HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ
学校法人北海学園
北海学園大学
北海商科大学

タイトル	準ラインイメージセンサによるSP 盤の非接触音再生
著者	トビアス，クーン; Tobias，Kuhn; 魚住，純; Uozumi，Jun
引用	工学研究 ： 北海学園大学大学院工学研究科紀要(17): 21-27
発行日	2017-09-30

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

研究論文

準ラインイメージセンサによるSP盤の非接触音再生

クーン　トビアス* ・ 魚　住　　純**

Noncontact sound reproduction from SP discs by means of a quasi-line image sensor

Tobias Kuhn* and Jun Uozumi**

1．はじめに

現代のレコードの主役であるCDが登場するまでには，100年以上にわたる長いアナログレコードの歴史がある．その間，多くの楽曲や音声などが，趣味や実用上の目的だけでなく，芸術的あるいは学術的な目的から録音が行われ，その多くが現存している．しかし，特に蠟管やSP盤は，脆くて壊れやすく，不適切な取り扱いや保存により，あるいは繰り返し再生することにより，深刻な損傷を受けているものも多い．また，貴重な録音がなされたレコード自体が守られるべき文化財であることから，摩耗を伴う蓄音機による再生が認められない場合もある．このため，非接触方式による音の再生法が必要とされ，多くの研究者により開発が行われてきた[1]．

SP盤を対象とする初期の試みにレーザ光の回折を利用した方法がある[2]．これは，実時間での再生が可能な方法であるが，レーザビームによる音溝のトラッキングが，特に損傷のあるレコードでは難しいこと，およびレコード表面の微細な凹凸による光散乱であるスペックルが雑音の原因となることが難点である．

これに対し，共焦点レーザ顕微鏡[3]や白色光干渉法[4]などを用いて，音溝情報の3D形状を捉えて再生を行う考え方もある．これらは，実時間では再生できないものの，レコードの音溝の3D像を捉えることにより，レコードの詳細な情報をディジタル記録できるというメリットがある．一方，一般にシステムが高価になるのが難点である．

半導体レーザを複数用いて，LP盤とSP盤を通常のレコードプレーヤーのように再生するLaser Turntableという商品が市販されている[4]．これは，優れた装置であるが，損傷のあるレコードには対応できない．また，簡便な方法として，イメージスキャナを使って音溝画像を取得し，再生する試み[6–8]もあるが，十分な成功には至っていない．

筆者らの研究グループは，これまで，ディジタルカメラを用いて撮影したSP盤の音溝の画像から音情報を抽出することを試みてきた[9]．斜め方向から光を照射して陰影をつけた音溝の顕微鏡像を，通常の矩形画像として順次撮影することにより，比較的良好な音を再生することに成功している．しかし，この方式では，隣接する画像間の音情報を高い精度で接続する処理を極めて多数回行う必要があり，その難しさが再生音質低下の一つの要因となっている．

本研究は，エリアセンサであるCCDカメラで取得する1フレームの画像を，「部分読み出し」の機能を使って幅32ピクセルの狭い領域に抑え，ラインセンサに近い「準ラインセンサ」として動作させることにより，音の接続の問題に対処するものである．この手法により，矩形画像を用いる方法で必要となる円弧状の音溝像の直線化処理も回避することができる．筆者らは，エリアセンサを準ラインセンサとして用いて蠟管[10]やSP盤[11]を再生する試みについてすでに報告している．これらの研究では，幅の狭い準ライン画像を動画と

* 北海学園大学工学部電子情報工学科（現在：株式会社インフィニットループ）
Faculty of Engineering (Electronics and Information Eng.), Hokkai-Gakuen University (Present: infinite loop Co. Ltd.)
** 北海学園大学大学院工学研究科電子情報生命工学専攻
Graduate School of Engineering (Electronics, Information, and Life Science Eng.), Hokkai-Gakuen University

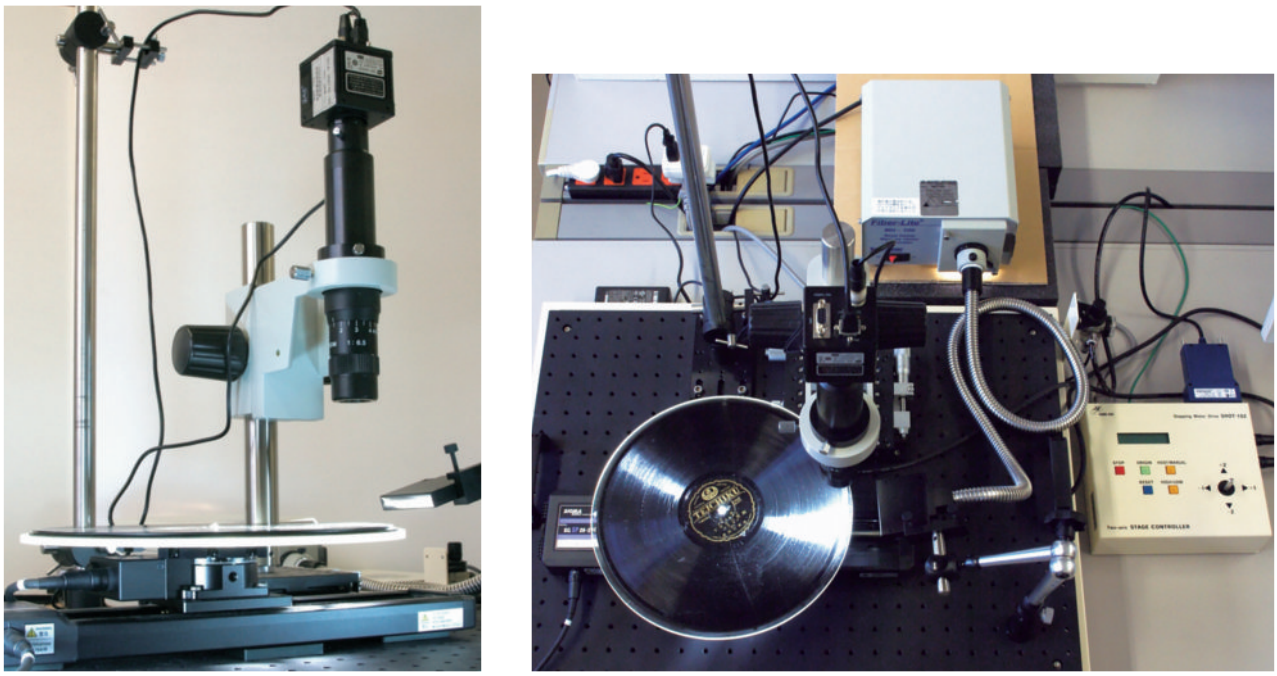


図 1　実験装置の構成

して記録し，その連続するフレームを順次接続する方法を用いた．これに対し，本報告では，一連の静止画像として撮像する方法を新たに導入している．

この方法では，レコード全面に渡る音溝データを幅の狭い膨大な数の画像として記録するため，一枚のレコードのディジタル画像化を自動的に行い，そのデータを管理するソフトウェア SP Record Analyzer を開発した．また，SP Record Analyzer が生成した画像データを対象とする一連の画像処理アルゴリズムを新たに作成した．このアルゴリズムを実行することにより，コンピュータで再生できる wav 形式の音ファイルが生成される．この画像処理アルゴリズムは，ひび，擦り傷，欠損などの損傷のあるレコードの音溝画像にも，一定程度対応できる機能を有しており，触針式では再生できないレコードの再生を可能としたことも本研究の特徴である．

2．実験装置

実験装置の写真を図 1 に示す．X 軸パルスステージ（シグマ光機，SGSP26-200(X)）の上に回転パルスステージ（シグマ光機，SGSP-60YAW-W-0B）を設置し，その上に，ゴム，アクリル，ゴムの各円板を順に置き，その上に SP 盤を置く．アクリル板は，径の小さい回転ステージ上にレコードを水平に置く面積を確保するためであり，2 枚のゴム円板は，回転ステージの加減速時にレコードの回転ずれが生じるのを防ぐためである．これらの装置全体は，空気ばねによる卓上防振台（シグマ光機，DT-A）上に設置したブレッドボードの上に固定することで周囲の振動から遮断されている．

2 つのパルスステージは，2 軸パルスステージコントローラ（シグマ光機，SHOT-102）により制御されており，このコントローラは，GPIB インタフェース（National Instruments，GPIB-USB-HS）を介して PC の USB 端子に接続されている．使用したパルスステージの回転角および移動距離に関する仕様を表 1 に示す．

メタルハライドランプ光源（Dolan-Jenner，Fiber-Lite MH-100）から光ファイバ束で導光した光をライン型の矩形出射口を持つ出射ヘッド（林時計工業，LGC1-8L1000-LS50X1.0）を用いてレコード表面の音溝に照射し，単眼ズーム式顕微鏡（シグマ光機，MZX-2）を通して CCD カメラ（JAI，BB-500GE）で撮影する．顕微鏡とカメ

