

車載魚眼カメラ画像の超解像における 入力画像枚数とブレンダー量に着目した最適化の検討

高野 照久 小野 晋太郎* (東京大学)
松下 脩暉 (鹿児島大学) 川崎 洋 (九州大学)
池内 克史 (東京大学)

Study on Optimization for Super Resolution of On-Vehicle Fisheye Camera
based on the Number and Blur Size of Input Images
Teruhisa Takano, Shintaro Ono* (The University of Tokyo)
Yuuki Matsushita (Kagoshima University), Hiroshi Kawasaki (Kyusyu University)
Katsushi Ikeuchi (The University of Tokyo)

A fisheye camera or a super wide-angle camera is widely used for on-vehicle camera of general cars, since it can capture wide area by itself. We assume to set such a camera on a vehicle, and to use the captured images as inputs to perform super resolution of a region within the images. The captured images have distortion and lower resolution especially in peripheral area of the sight. Therefore, under a practical condition, i.e., the number of captured images relative to displacement of the camera is finite, there is a trade-off between the number of input images for the super resolution and their image quality. In this report, we discuss the differences of input image quality and result of the super resolution, and consider the optimal choice of input images based on the amount of blur in the input images.

キーワード：魚眼カメラ，再構成型超解像，入力枚数，画質評価

(Keywords: Fisheye Camera, Reconstruction-based Super Resolution, Number of Input Images, Image Quality Evaluation)

1. はじめに

カメラやなどの車載センサが一般車両へ普及が進むにつれ，一般車両によるセンシングの可能性が広がりつつある。ドライブレコーダや駐車支援カメラ等で得られる画像や位置等の情報は，比較的品質・低精度であるものの，大量のデータが存在することから，後処理により精度を向上できる余地があり得る。

一般車両に搭載されるカメラは，概して少ない台数で広い範囲をカバーするために超広角／魚眼レンズが用いられることが多い。このようなカメラでは視野周辺部において特に歪みが大きく，解像度も低い。我々はこれまでに，このような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。

超解像処理を行うためには，ある程度の量の入力画像が必要であるが，車載カメラのように進行しながら対象を観測し，無限に細かい間隔で撮影できない制約の下では，入力とする画像列の枚数は限られる。また，画像の一部領域を超解像処理の対象とする場合，その領域が視野の周辺部で観

測された（見え始め・見え終わりの）低品質な画像も含めて超解像の入力枚数を多くとるか，中央付近で観測された画像に限定するかというトレードオフが生じる。

本報告は，このような条件下で良い超解像結果を得るための入力画像の条件について，画像のブレンダーの大きさに着目して検討するものである。

2. 関連研究

再構成型超解像に関する先行事例は無数に存在するが，そのうち [2]-[5]は曲面鏡を用いた全方位カメラ画像の超解像を扱っており，入力画像としては超広角／魚眼カメラ画像に近い設定である。しかし，これらはいずれもカメラに対する被写体の動きが「曲面鏡の軸周りの回転」と見なせ，それ以外の動きが無視できる（または考慮しない）場合のみを取り扱っている。すなわち，これは被写体の見かけ上の形状やブレンダーが変化しない場合に等しく，本研究のように平行移動成分が支配的な場合とは条件が異なる。

この他にも，入力画像に関する制約条件と超解像結果の関係について考察された研究は見られない。

3. 魚眼カメラ画像における超解像

〈3・1〉 画像品質と枚数のトレードオフ

車載カメラが進行しながら対象を観測し、無限に細かく撮影できない（カメラの変位量に対して撮影できる画像枚数が有限である）制約の下では、対象領域がカメラの視野内、あるいは視野の中央付近で観測される回数は限られる。

従って、超解像処理の入力とする画像の品質と枚数の間にはトレードオフが生じる。すなわち、対象領域を視野の中央付近で捉えた高品質な画像のみを入力として用いると枚数が少なくなり、逆に枚数を多く確保すると低品質な画像が入力に含まれる。

再構成型超解像は、原理的に、入力画像の枚数が十分でなければ高解像度画像を出力できない。一方、低品質な画像は、各入力画像間の観測パラメータ（変位、ブラーなど）の推定に誤差を生じやすくすることから、やはり出力画像の精度を低下させると考えられる。従って入力画像の取捨選択により、超解像の結果を最適にする入力画像枚数と画像品質の関係を求めることができる。

