

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6446997号
(P6446997)

(45) 発行日 平成31年1月9日 (2019.1.9)

(24) 登録日 平成30年12月14日 (2018.12.14)

(51) Int. Cl.	F I
G06T 1/00 (2006.01)	G06T 1/00 315
H04N 13/128 (2018.01)	H04N 13/128
H04N 13/232 (2018.01)	H04N 13/232

請求項の数 20 (全 25 頁)

(21) 出願番号 特願2014-216328 (P2014-216328)
 (22) 出願日 平成26年10月23日 (2014.10.23)
 (65) 公開番号 特開2015-84223 (P2015-84223A)
 (43) 公開日 平成27年4月30日 (2015.4.30)
 審査請求日 平成29年10月10日 (2017.10.10)
 (31) 優先権主張番号 14/064,090
 (32) 優先日 平成25年10月25日 (2013.10.25)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 000006747
 株式会社リコー
 東京都大田区中馬込1丁目3番6号
 (74) 代理人 100107766
 弁理士 伊東 忠重
 (74) 代理人 100070150
 弁理士 伊東 忠彦
 (72) 発明者 イヴァナ トシツ
 アメリカ合衆国, カリフォルニア 940
 25-7054, メンロ・パーク, サンド
 ・ヒル・ロード 2882番, スイート
 115 リコー イノベーション インク
 内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 スケール及び深度空間に変換することによるライトフィールドの処理

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

3次元シーンのライトフィールドイメージを処理する方法であって、当該方法は、コンピュータシステム上で実行され、

前記3次元シーンのライトフィールドイメージの（イメージ，ビュー）ドメイン表現にアクセスするステップと、

前記（イメージ，ビュー）ドメイン表現を（イメージ，スケール，深度）ドメイン表現に変換するため、スケール・深度変換を適用するステップと、

前記3次元シーンの（イメージ，スケール，深度）ドメイン表現を処理するステップと、
 を有する方法。

【請求項2】

前記スケール・深度変換の（スケール）部分は、ガウスカネル又はその導関数の1つに基づく、請求項1記載の方法。

【請求項3】

前記スケール・深度変換の（深度）部分は、前記（イメージ，ビュー）ドメインにおいて異なる曲線を生成する前記3次元シーンにおける異なる深度のポイントに基づく、請求項1記載の方法。

【請求項4】

前記スケール・深度変換の（深度）部分は、前記（イメージ，ビュー）ドメインにおいて

て異なる角度によりレイを生成する前記 3 次元シーンにおける異なる深度のポイントに基づく、請求項 3 記載の方法。

【請求項 5】

前記スケール・深度変換は、Ray - Gaussianカーネル

【数 1】

$$\mathcal{R}_{\sigma,\varphi}(x,u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x+u\tan\varphi)^2}{2\sigma^2}}$$

10

又はその導関数の 1 つに基づき、 x は (イメージ) 座標であり、 u は (ビュー) 座標であり、 σ は (スケール) 座標であり、 φ は (深度) 座標である、請求項 1 記載の方法。

【請求項 6】

前記スケール・深度変換を適用するステップは、

$\sigma \quad \{\sigma_1, \dots, \sigma_n\}$ 及び $\varphi \quad \{\varphi_1, \dots, \varphi_m\}$ について、前記 Ray - Gaussianカーネル又はその導関数により前記 (イメージ, ビュー) ドメイン表現を畳み込むステップと、

p により前記 (イメージ, ビュー) ドメイン表現をダウンサンプリングし、 $\sigma \quad \{\sigma_1, \dots, \sigma_n\}$ 及び $\varphi \quad \{\varphi_1, \dots, \varphi_m\}$ について、前記 Ray - Gaussianカーネル又はその導関数により畳み込むステップを $(k - 1)$ 回繰り返すステップと、
を有し、

20

n はスケールのダウンサンプリング範囲毎のサンプル数であり、 m は深度ドメインにおけるサンプル数であり、 p はダウンサンプリングファクタである、請求項 5 記載の方法。

【請求項 7】

前記スケール・深度変換を適用するステップは、

$\sigma \quad \{\sigma_1, \dots, \sigma_n\}$ 及び $\varphi \quad \{\varphi_1, \dots, \varphi_m\}$ について、前記 Ray - Gaussianカーネル又はその導関数により前記 (イメージ, ビュー) ドメイン表現を畳み込むステップと、

p により前記 (イメージ, ビュー) ドメイン表現のイメージ部分をダウンサンプリングし、 $\sigma \quad \{\sigma_1, \dots, \sigma_n\}$ 及び $\varphi \quad \{\varphi_1', \dots, \varphi_m'\}$ について、前記 Ray - Gaussianカーネル又はその導関数により畳み込むステップを $(k - 1)$ 回繰り返すステップと、
を有し、

30

n はスケールのダウンサンプリング範囲毎のサンプル数であり、 m は深度ドメインにおけるサンプル数であり、 p はダウンサンプリングファクタである、請求項 5 記載の方法。

【請求項 8】

前記 3 次元シーンの (イメージ, スケール, 深度) ドメイン表現を処理するステップは、前記 (イメージ, スケール, 深度) ドメイン表現に基づき前記 3 次元シーンにおける深度を推定するステップを含む、請求項 1 記載の方法。

【請求項 9】

40

前記スケール・深度変換は、正規化された 2 次導関数 Ray - Gaussian 変換であり、

前記 3 次元シーンにおける深度を推定するステップは、前記正規化された 2 次 Ray - Gaussian 変換の極値を検出し、前記極値に基づき深度を推定するステップを含む、請求項 8 記載の方法。

【請求項 10】

前記 3 次元シーンにおいて深度を推定するステップは更に、前記極値に基づきオクルージョンを検出するステップを含む、請求項 9 記載の方法。

【請求項 11】

正規化された 1 次導関数 Ray - Gaussian 変換を前記 (イメージ, ビュー) ド

50

メイン表現に更に適用するステップと、

前記正規化された1次Ray - Gaussian変換の極値を検出するステップと、

前記正規化された1次Ray - Gaussian変換の極値に基づき前記3次元シーンにおけるエッジを推定するステップと、

前記推定されたエッジに基づき前記深度の推定を改善するステップと、
を更に有する、請求項9記載の方法。

【請求項12】

前記3次元シーンの(イメージ, スケール, 深度)ドメイン表現を処理するステップは、前記(イメージ, スケール, 深度)ドメイン表現の処理に基づき前記3次元シーンにおいて3次元特徴を抽出するステップを含む、請求項1記載の方法。

10

【請求項13】

前記スケール・深度変換は、正規化された1次導関数Ray - Gaussian変換であり、

前記3次元シーンにおいて3次元特徴を抽出するステップは、前記正規化された1次導関数Ray - Gaussian変換の極値を検出し、前記極値に基づき3次元特徴を抽出するステップを含む、請求項12記載の方法。

【請求項14】

前記3次元シーンのライトフィールドイメージは、一定に離間した視点から撮影される、請求項1記載の方法。

【請求項15】

20

前記3次元シーンのライトフィールドイメージは、プレノプティックイメージングシステムによりキャプチャされる、請求項1記載の方法。

【請求項16】

前記(スケール)ドメイン及び前記(深度)ドメインはそれぞれ、1次元である、請求項1記載の方法。

【請求項17】

前記ライトフィールドイメージは、前記(スケール)ドメインと前記(深度)ドメインとの間の確定的関係を有し、

前記(イメージ, スケール, 深度)ドメイン表現を処理するステップは、前記確定的関係を利用する、請求項1記載の方法。

30

【請求項18】

前記3次元シーンのライトフィールドイメージは、プレノプティックイメージングシステムによりキャプチャされ、

前記(スケール)ドメインと前記(深度)ドメインとの間の確定的関係は、前記プレノプティックイメージングシステムにより決定される、請求項17記載の方法。

【請求項19】

前記(イメージ, スケール, 深度)ドメイン表現を処理するステップは、前記(イメージ, スケール, 深度)ドメイン上でサーチするステップを含み、

前記(スケール)ドメインと前記(深度)ドメインとの間の確定的関係は、前記サーチの計算複雑さを低減する、請求項17記載の方法。

40

【請求項20】

3次元シーンのライトフィールドイメージを処理する方法を実現するようコンピュータシステムに指示するためのコンピュータプログラムコードを含む非一時的な有形なコンピュータ可読媒体であって、
前記方法は、

前記3次元シーンのライトフィールドイメージの(イメージ, ビュー)ドメイン表現にアクセスするステップと、

前記(イメージ, ビュー)ドメイン表現を(イメージ, スケール, 深度)ドメイン表現に変換するため、スケール・深度変換を適用するステップと、

前記3次元シーンの(イメージ, スケール, 深度)ドメイン表現を処理するステップと

50

、
を有する媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、一般に3次元シーンのライトフィールド（マルチビューイメージを含む）の処理に関し、例えば、プレノプティックイメージングシステム（plenoptic imaging system）によりキャプチャされた3次元シーンのライトフィールドの処理などに関する。

【背景技術】

10

【0002】

ライトフィールドは、異なる視点から撮影された3次元シーンの複数のビューを介して当該シーンを表現するため、コンピュータグラフィックコミュニティにおいてまず導入された。一般に、シーンのライトフィールドは、任意の波長及び任意の時点における3次元空間の任意の視点から撮影されたシーンの2次元イメージ（すなわち、ライトフィールドイメージ）を含む7次元関数である。コンピュータグラフィックアプリケーションでは、コンピュータは、その3次元形状及びテクスチャを含む明示的な3次元シーンモデルを有するため、任意の視点からシーンをレンダリング可能である。すなわち、コンピュータは、ライトフィールドイメージの何れかをレンダリングし、シーンのライトフィールド全体をまた計算することが可能である。

