

自動ピアノの演奏情報処理に関する研究 ——第1報，ピアノアクションの挙動に基づく 基本的な打鍵のための変換処理方法

林 英 治[†] 山 根 雅 巳^{††} 森 一^{†††}

本研究は、安定な弱音や高速な反復打鍵を演奏することができる高性能な自動ピアノを開発することを目的としている。本論文では、開発した自動ピアノの演奏システムについて述べている。演奏システムは、88 台の打鍵用アクチュエータと 2 台のペダル用、およびそれらのサーボシステムによって構成されている。アクチュエータを実時間で制御するため、3 階層のコンピュータシステムを構成した。そして、編集したデータをピアノで再生するためには、実際に打鍵する必要があり、ピアノアクションの挙動を無視することはできない。そこで、各鍵ごとに、ピアノアクションの挙動の解析を基に構成したデータベースを作成した。さらに、編集データから鍵の駆動波形を作成するための変換方法を提案した。以上の結果、データベースを用いて編集データを提案した変換方法によって、安定した音の再生や再現性を確保し、また、希望する音の正確な再生を実現した。

Development of Performance Information Processing for Automatic Piano——1st, Translating Method for Basic Touch Based on Behavior of Piano-action

EIJI HAYASHI,[†] MASAMI YAMANE^{††} and HAJIME MORI^{†††}

The purpose of this study is to develop of an automatic piano which provides superior playback capabilities, with an ability to play stable soft tones and fast repetition of the same key. In this paper, discussion is made on the automatic piano system developed based on our findings. The system comprises of 90 actuators, 88 for the keys and 2 for the pedals, with a servo mechanism for each actuator. In order to control this network of actuators, a three level, hierarchically structured computer system was introduced. And in order to reproduce a music with the musical data in main computer, the behavior of the piano-action can't be needed because of our automatic piano automatically play a piano by driving the keys. Based on the results of the piano-action analysis study, a data-base has been constructed which translates the musical data into an optimal input waveform for the mechanical input motion of the key, to drive the touch actuator. As a result, the entire system will automatically prepare the optimal input waveform, and will allow the piano to be played with a much wider dynamic range, accompanied by subtle alterations of the tone volume and very stable soft tones. And a new standard of reproduction of performances will be now possible.

1. はじめに

近年、電子技術の発達により、電子機器における電子楽器は著しい進歩をとげている。特に、電子楽器の

音源に用いられるデータの分解能は、CD と同程度のクオリティを有している。しかしながら、電子楽器ではその再生にスピーカを用いており、現在の音響機器の技術レベルでも、高級な音響機器を用いたとしてもスピーカから再生される音は、実際のピアノの音には及ばないのが現状である。

ピアノに限らず楽器の演奏は、音の強弱に関する強さやスピードの正確な動き司る指、腕などの運動制御は曲の表現を行ううえで重要となる。ピアノの場合、鍵を動かしてから音が発生するまでの時間は、強い音から弱音まで 20～300 ms 程度の変化を有し、人間が

[†] 九州工業大学情報工学部機械システム工学科
Department of Mechanical System Engineering,
Kyushu Institute of Technology

^{††} 早稲田大学理工学部機械工学科
Department of Mechanical Engineering, Waseda
University

^{†††} 株式会社アベックス
APEX Corporation

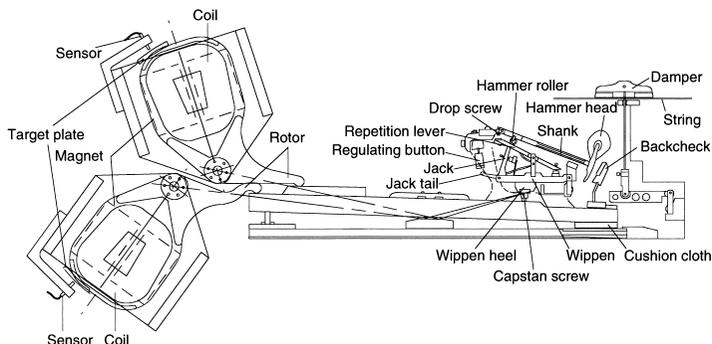


図 1 打鍵用アクチュエータとグランドピアノのアクション機構

Fig. 1 Schematic view of touch actuators and piano-action in a grand piano.

簡単に強弱の打鍵を制御することは難しく、ましてや、希望する音を得るには大変な修練が必要となる。このような意味においても、ピアニストは卓越した能力を持っているといえる。そのため、演奏家の鍵の動きを再現すれば、優れた演奏技法によって演奏家の演奏を再現できるのだが、演奏家による演奏は対象のピアノやホールなどの場所に大きく依存する。一方、ピアノの音の強さはハンマの打弦する速度で決まるため、自動演奏装置で演奏するうえでは、必ずしもピアニストが演奏したときのタッチを忠実に再現する必要はないと考える。

ピアノ演奏の中で、微妙な音の強弱、幅広いダイナミックレンジを得るための弱音の演奏や同一鍵の高速な反復打鍵を行うことはピアニストにとっても難しい演奏技法であり、これまでに市販されている自動ピアノにとっては、重要な問題である。著者らは、これまで、高性能な自動ピアノを開発するために、打鍵装置、ペダル駆動装置を開発した^{1),2)}。そして、弱音や高速な反復打鍵の問題を解決するために、ピアノアクションの挙動の解析を提案した力学モデルを使って解析を行い、それらの問題を明らかにし、また、ピアノアクションの動的な特性を解明した^{3)~6)}。その結果、弱音や高速な反復打鍵のための駆動波形を見出した。そして、その結果を基に、ピアノ(MIDIデータ記録機能付き)で演奏したときの記録データや人間が音符に対して音の強さ、長さ、テンポなどを編集したデータから、それらのデータの1つの音を発生させるための最適な打鍵波形を自動的に作成して、演奏を行わせることができるシステムを開発した^{7),8)}。

本論文では、本演奏システムの全容と、ピアノ曲の各音符情報の音の強さ、長さ、テンポ(音と音の間隔や音の長さ)を編集したデータから希望した音の正確な演奏(特に、弱音の演奏)や再現性を得るためのデータベース、開発したデータベースを用いて各音符

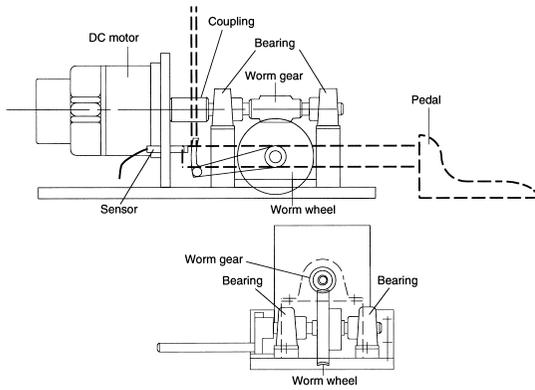
情報から最適な打鍵波形を作成するための変換処理について論じる。作成する打鍵波形については、反復打鍵を除いた本システムの基本となるピアニストにとっても難しい安定した弱音から強音までの演奏のための打鍵波形作成法についてのみ述べる。

