

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2008-47109

(P2008-47109A)

(43) 公開日 平成20年2月28日(2008.2.28)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード (参考)
G06F 17/50 (2006.01)	G06F 17/50 612H	5B046
	G06F 17/50 612J	
	G06F 17/50 680Z	

審査請求 未請求 請求項の数 14 O L (全 19 頁)

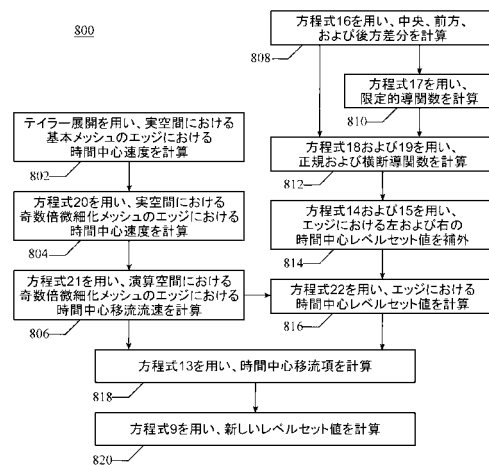
(21) 出願番号	特願2007-200444 (P2007-200444)	(71) 出願人	000002369
(22) 出願日	平成19年8月1日(2007.8.1)		セイコーエプソン株式会社
(31) 優先権主張番号	11/464374		東京都新宿区西新宿2丁目4番1号
(32) 優先日	平成18年8月14日(2006.8.14)	(74) 代理人	100095728
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 上柳 雅普
		(74) 代理人	100107261
			弁理士 須澤 修
		(74) 代理人	100127661
			弁理士 宮坂 一彦
		(72) 発明者	ジャン ダー ユー
			アメリカ合衆国 カリフォルニア州 サニ
			ーベール ボンダローザ アベニュー 9
			94 アパートB
		Fターム(参考)	5B046 AA07 JA09

(54) 【発明の名称】 第1流体、第2流体、および第1流体と第2流体との間のインタフェースの動きをシミュレートするプロセス

(57) 【要約】

【課題】 第1流体、第2流体、および第1流体と第2流体との間のインタフェースの動きをシミュレートするプロセス。

【解決手段】 第1流体および第2流体の流体速度および圧力が第1の時間ステップにおいて第1メッシュ上の第1組のノードにおいて計算される。流体速度および圧力は第1の時間ステップにおける第1流体および第2流体の動きを表す。レベルセットは第1の時間ステップにおけるインタフェースの位置を表すが、第2メッシュにおける第2組のノードにおいて計算される。第2メッシュは第1メッシュより奇数倍細かい。第1流体および第2流体の新規流体速度および圧力が第2の時間ステップにおいて第1組の点において計算される。第1流体および第2流体の新流体速度および圧力は第2の時間ステップにおける第1組のノードで計算されるが、第2の時間ステップにおける第1流体および第2流体の新



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

第 1 流体、第 2 流体、および前記第 1 流体と前記第 2 流体との間のインタフェースの動きをシミュレートするプロセスで、前記第 1 流体および前記第 2 流体の流体速度および圧力を、第 1 の時間ステップにおいて第 1 メッシュ上の第 1 組のノードで計算するステップで、これにより前記第 1 の時間ステップにおける前記第 1 流体および前記第 2 流体の動きを表すステップと、前記第 1 の時間ステップにおける前記インタフェースの位置を表すレベルセットを、前記第 1 メッシュより奇数倍細かい第 2 メッシュ上の第 2 組のノードで計算するステップと、前記第 1 流体および前記第 2 流体の新しい流体速度および圧力を、第 2 の時間ステップにおいて前記第 1 組のノードで計算するステップで、これにより前記第 2 の時間ステップにおける前記第 1 流体および前記第 2 流体の新しい動きを表すステップと、前記第 2 組のノードにおける新しいレベルセットを計算するステップで、これにより前記第 2 の時間ステップにおける前記インタフェースの新しい位置を表すステップを含むプロセス。

10

【請求項 2】

前記第 2 メッシュは前記第 1 メッシュより 3 倍細かい、請求項 1 に記載されるプロセス。

【請求項 3】

前記流体速度および圧力の計算は有限差分方法で行なわれる、請求項 1 に記載されるプロセス。

20

【請求項 4】

前記第 1 流体はインクで前記第 2 流体は空気である、請求項 1 に記載されるプロセス。

【請求項 5】

シミュレートされる前記動きは前記第 1 流体の一部がノズルから射出されることを含む、請求項 1 に記載されるプロセス。

【請求項 6】

前記第 1 メッシュおよび前記第 2 メッシュは物理的空間における四辺形メッシュである、請求項 1 に記載されるプロセス。

【請求項 7】

さらに、前記第 1 メッシュおよび前記第 2 メッシュを前記物理的空間から、前記第 1 メッシュおよび前記第 2 メッシュが長方形の演算空間にマッピングすること、を含む、請求項 6 に記載されるプロセス。

30

【請求項 8】

さらに前記物理的空間を前記演算空間にマッピングするためにプロセスの初めに前記第 1 メッシュおよび前記第 2 メッシュ向けに 2 組の変換マトリクスおよびヤコビアンを計算し格納するステップを含む、請求項 7 に記載されるプロセス。

【請求項 9】

前記流体の前記動きは三次元の座標システムにおいてシミュレートされる、請求項 1 に記載されるプロセス。

【請求項 10】

前記座標システムは軸対称座標システムで、方位に沿った角運動はシミュレートされない、請求項 9 に記載されるプロセス。

40

【請求項 11】

前記流体速度は前記第 1 メッシュの中心において計算され、前記圧力は前記第 1 メッシュのノードにおいて計算され、前記レベルセットは前記第 2 メッシュの前記ノードにおいて計算される、請求項 1 に記載されるプロセス。

【請求項 12】

さらに半時間ステップにおいて前記第 2 メッシュのエッジ上におけるエッジ速度の計算を含み、

前記半時間ステップは前記第 1 の時間ステップおよび前記第 2 の時間ステップの中間に

50

あり、前記エッジのレベルセット値は、前記第1メッシュのエッジと一致する前記第2メッシュのエッジに対してはテイラー展開を用い、また前記第2メッシュ上のエッジ速度に対しては距離加重平均を用いて計算される、請求項1に記載されるプロセス。

【請求項13】

さらに、第1軸に沿った前記第2組のノードにおける前記レベルセットの中央差の計算と、前記第1軸に沿った前記第2組のノードにおける前記レベルセットの前方差の計算と、前記第1軸に沿った前記第2組のノードにおける前記レベルセットの後方差の計算と、第1軸に沿った前記第2組のノードにおける前記レベルセットの限定的導関数の計算と、第1軸に沿った前記第2組のノードにおける二次の限定的導関数の計算と、第2軸に沿った第2組のノードにおける接線導関数項の計算、を含む、請求項1に記載されるプロセス。

10

【請求項14】

装置が請求項1に記載されるプロセスを実行するよう指示する1組の命令を含むコンピュータ・プログラムをコード化した機械読み取り可能な媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明はレベルセット方法を用いて2つの流体の動きおよびこれらの流体間にインタフェースをモデル化、シミュレート、および分析するシステムおよび方法に関する。

【背景技術】

20

【0002】

インクジェット印刷ヘッドは印刷媒体にインクの液滴を射出することにより画像を実現する印刷装置である。インク射出プロセスとそれに続くインクの液滴を制御することは印刷ヘッドにより作成される任意の産物の質を確保するために不可欠である。このような制御を達成するためには印刷および射出プロセスの正確かつ効率的なシミュレーションを行なうことが重要である。このプロセスをシミュレートすることは少なくとも2つの流体（すなわちインクと空気）およびこれら流体間のインタフェースのモデル化を含む。先行技術による方法はこの挙動をモデル化するために計算流体力学、有限要素解析、有限差分解析、およびレベルセット方法を用いている。

