

NAIST-IS-DD0961003

博士論文

高解像度高フレームレート化と露光量確保のための
撮像方式に関する研究

今川 太郎

2010年3月24日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

今川 太郎

審査委員：

横矢 直和 教授	(主指導教員)
千原 國宏 教授	(副指導教員)
山澤 一誠 准教授	(副指導教員)
佐藤 智和 助教	(副指導教員)

高解像度高フレームレート化と露光量確保のための 撮像方式に関する研究*

今川 太郎

内容梗概

カメラを小型化しつつ高解像度の映像を得るためには、撮像素子の微細化(画素の高密度化)が必要になる。この撮像素子の微細化は、半導体製造プロセス技術の進展により実現されてきた。しかし、微細化が進むに従い、画素当たりの集光量が減少し、SN比が低下する。さらなる微細化に伴い、暗所のみならず、これまで露光量が十分であった照明環境下でも露光量不足が問題となる。また、動画撮影の高解像度化では、撮像素子から記録部への画素値の読み出しデータ量が増加する。しかし、実際の撮像システムでは、撮像素子や記録回路の動作周波数の制限により単位時間あたりの読み出しデータ量は制限される。このような、制限も高解像度化における課題となる。

本論文では、これらの課題を解決するために、長時間露出および画素サイズの拡大により露光量を確保し、読み取りデータ量を抑えて撮影した後、時空間高解像度化することで、高解像度高フレームレートの動画像を得る方式を提案する。具体的には、異なる時空間解像度を持つ2種類の画像で、それぞれ時間と空間方向に光量確保し、読み取り速度を抑えて撮影した後、2種類の画像間で時空間情報を相互に補完し、時空間高解像度化した画像を得る。また、この方式をカラー撮影に拡張し、光の利用効率を高めるために、波長分離型の光学系を利用し、露出時間を長くしたG画像と、画素面積を大きくした低解像度高フレームレートのR・B画像を用いて露光量を確保する。RGB間に時空間の拘束条件を設け、時空

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 博士論文, NAIST-IS-DD0961003, 2010年3月24日.

間周波数特性の異なる各色画像間で時空間情報を相互に補完することで，高解像度高フレームレートのカラー画像を生成する．

以降，1章では，撮像素子による光量確保の方式と撮像による光量確保の方式を概観し，本研究の位置づけと研究方針を述べる．2章では，解像度の異なる2種類のモノクロ画像を用いた時空間高解像度化方式を提案し，シミュレーションと試作カメラシステムを用いた実験結果について述べる．次に，3章では，3板式カラー撮像に拡張した提案方式について説明し，シミュレーション結果と，試作3板式カメラシステムを用いた生成画像の評価結果について述べる．4章では，本論文の考察を行う．5章で本論文のまとめを行い，今後の展開について述べる．

キーワード

撮像, 光量, 超解像, 動きぶれ除去, 画像再構成

Studies on High Spatio-temporal Resolution and Well-Exposed Imaging*

Taro Imagawa

Abstract

High resolution imaging with downsized pixels of an image sensor makes shortage of light exposure. To overcome this problem, this thesis proposes a high-resolution and high-framerate video imaging method in dark conditions. The proposed method consists of two steps. First, a pair of video sequences that take the same scene with different spatio-temporal resolution are acquired. One is long-term exposed video sequence with high-resolution and low-framerate. The other is short-term exposed video sequence with low-resolution and high-framerate. Second, the method mutually compensates spatio-temporal information between two kinds of video sequences, since the long-term exposure makes motion blurs and the low-resolution imaging makes spatial blurs. The compensation is performed by minimizing a cost function. This framework significantly reduces those blurs, because the deficit information in an input video sequence caused by such blurs is compensated by the other one.

This thesis is organized as follows. Section 1 describes a pixel structure in an image sensor and reviews related work such as super-resolution and motion-deblurring method. Section 2 proposes a novel imaging method with two different resolution images. Section 3 shows an extension of the proposed method for RGB color images. Section 4 discusses the present study. Finally, section 5 summarizes the thesis and shows future works.

* Doctoral Dissertation, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DD0961003, March 24, 2010.

Keywords:

imaging, light exposure, super-resolution, motion deblurring, image reconstruction

目次

1. はじめに	1
1.1 序論	1
1.2 撮像素子による露光量確保	2
1.2.1 撮像素子の受光部の構造	2
1.2.2 オンチップマイクロレンズによる集光	3
1.2.3 裏面照射方式	5
1.3 露光量を確保した撮像と時空間高解像度化処理	7
1.3.1 低解像度画像の高解像度化	7
1.3.2 長時間露出画像の動きぶれ除去	11
1.4 本研究の目的と方針	17
1.5 本論文の構成	18
2. 時空間解像度が異なる2種類のモノクロ動画からの時空間高解像度画像生成	19
2.1 序言	19
2.2 低解像度高フレームレート画像と高解像度低フレームレート画像による撮像処理方式	20
2.2.1 撮像方式	20
2.2.2 画像復元による動画の時空間高解像度化	21
2.2.3 モノクロ動画生成に用いる評価関数の定義	21
2.2.4 評価関数の最小化	25
2.3 シミュレーションによる画質評価	25
2.3.1 利得の周波数特性の評価	26
2.3.2 自然画像を用いた生成画質の評価	30
2.3.3 高解像度画像を動き補償する手法との比較	36
2.4 2カメラ構成の試作カメラシステムによる画像生成	41
2.4.1 2カメラシステムの構成	41
2.4.2 2カメラ間の画像の輝度補正	44

2.4.3	2カメラ間の画像の位置合わせ	44
2.4.4	2カメラシステムによる画像生成	46
2.4.5	長時間露出のノイズ低減効果の検証	47
2.5	考察	49
2.6	結言	50
3.	時空間解像度が色ごとに異なる動画像からの時空間高解像度カラー画像生成	51
3.1	序言	51
3.2	時空間解像度が色ごとに異なる RGB3 板式撮像処理方式	52
3.2.1	カラー撮像方式	53
3.2.2	画像復元によるカラー動画像の時空間高解像度化	56
3.2.3	カラー動画像生成に用いる評価関数の定義	56
3.2.4	評価関数の最小化	60
3.3	シミュレーションによる画質評価	61
3.3.1	RGB ごとの利得の周波数特性評価	61
3.3.2	カラー自然画像を用いた生成画質の評価	63
3.4	RGB 3 板式の試作カメラシステムによるカラー画像生成	69
3.4.1	3板式カメラシステムの構成	69
3.4.2	3カメラ間の輝度補正	72
3.4.3	3カメラ間の画像の位置合わせ	72
3.4.4	3板式カメラシステムによる画像生成	72
3.5	考察	74
3.6	結言	76
4.	考察	78
4.1	動き検出	78
4.2	低解像度高フレームレート画像の動きぶれ	79
4.3	入力画像の時空間周波数特性	79
4.4	画像圧縮	81

4.5 演算処理の高速化	81
5. 結論	83
5.1 本論文のまとめ	83
5.2 今後の展望	83
謝辞	85
参考文献	86
付録	105
A. 疎な係数行列を持つ連立一次方程式の共役勾配法による解法	105
A.1 共役勾配法による連立一次方程式の解法	105
A.2 疎な係数行列を用いた演算	106
A.3 疎行列の表現方法	107

目 次

1	撮像素子の受光部の基本構造	3
2	オンチップマイクロレンズの配置	4
3	集光量の入射角依存性	5
4	裏面照射方式	6
5	裏面照射方式における集光量の入射角依存性	6
6	高解像度化手法の分類	8
7	学習型による顔画像の超解像の例	9
8	同種の複数画像を用いた超解像の例	10
9	解像度の異なる画像を用いた超解像の例	12
10	動きぶれ除去手法の分類	13
11	一様動きぶれ除去の例	14
12	非一様動きぶれ除去の例	16
13	提案方式の概要	20
14	撮像光学系の構成例	21
15	劣化過程	23
16	評価実験の手順	26
17	チャープ格子画像の処理結果	27
18	異なる動きに対する利得の周波数特性	29
19	評価用モノクロ画像の例	31
20	提案方式の入力画像の例 (Yatching)	33
21	提案方式による生成画像の例 (720 × 480 画素)	34
22	拡大率ごとの総合 PSNR	34
23	画像ごとの PSNR($N_T=9$, $N_S=3$)	35
24	動きの小さい画像の例 (Swinging)	37
25	大小の動きが混在する画像の例 (Yachting)	38
26	動きの大きい画像の例 (Japanese room)	39
27	提案方式と短時間露出方式の PSNR の比較	40
28	フレームごとの PSNR(Yachting)	41

29	生成画像の例 (Yachting)	42
30	試作カメラシステムの概観	43
31	試作カメラシステムによる撮影画像	45
32	試作カメラシステムの画像から生成した画像 (800 × 700 画素)	47
33	従来方式の撮影画像の例	48
34	長時間露出と画像加算のノイズ比較	49
35	提案方式の概要	52
36	波長分離型撮像光学系の構成例	53
37	1 画素の RGB の平均情報量	55
38	1 画素の RGB 間の相互情報量	55
39	チャープ格子画像	62
40	RGB ごとの利得の周波数特性	64
41	評価用カラー画像の例	66
42	入力画像の例. 右側は白線領域の拡大画像	67
43	生成画像の例. 右側は白線領域の拡大画像	68
44	評価画像ごとの PSNR($N_T=6, N_S=3$)	70
45	拡大比率ごとの PSNR	71
46	試作カメラシステムの構成	71
47	光学系の透過率波長特性	73
48	試作カメラシステムによる撮影画像の例	75
49	試作カメラシステムの画像から生成した画像の例 (720 × 480 画素)	76
50	従来方式の撮影画像の例	77
51	入力画像とコントラスト感度の時空間特性	80

表 目 次

1	カメラシステムの撮像条件	43
2	3 板式カメラシステムの撮像条件	72
3	Compressed Row Storage(CRS) 表現の例	107

1. はじめに

1.1 序論

デジタル撮影された画像(以降, デジタル画像と呼ぶ)は, 放送やパッケージコンテンツのみならず, インターネット上のコンテンツや個人所有のコンテンツとしても多くを占めるようになってきている. デジタル画像は, 単に鑑賞の対象としてだけでなく, テレビ会議や動画共有のようなコミュニケーション手段, オンライン検索の情報源, 映像監視の手段などのように社会の情報インフラにおける重要な要素となっている.

このようなデジタル画像は, 固体撮像素子(以降, 撮像素子と呼ぶ)により撮影される. 撮像素子は1970年代に開発された複数の方式のうち Charge Coupled Device(CCD)[BS70]の開発が進み, 1980年代に CCD を用いた民生用ムービーカメラが開発され, 撮像素子が一般に広く使われるようになった. その後, 1990年代の民生用スチルカメラの製品化[末高 96]が端緒となり, 多画素化と小型化が急速に進んできた. 初期の民生用デジタルカメラ[末高 96]の画素数は30万画素程度であったが, 現在では1000万画素を超えるコンパクトカメラが一般化し, 2000万画素を超えるレンズ交換式カメラも開発されている. このようなデジタルカメラは, 単なるフィルムカメラの置き換えに留まらず, 顔認識やパノラマ画像合成などフィルムカメラには無い多様な機能を実現している.

更に, 高臨場感を目指したデジタルシネマ [Swa05], スーパーハイビジョン [KMH+05], ギガピクセル撮像 [KUDC07] などの広視野高精細映像や, インテグラル立体映像 [AOYO06] のようなポストハイビジョン映像, 広域映像監視などの新たな映像サービスに向けて, さらなる多画素化が必要とされている.

一方で, デジタルカメラは, 小型化することで携帯電話やゲーム機など様々な機器に組み込まれ, 新たな機能を提供している. 近年では, 安全運転支援のために車に複数のカメラを設置した車両周辺監視システムも開発されている [ONN+00], [吉岡 08].

このように, カメラを小型化しつつ高解像度(多画素)の映像を得るためには, 撮像素子の微細化(画素の高密度化)が必要になる. 撮像素子の微細化は, 半導体

製造プロセス技術の進展により実現されてきた。すでに，画素間隔が $2\mu\text{m}$ を下回る撮像素子も開発されている [NLLK05], [KIM⁺06], [CLE⁺07]。しかし，微細化が進むに従い，画素当たりの集光量が減少し，SN 比が低下する。さらなる微細化に伴い，暗所のみならず，これまで露光量が十分であった照明環境下でも露光量不足が問題となる。また，動画撮影の高解像度化では，撮像素子から記録部への単位時間あたりの画素値の読み出しデータ量が増加する。しかし，実際の撮像システムでは，撮像素子や記録回路の動作周波数の制限により単位時間あたりの読み出しデータ量も制限される。このような制限も高解像度化における課題となる。

本論文では，これらの課題を解決するために，長時間露出および画素サイズの拡大により露光量を確保した後，時空間高解像度化することで，高解像度高フレームレート化と露光量確保を両立した動画像を再構成する方式を提案する。以下では，撮像素子による露光量確保の方式と，撮像による露光量確保の方式について概観し，次に本研究の位置づけと研究方針を説明する。

1.2 撮像素子による露光量確保

露光量確保は，撮像素子の微細化が進むに従い重要な課題となってきた。本節では，撮像素子における露光量確保の方式について述べる。

1.2.1 撮像素子の受光部の構造

撮像素子の受光部の構造を説明する。撮像素子では，現在 CCD と Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) の 2 種類の方式が広く採用されている。CCD 撮像素子と CMOS 撮像素子では信号の増幅および電荷の読み出し部分の構造は異なるが，フォトダイオードにより光電変換する受光部分の構造は共通している。これらの撮像素子に共通する受光部の基本構造を図 1 に示す。図 1 は受光部の縦断面図で，図の上方より入射光を受ける。このような撮像素子では，他の半導体集積回路と同様に，フォトダイオードを基板 (シリコン基板) 内に形成した後，その基板上に配線層を形成する。このため，入射光のうち配線層の配線間隙

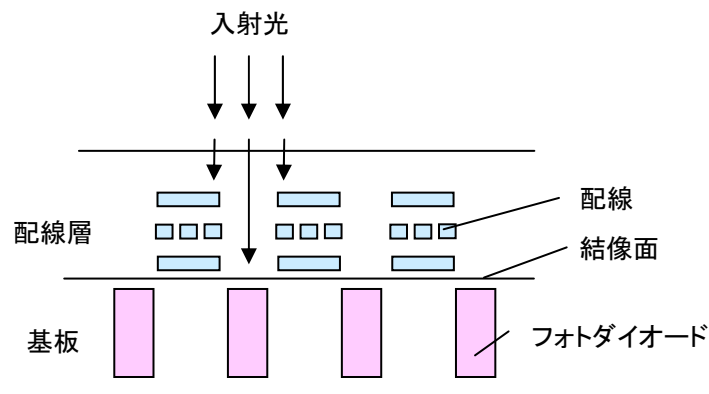


図 1 撮像素子の受光部の基本構造

を通過した光だけが、基板内のフォトダイオードで光電変換される(図1の矢印)。光電変換された電荷は、配線層を通じて読み出される。このような構造(図1)では、入射光の一部は配線層で遮光される。また、隣接するフォトダイオード間の絶縁のために、フォトダイオード間にも一定の間隙を設ける必要がある。1画素の占有面積(撮像素子の面積/画素数)に対する1ヶ所のフォトダイオードの受光面積が占める割合を画素の開口率と呼ぶ。上に述べた配線やフォトダイオードの配置の制限により、開口率は理論上限値100%よりも大幅に低下する¹。また、傾斜方向の入射光(以降、傾斜光と呼ぶ)では、配線層による遮光の影響が大きくなる。画素の微細化が進むと、1画素の占有面積が減少するだけでなく、配線部面積の微細化が伴わないと、開口率も低下する。さらに、傾斜光に対する遮光の影響も顕著になる。このような露光量不足の課題に対し、撮像素子の構造からの対策として広く用いられているオンチップマイクロレンズと、新たに採用されつつある裏面照射方式について説明する。

1.2.2 オンチップマイクロレンズによる集光

オンチップマイクロレンズによる集光について説明する。図1の構造では配線層によって入射光の一部が遮光され、フォトダイオードに光が届かない。遮光さ

¹ 画素間隔が 2.5μ の素子では25%程度。

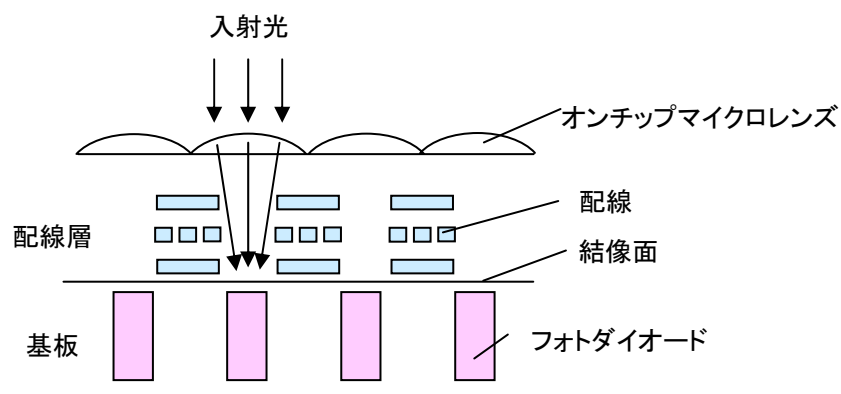


図 2 オンチップマイクロレンズの配置

れる光をフォトダイオードに集光するために、配線層より上面に、マイクロレンズを画素ごとに配置する(図2)[PSC88]。このようなオンチップマイクロレンズを用いることで、撮像素子に対して正面方向から入射する光を効率的にフォトダイオードに集光できる。

しかし、傾斜方向からの入射光は、フォトダイオードの感度の低い周辺位置もしくは外部に集光する(図3)。さらに、入射角が大きくなると、配線による遮蔽が起こる。撮像素子の中央部の画素に正面方向から光が入射する場合でも、周辺画素になるほど入射角が増大し、この影響が大きくなる。特に、F値(焦点距離/有効口径)の小さい光学系で、この影響が顕著になる。

この問題に対しては、マイクロレンズの集光位置を撮像素子の中心部と周辺部で変える[OTY+08]ことで、影響を抑えることができる。ただし、マイクロレンズの集光特性は固定されるため、レンズ交換やズームのように光学系が変化する場合には対応できない。また、傾斜方向からの光が配線によって遮光される影響も避けられない。

以上のように、オンチップマイクロレンズによって配線による開口率低下の影響を低減できるが、画素の微細化による露光量不足を補うためには十分でない。

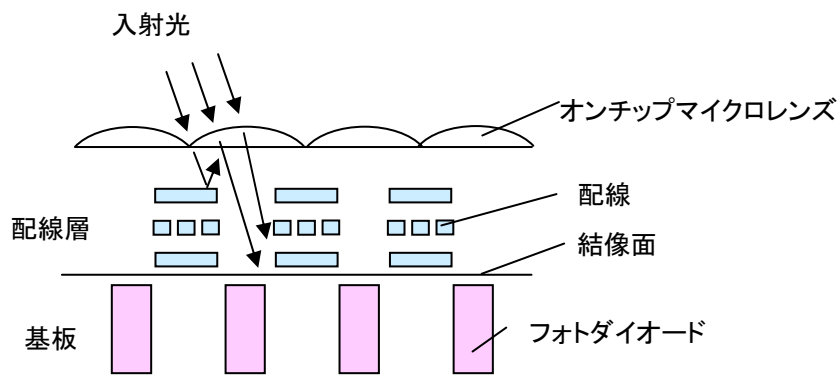


図 3 集光量の入射角依存性

1.2.3 裏面照射方式

近年実用化が進みつつある裏面照射方式について説明する．現在普及している撮像素子は，入射光のうち配線層を通過した光がフォトダイオードに到達する構造を持つ(図1～3)．この入射光を，配線層と反対側から受光する方式(図4)を裏面照射方式と呼ぶ．裏面照射方式による撮像素子は，天体撮影用 CCD などの特殊用途向けにすでに開発されていた [HGG⁺97]．しかし，入射光側のシリコン基板を薄く形成する量産化技術や，フォトダイオード間のクロストークの課題が残されていた．近年，この課題が解決されつつあり [PCN⁺05], [Pai05], [IMO⁺06]，民生用カメラに採用され始めている．

裏面照射方式は，配線層の影響を受けずに集光できるため開口率が向上する．更に，傾斜方向の入射光に対しても集光が容易になり(図5)，集光量の角度依存性を改善できる利点もある．

以上のように，オンチップマイクロレンズや裏面照射により，集光効率が改善されてきた．しかし，裏面照射においても露光量の増化は高々2倍程度に留まる [ソニ 08] ため，このような撮像素子の素子構造の改善だけでは微細化による露光量不足の解決に十分ではない．

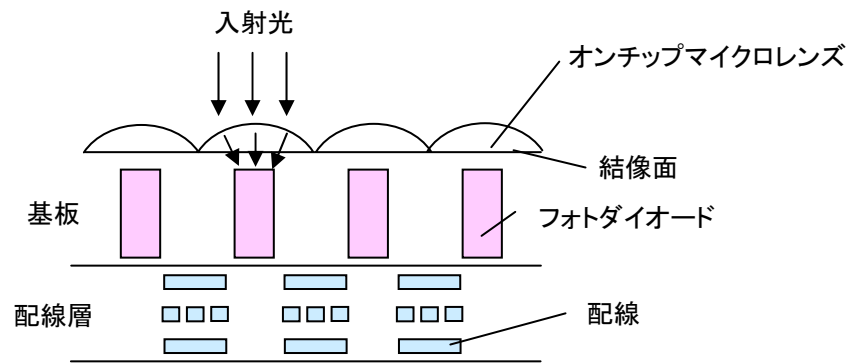


図 4 裏面照射方式

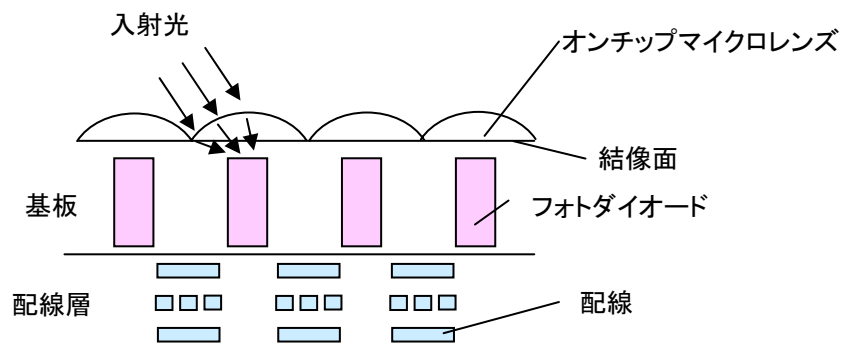


図 5 裏面照射方式における集光量の入射角依存性

1.3 露光量を確保した撮像と時空間高解像度化処理

前節では撮像素子の構造による露光量確保の方法を説明した。本節では、撮影過程において露光量を確保し、画像処理によって時空間高解像度画像を得る方法について述べる。一般に、露光量を増すためには、(1) 画素の面積を拡大するか、(2) 露出時間を長くする必要がある。(1) の画素面積の拡大では、素子の多画素化も合わせて行う方法 (1)-1 と、画素数を抑えて低解像度撮影した後に高解像度化する方法 (1)-2 が考えられる。受光面積の拡大と多画素化を同時に行う (1)-1 ためには、撮像素子を大型化する必要がある [SYK⁺05]。撮像素子を大型化すると、光学系もこれに合わせて大型化する必要があり、カメラの可搬性低下やコスト増加という問題が生じる。また、多画素化に伴い、撮像素子からの画素値の読み取りデータ量の向上も必要になる。

一方、低解像度撮影 (1)-2 や、長時間露出撮影 (2) によって露光量確保する方法は、撮像素子を大型化する必要がなく、カメラの小型化の動向にも整合する。同時に、撮像素子からの画素値の読み出しデータ量も抑えられる。ただし、低解像度撮影 (1)-2 した画像に対しては、高解像度化処理が必要になる。また、長時間露出撮影 (2) した画像に対しては、動きぶれが生じるため、動きぶれ除去が必要になる。

以降、露光量を確保した画像から高解像度画像を得るために必要な、高解像度化と動きぶれ除去の手法について、それぞれ 1.3.1 項と 1.3.2 項で説明する。

1.3.1 低解像度画像の高解像度化

低解像度画像の高解像度化は、図 6 に示すように単一の画像を利用する方法と、同一被写体を写した複数の画像を利用する方法に大別できる。前者の方法では、目的とする高解像度画像に関する知識や仮定が必要になる。この視点から、同方法は、事前知識の少ない信号処理的手法 (以降、信号処理型と呼ぶ) と、事前知識を充実させた学習型に分類できる。後者の複数画像を利用する方法は、同一被写体を異なる複数の条件で観測することで、高解像度化に必要な情報を得る。この方法では、解像度や露出時間の等しい画像を複数用いる同種画像組み合わせ方式

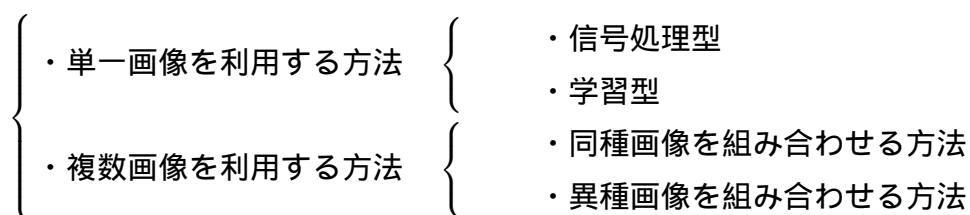


図 6 高解像度化手法の分類

と、解像度や露出が異なる複数の画像を組み合わせる異種画像組み合わせ方式に分類できる。

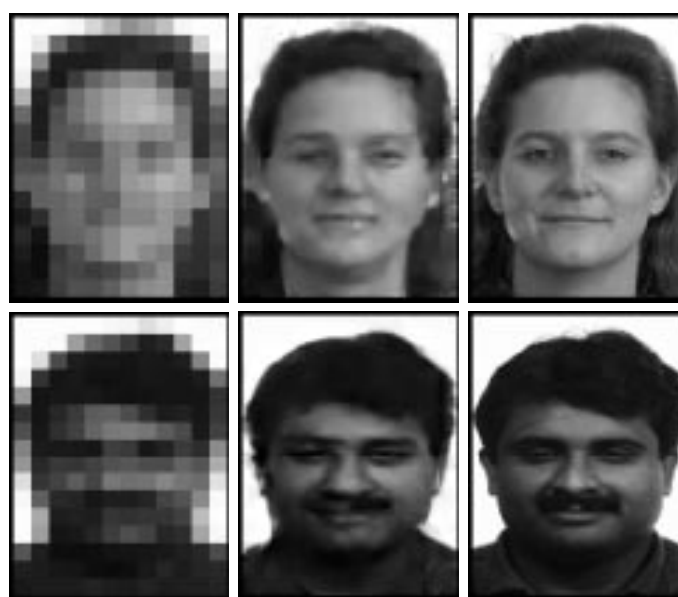
以降の項では、これらの方式に関し、その特性と露光量確保と自然画像への適用可能性について述べる。

信号処理型

信号処理型の高解像度化には、内挿法に基づく方法 [Key81], [HK01] や、高周波成分を適応的に強調する方法 [TM98], [CT03], フラクタル性を利用した方法 [Lu97], エッジを保存しやすい評価指標を用いた画像復元処理 [KS07], [松本 08] などがある。これらの方法は、局所的な画像情報に基づき高周波成分を強調することで、解像度を向上させる。しかし、高周波成分の強調が過剰になると、ノイズ成分の鮮明化や、エッジ付近のアーティファクトが問題になる。

学習型

学習型の手法では、高解像度画像と低解像度画像の関係をあらかじめ学習しておくか、データベースとして用意しておき、この対応関係を用いて高解像度化する。図 7 に顔画像を対象とした学習型超解像 [BK00] の例を示す。図 7 の左列が入力画像、中列が超解像結果、右列が対応する高解像度画像である。このような学習型の手法では、被写体のカテゴリを顔や文字などのように限定した場合、超解像が有効に働くことが実験的に示されている [BK00], [FJP02], [CQL05]。しかし、不特定多数のカテゴリを含む自然画像では、低解像度画像に対する高解像度画像



(a) 入力画像 (b) 超解像処理後の画像 (c) 高解像度画像

図 7 学習型による顔画像の超解像の例
(文献 [BK00] より引用)

の対応関係を一意に定めることが難しく、良好な結果が得られない場合が多い。また、上記以外に局所的な基底画像のみを学習し、これらの線形和で目的画像を表現することで、学習の汎化性向上を図る手法 [西野 08] も提案されているが、基底画像の大きさや基底数などのパラメータを設定する方法が確立されていない。

同種画像を組み合わせる方法

複数の同種画像を組み合わせる高解像度化では、サンプリング位相が異なる複数の低解像度画像を組み合わせることで、低解像度画像に折り返し(エリアシング)として含まれる高周波成分を復元する。この考え方に基づく高解像度化は Tsai らの研究 [TH84] 以来、異なる条件や解法の適用 [PKS87], [KPB88], [SO89], [KBV90], [IP91], [IP92], [UG92], [KIAS93], [IP93], [KS93], [MP94], [SS96], [SBZW96],



図 8 同種の複数画像を用いた超解像の例
(文献 [BEZN05] より引用)

[PST97], [HBA97], [CPZ98], [EF99], [FREM04] や, 2次元画像以外への適用 [BSWZ94], [CKK⁺96] が多数研究されている. この方法では, サブピクセルの位置ずれを含む画像同士の位置合わせが必要になる. この位置合わせの精度は生成画像の画質に大きく影響するが, 折り返し成分が顕著な場合や, 自然画像中の複雑な動きや被写体の変形・オクルージョンを含む領域での位置合わせに課題が残る.

