

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7544320号
(P7544320)

(45)発行日 令和6年9月3日(2024.9.3)

(24)登録日 令和6年8月26日(2024.8.26)

(51)国際特許分類	F I		
H 0 1 J 37/22 (2006.01)	H 0 1 J 37/22	5 0 2 H	
H 0 1 J 37/317 (2006.01)	H 0 1 J 37/317	D	
G 0 1 N 1/28 (2006.01)	G 0 1 N 1/28	F	
	G 0 1 N 1/28	G	

請求項の数 14 外国語出願 (全20頁)

(21)出願番号	特願2020-170634(P2020-170634)	(73)特許権者	501233536
(22)出願日	令和2年10月8日(2020.10.8)		エフ イー アイ カンパニ
(65)公開番号	特開2021-64606(P2021-64606A)		F E I C O M P A N Y
(43)公開日	令和3年4月22日(2021.4.22)		アメリカ合衆国 オレゴン 9 7 1 2 4 -
審査請求日	令和5年10月10日(2023.10.10)		5 7 9 3 ヒルズボロ ドーソン・クリー
(31)優先権主張番号	16/596,538		ク・ドライヴ 5 3 5 0 エヌイー
(32)優先日	令和1年10月8日(2019.10.8)	(74)代理人	100107766
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		弁理士 伊東 忠重
		(74)代理人	100070150
			弁理士 伊東 忠彦
		(74)代理人	100135079
			弁理士 宮崎 修
		(72)発明者	レムコ ヨハネス ペトラス グールツ
			アメリカ合衆国 9 7 1 2 4 - 5 7 9 3
			オレゴン州, ヒルズボロ ノースイース
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 オブジェクト位置特定のための機械学習による低 k e V イオンビーム画像復元

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

サンプル材料を成形するように、前記サンプル材料の領域上に1回以上の平削りステップを実施して、高 k e V 設定で動作するイオンビームを用いてサンプルを形成する、実施することと、

前記サンプルをサンプル操作プローブに取り付けることと、

前記イオンビームで前記サンプル材料から前記サンプルを分離することと、

低 k e V 設定で前記イオンビームを前記サンプルに照射することと、

前記イオンビームによる照射から生じる放出に基づいて、前記サンプルの低 k e V イオンビーム画像を生成することと、

復元画像を生成するように、前記サンプルの前記低 k e V イオンビーム画像に画像復元モデルを適用することと、

前記復元画像内で前記サンプルを位置特定することと、

前記復元画像内の位置特定された前記サンプルに基づいて、前記イオンビームで前記サンプルの低 k e V 平削りを実施することと、を含む、方法。

【請求項 2】

前記画像復元モデルを適用することが、少なくとも1つの機械学習モデルを適用することを含み、前記少なくとも1つの機械学習モデルが、1つ以上のニューラルネットワークを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記機械学習モデルが、前記復元画像の特徴を識別するようにトレーニングされ、前記特徴が、前記サンプルの特徴と前記復元画像の背景の特徴とを含む、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記復元画像の前記特徴を識別することが、前記復元画像の前記特徴に基づいて、前記復元画像内の前記サンプルのための位置および方向を決定することを含む、請求項 3 に記載の方法。

【請求項 5】

1 つ以上の顕微鏡設定に基づいて、一連のアルゴリズムの最良アルゴリズムを決定することをさらに含み、

10

前記画像復元モデルを適用することが、前記復元画像を生成するように、前記サンプルの前記低 $k e V$ イオンビーム画像に前記最良アルゴリズムを適用することを含む、請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の方法。

【請求項 6】

1 つ以上の顕微鏡設定に基づいて、一連のアルゴリズムからアルゴリズムの組み合わせを決定することをさらに含み、

前記画像復元モデルを適用することが、前記復元画像を生成するように、前記サンプルの前記低 $k e V$ イオンビーム画像に前記アルゴリズムの組み合わせを適用することを含む、請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の方法。

【請求項 7】

20

透過型電子顕微鏡で前記サンプルを検査することをさらに含み、前記サンプルが、TEM 薄板である、請求項 1 ~ 6 のいずれかに記載の方法。

【請求項 8】

前記 TEM 薄板が基準を含み、前記サンプルが、前記基準に少なくとも部分的に基づいて、前記復元画像内に配置されている、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

前記 1 回以上の平削りステップが、高 $k e V$ 設定で前記イオンビームで前記サンプル材料の部分に照射することを含み、

前記低 $k e V$ 設定が、200 eV、500 eV、1 keV、2 keV、5 keV、8 keV、および/または 16 keV 以下で第 1 の動作値で動作するように設定されている前記イオンビームを含み、

30

前記高 $k e V$ 設定が、16 keV、30 keV、および/または 50 keV 以上で第 2 の動作値で動作するように設定されている前記イオンビームを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 10】

前記サンプルが低 $k e V$ 設定で前記イオンビームで平削りされるときに、前記サンプルの生成中に前記イオンビームによって引き起こされた損傷を含む、前記サンプルの表面が除去される、請求項 1 ~ 9 のいずれかに記載の方法。

【請求項 11】

前記復元画像内で前記サンプルを位置特定することは、前記サンプルの少なくとも一部分を含む、前記復元画像の領域を低エネルギー平削りマッピングと関連付けることを含む、請求項 1 ~ 10 のいずれかに記載の方法。

40

【請求項 12】

前記低エネルギー平削りマッピングが、前記復元画像上に配置されるグラフィックを含み、前記サンプルの前記低 $k e V$ 平削りを実施することは、前記グラフィックによって覆われている、前記復元画像の一部分に対応する、前記サンプルの領域を、前記イオンビームで低 $k e V$ 平削りに供することを含む、請求項 11 に記載の方法。

【請求項 13】

グラフィックユーザーインターフェース上に、システムによって自動的に配置された前記グラフィック、および承認のための要求で前記復元画像を提示することをさらに含み、

50

前記サンプルの前記低 $k e V$ 平削りが、承認の了承に少なくとも部分的に基づいて実施される、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 4】

荷電粒子顕微鏡システムであって、

サンプル材料を保持するように構成されたサンプルホルダーと、

イオンビームで前記サンプルを照射するように構成されたイオン源と、

前記イオンビームでの照射にตอบสนองして前記サンプルによって放出された荷電粒子に基づいて、前記サンプルの画像をキャプチャするように構成された撮像システムと、

1 つ以上の処理ユニットと、

前記 1 つ以上の処理ユニットによって実行されるときに、請求項 1 ~ 1 3 のいずれかに記載の方法を、前記荷電粒子顕微鏡システムに実施させる、コンピュータ可読命令を格納するメモリと、を備える、荷電粒子顕微鏡システム。

10

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

透過型電子顕微鏡 (TEM) での検査のためのサンプル調整は、より大きなサンプル材料から TEM 薄板 (lamella) を作成するプロセスである。これは、入射電子ビームからの電子が通過することが可能である厚さを有する TEM 薄板を作成して、TEM システムでの評価および / または分析を可能にするように、サンプル材料の領域を平削りすることを伴う。しかしながら、TEM 薄板に最も近いサンプル材料の領域を平削り取るプロセスは、TEM 薄板の表面に損傷を引き起こす (例えば、表面特徴の沈着および / または除去を介して)。TEM 薄板の評価および / または分析に悪影響を与えることからこのような表面損傷を防ぐために、現在の TEM サンプル調整プロトコルにおける最後のステップは、集束イオンビーム (FIB) での低 $k e V$ 研磨の適用である。

20

【0002】

低 $k e V$ 研磨を均一に適用するには、熟練ユーザーまたはコンピュータ自動化ソフトウェアのいずれかが、TEM 薄板のエッジを位置特定 (localize) されなければならない。残念ながら、現在の TEM システムにおいて TEM 薄板のエッジを位置決めすることは、低 $k e V$ FIB でキャプチャされた低品質画像のため、困難である。さらに、画像キャプチャプロセス中に、FIB の電圧を上げることは、TEM 薄板にさらに損傷を起こす。このため、現在の FIB システムのための不釣り合いな量の開発コストは、低 $k e V$ エネルギーでの光学性能を改善するのに費やされる。これは、製造コストを増加させるだけでなく、システムの他の光学性能に向けられることができる、財源を制限する。

