

解像度が大きく変化する魚眼カメラ画像列における超解像の提案

高野照久^{†1} 松下侑輝^{†2} 小野晋太郎^{†1} 川崎洋^{†2} 池内克史^{†1}

車両のバックカメラや監視カメラで、魚眼カメラの採用が広がっている。このような魚眼カメラは一般のデジタルカメラに比べて解像度が低く、レンズの収差等による画質の劣化が起こりやすい。本稿では、魚眼カメラの画像を複数枚使って超解像処理を行うことで、魚眼カメラで欠損しやすい高周波成分を復元する手法を提案する。そのために、魚眼カメラの歪みを補正して位置合わせし、歪補正後の画像で超解像を行う。超解像に用いる劣化行列には、レンズのブラーと歪補正による拡大・縮小を合わせたようなブラー行列を用いる。魚眼レンズを取り付けたデジタルカメラで撮影した画像を用いて実験を行い、本手法の有効性を確認したので、その結果を報告する。

Super Resolution of Fisheye Camera Images with Widely Varying Resolution

TERUHISA TAKANO^{†1} YUUKI MATSUSHITA^{†2} SHINTARO ONO^{†1}
HIROSHI KAWASAKI^{†1} KATSUSHI IKEUCHI^{†1}

Fisheye cameras are widely adopted in the back view camera of vehicles and the surveillance camera. Compared to the normal digital cameras, their resolution and image quality are low. In this paper, we propose a method to restore the high resolution images from the fisheye camera by the reconstructed type of super resolution. First, we undistort the fisheye images and regularize these images. Then we super-resolve these regularized images. Blur kernel for super resolution includes the lens blur and the expansion and reduction by the undistortion. The experimental results confirm to the effectiveness of our method which applies to the images captured by the digital camera with fish-eye lens.

1. はじめに

近年、クルマへのカメラの採用が広がっている。後退時の後方視界確認用のバックビューカメラ、アラウンドビューカメラ[1]や緊急ブレーキ装置、レーンキープアシスト用のフロントカメラなどである。この中で、視界確認用のカメラは視野角 180 度以上の魚眼レンズを採用したものが増えている。このような用途における魚眼カメラは、焦点が無限遠点になっていること、レンズを大きくすることができず F 値が大きいこと、などから一般的に低解像度、低分解能であり、画質が悪い。

一方で、クルマが常時インターネットに接続するコネクテッド・カーの普及が進んでいる。クルマに取り付けられたさまざまなセンサー情報をサーバーで処理し、運転やクルマの補修に必要な情報を提供するサービスも開始されている。今後、クルマに取り付けたカメラのデータをサーバーで共有し、渋滞画像のリアルタイム配信や街中のセキュリティ監視に利用することも考えられる。

セキュリティ監視の用途に使うには高い画質が要求されるので、本研究では魚眼カメラの画像を複数枚用いて超解像処理を行い、高周波成分を復元することを試みた。車載カメラでは、クルマが進行するに従い、時系列的に同一の対象物を複数回撮影することになる。そのため、対象物の位置合わせができれば複数枚超解像処理が有効である。

本論文では、まず撮像位置によって解像度が大きく変化する魚眼カメラ超解像の手法を説明する。次に、魚眼レンズを搭載したデジタルカメラを用いて、屋内およびクルマから撮影した屋外を撮影し、超解像を実施したのでその結果を報告する。最後に、今回の結果に対する考察と今後の展望を説明する。

2. 魚眼カメラ超解像の概要

本論文では、魚眼レンズを取り付けたデジタルカメラの画像を複数枚使用して超解像を行う。図 1 に処理の流れを示す。まず、魚眼レンズには大きな歪みがついているため、歪みを補正する。歪み補正のためにはレンズパラメータが必要となるため、超解像の前段階として魚眼レンズの歪みを計測する。歪みの計測には、既定の格子縞を複数枚撮影して行う手法を利用した[2][3]。次に、その魚眼カメラを用いて対象物体を複数枚撮影する。ここでは、評価のための屋内画像と実際にカメラを車載して撮影した画像の 2 種類を用いた。その後、撮影した画像から超解像を行う領域を設定し、テンプレートマッチングによる位置合わせを行う。テンプレートマッチングには、正規化相互相関による荒い位置合わせと位相限定相関[4]によるサブピクセル単位の位置合わせの 2 ステップを用いた。最後に位置合わせを行った複数枚の画像を使って再構成型の超解像処理を行う。超解像には、多くの手法が提案されている[5][6]が、今回は最急降下法を使った超解像を用いた[7]。超解像では、劣化行列においてブラーの行列が必要となる。特に、魚眼レン