20

【0003】

最近、3次元シーンの4次元ライトフィールドをキャプチャするためのシステムが開発されてきた。これらのシステムは、カメラアレイ及びプレノプティックイメージングシステムを含む。これらのシステムは、典型的には、ある波長（又は波長帯域）及び時点において4次元ライトフィールド、すなわち、2次元面上の各種視点から撮影されたシーンの2次元イメージ（3次元空間における任意の視点を許容するのではなく）をキャプチャする。これらのシステムでは、3次元シーン情報は明示的にキャプチャされない。むしろ、それは、キャプチャされた4次元ライトフィールドのピクセル内に非明示的に含まれる。

【0004】

4次元ライトフィールドから3次元情報を抽出することは、逆の問題である。ライトフィールドの高次元のため、それは困難な問題である。高密度深度推定（シーン内の各ピクセルの深度の推定など）はこれら困難な問題の1つであり、これは、グローバルにスムーズでコンシスタントな深度マップの取得は、典型的にはグローバルな最適化を要求し、高次元データ処理のための非常に大きな複雑さを通常有するためである。

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

従って、ライトフィールドから深度及び他の情報を効率的かつロウバストに抽出するライトフィールド処理アプローチが必要とされる。

【課題を解決するための手段】

40

【0006】

本発明は、3次元シーン（マルチビューイメージなど）のライトフィールドイメージを（イメージ、ビュー）ドメインから（イメージ、スケール、深度）ドメインに変換することによって、従来技術の制約を解消する。その後、処理が（イメージ、スケール、深度）ドメインにおいて実行される。上述されたライトフィールドが、（イメージ、ビュー）ドメインにおいてキャプチャされる。それらは、プレノプティックイメージングシステム、カメラアレイ又は他のタイプのマルチビューイメージングシステムによってキャプチャ可能である。それは、複数の視点から観察される2次元イメージとしての3次元シーンの表現である。（イメージ、スケール、深度）ドメインでは、スケールが3次元シーンにおけるオブジェクトの異なるサイズを表し、深度が3次元シーンにおけるオブジェクトの深度

50

を表す。

【 0 0 0 7 】

便宜上、(イメージ, ビュー)ドメインから(イメージ, スケール, 深度)ドメインに変換する処理は、スケール・深度変換として参照され、結果として得られる表現は、オリジナルのライトフィールドのスケール・深度変換として参照されてもよい。異なる変換が可能であり、“スケール・深度変換”という用語は、(イメージ, ビュー)ドメインから(イメージ, スケール, 深度)ドメインへの全ての変換を含むことが意図される汎用的な用語である。

【 0 0 0 8 】

1つのアプローチでは、スケール・深度変換は、Ray - Gaussianカーネル又はその導関数(正規化された導関数を含む)に基づく。Ray - Gaussianにおける“Ray”とは、フラットな平面上に一定に離間した視点について、3次元シーンにおけるポイントが(イメージ, ビュー)空間において直線として現れるという事実を表す。この直線の角度が当該ポイントの深度に相当し、角度から深度へのマッピングはカメラパラメータに依存する。同一の深度の隣接するポイントは、そのとき、(イメージ, ビュー)空間における有限の断面エリアによる“レイ(ray)”を生成する。当該レイの角度は、(イメージ, スケール, 深度)ドメインの(深度)部分に相当する。Ray - Gaussianにおける“Gaussian”とは、ガウスカーネルを利用して、(イメージ, スケール, 深度)ドメインの(スケール)部分を実現することを表す。ライトフィールドの2次元スライスのRay - Gaussianカーネルの一例は、

【数1】

$$\mathcal{R}_{\sigma, \varphi}(x, u) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x+u \tan \varphi)^2}{2\sigma^2}}$$

であり、ここで、 x は(イメージ)ドメインからの座標であり、 u は(ビュー)座標であり、 σ は(スケール)座標であり、 φ は(深度)座標である。この特定の定式化は、高速変換を可能にするいくつかの効果をも有する。本例のRay - Gaussianカーネルは、ライトフィールドの2次元スライスについて定義されるが、当該変換は、3次元スライスやライトフィールド全体についてカーネルを定義するため拡張可能であるとき、このケースに限定されるものでない。

【 0 0 0 9 】

(イメージ, スケール, 深度)ドメインにおいて実行可能な処理の具体例は、深度推定及び3D特徴抽出である。1つのアプローチでは、スケール・深度変換は、Ray - Gaussianカーネルの2次導関数に基づき、深度推定は、ライトフィールドのスケール・深度変換において極値を検出することに基づく。他のアプローチでは、スケール・深度変換は、Ray - Gaussianカーネルの1次導関数に基づき、変換されたライトフィールドの極値の検出は、エッジ検出などの3D特徴検出に利用可能である。

【 0 0 1 0 】

本発明の他の態様は、上述したコンセプトに関連する方法、デバイス、システム、コンポーネント及びアプリケーションを含む。

【発明の効果】

【 0 0 1 1 】

本発明によると、ライトフィールドから深度及び他の情報を効率的かつロウバストに抽出するライトフィールド処理アプローチを提供することができる。

【 0 0 1 2 】

本発明は、添付した図面と共に参照されるとき、本発明の以下の詳細な説明及び添付した請求項からより容易に明らかになる他の効果及び特徴を有する。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 3 】

10

20

30

40

50

【図 1】図 1 は、3 次元シーンを示す図である。

【図 2】図 2 は、本発明によるライトフィールドイメージを処理する方法のフロー図である。

【図 3】図 3 A ~ 3 C は、3 つの異なる視点から見た 2 つのオブジェクトを示す図であり、図 3 D は、対応するライトフィールドの (x, u) スライスを示す図である。

【図 4】図 4 は、グレイスケールシーンのライトフィールドからの (x, u) スライス上に重畳されたレイを示す。

【図 5】図 5 A は、2 次元イメージのガウススケール空間を示し、図 5 B は、ガウスピラミッドを示す図である。

【図 6】図 6 は、 $\phi = \pi / 4$ 及び $\sigma = 6$ の Ray - Gaussian カーネルの一例を示す。

【図 7】図 7 A ~ 7 C は、Ray - Gaussian 変換を計算するための異なる方法を示すフロー図である。

【図 8】図 8 は、深度推定を示すフロー図である。

【図 9】図 9 A ~ 9 B は、可能性のあるオクルージョンを示す図である。

【図 10】図 10 A はライトフィールドイメージセットからの 1 つのイメージであり、図 10 B はライトフィールドイメージセットの深度推定を示し、図 10 C はライトフィールドイメージセットの特徴抽出を示す。

【図 11】図 11 は、プレノプティックイメージングシステムの図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

図面は、説明のみのため本発明の実施例を示す。以下の説明から、当業者は、ここに説明される構成及び方法の代替的な実施例がここに説明される本発明の原理から逸脱することなく利用可能であることを容易に認識するであろう。

【0015】

図面及び以下の説明は、単なる説明のための好適な実施例に関する。以下の説明から、ここに開示される構成及び方法の代替的な実施例が、特許請求の範囲の原理から逸脱することなく利用可能な実行可能な代替として容易に認識されることに留意すべきである。

[ライトフィールド]

以下の具体例では、ライトフィールドを何れか所与の方向の空間内の任意のポイントにおける放射輝度として表現する。ライトフィールドは、所与のリファレンス面上の位置 (u, v) において観察され、図 1 に示されるように、位置 (x, y) のポイントソースから到来するライトレイの放射輝度を表す 4 次元関数としてパラメータ化可能である。ライトフィールドを $I(x, y, u, v)$ として記す。

【0016】

図 1 は、3 つのオブジェクト 110 A ~ C による簡単化された 3 次元シーンを示す。図 1 はまた、リファレンス (x, y) プレーンとリファレンス (u, v) プレーンとを示す。2 つのポイント (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) がまた示される。 (u, v) プレーンは、視点プレーンとしてみなすことができ、座標 (u, v) は、(ビュー)ドメインとして参照される空間を定義する。ライトフィールドイメージ $I(x, y, u_1, v_1)$ は、視点 (u_1, v_1) から観察者により見えるであろうイメージである。それは、ピンホールがポジション (u_1, v_1) に配置されたピンホールカメラによりキャプチャされるイメージとしてみなすことができる。同様に、ライトフィールドイメージ $I(x, y, u_2, v_2)$ は、視点 (u_2, v_2) にいる観察者により見えるであろうイメージである。図 1 において、 (x, y) プレーンは、オブジェクト空間において描画されるが、イメージ空間に定義されるユニバーサル座標系としてより適切にみなすことができる。それは、全てのライトフィールドイメージが共通する (x, y) 座標系に対して定義されるという意味でユニバーサルである。座標 (x, y) は、(イメージ)ドメインとして参照される空間を定義する。

【0017】

10

20

30

40

50

従って、ライトフィールド $I(x, y, u, v)$ は、(イメージ) 及び (ビュー) ドメインからの 3 次元シーンの表現であるため、3 次元シーンの (イメージ, ビュー) ドメイン表現として参照されることもある。デバイスは、当該空間においてイメージをキャプチャするのに利用されてもよい。例えば、プレノプティックカメラ、カメラアレイ又は他のタイプのマルチビューイメージングデバイスが、異なる視点から 3 次元シーンのイメージをキャプチャするのに利用されてもよい。数学的には、これらのデバイスは、 (u, v) の異なる値においてライトフィールド $I(x, y, u, v)$ をサンプリングする。イメージセットはまた、3 次元シーンのマルチビューイメージとしても参照されてもよい。しかしながら、上述されたように、これらマルチビューイメージを直接処理し、それらの内部において本来的にキャプチャされる 3 次元情報を抽出することは困難となりうる。

