

博士論文

遠隔ピアノレッスンのための教授支援基盤技術の構築

公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科
システム情報科学専攻

松井 遼太

2022年3月15日

Doctoral Thesis

Construction of Core Technologies of Teaching Support for
Remote Piano Lessons

by

Ryota Matsui

Graduate School of Systems Information Science
Future University Hakodate
March 15, 2022

概要: 本論文では物理的に離れた2地点間における遠隔ピアノレッスンの実時間支援と、レッスン外の独習支援を包括する遠隔ピアノレッスンの教授支援基盤技術の構築に関する研究について述べる。

近年、通信技術・AR/VR技術などICT技術の発展に伴い、予備校におけるサテライト授業や会議システム、語学学習などの分野において遠隔・通信教育が一般化してきている。特に2020年以降は新型コロナウイルスの蔓延により、多くの会社や学校でリモートワークや遠隔授業が推進されてきた。また、既存の地図アプリなどを使用したオンライン旅行なども着目されるようになり、様々な業界からのリモートワークの需要が高まっているといえる。リモートワークや遠隔授業により、ユーザは本来通勤通学ができない遠くの会社や学校にも通うことができる。また、家を出るための身支度や、通勤通学の時間を削減できるため、余暇の時間を有効に活用するなど、日常生活をより豊かにすることが期待できる。

一方で、楽器演奏やスポーツに関しては依然として、対面環境における指導が一般的である。その理由として、音楽ではその楽器特有の演奏法や指導が求められたり、スポーツにおいてはスポーツの種類ごとに身体動作が異なることが挙げられる。視界や、身体への接触などの動作が制限される遠隔環境においては、これらの指導を円滑に行うことは難しい。遠隔環境ではコミュニケーションが何かしらの制限を受けるため、直接的な言葉や動きのやり取りが必要な楽器演奏においては、全てを円滑で賄うことは難しい。

また、ピアノの指導に関して、遠隔教育のみで全ての指導を行う場合、実際に生徒と教師が対面することがなく、両者とも、現実感や緊張感など、対面している感覚が薄れてしまうことも考えられる。そのため、生徒は自宅での練習に身が入らないなどの状況も発生する。一方レッスンを受けて独学で学習を進めようとした場合、ピアノ演奏技術の向上には多大な時間や労力を必要とするため、敷居の高さに利用や継続を断念したり、習熟効率の低さから挫折してしまう学習者も多い。

これらの問題に対し、筆者は実時間の遠隔レッスンを支援する「遠隔レッスン時支援」と、レッスンから次のレッスンまでの期間における、生徒の自宅での独習時に利用することを想定とした「独習時支援」の2つの側面からの支援を提案してきた。これらの研究成果は、遠隔ピアノ学習の活性化に大きく貢献するものであり、本論文はその研究成果をまとめたものである。

本論文は全6章から構成され、その内容は次の通りである。まず、第1章において、研究の背景、目的とその意義について述べる。次に第2章では、「遠隔レッスン時支援」のうちの一つである、共同注視支援システムについて述べる。提案システムは遠隔レッスン時の生徒と教師のコミュニケーションを共同注視の観点から支援する。また、複数視点のカメラを自動でスイッチングする機能を持ち、遠隔環境におけるカメラの視点数と見やすさのトレードオフを解消する。

第3章では、「遠隔レッスン時支援」のうち、教師向けの支援機能をもつ悪癖自動検出システムについて述べる。本システムは、生徒の演奏上の悪癖が起りやすい箇所を予測し、あらかじめ楽譜上にアノテーションする。これにより教師は、あたりをつけて生徒の演奏を聴くことができ、指導に必要な時間を減らすことができる。

第4章では、生徒が自宅での独習時に利用することを想定とし、「課題曲がいつ頃、師事している教師から合格をもらえるか」を予測し、提示するための課題曲合格日予測システムについて述べる。本システムは、生徒の日々の練習データから合格までの道のりを可視化することができる。

第5章では、記憶の定着方法の一つである、再固定化方に着目した学習支援システムである再固定化学習システムについて述べる。再固定化は運動スキルの定着に有効であると判明しており、本研究ではピアノの打鍵を運動であるとみなして、再固定化を利用した学習支援システムを設計した。本システムも、第4章の課題曲合格日予測システムと同じく「独習時支援」に該当する。

最後に、第6章では、提案システムの統合と合理性について議論し、遠隔ピアノレッスンにおける今後の進展に貢献する課題について述べ、本論文のまとめとする。

キーワード: ピアノ学習支援、遠隔レッスン、ヒューマンコンピュータインタラクション、音楽情報処理、ヒューマンインタフェース

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.1.1 ピアノレッスンを受講する重要性	1
1.1.2 ピアノ教室への通学を続ける難しさ	2
1.1.3 楽器演奏人口の減少	2
1.1.4 近年のピアノレッスンとICTの関連性	2
1.1.5 遠隔環境におけるピアノレッスンと独習の難しさ	4
1.2 本研究の目的と意義	6
1.3 本論文の構成	6
第2章 共同注視支援システム	8
2.1 まえがき	8
2.2 関連研究	9
2.2.1 ピアノ用e-ラーニング教材	9
2.2.2 既存の遠隔ピアノレッスンサービス	9
2.2.3 従来のピアノ独習支援システム	10
2.2.4 遠隔演奏支援	11
2.2.5 遠隔作業支援	12
2.3 設計	13
2.3.1 想定環境と使用する生徒のスキル	13
2.3.2 要件	14
2.3.3 システム構成	16
2.3.4 提示コンテンツ	17
2.3.5 機能	19
2.3.6 自動カメラスイッチング機能	20
2.3.7 実装	21
2.3.8 カメラスイッチングのルール	22
2.3.9 性能評価	23
2.3.10 手動カメラスイッチング機能	24
2.4 ユーザスタディ	25
2.4.1 システム全体のユーザスタディ	25
2.4.2 自動カメラスイッチング機能に特化したユーザスタディ	30
2.5 まとめ	33

第3章	悪癖自動検出システム	36
3.1	まえがき	36
3.2	関連研究	37
3.2.1	演奏の視覚化	37
3.2.2	複数映像提示手法	38
3.2.3	深層学習を用いた予測による業務効率化	38
3.3	ピアノ学習者の指使い観察実験	38
3.3.1	実験の目的	38
3.3.2	データセットの構築	38
3.3.3	ピアノ教師による指使い分析	40
3.3.4	結果	41
3.3.5	考察	42
3.4	設計	42
3.4.1	提案システムの基本機能	43
3.4.2	悪癖箇所の推測	43
3.5	ユーザスタディ	44
3.5.1	被験者	45
3.5.2	使用可能な機能	45
3.5.3	課題曲	46
3.5.4	ユーザスタディの流れ	46
3.5.5	結果	46
3.5.6	考察	47
3.6	まとめ	48
第4章	課題曲合格日予測システム	49
4.1	まえがき	49
4.1.1	想定する利用シナリオ	50
4.2	関連研究	50
4.2.1	ピアノ学習支援システム	50
4.2.2	Learning Analytics	50
4.3	データ収集実験	51
4.3.1	実験目的	51
4.3.2	分析用データセット構築	52
4.3.3	データ収集実験の結果と考察	53
4.4	予測モデルの設計	54
4.4.1	演奏協力と合格判定を実施したピアノ教師	54
4.4.2	演奏データの分析	55
4.4.3	予測モデルの構築と考察	57
4.5	予測モデル検証実験	59
4.5.1	実験目的	59
4.5.2	実験詳細	59
4.5.3	予測モデルの適用結果	60

4.6	考察	61
4.6.1	実験に関する考察	61
4.6.2	課題曲の楽曲構造と提案モデルの考察	62
4.6.3	学習者が練習を休んだ場合の議論と拡張点	62
4.6.4	音名シールと予測モデルに関する考察	62
4.6.5	今後の課題	63
4.7	まとめ	63
第5章	再固定化学習システム	68
5.1	まえがき	68
5.2	関連研究	69
5.2.1	補助情報を提示する学習支援システム	69
5.2.2	人間の記憶のメカニズム	70
5.3	設計	70
5.3.1	設計概念	71
5.3.2	学習者に提示される情報	71
5.3.3	ゲームモードの説明	73
5.4	ユーザスタディ	73
5.4.1	被験者	74
5.4.2	実験方法	74
5.4.3	実験結果	74
5.4.4	考察	76
5.4.5	議論	77
5.4.6	まとめ	77
第6章	結論	79
6.1	遠隔レッスンにおける提案システムの重要性	79
6.2	ピアノ以外の学習ドメインにおける本研究の適用	80
6.3	提案システムの限界と検討課題	80
6.4	本論文のまとめ	81
付録A	遠隔レッスンユーザスタディにおけるレッスンのストーリーと提示内容	92

第1章 序論

1.1 背景

1.1.1 ピアノレッスンを受講する重要性

ピアノ演奏者は、繊細な打鍵による演奏表情付け、複数声部の処理、複雑な和音の連打など、高度な演奏技術が要求される。また、自身で演奏しながら自身の打鍵した音を聴き、ホールや部屋の音の響き方を考慮して即座に演奏に反映させるという技術も求められる。これらの高度な技術を身に付けるためには、基礎的な技術から徹底して学ぶ必要がある。ピアノ演奏における基礎的な技術には譜読み、指示されている鍵への正確な打鍵、適切な運指（指使い）、リズム感覚、打鍵の強弱、テンポの維持などが存在する。基礎的な技術であっても、これらの修得には毎日、長期間の訓練を必要とする。このように、ピアノ演奏には多大な時間と労力を必要とするため、敷居の高さに学習を断念したり、習熟効率の低さから挫折してしまう演奏者が後を絶たない。特に独学の場合、初学者や上級者を問わず、以下のような問題が発生する。

- 打鍵することに集中するあまり、間違った鍵盤を打鍵したことに気がつかない
- 譜読みの段階で音を誤って覚えた場合、学習者自身が誤りを認識できない
- 運指やリズムの間違いなどは悪癖が身についた際の修正が難しい

そのため、うまく弾けない箇所の攻略方法を発見できずに練習のモチベーションが低下してしまい、挫折する可能性が高い [1]。したがって、たとえ基礎的な演奏技術の習得段階であっても、効率的なピアノ演奏技術の向上のためには教師からレッスンを受講することが不可欠である。

ピアノレッスンは通常、1週間に1回や2回から1ヶ月に1回などのペースで実施される。1回のレッスン時間は20分や30分から、人によっては数時間所要することもある。レッスンでは生徒が次回までの課題曲を教師から与えられ、生徒は次のレッスンに向けて、自宅で譜読みと十分な練習を行う。課題曲の完成には数週間から数ヶ月を要することもある。複数の課題曲を並行して練習することもある。教師は生徒の演奏技術や楽曲の好み、自宅で練習できる時間などを考慮して課題曲を選定する。しかし、様々な理由によってピアノ教室への通学を続けることは難しく、通学を断念してしまう例も存在する。これについては1.1.2節にて詳細を記述する。

1.1.2 ピアノ教室への通学を続ける難しさ

自宅から定期的に通える範囲にはレッスン教室の数が限られている。2014年の総務省の経済センサス-意識調査 [2] では、全国の音楽教室数は20,325軒であり、これは人口10万人あたり15.99軒となる。本調査ではピアノ教室とその他の楽器教室をまとめて「音楽教室」としているため、実際にピアノ教室に限定すると、より教室数は少なくなる。さらに、ピアノレッスン継続の敷居を高めている要素として、以下の2つが挙げられる。

1. ピアノレッスンでは通学時間や教室の待ち時間などが発生する
2. ピアノレッスンは基本的にマンツーマンで実施され、教師と生徒はある種の師弟関係で結ばれる

1に関して、時間に余裕がある人でなければレッスンに通うことは難しい。しかし大人のピアノ学習者の多くは、仕事や家事、育児などに追われてしまいレッスンに通う時間を確保できない。

2に関して、教え方や性格の合う教師から指導されることが効率的な上達や、モチベーションの維持には重要である。しかし、前述のように身近にピアノ教室が少ない場合も多く、体験的にレッスンを受講して教師と合わないと感じても、他ピアノ教室に行く選択肢が限定されてしまうことも多い。

1.1.3 楽器演奏人口の減少

1.1.2節で述べたピアノ教室への通学を続ける難しさについては、ピアノに限定されることではなく他の楽器にも共通している。総務省統計局の社会生活基本調査 [3] における「楽器を年に1回以上演奏する人」の割合は、2001年11.3%、2006年10.5%、2011年9.6%と5年間で約0.8%ずつ減少している(図1.1)。すなわち5年間で約100万人の楽器演奏者が減っている。さらに、ピアノ受講者に関して、ヤマハ音楽教室 [4] においては2010年51.5万人、2011年50.0万人、2012年46.0万人と年々減少傾向にある(図1.2)。

本研究で提案している遠隔レッスンが可能になれば、最適な教師を見つけやすくなり、ピアノレッスン自体の敷居が下がる。また、ピアノに限らず本研究のシステムを他楽器にも応用することで、潜在的に楽器を習いたい人が簡単にレッスンを受講でき、楽器演奏人口の増加につながると考えられる。そのため、本システムの一般化と普及によって、ピアノ演奏人口の減少に歯止めをかけることができると考えられる。

1.1.4 近年のピアノレッスンとICTの関連性

近年ICT技術の発展に伴い、様々な場面において遠隔コミュニケーション技術が用いられるようになった。身近な例だとZoomやSkypeなどを用いたビデオ会議や、遠隔地の作業者にロボットで直接指示を出す遠隔作業システムなど、その例は多岐にわたる。ピアノ指導においてもSkypeを利用した遠隔ピアノレッスンであるCafetalk [5] やオンライン

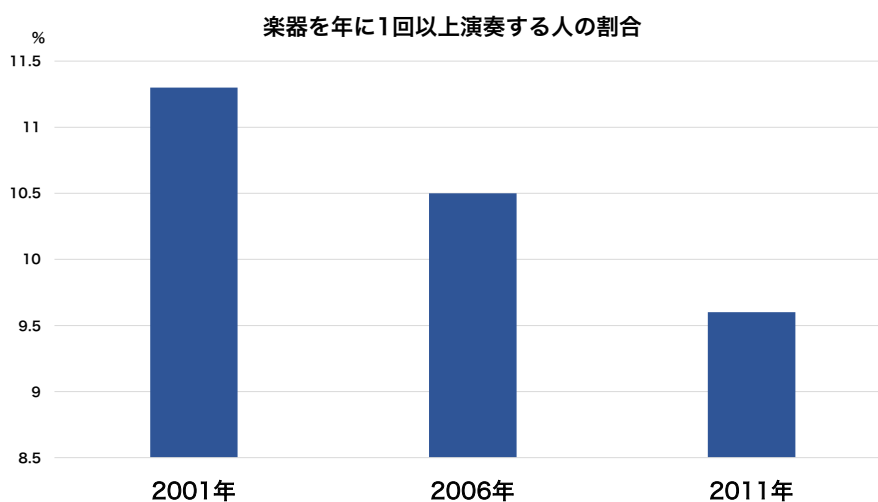


図 1.1: 社会生活基本調査における「楽器を年に1回以上演奏する人」

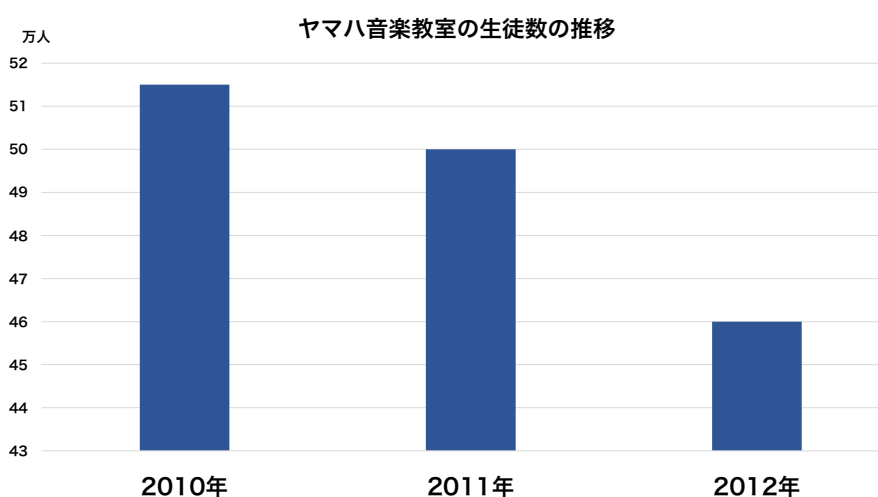


図 1.2: ピアノ学習者の減少

楽器レッスンジョイル [6] などのサービスが存在する。しかし、依然としてピアノ指導においてレッスンを遠隔で実施する場合には、1.1.5 節で後述するような課題も多い。また、ピアノ教育の業界全体として「ピアノレッスンは生演奏を聞かなければ意味がない」という、ピアノレッスンにおける ICT の活用に関して保守的な考えの教師や生徒も多く存在する。

一方、2020 年以降は新型コロナウイルスの蔓延により、リモートワークの需要が見直され、業種を問わず様々な場面でリモートワークが導入された。ピアノ教育においても、音楽大学やピアノ教室で遠隔レッスンが導入されはじめた。ドイツのフライブルク音楽大学では、YAMAHA 社の自動演奏が可能な、電子とアコースティックのハイブリッドピアノ

今までに遠隔レッスンを受講したことがありますか？

N = 104

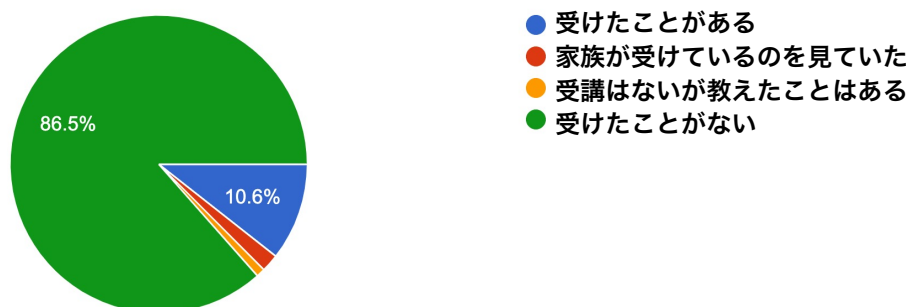


図 1.3: 遠隔レッスンの経験の有無に関する調査結果

である Disklavier[30] を利用した遠隔演奏入学試験が実施された [31]. また、遠隔レッスンの経験について 2020 年 12 月に、楽器の演奏経験がある 104 名にアンケート調査を実施したところ、約 10.6% が「遠隔レッスンを受けたことがある」と回答した (図 1.3). また、遠隔レッスンを初めて受講した時期を調査する質問には約 9.4% が「2020 年以降に初めて受講した」と回答した (図 1.4). これらの結果から、楽器経験者の約 1 割が遠隔レッスンの受講経験があり、そのうちのほぼ全員が 2020 年以降に受講を開始していることが判明した. したがって、楽器の遠隔レッスンはメジャーな選択肢になりつつあることが伺える.

1.1.5 遠隔環境におけるピアノレッスンと独習の難しさ

遠隔レッスンは手軽な手段であるものの、従来の手法では、単にビデオ通話を利用した遠隔ピアノレッスンのため、効果的な指導が難しい. 遠隔地同士のピアノレッスンでは、以下の大きな問題が生じる.

- 楽譜が直接見えない
書き込みをしたり、楽譜に指をさして「ここから弾いて」などと指示を出すことは困難である. 楽譜には音楽記号や強弱・表現の仕方を記入するが、それらの書き方は教師によって異なっていたり、表記自体が複雑なため、直接的な書き込みが出来なければ円滑にレッスンを実施できない.
- 手指や打鍵位置を直接見ることができない
相手側を撮影するカメラ視点が定点かつ視点数が少ない場合、相手側の打鍵位置や

遠隔レッスンを初めて受講した時期を教えてください

N = 104



図 1.4: 遠隔レッスンを開始した時期に関する調査結果

身体動作が詳しく見えないため、生徒の根本的な技術の改善につながらず、生徒側からも教師の手指を見て模倣するという学習方法が難しい。ピアノ指導においては、手指や身体動作を視覚的に把握しなければ指導できない要素が多く含まれている。そのため、遠隔環境におけるピアノレッスンでは相手側の視点数を限定せず、多視点映像の送受信が必要となる。

また、遠隔レッスンでは教師と直接対面することがないため、生徒の緊張感や見られている感覚が欠如することも考えられる。30年以上の指導経験を持ち、現在は遠隔レッスンをメインに指導しているピアノ教師にヒアリングを実施したところ、「ビデオ通話では生徒が集中できていないことが多い。子供は違う曲を弾きだしたり、大人でもスマホに目を配るなどの行動が目立つ」との回答を得た。また、Skypeを利用した遠隔レッスンの調査結果も存在する [32][33]。これらの研究では、遠隔レッスンを中心とした指導では学習効率が学生のモチベーションに大きく依存することが判明した。

生徒と教師が実際に対面することがない状況では、生徒の緊張感や見られている感覚が欠如して気が緩み、十分な独習をしないまま次回のレッスンに臨むということも考えられる。1.1.1 節で記述したように、ピアノ学習は自宅での独習が練習時間の大半を占める。生徒が前回のレッスンで指摘された点を十分に練習していない場合は、システムがどれだけ効率的に遠隔レッスンを支援しても、十分な学習効果は得られない。そのため、遠隔レッスンにおける根本的なピアノ教授支援を実施する場合には、レッスンそのものと、自宅での独習の二つを支援する必要がある。



図 1.5: 提案システムと各システムが支援する状況

1.2 本研究の目的と意義

本研究では、これらの問題を解決するために、遠隔レッスンそのものを支援する「遠隔レッスン時支援」と、非レッスン時の独習を支援する「独立時支援」の2つの側面から遠隔レッスンを支援し、遠隔ピアノレッスン環境における教授支援基盤技術の確立をめざす。提案するシステムが支援する状況の概要を図 1.5 に示す。提案システムは、独立時支援として課題曲合格日予測システムと再固定化学習支援システム、遠隔レッスン時支援として共同注視支援システムと悪癖自動検出システムの計4つのシステムからなる。課題曲合格日予測システム、再固定化学習支援システムは主に初学者を対象として、レッスン間の自宅での独習を支援する。共同注視支援システムは、生徒と教師のレッスン中のコミュニケーションを支援する。悪癖自動検出システムはピアノ教師を対象としており、効率的に生徒の演奏上の悪癖発見を支援する。提案システムは単に実時間の遠隔レッスンを支援するだけでなく、自宅での独立期間も支援することで、遠隔ピアノレッスンとその環境で学ぶ生徒を統合的に支援することができる。

1.3 本論文の構成

本論文は本章を含めて全6章から構成される。本論文の構成を以下に示す。第2章では、遠隔レッスン時の生徒と教師のコミュニケーションを共同注視の観点から支援し、また複数視点のカメラを自動でスイッチングする機能を持つ共同注視支援システムについて述べる。第3章では、教師が生徒の演奏上の悪癖を効率的に発見し、指導を円滑化するための悪癖自動検出システムについて述べる。本システムは深層学習により生徒の演奏上の悪癖が起りやすい箇所を予測し、楽譜上にアノテーションする。これにより教師は、予めあたりをつけて生徒の演奏を聴くことができ、指導に必要な時間を減らすことができる。第

4章では、生徒が自宅での独習時に「課題曲がいつ頃教師から合格をもらえるか」を予測し、提示するための課題曲合格日予測システムについて述べる。本システムは、生徒の日々の練習時の演奏データと、指示している教師の演奏との類似度を比較することで、目標としている演奏にどれだけ近づいているかを予測できる。第5章では、記憶の定着方法の一つである、再固定化方に着目した学習支援システムである再固定化学習システムについて述べる。再固定化方は運動スキルの定着に有効であると判明している。本研究ではピアノの打鍵を運動スキルであるとみなし、ピアノ学習においても再固定化方が有効であるとの仮説を検証した。最後に、第6章では、本研究のまとめを行い、遠隔ピアノレッスン教授支援に関する進展と今後の検討課題について述べ、本論文のまとめとする。また、各章には関連研究の節を設け、本研究に関連がある研究について紹介することで従来の既存研究との差別化を図り、各システムと本研究の位置付けを明確にする。

第2章 共同注視支援システム

2.1 まえがき

本研究の目的は、物理的に離れた2地点間においても同室感を感じるピアノレッスンを行うためのシステムの構築である。同室感とは「あたかも同じ部屋にいると感じる感覚」である。平田ら [29] は、同室感について以下のように定義している。

- その部屋にいるユーザ全員が周囲の音や映像に関して同じ認識や知覚を対称的に共有していること
- 他のユーザが実物と同じ大きさで認識され、自分のいる部屋と相手のいる部屋に没入している感覚が得られること
- ユーザどうしで方向感・距離感を共有していること

本研究では、ピアノレッスンという極めて限定的な状況についての支援を目的としている。これらをピアノレッスンという状況において換言すると、教師と生徒が同じ部屋に没入している感覚が得られること、教師と生徒が鍵盤や楽譜を共有できること、演奏時の相手の手指を直観的に把握して指摘できること、と捉えられる。これらの条件が可能になった場合、教師と生徒は遠隔地同士に居ながら指示語を用いた、簡潔な指摘や指導方法によって円滑なピアノレッスンができる。そこで本研究では同室感を以下のように定義した。

- 1回のレッスン(20分間とする)につき4回以上指示語を用いた会話があり、かつその指示語の対象物が何かを尋ねる会話が生じない
- 1回のレッスン(20分間とする)につき、鍵盤を示す指示語が1回以上、楽譜を示す指示語が2回以上出現する
- 対象物を指示する会話が発生しなくとも、楽譜や鍵盤を弾く動作のみで指示を出せる
- 教師が指摘した箇所についてほぼ実時間で、生徒が指示箇所を認識できる

これらは円滑にピアノレッスンを行う上で必須の事項であり、どれも対面環境のレッスンでは当たり前に行われている。対面環境におけるレッスンでは「ここを弾いて」や「ここはこう」などという会話が行われ、それらで用いられる指示語は鍵盤か楽譜のどちらかを示している。また、対面環境で教師がジェスチャを用いて「ここから演奏して」などと指示を出した場合、生徒が「何処ですか」とその指示箇所を質問することは発生しない。さらに、その指示箇所や指摘内容についてはほぼ実時間で共有することができる。そのため、本研究における同室感を上記のように定義した。

遠隔ピアノレッスンにおいて、同室感を感じることは非常に重要である。例えば、目の前にある楽譜やピアノの鍵盤を共有したり、好きな角度から相手の演奏を見ることは、対面環境では当たり前のように行われる。それら一連の行動が、特別な操作の必要なく行えることで初めて、対面環境のピアノレッスンと並ぶ選択肢として、遠隔ピアノレッスンが挙げられる。つまり、同室感を感じることは遠隔ピアノレッスンにとって必要条件であるといえる。本研究では同室感を感じつつ、遠隔でレッスンができるという強みを失っていない。

提案システムは、互いの打鍵位置や音声、映像、楽譜を共有できる。また、相手の打鍵位置を鍵盤上に投影したり、楽譜上に指をさした際の位置や書き込みを瞬時に共有するインタラクティブな機能により、対面環境と同様に直観的な指導やコミュニケーションが可能となる。多視点映像を送受信する方法としてカメラスイッチングの自動化を提案する。ニューラルネットワークを用いて楽曲の小節ごとの最適なカメラを予測し鍵盤周辺に配置された複数カメラの中から、演奏に合わせて常に最適な映像を提示する。また、本研究では多視点録画機能を搭載しており、レッスンをあらゆる角度から見返すことができる。この多視点録画機能は従来の対面ピアノレッスンでは成しえなかったものであり、対面環境と比して遠隔ピアノレッスンの立場を確立させるものであるといえる。よって、本研究における遠隔ピアノレッスンは従来のビデオ通話を利用した遠隔ピアノレッスンよりも対面環境に近い状況でレッスンができるため、より効率的な学習支援が可能となる。

2.2 関連研究

2.2.1 ピアノ用 e-ラーニング教材

これまでもピアノ学習支援に関する試みはいくつか行われている。自宅に居ながら教師のアドバイス付きで独学で学習できるピアノ用の e-ラーニング教材がある [7][8]。これらは動画内で教師が楽曲全体の解説や演奏で注意すべき点などの説明をするにとどまっている。動画による解説は、学習者の身近にピアノがない環境でも、練習中の楽曲の学習を補助できる。しかし、これらは図 2.1 に示したように各アクション間に時間差が生じてしまうため、実時間で教師が生徒の楽曲の理解度や演奏の進捗を確認できず、生徒も教師への質問が出来ないために、一方通行的なシステムである。そのため、生徒個人の実力や弾き癖にあった指導が出来ず、効率的な演奏技術の上達は難しい。したがって、

- 実時間で音声や映像、指示箇所を共有できない
- 実時間での会話を含めたコミュニケーションがとれない

という点において、指示語を用いた簡潔なコミュニケーションが困難であるため、本研究の同室感の定義を満たしていない。

2.2.2 既存の遠隔ピアノレッスンサービス

現在サービスとしてリリースしている遠隔ピアノレッスンとしては、Cafetalk[5] やオンライン楽器レッスンジョイル [6]、ピアノピクニック [10] などが存在する。これらは図 2.3

のように、既存のビデオ通話システムである Skype や Zoom を利用して、実時間で教師と生徒がピアノレッスンを行うサービスである。動画や文章による一方的な解説ではなく、生徒の演奏に対して教師が実時間でレスポンスとフィードバックを行い、指導を行うというインタラクティブなピアノレッスンができる点において e-ラーニング教材よりも効率的な指導が見込める。

また、オンラインレッスンの方法をまとめた「オンラインレッスン Q&A」という Web 教材を一般社団法人全日本ピアノ指導者協会 (ピティナ) が公開しており [9]、一般的に遠隔レッスンという選択肢が浸透していると推察できる。

また、単にビデオ通話を利用しただけではなく、システムが効果的なアドバイスを提示する遠隔ピアノレッスンも存在する。Skoove[11]では、手持ちのデバイスのマイクで演奏者の演奏を録音し、それに対してシステムが適切なフィードバックを行う機能や、演奏者に正しい演奏位置を教える機能などが存在する。Pianolens[12]では Microsoft 社の HoloLens を利用して、正しい演奏音がブロックのように流れてきて、それに対して演奏者が直観的に正しい打鍵位置を打鍵することができる (図 2.2)。しかし、前述したようにこれらの遠隔ピアノレッスンサービスでは、生徒と教師が楽譜や鍵盤を共有することができず、相手がどこに対して指示出しや質問をしているかを把握することが難しい。さらに、設置カメラ数が少ないために相手の手指を好きな角度から詳細に見ることができないため、演奏技術の指導が難しい。そのため、対面環境でのレッスンよりも結果的な指導効率とは下がると考えられる。したがって、

- 対象物へのジェスチャと指示語を交えた、簡潔な指示箇所共有ができない
- 映像が限られるため、指示箇所を視覚的に伝えることが難しい

という点において、指示語を用いた簡潔なコミュニケーションが困難であるため、本研究の同室感の定義を満たしていない。

2.2.3 従来のピアノ独習支援システム

独習用に特化したシステムでは、蓄積された演奏データから演奏者の苦手な奏法を割り出し集中的にトレーニングするシステム [14][15][16][17][18] や演奏を自動的に評価しアドバイス文や誤りを譜面上に提示 [19] するシステムがある。これらは、取得した打鍵情報から打鍵ミスや打鍵の強さなどを評価している。Piano Tutor[20]は演奏追従認識による自動譜めくり機能や、ビデオや音声による模範演奏の提示や、演奏者の演奏データを解析し改善点をテキストなどで指示する機能などをもつ。これらの研究で使用しているリアルタイムな打鍵情報からの打鍵の正誤判定や演奏追従認識などの技術は本研究においても要素技術として活用できる。