30

【発明の概要】

【0003】

低 $k e V$ FIB 画像のための画像復元アルゴリズムを使用して TEM 薄板を作成するための方法およびシステムが、開示される。例示的な方法は、低 $k e V$ 設定でイオンビームをサンプルに照射することと、イオンビームによる照射から生じる放出に基づいて、サンプルの低 $k e V$ イオンビーム画像を生成することと、その後、復元画像を生成するように、サンプルの低 $k e V$ イオンビーム画像に画像復元モデルを適用することと、を含む。その後、サンプルは、復元画像内で位置特定され、サンプルの低 $k e V$ 平削りは、復元画像内の位置特定サンプルに基づいて、イオンビームで実施される。本方法は、画像復元モデル、画像認識モジュール、および / またはそれらのコンポーネント機械学習アルゴリズム (複数可) をトレーニングすることをさらに含み得る。そのようなトレーニングは、類似および / または同一のサンプルの 1 つ以上のラベル付けされた画像のトレーニングセットに基づいて、処理され得る。

40

【0004】

顕微鏡システム内でサンプルを自動的に配向するためのシステムは、サンプルを保持するように構成されたサンプルホルダーと、イオンビームでサンプルを照射するように構成されたイオン源と、イオンビームでの照射にตอบสนองしてサンプルによって放出された荷電粒

50

子に基づいて、サンプルの画像をキャプチャするように構成された撮像システムと、備える。本開示によるシステムはさらに、1つ以上の処理ユニットと、1つ以上の処理ユニットによって実行されるときに、本開示による低k e V F I B画像のための画像復元アルゴリズムを使用してT E M薄板を作成するための方法を、荷電粒子顕微鏡システムに実施させる、コンピュータ可読命令を格納するメモリと、を含む。

【図面の簡単な説明】

【0005】

詳細な説明は、添付の図を参照して説明される。図において、参照番号の最も左の桁（複数可）は、参照番号が最初に現れる図を識別する。異なる図の同じ参照番号は、類似または同一の項目を示している。

【0006】

【図1】本発明による、荷電粒子システムにおける低k e V F I B画像のための画像復元アルゴリズムを使用するT E M薄板調製のための例示的な荷電粒子環境を示す。

【図2】荷電粒子システムにおける低k e V F I B画像のための画像復元アルゴリズムを使用するT E M薄板調整のための例示的なコンピューティングアーキテクチャを示す概略図を示す。

【図3】荷電粒子システムにおける低k e V F I B画像のための画像復元アルゴリズムを使用するT E M薄板調製のためのプロセスを示す、一連の図を示す。

【図4】顕微鏡画像におけるサンプルの画像に対して、本発明による低k e V画像内のサンプルを配置する、本明細書に開示されるシステムおよび方法の用途を示す、図である。

【0007】

同様の参照番号は、図面のいくつかの図を通して対応する部分を指す。概して、図において、所与の例において含まれる可能性が高い要素は、実線で示されているのに対し、所与の例において任意選択的である要素は、破線で示されている。しかしながら、実線で示される要素は、本開示の全ての例に必須である訳ではなく、実線で示される要素は、本開示の範囲から逸脱しない限り、特定の例から省略され得る。

【発明を実施するための形態】

【0008】

低k e V F I B画像のための画像復元アルゴリズムを使用してT E M薄板を作成するための方法およびシステムが、本明細書に開示される。より具体的には、本開示は、低k e V F I B照射でキャプチャされた画像の鮮明度を改善するように、機械学習アルゴリズムを利用して、改善された方法およびシステムを含む。これは、以前のT E M薄板調整プロセスよりも薄板の位置特定を容易にして、低k e V研磨をよりの確にすることを可能にする。以前のT E M薄板調製システムによって直面したこれらの位置特定および精度の課題を克服することによって、本発明による方法およびシステムはまた、以前は不可能であった、T E M薄板調製プロセスの信頼できる自動化を可能にする。しかしながら、これは、本明細書に開示される本発明の特定の用途の例示に過ぎず、方法およびシステムは、他の用途のための低k e V F I B画像の解像度を改善するように使用され得る。

【0009】

上記の開示された問題に対する1つの解決策は、T E M薄板調整プロセス中に荷電粒子顕微鏡システム内のT E M薄板の画像をキャプチャするように、低k e V F I Bを使用すること、その後、より高い解像度を有する改良された低k e V F I B画像を作成するように、ニューラルネットワーク画像処理を適用することを含む。その後、T E M薄板は、改善された低k e V F I B画像内に位置特定されることができ、これにより、低k e V研磨ステップを、荷電粒子顕微鏡システム内でT E M薄板に適用することが可能になる。いくつかの実施形態において、改善された低k e V F I B画像は、ニューラルネットワークアルゴリズムがT E M薄板を見つけ、その後、低k e V研磨パターンを自動的に配置および/または選択することを可能にする。

【0010】

図1は、本発明による、荷電粒子システム102における低k e V F I B画像のため

10

20

30

40

50

の画像復元アルゴリズムを使用するTEM薄板調製のための例示的な荷電粒子環境100の図である。具体的には、図1は、サンプル104の調整、評価、および/または分析のための例示的な荷電粒子システム(複数可)102を含むものとして、例示的な荷電粒子環境100を示す。サンプル104は、天然に発生するサンプル(例えば、生物学的サンプル、材料サンプルなど)、または調整されたサンプル(TEM薄板、集積回路など)であり得る。例示的な荷電粒子システム(複数可)102は、透過型電子顕微鏡システム106および集束イオンビームシステム108を含む、デュアルビームシステムであるとして示されている。しかしながら、他の実施形態において、システムは、1つ以上の異なるタイプの光学顕微鏡、および/または荷電粒子顕微鏡であり得るか、または含み得る。

【0011】

透過型電子顕微鏡システム106は、放出軸114に沿って、かつ加速レンズ116に向かって電子ビーム112を放出する、電子源110を含む。放出軸112は、電子源110から透過型電子顕微鏡システム106の長さに沿って、かつサンプル104を通して走る中心軸である。加速レンズ116は、電子ビーム112を集束カラム118に向けて加速/減速、集束、および/または方向付ける。集束カラム118は、電子ビーム112を集束し、それがサンプル104の少なくとも一部分に入射するようにする。いくつかの実施形態において、集束カラム118は、開口、走査コイル、および上部対物レンズのうちの1つ以上を含み得る。例えば、集束カラム118は、電子源110からの電子をサンプル104上の小さなスポットに集束させるように構成される。サンプルの異なる位置は、走査コイルを介して電子ビームの方向を調整することによって走査され得る。さらに、集束カラム118は、電子ビーム112の収差(例えば、幾何学的収差、色収差)を補正および/または調整し得る。

【0012】

サンプル104を通過する電子120は、プロジェクタ122に入ることができる。一実施形態において、プロジェクタ122は、集束カラム118とは別個の部品であってもよい。別の実施形態において、プロジェクタ122は、集束カラム118内のレンズからのレンズ視野の延長部であってもよい。プロジェクタ122は、サンプル104を通過した直接電子120が顕微鏡検出器システム122に衝突するように調整され得る。

【0013】

図1において、顕微鏡検出器システム124は、円盤状の明視野検出器および暗視野検出器(複数可)を含むものとして示されている。いくつかの実施形態において、顕微鏡検出器システム124は、1つ以上の他の検出器を含み得る。代替的に、または追加的に、顕微鏡検出器システム124は、走査型電子顕微鏡検出器システム、集束イオンビーム検出器システム、走査型電子顕微鏡二次電子検出器システム、集束イオンビーム二次電子検出器システム、および光学顕微鏡検出器システムを含み得る。

【0014】

図1は、イオン放出軸130に沿って、かつイオン集束カラム130に向かって荷電粒子ビーム128を放出するように構成される、荷電粒子源126を含むものとして集束イオンビームシステム108を示す。イオン放出軸130は、荷電粒子源126から集束イオンビームシステム108の長さに沿って、かつサンプル104を通して走る中心軸である。イオン集束カラム130は、荷電粒子ビーム128がサンプル104の領域に入射するように、集束するように構成される。いくつかの実施形態において、イオン集束カラム130は、開口、走査コイル、および上部対物レンズのうちの1つ以上を含み得る。例えば、イオン集束カラム130は、荷電粒子源126からのイオンをサンプル104上の小さなスポットに集束させるように構成される。集束イオンビームシステム108は、荷電粒子でサンプル104に照射および/または平削りするように構成される。サンプル104の異なる位置は、走査コイルを介して荷電粒子ビームの方向を調整することによって、照射および/または平削りされ得る。追加的に、照射および/または平削りされるサンプル104上のスポットのサイズは、イオン集束カラム130によって調整されることができる。集束イオンビームシステム108は、低keVモード(例えば、集束イオンビーム

10

20

30

40

50

システム 108 が、200 eV、500 eV、1 keV、2 keV、5 keV、8 keV、および / または 16 keV 以下の動作値で動作するように設定されている)、および高 keV モード (例えば、集束イオンビームシステム 108 が、16 keV、30 keV、および / または 50 keV 以上の第 2 の動作値で動作するように設定されている場合) を含む多数の電圧設定で動作することができる。