表 1　1 パルス当たりの回転角（回転ステージ）および移動距離（X 軸ステージ）

回転角 （回転ステージ）	移動距離 （X 軸ステージ）
0.0025°	0.002 mm

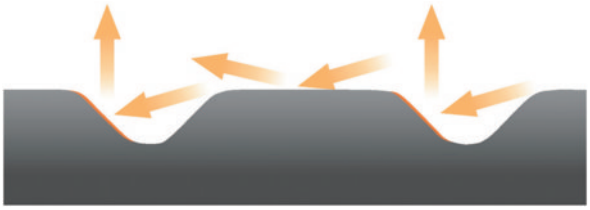


図 2　斜め光照射における反射の方向

ラは実験装置上で固定されており，２つのパルスステージによりレコードを精密に回転および平行移動させることにより，レコードの上の任意の場所を撮影することができる．

CCD カメラは，全画素を一度に読み出すのが原理上の基本的動作であるが，このカメラは variable partial scan の機能を有しており，全画素数 2456（h）×2058（v）の範囲内で ROI（region of interest）を設定することにより，ROI の画素データだけを部分読み出すことが可能である．本研究では，ROI を 2456（h）×32（v）に設定してこの機能を使い，ラインセンサに近い動作を実現している．

32 画素幅の準ライン画像から連続的な画像データを生成するため，SP 盤を一定の回転速度で回転させながら順次撮像を行う．そのためには，ROI，撮像トリガーモード，ゲイン，露出などのカメラに関するパラメータ，およびパルスステージを駆動する GPIB に関するパラメータを PC から設定する必要がある．これらの設定を容易にするため，グラフィカルユーザインタフェース（GUI）のプログラムを C＃により作成した．この GUI は，プログラム SP Record Analyzer に組み込まれており，後に詳述する．

3．音溝形状と光照射

顕微鏡を通して撮影した光学像から SP 盤の音溝に記録されたデータを復元するためには，撮像された画像に音溝の形状に関する情報が明確に現れている必要がある．このため，図 2 に示すように，レコード面に対して浅い角度で光を照射し，音溝の片方の壁が明るく帯状に写るようにすることが一つの有力な方法であることがこれまでの研究で明らかとなっている[9,11]．照射角度の調節により，SP 盤から垂直方向に反射する光の中で，音溝の壁部分からの寄与がほぼ最大となるようにすることが可能であり，音溝以外の平面領域からの

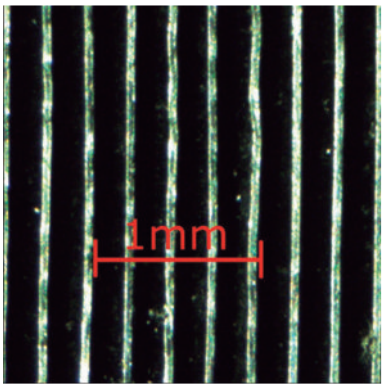


図 3　斜め光照射による SP 盤の画像

反射光は，顕微鏡の対物レンズにはほとんど入射しない．この光照射法により撮像された画像の例を，物理的なスケールとともに図 3 に示す．

本研究では，メタルハライド光源からの光をレコードに照射する際，従来用いていた円形の照射ヘッドによる画像では，音溝が大きく振動する部分において明るい帯状の領域に強度の大きな変動が生じ，画像処理段階で処理に支障を来す可能性が考えられため，横長のライン型矩形ヘッドを用いることによりこの問題を回避した．

4．部分読み出しによる画像合成法

本研究では，カメラの部分読み出し機能を用いて，ライン画像に準ずる 32 画素幅の画像を取得する．本節では，この方法を用いることの利点について述べる．

画像処理技術を用いて音溝の画像から音データを抽出するためには，画像に音溝データが途切れなく適切に連続して記録され，かつ余分な重複がないものでなければならない．しかし，回転する円盤の表面を短形の画像領域を持つカメラで撮影する場合，この連続性と重複性に関していくつかの問題が生じる．

4.1　領域重複の問題

図 4 において，長方形 ABCD をカメラの撮像範囲，S をレコードの外縁，M をレコードの中心，α を隣接して撮像する画像間のレコードの回転角とする．レコードを回転させながらこのような画像を撮影すると，図 5 に示すように，隣接する撮像領域間に重複部分が生じる．この図で，長方形 Q_1, Q_2, Q_3 が連続的に取得される撮像領域である．

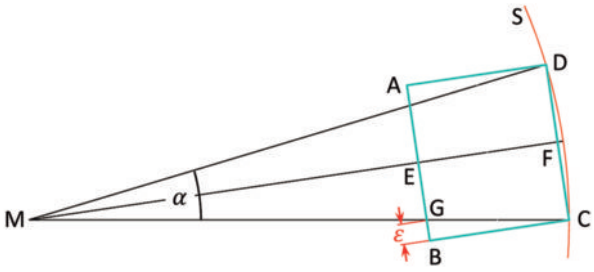


図 4　撮像の幾何学的配置の模式図

すなわち，撮像範囲が矩形であるため，音溝の像をもれなく取得するためには画像に重複部分が生じ，それを回避しようとすると欠落部分が生じる．これが，領域重複の問題である．カメラの撮像領域全体を利用する従来の方法では，隣接する画像間の対応する音溝を適切に接続するため，意図的に一定程度の重複領域を設けて撮影を行った[9]．本研究では，この音溝接続を回避することを目的としており，情報の欠落を回避しつつ，重複領域も最小限に抑える必要がある．

本研究では，図 4 に示す撮像範囲の幅 $\overline{\mathrm{AB}}=\overline{\mathrm{CD}}$ を小さくし，重複部分の影響を無視できる程度に抑えることで，この問題に対処する．そのため，画像の幅が画像の重複の大きさに及ぼす影響を調べる．図 5 から分かるように，図 4 中の ϵ が一画像の片方の重複部分であり，隣接する画像間のピクセルの重複部分は約 2ϵ となる．

△MCF と △MGE は相似であり，その相似比は $r=\overline{\mathrm{ME}}/\overline{\mathrm{MF}}$ であるから，

$$\epsilon=\overline{\mathrm{BG}}=\overline{\mathrm{BE}}\left(1-\frac{\overline{\mathrm{ME}}}{\overline{\mathrm{MF}}}\right)=\overline{\mathrm{BE}}(1-r) \tag{1}$$

が得られる．プログラム SP Record Analyzer では，パルスステージの動作に関するキャリブレーション機能を設けており，変数 $\overline{\mathrm{BE}}$，$\overline{\mathrm{ME}}$，および $\overline{\mathrm{MF}}$ を常に把握できることから，レコードの任意の位置において ϵ を求めることができる．

ϵ の具体的値を調べるため，レコードの最外周と最内周の 2 つの場合について，カメラの最大画素数で撮像を行った場合を考える．まず，画像の 1 画素に対応する物理的距離を求める．実験で設定した顕微鏡の設置位置と倍率においてプログラムのキャリブレーション機能を適用することにより，1 画素当たりの物理的距離 γ とその逆数は，

$$\gamma=0.002366\,[\mathrm{mm/pixel}], \tag{2}$$

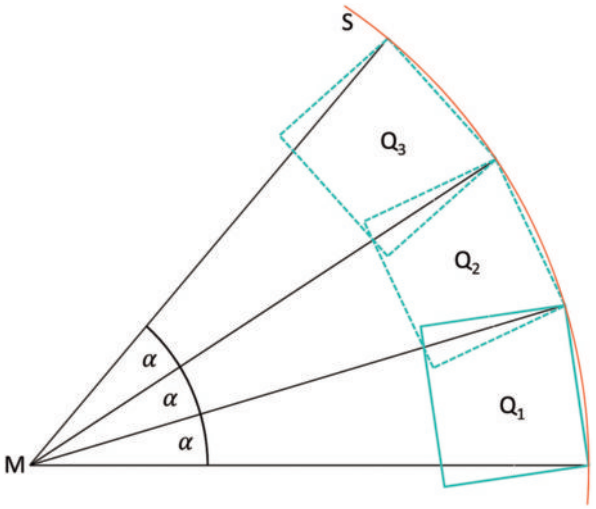


図 5　矩形画像の連続撮像による重複領域の発生

$$\gamma^{-1}=422.65\,[\mathrm{pixel/mm}] \tag{3}$$

と求められる．したがって，最大画素数で撮像した画像の高さ $\overline{\mathrm{EF}}$ と幅 $\overline{\mathrm{AB}}$ は，物理的サイズで，

$$\overline{\mathrm{EF}}=2456\gamma=5.811\,[\mathrm{mm}], \tag{4}$$

$$\overline{\mathrm{AB}}=2\overline{\mathrm{BE}}=2058\gamma=4.869\,[\mathrm{mm}] \tag{5}$$

