

ピクセルコーディングカメラを用いた シーンの動きに適用的な動画像サンプリング

園田 聡葵^{1,a)} 長原 一^{1,b)} Liu Dengyu² Gu Jingwei² 谷口 倫一郎^{1,c)}

概要：多くの通常のデジタルカメラの撮影には、空間的な解像度、時間的な解像度、輝度の解像度（ダイナミックレンジ）にトレードオフが存在する．たとえセンサがハードウェア的に高い能力を持っていたとしてもデータ転送のバンド幅がボトルネックになるため、通常の撮影では本質的に避けられない問題である．特に時空間解像度のトレードオフの解決に関して、これまでにいくつかの研究が、ピクセルコーディング露光による非一様なサンプリングを用いることで、高効率な動画撮影に成功している．しかしこれらの研究では時空間サンプリングは撮影シーンに非依存な、予め設定したものであった．本稿では、高い空間・時間・輝度解像度を実現する適用的サンプリング手法を提案する．シーンに対して適用的に露光パターンをアップデートし撮影することで、限られたバンド幅を効率的に配分した．具体的にはシーンを撮影中にリアルタイムに解析し、動領域に対しては従来手法による高時空間解像度を、静止領域には高空間・輝度解像度を割り当てた．

1. はじめに

通常のデジタルカメラの撮影には、空間的な解像度、時間的な解像度、輝度の解像度（ダイナミックレンジ）にトレードオフが存在する．多くのイメージセンサはどの要素に関しても高い解像度でシーン情報を得る能力を有しているが、問題は信号のAD変換にかかる時間やデータ転送のバンド幅がボトルネックとなることである．高価なカメラを用いればこの3要素はある程度は共立させることができるが、本質的に避けられない問題である．特に空間的な解像度と時間的な解像度のトレードオフに関して、これまでにいくつかの研究がピクセルコーディング露光による非一様なサンプリングを用いることで、高効率な動画撮影に成功している [6], [8], [13]．これらの手法では、撮像により得られた符号化画像から時空間の連続性を仮定し、動画を再構成している．通常のピクセル深度が8bitしかないセンサで輝度の高解像度を実現するには、同じシーンに対して異なる露光で複数回の撮影を行い、それらを合成するハイダイナミックレンジイメージングという技法が用いられてきた．この技法では動的なシーンではアーティファクトを生

じさせてしまうので、空間的な解像度と輝度の解像度は高く保てるものの、時間的な解像度が低いシーンしか扱えないと言える．また、時間解像度と輝度解像度のトレードオフに関して、[10]では露光量が互いに異なるピクセルで構成されたイメージセンサを用いることで、ワンショットでハイダイナミックレンジ撮像を実現している．露光量の異なるピクセル数個の情報をを用いて1pixelの出力を決定するため、空間解像度は本来の解像度に比べて落ちる．いずれの手法もトレードオフを回避しシーン情報を効率的に取得しているものの、サンプリング方法は撮影前に決まっている、シーンに独立なものであり、長い映像を撮影するのに最適化されているわけではない．例えばピクセルコーディング露光による非一様なサンプリングに関しては、動的な領域はピクセルコーディング露光によるサンプリングと再構成がなされるべきである一方、静止領域は通常の高空間解像度な撮影で、長い露光時間をかけるべきである．

我々の目的はイメージセンサが持つ能力・ハードウェア的な資源を撮像シーンに対して適切に割り当て、空間的にも時間的にも輝度的にも高解像度なシーン撮像を実現することである．本稿では上記従来研究 [8] に基づき、効率的な動画撮像のための、ピクセルコーディング露光を用いた適用的な時間・空間・輝度サンプリング手法を提案する．動画を撮像する際、シーンをリアルタイムに解析しフレームごとにシーンに適した露光パターンを用いる．具体的には単純なフレーム間の輝度の差分をとり、画像を動的な領

