

デジタル映像アーカイブのための 画像修復技術の研究開発

齊藤 隆弘

あらまし

筆者らの研究グループは、古い映像資料（映画フィルム）のデジタルアーカイブ化のための必須の基本技術である“経年劣化により傷んだ映画フィルムのデジタル映像修復技術”の研究開発に取り組んできた。経年劣化フィルムに先端的なデジタル映像修復技術を適用することで、撮影当時の生き生きとした映像を蘇らせることができる。本論文では、筆者らの研究グループがここ数年間に行った研究開発の成果について述べる。

I はじめに

経年劣化を避けることができない“実物の文化資産”の姿を、デジタル画像やデジタルデータとして高精度に記録し、これらを広く公開すれば、実物の文化資産の劣化の防止にもなり、さらには文化の普及にも貢献しうる。“実物の文化資産”をデジタル化するということは、実物の有効利用を促進することであり、また同時に実物の無用な利用を抑制することで、実物を劣化から守ることに繋がる。我が国においては、1990年代前半に、このようなコンセプトが自然発生的に生じ、このコンセプトの生みの親の一人であった東京大学、月尾嘉男教授が、このコンセプトを表す用語として「デジタルアーカイブ」という用語を提唱した⁽¹⁾。現在では、我が国におけるデジタルアーカイブ構想は、デジタル情報のネットワーク経由の高度な利活用までも視野に入れたものになっていることはいうまでもないことである。

デジタルアーカイブの特徴は、①デジタルデ

ータは経年劣化しないこと、②画像や音やテキスト等のデジタルデータの合成や編集が容易なこと、③ネットワーク経由の高度かつ便利な利活用が容易に実現できること、④高性能かつ先端的なデジタル信号処理やデジタル画像処理の適用が可能であること、⑤デジタルデータの記録と保存はアナログデータと比較して安価であること、⑥デジタル複製が容易であること、⑦デジタル技術の進歩は速いこと、といったものである。上記の特徴の中で、⑥と⑦は、長所にもなりうるし、欠点にもなりうる。

一方、デジタルアーカイブをその導入形態から分類すると、①“実物のアーカイブ”のデジタル化、②デジタル情報技術を活用した収蔵物のデジタルアーカイブ化、③散在する対象物のデジタルデータとしてデジタルアーカイブ化、という3種類に分類することができる⁽¹⁾。我が国においては、“実物のアーカイブ”そのものが、西欧諸国に比較すると、さほど普及していなかったということから、上記①の形態のデジタルアーカイブは主流ではなく、上記②や③のタイプのデジタルアーカイブが主流であるといわれている。多くの美術館・博物館では、デジタル情報通信技術やデータベース技術の普及に合わせ、アーカイブとデジタルアーカイブをほぼ同時に立ち上げるといった傾向がよく見られるとのことである。

我が国における美術館のデジタルアーカイブとその公開サービスの事例としては、東京国立博物館が、4×5フィルムをスキャンした4000×5000画素のデジタル画像データを最高レベルのデータとし、またそれを間引いた4段階のデジタル画像データを無圧縮のTIFF形式で長期保存用データとし、さらにインターネットを介しての一般公開には、国

際標準画像圧縮方式のJPEGによって情報圧縮したデータ形式を導入した事例が、標準モデルとなり、その後の流れの主要な方向性を決定付けた⁽²⁾。また、我が国においては、美術館における鑑賞のみならず、事前学習や事後学習にデジタル情報技術を使用する先端的な試みが、東京大学総合研究博物館等で始められ、現在では、このような高度な利活用の形態の実現を、その目標とすることがデジタルアーカイブの標準コンセプトになりつつある。

一方、我が国の動画像のデジタルアーカイブとしては、2003年に埼玉県川口市に設立されたNHKアーカイブスが、その規模と収蔵量から国内最大のものである⁽⁴⁾。これは、VTRテープなどの種々の媒体に記録された“過去に放送されたTV番組”や“番組素材映像”をデジタル化し、再利用しようとするものである。また、我が国の映画フィルムのデジタルアーカイブ化に関しては、組織的な試みとしては、東京国立近代美術館フィルムセンターの試みが唯一のものである⁽⁵⁾。このフィルムセンターでは、神奈川県相模原市に設置されているフィルム保管庫に、35mmフィルムで20万巻（長編映画に換算して約4万本相当）のフィルムを保存しているが、その多くのは経年変化によって劣化している。経年劣化した映画フィルムのデジタルアーカイブ化には、デジタル映像復元が必須であるが、フィルムセンターでは試行的なプロジェクトとして2002年度から2004年度の期間に下記の5本の映画作品を、

『斬人斬馬剣』（1929年 伊藤大輔監督）2002～2003年度

『和製喧嘩友達』（1929年 小津安二郎監督）2003年度

『瀧の白糸』（1933年 溝口健二監督）2004年度

『新・平家物語』（1955年 溝口健二監督）2004年度

『國士無双』（1932年 伊丹万作監督）2004年度

その映画フィルムの各コマを2048画素×1556画素の高解像度でデジタルスキャンし、さらにデジタル映像復元したが、その後は経費的な問題もあって、デジタルアーカイブ化は進展していないとのことである⁽⁵⁾。

