

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6920882号  
(P6920882)

(45) 発行日 令和3年8月18日(2021.8.18)

(24) 登録日 令和3年7月29日(2021.7.29)

(51) Int.Cl.	F 1
G 0 6 F 30/10	(2020.01) G 0 6 F 30/10 2 0 0
G 0 6 F 30/23	(2020.01) G 0 6 F 30/23
B 3 3 Y 50/00	(2015.01) B 3 3 Y 50/00
B 2 2 F 3/105	(2006.01) B 2 2 F 3/105
B 2 2 F 3/16	(2006.01) B 2 2 F 3/16

請求項の数 20 外国語出願 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2017-100213 (P2017-100213)
(22) 出願日	平成29年5月19日 (2017.5.19)
(65) 公開番号	特開2017-215957 (P2017-215957A)
(43) 公開日	平成29年12月7日 (2017.12.7)
審査請求日	令和2年5月14日 (2020.5.14)
(31) 優先権主張番号	62/339, 203
(32) 優先日	平成28年5月20日 (2016.5.20)
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国 (US)

(73) 特許権者	512293770 ダッソー システムズ シムリア コーポ レイション アメリカ合衆国 0 2 9 1 9 ロードアイ ランド州 ジョンストン アトウッド ア ベニュー 1 3 0 1 スイート 1 0 1 ダ ブリュ
(74) 代理人	110001243 特許業務法人 谷・阿部特許事務所
(72) 発明者	ヴィクター ジョージ オアンチェア アメリカ合衆国 0 2 8 1 8 ロードアイ ランド州 イースト グリニッジ キャバ リエ ドライブ 3 5

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】付加製造のスケーラブル有限要素シミュレーション

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

実世界オブジェクトの付加製造をシミュレーションする方法であって、  
メモリと通信するプロセッサによって、任意密度の任意メッシュを用いて、前記実世界  
オブジェクトの表現を複数の有限要素に離散化するステップであって、前記有限要素は前  
記実世界オブジェクトの幾何学的部分の表現である、ステップと、

前記有限要素を前記メモリに記憶するステップと、

前記プロセッサによって、実世界の付加製造シーケンスを、前記実世界オブジェクトを  
製造するために実世界付加製造装置によって用いられるように、時間の関数として決定す  
るステップであって、前記付加製造シーケンスは複数の時間ステップを含み、前記有限要  
素によって表される前記実世界オブジェクトの前記幾何学的部分を製造する順序を示す、  
ステップと、

前記付加製造シーケンスの各時間ステップに対して、

前記プロセッサによって、前記付加製造シーケンスに従って、前記有限要素のうちの  
有限要素の任意の幾何学的層の製造をシミュレーションするステップと、

前記プロセッサによって、前記付加製造シーケンスに従って、前記幾何学的層の対応  
する位置におけるシミュレーションされた熱流束のシーケンスを決定するステップであつ  
て、前記シミュレーションされた熱流束は、前記幾何学的層の前記製造をシミュレーション  
するときに、前記幾何学的層内の、シミュレーションされる付加製造装置の熱源の経路  
および強度を考慮する、ステップと、

前記幾何学的層に対応する前記有限要素に関連して、前記シミュレーションされた熱流束の表現を前記メモリに記憶するステップと、

シミュレーションされる製造された層を有する各有限要素に対して、

前記プロセッサによって、前記有限要素の現在露出されている部分的表面積を決定するステップと、

前記プロセッサによって、前記有限要素の前記現在露出されている部分的表面積に基づいて、前記有限要素の冷却をシミュレーションするステップと、

前記メモリにおいて、前記有限要素の前記シミュレーションされた冷却に基づいて、前記有限要素に関連付けられた前記シミュレーションされた熱流束の前記表現を更新するステップと

を含むことを特徴とする方法。

#### 【請求項 2】

前記有限要素の前記現在露出されている部分的表面積を決定するステップは、前記プロセッサによって、前記メモリに記憶された前記有限要素に基づいて、他のアクティブな有限要素の表面ファセットに隣接して位置しない、有限要素の表面ファセットを決定するステップを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

#### 【請求項 3】

前記幾何学的層の対応する位置における前記シミュレーションされた熱流束のシーケンスを決定するステップは、前記プロセッサによって、前記付加製造シーケンスに従って、前記幾何学的層に対して、シミュレーションされた付加製造ツールの経路を解析するステップを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

#### 【請求項 4】

前記シミュレーションされた熱流束のシーケンスを決定するステップは、所与のシミュレーションされた熱流束に対して、前記プロセッサによって、前記対応する層の一部分における前記熱源の強度および持続時間を決定するステップを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

#### 【請求項 5】

前記有限要素に関連付けられた前記シミュレーションされた熱流束の前記表現を更新するステップは、前記有限要素の部分的体積および前記有限要素の部分的ファセット領域を、前記プロセッサによって決定し、前記メモリに記憶するステップを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

#### 【請求項 6】

前記有限要素の前記熱流束の前記表現を更新するステップは、前記プロセッサによって、前記有限要素の前記シミュレーションされた冷却、前記有限要素の前記決定された部分的体積、および前記有限要素の前記部分的ファセット領域に基づいて、前記有限要素を製造するために用いられるシミュレーションされる基板の状態を決定するステップを含むことを特徴とする請求項 5 に記載の方法。

#### 【請求項 7】

各有限要素に対して、隣接した有限要素のリスト、ならびに前記隣接した有限要素の前記部分的体積および部分的ファセット領域を、前記メモリに記憶するステップをさらに含むことを特徴とする請求項 5 に記載の方法。

#### 【請求項 8】

実世界オブジェクトの付加製造をシミュレーションする方法であって、

表現として前記実世界オブジェクトの複数の有限要素を記憶したメモリと通信するプロセッサによって、前記実世界オブジェクトを製造するために実世界付加製造装置によって用いられるように実世界の付加製造シーケンスを取得するステップであって、前記付加製造シーケンスは複数の時間ステップを含む、ステップと、

前記付加製造シーケンスの各時間ステップに対して、

前記プロセッサによって、前記付加製造シーケンスに従って、前記複数の有限要素のうちの有限要素の任意の幾何学的層の製造をシミュレーションするステップと、

10

20

30

40

50

前記プロセッサによって、前記付加製造シーケンスに従って、前記幾何学的層の対応する位置における1または複数のシミュレーションされた熱流束を決定するステップであって、前記シミュレーションされた熱流束は、前記幾何学的層の前記製造をシミュレーションするときに、前記幾何学的層内の、シミュレーションされる付加製造装置の熱源の経路および強度を考慮する、ステップと、

前記幾何学的層に対応する前記有限要素に関連して、前記シミュレーションされた熱流束の表現を前記メモリに記憶するステップと、

シミュレーションされる製造された層を有する各有限要素に対して、

前記プロセッサによって、前記有限要素の現在露出されている部分的表面積を決定するステップと、

前記プロセッサによって、前記有限要素の前記現在露出されている部分的表面積に基づいて、前記有限要素の冷却をシミュレーションするステップと、

前記メモリにおいて、前記有限要素の前記シミュレーションされた冷却に基づいて、前記有限要素の前記熱流束の前記表現を更新するステップと  
を含むことを特徴とする方法。

