Vol.2016-CG-165 No.17
Vol.2016-DCC-14 No.17
Vol.2016-CVIM-204 No.17
2016/11/10

プロジェクタ投影光の時間積分に基づく運動情報の映像化

坂上 文彦[1,a)]　山口 哲矢[1]　佐藤 淳[1,b)]

概要：本研究では，人間やカメラがシーンを観測する際に一瞬の情報ではなく一定時間積分された情報を取得していることに着目し，これを利用した運動情報の可視化技術を提案する．さらに，この可視化技術を応用することで，対象の運動情報にあわせて観測される画像を変化させる，運動情報の映像化技術を提案する．これらの方法では，プロジェクタを用いて高速に変動するパターンを対象物体に投影し，これを観測系で積分しながら観測させる．このとき，対象が運動することによって積分される画像領域が変動することを利用して，対象の運動状態によって異なる映像を提示可能であることを示す．これにより，カメラ等のフィードバック系を一切必要とすることなく，運動情報に応じた画像提示が行える，新しい映像提示技術が実現可能であることを示す．

1. はじめに

近年，様々な情報を人間の分かりやすい形で可視化・提示する，情報の可視化技術が様々な分野で利用されている．このような技術では，抽象的な情報や肉眼では確認が難しい情報などを色情報などの比較的理解が容易である情報に変換して強調提示する．これにより，ユーザは元情報を直接確認する場合と比べて，より直感的に情報を理解することが可能となる．このような技術は，３次元形状の強調提示や，運動情報の解析にも有効であると考えられ，有効な技術の開発が求められている．

このような可視化技術を，現実の情報に新たな情報を追加する方法の一つとして考えると，これらは拡張現実感（AR: Augmented Reality）の一つとして捉えることができる．とりわけ，プロジェクタ等を用いて現実世界に直接的に情報を重畳提示させる方法は，観測者がより直接的に情報を取得することを可能とするため，非常に有効と考えられる．しかし，動物体を対象としてこのような情報の重畳提示を行う場合，重畳提示する情報が必ず現実世界から遅延してしまうという問題がある．これは，重畳させる情報を作成するためには，カメラ等のセンサを用いたシーン情報の取得およびその解析というプロセスが必要不可欠であり，必ず一定の処理が必要とされるためである．高速カメラや高速プロジェクタを利用することで，応答時間を十分に短くするという方法も提案されているが [1]，これらの処理時間を 0 とすることは原理的に不可能であるため，提示情報には必ず一定の遅延が生じることとなる．

このような問題に対し，稲垣ら [2] はシーン情報を一切取得することなく形状情報を色情報により強調する方法を提案している．この方法では，複数台のプロジェクタから特殊なパターンを投影し，これを対象上で重ね合わせることにより，対象との距離によって観測させる色を変化させることを実現している．また，この方法を拡張することで，特定の領域のみに着色を行う方法 [3]，非常に細かな形状の変動を強調する方法 [4] なども提案されている．これらの方法では，カメラ等でシーンを撮影する必要も，また，撮影された情報を処理する必要もないため，これらに起因する処理時間を完全に 0 とすることが可能となっている．

これらの方法では，一切の遅延なく対象の形状を可視化することが可能であるため，対象が運動しているようなシーンでも問題なく適用することが可能である．しかし，光の重ね合わせのみにより形状の可視化を実現しているため，対象の運動情報といった複雑な情報を可視化することができない．そのため，運動情報の可視化のためには，従来の方法と同じくカメラ等でシーンを撮影する必要があり，遅延の問題が発生してしまう．

そこで本研究では，対象物体上での光の重ね合わせが時間方向にも発生していることに着目し，これを利用した新しい運動情報の可視化法を提案する．さらに，その方法を利用することで，運動情報にあわせて提示画像を変化させる，運動情報の映像化を提案する．この方法は，カメラなどの運動情報を取得するための機材を一切必要とすることなく運動情報を映像へと変換することを可能とする．これ

[1] 名古屋工業大学
Gokiso, Showa, Nagoya 466–8555, Japan
[a)] sakaue@nitech.ac.jp
[b)] junsato@nitech.ac.jp