このような位置合わせの課題に対し, 位置ずれを既知とする撮像システムが提案されている [BEZN05], [SCI05]. 文献 [BEZN05] の例を図 8 に示す. [BEZN05] の手法では, 撮像素子上の結像位置を光学的にフレームごとにシフトする (図 8(a)) ことで, 静止被写体に対する解像度の改善効果を得ている (図 8(b), (c)). この場合, 動きのある被写体に対しては, 上記の位置合わせの問題が生じる. また, 文献 [SCI05] では, 視点と視野をほぼ一致させた複数のカメラ映像を用い, 各カメラ映像の大域的な時空間位置合わせ後に再構成することで, 被写体ごとの位置合わせを回避している. しかし, 多数のカメラによる同一視点の撮影の実現が, 実用上の問題となる.

さらに, 位置合わせを伴う再構成型手法は, 低解像度撮影の画素の Point Spread Function (PSF) の形状に依存して解像度改善に限界があることが示されている [EF97], [BK02], [LS04], [TO05].

異種画像を組み合わせる方法

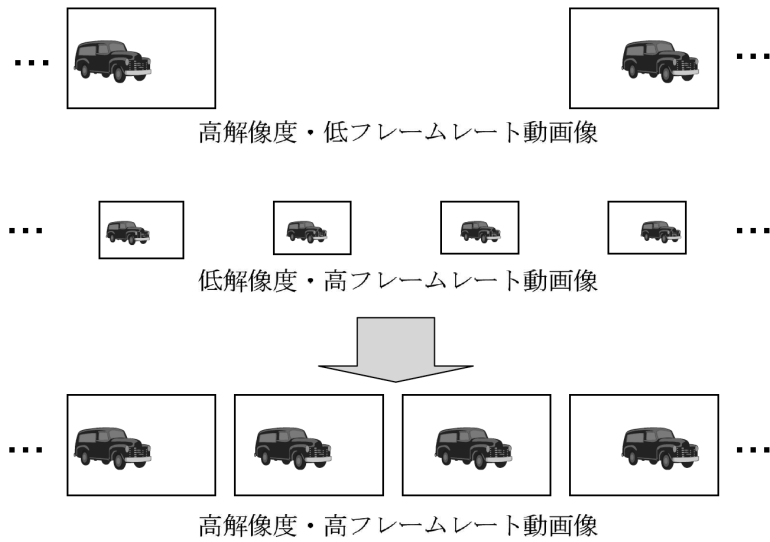
複数の異なる時空間解像度画像を陽に組み合わせた高解像度化手法として、文献 [重本 06], [渡邊 06], [松延 07], [今川 09a], [今川 09b] の手法がある。これらの手法では、異種画像を組み合わせることで、同種画像のみでは取得しにくい周波数成分を利用した高解像度化を実現している。文献 [重本 06], [渡邊 06], [松延 07] では、図 9 に示すように低解像度高フレームレート画像から得た動きを用いて高解像度低フレームレート画像の動き補償を行い (図 9(a)), 高解像度画像を得ている図 9(b), (c)。しかし、高解像度画像側において、動きぶれを生じないように露出時間を短く設定する必要がある。このため、撮像素子の微細化に伴う、露光量不足の問題を回避できない。

1.3.2 長時間露出画像の動きぶれ除去

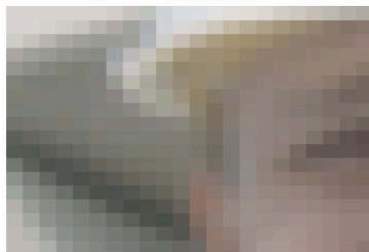
画素面積が拡大できない場合に、露光量を増すには、露出時間を長くする必要がある。しかし、長時間の露出では、被写体やカメラの移動により、動きぶれが生じる。これを除去する手法には、図 10 に示すように、手振れのような画像全体で空間的に一様な動きぶれを除去する方法 (1) と、被写体動きのように空間的に非一様な動きぶれを除去する方法 (2) がある。さらに、(1) は結像自体にぶれが生じないように光学的あるいは機械的に補正する方法と、撮影後に画像処理によってぶれを除去する方式と、ぶれ除去に必要な情報をシステムとして取得するカメラシステム方式がある。(2) には、単一の画像を用いる方法と、複数の画像を用いる方法がある。

また、(1), (2) のうち撮影後に動きぶれを除去する方法では、等速度の動きで生じる動きぶれの PSF 形状が、周波数空間でゼロ点 (利得が 0 になる点) を含むことによる情報損失も画像生成時の課題となる。

本項では、動きが画像全体で一様な場合と非一様な場合に対する動きぶれ除去方法について述べ、最後に PSF の形状による情報損失を低減する手法について説明する。



(a) 文献 [渡邊 06] の方式概要



(b) 入力の補間拡大画像



(c) 超解像処理後の画像

図 9 解像度の異なる画像を用いた超解像の例
(文献 [渡邊 06] より引用)

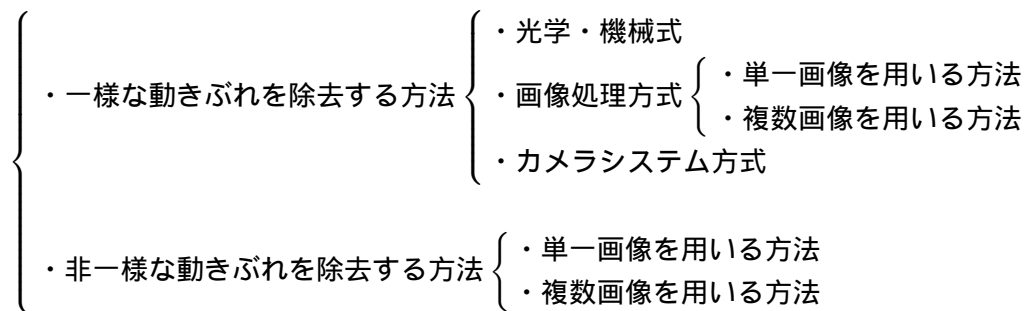


図 10 動きぶれ除去手法の分類

空間的に一様な動きぶれの除去

撮像時の手振れのように画像全体で空間的に一様な動きに対するぶれ除去について説明する。一様な動きぶれの除去は、ぶれ除去を撮像時に行う方法と撮像後に行う方法に分かれる。前者は、ぶれの動きを打ち消すように撮像素子上の結像位置を光学的または機械的にフィードバック制御する。このために、カメラにピッチとヨー方向の角速度センサを備え、ぶれの向きと大きさを検出する。検出したぶれのうち補正の対象となる動き成分に対し、光学系や撮像素子の配置を制御して動きを打ち消すように結像位置を移動する。特に手振れ補正を目的とした方式では、手振れに対応した周波数成分を補正するようにレンズやプリズムを变形・移動させる光学式や、撮像素子を移動させるセンサシフト方式が多くのデジタルカメラで採用されている [佐藤 93], [日下 02], [芝崎 07], [小澤 08]。これらの方式は、撮像素子上の結像にぶれを生じさせないため、撮影後にぶれ除去を行う方法のように PSF の周波数特性に依存した情報損失が生じない利点がある。一方、光学式ではロール方向の補正ができないなど、補正機構に依存して補正可能な動きの種類や大きさが制限される。また、動きぶれの検出に角速度や角加速度センサを用いるため、積分して得られるぶれの値の誤差が時間蓄積するため、長時間の動きぶれ補正には向かない。

後者の撮像後にぶれ除去を行う方法では、画像から動きぶれの PSF を高精度に推定する必要がある。単一の画像を用いた手法では、因子分解に基づく手法

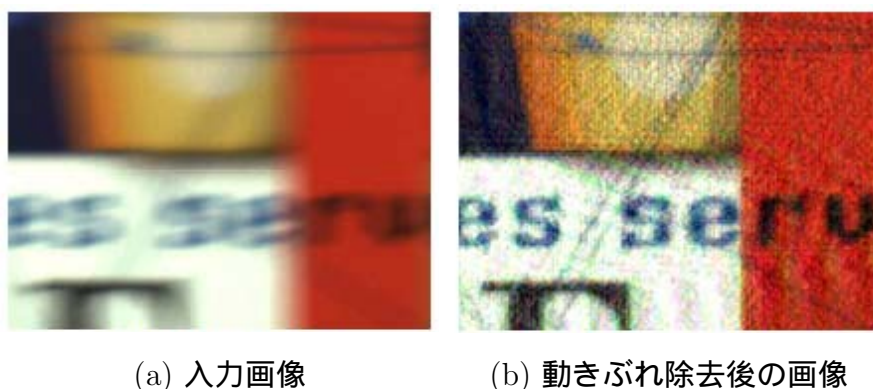


図 11 一様動きぶれ除去の例
(文献 [TYO07] より引用)

[KH96], PSF をパラメータ表現し, このパラメータと復元画像を同時推定する手法 [BSK04], ユーザが PSF に関する情報を指定する手法 [FSH⁺06], 周波数特性に基づく手法 [TYO07] などが提案されている. 図 11 に, 文献 [TYO07] の手法による処理の例を示す. これらの手法では, 等速直線運動のように単純な動きに対して, 単一の画像からでも良好な復元画像を得ている.

複数の画像を用いる手法として, Bascle らは動きぶれを含む画像シーケンスからぶれ除去を行い [BBZ96], Rav-Acha らは同一対象に対して異なる PSF のぶれ画像を用いて画像生成を行っている [RAP05]. また, Yuan らは同一の被写体に対し, 動きぶれを含む画像と動きぶれを含まないノイズを含んだ画像を併用した画像復元手法 [YSQS07] を提案している. このような複数画像を用いる手法は, 単一画像を用いる手法に比べ, 復元に使用する情報を増すことで復元問題を解きやすくしている. さらに, システム的アプローチでは, Ben-Ezra らはスチルカメラとビデオカメラから成るハイブリッドシステムを用い, ビデオカメラの映像を分析して大域的な PSF を推定し, スチルカメラの映像に含まれる動きぶれを除去している [BEN04]. ビデオ映像を用いることで, 複雑な形状の PSF の推定を可能にしている.

また, 撮影後のぶれ除去とは異なる方法として, 短時間露出で動きぶれを抑えた複数の画像を, 撮影後に位置合わせを行い, 単一の画像に合成する方式 [芝崎 07]

も提案されている．この方法は画像復元に比べ演算量が抑えられるため，カメラ付き携帯電話に使用されている [Mor06]．しかし，露光を複数回に分割することで，同じ露光量の長時間露出に比べ，撮影毎に発生するノイズが累積する．複数回露光の影響については 2.4.5 項で評価結果を述べる．

以上のように，画像全体で空間的に一様な動きぶれ除去は，条件を限定することで PSF の推定やその除去を容易にできるため，実用化が進んでいる．撮影後のぶれ除去も，デジタルカメラ向けの画像処理ソフトウェアとして製品化されている [COR]．しかし，複数の動きを含む被写体の動きに対しては，次に述べる空間的に非一様な動きに対する PSF の推定が必要になる．

空間的に非一様な動きぶれの除去

一般の被写体動きによる動きぶれの除去について説明する．これには空間的に非一様な動きぶれの PSF の推定が必要になる．Levin は画像の統計量に基づいて，単一の画像を同じ動きを持つ領域に分割し，ぶれ除去を試みている [Lev07]．Shanらは回転動きに限定し，領域分割を陽に行わずにぶれ除去を行っている [SXJ07]．また，動きぶれを含む画像シーケンスを用いて，同じ動きの領域を切り出してぶれ除去を行う手法も提案されている [FS04], [BJNP06], [BBRS07], [CML07]．図 12 に文献 [CML07] の手法による処理の例を示す．図 12(a) の入力に対し，動きが異なる領域ごとにぶれ除去を行っている図 12(b)．これらの手法では，動きぶれを含んだ画像をもとにして領域選択を行うため，複雑な動きを持つ領域や動き境界において，PSF の推定が困難となる．

ぶれによる情報損失の低減

ぶれによる情報損失の問題とこれを低減する方法について説明する．等速運動する被写体を撮影した場合，動きぶれの PSF は矩形関数となり，空間周波数領域でゼロ点 (利得がゼロになる点) を持つ．このため，PSF を正確に推定できても，周波数空間のゼロ点付近の情報は失われているため，ゼロ点付近の情報の復元が難しい．

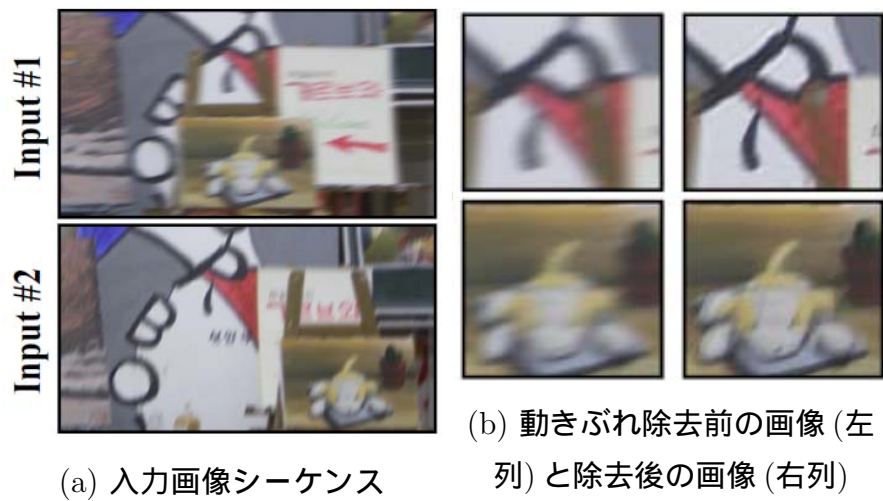


図 12 非一様動きぶれ除去の例
(文献 [CML07] より引用)

このゼロ点付近の情報損失の問題に対して，Raskar らは時間変調を加えた露出によって，動きぶれの PSF の周波数特性改善を図っている [RAT06]．また，西らは照明強度をチャープ信号で変調することで同様の効果を得ている [西 05]．しかしこれらの手法では，生成画像の周波数特性は改善するが，露光を変調するため，撮影時の露光量が犠牲になる．

以上のように，低解像度画像の高解像度化や動きぶれ除去は，露光量確保と高解像度高フレームレートの両立という視点からは課題が残されている．

1.4 本研究の目的と方針

目的

本研究の目的は、微細化した撮像素子による時空間高解像度撮影において、露光量不足による画質低下および撮像素子からの読み出しデータ量を抑えて画像を得ることである。

位置づけ

従来、撮像素子の微細化に伴う露光量不足は、撮像素子の課題として取り組まれてきた。しかし、微細化が進み撮像素子単体での解決は困難になりつつある。そこで本研究では、撮像素子単体での露光量確保の限界を超えるために、撮像過程と画像処理の組み合わせによりこの課題解決を図り、時空間高解像度撮影と露光量確保の両立を図る。

方針

本論文では、最初に時空間解像度を犠牲にして露光量確保した動画像を複数種類撮影し、撮影した複数の動画像間で時空間情報を相互補完することで時空間高解像度化を目指す [今川 09a], [今川 09b]。具体的には、高解像度低フレームレートで長時間露出の画像と、画素サイズを大きくして撮影した低解像度高フレームレート画像とを入力画像として用いる。なお、両画像は時間同期しているものとする。これにより、前者は時間的に、後者は空間的に露光量を確保し、撮像素子からの読み出しデータ量も抑制する。次に、露光量を確保して撮影した画像間で、時空間情報を相互補完することで時空間高解像度化を行い、露光量確保と時空間高解像度化の両立を図る。この処理は、低解像度高フレームレート画像に対する高解像度化と、高解像度低フレームレート画像に対する動きぶれ除去の同時処理になる。すなわち、提案手法は、前節の分類における複数画像を用いた高解像度化と複数画像を用いた動きぶれ除去を同時に行う手法になる。

このような，目的に合わせた撮影方法と画像処理とを組み合わせることで，撮像系単体では得られない画像を得るアプローチは，computational photography として注目されている．例えば，独自の撮影方法と画像処理により，焦点，ダイナミックレンジ，照明，視点などの撮影特性の改善や，これらの特性を撮影後に可変化する手法が提案されている（[DC95]，[NB03]，[PSA⁺04]，[Ng05]，[LFDF07]，[VRA⁺07]）．本論文の提案手法は，動画撮像の時空間高解像度化と露光量確保の両特性という課題に対する新たな computational photography 手法と位置づけることができる．

1.5 本論文の構成

以降の本論文の構成は以下の通りである．2章で時空間解像度の異なる2種類のモノクロ画像を用いた提案方式について説明し，シミュレーションと試作カメラシステムを用いた実験結果について述べる．次に，3章では，3板式カラー撮像に拡張した方式について説明し，シミュレーション結果と試作3板式カメラシステムを用いた生成画像の評価結果について述べる．4章では，本論文の考察を行う．5章で本論文のまとめを行い，今後の展開について述べる．

2. 時空間解像度が異なる2種類のモノクロ動画像からの時空間高解像度画像生成

2.1 序言

本章では，時空間高解像度撮影と露光量確保の両立のために，異なる時空間解像度で露光量を確保しつつ，読み取りデータ量を抑えた同一視点かつ同一視野の撮影画像から，正則化を用いた画像復元の枠組みで時空間高解像度画像を生成する動画像取得方式を提案する．

最初に，露光量を確保し，読み取りデータ量を抑えるために，露出時間を確保した高解像度低フレームレート画像と，受光面積を確保した低解像度高フレームレート画像とを同時に撮影する．次に，両者が持つ異なる時空間周波数特性を相互に補完することで，時空間高解像度画像を生成する．ここで，生成画像に2つの仮定を設ける．1つは，輝度の変化が空間的に滑らかであること，もう1つは，被写体の輝度が動きに沿って不変であるとする．正則化の枠組みで，これらの仮定を満たすように両入力画像を組合せ，時空間高解像度画像を生成する．提案方式では，被写体のカテゴリーや一様な動き等の特定の動き方には依存しない仮定を用いることで，任意の被写体の複雑な動きを含む自然画像に対する時空間高解像度画像を生成する

以下，本章では，2.2節で提案方式における，露光量を確保した撮像方式と，この画像に対する時空間高解像度化方式について説明する．2.3節では，シミュレーションによる周波数応答特性評価，自然画像に対する画質評価，露出時間の短い動き補償方式との比較について説明し，2.4節では原理検証用に構築した試作カメラシステムを用いた画像生成，ならびに長時間露出のノイズ抑制効果について述べる．2.5節では，実験結果について考察し，2.6節で結言を述べる．

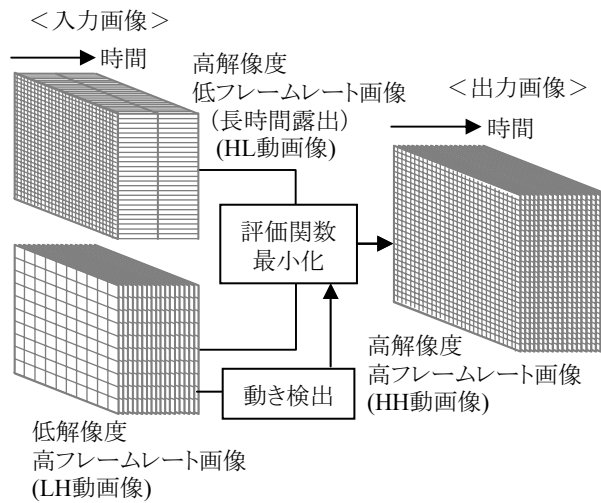


図 13 提案方式の概要

2.2 低解像度高フレームレート画像と高解像度低フレームレート画像による撮像処理方式

時空間高解像度画像を取るために、同一視点から時空間解像度の異なる 2 種類の動画画像で光量を確保し、読み取りデータ量を抑えて撮影した後、時空間的に高解像度化を行う撮像処理方式を提案する。提案方式の概要を図 13 に示す。以下、撮像方式と画像生成方式について順に説明する。

2.2.1 撮像方式

提案方式では、同一視点かつ同一視野で同期撮影した 2 種類のモノクロ動画画像を入力とする。撮像時には、高解像度撮影と高フレームレート撮影の両立よりも露光量を優先して撮影する。すなわち、図 13 に示すように、一方の画像は、高解像度低フレームレート長時間露出で撮影を行い(以降、HL 動画画像と呼ぶ)、他方は低解像度高フレームレート画像を大きい画素サイズで撮影する(以降、LH 動画画像と呼ぶ)。これにより、HL 動画画像は時間的に、LH 動画画像は空間的に露光量を確保する。これらの動画画像は、例えば図 14 に示すような、ビームスプリッタを用いた撮像光学系により得る。なお、各動画画像の各フレームの露出時間はフレー

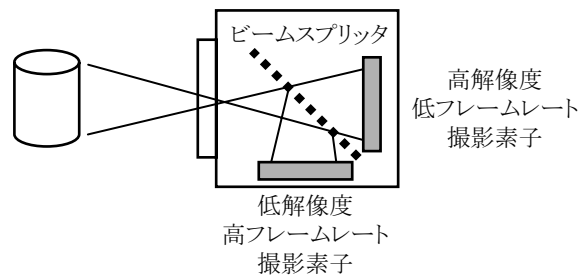


図 14 撮像光学系の構成例

μ間隔に一致させている。

2.2.2 画像復元による動画像の時空間高解像度化

提案方式では、露光量確保を優先して異なる時空間解像度で撮影した 2 種類の動画像の時空間情報を相互に補完する。これにより入力画像を時空間高解像度化し、高解像度撮影と露光量確保の両立を図る。この時空間高解像度化では、生成すべき高解像度高フレームレートの動画像 (以降、HH 動画像と呼ぶ) が満たすべき条件を評価関数として表現する。この評価関数を最小とする画像として HH 動画像を得る (図 13)。ここで、上記条件として、入力画像と生成画像の対応関係 (誤差項) に加え、拘束条件として生成画像の画素値の空間的滑らかさ (滑らかさ拘束項) と時間的連続性 (動き拘束項) を設定することで、各入力画像の異なる時空間情報を相互補完する。以下では、評価関数の構成と最小化手法について述べる。

2.2.3 モノクロ動画像生成に用いる評価関数の定義

生成画像を f とした場合の評価関数 $J(f)$ を式 (1) に示す。HH 動画像の生成に用いる評価関数は、誤差項 (式 (1) の第 1, 2 項)、滑らかさ拘束項 (第 3 項)、動き拘束項 (第 4 項) から成る。式 (1) を最小化することで、入力画像と生成画像の誤差を抑えながら、空間的に滑らかで、動きに沿って連続性のある動画像が求められる。ここで、誤差項は入力画像と生成画像の誤差を評価する。誤差項のみの最小化では、生成画像の画素数が入力画像の画素数よりも多く、解を一意に決定できない (不良設定問題)。これに対し、滑らかさ拘束項と動き拘束項を正則化項

として設けることで，評価関数の最小化の解を一意に決定できるようにしている（良設定問題化）．

$$J(\mathbf{f}) = \|\mathbf{H}_{\text{HL}}\mathbf{f} - \mathbf{g}_{\text{HL}}\|^2 + \|\mathbf{H}_{\text{LH}}\mathbf{f} - \mathbf{g}_{\text{LH}}\|^2 + \lambda_S \|\mathbf{Q}_S \mathbf{f}\|^2 + \lambda_m (\|\mathbf{Q}_{\text{mf}} \mathbf{f}\|^2 + \|\mathbf{Q}_{\text{mb}} \mathbf{f}\|^2) \quad (1)$$