【0003】

30

レベルセット方法は有用であるが、質量保存について問題を有することがある。質量保存とはシミュレーション方法において閉鎖システムの場合シミュレートされるシステムの質量を保存する能力を指す。同様に開放システムにおいて、増減された質量はシステムのシミュレートされる質量に反映される必要がある。先行技術における方法は定期的にレベルセットを再距離化するか、またはシミュレーション全体に対しより細かいメッシュを用いることにより質量保存の問題に対応している。

【0004】

【特許文献1】米国特許出願公開第20040181383号明細書

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

40

【0005】

より細かいメッシュを使用することはシミュレーションの質量保存を改良する一方、シミュレーションに必要な時間およびリソースが甚だしい増大につながる。例えば、二次元シミュレーションに対し $n \times m$ メッシュで始めた場合 $2 \times n \times m$ の速度、 $n \times m$ の圧力、および $n \times m$ のレベルセットを格納する必要がある。流体の非圧縮性を実施するために、 $n \times m$ 掛ける $n \times m$ の係数メトリクスを有する線形システムを解く必要がある。このように、メッシュが2倍細くなると、格納要求は4倍になる。さらに、非ゼロ要素を4倍含む係数マトリクスを有する線形システムを解く必要がある。直接ソルバが用いられる場合、4倍多い係数マトリクスは通常64倍長い演算時間を必要とする。これはさらに必要な演算時間を増加させることになる。

50

【0006】

従って、演算リソースに不必要に負担をかけずにレベルセット方法の質量保存を改良するシミュレーション方法が必要とされる。

【0007】

本発明の一目的はレベルセット方法を用いるシミュレーションにおいて、シミュレーションに必要な演算リソースを制限しながら質量保存を改良することである。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の一実施形態は第1流体、第2流体、および第1流体と第2流体と間のインタフェースの動きをシミュレートするシステムまたは方法であることができる。第1流体および第2流体の流体速度および圧力が第1の時間ステップにおいて第1メッシュ上の第1組の点において計算される。流体速度および圧力は第1の時間ステップにおける第1流体および第2流体の動きを表す。レベルセットは第1の時間ステップにおけるインタフェースの位置を表すが、第1メッシュより奇数倍細かい第2メッシュにおける第2組の点において計算される。第1流体および第2流体の新規流体速度および圧力が第2の時間ステップにおいて第1組の点において計算される。新規流体速度および圧力は第2の時間ステップにおける第1流体および第2流体の新規の動きを表す。第2組の点における新規レベルセットが計算される。新規レベルセットはインタフェースの第2の時間ステップにおける新位置を表す。

10

【0009】

20

添付図面と併せ、以下の説明およびクレームを参照することにより他の目的や成果と共に発明のより完全な理解が明らかになり、認識されよう。

【0010】

本発明の、第1流体、第2流体、および前記第1流体と前記第2流体との間のインタフェースの動きをシミュレートするプロセスは、前記第1流体および前記第2流体の流体速度および圧力を、第1の時間ステップにおいて第1メッシュ上の第1組のノードで計算するステップで、これにより前記第1の時間ステップにおける前記第1流体および前記第2流体の動きを表すステップと、前記第1の時間ステップにおける前記インタフェースの位置を表すレベルセットを、前記第1メッシュより奇数倍細かい第2メッシュ上の第2組のノードで計算するステップと、前記第1流体および前記第2流体の新しい流体速度および圧力を、第2の時間ステップにおいて前記第1組のノードで計算するステップで、これにより前記第2の時間ステップにおける前記第1流体および前記第2流体の新しい動きを表すステップと、前記第2組のノードにおける新しいレベルセットを計算するステップで、これにより前記第2の時間ステップにおける前記インタフェースの新しい位置を表すステップとを含む。

30

【0011】

また、前記第2メッシュは前記第1メッシュより3倍細かくてもよい。

【0012】

また、前記流体速度および圧力の計算は有限差分方法で行なわれるものであってもよい。

40

【0013】

また、前記第1流体はインクで前記第2流体は空気であってもよい。

【0014】

また、シミュレートされる前記動きは前記第1流体の一部がノズルから射出されることを含むものであってもよい。

【0015】

また、前記第1メッシュおよび前記第2メッシュは物理的空間における四辺形メッシュであってもよい。

【0016】

また、前記第1メッシュおよび前記第2メッシュを前記物理的空間から、前記第1およ

50

び前記第 2 メッシュが長方形の演算空間にマッピングすることを含むものであってもよい。

【 0 0 1 7 】

また、さらに前記物理的空間を前記演算空間にマッピングするためにプロセスの初めに前記第 1 メッシュおよび前記第 2 メッシュ向けに 2 組の変換マトリクスおよびヤコビアンを計算し格納するステップを含むものであってもよい。

【 0 0 1 8 】

また、前記流体の前記動きは三次元の座標システムにおいてシミュレートされるものであってもよい。

【 0 0 1 9 】

また、前記座標システムは軸対称座標システムで、方位に沿った角運動はシミュレートされないものであってもよい。

【 0 0 2 0 】

また、前記流体速度は前記第 1 メッシュの中心において計算され、前記圧力は前記第 1 メッシュのノードにおいて計算され、前記レベルセットは前記第 2 メッシュの前記ノードにおいて計算されるものであってもよい。

【 0 0 2 1 】

また、さらに半時間ステップにおいて前記第 2 メッシュのエッジ上におけるエッジ速度の計算を含み、前記半時間ステップは前記第 1 の時間ステップおよび前記第 2 の時間ステップの中間にあり、前記エッジのレベルセット値は、前記第 1 メッシュのエッジと一致する前記第 2 メッシュのエッジに対してはテイラー展開を用い、また前記第 2 メッシュ上のエッジ速度に対しては距離加重平均を用いて計算されるものであってもよい。

【 0 0 2 2 】

また、さらに、第 1 軸に沿った前記第 2 組のノードにおける前記レベルセットの中央差の計算と、前記第 1 軸に沿った前記第 2 組のノードにおける前記レベルセットの前方差の計算と、前記第 1 軸に沿った前記第 2 組のノードにおける前記レベルセットの後方差の計算と、第 1 軸に沿った前記第 2 組のノードにおける前記レベルセットの限定的導関数 (a limiting derivative) の計算と、第 1 軸に沿った前記第 2 組のノードにおける二次の限定的 (a second-order limiting derivative) 導関数の計算と、第 2 軸に沿った第 2 組のノードにおける接線導関数項の計算を含むものであってもよい。

【 0 0 2 3 】

また、本発明は、上述のプロセスを実行するよう指示する 1 組の命令を含むコンピュータ・プログラムをコード化した機械読み取り可能な媒体であってもよい。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 2 4 】

図 1 は、インク 1 0 2 およびインク 1 0 2 と空気との間のインタフェース 1 0 4 を含む代表的なインクジェット印刷ヘッドのノズル 1 0 0 を示す。圧力パルスはインク 1 0 2 に印加することができ、それによりインクの液滴がインタフェース 1 0 4 で形成される。圧力パルスは圧力板、すなわちダイヤフラム、経由でインク 1 0 2 に結合される圧電 (PZT) アクチュエータに動電圧を印加することにより生成することができる。

【 0 0 2 5 】

印刷ヘッドのノズル 1 0 0 を設計する場合計算流体力学 (CFD) コードを用いてインクの液滴の生成をシミュレートすることが有用である。CFD コードは流体速度、圧力、およびインタフェース位置に関する支配的な方程式の組 (すなわち二相流に関する非圧縮性ナビエ・ストークス方程式) を解くことによりインクの液滴の生成をシミュレートする。ナビエ・ストークス方程式は一例であり、インクの液滴の挙動を記述する他の方程式も請求される発明の範囲を変えることなく用いることができる。

【 0 0 2 6 】

図 2 は、先行技術で実施されるような数値的シミュレーションの結果を図示する。この例において、半径 0.3 の円形インク液滴が半径 3、長さ 20 の円筒型流路内で空気に囲