ⓒ 2016 Information Processing Society of Japan

Vol.2016-CG-165 No.17
Vol.2016-DCC-14 No.17
Vol.2016-CVIM-204 No.17
2016/11/10

により，形状の可視化法と同様に，処理に起因する情報の遅延を完全に解決することが可能となる．このような方法を用いることで，情報取得のためのの機材を一切利用することなくユーザからのフィードバックを提示映像に反映させることができる，新しい映像提示を実現することが可能となる．

2. 観測モデル

まず，本稿における輝度の観測モデルについて述べる．通常，人間やカメラがシーンを観測する場合，時間中のある一瞬のみを切り取って光量を取得しているのではなく，ある一定時間に得られた光の総量を積分することで入射した光量が計測されている．これにより，本来非常に高速に明滅を繰り返している蛍光灯などでも，継続的に光を発しているものとして観測される．また，カメラにおける観測では，一定時間シャッターを開放しておき，その時間内に入射した光量を計測していることから，より直接的に時間積分が行われていることを確認できる．本節では，このような時間積分を考慮した観測のモデル化について述べる．

いま，観測者が 3 次元点 $\mathbf{X}$ を点 $\mathbf{x}$ として観測しているものとする．また，点 $\mathbf{X}$ の時刻 t における発光輝度が $E(\mathbf{X}, t)$ として表現されるものとする．さらに，観測者が T 時刻分の入射光量を積分して観測を行っている，すなわち露光時間が T であるとする．このとき，時刻 T_0 に点 $\mathbf{X}$ を観測して得られる輝度値 $I(\mathbf{x}, T_0)$ は以下の式で表されるものとする．

$$I(\mathbf{x}, T_0) = \int_0^T E(\mathbf{X}, T_o + t)dt \tag{1}$$

さらに，$E(\mathbf{X}, t)$ をサンプリングにより離散化したものを $E'(\mathbf{X}, t)$ と表すと，式 (2) は以下のように書き換えることができる．

$$I(\mathbf{x}, T_0) = \sum_{t=0}^{T-1} E'(\mathbf{X}, T_o + t) \tag{2}$$

このモデルにおいては，時刻 T_0 において観測される輝度は，$E(\mathbf{X}, t)$ が時刻に応じて動的に変動した場合でも，積分された値が同じである場合には，同様のものとして観測されることを意味している．したがって，ある時刻において観測者に特定の観測を行わせるための発光量は一意に定められるものではなく，時間的な変動を含む様々なバリエーションが存在できることになる．本稿では，このような時間積分を考慮した観測モデルを用いることで，対象の運動に応じて観測結果を変化させる方法について議論する．

なお，観測時に入射された光線を積分するという考え方は，時間軸を含むライトフィールド [5] を観測しているとも考えることができる．ライトフィールドの考え方に則れば，点 $\mathbf{x}$ での観測輝度を得るためには $\mathbf{x}$ に入射する光線の全てを積分する必要があるが，本稿においては議論の簡単化のために，点 $\mathbf{x}$ へと入射する光線は，3 次元点 $\mathbf{X}$ のみから発せされるものとする．

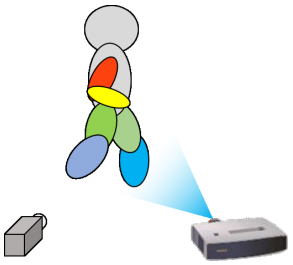


図 1 プロジェクタ投影光を利用した運動情報の可視化

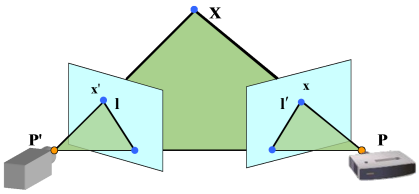


図 2 プロジェクタと観測者のエピポーラ幾何

3. 時間積分を利用した運動情報の映像化

3.1 プロジェクタとカメラのエピポーラ幾何

それでは先に述べた観測モデルの元で，運動情報を可視化・映像化する方法について述べる．本稿では，図 1 に示すように，対象物体上にプロジェクタによりパターンの投影を行い，これを観測者がプロジェクタとは異なる視点から観測する．このような状況において，対象の運動に応じて観測者が異なる映像を観測できるような系の構成を目指す．なお，観測者としては人間やカメラなどが考えられるが，本稿では観測者の形態に関わらず，シーンの観測モデルが射影カメラモデルにより表現できると仮定する．また，**2** で示したような時間積分を含む観測モデルにより輝度の観測が行われるものとする．さらに，パターンを投影するプロジェクタおよび観測者の位置関係は固定であるものとする．本節では，このような状況において観測者とプロジェクタの間に生じる幾何関係をについて述べる．