^{†1} 東京大学 生産技術研究所

^{†2} 鹿児島大学大学院 工学部理工学研究科

ズを用いた超解像では、歪み補正後に超解像を行うため、魚眼レンズのブラーと歪み補正による拡大・縮小を合わせたブラー行列を考慮しなければならない。

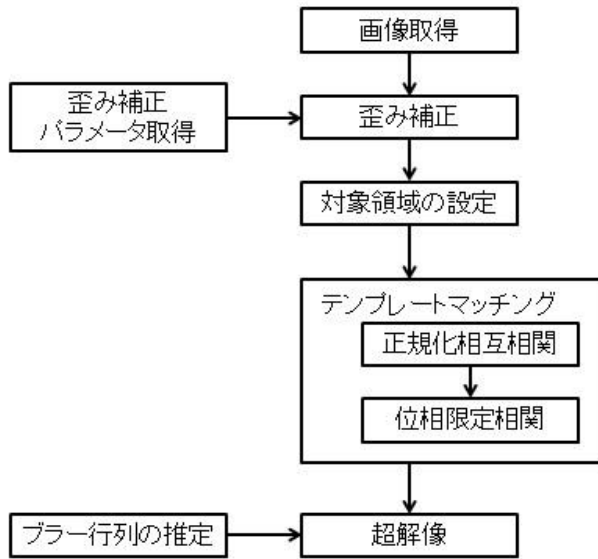


図 1 魚眼カメラ超解像の流れ

Figure 1 Flow of Super Resolution Process for Fisheye Camera.

3. 魚眼カメラ超解像手法

複数枚画像を使った再構成型の超解像では、大きく2つの処理が重要である。1つ目は、各画像間の位置合わせである。魚眼カメラでは、対象物の位置によって形状が変化するため、超解像前にレンズの歪み補正を行ってから位置合わせを行う。2つ目は、理想画像と観測画像の関係を表す劣化行列において、正確な劣化行列を推定することである。劣化行列は、動きとブラー、ダウンサンプルの3つからなる。動きについては位相限定相関の結果を用い、ブラーについては歪み補正後の輝度分布からベッセル関数型のブラー行列を仮定して使用する。以下に、本研究で用いる手法について説明する。

3.1 歪み補正

通常魚眼レンズは複数枚のレンズを用いて、撮像面に像を結ぶ。ここでは、モデルを簡単化するために、図2に示すものを採用する[2][3]。ここで、光軸ずれがない場合の理想的な撮像面上の点 p は次式であらわされる。

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ f(u, v) \end{bmatrix} \quad (1)$$

f は撮像面中心からの距離 $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$ の関数であるから、 $f(u, v) = f(\rho)$ と書ける。さらに f を次式に示す多項式で近似する。

$$f(\rho) = a_0 + a_1\rho + a_2\rho^2 + \dots + a_N\rho^N \quad (2)$$

撮像面と光軸にはずれが存在するため、実際の撮像面上の点 (u', v') と理想的な点 (u, v) の間には、以下のモデルを採用

する。

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & d \\ e & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} xc' \\ yc' \end{bmatrix} \quad (3)$$

以上より、 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_N, c, d, e, (xc', yc')$ を計算して歪みを補正する。

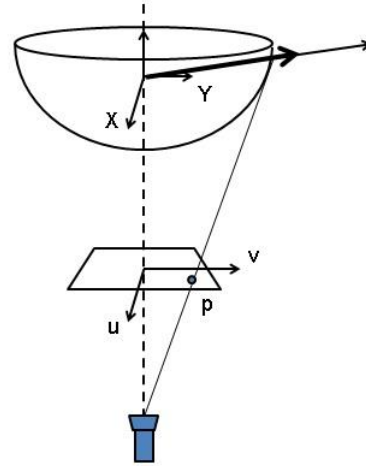


図 2 魚眼カメラを近似した球面モデル

Figure 2 Spherical Lens Model Equivalent to Fisheye Camera.

