

ピアノを MIDI で駆動する際のノート・オン・タイミングの補正について

宮川泰志* 三浦雅展** 柳田益造*

(*同志社大学・工 **龍谷大学・理工)

ピアノを MIDI で駆動する際の発音タイミングの誤差を、MIDI データを変更することで補正する方法を述べている。MIDI ピアノはある程度この誤差を補正する機能が備わっているのだが、ピアノの個体差を考慮していない点など不十分な部分がある。全ての鍵についてノート・オン・メッセージの送出から発音までの時間の打鍵強度(ベロシティ)依存性や鍵依存性、並びに各ベロシティ値に対して発音に必要な最小のデュレーション、同じ音が連続する場合発音可能な最低限の打鍵間隔を個別に測定することによって、正確な補正を可能にする方法を示している。

Compensation of note-on timing for pianos driven by MIDI

Yasushi MIYAGAWA* Masanobu MIURA Masuzo YANAGIDA

(*Doshisha Univ ** Ryukoku Univ)

Proposed is a method to adjust the timing of transmitted MIDI signals for driving a MIDI piano by rewriting MIDI data to compensate time delays caused by slow strokes comes from delay to note-on message with small velocity values. MIDI pianos are provided with systems to compensate this phenomenon, however these systems are usually unsatisfactory as they are designed common to the types of the pianos, but not for individual pianos.

Proposed here is an accurate compensation system for adjusting the transmission timing of MIDI signals by measuring velocity dependency of the delay time between the transmission time of a note-on message and corresponding stroke on a string and that of the minimum required time between two successive strokes on a string for each key

1.はじめに

近年、電子楽器産業の発展に伴い、作曲や演奏などの音楽活動において多種多様な形態が存在するようになってきている。特に、MIDI (Musical Instrument Digital Interface) の登場によって容易に電子楽器を扱うことができるようになり、楽器を満足に演奏することができなくとも、楽曲の演奏や作曲など音楽活動を楽しむことができる。このような中で電子楽器を用いた自動演奏の研究がさかんに行われている。

このような背景の下、MIDI を用いた楽曲の演奏や作曲においては主に DTM (Desk Top Music) 用の音源やシンセサイザが用いられるが、MIDI を用いての演奏に生楽器を用いたいという要求から、生楽器に制御機構を組み込むことで MIDI による自動演奏を可能とした製品も開発されている。[1]

MIDI 機能付自動演奏ピアノ (以下 MIDI ピアノと略す) もそのような製品の一つであり、鍵盤の下部に打鍵を制御する電磁石が装備されており、MIDI データを用いた自動演奏が可能になっ

ている。また、逆に演奏情報 (打鍵タイミングや打鍵速度、ペダル操作) を MIDI データとして出力あるいは記録できるようになっている。この MIDI ピアノにはさまざまなメリットがある。生ピアノを MIDI 音源として利用することができ、また、プロのピアノ奏者の演奏を MIDI ピアノを用いて記録し再生すれば、自宅でその演奏を再現することができる。また、友人や教師のピアノ伴奏を記録すれば、一人でアンサンブルの練習をすることも可能である。

MIDI ピアノを自動演奏させると、違和感のある演奏になる場合がある。

これは、打鍵タイミングや音の強さの乱れが原因と考えられるが、本研究ではこのうち打鍵タイミングの補正を試みる。

2.ピアノを MIDI で駆動する際の演奏の乱れ

MIDI ピアノを MIDI で駆動した際、明瞭に聞こえるべき旋律が伴奏音に埋もれてしまったり、同時に発音されるよう指示された複数の音のタイミングが揃わなかったり、本来等間隔で連続的

に発音されるべき複数の音が不規則に乱れて発音されたように聞こえたりするなど違和感のある演奏になってしまうことがある。音の強さや発音タイミングが乱れ、MIDI データの指示から逸脱してしまうことが問題の本質である。

補正を全く行わなければ、ベロシティ値の違いによって最大で 100ms もの発音タイミングのばらつきがありうる。

また、同一のベロシティ値であっても鍵のちがいでによって 10dB 程度の音の強さのばらつきがあることが分かっている。[2]

このような演奏タイミングの乱れは補正されるべきであり、MIDI データの指示通りの演奏が望まれる。

3.演奏の遅れとその補正の目標

MIDI では、発音や消音、ペダルの操作などを表す MIDI イベントの発音タイミングをデルタタイム（各イベントの時間差を独自の記述法で可変長表示したもの）により定めている、また MIDI イベントのうちノート・イベントは発音や消音に関するイベントであり、ノート・オンが発音、ノート・オフが消音を表し、同じ音が継続して発音されている時間をデュレーションと呼ぶ。また、ノート・オン・メッセージに含まれるベロシティ値が打鍵の強さに対応している。

