

タイトル	エリアイメージセンサの部分読み出しによる蠟管の音再生
著者	魚住，純；三上，亮；Uozumi, Jun; Mikami, Ryo
引用	工学研究：北海学園大学大学院工学研究科紀要(13): 61-70
発行日	2013-09-30

エリアイメージセンサの部分読み出しによる 蠟管の音再生

魚 住 純*・三 上 亮**

Sound reproduction of wax cylinders by means of
partial readout from an area image sensor

Jun Uozumi* and Ryo Mikami**

1. はじめに

蠟管は、19世紀末に登場した円筒型のレコードであり、音を録音し再生することのできる初めての普及型記録媒体であったことから、多くの録音蠟管が生産された。その中には、音楽・言語学・民族学などの貴重な資料や著名な人物の肉声や演奏が記録されているものがあり、それらの学術的また文化的遺産として意義は大きい。

文化財としての貴重さに加えて、物理的な損傷を受けているために蓄音機による再生が困難なものが多く現存することから、非接触方式による再生法として、レーザビームの反射特性を用いる実時間再生法¹⁻³⁾や、レーザ変位形⁴⁾、共焦点レーザ顕微鏡⁵⁾、白色干渉計⁶⁻⁸⁾、OCT⁹⁾などによる蠟管表面の3次元形状計測に基づいて再生を行う非実時間法などが報告されている¹⁰⁾。

筆者らは、2次元画像を用いた比較的簡便な非接触再生法として、蠟管を一定角度ずつ回転させながら、蠟管表面の区分的拡大像をエリアセンサにより順次撮影し、その後のデジタル処理において、音信号のセグメントを順次接続して再生する方法を示した¹¹⁾。この方法は、いくつかの要因によって画像フレーム内の音溝の位置が変動することから、音信号の接続に誤差が生じる傾向があり、この接続の精度が再生音の良否を大きく左右することが問題であった。

これを回避する一つの方法は、蠟管を一定の角

速度で回転させながらラインセンサで取得した1次元列画像を結合して2次元画像を合成する方法である。これにより、蠟管の一周が切れ目のない画像として取得できる。本論文では、エリアセンサの部分読み出し機能を用いて、これに準ずる撮影方法を実現し、音再生の可能性を検討したので、報告する。

2. 実験装置と音溝画像の取得

2.1 資料と実験装置

本研究は、エジソンタイプの蠟管を対象としている。実験では、前報¹¹⁾のものとは異なる、曲名等の記載のない蠟管数本を用いた。

蠟管は、音信号の変化に応じた記録針の上下運動、すなわち音溝の深さ方向の振動により音情報を記録している。蠟管への記録に用いられる針は先端が丸みを帯びており、溝が浅ければその幅が狭く削られ、溝が深ければその幅が太く削られることから、音溝の深浅と幅は概ね連動していると考えられる。このため、音溝の幅の変化を捕捉できれば、それから音情報を近似的に抽出することができると推測される。

使用した装置は、照射系、カメラおよびコンピュータを除いてほぼ前報¹¹⁾と同じ構成である。すなわち、音溝形状に応じて照射光により作られる陰影を顕微鏡により拡大して、カメラにより撮

* 北海学園大学大学院工学研究科電子情報工学専攻

Graduate School of Engineering (Electronics and Information Eng.), Hokkai-Gakuen University

** 北海学園大学工学部電子情報工学科（現在：独立行政法人 情報通信研究機構）

Faculty of Engineering (Electronics and Information Eng.), Hokkai-Gakuen University (present: National Institute of Information and Communication Technology)

