

連続講座

断層映像法の基礎 第15回
MRI投影再構成法におけるモーションアーチファクト

篠原 広行¹⁾・大瀨 新¹⁾・坂口 和也¹⁾・今江 禄一¹⁾・薄葉 大輔¹⁾
橋本雄幸²⁾

¹⁾ 東京都立保健科学大学 放射線学科
²⁾ 横浜創英短期大学 情報処理科

はじめに

第12回で、再構成像に混入するアーチファクトから、フーリエ変換法の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た。今回は、そのモーションアーチファクトが投影再構成法においてはどのように再構成画像に影響を及ぼすのかをシミュレーションを用いて見ていく。まずは、投影再構成法における1点画像のモーションアーチファクトの影響を示す。次にファントム画像を用いた場合のモーションアーチファクトの影響を示す。最後に第12回で示したフーリエ変換法におけるモーションアーチファクトとの比較を見ていく。

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 投影再構成法における1点画像のモーションアーチファクト 2. ファントムにおけるモーションアーチファクト 3. フーリエ変換法との比較 |
|--|

1. 投影再構成法における1点画像のモーションアーチファクト

投影再構成法においては、1方向に勾配磁場Gを加えるので、その方向における水素原子核の共鳴周波数は、その方向で線形的に変化する。勾配磁場を加える方向をXとし、位置X₀に強度S₀で水素原子が存在するとき、投影再構成法における計測データは、

$$s_{re}(t) = S_0 \cos[\gamma(B_0 + GX_0)t] \tag{1}$$

$$s_{im}(t) = -S_0 \sin[\gamma(B_0 + GX_0)t] \tag{2}$$

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、γは磁気回転比、B₀は静磁場の強度である。静磁場の強度B₀は、既知の値であるので、計測データからその影響を取り除くことができる。また、投影再構成法では、勾配磁場の方向を変えながら各方向の投影のフーリエ変換に相当するデータを

計測していく。よって、計測データはθの関数となる。計測データ上の水素原子の位置X(θ)は、点の座標が(x₀, y₀)の場合、

$$X(\theta) = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \tag{3}$$

となる。したがって、計測データは、

$$s_{re}(t, \theta) = S_0 \cos[\gamma G(x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta)t] \tag{4}$$

$$s_{im}(t, \theta) = -S_0 \sin[\gamma G(x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta)t] \tag{5}$$

となる。

ここで、被写体がx方向に速度v_xで動いたとすると、計測データは、

$$s_{re}(t, \theta) = S_0 \cos[\gamma G(x_0 + v_x t) \cos \theta + y_0 \sin \theta]t] \tag{6}$$

$$s_{im}(t, \theta) = -S_0 \sin[\gamma G(x_0 + v_x t) \cos \theta + y_0 \sin \theta]t] \tag{7}$$

となり、また、動きが複数の投影計測にまたぐ場合の計測データは、

$$s_{re}(t, \theta) = S_0 \cos[\gamma G(x_0 + v_x t + nv_x TR) \cos \theta + y_0 \sin \theta]t] \tag{8}$$

$$s_{im}(t, \theta) = -S_0 \sin[\gamma G(x_0 + v_x t + nv_x TR) \cos \theta + y_0 \sin \theta]t] \tag{9}$$

となる。ここで、nは被写体が動き出してから投影を撮像した回数で、TRは投影を計測する繰り返し時間である。この計測において被写体が時間Δtの間動いて静止したとすると、それ以降の計測は、

$$s_{re}(t, \theta) = S_0 \cos[\gamma G(x_0 + v_x \Delta t) \cos \theta + y_0 \sin \theta]t] \tag{10}$$

$$s_{im}(t, \theta) = -S_0 \sin[\gamma G(x_0 + v_x \Delta t) \cos \theta + y_0 \sin \theta]t] \tag{11}$$