10

20

30

40

50

まれている。初期時間ステップ t_0 において、速度は 1、密度比は 877、動粘性比は 208、レイノルズ数は 30.0、ウェーバー数は 31.3 で、流入圧力および流出圧力はゼロに設定されている。このシミュレーションは均一 30×200 の四角形メッシュで実施され、インク液滴の挙動を記述する速度、圧力、およびレベルセットを計算するために用いられる。時間ステップは $t = 0.002$ となるように取られる。レベルセットは 60 時間ステップ毎に再初期設定される。図 2 は、初期時間ステップ t_0 および後続のいくつかの時間ステップ t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 におけるシミュレーションによる結果を示す。このシミュレーションの結果はサイズが減少し、質量が保存されない液滴を示す。このモデルに蒸発は含まれない。従ってこの液滴の縮小はシミュレーションの産物である。本発明の一目的はこの種の産物の出現および影響を削減することにある。

10

【0027】

図 3 は、CFD コードが発明の一実施形態においてインクの液滴が生成される物理的空間を表すために用いることができる、境界に合わせた四辺形メッシュの例である。

【0028】

二相流の支配方程式は連続方程式 (1)、ナビエ・ストークス方程式 (2)、およびレベルセット対流方程式 (3) を含み、これらの方程式を以下に示す。

【0029】

【数 1】

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \dots (1)$$

20

【0030】

【数 2】

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho(\phi)} \nabla p + \frac{1}{\rho(\phi)Re} \nabla \cdot (2\mu(\phi)D) - \frac{1}{\rho(\phi)We} \kappa(\phi)\delta(\phi)\nabla\phi - \frac{1}{Fr} \mathbf{e}_z \quad \dots (2)$$

【0031】

【数 3】

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\phi = 0 \quad \dots (3)$$

30

これらの方程式中、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 t は時間、 ρ は相対密度、 p は圧力、 μ は相対動粘性、 Re はレイノルズ数、 We はウェーバー数、 Fr はフルード数、 κ は曲率、 δ はディラック・デルタ関数、および D は変形テンソル率である。相対密度 ρ 、相対動粘性 μ 、および曲率 κ は皆、レベルセット関数 () に関して定義される。

【0032】

代表的な印刷ヘッドのノズル 100 は軸対称である。従って、印刷ヘッドのノズル 100 を円筒形の座標システムでモデル化すると都合が良い。結果は方位に無関係であると仮定することが妥当である。従ってモデルは三次元から軸対称の物理的空間の二次元、 $X(r, z)$ 、に約分することができる。形状に合った四辺形のメッシュ 300 はこの物理的軸対称空間 X に作成される。

40

【0033】

図 4 に示されるように、この物理的軸対称空間 X は物理的軸対称空間 X におけるメッシュ点を演算空間 $\Omega = (r, z)$ および長方形メッシュとしてのメッシュ 400 にマップする変換 T により変換することができる。この演算空間 Ω におけるメッシュ 400 上の支配方程式は有限差分解析を用いて解くことができる。この変換のヤコビアン (4) および変換マトリクス (5) は以下に示す。

【0034】

【数 4】

$$J = g \det \nabla_{\Xi} \Phi = g \det \begin{pmatrix} r_{\xi} & r_{\eta} \\ z_{\xi} & z_{\eta} \end{pmatrix} \dots (4)$$

【0035】

【数 5】

$$T = g^{-1} J [\nabla_{\Xi} \Phi]^{-1} = \begin{pmatrix} z_{\eta} & -r_{\eta} \\ -z_{\xi} & r_{\xi} \end{pmatrix} \dots (5)$$

10

【0036】

【数 6】

$$\begin{aligned} \nabla_{\Xi} \cdot \mathbf{u} &= 0, \quad \mathbf{u} = g T \mathbf{u}, \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + J^{-1} (\mathbf{u} \cdot \nabla_{\Xi}) \mathbf{u} &= -\frac{1}{\rho(\phi) J} g T^T \nabla_{\Xi} p + (\text{Viscosity term}) - \frac{1}{Fr} \mathbf{e}_z \\ &\quad - \frac{g \delta(\phi)}{J^2 \rho(\phi) We} \nabla_{\Xi} \cdot \left(g T \frac{T^T \nabla_{\Xi} \phi}{|T^T \nabla_{\Xi} \phi|} \right) (T^T \nabla_{\Xi} \phi), \dots (6) \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} + J^{-1} \mathbf{u} \cdot \nabla_{\Xi} \phi &= 0 \end{aligned}$$

20

【0037】

【数 7】

$$\begin{aligned} &(\text{Viscosity term}) \\ &= \frac{g}{J \rho(\phi) Re} \left[T^T \nabla_{\Xi} \mu(\phi) \right] \cdot \left[g J^{-1} T^T \nabla_{\Xi} \mathbf{u} + (g J^{-1} T^T \nabla_{\Xi} \mathbf{u})^T \right] \\ &+ \frac{\mu(\phi)}{J \rho(\phi) Re} \nabla_{\Xi} \cdot \left\{ g^2 J^{-1} T T^T \nabla_{\Xi} \mathbf{u} \right\} + \frac{\mu(\phi)}{\rho(\phi) Re} \begin{pmatrix} -\mathbf{u} \\ r^2 \\ 0 \end{pmatrix} \dots (7) \end{aligned}$$

30

円筒型座標システムにおいて $g = 2 - r$ である。連続方程式 (1)、ナビエ・ストークス方程式 (2)、およびレベルセット対流方程式 (3) の数値を演算空間において求めるにはヤコビアン (4) および変換マトリクス (5) を用いて方程式 (1)、方程式 (2)、および方程式 (3) を上記の方程式 (6) に変換する必要がある。方程式 (2) の第 2 項は粘性項である。上記の方程式 (7) は演算空間で求める場合の粘性項である。

【0038】

四辺形メッシュ上で数値アルゴリズムが公式化される。以下において、上付き記号 n (または $n + 1$) は時間ステップを意味する。量 u^n, p^n, ϕ^n が与えられた場合、アルゴリズムの目的は支配方程式を満足する $u^{n+1}, p^{n+1}, \phi^{n+1}$ を得ることである。発明の一実施形態は時間的に一次の精度を有し、空間的に二次の精度を有する。発明はこの精度を有するアルゴリズムに限定されず、他の公式を含むことができる。

40

【0039】

図 4 に見られるように、変換 $X = (x, y)$ は演算空間における演算メッシュとしてのメッシュ 400 が単位四角形、 $J = \det \frac{\partial X}{\partial \Xi} = 1$ 、または長方形メッシュで構成されるようなものである。図 3 における境界に合わせた四辺形メッシュおよびノズル壁は単位四角形を有する演算メッシュとしてのメッシュ 400 にマップされる。

【0040】

以下の考察を通して変数は 1 つ以上のメッシュのノードおよびエッジにおいて計算される。ノードの相対位置はカッコ内または下付き記号として $(Z(x, y) = Z_{x,y})$ 変数のペアで表される。

【0041】

50

図5は、四辺形メッシュとしてのメッシュ300の一部を図示する。図5で示す通り、整数の時間ステップにおいて圧力 $p^n(i, j)$ は四辺形メッシュとしてのメッシュ400のノードで計算される。さらに整数の時間ステップにおいて速度成分 $u^n(i, j)$ は四辺形メッシュの各セルの中心において計算される。レベルセット値 ϕ^n は四辺形メッシュとしてのメッシュ400より奇数倍細かいメッシュ上で計算される。

【0042】

圧力は第1メッシュ上で計算される。速度は第1メッシュよりオフセットされる第2メッシュ上で計算される。第2メッシュは、第2メッシュにおける各ノードが第1メッシュの4ノードの中心にあるようにオフセットされる。レベルセット値は第3メッシュ上で計算される。第3メッシュは第2メッシュおよび第1メッシュより奇数倍細かい(3、5、7、9、等々)。第3メッシュのノードのサブセットが第2メッシュのノードに位置合わせされる。

10

【0043】

図6(A)は、均一メッシュとしてのメッシュ400の一部を示し、ここでレベルセット値 ϕ^n は3倍の微細化メッシュ上で計算される。図6(B)は、均一メッシュとしてのメッシュ400の一部を示し、ここでレベルセット値 ϕ^n は5倍の微細化メッシュ上で計算される。図6(C)は、均一メッシュとしてのメッシュ400の一部を示し、ここでレベルセット値 ϕ^n は7倍の微細化メッシュ上で計算される。