デジタル映像復元には、最先端の画像処理技術が適用されるが、処理対象のデジタルデータが膨大であり、また現状では計算時間も非常に長いことから、そのコストは非常に大きなものとならざるを得ない。筆者らの研究グループは、古い映像資料としての映画フィルムを対象とし、そのデジタルアーカイブ化のための基本技術の研究開発に取り組んできた。映像資料のデジタル化の妙味は、先端的なデジタル映像復元技術を適用することで、撮影当時の生き生きとした映像を蘇えらせることができる点にある。本論文では、筆者らの研究グループがここ数年間に行った研究開発の成果について述べる^{(6)~(17)}。

Ⅱ シネマ映像の経年劣化とそのデジタル修復

映画は100年以上前から存在しているが、映画フィルムの化学的不安定性に起因した経年劣化が生じることは避けられず、多くの貴重な映像資料が失われつつある⁽⁵⁾。とくに、1950年以前に採用されていた硝酸エステルが使用されていたフィルムでは経年劣化が避けられず、その多くは重度の損傷を被っている。そこで、映画フィルムをデジタル保存するとともに、損傷をデジタル画像処理技術により修復し、経年劣化以前の本来の品質の画像を復元することが必要とされている^{(5)~(7)}。

デジタル損傷修復を普及させるには、デジタル画像処理をできる限り自動化、高速化することで、デジタル損傷修復に要するコストを可能な限り削減する必要がある。世界で初めてデジタル損傷修復されて公開された映画は、ディズニー映画の「白雪姫（1937年作品）」であり、そのコストは700万USドルであった⁽¹⁸⁾。現在開発されている専用デジタル画像処理システムを用いた場合が、そのコストはフィルム損傷の程度によっても異なるが、1分間を修復するのに約3万～30万円かかるといわれている⁽¹⁹⁾。2時間の映画で約360万～3600万円かかるとなると、現時点の損傷修復コストは決して安いとはいえない。現状では、商業的に成功した映画のみがデ

デジタル損傷修復の恩恵を受けていて、芸術的価値は高くても商業的には成功しなかった映画や、ドキュメンタリー映像や資料映像は、高コストなままだと、デジタル損傷修復されず放置され、やがては消え去る運命にあるだろう。商業的に利用価値が見込めないと考えられている映像もデジタル損傷修復の恩恵が受けられるようにするには、デジタル損傷修復コストを大幅に下げるときの技術開発が必要不可欠である。

ECのDIAMANTプロジェクトでは、修復処理の対象となるさまざまなフィルム損傷の事例を収集、分類、整理するとともに、損傷動画像例をそのWebサイトに掲載している。⁽¹⁹⁾表1には、DIAMANTプロジェクトのWebサイトに掲載されているフィルム損傷の分類表を、再整理して示した。⁽¹⁹⁾なお、表1には、各損傷の見え方とその修復についてのコメントを記載したが、これはDIAMANTプロジェクトのWebサイトに記載されているものではなく、筆者の見解である。

表1では、フィルム損傷を、以下の6種類のカテゴリーに大分類している。

- (1) Loss of image information (画像情報の消失)
- (2) Defects originated in duplication (複写時の損傷)
- (3) Defects due to multiple copying (転写の繰り返しによる損傷)
- (4) Defects relating to early colored films (初期のカラーフィルムに関連した損傷)
- (5) Defects relating to early natural color system (初期カラーシステムに関連した損傷)
- (6) Defects relating to modern color system (最近のカラーシステムに関連した損傷)

上記の(1)の損傷は、フィルムそのものが傷ついたり、皺が付いたり、破損したり、黴が生えたり、感光乳剤が剥離、溶解したりして生じた損傷である。この種の損傷には、第一にアナログ的な修復技法が適用される。例えば、フィルム素材と同じ光学的特性を有した素材で傷を埋めたり、フィルム面を洗浄したりするものである。上記の(2)、(3)の損傷は、

オリジナルフィルムを、光化学的手法で複製したりする際に生じる損傷であり、これらの多くはもっぱらデジタル損傷修復の対象となる。上記の(4)～(6)の損傷は、カラーフィルムの損傷であり、軽度の損傷であるならば、モノクロフィルムと同様の手法を適用することによって修復可能である。

感光乳剤が塗布されたフィルム面と反対側のフィルムベース面に付いた傷は“フィルムの素材と同じ屈折率を有した液体に浸しながら、オリジナルフィルムを新しいフィルムに焼き付ける手法”であるウェッジゲート・プリンティングなどの光化学的手法によって修復することができる。⁽⁵⁾ポジフィルムの場合、黒く見えるスクラッチ(引掻き傷)がこれに相当する。一方、フィルム面の感光乳剤が塗布された面に傷が付くと、ポジフィルムの場合には白く見え、しかも傷の深さによって見え方が微妙に異なる。場合によっては、雪のように見えることもある。この傷は光化学的手法では修復することができない。この場合、デジタル損傷修復以外では修復不可能である。このように多様な損傷を効果的に修復するには、デジタル損傷修復が優位である。

筆者らの研究グループでは、実際のフィルム損傷事例を調査した結果、フレームの不規則な揺れ、フリッカ、スクラッチ、ブロッチ、ランダム雑音、フォーカス微動の補正(鮮鋭度の改善)は、画像処理技術によって修復、補正可能であると判断し、それらの損傷修復法や補正法を具体的な研究開発目標として設定した。^{(6)~(17)}