となる。

これに、第12回のフーリエ変換法で行ったシミュレーションに合わせて、次の値を当てはめてシミュレーションを行う。磁気回転比γ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を0.12G(ガウス)/cmとする。画像の視野を20cm正方と仮定し、図1のように画像の中心から

(0.5cm, 0.3cm)のところに1点だけ水素原子が存在すると仮定する。計測のサンプリングを0.1msごとに行い、角度 θ は、 $2\pi/128$ ごとに変化させ128個の投影を計測する。投影ごとの繰り返し時間TR=1000msで、被写体が $v_x=0.15\text{cm/s}$ の速さでx方向に投影の $m=54$ から74の間動いたとする。動いている間の計測は、

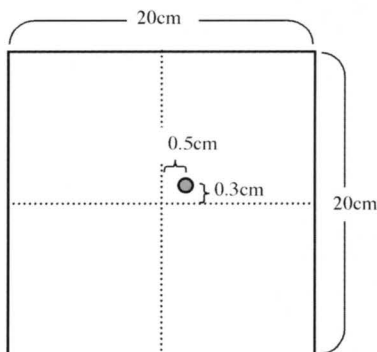


図1 1点にのみ水素原子がある画像
画像の大きさは20cm正方形で、水素原子は、(0.5cm, 0.3cm)の位置にある。

$$s_{re}(k,m) = \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times 0.12 \times 10^{-4} \times u(k,m) \times 0.15 \times k \times 10^{-4}] \quad (12)$$

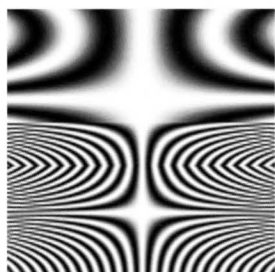
$$s_{im}(k,m) = -\sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times 0.12 \times 10^{-4} \times u(k,m) \times 0.15 \times k \times 10^{-4}] \quad (13)$$

ここで、

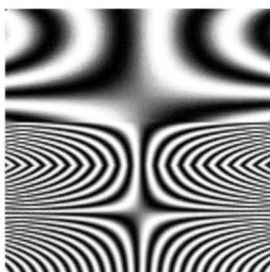
$$u(k,m) = (0.5 + 0.15 \times k \times 10^{-4} + [54 - m] \times 0.15 \times 1.0) \times \cos(2 \times \pi \times m / 128) + 0.3 \times \sin(2 \times \pi \times m / 128) \quad (14)$$

となる。この計測データは図2(a), (b)のようになる。図2(a), (b)の計測データをもとにフィルタ補正逆投影法で再構成した画像を図2(c)に示す。また、被写体が $v_x=0.05\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=34$ から94の間動いたときの計測データと再構成画像をそれぞれ図3(a), (b), (c)に示す。さらに、被写体が $v_x=0.025\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=4$ から124の間動いたときの計測データと再構成画像をそれぞれ図4(a), (b), (c)に示す。

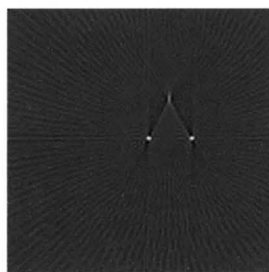
次に、被写体がy方向に動いた場合を考える。写体がy方向に速度 v_y で動いたとすると、計測データは、



(a) 実部の計測データ

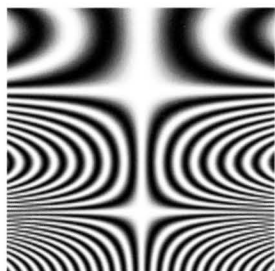


(b) 虚部の計測データ

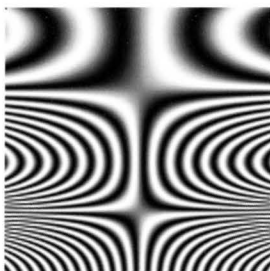


(c) フィルタ補正逆投影法によって再構成した画像

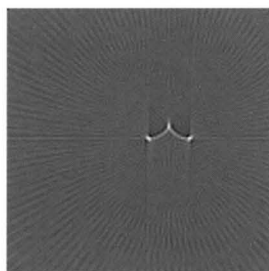
図2 投影再構成法において、投影を撮像する繰り返し時間TR=1000msで、被写体(1点画像)がx方向に $v_x=0.15\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=54$ から74までの間動いたときの計測データとそのデータを元に再構成した画像