〈3・2〉 適応的劣化モデルによる魚眼カメラ画像の超解像

魚眼カメラ画像における超解像処理について図 1 に概要を示す。具体的には(1)のように理想画像の劣化画像と観測画像の差を最小化することで実現される。

$$\min_x \sum_k |DB_k x - H_k y_k| \quad \dots\dots\dots (1)$$

x は理想画像、 y_k は観測画像中の対象領域にレンズ歪み補正を施した画像を表す縦ベクトルである。劣化過程を表す行列演算 H_k 、 B_k 、 D は、それぞれ変形位置合わせ、ブラー、ダウンサンプルを表す。ダウンサンプルは問題設定として与える定行列である。

本研究では、変型位置合わせ H_k は、射影変換で表されるとする。また、ブラー B_k は、レンズ自身の点拡がり関数およびデフォーカスによるブラーと、歪み補正に伴う画像伸縮により決定され、総合してガウシアンカーネルで表されるとする。

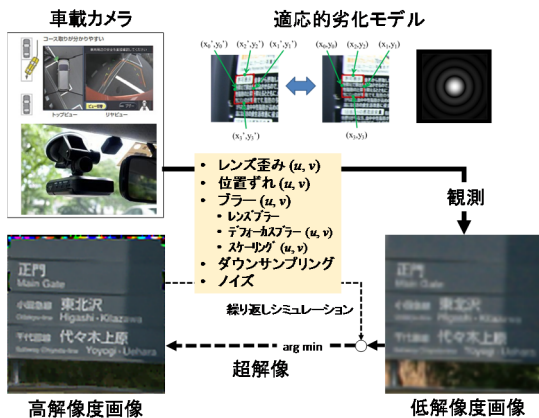


図 1 超解像処理のあらまし

Figure 1 Outline of the super resolution process.

超解像処理の計算は[6]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。

$$^{n+1}x = ^n x - \beta \left\{ \sum_k B_k^T D_k^T \text{sign}(D_k B_k x_n - H_k y_k) + \lambda \sum_l \sum_m \{ \alpha^{|l+m|} [I - S_y^{-m} S_x^{-l}] \text{sign}(x_n - S_x^l S_y^m x_n) \} \right\} - p \leq l \leq p, 0 \leq m \leq p, l+m \geq 0 \dots\dots\dots (2)$$

β は収束ステップ、 λ は画像の滑らかさ拘束、 α は距離に関する減衰、 S_x^l 、 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 x の初期値 0x には、適当な補正後観測画像 y_k を線形補間により拡大した画像を用いる。

4. データの取得と前処理

〈4・1〉 データの取得

屋外の案内板に書かれた文字を超解像の対象とし、そこから約 1, 2, 4 m の離れた直線に沿って車載カメラを断続的に移動させて静止画列を撮影した。カメラとレンズには民生品である Canon EOS Kiss Digital X と SIGMA 8mm F3.5 EX DG Circular Fisheye を用いた。カメラの焦点は撮影距離に合わせて固定した。図 2 に撮影した魚眼画像、図 3 に歪み補正を行った画像の例を示す。

以降では、画像中の対象領域 2 箇所 A、B（各 64×64 ピクセル）を設定し、この領域に対して超解像処理を行う。

〈4・2〉 前処理

〈4・2・1〉 位置合わせ処理

位置合わせは、まず各画像列間でブロックマッチングにより対応する矩形領域を粗く求め、続いてこれを初期値として SURF 特徴点対応で求めた射影変換行列により変形位置合わせを行う。以降では、対象領域 A、撮影距離 1, 2, 4m の矩形画像列を A1, A2, A4 と呼ぶ。対象領域 B の場合も同様に B1, B2, B4 と呼ぶ。

初期位置合わせで求めた矩形領域の一例を図 4 に示す。これらはそれぞれ図 3 の画像から切り取ったものである。

また、図 5 に変型位置合わせの例を示す。対象領域が境界の周辺部に近いところでは補正前の歪みが大きく、解像度の低下に伴うブラーも大きいため、正しく位置合わせできていない例も見られた。



(a) 撮影距離 1m



(b) 撮影距離 2m



(c) 撮影距離 4m

図 2 各距離で撮影した魚眼画像列の例

Figure 2 Fisheye images taken at each distance from the object.