ここで \mathbf{f} , \mathbf{g}_{HL} , \mathbf{g}_{LH} はそれぞれ生成画像，HL 動画像，LH 動画像の各画素値をベクトル表記したものである． \mathbf{H}_{HL} と \mathbf{H}_{LH} は，それぞれ HH 動画像から HL 動画像，LH 動画像への劣化過程を表す． \mathbf{Q}_S , \mathbf{Q}_{mf} , \mathbf{Q}_{mb} は，生成画像に対する評価作用素で，正則化条件を表現する． λ_S , λ_m は正則化項の重み定数である．以下， $J(\mathbf{f})$ の各項について説明する．

2 種類の撮像過程に基づく劣化拘束 (誤差項)

誤差項 (式 (1)) の第 1, 2 項は，生成画像の劣化動画像と入力との画素値の整合性を評価する．各項はそれぞれ HL 動画像と LH 動画像の評価に対応している．評価値は，生成画像 \mathbf{f} をそれぞれ劣化過程 \mathbf{H}_{HL} , \mathbf{H}_{LH} で変換した画像ベクトル \mathbf{g}_{HL}^d , \mathbf{g}_{LH}^d と，入力画像ベクトル \mathbf{g}_{HL} , \mathbf{g}_{LH} との誤差ベクトルの L2 ノルムの 2 乗を用いている．入力出力画像間の整合性を持たせることで，生成画像は 2 種類の入力画像それぞれの時空間周波数情報を継承する．式 (1) の第 1 項の劣化過程 \mathbf{H}_{HL} は，高解像度撮像素子の長時間露出の撮像過程を表現する．劣化過程 \mathbf{H}_{HL} の変換を式 (2) に示す．

$$\mathbf{g}_{\text{HL}}^d(x, y, t_{\text{HL}}) = \sum_{t=t_{\text{HL}} \times N_T}^{(t_{\text{HL}}+1) \times N_T - 1} \mathbf{f}(x, y, t) \quad (2)$$

ここで， $\mathbf{g}_{\text{HL}}^d(x, y, t_{\text{HL}})$ は HL 劣化画像の位置 (x, y) ，フレーム t_{HL} の画素値， $\mathbf{f}(x, y, t)$ は生成画像の位置 (x, y) ，フレーム t の画素値を示す． \mathbf{H}_{HL} は，HH 動画像の画素値を N_T フレームごとに時間的に加算して低フレームレート化する変換となる．

図 15 に $N_T = 4$ の場合について，HL 動画像の画素 (a) と HH 動画像の画素 (c) との関係を模式的に示す．同図の各小ブロックは 1 画素 1 フレームの占める時空

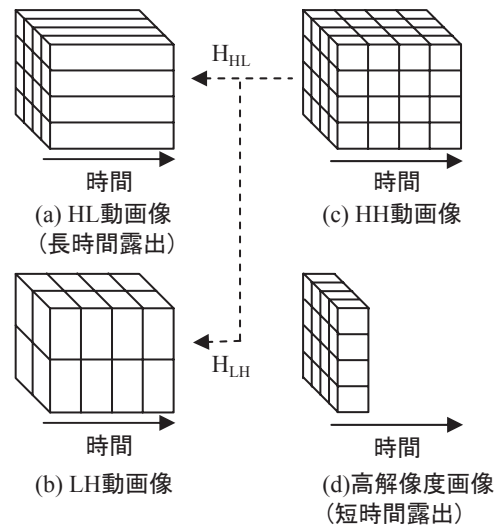


図 15 劣化過程

間領域を示しており，この例では，HH 動画画像の 4 フレームの加算画像として HL 動画画像が得られる．

次に，式 (1) の第 2 項の劣化過程 H_{LH} は，低解像度撮像素子の撮像過程を意味する．劣化過程 H_{LH} の変換を式 (3) に示す．

$$g_{LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t) = \sum_{x=x_{LH} \times N_S}^{(x_{LH}+1) \times N_S - 1} \sum_{y=y_{LH} \times N_S}^{(y_{LH}+1) \times N_S - 1} f(x, y, t) \quad (3)$$

ここで， $g_{LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t)$ は，LH 劣化画像の位置 (x_{LH}, y_{LH}) ，フレーム t の画素値を示す． H_{LH} は，前置光学フィルタなしの撮像過程を想定し，HH 動画画像の画素値を $N_S \times N_S$ 画素ごとに空間的に加算して低解像度化する過程となる．

図 15 に $N_S = 2$ の場合について，LH 動画画像の画素 (b) と HH 動画画像の画素 (c) との関係を模式的に示す．この例では，HH 動画画像の空間近傍 4 画素の加算画像として LH 動画画像が得られる．

輝度の空間的滑らかさを用いた空間内の拘束 (滑らかさ拘束項)

滑らかさ拘束項 (式 (1) の第 3 項) は，生成画像における画素値の空間的变化の滑らかさを評価する．画像の空間的な滑らかさは，ラプラシアンを中心差分表現

した作用素 Q_S (式 (4)) で求め、生成画像の各画素位置における滑らかさを要素とするベクトルの L_2 ノルムの 2 乗を評価値としている。

$$\|Q_S \mathbf{f}\|^2 = \sum_{(x,y,t) \in \text{HH}} \left[4 \mathbf{f}(x, y, t) - \mathbf{f}(x-1, y, t) - \mathbf{f}(x+1, y, t) - \mathbf{f}(x, y-1, t) - \mathbf{f}(x, y+1, t) \right]^2 \quad (4)$$

ここで、 $(x, y, t) \in \text{HH}$ は HH 動画像に含まれる (x, y, t) の範囲を表している。

動き検出結果を用いた時間軸方向の拘束 (動き拘束項)

動き拘束項 (式 (1) の最後の項) は画像中の動きに基づいた入出力画像間の整合性を評価する。この項では、画像中の動き情報を用い、時間方向の拘束条件を表現している。ここで、同一被写体の輝度は時間的に不変で、同一位置の画素値の時間変化は被写体の動きにより生じることを仮定している。この仮定に対する整合性評価を次の手順で行う。

1. 空間的に密な動きベクトル分布を求めるために、フレームレートの高い LH 動画像の各画素位置に対して窓領域を設定し、平行移動を仮定したサブピクセル精度のブロックマッチングによる動き検出 [Ana89] を時間的に双方向に行う。
 2. LH 動画像で求めた動きベクトルを、HH 動画像上の動きベクトルに N_S 倍拡大写像する。
 3. 拡大写像で得られた動きベクトルと生成画像との整合性を、動きベクトルの始点と終点間の画素値差分の 2 乗を画像全体で積算した値で評価する。
1. では、双方向の動き検出により、動き境界付近の動き検出精度の向上を図っている。時間的に前向きと後ろ向きの動きに基づく評価作用素 Q_{mf} , Q_{mb} を、それぞれ式 (5), (6) に示す。

$$\|Q_{mf} \mathbf{f}\|^2 = \sum_{(x,y,t) \in \text{HH}} \{ \mathbf{f}(x, y, t) - \mathbf{f}(x+v_{fx}(x, y, t), y+v_{fy}(x, y, t), t+1) \}^2 \quad (5)$$

$$\|\mathbf{Q}_{mb}\mathbf{f}\|^2 = \sum_{(x,y,t) \in HH} \{\mathbf{f}(x, y, t) - \mathbf{f}(x+v_{bx}(x, y, t), y+v_{by}(x, y, t), t-1)\}^2 \quad (6)$$

ここで， v_{fx} , v_{fy} は，それぞれ時間的に前向きの動き検出結果の拡大写像後の x , y 成分， v_{bx} , v_{by} は，それぞれ時間的に後ろ向きの動き検出結果の拡大写像後の x , y 成分である．

2.2.4 評価関数の最小化

生成すべき高解像度高フレームレート画像 \mathbf{f} は，評価関数 $J(\mathbf{f})$ の最小解として得る．式 (1) より， $J(\mathbf{f})$ は \mathbf{f} に関して 2 次形式になっており $J(\mathbf{f})$ の極小解が最小解となる．よって，ここでは \mathbf{f} の各要素による J の偏微分が 0 となる必要条件 (式 (7)) から，評価関数 J の最小解を求める．このとき，式 (1) の変換，作用素をすべて線形表現することにより，解くべき条件は，式 (8) に示す \mathbf{f} に関する連立 1 次方程式に帰着する．方程式の元数は総画素数 (1 フレームの画素数 \times 処理フレーム数) となる．解法には，共役勾配法 (付録 A) を用いている² ．

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(\mathbf{f})}{\partial \mathbf{f}} &= \mathbf{H}_{HL}^T (\mathbf{H}_{HL}\mathbf{f} - \mathbf{g}_{HL}) + \mathbf{H}_{LH}^T (\mathbf{H}_{LH}\mathbf{f} - \mathbf{g}_{LH}) \\ &+ \lambda_S \mathbf{Q}_S^T \mathbf{Q}_S \mathbf{f} + \lambda_m (\mathbf{Q}_{mf}^T \mathbf{Q}_{mf} \mathbf{f} + \mathbf{Q}_{mb}^T \mathbf{Q}_{mb} \mathbf{f}) \\ &= \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &\{\mathbf{H}_{HL}^T \mathbf{H}_{HL} + \mathbf{H}_{LH}^T \mathbf{H}_{LH} + \lambda_S \mathbf{Q}_S^T \mathbf{Q}_S + \lambda_m (\mathbf{Q}_{mf}^T \mathbf{Q}_{mf} + \mathbf{Q}_{mb}^T \mathbf{Q}_{mb})\} \mathbf{f} \\ &= \mathbf{H}_{HL}^T \mathbf{g}_{HL} + \mathbf{H}_{LH}^T \mathbf{g}_{LH} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 シミュレーションによる画質評価

本節では，生成画像の利得の周波数特性と画質をシミュレーションにより評価した結果について述べる．

² 式 (8) の連立方程式の係数行列 (左辺中括弧内) は実対称正定値行列となるため共役勾配法が適用できる．

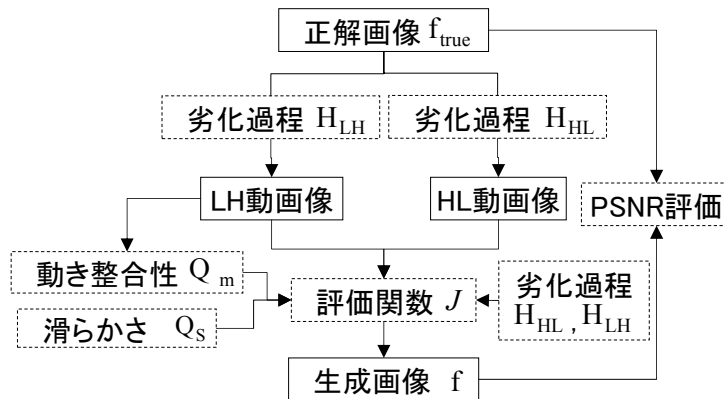


図 16 評価実験の手順

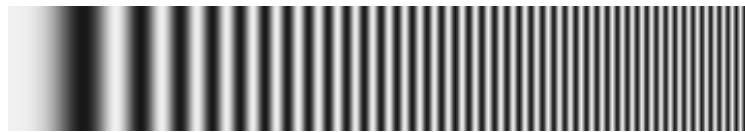
2.3.1 利得の周波数特性の評価

提案方式の利得の周波数特性を，以下の手順で評価した (図 16) ．

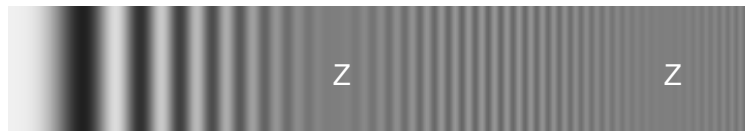
1. 本来は得られない真の高解像度高フレームレートの動画像 (正解画像 f_{true}) としてチャープ格子動画像を用意する．チャープ格子動画像は，水平方向に画素値の空間周波数が線形に変化し，垂直方向に画素値が等しいチャープ格子画像を，水平方向に等速で動かした動画像である．チャープ格子動画像の水平位置 x の画素値 $h(x)$ を，式 (9) に示す．チャープ格子画像の横軸は，格子の空間周波数に対応する．

$$h(x) = A \cos\{a(x - ut)^2 + \theta\} + I_B \quad (9)$$

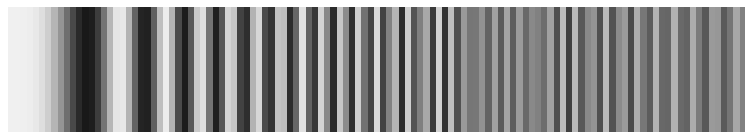
ここで，周波数パラメータ a は，評価する空間周波数域が 0 から HL 動画像のナイキスト周波数までの範囲となるように設定し，振幅 A とバイアス I_B は，チャープ信号の値が 0 から 255 の範囲に収まるように設定している． t はフレーム番号で， u は水平方向の画像の速度である． θ は初期位相を示す．図 17(a) に，正解画像として用いたチャープ格子画像 ($u=1, \theta=0, t=0, a=(2\pi \times 720(\text{チャープ格子画像幅}))^{-1}$) の低空間周波数域 (HL 動画像のナイキスト周波数の 1/2 まで) を示す．



(a) 正解画像 (360×120画素)



(b) HL画像 (360×120画素)



(c) LH画像 (120×40画素)



(d) 生成画像 (360×120画素)

図 17 チャープ格子画像の処理結果

($u=1, \theta=0, t=0, a=(2\pi \times 720(\text{チャープ格子画像幅}))^{-1}$) . “ Z ” はゼロ点を示す .

2. 劣化過程 $H_{HL}(N_T = 9)$, $H_{LH}(N_S = 3)$ を用いて HL 動画像と LH 動画像を生成する．図 17(b), (c) に，図 17(a) の画像から，それぞれ劣化過程 H_{HL} , H_{LH} で生成した HL 動画像と LH 動画像を示す．図 17(b) 中の "Z" は，動き ($u=1$) と長時間露出 ($N_T = 9$) とによって生じた空間周波数上のゼロ点位置を示す．ゼロ点付近の空間周波数域では信号の振幅が減少し，正解画像の情報が失われている．
3. 2. で生成した HL 動画像と LH 動画像を入力画像とし，提案方式により画像を生成する．
4. 3. で生成した HH 動画像と正解画像とを比較して画質を評価する．

ここで，画像生成に用いる正則化重み λ_S , λ_m の値は，自然画像を用いた画質評価実験 (2.3.2 項) によって Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) が最良となるよう 1 桁精度で求め， $\lambda_S=0.001$, $\lambda_m=0.01$ としている．この値は，本項と 2.3.2 項の全画像共通に適用している．なお，この実験では動き u は既知としている．

図 17(d) に，HL, LH 動画像から提案方式で生成した画像 (図 17(a) と同領域) を示す．提案方式による入力画像間の相互補完効果により，図 17(b) のゼロ点付近の振幅が復元されている．

次に，生成画像の空間周波数と等間隔 8 通りの初期位相 θ に対する平均利得の関係 (0 から HL 動画像のナイキスト周波数まで) を図 18 に示す．図 18(a) ~ (d) は，それぞれ動きが $u=0.0, 0.25, 0.5, 1.0$ の場合である．ここで，提案方式と同じ総画素数の入力画像から画像生成する手法と比較する．比較手法の入力画像は，提案方式の HL 動画像と LH 動画像を合わせた総画素数を持つ低解像度高フレームレート画像 (以降，LH2 動画像と呼ぶ) を用いる．LH2 動画像は LH 動画像とフレームレートが等しく，1 フレームの画素数は 2 倍になる．LH2 動画像の高解像度化は，次の手順で行う．

1. 提案方式の LH 動画像を LH2 動画像に置き換える．
2. HL 動画像を入力画像から除き，式 (1) の HL 動画像に関する誤差項を除いて画像生成する (以降，LH2 復元法と呼ぶ) ．

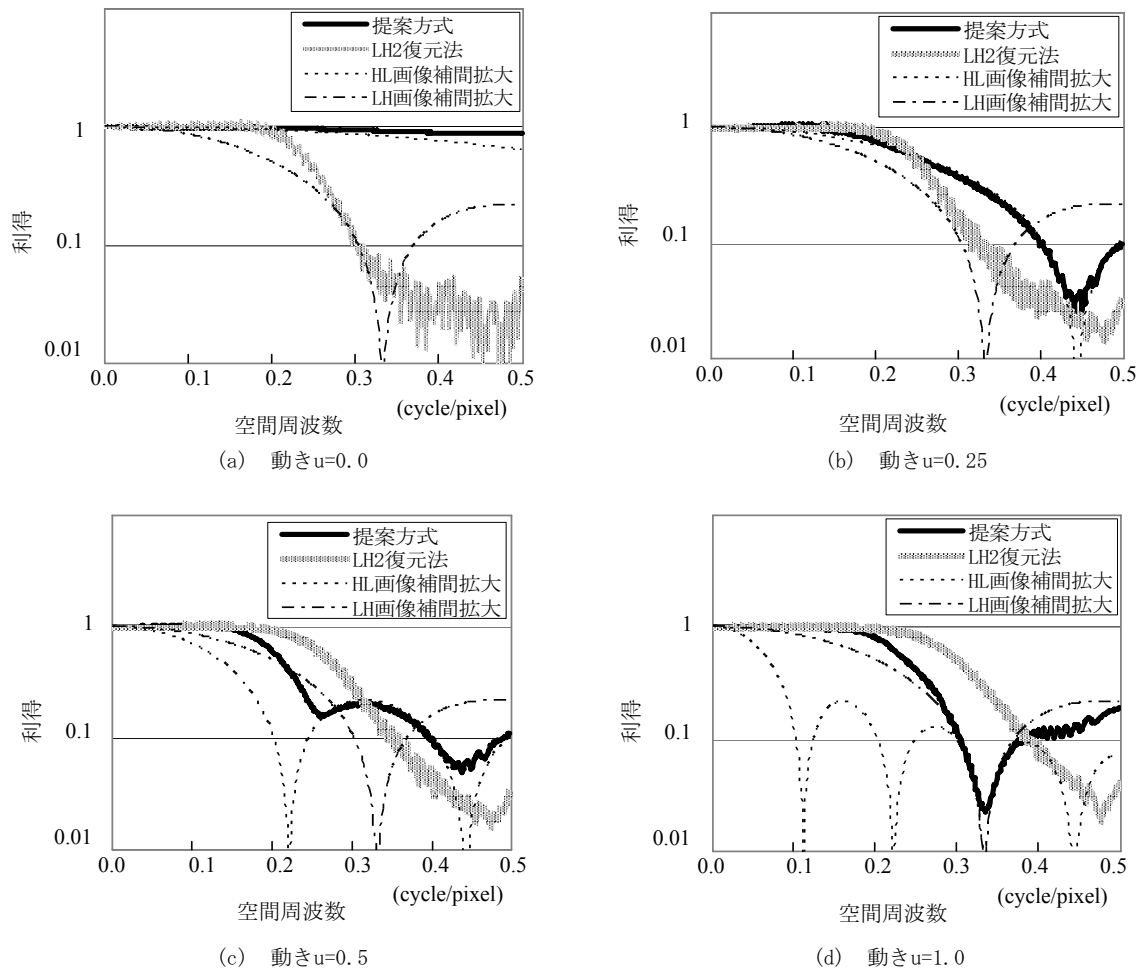


図 18 異なる動きに対する利得の周波数特性

LH2 復元法は、動き拘束の効果により、異なるフレーム間の位置合わせを用いた空間超解像処理となる。

図 18 において、提案方式の画像，LH2 復元画像，HL 動画画像補間拡大，LH 動画画像補間拡大の利得は、それぞれ、実線，灰色太線，点線，一点鎖線で示している。HL 動画画像の特性（点線）は、動きの大きさに応じてゼロ点が生じている。これに対し、提案方式（実線）では、入力画像間の補完効果で、HL 動画画像（点線）よりも利得は向上し、ゼロ点の復元効果も見られる。LH2 復元法との比較では、(c)、(d) において、高周波数域で LH2 復元法の利得が提案方式を上回っている。これ

は、動きぶれによる HL 動画像の周波数特性の低下に起因すると考えられる。

比較実験において用いた LH2 復元法の入力画像は、LH 動画像に比べ、約 1.4 倍の空間解像度を持つ。さらに、動き拘束の効果で空間解像度向上が可能である。しかしながら、動き既知の条件下でも、図 18(a), (b) のように動きが小さい場合には、提案方式の方が高周波成分の再現性が高い。これは、LH2 画像の PSF の周波数特性に起因する制限と考えられる。

2.3.2 自然画像を用いた生成画質の評価

自然画像を用いて、2.3.1 項と同様の手順で提案方式の有効性を評価した。評価には (社) 映像情報メディア学会監修の標準動画像集 (720 × 480 画素)[ITE] の画像の輝度成分を正解画像として用い、特に画像中に複数の動きが存在する 14 種類を選択した。評価画像の例を図 19 に示す。入出力画像間のフレーム数拡大比率 N_T および空間拡大比率 N_S は、HL 動画像と LH 動画像の総画素数が等しくなるように設定した。評価画像のフレーム数は、 N_T の倍数とし、開始フレーム番号は拡大比率によらず動画像ごとに同一としている。生成した画像の評価指標には、PSNR(単位 dB) を用いた。PSNR の定義を式 (10) に示す。

$$\text{PSNR}(\mathbf{f}) = 10 \log_{10} \frac{S_P^2}{\frac{1}{N_P} \left[\sum_{(x,y,t) \in \text{HH}} \{\mathbf{f}(x,y,t) - \mathbf{f}_{\text{true}}(x,y,t)\}^2 \right]} \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{f}_{\text{true}}(x,y,t)$ は正解画像の t 番目のフレームの位置 (x,y) の画素値、 $\mathbf{f}(x,y,t)$ は同じく生成画像の画素値、 N_P は全フレームの総画素数 (1 フレームの画素数 × フレーム数) を表す。 S_P は画素値の取り得る最大値 (8bit 階調の場合 255) である。

拡大比率 $N_T=9$ 、 $N_S=3$ の場合についての画像生成結果を以下に示す。評価画像 Yachting に対する入力画像の例を図 20 に示す。図 20 は、右方向に疾走するヨット上の女性を中心とし、緩やかに拡大ズーム撮影している画像である。図 20(a)



(a) Cognac and Fruit



(b) European Market



(c) Walk through the Square



(d) Yatching



(e) Winter River



(f) Swinging



(g) Japanese Room



(h) Todays Catch



(i) Summertime Tanning



(j) Crowded Crosswalk



(k) Flamingoes



(l) Horse Race



(m) Airplane Landing



(n) Driving

図 19 評価用モノクロ画像の例

が HL 動画像，(b) が LH 動画像である．HL 動画像は，露出時間が長いいため動きぶれを含んでおり，LH 動画像は空間解像度が低い．

提案方式による生成画像の例を図 21 に示す．生成画像では，図 20 の入力画像の HL 動画像で見られる動きぶれが低減し，LH 動画像よりも解像度が高い．

次に，図 22 に 3 通りの拡大比率 $N_T \cdot N_S$ の組合せに対応する 14 画像の総合 PSNR（全評価画像を連続した 1 つの画像として求めた PSNR）を示す．実験で用いた N_T, N_S ，および総フレーム数 N_F の組合せは， $(N_T, N_S, N_F) = (4, 2, 12), (9, 3, 18), (16, 4, 16)$ である．それぞれの拡大比率の組において，入力画像に対する生成画像の総画素数の増加率は，2, 4.5, 8 倍である．比較手法は，LH2 動画像を空間的に Bi-cubic 補間拡大する手法（以降，補間拡大法と呼ぶ）と LH2 復元法を用いる．図 22 において，印は提案方式，印は補間拡大法，印は LH2 復元法の結果を示す．提案方式の PSNR は，すべての拡大率で補間拡大法を上回る．LH2 復元法との比較では，2 通りの組合せ $((N_T, N_S) = (4, 2), (9, 3))$ において提案方式の総合 PSNR が高く， $(N_T, N_S) = (16, 4)$ では LH2 復元法の総合 PSNR が高い．フレーム数拡大比率が大きい場合，被写体動きの影響が大きくなり，2.3.1 の結果と同様に，HL 動画像の周波数特性が低下し，総合 PSNR が相対的に低下すると考えられる．

次に， $(N_T, N_S) = (9, 3)$ における，評価画像ごとの PSNR を図 23 に示す．図中の棒グラフの白色，水平線，黒色，左斜線，右斜線は，それぞれ提案方式，LH2 復元法，補間拡大法，HL 動画像の時間補間拡大，LH 動画像の空間補間拡大の結果を示す．提案方式は，HL・LH 動画像間の相互補完効果により，すべての画像において入力画像（HL もしくは LH 動画像）の補間拡大画像よりも，PSNR が高い．また，14 画像中 12 画像において，LH2 画像の補間拡大法よりも PSNR が高い．一方，LH2 復元法と比較した場合，提案方式は 14 画像中 5 画像で PSNR が高い．これは，個々の画像に含まれる空間周波数成分や動きの大きさの違いに依存していると考えられる．

14 評価画像の中で，動きの大きさが異なる 3 画像に対する各手法の生成画像を，それぞれ図 24, 25, 26 に示す．各図の (a), (b), (c) はそれぞれ提案方式，LH2 復元法，LH2 画像の補間拡大法の結果を示す．図 24 は，評価画像中で動きの小さ



(a) HL 画像 (720 × 480 画素)



(b) LH 画像 (240 × 160 画素)

図 20 提案方式の入力画像の例 (Yatching)



図 21 提案方式による生成画像の例 (720 × 480 画素)

