

車載魚眼カメラ画像の超解像処理における入力枚数と品質の トレードオフ最適化に関する検討

高野 照久 小野 晋太郎* (東京大学)

松下 脩暉 川崎 洋 (鹿児島大学)

池内 克史 (東京大学)

Study on Trade-off between the Number and the Quality of Input Images for Super Resolution of On-Vehicle Fisheye Camera

Teruhisa Takano, Shintaro Ono* (The University of Tokyo)

Yuuki Matsushita, Hiroshi Kawasaki (Kagoshima University)

Katsushi Ikeuchi (The University of Tokyo)

A super wide-angle lens or a fisheye lens, which is commonly used for on-vehicle camera, generally gives distorted images, and the relative resolution becomes quite lower in the peripheral area of the sight. Therefore, when the on-vehicle camera sequentially observes and tracks a particular target area in a scene, the captured images inevitably include the images with both better and worse quality. This brings out a trade-off for super-resolution process, between the number and the quality of input images. In this report we examine and discuss some conditions to obtain the optimal super-resolution result under such constraints.

キーワード：再構成型超解像，車載カメラ，超広角カメラ，魚眼レンズ，レンズ歪み

(Keywords: Reconstruction-based super resolution, On-vehicle camera, Super wide-angle camera, Fisheye lens, Lens distortion)

1. はじめに

カメラやなど各種の車載センサは、事業用車両のみならず一般車両へも普及が進んでいる。これにより、様々な道路交通環境が高い頻度で観測され得る時代が到来している。これらの大量データを収集し、個人情報適切に保護した上で共有することができれば、道路管理、交通管理、地図構築、ナビゲーション、防犯・犯罪捜査など、業務効率化や利便性向上を通じて社会への貢献が期待できる。

一般車両に搭載される視界支援用カメラは、少ない台数で広い範囲をカバーするため、超広角レンズ、魚眼レンズが用いられることが多い。一般に、このようなカメラは他のカメラよりも解像度（画角あたりの画素数）が低い。また、レンズの中央付近で観測される領域は相対的に高品質であるが、レンズ周辺部で観測される領域は低品質である。我々はこれまでに、このような車載魚眼カメラの特性を考慮した「適応的劣化モデル」に基づいた超解像処理手法⁽¹⁾を開発し、後処理によって高精細の画像を生成している。

再構成型超解像処理を行うためには、ある程度の枚数の

入力画像が必要である。実環境において車載魚眼カメラを利用する場合、車両が進行しながら対象を観測するため、その対象がレンズの中央付近で観測される回数は限られる。

従って、車載カメラ画像による再構成型超解像処理を行う際には、処理対象とする画像の入力枚数とその解像度の間にトレードオフが生じる。すなわち、入力枚数を多く確保することは、レンズ周辺部近くで観測した低解像度画像が含まれることを意味する。

本稿では、このような制約下でより良い超解像結果を得るために必要な入力画像の条件について検討する。

2. 魚眼カメラにおける超解像処理

〈2・1〉 あらまし 一般に再構成型超解像処理においては、観測された低解像度画像は、理想的な高解像度画像が各種の要因による「劣化過程」を経て観測されたものであると考える。理想画像の劣化画像と、観測画像の差を最小化するような理想画像を求めれば、超解像処理が実現される。

魚眼カメラにおける超解像処理は、次のように定式化さ

れる。

$$\min_{\mathbf{X}} \sum_k |D_k B_k \mathbf{X} - \mathbf{z}_k| \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\mathbf{z}_k = H_k \mathbf{y}_k$$

$\mathbf{X}$ は理想画像、 $\mathbf{y}_k$ は観測画像の歪みを補正した画像、 $\mathbf{z}_k$ は $\mathbf{y}_k$ に変形位置合わせ H_k を施した画像である。 B_k , D_k は画像に対してブラー (ぼけ)、ダウンサンプルを施す演算である。



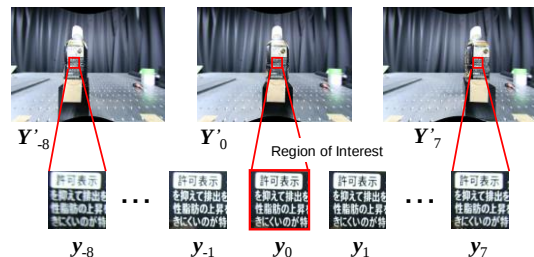
図 1 魚眼カメラ画像の超解像処理のあらまし
Fig. 1. Overview of the super-resolution for fisheye images.

