

氏名	萩原 瑞木
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成17年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電子工学専攻
学位論文題目	古いフィルム映像のデジタル修復に関する研究
指導教官	東北大学教授 川又 政征
論文審査委員	主査 東北大学教授 川又 政征 東北大学教授 阿曾 弘具 東北大学教授 牧野 正三 東北大学講師 阿部 正英

論文内容要旨

第1章 緒言

20世紀は映像の世紀と言われ、19世紀末のフィルム映画の発明以来、大衆文化やマスメディアの記録媒体として膨大な量の映像が記録されてきた。これらフィルム映像の多くは、文化的、芸術的そして歴史的価値が高い。しかし、フィルムはその素材の化学的性質により経年劣化を避けられず、多くの映像情報が失われつつある。特に、1950年以前の硝酸エステルフィルムは重度の損傷を被っている。UNESCOの推定によると、1950年以前に製作された約22億枚の硝酸エステルフィルムが存在し、すでにそれらの多くが全面的に修復の必要性に迫られている。

過去50年間にわたってフィルムは光化学的複製法により修復されてきたが、この方法ではフィルム感光面に付いた傷のみ修復可能である。近年のプロセッサ技術の発達や記憶装置の大容量化などにより、デジタル信号処理の応用技術として画像・映像処理アルゴリズムを汎用計算機や専用ハードウェア上で実現可能となってきた。また、修復コストの面から、単にデジタル的に人手で修復するのみならず、できるだけ人手を介さず修復する手法の開発が望まれている。これらの要求に伴い、劣化フィルムをデジタル的に保存・修復する手法も盛んに研究されてきた。

本論文では、劣化した古いフィルム映像をデジタル的に自動修復するアルゴリズムの開発を行った。劣化として、フレーム毎の位置ずれ、フリッカ、プロッチを扱う。それぞれの劣化に対する修復アルゴリズムを考察し、最終的に統合することにより映像修復アルゴリズム全体を完成させる。

第2章 古いフィルム映像の修復に関する基礎的考察

本章では、古いフィルム映像の修復に関する基礎的考察を行った。

第1章で示したように、古いフィルム映像は固有の劣化を生じている。これらの固有の劣化により、古いフィルム映像は視覚的に大変見辛いものとなっている。本章では、これらの劣化の性質の考察およびモデル化を行い、修復の原理を概説した。

本論では、劣化を次式のようにモデル化した。

$$I_n(n_1, n_2) = \phi_n(n_1, n_2)E_n(n_1 - \tau_{1n}, n_2 - \tau_{2n}) + \psi_n(n_1, n_2) + \mathcal{N}(n_1, n_2) \quad (1)$$

$E_n(n_1, n_2)$ と $I_n(n_1, n_2)$ は、それぞれフレーム番号 n のときの原映像と劣化映像を示す。 (τ_{1n}, τ_{2n}) は位置ずれ量、 ϕ_n と ψ_n はそれぞれフリッカゲインパラメータとフリッカオフセットパラメータを示す。 $\mathcal{N}(n_1, n_2)$ はプロッチ、スクラッチやその他の雑音と取りまとめたパラメータを表す。映像修復は、これらの各劣化パラメータを推定し、式(1)に対して逆変換を施すことにより行われる。

第3章 位置ずれ推定

本章では、古いフィルム映像に存在するフレーム毎の位置ずれ補正法を提案した。

位置ずれ補正は、フレーム毎の位置ずれ量を推定し、推定されたずれ量を補正するという2段階の処理で行われる。位置ずれ量の推定には位相限定相関を用いる。

画像 $a(n_1, n_2)$ と $b(n_1, n_2)$ の位相限定相関 $g_{ab}(n_1, n_2)$ は、次式のように2つの画像の正規化クロスパワースペクトルのフーリエ逆変換として定義される。

$$g_{ab}(n_1, n_2) = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{A(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}) B^*(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})}{|A(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})| |B(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})|} \right] \quad (2)$$

ここで、 \mathcal{F}^{-1} は離散空間フーリエ逆変換を示し、 $A(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ と $B(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ はそれぞれ画像 $a(n_1, n_2)$ と $b(n_1, n_2)$ のスペクトルを表す。

位置ずれ量推定のため、画像 $a(n_1, n_2)$ と $b(n_1, n_2) = a(n_1 - \tau_1, n_2 - \tau_2)$ の位相限定相関 $g_{ab}(n_1, n_2)$ を考える。ここで、 τ_1 と τ_2 はサブピクセルレベルの位置ずれ量を表す。この場合の位相限定相関は

$$\begin{aligned} g_{ab}(n_1, n_2) &= \mathcal{F}^{-1} \left[e^{j\omega_1(n_1 + \tau_1)} e^{j\omega_2(n_2 + \tau_2)} \right] \\ &= \text{sinc}(n_1 + \tau_1) \text{sinc}(n_2 + \tau_2) \end{aligned} \quad (3)$$