今回はノート・オン・タイミングの補正を扱う。発音タイミングが遅れる時間だけノート・オン・メッセージを早く送信することで MIDI データの指示通りのタイミングで発音させることが可能なのである。

発音タイミングを補正することによって、同時に発音するべきであるにもかかわらずベロシティ値の差によってばらついていた複数の音が揃って聞こえるようにできるだけでなく、発音を若干早めることによって同時発音では聞こえにくかった音浮き立たせることができる。ディミニマンドしながらのアルペジオの各音の間隔が揃うことで音がきれいに響くなどの効果も期待できる。

発音タイミングが乱れる主な原因は、ベロシティ値や鍵の違いによってノート・オン・メッセージを MIDI ピアノが受け取ってから実際に発音されるまでの時間が異なっているためである。具体的には、ベロシティ値が小さい場合は鍵を駆動するソレノイドの力が弱く、ハンマーの動きが遅くなるからである。

本研究では MIDI ピアノとして Y 社の C3 サイレント・アンサンブル・プロフェッショナルモデルを使用した。このピアノにはベロシティ値の違いによる発音タイミングの違いをある程度補正

すると共に、ある音のノート・オフに続いて極めて短い時間で同じ音がノート・オンされる場合など、ピアノの構造上演奏不可能な MIDI データを受信した場合でもデータ通りでなくとも次善の演奏を可能にする機能が組み込まれている。

しかしこの Y 社の補正システムは同じ機種であれば全てのピアノに同じものが搭載されており、ピアノの個体差や鍵の違いによる発音タイミングの違いは考慮されていない。この Y 社の補正システムを OFF にし、実際に特定のピアノについて鍵ごとにすべてのベロシティ値についてノート・オン・メッセージの発信から実際の発音までの時間を測定することでより正確な補正が可能になるはずである。

4.MIDI ピアノの特性の測定

ノート・オン・メッセージが送信されてから実際に発音となされるまでの時間を発音遅延時間と呼んでおく。発音遅延時間のベロシティ値や鍵の違いによる差や、Y 社の補正システムの機能を調査するために以下の測定を行った。

4.1 発音遅延時間のベロシティ値・鍵依存性

4.1.1 測定方法

市販のソフトウェアシーケンサの MIDI 再生と同期して録音を行う機能を用いて、MIDI データの指定するタイミングと実際に発音された時間との差を求めた。実際にはソフトウェアシーケンサの MIDI データの発信には若干（1~2ms 程度）の誤差があり測定方法は改善の余地を残している。ただし、発音遅延時間よりも 2 桁小さいので、詳細さを求めなければこれを誤差として無視できるレベルである。

4.1.2 測定内容

Y 社の補正システムを OFF にした状態、ON にした状態双方で、すべての鍵について 1~127 すべてのベロシティ値のノート・オン・メッセージを逐次送信して録音した。ある音の波形の振幅が一定値を超える瞬間をその音のアタック時点としている。すべての測定はマイクを固定位置としたので、発音弦とマイクの距離は鍵によって異なることになる。当該ピアノの幅は 1.49m、マイク位置はピアノの横 30cm、高さ 150cm 程度のところに立てたので、その差は最大で 3.6ms 以下である。

4.1.3 測定結果

(1) 鍵依存性

ベロシティ値ごとに全ての鍵の発音遅延時間の平均と標準偏差を求めた。

これを、横軸にベロシティ値、縦軸に発音遅延

時間をとったグラフで示す。

図1がY社の補正システムをOFFにしたもの、
図2がONにしたものである。

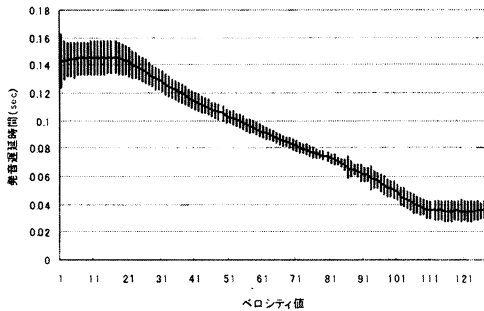


図1：Y社の補正システムをOFFにした場合のペロシティ値と発音遅延時間の関係（全ての鍵に関する平均と標準偏差）

図1からペロシティ値が20～110の範囲において、発音遅延時間はペロシティ値が小さくなるにつれ直線的に増大、ペロシティ値1～20、110～127の範囲においてはほとんど変化が無いとが分かった。

