

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6456269号
(P6456269)

(45) 発行日 平成31年1月23日 (2019. 1. 23)

(24) 登録日 平成30年12月28日 (2018. 12. 28)

(51) Int. Cl.

F I

G O 1 S 17/89 (2006. 01)

G O 1 S 17/89

G O 1 B 11/25 (2006. 01)

G O 1 B 11/25

H

請求項の数 22 外国語出願 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2015-218436 (P2015-218436)	(73) 特許権者	000006013
(22) 出願日	平成27年11月6日 (2015. 11. 6)		三菱電機株式会社
(65) 公開番号	特開2016-99346 (P2016-99346A)		東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(43) 公開日	平成28年5月30日 (2016. 5. 30)	(74) 代理人	100110423
審査請求日	平成30年8月23日 (2018. 8. 23)		弁理士 曾我 道治
(31) 優先権主張番号	14/551, 394	(74) 代理人	100111648
(32) 優先日	平成26年11月24日 (2014. 11. 24)		弁理士 梶並 順
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100122437
早期審査対象出願			弁理士 大宅 一宏
		(74) 代理人	100147566
			弁理士 上田 俊一
		(74) 代理人	100161171
			弁理士 吉田 潤一郎
		(74) 代理人	100161115
			弁理士 飯野 智史

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 シーンを再構成するシステムおよび方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

シーンを再構成するシステムであって、
 光パルスを前記シーンの方へ送信するように構成された光源と、
 反射パルスを受信して、前記光パルスに対応する検知信号を、前記反射パルスの時間プロファイルに従って取得するように構成されたセンサの組と、
 前記シーンと前記センサの組との間の光路における固定符号化開口と、
 前記光源および前記センサの組に接続され、前記検知信号から、シーンモデルを用いて三次元 (3D) 奥行きマップとして前記シーンを再構成する方法を実行するように構成されたプロセッサと、
 を備えたシーンを再構成するシステム。

【請求項 2】

前記固定符号化開口は、前記光源と前記シーンとの間にあり、
 請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 3】

前記固定符号化開口は、前記シーンと前記センサの組との間にあり、前記センサの組は、光ベースの飛行時間 (TOF) 奥行きセンサである、
 請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 4】

奥行きマップのシーケンス内に 3D 奥行きマップごとに 1 つの光パルスが存在する、

請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 5】

前記光パルスは、広幅ビーム光パルスである、
請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 6】

前記光パルスは、時間においてガウス形状をとる、
請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 7】

前記光パルスは、パルスの符号化シーケンスを含む、
請求項 1 に記載のシステム。

10

【請求項 8】

前記センサの組の配置は、ランダムであり、前記光源と同一平面上にある、
請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 9】

前記センサの組の配置は、等間隔アレイを形成する、
請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 10】

前記センサの組の出力は、前記プロセッサにおいて、スパースな再構成方法を用いて処理される、

請求項 1 に記載のシステム。

20

【請求項 11】

前記センサの組の出力は、前記プロセッサにおいて、モデルベースのスパースな再構成方法を用いて処理される、

請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 12】

前記光源は、非定常であり、非定常光源は、前記シーンを走査する、
請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 13】

前記固定符号化開口のパターンは、ランダムである、
請求項 1 に記載のシステム。

30

【請求項 14】

前記パターンは、バイナリ値を有する、
請求項 11 に記載のシステム。

【請求項 15】

前記パターンは、連続値を有する、
請求項 11 に記載のシステム。

【請求項 16】

前記シーンモデルは、前記 3D 奥行きマップに対し制約を課す、
請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 17】

前記 3D 奥行きマップに対する前記制約は、総変動 (TV) 制約である、
請求項 16 に記載のシステム。

40

【請求項 18】

前記 TV 制約に対する投影は、ネットワークフロー問題を解くことによって求められる、

請求項 17 に記載のシステム。

【請求項 19】

前記シーンモデルは、任意の方向に沿って最大で単一の反射器が存在するという制約を課す、

請求項 1 に記載のシステム。

50

【請求項 20】

シーンを再構成する方法であって、
 光源によって、光パルスを前記シーンの方へ送信するステップと、
 センサの組において反射パルスを受信して、前記光パルスに対応する検知信号を、前記反射パルスの時間プロファイルに従って取得するステップであって、前記シーンと前記センサの組との間の光路内に固定符号化開口が存在する、ステップと、
 前記検知信号を処理して、シーンモデルを用いて前記シーンを三次元（３Ｄ）奥行きマップとして再構成するステップと、
 を備えたシーンを再構成する方法。

【請求項 21】

10

前記光パルスが前記光源から前記シーンに進み、前記センサの組に戻る距離は、パルス遅延、すなわち光ベースの飛行時間（ＴＯＦ）であり、前記ＴＯＦは、センサ面からの距離、すなわち奥行きと同等の時間を有するように構成される
 請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 22】

シーンを再構成する方法であって、
 光源によって、時系列のフレームごとに光パルスを送信するステップであって、プロセッサは前記光源によって送信される前記パルスのタイミングを制御する、ステップと、
 前記光源と平面になるように配置された飛行時間（ＴＯＦ）センサの組において反射パルスを受信して、前記光パルスに対応する検知信号を、前記反射パルスの時間プロファイルに従って取得するステップであって、前記シーンと前記ＴＯＦセンサの組との間の光路内に固定符号化開口が存在する、ステップと、
 前記検知信号を処理して、シーンモデルを用いて前記シーンを三次元（３Ｄ）奥行きマップとして再構成するステップと、
 を備えたシーンを再構成する方法。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、包括的には、光パルスを用いてシーンを再構成することに関し、より詳細には、シーンを三次元（３Ｄ）奥行きマップとして再構成することに関する。