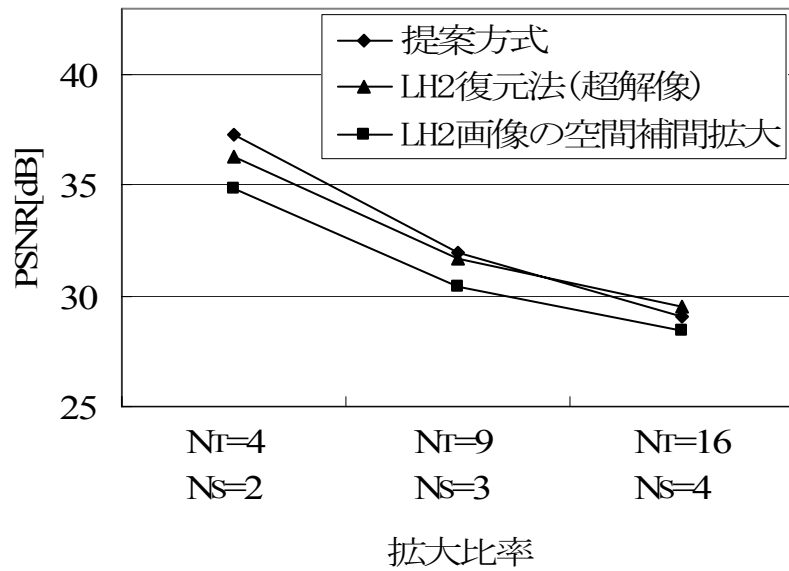


図 22 拡大率ごとの総合 PSNR

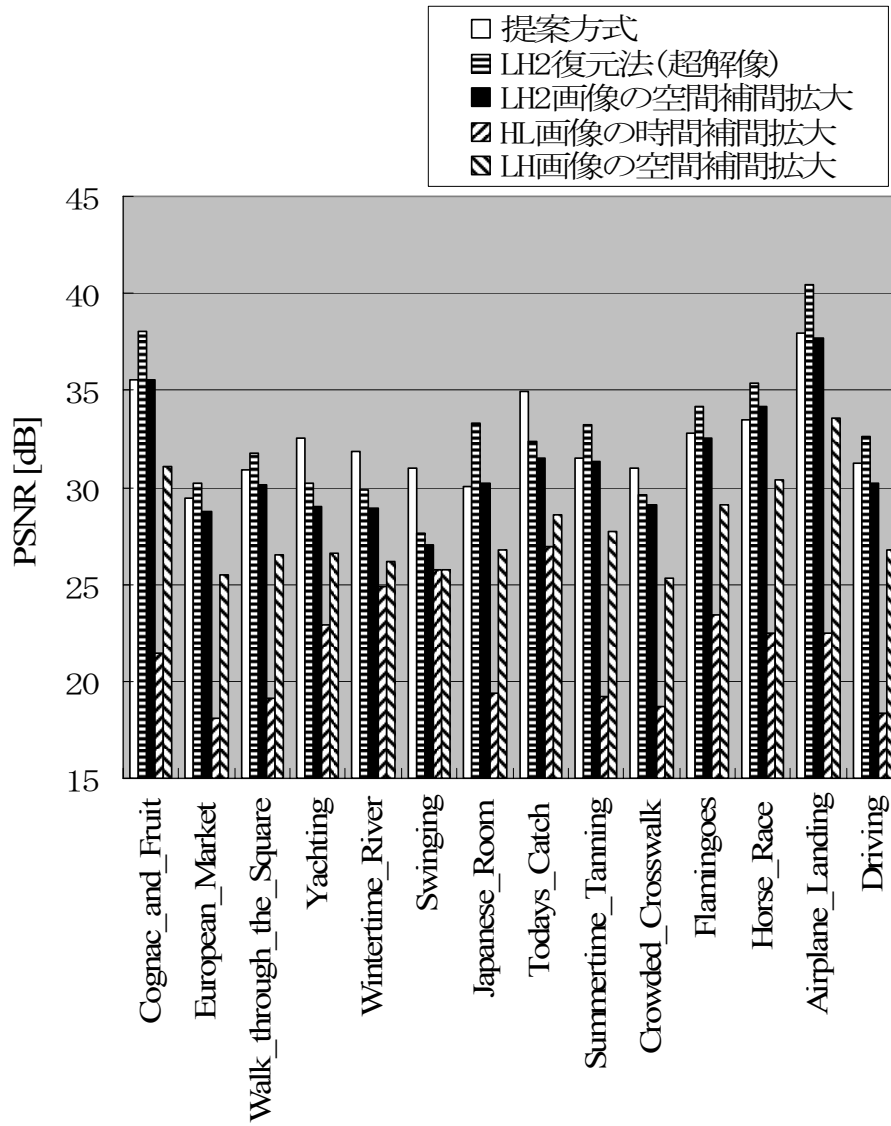


図 23 画像ごとの PSNR($N_T=9$, $N_S=3$)

い画像 Swinging(画像の一部)の結果である。入力画像は、ブランコにすわる女性を中心とし、緩やかな拡大ズーム撮影をしている画像である。提案方式の図 24(a)では、背景のフェンスや木の葉など、図 24(b), (c) よりも全体的に鮮明な画像が得られている。

次に、大小の動きが混在する画像の例を図 25 に示す。図 25 の評価画像 Yachting(画像の一部) は、動きの少ない前景と動きの大きい背景が混在した画像である。提案方式の図 25(a) では、前景のヨットのフレームや女性の服などが、(b), (c) に比べて鮮明である。背景は、動きが大きいものの高空間周波数成分は少なく、各手法間で明確な差異は見られない。

最後に、画像全体に動きが大きい画像の例を示す。図 26 の評価画像 Japanese room(画像の一部) は、立ち上がる女性の動きに合わせ、カメラを上向きにチルト操作している画像である。図 26 においては、高周波成分を含む背景のすだれの領域は、LH2 復元法の結果 (b) が提案方式よりも鮮明に再現されている。

なお、以上の実験は PC(CPU: Intel Core 2 Quad Q6600 2.4GHz) 上のソフトウェア処理で行った。処理時間は、拡大比率 $N_T=9$, $N_S=3$ の場合 (720 × 480 画素 × 12 フレーム)、2 ~ 4 分であった。

2.3.3 高解像度画像を動き補償する手法との比較

高解像度画像を動き補償する手法との比較結果について説明する。HL 動画像の露出時間の影響を検証するため、文献 [重本 06], [渡邊 06], [松延 07] の撮像方式と同様に、HL・LH 動画像双方の露出時間を短くし (短時間露出方式)、HL 動画像が長時間露出の場合 (提案方式) と PSNR を比較した。短時間露出方式では、提案方式の HL 動画像の露出時間のみを、LH 動画像と同じ時間まで短縮し (図 15(d))、提案方式と同じ手続きで画像生成した。ここで、動き検出結果は提案方式と等しく、正規化の重み定数 $\lambda_S \cdot \lambda_m$ は短時間露出方式において評価画像に対する PSNR が最良となる値 ($\lambda_S=0.001$, $\lambda_m=0.01$) を用いている。

図 27 に提案方式と、短時間露出方式の総合 PSNR を拡大率ごとに示す。図 27 では、いずれの拡大率においても提案方式の PSNR が大きく、長時間露出の有効性が確認できる。短時間露出方式では、高解像度画像の未露出期間フレームの高



(a) 提案方式



(b) LH2 復元方式



(c) LH2 画像の補間拡大法

図 24 動きの小さい画像の例 (Swinging)



(a) 提案方式



(b) LH2 復元方式



(c) LH2 画像の補間拡大法

図 25 大小の動きが混在する画像の例 (Yachting)



(a) 提案方式



(b) LH2 復元方式



(c) LH2 画像の補間拡大法

図 26 動きの大きい画像の例 (Japanese room)

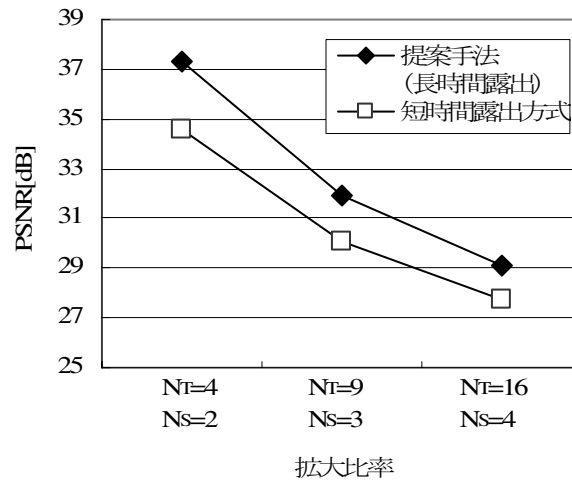


図 27 提案方式と短時間露出方式の PSNR の比較

解像度化は、動き補償 (本評価では、動き拘束として実現) にのみ依存する。一方、提案方式では動き拘束に加え、HL 動画像 (長時間露出) により、連続する複数フレームの時間積算値が拘束される (式 (1) の第 1 項)。一般に、自然画像に対する動き検出では誤検出が発生する。提案方式は、上記拘束の効果により、誤検出の生成画質への影響が、短時間露出方式に比べて抑えられ、PSNR を改善できると考えられる。

図 28 に評価画像 Yachting に対する、フレーム毎の PSNR の比較を示す。同図中の実線は長時間露出の結果を示し、破線は短時間露出の結果を表す。短時間露出では、HL 動画像の露出タイミング (図中の 印) で、PSNR が高く、前後のフレームでは PSNR が低い。一方、長時間露出ではフレームごとの PSNR の変化が短時間露出の場合に比べて小さい。

図 29(a), (b) に長時間露出と短時間露出の場合の生成画像例を示す (Yachting, 図 28 のフレーム 306)。ここでは同図右下に、画像中の矩形部を 2 倍拡大した画像を示している。図 29 の画像は、前景のヨット上の人物を中心とした緩やかなズームアウトが行われている動画像で、背景は左向きに移動している。図 29 の (a), (b) において前景と背景の動き境界などに差が見られ、短時間露出では長時間露出の画像よりも画像の乱れが認められる (拡大部分)。長時間露出の場合、時間積算値で生成画像が拘束されるため、正確な動き検出が難しい領域でも大きな

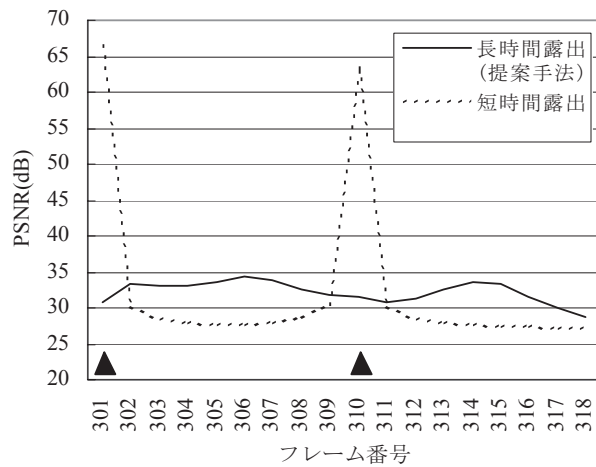


図 28 フレームごとの PSNR(Yachting)
 (図中の ▲ は短時間露出の露出タイミングを示す)

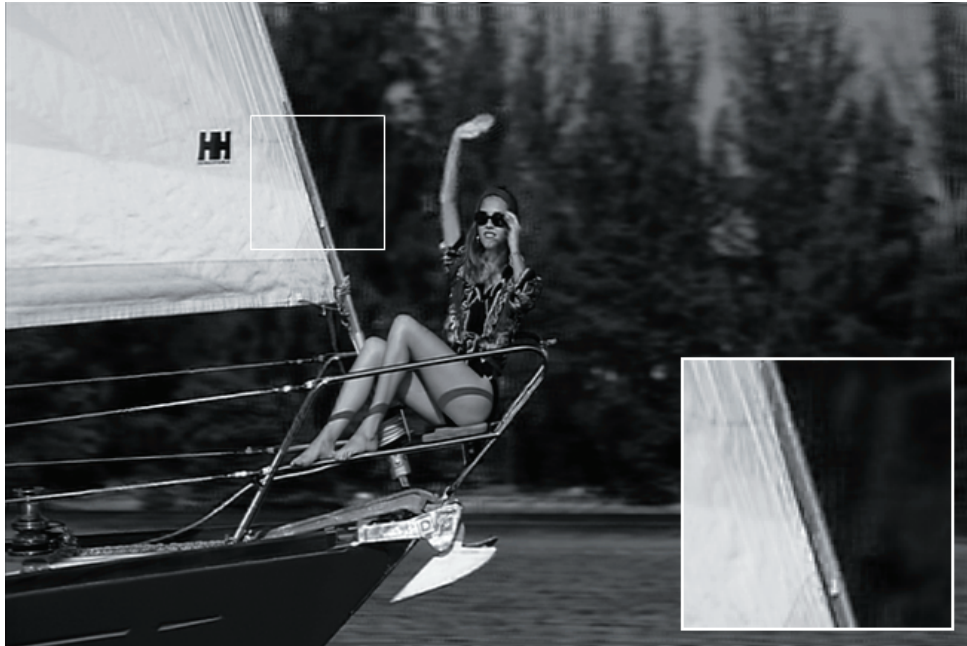
誤差が生じにくいと考えられる。

2.4 2カメラ構成の試作カメラシステムによる画像生成

提案方式を実写で検証するために、2つのモノクロカメラから成る撮像システムを構築した。本節では、カメラシステムの構成と、これを用いて撮影した画像の処理結果について説明する。

2.4.1 2カメラシステムの構成

異なる解像度とフレームレート・露出時間の画像を同一視点・同一視野で同期撮影するために、撮像素子内で画素値加算(オンチップビニング)が可能でフレームレート・露出時間が可変なモノクロデジタルカメラ(IMPERX, Inc.: IPX-11M5-LM)を2台用いた。本システムでは、対物レンズ(HOYA 株式会社: SMC PENTAX-FA645 45mm F2.8)を通した入射光をビームスプリッタ(ハーフプリズム)で分離して2台のカメラで受光している(図 30)。同期撮影した画像は、ビデオキャプチャを介してPCに記録する。各カメラの撮影条件を表 1 に示す。フレーム数拡大比率 N_T および空間拡大比率 N_S は、それぞれ4と2に設定している。



(a) 長時間露出の場合 (提案手法)(720 × 480 画素)



(b) 短時間露出の場合 (720 × 480 画素)

図 29 生成画像の例 (Yachting)

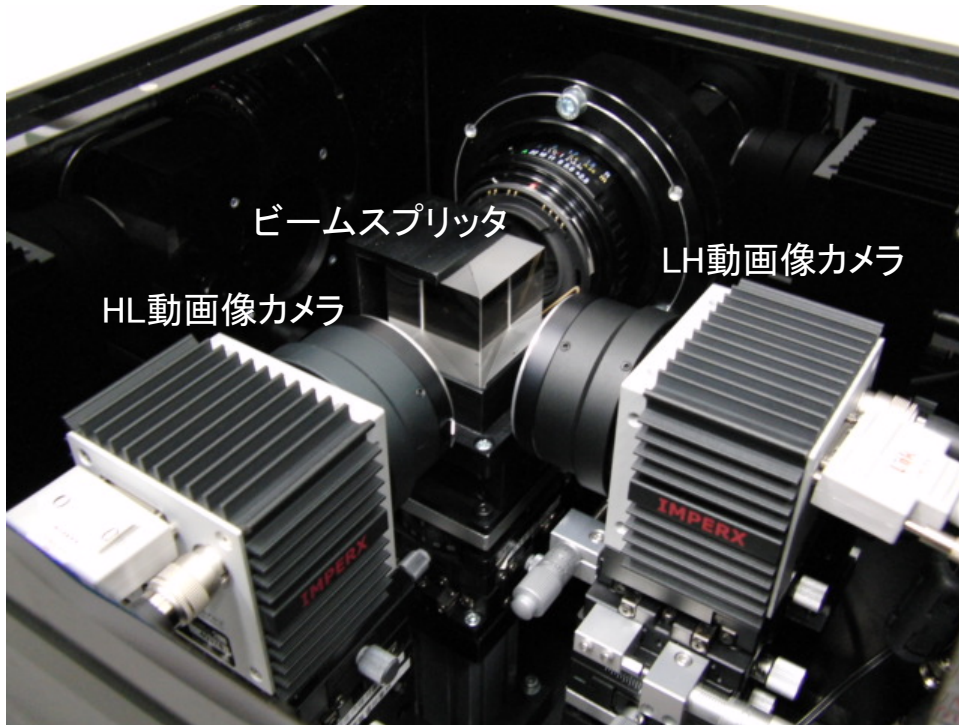


図 30 試作カメラシステムの概観

表 1 カメラシステムの撮像条件

	画素数 (横 × 縦)	フレームレート (fps)	露出時間 (ms)
HL 動画像カメラ	4000 × 2000	2	500
LH 動画像カメラ	2000 × 1000	8	125

試作カメラシステムを用いて撮影した画像の例を図 31 に示す。図 30 のカメラシステムの撮影画像から 4000×2000 画素の画像を生成できるが、ここでは細部の画質を確認しやすくするため、HL 動画像において 800×700 画素の領域を切り出している。図 31 では、静止背景の前で、回転台に乗ったぬいぐるみが水平方向に回転している。図 31(a) は HL 動画像 (800×700 画素) で、長時間露出による動きぶれを含んでいる。図 31(b) は、LH 動画像 (400×350 画素) で、HL 動画像に対し、オンチップビニングにより $1/2$ の低解像度画像となっている。

2.4.2 2カメラ間の画像の輝度補正

カメラ入力画像に対する輝度補正について説明する。式 (2), 式 (3) では、以下の2点を仮定している。

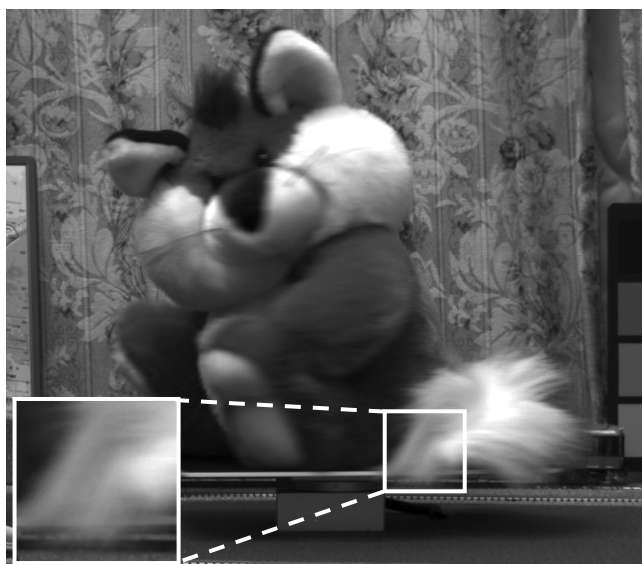
- 画素値は入射光量に対して比例する (線形性)
- 比例定数は空間的に一定 (一様性)。

しかし、ハーフプリズムの透過特性やカメラの撮像素子の感度特性の位置依存性や個体差により、カメラの撮影画像では、上記仮定は必ずしも成立しない。

そこで、カメラシステムの画像を用いて提案手法の処理を行う前に、入力画像の画素ごとに輝度補正を行った。補正に必要な補正值 (2カメラ間の画素値のオフセットの差と利得の比) は、あらかじめ撮影用光源下で白色拡散板を複数の照明強度下で撮影して得た。輝度補正後に次項で説明する位置合わせを行い、画像生成に用いた。

2.4.3 2カメラ間の画像の位置合わせ

試作カメラシステムにおける2カメラ間の画像の位置合わせについて説明する。提案手法では、2カメラの画像間の相対的位置関係が、劣化過程 (式 (2), 式 (3)) により定まる。試作カメラでこの位置関係を満たすためには、HL 動画像の画素精度で両画像の位置を合わせる必要がある。



(a) HL画像(800×700画素)



(b) LH画像(400×350画素)

図 31 試作カメラシステムによる撮影画像

そこで，試作カメラシステムでは，以下の手順で2カメラの画像間の位置合わせを行った．ここで，使用した2カメラは同一製品で，同じ光学系を通じて撮影するため，位置合わせにおいて画像に含まれるレンズひずみを考慮する必要はない．

1. 2つのカメラをそれぞれ異なるXYZステージ上に固定し，XYZステージの調整軸の一つのを光軸方向に設置する．
2. 光軸方向の調整軸を用いてそれぞれのカメラの焦点を調整する．
3. 残りの2つの調整軸を用い，2カメラの視野を20～30画素の精度で一致させる．
4. 視野の四隅付近に三角形マーカを設置して両カメラで撮影し， 11×11 画素の矩形領域(マーカを含む)の正規化相互相関が最大となる対応点を2画像間で求める．
5. 4.で求めた対応点を用いて affine 変換(LH 動画像から HL 動画像への変換)を求める．
6. 5.で求めた affine 変換で LH 動画像を変換し(補間方式：バイリニア)，位置合わせ後の LH 動画像とする．

2.4.4 2カメラシステムによる画像生成

図32は，図31の入力画像を用いて提案方式により生成した画像である．図31と図32では，画像中の白線矩形領域を図中に拡大表示している．図32の生成画像では，ぬいぐるみの尾部等において，入力 of HL 動画像(図31(a)白線矩形)に比べて水平方向の動きぶれが低減し，斜め方向の毛並みが明確になり，LH 動画像(図31(b)白線矩形)に比べて解像度が向上している．図33に通常の撮像方式による撮影画像を示す．図33(a)は高解像度短時間露出の撮影画像で，HL 動画像と同じ解像度かつ，LH 動画像と同じ露出時間で撮影している．動きぶれが生じないように露出時間を短くした場合，露光量不足で暗い画像となる．一方，図33(b)は高解像度長時間露出の撮影画像で，提案手法と同じ露光量になるように

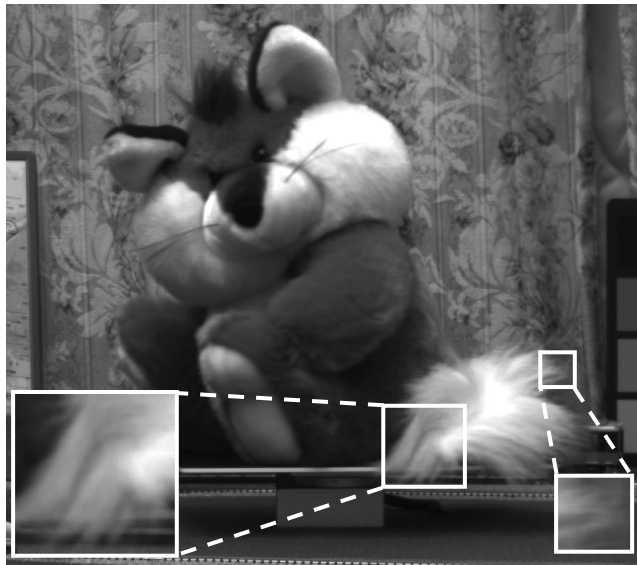


図 32 試作カメラシステムの画像から生成した画像 (800 × 700 画素)

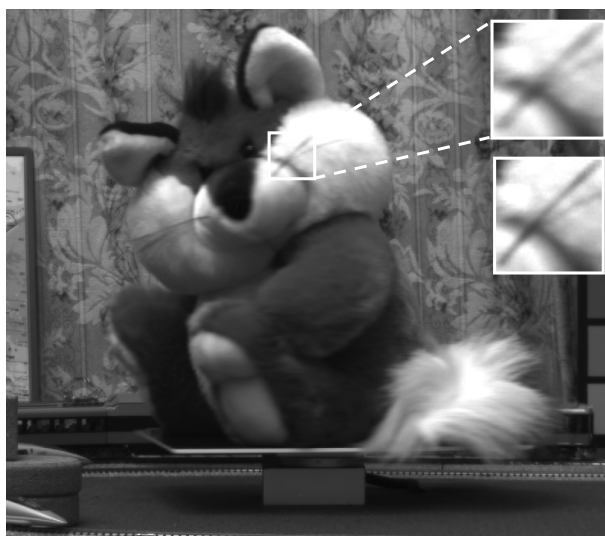
撮影している．露出時間を長くすると露光量は確保できるものの，被写体動きによる動きぶれが生じる．

2.4.5 長時間露出のノイズ低減効果の検証

提案方式は，撮影時に光量確保することで，画像に混入するノイズを撮影段階で低減させる．ここで，撮影時の光量確保(長時間露出)の効果を検証するため，撮影時の露出で光量を得る場合(アナログ加算)と，撮影後の画像加算で光量を得る場合(デジタル加算)とのノイズ量を比較する．図 34 に白色拡散板を撮影した時の，総露出時間と画素値の分散(ノイズ量)との関係を示す．分散は画像中央の 100×100 画素の領域から求めた．図 34 において，黒ひし形印は露出時間を 100ms から 100ms ごとに増して撮影(アナログ加算)した結果を示し，白四角印は， 100ms の露出で複数回撮影した画像を，黒ひし形印の画像と同じ光量になるようにデジタル加算した結果を示す．図 34 において，どちらの加算方式も光量の増加に対して画素値の分散(σ^2)は増加している(光量に対する標準偏差(σ)の比は低下)が，デジタル加算の方が，アナログ加算よりも光量の増加に対するノイ



(a) 高解像度短時間露出の画像 (800 × 700 画素)



(b) 高解像度長時間露出の画像 (800 × 700 画素)
(下側の白枠内は提案方式による生成画像)

図 33 従来方式の撮影画像の例 .