#### 【請求項9】

前記有限要素の前記現在露出されている部分的表面積を決定するステップは、前記プロセッサによって、前記メモリに記憶された前記有限要素に基づいて、他のアクティブな有限要素の表面ファセットに隣接して位置しない、有限要素の表面ファセットを決定するステップを含むことを特徴とする請求項8に記載の方法。

#### 【請求項10】

前記幾何学的層の対応する位置における前記シミュレーションされた熱流束を決定するステップは、前記プロセッサによって、前記付加製造シーケンスに従って、前記幾何学的層に対して、シミュレーションされた付加製造ツールの経路を解析するステップを含むことを特徴とする請求項8に記載の方法。

#### 【請求項11】

前記シミュレーションされた熱流束を決定するステップは、所与の熱流束に対して、前記プロセッサによって、前記対応する層の一部分における前記熱源の強度および持続時間を決定するステップを含むことを特徴とする請求項8に記載の方法。

#### 【請求項12】

前記有限要素に関連付けられた前記シミュレーションされた熱流束の前記表現を更新するステップは、前記有限要素の部分的体積および前記有限要素の部分的ファセット領域を、前記プロセッサによって決定し、前記メモリに記憶するステップを含むことを特徴とする請求項8に記載の方法。

#### 【請求項13】

前記有限要素の前記熱流束の前記表現を更新するステップは、前記プロセッサによって、前記有限要素の前記シミュレーションされた冷却、前記有限要素の前記決定された部分的体積、および前記有限要素の前記部分的ファセット領域に基づいて、前記有限要素を製造するために用いられるシミュレーションされる基板の状態を決定するステップを含むことを特徴とする請求項12に記載の方法。

#### 【請求項14】

各有限要素に対して、隣接した有限要素のリスト、ならびに前記隣接した有限要素の前記部分的体積および部分的ファセット領域を、前記メモリに記憶するステップをさらに含むことを特徴とする請求項12に記載の方法。

#### 【請求項15】

実世界オブジェクトの付加製造をシミュレーションするためのシステムであって、

前記実世界オブジェクトの複数の有限要素を記憶したデータストアであって、前記有限要素は、任意密度の任意メッシュに従った、前記実世界オブジェクトの幾何学的部分の表現である、データストアと、

前記データストアと通信し、複数の時間ステップを含む付加製造シーケンスに従って、

10

20

30

40

50

前記実世界オブジェクトを製造する、実世界付加製造装置をシミュレーションするように構成されたハードウェアプロセッサと、

前記ハードウェアプロセッサおよび前記データストアと通信し、前記付加製造シーケンスの特定の時間ステップを前提として、(i)前記付加製造シーケンスの前記特定の時間ステップにおいて、前記シミュレーションされる付加製造装置によって影響を受ける有限要素に対する、付加された体積および部分的ファセット領域を決定し、(ii)前記付加製造シーケンスの前記特定の時間ステップにおいて、前記有限要素に対する熱流束事象および位置を決定するように構成された交差モジュールと

を備え、

前記ハードウェアプロセッサは、前記実世界付加製造装置をシミュレーションすることにおいて、前記付加製造シーケンスの各時間ステップに対して、

前記時間ステップを前記交差モジュールにもたらし、

前記交差モジュールから、前記付加製造シーケンスの前記特定の時間ステップにおいて、前記シミュレーションされる付加製造装置によって影響を受ける有限要素に対する、付加された体積および部分的ファセット領域を受け取り、

前記影響を受けた有限要素の各有限要素に対して、前記有限要素に対する前記付加された体積および部分的ファセット領域を用いて、前記データストアに記憶された前記有限要素を更新し、前記有限要素に対する前記付加された体積および部分的ファセット領域に基づいて、前記有限要素の現在露出されている部分的表面積を決定し、

前記交差モジュールから、前記有限要素に対する熱流束事象および関連付けられた位置を受け取り、

前記受け取られた熱流束事象の各熱流束事象に対して、前記関連付けられた位置に基づいて、前記データストアに記憶された、対応する有限要素に関連付けられたノード熱流束を更新し、

前記有限要素の前記現在露出されている部分的表面積に基づいて、各有限要素の冷却を決定し、

前記ノード熱流束に対応する前記有限要素の前記決定された冷却に基づいて、各ノード熱流束を更新する

ように構成されることを特徴とするシステム。

#### 【請求項16】

前記データストアは、前記データストアに記憶された各有限要素に対して、隣接した有限要素のリストをさらに含み、前記ハードウェアプロセッサは、所与の有限要素に対する、前記隣接した有限要素のリストに基づいて、前記所与の有限要素の前記現在露出されている部分的表面積を決定するように構成されることを特徴とする請求項15に記載のシステム。

#### 【請求項17】

前記データストアは、隣接した有限要素の各リスト内の各隣接した有限要素に対して、前記隣接した有限要素がアクティブであるかどうかの表示をさらに含み、前記ハードウェアプロセッサは、前記所与の有限要素に対する、前記隣接した有限要素のリスト、および各隣接した有限要素がアクティブであるかどうかの前記関連付けられた表示に基づいて、所与の有限要素の前記現在露出されている部分的表面積を決定するように構成されることを特徴とする請求項16に記載のシステム。

#### 【請求項18】

前記ハードウェアプロセッサは、前記交差モジュールに、前記シミュレーションされる付加製造装置のノード座標をもたらすようにさらに構成されることを特徴とする請求項15に記載のシステム。

#### 【請求項19】

前記交差モジュールは、前記付加製造シーケンスの所与の時間ステップにおいて、前記シミュレーションされる付加製造装置のシミュレーションされる熱源の、強度および経路に基づいて、熱流束事象を決定するように構成されることを特徴とする請求項15に記載

10

20

30

40

50

のシステム。

【請求項 20】

前記ハードウェアプロセッサは、前記有限要素の前記シミュレーションされた冷却、および前記熱流束事象に基づいて、前記有限要素を製造するために用いられる、シミュレーションされる基板の状態を決定し、前記データストアに記憶するようにさらに構成されることを特徴とする請求項 15 に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

関連出願の相互参照

10

本出願は、2016年5月20日に出願した米国特許仮出願第 62/339,203 号の利益を主張するものである。上記出願の教示全体は、参照により本明細書に組み込まれる。

【背景技術】

【0002】

3D印刷技術の勢いは、近年において著しい。多くのプリンタ製造業者が存在し、新しい会社が一夜にして現れるようである。この新しい開発の波にも関わらず、多くの場合（ほとんどではないにしても）、技術の信頼性は限られ、印刷または付加製造（「AM」）された部品は、従来の技術を用いて製造された部品と比べたときに、標準より下の強度および疲労寿命に繋がる欠陥を被る。このマイナスの側面は、技術の広がりを大幅に制限する。プロセスへの洞察をもたらし、それにより AM 部品の品質の向上における進歩が達成され得るような、コンピュータシミュレーションが求められる。

20

【0003】

付加製造プロセスの多くの物理現象関連の側面は、鋳造および溶接などの従来の製造技術のいくつかと同様である。高温の流体状態の材料が加えられ、次いでそれが冷却する。付加製造において材料は、溶融状態で増分的に加えられ、または移動する熱源（例えばレーザ）によって溶融状態にもたらされ、その後に連続的に進展する表面上で冷却が生じる。AM に伴う、特に金属製作に伴う追加の課題は、製造時に対処しなければならない時間および長さスケールにおける大きな差異に関係し、「処置」ゾーンにおける非常に局在した、急速に進展する物理現象の一方、全体の部品に対する製造プロセスは数時間またはおそらく数日かかる。