竹川らのシステム [21][22]では、ピアノの上部にプロジェクタを設置し演奏を支援する情報を鍵盤やその周囲に提示することで、演奏初期段階における打鍵位置や運指の習熟を高める学習支援が可能である。これらの研究では演奏初期段階の学習者にとって、鍵盤への補助情報の提示などの直観的な方法は有用だと判明している。本研究においては打鍵情報などのレッスン補助情報を同様の方法で提示することで、遠隔環境におけるピアノレッ

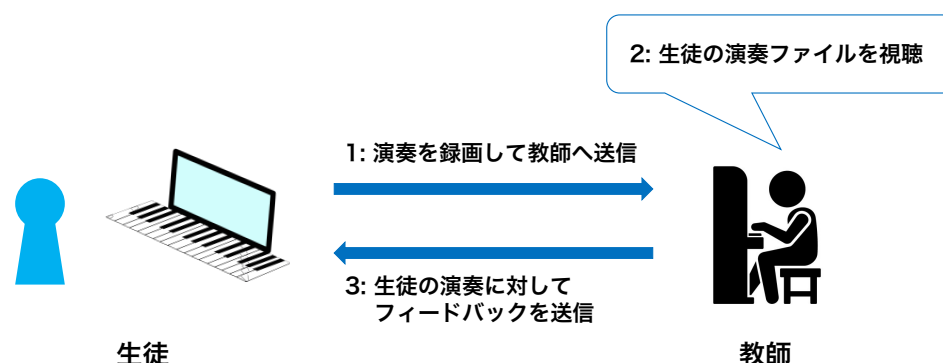


図 2.1: 既存のピアノ用 e-ラーニング教材を使用した学習の流れ

スンにおいても効果的な支援を提供できる可能性がある。竹川らのシステムを遠隔レッスンで使用した場合、

- 鍵盤に打鍵情報を投影している

という点において、指示語を用いた鍵盤や打鍵位置の共有が可能であるため、本研究の同室感の定義を一部満たしていると考えられる。一方で楽譜の素早い共有や、多角的な映像の共有はできないため、同室感を感じることは難しいといえる。

2.2.4 遠隔演奏支援

これまでも遠隔演奏に関する試みは行われてきた。遠隔演奏とは、物理的に離れた2地点間に置かれた楽器をMIDI接続によって演奏することである。MIDIはMusical Instrument Digital Interfaceの略称であり、演奏情報を様々なメーカーのデバイス間で送受信できる規格である。MIDIは音源ではなく、あくまで打鍵の速度や音高などの演奏情報であるが、遠隔地同士で送受信した場合遅延が発生する。NETDUETTO[23]という楽器間を光回線で接続することができる技術を(株)ヤマハが開発し、教育現場や遠隔セッションの場で導入されてきた。NETDUETTOは、遠隔地におけるMIDIの送受信を、人間が遅延を感じることはない速度で送受信することができる。NETDUETTOを利用することで、遅延を解消できる見込みがあるため、本研究では、遅延対策はスコープ外とする。一方、人間が演奏に支障をきたさない音源の遅延は約20ms以内といわれており、これを越える遅延が発生すると、打鍵から発音までのプロセスがずれ、正常な演奏が難しくなる。

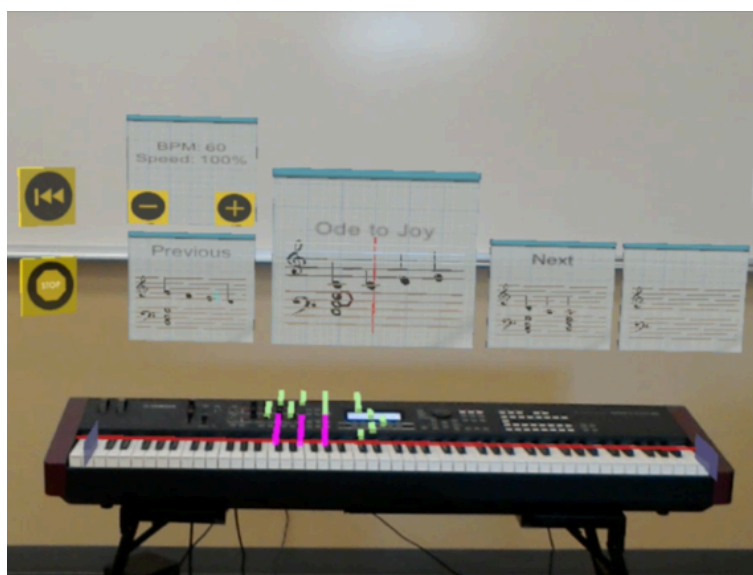


図 2.2: Pianolens による打鍵位置と補助情報の提示

2.2.5 遠隔作業支援

葛岡ら [24] は、作業者への指示出しを、1. 対面環境かつジェスチャあり、2. 対面環境かつジェスチャなし、3. 遠隔環境かつジェスチャあり、4. 遠隔環境かつジェスチャなし、の 4 パターンに分類し、作業完遂までの時間を計測する実験を行った (図 2.4)。その結果、遠隔地にいる相手への作業指示においてジェスチャの共有が、円滑な作業指示に必要であると証明した。葛岡らの研究を遠隔レッスンに応用した場合、ジェスチャと音声を共有した素早い指示出しを可能にしているという点で、本研究の同室感の定義を一部満たすことができる。一方で、直観的な鍵盤や打鍵位置の共有については、単純なジェスチャと音声の共有だけでは難しい。

また、遠隔地から指示を出す遠隔指導や遠隔作業において、視線や視線の移動方向を他者に伝達することは有効的であると判明している。遠隔演技指導において視線を活用したシステム [25] が存在する。また、樋口ら [26] は、実際に作業を行うユーザーを「作業者」、遠隔地から指示を出すユーザーを「指示者」と呼び、指示者によるハンドジェスチャを作業者のヘッドマウントディスプレイに提示することで両者の協調的作業を促すシステムを構築した。作業空間をモニタを介して閲覧する指示者の視線情報を計測し、作業者への指示に応用している。その結果ハンドジェスチャのみの指示だしの場合よりも、指示者の視線情報とハンドジェスチャを組み合わせた指示出しのほうが、作業効率が向上することが判明した。ピアノレッスンにおける視線計測は鍵盤や楽譜、相手側カメラなど多くの情報に視線が動くため直接的な導入は難しく、本研究では視線を活用した支援は取り入れている。また、演奏者にとってヘッドマウントディスプレイやウェアラブルカメラなどの機器の装着は、演奏に支障をきたす可能性がある。しかし、ある限定的な局面における視線情報を活用したコミュニケーション手法や指導方法を取り入れることで、より効果的な遠隔ピアノレッスンが期待できると考えられる。



図 2.3: ビデオ通話サービスを利用した遠隔レッスンの様子

これらの、ジェスチャや視線、音声・映像等を共有し、他者と同じものに注意を向けることをジョイントアテンションという。図 2.5 はジョイントアテンションの一例である。ジョイントアテンションは受け手と出し手の観点から、Initiating Joint Attention（開始のジョイントアテンション）と Responding to Joint Attention（応答のジョイントアテンション）に分けられるため、図中の行動 1、行動 2 はともにそれぞれ独立したジョイントアテンションであるといえる。この他にも、指示を出した際にアイコンタクトをとったり、声をあげて質問をしたりする場合もジョイントアテンションに含まれる。

遠隔環境において、指示語を用いた簡潔なコミュニケーションを実現するにはジョイントアテンションが必要である [27]。遠隔環境では、ジョイントアテンションの要素が多くなるほど、対面環境に近くなるといわれている。そのため、遠隔ピアノレッスンにおいても対面環境と同様に教師と生徒のアテンションの共有が必要である。提案システムでは、鍵盤や楽譜などアテンションが広範で多彩なピアノレッスンにおいても、幅広くアテンションを共有するための機能を有している。

2.3 設計

2.3.1 想定環境と使用する生徒のスキル

本システムは、生徒および教師の自宅やレッスン室に設置、両環境をインターネット接続して使用することを想定している。レッスン自体は通常の対面環境でのピアノレッスンと同様、マンツーマンを想定している。使用する生徒のスキルは、初級者や中級者を想定

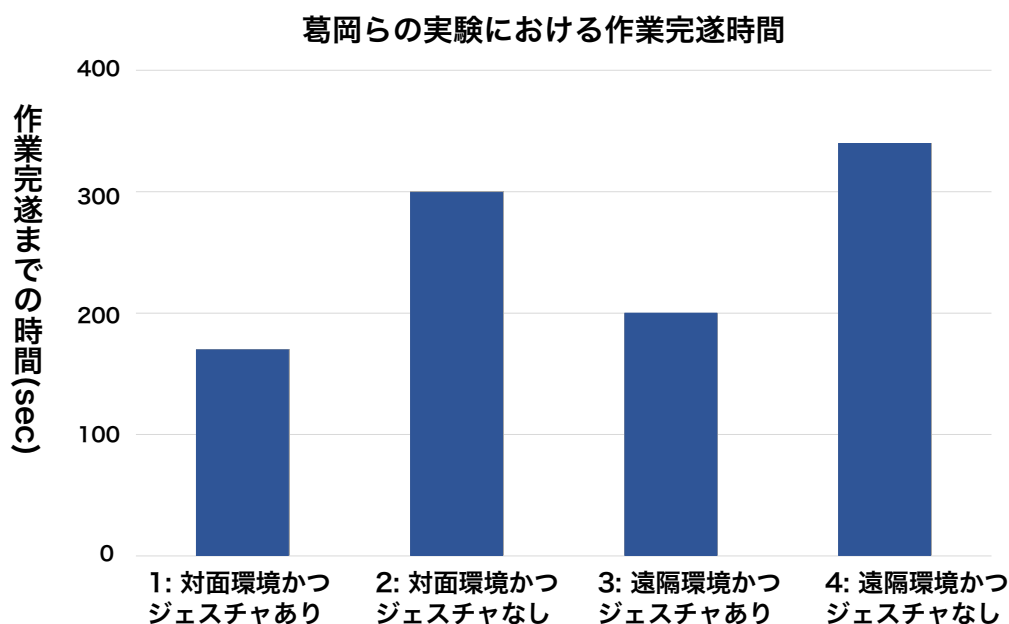


図 2.4: 葛岡らの実験結果

している。1.1.1 節でも述べたように自分の演奏からミスを発見することは難しい。特に初級者や中級者にとっては困難であり、これがモチベーション低下の要因となるため、独学でピアノを続けることは非常に難しい。一方で、上級者はある程度自分のミスに自発的に気づくことができ、すでに対面環境でレッスンを受講できるピアノ教師と師弟関係が完成しており、本システムによる支援が必要のない環境にいる者も多い。また、上級者になればなるほど、音楽表現の指導が中心になり、音質が重要になってくる。楽器の演奏音のクリアな伝達には限界があるため、上級者の支援は、本研究ではスコープ外とする。

2.3.2 要件

共同注視の必要性

遠隔環境では相手の楽譜が直接見えないため、書き込みをしたり、楽譜に指をさして直接指示を出すことが困難である。楽譜には各小節に小節番号が振り分けられているが、単に教師が小節番号で指示を出しても、生徒は一見するとどここの小節を指示しているのかわからない。図 2.6 のように、対面環境における指示語や指さし動作によって「この小節」というような指示語を用いた指導方法が最も一般的な指導方法であるといえる。提案システムでは、鍵盤や楽譜など互いに注視する対象が広く多彩なピアノレッスンにおいても直感的に共同注視ができる機能を提案する。

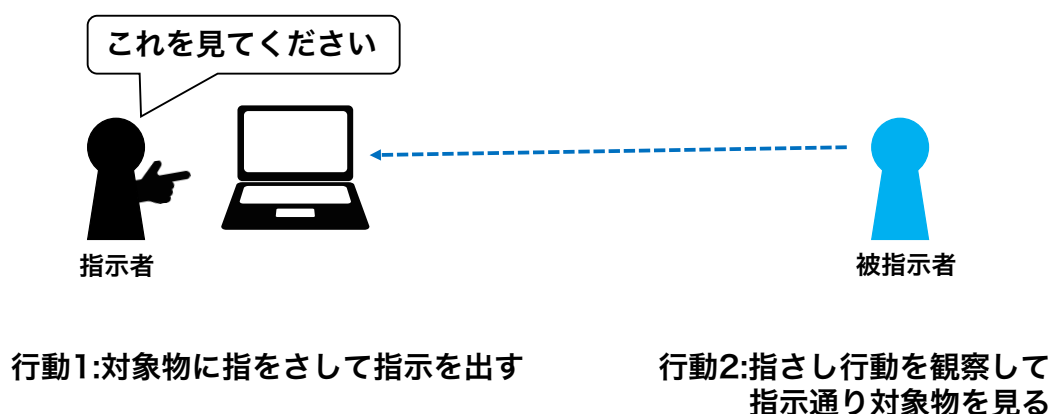


図 2.5: ジョイントアテンションの例

手指の視覚的把握の必要性

対面環境のピアノレッスンにおいては図 2.7 のように教師が打鍵方法を教示して、それを生徒が目で見ても倣うといった直観的な指導が行われる。ピアノ指導においては、図 2.8 のように手指や身体動作を視覚的に把握しなければ指導できない要素が多く存在する。手指の形は生徒の奏法や教師の指導指標によって異なる。手首を例にとると、打鍵主体の奏法であれば手首を高く保つ形、腕の重みで弾く圧鍵が主体の奏法では手首が上下する、などの奏法の違いがある。これら手指の形は一概に良し悪しを判断することはできず、教師によって見たい視点、見るべき視点は異なる。一方、遠隔環境において相手の手指を見たい時に見たい角度から見ることは難しい。そのため、遠隔環境におけるピアノレッスンでは様々なアングルから手指を見ることができるよう、複数のカメラを配置することが必要となる。しかし、図 2.16 のように同時に複数の視点を表示すると、視点数が多い分教師または生徒はどこを見るべきかわからずに混乱してしまう。さらに、視点数が多ければ多いほど画面を圧迫し、個々の視点が小さくなってしまいうため、別の意味での見逃しが生じてしまう。一方で、図 2.17 のように表示する視点数が少ないと、表示領域は大きくなり、一つの画面として見やすくなるものの、指導に必要な視点数は確保できない。

そこで、本研究ではカメラスイッチングを自動化することで、この問題の解決を目指す。ニューラルネットワークを用いて小節ごとの最適なカメラを予測し、提示する。生徒の演奏が楽譜と完全に一致しており、かつ教師の見たい視点が一定であれば、ルールベースの推論でも対応できる。しかし、実際には以下の 2 つの理由から完全なルールベースによる推論は難しいといえる。

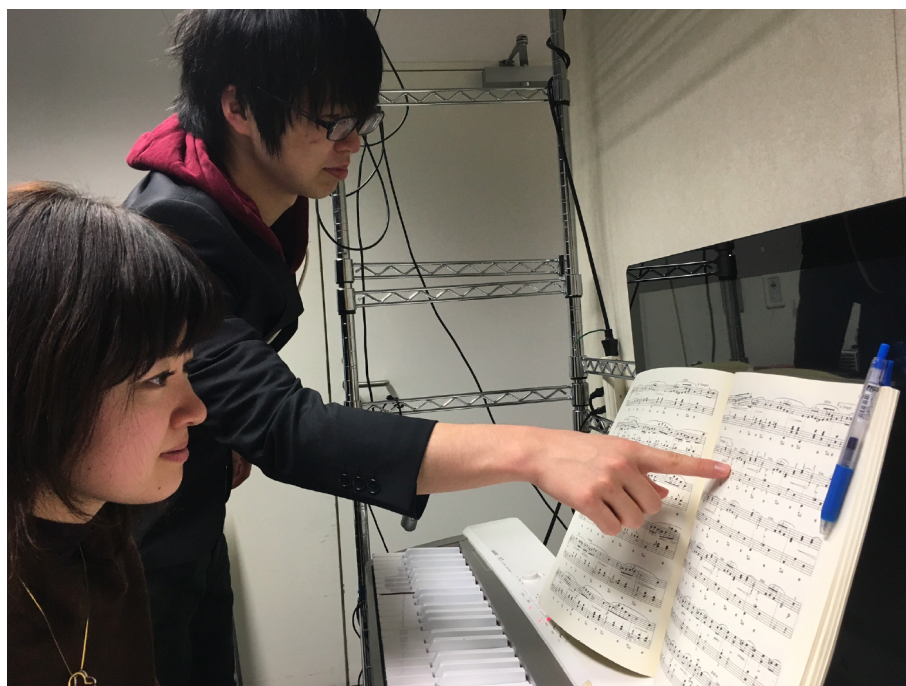


図 2.6: 対面環境における楽譜と指示箇所との共有

- 生徒の演奏が常に楽譜通りとは限らない
レッスンを重ねて生徒の演奏技術が上達したとしても、演奏中に突発的にミスをしてしまうことは、実際のレッスンの現場において発生する。その結果、小節の途中から演奏を再開したり、全く別の箇所から新たに演奏を開始することが予想される。このような場合は、ルールベースでは再開箇所の特정이非常に難しい。
- 同一の演奏に対しても教師の見たい視点は変化する
教師が見たい視点は、何を重点的に指導するかによって変化する。例えば、単純な演奏のミスを指摘したい場合と、演奏表情付けのために特定の指の動きを細かく指導したい場合では、見たい視点は異なる。そのため、ルールベースではルールを決定する要因が一意に定まらず、対応が難しいといえる。

2.3.3 システム構成

図 2.11 に示したように、提案システムは、電子鍵盤楽器、投影用プロジェクタ、複数カメラ、タッチパネルディスプレイなどから構成される。これらの機材は、教師側および生徒側環境の両方に設置される。生徒、教師側の双方に配置された PC 間では鍵盤の打鍵位置情報、打鍵速度情報が送受信され両者のディスプレイ上に可視化して表示される。

また、これらの打鍵情報は鍵盤の上方に設置されたプロジェクタによって実際の鍵盤上にも表示される。プロジェクタを鍵盤の真上に設置することで、鍵盤上やその周囲にさまざまなレッスン補助情報を提示できる。教師や生徒の表情・指示・指や手の形などを視覚



図 2.7: 対面環境における打鍵位置の教示方法

的に確認するためにアングルの異なる複数台のカメラを設置する。カメラの映像情報は相手側環境のディスプレイに提示され、実際のレッスンと同様に教師が生徒の指使いを確認したり、生徒が教師の演奏方法を模倣できる。ディスプレイ上の楽譜に音声やタッチペンでメモや気づきを記入する機能、それらを保存し相手と共有する機能をもつ。

2.3.4 提示コンテンツ

図 2.12, 図 2.13 を用いて提案システムの提示コンテンツについて説明する。図中の番号は、以下の箇条書き番号に対応している。これらの機能は、2.2.1 節「ピアノ用 e-ラーニング教材」や 2.2.2 節「既存の遠隔ピアノレッスンサービス」で述べた関連研究および既存システムにはないものである。これら機能は遠隔レッスンにおける指導やコミュニケーションを円滑にし、同室感をもたらす一因になると推察する。

(i) 書き込み共有楽譜

レッスン中の気づきや指摘を直観的に記録する楽譜共有機能をもつ。ディスプレイにはタッチパネルを採用しているため、タッチペンを用いて直接的な書き込みや、複雑な音楽記号などもすぐに書き込んで共有することができる。

(ii) 仮想鍵盤

相手の打鍵位置をディスプレイ上に表示された仮想鍵盤で把握することができる。仮想鍵盤の打鍵情報は、実際の両者の鍵盤上にも投影される。

(iii) 相手側カメラ視点

相手側のカメラ映像を表示する。演奏に合わせた最適な視点が常に 1 つ表示される。

手指の視覚的な把握

打鍵時の
指関節



手首の上下



運指



図 2.8: 手指の視覚的な把握方法と一例

(iv) カメラ手動切り替え候補

(iii) で表示した視点以外のカメラ映像を、手動切り替え候補として表示している。

(v) 動体検知カメラモードおよび切り替えボタン

画面右下に配置されたボタンをタッチすることで、カメラ視点が動体検知カメラモードに移行する。このモードではフレーム間の背景差分により動いている物体を自動で検知し、その周囲を緑色で表示する。さらにその中心座標に赤い丸を表示する。この機能によって演奏の際に動かす必要のない身体の部位が動いていると一目でわかり、遠隔ではわかりづらい身体の細かな動きにも的確な指示を出せる。

(vi) 音声譜めくり機能

音声認識機能による「次のページ」「前のページ」という言葉に反応して自動で譜めくりが行われる。ピアノ学習者は対面環境における通常のレッスンの際も楽譜を見ながら弾くことが多く、従来通りのレッスンでは紙媒体の楽譜を使用することがほとんどだが、演奏中にページをめくることは難しく、慣れないうちは紙が破れたり、見たいページを飛ばしてしまったりすることも多い。また両手を使用する演奏中に楽譜をめくる動作は、一度演奏を中断しなければならず、煩わしく感じる奏者も多い。そこでディスプレイに表示される電子楽譜の譜めくりを音声認識で行うことによって、従来の譜めくりの煩わしさを解消する。

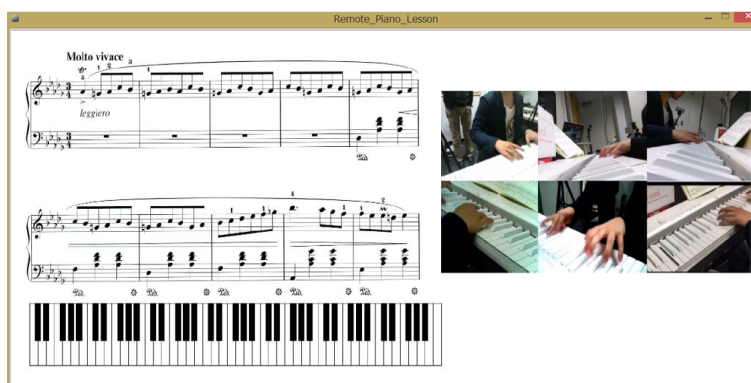


図 2.9: 表示する視点数が多い場合

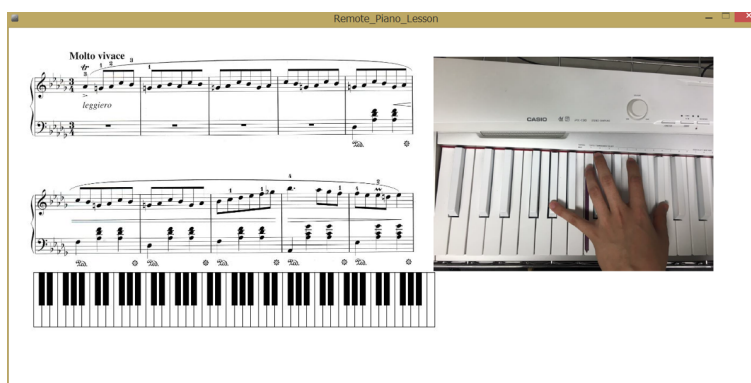


図 2.10: 表示する視点数が少ない場合

2.3.5 機能

鍵盤共有機能

生徒および教師の現在の打鍵位置をお互いの鍵盤上に投影する。両者の打鍵位置はディスプレイ上の仮想鍵盤にも表示されるが、図 2.14 のように実際の鍵盤上にも投影することで、より直観的な指導や演奏ができる。これは同室レッスンにおける、教師が楽譜に指を指して指摘し生徒は目で見確認する、指摘した音と対応する鍵盤に手を置き、鍵盤上の場所を教えるという動作を模倣した機能である。これにより教師は生徒の打鍵の間違いを指摘し、生徒は直観的に正しい打鍵位置を模倣できるため、指導が非常に容易となる。

楽譜指示箇所共有機能

対面環境において何かを指導したり共同で作業を行う場合、身振りや手ぶりなどのジェスチャを交えながらコミュニケーションをとる。これらはジョイントアテンションに含まれる動作である。このような身体動作は、ある具体的な行為の直前に発生する予備動作を観察することで、相手の次の行動や会話の内容を予測することができる。例を挙げると、

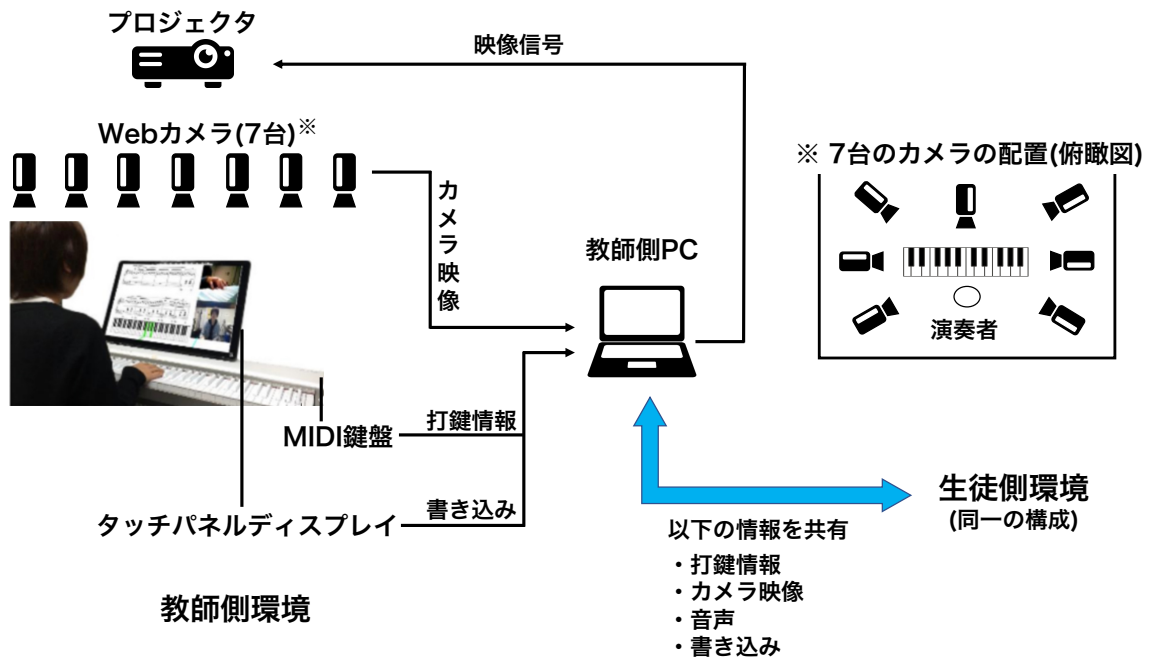


図 2.11: システム構成

教師が黒板に指をさして説明したあとに教科書を指さして説明しようとした際、生徒がこの一連の動作を観察することで次に説明される対象物を予測することができる。このような予備動作の観察が、円滑なコミュニケーションには必要不可欠となる [28]。これは遠隔ピアノレッスンにおいても例外ではない。遠隔レッスンの場合、相手側の手元や楽譜が見えないため、指さし動作による指示出しは生徒に伝わりづらい。相手の指示した箇所がどこなのかを理解する速さが、遠隔レッスンにおける円滑なコミュニケーションには欠かせない。ピアノレッスンにおいても瞬時に指示箇所を理解するためには、指さしなどの指示を出すまでの予備動作の観察が求められる。本機能は図 2.15 のように、指をさした箇所の周囲に円が収縮するアニメーションを付与し、そのまま指を離すとポインタのみが楽譜上に残る。そのため教師および生徒は互いの予備動作を観察でき、瞬時に指示箇所を共有できる。

2.3.6 自動カメラスイッチング機能

図 2.18 に一連の処理の流れを示す。FFNN(FeedForward Neural Network) を用いて、小節ごとにそのとき見るべき最適なカメラを予測する。その後、予測したカメラに対して、ルールを適用し最適なカメラを選定する。入力ノード数は対象楽曲の小節数 \times 入力パラメータ数である。今回対象とした楽曲では、1469 次元存在し、各特徴量は 0/1 で入力している。特徴量の例として、過去の演奏でミスがあれば、該当する次元の特徴量は 1、ミスがなければ 0 として入力し、それらがパラメータの種類数と楽曲の小節数に依存している。各層は 1 層の構造であり、各ニューロンの活性化関数として sigmoid 関数を使用し

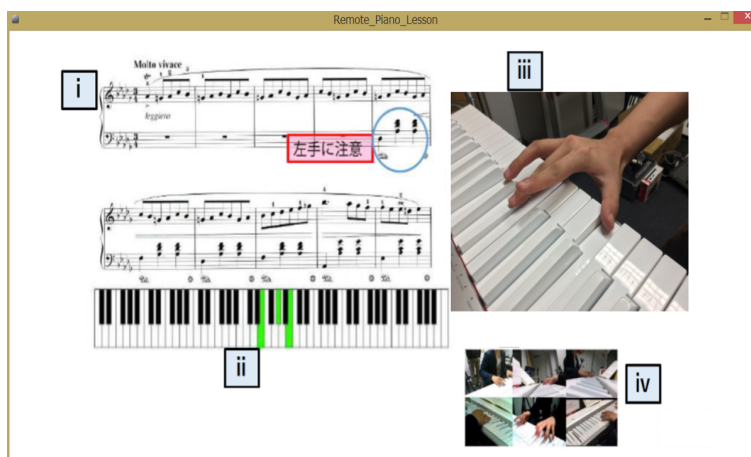


図 2.12: スクリーンナップショット 1

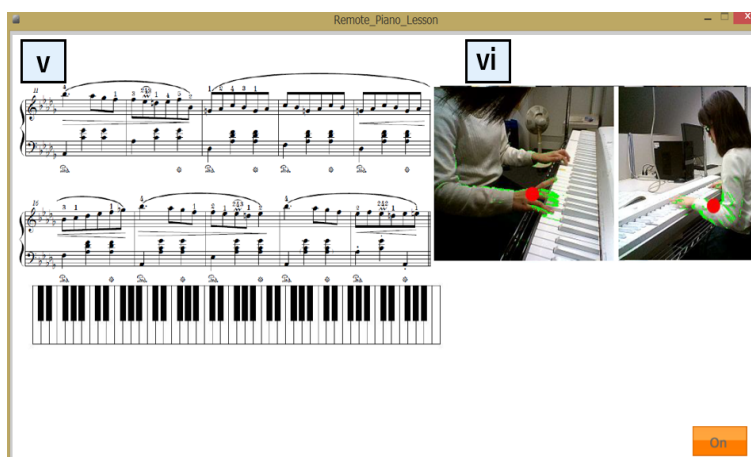


図 2.13: スクリーンナップショット 2

ている。また、各カメラの使用率に、大きく差が出ない場合に判別できるよう、中間層のノード数は6とした。さらに、出力ノード数は使用するカメラの個数とし、出力値が最大のものをFFNNで選定した最適なカメラとする。なお、本機能はピアノ教師が使用することを想定している。ピアノ教師が生徒のミスに合わせてカメラを全て手動で変更することは、非常に煩雑な作業となり、レッスンに集中できないためである。

2.3.7 実装

前述の遠隔ピアノレッスン支援システムのプロトタイプを実装した。PCはDell社のInspironを使用した。また、MIDI鍵盤としてCASIO社のPriviA PX-110を使用し、プロジェクタとしてBenQ社のMP776 STを使用した。なお、プロジェクタの鍵盤投影領域は6オクターブ(72鍵)で、プロジェクタの映像がよく見えるように黒鍵を白く塗装し



図 2.14: 鍵盤共有機能による打鍵位置の投影

た. 複数カメラとして Web カメラは Microsoft 社の Microsoft Lifecam を使用した. PC 上のソフトウェアの開発は, Windows 8 上で Processing と Python, Intel 社の OpenCV ライブラリを用いて行った.

