

デジタル画像処理による古い映像フィルムの修復と デジタルフィルムアーカイブの構築

齊藤 隆弘
SAITO Takahiro

あらまし

経年劣化により傷んだ古い映像フィルムをデジタル画像処理により修復し、元の画像品質を復元する技術の研究開発の現況について述べる。まず、映像フィルムの修復とデジタルフィルムアーカイブの構築についての EC 研究開発プロジェクトや、その文化的意義について述べる。合わせて、デジタル修復の対象となる損傷にはどのような損傷があるのか、そしてそれらの画像損傷は一体どのような手法で修復することができるのかについて、筆者らの研究グループの研究成果に触れながら、現在の技術水準と今後の課題について論じる。

1 はじめに

映像フィルムはその誕生からすでに 100 年が経過している。映像フィルムは、長期間保存するのに適した媒体であるものの、その化学的不安定性のため経年劣化を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。1950 年以降は、トリアセートフィルムが採用されたので、経年劣化に関しては比較的安全であり、損傷の程度も軽微であると言われている。一方、1950 年以前は、長い間、硝酸エステルフィルムが使用されていたので、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。黴や湿気によってフィルムが傷んでいたり、褪色していたり、映写やフィルム転写の際にフィルム面に傷がつけられたりしている。

UNESCO の推定によると、1950 年以前に制作されたおおよそ 22 億枚の硝酸エステルベースのフィルムがフィルムアーカイブに保管されているが、すでにその多くがフィルムとしてそのままでは使用不可能な状態にあり、全面的修復が早急に必要であるという。1930 年以前に撮影された映像フィルムの約 90% が既に失われ、また 1950 年以前に撮影された映像フィルムの約半数が既に失われたとの報告もある。⁽¹⁾ 現在残っている映像フィルムでも大きな損傷を受けており、視聴に耐えうる画像品質レベルにはほど遠いものが多い。また、過去 50 年間にわたって、フィルムは光化学的複製法によって修復されてきたが、この光化学的複製法では、フィルム感光面と反対側のベース面についた傷は修復可能だが、感光面についた損傷などのその他の多くの損傷はそのまま複製されてしまう。そこで、このような損傷をデジタル画像処理技術によって修復し、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。

古い映像フィルムを文化財として次世代に保存・継承するには、映像フィルムに刻みこまれている現時点での像をデジタルアーカイブ化するだけで十分であるようにも思えるが、一方その再利用を促進するには、損傷を修復し、視聴に耐えうるレベルまで画像品質を回復することが重要である。また、デジタル損傷修復の普及によって再利用が促進されれば、デジタルアーカイブ化にさらなる拍車がかかり、結果として文化財の保存と継承が軌道に乗るであろう。しかし、デジタル損傷修復には、捏造という暗い影が絶えずつきまとっていることを忘れてはいけない。オリジナルな映像フィルムがアナログ形式とデジタル形式の両方の形式で保存されていることが大前提となる。

上記の映像フィルムの場合以外にも、デジタル損傷修復が必要とされる場合がある。たとえば、オリジナルをテレビ映像として撮像し、これをフィルムに記録・保存した場合。あるいは、映像フィルムに撮影・記録されたが、オリジナルフィルムがすでに失われ、テレシネ変換されたビデオ映像のみが残っている場合などである。このような場合にもデジタル画像処理による損傷修復が必要とされている。このように、デジタル損傷修復は映像フィルムのみならず、劣化を含んだビデオ映像でも必須のものである。

実際の損傷修復作業は、最高 3000 画素×4000 画素程度の非常に高い空間解像度でデジタルスキャンされたフィルム映像や、ビデオ映像をデジタル画像処理システムに取り込み、オペレータが処理結果を画面上で目視確認しながら対話的に進められる。現時点のデジタル画像処理の技術水準では、処理過程を全自動化した場合、満足な修復結果を得ることができない。そこで、人間の優れた認識能力や評価能力に大幅に頼らざるを得ない。結局、オペレータが修復処理の過程に頻繁に介入することとなり、処理時間や労賃が膨れ上がる。デジタル画像処理による損傷修復の普及をはかるには、損傷修復の処理過程をできるかぎり自動化、高速化することで、デジタル損傷修復に要するコストを削減する必要がある。現在開発されているデジタル画像処理システムを用いた場合、そのコストはフィルムの損傷の程度によっても異なるが、一分間のシーケンスを修復するのに 5 万円から 50 万円の⁽¹⁾コストがかかると言われている。このように、現時点での損傷修復のコストは決して安いとは言えない。現状では、映画『Star Wars』のように商業的に大成功した映画のみがデジタル損傷修復の恩恵を受け、一方で芸術的な価値や学術的な価値は高いが、商業的には無価値であると評価された映画や、そもそも商業的価値とは無縁なドキュメンタリー映像や資料映像は、このまま高コスト状況が続けば、その映像損傷は修復されることなく、放置され、やがては消え去る運命にある。現在の大衆の嗜好に適合せず、現時点では商業的利用価値が見込めないと考えられている映像や、商業的な価値とは無縁な映像が、デジタル損傷修復の恩恵が受けられるのを常態とするには、映像損傷の修復コストを下げるための技術の開発が不可欠である。

この観点から、EC では、経年劣化映像フィルムのデジタル損傷修復技術の研究開発に関する国家間規模プロジェクトが複数同時進行してきた。^{(1)~(7)}ヨーロッパでは、映画は単なる娯楽ではなく、映像芸術や文化の一形式と位置づけられており、過去の芸術遺産や学術資料映像を保存し、後代へと継承して行くという観点から、デジタル損傷修復技術の研究開発に多くの人的資源と資金とが投入されている。

以下では、まず、デジタル損傷修復され、公開された映画の事例を紹介する。次に、EC においてこれまで推進されてきた研究開発プロジェクトについて紹介する。経年劣化映像のデジタル損傷

修復技術の研究開発のみならず、フィルム映像やビデオ映像のデジタルアーカイブ化に関する関連プロジェクトについても紹介する。最後に、デジタル修復の対象となる損傷にはどのような損傷があるのか、そしてそれらの画像損傷は一体どのような手法で修復することができるのかについて、筆者らの研究グループの研究成果に触れながら、現在の技術水準と今後の課題について論じる。

2 デジタル損傷修復された映画の事例

世界で始めてデジタル損傷修復され、公開された映画は、ディズニー映画『白雪姫（1937年作品）』である。このデジタル損傷修復は、1993年に、コダック（Kodak）社のデジタル映像センター（シネサイト）によって行われた。同社のCineon Digital Film Systemを用い、18週にわたって40台のWSをフル稼働し、総計15 Tera Byteのデータを処理し、コストは総計700万US\$であった⁽⁸⁾。

このデジタル損傷修復が契機となり、その後、デジタル損傷修復技術の研究開発が活発化し、現在に至っている。1990年代半ば以降、ヨーロッパにおいて、デジタル損傷修復に関するECレベルの研究開発プロジェクトが進展し、その成果として実用的な損傷修復専用のデジタル画像処理システムが開発されてきた。さらに、この専用システムが1998年頃から、実際の映画の修復に適用されており、2000年までに数本の映画が損傷修復され、劇場公開された。現時点での損傷修復コストは、損傷の程度にもよるが、おおよそ5万円から50万円であるとされている。2000年以前は、試験的に損傷修復がなされた場合が多かったが、それ以降、修復コストに見合う高収益が見込める商業的価値の高い映画に関しては、損傷修復が積極的に導入されてきた。現在では、名作映画については、オリジナル映像フィルムを損傷修復した映像フィルムをデジタルリマスター版としてリバイバル上映することがブームとなりつつある。