10

【0018】

図 2 は、本発明によるライトフィールドイメージを処理する方法のフロー図である。(イメージ, ビュー) ドメインにおいてライトフィールドイメージを直接処理する代わりに、提供 270 されるライトフィールドイメージは、(イメージ, ビュー) ドメインから (イメージ, スケール, 深度) ドメインに変換 280 され、当該ドメインにおいて代わりに処理 290 される。変換 280 は、スケール・深度変換として参照される。(イメージ, スケール, 深度) ドメインへの変換を含む (スケール) 及び (深度) ドメインのそれぞれが、以下においてより詳細に説明される。簡単化のため、以下の説明は、1 次元 “イメージ” を用いるが、2 次元への拡張は容易である。(イメージ)、(ビュー)、(スケール) 及び (深度) の次元はそれぞれ、座標 x, u, σ 及び ϕ により表される。

20

[(深度) ドメイン]

図 3 A ~ 3 D に示されるようなライトフィールドの 2 次元スライス $I(x, u)$ のいくつかの具体例を見る場合、一様に離間した視点によるライトフィールドの特性に固有のライン構成を観察することが可能であり、ここで、 (x, u) ドメインのラインの角度はシーン内の異なる深度に対応する。図 3 A は、異なる深度にある 2 つのオブジェクト 210, 220 を示す。オブジェクト 220 はオブジェクト 210 の前方である。それは、視点 u に応じてオブジェクト 210 を塞ぐかもしれないし、又はそうでないかもしれない。

【0019】

図 3 A は、視点 u_1 から撮影される。当該視点から、オブジェクト 210 は x インターバル 211 を占有し、オブジェクト 220 は x インターバル 221 を占有する。2 つのインターバル 211, 221 は重複せず、オクルージョン又は閉塞 (occlusion) はない。図 3 D は、これら 2 つのオブジェクトのライトフィールドの 2 次元 (x, u) スライスを示す。図 3 A の x スライス、垂直方向の u 軸上の u_1 によりマーク付けされる。2 つのインターバル 211, 221 は、図 3 D の座標 $u = u_1$ の 2 つのラインセグメントとして再生される。図 3 B は、異なる視点 u_2 からの同一の 2 つのオブジェクトを示す。当該視点から、オブジェクト 210 は x インターバル 212 を占有し、オブジェクト 220 は x インターバル 222 を占有する。これはまた、図 3 D の座標 $u = u_2$ の 2 つのラインセグメントにより示される。座標 $u = u_1$ におけるセグメントに関するこれらのセグメントのシフトが存在することに留意すべきである。視点の変更による当該相対的なシフトは、視差と呼ばれる。図 3 B において、2 つの x インターバル 212, 222 は単に接触している。図 3 C は、視点 u_3 からの 2 つのオブジェクトを示す。ここで、図 3 D の $u = u_3$ における 2 つのラインセグメントにより示されるように、オブジェクト 210 は x インターバル 213 を占有し、オブジェクト 220 は x インターバル 223 を占有する。2 つの x インターバル 213, 223 はオーバーラップしており、それは、オブジェクト 220 がオブジェクト 210 の一部を塞ぐことを意味する。閉塞された領域は、オーバーラップエリアである。他の視点 u について当該処理を繰り返すことは、図 3 D に示される 2 つの台形 219, 229 をもたらし、それはレイ (ray) として参照される。オーバーラップエリア 239 は、オブジェクト 220 によるオブジェクト 210 のオクルージョンを表す。オブジェクト 220 はオブジェクト 210 の前方にあるため、レイ 229 は、オーバーラップ領域 239 による影響を受けない。すなわち、レイ 229 のエッジは、平行で

30

40

50

ありつづける。他方、レイ 2 1 9 は、マイナスの三角形のオーバーラップ領域 2 3 9 となる。

【 0 0 2 0 】

図 3 D から、固有のライン構成が見える。すなわち、オブジェクトの各ポイントは、 x 軸との法線に関する角度 φ の (x, u) プレーンにおいてラインを生成する。同じ深度の隣接するポイントセットは、垂直軸と角度 φ を形成する幅のレイを生成する。これらの角度は、図 3 D において φ_1 及び φ_2 とラベル付けされる。一般的な 4 次元のケースでは、これらの角度は、 (x, y) プレーンとの法線に関するものとなる。便宜上、角度 φ は視差角度として参照される。視差角度 φ は、オブジェクトの深度位置に依存する。視差のため、視点となる u プレーンから深さに関してより遠いオブジェクトは、より小さな視差角度 φ によるラインを生成する。 u 軸からより遠いオブジェクト 2 1 3 に対応するレイ 2 1 9 は、より小さな視差角度 φ を有する。 u 軸により近いオブジェクト 2 2 3 に対応するレイ 2 2 9 は、より大きな視差角度 φ を有する。カメラレイ又はプレノプティックカメラのいくつかの構成では、角度 φ はまた負となりうる。これらのレイは、垂直方向のレイ（すなわち、 $\varphi = 0$ のレイ）を生成するオブジェクトより、視点に対する方向に沿って更に遠くにあるオブジェクトに対応する。一般に、角度 φ は、インターバル $(-\pi/2, \pi/2)$ 内の値をとりうる。

10

【 0 0 2 1 】

図 4 は、グレイスケールシーンのライトフィールドからの (x, u) スライスを示す。図 4 はまた、可変的な角度（深度）及び幅の 3 つのレイ 4 1 9 , 4 2 9 , 4 3 9 を示す。

20

【 0 0 2 2 】

3 次元シーンにおいて視差角度 φ と深度との間には直接的な対応関係がある。この結果、3 次元シーンの (x, u) 表現は、 (x, φ) ドメインに変換可能である。当該ドメインの (φ) 部分は、視差角度 φ と深度との間の直接的な対応関係による（深度）ドメインの一例である。

〔（スケール）ドメイン〕

図 3 D に戻って、各レイ 2 1 9 , 2 2 9 の幅は、3 次元シーンの対応するオブジェクト 2 1 0 , 2 2 0 の空間的な範囲（すなわち、サイズ）に対応する。異なるサイズのオブジェクトは、シーンのスケール空間表現を用いることによって処理することができる。

【 0 0 2 3 】

30

1 つのアプローチでは、イメージのスケール空間表現は、スケールが小さなスケール（狭くシャープなカーネルを与える）から大きなスケール（広くスムーズなカーネルを与える）に変化するカーネルによりそれを畳み込むことによって取得される。異なるレベルのスケール空間において、異なるサイズのイメージ特徴は異なってスムーズ化され、すなわち、小さな特徴はより大きなスケールでは消失する。従って、スケール空間フレームワークは、スケールに不変なイメージ処理を可能にし、それは、オブジェクトのポーズやカメラの向き及び距離などのため、イメージにおけるオブジェクトサイズの変化を処理するのに有用である。

【 0 0 2 4 】

スケール空間を構成するのに通常利用されるカーネルはガウスカーネルである。1 次元のケースにおけるガウススケール空間（今のところ視点 u を無視する）は、

40

【 数 2 】

$$I(x, \sigma) = I(x) * G_\sigma(x) \quad (1)$$

として定義される。ただし、

【数 3】

$$G_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

であり、 σ は (スケール) 座標であり、 $*$ は畳み込み演算子を示す。

【 0 0 2 5】

ガウスカーネルの導関数に基づくスケール空間がまた構成可能である。例えば、ガウススケール空間の正規化された 1 次導関数

【数 4】

10

$$I'(x, \sigma) = I(x) * \sigma \frac{dG_{\sigma}(x)}{dx} \quad (3)$$

はエッジ検出に利用可能であり、ここで、“正規化”とは σ との乗算を表す。すなわち、所与の信号が $I(x) = t(x - x_0)$ であるとき(ただし、 $t(x)$ はステップ関数である)、

【数 5】

$$I(x) * \frac{dG_{\sigma}(x)}{dx} = \frac{dI(x)}{dx} * G_{\sigma}(x) = \delta(x - x_0) * G_{\sigma}(x) = G_{\sigma}(x - x_0). \quad (4)$$

20

となる。

【 0 0 2 6】

ガウススケール空間の正規化された 2 次導関数

【数 6】

$$I''(x, \sigma) = I(x) * \sigma^2 \frac{d^2 G_{\sigma}(x)}{dx^2} \quad (5)$$

30

は、blob 検出 (blob detection) に利用可能であり、ここで、“正規化”とは σ^2 との乗算を表す。これは、 $I(x) = t(x - x_0) - t(x - x_1)$ であるとき、

【数 7】

$$I(x) * \sigma^2 \frac{d^2 G_{\sigma}(x)}{dx^2}$$

が、

【数 8】

40

$$\sigma = \frac{x_0 - x_1}{2}$$

に対して最小値を有するためである。ガウススケール空間の更なる既知の性質は Appendix に説明される。

【 0 0 2 7】

ガウススケール空間の 1 つの効果は、図 5 A ~ 5 B に示されるように、ガウスピラミッドを介した再帰的なスケールドメインの実現を可能にすることである。図 5 A において、要素 5 1 0 はガウススケール空間を表す。(x, y) 座標はイメージ座標であり、 σ はス

50

ケール座標である。簡単化のため、1次元のみのスケーリングを仮定する。要素510は、垂直軸に沿って $\log(\sigma)$ による式(1)を表す。要素510を構成する1つの方法は、要素510の異なる“スライス”により表されるような σ の異なる値について式(1)を直接計算することである。

