

複数の焦点変化を有する金網越し画像からの金網除去

Wire Net Removal from Multi-Focus Images

松井 彰良[†], 山下 淳[†], 金子 透[†]

Akiyoshi MATSUI[†], Atsushi YAMASHITA[†] and Toru KANEKO[†]

[†]:静岡大学工学部, {f0830057,tayamas,tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

概要 金網越しに撮影を行う場合、撮影対象の一部にぼけた金網の像が重なって、その部分が本来とは異なる明るさや色で撮影される問題がある。この問題に対し、まず金網越しに撮影された画像の画素値と撮影対象と金網が持つ放射輝度の関係について述べ、その関係に基づいて金網越しに撮影された画像と金網にピントの合った画像から撮影対象を再現性良く復元する手法を提案する。実験結果により提案手法の有効性を示す。

1 序論

カメラと撮影対象の間に不要物が存在するために望んでいる画像を得ることができない場合がある。その不要物の1つに安全上の理由で設置されている金網が挙げられる。具体例として、ビルの屋上や橋等には転倒・落下防止のために金網が設置されている。そのように金網によって隔てられた領域の中には撮影者は入ることができない。したがって撮影者は金網越しに撮影することが余儀なくされる。その場合、撮影対象の一部は金網の影響を受けて本来とは異なる明るさや色で撮影される問題が生じる。実際、金網越しに撮影された画像を図1に示す。図1においてサッカーゴールに注目すると、金網の影響を受けた領域はその周辺の領域と明るさや色が異なることが分かる。

前述のように撮影したい対象が金網の中にあるとき、金網を避けて撮影することは困難であるため、金網越しに撮影した画像から金網の影響のみを除去し撮影対象を再現性良く復元する技術が求められている。

従来から画像中から不要物を除去する手法が提案されてきた。その代表的な手法とそれを金網除去に用いた場合の問題点について以下に述べる。まず、プロの絵画修復技師の技能をまねた Image Inpainting [1] という手法がある。また、この手法を金網の除去に応用した研究 [2, 3] がある。この手法は除去する領域とその周囲と相関性の高い部分の再現性は良いが、



図 1: 金網越し画像

除去する領域の周囲が不規則なテクスチャを持つ場合に対しての再現性が悪いという性質がある。同様の問題は画像のフラクタル性を利用した画像復元手法 [4] にも当てはまる。金網越し画像において修復を行いたい撮影対象は周囲との相関性が高いものと限定できないので、この手法によって金網の除去を行うことは再現性の点で問題がある。次に、2台のカメラを使用し2画像間で不要物が存在しない領域を補完する手法 [5] がある。しかし、不要物によって遮蔽される領域が2画像間で重なった場合、補完を行うことができない。他には動画像を用いる方法として、視野内を移動する雪や雨を対象にしたものに時間メディアンフィルタを用いる手法 [6] や、雨の物理モデルを用いる手法 [7] がある。しかし、これらの手

法ではフレームごとに不要物が移動することを前提にしているため、金網越しに静止して撮影を行う場合には対応することができない。

金網越し画像から金網を除去するために、我々は複数焦点変化を有する画像を用いる手法を提案した [8]。提案手法では、図 1 に示されるように金網の影響が強い領域においても完全には遮蔽されずに撮影対象が撮影されていることに着目する。これは逆投影ぼけモデル [9] を用いて説明することが可能である。そのモデルによれば金網越しに撮影された画像の画素値は金網と撮影対象のそれぞれの放射輝度によって決まる。それに基づいて金網にピントを合わせた画像から金網の影響を推定し、金網の影響を受けた領域の明るさや色の補正を行っている。しかし、同手法では、金網領域の指示を手動で行っているという問題点があった。そこで本論文では金網を自動的に抽出する手法を提案する。