(a) 実部の計測データ

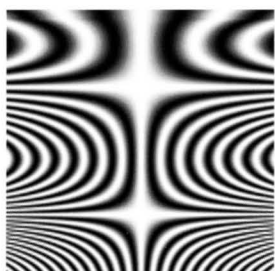


(b) 虚部の計測データ

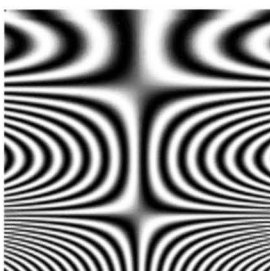


(c) フィルタ補正逆投影法によって再構成した画像

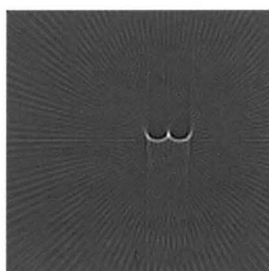
図3 投影再構成法において、被写体(1点画像)がx方向に $v_x=0.05\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=34$ から94までの間動いたときの計測データとそのデータを元に再構成した画像



(a) 実部の計測データ



(b) 虚部の計測データ



(c) フィルタ補正逆投影法によって再構成した画像

図4 投影再構成法において、被写体(1点画像)がx方向に $v_x=0.025\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=4$ から124までの間動いたときの計測データとそのデータを元に再構成した画像

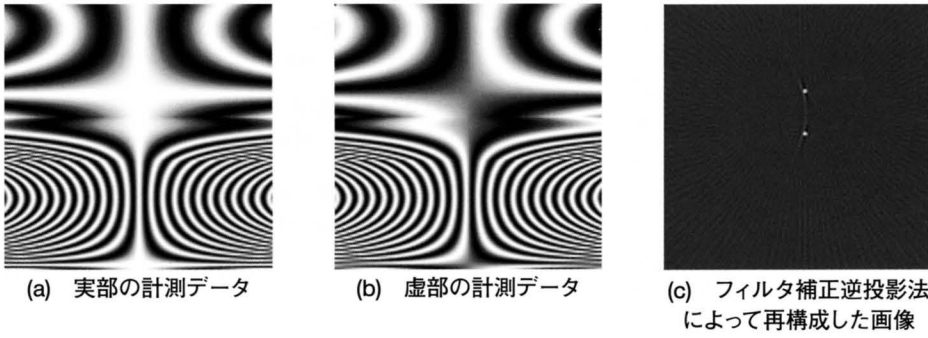


図5 投影再構成法において、被写体(1点画像)がy方向に $v_x=0.15\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=54$ から74までの間動いたときの計測データとそのデータを元に再構成した画像

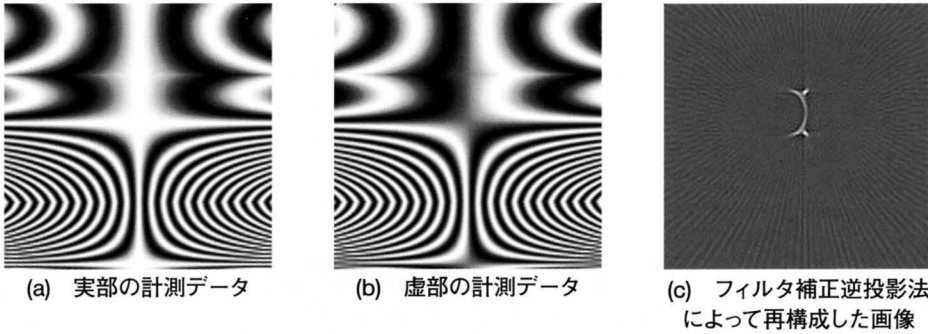


図6 投影再構成法において、被写体(1点画像)がy方向に $v_x=0.05\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=34$ から94までの間動いたときの計測データとそのデータを元に再構成した画像