【0028】

他のアプローチは、図5Bに示されるように、ガウスピラミッドを構成することである。この場合、要素520Aは、式(1)を直接計算することによって構成される。要素520Bは、2のファクタ(1オクターブ)など乗数ファクタにより要素520Aのダウンサンプリングによって取得される。すなわち、要素520Bのスライスは、2の乗数などの要素520Aに利用されるものの乗数である σ の値において評価される。要素520Bのスライスは、式(1)の直接的な適用により計算する代わりに、要素520Aのスライスをフィルタリング及びダウンサンプリングすることによって構成可能である。同様に、要素520Cのスライスは、要素520Bのスライスをフィルタリング及びダウンサンプリングすることによって構成可能である。

[(イメージ, スケール, 深度)ドメインへの変換]

ここで、上述した具体例に基づき(イメージ, ビュー)ドメインから(イメージ, スケール, 深度)ドメインへの変換の具体例を検討する。本例では、キャプチャされたマルチビューイメージは、 $I(x, u)$ によって(イメージ, ビュー)ドメインにおいて表現される。(イメージ, ビュー)ドメイン表現 $I(x, u)$ を(イメージ, スケール, 深度)ドメイン表現 $L(x; \sigma, \varphi)$ に変換することを所望する。便宜上、 $L(x; \sigma, \varphi)$ はまた、 $I(x, u)$ のスケール・深度変換(又はスケール・深度空間)として参照されてもよい。

【0029】

まず当該変換において用いるカーネルを定義する。Ray-Gaussianカーネルを

【数9】

$$R_{\sigma, \varphi}(x, u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x+u \tan \varphi)^2}{2\sigma^2}}, \quad (6)$$

として定義する。ここで、 x 及び u は図2Dに定義されるものであり、 φ は u 軸によりRay-Gaussianカーネルが構成する角度であり(すなわち、 x 軸との法線との角度)、 σ はカーネルの幅パラメータである。Ray-Gaussianの“Ray”とは、 (x, u) 空間にあるレイを表す。

【0030】

図6は、 $\varphi = \pi/4$ 及び $\sigma = 6$ によるRay-Gaussian関数の一例を示す。このグレイスケールピクチャでは、より明るいピクセルはより大きな値であり、より暗いピクセルはより小さな値である。Ray-Gaussianは、 x 方向についてガウス状であり、 u 方向についてリッジ状である。リッジの傾きは、 $\tan \varphi$ に等しく、指数における x のシフトにおいて u を乗算する。このリニアシフト $x_0 = u \tan \varphi$ は、フラットプレーン上の視点の一般的な離間により取得されるライトフィールドのための(イメージ, ビュー)ドメインにおけるレイ構成を最も良く表すため選択される。

【0031】

しかしながら、曲線状のレイなどの異なる構成を表すためシフト $x_0 = f(u)$ の異なる(及び非線形であり得る)パラメータ化を選択することが可能であることに留意されたい。 $f(u)$ の適切な選択は、ライトフィールドイメージ取得のジオメトリに依存する。図2の具体例では、3次元シーンの各ポイントは、(イメージ, ビュー)スライスにおいてラインを生成し、異なる深度のポイントは、異なる角度のラインに対応する。しかしながら、マルチビューイメージが非一様マイクロレンズアレイ密度による非フラットプレー

ン又はブレノプティックカメラ上の非一様なカメラアレイによりキャプチャされる場合、3次元シーンの異なる深度のポイントは、(イメージ, ピュー)スライスの異なる曲線に対応してもよい。関数 $f(u)$ はこれに対応して選択される。

【0032】

Ray - Gaussianカーネルを用いて、
【数10】

$$\mathcal{L}(x; \sigma, \varphi) = (I * \mathcal{R}_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0} \quad (7)$$

10

に従って $I(x, u)$ の Ray - Gaussian変換 $\mathcal{L}(x; \sigma, \varphi)$ を構成する。ただし、 x (イメージドメイン) 上でのみ畳み込みを評価しているため、 $u = 0$ が選択される。すなわち、

【数11】

$$(f * g)(x, u)|_{u=0} = \int_{x'} \int_{u'} f(x - x', -u') g(x', u') dx' du' \quad (8)$$

である。畳み込みは x 上のみであるため、 $\mathcal{L}(x; \sigma, \varphi)$ は u に依存せず、 $\mathcal{L}(x; \sigma, \varphi)$ はパラメータとしてスケール σ と角度 φ との双方を有することに留意されたい。

20

【0033】

同様に、Ray - Gaussian変換の n 次導関数を
【数12】

$$\frac{d^n}{dx^n} \mathcal{L}(x; \sigma, \varphi) = (I * \frac{d^n}{dx^n} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0} \quad (9)$$

として定義する。

【0034】

以下において、Ray - Gaussian変換を構成するのに有用な Ray - Gaussian関数の特定の性質を示す。次の2つの補題は Ray - Gaussianとそのダウンサンプリング又はアップサンプリングファクタとのスケール変更に関する等式を証明する。

30

【0035】

補題1：以下の式が成り立つ。

【数13】

$$\mathcal{R}_{s\sigma, \varphi}(x, u) = s \mathcal{R}_{\sigma, \varphi}(sx, su) \quad (10)$$

ただし、 $s > 0$ はスケールファクタである。

40

【0036】

証明：

【数14】

$$s \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi}(sx, su) = \frac{s}{s\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(sx+su \tan \varphi)^2}{2s^2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x+u \tan \varphi)^2}{2\sigma^2}} = \mathcal{R}_{\sigma, \varphi}(x, u). \quad (11)$$

補題1は、スケール σ 及び角度 φ による Ray - Gaussianが、ダウンサンプリングファクタ s について s により乗算される値によるスケール $s\sigma$ 及び角度 φ によるそのダウンサンプリングされたバージョンに等しいことを示す。ライトフィールドでは、 u

50

のダウンサンプリングは、その個数が通常は小さいシーンのいくつかのビューをドロップしていることを意味するため、通常は望ましくない。従って、 x のみにおけるダウンサンプリングを扱う以下の補題を示す。

【 0 0 3 7 】

補題 2 : 以下の式が成り立つ。

【 数 1 5 】

$$\mathcal{R}_{\sigma,\varphi}(x,u) = s\mathcal{R}_{s\sigma,\varphi'}(sx,u), \quad (12)$$

ただし、 $\varphi' = \arctan(s \tan \varphi)$ であり、 $\varphi \in (-\pi/2, \pi/2)$ であり、 $s > 0$ である。 10

【 0 0 3 8 】

証明 : $\tan(\varphi') = s \tan \varphi$ であるため、

【 数 1 6 】

$$s\mathcal{R}_{s\sigma,\varphi'}(sx,u) = \frac{s}{s\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(sx+u \tan \varphi')^2}{2s^2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(sx+su \tan \varphi)^2}{2s^2\sigma^2}} = \mathcal{R}_{\sigma,\varphi}(x,u) \quad (13)$$

となる。

【 0 0 3 9 】

第 2 の補題は、スケール σ 及び角度 φ による Ray - Gaussian が、ファクタ s による x のみにおけるダウンサンプリングについて、 s により乗算された値によるスケール $s\sigma$ 及び角度 $\varphi' = \arctan(s \tan \varphi)$ におけるそのダウンサンプリングされたバージョンに等しいことを示す。

【 0 0 4 0 】

これら 2 つの補題が提供されると、Ray - Gaussian 変換 $I * \mathcal{R}_{\sigma,\varphi}$ の以下の性質を示すことができる。次の 6 つの命題は、ライトフィールド I のダウンサンプリングによる Ray - Gaussian 変換の動作に関する。完全性のため、これらの命題の証明は、Appendix に与えられる。

【 0 0 4 1 】

命題 1 : $J(x,u) = I(sx,su)$ となるような (すなわち、 I は J のダウンサンプリング又はアップサンプリングバージョンである) ライトフィールドスライス $J(x,u)$ を有する場合、

【 数 1 7 】

$$(J * \mathcal{R}_{\sigma,\varphi})(x,u)|_{u=0} = \frac{1}{s}(I * \mathcal{R}_{s\sigma,\varphi})(sx,su)|_{su=0} \quad (14)$$

である。

【 0 0 4 2 】

命題 2 : $J(x,u) = I(sx,u)$ となるような (すなわち、 I は x のみにおける J のダウンサンプリング又はアップサンプリングバージョンである) ライトフィールドスライス $J(x,u)$ を有する場合、

【 数 1 8 】

$$(J * \mathcal{R}_{\sigma,\varphi})(x,u)|_{u=0} = (I * \mathcal{R}_{s\sigma,\varphi'})(sx,u)|_{u=0} \quad (15)$$

である。ただし、 $\varphi' = \arctan(s \tan \varphi)$ であり、 $\varphi \in (-\pi/2, \pi/2)$ であり、 $s > 0$ である。 50

【 0 0 4 3 】

Ray - Gaussian変換のこれら2つの性質は、複数の方法によりライトフィールドIの変換 $L(x; \sigma, \varphi)$ を構成可能であることを示す。図7Aは直接的なアプローチを示す。このアプローチでは、Iは、 $\sigma \{ \sigma_1, \dots, \sigma_n, 2\sigma_1, \dots, 2\sigma_n, \dots, 2^k \sigma_1, \dots, 2^k \sigma_n, \}$ 及び $\varphi \{ \varphi_1, \dots, \varphi_m \}$ について、 $R_{\sigma, \varphi}$ により畳み込まれる710。この式では、nはスケールのオクターブ毎のサンプルの個数であり、 $(k+1)$ はオクターブの個数であり、mは深度ドメインにおけるサンプルの個数である。他のファクタpもまた利用可能であるが、ダウンサンプリングファクタは2として選択される。図7Aにおいて、これは2つのループ722, 724により実現される。