また、ペロシティ値が低い値においては鍵によるばらつきが大きく20ms程度になった。

次にY社のシステムをONにした場合のグラフを図2に示す。

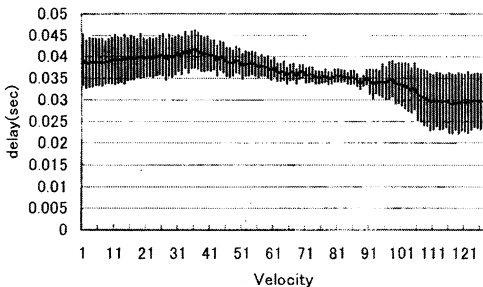


図2：Y社の補正システムをONにした際のペロシティ値と発音遅延時間の関係（全ての鍵に関する平均と標準偏差）

図1、2から、Y社の補正システムによってペロシティ値による発音遅延時間の差が抑制され、高いペロシティ値と低いペロシティ値の発音遅延時間の差が10ms程度となっている様子が確認できる。また、鍵によるばらつきはY社の補正システムをOFFにした場合と比較して大差なく、Y社の補正システムは鍵による発音遅延時間の違いを考慮していないことが分かる。

(2) 鍵依存性

横軸に鍵の音名を、縦軸に発音遅延時間を取り、ペロシティ値1から10刻みで表示した。

まず、図3にY社の補正システムをOFFにし

た場合を示す。

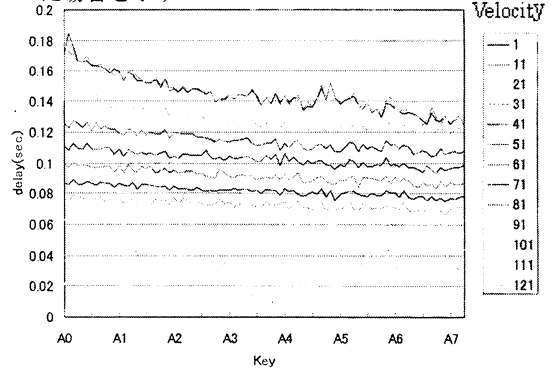


図3：Y社の補正システムをOFFにした場合の鍵と発音遅延時間の関係

図3から、特にA2以下の低音部の鍵において低いペロシティ値での発音遅延時間が大きくなる傾向が見られる。また、高いペロシティ値においては、決まった傾向は見られないが、発音遅延時間のばらつきが大きくなるようである。

次に、Y社の補正システムをONにした場合を示す。

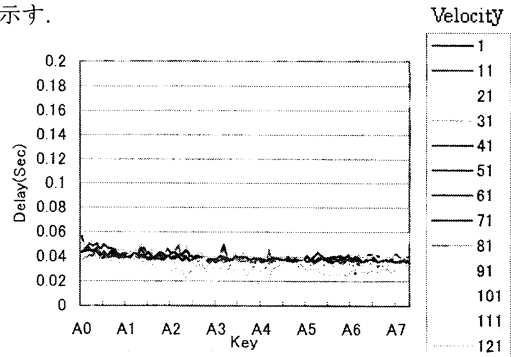


図4：Y社の補正システムをONにした場合の鍵と発音遅延時間の関係

図3、4からY社の補正システムによってペロシティ値による発音遅延時間の差が抑制されること、低音弦でペロシティ値が低い場合に発音遅延時間が大きくなる傾向がある程度抑制されていることが分かる。

(3) 典型的特性

まず、Y社の補正システムをOFFにしたものから、いくつか典型的な挙動をする鍵をあげて例を示す。

まず、Y社の補正システムをOFFにした場合の、E5、G6について示す。グラフは横軸にペロシティ、縦軸に発音遅延時間を取っている。

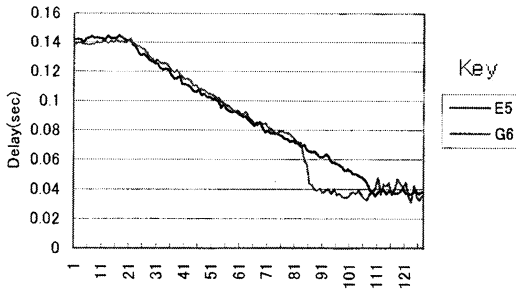


図 5 : Y社の補正システムを OFFにした場合のペロシティ値と発音遅延時間の関係 (E5,G6)