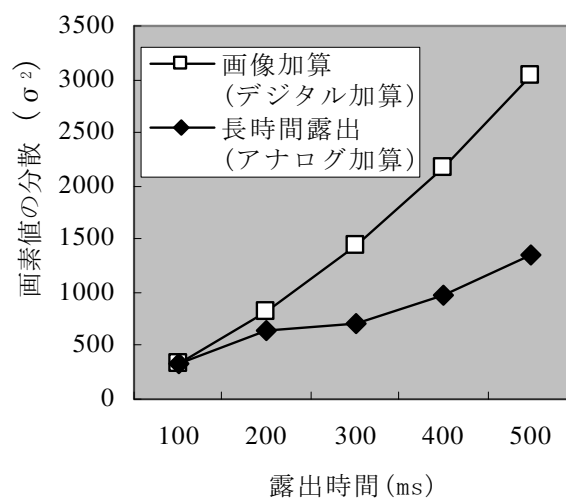


図 34 長時間露出と画像加算のノイズ比較

ズの増加量が多い(グラフの勾配が急)。これは、両者に共通する光由来のノイズ(光ショットノイズ)に加え、デジタル加算では、アンプノイズのように個々の撮影ごとに生じる撮像素子由来のノイズを加算前の各画像が含むため、加算数に応じてこのノイズ成分が増加することによる。提案方式は2つの撮像素子で撮影するため、2つの画像加算に相当し、3フレーム以上のデジタル加算に比べて、撮影画像のノイズ低減効果がある。

2.5 考察

提案方式について考察する。次章のカラー拡張方式と共通する項目は、4章で考察する。シミュレーションによる実験結果から、低解像度画像の補間拡大や超解像処理に比べ、提案方式は、画像中の被写体の動きが小さいところで顕著に高空間周波数成分の再現性が高くなることを示した。これは、LH 動画画像が持つ空間周波数域よりも高い周波数域において、画像の動きが小さい場合に HL 動画画像の利得が特に大きいことによる。また、動きが大きい場合でも、被写体の空間周波数が低い場合には、提案方式は比較手法と同等な再現性を持つ。また、Yachtingの前景・背景の境界付近のように動き検出が困難な領域では、相互補完効果も利

用する提案方式に比べ、動き検出にのみ依存した超解像処理 (LH2 復元法) は、誤差を生じやすい。同様の結果は、高解像度の短時間露出画像を動き補償する方式との比較 (2.3.3 項) にも見られる。長時間露出の画像を用いた画像生成では、露光量確保の効果に加え、時間平均情報が得られることで、生成画像で過剰な誤差を生じにくい効果がある。

一方、動き検出が正確に行われた場合、LH2 復元法や高解像度の短時間露出画像を動き補償する方式は、時間周波数と空間周波数が共に高い成分の再現において、提案手法よりも有効である。しかし、このような周波数成分は、人の視覚では知覚されにくいいため、主観画質での差異は、他の周波数成分の場合に比べて少ないと考えられる。

2.6 結言

本章では、時空間高解像度撮影と露光量確保の両立のため、異なる時空間解像度を持つ 2 種類の画像で、それぞれ時間と空間方向に光量確保し、読み取りデータ量を抑えて撮影した後、時空間情報を相互補完し、時空間高解像度化した画像を得る方式を提案した。シミュレーション実験および試作カメラシステムにより動きぶれの抑制と時空間情報の相互補完の効果を検証し、露光量を確保して撮像素子からの読み出しデータ量を抑えて撮影した画像から時空間高解像度画像を得る提案方式の有効性を確認した。特に動きの小さい領域ほど解像度改善効果が得られ、動き検出が困難な動き境界においても画質が劣化しにくい特性を確認した。本手法の実用化においては、撮影と画像処理のカラー画像への対応が課題となる。

3. 時空間解像度が色ごとに異なる動画像からの時空間高解像度カラー画像生成

3.1 序言

2章では、2つの異なる時空間解像度のモノクロ動画像を撮影して、時空間高解像度撮影と露光量確保を両立させるための撮像処理方式を提案した。次に、この方式をカラー画像に拡張する。カラー撮影では、ベイヤ配列などの Color Filter Array(CFA) を備えた単板撮像素子で RGB 画像を撮影する方法が多くのカメラで用いられている。まず、2章の提案方式の入力画像をこのような単板式カラーカメラの画像に置き換えてカラー化する方法が考えられる。しかし、CFA は透過色以外の色の光は反射・吸収するため、光の利用効率が低い。また、異なる色フィルターを空間的に交互に配置するため、各色の空間解像度が低下する。これに対し、ダイクロイックミラーなどの波長分離型の光学系を用いる 3 板式カラー撮影は、反射光と透過光をともに利用するため光の利用効率が高く、各色の空間解像度も低下しない。ただし、3 板式を 2 章の 2 カメラ構成にそのまま適用すると、撮像素子が 6 枚必要になり、カメラが大型化する問題が生じる。

そこで、本章では、RGB ごとに異なる時空間解像度で露光量を確保し、読み取りデータ量を抑えて撮影した同一視点かつ同一視野の 3 板式撮像画像を用い、RGB の持つ異なる時空間情報を相互に補完することで時空間高解像度化を行い、高解像度高フレームレート化と露光量確保を両立させるカラー動画像取得方式を提案する。具体的には、撮像時に RGB 間で解像度、フレームレート、露出時間を変えて、時間的もしくは空間的に露光量を確保する。画像生成では、入出力画像間の対応関係と生成画像に対する仮定を用いる。ここで、RGB 間の時空間的な相関関係、すなわち色の空間的变化の滑らかさと、時間的な画素値の変化が被写体の動きにより生じ、RGB 間でこの動きが一致することの 2 点を仮定する。各色画像間の時空間拘束条件を満たすカラー画像を画像復元の枠組みで生成し、RGB 各色の異なる時空間情報を相互に補完する。これにより、時空間高解像度のカラー画像を得る。

以下、本章では、3.2 節で、提案方式における露光量を確保した撮像方式と、こ

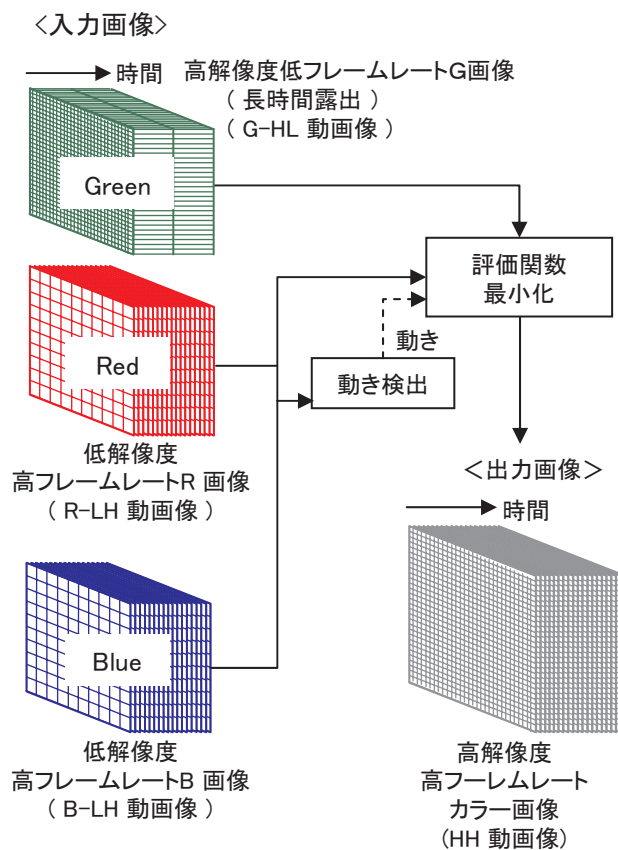


図 35 提案方式の概要

の画像に対する時空間高解像度化方式について説明し，3.3 節でシミュレーション結果を述べ，3.4 節で原理検証用に構築した試作 3 板式カメラシステムを用いた生成画像の評価結果について説明する．最後に，3.5 節で考察し，3.6 節で結言を述べる．

3.2 時空間解像度が色ごとに異なる RGB3 板式撮像処理方式

高解像度高フレームレートのカラー画像取得と露光量の確保を両立するため，同一視点から撮影した時空間解像度の異なる RGB 動画画像を用いて，時空間高解像度化する撮像・処理方式を提案する．提案方式の概要を図 35 に示す．以下，提案方式における撮像方式と画像生成方式について順に説明する．

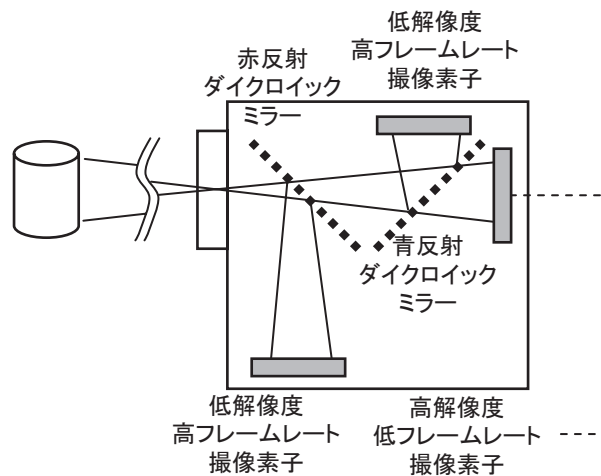


図 36 波長分離型撮像光学系の構成例

3.2.1 カラー撮像方式

提案方式では、同一視点かつ同一視野で同期撮影した RGB 画像を入力とする。撮像時には、高解像度高フレームレート撮影よりも露光量を優先して撮影する。すなわち、図 35 に示すように、G は高解像度低フレームレート (G-HL 動画像)、R と B は低解像度高フレームレート (R-LH, B-LH 動画像) で撮影する。これにより、G は時間的に、R と B は空間的に露光量を確保する。これら RGB 画像は、例えば図 36 に示すような、ダイクロイックミラー等を用いた波長分離型の撮像光学系により得る。各動画像の各フレームの露出時間はフレーム間隔に一致させている。入力画像の空間解像度と RGB チャンネルとの対応付けは以下の 2 点を考慮し、G を高解像度画像、R と B を低解像度画像としている。

(1) 人の視覚において輝度成分に対する空間分解能は、色差成分のそれよりも高い ([視覚 00], [三橋 09])。また、G の波長帯域は輝度成分に対する寄与率が最も高い ([BT.95])。従って、G を高解像度入力画像とすることで、生成画像の主観的な空間解像度を高められる。

(2) 提案方式では、RGB 画像間の時空間的關係性を仮定することで、各色画像間で時空間情報を相互補完する。RGB 間の關係性において、被写体の反射率や光源のスペクトル特性の波長連続性を仮定すると、一般的には隣接する波長帯域

(RG, GB) 間の方が離れた波長帯域 (RB) 間よりも関係性が高い。そこで、入力画像において隣接する波長帯域 (RG, GB) に異なる時空間特性を割り振ることで、撮影時の RGB 間の冗長性を抑えて相互補完効率を高める。

ここで、(2) の RGB 間の関係性について情報量の観点から以下のように検証した。

RGB 間の関係性

提案方式では、RGB 画像間の時空間的关系性を仮定することで、各色画像間で時空間情報の相互補完を行う。この関係性を検証するために、正解画像における各画素の RGB 間の相互情報量を求めた。検証では、シミュレーション実験 (3.3.2 項) で用いる 14 評価画像の各先頭フレーム画像を用い、RGB 間の相互情報量 I を式 (11) に基づいて画素単位で求めた。

$$I(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y) \quad (11)$$

ここで、 $I(X, Y)$ は色 X と色 Y との相互情報量、 $H(X)$ は色 X の平均情報量、 $H(X, Y)$ は色 X, Y の同時分布に対する平均情報量である。

図 37 に RGB それぞれの平均情報量を、画像ごとおよび 14 画像全体 (Overall) について示す。対象画像は RGB 各 8bit 表現の画像であるが、発生頻度に偏りがあるために RGB それぞれの平均情報量は 7.6bit 程度である。次に、図 38 に 1 画素における RG, GB, RB 間の相互情報量を示す。図 38 では、14 画像中 12 画像で RB 間の相互情報量が最も少なく、14 画像全体では RB, GB 間の相互情報量 2.1bit よりも RB の相互情報量は 0.6bit 少ない。すなわち、離れた波長帯域 (RB) 間の方が、隣接する波長帯域 (RG, GB) 間よりも相互情報量が少ない傾向にある。従って、RG, GB 間で時空間周波数特性を変えて撮影することで、撮影時の情報の冗長性を抑えることができる。

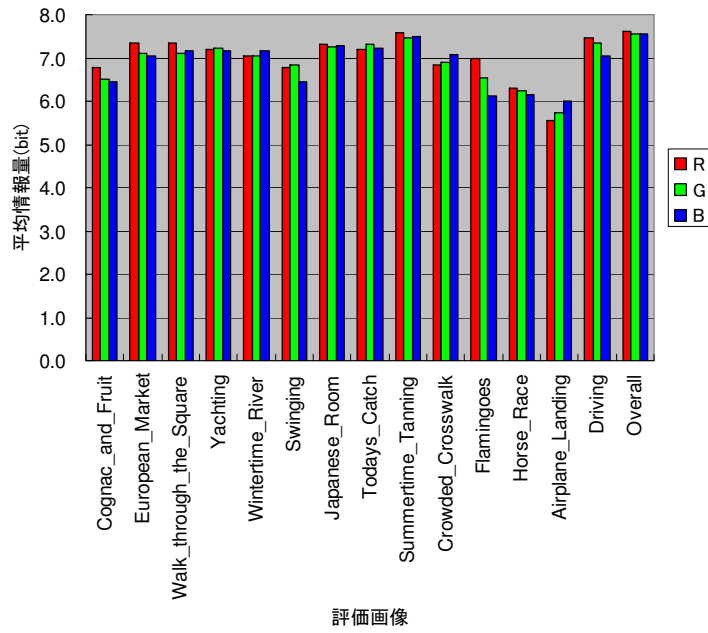


図 37 1 画素の RGB の平均情報量

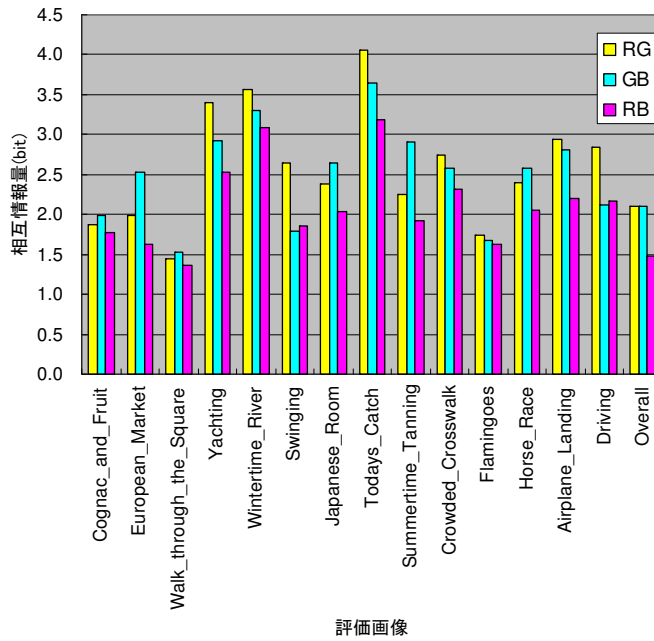


図 38 1 画素の RGB 間の相互情報量

3.2.2 画像復元によるカラー動画像の時空間高解像度化

提案方式では，露光量を優先して撮影した RGB 画像に対し，時空間情報を相互補完することで時空間高解像度化し，時空間高解像度と露光量の両立を図る．具体的には，生成すべき高解像度高フレームレートのカラー動画像（以降，HH 動画像と呼ぶ）が満たすべき条件を評価関数として表現し，この評価関数を最小とする画像として HH 動画像を得る（図 35）．ここで，上記条件として，入力画像と生成画像の対応関係（誤差項）に加え，拘束条件として生成画像の色の空間的滑らかさ（色の滑らかさ拘束項）と時間的連続性（動き拘束項）を設定することで，RGB 入力画像の異なる時空間情報を相互補完する．

提案手法では，低解像度で撮影した R と B を G の空間解像度まで復元し，低フレームレートで撮影した G を R と B のフレームレートまで復元することを目指す．なお，焦点ぼけのように LH，HL 動画像が共通して含む空間ぼけや，R・B に含まれる動きぶれの除去は，本章では扱わない．

以下，評価関数の構成と最小化手法について述べる．

3.2.3 カラー動画像生成に用いる評価関数の定義

生成カラー動画像を f とした場合の評価関数 $J(f)$ を式 (12) に示す．HH 動画像の生成に用いる評価関数は，誤差項（式 (12) の第 1～3 項），色の滑らかさ拘束項（第 4～6 項），動き拘束項（第 7 項）から成る．

$$\begin{aligned} J(f) = & \| \mathbf{H}_{LH} \mathbf{H}_R \mathbf{f} - \mathbf{g}_R \|^2 + \| \mathbf{H}_{HL} \mathbf{H}_G \mathbf{f} - \mathbf{g}_G \|^2 \\ & + \| \mathbf{H}_{LH} \mathbf{H}_B \mathbf{f} - \mathbf{g}_B \|^2 + \lambda_{C1} \| \mathbf{Q}_S \mathbf{H}_{C1} \mathbf{f} \|^2 \\ & + \lambda_{C2} \| \mathbf{Q}_S \mathbf{H}_{C2} \mathbf{f} \|^2 + \lambda_{C3} \| \mathbf{Q}_S \mathbf{H}_{C3} \mathbf{f} \|^2 \\ & + \lambda_m (\| \mathbf{Q}_{mf} \mathbf{f} \|^2 + \| \mathbf{Q}_{mb} \mathbf{f} \|^2) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで f , g_R , g_G , g_B はそれぞれ生成画像，R-LH 動画像，G-HL 動画像，B-LH 動画像の各画素値をベクトル表記したものである． \mathbf{H}_{HL} と \mathbf{H}_{LH} は，それぞれ HH 動画像から HL 動画像と LH 動画像への劣化過程を表し， \mathbf{H}_R , \mathbf{H}_G , \mathbf{H}_B は，それぞれ f から RGB の単色画像を抽出する過程である． \mathbf{Q}_S , \mathbf{Q}_{mf} , \mathbf{Q}_{mb} は，生成画像

に対する評価作用素で，正則化条件を表現する． H_{C1}, H_{C2}, H_{C3} は，主成分分析で予め設定した座標軸 (C1, C2, C3) で張る色空間において，色要素 (C1, C2, C3) ごとの画像をそれぞれ f から抽出する過程である． $\lambda_{C1}, \lambda_{C2}, \lambda_{C3}, \lambda_m$ は，正則化項の重み定数である．式 (12) を最小化する f を求め生成カラー動画像とする．以下， $J(f)$ の各項について説明する．

時空間解像度が色ごとに異なる撮像過程に基づく劣化拘束 (誤差項)

誤差項 (式 (12) の第 1~3 項) は，生成画像の劣化画像と入力画像との画素値の誤差を評価するペナルティ項である．各項はそれぞれ RGB の各色画像の評価に対応している．評価値は，生成画像を劣化過程を通して劣化させた画像ベクトルと，入力画像ベクトルとの誤差ベクトルの L2 ノルムの 2 乗を用いている．入出力画像間の整合性を持たせることで，生成画像は RGB 入力画像が持つ異なる時空間周波数情報を継承する．式 (12) の第 1 項と第 3 項の劣化過程 H_{LH} は，HH 動画像から LH 動画像への劣化過程を意味する．生成画像の単色画像 f_m (生成画像の R 成分 $H_R f$ ，または B 成分 $H_B f$) から LH 劣化画像 g_{LH}^d への劣化過程 H_{LH} を式 (13) に示す．

$$g_{LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t) = \sum_{x=x_{LH} \times N_S}^{(x_{LH}+1) \times N_S - 1} \sum_{y=y_{LH} \times N_S}^{(y_{LH}+1) \times N_S - 1} f_m(x, y, t) \quad (13)$$

ここで， $g_{LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t)$ は，LH 劣化画像の位置 (x_{LH}, y_{LH}) フレーム t の画素値， $f_m(x, y, t)$ は，生成画像の単色画像の位置 (x, y) フレーム t の画素値を示す．式 (13) は，HH 動画像の画素値の $N_S \times N_S$ 画素ごとの空間加算で，HH 動画像に対する相対的な空間ぼけと低解像度化を表現する．

次に，式 (12) の第 2 項の G 成分に対する劣化過程 H_{HL} は，HH 動画像から HL 動画像への劣化過程を表現する．劣化過程 H_{HL} の変換を式 (14) に示す．

$$g_{HL}^d(x, y, t_{HL}) = \sum_{t=t_{HL} \times N_T}^{(t_{HL}+1) \times N_T - 1} f_m(x, y, t) \quad (14)$$

ここで， $g_{HL}^d(x, y, t_{HL})$ は HL 劣化画像の位置 (x, y) ，フレーム t_{HL} の画素値を示す

す．式 (14) は，HH 動画像の画素値の N_T フレームごとの時間加算で，HH 動画像に対する相対的な露出の長時間化 (動領域の動きぶれ) と低フレームレート化を表現する．

誤差項に含まれる劣化過程は，HH 画像に対する RGB それぞれの撮影条件の相対的な違いを表している．撮影時の露出時間や集光面積の違いによって入力画像側で RGB 間の光量不均衡が生じてても，誤差項が小さくなるように画像を生成することで，生成画像側での RGB 間の光量均衡は保たれる．

色の空間的滑らかさをを用いた空間内での拘束 (色の滑らかさ拘束項)

色の滑らかさ拘束項 (式 (12) の第 4 ~ 6 項) は，生成画像における色の空間的变化の滑らかさを評価する．提案方式では，RGB の色画像ごとに異なる時空間解像度の情報を，相互に補完させることで時空間高解像度画像を生成する．自然画像では，RGB の値はそれぞれ独立に変化するのではなく，時空間的に互いに関係を持って変化する傾向がある．この関係として色の空間的变化の滑らかさを仮定する．また，自然画像を対象とする場合，画素の RGB 値の分布は RGB 空間内で非等方的である．そこで提案方式では，RGB 値の分散の偏りに応じて滑らかさ拘束を設定するため，主成分分析 (Principal Component Analysis: PCA) を用いた．滑らかさを定義する色空間座標軸 (C_1, C_2, C_3) は，あらかじめ評価画像の集合全体に対して PCA を行うことにより得る．PCA 基底軸ごとの画像 f_{C_i} と生成画像 f との関係を式 (15) に示す．

$$f_{C_i} = H_{C_i} f \quad i \in \{1, 2, 3\} \quad (15)$$

ここで， $f_{C_1}, f_{C_2}, f_{C_3}$ は，それぞれ RGB 空間における第 1，第 2，第 3 主成分の軸に沿った画素値の画像 (PCA 色画像) のベクトル表記で， $H_{C_1}, H_{C_2}, H_{C_3}$ は f から各 PCA 色画像への射影変換を示している．各 PCA 色画像の空間的な滑らかさは，2.2.3 項の式 (4) と同じ作用素 Q_S (式 (16)) で求め，生成画像の各画素位置における滑らかさを要素とするベクトルの L_2 ノルムの 2 乗を評価値としている．

$$\begin{aligned}
|Q_s \mathbf{f}_{Ci}|^2 = \sum_{(x,y,t) \in HH} & \left[4 \mathbf{f}_{Ci}(x, y, t) \right. \\
& - \mathbf{f}_{Ci}(x-1, y, t) - \mathbf{f}_{Ci}(x+1, y, t) \\
& \left. - \mathbf{f}_{Ci}(x, y-1, t) - \mathbf{f}_{Ci}(x, y+1, t) \right]^2
\end{aligned} \tag{16}$$

色の滑らかさ拘束に用いる色空間座標系

色の滑らかさ拘束で用いる色空間座標系は，評価画像全体の RGB 画素値の主成分分析 (PCA) により決定する．後藤ら [後藤 04] が滑らかさ拘束に用いた固定の非直交系である YCbCr 色座標系に比べ，PCA を用いた場合には，画像入力系の特性に応じた座標系上で軸ごとの正規化重みを独立に設定できる．そのため，画質的に有利と考えられる．また，入力画像の RGB の分布は，照明や光学系の波長スペクトル特性に依存して変化する．PCA を用いて色座標系を設定する提案方式の場合，これらの特性に合わせて色空間を設定することができる．

カラー動画の時間軸方向の拘束 (動き拘束項)

式 (12) の最後の項は画像中の動きに基づいた入出力画像間の整合性を評価する．この項では，RGB 各色画像の情報を相互に補完させる目的で，画像中の動き情報を用い，時間方向の拘束条件を表現している．ここで，フレーム間の画素値変化は被写体の動きにより生じ，RGB 各画像の動きは同一であることを仮定している．この仮定に対する整合性評価を次の手順で行う．

1. 2.2.3 項と同じ手法により，フレームレートの高い LH 動画の各画素位置毎にサブピクセル精度の動き検出を時間的に双方向に行う．実験では，同じ解像度を持つ R-LH 動画と B-LH 動画を，同じ画素位置で加算した加算 LH 動画を求め，加算 LH 動画から動き検出を行っている．
2. LH 動画で求めた動きベクトルを，HH 動画上の動きベクトルに N_S 倍拡大写像する．
3. 拡大写像された動きベクトルの始点と終点間の RGB それぞれの画素値差分の 2 乗を画像全体で積算し，この値に基づいて動きベクトルと生成画像と

の整合性を評価する .

時間的に前向きと後ろ向きの動きを用いた評価式をそれぞれ式 (17), (18) に示す .

$$\begin{aligned}
 |\mathbf{Q}_{mf}|^2 = \sum_{(x,y,t) \in \text{HH}} [& \\
 \{ \mathbf{f}_R(x, y, t) - \mathbf{f}_R(x+v_{fx}(x, y, t), y+v_{fy}(x, y, t), t+1) \}^2 & \\
 + \{ \mathbf{f}_G(x, y, t) - \mathbf{f}_G(x+v_{fx}(x, y, t), y+v_{fy}(x, y, t), t+1) \}^2 & \\
 + \{ \mathbf{f}_B(x, y, t) - \mathbf{f}_B(x+v_{fx}(x, y, t), y+v_{fy}(x, y, t), t+1) \}^2] & \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 |\mathbf{Q}_{mb}|^2 = \sum_{(x,y,t) \in \text{HH}} [& \\
 \{ \mathbf{f}_R(x, y, t) - \mathbf{f}_R(x+v_{bx}(x, y, t), y+v_{by}(x, y, t), t-1) \}^2 & \\
 + \{ \mathbf{f}_G(x, y, t) - \mathbf{f}_G(x+v_{bx}(x, y, t), y+v_{by}(x, y, t), t-1) \}^2 & \\
 + \{ \mathbf{f}_B(x, y, t) - \mathbf{f}_B(x+v_{bx}(x, y, t), y+v_{by}(x, y, t), t-1) \}^2] & \quad (18)
 \end{aligned}$$

ここで , $v_{fx}(x, y, t)$, $v_{fy}(x, y, t)$, $v_{bx}(x, y, t)$, $v_{by}(x, y, t)$ は , それぞれ生成画像上の位置 (x, y) , フレーム t における前向きと後ろ向きの動きベクトルの x 成分 , y 成分を表している .

3.2.4 評価関数の最小化

生成すべき高解像度高フレームレート画像 f は , 評価関数 J の極小解として得る . 式 (12) より , $J(f)$ は f の 2 次形式であるため $J(f)$ の極小解が最小解となる . よって , ここでは f の各要素による J の偏微分が 0 となる必要条件 (式 (19)) から , 評価関数 J の最小解を求める . このとき , 式 (12) の変換 , 作用素を全て線形表現することにより , 解くべき条件は式 (20) で示す連立 1 次方程式に帰着する . 方程式の元数は総画素数 (1 フレームの画素数 \times 処理フレーム数 \times 3) となる . 連立方程式の解法には , 共役勾配法 (付録 A) を用いている³ .