30

【背景技術】

【0002】

圧縮センシング

圧縮センシング（ＣＳ）は、取得した信号の次元によって示されるよりも少ない線形測定値を用いる。取得レートを低減するために、ＣＳ再構成法は、信号の構造を利用する。構造を捕捉するために、最も一般的に用いられる信号モデルはスパース性である。

【0003】

本明細書において用いられるとき、スパースは信号処理分野においてよく知られた用語であり、不定関係詞ではない。「スパース」近似は、高次元の測定データおよび取得行列を所与とした連立一次方程式を満たす、スパースベクトル、すなわち、ほとんどの係数がゼロに等しいかまたは概ねゼロに等しいベクトルを推定する。

40

【0004】

ＣＳに基づく取得システムは以下のようにモデル化することができる。

【数 1】

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}(\mathbf{s}) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{A}(\cdot)$ は線形関数であり、 $\mathbf{s}$ は、或る適切な信号空間内にあり、 $\mathbf{r}$ は測定空間内にある。測定空間は信号空間よりもはるかに低い次元を有する。モデルに依拠する、低コヒーレンス、制限された等長特性等の、 $\mathbf{A}(\cdot)$ の複数の可能な特性によって、適切な

50

方法を用いて再構成が可能であることが保証される。

【 0 0 0 5 】

C S は多くの撮像システムにおける適用に成功し、通常、取得される信号 s は、

【 数 2 】

$$\mathbb{R}^{N_x \times N_y}$$

における 2 D 画像である。

【 0 0 0 6 】

圧縮センシング手法を用いることにより、ピクセル数 $N_x \times N_y$ の僅か 1 0 % の測定値で画像を取得することができることが示された。これらの進歩は、電荷結合素子および金属酸化膜半導体センサ技術が測定を極度に安価にし、医用撮像、微光撮像、ハイパースペクトル撮像および奥行き検知等の他の様式に大きな影響を与えた従来の可視光撮像には関連していない。しかしながら、これらの進歩は、「飛行時間型」(T O F) の光センサまたはレーダセンサ等の複雑でコストの高いセンサに依存する撮像システムにとって重大である。

【 0 0 0 7 】

モデルベースの圧縮センシング

モデルベースの C S フレームワークは、多数の信号モデルを開発し、C S 取得への適性を特徴付けることへの一般的な手法を提供する。このフレームワークの下モデルは、信号サポートに制約を課すことによって生成される。基本動作は、モデルに対するサポート制約を満たす信号の組への一般信号の投影である。そのような投影を計算することができる限り、圧縮サンプリングマッチング追跡 (C o S a M P) および反復ハード閾値処理 (I H T) 等の一般的な貪欲 C S 再構成方法を変更して、モデルにおける信号を再構成することができる。さらに、異なる近似特性を有する一対の近似投影が、厳密な投影ではなく正確な再構成を保証するのに十分であることが示された。非特許文献 1 を参照されたい。

【 0 0 0 8 】

1 つの信号モデルである、近似耐性モデルベースの圧縮センシングは、2 D の地震学的 (s e i s m i c) 撮像を用いて測定される信号によって動機付けられる。そのモデルによる信号

【 数 3 】

$$\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{N \times T}$$

は、 N 個の行および T 個の列を有する行列である。信号の各行は S 個の非ゼロエントリしか有さず、これらは上または下の行の S 個の非ゼロエントリに空間的に近接している。これは、信号の後続の行のサポート間のアースムーバ距離 (E M D) を制約することによって強制される。近似耐性モデル下の投影は、一連のネットワークフロー問題を解決することによって行われる。

【 0 0 0 9 】

光検知

光検知は、光信号を用いてシーンを照明し、反射光を解析することによってシーンへの距離を測定する。1 つの光検知技法、例えば光レーダ (L i d a r) を、地球科学、遠隔検知、航空機レーザマッピング (A L S M) 、レーザ高度測定、等高線マッピングおよび車両ナビゲーション等の用途で用いることができる。

【 0 0 1 0 】

従来の高解像度、高フレームレートの光ベースのシステムは、通常、精密 T O F センサの高価なアレイを用い、定常レーザによって送信される単一のパルスでシーンを照明する。代替的に、フレームレートが低減することと引き換えに、レーザはシーンを走査する。同じくシーンを走査することができる、より小さなセンサアレイが反射を取得する。結果として得られるシステムにより、コストが大幅に下がるが、機械部品の使用が必要となり、これは故障を起こしやすく、モバイル用途では厄介である。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 1 】

圧縮センシングは、低減された検知コストに起因する計算能力における大きな利得を利用して、複雑な信号モデルおよび再構成方法を可能にし、これによって、センサ複雑度を低減することを可能にする。例えば、いくつかの圧縮奥行きセンシングシステムは、空間光変調器と組み合わせられた単一のセンサと、シーンを照明する複数のパルスとを用いる。

【 0 0 1 2 】

空間光変調器を用いて、全てのパルスとともに変化する可変符号化開口が実施される。一方、これによって、これらのシステムが静的シーンに制限される。非特許文献2、非特許文献3および非特許文献4、並びに特許文献1を参照されたい。さらに、空間光変調器 (SLM) は比較的高価であり、所望の分解能に依拠して、例えば1000\$以上である。Holoeye (商標) またはTexas Instruments DLP (商標) 製品を参照されたい。

10

【 0 0 1 3 】

$S = 1$ の場合、上記の近似耐性モデルの制約付きバージョンは、光パルスを用いた2D撮像 (1つの空間次元および1つの奥行き次元) のための良好なモデルである。なぜなら、このモデルは、奥行きマップの1Dの総変動を最小にするためである。一方、モデルを3D体積、すなわち信号

【 数 4 】

$$\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_y \times T}$$

20

(2つの空間次元および1つの空間次元) に拡張することは、不都合ながら自明でない。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 1 4 】