表1に、1998年以降の2000年頃までの初期の段階で、試験的にデジタル損傷修復された映像の事例を示した。なお、表1には、一部のシーケンスのみの損傷修復事例は記載していない。全てのシーケンスが損傷修復された事例のみを記載した。例えば、我が国においても、1998年に東京大学総合研究博物館によって、小津監督の映画『東京物語』の一部のカットがデジタル損傷修復され、公開された⁽⁹⁾が、これは5分間分の映像のみを損傷修復したものであり、表1では割愛している。

表1の事例の内、映画『Un spécialiste』以外は全て、原版が35mmフィルムであり、その損傷をデジタル修復した映画の事例である⁽¹⁾。表1の映画『Un spécialiste』の事例は、他とは異なり、その原版の映像素材はNTSC 2inchビデオテープに記録された350時間分のビデオ映像（1961年にイスラエルで行われた元ナチス親衛隊中佐アドルフ・アイヒマンの裁判を撮影した約350時間の記録映像）であり、『国境なき医師団』の元総裁のロニー・ブローマン（Rony Brauman）とフランスのドキュメンタリー映画作家エイアル・シヴァン（Eyal Sivan）とが共同でこれにデジタル編集とデジタル損傷修復を適用し、特殊効果を加え、空間解像度をアップさせ、最終的に約2時間の35mmドキュメンタリー映画に編集し、劇場公開したものである⁽¹⁰⁾。

映画『Un spécialiste』の事例は、デジタルアーカイブの重要性や、今後の高度利用という観点から注目される。ブローマンとシヴァンは、この映画制作の経験という視点から、映像資料を利用可

表1 1998年以降2000年までの初期の段階で試験的にデジタル損傷修復され一般公開された映画の事例（#）

作品名	原版の制作年	原版素材	内容	損傷と修復	修復年	その他
Voyage to the moon	1908	35mm	最初期のSF映画	それほどひどい損傷ではない。フリッカやフィルムゆれのゆれが目立つ。これらを軽減すると共に、プロットの除去。	1998	アムステルダムDutch Filmmuseum所蔵のフィルムの修復。
Panorama von Graz, ca., Holzflösser auf der Mu	1915 1938	35mm	昔の生活を記録したドキュメンタリーフィルム	LIMELIGHTデジタル修復システムで修復。	1998	修復映像はデジタルビデオに記録。1998年春にパリで開かれた博覧会で公開。
Un spécialiste	1961	NTSC 2inchビデオテープ	350時間のアイヒマン裁判の記録映像	ボケた輪郭、ビデオスクラッチ、蟻走感、弱いコントラスト等の損傷の修復。仮想的なカメラワークなどの特殊効果。空間解像度の向上。	1998	35mmフィルムにコピーし、2時間の新作映画として1999年3月にフランスで封切。日本公開は、2000年2月。
Hans Hass · Der Mann, der das Meer Entdeckte	1934～ 1954	35mm	Hans Hassが制作した歴史的なダイビングフィルム	非常に悪い条件。初期のフィルムのおおよそ30分のシーケンスの、フリッカの軽減し、プロットの除去、ノイズの低減。	1998～ 1999	1999年にTV番組として放送。
Stadt ohne Juden	1925	35mm	オーストリアの映画史上の重要な作品	かなりひどい損傷。スクラッチやプロットの除去。部分的に破壊されたフレームの再構成。	2000	2000年11月8日にウィーンで劇場公開。

(#) 一部のシーケンスのみの修復事例、あるいは一般には未公開の修復事例は記載していない。全てのシーケンスが修復され、一般公開された事例のみを記載している。

能な状態に保存することの重要性について、以下のような示唆に富む発言を行っている。⁽¹¹⁾

「努力のすべては、膨大な量の映像から、行政的犯罪というナチスの破壊の企てについて、根本的かつ一般化できる側面を暴き出す映像を、まとまったものとして刻み出すことにあった。長期間にわたった切り分けと縫合の相次ぐ一連の段階は、最終的にモンタージュされた映像の形式の下に保管されている。それらの各段階は、その実現を可能とした詳細なカタログのおかげで、再構成することができる。こうして、逆説的にも、このドキュメンタリー映画が、その源泉である下地のアーカイブには存在しないショットを含んでいるとしても、映画のあらゆる場面をその源泉から現存の映画の場面に至るまでの発展の過程に結びつけることができる。捏造という選択をしたことの釈明よりも、こうした透明性こそが、映画制作の出発点において自覚した倫理的命法であった。この映画の個別的な事例を越え、再びここに現れてくる問題は、資料を利用可能な状態で、さらには出典とその再利用との間の自在な往復運動を可能にするような完全な状態で、出典それ自体を保存しておくことにより一般的な必要性である。」

このように損傷修復は捏造という問題を抱えている。我が国の映画制作者や映画マニアはこの捏造の問題を過大視する傾向があり、このことが我が国において映像修復が普及するのを妨げている。現存のオリジナルフィルムを過度に神聖視することは間違いである。ブローマンとシヴァンが述べているように、現存のフィルムの姿から修復された姿までの全過程が再現できるように、デジタルアーカイブ化すれば何の問題もない。

3 大規模研究開発プロジェクトの進展——ヨーロッパの多国間プロジェクト——

ヨーロッパでは、過去の芸術遺産や学術資料を保存し、後代へと継承して行くという観点から、デジタル損傷修復技術の研究開発に多くの人的資源と資金とが投入されている。経年劣化映像のデジタル損傷修復技術の研究開発に関する EC 水準の二系統のプロジェクトが並列に進行し^{(1)～(5)}てきた。以下では、これらの研究開発プロジェクトについて紹介するとともに、フィルム映像やビデオ

オ映像のデジタルアーカイブ化に関する関連プロジェクト⁽⁶⁾⁽⁷⁾についても紹介する。

3.1 DIAMANT/LIMELIGHT/FRAME プロジェクト^{(1)~(3)}

これらのプロジェクトは、全て、オーストリアの Joanneum Research が統括責任機関（コーディネータ）となっており、これにフィルムアーカイブ管理団体や、民間企業が加わっている。このプロジェクトは、映像フィルムの損傷修復のみを対象とし、ビデオアーカイブの損傷修復は対象とはしていない。

Joanneum Research では、1993 年から映像フィルムのデジタル損傷修復の研究開発に着手しており、DIAMANT プロジェクトでは、フィルムのデジタルスキャン、処理、ポストプロダクション、フォーマット変換、記録までの全てのプロセスを統合的にサポートするプラットフォームの研究開発が行われた。LIMELIGHT/FRAME プロジェクトでは、デジタル損傷修復ソフトウェア⁽¹⁾ “LIMELIGHT/FRAME” が開発され、DIAMANT プロジェクトで開発されたプラットフォームに組み込まれた⁽²⁾⁽³⁾。

LIMELIGHT プロジェクトは EUREKA の先行プロジェクトであり、FRAME プロジェクトはその後継の ESPRIT プロジェクトである。LIMELIGHT プロジェクトでは、映画フィルムの損傷修復をターゲットとし、コストの観点から修復処理速度を 1 フレーム当り 10～20 秒程度に目標設定して、ソフトウェア開発のプロジェクトをスタートさせたと言う。LIMELIGHT プロジェクトでは、並列計算の導入を前提としていなかったため、この目標を達成できなかった。後継の FRAME プロジェクトでは、並列計算を導入することで、この処理速度の目標を達成し、LIMELIGHT プロジェクトで開発したソフトウェアの実際の産業利用を促進することが、その目標となっている。現在までに開発された “FRAME” 損傷修復技術によって、フレーム当り 10～70 秒程度の処理速度で映像フィルムの損傷を修復するシステムが 5000 万程度で構築可能であると言う。それ以前の “LIMELIGHT” システムに比較して、少なくとも 10 倍のスピードアップになっている。また、このシステムのランニングコストは、フィルムの損傷の程度によっても異なるが、一分間のシーケンスを修復するのに 5 万円から 50 万円のコストがかかると報告されている。

