

家庭における子どもの練習意欲を高める ピアノ連弾支援システムの提案

大島 千佳[†] 西本 一志^{†,††} 鈴木 雅実[†]

本論文では、演奏初心者の親が、初級者の子どもと容易にピアノ連弾できるようにするシステム“Family Ensemble”を提案する。近年、ピアノ・レッスンに連弾が取り入れられ、連弾を通じて生徒の練習意欲が高まったという報告がある。さらに連弾には、パートナーと呼吸を合わせることで、音楽性を育てるという効果がある。しかし子どもが、家庭内で演奏経験の乏しい家族と連弾を行うことは難しい。そこで、本研究で提案する Family Ensemble では、子どもの親が担当する連弾のパートを、正確な音高列を出力する機能と、子供の演奏位置を追従する機能により支援することで、まったくの初心者の親が、演奏誤りの多い初級者の子どもとでも連弾できるようにした。Family Ensemble を使用する場合としない場合の両方について、合同練習を 5 組の被験者ペアに行ってもらったところ、使用した合同練習では、連弾の回数と Family Ensemble に支援されていない子供の独奏による練習回数が大幅に増加した。この結果から、Family Ensemble によりまったくの初心者と初級者によるピアノ連弾が可能になることだけでなく、支援されていない子どもの練習意欲が増すことが示された。さらに、初心者と初級者のペアでありながら、お互いに音楽的なアイデアや演奏技術について意見をかわしている様子が見られた。

A Piano Duo Performance Support System to Motivate Children's Practice at Home

CHIKA OSHIMA,[†] KAZUSHI NISHIMOTO^{†,††} and MASAMI SUZUKI[†]

In this paper, we propose “Family Ensemble” system that is a piano duo supporting system for a pre-instrumental parent and his/her child who is a beginner in playing a musical instrument. Recently, a piano duo-play is introduced into piano lessons and it has often been reported that children come to practice more enthusiastically and to perform more musically by means of the duo-play. However, most children can play duos only in the piano lesson, since most of their parents cannot play the piano. Family Ensemble system makes it easier for the parent to correctly reproduce given sequence of pitches along with the child's performance, using a score-tracking algorithm. In experiments, we confirmed that Family Ensemble can facilitate the playing of duos by the pre-instrumental performer and the beginner. By supporting the pre-instrumental performer, Family Ensemble prompts the child to practice the piano more willingly. Furthermore, we found, during a joint practice using Family Ensemble, that some subjects discussed musical ideas that they could not have talked about without the system.

1. はじめに

本論文では、演奏初心者の家族が、ピアノのレッスンに通う子どもと容易にピアノ連弾できるようにするシステム“Family Ensemble”（以下、“FE”と略す）を提案する。このシステムの主たる目的は、家庭での

子どものピアノを練習する意欲を促進することにある。さらに、初級者と初心者による初級連弾曲を用いたピアノ連弾の実験によって、FEの有効性を評価する。

ピアノ・レッスンでは、独奏曲を課題曲として用いることが一般的であった。しかし近年、2人で1台のピアノを同時に演奏する「連弾」を取り入れることが奨励されている。たとえば、ピアノを習い始めて1週目の初級者の子どもが、「ド」を数個並べただけの楽曲を練習する際にも、先生が連弾のパートナーとして多様な和音を響かせながら付き添うレッスンが行われている^{9),12)}。連弾を通じて生徒の練習意欲が高まり、子どもたちがパートナーの演奏を聴くことで自ら「やり

[†] 株式会社国際電気通信基礎技術研究所メディア情報科学研究所
Media Information Science Laboratories, Advanced
Telecommunications Research Institute International

^{††} 北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター
Center for Knowledge Science, Japan Advanced Institute
of Science and Technology

たい表現」を自然に演奏に表すようになることが示されている¹⁰⁾。また、どんなに初級者の子どもも、連弾の中でパートナーと呼吸を通わせるという、音楽性を育てるうえで必要不可欠な営みを行うようになることが報告されている¹³⁾。

このようにピアノ連弾をピアノの学習に取り入れることには多くの利点があるが、教室を離れて家庭でも連弾による練習を実践することは一般に難しい。多くの場合、子どもの両親は楽器演奏経験がないか、楽器を弾かなくなってから長い期間が経過しているため、すぐには楽器を演奏できない。また初級者同士では双方に誤りが多く、しかもお互いにパートナーの演奏誤りに即座に対処できる能力がないため、連弾することは難しい。これは、市販されているほとんどの連弾曲集が、少なくともペアの一方として中級以上を想定していることから示唆される。この結果、家庭ではピアノ演奏学習における連弾の有効性を活用できないのが実情である。

そこで本論文では、家庭において初級者の子どもと初心者の親がピアノ連弾を容易に行えるようにするシステムである FE を提案する。先述のとおり、音楽性の育成においては、パートナーの演奏を聴き、呼吸を合わせることが非常に重要となる。それゆえ本研究では、子どもの演奏にあわせて自動的に伴奏する機械を構築するのではなく、あくまで人間を連弾のパートナーとする。したがって、演奏誤りが多い子どもと、まったくの初心者である親による連弾を可能とする支援手段の実現が、本研究が解決すべき技術的課題となる。

この支援手段の実現にあたって留意すべきことは、子どもに対する直接的な支援は行うべきではない点である。これは、ピアノ学習者である子どもに対して余計な支援を行うことは、むしろ学習を阻害する可能性が高いという判断に基づく。そこで FE は、子どものパートナーとなる親のみを直接に支援する手段をとる。つまり、FE における親の位置づけは、学習者でも子どもの指導者でもなく、あくまで子どもの家庭における練習意欲を促進する支援者と割り切っている。ただし、子どもの演奏と呼吸を合わせることが可能とするためには、親の演奏にも必要十分な表現の余地を保証する必要がある。つまり親に対する支援手段は、音量や速さの変化等の音楽的表現には立ち入らないものであることが望ましい。

上記の条件を満たすために、あらかじめ楽譜上の音

見方を変えれば、FE は、楽器演奏できない多くの親が抱いている「子どもと一緒に演奏したい」という願望を容易にかなえるツールと見なすこともできる。

高列をデータベースに登録しておくことで、容易に音高列を再現して演奏できるシステム¹⁶⁾と、初級者の子どもの演奏位置に追従する機能を組み合わせることによって FE を実現する。演奏位置への追従機能は、Dannenberg による手法³⁾を基礎とし、これを初級者特有の誤りにも対処可能なように独自に拡張する。FE は、連弾している最中に、子どもが演奏した音の音高データを逐次取得し、子どもの現在の演奏位置（楽譜上の音符の位置）を判定する。この判定結果に基づき、子どもの現在の演奏位置に応じて親が演奏すべき音を楽譜から取得することにより、親が鍵盤上のどの鍵を叩いても正しい音高の音を出力する。この結果、親は 1 つの鍵のみを用いても、子どもの演奏位置に応じた適切な音高で演奏することができる。ただし、親の打鍵タイミングや打鍵強度などに対する補正はいっさい行わないので、音楽的表現の部分は親の演奏がそのまま出力される。

以下本論文では、構築した FE の構成について詳細に述べるとともに、これを用いた評価実験を行い、提案する手法の有効性について検討する。次の 2 章では、関連研究について概観する。3 章では、システムに初級者の子どもならではの演奏誤りに対処できる頑健な演奏追従機能を持たせるために、子どもの演奏を収録し演奏誤りを分析する。4 章では、構築したシステムについて説明する。5 章ではシステムを用いた評価実験を行い、FE を使用することによって、まったくの初心者と初級者でもすぐに連弾ができることを示す。6 章では家庭内の楽器練習を促進する手段としての FE の適用について議論を行い、7 章でまとめる。

2. 関連研究

近年、人間の奏者と合奏するシステムの研究が進んでいる。最近ではピアノ学習用として、あらかじめパートナーの演奏データが用意されたマイナス・ワンを多くみかけるようになった^{2),9)}。しかし、三善¹³⁾によれば、このような方法では 1 人 1 人の演奏行為と実在的な関わりを持たないため、パートナーと呼吸を通わせることができない。一方で、自然な伴奏システムの演奏を目指して、人間とコンピュータの合奏を分析し、コンピュータと人間との「ずれ」から次の「時間長変化」を予測するモデルの提案⁷⁾や、人間とコンピュータの相互作用を考慮したモデルの提案⁸⁾が行われている。さらに独奏者の表現豊かな演奏を予測するモデルの研究も行われている⁴⁾。あらかじめ楽譜が与えられている音楽を対象とした自動伴奏システムでは、Dannenberg³⁾は奏者が出力した音高情報だけを用い