2 焦点ぼけモデル

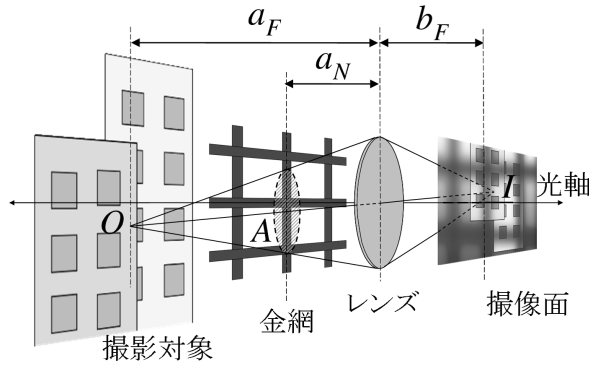


図 2: 撮影対象合焦点時の撮影対象と金網と撮像面の関係

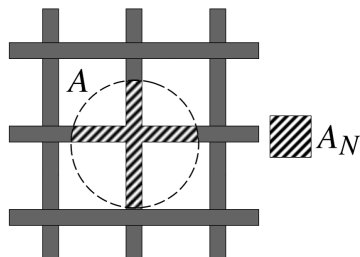


図 3: 金網の放射輝度の影響を受ける領域

一般にカメラのレンズは複数枚のレンズで構成さ

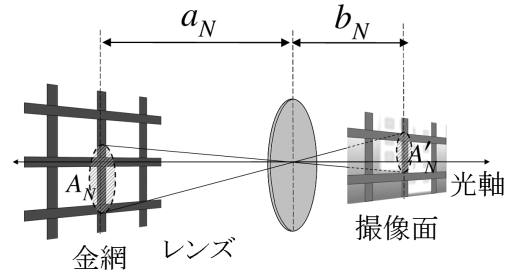


図 4: 金網合焦点時の金網と撮像面の関係

れているが、簡単のために焦点距離 f が固定の 1 枚の理想的な薄肉レンズにモデル化する。レンズ前方 a の距離にある物体がレンズ後方 b の距離で結像するとき、次の式のような関係が成り立つ（ガウスのレンズの公式）。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

まず、撮影対象の像に与える金網の影響を考えるために、ピントが撮影対象に合っている状態を想定する。その時の撮影対象と金網と撮像面の位置関係を図 2 に示す。式 (1) に従い、撮影対象はレンズ前方 a_F の距離に存在し、撮影対象の像はレンズ後方 b_F の距離に存在する撮像面上で結像する。金網は撮影対象よりもレンズに近い距離 a_N の位置に存在する。ここで撮像面上の 1 画素に対応する点を I とし、それに対応した撮影対象上の点を O とする。点 O から放射された光束はレンズ全体を通り点 I に収束する。ただし、光束の一部はレンズと撮影対象との間に存在する金網によって遮られる。ここで、金網が存在する平面上に対して O から放射された光束が拡がる領域を今後、“投影領域”と呼び、その面積を A とする。また、投影領域内で光束が実際に金網によって遮られる領域の面積を A_N とする（図 3）。

点 O における放射輝度を L_F 、点 I における放射照度を E_F とする。また、金網上の微小領域における放射輝度を L_N とし、その金網上の微小面積を dA_N とする。面積 A に対する面積 A_N の割合を α とするとレンズに入射する放射エネルギーは、

$$\Delta\Phi \propto \alpha \int_{A_N} \frac{L_N}{A_N} \cdot dA_N + (1 - \alpha) L_F \quad (2)$$

と表される。放射エネルギー $\Delta\Phi$ はレンズを通して撮像面上に結像するため、放射照度 E_F は係数 k を用いて

$$E_F = \alpha k \int_{A_N} \frac{L_N}{A_N} \cdot dA_N + (1 - \alpha) k L_F \quad (3)$$

と表される．ここで $\alpha = 0$ つまり撮影対象の像が金網の影響を受けない場合，式 (3) は，

$$E_F = kL_F \quad (4)$$

となり，式 (3) における kL_F は金網の影響がない場合の放射照度 E_F に相当する．そこで $E_e = kL_F$ とし式 (3) を次のように変形する．

$$E_e = \frac{1}{1-\alpha} E_F - \frac{\alpha}{1-\alpha} k \int_{A_N} \frac{L_N}{A_N} \cdot dA_N \quad (5)$$