以下には、修復対象とした5種類のフィルム損傷の定義と原因を簡単に列記した。

(1) フリッカ⁽⁹⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾

元のシーンには存在しない明るさの不自然な時間的変動として定義される。その原因には、フィルムの経年劣化、化学的処理や複製の不完全性、シャッタ時間の変動等、多くのものがある。⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹²⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾

(2) ブロッチ

フィルム表面の埃の付着や、経年劣化による感光乳剤の剥離等の様々な要因によって生じた斑点状の損傷である。その輝度は暗い場合もあるし、明るい場合もある。

表1 種々のフィルム損傷タイプとその修復

| Defects Types (損傷のタイプ) | 損傷の見え方とその修復 |
|--|---|
| (1) Loss of Image Information (画像情報の消失) | |
| (1-1) Scratches (スクラッチ：引掻き傷) | 化学的修復。モフォロジ処理などのフレーム内画像処理による検出と修復。 |
| (1-2) Tears (裂け目あるいは断裂) | 裂け目や断裂をフレーム間処理で検出し、時空間補間によりフレーム挿入。 |
| (1-3) Crowsfeet (カラスの足跡) | モフォロジ処理などのフレーム内画像処理による検出と修復。 |
| (1-4) Cue dots (目印点) | 大きなブロッチ。フレーム間差分にモフォロジ処理等を適用して検出。フレーム間補間。 |
| (1-5) Missing frames (消失フレーム) | 消失フレームをフレーム間処理で検出し、フレーム間補間により消失フレームを挿入。 |
| (1-6) Wide splices (幅広の繋ぎ目) | 周囲と不連続な水平の繋ぎ目を検出し、隣接領域からの時空間補間により修復。 |
| (1-7) Reticulation (網状のしわ) | 修復は困難。種々の非線形平滑化処理等の適用。 |
| (1-8) Water damage (水による損傷) | 大面積ブロッチ。フレーム間差分にモフォロジ処理等を適用して検出。フレーム間補間。 |
| (1-9) Rust damage (錆の付着による損傷) | 錆によるしみをフレーム間差分にモフォロジ処理等を適用して検出。フレーム間補間。 |
| (1-10) Fingerprints (指紋の付着) | 小さなブロッチがバースト的に発生。フレーム間・フレーム内処理で検出し、時空間補間。 |
| (1-11) Oil stains (油の汚れ) | 雨のように見える。フレーム間・フレーム内処理で検出し、時空間補間にて修復。 |
| (1-12) Bilstering or peeling of the emulsion (感光乳剤の剥離) | 大きな白いブロッチ。フレーム・フレーム内処理で検出し、フレーム間補間にて修復。 |
| (1-13) Melting of the emulsion (感光乳剤の熔融) | 画像の一部が白い『液体』状に見える。大抵、修復は不可能。 |
| (1-14) Mold (黴による感光乳剤の侵食) | 様々な形と明るさを持ったパターンが時間的に変化。修復は困難。 |
| (1-15) Effects of improper chemical treatment of the film (不適な化学的処理) | 大きなしみ。数珠状のブロッチ。染み抜きフィルタ。フレーム間・フレーム内処理で検出。 |
| (1-16) Decomposition (フィルムの分離・分解) | 感光乳剤と合成樹脂膜とが分離・分解。大抵、修復は不可能。 |
| (2) Defects originated in duplication (複写時の損傷) | |
| (2-1) Unsteadiness (フレームの不規則な揺れ) | 大域的な動き解析を用いた揺れの検出と補正。カメラワークの分離が必要。 |
| (2-2) Flicker (フリッカ) | 基準参照フレームを用いたフリッカ補正処理。フレーム間の処理。 |

⁽⁹⁾⁽¹²⁾⁽¹⁷⁾
(3) スクラッチ

スクラッチ損傷は、フィルムとビデオとは現れ方が異なる。フィルムスクラッチはフィルム走行時にフィルム表面に付いた引掻き傷であり、周囲よりも暗い、または明るい垂直に近い線分として見え、数フレーム期間にわたってほぼ同じ位置に見える。