〈2・2〉 画像の変形位置合わせ 自動車の運動には平行移動成分だけでなく回転成分が含まれるため、同じ対象を観測した複数の画像領域の間では、位置ずれだけでなく変形が生じている。ここでは、位置ずれ・変形が局所的に射影変換 H_k で表されると仮定し、これを求めることで変形位置合わせを実現する。

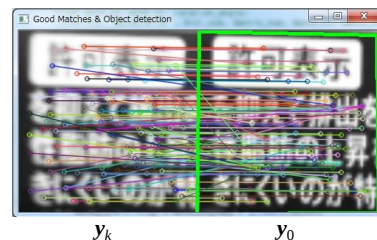
最適な射影変換は2段階の処理により求める。まず前処理として、観測画像 $\{\mathbf{Y}_k\}$ に対してレンズ歪み補正を行った画像 $\{\mathbf{Y}'_k\}$ を求め、基準画像 $\mathbf{Y}'_0$ から超解像処理の対象矩形領域 $\mathbf{y}_0$ を指定しておく。

次に、他の観測画像 $\{\mathbf{Y}'_k | k \neq 0\}$ で $\mathbf{y}_0$ に対応する領域 $\{\mathbf{y}_k | k \neq 0\}$ をテンプレートマッチング (正規化相互相関) により求める。

最後に、 $\mathbf{y}_k$ と $\mathbf{y}_0$ の間で SURF 特徴点⁽²⁾の対応を探索する。この対応点の組から、射影変換を適用した後の画像 $\mathbf{z}_k = H_k \mathbf{y}_k$ において対応点間の距離の総和が最小となるような射影変換行列 H_k が計算される。基準画像においては $H_0 = I$ (単位行列) である。



(a) 歪み補正後画像のテンプレートマッチング



(b) SURF 特徴対応点による射影変換行列の推定

図 2 画像の変形位置合わせ
Fig. 2. Deformable image alignment.

〈2・3〉 適応的ブラーモデルとブラーの推定 次に、画像上に生じるブラー (ぼけ) を定式化・定量化する。ブラーは、以下の 3 つの光学的・幾何学的要因により構成されると仮定する。

- ・ σ_L : レンズブラー (レンズを通る光の回折・干渉の影響)
- ・ σ_F : デフォーカスブラー (ピントぼけ)
- ・ s_x, s_y : ブラーの伸縮 (レンズ歪み補正による画像伸縮の影響)

これらを全て合成したブラーは以下のように表される。

$$B(x, y) = G_{\sigma_x \sigma_y}(x, y)$$

$$= \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_x = s_x \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_F^2}, \quad \sigma_y = s_y \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_F^2}$$

σ は正規分布で近似された光の拡がりの度合いを表すパラメータである。以降では σ をブラーのサイズと呼ぶ。

観測対象がレンズ中心の正面にあり、ピントの合った状態で撮影された画像 (歪み補正・変形位置合わせ後画像) $\mathbf{z}_0$ にはレンズブラーのみが生じている。このとき明暗エッジを観測すれば σ_L を求めることができる。このエッジの立ち上がり、理想的な明暗エッジにサイズ σ_L のガウシアンブラーをかけた画像が一致する (正規化相互相関が最大となる) ときの σ_L が求めるべき σ_L である。

一方、観測対象がレンズ中心の正面にない画像 (歪み補正・変形位置合わせ後画像) $\{\mathbf{z}_k | k \neq 0\}$ では、 $\sigma_L, \sigma_F, s_x, s_y$ の

