

古いフィルム映像における動きに対して ロバストなフリッカパラメータ推定

浜口 洋司[†] 阿部 正英[†] 川又 政征[†]

[†] 東北大学大学院工学研究科

980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: †{youzi.masahide,kawamata}@mk.ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 本稿では古いフィルム映像における動きに対してロバストなフリッカパラメータ推定法を提案する。提案法では、映像中の動きがある領域のフリッカパラメータを一定であると仮定し、映像中の動きに対してフリッカパラメータをロバストに推定する。提案法により求められたフリッカパラメータを用いて、フリッカにより劣化された映像を補正する。人工的にフリッカを付加した映像をフリッカ補正する実験より、提案法は従来法より SN 比が約 2dB 向上するという結果が得られた。さらに、実際にフリッカにより劣化している実映像をフリッカ補正する実験より、提案法は従来法よりも高精度にフリッカを補正していることを示した。

キーワード フリッカ, 古いフィルム映像, フリッカパラメータ, 動き

Robust Flicker Parameter Estimation for Motion in Old Film Sequences

Youji HAMAGUCHI[†], Masashide ABE[†], and Masayuki KAWAMATA[†]

[†] Graduate School of Engineering, Tohoku University

Aoba-yama 6-6-05, Sendai 980-8579 JAPAN

E-mail: †{youji.masahide,kawamata}@mk.ecei.tohoku.ac.jp

Abstract This paper proposes a robust flicker parameter estimation for old film sequences. The proposed method robustly estimates flicker parameters by assuming that flicker parameters in motion are constant. The sequences with intensity flicker are corrected using the estimated flicker parameters. Two experiments are performed. One is the flicker correction experiment using film sequences with artificial intensity flicker. This experimental result shows that the proposed method improves SN ratio by 2 dB when compared with the conventional method. The other is the flicker correction experiment using old film sequences with natural intensity flicker. This experimental result shows that the proposed method performs flicker correction of higher precision than the conventional method.

Key words Flicker, Old Film Sequences, Flicker Parameter, Motion

1. はじめに

古いフィルム映像は当時の文化や社会情勢、街並みを知る上で重要な資料となる。しかし、古いフィルム映像は、さまざまな劣化を受け鑑賞に耐える画像品質にはほど遠いものが多い。このような古いフィルム映像のデジタルアーカイブ化や再利用の促進のために、古いフィルム映像に対するデジタル修復技術の研究開発が活発に行われている [1]。

古いフィルム映像の劣化現象の一つとして、明るさの不自然な時間的変動であるフリッカがある。フリッカが生じている映像は、鑑賞する上で不快に感じるため、長時間の鑑賞には向

きである。そこで、古いフィルム映像をより見やすくするためにはフリッカの補正が必要である。そのため、これまでに古いフィルム映像に対するフリッカ補正の手法が提案されている [2]。

本研究は古いフィルム映像に含まれる劣化現象であるフリッカの補正を目的としている。フリッカ補正では、劣化画像に対して参照画像 (前フレーム) の対応する部分の画素値に基づきフリッカパラメータを推定する。しかし、映像中の動きがある領域では、劣化画像と参照画像が異なる。このため、映像中の動きを考慮した処理が必要となる。そこで、本稿では、映像中の動きにおけるフリッカパラメータの従来の推定法を検討し、映像中の動きにロバストなフリッカパラメータの推定法を提案す

る。従来法と提案法によりフリッカパラメータを推定し、フリッカの補正結果の映像を用いてフリッカ補正の性能を検討する。

2. フリッカモデルとフリッカ補正法

本節ではフリッカのモデルと、このモデルに基づいたフリッカ補正法について概説する。本節では、映像中に動きがないと仮定する。

2.1 フリッカモデル

本稿では、以下の式をフリッカモデルとして用いる [2]。

$$Z(i, j, t) = \alpha(i, j, t) \cdot Y(i, j, t) + \beta(i, j, t) \quad (1)$$

ここで、 i と j は画素の位置を示し、 t はフレーム番号を示す。 $Z(i, j, t)$ はフリッカで劣化した画像の輝度値、 $Y(i, j, t)$ は劣化していない画像の輝度値を示す。 $\alpha(i, j, t)$ と $\beta(i, j, t)$ はフリッカゲイン係数とフリッカオフセット係数である。フリッカパラメータ推定とは、劣化画像 $Z(i, j, t)$ からフリッカパラメータ $\alpha(i, j, t)$ と $\beta(i, j, t)$ を推定することである。フリッカ補正とは、 $Z(i, j, t)$ 、および $\alpha(i, j, t)$ と $\beta(i, j, t)$ の推定値から、 $Y(i, j, t)$ を推定することである。次節以降で、フリッカパラメータの推定法とフリッカ補正法を説明する。