3.2 魚眼レンズのブラー

文献[8]にあるように、無収差レンズの焦点近傍の光の複素振幅は、 (θ, ϕ) の極座標系で書くと、

$$u(\vec{r}) = \iint \omega(\theta, \phi) e^{-jk(xs\sin\theta\cos\phi + ys\sin\theta\sin\phi + z\cos\theta)} \sin\theta d\theta d\phi \quad (4)$$

である。 $\omega(\theta, \phi)$ は各光線の寄与を表す重み関数、 z は像面からの距離である。レンズが円形の場合にこの計算は、ベッセル関数の母関数展開式

$$e^{jz\sin\phi} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(z) e^{jn\phi} \quad (5)$$

を用いて

$$u(r) = u_0 \frac{\lambda}{\pi s_m r} J_1(2\pi s_m r / \lambda) \quad (6)$$

と書ける。ここで、 $u_0 = u(0) = A\pi s_m^2$ は、原点における振幅である。以上より、レンズのブラーは1次のベッセル関数で表すことができる。

3.3 テンプレートマッチング（正規化相互相関と位相限定相関）による位置合わせ

歪み補正を行った後、時刻 t_i 画像中の対象領域 r_i を設定し、時刻 t_0 から時刻 t_n の画像中の対象領域 r_0 から r_n を正規化相互相関で求める。さらに、正規化相互相関で対象領域を荒く見つけた後、位相限定相関によりサブピクセル精度の位置合わせを行う。ここでは、位相限定相関[4]による

サブピクセル精度の位置合わせの理論的説明を行う。

画像 $a(n_1, n_2)$ を考える。 $a(n_1, n_2)$ の離散フーリエ変換を $A(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ とし、振幅スペクトルを1に正規化したスペクトルを $A'(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ とすると、

$$A'(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) = e^{j\alpha(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})} \quad (7)$$

である。同様に画像 $b(n_1, n_2)$ についても正規化スペクトル $B'(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) = e^{j\beta(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})}$ を考える。このとき、位相限定相関 $g_{ab}(n_1, n_2)$ は、 A' と B' の複素共役を乗算した合成信号 $F_{ab}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ の離散空間フーリエ逆変換となる。

$$F_{ab}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) = e^{j\{\alpha(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) - \beta(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})\}} \quad (8)$$

$$g_{ab}(n_1, n_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j(\alpha - \beta) e^{j\omega_1 n_1} e^{j\omega_2 n_2}} d\omega_1 d\omega_2 \quad (9)$$

ここで、画像 $b(n_1, n_2)$ が画像 $a(n_1, n_2)$ に対して n_1 方向に τ だけ移動した画像 $b(n_1, n_2) = a(n_1 - \tau, n_2)$ を考えると、画像 $a(n_1, n_2)$ と $b(n_1, n_2)$ の合成信号と位相限定相関は以下で与えられる。

$$F_{ab}(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) = e^{j\{\alpha(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) - \beta(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) + \omega_1 \tau\}} \quad (10)$$

$$g_{ab}(n_1, n_2) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j(\alpha - \beta + \omega_1 \tau) e^{j\omega_1 n_1} e^{j\omega_2 n_2}} d\omega_1 d\omega_2 = g_{ab}(n_1 + \tau, n_2) \quad (11)$$

これより、2つの信号間で位置ずれ τ がある場合には、位相限定相関全体が τ ずれることがわかる。位相限定相関では鋭いピークを持つので、このピークを調べることで画像の位置ずれ量を測定できる。

3.4 複数枚画像を用いる再構成型超解像

本研究では、複数枚の画像を用いた再構成型の超解像手法[7]を用いた。理想的な画像を Y 、観測される画像を X_k とすると、理想的な画像は、動き、ブラー、ダウンサンプルに分解される劣化行列に影響を受けて観測される。動きを表す行列を F 、ブラーをあらわす行列を $H(u, v)$ 、ダウンサンプルを表す行列を D とすると、 $X_k = (DHF)Y$ と書くことができる。 (DHF) を劣化行列と呼ぶ。今回用いた手法では、複数枚の観測画像から理想画像を求めるために、以下に示される繰り返し演算を行い、理想画像に近づけていく。

$$X_{n+1} = X_n - \beta \left\{ \sum_{k=1}^N F_k^T H_k^T D_k^T \text{sign}(D_k H_k F_k X_n - Y_k) \right\}$$

$$+ \lambda \sum_{l=-p}^p \sum_{m=0}^p \alpha^{m+l} \left[I - S_y^{-m} S_x^{-l} \right] \text{sign}(X_n - S_x^l S_y^m X_n) \quad (12)$$