影響が含まれており、 $\mathbf{z}_0$ との違いは σ_F, s_x, s_y である。従って、それらを表すガウシアンブラーである $G_{\sigma_x \sigma_y}(x, y)|_{\sigma_L=0}$ を $\mathbf{z}_0$ に施した画像が $\mathbf{z}_k$ と一致する（正規化相互相関が最大となる）ときの σ_F が求めるべき σ_F である。

ブラーの伸縮 s_x, s_y は、歪み補正前後の画像の伸縮率に等しく、歪み補正のパラメータから求めることができる。

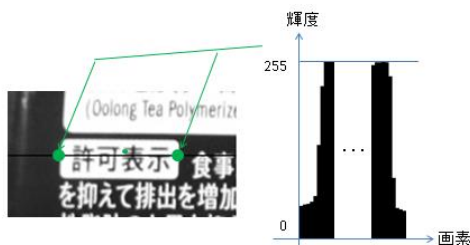


図 3 明暗エッジの輝度変化を利用したブラー推定
Fig. 3. Blur estimation using brightness edge.

〈2・4〉 超解像処理の計算 超解像処理の計算は、最急降下法に基づいた繰り返し演算⁽³⁾により行う。理想画像の近似解は以下の漸化式により求められる。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{n+1} = & \mathbf{X}_n - \beta \left\{ \sum_k \mathbf{B}_k^T \mathbf{D}_k^T \text{sign}(\mathbf{D}_k \mathbf{B}_k \mathbf{X}_n - \mathbf{z}_k) \right. \\ & \left. + \lambda \sum_l \sum_m \{ \alpha^{|l|+|m|} [I - \mathbf{S}_y^{-m} \mathbf{S}_x^{-l}] \text{sign}(\mathbf{X}_n - \mathbf{S}_x^l \mathbf{S}_y^m \mathbf{X}_n) \} \right\} \\ & -p \leq l \leq p, 0 \leq m \leq p, l+m \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで β は収束のステップサイズ、 λ は画像の滑らかさの拘束の強さ、 α は距離に関する減衰を表すパラメータである。また $\mathbf{S}_x^l, \mathbf{S}_y^m$ は画像を x, y 方向に l, m ピクセル平行移動する行列を表す。理想画像 $\mathbf{X}$ の初期値 $\mathbf{X}_0$ には、適当な補正後観測画像 $\mathbf{z}_k$ を線形補間により拡大した画像を用いる。

3. 超解像処理実験

魚眼カメラを用いて超解像効果の確認を行った。

〈3・1〉 実験条件 シーン1（屋内）では奥行き約 100 mm、シーン2（屋外）では奥行き約 3m の位置に対象物体を設定し、カメラを連続的に移動させて静止画を撮影した。カメラとレンズは民生品である Canon EOS Kiss Digital X と SIGMA 8mm F3.5 EX DG Circular Fisheye を用いた。

その後、対象をカメラの光軸上、すなわちレンズ中央正面で捉えた画像（基準画像）を含む連続 16 枚の画像を抽出して歪みを補正し、画像内の 64×64 ピクセルを対象領域として位置合わせ、ブラー推定、超解像処理を行った。式（3）

のパラメータは $\beta = 1.0, \lambda = 0.2, \alpha = 0.5, p = 3$ とした。

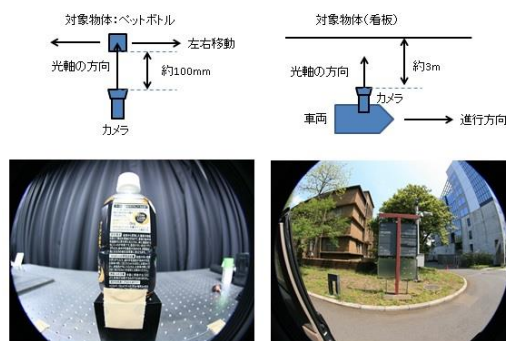


図 4 実験条件

Fig. 4. Configuration of the experiment.