これにより，金網の影響がない場合の放射照度に相当する E_e を求めるために必要なパラメータは，放射照度 E_F と放射輝度 L_N と投影領域と金網の面積との割合 α であることが分かる．

ここで，式 (5) の金網の放射輝度 L_N は直接取得することはできない．そこでピントが金網に合っている別の画像を利用することとし，そこから導かれる金網と撮像面の関係から式 (5) を放射照度による式に変形する．このとき，式 (1) に従いレンズ前方 a_N の距離に存在する金網に対し金網の像はレンズ後方 b_N の距離に存在する撮像面上で結像する (図 4)．金網合焦点時での撮像面の放射照度 E_N と金網の放射輝度 L_N との関係は係数 k' を用いて，

$$E_N = k' L_N \quad (6)$$

と表わされる．また，金網上の面積 A_N に対応する撮像面上の面積 A'_N は式 (1) により

$$A'_N = \frac{b_N^2}{a_N^2} A_N \quad (7)$$

と表わされる¹．

式 (5) は式 (6) と式 (7) により次のように変形される．

$$E_e = \frac{1}{1-\alpha} E_F - m \frac{\alpha}{1-\alpha} \overline{E_N} \quad (8)$$

ただし， $m = \frac{k}{k'}$ である．この補正係数 m はピントが異なるために生じる放射照度の変化率であり，適切に調節して除去処理を行う必要がある．また，

$$\overline{E_N} = \int_{A'_N} \frac{E_N}{A'_N} \cdot dA'_N$$

は面積 A'_N に含まれる放射照度の平均である．

これにより，式 (8) に対して撮影対象合焦点時の撮像面から放射照度 E_F を取得し，金網合焦点の撮

¹同様に dA_N に対しても式 (7) に示した関係が成立し，その面積は dA'_N である．

像面に対して投影領域を適切に与え，投影領域に対する金網の占める割合 α と投影領域に含まれる金網の放射照度の平均 $\overline{E_N}$ を取得し，補正係数 m を適切に与えることができれば，金網の影響がない場合の放射照度に相当する E_e を推定することができる．

3 画像取得

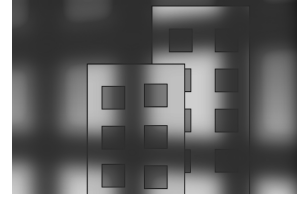
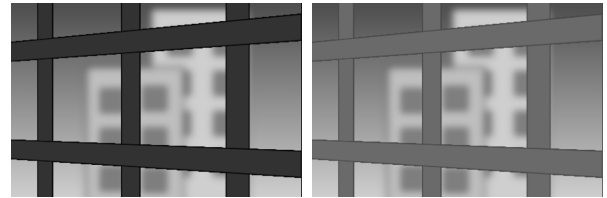


図 5: 撮影対象合焦点画像



(a) フラッシュなし

(b) フラッシュあり

図 6: 金網合焦点画像

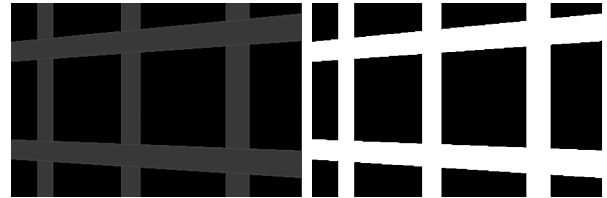


図 7: 差分画像

図 8: 2 値化画像

本手法では，撮影対象にピントの合っている金網越し画像 (図 5) と，金網にピントを合わせて撮影を行った画像を取得する．このとき，金網合焦点画像の金網は被写界深度の範囲内でピントが合っているものとする．

まず，図 6 (a) に示すようにフラッシュを発光させずに撮影する．次にフラッシュを発光させて撮影を行い，図 6(b) を取得する．図 6(b) においてフラッシュの光は遠方に存在する撮影対象には届かないため，金網だけが明るくなる．このことを利用してフラッシュを発光させた状態と発光させなかった状態との差分をとり (図 7)，これを 2 値化することで金