ここで、 β は収束のステップサイズを、 λ は画像の滑らかさの拘束の強さを、 α は距離に関する減衰を表すパラメータになっている。また、 S_x^l 、 S_y^m は画像を x 、 y 方向にそれぞれ l 、 m ピクセル平行移動する行列を表す。 I は単位行列、 sign は符号関数で、正の場合に1、負の場合に-1を返す関数である。理想画像 X の初期値 X_0 として、時刻 t_i における観測画像 Y_i をバイリニア補間により拡大した画像を代入し、繰り返し演算することで理想画像を求める。

劣化行列のうち、 F については、3-3節で示した位相限定相関により求める。今回は平行移動のみ処理に追加した。 $H(u, v)$ については、3-2節で示した1次のベッセル関数から計算した行列を使う。歪み補正による拡大・縮小、レンズ中心とレンズ端におけるブラーの変化などを考慮して、撮像位置に応じたブラー行列を計算すべきだが、今回は一様なブラー H を仮定した。 D については、拡大率のためパラメータの設定となる。今回は4倍に拡大した。

4. 実験

本研究では、評価のための屋内実験と魚眼レンズ付きデジタルカメラを車載して風景を撮影する屋外実験を行う。カメラはCanon製デジタルカメラ(EOS Kiss Digital X)に、シグマ製魚眼レンズ(8mm F3.5 EX DG CIRCULAR FISHEYE)を取り付けたものを使用した。屋内実験では、カメラから約100mmの位置にペットボトルを設置し、そのペットボトルを光軸と垂直な面上で移動させて画像を撮影した。屋外実験では、カメラを車内に設置して、車両の進行方向と垂直な方向に光軸を向けて風景を撮影した。図3にカメラと対象物の関係と画像の一例を示す。

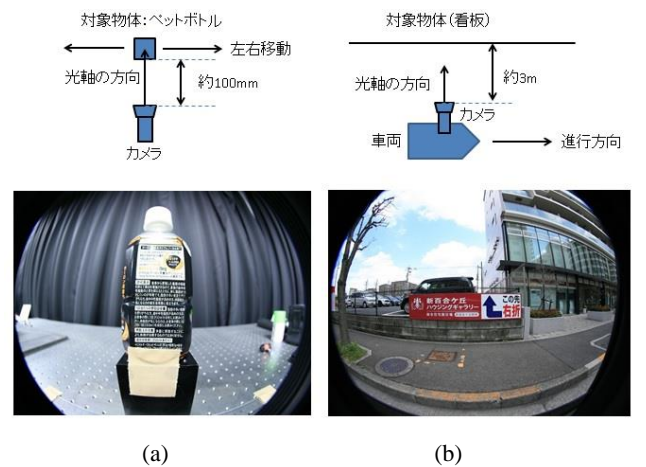


図3 カメラの向きと魚眼カメラ画像例。(a)屋内 (b)屋外
Figure 3 Camera Direction and Image Sample of Fisheye Camera. (a) Inside. (b) Outside.

4.1 歪み補正

魚眼レンズの歪み補正には、図4に示す格子縞を用いる手法を使用した。魚眼カメラの前で格子縞を適当に動かしながら、複数回撮影する。使用する画像は通常10枚程度で十分である。その後、自動および手動で格子の交点を求めて、入射角と像高の関係を求める。この関係を図5に示す。このグラフは、上側が像高とFの関係を表しており、下側が像高と入射角の関係を示している。また、求めた入射角と像高の関係式を使って歪み補正した結果を図6に示す。屋内と屋外では対象物までの距離が異なるため、フォーカスが異なる。そのため、屋内と屋外それぞれで格子縞を撮影して歪みパラメータを求めた。

