

Title	ResonantDialogues : 二台ピアノ演奏者のための感覚情報共有に基づく演奏支援システム
Sub Title	ResonantDialogues : a performance support system for two-piano players based on sensory information sharing
Author	頼岡, えみり(Yorioka, Emiri) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kōta)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2024
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2024年度メディアデザイン学 第1166号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002024-1166

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2024 年度

ResonantDialogues: 二台ピアノ演奏者のための
感覚情報共有に基づく演奏支援システム



慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

頼岡 えみり

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

頼岡 えみり

研究指導コミッティ：

南澤 孝太 教授 (主指導教員)

佐藤 千尋 准教授 (副指導教員)

論文審査委員会：

南澤 孝太 教授 (主査)

佐藤 千尋 准教授 (副査)

陳 敦雅 准教授 (副査)

修士論文 2024 年度

ResonantDialogues: 二台ピアノ演奏者のための 感覚情報共有に基づく演奏支援システム

カテゴリ：デザイン

論文要旨

二台ピアノは、音楽の調和と協奏を表現する最も美しい形態の一つであり、対面する二人のピアニストが互いの個性を活かしながら対話的な協奏を展開する、壮大で熱狂的な音楽空間を創り出す演奏形式である。しかし、対面での演奏により相手の姿が見えないことから、ズレが生じやすく多大な練習時間を要するという課題がある。

本研究は、二台ピアノ演奏における完全な調和と効率的な練習を目的とした、個別練習支援システム“Resonant Dialogues”を提案する。本稿では、練習時での演奏映像と体幹動作センシング・触覚刺激に基づく感覚情報共有により、タイミングの精度向上を図り、提案システムが演奏精度の向上や練習の効率化に与える影響の可能性を検証した。さらに、主観的体験の評価やズレの頻度の変化を調査し、演奏精度向上や練習の効率化だけでなく、より高次の芸術表現への可能性が示唆された。

キーワード：

二台ピアノ, 身体性メディア, 演奏支援, 触覚, 感覚共有

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

頼岡 えみり

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2024

ResonantDialogues: A Performance Support System for Two-Piano Players Based on Sensory Information Sharing

Category: Design

Summary

Two-piano performance is a beautiful form of musical collaboration where two pianists create a dynamic dialogue by blending their unique styles. However, the performers' inability to see each other often leads to synchronization issues, requiring significant practice time.

This study proposes “Resonant Dialogues”, a practice support system for two-piano performances. By sharing sensory information through performance videos, core body movement sensing, and tactile feedback, the system aims to improve timing accuracy and practice efficiency. The results suggest not only enhanced synchronization and efficiency but also potential for more advanced artistic expression.

Keywords:

two pianos, embodied media, performance support, tactile sensation, sensory sharing

Keio University Graduate School of Media Design

Emiri Yorioka

目次

第1章 Introduction	1
1.1. 二台ピアノにおける対話的協奏	1
1.2. 協奏における身体的動作とタイミングの関係	3
1.3. 二台ピアノ演奏時の制約と課題	4
1.4. 本研究の目的	6
1.5. 本論文の構成	7
第2章 Literature Review	8
2.1. 演奏時の身体動作と音の相互作用	8
2.1.1 ピアノ演奏時の身体動作と表現	8
2.1.2 協奏時の視線行動と特性	11
2.2. 身体協調とパフォーマンス	13
2.2.1 舞踊における協調的動作	13
2.2.2 チームスポーツでのプレイヤー間の同期	14
2.2.3 ピアノデュオにおける身体協調と音楽的役割	15
2.3. 協奏における多領域でのアプローチ法	18
2.3.1 視覚表現による過去との共演	18
2.3.2 AIを用いた協調演奏	20
2.3.3 演奏同期支援デバイス	22
2.4. 感覚共有を通じた身体協調	25
2.4.1 可視化・可聴化を用いた感覚共有	25
2.4.2 身体性と触覚	27
2.4.3 触覚技術による技能や感覚の共有	28

2.4.4 全身触覚を用いた感覚共有	29
2.5. 本研究の位置付け	31
第3章 Concept design	33
3.1. 問題設定	33
3.2. fieldwork	33
3.2.1 概要	33
3.2.2 インタビュー内容	34
3.3. タイミング精度を高める重心共有の仮説	39
3.4. コンセプト	40
3.5. システムデザイン	41
3.5.1 ハードウェア	41
3.5.2 ソフトウェア	44
3.6. 本章のまとめ	45
第4章 Design Process	46
4.1. Iteration 1: リアルタイム共有による重心移動の基礎検証	46
4.1.1 検証目的	46
4.1.2 検証手法	46
4.1.3 体験者からのフィードバック	47
4.1.4 考察	48
4.2. Iteration 2: 視聴触覚情報を組み合わせた検証	49
4.2.1 検証目的	49
4.2.2 検証手法	49
4.2.3 体験者からのフィードバック	50
4.2.4 考察	51
4.3. Iteration 3: 記録・再生による演奏時の重心提示	52
4.3.1 検証目的	52
4.3.2 検証手法	52
4.3.3 体験者からのフィードバック	53

4.3.4	3つの展示会及び体験会でのデモンストレーション	54
4.3.5	考察	58
4.4.	Iteration 4 : 視覚表現の検討	59
4.5.	アプローチ方法の再考	61
4.5.1	リアルタイム共有から個人練習用システム	61
4.5.2	システムの再構成	61
4.6.	予備実験：二台ピアノ奏者の個人練習支援システム	62
4.6.1	概要	62
4.6.2	実験スケジュール	63
4.6.3	評価方法	64
4.6.4	結果	64
4.6.5	考察	67
4.7.	本章のまとめ	67
第5章	Proof of Concept	69
5.1.	プロトタイプの再設計	69
5.1.1	Resonant Dialogues	69
5.1.2	重心計測椅子 (ピアノ椅子)	70
5.1.3	触覚提示椅子	72
5.2.	システム検証実験	74
5.3.	検証1 マグニチュード推定法	74
5.3.1	実験目的	74
5.3.2	実験設定	74
5.3.3	触覚設計	75
5.3.4	実験手法と条件	75
5.3.5	評価方法	75
5.3.6	結果	75
5.3.7	考察	76
5.4.	検証2 産出法	77
5.4.1	実験目的	77

5.4.2	実験設定	77
5.4.3	触覚設計	78
5.4.4	実験手法と条件	78
5.4.5	評価方法	79
5.4.6	結果	79
5.4.7	考察	80
5.5.	二台ピアノ演奏者のための実験	80
5.6.	実験目的	80
5.7.	実験手法と評価方法	81
5.8.	全体の体験デザイン	81
5.9.	実施期間と条件	82
5.10.	実験実施	83
5.11.	結果	89
5.11.1	被験者 A：システムあり（A 曲）	90
5.11.2	被験者 A：システムなし（B 曲）	94
5.11.3	被験者 B：システムあり（A 曲）	97
5.11.4	被験者 B：システムなし（B 曲）	101
5.11.5	被験者 C：システムあり（A 曲）	105
5.11.6	被験者 C：システムなし（B 曲）	108
5.11.7	A 曲と B 曲の比較	111
5.12.	インタビュー	113
5.13.	考察	127
5.14.	本章のまとめ	130
第 6 章 Conclusion		132
謝辞		134
参考文献		136

付録	144
A. 検証1（マグニチュード推定法）の記録	144

目 次

1.1	対面式で演奏する二台ピアノ	2
1.2	楽譜や譜面台による視覚的制約	5
2.1	ピアニストの詳細な身体動作解析	10
2.2	デュオ時の視線行動	12
2.3	カルテット演奏者の動作パターンとその役割	16
2.4	MirrorFugue III	19
2.5	MuEns	20
2.6	「だれでも第九」	21
2.7	「だれでもピアノ」	21
2.8	プロジェクトセカイ・ピアノ	22
2.9	Soundbrenner Pulse	23
2.10	視覚障害者向けのタイミング支援デバイス	24
2.11	毛筆書字動作の可聴化と音の鳴るフリスビー	26
2.12	Boiling Mind	27
2.13	Synesthesia Wear	29
2.14	Synesthesia X1-2.44	30
3.1	フィールドワークの様子	34
3.2	コンセプトイメージ	40
3.3	システム全体図	42
3.4	TorsionCrowds	43
3.5	床センサー Flexel	43
3.6	システム構成図	44

4.1	ヴィオラ奏者の重心移動を体験する被験者	47
4.2	日本科学未来館での体験会（左）と VRSJ2024 での体験会（右）	55
4.3	KMDforum でのデモンストレーション	56
4.4	パーティクルエフェクトを用いた視覚表現	60
4.5	記録・再生用システムの構成図	62
4.6	個人練習用システムを体験をする被験者	63
4.7	予備実験の結果：初回合わせ（上）2 回目の合わせ（下）	66
5.1	重心計測椅子 (左) と触覚提示椅子 (右)	69
5.2	体重が均等に分散するように再設計された座面の配置と構造	70
5.3	重心計測椅子の設計図	71
5.4	重心計測椅子 (ピアノ椅子)	72
5.5	ピアノ椅子の寸法に合わせて再設計された座面の配置と構造	73
5.6	練習用触覚提示椅子	73
5.7	検証 1 の結果：左側の強度推定分布（左）と右側の強度推定分布（右）	76
5.8	左右に揺れる動作の触覚提示	78
5.9	検証 2 の結果	79
5.10	実験の手順	82
5.11	初回二台ピアノ合わせの様子	85
5.12	触覚提示椅子を用いて個人練習を行う被験者	86
5.13	1st 奏者の演奏スタイルや癖など記録している様子（上）とシステムを用いた個人練習の様子（下）	88
5.14	ズレ評価結果の全体図	89
5.15	被験者 A：A 曲 1 回目のズレ評価	90
5.16	被験者 A：A 曲 2 回目のズレ評価	91
5.17	被験者 A：A 曲 3 回目のズレ評価	93
5.18	被験者 A：B 曲 1 回目のズレ評価	94
5.19	被験者 A：B 曲 2 回目のズレ評価	95
5.20	被験者 A：B 曲 3 回目のズレ評価	96

5.21	被験者 B : A 曲 1 回目のズレ評価	97
5.22	被験者 B : A 曲 2 回目のズレ評価	99
5.23	被験者 B : A 曲 3 回目のズレ評価	100
5.24	被験者 B : B 曲 1 回目のズレ評価	101
5.25	被験者 B : B 曲 2 回目のズレ評価	103
5.26	被験者 B : B 曲 3 回目のズレ評価	104
5.27	被験者 C : A 曲 1 回目のズレ評価	105
5.28	被験者 C : A 曲 2 回目のズレ評価	106
5.29	被験者 C : A 曲 3 回目のズレ評価	107
5.30	被験者 C : B 曲 1 回目のズレ評価	108
5.31	被験者 C : B 曲 2 回目のズレ評価	109
5.32	被験者 C : B 曲 3 回目のズレ評価	110
5.33	A 曲と B 曲のズレ回数比較	111
A.1	検証 1 の記録	145

第 1 章

Introduction

1.1. 二台ピアノにおける対話的協奏

フランス語で二重奏を表す”Duo (デュオ)”は、2人の演奏者による器楽の重奏を意味し、互いが「対等」にぶつかり合いながら一つの作品を作り上げる。これは単なる二重奏を超えた深い意味を内包しており、二つの独立した音楽的個性が融合し、より高次の芸術表現を生み出す究極的な表現の一つと言える。クラシック音楽の歴史において、特異な発展を遂げてきた二台ピアノという演奏形態は、18世紀末、モーツァルトが作曲したソナタ KV.448 が、初期の二台ピアノのための作品として広く知られており、サロン文化の発展とともに、二台のフォルテピアノによる演奏は貴族社会における洗練された娯楽として位置づけられていた。その後、19世紀のロマン派時代には、リストやショパンらによって、その表現可能性がさらに探求され、交響乐的な響きを実現する革新的な手段として注目されるようになった。

二台ピアノは、ソロや連弾（一台四手）とは本質的に異なる音楽的特性を持つ。ソロ演奏は一人の演奏者の純粋な音楽的表現の追求であり、連弾は一つの楽器を二人で共有する親密な協演形態である。それに対し二台ピアノは、図 1.1 のようにグランドピアノの凹み部分を噛み合わせるようにして、二人の演奏者が二つの独立した楽器を対面で演奏するスタイルであり [1]、異なる個性を持つピアニストたちは、対話の中で協奏することで、壮大で熱狂的な音楽空間を創り出す。通常二台ピアノは下手に 1 st ピアノ、上手に 2 nd ピアノの配置で演奏されるが、この対面での演奏という物理的配置は、楽譜や譜面台によって相手の姿を遮られるという視覚的制約をもたらし、二台ピアノでは二つの異なる響きの融合という高度



図 1.1 対面式で演奏する二台ピアノ

な技術的課題が生じるため，同一の響板を通じて振動を共有することで，自ずと一体的な響きが生まれる連弾とは大きく異なる．また，ペダリングの自由度も大きく異なり，二台ピアノでは各演奏者が独立したペダル操作を行うことで，より複雑な響きのコントロールが可能となる．

