

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500214

研究課題名(和文)高フレームレート撮像による画像入力システムのための高精度動きベクトル推定

研究課題名(英文)High-accuracy motion vector estimation for high frame-rate imaging system

研究代表者

浜本 隆之(Hamamoto, Takayuki)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：10297624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高速に撮像された画像情報に対して高精度に動きベクトルを推定する手法について提案し、その情報を基に複数のフレーム画像に対し統合処理を施すことで高品質な画像を取得するシステムについて検討した。動き推定手法では、予測に基づく空間勾配の算出位置と算出方向等を変更した勾配法を導入することで、高速で高精度な手法を実現した。また、動き情報を基に空間解像度を向上させる処理について、ハードウェア実装を前提に、低演算量で実現する手法について検討した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we investigated high-accuracy estimation methods of motion vectors for high frame rate images and the imaging system to obtain high quality images by integrating multiple frames using the estimated motion vectors. First we proposed the high-speed and high-accuracy methods of motion estimation based on the gradient method by using a constraint equation with low estimation errors by shifting the target-pixel positions or adjusting the calculated directions as well as positions of the spatial gradients. In addition, we proposed the method to apply the estimated motion vectors to the super resolution for hardware implementation.

研究分野：画像情報処理・情報センシング

キーワード：動きベクトル推定 高フレームレート 超解像 画像入力

1. 研究開始当初の背景

(1) 画像入力技術は、空間（多画素化や3次元化）、時間（高フレームレート化）、振幅（広ダイナミックレンジ化）、波長（多色化）の各軸で、その性能を伸ばしている。それには、半導体製造技術の発展に伴うイメージセンサの著しい性能向上が寄与していることは言うまでもない。例えば、多画素化により空間解像度が向上し、センサ内 A/D 変換と高速読み出しによりフレームレートが向上している。しかし、このような発展の中で2次元空間解像度は光学的な要因から限界に近づきつつあると言われている。それは、各画素の回路サイズが光レンズの分解能を超えて小さくなり、いわばボケた画像をオーバーサンプルする状態になるためである。

(2) 画像入力や処理システムの性能をさらに向上するには、多次元の時空間領域でのサンプル点を増やし適切に配置することが大事である。本研究課題は、単眼カメラで高速に撮像した画像を適切に統合することで、通常フレームレートで高品質な画像を取得する入力システムを実現するものである。いわば、高い時間解像度を空間解像度などの向上に変換する処理技術の検討である。

(3) 高速撮像は、例えばカシオ EXILIM のように毎秒 1000 フレームを実現可能なコンシューマカメラが既にある。現状では高速撮像時の画素数は少ないものの、LSI 設計・製造技術の発展により改善が期待できる。これまでもフレームを統合させて超解像度化する検討は内外のグループにより行われてきたが、高フレームレート画像を用いるもの、ハードウェア化を前提としたものに関する検討は見当たらない。

2. 研究の目的

本研究では、高速カメラで撮像した高フレームレート画像を統合することで、超解像度化、低雑音化、広ダイナミックレンジ化を図る画像入力システムについて検討を行う。これを実現する上で最も重要なのは、高フレームレート画像間で正確に同一点の対応をとり、高い精度で動きベクトルを推定することである。このことを中心に処理方式を検討する。さらに、高速カメラと FPGA ボードを用いて画像入力システムを構築し、本提案方式の有効性を確認する。

3. 研究の方法

(1) 高フレームレート画像を用いた高精度動き推定についての検討

フレーム間の相関が高く移動量が小さい、時間的な雑音が増加する、という特徴を有する高フレームレート画像に対して、低演算量で高精度な動きベクトル推定を行う方式について提案する。相対的に動き量が小さいときは、空間勾配を求める位置や向きによって

精度が変わるため、その適応化について検討する。

(2) 推定した動きベクトルを用いた超解像像についての検討

(1)で求めた動きベクトルを活用して複数のフレームを統合することで、空間解像度を向上する手法を提案する。基準フレームの小數位置に置かれた複数の前フレーム情報を統合し、高空間解像度化を図ることを検討する。

(3) 画像入力システムの開発

高速カメラと FPGA ボードを用いて画像入力システムを構築する。推定した動きベクトルを用いた超解像度化以外にも、高フレームレート画像を統合する際に、被写体の明るさに合わせて合成する等で、広ダイナミックレンジ化や低雑音化を図る方式について検討する。