と、sinc関数で表せる。この式より、2つの画像間の位相限定相関を計算し、その移動量を検出することにより画像間の位置ずれ量を推定することができる。また、この性質をより、サブピクセル精度の位置ずれ量を推定することが可能である。つまり、離散的に求められた位相限定相関に連続的なsinc関数をフィッティングし、そのフィッティングされたsinc関数の位置を計測すれば求めるサブピクセル精度の位置ずれ量を得ることができる。ただし、sinc関数のフィッティングは非線形の問題に帰着し計算時間が多くなってしまったため、本論文では2次曲線のフィッティングによる方法を提案し計算時間の削減を行った。

以上の議論は、離散空間フーリエ変換を用いて行われたが、実際に計算機を用いて位相限定相関を計算する時には離散フーリエ変換を用いる。この場合、式(3)で示した位相限定相関の一般形は異なる形となる。しかし、離散フーリエ変換を用いた場合においても、近似的に式(3)を用いてサブピクセル精度の位置ずれ量推定が行える。

また、この位置ずれ量推定法に関して、人工的にずれを発生させた映像にたいして性能評価実験を行った結果、推定誤差が0.01ピクセル以下と高精度な位置ずれ量推定が行えることが確認された。

第4章 ショットチェンジ検出とカメラワーク推定

本章では、古いフィルム映像中のカメラワーク推定法およびショットチェンジ検出法を提案した。

前章で示した位置ずれ推定法は推定量にカメラワーク量を含むため、カメラワークを保存して不要な位置ずれのみを補正するためにはカメラワークの推定が必要となる。カメラワークの推定は古いフィルム映像の位置ずれ補正で用いるだけでなく、フリッカ補正やブロッच除去の際の計算に必要なパラメータとして非常に重要である。また、映像中のカメラワークはショット毎に異なるため、映像を各ショットに分割する必要がある。本章では、まず与えられた映像をショットに分割する手法について考察し、分割されたショットのカメラワークを推定する手法を考察した。

上述の位置ずれ量推定法では、映像中の連続する2フレーム間の位置ずれ量を推定する。これを1フレーム目から最後のフレームまで行う。前述のように、提案法ではフレーム間の位置ずれ量推定に位相限定相関を用いている。位相限定相関は、相関を計算する2つの画像の類似度が高い場合鋭いピークを持ち(図1(a))、全く違う画像の相関を計算した場合は大きなピークを持たない(図1(b))という性質がある。提案法では、連続するフレーム間の位相限定相関を計算するため、カット時に極端にピーク値が小さくなる。よって、提案するカット検出法では、各フレーム間の位相限定相関のピーク値を測定し、極端に値の小さくなった点をカット点とする。また、位置ずれ量推定と同時にピーク値を測定することにより、特別な計算を要することなくカット検出を行える。さらに、位相限定相関はその計算過程において振幅スペクトルを正規化するため、フリッカに対してロバストであるという性質を持つ。

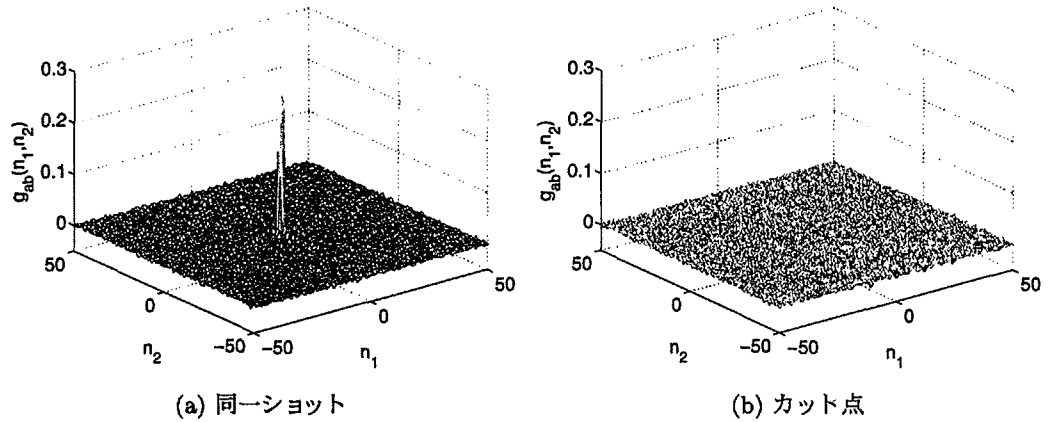


図 1: 原点付近の位相限定相関の比較

本章では、カット検出における閾値を、位相限定相関の数学的な解析結果により導出した。この閾値を用いることにより、劣化映像に対しても高精度なカット検出が行えることを実験的に確認した。また、カット検出法を拡張することによりディゾルブ検出にも対応した。