デュオ演奏の本質は，2人の演奏者が互いにリードし，フォローし合いながら，絶妙なバランスを保つ対話的な性質にある．音楽的フレーズやダイナミクスの交換，即興的な解釈の応酬を通じて，ピアニストたちは互いに見えないという制約の中で，より高度な信頼関係と感覚的な共鳴を実現する．このプロセスこそが，二台ピアノという形態の真の魅力であり，音楽における対話の究極的な表現なのである．

二台ピアノの演奏において，1st ピアノと 2nd ピアノは明確な役割分担を持ちながらも，その関係性は単なる主従ではない．1st ピアノが紡ぎ出す主要な旋律やテーマは，2nd ピアノが織りなすハーモニーとリズムの織物によって支えられ，全体のバランスを保つ役割を担いながら，豊かな音楽的テクスチャーを形成する．この相互補完的な関係性こそが，二台ピアノ音楽の本質的な魅力であり，これにより，音楽の多層的な構造が生まれ，それぞれのピアニストが独自の表現を持ちながらも，ひとつの調和した作品を創り上げることができる．このようなデュオ演奏の真髄は，その対話的な性質にあり，言葉を越えたコミュニケーションとして，音楽的フレーズの交換，ダイナミクスの呼応，即興的解釈の共有など，多層的な

対話を通じて実現される。特に二台ピアノの演奏では、視覚的な制約が伴うため、演奏者は自らの身体の動きや音のニュアンスを通じて、相手の意図を感じ取る能力が求められ、これには深い信頼関係と鋭敏な音楽的感覚が不可欠であり、演奏者は互いの動きに敏感でなければならない。音楽のフレーズが交互に響き合う中で、視覚的な情報に頼ることが難しいため、身体感覚に基づく直感的なコミュニケーションが重要となる。このような状況下での演奏は、単に技術的な演奏にとどまらず、互いの存在を意識した高度なインタープレイが必要である。

また、2nd ピアノが果たす役割は、単にハーモニーを提供するに留まらず、音楽の情緒を豊かにする重要な要素でもあり、1st ピアノの旋律に対して独自の視点からアプローチし、新たな色彩を加えることができる。このような相互作用は、音楽の多層的な構造を生み出し、各ピアニストが独自の声を持ちながらも、全体として調和した作品を形成することに寄与する。1st ピアノの旋律に対して、2nd ピアノが織りなすリズムや和声は、まるで会話のように流れ、互いの表現を高め合うのである。演奏者は、各々の役割を理解しつつも、その境界を越えた創造的な対話を展開することで、音楽の深みを増し、演奏者の内面が反映される場でもあり、二台ピアノの演奏における 1st ピアノと 2nd ピアノの相互作用は、単なる技術の交流ではなく、芸術的な表現の深化を促進する重要な要素となり、音楽の流れの中で生まれる対話的な関係は、その瞬間瞬間の演奏が特別な意味を持つ。

1.2. 協奏における身体的動作とタイミングの関係

二台ピアノや協奏における身体の動かし方とタイミングの関係性は、演奏者間の微細なコミュニケーションが音楽の一体感に直結する、非常に重要な要素であり、二人のピアニストが異なるパートを演奏する中で、一体感を醸成するためには、音を介した「呼吸」の共有が必要である。これは、単なる音楽的正確性に留まらず、演奏者間の深い繋がりによって、音楽の情緒的な表現を豊かにするための基盤であり、視覚的な合図だけでなく、身体全体の動きや姿勢、呼吸がタイミングの調整に重要な役割を果たし、音楽に内在する情緒や表現を共に生み出すための要素でもある。

二台ピアノ演奏における身体の動きは、楽曲の構造に応じて異なる役割を果たす。たとえば、楽曲の緊張が高まるクライマックスに向けて、ピアニスト同士の動きが顕著になり、身を乗り出すようにしてタイミングを合わせる様子が見受けられる。ここでの身体の動きは、次のフレーズへの期待感を生み出し、互いの演奏に即座に影響を与えるなど、一瞬の視覚的なヒントをもとに、次にどのように呼応するべきかを感じ取り、アンサンブルの精度を高めていく。

さらに、ピアニストたちは身体の動きと音楽的フレーズを一致させることで、音楽の表現を高めるが、ここで重要なのは、音楽の進行と身体の「重さ」の連動である。たとえば、穏やかなフレーズでは、体の重心が安定し、肩や手がゆっくりと動くことで柔らかな音色が生まれる。一方、激しく鋭いフレーズやリズムの転換が激しい部分では、体が瞬間的に緊張し素早く重心を移動させることで、指先や手首も鋭く動かすことが可能になり、力強い音が奏でられる。このように、身体の動きと音が調和することで、音楽のダイナミズムはより一層際立つ。二台ピアノでのタイミング調整には、音符の長さやリズムの構造の中で、ピアニスト同士が無意識に「今この瞬間」を共有することで、緻密なタイミング調整が可能になる。フレーズの終わりや始まりで生まれる「間」は、身体の一瞬の静止や手が鍵盤に向かう軌跡を通じて感じられ、この「間」にこそ、演奏者同士の深い理解が現れる。

このように、二台ピアノの協奏における身体の動きとタイミングの関係は、音楽のリズムやメロディの流れを支えるだけでなく、演奏者同士の無言の対話を生み出すものである。李、音楽的なタイミングにおいて身体の動きがどれだけ緻密に作用するかを知ることで、二台ピアノの演奏は一層豊かな表現を生み、観客もまた、視覚と聴覚の両面から音楽に引き込まれるのである。

1.3. 二台ピアノ演奏時の制約と課題

2台のピアノによる演奏は、音楽の調和と協調を表現する最も美しい形式のひとつであるが、同時に最も困難な演奏形式のひとつでもあり、互いの意図や感情を理解し、複雑な相互作用を理解することは演奏家にとって困難である。私が初

めて二台ピアノ演奏に挑戦した際、楽譜や譜面台による視覚的制約により、相手の演奏者とのタイミングの不一致が頻発し、技術的な問題を超えて、相手の意図や感情を理解し共鳴することの難しさが浮き彫りになった (図 1.2)。私たちの演



図 1.2 楽譜や譜面台による視覚的制約

奏に一体感を持たせるには、お互いのスタイル、呼吸、動きに精通する必要がある、お互いのテンポやニュアンスを徐々に感じ取るために何時間も練習する必要があった。この経験は、2台ピアノ演奏に求められる深い相互理解と感性を浮き彫りにした。

二台ピアノの練習には、他の形態の演奏と比べて多くの時間が求められる。二人のピアニストが共に演奏するには、それぞれが奏でるパートを細部まで理解し合い、互いの表現やリズム感、アーティキュレーションを完璧に調和させる必要がある。そのため、単独での練習以上に、二人が同じ空間で密に練習する時間が重要であるが、二台ピアノのための練習環境を整えることは、決して簡単ではない。多くの練習場所にはピアノが一台しかないことが多く、演奏者は練習場所の確保において大きな制約に直面するのである。

さらに、二台ピアノの練習が抱えるもう一つの問題は、時間の制約である。二台ピアノの練習には、一人での演奏では感じられない、パートナーとの「タイミング」の微調整が必要となる。例えば、フレーズの締めくくりや休符の瞬間には、

互いのタイミングを正確に合わせなければならない。そのためには、各々が自身のパートを完璧にこなすだけでなく、相手の演奏に呼応することが求められ、繊細な練習と調整が必須である。このタイミングをすり合わせる作業は一朝一夕には身につかず、共に練習する時間が増えるにつれて、徐々に深まっていくものである。このような事情から、二台ピアノの練習には多大な練習時間が求められるのだ。しかし、二人のピアニストが日々のスケジュールを合わせることは難しく、特に社会人の演奏者にとっては、共通の練習時間を確保することが大きな負担となる。演奏技術の向上には定期的な練習が不可欠だが、限られた時間で効率的な練習を行うことは、二台ピアノのようなデュオ形式においてさらに困難であり、ピアニストの動きや視線、呼吸といった「身体的なコミュニケーション」が必要とされるため、双方が同じ空間で同時に練習することは不可欠であるが、物理的な制約が大きいため、こうした「共時的な練習」は思うように行えず、練習の質と頻度が大きく制限されてしまう。二台ピアノの練習には、場所と時間の確保が大きな障壁となっており、こうした物理的な制約は、演奏技術や表現力の向上に直接影響を与える要因となりうる。

1.4. 本研究の目的

本研究の目的は、二台ピアノ演奏におけるタイミング同期を円滑にし、演奏者間の理解と協調を深める環境を実現することである。二台ピアノは、視覚的制約や練習環境の制限など、ソロや連弾とは異なる特有の課題があり、演奏者間でタイミングのズレが生じやすいため、本研究ではタイミングの同期を改善し、演奏者間の協奏力を高める方法を模索する。演奏者が互いに深く理解し、協調し合うためには、視覚的な制約を超えた新しい練習環境が必要であり、視覚だけに依存する従来の練習方法では、相手の動きやタイミングを完全に同期させることが難しいため、互いの動きを効果的に感じ取る方法を構築する。さらに、身体的な動きとタイミングを意識的に合わせることが、演奏者の技術向上に寄与すると考えられ、他者の動きに反応することで、演奏者はより自然な協奏ができるかもしれない。そこで本研究は、二台ピアノの演奏におけるズレ改善による技術的向上だ

けでなく、演奏者同士の一体感や音楽的なコミュニケーションの質を向上させるための新たなアプローチを提供することを目的としている。

1.5. 本論文の構成

本章は全6章で構成されている。最初に、二台ピアノの壮大さとその魅力について言及し、視覚情報の制約や練習の難しさに焦点を当て、二台ピアノにおけるズレの改善および練習の効率化に注目した。本研究では、ズレの改善を目的として、二台ピアノの新しい練習環境をデザインし、演奏者間の協調を高める方法を模索する。第二章では、演奏時の身体動作と協調について、また協奏における既存のアプローチや感覚共有と触覚技術について調査する。第三章では、フィールドワークを行い仮説を立て、触覚を介して演奏者の感覚を共有する新しい体験のコンセプトについて述べ、第四章では、デザインした体験を繰り返し試行錯誤し、その結果をもとにアプローチの再設計を行う。第五章では、再設計したデバイスと体験に基づき、触覚刺激のシステム検証を行い、実際に二台ピアノの練習に「Resonant Dialogues」を取り入れた結果をもとに、本研究の目的達成について論じる。第六章では、本論文を総括し、結論を述べる。

第 2 章

Literature Review

2.1. 演奏時の身体動作と音の相互作用

2.1.1 ピアノ演奏時の身体動作と表現

コンサートホールや映像で，プロのピアニストが上半身を揺らしながら，まるで音に陶酔しているかのように演奏している姿を目にすることがある．ピアニストが演奏中に上半身を揺らすのは，単なる癖や無意識の動きに過ぎないのだろうか？演奏者が高度な技巧を持続的に発揮する方法について，まずは身体動作と音楽表現の関係について目を向ける必要がある．

Jenseni^{us} ら [2] は，音楽に関連した身体的動作について，音楽の中でのジェスチャーがどのように解釈され，どのような意味を持つかを探求した．この研究では，異なるジャンル（クラシック，ジャズ，電子音楽，伝統音楽）の音楽家，多様な楽器（弦楽器，管楽器，打楽器，電子楽器）の演奏者からデータを収集し，データを収集し，音楽ジェスチャーを機能的ジェスチャー，描写的ジェスチャー，感情的ジェスチャー，文化的ジェスチャーの4つに分けている．

まず機能的ジェスチャーには，音を生成するための楽器演奏に直接必要な物理的動作（例：弓の操作，鍵盤の押下，管楽器の息の制御など）が挙げられ，描写的ジェスチャーは音楽的意図や感情を視覚的に表現する動きや，音楽的フレーズや構造を身体で解釈し観客に音楽的ナラティブを伝達する方法であり，感情的ジェスチャーは演奏者の内面的感情を身体的に表現したり，音楽的感情表現の重要な伝達手段として用いられる．4つ目の文化的ジェスチャーとは特定の音楽文化や伝統に根ざした身体動作など音楽的アイデンティティの重要な役割を果たす．この研究では，音楽パフォーマンスにおける身体動作の理解を深化するために，音

楽におけるジェスチャーの包括的な概念的枠組みを確立し、ジェスチャーが単なる技術的動作以上の意味を持つことを解明している。これは、音楽ジェスチャーが、複雑で多層的な音楽的表現形式として捉え、身体動作が音楽的コミュニケーションの本質的な部分であり、技術、感情、文化が交差する豊かな表現手段であることを明らかにしている。