4. 研究成果

(1) 高フレームレート画像を用いた高精度動き推定についての検討

① 勾配法に基づく動き推定

勾配法は、輝度値の不変性、時間的な連続性と空間的な一様性の仮定に基づき対象画素の動きベクトルを求める方式である。注目画素における動き V は、注目画素の輝度値 I の水平方向 (x 方向) および垂直方向 (y 方向) の空間勾配 I_x, I_y とフレーム間の輝度値の時間変化量 I_t と式(1)に示すような関係がある。なお本稿では、式(1)の関係式を拘束式と呼称し、 I の添字は空間勾配を、 V の添字はその方向の動き量を指す。

$$I_x \cdot V_x + I_y \cdot V_y + I_t = 0 \quad (1)$$

単一の画素だけでは式(1)を解くことができないため、注目画素とその周囲の画素からなる $M \times M$ (M は奇数) のサイズの領域 (ブロック) における拘束式を連立し、最小二乗法によって動きベクトルを求める。

② 提案方式

・推定誤りの小さい拘束式の導出

高フレームレート画像の「動きベクトルの時間的相関が高い」という特徴から、直前のフレームの動きから現在のフレームの動きを予測することを考える。この特徴を用いて直前のフレームの動きベクトルを予測された動きベクトルとして使用し、推定誤りの小さい拘束式を導出する二つの方式を以下に示す。

A. 予測に基づき空間勾配の算出位置と算出方向を変更する方法 (可変空間勾配法)

図 1 に示すように、現在の動きベクトルが正確に予測できた場合、注目画素と予測された動きベクトルのマイナス倍離れた位置の輝度値から空間勾配を算出することで推定誤りを低減できる。さらに、空間勾配の算出方向を予測された動きベクトルと合わせる

ことで、フレーム間における空間勾配の変化を小さくし推定誤りを低減できる。 k フレームを基準フレームとしたとき、予測された動きベクトルを直前のフレームの動きベクトルである $V(x, y, k-1)$ とし、その方向を a 、 a を 90° 回転させた方向を b とする。このとき、注目画素 (x, y) における輝度値 I の a 、 b 方向それぞれの空間勾配 $I_a(x, y, k)$ 、 $I_b(x, y, k)$ は式(2)、(3)から求まる。

$$I_a(x, y, k) = \frac{I(x, y, k) - I\left(\begin{matrix} x - V_x(x, y, k-1) \\ y - V_y(x, y, k-1) \end{matrix}, k\right)}{\sqrt{V_x(x, y, k-1)^2 + V_y(x, y, k-1)^2}} \quad (2)$$

$$I_b(x, y, k) = \frac{I(x + \alpha, y + \beta, k) - I(x - \alpha, y - \beta, k)}{2 \times \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (3)$$

式(3)において、 α 、 β は十分に小さい値に設定して空間勾配を算出する。このときの空間勾配の算出位置は図 2 のようになる。なお、時間変化量 I_t は通常の勾配法と同様に算出する。

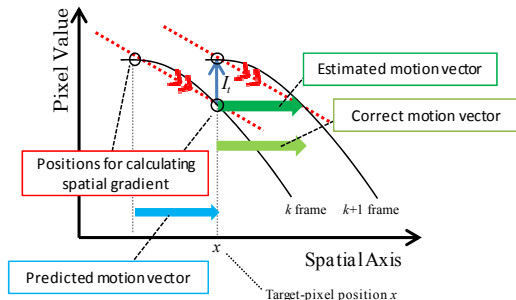


図 1 可変空間勾配法による動き推定

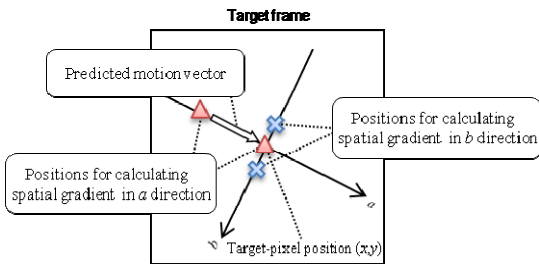


図 2 可変空間勾配法における空間勾配の算出位置

B. 予測に基づくシフトを用いる方法 (シフト勾配法)

図 3 に示すように、予測された動きベクトルに従って基準フレームである k フレームの像を移動させ、比較対象の $k+1$ フレームの像との間の動きを求めることで、大域的な動きに対しても高い推定精度を保つことができる。空間勾配の方向を a 、 b としたとき、注目画素 (x, y) における輝度値 I の a 、 b 方向それぞれの空間勾配 $I_a(x, y, k)$ 、 $I_b(x, y, k)$ は式(4)、(5)から求まる。また、時間変化量 $I_t(x, y, k)$ は、注目画素の位置が移動するため、通常の勾配法と異なり式(6)のように求まる。