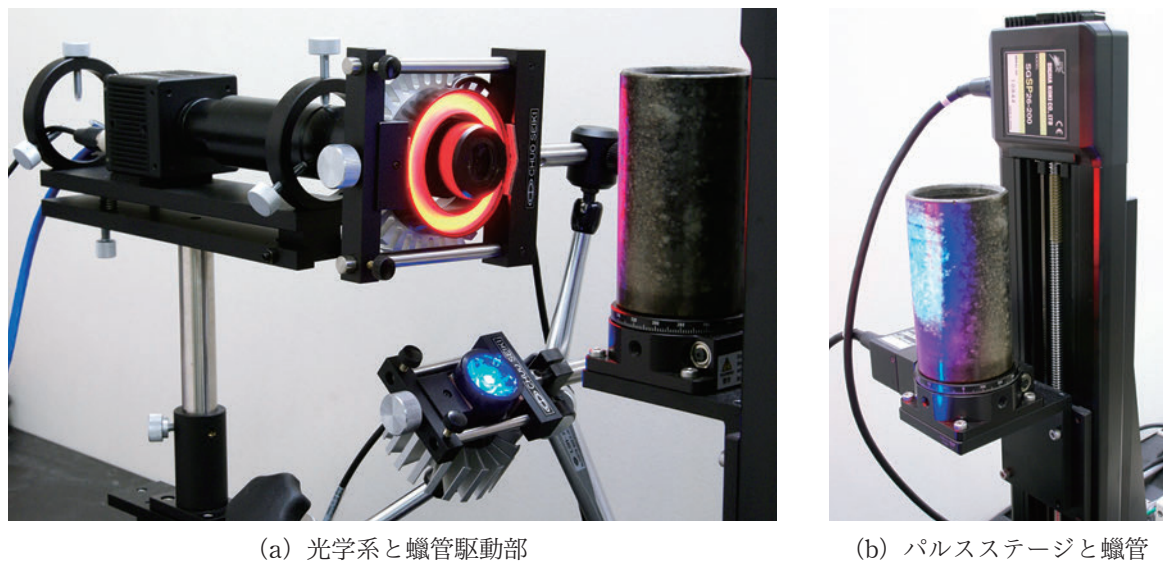


図1 実験装置

像する。実験に用いた光学系および駆動系の写真を図1(a)に示す。図1(b)は、パルスステージ上の蠟管のみを示したものである。

Z軸パルスステージ（シグマ光機，SPSG26-200）にマウントした回転パルスステージ（シグマ光機，SPSG-60YAW-OB）の上に蠟管を中心軸が垂直になるように置く。単眼ズーム式顕微鏡（シグマ光機，MXZ-2）にデジタルカメラ（JAI，BB-500GE）を接続したユニットの中心軸が蠟管および回転パルスステージの軸に対して垂直になるよう、横向きに設置して、蠟管表面の音溝を拡大撮影する。その際、回転パルスステージの回転中にカメラの焦点が音溝面に常に合うように注意して蠟管の位置を定める。このカメラには、画素数 2456×2058 のカラーCCD エリアセンサが内蔵されており、1フレーム内に多くの音溝が含まれるようにするため、画像の行幅2456画素方向に対して蠟管の音溝方向が垂直になるよう、カメラを蠟管に向かって左に 90° 回転させた。

照射光の光源には、青色高輝度LEDスポットライト（Edmund Optics，63336）および赤色高輝度LEDリングライト（Edmund Optics，63304）を用いた。赤色リングライトは、顕微鏡の鏡筒の外側にほぼ同軸となるように固定し、蠟管全体を均一に照射する目的で設置した。青色スポットライトは、音溝に陰影を与えるため、前報¹⁾と同様に斜め下方約 60° の角度に設置した。これは、赤色の均一照射光により、蠟管表面の部分的変色による反射率の面内分布に関する情報を取得し、そ

れを用いて青色スポットライトによる音溝画像の2値化を動的に行うことを意図したものである。2つのLEDを赤と青に色分けすることにより、1つのRGBカラー画像から各LED光による反射画像を分離して取得することが可能である。

この構成で、回転ステージにより蠟管を回転させながら、カメラの部分読み出し機能を用いて一定の行幅の領域だけを動画撮影し、1周の回転の後、 z 軸方向に一定距離移動させて、2周目の撮影を行うという方法を用いた。2つのパルスステージは、2軸ステージコントローラ（シグマ光機，SHOT-102）をUSB経由のGP-IB（National Instruments，GP-IB-USB-HS）を介してPCから制御することにより駆動した。

撮影した動画は、イーサネット接続されたLANボードを介してGigE方式によりPCに取り込み、MATLABを用いて画像処理および信号処理を行った。PCには、プロセッサCore i7 2600（3.4 GHz）およびメインメモリ16 GBのハードウェアにWindows 7 Professional 64ビット版を搭載したものをを用いた。MATLABは、Image Processing Toolbox（IPT）およびInstrument Control Toolbox（ICT）を併用し、GP-IBの制御にはICTの関数を用いた。

なお、実験を進めるなかで、赤色リングライトにより実際に撮影された画像は、必ずしも部分的変色による反射率分布のみの情報を反映しないことが判明したため、本研究では、その後この方法による蠟管表面の変色への対応を行わず、青色ス

ポットライトの反射光のみを用いて実験を進めた。

2.2 撮影設定

撮影した音溝は、フレーム毎に分割された静止画像もしくは AVI ファイル形式の動画画像のいずれかの形でカメラから出力することができる。しかし、静止画像での出力を行うと、画像ファイル数が膨大になり、ファイルへのアクセスによる処理速度の低下などが予想されることから、動画画像で出力を行うことにした。

撮影は、カメラの部分読み出し機能による ROI (region of interest) モードを用いて行い、指定したサイズの領域のみを出力し、動画画像として取得する。部分読み出し機能は、フレームレートを上げるため、読み出しエリアの垂直方向の中心を基点に上下に範囲を指定して映像を読みだす走査方式であり、BB-500GE では、読み出しライン数 8-2058 の範囲内で設定可能である。撮影において

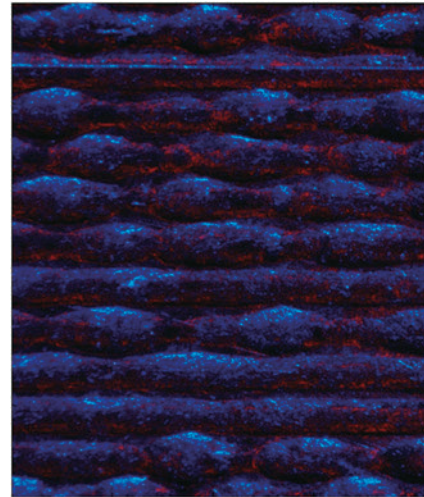
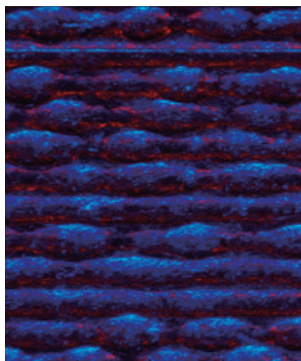
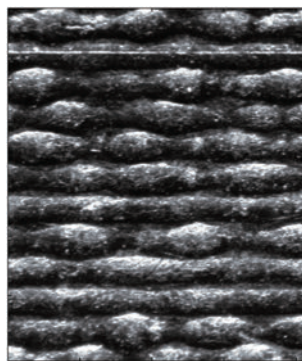


