金網越し複数焦点画像からの金網除去*

松井 彰良^{*1}, 山下 淳^{*2}, 金子 透^{*2}

Mesh Removal from Multi-Focus Images

Akiyoshi MATSUI*3, Atsushi YAMASHITA and Toru KANEKO

*³ Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Shizuoka University 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

When an image is acquired by a camera through a mesh, it interrupts a field of view. Therefore, we propose a new removal method of a mesh from multi-focus images by using an image processing technique. Most of previous methods interpolate the interrupted regions by using information of surrounding textures. However, these methods sometimes fail when information of surrounding textures is not rich. On the other hand, there are methods that acquire multiple images for image restoration and composite them to generate a new clear image. In this paper, the latter approach is adopted because it is robust and accurate. We acquire multi-focus images and utilize "defocusing" information to generate a clear image. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Image Restoration, Image Processing, Defocus, Noise Reduction

1. 序 論

ロボットと撮影対象の間に不要物がある場合,視野 遮蔽物(不要物)の影響によりロボットの物体認識が 阻害される場合がある.その不要物の1つに金網が挙 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.そのような 場所で撮影を行った場合,撮影物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.実 際の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.金網によって撮影物の明るさや色が変化す る場合,ロボットが事前に与えられた物体の情報との 類似性が低下すると考えられ,物体の認識に失敗した り,物体の位置推定に問題が生じると考えられる.

このような金網の影響による類似性の低下を防ぐた めに,金網越しの状況で取得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ことが必 要である.

これまで,著者らはレスキューロボット用途で降雨 などの理由によりロボットのカメラについた水滴の除



Fig.1 金網越し画像

去について研究を行ってきた.具体的には,複数台の カメラを使いそれぞれのカメラ間で不要物の存在しな い領域を補完する手法⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾を提案した.これらの 手法では,不要物によって遮蔽される領域がカメラ間 で重なった場合,不要物の除去を行うことができない. また,カメラを回転させた時の視差の変化を利用した 手法⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾を提案した.しかし,これらの手法では, カメラの回転する方向と金網のワイヤーの向きが一致 している場合除去を行うことができない.このように 水滴の除去に用いられた手法では金網の除去には対応 することが困難である.

他方,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⁽⁷⁾

^{*} 原稿受付 2009 年 10 月 23 日

^{*1} 学生員 静岡大学 (〒 432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1)

^{*&}lt;sup>2</sup> 正員 静岡大学 Email: f0830057@ipc.shizuoka.ac.jp

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⁽⁸⁾⁽⁹⁾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,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⁽¹⁰⁾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た,め 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、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 (11)や,雨の物理モデルを 用いる手法 (12)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.また,レンズ上の付着物などの焦 点ぼけが生じた遮蔽物を,カメラの絞り値の変化に伴 い遮蔽物のぼけ量が変化することを利用して除去する 手法(13)がある.しかしこの手法は,遮蔽物が単色であ ることを前提としている.金網が屋外に存在する場合, 風雨にさらされたことで生じた錆びや影などの複雑な テクスチャがあると考えられる.それゆえこの手法を 用いてそのような金網を除去することはできない.

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⁽¹⁴⁾. 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⁽¹⁵⁾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

ー般にカメラのレンズは複数枚のレンズで構成され 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).

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \tag{1}$$



Fig. 2 撮影対象合焦点時の撮影対象と金網と撮像面の関係



Fig. 3 金網の放射輝度の影響を受ける領域



Fig. 4 金網合焦点時の金網と撮像面の関係

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_E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 0とする.点 0から放射された光束は レンズ全体を通り点 / 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0 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_x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,

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

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

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

$$E_F = kL_F \tag{4}$$

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 $E_e = kL_F$ として式(3)を次のように変形する.

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

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,

$$E_N = k' L_N \tag{6}$$

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

$$A'_{N} = \frac{b_{N}^{2}}{a_{N}^{2}} A_{N}$$
(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.

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



Fig. 5 撮影対象合焦点画像



Fig. 7 差分画像 Fig. 8 2 值化画像

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,

$$\overline{E_N} = \int_{A_N'} \frac{E_N}{A_N'} \cdot dA_N' \tag{9}$$

は面積 A' に含まれる放射照度の平均である.

これにより,式(8)に基づいて金網の影響がない場 合の放射照度に相当する E_e を推定するために,まず, 撮影対象合焦点時の撮像面から放射照度 E_F を取得す る.次に,金網合焦点の撮像面に対して投影領域を適 切に与え,投影領域における金網の占める割合 α と放 射照度の平均 $\overline{E_N}$ を取得する.取得されたパラメータ を式(8)に代入し補正係数 m に適切な値を与えること で, E_e を推定することができる.