2.2 フリッカパラメータ推定法

フリッカパラメータ $\alpha(i, j, t)$ と $\beta(i, j, t)$ には、あるフレーム t について位置座標 i と j に対して、大局的にゆるやかな変化が存在するので、フリッカパラメータ $\alpha(i, j, t)$ と $\beta(i, j, t)$ は局所領域でみると一定であると仮定する [2]。この仮定より、フリッカパラメータを以下の式とする。

$$\begin{cases} \alpha(i, j, t) = \alpha_{m,n}(t) \\ \beta(i, j, t) = \beta_{m,n}(t) \end{cases} \quad \forall i, j \in \Omega_{m,n} \quad (2)$$

ここで、 $\Omega_{m,n}$ は局所領域を示す。本稿ではブロック状の局所領域を用いる。 m と n は局所領域 $\Omega_{m,n}$ の画像中の位置を示す。これより、式 (1) は以下の式に再定義できる。

$$Z(i, j, t) = \alpha_{m,n}(t) \cdot Y(i, j, t) + \beta_{m,n}(t) \quad \forall i, j \in \Omega_{m,n} \quad (3)$$

式 (3) より、 $Y(i, j, t)$ を推定するためには、フリッカパラメータ $\alpha_{m,n}(t)$ と $\beta_{m,n}(t)$ を推定しなければならない。各局所領域内の輝度値の分散と平均を用いることで、以下の式によりフリッカパラメータの推定が可能である。

$$\alpha_{m,n}(t) = \sqrt{\frac{\text{var}[Z(i, j, t)]}{\text{var}[Y(i, j, t)]}} \quad (4)$$

$$\beta_{m,n}(t) = E[Z(i, j, t)] - \alpha_{m,n}(t)E[Y(i, j, t)] \quad (5)$$

ここで、 $\text{var}[\cdot]$ は局所領域 $\Omega_{m,n}$ 内の分散値であり、 $E[\cdot]$ は局所領域 $\Omega_{m,n}$ 内の平均値である。

しかし、式 (4) と式 (5) には、未知の値である劣化前の画像の輝度値 $Y(i, j, t)$ が含まれているので、このままでは $\alpha_{m,n}(t)$ と $\beta_{m,n}(t)$ を推定することができない。そこで、文献 [2] では $Y(i, j, t)$ の代わりにフリッカ補正後の 1 フレーム前の画像の輝

度値 $\hat{Y}(i, j, t-1)$ を用いている。

以上より、フリッカパラメータ $\hat{\alpha}_{m,n}(t)$ と $\hat{\beta}_{m,n}(t)$ を推定する式は以下となる。

$$\hat{\alpha}_{m,n}(t) = \sqrt{\frac{\text{var}[Z(i, j, t)]}{\text{var}[\hat{Y}(i, j, t-1)]}} \quad (6)$$

$$\hat{\beta}_{m,n}(t) = E[Z(i, j, t)] - \hat{\alpha}_{m,n}(t)E[\hat{Y}(i, j, t-1)] \quad (7)$$

2.3 フリッカ補正法

式 (6) と式 (7) より推定したフリッカパラメータを用いて、劣化画像 $Z(i, j, t)$ をフリッカ補正する。フリッカ補正画像は以下の式で求められる。

$$\hat{Y}(i, j, t) = \frac{Z(i, j, t) - \hat{\beta}_{m,n}(t)}{\hat{\alpha}_{m,n}(t)} \quad \forall i, j \in \Omega_{m,n} \quad (8)$$