た演奏追従のアルゴリズムを示し、Vercoe¹⁹⁾ は音高と一定時間ごとの演奏時刻を認識し伴奏を変化させる手法を提案した。楽譜のない状態で即興を行うジャムセッションシステムでは、人間が作成したフレーズ等にコンピュータがフレーズを作って応答するシステム¹⁸⁾ や、人間による即興ソロ演奏の特徴量から演奏者のテンション値を求め、それに応じてシステムの演奏が変化していく手法の提案²⁰⁾、さらに計算機のプレーヤの主張を可能にして、抑揚のついたセッションを実現させる研究⁶⁾ も行われている。

以上の研究は、人間とシステムによる合奏を目的としており、しかも対象ユーザとしてある程度演奏経験を持つ奏者を想定している。一方、本論文で提案する FE は、人間同士のペアを対象にし、しかもまったくの初心者と初級者がすぐに合奏できることが特徴である。そのために、Dannenberg の演奏追従の手法を拡張して、初級者ならではの演奏の誤りにも対処できるようにする。

3. 初級者の演奏の誤りパターンの分析

初級者の子どもの演奏に対処できる頑健な演奏追従機能を実現するために、子どもの演奏を収録し、初級者の子ども特有の演奏誤りパターンを明らかにする。なお、ここでは音高の誤りのみを「演奏誤り」として取り扱い、リズムや音楽的表現上のよし悪しについては取り扱わない。

3.1 初級者の演奏誤りへの対処の必要性

本論文で提案する FE は、連弾を行う 2 人の奏者のうち「親」のパート（以下、本論文では「セコンド」と称する）のみを直接支援する。支援手段として、大島らが提案する手法¹⁶⁾ を採用する。この手法によれば、たとえ 1 つの鍵盤のみを打鍵し続けても、楽譜に書かれた順に音高列を演奏でき、音高の誤りがない状態で演奏できる。一方、音の長さや強さ等の音楽的な表現に関わる要素に関してはいっさい支援せず、すべて奏者に依存している。このためセコンドについても、通常の楽器で演奏するように奏者の音楽的な表現がそのまま演奏に現れる。

しかし、この手法による支援を単純に連弾に適用すると、支援されずに通常どおり演奏するもう 1 人の奏者（以下、本論文では「プリモ」と称する）、つまり「子ども」の演奏状況によっては、大変に連弾しに

くい状態になる。この手法では、セコンドが打鍵するつど、楽譜上に記載されている次の音が自動的に取得され、次の打鍵でこの音が発音される。したがって、セコンドがプリモに合わせたタイミングで楽譜上の音数どおりに打鍵し続け、しかもプリモが誤りをまったくしなければ、問題なく最後まで連弾することは可能である。しかし実際には、特にプリモが初級者の場合、演奏誤りが頻発する。たとえばプリモが楽譜上にない余計な音を奏でたり、すでに演奏した個所に戻って奏でたりした場合、セコンドの方が楽譜上で先に進んだ個所を演奏することになる。また、プリモが楽譜上の音を飛ばして先を奏でてしまった場合は、セコンドよりもプリモの方が進んだ個所を演奏することになる。このようにプリモの演奏誤りによって、2 人の演奏位置にずれが生じてしまう。修正方法としては、プリモがセコンドの演奏位置を確認して途中から入る方法や、再度最初から演奏を開始する方法が考えられる。しかし、誤りにより自ら演奏を中断することは、音楽教育的な見地からも好ましくない。

そこで、プリモの演奏位置を常時判定し、プリモの演奏位置に対応する位置のセコンドのパートの音高を、セコンドがつねに奏でることができるようにすればよい。Dannenberg³⁾ は、DP（動的計画法、Dynamic Programming）マッチングを応用した演奏位置判定アルゴリズムを開発し、これを用いて人間の演奏に常時追従できる自動伴奏システムを実現した。この演奏位置判定アルゴリズムは、演奏の音高に限った以下の 3 種類の音高に関する誤り¹⁾ に対処可能となっている。

- (1) 挿入 (extra) : 演奏された音が楽譜上の音と一致しない (余分な音数)。
- (2) 音高誤り (wrong) : 楽譜上の音数どおりに音を出しているが、音高が不正確である。
- (3) 脱落 (missing) : 演奏された音が楽譜上の音の数よりも少ない。

ただしこのシステムは、初級者ではない奏者の演奏、またはよく練習を重ねたうえで仕上がった演奏を自動伴奏づけの対象としている。ゆえに、これらの誤りがあっても、それは一度に前後 1 音程度であり、基本的にほとんどの部分で、奏者は楽譜どおりに演奏するという前提に立っている。

一方、本論文で構築する FE は家庭でのピアノ連弾練習にも使用できるシステムを目指しているため、奏者 (プリモ) が初級者の場合や、練習中の仕上がっていない演奏の場合でも、奏者 (プリモ) の演奏位置を判定できなければならない。そこで次の 3.2 節、3.3 節では初級者の子どものピアノの練習を収録し、初級

ピアノ連弾でピアノの低音部を担当するパートを通常「セコンド (Secondo)」と呼ぶ。

ピアノ連弾でピアノの高音部を担当するパートを通常「プリモ (Primo)」と呼ぶ。

者特有の誤りについて分析する。

3.2 実験の概要

2人の被験者は姉妹であり、第1筆者のピアノ・レッスンの生徒である。一方はレッスンに通いはじめて4年半の小学4年生である(以下被験者Aと記す)。他方はレッスンに通いはじめて1年の保育園生である(以下被験者Bと記す)。両者が通常のレッスンで使用している教材は、全音楽譜出版社による教本の難易度一覧によれば、「初級・第1課程」に属する。

練習の課題曲として被験者Aには、練習曲集4冊、作品集2冊、そして連弾曲集2冊から合計17曲を選んだ。被験者Bには、練習曲集2冊、連弾曲集1冊から合計13曲を選んだ。各々の被験者にとって課題曲は、収録日に初めて楽譜を見て演奏する曲(新曲視奏曲)であった。

およそ15日間の間に4回の収録日を設定し、1回の収録時間は1人約30分とした。演奏回数は課題曲の長さによって1回から5回であり、「最初から最後まで通して演奏するように」と指示した。このように指示したのは、被験者が楽曲を個人的に練習するのではなく、連弾などのパートナーとともに演奏する状況と似た状況を作り出すためである。連弾曲では、プリモを被験者、セコンドを第1筆者が担当した。収録は防音室で行われ、練習の様子は録音、録画した。ピアノはYAMAHA SILENT ENSEMBLE GRAND PIANO PROFESSIONAL MODEL C5を使用した。

3.3 結果

表1は、被験者の誤りのケースを分類し、それぞれの回数を示したものである。この結果、初級者の演奏では、先に示した3つの演奏誤りにあてはまらない、以下の誤りが非常に多数見られた。

- (4) 弾き直し：今弾いた個所が正確、不正確にかかわらず、すでに弾き終えた個所に戻って弾き直す。

弾き直すことで演奏全体の音数が増えるため、一見「(1)挿入」に相当するようと思われるが、「(4)弾き直し」で挿入される音は、「(1)挿入」と違い、楽譜上に存在する音である。

表1では、「弾き直し」の項目を、さらに弾き直すために戻った個所の特徴別に分けて示している。「段」と

表1 初級者による誤りの種類と頻度

Table 1 Frequency of errors.

	弾き直しの開始箇所	A	B	合計	%
挿入	—	1	6	7	1.2
音高誤り	—	0	37	37	6.1
脱落	—	3	0	3	0.5
弾き直し	曲の最初	7	3	10	1.7
	段の最初	1	1	2	0.3
	フレーズ開始	5	0	5	0.8
	手の替え	4	0	4	0.7
	1 拍目	315	141	456	75.4
	第2の強拍	17	2	19	3.1
	最終拍	0	6	6	1.0
	1 拍目(1小節前)	26	25	51	8.4
最終拍(1小節前)	2	3	5	0.8	
合計	—	381	224	605	100.0

は譜面上で横1列に印刷された数小節の塊を指す。ただし、「曲の最初」から弾き直した回数は含まれない。「フレーズ開始」とは、スラーのはじめや、弱起のメロディのはじまりを指す。ただし、「曲の最初」や「段の最初」から弾き直した回数は含まれない。「手の替え」とは、1つのメロディの中で、弾く手が右手から左手に替わった個所に戻ったことを意味する。ただし、上記3種類の弾き直し箇所は含まれない。「1拍目」とは、弾き直す直前に演奏していた小節と同じ小節の1拍目に戻ったことを示す。「第2の強拍」とは、4拍子の3拍目や2拍子の2拍目を指す。「最終拍」とは3拍子の3拍目や4拍子の4拍目を指し、2拍子の2拍目は含まない。なお「1小節前」とは、弾き直す直前の音の1小節前に戻ったことを意味している。「1拍目」「第2の強拍」「最終拍」には、「曲の最初」「段の最初」「フレーズの開始」「手の替え」から弾き直した個所の回数は含まれていない。被験者Aは全部で381回の誤りがあり、被験者Bは全部で224回の誤りがあった。そのうち弾き直しの数は、被験者Aで377回、被験者Bは181回あり、初級者においては誤りの大半を「弾き直し」が占めていることが明らかである。また、戻り位置は、小節の1拍目が75%を占めている(表1)。