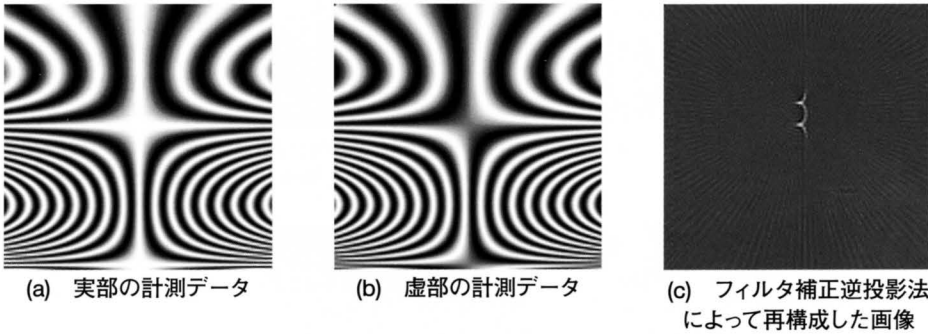


図7 投影再構成法において、被写体(1点画像)がy方向に $v_x=0.025\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=4$ から124までの間動いたときの計測データとそのデータを元に再構成した画像

$$s_{re}(t, \theta) = S_0 \cos[\gamma G \{x_0 \cos \theta + (y_0 + v_y t) \sin \theta\} t] \quad (15)$$

$$s_{im}(t, \theta) = -S_0 \sin[\gamma G \{x_0 \cos \theta + (y_0 + v_y t) \sin \theta\} t] \quad (16)$$

となり、また、動きが複数の投影計測にまたぐ場合の計測データは、

$$s_{re}(t, \theta) = S_0 \cos[\gamma G \{x_0 \cos \theta + (y_0 + v_y t + n v_y TR) \sin \theta\} t] \quad (17)$$

$$s_{im}(t, \theta) = -S_0 \sin[\gamma G \{x_0 \cos \theta + (y_0 + v_y t + n v_y TR) \sin \theta\} t] \quad (18)$$

となる。ここで、 n は被写体が動き出してから投影を撮像した回数で、 TR は投影を計測する繰り返し時間である。被写体が時間 Δt の間動いて静止したとすると、それ以降の計測は、

$$s_{re}(t, \theta) = S_0 \cos[\gamma G \{x_0 \cos \theta + (y_0 + v_y \Delta t) \sin \theta\} t] \quad (19)$$

$$s_{im}(t, \theta) = -S_0 \sin[\gamma G \{x_0 \cos \theta + (y_0 + v_y \Delta t) \sin \theta\} t] \quad (20)$$

となる。(17), (18)式に、x方向への移動と同様の条件で、被写体が $v_y=0.15\text{cm/s}$ の速さでy方向に投影の $m=54$ から74の間動いたとすると、そのときの計測は、

$$s_{re}(k, m) = \cos[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times 0.12 \times 10^{-4} \times u(k, m) \times 0.15 \times k \times 10^{-4}] \quad (21)$$

$$s_{im}(k, m) = -\sin[2 \times \pi \times 42.58 \times 10^6 \times 0.12 \times 10^{-4} \times u(k, m) \times 0.15 \times k \times 10^{-4}] \quad (22)$$

ここで、

$$u(k, m) = 0.5 \times \cos(2 \times \pi \times m / 128) + (0.3 + 0.15 \times k \times 10^{-4} + [54 - m] \times 0.15 \times 1.0) \times \sin(2 \times \pi \times m / 128) \quad (23)$$