実際に、このプロジェクトで開発されたシステムが、映画の損傷修復に適用されている。先に、表 1 に示した損傷修復映画の事例の中で、35 mm フィルムの損傷修復は全てこのシステムで行われたものである。

3.2 AURORA/BRAVA プロジェクト⁽⁴⁾⁽⁵⁾

AURORA (AUtomed Restoration of ORiginal Film and Video Archives) プロジェクトは、EC の ACTS (Advanced Communications Technologies & Services) プログラムのテレコム分野の研究開発プロジェクトとして、1995 年 9 月から 1999 年初めまでの期間行われた⁽⁴⁾。ACTS の Web site (<http://www.infowin.org/>) から、成果報告書 (AC072-INA-RD-DS-P-D13-b)⁽¹⁾ を入手可能である。また、BRAVA (Broadcast Archives Restoration through Video Analysis) プロジェクトは、AURORA プロジェクトの後継プロジェクトであり、EC の IST (Information Society Technologies) プログラムのテレコム分野のプロジェクトとして、1999 年からスタートした⁽⁵⁾。両プ

プロジェクトとも、その統括責任機関（コーディネータ）は INA（Institut National de L'Audiovisuel, フランス）であり、これに BBC などの放送事業体、Delft University of Technology などの大学研究機関、民間企業が加わっている。

AURORA/BRAVA プロジェクトは、フィルムアーカイブやビデオアーカイブに保管されている映像資料を、低コストで、かつ高速に損傷修復するための手法を開発し、また統合的プロトタイプ専用デジタル画像処理システムを構築して、その有用性を実証することを目標としたものであり、特にビデオアーカイブの損傷修復に力点が置かれている点の特徴としている。

AURORA プロジェクトでは、画像損傷を高速に修復するためのアルゴリズムがハードウェアとして実装された。このハードウェアが、各種の制御ソフトと共に損傷修復用の専用デジタル画像処理システムとして統合化されている。また、この統合専用システムの実証試験が行われ、その結果、フレームの不規則な揺れやフリッカなどについては、従来の修復アルゴリズムよりもはるかに優れた修復能力を示したと、報告されている。

BRAVA プロジェクトは、AURORA プロジェクトの成果を継承し、さらに発展させ、アーカイブ管理者や放送プログラム制作者がこれまで利用不可能であった多量の映像資料を利用可能とするように、損傷修復に要するコストを削減する専用プロトタイプシステムを開発することを目標としている。これまで人手で行われてきたような多様な画像損傷の修復処理を、可能な限り自動化し、またリアルタイムに近い処理速度を達成することを目標としている。このための新しい損傷修復アルゴリズムの開発も行われた。開発された専用システムは、とくに放送事業者が TV アーカイブプログラムの損傷修復のために使用することを前提として、その仕様が決定されている。そこでは、プログラム制作、画像損傷修復、音損傷修復の三種類のタスクが、リニア且つリアルタイムで行えることや、コスト削減が厳しく要求されている。また、オペレータは目視にて処理結果を確認しながらパラメータ調整を短時間に行いつつ、いつでも処理をいったん停止し、それ以前の任意の処理過程へと戻って処理を再開可能することが可能となっている。

3.3 フィルム映像やビデオ映像のデジタルアーカイブ化に関する関連プロジェクト

[1] PRESTO プロジェクト⁽⁶⁾

PRESTO (Preservation Technology for Broadcast Archives) は、EC の IST (Information Society Technologies) プログラムの研究開発プロジェクトとして、2000 年 9 月から 18 ヶ月間のプロジェクトとしてスタートしたものである。統括責任機関（コーディネータ）は、INA (Institut National de L'Audiovisuel, フランス) であり、この他に BBC を始めとする EC 加盟国の放送事業体や放送映像アーカイブ管理団体、Joanneum Research、民間企業が加わっている。

このプロジェクトは、放送映像アーカイブに関する研究開発プロジェクトである。ヨーロッパでは、TV 放送の開始時から 1980 年頃までの間に制作された全ての放送映像資料が失われる危機に直面しており、ヨーロッパ全体で約 200 万時間の放送映像資料が消滅の危機に瀕していると言う。現在の技術では、デジタルアーカイブ化に要するコストは、オーディオやビデオテープでは 1 時間当たり 100 Euro、16 mm フィルムでは 1 時間当たり 1000 Euro であり、トータルでは、おおよそ 10 億 Euro

のコストがかかると見積もられている。そのためコストを削減することが急務であり、本プロジェクトではコストを大幅に低減する技術の開発が進められた。具体的には、低コストでの映像遺産のデジタル化のための技術的ツールとして、メディア選択、ハンドリング、変換、長期記録、分配、アクセス制御など多岐の分野にわたるツールが、3段階のフェーズで開発されている。また、それと共に、デジタルアーカイブ化による映像利用の新たな可能性を開拓し、新しい需要を喚起することも、その目標として掲げられている。

[2] COLLATE プロジェクト⁽⁷⁾

COLLATE (Collaboratory for Annotation, Indexing and Retrieval of Digitized Historical Archive Material) プロジェクトは、EC の IST (Information Society Technologies) プログラムの“Digital Preservation of Cultural Heritage”の一環の研究開発プロジェクトとして、2000年9月からスタートし、2003年8月まで行われた。統括責任機関(コーディネータ)は、ドイツのGMD-IPSIであり、この他、Deutsches Filminstitutなどのフィルムアーカイブ管理団体、民間企業が加わっている。このプロジェクトは、デジタル化された文化財のWebベースのマルチメディア・アーカイブを構築し、さらに研究者、エンドユーザのためのWebベースの分散型コラボレーション環境を提供することを目標としている。

図1には、開発されたシステムのアーキテクチャを示した。開発されたシステムは、1920年代と1930年代に制作されたヨーロッパの映画遺産を取り扱うという、現実的応用課題を目標に据えて構築され、実際に評価された。そのコレクションは、COLLATEシステムのパイロット・ユーザであ

