

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-12-26

輝度運動情報を用いた煙のボリュームレンダリング映像の表現

Chiba, Yusuke / 千葉, 裕介

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院情報科学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 情報科学研究科編

(巻 / Volume)

14

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2019-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00021945>

輝度運動情報を用いた 煙のボリュームレンダリング映像の表現 Expression of Volume Rendering for Smoke Video using Brightness Kinetic Information

千葉 裕介

Yusuke Chiba

法政大学大学院情報科学研究科情報科学専攻

E-mail: yusuke.chiba.5i@cis.k.hosei.ac.jp

Abstract

We propose a method to create videos expressing the movement of smoke by combine a still image of Computer Graphics (CG) with a brightness kinetic information which is luminance changing with time. Volume rendering is one of the rendering method considering absorption and scattering of light by a medium involved in the air such as smoke. It can express smoke more realistic more than normal rendering, and it takes time to create CG video with smoke. In this research, we express smoke motion of the video created using volume rendering by combining a still image by normal rendering with a brightness kinetic information. We experimented to compare perceptual quality of videos created by proposal method and using volume rendering. We used image quality evaluation index and questionnaire for evaluation of perceptual quality. Experiment results show the proposal method can shorten the creation time and create videos keeping perceptual quality of videos using volume rendering.

1. はじめに

近年、コンピュータグラフィックス(CG)は映画やゲームの分野で多く使われている。CGは仮想3次元空間の物体から立体感のある画像や映像を作成する手法である。

CGの作成方法はプリレンダリングとリアルタイムレンダリングの2つに大別される。プリレンダリングは主に映画などの写実的な映像を制作する場合に用いられ、長時間かけて作成される。一方で、リアルタイムレンダリングはゲームなどに用いられ、ユーザーによる操作や入力に対応してCG映像を生成する。映像を実時間内に生成できる一方で、計算量の差から写実的な表現や画像の精度はプリレンダリングに劣る。

長時間の計算が必要な処理の一例として、ボリュームレンダリング[1]が挙げられる。ボリュームレンダリングは、煙などの空気中の関与媒質による光の吸収や散乱を考慮したレンダリングである。写実的に関与媒質を表現

できる一方で、計算時間が長くなるためリアルタイムレンダリングには向かない。

Kawabeらは、時間的に変化する輝度運動情報を1枚の静止画に対して投影することで、静止画に錯覚的な動きを与えた[2]。しかし、投影対象は実世界の静止画のみであり、CGの静止画を対象としていなかった。

著者らは、輝度運動情報をCGの静止画に重ねることで、錯覚的な煙の動きを表現する映像作成手法を提案した[3]。通常のレンダリングを行ったCGシーンに対して輝度運動情報を合成することで、ボリュームレンダリングで作られた映像に近い煙の動きを表現した。また一对の映像を用いた実験から、提案手法が煙らしい印象を与えるのに有効であるという結果を得た。

本研究では、提案手法によって作成した映像とボリュームレンダリングを用いた映像を複数用意して、知覚品質を比較する実験を行い、本手法の有効性を調査する。また、煙の存在するCG映像の作成時間を短縮しつつ、ボリュームレンダリングを用いた映像の知覚品質を保った映像を作成することを目標とする。

2. 関連研究

CG映像の生成は、モデリング、アニメーション生成、レンダリングの3つの工程に分かれる。モデリングでは、3次元の形状データであるオブジェクトを作成する。アニメーション生成では、オブジェクトの動きを表現する。レンダリングでは、モデリングとアニメーション生成のデータを用いて、仮想空間内のカメラから見える映像を生成する。煙などの流体をCG映像として生成する際は、主に流体シミュレーションを用いてモデリングとアニメーション生成を行う。その結果に対して、レンダリングを行い、最終的な映像を得る。

流体シミュレーションを用いない動きの表現方法として、静止画に対して特定の処理を行う手法が挙げられる。イメージベースレンダリングの分野では、2次元の静止画に対して、流体映像のデータベースを用いることで、静止画内に動きを表現する。プロジェクションマッピングの分野では、人間の視覚特性を利用して錯覚的な動きを表現する。実世界の静止画に対し輝度の動きを投影することで、ろうそくや水の揺らめきを再現した。