【0044】

アルゴリズムでは変換(またはマッピング)の局部定義のみが必要であることが特記される。大域変換 $X = (\quad)$ の存在または正確な形は重要でない。ヤコビアン(4)および変換マトリクス(5)は正規のメッシュおよび奇数倍細かいメッシュ双方に対し計算される必要がある。

20

【0045】

代表的なシステムで、両流体の密度および粘性は非常に差がある。インタフェース104を挟んだこの急激な変化はシミュレーションにおいて問題を起こす可能性がある。従ってこの急激な変化を平滑化関数で置き換えることができる。平滑化はインタフェース104を中心に厚み2 δ の空間領域で生じ得る。従って δ はインタフェース104のスミアリングの度合いを表す。このような平滑化関数の例としては方程式(6)に示される下記の平滑化ヘビサイド関数(8)が挙げられる。

30

【0046】

【数8】

$$H(\phi) = \begin{cases} 0 & \text{if } \phi < -\varepsilon \\ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\phi}{\varepsilon} + \frac{1}{\pi} \sin(\pi\phi/\varepsilon) \right] & \text{if } |\phi| \leq \varepsilon \\ 1 & \text{if } \phi > \varepsilon \end{cases}, \quad \delta(\phi) = \frac{dH(\phi)}{d\phi} \quad \dots (8)$$

代表的な δ の値はメッシュ300の四辺形セルの平均サイズに対し比例して1.7から2.5倍であることができる。加えて、平滑化関数の導関数は方程式に示されるように平滑化ヘビサイド関数(8)は、デルタ関数として定義することができる。

40

【0047】

インタフェース104はレベルセット関数()のゼロ・レベルセットで表される。レベルセット関数()はインタフェース104への符号付き距離として初期設定される。すなわちレベルセット値はインク102側でインタフェース104までの最短距離で空気側では最短距離の負となる。レベルセット関数()は第3メッシュの各ノードにおいて計算される。

【0048】

下記の方程式(9)に示すとおりレベルセット対流方程式($\phi_t + u \cdot \nabla \phi = 0$)から導かれる方程式(9)を用いてレベルセット値 ϕ^{n+1} を更新することができる。方程式(9)における時間中心の移流項は時間 t^n で得られるデータのみを必要とする陽公式の予

50

測修正スキームを用いて数値を求めることができる。

【 0 0 4 9 】

【 数 9 】

$$\phi^{n+1} = \phi^n - \frac{\Delta t}{J} [\mathbf{u} \cdot \nabla_{\Xi} \phi]^{n+1/2} \dots (9)$$

【 0 0 5 0 】

速度ベクトルを更新するには、方程式 (6) から導くことのできる下記の方程式 (1 0) を用いて中間値 u^* をまず計算することができる。その後、下記の方程式 (1 1) を用いて圧力フィールド p^{n+1} を計算することができる。下記の方程式 (1 2) を用い新しい速度ベクトル・フィールド u^{n+1} を計算することができる。

10

【 0 0 5 1 】

【 数 1 0 】

$$u^* = u^n + \Delta t \left\{ -J^{-1} [(\mathbf{u} \cdot \nabla_{\Xi}) \mathbf{u}]^{n+1/2} + (\text{Viscosity term})^n + \text{mod} * 2.5 \text{cm} (\text{Surface tension})^{n+1/2} - \frac{1}{Fr} e_2 \right\} \dots (10)$$

【 0 0 5 2 】

【 数 1 1 】

$$\nabla_{\Xi} \cdot (g T u^*) = \nabla_{\Xi} \cdot \left(\frac{g^2 \Delta t}{\rho(\phi^{n+1/2}) J} T T^T \nabla_{\Xi} p^{n+1} \right) \dots (11)$$

20

【 0 0 5 3 】

【 数 1 2 】

$$u^{n+1} = u^* - \frac{g \Delta t}{\rho(\phi^{n+1/2}) J} T^T \nabla_{\Xi} p^{n+1} \dots (12)$$

【 0 0 5 4 】

インタフェース 1 0 4 を正しく捕らえ表面張力を正確に計算するために、レベルセットはインタフェース 1 0 4 に対する符号付き距離関数として維持する必要がある。しかしレベルセットが方程式 (9) により更新された場合はそうでなくなる。従ってシミュレーションは定期的に停止され新しいレベルセット関数 () が再現される。

30

【 0 0 5 5 】

移流項はセル中心の予想修正スキームを用いて計算することができ、これは J o h n B . B E L L 他が「可変密度の流れに対する二次投影法」(「A Second-order Projection Method for Variable-Density Flows」)、Journal of Computational Physics、101、334-348頁、1992年、において二相流 (2 つの一定密度) に関し述べた非分割二次ゴドゥノフ法に基づき得る。

【 0 0 5 6 】

下記の方程式 (1 3) は方程式 (9) に見られる時間中心の移流項を計算するのに用いられる修正ステップである。3 倍微細化メッシュについて、定数 a および定数 b は (1 , 0 および - 1) の値を取り得る。当業者であれば方程式 (1 3) を修正して 5 、 7 、または 9 倍微細化メッシュなど奇数倍微細化メッシュを記述するのは自明であろう。

40

【 0 0 5 7 】

【数 1 3】

$$\begin{aligned}
& \left[(\mathbf{u} \cdot \nabla_{\Xi}) \phi \right]_{i+a/3, j+b/3}^{n+1/2} \\
&= \frac{\bar{u}_{i+a/3+1/6, j+b/3}^{n+1/2} + \bar{u}_{i+a/3-1/6, j+b/3}^{n+1/2}}{2} \left(\phi_{i+a/3+1/6, j+b/3}^{n+1/2} - \phi_{i+a/3-1/6, j+b/3}^{n+1/2} \right) \dots (13) \\
&+ \frac{\bar{v}_{i+a/3, j+b/3+1/6}^{n+1/2} + \bar{v}_{i+a/3, j+b/3-1/6}^{n+1/2}}{2} \left(\phi_{i+a/3, j+b/3+1/6}^{n+1/2} - \phi_{i+a/3, j+b/3-1/6}^{n+1/2} \right), \\
&a, b = 1, 0, -1
\end{aligned}$$

【0058】

10

図7は、均一メッシュとしてのメッシュ400および3倍微細化メッシュの一部におけるレベルセット値 ϕ^n 、速度 \mathbf{u}^n 、時間中心のレベルセット値 $\phi^{n+1/2}$ および時間中心のエッジ速度 $\mathbf{u}^{n+1/2}$ の相対位置を示す。方程式(13)は方程式(9)からの時間中心の移流項が3倍微細化メッシュ上で計算できるかの例である。

【0059】

時間中心のエッジ速度および時間中心のエッジ・レベルセットは時空におけるテイラー展開および風上差分スキームの慎重な組み合わせ経路で得ることができる。図7は、演算メッシュとしてのメッシュ400における時間中心のエッジ速度の位置を示す。レベルセット対流方程式はレベルセット ϕ_t^n の時間導関数の置換として用いることができる。補外は奇数倍微細化メッシュの両側からなされ、次にゴドゥノフ型風上差分を用いてどの補外結果を使用するか選択する。

20

【0060】

項 $\phi_{i+a/3+1/6, j+b/3}^{n+1/2}$ は次の方法を用いて計算される。左側から補外すると下記の方程式(14)が得られる。右側から補外すると下記の方程式(15)が得られる。

【0061】

【数 1 4】

$$\begin{aligned}
\phi_{i+a/3+1/6, j+b/3}^{n+1/2, L} &= \phi_{i+a/3, j+b/3}^n + \frac{1}{2} \phi_{\xi, i+a/3, j+b/3}^n + \frac{\Delta t}{2} \phi_{t, i+a/3, j+b/3}^n \\
&= \phi_{i+a/3, j+b/3}^n + \left(\frac{1}{2} - \frac{\Delta t}{2J_{i+a/3, j+b/3}} \bar{u}_{i+a/3, j+b/3}^n \right) \phi_{\xi, i+a/3, j+b/3}^n \dots (14) \\
&\quad - \frac{\Delta t}{2J_{i+a/3, j+b/3}} (\bar{v} \phi_{\eta})_{i+a/3, j+b/3}^n, \\
&a, b = 1, 0, -1
\end{aligned}$$