【0015】

図 1 は、サンプルホルダー 132、サンプル操作プローブ 134、化学送達ユニット 136、コンピューティングデバイス 138、および 1 つ以上の撮像センサー (複数可) 140 をさらに含む、例示的な荷電粒子システム (複数可) 102 をさらに示す。サンプルホルダー 132 は、サンプル 104 を保持するように構成され、荷電粒子システム 102 に対してサンプル 104 を並進、回転、および / または傾斜させることができる。同様に、サンプル操作プローブ 134 は、サンプル 104 を保持、移送、および / または他の方法で操作するように構成される。撮像センサー (複数可) 140 は、荷電粒子ビーム 128 で照射されるサンプル 104 から生じる放出に基づいて、センサーデータを検出するように構成される。いくつかの実施形態において、サンプルを照射することは、サンプルを横切って移動するように、荷電粒子ビームイメージングをスキャンすることを含む。サンプル 104 (例えば、アトムプローブ、TEM トモグラフィーサンプル調整、薄板、チャンク (chunk)、ドッグボーン (dog bone)、電話帳 (phone book)、TEM 薄板、1 つ以上の窓を備えた TEM 薄板など) への損傷を防ぐために、集束イオンビームシステム 108 は、撮像のためにサンプル 104 を照射するときに、低 keV モードで動作する。その後、コンピューティングデバイス 138 は、撮像センサー (複数可) 140 からのセンサーデータに基づいて、サンプル 104 の画像を生成するように構成される。いくつかの実施形態において、画像は、サンプルの形状および / または材料を示すコントラストを示す、グレースケール画像である。残念ながら、集束イオンビームシステム 108 は、撮像のためにサンプル 104 を照射するときに低 keV モードで動作するため、コンピューティングデバイス 138 によって生成された画像は、詳細および / または解像度が低い。

【0016】

本発明によれば、荷電粒子システム 102 は、薄板調製プロセスを介して TEM 薄板を生成および分析するように構成され得る。すなわち、荷電粒子システム 102 は、より大きなソース材料から TEM 薄板を製造するように構成され得る。例えば、集束イオンビームシステム 108 は、TEM 薄板を取り囲む、ソース材料の部分を平削り取ることができる (すなわち、TEM 薄板が残るように、ソース材料の部分を除去する)。その後、サンプル操作プローブ 134 は、化学送達ユニット 136 を使用して TEM 薄板に取り付けられ得、集束イオンビームシステム 108 は、TEM 薄板がもはやソース材料で接続されないように、ソース材料の部分をさらに平削りおよび / または切り取り得る。その後、サンプル操作プローブ 134 は、荷電粒子システム 102 内の TEM 薄板を並進および / または再配向し得る。その後、TEM 薄板は、研磨および分析のためにサンプルホルダー 132 に取り付けられ得る。代替的に、TEM 薄板は、サンプル操作プローブ 134 に取り付けられている間に、研磨および / または分析され得る。集束イオンビームシステムは、平削り時に高 keV モードで動作するため、高エネルギーの荷電粒子ビームは、ソース材料の部分の平削り中に、TEM 薄板の表面に損傷を与え得る。代替的に、平削りは、ソース材料の部分が平削りされていることに起因して、TEM 薄板の表面に堆積物を引き起こし得る。

【0017】

TEM 薄板を研磨することは、集束イオンビームシステム 108 が、低 keV モードで動作して、TEM 薄板から少量の材料を除去するだけの、低電力荷電粒子ビームで TEM 薄板を照射することを含む。このようにして、TEM 薄板の製造 (すなわち、平削り) 中に作成される、表面上の損傷した部分および / または堆積物は、除去される。研磨されると、TEM 薄板は、透過型電子顕微鏡システム 106 で分析され得る。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 8 】

T E M薄板を研磨するプロセスは、T E M薄板の位置を特定し、その後、低 k e V モード荷電粒子ビームが対象とされる、領域を識別することを伴う。いくつかの実施形態において、これは、撮像センサー（複数可）1 4 0からのセンサーデータに基づいて構成されるコンピューティングデバイス1 3 8によって生成された1つ以上の画像におけるT E M薄板の位置を識別すること、その後、集束イオンビームシステムが低 k e V モードで動作している間に、動作する1 0 8ことによって照射される、領域に対応する、画像の領域を選択することを含む。

【 0 0 1 9 】

T E M薄板は、ユーザーによって手動でそのような画像内に配置され得るか、またはコンピューティングデバイス1 2 8、またはそれらの組み合わせによって自動的に検出され得る。例えば、コンピューティングデバイス1 2 8は、画像内のT E M薄板の位置を推定し得、その後、推定された位置を識別し、ユーザーに検証を促すグラフィカルユーザーインターフェースをユーザーに提示し得る。画像内のT E M薄板の位置を決定することは、画像内のT E M薄板の位置および/または方向を決定することを含み得る。

【 0 0 2 0 】

しかしながら、上で考察されたように、集束イオンビームシステム1 0 8は、撮像のためにT E M薄板を照射するときに、低 k e V モードで動作するので、コンピューティングデバイス1 3 8によって生成された画像は、詳細および/または解像度が低い。これは、生成された画像におけるT E M薄板の正確な位置を決定することが非常に難しいことを意味する。本明細書に提示されるシステムおよび方法は、画像の復元バージョンを生成するように、1つ以上の画像復元モデルを画像に適用することによって、この困難を克服する。画像復元モデルは、復元画像が詳細および/または解像度を向上されるように、低 k e V モードで動作する集束イオンビームシステム1 0 8を使用して生成された画像を復元するようにトレーニングされた、機械学習モデル（例えば、人工ニューラルネットワーク、畳み込みニューラルネットワーク、リカレントニューラルネットワーク、教師ありモデル、教師なしモデルなど）に対応する。いくつかの実施形態において、コンピューティングデバイス1 3 8は、画像の特徴、顕微鏡システム1 0 2の設定、またはその両方に基づいて、特定の画像に適用するように、最良アルゴリズムおよび/またはアルゴリズムのコレクションを決定するように構成される。画像復元モデルがそのような復元画像を生成すると、コンピューティングデバイス1 3 8は、画像内の特徴（例えば、影、エッジ、基準、境界、構造、背景特徴、サンプル1 0 4の特徴など）、復元画像におけるT E M薄板、またはその両方の位置を識別することができる。例えば、コンピューティングデバイス1 3 8は、第1に、復元画像内の特徴を識別して、その後、識別された特徴に基づいて、復元画像におけるT E M薄板の位置を決定し得る。

【 0 0 2 1 】

T E M薄板の位置が決定されると、集束イオンビームシステムが動作する1 0 8ことによって研磨する対象とされる、領域を描写する、復元画像の領域が、決定される。これは、復元画像のそのような領域を低エネルギー平削りマッピングと関連付けることを含み得る。低エネルギー平削りマッピングは、集束イオンビームシステム1 0 8によって研磨する対象とされる、画像の領域を記載する。いくつかの実施形態において、低エネルギーマッピングは、領域内に含まれる画像のピクセル、領域の境界などを識別する座標に対応する。代替的に、または追加的に、エネルギーマッピングは、ユーザー、コンピュータアルゴリズム、またはそれらの組み合わせによって復元画像上に低オーバーレイされたグラフィックであり得る。例えば、機械学習アルゴリズムは、画像において識別された1つ以上の特徴に基づいて、復元画像の上に低エネルギーマッピンググラフィックをオーバーレイし得る。代替的に、コンピューティングシステム1 3 8は、ユーザーが復元画像上に低エネルギーマッピンググラフィックを配置すること、または機械学習アルゴリズムによって自動的にオーバーレイされる低エネルギーマッピンググラフィックの配置を承認することを可能にする、グラフィカルユーザーインターフェースを提示し得る。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 2 】

当業者であれば、図 1 に図示するコンピューティングデバイス 1 3 8 は、単なる例示であり、本開示の範囲を限定することを意図するものではないことを理解するであろう。コンピューティングシステムおよびデバイスは、コンピュータ、ネットワークデバイス、インターネット家電製品、PDA、無線電話、コントローラ、オシロスコープ、増幅器等を含む、指定された機能を実行することができるハードウェアまたはソフトウェアの任意の組み合わせを含んでもよい。コンピューティングデバイス 1 2 8 はまた、図示されていない他のデバイスに接続されてもよく、または代わりに、スタンドアロンシステムとして動作してもよい。さらに、図示のコンポーネントにより実現される機能は、いくつかの実施態様では、より少ないコンポーネントに組み合わせることができる、または追加のコンポーネントに分散させることができる。同様に、いくつかの実施態様では、図示のコンポーネントのうちいくつかのコンポーネントの機能は実現されなくてもよい、および / または他の追加機能が利用可能であり得る。