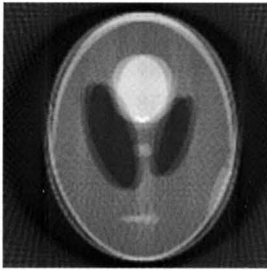


図8 投影再構成法において、数値ファントム全体が計測中にx方向に動いたときの再構成像
投影の繰り返し時間TR=1000msで、被写体がx方向に $v_x=0.03\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=54$ から74までの間動いたときの計測データを元に再構成した画像

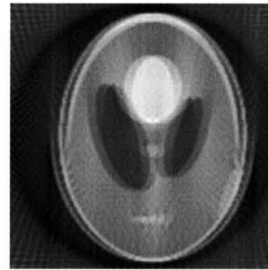


図9 投影再構成法において、被写体がx方向に $v_x=0.01\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=4$ から120までの間動いたときの計測データを元に再構成した画像

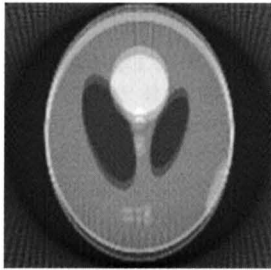


図10 投影再構成法において、被写体がy方向に $v_y=0.03\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=54$ から74までの間動いたときの計測データを元に再構成した画像

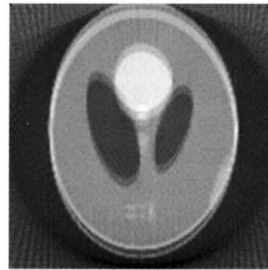


図11 投影再構成法において、被写体がy方向に $v_y=0.01\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=4$ から120までの間動いたときの計測データを元に再構成した画像

となる。この計測データは図5(a), (b)のようになる。図5(a), (b)の計測データをもとに再構成した画像を図5(c)に示す。また、被写体が $v_y=0.05\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=34$ から94の間動いたときの計測データと再構成画像をそれぞれ図6(a), (b), (c)に示す。さらに、被写体が $v_y=0.025\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=4$ から124の間動いたときの計測データと再構成画像をそれぞれ図7(a), (b), (c)に示す。

x方向の動きとy方向の動きに対する再構成画像のアーチファクトの違いが見られるのは、投影をx方向のデータから順に回転しながら計測しているので、方向とその計測の順番との間に関係が出てくるためである。

2. ファントムにおけるモーションアーチファクト

投影再構成法におけるモーションアーチファクトをこれまで使用してきた数値ファントムで再現する。投影を計測する間にx方向とy方向に被写体全体が動いたときの結果を示す。投影はx方向のデータから順に反時計回りで計測されるものとする。元の被写体分布を $f(x,y)$ とすると、被写体全体がx方向に速度 v_x で動いたときの計測データは、

$$s_{re}(t, \theta) = \iint f(x,y) \cos [yG\{x + v_x t\} \cos \theta + y \sin \theta\} t] dx dy \quad (24)$$

$$s_{im}(t, \theta) = -\iint f(x,y) \sin [yG\{x + v_x t\} \cos \theta + y \sin \theta\} t] dx dy \quad (25)$$

と表される。y方向も速度 v_y で動いたとすると、同様に

$$s_{re}(t, \theta) = \iint f(x,y) \cos [yG\{x \cos \theta + (y + v_y t) \sin \theta\} t] dx dy \quad (26)$$

$$s_{im}(t, \theta) = -\iint f(x,y) \sin [yG\{x \cos \theta + (y + v_y t) \sin \theta\} t] dx dy \quad (27)$$

と表すことができる。

投影再構成法において、被写体がx方向に $v_x=0.03\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=54$ から74の間動いたときの再構成画像を図8に示す。さらに、被写体が $v_x=0.01\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=4$ から124の間動いたときの再構成画像を図9に示す。また、被写体がy方向に $v_y=0.03\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=54$ から74の間動いたときの再構成画像を図10に示す。さらに、被写体が $v_y=0.01\text{cm/s}$ の速さで投影の $m=4$ から124の間動いたときの再構成画像を図11に示す。x方向への動きの場合、x方向からデータを取り始めていることもあり、取り始めのデータと取り終わりのデータに大きな食い違いが生じるため、楕円の両端で上方向に筋が伸びたようなアーチファクトが見られる。一方、y方向への動きの場合、最初と最後の大きな食い違いはないため、y方向にぶれたような画像になっている。