入力パラメータ

現在の演奏, 過去の演奏, 楽曲構造, カメラ位置の 4 種類, 計 13 個の入力パラメータがカメラを予測する際の入力となる. 現在の演奏に関しては DP マッチング (Dynamic Programming) を通して現在の打鍵位置の同定を行い, 予測する小節と合致しているかを判定する. 過去の演奏に関しては, レッスンごとの演奏データを記録し, それを入力パラメータとして用いる. 具体的には, 当該小節での前回演奏時のミスの有無と, 前後の小節でのミス頻発小節の有無がある. ミス頻発小節とは, 過去の演奏データのうち, 小節ごとのミスなく弾けた回数を, 今まで課題曲を弾いた回数の合計で割り, 閾値 0.7 を下回ったものをミス頻発小節と設定する. 楽曲構造に関しては, 当該小節の最高音, 最低音, 小節頭の音の傾き, 休符長, 音数, 最短音長, 最長音長を入力とする. カメラ位置に関しては, 予測する小節の前後の, 前回予測時のカメラ位置を入力する. これは, 小節前後のカメラ位置が, その後の小節のカメラ位置に影響を与えるパラメータとなりえるため, 設定している.

2.3.8 カメラスイッチングのルール

実際にカメラを切り替える処理を行う際に, 以下のルールベースを適用する.

- 1: 繰り返し部分は全く同じスイッチングを使用
- 2: カメラ切り替えタイミングの候補は毎小節の頭
- 3: スwitchング後, 最低 2 小節は切り替えない

1 に関して, 曲中の類似部分ではなく, リピートなどの全く同様の繰り返し部分に関して適応される. 2 に関して, 小節の途中で切り替えるのではなく, 毎小節の頭にカメラを切

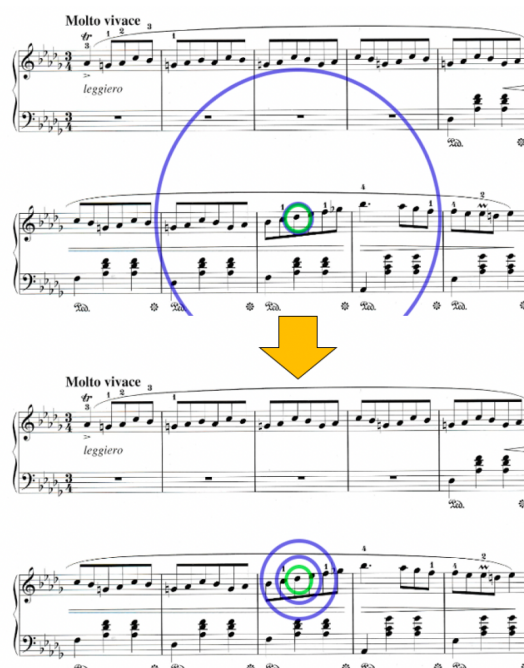


図 2.15: 楽譜指示箇所共有のための指さしポイント

り替えるタイミングが用意される．3 に関して，毎小節ごとにカメラが切り替わると，目が追いつかなくなる可能性があるため，一度切り替えたならその小節を含めて 2 小節間は，カメラの切り替えを行わない．なお，カメラ切り替え後の小節が前小節と同じカメラに切り替わった場合は，前小節の同カメラから小節数をカウントする．

2.3.9 性能評価

FFNN によるカメラ予測の予測精度を検証した．使用楽曲は F. F Chopin の子犬のワルツの中間部を除く全 113 小節である．カメラは合計 7 個使用し，配置場所は鍵盤と演奏者を取り囲むように設置した．過去の演奏データには 8 回分の課題曲演奏データを用意した．各小節ごとに 7 台のカメラから 1 台を割り当て，図 2.19 に示す主観的な基準で課題曲におけるカメラ選択の正解データを作成した．なお，これは基準の概要で，実際には言語化できない基準は存在する．8-fold cross validation でカメラ予測の正解率を算出したところ，68.1 % の正解率が得られた．また，各カメラからのアングルについては図 2.20 に示す．課題曲内には繰り返してなくとも和声的に類似した構造が多く，現在入力としているパラメータのみでは分類が難しいと思われる箇所が存在するため，正解率は低くなったと考えられる．

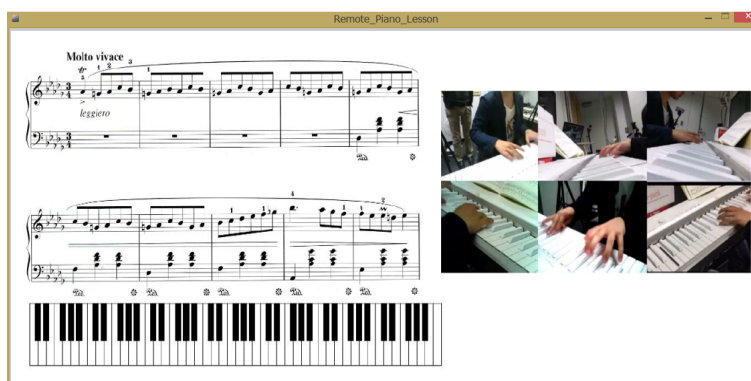


図 2.16: 表示する視点数が多い場合

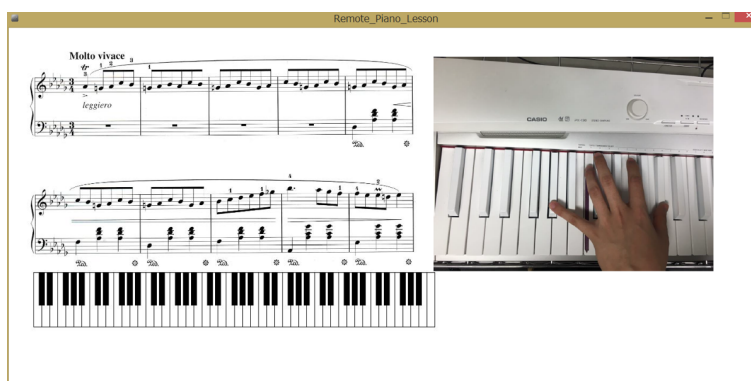


図 2.17: 表示する視点数が少ない場合

2.3.10 手動カメラスイッチング機能

2.3.9 節で示したようにカメラスイッチングの予測精度には向上の余地が残されているものの、カメラの切り替えには教師の指導方法が生徒の悪癖に依存するという個人差があり、予測精度には限界がある。この問題を解決するために、本システムでは自動スイッチング機能を利用していても、図 2.12 のカメラ手動切り替え候補の映像をタップすることで、任意にカメラ映像を手動で切り替え可能にする。手動切り替え機能によって、自動切り替えの予測精度をカバーすることができる。

自動切り替えでは、予測したカメラ位置が本来見るべき最適な視点とは異なる場合がある。その際に、手動切り替え機能を使用することで、最適な視点へとシームレスに切り替えることができる。この手動切り替え機能を例えるならば、テレビ番組でピアニストが演奏している際に、右手が映っているアングルが放映されているが、左手側を見てみたいと思った際に、即時自分で任意のアングルに変更できるといった機能である。

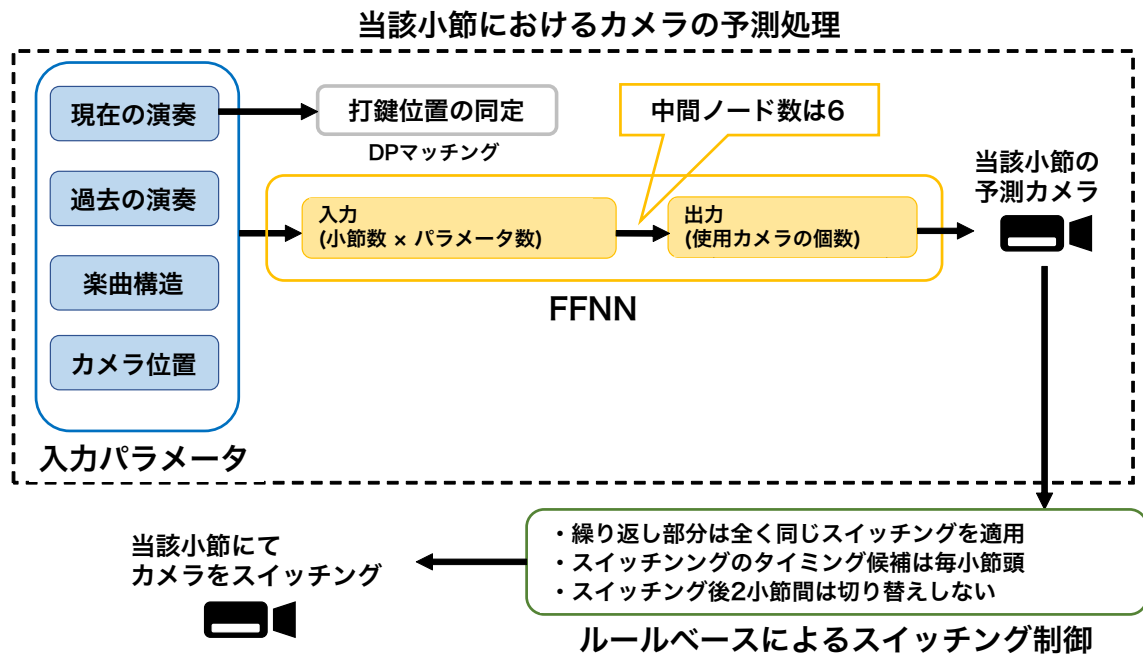


図 2.18: 自動カメラスイッチング機能の概要

2.4 ユーザスタディ

提案する遠隔ピアノレッスンシステムの有用性を検証するため、またシステムが生成した自動スイッチングの妥当性を検証するため、2種類のユーザスタディを実施した。

2.4.1 システム全体のユーザスタディ

提案システムによる遠隔レッスンが、従来の Skype を利用した遠隔レッスンと比較して、どの程度効率的に課題曲を習得できるかについて、実際に遠隔地同士でレッスンを実施し、タスク達成度を比べることで検証した。実験の手順を以下に示す。

提案手法 提案手法では、本章で述べた遠隔ピアノレッスンシステムを使いながら遠隔レッスンを実施する。

比較手法 比較手法では、Skype を用いながら遠隔ピアノレッスンを実施する。カメラは教師側の環境および生徒側の環境に1台ずつそれぞれ設置した。教師、および生徒には、レッスンの状況に応じてカメラの位置やアングルを変えてよい旨を教示した。電子ピアノ、紙の楽譜、マイク、スピーカーがあり、実験中に映像や打鍵音が乱れることはなく、鮮明に送受信できる。

実験環境 本ユーザスタディでは図 2.21 に示すように教師役と生徒役が別室に別れて実施した。また、レッスンはマンツーマンの形式で実施した。

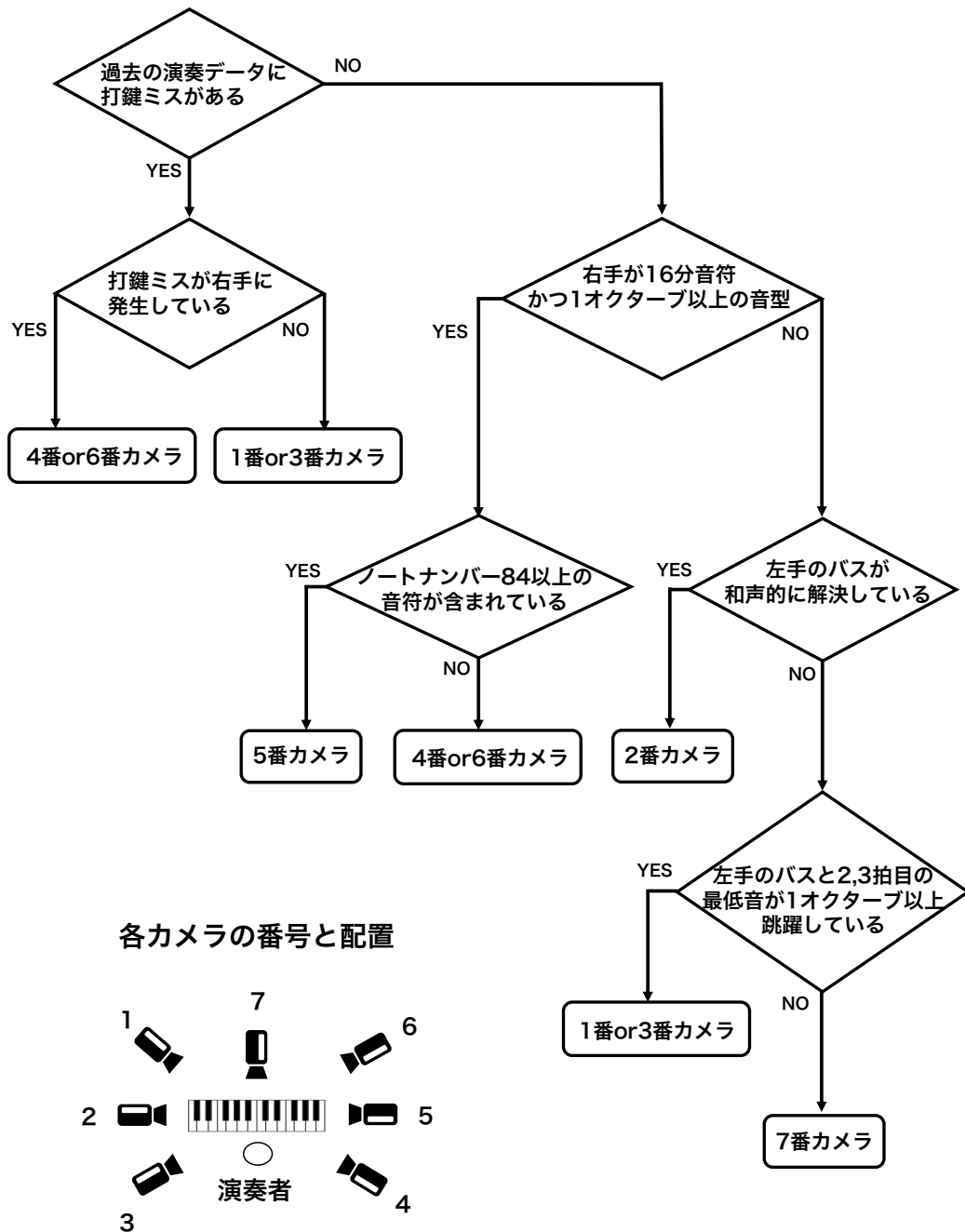


図 2.19: カメラの正解データ作成基準の概要

実験参加者 生徒役に関して、提案手法 (参加者 A, B, C) および比較手法 (参加者 D, E, F) ごとにそれぞれ 3 名ずつ、合計 6 名に参加してもらった。教師役はピアノ経験歴 17 年の上級者 1 名で、提案手法および比較手法ともに、全てのレッスンを担当しても

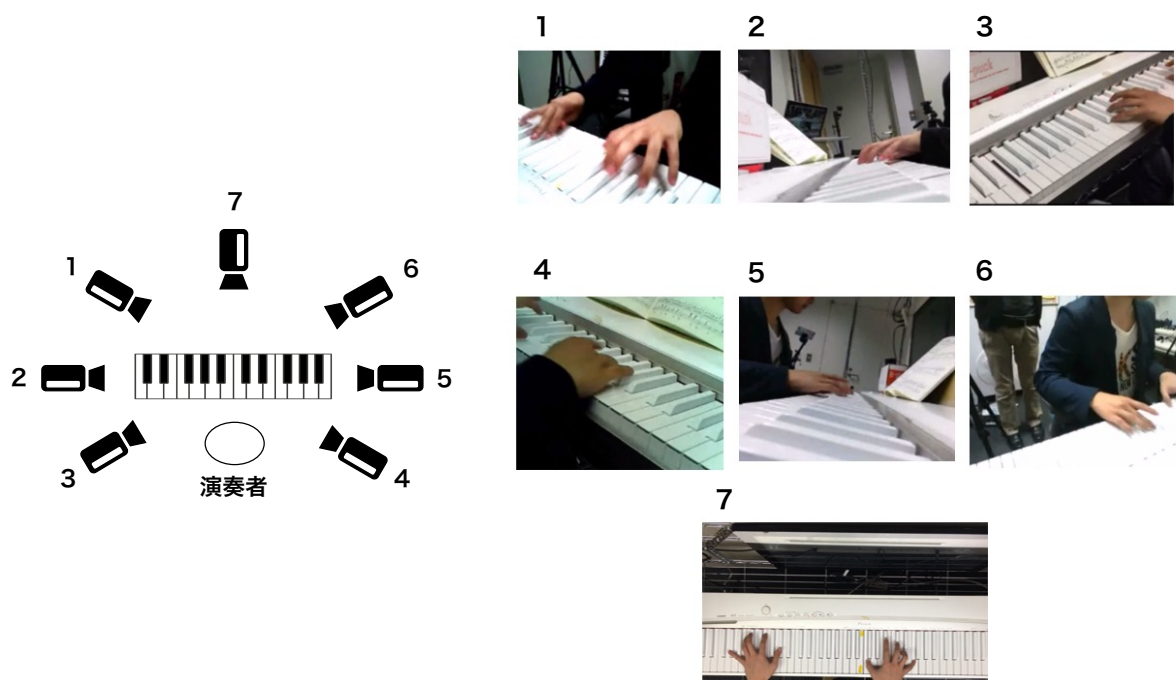


図 2.20: 各カメラからのアングル

らっている．また，教師役参加者が，提案手法および比較手法で指導する順番はランダムとし，指導による慣れが結果に影響しないように配慮した．生徒役参加者は小・中・高等学校の音楽の授業で鍵盤楽器を使って演奏した程度で，ピアノレッスンを個別に受講するなど専門的な教育を受けていない大学生である．いずれの参加者も課題曲はよく聴いたことがあり，よく知っている．なお，教師役参加者には事前に提案手法，および比較手法の機能を満足するまで利用してもらった．また，生徒役参加者にはあらかじめ楽譜上に書かれている音符の意味を確認し，各群に割り当てられた手法の機能を満足するまで利用してもらった．参加者が各種機能の使い方を理解したことを実験者は確認した．

課題曲 F. F. Chopin 作曲の子犬のワルツ 1 小節目から 10 小節目を課題曲として選定した．本課題曲を選定した理由は，一般的に知られている楽曲であること，白鍵だけでなく黒鍵も弾く必要がある，16 分音符の細かなパッセージがある，左手の打鍵に音の跳躍が含まれるためである．本課題曲は初学者が取り組むには難しい楽曲であるが，初学者であっても弾いてみたい楽曲は存在し，本研究ではその楽曲の難度を子犬のワルツレベルの難しさと想定しているためである．

実験方法 提案手法，および比較手法のレッスンは 20 分間である．開始から 20 分が経過した時点で，たとえ演奏中であってもレッスンは終了としている．表 2.1 に示すようにレッスンの進行状況を 9 段階に分類し，現在の段階の条件を誤打鍵なく 3 回弾けた場合，次の段階へレッスンを進めるよう教師役に指示している．第 3 段階ではテ

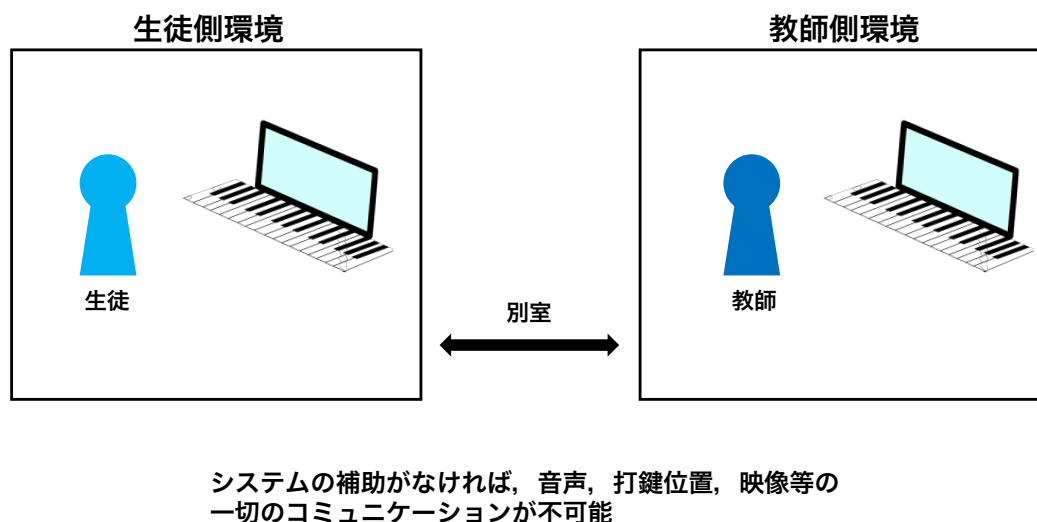


図 2.21: 実験環境

ンポを Andante と指定しているが、これは 1-8 小節目の右手の音型が子犬のワルツの主動機 (曲中でメインとなるフレーズ) であり、ある程度流暢に弾けるようになる必要があるため設定している。レッスン終了後に進行状況を比較して、提案手法と比較手法のレッスンの効率を比較する。また、鍵盤共有機能と楽譜指示箇所共有機能についてのアンケートをレッスン終了後に実施して、5 件法のリッカートスケール (1: そう思わない-5: そう思う) で評価してもらった。なお、教師役へのアンケートは最後のレッスン時にレッスン全体を振り返って回答してもらった。

実験参加者への教示 生徒役参加者には、レッスン中は教師の指示に従うことのみを教示した。一方、教師役参加者には、「生徒の演奏レベルや音楽知識に合わせて、時間内により多くの段階をクリアできるようにレッスンを進める」よう教示した。詳しい指導や演奏方法の教示については教師役の演奏経験に一任した。

結果と考察

提案手法と比較手法それぞれのレッスン結果を表 2.2 に示す。提案手法群の最終的な課題曲習得段階は比較手法群に比べて高かった。提案手法群におけるレッスン終了時の課題曲の習熟度は全参加者とも第 4 段階まで合格していた。全員が第 5 段階で止まっていたが、レッスン時間が長ければ、より先の段階まで進んでいたと予測できる。提案手法の特徴として指示語を用いた会話が非常に多く、指示語の対象物が何かを訪ねる会話が発生することもなかった。提案手法群のレッスン中における会話例を挙げる。

表 2.1: レッソンの進行段階と各段階の合格条件

	範囲	手の限定	テンポ
1 段階	1-4 小節	右手	指定なし
2 段階	5-8 小節	右手	指定なし
3 段階	1-8 小節	右手	Andante
4 段階	5-8 小節	左手	指定なし
5 段階	5-8 小節	両手	指定なし
6 段階	9-10 小節	右手	指定なし
7 段階	9-10 小節	左手	指定なし
8 段階	9-10 小節	両手	指定なし
9 段階	1-10 小節	両手	指定なし

教師「(楽譜指示箇所共有機能を使用しながら)ここからここまで、テンポに気をつけて弾いてみて」

生徒「(鍵盤共有機能を使用しながら)わかりました、最初の音はこの音であってますか」

教師「(鍵盤共有機能を使用しながら)いや、音が違う。こうです、中指はレのフラット」

このように、ほぼ全ての会話において鍵盤共有機能もしくは楽譜指示箇所共有機能を使用しながら指示語を用いていた。一方、比較手法の群では、第1段階および第2段階で進行状況は停滞していた。この原因としては、指示語を用いたコミュニケーションがとれないため、指示箇所を誤解したり、何度も相手の指示箇所がどこかを確認する会話が行われていた場面が多く見られた。実際の会話例を挙げる。

教師「5小節目から始めてください。指番号に注意して」

生徒「えーと、ソラドのところですか」

教師「5小節目です。人差し指でラのフラット」

このように、相手と指示箇所を共有するまでの時間が長く、会話においても相手と確認しあうことが多かった。また、レッスン終了後に実施したアンケートは鍵盤共有機能、楽譜指示箇所共有機能について、「レッスンに役立ったか」「遠隔レッスンをする場合、この機能を使いたいか」を5段階で質問している。アンケート結果を図2.22および図2.23に示す。これらの結果にはマンホイットニーのU検定を適用して検定しているが、明確な有意差は観測できなかった。この点については、今後より多くの実験参加者を募り再度検討する必要がある。一方で提案手法による機能は概ね、両機能とも教師役および生徒役からは肯定的であり、遠隔レッスンを実施する上で有用であるといえる。

鍵盤共有機能について生徒役の実験参加者から「どこを打鍵すればいいか直観的にわかる」「左手で和音をおさえるのに役立った」というコメントが得られ、楽譜指示箇所共有機能については「○小節目○拍目から弾いてください、などといわれるよりわかりやすかった」「指示した音符を伝えやすい」というコメントが得られ、両機能とも肯定的な意見が多かった。

これらの結果から、提案システムを用いて遠隔レッスンを実施した場合、相手と指示箇所を共有するまでの時間が短く、指示箇所を誤解しないため、円滑にコミュニケーションができる。そのため、従来のビデオ通話を使用したレッスンよりも短時間で楽曲を習得で

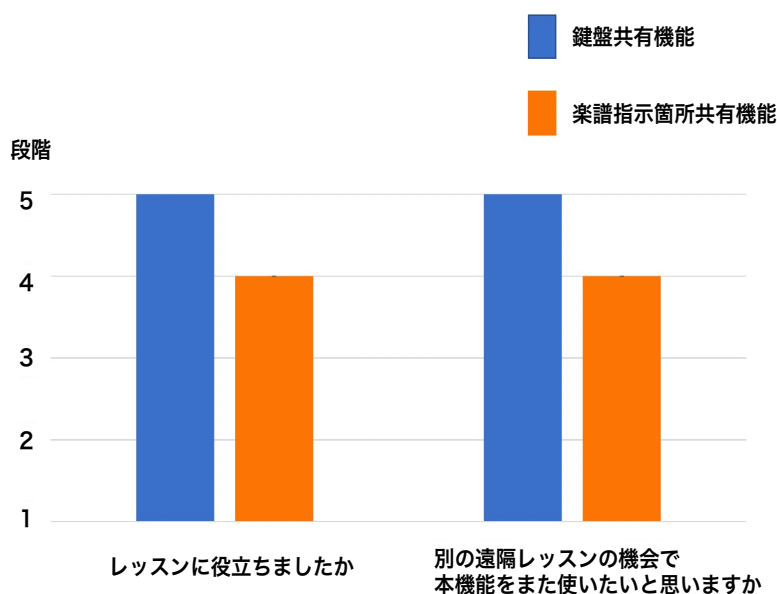


図 2.22: 教師に対する遠隔レッスン補助機能に関するアンケート結果

表 2.2: 実験参加者ごとのレッスン結果

	レッスン進行段階	指示語の出現回数
参加者 A	5 段階	13 回
参加者 B	5 段階	17 回
参加者 C	5 段階	11 回
参加者 D	2 段階	1 回
参加者 E	1 段階	0 回
参加者 F	2 段階	0 回

き、効率的に遠隔レッスンを進められる。

2.4.2 自動カメラスイッチング機能に特化したユーザスタディ

2.4.1 節のシステム全体のユーザスタディでは自動カメラスイッチング機能を利用していましたが、意味のある映像を提供しているカメラは3台で、自動カメラスイッチング機能の有用性は十分に検証できなかった。そこで、本ユーザスタディでは7台のカメラを用いて、提案手法で生成したスイッチング動画がピアノを指導する立場から視聴した際、他映像提示手法と比較して「見やすい」かどうかを検証する。

提案手法 提案手法では、2.3.6 節で述べた自動カメラスイッチング機能が生成した映像を視聴してもらった。実際に入力された演奏とシステムが選択したカメラの遷移の挙動を図 2.24 に示す。

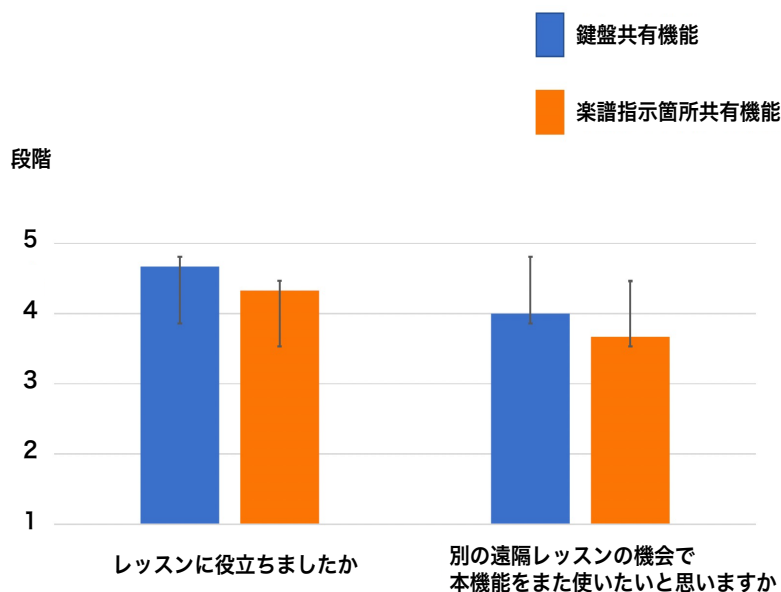


図 2.23: 生徒に対する遠隔レッスン補助機能に関するアンケート結果

比較手法 1 比較手法 1 では、背景差分法により、小節ごとに物体を検知して最も差分の大きいカメラ映像に自動でスイッチングする手法で生成した映像を、視聴してもらった。

比較手法 2 比較手法 2 では、全 7 視点を同時に視聴する多視点映像を視聴してもらった。

実験環境 実験参加者には外部の環境音が聞こえない個室にて、上述の 3 手法の動画を視聴してもらった。映像はディスプレイに表示され、スピーカーから音声が十分な音量で流れる。映像を見ながら好きなタイミングで紙の楽譜を見て演奏と照らし合わせることもできる。

なお、提案手法における各カメラと教師データの分散は以下の通りであり、図 2.20 における各カメラの番号に一致している。

カメラ 1 を選択する教師データの個数=1

カメラ 2 を選択する教師データの個数=2

カメラ 3 を選択する教師データの個数=1

カメラ 4 を選択する教師データの個数=4

カメラ 5 を選択する教師データの個数=3

カメラ 6 を選択する教師データの個数=4

カメラ 7 を選択する教師データの個数=3

実験参加者 実験参加者は計 6 人、各ピアノ経験歴 6-17 年の中上級者で、提案手法および比較手法 1、比較手法 2 によって生成した映像を見て「見やすい」かどうかを判別するピアノ教師役である。自動カメラスイッチング機能はピアノ教師側が使用するこ



図 2.24: 提案システムにおける演奏とシステムの挙動

とを想定している．そのため「見やすい」かどうかは、「演奏を指導する際に必要な各指や手首の情報が映像から確認できるか」という基準で判定してもらおう．このため，表 2.3 に示すように実際のレッスンで生じるような指導のシーンを設定し，判断してもらった．

課題曲 課題曲は，システム全体のユーザースタディと同様，子犬のワルツである．子犬のワルツは 1-36 小節目の音型が楽曲の大半を占めるのと同時に，16 分音符の細かいパッセージや左手の跳躍など，幅広い演奏技法が要求される．そのため，複数のカメラに満遍なくスイッチングする必要があるため，本楽曲を課題曲として選定した．

実験方法 子犬のワルツの演奏上で生じるミスをも 5 つのシーンに分類した．5 つのシーンごとにそれぞれ提案手法(本システムによる自動カメラスイッチング)，比較手法 1(背景差分法により，小節ごとに動体を検知して最も差分の大きいカメラに自動でスイッチングする手法)，比較手法 2(7 視点同時視聴の多視点動画)の 3 種類の動画を計 40 分視聴してもらった．あるシーンにおいて 3 種類の動画を視聴する順番はランダムである．各シーンの動画に対応する演奏ミスと視聴の観点を表 2.3 に示す．動画の視聴後に 5 件法のリッカート尺度(1: 見づらい-5: 見やすい)で評価してもらった．

参加者への教示 1 つのシーンにつき，それぞれの動画を 1 度ずつ視聴したのちは，希望があればもう 1 回ずつだけ動画を視聴できる旨を伝えた．質問事項は「あなたがこの生徒を指導する立場になって，以下の動画の見やすさについて回答してください」である．

結果と考察

提案手法と比較手法1, 比較手法2の回答結果, および Steel-Dwass 法による多重比較の適用結果を図2.25に示す. シーン4, シーン5のように細かな右手の動きを視聴する際には提案手法の評価が高く, シーン3のように俯瞰的に全体の手指の動きを把握する場合には比較手法2の評価が高かった.