2.1. 流体シミュレーションによる動きの表現

自然界に存在する水や煙などの様々な流体の動きは、流体シミュレーションを行うことで表現されることが多い。代表的な流体シミュレーションの手法としてナビエ・ストークス方程式を解く方法が挙げられる。ナビエ・ストークス方程式とは、流体力学における流体の運動を記述した方程式であり、ニュートン力学における運動量の流れの保存則を表す。方程式には時間項・移流項・圧力項・粘性項・外力項が存在し、各項に値を代入することで時間ごとの流体の動きを求める。

Fedkiw らは、仮想的な力を外力として加えながらナビエ・ストークスの方程式を解くことで、煙の動きをシミュレートする手法を提案した[4]。仮想的な力を外力項として考慮することで、方程式の解の数値的誤差を抑え、滑らかな煙の動きの表現を可能にした。

Chem らは、シュレディンガー方程式を用いた煙の表現手法を提案した[5]。シュレディンガー方程式は、主に量子力学の分野で用いられる偏微分方程式である。方程式の解は波動関数と呼ばれ、電子などの量子系の状態を表す。また、量子系の状態の時間的変化を記述する。この波動関数を流体シミュレーションに応用することで、煙の複雑な動きを安定して表現できる。

どちらの手法も滑らかな煙の動きを生成することができる一方で、複雑なシミュレーションとレンダリングが必要となるため映像の作成に時間がかかる。

2.2. 静止画に対する動きの表現

Okabe らは、水が流れる様子を撮影した流体映像のデータベースを用いて、静止画内の選択領域に対して水の動きを与えるシステムを提案した[6]。選択された領域に対して、最も適切な流体映像をデータベースから選び、静止画に合成することで滑らかな水の動きを再現した。滑らかな映像を得られる一方で、データベースの作成には大量の流体映像のデータを用意する必要がある。

Kawabe らは、実世界の静止画に対してプロジェクターを用いて、輝度運動情報を投影することで動きを表現する光投影技術“変幻灯”を提案した。一般に人間の視覚情報処理では、色・形・動きの3つの要素を脳内で統合することで物体を知覚する。一方で視覚科学では、周辺の運動情報の影響により、止まっている物体が動いて見える錯覚情報が存在する。“変幻灯”は、輝度運動情報によって錯覚を生じさせ、静止画がまるで動いているかのように知覚させる。

流体の動きの表現方法の中でも、計算コストが低く事前準備が少ない“変幻灯”に着目する。“変幻灯”では、実世界の静止画に対して輝度運動情報を投影することで動きを表現したが、CGの静止画を対象にした研究は存在しなかった。本研究では、CGの静止画に対して輝度運動情報を合成することで、煙の映像を作成する。また、作成した映像とボリュームレンダリング映像の違いを定量評価と主観評価の2面から調査する。

3. ボリュームレンダリング

現在、主流のCGレンダリング手法としてレイトレーシングが挙げられる。レイトレーシングでは、光源から出た光の反射や屈折を追跡し、カメラに入射する光の色や明るさを求める。

一般的にレイトレーシングなどのCG画像のレンダリングは、真空状態を仮定する。しかし、写実性の高い画像を生成する際にあたって、真空という仮定では再現できない現象が多くある。例えば、空気遠近法と呼ばれる遠くの物ほど色ががすんで見える現象は、遠くの物から観測者に届く光が大気中で散乱することで発生する。また、雲や煙のような明確な表面を持たずに光に作用する物質や炎のように空間が光を発する現象も真空下での表現が難しい。

ボリュームレンダリングは、煙などの空気中の関与媒質による光の吸収や散乱を考慮したレンダリングである。光の挙動はボリュームレンダリング方程式[7]を解くことで計算される。方程式は、光が関与媒質内のある位置 x を方向 $\vec{\omega}$ に向かって微小距離進むときの光の変化量 $dL(x, \vec{\omega})$ を表す。光の変化量は媒質内で発生する現象によって異なるため、現象ごとの式を以下に示す。また、図1にボリュームレンダリングで考慮する現象のイメージを示す。