$$I_a(x, y, k) = \frac{I(x + \gamma, y + \delta, k) - I(x - \gamma, y - \delta, k)}{2 \times \sqrt{\gamma^2 + \delta^2}} \quad (4)$$

$$I_b(x, y, k) = \frac{I(x + \delta, y + \gamma, k) - I(x - \delta, y - \gamma, k)}{2 \times \sqrt{\gamma^2 + \delta^2}} \quad (5)$$

$$I_t(x, y, k) = \frac{I(x + V_x(x, y, k-1), y + V_y(x, y, k-1), k+1) - I(x, y, k) - I_a(x, y, k) \cdot V_a(x, y, k-1)}{\dots} \quad (6)$$

なお、式(4)、(5)において、 γ 、 δ は十分に小さい値に設定して空間勾配を算出する。

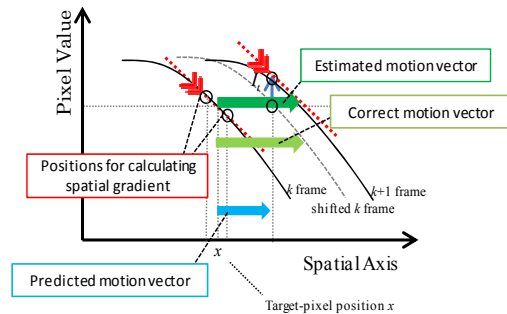


図 3 シフト勾配法による動き推定

・可変空間シフト勾配法

可変空間勾配法およびシフト勾配法を効果的に組み合わせ高精度な動き推定を行う方式を検討する。シフト勾配法は、正確に現在の動きベクトルを予測できた場合は、大域的な動きに対して高い推定精度を保つことができ、加えてノイズや量子化誤差に影響されにくい。基本的には可変空間勾配法よりも推定精度が高い。しかし、予測ベクトルが誤りを含む場合、画像の平坦な領域や際立ったエッジ領域では推定精度が低下する。それを踏まえて、可変空間シフト勾配法では画素毎にエッジの強度を算出し、エッジの強度が十分小さいまたは大きい範囲では可変空間勾配法に用いる拘束式を、その範囲外ではシフト勾配法に用いる拘束式を立てる。処理の各手順について以下で説明する。

- ラプラシアンフィルタを用いてエッジの強度を算出し、閾値処理を行う。
- エッジの強度が十分に小さいまたは大きい場合は、可変空間勾配法に用いる拘束式を立てる。
- エッジの強度が(B)の範囲外の場合は、シフト勾配法に用いる拘束式を立てる。
- (B)、(C)で導出した拘束式を集約し動きを求める。

・拘束条件の拡張による推定精度の向上

k フレームから $k+1$ フレームの動きベクトル $V(x, y, k)$ は、空間勾配の方向を a 、 b としたとき式(7)として表される。また、高フレームレート画像の「動き量が小さい」という特徴から隣接画像間における同じ位置の画素は等しく動くことと仮定でき、式(8)としても表すことができる。

$$I_a(x, y, k) \cdot V_a(x, y, k) + I_b(x, y, k) \cdot V_b(x, y, k) + I_t(x, y, k) = 0 \quad (7)$$

$$I_a(x, y, k+1) \cdot V_a(x, y, k) + I_b(x, y, k+1) \cdot V_b(x, y, k) + I_t(x, y, k+1) = 0 \quad (8)$$