シーン4およびシーン5において, 提案手法, および比較手法間に有意差が観測されたことから, 右手の細かな指の動きや手首の上下など, 細かなミスや細かな手指の動きを指摘する場合に提案手法の自動切り替えが有用であると考えられる. 各動画内の演奏は多少の差はあれど, シーン1からシーン5にかけて, ミスを指摘する場合には見なければいけない視点が細くなる. 例えばシーン1では単なる誤打鍵を指摘するものであり, シーン4では右手のトリルの指, シーン5では手首の上下を指摘する観点を設定していた. そのため, 本ユーザスタディの結果を受けて, 提案手法による自動切り替えは, 右手の各指の動きを目で追う場合や, 手首の上下を指摘する場合に有用であるといえる.

一方, シーン3では比較手法2(多視点映像)が, 最も良い結果となった. 比較手法2は提案手法に対して有意差が見られた. シーン3は生徒が演奏の途中で別の箇所から弾き直しており, 指導する観点から動画を視聴する実験参加者には, 楽譜のどこから生徒が弾き直すかを知らせていない. これは実際のレッスンにおいても同様で, 生徒が自らの意志で弾き直す場合, 教師は生徒がどこから弾き直すかがわからない. 弾き直し箇所を視聴者が同定する場合, 全体を広く俯瞰的かつ多角的に見なければいけない. そのため, 弾き直し箇所を同定してミスを指摘する観定のシーン3では, 比較手法2の多視点映像の評価が高かったと考えられる.

そのため, これらの結果を統括すると, 手指の細かな動きを指摘する場合は提案手法が有用, 一方弾き直し箇所を同定する場合には多視点映像が有用であるといえる. 本ユーザスタディでは, 典型的な演奏シーンである「手指の細かな動きを指摘する場合」と「弾き直し箇所を同定する場合」の2つを評価した. しかし, その他に「手指の動き全体を俯瞰的にみる場合」「速い指の動きに注目する場合」などがあり, これらのシーンに提案手法が対応できるか検証する必要がある.

得られたスイッチングデータが見やすいかどうかを一意に判断するのは非常に難しく, 今後の重要な課題の一つである. 今回の自動スイッチングで得られたデータは, 楽譜や教師の見たい視点に対応できる部分も多いが, それを全く別の教師が見た場合に, 見やすいと感じるかどうかはわからない. その理由として, 教師によって見たい視点が変わることや, スwitchingのタイミングや, ユーザスタディでも実施した多視点・自動スイッチングなどの映像提示の手法も好みがわかれるためである.

2.5 まとめ

本研究では物理的に離れた2地点間における遠隔ピアノレッスンを支援するためのシステムを構築した. 同室感をもたらす機能として, 楽譜への書き込みと指摘箇所を共有する楽譜共有機能, 生徒と教師の打鍵位置を鍵盤上に投影する鍵盤共有機能などが存在する. これらの機能によって遠隔地においても指示語を用いて指示出しができたり, 相手の意図を直観的に把握できる.

回答の平均点

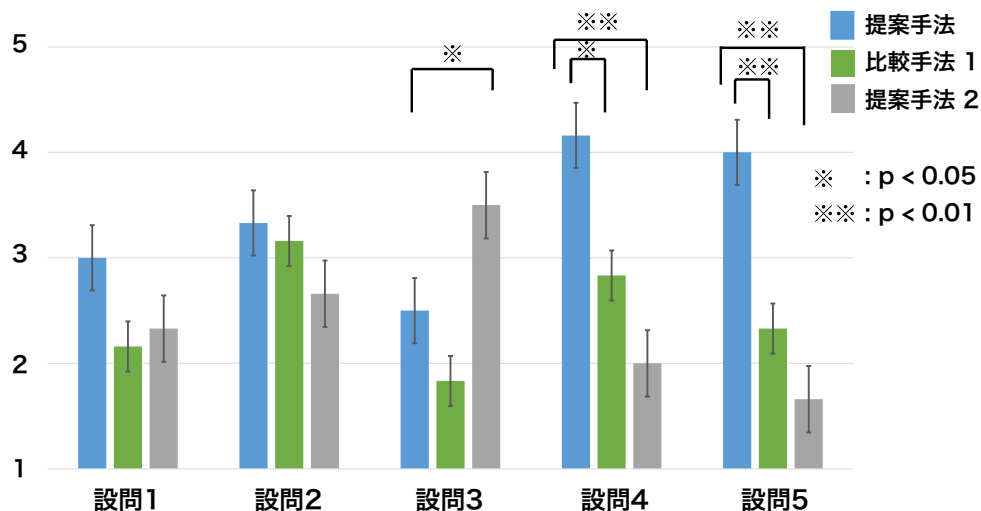


図 2.25: 提案手法-比較手法 1-比較手法 2 の比較結果

さらに、複数カメラと画面に表示する視点数の問題をニューラルネットワークとルールベースを用いた自動カメラスイッチングによって解決した。ユーザスタディの結果、自動スイッチングの映像選択手法は「手指の細かな動きを指摘する場合」や「弾き直し箇所を同定する場合」において有用であるといえる。一方で、全体を俯瞰的に見る必要がある演奏の場合は、多視点映像が最も高い評価であった。教師によっても視点の好みや選び方が異なるため、今後は様々な場面や教師に対応できる映像提示手法を検討する必要がある。

また、本システムを利用した遠隔レッスンでは従来の遠隔レッスンよりも効率よく、円滑にレッスンを実施できていた。ユーザスタディの結果、2.1 節で述べた本研究における同室間の定義を満たしていた。そのため、本システムが遠隔レッスンの場において、同室感をもたらすことができるといえる。

今後の課題として、実験参加者数を増やしてより長期的に遠隔レッスンを実施するユーザスタディがあげられる。また、レッスンで用いる課題曲を増やしたり、指導方法の異なるピアノ教師にも実験参加者としてユーザスタディに参加してもらうことで、システムを改善する。

表 2.3: 各シーンの動画内で発生している演奏ミス, および視聴の観点

	演奏ミス	視聴する観点
シーン 1	6-16 小節までを演奏中左手の最低音を誤打鍵	生徒のミスの原因は左手小指が寝たまま打鍵していることが推察されます
シーン 2	12-20 小節までを演奏中左手のワルツのリズムと右手の打鍵タイミングがずれる	生徒のミスの原因は右手に力が入りすぎて各指がバラバラに動いていることが推察されます
シーン 3	17-21 小節までを演奏中演奏を突然中断し何度も弾き直す	生徒のミスの原因は練習不測による楽曲の暗譜が不完全であることが推察されます
シーン 4	21-28 小節までを演奏中右手のトリル (細かな指の動き) に失敗	生徒のミスの原因はトリルを 2 と 4 の指で行っており手首の位置が低いことが推察されます
シーン 5	29-36 小節までを演奏中右手打鍵音の音量がバラバラ	生徒のミスの原因は右手首が必要以上に上下していることと打鍵時の指の角度がおかしいことが推察されます

第3章 悪癖自動検出システム

3.1 まえがき

ピアノ演奏者は、繊細な打鍵による演奏表情付け、複数声部の処理、複雑な和音の連打など、高度な演奏技術を要求される。これら高度な演奏技術を実現するためには、正しい指使いを修得する必要がある。なお、本稿における指使いとは運指だけでなく、演奏時の手指のフォーム、手首の形を含む。正しい指使いを修得していない演奏者は、ショパンやリストなどの、オクターブの跳躍や両手の高速なユニゾン奏法が求められる難しい楽曲を楽譜通りに演奏することすらままならない。手首に悪癖がある場合の例を図3.1に示す。指の付け根にある第三関節が未発達の場合、演奏者は手首の力で打鍵しようとし、図3.1に示すように手首が下がったまま演奏してしまう。しかし、手首が下がった状態では打鍵の際に指が十分に上がらないため、高速な打鍵に対応できない。このように、指使いは身体や運動など個人の体格や弾き方に依存し、演奏に大きく影響する。間違った指使いであっても、その場しのぎで個人が弾きやすい指使いを使用すると弾きやすさから、その指使いは演奏の随所に現れる。手首の構造や関節の強さによって定着しやすい悪癖があることは御木本 [34] によって報告されている。これらのことから、指使いに関する悪癖は定着しやすく、定着後に修正することは難しい。そのため、ピアノ教師は生徒個人に合わせて、指使いに関する悪癖を発見し、指導する必要がある。

悪癖の発見手法には、聴覚的アプローチと視覚的アプローチの2種類が考えられる。しかし、以下の理由からピアノ教師が生徒の悪癖を発見することは難しい。

- 聴覚的アプローチ
ピアノ教師が生徒の演奏を聴いて悪癖があるかどうかを判断する。しかし、基礎的な練習曲や簡単な曲の場合、生徒の演奏に悪癖があっても上手く弾けている場合もある。そのため、ピアノ教師が単に一聴しただけでは悪癖の発見が困難である。そのため、本研究では聴覚的な悪癖発見支援はスコープ外とする。
- 視覚的アプローチ
ピアノ教師が生徒の演奏している手指を目視で確認することで、悪癖を発見する。指使いに関する悪癖は演奏者の手指や手首に視覚的に現れる。しかし、演奏中の手指は動きが素早く、また中指や薬指は他の指の死角になることも多い。そのため、ピアノ教師が実時間で単方向から見ただけでは、悪癖の発見が難しい。

そこで本研究では、これらのうち視覚的アプローチに関する問題を解決し、効率的に悪癖を発見できるシステムの構築をめざす。提案システムは、生徒の演奏を可視化することで、教師の効率的かつ詳細な分析をめざす。また、深層学習を用いて生徒の演奏から悪癖



手首が下がる悪癖



正しい手首のフォーム

図 3.1: 悪癖の例

が起りやすい箇所を予測する。この予測結果を教師に提示することで、分析に必要な時間を減らして、教師の負担解消をめざす。

3.2 関連研究

3.2.1 演奏の視覚化

演奏の分析のために、演奏情報(音量, テンポ, 手指の動き)を可視化する研究がある。Hiraga[35]は、3D空間上に演奏を立体的に表現するシステムを構築した。ピアノ教師にとっては楽譜の方が馴染みがあり、立体図形は学習コストが負担となる。そこで本研究では、ピアノ教師の学習コストを考慮し、グラフやヒートマップなどの簡単な提示手法に留める。

また、ピアノレッスンの場において生徒の演奏をMIDIデータとして記録し、楽譜上に強弱やテンポ、アーティキュレーションなどを表示する研究がある[36]。このような手法は教師が生徒の演奏を客観的なデータとして定量的に確認できる。これらの手法は本研究においても要素技術として直接的に利用できる。

しかし、これらの研究では根本的に悪癖を発見することは考慮していない。悪癖発見の補助的ツールとして、演奏情報を可視化して提示することは効果的といえる。しかし、悪癖の判断自体はピアノ教師が実際の生徒の演奏を多角度から目で見えて判断する。そのため、悪癖箇所発見のための演奏情報の可視化と提示、教師がさまざまな角度から生徒の演奏を視覚的に確認できるツールを組み合わせることが重要といえる。

3.2.2 複数映像提示手法

筆者らが開発した遠隔ピアノレッスン支援システムである Tel-Gerich[37] では遠隔環境にいる生徒の映像を複数視点から撮影し、ピアノ教師に提示している。Tel-Gerich では様々な演奏ミスを想定し、7台のカメラから撮影しているが、多数の視点を同時に視聴することによる混乱を防ぐため、システムが自動で選択した最適な視点を1つのみ表示している。本研究では、複数視点の中から教師自身が視聴する視点と視点数を自由に選べることとする。本システムは実時間のレッスンではなく、レッスン後に教師が使用することを想定している。そのため、時間をかけてじっくりと好きな視点を吟味し、自由に選択できることが重要といえる。

3.2.3 深層学習を用いた予測による業務効率化

近年、深層学習を用いた予測によって業務の効率化を図る研究が行われている。仲川ら[38]は病院内において患者の行動を予測することで、医療スタッフの業務効率化を実現させた。このような深層学習を用いた予測手法は、ピアノ指導の現場においても応用できると考えられる。提案システムでは撮影した生徒の演奏をもとに、悪癖出現箇所を予測して、楽譜上にアノテーションを行う。事前に悪癖の出現箇所を予測して楽譜上に表示することで、教師が分析の際に見るべき箇所が減り、生徒一人あたりに必要な分析の時間を短縮できる。教師の分析の負担が減ることで、教師はより多数の生徒を指導したり、生徒一人あたりに詳細な指導をすることができる。そのため、生徒の演奏の映像を入力とした悪癖箇所のアノテーションは、教師向け支援システムを設計するうえで重要であるといえる。

3.3 ピアノ学習者の指使い観察実験

3.3.1 実験の目的

ピアノ教師向け指使い悪癖発見支援システムに必要な機能を検討するために、ピアノ教師を対象とした観察実験を実施する。

3.3.2 データセットの構築

ピアノ教師が分析するためのデータセット構築のために、演奏協力者に課題曲を演奏してもらい、演奏データを取得する。

演奏データの収集

演奏協力者が課題曲を演奏している様子を3視点から撮影し、打鍵時間間隔と打鍵強度、演奏動画を取得した。それぞれの詳細は以下のとおりである。

- 打鍵時間間隔
演奏中に取得したMIDIデータから抽出した、打鍵時間間隔 (IOI, inter-onset interval)

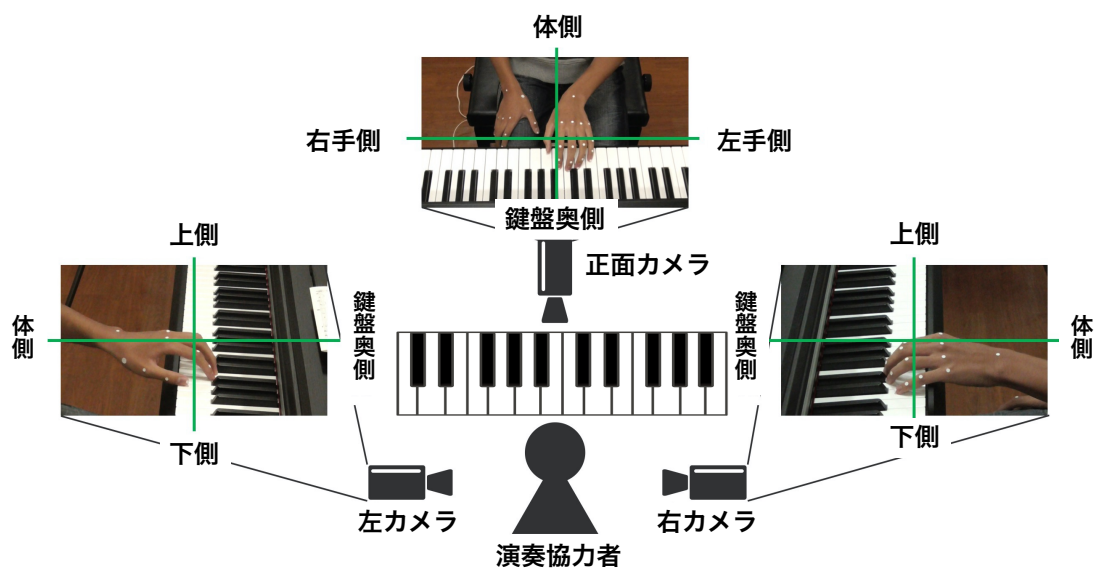


図 3.2: 実験環境

である。

- 打鍵強度
演奏中に取得した MIDI データから抽出した、打鍵時の速度 (velocity) である。
- 演奏動画
図 3.2 に示すとおりビデオカメラ 3 台を演奏協力者の左側・右側・正面にそれぞれ設置して撮影した。

演奏協力者

演奏協力者は 7 歳から 13 歳の小中学生 6 名であった。いずれの演奏協力者も、ピアノコンクール入賞を実績にもつピアノ学習者である。この年頃のピアノ学習者は演奏技術が発展途上であり、かつ手指の筋肉や骨格が成長段階であるため、演奏時に悪癖が現れやすい。そのため、本実験の演奏協力者として妥当である。

課題曲

C. Czerny 作曲の 30 番練習曲第 1 番における、第 1 小節から第 8 小節の上声部旋律を課題曲とした。本課題曲は 5 指をほぼ均等に使用し、指の独立性を向上させる練習曲として広く使われている。また、体格や手の大きさが影響するような演奏技術が必要なく、演奏協力者の年齢差による演奏の差が出にくい。さらに、演奏協力者全員が過去に本課題曲の

演奏経験があり、新たに練習をする必要がない。以上の理由から、本課題曲を選定した。

データ収集の流れ

演奏データ収集の一連の流れを以下に記述する。

1. 演奏協力者に以下のことを教示した。
 - 1分間に60拍から72拍のテンポで弾くこと
 - 打鍵強度は一定に保つこと
 - 片手で演奏中は、もう一方の手を膝の上に置くこと
 - 楽譜を見ながら演奏しても良いこと
2. 演奏協力者に右手で課題曲を3回最初から最後まで繰り返し弾いてもらった。なお、打鍵ミスがあれば最初から弾き直してもらった。
3. (2)と同様に演奏協力者に左手で弾いてもらった。

3.3.3 ピアノ教師による指使い分析

演奏協力者の演奏データを提案システムによる分析ツールで可視化した。提案システムの概要を図3.3に示す。提案システムは記録した生徒の演奏データを、後ほど教師が効率的に分析できるように可視化できる。可視化した結果をピアノ教師に見てもらい、指使いの悪癖を分析してもらった。

ピアノ教師が使用したツール

取得した演奏データを分析するために、以下の2つのツールを用いた。

- 演奏情報可視化ツール

図3.3の、打鍵情報ヒートマップと打鍵間隔グラフに示すように、打鍵強度や打鍵時間間隔をヒートマップ、またはグラフの表現形式で楽譜上に重畳してディスプレイに表示できる。ヒートマップの場合は、打鍵時間間隔と打鍵強度を同時に可視化できる。グラフの場合は、打鍵時間間隔と打鍵強度それぞれを別々のウィンドウで表示する。なお、両グラフとも複数の演奏を重複して表示できる。

- 動画プレイヤー

撮影した演奏動画を視聴するための動画プレイヤーとして、動画編集ソフトウェアTMPGEncVideoMasteringWorks 6を用いた。本ソフトウェアは、通常再生のほか、再生中に動画の拡大・縮小ができる。なお、同時に視聴できる動画は1視点のみである。

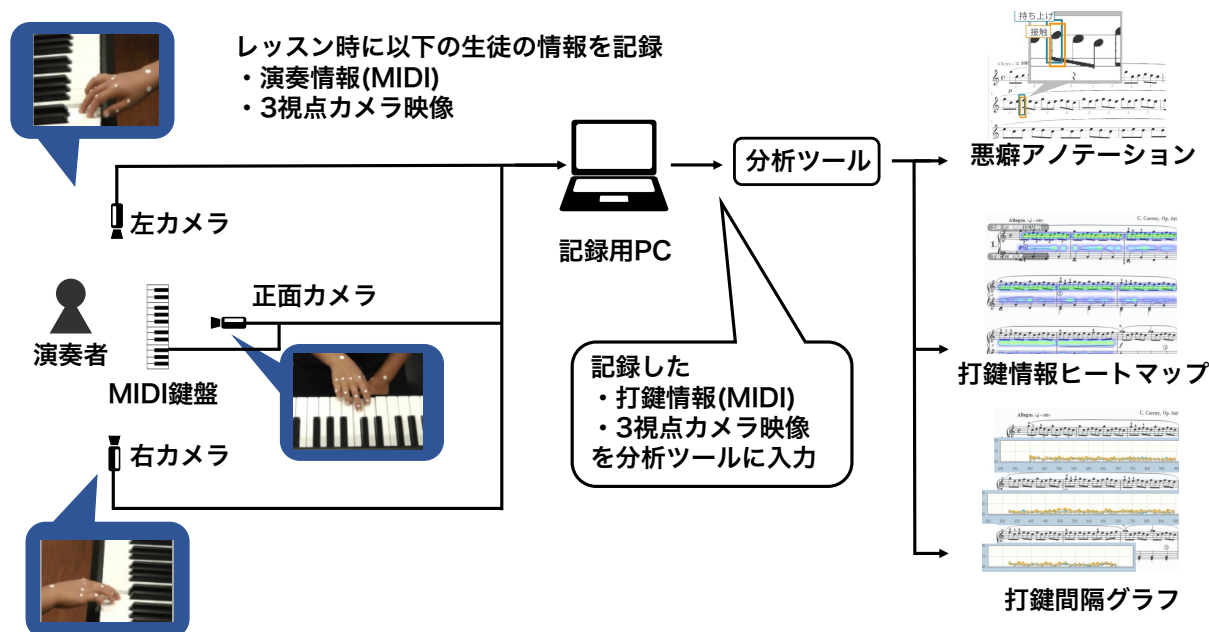


図 3.3: 提案システムの概要

被験者

400人以上の指導経験をもつ、教育学部音楽教育専攻ピアノ科の教授1名を被験者とした。被験者には、演奏情報可視化ツールおよび動画プレイヤーを使用して各演奏協力者の悪癖を発見してほしいと指示した。また、分析にかかる時間は特に制限を設けず、満足するまで分析してもらった。被験者には課題曲の楽譜をプリントアウトした用紙を渡し、演奏協力者ごとに悪癖を自由に記述してもらった。実験終了後、被験者に各分析ツールの使用方法や分析方法、動画の注目箇所についてヒアリングした。

3.3.4 結果

被験者による演奏協力者6名両手分の分析後に、被験者から演奏協力者それぞれについて発見した悪癖に関して回答を得た。ヒアリングの自由回答では被験者から、「演奏協力者1名両手分の分析には約3時間ほど所要し、分析にはまとまった時間と集中力が必要」という回答を得た。長時間におよぶ実験であったが、被験者は最終的に11種類の悪癖を発見できた [39]。

また、分析方法に関するヒアリングでは、以下の手順で分析していたとの回答が得られた。

1. 演奏情報可視化ツールのグラフから打鍵時間間隔および打鍵強度が一定でない箇所に着目する。

2. グラフで着目した箇所に対し正面カメラで撮影した動画を閲覧しながら目視で確認する。
3. 左カメラおよび右カメラの映像も閲覧し、何度も同じ演奏箇所を再生し、目視で確認する。
4. 悪癖を発見した場合、同様のフレーズや類似の指使いをもつ他の箇所において、悪癖がないか (1) –(3) の手順で確認する。

3.3.5 考察

被験者は「打鍵位置が前後に移動して不安定」のように、手が鍵盤の奥側・演奏者の体側の2方向、および上下2方向へ動く弾き方に注目していた。また、指同士の接触や指の左右の移動についても注目していた。被験者は、図3.2のように複数の視点から撮影した演奏を閲覧して確認していた。特に親指や小指は他の指に隠れることが多々あり、正面から撮影した映像だけでは判断しづらいため、左側および右側から撮影した映像で確認していた。このことから、3視点の映像を提供したことや、3視点のカメラアングルは妥当であったといえる。また、被験者からその他のアングルから撮影した映像を見たいという要望はなかった。しかし、分析ツールの使用方法に関するヒアリングにおいて、「3つの視点を同時に閲覧することはできず、その都度、映像を切り替えないといけないため、この点において煩雑さと不便さを感じる」と回答していた。

被験者は最初から最後まで何度も繰り返し映像を見るのではなく、悪癖と判定した類似箇所を中心に探索的に悪癖を発見していた。これに関して理由を尋ねたところ「演奏者によっては全ての音符に同一の悪癖が観測され、個別に悪癖を観測することは煩雑であった」と回答していた。また、悪癖の判定において、時には動画を見ながら1つ前の打鍵を何度も見返していた。これらをシークバーを使って操作していたが、「シークバーによる動画の再生箇所の操作は難しく、特定の演奏箇所を指定することは難しかった」と被験者は回答していた。さらに、分析方法に関するヒアリングにおいて「打鍵を確認するために再生速度を遅くしたり、悪癖を確認した箇所は早送り飛ばした」という回答や、「スローモーション映像を見ながら詳細に分析したい」という被験者の回答があり、打鍵の直前から離鍵するまでにかけて、多様な再生速度調整が求められる。

加えて、被験者は打鍵時間間隔や打鍵強度のグラフも演奏箇所を特定するために使用しており、悪癖発見において有効な情報といえる。

3.4 設計

3.3節で説明した指使い観察実験をもとに、以下の機能を提案する。

3.4.1 提案システムの基本機能

複数視点同期再生機能

提案システムのスクリーンナップショットを図 3.4 に示す。提案システムは演奏者の左右正面、計 3 視点から撮影した演奏動画を同期、再生できる。また、本機能はモードレスウィンドウに対応しており、複数の演奏動画を同時に見比べることもできる。

音符単位再生機能

楽譜上のある単一の音符の打鍵の瞬間を再生できる。ここでは打鍵の瞬間とは、当該音符の接鍵 (打鍵する鍵盤への接近動作) から離鍵 (鍵盤から指を離す動作) のことを指す。

演奏データ可視化機能

演奏時の打鍵時間間隔と打鍵強度を可視化し、折れ線グラフ、およびヒートマップとして表示できる。グラフとヒートマップは、3.3 節の指使い観察実験の際に使用した演奏情報可視化ツールと同じものである。

再生速度調整機能

演奏動画の再生速度を調整できる。

コマ送り再生機能

演奏動画を 1 コマずつ再生できる。また、コマ送りとコマ戻しの両方に対応している。再生方向にかかわらず、1/60 秒ごとのコマ送りとなる。

3.4.2 悪癖箇所の推測

演奏中の楽曲には類似した箇所が多く、同様の悪癖が複数箇所に発生することがある。しかし、同様の悪癖が複数箇所にある場合、教師が全ての悪癖を見つけることは時間がかかる。3.3.5 節で述べたように出現頻度高い悪癖の確認に対して、教師は煩雑さを感じていた。このため、提案システムでは悪癖のある箇所を自動で予測し、譜面上の該当箇所にアンテーションを付与する機能を提供することで、教師による悪癖発見の補助をめざす。

悪癖推測モデル

複数の悪癖が同時に出現することも考えられるため、VGGNet[40] を用いたマルチラベル認識手法を用いた。対象とした悪癖は、悪癖の中でも頻出していた、接触、巻き込み、傾斜打鍵、持ち上げの 4 クラスとした。入力は縦横サイズ 128pixel の画像と画像内に出現する悪癖のラベルである。入力画像として、3.3.2 節で述べたデータセット構築の演奏動画

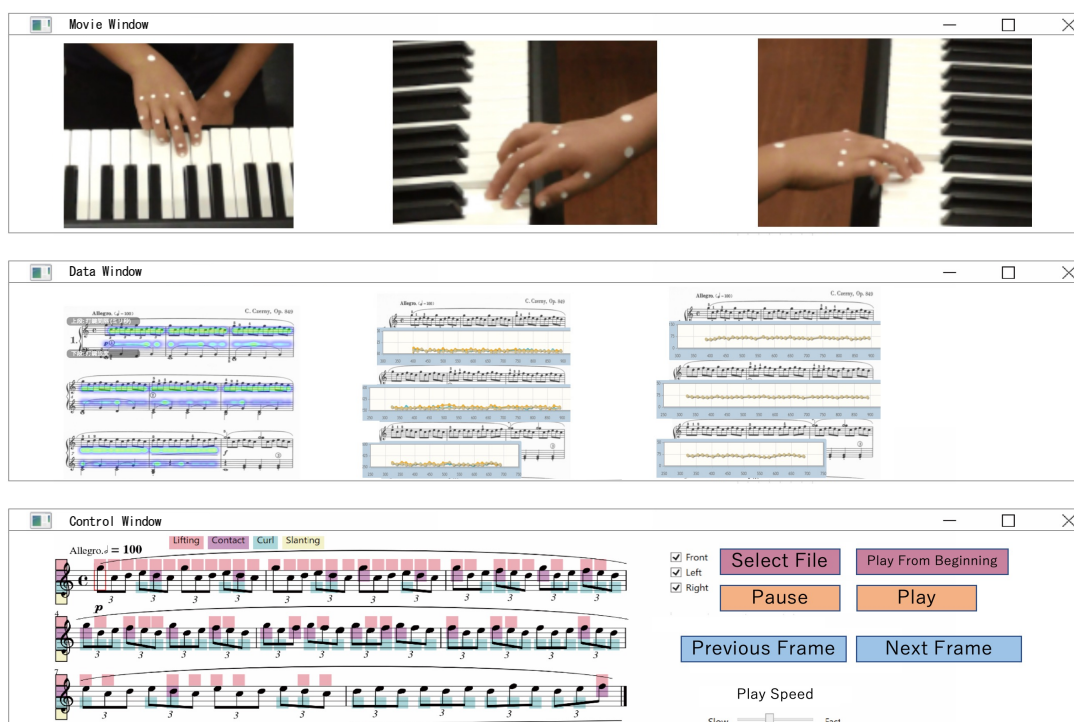


図 3.4: 提案システムのスクリーンショット

から、打鍵した瞬間のフレームを PNG 形式に出力した画像を生成した。また、出力は 4 クラスにそれぞれ所属する確率である。畳み込み層を 5 層、バッチ正規化層を 6 層、最大値プーリング層を 3 層、全結合層を 2 層にスケールダウンした VGGNet を、4 クラスに所属する計 1362 枚の画像で訓練し、621 枚を用いてテストした。所属クラスの内訳は表 3.1 に表す。テストデータによる正答率は 80.44%であった。

悪癖アノテーション機能

提案システムのアプリケーションで表示された譜面上の音符ごとに、図 3.5 に示すように推測された悪癖の種類のアノテーションを付与する。表示した楽譜の音符ごとに、悪癖の有無とその種類を表示できる。