となり，最外周を撮像するときの距離 $\overline{\mathrm{ME}}$ は

$$\overline{\mathrm{ME}}=120.0\,[\mathrm{mm}] \tag{6}$$

となる．$\overline{\mathrm{MF}}=\overline{\mathrm{ME}}+\overline{\mathrm{EF}}$ を考慮に入れて式(5)と(6)を式(1)に代入し，式(3)の単位換算定数 γ^{-1} をかけることにより，最外周撮影時の ϵ の値 ϵ_1 として

$$\epsilon_1=0.1125\,[\mathrm{mm}]=47.54\,[\mathrm{pixel}] \tag{7}$$

を得る．

同様に最内周での値 ϵ_2 を $\overline{\mathrm{ME}}=50.0\,[\mathrm{mm}]$ として求めると

$$\epsilon_2=0.2534\,[\mathrm{mm}]=107.1\,[\mathrm{pixel}] \tag{8}$$

となる．したがって，隣接画像の重複距離は，最悪の条件下で，

$$2\epsilon_2=0.5068\,[\mathrm{mm}]=214.2\,[\mathrm{pixel}] \tag{9}$$

となる．これは，明らかに無視できない重複距離である．

一方，画像の横幅を 32 ピクセルに指定した場合の最悪条件下での重複距離 ϵ_3 は，

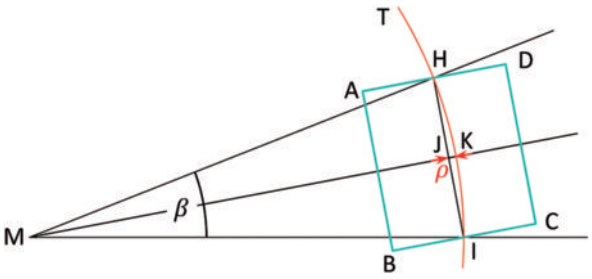


図6　音溝湾曲を数値化した変数 ρ

$$\overline{\mathrm{AB}}=2\overline{\mathrm{BE}}=0.07571[\mathrm{mm}], \tag{10}$$

$$2\epsilon_3=0.007882[\mathrm{mm}]=3.331[\mathrm{pixel}] \tag{11}$$

となる．顕微鏡による拡大率が大きい撮像条件から，幅3ピクセルの間に音溝に大きな変化は生じないと考えられ，撮影された画像においてもそのことが視覚的に確認される．したがって，この程度の重複は無視できる判断される．

4.2　音溝湾曲の問題

SP盤に刻まれた音溝はらせん状にレコードの中心へと近づいていくことから，レコード上の任意の位置の画像において，音溝は円弧状の湾曲を伴った形状として記録される．これが音溝湾曲の問題である．複数の連続的に撮像された画像を順次接続すると，音溝の湾曲成分が周期的な上下振動として残ることになるため，湾曲の影響を最小限に抑える必要がある．

図6は，画像の中央に音溝Tがある状況を表している．音溝Tが線分AD，BCと交わる点をそれぞれH，Iとし，∠HMIをβとする．また，線分HIの中点をJとし，MJの延長線が音溝と交わる点をKとする．これにより，音溝の湾曲の大きさを表す量$\rho=\overline{\mathrm{JK}}$を定義できる．また，$\overline{\mathrm{IJ}}=\overline{\mathrm{JH}}$であり，∠MJIはほぼ直角である．このとき，

$$\overline{\mathrm{JI}}=\frac{\overline{\mathrm{AB}}}{2}, \tag{12}$$

$$\frac{\beta}{2}=\sin^{-1}\left(\frac{\overline{\mathrm{JI}}}{\overline{\mathrm{MI}}}\right)=\sin^{-1}\left(\frac{\overline{\mathrm{JI}}}{\overline{\mathrm{MK}}}\right), \tag{13}$$

$$\overline{\mathrm{MJ}}=\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\overline{\mathrm{MI}}, \tag{14}$$

$$\rho=\overline{\mathrm{MK}}-\overline{\mathrm{MJ}} \tag{15}$$

であるから，これらの式より

$$\rho=\overline{\mathrm{MK}}\left\{1-\cos\left[\sin^{-1}\left(\frac{\overline{\mathrm{AB}}}{2\overline{\mathrm{MK}}}\right)\right]\right\} \tag{16}$$

を得る．

重複問題の場合と同様に，レコードの最外周と最内周でρを求める．まず，画像の横幅を32ピクセルと設定し，実際の画像幅wを

$$w=\overline{\mathrm{AB}}=0.07571[\mathrm{mm}] \tag{17}$$

と置く．レコードの外周では

$$\overline{\mathrm{MK}}=120.0[\mathrm{mm}] \tag{18}$$

であり，このときの湾曲の大きさρをρ_1とすると，

$$\rho_1=0.005971[\mu\mathrm{m}]=0.002524[\mathrm{pixel}] \tag{19}$$

と，極めて小さな値となる．同様に，レコードの内周では

$$\overline{\mathrm{MK}}=50.0[\mathrm{mm}] \tag{20}$$

であるので，このときの湾曲の大きさρ_2は

$$\rho_2=0.01433[\mu\mathrm{m}]=0.06057[\mathrm{pixel}] \tag{21}$$

となり，横幅32ピクセルで画像撮像を行った場合は，湾曲の問題による影響は極めて小さく，明らかに無視できることがわかる．

一方，比較のため，悪条件である画像幅2058ピクセルによるレコードの内側での撮像を考えると，式(5)よりこの幅は$\overline{\mathrm{AB}}=4.869[\mathrm{mm}]$であるから，このときの湾曲の大きさ$\rho_3$は，

$$\rho_3=59.30[\mu\mathrm{m}]=25.06[\mathrm{pixel}] \tag{22}$$

と，無視できない値であることが確認できる．

4.3　うねりの問題

音溝の湾曲が無視できる設定で撮像を行った場合においても，連続して撮影された一連の画像を接続した得られた画像には，レコードの回転と同じ周期を持つ音溝の振動，すなわちうねりが現れる場合がある[11]．

このうねりの原因は，レコードに開けられた穴の偏心である．これは，レコードの中心孔が，らせん状に刻まれた音溝の中心に一致していないことに起因しており，その発生の有無や程度はレ

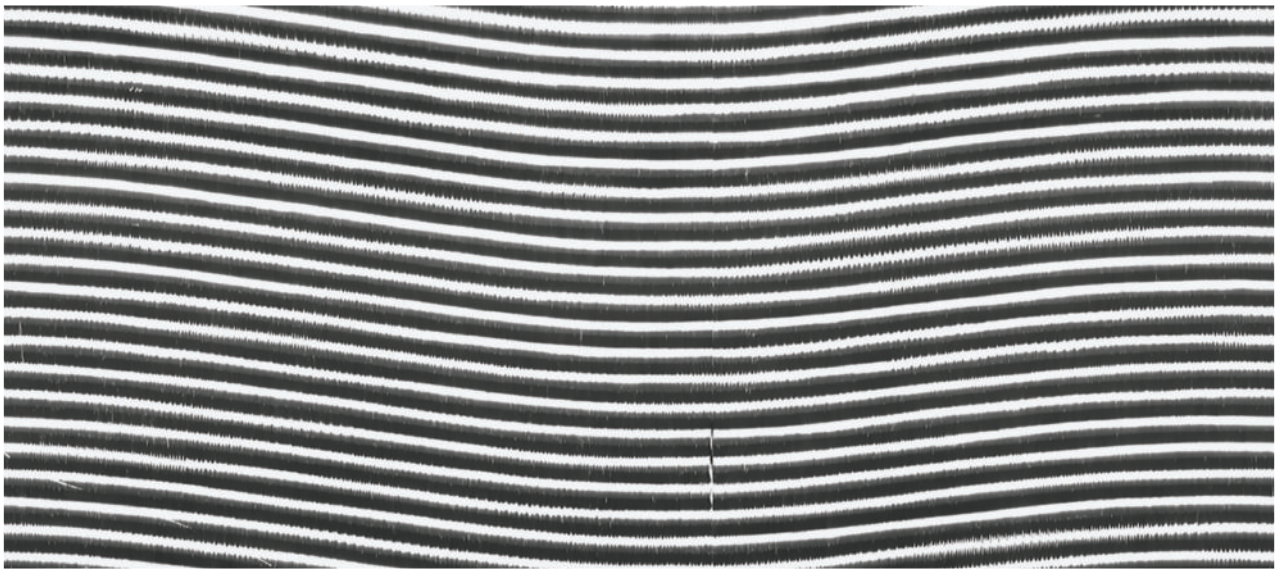


図 7　レコード 1 周分の画像．横幅は表示の都合上圧縮してある．

コード毎に異なる．

図 7 に，画像接続により合成されたレコード 1 周分の画像を示す．ただし，ページ内に収まるように，横幅は圧縮してある．この画像から，音溝がゆっくりと上下に 1 周期だけ振動していることが分かる．この振動は明らかに音情報ではなく，レコードの回転が偏心運動しているために生じている．類似の現象は，蠟管からの音溝画像にも見られ[10]，これまでは，うねりを表す周期関数を求めて，その成分を差し引くことによりうねりを除去する画像処理を行ってきた．しかし，本研究では，このうねりの影響を画像処理ではなく，その後の信号処理において抑制する．