図 5 から鍵 E5 においてはペロシティ双方とも 20~110 の範囲においてペロシティ値が小さくなるにつれ発音遅延時間がほぼ直線的に増大しているのが分かる。しかし、G6 においては、この関係が崩れ、ペロシティ値が 85 辺り以下で急激に発音遅延時間が大きくなり、以上では平坦になっていることが分かる。

また、同様に Y 社の補正システムを ON にした状態での同じ E5, G6 の鍵について示す。

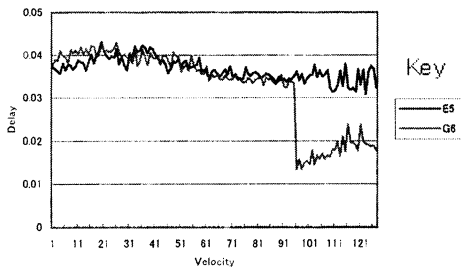


図 6 : Y社の補正システムを ONにした場合のペロシティ値と発音遅延時間の関係 (E5, G6)

Y 社の補正システムを OFF にした場合と ON にした場合を比較すると、E5 のような Y 社の補正システムを OFF にしたとき比較的直線に近い変化をしている鍵に関しては発音遅延時間がほぼ一定になっているが、G6 のような Y 社の補正システムを OFF にした時、特定のペロシティ値以下で急激に発音遅延時間が大きくなるような鍵に関しては、Y 社の補正システムを ON にした場合も同様の傾向が残っているのが見られた。

(4) 再現性

Y 社の補正システムを切った状態で C1, C4, C7 の三つの鍵について、1~127 すべてのペロシティ値のノート・オン・メッセージを 10 回づつ送信し録音。同一の MIDI 信号から得られた発音遅延時間の平均と標準偏差を求めた。

横軸にペロシティ値、縦軸に発音遅延時間を取ったグラフに、鍵ごとのペロシティと 10 回の平均の発音遅延時間の関係をプロット、縦線で標準偏差を表す。

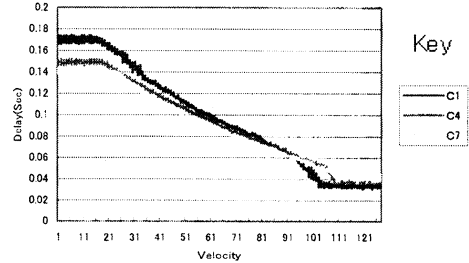


図 7 : 同一 MIDI 信号での発音遅延時間のばらつき

同一の MIDI 信号での発音遅延時間の標準偏差は 5ms 以下であり多くは 2~3ms 程度であった。これは MIDI シーケンサの動作の誤差が多少含まれることを考慮すると、MIDI ピアノの動作の誤差は十分小さいと考えられる。

4.2 発音可能な最小ペロシティ値とデュレーションの関係

本研究で使用した MIDI ピアノでは、Y 社の補正システムを OFF にした状態で、非常に低いペロシティ値で、非常に短いデュレーションのノートメッセージを受け取るとハンマーが弦に届かず、音が出ない場合があることが分かっている。

どの程度のデュレーションがあれば、どの程度のペロシティ値でも発音可能であるかを調べるために、C1,C2……C8 の 8 つの鍵について、デュレーション 1ms, 10ms……110ms のノート・イベントについて、発音可能な最小のペロシティ値を求めた。ペロシティは 10 刻みで測定した。

各鍵での各デュレーションでの発音可能な最小のペロシティ値図 8 に、横軸にデュレーション、縦軸にペロシティ値を取り各デュレーションでの発音可能な最小のペロシティ値の全鍵での平均プロット、標準偏差を縦線で表した。

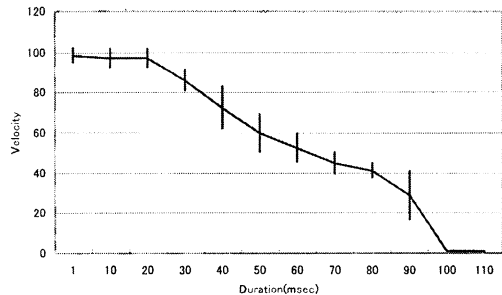


図 8 : 発音可能な最小のペロシティ値とデュレーションの関係

図 6 から、1~20 の低いベロシティ値では少なくとも 100ms 程度のデュレーションがなければ発音が不可能であることが分かる。デュレーションが長くなるにつれ、低いベロシティ値であっても発音が可能となっている様子が確認できる。