図2 ROI 機能を用いずに撮影した音溝画像

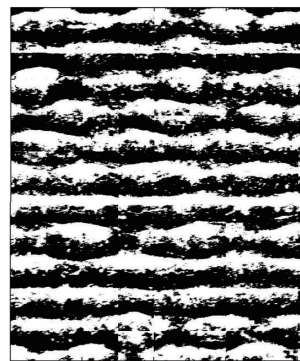
は、回転パルスステージの回転速度をカメラの読み出しライン幅とフレームレートを考慮した適切な値に設定する必要がある。本研究では、目視によって回転パルスステージ 1 パルス分の移動量が画像における 1 画素分に相当すると判断し、回転



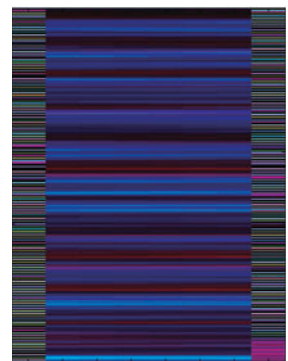
(a) RGB 画像



(b) B 成分の濃淡画像

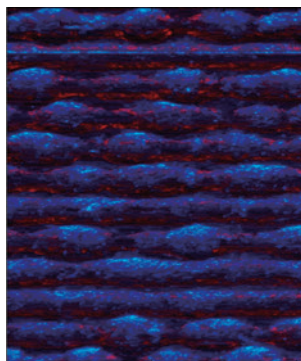


(c) 2 値画像

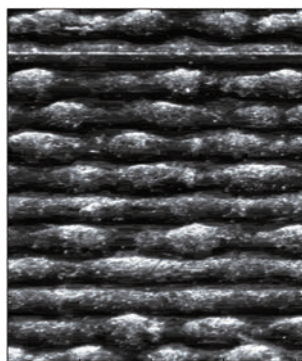


(d) 1 フレームの画像

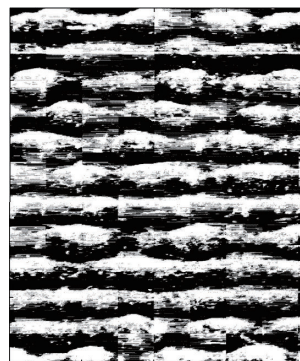
図3 8ライン, 15fps, 圧縮なし



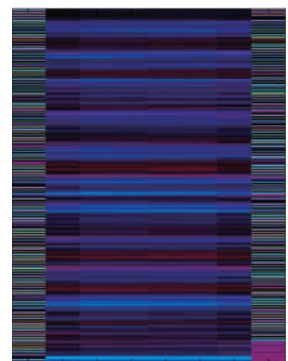
(a) RGB 画像



(b) B 成分の濃淡画像



(c) 2 値画像



(d) 1 フレームの画像

図4 8ライン, 15fps, 圧縮あり

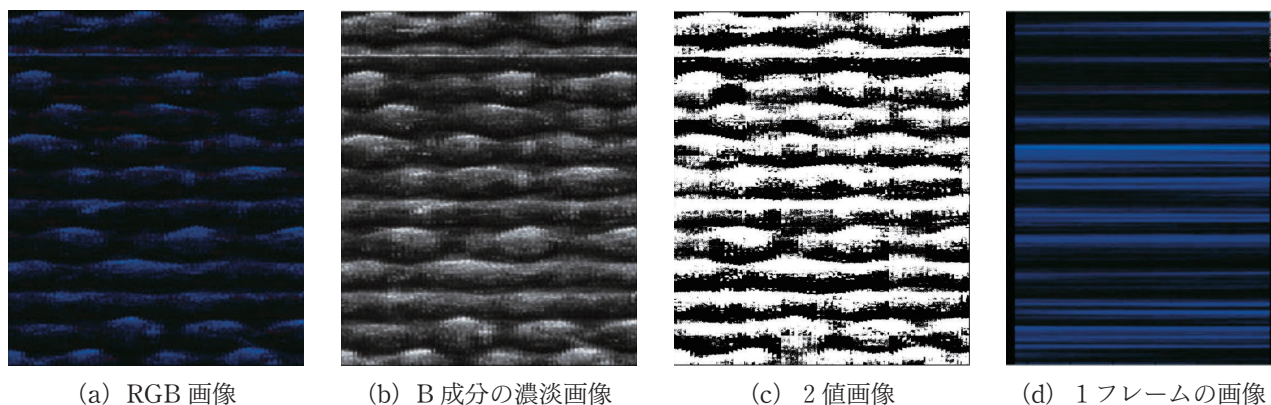


図5 32 ライン, 60 fps, 圧縮なし

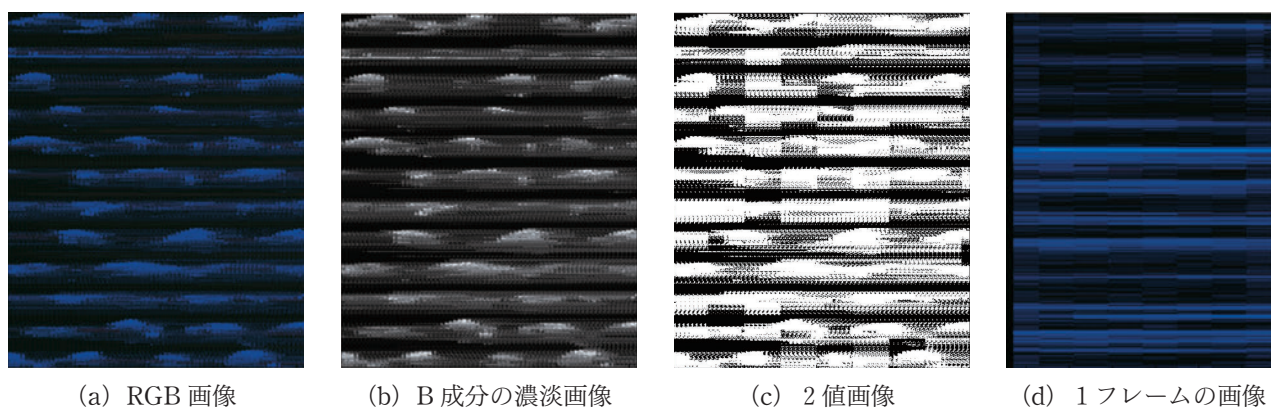


図6 32 ライン, 60 fps, 圧縮あり

速度を決定した。

撮影時の読み出しライン幅とフレームレート、および動画像を保存する際の圧縮の有無による取得画像の違いを検討するため、読み出しライン数を8-32、フレームレートを15-60 fpsの間で変えて取得画像の比較を行った。参考として、ROI機能を用いずに撮影した静止音溝画像を図2に示す。