3. フーリエ変換法との比較

フーリエ変換法で、計測中にファントム全体が読み出し方向(x方向)と位相エンコード方向(y方向)に動いたときの結果を示す。計測には、投影再構成法で行ったものと同様の条件を与える。まず、被写体がx方向に $v_x=0.03\text{cm/s}$ の速さで繰り返しの $m=10$ から-10の間動いたときの再構成画像を図12に示す。さらに、被写体が $v_x=0.01\text{cm/s}$ の速さで繰り返しの $m=60$ から-60の間動いたときの再構成画像を図13に示す。また、被写体がy方向に $v_y=0.03\text{cm/s}$ の速さで繰り返しの $m=10$ から-10



図12 フーリエ変換法において、数値ファントム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。繰り返し時間TR=1000msで、被写体が読み出し方向であるx方向に $v_x=0.03\text{cm/s}$ の速さで位相エンコードの $m=10$ から -10 までの間動いたときの計測データを元に再構成した画像

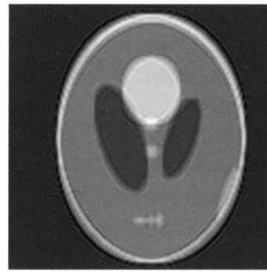


図13 フーリエ変換法において、被写体がx方向に $v_x=0.01\text{cm/s}$ の速さで位相エンコードの $m=60$ から -60 までの間動いたときの計測データを元に再構成した画像

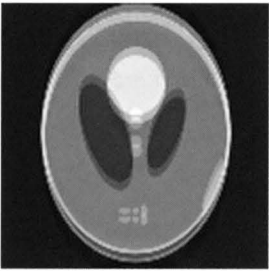


図14 フーリエ変換法において、被写体が位相エンコードの方向であるy方向に $v_y=0.03\text{cm/s}$ の速さで位相エンコードの $m=10$ から -10 までの間動いたときの計測データを元に再構成した画像

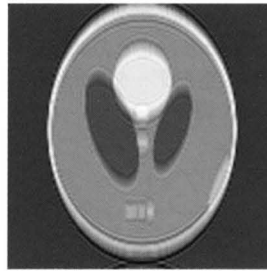


図15 フーリエ変換法において、被写体がy方向に $v_y=0.01\text{cm/s}$ の速さで位相エンコードの $m=60$ から -60 までの間動いたときの計測データを元に再構成した画像

の間動いたときの再構成画像を図14に示す。さらに、被写体が $v_y=0.01\text{cm/s}$ の速さで繰り返しの $m=60$ から -60 の間動いたときの再構成画像を図15に示す。x方向では、撮像中にわたって連続的に動いた場合は、y方向にもその影響が大きくなるので、全体がぼけた感じになる。一方、y方向ではその影響はy方向のみに出るので、全体的に動いた場合はy方向に直線的なぶれになる。

投影再構成法と比較すると、投影再構成法では、x方向においてもy方向においても画像のぶれは移動した方向に対しそのままアーチファクトとして生じるが、フーリエ変換法では、x方向の移動に対しては、y方向にもその影響が出てしまい、移動時間が大きくなるとxとyの両方向にぶれたような画像になる。これは、フーリエ変

換法においては、x方向(読み出し方向)への移動の変化がy方向(位相エンコード方向)によって異なってくるため、y方向にも同様に移動の影響が出てくるためである。長い時間、複数の位相エンコードにわたって移動が生じると、x方向と同じぐらいy方向にもデータの食い違いが生じることになる。

被写体の移動によるモーションアーチファクトでは、同じ移動でも計測の方法によって異なったアーチファクトが生じることが分かる。

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