以上の結果から、奏者が初級者の場合には、3.1節で示した3種の誤りに加えて、「(4)弾き直し」の誤りが非常に多く現れることが分かった。ゆえに、初級者の演奏に適用可能な演奏位置判定アルゴリズムの実現には、「(4)弾き直し」の誤りに対処することが不可欠である。

4. システム構成

本章では、FEのシステムについて概要を説明したあと、Dannenbergらの演奏位置判定アルゴリズムを、「(4)弾き直し」誤りを多数含む初級者の演奏に適用できるように拡張したアルゴリズムについて述べる。

各々の楽譜の最後の頁に一覧表が掲載されている。第1課程とは、よく知られた「バイエル教則本」と同じ課程であり、「バイエル教則本」終了程度が「初級・第2課程」に相当する。個人的な練習中によく見られる「部分練習」も「弾き直し」といえるが、今回の予備的な収録では、あらかじめ被験者に最初から最後まで通して演奏することを指示していることから、練習の意味を持つ弾き直しではないと判断し、演奏の誤りに含めている。

4.1 システムの概要

図 1 に FE のシステム構成を示す。システムは Visual C++ で構築され、Windows XP が 2000 上で動かすことができる。プリモの演奏は、MIDI データとして出力され、そのままなら処理を施されずに MIDI 音源 に入力され、スピーカから音として出力される。同時にプリモの演奏データは、「演奏位置判定モジュール」にも入力される。演奏位置判定モジュールは、楽譜データベースにあらかじめ用意されている演奏曲のプリモ用の音高列データと、逐次入力されてくるプリモの演奏データの音高とを照合し、現在プリモが楽譜上のどの位置を演奏しているかを判定し、この結果を「演奏音高取得モジュール」に通知する。演奏音高取得モジュールは、楽譜データベースから取得したセコンド用の音高列データと、演奏位置判定モジュールから送られてきたプリモの演奏位置を参照し、現在のプリモの演奏位置に対応する、セコンドの楽譜上の個所を見いだす。ここからセコンドが次に演奏すべき音高のデータを取得し、これを「音高データ差し替えモジュール」に渡す。音高データ差し替えモジュールは、セコンド用の入力インタフェースから入力された演奏音の MIDI データのうち、音高データを指定する値のみを、演奏音高取得モジュールから渡された音高データに差し替える。この際、その他のデータ（音量、発音時刻、消音時刻）はすべてセコンドが入力した値（演奏データの値）を保持する。こうして、音高データのみ差し替えられたセコンドの演奏データが MIDI 音源に入力され、スピーカから音として出力される。

以上のシステムによって、セコンドが鍵盤上のどの鍵を打鍵しても、各時点でプリモの演奏位置に対応した、演奏すべき正しい音高の音が出力される。一方、セコンドの演奏における音の強弱や発音タイミングなどの音楽的な表現は、通常のピアノを弾くときと同じように、セコンドが打鍵により調整して演奏できる。したがってセコンドも、アコースティックの楽器と同じように、十分に音楽的な表現を行うことができ

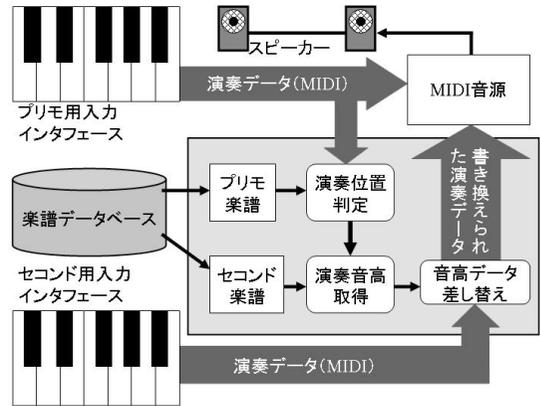


図 1 Family Ensemble の構成
Fig. 1 Setup of Family Ensemble.

る¹⁶⁾。また、プリモの演奏データは、システムによる補正などはいっさい加えられず、そのまま音源に入力され、音として出力される。したがって、FE を使用する場合でも、プリモの演奏方法は、通常のピアノを演奏するのとまったく同じである。

プリモが演奏誤りをした場合、演奏位置判定アルゴリズムが正しい演奏位置を検出し、その位置に応じたセコンドが演奏すべき音高を取得する。これにより、セコンド自身がプリモの誤りに対処しなくても、自動的に正しい音高の音を演奏できるようになる。また、プリモが演奏を続けているにもかかわらず、セコンドがしばらく休止した場合（打鍵しなかった場合）でも、システムはプリモの演奏データからつねに演奏位置を認識している。よって、いつセコンドが打鍵を再開しても、プリモが現在演奏している位置ですぐに合わせることができる。逆に、プリモが演奏を休止したにもかかわらずセコンドが打鍵し続けた場合は、1 回目の打鍵はプリモが次に演奏する予定の個所に相当した音高が鳴るが、それ以後はプリモが演奏し始めるまで、音が出なくなるように設定されている。そして再度、プリモが演奏を休止した位置やまったく別の位置から演奏を開始すると、またセコンドも打鍵することで、プリモの演奏位置に合った音を出すことができるようになる。

なお、実際に FE を使用する際には、プリモとセコンドの使用する鍵盤領域を任意に決定することができる。演奏する楽曲は、テキスト・データとしてあらかじめ用意したものから自由に選択することができる。

4.2 演奏位置判定モジュール

次に、演奏位置判定モジュールにおける処理について説明する。演奏位置検出（いわゆる Score Following/Tracking）に関する研究は 80 年代より非常に多

図では、便宜的にプリモ用とセコンド用の入力インタフェースを別々に示しているが、連弾の場合同一鍵盤を 2 つの領域に分けて使用することになる。

今回の実装で使用したピアノには、コンサートグランドピアノの生の音をステレオサンプリングした AWM 音源が内蔵されており、後述する実験ではこの音源を使用した。外部の別の音源を使用することももちろん可能である。

現在の FE ではプリモがトリルを奏する場合も、通常の音符を奏するときと同じ原理である。セコンドがトリルをあらかじめ決めた音数で奏でないうちに、プリモが先を演奏した場合には、セコンドのトリルは打ち切られることになる。即興的なトリルにも対応できるようにするのは今後の課題である。

数なされている(たとえば文献 3), 5), 14), 17)). これらのシステムは, 3.1 節で示した, (1) 挿入, (2) 音高誤り, (3) 脱落, の 3 種類の誤りについて対処しているが, いずれも基本的に大きな誤りは起こらない演奏を扱っている. 一方本論文では, 初級者による演奏を扱うため, 誤りの回数が非常に多く, しかもこれら 3 種類の誤りに加えて, 3.3 節で示した (4) 弾き直しの誤りにも対処可能としなければならない.

そこで本研究では, Dannenberg³⁾ が提案した DP マッチングによる演奏位置判定アルゴリズムを拡張し, 弾き直しに対処可能な演奏位置検出手法を考案・実装した. 本手法では, Dannenberg の手法同様, 各音の楽譜上での音価と演奏音の音長は無視して, 音高のみのマッチングで演奏位置を判断する. これは, 初級者の演奏では演奏時の音長の変動がきわめて大きく, 楽譜にはない長い停止も頻発するため, 音価と音長はマッチングの対象として扱えないという判断に基づく.

Dannenberg のアルゴリズムの基本的な考え方は, 以下のとおりである. まず, ある時点までに奏者によって演奏された音高列(これを「演奏音高列」と呼ぶことにする)を, 楽譜上に記載されたすべての音の音高列(これを「楽譜音高列」と呼ぶことにする)と比較する. そこまでの演奏にまったく誤りがなければ, 演奏音高列と完全に一致するような, 楽譜音高列の部分列を見いだせる. この場合, 現在の演奏位置は, この部分列の最後の音の位置であると判定できる. しかし, 誤りが含まれる場合は, 演奏音高列と完全に一致する楽譜音高列の部分列を見いだせない. この場合, 演奏音高列に含まれる個々の音高を, 楽譜音高列に含まれる個々の音高と順に比較することにより, 一致する音高を最も多く含む楽譜音高列の部分列を見だし, この部分列の最後の音を現在の演奏位置であると判定する. 以上の一致判定演算は, DP マッチング手法を応用して行っている.

この手法では, 演奏誤りが生じた場合でも, 演奏位置は本来の正しい演奏位置のごく近傍にとどまっているということが前提となっている. しかしながら, 弾き直しが生じた場合には, この前提が成立しなくなる. そこで本研究では, なんらかの演奏誤りを検出した際に, 本来の正しい演奏位置の近傍に加えて, 表 1 に示した「弾き直して戻りやすい箇所」をも現在の演奏位置候補に加えることにより, 弾き直しの演奏誤りに迅速に対処可能とするようにアルゴリズムを拡張した.