比較を行った一例として、読み出し幅8ライン、フレームレート15 fps、および読み出し幅32ライン、フレームレート60 fpsの各々について、圧縮の有無を指定して取得した動画像から構成した(a) RGB画像、(b) B成分の濃淡画像、(c) B成分の2値画像、および(d) 1フレーム分の画像を図3、4、5および6の各図に示した。この2組のパラメータの間の値に設定して取得した画像では、この2例の中間的な変化を示した。

取得したAVIファイル中の各フレーム画像には、縦方向の開始1行目と横方向の左右端1列は出力されなかった。これはカメラ自体の仕様であ

ると思われる。このため、回転パルスステージの回転速度を決定する際には、カメラに附属するコントロールツールで設定した値から2を引いたものを撮影ライン数として回転速度を決定した。また、取得したAVIファイルに圧縮をかけた場合においては、左右各2列に圧縮方法が原因と思われる大きなノイズが発生したため、回転パルスステージの回転速度を決定する際にはコントロールツールで設定した値より4を減じたものを撮影ライン数として用いた。画像の精度の面では若干劣るが、音溝境界線については十分判別可能であること、および撮影時間とデータサイズを考慮して、本研究においては読み出し幅32ライン、フレームレート30 fps、圧縮有りとして実験を行った。この設定を用いて取得した画像を図7に示す。

撮影に際し、顕微鏡の倍率を3倍に設定し、画像1枚当たりの音溝数を11本としたが、後の画像補正処理のため、周間の z 方向移動パルス数は音溝9本分とし、 z 方向の隣接画像間で重なりができるようにした。

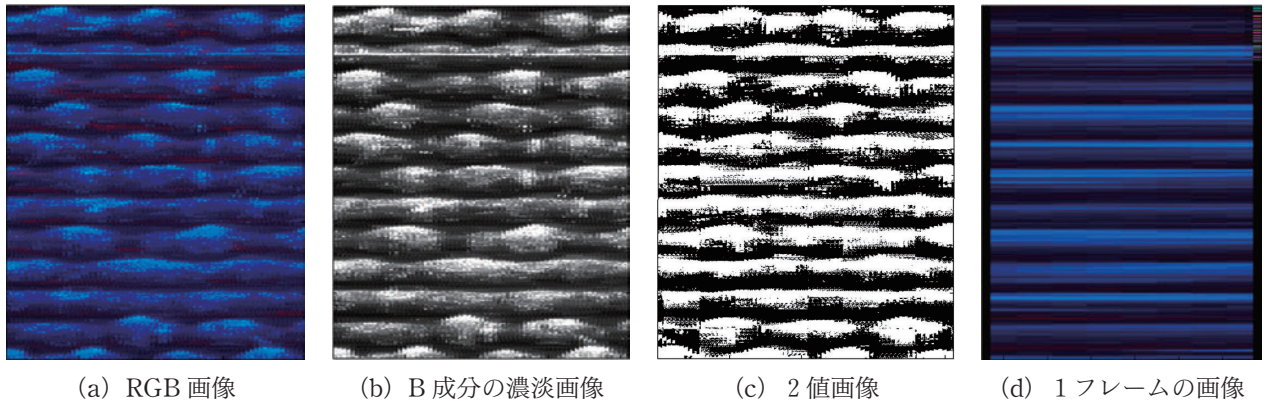
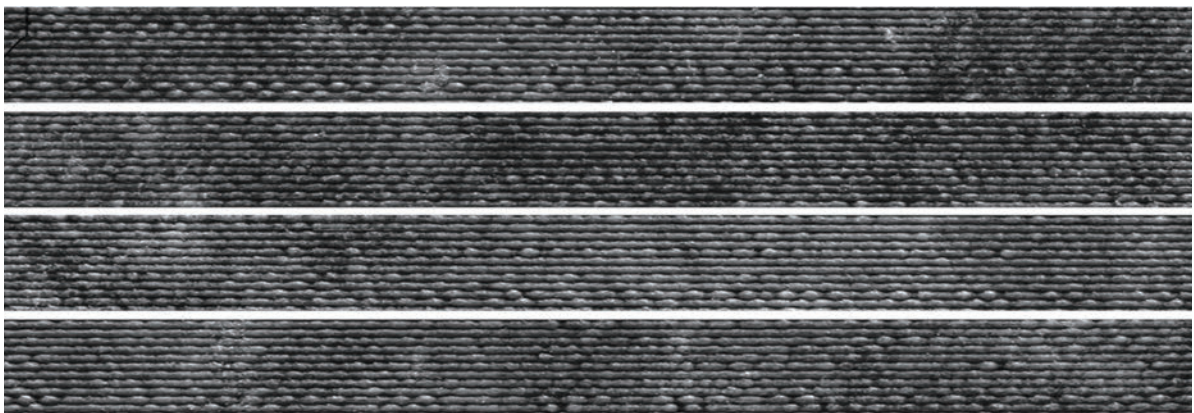
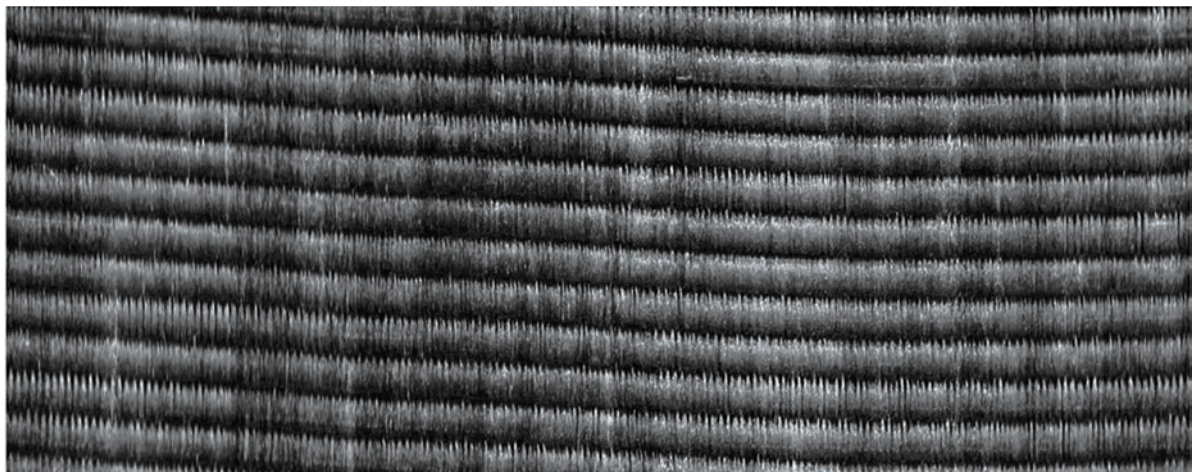


