v_y TR) t_y] \quad (16)$$

となる。

## 2. 1点画像のシミュレーション

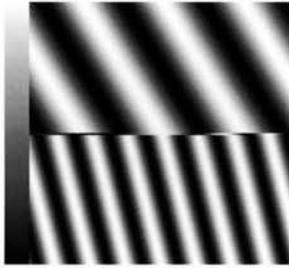
前節に述べたモーションアーチファクトを含んだ計測に実際の値を当てはめて、シミュレーションをする。磁気回転比 $\gamma$ は水素原子核の場合42.58MHz/T(テスラ)で、静磁場強度を1T(テスラ)とし、勾配磁場 $G_x$ を0.12G(ガウス)/cmとする。水素原子の信号強度 $S_0$ は1とし、 $(x_0, y_0)$ を(0.5cm, 0.3cm)に設定する。画像の視野を20cm四方と仮定し、画像の中心から(0.5cm, 0.3cm)のところに1点だけ水素原子が存在する場合を図で表すと図1のようになる。計測のサンプリングを0.1msごとに行い、位相エンコードのy方向の勾配磁場を $t_y = 1\text{ms}$ で $G_y$ を0.012G(ガウス)ごとに変化させるものとする。

被写体に動きがない場合は、

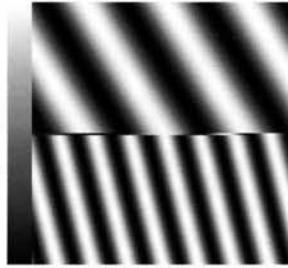
$$s_{re}(k, m) = \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times 0.5 \times k \times 10^{-4} + m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 0.3 \times 1 \times 10^{-3})] \quad (17)$$

$$s_{im}(k, m) = -\sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times (0.12 \times 10^{-4} \times 0.5 \times k \times 10^{-4} + m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 0.3 \times 1 \times 10^{-3})] \quad (18)$$

となる。ここで、kはサンプリング点を表し、 $-n/2$ から計測数  $n/2 - 1$ までの整数値をとり、mは繰り返しに相



(a) 実部の計測データ



(b) 虚部の計測データ

図2 位相エンコードの大きさが $m=0$ での計測中に、被写体が読み出し方向である $x$ 方向に $v_x=50\text{cm/s}$ の速さで動いたときの計測データ  
読み出しのサンプリング $k$ を横軸、位相エンコードの大きさである $m$ を縦軸として画像で表している。

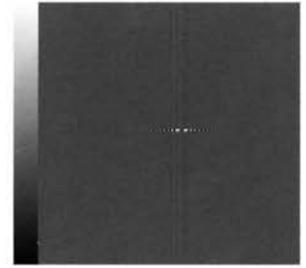


図3 図2の計測データをもとに2次元フーリエ逆変換によって再構成した画像

当する位相エンコードの度合いを表し、 $n/2-1$ から $-n/2$ までの整数値をとる。シミュレーションでは、 $n=128$ 点のサンプリングを行うものとする。位相エンコードの度合い $m=0$ の時に被写体が $v_x=50\text{cm/s}$ の速さで動いたとすると、 $m=63$ から $1$ の間の計測は、(17)、(18)式になり、 $m=0$ の計測は、

$$s_{re}(k,0) = \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times 0.12 \times 10^{-4} \times (0.5 + 50 \times k \times 10^{-4}) \times k \times 10^{-4}] \quad (19)$$

$$s_{im}(k,0) = -\sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times 0.12 \times 10^{-4} \times (0.5 + 50 \times k \times 10^{-4}) \times k \times 10^{-4}] \quad (20)$$

となる。また、計測している間のみ被写体が動いたとすると、 $\Delta t=12.8\text{ms}$ となるので、 $m=-1$ から $-64$ までの計測は、

$$s_{re}(k,m) = \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times \{0.12 \times 10^{-4} \times (0.5 + 50 \times 128 \times 10^{-4}) \times k \times 10^{-4} + m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 0.3 \times 1 \times 10^{-3}\}] \quad (21)$$

$$s_{im}(k,m) = -\sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times \{0.12 \times 10^{-4} \times (0.5 + 50 \times 128 \times 10^{-4}) \times k \times 10^{-4} + m \times 0.012 \times 10^{-4} \times 0.3 \times 1 \times 10^{-3}\}] \quad (22)$$