(a) 撮影距離 1m



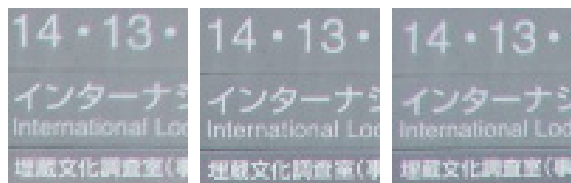
(b) 撮影距離 2m



(c) 撮影距離 4m

図 3 レンズ歪みを補正した画像の例

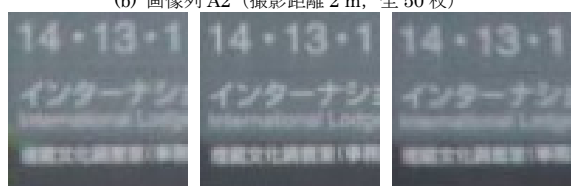
Figure 3 Undistorted images of the example.



(a) 画像列 A1 (撮影距離 1m, 全 20 枚)



(b) 画像列 A2 (撮影距離 2m, 全 50 枚)



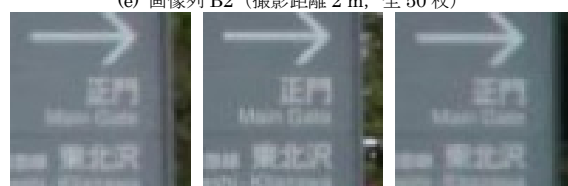
(c) 画像列 A4 (撮影距離 4m, 全 64 枚)



(d) 画像列 B1 (撮影距離 1m, 全 25 枚)



(e) 画像列 B2 (撮影距離 2m, 全 50 枚)



(f) 画像列 B4 (撮影距離 4m, 全 64 枚)

図 4 初期位置合わせを行った矩形画像列

Figure 4 Image sequences after initial alignment.

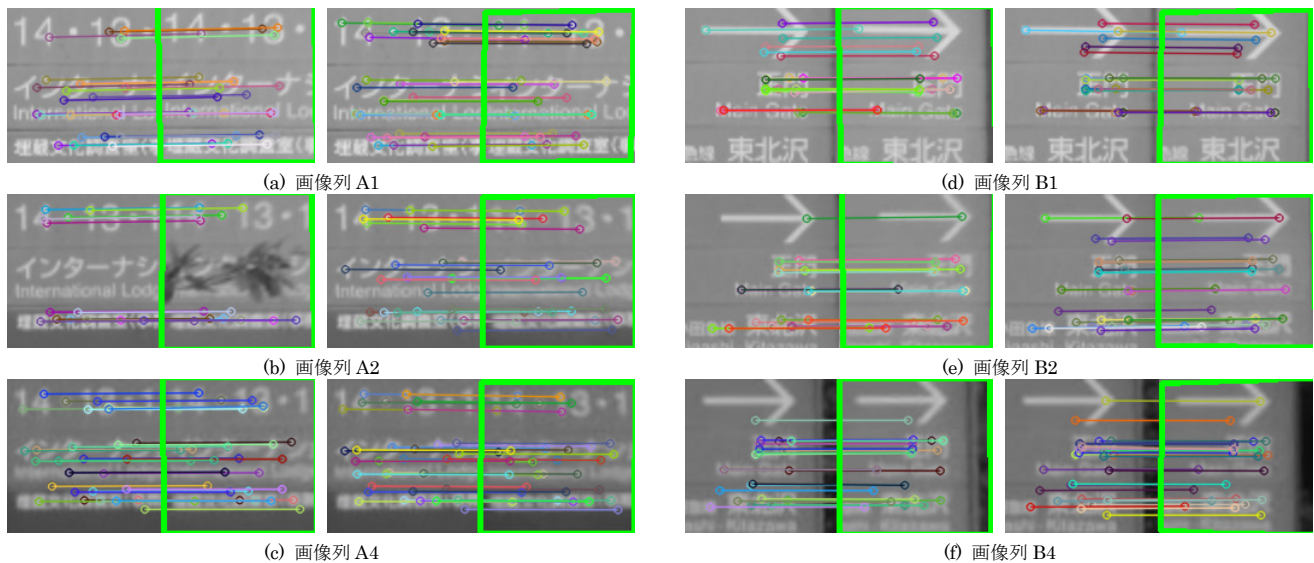


図5 連続画像間の特徴点对応と射影変換による変形位置合わせ

Figure 5 Corresponding points and deformable image alignment by homography conversion between adjacent images.