ただし, いずれの音高列についても, 和音など, 同時に複数の音が同時に発音される箇所では, 最高音の音高のみを比較対象とする.

以下, 本手法の詳細を説明する. プリモ用の楽譜に含まれる音の数を N とする. ただし, 和音のように複数の音が同時に発音される場合, その個所の音数は, 同時に発音する音数にかかわらず 1 とし, 最高音のみをマッチングの対象とする. 「演奏時点」は t_j で表し, j はその時点までにプリモによって演奏された音の数である. 演奏時点 t_{j-1} における演奏位置が $S_i (1 \leq i \leq N)$ の音であると判定され, 次にプリモが演奏時点 t_j において, 音 P_j を演奏したとする. このとき, 演奏位置判定モジュールは以下のアルゴリズムによって, 演奏された音 P_j と楽譜上の音との対応を行う.

(1) 演奏時点 t_j での, 楽譜上のすべての音 $S_k (1 \leq k \leq N)$ の音高 $Pitch(S_k)$ と P_j の音高 $Pitch(P_j)$ を比較し, すべての音について重み $W(S_k, t_j)$ を以下の方法で求める.

- (a) if $Pitch(S_k) = Pitch(P_j)$
then $W(S_k, t_j) := W(S_{k-1}, t_{j-1}) + 1$.
(b) else $W(S_k, t_j) := W(S_{k-1}, t_{j-1}) - 1$.
ただし,
if $W(S_{k-1}, t_{j-1}) - 1 < 0$,
then $W(S_k, t_j) := 0$.

つまり重み, $W(S_k, t_j)$ とは演奏時点 t_j において S_k の音を終端とする楽譜音高列の部分列と, P_j を終端とする演奏音高列とを比較して得られる, 一致する音高の数である. したがって重み $W(S_k, t_j)$ が大きいほど, S_k の音が現在の演奏位置である可能性が高いことになる.

(2) もし $W(S_{i+1}, t_j) \neq W(S_i, t_{j-1}) + 1$ ならば, 誤りがあったと判定し, 次のアルゴリズムが適用される.

- (a) 「弾き直し」に対処するために, $W(S_h, t_j) := W(S_{i+1}, t_j) - m$ (m は正の定数) とする. S_h は初級者が弾き直しのために戻りやすい箇所(表 1)である. m は経験的に 2 としている.

- (b) 「挿入」「音高誤り」「脱落」に対処するために, $W(S_g, t_j) := W(S_{i+1}, t_j)$ とする. S_g は, S_{i-r} から S_{i+r} までのすべての音である. r は経験的に 2 としている.

(3) $W(S_k, t_j)$ が演奏時点 t_j における唯一の最大の値をとるならば, S_k がその時刻における演奏位置とする. もし最大の重みを持つ演奏位置が複数ある場合には, 以下の順に優先する.

- (a) もし $W(S_{i+1}, t_j)$ が最大の重みであれ

ば、 S_{i+1} をその時点の演奏位置とする。

(b) もし $W(S_{i+1}, t_j)$ が最大の重みではなかった場合は以下により演奏位置を決定する。

- (i) 音 S_k の重みが最大値であり、音 S_i に最も近い場合には、音 S_k が現在の演奏位置とする。
- (ii) もし音 S_i から距離が同じ2つの音 S_{i-d} と S_{i+d} の重みが同じように最大値であった場合には、 S_{i-d} をその時点での演奏位置とする。

以上のアルゴリズムによって、従来から扱われてきた3種類の演奏誤りに加えて、初心者者の演奏で頻発する「弾き直し」に対しても迅速に追従できる頑健な演奏追跡処理が実現される。

図2には、「たきび」の演奏中、奏者（プリモ）が演奏したデータのうち、9番目の音から30番目の音までの結果を示している。図2(a)は上記アルゴリズムの(2)の(a)の処理を組み込むことにより、弾き直しへの対処を行った場合であり、図2(b)はこの処理を組み込まず、弾き直しへの対処を行わなかった場合である。(a),(b)いずれの図についても、一番上の行 S_i は童謡の「たきび」の1~26番目の音符の音高を左から右へ順に示してある(先に述べた「楽譜音高列」の一部に相当する)。一番左の列 t_j は演奏時点を示しており、紙面の都合上、演奏を開始して9~30個目に奏でた音高を、次の列 P_j に順に上から示している(先に述べた「演奏音高列」に相当する)。図中のその他の部分に示してある数値は、各時点 t_j における個々の音 S_k に、前述のアルゴリズムによって付与された重み $W(S_k, t_j)$ である。たとえば、演奏時点 t_9 で音高「ド」を奏でたとき、先に示したそこまでの演奏に誤りがない場合、楽譜上の各音符に関する重み $W(S_k, t_j)$ は、それぞれ1行目に示すとりの値となる。このとき、最初から9番目の「ド」の音が最大の重み(10)を持つので、この音がこの時点での演奏位置と判定される。以下同様に、各時点における楽譜上のすべての音に関する重みを求め、現在の演奏位置を決定していく。図中、白抜き文字で示している個所が、各時点において現在の演奏個所であるとシステムが判断した個所である。

この例では演奏時点 t_{13} までは楽譜どおりの音高列である「ドレミミレ」を演奏していたが、演奏時点 t_{14} で弾き直しが生じている。すなわち、本来演奏時点 t_{14} からは、楽譜上の音高の「ミソソラドド」の部分が演奏されるべきだったが、この例の奏者は曲

$t_j \backslash S_i$	ソ	ラ	ソ	ミ	ソ	ラ	ソ	ミ	ド	レ	ミ	ミ	レ	ソ	ソ	ソ	ラ	ド	ド	ド	ソ	ラ	ミ	レ	ド	
9 ド	0	0	0	0	3	0	0	0	10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10 レ	0	0	0	0	2	0	0	0	0	11	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11 ミ	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	12	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12 ミ	0	0	0	1	0	0	2	0	0	1	13	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
13 レ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
14 ソ	0	2	1	0	0	0	0	0	0	11	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
15 ソ	10	12	0	0	0	2	0	0	10	10	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
16 ソ	2	9	14	0	1	0	3	0	0	9	9	0	11	11	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
17 ミ	0	1	8	14	0	0	0	4	0	0	10	10	0	12	10	12	12	12	10	0	0	0	0	0	1	0
18 ソ	1	0	2	7	15	0	1	0	3	0	0	9	9	0	13	11	13	11	11	9	0	1	0	0	0	0
19 ソ	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
20 ソ	1	0	3	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	7	9	13	9	13	9	0	1	0	0	0	0
21 ミ	0	0	0	4	0	1	4	18	0	0	1	2	0	1	6	8	0	12	8	8	1	0	0	0	0	0
22 ド	0	0	0	0	3	0	0	3	19	0	0	1	0	0	5	7	0	11	7	11	7	7	0	1	0	
23 ソ	0	0	0	0	2	0	0	2	20	0	0	1	0	0	4	6	0	10	6	10	6	6	6	6	6	
24 ミ	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	21	1	0	2	0	0	3	5	0	5	9	5	9	5	7	
25 ミ	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	22	0	1	1	0	0	2	4	0	4	8	10	6	4	4	
26 レ	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	23	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	7	3	11	5
27 ミ	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2	1	0	24	0	0	0	0	0	0	2	0	8	2	10	6
28 ソ	1	0	1	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	25	1	1	0	0	0	0	1	1	0	7	1	1
29 ソ	2	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	16	2	0	0	0	0	1	0	0	6	0	6
30 ソ	1	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	27	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0

(a) 弾き直しへの対応を行った場合

$t_j \backslash S_i$	ソ	ラ	ソ	ミ	ソ	ラ	ソ	ミ	ド	レ	ミ	ミ	レ	ソ	ソ	ソ	ラ	ド	ド	ド	ソ	ラ	ミ	レ	ド	
9 ド	0	0	0	0	3	0	0	0	10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10 レ	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11 ミ	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	12	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12 ミ	0	0	0	1	0	0	2	0	0	1	13	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
13 レ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
14 ソ	0	2	1	0	0	0	0	0	0	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
15 ソ	10	12	0	0	0	2	0	0	0	11	11	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
16 ソ	2	9	14	0	1	0	3	0	0	0	11	11	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
17 ミ	0	1	8	14	0	0	4	0	0	1	1	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
18 ソ	1	0	2	7	15	0	1	0	3	0	0	0	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
19 ソ	0	2	0	1	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	14	10	10	10	0	2	0	0	0	0
20 ソ	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	13	13	13	13	9	11	0	1	0	0
21 ミ	0	0	0	4	0	1	4	18	0	0	1	2	0	1	6	8	0	12	12	12	10	1	0	0	0	0
22 ド	0	0	0	0	3	0	0	3	19	0	0	1	0	0	5	7	0	11	11	11	11	11	11	11	11	11
23 ソ	0	0	0	0	2	0	0	2	20	0	0	1	0	0	4	6	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10
24 ミ	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	21	1	0	2	0	0	3	5	0	5	9	5	9	5	11	11
25 ミ	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 レ	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27 ミ	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2	1	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28 ソ	1	0	1	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	15	1	1	0	0	0	0	1	0	5	7	5	5
29 ソ	2	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	16	2	0	0	0	0	1	0	0	6	0	6
30 ソ	1	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	27	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0

(b) 弾き直しへの対応を行わなかった場合

図2 弾き直しへの追従の結果
Fig. 2 Results of score-tracking.