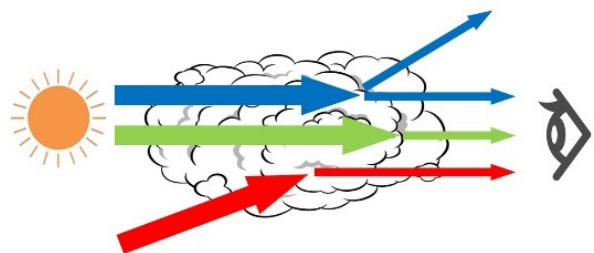


図1 ボリュームレンダリングのイメージ

3.1. 関与媒質による光の減衰

図1の上の矢印のように、光が媒質内の散乱成分と衝突することで光が入射方向 $\vec{\omega}$ 以外の方向に散乱した時、方向 $\vec{\omega}$ へ進む光は減衰する。この現象における $dL(x, \vec{\omega})$ は式(1)のようになる。

$$dL(x, \vec{\omega}) = -\sigma_s(x)L(x, \vec{\omega})ds \quad (1)$$

ここで $L(x, \vec{\omega})$ は入射した光の強さを表し、 $\sigma_s(x)$ は散乱係数と呼ばれる。散乱係数は光が微小距離あたりに入射方向以外の方向にどれだけ散乱するかを表す。

図1の中央の矢印のように、光が媒質内を進む際、光が媒質に吸収されることで光の量は減衰する。この時、 $dL(x, \vec{\omega})$ は式(2)のようになる。

$$dL(x, \vec{\omega}) = -\sigma_a(x)L(x, \vec{\omega})ds \quad (2)$$

ここで $\sigma_a(x)$ は吸収係数と呼ばれ、光が微小距離あたりにどれだけ吸収されるかの割合を表す。

式(1)(2)で定義される入射光の減衰は式(3)のようにまとめられる。

$$dL(x, \vec{\omega}) = -\sigma_t(x)L(x, \vec{\omega})ds \quad (3)$$

ここで σ_t は消滅係数と呼ばれ、吸収係数と散乱係数の和で定義される。 σ_t が定数の場合、非常に簡単な指数関数となり、位置 x から媒質内を距離 d だけ進んだときの光 $L(x+d, \vec{\omega})$ は(4)式ようになる。

$$L(x+d, \vec{\omega}) = e^{-\sigma_t d} L(x, \vec{\omega}) \quad (4)$$

3.2. 関与媒質による光の増加

図1の下の方の矢印のように、媒質内の位置 x に $\vec{\omega}$ 以外の方向から入射した光が $\vec{\omega}$ 方向に散乱することで、 $\vec{\omega}$ 方向への光が増加する。 $\vec{\omega}$ 方向への光の増加量は式(5)のようになる。

$$dL(x, \vec{\omega}) = \sigma_s(x) \int_{s_2} f_p(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L(x, \vec{\omega}') d\vec{\omega}' ds \quad (5)$$

ここで、 $f_p(x, \vec{\omega}', \vec{\omega})$ は位相関数と呼ばれ、ヘニエイ・グリーンステイン関数[8]を用いる。この関数は関与媒質の散乱方向の特性を表しており、主に煙や炎などの自然物の表現に用いられる。 $L(x, \vec{\omega}')$ は $\vec{\omega}$ 以外の方向から入射する光であり、位置 x に入射して $\vec{\omega}$ 方向に散乱する光の総量を積分によって求められる。

3.3. 映像の生成

ボリュームレンダリングした画像を1フレーム毎に生成することで映像を得る。各画像のレンダリングでは、レイトレーシングと同じように光の反射や屈折を追跡する。また、関与媒質を考慮するため、光の減衰と増加の処理が追加される。