10

【 0 0 4 4 】

図7Bは、上記命題を用いて図5のものと同様のピラミッドをダウンサンプリング及び構成することによって計算量を低減する。これは、大きなライトフィールドにとって特に有用となりうる。このアプローチでは、Iは、図7Bのループ722, 726により示されるように、 $\sigma \{ \sigma_1, \dots, \sigma_n \}$ 及び $\varphi \{ \varphi_1, \dots, \varphi_m \}$ について $R_{\sigma, \varphi}$ により畳み込みされる。 σ の値は図7Aと比較してはるかに少ないオクターブ未満にしか及ばないことに留意されたい。その後、Iは2によりダウンサンプリング730され、ダウンサンプリングされたIは、2により乗算され(式(14)に従って)、 $\sigma \{ \sigma_1, \dots, \sigma_n \}$ 及び $\varphi \{ \varphi_1, \dots, \varphi_m \}$ について $R_{\sigma, \varphi}$ により畳み込みされる。この畳み込みは、Iがダウンサンプリングされているため、より少ない計算量しか必要としない。これがループ732において $(k-1)$ 回繰り返される。

20

【 0 0 4 5 】

図7Cは、ダウンサンプリング737がuでなくxにおいてのみ実行されることを除き、図7Bと類似する。この場合、各ダウンサンプリングについて、深度値 φ がまた変更737される。すなわち、ダウンサンプリング後、ダウンサンプリングされたIが、 $\sigma \{ \sigma_1, \dots, \sigma_n \}$ 及び $\varphi \{ \varphi_1', \dots, \varphi_m' \}$ について $R_{\sigma, \varphi}$ により畳み込みされる。

【 0 0 4 6 】

また、同様の性質が、Ray - Gaussianの1次及び2次導関数に対して構成された変換について成り立つことを証明できる。

【 0 0 4 7 】

命題3： $J(x, u) = I(sx, su)$ となるようなライトフィールドスライス $J(x, u)$ を有する場合(すなわち、IがJのダウンサンプリング又はアップサンプリングされたバージョンである)、

30

【 数 1 9 】

$$(J * \sigma \frac{d}{dx} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0} = \frac{1}{s} (I * s \sigma \frac{d}{dx} \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi})(sx, su)|_{su=0} \quad (16)$$

となる。

【 0 0 4 8 】

命題4： $J(x, u) = I(sx, u)$ となるようなライトフィールドスライス $J(x, u)$ を有する場合(すなわち、Iがx上でのみJのダウンサンプリング又はアップサンプリングされたバージョンである)、

40

【 数 2 0 】

$$(J * \sigma \frac{d}{dx} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0} = (I * s \sigma \frac{d}{dx} \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi'})(sx, u)|_{u=0} \quad (17)$$

となる。ただし、 $\varphi' = \arctan(s \tan \varphi)$ であり、 $\varphi \in (-\pi/2, \pi/2)$ であり、 $s > 0$ である。

50

【 0 0 4 9 】

命題 3 , 4 から、1 次導関数 R a y - G a u s s i a n 変換 $L' (x; \sigma, \varphi)$ の構成のため、“正規化”された R a y - G a u s s i a n 導関数

【数 2 1】

$$\mathcal{R}'_{\sigma, \varphi} = \sigma \frac{d}{dx} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi}$$

を用いて、図 7 A ~ 7 C に示されるものと同様のアプローチを実現することができる。

【 0 0 5 0 】

10

命題 5 : $J(x, u) = I(sx, su)$ となるようなライトフィールドスライス $J(x, u)$ を有する場合 (すなわち、 I が J のダウンサンプリング又はアップサンプリングされたバージョンである)、

【数 2 2】

$$(J * \sigma^2 \frac{d^2}{dx^2} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0} = \frac{1}{s} (I * s^2 \sigma^2 \frac{d^2}{dx^2} \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi})(sx, su)|_{su=0} \quad (18)$$

となる。

【 0 0 5 1 】

20

命題 6 : $J(x, u) = I(sx, u)$ となるようなライトフィールドスライス $J(x, u)$ を有する場合 (すなわち、 I が x 上でのみ J のダウンサンプリング又はアップサンプリングされたバージョンである)、

【数 2 3】

$$(J * \sigma^2 \frac{d^2}{dx^2} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0} = (I * s^2 \sigma^2 \frac{d^2}{dx^2} \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi'})(sx, u)|_{u=0} \quad (19)$$

となる。ただし、 $\varphi' = \arctan(s \tan \varphi)$ であり、 $\varphi \in (-\pi/2, \pi/2)$ であり、 $s > 0$ である。

30

【 0 0 5 2 】

同様に、命題 5 , 6 から、2 次導関数 R a y - G a u s s i a n 変換 $L'' (x; \sigma, \varphi)$ の構成のため、“正規化”された R a y - G a u s s i a n 2 次導関数

【数 2 4】

$$\mathcal{R}''_{\sigma, \varphi} = \sigma^2 \frac{d^2}{dx^2} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi}$$

を用いて、図 7 A ~ 7 C に示されるものと同様のアプローチを実現することが可能である。

40

【 0 0 5 3 】

角度の変化の下でのライトフィールドとの内積の保存に関する R a y - G a u s s i a n カーネルの 1 以上の性質を証明することが有用である。

【 0 0 5 4 】

命題 7 : $I(x, u) = f(x - au)$ を満たすライトフィールド (ただし、 a は定数を有する場合 (オクルージョンがない場合)、

【数 2 5】

$$\{f(x - u \tan \varphi_1) \mathcal{R}_{\sigma, \varphi_1}(x, u)\} = \{f(x - u \tan \varphi_2) \mathcal{R}_{\sigma, \varphi_2}(x, u)\}. \quad (20)$$

となる。

【0055】

同様の命題が、導関数 $\mathcal{R}'_{\sigma, \varphi}$ 及び $\mathcal{R}''_{\sigma, \varphi}$ について成り立つ。これは、深度推定のための重要な性質である。なぜなら、レイの角度に関するバイアスがなく、深度値に関するバイアスがないことを保証するためである。

10

[正規化された2次導関数 Ray - Gaussian変換からの深度推定]

図2に戻って、スケール・深度変換が、異なる目的を実現するため異なる方法により処理290されることが可能である。1つの適用では、3次元シーンの(イメージ, スケール, 深度)ドメイン表現は、3次元シーンにおける深度を推定するため処理される。以下の具体例は、スライスにおける位置、幅(σ に基づく)及び角度(φ に基づく)と共に(x, u)空間においてレイを検出することに基づく。

【0056】

図8は、Ray - Gaussianに基づきこれを実現するためのフロー図を示す。図8は、図2に示される処理の一例である。ここで、変換ステップ880は、正規化された2次導関数 Ray - Gaussian変換

20

【数 2 6】

$$\mathcal{L}''(x; \sigma; \varphi) = (I * \mathcal{R}''_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0}$$

に基づく。処理ステップ890は、 $\mathcal{L}''(x; \sigma, \varphi)$ の極値(局所的最小値及び最大値)を求めることに基づく。極値ポイントのパラメータ $\{(x_p, \sigma_p, \varphi_p)\}$ は、各レイpについて以下の情報を与える。

- ・レイの中心の位置 x_p
- ・レイの幅 $2\sigma_p$
- ・レイの角度 φ_p

30

角度 φ_p から、カメラキャリブレーションパラメータを $d_p = f b / \tan(\varphi_p)$ として利用することによって(ただし、 f はカメラ焦点長さであり、 b はカメラ間距離である)、当該レイの深度 d_p (すなわち、3次元シーンにおける対応するポイントの深度)を取得できる。プレノプティックカメラについて、レイトレーシング又は波伝搬を用いてプレノプティックイメージ形成をシミュレートすることによって、より正確な角度・深度値の割り当てを評価できる。この第2アプローチは、深度推定において光パラメータのより正確な利用を含む。

【0057】

レイを検出し、そのパラメータを検出した後、更なる技術を適用することによって結果を更に精緻化できる。1つの技術は、重複するレイ間のオクルージョンコンフリクト892を決定する。各レイの位置及び幅を有するため、図3Dに示されるものなど、オーバーラップするレイセットを求めることができる。オーバーラップしているレイを検出すると、フォアグラウンドからバックグラウンドへのレイのオーダリングを決定することができる。より大きな角度のレイはより小さな深度を示すため(より近いオブジェクトとより大きな視差)、より大きな角度のレイは、図9Aに示されるようにフォアグラウンドにあるべきである。図9Aにおいて、レイ910は(x, u)空間においてレイ920を塞ぐ。これは、レイ910がより急峻な角度であるため可能であり、それがカメラにより近く、より近くのオブジェクトがより遠くのオブジェクトを塞ぐことを意味する。

40

【0058】

50

イメージにおけるノイズのため、検出されたレイは図 9 B に提供される状況に従う。本例では、レイ 9 2 0 はレイ 9 1 0 を塞ぐが、レイ 9 2 0 はより遠くのオブジェクトを表す。重複するレイによるこのようなケースを処理するための 1 つのアプローチは、全てのレイのセットから“塞がれた”レイ 9 1 0 を取り除くことである。図 9 A に従う状況について、レイを維持し、更にオクルージョンに関する情報を記録することが可能である。

【 0 0 5 9 】

オクルージョン検出 8 9 2 の後に残った検出されたレイからの情報を組み合わせることによって、深度 8 9 4 をピクセルに割り当てることが可能である。また、(x , u) スライスからのスケール・深度空間と、ライトフィールドの(y , v) スライスからのスケール・深度空間とを処理することによって検出されるレイからの情報を合成可能である。(x , u) は水平方向の視差によるビューに対応し、スライス(y , v) は垂直方向の視差によるビューに対応する。割り当てのための複数のオプション(複数のレイ)によるピクセルについて、より高い信頼値を有する割り当てを選択してもよい。他の全てのファクタが等しい場合、当該ピクセルのスケール・深度空間の最も大きな絶対値を有するレイを抽出する。