¹ 九州大学
Kyushu University

² ロチェスター工科大
Rochester Institute of Technology

a) sonoda@limu.ait.kyushu-u.ac.jp

b) nagahara@ait.kyushu-u.ac.jp

c) rin@ait.kyushu-u.ac.jp

域と静止領域に分割した．動的な領域は [8] による高時空間解像度を，静止領域には [10] の発展形である手法を用い高空間・輝度解像度を割り当てた．

本稿のコントリビューションは以下の通りである．

- 動画再構成時の計算コスト削減と，得られる光量の増加 これはシーンの動きが既知な時空間サンプリングである．すなわち，ピクセルコーディング露光が適用されるのは動的であると判断された領域に限られるため，再構成のための計算コストが静止領域の面積に応じて減少する．また，静止領域はピクセルコーディング露光で符号化されないのので得られる光量は増加する．動領域/静止領域のセグメンテーションは単純なフレーム間差分を使用している．
- 適用的な撮像資源配分 上記の通り，動領域には高時空間解像度を実現するピクセルコーディング露光を行い，静止領域には高空間・輝度解像度を実現する HDR 撮像を行う．従来では高価なカメラを使用するなどして，撮像画像の全ピクセルに対し，高空間・時間・輝度解像度をハードウェア的に予め用意しなければならなかったのに対し，本手法では限られたバンド幅の中でシーンの情報をリッチに取得することができる．

高輝度解像度 (16bit) のハイスピードカメラで撮影した動画を Ground truth としてシミュレーション実験を行い提案手法の有用性を確かめた．具体的には，撮像シーンに対し適切に解像度の割り振りが成され見た目の良好な動画が得られていることと，従来の全画面符号化・再構成に対して計算コストが下がっていることを確認した．実験では Ground truth 動画のひとつのフレームをそれに対応する露光パターンでマスクし，複数フレームを重ねあわせ，輝度解像度を低 bit のみ残すことで高解像度・低フレームレート・ローダイナミックレンジな実際の撮像を模した．

2. 関連研究

高時空間解像度を実現する効率的な動画撮像．動画撮像の際の時間解像度と空間解像度の基本的なトレードオフに対して，従来二種類の手法がとられてきた．一つ目は複数のカメラを用い，得られた複数の動画の情報を補完的に結合させる方法である [1], [5], [15], [19]．二つ目は，単体のカメラを用いる方法で，シャッター関数 (*i.e.*, 時空間サンプリング) のデザインと，事前情報 (*i.e.*, 疎性，時間的・空間的な滑らかさ) を使った再構成が集中的に研究されてきた．非一様な時空間サンプリングの例として，周期的な動きに対する flutter shutter [17]，符号化ローリングシャッター [4]，グリッドシャッターによる密な空間サンプリングと時間サンプリングの組み合わせ [2], [6]，ピクセルコーディング露光 [8], [13] が挙げられる．事前情報を用いた再構成に関して，空間と時間の滑らかさの仮定が，動きが既知な場合の動画の補完に用いられている [2], [6]．疎性も広

く用いられている [8], [14], [16], [18] (オプティカルフローのようなその他の制約と共に用いられることもある [13])．いずれの手法も有用ではあるものの，その時空間サンプリング方法は予め決められたものであり，撮影中は常に同じパターンが用いられる．またシーンに非依存であり，ひとつの符号化画像を再構成するには適しているが，符号化動画 (連続した符号化画像のまとまり) を再構成するのに適しているわけではない．

また我々の研究は，動領域のみを検出・キャプチャする新しいイメージセンサを作成した [9] と関連している．ただしこれを用いた撮像には空間解像度に限りがあり，特にデザインされたイメージセンサが必要となる．