図7 32 ライン, 30 fps, 圧縮あり



(a) 4 分割表示



(b) 横軸を 1/20 に圧縮した表示

図8 動画フレームの結合処理により取得した蠟管 1 周分の白黒濃淡画像

2.3 動画フレームの結合

カメラから得られた AVI ファイルのデータは, MATLAB の IPT に含まれる VideoReader クラスの VideoReader 関数と read メソッドを

用いて MATLAB ワークスペース上に読み取り, 動画の各フレームの結合処理により, 1 周の撮影動画を一枚の静止画像に合成する. その際, 元の動画は RGB カラーであるが, 青色 LED 光の反射像のみを用いることから, B 成分のみを抽

出して使用した。合成した1周分の画像を横に4分割したものを図8(a)に、分割せずに横軸を1/20に縮小して表示したものを図8(b)に示す。

3. 画像処理

3.1 2値化

音溝部分と非音溝部分の境界線を明確にするため、結合処理により作成した濃淡画像を2値化する。2値化にあたっては、しきい値の設定が重要であり、白黒両方の成分をバランスよく保ち、音溝の情報が欠落しないよう、適切な値にする必要がある。

しきい値の決定法には、一般に画像全体に同一のしきい値を適用する固定しきい値法と画素ごと、あるいは部分領域ごとにしきい値を変える可変しきい値法があり、エリアセンサによる区分的な撮像方法を用いた前報¹¹⁾では、固定しきい値法を用いた。しかし、古蠟管には、経年による変色を起こしている部位が散在しているものが多く、固定しきい値法を適用することは問題が大きいと思われる。そのような蠟管に対する本方式の音溝画像の例を図9に示す。そこで、この画像を用いて、固定しきい値法と可変しきい値法による2値化処理の結果を比較、検討した。

固定しきい値法では、画像中の全画素の平均濃度値に0.8-0.9倍の係数をかけた値を画像全体の

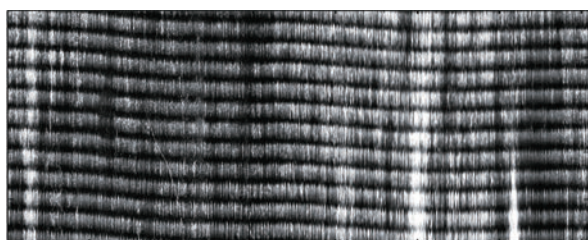


図9 一部が変色した蠟管の音溝画像

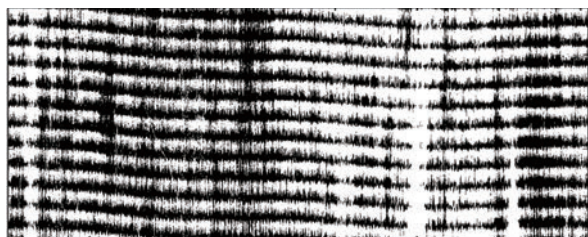
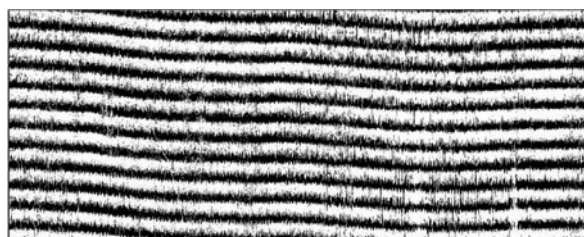


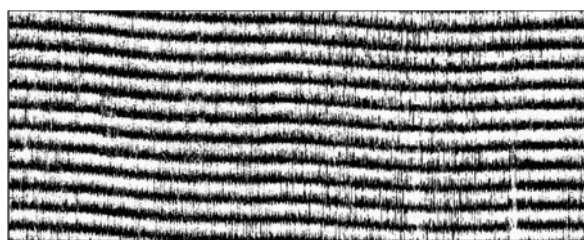
図10 固定しきい値による2値化画像

しきい値として2値化を行った。その結果を図10に示す。この図から、固定しきい値法による2値化では、低濃度領域においては音溝が大幅に欠落し、高濃度領域では上下の音溝が連結する現象が生じるなど、蠟管の色の異なる部分で音溝の情報を正しく得られない場合が生じることが分かる。