このグラフは 4.1 節で求めたベロシティ値と発音遅延時間の関係のグラフから 30ms を減じたものとほぼ同じである。

尚、Y 社の補正システムを ON にした場合には、全ての鍵、ベロシティ値、可能な限り短く設定したデュレーションで発音が可能であった。

このことから Y 社の補正システムでは、ベロシティ値が低くデュレーションが短いノート・イベントを受信した際、ノート・オフを遅らせることで発音を可能にしていると考えられる。

4.3 発音可能な同音最小打鍵間隔の測定

MIDI ピアノに同じ鍵を連続で打鍵するノート・イベントが送られた際、正常に発音が行われない場合がある。

どのような状況で正常に発音が行われないか調べるために、4.3.1 節ではある音をノートオフしてからごく短時間に同じ音を再びノートオンする場合について、4.3.2 節では同じ音を短い時間内に複数回連続で打鍵する場合について測定を行った。

4.3.1 同音 2 回打鍵の最短時間間隔

ある音をノート・オフしてから同じ音をノート・オンする MIDI データについて、先行音のノート・オフから後続音のノート・オンまでの時間を、5ms、10ms、15ms……100ms と変化させ、後続音が正常に発音される最小の間隔を求めた。

後続音のベロシティ値や、鍵によって発音可能な最小の間隔が異なっている可能性があるため、ベロシティ値は 1 から 120 まで 10 刻みで、C1 から C8 まで 1 オクターブごとに測定を行った。

横軸にベロシティを、縦軸に時間をとり全ての鍵の発音可能な時間間隔の最小値の平均をプロット、縦線で鍵によるばらつきを表している。

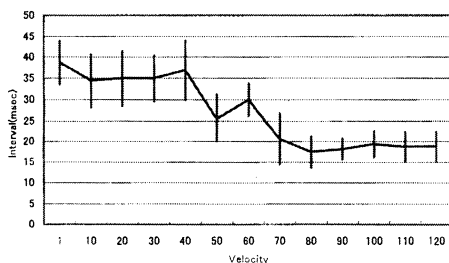


図 9：発音可能な最小の時間間隔とベロシティ値の関係

低いベロシティ値させるには、40ms 程度あるいはそれ以上の時間間隔が必要であった。

これにより、先行音がノート・オフされてから鍵が水平状態に戻るまでに 40ms 程度の時間がかかると考えられる。ベロシティ値が高くなるにつれ、短い時間間隔でも発音が可能となる傾向が見られるが、これはベロシティ値が高ければ、鍵が完全に水平状態に戻らなくても、強引に打鍵が可能であるためと考えられる。また、ベロシティ値が低い場合に、時間間隔が小さいと、後続音が不自然に大きくなってしまいう現象が見られた。後続音の乱れの程度は不規則であり、特定の時間間隔で乱れが大きくなるといった傾向は見られなかった。この傾向はとくに高音部の鍵が顕著であった。

Y 社の補正システムを ON にした場合には、先行音のノート・オフから後続音のノート・オンまでの時間が 0 であっても発音が可能であった。Y 社の補正システムは、先行音を強制的にノート・オフして後続音の発音を可能にしているものと考えられる。

4.3.2 同音連続打鍵の最短時間間隔

一拍で 10 回同じ音を打鍵する MIDI データを、様々なテンポで MIDI ピアノに送信し、音が抜けることなく 10 回発音される最大のテンポを求めた。テンポは 20BPM から 10 刻みで 140BPM まで、ベロシティ値は十分に大きく取り 110 で固定、デュレーションは設定できる限り短くした。

鍵によるばらつきを見るために、C1 から C8 まで 1 オクターブごとに測定を行った。

Y 社の補正システムを OFF にした状態と ON にした状態について、同様の測定を行った。

図 10 に横軸に鍵、縦軸にテンポをとり、発音可能な最大のテンポをプロットした。

Y 社の補正システムを ON にした場合を実線で、OFF にした場合を破線で表している。

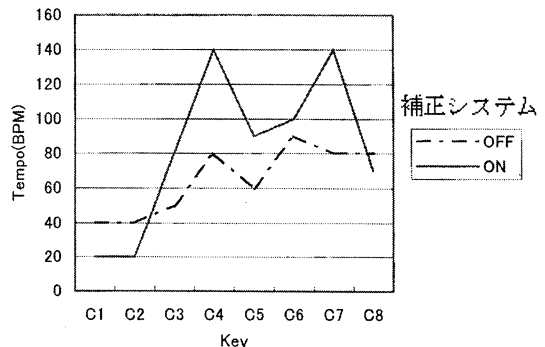


図 10：発音可能な最大のテンポ

Y 社の補正システムを OFF にした状態では、

およそテンポ 65BPM 程度まで発音が可能であるが、低音源ではテンポ 40BPM 程度が限界となっている。また、高音部の鍵になるにつれ高速な打鍵が可能となる傾向があるが、鍵によるばらつきが大きく統一的には扱えない。