2. 演奏システムの構成

2.1 演奏装置

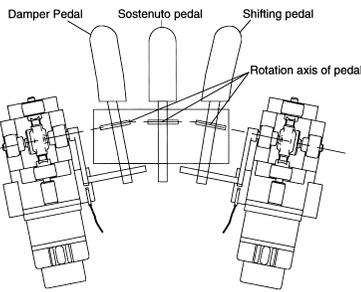
人間は演奏しているとき、速さと同時に鍵の深さやペダルの深さを制御しているため、打鍵用、ペダル用(ダンパペダル、シフティングペダル)アクチュエータは、位置制御を可能とし、1鍵、そして、ペダル1台ごとに配置した。開発した打鍵用アクチュエータとグランドピアノのピアノアクション機構を図1に示す。打鍵用アクチュエータは、鍵盤上に白鍵、黒鍵のそれぞれに1鍵ごとに1つのアクチュエータを取り付ける。白鍵と黒鍵では、指部の形状のみが異なっている。このアクチュエータによる打鍵は、鍵の初期の静止位置の鍵上に触れた位置から打鍵を行う。この方法によっても、このアクチュエータは、ハンマの質量が大きい低音部の鍵でも、鍵先端で2m/sの鍵速度を得ることができ、人間がフォルテシモを演奏した場合、0.8mの鍵速度であることから打鍵性能は十分である。ただ、このアクチュエータは鍵上の10mmまでの任意の位置から打鍵でき、簡単に強音を得るためには有効な手段であるが、鍵と接触した瞬間の衝突音や打撃瞬間後、鍵が打撃されるために鍵が弾かれ、アクチュエータの指先と離れ、打鍵途中の鍵の動きを制御できない問題が生じる。

アクチュエータの制御は、位置制御を行わせるために、ロータの後端にギャップセンサとプレートを取り付けた。この機構により、ロータの回転角をセンサとプレートの間隔に変換し、ロータの位置を非接触で検出した。この位置検出によって得られる信号を用いて、



(a) ペダルの駆動方法

(a) Way of pedaling by actuator



(b) ペダル用アクチュエータの配置

(b) Arrangement of pedaling actuator

図2 ペダル用アクチュエータ

Fig. 2 Schematic view of pedaling actuator.

位置、速度帰還を構成し、任意の波形に追従できる追従制御とした。また、アクチュエータに十分な出力が得られるように、最大9Aを出力するPWM(Pulse Width Modulation)の増幅器を使用している。

図2に示すペダル駆動用アクチュエータは、ウォームギアとウォームホイールによるセルフロック機構と直流モータを組み合わせて設計した。セルフロック機構は、負荷が大きくペダルを途中で保持する場合に、モータに電流を流さないで機械的に保持することができ、モータロータの消耗と電力の低減を図った。また、ペダルはグランドピアノの場合、3つのペダル(シフティングペダル, サステインペダル, ダンパペダル)を有する。3つのペダルの真ん中に位置するサステインペダルは、打鍵用アクチュエータにより鍵を押さえ続けることに代替できるため、ペダル用アクチュエータはシフティングとダンパペダルに設置している。

2.2 演奏システム

装置は打鍵用、ペダル用のアクチュエータを合わせると合計90台で構成される。これらの装置を統括・

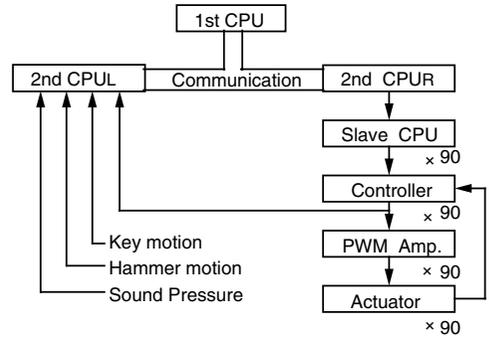


図3 コンピュータの構成

Fig. 3 Structure of computer system.

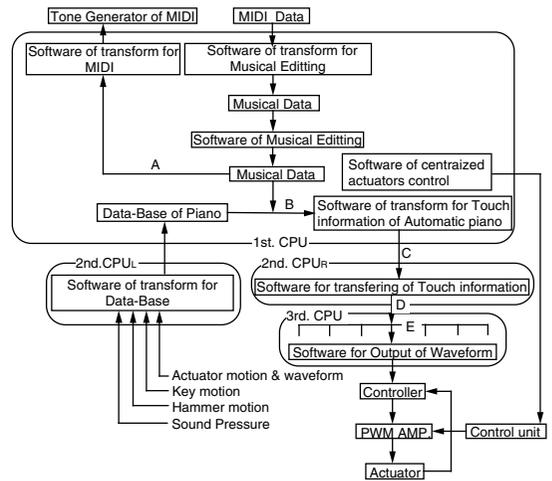


図4 演奏システムの情報処理

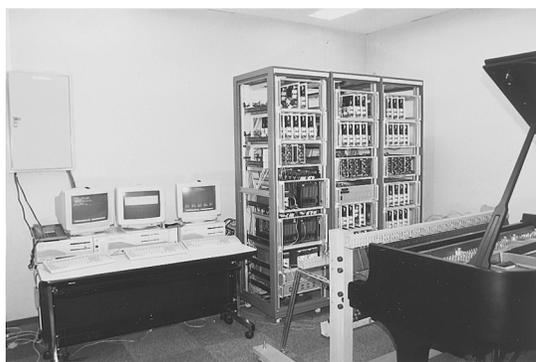
Fig. 4 Information processing performance system.

管理制御して、演奏では実時間制御によって同時に何台もの装置に打鍵・ペダル波形を供給する必要がある。さらに、曲の編集から演奏やピアノアクションの運動を計測し、データベース(5章参照)の作成を行えるようにするため、3つの部分から成るコンピュータシステムを構成した。システムの構成にあたって、アプリケーションはMS-DOS上で開発し、演奏場面の楽譜表示の切替えや打鍵・ペダル波形情報の実時間制御によって転送を行わせるには、1台のコンピュータのタイマで多重割込みによっても可能ではあるが、使用したコンピュータがPC-98(OS:MS-DOS, ver.5.0)であるため、正確な割込み時間を刻むことが難しい。また、楽譜を表示するための画像データ、曲の編集や演奏にかかわるデータに関するメモリの制約や処理能力を考慮して、3台の構成とした。図3にコンピュータの構成、図4に情報処理の概略を示し、以下に各処理内容を述べる。また、図5にシステムの全体写真を示す。



(a) アクチュエータとグランドピアノ

(a) Actuators and grand piano



(b) コンピュータシステムと制御機器

(b) Computer system and control devices

図5 システムの概観

Fig.5 Schematic view of system.