10

【 0 0 2 3 】

コンピューティングデバイス（複数可）1 3 8 は、例示的な荷電粒子システム（複数可）1 0 2 のコンポーネントであり得、ネットワーク通信インターフェースを介して例示的な荷電粒子システム（複数可）1 0 2 と通信する、例示的な荷電粒子システム（複数可）1 0 2 とは別個のデバイスであり得るか、またはそれらの組み合わせであり得ることに留意されたい。例えば、例示的な荷電粒子システム（複数可）1 0 2 は、例示的な荷電粒子システム（複数可）1 0 2 のコンポーネント部分である、第 1 のコンピューティングデバイス 1 3 8 を含み得、これは、例示的な荷電粒子システム（複数可）1 0 2 の動作を駆動する、コントローラとして機能する（例えば、走査コイルを動作させることによって、サンプル 1 0 4 上の走査場所を調整する、など）。このような実施形態において、例示的な荷電粒子システム（複数可）1 0 2 はまた、例示的な荷電粒子システム（複数可）1 0 2 とは別のデスクトップコンピュータである第 2 のコンピューティングデバイス 1 3 8 を含み得、それは、撮像センサー（複数可）1 4 0 および顕微鏡検出システム 1 2 4 の一方または両方から受信したデータを処理して、サンプル 1 0 4 の画像を生成する、および / または他のタイプの分析を実施するように実行可能である。コンピューティングデバイス 1 3 8 は、キーボード、マウス、タッチパッド、タッチスクリーンなどを介して、ユーザー選択を受信するように構成され得る。

20

30

【 0 0 2 4 】

図 2 は、荷電粒子システムにおける低 keV FIB 画像のための画像復元アルゴリズムを使用する TEM 薄板調製のための例示的なコンピューティングアーキテクチャ 2 0 0 を示す概略図を示す。例示的なコンピューティングアーキテクチャ 2 0 0 は、本開示で説明される技術を実装するために使用され得るハードウェアおよびソフトウェアコンポーネントの詳細を示している。当業者は、コンピューティングアーキテクチャ 2 0 0 が単一のコンピューティングデバイスに実現され得るか、または多数のコンピューティングデバイスにわたって実現され得ることを理解するであろう。例えば、コンピューティングアーキテクチャ 2 0 0 に示される個々のモジュールおよび / またはデータ構成は、異なるコンピューティングデバイスによって実行され、および / または格納され得る。このようにして、本開示による本発明の方法の異なるプロセスステップは、別個のコンピューティングデバイスによって実行および / または実施され得る。

40

【 0 0 2 5 】

例示的なコンピューティングアーキテクチャ 2 0 0 では、コンピューティングデバイスは、1 つ以上のプロセッサ 2 0 2 と、1 つ以上のプロセッサ 2 0 2 に通信可能に結合されたメモリ 2 0 4 とを含む。例示的なコンピューティングアーキテクチャ 2 0 0 は、メモリ 2 0 4 に格納された撮像モジュール 2 0 6、画像復元モジュール 2 0 8、画像認識モジュール 2 1 0、制御モジュール 2 1 2、および任意選択のトレーニングモジュール 2 1 4 を含むことができる。例示的なコンピューティングアーキテクチャ 2 0 0 は、メモリ 2 0 4 に格納されたトレーニングセット 2 1 6 を任意選択で含むものとしてさらに示される。ト

50

レーニングセット 2 1 6 は、低 k e V モードで動作するイオンビーム源での照射を介して生成された画像を復元するように、画像復元モジュール 2 0 8 および / またはそのコンポーネント機械学習アルゴリズムをトレーニングするように使用されるデータ構 (例えば、画像、ファイル、表など) またはデータ構造の集合である。

【 0 0 2 6 】

例えば、トレーニングセット 2 1 6 は、低 k e V モードで動作するイオンビーム源での照射を介して生成され、画像の特徴 (例えば、影、エッジ、基準、境界、構造、背景特徴、サンプル特徴など) がラベル付けされているサンプル (例えば、T E M 薄板) の画像を含み得る。追加的に、または代替的例において、トレーニングセット 2 1 6 は、低 k e V モードで動作するイオンビーム源での照射を介して生成された、サンプルの画像、および高 k e V モードで動作するイオンビーム源での照射を介して生成された、同じサンプルの画像を含み得る。

10

【 0 0 2 7 】

本明細書で使用される場合、「モジュール」という用語は、考察の目的で実行可能な命令の例示的な区分を表すように意図されており、あらゆるタイプの要件または必要な方法、方式または編成を表すようには意図されていない。したがって、様々な「モジュール」が説明されているが、それらの機能および / または同様の機能は、異なって配置されることができる (例えば、より少数のモジュールに結合、より多数のモジュールに分割等) 。

【 0 0 2 8 】

さらに、特定の機能およびモジュールは、本明細書ではプロセッサ上で実行可能なソフトウェアおよび / またはファームウェアによって実装されるものとして説明されているが、他の例では、任意または全てのモジュールは、説明された機能を実行するようにハードウェア (例えば、特殊な処理ユニット等) によって全体または部分的に実装されることができる。様々な実施態様において上で考察されたように、例示的なコンピューティングアーキテクチャ 2 0 0 に関連して本明細書で記載されるモジュールは、多数のコンピューティングデバイスにわたって実行され得る。

20

【 0 0 2 9 】

撮像モジュール 2 0 6 は、荷電粒子顕微鏡システム (例えば、荷電粒子システム 1 0 2) の撮像センサーからセンサーデータを受信して、荷電粒子顕微鏡システム内のサンプルの画像を生成するように、プロセッサ 2 0 2 によって実行可能であり得る。いくつかの実施形態において、画像は、サンプル (例えば、T E M 薄板) の形状および / または材料を示すコントラストを示す、グレースケール画像である。センサーデータは、荷電粒子ビームでのサンプルの照射から生じる、検出イベントに基づいて、撮像センサーによって生成される。例えば、センサーデータは、荷電粒子カラム (例えば、集束イオンビームシステム 1 0 8) からのイオンビームで照射されているサンプルからの放出の検出に基づいて、生成され得る。照射中のサンプルへの損傷を防ぐために、荷電粒子カラムは、サンプルを照射するときに、低 k e V モードで動作するように設定され、これにより、サンプルに入射する荷電粒子ビームの強度が低減する。ビーム強度のこの低減は、サンプルへの損傷を低減するが、撮像センサーによって生成される検出イベントの数および / またはセンサーデータの品質も低減する。これは、撮像モジュールによって生成される画像が、概して低品質画像であることを意味する (例えば、低ディテール、ぼやけ、低解像度など) 。これは、生成された画像におけるサンプルの正確な位置を決定することが、非常に難しいことを意味する。

30

40

【 0 0 3 0 】

画像復元モジュール 2 0 8 は、撮像モジュール 2 0 6 によって生成された画像の復元バージョンを生成するように、プロセッサ 2 0 2 によって実行可能であることができる。復元画像は、サンプル、背景、および / またはその特徴が人間または自動化されたシステムによって識別 / 位置決めすることができるように、詳細および / または解像度が改善されている、撮像モジュール 2 0 6 によって生成された画像のバージョンである。画像復元モジュール 2 0 8 は、画像の復元バージョンを生成するように構成される、1 つ以上の画像

50

復元モデルを備える。個々のそのような画像復元モデルは、荷電粒子カラムによって照射を介して生成された、サンプル（例えば、TEM薄板）の画像を復元するようにトレーニングされた、機械学習モデル（例えば、人工ニューラルネットワーク、畳み込みニューラルネットワーク、リカレントニューラルネットワーク、教師ありモデル、教師なしモデルなど）に対応し、低keVモードで動作するように設定される。いくつかの実施形態において、画像復元モジュール208は、画像の特徴、関連する荷電粒子顕微鏡システムの設定/特徴、または両方に基づいて、特定の画像に適用するように最良の画像復元モデルおよび/または画像復元モデルのコレクションを決定するように、実行可能である。

【0031】

画像復元モデル208がそのような復元画像を生成すると、画像認識モジュール210は、画像内の特徴（例えば、影、エッジ、基準、境界、構造、背景特徴、サンプル特徴など）、復元画像内のサンプルの位置および/または方向、あるいはその両方を識別するように、プロセッサ202によって実行可能である。例えば、画像復元モデル208は、第1に、復元画像内の特徴を識別し得、その後、識別された特徴に基づいて、復元画像におけるサンプルの位置を決定し得る。