フリッカパラメータ $\alpha_{m,n}(t)$ と $\beta_{m,n}(t)$ が局所領域内で一定であると仮定しているので、式 (8) によるフリッカ補正後の画像にブロックノイズが生じることがある。このため、フリッカ補正後の画像にブロックノイズが生じないように、フリッカパラメータ α と β を補間しなければならない。ここで、以下の式により、フリッカパラメータ $\alpha_{m,n}(t)$ と $\beta_{m,n}(t)$ を補間する。

$$\begin{cases} \hat{\alpha}(i, j, t) = I[\alpha_{m,n}(t), \alpha_{m+1,n}(t), \alpha_{m,n+1}(t), \alpha_{m+1,n+1}(t)] \\ \hat{\beta}(i, j, t) = I[\beta_{m,n}(t), \beta_{m+1,n}(t), \beta_{m,n+1}(t), \beta_{m+1,n+1}(t)] \end{cases} \quad (9)$$

ただし、 $\hat{\alpha}(i, j, t)$ 、 $\hat{\beta}(i, j, t)$ は補間後のフリッカパラメータとする。ここで、 $I[\cdot]$ は補間した値を求める関数である。本稿では、補間法として共 1 次補間法を用いた [3]。以上より、ブロックノイズの発生をおさえたフリッカ補正後の画像の輝度値は式 (8) と式 (9) より以下の式になる。

$$\hat{Y}(i, j, t) = \frac{Z(i, j, t) - \hat{\beta}(i, j, t)}{\hat{\alpha}(i, j, t)} \quad (10)$$

3. 映像中の動きを考慮した従来のフリッカパラメータ推定法

前節のフリッカ補正法では映像中に動きがないと仮定しているので、映像中の動きに対してはフリッカ補正できない。そこで、本節ではフリッカで劣化した映像中の動き推定法と映像中の動きに対する従来のフリッカパラメータの推定法を説明する。

3.1 フリッカで劣化した映像中の動き推定

前節より、式 (6) と式 (7) を用いて、フリッカパラメータ $\hat{\alpha}_{m,n}(t)$ と $\hat{\beta}_{m,n}(t)$ を推定するためには、以下の式が近似的に成り立たなければならない。

$$\begin{cases} E[Y(i, j, t)] = E[\hat{Y}(i, j, t-1)] \\ \text{var}[Y(i, j, t)] = \text{var}[\hat{Y}(i, j, t-1)] \end{cases} \quad (11)$$

しかし、移動物体がある局所領域では式 (11) は近似的に成り立たない。このため、移動物体がある局所領域では式 (6) と式 (7) を用いて推定できない。そこで、移動物体がある局所領域においては移動物体を考慮したフリッカパラメータ推定法が



図 1 各局所領域が重なり合うように分割した画像

必要となる。このため映像中の移動物体がある局所領域を検出しなければならない。そこで、文献[2]ではフリッカで劣化した映像中の動きがある領域を検出する方法に以下のアルゴリズムを用いる。

Step 1: 図 1 のように画像を上下左右の隣接した局所領域が重なりあうように分割する。この重なりあった領域を境界領域とする。

Step 2: 式 (6) と式 (7) を用いて各局所領域のフリッカパラメータを推定し、式 (8) を用いて各局所領域を補正する。

Step 3: 境界領域において輝度値の差分絶対値をとる。差分絶対値が閾値 T_d 以上のピクセルを数える。

Step 4: 境界領域において、Step 3 で数えたピクセル数が D_{max} 以上ならば境界領域を含む領域に移動物体があるとするとする。

3.2 映像中の動きに対する従来のフリッカパラメータ推定法

3.2.1 dilation 法

dilation 法とは、移動物体があると推定された局所領域のフリッカパラメータを補間する手法である。この手法は、補間する局所領域における 4 近傍内の局所領域でフリッカパラメータが確定した局所領域のフリッカパラメータを用いて補間する [2]。ここで、図 2 に dilation 法による補間の例を示す。図 2(a) は初期状態である。黒い領域は移動物体がない領域、または移動物体があるがフリッカパラメータが補間された領域を示す。白い領域は移動物体があり、フリッカパラメータが補間されていない領域を示す。図 2(b) は反復回数 $k = 1$ 、図 2(c) は反復回数 $k = 2$ 、図 2(d) は反復回数 $k = 3$ のときの補間結果である。反復回数が増していくごとに移動物体がある領域のフリッカパラメータが補間されていくことがわかる。

ここで、dilation 法の問題点を示すために、dilation 法によりフリッカを補正する。図 3(a) にフリッカで劣化した画像を示す。図 3(b) に dilation 法により補正した画像を示す。図 3(b) より、移動物体 (自転車) が白くぼやけていることがわかる。こ