〈3・2〉 超解像処理の結果 本手法（適応的劣化モデル）による超解像結果を図 5 に示す。比較の参考として、適応的劣化モデルを使用しない場合（射影変換行列 H とデフォーカスブラー σ_F を定数とした場合）の結果も併せて示す。適応的劣化モデルの効果が現れていることがわかる。

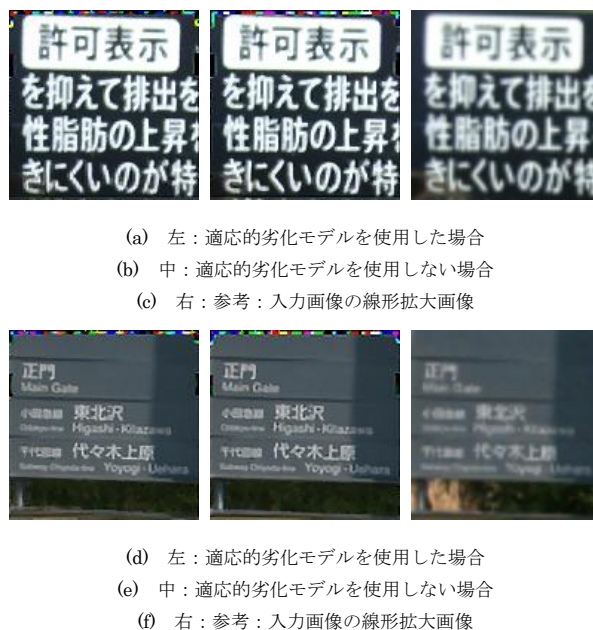


図 5 超解像結果

Fig. 5. Result of the super-resolution.

4. 入力画像の枚数・品質の変化にともなう超解像効果の検証

1 章に述べた影響を検証するため、入力画像の枚数と劣化パラメータ（ブラー、位置ずれ）の関係を考慮して、表 1 の条件に沿って超解像効果の検証を行った。

表 1 超解像効果の検証条件

Table 1. Conditions for verifying the effect of the super-resolution.

	入力画像	正解画像	位置ずれ量	ブラーサイズ	定量評価指標
1)	実測	未知	推定により求める	推定により求める	—
2)	人為的に生成	既知	真値を与える	真値を与える	PSNR
3)	人為的に生成	既知	誤った値を与える	真値を与える	PSNR

表 2 ブラーサイズの推定値

Table 2. Estimated values of the blur size.