また、Allingham ら [3] は、演奏者の身体動作が音の生成と表現にどのように影響するかを包括的に研究し、従来の音楽理論では見逃されてきた身体動作の微細な役割を探求した。実験にはモーションキャプチャーや、高速度カメラなどを使い、音の「温かさ」や「エネルギー」が身体動作と強く関連していることや、感情的表現時、身体動作の振幅が大きく変化することについて触れている。その中でも特に呼吸と身体動作が互いに影響し合うことを示している。具体的には、演奏者の呼吸パターンが音楽的フレージングに重大な影響を及ぼすことや、呼吸と身体の揺れが音の微細な変化を生成し、呼吸の深さと身体の動きが音楽的感情表現に寄与することが明らかになった。これは、身体の動きが楽器の「共鳴」に影響し、楽器と演奏者の身体が一体となっていることを示唆している。この研究は、演奏者の身体的表現が音楽的感情的伝達にどのように貢献するかを強調しており、技術的な演奏能力とともに、感情的な表現を補完する手段としての身体的ジェスチャーの重要性を示している。

音楽演奏は長時間にわたる繰り返し練習と細かな身体動作の統合から成り立っており、特にピアニストは腕、手、指だけでなく、体幹（腰や背部）を使った全身の安定した動作が求められ、身体の動きは、単なる付随的な現象ではなく、音楽的表現の本質的な要素として捉えられる。例えば、ピアノ演奏における体幹の重要性に注目した Laberge ら [4] は、ピアノ演奏中の股関節の運動学的分析に焦点を当て、特定の音楽的フレーズや感情の表現に対応する独特の股関節の動きパターンを特定し、演奏者の身体の動きと音楽的感情表現の間に明確な関連性を示した。具体的には、体幹が安定している場合、ピアニストは腕や手をより自由に動かすことができ、精緻な指の操作や音色のコントロールがしやすくなる。また、腰部を適切に動かすことで全体の重心がコントロールされ、身体全体の動きが滑らかになるため、音楽のフレージングやダイナミクス表現も向上する。このよう

な身体的な安定性は、演奏者が曲の表現に集中できる状態を生み出し、結果として演奏の質を高めることができる。ピアノ演奏における腰部の役割に着目することで、演奏技術のさらなる向上を支えるための重要な知見が提供されている。

さらに Turner ら [5] は、プロピアニストの詳細な身体動作解析を通じて、音楽演奏中の高度な運動制御とその美的要素について研究している。具体的には、ピアニストが持つ高度な運動スキルが、音楽表現にどのように寄与しているかを運動学的に検証し、リズムやタイミング、ダイナミクスの調整における体の動きを分析している (図 2.1)。

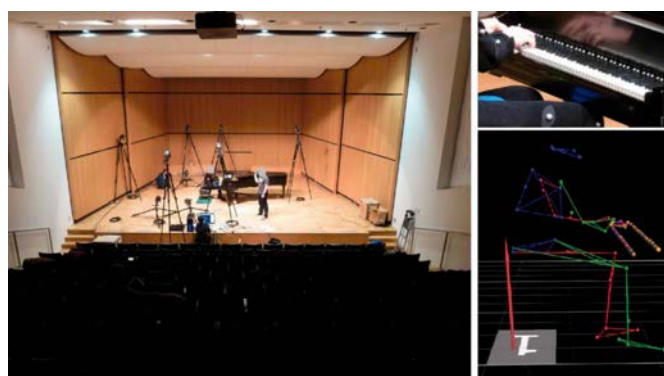


図 2.1 ピアニストの詳細な身体動作解析 ([5] より引用)

喜び、悲しみ、緊張などの感情が身体動作を通じて音に反映されることや、無意識的な身体動作が音楽表現に重要な役割を果たすことを示すなど、楽器の物理的特性と身体動作の複雑な相互作用を解明している。これは、単なるテクニックの向上だけでなく、演奏者が音楽を通じて伝えるメッセージの深さや感情の表出を支える要素としての身体動作を捉え、音楽のパフォーマンスにおける「身体の美的表現」に関する新たな理解をもたらしている。

これらの研究は、演奏中の身体動作と演奏の質の関係性を科学的に明らかにすることで、演奏者がより効果的に音楽を表現するための支援につながる知見を提供している。特に、体幹の安定性や動作の滑らかさは、演奏技術の向上に多大な影響を与える要因となる。さらに、身体動作を音楽の美的表現と結びつけ、演奏者が演奏行為を通して「身体を使った芸術表現」としての音楽の本質に触れてい

る。音楽の動作解析は、演奏支援や教育の分野でも重要な示唆を与える。

2.1.2 協奏時の視線行動と特性

オーケストラや合唱では、指揮者という明確な調整役が存在し、楽曲の全体的な解釈や tempo、表現を統括している。一方、室内楽やジャズアンサンブル、ピアノデュオなどの小規模な編成では、この外部からの調整機能が存在しない。そのため、演奏者たちは互いの非言語的コミュニケーション、特に視線や身体動作を通じて、音楽的な同期と表現の調和を自律的に実現しなければならない。特に視線は、指揮者の役割を代替する重要な調整メカニズムとして機能する。演奏者は、互いの目を通じて音楽的意図を瞬時に伝達し、テンポの調整、フレー징の同期、表現の微妙な変化を共有する非常に重要な要素である。Vandemoortele ら [6] はトリオにおいて、演奏者が互いに視線を交わす頻度とそのタイミングが、演奏の協調にどのように寄与するかを調べ、特に、視線を交わす瞬間が曲の大きな変化点やフレーズの境界と一致することが示された。この研究は、モバイル眼球運動追跡技術を用いて、演奏者が互いをどのように、いつ、なぜ注視するのかを詳細に分析し、演奏者の視線が単なる偶然ではなく、音楽的キューの交換や微妙な調整のための戦略的なコミュニケーション手段であることを示している。さらに、視線行動は単にリズムやタイミング同期にとどまらず、演奏者同士の「目に見えない対話」の一環として機能し、音楽の進行に沿った協調を促進する重要な要素でもあったことがわかった。また、Bishop ら [7] は、視線の役割をさらに深く探求し、音楽的同期を超えた、より複雑な身体的相互作用に焦点を当てた。視線方向が演奏の表現や協調にどのように寄与するかを詳細に分析した結果、視覚的コミュニケーションが演奏者間の創造的な対話を可能にする重要な媒体であることを明らかにした (図 2.2)。

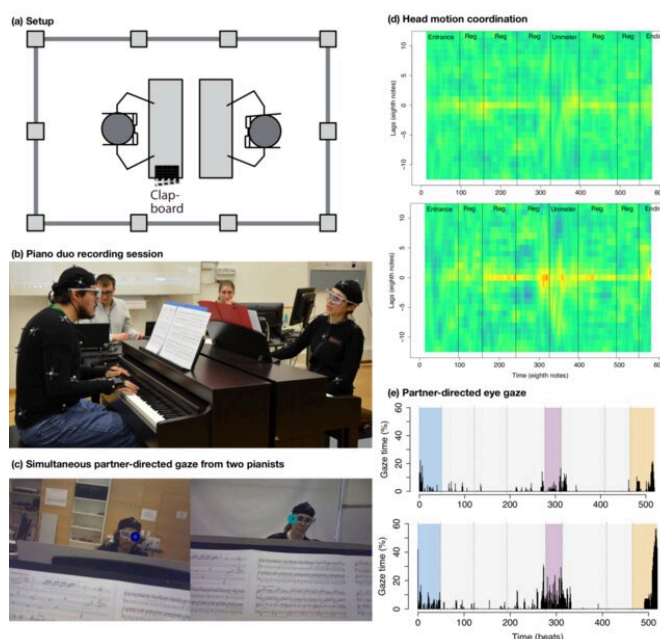


図 2.2 デュオ時の視線行動 ([7] より引用)

ピアノデュオに特化した [8] では、ピアノデュオ演奏における視線行動の特異性を解明している。この研究は、ピアノ演奏者の視線パターンが演奏の同期とタイミング調整にどのように影響するかを詳細に検証しており、演奏者が互いの視線や身体動作からリズムのタイミングや速度を読み取り、即座に同期を図るプロセスを明らかにし、演奏の精度や一体感の向上に視覚的要素が貢献していることを示唆している。これは視覚的な手がかりが、演奏者同士の協調行動におけるコミュニケーション手段となることを立証し、特に頭部運動に注視することでタイミング同期を図れることが示唆されている。一方で、視覚的な制約を用いた場合、他の手がかり（音や身体動作）が協調を補完する可能性があることが示唆され、特に楽曲の構造が明確で、一定のリズムを維持している場合には、視覚的な情報がなくても十分な協調が可能であったが、テンポ変化や複雑なリズムが含まれる場面では、視覚的な情報が演奏者間の同期性を高める重要な役割を果たすことが明らかになっている。以上のことから、視線は単なる情報収集の手段ではなく、音楽的対話の重要な要素であるが、二台ピアノという物理的配置は、この対話を複

雑にする要因となっている。

2.2. 身体協調とパフォーマンス

2.2.1 舞踊における協調的動作

舞踊においてもまた、身体協調はパフォーマンスの質や表現力を左右する重要な要素である。Qin ら [9] は時空間畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いてダンスの動作品質を評価している。具体的には、ダンサーの動作の空間的および時間的特徴を抽出し、それを基に動作の質を定量的に分析する技術が開発され、従来の主観的な評価に代わる客観的かつ再現性のある評価基準が提供され、身体動作の協調や精度を詳細に把握することが可能となった。Burger ら [10] もダンス動作における時間と同期について舞踊における動作のタイミングと同期性のメカニズムを探求している。特に、音楽との同期性が舞踊の動作にどのような影響を与えるかを調査し、時間的精度が身体協調の基盤となることを示した。音楽と舞踊の相互作用について、Camurri ら [11] は音楽と舞踊のパフォーマンスにおける表現的ジェスチャーを多面的に分析し、視覚的、運動的、音響的なデータを統合する手法を用いて、舞踊者間のジェスチャーの同期性や感情的な表現が、音楽とどのように連動するかを検討し、身体協調の複雑な相互作用を明らかにした。

また、ペアダンスにおいて Derrick.D ら [12] は、部分的な視覚情報が身体協調に与える影響について、パートナーの動きが部分的にしか見えない場合、ダンサー間の協調にどのような影響があるかを調査した。視覚情報が不完全である場合でも、身体のタイミングやリズムを基に協調を維持する能力が確認され、非言語的コミュニケーションの重要性が示唆された。Liu ら [13] もまた、ダンススポーツカップルの関係性が競技のパフォーマンスに及ぼす影響を調査し、相互のエンゲージメント（関与）が協調性とパフォーマンスの向上に寄与することを示している。

さらに、Torrents ら [14] の接触即興舞踊における対人協調についての研究では、動作の同期性やリーダーとフォロワーの交代が、身体協調にどのように影響するかを分析し、ダンサー間の動的な相互作用が即興的な表現の質を向上させることが示され、接触即興舞踊では、ダンサー同士の身体的接触と相互反応が重要な役

割を果たすことが明らかになった。リハーサルにおける相互調整と同期の時間的プロセスについて解析した研究 [15] では、協調がどのように発展し、持続するかを詳細に明らかにしており、動作の同期が共同的な意味形成において中心的な役割を果たすことが示されている。これらの研究は、舞踊における身体協調のメカニズムを多面的に明らかにしており、技術的アプローチから心理的要因、非言語的コミュニケーションまで幅広い視点を提供し、舞踊の教育やパフォーマンスの向上において重要な基盤となる。

2.2.2 チームスポーツでのプレイヤー間の同期

身体協調の研究はスポーツにおける対人協調の研究から多くの示唆を得ることができる。スポーツ競技における協調は、ダイナミックな状況での動作タイミングや空間的調整の重要性を強調しており、Fernandes ら [16] の衝突回避タスクにおいて、女性サッカー選手間のリーダー・フォロワーの役割分担が協調に及ぼす影響についての研究では、選手間の動きの同期や役割の明確化が、競技状況での協調性を高めることが示され、アンサンブルにおけるリーダーシップとフォロワーシップの重要性を示唆し、特に即興的な調整や対話的なパフォーマンスにおける応用が期待される。また、Bartlett ら [17] はサッカーにおけるチーム協調パターンを、サッカーにおける選手の動きの軌跡を基に分析し、空間的および時間的データを用いてチーム内の役割分担や動きの同期を明らかにしている。これにより、複数人のダンサーがどのように空間を共有し、動作を調整するかを理解するための有益な視点が提供されている。

さらに、ペアで行う卓球やテニスにおいても選手間の動きの同期や役割の明確化がされている。Poizat ら [18] はダブルス卓球において選手間の協調を、第一人称視点と第三人称視点のデータを統合して分析し、選手が相手やパートナーの動きをリアルタイムでどのように認識し、適応するかが明らかになった。これは二台ピアノにおいても、パートナーの動きをどのように知覚し、それに応じて身体を調整するかを探るうえで、同様のアプローチが有効である。また、テニスのラリーにおける対人ダイナミクスについて、テニスのラリー中におけるプレイヤー間の動的な相互作用を分析した研究 [19] では、特にタイミングや空間的配置がラ

リーの持続性に与える影響を明らかにし、プレイヤー間の相互作用も動的な調整とタイミングが重要であることを示している。これらのスポーツにおける研究は、動的な環境下での協調のメカニズムを解明しており、アンサンブルにおける身体協調を理解するための重要な示唆を提供している。中でも、リーダーとフォロワーの役割分担、視覚的・時間的データの統合分析、相互作用のタイミングと空間的配置の重要性は、協奏における協調動作の分析や教育において応用可能な概念である。