3.5 ユーザスタディ

提案システムが、従来の動画再生ツールと比較して悪癖発見に有効であるかを評価するため、提案システムのユーザスタディを実施した。

表 3.1: 各悪癖のデータ内の出現回数

悪癖名称	訓練データ	テストデータ
接触	711 回	297 回
巻き込み	420 回	165 回
傾斜打鍵	684 回	288 回
持ち上げ	954 回	477 回

コントローラウィンドウ

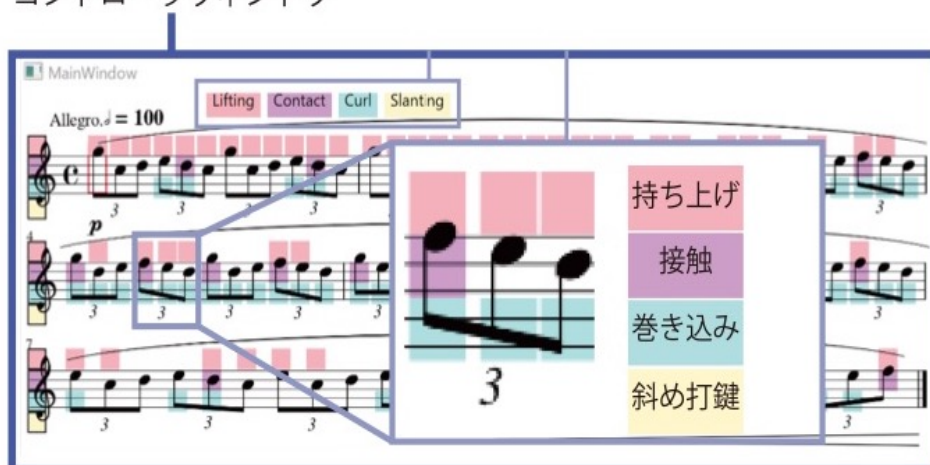


図 3.5: 悪癖アノテーション機能

3.5.1 被験者

比較手法および提案手法ごとにそれぞれ2名ずつ合計4名の被験者に参加してもらった。また、一度実験に参加した被験者は他の比較対象の実験には参加せず、実験は全て異なる被験者により実施された。被験者は、ピアノレッスンを個別に受講するなど専門的な教育を受けた20代の大学生計4名である。

3.5.2 使用可能な機能

表 3.2 に示すように、各群ごとに使用できる機能を制限している。

- 提案手法群

3.4 節で述べた提案システムの全機能を自由に使用できる。

- 比較手法群

提案システムの機能のうち、再生速度調整機能とコマ送り再生機能のみ使用できる。その他の提案システムの機能は使用できない。

表 3.2: 使用可能な機能

機能名	提案手法群	比較手法群
複数視点同期再生機能	○	-
音符単位再生機能	○	-
再生速度調整機能	○	○
コマ送り機能	○	○
演奏データ可視化機能	○	-
悪癖アノテーション機能	○	-

3.5.3 課題曲

3.3 節と同様の課題曲を利用した。被検者に悪癖を確認してもらう映像は 3.3 節の実験で記録した演奏協力者 1 名の演奏を利用した。

3.5.4 ユーザスタディの流れ

実験者は提案手法群、比較手法群それぞれで利用できる機能の使い方を被験者に説明し、被験者が各種機能の使い方を理解したことを実験者は確認した。課題曲の楽譜が掲載された悪癖記述用紙を用意し、被験者に発見した悪癖の種類および悪癖に該当する指を記述してもらった。なお、悪癖は図 3.6 に示す 4 種類であり、4 種類の悪癖がどのようなものであるか動画を見せながら説明した。いずれの被験者もピアノ経験者であるため、4 種類が悪癖であることは容易に理解できた。制限時間は楽曲の長さとお癖の種類を考慮して最長 1 時間とし、悪癖を全て発見したと自己申告があった場合はその時点でユーザスタディを終了する旨を説明した。

3.5.5 結果

正解データは、3.3 節に記述した観察実験においてピアノ教師が悪癖と判断したデータを利用した。被験者の悪癖記述用紙の結果と正解データを照らし合わせて、正解率・再現率・適合率・F 値を算出した。これら評価指標値の算出方法は以下の通りである。

1. 各被験者が予測した楽譜内の悪癖箇所と種類をペアとしてカウントする。
2. (1) でカウントした結果と正解データを比較する。
3. 表 3.3 のように被験者の予測結果と正解データからスレットスコアを算出する。
4. 算出したスレットスコアから、正解率・再現率・適合率・F 値を求める。それぞれの項目は以下の式で算出した。

$$\text{正解率 (accuracy)} = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN}$$

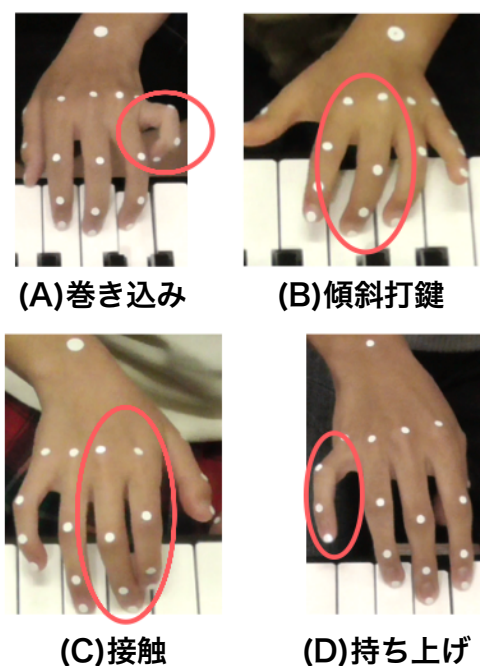


図 3.6: 動画内に出現する 4 種類の悪癖

表 3.3: 被験者の予測結果と正解データの分割表

		正解データ	
		正	負
被験者の 予測結果	正	TP(True Positive)	FP(False Positive)
	負	FN(False Negative)	TN(True Negative)

$$\text{再現率 (recall)} = \frac{TP}{TP+FN}$$

$$\text{適合率 (precision)} = \frac{TP}{TP+FP}$$

$$F \text{ 値} = \frac{2 * \text{precision} * \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}}$$

表 3.4 に各評価指標の平均値を示す。

3.5.6 考察

提案手法群では、正解率と再現率の平均値が比較手法群の 2 倍以上の数値となった。このことから、提案システムの機能が悪癖発見に有効であると推察できる。両群の操作ログを分析したところ、比較手法群ではほぼ全てのログが事細かに再生と停止を繰り返してい

表 3.4: 群ごとの各評価指標の平均値

	提案手法群	比較手法群
正解率	0.64	0.30
再現率	0.64	0.30
適合率	0.71	0.70
F 値	0.67	0.42

るものだった。一方で、提案手法群では音符単位再生機能とコマ送り再生機能の使用がログ全体の7割近くを占めていた。また、ユーザスタディ後に実施したヒアリングでは、提案手法群の両者ともが「悪癖アノテーション機能の結果をもとに、悪癖箇所の目安を立てていた」と回答した。以上のことから、ユーザは悪癖アノテーション機能により悪癖出現箇所を推測してから、音符単位再生機能やコマ送り再生機能を使用して動画を閲覧して悪癖を発見していた。音符単位再生機能やコマ送り再生機能は悪癖発見には有効であるが、動画全てを閲覧するには時間がかかる。しかし、悪癖アノテーション機能を使用することで、あらかじめ悪癖出現箇所の目安を立てられるため、悪癖発見にかかる時間を短縮できる。そのため、これら両機能を組み合わせて使用することにより、従来手法よりも効率的に悪癖を発見できていたと推察できる。

3.6 まとめ

本章では、ピアノ教師向け悪癖発見支援システムの構築と評価について記述した。複数の演奏協力者の演奏をもとに、現役ピアノ教師の分析とその手法を観察した。観察結果をもとに提案システムの機能を設計した。提案システムは、複数視点同期再生機能や音符単位再生機能、演奏データ可視化機能など、視覚的アプローチによりピアノ教師の悪癖発見を補助する。さらに、悪癖の種類と出現箇所を自動で楽譜上にアノテーションする機能をもつ。実際に提案システムを用いて悪癖を発見するユーザスタディの結果、提案システムを使用した提案手法群において悪癖発見の効率化が示唆された。

今後は、同一の課題曲において被験者の人数を増やすと同時に各機能ごとに悪癖発見への影響を評価する必要がある。また、ユーザスタディでは4種類の悪癖を発見してもらうタスクを実施したが、その他に分類される悪癖を発見するための作業も実施する必要がある。また、各機能の悪癖発見への影響を調査し、よりシステムの機能を悪癖発見に有効となるよう改善する必要がある。

第4章 課題曲合格日予測システム

4.1 まえがき

1章で述べたように、ピアノの演奏技術を効率的に向上させるためには教師からレッスンを受けることが大切である。学習者は通常、月に数回のレッスンを受け、自身の演奏の誤りや技術について指導を受ける。レッスン後は自宅で練習し、次のレッスン日までに与えられた課題や修正点を中心に練習する。レッスンそのものも重要であるが、ピアノの学習時間の大半は自宅での練習に費やされる。学習者は演奏技術や知識が未熟であり、前回のレッスン時に指摘された箇所を修正するために、毎日どの程度練習すれば良いのかの目算がつかない。さらに、仕事や勉強の合間に練習する場合は可能な練習時間が限られるため、1日あたりどの曲をどれだけ練習するかという計画を立てる必要がある。

課題曲の合格時期が予測できることで、学習者は効率的に学習を進めることができ、学習の見通しが立てられるようになる。一方、ピアノの学習において課題曲の合格時期を予測することは難しい。その理由として、以下の点が挙げられる。

- 師事する教師によって重要視する演奏の要素が異なる
レッスンにおいて、課題曲を合格するためには楽譜通りなるべく音を間違えずに、正しいリズムで演奏することが求められる。一方で、教師によってはリズムを溜めて演奏することを求めたり、音の間違いはそれほど気にせずテンポを守って演奏することを求める例も存在する。そのため、課題曲合格までの残り日数を予測する際の基準は、師事する教師、すなわち目標とする教師の演奏とする必要がある。
- 打鍵の誤りだけでは演奏の熟達を評価できない
一般に打鍵の誤りは少ない方がより良い演奏とされる。しかし、打鍵の誤りは課題曲を弾き慣れることで自然と少なくなるため、レッスンでは逐一指摘せずに、リズムなどの他の演奏表現(演奏表現とは、テンポの強弱や拍の取り方、音量の調整などアゴーギクやデュナーミクの総称である)の要素だけで合格を判断するという場合も存在する。したがって、課題曲の合格時期を予測するためには、演奏した音符が正しいかどうかという情報のみでは難しい。

そこで本研究では、ピアノ学習者がレッスンの合間の独習において、師事している教師の合格基準に合わせて、学習者が教師から与えられた課題曲の合格をもらうまでの日数を予測するシステムを構築する。提案システムは学習者の演奏と教師の演奏の類似度を、音高や打鍵時間間隔などの演奏の構成要素に基づいて算出する。算出した類似度を説明変数として重回帰分析を行い、合格までの予測日数を出力する。本モデルは音高正解率、旋律部音高正解率、打鍵時間間隔 (IOI) 類似度、和音欠損率、和音 IOI の5つのデータに基づいて、学習者の課題曲の合格までに必要な日数を予測する。

学習者に対して、学習者自身の課題曲の進捗状況や合格時期をフィードバックすることで、学習者は計画的に練習に取り組み、さらなる学習に励むこともできる。そのため、本システムは単なる自宅学習においても利用できると考えられる。

4.1.1 想定する利用シナリオ

本システムでは、主な想定利用者を保育士、または幼稚園教諭の資格課程におけるピアノ実技受験者としている。資格試験などのためにのみピアノを学習する学習者にはピアノ初学者も多く、自身に最適な練習時間の見通しが立てられず、効率的に学習を進めることが難しい。そのため、本システムにより課題曲の合格予測時期を提示することは、ピアノ学習を効率化させ、学習者が短期的な目標を立てやすくなる。学習者は本システムの提案技術を用いて、必要な量の学習のみを行い、合格予測時期を参照することで合格までの道のりを逆算して練習の計画が立てられる。このような学習体験を繰り返すことで、自身の合格までに必要な練習量を、体感で予測できる能力も身に付く。また、学習者は課題曲を、試験日までどの程度の時間練習すれば良いかがわかることで、ピアノ実技以外の科目に関する学習時間を効率よく配分できる。したがって本研究における実験では、課題曲の難易度を初学者向けに調整している。そのため、本研究ではシステムの主な使用対象者をピアノ初学者としている。

4.2 関連研究

4.2.1 ピアノ学習支援システム

これまでもピアノ学習支援に関する研究は数多く行われてきた [1][21][22]。これらのシステムは初学者の独習支援を対象としている。また、学習者の苦手な演奏箇所を特定し、集中的に訓練するためのピアノ学習支援システムや [20]、演奏を自動的に評価してアドバイスや間違いを譜面上に提示するシステムもある [15][16][17][18]。このようなピアノ学習支援システムは、取得した打鍵情報から音高の正誤や打鍵の強さを判別している。これらの研究では、取得したデータから学習者の苦手箇所の予測などが行われているが、学習者の課題曲習熟度合いや合格時期を予測しているものはない。本研究においては学習者の打鍵情報を取得・記録し、合格時期の予測に用いる。

4.2.2 Learning Analytics

近年、IT を利用した教育の充実化に伴い Learning Analytics の分野における研究が活発化している。Learning Analytics について、Ferguson は「学習とそれが生じる環境を理解し、最適化することを目的として、学習者とその状況についてのデータを測定・収集・分析・報告すること」と定義している [41]。さらに、Learning Analytics の専門論文誌である Journal of Learning Analytics では、Learning Analytics のカテゴリとし “Understanding Learning” (効果的な学習環境の要因分析など)[42][43]、 “Improving Learning” (カリキュラムや教材の改善を目的とした研究など)[44][45]、 “Meta-Issues” (プ

ライブシヤ倫理関係の研究など)[46][47], “Tracing Learning”(マルチモーダルな学習プロセスの分析, データの可視化など)[48][49][50]の4トピックに分類されている[51]. Learning Analyticsは, 教育分野における課題の解決手段の一つとして利用される. 大学教育においても, 日々の学習成績をもとに最終的な不合格者を予め予測し, 教育的なサポートを実施することが試みられている.

身近な例としては, e-ポートフォリオや学習管理システム(LMS: Learning Management System)が挙げられる. これらのシステムにより蓄積されたデータに対してデータマイニングし, 分析することで学習者の達成度や進捗状況を予測する研究が存在する. Gökhanらは講義中の学生の学習パターンの調査を目的として, 電子書籍プラットフォームの学生のクリックストリームデータを分析した[52]. その結果, 似たような学習パターンをもつ学生を3つのグループに分類し, 自己申告データのみでは困難な学生の学習パターン分類の把握に成功した. Iqbalらは強調フィルタリングや制限付きボルツマンマシンの手法を応用して, 機械学習に基づいた学生の成績予測手法を検討した[53]. また, Kostopoulosらは遠隔教育コースの学生の成績予測システムを構築し, 彼らの提案した半教師あり学習の手法は, 高い精度で学生の最終的な成績を予測した[54]. このように, 学校教育において生徒の成績を予測することは広く実施されており, 学習者個人に合わせた適切な教育が期待できる.

しかし, スポーツや楽器などの, 身体的な技能を駆使する分野においては Learning Analytics はあまり利用されていない. 勉強などの学習においてはテストなどにより成績を点数化することが比較的容易であるが, スポーツや音楽の分野においては一概に成績を点数化することは難しい. ピアノの教育現場においても Learning Analytics が取り入れられている事例はほとんどない. ピアノ学習においては特に成績を点数化することが難しい. その理由として, ピアノ演奏は正しい音高で演奏していることだけが正解ではないことが挙げられる. 正しい音高や音価で演奏することは重要であり, 正しい演奏に関して大まかな共通概念は存在するものの, 師事するピアノ教師によっては多少の打鍵の間違ひは気にせず, リズムよく演奏することが求められる場合もある. このように教師によって正解の演奏の価値観が異なるため, 生徒の合格までの道のりを予測することは難しい. そのため, 合格までの道のりを予測する場合の予測モデルは師事する教師によって異なる. 本研究では, 学習者が演奏した打鍵情報から, 打鍵時間間隔や音高正解率などの要素を抽出し, それぞれの演奏者ごとに比較できるようフォーマットする. ピアノ演奏に含まれる要素を総合的に判断し, また, 目標とする「正解の演奏」との類似度を比較することで正解の演奏を判断する. つまり, 本研究における正解の演奏とは, 「目標としている演奏」や「師事している教師のお手本の演奏」である. これにより, 演奏者間での演奏の比較や, 教師の視点からの合格可能時期を予測できる.

4.3 データ収集実験

4.3.1 実験目的

ピアノ学習者の課題曲合格日予測に用いるための演奏データを収集するために, 自宅での練習を模した環境で, 初学者を対象とした演奏データ収集実験を実施した.

4.3.2 分析用データセット構築

被験者に最大で合計5日間課題曲を練習してもらい、各日の演奏データを取得する。

演奏データの収集

被験者が課題曲を練習している様子を2視点から撮影し、両手の打鍵時刻と音高、演奏動画を取得した。それぞれの詳細は以下のとおりである。

- 打鍵時刻
被験者が鍵盤を打鍵した際の時刻をミリ秒単位で記録する。実験終了後、分析ツールを使用して記録した打鍵時刻から打鍵時間間隔 (IOI, inter-onset-interval) を算出した。
- 音高
演奏中に取得した MIDI データから抽出した、打鍵された鍵の音高 (pitch) である。
- 演奏動画
図 4.1, 4.2 に示すとおりビデオカメラ2台を演奏協力者の正面上部、後方右側にそれぞれ設置して撮影した。なお、正面上部の映像からは打鍵位置と打鍵の瞬間、後方右側の映像からは肘を含めた体全体の動きを確認できる。

被験者

被験者は25歳から36歳までの男女6名であった。被験者は全員、学校教育以外でのピアノ演奏経験が1年未満の初学者であった。初学者を対象とした理由は、上級者であればあるほど自身の演奏のレベルを把握しやすく、学習者本人が合格までの道のりを把握できるためである。対象者の中にはギターなどピアノ以外の楽器の経験がある者もいたが、五線譜のト音記号が読める者はいなかった。

課題曲

課題曲は世界中で民謡として広く親しまれている「子犬のマーチ」とした。課題曲の楽譜を図 4.3 に示す。本楽曲は旋律が広く知られており、また全16小節と程良い長さであるため、初学者が演奏するのに馴染みやすい。また、左手の伴奏形が最も基本的な3和音の全音符のみである。さらに、和声が基本的なカデンツを構成するトニック、ドミナント、サブドミナントの3種類のみである。そのため、ピアノ未経験者や初学者にとっても馴染みやすく、かつピアノ演奏の最も基礎的な技能のみが要求されると言える。以上の理由から本課題曲を選定した。

実験環境

実験に使用したピアノはヤマハのトランスアコースティックピアノ TA2 である。TA2 は打鍵するとハンマーが内部の弦を打ち鳴らす機構を搭載している。そのため、アコース

ティックピアノと同様の打鍵の感覚を持ちながら MIDI データを取得できる。なお、本実験の被験者には全くのピアノ未経験者もいるため、鍵盤の 2 オクターブ半と楽譜にイタリア音名が書かれた音名シールを貼り付けている。音名シールが演奏を妨げることはない。筆者らが実際に教育大学の保育士養成過程の学生らにヒアリング調査を実施したところ、初学者が学習の過程で音名シールを貼っている例が存在した。また、当該学生らの指導を担当している教師からも音名シールが演奏を妨げることはなく、学習の過程で鍵盤を覚えるためにシールを貼ることは問題ないとの回答を得た。

実験は実際のレッスンとレッスンの間の独習期間を想定し、1 日あたり 25 分間の練習時間を設け、計 5 日間実施した。25 分の練習終了後に到達度テストを実施し、課題曲を 2 回通し演奏してもらった。日毎の実験終了後に 5 件法によるアンケートを実施し、演奏の出来栄や課題曲への印象を調査した。また被験者は、予め用意しておいた模範演奏動画を自由に閲覧できる。これは自宅での練習の際に Youtube などの動画投稿サイトを参考に閲覧することを想定したものである。実験前に被験者に以下のような教示を行った。

- これから課題曲を 25 分間練習していただきます。模範演奏の動画を参考に練習してください。動画は何回視聴しても構いません。
- 練習終了後に到達度テストを行います。テストの際はその時点で弾ける範囲で構いませんので、2 回通し演奏をしてください。
- 間違えずに演奏できるようになっても、強弱などを工夫してより良い演奏になるよう練習してください。
- 演奏の正誤や練習方法に関する質問にはお答えできません。

4.3.3 データ収集実験の結果と考察

被験者らが一通りスムーズな演奏ができるようになるまで、おおよそ 3 日を要した。被験者に対して練習方法の指示や助言は与えていないため、各々が自由な練習方法を用いていた。6 名中 4 名は部分練習を、残り 2 名は通し練習を中心に練習していた。ピアノ学習における部分練習とは、楽曲の一定の部分のみを繰り返し練習することである。両手ではなく、右手や左手のみなど苦手なパートだけを部分練習することもある。一方、通し練習とは楽曲のはじめから終わりまでを何度も繰り返し練習することである。片手のみの通し練習も存在する。

被験者のうち部分練習を中心に行っていた 4 名に共通することとして、ダンスや新体操、ギターなど他の技芸の長期の経験歴があった。これらの技芸はいずれもピアノ練習と同様に音楽と合わせて実施するものであり、練習の際には楽曲を区切って部分練習を行うため、それに倣って「ピアノにおいても部分練習を中心に行った」と感想を述べていた。一方で、通し練習を中心に行っていた 2 名はピアノ以外の技芸に関してはサッカーの経験歴があった。サッカーでは楽曲に合わせて練習するという方法は存在しない。そのため、部分練習という概念が存在しなかったことが考えられる。実験後のヒアリングでは「部分練習では効率が悪く、全体を通して練習した方が効率が良いと思った」などと回答を得た。部分練習を行った被験者と通し練習を行った被験者感において、習熟効率に大きな差は見られな

表 4.1: 課題曲「子犬のマーチ」における各説明変数と予測モデルの出力日数

	IOI 類似度	音高正解率	和音 IOI(ms)	旋律部音高 正解率	和音欠損率	残り日数
被験者 A 1 日目	-0.24	66.3%	177.2	87.2%	50.0%	2.46 日
被験者 A 2 日目	-0.55	84.2%	133.1	82.9%	6.2%	1.26 日
被験者 A 3 日目	0.92	94.7%	60.1	100.0%	6.2%	0.21 日
被験者 B 1 日目	-0.56	90.0%	86.1	95.7%	0.0%	1.52 日
被験者 B 2 日目	-0.12	90.5%	85.7	93.6%	0.0%	1.03 日
被験者 B 3 日目	0.98	98.9%	44.4	100.0%	0.0%	0.01 日
被験者 C 1 日目	-0.63	81.0%	160.2	89.3%	6.2%	1.47 日
被験者 C 2 日目	0.39	94.7%	66.6	93.6%	0.0%	0.41 日
被験者 C 3 日目	0.99	97.8%	56.7	100.0%	0.0%	0.02 日
被験者 D 1 日目	-0.56	91.6%	53.8	95.7%	6.2%	1.81 日
被験者 D 2 日目	0.23	95.7%	49.1	100.0%	6.2%	1.00 日
被験者 D 3 日目	0.98	100.0%	44.6	100.0%	0.0%	0.01 日
被験者 E 1 日目	0.93	48.4%	-	97.8%	100.0%	3.90 日
被験者 E 2 日目	0.87	70.5%	35.7	97.8%	56.2%	2.17 日
被験者 E 3 日目	-0.69	87.3%	57.9	89.3%	12.5%	3.42 日
被験者 E 4 日目	-0.67	89.4%	50.6	95.7%	0.0%	1.56 日
被験者 E 5 日目	0.36	100.0%	35.3	100.0%	0.0%	0.65 日
被験者 F 1 日目	0.80	71.5%	46.5	97.8%	43.7%	1.81 日
被験者 F 2 日目	0.89	100.0%	32.8	100.0%	0.0%	0.07 日

かったが、今後被験者を増やし、練習条件を整えることで習熟効率に影響が見られる可能性がある。

4.4 予測モデルの設計

課題曲合格時期予測モデルを構築するため、4.3 節で記述した演奏データ収集実験の結果を分析ツールを用いて、データを算出、および分析した。

4.4.1 演奏協力と合格判定を実施したピアノ教師

本実験では 20 年以上の演奏経験をもつピアノ教師に課題曲を演奏してもらい、演奏データを収集した。教師から得られた演奏データは後述する IOI 類似度や、和音 IOI の算出に用いている。また、本教師には 4.3 節の実験における被験者らの各回の演奏動画を視聴してもらい、「本動画の生徒はピアノを学び始めて 1ヶ月以内の初学者です。彼らを指導する立場になって課題曲の合格、または不合格を判定してください」という提示のもと、合格、不合格の判定を実施してもらった。なお、4.3 節のデータ収集実験では各被験者とも一律に 5 日間練習してもらっているが、4.4 節において教師が合格であると判断した日以降の各被験者の演奏データは、予測、およびモデルの設計には使用していない。

4.4.2 演奏データの分析

日毎に取得した演奏データから分析ツールを用いて必要なデータを算出した。被験者らには課題曲を2回演奏してもらっているが、本分析では全て2回目の演奏を分析対象のデータとした。分析ツールの詳細を以下に記述する。

使用した分析ツール

被験者の課題曲演奏データから、予測に必要な要素を整形、算出を行うための分析ツールをwebアプリケーションとして構築し、使用した。本分析ツールは以下の機能を有する。

- 演奏データ読み込み機能
Standard MIDI File形式の演奏データをインポートして読み込むことができる。読み込む際に右手パートと左手パートを手動で分離し、パートを指定して読み込むことで、両手を分離してデータを扱うことができる。
- データ整形機能
読み込んだデータに対して、右手パートは課題曲の音価をラベリングし、左手パートは左手3音ごとに和音のラベリングを手動で実施する。今回の課題曲においては左手パートの音符が3和音のみのため、3音ごとに1つの和音として認識させている。右手パートの音価をラベリングする理由は、IOI類似度を算出する際に音価ごとの分類が必要なためである。また、左手にミス打鍵がある場合はデータを直接確認し、手動で調整を行うことで対応している。
- 分析用データ算出機能
課題曲合格日を予測するために必要な音高正解率、旋律部音高正解率、IOI類似度、和音IOI、和音欠損率の5つの要素を算出する。各要素の概要と算出方法については以下の各節にて記述する。

音高正解率

課題曲の全ての音符数を n 、演奏データに含まれるミス打鍵数を k としたときの音高正解率 C の導出は以下の式による。

$$C = \frac{n - k}{n} \quad (4.1)$$

音高正解率は課題曲の両手の正しく打鍵できている割合を算出した値である。すなわち、全ての音符に対して、打鍵された鍵のうちからミス打鍵を除いたものの割合である。本研究におけるミス打鍵とは、楽譜に記載されていない余計な鍵を打鍵する余打鍵、楽譜に記載されている鍵盤を打鍵しなかった未打鍵、順序は楽譜通りに演奏していたが間違った鍵盤を打鍵する誤打鍵の3種類とする。ミス打鍵の判定は、分析ツールを用いて演奏データを右手・左手パートに分類し、各パートとも課題曲の1音目から順に、余打鍵・未打鍵・誤打鍵に該当するかを判定している。

旋律部音高正解率

課題曲の右手パート全ての音符数を n_r 、右手パートの演奏データに含まれるミス打鍵数を k_r としたときの音高正解率 C_r の導出は以下の式による。

$$C_r = \frac{n_r - k_r}{n_r} \quad (4.2)$$

旋律部音高正解率は旋律部である右手パートのみの音高正解率の値である。本値を導出した理由は、本課題曲において演奏する上で最も重要なメロディ部分を右手が担っており、後述の打鍵時間間隔がどれほど均等であっても右手の音高に間違いが多ければ、音楽として成立しないためである。

IOI 類似度

課題曲の演奏のうち、旋律部(右手)の各音符の発音時刻の差分の標準偏差を算出した。発音時刻はミリ秒単位で記録されている。課題曲の旋律部には4分音符と2分音符の2種類の音価の音符が存在する。これらは4分音符から4分音符、4分音符から2分音符、2分音符から4分音符、2分音符から2分音符、の4種類の音価の遷移があるといえる。そのため、上記の4種類の遷移状態に分けて打鍵時間間隔(IOI)を算出した。その結果、各被験者とも2分音符から4分音符に遷移する際に、最もIOIの分散値が大きかった。初学者にとって、現在弾いている音符の音価から異なる音価に遷移することは難しく、戸惑うことが考えられる。特に2分音符から4分音符に遷移する際は、楽曲内の「フレーズの終わりから始まり」つまり、カデンツの終了と開始部分であることが多い。これらは旋律の切れ目であり、演奏に慣れていない学習者は打鍵を戸惑いやすいため、2分音符から4分音符に遷移する際のIOIが高い結果になったといえる。課題曲における2分音符-4分音符間の遷移パターンの出現回数を m 、教師の演奏データにおける2分音符-4分音符間のIOI(出現箇所 l) を a_l 、生徒の演奏データにおける2分音符-4分音符間のIOI(出現箇所 l) を b_l としたときのIOI類似度 S の算出方法は以下の式による。

$$S = \frac{\sum_{l=1}^m a_l b_l}{\sqrt{\sum_{l=1}^m a_l^2} \sqrt{\sum_{l=1}^m b_l^2}} \quad (4.3)$$

収集したIOIの値はミリ秒単位であり、教師の演奏と生徒の演奏間で頭出しの発音時刻を揃えてから、IOI類似度を算出する。IOI類似度の値によって、演奏全体のテンポを度外視しつつ、生徒と教師の演奏の滞留度を比較できる。

IOI類似度は特定の箇所だけに着目した値のため、特定の課題曲でのみ使用できる値である。しかし、特定の音価に着目せず、楽曲内の連続するある2つの音符間において、音長が長い音符から短い音符に遷移する箇所を算出することで、一般の楽曲にも拡張できる可能性がある。IOI類似度の一般化に関する調査は今後の課題である。

和音 IOI

課題曲の演奏のうち、各小節の左手和音部の最初に打鍵された音と、最後に打鍵された音の発音時刻の差分を算出した、その回の演奏における平均値である。ピアノ指導におい

ては一般に、演奏の習熟に伴い和音の発音が揃うことを「音の粒が揃う」などと表現される。そのため、課題曲の合格判定においても和音の発音のバラツキ具合を考慮することは重要であるといえる。なお、速いテンポの曲において左手に16分音符や32分音符のアルペジオがある場合、和音との判別が難しいこともある。しかし、本課題曲はテンポが速くなく、左手の音価も全音符のみであるため、アルペジオとの判別がつかないという問題は発生しない。本分析において和音のバラツキ具合である和音 IOI は、3和音のうち2音以上打鍵している場合に算出し、未打鍵等により当該和音の打鍵数が1音以下の場合、欠損値として扱っている。本研究では4.4.1節にて記述したピアノ教師に課題曲を演奏してもらい、教師の演奏データの和音 IOI を収集した。和音 IOI と音高正解率について、被験者ごとにおける各回の平均値と教師の1回の演奏をそれぞれプロットした散布図を図4.4に示す。縦軸は音高正解率を、横軸は和音 IOI 平均値を示している。教師の和音 IOI は、いずれの被験者の和音 IOI 平均値よりも小さく、教師の音高正解率は100%である。また、被験者が合格判定をもらった最終日の和音 IOI よりも、教師の和音 IOI は小さく、教師は生徒よりも、和音を構成する各鍵を同時に打鍵できているといえる。