ハイダイナミックレンジイメージング．通常の商用カメラのイメージセンサに多い 8bit の輝度解像度を用いてハイダイナミックレンジイメージングを行うには，一般的にひとつのシーンを複数回の異なる露光で撮像・合成する [3]．この方法では動的なシーンに対してはゴースティング等のアーティファクトを生じさせてしまうので，動的なシーンに対応するために (*i.e.* 高時間解像度) 大きく分けて 2 つのアプローチが取られてきた．一つは複数枚の画像間のズレをオプティカルフロー等の後処理で解析し動き補償を行う [7]，またはモーションブラー除去を行う等してゴースティングを取り除く方法である [20]．もう一つは特殊なハードウェアを用いる方法である．通常のイメージセンサでは全てのピクセルは様にシーンの輝度をサンプリングするが，[10] ではピクセルごとに異なる露光になるようイメージセンサにフィルタをかけ，ワンショットで複数回露光分の情報を得ている．ただしこの手法では複数のピクセルの情報をを用いて 1pixel の高輝度解像度出力を決定するため，空間解像度はイメージセンサ本来の解像度に比べて落ちる．このサンプリングの方式はカラー画像撮像におけるベイアパターンに似ているが，こちらの場合スペクトルではなく輝度をフィルタリングしている．サンプリングの仕方はハードウェアで決まっているためシーンに応じて変更することは難しい．

効率的な動画撮像とハイダイナミックレンジイメージングを同時に扱った研究は以前にも行われている．上にも挙げた Gu ら [4] は符号化ローリングシャッターを用いて二次元画像上に動き情報と高い輝度解像度情報を記録し，その画像から (空間解像度は落ちるものの) 動画を復元する方法を示した．我々の研究に最も目的に近いものに Portz ら [12] の研究がある．露光時間が各ピクセルで異なるピクセルコーディング露光撮像により，高時空間解像度かつハイダイナミックレンジな動画を復元する手法を示した．キャプチャされた符号化画像間で時空間上の冗長性を探索し動画の再構成を行っている．この手法もシーンのサンプリング方法はシーン非依存な固定パターンを繰り返すものであり，実現可能性は示しているものの実実験は行ってい

ない。

3. 適用的なピクセルコーディング撮像

我々は適用的な空間・時間・輝度サンプリングの方法を提案する。すなわち、シーンの動的な領域にのみピクセルコーディング露光の撮像を、静的な領域には空間的に異なる露光の撮像を適用する。つまり我々の提案手法により最終的に得られる出力画像は以下に示すように2つの領域からなる。

$$I_t^{output} = \hat{E}_t \cup I^{HDR}, \quad (1)$$

$$\hat{E}_t \cap I^{HDR} = \emptyset,$$

ここで、 I_t^{output} は高い空間・時間・輝度解像度を持つ出力画像であり、 $\hat{E}_t$ は撮像された画像の動領域から復元された、高空間・時間解像度な再構成画像のうちの一枚である。 I^{HDR} は撮像された画像の静止領域から復元されたハイダイナミックレンジ画像である。本稿では動領域/静止領域のセグメンテーションは、単純にフレーム間差分を用いた。セグメンテーションの精度向上のためにより発展的な手法 (e.g., [1], [5], [15], [19]) を用いることも考えられる。

得られる利点は2点あり、ひとつは計算時間の減少：ピクセルコーディング露光を動領域にのみ適用し、その領域のみ動画再構成処理を行うことで全画面符号化・再構成に比べ計算コストが低くなる。もうひとつは得られる光量の増加：静止領域にはピクセルコーディング露光をもちいる必要が無いため、より多くの光量が得られ、利用することができる。我々の手法ではこの光量をハイダイナミックレンジ撮像に利用している。

本節の以降の部分では提案手法を順に説明する。提案手法の動領域への手続きは Hitomi ら [8] に基づいている。節 3.1 では Hitomi らの手法を簡潔にまとめ、更に他の関連する手法の時空間サンプリング方法との比較も示した。節 3.2 には静止領域へのサンプリングとハイダイナミックレンジ復元方法として、従来研究 [10] の発展形である我々の手法を説明した。