さらに、シフト勾配法の場合、比較対象フレームにおける注目画素から予測ベクトル分離された位置の空間勾配を用いることで、式(9)、(10)として表すことができる。

$$I_a(x + V_x(x, y, k-1), y + V_y(x, y, k-1), k+1) \cdot V_a(x, y, k) + I_b(x, y, k) \cdot V_b(x + V_x(x, y, k-1), y + V_y(x, y, k-1), k+1) + I_t(x, y, k) = 0 \quad (9)$$

$$I_a(x - V_x(x, y, k-1), y - V_y(x, y, k-1), k) \cdot V_a(x, y, k) + I_b(x, y, k) \cdot V_b(x - V_x(x, y, k-1), y - V_y(x, y, k-1), k) + I_t(x, y, k+1) = 0 \quad (10)$$

上記の拘束式を、注目画素とその周囲の画素からなるブロックにおいて連立し、最小二乗法によって動きベクトル $V(x, y, k)$ を求める。このように、シフト勾配法では4つの拘束式を、シフト勾配法以外では2つの拘束式を連立して解くことで拘束条件が増え、推定精度の向上が期待できる。

③ シミュレーションによる評価実験

提案方式の性能を検証した。図4に示される合成画像は、画面全体が等速で平行移動しており、フレーム間に水平及び垂直方向にそれぞれ1/16画素単位の動き量がある。この合成画像を用いて動き推定の精度評価を行った。比較対象にした方式及び条件設定は下記の通りである。

- ・ブロックマッチング (BM)
- ・4倍拡大 BM
- ・通常の勾配法
- ・可変空間勾配法
- ・シフト勾配法
- ・拡張-可変空間勾配法
- ・拡張-シフト勾配法
- ・拡張-可変空間シフト勾配法

(ブロックサイズ $M=9$)

(BMの探索範囲 $S=3$)

BMにはパラボラフィッティングを適用



図4 サブピクセル位置ずれ合成画像

正解の動き量に対する推定動き量の平均誤差を算出した結果を図5に示す。図5の横軸は合成画像の動き量、縦軸は平均誤差を示している。

図5から、可変空間勾配法やシフト勾配法による通常の勾配法の推定精度の改善と、拘束条件の拡張によるそれらの方式の推定精度向上が確認できる。さらに、可変空間勾配法とシフト勾配法を組み合わせることで広範囲の動き量に対して他方式を上回る精度を獲得できることがわかる。

また、このとき各方式が1つの対象画素の動き推定に必要とする演算量を表1に示す。表1より、拡張-可変空間シフト勾配法は拡大を用いたBMと比べて演算量が1/500倍程度であるが、推定精度は広い範囲で上回っていることが確認できる。

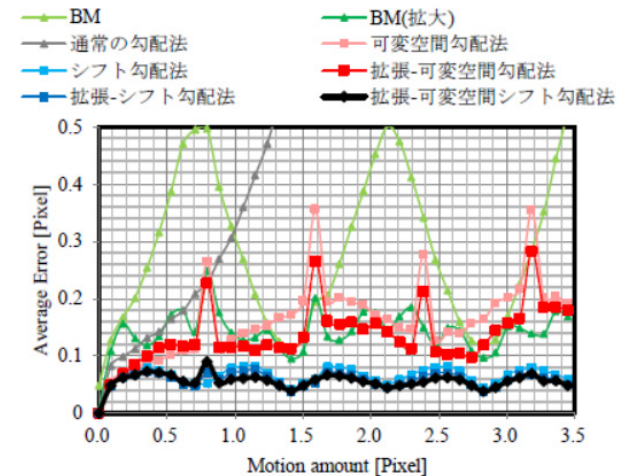


図5 シミュレーション結果

表1 演算量の比較

方式	加算	減算	乗算	除算
BM	11911	7942	3975	2
BM(拡大)	33210232	6480040	47790354	810008
通常の勾配法	597	409	413	167
可変空間勾配法	13205	2357	19946	488
シフト勾配法	19523	3570	28937	650
拡張-可変空間勾配法	26408	4785	38819	974
拡張-シフト勾配法	59537	11346	86771	2108
拡張-可変空間シフト勾配法	60509	13614	86771	2108

(2) 推定した動きベクトルを用いた超解像についての検討

① 超解像の提案手法

提案手法による再構成処理の流れを図6に示す。本手法の再構成処理は以下の3つのステップで構成されている。

A. ノイズ低減画像の作成

入力画像群をBicubic法で拡大し、各動き推定結果を基準となるフレームの補償画像をそれぞれ作成する。各補償画像を加算し、画素ごとに平均をとることでノイズ低減画像を得る。