30

【0004】

付加製造プロセスのいくつかの側面をシミュレーションするための数値的技法を開発する努力は数多くあり、研究者から応用研究商業事業体までの科学者およびエンジニアのいくつかのグループに広がる。このようなプロセスをコンピュータシミュレーションによって捕捉 / 予測する難しさは多くあり、以下を含む：（1）溶融 / 固体化物理現象（ミリ秒）、および典型的な部品の全体の製造時間（機械上の数時間の印刷）の非常に異なる時間スケール、（2）溶融プールに関連付けられる数ミクロンから、典型的な部品をモデル化するのに必要な数百ミリメートルまでの、スケール長さの広い範囲、（3）高度に異方性な材料の最終特性（最終的熱処理の前の）に繋がる、「処置」ゾーンの周りの急速に進展する高い温度勾配、（4）適切なモデルが使用されると仮定して上記のすべてを捕捉するためには、このようなプロセスをモデル化するために、非常に大きなシミュレーション時間が通常必要となる。

40

【0005】

これらすべての課題に対処するために、新規な数値的方式を開発することが必要になる。以下は既存の技術の例であり、そのそれぞれは上述の問題を解決しない。

【0006】

3DSIM は、有限要素に基づく効率的な数値シミュレーション技術を開発すると主張する会社である。3DSIM の方法は、先進の金属モデル化構造拳動を活用しながら、適応型メッシュ微細化 / 粗大化技法をうまく利用していると思われる。（例えば、非特許文

50

献 1 参照）。この技術は、レーザ溶融 / 焼結 AM アプリケーションを対象としており、「処置」ゾーン（例えば現在のレーザ位置）における自動化されたメッシュ微細化技法を使用する。しかしこれは、実際のレーザ経路情報、および部品全体にわたるリコータ / スプレッダバーを活用していない。その結果、部品全体に対する対流および放射による全体的な冷却は、結果として正確さおよび / 予測性を失う。さらにメッシュの自動化された微細化 / 粗大化は、解析が複数の CPU 上（特に多数の CPU 上）で並行して実行されるとき、全体の計算性能に対してマイナス要素を有する。

#### 【 0 0 0 7 】

PAN COMPUTING は、有限要素をベースとするソリューションを活用する会社の他の例である。PAN COMPUTING の方法も適応型メッシュ微細化技法を組み込み、印刷プロセス時の望ましくない歪みを予測することが可能である。（例えば、非特許文献 2 参照）。技術は 3DSIM と同様であり、同様な制限に直面する。

10

#### 【 0 0 0 8 】

米国国立研究所もまたこのトピックに投資しており、ロスアラモスおよびローレンス・リバモアが活動をリードしている。ロスアラモスでは、長期にわたり存在してきた鋳造シミュレーションソフトウェアが、現在、AM プロセスを数値的に研究するために適応化 / 再利用化されている（www.lanl.gov で利用可能な Truchas 鋳造ソフトウェアを参照）。ローレンス・リバモアでは、粉末から液体へ、固体への相転移の複雑な物理現象を微小規模で対処するために、包括的なシミュレーション技術が開発されており、非常に小さな部品に対する残留応力を予測することを試みている。（例えば、非特許文献 3 参照）。米国国立研究所は、部品レベルシミュレーションに対する正確な予測には焦点を当てていないように思われる。代わりに彼等は、現実的な部品に関する限り、全体的な挙動には十分な注意を払わずに、非常に小さなスケールのモデルにおける基本的挙動の理解に多くの努力を費やしているように思われる。

20

#### 【 0 0 0 9 】

このトピックを調査している研究者は、ここで包括的なやり方で列挙するには数が多すぎる。多くは文献（例えば、非特許文献 4 参照）で述べられているものなど、もともと溶接または鋳造のために開発された古い既存のモデルを活用している。より最近の研究（例えば、非特許文献 5 参照）は、大体、非常に有用で実用的な、高性能の材料構造挙動モデルに焦点を当てている。すべての種類の研究者はまた国立研究所と同様に、スケーラブルな予測的ソリューションに対する部品レベルシミュレーションに焦点を当てていない。部品レベルの提示が含められたとき、現実的な部品への対処における技術の不足に対応するために、形状に関連付けられた幾何形状は大幅に単純化される。

30

#### 【 0 0 1 0 】

熱処理に関するアプリケーションの数値モデル化は、金属の場合において、モデル化されつつある部品の全体にわたって、冶金学的変形のモデル化において重要な関連性を有する。（例えば、非特許文献 6 参照）。熱処理ソフトウェアパッケージは、多様な観点から AM プロセスシミュレーションに対して非常に関連性があるが、厳しい制限を受け、局所的な熱的側面（レーザ加熱など）をシミュレーションする、および付加製造プロセスの進展する表面を管理する能力が不足する。

40

#### 【 0 0 1 1 】

従って様々な数値モデル化技術を開発するための数多くの先行する努力にも関わらず、これらの開発に関連するいくつかのかなり顕著な制限が存在する。

#### 【先行技術文献】

#### 【非特許文献】

#### 【 0 0 1 2 】

【非特許文献 1】www.3dsim.com、および I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing, Springer, New York

50

k, 2009

【非特許文献2】www.pancomputing.com、およびP. Michaleris, "Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes In situ monitoring." Finite Element Analysis and Design (2014) : 51 - 60

【非特許文献3】N. E. Hodge, R. M. Ferencz, J. M. Sölb erg, "Implementation of a thermomechanical model for the simulation of selective laser melting" Comput Mech (2014) 54 : 33 - 51

【非特許文献4】J. B. Leblond, "Mathematical Modelling of Transformation Plasticity in Steels," International Journal of plasticity, Vol 5, 573 - 591, 1989

【非特許文献5】Xipeng Tan, Yihong Kok, etc. "An experimental and simulation study on build thickness dependent microstructure for electron beam melted Ti6Al4V," Journal of Alloys and Compounds 646 (2015) 303 - 309

【非特許文献6】www.dante-solutions.com、およびB. Lynn Ferguson and Zhichao Li, "Using Simulation for Heat Treat Process Design: Matching the Quenching Process", ICTPMCS - 2010, 31 May - 2 June 2010, Shanghai, China

【発明の概要】

【0013】

本発明の実施形態は、部品レベルシミュレーションのための数値的方法を用いた、正確な、スケーラブル、および予測的3D印刷シミュレーションをもたらす。本発明の1つの例示の実施形態は、実世界オブジェクトの付加製造をシミュレーションする方法である。方法によればプロセッサは、任意密度の任意メッシュを用いて、実世界オブジェクトの表現を複数の有限要素に離散化し、有限要素は実世界オブジェクトの幾何学的部分の表現であり、有限要素はメモリに記憶される。実世界オブジェクトを製造するために実世界付加製造装置によって用いられることになる実世界の付加製造シーケンスは、時間の関数として決定され、付加製造シーケンスは複数の時間ステップを含み、有限要素によって表される実世界オブジェクトの部分を製造する順序を示す。付加製造シーケンスの各時間ステップに対して、プロセッサは、(i)付加製造シーケンスに従って、上記有限要素のうちの有限要素の任意の幾何学的層の製造をシミュレーションし、(ii)付加製造シーケンスに従って、有限要素の層の対応する位置におけるシミュレーションされた熱流束のシーケンスを決定し、シミュレーションされた熱流束は、層の製造をシミュレーションするときに、層内の、シミュレーションされる付加製造装置の熱源の経路および強度を考慮し、(iii)層に対応する有限要素に関連して、シミュレーションされた熱流束の表現をメモリに記憶し、(iv)シミュレーションされる製造された層を有する各有限要素に対して、有限要素の現在露出されている部分的表面積を決定し、有限要素の現在露出されている部分的表面積に基づいて、有限要素の冷却をシミュレーションし、メモリにおいて、有限要素のシミュレーションされた冷却に基づいて、有限要素に関連付けられたシミュレーションされた熱流束の表現を更新する。