【0032】

サンプルの位置および/または方向が復元画像において決定されると、画像認識モジュール210は、低keVモードで動作する荷電粒子カラムを使用して、研磨の対象とされる、領域を描写する、復元画像の領域を識別するように、さらに実行可能であり得る。これは、復元画像のそのような領域を、荷電粒子カラムによって研磨の対象とされる、画像の領域を記述する、低エネルギー平削りルマッピングと関連付けることを含み得る。低エネルギーマッピングは、領域内に含まれる画像のピクセル、領域の境界、などを識別する座標に対応し得る。代替的に、または追加的に、低エネルギーマッピングは、ユーザー、コンピュータアルゴリズム、またはそれらの組み合わせによる復元画像上にオーバーレイされる、グラフィックであり得る。例えば、機械学習アルゴリズムまたは他のタイプのアルゴリズムは、画像において識別された1つ以上の特徴に基づいて、復元画像の上に低エネルギーマッピンググラフィックをオーバーレイし得る。代替的に、画像認識モジュール210は、ユーザーが復元画像上に低エネルギーマッピンググラフィックを配置すること、または機械学習アルゴリズムによって自動的にオーバーレイされる低エネルギーマッピンググラフィックの配置を承認することを可能にする、グラフィカルユーザーインターフェースを提示し得る。ユーザーが復元画像上に低エネルギーマッピンググラフィックを配置することを可能にする実施形態において、グラフィカルユーザーインターフェースは、ユーザーが低エネルギーマッピンググラフィックを正しく配置するのを支援するように、1つ以上のオーバーレイグラフィックを提示し得る。例えば、オーバーレイグラフィックスは、復元画像内のサンプルの軸、サンプルのエッジ、サンプルの境界、サンプルの特徴などを含み得る。画像認識モジュール210は、復元画像の決定された特徴に基づいて、オーバーレイグラフィックスを自動的に配置するように実行可能であり得る。

【0033】

制御モジュール212は、コンピューティングデバイスおよび/または関連する荷電粒子顕微鏡システム（例えば、荷電粒子システム102）に、1つ以上のアクションを実行させるように、プロセッサ202によって実行可能であり得る。例えば、制御モジュール212は、関連する荷電粒子顕微鏡システムに、サンプルを再配置/配向させ、電子顕微鏡カラムでサンプルを走査し、集束イオンビームカラムでサンプルを照射し、集束イオンビームカラムまたは電子顕微鏡カラムの設定を調整し（例えば、対応するビームの電圧を調整する）、集束イオンビームカラムまたは電子顕微鏡カラムの光学設定を調整するなどを、させ得る。

【0034】

制御モジュール212は、復元画像、低エネルギーマッピング、またはそれらの組み合わせに基づいて、低keVモードで動作する荷電粒子カラムを使用して、サンプル（例えば、TEM薄板）を研磨させるようにさらに実行可能である。例えば、制御モジュール2

10

20

30

40

50

12は、低エネルギーマッピンググラフィックによってオーバーレイされた復元画像の部分に対応するサンプルの領域を照射するように、荷電粒子カラムを低keVモードで動作させ得る。

【0035】

コンピューティングアーキテクチャ200は、任意選択で、画像復元モデル208、画像認識モジュール210、および/またはそれらのコンポーネント機械学習アルゴリズム(複数可)をトレーニングするために実行可能な、トレーニングモジュール214を含み得る。トレーニングモジュール214は、類似および/または同一のサンプルの1つ以上のラベル付き画像のトレーニングセットに基づいて、画像復元モデル208、画像認識モジュール210、および/またはそれらのコンポーネント機械学習アルゴリズム(複数可)のトレーニングを容易にする。ラベル付けされた画像のラベルは、サンプルの特定のキーポイントに対応する、画像の領域および/またはポイント、特定のクラスのピクセルのグループ化に対応する画像の選択(すなわち、セグメンテーション情報)を含み得る。画像のトレーニングセットは、熟練の人間のオペレータによって、計算アルゴリズムによって、またはそれらの組み合わせによってラベル付けされ得る。

10

【0036】

いくつかの実施形態において、トレーニングモジュール214は、単一のラベル付けされた画像、モデル、および/またはサンプルのCAD図面などから1つ以上のラベル付けされた画像のトレーニングセットを生成するように構成され得る。例えば、トレーニングモジュール214は、複数のラベル付けされた変態(morph)画像を形成するように、ラベル付けされた画像、モデル、および/またはCAD図面に1つ以上の変態操作を実施し得る。トレーニングモジュール214は、新しいトレーニングデータで追加のトレーニングを実施し、その後、更新を送信して、画像復元モデル208、画像認識モジュール210、および/またはそのコンポーネント機械学習アルゴリズム(複数可)のパフォーマンスを向上させるように構成され得る。

20

【0037】

上で考察されたように、コンピューティングアーキテクチャ200は、1つ以上のプロセッサにアクセス可能なメモリ(複数可)204中に格納された命令、アプリケーション、またはプログラムを実行するように構成された1つ以上のプロセッサ202を含む。いくつかの例では、1つ以上のプロセッサ202は、これらに限定されるものではないが、ハードウェア中央処理装置(CPU)、グラフィックス処理装置(GPU)などを含むハードウェアプロセッサを含むことができる。多くの場合、本技術は、1つ以上のプロセッサ202によって実行されるものとして本明細書では説明されているが、場合によっては、本技術は、フィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)、複合プログラマブル論理デバイス(CPLD)、特定用途向け集積回路(ASIC)、システムオンチップ(SoC)、またはそれらの組み合わせなどの1つ以上のハードウェア論理コンポーネントによって実装されてもよい。

30

【0038】

1つ以上のプロセッサ202にアクセス可能なメモリ204は、コンピュータ可読媒体の例である。コンピュータ可読媒体は、2つのタイプのコンピュータ可読媒体、すなわちコンピュータ記憶媒体および通信媒体を含むことができる。コンピュータ記憶媒体は、コンピュータ可読命令、データ構造、プログラムモジュール、または他のデータのような、情報を格納する任意の方法または技術で実現される揮発性媒体および不揮発性媒体、着脱可能媒体、および着脱不能媒体を含み得る。コンピュータ記憶媒体は、これらに限定されないが、ランダムアクセスメモリ(RAM)、リードオンリーメモリ(ROM)、消去可能なプログラマブルリードオンリーメモリ(EEPROM)、フラッシュメモリもしくは他のメモリ技術、コンパクトディスクリードオンリーメモリ(CD-ROM)、デジタル多用途ディスク(DVD)、もしくは他の光記憶、磁気カセット、磁気テープ、磁気ディスク記憶装置もしくは他の磁気記憶デバイス、または所望の情報を格納するように使用され得、かつコンピューティングデバイスによってアクセスされ得る、任意の他の非伝送媒

40

50

体を含む。一般に、コンピュータ記憶媒体は、1つ以上の処理ユニットによって実行されるときに、本明細書に記載される様々な機能および/または操作を実施するようにする、コンピュータ実行可能命令を含み得る。対照的に、通信媒体は、コンピュータ可読命令、データ構造、プログラムモジュール、もしくは搬送波のような変調データ信号における他のデータ、または他の伝送機構を具体化する。本明細書において定義されるように、コンピュータ記憶媒体は通信媒体を含まない。

【0039】

当業者であれば、項目またはその部分が、メモリ管理およびデータ完全性の目的のために、メモリ204と他の記憶デバイスとの間で転送され得ることを理解することもできるであろう。代替的に、他の実施態様において、ソフトウェアコンポーネントのいくつかは、または全ては、別のデバイスのメモリで実行し得、コンピューティングデバイスと通信し得る。システムコンポーネントまたはデータ構造のいくつかは、または全ては、非一時的なコンピュータアクセス可能媒体に格納する、または適切なドライブにより読み取られるポータブル製品に格納することもでき(例えば、命令または構造化データとして)、適切なドライブの様々な例は、上に説明されている。いくつかの実施態様において、コンピューティングデバイスとは別個のコンピュータアクセス可能媒体に格納されている命令は、伝送媒体または無線リンク等の通信媒体を介して伝達される電気、電磁、またはデジタル信号等の信号を介して、コンピューティングデバイスに伝送され得る。様々な実施態様は、コンピュータアクセス可能媒体に関するこれまでの記述に従って実現される命令および/またはデータを受信する、送信する、または格納することをさらに含むことができる。