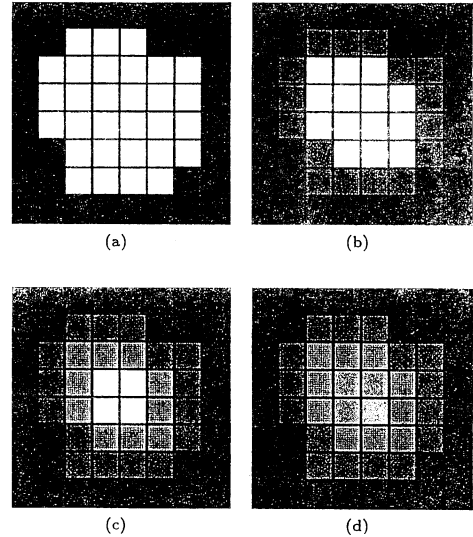


図 2 dilation 法による補間の例。(黒い領域はフリッカパラメータが確定している領域を、白い領域はフリッカパラメータが確定していない領域を示す。)(a) 初期状態、(b) 反復回数 $k = 1$ 、(c) 反復回数 $k = 2$ 、(d) 反復回数 $k = 3$ のときの補間結果。

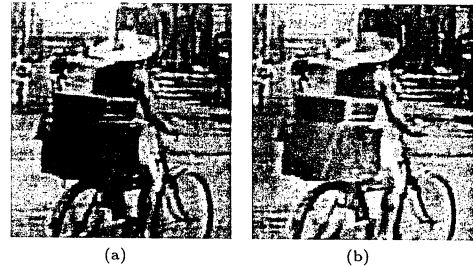


図 3 dilation 法による補正後の影響。(a) 原画像、(b) dilation 法による補正後の画像

れは、dilation 法が、周囲のフリッカパラメータを用いて移動物体がある領域のフリッカパラメータを補間するために、移動物体が複数の局所領域にわたる場合、フリッカパラメータの推定が不正確となってしまいうためである [4]。

3.2.2 動き量推定を用いたフリッカパラメータ推定法

動き量推定を用いたフリッカパラメータ推定法とは、移動物体があると推定された局所領域に対し動き量を推定し、推定された動きを補償して、移動物体中のフリッカパラメータを推定する手法である [5]。この手法では、動き量を推定するために Block Matching (以降 BM) 法を用いる。しかし、一般的な BM 法ではフリッカの影響で正確には動き量を推定できない。そこで、この手法では BM 法でのフリッカの影響をおさえるために、一度 dilation 法によりフリッカを補正した画像を用いて BM 法により動き量を推定する。これにより、推定した動き量を用い、以下の式により移動物体がある局所領域のフリッカパラメータを推定する。



図4 移動物体が形状を変えながら動く場合の例。(a) 参照画像、(b) 劣化画像、(c) 動き量を推定した画像 (矢印が動き量を示す)。(d) 動き量推定を用いたフリッカパラメータ推定法後の補正画像。

$$\hat{\alpha}_{m,n}(t) = \sqrt{\frac{\text{var}[Z(i,j,t)]}{\text{var}[\hat{Y}(i+q,j+r,t-1)]}} \quad (12)$$

$$\hat{\beta}_{m,n}(t) = E[Z(i,j,t)] - \hat{\alpha}_{m,n}(t)E[\hat{Y}(i+q,j+r,t-1)] \quad (13)$$

ここで、 q と r は推定した動き量を示す。

しかし、この手法は dilation 後の補正画像を用いて動き量を推定しているため、動き量推定の性能が dilation 後の補正画像に依存してしまう。前項で述べたように、dilation 法には移動物体が複数領域にわたる場合にフリッカパラメータの推定が不正確になるという問題点がある。これにより、dilation 後の補正画像を用いても動き量の推定が不正確となり、移動物体中のフリッカパラメータの推定が不正確となる。

さらに、移動物体が形状を変えながら動く場合、形状の変化により、物体の同一部位でも画像の輝度値が変化するため、ブロックマッチングを用いて移動量は推定できない。従って、これに基づくフリッカパラメータの推定はできない。