となる。この式をもとに計測を行ったデータを図2(a),(b)に示す。図2(a)が実部で、図2(b)が虚部であり、読み出し方向の $k$ を横軸、位相エンコード方向の $m$ を縦軸にとって画像に表している。中心付近で位相が変わっているのが分かる。このデータの乱れが $x$ 方向の動きによるものである。図2の計測データをもとに2次元フーリエ逆変換することによって再構成した画像を図3に示す。 $x$ 方向に移動しているため、 $x$ 方向へのぶれとその両側

に尾を引くようにギブスアーチファクト(リングング)が見られる。両側のリングングは、1点画像が急激な変化を伴っていることによるアーチファクトで、動きとは直接関係ない。また、 $y$ 方向(縦方向)に筋状のアーチファクトも見られる。 $y$ 方向においては、 $x$ 方向の動きの前後でデータのあるべき場所が変わるので、再構成のフーリエ変換によってその矛盾が $y$ 方向に尾を引いた形で出ている。

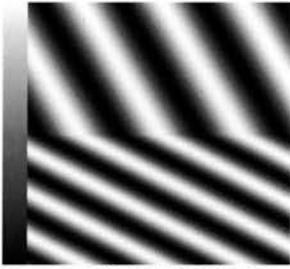
また、被写体が $m=0$ の時に $v_y=50\text{cm/s}$ の速さで動いたとすると、 $m=63$ から $0$ の間の計測は、(17)、(18)式になり、 $m=-1$ から $-64$ までの計測は、

$$s_{re}(k,m) = \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times \{0.12 \times 10^{-4} \times 0.5 \times k \times 10^{-4} + m \times 0.012 \times 10^{-4} \times (0.3 \times 50 \times 128 \times 10^{-4}) \times 1 \times 10^{-3}\}] \quad (23)$$

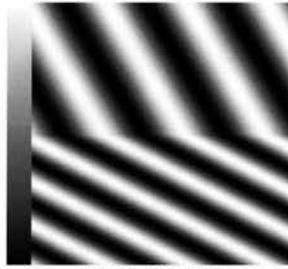
$$s_{im}(k,m) = -\sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times \{0.12 \times 10^{-4} \times 0.5 \times k \times 10^{-4} + m \times 0.012 \times 10^{-4} \times (0.3 \times 50 \times 128 \times 10^{-4}) \times 1 \times 10^{-3}\}] \quad (24)$$

となる。この式をもとに計測を行ったデータを図4(a),(b)に示す。 $y$ 方向の場合は、動きのあった中心付近で $x$ 方向の縞模様は数が変わらず角度のみが変わっているのが分かる。図4の計測データをもとに再構成した画像を図5に示す。 $y$ 方向への動きによる $y$ 方向への点のぶれが見られ、 $x$ 方向へはリングングが生じる。 $x$ 方向へのリングングは、動きに直接関係ないので、 $y$ 方向へのぶれのみが動きによる影響と見られる。

次に繰り返し時間 $TR=1000\text{ms}$ で、被写体が $v_x=0.1\text{cm/s}$ の速さで繰り返しの $m=9$ から $-10$ の間動いたとすると、 $m=63$ から $10$ の間の計測は、(17)、(18)式になり、 $m=9$ から $-10$ までの計測は、



(a) 実部の計測データ



(b) 虚部の計測データ

図4 位相エンコードの大きさが $m=0$ での計測中に、被写体が位相エンコード方向である $y$ 方向に $v_y=50\text{cm/s}$ の速さで動いたときの計測データ読み出しのサンプリング $k$ を横軸、位相エンコードの大きさである $m$ を縦軸として画像で表している。

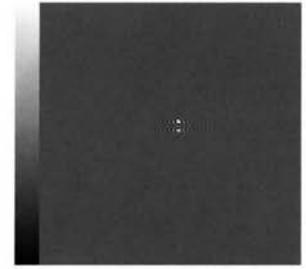
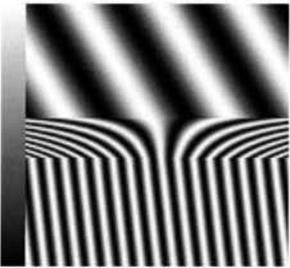
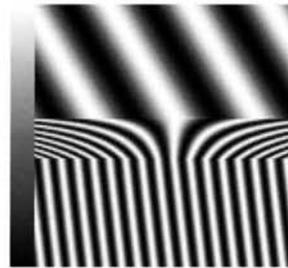