2.2.1 1st CPU

1st CPU は、32 bit CPU を使用し、通信用、アクチュエータの統括・管理用、MIDI 用の合計 4 枚のインタフェースボードを搭載している。一般的な MIDI ファイルを変換し、曲ファイル(表 1 参照、以下、演奏情報)を作成してから 1st CPU 内で編集を行う。MIDI 機器による演奏の場合は、図 4 中 A の経路を通して演奏する。また、本システムを使用する場合、図 4 中 B の経路を通り、演奏情報からデータベースを参照しながら、アクチュエータ用の打鍵・ペダル波形パラメータ(表 2 参照、以下、打鍵情報)に変換する。そして、打鍵情報を 2nd CPU_R に転送する。転送終了後、1st CPU が演奏準備を行うために、コントロールユニットに指令を送り、その曲で使用される鍵に対してアクチュエータのスイッチを入れる。その後、演奏を開始し、1st CPU では演奏場面の楽譜の表示が行われる。

曲の編集は図 6 に示すような画面から行い、このアプリケーションがすべての処理のメインとなる。そし

表 1 演奏情報

Table 1 Performance information.

Parameter	byte	
key	1	keys:21~108 pedals:119(damper) 110(shifting)
gate	2	
velo	1	
timing	4	
bar	2	

表 2 打鍵情報

Table 2 Touch information.

Parameter	byte	Reference
timing for output	4	
key	1	
kind	1	
p1	2	
slope1	2	
p2	2	
slope2	2	
-	2	in case of pedal → p3
keeping time	2	in case of pedal → slope3
p4	2	
slope4	2	

編集Menu		key	velo	gate	step	timing	bar
D:Delete	I:Insert	E:Edit	63 D#5	48	320	0	1000
F:Find	M:Move	K:KeyDel	75 D#6	48	320	380	1000
V:Velo	G:Gate	S:Step	63 D#5	48	320	0	1380
T:Tempo	P:Play	C:Clear	75 D#6	52	320	380	1380
			63 D#5	48	320	0	1760
			75 D#6	52	320	410	1760

図 6 曲編集のためのアプリケーション画面

Fig.6 Application display for editing parameters of musical data.

て、この画面上のコマンドを使用することによって、上記に述べた処理はすべて子プロセスとして呼び出されて実行される。画面上では、音程 (key), 音の強さ (velo), 音の長さ (gate), 発音時刻 (timing) のパラメータ (以下、編集情報) によって曲に表現をつけていく。ペダルに関しては、任意の時間上にペダルの踏み込み深さ (以下、深さ) を velo のパラメータを用いて編集できるようにした。ペダルの深さは、たとえば、ダンパペダルでは、ペダルを踏み込んだとき、途

中までダンパが持ち上がらない機構上の“遊び”が存在する．そのため、ダンパが実際に動き始める位置を数値 64，数値 127 のとき深さを最大として，その間の数値はより微細な動きを表現するために，0～127 の分解能を持たせた．

上記の編集情報は，表 3 に示すようなデータフォーマットとした．key21 はピアノの最低音の鍵に対応し，velo は最弱音から最強音を 1 から 127 の整数値で表し，gate，step と timing は最小単位 1 ms で表している．

2.2.2 2ndCPU

2ndCPU は，左右それぞれに 1 台ずつ置く．左側の 2ndCPU_L は，増幅器から打鍵装置各鍵への信号，打鍵装置の位置信号，鍵およびハンマの運動を計測する．これらの計測データは，1stCPU で曲データから駆動波形への変換の際に用いるデータベースに必要なデータを得る．さらに，打鍵アクチュエータがつねに安定した打鍵を行えるように，鍵の静止状態での鍵表面の位置および鍵底の位置を打鍵装置の増幅器の出力信号から取得する．このときの打鍵は，RS232C によるシリアル通信を用いることにより，1stCPU を通して，2ndCPU_R と通信を行っている．

右側の 2ndCPU_R は演奏制御の中心であり，各装置の窓口となっている．2ndCPU_R では，1stCPU で作成された打鍵情報が転送されると(図 4 中 C 部)，コンピュータ上のメモリに書き込む．その後，1stCPU からの演奏開始信号を受け取り，タイマ割込みにより，実時間制御(内部クロック 1 ms)で波形出力のタイミングになると同時に，鍵に対応した 3rdCPU 群内の指定アドレスに 1 回分の打鍵情報を一括転送する(図 4 中 D 部)．このタイマ割込み 1 ms が，本システムの演奏タイミングをとっているので，3rdCPU への打鍵情報の転送はすべて割込み時間内に行い，1 ms 以内に打鍵情報を転送できる鍵数が本システムでの同時打鍵数に関する最大能力となる．計算上では，2ndCPU_R

から 3rdCPU へ転送できる打鍵情報は，およそ 40 鍵分が可能である．

2.2.3 3rdCPU

3rdCPU は，必要な機能のみにより製作し，各装置に 1 個ずつ合計 90 台の 8 bit のワンチップマイコン(NEC 製：μPD78)と 12 bit D/A を用い，2ndCPU_R から各鍵の 3rdCPU へのデータ転送は，デュアルポートメモリ(Dual Ported Memory)を用い，2ndCPU_R と 3rdCPU のインタフェースを製作し，高速なデータ転送を可能としている．

2ndCPU_R から転送された打鍵情報が指定アドレスのメモリに書き込まれる(図 4 中 E 部)と同時に，それに対応した CPU がアクチュエータの打鍵波形を作成しながら，アクチュエータ・サーボ系へ出力する．

3. 打鍵によるピアノアクションの運動

グランドピアノのピアノアクションの構造は，図 1 に示したように，複雑な機構を有し，その素材には，木材，革，そして，フェルトが用いられている．このピアノアクションの運動は，著者らのピアノアクションの挙動に関するハンマが打弦するまでの研究によって，バネ-スプリング系と類似した特性を示すことが分かっている．しかし，ハンマが打弦するまで，あるいは，打弦後の運動を全鍵において解析値に頼ることは難しいため，定量的な関係を定義することにした．

そして，まず，演奏の再現性を得るために，一連の打鍵動作(図 7 参照)を大きく 4 つの区間 A～D に区切り，鍵を動かして始めてからハンマが打弦するまで

表 3 編集情報
Table 3 Musical information for editing.

Parameter	Unit	Reference
Key	-	Key:21～108 Damper pedal:119 Shifting pedal:110
Volume of tone	-	1～127 in case of pedals, the values are expressed position of pedaling
Gate(Duration of tone)	ms	
Step	ms	
Timing of tone producing	-	
Bar		

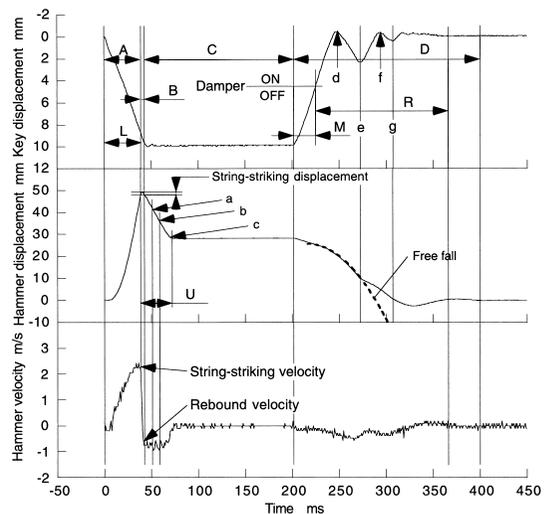


図 7 中程度の打鍵強度で打鍵した際の鍵およびハンマの運動
Fig. 7 General histories of displacement of key, hammer and velocity of hammer at touch in forte.