Index k	k'	Lens blur σ_L	Defocus blur σ_F	$\sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_F^2}$	Scaling		Total blur		
					s_x	s_y	σ_x	σ_y	Mul. Mean
-16	0	0.75	4.3	4.36	1.33	0.81	5.82	3.54	4.54
-15	1	0.75	3.6	3.68	1.25	0.79	4.61	2.91	3.66
-14	2	0.75	3.3	3.38	1.19	0.78	4.01	2.64	3.25
-13	3	0.75	5.0	5.06	1.12	0.75	5.68	3.81	4.65
-12	4	0.75	5.5	5.55	1.05	0.74	5.82	4.13	4.90
-11	5	0.75	2.5	2.61	0.98	0.73	2.57	1.90	2.21
-10	6	0.75	2.2	2.32	0.93	0.71	2.16	1.65	1.89
-9	7	0.75	1.8	1.95	0.89	0.70	1.73	1.36	1.53
-8	8	0.75	1.5	1.68	0.84	0.69	1.41	1.15	1.28
-7	9	0.75	1.2	1.42	0.80	0.67	1.13	0.95	1.04
-6	10	0.75	1.0	1.25	0.76	0.67	0.95	0.83	0.89
-5	11	0.75	0.8	1.10	0.72	0.65	0.79	0.72	0.75
-4	12	0.75	0.0	0.75	0.70	0.64	0.52	0.48	0.50
-3	13	0.75	0.0	0.75	0.67	0.64	0.51	0.48	0.49
-2	14	0.75	0.3	0.81	0.65	0.63	0.53	0.51	0.52
-1	15	0.75	0.0	0.75	0.63	0.63	0.48	0.47	0.47
0	16	0.75	0.0	0.75	0.62	0.62	0.47	0.47	0.47
1	17	0.75	0.0	0.75	0.62	0.62	0.46	0.47	0.46
2	18	0.75	0.0	0.75	0.62	0.62	0.46	0.46	0.46
3	19	0.75	0.0	0.75	0.62	0.62	0.46	0.47	0.46
4	20	0.75	0.0	0.75	0.62	0.62	0.46	0.46	0.46
5	21	0.75	0.0	0.75	0.62	0.62	0.47	0.47	0.47
6	22	0.75	0.0	0.75	0.63	0.63	0.48	0.47	0.47
7	23	0.75	0.0	0.75	0.67	0.63	0.50	0.48	0.49
8	24	0.75	0.0	0.75	0.70	0.65	0.52	0.48	0.50
9	25	0.75	1.5	1.68	0.71	0.65	1.19	1.08	1.14
10	26	0.75	0.8	1.10	0.74	0.66	0.82	0.72	0.77
11	27	0.75	1.2	1.42	0.79	0.67	1.12	0.95	1.03
12	28	0.75	1.6	1.77	0.82	0.68	1.45	1.20	1.32
13	29	0.75	1.7	1.86	0.86	0.70	1.61	1.29	1.44
14	30	0.75	2.0	2.14	0.93	0.71	1.98	1.52	1.73
15	31	0.75	2.2	2.32	0.97	0.72	2.25	1.67	1.94

〈4・1〉 入力画像の追加とブラーの上昇にともなう超解像効果の検証（実測画像） 入力画像を、基準画像を含む連続 8 枚、16 枚、32 枚とした場合について超解像効果の違いを比較した。3 章の実験で得られた全画像のブラーサイズは表 2 の通りであった。従って本検証におけるブラーサイズは最大で表 3 のようになる。

検証の結果を図 6 に示す。入力画像枚数が 8 枚を越えると、却って画質が悪化していることが分かる。すなわち、本実験条件においては、ブラーサイズがおよそ 1 を越える画像を超解像に含めることには問題があったことが分かる。

表 3 各検証条件におけるブラーサイズの最大値

Table 3. Maximum value of blur size in each condition.

入力画像 枚数	レンズ ブラー	デフォーカ スブラー	全体ブラー (X 方向)	全体ブラー (Y 方向)
8	0.75	0.0	0.52	0.48
16	0.75	1.5	1.4	1.2
32	0.75	4.3	5.8	3.5

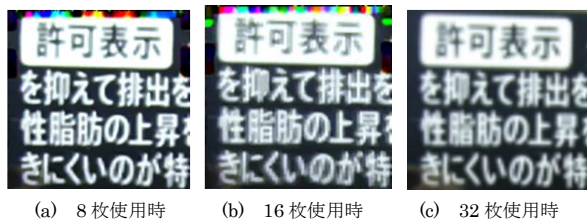


図 6 入力画像の追加とブラーの上昇にともなう超解像効果の検証結果

Fig. 6. Result of verifying the super-resolution with more input images and larger blur.

〈4・2〉 入力画像の追加とブラーの上昇にともなう超解像効果の検証（シミュレーション画像） 4.1 の検証は実測画像を用いるため、位置ずれ補正やブラーサイズなどを推定により求めているが、実際には推定に誤差が含まれていると考えられる。そこで、ある画像に対して人為的に劣化（位置ずれ、ブラー、ダウンサンプル）を与えた「シミュレーション画像」を用意し、劣化過程を既知として超解像処理の入力とした場合の効果を検証する。