30

【0062】

【数 1 5】

$$\begin{aligned}
\phi_{i+a/3+1/6, j+b/3}^{n+1/2, R} &= \phi_{i+a/3+1/3, j+b/3}^n - \frac{1}{2} \phi_{\xi, i+a/3+1/3, j+b/3}^n + \frac{\Delta t}{2} \phi_{t, i+a/3+1/3, j+b/3}^n \\
&= \phi_{i+a/3+1/3, j+b/3}^n - \left(\frac{1}{2} + \frac{\Delta t}{2J_{i+a/3+1/3, j+b/3}} \bar{u}_{i+a/3+1/3, j+b/3}^n \right) \phi_{\xi, i+a/3+1/3, j+b/3}^n \\
&\quad - \frac{\Delta t}{2J_{i+a/3+1/3, j+b/3}} (\bar{v} \phi_{\eta})_{i+a/3+1/3, j+b/3}^n, \dots (15) \\
&a, b = 1, 0, -1
\end{aligned}$$

40

【0063】

演算空間における正規レベルセット導関数 {例、 $\phi_{\xi}^n(i+a/3, j+b/3)$, $\phi_{\xi}^n(i+a/3+1/3, j+b/3)$, $\phi_{\eta}^n(i+a/3, j+b/3)$ および $\phi_{\eta}^n(i+a/3, j+b/3+1/3)$ } は単調性制限の中心差分方法を用いて求めることができる。横断導関数項 {例、 $(\bar{\nabla}\phi_{\eta})^n(i+a/3, j+b/3)$ および $(\bar{\nabla}\phi_{\xi})^n(i+a/3, j+b/3)$ } は風上差分スキームを用いて求めることができる。

【 0 0 6 4 】

正規導関数を得ることは中央、前方、および後方差分を下記に示した式 (1 6) の計算が係わる。限定的導関数 (a limiting derivative) が下記の方程式 (1 7) で定義される。二次の限定された導関数 (the second-order limited derivative) が下記の方程式 (1 8) で与えられる。接線導関数は風上差分スキームを用いて計算することができる。下記の方程式 (1 9) は接線導関数を計算するために用いることのできる方法である。

10

【 0 0 6 5 】

【 数 1 6 】

$$\begin{aligned} D_{\xi}^c(\phi^n)_{i+a/3, j+b/3} &= (\phi_{i+a/3+1/3, j+b/3}^n - \phi_{i+a/3-1/3, j+b/3}^n) / 2, \\ D_{\xi}^+(\phi^n)_{i+a/3, j+b/3} &= (\phi_{i+a/3+1/3, j+b/3}^n - \phi_{i+a/3, j+b/3}^n), \quad \dots (16) \\ D_{\xi}^-(\phi^n)_{i+a/3, j+b/3} &= (\phi_{i+a/3, j+b/3}^n - \phi_{i+a/3-1/3, j+b/3}^n) \end{aligned}$$

20

【 0 0 6 6 】

【 数 1 7 】

$$\delta_{\text{lim}}(\phi^n)_{i+a/3, j+b/3}^n = \begin{cases} \min(2 | D_{\xi}^-(\phi^n)_{i+a/3, j+b/3} |, 2 | D_{\xi}^+(\phi^n)_{i+a/3, j+b/3} |) & \text{if } (D_{\xi}^-(\phi^n)_{i+a/3, j+b/3})(D_{\xi}^+(\phi^n)_{i+a/3, j+b/3}) > 0 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \dots (17)$$

【 0 0 6 7 】

【 数 1 8 】

$$\begin{aligned} (\phi_{\xi}^n)_{i+a/3, j+b/3} &= \min(| D_{\xi}^c(\phi^n)_{i+a/3, j+b/3} |, \delta_{\text{lim}}(\phi^n)_{i+a/3, j+b/3}) \times \text{sign}(D_{\xi}^c(\phi^n)_{i+a/3, j+b/3}), \quad \dots (18) \\ a, b &= 1, 0, -1 \end{aligned}$$

30

【 0 0 6 8 】

【 数 1 9 】

$$\begin{aligned} (\bar{\nabla}\phi_{\eta})_{i+a/3, j+b/3}^n &= \max(\bar{\nabla}_{i+a/3, j+b/3}^n, 0)(\phi_{i+a/3, j+b/3}^n - \phi_{i+a/3, j+b/3-1/3}^n) \\ &+ \min(\bar{\nabla}_{i+a/3, j+b/3}^n, 0)(\phi_{i+a/3, j+b/3+1/3}^n - \phi_{i+a/3, j+b/3}^n), \quad \dots (19) \\ a, b &= 1, 0, -1 \end{aligned}$$

40

【 0 0 6 9 】

必要な点すべてにおいて時間中心の移流流束の値を求めるのにテイラー展開を用いるのは実際的でないかもしれない。これは図 5、図 6 (A) ~ 図 6 (C) に示されるように、任意の時間ステップ t_n における速度は基本メッシュのセル中心においてのみ定義されるからである。従ってテイラー展開は基本メッシュのセル・エッジにおける時間中心速度しか与えない。代わりに下記の方程式 (2 0) に示すように、距離加重局部平均を用いて時間中心の移流速度を計算する。得られた移流速度は次に下記の方程式 (2 1) に示すように、より細かいメッシュのエッジにおける移流流束を計算するために用いられる。これら

50

の移流流束は下記の方程式(22)に示すように、ゴドゥノフ型風上差分スキームで用いてどの時間中心エッジ・レベルセット値((13)および(14)より)を保持するかを決めることができる。

【0070】

【数20】

$$\begin{aligned} u_{i+a/6, j+b/3}^{n+1/2} &= \frac{3+a}{6} \left(\frac{2}{3} u_{i+1/2, j}^{n+1/2} + \frac{1}{3} u_{i+1/2, j+b}^{n+1/2} \right) \\ &+ \frac{3-a}{6} \left(\frac{2}{3} u_{i-1/2, j}^{n+1/2} + \frac{1}{3} u_{i-1/2, j+b}^{n+1/2} \right), \quad a=3, 1, -1, -3, \quad b=1, 0, -1, \quad \dots (20) \\ v_{i+a/3, j+b/6}^{n+1/2} &= \frac{3+b}{6} \left(\frac{2}{3} v_{i, j+1/2}^{n+1/2} + \frac{1}{3} v_{i+a, j+1/2}^{n+1/2} \right) \\ &+ \frac{3-b}{6} \left(\frac{2}{3} v_{i, j-1/2}^{n+1/2} + \frac{1}{3} v_{i+a, j-1/2}^{n+1/2} \right), \quad a=1, 0, -1, \quad b=3, 1, -1, -3 \end{aligned}$$

【0071】

【数21】

$$\begin{aligned} u_{i+a/6, j+b/3}^{n+1/2} &= g_{i+a/6, j+b/3} T_{i+a/6, j+b/3} u_{i+a/6, j+b/3}^{n+1/2}, \quad a=3, 1, -1, -3, \quad b=1, 0, -1, \quad \dots (21) \\ u_{i+a/3, j+b/6}^{n+1/2} &= g_{i+a/3, j+b/6} T_{i+a/3, j+b/6} u_{i+a/3, j+b/6}^{n+1/2}, \quad a=1, 0, -1, \quad b=3, 1, -1, -3 \end{aligned}$$