【 特許文献1 】 米国特許出願公開第2013/0088726号

【 非特許文献 】

【 0 0 1 5 】

【 非特許文献1 】 Hegde 他 「Approximation-tolerant model-based compressive sensing」 Proc. ACM Symposium on Discrete Algorithms (SODA). SIAM, pp. 1544-1561, January 2014

30

【 非特許文献2 】 Howland 他 「Compressive Sensing Lidar for 3D imaging」 CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2011, CMG3

【 非特許文献3 】 Kirmani 他 「Exploiting sparsity in time-of-flight range acquisition using a single time-resolved sensor」 Opt. Express, vol. 19, no. 22, pp. 21485-21507, Oct 2011

40

【 非特許文献4 】 Kirmani 他 「CoDAC: a compressive depth acquisition camera framework」 IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2012, pp. 5425-5428

【 発明の概要 】

【 0 0 1 6 】

光検知コンポーネントの持続的改善および信号取得理論における近年の進展により、奥行き検知システムのコストを低減し、機能を高める機会がもたらされている。本発明の実施形態は、従来のシステムと比較して、固定符号化開口 (マスク) を用いて必要なセンサ

50

数を大幅に低減する新規の奥行き検知システムおよび方法を提供する。利点として、マスクは任意の透明材料の上に安価にプリントすることができる。

【 0 0 1 7 】

実施形態は、多岐にわたる奥行き検知システムを特徴とするモデルベースの圧縮センシングに基づくモデル化および再構成のフレームワークも提供する。実験データは、検知品質に対する無視できる程度の影響で、センサ数を 8 5 % よりも大きく低減することが可能であることを示している。

【 0 0 1 8 】

本発明の主な寄与は、

- ・ 光ベースの飛行時間 (T O F) 奥行きセンサのためのリアルタイム圧縮ハードウェアアーキテクチャと、
 - ・ 数の奥行き検知システムアーキテクチャを特徴付ける非常に一般的なシステムモデルと、
 - ・ 構成を改善するために奥行きシーンの低変動 (T V) を利用するモデルベースの圧縮センシング (C S) 再構成方法と、
- を含む。

【 0 0 1 9 】

従来技術と対照的に、実施形態は少数のセンサおよび固定符号化開口を用いる。開口は、空間光変調器 (S L M) と比較して非常に安価なコンポーネントである。コードは変化しないので、本発明の 1 つの実施形態は、フレーム、すなわち奥行きマップのシーケンスにおける奥行きマップあたり単一のパルス送信のみを必要とする。これはコードを搬送する場合もしない場合もある。このため、はるかに高価な単一パルスシステムと同等のフレームレートを、大幅に低いコストで達成することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 0 】

【図 1】本発明の実施形態による、光検知を用いるシーン再構成システムおよびシーン再構成方法の概略図である。

【図 2】本発明の別の実施形態による、光検知を用いるシーン再構成システムの概略図である。

【図 3】本発明の実施形態による、スパースシーン再構成方法の流れ図である。

【図 4】本発明によるモデルベースの C o S a M P 再構成方法の擬似コードのブロック図である。

【図 5】本発明によるモデルベースの I H T C o S a M P 再構成方法の擬似コードのブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 1 】

本発明の実施形態は、光検知および固定符号化開口を用いてシーンを再構成するための方法およびシステムを提供する。

【 0 0 2 2 】

光検知

システムアーキテクチャ

図 1 に示すように、固定光源 1 1 0、例えばレーザが、シーン 1 0 0 から取得されるフレームごとに光パルスを送信する。レンズはパルスを広幅ビームパルス 1 1 1 にする。広幅ビームパルスを用いることによって、シーンは走査される必要がない。パルスは、例えば、時間においてガウス形状 1 1 3 をとり得る。代替的に、パルスの符号化シーケンス 1 1 4 を用いることができる。

【 0 0 2 3 】

反射器である各シーン点 1 0 2 からの反射パルス 1 1 2 は、レンズ 1 2 0 を通過する。レンズ 1 2 0 は、反射パルスを、光源と平面になるように配置された 1 組のセンサ 1 4 0 に分散する。このようにして、総距離は単に 2 d となる。分散されたパルスは、光源とシ

10

20

30

40

50

ーンとの間の光路内のマスクの形態の固定符号化開口 1 3 0 を通る。マスクは、透明材料、例えば酢酸シート上に安価にプリントすることができる。マスクは、分散されたパルス空間的に変調する。

【 0 0 2 4 】

1 つの実施形態では、センサの配置はランダムにすることができる。別の実施形態では、センサは等間隔アレイとして配置することができる。特に、光学飛行時間 (T O F) センサのコストが大きいときのこれらの実施形態の 1 つの利点は、検知品質を維持しながら、必要とされるセンサ数が、従来のシステムと比較して約 8 5 % 低減されることである。

【 0 0 2 5 】

1 組のセンサの出力 3 0 1 は、プロセッサ 1 5 0 において、スパース再構成方法 3 0 0 によって処理され、シーンモデルを用いて奥行きマップ 1 0 1 の形態で再構成されたシーンが得られる。プロセッサは、光源 1 1 0 によって送信されるパルスのタイミングも制御することができる (1 5 1) 。

【 0 0 2 6 】

図 2 は、システムの代替的な構造を示す。この場合、マスク 1 3 0 は光源とシーン 1 0 0 との間の光学経路内にある。この実施形態では、シーンは非定常光源 1 1 0 によって走査され (1 1 5) 、組は 1 つのセンサ 1 4 0 しか有しない。光源がシーンを走査するとき、光源は、走査経路 1 1 5 の各位置において 1 つのパルスを、符号化開口を通してシーンに送信する。通常、固定符号化開口は、光源とセンサの組との間の光路内にある。

【 0 0 2 7 】

さらに、または代替的に、センサは、シーンを走査する間、非定常とすることができる。代替的な実施形態は、2 つのアーキテクチャーを組み合わせて、前に固定符号化開口を有する走査レーザと、有しないレーザとの双方を用いる。これらのレーザは、反射の戻り経路における、同じコードまたは異なるコードを用いる別の固定符号化開口の後ろの複数のセンサと組み合わせられる。

