

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：84502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25790092

研究課題名(和文)マルチビームクロスオーバーイメージングによるX線ライブ観察の3次元化

研究課題名(英文)Three-dimensional visualization of X-ray live imaging using multi-beam cross over imaging technique

研究代表者

星野 真人(Hoshino, Masato)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・研究員

研究者番号：30508461

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、X線マルチビームを用いたライブイメージングの3次元可視化法の開発を目的として、動的試料の透過像を異なる3方向から同時に計測することが可能なX線トリスコピックイメージング装置の開発と、得られたマルチビームライブ画像から動的試料の3次元像や情報を再構築することが可能な解析手法の開発を行った。マルチビームを用いたライブ計測では、30Hzのフレームレートで動的試料の計測が可能であることを確認した。また、試料形状や測定条件に応じて2通りの3次元可視化法の検討を行い、実際に装置を用いて得られた画像に適用することで、ライブ画像の3次元化を行えることを確かめた。

研究成果の概要(英文)：Three-dimensional visualization technique for X-ray live measurement was developed. An X-ray triscopic imaging system, which made it possible to measure transmission images of a dynamic sample from different three viewing angles simultaneously, was developed. Also, analytical methods to reconstruct the three-dimensional image and information from multi-beam transmission images of the dynamic sample were developed. In the X-ray multi-beam imaging for the dynamic sample, a frame rate of more than 30Hz was achieved. Two kinds of analytical methods for the three-dimensional visualization were considered according to the sample configuration and the measurement condition. The analytical methods developed were applied to the X-ray multi-beam images to represent the three-dimensional configuration and information of the dynamic samples.

研究分野：X線イメージングおよびその応用測定技術の開発

キーワード：X線ライブイメージング 3次元可視化 放射光 マルチビーム

1. 研究開始当初の背景

近年の放射光 X 線イメージングでは、放射光の特徴である「高輝度」という利点を活かして、様々な研究分野において動的試料を対象とした X 線ライブイメージングが脚光を浴びている。しかしながら、従来の X 線ライブイメージングで得られる情報は、試料が X 線ビームによって単純投影された 2 次元の透過情報であり、X 線ビームに沿った奥行き方向の情報、つまり試料の 3 次元構造情報は失われてしまっている。一方で、放射光 X 線を用いて、試料の 3 次元情報を取得する手法として一般的に用いられているのが X 線マイクロ CT であり、計算機を用いた演算処理により、3 次元構造を再構成することができる。しかし、計算機による演算処理を行うためには、試料を回転させながら多数枚の透過投影像を取得する必要があるため、試料の動的現象を十分な時間分解能で捉えることは出来ない。以上の理由により、ライブ観察という時間スケールで、試料の 3 次元構造や情報を測定するための有効な手法がないのが現状であり、X 線ライブイメージングにおいて、得られる情報の 3 次元化を行える測定手法の開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究課題では、上記の研究背景を踏まえて、2 次元の透過投影 X 線ライブイメージングと X 線マイクロ CT の相補的な測定法として位置付けることができる、X 線マルチビームクロスオーバーイメージングを用いた X 線ライブ観察における 3 次元可視化を目的とする。試料の 3 次元構造を解析するためには、X 線マイクロ CT の再構成原理からも明白なように、試料に対して異なる投影角度からの複数枚の透過投影情報が得られれば良いことになる。動的試料に対しては、異なる投影角度で同時に透過像を測定できるような光学系が望ましい。そこで、まずはライブ観察という時間分解能の中で、試料に対して異なる 3 方向から同時に透過投影像の取得が可能な装置開発を行う。また、開発した装置を用いて得られた異なる 3 方向からの投影情報を元に、動的試料の 3 次元像や情報を定量的に抽出・再構築できるような解析手法の開発を目的とする。

3. 研究の方法

放射光のような指向性の高い 1 本のビームから X 線マルチビームを生成するための手法としては、これまで開発を行ってきた X 線ステレオイメージングと同じ手法を踏襲する。試料を異なる 3 方向から同時投影することが可能な X 線トリスコピックイメージング光学系の概略図を図 1 に示す。X 線光源としては、大型放射光実験施設である SPring-8 を用いる。また、図 1 に示す

ように、入射 X 線ビームから 3 本の異なる進行方向を持つビームを生成するため、100mm 超の幅の広い単色 X 線ビームが利用できる中尺偏向電磁石ビームラインである BL20B2 を利用する。放射光実験に際しては、当該研究に関わる申請書を提出し、課題採択の後に利用実験を行う。入射 X 線ビームから異なる進行方向のビームを作り出すために、Si(111)結晶によるブラッグ反射を利用する。入射ビームに対して、両端に対称的に Si 平板結晶を配置することにより、各結晶におけるブラッグ反射で 2 本の反射ビームおよび結晶間を抜ける直進ビームの計 3 本の X 線ビームを得る。ただし、入射 X 線自体が持つビーム発散角や、ビームライン分光器において大面積 X 線ビームを得ることに伴う熱負荷によって生じる僅かなエネルギー分散の影響により、鏡面研磨の Si 結晶では幾何光学的な結晶アクセプタンスによって定義される反射ビーム幅を得ることは困難である。そこで、実効的なロッキングカーブ幅を広げる措置として、反射面の粗さを調整したラップ研磨結晶を用いることにより、結晶アクセプタンスに応じた反射ビーム幅を得る。

