

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23650082

研究課題名(和文) 暗闇での物体追跡と画像復元の研究

研究課題名(英文) Research on object tracking and image restoration in the dark

研究代表者

小室 孝 (KOMURO, Takashi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10345118

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、暗闇での物体追跡と画像復元を実現するため、ベイズ推定の枠組みを用いて対象の運動と参照画像を同時に推定する手法を提案した。ぶれのある画像に対しては、運動推定により得られたパラメータを用いてぶれ補正を行うようにした。その結果、シミュレーションではPSNRが-6dBまでの動画像、実環境では被写体照度0.01lx以下の暗闇環境で撮影した動画像に対し、物体追跡と画像復元を行うことができた。さらに、画像復元のための最適フレームレートを調査し、比較的ノイズが少ないときは高いフレームレートが、ノイズが多いときには低いフレームレートのほうが良いことがわかった。

研究成果の概要(英文)：In this research, we proposed a method of realizing object tracking and image restoration in the dark in which target motion and a reference image are simultaneously estimated using a Bayesian framework. Deblurring is performed using the motion parameters estimated from the blurred images. As a result, we realized object tracking and image restoration from simulated video images with an SNR of up to -6 dB, and real video images captured in a dark environment of less than 0.01 lx illuminance at the subject surface. In addition, we examined the optimal frame rate for image restoration and we found that a higher frame rate was better under relatively little noise while a lower frame rate was better under much noise.

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：画像合成 ベイズ推定 フレームレート ぶれ補正

1. 研究開始当初の背景

暗闇の中で動物体を鮮明に撮影することができれば、防犯監視や交通システム、生物の観察などに応用が可能である。従来の暗視カメラは、赤外線を用いるものが主流であるが、特殊なハードウェアを必要とすることや、カラー画像の取得ができないといった問題があった。近年ではイメージセンサ技術の高感度化が進んでおり、デジタルカメラで夜景などをきれいに撮影できるようになりつつあるが、暗闇の中で撮影できるまでには至っていない。

また、ぶれ補正技術により、十分な露光時間を確保しつつ、動物体をぶれずに撮影する方法や、複数枚の連続画像を合成することでノイズを減らす方法もあり、最近のデジタルカメラやカメラ付き携帯電話に搭載されつつある。しかし、ぶれ補正や画像合成に必要な被写体の動き推定は、撮影した画像を用いて行う必要があり、暗闇でそもそも対象がほとんど見えない場合、動きの推定は困難になる。

2. 研究の目的

本研究では、対象が持つ物理特性に基づいて動きに対する制約を定め、その制約の元で動き推定を行う手法を提案する。さらに、ベイズ推定の枠組みを用いて対象の運動と復元画像を同時に推定する。さらに、本手法の構築を通じて、暗闇での物体トラッキングに最適なフレームレートを導出するとともに、動物体を鮮明に撮影できるようにすることで、イメージセンサの感度向上の壁を打ち破ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 提案手法に基づくトラッキングアルゴリズムの構築を行い、計算機シミュレーションによって検証を行う。撮影対象を単一平面と仮定し、 x, y 方向の並進のみを行うものとする。カメラのフレームレートはサンプリング周波数に対して十分高く、また画像にぶれはないものとする。また、参照画像は既知とする。

(2) 参照画像が未知の場合に対応するため、ベイズ推定の枠組みを用いて対象の運動と参照画像を同時に推定するアルゴリズムの構築を行う。運動パラメータをハイパーパラメータとし、参照画像について周辺化した確率分布に基づき、最尤推定を行う。

(3) 対象の動きがフレームレートに対して速く、画像のぶれを考慮しなければならない場合にも対応できるようにアルゴリズムの拡張を行う。推定パラメータから導かれる運動軌跡に基づいて実際にぶれのある画像を生成し、入力画像と比較することでパラメータを推定する。

(4) 高フレームレートモノクロカメラで撮影した実画像に対し、前年度に構築したアルゴリズムを適用し、動作実験を行う。さまざまなフレームレートで撮影した画像に対して実験を行い、シミュレーション結果と一致することを確認する。

(5) フレームレートがサンプリング周波数より低い場合にも対応できるようにアルゴリズムの拡張を行う。また、さまざまなフレームレートでシミュレーションを行い、最適なフレームレートを求める。

(6) 画面内に複数の対象が存在する場合や背景が存在する場合に、各対象の動きから領域を分割する手法を確立し、シミュレーションと実画像で実験を行う。また、対象の運動を6次元に拡張し、平面アフィン変換で表される運動・変形に対応できるようにする。