2.2.3 ピアノデュオにおける身体協調と音楽的役割

音楽パフォーマンスにおける演奏者間の協調は、編成の規模と形態によって異なる調整メカニズムを必要とする。オーケストラなどの大規模な編成においては指揮者が全体的な解釈と統括を担うが、室内楽、アンサンブル、ピアノデュオなどの小規模編成では、演奏者自身が自律的に音楽的同期を実現する必要がある。その結果、演奏者たちは互いの非言語的なコミュニケーション（視線や身体動作）を通じて、自律的に音楽的な同期と表現の調和を図る必要がある。

特にカルテットなどの小規模なアンサンブルでは、メンバーの役割分担と動作の調和が音楽の表現に直結し、精密なタイミングやダイナミクスの調整が求められる。熟練したカルテット演奏者が行う動作パターンとその機能について分析した研究 [20] は、カルテット内の各演奏者がどのようにして役割を分担し、身体的動作を通じて相互に協調しているかに着目している。具体的には、演奏者が演奏中に行う視線や体の動きを観察し、音楽的な流れにおいてどのように役割分担が成り立っているか、また動作が協調行動にどのような影響を与えるかを明らかにしている (図 2.3)。

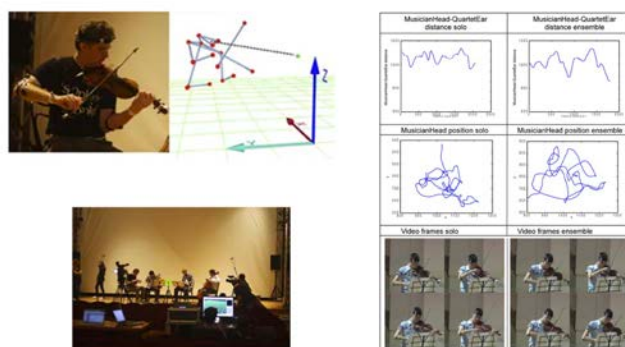


図 2.3 カルテット演奏者の動作パターンとその役割 ([20] より引用)

この知見は、アンサンブル演奏の理解を深めるだけでなく、演奏者が互いの動きを頼りにすることで、リズムの同期やダイナミクスの統一が図られていることを示唆し、これにより、アンサンブル演奏における動作の重要性が再確認され、協調や同期を支援する技術開発や教育法の発展に貢献するものである。このような非言語的コミュニケーションと音楽の相互作用について分析した研究は多く、Goebler [21] は、音楽家がどのように互いに協調し、音楽的表現を同期させているかを分析し、演奏時の音の正確なタイミングの測定や各音楽家の演奏の微細な時間的な変化の分析から解明している。演奏者の身体の動きがリズム、フレーズ、感情表現の同期などの音楽的解釈に大きく影響しており、熟練した音楽家ほど、より洗練された調整能力を持つことが示唆された。

ピアノデュオにおける身体協調について、特に非言語的なジェスチャーの役割に焦点を当てている研究 [22] では、演奏者のジェスチャーの運動学的特徴と慣習性が、二人の演奏者の同期成功にどのように影響するかを探求している。これは、二人のピアニストがどのようにジェスチャーを通じて音楽的同期を達成するかや、ジェスチャーの運動学的特徴（速度、加速度、軌道など）と慣習性（どの程度標準的で予測可能か）が同期に与える影響を検証したものである。具体的には、二人のピアニストに二重奏を演奏してもらい、その過程を詳細に記録し、実験には異なる難易度の楽曲を用いた。この実験により、予測可能な滑らかなジェスチャーは、より高い同期率と関連し、急激な動きや不規則な動きは同期を阻害する傾向

にあった。また、経験豊富な演奏者ほど、より洗練された慣習的なジェスチャーを用いることや、自然で効果的なジェスチャーによるコミュニケーションを用いる。一方で、初心者は、ジェスチャーを通じた効果的な同期に課題を抱えることが多い。この研究から、音楽パフォーマンスにおけるノンバーバルコミュニケーションの複雑さと重要性を明らかにし、演奏者間の協調におけるジェスチャーの役割を示した。ピアノデュオは、単なる高度な技術的演奏行為だけでなく、協調的創造性のプロセスとして新たな洞察を提供することを示唆している。

視覚的制約によりアイコンタクトや身体動作から同期を目指すデュオだが、二人の演奏者が音楽を通じてどのように「共鳴」し、脳活動を同期させるかについて、Lender ら [23] は二台ピアノ時の脳間同期についてのダイナミクスについて解析している。この研究の主な目的は、演奏中の音楽的相互作用と、それに伴う脳の協調的な活動パターンを詳細に調査することであり、参加者は異なる音楽的タスク（難易度、協調レベルが異なる）の中で演奏し、その際の脳活動の時間的および空間的同期や、fNIRS システムを使用した脳の酸素化ヘモグロビンレベルを分析した。この研究では、音楽的タスクの難易度に応じて、二人のピアニストの脳活動の同期パターンが変化することや、高度に協調的な状態になると、脳活動の同期がより顕著になるなど、左右の前頭前皮質が音楽的協調と密接に関連していることを示した。

さらに、ピアノ二重奏におけるリーダーとフォロワーの役割が、神経科学的な観点から脳波（特にアルファ波）と行動的同期にどのように影響するかを調査した Washburn ら [24] は、ピアノ二重奏における音楽的役割（リーダーとフォロワー）の違いが、脳の神経振動と演奏の同期性にどのような影響を与え、音楽パフォーマンスにおける役割の非対称性が、脳活動と協調的な演奏にどのように関連しているかを調査した。実験では、一方の演奏者がリーダー、もう一方がフォロワーとして指定し、事前に決められた音楽作品を演奏する。その際の脳波（EEG）と同期性を記録し、各デュオのリーダーとフォロワーの役割を交代して複数回実験する。そのデータをもとにアルファ波（8-12 Hz）の振動パターンを解析し、役割による脳活動と演奏の違いを統計的に検証した。結果としては、リーダーはフォロワーよりも特定の脳領域でアルファ波の同期性が高く、リーダーの役割が演奏

の協調性に重要な影響を与えることが示唆された。この研究で、アルファ波の活動パターンと演奏の同期性に相関関係が確認され、音楽的役割の非対称性は、脳の神経振動と協調的な演奏に有意な影響を与えることを示された。

音響伝送の遅延（レイテンシ）と音楽的役割の非対称性がいかにパフォーマンスに影響するか、ネットワークを介したピアノ二重奏におけるタイミングの調整に焦点を当てた研究 [24] では、演奏の役割（主導的役割と従属的役割）の非対称性が、遅延の影響を受ける程度にどのように影響を与えるかが議論されており、役割の違いが協調行動に与える重要性が示唆されている。具体的には、「リーダー」と「フォロワー」の役割を与えられた2人のピアニストがネットワークを介して異なる遅延条件（0ms, 20ms, 100ms）のもと演奏し、各演奏のタイミングを高精度で記録、音響信号と演奏者の動きを同期して計測している。遅延と役割の組み合わせを系統的に変化させ、客観的な指標と主観的な評価の両方を収集して分析している。結果は、遅延が増加するにつれ、ピアニスト間の同期が劣化し、20msまでの遅延は比較的軽微な影響だが、100msを超える遅延は顕著な同期の乱れを引き起こす。さらに興味深いのが、リーダーは遅延に対してより適応的しているのに対し、フォロワーは遅延の影響をより強く受けるといった、役割によって遅延への対処戦略が異なることを明確にした。これにより、ピアノデュオにおいて聴覚的フィードバックと予測的な動きが重要な役割を果たすことが明らかになった。これらの研究から、身体動作、脳活動、演奏役割の非対称性といった多面的な要因が、演奏者間の身体協調の形成に寄与することが示され、特に二台ピアノにおいて、リーダーが協奏において多大な役割を果たす。

2.3. 協奏における多領域でのアプローチ法

2.3.1 視覚表現による過去との共演

演奏者が過去の自分やピアニストと同じ空間で共演しているような体験を提供する手段として注目されている MirrorFugue¹は、録画されたピアニストの演奏映

1 MirrorFugue <https://tangible.media.mit.edu/project/mirrorfugue/>

像を視覚的に再現することで、あたかもその演奏者が目の前に存在しているかのような感覚を生み出すシステムである [25](図 2.4)。この技術は、演奏者の動きや姿勢を忠実に映し出し、過去の演奏とのリアルタイムな対話や学習機会を創出することを目的としている。



図 2.4 MirrorFugue III(MIT Media Lab Web サイト¹より引用)

MirrorFugue III は、録画されたピアニストの手や身体の動きを視覚的に映し出し、演奏者がその動きに合わせて練習したり、タイミングやフレーズ解釈を学ぶ手助けをする。このような視覚的フィードバックは、従来の音声や楽譜情報に比べて具体的で直感的な手がかりを与え、学習者が模倣や同期を行いやすく、遠隔地にいる教師や他の演奏者とあたかも同じ空間にいるかのように、視覚的に動きやニュアンスを共有できる点で新たな可能性を提示している。この視覚表現は、単なる視覚的再現に留まらず、音楽演奏における身体の動きや姿勢といった視覚情報を通じて、演奏者が時空を超えて連携できる支援技術を提供する点にあり、これにより、学習や協調の方法が拡張され、特にアンサンブル演奏や教育現場において、実際の対面環境に近い形での共演体験を可能にしている。

2.3.2 AI を用いた協調演奏

また、協調演奏において AI を用いたアンサンブルは、音楽分野において新たな可能性を切り開いている。ライブ演奏におけるシステム開発²は、演奏者と機械が一体となって音楽表現を行うことを目指し、相互作用や協調の質を高める重要な領域である。Maezawa ら [26] は、人間と機械がライブ演奏で高度に同期するアンサンブルを実現するために、音や演奏中の身体動作からテンポ変化や抑揚の推測をし、タイミング調整を行うシステムを開発した (図 2.5)。



図 2.5 MuEns(YAMAHA AI 合奏技術紹介 Web サイト²より引用)

これは、演奏者が機械とタイミングやダイナミクスを合わせるだけでなく、互いの感覚フィードバックを基にした即興的な音楽表現を可能にする。具体的には、視覚的フィードバックによって演奏者の動きを捉え、触覚的フィードバックにより微細なタイミングの調整やリズムの共有を行い、聴覚的フィードバックで音響調和を実現する。この複合的なアプローチにより、従来の指揮者や演奏者同士のコミュニケーションを機械でも補完し、機械と人間が音楽の流れやニュアンスを共有することで、リアルタイムでの即興を可能にした。

この AI 合奏技術を用いて、障がいのあるピアニスト 3 名とオーケストラ、合唱

2 YAMAHA AI 合奏技術 <https://www.yamaha.com/ja/tech-design/research/technologies/muens/>

団で奏でる「だれでも第九」³(図 2.6) は、AI 合奏技術を活用した演奏アシストシステム「だれでもピアノ」⁴(図 2.7)のもと実現された。



図 2.6 「だれでも第九」(「だれでも第九」紹介 Web サイト³より引用)



図 2.7 「だれでもピアノ」(「だれでもピアノ」紹介 Web サイト⁴より引用)

これは、指定された旋律を演奏すると、それに合わせて伴奏とペダルが自動的に追従し、演奏をサポートする仕組みであり、年齢や経験を問わず、誰でもピアノを通じて楽しむことができる。このシステムにより多くの人にピアノ演奏を介

3 「だれでも第九」<https://www.yamaha.com/ja/stories/culture/the-9th/>

4 「だれでもピアノ」<https://www.yamaha.com/ja/stories/feature/feature-16/>

した新たな自己表現方法の実現を示した。また、これらのシステムを活用したプロジェクトセカイ・ピアノ⁵では、演奏者が指定の曲を弾くことで、バーチャルシンガーが合わせて歌うシステムを搭載した図 2.8 のような電子ピアノであり、より多くの人に楽器演奏を楽しんでもらうためのアプローチがされている。



図 2.8 プロジェクトセカイ・ピアノ (プロジェクトセカイ・ピアノ紹介 Web サイト⁵より引用)

AI を合奏に組み込んだシステム設計は、演奏者が高度な協調演奏を行うための支援技術として有効である一方、未経験の人に対しても音楽というノンバーバルコミュニケーションは新たなコミュニケーションツールとしても役立っている。

2.3.3 演奏同期支援デバイス

音楽アンサンブルにおける演奏者のタイミングやテンポの共有は、長年にわたり多くの演奏者や指導者にとって重要な課題であった。特に、複数の演奏者が視覚的・聴覚的な手がかりに頼って演奏のタイミングを合わせるアンサンブル演奏は、緻密な同期が求められる。しかし、演奏者同士が離れて配置される二台ピアノ

5 プロジェクトセカイ・ピアノ https://www.yamaha.com/ja/tech-design/research/reports/21_proseka/

ノ演奏や、視覚障害を持つ演奏者が参加するケースでは、タイミングの精度を保つことが難しい場面が多く、従来の視覚・聴覚に依存した方法に代わる新しい同期手段の必要性が高まっている。