3.1 動領域への時空間サンプリング

図 1 にいくつかの関連する時空間サンプリング手法をまとめた。ハイスピードな動物体 (正方形と円) と静止物体 (菱型) の存在する、赤線で示した直方体の時空間ボリュームを撮像することを想定している。限られたバンド幅の中で高空間解像度カメラは静止物体を撮することはできるが、動物体にはモーションブラーを生じさせてしまう。一方高時間解像度カメラは動物体をとらえることはできるものの細かいテクスチャは保てない。通常のカメラでは即ち、時空間サンプリングは一定で、そのサンプリング関数は $S(x, y, t) = 1$ と表せる。図 1(c)-(f) は最近のフレキシブルな時空間サンプリング手法であり、いずれも効率的な動画

撮像のために動画の冗長性を探索することを狙っている。Flutter shutter [17] は一次元のサンプリング関数 $S(t)$ を周期的な動きの復元に用いた。ローリングシャッター [4] はイメージセンサのリードアウトのタイミングと露光時間を行レベルでコントロールし、そのサンプリング関数は $S(y, t)$ であった。特に最近では、三次元のサンプリング関数が $S(x, y, t)$ ピクセルコーディング撮像として実装されている [6], [8], [13]。これらは様々な事前情報や拘束、例えば時間/空間の滑らかさ、オプティカルフロー、疎性などを用いて動画を再構成している。Portz ら [12] の研究では、その有用性をシミュレーションでしか示していないものの、効率的な空間・時間・輝度サンプリングを、数種類の露光時間オフセットのランダムピクセルコーディングで実現している。表 1 にて、それぞれの手法を比較した。多くの手法が提案されているが、いずれの手法もそのサンプリング手法は常に固定である。我々は長い動画の再構成のための、適用的なサンプリング手法を開発することを狙った。以下に我々の研究のベースとなっている Hitomi ら [8] の手法を簡潔にまとめる。

$E(x, y, t)$ が我々が復元することを目指す撮影対象シーンであり、 $I(x, y)$ は撮影により得られた (符号化) 画像である。

$$I(x, y) = \sum_{t=1}^N S(x, y, t) \cdot E(x, y, t), \quad (2)$$

N は復元を目指す時空間ボリュームの潜在的なフレーム数である。

$E(x, y, t)$ の各ボクセルは、学習により得られた辞書のいくつかのモーション基底 $\mathbf{D} = [D_1(x, y, t), D_2(x, y, t), \dots, D_K(x, y, t)]$ の疎な (線形の) 組み合わせにより表現される ($\mathbf{E} = \mathbf{D}\alpha$) とする。式 (2) を行列に書き直すと、

$$\mathbf{I} = \mathbf{S}\mathbf{E} = \mathbf{S}\mathbf{D}\alpha. \quad (3)$$

辞書 $\mathbf{D}$ は無作為に集められた動画から学習されたものである。既知の $\mathbf{D}$, $\mathbf{S}$, $\mathbf{I}$ より、 $\hat{\alpha}$ は Orthogonal Matching Pursuit (OMP) [11] のような標準的なスパース最適化により求めることができる。すなわち、

$$\min \|\alpha\|_0 \text{ s.t. } \|\mathbf{I} - \mathbf{S}\mathbf{D}\alpha\|_2^2 \leq \varepsilon, \quad (4)$$

よって、 $\hat{\mathbf{E}}$ は以下のように表される。 $\hat{\mathbf{E}} = \mathbf{D}\hat{\alpha}$ 。

3.2 静止領域への空間-輝度サンプリング

静止領域には、空間的に異なる露光によるハイダイナミック撮像を適用する。すなわち、イメージセンサのピクセル一つ一つを異なる露光に設定し使用する。シーンの符号化の様子を式 2 と同様に以下のようなモデルで表す。