【 0 0 2 8 】

再構成方法

図 3 は、本発明の実施形態による再構成方法を示す。1 つの実施形態 (C o S a M P) について、ステップ 1 ~ 1 0 のための擬似コードが図 4 に示されている。代替的な実施形態 (I H T) について、ステップ 1 ~ 9 のための擬似コードが図 5 に示されている。ステップは、推定される信号が奥行きマップ 1 0 1 に収束するまで反復する。擬似コードにおいて用いられる変数を本明細書において説明する。

【 0 0 2 9 】

最初に、信号推定値がゼロに設定される (3 1 0) (ステップ 1) 。入力データは、1 組のセンサ 1 4 0 によって取得された信号の行列の形態をとる。入力データが信号推定値とどの程度一致しないかを記述する残余が、信号推定および入力データ (信号) から求められる (3 2 0) (ステップ 4 ~ 6) 。

【 0 0 3 0 】

次に、信号推定値が、現在の信号推定値、信号モデルおよび残余を用いて更新される (3 3 0) 。再構成手順に依拠して、モデルはこのステップにおいて用いられる場合も用いられない場合もある。

【 0 0 3 1 】

次に、ステップ 3 4 0 において、シーンモデル 2 1 0 を強制することによって信号推定値が更新される。プロセスは、3 2 0 から収束 3 5 0 まで繰り返される。1 つの実施形態では、シーンモデルは、任意の方向に沿って最大で単一の反射器が存在するという制約を課す。

【 0 0 3 2 】

本方法の実施形態は、K 項トランケーションステップに頼る。このステップは、様々な実施形態において様々な形態をとることができる。例えば、トランケーションステップは、当該技術分野において知られているような単純な K スパース近似とすることもできるし

10

20

30

40

50

、米国特許出願第 1 3 / 4 0 5 , 5 0 4 号に記載されているように、全ての空間方向に沿った単一の反射器に関連する大きさ係数における最大のものの選択とすることもできる。さらに、または代替的に、以下で説明するようにグラフカットの定式を用いることができる。

【 0 0 3 3 】

飛行時間

反射パルスの検知は、距離 $2d$ に起因して、パルスが送信される時間から遅延するので、奥行きマップの再構成は飛行時間 (T O F) の原理に基づく。遅延は、シーン内の各点 1 0 2 への距離または各点 1 0 2 の奥行きに対応する。

【 0 0 3 4 】

従来のシステムは、各方向からの反射パルスを注意深く分離および検知して T O F を求め、奥行きマップ 1 0 1 内の正しい場所に遅延を割り当てなければならない。

【 0 0 3 5 】

対照的に、本発明では圧縮センシング (C S) の原理を用い、全ての方向における反射パルスを意図的に混合してサンプリング負荷を低減する。したがって、本発明では、混合を分離して、シーン内の各点に正しい奥行き値を割り当てる計算方法に頼る。

【 0 0 3 6 】

例えば、バイナリパターンに従って光をブロックするマスクを用いて固定符号化開口を実装することができる。1つの実施形態では、パターンはランダムである。パターンが範囲 $[0, 1]$ において連続値を有しない符号化開口も可能である。レンズおよび符号化開口の組み合わせによって、各方向から受信した反射パルスを混合し、1組のセンサに混合パルスを投影する。各センサは、開口コードによって決まる異なる混合を受信する。このため、各センサによって取得される信号は、センサによって受信される反射パルスの混合である。これらの混合を用いてシーンを再構成する。

【 0 0 3 7 】

代替的な実施形態では、符号化開口を有するレーザがシーンを走査するにつれ、単一のセンサは異なる混合を受信する。レーザの走査経路の全ての点において、シーンは異なる形で照明され、したがって、センサによって取得される各反射はシーンの異なる混合である。

【 0 0 3 8 】

信号モデル

システムをモデル化するために、検知面から距離 d にある単一反射シーン点から開始し、符号化開口がないと仮定する。都合上、光源 1 1 0 がセンサと同一平面にあると仮定するが、この仮定は自明的に緩和することができる。このため、パルスが光源から反射シーン点に進み、センサに戻る距離は $2d$ であり、パルス遅延、すなわち T O F、 $\tau = 2d/c$ に対応する。ここで、 c は媒体内の光速である。この対応関係を用いると、時間はセンサ面からの距離、すなわち奥行きと同等である。本明細書では、距離および奥行きを交換可能に用いる。

【 0 0 3 9 】

2つの空間方向、すなわち、センサ面に対する横方向と、時間または遅延と呼ばれ、センサ面に対し直交する1つの奥行き方向とを含む3Dシーンを考える。このため、取得されるシーンは、関数 s_x, y, t によって表すことができ、ここで、 s は点 (x, y, t) におけるシーンの反射率を表す。点からの反射がない場合、対応する反射率は0である。

【 0 0 4 0 】

透明性のないランバート面を仮定する。これは、任意の (x, y) 対について、非ゼロ反射率を有する奥行き t が1つしか存在しないことを示す。換言すれば、 (x, y, t) からの反射がある場合、そのロケーションと検知面との間、すなわち反射器の前に反射器が存在しない。さらに、同じ (x, y) 対についてその点の後ろのいかなる反射器にも光が到達せず、したがって、それらの反射率もゼロである。この制約は、コヒーレントな検

10

20

30

40

50

知システムの文脈において、 s に対する奥行き制約である。有効なシーン信号 s はこの奥行き制約を満たすべきである。

【 0 0 4 1 】

座標 (x, y) におけるシーンの奥行き、および同じ座標についての反射率（アルベド）マップ $a_{x, y}$ とを表す奥行きマップ $d_{x, y}$ を所与として、シーンは以下によって表すことができる。