³ 式 (20) の連立方程式の係数行列 (左辺中括弧内) は実対称正定値行列となるため共役勾配法が適用できる .

$$\begin{aligned}
\frac{\partial J}{\partial \mathbf{f}} &= (\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_R)^T(\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_R\mathbf{f} - \mathbf{g}_R) \\
&+ (\mathbf{H}_{HL}\mathbf{H}_G)^T(\mathbf{H}_{HL}\mathbf{H}_G\mathbf{f} - \mathbf{g}_G) + (\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_B)^T(\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_B\mathbf{f} - \mathbf{g}_B) \\
&+ \lambda_{C1}(\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C1})^T\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C1}\mathbf{f} + \lambda_{C2}(\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C2})^T\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C2}\mathbf{f} \\
&+ \lambda_{C3}(\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C3})^T\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C3}\mathbf{f} + \lambda_m(\mathbf{Q}_{mf}^T\mathbf{Q}_{mf}\mathbf{f} + \mathbf{Q}_{mb}^T\mathbf{Q}_{mb}\mathbf{f}) \\
&= \mathbf{0}.
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
&\{(\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_R)^T(\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_R) \\
&+ (\mathbf{H}_{HL}\mathbf{H}_G)^T(\mathbf{H}_{HL}\mathbf{H}_G) + (\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_B)^T(\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_B) \\
&+ \lambda_{C1}(\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C1})^T\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C1} + \lambda_{C2}(\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C2})^T\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C2} \\
&+ \lambda_{C3}(\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C3})^T\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C3} + \lambda_m(\mathbf{Q}_{mf}^T\mathbf{Q}_{mf} + \mathbf{Q}_{mb}^T\mathbf{Q}_{mb})\}\mathbf{f} \\
&= (\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_R)^T\mathbf{g}_R + (\mathbf{H}_{HL}\mathbf{H}_G)^T\mathbf{g}_G + (\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_B)^T\mathbf{g}_B
\end{aligned} \tag{20}$$

3.3 シミュレーションによる画質評価

本節では，生成画像の RGB ごとの利得の周波数特性と画質をシミュレーションにより評価した結果について述べる．

3.3.1 RGB ごとの利得の周波数特性評価

提案方式の周波数応答特性を，2.3.1 項と同様に以下の手順で評価した．

1. 正解画像となるカラーのチャープ格子動画像を用意する．カラーのチャープ格子動画像は，水平方向に RGB 画素値の空間周波数が線形に変化し，垂直方向に画素値が等しいチャープ格子画像を，水平方向に等速で動かした動画像である．チャープ格子動画像の水平位置 x の RGB 画素値 $R(x)$, $G(x)$, $B(x)$ を，それぞれ式 (21) ~ (23) に示す．

$$R(x) = A \cos\{a(x - ut)^2 + (\theta + \phi_R)\} + I_B \tag{21}$$

$$G(x) = A \cos\{a(x - ut)^2 + \theta\} + I_B \tag{22}$$

$$B(x) = A \cos\{a(x - ut)^2 + (\theta + \phi_B)\} + I_B \tag{23}$$

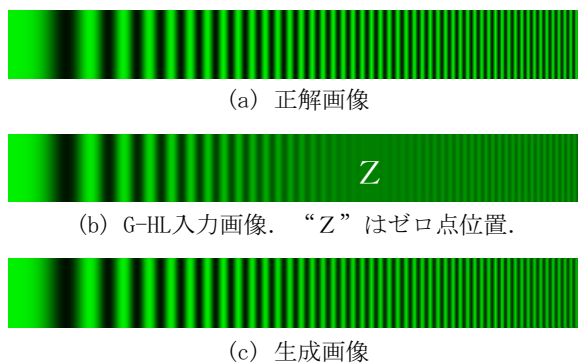


図 39 チャープ格子画像

($u=1, \phi_R=\phi_B=0, t=0$) の G 成分処理結果の例. “Z”は周波数空間のゼロ点.

ここで、周波数パラメータ a 、振幅 A 、バイアス I_B は、2.3.1 項と同様に設定している。 t はフレーム番号で、 u は水平方向の画像の速度である。 ϕ_R, ϕ_B は G の初期位相、 ϕ_R, ϕ_B は G に対する R と B の初期位相差である。実験では、 $(\phi_R, \phi_B) = (0, 0), (\pi/2, -\pi/2), (2\pi/3, -2\pi/3)$ の 3 通りの位相差の組を用いている。図 39(a) に、正解画像として用いたチャープ格子画像 ($u=1, \phi_R=\phi_B=0, t=0$, G 成分) の低空間周波数域 (サンプリング周波数の $1/4$ まで) を示す。

2. 2 種類の劣化過程 H_{HL} ($N_T = 6$), H_{LH} ($N_S = 2$) を用いて G-HL 動画像と R-LH, B-LH 動画像を生成する。図 39(b) に、図 39(a) の画像から劣化過程 H_{HL} で生成した G-HL 動画像を示す。図中の“Z”は、動き ($u=1$) と長時間露出 ($N_T = 6$) とによって生じた空間周波数上のゼロ点位置を示す。ゼロ点付近の空間周波数域では信号の振幅が減少し、正解画像の情報が失われている。
3. 2. で生成した G-HL 動画像と R-LH, B-LH 動画像を入力画像とし、提案方式によりカラー画像を生成する。
4. 3. で生成した HH 動画像と正解画像とを比較して画質を評価する。

ここで画像生成に用いる正則化重み λ_{C1} , λ_{C2} , λ_{C3} , λ_m の値は, 画質評価実験 (3.3.2項) によって PSNR が最良となるよう 1桁精度で求め, $\lambda_{C1}=0.001$, $\lambda_{C2}=\lambda_{C3}=0.01$, $\lambda_m=0.005$ としている. この値を, 本項と 3.3.2 項の全画像共通に適用している. なお, 本実験では動き u を既知としている.

図 39(c) に, 図 39(b) を含む G-HL, R-LH, B-LH 動画像から提案方式で生成した画像 (図 39(a), (b) と同領域) の G 成分を示す. 提案方式による RGB 間の相互補完効果により, 図 39(b) のゼロ点付近の振幅が復元されている.

次に, 空間周波数ごとの正解画像に対する利得を図 40 に示す. G-HL, R, B-LH 動画像, 生成画像の G と R, B 画像の利得はそれぞれ, 細実線, 細点線, 太実線, 太点線で示している. 図 40 (a) ~ (c) は $u=1$ において, (a) は位相差=0 で G と R B 間の相関が最大の場合 (モノクロ画像), (b) は位相差= $\pm \pi/2$ で G と R B が無相関の場合, (c) は位相差= $\pm 2\pi/3$ の結果で, (a) と (b) の中間的状态である. G-HL 動画像の特性 (細実線) では, 式 (12) の第 2 項および式 (14) で表現した長時間露出に伴う動きぶれで生じるゼロ点 (図 40 中の A, B, C) が, (a) ~ (c) 共通に見られる. これに対し, 図 40(a) の生成画像の G では, 拘束条件による各色画像間の補完効果で周波数特性 (太実線) は大きく向上し, ゼロ点も除かれている. 一方, RGB が無相関の図 40(b) では, 生成画像の G の周波数特性改善は小さく, 高周波域で R, B の利得が低下している. 図 40(c) は, (a) に比べて G と R B 間の相関は小さいものの, G のゼロ点付近の利得は大きく改善している. さらに, 図 40(d) ($u=0$, 位相差=0) では, R B の空間ぼけによるゼロ点 (D) 付近の利得が, G による補完効果で大きく改善している. 多くの場合, 自然画像では RGB 間に相関があるため, 提案方式による RGB 間相互の情報補完効果が有効となる.

3.3.2 カラー自然画像を用いた生成画質の評価

自然画像を用いて, 提案方式の有効性を評価した. 3.3.1 項と同じ手順で, 2.3.2 項と同じ画像をカラー画像として評価に用いた. 色の滑らかさ拘束で用いる色空間座標系は, 評価画像全体の RGB 画素値の主成分分析 (PCA) により決定した. この結果, RGB 空間における基底ベクトルは, PCA で得た固有値 [4.13, 0.255, 0.0573] の大きい順に, $[R, G, B]=[0.550, 0.574, 0.607]$, $[-0.797, 0.144, 0.587]$, $[-$

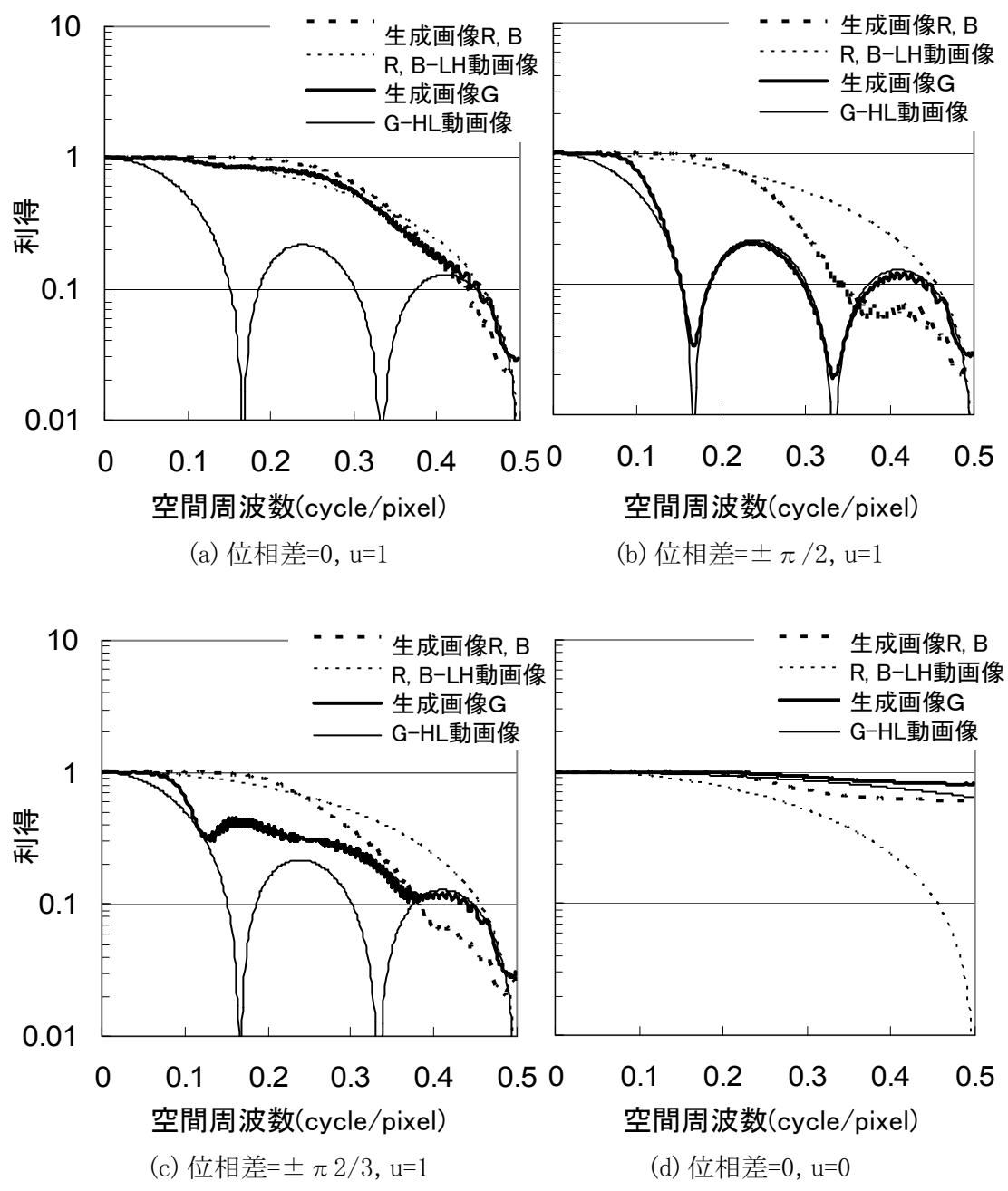


図 40 RGB ごとの利得の周波数特性

0.250, 0.806, -0.536] となった．文献 [後藤 04] の滑らかさ拘束で使われた YCbCr 色座標系 (基底ベクトル: $[R, G, B] = [0.230, 0.587, 0.114], [-0.169, -0.331, 0.500], [0.500, -0.419, -0.0813]$) に比べると, 第一主成分は Y 成分よりも RGB の寄与度が均等に近い．評価用のカラー画像の例を図 41 に示す．入出力画像間のフレーム数拡大比率 N_T および空間拡大比率 N_S は, RGB 各色の入力動画像の総画素数が等しくなるように設定した．評価画像のフレーム数は, N_T の倍数とし, 開始フレーム番号は拡大比率によらず動画像ごとに同一としている．実験で用いた N_T, N_S, N_F の組み合わせは, $(N_T, N_S, N_F) = (4, 2, 12), (6, 3 \text{ 垂直} : 2 \text{ 水平}, 18), (9, 3, 18), (16, 4, 16)$ の 4 通りである．生成した画像の評価指標には PSNR を用いた．PSNR の算出において, 平均二乗誤差は RGB の 3 色を均等に扱っている．拡大比率 $N_T=9, N_S=3$ の場合についての画像生成結果を以下に示す．図 42 に評価画像 Cognac and Fruit に対する入力画像の例を示す．図 42 は, 女性がボトルをテーブルに移動させているシーンを, 左下方向へのパン・チルトしながら撮影した画像である．図 42(a) が G-HL 動画像, (b) が R-LH 動画像, (c) が B-LH 動画像のフレーム画像である．左列の画像中の, 白線で囲んだ領域の拡大画像を右列に示している．G-HL 動画像は, 露出時間が長いいため動きぶれを含んでおり, R-LH および B-LH 動画像は空間解像度が低い．生成画像の例を図 43 に示す．

図 43(a) は図 42 の画像を入力画像として提案方式で生成した画像．(b) は G 画像を R-LH, B-LH 動画像と同じ低解像度高フレームレートの条件で撮影した画像, すなわち総画素数の等しい低解像度画像を補間拡大した画像．(c) は図 42 の入力画像を, 色ごとに正解画像の画素数とフレーム数まで時空間的に補間拡大した画像を示す．入力画像をそのまま補間拡大した場合 (図 43(c)) に比べ, 提案方式では動きぶれが低減している (図 43(a))．また, 低解像度画像の補間拡大画像 (図 43(b)) と比べて提案方式では空間解像度も向上している．図 44 に, 生成画像と補間拡大画像それぞれの PSNR を評価画像ごとに示す．図中の 3 種類の棒グラフは, 白色が提案方式の生成画像, 黒色が低解像度画像の補間拡大画像, 斜線が提案方式の入力画像を補間拡大した画像 (G は時間方向, R・B は空間内の補間拡大) の PSNR をそれぞれ示している．提案方式は, 入力画像の補間拡大に比べて全ての画像について PSNR が高い．これが入力画像に対する提案方式の相互補完



(a) Cognac and Fruit



(b) European Market



(c) Walk through the Square



(d) Yatching



(e) Winter River



(f) Swinging



(g) Japanese Room



(h) Todays Catch



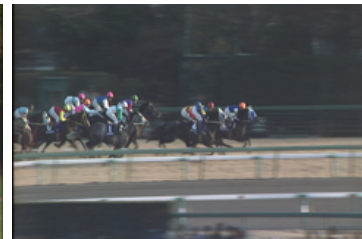
(i) Summertime Tanning



(j) Crowded Crosswalk



(k) Flamingoes



(l) Horse Race



(m) Airplane Landing

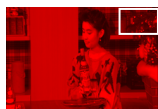


(n) Driving

図 41 評価用カラー画像の例



(a) G-H L 画像



(b) R-L H 画像



(c) B-L H 画像

図 42 入力画像の例. 右側は白線領域の拡大画像 .



(a) 提案方式による生成画像



(b) 低解像度画像の補間拡大画像



(c) 提案方式の入力画像の補間拡大画像

図 43 生成画像の例. 右側は白線領域の拡大画像 .

の効果である。また、低解像度画像の補間拡大と比べた場合も、提案手法はすべての画像で提案方式で PSNR が高く、実用性のある画質を実現している。

次に、提案方式における色の滑らかさ拘束と動き拘束の効果を比較する。図 45 に拡大比率 $N_T \cdot N_S$ の 4 通りの組み合わせに対応する 14 画像の総合 PSNR を示す。図 45 において 印は提案方式、 印は提案方式において動き拘束を除いた場合、 印は低解像度画像の補間拡大、 印は提案方式の入力画像の補間拡大結果を示す。提案方式で動き拘束を除いた場合()が、入力画像の補間拡大()と提案方式()との中間付近の PSNR を持つことから、2 種類の拘束条件のそれぞれが、ほぼ同程度に PSNR の向上に貢献していると考えられる。なお、以上の実験は PC(CPU: Intel Core 2 Quad Q6600 2.4GHz) 上のソフトウェア処理で行った。処理時間は、拡大比率を $N_T=4$, $N_S=2$ として画像生成した場合 (720 × 480 画素 × 12 フレーム), 14 ~ 19 分であった。

3.4 RGB 3 板式の試作カメラシステムによるカラー画像生成

3.4.1 3 板式カメラシステムの構成

提案方式の撮像を実現する試作カメラシステムを構築した。RGB ごとに異なる解像度・フレームレート・露出時間の画像を、同じ視点・視野で同期して撮影するために、撮像素子内の画素値加算 (オンチップビニング) が可能な同一のモノクロデジタルカメラ (IMPERX, Inc.: IPX-11M5-LM) 3 台を用いた。対物レンズ (富士フィルム株式会社: CM FUJINON CM Wide 1F5.6/105mm) を通した入射光を、赤と青を反射する 2 種類のダイクロイックミラー (中央精機株式会社: FDS-050-R, FDS-050-B) で色分離し、3 台のカメラでそれぞれ RGB 画像を撮影している (図 46)。同期撮影した画像は、ビデオキャプチャを介して PC に記録する。各カメラの撮像条件を表 2 に示す。フレーム数拡大比率 N_T および空間拡大比率 N_S は、それぞれ 4 と 2 に設定している。

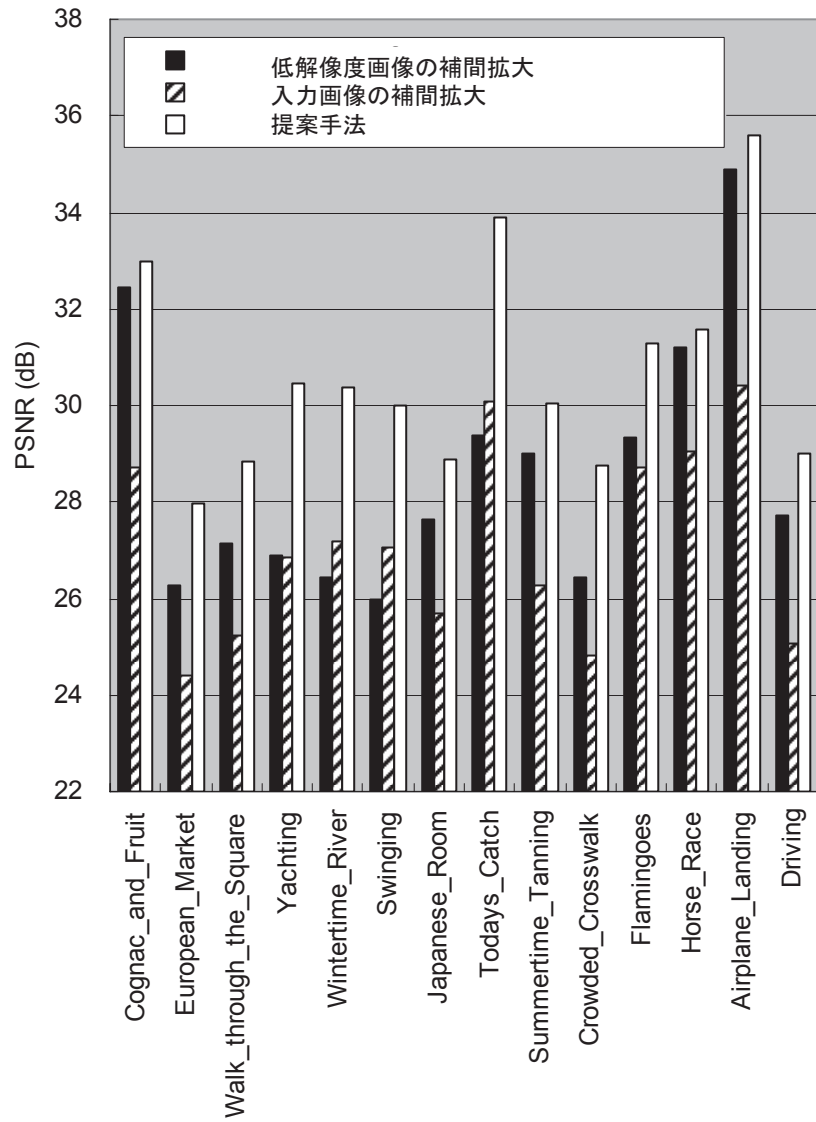


図 44 評価画像ごとの PSNR($N_T=6$, $N_S=3$)

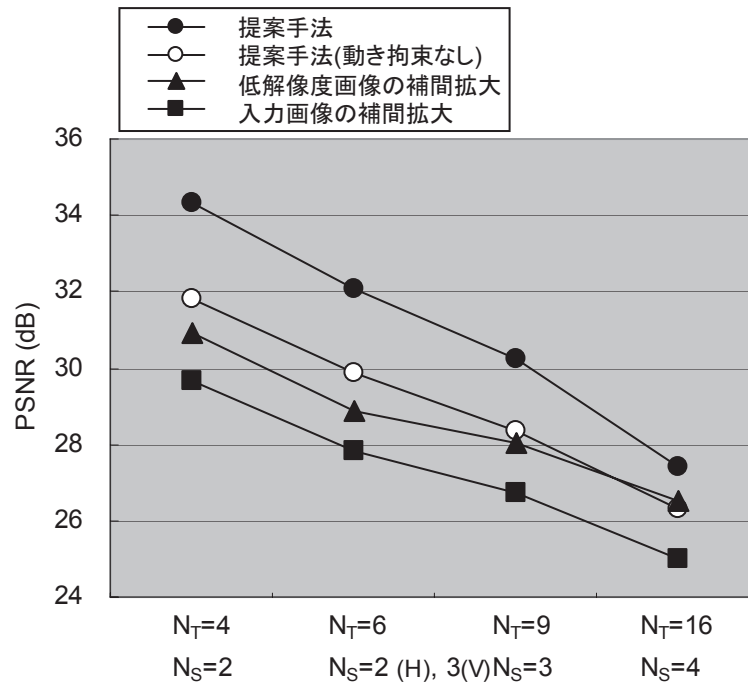


図 45 拡大比率ごとの PSNR

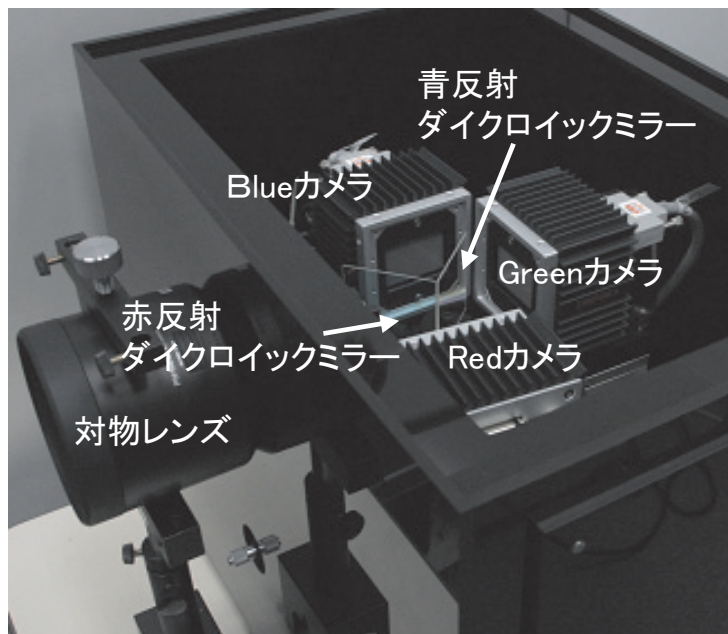


図 46 試作カメラシステムの構成

表 2 3 板式カメラシステムの撮像条件

	画素数 (横 × 縦)	フレームレート (fps)	露出時間 (ms)
Red カメラ	2000 × 1000	8	125
Green カメラ	4000 × 2000	2	500
Blue カメラ	2000 × 1000	8	125

3.4.2 3 カメラ間の輝度補正

ダイクロイックミラーの組合せによる透過率波長特性を図 47 に示す。3.2.3 項で述べた露出時間や集光面積の差異による RGB 間の光量不均衡とは別に、ミラーの透過率波長特性や受光センサの感度波長特性、光源スペクトルによっても RGB 間の光量不均衡は生じる。これを解消するために、通常のカメラと同様、ホワイトバランス補正を行った。補正に必要な補正值 (RGB 間のオフセットの差と利得の比) は、あらかじめ撮影用光源下で白色拡散板を撮影して画素ごとに得た。ホワイトバランス補正後に次項で説明する位置合わせを行い、画像生成に用いた。

3.4.3 3 カメラ間の画像の位置合わせ

試作カメラシステムにおける 3 カメラ間の画像の位置合わせについて説明する。提案手法では、3 カメラの画像間の相対的位置関係が、劣化過程 (式 (13), 式 (14)) により定まる。試作カメラでこの位置関係を満たすためには、HL 動画像の画素精度で両画像の位置を合わせる必要がある。そこで、試作カラーカメラシステムでは、2.4.3 項と同様の手順で 3 カメラの画像間の位置合わせを行った。

3.4.4 3 板式カメラシステムによる画像生成

カメラシステムを用いて撮影した画像の例を図 48 に示す。図 46 の撮像システムで撮影した画像から 4000 × 2000 画素の画像を生成できるが、ここでは画像

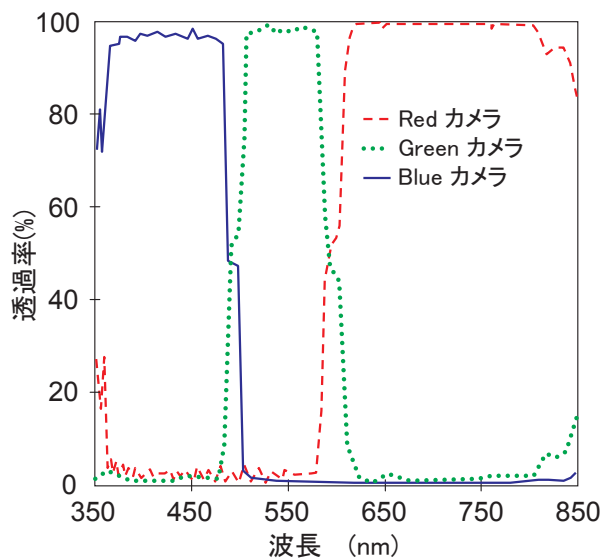


図 47 光学系の透過率波長特性 .