〈4・2・2〉 ブラー推定

式(1)のガウシアンブラー B_k は、レンズブラーと画像拡大縮率の量み込みで計算される。

レンズブラーは、レンズ中央部で観測された画像を用いる。この状態ではデフォーカスや伸縮が生じていないため、観測されるブラーはレンズに起因すると見なしている。この画像に含まれるエッジ部分の輝度推移にガウス関数を当てはめ、ガウシアンカーネルのパラメータ（標準偏差 σ ）を求める。

画像拡大率は、歪み補正前後で各画素の拡大率を計算することで得られる。伸縮率は画像領域内においても各画素の位置により異なるが、ここでは同じ画像領域内の伸縮率は近似的に一定とし、平均値を用いる。以降では、ガウシアンカーネルの標準偏差 σ 、およびこれと伸縮率の積をブラーのサイズと呼ぶ。

各画像群におけるレンズブラーのサイズを表1に示す。また、各画像の伸縮率は、後述の表2（1～3列目）にまとめて示している。

表1 各画像列のレンズブラーサイズ推定値

Table 1 Estimated size of lens blur for each image sequence	
画像列名	レンズブラーサイズ
A1, B1	0.60
A2, B2	0.62
A4, B4	1.0

5. 実験

各画像群より適当な画像を選択して超解像処理を行い、入力画像枚数とブラーサイズが増大するに従って超解像結果の品質がどのように変化するかを調べた。

〈5・1〉 入力画像の選択と超解像処理

A1~B4の各画像列において、超解像処理の入力として選択した画像は表2（4列目）の通りである。例えば、A1で8枚の入力画像を使って超解像を行ったときは、画像インデ

ックス4~11の8枚を用いたことを意味する。A1では、4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 17枚の画像を入力として用いる、すなわち8パターンの実験を行っている。

入力画像の枚数を多く取るに従って、ブラーサイズ（レンズブラーサイズと拡大率の積）が大きく、品質の低い画像が多く含まれるようになる。入力画像枚数とブラーサイズの関係は図6の通りである。入力画像は最小で4枚、ブラーサイズは最大で2.8程度まで含める設定である。

超解像処理は、図4に示す入力画像の1つを初期入力画像として、式(2)の再構成型超解像の方程式を用いて漸的に理想画像を求めた。式(2)の漸化式で用いられるパラメータは、 $\beta = 1.0, \lambda = 0.2, \alpha = 0.5, p = 3$ 、超解像の拡大率2倍とした。

〈5・2〉 超解像の結果と評価

〈5・2・1〉 超解像の結果

A1~B4の各画像群において超解像を行った結果を図7に示す。比較のため、超解像の繰り返し計算を1000回行った時の画像と、入力画像をLinear拡大したものを示す。端部処理の影響により一部に偽色が生じているが、超解像の効果は得られていることが分かる。

〈5・2・2〉 超解像の評価指標

一般に画像の劣化・復元などにおいては、評価の指標としてPSNRがよく用いられる。ただし、PSNRを評価指標とするためには比較対象として真値（正解画像）が必要である。実測画像の超解像処理においては、真値は未知である。単純に、カメラの設定により低解像度および高解像度モードで撮影し、前者を超解像の入力とし、後者を真値とすることは正しくない。何故ならば、後者の画像自身にもレンズブラーが含まれており、真値と異なるからである。

本研究では、超解像により画像の高周波成分が復元されるため、画像中のエッジに着目し、輝度勾配を評価することで超解像結果画像の品質を判断することとした。

表2 超解像処理の入力として選択した画像 (4列目), およびその画像の平均拡大率 (2, 3列目)

Table 2 Images selected as inputs of super resolution (col. 4) and their average magnification rate (col. 2, 3).