【0040】

図3は、ハードウェア、ソフトウェア、またはそれらの組み合わせで実現することができる一連の操作を表す論理フローグラフのブロックの集まりとして示された例示的なプロセスのフロー図である。ソフトウェアの状況では、ブロックは、1つ以上のコンピュータ可読記憶媒体に格納されているコンピュータ実行可能命令を表し、コンピュータ実行可能命令が1つ以上のプロセッサにより実行されると、列挙される操作を実行ようになる。一般に、コンピュータ実行可能命令は、特定の機能を実施する、または特定の抽象データタイプを実現するルーチン、プログラム、オブジェクト、コンポーネント、データ構造などを含む。操作が記述される順序は、限定として解釈されるべきではなく、任意の数の記述ブロックは、任意の順序で組み合わせる、および/または同時に行われるように組み合わせるプロセスを実現することができる。

【0041】

具体的には、図3は、荷電粒子システムにおける低keV FIB画像のための画像復元アルゴリズムを使用するTEM薄板調製のための例示的なプロセス300の流れ図である。プロセス300は、環境100において、および/または1つ以上のコンピューティングデバイス(複数可)138によって、および/またはコンピューティングアーキテクチャ200によって、および/または他の環境において、およびコンピューティングデバイスによって実現され得る。

【0042】

302で、1つ以上の機械学習モデルは、サンプルの低keV画像を復元し、および/または復元画像内でサンプルを位置特定するように、トレーニングされる。具体的には、機械学習モデル(CNN、GAN、ニューラルネットワークなど)は、類似および/または同一のサンプルの1つ以上のラベル付き画像のトレーニングセットを使用してトレーニングされる。ラベル付けされた画像のラベルは、サンプルの特定のキーポイントに対応する、画像の領域および/またはポイント、特定のクラスのピクセルのグループ化に対応する、画像のセクション(すなわち、セグメンテーション情報)を含み得るが、これらに限定されない。画像のトレーニングセットは、熟練の人間のオペレータによって、計算アルゴリズムによって、またはそれらの組み合わせによってラベル付けされ得る。例えば、トレーニングセットは、単一のラベル付き画像、モデル、および/またはサンプルのCAD図面から、ソースラベル付き画像/モデル/CAD図面を変態および/または変形して複

数のラベル付き画像を形成するコンピューティングアルゴリズムによって自動的に生成され得る。いくつかの実施形態において、機械学習モデル（複数可）は、パフォーマンスを改善するために定期的に再トレーニングされ得る。

【0043】

304で、トレーニング済みの機械学習モデル（複数可）は、任意選択で展開される。例えば、中央コンピューティングデバイスによってトレーニングされ得、対応する荷電粒子顕微鏡システムに個別に関連付けられ、本明細書に開示されるシステムおよび方法を実行する、1つ以上の消費者コンピューティングデバイスに配布され得る。追加的に、1つ以上の機械学習モデル（複数可）が定期的に再トレーニングされる場合、更新は、以前に展開された、機械学習モデルのパフォーマンスを改善するように、本明細書に開示されるシステムおよび方法を実行する消費者コンピューティングデバイスに送信され得る。

10

【0044】

306で、荷電粒子顕微鏡システムの集束イオンビームカラムは、低keV条件に設定される（例えば、 $HV = 2\text{ keV}$ 、 $I = 100\text{ pA}$ ）。荷電粒子顕微鏡システムが低keV条件に設定されているときに、荷電粒子顕微鏡システム内のイオンビームシステムは、 200 eV 、 500 eV 、 1 keV 、 2 keV 、 5 keV 、 8 keV 、および/または 16 keV 以下の動作値で動作するように設定される。上で考察されたように、荷電粒子カラムは、照射中のサンプルへの損傷を防ぐように、低keV条件で動作するように設定される。すなわち、荷電粒子ビームの入射エネルギー（*landing energy*）を低減することによって、照射するときに、荷電粒子ビームを撮像するためのサンプルは、サンプルに構造的損傷を与えることなく、画像センサーによって検出されることができ放

20

【0045】

308で、荷電粒子顕微鏡システムにおけるサンプルの低keV画像は、荷電粒子顕微鏡システムによって生成される。具体的には、荷電粒子顕微鏡システムの撮像システムは、荷電粒子顕微鏡システム内のサンプルの画像を生成する。様々な実施形態において、サンプルは、TEM薄板であることに対応することができるが、これに限定されない。低keV画像は、低keV条件で動作する、集束イオンビームカラムによって照射されるサンプルによって引き起こされる検出された放出イベントから生成されるため、撮像センサーによって生成されるセンサーデータの量および/または質に留意されたい。これは、サンプルの低keV画像が、概して低品質画像（例えば、低ディテール、ぼやけ、低解像度など）である結果になる。例えば、低keVにおいて、画像の解像度は、その中のサンプルの正確な位置を決定することが非常に困難であるようなものであり得る。

30

【0046】

310で、画像復元アルゴリズムは、荷電粒子顕微鏡システムによってサンプルの低keV画像に適用される。具体的には、荷電粒子顕微鏡システムは、サンプル、背景、および/またはその特徴を識別/位置決めできるように、人間または自動化されたシステムによって、詳細および/または解像度が改善された低keV画像の復元バージョンを生成する画像復元アルゴリズムを適用する。画像復元アルゴリズムは、ステップ302でトレーニングされたものなど、サンプルの低keV画像を復元するようにトレーニングされた1つ以上の機械学習モデルを含み得る。

40

【0047】

312で、サンプルは、復元画像において位置特定される。いくつかの実施形態において、サンプルは、荷電粒子顕微鏡システムのユーザーによって位置特定され得る。代替的に、画像復元アルゴリズムは、サンプルを自動的に位置付けし得、および/または復元画像の特徴に基づいて、サンプルを位置付けすることにおいてユーザーを支援し得る。例えば、画像復元アルゴリズムは、復元画像内の特徴（例えば、影、エッジ、基準、境界、構造、背景特徴、サンプル特徴など）を識別し、その後、復元画像におけるサンプルの位置

50

および／または方向を決定するように、さらに実行可能であり得る。ステップ 3 1 2 は、方法 3 0 0 において、3 1 0 とは別のものとして示されているが、いくつかの実施形態において、サンプルは、ステップ 3 1 0 において適用される画像復元アルゴリズムと並行して、および／またはそれによって位置特定され得る。

【 0 0 4 8 】

3 1 4 で、平削りパターンは、任意選択で、復元画像内に配置される。例えば、平削りパターンは、ユーザー、コンピュータアルゴリズム、またはそれらの組み合わせによって復元画像にオーバーレイされるグラフィックに対応し得、平削りパターングラフィックがオーバーレイする画像の一部分は、荷電粒子カラムによって研磨の対象とされる画像の領域に対応する。いくつかの実施形態において、平削りパターンは、荷電粒子顕微鏡システムによって、またはそのユーザーによって自動的に配置され得る。例えば、荷電粒子顕微鏡システムは、復元画像の 1 つ以上の特徴に基づいて、平削りパターンを自動的に配置し得る。代替の実施形態において、荷電粒子顕微鏡システムは、ユーザーが復元画像上に平削りパターングラフィックを配置すること、または機械学習アルゴリズムによって自動的にオーバーレイされる、低エネルギーマッピンググラフィックの配置を承認することを可能にする、グラフィカルユーザーインターフェースを提示し得る。さらに、ユーザーが復元画像上に低エネルギーマッピンググラフィックを配置することを可能にする場合、グラフィカルユーザーインターフェースは、ユーザーが低エネルギーマッピンググラフィックを正しく配置するのを支援するように、1 つ以上のオーバーレイグラフィックを提示し得る。

【 0 0 4 9 】

3 1 6 で、平削り操作は、荷電粒子顕微鏡システムによってサンプル上で実施される。これは、サンプルの研磨を含み得るが、これに限定されない。例えば、サンプルの研磨は、サンプルから少量の材料のみを除去する荷電粒子ビームとなるように、低 k e V モードで動作する集束イオンビームシステムでサンプルを照射する荷電粒子顕微鏡システムを含み得る。このようにして、サンプルの製造（すなわち、平削り）中に作成されたサンプルの表面上の損傷した部分および／または堆積物は、除去されることができる。研磨されると、サンプルは、荷電粒子顕微鏡システムによって分析され得る。

【 0 0 5 0 】

図 4 は、顕微鏡画像におけるサンプルの画像に対して、本発明による低 k e V 画像内のサンプルを配置する、本明細書に開示されるシステムおよび方法の用途 4 0 0 を示す。図 4 は、低 k e V モード（例えば、 $HV = 2 \text{ keV}$ 、 $I = 100 \text{ pA}$ ）で動作する集束イオンビームでサンプルを照射することによって生成された、荷電粒子顕微鏡システム内のサンプル 1 0 2 の低 k e V 画像 4 0 2 を含む。図 4 において見られ得るように、低 k e V 画像 4 0 2 は、非常に低品質であり、したがって、サンプル 1 0 2 の正確な境界、またはサンプル 1 0 2 が終了し、サンプルホルダー 1 3 2 が開始する場所を決定することは困難である。

【 0 0 5 1 】

図 4 はまた、本発明による荷電粒子顕微鏡システムによって生成された、低 k e V 画像 4 0 4 の復元バージョンを示す。見られることができるように、1 つ以上の画像復元アルゴリズム（例えば、CNN、GAN、ニューラルネットワークなど）の適用は、サンプル 1 0 2 の境界およびサンプルホルダー 1 3 2 がはっきりと見えるように、画像の解像度が拡大された。追加的に、低 k e V 画像 4 0 4 の復元バージョンにおいて、低 k e V 画像 4 0 2 で完全には検出できない基準 4 0 6 が見える。図 4 は、低 k e V 画像 4 0 4 の復元バージョン上にオーバーレイされた、低エネルギーマッピンググラフィック 4 0 8 をさらに含む。

【 0 0 5 2 】

本開示による本発明の主題の例は、以下に列挙される段落で説明される。

【 0 0 5 3 】

A 1 .