シミュレーション画像は 2 種類を用いる。1 種類目は、実画像を人為的に劣化させた画像である。3.1 のシーン 1 において、対象をカメラの光軸上で撮影した画像を n ピクセルだけ横方向に平行移動させた画像群を生成する。ここで n は 0 以上 2 以下の一様乱数である。この画像群に対して二次元ガウス関数の等方性ブラーをかける。ブラーのサイズは $\sigma = 0.3, 0.5, 0.7, 1.0$ の 4 通りである。最後に各画像を $1/2$ に縮小する。

2 種類目は、人工画像（周期的な縦縞パターン）を人為的に劣化させた画像である。パターンは、横方向 8 ピクセル中 2 ピクセルが高輝度（輝度値 200）、残り 6 ピクセルが低輝度（同 50）の繰り返しである。これに対して 1 種類目と同様のランダム平行移動、ブラー、ダウンサンプルを施して低解像度画像生成する。

このように生成した劣化シミュレーション画像を入力として、劣化パラメータ（位置ずれ、ブラー、ダウンサンプル）を既知として一連の超解像処理を行った。図 7 にその結果の一例を示す。

この実験では、劣化させる前の画像が理想画像（正解画像）であるため、PSNR による定量的な真値比較を行うことができる。その結果を図 8 に示す。一般に画像の圧縮・復

元においては PSNR = 35 程度が品質の目安とされることから、位置ずれとブラーの推定に誤差がなければ、入力画像の枚数は 8 枚程度でも十分な品質を得られることが分かる。

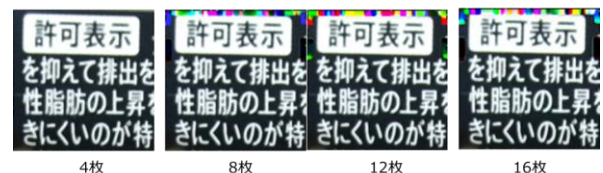
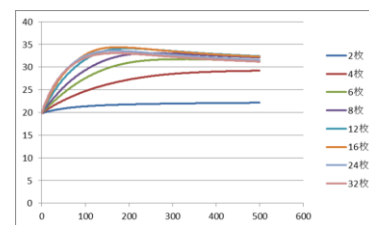
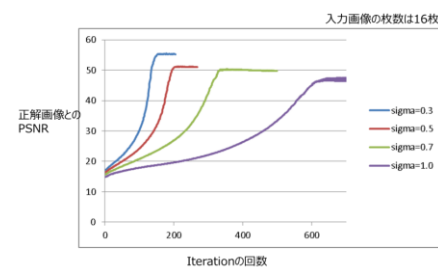


図 7 劣化シミュレーション画像を用いた場合の超解像結果の例

Fig. 6. Result of the super-resolution when the simulative degraded images are used as input.



(a) 実画像の劣化シミュレーション画像を用いた場合



(b) 人工画像の劣化シミュレーション画像を用いた場合

図 8 劣化シミュレーション画像を用いた場合の超解像の品質評価 (PSNR)

Fig. 8. Quantitative quality evaluation of the super-resolution when the simulative degraded images are used as input.

表 4 画像位置ずれ推定誤差の度数分布
Table 4. Frequency distribution of image alignment error.

	パターン1			パターン2			パターン3			パターン4			パターン5	
平均	0			0			0			0			-	
標準偏差	0.2			0.15			0.1			0.05			-	
	正規分布	丸め値	採用値	正規分布	丸め値	採用値	正規分布	丸め値	採用値	正規分布	丸め値	採用値	採用値	
位置 ずれ 誤 差	-0.5	0.098	0	0	0.011	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0	ラン ダム
	-0.4	0.223	0	0	0.068	0	0	0.002	0	0	0.000	0	0	
	-0.3	0.525	1	1	0.304	0	0	0.048	0	0	0.000	0	0	
	-0.2	0.968	1	1	0.887	1	1	0.485	0	0	0.011	0	0	
	-0.1	1.397	1	1	1.686	2	2	1.934	2	2	1.258	1	1	
	0.0	1.579	2	2	2.089	2	2	3.063	3	4	5.462	5	6	1
	+0.1	1.397	1	1	1.686	2	2	1.934	2	2	1.258	1	1	ラン ダム
	+0.2	0.968	1	1	0.887	1	1	0.485	0	0	0.011	0	0	
	+0.3	0.525	1	1	0.304	0	0	0.048	0	0	0.000	0	0	
	+0.4	0.223	0	0	0.068	0	0	0.002	0	0	0.000	0	0	
+0.5	0.098	0	0	0.011	0	0	0.000	0	0	0.000	0	0		
合計枚数	8.001	8	8	8.001	8	8	8.001	7	8	8.000	7	8	8	