【数 5】

$$s_{x,y,t} = a_{x,y} \delta_{t-2d_{x,y}/c}, \quad (2)$$

ここで、 δ_t はディラックインパルス関数である。奥行き制約を満たす任意のシーンについて、奥行きマップおよびアルベドマップを抽出することは自明である。換言すれば、3D シーンは 2D 奥行きマップおよび 2D アルベドマップに対応する。同様に、2D（1つの空間および 1つの奥行き寸法）シーンは 1D 奥行きマップおよび 1D アルベドマップに対応する。

10

【 0 0 4 2 】

取得モデル

p_t を用いて、シーン 100 によって反射される伝達されたパルス 111 またはパルスシーケンスを表す。ピンホール開口が存在すると仮定すると、ロケーション (x, y) の受信信号は以下となる。

【数 6】

$$\hat{r}_{x,y,t} = a_{x,y} p_{t-2d_{x,y}/c} = p_t \circledast_t s_{x,y,t}, \quad (3)$$

20

ここで、

【数 7】

$$\circledast_t$$

は時間方向に沿った線形畳み込みを表す。空間コード $m_{x, y}$ を有する符号化開口 130 は、反射パルスの混合をもたらす。これは、マスクを用いた

【数 8】

$$\hat{r}_{x,y,t}$$

30

の空間的畳み込みであることを示すことができる。このため、センサ面における受信光束は、

【数 9】

$$\tilde{r}_{x,y,t} = m_{x,y} \circledast_{x,y} \hat{r}_{x,y,t} = m_{x,y} \circledast_{x,y} p_t \circledast_t s_{x,y,t}. \quad (4)$$

である。

【 0 0 4 3 】

この信号は、 $m = 1, \dots, M$ によってインデックス付けされた M 個のセンサによって検知される。各センサはロケーション (x_m, y_m) に位置決めされる。各センサは、センサ面において光束をサンプリングし、時間において

40

【数 10】

$$r_{m,t} = \tilde{r}_{x_m,y_m,t}$$

をサンプリングする。

【 0 0 4 4 】

シーンを

【数 11】

$$\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{N_x, N_y, N_t}$$

50

に離散化する。ここで、 N_x 、 N_y は取得される空間ピクセル数であるか、またはシステムの所望の分解能であり、 N_t は時間サンプル数である。離散化は、シーン内の各反射器が概ね平坦でありかつピクセルのエリアにわたってセンサ面に対し平行であると推定することができるようにされ、それによって離散表現において奥行き制約が保持される。この離散化は、離散化 2 D 奥行きマップ

【数 1 2】

$$\mathbf{d} \in \mathbb{R}^{N_x, N_y}$$

も示し、これも離散値 $d_{x, y} \in \{1, \dots, N_t\}$ をとる。

【0045】

さらに、サンプリング時間は、伝送パルスのナイキストレートよりも高いレートである。同様に、パルス、符号化開口マスクおよび受信信号を離散化し、パルスおよびマスクパターンを用いた畳み込みを離散時間において表現することができるようにする。

【0046】

センサ m における離散化された受信信号

【数 1 3】

$$\mathbf{r} \in \mathbb{R}^{M, N_t}$$

の線形結合は、一連のより単純な線形変換として分解することができる。

【数 1 4】

$$\mathbf{r} = \mathbf{S}(\mathbf{M}(\mathbf{P}(\mathbf{s}))) = \mathbf{A}(\mathbf{s}), \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{M}$ および $\mathbf{S}$ はそれぞれ、パルス、符号化開口のマスクおよびセンサによる光場のサンプリングに起因した線形変換を示す。それらの成分 $\mathbf{A}$ は、受信信号 $\mathbf{r}$ へのシーン $\mathbf{s}$ の順方向線形変換マッピングである。

【0047】

特定のモデルが図 1 の実施形態、すなわちレーザが定常であるときの実施形態を説明したが、レーザが符号化開口を用いてシーンを走査する図 2 の実施形態等の他の実施形態を説明する非常に類似した線形モデルを容易に導出することができる。再構成方法は、そのような線形モデルが存在することのみを必要とする。そのような線形モデルは、シーン $\mathbf{s}$ を取得し、そのシーンの線形変換 $\mathbf{r} = \mathbf{A}(\mathbf{s})$ として受信信号 $\mathbf{r}$ を表すことができる。

【0048】

モデル実施

式 (5) における線形モデルを用いる効率的な計算は最近の反復再構成方法において最重要である。このために、高速フーリエ変換 (FFT) に基づく畳み込み方法を用いて離散時間で演算子 $\mathbf{P}$ および $\mathbf{M}$ を効率的に実施することができる。

【0049】

さらに、 $\mathbf{S}$ は単に適切な信号を選択するので、計算的に自明である。ほとんどの再構成方法に必要な随伴行列 $\mathbf{A}^*$ は、各演算子の随伴行列を逆の順序で、すなわち $\mathbf{A}^*(\mathbf{r}) = \mathbf{P}^*(\mathbf{M}^*(\mathbf{S}^*(\mathbf{r})))$ を用いて作成することによって実施することができる。この実施はまた、式 (5) において空間演算子と時間演算子との可分性を利用し、線形結合を $\mathbf{S}(\mathbf{M}(\mathbf{P}(\mathbf{s}))) = \mathbf{P}(\mathbf{S}(\mathbf{M}(\mathbf{s})))$ として再編成して複雑度を単純化することができる。このため、パルス畳み込み $\mathbf{P}$ は、 $N_x \times N_y \times N_t$ 次元のオブジェクトではなく $M \times N_t$ 次元のオブジェクトに適用され、この間 $\mathbf{S}$ および $\mathbf{M}$ の複雑度は変化しない。