低 $k e V$ 設定でイオンビームをサンプルに照射することと、
イオンビームによる照射から生じる放出に基づいて、サンプルの低 $k e V$ イオンビーム画像を生成することと、

復元画像を生成するように、サンプルの低 $k e V$ イオンビーム画像に画像復元モデルを適用することと、

復元画像内でサンプルを位置特定することと、

復元画像内の位置特定サンプルに基づいて、イオンビームでサンプルの低 $k e V$ 平削りを実施することと、を含む、方法。

【 0 0 5 4 】

A 1 . 1 . 画像復元モデルを適用することが、畳み込みニューラルネットワーク (C N N) を適用することを含む、段落 A 1 に記載の方法。

10

【 0 0 5 5 】

A 1 . 1 . 1 . 機械学習モデルが、畳み込みニューラルネットワーク (C N N) 、敵対的生成ネットワーク (G A N) 、および / またはニューラルネットワークの 1 つである段落 A 1 . 1 に記載の方法。

【 0 0 5 6 】

A 1 . 1 . 2 . 機械学習モデルが、サンプルの特徴および復元画像の背景の特徴を認識するようにトレーニングされ、サンプルが、サンプルの特徴および復元画像の背景の特徴の両方に基づいて位置特定される、段落 A 1 . 1 ~ A 1 . 1 . 1 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 5 7 】

20

A 1 . 2 . 1 つ以上の顕微鏡設定に基づいて、一連のアルゴリズムの最良アルゴリズムを決定することをさらに含み、画像復元モデルを適用することが、復元画像を生成するように、サンプルの低 $k e V$ イオンビーム画像に最良アルゴリズムを適用することを含む、段落 A 1 ~ A 1 . 1 . 2 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 5 8 】

A 1 . 2 . 1 . 最良アルゴリズムが、機械学習モデルである、段落 A 1 . 2 に記載の方法。

【 0 0 5 9 】

A 1 . 2 . 2 . 一連のアルゴリズムの各アルゴリズムが、機械学習モデルである、段落 A 1 . 2 ~ A 1 . 2 . 1 のいずれかに記載の方法。

30

【 0 0 6 0 】

A 1 . 3 . 1 つ以上の顕微鏡設定に基づいて、一連のアルゴリズムからアルゴリズムの組み合わせを決定することをさらに含み、画像復元モデルを適用することが、復元画像を生成するように、サンプルの低 $k e V$ イオンビーム画像にアルゴリズムの組み合わせを適用することを含む、段落 A 1 ~ A 1 . 2 . 2 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 6 1 】

A 2 . 荷電粒子顕微鏡でサンプルを検査および / または分析することをさらに含み、段落 A 1 ~ A 1 . 3 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 6 2 】

A 3 . サンプルが、薄板である、段落 A 1 ~ A 2 のいずれかに記載の方法。

40

【 0 0 6 3 】

A 3 . 1 . 薄板が基準を含み、サンプルが、基準に少なくとも部分的に基づいて、復元画像内に配置されている、段落 A 3 に記載の方法。

【 0 0 6 4 】

A 4 . イオンビームを使用してサンプル材料からサンプルを生成することをさらに含み、サンプルを生成することが、

イオンビームでサンプルを成形するように、サンプル材料の領域上に 1 回以上の平削りステップを実施することと、

サンプルをサンプル操作プローブに取り付けることと、

イオンビームでサンプル材料からサンプルを分離することと、を含む、段落 A 1 ~ A 3

50

． 1 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 6 5 】

A 4 . 1 . 1 つ以上の平削りステップが、高 k e V 設定で動作するイオンビームで処理される、段落 A 4 に記載の方法。

【 0 0 6 6 】

A 4 . 1 . 1 . 高 k e V 設定が、 1 6 k e V 、 3 0 k e V 、 および / または 5 0 k e V 以上で第 2 の動作値で動作するように設定されているイオンビームを含む、段落 A 4 . 1 に記載の方法。

【 0 0 6 7 】

A 4 . 2 . サンプルをサンプルホルダーに取り付けることをさらに含み、サンプルを照射することは、サンプルがサンプルホルダーに取り付けられたときに、低 k e V 設定でイオンビームでサンプルを照射することに対応する、段落 A 4 ~ A 4 . 1 のいずれかに記載の方法。

10

【 0 0 6 8 】

A 4 . 3 . サンプルが低 k e V 設定でイオンビームで照射されるときに、サンプルの表面が、サンプルの作成中にイオンビームによって引き起こされた損傷を含み、イオンビームでのサンプルの低 k e V 平削りが、サンプルの表面から損傷を取り除く、段落 A 4 ~ A 4 . 2 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 6 9 】

A 5 . イオンビームの低 k e V 設定を設定することをさらに含む、段落 A 1 ~ A 4 . 3 のいずれかに記載の方法。

20

【 0 0 7 0 】

A 5 . 1 . 低 k e V 設定が、 2 0 0 e V 、 5 0 0 e V 、 1 k e V 、 2 k e V 、 5 k e V 、 8 k e V 、 および / または 1 6 k e V 以下の動作値で動作するように設定されているイオンビームを含む、段落 A 1 ~ A 5 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 7 1 】

A 6 . 復元画像内のサンプルを自動的に識別することをさらに含む、段落 A 1 ~ A 5 . 2 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 7 2 】

A 6 . 1 . 復元画像の特徴を識別すること、特徴に基づいて、復元画像内のサンプルの位置および / または方向を決定すること、段落 A 6 に記載の方法。

30

【 0 0 7 3 】

A 6 . 2 . 復元画像および / または復元画像の識別された特徴をユーザーに提示することをさらに含む、段落 A 6 ~ A 6 . 1 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 7 4 】

A 7 . 復元画像内でサンプルを位置特定することは、サンプルの少なくとも一部分を含む、復元画像の領域を低エネルギー平削りマッピングと関連付けることを含む、段落 A 1 ~ A 6 . 2 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 7 5 】

A 7 . 1 . 低エネルギー平削りマッピングが、復元画像上に配置される、グラフィックを含み、サンプルの低 k e V 平削りを実施することは、グラフィックによって覆われている、復元画像において示されるようにサンプルの一部分に対応する、サンプルの領域を、イオンビームで低 k e V 平削りに、対象とすることを含む、段落 A 7 に記載の方法。

40

【 0 0 7 6 】

A 7 . 1 . 1 . グラフィックが、矩形である、段落 A 7 . 1 に記載の方法。

【 0 0 7 7 】

A 7 . 1 . 2 . グラフィックが、ユーザーインターフェースを介してユーザーによって配置される、段落 A 7 . 1 ~ A 7 . 1 . 1 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 7 8 】

A 7 . 1 . 3 . グラフィックが、システムによって自動的に配置される、段落 A 7 . 1

50

～ A 7 . 1 . 2 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 7 9 】

A 7 . 1 . 3 . 1 . グラフィックが、追加的機械学習アルゴリズムを使用して配置される、段落 A 7 . 1 . 3 に記載の方法。

【 0 0 8 0 】

A 7 . 1 . 3 . 2 . グラフィックが、エッジ検出アルゴリズムを使用して配置される、段落 A 7 . 1 . 3 に記載の方法。

【 0 0 8 1 】

A 7 . 1 . 3 . 3 . グラフィックが、テンプレートマッチングを使用して配置される、段落 A 7 . 1 . 3 に記載の方法。

【 0 0 8 2 】

A 7 . 1 . 3 . 4 . グラフィックが、特徴ベースマッチングを使用して配置される、段落 A 7 . 1 . 3 に記載の方法。

【 0 0 8 3 】

A 7 . 1 . 3 . 4 . グラフィックユーザーインターフェース上に、システムによって自動的に配置されたグラフィック、および承認のための要求で復元画像を提示することをさらに含み、サンプルの低 k e V 平削りが、承認の了承に少なくとも部分的に基づいて実施される、段落 A 7 . 1 . 3 ～ A 7 . 1 . 3 . 2 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 8 4 】