図5 図4の計測データをもとに2次元フーリエ逆変換によって再構成した画像



(a) 実部の計測データ



(b) 虚部の計測データ

図6 繰り返し時間 $TR=1000\text{ms}$ で、被写体が読み出し方向である $x$ 方向に $v_x=0.1\text{cm/s}$ の速さで複数の繰り返しにまたがって動いたときの計測データ読み出しのサンプリング $k$ を横軸、位相エンコードの大きさである $m$ を縦軸として画像で表している。

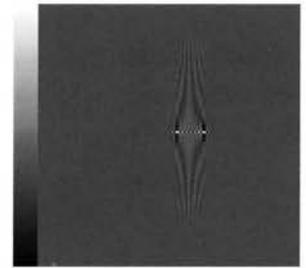
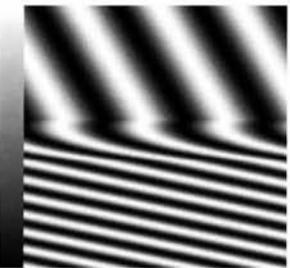
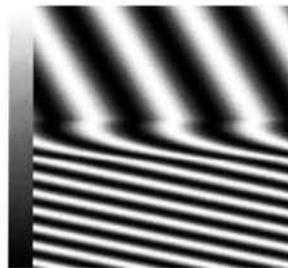


図7 図6の計測データをもとに2次元フーリエ逆変換によって再構成した画像



(a) 実部の計測データ



(b) 虚部の計測データ

図8 繰り返し時間 $TR=1000\text{ms}$ で、被写体が位相エンコード方向である $y$ 方向に $v_y=0.1\text{cm/s}$ の速さで複数の繰り返しにまたがって動いたときの計測データ読み出しのサンプリング $k$ を横軸、位相エンコードの大きさである $m$ を縦軸として画像で表している。

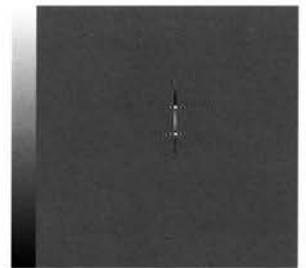


図9 図8の計測データをもとに2次元フーリエ逆変換によって再構成した画像

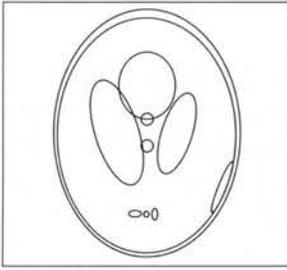
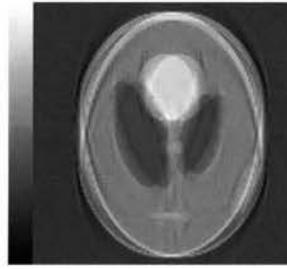
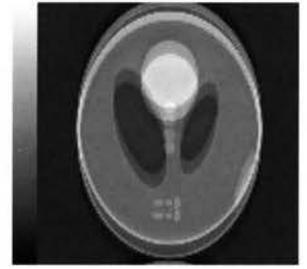


図10 数値ファントムの形状

図11 数値ファントムの全体が計測中に読み出し方向であるx方向に動いたときの再構成像  
(TR=1000ms, v<sub>x</sub>= 0.1cm/s)図12 数値ファントムの全体が計測中に位相エンコード方向であるy方向に動いたときの再構成像  
(TR=1000ms, v<sub>y</sub>= 0.1cm/s)

$$s_{re}(k,m)=\cos[2\times\pi\times 42.58\times 10^6\times(0.12\times 10^{-4}\times(0.5+0.1\times k\times 10^{-4}+[9-m]\times 0.1\times 1.0)\times k\times 10^{-4}+m\times 0.012\times 10^{-4}\times 0.3\times 1\times 10^{-3})] \quad (25)$$

$$s_{im}(k,m)=-\sin[2\times\pi\times 42.58\times 10^6\times(0.12\times 10^{-4}\times(0.5+0.1\times k\times 10^{-4}+[9-m]\times 0.1\times 1.0)\times k\times 10^{-4}+m\times 0.012\times 10^{-4}\times 0.3\times 1\times 10^{-3})] \quad (26)$$