網領域を抽出する (図 8)。

4 画像間のレジストレーション

金網合焦点時と撮影対象合焦点時ではピンホールカメラモデルにおける焦点距離が変化しそれに伴って像の大きさも変化する [10]。また、レンズ系の主点の移動による局所的な歪みも存在する [11]。そのためピントの異なる画像間で処理を行う場合、歪曲収差の補正とレジストレーションを行う必要がある。

レンズへの入射角が大きくなると、結像条件が変化することにより結像位置がずれる歪曲収差が生じる。ここでは、Weng らのレンズの歪みモデル [12] のうち radial 歪みを扱い、歪み補正を行う。

歪曲収差の補正を行ったことにより、撮影対象合焦点画像と金網合焦点画像の結像位置の変化は画像中心を中心とした拡大率 s のスケール変換であるとする。この関係を同次座標を用いて表現する。撮影対象合焦点画像の同次座標を $\tilde{\mathbf{x}}_F = \begin{pmatrix} u & v & 1 \end{pmatrix}^t$ とし、金網合焦点画像の同次座標を $\tilde{\mathbf{x}}_N = \begin{pmatrix} u' & v' & 1 \end{pmatrix}^t$ とする。次に $\tilde{\mathbf{x}}_F$ から $\tilde{\mathbf{x}}_N$ への線形変換を考え、そのときの変換行列を $\mathbf{H}$ とすると、

$$\tilde{\mathbf{x}}_N = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}}_F \quad (9)$$

と表現できる。ただし、

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} s & 0 & t_x \\ 0 & s & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

である。ここで、 $\mathbf{H}$ の t_x と t_y は平行移動成分である。ある像の撮影対象合焦点画像上での位置とそれに対応する金網合焦点画像上での位置がえられれば、それによって 2 つの方程式が得られる。 $\mathbf{H}$ の未知数は 3 個なので、既知の位置座標の組が最低 2 個あれば方程式の数が未知数の数を上回るため、 $\mathbf{H}$ の成分をすべて求めることができる。実際には、誤差の影響を軽減するために、ある程度多くの既知の点を用いて最小二乗法を利用して求める。求めた変換行列 $\mathbf{H}$ を用い、一方の画像を他方の画像に対してレジストレーションを行う。

5 金網の除去

画像座標 (u, v) を注目画素として、複数焦点変化を有する金網越し画像から金網を除去する処理概要

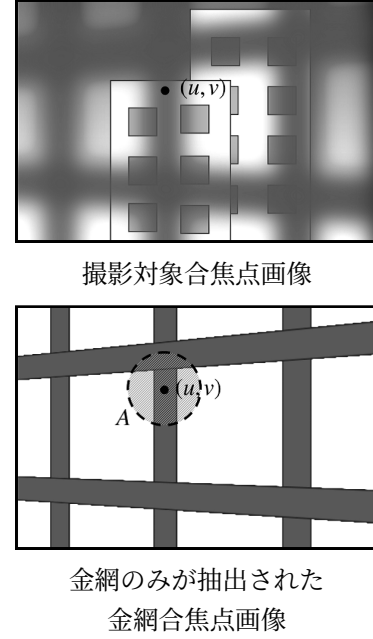


図 9: 金網除去の処理概要

を図 9 に示す。

まず、撮影対象合焦点画像 (図 5) の画素値 $g_F(u, v)$ によって、式 (8) の放射照度 E_F を取得する。次に、金網合焦点画像 (図 6(a)) に対して差分の 2 値化画像 (図 8) を用いてマスク処理を行い、金網を抽出する。抽出した金網に対して、 (u, v) を中心として投影領域を与える。投影領域は金網の位置により変化するので、金網に対してカメラキャリブレーションを行い、位置を取得する。投影領域の画素数と投影領域に含まれる金網の画素数の割合により式 (8) における α を求め、投影領域に含まれる金網の画素値の平均を求め、 $\overline{E_N}$ を取得する。

これにより、金網の影響がない場合の放射照度に相当する E_e が式 (8) によって得られる。

6 実験

図 10 に示す金網越し撮影画像から金網の除去を行った。撮影対象であるビルや建物が金網の焦点ぼけの影響を受けていることが分かる。図 11(a) に、金網にピントを合わせてフラッシュを発光させずに撮影した画像を示し、図 11(b) にフラッシュを発光させて撮影した画像を示す。図 11(a) と図 11(b) の差分結果を図 12 に、2 値化処理により得られた金網領域を図 13 に示す。