いま，図 2 に示すようにシーン中の 3 次元点 $\mathbf{X}$ がプロジェクタから投影される画像中の点 $\mathbf{x}$ により照らされ，また，その点が観測者により $\mathbf{x}'$ として観測されているものとする．このとき，プロジェクタの投影行列を $\mathbf{P}$，観測者の投影行列を $\mathbf{P}'$ とすると，$\mathbf{x}, \mathbf{x}'$ は以下のように表される．

$$\lambda\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{X}} \tag{3}$$

$$\lambda'\tilde{\mathbf{x}}' = \mathbf{P}'\tilde{\mathbf{X}} \tag{4}$$

ここで，$\tilde{\mathbf{x}}$ は $\mathbf{x}$ の斉次表現であり，$\tilde{\mathbf{x}} = [\mathbf{x}^\top, 1]^\top$ である．また，λ, λ' は斉次表現における定数倍の不定性を表している．このような関係において，$\mathbf{x}$ と $\mathbf{x}'$ の関係は，3 次元点 $\mathbf{X}$ を介することなく以下のように表すことが出来る．

$$\tilde{\mathbf{x}}'^\top \mathbf{F} \tilde{\mathbf{x}} = 0 \tag{5}$$

ⓒ 2016 Information Processing Society of Japan

Vol.2016-CG-165 No.17
Vol.2016-DCC-14 No.17
Vol.2016-CVIM-204 No.17
2016/11/10

ここで，$\mathbf{F}$ は基礎行列と呼ばれる 3×3 の行列である．このようにして記述される関係はエピポーラ幾何 [6] と呼ばれ，プロジェクタとカメラだけでなく，カメラどうしの関係を記述する場合にも用いられる．この式 (5) は，対応点 $\mathbf{x}$，$\mathbf{x}'$ が以下で表されるエピポーラ線 $\mathbf{l}, \mathbf{l}'$ 上に存在することを表している．

$$\mathbf{l} = \mathbf{F}\mathbf{x} \tag{6}$$

$$\mathbf{l}' = \mathbf{F}^{\top}\mathbf{x}' \tag{7}$$

これは，3 次元点 $\mathbf{X}$ の奥行きがどのように変化した場合でも，点 $\mathbf{x}'$ の対応点はエピポーラ線 $\mathbf{l}'$ 上に存在するということを表している．つまり，対象物体がいかなる運動を行った場合でも，点 $\mathbf{x}'$ で観測される点はプロジェクタ投影画像におけるエピポーラ線 $\mathbf{l}'$ 上の点のいずれかになるといえる．

一般的なシーンにおいてはエピポーラ線の方向と画像の軸とは無関係であるが，エピポーラ線の平行化 [6] を行うことで，エピポーラ線と画像の軸を一致させることが可能となる．本稿では表現の簡単化のためあらかじめエピポーラ線の平行化が行われているものとし，観測者が点 $\mathbf{x}' = (x, y)^{\top}$ にて観測する画像は，投影画像中の点 $\mathbf{x} = (x + \alpha, y)^{\top}$（$\alpha$ は対象の奥行きに基づくする変数）として表現できるものとする．

3.2 時間積分に基づく運動の可視化

次に，このような環境下で対象が運動を行った場合にどのような観測が行われるかについて述べる．先に述べたとおり，対象がいかなる運動を行った場合でも，ある観測点で観測される輝度は必ず対応するエピポーラ線上の点となる．このようなエピポーラ線はエピポールを除いて交わることがないため，それぞれのエピポーラ線上での観測は独立したものとなる．そのため，ここではシーン中のあるエピポーラ線に着目し，その線上においてどのような観測が行われるかについて議論する．

いま，観測点 $\mathbf{x}'$ に対応するプロジェクタからの投影画像上のエピポーラ線を $\mathbf{l}'$ とし，この $\mathbf{l}'$ に投影される画像が図 3 に示す時間軸を含む時空間画像のように，時間に応じて変動しているものとする．このような状況において，対象の状況に応じて観測がどのように変化するかを考える．