【0014】

10

20

30

40

50

本発明の他の例示の実施形態も、実世界オブジェクトの付加製造をシミュレーションする方法であり、表現として実世界オブジェクトの複数の有限要素を記憶したメモリと通信するプロセッサが関わる。方法は、実世界オブジェクトを製造するために実世界付加製造装置によって用いられるように実世界の付加製造シーケンスを取得し、付加製造シーケンスは複数の時間ステップを含む。付加製造シーケンスの各時間ステップに対してプロセッサは、(i)付加製造シーケンスに従って、上記複数の有限要素のうちの有限要素の任意の幾何学的層の製造をシミュレーションし、(ii)付加製造シーケンスに従って、層の対応する位置における1または複数のシミュレーションされた熱流束を決定し、シミュレーションされた熱流束は、層の製造をシミュレーションするときに、層内の、シミュレーションされる付加製造装置の熱源の経路および強度を考慮し、(iii)層に対応する有限要素に関連して、シミュレーションされた熱流束の表現をメモリに記憶し、(iv)シミュレーションされる製造された層を有する各有限要素に対して、有限要素の現在露出されている部分的表面積を決定し、有限要素の現在露出されている部分的表面積に基づいて、有限要素の冷却をシミュレーションし、メモリにおいて、有限要素のシミュレーションされた冷却に基づいて、有限要素の熱流束の表現を更新する。

#### 【0015】

上記の方法のいくつかの実施形態において、有限要素の現在露出されている部分的表面積を決定するステップは、メモリに記憶された有限要素に基づいて、他のアクティブ有限要素表面ファセットに隣接して位置しない有限要素の表面ファセットを決定するステップを含むことができる。

#### 【0016】

上記の方法のいくつかの実施形態において、層の対応する位置におけるシミュレーションされた熱流束のシーケンスを決定するステップは、付加製造シーケンスに従って、層に対して、シミュレーションされた付加製造ツールの経路を解析するステップを含むことができ、シミュレーションされた熱流束のシーケンスを決定するステップは、所与のシミュレーションされた熱流束に対して、対応する層の一部分における熱源の強度および持続時間を決定するステップを含むことができる。

#### 【0017】

上記の方法のいくつかの実施形態において、有限要素に関連付けられたシミュレーションされた熱流束の表現を更新するステップは、有限要素の部分的体積および有限要素の部分的ファセット領域を決定し、メモリに記憶するステップを含むことができる。このような実施形態において、有限要素の熱流束の表現を更新するステップは、有限要素のシミュレーションされた冷却、有限要素の決定された部分的体積、および有限要素の部分的ファセット領域に基づいて、有限要素を製造するために用いられるシミュレーションされる基板の状態を決定するステップを含むことができ、または各有限要素に対して、隣接した有限要素のリスト、ならびにそれらの隣接した有限要素の部分的体積および部分的ファセット領域を、メモリに記憶するステップをさらに含むことができる。

#### 【0018】

本発明の他の例示の実施形態は、実世界オブジェクトの付加製造をシミュレーションするためのシステムであり、データストア、ハードウェアプロセッサ、および交差モジュールを含む。データストアは、実世界オブジェクトの複数の有限要素を記憶し、有限要素は、任意密度の任意メッシュに従った、実世界オブジェクトの幾何学的部分の表現である。ハードウェアプロセッサは、データストアと通信し、複数の時間ステップを含む付加製造シーケンスに従って、実世界オブジェクトを製造する、実世界付加製造装置をシミュレーションするように構成される。交差モジュールは、ハードウェアプロセッサおよびデータストアと通信し、付加製造シーケンスの特定の時間ステップを前提として、(i)付加製造シーケンスの特定の時間ステップにおいて、シミュレーションされる付加製造装置によって影響を受ける有限要素に対する、付加された体積および部分的ファセット領域を決定し、(ii)付加製造シーケンスの特定の時間ステップにおいて、有限要素に対する熱流束事象および位置を決定するように構成される。ハードウェアプロセッサは、実世界付加

10

20

30

40

50

製造装置をシミュレーションすることにおいて、付加製造シーケンスの各時間ステップに対して、(i) 時間ステップを交差モジュールにもたらし、(ii) 交差モジュールから、付加製造シーケンスの特定の時間ステップにおいて、シミュレーションされる付加製造装置によって影響を受ける有限要素に対する、付加された体積および部分的ファセット領域を受け取り、(iii) 影響を受けた有限要素の各有限要素に対して、有限要素に対する付加された体積および部分的ファセット領域を用いて、データストアに記憶された有限要素を更新し、有限要素に対する付加された体積および部分的ファセット領域に基づいて、有限要素の現在露出されている部分的表面積を決定し、(iv) 交差モジュールから、有限要素に対する熱流束事象および関連付けられた位置を受け取り、(v) 受け取られた各熱流束事象に対して、関連付けられた位置に基づいて、データストアに記憶された、対応する有限要素に関連付けられたノード熱流束を更新し、(vi) 有限要素の現在露出されている部分的表面積に基づいて、各有限要素の冷却を決定し、(vii) ノード熱流束に対応する有限要素の決定された冷却に基づいて、各ノード熱流束を更新するように構成される。

#### 【0019】

いくつかの実施形態においてデータストアは、データストアに記憶された各有限要素に対して、隣接した有限要素のリストを含むことができ、プロセッサは、所与の有限要素に対する、隣接した有限要素のリストに基づいて、所与の有限要素の現在露出されている部分的表面積を決定するように構成され得る。このような実施形態においてデータストアは、隣接した有限要素の各リスト内の各隣接した有限要素に対して、隣接した有限要素がアクティブであるかどうかの表示をさらに含むことができ、プロセッサは、所与の有限要素に対する、隣接した有限要素のリスト、および各隣接した有限要素がアクティブであるかどうかの関連付けられた表示に基づいて、所与の有限要素の現在露出されている部分的表面積を決定するように構成され得る。

#### 【0020】

いくつかの実施形態においてハードウェアプロセッサは、交差モジュールに、シミュレーションされる付加製造装置のノード座標をもたらすようにさらに構成され得る、または有限要素のシミュレーションされた冷却、および熱流束事象に基づいて、有限要素を製造するために用いられる、シミュレーションされる基板の状態を決定し、データストアに記憶するようにさらに構成され得る。

#### 【0021】

いくつかの実施形態において交差モジュールは、付加製造シーケンスの所与の時間ステップにおいて、シミュレーションされる付加製造装置のシミュレーションされる熱源の、強度および経路に基づいて、熱流束事象を決定するように構成され得る。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0022】