B. 高解像度画像の作成

動き推定結果を用いて入力画像群のレジストレーションを行う。式(11)によりノイズ低減画像の輝度勾配を求め、輝度勾配とレジストレーション結果を基に初期高解像度画像を作成する。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{up}(x,y) &= I(x,y-1) - I(x,y), & \varepsilon_{down}(x,y) &= I(x,y+1) - I(x,y) \\ \varepsilon_{left}(x,y) &= I(x-1,y) - I(x,y), & \varepsilon_{right}(x,y) &= I(x+1,y) - I(x,y) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $\varepsilon_{up}(x,y)$ 、 $\varepsilon_{down}(x,y)$ 、 $\varepsilon_{left}(x,y)$ 、 $\varepsilon_{right}(x,y)$ は上下左右の各方向の輝度勾配であり、 $I(x,y)$ は画素位置 (x,y) における輝度値である。初期高解像度画像から動き補償とダウンサンプリングにより推定入力画像群を作成する。推定入力画像群と入力画像群の差分をとり、差分情報群を得る。差分情報群を拡大し、レジストレーションを行った拡大差分情報と初期高解像度画像を足すことで高解像度画像を作成する。

C. 再構成画像の合成

まず、高解像度画像の作成時に求めた輝度勾配を基に、ノイズ低減画像のエッジ検出を行う。輝度勾配が大きく変化するところがエッジであるため、画素位置 (x,y) の輝度勾配の変化量 $g_{var}(x,y)$ を、

$$g_{var}(x,y) = |\varepsilon_{up}(x,y) - \varepsilon_{down}(x,y)| + |\varepsilon_{left}(x,y) - \varepsilon_{right}(x,y)| \quad (12)$$

より求め、 $g_{var}(x,y)$ が閾値 th_{edge} を超える場合にエッジと判定する。最後に、オープニング処理を施すことで、ノイズ低減画像のエッジ画像を得る。作成したエッジ画像を基に、エッジ部は高解像度画像を、平坦部はノイズ低減画像を選択することで再構成画像を合成する。

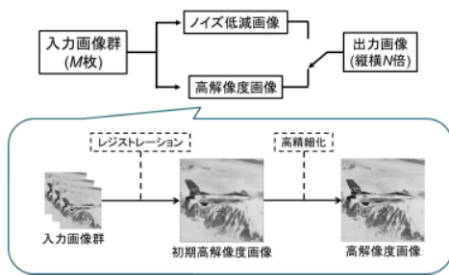


図6 超解像手法の流れ

② 評価実験

300fps で撮像した図 7(a) の画像をダウンサンプリングし、縦横 1/2 倍の低解像度画像群を作成する。11 フレームの低解像度画像群を用いて再構成する。表 2 に原画像との PSNR を、図 7(b) ~ (d) に結果画像の一部を拡大したものを示す。補間画像や IBP 法と比べ PSNR が向上し、高周波成分が復元されていることが確認できる。



(a) 原画像

(b) 補間画像



(c) IBP 法

(d) 提案手法

図7 実画像による結果 (512×384 画素)

表2 PSNR 比較(実画像) [dB]

補間画像	IBP 法	提案手法
23.87	24.49	24.91

(3) 画像入力システムの開発

図 8 に画像入力システムの構成を示す。本システムは、高速カメラ、FPGA ボード、コンピュータにより構成される。高速カメラでは、フレームレート 500fps、解像度 640×480 画素の高フレームレート画像の撮影を行う。FPGA ボードでは画像のキャプチャと動き推定を行い、画像データと動きベクトルを PCI Express を介してコンピュータに送る。コンピュータでは、送られてきた画像データと動きベクトルを基に、画像を再構成し出力映像を作成・表示する。

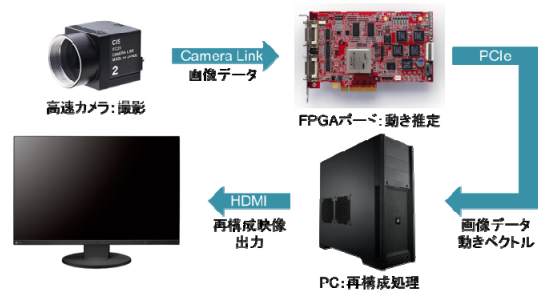


図8 画像入力システムの構成

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計7件)