和音欠損率

和音欠損率は左手全体に対する3和音のうち、2音以上が未打鍵、または誤打鍵の箇所の割合である。本分析では当該小節における左手3和音のうち打鍵数が1音以下の場合を欠損値として扱っている。これは、3和音のうち2音以上が判明している場合は和声的な構造から和音を推測できるためである。一方で、このような和音判定のアルゴリズムでは、学習者が右手のみを練習したり、左手をほとんど弾けていない場合に正常な判定ができない。左手の弾けるところのみを弾き、弾けないところは飛ばすという弾き方をした際に、音高正解率のみが上昇してしまう。そのため、課題曲の演奏のうち「どれだけ和音が弾けていないか」という情報を考慮する必要があるため、和音欠損率を導入した。

4.4.3 予測モデルの構築と考察

4.4.2節で述べた5つのデータを説明変数、合格までの残り所要日数を目的変数として重回帰分析を適用し、合格までの日数予測モデルを構築した。予測モデルの式を以下に記述する。

$$y = b_1 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \quad (4.4)$$

予測モデルの式(4)における各変数を表4.2に示す。また、式中の x_1 はIOI類似度、 x_2 は音高正解率、 x_3 は和音IOI、 x_4 は旋律部音高正解率、 x_5 は和音欠損率である。出力される y の値は教師に合格をもらえるまでの残り日数の予測値であり、非整数値で出力される。それぞれの説明変数は標準化し、予測モデルに入力した。今回のデータ収集実験で得られたデータに重回帰分析を適用した際の提案モデルの結果を表4.3に記載する。本研究では、平均平方二乗誤差(RMSE)、平均絶対誤差(MAE)、決定係数(R^2)の3つを精度評価指標として用いた。また、提案モデルが出力した予測値と、実際に合格までに所要した日数のプロットを図4.5に示す。表4.1は実際の演奏データから得られた各要素を被験者

表 4.2: 予測モデル式 (4) の各変数

	各変数の値
b_1	-0.0069
a_1	-1.10
a_2	-1.52
a_3	2.71
a_4	-0.0037
a_5	3.01

と日数ごとにまとめたものである。表 4.1 中の「残り日数」の列が予測モデルで出力した残り日数 y である。同じ列のその他の行の値が当該日のデータである。被験者 E は 3 日目において打鍵時間間隔が大きく上昇している。この理由としては、被験者 E は 1 日目、2 日目共に和音欠損率が非常に高い。つまり、1 日目、2 日目は左手をあまり弾かず、3 日目から左手も通して演奏していたことがわかる。そのため、3 日目から両手演奏を開始したことで戸惑い、一時的に右手が左手につられるように演奏してしまったといえる。

予測モデルの各説明変数と回帰係数の一覧を表 4.4 に示す。最も寄与度の高かった説明変数は和音欠損率、ついで和音 IOI である。本課題曲のように左手パートが和音を鳴らすような楽曲の場合、楽曲中における和音の出現箇所が多い。和音は楽曲の調性を決定づけ、演奏する上でも土台となるため、重要である。そのため、和音が弾けているかどうかを判断する和音欠損率、和音が円滑に演奏できているかどうかを判断する和音 IOI の 2 つの値の寄与度が高かった。実際に表 4.1 に示すように、和音欠損率の値と、和音 IOI の値は日を追うごとに向上している。

また、表 4.5 に単純に音高の正解不正解という要素のみで、重回帰分析を用いて残り日数を予測した結果を示す。本表は、音高正解率と旋律部音高正解率の 2 つの要素だけを用いて残り日数を予測した結果である。5 つの要素をもとに予測した表 4.1 の結果と比較すると、表 4.5 の方が実際の所要日数と解離があるものの、一見すると大きく外れている結果は見当たらない。しかし、被験者 B の 1 日目と 2 日目のように、テンポを考慮せずに音高の正しさを優先させた演奏においては、正確な予測が難しいといえる。また、表 4.1 に見られるように、被験者 F はテンポと右手の音高を重要視した演奏をしていたものの、和音欠損率が高いことから、左手を軽視して練習していたことが伺える。そのため被験者 F も、表 4.5 のように音高正解率と、旋律部音高正解率からでは、正確な予測が難しい。したがって、ただ単に音高の正解不正解という情報のみでは課題曲の合格時期を予測することは難しく、IOI 類似度、和音 IOI、和音欠損率の値を導入したことは妥当である。

実験の結果は、一見妥当な結果が得られたように見えるが、適用している楽曲がモデル構築時と同じであるため、他の課題曲や被験者においても有効であるかはわからない。課題曲に過学習していることも十分に考えられる、そのため、別の課題曲と被験者のデータセットに本モデルを適用して有効性を検証する必要がある。

表 4.3: 「課題曲子犬のマーチ」における精度評価指標

	RMSE	MAE	R^2
提案モデル	0.56	0.41	0.80

表 4.4: 予測モデルの回帰係数

	各説明変数の回帰係数
IOI 類似度	-1.10
音高正解率	-1.52
和音 IOI	2.71
旋律部音高正解率	-0.0037
和音欠損率	3.01

4.5 予測モデル検証実験

4.5.1 実験目的

4.4 節で設計した課題曲合格日予測モデルの有効性を検証する。データ収集実験とは別の課題曲を使用し、新たに数名の被験者を対象として演奏データを収集する。その後、収集した演奏データに対して設計した予測モデルを適用、および評価を実施する。

4.5.2 実験詳細

被験者に課題曲を最長 5 日間、1 日あたり 25 分間練習してもらった。日毎の演奏の動画を実験協力者のピアノ教師が確認し、途中の日程であっても被験者が十分に上手く演奏できていると判断した場合は、当該日で練習を終了している。被験者に対して、練習方法や演奏の正誤など、演奏の熟達に関係する提示はしていない。被験者にはイタリア語音名の書かれた楽譜と、実験協力者のピアノ教師が課題曲を演奏している模範演奏動画のみが学習教材として与えられる。模範演奏動画は被験者が何度でも自由に閲覧できる。25 分の練習が終了した後、到達度テストとして楽曲全体を演奏してもらい、その際の演奏データを収集した。途中までしか演奏できない場合は、当該箇所までの演奏データを使用することとした。また、各被験者には各回の実験終了後に演奏の自己評価についてのアンケートを実施した。上記のデータ収集実験後、収集した演奏データに対して予測モデルを適用し、終了までの予測日数を出力した。また、予測モデルが出力した結果に対して、leave-one-group-out 交差検証を実施した。

一般に、ピアノ教師によって合格判定の基準は異なるため、本節の予測モデル検証実験における合格判定のラベル付けを行ったピアノ教師と、4.4 節において合格判定を行ったピアノ教師は別の教師とした。

本節において合格判定を実施したピアノ教師は 25 年の演奏経験歴をもち、初学者を対象とした指導経験歴も約 10 年という経歴をもつ。合格判定に関しては、4.4.1 節のピアノ教師と同様に「本動画の生徒はピアノを学び始めて 1ヶ月以内の初学者です。彼らを指導する立場になって課題曲の合格、または不合格を判定してください」と提示して、合格、

表 4.5: 音高正解率と旋律部音高正解率のみによる予測日数の出力結果

	残り日数
被験者 A 1 日目	2.74 日
被験者 A 2 日目	1.62 日
被験者 A 3 日目	0.60 日
被験者 B 1 日目	1.00 日
被験者 B 2 日目	1.03 日
被験者 B 3 日目	0.37 日
被験者 C 1 日目	0.87 日
被験者 C 2 日目	0.53 日
被験者 C 3 日目	0.27 日
被験者 D 1 日目	1.71 日
被験者 D 2 日目	0.70 日
被験者 D 3 日目	0.40 日
被験者 E 1 日目	3.74 日
被験者 E 2 日目	2.22 日
被験者 E 3 日目	1.32 日
被験者 E 4 日目	1.06 日
被験者 E 5 日目	0.27 日
被験者 F 1 日目	2.15 日
被験者 F 2 日目	0.27 日

不合格を教師の判断で判定してもらった。また、本ピアノ教師には合格判定だけでなく、課題曲「花」の模範演奏も実施してもらい、IOI 類似度算出時の教師の演奏データとした。

被験者

21 歳から 25 歳までの男女合わせて 6 名を被験者として実験に参加してもらった。各被験者ともピアノの演奏経験はなく、これまでに音楽に関して専門的な教育は受けていない。

課題曲

課題曲は滝廉太郎の「花」を独奏用に編曲したものを使用した。図 4.6 に楽譜を示す。「花」は旋律が親しみやすく、学校教育においても使用されるため、誰もが聞いたことのある楽曲である。また、伴奏形も左手で和音を弾く曲であり、かつトニック、ドミナント、サブドミナントの基本のカデンツが大半を占めているため、初学者にとっても演奏しやすい。また、曲中に一箇所のみドッペルドミナントが出現する箇所があり、4.3 節の実験で使用した子犬のマーチよりも少しだけ難易度が高い。そのため、本楽曲を課題曲として採用した。

4.5.3 予測モデルの適用結果

収集した演奏データに予測モデルを適用したところ、表 4.6 のような結果となった。表中の「残り日数」の列が予測モデルで出力した残り日数である。ほぼ全ての被験者に言えることとして、日を追うごとに「残り日数」が短くなっている。被験者 G、被験者 H、被

験者 I, 被験者 J, 被験者 K, 被験者 L の各回の演奏動画を, 本節における模範演奏動画の演奏を担当したピアノ教師に見せたところ, 各被験者の全ての動画視聴後に「日を追うごとに上達している」ことを確認した. 各動画は連続的に視聴するのではなく, 各被験者の演奏を日毎に分割して視聴してもらった. 今回の実験では, 5日間経過しなくとも, 被験者が十分に演奏できるようになった時点で終了している. それぞれの被験者が実際に所要した日数は図の行数と同様に, 被験者 G が 3 日間, 被験者 H が 3 日間, 被験者 I が 2 日間, 被験者 J が 3 日間, 被験者 K が 5 日間, 被験者 L が 5 日間である. 予測モデルで出力した結果と, 実際に所要した日数を比較すると, 概ね一致していることがわかる. 課題曲「花」における精度評価である平均平方二乗誤差 (RMSE) の値は 0.76, 平均絶対誤差 (MAE) の値は 0.65 であった.

また, 本節において, 予測モデルの回帰式は 4.3 節 (4) のまま, 回帰係数のみを再学習して課題曲「花」用の予測モデルを構築し, その場合の予測精度を検証した. 精度検証の前処理として, 被験者の各日の予測結果のデータを各被験者ごとの全 6 グループに分け, 計 6 個のデータとした. このうち 5 個のデータを学習データ, 残り 1 つをテストデータとする leave-one-group-out 交差検証で確認したところ, 80.03% の精度¹ が得られた. したがって, 4.4 節にて構築した予測モデルの回帰式や説明変数は, 異なる楽曲においても一定の有用性が認められる.

以上のことから, 本研究で構築した予測モデルによって課題曲が完成するまでの日数, つまり合格までの残り日数を, 比較的高精度で出力することができたといえる.

また, 各日の終了後に被験者に実施したアンケートの結果を表 4.6 の 8 列目と 9 列目に示す. 本アンケートでは「本日の演奏の出来栄を 100 点満点で評価してください」という自己採点の項目と, 「同様のペースで練習した場合, 課題曲の完成まであと何日かかると思いますか」という被験者自身による予測の項目を設けた. 各被験者とも, 表 4.6 における自己採点の項目と被験者自身の残り日数予測の項目は反比例しており, 自身が上達するにつれて, 完成までの道のりが近くなっていることを認識しているといえる. 一方で, 被験者自身の残り日数予測の項目は, 実際に所要した終了までの日数や, システムが出力した残り日数とは乖離しており, 被験者らが自身で終了までの日数を正確に予測することは難しいといえる.

4.6 考察

4.6.1 実験に関する考察

4.5 節の実験の結果, 構築した予測モデルは学習者の課題曲合格日を高い精度で予測できることが判明した. 一方で, 表 4.6 における被験者 K の 5 日目や, 被験者 G の 1, 2 日目のように, 出力した残り日数と実際の所要日数が乖離している場合も見られる. 被験者 K の 5 日目に関して, 被験者 K は 5 日目終了時点における合格までの残り日数が 1.56 日と出力されており, 実際の学習環境においては 6 日目以降も練習が必要になることが想定される. 今回の実験ではピアノ初学者を対象としており, 練習日を最大 5 日間に設定していた. そのため, 被験者 K は課題曲の練習状況が途中の段階で最終日を迎えている. また, 被

¹正解判定方法は, 推定日数に ± 0.5 日分の許容誤差を適用し, 実測値がその範囲内であれば正解とした.

験者 G の 1,2 日目に関して, 被験者 G は音高正解率をはじめとした各要素の成績がよく, 初日から残り出力日数の数値は 1 日未満であった。一方で, 教師が合格と判断した日は 3 日目である。被験者 G の 1,2 日目の演奏に共通していることとして, IOI 類似度の低さが挙げられる。IOI 類似度の低さは演奏中の滞留として現れる。ピアノ教師は滞留を耳で判断し, 予測モデルよりも滞留を深刻に判断したため, 結果の乖離が生じたと推察できる。

4.6.2 課題曲の楽曲構造と提案モデルの考察

今回のモデル適用実験では, 比較的高い精度で予測できた理由として, 課題曲が短く, 簡単な曲であったことが挙げられる。簡単な曲であれば複雑な演奏表現などの予測困難な要素が少なく, システムが予測する際にも誤差が生まれにくいといえる。また, 4.3 節のデータ収集実験の課題曲「子犬のマーチ」と, 4.5 節の実験で使用した課題曲「花」は楽曲として似ていることも挙げられる。この 2 曲は旋律や和声進行こそ別物であるが, 左手パートが一般的なコード弾きをする楽曲である。そのため提案システムは, このような左手がコード弾きをする曲において高い精度で予測できるということがいえる。

4.6.3 学習者が練習を休んだ場合の議論と拡張点

また, 今回の実験においてはあくまで「毎日 25 分ずつ練習する」ことを前提としてシステムを構築し, 実験を実施した。この前提が存在する以上, システムが合格までの時期を日数で表示することは合理的であるといえる。しかし, 現実の練習においては学習者が練習時間を確保できなかったり, 練習を放棄するなど, 「毎日 25 分ずつ練習する」という前提が崩壊することも考えられる。一般的に, ピアノ学習において練習を休むと, その分合格までの道のりが長くなる。具体的に何日休むとどの程度合格までの期間が伸びるというデータは存在しない。一方で, 現在の手法では練習を休んだ場合にどの程度合格までの時間が追加になるかという情報は表示されない。そこで今後のシステムの拡張点として, 学習者が練習を休んだ場合のデータを収集し, 合格予測日が似ている学習者同士を比較して, 1 日練習を休んだ場合にどの程度合格までの期間が長くなるかを調査する。これらのデータを蓄積することで, 実際に学習者が練習を休んだ場合に, どの程度日数が追加になるかを予測し, 学習者に提示できる。

4.6.4 音名シールと予測モデルに関する考察

本研究では, 初学者でも音名との対応づけがわかりやすいよう, 鍵盤に音名シールを貼り付けて実験を実施した。学習過程において鍵盤に音名シールを貼り付けることは, 実際の教育現場でも行われる。一方で, 音名シールを貼ることで音名と鍵盤の対応づけが明瞭になり, 被験者らのミスが減ったとも考えられる。つまり, 音名シールがあることでモデルの精度に影響が生じていると推察できる。本モデルに対する音名シールの影響に関する調査は今後の課題である。

4.6.5 今後の課題

今回の実験で構築、および使用した分析ツールは以下の点において手動で調整する必要がある。

- 右手・左手パートの分離、および識別
- 右手パートの音価のラベリング
- 左手パートの和音のグループ化

これらは本システムを完全に自動化する上で、今後解決すべき技術的な課題である。演奏データを SMF 形式で取得する以上、左右のパートの分離や、音価情報を取得することは難しい。現状、これらの問題は人間が聞く、もしくはデータを直接見て判断しなければ解決できない。この問題に関しては、Nakamura ら [73] の楽譜と演奏音符のマッチング技術を参考に、本研究にも応用することで解決できると考えられる。

現在の予測精度が実際のレッスンで使用するのに十分かどうかは不明である。そのため、複数人のピアノ教師が学習者の合格時期を予測した場合の結果と比較して、実際に予測モデルの精度を検証する必要がある。課題曲や生徒の学習状況によっては、人間の教師の方がより高い精度で予測できる場合もある。しかし、予測モデルの方が正確に予測できるケースも考えられる。また、左手の伴奏形が特殊な課題曲に対応できる予測モデルを設計することも重要である。現在の予測モデルでは、左手の伴奏形がアルペジオやアルベルティバスである場合に対応できない可能性がある。そのため、様々な伴奏形態の課題曲を学習データとして、複数の予測モデルの設計をめざす。

今回の実験における課題曲は短く簡単であったため、比較的高い精度で予測ができた。しかし本来、学習者ごとに学習効率や演奏技術が異なるため、学習者ごとに回帰係数を変更するように調整する必要がある。学習効率が大きく異なる学習者や、1日目の演奏データしか得られない場合、正確に合格までの日数を予測することは難しい。そのため、今後は複数の回帰モデルの構築や、学習者の特徴ごとに回帰係数やパラメータの調整を検討する。

4.7 まとめ

本研究では、生徒の日々の演奏から課題曲の合格時期を予測するモデルを構築した。予測モデルは生徒の演奏と、目標とする模範演奏の類似度に基づいて重回帰分析を行い、課題曲合格までの残り日数を出力する。目標とする演奏との類似度に基づいて合格日を予測することで、同じ楽曲において教師の評価基準が異なる場合でも、各教師の評価基準と合致した予測結果を出力することができる。今後は、より多くの楽曲や生徒の演奏データを収集し、本予測モデルの適用範囲を拡大していく予定である。また、実際に定期的なレッスンを受けている生徒を対象としたユーザースタディも実施していく。



図 4.1: 正面上部から撮影した演奏動画



図 4.2: 後方右側から撮影した演奏動画

子犬のマーチ



図 4.3: 課題曲「子犬のマーチ」の楽譜

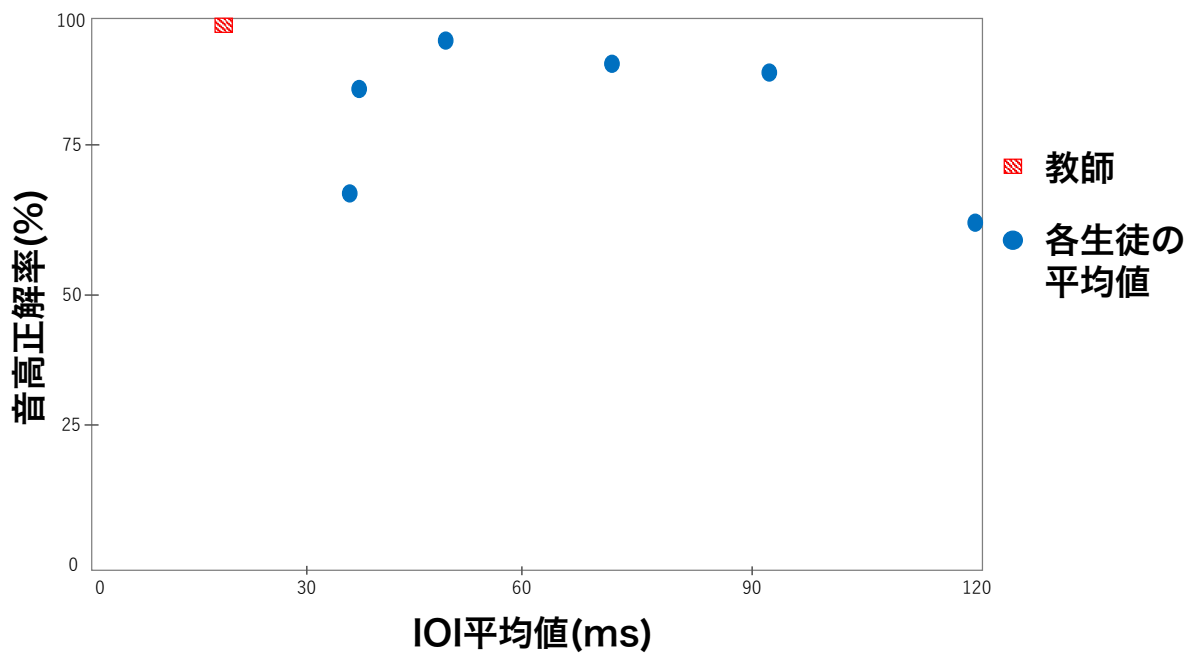


図 4.4: 教師の演奏と生徒の各回の演奏の平均値

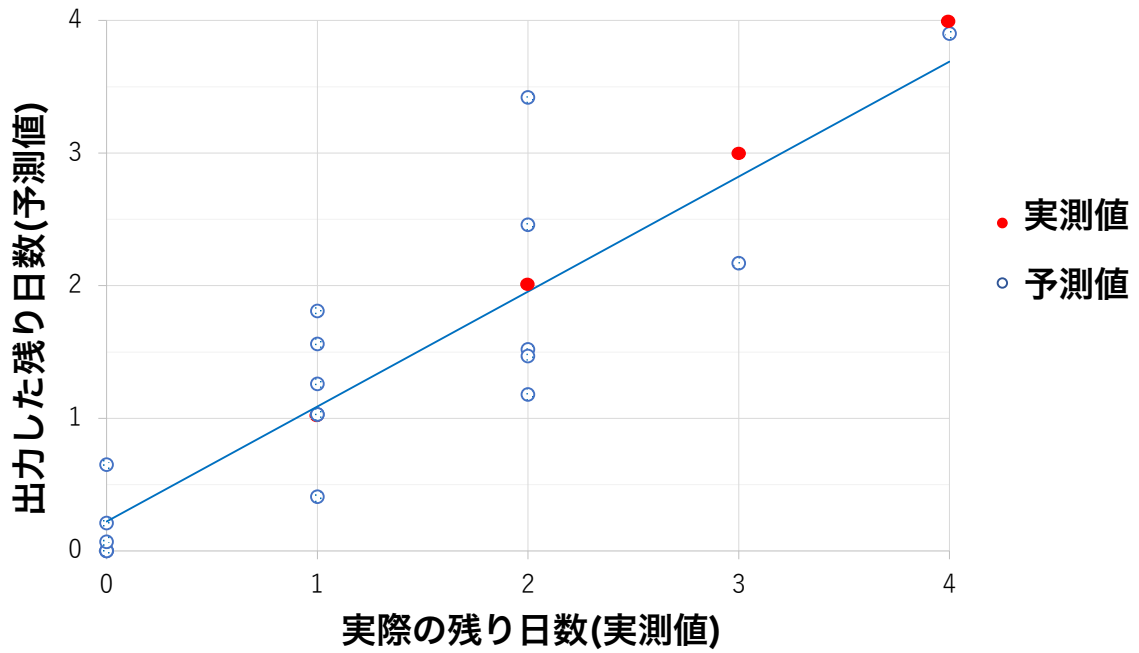


図 4.5: 予測値と実測値のプロット



図 4.6: 課題曲「花」の楽譜

表 4.6: 課題曲「花」における各説明変数と予測モデルの出力日数および被験者アンケートの結果

	IOI 類 似度	音高正 解率	和 音 IOI(ms)	旋律部 音高正 解率	和音欠 損率	残り日 数	自己採 点	被験者自 身の残り 日数予測
被験者 G 1 日目	0.20	92.1%	26.1	90.2%	2.0%	0.77 日	60 点	残り 2 日
被験者 G 2 日目	0.32	100.0%	18.6	100.0%	0.0%	0.75 日	80 点	残り 0 日
被験者 G 3 日目	0.82	100.0%	26.5	100.0%	0.0%	0.20 日	88 点	残り 0 日
被験者 H 1 日目	0.20	94.4%	33.8	97.3%	6.5%	1.02 日	50 点	残り 3 日
被験者 H 2 日目	0.67	100.0%	23.4	100.0%	0.0%	0.35 日	70 点	残り 2 日
被験者 H 3 日目	0.75	100.0%	21.9	100.0%	0.0%	0.27 日	75 点	残り 1 日
被験者 I 1 日目	-0.40	86.1%	129.1	91.6%	12.6%	1.41 日	60 点	残り 3 日
被験者 I 2 日目	0.39	100.0%	31.5	100.0%	0.0%	0.63 日	70 点	残り 3 日
被験者 J 1 日目	-0.64	93.0%	43.9	97.3%	7.1%	1.96 日	30 点	残り 2 日
被験者 J 2 日目	-0.63	97.3%	25.2	100.0%	2.0%	1.86 日	60 点	残り 1 日
被験者 J 3 日目	-0.11	100.0%	27.3	100.0%	0.0%	1.21 日	80 点	残り 1 日
被験者 K 1 日目	-0.40	25.3%	23.7	28.3%	77.8%	3.23 日	35 点	残り 7 日 以上
被験者 K 2 日目	-0.06	36.3%	70.6	36.1%	74.3%	2.46 日	40 点	残り 5 日
被験者 K 3 日目	-0.01	77.3%	24.0	97.3%	24.3%	2.10 日	65 点	残り 3 日
被験者 K 4 日目	-0.09	90.3%	18.6	95.1%	10.9%	1.53 日	70 点	残り 2 日
被験者 K 5 日目	-0.29	97.3%	24.2	100.0%	3.1%	1.56 日	85 点	残り 1 日
被験者 L 1 日目	-0.81	30.5%	230.1	32.6%	81.7%	2.85 日	30 点	残り 7 日 以上
被験者 L 2 日目	-0.81	57.1%	105.2	61.8%	60.7%	2.63 日	30 点	残り 7 日 以上
被験者 L 3 日目	-0.26	64.5%	64.6	69.0%	36.7%	2.02 日	60 点	残り 2 日
被験者 L 4 日目	0.12	75.6%	54.1	81.8%	27.0%	1.39 日	60 点	残り 2 日
被験者 L 5 日目	0.45	89.1%	43.1	94.2%	12.6%	0.81 日	70 点	残り 1 日

第5章 再固定化学習システム

5.1 まえがき

1章で述べたようにピアノ学習に必要な技能を習得するためには、長期間の基礎的な訓練が必要となる。初学者の場合は楽譜に書かれた音符や指使いを見て、鍵盤上の位置を特定し、指定された指使いで演奏するという一連の基本的な練習を行うことが難しい。また、これらは基礎練習であり、非常に単純な作業であるため、挫折の原因ともなり得る。そのため、ピアノ学習においてはモチベーションを維持し、楽しく学ぶことが求められる。

竹川らはこれまでに、多くの初学者向けのピアノ学習支援システムを構築してきた[1][21][22]。これらのシステムではプロジェクションマッピングを用いて、学習者が引くべき鍵盤を明示することで、学習者が直観的に打鍵位置を理解できるようになっている。このようなシステムは学習者はゲーム感覚で学習を進めることができる。

学習にゲームを取り入れることで、学習意欲や学習効果が高まることが知られている。これまでも、ピアノ学習システムにゲーミフィケーションを取り入れる研究が実施されてきた[55]。これらの研究ではピアノロールのように、学習者が弾くべき鍵盤に音符が流れてくる。それぞれの音符の色が指の動きに対応しているため、学習者はリズムゲームのように鍵盤を打鍵できる。また、Raymaekersら[56]は、WeingらのP.I.A.N.O.を応用して、スペースインベーダーのゲーム機のように鍵盤を弾けるようにしたGAME OF TONESを提案した。ゲーム感覚で、適切なタイミングで鍵盤を押させることで、学習者が気軽に楽器を扱えるようになり、「ピアノを練習しなくてはいけない」という脅迫観念を軽減することができる。このように、ピアノ学習をサポートするシステムは数多く存在する。初学者はこのようなシステムを利用することで、学習の敷居が下がり、学習を継続しやすくなる。また、このようなシステムは学習者が楽しく学ぶことで、モチベーションを維持することができる。

しかし、より効率的にピアノ学習を支援するためには、人間の記憶のメカニズムに着目する必要がある。これらのシステムでは、打鍵位置の表示がなくなった瞬間に、どこを弾けばよいのかがわからなくなるため、楽譜と鍵盤で弾くべき音の対応関係を把握することが難しく、かえって上達が難しい場合もある。そのため、効率的なピアノ学習支援システムの設計には、ゲーミフィケーションを取り入れた学習の敷居の低さと、打鍵位置の記憶を定着させる仕組みの両方が求められる。

人間の記憶は、符号化されて一時的に短期記憶 (STM) として保存されたのち、断片的に符号化された記憶が統合され、長期記憶 (LTM) として定着される。統合されて定着した記憶は、忘却されない限り保存されるとされている。しかし、Nederらは、LTMは何らかの刺激によって想起された場合、想起時に新しい情報が記憶として取り込まれる可能性があることを提唱した[65]。これを再固定化という。つまり再固定化とは、LTMとして

統合された記憶が、不安定な状態で想起され、再び安定した状態に戻ることを意味している。Wymbsらは、再固定化が運動技能の強化に役立つことを証明した [67].