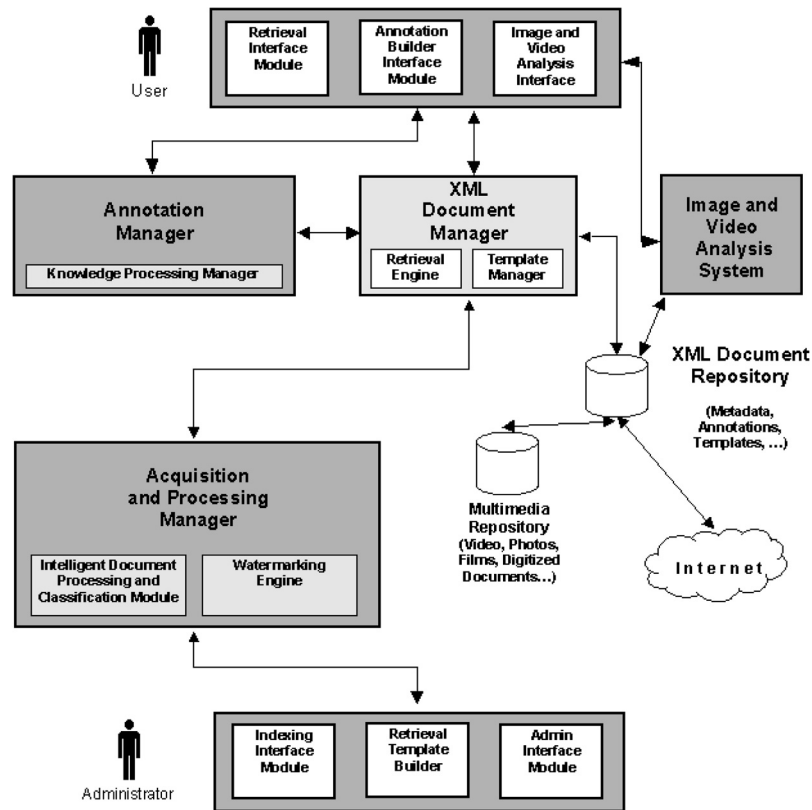


図1 COLLATE システムのアーキテクチャ⁽⁷⁾

るドイツ、オーストリア、チェコの主要な映画会社やフィルムアーカイブ管理団体から提供された素材を基に作成され、数千の歴史的映画に関する校閲済みの文書や、デジタル写真やフィルム断片を含むマルチメディア・コンテンツとして整備されている。

また、図2には、COLLATE システムでサポートされている機能レイヤの概念図を示した。COLLATE システムでは、XML ベースの文書ハンドリング機能に加え、デジタル透かし、コンテンツベースのアクセスや、デジタル化された素材の比較・精細な自動インデキシング・注釈付けなどの知識マネージメント機能を具備した文書処理・管理機能を提供することで、分散したユーザグループのコラボレーションをサポートする仕組みとなっている。また、COLLATE プロジェクトでは、パイロット・ユーザや、歴史的映画の専門家チームの活動に試用され、評価され、その評価結果がシステム設計へとフィードバックされるという道筋が設定されている。

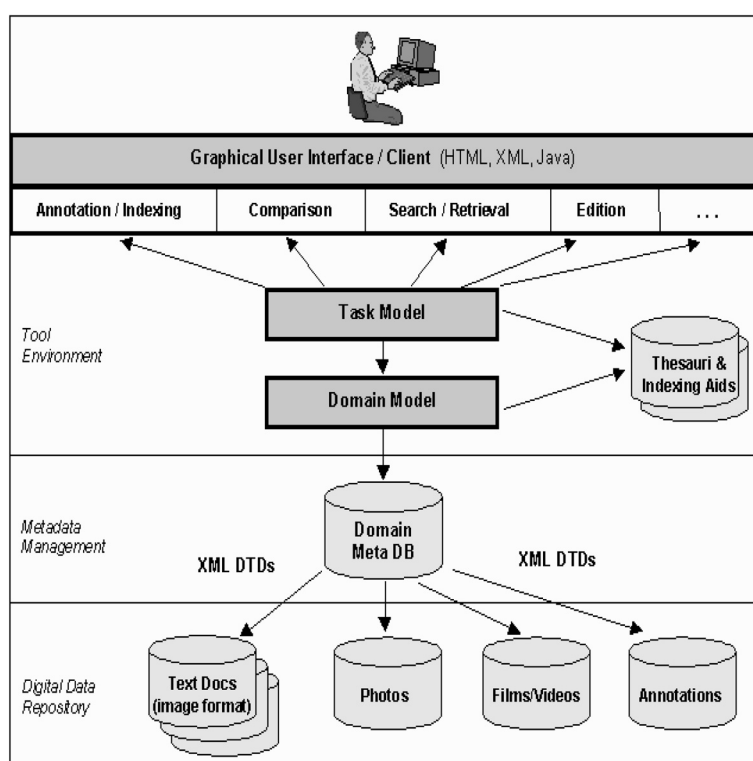


図2 COLLATE システムでサポートされている機能レイヤ概念図(7)

4 映像フィルム損傷とそのデジタル修復技術

デジタル損傷修復の対象となる映像フィルム損傷にはどのような損傷があるのか、そしてそれらの画像損傷は一体どのようなデジタル画像処理手法で修復することができるのかについて、筆者らの研究グループの研究成果に触れながら、簡単に紹介する。また、現在の技術水準と今後の課題についても論じる。

4.1 映像フィルム損傷の分類

先に紹介した DIAMANT プロジェクトでは、修復処理の対象となるさまざまな映像フィルム損傷

の事例を収集し、分類し、整理すると共に、損傷動画像（MPEGで圧縮したもの）が例示されている。表2には、DIAMANTプロジェクトのWebサイトに掲載されている映像フィルム損傷の分類表を、整理して示した⁽¹⁾。なお、DIAMANTプロジェクトによる損傷コレクションの1つの目的は、『フィルムアーカイブ管理者、映画・画像関連の研究者、情報技術の異なるバックグラウンドで活動している技術者・研究者の間で、共有可能な英語の専門用語を提案する』ということであり、したがってこれに対応した日本語の専門用語が必ずしも存在しない。この意味で、表2の日本語の用語には私見が含まれていることをご容赦いただきたい。また、表2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2では、映像フィルム損傷は、以下の六種類のカテゴリーに大分類されている。

- (1) Loss of image information（画像情報の消失）
- (2) Defects originated in duplication（複写時の損傷）

表2 種々の映像フィルム損傷タイプとその修復

Defects Types（損傷のタイプ）	画像例の有無（#）	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）	有	化学的修復。モル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）	有	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）	無	モル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）	有	大きなブロッチ。フレーム間差分にモル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）	無	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）	有	周囲と不連続な水平の繋ぎ目を検出し、隣接領域からの時間空間補間により修復。
(1-7) Reticulation（網状のしわ）	無	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）	無	大面積ブロッチ。フレーム間差分にモル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）	有	錆によるしみをフレーム間差分にモル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）	有	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）	無	雨のように見える。フレーム間・フレーム内処理で検出し、時間空間補間にて修復。
(1-12) Bilstering or peeling of the emulsion（感光乳剤の剥離）	無	大きな白いブロッチ。フレーム間・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（感光乳剤の溶融）	有	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）	有	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）	有	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）	無	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）	有	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）	有	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。
(2-3) Breathing（フォーカスの微動）	有	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）	有	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）	有	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）	有	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）	無	モル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）	無	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）	無	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）	無	各種のコントラスト補正法の適用。
(2-11) Under-exposure（露光不足）	無	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）	無	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）	無	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）	有	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）	無	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）	無	鮮鋭度、コントラストの低下。粒状性の増大。先鋭化と雑音除去との両立処理。
(4) Defects relating to early colored films（初期カラーフィルムの損傷）		
(4-1) Dye fading（褪色）	無	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）	有	フレーム間・フレーム内処理による色欠領域の検出と修復。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）	有	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）	有	何層かの感光層がに消失。カラーグレーディング補正。カラーズレートを参照した補正。

(#) DEAMANTプロジェクトのWebサイト (<http://diamant.joanneum.ac.at>) に損傷動画像の例が掲示されているか否かを示している。

- (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、皺がついたり、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。この類の損傷には、第一に、アナログ的な修復技法が適用される。たとえば、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)の損傷と(3)の損傷は、オリジナルフィルムを、光化学的な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ついた傷は、「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⁽¹²⁾。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つくと、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。

AURORA プロジェクトや DIAMANT プロジェクトでは、多くの映像フィルム損傷事例が調査され、その結果、フレームの不規則な揺れ、フリッカ、スクラッチ、ブロッチ、ランダム雑音は、画像処理技術によって修復し、補正することが可能であると判定され、それらの損傷の修復法や補正法の開発が具体的な技術開発目標として設定された^{(1)~(5)}。これに加え、フォーカス微動の補正(鮮鋭度改善)なども修復対象となる画像損傷として取りあげることができる。現在、世界の多くの研究者が、開発に取り組んでいる損傷修復アルゴリズムは、これらの損傷を修復するためのものである。次節では、これらの損傷修復について取りあげる。