【0050】

効率的な実施態様は、メモリ要件を大幅に低減するために、奥行きマップ $\mathbf{d}$ およびアルベド $\mathbf{a}$ 表現を用いることができる。そのような表現から順方向演算子を効率的に求めることができるが、随伴行列は、 $\mathbf{s}$ 全体を記憶するための追加の一時メモリを必要とする。

【0051】

奥行き再構成

奥行きシーン、変動およびネットワークフロー

10

20

30

40

50

サブサンプリングされた信号を再構成し、ノイズを低減するために、CSは取得信号の構造を利用する。特に、奥行きマップは低変動(TV)ノルムを有する傾向にある。低TVノルムを有する信号は概ね平坦であり、不連続性が非常に僅かであり、小さな勾配を有するエリアが非常に僅かである。

【0052】

離散マップ

【数15】

$$\mathbf{d} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_y}$$

の(1)TVノルムは以下のように定義される。

【数16】

$$\|\mathbf{d}\|_{TV} = \|\nabla_x \mathbf{d}\|_1 + \|\nabla_y \mathbf{d}\|_1, \quad (6)$$

ここで、 $\nabla_x \mathbf{d}$ は方向xに沿った離散勾配であり、 $\|\cdot\|_1$ は行列の要素単位の ℓ_1 ノルムであり、すなわち以下である。

【数17】

$$\|\nabla_x \mathbf{d}\|_1 = \sum_{n_y=1}^N \sum_{n_x=1}^{N-1} |d_{n_x, n_y} - d_{n_x+1, n_y}|, \quad (7)$$

ここで、y方向も同様に定義される。

【0053】

TVノルム奥行き制約を満たすシーンを所与とすると、奥行きマップのTVノルムに対する追加の制約は、sにおける非ゼロのサポートに対する制約と等しい。特に、sの2つの空間的に隣接した非ゼロ要素、すなわち n_x および n_y 座標に関して空間的に隣接した非ゼロ要素も、非常に僅かな不連続性を除いて、同様の奥行き、すなわち n_t 座標を有すべきである。しかしながら、この1対1の対応は、sが奥行き制約を満たすことを必要とする。一般的な密なsはこの奥行き制約を満たさない。このためCosAMPおよびIHT等のモデルベースのCS方法について、奥行き制約およびTV制約の双方への投影が必要とされる。

【0054】

1次元奥行きマップ問題について、すなわち、2次元シーン

【数18】

$$\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{N_x, N_t}$$

および

【数19】

$$\mathbf{d} \in \mathbb{R}^{N_x}$$

について、非特許文献1によって記載されている投影が解決策を提供している。この解決策では、行列として表される2D信号が検討される。行列の各行は、S個の非ゼロのみを有し、サポート間のEMDに対する所定の制約に従って、行間のこれらの非ゼロのサポートはほとんど変化しない。

【0055】

S=1の場合、sに適用されるEMD制約が、そのサポート、すなわち奥行きマップに対するTV制約となることを示すことができる。制約への投影は、ネットワークフロー問題を解く一連の動的プログラムを用いて求めることができる。不都合なことに、その手法は、2D奥行きマップ、すなわち3Dシーンを一般化しない。これらのために、異なる定式化を用いる。

【0056】

3Dシーンのために用いることができる1つの定式化が、米国特許出願第13/405,504に記載されている。ここでは、空間位置x, yごとに、奥行き方向に沿った奥行

10

20

30

40

50

き係数が最大のものが選択される。これらの中から、K個の最大係数およびそれらのロケーションが選択される。本発明の1つの実施形態は、この定式化を用いることができる。一方、この定式化は、2D奥行きマップにおいて(すなわち、3Dシーンにおける非ゼロのサポートにおいて)低TVノルム制約を強制しない。

【0057】

この制約を強制することができる異なる定式化を次に説明する。これは、他の定式化を用いる実施形態と比較して、センサ数およびレーザ走査時間の更なる低減を可能にするので、本発明の好ましい実施形態である。

【0058】

2D変動およびグラフカット

10

投影を3Dオブジェクトに、すなわち2D奥行きマップ一般化するために、グラフカット定式化を用いる。無向の重み付きグラフ $G = (V, E)$ について、一般的なグラフカット問題を検討する。すなわち、1組の観測値 X を所与として、タスクは、全ての頂点 l の共同ラベル付けにより、ラベルと観測値との間のエネルギー関数 $E(l, X)$ が最小化されるように各頂点 $v \in V$ にラベル $l_v \in L$ を割り当てることである。

【0059】

本発明の奥行き検知方法では、各頂点を、シーンの空間ロケーション $v = (n_x, n_y)$ を表すようにマッピングし、各ラベルは離散奥行き値

【数20】

$$l_v = d_{n_x, n_y}$$

20

を表す。このため、組 V のおよび L の濃度はそれぞれ $N_x \times N_y$ および N_t である。

【0060】

また、観測値 X の組をシーン s にマッピングする。エネルギー関数を、1変数項および2変数項の和として表す。

【数21】

$$E(l, s) = \underbrace{-\sum_{v \in V} s_{v, l_v}^2}_{\text{Unary}} + \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{u \in \mathcal{N}_v} \lambda |l_v - l_u|}_{\text{Pairwise}}, \quad (8)$$

30

$$= - \sum_{(n_x, n_y) \in V} s_{n_x, n_y, d_{n_x, n_y}}^2$$

$$+ \sum_{\substack{(n_x, n_y) \in V \\ (n_{x'}, n_{y'}) \in \mathcal{N}_{n_x, n_y}}} \lambda |d_{n_x, n_y} - d_{n_{x'}, n_{y'}}|, \quad (9)$$

ここで、

【数22】

$$\mathcal{N}_{n_x, n_y} = \{(n_{x+1}, n_y), (n_{x-1}, n_y), (n_x, n_{y+1}), (n_x, n_{y-1})\}$$