(a) 画像列 A1

画像イン デックス	平均拡大率		入力選択 画像・枚数
	横方向	縦方向	
0	2.85105	2.00839	16
1	2.32330	1.96568	14
2	2.01253	1.94184	12
3	1.70533	1.93013	10
4	1.47402	1.93628	8
5	1.32665	1.95268	4
6	1.26724	1.96507	4
7	1.27120	1.95909	4
8	1.30974	1.95696	4
9	1.37789	1.9452	6
10	1.44527	1.94395	6
11	1.58637	1.94621	8
12	1.77449	1.95681	10
13	2.08372	1.97942	12
14	2.35329	2.01123	14
15	2.58075	2.035	16
16	3.02138	2.08485	17

(d) 画像列 B1

画像イン デックス	平均拡大率		入力選択 画像・枚数
	横方向	縦方向	
4	3.84842	1.93331	19
5	3.14572	1.83802	18
6	2.5938	1.76086	16
7	2.1769	1.70263	14
8	1.93135	1.66946	12
9	1.7097	1.64139	10
10	1.57717	1.62611	8
11	1.40696	1.60931	6
12	1.28308	1.60692	6
13	1.19219	1.60451	4
14	1.17637	1.60674	4
15	1.19135	1.61035	4
16	1.27122	1.61506	4
17	1.46213	1.64244	6
18	1.76584	1.69074	8
19	2.05011	1.73834	10
20	2.41349	1.79068	12
21	2.86783	1.86252	14
22	3.48906	1.95859	16
23	4.12326	2.05543	18

(b) 画像列 A2

画像イン デックス	平均拡大率		入力選択画 像・枚数
	横方向	縦方向	
2	3.6333	1.72127	14
5	2.38958	1.45494	12
8	1.92132	1.36341	10
11	1.48512	1.27475	6
14	1.22718	1.21394	4
17	1.09564	1.18394	4
20	1.05858	1.17844	4
23	1.12682	1.20145	4
26	1.28383	1.24526	6
29	1.49842	1.30371	8
32	1.80243	1.37942	8
35	2.18127	1.46287	10
38	2.67048	1.56287	12
41	3.23841	1.66983	14
44	3.77065	1.75991	16
47	4.53422	1.88207	16

(e) 画像列 B2

画像イン デックス	平均拡大率		入力選択画 像・枚数
	横方向	縦方向	
0	4.47758	2.77610	18
2	3.85037	2.38723	16
5	3.14989	1.95293	14
8	2.42463	1.50327	12
11	1.90064	1.17840	10
14	1.53952	0.95450	8
17	1.26256	0.78279	6
20	1.09813	0.68084	4
23	1.04401	0.64729	4
26	1.07083	0.66391	4
29	1.17091	0.72596	4
32	1.34506	0.83394	6
35	1.61927	1.00395	8
38	1.97853	1.22669	10
41	2.35736	1.46156	12
44	2.95477	1.83196	14
47	3.61560	2.24167	16
49	4.15952	2.57890	18

(c) 画像列 A4

画像イン デックス	平均拡大率		入力選択画 像・枚数
	横方向	縦方向	
14	2.64377	1.38115	20
16	2.13198	1.28059	18
18	1.79901	1.21161	16
20	1.58994	1.16516	14
22	1.40673	1.12131	12
24	1.2514	1.08211	10
26	1.12736	1.04871	8
28	1.06006	1.03122	6
30	1.01838	1.02212	4
32	1.00864	1.0212	4
34	1.01443	1.02542	4
36	1.03869	1.03602	4
38	1.07136	1.04839	6
40	1.14487	1.0749	8
42	1.2466	1.10839	10
44	1.38823	1.15139	12
46	1.55485	1.19977	14
48	1.69641	1.23828	16
50	1.91601	1.29415	18
52	2.27581	1.38304	20

(f) 画像列 B4

画像イン デックス	平均拡大率		入力選択画 像・枚数
	横方向	縦方向	
9	3.21627	1.47294	22
11	2.76332	1.39463	20
13	2.34007	1.31693	20
15	2.06362	1.26263	18
17	1.80767	1.2083	16
19	1.57755	1.15619	14
21	1.37345	1.1062	12
23	1.24206	1.07289	10
25	1.13354	1.04517	8
27	1.08254	1.0315	6
29	1.0357	1.01915	4
31	1.01191	1.01415	4
33	1.00565	1.01409	4
35	1.01933	1.02235	4
37	1.06096	1.03904	6
39	1.13722	1.06597	8
41	1.23965	1.10047	10
43	1.33474	1.13062	12
45	1.49027	1.17622	14
47	1.76472	1.25422	16
49	2.20677	1.36239	18
51	2.84753	1.49519	22



図 6 超解像に用いた入力画像の枚数とブラーサイズの分布

Figure 6 The number of input images for super resolution and the distribution of the blur size for each case.