の冒頭に戻って、 t_{14} から t_{26} の範囲で S_1 から S_{13} の「ソラソミソラソミドレミミレ」を弾き直している。図中、 P_j の列で網掛けして示した P_{14} から P_{26} の部分が、この弾き直しの個所を示している。また、図中太い枠で囲んだ個所は、実際の奏者（プリモ）の演奏位置を示す。

さて、(a) では弾き直しが発生した t_{14} の時点で、前述のアルゴリズムの弾き直しへの対処により、弾き直しの際に戻りやすい個所としてあらかじめ指定されている個所である S_1 の「ソ」の音と、 S_9 の「ド」の音の個所に重み(11)が付与されている。同時に、「挿入・音高誤り・脱落」への対処によって、 $S_{11} \sim S_{13}$ および S_{15} に重み(13)が付与されている。この結果、 t_{14} の時点では、本当の演奏位置は S_1 の「ソ」の音であるが、 S_{14} の「ミ」の音が誤って現在位置と判定され、以後 t_{16} までの3音の間誤った演奏位置を判定した後、 t_{17} の時点で、 S_4 の「ミ」の音を演奏位置として正しく判定している。人間の奏者であっても、突然パートナーが弾き直しをした場合、1音の遅れもなく戻った個所を判断することは不可能であり、どうしても3音程度の遅れは生じる。したがって、この程度の遅れは不可避であり、十分実用に耐えるレベルであるといえる。一方、図2(b)の弾き直しへの対処を行っ

ていない場合は、 t_{14} から t_{26} までの間、13 音もの誤認識をした後に、ようやく正しい演奏箇所を見いだしている。13 音の遅延はきわめて大きく、プリモの演奏とまったく一致しない伴奏が長時間出力されることになり、実際には演奏の継続が困難となる。

このように、本提案手法によって、弾き直しへも十分な実用的なレベルでの追従が可能となっていることが分かる。なお、本研究では初級から中級者向けの合奏曲を処理対象としているので、ほとんどの楽曲の長さは短く、容量から判断して毎時点において楽譜全体を走査しても処理時間は無視できる程度であり、実際に後述する試用実験においても、遅延による支障は生じなかった。

5. FE を使用した連弾練習の収録

FE の有効性を調べるために、親子と学生同士の合計 5 ペアに FE を使用しない条件と、使用する条件でピアノ連弾の練習を行ってもらった。

5.1 実験的試用の目的

本章で行う実験の目的は、FE を使用することによって、1) 楽器演奏の経験がない初心者（セコンドを担当）が初級者（プリモを担当）とでもすぐにピアノ連弾を行えるかどうか、2) 初級者（特にプリモを担当する子ども）の練習意欲が促進されるかどうか、の 2 点を明らかにすることである。そのために、親子と学生同士のペア合計 5 組によるピアノ連弾の練習を収録し、収録中の演奏データと発話、および被験者に対する質問票調査により分析する。

5.2 収録方法

被験者

3 組の親子ペアと 2 組の学生どうしのペアを被験者に採用した。

ペア A プリモはピアノ学習歴が 8 年の女子中学生である。セコンドはプリモの父親で、楽器演奏の経験がほとんどない。

ペア B プリモはピアノ学習歴が 4 年の女子小学生である。セコンドはプリモの母親で、オルガン学習歴が 2 年ある。

ペア C プリモはピアノ学習歴が 1 年の保育園生であり、ペア B のプリモの妹である。セコンドはその母親である。ペア B, C のプリモは、3 章で示したシステム構築前の収録に参加した 2 人の姉妹である。

ペア D プリモは電子オルガン学習歴が 8 年の男子大学院生で、セコンドは音符を読むことがほとんどできない男子大学院生である。

ペア E プリモはペア D と同じである。セコンドは

音符に相当する鍵盤の位置もまったくわからない男子大学院生である。ペア D, E の 3 名の学生は同じ研究室に属し、顔馴染みであった。

収録設定と課題曲

収録は第 2 筆者の研究室にある防音室において、3 章での収録と同じグランドピアノを使用して行われた。ピアノは FE システムの入ったコンピュータにつながられた。FE の使用・不使用にかかわらず、ピアノに内蔵された音源を使用し、ピアノの下に設置したスピーカから音が出力されるように設定した。

FE を使用した収録では、システムに支援されるセコンドは、C3（いわゆる“真ん中のド”の 1 オクターブ下の“ド”）より低音にあたる鍵盤ならばどれを使用してもよい状態にした。これらの鍵盤は、各音符に対応した鍵盤を用いて通常の演奏をするプリモが使用しない範囲にある。

課題曲は被験者が聴いたことのある 3 曲を用意した。1 曲目は 16 小節からなるショパン作曲の「プレリュード作品 28 第 7 番」を、初級者用に八長調の連弾に編曲したもの¹¹⁾である（以下、「プレリュード」と略称する）。2 曲目はショパン作曲の「ワルツ第 1 番作品 18」である。プリモ・パートは初心者用に 60 小節の八長調の独奏曲として編曲されたもの¹⁵⁾を使用した。セコンド・パートはオリジナルの楽譜の低音部譜表をもとに、編曲版に合わせて八長調に移調した（以下、「ワルツ」と略称する）。3 曲目は 16 小節からなる渡辺茂作曲の「たきび」である。プリモが弾くメロディは八長調に移調し、プリモが左手で弾く伴奏は初級者用に、セコンド・パートは中級者用に第 1 筆者が編曲した。

親子ペアはプリモ（子ども）のピアノ学習歴を考慮して、ペア A には全 3 曲に挑戦してもらい、ペア B には「プレリュード」と「ワルツ」の 2 曲、ペア C には「たきび」に挑戦してもらった。学生ペアはペア D には「たきび」、ペア E には「たきび」と「プレリュード」に挑戦してもらった。

各々のプリモにはあらかじめ課題曲のプリモ・パートのみを渡した。FE の機能を評価するには、プリモの演奏は完全なものであるよりも誤りが出現する方が適当であったため、「だいたい弾けるようになるまで練習するように」と指示した。ペア A のプリモは 4 日間程度、ペア B, C のプリモは 7 日間程度、ペア D, E のプリモは 1 日の練習で本番の収録に臨んだ。どのプリモも、数回に 1 回は完璧に最後まで弾ける程度であった。

なお、FE を使用した演奏では図 3 のような表記の

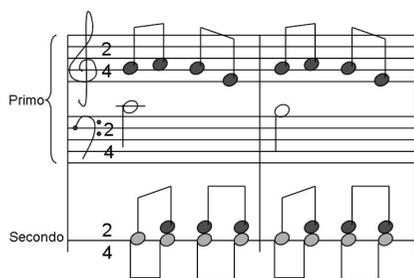


図3 Family Ensemble で使用する楽譜の例
Fig.3 Example of the score for Family Ensemble.