4.2 損傷モデルとその修復

損傷修復アルゴリズムの開発のキーポイントは、できるだけ高速なアルゴリズムとすること、経年劣化映像に含まれている各種の画像歪の影響を受けにくい頑健なアルゴリズムとすることの二点である。とくに、画像歪に対する高度な頑健性が要求される点は、他の画像修復問題とは大いに異なる点である。

以下では、修復対象である損傷ごとに、その損傷モデルと修復法について簡単に紹介する。具体的には、フリッカ、ブロッチ、スクラッチ、フレームの不規則な揺れ、フォーカス微動の修復について論じる。

[1] フリッカモデルとその修復

フリッカは、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、シャッター時間の変動などの多くのものがある。このような要因を考慮したフリッカモデルは知られておらず、また修復の観点からはフリッカモデルに関する正確な知識は必ずしも必要ではない。修復の立場からは、後述するように、フリッカを補正するためのモデル、すなわちフリッカ補正モデルを適当に指定すればよい。

式 (1) には、フリッカモデルの一例を示した。

$$z(\mathbf{p}) = \alpha(\mathbf{p}) \cdot y(\mathbf{p}) + \beta(\mathbf{p}) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{p} = (i, j, t)$ は、時刻 t のフレーム上で空間座標 (i, j) を有する画素の時空間三次元座標を意味する。 $z(\mathbf{p})$ と $y(\mathbf{p})$ は、損傷画像と非損傷原画像である。 $\alpha(\mathbf{p})$ と $\beta(\mathbf{p})$ は、フリッカゲイン係数とフリッカオフセット係数であり、 \mathbf{p} の関数として定義される。 $\alpha(\mathbf{p})$ と $\beta(\mathbf{p})$ は、時間 t に関しては不規則に変動し、空間座標 (i, j) に関しては滑らかに変化するとしてモデル化される。

フリッカ補正問題の一つの定式化として、「補正対象画像の明るさを、入力画像系列から1つ選んだ参照画像の明るさに合わせる問題」として定式化することができる。このように定式化されたフリッカ補正問題の最も単純な解法は、よく知られたヒストグラム等化法 (Histogram equalization) の適用であるが、この解法では十分なフリッカ補正効果が得られない。そこで、より強力な手法が考案されている。例えば、Delft 工科大学の Roosmalen らは、画像をサブブロックに分割し、サブブロックごとに、補正対象画像と参照画像との間の平均と分散の関係から、フリッカゲイン係数とフリッカオフセット係数を推定し、これらを補間することで画素ごとにフリッカゲイン係数とフリッカオフセット係数を定め、フリッカ補正を行う方式を提案している⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。また、筆者らは、これとは別に、補正対象画像 $z(\mathbf{p})$ から補正画像 $x(\mathbf{p})$ を生成する次式のフリッカ補正モデルにおいて、

$$x(\mathbf{p}) = \gamma(\mathbf{p}) \cdot z(\mathbf{p}) + \delta(\mathbf{p}) \quad (2)$$

フリッカ補正ゲイン係数 $\gamma(\mathbf{p})$ とフリッカ補正オフセット係数 $\delta(\mathbf{p})$ を空間変数 (i, j) の多項式関数に限定し、その多項式係数を補正画像が参照画像に近づくように、ロバスト最適化法によって決定する方式を提案した⁽¹⁵⁾。いずれの方式も、フリッカによって明るさが変化している部分と、動きによって明るさが変化している部分を、分離して識別する工夫が必要とされる。そこで、筆者らは、ロバスト推定 (Robust estimation) の概念を導入し、動きやハイライトなどの種々の要因によってフリッカ補正画像が参照画像に近付かない部分を外れデータ (outlier) として抽出し、この部分を用いずに再度フリッカ補正モデルを推定する手法を考案し、この手法をフリッカ損傷が含まれている実際の経年劣化映像に適用し、有効であることを実証した⁽¹⁵⁾。しかしながら、これらの方式は、フリッカ損傷を補正した映像の鮮鋭度を低下させてしまい、とくに動物体の境界付近で画像ぼけが目立つ。そこで、筆者らは、最近、人間の視覚の明度順応機能に対応した網膜の神経回路網メカニズムをモデリングした明度補正アルゴリズムを考案し、人工的に生成したフリッカテスト映像を用いた予備的シミュレーションによりこのアルゴリズムによって映像の鮮鋭度を低下させることなく、フリッカを除去することが可能であることを確認している⁽¹⁶⁾。

[2] ブロッチモデルとその修復

ブロッチは、フィルム表面への埃の付着や、経年劣化による感光乳剤の剥離などのさまざまな要因によって生じる斑点状の損傷であるが、その輝度は暗い場合もあるし、明るい場合もある。図3には、ブロッチ損傷を含む経年劣化映像の一例、および後述の文献(21)の筆者らの手法によってブロッチ損傷を修復した結果を示した。画像中央のやや右側の位置には大きな黒いブロッチ損傷が見え、また画像中央やや下方の位置には比較的小さな白いブロッチ損傷が見えるが、これらのブロッチ損傷はあまり目立たない程度にまで修復されている。



(a) ブロッチ損傷を含む経年劣化映像

(b) 文献(21)の手法によるブロッチ損傷修復結果

図3 ブロッチ損傷とその修復例⁽²¹⁾

ブロッチによる損傷は、次式でモデル化される。

$$z(\mathbf{p}) = (1 - \mu(\mathbf{p})) \cdot y(\mathbf{p}) + \mu(\mathbf{p}) \cdot b(\mathbf{p}) \quad (3)$$

ここで、 $z(\mathbf{p})$ と $y(\mathbf{p})$ は、損傷画像と非損傷原画像である。また、 $b(\mathbf{p})$ は、ブロッチの明るさであり、一般に $b(\mathbf{p}) \neq y(\mathbf{p})$ である。 $\mu(\mathbf{p})$ は、ブロッチ損傷の有無を表す値である。感光乳剤の剥離の程度によってブロッチ損傷の見え方が異なるので、正確には $\mu(\mathbf{p})$ は $\mu(\mathbf{p}) \in [0, 1]$ の連続量とすべきであるが、⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾簡単のために $\mu(\mathbf{p}) \in \{0, 1\}$ の二値量として扱われることが多い。

ブロッチは、以下のような性質を持つ損傷である。第一の性質は、1つのブロッチの内部では $b(\mathbf{p})$ の値はほぼ一定であるという“空間的一様性”の性質である。また、第二の性質は、ブロッチは時間的に近接したフレーム間で同一の空間的な位置に生じることはないという“時間的不連続性”の性質である。

ブロッチ損傷修復は、多くの場合、誤検出による悪影響を抑えるため、ブロッチ検出とブロッチ補正の二段階で行われる。第一段階のブロッチ検出では、動き解析結果を参照しつつ、時間的不連続性を検出することで、入力画素がブロッチであるか否かを表すマスク $\mu(\mathbf{p})$ を推定する。さらに、空間的一様性に基づく後処理をブロッチ検出領域に適用することで、誤検出を抑制する。第二段階のブロッチ補正では、空間的一様性の性質とマスク $\mu(\mathbf{p})$ の値に基づき、時空間的な補間手法によって画素値を補正する。ブロッチ損傷修復法のポイントは、検出段階で用いる動き解析法、及び動き補償予測画像を参照した検出法、補正段階で用いる時空間補間法にある。