以上の方法で分割された各ショットに対してカメラワーク推定を行う。本論文では、位置ずれ量推定結果のローパスフィルタリングによるカメラワークの推定法を提案した。一般にカメラワークは緩やかな動作であるのに対して、フレーム毎の位置ずれは不規則なものである。そこで、推定結果をローパスフィルタリングし、高周波成分を除去することでショット全体のおおまかな動き、つまりカメラワークを推定することが可能となる。

これらの方法を用いてショットチェンジ検出実験およびカメラワーク推定実験を行った結果、高精度な検出と推定が行えることが確認された。

第 5 章 フリッカ補正とブロッチ除去

本章では、古いフィルム映像に存在するフリッカの補正法とブロッチの除去法を考察した。

提案法により位置ずれを補正した後に、フリッカ補正とブロッチ除去を行うことにより、古いフィルム映像修復アルゴリズム全体を完成させる。本章では、いくつかのフリッカ補正法の概要を示し、実験により性能を評価した。実験結果より、補正性能が高い移動物体に対してロバストなフリッカパラメータ推定法を用いたフリッカ補正法を修復アルゴリズムに採用した。

また、いくつかのブロッチ除去法の概要を示し、フリッカ補正法と同様に性能評価実験を行った。性能評価実験の結果より、ブロッチの除去率が高かった背景領域限定フィルタリング法を本論文の修復アルゴリズムに採用した。

第 6 章 古いフィルム映像の修復実験

本章では、提案する古いフィルム映像のデジタル修復アルゴリズムを実際の古いフィルム映像に適用し、その性能を評価した。

提案法は大きく分けて、フレーム毎の位置ずれ補正、フリッカ補正、ブロッチ除去、という 3 段階の処理で構成される。実験には 3 つの古いフィルム映像を用いた。本章では、各修復処理を古いフィルム映像に対して段階的に適用し、それぞれの手法の効果を確認した。その結果、それぞれの手法において視覚的に十分な精度での修復が行えることを確認した。

第 7 章 結言

以上のように、本論文では古いフィルム映像のデジタル修復アルゴリズムを提案し、実際のフィルム映像の対する修復実験により、高精度な修復が可能であることを検証した。

論文審査結果の要旨

古いフィルム映像は、撮影当時の生活・文化の記録として歴史的・文化的価値が高い。しかし、古いフィルム映像は、撮影機構の不安定性や経年変化により様々な損傷を被って劣化しており、視覚的にきわめて見づらいものが多い。そこで、劣化したフィルム映像を修復する必要があるが、修復精度や修復コストを考慮すると、コンピュータを利用し自動的に修復が行われることが望まれる。本論文では、古いフィルム映像の劣化をデジタル信号処理により自動的に修復する手法について研究し、映像修復法の第1段階の処理であるフレーム毎の位置ずれ補正法に関して、高精度位置ずれ量推定法、ショットチェンジ検出法、カメラワーク推定法を提案した。本論文は、これらをまとめたものであり、全編7章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章では、古いフィルム映像中に存在する様々な劣化について述べている。古いフィルム映像中の劣化は、フレーム毎の位置ずれ、フリッカ、ブロッチ・スクラッチ、その他の雑音に分類され、これらの劣化を差分方程式によってモデル化した。

第3章では、位相限定相関を用いた画像の位置ずれ量推定法を提案している。視覚的に安定した補正映像を得るためには、サブピクセル精度の位置ずれ量推定が必要である。本章では位相限定相関の性質について数学的な解析を行い、推定精度をサブピクセル精度に拡張した。これにより、推定誤差の平均値が0.075pixelというきわめて高精度な位置ずれ量推定が可能となった。これは、実用上、有用な成果である。

第4章では、映像のショットチェンジ検出法とカメラワーク推定法を提案している。ショットチェンジ検出では、位相限定相関の統計的な解析結果によって、検出のためのパラメータを理論的に決定できることを明らかにした。これは、優れた理論的成果である。これにより、これまで検出できなかった損傷の激しい映像に対してもショットチェンジ検出が可能となった。また、高精度の位置ずれ補正にとって重要なカメラワーク推定法を提案し、自動修復法をより実用的なものとした。

第5章では、フリッカ補正法とブロッチ除去法について従来法を調査し、提案する位置ずれ補正法と整合性の良い方法を統合することにより、古いフィルム映像の修復アルゴリズム全体を構築している。

第6章では、実際の古いフィルム映像に対して、提案する映像修復アルゴリズムを用いて修復実験を行っている。修復結果の映像を視覚的に確認することにより、提案法の優れた性能を確認した。

第7章は結言である。

以上要するに本論文は、古いフィルム映像のデジタル修復手法を提案し、これをコンピュータ上に実装するとともにその有効性を示したものであり、画像・映像処理工学および電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。