A 8 . イオンビームでサンプルの低 k e V 平削りを実施することは、イオンビームで切断ステップを実施することを含む、段落 A 1 ～ A 7 . 1 . 3 . 3 のいずれかに記載の方法。

【 0 0 8 5 】

B 1 .
サンプルを保持するように構成されたサンプルホルダーと、
イオンビームでサンプルを照射するように構成されたイオン源と、
イオンビームでの照射に应答してサンプルによって放出された荷電粒子に基づいて、サンプルの画像をキャプチャするように構成された撮像システムと、
1 つ以上の処理ユニットと、
1 つ以上の処理ユニットによって実行されるときに、段落 A 1 ～ A 8 のいずれかに記載の方法を、荷電粒子顕微鏡システムに実施させる、コンピュータ可読命令を格納するメモリと、を備える、荷電粒子顕微鏡システム。

【 0 0 8 6 】

C 1 . 段落 B 1 の荷電粒子顕微鏡システムの使用。

【 0 0 8 7 】

本明細書に記載のシステム、装置、および方法は、多少なりとも制限的なものとして解釈されるべきではない。代替的に、本開示は、単独で、ならびに相互の様々な組み合わせおよび部分的な組み合わせにおいて、様々な開示された実施形態のすべての新規性および非自明性を有する特徴および態様を対象とする。開示されたシステム、方法、および装置は、任意の特定の態様または特徴もしくはそれらの組み合わせに限定されず、開示されたシステム、方法、および装置は、任意の 1 つ以上の特定の利点が存在する、または問題が解決されることも必要としない。いずれの動作理論も説明を容易にするためであるが、開示されたシステム、方法、および装置は、そのような動作理論に限定されない。

【 0 0 8 8 】

開示された方法のいくつかの動作は、便宜的な提示のため、特定の順番で記載されているが、以下に記載される具体的な用語によって特定の順序が要求されない限り、この説明様式が並び替えを包含することを理解されるものとする。例えば、順に記載される動作は、いくつかの場合において、並び替えられるかまたは同時に実施され得る。さらに、単純化のために、添付の図面は、開示されたシステム、方法、および装置が、他のシステム、方法、および装置とともに使用され得る様々な方式を示さないことがある。追加的に、記載は、開示された方法を記載するために、「決定する」、「識別する」、「製造する」およ

10

20

30

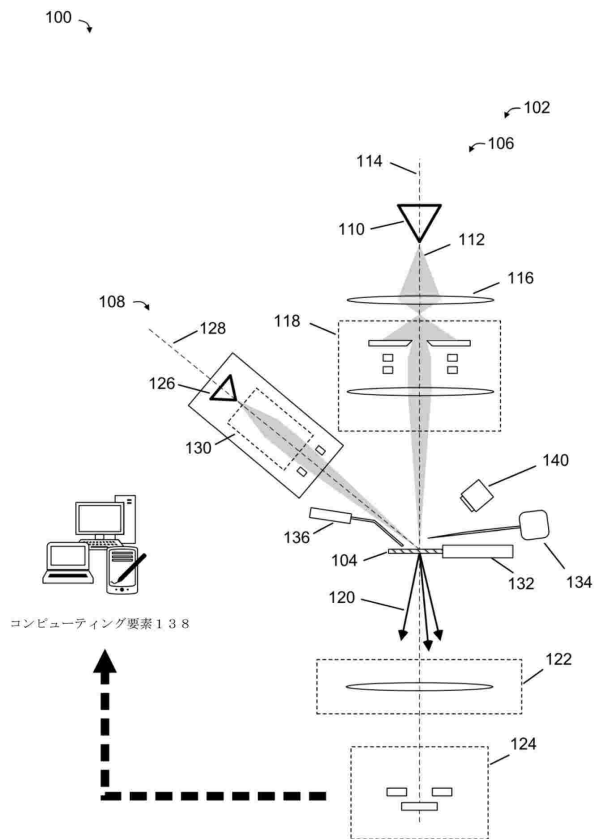
40

50

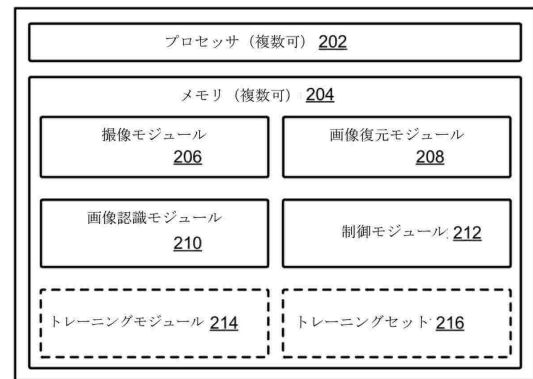
び「提供する」などの用語を使用することがある。これらの用語は、実施される実際の動作の高レベルの抽象化である。これらの用語に対応する実際の動作は、特定の実施態様に応じて、様々であり、当業者には容易に認識可能である。

【図面】

【 図 1 】



【 図 2 】



10

20

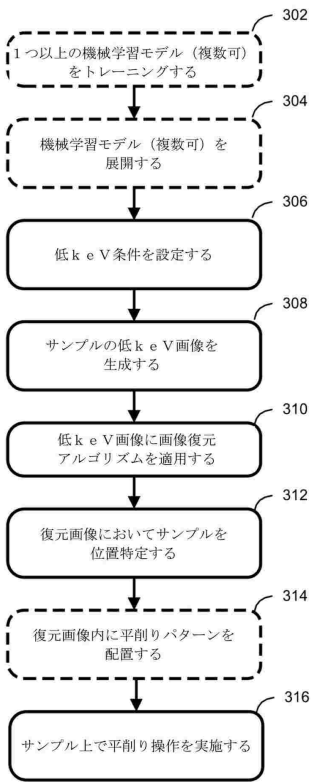
30

40

50

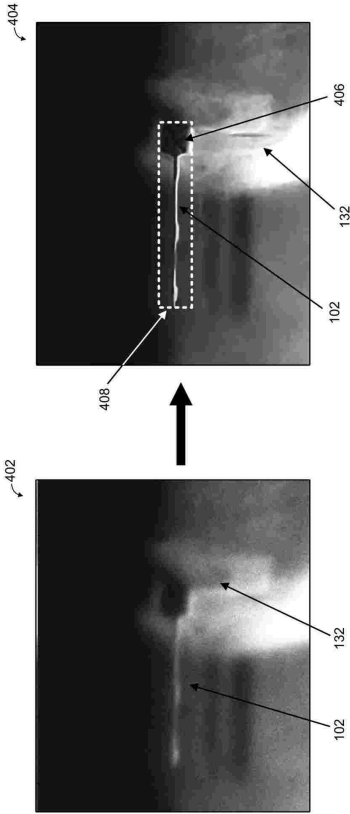
【図 3】

300 ↗



【図 4】

400 ↗



10

20

30

40

50

フロントページの続き

ト・ドーソン・クリーク・ドライヴ ５３５０ エフイーアイカンパニー内

(72)発明者 バヴェル ポトチェク
アメリカ合衆国 ９７１２４ - ５７９３ オレゴン州，ヒルズボロ ノースイースト・ドーソン・ク
リーク・ドライヴ ５３５０ エフイーアイカンパニー内

(72)発明者 マウリス ペーメン
アメリカ合衆国 ９７１２４ - ５７９３ オレゴン州，ヒルズボロ ノースイースト・ドーソン・ク
リーク・ドライヴ ５３５０ エフイーアイカンパニー内

(72)発明者 オンドレイ マチェク
アメリカ合衆国 ９７１２４ - ５７９３ オレゴン州，ヒルズボロ ノースイースト・ドーソン・ク
リーク・ドライヴ ５３５０ エフイーアイカンパニー内

審査官 藤田 健

(56)参考文献 特表２０１５ - ５２５９５９（ＪＰ，Ａ）
 米国特許出願公開第２００７／００１９８８７（ＵＳ，Ａ１）
 特開２０１７ - ６９１８６（ＪＰ，Ａ）
 特開２０１４ - ０４８２８５（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野 (Int.Cl.，ＤＢ名)
 H 0 1 J 3 7 / 0 0
 G 0 1 N 1 / 2 8