⁽⁹⁾⁽¹⁷⁾
(4) フレームの不規則な揺れ

撮影時やフィルム転写時におけるフィルム送り機

構の動作の不安定性によって生じるものである。

⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹³⁾
(5) フォーカス微動

フィルム転写時や、場合によっては、撮影時にフォーカスがフレームごとに微変動し、画像が時々ぼけたり、鮮明になったりするように見える。

筆者らは、先に、画質劣化の要因の一つであるブロッチノイズの検出と修復を行う方式を提案した。⁽⁸⁾ 筆者らの先の提案方式では、損傷のある画像に対し

| Defects Types (損傷のタイプ) | 損傷の見え方とその修復 |
|---|---|
| (2-3) Breathing (フォーカスの微動) | フォーカスの外れたフレームを検出し、鮮鋭度を上げる。フレーム内フィルタ。 |
| (2-4) Multiple frame line (多重フレームのライン) | 周囲と不連続なラインを検出し、隣接領域からラインを生成し、置換。 |
| (2-5) Cropped image (画像の過度のトリミング) | 無声映画に有音映画のマスクを当ててトリミング。修復は不可能。 |
| (2-6) Copied dust or hairs (塵や髪の毛の複写) | ブロッチや曲線状の損傷。フレーム間・フレーム内処理で検出し、修復。 |
| (2-7) Newton's rings (ニュートン環) | モフォロジ処理などのフレーム内画像処理による検出と修復。 |
| (2-8) Halation (ハレーション) | 明るい被写体の周囲の暈(ハロー)を検出し、除去。 |
| (2-9) Uneaven exposure (不均一な露光) | 明るさの空間的变化からトレンドを推定して補正。 |
| (2-10) Over-exposure (露光過度) | 各種のコントラスト補正法の適用。 |
| (2-11) Under-exposure (露光不足) | 各種のコントラスト補正法の適用。 |
| (2-12) Late lights (露光タイミングのずれ) | 正常に露光された周囲のフレームに明るさを合わせる。輝度値の非線形変換。 |
| (2-13) Flare (光斑) | 暗い領域中で一様に明るく輝いている部分を検出し、周囲から補間。 |
| (2-14) Fogging (曇り、かぶり) | 画像部分領域で突発的に発生する明るさの不規則時間変動。フリッカ補正の適用。 |
| (2-15) Fringing (カラーの縞) | 色の縞。色成分の位置ずれの検出と補正。 |
| (3) Defects due to multiple copying (転写の繰り返しによる損傷) | 鮮鋭度、コントラストの低下。粒状性の増大。鮮鋭化と雑音除去との両立処理。 |
| (4) Defects relating to early colored films (初期のカラーフィルムの損傷) | |
| (4-1) Dye fading (褪色) | 大抵の場合、元の色を復元することは困難。人手による着色処理。 |
| (4-2) Fading of the silver salts (銀塩の消失) | フレーム間・フレーム内処理による色褪領域の検出と修復。カラーフリッカ補正処理。 |
| (5) Defects relating to early natural color system (初期カラーシステムの損傷) | マゼンダ成分の部分的消失。赤いブロッチの検出・補正。 |
| (6) Defects relating to modern color system (最近のカラーシステムの損傷) | |
| (6-1) Fading (褪色) | 何層かの感光層が消失。カラーグレーディング補正。カラーズレート参照した補正。 |

でも適用可能な動き解析法を用いるとともに、着目画像と動き補償画像の二つの画像間の最小差分法に基づく検出と修復を行うことにより、ロバスト性の高い高精度なノイズ抑制を達成している。しかしながら、膨大な処理時間を必要とするため、実用化のためには、デジタル損傷修復コストを大幅に下げするための研究開発が必要不可欠であった。そこで、その後、筆者らの研究グループは、先の提案処理の

高速化と改良について検討し、ほぼ同画質のノイズ除去性能を維持しつつ、20倍以上の大幅な高速化を実現することができた⁽¹⁶⁾。以下では、主としてこの成果について述べる。

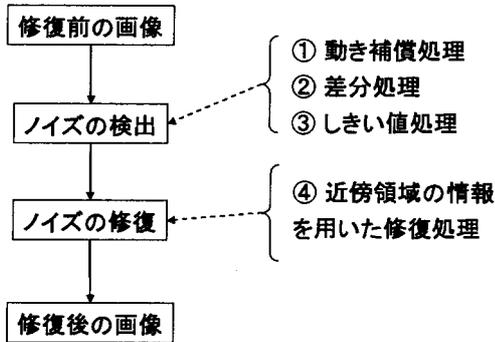


図1 デジタル修復処理の基本的な構成

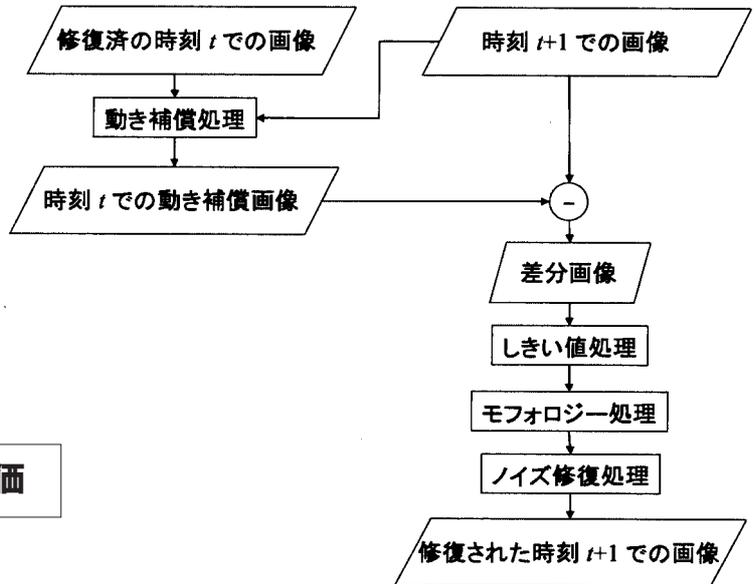


図2 高速ブロッच修復法の処理の基本的な流れ

Ⅲ 高速ブロッच修復法とその評価

(1) 手法

ブロッचのデジタル修復処理は、大きく分けて2段階に分類される。ブロッचの検出とブロッचの修復であり、図1にその処理の基本的な構成を示した。

ノイズの検出は、最初に、修復したい画像とその1フレーム前の画像間で動いている人や物に対して動き補償処理を行う（図1の①）。すなわち、後のフレーム間差分処理において、ノイズによるフレーム間差分値と動きによって生じるフレーム間差分値とが混在しないように、あらかじめ動きによって生じるフレーム間差分を補正するために実施する。次に、動き補償処理をした画像と修復したい画像との間でフレーム間差分処理を行う（図1の②）。このフレーム間差分処理によってノイズ検出のための前処理ができたことになる。さらに、差分画像にしきい値処理を適用することで、修復画像からノイズが検出される（図1の③）。