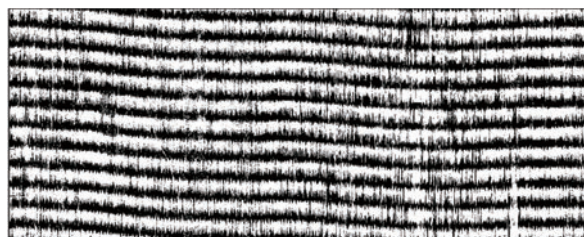
つぎに、可変しきい値法として、同様のしきい値の決め方を、IPTの関数であるblockprocを用いて画像の局所領域ごとに適用して2値化を行った。分割する領域のサイズを3通りに変えて求めた画像を図11に示す。この図に示すように、固定しきい値で得た画像に比べて音溝の境界線部分をより明確に区別できる画像が得られた。しかし、分割する領域のサイズによっては、明確な音溝の境界線が得られない場合や、処理に時間を要する場合があります。また、本方式では、蠟管1周分を一つの画像とするため、そのデータサイズが大きく、コンピュータのメモリに十分な作業領域を確保できない場合が生じたが、blockprocを用いた分割処理により



(a) 分割領域 (250×250)



(b) 分割領域 (500×500)



(c) 分割領域 (1000×1000)

図11 ブロック分割を用いた可変しきい値法による2値化画像

メモリ領域に余裕ができ、処理の高速化にもつながった。

3.2 音溝の傾きとうねりの補正

4本の異なる蠟管から作成した2値化音溝画像を図12に示す。この図からわかるように、蠟管の音溝にはうねりのようなトレンドが見られる。このうねりは、蠟管ごとに異なるうえ、同じ蠟管においても音溝の周が進むごとに徐々に変化していくことから、これは回転ステージ等の実験系による変動ではなく、蠟管に固有のものであって、蠟管を記録した装置の機械的送り機構の送りむらによるものであると推測される。

このようなうねりの存在は、区分的に撮影をしていた前報¹⁾の段階では気づかれておらず、このうねりが、隣接画像および音信号セグメントの接続の難しさの主要因であると考えられる。

このうねりは、後述する音溝境界線の切り出し

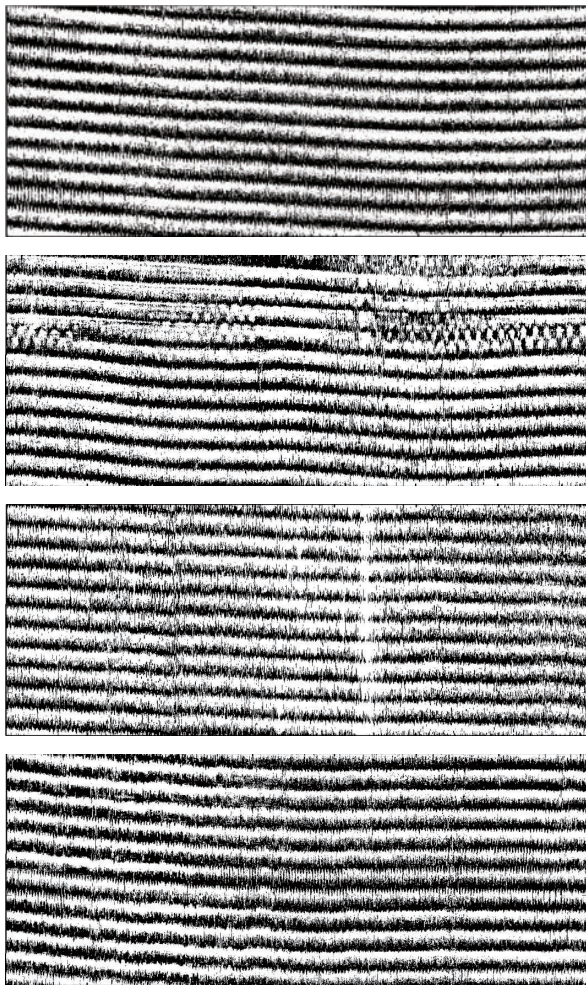


図12 4本の異なる蠟管の音溝画像

の処理の際に障害となるため、取り除く必要がある。ここでは、以下の方法で音溝画像の傾きとうねりを補正する。

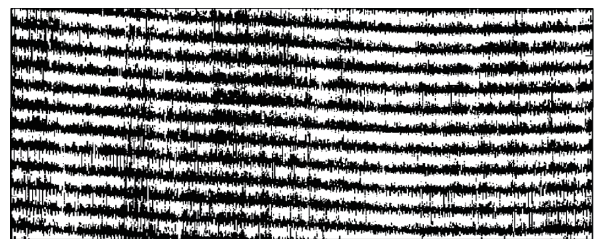
3.2.1 線形トレンドの補正

蠟管の音溝は基本的に螺旋状であるため、取得した音溝画像にはそれによる一定の傾きが現れる。蠟管の周の長さが $L \approx 170 \text{ mm}$ 、音溝のピッチが $d \approx 0.254 \text{ mm}$ であるから、この音溝の傾きは $\theta = \tan^{-1}(d/L) \approx 0.0856^\circ$ である。この傾きは基本的に線形のトレンドを与えるため、図13に示すように、画像中の音溝の左右端が一致するよう線形の補正を適用する。