40

は

【数23】

$$\mathcal{N}_{n_x, n_y}$$

の近傍であり、すなわち、 $\mathcal{N}_v$ はグラフ内で $v = (n_x, n_y)$ に直接隣接する全ての頂点を含む。

【0061】

1変数項はフィデリティ項であり、ラベル、すなわち奥行き値を用いてシーン s から適切なデータ点を選択し、 l_2 データペナルティを課す。2変数項は、近傍組 $\mathcal{N}_v$ 内の v

50

のラベルと頂点のラベルとの間の平滑性制約を課す。このため、式(8)からの2変数項は奥行き値の勾配の l_1 ノルム、すなわち、 d のTVノルムである。ルーディン-オッシャー-ファテミ総変動と類似して、パラメータ λ はデータ忠実性と平滑性とのトレードオフを表す。

【0062】

既知である、式(8)を最小化するソルバーは、 α 拡張および α - β スワップ、並びにブール手法を含む。1つの実施形態では、 α 拡張技法を用いる。

【0063】

本発明のモデルベースの方法のランケーションステップ(図4の6、8および図5の8)は、式(8)を最初に最適化して候補奥行きマップ d を得ることによって s の K 項ランケーションを組み込み、これは候補サポート組

10

【数24】

$$(n_x, n_y, \mathbf{d}_{n_x, n_y})$$

に対応する。この候補サポート組から、 s の最大の K 個の成分が選択され、モデルベースのCOSAMPまたはIHTの適切なステップによって用いられる。

【0064】

対照的に、従来のランケーションは、グラフカット解決策によって制約されないデータ s の K 個の最大成分を単に選択する。従来のスパース性と比較して、本発明のモデルベースの閾値処理は、奥行き制約およびTV制約を満たすシーン s を生成する。

20

【0065】

シーン再構成

上記で記載したような投影を所与とすると、これを再構成アルゴリズムに組み込んで、実際の奥行きマップを復元することができる。図4および図5に2つの代替的な実施形態が実証される。

【0066】

図4において、モデルベースのCOSAMP(圧縮サンプリングマッチング追跡)に基づいて再構成を実行するための反復アルゴリズムが説明される。反復カウンタ1および信号推定値

【数25】

$$\tilde{\mathbf{s}}^l$$

30

が維持され、各反復を通じて更新される。ステップ1はこれらをゼロに初期化する。ステップ3は反復カウンタを増大させる。ステップ4は、信号推定値

【数26】

$$\tilde{\mathbf{s}}^{l-1}$$

とデータ r との不一致を捕捉する残余 u^1 を計算する。ステップ5において、シーンのためのプロキシ g^1 が計算される。これは、現在のシーン推定値

【数27】

$$\tilde{\mathbf{s}}^{l-1}$$

40

におけるコスト関数の勾配でもある。ステップ6は、上記で記載したようなモデルベースのランケーション関数を用いて、 $\text{supp}(\text{trunc}(g^1, K))$ で表されるモデルに従って K 個の係数にランケートされた、プロキシのサポートを求める。代替的な実施形態は、 $2K$ または $K/2$ 等の異なるランケーション長を用い得ることに留意されたい。このサポートは、

【数28】

$$\text{supp}(\tilde{\mathbf{s}}^{l-1})$$

50

、すなわち現在の信号推定値のサポートと一体化され、サポート候補 T^1 が形成される。ステップ 7 において、サポート候補にわたって制限されたシステムを反転することによってステップ 7 に新たな一時信号推定値 b^1 が形成される。一時信号推定値は、ステップ 8 において、信号推定値

【数 2 9】

$$\tilde{s}^l$$

を更新するようにトランケートされる。ステップ 3 ~ 8 は、アルゴリズムが収束するまで、または有限数の反復にわたって反復される。収束は、例えばステップ 4 において計算される残余の大きさによって、または反復間の信号推定値

10

【数 3 0】

$$\tilde{s}^l$$

の変化量によって測定することができる。ステップ 1 0 において、収束後の最終信号推定値

【数 3 1】

$$\tilde{s}^l$$

が返される。

【0 0 6 7】

図 5 において、再構成を実行するための代替的な反復アルゴリズムがモデルベースの IHT (反復ハード閾値処理) に基づいて説明される。反復カウント 1 および信号推定値

20

【数 3 2】

$$\tilde{s}^l$$

が維持され、各反復を通じて更新される。ステップ 1 はこれらを 0 に初期化する。ステップ 3 は、反復カウントを増大させる。ステップ 4 は、残余 u^1 を計算し、これは、信号推定値

【数 3 3】

$$\tilde{s}^{l-1}$$

とデータ r との不一致を捕捉する。ステップ 5 において、シーンのプロキシ g^1 が計算される。これは、現在のシーン推定値

30

【数 3 4】

$$\tilde{s}^{l-1}$$

におけるコスト関数の勾配でもある。ステップ 6 において、ステップサイズ τ を有する勾配を辿ることによって代替的な一時シーン推定値

【数 3 5】

$$\hat{s}^l$$

が形成される。ステップ 7 において、一時信号推定値は、信号推定値

【数 3 6】

$$\tilde{s}^l$$

40

を更新するようにトランケートされる。ステップ 3 ~ 8 は、アルゴリズムが収束するまで、または有限数の反復にわたって反復される。収束は、例えばステップ 4 において計算される残余の大きさによって、または反復間の信号推定値