4.4　部分読み出しによる画像合成の利点

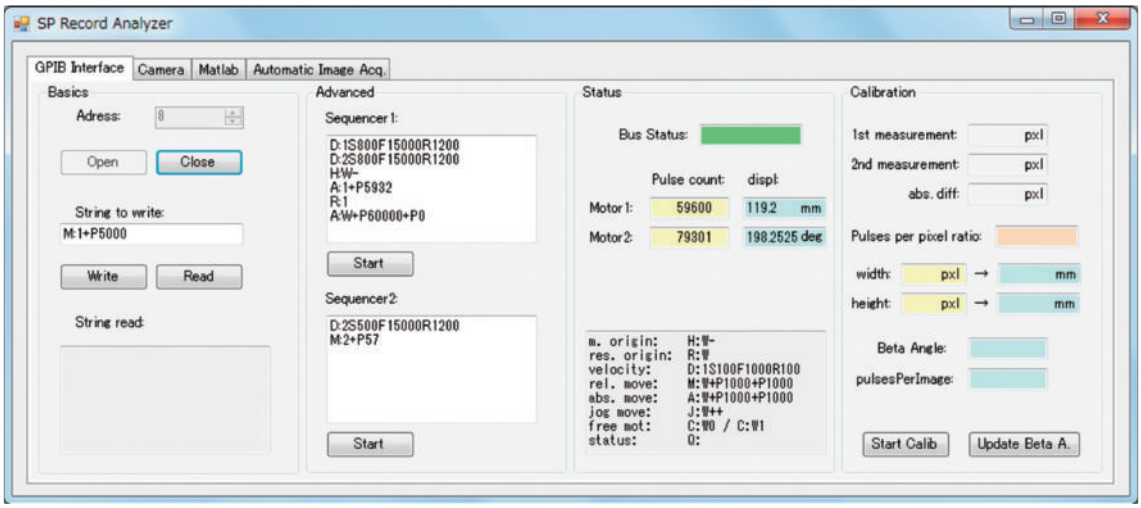
本節では，これまで，らせん状の音溝を一連の矩形画像として撮影し，それを接続して連続的な音溝の画像を合成する場合に生じる問題とその解決法について，幾何学的に考察し，さらに，カメラの部分読み出し機能を用いて幅 32 ピクセルの準ライン画像を取得し，それを順次接続することにより，重複領域の問題と音溝湾曲の問題を実質的に回避することができることを定量的に明らかにした．これにより，従来円盤レコードの再生に用いてきたエリアセンサの全画素の画像を用いる方法に対する改善点が明確に示された．

部分読み出しを使う方法では，撮影する画像の枚数が極めて多くなり，それに伴って画像の結合処理も増加するが，これは大きな問題点とはならない．全画素の画像を用いる方法では，画像内の音溝の位置によって隣接画像との重複の長さが異なるため，画像間の音溝の接続が重要な処理事項となる．このため，画像間の重複領域を一定程度大きく確保して撮影を行い，同じ特徴を持つ領域を検索することにより，隣接音溝間の一致点を求める方法を用いる[9]．これに対し，本方法では，隣接する画像間の撮影のタイミングを適切に行うことにより重複問題が実質的に回避可能であり，撮影された画像を単に並べるように結合させるだけでよい．このため，画像数が多いことは大きな負担とはならない．

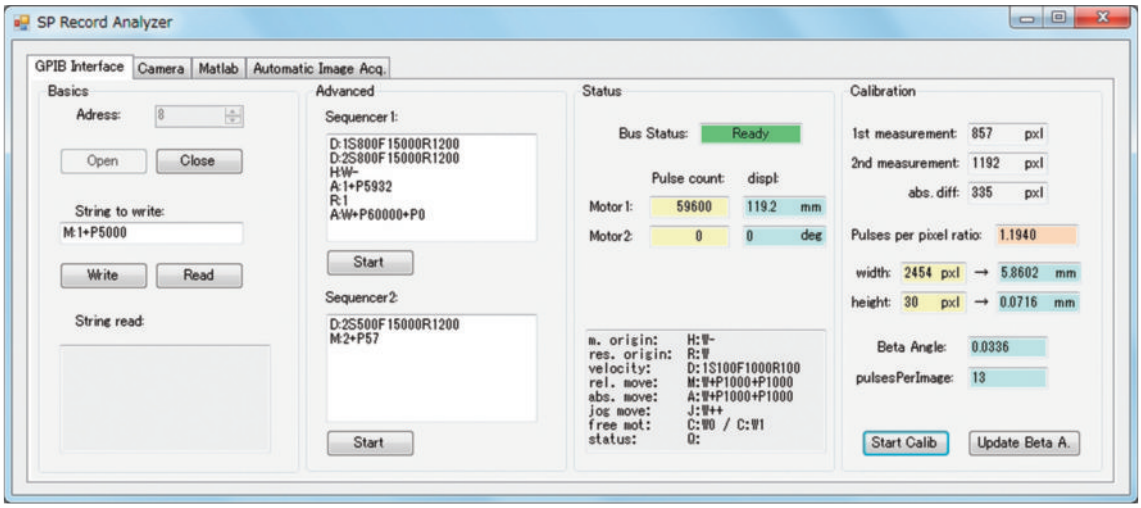
したがって，本方法による音再生は，レコードの回転と画像撮影の時間的精度，すなわちタイミングの確保が重要な点となる．

5．画像データ生成

カメラからの準ライン画像を連続的に取得する方法には，ビデオ（動画像）として取得する方法と静止画像として取得する方法の 2 つがある．筆者らの研究グループによるこれまでの研究では前者の方法を使い，動画の保存時に圧縮をかけなければ，Matlab の関数を用いて動画像を個々のフレームに分解し，それらを接続することができることを示してきた[10,11]．この方法の利点は，撮影のフレームレートを一度設定した後は，カメラが高精度なタイミングで画像を取得し動画ファイル



（a）　GPIB セットアップ後の GPIB Interface タブ



（b）　キャリブレーション後の GPIB Interface タブ

図 8　SP Record Analyzer の GUI

に格納することである．したがって，フレームレートとレコードの回転速度を正しく設定すれば，一連のフレーム画像から良質な連続画像データが得られる．しかし，その設定に誤差がある場合，それが微小であっても，連続的な動画撮影によってそれが累積されること，また，レコードの回転速度が一定になってから撮影を開始する必要があることから，動画の最初と最後のフレームの音溝の位置を正確に制御するのが難しいことが欠点である．

一方，動画を分解して利用するのであれば，最初から一連の静止画として取得し，ファイルに保存する後者も自然な方法であり，画像取得のタイミングを何らかの基準に基づいて高精度に行うことができれば，各静止画の音溝の位置はプログラムから把握することが可能であると考えられる．したがって，この方法の成否は，レコードの回転角度の把握と，カメラへの撮影命令発行の正確さにかかっている．本研究では，この後者の方法を用い，回転ステージの回転角度をマイクロ秒単位で取得し，それに基づいて撮像命令発行のタイミングを決めることを試みた．

5.1　SP Record Analyzer

本研究では，PC とカメラおよびパルスステージとの通信を制御し，大量の画像データを管理するためのプログラム SP Record Analyzer（ファイル名は SPRecAnalyzer）を開発した．このプログラムは C＃により作成し，カメラの制御には，その製造会社である JAI が提供しているカメラ制御用 DLL ライブラリファイルを利用した．

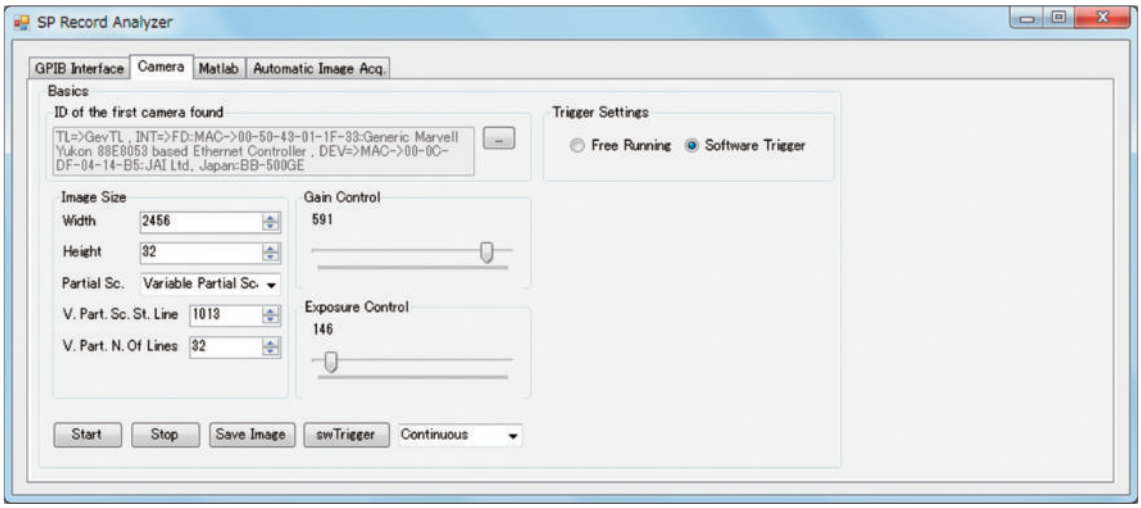


図 9　カメラの設定を終えた後の Camera タブ

パルスステージとの通信には，同様に National Instruments が提供している GPIB コントローラ専用の DLL ファイルを使用した．

図 8 に SP Record Analyzer の GUI を示す．SP Record Analyzer の目的は画像データの取得であり，カメラと GPIB のパラメータ設定を行い，パルスステージによる物理的な移動と画像上の移動画素値の関係を求めるキャリブレーションを行った後に，Automatic Image Acq. タブにおいて「Start」ボタンを押すことにより，自動的にレコードの全面画像データ取得プログラムが開始できる．

図 8 から分かるように，SP Record Analyzer の GUI には 4 つのタブが設定してあり．そのうち，GPIB 設定，パルスステージ状況表示，およびキャリブレーショを行う GPIB Interface タブ，カメラ設定を行う Camera タブ，および自動画像取得（automatic image acquisition）を行う Automatic Image Acq. タブの 3 つが重要である．Matlab タブはデバグ目的で作成したもので，画像データ生成や各装置のセットアップには不要である．