こうした背景から、触覚や振動を利用してタイミングを共有するシンクロ支援デバイスが開発されており、たとえば Soundbrenner Pulse⁶(図 2.9) は、振動によって演奏者にテンポを伝えるウェアラブルメトロノームで、個人やグループでのテンポ共有を支援する。



図 2.9 Soundbrenner Pulse(SoundbrennerWeb サイト⁶より引用)

6 Soundbrenner <https://support.soundbrenner.com/hc/ja>

視覚や聴覚以外でテンポを共有するため、周囲の音響環境に左右されず、バンドやアンサンブルにおける練習の精度を向上させる効果がある。

さらに、視覚障害を持つ演奏者向けに、Turchet ら [27] が開発したデバイス (図 2.10) は、触覚フィードバックによりタイミング情報を伝えることで、視覚に頼らずに他の演奏者とタイミングを合わせる支援を行った。

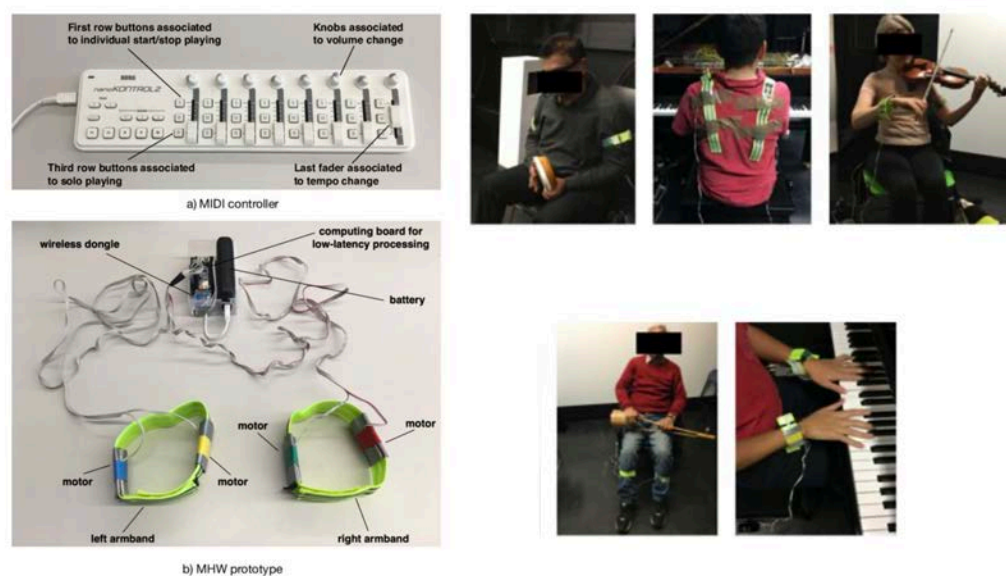


図 2.10 視覚障害者向けのタイミング支援デバイス ([27] より引用)

これらのシンクロ支援デバイスは、従来の視覚・聴覚情報に依存せず、触覚を通じた新しい同期手段を提供し、演奏環境に多様性と柔軟性をもたらしている。これにより、演奏者の一体感や演奏精度の向上が期待され、今後さらに幅広い音楽シーンでの活用が見込まれる。

2.4. 感覚共有を通じた身体協調

2.4.1 可視化・可聴化を用いた感覚共有

可視化を活用して、個人間やグループ間で技能や感覚を共有する研究は、多様な分野で進められ、多くは身体活動や生理的データを媒介として、情報の伝達精度や学習効率を向上させることにある。五十嵐ら [28] は、着用型発光センサスーツを用いて、下肢の動作状態をセンサによりリアルタイムで検知し、それを視覚的にフィードバックすることで、運動学習やリハビリテーションにおける効果的な支援を目指した。これは運動中の自身の動きを把握することが困難な状況での”外部化された視覚情報”によって、自身の身体感覚と視覚的な動作認識との統合を促進する。その結果、利用者は自身の運動パターンを意識的に修正することが可能となり、運動学習の効率化や誤動作の防止に寄与する。また、可視化システムを活用した協調学習の研究 [29] において、学習者同士が身体動作の可視化を通じて学び合う環境を構築し、動作のフィードバックが理解度や学習成果にどのような影響を与えるかを分析した。結果として、視覚化された動作情報は、学習者間の認識のズレを明確にし、互いの動作の違いを把握することを通じて、理解度を深める効果があることが示され、動作の透明性が高まることで、学習者間のコミュニケーションが円滑化し、協調的な問題解決が促進されることが明らかになった。

さらに、宝里ら [30] は、身体動作や道具を操作する際の動きをリアルタイムで音響信号に変換し、それをフィードバックとして利用者に提供することで、身体の状態や動作に対する気づきを促そうとするものである。実験には、図 2.11 のような毛筆書字動作の可聴化、おもちゃの可聴化、音の鳴る倒立振子、音の鳴るフリスビーなど多様な動きに注目している。



図 2.11 毛筆書字動作の可聴化と音の鳴るフリスビー ([30] より引用)

その中でも演奏者の演奏時の「動きの美しさ」と「音の美しさ」にも焦点を当て、芸術における身体動作と技術向上についても示唆している。また、柏野ら [31] は、身体運動のダイナミクスを音響信号に変換することで、動きのニュアンスを明示化した。それにより運動スキルの改善や自己認識の向上を試み、動作のフィードバックループを強化し、パフォーマンスの精度向上を実現した。

また、パフォーマーの生理的データの可視化と感覚の共有した「Boiling Mind」⁷ [32] では、パフォーマーの心拍数や皮膚電気活動を可聴化・可視化し、観客との接続を強化するアプローチ法を確立させた (図 2.12)。

⁷ Boiling Mind <https://www.embodiedmedia.org/projects/boiling-mind>



図 2.12 Boiling Mind(Boiling Mind⁷より引用)

これは、感情的なつながりや身体的反応を観客に伝えることで、従来のパフォーマンス体験を拡張している。これに関連する研究 [33] では、ダンスパフォーマンス中の生理信号データセットが提供され、振り付けとの関連性を探索された。また、Han ら [34] も観客の生理的データと振り付けの関連性を分析することで、パフォーマンスの理解と感情的共鳴の新たな形を提案している。

2.4.2 身体性と触覚

触覚は、人間の身体に深く根ざした感覚であり、他の感覚と異なり、直接的な身体的接触を前提とする点で特異性を有する。触覚の知覚体験は、単に外部の物理的特性を受け取るにとどまらず、身体そのものの存在や位置、動きの確認といった自己認識の基盤をも提供する [35]。視覚や聴覚のような遠隔感覚とは異なり、触覚は身体を介した直接的な相互作用を通じて情報を取得し、理解する感覚として機能している。

また、触覚はその物理的特性を知覚するのみならず、記号的に使用する可能性

を秘めており、触覚による記号化は、感覚を理論的に構造化し、視覚や言語のように触感を組み合わせることで新たな表現を創出する潜在力を持つ。これは、触覚が単なる受動的な感覚ではなく、能動的かつ創造的な意味生成の媒体として機能する可能性を示している。

さらに、渡邊氏が提唱する「触知性（タクタイル・インテリジェンス）」という概念は、触覚が情報を結びつけ、意味を構築する力を指し、この触知性は、触覚を基盤とした新たな記号論的可能性を示唆すると同時に、視覚や聴覚と連動することで感覚の補完的な役割を果たす点でも注目される。特に、身体性との相互作用によって、触覚が媒介する情報伝達は他の感覚では得られない直感的な理解や身体的な没入感をもたらす。

触覚を活用したインタフェースやメディアは、デジタル技術や人工知能との融合を通じて、従来の視覚や聴覚では到達し得ない感覚的な価値を創出する可能性を秘めている。

2.4.3 触覚技術による技能や感覚の共有

触覚を通じた技能や感覚の共有については、近年、身体性や直接的な感覚の伝達を探る取り組みが進められており、心臓ピクニック [36] では、鼓動に「触れる」ことで他者の生命活動を身体的に感じ取るワークショップである。このワークショップでは、触覚を介して心臓の鼓動という内的なリズムを外部化し、参加者同士が触覚を通じてその感覚を共有する体験が提供される。このような触覚的アプローチは、身体感覚やリズムの共有を通じて、他者との身体的な共鳴や理解を促進するものであり、触覚を情報伝達的手段として用いる新たな可能性を示している。また、HAPTIC PLASTeR [37] は、日常生活の中で容易に装着・利用できるデバイスとして、触覚を通じた情報提示や感覚共有により、従来の硬質な触覚フィードバックデバイスと異なり、身体に自然にフィットし、日常動作を妨げることなく触覚情報を伝達することが可能となった。さらに、Horie ら [38] による力覚情報を収集する力筋動計測（FMG）と皮膚ストレッチフィードバックを組み合わせたウェアラブルシステムにより、力の加減といったスキルの学習の有効性や、触覚刺激を通じた運動制御能力の向上が示唆された。これらは、触覚技術が単なる補

助的手段ではなく、感覚や技能の新たな伝達・共有手段として発展する可能性を示唆している。

2.4.4 全身触覚を用いた感覚共有

全身触覚インターフェースは、感覚の共有や拡張を目的として、触覚技術と視覚・聴覚など他の感覚を統合することで、没入型体験を提供する分野で注目されている。Furukawa ら [39] は Synesthesia Wear⁸(図 2.13) を開発し、全身を覆う触覚衣服を通じて、多様な触覚刺激を生成し、ユーザーが外部環境や他者と感覚的に接続する新たな手段を確立した。



図 2.13 Synesthesia Wear(Synesthesia Wear⁸より引用)

これらの研究では触覚信号の広範な伝達能力により、音楽、ダンス、ゲームなど、複数の応用分野での可能性が示されている。また、Hanamitsu ら [40] の Synesthesia X1-2.44⁹は 44 個の振動子を組み込んだ装置(図 2.14)で、音と振動、光が全身を包み込み、体験者が抱く「心象」そのものがアートとなるデバイスである。

⁸ Synesthesia Wear <https://www.embodiedmedia.org/projects/synesthesia-wear>

⁹ Synesthesia Lab <https://synesthesialab.com/x/>

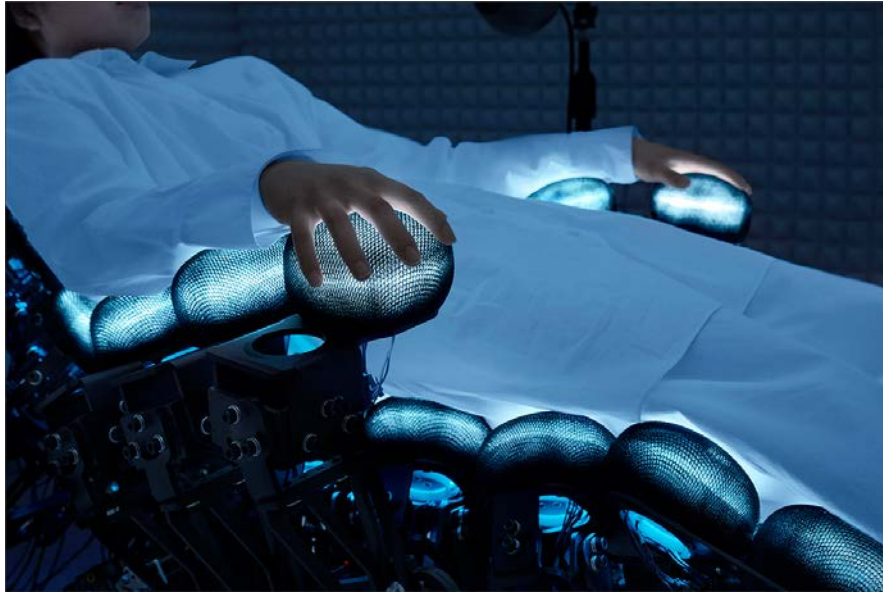


図 2.14 Synesthesia x1-2.44(Synesthesia Lab ⁹より引用)

これは、感覚をクロスモーダルに結びつけ、ユーザーが音や触覚、映像を同期的に体験できる環境を構築することにより、音楽や映像作品の感覚的な深みを拡張し、芸術やエンターテインメント分野での新たな創作手法が提案されている。さらに、この Synesthesia X1 は擬似行動と環境触覚刺激を組み合わせることで、エピソード記憶の鮮明度を高める研究 [41] にも用いられ、触覚刺激を利用して想像力を刺激し、記憶や情景描写の深さを向上させることが示された。全身触覚の使用は、感覚的なイメージの強化に寄与し、教育やリハビリテーション分野での応用可能性が示唆されている。

全身触覚インターフェースにおける新たなアプローチとして、触覚刺激を利用してユーザーに対する感覚の強化や共有を図るものが多く、特に皮膚への作用を重視した新しい技術が提案されている。Horie ら [42] は皮膚のせん断変形を利用した新しい触覚ディスプレイとして、皮膚に対する回転的な変形を利用した、せん断変形による刺激は、皮膚の表面に対する新しい感覚を作り上げた。これにより、よりリアルで直感的な触覚体験を生み出し、従来の触覚インターフェースよ