レンダリングするシーンは変わらないが、媒質は1フレーム毎に移動する。したがって、正確に媒質を表現するために、1フレーム毎のレンダリングが必要となる。

4. 提案手法

本研究では、媒質を考慮せずにレンダリングした静止画（以下、基準画像）を1枚作成し、輝度運動情報を合成することでボリュームレンダリング映像よりも作成時間を短縮して映像を生成する。また、錯覚的な煙の動きを知覚させることで、ボリュームレンダリング映像と類似した煙の動きを表現する。

輝度運動情報とは、時間ごとに変化する輝度情報であり、ピクセルごとに0から1までの値を格納している。本手法では、煙の動きを再現するため基準画像内のオブジェクトには動きを与えない。しかし、[2]の輝度運動情報の作成方法では、画像内のオブジェクトにも動きを与えてしまうため、本手法では異なった作成方法を用いる。図2に提案手法の概要を示す。

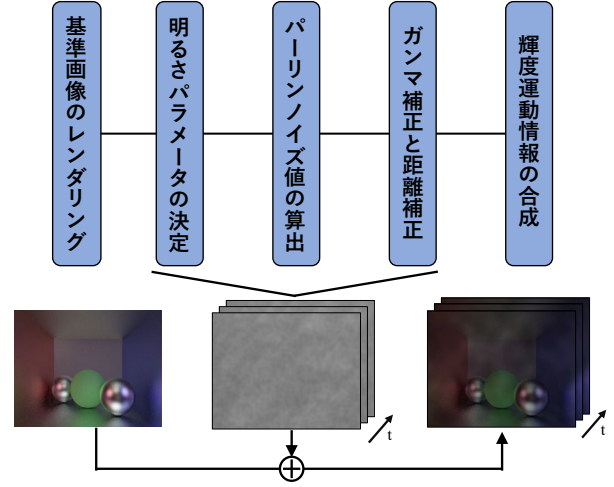


図2 提案手法の概要

4.1. 基準画像のレンダリング

基準画像のレンダリングには、Multiplexed Metropolis Light Transport (MMLT)[9]を用いる。MMLTはレイトレーシング手法の1種であり、マルコフ連鎖モンテカルロ法と多重重点的サンプリングを組み合わせ、非常に効率的にパス構築を行う。パスとは光源からカメラに光が入るまでの道筋のことを指し、各パスでカメラに入ってくる光の量を計算することでCG画像が生成される。

パスの構築と光量の計算は、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いる。また、モンテカルロ法の計算の際に生じる光量の分散を抑えるために多重重点的サンプリングを用いている。基準画像のレンダリングでは媒質を考慮しないため、散乱係数と吸収係数を0としている。これにより、媒質による光の減衰・増加は発生しなくなる。

4.2. 輝度運動情報の生成

輝度運動情報は時間ごとに変化する輝度情報であり、ピクセルごとに0から1までの実数値を格納している。図2の中央の画像群が輝度運動情報のイメージであり、輝度情報が時系列順にフレームごとに並んでいる。それぞれの輝度情報の値は明るさパラメータ、パーリンノイズ、ガンマ補正・距離補正によって算出される。

4.2.1. 明るさパラメータの決定

明るさパラメータ L は、入力する消滅係数の値によって決まる。まず、基準となるボリュームレンダリング映像を作成し、用いられている消滅係数を基準の係数 σ_t とし、1フレーム目の輝度平均を L_s とする。次に、作成したい映像の消滅係数 σ_t' を入力する。 σ_t と σ_t' の比率 r から明るさパラメータを決定する。比率 r と明るさパラメータ L を式(6)に示す。

$$r = \sigma_t' / \sigma_t, \quad L = L_s (2/3)^{(r-1)} \quad (6)$$

4.2.2. パーリンノイズの値の算出

パーリンノイズ[10]はCGを写実的に表現するためのテクスチャ作成技法であり、時間的・空間的に変化する値を生成する。輝度運動情報の動きの表現は主にパーリンノイズの値が大きく影響しており、座標と時間を引数として計算される。本実装では、座標を基準画像の縦横座標とし、時間に輝度運動情報のフレーム番号を用いた。