5.1.1　GPIB Interface タブ

このタブの一番左に「Basics」のセクションがあり，そこで GPIB をセットアップできる．パルスステージは標準でアドレスが 8 になっており，変更する必要はない．「Open」ボタンで通信を開始した後，「Write」と「Read」のボタンでバスへの書き込みによるステージコントローラへの命令の発行とバスバッファからの読出しができる．

「Advanced」セクションではパルスステージに対する命令を複数行記述し「Start」ボタンを押すことで順次それを実行できる．「Status」セクションはバスの状況についての情報が表示される．「Calibration」セクションはキャリブレーション機能を実行し，その結果を確認するために設置した．なお，キャリブレーション機能を実行するためには GPIB とカメラがセットアップ済みでなければならない．GPIB をセットアップした後，およびキャリブレーションを行なった後の GUI を，それぞれ図 8(a) および (b) に示す．

5.1.2　Camera タブ

Camera タブでは，カメラ設定を行い，画像データを取得することができる．本研究ではカメラの Software Trigger 機能を利用して撮影毎にトリガを送ることで画像データの取得タイミングを決める．「Gain Control」スライダではカメラのアナログ利得を設定可能であり，「Exposure Control」スライダではカメラの露光時間を設定できる．本研究の撮像設定では，レコードを一定速度で回転させながら撮像を行うため，露光時間の値を大きく設定すると画像データに回転によるぶれが生じる．このため，露光時間は比較的小さい値を設定する．カメラの設定を終えた後の Camera タブを図 9 に示す．

5.1.3　Automatic Image Acq. タブ

Automatic Image Acq. タブでは自動撮像機能に関する操作ができる．5.2 節で述べる物理的距離検出アルゴリズムで，カメラに接続した顕微鏡の拡大率に関わらず正確に 1 ピクセルの物理的な

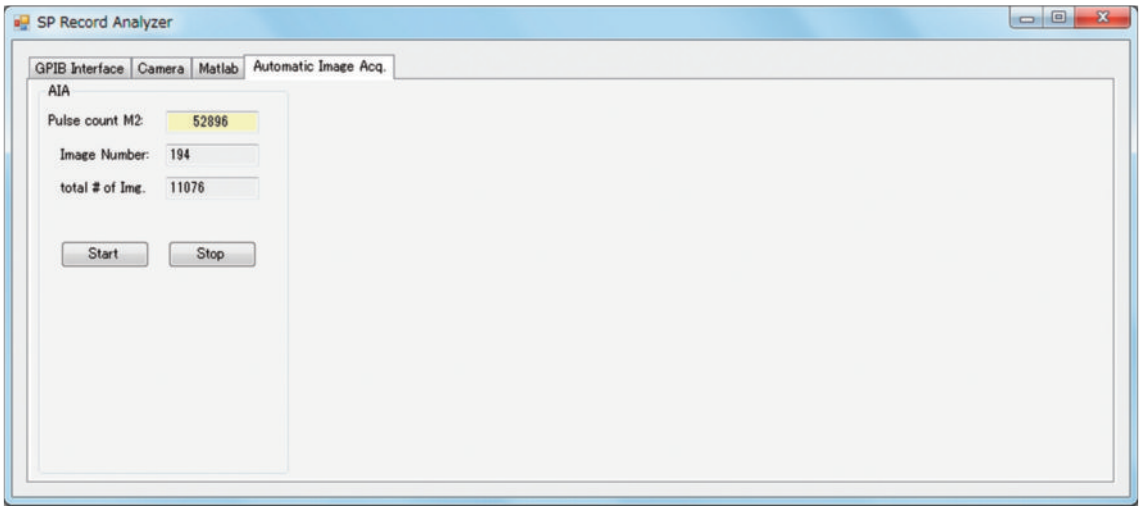


図 10　自動撮像中の Automatic Image Acq. タブ

大きさが計算できるため，顕微鏡の拡大率を変えても，自動撮像機能で取得する画像データの連続性が保証される．

また，パルス対ピクセルの割合が計算で求まるため，レコードを一周した後に正確に 1500 ピクセルだけ，レコードの中心へと平行移動することができる．平行移動後に撮像する画像データは前の周のデータと比べて 1500 ピクセルの差があることが保証されるため，音検出アルゴリズム SigExBot は，例えば，第 1 周（Round1）から第 2 周（Round2）のデータに移行するときに，現在追跡中の音溝を新しい画像データの中で容易に特定することができる．

取得される画像データは，プログラムで設定した特定のフォルダ内に Round1, Round2, Round3, ... という周別のフォルダに格納される．このデータは次節の画像処理アルゴリズムの対象となる．自動撮像実行中の Automatic Image Acq. タブを図 10 に示す．

5.2　物理的距離検出

カメラに撮像命令を送信する際，次の画像の撮影前に X 軸パルスステージに送るべきパルス数を決めるには，X 軸パルスステージが 1 パルス当たり何画素進むかという情報が必要である．このため，物理的距離検出は，本研究において特に重要な機能である．SP Record Analyzer では，この「1 画素あたりのパルス数」を Pulses per pixel ratio と呼ぶ．

物理的距離検出は，以下のアルゴリズムにより動作する．

1．レコードの外側の音溝がカメラ撮像範囲の半分くらいに入る位置まで移動
2．画像を 1 枚撮影
3．Matlab で画像処理を行い，レコードの外側に最も番近い音溝の位置情報を検出
4．平行移動パルスステージを 400 パルスだけレコード中心に向かって移動
5．画像を 1 枚撮影
6．Matlab で画像処理を行い，レコードの外側に最も番近い音溝の位置情報を検出
7．2 回行った画像処理の位置情報を比較し，平行移動後，音溝が何ピクセル移動したかを計算

400 パルス分移動した際に，表 1 の定数を利用することで何 mm 平行移動したかが容易に計算できる．この結果を用いて，mm/pixel の値，すなわち 1 ピクセルの物理的サイズが計算できる．これを 1 画像当たりの回転パルス数の計算にも利用する．

5.3　角度 β の算出

角度 β は，図 6 に示すように，画像 1 枚当たりに回転すべき角度（単位は度）であり，それをパルス数に換算した値が pulsesPerImage である．SP 盤の回転速度を一定に保ちながらレコードの外側から内側へと移動すると，レコードの表面速度（線速度）が低下する．したがって，レコードの内側に近づくほど，一定幅の画像を撮像する際

の「pulsesPerImage」の値が大きくなると考えられる．

図 6 において，カメラの撮像範囲を長方形 ABCD，$\overline{MJ}$ をレコードの中心からカメラ撮像領域中心点までの距離とする．また，$\overline{HI}$ を撮影画像幅とする．△MJI が直角三角形であることから，角度βは，式(14)，あるいは

$$\beta=2\tan^{-1}\left(\frac{\overline{JI}}{\overline{MJ}}\right) \tag{23}$$

で与えられる．物理的距離検出の物理的ピクセルサイズと表 1 に示す定数を利用し，1 画像当たりの回転パルス数 pulsesPerImage を計算できる．このようにして算出された角度βと pulsesPerImage は，次に述べるキャリブレーション機能によって，図 8(b)に示した GPIB Interface タブの「Calibration」のセクションに表示される．

5.4　キャリブレーション機能

キャリブレーション機能は，図 8 の GPIB Interface タブに配置された「Start Calib」ボタンで実行できる．自動撮像機能を使う前にこの機能を実行する必要がある．キャリブレーション機能の処理内容を以下に示す．

1．パルスコントローラに機械原点復帰命令を送信
2．パルスコントローラの論理原点をレコードの中心に設定
3．物理的距離検出を実行
4．角度βの算出を実行

なお，パルスコントローラの論理原点設定においては，どのようなレコードを使用しても，その中心の位置が変わらないことから，機械原点から一定のパルス数だけ進むことにより，レコードの中心をカメラの中心に合わせることができる．

6．画像処理

本研究の画像処理は，SpliceBot，SigExBot および Needle の 3 つのプログラムが連携して動作するように開発した．これらは，Matlab のクラスファイルとして作成されているが，いずれも Matlab の基本機能のみを用いており，Toolbox は使用していない．

図 11　Round** の内容

SP Record Analyzer を利用して取得した画像データは，数多くの 2456×32 ピクセルの画像ファイルから構成される．原理的には，この画像データを個別にメモリに読み込んで処理を行うことも可能であるが，極めて幅の狭い画像を順次結合してより幅の広い画像に合成した後に処理を行う方が，画像処理の開発やその結果の確認が行いやすく，効率が良い．

したがって，これらの画像データを数十枚結合して幅の広い画像データを作成するのが SpliceBot アルゴリズムの役割である．SigExBot は，SpliceBot が作成した画像データを元に音溝に沿って信号データを抽出する．そして，最後に，Needle が SigExBot の信号データに信号処理を施して音信号の形への変形を行う．

以下，各プログラムの動作について簡単に説明する．

6.1　SpliceBot

6.1.1　フォルダ構成

SpliceBot が正常に作動するためには，プログラムファイル SpliceBot.m と同じフォルダに Round** フォルダを置く必要がある．ただし，** は 1 から始まる画像データ生成の際の周番号であり，例えば，Round1 フォルダにはレコードの最外周を一周したときの画像データを格納する．この一連のフォルダは，5.1.3 節で述べた SP Record Analyzer の Automatic Image Acq. タブの操作により自動生成される．各 Round** フォルダの中には，図 11 に示す 4 つのフォルダが置かれる．