となる。また、m=-11から-64までの計測は、

$$s_{re}(k,m)=\cos[2\times\pi\times 42.58\times 10^6\times(0.12\times 10^{-4}\times(0.5+20\times 0.1\times 1.0)\times k\times 10^{-4}+m\times 0.012\times 10^{-4}\times 0.3\times 1\times 10^{-3})] \quad (27)$$

$$s_{im}(k,m)=-\sin[2\times\pi\times 42.58\times 10^6\times(0.12\times 10^{-4}\times(0.5+20\times 0.1\times 1.0)\times k\times 10^{-4}+m\times 0.012\times 10^{-4}\times 0.3\times 1\times 10^{-3})] \quad (28)$$

となる。この計測データは図6(a),(b)のようになる。この場合、幅を持って位相の変化が起き、最終的にx方向に占める縞模様の数とその方向が変わっている。図6の計測データをもとに再構成した画像を図7に示す。移動した距離が大きいためx方向への大きなぶれが見られ、y方向への筋状のアーチファクトも見られる。

さらに、同様の条件で被写体がv<sub>y</sub>=0.1cm/sの速さで繰り返しのm=9から-10の間動いたとする。m=63から9の間の計測は、(17)、(18)式になり、m=8から-10までの計測は、

$$s_{re}(k,m)=\cos[2\times\pi\times 42.58\times 10^6\times(0.12\times 10^{-4}\times 0.5\times k\times 10^{-4}+m\times 0.012\times 10^{-4}\times(0.3+[9-m]\times 0.1\times 1.0)\times 1\times 10^{-3})] \quad (29)$$

$$s_{im}(k,m)=-\sin[2\times\pi\times 42.58\times 10^6\times(0.12\times 10^{-4}\times 0.5\times k\times 10^{-4}+m\times 0.012\times 10^{-4}\times(0.3+[9-m]\times 0.1\times 1.0)\times 1\times 10^{-3})] \quad (30)$$

となる。また、m=-11から-64までの計測は、

$$s_{re}(k,m)=\cos[2\times\pi\times 42.58\times 10^6\times(0.12\times 10^{-4}\times 0.5\times k\times 10^{-4}+m\times 0.012\times 10^{-4}\times(0.3+20\times 0.1\times 1.0)\times 1\times 10^{-3})] \quad (31)$$

$$s_{im}(k,m)=-\sin[2\times\pi\times 42.58\times 10^6\times(0.12\times 10^{-4}\times 0.5\times k\times 10^{-4}+m\times 0.012\times 10^{-4}\times(0.3+20\times 0.1\times 1.0)\times 1\times 10^{-3})] \quad (32)$$

となる。この計測データは図8(a),(b)のようになる。この場合も、幅を持って縞模様の変化が起きるが、そのx方向に占める縞の数は変わらず、方向のみが変わっていく様子が分かる。図8の計測データをもとに再構成した画像を図9に示す。移動した距離が大きいためy方向への大きなぶれが見られ、また、その延長線上にもリングングのようなものが見られる。x方向へはリングングのみが見られる。

### 3. 数値ファントムにおけるモーションアーチファクト

モーションアーチファクトを数値ファントムで再現する。使用した数値ファントムの形状を図10に示す。画素数は128x128で、1辺は20cmとする。計測中にファントム全体が読み出し方向(x方向)か、または、位相エンコード方向(y方向)に動くものとする。その動きは、各節の後半で示したような複数の繰り返しの渡って動いたものとする。ファントムが読み出し方向であるx方向に動いた再構成像を図11に示す。再構成像全体がx方向にぶれているのが分かる。また、y方向にも筋状のアーチファクトが見られる。ファントムが位相エンコード方向であるy方向に動いた再構成像を図12に示す。こちらは、再構成像全体がy方向に、二重にぶれたような再構成像になる。

謝辞：本稿で使用したプログラムの開発は、東京都立保健科学大学特定プロジェクト研究「生体内可視化技術に関する教育研究支援プログラムの開発」によるものである。

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

### 複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（(社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F FAX：03-3475-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619