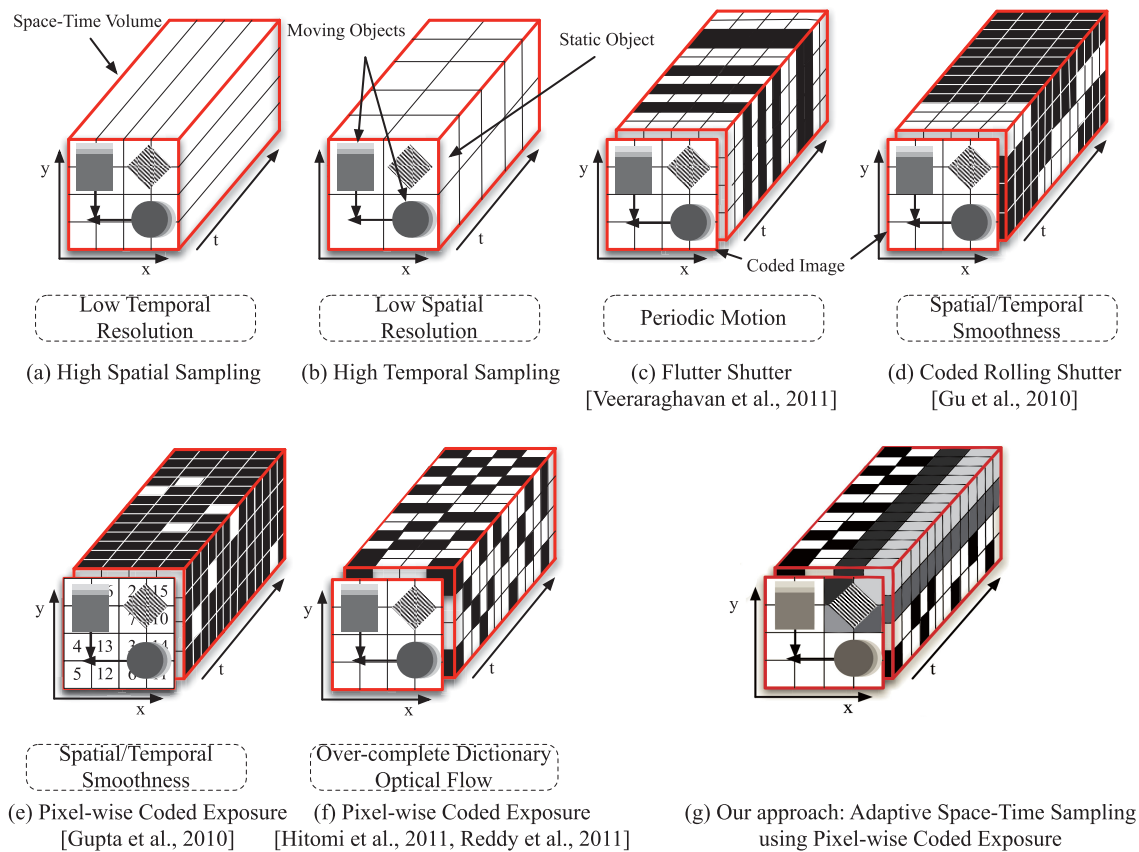


図 1 本研究と関連する研究の時空間サンプリング手法の外観。赤線の直方体で示される時空間を撮像する時、従来のデジタルカメラでは、(a) に示される密な空間解像度かつ疎な時間解像度、もしくは反対に (b) 疎な空間解像度かつ密な時間解像度しか扱えなかった。(c) フラッターシャッターによる時空間サンプリングは周期的な動きの動画再構成に用いた。 (d) 符号化ローリングシャッターは、CMOS センサーに実装しやすいように、センサの各行毎にリードアウトのタイミングと露光時間をコントロールすることを提案した。(e) 密な空間サンプリングと密な時間サンプリングの組み合わせグリッドシャッターとして実装され、動きが既知である場合のハイスピード撮像を可能とした。(f) ピクセルコーディング露光によるサンプリング。(c)-(f) では、破線の四角形内に示した様々な事前情報や制約を用いて、赤線正方形で示した符号化された一枚の符号化画像から動画が再構成されている。なおこれらの手法では全てのサンプリングパターンは固定である。本手法を (g) に示す。我々は符号化露光パターンをシーンに適用的に変化させる。すなわち、静止している菱型のオブジェクトが存在する領域は、ハイダイナミックレンジ撮像のための符号化がなされる。