〈5・2・3〉エッジ輝度勾配による超解像の評価

各画像群において、画像中の文字等の縁により生じるエッジの輝度推移を図 8 に示す。図に示すように、画像群 A では文字“1”（2 箇所）および“イ”、“タ”の下部、画像群 B では“→”および“門”の下部を横切るラインに沿って立上り／立下りの輝度勾配を比較した。なお、ここでエッジを見ると、鮮鋭化フィルタのようにエッジ前後で輝度差を大きく広げることなくエッジの勾配が大きくなっており、ここからも超解像の効果が得られていることが分かる。

各ケースの輝度勾配の違いから超解像結果の品質を判断すると、A1 画像群では 16 枚の入力画像を用いたケースでも品質は低下していなかった。図 6 に示すように、また計算により、このときのブラーサイズは最大で $\sigma = 1.71$ ピクセルであり、この程度のブラーを持った画像を超解像の入力として用いることには問題がなかったことが分かる。

同様に、他の画像群でも輝度勾配の違いを利用して、画像品質に劣化を生じさせないと推定されるブラーサイズの範囲を求めた。その結果は図 9 のようになる。劣化を生じさせないブラーサイズは、下限値が平均で $\sigma = 1.58$ [pix]、上限値が平均で $\sigma = 1.85$ [pix]であった。

〈5・3〉考察

今回の評価実験では、超解像の入力枚数を増やし、ブラーサイズが概ね 1.6 程度を越える画像が入力に含まれるケースでは、結果が悪化することが分かった。ここでは、その要因について考察する。

まず、入力画像が多数あること自体が結果を悪化させる直接的な要因にはなり得ない [7]。このことは再構成型超解像の原理からも明らかである。要因として考えられるのは、劣化観測パラメータ（変位、ブラー）の推定誤りである。このうち、〈4・2・2〉のレンズブラー推定は各ケースに共通の処理であり、ブラー拡大率は解析的に求まることから、要因とは考えにくい。一方、〈4・2・1〉の変形位置合わせは、ブラーが大きくなるに従って対応点探索の精度が低下し、超解像結果を悪化させる要因になっていると推察される。

比較対象として、これらの誤差要因を排除したシミュレーション実験 [8] では、人為的に生成したエッジ画像を人為的に劣化させた画像を入力とし、位置合わせ／ブラー行列に真値を与えて超解像を行った場合、非常に結果が良いことが示されている。

6. おわりに

本報告では、車載カメラを想定した超解像処理における入力画像の取舍選択と超解像結果への影響について評価した。ブラーの大きい入力画像を入力に含めると結果が悪化し、位置合わせ誤差がその要因であると推察された。

今後は、超解像結果の定量的評価指標について検討するとともに、車載魚眼カメラで画像を収集し、より効果的な超解像結果を得るための要件を検討する。



図7 超解像に使用する入力画像の枚数を変化させた場合の超解像結果画像 (繰り返し演算 1000 回目の結果)

Figure 6 Result images of super resolution, when varying the number of input images used for super resolution (calculation iteration is 1000)