図4に移動物体が形状を変えながら動く場合の例を示す。図4(a)に1フレーム前の参照画像を示す。図4(b)にフリッカで劣化した画像を示す。図4(c)に動き量を推定した画像を示す。矢印は動き量を示す。図4(d)に動き量推定を用いたフリッカパラメータ推定法で補正した画像を示す。図4(c)のように、移動物体が形状を変えながら動く場合、動き推定が不正確となる。図4の例では、中央の女性が左手を振りながら移動している。手を振りながら移動しているため、手の形状が2フレーム間で変化している。図4(d)より、動き推定の不正確さが補正後の画像に影響が生じていることがわかる。

4. 映像中の動きに対するフリッカパラメータ推定法の提案

従来法では映像中に動きがある場合、フリッカ補正に問題点が生じる。そこで、本節では従来法の問題点を検討し、映像中の動きに対してロバストなフリッカパラメータ推定法を提案する。

4.1 従来法の問題点の検討

従来法の問題点から以下の点がわかった。dilation 法や移動物体がある領域のフリッカパラメータを補間するその他の手法[2]から、移動物体がある局所領域のフリッカパラメータをその周辺領域のフリッカパラメータから補間することが困難であることがわかった。

移動物体が形状を変えながら動く場合、参照できる局所領域は存在しない。これにより、移動物体中の局所領域におけるフリッカパラメータを推定することは困難であることもわかった。実映像においては、移動物体が形状を変えながら動く場合が多数存在するため、この場合のフリッカ補正は非常に重要である。

以上の点から、移動物体がある領域のフリッカパラメータは局所領域毎に補間または推定することが困難である。

実映像の移動物体は局所領域を対象とすると、式(11)の仮定を満たすことができない。しかし、図4(a)と図4(b)からもわかるように、実映像では移動物体全体を見ると、2フレーム間では映像の特徴量の変化が少ないということがわかった。この映像の特徴を活かし、新たなフリッカパラメータ推定法を提案する。

4.2 提案法

提案法では、移動物体を含む領域の映像の特徴量は大域的に見ると2フレーム間では変化が少ないという特徴を活かす。そこで、移動物体がある局所領域では以下の式となる。

$$\begin{cases} E[Y(i,j,t)] \neq E[\hat{Y}(i,j,t-1)] \\ \text{var}[Y(i,j,t)] \neq \text{var}[\hat{Y}(i,j,t-1)] \end{cases} \quad (14)$$

しかし、移動物体全体が入るような大域的な領域 Ψ_k においては、以下の式が近似的に成り立つ。

$$\begin{cases} E[Y(i,j,t)] \simeq E[\hat{Y}(i,j,t-1)] \\ \text{var}[Y(i,j,t)] \simeq \text{var}[\hat{Y}(i,j,t-1)] \end{cases} \quad (15)$$

そこで、本稿では大域的に見ると移動物体はフリッカパラメータが一定であると仮定し、式(15)の条件を用いて、フリッカパラメータを推定する手法を提案する。本稿では、大域的な領域 Ψ_k として、4近傍内で連結した移動物体がある局所領域を用いる。これより、移動物体がある領域 Ψ_k のフリッカパラメータ $\hat{\alpha}_k$ と $\hat{\beta}_k$ を推定する式は以下となる。

$$\hat{\alpha}_k(t) = \sqrt{\frac{\text{var}[Z(i,j,t)]}{\text{var}[\hat{Y}(i,j,t-1)]}} \quad (16)$$

$$\hat{\beta}_k(t) = E[Z(i,j,t)] - \hat{\alpha}_k(t)E[\hat{Y}(i,j,t-1)] \quad (17)$$