りも優れた体験提供が期待されている。その中でも TorsionCrowds¹⁰ [43] は、背もたれや座面に複数の回転接触子（モーター）が埋め込まれており、これらが群れのように回転し、皮膚表面に同時かつ広範囲に捻りを加えることで、力の二次元的な分布を提示する装置であり、この回転接触子群の回転角度や回転方向を制御することで、体表面に生じる刺激の強度分布をダイナミックに再現できる。ねじり刺激は、ユーザーに対して感覚的に新たな情報を伝える手段として効果的であり、特に動きの感覚や空間的な方向感覚を強化するための応用が期待される。

2.5. 本研究の位置付け

アンサンブル演奏において、同調を達成することは単なるリズムの一致にとどまらず、音楽の解釈を共有するために、メトロノームや視覚教材のようなツールだけでは、解釈のニュアンスの相互理解を促進することはできない。これまでの研究では、アンサンブル演奏における同調と相互理解を深めるための多様なアプローチを示しているが、デュオにおける解釈のニュアンスの相互理解を促進するためには、更なるアプローチが必要である。

二台ピアノ演奏という形式は、二人の演奏者が対等な立場で楽曲を共同構築することを要求するため、より高度な同期性と解釈の共有が求められる。この形式において、演奏者同士の視覚的な接触が困難であり、加えて、楽器の配置や音響的な制約が相互のタイミングのずれを引き起こしやすいという特性がある。そのため、二台ピアノ演奏の特性を踏まえた専用の支援ツールの開発は、実践的な意義が大きい。既存の研究では、視覚的または聴覚的フィードバックを活用したシステムが多く提案されているが、こうしたアプローチは、主にソロ演奏や全体的なアンサンブルの場面で用いられることが多く、特に二台ピアノ演奏のような対等なデュオ形式に特化した応用例は少ない。さらに、視覚的フィードバックだけでは、演奏中の注意を視覚に限定してしまう可能性があり、音楽表現を妨げる恐れも指摘されている。

本研究では、これらの課題に対処するため、身体動作データを基にした視覚お

10 TorsionCrowds <https://aratahorie.com/torsioncrowds>

よび触覚の複合的なフィードバックシステムを提案し、デバイスを通じて相手の演奏者に共有することで、視覚的接触が困難な状況でも演奏者同士がタイミングや解釈のニュアンスをより深く理解し合える環境を提供することを目指す。さらに、本研究は単なる同期性向上だけではなく、演奏者の身体動作や演奏スタイルをデータとして記録し、その特性を明らかにすることで、演奏者自身が自らの動作の特徴を理解し、自己研鑽のためのシステムとして活用し、音楽表現の質を高めるだけでなく、演奏者間のつながりを強化することを目指す。

第 3 章

Concept design

3.1. 問題設定

演奏時のアイコンタクトは非言語コミュニケーションの最高潮であるアンサンブルにおいて最も重要であるが [6], 二台ピアノにおいては視野制約のため難しく, ズレが生じやすい [1]. さらに, 演奏者自身が自律的に音楽的同期を実現する必要がある小規模編成では, 身体動作が演奏同期に大きな役割を果たすが [20], 対面式で行われる二台ピアノ演奏においては, 演奏者同士は感覚的に合わせるほかないのが現状である. また, タイミングや音楽表現の一致を実現するためには, 演奏者同士が互いの演奏スタイルや呼吸, 身体動作に精通する必要があるが, そのための十分な練習時間を確保することは難しく, スケジュール調整も大きな課題となる. これらの課題を踏まえ, 本研究では感覚共有を介した演奏体験により, 演奏同期を高め, 練習効率の向上を図るための体験デザインを検討した.

3.2. fieldwork

3.2.1 概要

フィールドワークでは, 武蔵野音楽大学の修士 1 年生の友人 2 名と, 現役音楽講師兼ピアニストの友人 2 名, 計 4 名に対して, 二台ピアノ演奏におけるタイミングに関する調査を実施した. 調査方法としては, インタビュー形式で, 普段の練習方法や演奏時の課題について詳細な情報を収集した (図 3.1). インタビューの内容としては, 二台ピアノ特有の相手との呼吸やリズムの合わせ方, タイミングを取るための視覚的工夫などが含まれる. また, 練習環境や時間の確保の難しさ,



図 3.1 フィールドワークの様子

独自に行っている練習手法，ソロとの違い，特に課題とを感じる点についてもヒアリングした．

3.2.2 インタビュー内容

二台ピアノ演奏における体幹・呼吸とタイミング精度の関係について調査した，フィールドワーク内での内容を以下に記述する．

▼ 普段の2台ピアノ練習方法

1. それぞれで譜読み
2. テンポをすり合わせて譜読み
3. すり合わせたテンポで合わせる
4. 合わなかったところを確認する

5. 相手の演奏だけで聞く（主に 1st）
6. 合わせるために，どこで呼吸をするか，目線を合わせるか決める．以下に倣って話し合いながら進める．
7. 合わなかったところを繰り返し練習する
8. 合うようになったらインテンポまで上げて仕上げる

▼タイミングの合わせ方

- 肩や頭の動き（浮き沈み）を見る
- 演奏前のリズムやテンポ感の確認
- アイコンタクト

▼難しい部分

- 相手の目線が見えないと合わせづらい．
- アイコンタクトがうまくいかない時がある（本番緊張でタイミングミスや調整が難しい）
- 呼吸音も聞こえないとタイミングがわからない．
- 連弾と違い，呼吸感を感じにくい．
- 2台ピアノは凹み部分をかみ合わせるようにし，鍵盤の角度を平行に配置しているため，正面から相手が見えず，視覚情報が制限されるため，テンポやリズムの把握が難しい
- 相手の呼吸に合わせる必要があり，ブレスのタイミング，速さを相手に合わせるため，自分1人のテンポ感とは違う．
- 複雑な重なり合う音色の中で，自分の演奏音と相手の音を聴き分けるのが難しい

- 相手の緊張度や息遣いを感じ取ることが難しく、心理状態への配慮が欠けがち
- 曲想やテンポの変化のタイミングを合わせる手掛かりが少ない
- 肩・頭の浮き沈みが見えないため、タイミングがズレる
- お互いのスケジュールを調整しながら進めていくのが大変、特に社会人
- 練習環境（ピアノが二台ある・対面である）が整っている場所の確保が難しい。音大でも予約制だったり、空いてないことが多い
- 二台ピアノの練習自体、ピアノ二台横に並べて練習するのが一般的で、本番が近くなると対面にして合わせていく感じで練習するが、本番が対面なので、練習時から常に対面で練習するのがベスト
- ソロと違い、二人で作品を作り上げるため、お互いがその曲に対してどういうイメージを持っているかや、フレージングをどう表現したいか確認が必要で多大な時間がかかる（練習時間のほとんどが言葉でのコミュニケーションで、言語化が難しく伝わりにくい）
- タイミングを合わせる直前前屈みになる
- 上半身の動き・揺れが見えず、相手のテンポ感がわからない

二台ピアノ合わせ練習の進め方について

二台ピアノの合わせ時、曲の解釈や全体のイメージを確認する際の基本的な共有方法について

1. 基本的な解釈の共有
 - 楽曲全体のイメージ
 - 曲の全体的な雰囲気や感情の方向性はどう考えているか.
 - 例:「この曲は力強く重厚に弾きたい」「軽やかに歌うように演奏したい」など.

- フレーズごとのニュアンス
- 特定のフレーズや音形で表現したい内容を具体的に言葉にする.
- 例:「このフレーズは問いかけるように演奏したい」「ここは溜めたい」など.

2. テンポとリズム

- 全体のテンポ感
- メトロノーム速度を参考に, 基本のテンポを確認する.
- 例:「この部分は少し遅く感じるけど, どう思う?」
- ルバートやテンポの変化
- 特定の箇所ではテンポを柔軟に変化させる場合, その意図を共有する.
- 例:「ここは少し広がりを持たせて, 次で勢いをつけたい。」

3. ダイナミクス (強弱)

- 強弱の方向性
- クレッシェンドやデクレッシェンドの意図を共有.
- 例:「ここは p から一気に ff まで持ち上げたい」「この部分は mp で落ち着いて」といった強弱のイメージ.

- 特定の音やフレーズの強調
- 演奏中に特に強調したい音やフレーズを確認.
- 例:「ここはこの和音が重要だと思うから, 少し重めに弾いてほしい。」

4. アーティキュレーション

- フレーズの始まりや終わり
- スラー, スタッカート, レガートの処理を統一する.
- 例:「ここは滑らかに繋げたい」「ここは一つ一つ短く切るイメージで」.
- アクセントの付け方
- アクセントの位置や程度を相談.
- 例:「この音は軽く強調する程度で, 次の音につなげる感じに。」

5. 呼吸や動作のタイミング

- 出だしのタイミング
- 最初の音をどのように合わせるかを確認.
- 例:「目を合わせて息を合わせよう」「ここは頭の動きでタイミングをとる。」

- タイミングのズレや合わせ方
- 特に難しい箇所ではどのようにタイミングを取るかを明確にする.
- 例:「この音の後で少し間を空ける感じにしよう。」

6. 個人の演奏の癖

- 自身の癖の共有
- それぞれの演奏スタイルや癖を説明.
- 例:「ここで少し遅れがちになることがある」「この和音は力を入れがちかもしれない。」

- 相手の癖を確認
- 過去の経験から、相手の演奏で気になる点を伝える.
- 例:「ここで少し急ぎやすい傾向がある。」

7. 難所や課題の共有

- 技術的に難しい箇所
- 自身が難しいと感じている箇所を伝える.
- 例:「この音型が早くて合わせにくいので、少しテンポを緩めてもいい？」
- 二人でタイミングを合わせるべき箇所
- 特に注意が必要な箇所を特定.
- 例:「ここはタイミングがズレやすいから、しっかり目で合わせよう。」

8. 練習方針の確認

- 練習の進め方- 初回合わせでどの部分を重点的に練習するかを決める.
- 例:「まずは全体を通してから、このセクションを細かく確認しよう。」
- 演奏を分けて練習する- 特定のフレーズやセクションを個別に練習.
- 例:「このセクションだけ繰り返してみよう。」

二台ピアノの練習における工程は、ソロ演奏とは異なり、相手の呼吸やテンポ感に合わせる必要があり、演奏者の自律的なテンポ感と異なる「二人のテンポ感」を形作っていくことが求められる。二台ピアノのタイミングを合わせるために、演奏者は相手の肩や頭の動きに注目し、動きの「浮き沈み」をタイミングの指標とすることが多く、演奏を始める前に二人でリズムやテンポ感を確認するなど、視覚的・聴覚的な手がかりを共有することも重要である。しかし、二台ピアノ

ノは連弾と違って離れて配置されるため、相手の目線が見えにくく、呼吸音も聞こえにくい。加えて、2台ピアノは凹み部分をかみ合わせるように鍵盤が平行に配置されており、視覚情報が限られることからテンポやリズムを把握するのが難しい。

こうした視覚的な制約により、演奏者が相手の上半身の動きや揺れ、呼吸感を正確に感じ取るのは困難であり、テンポやリズムのずれが発生しやすい。また、曲想やテンポの変化を合わせるための手がかりも限られており、身体的なサインに頼らざるを得ない状況も多い。このフィールドワークの結果を通じて、二台ピアノ演奏時のタイミングに関する現状の問題が明確になり、今後のシステム開発や指導法への可能性が示された。

3.3. タイミング精度を高める重心共有の仮説

二台ピアノ演奏におけるタイミングの課題から、演奏者同士が身体的・心理的にシンクロする必要性が浮かび上がる。特に、体幹の動きや呼吸は演奏時の重心のコントロールに密接に関わっており、これを視覚的・触覚的に共有することで、演奏の一体感やタイミングの精度が向上する可能性がある。相手の身体動作や呼吸が適切に見えづらい現状では、相手の意図や動きの予測が困難となり、結果としてタイミングのずれが発生することが多いが、演奏者が自分自身のテンポ感を保持しつつも、相手のタイミングに合わせなければならない二台ピアノ演奏ならではの課題である。

そこで仮説として、二人の演奏者が互いの重心移動をより直接的に共有できるような仕組みを導入することで、タイミングのずれが改善できるのではないかと考えられる。例えば、演奏者の体幹の動きや呼吸・リズム感をリアルタイムでフィードバックするシステムがあれば、相手の意図や呼吸感が視覚情報や触覚情報として伝わりやすくなるため、より自然にタイミングを合わせられるようになるかもしれない。

さらに、二台ピアノのみならず、他のアンサンブル形式にも応用できる可能性があり、これは、重心移動の共有が一種の非言語的な合図として機能し、音楽的

な対話をよりスムーズに促進する効果が期待されるだけでなく、タイミング精度や演奏者間の一体感を向上させるための新しいアプローチを提供できるかもしれない。この重心共有システムが、演奏者同士の身体的なつながりを補完し、従来の視覚・聴覚的制約を超える新たな手法として、演奏精度を向上させることが期待される。