次に行うのがノイズの修復である。検出されたノイズに対して近隣領域の画像情報を用いて穴埋め処理を行うことでノイズを除去する（図1の④）。

以上がデジタル修復処理の大まかな流れである。さらに、本手法では、動き補償処理とフレーム間差分処理によるブロッचノイズの検出と修復処理を再帰的に繰り返すアルゴリズムを採用している。図2に本手法の処理の基本的な流れを示した。また、以下の各節において、本手法の各処理の詳細について述べる。

①高速化の工夫

基本的には筆者らの従来手法⁽⁸⁾も本手法も、図1に示したように、“ブロッचの検出”と“ブロッचの修復”の二つの処理で構成されている。従来手法では、5フレームを用いて動きの連続的方向検出と非線形関数による非汚染度を推定することによってブロッचを検出しているが、本手法では2フレーム間の動き補償処理をベースに、フレーム間差分処理とモフォロジー処理を組み合わせた処理を採用することで、使用するフレーム数の減少と、簡易処理への置き換えによる高速化を実現している。また、従来手法では、時空間補間法により修復を行っているが、本手法では、フレーム間補間法によって高速化を実現している。さらに、画素間引き処理、誤差計算法の簡素化、ソフトウェア的改善を行い、高速化を実現した。これらはいずれも修復不足等の画質面での影響と照らし合わせながら、損傷修復結果に視覚的に有意な差異を生じない範囲内で行った。

②動き補償処理

時刻 t での画像の N 画素 \times N 画素サイズの着目領域 (ROI) に対し、時刻 $t+1$ での画像の同一位置を中心とした $(2N+1)$ 画素 \times $(2N+1)$ 画素サイズの探索着目領域 (ROI) の中で、絶対値差分最小値検索を階層的精粗サーチ法により行う。階層的精粗サーチ法とは、低解像度の画像で誤差最小の位置を

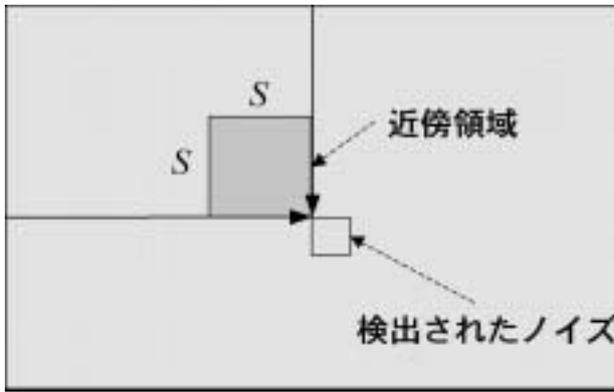


図3 修復処理における近傍領域の定義

決め、それを中心として探索着目領域 (ROI) を $1/4$ ずつ小さくし、その分だけ解像度を上げて探索する方法である。

③フレーム間差分処理

動き補償された時刻 t での画像 (時刻 t からの時間経過による動き変化成分を補正し、時刻 $t+1$ での画像を予測した画像) と、時刻 $t+1$ での実際の画像とのフレーム間差分画像を作成する。また、フレーム間差分画像に対して、フレーム間差分値 (フレーム間差分画像の画素値) の絶対値が所定のしきい値よりも大きい画素は、ブロッचとして検出するとともに、その周辺画素 (周囲8方向の8画素) もブロッचとして検出するものとした (モフォロジー処理の Dilation [膨張] 処理に相当)。すなわち、単純なしきい値処理よりも一回り領域拡張されたことになり、これによってブロッचの中心領域だけでなく、ブロッच全体を覆うようにブロッच領域を検出できるようになる。

④修復処理

フレーム間差分値の絶対値が所定のしきい値より小さいものは修復せず、ブロッच検出領域内でそのフレーム間差分値が正の画素は近傍領域中の最大平均値に、そのフレーム間差分値が負の画素は近傍領域中の最小平均値に、時刻 $t+1$ での画像の画素を置き換える。

図3に修復処理で参照する近傍領域の定義を示した。画像をラスタースキャンしながら、検出されたノイズを見つけたら、図3のように走査済み (修復

表2 演算時間の比較

| 演算時間 | 筆者らの従来手法 | 提案手法 |
|------------|----------|------|
| 1画像当たり | 180秒 | 7~9秒 |
| フィルム2時間当たり | 約1年 | 約16日 |

済み) の S 画素 \times S 画素のサイズの近傍領域を定義し、この近傍領域中の画素値の上位の30%の平均値を最大平均値、画素値の下位の30%の平均値を最小平均値と定義し、ノイズの正負に応じて上記のように画素値を置き換えていく。このように、ノイズ修復済みの近傍領域中の画素の値のみを用いて、順次画素値を置き換えていく。

⑤再帰的繰り返し処理

上記処理により時刻 $t+1$ での画像が修復される。次の時刻 $t+2$ での画像の処理を行うときは、修復された時刻 $t+1$ での画像を用いることで、再帰的繰り返し演算を行う。