(7) 撮影対象を三次元の剛体と仮定し、対象が剛体であり、どの点においても同じ運動パラメータを持つことを拘束条件として、対象の運動と形状の推定を最適化問題で解く手法を確立し、シミュレーションと実画像で実験を行う。

(8) 高フレームレートカラーカメラを用いて、カラー画像に対してもトラッキングが実現できることを示す。カラーカメラを用いる場合、トラッキングや画像復元がカラーフィルタの配置に影響されるので、それを考慮したアルゴリズムの改良を行う。

(9) 上記のそれぞれについて、ベイズ推定の枠組みを用いて画像復元と統一した枠組みで問題を定式化する。

4. 研究成果

(1) ベイズ推定の枠組みによる定式化

動画のフレーム数を F 、原画像 (= 参照画像) を \mathbf{x} 、運動パラメータを $\theta_1, \dots, \theta_F$ とする。ここで \mathbf{x} は画素値を要素とするベクトルである。観測画像 $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_F$ が観測されたときの運動パラメータを推定するには、尤度関数

$$L(\theta_1, \dots, \theta_F) = p(\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_F | \theta_1, \dots, \theta_F) \quad (1)$$

を最大化する $\theta_1, \dots, \theta_F$ を求めればよい。しかしながら、上式を直接計算することはできないため、以下のように \mathbf{x} に関して周辺化を行う。

$$L(\theta_1, \dots, \theta_F) = \int p(\mathbf{x}) p(\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_F | \mathbf{x}, \theta_1, \dots, \theta_F) d\mathbf{x} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{x} の事前確率分布 $p(\mathbf{x})$ を一様とし、各画素に加わるノイズが平均 0、分散 σ^2 の正規分布に基づくものとする、

$$L(\theta_1, \dots, \theta_F) \propto \int \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^F \|y_k - M(\theta_k)x\|^2\right) \quad (3)$$

ここで、 $M(\theta)$ は x を運動パラメータ θ によって移動させる行列である。ここで、

$$y_k = M(\theta_k)y'_k(\theta_k) \quad (4)$$

となるような y'_k を用いると、 $M(\theta_k)$ がすべて直交行列であれば、

$$\begin{aligned} L(\theta_1, \dots, \theta_F) &\propto \int \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^F \|y'_k(\theta_k) - x\|^2\right) \\ &\propto \int \exp\left(-\frac{F}{2\sigma^2} \left(\frac{1}{F} \sum_{k=1}^F \|y'_k(\theta_k)\|^2 - \left\|\frac{1}{F} \sum_{k=1}^F y'_k(\theta_k)\right\|^2\right)\right) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。これを最大化するには、

$$V = \frac{1}{F} \sum_{k=1}^F \|y'_k(\theta_k)\|^2 - \left\|\frac{1}{F} \sum_{k=1}^F y'_k(\theta_k)\right\|^2 \quad (6)$$

を最小化すればよい。これは動き補正を施した観測画像の画素毎の分散の和となっている。

(2) 最適化と画像合成

V を最小化するパラメータ $\theta_1, \dots, \theta_F$ を一度に求めようとすると、広大な解空間を探索することになる。そこで、 $\{\theta_1, \theta_2\} \rightarrow \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\} \rightarrow \dots$ と、順番に求めていくことにし、 θ_k の初期値はその時点での θ_{k-1} とする。

反復解法で計算するには、画像の勾配を求める必要があるが、局所解に落ちるのを防ぐため、画像に強いローパスフィルタをかけた後で差分を取る。また、ドリフト防止のため、毎回の反復において θ_1 が一定値となるように値を修正する。

推定した運動パラメータ $\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_F$ を用いて、 x の推定値 \hat{x} を求める。

$$\hat{x} = \frac{1}{F} \sum_{k=1}^F y'_k(\hat{\theta}_k) \quad (7)$$

(3) シミュレーション実験

人工的に生成した画像を用いて実験を行った。モノクロ 8 ビット階調、 512×512 画素の画像内を、対象が半径 100 画素の円形軌道を描いて並進移動する。対象は 256×256 画素の Lenna 画像で、100 フレームで円軌道を 1 周する（移動速度 2π [pixel/frame]）。フレーム数 F は 1~100 とし、画像にぶれはないものとした。画像には平均 0 のガウシアンノイズを付加し、画素値が 8 ビットに収まるように、ゲインとオフセットを調整した。推定に

利用する範囲は 128×128 画素とし、合成画像のサイズもこれと等しくした。画像に付加するノイズの標準偏差 σ （ゲイン調整前の値）は 512 とした。図 1 に入力画像の例を示す。