の時間(区間 A),ハンマが打弦後,跳ね返りバックチェックに保持されるまでの時間(区間 B),ハンマがバックチェックに固定されるまでの時間(図中区間 C 内のハンマ変位が一定値を示す箇所),鍵が放され,ハンマが初期の静止位置に静止するまでの時間(図中区間 D,以下,鍵復帰時間)のように,ピアノアクションの挙動を観測した.

3.1 打鍵による鍵およびハンマの運動

図 7 に中程度で打鍵した際の鍵およびハンマの運動を示す.鍵およびハンマの運動は,レーザー変位計を用いて計測し,また,ハンマの速度に関しては,ハンマの変位信号を微分して求めた.以下に,各区間について述べる.

3.1.1 区間 A

この区間は,鍵を動かし始めてからハンマが打弦するまでの過程で,ハンマが打弦するまでに遅れ時間(以下,打弦遅れ時間)があり,その打弦遅れ時間は音の強さが大きいと短く,小さいと長くなる.さらに,この打弦遅れ時間は,鍵を沈ませ,その沈ませた位置から打鍵を開始すると,ハンマの打弦するまでの距離が短くなるため,後述するように打弦遅れ時間を短くできる.たとえば,音の強さが同じである場合,沈ませる位置を大きくすることで,遅れを小さくすることができることになる.

3.1.2 区間 B

この区間は,ハンマヘッドが弦に衝突後,ハンマヘッドと弦のたわみにより,ごくわずか上方に変位する.高音部では,弦長が短く,剛性が高いため,そのたわみは非常に小さい.この区間の時間間隔は,打弦速度によらずほぼ一定の値を示し,高音部の方がその値は小さくなり,低音部約 4 ms,中音部約 2.4 ms,高音部約 1.6 ms であった.

3.1.3 区間 C

打弦後,区間 U では,ハンマの跳ね返り速度と打弦速度の関係はほぼ一定の関係を示す.ハンマの跳ね返り速度はハンマヘッド,弦の剛性などに影響し,打弦速度に対する比は低音部で約 30%,中高音部で約 50~60%,高音部で約 75%である.

打弦後,跳ね返ったハンマは, a 点でハンマローラがレペティションレバに接触し,レペティションレバを押し下げながらハンマは下方に移動する.このとき,バックチェックのとの摩擦によりハンマは制動される. c 点でハンマは固定され,指が鍵から放されるまで,その位置(以下,停止位置)で保持される.打弦後,区間 C の開始点から c 点でハンマがバックチェックに固定されるまでの時間は,打弦速度の大きさに影響し,

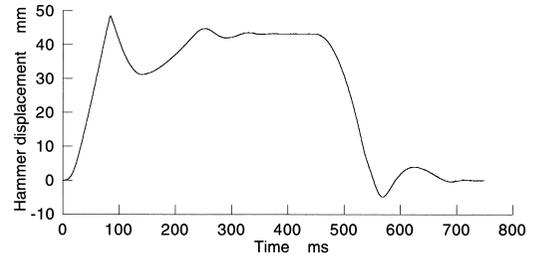


図 8 弱音の場合の打弦後のハンマ動作
Fig. 8 Sample motion of hammer after hammer struck a string in soft tone less than pianissimo.

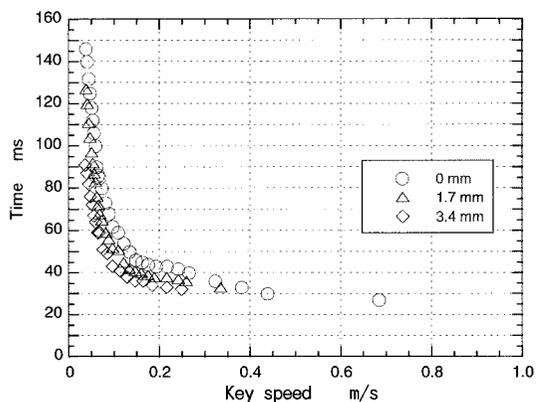
打弦速度が大きいと固定されるまでの時間は短くなる.ハンマの停止位置と打弦速度の関係は比例的な関係があり,打弦速度が大きいと停止位置は低くなり,弱くなると高い位置になる.また,弱い音になるとバックチェックに保持されず,図 8 に示すように,ハンマはレペティションスプリングに弾かれ,再び弦に近い位置まで上昇し,静止するまでかなりの時間を必要とする.

3.1.4 区間 D

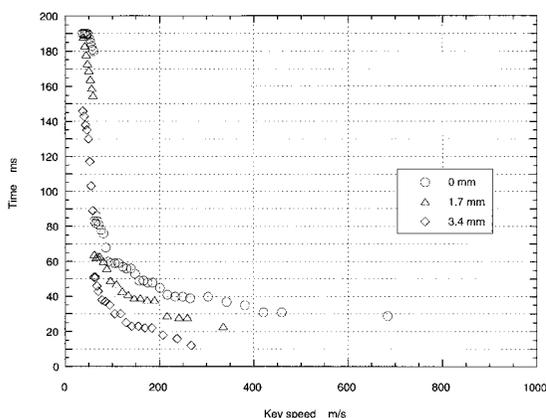
この区間は,指が鍵から放されると,レペティションスプリングの復元力によって,鍵は初期の静止位置に戻り,ハンマは少し遅れて自由落下する.初期の静止位置に戻った鍵は, d 点で鍵の後部がクッションクロスに衝突して跳ね返り,落下してきたハンマがレペティションレバ,ウィッペンを介して,鍵を再び押し戻す. f 点で再び d 点と同様な挙動を繰り返す.ハンマ静止位置が低いと鍵の戻りが速く,鍵およびハンマの静止するまでの時間が早くなり,区間 C のハンマの停止位置が同じであれば,打鍵の終点を鍵を沈ませた位置とすることで,鍵およびハンマをより早く静止させることができる.また, g 点以前で次の打鍵を行うと, d-e 点間, f-g 点間で鍵が他の機構と離れているため,希望どおりの音を得ることが難しく,演奏の再現性や安定性に影響する.