BWImages フォルダには 2 値化された画像データが格納される．SpliceBot のメンバである ConvertToBWImages メソッドがこのデータを作成する．2 値画像は，画像データ確認の一つの手段であり，次段階の画像処理アルゴリズムは使用しないため，処理時間短縮を目指す場合には，このメソッドの動作を止めて構わない．

rawdata フォルダには画像データ生成で作成さ

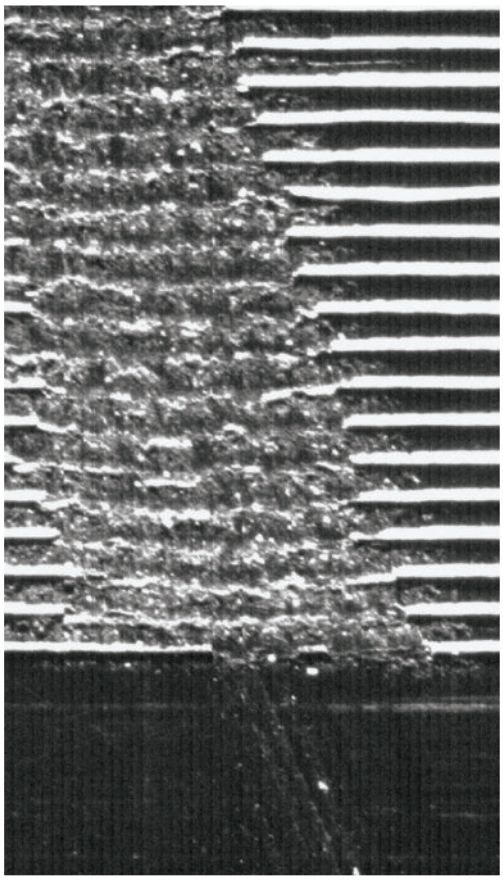


図12　pliceBotが作成した合成画像（レコードの表面が削れた箇所）

れる画像を格納する．画像のファイル名はAIA**.bmpであり，**は1から始まる一連の番号である．SpliceBotはこのフォルダの画像データを処理対象にする．splicedImagesフォルダにはSpliceBotが画像合成処理を行った結果の画像データが格納される．画像合成によって作成された画像の例を図12に示す．markedImagesフォルダには，SigExBotが追跡マークをプロットした後の画像データが入る．

図12の画像には，下端に音溝が刻まれていないレコードの外縁部が写っており，そこには周期的な縦筋が薄く確認できる．この周期が，合成前の画像の32ピクセル幅に相当している．

6.1.2　処理内容

上述のように，SpliceBotはクラスとして定義されているため，クラスをインスタンス化することにより，動作を開始する．すなわち，Matlab環境内でパスをSpliceBot.mが格納されているフォルダに設定した後，Command Windowに「spliceBot = SpliceBot();」を入力することにより，SpliceBotのオブジェクトが生成される．また，これにより，クラスファイルと同じフォルダにあるRound**フォルダが全てオブジェクト内に登録される．

処理を実行するには「spliceBot.Start();」を入力する．これにより，全ての登録されているRound**フォルダに対し，概略以下の処理が行われる．

1．rawdataフォルダ内のbmpファイル数を検出
2．rawdataフォルダ内の画像データを50枚ずつ1つのbmpファイルに合成し，splicedImagesフォルダに格納
3．合成された画像をグレースケールに変換
4．合成された画像を2値化し，BWImagesフォルダに格納

6.2　SigExBot

SigExBotは，Signal Extraction Botの略称として名付けた音信号検出アルゴリズムで，本研究の画像処理の中で中心的な役割を果たしている．SpliceBotが作成した合成画像を対象として処理を行い，SpliceBotと同じフォルダ構造に基づいて動作する．

6.2.1　処理内容

はじめに，Command Windowに「sigExBot = SigExBot();」と入力してクラスをインスタンス化し，sigExBotオブジェクトを生成する．これにより，以下の処理が行われる．

1．様々なパラメータの初期化
2．Round**フォルダの個数を検出し，処理対象フォルダをRound1に設定
3．Round1フォルダ内のbmpファイル数を検出
4．Round1フォルダの検出された画像データを全て主記憶に転送

さらに，「sigExBot.Start();」と入力することにより，以下の処理が実行される．ただし，信号修正機能については後に説明するため，ここでは省略する．

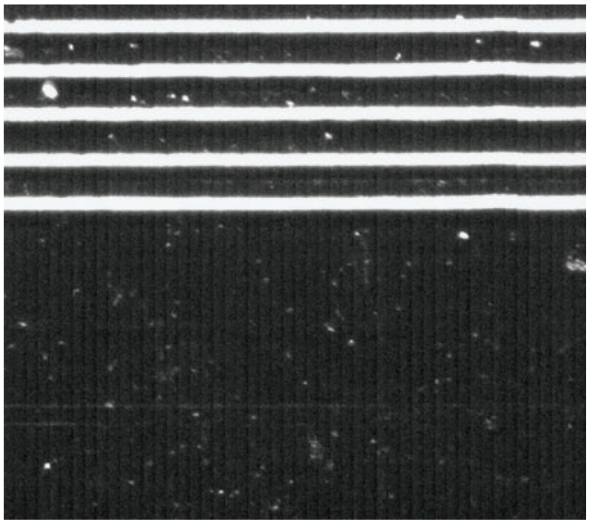


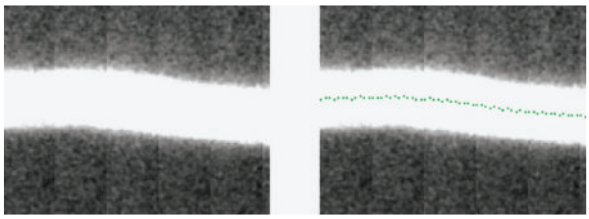
図 13　処理開始直後，SigExBot は左下から上に向かって音溝を探す

1．開始直後，設定された画像データのピクセル値を左下の端から上へ向って調べ，音溝を探索．
2．音溝が見つかると，縦軸に対するその中心を計算し，現在位置をそこに設定（図 13 の最下音溝の左端の中心点）
3．現在位置のピクセルに色を設定（デバグ用）
4．設定されたステップサイズの値だけ右へ現在位置を移動
5．2．に戻り，処理を繰り返し実行

基本的な処理内容は以上である．ただし，現在位置を順次右へと進み，画像の右端に到達すると，次の画像が現在処理対象画像に設定される．また，画像データを何回か周回し，画像の上部への移動がある一定のピクセル数を超えると，Round 番号がインクリメントされ，次の一連の画像データが主記憶に転送され，上記の処理が繰り返し行われる．

なお，既に述べたように，SP Record Analyzer では Round$x$ と Round$x$+1 の撮像縦座標の差が正確に 1500 ピクセルになるように設定されているため，処理が次の Round へ進むときは，現在の縦座標パラメータから 1500 ピクセルを差し引くことにより，途切れることなく音溝追跡処理が続けられる．

4．のステップサイズに関して説明する．蓄音機によるレコードの再生では，レコードの回転角速度が一定であるため，針が外側から内側へと移動するするに連れて，針の直下を回るレコードの線速度が減少する．たとえば，同じ 1 kHz の正弦信号をレコードの外側と内側とで比較すると，内側の方が音溝の空間的な振動周期が短くなる．これは線速度が減少しても，時間軸に対しては同じ 1 kHz の信号を保たなければならないからである．この音溝の横軸に対する収縮に対応するため，処理対象の Round フォルダが変わるたびに，中心に近いほどステップサイズが小さくなるように値を調節する．



（a）　　（b）

図 14　(a) 元画像と (b) SigExBot 適用後の画像

また，Round フォルダが変わるたびに，アルゴリズムの追跡マークが付けられた画像が markedImages フォルダ内に保存される．これは，デバグ用の画像であり，次段階の信号処理アルゴリズムでは使用しない．図 14 に追跡マーク付きの画像を示す．したがって，追跡マークに関連するメソッドを無効化することにより，処理時間の短縮が可能である．なお，図 14 に示された追跡マークは実際に検出されるデータと一致する．

6.2.2　信号修正機能

本研究で音検出対象となる SP 盤レコードには，擦り傷，割れ，ひびなどの損傷を伴うものが多い．また，音溝から反射する光が音溝の形状解析の手段になるため，蓄音機と異なり，微細なほこりにも影響を受ける．音信号検出アルゴリズムには，これらの悪影響に対処するための工夫を施した．乱れた信号を修正するための機能は以下のとおりである．

1．GapFilling
2．TryToRecover

Matlab プログラムの関数名と一致させるため，機能名は英語で表記した．これらの機能について，以下に説明する．

6.2.3　GapFilling

GapFillingは，ほこり，擦り傷，ひびなどに対応するギャップ充填機能として実装した．この機能を説明する前に，SigExBotの状態について述べる．SigExBotが取り得る状態を以下に示す．