動き解析法は、損傷に耐性を有するロバストな手法が望ましい。この観点から、探索手順を工夫・改善した階層型ブロックマッチング法⁽¹³⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾、パラメトリック動きモデル推定と均一動き領域へのセグメンテーションとを同時に行う筆者らが提案したロバスト動き解析法⁽²¹⁾、マルコフ確率場モデルに基づく動

^{(22)~(24)}き解析法などが適用されている。この中で、現時点で実用的な意味を持つ方式は、階層型ブロックマッチング法のみであるが、隠蔽などへの対処がやや不十分である点に問題がある。他の方式は、動き解析自体の能力は高いものの、計算量がやや多くなる。

ブロッチ検出は、着目画素の輝度値が、着目画素と空間的に近接した位置に存在する動き補償予測画像上の局所的画素集合の輝度値と大きく異なる場合、着目画素をブロッチ画素と判定することで行われる。簡単には、着目画素について計算した動き補償前方予測誤差と動き補償後方予測誤差の内から大きさの小さな方の値を選択し、この値及びブロッチ画素の空間的連続性に基づきブロッチ検出を行えばよい。^{(21)~(23)}動き補償自体の信頼性が高い場合には、この方式で良好な結果が得られる。動き補償に誤りが含まれる場合には、検出段階にロバスト性を持たせることで、誤検出を抑制できる。たとえば、動き補償前方・後方予測画像上での着目画素の局所的近隣画素輝度の順序統計量と、着目画素の輝度値とを比較し、ブロッチ検出を行う方式も提案されている。⁽¹⁹⁾また、動き補償前方予測画像あるいは動き補償後方予測画像上での着目画素の局所的近隣画素集合から着目画素の輝度値を自己回帰モデル (AR model) で予測できると仮定し、この予測誤差の大きさによってブロッチ検出を行う方式も提案されている。⁽²²⁾文献 (13) には、動き解析法として階層型ブロックマッチング法を用いた場合について、これらの検出法が比較されているが、実験した範囲内では明確な優位差は現れなかったと報告されている。

時空間補間法は、マスク $\mu(\mathbf{p})$ の値を $\mu(\mathbf{p}) \in \{0, 1\}$ の二値量として扱うか、 $\mu(\mathbf{p}) \in [0, 1]$ の連続量ととして扱うかによって異なる。 $\mu(\mathbf{p})$ の値を二値量として扱う場合は、 $\mu(\mathbf{p}) = 1$ のブロッチと判定された画素の輝度値のみを時空間補間値で置換すればよい。一方、 $\mu(\mathbf{p})$ の値を連続量として扱う場合は、観測画像 $z(\mathbf{p})$ の値と時空間補間値を $\mu(\mathbf{p})$ の値に応じて荷重混合させることになる。⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾後者の方式では、荷重混合の適応的制御の最適化について未解決な問題があったが、筆者らは人工的に生成したブロッチ損傷を含んだ動画をトレーニングデータとして用いて荷重混合の適応的制御を最適設計する学習アルゴリズムを考案し、これにより良好な修復が実現できることを実証した。⁽²⁵⁾具体的な時空間補間法としては、動き補償前方・後方予測画像上での着目画素の局所的近隣画素についての多段メディアン値を補間出力とするもの、⁽²⁴⁾着目画素の輝度値を動き補償前方・後方予測画像上での局所的近隣画素集合から予測する 3D 自己回帰モデル法、⁽²⁴⁾ブロッチ判定画素の値を動き補償前方予測画像あるいは動き補償後方予測画像から領域単位で切り貼りする方式などがある。⁽¹³⁾⁽²¹⁾⁽²⁶⁾いずれの方式も、ブロッチ検出法との相性によってその適否を判定すべきものである。例えば、動き補償が信頼の置けるものであるならば、領域単位で切り貼りする方式が最も自然な補正結果を与えるが、逆に動き補償に誤りがある場合には、人工的な歪がかえって目立つ結果となる。

[3] スクラッチモデルとその修復

スクラッチ損傷は、フィルムとビデオでは、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ついた引掻き傷であり、周囲よりも暗い、あるい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。このため、画像に元々含まれていた垂直方向のテクスチャ成分とスクラッチを区別することは極めて困難な作業となる。一方、ビデオスクラッチは、ビデオプレイヤーで採用されているヘリカルスキャンによって、短い水平方向の線分として画

面のあちこちに広く分布して現れ、しかもその現れる位置はフレームごとに変化する。したがって、前出のブロッチ検出と同様に、動き解析を適用し、水平方向に伸びた損傷領域を検出すればよい。以下では、フィルムスクラッチの検出と修復についてのみ述べる。

図4には、スクラッチ損傷を含む経年劣化映像の一例、および後述の文献(22)の手法によるスクラッチ損傷修復結果を示した。画像中央近くの位置には縦方向に長く伸びた白いスクラッチ損傷が見えるが、このスクラッチ損傷はほぼ見えない程度にまで修復されている。一方、図5には、スクラッチ/ブロッチ損傷を含む経年劣化映像の一例、および後述の文献(22)の手法、文献(27)(28)の筆者らの手法によるスクラッチ/ブロッチ損傷修復結果を示した。図5では、損傷はある程度目立たなくされてはいるが、一部は残存し、なお見えている。図4の場合とは異なり、図5の経年劣化映像には多くの不鮮明なスクラッチ損傷が含まれており、画像の他の部分に影響を与えることなく、これらのスクラッチ損傷を見えない程度にまで修復することは極めて困難である。



(a) スクラッチ損傷を含む経年劣化映像



(b) 文献(22)の手法によるスクラッチ損傷修復結果

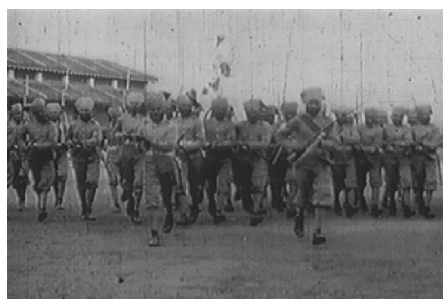
図4 スクラッチ損傷とその修復例⁽²²⁾



(a) スクラッチ/ブロッチ損傷を含む経年劣化映像



(b) 経年劣化映像(a)の損傷修復結果⁽²²⁾



(c) スクラッチ/ブロッチ損傷を含む経年劣化映像



(d) 経年劣化映像(c)の損傷修復結果⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾

図5 スクラッチ/ブロッチ損傷とその修復例⁽²²⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾

フィルムスクラッチの修復も、ブロッチ修復と同様に、検出と補正の二段階で行われる。第一段階のスクラッチ検出では、輝度の水平方向の不連続性を手がかりに、検出が行われる。筆者らはそのための手法として、周囲に比較して突出して明るい輝度成分あるいは暗い輝度成分を入力輝度変化から分離する一種のモルフォロジーフィルタ、すなわちトップハット変換 (Top-hat transformation)⁽²⁰⁾を用いる方式を提案した⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。トップハット変換出力をさらに数フレーム期間にわたって時間積分することにより、スクラッチ検出の信頼性を高めることができる⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。また、トップハット変換を拡張したモルフォロジー演算によって、固定した位置に現れる他の損傷 (指紋や髪の毛の跡など) も検出可能である⁽²⁰⁾。これらとは異なる検出法として、スクラッチと直交する方向の輝度変化パターン $s(i)$ を、次式のようにオフセット減衰コサイン関数としてモデル化し、

$$s(i) = A \cdot k^{|c-i|} \cdot \cos\left(\frac{|c-i|}{w}\right) + B \quad (4)$$