ノイズの周波数や振幅を変えたノイズをオクターブと呼ぶ。本手法では、オクターブを複数組み合わせ合わせたパーリンノイズであるオクターブパーリンノイズを用いた。式(7)にオクターブパーリンノイズの関数 PN を示す。

$$PN(x/d1, y/d1, f/d2, O, P) \quad (7)$$

ここで x と y は基準画像内のピクセルの座標、 f はフレーム番号、 $d1$ はノイズの空間的な周波数を制御するパラメータであり、 $d2$ は時間的な周波数を制御する。 O はオクターブの数、 P はオクターブの影響力を表す。

4.2.3. ガンマ補正と距離補正

ガンマ補正と距離補正は煙らしい表現を高めるために用いる。ガンマ補正は画像の輝度を非線形に変更することで、画像のコントラストを調節する。本実装では、コントラストを全体的に暗くし煙をより際立たせるために用いる。

一方、距離補正では画像の中心をより暗くすることで、空間内の奥行による煙の濃度差を表現する。中心からの距離が離れるほど明るくするために、ガウス関数を用いた。ガウス関数を用いた理由は、自然界の多くの事象が正規分布に従うことから、より自然な煙に近づくのではないかと考えたためである。

4.3. 輝度運動情報の合成

輝度運動情報は、各ピクセルのパーリンノイズの値に対し、ガンマ補正と距離補正を行い、明るさパラメータを掛け合わせた結果を輝度運動情報とする。

基準画像に対して、各フレームの輝度運動情報を合成することで、最終的な映像を得る。合成では、基準画像の各ピクセルに対して対応するピクセルに格納された輝度運動情報の値を掛け合わせる。この合成の処理を全フレームに対して行い、煙の動きを知覚させる映像を得る。

5. 評価実験

ボリュームレンダリングによる映像(以下、目標映像)と提案手法による映像(以下、提案映像)を各6種類ずつ作成し、2つの評価実験を行った。

1つは、Structural Similarity (以下、SSIM) [11]と Multi Scale-Structural Similarity (以下、MS-SSIM) [12]の2つの画質評価指標を用いた定量評価である。画質評価指標は、2種類の画像や動画がどれほど類似しているかを数値化する。目標映像を正解の映像として、合成映像が正解とどれほど類似しているかを数値として評価できる。

表1 映像の作成に用いた各係数

映像対	散乱係数	吸収係数	消滅係数
A・A'	0.010	0.015	0.025
B・B'	0.012	0.018	0.030
C・C'	0.014	0.021	0.035
D・D'	0.016	0.024	0.040
E・E'	0.018	0.027	0.045
F・F'	0.020	0.030	0.050

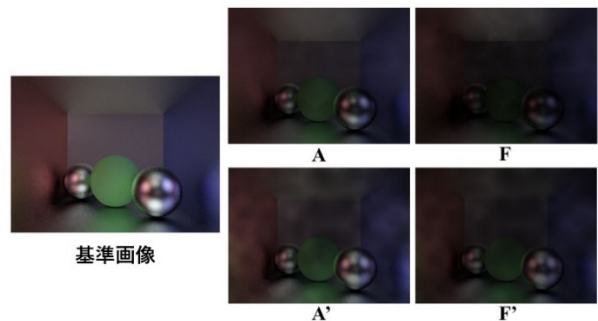


図3 基準画像と評価映像の1フレーム目。上が目標映像、下が提案映像である。

もう1つは、アンケート評価を用いた主観評価である。被験者は並べられた2つの映像を見て、どちらがより煙らしかったかを答える。この際、2つの映像のうち左側を常に同じ映像とすることで、2つの手法による映像の対応関係を見ることができる。

5.1. 評価に用いる映像

評価に用いる映像は、目標映像と提案映像の各6種類ずつ計12種類である。目標映像をA, B, C, D, E, Fとし、各目標映像に近似させた提案映像をA', B', C', D', E', F'とする。それぞれの映像は100フレームであり、フレームレートは6fpsとした。

映像にノイズを出さない十分な質を確保するため、目標映像の各フレームのレンダリング時間は600秒とした。目標映像では全フレームをレンダリングするため、1つの映像の生成時間は60000秒である。