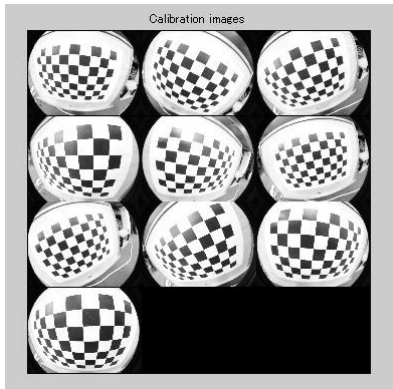


図4 格子パターン
 Figure 4 Grid Pattern

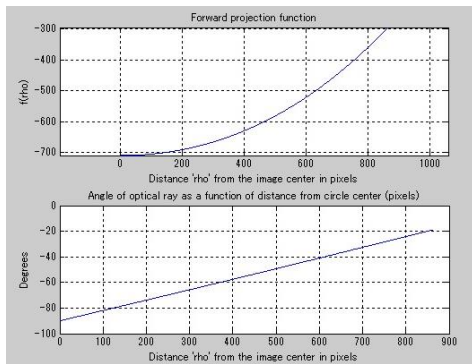


図5 歪みパラメータ 上: x:F-y:像高, 下: x:入射角-y:像高
 Figure 5 Lens Parameter. Upside: F to distance from sensor center, downside: angle of optical ray to distance from center.

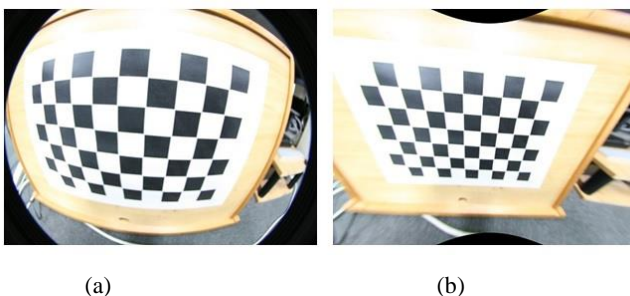


図6 キャリブレーション結果. (a)補正前 (b)補正後
 Figure 6 Calibration. (a) Distorted. (b) Undistorted.

4.2 ブラー行列の設計

4-1節で撮影した格子縞の輝度分布を求めて、エッジ部分の立ち上がり方よりブラー行列を推定した。用いた画像と輝度分布を図7に示す。一方で、格子縞をプリントアウトする前の画像データからブラー画像を作成し、輝度分布を作成する。両者の分布がほぼ一致するように、ベッセル関数の形状を変えながら適切なブラー行列を設定する。今回は、超解像での計算時間を考慮し、表1に示す11x11pixelのブラー行列を用いた。今回のブラー行列は、画像全体に一樣なブラー行列を用いており、画像の中心と画像の端におけるブラー行列の変化は考慮していない。

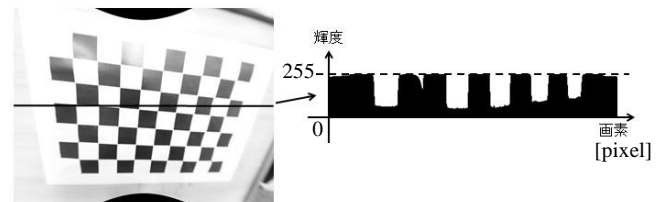


図7 輝度分布
 Figure 7 Brightness Distribution.

表1 ベッセル関数を使って求めたブラー行列

Table 1 Blur matrix by 1st dimension Bessel function.

0	0	0.011045	0.016479	0.017474	0.017169	0.017474	0.016479	0.011045	0	0
0	0.013523	0.017169	0	0.030563	0.051094	0.030563	0	0.017169	0.013523	0
0.011045	0.017169	0	0	0.030563	0.051094	0.030563	0	0.017169	0.013523	0.011045
0.016479	0	0	0.080078	0.242515	0.332612	0.242515	0.080078	0	0.016479	0.017474
0.017474	0	0.030563	0.242515	0.592879	0.774578	0.592879	0.242515	0.030563	0.017474	0.017169
0.017169	0	0.051094	0.332612	0.774578	1	0.774578	0.332612	0.051094	0.017169	0.017474
0.017474	0	0.030563	0.242515	0.592879	0.774578	0.592879	0.242515	0.030563	0.017474	0.016479
0.016479	0	0	0.080078	0.242515	0.332612	0.242515	0.080078	0	0.016479	0.011045
0.011045	0.017169	0	0	0.030563	0.051094	0.030563	0	0.017169	0.013523	0.011045
0	0.013523	0.017169	0	0.030563	0.051094	0.030563	0	0.017169	0.013523	0
0	0	0.011045	0.016479	0.017474	0.017169	0.017474	0.016479	0.011045	0	0