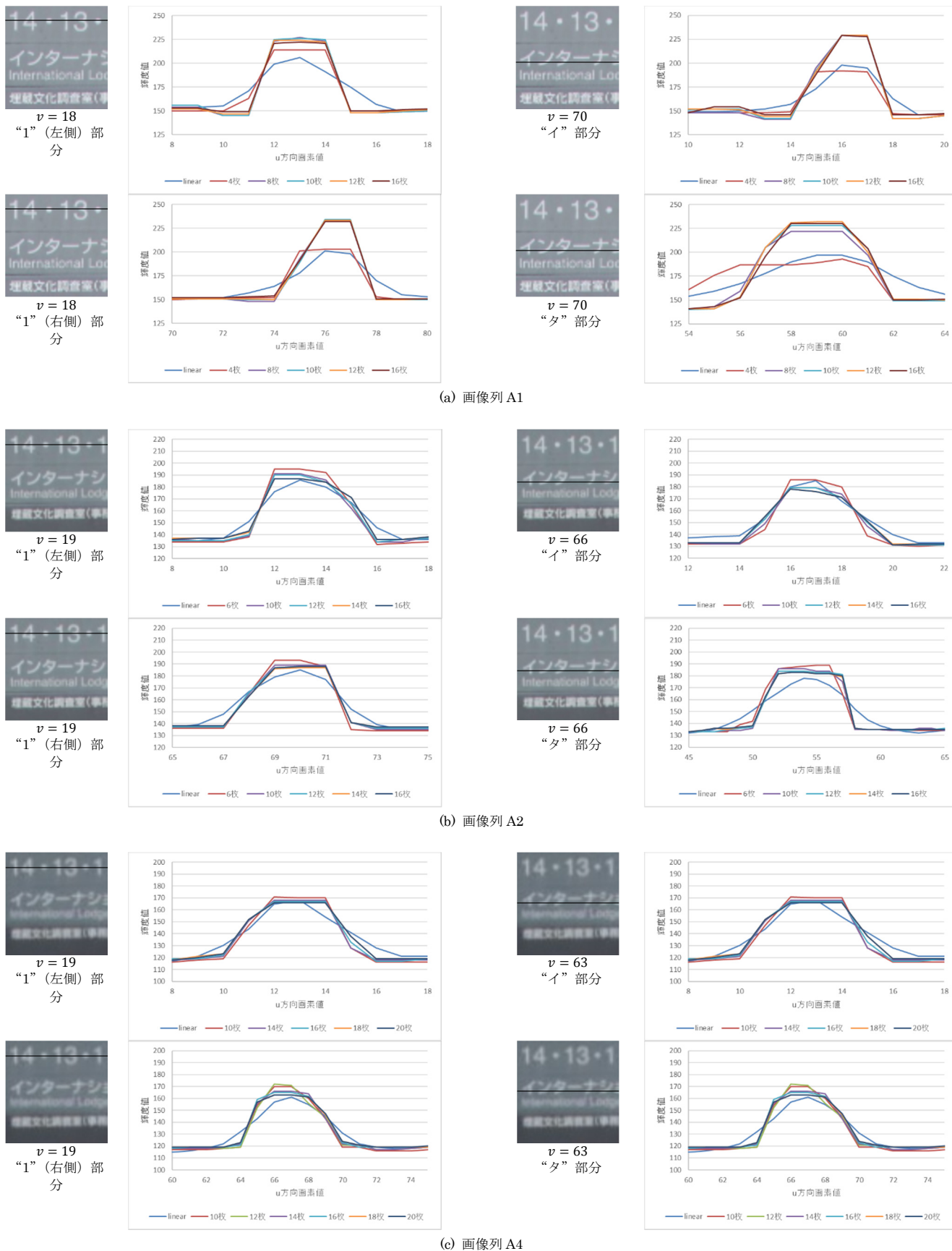
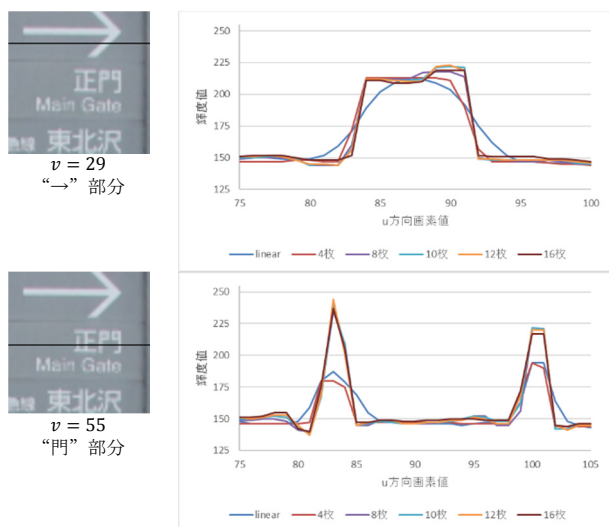
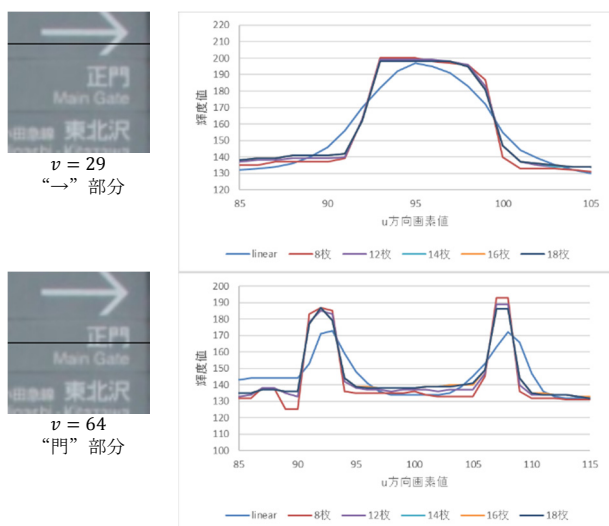