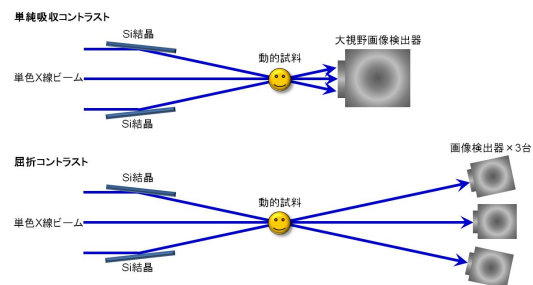


図 1. X 線トリスコピックイメージング光学系の概略図

X 線画像検出器は可視光変換型の画像検出器とし、高速撮影および高ダイナミックレンジ撮影が可能で、科学計測用 CMOS カメラを用いる。これにより、高いフレームレートでのライブ計測を可能とし、試料から得られる情報を最大限に利用することが可能となる。単純吸収コントラストにおける計測では、大視野画像検出器を試料に近づけて設置することで、3 方向からの透過投影像を 1 台の画像検出器で同時に検出する。一方で、生体試料のような軟組織の測定を想定した屈折コントラストを用いた測定では、試料と検出器間の距離を離す必要があるため、3 方向からの投影像を 1 台の画像検出器で測定することが不可能となる。そこで、各投影像を独立に測定できるように 3 台の画像検出器を設置して、同期測定を行うことにより、屈折コントラストを用いた場合でもマルチビームイメージングが行えるような装置の開発を行う。

次に、開発を行ったマルチビームイメー

ジング装置を用いて動的試料の計測を行い、動的試料に対して3方向から同時測定ができることを確認するとともに、マルチビーム投影データから試料の3次元像や情報を抽出・再構築できるような解析手法の開発を行う。図2に示すように、試料のある点に対して、異なる角度で投影した各透過投影像において、注目点の座標を得ることができれば、試料の奥行き方向の座標(Y座標)もX線ビームの交差角を加味した計算により求めることができる。これにより得られた位置座標情報を元に、動的試料の3次元構造情報を可視化することができる解析手法の開発を行う。

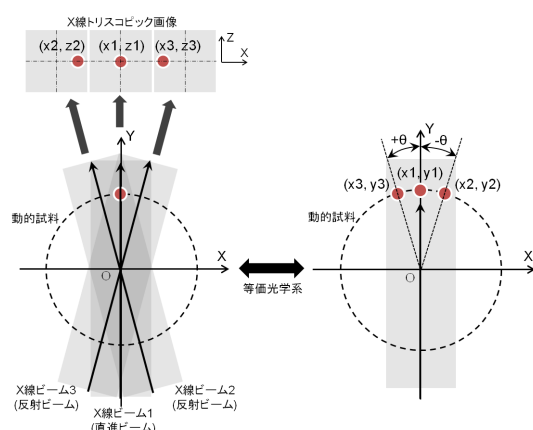


図2. X線トリスコピックイメージング光学系およびその透過投影像の座標系概念図とその等価光学系

4. 研究成果

異なる3方向から試料を同時投影することが可能なX線マルチビームイメージング装置の開発および立ち上げを行った。これにより、単純吸収イメージングに加えて、屈折コントラストを用いた場合でも動的試料のマルチビームライブイメージングが行えることを確認した。単純吸収コントラストにおける測定では、画像検出器1台によりマルチビーム透過像の取得が可能であることから、比較的広い視野で測定する場合は30Hz程度のフレームレート(実効画素サイズ: 25.2 μm、1方向ビームあたりの視野サイズ: 16.4mm(H) × 16.5mm(V))で測定することが可能であり、視野を絞れば最大300Hzのフレームレート(画素サイズ: 12.3 μm、1方向ビームあたりの視野サイズ: 7.4mm(H) × 5mm(V))でマルチビームイメージングが行えることを確認した。X線マルチビームイメージングの応用を視野に入れた測定では、血管造影を模した液体流体の計測として、任意に設定した流路における液体の流れを3方向から同時に計測を行った。一方で、屈折コントラストを用いた測定では、生体試料として人工呼吸条件下でのマウス胸部のライブイメージ

ングを行い、単純吸収コントラストに比べて、屈折によりエッジ部分が強調されたマルチビームライブ画像を取得することが出来た。

異なる3方向から得られた試料の透過像から、3次元像や構造情報を抽出・再構築するための解析手法として、試料形状および測定条件に応じた2パターンの解析手法の開発を行った。