4.3 超解像に用いるテンプレート

今回の超解像で用いたテンプレートを図8に示す。時刻 t_i の画像から切り出した64x64pixel小領域の画像をテンプレートとし、時刻 t_0 から t_n までの画像に対して正規化相互相関で超解像用のテンプレートを増やす。超解像に用いるテンプレート群を図9に示す。屋内画像では24枚、屋外画像では5枚のテンプレートを用意した。さらに、これらのテンプレートは正規化相互相関による荒い位置合わせであるため、位相限定相関によりサブピクセル精度で位置合わせを行った。

4.4 超解像結果

4-3節に示したテンプレート群を用いて位相限定相関によるサブピクセル精度の位置合わせを行い、超解像を行った。式(12)における超解像のパラメータは、 $\beta = 1.0, \lambda = 0.2, \alpha = 0.5, p = 3$ である。また、劣化行列のブラー行列には4-2節で計算したブラー行列を用いた。繰り返し回数20/100/200回の際の超解像結果を図10に示す。屋内画像では高周波成分の復元ができており、16枚のテンプレートを使った画像において最も超解像の効果が表れている。

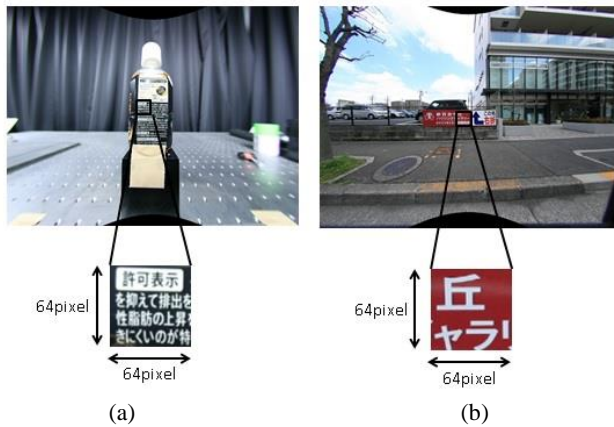


図 8 初期テンプレート. (a)屋内 (b)屋外
 Figure 8 Default Template. (a) Inside. (b) Outside.

しかし、16枚から24枚にテンプレートの数を増やした時に、高周波成分の復元が弱くなっており、超解像の効果が薄れている。屋外画像では繰り返し回数を増やした時にノイズが増えていることがわかる。

5. まとめ

魚眼カメラ画像に対する超解像に関して、歪み補正後の画像を使って正規化相互相関・位相限定相関によるサブピクセル精度の位置合わせを行い、超解像を行う手法を提案した。実際に、魚眼レンズを搭載したデジタルカメラで撮影した画像を用いて超解像を行い、魚眼カメラ画像においても複数枚の画像を使った超解像が有効であることを示した。

今回は、劣化行列のブラー行列としてブラーが異なる行列を使用した。しかし、レンズ中心とレンズ端では歪み補正により画像の拡大率が異なるため、撮像位置に応じた個別のブラー行列を用いたほうがより正確である。図11に個別のブラー行列についてサンプル画像を用いて実験した結果を示す。これは、画像個別のブラー行列を用いてサンプル画像にブラーを追加した後、一様なブラー行列で超解像



図 11 個別ブラー行列による超解像結果. (a)個別ブラー行列 (b)一様ブラー行列

Figure 11 Result by the Individual Blur Matrix. (a) Individual. (b) Uniform.

した画像と個別のブラー行列で超解像した画像とを比較したものである。確かに、個別のブラー行列を用いて超解像した画像において画質が改善されている。これより、実画像でも撮像位置に応じたブラー行列の推定により画質の改善が見込まれそうなことがわかる。

また、カメラを車載して撮影した風景画像では、繰り返し回数を増やすことによりノイズが増加した。超解像に用いたテンプレートを見ると、対象物の形状に平行移動だけでは表せない変形が起きている。これは、対象物とカメラの光軸が垂直でない、車の移動によりカメラがぶれる、などの原因が考えられる。劣化行列の動き行列として平行移動のみを仮定しているために、形状の変化に対応する位置合わせが実現できていない。これにより超解像の効果が十分に発揮できなかったものと考えられる。さらに、車両のサイドミラーに取り付けた実際の車載カメラにおいては、前景画像と背景画像のオクルージョンなどが起こりうることも課題である。