まず，図 4(a) に示すように，対象物体が静止している場合を考える．このような場合，時間が経過しても観測者とプロジェクタとの対応関係は変動しない．そのため，図中の黒枠で示すように投影画像中の同一の点を積分した輝度値が観測されることとなる．次に，図 4(b) に示すように，対象物体が前方に運動する場合を考える．このような場合，観測点 $\mathbf{X}$ の奥行きが変動することになるため，時間に応じてプロジェクタ上の観測点が変動することとなる．そのため，図中の青枠で示すような斜めの領域を積分した

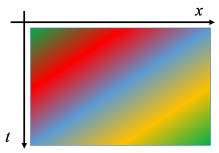
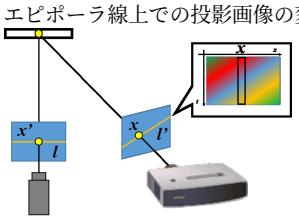
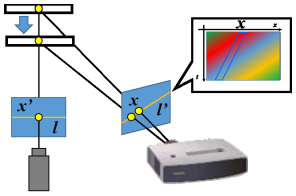


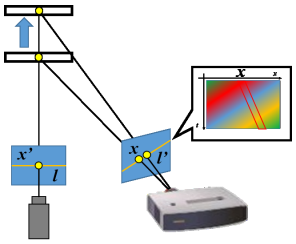
図 3 エピポーラ線上での投影画像の変化例



(a) 対象が静止している場合



(b) 対象が前方に運動している場合



(c) 対象が後方に運動している場合

図 4 対象の運動に応じた観測の変化

値が観測されることとなる．さらに，図 4(c) に示すように，物体が後方に運動する場合には，赤枠で示すような領域が積分され観測されることになる．このように物体が運動することによって，その運動に応じて時空間画像における積分領域が変化し，それに伴い観測輝度が変化する．この積分領域は対象の運動速度，すなわち運動情報により変動するため，これにより運動情報の可視化が可能となる．

3.3 時空間画像の観測

次に，前節で述べた運動の可視化をより具体的にモデル化する．いま，観測者が $\mathbf{x}'$ を観測する視線上に 3 次元点 $\mathbf{X}$ が存在し，この点が観測者の視線上を速度 v で移動する場合を考える．時刻 0 における点 $\mathbf{X}$ の奥行きを d とし，点 $\mathbf{X}$ はプロジェクタ投影画像の点 $\mathbf{x} = (x + \alpha(d), y)^{\top}$ により照らされているものとする．このような場合，点 $\mathbf{x}'$ と対応するプロジェクタ画像上の点 $\mathbf{x}$ は以下の式で表すことができる．

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x + \alpha(d + vt) \\ y \end{bmatrix} \tag{8}$$

ⓒ 2016 Information Processing Society of Japan

Vol.2016-CG-165 No.17
Vol.2016-DCC-14 No.17
Vol.2016-CVIM-204 No.17
2016/11/10

ここで，プロジェクタと対象の距離が十分に離れていると仮定した場合，α を線形な関数として近似できるこれにより，式 (9) は以下のように近似できる．

$$\mathbf{x} \sim \begin{bmatrix} x + \alpha(d) + v\alpha(t) \\ y \end{bmatrix} \tag{9}$$

ここで，運動開始前に観測画像と投影画像の座標が完全に一致するように校正が行われているとすると，$\alpha(d) = 0$ と置き換えることができる．さらに，時刻 t においてプロジェクタから投影される点 (x, y) の輝度を $E(x, y, t)$ として表し，観測者の露光時間を T とするとき，時刻 T_0 において点 $\mathbf{x}$ で観測される輝度 $I(\mathbf{x}, T_0)$ は以下の式で表すことができる．