表 1 Comparison of Space-Time Sampling Schemes

Method	Sampling Function	Reconstruction	Hardware	Limitation
Wakin et al.[18]	Pixel-wise Random $S(x, y, t)$	Greedy Algorithm Sparsity Constraint	DMD Beam Splitter	Not suitable for video
Veeraraghavan et al.[17]	Flutter Shutter $S(t)$	l_1 -norm Minimization	Ferroelectric Shutter	Only for periodical video
Gu et al.[4]	Coded Rolling Shutter $S(y, t)$	Interpolation Optical Flow	CMOS sensor with modified control unit	Lack flexibility on vertical direction
Gupta et al.[6]	Pixel-wise Grid $S(x, y, t)$	Interpolation Optical Flow	Projector Beam Splitter	Ambient illumination, low SNR
Reddy et al.[13]	Pixel-wise Random $S(x, y, t)$	Sparsity Constraint Optical Flow	LCoS Beam Splitter	Multiple coded images required
Hitomi et al.[8]	Pixel-wise Random $S(x, y, t)$	Greedy Algorithm Dictionary Learning	LCoS Beam Splitter	background low SNR, non-adaptive dictionary
Portz et al.[12]	Random permutation and off-set of different exposures $S(x, y, t)$	Exhaustive search for the K-nearest space-time patches	No real experiment	No real experiment

$$I(x, y, f) = S(x, y, f) \cdot E(x, y), \quad (5)$$

$$S(x, y, f) = e_{(2y+x+f) \bmod 4},$$

ここで f はシーンを連続で撮影する際のキャプチャ画像のフレーム番号を表す。一枚のキャプチャ画像を動画に再

構成した際のフレーム番号 t とは異なることを注意されたい。 e はイメージセンサ上の注目ピクセルに設定する露光を表す。本稿では e_0, e_1, e_2, e_3 の4種のそれぞれ異なる露光を用いた。あるフレームに注目すると、異なる露光のパターンがカラーカメラにおけるベイヤパターンのように並ぶことになる。またあるピクセルに注目したとき、フレーム間で必ず異なる露光になり4フレームで1サイクルを形成する。

得られた動画 $I(x, y, f)$ からそのハイダイナミックレンジ画像 I^{HDR} の復元は $I^{HDR}(x, y, f) = I(x, y, f) + I(x, y, f-1) + I(x, y, f-2) + I(x, y, f-3)$ で得られる。この式からわかるように、あるフレーム f のハイダイナミックレンジ画像一枚を得る際、そのフレーム以前の画像 $f-1, f-2, f-3$ を参照し計4枚の画像を用いる。もし注目領域が連続4フレームの間常に静止でなかった場合 (i.e., $I(x, y, f) = null$), 時間的、もしくは空間的に内挿し補完する。

本稿の静止領域に対する手法は、Shree ら [10] の手法の発展形である。Shree らの手法ではシーン符号化は同じく空間的に異なる露光パターンを用いるが、フレーム間で変化せず常に固定である。ハイダイナミックレンジ画像復元の際もフレーム間の参照は行わず、常に空間的に内挿を行うので空間的な解像度はイメージセンサ本来の解像度と比べて低下する。