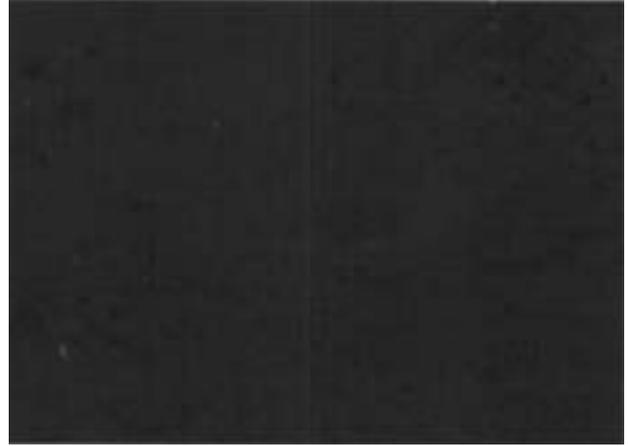
(2) 修復性能の評価

修復実験に使用した“デジタルスキャンされたシネマ画像”の1シーンの原画像を、図4に示した。表2には、図4の画像を本手法で処理した際の演算処理時間を、筆者らの従来手法⁽⁸⁾で処理した際の演算処理時間と比較して示した。また、表2では、1画像当たりの演算時間の実測値から24 (フレーム/秒) としたときの2時間映像当たりの処理時間の見積値も合わせて示した。なお、演算時間は、Pentium D2、80GHz (1.0 GB RAM) のコンピュータで処理した際の演算処理時間である。

図5には、原画像と、1フレーム前の修復済み画像を用いて動き補償を行って得られた画像との間のフレーム間差分画像を示した。また、参考のため、図6には、動き補償処理を行わなかった場合のフレーム間差分画像も示した。図7にはフレーム間差分画像を単純にしきい値処理した結果を、図8にはフレーム間差分画像をモフォロジー処理で領域拡張した結果を示した。さらに、図9にはノイズ修復処理を行い、本手法によって最終的に得られた修復画像を示した。また、比較のため、図10には筆者らの従来手法⁽⁸⁾による修復画像を示した。



図4 使用したシネマ画像の1シーンの画像



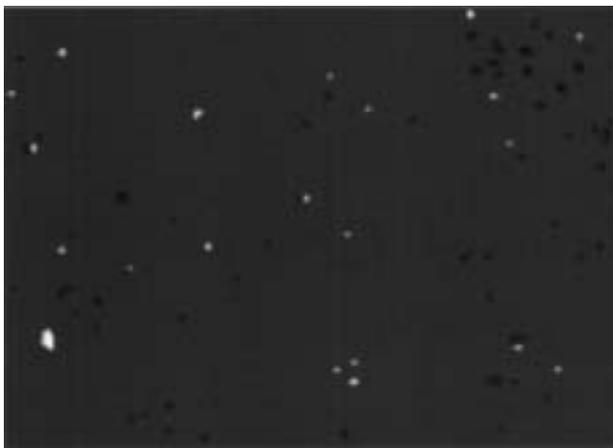
(灰色=0、黒=負値、白=正值)
図5 フレーム間差分画像 (動き補償あり)



(灰色=0、黒=負値、白=正值)
図6 フレーム間差分画像 (動き補償なし)



(灰色=0、黒=負値、白=正值)
図7 しきい値処理結果 (モフォロジー処理なし)



(灰色=0、黒=負値、白=正值)
図8 しきい値処理結果 (モフォロジー処理あり)



図9 提案手法による修復画像

①動き補償処理の効果

図5と図6の比較からわかるように、図6のように動き補償処理を行わないと、自動車や線路のような非ノイズ成分までもフレーム間差分値として抽出されてしまい、ブロッチノイズと区別できなくなってしまう。すなわち、フレーム間差分成分にノイズ成

分と動き成分の両方が同時に重畳されてしまう。一方、図5のように動き補償処理を適用した場合は、フレーム間差分にはシーンの絵柄がほとんど見えず、フレーム間差分はほぼノイズ成分のみで構成されていることがわかる。以上から、動き補償処理は有効であり、必須な処理であるといえる。



図10 筆者らの従来手法⁽⁸⁾による修復画像

②モフォロジー処理の効果

図7と図8の比較からわかるように、図8のようにモフォロジー処理を適用することによって、ある程度大きいブロッチノイズにおいても形状全体が抽出されているが、図7のようにモフォロジー処理を適用しない場合には、ブロッチノイズの中心部分のみしか抽出されておらず、正確なブロッチ形状が検出できていない。このことから、モフォロジー処理は、効果的な処理であるといえる。

③修復結果の比較

ノイズ抑制の効果は他のシーンでも同様に確認された。とくに、本手法は再帰的繰り返し処理を行っており、ノイズの軽減された修復済みの画像を前フレームの参照画像として用いているところに特徴がある。そのため、シーンが変わることによって、ノイズ軽減効果が薄れることが懸念されたが、本手法ではノイズ抑制の応答が早いため、その影響は小さく、動画像として観察した場合にはほとんど気にならない。

本手法は比較的簡易な処理であるため、演算時間だけでなく、ハードウェア化による実現も比較的容易であるというメリットもある。

④筆者らの従来処理⁽⁸⁾との比較

図9と図10の比較から、本手法による修復画像と、筆者らの先的手法⁽⁸⁾による修復画像は、視覚的にはほぼ同程度であることがわかる。他のフレームの画像においても同様な傾向が見られた。