そこで本研究では、再固定化と運動技能の強化の関係性が、ピアノ学習においても有効であるという仮説を立てた。ピアノ演奏では鍵盤を打鍵するという動作が入力となり、その結果が音として出力される。このことから、学習者は与えられた楽曲(課題曲)の演奏を動作として学習することができ、結果的に効率よく課題曲を習得できると考えられる。そこで打鍵の動きに着目し、再固定化を取り入れたピアノ学習支援システムを構築する。提案システムは、再固定化を用いて、ピアノ演奏における打鍵の動きを効率的に支援する。学習者自身が再固定化操作を行っていることを認識しないことが重要であるため、ゲーミフィケーションを用いて、無意識的に再固定化を利用しながら練習ができるピアノ学習支援システムを提案する。このような学習方法では、これまで一般的に実施されてきたピアノ練習方法よりも、効率的に学習できると考えられる。

5.2 関連研究

5.2.1 補助情報を提示する学習支援システム

歌や書道、楽器演奏の支援では、学習者に模範となる動作や情報を提示し、学習者の間違いを示すことが支援情報として有効であることが確認されている。これらは技能習得期間の短縮に繋がる。お手本と現状の両方を提示し、間違いを表示する学習支援システムの例として、ピアノ学習における演奏の初期段階(初めて楽譜を見て、指使いや鍵盤の位置を覚えるために練習をする段階)では、あらかじめ鍵盤に全ての音名と打鍵する順番がシールで記されている場合がある。また、楽器メーカーから販売されている「Lighted Keyboard」や、次にどの鍵盤を押せばよいかなどの演奏支援情報を提示するソフトウェアなども存在する [13]。このような支援方法は、ピアノの鍵盤を押さえる動作を覚えるために有用である。

ピアノ学習にゲーミフィケーションを取り入れた研究も数多く存在する [55][56][57][58]。ゲーミフィケーションを取り入れることで、音や鍵盤の動きを可視化し、学習の敷居を下げるができる。そのため、ゲーミフィケーションは従来の手法と比較して、初学者にとって効率的、かつ楽しいと感じる学習プロセスを実現できる。ゲーミフィケーションとピアノを組み合わせた研究では、HMDを用いたAR(拡張現実)学習が用いられることも多い [59][60]。HMDを用いた手法は視覚的にもわかりやすく、ゲーム性も十分に併せ持つが、ピアノ初学者にとってHMDの装着が演奏の障害になる可能性もあるため、本研究では用いていない。

また、福屋らは、モチベーション維持を考慮したピアノ学習支援システムを提案している [71]。これらのシステムは練習前に模範演奏を提示することで学習の敷居を低くすることに加え、正しい打鍵位置と学習者の現在の打鍵位置を視覚的に強調することで、誤った打鍵をした際に学習者に通知することができる。また、打鍵位置を間違った際には次のお手本が表示されず、間違えた部分をやり直すというペナルティを課すことで、学習者が正しい打鍵位置を理解できるようにする機能も備えている。このように、演奏の初期段階では、学習者は支援機能を利用して練習することができる。さらに、福屋らのシステムでは、

学習者が間違っただけでも正しい音が出力される機能を持ち、この機能により学習者が効率よく学習できることを証明した。これらの結果は本研究においても大きな参考となる。また、竹川らは、支援からの脱却を促進するために、支援情報を利用したかどうかを学習者に視覚的にフィードバックする機能を持ったシステムを提案している [22]。学習者の習熟度に応じて提示する支援情報を徐々に減らしていくシステムも提案されている [61]。このように、システムによる学習支援を行う際は、徐々に支援からの脱却を目指すことが重要である。

偽情報や曖昧情報などの情報を含むバイオリン学習支援システムも提案されている [63]。このシステムでは、学習者は提示された情報の真偽を任意のタイミングで選択することができる。実験結果から、正しい情報だけでなく、偽情報や曖昧情報など従来の情報とは異なる情報を含む学習を行ったグループは、正しい情報だけを用いたグループよりも効率的に学習できることが判明した。また、曖昧な情報を含むグループよりも、誤った情報を含むグループの方が、学習が効率的であったことがわかった。これは、提示された情報が間違っている場合、学習者は能動的に判断しなければならず、それが学習に良い影響を与えている可能性を示唆している。再固定化を用いた効率的な学習方法も、同様のメカニズムである可能性がある。

5.2.2 人間の記憶のメカニズム

一般的に、記憶は符号化されて短期記憶 (STM) として一時的に保存され、のちにそれらが統合されて長期記憶 (LTM) として保存される。統合された記憶は忘れない限り半永久的に保存される。Nader らは、LTM に変換された記憶が想起されて新たな情報として定着することを示した。一度安定化した記憶が想起され、一時的に破壊された後に、再び強固に安定した状態に戻ることを記憶の再固定化という [64][65][66]。

Wymbs らは、再固定化が運動技能の強化に有用であることを証明した。それ以前は、再固定化は記憶の定着には有用だが、運動技能の向上に役立つかは不明であった。Wymbs らが実施した運動技能の学習に関する実験では、特に学習の初期段階では、反復練習が効率的な技能強化の方法ではないことが明らかになった。つまり、初学者が効率よく技能を向上させるためには、反復練習以外の方法を検討する必要がある。これはピアノ学習においても同様であると考えられる。そこで本研究では再固定化を考慮した、ピアノ学習支援システムを構築する。提案システムではゲーミフィケーションを応用し、ゲームのシナリオ進行に合わせて、本来打鍵する鍵盤とは異なる位置の鍵盤を打鍵することが要求される。この間の動作によって、被験者は自身が再固定化操作を行っていることを無意識に、音の違いを認識することができる。

5.3 設計

提案システムの構成を図 5.1 に示す。提案システムでは MIDI 入出力に対応したキーボードを使用する。キーボードは鍵盤部分のみを分解し、鍵盤がディスプレイの直下に位置するよう固定している。また、本キーボードで打鍵された演奏データは MIDI ケーブルを通して MIDI データ形式で PC に送信される。提示するコンテンツはプログラミング言語で

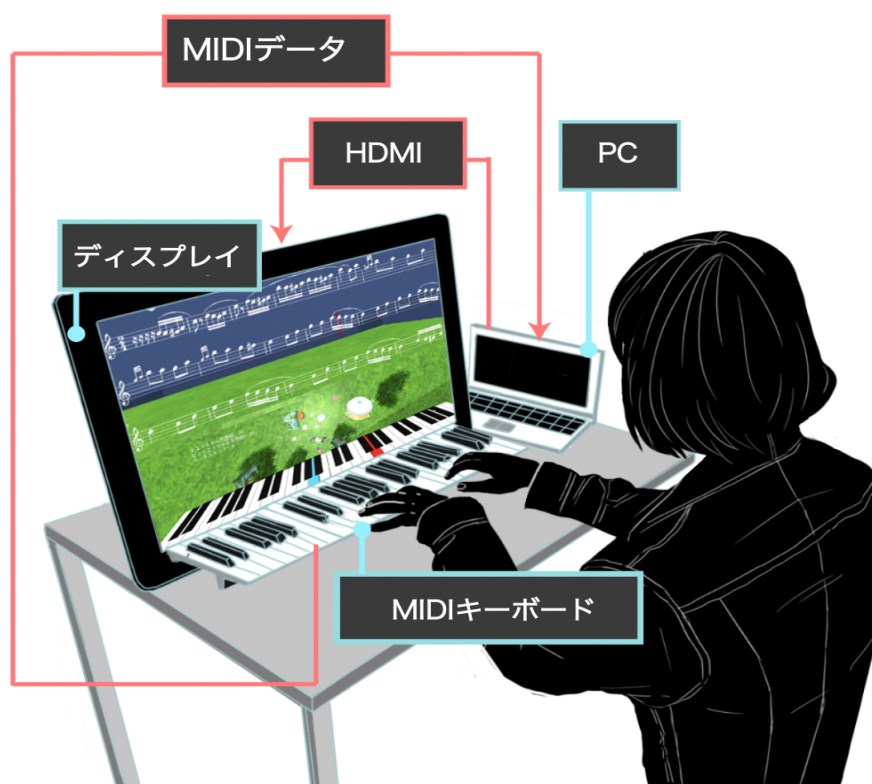


図 5.1: 提案システム

ある C# を用いて、Unity で実装している。MIDI ピアノから入力された MIDI データは、unity-midi-input のプラグインで読み込まれる。

5.3.1 設計概念

提案システムでは、学習者はゲームの進行に合わせて課題曲を練習し、ゲームのシナリオに合わせて意図的に間違った鍵盤を打鍵させることで、ゲーミフィケーションによる記憶の再固定化を目指している。学習者は、ゲームをしながら課題曲を練習できるので、自身が再固定化を行っていることに気がつかない。打鍵を運動として認識し、記憶することは、課題曲の練習にとって有効である。

5.3.2 学習者に提示される情報

学習者には図 5.2 に示すコンテンツを提示する。図中の番号は、以下の番号の項目に対応している。

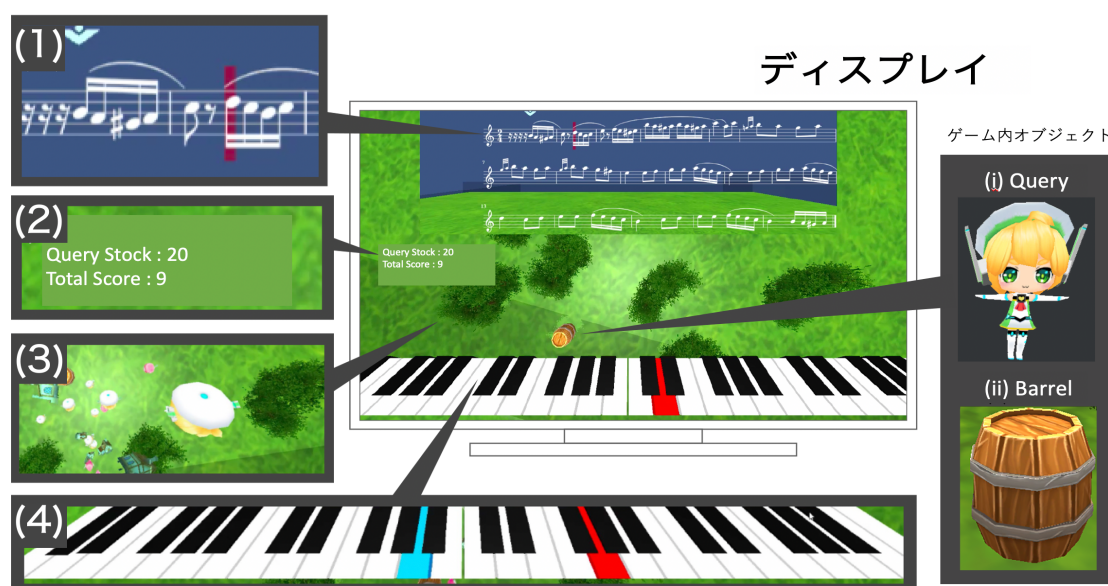


図 5.2: 提案システムのスクリーンナップショット

(1) 表示される楽譜

楽譜はコンテンツの上部に表示される。演奏を開始する音符の上には、下向きの水色の矢印 (1) が表示されている。次に弾くべき音符の上には、半透明の赤い四角形が重なって表示されている。本システムでは、学習者が打鍵を間違えても、正しい (true) 音が出力され、次の音へと演奏が進行する。どの鍵盤を打鍵しても正しい音が出力されるという点は、大島ら [70] の「Coloring-in Piano」や、竹内ら [72] の「Two Finger Piano」から着想を得ている。

学習者が間違えた打鍵をしても正しい音が出力されるという本手法は、音楽学習のカリキュラムとして広く知られている「スズキ・メソッド」とは正反対の手法である。スズキ・メソッドは主に、子どもたちが規則的な段階を経て、音楽を学ぶことを目的としている。学習段階の子どもに対して、「打鍵位置と異なる音を出力する」という操作を行うと、正しく音高を判断する能力が身に付かない。しかし、本研究の主な対象は、大人の初学者である。通常、学習者は打鍵を動作として認識し、1つの楽曲を通して演奏する。大人は過去の成功体験に基づいて学習する傾向があるので、1曲を通して演奏できることは、彼ら自身にとって報酬となる。学習を継続する上で、1曲を演奏できるようになった、という報酬はモチベーションを維持するためにも重要である。したがって本研究では、学習者のモチベーションを維持するために、打鍵の操作にかかわらず、正しい音高を出力する操作を取り入れることが正解である。

課題曲として W.A. モーツァルトの「トルコ行進曲」(K.331) の冒頭から 17 小節目までを使用した。

本システムを利用するピアノ初学者の定義は以下の通りである。

- 課題曲「トルコ行進曲」(K.331)の単音のみで構成された楽譜を読むことができる。
- 楽譜を見ても、ピアノの鍵盤との対応付けができない。

(2) - (3) ゲームモードのキャプチャ

提案システムは、ユーザが自然に再固定化を行うことができるゲームモードを備えている。ゲームモードでは、後述するように、スコア(2)を獲得することがユーザへの報酬となる。ゲームのスコアは、打鍵によって生成されたキャラクターのオブジェクト数(3)と、打鍵の時間によって決定される。打鍵中は2秒に1回キュー音が鳴り、打鍵時間がこの時間を超えると、1秒に1ポイントの割合でスコアが減算されていく。また、現在生成されているキャラクターオブジェクトの数も記録されている。

(4) 仮想キーボード

画面上には仮想のキーボードが表示される。また、本物のMIDIキーボードは画面上のキーボードに対応する位置に取り付けられている。仮想キーボードでは、次の打鍵位置が赤で表示され、学習者が打鍵した位置が青で表示される。これらの機能により、学習者は打鍵位置を視覚的に記憶して学習を進めることができる。

5.3.3 ゲームモードの説明

本システムで提案するゲームは、ゲーム内のスコアを減少させるBurrelオブジェクト((ii)図5.2)を打鍵の操作で回避し、Queryオブジェクト((i)図5.2)を打鍵の操作で増加させてゲームスコアを獲得するゲームである。図5.2の(4)では、Burrelオブジェクト((ii)図5.2)をタイミングよく避ける必要がある。Burrelオブジェクト((ii)図5.2)に衝突すると、ゲーム内のスコアが減少するため、ユーザは意図的にBurrelオブジェクト((ii)図5.2)を避ける必要がある。ゲーム内での再固定化の操作は以下の通りである。打鍵すべき鍵盤にBurrelオブジェクトが接近する。学習者は正しい打鍵位置を知っているが、Burrelオブジェクトを避けるために、意図的に間違った鍵盤を打鍵する。学習者がゲームを進めるために、意図的に間違った鍵盤を打鍵すること、また学習者自身がその事実気づくことで、正しい打鍵位置を再確認するようになる。これにより、学習の効率を高めることができる。

5.4 ユーザスタディ

再固定化を用いた提案システムの有用性を検証するために、ユーザスタディを実施した。

5.4.1 被験者

実験には当初 17 名の被験者が参加した。実験初日の最初に、スクリーニング用の追加テストを開始し、その時点で 90%以上のスコアを獲得していた被験者は、第一段階の演奏に苦戦していないと判断し、その後の実験では除外した。そのため、被験者の演奏能力はある程度均一化されている。そこで、全 17 名のうち、12 名を実験の対象とした。この 12 名の被験者を、6 名ずつの 2 つのグループに分類した。True グループは True モードのみを使用し、Game グループは True モードと Game モードの両方を使用し、指示されたときにモードを切り替える。実験は、被験者全員が楽譜を読むことができ、かつピアノ初学者であることを確認した上で実施した。本研究では、ピアノ初学者とは、楽譜に書かれた音符を見て、それに対応する鍵盤の位置を想像することができない人、と定義している。被験者には約 10 分間の実験を行い、システムの使い方を理解してもらった。実験では、演奏する音の MIDI ノートナンバーと被験者が演奏した MIDI ノートナンバー、現在の学習モード、システム起動開始からの経過時間、学習した楽曲のスコア、ゲーム内のスコアを記録した。

5.4.2 実験方法

被験者は練習として、トルコ行進曲の楽曲を約 5 分の休憩を挟んで演奏した。練習ではトルコ行進曲を 17 小節目まで 3 回演奏し、右手だけで合計 252 音を演奏している。練習では、楽譜の音符を見て、その音符から鍵盤上の打鍵位置を覚えることを目的としている。3 回の演奏のうち、1 回目の学習では、両グループの被験者とも、True モードを割り当てて練習してもらった。2 回目の学習では、True グループは True モードで、Game グループは Game モードで練習をした。3 回目の学習セッションでは、両グループとも 1 回目の学習セッションと全く同じ練習を実施してもらった。その後、到達度テストとして、トルコ行進曲を 17 小節目まで、鍵盤上の打鍵位置の指示なしに演奏してもらった。両グループとも、各回のセッションから 24 時間以上が経過している。これは適切に記憶の再固定化を行うために必要な時間である [67]。Game グループの 1 回のセッションにおいて、被験者に、Barrel オブジェクトを避けて再固定化の操作をさせる回数はランダムである。

また、実験終了後にはモチベーションに関する調査や、被験者が練習を楽しめるようになったかどうかを尋ねるためのアンケート調査を実施した。

5.4.3 実験結果

到達度テストの獲得したゲーム内スコアの平均点を 84 点満点から 100 点満点に換算したものを図 5.3 に示す。縦軸は到達度テストの獲得スコア、横軸は各グループごとの結果を表している。各グループの到達度テストの平均点を比較すると Game グループは 92%、True グループは 77%であった。有意水準 5%で student の t 検定を実施したところ、Game グループと True グループの間に有意差が認められた ($t(5) = 2.55, p = 0.03ta$)。

Game グループのゲーム内スコアの平均得点は 353.4 点であるが、それに対して到達度テストの平均得点は 77.3 点となっている。ゲーム内スコアと到達度テストのスコアには非常に高い相関関係があることがわかった ($r = 0.80, p = 0.03$)。また、Game グループ

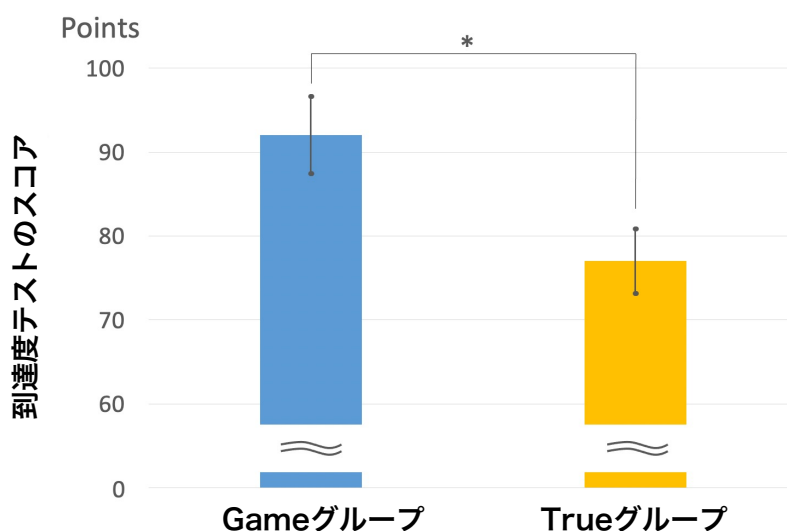


図 5.3: 両グループの平均スコア

と True グループの学習終了までの平均所要時間を比較すると、Game グループの平均所要時間は 12.5 分、True グループの平均所要時間は 14.1 分であることがわかった。したがって、Game グループと True グループの所要時間の間には相関関係は見られなかった ($r = 0.35, p = 0.44$)。

したがって、提案システムの Game モードは、良い演奏方法を身に付けるために有効であることが判明した。このことから、提案した再固定化を考慮したピアノ学習支援システムは、従来のような単調なピアノ学習よりも効率的であることが推察できる。今後はより多くの被験者でユーザスタディを実施し、様々な難易度の課題曲で実験を行うことで、より、本手法の有効性が証明できる。

実験後に実施したアンケートの結果を、表 5.1 に示す。表中の MOTIVATION は「提案システムでモチベーションを維持できるか」という質問項目である。被験者は 1 から 5 の 5 段階で回答でき、1 に近いほどモチベーションを維持できない、5 に近いほどモチベーションを維持できる、という設計である。表中の ENJOYMENT は「提案システムを利用して楽しさを感じられたか」という質問項目である。被験者は 1 から 5 の 5 段階で回答でき、1 に近いほど楽しさを感じることができず、5 に近いほど楽しさを感じることができると、という設計になっている。

MOTIVATION と ENJOYMENT の質問では、どちらも Game グループの方が高いスコアを示した、したがって提案システムのゲームモードは使っていて楽しく、学習者の学習意欲を持続できるものであると推察できる、この結果は Game モードの Barrel を回避する回避ゲームが、ゲームとして十分に面白かったことを示している、また、アンケートの自由記述欄に寄せられたコメントを見ると、True グループでは、学習が退屈であったという否定的な意見が多かった。一方で、MOTIVATION ($U = 14.0, p > 0.05$) と ENJOYMENT ($U = 17.0, p > 0.05$) のアンケート結果にマンホイットニーの U 検定を適用したところ、どちらも 2 つのグループ間で有意な差は見られなかった。

表 5.1: アンケート結果

グループ名	MOTIVATION	ENJOYMENT
Game グループ	4.6	4.1
True グループ	4.1	3.4

5.4.4 考察

実験結果から、提案した方式を使用したグループは効率的に上達したといえる。しかし、提案システムには議論すべき課題が存在する。

間違った鍵盤を打鍵することによる学習への影響

通常、間違った鍵盤を打鍵することはよくないとされる。スズキ・メソッドのような伝統的な音楽教育手法においては、鍵盤と音の対応関係を重視している。これらの考え方は、音楽的にごく正当であり、正しいものである。特に幼児期においては音名と鍵盤を性格に対応させることは重要であるとされている。一方、本研究で提案しているシステムは大人を対象としており、ユーザスタディの被験者も大人の初学者である。大人の場合は鍵盤と音の対応関係を覚えることよりも、いち早く課題を終わらせることが目的となる。この理由として、大人は間違った鍵盤や音が、ゲームの進行のために意図的に行われる操作であることを認識できていることが挙げられる。しかし、今後提案システムを広く普及させるためには、鍵盤と音の対応関係を学習する方法も開発する必要がある。

被験者が提案システムの目的に気づいていたかどうか

今回のユーザスタディでは、被験者はゲームの操作に夢中になっていて、再固定化を利用した学習というシステムの真の目的を意識していなかった。システムの目的を伝えることにより、実験の結果に大きな影響を及ぼすと考えたため、実験では敢えてシステムの目的や、再固定化方についてを伝えていなかった。

モチベーションと熟達の関係

最後に、やる気と熟達の関係性について考察する。今回の実験では、練習に対するモチベーションについても調査した。提案システムでは、ユーザは毎日熟達し、モチベーションを維持することができた。しかし、今回の実験では、熟達とモチベーションの関係を明らかにできなかった。これは、提案したシステムの効果によって被験者がモチベーションを維持したのか、それとも被験者の熟達そのものが各被験者のモチベーション維持に役立ったのかを判別できないためである。したがって今後は、システム自体がモチベーション維持に役立つのか、学習者の熟達そのものがモチベーションの維持に役立つのかを見極めるための実験も必要である。

5.4.5 議論

本研究で実施したユーザスタディ詳細について、議論が必要な点が存在する。具体的には、Burrelの爆発の回数とタイミング、つまり再固定化の操作が適切であったかどうかである。本ユーザスタディでは、Burrelオブジェクトの出現回数とタイミングを関数でランダムに制御した。実験の結果、再固定化操作を実施したグループの方が、実際の学習効率が優れていることが判明した。出現をランダムに制御した目的は、被験者間の値の偏りを防ぐためである。しかし、ピアノの練習において、「再固定化操作を何回行うことが有益であるか」という点についてはいまだ不明である。例えば、再固定化操作を10回取り入れたグループと3回取り入れたグループでは、練習効率が異なる可能性がある。また、操作のタイミングによっても効果が異なる可能性がある。練習の最初の3分間に再固定化操作を取り入れたグループと、最後の1分間に再固定化操作を取り入れたケースとでは、効果の偏りが異なる可能性も十分にある。そのため、最適な再固定化操作を行うためには、出現の回数やタイミングを考慮する必要がある。最適な再固定化操作の回数を見つけるためには、多数の被験者をグループに分け、それぞれが指定された回数の再固定化操作を行う、という実験を実施して検証する必要がある。

再固定化操作によって、学習者の頭の中に固定されている打鍵の情報が一度崩壊される。これは、学習者が本来、頭の中で再生する情報を再考し、記憶を整理することに相当する。そのため、学習者は打鍵すべき鍵盤を再確認することができる。学習過程の曖昧な部分を認識することで、打鍵の記憶をより強力に定着させることができると推察される。さらに、再固定化操作の挿入は、曲中のいずれのタイミングでも実施できる。一般的に、生演奏においては演奏者が予期しない場面で演奏ミスが発生する。「うまく弾けるだろう」と思っていたところで想定外のミスが生じると、演奏者は大きく動揺する。しかし、提案システムのように、学習者が再固定化を取り入れて学習を続けていた場合、想定外の箇所でミスを起こさざるを得ない状況が練習の段階で発生する。そのため、生演奏の場において想定外のミスが発生した場合に、従来手法の練習を続けたときよりも、突発的な対応ができる可能性がある。このような生演奏での予期しないミスに対処するためのシステムとしては、横山ら [62] の研究が存在する。

通常、1つの楽曲を練習するには、1週間や1ヶ月といった長い期間が必要となる。しかし、今回の実験では、被験者は合計3日間しか練習していない。短期間の練習では、練習方法によるモチベーションや熟達度合いに差が生じにくいと考えられる。また、練習時間が短いと、本研究における提案手法では、長期間継続した場合の効果が不明瞭である。そのため、1週間や1ヶ月といった長時間の実験で、提案した再固定化を用いた手法が有用であることを証明する必要がある。

5.4.6 まとめ

本研究では、ピアノ初学者のための再固定化を考慮した学習支援システムを提案した。提案システムでは、ゲーミフィケーションをピアノ学習支援システムに取り入れ、ユーザが無意識に再固定化を利用しながら練習できるシステムを設計した。提案システムによって、学習者は再固定化操作を認識することなく、ゲーム感覚でピアノの運動技能を習得できる。ユーザスタディの結果、提案システムを利用した学習グループは、従来の手法を用

いた学習グループよりも効率的に学習できることが判明した。今後の課題としては、被験者数の増加や長期的な学習への利用。他課題曲での練習などが挙げられる。対象者数や練習日数を増やすことで、提案手法によるゲーミフィケーションや再固定化方の有用性が確立できる。また、複数の課題曲を扱うことで、学習者は様々な演奏技術を身に付けることができる。

第6章 結論

6.1 遠隔レッスンにおける提案システムの重要性

本論文ではこれまで、4つの提案システムにおける遠隔レッスンの支援方法について記述した。本節では、これら提案システムの重要性と、各システムの有機的な統合について議論する。1章で述べたように、遠隔ピアノレッスンでは生徒と教師が対面していないため、レッスン中のコミュニケーションの難しさ、同室感や対面感の欠如という課題が生じる。これらの課題はそれぞれ、レッスンの効率低下、独習のモチベーション低下という問題を引き起こす。本研究では、「遠隔レッスン時支援」と「独習時支援」の2つの側面からこれらの問題を解決し、効果的な遠隔レッスンの教授支援基盤技術の構築をめざしてきた。これら2つの側面からの支援は、システムとしては独立しているものの、遠隔環境においてピアノを教授するという点において、相乗効果的に作用することが見込める。「遠隔レッスン時支援」に該当するシステムや機能を使用して遠隔レッスンを実施し、生徒はそのレッスンの録画を振り返ることもできる。「独習時支援」に該当するシステムや機能を使用して独習を進めた生徒は、次のレッスンまでに指摘された箇所を効率的に修正できるため、実時間の遠隔レッスンの効率を向上できる。このように、「独習時支援」の機能を使用して独習の効率を向上させることで、遠隔レッスン時に前回の注意点や指摘箇所を再確認する必要がなくなる。また、「遠隔レッスン時支援」の機能を使用して効率的にレッスンを進めることは、レッスンの質の向上に繋がり、独習時に学習すべき事項や箇所が明確となるため、結果的に独習時の学習効率向上も期待できる。したがって、これら2つの支援側面は相乗効果的に作用するため、本研究が提案する各システムには、必然性があるといえる。

また、各システムが提案している機能は新規的、かつ独創的ではあるものの、本質的にはこれまでに音楽教育で実施されてきたカリキュラムや伝統に則っている。例えば、共同注視支援システムに関しては、システムの補助はあくまでレッスン時のコミュニケーションを補助することに留まっている。また、悪癖検出システムは、教師が悪癖を発見するプロセスを簡略化し、候補を提示することがシステムの機能であり、最終的な悪癖の判断や指導は教師が実施する。「独習時支援」に該当する課題曲合格日予測システムに関して、師事している教師の演奏にどれだけ生徒の演奏が近づいたかという評価指標は、従来の対面が主となるピアノ学習においても、恒常的に用いられてきた。

ピアノレッスンは、多くの演奏家や専門家により知識が蓄積、洗練されてきた。また、生徒の演奏レベルに関して、初学者からプロの演奏家まで多岐にわたる。演奏技術には言語で明確に定義することが難しいものも多く含まれるため、レッスンの現場では暗黙知的に感覚で教わる内容も多い。そのため、古来から蓄積されてきたレッスンのノウハウや演奏の暗黙知を効果的に伝授するためには、伝統的な手法を踏襲しつつ、それを阻害しな

い範囲で支援をすることが重要である。今後、革新的な ICT 技術の登場などによりシステムのアルゴリズムが大きく変化しても、提案システムの根本的な課題解決の考え方に関しては、大きく変化することは少なく、本研究における支援は伝統的な教授方法を踏襲した、支援方法であるといえる。

提案システムの登場によって、遠隔ピアノレッスンが実用的となり、学習者にとっては対面と等価な選択肢となり得る。つまり、提案システムはピアノレッスンを遠隔手法のみに限定するというものではなく、対面と遠隔を越境した学習環境を提供できる。また、提案システムは過去の学習を記録し、振り返ることで過去と現在を、現在の演奏から未来の完成度を予測することで、現在と未来を、それぞれ越境できる。このように対面と遠隔、過去と現在、現在と未来を越境する学習モデルを NON-DIVISION LEARNING (NDL) モデルと定義する。図 6.1 に、NDL モデルによるピアノ学習環境の変化を示す。NDL モデルでは、学習者は長い学習の過程で、対面と遠隔を状況に合わせて「今週は対面で、来週は遠隔」のように自由に選択できる。同様に、自宅における独習についても、提案システムによる支援の有無を自分の状況に合わせて選択することができる。このように、NDL モデルは対面や遠隔など個々の学習ドメインの壁を取り払い、時間の壁をも超えた学習環境を提供できる。

学習環境が対面か遠隔か、という問題はどちらにも利点と欠点が存在する。そのため、本研究によって、遠隔を主とした学習環境の整備は、遠隔環境におけるピアノ学習の地位を向上できたと推察できる。したがって、提案システムは、遠隔ピアノレッスンにおける教授支援の基盤を確立し、統合的にピアノ学習を支援することに寄与したといえる。

6.2 ピアノ以外の学習ドメインにおける本研究の適用

本研究では、遠隔レッスンにおける教授支援基盤技術を構築し、個々の学習ドメインや時間を越境して学習ができる NDL モデルを提唱した。本研究における局所的な技術に関しては、ピアノ学習にのみ特化している。一方で、システム構築に関する基幹的な学習支援方法などは、他の学習ドメインにおいても十分に適用できる。聴覚など限られた情報を、視覚など他の情報に置き換え、提示することは、ピアノ学習以外にも幅広く適用でき、効率的に学習を支援できる。また、教師の演奏と、生徒の演奏の類似度を比較してゴールを算出するという考え方は、ピアノ以外の学習ドメインにも応用できる。例えば、絵画や彫刻などの、正解が個々人の基準によって定まるような学習ドメインにおいての応用が期待できる。したがって、本研究において構築した技術と支援方法は、他の楽器や芸術分野にとどまらず、スポーツやプログラミングなど、幅広い学習ドメインへの応用が考えられる。

6.3 提案システムの限界と検討課題

本研究では 4 つのシステムから構成される、遠隔ピアノレッスンの教授支援基盤技術を構築した。提案システムは現状、遠隔レッスン時に起こり得る課題を網羅的に支援できる。一方で、これらの機能やシステムのみで、遠隔レッスンの全ての問題が解決しているとはいえない。本システムを、実際に長期的な遠隔レッスンの現場で運用しなければ浮上しない問題点や、解決すべき課題が存在する。今後は、提案システムの支援のみでは足りない