提案映像の生成時間は、基準画像のレンダリング時間と輝度運動情報の生成と合成に要する時間に依存する。基準画像のレンダリング時間は、目標映像のフレーム生成時間に合わせて、600秒とした。輝度運動情報の生成と合成は、非常に短時間であり30秒以内で行われる。

各目標映像に対応する提案映像を作成するため、対応する目標映像の消滅係数を入力として作成した。明るさパラメータの基準となる映像はAとした。映像の生成に用いた散乱係数と吸収係数、2つの係数の和である消滅係数を表1に示す。また、輝度運動情報を合成する基準画像とA, A'とF, F'の1フレーム目の画像を図3に示す。映像作成に使用したPCはHP ENVY Desktopである。また、CPUはIntel Core i7-6700で16Gであり、GPUはNVIDIA GeForce GTX 960で10Gである。

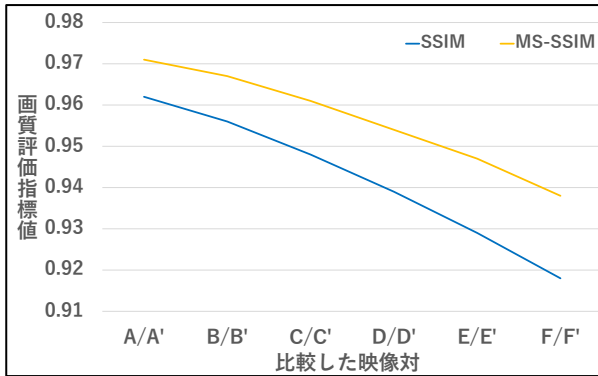


図4 各映像対と SSIM・MS-SSIM の値

5.2. 画質評価指標による評価実験

目標映像を正解として、提案映像が正解からどれほど離れているかを SSIM と MS-SSIM を用いて評価した。SSIM は画像や動画の画質評価指標であり、MS-SSIM は画像を段階的にぼかしながら SSIM を求める手法である。どちらの指標も人間の視覚特性に近い評価を行うことができる。

5.2.1. SSIM と MS-SSIM

SSIM は 2 つの画像がどの程度類似しているかを数値的に示す。まず、原画像と比較画像から局所領域を選択し、領域内の類似度である SSIM を求める。そして、局所領域を少しずつずらしていき、各領域で求めた SSIM の平均が最終的な SSIM 値となる。局所領域をずらしながら SSIM 値を求めることで、画像内の局所的な違いを捉えることができるため、人間の視覚特性に近い結果を得られる。SSIM の算出式を式(8)に示す。

$$SSIM = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (8)$$

ここで μ は局所領域内の画素値の平均であり、 σ は画素値の標準偏差である。下付き文字の x は元画像を表し、 y は比較画像を表す。 σ_{xy} は共分散を意味し、 c_1, c_2 は定数である。

一方、MS-SSIM は元画像と比較画像を段階的にぼかし、各段階で SSIM 値を求める。求めた SSIM 値に対して重みづけを行い、最終的な MS-SSIM 値を得る。段階的な評価値を用いることで、SSIM と同等またはそれ以上に機能することが示されている[13]。

5.2.2 画質評価指標による実験結果

SSIM と MS-SSIM による評価値を図 4 に示す。映像の評価の場合には、1 フレーム毎に評価値を求めその平均を取った値を用いる。

各評価指標は 0~1 の実数値を出力し、1 に近いほど 2 つの映像が類似していることを示す。人間の目では違いを視認できないとされる値である 0.95 以上を目標値とした。