〈4・3〉 位置ずれ推定に誤差を含む場合の検証 次に、2・2 の位置ずれの推定に誤差が含まれる場合を模擬して検証を行う。入力画像を 8 枚、位置ずれの推定誤差が正規分布（標準偏差 0.2, 0.15, 0.1, 0.05）、および「準乱数分布」（1 枚は誤差なし、残りは誤差-0.5~0.5 の一様乱数）に従うとして、表 3 のようなパターンで誤って位置合わせが施された画像群を超解像の入力とする。なお、入力画像を計 8 枚に揃えるため、度数分布を本来の正規分布から修正している箇所が存在する（表中斜体字）。

PSNR による評価の結果を図 9 に示す。誤差分布の標準偏差が 0.2（パターン 1）の場合は位置ずれ誤差が 0、すなわち正しく与えられている画像が相対的に少なく、その他の画像より 1 枚多いに過ぎないが、正解に収束していることが分かる。また、「準」乱数分布（パターン 5）の場合でも PSNR が 35 を越えており、1 枚でも位置ずれ誤差 0 の画像が含まれていれば高い品質で超解像ができていることが分かる。

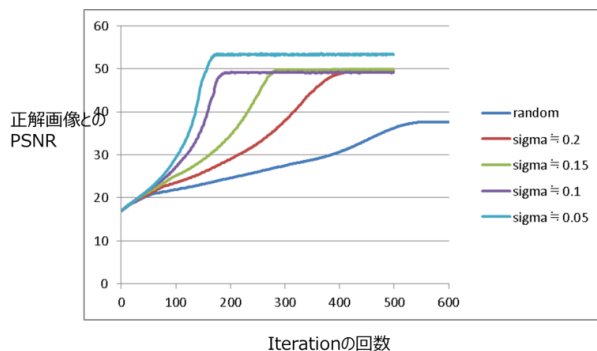


図 9 位置ずれ推定に誤差が画像を用いた場合の超解像の品質評価 (PSNR)

Fig. 8. Quantitative quality evaluation of the super-resolution when the simulative degraded images are used as input.

6. おわりに

車載カメラ画像列を入力とした再構成型超解像処理を行う際に、画像の入力枚数とその解像度のトレードオフが生じる制約のもと、より良い超解像結果を得るための要件について検討した。本実験条件においては以下のような傾向が見られ、これを満たすように入力画像および劣化パラメータを推定する必要があることが示唆された。

- ・ ブラーサイズがおおよそ 1 を越える画像を超解像に含めると悪影響を与える
- ・ 位置ずれとブラーの推定に誤差がなければ、入力画像の枚数は 8 枚程度でも十分な品質を得られる
- ・ 位置ずれの推定に誤差があっても、推定誤差のない画像が 1 枚でも含まれていれば、十分な品質の超解像結果が得られる

ブラーサイズの推定に誤差が含まれる場合の検証や、より一般的な実験条件においても同様の傾向が見られるかの検証は今後の課題である。

文 献

- (1) T. Takano, S. Ono, Y. Matsushita, H. Kawasaki, K. Ikeuchi: "Super Resolution with Fisheye Camera Images for Visibility Support of Vehicle", IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (2015)
- (2) H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool: SURF: Speeded Up Robust Features: 9th European Conference on Computer Vision 404-417 (2006).
- (3) Farsiu, S., Robinson, D., Elad, M., Milanfar, P: Fast and robust multiframe super resolution: IEEE Trans. Image Processing 13 (2004) 1327-1344.