上記は、異なる図にわたって類似の参照記号は同じ部分を指す添付の図面に示される、以下の本発明の例示の実施形態のより具体的な説明から明らかになるであろう。図面は必ずしも原寸に比例して描かれておらず、代わりに本発明の実施形態を例示することに重点が置かれる。

【図1】付加製造プロセスを用いて製造されることになる複雑な形状の、任意メッシュ化を示す概略図である。

【図2】本発明の例示の実施形態による、有限要素の2つの層に沿った2つの例示の平面を示す、例示の有限要素を示す概略図である。

【図3】本発明の例示の実施形態による、図2の有限要素などの有限要素の例示の層を製造するために用いられる、例示の付加製造ツールの経路を示す概略図である。

【図4】本発明の例示の実施形態による、2つの例示の隣接の有限要素、有限要素の1つに付加された層、および有限要素の部分的表面積を示す概略図である。

#### 【図5】例示の全体的な付加製造ワークフローを示すプロック図である。

#### 【図6】本発明の例示の実施形態による、付加製造プロセスのシミュレーションを示すフ

10

20

30

40

50

口一図である。

【図7】本発明の例示の実施形態による、付加製造プロセスをシミュレーションするためのコンピュータ（またはデジタル処理）システムのブロック図である。

【図8】本発明の実施形態が実施され得る、例示のコンピュータネットワーク環境の概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0023】

以下は本発明の例示の実施形態の説明である。

【0024】

本発明の実施形態は、部品レベルシミュレーションのための数値的方法を用いた、正確な、スケーラブル、および予測的3D印刷シミュレーションをもたらし、以下の方法論を含む。

【0025】

メッシュ化：3D印刷プロセスがそれに対してモデル化されることになる、部品の幾何学的形状は、最初に有限要素により離散化される。任意メッシュ密度の任意メッシュが用いられ得る。このようなメッシュを用いることは、通常AM製作される部品は一様なメッシュが実際には可能でない非常に複雑な形状を有するので、解析プロセスの能率化を大きく改善する。任意メッシュ化を有するこのような複雑な形状の例は、図1に示される。

【0026】

機械情報：部品を製造することになる3D印刷機械に関する情報（例えば粉末再コティングシーケンス、レーザ走査経路、印刷ヘッドの材料堆積など）は、物理的機械によって用いられるような実際のデータから、正確さを失うことなく前処理される。従ってモデル化プロセスに関する限り、印刷機械が実際に用いることになる情報を簡略化することによって、正確さを失うことはない。

【0027】

交差：幾何学的意味において、有限要素メッシュを、印刷機械のツールの経路情報に「交差」させるために、「交差モジュール」と呼ばれる構成要素が用いられる。例えば粉末床リコータの現在の表面高さの情報が、任意の所与の時間において交差される要素の部分的要素体積を計算するために用いられ得る。図2は有限要素200を示し、シミュレーション時の2つの異なる時点における、2つの異なる部分的体積を示す。Pdは付加製造方向を示す。平面Piは、層Liにおける有限要素200の充填レベルを示す。平面Pjは、Liより後の時点での層Ljにおける有限要素200の充填レベルを示す。さらに、交差された要素のファセットの部分的領域が計算される。例えば有限要素が層Liまで充填されたとき、多角形A, B, Cの部分的領域は、I1, I2, B, Cとなる。交差は、部品のものとの形状、または解析時の部品の予測される変形された／歪まされた形状の現在の形状に基づくことができる。多くの実施形態では交差モジュールは、ソフトウェアを用いて実施され得る。

【0028】

漸進的要素アクティブ化：上述の部分的要素体積に基づいて、シミュレーション時の任意の所与のポイントにおいて、任意の特定の有限要素は、物質で完全に充填される、物質で部分的に充填される、または完全に空のいずれかである。交差モジュールは、この進展を精密なやり方で追跡する。部分的体積積分技法は、これらの部分的体積のそれぞれにおける様々な材料相または状態（例えば粉末、溶融液体状態、固体状態）を考慮するために使用される。任意の時間増分シーケンスが可能になる。例えば図2において、有限要素200のI1, I2, I3, I4多角形(Pi)の周りの薄いスライスは生の状態の材料（例えば粉末または液体）となり、それより下は固体（または部分的に液体）となり、それより上は空となるであろう。漸進的アクティブ化技術は、所与の要素に生の状態（例えば粉末）の材料が付加され得る、初期温度の厳密な指定を可能にする。これは、要素の積分ポイントの現在の温度と、所望の初期温度との差に基づいた、自動的に計算される等価な潜熱流束を適用することによって達成される。

10

20

30

40

50

## 【0029】

漸進的加熱計算：任意の時点において特定の熱バーストは、レーザ走査をベースとする A M プロセスに対して図 3 に例示されるように、熱源の実際の経路を考慮することによって計算される。図 3 は、上面交差平面（例えば、図 2 からの P j、上から見て）に関連付けられた断面図を示す。時間および空間の両方における加熱源の正確な表現のために、任意の数の加熱事象（図 3 に丸印 3 0 5 として示される、所与の位置における熱流束のシーケンスとして特性付けられる）が、要素ごと層ごとに計算される。図 3 において経路 3 1 0 は、機械情報に従ってレーザがとる経路を表す。図 3 の特定の実施形態において熱流束は、三角形の層の上のレーザの各通過によってカバーされる領域、およびレーザの強度に基づいて計算される。任意の時間増分シーケンスが可能になる。

10

## 【0030】

対流および放射による漸進的冷却：上記で論じられた部分的ファセット領域積分は、任意の所与の有限要素離散化に対する冷却に関する熱流束の非常に精密な算定を可能にする。図 4 に示されるように多角形 I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub> および側方の多角形 B, I<sub>2</sub>, I<sub>1</sub>, C の位置および表面積は、現在外部に露出された、製作されつつある部品の領域を、非常に精密に考慮するように、任意の時点において計算される。次いで放射および対流冷却は、正確に計算された領域に対して良好にモデル化ができる。

## 【0031】

本発明の実施形態は、多くの種類の付加製造プロセスの部品レベルシミュレーションに対する、高度にスケーラブルなソリューションをもたらす。これは S L M、D L M、P o l y j e t、インクジェット、および F D M 技術を含むが、それらに限定されない。いくつかの特定の利点は以下を含む：

20

## 【0032】

(1) 独立および任意メッシュ化を可能にする。複雑な部品は、機械に関連付けられた層（または任意の他の）情報を用いて、複雑な幾何形状を分割することを必要とせずに、好みの有限要素（F E）メッシュを用いて、通常のようにメッシュ化ができる。非常に複雑な部品に対してこの手法は、特別なメッシュ化技術を開発すること、または固有の人工的な、応力を集中させるものの影響を被るボクセルをベースとする手法に頼ることを必要とせずに、製作されつつある部品の形状のずっと良好な近似を可能にする。

## 【0033】

30

(2) 実際のツールの経路および実際の印刷時間（レーザ、電子ビーム、堆積ヘッド、リコータバーなど）を、これらの経路が実際の機械で用いられるかのように考慮する。これは実際の生産部品の複雑な幾何形状に従う、数千の層、数百万のセグメントを用いたツールの経路を含む。ユーザは、機械情報の近似を試みる必要はない。