【数 3 7】

$$\tilde{s}^l$$

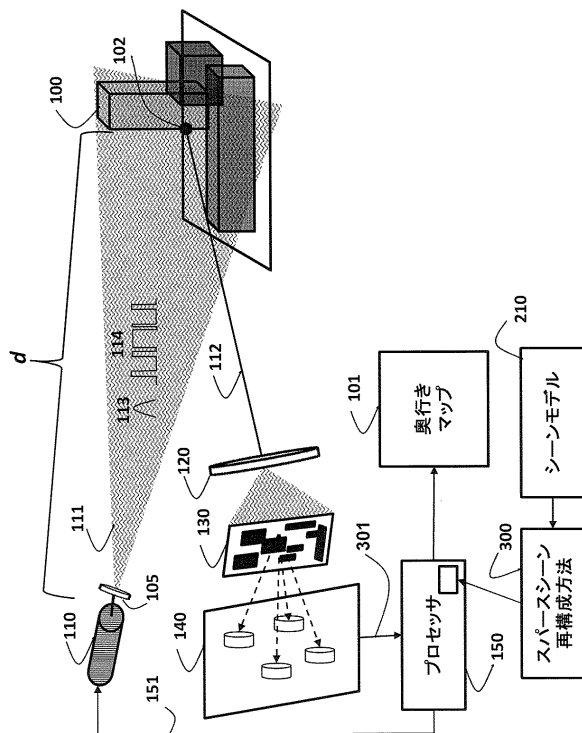
の変化量によって測定することができる。ステップ 9 において、収束後の最終信号推定値

【数 3 8】

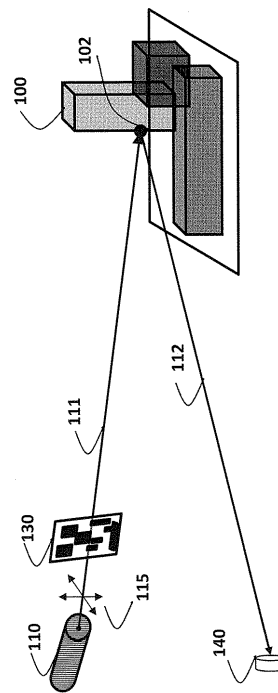
 $\tilde{s}^l$

が返される。

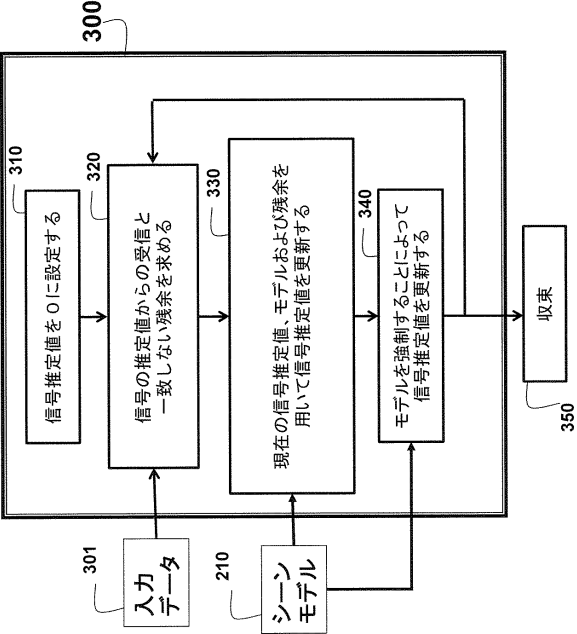
【図 1】



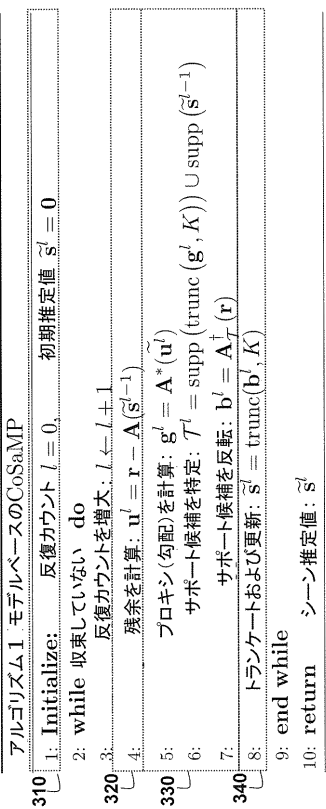
【図 2】



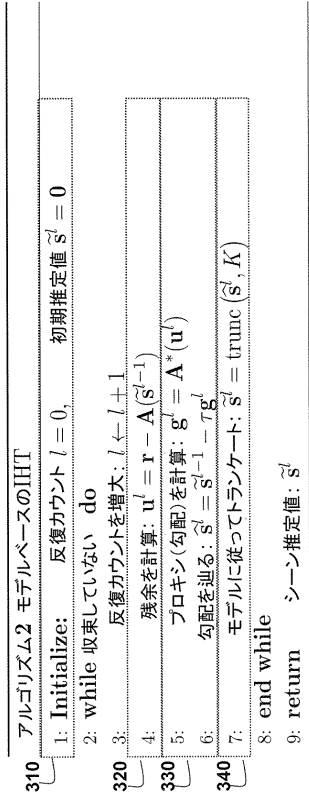
【図 3】



【図 4】



【図 5】



フロントページの続き

(74)代理人 100194939

弁理士 別所 公博

(72)発明者 ペトロス・ティー・ボウフォウノス

アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケンブリッジ、ブロードウェイ 201、ケアオブ・ミッ
ピシ・エレクトリック・リサーチ・ラボラトリーズ・インコーポレイテッド

(72)発明者 アチュータ・カダンビ

アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケンブリッジ、ブロードウェイ 201、ケアオブ・ミッ
ピシ・エレクトリック・リサーチ・ラボラトリーズ・インコーポレイテッド

審査官 ▲高▼場 正光

(56)参考文献 米国特許出願公開第2013/0315501(US, A1)

中国特許出願公開第103472457(CN, A)

特開2013-174584(JP, A)

特表2012-510064(JP, A)

Andrea Colaco, 外4名, Compressive Depth Map Acquisition Using a Single Photon-Countin
g Detector: Parametric Signal Processing Meets Sparsity, 2012 IEEE Conference on Compu
ter Vision and Pattern Recognition, 米国, IEEE, 2012年 6月26日, 96 - 102

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

IPC G01S 7/48 - 7/51

17/00 - 17/95

G01B 11/00 - 11/30