の詳細が確認できるように、G-HL 画像で 720×480 画素の領域を切り出している。図 48 の映像では、静止背景の前で回転台上の人形が水平に回転している。図 48(a) は G-HL 動画像 (720×480 画素) で動きぶれを含んでいる。図 48(b), (c) は、それぞれ R-LH, B-LH 動画像 (360×240 画素) で、G-HL に対し、オンチップビニングにより $1/2$ の低解像度画像となっている。図 49 は、図 48 の入力画像を用いて提案方式により生成したカラー画像である。生成画像では入力 of G-HL 動画像に比べて動きぶれが低減しており、R-LH・B-LH 動画像に比べて解像度が向上している。なお、図 49 の生成画像では、動きのある人形の色境界付近で色ずれ (緑色、マゼンタ色) が残っている。3.3.2 項のシミュレーション実験では、このような色ずれは目立たなかったことから、画像生成に用いた長時間露出の劣化過程のモデルと試作カメラシステムの撮影条件との間に誤差が生じていたことが考えられる。図 50 に通常の撮像方式による撮影画像を示す。図 50(a) は高解像度短時間露出の撮影画像で、RGB 全て G-HL 動画像と同じ解像度かつ、R-LH, B-LH 動画像と同じ露出時間で撮影している。動きぶれが生じないように露出時間を短くした場合、露光量不足で暗い画像となる。一方、図 50(b) は高解像度長時間露出の撮影画像で、RGB 全て G-HL と同じ解像度・露出時間である。露出時間を長く

すると露光量は確保できるものの，被写体動きによる動きぶれが生じる．

3.5 考察

カラー拡張した提案方式について考察する．2章の2種類のモノクロ画像を用いた方式と共通する項目は，4章で考察する．

RGB 間の相互補完効果

提案方式における RGB 間の相互補完の効果は，周波数空間では 3.3.1 項の周波数特性の改善として観察され，実空間では 3.3.2 項の PSNR 向上として現れている．補完処理で使用する正則化パラメータ値や PCA による色座標系は，3.3.2 項では固定しているが，被写体に応じてこれらを動的に制御することでさらなる補完効果の改善が望める．

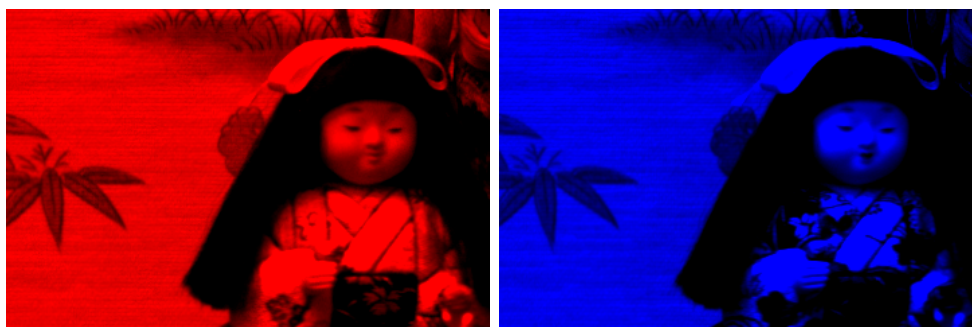
RGB 間の関係性

提案手法は，RGB 画像間の時空間的な関係性を仮定している．もし，R や B 画像が G 画像と独立であれば相互補完効果が得られず，時空間高解像度化は難しい．このような状態は，光源スペクトルや被写体の反射率スペクトルが狭帯域の場合に起こり得る．しかし，多くの自然画像において光源スペクトルや被写体の反射率スペクトルは一定の広がりを持つため，同一の被写体を写した RGB 画像間に関係性がある．

また，光源スペクトルや被写体の反射率スペクトルが狭帯域の場合でも，撮影に用いるカラーフィルターの透過率スペクトル特性が RGB 間でオーバーラップしていれば (図 47)，得られる RGB 画像に相関が生じる．カラーフィルターの透過率スペクトルは，一般に色の再現性や露光量に関与するが，提案手法では更に生成画像の画質にも関連するため，これらの条件の最適設計も重要である．



(a) G-HL 動画像 (720 × 480 画素)



(b) R-LH 動画像 (360 × 240 画素) (c) B-LH 動画像 (360 × 240 画素)

図 48 試作カメラシステムによる撮影画像の例



図 49 試作カメラシステムの画像から生成した画像の例 (720 × 480 画素)

3.6 結言

本章では、高解像度高フレームレートのカラー画像取得と露光量確保を両立する方式を提案した。提案方式では、露出時間を長くした G 画像と、画素面積を大きくした低解像度高フレームレートの R・B 画像で露光量を確保し、読み取りデータ量を抑えて撮影した。撮影した画像に対し、RGB 間に時空間拘束条件を設け、時空間周波数特性の異なる各色画像間で時空間情報を相互に補完することで、高解像度高フレームレートのカラー画像を生成した。シミュレーション実験および試作カメラシステムにより、G 画像の動きぶれの抑制、RB 画像の高解像度化、RGB 相互のゼロ点情報の補完効果を検証し、提案方式の有効性を示した。



(a) 高解像度短時間露出の画像 (720 × 480 画素)



(b) 高解像度長時間露出の画像 (720 × 480 画素)

図 50 従来方式の撮影画像の例 .

4. 考察

本節では、2種類のモノクロ画像を用いた方式(2章)と、これをRGB 3板画像に拡張した方式(3章)に共通な項目として、動き検出、低解像度高フレームレート画像の動きぶれ、入力画像の時空間周波数特性、画像圧縮、演算処理の高速化について考察する。

4.1 動き検出

提案手法では、空間的に密な動きベクトルを得るために、ブロックマッチングベースの動き検出 [Ana89] を用い、明確な特徴点が無い場合でも対応点を検出している。ブロックマッチングを用いた動き検出では、動き領域の境界付近や、回転を含む動きや、ブロックサイズよりも小さな領域の動きを含む場合などに検出精度が落ちる。この点については、特徴点ベースの動き検出 (Harris オペレータ [HS88], Kanade Lucas Tomasi(KLT) 法 [TK91], Scale Invariant Feature Transform(SIFT) 特徴量 [Low04] などを用いたマッチングを併用することで、上記のような領域での動き検出精度を上げることが可能である。

提案手法では低解像度高フレームレート画像からのみ動き検出を行っているが、1.3.2 項で述べたような動きぶれの PSF 推定手法を用いることで、高解像度低フレームレート画像から動きを求めて併用することも可能である。この場合、3.2 節のように色ごとに解像度を変えた撮影において、動き検出に用いる RB 画像の色成分が少ない被写体に対する動き検出精度を改善できる。

また、提案手法では、目的とする高解像度の生成画像上で定義する動き拘束を、入力画像(低解像度高フレームレート画像)の動きを用いて設定している。すなわち、(1) 低解像度画像からの動き検出と (2) 動き検出に基づいた画像生成は逐次処理となる。このため、(1) において解像度が低いことに起因する検出誤差は、(2) の処理に全て影響する。この影響を低減させるためには、動きと生成画像を同時に推定することが望ましい。これと同様な課題に対し、後藤らは動き検出とレジストレーションの同時推定 [後藤 07] を試みている。文献 [後藤 07] では、動き検出とレジストレーションを交互に行っている。このような交互処理による最適化

は，最適解への収束性は一般に保証されないが，最適解付近に初期解を設定できれば，提案手法に適用し，動き検出と画像生成の繰り返し処理による画質向上が期待できる．また，交互処理を用いない方法としては，画像生成の評価関数に動き検出を統合して画像と動きを同時推定し，逐次処理による局所解への落ち込みを回避するアプローチが考えられる．この場合，最適化すべき評価関数は必ずしも2次形式になるとは限らず，関数形状に合わせた最適化手法も必要になる．

4.2 低解像度高フレームレート画像の動きぶれ

提案手法では，高解像度低フレームレート画像の動きぶれ除去は行っているが，低解像度高フレームレート画像に含まれる動きぶれ除去は行っていない(3.2.2項)．動画像に含まれる動きぶれは主観的な先鋭感を高める効果がある(motion sharpening) [RRV74]，[BES95]，[TDV05]．従って，生成画像におけるぶれ除去の必要性やその程度は生成画像の鑑賞目的や表示条件に依存して選択することが望ましい．

仮に，提案手法の高フレームレート画像に含まれる動きぶれを除去する必要があるならば，生成した画像に対し，[FS04]，[BJNP06]，[BBRS07]，[CML07]などの動きぶれを含む画像シーケンスからのぶれ除去手法を適用することができる．また，提案手法において，式(1)，式(12)の劣化過程 H_{HL} や H_{LH} に高フレームレート画像の動きぶれに対応する劣化を追加することで，動きぶれを除いた画像を直接生成することも可能である．

また，視覚的に先鋭感を高められるような動きぶれのみが残るように，入力画像の撮影条件(解像度・露出時間・フレームレート)や画像生成処理のパラメータを設定することで，後処理としての動きぶれ除去を省略でき，演算量やアーティファクトの発生低減効果が期待できる．

4.3 入力画像の時空間周波数特性

提案手法の入力画像の時空間周波数特性について考察する．図51に入力画像と人の視覚のコントラスト感度関数の時空間特性を示す．図の縦軸は対数時間周

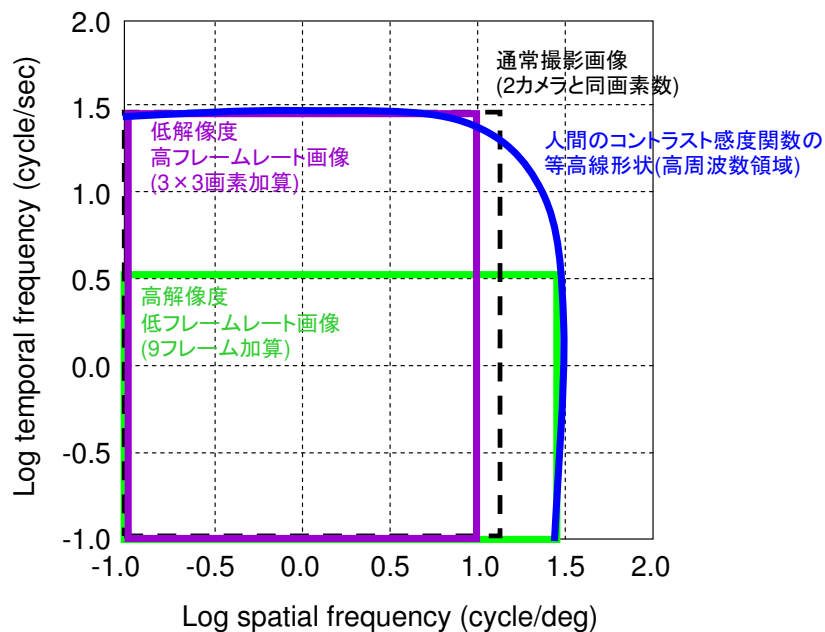


図 51 入力画像とコントラスト感度の時空間特性

波数軸，横軸は対数空間周波数軸である．図 51 の紫色の矩形と緑色の矩形は，それぞれ提案手法 (拡大比率 $N_T=9$, $N_S=3$) の入力画像の LH 動画像と HL 動画像の周波数の範囲を示す．ここで，LH 動画像の時間周波数と空間周波数の上限がそれぞれ $30(\text{cycle/sec})$, $10(\text{cycle/deg})$ となるように図示している．黒色の破線の矩形は LH 動画像と同じフレームレートで，単位時間あたりの入力画素数が LH 動画像と HL 動画像の和に等しい動画像の周波数の範囲を示している．また，青色の太線は人のコントラスト感度関数の高周波数領域での等高線の概形 [Dal98] を示したものである．人の視覚では，コントラストの空間周波数が高い場合，知覚できる時間周波数は低下する．

提案手法で用いる 2 種類の解像度の入力画像では，単位時間あたりの画素数が等しい通常方式の撮影に比べ，高空間解像度低時間周波数の情報を優先して得ている．これは，視覚のコントラスト感度関数の特性形状に整合する．

本論文の実験では時空間解像度が異なる入力画像の単位時間あたりの入力画素数を同一にし，限られた拡大率の組み合わせでのみ実験を行ったが，これらの設定をコントラスト感度関数の形状に合わせて設定することで，さらにコントラス

ト感度の高い周波数領域を効率よく撮影することが可能になる。

4.4 画像圧縮

提案方式を画像圧縮の視点から考察する。提案手法の撮影では、図 51 のように、時空間ともに高周波数の領域よりも、時空間の一方の周波数が高い領域を優先した画像を得ている。また、2.3.1 項や 3.3.1 項の周波数特性の実験結果から、生成画像についても時空間ともに高周波数の画像よりも、時空間の一方の周波数が高い画像の再現性が高い。

一方、デジタル動画像では、多画素化や無線通信などの狭帯域通信に対応するため、圧縮符号化の高圧縮率化が進んできた [H261[CCI90], MPEG1[MPG1], MPEG2[IS00], H263[IS96], MPEG4[MPG4], H.264[IS03]]。これら動画像圧縮符号化では、人間の視覚において高時空間周波数成分が知覚されにくいことを利用し、これらの情報を削減することで圧縮率を向上させている。提案手法では、このような圧縮符号化と同様の作用を撮影時に行っていると解釈することができる。これは、近年研究が進んでいる Compressed Sensing([Don06], [CRT06], [CT06], [WLD+06], [PBP+06], [LDP07]) の考え方にも合致する。画像圧縮や効率的なサンプリングという観点に基づけば、被写体の情報をできるだけ損失しないように、色ごとの時空間解像度を選択することが望ましい。

4.5 演算処理の高速化

並列演算

ソフトウェアによる提案手法の画像生成では処理時間が大きな問題となる。3.3.2 項の実験例では、処理時間が撮影時間の 1000 倍以上になる。処理時間の大部分は、2.2.2 項の評価関数 (式 (1)) や、3.2.2 項の評価関数 (式 (12)) の最小化が占める。この最小化は、連立一次方程式 (7), 式 (19) を解くための行列演算から成る。これらの演算は、主に行列・ベクトル積、ベクトル積の演算から成り (付録 A), 行列

演算が並列計算できることと、行列の非ゼロの要素が疎で局在することを利用し、大幅な高速化が可能となる。

このような並列演算の実現性については、サーバ PC 向けの CPU のマルチコア化 [Die99] からパーソナル PC 向け CPU、さらに情報家電、組み込み分野へと、マイクロプロセッサのマルチコア化が進んでいる [木村 06], [PAB⁺06],[GS05]。また、高速高精細の画像描画を実現するために演算の並列化を進めてきた Graphics Processing Unit(GPU) を、汎用計算の目的で利用する General-Purpose computation on GPUs(GPGPU) の利用環境が民生向けに実用化されてきた。このようなアーキテクチャを用いた高速な画像処理の可能性が示されている [KTK05]。本論文では、4 つの演算コアを持つ CPU(Intel:Core 2 Quad) を用い、並列演算を一部に取り入れて処理したが、上記のような並列演算環境への適用や、並列演算の専用回路化によって、さらに大幅な高速化が可能である。

メモリアクセス

提案手法では動き検出結果に基づく拘束条件を使用するため、あるフレーム画像の処理中に別のフレーム画像へのアクセスが発生する。さらに動き拘束は、画像に依存して変化するため、メモリアクセスはランダムアクセスとなる。画像はメモリ上で一次元展開されて格納されるため、上記のようなメモリアクセスを高速に行うためには、フレーム画像サイズおよび想定される動きの範囲を含み得るキャッシュメモリが必要になる。また、メモリ上の画像配置を空間領域ごとに分けて、メモリ上のフレーム間配置を近づけることや、演算モジュールの分散化に合わせてメモリを分散配置することが望ましい。

5. 結論

5.1 本論文のまとめ

本論文では、微細化した撮像素子による時空間高解像度撮影において、露光量の確保と高解像度撮影を両立するため、異なる時空間解像度を持つ2種類の画像で、それぞれ時間と空間方向に光量確保し、読み取りデータ量を抑えて撮影した後、時空間情報を相互補完し、時空間高解像度化した画像を得る方式を提案した。モノクロ画像を用いたシミュレーション実験および試作カメラシステムにより動きぶれの抑制と時空間情報の相互補完の効果を検証し、提案方式の有効性を確認した。

さらに、この方式をカラー撮影に拡張し、光の利用効率を高めるために、波長分離型の光学系を利用し、露出時間を長くしたG画像と、画素面積を大きくした低解像度高フレームレートのR・B画像を用いて露光量を確保した。RGB間に時空間拘束条件を設け、時空間周波数特性の異なる各色画像間で時空間情報を相互に補完することで、高解像度高フレームレートのカラー画像を生成した。カラー画像を用いたシミュレーション実験および試作カメラシステムにより、動きぶれの抑制とRGB相互のゼロ点情報の補完効果を検証し、提案方式の有効性を示した。

5.2 今後の展望

現在、デジタルスチルカメラの高解像度化に続き、動画画像の高解像度化も進んでいる。ハイビジョンカメラに続く4K2K⁴以降の動画撮影カメラの小型化には、光量不足の問題解決が必須である。これに対し、提案手法を適用するためには、時空間解像度の異なる画像を同時撮影する小型撮像デバイスや、画像処理部のハードウェア実装が必要になる。今後、撮像デバイスについては、多くのデジタルカメラで用いられているCFAを用いた単板撮像素子への適用や、提案方式の撮影に適した撮像素子構造について検討する。また、画像生成処理については、生成

⁴ 4000 × 2000 画素級の動画画像の通称。

画質の向上を図るとともに、Field Programmable Gate Array (FPGA) 等を用いて並列処理による実装検討を行い、小型高解像度のビデオカメラの実現を目指す。

謝辞

本研究の機会を与えていただき，懇切なるご指導，ご鞭撻を賜りました視覚情報メディア講座 横矢 直和教授に心より感謝申し上げます．また，本研究をまとめるにあたり，ご指導頂きました像情報処理学講座 千原 國宏教授に厚く御礼申し上げます．同じく本研究をまとめるにあたり，ご指導頂きました視覚情報メディア講座 山澤 一誠准教授に厚く御礼申し上げます．

本研究では全過程を通じ，ご指導頂きました視覚情報メディア講座 佐藤 智和助教に深く感謝申し上げます．同じく，本研究の推進に関し，ご支援を頂きました視覚情報メディア講座 神原 誠之助教に感謝申し上げます．また，研究室での研究活動を支えていただきました視覚情報メディア講座 前事務補佐員 守屋 知代氏，事務補佐員 高橋 美央氏に感謝申し上げます．研究室での活動に協力いただきました視覚情報メディア講座の諸氏にも深く御礼申し上げます．

加えて，本研究の機会を与えていただくとともに，研究の推進にあたり，有益なご助言・ご助力を頂きましたパナソニック（株）先端技術研究所技監 丸野 進氏，五感処理研究グループマネージャ 菰淵 寛仁氏，動画超解像プロジェクトリーダー 吾妻 健夫氏に心より感謝申し上げます．ソフトウェア実装・評価実験にご協力頂きましたパナソニック情報システム（株）寺本 晶氏，井口 詩乃氏に心より感謝いたします．また，本研究の全過程を通じ有益なご助言，実験への支援を頂きました五感処理研究グループ 主幹研究員 登 一生氏，戦略企画室 主幹研究員 本村 秀人氏に御礼申し上げます．最後に，日ごろの研究活動に，ご支援頂きました五感処理研究グループ諸氏に深く感謝いたします．

参考文献

- [Ana89] P. Anandan. A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion. *International Journal of Computer Vision*, 2(3):283–310, 1989.
- [AOYO06] J. Arai, M. Okui, T. Yamashita, and F. Okano. Integral three-dimensional television using a 2000-scanning-line video system. *Applied optics*, 45(8):1704–1712, 2006.
- [BBRS07] L. Bar, B. Berkels, M. Rumpf, and G. Sapiro. A Variational Framework for Simultaneous Motion Estimation and Restoration of Motion-Blurred Video. In *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Vision*, pages 1–8, 2007.
- [BBZ96] B. Bascle, A. Blake, and A. Zisserman. Motion Deblurring and Super-resolution from an Image Sequence. In *Proceedings of the 4th European Conference on Computer Vision*, pages 573–582, 1996.
- [BEN04] M. Ben-Ezra and S.K. Nayar. Motion-based motion deblurring. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(6):689–698, 2004.
- [BES95] P.J. Bex, G.K. Edgar, and A.T. Smith. Sharpening of drifting, blurred images. *Vision Research*, 35(18):2539–2546, 1995.
- [BEZN05] M. Ben-Ezra, A. Zomet, and S.K. Nayar. Video super-resolution using controlled subpixel detector shifts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(6):977–987, 2005.
- [BJNP06] J. Bardsley, S. Jefferies, J. Nagy, and R. Plemmons. Blind iterative restoration of images with spatially-varying blur. *Optics Express*, 14:1767–1782, 2006.

- [BK00] S. Baker and T. Kanade. Hallucinating faces. In *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, pages 83–88, 2000.
- [BK02] S. Baker and T. Kanade. Limits on super-resolution and how to break them. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(9):1167–1183, 2002.
- [BR94] R. Barrett and C. Romine. *Templates for the solution of linear systems: building blocks for iterative methods*, chapter Data Structure, pages 63–68. Society for Industrial Mathematics, 1994.
- [BS70] W.S. Boyle and G.E. Smith. Charge-coupled semiconductor devices. *Bell System Technical Journal*, pages 587–593, 1970.
- [BSK04] L. Bar, N. Sochen, and N. Kiryati. Variational pairing of image segmentation and blind restoration. *Lecture Notes in Computer Science*, 3022:166–177, 2004.
- [BSWZ94] M. Berthod, H. Shekarforoush, M. Werman, and J. Zerubia. Reconstruction of high resolution 3D visual information. In *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 654–654, 1994.
- [BT.95] ITU-R Recommendation BT.601-5. Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios, 1995.
- [CCI90] CCITT. Recommendation H.261 - Video Codec for Audiovisual Services at px 64 kbit/s. *The International Telegraph and Telephone Consultative Committee*, 1990.
- [CKK⁺96] P. Cheeseman, B. Kanefsky, R. Kraft, J. Stutz, and R. Hanson. Super-resolved surface reconstruction from multiple images. In

Proceedings of the Thirteenth International Workshop on Maximum Entropy and Bayesian Methods, page 293, 1996.

- [CLE⁺07] K.B. Cho, C. Lee, S. Eikedal, A. Baum, J. Jiang, C. Xu, X. Fan, and R. Kauffman. A 1/2.5 inch 8.1 Mpixel CMOS image sensor for digital cameras. In *IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers*, pages 508–618, 2007.
- [CML07] S. Cho, Y. Matsushita, and S. Lee. Removing non-uniform motion blur from images. In *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Vision*, pages 1–8, 2007.
- [COR] CORPUS CORPORATION. ピンぼけ・手ぶれレスキュー.
http://www.corpus.co.jp/products/ptr_4/index.html.
- [CPZ98] P. Ciaccia, M. Patella, and P. Zezula. Processing complex similarity queries with distance-based access methods. *Lecture Notes in Computer Science*, 1377:9–23, 1998.
- [CQL05] M. Chen, G. Qiu, and K.M. Lam. Example selective and order independent learning-based image super-resolution. In *Proceedings of International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, pages 77–80, 2005.
- [CRT06] E.J. Candes, J. Romberg, and T. Tao. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(2):489–509, 2006.
- [CT03] P. Choudhury and J. Tumblin. The trilateral filter for high contrast images and meshes. In *Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering*, pages 186–196, 2003.

- [CT06] E.J. Candes and T. Tao. Near-optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies? *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(12):5406–5425, 2006.
- [Dal98] S.J. Daly. Engineering observations from spatiovelocity and spatiotemporal visual models. In *Proceedings of SPIE*, volume 3299, pages 180–191, 1998.
- [DC95] E.R. Dowski, Jr and W.T. Cathey. Extended depth of field through wave-front coding. *Applied Optics*, 34(11):1859–1866, 1995.
- [Die99] K. Diefendorff. Power4 focuses on memory bandwidth. *Microprocessor Report*, 13(13):1–8, 1999.
- [Don06] D.L. Donoho. Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(4):1289–1306, 2006.
- [EF97] M. Elad and A. Feuer. Restoration of a single superresolution image from several blurred, noisy, and undersampled measured images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(12):1646–1658, 1997.
- [EF99] M. Elad and A. Feuer. Superresolution restoration of an image sequence: adaptive filtering approach. *IEEE Transactions on Image Processing*, 8(3):387–395, 1999.
- [FJP02] W.T. Freeman, T.R. Jones, and E.C. Pasztor. Example-Based Super-Resolution. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 22(2):56–65, 2002.
- [FREM04] S. Farsiu, MD Robinson, M. Elad, and P. Milanfar. Fast and robust multiframe super resolution. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(10):1327–1344, 2004.

- [FS04] P. Favaro and S. Soatto. A variational approach to scene reconstruction and image segmentation from motion-blur cues. In *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 1, pages 631–637, 2004.
- [FSH⁺06] R. Fergus, B. Singh, A. Hertzmann, S.T. Roweis, and W.T. Freeman. Removing camera shake from a single photograph. In *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, page 794, 2006.
- [GS05] J. Goodacre and A.N. Sloss. Parallelism and the ARM instruction set architecture. *Computer*, 38(7):42–50, 2005.
- [HBA97] R.C. Hardie, K.J. Barnard, and E.E. Armstrong. Joint MAP registration and high-resolution image estimation using a sequence of undersampled images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(12):1621–1633, 1997.
- [HGG⁺97] S.E. Holland, G. Goldhaber, D.E. Groom, W.W. Moses, C.R. Penypacker, S. Perlmutter, N.W. Wang, R.J. Stover, and M. Wei. Development of back-illuminated, fully-depleted CCD image sensors for use in astronomy and astrophysics. In *IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors*, number R26, 1997.
- [HK01] J.K. Han and H.M. Kim. Modified cubic convolution scaler with minimum loss of information. *Optical Engineering*, 40:540, 2001.
- [HS88] C. Harris and M. Stephens. A combined corner and edge detector. In *Proceedings of Alvey Vision Conference*, volume 15, page 50, 1988.
- [IMO⁺06] S. Iwabuchi, Y. Maruyama, Y. Ohgishi, M. Muramatsu, N. Karasawa, and T. Hirayama. A Back-Illuminated High-Sensitivity

- Small-Pixel Color CMOS Image Sensor with Flexible Layout of Metal Wiring. In *IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2006. Digest of Technical Papers*, pages 1171–1178, 2006.
- [IP91] M. Irani and S. Peleg. Improving resolution by image registration. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 53(3):231–239, 1991.
- [IP92] M. Irani and S. Peleg. Image sequence enhancement using multiple motions analysis. In *Proceedings of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 1992*, pages 216–221, 1992.
- [IP93] M. Irani and S. Peleg. Motion analysis for image enhancement: Resolution, occlusion, and transparency. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 4(4):1993–12, 1993.
- [IS96] ITU-T Recommendation H.263 IS. Video codec for low bit rate communication, 1996.
- [IS00] ITU-T Recommendation H.262 IS(MPEG-2). Information technology-Generic coding of moving pictures and associated audio information : Video, 2000.
- [IS03] ITU-T Recommendation H.264 IS. Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services, 2003.
- [ITE] (社)映像情報メディア学会. テレビジョン・システム評価用テストチャート. http://www.ite.or.jp/shuppan/testchart_index.html.
- [KBV90] S.P. Kim, N.K. Bose, and H.M. Valenzuela. Recursive reconstruction of high resolution image from noisy undersampled multiframe. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 38(6):1013–1027, 1990.