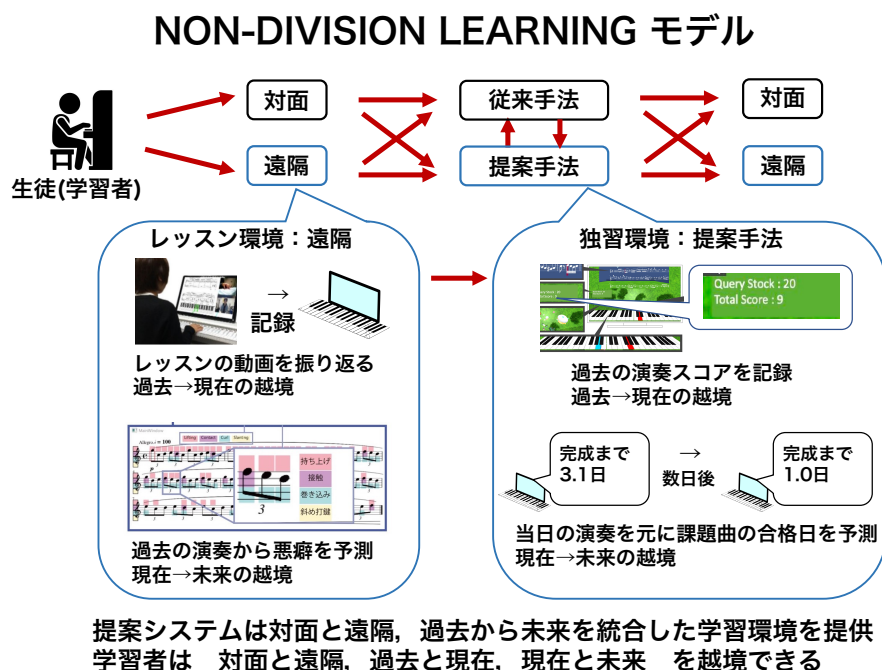


図 6.1: NON-DIVISION LEARNING モデルによるピアノ学習環境の変化

具体的な事例を明らかにすることで，新たにシステムの設計方針や追加機能を検討する予定である。

6.4 本論文のまとめ

本論文では，遠隔レッスンにおける教授支援基盤技術の構築について議論した。まず，第1章では，ピアノを学ぶ上でのレッスンを受講する重要性とその難しさについて説明し，近年の遠隔レッスンの動向と遠隔レッスンに関連する問題について議論し，本研究の目的を明らかにした。

第2章では，実時間の遠隔レッスンにおける共同注視を支援し，複数カメラのスイッチングを自動化する共同注視支援システムの構築について述べた。提案システムは楽譜への指さしや，打鍵位置の視覚的な共有により，遠隔環境においても指示語を用いた簡潔なコミュニケーションができる。また，カメラの視点数と見やすさのトレードオフを解消するための，自動カメラスイッチング機能を有する。これらにより，従来のビデオ通話を利用した遠隔レッスンよりも，効率的な遠隔レッスンが可能であることを証明した。

第3章では，ピアノ教師向けのシステムである，悪癖自動検出システムの構築について述べた。提案システムは，視覚的なアプローチによってピアノ教師の悪癖発見を補助できる。また，深層学習を用いて，悪癖の種類と出現箇所を自動で楽譜上にアノテーションする機能をもつ。提案システムを使用した提案手法群において，悪癖発見の効率化が期待できる。

第4章では，生徒が自宅での独習時に使用することを想定した，課題曲合格日予測シス

テムの構築について記述した。提案システムの予測モデルは比較的高い精度で合格までの予測残り日数を出力できる。教師ごとに異なる評価基準を持っていても、目標とする演奏との類似度を比較することで、各教師の評価基準と等価な予測結果を出力することができる。また、生徒は合格までの日数が可視化されることで、学習の継続が容易になることも考えられる。

第5章では、ゲーミフィケーションを応用し、記憶の定着方法の一つである、再固定化学習システムの構築について述べた。ピアノの打鍵を運動技能とみなして、再固定化を取り入れた提案システムは、従来の方法よりも効率的に課題曲を習得できることが示唆された。また、ゲーミフィケーションを取り入れたことにより、学習のモチベーション維持にも役立つことが推察できた。

本研究で構築した提案システムは、対面と遠隔、過去と現在、現在と未来を越境して学習できる。このような、越境して学習できる学習環境のモデルを NON-DIVISION LEARNING モデルと定義した。

本研究では、独習時支援とレッスン時支援の両面から、遠隔レッスンにおける教授支援基盤技術の構築について提案してきた。しかし、いずれも基礎的な研究にとどまっており、実際にサービスとしての運用などは今後の課題として残されている。今後はこれらの研究を元とした遠隔レッスン支援サービスを立ち上げ、本研究の実運用を目指していきたい。また、実運用を通して遠隔レッスンの特性をより深く理解し、提案システムのさらなる強化や、新たな着想による問題解決を実現できる。構築したシステムを実生活で応用することで、ピアノが弾ける人を増やし、誰もがピアノを楽しく学べる環境づくりに注力していきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、博士論文指導教員の竹川佳成准教授からは、終始懇切なる厳しくも優しい、熱心なご指導をいただきました。ここに竹川佳成准教授に衷心より感謝申し上げます。竹川佳成准教授のご指導がなければ本研究は遂行できませんでした。竹川佳成准教授には、学部から社会人を経て、博士課程にわたり辛抱強くご指導を賜りました。竹川佳成准教授のご指導の下での貴重な体験は、研究者としてだけでなく、今後の人生の糧になったと確信しております。

同様に、研究に対して的確に指導して下さった平田圭二教授に心より感謝申し上げます。修士課程においては指導教官を引き受けて頂き、懇切なるご指導と惜しみない助言を頂きました。平田圭二教授のもとで学んだ多くの技術と知識は、常に自身を助ける術となっております。

公立はこだて未来大学 鈴木恵二教授、同大学 寺井あすか教授には、本博士論文の審査委員をご快諾戴き、数々の御助言とご指導を賜りました。

本研究を推進するにあたり、直接の御指導、御助言、御討論を頂きました、mplusplus 株式会社 CTO 柳沢豊博士に深く感謝いたします。日頃から気にかけて頂き、快適な研究生活を過ごすことができたと共に、深い知識と技術を身に付けることができました。

本研究を進める上で惜しみない御助言や実験等への御協力を頂きました、mplusplus 株式会社の皆様に心よりの感謝を申し上げます。mplusplus 株式会社の皆様の御協力がなければ、本研究は遂行できませんでした。

日常の議論を通じて多くの御助言や示唆を頂いた平田♪竹川研究室の皆様に感謝いたします。皆様と一緒に苦楽を共にし、多くの議論をしてきたことは、私にとってかけがえのない財産となりました。

本研究の一部は、JST CREST JPMJCR18A3 の助成を受けて行われました。ここに感謝の意を記します。

最後に、博士課程入学直前まで暖かい御支援と多大なる御理解を頂いた母 松井綾子氏 (故人) に心からの感謝と御礼を申し上げます。

発表・採録実績

学術雑誌

- [I] 松井遼太, 竹川佳成, 平田圭二, “Tel-Gerich: 共同注視およびカメラスイッチングに着目した遠隔ピアノレッスン支援システム”, ヒューマンインターフェース学会論文誌特集号, Vol.20, No.3, pp.321-332, 2018(査読あり).
- [II] 松井遼太, 長谷川麻美, 竹川佳成, 平田圭二, 柳沢豊, “ピアノ教師向け悪癖発見支援システムの設計と実装および評価”, 情報処理学会論文誌特集号, Vol.61, No.4, pp.789-797, 2020(査読あり).
- [III] 松井遼太, 竹川佳成, 平田圭二, 柳沢豊, “ピアノ学習における課題曲合格時期予測システムの構築”, 情報処理学会論文誌特集号, 2022(掲載決定).

国際会議

- [I] Ryota Matsui, Yoshinari Takegawa, Keiji Hirata, Yutaka Yanagisawa, “Remote Piano Lesson System Considering Camera Switching”, International Computer Music Conference, Paper ID:540, 2019(査読あり).
- [II] Ryota Matsui, Marimo Kumaki, Yoshinari Takegawa, Keiji Hirata, Yutaka Yanagisawa, “Proposal of a Piano Learning Support System Considering Gamification Based on Reconsolidation”, 24th International Conference on Human-Computer Interaction, 2022(掲載決定).

国内会議・研究会

- [I] 松井遼太, 竹川佳成, 平田圭二, “複数カメラのスイッチング半自動化機能をもつ遠隔ピアノレッスン支援システム”, インタラクティブシステムとソフトウェア XXII: 日本ソフトウェア科学会 WISS2017, 2017(査読あり).
- [II] 松井遼太, 竹川佳成, 平田圭二, “最適な多視点カメラワークを自動生成する遠隔ピアノレッスン支援システムの設計と実装”, 情報処理学会研究報告, 2017-MUS-114, No23, 2017(査読なし).
- [III] 松井遼太, 竹川佳成, 平田圭二, 柳沢豊, “学習者の習得度を予測するピアノ学習支援システムに向けた演奏習得度判定モデルの構築”, 情報処理学会研究報告, 2020-MUS-126, No12, 2020(査読なし).

その他メディア等

- [1] 松井遼太, “ピアノレッスン♪ オンラインでも臨場感”, 北海道新聞 (2021年2月22日).

参考文献

- [1] Y. Takegawa, T. Terada, and M. Tsukamoto, “A Piano Learning Support System Considering Rhythm”, Proceedings of International Computer Music Conference, pp.326-332, 2012.
- [2] 総務省統計局：平成 26 年経済センサス-基礎調査結果
<http://www.stat.go.jp/data/e-census/2014/>
- [3] 総務省統計局：社会生活基本調査
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL02100104.do?tocd=00200533>
- [4] ヤマハ株式会社：ヤマハ音楽教室
<http://www.yamaha-mf.or.jp/t-audition/sys/school/>
- [5] 株式会社スモールブリッジ：オンライン習い事サイト カフェトーク
<https://cafetalk.com/?lang=ja>
- [6] プラスアド株式会社：オンライン楽器レッスングジョイル
<http://www.plus-add.com/ja/service/>
- [7] 河合楽器製作所：簡単!ピアノマスター
<http://www.kawai.co.jp/cmusic/products/pm/index.html>
- [8] 一般社団法人全日本ピアノ指導者協会: ピティナ e-ラーニング
<http://www.piano.or.jp/seminar/elearning/>
- [9] 一般社団法人全日本ピアノ指導者協会: オンラインレッスン Q&A
https://research.piano.or.jp/series/KeepOnMusic/2020/04/onlinelesson_qa.html
- [10] FineAllies 株式会社：最高の先生から学ぶオンラインピアノレッスン ピアノピクニック
<https://www.pianopicnic.net/>
- [11] Skoove : Online piano lesson.
<https://www.skoove.com/en?>
- [12] Evan Strasnick, Austin Chambers, Liu Jiang, Xiaonan Tong, Stanford University(Unpublished Work).
<http://cs.stanford.edu/people/estrasni/research/pianolens/>

- [13] CASIO : Glowing navigation keyboard
<https://casio.jp/emi/products/lk511/>
- [14] 大島千佳, 井ノ上直己, “不得手要素を克服させるピアノ学習支援システムにむけて”, 情報処理学会研究報告, 2007-MUS-71, Vol.2007, No.81, pp.185–190, 2007.
- [15] M. Mukai, N. Emura, M. Miura, and M. Yanagida, “Generation of Suitable Phrases for Basic Training to Overcome Weak Points in Playing the Piano”, Proceedings of International Congress on Acoustics, MUS-07-018, 2007.
- [16] T. Kitamura, and M. Miura, “Constructing a Support System for Self-learning Playing the Piano at the Beginning Stage”, Proceedings of International Conference on Music Perception and Cognition, pp.258-262, 2006.
- [17] S. Akinaga, M. Miura, N. Emura, and M. Yanagida, “An Algorithm to Evaluate the Appropriateness for Playing Scales on the Piano”, Proceedings of International Congress on Acoustics, MUS-07-005, 2007.
- [18] S. Akinaga, M. Miura, N. Emura, and M. Yanagida, “Toward Realizing Automatic Evaluation of Playing Scales on the Piano”, Proceedings of International Conference on Music Perception and Cognition, pp.1843-1847, 2006.
- [19] 森田慎也, 江村伯夫, 三浦雅展, 秋永晴子, 田益造, “演奏特徴の強調およびアドバイス文呈示によるピアノ基礎演奏の独習支援”, 日本音響学会平成 20 年度秋季研究発表会, pp.933–934, 2008.
- [20] R. Dannenberg, M. Sanchez, A. Joseph, P. Capell, R. Joseph, R. Saul, “A Computer-Based Multi-Media Tutor for Beginning Piano Students”, Journal of New Music Research, Vol.19, No2-3, pp. 155-173, 1990.
- [21] Y. Takegawa, M. Tsukamoto, and T. Terada, “Design and Implementation of a Piano Practice Support System using a Real-Time Fingering Recognition Technique”, Proceedings of International Computer Music Conference, pp.1-8, 2011.
- [22] Y. Takegawa, T. Terada, and M. Tsukamoto, “Design and Implementation of Piano Performance Learning System Considering Withdrawal from System Support”, Computer Software(Journal of Japan Society for Software Science and Technology), Vol.30, No.4, pp.51–60, 2013.
- [23] ヤマハ株式会社: NETDUETTO
<http://www.y2lab.com/project/netduetto/>
- [24] 葛岡英明, 庄司裕子, “空間型共同作業の評価手法の提案とその利用”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.77, No.6, pp.915-922, 1994.
- [25] 藤重想, 山崎剛, 呉洋, 岡田謙一, “演出家による舞台役者への遠隔演技指導支援”, 情報処理学会研究報告, Vol.2014-HCI-157, No.44, pp.1-6, 2014.

- [26] 樋口啓太, 米谷竜, 佐藤洋一, “遠隔作業支援シナリオにおける中止位置可視化の効果”, Workshop on Interactive Systems and Software 2015(WISS2015), Vol.76, 2015.
- [27] B. Scassellati, “Imitation and Mechanisms of Joint attention: A Developmental Structure for Building Social Skills on a Humanoid Robot”, International Workshop on Computation for Metaphors, Analogy, and Agents, Vol.1562 Springer Lecture Notes in Artificial Intelligence, pp.176-195, 1999.
- [28] C. Goodwin, “Professional vision”, Journal of American Anthropologist New Series, Vol.96, No.3, pp.606-633, 1994.
- [29] 平田圭二, “未来の電話を考える-遠隔コミュニケーションシステム t-Room”, NTT 技術ジャーナル, pp.10-12, 2007.
- [30] ヤマハ株式会社 : Disklavier 製品情報
https://jp.yamaha.com/products/musical_instruments/pianos/disklavier/enspire_pro/index.html#product-tabs
- [31] ヤマハ株式会社 : フライブルク音楽大学の “ リモート入試 ” にヤマハが協力
https://www.yamaha.com/ja/news_release/2020/20061701/
- [32] N. B. Kruse, S. Harlos, R. M. Callahan, M. L. Herring, “Skype music lessons in the academy: Intersections of music education, applied music and technology”, Journal of Music Technology and Education, Vol.6, pp.43-60, 2013.
- [33] G. Comeau, Y. Lu, and M. Swirp, “On-site and distance piano teaching: An analysis of verbal and physical behaviours in a teacher, student and parent”, Journal of Music Technology and Education, Vol.12, pp.49-77, 2019.
- [34] 御木本澄子, “正しいピアノ奏法”, 音楽之友社, 2004.
- [35] R. Hiraga, R. Mizaki, and I. Fujishiro, “Performance Visualization: a New Challenge to Music Through Visualization”, Proceedings of the ACM international conference on Multimedia, pp.239-242, 2002.
- [36] S. W. Smoliar, J. A. Waterworth, and P. R. Kellock, “pianoFORTE: A System for Piano Education Beyond Notation Literacy”, Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia, pp.457-465, 1995.
- [37] R. Matsui, Y. Takegawa, and K. Hirata, “Tel-Grich:Remote Piano Lesson System Considering Joint Attention and Automated Camera-Switching”; *Journal of Human Interface Society*, Vol.20, pp.321-332, 2018.
- [38] 仲川正則, 齊藤葵, 村上和哉, 谷口竜, 黒田裕芳, 伊藤政彦, 矢嶋知己, 秦史壯, 中西崇文, “病院内行動ログおよび属性情報を用いた行動予測手法の実現”, 人口知能学会第33回全国大会, vol.33, 2019.

- [39] 兼重直文, “ヒートマップと動作追尾によるピアノ演奏基礎能力に関する研究 (中間報告)”, 日本音楽表現学会第 15 回大会, pp. 130, 2017.
- [40] K. Simonyan, and A. Zisserman, “Very deep convolutional networks for large-scale image recognition”, InICLR, 2015.
- [41] R. Ferguson, “Learning analytics: drivers, developments and challenges” International Journal of Technology Enhanced Learning, pp.304-317, 2012.
- [42] M. Brinkhuis, A. Savi, A. Hofman, F. Coomans, H. Maas, and G. Maris, “Learning As It Happens: A Decade of Analyzing and Shaping a Large-Scale Online Learning System”, Journal of Learning Analytics, Vol.5, No.2, pp.29-46, 2018.
- [43] F. Harrak, F. Bouchet, and V. Luengo, “From Students’ Questions to Students’ Profiles in a Blended Learning Environment”, Journal of Learning Analytics, Vol.6, No.1, pp.54-84, 2019.
- [44] A. Brennan, A. Sharma, and P. Munguia, “Diversity of Online Behaviours Associated with Physical Attendance in Lectures”, Journal of Learning Analytics, Vol.6, No.1, pp.34-53, 2019.
- [45] Q. Nguyen, M. Huptych, and B. Rienties, “Using Temporal Analytics to Detect Inconsistencies Between Learning Design and Students Behaviours”, Journal of Learning Analytics, Vol.5, No.3, pp.120-135, 2018.
- [46] M. Rodr ´iguez-Triana, A. Mart ´mez-Mon ´es, and S. Villagr ´a-Sobrino, “Learning Analytics in Small-scale Teacher-led Innovations: Ethical and Data Privacy Issues”, Journal of Learning Analytics. Vol.3, No.1, pp.43–65, 2016.
- [47] C. Steiner, M. Kickmeier-Rust, and D. Albert, “LEA in Private: A Privacy and Data Protection Framework for a Learning Analytics Toolbox”, Journal of Learning Analytics, Vol.3, No.1, pp.66-90, 2016.
- [48] C. Herodotou, B. Rienties, B. Verdin, and A. Boroowa, “Predictive Learning Analytics ‘At Scale’: Guidelines to Successful Implementation in Higher Education”, Journal of Learning Analytics, Vol.6, No.1, pp.85-95, 2019.
- [49] Z. Pardos, and L. Horodyskyj, “Analysis of Student Behaviour in Habitable Worlds Using Continuous Representation Visualization”, Journal of Learning Analytics, Vol.6, No.1, pp.1–15, 2019.
- [50] M. Shirvani-Boroujeni, and P. Dillenbourg, “Discovery and Temporal Analysis of MOOC Study Patterns”, Journal of Learning Analytics, Vol.6, No.1, pp.16-33. 2019.
- [51] Society for Learning Analytics Research : LAK 2017 “7th International Conference on Learning Analytics and Knowledge”, [Online], <http://www.wikicfp.com/cfp/servlet/event.showcfp?eventid=56877%E2%83%9Dc%20ownerid>

- [52] A. Gökhan, H. Mohammad, M. Rwitajit, C. Mei-Rong, F. Brendan, and H. Ogata, “Exploring Temporal Study Patterns in eBook-based Learning”, Proceedings of International Conference on Computers in Education, pp.342-347, 2020.
- [53] Z. Iqbal, J. Qadir, A. Mian, and F. Kamiran, “Machine Learning Based Student Grade Prediction: A Case Study”, Journal of Clinical Orthopaedics and Related Research, pp.1-22, 2017.
- [54] G. Kostopoulos, S. Kotsiantis, N. Fazakis, G. Koutsonikos, and C. Pierrakeas, “A Semi-Supervised Regression Algorithm for Grade Prediction of Students in Distance Learning Courses”, Journal of International Journal on Artificial Intelligence Tools, Vol.28, 1940001, 2019.
- [55] M. Weing, A. Rhlig, K. Rogers, and M. Weber, “P.I.A.N.O.: Enhancing Instrument Learning via Interactive Projected Augmentation”, Proceedings of ACM conference on Pervasive and ubiquitous computing adjunct publication UbiComp’13, pp.75–78, 2013.
- [56] L. Raymaekers, J. Vermeulen, K. Luyten, and K. Coninx, “Game of Tones: Learning to play songs on a piano using projected instructions and games”, Proceedings of Special Interest Group on Computer-Human Interaction 2014, pp.411-414, 2014.
- [57] M. Karola, W. Andreas, and K. Thomas, “Supporting Musical Practice Sessions Through HMD-Based Augmented Reality”, Proceedings of the Mensch and Computer 2019 - Workshopband, 2019.
- [58] M. Klepsch, B. Könings, M. Weber, and T. Seufert, “Fostering Piano Learning by dynamic mapping of notes”, Proceedings of EARLI SIG Text and comprehension, 2013.
- [59] D. Molero, S. Schez-Sobrino, D. Vallejo, C. Glez-Morcillo, and J. Albusac, “A novel approach to learning music and piano based on mixed reality and gamification”, Journal of Multimedia Tools and Applications, pp.165-186, 2020.
- [60] L. Gerry, S. Dahl, and S. Serafin, “ADEPT: Exploring the Design, Pedagogy, and Analysis of a Mixed Reality Application for Piano Training”, Proceedings of the 16th Sound and Music Computing Conference SMC 2019, pp.241-239, 2019.
- [61] J. Nonami, and Y. Takegawa, “Construction of a Support System for Learning Character Balance in Transcription for Beginners”, Proceedings of IEEE Global Conference on Consumer Electronics, pp.26–30, 2014.
- [62] Y. Yokoyama, and K. Nishimoto, “A piano Practice Support System for Preventing Performance Cessation Caused by Performance Errors”, Journal of Information Processing Society of Japan, Vol.2010, No.4, pp.205–208, 2010. (in japanese).

- [63] M. Kumaki, Y. Takegawa, and K. Hirata, “Design and Implementation of a Positioning Learning Support System for Violin Beginners, Using True, Vague and False Information”, *Journal of Information Processing Society of Japan*, Vol.2018, No.26, pp.285–293, 2018.
- [64] K. Nader, G.E. Schafe, and J.E. Le Doux, “Fear Memories Require Protein Synthesis in the Amygdala for Reconsolidation After Retrieval”, *Nature*, No.406, pp.722-726, 2000.
- [65] K. Nader, and O. Hardt, “A Single Standard for Memory: the Case for Reconsolidation”, *Journal of Nature Reviews Neuroscience*, No.10, pp.224–234, 2009.
- [66] N. C. Tronson, and J. R. Taylor, “Molecular Mechanisms of Memory Reconsolidation”, *Journal of Nature Reviews Neuroscience*, No.8, pp.262-275, 2007.
- [67] N. F. Wymbs, A. J. Bastian, and P. A. Celnik, “Motor Skills are Strengthened Through Reconsolidation”, *Journal of Current Biology*, Vol.26, pp.338-343, 2009.
- [68] M. P. Walker, T. Brakefield, J.A. Hobson, and R. Stickgold, “Dissociable Stages of Human Memory Consolidation and Reconsolidation”, *Nature*, No.425, pp.616-620, 2003.
- [69] N. Censor, M.A. Dimyan, and L.G. Cohen, “Modification of Existing Human Motor Memories is Enabled by Primary Cortical Processing During Memory Reactivation”, *Journal of Current Biology*, Vol.20, pp.1545-1549, 2010.
- [70] C. Oshima, Y. Miyagawa, and K. Nishimoto, “Coloring in Piano: A Piano that Allows a Performer to Concentrate on Musical Expression”, *Proceedings of the 7th International Conference on Music Perception and Cognition*, pp.707-710, 2002.
- [71] Y. Takegawa, Y. Fukuya, and H. Yanagi, “Design and implementation of a piano learning support system considering maintenance of motivation”, *Proceedings of Ed-Media 2016 World Conference on Educational Media and Technology*, pp.449–463, 2016.
- [72] Y. Takeuchi, H. Katayose, “Representation of Music Expression with Two Finger Piano”, *Journal of Information Processing Society of Japan*, Vol. 1995, pp.37-44, 1995.
- [73] E. Nakamura, K. Yoshii, and H. Katayose, “Performance Error Detection and Post-Processing for Fast and Accurate Symbolic Music Alignment”, *Proceedings of International Society for Music Information Retrieval*, pp.347-353, 2017.

付録A 遠隔レッスンユーザスタディにおけるレッスンのストーリーと提示内容

2章2.4節にて記述した遠隔レッスンユーザスタディにおいて、教師役に提示した実際のストーリーと提示内容を以下に記述する。

あなたは遠隔ピアノレッスンの教師役です。

以下のレッスンのストーリーの通りにピアノレッスンを進めてください。

ただし、生徒からの質問や意見があった場合には優先的に回答および指導を行ってください。

レッスンのストーリー

レッスンは以下の段階を踏襲して行っていきます。それぞれの段階の合格条件を満たした場合のみ、次の段階へとレッスンを進めてください。

第1段階

- ・まず最初に、教師役のあなたがお手本の演奏をしてください
- ・1-4小節目までの右手部分のみを生徒に練習してもらってください
- ・トリルは演奏させないでください
- ・必要に応じてアドバイスや指摘、模範演奏を行ってください
- ・生徒が楽譜を読めない場合は、あなたが1音1音ゆっくり弾いて、後を追わせてください

合格条件

範囲：1-4小節

手の限定：右手のみ

テンポ：指定なし

その他：トリルなし

誤打鍵せずに3回通しで演奏

第2段階

- ・5-8小節目までの右手部分のみを生徒に練習してもらってください
- ・必要に応じてアドバイスや指摘、模範演奏を行ってください
- ・生徒が楽譜を読めない場合は、あなたが1音1音ゆっくり弾いて、後を追わせてください

合格条件

範囲：5-8小節

手の限定：右手のみ

テンポ：指定なし

誤打鍵せずに3回通して演奏

第3段階

- ・1-8小節目までの右手部分のみを生徒に練習してもらってください
- ・必要に応じてアドバイスや指摘、模範演奏を行ってください
- ・生徒が楽譜を読めない場合は、あなたが1音1音ゆっくり弾いて、後を追わせてください

合格条件

範囲：1-8小節

手の限定：右手のみ

テンポ：Andante くらいの速度を守れるように

誤打鍵せずに3回通して演奏

第4段階

- ・5-8小節目までの左手部分のみを生徒に練習してもらってください
- ・左手に不慣れな場合、1拍目のバスの音だけが変わることを説明してください
- ・必要に応じてアドバイスや指摘、模範演奏を行ってください
- ・生徒が楽譜を読めない場合は、あなたが1音1音ゆっくり弾いて、後を追わせてください

合格条件

範囲：5-8小節

手の限定：左手のみ

テンポ：指定なし

誤打鍵せずに3回通して演奏

第5段階

- ・5-8小節目までを両手で生徒に練習してもらってください
- ・テンポを気にする必要がないことを生徒に指示してください
- ・必要に応じてアドバイスや指摘、模範演奏を行ってください
- ・生徒が楽譜を読めない場合は、あなたが1音1音ゆっくり弾いて、後を追わせてください

合格条件

範囲：5-8小節

手の限定：両手

テンポ：指定なし

誤打鍵せずに3回通して演奏

第6段階

- ・9-10小節目までの右手部分を生徒に練習してもらってください

- ・必要に応じてアドバイスや指摘，模範演奏を行ってください
- ・生徒が楽譜を読めない場合は，あなたが1音1音ゆっくり弾いて，後を追わせてください
- ・トリルは演奏させないでください

合格条件

範囲：9-10 小節

手の限定：右手のみ

テンポ：指定なし

誤打鍵せずに3回通して演奏

第7段階

- ・9-10 小節目までの左手部分を生徒に練習してもらってください
- ・左手に不慣れな場合，1拍目のバスの音だけが変化することを説明してください
- ・必要に応じてアドバイスや指摘，模範演奏を行ってください
- ・生徒が楽譜を読めない場合は，あなたが1音1音ゆっくり弾いて，後を追わせてください

合格条件

範囲：9-10 小節

手の限定：左手のみ

テンポ：指定なし

誤打鍵せずに3回通して演奏

第8段階

- ・9-10 小節目までを両手で生徒に練習してもらってください
- ・テンポを気にする必要がないことを生徒に指示してください
- ・必要に応じてアドバイスや指摘，模範演奏を行ってください
- ・生徒が楽譜を読めない場合は，あなたが1音1音ゆっくり弾いて，後を追わせてください

合格条件

範囲：9-10 小節

手の限定：両手

テンポ：指定なし

誤打鍵せずに3回通して演奏

第9段階

- ・1-10 小節目までを両手で生徒に練習してもらってください
- ・テンポを気にする必要がないことを生徒に指示してください
- ・必要に応じてアドバイスや指摘，模範演奏を行ってください
- ・生徒が楽譜を読めない場合は，あなたが1音1音ゆっくり弾いて，後を追わせてください
- ・特定箇所ミスが頻発する場合は，その箇所を集中的に練習するよう指示を出してください

さい

合格条件

範囲：1-10 小節

手の限定：両手

テンポ：指定なし

誤打鍵せずに 3 回通して演奏

目次

1.1	社会生活基本調査における「楽器を年に1回以上演奏する人」	3
1.2	ピアノ学習者の減少	3
1.3	遠隔レッスンの経験の有無に関する調査結果	4
1.4	遠隔レッスンを開始した時期に関する調査結果	5
1.5	提案システムと各システムが支援する状況	6
2.1	既存のピアノ用e-ラーニング教材を使用した学習の流れ	11
2.2	Pianolensによる打鍵位置と補助情報の提示	12
2.3	ビデオ通話サービスを利用した遠隔レッスンの様子	13
2.4	葛岡らの実験結果	14
2.5	ジョイントアテンションの例	15
2.6	対面環境における楽譜と指示箇所共有	16
2.7	対面環境における打鍵位置の指示方法	17
2.8	手指の視覚的な把握方法と一例	18
2.9	表示する視点数が多い場合	19
2.10	表示する視点数が少ない場合	19
2.11	システム構成	20
2.12	スクリーンナップショット1	21
2.13	スクリーンナップショット2	21
2.14	鍵盤共有機能による打鍵位置の投影	22
2.15	楽譜指示箇所共有のための指さしポインタ	23
2.16	表示する視点数が多い場合	24
2.17	表示する視点数が少ない場合	24
2.18	自動カメラスイッチング機能の概要	25
2.19	カメラの正解データ作成基準の概要	26
2.20	各カメラからのアングル	27
2.21	実験環境	28
2.22	教師に対する遠隔レッスン補助機能に関するアンケート結果	30
2.23	生徒に対する遠隔レッスン補助機能に関するアンケート結果	31
2.24	提案システムにおける演奏とシステムの挙動	32
2.25	提案手法-比較手法1-比較手法2の比較結果	34
3.1	悪癖の例	37
3.2	実験環境	39
3.3	提案システムの概要	41

3.4	提案システムのスクリーンショット	44
3.5	悪癖アノテーション機能	45
3.6	動画内に出現する4種類の悪癖	47
4.1	正面上部から撮影した演奏動画	64
4.2	後方右側から撮影した演奏動画	64
4.3	課題曲「子犬のマーチ」の楽譜	65
4.4	教師の演奏と生徒の各回の演奏の平均値	65
4.5	予測値と実測値のプロット	66
4.6	課題曲「花」の楽譜	66
5.1	提案システム	71
5.2	提案システムのスクリーンショット	72
5.3	両グループの平均スコア	75
6.1	NON-DIVISION LEARNING モデルによるピアノ学習環境の変化	81