4. 実験

適用的なピクセルコーディング撮像のシミュレーション実験結果を図2に示した。Ground Truth 画像には、ハイダイナミックレンジでの撮像が可能なハイスピードカメラ (Point Grey GS3-U3-23S6C) を用いて実際に撮影したものをを用いた。Ground Truth 動画の諸パラメータは以下のとおりである。空間解像度 480×400 , 時間解像度 $180fps$, ハイダイナミックレンジ $16bit$ 。我々は提案手法と通常の撮像、Shree らの手法 (ハイダイナミックレンジ), Hitomi らの手法 (長時間解像度) を比較した。図2において、上の行から、動画の中の一枚の画像 (提案手法, Shree らの手法, Hitomi らの手法の画像は再構成後のもの), 二段目に動領域、三段目に静止領域の明るい箇所、四段目に静止領域の暗い箇所の拡大画像をそれぞれ示した。ハイダイナミックレンジ画像である、Shree らの手法、提案手法、Ground Truth の画像はトーンマッピングをかけた画像を表示している。また、静止領域の暗い箇所の画像は全ての画像でゲインを上げる補正をかけている。全ての拡大画像で、提案手法は他に比べ、よりよい品質の画像が得られていることがわかる。これにより提案手法はシーンの情報を適用的にサンプルできていることが示された。

5. 結論

本稿では、我々は動画を効率的に撮像する方法である、

適用的なピクセルコーディング撮像を提案した。本手法では対象シーンの性質にもとづいて自動的に選択された、効率的なサンプリング方法が適用される。動領域にのみピクセルコーディング露光、静止領域にのみ、空間的に異なる露光を適用し高い空間・時間・輝度解像度を実現した。また我々は実際に撮影した動画をもとにしたシミュレーション実験を行い、提案手法の実用性を示した。

参考文献

- [1] Agrawal, A., Gupta, M., Veeraraghavan, A. and Narasimhan, S.: Optimal Coded Sampling for Temporal Super-Resolution, *CVPR*, pp. 599–606 (2010).
- [2] Bub, G., Tecza, M., Helmes, M., Lee, P. and Kohl, P.: Temporal Pixel Multiplexing for Simultaneous High-Speed, High-Resolution Imaging, *Nature Methods*, Vol. 7 (2010).
- [3] Debevec, P. E. and Malik, J.: Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs, *SIGGRAPH 97* (1997).
- [4] Gu, J., Hitomi, Y., Mitsunaga, T. and Nayar, S.: Coded Rolling Shutter Photography: Flexible Space-Time Sampling, *ICCP*, pp. 1–8 (2010).
- [5] Gupta, A., Bhat, P., Dontcheva, M., Deussen, O., Curless, B. and Cohen, M.: Enhancing and Experiencing Space-Time Resolution with Videos and Stills, *ICCP*, pp. 1–9 (2009).
- [6] Gupta, M., Agrawal, A. and Veeraraghavan, A.: Flexible Voxels for Motion-Aware Videography, *ECCV*, Vol. 3, p. 6 (2010).
- [7] Gupta, M., Iso, D. and Nayar, S.: Fibonacci Exposure Bracketing for High Dynamic Range Imaging, *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 1–8 (2013).
- [8] Hitomi, Y., Gu, J., Gupta, M., Mitsunaga, T. and Nayar, S.: Video from a Single Coded Exposure Photograph using a Learned Over-Complete Dictionary, *ICCV*, pp. 287–294 (2011).
- [9] Lichtsteiner, P., Posch, C. and Delbruck, T.: A 128 x 128 120 dB 15 us Latency Asynchronous Temporal Contrast Vision Sensor, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 43, No. 2 (2008).
- [10] Nayar, S. and Mitsunaga, T.: High Dynamic Range Imaging: Spatially Varying Pixel Exposures, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Vol. 1, pp. 472–479 (2000).
- [11] Pati, Y., Rezaifar, R. and Krishnaprasad, P. S.: Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition, *Conference Record of The Twenty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 40–44 vol.1 (1993).
- [12] Portz, T., Zhang, L. and Jiang, H.: Random Coded Sampling for High-Speed HDR Video, *ICCP*, Boston, MA (2013).
- [13] Reddy, D., Veeraraghavan, A. and Chellappa, R.: P2C2: Programmable Pixel Compressive Camera for High Speed Imaging, *CVPR*, pp. 329–336 (2011).
- [14] Sankaranarayanan, A. C., Studer, C. and Baraniuk, R. G.: CS-MUVI: Video Compressive Sensing for Spatial-Multiplexing Cameras, *ICCP*, pp. 1–10 (2012).
- [15] Shechtman, E., Caspi, Y. and Irani, M.: Space-time super-resolution, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 27, No. 4, pp. 531–545 (2005).
- [16] Shu, X. and Ahuja, N.: Imaging via three-dimensional compressive sampling (3DCS), *ICCV*, pp. 439–446 (2011).
- [17] Veeraraghavan, A., Reddy, D. and Raskar, R.: Coded Stroboscopic Photography: Compressive Sensing of High Speed Peri-