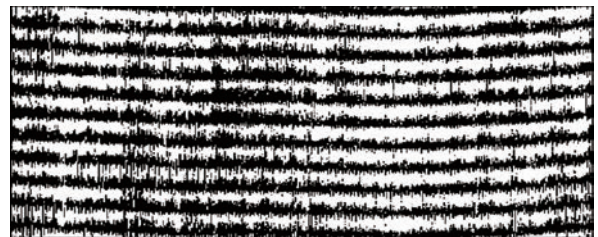
3.2.2 細線化とうねりの補正

図13(b)の画像のように、線形のトレンドの除去後には、ゆっくりとした不規則なうねりが残されている。このうねりを補正するためには、うねりの形状を表す周期関数を求める必要がある。

この周期関数は、うねりの変動のみを表し、音情報を含まないことが重要であるから、画像の細部の変化を除外するとともに、画像処理の負担を軽減するため、100列ごとに列成分の平均値を取り、それを1列に置き換えることで間引きによる列方向の再配列処理を行う。再配列後の画像をさらにメディアンフィルタ処理により滑らかにし、細線化した結果を図14に示す。この曲線がうねりの形状を表しているものと考えられることから、曲線の高さの変化をベクトルデータとして取得す



(a) 補正前

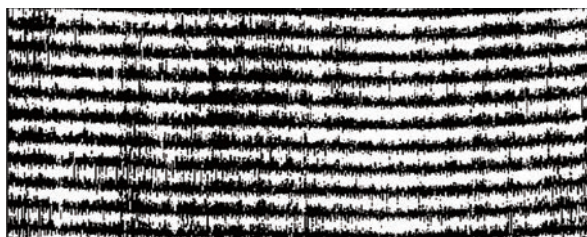


(b) 補正後

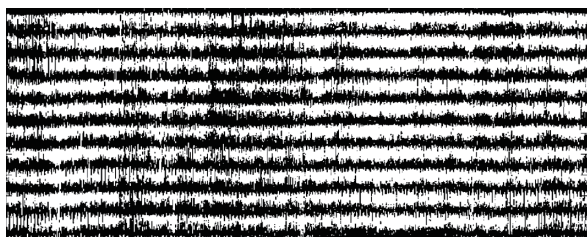
図13 線形トレンドの補正



図14 細線化処理を施した画像



(a) 補正前



(b) 補正後

図15 うねりの補正

る。

このベクトルデータをさらに平滑化し、最終的なうねりを表す近似的な周期関数を求め、それを用いて、音溝画像がうねりの無い直線的な画像になるよう補正を行った結果を図15に示す。

3.3 音溝境界部分の抽出

以上の処理を行った画像から、音溝の幅の変化を反映した境界線を取り出すため、上側が黒、下側が白となっている音溝部と非音溝部の境界線を含む部分を画像から帯状に切り出す。

前報¹¹⁾の研究では、画像に含まれる境界線の本数で画像を行方向に等分して切り出しを行っていた。これに対し、本報告では、音溝の形状の変化等に適応した、より精度の高い分割を行うことを意図して、図16に示すように、画像の行成分の和を表すベクトルデータを周期関数で近似し、この周期関数の頂点で切り出しを行う方法を用いた。図の右に示す青い曲線が、音溝の縦方向の周期的な配置を表す周期関数であり、その頂点の位置に相当する赤破線を行を下端、緑破線を行を上端として左の画像を帯状に切り離す。その結果の画像を図17に示す。

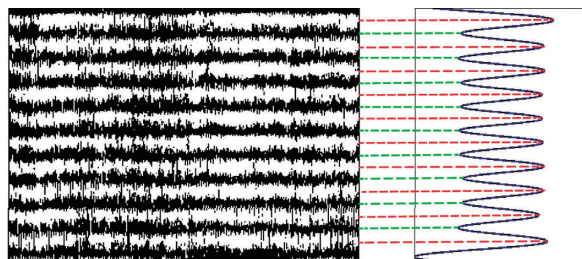


図16 音溝切り取り位置を決定する周期関数と切り取り線

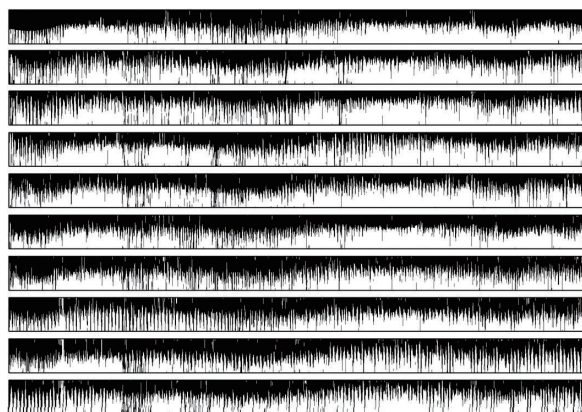


図17 音溝ごとに境界線を切り出した画像

4. 音信号の抽出と処理

図17の各画像における白黒領域の境界線の高低の変化が音信号に相当すると考えられるため、各画像に対する列成分の和として音信号を取得する。それ以降の処理は、周間の結合以外の隣接する音信号セグメントの結合処理が不要である点を除いて、前報¹¹⁾の場合とほぼ同様である。すなわち、平滑化によるノイズ低減、およびバンドパス周波数フィルタ処理による不要周波数成分の除去を行った後、音信号を wave 形式のファイルとして保存した。以上の方法により、不十分な音質ながら、1周分の動画画像から約12秒の音の抽出を行った。

5. 考察と課題

以上に述べた方法により、隣接音信号の接続処理の軽減に成功するとともに、蠟管1周分の画像から、蠟管の回転に伴ううねりのようなトレンドが存在することが明らかになった。このうねりが、従来の方法による隣接画像間の音溝接続を難しくしていた原因の1つであると推測される。本方法