1．ライントレース中（緑）
2．警戒中（赤）
3．ギャップ充填中（青）

かっこの中の色はデバグ用の追跡マークの色に対応する．通常，SigExBotは，「ライントレース中」の状態にある．アルゴリズムがなぞろうとしている白い線の幅が急激に一定値（原稿執筆時点では5ピクセル）以上変化すると，アルゴリズム状態が「警戒中」へと遷移する．警戒中の追跡点線は赤に変わり，線幅が平均値±5ピクセルを越える状態が続く限り，水平に直進する．なお，アルゴリズムが追跡する白い線は，音溝の壁から反射する光であり，当然のことながら，反射光で撮像する画像データ内の白い線の幅は一定にはならず，レコードの回転に伴って増減する．写り具合が多少変わることによる幅の自然な変化と，ほこりやひびによる幅の変化を区別するため，アルゴリズム内では平均的な幅を常に計算している．そのため，100ステップに渡って画像データ内の音溝幅が次第に大きくなることにより5ピクセルを越えても，アルゴリズム状態は「警戒中」とならず，追跡処理が通常通りに続けられる．

一旦アルゴリズム状態が「警戒中」となった後は，音溝データの幅が平均値±5ピクセル以内に戻らなければ回復できない．また，音溝幅が平均値±5ピクセル以内になった場合は，赤い追跡線は再び音溝の中心を追いはじめるが，その状態が30ステップ続かなければ「警戒中」は解除されない．そして，これらの条件が満たされたとき，アルゴリズムは「警戒中」から「ライントレース中」に戻り，追跡マークが赤から緑に変わる．

しかし，警戒中の間に進んだ区間の信号データは適切なものではないと考えられるため，GapFillingの中心的な機能である「ギャップ充填」が警戒中からライントレース中に戻る直前に行われる．この機能は，信号データを上書きする機能である．上書きの対象となるのは警戒中に入った位置から，ライントレース中に戻った位置の26ステップ前までである．この範囲をギャップとし，2点が直線で結ばれる様に追跡マークを打ち，

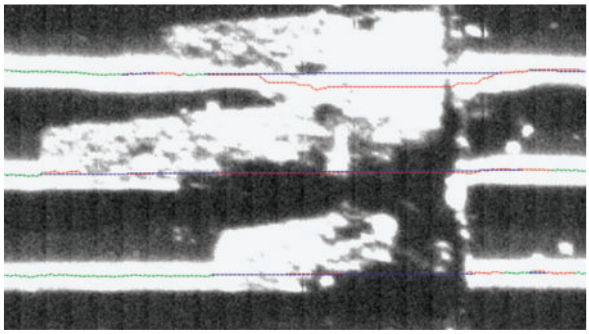


図15　GapFillingによる割れで乱れた音溝の追跡と修正

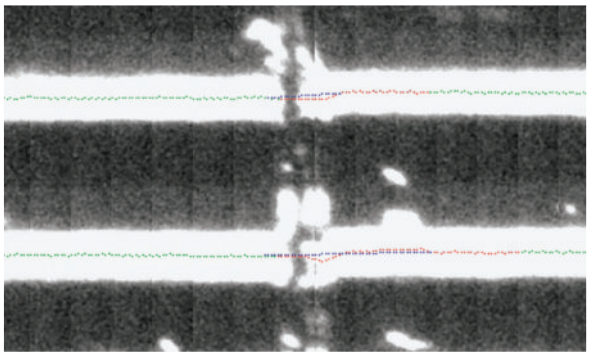


図16　GapFilling機能によるひびで乱れた音溝の追跡と修正

信号データを上書きする．この処理を行っている間はアルゴリズム状態は「充填中」となり，充填による追跡マークは青で表示される．充填処理が終わった後，アルゴリズムはギャップ充填処理直前の位置に戻り，状態は「ライントレース中」となる．

図15はレコードの表面に割れが生じている画像の追跡マークである．青い点線が赤点線のデータを上書きしている．これはGapFilling機能が正常に動いている例であり，アルゴリズムは乱れた音溝データの両端を直線で結び，データ修正が成功している．同様に，図16にはひびが入った場合の充填機能の例である．

一方，図17はGapFilling機能が判断を誤り，音信号を誤って修正した例である．これは音信号データを悪化させることになり，回避すべきものであるが，それにはギャップ判定の判断基準に修正を加えるなどの対応が必要であり，今後の検討課題である．

6.2.4　TryToRecover

図18の中心にある音溝データに着目すると，赤い点線が，アルゴリズムの仕様の結果，黒領域

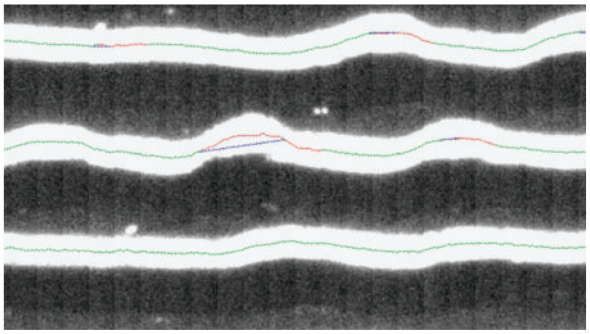


図 17　GapFilling 機能が正常な音信号データを誤って修正した例

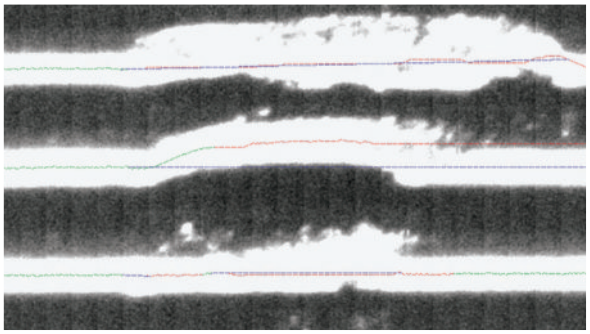


図 18　TryToRecover 機能による無限警戒状態からの回復

に入っていることが確認できる．一旦黒領域に入ると抜け出すことは困難であり，SigExBot はいつまでも警戒中となり，直進を続ける状態に陥る．この事態を回避するするため，TryToRecover 機能が備えられている．

TryToRecover 機能の呼び出し条件は，黒領域（アルゴリズムの閾値以下のピクセル領域）を 600 ステップ以上連続的に進んだ場合である．呼び出された後は，現在の縦座標値を 750 ステップ前（まだ黒領域ではなかった箇所）の縦座標の値に設定し，これにより作成された点を終点とする．次に 750 ステップ前の座標点を読み込み，この点と終点を直線で結び，GapFilling と同様にデータを上書きする．その後，SigExBot は，その終点からライントレースを再開する．

6.3　Needle

このアルゴリズムは SigExBot が検出した信号を処理対象とし，フーリエ変換や振幅調整などを用いて標準音信号ファイルである wav ファイルに適合したデータ形式に変換した後，実際に wav ファイルとして保存する．

SigExBot が音溝画像から抽出した追跡結果の

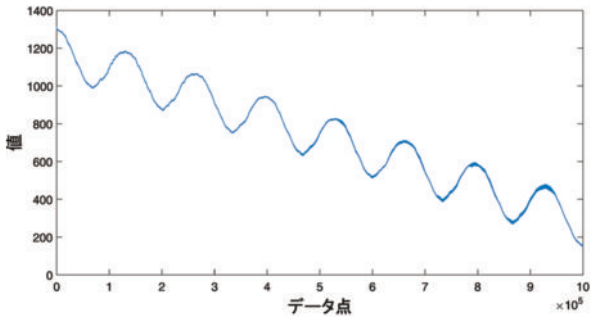


図 19　SigExBot が出力した信号データ

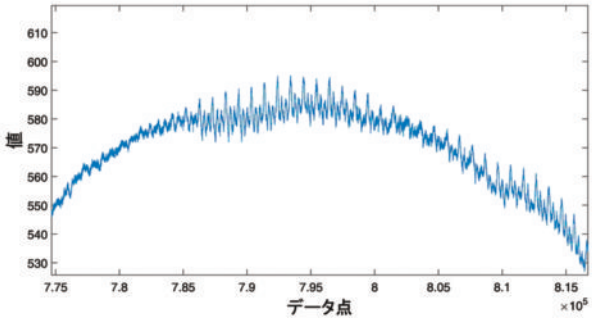


図 20　SigExBot が出力した信号データを一部拡大した結果

信号を図 19 に示す．このデータは処理終了後に「sigExBot. Signal」により アクセスできる．Needle アルゴリズムは，インスタンス化に際して処理対象信号データを引数として渡す必要があり，「needle = Needle(sigExBot.Signal);」と入力することによりオブジェクトが生成される．その後，「needle.Start();」の入力で処理が開始される．

6.3.1　処理の概要

図 19 に示す信号データについて考察する．まず特徴的な点として，ゆっくりとした正弦波に近い振動成分が見られる．これは，音溝のうねり問題の影響である．レコードの穴が偏心していることによる音溝像への影響が理論上正弦波になること，および音信号に比べてはるかに振幅が大きく，周期が長いことから，偏心によるものと判断できる．また，この信号を構成するもう一つの成分として，左上から右下に向かう線形のトレンドが挙げられる．これは，音溝がうずまき状であるために，それをなぞることによって，レコードの中心に近付いていくことによるものである．同様の特徴は，カメラの全画素を用いた矩形画像により取得した音信号でも確認されている[9]．