$$I(\mathbf{x}, T_0) = \int_{T_0}^{T_0+T} E(x + v\alpha(t), y)dt \tag{10}$$

また，時刻のサンプリングを行うことにより，この式は以下のように書き換えられる．

$$I(\mathbf{x}, T_0) = \sum_{t=T_0}^{T_0+T-1} E(x + v\alpha(t), y) \tag{11}$$

この観測モデルが示すとおり，速度 v が変動することで，それぞれ投影画像の異なる画素値が積分されることになり，運動ごとに異なる画像を観測させることが可能となる．

3.4 運動情報の映像化のための投影パターン生成

次に，式 (11) に基づき運動ごとに異なる画像を観測させるための投影パターンを生成する方法について考える．さきに述べたとおり，プロジェクタと観測者の位置関係が固定されている場合，対応点はエピポーラ線上のみに存在することとなり，また，それぞれのエピポーラ線上の関係は互いに独立なものとなっている．そのため，本節ではあるエピポーラ線に着目し，そのエピポーラ線から投影される輝度を $E(x, t)$ として時刻と x 座標の 2 変数のみで記述するものとする．

いま，対象が速度 v_1 で移動する場合に画像 $\hat{\mathbf{I}}_1$ を観測させる場合を考える．$\hat{\mathbf{I}}_1$ における点 x の輝度値を $\hat{I}_1(x)$ とするとき，このような観測を行わせるための投影パターンは以下の評価式を最小化することで求めることができる．

$$E_1 = \sum_x \left(\hat{I}_1(x) - \sum_{t=0}^{T-1} E(x + v\alpha(t), y) \right)^2 \tag{12}$$

さらに，対象が速度 $v_i (i = 1, \cdots, M)$ で運動した場合に，それぞれ異なる画像 $\hat{\mathbf{I}}_i$ を観測を観測させることは，以下の評価式を最小化する投影パターンを投影することで実現できる．

$$E = \sum_{i=1}^{M} \sum_x \left(\hat{I}_i(x) - \sum_{t=0}^{T-1} E(x + v\alpha(t), y) \right)^2 \tag{13}$$

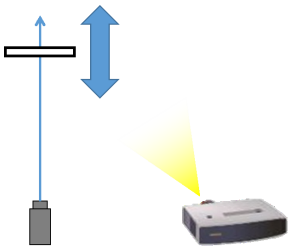


図 5 実験環境

なお，プロジェクタから投影可能な明るさには上限，下限が存在しているため，上式を最小化する場合にもそのような輝度の範囲を考慮した最小化する必要がある．また，運動ごとに十分に異なる画像を観測させるためには，映像化を行う速度の種類 M が離散化された露光時間 T よりも小さい必要がある．これは，$M > T$ となるような場合には，投影パターンの自由度が観測画像の自由度を下回ってしまうため，それぞれの速度ごとに異なる画像を観測させることが難しくなるためである．

以上により，カメラ等のセンサを用いることなく対象の速度に応じて観測画像を変化させる方法を実現することができる．

4. 実験

4.1 実験環境

本節では提案法を用いて運動情報を映像化する実験を行った．この実験では計算機上に実験環境を構成し，この環境のもとで提案法により運動の映像化が行えるかどうかを確認した．まず，実験に用いた環境を示す．

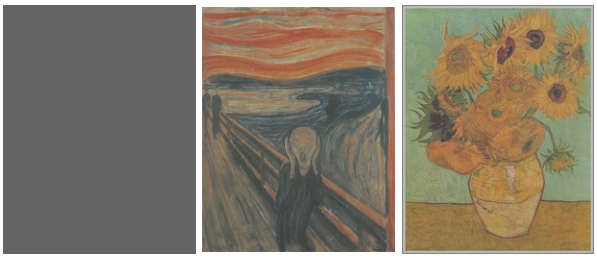
この実験では，図 5 に示すようにプロジェクタとカメラを配置した．対象物体は平面物体であるものとし，観測者の視線方向に沿って一定の速度で移動するものとした．観測者およびプロジェクタの投影モデルにはアフィンカメラモデルを用い，式 (9) による近似が完全に成立するものとした．対象は (a) 静止，(b) 高速，(c) 低速の 3 種類の速度で移動させるものとした．高速の場合には対応点が 1 pixel/frame で移動するものとし，低速の場合には 0.5 pixel/frame で移動するものとした．それぞれの速度について，図 6 に示す画像を観測させることを目標とし，投影パターンを生成した．カメラの露光時間は 20frame とし，提案法により作成されたパターンを観測した場合にどのような画像が観測されるかを確認した．