3.1.5 打鍵開始の始点,終点

打鍵の始点,終点を鍵を沈ませた位置とすることによって,区間 A, D の時間を短縮することができる.そして,音の長さの表現を考慮して,鍵を沈ませた位置はダンパが持ち上がる手前までの 3 段階(pos1, pos2, pos3)とした.このときの各区間の打鍵速度と時間の関係を図 9 (a), (b) に示す.鍵を沈み込ませる位置を 3 段階としたのは,各位置から打鍵した場合,ハンマの打弦速度が飽和して音の強さもそれ以上の強さを得ることができなくなることや,波形の接続を考慮したためである.図 9 中での飽和速度は, pos2 で



(a) 区間 A
(a) Section A



(b) 区間 D
(b) Section D

図9 鍵を沈み込ませた場合の区間 A, D の打鍵速度と各区間の時間の関係

Fig. 9 Relationship between the key velocity and the interval time in sections A and D when the start position of the key is gone down from the original position of the key.

約 0.4 m/s, pos3 で約 0.3 m/s となる。

3.1.6 考察

各区間の特性は音の強さが小さくなると、より長い時間間隔を必要とし、前章に述べた編集情報から実際のピアノを打鍵して演奏する場合には、一連の打鍵は音の強さに対応した各区間の必要時間を考慮することが重要である。また、後述するように、鍵ごとに音圧特性が異なるため、音の強さに対する挙動は 1 鍵ごとに異なることになる。さらにまた、同じ音を繰り返し発生させる再打鍵の場合には、区間 A, C, D の時間間隔は打鍵を行ううえで重要な要素であり、演奏を繰り返し行ったときの再現性を確保するうえでも重要で

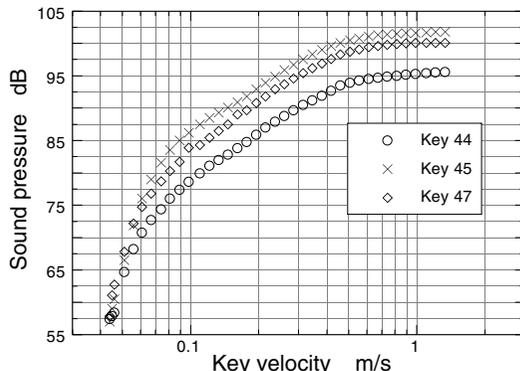


図 10 近傍の鍵による打鍵速度と発生音圧の関係

Fig. 10 Relationship between key velocity and sound pressure in neighboring keys.

あることが分かった。

4. 音の表現および打鍵波形に関する規定

前章で得た結果を基に、本システムでの音符データの編集情報である音の発生時刻、音の強さ、音の長さを定義した。以下について述べる。

4.1 音の発生時刻

音の発生時刻は鍵を駆動してからハンマが打弦するまでに打弦遅れ時間が生じ、音が小さくなるとその遅れは大きくなる。編集情報で設定した音の発生時刻を正確に表すために、音の強さによる打弦遅れ時間だけ前の時点で鍵を駆動する。

使用したピアノでは、後述する打鍵方法の場合、この打弦遅れ時間は音の強弱によって約 20 ~ 150 ms となっている。

4.2 音の強弱

本システムは MIDI 機器の使用もできるようにシステム設計を行った。MIDI 規格では、音の強さを 0 ~ 127 の数値で表している。図 10 に示すように、第 44 番鍵 (E4), 第 45 番鍵 (F4), 第 47 番鍵 (G4) の近傍の鍵による打鍵速度と発生音圧の関係を示す。最大音圧、最小音圧などその特性が異なるが、どの鍵についても打鍵強度と発生音圧の間には比例的な関係がある。そこで、最弱音となる鍵およびハンマの挙動を考慮して、最大、最小音圧を決めた。どの鍵でも打鍵速度 1.0 m/s 付近で打弦速度が飽和するため、最大音圧はその打鍵速度のときの音圧とし、全鍵の中で一番大きい発生音圧を音の強さ 127 とした。最小音圧は音の強さ 0 は使用せず、全鍵の中で発生できる最小の音圧を 1 と定めた。そして、127 段階に等分割したピアノ音圧テンプレートを作成した。このピアノ音圧テンプレートと鍵の発生音圧の関係を図 11 に示す。このテ

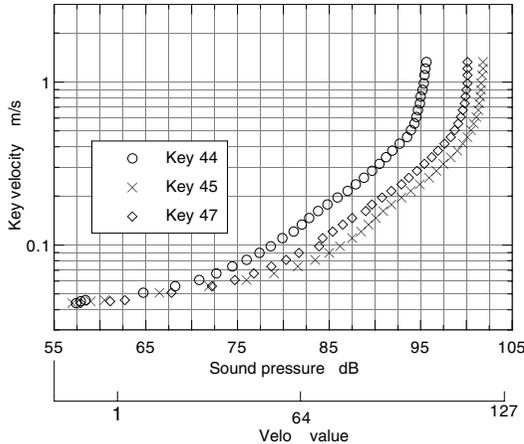


図 11 発生音圧とピアノ音圧テンプレート

Fig. 11 Relationship between sound pressure and volume in system.

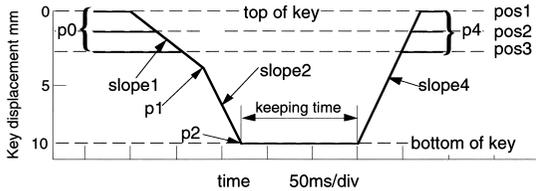


図 12 作成される演奏のための打鍵波形

Fig. 12 Touch waveform for performance.

ンプレートは全鍵に対して共通であるが、音圧計で計測して得た音圧と実際に聞こえる音量感が異なる鍵がある。このような場合には、人間の聴覚により任意の Velo において同じ音量感を得られるようにし、数値補正を行っている。

今回使用したピアノでは、最大、最小音圧の差約 40 dB が得られ、この結果、音の強さの分解能は約 0.3 dB となっている。

4.3 音の長さ

音の長さは、ハンマが打弦したときからダンパが弦上に戻るまでの時間として定義した。

4.4 打鍵波形

図 12 に本システムで作成される基本的な波形を示す。図中の記号は打鍵情報に対応し、また、P1 と P4 は POS1 ~ POS3 のうち、後述する変換方法によって、それぞれ 1 つが選ばれ、P1 と P4 の組合せにより 9 通りの打鍵波形が作成できるようにした。

鍵を一定の速度で鍵底まで動かした場合、図 13 に示すような打鍵速度とハンマ打弦速度の関係が得られるが、打鍵速度が 0.1 m/s 付近以下の弱い音の領域で、傾きが急峻になり、結果的に、発生音の解像度が悪くなる。そこで、文献 3)~6) で得られた解析の結果を基

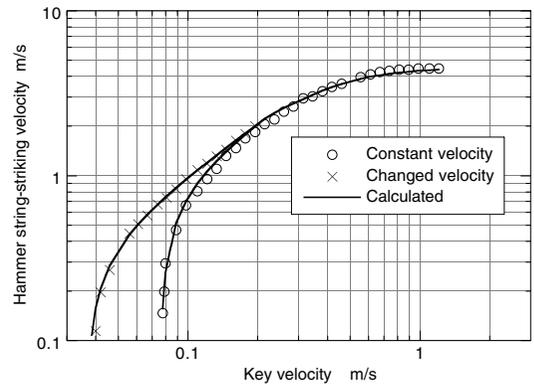


図 13 一定速度と切り換える方法による打鍵速度と発生音圧の比較
Fig. 13 Comparison between constant speed and switched speed in typical type of touch regarding between key speed and sound pressure.