楽譜を使用した。灰色の音符は実際には赤色で表示されている。セコンドはこの赤色の音符のみを、鍵を1つだけ使用して弾いていっても、和音（一度に2音以上の音が鳴る）は楽譜どおりの音数の音が鳴るような仕組みになっている。

収録の流れ

親子または学生どうしでのピアノ連弾の練習の様子を収録した。ペアごとに要求した収録すべてを1日のうちに40分から1時間半かけて行った。以下、収録の流れを示す。なお、すべてのペアにおいて、FEを使用しない条件の合同練習を先に行った後に、FEの説明とFEを使用した条件の合同練習を行う順番で実験を行った。FEを使用する場合、セコンドの負担が大幅に軽減され、容易に演奏できるようになる。このため、先にFEを使用し、その後FEを使用しない条件の収録を実施した場合、通常の楽器を用いた演奏の困難さの印象が過剰に強化され、セコンドのやる気を削ぎ、FEを使用しない場合の結果を不当に悪化させることが懸念される。またいずれの被験者も、実験以前にはFEを用いた演奏を体験していないので、先にFEを使用しない条件の実験を実施することにより、通常の楽器での連弾を自然な状態で収録できると思われる。以上の理由により、FEを使用しない条件の収録を先に行った。

収録1. ペアA, B, Cについては、5分間プリモ（子ども）が1人で練習し、セコンド（親）はそばに付き添った。

収録2. FEを使用せずに、ペアA, B, Eには「プレリユード」、ペアC, Dには「たきび」の演奏を15分間、2人で合同練習してもらった。複数の課題曲を指示したペアA, B, Eに「プレリユード」の練習を指示したのは、FEを使用しない通常のピアノの演奏では、セコンド・パートにとって「プレリユード」が最も簡単であると考えられたからである。

被験者へのFEの使用方法的説明 FEの使用方法和

動作について簡単な説明をした後に、セコンドには練習曲を用いて試してもらい、質問を受け付けた。

収録3. FEを使用して、どのペアも収録2と同じ課題曲を練習した。ペアA, B, Eには「プレリユード」を、ペアC, Dには「たきび」を連弾できるようになることを目指して、15分間の合同練習をしてもらった。

収録4. FEを使用して、ペアA, B, Eには「たきび」を連弾できるようになることを目指して、10分間の合同練習をしてもらった。「たきび」と「ワルツ」は「プレリユード」よりもセコンド・パートのリズムが簡単であるため、FEを使用した場合には、より早く連弾できるようになると予測できた。よって、被験者の負担を軽くするために、練習時間を5分短縮した。

収録5. FEを使用して、ペアAには「ワルツ」を連弾できるようになることを目指して、10分間の合同練習をもらった。

収録6. ペアD, Eのプリモ（同一人物）には、「たきび」と「プレリユード」をマイナス・ワン（セコンド・パートの演奏のみをMIDIデータとして収録したもの）に合わせて、それぞれ「遅め」「中くらい」「速め」の3段階の速さで、3回ずつ練習してもらった。なお、これらのマイナス・ワンのデータは、事前に第1筆者がメトロノームを聴きながら作成した。「たきび」は「1分間に四分音符が44個、60個、72個打つ速さ」の3段階で、「プレリユード」は「1分間に四分音符が72個、88個、104個打つ速さ」の3段階で準備された。

質問票への回答 全員の被験者に、次の5.3節で述べる質問について回答をお願いした。

5.3 質問票による調査

被験者はすべての課題曲の練習後に以下の質問に回答した。

質問1. セコンドがFEを使わず課題曲を演奏することは難しかったですか？(1の「とても簡単」から5の「とても難しい」)

質問2. なぜそのように思いましたか？

質問3. セコンドがFEを使いながら課題曲を演奏することは難しかったですか？(1の「とても簡単」から5の「とても難しい」)

質問4. なぜそのように思いましたか？

質問5. セコンドはFEを使うと、指1本でも演奏できることについてどう思いますか？

質問6. またFEを使って連弾したいですか？(「はい」「どちらでもない」「いいえ」)

質問7. なぜそのように思いましたか？

質問 8. 今後誰と合奏してみたいですか？

質問 9. 改良点などありましたらお書きください。

【マイナス・ワンを試したペア D, E のプリモへの質問】

質問 10. 正確なメロディやリズムで演奏できましたか？(1 が「できた」、2 が「どちらともいえない」3 が「できなかった」)

質問 11. 細かい速さの変化をつけることができましたか？(1 が「できた」、2 が「どちらともいえない」3 が「できなかった」)

質問 12. 細かい強弱の変化をつけることができましたか？(1 が「できた」、2 が「どちらともいえない」3 が「できなかった」)

5.4 練習回数の比較と質問票調査の結果

FE を使用しなかった連弾の練習と、使用した連弾の練習の各々で演奏された回数と質問票調査の結果を示す。表 2 は FE を使用しなかった 15 分間の合同練習(収録 2)と、FE を使用した 15 分間の合同練習(収録 3)における演奏の回数を示している。収録 2 と収録 3 はどのペアも同一曲により実施された。演奏回数は、演奏が長く途切れたところや、音の途切れはほとんどなくても、すでに演奏した個所に戻ったところで、1 回の演奏が終わったとして数えた。「演奏パート」とは、その奏者が演奏したパートを示している。括弧内の数は各項目の全演奏のうち、最初から最後まで通して演奏した回数である。なお「連弾」の項目の括弧内の回数は、2 人で同時に演奏し始めて、少なくとも片方が最後まで演奏し、かつ少なくとも 2 小節以上は 2 人で連弾した回数である。これらの演奏回数には、片手のみの演奏や多くの誤りがあった演奏も含まれている。

表 3 は質問票調査のうち、質問 1, 3, 6, 8 の結果を示しており、表 4 はマイナス・ワンについての質問 10, 11, 12 の結果について示している。

表 2 の結果から、FE を使用した合同練習の方が使用しなかった合同練習よりも、曲の最初から最後まで通した連弾が多く行われたことが明らかである(「連弾」の項目の括弧内の結果)。FE を使用しない合同練習では、連弾を合計で 41 回試みているが、そのうちペア B の 5 回しか最後まで通して連弾できていない。その 5 回もペア B のセコンドは右手のみで参加している。一方で FE を使用した合同練習では、43 回も課題曲全体を通して連弾することができた。また当然ながら、FE を使用した合同練習の方が、セコンドの独奏による練習回数は大幅に減っている。質問 2 への回答によると、特にペア A, D, E のセコンドは楽

譜を読むことがほとんどできなかったため、FE を使用しない合同練習では、各ペアのプリモがセコンドに各音符に対応する鍵盤の位置を教えることに終始していた。よって、質問 1 への回答もほとんどの被験者が「5: とても難しい」と回答している(表 3)。

また、表 2 の結果から、FE を使用した合同練習ではプリモによる曲全体を通した独奏練習が大幅に増えていることが分かる。ペア D, E のプリモの質問 9 への回答によると、FE を使用した合同練習では、セコンドの演奏よりも、プリモの演奏が下手になることが多いため、さらに練習しなければならないという気持ちになったという。質問 5 への回答によると、プリモたちはセコンドが FE に支援されることにより、指 1 本でも弾けてしまうことを羨ましいとは感じていなかった。しかし、セコンドが FE に支援されると、連弾中に演奏がうまくいかなくなるような誤りは、通常、プリモによって引き起こされることになる。よって、ペア A のプリモは、連弾が上手にはできなかった場合に、父親であるセコンドを怒れないと回答している。

ペア D, E は質問 4 や 7 への回答によると、FE を使うことによって、まったくの初心者でも曲の最初から最後まで通して弾くことができるのはすばらしいと感じていた。質問 6 では全員が再度 FE を使ってみたいと回答し、質問 8 では、FE を使って、妻子、姉妹、友人、恋人と合奏したいと回答している。

一方で今回の被験者ペアのセコンドの中で、唯一鍵盤楽器の演奏経験があったペア B, C のセコンドは、質問 9 への回答として、音高列を奏でることに関しても、徐々に敷居を高くしていくシステムになることを望んでいた。彼女はペア B のセコンドとして臨んだ、FE を使わない合同練習のたった 15 分の間に、右手のみならば、楽譜上の音高のうち 76.7% を正確に演奏できるようになっていた。

ペア D と E のプリモを担当した学生は、マイナス・ワンとの合奏を試みる収録 6 に臨み、収録後には演奏のでき具合について、「メロディとリズム」「曲中の速さの変化」「曲中の強さの変化」の項目ごとに回答した。表 4 によると、「中くらい」の速さでの「メロディとリズム」以外は、どの項目も速さに関係なく「できなかった」と答えていた。「曲中の速さの変化」への回答理由としては、マイナス・ワンのテンポが一定のため、自分の感覚とずれていたことをあげている。

5.5 FE 使用の有無による被験者の変化の事例

本章では FE を使用しなかった合同練習と使用した合同練習を比較しながら、FE がセコンドを支援することで、プリモの練習意欲が湧いた事例と表情豊かな

表 2 FE の使用有無による演奏回数の頻度

Table 2 Results of the number of performance in the fifteen-minute joint practices without and with FE.

奏者 演奏パート	FE を使用せず					FE を使用				
	プリモ		セコンド		連弾	プリモ		セコンド		連弾
	プリモ	セコンド	セコンド	プリモ		プリモ	セコンド	セコンド	プリモ	
ペア A	0	6(0)	99(0)	0	0	2(1)	0	0	0	15(13)
ペア B	0	5(0)	18(0)	0	17(5*)	1(0)	0	0	0	15(14)
ペア C	4(0)	0	28(0)	0	7(0)	6(4)	0	0	0	7(2)
ペア D	8(0)	16(0)	96(0)	0	6(0)	7(7)	0	0	0	18(5)
ペア E	7(0)	20(0)	33(0)	0	11(0)	3(1)	0	0	0	12(9)
合計	19(0)	47(0)	274(0)	0	41(5*)	19(13)	0	0	0	67(43)

注：括弧内は楽曲の最初から最後まで通して演奏した回数を示す。

* ではセコンドは右手のパートのみ参加。

表 3 質問 1 . 3 . 6 . 8 への回答

Table 3 Answers for Question-1, 3, 6, 8.