- [Key81] R. Keys. Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 29(6):1153–1160, 1981.
- [KH96] D. Kundur and D. Hatzinakos. Blind image deconvolution. *IEEE Signal Processing Magazine*, 13(3):43–64, 1996.
- [KIAS93] T. Komatsu, T. Igarashi, K. Aizawa, and T. Saito. Very high resolution imaging scheme with multiple different-aperture cameras. *Signal Processing. Image communication*, 5(5-6):511–526, 1993.
- [KIM⁺06] M. Kasano, Y. Inaba, M. Mori, S. Kasuga, T. Murata, and T. Yamaguchi. A 2.0- μm pixel pitch MOS image sensor with 1.5 transistor/pixel and an amorphous Si color filter. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 53(4):611–617, 2006.
- [KMH⁺05] M. Kanazawa, K. Mitani, K. Hamasaki, M. Sugawara, and F. Okano. Super Hi-Vision theater at Expo'05. In *IEICE The First International Workshop on Image Media Quality and its Applications*, pages 45–49, 2005.
- [KPB88] D. Keren, S. Peleg, and R. Brada. Image sequence enhancement using sub-pixel displacements. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 742–746, 1988.
- [KS93] S.P. Kim and W.Y. Su. Recursive high-resolution reconstruction of blurred multiframeimages. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2(4):534–539, 1993.
- [KS07] T. Komatsu and T. Saito. Sharpening-Demosaicing Method Using Total-Variation Regularization. *The Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers*, 61(11):1621–1632, 2007.

- [KTK05] T. Kikuchi, M. Takahashi, and A. Kuroda. State of the arts and future of gpu computing. *The Journal of the Society for Art and Science*, 4(1):13–19, 2005.
- [KUDC07] J. Kopf, M. Uyttendaele, O. Deussen, and M.F. Cohen. Capturing and viewing gigapixel images. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3):93, 2007.
- [LDP07] M. Lustig, D. Donoho, and J.M. Pauly. Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging. *Magnetic Resonance in Medicine*, 58(6):1182–1195, 2007.
- [Lev07] A. Levin. Blind motion deblurring using image statistics. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 19:841, 2007.
- [LFDF07] A. Levin, R. Fergus, F. Durand, and W.T. Freeman. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture. In *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 2007.
- [Low04] D.G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2):91–110, 2004.
- [LS04] Z. Lin and H.Y. Shum. Fundamental limits of reconstruction-based superresolution algorithms under local translation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(1):83–97, 2004.
- [Lu97] N. Lu. Fractal Blowup. In *Fractal Imaging*, pages 217–222. Academic Press, 1997.

- [Mor06] Morpho, Inc. PhotoSolid . <http://www.morphoinc.com/PressRelease/2006/N902is-20060822.pdf>, 2006.
- [MP94] S. Mann and R.W. Picard. Virtual bellows: Constructing high quality stills from video. In *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, volume 1, pages 363–367, 1994.
- [MPG1] ISO/IEC JTC1 IS 11172(MPEG-1). Coding of moving picture and coding of continuous audio for digital storage media up to about 1.5Mbps, 1992.
- [MPG4] ISO/IEC 14386(MPEG-4). Information technology- Coding of audio-visual objects, 2000.
- [NB03] S.K. Nayar and V. Branzoi. Adaptive Dynamic Range Imaging: Optical Control of Pixel Exposures over Space and Time. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 1168–1175, 2003.
- [Ng05] R. Ng. Fourier slice photography. In *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 735–744, 2005.
- [NLLK05] H. Noh, K. Lee, D. Lee, and K. Kim. The Design and Characterization of CMOS Image Sensor with Active Pixel Array of 2.0 μm Pitch and Beyond. In *IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors*, pages 197–200, 2005.
- [ONN⁺00] S. Okamoto, M. Nakagawa, K. Nobori, A. Morimura, T. Okada, S. Masuda, and Y. Fujita. Development of Parking Assistance System Using Virtual Viewpoint Image Synthesis. In *Proceedings of the 7th ITS International Conference*, page 3075, 2000.

- [OTY⁺08] K. Onozawa, K. Toshikiyo, T. Yogo, M. Ishii, K. Yamanaka, T. Matsuno, and D. Ueda. A MOS Image Sensor With a Digital-Microlens. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 55(4):986–991, 2008.
- [PAB⁺06] D.C. Pham, T. Aipperspach, D. Boerstler, M. Bolliger, R. Chaudhry, D. Cox, P. Harvey, P.M. Harvey, H.P. Hofstee, and C. Johns. Overview of the architecture, circuit design, and physical implementation of a first-generation cell processor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 41(1):179–196, 2006.
- [Pai05] B. Pain. Fabrication and Initial Results for a Back-illuminated Monolithic APS in a mixed SOI/Bulk CMOS Technology. In *Proceedings of IEEE Workshop on CCD and Advanced Image Sensors*, pages 102–104, 2005.
- [PBP⁺06] N.P. Pitsianis, D.J. Brady, A. Portnoy, X. Sun, T. Suleski, M.A. Fiddy, M.R. Feldman, and R.D. TeKolste. Compressive imaging sensors. In *Proceedings of SPIE*, volume 6232, page 62320A, 2006.
- [PCN⁺05] B. Pain, T. Cunningham, S. Nikzad, M. Hoenk, T. Jones, C. Wrigley, and B. Hancock. A back-illuminated megapixel CMOS image sensor. In *Proceedings of IEEE Workshop on CCD and Advanced Image Sensors*, pages 35–38, 2005.
- [PKS87] S. Peleg, D. Keren, and L. Schweitzer. Improving image resolution using subpixel motion. *Pattern Recognition Letters*, 5(3):223–226, 1987.
- [PSA⁺04] G. Petschnigg, R. Szeliski, M. Agrawala, M. Cohen, H. Hoppe, and K. Toyama. Digital photography with flash and no-flash image pairs. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3):664–672, 2004.

- [PSC88] Z.D. Popovic, R.A. Sprague, and G.A.N. Connell. Technique for monolithic fabrication of microlens arrays. *Applied optics*, 27(7):1281–1284, 1988.
- [PST97] A.J. Patti, M.I. Sezan, and A.M. Tekalp. Superresolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time. *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(8):1064–1076, 1997.
- [RAP05] A. Rav-Acha and S. Peleg. Two motion-blurred images are better than one. *Pattern Recognition Letters*, 26:311–317, 2005.
- [RAT06] R. Raskar, A. Agrawal, and J. Tumblin. Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter. In *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, volume 25, pages 795–804, 2006.
- [RRV74] V.S. Ramachandran, V.M. Rao, and T.R. Vidyasagar. Sharpness constancy during movement perception. *Perception*, 3(1):97–98, 1974.
- [SBZW96] H. Shekarforoush, M. Berthod, J. Zerubia, and M. Werman. Sub-pixel bayesian estimation of albedo and height. *International Journal of Computer Vision*, 19(3):289–300, 1996.
- [SCI05] E. Shechtman, Y. Caspi, and M. Irani. Space-time super-resolution. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(4):531–545, 2005.
- [SO89] H. Stark and P. Oskoui. High-resolution image recovery from image-plane arrays, using convex projections. *Journal of the Optical Society of America A*, 6(11):1715–1726, 1989.

- [SS96] R.R. Schultz and R.L. Stevenson. Extraction of high-resolution frames from video sequences. *IEEE Transactions on Image Processing*, 5(6):996–1011, 1996.
- [Swa05] C.S. Swartz. *Understanding digital cinema: a professional handbook*. Focal Press, 2005.
- [SXJ07] Q. Shan, W. Xiong, and J. Jia. Rotational motion deblurring of a rigid object from a single image. In *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Vision*, pages 1–8, 2007.
- [SYK+05] H. Shimamoto, T. Yamashita, N. Koga, K. Mitani, M. Sugawara, F. Okano, M. Matsuoka, J. Shimura, I. Yamamoto, T. Tsukamoto, and S. Yahagi. An 8k × 4k Ultrahigh-Definition Color Video Camera with 8M-Pixel CMOS Imager. *SMPTE Motion Imaging Journal*, (July/August):260–268, 2005.
- [TDV05] T. Takeuchi and K.K. De Valois. Sharpening image motion based on the spatio-temporal characteristics of human vision. In *Proceedings of SPIE*, volume 5666, pages 83–94, 2005.
- [TH84] R.Y. Tsai and T.S. Huang. Multiframe image restoration and registration. *Advances in Computer Vision and Image Processing*, 1(2):317–339, 1984.
- [TK91] C. Tomasi and T. Kanade. Detection and tracking of point features. Technical report, Technical Report CMU-CS-91-132, Carnegie Mellon University, 1991.
- [TM98] C. Tomasi and R. Manduchi. Bilateral filtering for gray and color images. In *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, pages 839–846, 1998.

- [TO05] M. Tanaka and M. Okutomi. Theoretical analysis on reconstruction-based super-resolution for an arbitrary psf. In *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 2, pages 947–954, 2005.
- [TYO07] M. Tanaka, K. Yoneji, and M. Okutomi. Motion Blur Parameter Identification from a Linearly Blurred Image. In *International Conference on Consumer Electronics*, pages 1–2, 2007.
- [UG92] H. Ur and D. Gross. Improved resolution from subpixel shifted pictures. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 54(2):181–186, 1992.
- [VRA⁺07] A. Veeraraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan, and J. Tumblin. Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3):69, 2007.
- [WLD⁺06] M.B. Wakin, J.N. Laska, M.F. Duarte, D. Baron, S. Sarvotham, D. Takhar, K.F. Kelly, and R.G. Baraniuk. An architecture for compressive imaging. In *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, pages 1273–1276, 2006.
- [YSQS07] L. Yuan, J. Sun, L. Quan, and H.Y. Shum. Image deblurring with blurred/noisy image pairs. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3):1, 2007.
- [ソニ 08] (株) ソニー. 従来比約 2 倍の感度および低ノイズで高画質を実現した、裏面照射型 CMOS イメージセンサー 新開発. <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/200806/08-069/>, 2008.
- [吉岡 08] 吉岡健司, 佐藤政喜, 野尻篤史. 全周囲カメラシステムの開発. *Matsushita Technical Journal*, 54(2):86–91, 2008.

- [後藤 04] 後藤知将, 奥富正敏. 単板カラー撮像素子の raw データを利用した高精細画像復元. 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, 45(8):15–25, 2004.
- [後藤 07] 後藤知将, 奥富正敏. 画像復元とレジストレーションの同時最適化の実験的検証. 電子情報通信学会論文誌 D, 90(6):1632–1635, 2007.
- [今川 09a] 今川太郎, 吾妻健夫, 佐藤智和, 横矢直和. 時空間解像度の異なる動画像を用いた高解像度高フレームレート撮影と露光量確保の両立. 映像情報メディア学会誌, 63(8):1139–1148, 2009.
- [今川 09b] 今川太郎, 吾妻健夫, 登一生, 本村秀人. 高解像度高フレームレート化と露光量確保のための時空間解像度が色ごとに異なるカラー画像からの動画像生成. 電子情報通信学会論文誌 D, 92(8):1229–1239, 2009.
- [佐藤 93] 佐藤満, 石塚茂樹, 二神章, 佐藤弘一. 光学式手振れ補正システム: コンシューマエレクトロニクス. テレビジョン学会技術報告, 17(5):15–20, 1993.
- [三橋 09] 三橋哲雄, 矢野澄男, 畑田豊彦. 画像と視覚情報科学, chapter 2.2.5, pages 78–83. コロナ社, 2009.
- [芝崎 07] 芝崎清茂. デジタル一眼レフカメラの手振れ防止技術. 映像情報メディア学会誌, 61(3):279–283, 2007.
- [重本 06] 重本倫宏, 星川章, 長原一, 岩井儀雄, 谷内田正彦, 鈴木俊哉. 時間的・空間的分解能の異なる複合センサカメラシステム. 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, 47(5):35–44, 2006.
- [小澤 08] 小澤健一, 木村克行, 山下健一郎, 藤巻真. デジタルカメラに学ぶ先端デバイス技術 (I). 電気学会誌, 128(10):692–695, 2008.

- [松本 08] 松本信幸. フレーム内再構成型超解像の領域適応処理による高画質化—エッジ/テクスチャ/平坦部での適応処理による鮮鋭なアップスケールリングの実現. 画像ラボ, 19(10):33–36, 2008.
- [松延 07] 松延徹, 長原一, 岩井儀雄, 谷内田正彦, 鈴木俊哉. モーフィングによる高解像度高フレームレート動画の生成. 電子情報通信学会論文誌 D, 90(4):1073–1084, 2007.
- [西野 08] 西野洋一, 西浦秀成, 中静真, 飯國洋二. シフト不変スパースコーディングにより学習された基底系を用いた画像超解像. 電子情報通信学会技術研究報告, 108(71):1–6, 2008.
- [西 05] 西一樹, 千葉聡, 津田啓太郎. 輝度変調方式によるブレ画像修復. 情報処理学会研究報告. コンピュータビジョンとイメージメディア, 2005(4):99–104, 2005.
- [渡邊 06] 渡邊清高, 岩井儀雄, 長原一, 谷内田正彦, 鈴木俊哉. ウェーブレット領域での動き補償と画像統合による高解像度高フレームレート動画の生成. 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, 47(10):195–207, 2006.
- [視覚 00] 日本視覚学会. 視覚情報処理ハンドブック, chapter 5.4, page 234. 朝倉書店, 2000.
- [日下 02] 日下博也. 手振れ補正機能の高解像度・高性能化. 画像電子学会誌, 31(6):1183–1191, 2002.
- [末高 96] 末高弘之. 液晶デジタルカメラ qv-10. テレビジョン学会誌, 50(1):156, 1996.
- [木村 06] 木村浩三, 藤井茂樹, 西道佳人, 中島雅逸, 清原督三. デジタル家電統合プラットフォーム UniPhier におけるメディアプロセッサ. 電子情報通信学会技術研究報告. ICD, 集積回路, 106(425):137–142, 2006.

研究実績

論文

1. 今川太郎, 福島邦彦 . 選択的注意機構による英字筆記体連結文字列認識 . 電子情報通信学会論文誌 D . 74(12):1768-1775, 1991.
2. 今川太郎, 吾妻健夫, 佐藤智和, 横矢直和 . 時空間解像度の異なる動画像を用いた高解像度高フレームレート撮影と露光量確保の両立 . 映像情報メディア学会誌, 63(8):1139-1148, 2009. (本論文の 2 章に関連)
3. 今川太郎, 吾妻健夫, 登一生, 本村秀人 . 高解像度高フレームレート化と露光量確保のための時空間解像度が色ごとに異なるカラー画像からの動画像生成 . 電子情報通信学会論文誌 D . 92(8):1229-1239, 2009. (本論文の 3 章に関連)

国際会議

1. K. Fukushima, T. Imagawa, and E. Ashida . Character recognition with selective attention . *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks(IJCNN)*, vol.1, pages 593-598, 1991.
2. T. Imagawa, T. Kohda, M. Moriya, and S. Maruno . Jigsaw puzzle solving using temporal pattern recognition networks with quantizer neuron chip . *Proceedings of International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The Second International Fuzzy Engineering Symposium*, vol. 5 , pages 59-60, 1995.
3. T. Imagawa, T. Azuma, T. Sato, and N. Yokoya . High-spatio-temporal-resolution Image-sequence Reconstruction from Two Image Sequences with Different Resolutions and Exposure Times . *Proceedings of ACCV'07 Satellite Workshop on Multi-dimensional and Multi-view Image Processing*, pages 32-38, 2007. (本論文の 2 章に関連)

4. T. Imagawa, T. Azuma, K. Nobori, and H. Motomura . Video generation for high spatio-temporal resolution imaging . *Proceedings of International Conference on Consumer Electronics 2009 (ICCE 2009)*, pages 287-288 , 2009. (本論文の3章に関連)

研究会・シンポジウム

1. 今川太郎, 丸野進, 阪上茂生, 木泰治 . 適応増殖量子化ニューロンによる形状認識 . 画像電子学会研究会研究会予稿, 92-04-05:25 - 30, 1992.
2. 今川太郎, 香田敏行, 森家みち代, 丸野進 . 量子化ニューロンによるジグソーパズル組立 . 画像電子学会研究会研究会予稿, 94-04-05:17 - 20, 1994.
3. 今川太郎, 森家みち代, 近藤堅司, 丸野進 . 量子化ニューロンチップによる手振りインターフェース . テレビジョン学会技術報告, 19(57):19-24, 1995.
4. 今川太郎, 松川善彦, 近藤堅司, 目片強司 . 文字毎に認識信頼度を付与した誤認識を含むテキストからの検索手法 . 電子情報通信学会技術報告, PRMU 99-72:63-68, 1999.
5. 今川太郎, 吾妻健夫, 佐藤智和, 横矢直和 . 解像度と露出時間の異なる画像を用いた高時空間解像度画像の生成 . 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU-278:137-142, 2007. (本論文の2章に関連)
6. 今川太郎, 吾妻健夫, 佐藤智和, 横矢直和 . 解像度と露出時間の異なる2種類の動画からの時空間高解像度動画の生成 . 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007) 講演論文集, pages 558-563, 2007. (本論文の2章に関連)
7. 登一生, 今川太郎, 本村秀人, 吾妻健夫 . 時空間解像度の異なる3板撮像画像からの高時空間解像度カラー画像生成 動きと生成画像の同時推定 . 情報処理学会研究報告 CVIM, 2008(27):377-384, 2008.

8. 今川太郎, 吾妻健夫, 登一生, 本村秀人 . 時空間解像度の異なる 3 板撮像画像からの高時空間解像度カラー画像生成 再構成型超解像の利用 . 情報処理学会研究報告 CVIM, 2008(27):385-392, 2008. (本論文の 3 章に関連)
9. 今川太郎, 吾妻健夫, 登一生, 本村秀人 . 時空間解像度の異なる 3 板撮像画像からの高時空間解像度カラー画像生成 . 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008) 講演論文集, pages 221-228, 2008. (本論文の 3 章に関連)
10. 今川太郎, 鷓川三蔵, 吾妻健夫 . 画像の高解像度化手法の技術動向 . 画像電子学会研究会予稿, 2009-11-26:55-61, 2009. (本論文の 1 章 3 節, 3 章に関連)

全国大会

1. 今川太郎, 香田敏行, 丸野進, 木泰治 . 適応増殖量子化ニューロンを用いた構造化ニューラルネットワーク . 電子情報通信学会春季全国大会予稿, D-17, page 6, 1993.

国内登録特許

1. 今川太郎, 香田敏行, 小島良宏, 丸野進, 木泰治 . 学習認識装置 . 特許第 2779119 号, 1998.
2. 今川太郎, 松川善彦, 近藤堅司, 目片強司 . 検索方法, 検索装置および記録媒体 . 特許第 3599180 号, 2004.
3. 今川太郎, 近藤堅司, 松川善彦, 目片強司 . 検索装置, 記録媒体およびプログラム . 特許第 3669626 号, 2005.
4. 今川太郎, 目片強司 . 物体認識装置、物体を認識する方法, プログラムおよび記録媒体 . 特許第 3659914 号, 2005.
5. 今川太郎, 岩崎正宏 . 人物判定装置及び人物検索追跡装置 . 特許第 3910629 号, 2007.

6. 今川太郎, 中川雅通, 吾妻健夫, 岡本修作 . 物体検出装置 , 物体検出サーバおよび物体検出方法 . 特許第 3927980 号, 2007.
7. 今川太郎, 吾妻健夫 . 画像生成装置および画像生成方法 . 特許第 3934151 号, 2007. (本論文の 2, 3 章に関連)
8. 今川太郎, 吾妻健夫 . 画像生成装置および画像生成方法 . 特許第 4215266 号, 2008. (本論文の 2, 3 章に関連)
9. 今川太郎, 登一生, 吾妻健夫 . 画像生成装置および画像生成方法 . 特許第 4215267 号, 2008.

外国登録特許

1. 今川太郎, 香田敏行, 小島良宏, 丸野進, 木泰治 . 学習認識装置 . U.S. Patent No. 5479570, 1995.
2. 今川太郎, 近藤堅司, 松川善彦, 目片強司 . インデックスを用いた検索方法およびインデックス作成方法 . U.S. Patent No. 6944344, 2005.
3. 今川太郎, 松川善彦, 近藤堅司, 目片強司 . 検索処理方法 . U.S. Patent No. 7130487, 2006.
4. 今川太郎, 目片強司 . 物体検出方法 . U.S. Patent No. 6961466, 2005.
5. 今川太郎, 中川雅通, 吾妻健夫, 岡本修作 . 物体検出装置 . U.S. Patent No. 7180050, 2007.
6. 今川太郎, 岩崎正宏 . 人物判定装置及び人物検索追跡装置 . U.S. Patent No. 7397931, 2008.

付録

A. 疎な係数行列を持つ連立一次方程式の共役勾配法による解法

本章では、大規模かつ係数が疎な連立一次方程式の解法として用いた共役勾配法を説明する。

A.1 共役勾配法による連立一次方程式の解法

共役勾配法による解法を説明する。解くべき連立一次方程式を式 (24) と置く。A, b はそれぞれ係数行列と係数ベクトル, x は解ベクトルである。共役勾配法による解法では、式 (24) の解を求める問題を式 (25) の最小化問題と定式化し、初期解ベクトル x_0 から反復的に解ベクトルを修正し、最終的な解ベクトル x を得る。

$$Ax = b \quad (24)$$

$$F(x) = \frac{1}{2}(x, Ax) - (x, b) \quad (25)$$

ここで、A が実対称正定値行列の場合、式 (25) は唯一の最小値解を持つ。反復計算では、互いに A-共役な修正ベクトルを用いて x を修正するため、理論的には高々 x の次元数回以内に収束する。

また、次節で示すように、A が疎行列である場合に計算量や演算に必要なメモリを削減することが可能である。具体的な計算手続きを次に示す。

```

r0=b(-Ax0)
p0=r0
for k=0,1,,,
  αk =  $\frac{(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_k)}{(\mathbf{p}_k, \mathbf{A}\mathbf{p}_k)}$ 
  xk+1=xk+αkpk
  rk+1 = rk - αkA pk
  βk =  $\frac{(\mathbf{r}_{k+1}, \mathbf{r}_{k+1})}{(\mathbf{r}_k, \mathbf{r}_k)}$ 
  pk+1=rk+1+βk pk
end

```

ここで、 x_k は解ベクトル、 x_0 はその初期ベクトル、 k は反復回数、 p_k は修正ベクトル、 r_k は誤差ベクトルである。反復計算ごとに、互いに A-共役な修正ベクトル p_k を、 x_k に加算して誤差を減少させる。収束判定は誤差 r_{k+1} の大きさを用い、この値が十分に小さくなった場合に終了し、 x_k を解とする。

A.2 疎な係数行列を用いた演算

疎な係数行列を用いた演算について説明する。前節に示す演算において、方程式の元数が大きい場合、反復計算中の行列 A とベクトル p_k との積演算が支配的になる。ここで、A の行数列数を N とすると、 $A p_k$ の計算は N^2 個の積演算を含む。

ここで、行列 A が疎行列で、 x_k 、 p_k 、 r_k が密ベクトルの場合を考える。A が疎行列の場合、非ゼロの要素と対応するベクトル要素と積演算のみを行うことで、演算量を削減できる。本稿で扱う行列は時空間的に近傍にある画素の関係を表現しており、劣化の条件を固定すれば、各行 (又は列) の非ゼロの要素数は N に依存せず一定である。従って、疎行列を考慮した場合、上記の行列ベクトル積の演算量は N に比例する。反復回数が理論的な最大収束回数 (=N) に比例すると仮定すると、方程式の解を求める積演算数は、 N^2 に比例する。

A.3 疎行列の表現方法

疎行列計算で用いる係数の表現方法を説明する．疎行列表現の例として Compressed Row Storage(CRS)形式 [BR94] を示す．CRS 表現は, 3 種類の配列 (*value*, *index*, *ptr*) で疎行列の非ゼロ要素を表現する．疎行列 (式 (26)) とその CRS 表現を表 3 に示す．

$$A = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

表 3 Compressed Row Storage(CRS) 表現の例

<i>value</i>	4	2	3	1
<i>index</i>	0	2	3	1
<i>ptr</i>	0	2	3	5

NZ=4

NZ は疎行列 A の非ゼロの要素数である．配列 *value* は, 長さ NZ で, 行列 A の非ゼロ要素の値を行方向に順に格納する．配列 *index* は, 長さ NZ で, 配列 *value* に格納された非ゼロ要素の列番号を順に格納する．配列 *ptr* は, 長さ NZ + 1 で, 各行の最初の非ゼロ要素の開始位置 (最初から数えた非ゼロ要素数) を順に格納し, 最後は NZ + 1 を格納する．

次に, CRS 形式 (*value*, *index*, *ptr*) の行列 A とベクトル x との積演算 ($y = Ax$) の C 言語コードの例を以下に示す．

```
for( i=0; i<NZ; i++ ) {
    y[i] = 0.0;
    for( j=ptr[i]; j<ptr[i+1]; j++ ) {
        y[i] += value[j] * x[index[j]];
    }
}
```

```
}  
}
```

このような疎行列表現を利用して演算することで、演算量・使用メモリ量・メモリアクセス回数を、密行列の演算に比べて大幅に低減させることができる。