【0072】

【数22】

$$\phi_{i+a/6, j+b/3}^{n+1/2} = \begin{cases} \phi_{i+a/6, j+b/3}^{n+1/2, L} & \text{if } \bar{u}_{i+a/6, j+b/3}^{n+1/2} > 0 \\ \phi_{i+a/6, j+b/3}^{n+1/2, R} & \text{if } \bar{u}_{i+a/6, j+b/3}^{n+1/2} < 0 \\ \frac{\phi_{i+a/6, j+b/3}^{n+1/2, L} + \phi_{i+a/6, j+b/3}^{n+1/2, R}}{2} & \text{if } \bar{u}_{i+a/6, j+b/3}^{n+1/2} = 0, \end{cases} \quad \dots (22)$$

mod*5ema = 3, 1, -1, -3, b = 1, 0, -1.1.0em

【0073】

図8は、新しいレベルセット値 $^{n+1}$ がどのように奇数倍細かいメッシュ上で計算できるかを示すフローチャートである。図5で示すように、ある時間ステップ n における流体の速度 u^n は時間ステップ n における流体の圧力 p^n が計算された第1メッシュからオフセットされる第2メッシュ上で計算することができる。新しいレベルセット値 $^{n+1}$ の計算には時間中心のエッジ速度の計算が必要かもしれない。レベルセット値が奇数倍細かいメッシュ上で計算された場合、時間中心のエッジ速度もその奇数倍細かいメッシュ上で計算される必要があるかもしれない。時間中心のエッジ速度はステップ802において基本メッシュ上で計算することができる。これはテイラー展開およびゴドゥノフ風上差分を用いて行なうことができる。基本メッシュ上の時間中心のエッジ速度は次に奇数倍細かいメッシュ上で時間中心のエッジ速度を計算するのに用いることができ、これはステップ804において方程式(20)を用い、最隣接の2から4の一次距離加重局部平均を用いて計算することができる。次にステップ806において方程式(21)を用い奇数倍細かいメッシュ上の時間中心のエッジ流束を計算することができる。

【0074】

新しいレベルセット値 $^{n+1}$ の計算は新しいレベルセット値 $^{n+1}$ を計算するのに役立つ中間値の計算が関与することができる。例えばステップ808において方程式(16)を用い、微細化メッシュ上で演算メッシュの第1軸に沿ったレベルセットの中央、前方、および後方差分を計算することができる。特定ノードにおける前方差分は第1軸に沿った正の方向における最も近い隣接ノードのレベルセット値と特定ノードにおけるレベルセット値

10

20

30

40

50

との間の差分である。特定ノードにおける後方差分は特定ノードにおけるレベルセット値と第1軸に沿った負の方向における最も近い隣接ノードのレベルセット値との間の差分である。中央差分は第1軸に沿った正の方向における最も近い隣接ノードと負の方向における最も近い隣接ノードのレベルセット値との差分の半分である。当業者であれば演算メッシュの第2軸に沿った後方、前方、および中央差分を計算するのは自明であろう。

【0075】

前方および後方差分は、ステップ810において方程式(17)を用い、微細化メッシュのノードにおける演算空間の第1軸に沿ったレベルセットの限定的導関数を計算するのに利用することができる。特定ノードにおける前方および後方差分が反対の符号を有し、または少なくとも片方がゼロである場合、限定的導関数はゼロに等しい。それ以外の場合、限定的導関数は前方差分または後方差分のいずれか小さい方の絶対値の2倍に等しい。

10

【0076】

限定的導関数および中央差分はステップ812において方程式(18)を用い、微細化メッシュの特定ノードにおける演算空間の第1軸に沿ったレベルセットの二次の限定された導関数を計算するのに利用できる。第1軸は実空間の半径方向に相当することができる。限定的導関数の小さい方または中央差分の絶対値を中央差分の符号で乗じ、二次の限定された導関数を生み出すことができる。

【0077】

ステップ812において方程式(19)を用い、接線導関数項を計算することができる。演算空間の第2軸は実空間の軸方向の軸に関係することができる。特定ノードにおける第2軸に沿った速度がゼロより大きい場合、接線導関数項は第2軸に沿った速度掛けるその特定ノードおよび第2軸に沿って負の方向の隣接ノードにおけるレベルセット値間の差分に設定することができる。その特定ノードにおける第2軸に沿った速度がゼロ未満の場合、接線導関数項は第2軸に沿った速度掛ける第2軸に沿って正の方向の隣接ノードにおけるレベルセット値およびその特定ノードにおけるレベルセット値間の差分に設定することができる。

20

【0078】

微細化メッシュの垂直エッジにおける左および右の時間中心レベルセット値はステップ814において方程式(14)および(15)を用い計算することができる。方程式(14)は左からの補外で、方程式(15)は右からの補外である。

30

【0079】

微細化メッシュのエッジにおける時間中心レベルセット値はステップ816において方程式(22)を用い計算することができる。特定エッジにおける正規移流流速がゼロより大きい場合、その特定エッジにおける時間中心レベルセット値はその特定エッジにおける左の時間中心レベルセット値に設定できる。特定エッジにおける正規移流流速がゼロ未満の場合、その特定エッジにおける時間中心レベルセット値はその特定エッジにおける右の時間中心レベルセット値に設定できる。特定エッジにおける速度がゼロの場合、その特定エッジにおける時間中心レベルセット値はその特定エッジにおける左および右双方の時間中心レベルセット値の平均に設定することができる。当業者であればその特定エッジに直交するエッジにおける時間中心レベルセット値を計算するのは自明であろう。

40

【0080】

演算空間における微細化メッシュ上のノードの時間中心移流項はステップ818において方程式(13)を用い計算することができる。方程式(13)は時間中心移流項の高次差分化であることができる。演算空間における微細化メッシュ上のノードの新しいレベルセット値はステップ820において方程式(9)を用い計算することができる。

【0081】

上記の値はすべて前以てまたは必要に応じて計算することができる。これらの値は微細化メッシュのすべてのエッジに対し計算することができ、またはインタフェース近辺のエッジに対してのみ計算することができる。添付クレームの精神および範囲を逸脱することなく、上述された方程式の高次近似を用いて上述の値を計算することができる。

50

【 0 0 8 2 】

[偶数微細化メッシュ]

図 9 は、レベルセット値 がセル中心の 2 倍微細化メッシュ上で計算される基本的演算メッシュとしてのメッシュ 4 0 0 を示す。基本メッシュにおける速度の位置は中空の円で印され、レベルセット値 の位置は黒点で印される。いずれのレベルセット値 も速度と同じ位置にはない。偶数微細化メッシュ上のレベルセット値 は奇数倍微細化メッシュ上のレベルセット値 を更新するのに用いた方程式に類似した方程式を用いて更新することができる。いずれの速度もレベルセット値 と同じ位置にないので、新しいレベルセット値を計算する際使用される速度値はすべてテイラー展開を行なう前に基本メッシュ上の速度を平均して計算する必要がある。これは数値的粘性を導入し、メッシュ解像度を削減し、シミュレーション精度を下げる。本発明の一実施形態のように 3 倍微細化メッシュを用いると、基本メッシュ上で 9 個中 1 個のレベルセット値 が速度と同じ位置になる。

10

【 0 0 8 3 】

図 1 0 は、本発明の一実施形態で実施され得る数値シミュレーションの結果を図示する。この例において、半径 0 . 3 の円形インク液滴が半径 3、長さ 2 0 の円筒型流路内で空気に囲まれている。初期時間ステップ t_0 において、速度は 1、密度比は 8 7 7、動粘性比は 2 0 8、レイノルズ数は 3 0 . 0、ウェーバー数は 3 1 . 3 で、流入圧力および流出圧力はゼロに設定されている。このシミュレーションは均一 $3 0 \times 2 0 0$ の四角形メッシュで実施され、速度と圧力を計算するのに用いられた。レベルセット向けの奇数倍微細化メッシュは $9 0 \times 6 0 0$ である。時間ステップは $t = 0 . 0 0 2$ となるように取られる。レベルセットは 6 0 時間ステップ毎に再初期設定される。図 2 は、初期時間ステップ t_0 および後続のいくつかの時間ステップ t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 におけるシミュレーションによる結果を示す。このシミュレーションの結果はサイズが大幅に変わらない液滴を示す。このように、このシミュレーションにおいては必要とする演算リソースを大幅に増やすことなく質量の保存が大幅に増加する。