1つは、任意に設定した流路を流れる液体のライブ計測から得られたデータを用いて、液体の軌跡を3次元再構築するための手法である。連続するフレーム間の差分をとることで、フレーム間の変位量を求め、単純化された変位分データから画像相関法を利用して座標データを取得し、奥行き方向も含めた3次元位置情報を取得した。なお、フレーム間の差分により画像データを単純化した背景には、画像相関法だけでは試料の構造すべてを同時かつ正確に抽出することが困難であったことに起因する。フレーム間の変位分の3次元位置データを連続的に積算していくことで、最終的に液体流路の3次元像を得ることができた。開発した手法によって得られた液体軌跡の時系列3次元像を図3に示す。なお、この手法を用いることにより、液体の流れを連続的に追跡することも可能である。

2つめの手法としては、より一般的な試料に対する3次元情報の抽出法であり、X線トモシンセシスの原理を応用することにより、X線ビームの進行方向に沿った任意の位置での試料断面像を得ることを目的としている。ここでは、屈折コントラストを用いて測定した人工呼吸下のマウス胸部のライブ画像について、胸部奥行き方向の断面像の取得を試みた。図4に、X線トモシンセシスの原理を用いて得られた、マウス胸部における奥行き方向の断面像を示す。画像形成に寄与している投影数が3投影であるため、バックグラウンドの情報を十分に落とすことはできていないが、注目する器官に対してその構造情報を強調することができている。完全な断面像とは言い難いが、ライブ観察の時間分解能で、動的試料の奥行き方向の断面像を得ることが出来た。

X線ライブイメージングの3次元化は、国内外を問わず非常に興味深い研究分野であり、高速X線マイクロCTの開発など、3次元イメージングに時間分解能を付加しようとする試みがなされている。本研究課題は、そのなかでもX線ライブイメージングを基本として、そこに複数方向から透過投影像を同時に取得することができるという特徴を加えたという点で、非常に独創性が強い計測手法と言える。「X線ライブイメージング=2次元の投影像」とされてきた従来の概念を変えることができる研究成果であると言える。

今後の課題としては、1KHz以上の高速

現象を捉えることができるようなマルチビームイメージング装置の開発や、3次元情報を抽出するための解析手法を見直すことによる3次元再構成画像の質の向上などが挙げられる。

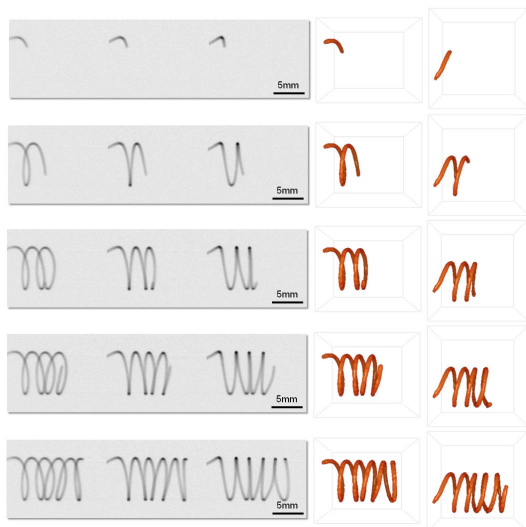


図 3. X線トリスコピック画像から再構成した液体軌跡の時系列3次元画像

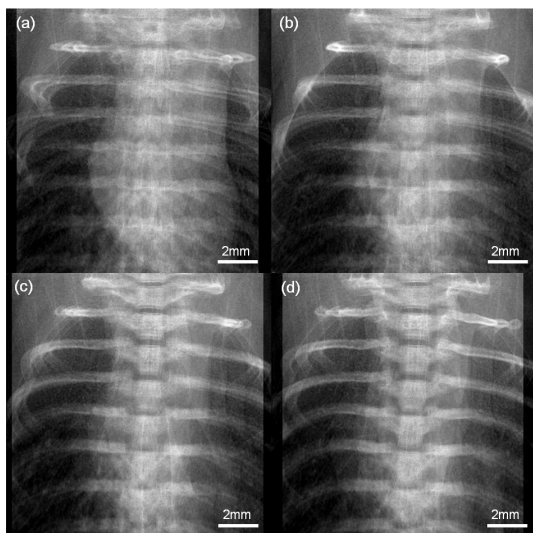


図 4. X線トリスコピック画像から得られたマウス胸部のX線ビーム進行方向に沿った断層像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

M. Hoshino, T. Sera, K. Uesugi and N. Yagi, "Development of X-ray triscopic imaging system towards three-dimensional measurements of dynamic samples", *Journal of Instrumentation* 8 (2013) C05002. 査読有

doi: 10.1088/1748-0221/8/05/C05002

M. Hoshino, K. Uesugi, T. Sera and N. Yagi, "X-ray micro-tomography using

white beam radiation from SPring-8", *Journal of Instrumentation* 8 (2013) P07018. 査読有
doi: 10.1088/1748-0221/8/07/P07018

〔学会発表〕(計 1件)

星野真人, 上杉健太郎, 八木直人, X線トリスコピックイメージングによるライブイメージングの3次元可視化, 第28回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2015年1月10~12日, 「立命館大学びわこ・くさつキャンパス(滋賀県草津市)」

6. 研究組織

(1)研究代表者

星野 真人 (HOSHINO, Masato)

公益財団法人高輝度光科学研究センター,
利用研究促進部門, 研究員

研究者番号: 30508461