図 10: 原画像（撮影対象）



(a) フラッシュなし (b) フラッシュあり
図 11: 原画像（金網）

なお撮影する際は、ピントを変えた画像間で光軸方向が変化しないようにカメラを三脚で固定した。カメラの設定は焦点距離は 70mm, F 値は 10 として撮影を行った。ピント調節は手動で行った。撮影時の天候は曇りであった。フラッシュの強度はカメラの性能の最大の値を使用した。

画像間のレジストレーションは、キャリブレーションテーブルを用いて、撮影対象合焦点時のピントでテーブルのマーカーの座標を取得し、その後、テーブルを動かさずに金網合焦点時のピントへ変更してマーカーの座標を再び取得し、それらに対応座標の組として変換行列 $\mathbf{H}$ を求めた。

以上のような実験条件の下に行った実験結果を以下に示す。従来手法との比較を行うため Image Inpainting [1] による除去結果を図 14 に示し、提案手

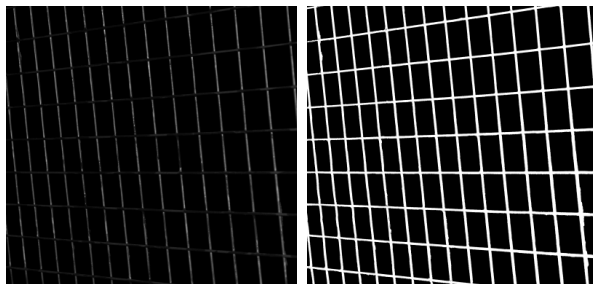


図 12: 差分画像

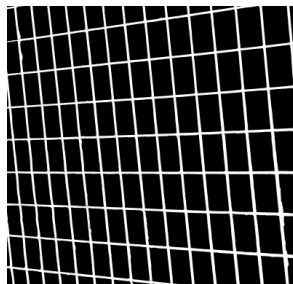


図 13: 金網領域抽出結果



図 14: Inpainting による
除去結果



図 15: 提案手法による除
去結果

法による除去結果を図 15 に示す。図 14 では金網を除去した領域で撮影対象の復元が失敗している。たとえば、画像中央にあるビルの屋上に存在する突起構造が失われている。一方、図 15 では金網を除去した領域でも画像中央にあるビルの屋上に存在する突起構造が失われずに復元されていることが分かる。次に各画像をグレースケール化したあと、金網を物理的に撤去した場合の画像を真値としてそれに対する差分画像を示す。まず、金網を物理的に撤去した場合の画像を図 16 に示す画像に示す。図 16 に対する原画像（図 10）との差分画像を図 17 に、Image Inpainting による除去結果（図 14）との差分画像を図 18 に、提案手法による除去結果（図 15）との差分画像を図 19 にそれぞれ示す。図 17 おいて、金網の焦点ぼけの影響を受けた領域に差分が生じているのが分かる。

次に、図 18 では、空などのテクスチャの少ない領域では図 17 における金網の影響による差分が減少している。しかし建物などが密集するテクスチャ変化の激しい領域では図 17 にはなかった失われたテクスチャによる差分が発生している領域が存在する。これに対し図 19 では、撮影対象のテクスチャを失わずに図 17 における金網の影響による差分のみを取り除くことができ、良好な結果が得られた。

7 結論

金網越しに撮影を行う場合、金網の像が重なって撮影対象の一部が本来とは異なる明るさと色で撮影される問題に対し、金網の影響を受けた領域から金網の影響のみを除去し再現性高く復元する手法について検討した。撮影対象合焦点時の撮影対象と金網と撮像面の関係から撮影対象の復元に必要なパラメータを明らかにし、それに基づき撮影対象合焦点画像