以上より、大域的な領域 Ψ_k に含まれる局所領域 $\Omega_{m,n}$ のフリッ

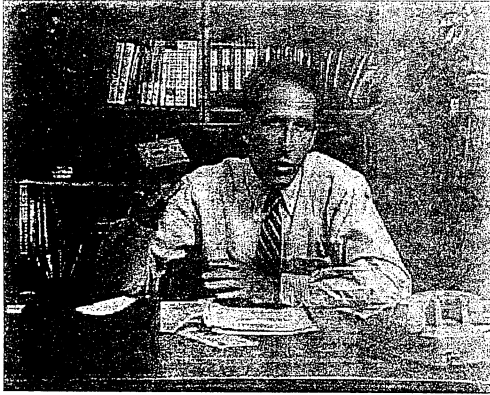


図5 人工的にフリッカを付加した実験に用いた映像 salesman

カパラメータを以下の式から推定する。

$$\hat{\alpha}_{m,n}(t) = \hat{\alpha}_k(t) \quad (18)$$

$$\hat{\beta}_{m,n}(t) = \hat{\beta}_k(t) \quad (19)$$

5. 提案法のフリッカ補正結果

前節で提案した提案法と従来法を用いてフリッカを補正し、フリッカ補正後の映像を比較することでフリッカ補正の性能を評価する。

5.1 人工的にフリッカを付加した映像を用いた実験

人工的にフリッカを付加した映像を用いて、従来の補正法と提案法の性能を比較する。文献[2]では、フリッカパラメータ $\alpha(i, j, t)$ と $\beta(i, j, t)$ に2次元多項式を用いて人工的にフリッカを発生させている。そこで、本稿でも文献[2]の手法を用いて画像に人工的にフリッカを付加する。実験映像として、salesman と susie の映像を使用した。図5に映像 salesman の1フレームを示す。図6に映像 susie の1フレームを示す。本実験ではフリッカ補正の評価指標として、SN比を用いた。本稿では、以下の式を用いてSN比を求める。

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i,j} Y^2(i, j, t)}{\sum_{i,j} (Y(i, j, t) - \hat{Y}(i, j, t))^2} \quad (20)$$

ここで、 $Y(i, j, t)$ は原画像の画素値を示す。 $\hat{Y}(i, j, t)$ は劣化画像またはフリッカ補正画像の画素値を示す。

図7と図8は、それぞれ人工的にフリッカを付加した映像 salesman と susie に対して、dilation 法と動き量推定を用いた補正法（グラフの凡例では動き推定法として示している）、提案法をそれぞれ用いてフリッカを補正した画像のSN比である。図7と図8より、提案法はSN比が高く、映像中の動きに対してロバストにフリッカを補正していることがわかる。

5.2 フリッカで劣化した実映像を用いた実験

実映像にはフリッカ以外にも様々な劣化現象が生じている。古いフィルム映像には位置ずれという劣化現象が生じる。本稿で用いているフリッカ補正法は参照画像と劣化画像を比較して



図6 人工的にフリッカを付加した実験に用いた映像 susie

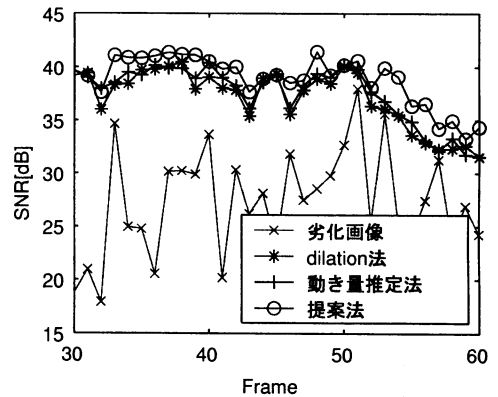


図7 人工的にフリッカを付加した画像 salesman を補正した画像の原画像とのSN比

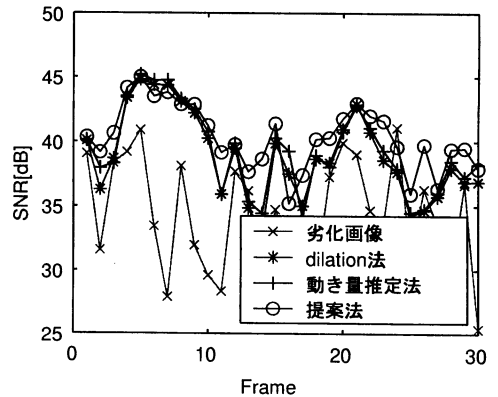


図8 人工的にフリッカを付加した画像 susie を補正した画像の原画像とのSN比

補正しているため、位置ずれが生じているとフリッカ補正の精度が低下する。このため、実験には位置ずれ補正[6]後の画像を用いる。本節では実際の古いフィルム映像 asahikawa^(注1)を用いて、各手法のフリッカ補正における性能を評価する。こ

(注1)：使用したフィルム映像は「北海道／旭川」(北海道映像記録(株))の一部である。



図 9 実験に用いた映像 asahikawa

で、図 9 に実験に用いた asahikawa の 1 フレームを示す。

図 10 に実映像を用いた補正画像の例を示す。図 10(a) に参照画像を示す。図 10(b) にフリッカを補正する劣化画像を示す。図 10(c) に動き量推定を用いてフリッカパラメータを推定した補正画像を示す。図 10(d) に提案法を用いてフリッカパラメータを推定した補正画像を示す。図 11 に asahikawa の 1 カット内における各フレームの輝度値の平均値をプロットしたグラフを示す。