ペア	パート	Q1: FE を使用せず	Q3: FE を使用して			Q6: FE の再利用率	Q8: 誰と
			たきび	プレリユード	ワルツ		
A	プリモ	プレリユード	5	1	1	3	父
	セコンド		5	2	4	2	子、妻
B	プリモ	プレリユード	4	1	4	—	妹
	セコンド		5	1	2	—	子
C	プリモ	たきび	5	5	—	—	姉
	セコンド		5	2	—	—	—
D	プリモ	たきび	5	2	—	—	恋人
	セコンド		5	2	—	—	友人
E	プリモ	プレリユード	5	2	2	—	—
	セコンド		5	2	2	—	友人

表 4 質問 10 . 11 . 12 への回答

Table 4 Answers for Question-11, 12, 13: with minus-one software.

テンポ	Q10: メロディ, リズム	Q11: 細かい速さ	Q12: 細かい強弱
遅め	3	3	3
中くらい	2	3	3
速め	3	3	3

演奏を目指した合同練習になった事例を示す。

表 2 の結果から、FE を使用することにより初心者でもすぐに課題曲を連弾できたことが明らかであるが、FE を使用しない合同練習と比較して、FE を使用した合同練習では、プリモの様子に変化が見られた。

ペア A の FE を「使用した収録 3」では、次の会話が見られた。

プリモとセコンド：連弾(プリモがたくさんミスをする)

プリモ：間違えた=

セコンド：=だめだね。:=

プリモ：=むかつく

セコンド：じゃあ、もう 1 回いきましようねえ

プリモとセコンド：連弾(プリモの失敗により出だして終わる)

セコンド：おまえ、まず練習せい

プリモ：うん、練習するわ

プリモ：独奏

プリモ：よっしゃいこう

セコンド：ええか？

プリモ：お父さんと弾くとやりにくいよな。

セコンド：[なんてや

ねん

プリモとセコンド：連弾

プリモの「お父さんと弾くとやりにくいよな」は、プリモは連弾が上手にできなかったときに父親であるセコンドを怒ることができず(質問 5 への回答)、上

書き起こしの表記は Jefferson (1979) の表記法に、ほぼ従っている。

手に弾けないことへの焦りを感じたゆえの発言と考えられる。セコンドはFEに支援されているため「挿入」「音高誤り」「弾き直し」の演奏誤りをするのではない。よって多くの場合、楽譜どおりに奏でられなかった原因はプリモにある。ペアD、Eのプリモも同じような焦りを感じており(質問9への回答)、これが合同練習中のプリモによる独奏練習の増加(表2)につながったと考えられる。

FEを使用した収録では他に、楽譜上の音高列どおりに奏でることにとどまらず、さらに表情豊かな演奏になるように2人で協調して作っている様子が見られた。次はペアAの収録4に見られた会話である。

プリモ: あ::こう、タンタンタンって弾くと音途切れるわけよ=

セコンド: =うんうんうん

プリモ: だから、もうちょっとさあ

プリモ: 独奏(前よりも1音1音長めに弾きながら)

[
プリモ: お父さん今の

セコンド: うん、もっと、こう、伸ばせていうの? =

プリモ: =そう

セコンドの担当するパートは、プリモ・パートのメロディと同じ音価(八分音符)であった。プリモはセコンドの演奏の各音が途切れていることを指摘し、各音を伸ばしぎみにしてほしいということを実際に弾くことで示しているのである。さらに収録3では、まったくの初心者であるセコンドが、お互いの演奏がずれている付点の音符のリズムを指摘し、より表現を高めるために練習を一緒にすることをもちかけていた。

プリモとセコンド: 連弾

プリモ: お::できたやん=

セコンド: =あ、ここ(楽譜を指す)合いたいね(指で付点の音符のリズムを囲む)

プリモ: 独奏

[[
プリモ: たーんたたん

[
セコンド: そうそう、たーんたたん、うん
ここだけ練習する?

これらの発話中に示された、なめらかに演奏することやリズムを2人で合わせること等の演奏表現を高め

るための話し合いは、FEを使用しなかった収録ではまったく見られなかった。FEを使用しない場合には、多くの場合、まず楽譜上の音高列どおりに演奏できるようになることに終始してしまう。特に、親の演奏練習にほとんどの時間が費やされるため「家庭での子ども自身の練習」の手段として、通常のピアノによる親と子どもの連弾は現実的ではないことが示された。また、合奏の合同練習とは本来、奏者達が各々に望ましいと思う表現を示しあって共有し、演奏を創りあげていく場である。FEが音高列の再現技術が低い奏者の方を支援することで、このような本来の合同練習が家庭においても可能になったことが確認された。

6. 議論: 家庭内練習を促進する手段としてのFE

表2に示したように、FEを使用することで課題曲の最初から最後まで通した連弾の回数が大幅に増加した。この結果から、本研究の第1の目的である、まったくの初心者(セコンド)と初級者の奏者(プリモ)によるピアノ連弾が、FEによって可能となることが示された。

また、同じく表2に示すとおり、FEを使用することでプリモの独奏練習が増加した。これは、単にFEの支援によってセコンドの練習時間が減少したためだけではないと考えられる。FEによる支援下での演奏では、生じる誤りのほとんどがプリモの誤りに起因し、それがプリモとセコンドの両者にとって明らかとなる。この結果、セコンドに対するプリモの優位性が失われるので、この地位を挽回すべく、プリモの練習意欲が高まったのであろう。このことは、5.5節に示したペアAによる収録3での対話例中の、プリモによる「むかつく」などの発言に見てとることができる。

1章でも述べたように、FEにおける親の役割は、先生の代わりに子どもを指導することではなく、家庭で子どもを楽器の前に座らせるきっかけを作り、子どもが自主的に学習する機会をもたらすことにある。多くの子どもは家庭での楽器練習を嫌がる傾向にあるが、家族からの「練習しなさい」という命令形の呼びかけではなく、「一緒に弾こう」という誘いには応じやすいと考えられる。FEによって親との連弾が可能となれば、家庭での練習もレッスンを受けるときのような協同作業の色合いが濃くなり、子どもが楽器の前に座るきっかけになると思われる。

以上の結果ならびに考察から、本研究の第2の目的である、子どもの練習意欲の促進についても、FEは有効である可能性が示された。ただし、今回の実験は

付点八分音符と十六分音符のリズムが連なった個所であり、音価は十六分音符を1とすると、付点八分音符は3であるが、実際の演奏における割合は、人により癖が出やすい。

非常に短期的な実験であったため、持続的に練習意欲を促進しうるかどうかについては、FE を用いた長期的試用実験の実施が不可欠である。これは今後の課題とする。

さらに、家族と連弾することで、子どもが自分の演奏に何らかの不備があることに気が付ける可能性がある。レッスン以外では、たとえば、間違った運指で練習をしていてもなかなか自分では気が付かない。しかし、連弾の演奏具合が思わしくないと判断し、その理由が自分の不適切な運指であることに気が付いたら、他人に指摘される以上に、学習効果をもたらすであろう。

FE を使用した合同練習中に、お互いに音楽表情や演奏技術について議論している様子が見られた。これは、FE を使用しない収録ではまったく見られなかった様子である。FE を使用しない場合には、セコンドが音高どおりに演奏できるようにセコンドが練習することに終始してしまっていた。

このような効果は、機械による自動的な伴奏では得がたいと思われる。2章で示したように、近年独習用教材としてマイナス・ワンが多用されているが、今回実施したマイナス・ワンを使った連弾との比較実験にも現れているように、人間の奏者の意図がまったく反映されないために、あらかじめ収録されたデータとの合奏は難しい。また、マイナス・ワンのソフトウェアとは、音楽的な表現や演奏技術を議論し合って協調的に演奏を創りあげていくこともできない。より高度な対話型自動伴奏システムを用いれば、少なくとも人間の奏者の意図が多少は反映される分、先の問題は緩和されるが、音楽的表現を協調して創りあげることが依然としてほぼ不可能である。

FE は親のパートにのみ支援機能を提供している。この結果、親側の楽器は、見た目はピアノであるが、その奏法はピアノとは大幅に異なるものとなっているため、いくらこれを練習しても、親が「ピアノ」を演奏できるようにはならないであろう。これは、ピアノを学習するのはあくまで子どものみという割り切りに基づくものである。しかし、この支援機能は、音高列の再生のみを支援しており、リズムや強弱などには、人の演奏がそのまま反映される仕組みになっている。したがって、親側の楽器も、通常の楽器と遜色ない音楽表情づけのポテンシャルを持っているため¹⁶⁾、音高列どおりに演奏するという最初の障壁を超えて、すぐに表情豊かな演奏を目指すことに集中できる。親側にもこのような「表情付けへの取り組みの余地」が十分にあればこそ、ペア A の収録 3 や 4 で見られた、音楽表現に関わる親子の間での議論が生まれたのだとい