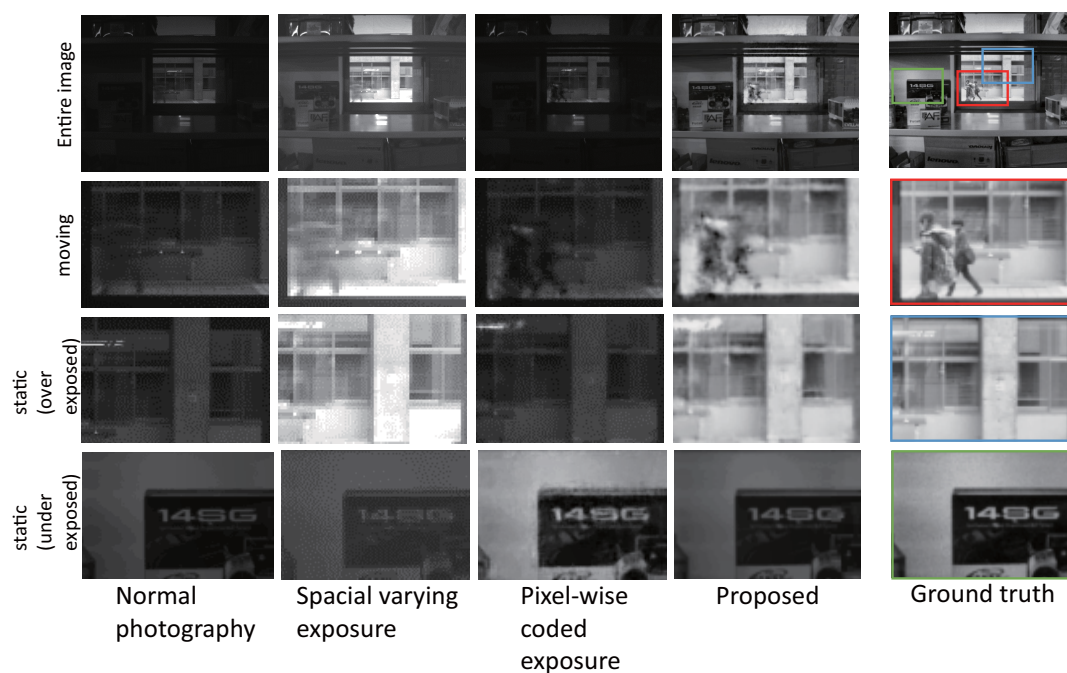


図2 シミュレーション実験結果

- odic Videos, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 33, No. 4, pp. 671–686 (2011).
- [18] Wakin, M., Laska, J., Duarte, M., Baron, D., Sarvotham, S., Takhar, D., Kelly, K. and Baraniuk, R.: Compressive Imaging for Video Representation and Coding, *Picture Coding Symposium* (2006).
 - [19] Wilburn, B., Joshi, N., Vaish, V., Levoy, M. and Horowitz, M.: High-Speed Videography using a Dense Camera Array, *CVPR*, Vol. 2, pp. 294–301 (2004).
 - [20] Yuan, L., Sun, J., Quan, L. and Shum, H.-Y.: Image Deblurring with Blurred/Noisy Image Pairs, *ACM SIGGRAPH 2007 Papers*, SIGGRAPH '07, New York, NY, USA, ACM, (online), DOI: 10.1145/1275808.1276379 (2007).