3.4. コンセプト

本研究のコンセプトは、図 3.2 のように演奏者が視聴覚情報と触覚情報を通じて相手の状況を共有し、演奏時のタイミングのズレ改善を目指す。

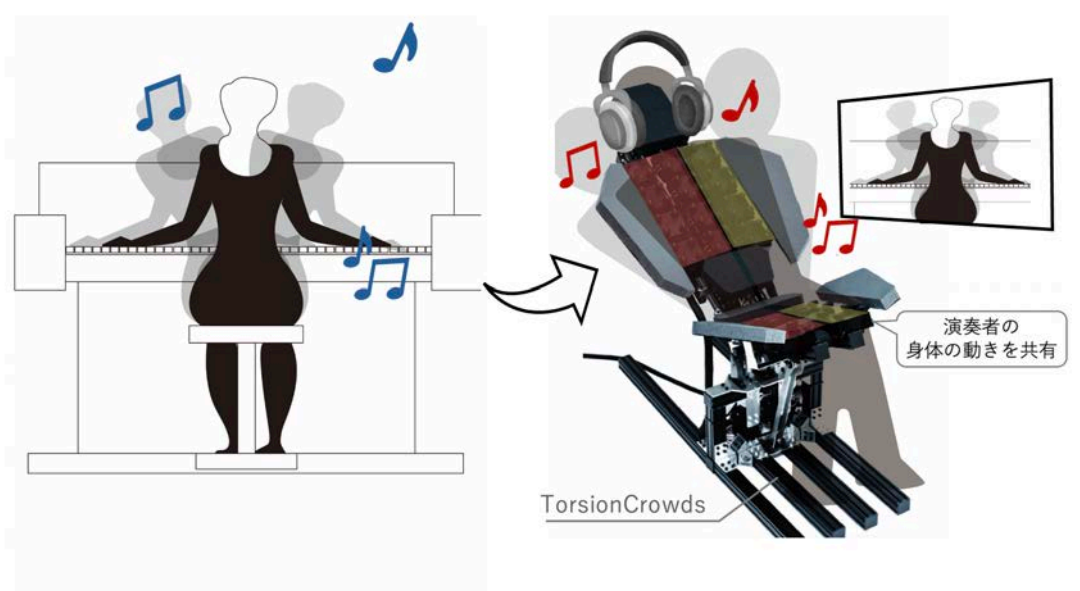


図 3.2 コンセプトイメージ

視覚的には相手の演奏映像を提示し、演奏者が互いの動きやリズム感を把握できるようにし、触覚提示には「重心データ」を用いることで、相手の体重移動や姿勢変化など、微細な身体動作のフィードバックを提供する。これにより、視覚

や聴覚だけでは捉えきれない相手の動きの変化やリズム感のズレを、触覚によっても感じ取ることを可能にする。

このシステムを通じて、演奏者は身体全体を使ってリズム感やダイナミクスを共有し、より深い一体感を持って演奏できるようになることを目指し、視覚と触覚の組み合わせにより、視覚的な制約がある場面でもタイミングの調整が可能となり、ズレが改善されることを期待する。

また、本システムは、ピアノ専攻の音楽大学生、ピアノ講師、そしてプロのピアニストなど、クラシック音楽の演奏や教育に携わる人々を対象に設計し、特に、二台ピアノの練習時におけるタイミングの調整や演奏者間の一体感の向上を目的として活用されることを想定している。

3.5. システムデザイン

3.5.1 ハードウェア

本システムでは図 3.3 のようなハードウェアを用いてシステム開発を行う。

本システムでは触覚提示手法として、回転によるせん断変形の分布を活用する。身体の運動のような力のダイナミクスを提示する手法として、これまで皮膚のせん断変形を用いた触覚提示が採用されてきた [43, 44]。本稿で提示する情報は身体の運動による重心の移動という準静的な身体の運動の情報であり、スキンストレッチによる刺激が刺激モードとしては適していると考えられる。

装置には Horie ら [43] の先行研究の装置と同様に、回転するせん断変形素子が 36 個配置されている。本刺激素子の配置は図 3.4 に示す通りである。刺激素子のエッジ間の距離は二点弁別閾よりも小さく、隣接する刺激素子を同時に制御することに寄って PhantomSensation による空間的に連続的な触覚提示が可能である [45]。素子の直径は 25mm であり、変形に十分な圧力がかかりながらも痛みを生じにくい大きさである。変形に十分であることについては次章の実験にて示す。各素子はサーボモーター（RS204MD, Futaba）で駆動し、身体の重量はスラストベアリングを挟むことで筐体側で支持する設計となっている。4つのモーターあたり1つ

の制御基板 (SSP 001-UA-S, commissure) に接続され、それらをデージーチェーン接続することで全てのモーターを同期制御している。

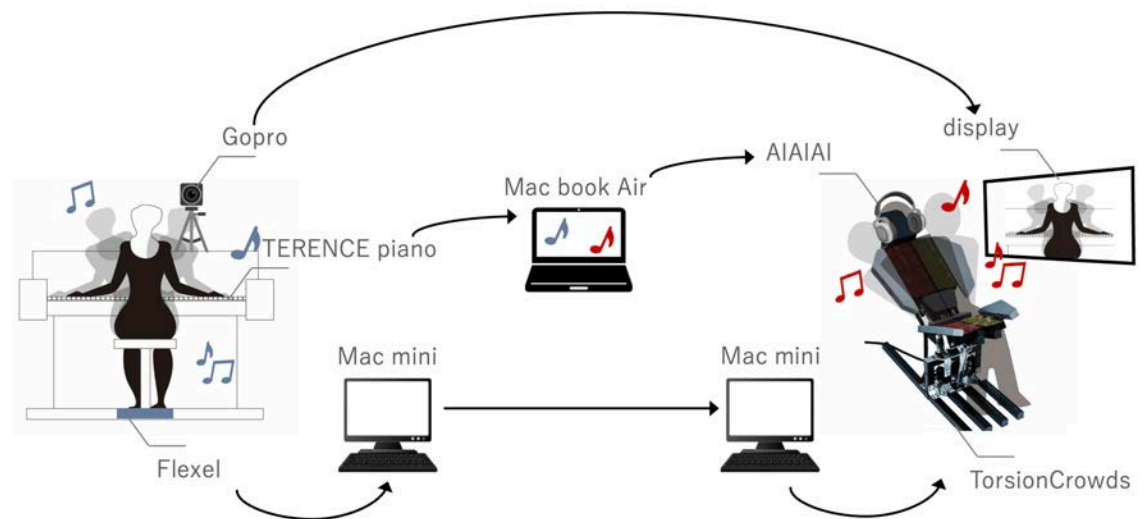


図 3.3 システム全体図

また、本システムで用いる床センサー Flexel [46](図 3.5) は、一辺 50cm の床材に 1 つあたり耐荷重 50kg の荷重センサーが 36 個据え付けてあり、表面への分布荷重を計測することができる。本センサーの上に椅子の座面を設置することで上半身の荷重中心の時系列変化を取得できるよう組み立てた。



図 3.4 TorsionCrowds(TorsionCrowds¹⁰より引用)

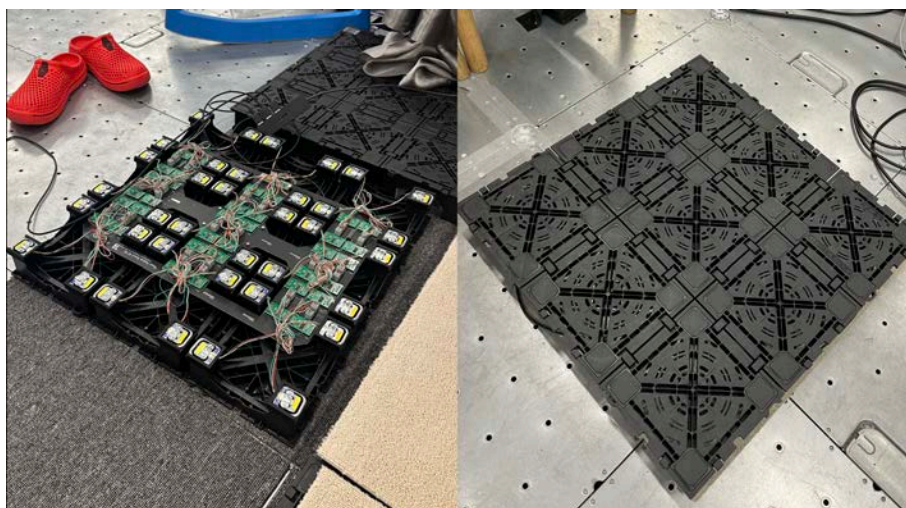


図 3.5 床センサー Flexel

3.5.2 ソフトウェア

本研究で提案するシステムを図 3.6 に示す。

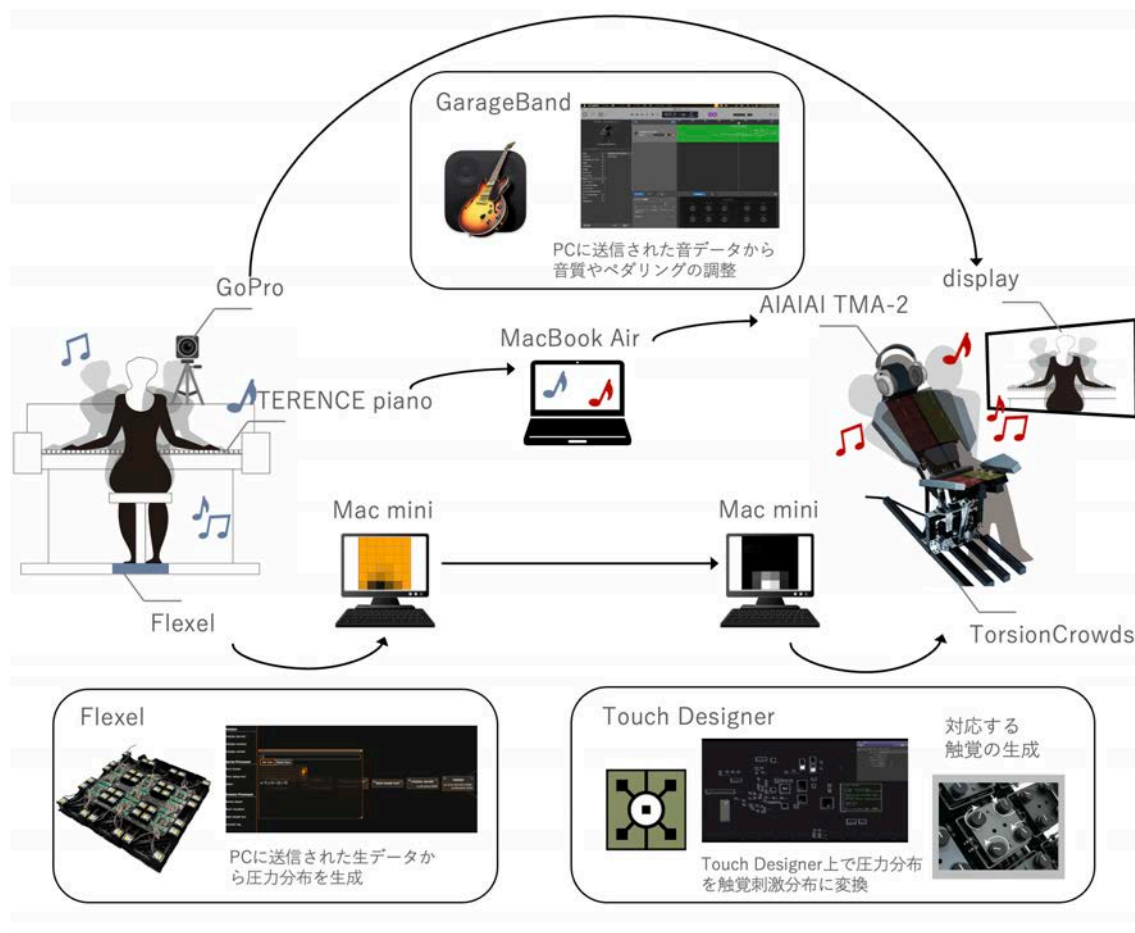


図 3.6 システム構成図

ソフトウェアはTouchDesignerによって設計された。センサーから得られたRaw-Dataはjson形式でUDPによって制御PCに送信される。受信したjson形式のデータをパースし、センサの値の行列を得る。零点補正を行った後、得られた行列を刺激強度分布として最大回転角度40度触覚生成モジュールに送信している。触覚生成モジュールでは、圧力分布データの空間的な分布に対して、ガウシアンフィ

ルタを適用して空間的な連続性を持たせている。また、0.05 秒の時間幅で時間方向にもガウシアンフィルタを適用し、センサに含まれるノイズを平滑化する処理を加えている。