に、鍵を動かし始めてから、ピアノアクションの機構の固有振動周期の半周期を経過したとき、その時点でのハンマ速度と同じになるように鍵の速度を切り換えるという鍵の駆動方法を考案した。その結果、一定の速度で打鍵した場合と比較すると、図 13 に示すように、この固有振動周期の半周期経過した時点で切り換える波形では、弱い音の領域での急峻な関係が改善され、打鍵速度に対する音の解像度を高くでき、また、安定な弱音の発生が可能となる。本システムでは、この切り換える方法による演奏を行わせるために、固有振動周期までの速度を slope1 で表し、固有振動周期を経過後、鍵底までをハンマの速度と等しくなる速度を slope2 を用いて表した。

5. データベース

鍵ごとに異なる特性(ピアノアクションの運動特性自体は近傍の鍵では類似しているが、音の強さを含めると異なる)を有するピアノアクションの運動を編集情報上で考慮することなく、人間が編集できるようにするために、各鍵ごとにデータベースを構成した。さらに、このデータベースは、後述する打鍵情報への変換処理で、1 回の打鍵に対して、次の打鍵状態を考慮しながら、そのつど、編集情報の velo を基にデータベースを参照し、演奏のための最適な打鍵波形を作成できるようにした。

5.1 データベースの構造

データベースはヘッダ部とデータ部から成り、データ部は前章で述べた音の強さと打鍵速度の関係を基にそれぞれの始点・終点に対応させてデータを構成した。データ構造を図 14(図 14 中のアルファベット記号は図 7 の記号に対応)に示す。ヘッダ部は、鍵底、打鍵

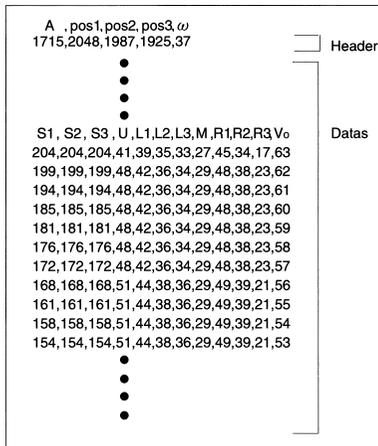


図 14 データベースのデータ構造

Fig. 14 Structure of data in data-base.

の始点・終点 (P1 ~ P3), および, 最適な駆動波形を作成するための固有振動の半周期の値 (ω) で構成した. 鍵底と打鍵の始点・終点に関しては, 位置を 12 bit D/A のビット値を用いて表し, 固有振動の半周期 ω は ms で表している.

データ部について, 以下に説明する. 各節の見出しの添字は pos1 ~ pos3 に対応し, 添字がない場合は, 打鍵の始点・終点に依存せず一定であることを表す.

5.1.1 音の強さ (V0)

データベースは, 以下 5.1.2 ~ 5.1.6 項までのパラメータをこの値 V0 に対応させてレコード形式で構成した. そして, 音の強弱を 1 ~ 127 の数値で表し, 数が多いほど音は強くなる.

曲データから打鍵波形を作成する場合には, 3.2 節の Velo から V0 に対応するパラメータを用いて変換を行う.

5.1.2 打鍵速度 (S1 ~ S3)

打鍵の各始点に対する打鍵速度を表す.

5.1.3 鍵底最小保持時間 (U)

区間 C でハンマが静止する以前に指を鍵から放すと, 鍵およびハンマはきわめて不安定な挙動を示し, ハンマの打弦後の挙動の予測が困難となり, 次の打鍵の希望どおりの音の再現性に影響する. そのため, ハンマがバックチェックに静止するまでの時間を設定し, 鍵底での最小時間間隔を表した. この値は打鍵の始点の位置とは関係なく, 打弦速度に対するハンマの跳ね返り速度に影響するため, 値は 1 つとなる.

5.1.4 打弦遅れ時間 (L1 ~ L3)

前に述べたように, 打鍵の各始点を下げることにより, 発音時刻の打弦遅れ時間が短くなるため, pos1 ~

pos3 に対応した打弦遅れ時間 L1 ~ L3 を表す.

5.1.5 ダンパ接触タイミング (M)

音の長さは前章で述べたように定義しているので, 指を鍵から放してからダンパが弦に触れるまでの時間間隔を設定した. この値は, 区間 C のハンマの停止位置に影響するが, 鍵の位置を下げた場合でも, 音の強さは同じであるため, 値は 1 つとなる.

5.1.6 次打鍵可能最小時間 (R1 ~ R3)

5.1.5 項の時間の終わりから鍵およびハンマが安定に静止するまでの時間で, 打鍵の各終点の時間間隔を表す. この値は, 次の打鍵の安定な動作を確保し, 希望どおりの音を得るために設定し, POS1 ~ POS3 の鍵の位置に影響するため, 次の打鍵が行えるそれぞれの最小時間間隔を表す.

6. 演奏のための変換方法

上述したデータベースでアクチュエータのための打鍵波形を作成する過程について述べる.

駆動波形の作成は, 対象の曲で使われている鍵およびペダルについて, 演奏情報の中から各鍵, 各ペダルごとに抽出する. そして, 抽出した情報ごとに打鍵波形の出力開始時刻を含む 22 byte 長のブロックデータの打鍵情報に変換を行い, すべての打鍵情報を対象に, 出力開始時刻の時間列順に並べ直して, 最終的に, 打鍵情報のファイルを作成する.

図 15 に, 1 鍵分の打鍵波形の変換過程と変換によって作成された波形で演奏した場合の鍵およびハンマの運動を示す. 対象となる曲情報からある鍵のデータのみを抽出したものは, 図 15 に示すように横軸を時間, 縦軸を音の強さとして, 矩形の状態で表すことができる. 矩形は左側が音の発音開始時刻, 右側が音の発音終了となり, 左側と右側の間は音の長さが表される. ここで, 鍵の時系列順の n 番目の演奏情報を $mus[n]$ と表し, その演奏情報に対応するデータベース内のベース情報を $base[n]$ として表す. $mus[n]$, $base[n]$ の要素は, 演奏情報, データベースの各データに関する記号を用いて表す.