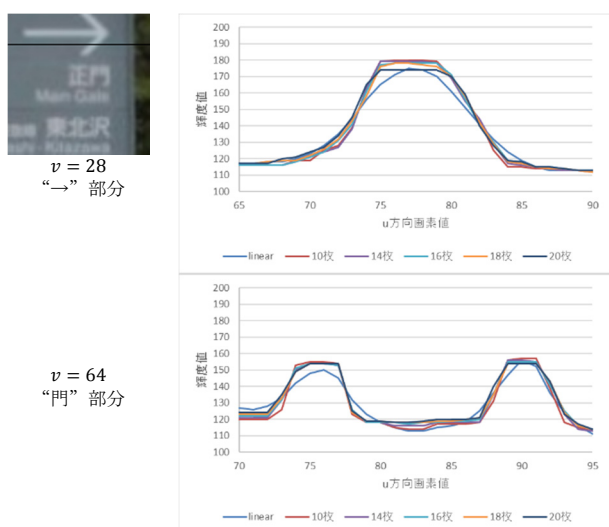
図 8 エッジ部の輝度パターン (画像列 A)
Figure 8 Brightness patterns around edges in image sequence A.



(a) 画像列 B1



(b) 画像列 B2



(c) 画像列 B4

図9 エッジ部の輝度パターン (画像列 B)

Figure 8 Brightness patterns around edges in image sequence B.

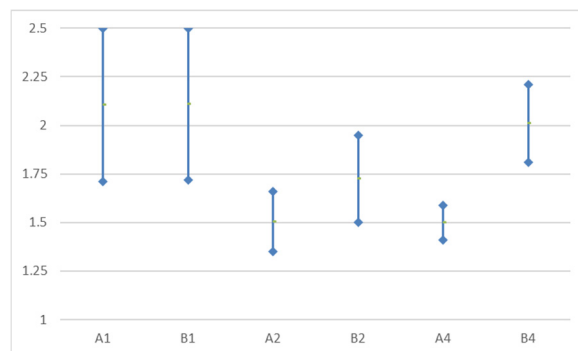


図9 結果画像品質を劣化させないブラーサイズの範囲
Figure 9 Ranges of blur size that do not degrade quality of the result image.

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. Kawasaki, K. Ikeuchi, and M. Sakauchi, "Super-resolution omnidirectional camera images using spatio-temporal analysis," Electronics and Communications in Japan, vol. 89, no. 6, 2006.
- (3) H. Nagahara, Y. Yagi, and M. Yachida, "Super-resolution from an omnidirectional image sequence," in Proc. 26th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2000), vol. 4, pp. 2559-2564.
- (4) Z. Fan and Z. Qi-dan, "Super-resolution image reconstruction for omni-vision based on POCs," in Proc. 21st annual Int'l Conf. on Chinese Control and Decision (CCDC), pp. 5045-5049, Jun. 2009.
- (5) Zafer Arican, Pascal Frossard, "Joint Registration and Super-Resolution With Omnidirectional Images", IEEE Trans. on Image Processing, vol. 20, no. 11, Nov. 2011
- (6) Farsiu, S., Robinson, D., Elad, M., Milanfar, P.: Fast and robust multiframe super resolution: IEEE Trans. Image Processing 13 (2004) 1327-1344.
- (7) M. Tanaka, M. Okutomi: Theoretical Analysis about Limitations on Reconstruction-based Super-resolution: IPSJ Transactions on Computer Vision and Image Media, Vol.47, No.SIG5 (CVIM13), pp.80-89, March, 2006
- (8) T. Takano, S. Ono, Y. Matsushita, H. Kawasaki, K. Ikeuchi: "Study on Optimal Image Set for Inputs for Super Resolution of On-Vehicle Fisheye Camera": ITS symposium (2016)