20

【 0 0 8 4 】

[システム]

発明の詳細を説明した上、本発明の 1 つ以上の態様を実施するために用いることのできる代表的なシステムを以下、図 1 1 を参考に説明する。図 1 0 に示されるように、システムは演算リソースを提供し、コンピュータを制御する中央演算装置（以降、CPU と称する）1 0 0 1 を含む。CPU 1 0 0 1 はマイクロプロセッサ等々により実施することができる。グラフィックス・プロセッサおよび / あるいは数学的演算用に浮動小数点プロセッサを含むことができる。システム 1 0 0 0 はさらにシステム・メモリ 1 0 0 2 を含むことができ、これはランダムアクセス・メモリ（RAM）および読み取り専用メモリ（ROM）の形を取ることができる。

30

【 0 0 8 5 】

図 1 0 に示すように、コントローラおよび周辺機器もいくつか備えることができる。入力コントローラ 1 0 0 3 はキーボード、マウス、またはスタイラスなど各種入力装置 1 0 0 4 へのインタフェースを表す。スキャナ 1 0 0 6 と通信するスキャナ・コントローラ 1 0 0 5 もあって良い。システム 1 0 0 0 はさらに記憶コントローラ 1 0 0 7 を含むことができ、これはオペレーティング・システム、ユーティリティ、および本発明の各種態様を実施するプログラムの具現を含むことのできるアプリケーション向けの命令からなるプログラムを記録するために用いることのできる磁気テープもしくはディスク、または光媒体などを各々含む 1 つ以上の記憶装置 1 0 0 8 とのインタフェースとなる。さらに発明に従い処理されたデータ、または処理されるデータを記憶するために記憶装置 1 0 0 8 を用いることができる。システム 1 0 0 0 はさらにブラウン管（CRT）または薄膜トランジスタ（TFT）ディスプレイであり得る表示装置 1 0 1 1 へのインタフェースを提供するための表示コントローラ 1 0 0 9 を含むことができる。システム 1 0 0 0 はプリンタ 1 0 1 3 と通信するプリンタ・コントローラ 1 0 1 2 も含むことができる。通信コントローラ 1 0 1 4 はシステム 1 0 0 0 がインターネット、ローカル・エリア・ネットワーク（LAN

40

50

)、広域ネットワーク(WAN)を含む各種ネットワークを通じ、または赤外線信号を含む任意の適当な電磁キャリア信号を通じ遠隔装置と接続することを可能にする1つ以上の通信装置1015とインタフェースすることができる。

【0086】

図示されたシステムにおいて、主要なシステム・コンポーネントはすべて2つ以上の物理的バスを表し得るバス1016に接続されることができる。しかし、各種システム・コンポーネントは互いに物理的に近接していてもいなくても良い。例えば、入力データおよび/あるいは出力データは1つの物理的な場所から別の場所に遠隔的に伝送することができる。また、発明の各種態様を実施するプログラムはネットワーク上で遠隔地(例、サーバ)からアクセスしても良い。このようなデータおよび/あるいはプログラムは磁気テープもしくはディスク、または光ディスク、または送信機・受信機のペアを含む各種のコンピュータ読み取り可能な媒体のいずれかを通じて搬送することができる。

10

【0087】

本発明はソフトウェアで都合よく実施することができる。しかし、ハードウェアによる実施、またはソフトウェア/ハードウェアによる実施を含み他の実施ももちろん可能である。ハードウェアにより実施される機能はASIC、デジタル信号処理回路等々を用いて実現することができる。従ってクレームにおける「手段」の用語はソフトウェアおよびハードウェアによる実施双方を対象とすることを意図している。同様に、本明細書で用いられる「コンピュータ読み取り可能な媒体」の用語はソフトウェア、命令のプログラムを組み込んだハードウェア、またはその組み合わせを含む。これら実施の選択を念頭に置き、図面およびそれらに伴う説明は当業者が必要な処理を実施するためのプログラム・コード(すなわちソフトウェア)を書き、または回路を制作するために必要とする機能的情報を提供するもつとであると理解される。

20

【0088】

発明のさらなる態様により、上述の方法またはそのステップのいずれも命令のプログラム(例、ソフトウェア)に具現化することができ、命令のプログラムはコンピュータまたは他のプロセッサ制御装置に記憶され、または搬送され、実行されることができる。あるいは、方法またはそのステップのいずれも機能的に同等のハードウェア(例、特定用途向集積回路(ASIC)、デジタル信号処理回路、等々)またはソフトウェアとハードウェアの組み合わせで実施することができる。

30

【0089】

発明はいくつかの具体的な実施形態に関連して説明されたが、前述の説明に照らし当業者であればさらに別の選択、変更、変形および用途が明らかになる。このような別の選択は例えば以下を含む。より高い次元、別の座標システム、別の流体、別の境界条件、別の流路、別の支配的方程式、別の数値的近似、および2つより多い流体のシステムである。このように本明細書で説明される発明は添付クレームの精神および範囲に入るこのような別の選択、変更、変形および用途をすべて含むことを意図している。

【図面の簡単な説明】

【0090】

図面において、同種の参照記号は同種の部分を指す。

40

【図1】発明の一実施形態がシミュレートし得る代表的なインクジェット・ヘッドのノズルを示す。

【図2】液滴の動きをシミュレートする際に質量保存がない状態を示す。

【図3】インクジェット・シミュレーション用の、境界に合わせた四辺形メッシュを示す。

【図4】四辺形の演算空間におけるメッシュ点の物理的軸対称空間Xへの変換を示す。

【図5】物理的軸対称空間Xにおける四辺形メッシュ上で変数が計算される相対的メッシュ点を示す。

【図6】(A)、(B)、(C)は、演算空間における四辺形メッシュ上で変数が計算

50

される相対的メッシュ点を示す。

【図7】演算空間における四辺形メッシュ上で変数が計算される相対的メッシュ点を示す。

【図8】液滴の動きのシミュレーションに係わるいくつかのステップを示すフローチャート。

【図9】演算空間における四辺形メッシュ上で変数が計算される相対的メッシュ点を示す。

【図10】本発明の一実施形態で形成された液滴の動きのシミュレーション結果を示す。

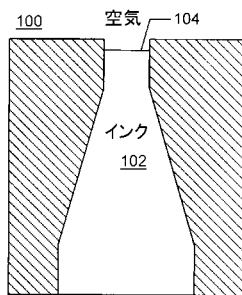
【図11】本発明の態様を実施するために用いることができる代表的なシステムを示すブロック図である。

【符号の説明】

【0091】

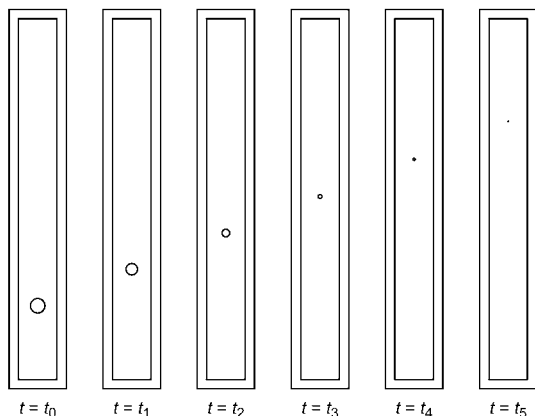
1004...入力装置、1006...スキャナ、1008...記憶装置、1011...表示装置、1013...プリンタ、1003...入力コントローラ、1005...スキャナ・コントローラ、1007...記憶コントローラ、1009...表示コントローラ、1012...プリンタ・コントローラ、1001...CPU、1014...通信コントローラ、1002...システム・メモリ、1015...通信装置。