まず, $note[n]$ は, $n = 0$ であるから前の打鍵状態を考慮する必要がないため, $mus[n].velo$ と等しい $base[n].Vo$ を検索する. $base[n].Vo$ に対応する要素を用い, 5.1.3 項の定義時間まで作成する. そして, 図 15 中に示す Step と $mus[n].gate$ の差を gap とし, $base[n].pos1$ から順に, 以下の式により, REL_CHECK を求める.

$$REL_CHECK = gap - base1.R1 - base2.L1$$

(1)

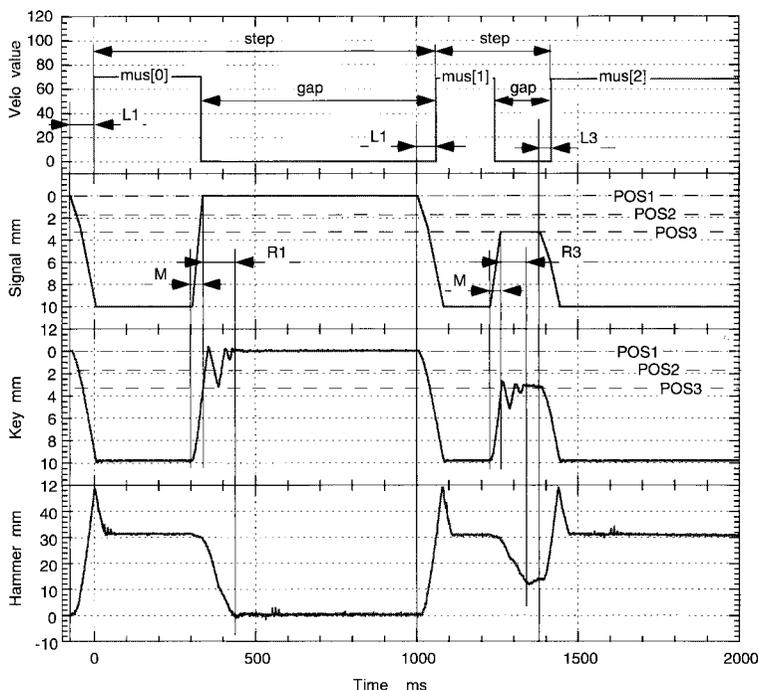


図 15 打鍵波形の作成方法

Fig. 15 Translating method from musical data.

REL_CHECK が正であるならば、そのときの pos1 に対応する要素を用い、負であるならば、pos1 を pos2, pos3 と下げ、それぞれに対応する要素を用いて、REL_CHECK が正となる位置まで繰り返し計算を行う。図 15 中に示す mus[0] と mus[1] の関係では、上記の式より pos1 が選択される。

図 15 中の mus[1] と mus[2] の関係のように、pos3 において、REL_CHECK が正とならない場合、演奏の再現性の観点から base[n] の要素を修正することはできない。これは、人間が弾いたものを記録した MIDI データから曲情報を作成した場合には、人間は指、腕の運動上、機構の特性を把握して演奏が行われているため、上記の pos3 の位置で変換できないことはない。しかしながら、演奏のための運動を行わず、コンピュータ上で数値を与えて、曲の表現をつける自動ピアノの場合には、gate の長さに対して、過大な時間を与えている場合やピアノ各鍵のピアノアクションの動的な特性上 gate が与えた数値を満足できない場合がある。特に、後者のピアノアクションの動的な特性上変換できない場合が低音域の鍵で多くある。これは、ピアノのハンマの質量が高音域に比べて、大きいため、スティフネスが小さいことや慣性力が大きくなることに起因していると考えられる。そのため、その gate を修正することによって、変換できるかどうかを再評

価することで基本的な打鍵であるのか、あるいは、同一鍵の反復打鍵になるのかの判断を含めて処理を行うようにする必要が生じた。そこで、mus[n].gate の長さを必要分だけ短くすることによって、gap の値が大きくなるようにした。このときの変換は、以下の式に従う。まず、REL_SAFE を求める。

$$\text{REL_SAFE} = \text{gap} - \text{base}[n+1].L3 \quad (2)$$

base[n].R3 と比較して、REL_SAFE が小さい場合には、次式の条件を検索する。

$$\text{mus}[n].\text{gate} > \text{base}[n].U \quad (3)$$

式 (3) の条件が成立する場合には、さらに、以下の条件を検索する。

$$\begin{aligned} & (\text{base}[n].R3 - \text{REL_SAFE}) \\ & \leq (\text{mus}[n].\text{gate} - \text{base}[n].U) \quad (4) \end{aligned}$$

式 (4) の条件が適合した場合、式 (4) の左辺が mus[n].gate を必要分だけ短くする量となり、新たな mus[n].gate の値が算出され、この値を用いて、鍵底保持時間を作成する。

以後、最終音まで変換を繰り返す。

ペダルデータは、ペダルの深さを 0 ~ 127 段階に分割し、データの深さと時刻から位置と傾きによる駆動データに変換を行っている。また、1 つの駆動データは 4 バイトとし、鍵用の 22 バイトにあわせるため、4 つ 1 組でまとめたデータとした (表 2 参照)。

表 4 変換結果

Table 4 Results of translated toch information.

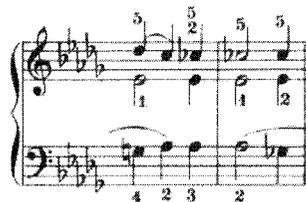
Title	Total notes	Translated notes	Translating rate %
Sonata No.14 Op.27 "Moonlight";Beethoven			
1. Adagio sostenuto	1144	1144	100
2. Allegretto	902	900	99.8
3. Presto	8320	6555	78.8
Sonata No.23 Op.58 "Appassionata";Beethoven			
1. Allegro assai	8018	6320	78.8
2. Allegro ma non troppo	2002	1980	98.9
3. Allegro ma non troppo	8359	7198	86.1
Sonata No.8 Op.13 "Pathétique";Beethoven			
1. Grave-Allegro di molto e con brio	7914	5939	75.0
2. Adagio cantabile	1657	1641	99.0
3.Rondo (allegro)	2448	2385	97.4
Paganini Etude No.3 "La Campanella";Liszt	5340	4194	78.5

7. 実 行

実際に、上記のデータベースと変換方法を用いたアプリケーションを開発し、MIDI 機器(ヤマハ製ピアノプレイヤー)を用いて、人間が弾いたときのデータを記録したものと、楽譜どおりの曲データから強さ、音の長さやテンポなどを編集した曲データの変換を行った。変換した曲は、ベートーベン作曲の月光(第1, 2, 3楽章), 熱情(第1, 2, 3楽章), 悲愴(第1, 2, 3楽章), リスト作曲の鐘の計 10 曲について行った。

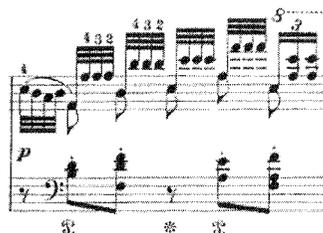
変換の結果を表 4 に示す。結果とし、試作したシステムで、変換できたのは月光の第 1 楽章のみであった。この曲は、テンポが他の曲に比べ遅いことが、エラーなしに変換が行えた理由と考えられる。しかしながら、この月光の第 1 楽章は、ピアニストでも大変な修練を必要とするきわめて弱い音で演奏が行われており、これらの結果を見る限り、変換ができたことと、曲の難易度が必ずしも一致しないことが分かる。