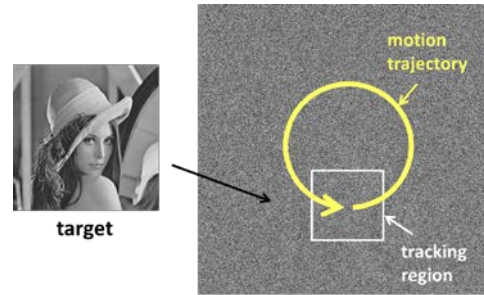


図 1 シミュレーションに用いた画像

図 2 に画像合成の結果を示す。フレーム数が増えるにつれて、ノイズが低減され、対象がより鮮明になっていく様子がわかる。

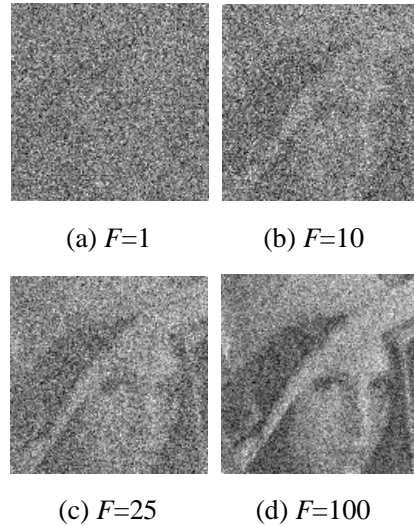


図 2 画像合成結果

図 3 に合成画像のピーク信号対雑音比 (PSNR) のグラフを示す。 $F=1$ の場合は合成画像は入力画像と一致し、PSNR は -6.0 dB であった。 F を上げていくにつれて PSNR は上がっていき、 $F=100$ のとき 13.2 dB となった。したがって、画像合成により、PSNR が 19.2 dB（倍率では 9.1 倍）向上したことになる。

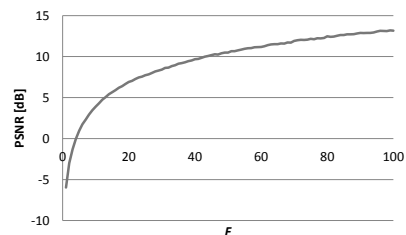


図 3 合成画像の PSNR

(4) 実画像を用いた実験

USB3 モノクロカメラ Flea3 FL3-U3-12S2M (Point Gray Research Inc.) を用いて、画像サイズ 640×480 、フレームレート 60fps で、100 フレーム分の動画像を撮影した。照明を消した夜間のオフィス環境で撮影し、光源はコンピュータのディスプレイのみであった。カメラから対象までの距離は約 100cm で、対象表面で照度計を用いて測定した照度は 0.01lx 以下 (用いた照度計の測定限界) であった。対象にはペットボトル飲料を用い、トラッキングと合成の領域は 128×128 画素とした。シミュレーションの時とは異なり、今回は動きを平面アフィン変換とした。図 4 に追跡結果を、図 5 に合成画像を示す。入力画像には、追跡領域を枠で示している。

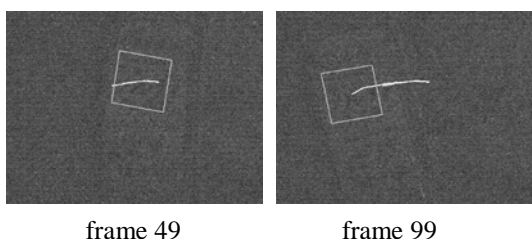


図 4 追跡結果

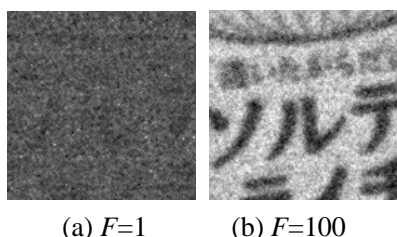


図 5 合成画像

(5) カラー画像を用いた実験

USB3 カラーカメラ Flea3 FL3-U3-12S2C (Point Gray Research Inc.) を用いて、カラー動画像を撮影した。撮影条件はモノクロのときとほぼ同じである。モノクロ画像に対するアルゴリズムと同じものをカラー画像の各チャンネル値を並べたデータに適用した。図 6 に追跡結果を、図 7 に合成画像を示す。色情報を含めて復元されていることがわかる。