## 【0034】

(3) 計算性能と正確さとの間を緩和するためのスケーラビリティ。単純に、非常に正確な基準ソリューションのためには、非常に微細なメッシュを用いることができ（通常は小さな部品に対して）、または計算上効率的なソリューションのためには、より粗大なメッシュを用いることができる（通常は、より大きな部品に対して）。F E メッシュの全範囲が用いられ得る。時間ステップサイズ、過渡挙動、数値的収束、および計算性能などの、各技術の固有の利点から恩恵を受けるように、陰的および陽的時間積分方式の両方に適用可能である。

40

## 【0035】

(4) 所与の F E メッシュに対して「交差」技術は、異なる材料（粉末、溶融液体状態、および固体状態などの生の状態）の体積が精密に考慮されるので、任意の量の体積ベースの積分（いずれの F E ソフトウェアにおいても典型的な動作）に対して、最良の結果を生じる。このソリューションは、必要に応じて追加の自動化されたメッシュ微細化技法と共に用いられ得る。

## 【0036】

(5) 局在した加熱効果が非常に良好に捕捉される。このような熱事象の位置、それら

50

の強度、およびそれらの持続時間は、メッシュを用いた熱源（高速で移動するレーザスポットなど）の「交差」計算により、メッシュ選択に直接依存せずに、非常に精密に捕捉される。

【0037】

(6) 対流および放射熱損失は、精密に計算された表面積上で算定され、これは任意の所与のメッシュ選択に対して、可能な限り精密になり得る。上述のように、冷却の大部分が生じる上面を精密に計算することにより、および部分的ファセット計算と一緒に、アクティブ／非アクティブ隣接要素のリストを保持することによって、冷却がその上で生じる表面積の正確さは、メッシュ離散化の選択をはるかに超える。

【0038】

全体的な付加製造ワークフローは、図5に示されるように、より多数のビルディングブロックを含む。この関連において、本明細書で述べられる様は、図5において丸で囲まれた2つのビルディングブロックに関連付けられる。より詳しくは、2つの丸で囲まれたブロックは、図6に示されるフローチャート600に従うことができる。チャートはアーキテクチャ上の詳細を含み、時間遷移熱伝達ソリューションのためのラグランジュFEコードに基づく。時間進行シーケンスは、時間遷移ソリューションにおいて通常遭遇する、典型的な増分シーケンスに従う。

【0039】

図6のフローチャート600は、その機能を実行するために以下のように、4つの主要なビルディングブロックを含む。

【0040】

(1) 解析ごとに1回の機能605、これは機械情報を、有限要素メッシュに「交差」させることに関連付けられた、効率的データ構造をセットアップする。

【0041】

(2) 機械データとFEメッシュとの間の幾何学的交差に関連付けられたデータはデータベースに記憶され、これは交差モジュール610の一部とすることができます。上述のようなFEメッシュとの粉末床交差上面、およびレーザ加熱バーストなどの、データの記憶および実際の計算をトリガするために、いくつかのアプリケーションプログラミングインターフェース(API)がもたらされ得る。

【0042】

(3) 部品を印刷するために必要な時間にわたる時間増分ループは、610、615、620および625に示される。これらは、陰時間積分ソリューションにおいて、非線形FEモデル化に関連付けられた通常のニュートン・ラプソループに、どれだけ多くの反復を要しても、増分ごとに1回トリガされる。機械データとFEメッシュとの間の実際の交差の計算はここで生じ、メッシュのもとの構成、または(結合された熱伝達・応力解析の場合)現在の変形された構成を用いることができる。必要なデータは記憶され、計算され、最終的に必要に応じてデータベースから抽出される。

【0043】

(4) 最後に、FEコードにおいて通常のように反復時に、必要な情報を専門のデータベースから取り出すことによって、外部熱流束(上記で詳述されたように加熱と冷却の両方)を適用するためのいくつかの計算が存在する。これらの計算は610および630に示される。

【0044】

上記の構成要素を実施するためのいくつかの例示のデータ構造は、有限要素データ構造を含むことができ、これはシミュレーションされることになるオブジェクトの有限要素に対して、(1)要素に関連付けられたノード番号、(2)要素に対する3Dにおけるノード座標、および(3)ノード変位(要素の変形された構成を計算するために用いられる)を記憶する。このようなデータ構造は、メモリにおいて、製作されることになる部品の要素の集合を表すために用いられる。このようなデータ構造はまた、メモリにおいて、印刷プロセス時に部品を固定するために用いられる支持物の要素の集合を表すために用いら

10

20

30

40

50

れ得る。

【0045】

上記の構成要素を実施するための例示のデータ構造はまた、機械処理情報を含むことができ、これは原材料到来情報を表すデータ、および移動する熱源情報を表すデータ（例えばレーザ、UVランプなど）を記憶する。原材料到来を表すデータは例えば、（1）原材料堆積構成要素の幾何形状（例えばノズル、スプレッダバー、インクジェット印刷バンクなど）、（2）材料堆積構成要素が材料の堆積を開始したときの時間および位置座標、および（3）材料堆積構成要素が材料の堆積を終了したときの時間および位置座標を、含むことができる。移動する熱源を表すデータは例えば、（1）熱源の幾何形状、（2）熱源がオンにされたときの時間および位置座標、および（3）熱源がオフにされたときの時間および位置座標を含むことができる。10

【0046】

上記の例示のデータ構造を用いて、本発明の例示の実施形態による交差モジュールは、シミュレーションの各増分において、機械処理情報と有限要素との間の交差を計算し、記憶することができる。このような交差は、（1）各有限要素に対して、材料堆積痕跡と有限要素との間の交差を計算し、（2）痕跡と有限要素の端部との交差の座標を記憶し、（3）増分に対して、対応する有限要素内の付加された原材料の質量中心を計算し、（4）各有限要素に対して、各移動する熱源の痕跡と、有限要素の端部との間の交差を計算し、（5）対応する要素において各移動する熱源によって費やされた時間の持続時間、および対応する要素において熱源によって覆われた領域の中心の位置を記憶すること、によって計算され得る。20

【0047】

図6のチャート600は、熱伝達ソリューションのための陰時間積分ソリューションに関連付けられるが、非常に似たワークフローが陽時間積分熱伝達ソリューションに関連付けられ得る。

【0048】

計算性能：使用され得る、より長い時間増分（モデル化するために必要な大きな物理時間を前提とすると、より少ない増分）のために、通常のワークフローが陰時間積分方式を用いることを想定するのは自然であるが、陽積分ソリューションは、処置ゾーンにおける、より高速な過渡現象を捕捉できるという固有の利点を提供する。陽時間積分FEコードは通常、多数のコアに対して、陰時間積分のものより良好にスケーリングできるという事実と組み合わされて、陽時間積分ソリューションは非常に魅力的となる。現実の部品に対するベンチマーク実行は、この点を実証している。部品歪みおよび残留応力に関心がある場合は、構造解析に対して同様なワークフローチャートが当てはまる。30

【0049】

上記の議論は、最初に熱伝達問題を解いて、その後に後続の応力解析における計算温度履歴の適用が続く、シーケンシャルワークフローを中心としている。これは通常、温度進展は応力に強く影響を及ぼす（例えば熱膨張、および温度が影響する相転移）が、機械的応力および歪みは大部分は温度進展に影響を及ぼさないので可能であるが、現在、結合された温度-応力ソリューションは容易に利用可能である。40