3. 画像取得

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,

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.

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⁽¹⁶⁾.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⁽¹⁷⁾.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⁽¹⁸⁾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 $\mathbf{\tilde{x}}_{F} = (u, v, 1)^{t}$ とし,金網合焦点 画像の同次座標を $\mathbf{\tilde{x}}_{N} = (u', v', 1)^{t}$ とする.次に $\mathbf{\tilde{x}}_{F}$ か ら $\mathbf{\tilde{x}}_{N}$ への線形変換を考え,そのときの変換行列を H とすると,

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\mathbf{N}} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}}_{\mathbf{F}} \tag{10}$$

と表現できる.ただし,

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} s & 0 & t_x \\ 0 & s & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(11)

である.ここで, Hの t, とt, 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.Hの未知数は3個であり,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,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を 図9に示す.



(b) 金網のみが抽出された金網合焦点画像

Fig.9 金網除去の処理概要

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(a) に,2値化処理により得られた金網領域を図12(b) に示す.

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



Fig. 10 原画像(撮影対象)



- (a) フラッシュなし
- vュなし (b) フラッシュあり Fig. 11 原画像(金網)



Fig. 12 金網領域抽出処理

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,それらを対応座標の組とし て変換行列 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⁽⁷⁾による除去結果を図 13(a) に示し,提案 手法による除去結果を図 13(b) に示す.図 13(a) 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(図 14(a)).一方,図 13(b) 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(図 14(b)).

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





(a)Inpainting による結果(b) 提案手法による結果Fig. 13 処理結果画像



(a)Inpainting による結果 (b) 提案手法による結果 Fig. 14 処理結果画像の拡大結果



(a) 金網なし画像(真値)(b) 真値と原画像との差分Fig. 15 金網なし画像(真値)と原画像との差分結果



(a)Inpainting による結果(b)提案手法による結果Fig. 16 真値とそれぞれの除去結果との差分結果

差分処理を行った.差分の大きさを分かりやすくする ため,差分結果をその濃淡に対し値がほとんどない場 合には白色で値が大きくなるにつれて黒色に近くなる ような色付けを行ったグレースケール画像として示す. まず,金網を物理的に撤去した場合の画像を図 15(a) に示す画像に示す.図 15(a)に対する原画像(図 10) との差分画像を図 15(b)に,Image Inpainting による除 去結果(図13(a))との差分画像を図16(a)に,提案手法による除去結果(図13(b))との差分画像を図16(b)にそれぞれ示す.図15(b)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16(a)では,空などのテクスチャの少ない 領域では図15(b)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15(b)にはなっかった失われた 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16(b)では,撮影対象のテクスチャを失 わずに図15(b)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.

文 献

- Atsushi Yamashita, Masayuki Kuramoto, Toru Kaneko, and Kenjiro T. Miura: "A Virtual Wiper -Restoration of Deteriorated Images by Using Multiple Cameras-", Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), pp.3126– 3131, 2003.
- (2)山下淳,田中友,原田知明,金子透,三浦憲二郎:"バー チャルワイパー~画像処理を用いた屋外環境での視野 明瞭化~",第10回ロボティクスシンポジア講演予稿 集,pp.549–556,2005.
- (3) Yuu Tanaka, Atsushi Yamashita, Toru Kaneko, and Kenjiro T. Miura: "Removal of Adherent Waterdrops from Images Acquired with a Stereo Camera System", IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.89-D, No.7, pp.2021–2027, 2006.
- (4) Atsushi Yamashita, Toru Kaneko, and Kenjiro T. Miura: "A Virtual Wiper -Restoration of Deteriorated Images by Using a Pan-Tilt Camera-", Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004), pp.4724–4729, 2004.

- (5) Atsushi Yamashita, Takahiro Harada, Toru Kaneko, and Kenjiro T. Miura: "Virtual Wiper -Removal of Adherent Noises from Images of Dynamic Scenes by Using a Pan-Tilt Camera-", Advanced Robotics, Vol.19, No.3, pp.295– 310, 2005.
- (6) Atsushi Yamashita, Isao Fukuchi, Toru Kaneko, and Kenjiro T. Miura: "Removal of Adherent Noises from Image Sequences by Spatio-Temporal Image Processing", Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2008), pp.2386–2391, 2008.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) Jinwei Gu, Ravi Ramamoorthi, Peter Belhumeur, and Shree Nayar: "Removing Image Artifacts Due to Dirty Camera Lenses and Thin Occluders", ACM Transactions on Graphics, Vol.28, No.5, pp.144:1–144:10, 2009.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) Juyang Weng, Paul Cohen, and Marc Herniou: "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.10, pp.965–980, 1992.