一方、本手法の演算時間は、表2のように、筆者らの先的手法⁽⁸⁾と比較して大幅な高速化を実現している。しかしながら、本手法でも、2時間の映像フィルムをすべて処理するには、1台の標準的なパーソナルコンピュータで約16日、10台のパーソナルコンピュータで並列処理しても約2日かかる。よって、高速化はまだ十分とはいえない。本手法の演算時間の90%以上は、動き補償処理に費やされている。よって、今後のさらなる高速化のためには、動き補償処理の高速化について、さらに検討する必要がある。

⑤高速化の要因

本手法で達成した高速化の要因は、下記の通りである。すなわち、

- (1) 階層的精粗サーチ法による高速化
 - (2) サーチ演算手法の工夫（誤差を最大絶対値で近似、誤差計算の打ち切り等）による高速化
 - (3) 動き補償処理の画素間引きによる高速化
 - (4) 検出処理で使用するフレーム数の減少化と簡易処理への置き換えによる高速化
 - (5) 修復処理を時空間補間法からフレーム内補間法に変更したことによる高速化
 - (6) ソフトウェア的な改善による高速化
- 以上の6点である。

さらに、作成したシミュレーションソフトウェアをプロファイル解析した結果、上記要因のそれぞれ単独の高速化効果は、筆者らの従来手法⁽⁸⁾に対して、(1) 約2倍、(2) 約1.2倍、(3) 約1.5倍、(4) 約3倍、(5) 約2倍、(6) 約1.5倍であった。それぞれが高速化に寄与し、全体として表1のように約20倍の高速化を達成した。

IV その他のフィルム損傷の修復

筆者らの研究グループは、上記Ⅲで述べたブロッチノイズ修復法をさらに改善するとともに、実用化を視野に入れ、その他の各種のノイズ抑制についても検討を加え、4種の経年劣化ノイズの軽減手法を開発した^{(9)(12)(14)~(17)}。下記にそれらの手法の処理概要を示した。



(a) 入力損傷画像



(b) 処理結果画像

図11 フリッカとスクラッチの抑制結果



図12 フレームの揺れ抑制過程

(1) 各種の損傷修復手法

①フリッカ抑制手法⁽⁹⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾

ヒストグラム解析により画像のダイナミックレンジ (DL) および平均輝度 (M) を計測し、基準信号との差から次式に基づき階調変換する手法である。

$$z(p) = \gamma \cdot x(p) + \delta \quad (1)$$

ただし、上式において、 δ は平均輝度 M と基準値との差、 γ はダイナミックレンジ DL と基準値との比、 $x(p)$ は原画像、 $z(p)$ は修復画像を表している。

②フレームの揺れ抑制手法⁽⁹⁾⁽¹⁷⁾

複数の着目領域 ROI 内で推定された複数の動きベクトルから、あらかじめ定めた取捨選択基準によって選ばれた動きベクトルのみを用いて、フレームのグローバルなワーピングモデルを推定し、このワーピングモデルに基づきフレームの揺れを抑制する手法である。なお、時刻 t での画像のフレームを修正し、この修正画像を次のフレームの修正に再帰的に用いている。

③スクラッチノイズ抑制手法⁽⁹⁾⁽¹²⁾⁽¹⁷⁾

下記の3通りの手法について検討した。

1. 手法A

“垂直線成分に反応する選択的な構造要素”を用いたモルフォロジー演算によるオープニング処理 (黒のスクラッチが抽出対象) と、クロージング処理 (白のスクラッチが抽出対象) を用いた抑制手法である。

2. 手法B

微分オペレーターによる線強調と Hough 変換による線検出、および補間処理によるスクラッチ抑制手法である。

3. 手法Aと手法Bを組み合わせた処理である。⁽¹⁷⁾

④ブロッチのノイズ抑制手法

Ⅲで述べたブロッチノイズ抑制手法⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾を改良し、ラベリングによるノイズ除去、および前後複数フレーム画像を用いた画素移植による修復処理の追加を行った。⁽¹⁷⁾

(2) 修復性能の評価

図11、図12、図13に処理結果を示した。これらの処理結果に示したように、除去対象としているノイズを軽減することができた。一方、画像一枚当たりの演算時間は、フリッカ、フレームの揺れ、スクラッチノイズの抑制処理に関しては0.1秒未満、ブロッチノイズの抑制処理に関しては7~9秒程度 (おもに動き補償の処理に演算時間を要している) であり、ブロッチノイズの抑制処理に関しては、さらなる高速化の検討が必要である。