【図1】

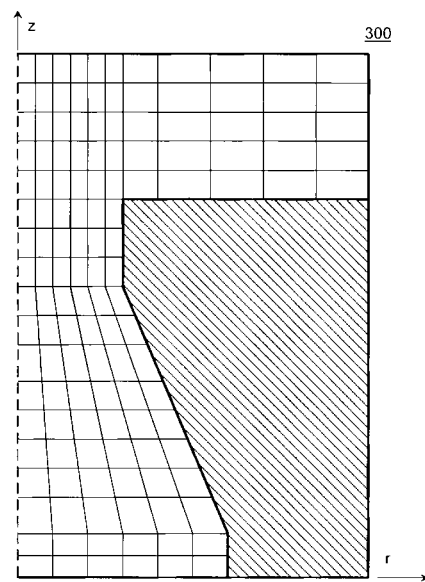


【図2】

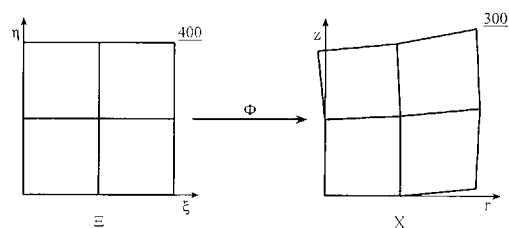
(先行技術)



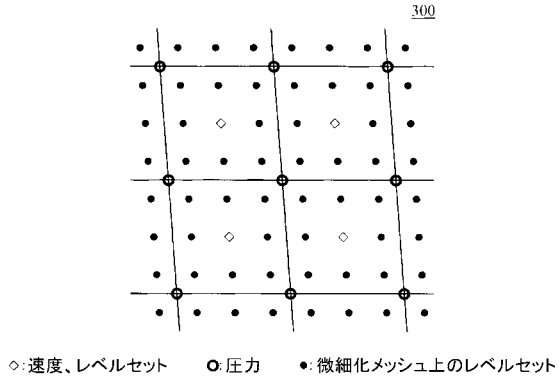
【図3】



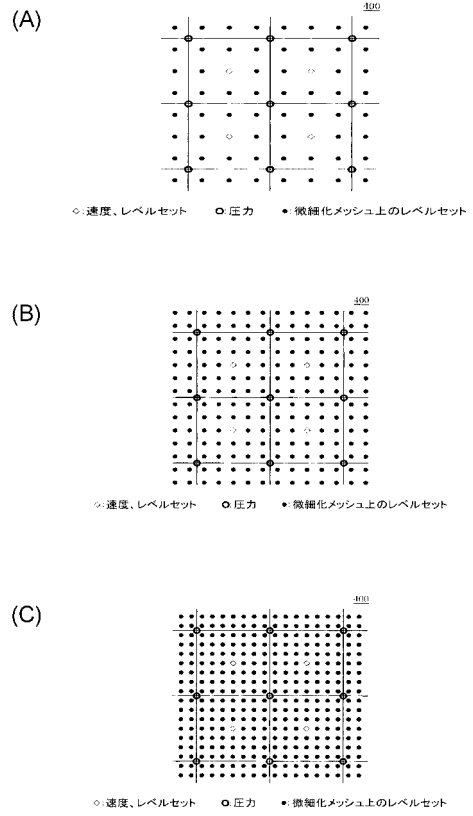
【図4】



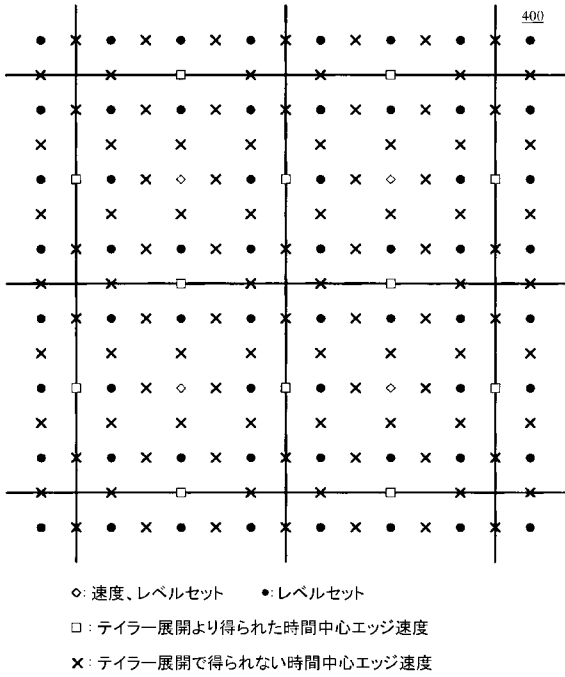
【 図 5 】



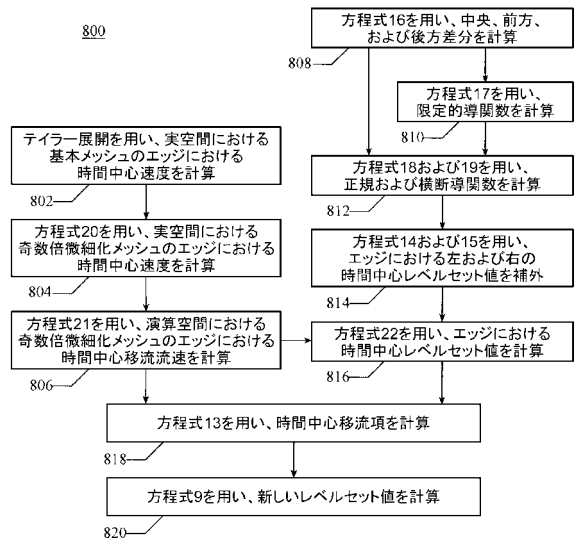
【 図 6 】



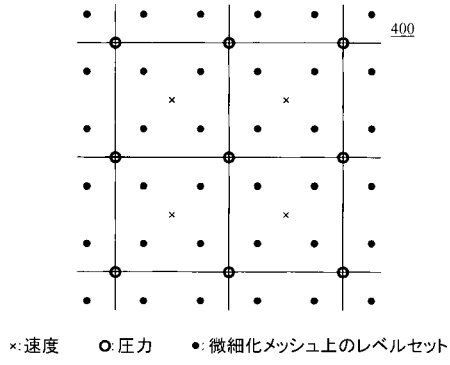
【 図 7 】



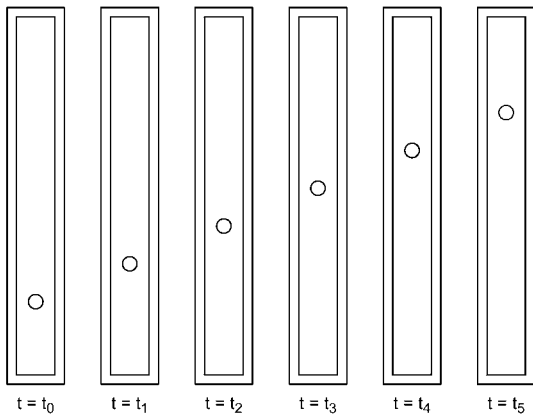
【 図 8 】



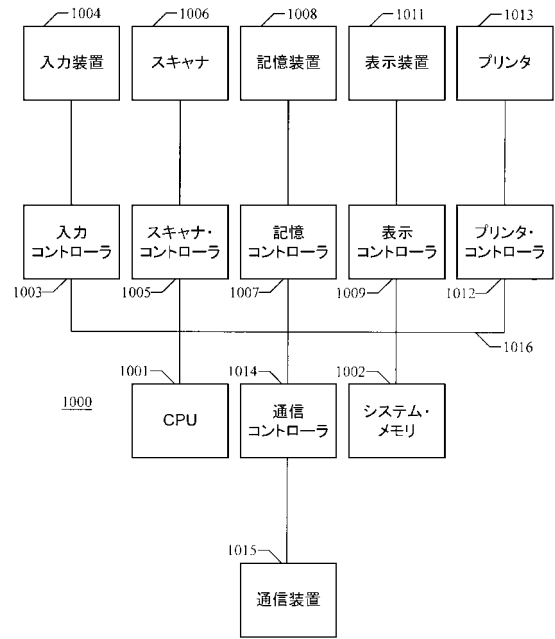
【 図 9 】



【 図 1 0 】



【 図 1 1 】



フロントページの続き

【要約の続き】
規の動きを表す。
【選択図】図8