では、うねりの形状を表す関数を割り出し、それによるうねりの補正処理を行うことにより、この問題に対処した。

古蠟管の多くには、蠟が変色した部分が存在するため、この部分の音溝形状の情報が欠落する場合があります。うねりの形状関数の導出が適切に行えず、さらには音情報自体が抽出できない問題が生じる。画像を局所領域に分割してしきい値処理を行う方法により改善は見られたが、まだ改良の余地はあると思われる。本研究では、当初、この部分的変色の問題を解決するために赤色 LED リングライトによる照射を導入したが、その目的は達成できていない。この問題の解決へ向けて、LED の照射方法や画像処理方法をさらに検討する必要がある。

また、音溝境界部分の切り出しにおいては、パルスステージの z 軸方向の撮影位置のずれにより上下端の音溝が正しい位置で切り取れない場合や、変色している蠟管などの 2 値化によって音溝が明確に現れない画像などでは周期関数の頂点が意図しない部分に生じる場合があるなどの問題が残っている。パルスステージの z 軸方向の移動量のずれを何らかの方法で補正することや、撮影時の照射系の改善、画像処理の工夫などにより、これらに対する対策を行っていく必要がある。

本研究では 1 画素分の移動に必要な回転パルスステージの移動量を 1 パルスとしてパルスステージの回転速度を決定したが、取得した音溝画像において結合するフレーム間で音溝位置がずれることがあったため、今後さらにカメラやパルスステージ、顕微鏡倍率の設定を精査していく必要がある。

高輝度 LED を用いた本方式では、蠟管表面の同じ部位に長時間最大出力で照射を行うと、蠟管に亀裂が入ることが数回確認された。LED 光とはいえ、蠟管は濃色であることから照射光の吸収が大きく、その熱による変形が原因であると思われる。このため、LED 光を長時間同じ部位に照射しない、LED の出力を抑えてカメラのゲインを高めに設定して撮影を行うなど注意が必要である。

6. おわりに

前論文¹¹⁾で報告した LED 光照射による音溝の陰影画像から古蠟管を再生する方法においては、各静止画像から得られる音信号セグメントを順次

接続する際の問題や負担が大きいことから、これを回避するため、部分読み出し機能を持つ CCD エリアセンサによる動画像から蠟管 1 周分の連続静止画像を合成する方法について検討した。その結果、エリアセンサのフレームレートとパルスステージの回転速度の調節により、従来のエリアセンサで取得した画像とほぼ同等の精度で蠟管一周分の連続画像を取得し、約 12 秒の音の抽出に成功した。しかし、蠟管全体の再生には至っておらず、音質も極めて不十分であることから、本報告は本方法に関する中間報告とみなすべきものである。

今後は、前節に述べた問題点への対策を中心に改良を進め、本再生法の実用性を高めてゆきたい。

本研究は、平成 24 年度北海学園大学学術研究助成、および科学研究費補助金（基盤研究（A））「蠟管を中心とした初期録音資料の音源保存・音声復元・内容分析に関する横断的研究」の支援のもとで行われた。

【参考文献】

- 1) 伊福部達, 朝倉利光, 川嶋稔夫: ピウスツキ録音蠟管レコードとその再生方法, 日本音響学会誌, **40**, 3, pp. 167-174, 1984.
- 2) T. Iwai, T. Asakura, T. Ifukube and T. Kawashima: Reproduction of sound from old wax phonograph cylinders using the laser-beam reflection method, *Appl. Opt.*, **25**, 5, pp. 597-604, 1986.
- 3) J. Uozumi and T. Asakura: Optical methods for reproducing sounds from old phonograph records, *International Trends in Optics and Photonics ICO IV* (Springer, Berlin, 1999) pp. 409-425.
- 4) 武岡成人・服部永雄・山崎芳男: レーザ光全面読み出しによる蠟管・レコードの再生, 日本音響学会誌, **60**, 10, pp.581-587, 2004.
- 5) V. Fadeyev, C. Haber and C. Maul: Reconstruction of recorded sound from an Edison cylinder using three-dimensional non-contact optical surface metrology, *LBNL report* 54927, 2004.
- 6) P. J. Boltryk, M. Hill, J. W. McBride and A. Nascè: A comparison of precision optical displacement sensors for the 3D measurement of complex surface profiles, *Sensors and Actuators A*, **142**, pp. 2-11, 2008.
- 7) P. J. Boltryk, J. W. McBride, M. Hill, A. J. Nascè and Z. Zhao: Noncontact surface metrology for preservation and sound recovery from mechanical sound recordings, *J. Audio Eng. Soc.*, **56**, 7/8, pp. 545-559, 2008.

- 8) A. Nascè, M. Hill, J. W. McBride and J. Boltryk: A quantitative analysis of signal reproduction from cylinder recordings measured via noncontact full surface mapping, *J. Acoust. Soc. Am.*, **124**, 4, pp. 2042–2052, 2008.
- 9) T. Hasegawa and T. Iwai: Reproduction of sound information from a replica of the phonograph cylinder based on low-coherence tomography, *Proc. 8th Japan-Finland Joint Symp. on Optics in Engineering (OIE'09)*, pp.155–156, 2009
- 10) 魚住 純：光と画像による古レコードの非接触再生＝蠟管・SP盤を針を使わずに再生する＝, *光アイアンズ*, **23**, 5, pp.21–25, 2012.
- 11) 魚住 純・前田尚範・吉田拓馬：古蠟管からの画像工学的音声再生, *工学研究（北海学園大学大学院工学研究科紀要）*, No.10, p.23–32, 2010.