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 斎 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

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³¹ や白色光干 渉法⁴¹ 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	移動距離	
(回転ステージ)	(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 Q₁, Q₂, Q₃ 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 $\overline{AB}=\overline{CD}$ 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2 ϵ となる、

 $\Delta MCF \ge \Delta MGE は相似であり、その相似比$ $は <math>r = \overline{ME} / \overline{MF}$ 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 BE, ME, および 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、

$$\gamma = 0.002366 [\text{mm/pixel}],$$
 (2)



図5 矩形画像の連続撮像による重複領域の発生

$$\gamma^{-1} = 422.65 [pixel/mm]$$
 (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 $\overline{\text{EF}}$ と幅 $\overline{\text{AB}}$ は、物理的サイズで、

$$\overline{\rm EF} = 2456\gamma = 5.811 [\rm mm],$$
 (4)

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

となり、最外周を撮像するときの距離 ME は

$$ME = 120.0[mm]$$
 (6)

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

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

を得る.

同様に最内周での値 €2 を ME=50.0[mm]とし て求めると

$$\epsilon_2 = 0.2534 [\text{mm}] = 107.1 [\text{pixel}]$$
 (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,

$$2\epsilon_2 = 0.5068 [\text{mm}] = 214.2 [\text{pixel}]$$
 (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 e₃ は,



図6 音溝湾曲を数値化した変数 ρ

 $\overline{AB} = 2\overline{BE} = 0.07571 [mm], \qquad (10)$

 $2\epsilon_3 = 0.007882 [\text{mm}] = 3.331 [\text{pixel}]$ (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、 \angle 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 $\rho=\overline{JK}$ を定義できる.また、 $\overline{I}\overline{J}=\overline{JH}$ であり、 \angle MJI はほぼ直角である.このと き.

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

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

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

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

であるから、これらの式より

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

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

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 $\rho \epsilon \rho_1$ とすると、

 $\rho_1 = 0.005971 [\mu m] = 0.002524 [pixel]$ (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 p2 は

 $\rho_2 = 0.01433 [\mu m] = 0.06057 [pixel]$ (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 AB=4.869[mm]であるか ら,このときの湾曲の大きさρ3 は,

 $\rho_3 = 59.30 [\mu m] = 25.06 [pixel]$ (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

GPIB Interface Camera Matlab Auto	matic Image Acq.			
Basics	Advanced	Status	Calibration	
Adress: 8	Sequencer 1:	Bus Status:	1st measurement pxl	
	D: 1S800F 15000R 1200			
Open	HW-	Pulse count displ	2nd measurement px1	
	R:1+P5932	Mater 1 50500 110.2	abs.diff: pxl	
String to write:	A:W+P60000+P0	Motor I: 59000 119.2 mm		
M: 1+P5000		Motor 2: 79301 198.2525 deg	Pulses per pixel ratio:	
Write Read	Start		width: pxl - mm	
	Sequencer2		height pxl → mm	
String read	D:2S500F15000R1200			
	M-2+P57	m. origin: H:W- res. origin: R:W velocity: D:IS100F1000R100 rel.move: M:W+P1000+P1000 abs.move: A:W+P1000+P1000 jos move: J:W++ jos move: J:W++	Beta Angle:	
	Start	status: 0:	Start Calib Update Beta A	

(a) GPIB セットアップ後の GPIB Interface タブ

GPIB Interface Camera Matlab Auto	matic Image Acq.	
Basics Advacer 8	Advanced	Status Calibration
Porcess	D: 1S800F 15000R1200	Bus Status: Ready 1st measurement: 857 pxl
Open Close	D:2S800F15000R1200 HW-	Pulse count dispt
String to write:	A:1+P5932 R:1 A:W+P60000+P0	Motor 1: 59600 119.2 mm abs. diff: 335 px1
M: 1+P5000		Motor2: 0 0 deg Pulses per pixel ratio: 1.1940
Write Read	Start	width: 2454 pxl → 5.8602 mm
	Sequencer2	height <mark>30 pxl</mark> → 0.0716 mm
String read	D:25500F15000R1200 M:2+P57	m. origin: H:W- Beta Angle: 0.0335 res. origin: R:W D: \$100F1000R100 pulsesPerImage: 13 velocity: D: \$100F1000+P1000 pulsesPerImage: 13 abs. move: A:W+P1000+P1000 pulsesPerImage: 13
	Start	free mot: C:W0 / C:W1 status: 0: Start Calib. Undate Beta 4

(b) キャリブレーション後の GPIB Interface タブ



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.

GPIB Interface	Camera Matlab	Automatic Image Acq.			
Basics					
ID of the firs	t camera found		Trigger Settin	₫S	
TL=>GevTL, Yukon 88E80 DF-04-14-B	INT=>FD:MAC->0 53 based Ethernet 5:JAI Ltd, Japan:1	00-50-43-01-1F-33:Generic Marvell t Controller , DEV=>MAC->00-0C- BB-500GE	Free Ru	unning 💿 Software Trigger	
Image Size		Gain Control			
Width	2456	591			
Height	32	*	-0-		
Partial Sc.	Variable Partial	Sc. •			
V. Part. Sc.	St. Line 1013	Exposure Control			
V. Part. N. C	Of Lines 32	146			
Start	Stop Save	e Image swTrigger Continuous	•		

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

SP Record Analyz	er			
GPIB Interface Car	nera Matlah Automatic Im	age Acg.		
AIA				
Pulse count M2:	52896			
Image Number:	194			
total # of Imm	11076			
total # 01 Img.	11070			
Start	Stop			

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
- 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. ΔMJI が直角三角形であることか ら、角度 β は、式(14)、あるいは

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



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、Roundl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.

- rawdata フォルダ内の bmp ファイル数を 検出
- 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
- 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
- Roundl フォルダ内の bmp ファイル数を 検出
- Roundl 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 Roundx と Roundx+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



図 14 (a) 元画像と(b) SigExBot 適用後の画像

線速度が減少する.たとえば、同じ1kHz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 1kHz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.

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.

ー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



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.m¹²⁾ 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



図 22 SpliceBot が作成した連続画像に生じたずれ

と考えられる.

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/matlab central/profile/870233-shmuel-ben-ezra