【 0 0 6 0 】

図 8 における破線は、3 次元シーンにおけるエッジ及びそれらの角度を検出するための更なる処理パスを示す。これは、以下においてより詳細に説明される。当該情報はまた、深度割り当てを向上させるため利用可能である。例えば、レイ検出及びエッジ検出からの信頼値を組み合わせ、より良好な深度割り当てを取得することができる。また、誤りがあるかもしれないとき、両サイドにおけるシャープなエッジを有しない弱いレイを排除することができる。

[1 次導関数 R a y - G a u s s i a n 変換からの 3 D 特徴検出]

3 次元シーンにおいてエッジを検出し、正規化された 1 次導関数 R a y - G a u s s i a n 変換

【 数 2 7 】

$$\mathcal{L}'(x; \sigma, \varphi) = (I * \mathcal{R}'_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0}$$

において極値を検出することによって、これらのエッジの深度値を推定することが可能である。極値ポイントのパラメータ { (x_q , σ_q , φ_q) } は、各エッジ q に関する以下の情報を提供する。

- ・エッジの位置 x_q
- ・エッジのスケール σ_q
- ・エッジの角度 φ_q

エッジは、通常は有用なイメージ特徴である。各エッジ特徴に割り当てられた深度値を取得するため、本方法は 3 D 特徴検出を効果的に実行する。図 8 の破線のボックスにおいて、エッジ特徴検出方法のフローチャートが示される。これは、図 2 に示される処理の他の例である。ここで、変換ステップ 9 8 0 は、正規化された 1 次 R a y - G a u s s i a n 変換

【 数 2 8 】

$$\mathcal{L}'(x; \sigma, \varphi) = (I * \mathcal{R}'_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0}$$

に基づく。処理ステップ 9 9 0 は、L' (x ; σ , φ) の極値 (局所的最小値及び最大値) を検出することに基づく。オクルージョン検出 9 9 2 はまた、エッジ検出に適用可能である。

【 0 0 6 1 】

図 8 の破線のボックスにおいて示されるアプローチは、他のタイプの特徴検出に一般化できる。処理ステップ 990 は、所望される特徴検出に応じて異なる処理と置換されうる。例えば、第 2 イメージ次元 y に沿って連結されたスケール・深度変換の 4 D ボリュームにおいて極値を検出することによって、イメージ特徴としてコーナーを検索できる。

〔実験結果〕

スタンフォードデータベースからの“トラック”ライトフィールド上の深度推定及び 3 D 特徴検出方法を評価した。これは、カメラガントリにより取得された (x, y, u, v) ライトフィールドであり、水平方向と垂直方向との双方のカメラのずれによるイメージを含む。トータルで 16×16 のイメージがある。図 10 A において、1 つのイメージのグレイスケールバージョンが示される。以下の結果は、ライトフィールドのグレイスケールバージョンについて示されるが、ここで説明されるアプローチはまた、マルチカラーチャンネルからの結果を集約するのに利用可能である。

【0062】

(x, u) 及び (y, v) スライスについて個別に Ray - Gaussian 変換、レイ検出及びエッジ検出を適用し、その後、深度割り当て前にそれらを合成した。深度マップ推定のため、レイ検出とエッジ検出との双方からの情報を利用した。ある後処理後（メディアンフィルタリング及びモーフオロジカルクロージング）に取得した深度マップが図 10 B に示される。図 10 B では、より明るいグレイスケールはより近い深度を表し、より暗いグレイスケールはより遠くの深度を表す。最終的に、図 10 C は、オリジナルカラーイメージにオーバレイされた検出された 3 D 特徴の位置を示す。各特徴の深度は、特徴マーカの擬似カラーにより示される。より暖色（赤色）のカラーはより近い特徴を示し、より寒色（青色）のカラーはより遠くの特徴を示す。

〔プレノプティックイメージングシステム〕

図 11 は、上述したアプローチにより用いるのに適したライトフィールドイメージをキャプチャすることが可能なプレノプティックイメージングシステムの図である。システムは、シーン 110 のプレノプティックイメージをキャプチャする。プレノプティックイメージは、本来的にシーン 110 のマルチビューイメージである。プレノプティックイメージングシステムは、光学モジュール 1105 が複数の要素及び / 又は非レンズ要素（ミラーなど）を含みことが可能であることが理解されるが、図 11 において単一のレンズ要素により表される画像形成光学モジュール 1105 を含む。光学モジュール 1105 は、シーン 110 の従来の光学イメージ 1160 を形成する。光学モジュール 1105 はまた、プライマリイメージングモジュール、サブシステム又はシステムとして参照されてもよい。光学イメージ 1160 は、光学モジュール 1105 のイメージプレーン 1125 において形成される。光学モジュール 1105 は、瞳 1117 及び瞳面 1115 により特徴付けられ、図 11 において、単一のレンズ要素と共置される物理的な開口絞りにより表される。より複雑な光学モジュール 1105 では、瞳 1117 及び瞳面 1115 は、光学モジュール内の何れの光要素とも共置される必要はない。

【0063】

従来のイメージングシステムでは、検出アレイは、光学イメージ 1160 をキャプチャするため、イメージプレーン 1125 に配置される。しかしながら、このことは、図 11 のプレノプティックイメージングシステムの場合には異なる。本例では、マイクロイメージング要素 1121 のアレイ 1120 は、イメージプレーン 1125 に配置される。図 11 において、マイクロイメージング要素 1121 はマイクロレンズとして示される。ピンホールのアレイなどの他の要素がまた利用可能である。検出アレイ 1130 は、マイクロイメージングアレイ 1120 の後方（すなわち、光学的に下流）に配置される。より詳細には、検出アレイ 1130 は、瞳プレーン 1115 に対する共役面に配置される。すなわち、各マイクロイメージング要素 1121 は、共役面 1135 において瞳プレーン 1115 のイメージを生成し、当該イメージが検出アレイ 1130 によりキャプチャされる。

【0064】

マイクロレンズの場合、各マイクロレンズ 1121 は、検出プレーン 1135 において

10

20

30

40

50

瞳のイメージ 1 1 7 0 を形成する。瞳のイメージは、検出アレイ 1 1 3 0 において検出手段 1 1 3 1 のサブセットによりキャプチャされる。各マイクロレンズ 1 1 2 1 は、それ自体のイメージ 1 1 7 0 を形成する。従って、検出プレーン 1 1 3 5 において形成されるブレノプティックイメージ全体は、各マイクロレンズ 1 1 2 1 に 1 つのイメージとなるイメージ 1 1 7 0 のアレイを含むことになる。このアレイ化されたイメージングは、検出アレイをスーパーピクセル 1 1 3 3 に効果的に細分化し、各スーパーピクセルは複数の検出手段 1 1 3 1 を含む。各マイクロレンズ 1 1 2 1 は、瞳に対応するスーパーピクセル 1 1 3 3 にイメージングし、各瞳イメージは、その後に対応するスーパーピクセルの検出手段によりキャプチャされる。

【 0 0 6 5 】

各検出手段 1 1 3 1 は、瞳 1 1 1 7 の一部を介し移動するレイを収集する。各マイクロレンズ 1 1 2 1 は、シーン 1 1 0 の一部から生じるレイを収集する。従って、各検出手段 1 1 3 1 は、シーン 1 1 0 の一部から特定方向に移動するレイを収集する。すなわち、各検出手段 1 1 3 1 は、特定の視点から撮影されるとき、シーンのイメージ全体の小さな部分を収集する。同じ視点から生じる検出手段 1 1 3 1 により収集されたデータを集約することによって、当該視点からのシーンの完全なイメージが構成可能である。異なる視点から全てのイメージを集約することによって、シーンの完全なライトフィールドが構成可能である。図 1 1 において、プロセッサ 1 1 8 0 は、検出アレイ 1 1 3 0 からデータを収集し、それを処理する。プロセッサ 1 1 8 0 はまた、L F 変換と上述された他の処理とを実行してもよい。

【 0 0 6 6 】

図 1 1 は、ブレノプティックイメージングシステムによるライトフィールドのキャプチャを示す。上述されるように、カメラアレイなどの他のタイプのライトフィールドイメージングシステムがまた利用可能である。

【 0 0 6 7 】

多くのブレノプティックカメラは、これらのカメラから取得したライトフィールドの具体的な構成を生じさせる特定の光学的性質を有する。当該構成は、ライトフィールドの（イメージ、ビュー）ドメインのレイの角度とスケールとの間の確定的な関係に反映される。例えば、遠く離れてフォーカスされたメインレンズ（レンズの“過焦点距離”などにある）を備えたブレノプティックカメラは、小さな視差角度により特徴付けされるレイが小さなブラー（又はブラーのない）を有し、より大きな視差角度により特徴付けされるレイがより大きなブラーを有するライトフィールドを生成する。ブラー（スームスネス）は、レイがスケール深度処理により検出されるスケールのレベルに影響を与えるため、深度とスケールとの間には確定的な関係がある。これらのタイプの関係は、（イメージ、スケール、深度）空間におけるサーチの複雑さを低減するため、効果的に利用可能である。例えば、関数 f により与えられるスケールと深度との間の一对一の関係が存在する場合、（イメージ、スケール、深度）空間内の 3 次元サーチは、（イメージ、 f （スケール、深度））内の 2 次元サーチに減縮可能である。これは、スケール・深度処理の他の適用と共に、深度推定及び 3 D 特徴検出への双方の適用例において利用可能である。