Y 者の補正システムを ON にした場合は、多くの鍵で OFF にした時よりも速いテンポでも音が抜けることがなく発音できたが、C1, C2 の鍵では 30BPM という遅いテンポで打鍵が行えなくなった。

これは、4.2 や 4.3.1 節で述べたような補正が、鍵による鍵が水平状態に戻る時間の違いなどを考慮していないために不適切な補正が行われた結果と考えられる。

また C4 などの鍵では非常に高いテンポで発音が可能であったが、指定したテンポよりかなり遅れた演奏となっていた。これは、演奏が不可能な短い時間間隔のノート・オンを受信した場合、後ろのノート・オンを遅らせて発音を可能にしているためと考えられる。

5. ノート・イベントの補正

4 節の測定から、この MIDI ピアノにおいて MIDI データの指示通りの演奏を行うための補正システムは以下のような条件を満たさなければならぬことが分かった。

1. ノート・オン・タイミングを各鍵ごとにベロシティ値に応じて適切に補正しなければならない。
2. 全てのノート・イベントのデュレーションは発音可能な長さで無ければならない。
3. 2 の条件に引っかからない限り、同じ音が連打される場合の先行音のノート・オフは、後続音のノート・オンよりも 100ms 以上早くなければならない。
4. 2 の条件により 3 の条件を満たせない場合は、同じ音が連打される場合、先行音のノート・オフと後続音のノート・オンの間の時間差は、後続音が発音可能な最短の時間間隔よりも長くなければならない。このような条件を満たす補正システムのアルゴリズムは、以下のような物になる。

(1) 対象となる MIDI データの中のノート・オン・メッセージを測定によって得られた遅延時間だけ前にずらす。ノート・オン・メッセージだけを前にずらすことで発音遅延時間の分だけデュレーションが延長される。発音可能な最短のデュレーションとは、ノート・オン・メッセージを MIDI ピアノが受け取ってから、惰性で発音可能

な位置まで鍵が移動する時間であるから、この操作によって十分発音可能なデュレーションが確保できる。

(2) 同じ鍵を連続で打鍵する場合、先行音のノート・オフを後続音のノート・オンより 100ms 以上早くする。

(3) 2 の操作によって先行音のデュレーションが発音できないほど小さくなってしまった場合は後続音が発音可能な範囲で先行音のデュレーションを長くする。

(4) (3) の操作をしても先行音が発音可能なデュレーションが確保できない場合は後続音のノート・オンを後ろにずらす。

6. まとめ

Y 社の MIDI ピアノの、発音遅延時間の対ベロシティ値や鍵に対する依存性や、発音可能な最小のベロシティ値とデュレーションの関係、発音可能な最小の打鍵間隔を Y 社の補正システムを OFF にした状態、ON にした状態双方について求め、MIDI ピアノの特性や Y 社の補正システムの機能を推測し、より正確な補正を行うためのアルゴリズムを提唱した。

このアルゴリズムを実装し、ある曲に適応して MIDI ピアノで演奏したものを聴取してみると、Y 社の補正システムと比べ、よくなっている部分もあるが、悪くなっている部分もあるという印象を受けた。現在のところどのいうフレーズであればよくなるということは確定的に分かってはいない。

尚、本研究は同志社大学学術フロンティア事業の助成を受けた。

参考文献

- [1] RENCON Web Site
<http://shouchan.ei.tuat.ac.jp/~rencon/NIME04/index.shtml>
- [2] 宮川泰志 “ピアノを MIDI で駆動する際のベロシティ値の補正について” 音楽音響学会資料 (2004, 3)
- [3] 田口友康, “MIDI ピアノ音源の二、三の音響特性”, 音楽音響学会資料, (2003, 6)
- [4] 田口友康, “ある MIDI ピアノ音源のラウドネス特性”, 音楽音響学会資料, (2002, 5)