その他の曲で、変換できない場合の例を、ベートーベンの“月光”第 2 楽章, リストの“カンパネラ”で考察した。図 16 には、それらの曲の楽譜の一例を示す。月光第 2 楽章の変換ができなかった箇所は、21 小節で、繰り返し出てくる A の音である。この音の繰返し周期は 300 ms 程度であり、けっして速いテンポではない。しかしながら、音の強さが *pp* ~ *p* 以下の弱い音であるため、その音の強さによって、打弦遅れ時間(L1~L3)や次打鍵可能最小時間(R1~R3)を考慮すると変換ができなくなる。また、表 4 内の曲で、変換できなかった音は、多くの場合、上記と同様な理由によるものである。カンパネラでは、音の強さが *p*



(a) 月光第 2 楽章 小節 21 ~ 22

(a) Bars.21-22 in "Moonlight"



(b) カンパネラ 小節 63

(b) Bar.63 in "La Campanella"

図 16 変換できなかった演奏箇所

Fig. 16 Samples of musical notes system couldn't translated in musical scores.

程度であるのだが、F のように 3 回ずつ繰り返す音があり、その周期は 83 ~ 63 ms (12 ~ 16 Hz) を必要とするため、変換できなかったといえる。ピアニストにとっても、このような高速な繰返し打鍵は難しい演奏技法の 1 つである。基本的な打鍵による演奏方法では、音の強さを *ff* 以上に設定したとしても、14 Hz 以上の演奏は難しい。

以上の考察により、同一鍵の反復打鍵(鍵の中途から中途まで鍵を動かす演奏方法)を可能とする処理が必要であることが分かった。また、繰返し周期が高くなくても、*pp* 以下の弱い音の場合にも、反復打鍵の必要性があることを認識した。

すべてにわたって変換できた月光の第1楽章で、曲の演奏を行い、システムは編集から装置のセットアップ、そして、本システムでの演奏では、安定な弱音の演奏を行うことができ、繰返し演奏を行った場合の再現性を有することを確認した。

8. ま と め

本研究では、自動ピアノの楽譜情報処理に関する演奏システムの開発を行った。

開発した演奏システムは、システムを3つのコンピュータで構成することにより、演奏場面の画像表示、曲編集、データ転送の実時間制御、メモリの制約に関する要求を満たす、効率的な開発を行うことができた。現段階においては、システムは十分に機能していることを確認した。

演奏情報処理においては、各鍵で異なる特性を有するピアノアクションの挙動を、曲の編集時に考慮することなく編集できるようにするために、データベースを構築した。そして、ピアノアクションの挙動を観察することによって得られた結果を、データベース内に構成することによって、演奏の再現性を有し、安定した自動演奏を可能とした。さらに、変換処理によって作成された自動演奏は、ピアニストにとっても難しい安定した弱音の演奏でさえも、データベース中のデータを再現し、安定、かつ、繰返し演奏した場合の再現性を有することを確認した。

結果的に、基本的な打鍵、つまり、鍵の初期位置から鍵底まで鍵を動かす打鍵を行った動作では、有名な作曲家が作曲した曲を演奏することができないことが見い出され、さらにまた、自動演奏装置には、同一鍵の反復打鍵を可能とするシステムが必要であることも明らかになった。

参 考 文 献

- 1) 林 英治, 山根雅巳, 森 一: ピアノ打鍵装置の開発, 精密工学会誌, Vol.59, No.4, pp.135-140 (1993).
- 2) Hayashi, E., Yamane, M. and Mori, H.: Development of Moving Coil Actuator for an Automatic piano, *Int. J. JSPE*, Vol.28, No.2, pp.164-169 (1994).
- 3) 林 英治, 山根雅巳, 森 一: 自動ピアノの開発

に関する研究—第1報, ハンマ打弦に至るまでのピアノアクションの挙動の解析, 日本機械学会論文集中編, Vol.60, No.579, pp.325-331 (1994).

- 4) 林 英治, 山根雅巳, 森 一: 自動ピアノの開発に関する研究—第2報, ピアノアクションの挙動に基づく同一鍵の反復打鍵の研究, 日本機械学会論文集中編, Vol.61, No.587, pp.339-345 (1995).
- 5) Hayashi, E., Yamane, M. and Mori, H.: Behavior of Piano-action in a Grand Piano for an Automatic Piano, *Proc. 1st Pioneering International Symposium on Motion and Vibration Control in Mechatronics*, pp.80-85 (1999).
- 6) Hayashi, E., Yamane, M. and Mori, H.: Behavior of Piano-Action in a Grand Piano. I: Analysis of the Motion of the Hammer Prior to String Contact, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol.105, pp.3534-3544 (1999).
- 7) Hayashi, E., Yamane, M., Mori, H., et al.: *Development of a Piano Player*, pp.426-427, International Computer Music Conference (1993).
- 8) 林 英治, 山根雅巳: ピアノの自動演奏について—ハードウェアからのアプローチ, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2, pp.26-29 (1996).

(平成11年9月2日受付)

(平成12年5月11日採録)



林 英治(正会員)

1966年生。1989年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1994年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。1994年同大学理工学部助手。1997年九州工業大学情報工学部講師を経て、1999年同大学助教授。工学博士。機械力学・制御、メカトロニクスの観点から、楽器の自動演奏システム、自律駆動型パーソナルロボット、および、知的情報処理システムの研究に従事。日本機械学会、精密工学会、日本ロボット学会、日本AEM学会各会員。



山根 雅巳

1929年生．1953年早稲田大学第一理工学部機械工学科卒業．1967年同大学理工学部機械工学科助教授．1972年同大学教授．2000年同大学名誉教授．工学博士．楽器の自動演奏装置の研究に従事し，現在もオルガンの自動演奏装置の開発・研究を続けている．日本機械学会，日本オーディオ協会各会会員．

1929年生．1953年早稲田大学第一理工学部機械工学科卒業．1967年同大学理工学部機械工学科助教授．1972年同大学教授．2000年同大学名誉教授．工学博士．楽器の自動演奏装置の研究に従事し，現在もオルガンの自動演奏装置の開発・研究を続けている．日本機械学会，日本オーディオ協会各会会員．



森 一

1930年生．1954年一橋大学経済学部卒業．家業の紡績会社へ入社の際の紡績部長，営業部長などを経る．1961年アメリカで新規事業の調査を行い，自動販売機の研究をはじめる．

1963年日本自動販売機（株）設立，専務取締役〔1984年（株）アベックスに改称〕．1967年代表取締役社長．学生時代からクラシック音楽に興味を持ち，特にピアノを非常に熱心に練習．また，山登りを通して自然に親しむ．釣り，ハンティング，写真（草花，風景など）も嗜む．