【0050】

デジタル処理環境

図7は本発明の例示の実施形態による、付加製造プロセスをシミュレーションするために用いられ得る、コンピュータベースのシステム720の簡略化されたブロック図である。システム720はバス725を備える。バス725は、システム720の様々な構成要素の間の相互接続部として働く。バス725には、キーボード、マウス、ディスプレイ、タッチスクリーンオーバーレイ、スピーカ、カメラ、センサフィード、コントローラなどの様々な入力および出力デバイスをシステム720に接続するための、入力/出力デバイスインターフェース728が接続される。中央処理装置(CPU)722はバス725に接続され、コンピュータ命令の実行をもたらす。メモリ727は、コンピュータ命令を実50

行するために用いられるデータに対する揮発性記憶をもたらす。ストレージ726は、オペレーティングシステム(図示せず)などのソフトウェア命令のために、不揮発性記憶をもたらす。具体的にはメモリ727および/またはストレージ726は、例えば図6に関連して詳述されたような付加製造プロセスをシミュレーションするための方法を実施するプログラム命令、および/またはモジュール600、605、610、615、620、625、および630により構成される。システム720はまた、クラウド、広域ネットワーク(WAN)およびローカルエリアネットワーク(LAN)を含む、当技術分野で知られている任意の多様なネットワークに接続するための、ネットワークインターフェース721を備える。

#### 【0051】

10

本明細書で述べられる例示の実施形態は、多くの異なる方法において実施され得ることが理解されるべきである。いくつかの例において、本明細書で述べられる様々な方法、システム、および装置は、それぞれ物理的、仮想、またはハイブリッド汎用コンピュータによって実施され得る。コンピュータシステム720は、例えばCPU722による実行のために、ソフトウェア命令をメモリ727または不揮発性ストレージ726にロードすることによって、本明細書で述べられる方法を実行する機械に変換され得る。

#### 【0052】

図8は、本発明の実施形態が実施され得る、コンピュータネットワーク環境860を示す。コンピュータネットワーク環境860において、サーバ831は、通信ネットワーク832を通じて、クライアント833a~nにリンクされる。環境860は、クライアント833a~nが、単独でまたはサーバ831と一緒に、本明細書で上述されたモジュールおよび/または方法のいずれか(例えば図6に関連して詳述された、例えば方法および/またはモジュール600、605、610、615、620、625、および630)を、実行することを可能にするために用いられ得る。上述の例示の実施形態は、多くの異なる方法で実施され得ることが理解されるべきである。いくつかの例において、本明細書で述べられる様々な方法および機械は、それぞれ物理的、仮想、またはハイブリッド汎用コンピュータ、またはコンピュータ環境860などのコンピュータネットワーク環境によって実施され得る。

20

#### 【0053】

30

実施形態およびその態様は、ハードウェア、ファームウェア、またはソフトウェアの形で実施され得る。ソフトウェアとして実施される場合、ソフトウェアは、プロセッサがソフトウェアまたはその命令のサブセットをロードすることを可能にするように構成された、任意の非一時的コンピュータ可読媒体に記憶され得る。次いでプロセッサは、命令を実行し、本明細書で述べられるやり方で動作する、または装置に動作させるように構成される。

#### 【0054】

40

さらにファームウェア、ソフトウェア、ルーチン、または命令は、データプロセッサの一定の処置および/または機能を行うものとして本明細書で述べられ得る。しかし本明細書に含まれるこのような記述は単に便宜上であり、このような処置は実際には、ファームウェア、ソフトウェア、ルーチン、命令などを実行するコンピュティングデバイス、プロセッサ、コントローラ、または他のデバイスから生じることが理解されるべきである。

#### 【0055】

フロー図、ブロック図、およびネットワーク図は、より多いまたは少ない要素を含むことができ、異なって構成され、または異なって表され得ることが理解されるべきである。しかしさらに、いくつかの実装形態は、実施形態の実行を示すブロックおよびネットワーク図、ならびにいくつかのブロックおよびネットワーク図が、特定の方法で実施されることを決定付け得ることが理解されるべきである。

#### 【0056】

それに従って他の実施形態もまた、多様なコンピュータアーキテクチャ、物理的、仮想、クラウドコンピュータ、および/またはそれらの何らかの組み合わせにおいて実施され

50

ることができ、従って本明細書で述べられるデータプロセッサは、説明の目的のためのみであり、実施形態を限定するものではない。

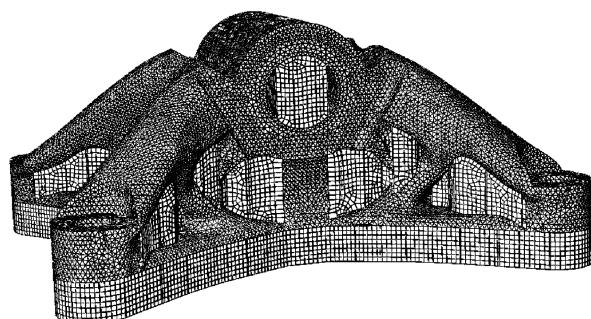
【0057】

本明細書において記載されたすべての特許、公開された出願、および参考資料の教示は、それらの全体が参照により組み込まれる。

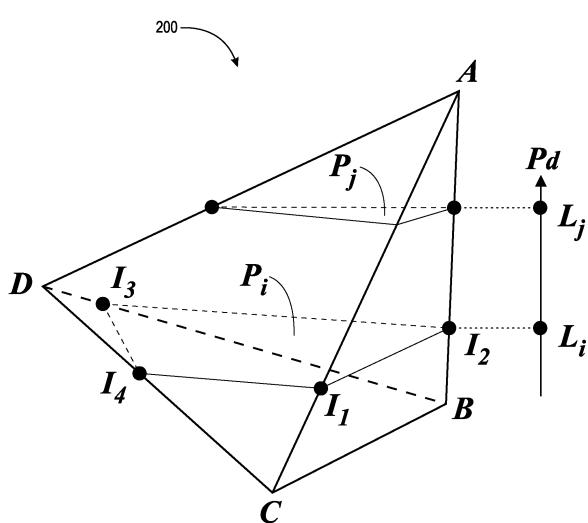
【0058】

本発明についてその例示の実施形態を参照して具体的に示され述べられたが、添付の特許請求の範囲によって包含される本発明の範囲から逸脱せずに、形および詳細において様々な変更がなされ得ることが、当業者により理解されるであろう。