【 0 0 6 8 】

メインレンズが過焦点距離より近いオブジェクトにフォーカスされている場合、焦点距離より近いオブジェクトを含むライトフィールドは、より大きな視差角度及びより大きなブラーによるレイによって特徴付けされる。焦点距離より遠くのオブジェクトは、より大きな負の視差角度及びより大きなブラーにより特徴付けされる。

【 0 0 6 9 】

詳細な説明は多くの詳細を含むが、これらは本発明の範囲を限定するものとして解釈されるべきでなく、本発明の異なる具体例及び態様を示すためのものとして単に解釈されるべきである。本発明の範囲は詳細に上述されていない他の実施例を含むことが理解されるべきである。例えば、ライトフィールドは、カメラの非正規的な配置によるカメラアレイやマルチ開口光学系（複数のレンズと 1 つのセンサアレイとを有するシステム）などのブ

10

20

30

40

50

レノブティックイメージングシステム以外のシステムによりキャプチャ可能である。他のレイとして、スケール・深度ライトフィールド変換は、上述された具体例以外の目的のため、すなわち、セグメント化、圧縮、オブジェクト検出及び認識、オブジェクトトラッキング及び3Dシーン可視化などのために処理可能である。最後の例として、スケール空間は、上述されたガウスカネル以外のカーネルを用いて構成可能である。当業者に明らかな他の各種修正、変更及び変形が、添付した請求項に規定されるような本発明の趣旨及び範囲から逸脱することなく、ここに開示された本発明の方法及び装置の構成、処理及び詳細において可能である。従って、本発明の範囲は、添付した請求項及びそれらの法的な均等によって決定されるべきである。

【0070】

他の実施例では、本発明は、コンピュータハードウェア、ファームウェア、ソフトウェア及び/又はこれらの組み合わせにより実現される。本発明の装置は、プログラマブルプロセッサによる実行のため、非一時的なマシーン可読記憶媒体において有形に具現化されるコンピュータプログラムプロダクトにより実現可能であり、本発明の方法ステップは、入力データに対して操作し、出力を生成することによって本発明の機能を実行するための命令のプログラムを実行するプログラマブルプロセッサにより実行可能である。本発明は、データストレージシステム、少なくとも1つの入力装置及び少なくとも1つの出力装置との間でデータ及び命令を送受信するため接続される少なくとも1つのプログラマブルプロセッサを含むプログラマブルシステム上で実行可能な1以上のコンピュータプログラムにより効果的に実現可能である。各コンピュータプログラムは、ハイレベル手続き型又はオブジェクト指向プログラミング言語により、又は所望される場合にはアセンブリ又は機械語により実現可能であり、何れの場合も、言語はコンパイル又はインタープリットされた言語とすることが可能である。適切なプロセッサは、例えば、汎用及び特定用途マイクロプロセッサとの双方を含む。一般に、プロセッサは、ROM及び/又はRAMから命令及びデータを受信する。一般に、コンピュータは、データファイルを格納するための1以上のマストレージデバイスを含み、当該デバイスは、内部のハードディスク及び着脱可能なディスクなどの磁気ディスク、光磁気ディスク及び光ディスクを含む。コンピュータプログラム命令及びデータを有形に具現化するのに適した記憶装置は、例えば、EPROM、EEPROM及びフラッシュメモリデバイスなどの半導体メモリデバイス、内部のハードディスク及び着脱可能なディスクなどの磁気ディスク、光磁気ディスク及びCD-ROMディスクなどを含む全ての形態の不揮発性メモリを含む。上述した何れかは、ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) 及び他の形態のハードウェアにより補完又は搭載可能である。

[Appendix: 1次元ガウスカネルの性質 (従来技術)]

以下の性質は、1次元ガウスカネルについて示される。2次元以上への拡張は容易である。1次元ガウスカネルについて、

【数29】

$$G_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} = \frac{s}{s\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{s^2 x^2}{2s^2 \sigma^2}} = sG_{s\sigma}(sx) \quad (21)$$

となる。 $J(x) = I(sx)$ を定義する。このとき、

【数30】

$$(J * G_{\sigma})(x) = (I * G_{s\sigma})(sx) \quad (22)$$

が成り立つ。1次導関数について、

【数 3 1】

$$(J * \sigma \frac{dG_{\sigma}(x)}{dx})(x) = (I * s\sigma \frac{dG_{s\sigma}}{dx})(sx) \quad (23)$$

が成り立つ。2 次導関数について、

【数 3 2】

$$(J * \sigma^2 \frac{d^2 G_{\sigma}(x)}{dx^2})(x) = (I * s^2 \sigma \frac{d^2 G_{s\sigma}}{dx^2})(sx). \quad (24)$$

10

が成り立つ。

【0 0 7 1】

さらに、以下は、命題 1 ~ 6 (上述した式 (1 4) ~ (1 9)) の証明である。

【0 0 7 2】

命題 1 の証明：

【数 3 3】

$$\begin{aligned} (J * \mathcal{R}_{\sigma,\varphi})(x, u)|_{u=0} &= \int_{x'} \int_{u'} \mathcal{R}_{\sigma,\varphi}(x - x', -u') J(x', u') dx' du' \\ &= \int_{x'} \int_{u'} s \mathcal{R}_{s\sigma,\varphi}(sx - sx', -su') I(sx', su') dx' du' \quad (\text{using Lemma 1}) \\ &= \int_w \int_v s \mathcal{R}_{s\sigma,\varphi}(sx - w, -v) I(w, v) \frac{dw}{s} \frac{dv}{s} \quad (w = sx', v = su') \\ &= \frac{1}{s} (I * \mathcal{R}_{s\sigma,\varphi})(sx, su)|_{su=0}. \end{aligned}$$

20

命題 2 の証明：

【数 3 4】

$$\begin{aligned} (J * \mathcal{R}_{\sigma,\varphi})(x, u)|_{u=0} &= \int_{x'} \int_{u'} \mathcal{R}_{\sigma,\varphi}(x - x', -u') J(x', u') dx' du' \\ &= \int_{x'} \int_{u'} s \mathcal{R}_{s\sigma,\varphi'}(sx - sx', -u') I(sx', u') dx' du' \quad (\text{using Lemma 2}) \\ &= \int_w \int_{u'} s \mathcal{R}_{s\sigma,\varphi'}(sx - w, -u') I(w, u') \frac{dw}{s} du' \quad (w = sx') \\ &= (I * \mathcal{R}_{s\sigma,\varphi'})(sx, u)|_{u=0} \end{aligned}$$

30

命題 3 の証明：

40

【数 3 5】

$$\begin{aligned}
(J * \sigma \frac{d}{dx} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0} &= \int_{x'} \int_{u'} \sigma \frac{d}{dx} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi}(x - x', -u') J(x', u') dx' du' \\
&= \int_{x'} \int_{u'} s \sigma \frac{d \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi}(sx - sx', -su')}{dx} I(sx', su') dx' du' \quad (\text{using Lemma 1}) \\
&= \int_w \int_v s \sigma \frac{d \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi}(sx - w, -v)}{dx} I(w, v) \frac{dw}{s} \frac{dv}{s} \quad (w = sx', v = su') \\
&= \int_w \int_v s \sigma \frac{d \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi}(sx - w, -v)}{d(sx - w)} \frac{d(sx - w)}{dx} I(w, v) \frac{dw}{s} \frac{dv}{s} \\
&= \frac{1}{s} (I * s \sigma \frac{d}{dx} \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi})(sx, su)|_{su=0}
\end{aligned}$$

10

命題 4 の証明：

【数 3 6】

$$\begin{aligned}
(J * \sigma \frac{d}{dx} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0} &= \int_{x'} \int_{u'} \sigma \frac{d}{dx} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi}(x - x', -u') J(x', u') dx' du' \\
&= \int_{x'} \int_{u'} s \sigma \frac{d \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi'}(sx - sx', -u')}{dx} I(sx', u') dx' du' \quad (\text{using Lemma 2}) \\
&= \int_w \int_{u'} s \sigma \frac{d \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi'}(sx - w, -u')}{dx} I(w, u') \frac{dw}{s} du' \quad (w = sx') \\
&= \int_w \int_{u'} s \sigma \frac{d \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi'}(sx - w, -u')}{d(sx - w)} \frac{d(sx - w)}{dx} I(w, u') \frac{dw}{s} du' \\
&= (I * s \sigma \frac{d}{dx} \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi'})(sx, u)|_{u=0}
\end{aligned}$$

20

命題 5 の証明：

【数 3 7】

$$\begin{aligned}
(J * \sigma^2 \frac{d^2}{dx^2} \mathcal{R}_{\sigma^2, \varphi})(x, u)|_{u=0} &= \int_{x'} \int_{u'} \sigma^2 \frac{d^2}{dx^2} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi}(x - x', -u') J(x', u') dx' du' \\
&= \int_{x'} \int_{u'} s \sigma^2 \frac{d^2 \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi}(sx - sx', -su')}{dx^2} I(sx', su') dx' du' \quad (\text{using Lemma 1}) \\
&= \int_w \int_v s \sigma^2 \frac{d^2 \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi}(sx - w, -v)}{dx^2} I(w, v) \frac{dw}{s} \frac{dv}{s} \quad (w = sx', v = su') \\
&= \int_w \int_v s \sigma^2 \frac{d^2 \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi}(sx - w, -v)}{d(sx - w)^2} \frac{d(sx - w)^2}{dx^2} I(w, v) \frac{dw}{s} \frac{dv}{s} \\
&= \frac{1}{s} (I * s^2 \sigma^2 \frac{d^2}{dx^2} \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi})(sx, su)|_{su=0}
\end{aligned}$$