- ① 松崎哲, 藤井翔太, 菅井男也, 浜本隆之, 高精度動き推定に基づく高フレームレート画像の統合による高空間解像度化, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無,

- Vol. 114, No. 275, 2014, 13-17
- ② Yuki Sato, Danya Sugai, Takayuki Hamamoto, Gradient-Based Motion Estimation Using Characteristics of High Frame-Rate Images, Proc. of International Workshop on Advanced Image Technology, 査読有, 2013, 23-28
 - ③ 佐藤佑樹, 菅井男也, 浜本隆之, 高フレームレート画像の特徴を用いた勾配法に基づく高精度動き推定, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol. 112, No. 335, 2012, 101-106
 - ④ Danya Sugai, Hiroshi Katayama, Takayuki Hamamoto, Image Emphasis Based on Integration of high Frame-Rate Images by New Gradient-Based Motion Estimation Method, Proc. of IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 査読有, 2012, 118-123
 - ⑤ 藤井翔太, 菅井男也, 浜本隆之, 基準フレームの SAD 傾配に基づくフィッティングによるブロックマッチング動き推定の精度向上, Proc. of Picture Coding Symposium, 査読無, P-2-12, 2012, 31-32
 - ⑥ H. Katayama, D. Sugai, T. Hamamoto, High-accuracy motion estimation by variable gradient method using high frame-rate images, IEICE trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol. E95-A, No. 8, 2012, 1302-1305,
<http://ci.nii.ac.jp/naid/10031126647>
 - ⑦ 菅井男也, 片山泰志, 浜本隆之, 高速撮像情報を用いた画像強調方式の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol. 112, No. 40, 2012, 23-26

[学会発表] (計 11 件)

- ① Danya Sugai, Improvement of Spatial Resolution using Block-Matching Based Motion Estimation and Frame Integration, International Conference on Manufacturing Science and Technology, 2015年6月1日, Brunei
- ② Takashi Kobayashi, Design and implementation of interleave integration control image sensor, 2nd Asian Image Sensors and Imaging Systems Symposium, 2014年12月, 東京工業大学
- ③ 松崎哲, 高精度動き推定に基づく高フレームレート画像の統合による高空間解像度化, 電子情報通信学会イメージメディアクオリティ研究会, 2014年10月24日, 京都工芸繊維大学
- ④ 松崎 哲, 高精度動き推定に基づく低演

- 算量な画像統合処理による空間解像度の改善, 映像情報メディア学会年次大会, 2014年9月2日, 大阪大学
- ⑤ 藤井翔太, 高フレームレート画像の統合による高空間解像度化, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013年9月20日, 福岡工業大学
- ⑥ Yuki Sato, Gradient-Based Motion Estimation Using Characteristics of High Frame-Rate Images, International Workshop on Advanced Image Technology, 2013年1月, 名古屋大学
- ⑦ 佐藤佑樹, 高フレームレート画像の特徴を用いた勾配法に基づく高精度動き推定, 電子情報通信学会イメージクオリティ研究会, 2012年12月7日, 富山大学
- ⑧ Danya Sugai, Image Emphasis Based on Integration of high Frame-Rate Images by New Gradient-Based Motion Estimation Method, International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2012年11月, 台湾
- ⑨ 藤井翔太, 基準フレームの SAD 傾配に基づくフィッティングによるブロックマッチング動き推定の精度向上, 画像符号化シンポジウム, 2012年10月, 修善寺
- ⑩ 佐藤佑樹, 高フレームレート画像を用いた勾配法に基づく高精度動き推定, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2012年9月11日, 富山大学
- ⑪ 菅井男也, 高速撮像情報を用いた画像強調方式の検討, 電子情報通信学会イメージメディアクオリティ研究会, 2012年5月18日, 東海大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜本 隆之 (HAMAMOTO, Takayuki)
東京理科大学・工学部・教授
研究者番号: 10297624

(2) 研究分担者

池岡 宏 (IKEOKA, Hiroshi)
東京理科大学・工学部・助教
研究者番号: 20579966

保坂 忠明 (HOSAKA, Tadaaki)
東京理科大学・経営学部・講師
研究者番号: 60516235
(平成 25 年 3 月 31 日 削除)

杉村 大輔 (Sugimura, Daisuke)
東京理科大学・工学部・助教
研究者番号: 10712052
(平成 25 年 4 月 1 日 追加)

(3) 連携研究者

なし