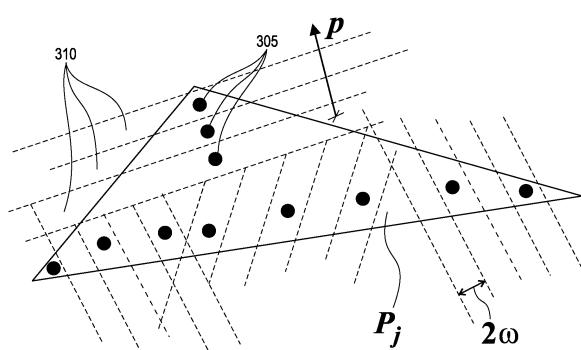
【図1】



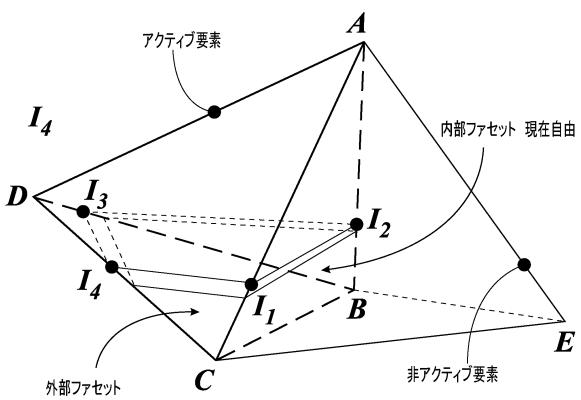
【図2】



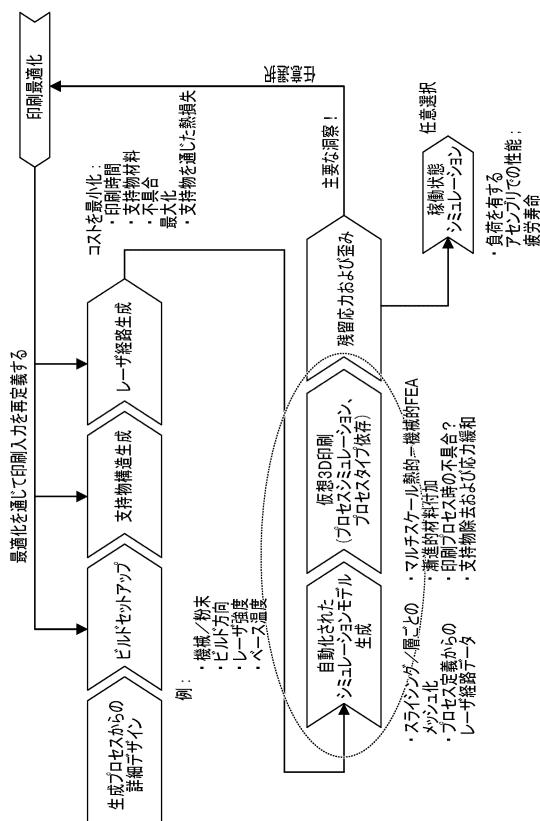
【図3】



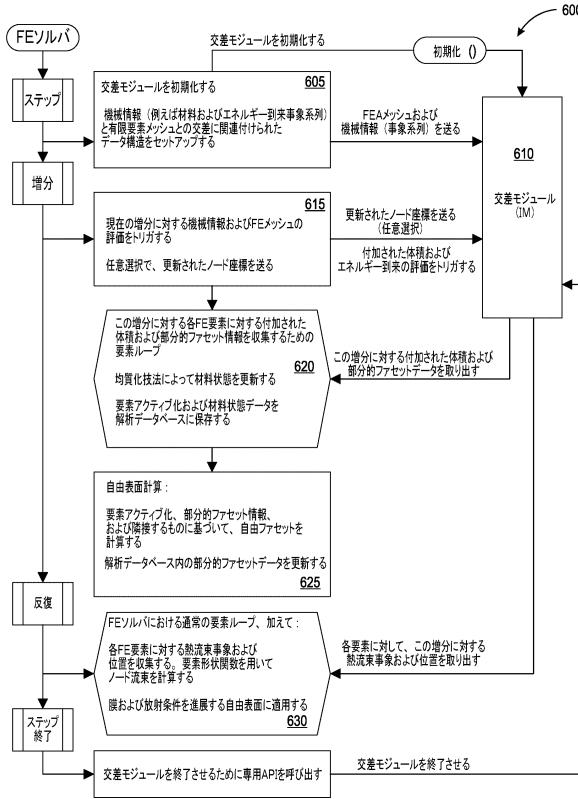
【図4】



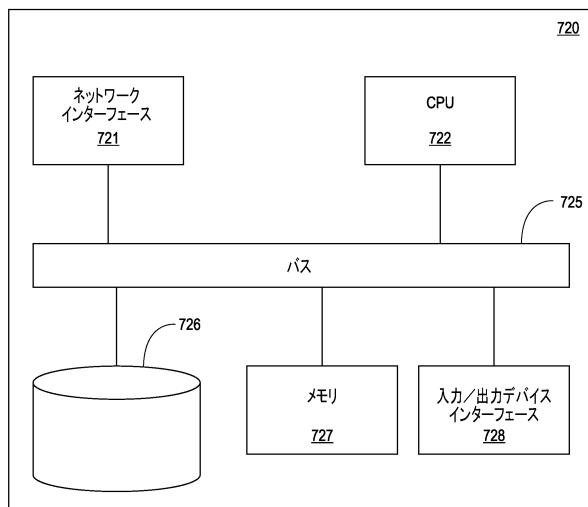
【 図 5 】



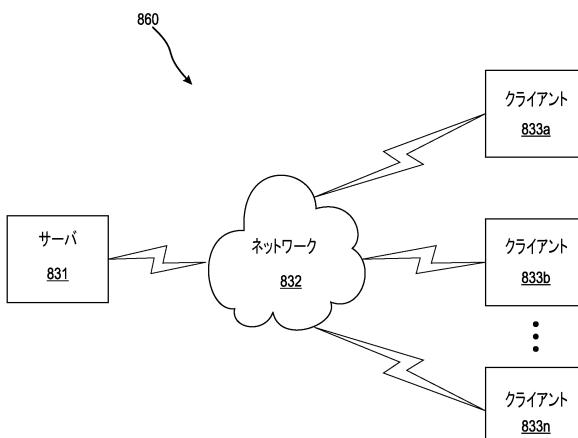
【図6】



【 义 7 】



【圖 8】



---

フロントページの続き

(72)発明者 ファン アントニオ ウルタド オルティス  
アメリカ合衆国 02906 ロードアイランド州 プロビデンス デックスターデール ロード  
56

(72)発明者 ブルース エンゲルマン  
アメリカ合衆国 02818 ロードアイランド州 イースト グリニッジ スプリング ストリ  
ート 170

(72)発明者 ウィリアム ジョン グライムス  
アメリカ合衆国 02025 マサチューセッツ州 コハセット ショート ストリート 13

審査官 合田 幸裕

(56)参考文献 國際公開第2016/043915 (WO, A1)  
國際公開第2015/184495 (WO, A1)  
米国特許出願公開第2015/0286757 (US, A1)  
TALAGANI Farid et al., Numerical Simulation of Big Area Additive Manufacturing (3D Pri  
nting) of a Full Size Car, Sampe Journal, 2015年07月, Vol. 51, No. 4, pages 27-36, イ  
ンターネット: <URL: [https://www.researchgate.net/publication/279532514\\_Numerical\\_Simu  
lation\\_of\\_Big\\_Area\\_Additive\\_Manufacturing\\_3D\\_Printing\\_of\\_a\\_Full\\_Size\\_Car](https://www.researchgate.net/publication/279532514_Numerical_Simu<br/>lation_of_Big_Area_Additive_Manufacturing_3D_Printing_of_a_Full_Size_Car)>

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

G 06 F 30 / 10  
G 06 F 30 / 23  
B 33 Y 50 / 00  
B 22 F 3 / 105  
B 22 F 3 / 16  
I E E E X p l o r e  
J S T P l u s ( J D r e a m I I I )