4.2 実験結果

まず，提案法により作成された投影パターンの一部を図 7 に示す．この図を見ると，目標画像の情報がそれぞれの画像に少しずつ含まれていることが確認できる．これにより，投影パターンを積分することで目標画像が構成されると考えられる．次に，このパターンを対象に投影し，それ

ⓒ 2016 Information Processing Society of Japan

Vol.2016-CG-165 No.17
Vol.2016-DCC-14 No.17
Vol.2016-CVIM-204 No.17
2016/11/10



(a) 静止　(b) 高速　(c) 低速

図 6　目標画像

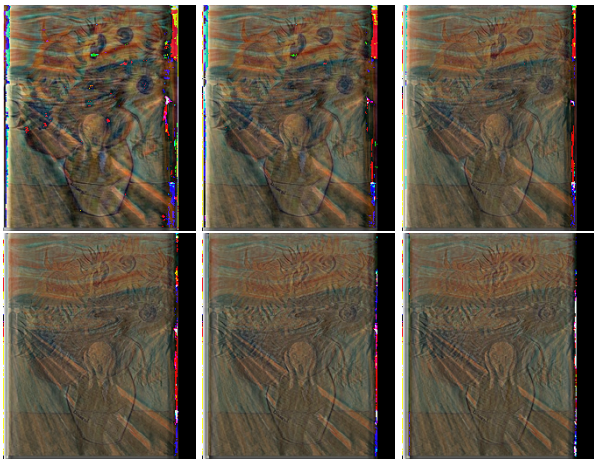


図 7　提案法により作成された投影パターン

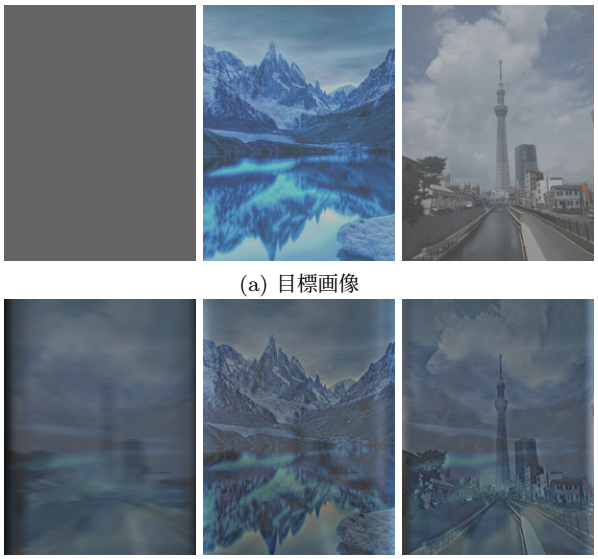


(a) 静止　(b) 高速　(c) 低速

図 8　観測画像

を観測した結果図 8 に示す．これの結果は目標とした速度と全く同一の速度で対象を移動させた場合に観測された画像となっている．これらの観測結果を見ると，(a) においては目標とした平坦なパターンではなく，別の速度の目標画像がうっすらと観測されていることが確認できる．しかし，(b)，(c) の速度においては観測画像中に目標画像の特徴が強く表れていることが確認できる．このことから，提案法を用いることで運動に応じて異なる画像を観測させることが可能であることを確認することができる．

次に，図 9 に同様の環境において異なる画像組を用いて運動の映像化を行った結果を示す．この結果においても，先の実験と同様に運動に応じて異なる画像が観測できていることが確認できる．このことから，提案法では目標画像によらず運動の映像化を行うことができることが確認できた．