うことができるだろう。

このように、FE によって連弾によるピアノ練習が持つ「パートナーと呼吸を合わせつつ、音楽性を育てる」というもう 1 つの重要な効果を、家庭でも活用可能となることが示唆された。

今後の課題としては、電子楽譜の作成があげられる。現在はシステムの支援により打鍵すると正解の個所の音高を鳴らすことはできるが、セコンドは楽譜上の位置も把握していることが望ましい。よって、電子楽譜により、プリモが演奏しているとシステムが判定している位置をセコンドに提示してあげることが必要である。また、現在は楽曲の途中からいきなり開始した場合、2, 3 音の間、セコンドは不正解な音高を出力してしまう。よって、電子楽譜上の任意の個所を触れると、そこからセコンドも正解の音高で開始できるようになることが望ましい。

7. おわりに

まったくの楽器演奏初心者が初級者としてもピアノ連弾できるシステム“Family Ensemble”を提案した。楽器レッスンに通う子どもとピアノ連弾する初心者の親のパートは、正確な音高列を出力する機能と、演奏位置の追従機能により支援されているため、すぐに子どもと連弾することができる。評価実験でも、FE を使用しない場合はピアノ連弾がほとんど実施不可能であったにもかかわらず、FE を使用した収録では、どの被験者ペアも連弾を行うことができるようになり、中には 15 分間で 10 回以上の連弾をしたペアもいた。また、FE を用いた場合、子どもが自分のパートを通し練習する回数が増加することも明らかになった。さらに、音楽演奏の経験がまったくない親と初級者の子どもが、FE を使用した合同練習中に、音楽的な表現や演奏技法などについて議論し、協調して音楽表現を創りあげていく様子が確認された。

今後は電子楽譜を作成し、家庭の中での Family Ensemble の長期的な使用を試みていきたい。

謝辞 収録にご協力いただいた北陸先端科学技術大学院大学の教官およびご家族の皆様、学生の皆様に心より感謝いたします。本研究の大島、鈴木担当は独立行政法人情報通信研究機構 (NICT)「超高速ネットワーク社会に向けた新しいインタラクション・メディアの研究開発」において実施したものである。また、西本担当は科学技術研究費補助金基盤研究 (C) (2) 課題番号 16500580、および中山隼雄科学技術文化財団の支援を受けて実施したものである。

参 考 文 献

- 1) Bloch, J. and Dannenberg, R.B.: Real-Time Computer Accompaniment of Keyboard Performances, *Proc. ICMC85*, pp.279-289, ICMA (1985).
- 2) Casio: LK-55 Full Size Keyboard with Key Lighting System, <http://www.casio.com/index.cfm?fuseaction=products.detail&product=LK%2D55>.
- 3) Dannenberg, R.: An On-Line Algorithm for Real-Time Accompaniment, *Proc. ICMC84*, pp.193-198, ICMA (1984).
- 4) 福井浩司, 堀内靖雄, 市川 薫: 複数のモデルを利用した重回帰分析による演奏表現の学習, 情報処理学会研究報告, MUS-49, pp.13-18, 情報処理学会 (2003).
- 5) Grubb, L. and Dannenberg, R.: A Stochastic Method of Tracking a Vocal Performer, *Proc. ICMC97*, pp.301-308, ICMA (1997).
- 6) 日高伊佐夫, 後藤真孝, 村岡洋一: すべてのプレイヤーが対等なジャズセッションシステム II. ベーシストとドラマーの実現, 情報処理学会研究報告, MUS-14, pp.29-36, 情報処理学会 (1996).
- 7) 堀内靖雄, 坂本圭司, 市川 薫: 合奏における人間の発音時刻制御モデルの推定, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.2, pp.260-267, 情報処理学会 (2002).
- 8) 井川孝之, 直井邦彰, 大照 完, 橋本周司: 相互作用モデルによる実時間適応自動伴奏とその動作解析, 電子情報通信学会春季全国大会講演論文集, pp.1389-1390 (1992).
- 9) 樹原涼子: ピアノランド, Vol.1-5, ミュージックデータ付き, 音楽之友社.
- 10) 児玉幸子: 他人と合わせることによって表現したいことが自然に出てくるようになる, レッソンの友, Vol.37, No.11, pp.11-13, レッソンの友社 (1999).
- 11) 久木山直ほか (編曲): 先生と生徒のれんだんコンサート ショパン名曲集, ヤマハミュージックメディア (1999).
- 12) 三善 晃: Miyoshi ピアノ・メソード, Vol.1-8, カワイ出版.
- 13) 三善 晃: 連弾 ことばを越えた交感の世界—音を重ねることが連弾ではない, ムジカノーヴァ, Vol.31, No.9, pp.30-32, 音楽之友社 (2000).
- 14) Orio, N., Lemouton, S. and Schwarz, D.: Score Following: State of the Art and New Developments, *Proc. NIME03*, pp.36-41 (2003).
- 15) 大政直人ほか (編曲): ショパン名曲コレクション, ヤマハミュージックメディア (1999).
- 16) 大島千佳, 西本一志, 宮川洋平, 白崎隆史: 音楽表情を担う要素と音高の分割入力による容易な MIDI シーケンスデータ作成システム, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.7, pp.1778-1790, 情報処理学会 (2003).
- 17) 尾崎昭剛, 原尾政輝, 平田耕一: 演奏習得支援システムのための効率的な演奏現在位置解析アルゴリズム, エンターテインメントコンピューティング 2003 論文集, IPSJ Symposium Series, Vol.2003, No.1, pp.41-46 (2003).
- 18) Pachet, F. and Addressi, A.: When Children Reflect on Their Playing Style: Experiments with the Continuator and Children, *ACM Computers in Entertainment*, Vol.2, No.1, Article 05 (2003).
- 19) Vercoe, B.: The Synthetic Performer in the Context of Live Performance, *Proc. ICMC84*, pp.199-200, ICMA (1984).
- 20) 和氣早苗, 加藤博一, 才脇直樹, 井口征士: テンション・パラメータを用いた協調型演奏システム, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.7, pp.1469-1481, 情報処理学会 (1994).

(平成 16 年 5 月 24 日受付)

(平成 16 年 11 月 1 日採録)



大島 千佳 (正会員)

1973 年生. 1996 年武蔵野音楽大学音楽学部器楽学科ピアノ専攻卒業. 1990 年, 1995 年ウィーン国立音楽大学夏期セミナー修了. 2001 年いしかわミュージックアカデミーマスターコース (選抜) 受講. 2001 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士前期課程修了. 2004 年同大学院後期課程修了. 優秀修了者. 2004 年 4 月より (株) ATR メディア情報科学研究所感性・知育メディア研究室研究員. 1991 年埼玉ピアノコンクール入賞. 1993 年, 1995 年武蔵野音大にて福井直秋賞, 2004 年インタラクシオン 2004 ベストインタラクティブ発表賞, ACM Multimedia 2004 Best Paper Award, 各受賞. 日本教育心理学会, 日本創造学会, Cognitive Science Society 各会員. 博士 (知識科学).



西本 一志 (正会員)

1962年生。1987年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。1987年松下電器産業(株)入社。1992年(株)ATR通信システム研究所知能処理研究室に外向。1995年(株)ATR知能映像通信研究所客員研究員。1999年より北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター助教授。2000年～2003年科学技術振興事業団さきがけ研究21「情報と知」領域研究員兼任。2001年～2004年(株)ATRメディア情報科学研究所第1研究室非常勤客員研究員兼任。2004年より(株)ATRメディア情報科学研究所感性・知育メディア研究室非常勤客員研究員兼任。1997年度人工知能学会研究奨励賞, 1999年度情報処理学会坂井記念特別賞, 1999年度人工知能学会論文賞, インタラクシオン2004ベストインタラクティブ発表賞, ACM Multimedia 2004 Best Paper Award, 各受賞。IEEE Computer Society, ACM, 人工知能学会各会員。博士(工学)。



鈴木 雅実 (正会員)

1955年生。1980年慶應義塾大学大学院工学研究科修士課程修了。同年KDD(現KDDI)入社。1983年より同社研究所, 1989年～1993年ATR自動翻訳電話・音声翻訳通信研究所にて音声言語翻訳・自然言語処理関連の研究に従事。KDDI研究所主任研究員(1999年9月よりTAO学校インターネット研究員)を経て2002年よりATRメディア情報科学研究所, 現在感性・知育メディア研究室長, 体験共有コミュニケーションと知育メディアの研究に従事。博士(工学, 東京工業大学), 電子情報通信学会, 人工知能学会, 言語処理学会, 感性工学会等各会員, NPO法人CANVASフェロー。