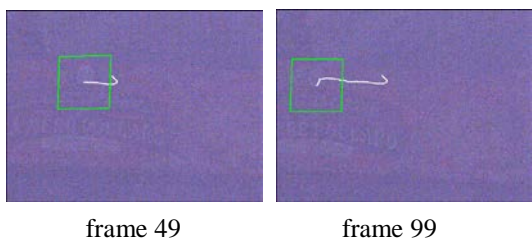


図 6 追跡結果



(a) $F=1$ (b) $F=100$

図 7 合成画像

(6) ぶれ画像の復元

対象の動きに対して露光時間が長い場合、撮影した画像にぶれが発生する。露光時間を短くすればぶれは抑えられるが、その分入射する光の量が減少し、 S/N がより悪化する。ぶれを考慮しつつ運動推定を行うのは難しいので、まずはぶれがないものと仮定して運動推定を行い、その結果を用いてぶれ補正を行う。推定したパラメータから、各フレームにおける PSF を計算する。動き推定においては、事前分布をフラットとしたが、ぶれ補正では、正則化のために画像の滑らかさを仮定する。図 8 にぶれを含む画像の復元結果を示す。

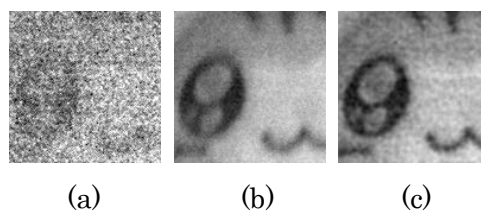


図 8 ぶれを含む画像の復元

(a) 入力画像 (frame 0), (b) 合成画像 (ぶれ補正なし), (c) 合成画像 (ぶれ補正あり)

ぶれを含む画像に対し、動き推定で推定したパラメータからぶれ補正を行うことで、ぶれの少ない画像を復元できることが示された。

(7) 最適フレームレートの導出

露光時間を長くすると、撮影する画像の S/N は向上するが、ぶれが大きくなる。また、露光時間が短いと、その分フレームレートを高くすることができるので、同一時間内に多くの画像が取得できる。そこで、フレームレートを変えて、画像合成とぶれ補正を行うシミュレーション実験を行った。露光時間はフレームレートの逆数 (フレーム間の時間) とした。3 節の実験で用いたフレームレートを $FR=1$ とし、 $FR=0.5 \sim 4$ に変えて実験を行った。1 フレーム当たりの対象の移動量は FR に反比例、合成に用いる画像の数 F は FR に比例するようにした。入力画像は、信号量に対するノイズ量の比が FR に比例するように付加す

るノイズ量を調整した。

図7は、 FR を0.25~4と変えたときのPSNRのグラフである。PSNRの評価尺度では、 σ が64および128のときは $FR=1$ の場合が最も良い結果となったが、 σ が大きくなるにつれて、 FR を小さくしたほうが良い結果になった。

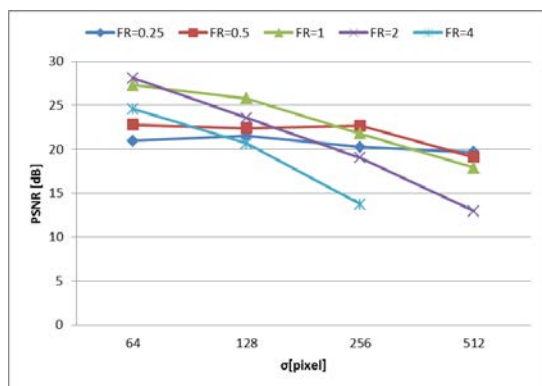


図9 フレームレートと PSNR の関係

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 2 件)

[1] Takashi Komuro, Hayato Kuroda: Object Tracking and Image Restoration from Multi-Frame Images Captured in a Dark Environment, ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol. 2, No. 2, pp. 176-184 (2014) 査読あり

[2] 小室孝: 暗闇での物体追跡と画像復元, 画像ラボ, Vol. 23, No. 11, pp. 10-14 (2012) 査読なし

[学会発表] (計 4 件)

[1] Hayato Kuroda, Takashi Komuro: Object Tracking and Image Restoration in the Dark, Proc. 2014 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT 2014), pp. 183-187 (2014) (IWAIT 2014 Best Paper Award 受賞) 査読あり

[2] 黒田隼, 小室孝: 暗闇で撮影した動画の画像合成による高画質化, 第19回画像センシングシンポジウム (SSII 2013) 講演論文集, IS1-06 (2013) 査読なし

[3] 小室孝, 黒田隼: 暗闇での物体トラッキングと画像合成による高画質化, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 36, No. 38, pp. 13-16 (IST2012-44) (2012) 査読なし

[4] 小室孝: 暗闇での物体追跡と画像復元,

電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 112, No. 20, pp. 41-46 (IE2012-8) (2012) 査読なし

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

小室 孝 (KOMURO, Takashi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 10345118