レコードに録音されている音本来の信号データは，この正弦的な振動に比べてはるかに振幅が小

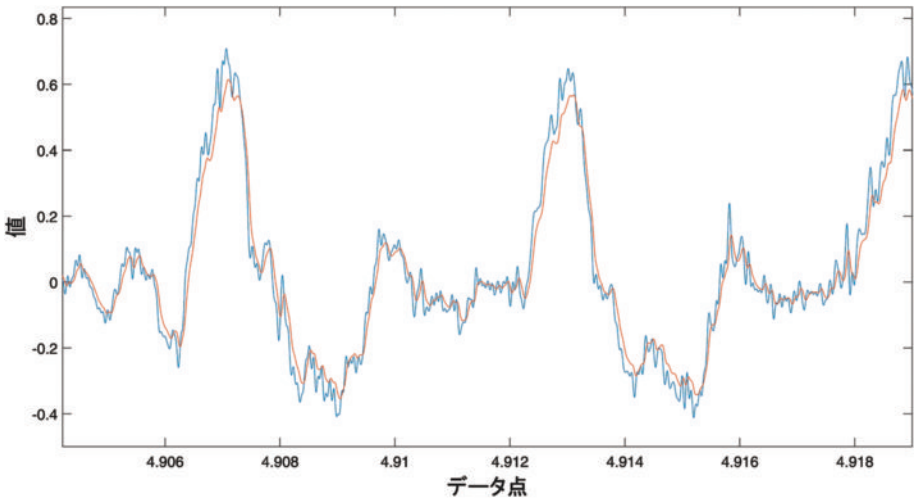


図 21　NeedleSimulation による処理結果（オレンジ）と通常の処理結果（青）の比較

さく，図 19 ではその存在の確認が難しい．図 19 の一部を拡大した図が図 20 であり，音信号が確かにうねり信号に重畳していることが分かる．

6.3.2　処理内容

図 19 に示す信号データからうねり成分と直線成分を除去し，音ファイルへと変換できるように振幅を調節し，ノイズを極力除法するのが Needle の機能である．Needle アルゴリズムの個別の機能は，以下のとおりである．

1．TrendCorrectSignal
2．FFT
3．Crop
4．AdjustAmplitude
5．NeedleSimulation
6．Savewav

TrendCorrectSignal はレンド修正処理である．全信号を対象とする 1 次の多項式近似で直線成分を抽出し，それを信号データから減算する．Matlab が標準で備える関数 polyfit と polyval で構成している．

FFT は，fast Fourier transform すなわち高速フーリエ変換処理であり，うねり成分削除とノイズ除法を目的とする．実装には Shmuel Ben-Ezra が Matlab の公式ファイル交換サイト（Matlab File Exchange）に投稿した fftf.m[12] を利用した．ただし，バンドパスフィルタリングができるよう改造を行った．バンドパスフィルタリングにより，100–15,000 Hz 以外の周波数成分を全て削除する．これにより低周波数ゆらぎと高周波数ノイズをある程度抑制することに成功した．しかし，この処理後も残存するノイズがあり，通過周波数帯域を，たとえば 100–5,000 Hz に設定すると，高周波数ノイズがさらに減少する半面，抽出しようとしている音声データに影響が生じ，「つ，ち」などの破擦音が聞きづらくなり，音声が全体的にこもる結果となった．したがって，残存ノイズの除法には別の手段で対応する必要がある．

Crop は信号の前後のデータ点を数百個を除法する処理である．高速フーリエ変換は，その数学的原理上信号が周期関数であることを仮定しており，フーリエ変換に際して信号の前後のデータ点が接続しているものとして処理が行われる．これにより，処理後の信号は前後のデータに乱れが生じるため，それを削除することでこの問題に対処している．

次に AdjustAmplitude 処理が実行される．その名称どおり，信号の振幅を調節する処理であり，信号の絶対値の最大値が 1 を超えないように設定した．この処理は後で Matlab の audiowrite 関数を利用するために必要な処理である．

NeedleSimulation は，仮想的な針の動きをシミュレートすることにより蓄音機と同等レベルの音質を得ることを目指して，試行的に作成した機能である．そのため，その処理方法の詳細は省略するが，処理結果の一例を図 21 に示す．NeedleSimulation 機能を適用した信号（オレンジ）の方が，適用しない信号（青）に比べてややゆっくり変化しており，微細な凹凸が抑制されることがわかる．NeedleSimulation 処理による再

生結果は，FFT 段階の信号とともに自動的に wav ファイルとして保存される．

最後に，savewav は，その名称のとおり，処理結果の音信号を wav ファイルとして保存する．

7．おわりに

本研究では，使用したカメラが装備する部分読み出し機能を用いて SP 盤からの音検出を試みた．レコード 1 枚分の音溝画像を完全にディジタルデータ化するプログラム SP Record Analyzer を作成し，それにより生成した画像を新たに開発した画像処理アルゴリズム SpliceBot，SigExBot，および Needle により解析し，wav ファイルに保存した．人間による語りが録音されたから SP 盤から作成された音信号ファイルを再生すると，人間の声が明確に聞こえており，ある程度目的を達成したといえる．

しかし，画像処理を用いる方法では，音溝の欠損やほこり等の影響を除去する処理も適用できることから，原理的には触針式再生法よりも高音質な音が得られることが期待されるが，本研究で用いた方法では，通常の蓄音機に匹敵する音質が得られなかった．すなわち，蓄音機の音質と比較して，本研究で得られた再生音には白色雑音に由来すると思われるノイズ成分が強く残存していると考えられた．この雑音を低減するため，FFT による帯域通過フィルタリングの高周波端の遮断周波数を下げると，高周波ノイズ成分が減衰する半面，音信号成分も劣化し，よりこもった音となった．

これは，基本的には，人間の声や楽曲の音にも高い周波数成分があり，高周波ノイズと同領域に信号成分が存在しているため，信号とノイズを明確に区別することが困難であることに起源している．また，本研究で開発した SigExBot の GapFilling 機能では，5 ピクセル以内の音溝幅の変動に対しては警戒態勢を取らずに自然な幅の変動と見なすため，非常に微細なほこりや音溝の傷の影響を排除できていない可能性がある．これらに起因する信号の微細な変動は，極めて局所的であり，信号全体に一律に適用される周波数フィルタ処理はその除去には適さない．このため，FFT を用いた周波数フィルタによる処理だけではなく，GapFilling 機能の改善や動的なフィルタの適用も加えることにより，音質の改善が可能であると考えられる．

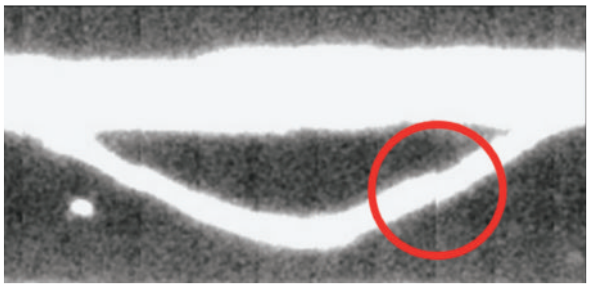


図 22　SpliceBot が作成した連続画像に生じたずれ

また，図 22 に示すように，本研究で用いた手法では，SliceBot によって接続される隣接画像が 8 ピクセル程度ずれることがある．これはパルスステージ回転軸の角度情報がパルス数によって決まる離散値であること，および，現在位置情報をパルスコントローラから取得する頻度に上限があることが原因であると考えられる．このずれが，音質の低下に関わっている可能性も排除できない．したがって，このずれの発生メカニズムの解析とその対策も今後の課題である．これには，本研究で新たに導入した，画像データを連続した静止画像として取得する方法ではなく，前報告[10,11] で用いた動画像による保存方法も，再度検討する余地があると考えられる．

本研究は，科学研究費補助金（基盤研究（A））「蝋管等初期録音資料群の音源保存，音声復元，内容分析，情報共有に関する横断的研究」（No. 25244030）の支援のもとで行われた．

【参考文献】

1）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＝，光アライアンス，23，5，pp.21-25，2012.

2）J. Uozumi and T. Asakura: Reproduction of sound from old disks by the laser diffraction method, Appl. Opt., 27, 13, pp.2671-2676, 1988.

3）IRENE プロジェクト：http://irene.lbl.gov/

4）P. J. Boltryk, J. W. McBride, M. Hill, A. J. Nasce 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.

5）株式会社エルプ：http://www.laserturntable.co.jp/turntable/

6）O. Springer：http: //www. cs. huji. ac. il/~springer/DigitalNeedle/

7）M. McCann, P. Calamia and N. Ailon: Audio Extraction from Optical Scans of Records, http://www.public.asu.edu/~mamccan1/visionfinal/doc/
8）鹿間信介，水野宏亮：ディジタル画像処理によるアナログレコードの音再現，電気学会論文誌，133，7，pp.1309–1315，2013.
9）魚住　純：画像処理によるモノラル円盤レコードからの音声再生，北海学園大学工学部研究報告，No.35，pp.119–129，2008.
10）魚住　純・三上　亮：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，工学研究，No.13，pp.61–70，2013.
11）魚住　純：エリアイメージセンサの部分読み出しによるSP盤の音溝画像合成，工学研究，No.16，pp.33–37，2016.
12）S. Ben-Ezra: FFT filter - clean your signals and display results!, https://jp.mathworks.com/matlabcentral/profile/870233-shmuel-ben-ezra