30

40

命題 6 の証明：

【数 3 8】

$$\begin{aligned}
(J * \sigma^2 \frac{d^2}{dx^2} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi})(x, u)|_{u=0} &= \int_{x'} \int_{u'} \sigma^2 \frac{d^2}{dx^2} \mathcal{R}_{\sigma, \varphi}(x - x', -u') J(x', u') dx' du' \\
&= \int_{x'} \int_{u'} s \sigma^2 \frac{d^2 \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi'}(sx - sx', -u')}{dx^2} I(sx', u') dx' du' \quad (\text{using Lemma 2}) \\
&= \int_w \int_{u'} s \sigma^2 \frac{d^2 \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi'}(sx - w, -u')}{dx^2} I(w, u') \frac{dw}{s} du' \quad (w = sx') \\
&= \int_w \int_{u'} s \sigma^2 \frac{d^2 \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi'}(sx - w, -u')}{d(sx - w)^2} \frac{d(sx - w)^2}{dx^2} I(w, u') \frac{dw}{s} du' \\
&= (I * s^2 \sigma^2 \frac{d^2}{dx^2} \mathcal{R}_{s\sigma, \varphi'})(sx, u)|_{u=0}
\end{aligned}$$

10

命題 7 の証明：

任意の $a \in (-1, 1)$ について、

【数 3 9】

$$\begin{aligned}
\langle f(x - au) \mathcal{R}_{\sigma, \varphi'}(x, u) \rangle &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x - au) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-au)^2}{2\sigma^2}} dx du \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(w) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{w^2}{2\sigma^2}} dw du \\
&= \langle f(x) \mathcal{R}_{\sigma, 0}(x, u) \rangle,
\end{aligned}$$

20

where $\varphi' = \arctan(a)$

となる。

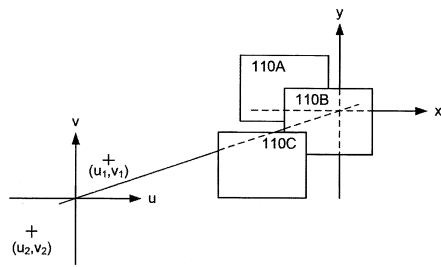
30

【符号の説明】

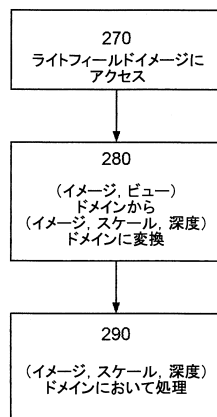
【0 0 7 3】

1 1 0 5 光学モジュール
1 1 2 0 マイクロイメージングアレイ
1 1 3 0 検出アレイ
1 1 8 0 プロセッサ

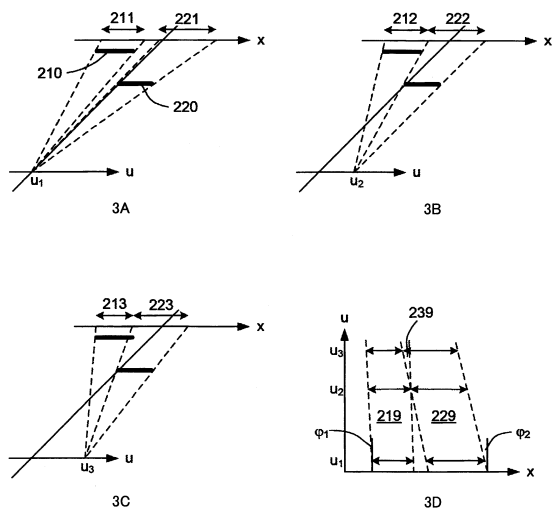
【 図 1 】



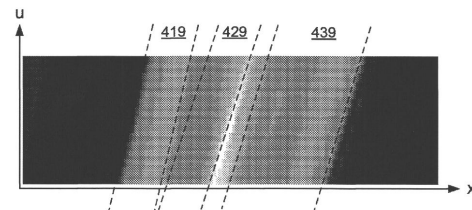
【圖 2】



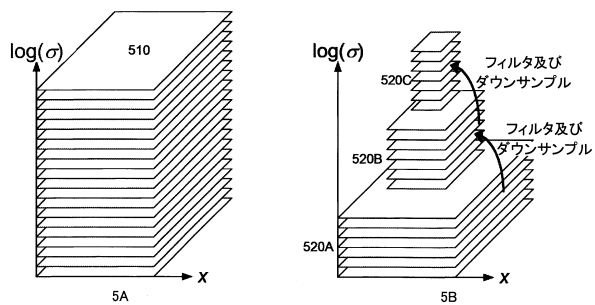
【 図 3 】



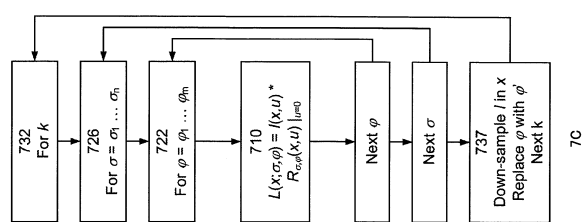
【 図 4 】



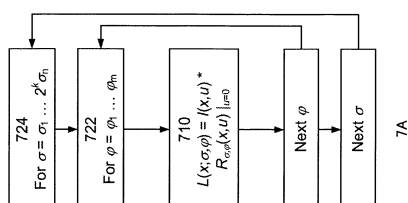
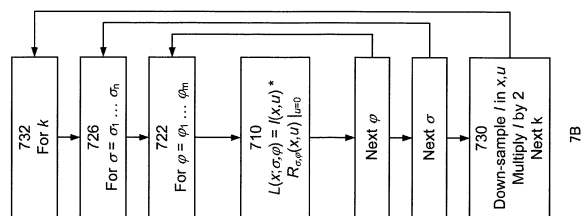
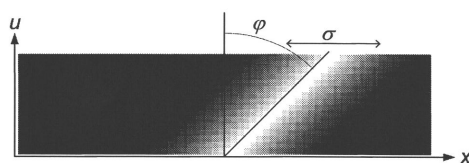
【 図 5 】



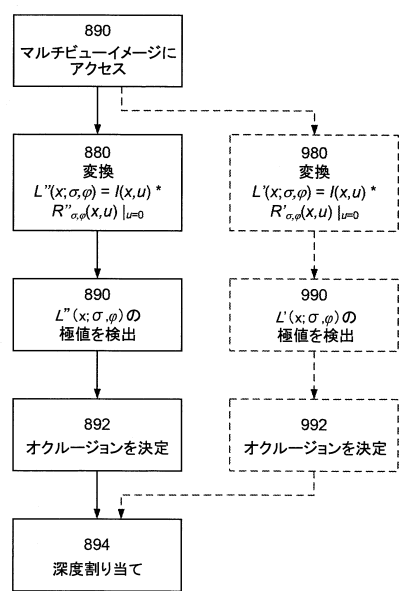
【圖 7】



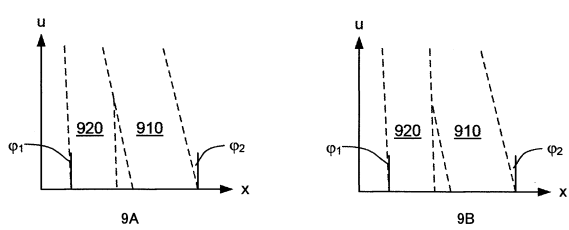
【 図 6 】



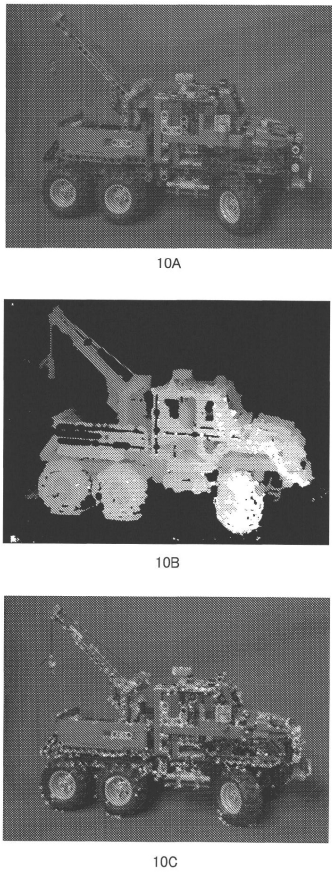
【 図 8 】



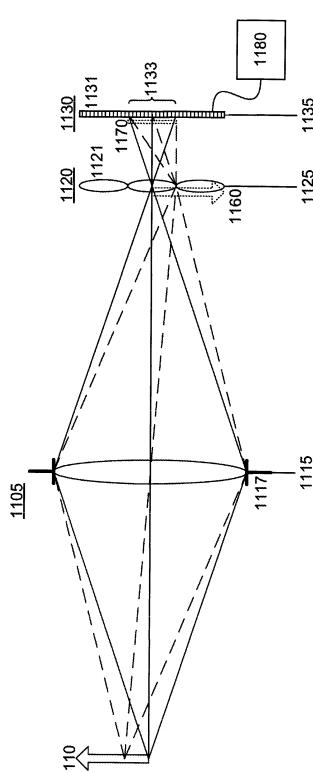
【 図 9 】



【 図 1 0 】



【 図 1 1 】



フロントページの続き

(72)発明者 キャサリン パークナー

アメリカ合衆国, カリフォルニア 94025 - 7054, メンロ・パーク, サンド・ヒル・ロード 2882番, スイート 115 リコー イノベーション インク内

審査官 山田 辰美

(56)参考文献 米国特許出願公開第2013/0064453 (US, A1)

特開2013-058112 (JP, A)

特開2010-086540 (JP, A)

特開2011-248671 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G06T 1/00

H04N 13/128

H04N 13/232

IEEE Xplore