(a) 目標画像

(b) 観測画像

図 9　目標画像と観測画像

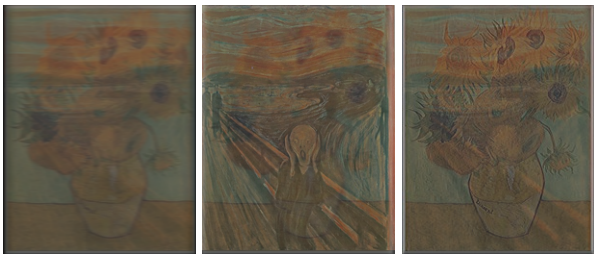
4.3　評価実験

次に，先の実験と同様の環境において，観測者の露光時間や対象の移動速度を変化させた場合にどのような観測が行われるのかを確認した結果を示す．まず，観測者の露光時間を $T = 5, 10, 15, 20$ の 4 種類に変化させ，それぞれの場合にどのような観測が行われるのかを確認した．図 10 にそれぞれの露光時間における観測結果を示す．この結果を見ると，露光時間を増加させることで観測画像の質がわずかに改善していることが確認できる．しかし，自由度の増加に伴う大幅な画質の改善を確認することができなかった．これは，露光時間を増加させた場合には積分される画素の数も増加してしまうため，各画素の輝度値の独立性が低下する．これにより，期待したほど投影画像の自由度が増加しなかったものと考えられる．また，プロジェクタから画像を投影する場合には，投影可能な輝度の範囲がプロジェクタの性能により制限されており，これにより，最適解においても十分に目標画像に近い画像が得られないと考えられる．このような輝度範囲の影響を減少させるためには，目標画像のコントラストを適応的に変化させるなど，現在とは異なる対策が必要になると考えられる．

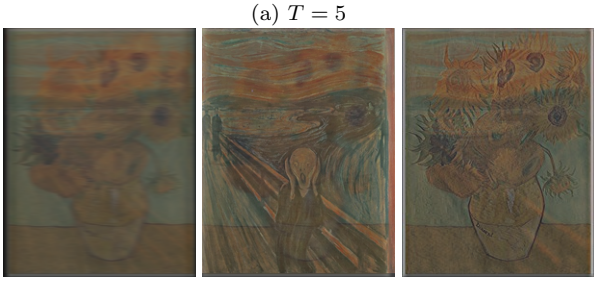
次に，目標とした速度以外の速度で対象を運動させた場合にどのような画像が観測されるかを確認した．この実験では対象の運動速度を画素の移動速度が 0 ～ 1pixel/frame となるように変化させ，それぞれの速度でどのような画像が観測されるかを確認した．図 11 に対象の速度とそれぞれの速度における観測画像を示す．この結果を見ると，対象の速度を変化させることで，観測画像が徐々に変化していっていることが確認できる．また，目標画像と同一の速度である場合には，目標に近い画像が観測されていることも確認できる．このことから，提案した運動の映像化法は速度の変動に対してある程度のロバスト性を持っていると

ⓒ 2016 Information Processing Society of Japan

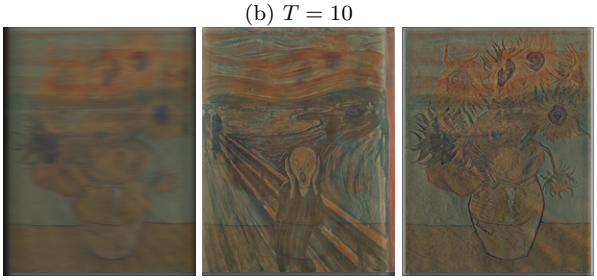
Vol.2016-CG-165 No.17
Vol.2016-DCC-14 No.17
Vol.2016-CVIM-204 No.17
2016/11/10