(a) 入力損傷画像



(b) 処理結果画像

図13 ブロッチノイズの抑制結果

大きい円の中の小さいブロッチは完全に消えているが、小さい円の中の大きいブロッチはまだ不完全である。

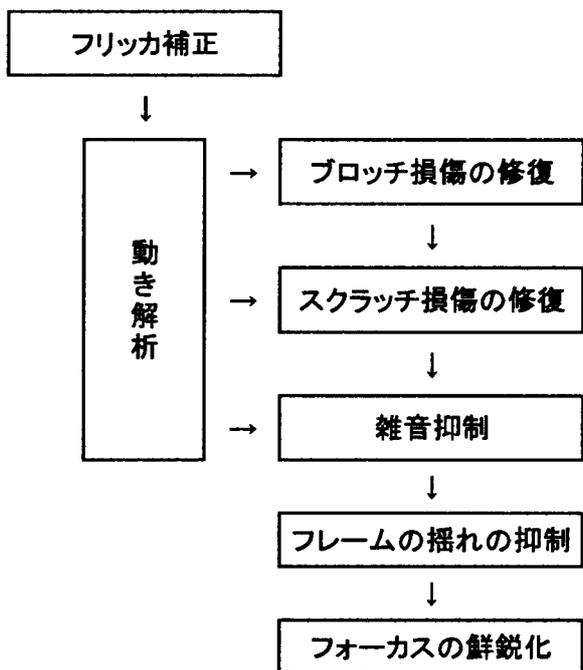


図14 各種のノイズ抑制処理の統合

V むすび

本研究では、古い映像資料のデジタルアーカイブへの適用をその目標とし、経年劣化映像のデジタル損傷修復のコストを大幅に低減するためのブロッチノイズの新たな軽減手法を考案し、筆者らが先に提案した手法⁽⁸⁾と比較して、優れたノイズ軽減効果を維持しつつ、演算時間を大幅に短縮した。また、

他の経年劣化要因であるスクラッチノイズ、フリッカ、フレームの揺れについても実用的な処理を考案した。今後、これら主要なノイズや変動を抑制するデジタル画像処理^{(9)~(17)}を、図14に示したように統合し、総合的なデジタル映像修復システムを開発することを計画している。その中で、とくに人の視覚を考慮したノイズ抑制方式について研究する予定である。さらに、多種多様なデジタル映像修復処理を比較する際に、各種の経年劣化ノイズを数学的にモデル化し、ノイズのない画像にこの数学モデルに従って人工的に発生した経年劣化ノイズを付加した動画像をテスト動画像として用いて修復処理を行い、修復性能を定量評価する予定である。

これらの技術開発が、今後の映像資料のデジタルアーカイブの進展や普及に貢献することを、切に望む。

謝辞

本研究は、神奈川工科大学・武尾英哉研究室との共同研究として行われたものである。ここに、武尾英哉准教授をはじめとする武尾英哉研究室のメンバー各位に感謝の意を表する。

(さいとう・たかひろ)

【参考文献】

- (1) 笠羽晴夫
2007 「デジタルアーカイブの歴史的考察」『映像情報メディア学会誌』61 (11) : 1545-1548
- (2) 高見沢明雄
1997 「東京国立博物館の文化財情報システム」『文化庁月報』347 : 6-7

- (3) 坂村健
1997 「デジタルミュージアム—博物館の未来を目指して—」『文化庁月報』347：4-5
- (4) 江原学
2007 「放送映像アーカイビング」『映像情報メディア学会誌』61（11）：1567-1572
- (5) 室屋泰三
2007 「美術館におけるデジタルアーカイブの現状と課題～独立行政法人国立美術館の事例～」『映像情報メディア学会誌』61（11）：1589-1592
- (6) 齊藤隆弘
2001 「デジタル画像処理によるフィルム映像の復元（1）」『映像情報メディア学会誌』55（12）：1599-1604
- (7) 齊藤隆弘
2002 「デジタル画像処理によるフィルム映像の復元（2）」『映像情報メディア学会誌』56（1）：85-92
- (8) 小松隆、岩間徹、齊藤隆弘
1998 「古い映像フィルムの損傷の検出と修復」『電子情報通信学会論文誌』J81-D-II（8）：1912-1919
- (9) T. Saito, T. Komatsu, T. Ohuchi, T. Seto.
2000 Image processing for restoration of heavily-corrupted old film sequences. Proc. 15th IAPR Int. Conf. Pattern Recognition 2：17-20
- (10) T. Ohuchi, T. Seto, T. Komatsu, T. Saito.
2000 Selective sharpness enhancement of heavily-corrupted old film sequences. Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Image Processing II：676-679
- (11) 齊藤隆弘、薩摩林純、小松隆
2002 「連立非線形拡散・反作用型時間発展方程式に基づく画像の選択的鮮鋭度改善とその動画像ブリーディング歪の抑制への応用」『電子情報通信学会論文誌』J85-A（10）：1100-1114
- (12) 飯高一郎、小松隆、齊藤隆弘
2003 「経年劣化映像の損傷検出・修復の定量的評価」映像メディア処理シンポジウム（IMPS2003）I-4：15
- (13) 齊藤隆弘、原田寛之、薩摩林純、小松隆
2004 「連立非線形拡散法によるカラー画像の選択的鮮鋭化」『映像情報メディア学会誌』58（11）：1673-1679
- (14) 大貫崇英、小松隆、齊藤隆弘
2005 「対数輝度補正アルゴリズムによる画像フリッカ補正」映像情報メディア学会年次大会、24-1
- (15) 大貫崇英、小松隆、齊藤隆弘
2006 「経年劣化損傷にロバストな高速フリッカ補正法」映像メディア処理シンポジウム（IMPS2006）、I-4：10
- (16) 武尾英哉、小松隆、齊藤隆弘
2007 「実用化に向けた経年劣化シネマ映像のデジタル修復に関する検討」『画像電子学会誌』36（4）465-470
- (17) 武尾英哉、小松隆、齊藤隆弘
2008 「デジタル映像アーカイブのための経年劣化シネマ映像の修復の検討」電子情報通信学会2008年総合大会、D-11-72
- (18) L. Rohrbough.
1993 Massive effort restored snow white to theater quality, *Newsbyte*, July 9
- (19) <http://diamant.joanneum.ac.at>