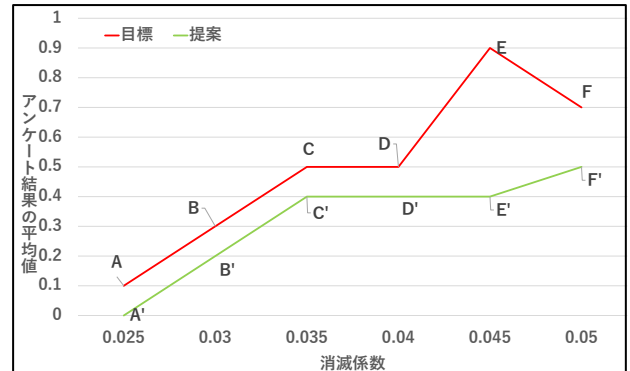


図5 消滅係数と回答の平均値

2 つの評価結果から、A・A' と B・B' の映像対において目標値を上回る値となった。C・C' と D・D' においては、MS-SSIM のみ目標値を上回った。どちらの指標でも消滅係数が上昇するにしたがって、評価値が減少していきることが分かる。

5.3. アンケートによる評価実験

2 つの映像を比較するため、[2]で行われたアンケートと同様のアンケートを行った。被験者に 2 つの映像を同時に見てもらい、どちらがより煙らしく見えるか右か左で答えてもらった。アンケートには 10 人 (男性 8 人、女性 2 人、21-25 歳) が参加した。

5.3.1. 映像の提示方法

1 つのディスプレイ内の左右に目標映像もしくは合成映像を表示し、被験者に見てもらった。左側に表示する映像は目標映像の C であり、常に同じである。右側の映像は C を含めた 12 種類の映像のうちのどれかである。被験者には、左側の映像が常に同じであることは伝えない。映像を提示する順番はランダムであり、同じ映像が選ばれることはないため、被験者が見る映像に重複はない。つまり、被験者は合計 12 回の回答を行う。

被験者にはディスプレイから頭部まで約 70cm 離れた状態で映像を提示した。1 つの映像の提示時間に制限はなく、被験者が回答を終えるまで提示し続けた。

5.3.2. アンケートによる実験結果

提示した映像に対して右と回答した場合を 1、左と回答した場合を 0 と定義した時の平均値のグラフを図 5 に示す。

左の映像は常に C であるので、平均値が 0.5 未満の場合は C よりも煙らしくないと感じ、0.5 より大きい場合は C よりも煙らしさを感じていることを表す。目標映像の平均値は A から E まで、増加傾向にあることが分かる。しかし F は E よりも値が低くなった。一方、提案映像では A' から F' で値が増加していく傾向があった。しかし、C' から E' まで同じ値を取り、この区間では増加傾向は見られなかった。

どの消滅係数においても、提案映像が目標映像の値を上回ることにはなかった。しかし、0.025 から 0.04 までの消滅係数において、提案映像と目標映像のグラフは 0.1 の差を保った同じ形になっていた。

また、各消滅係数における提案映像と目標映像の回答に対して、信頼水準を 95%として t 検定を行った。消滅係数が 0.045 の映像対において有意差がみられ、その他の係数で有意差は出なかった。

6. 考察

図 4 より、画質評価指標では、消滅係数の値の増加に伴い SSIM, MS-SSIM 共に減少することが分かった。SSIM では A と B, MS-SSIM では A~D において、人間の目では違いを認識できないとされる値 0.95 を上回った。このことから、提案手法の映像と既存手法の映像は、今回の消滅係数の範囲において定量的にみて類似していると言える。しかし、グラフの概形から消滅係数の増加に伴って評価値は落ちていくと考えられる。これは、消滅係数の値の増加によって煙の濃度が高くなり、煙のある画素とない画素の画素値の差が大きくなるため評価値が低くなったと考えられる。

図 5 より提案映像のアンケート評価の平均値は、消滅係数の増加と共に増加することが分かった。目標映像の平均値にも増加傾向が見られたが、消滅係数 0.045 から 0.05 にかけて値は減少した。また、提案映像の平均値は目標映像の平均値を超えることはなかった。このことから、提案映像は目標映像の知覚品質を超えることはなかったと言える。

消滅係数が 0.025 から 0.04 までの区間において、目標映像と提案映像の回答の平均値は一定の差を保っていた。また、t 検定において同区間の係数で有意差は出なかったため、被験者の知覚に差が生まれなかったと言える。これらのことから、提案手法によって作成された映像は、0.025 から 0.04 の消滅係数において、目標映像と同程度の知覚品質を保っていると言える。