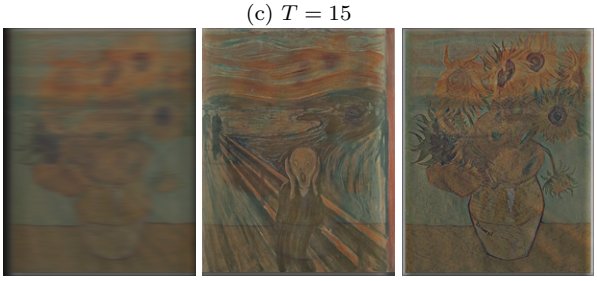
(a) $T = 5$



(b) $T = 10$

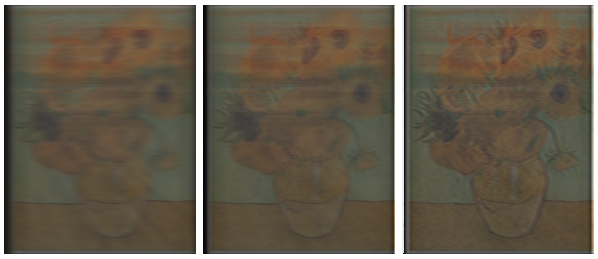


(c) $T = 15$

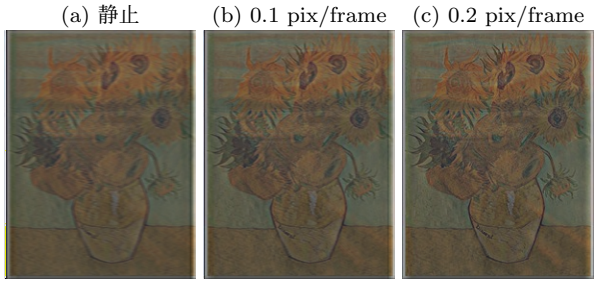


(d) $T = 20$

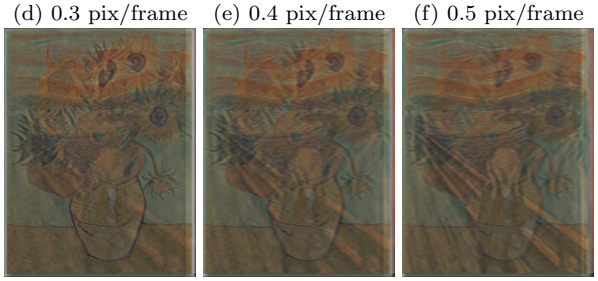
図 10 露光時間の変化に伴う観測画像の変化



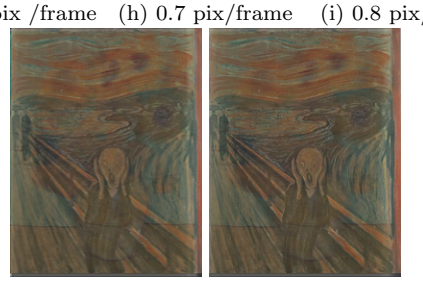
(a) 静止 (b) 0.1 pix/frame (c) 0.2 pix/frame



(d) 0.3 pix/frame (e) 0.4 pix/frame (f) 0.5 pix/frame



(g) 0.6 pix /frame (h) 0.7 pix/frame (i) 0.8 pix/frame



(j) 0.9 pix /frame (k) 1.0 pix /frame

図 11 速度の違いによる観測画像の変化

考えられ，対象が目標に近い速度で運動していれば，目標画像に近い画像を観測させることができると考えられる．

5. まとめ

本稿では，観測者がシーンを観測する際に光量の時間的な積分を行っていることに着目し，これを利用した運動情報，特に速度情報を映像に変換する技術を提案した．この方法では，カメラ等のフィードバック系を一切利用することなく目標の速度に応じて異なる画像を提示することが可能である．これにより，系全体を簡易化するだけでなく，より頑健なシステムを構成することが可能となっている．この方法を応用することで，ユーザの行動に併せて提示情報を変化させるといった，よりインタラクティブな映像提示を実現することが可能となる．また，本稿ではある一軸に沿った 3 次元運動の映像化について述べたが，提案した方法を複数同時に利用することで，より 3 次元的な運動情報の映像化も可能になると考えられる．

参考文献

[1] Tamburo, R., Nurvitadhi, E., Chugh, A., Chen, M., Rowe, A., Kanade, T. and Narasimhan, S. G.: Programmable Automotive Headlights, *Proc. ECCV2014*, pp. 750–765 (2014).

[2] 稲垣雅彦，坂上文彦，佐藤　淳：車載マルチプロジェクタを用いた悪路走行支援のための路面形状強調提示，第 15 階画像センシングシンポジウム (SSII2009) 予稿集 (2009).

[3] R.Nakamura, F.Sakaue and J.Sato: Emphasizing 3D Structure Visually using Projection from Multiple Projectors, *Proc. Asian Conference on Computer Vision2010*, pp. 619–632 (2010).

[4] Takada, S., Sakaue, F. and Sato, J.: 3D Object Emphasis using Multiple Projectors, *Proc. nternational Conference on Computer Vision Theory and Applications(VISAPP2014)* (2014).

[5] 高松淳，日浦慎作，　長原一，富永昌治，向川康博：コンピュータビジョン最先端ガイド 4 -CVIM チュートリアルシリーズ，アドコム・メディア (2011).

[6] Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press (2000).

ⓒ 2016 Information Processing Society of Japan