入力損傷画像 $z(\mathbf{p})$ にこのスクラッチモデルを当てはめ、減衰係数 k 、振幅 A 、幅 w 、中心位置 c 、周囲のオフセット平均輝度 B の値を推定し、これらの値からスクラッチの有無を判定するものがある⁽²²⁾⁽²⁹⁾。

第二段階の補正では、ブロッチ損傷の修復とは異なり、フレーム間の輝度相関を利用することができない。そこで、静止画像の損傷修復用に考案されたフレーム内の補正法を適用することになる。検出段階でトップハット変換を用いた場合は、これに対応したオープニングフィルタ (Opening) の出力やクロージングフィルタ (Closing) の出力を補間値として、スクラッチ画素の輝度値を置換すればよい⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。この他、2D 自己回帰モデルによって補間値を生成する方式などもある⁽²²⁾⁽²⁹⁾。また、写真修復のために最近考案されている非線形偏微分時間発展方程式に基づくインペイントアルゴリズム (Inpainting Algorithm) をスクラッチ補正に適用することも考えられる。しかしながら、現在までに考案されているインペイントアルゴリズムでは^{(30)~(32)}、単純な絵柄の画像では良好な修復結果が得られるものの、複雑なテクスチャを含む画像では十分な画像品質の補正画像が得られていない。今後、複雑なテクスチャを含む画像にも適用しうるようにアルゴリズムを拡張する必要がある。

[4] フレームの不規則な揺れとその抑制

フレームの不規則な揺れは、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り、次式のようにフレーム間での大域的な位置ずれとしてモデル化できる。

$$z(\mathbf{p}) = y(i', j', t) \quad (5)$$

$$(i', j') = \varphi_E \circ (i, j)$$

ここで、 φ_E は、画面上の空間座標 (i, j) から (i', j') へのパラメトリックな幾何学的変換、すなわちワーピングモデル (Warping model) であり、平行移動に加え、回転や、拡大・縮小をも考慮した相似変換や、アフィン変換を採用する必要がある。これは、ズーム、パン、トラベリングなどのカメラワークが含まれている場合、連続する複数フレームについて各フレームペア間でワーピングモデルを推定し、ワーピングモデルパラメータの時間的変動をカメラワークに対応した持続する緩やかな変動成分と、不規則な揺れに対応した不規則変動成分とに分離した上で、フレームの位置合わせを行う必要があるからである。また、フレームの揺れを抑制し、視覚的に安定した修復画像を得るためには、不規則な揺れを小数画素精度で検出し、位置合わせを行う必要がある。筆者らは、この観点か

ら、ワーピングモデル推定と均一ワーピング領域へのセグメンテーションとを同時に行う推定法を基本とした方式を提案した。⁽³³⁾

また、古い世代のテレシネ変換の場合、固有の位置ずれを生じている。この位置ずれは、奇数フィールドと偶数フィールドでそれぞれ別システムの光学系を用いていることに起因するものであり、このことを考慮してフィールド単位で位置合わせを行う必要がある。⁽³⁴⁾

[5] 鮮鋭度改善とフォーカス微動の補正

表2のBreathingの項目で示したように、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ことがある。鮮鋭化処理によってこれを補正することが可能であるが、全画面に一律に適用したのでは、スクラッチやブロッチなどの損傷も強調されてしまう。そこで、スクラッチやブロッチの検出領域を鮮鋭化対象から除外し、またランダム雑音成分が支配的な部分も除外し、ぼけた輝度変化部分のみを選択的に鮮鋭化する必要がある。筆者らは、この観点から、原信号からその二階微分を引くピーキング法を適応化した選択的ピーキング法や、繰り返し型の非線形処理である連立非線形拡散法を適応化した⁽²⁸⁾方式を考案した。⁽³⁶⁾とくに、後者の方式は極めて優れた方式である。

図6には、ぼけを含む経年劣化映像の一例、および文献(28)の適応的連立非線形拡散法による鮮鋭度改善結果を示した。また、図6には、画像中の蒸気機関車前面の上半分を拡大して示した。画像中に含まれている種々の損傷やランダム雑音を強調することなく、ぼけ補正がなされ、選択的に鮮鋭度が改善されている。特に、蒸気機関車前面部分、画像右下の白いプレートの境界部分、画像左下の人物像の境界部分に、鮮鋭度改善効果が見られる。



(a) ぼけを含む経年劣化映像



(b) 画像(a)の拡大像



(c) 文献(28)の手法による鮮鋭度改善結果

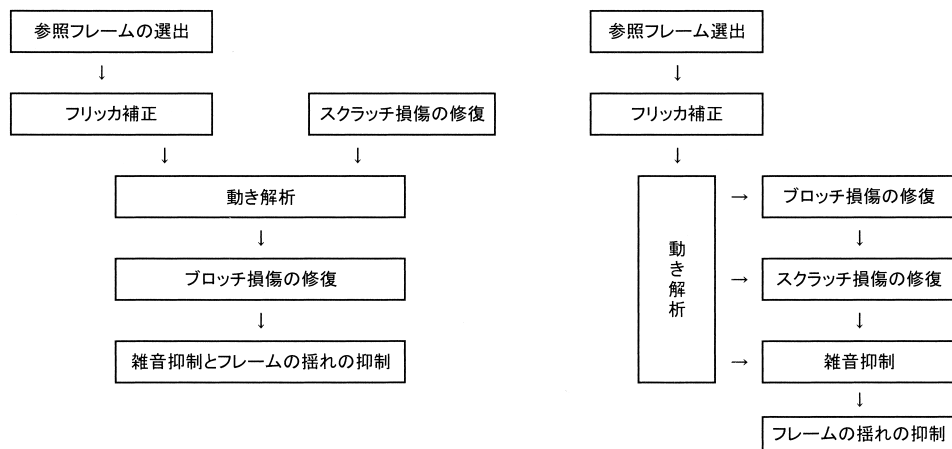


(d) 画像(c)の拡大像

図6 ぼけを含む経年劣化映像と鮮鋭度改善例⁽²⁸⁾

4.3 損傷修復の順序

前記のフレームの不規則な揺れ、フリッカ、スクラッチ、ブロッチなどのさまざまな損傷をどのような順序で修復して行くかも重要なポイントである。図7には、LIMELIGHT/FRAMEプロジェクトで採用された標準的な損傷修復順序と、AURORA/BRAVAプロジェクトで採用された標準的な損傷修復順序⁽¹³⁾を比較して示した。両者とも、動き解析を安定化させるために、動き解析の前にフリッカ補正を行う点は共通している。しかし、スクラッチ補正をいつ行うかには、若干の相違点がある。AURORA/BRAVAプロジェクトは、ビデオ映像損傷であるビデオスクラッチをも考慮しているため、LIMELIGHT/FRAMEプロジェクトとは異なる順序を採用している。ビデオスクラッチは、ヘリカルスキャンによってフレームごとに異なるとびとびの位置に現れることが多く、動き解析結果を参照して修復した方がより良い修復結果が得られるからである。その他の点では、ほぼ共通した順序が採用されている。



(a) LIMELIGHT / FRAMEプロジェクトにおける損傷修復の順序 (b) AURORA / BRAVAプロジェクトにおける損傷修復の順序

図7 フィルムの損傷修復処理の適用順序

5 むすび

経年劣化により傷んだ映画フィルムをデジタル画像処理により修復する技術を紹介すると共に、デジタル修復技術の開発やフィルム映像やビデオ映像のデジタルアーカイブ化に関するECの研究開発プロジェクトや、損傷修復の文化的意義についてその適用事例を通して述べた。