今後は、撮像位置に応じたブラー行列の推定と、車載時に起こりうることを見据えた平行移動だけでなく動き行列の推定を行う予定である。前者では、魚眼レンズの中心と端におけるブラーを推定し、歪み補正による拡大・縮小でブラーの量が変形した時に、その量をベッセル関数で表して劣化行列に追加する。また、後者では、拡大・縮小に加えてアフィン変換で表される変形に対する動きを行列に追加して超解像を行うと良いと考えている。

参考文献

- 1) 日産自動車: 製品情報
<http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/avm.html>
- 2) Scaramuzza, D., Martinelli, A., Siegwart, R.: A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion. Proceedings of IEEE International Conference of Vision Systems (ICVS'06), January (2006) 5-7
- 3) Scaramuzza, D., Martinelli, A., Siegwart, R.: A Toolbox for Easy Calibrating Omnidirectional Cameras. Proceedings to IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), October (2006) 7-15
- 4) 荻原, 川又: 位相限定相関を用いた画像のサブピクセル精度の位置ずれ検出, Technical Report of IEICE. (2001-06) 79-86
- 5) Farsiu, S., Elad, M., Milanfar, P.: A Practical Approach to Superresolution: Visual Communication and Image Processing: Volume 6077. (2006)
- 6) Park, S.C., Park, M.K., Kang, M.G.: Super-resolution image reconstruction: A technical overview, IEEE Signal Processing Magazine 20 (2003) 21-36.
- 7) Farsiu, S., Robinson, D., Elad, M., Milanfar, P.: Fast and robust multiframe super resolution: IEEE Trans. Image Processing 13 (2004) 1327-1344.
- 8) 黒田: 光学 講義ノート 第6章
<http://qopt.iis.u-tokyo.ac.jp/optics>

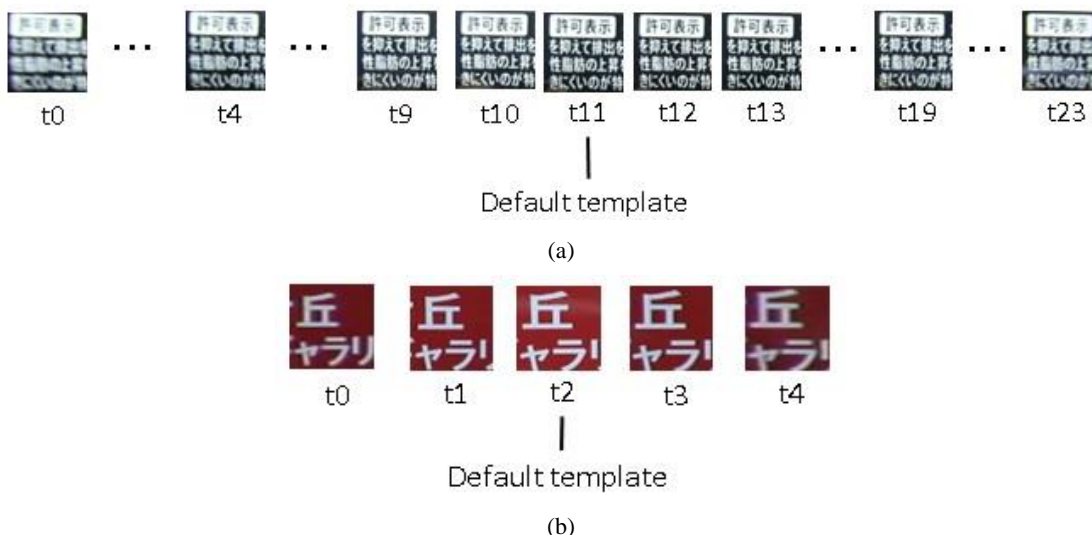


図 9 超解像に使用した画像列. (a)屋内 (b)屋外

Figure 9 Group of Template for Super Resolution. (a) Inside. (b) Outside.



図 10 超解像結果. (a)屋内 (b)屋外

Figure 10 Result. (a) Inside. (b) Outside.