

散乱スクリーンへの適応的3次元画像提示とリアルタイム散乱特性推定

赤塚俊亮 坂上文彦 佐藤淳

名古屋工業大学

1. はじめに

霧や煙などの光を拡散させる媒体を散乱媒体と呼ぶ。多くの場合、散乱媒体は人間の視界を遮る。しかしながら、このような散乱媒体にプロジェクタ等から画像を投影することで、まるで空中に画像が浮いているような特殊な映像を作り出すことができる。ただし、媒体の厚みが薄い場合、散乱媒体に投影された画像はスクリーンに投影された画像と近くなり、立体感を得ることは難しい。一方で、自然に発生する霧のような深さがある散乱媒体に投影した場合、媒体内で光は散乱し、観測される画像は一般的なスクリーン上の観測とは大きく異なるものとなる。そのため、このようなシーンに対して適切な画像を投影することで、あたかも空中に物体が浮かんでいるような情報提示を実現することができる。このような3次元低次手法はいくつか提案されているが、それらは霧や煙のような時間的に変化する媒体を仮定しておらず、その時間変化に対応できない[1]。そこで本研究では、時間的に変化する媒体に適応的に画像を投影することで、任意の画像を観測できる手法を提案する。

2. PSFを用いた観測モデル

まず、1本の光線を厚い散乱媒体に投影した場合の観測を考える。この場合、投影された光は、観測者の視点方向に散乱しながら媒体内を進んでいく。したがって、観測される画像は図1(a)に示すように、光線の経路を示す直線となる。このような光線の観測画像をPSF(Point Spread Function)と呼ぶ。媒体に画像を投影することは、複数の光線を同時に媒体に投影することと同様であるため、観測画像はPSF画像 P_i を用いて、次のように計算ができる。

$$I = \sum_i E_i P_i \quad (1)$$

このとき、 E_i はプロジェクタのピクセル i から投影された光の強度である。また、 P_i はそのピクセルの光線に対応するPSFである。従来法[1]では、すべてのPSFを事前に測定し、観測画像に基づき E_i を決定する。そのため、このPSFが変化する場合には適切な画像投影を行うことができない。

3. 畳み込みに基づく観測モデル

このような問題を解決するには、時刻ごとにPSFを再度計測・推定する必要があるが、式(1)のように全てのピクセルでPSFを再計測することは現実的ではない。そのため、本研究ではより効率的なPSFの表現方法を検討する。カメラとプロジェクタ間のエピポーラ幾何に注目すると、PSFで観測される光の直線はエピポーラ線に準ずることがわかる。これは、この光線が投影画像のピクセル i とその光学中心を結ぶ直線と同じためである。この場合、プロジェクタの投影画像と観測画像のそれぞれにステレオ画像の平行化を適用すると、図1(b)に示すようにすべてのPSF画像は画像の水平方向に平行な直線となる。これにより、各ピクセルのPSFは単一のPSFで近似することが可能となる。この場合、観測画像は投影画像とPSF画像の畳み込み積分の結果として、次のように計算できる。

$$I = E * P \quad (2)$$

ここで、 E は投影画像、 P は近似したPSFである。また、 $*$ は畳み込み積分を示す。このモデルを使用すると、推定すべきPSFは1つのみであり、従来法と比較して非常に短時間でこれを再推定することが可能となる。



(a) もとの PSF (b) 平行化された PSF

図 1 光線の PSF

4. 不均一散乱媒体への適応

先述した畳み込みに基づく散乱モデルは、散乱媒体が均一であることを仮定している。しか

し、霧や煙を対象とする場合、その広がり是不均一なものとなる。均一な散乱媒体の場合、すべての点において発生する散乱は等しくなる。そのため、少ない PSF で散乱媒体全体を表現することが可能となる。しかし、不均一な散乱媒体の場合、媒体中の全ての点で性質の異なる散乱が発生することになるため、これを表現するためには従来法のような画素ごとの PSF が必要となる。この問題を解決するために、少数の PSF を用意し、これを画素毎に異なる重みで足し合わせることで、画素毎の PSF の違いを表現する。この方法では、散乱は滑らかに変化していると仮定することで、それぞれの画素における PSF を少数の PSF の線形和により表現することで実現される。このモデルを用いた場合、観測画像 I は PSF P^j とこの PSF に対応する画素毎の重みを表す行列 W^j により、以下のように表現できる。

$$I = \sum_j W^j E * P^j \quad (3)$$

なお、 W^j の自由度は非常に高いものとなるが、実際の推定ではこれをサンプリングしたものを線形補間することで安定な推定を実現する。

5. 散乱媒体特性と投影画像の交互推定

前節の観測モデルに基づいて、任意の画像を観測するための PSF と重みマップ、投影画像を決定する。時間 t に投影画像 E_t が投影され、それが I_t として観測されるとすると、PSF P_t^j 、 W_t^j 、 E_t 、 I_t の関係は次のように記述可能である。

$$I_t = \sum_j W_t^j E_t * P_t^j \quad (4)$$

この式を利用すると、時間 t での PSF P_t^j は次のように推定できる。

$$P_t = \arg \min_P \left\| I_t - \sum_j W_t^j E_t * P^j \right\| \quad (5)$$

同様に w_t は次のように推定できる。

$$w_t = \arg \min_W \left\| I_t - \sum_j W^j E_t * P_t^j \right\| \quad (6)$$

ここで、時刻 $t + 1$ に目標画像 I_{t+1}^o を観測させたい場合、投影画像 E_{t+1} は先ほど推定された PSF および重みマップを用いて以下のように決定できる。

$$E_{t+1} = \arg \min_E \left\| I_{t+1}^o - \sum_j W_t^j E * P_t^j \right\| \quad (7)$$

このように投影画像から PSF と重みマップを推定し、PSF と重みマップに基づいて投影画像を順次更新することにより、媒体が変化した場合でも適応的に画像を投影することが可能である。

6. 実験結果

提案手法が不均一な散乱媒体上に適応的に画像を投影できるかどうかを確認するために、計算機上でシミュレーション実験を行った。この実験ではシミュレーション環境で媒体の密度を変化させて、提案された方法が媒体のさまざまな濃度に対して PSF と重みマップ、投影画像を適切に推定できるかどうかを確認した。図 2(a) の画像を目標画像とし、図 3(a)、図 4(a) に示す PSF と重みマップを用いて媒体内の散乱をシミュレートした。このとき、PSF は時刻に応じて変化させ、提案手法を用いて追従できるかを確認した。図 3(b) は異なる時刻での PSF を表しているが、提案法を用いることで、時刻の変化に応じて異なる PSF を推定できていることがわかる。また、重みマップとして図 4(b) が推定されており、真値に近い重みマップを推定可能であることも確認できる。観測結果については目標画像とは異なるものとなってしまっているが、これは今回用いたプロジェクタが 1 台であったため、適切な投影を実現できなかったものと考えられる。これについてはプロジェクタの台数を増加させることで、結果の改善が期待できる。

以上の結果から、提案法により媒体の状態が変化するシーンに対して媒体の状態推定および投影画像の更新を適応的に実現可能であることを確認できた。



(a) 目標画像 (b) 観測結果

図 2 目標画像と観測結果



(a) 真値 (b) 推定結果 (a) 真値 (b) 推定結果

図 3 推定された PSF 図 4 推定された重みマップ

参考文献

- [1] E. Yuasa et al., “Generating 5D Light Fields in Scattering Media for Representing 3D Images”, Proc. CVPRW2017, 2017