フィルム映像やビデオ映像のデジタルアーカイブ化への我が国の取り組みは、ECの取り組みに比較すれば明らかなように、大いに遅れていると言わざるを得ない。筆者の知る限りでは、ECプロジェクトに比肩しうるような動きはない。個々のアーカイブ管理者、研究者が、予算的な制約や著作権などの法律的な制約の中で、孤立して独立に活動しているに過ぎない。最近、筆者も参画しているデジタルシネマコンソーシアムの活動を通して、映像フィルムのデジタル修復とデジタルアーカイブ化を組織的に行おうとする気運も高まりつつあるが、残念ながらその活動そのものがハリウッド映画産業の強い影響下にあり、興行的に無価値な資料映像は対象外とされている。文化財としての映像フィルムを復元保存し、継承して行く活動が長期にわたって安定に維持されるような社会的仕組みが一刻も早くできることを願うばかりである。

参考文献

- (1) <http://diamant.joanneum.ac.at>
- (2) <http://www.joanneum.ac.at/iis/projects/frame.htm>
- (3) <http://www.hpcn-ttn.org/ttn/video>
- (4) <http://www.ina.fr/Recherche/Aurora/>
- (5) <http://www.ina.fr/Recherche/Brava/>
- (6) <http://website.lineone.net/~preservation>
- (7) <http://www.collate.de/index.htm>
- (8) L. Rohrbough : Massive effort restored Snow White to theater quality, Newsbyte, July 9, 1993.
- (9) 坂村健, 蓮実重彦 (編) : デジタル小津安二郎, 東京大学総合博物館, 1998.
- (10) エイアル・シヴァン, ロニー・ブローマン : スペシャリスト——自覚なき殺戮者——, DVD VIDEO # IVCF-211, アイ・ヴィー・シー, 2000.
- (11) Rony Brauman and Eyal Sivan : Éloge de la désobéissance—A propos d'《un spécialiste》Adoruf Eichmann, Éditions Le Prommier, Librairie Arthème Fayard, Paris, 1999. [ロニー・ブローマン, エイアル・シヴァン (著), 高橋哲哉, 堀潤之 (訳) : 不服従を讃えて——「スペシャリスト」アイヒマンと現代——, 産業図書, 2000.]
- (12) 佐伯知紀 : 映画フィルムの収集と復元, 映像情報メディア学会誌, 55, 1, pp. 14-17, 2001.
- (13) P. M. B. van Roosmalen : Restoration of Archived Film and Video, Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, Dutch, 1999.
- (14) P. M. B. van Roosmalen, R. L. Lagendijk, J. Biemond : Flicker Reduction in Old Film Sequences, Time-Varying Image Processing and Moving Object Recognition, 4, pp. 9-18, Elsevier Science, 1997.
- (15) T. Ohuchi, T. Seto, T. Komatsu, T. Saito : A Robust Method for Image Flicker Correction for Heavily Corrupted Old Film Sequence, Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Image Process., pp. 672-675, 2000.
- (16) 山野剛 : 明度補正アルゴリズムのフリッカ補正への応用, 神奈川大学電気電子情報工学科 2003 年度卒業論文 (齊藤研究室), 2004.
- (17) T. Hoshi, T. Komatsu, T. Saito : Film Blotch Removal with a Spatiotemporal Fuzzy Filter Based on Local Image Analysis of Anisotropic Continuity, Proc. 1998 IEEE Int. Conf. Image Process., TA11.08, 1998.
- (18) T. Saito, T. Komatsu, T. Ohuchi, T. Hoshi : Practical Nonlinear Filtering for Removal of Blotches from Old Film, Proc. 1999 IEEE Int. Conf. Image Process., 27AO3. 4, 1999.
- (19) M. J. Nadenau, S. K. Mitra : Blotch and Scratch Detection in Image Sequences based on Rank Ordered Differences, Time-Varying Image Processing and Moving Object Recognition, 4, pp.27-35, Elsevier Science, 1997.
- (20) O. Buisson, B. Besserer, S. Boukir, F. Helt : Deterioration Detection for Digital Film Restoration, Proc. 1997 IEEE CVPR, pp. 78-84, 1997.
- (21) 小松隆, 岩間徹, 齊藤隆弘 : 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, pp. 1912-1219, 1998.
- (22) A. C. Kokaram : Motion Picture Restoration, Springer Verlag, 1998.
- (23) A. C. Kokaram, R. D. Morris, W. J. Fitzgerald, P. J. W. Rayner : Detection of Missing Data in Image Processing, IEEE Trans. Image Process., 4, 11, pp. 1496-1508, 1995.
- (24) A. C. Kokaram, R. D. Morris, W. J. Fitzgerald, P. J. W. Rayner : Interpolation of Missing Data in Image Processing, IEEE Trans. Image Process., 4, 11, pp. 1509-1519, 1995.
- (25) T. Saito, K. Yashiro, J. Satsumabayashi, T. Komatsu : Statistically Optimal Control of a Blending-

- Type Filter with Application to Old Film Restoration, Proc. 2002 European Signal Process. Conf., vol. III, pp. 243-246, 2002.
- (26) P. M. B. van Roosmalen, A. C. Kokaram, J. Biemond : Fast High Quality Interpolation of Missing Data in Image Sequences using a Controlled Pasting Scheme, Proc. 1999 IEEE ICASSP, 1999.
- (27) T. Saito, T. Komatsu, T. Ohuchi, T. Seto : Image Processing for Restoration of Heavily-Corrupted Old Film Sequences, Proc. 15th IAPR Int. Conf. Pattern Recognition, vol. 2, pp. 17-20, 2000.
- (28) T. Ohuchi, T. Seto, T. Komatsu, T. Saito : Selective Sharpness Enhancement of Heavily Corrupted Old Film Sequences, Proc. 2000 IEEE Int. Conf. Image Process., pp. 676-679, 2000.
- (29) R. D. Morris, W. J. Fitzgerald, A. C. Kokaram : A Sampling Based Approach to Line Scratch Removal from Motion Picture Frames, Proc. 1996 IEEE Int. Conf. Image Process., pp. 801-804, 1996.
- (30) M. Bertalmio, G. Sapiro, C. Ballester, V. Casselles : Image Inpainting, Proc. SIGGRAPH 2000 Conf., pp. 417-424, 2000.
- (31) C. Ballester, M. Bertalmio, V. Casselles, G. Sapiro, J. Verdera : Filling-In by Joint Interpolation of Vector Fields and Gray Levels, IEEE Trans. Image Process, 10, 8, pp. 1200-1211, 2001.
- (32) M. Bertalmio, L. Vese, G. Sapiro, S. Osher : Simultaneous Structure and Texture Image Inpainting, IEEE Trans. Image Process, 12, 8, pp. 882-889, 2003.
- (33) T. Komatsu, T. Saito: A Robust Method for Correction of Interframe Misalignment in Telecine Conversion, Proc. 1999 IEEE Int. Conf. Image Process., 26PP6. 6, 1999.
- (34) R. D. Morris, W. J. Fitzgerald, A. C. Kokaram : A Sampling Based Approach to Line Scratch Removal from Motion Picture Frames, Proc. 1996 IEEE Int. Conf. Image Process., pp. 801-804, 1996.
- (35) T. Saito, J. Satsumabayashi, K. Yashiro, T. Komatsu : Selective Image Sharpness Enhancement by Coupled Nonlinear Reaction-Diffusion Time-Evolution and Its Practical Application, Proc. 2002 European Signal Process. Conf., vol. II, pp. 445-448, 2002.
- (36) 齊藤隆弘, 薩摩林純, 小松隆 : 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, pp. 1100-1114, 2002.

(事業推進担当者)