図 10(c) より、動き量推定を用いた補正画像は自転車に乗っている人の部分が白くぼやけていることがわかる。このように、動き量推定を用いた補正法では、形状を変えながら動く移動物体において、参照画像や劣化画像にはない補正後の誤差が生じてしまう。しかし、図 10(d) より、提案法では動き量推定を用いた補正画像のような誤差が生じないことがわかる。さらに、図 11 より、動き量推定を用いた補正画像や dilation 法を用いた補正画像よりも、提案法を用いた補正画像の方が輝度値の平均値がばらついていないことがわかる。これは、提案法が各種補正法よりも高精度にフリッカを補正していることを示している。以上の結果より、提案法は従来法よりも映像中の動きに対してロバストにフリッカを補正していることがわかる。

6. ま と め

本稿では、古いフィルム映像における映像中の動きにロバストなフリッカパラメータ推定法を提案し、その性能を従来法と比較し評価した。人工的にフリッカを付加させた映像を用いて、提案法と従来法によりフリッカを補正する実験をした。この実験より、SN 比を指標に用いて比較したところ、提案法が各従来法よりも SN 比が良く、効果的にフリッカ補正できていることが示された。さらに、フリッカで劣化した実映像を用いて、フリッカ補正の実験をした。以上より、本稿では提案法は従来法よりもフリッカの補正が高精度にできることがわかった。

文 献

- [1] Anil Kokaram: Motion Picture Restoration, Springer, 1998.
- [2] P. M. B. van Roosmalen: Restoration of Archived Film and Video, Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, 1999.
- [3] 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版, 1991.
- [4] 大野誠司: 古いフィルム映像に含まれるフリッカの補正に関する研究, 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻修士論文, 2002.
- [5] 大野誠司, 阿部正英, 川又政征: フリッカに強い動き推定を用い

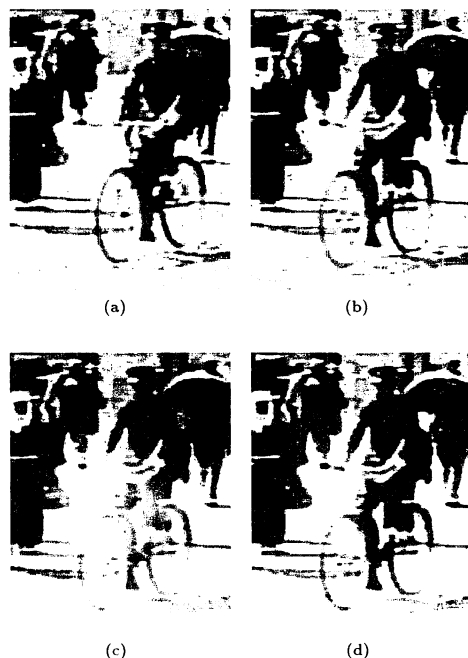


図 10 実映像を用いた補正画像の例。(a) 参照画像, (b) 劣化画像, (c) 動き量を用いた補正画像, (d) 提案法の補正画像。

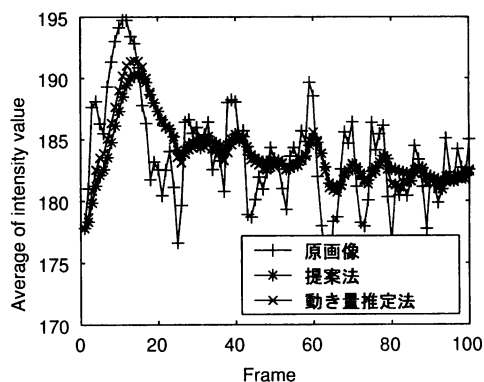


図 11 実映像を用いた各手法における補正画像の輝度値の平均 (ここで、動き推定法とは動き量推定を用いた補正法を示す)

た古いフィルム映像のフリッカ補正, 第 17 回デジタル信号処理シンポジウム講演論文集, November, 2002.

- [6] 萩原瑞木, 川又政征: 移送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の性能評価, 第 16 回デジタル信号処理シンポジウム講演論文集, pp. 517-522, 2001.