図 16: 金網なし画像

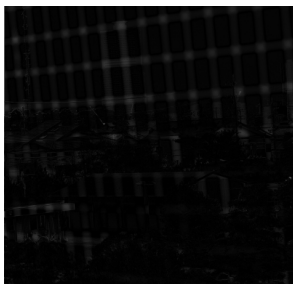


図 17: 原画像と真値の画像との差分画像

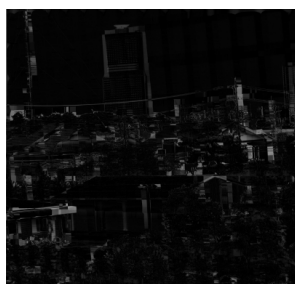


図 18: Inpainting と真値
の画像との差分画像

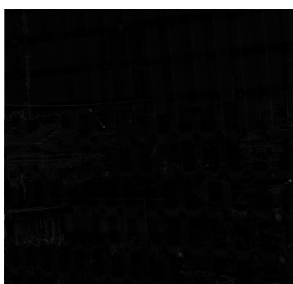


図 19: 提案手法と真値の
画像との差分画像

と金網合焦点画像から金網を除去する方法について述べた。金網の除去に当たっては金網領域の指定が必要となるが、そのための金網領域の自動抽出法として、金網にピントを合わせて撮影する際のフラッシュの有無による画像の変化を利用する方法を採用した。実験結果により、提案手法は金網の焦点ぼけの影響のみを除去し撮影対象を再現性高く復元できることを示した。

今後の課題としては、除去性能の向上と動画を対象とした場合の処理の効率化などが挙げられる。

参考文献

- [1] Marcelo Bertalmio, Guillermo Sapiro, Vincent Caselles and Coloma Ballester: “Image Inpainting”, Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques(SIGGRAPH2000), pp.417–424, 2000.
- [2] 鈴木博, 玉木徹, 山本正信: “画像復元のための周期的な遮へい物体の抽出”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.87, No.5, pp.1189–1192, 2004.
- [3] 鈴木博, 玉木徹, 山本正信: “紐状遮へい領域の除去と画像の復元”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.104, No.667, pp.79–84, 2005.
- [4] 小幡恭久, 剣持雪子, 小谷一孔: “画像のフラクタル性を活用した局所的な画像推定法による画像復元手法”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.102, No.471, pp.37–42, 2002.
- [5] Yuu Tanaka, Atsushi Yamashita, Toru Kaneko and Kenjiro T. Miura: “Removal of Adherent Water-drops from Images Acquired with a Stereo Camera System”, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.89-D, No.7, pp.2021–2027, 2006.
- [6] 三宅一永, 米田政明, 長谷博行, 酒井充, 丸山博: “時間メディアンフィルタによる降雪ノイズ除去”, 画像電子学会誌, Vol.30, No.3, pp.251–259, 2001.
- [7] Kshitiz Garg and Shree K. Nayar: “Detection and Removal of Rain from Videos”, Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2004), Vol.1, pp.528–535, 2004.
- [8] 松井彰良, 山下淳, 金子透: “焦点ぼけを利用した金網越し画像からの金網除去”, 精密工学会画像応用技術専門委員会サマーセミナー 2009 テキスト, Vol.18, pp.51–52, 2009.
- [9] 浅田尚紀, 藤原久永, 松山隆司: “逆投影ぼけモデルを用いた遮へいエッジの光学的性質の解析”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J-78-D-II, No.2, pp.248–262, 1995.
- [10] Reg G. Willson and Steven A. Shafer: “What is the Center of the Image?”, Journal of the Optical Society of America, Vol.11, No.11, pp.2946–2955, 1994.
- [11] 久保田彰, 児玉和也, 相澤清晴: “多焦点画像処理のための位置合わせ手法と撮像系の構築”, 映像情報メディア学会誌, Vol.54, No.2, pp.260–267, 2000.
- [12] Juyang Weng, Paul Cohen and Marc Herniou: “Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992.

松井彰良: 静岡大学大学院工学研究科修士課程に在籍。金網越し画像からの金網を除去する研究に従事。

山下淳: 静岡大学工学部機械工学科准教授。コンピュータビジョン, ロボットの知能化に関する研究に従事。

金子透: 静岡大学工学部機械工学科教授。画像処理, コンピュータビジョンの研究に従事。