7. まとめと今後の課題

本研究では、輝度運動情報を用いて錯覚的な煙の動きを与える映像作成手法を提案した。正確な煙の動きを表現したボリュームレンダリング映像と提案手法を用いた映像を作成した。作成した映像は 100 フレームであり、ボリュームレンダリング映像は作成時間が 60000 秒であるのに対し、提案手法による映像は 600 秒で作成した。つまり、映像の作成時間は短縮されたと言える。

作成した複数の映像を用いて、画質評価指標とアンケートの 2 つの評価実験を行った。画質評価指標による実験から 2 つの手法による映像は、消滅係数が低い場合において、定量的に見て類似していることが分かった。またアンケートによる実験と t 検定の結果から、煙の濃度が薄くなるような消滅係数において 2 つの手法の映像は同程度の知覚品質を持っていると言えた。

以上のことから、濃度の薄い煙の存在するシーンの映像作成において、ボリュームレンダリングに比べて知覚品質を落とさずに作成時間を短縮させたとと言える。

今後は、様々な消滅係数のボリュームレンダリング映像に対して、同程度の知覚品質を保った映像を作成する手法の提案が望まれる。このために、輝度運動情報の生成方法の改良が必要である。例えば、パーリンノイズの生成において、出力結果はパラメータに非常に左右される。ボリュームレンダリング映像の消滅係数によって、使用するパラメータを変更することで、より映像の知覚品質を高められると考える。

参考文献

- [1] E. P. Lafortune and Y. D. Willems, "Rendering participating media with bidirectional path tracing", *Proceedings of Rendering Techniques '96*, pp. 91-100, 1996.
- [2] T. Kawabe, T. Fukiage, M. Sawayama and S. Nishida, "Deformation lamps: A projection technique make static objects perceptually dynamic", *ACM Transactions on Applied Perception*, vol. 13, no. 2, 2016.
- [3] 千葉裕介, 小池崇文, "輝度変動情報を用いた煙のボリュームレンダリングアニメーションの近似", *情報処理学会第 80 回全国大会 2018*, 2018.
- [4] R. Fedkiw and J. Stam, H. W. Jensen, "Visual simulation of smoke", *Computer Graphics SIGGRAPH '01 Proceedings*, pp. 15-22, 2001.
- [5] A. Chern, F. Knoppel, U. Pinkall, P. Schroder and S. Weibmann, "Schrodinger's smoke", *ACM Transactions on Graphics*, vol. 35, no. 4, pp. 1-13, 2016.
- [6] M. Okabe, K. Anjou and R. Onai, "Creating fluid animation from a single image using video database", *Computer Graphics Forum*, vol. 30, no. 7, pp. 1973-1982, 2011.
- [7] J. T. Kajiya and B. P. V. Herzen, "Ray tracing volume densities", *Computer Graphics SIGGRAPH '84 Proceedings*, vol. 18, no. 3, pp. 165-174, 1984.
- [8] L. G. Henyey, J. L. Greenstein, "Diffuse radiation in the Galaxy", *Astrophysical Journal*, vol. 93, pp. 70-83, 1941.
- [9] K. Perlin, Improving noise, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 21, no. 3, pp. 681-682, 2002.
- [10] T. Hachisuka, A. S. Kaplanyan and C. Dachsbacher, "Multiplexed Metropolis Light Transport", *ACM Transactions on Graphics*, vol. 33, no.4, pp. 1-10, 2014.
- [11] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no.4, pp. 600-612, 2004
- [12] Z. Wang, E. P. Simoncelli and A. C. Bovik, "Multi-scale structural similarity for image quality assessment", *Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, vol. 2, no. 5, pp. 1398-1402, 2003.
- [13] J. Sogaard, L. Krasula, M. Shahid, D. Temel, K. Burnstorm, M. Razaakh, "Applicability of Existing Objective Metrics of Perceptual Quality for Adaptive Video Streaming", *Image quality and System Performance XIII on Electronic Imaging*, vol. 13, pp. 1-7, 2016, 2016.