3.6. 本章のまとめ

本章では、二台ピアノ演奏における視野制約および練習効率の向上に関する問題設定を行い、音楽大学生やピアニストを対象にフィールドワークを実施した。フィールドワークではインタビュー形式を用い、普段の練習方法、演奏時に感じる課題、および二台ピアノの合わせにおける進行方法について詳細な情報収集を行った。その結果、演奏者同士の「重心移動の共有」が演奏のタイミング同期に寄与する可能性が示唆された。この知見を基に、重心移動共有を核とした仮説を立て、二台ピアノにおける演奏タイミングのズレを改善するためのシステムコンセプトをデザインした。具体的には、視覚・聴覚情報に加え、触覚情報を通じて相手の身体状況や演奏動作を共有することで、演奏者同士がタイミングのズレをより認識しやすくし、効率的な同期と練習の精度向上を目指す体験をデザインした。本研究では、このコンセプトを具現化するために、椅子型触覚デバイス TorsionCrowds および圧力センサ Flexel を活用したシステムを構築し、その有効性について検証を行う。これらのデバイスを通じた体験は、演奏者は自身と相手の重心移動や身体の動きに対する新たなフィードバックを得ることが期待され、特に視野が制限される状況下においても、触覚フィードバックが同期精度の向上に貢献することを目指す。

第 4 章

Design Process

4.1. Iteration 1 : リアルタイム共有による重心移動の基礎検証

初期のプロトタイプとして、演奏者の身体動作をリアルタイムに取得し、視覚と触覚の両面から相手の状態を共有するシステムを作り検証を行った。

4.1.1 検証目的

この検証では、演奏者が視覚と触覚の両面でパートナーの動きを感じ取れるかを試し、ピアノソロ、ヴィオラソロ、ピアノとヴィオラのデュオという3つの演奏形態において、ソロ（ピアノ・ヴィオラ）とアンサンブル演奏の違いがそれぞれどのように触覚提示の認識に影響を与えるかを観察した。

4.1.2 検証手法

本検証では、リアルタイム演奏時の重心移動を触覚提示として共有するシステムの有効性を評価するため、ピアニスト1名とヴィオラ奏者1名の協力を得て、ピアノソロ、ヴィオラソロ、ピアノとヴィオラのデュオという3つのパターンで演奏実験を実施した。具体的には、図4.1のように演奏者の上半身をキーボードの前方から撮影し、モニターに映し出すことで視覚的フィードバックを提供すると同時に、床センサで取得した重心データを椅子の座面に触覚提示として出力し、演奏中の重心移動をリアルタイムで共有した。



図 4.1 ヴィオラ奏者の重心移動を体験する被験者

4.1.3 体験者からのフィードバック

ピアノ

- 座面の場所によって、感じ方が違うため調整が必要
- 思いのほか演奏中動いているため、触覚提示がわかりやすい
- 画面・触覚提示を反転した方が良い
- ピアノソロ時、左右に揺れることで引っ張られているような感覚が得られた

- ピアノ演奏時は自分自身も揺れているため、触覚提示を感じながら演奏するのは難しそう

ヴィオラ

- ヴィオラソロ時古典曲（バッハ無伴奏）が一番分かりやすかった
- ヴィオラはソロよりもアンサンブル（ピアノ・ヴィオラ）が分かりやすい
- 弦楽器は自由度が高いため、常に動いている。そのため、情報が多く少しわかりづらい

ピアノとヴィオラのデュオ

- ヴィオラと合わせる直前の、ピアノの伴奏が若干前屈みになる動きがよく分かり、アンサンブルが合わせやすそうだった
- 人によって呼吸するタイミングや、重心の置き方が違うから、その癖が練習時に分かったと良いかも

4.1.4 考察

今回の検証では、触覚提示が演奏者の動きやリズムの共有において一定の効果を発揮している可能性が示唆された。特に、演奏者の体の動きが触覚を通じて提示されることで、視覚や聴覚だけでは捉えきれない身体的な情報を直感的に感じ取ることができるかもしれない。また、アンサンブル演奏時には、触覚提示がソロ演奏時よりも効果的であるように感じられた。このことは、触覚がタイミング調整や一体感の醸成を補助する役割を果たしている可能性を示している。

一方で、いくつかの課題も浮き彫りになった。まず、リアルタイムでの触覚提示における遅延が気になる場面があり、このわずかな遅延が演奏者間の同期に影響を与える可能性が考えられる。演奏者同士が同時に演奏しながらリアルタイムで触覚提示を共有する場合、この遅延がタイミングのズレを引き起こす懸念があ

り，リアルタイム共有が演奏時の同期に適しているかについてはさらなる検討が必要である．

さらに，リアルタイムでの触覚提示を用いた共有が，演奏者の集中や表現に与える影響についても慎重に考える必要がある．たとえば，触覚提示が演奏者の意識を分散させ，逆にタイミング合わせを意識しすぎることによって自然な演奏が妨げられる可能性もあり，提示方法においては，座面の配置や触覚の強度が認識に大きな影響を与えるため，これらの調整が必要とされる．

4.2. Iteration 2 : 視聴触覚情報を組み合わせた検証

Iteration 2 では，演奏者の動き（重心移動）が触覚提示によってどのように認識されるかを評価するため，視聴触覚情報の組み合わせによる触覚提示の効果を検証した．

4.2.1 検証目的

この検証の目的は，触覚提示が視覚や聴覚と連携することで演奏者の動き（重心移動や身体の揺れ）の認識にどのような影響を与えるかを明らかにすることであり，視覚や触覚といった感覚提示の組み合わせが，演奏者の癖の把握や呼吸感の共有にどのように寄与するかを検証した．さらに，練習の初期段階や応用段階において，どの感覚組み合わせが最適であるかを検討し，触覚提示の具体的な活用方法を提案することを目的とする．

4.2.2 検証手法

本検証では，ピアニスト 1 名に参加してもらい，ピアノソロ演奏を対象に，視覚・聴覚・触覚の 3 つの感覚を異なる組み合わせで提示し，各条件下での触覚提示の認識や有効性を比較した．具体的には，以下の 3 つの条件を設定して実験を実施した．

- 視聴覚（視覚・聴覚のみ）
- 触聴覚（聴覚・触覚のみ）
- 視聴覚触覚（視覚・聴覚・触覚の全て）

なお、聴覚を除外した「視覚・触覚」の条件は音楽体験として成立しないため対象外とした。

4.2.3 体験者からのフィードバック

視覚聴覚

- 上半身しか見えず、ピアノの蓋を全開もしくは半開にするとすれば、細かい重心の動きがわかりづらい。
- 上半身が良く動く人ならまだしも、あまり動かない人だと重心の動きが分からない。
- 練習で後ろからの映像があると分かりやすいが、細かいニュアンスは分からない。

触覚聴覚

- 触覚提示により、重心の左右が分かるのと、意外と視覚が無いことによってより、触覚に意識が集中して分かりやすいと感じた。

視覚聴覚触覚

- 全ての感覚が分かるので、練習用としてこのシステムを使う場合、1番最初にこれを使うのが有効的だと感じた。理由としては、奏者の弾き方の癖をまず視覚でも認識する方がよりスムーズにいくから。

- 演奏中のどんな場面で、どういう姿勢になっているかを視覚と共に聴覚、触覚で認識すると、その後の練習に役立ちそう。
- まず、視聴触覚を体験し、その後は触聴覚で練習に取り入れるのが良さそう。

4.2.4 考察

感覚の組み合わせによる触覚提示の検証から、視覚・聴覚・触覚の3つの感覚を組み合わせることで演奏者の動き（重心移動）がより明確に認識できる可能性が示唆され、視覚を通じて演奏者の姿勢や癖を把握しつつ、聴覚と触覚で補完することで、総合的に動きを理解しやすいと感じられた。このことから、練習の初期段階で視聴触覚を利用することで、奏者自身や指導者が演奏癖を効果的に把握できる可能性がある。

一方で、視覚がない触聴覚の条件では、触覚への集中が高まり、左右の重心移動を明確に感じ取れるという報告があったが、この結果は、視覚情報がないことで触覚に意識が向きやすくなるが、視覚情報がないことで全体的な動きや姿勢を捉えるのが難しい場面も想定され、触聴覚が適しているのは細かな動きの調整や応用段階での練習かもしれない。また、視聴のみの条件では、重心の動きが分かりづらいという意見が多かった。特に、ピアノの蓋を開けた場合や、上半身の動きが少ない奏者では、細かな重心移動を視覚的に把握するのが難しかった。このことから、視覚のみでは限界があり、他の感覚と組み合わせる必要性が示唆された。

今回の検証では、視聴触覚が最も包括的な情報を提供できる組み合わせとして評価され、練習初期段階での利用に適している可能性が示された。その後、触聴覚を活用することで、触覚を中心とした練習を進めると、重心移動や動きの細部に集中しやすいかもしれない。また、視覚が演奏者間の動きの把握を助ける一方、触覚が演奏者自身の感覚を補完する役割を果たす可能性がある。しかし、この結果が全ての奏者や状況に当てはまるとは限らず、使用感や効果は個々の演奏スタイルや楽曲の性質に左右される可能性があり、視覚・触覚提示の方法や環境が認識に与える影響についても追加の検証が必要である。

4.3. Iteration 3 : 記録・再生による演奏時の重心提示

リアルタイム共有による触覚提示の検証に続き、演奏者が時間や場所に縛られずに練習を行える環境を提供するため、記録・再生を利用した重心提示システムを構築した。

4.3.1 検証目的

演奏時に取得した重心移動データを記録し、触覚提示として再生することで、アンサンブル練習の補助だけでなく、個々の演奏者が自身の動きを見直し改善するためのシステムを開発した。これは、演奏の質を高めるだけでなく、練習環境の柔軟性を向上させる新たなアプローチを提供することを目指し、システムがソロやアンサンブルの個人練習にどのように作用するのか検証を行った。

4.3.2 検証手法

検証では、ピアノソロと二台ピアノの演奏において、記録された触覚データが演奏者のタイミング調整や動きの理解にどのように寄与するかを評価した。また、二台ピアノの検証では、演奏者間のタイミングのズレを改善し、練習効率を向上させるために、触覚提示を用いた以下のような3つの異なる条件を設定し、それぞれの効果を評価した。

1. 1st ピアノの演奏データを触覚提示として出力。
2. 2nd ピアノの演奏データを触覚提示として出力。
3. 1st および 2nd ピアノのデータを混合し、リーダーに当たる演奏者の動きに焦点を当てた触覚提示を出力。

さらに本検証では、1st ピアノと 2nd ピアノの演奏者それぞれにデータ収録に協力してもらい、上記3つの条件で現役のプロピアニストに触覚提示を体験してもらい、触覚提示がタイミング調整や一体感の向上にどのように寄与するかを評価した。

4.3.3 体験者からのフィードバック

ピアノソロ

- 重心が前になる時 (演奏時, 力強くなる部分) に, 椅子の触覚提示が分かりやすい.
- 演奏家にとっても, 今後の研究, 自己研鑽にもつながる. アンサンブルすることの可能性を広げてくれるかもしれない
- 触覚が足りない. 重心がかなり動かないと動かないから, 演奏中はもっと繊細な重心, 動かない人もいるからこそ, ちょっとした移動ももっとオーバーにデバイスが動いてくれるといい
- それぞれの癖. 門下生によっても違う. 引き方が変わるのは重心も変わって. だから, それがわかると面白い
- 音が大きすぎると触覚に気がいかないやるのであれば, 音は最小にする
- 最初は聴覚>視覚だが, 最終的には=バス, 重くするときにはめっちゃ左に行く. 薄いときは右後ろに重心を置く.
- 音大の室内がくとかアンサンブルの授業に取り入れるといいかも
- 最終的なゴールは, ピアノ五重奏とか, ピアノトリオとか, の授業で取り入れると面白い. 今回は, 聴覚と触覚のみ. 視覚は使わない

2台ピアノ

- 練習用で使うのであれば, メロディをずっと追うのは実用的ではない. 理由は, どちらか片方の重心が分かった方が, もう片方が合わせ安い.
- 視覚と触覚は意味がないけど, 相手の動きは分かる, でも, それが演奏とはコネクトしない
- 譜読み後の1番最初の時に体験すると良い

- 1 の 1st ピアノの演奏データを触覚提示として出力するやり方が一番わかりやすかった.
- 3 の mix バージョンはリーダーが複雑に切り替わることでわかりにくかった.

4.3.4 3つの展示会及び体験会でのデモンストレーション

本研究のシステムを幅広い年齢層や様々なバックグラウンドを持つ人々に評価してもらうため、3つ展示会や体験会でのデモンストレーションを実施した. この体験会は、音楽経験者に限定せず、多様なユーザーがシステムを利用した際の操作性や効果を確認し、改良のためのフィードバックを得ることを目的としている.

実施内容

デモンストレーションは以下の3つの異なるイベントで行われ、子供から大人まで男女約70人以上の参加者に体験してもらった.

1. 日本科学未来館での研究棟ラボツアー企画「カラダで感じる！カラダをあそぶ！未来のコミュニケーション」¹(図4.2)
 - 2024年6月2日
 - 日本科学未来館
2. VRSJ2024²(図4.2)
 - 2024年9月12日
 - 名城大学天白キャンパス

1 カラダで感じる！カラダをあそぶ！未来のコミュニケーション <https://www.miraikan.jst.go.jp/events/202406023467.html>

2 VRSJ2024 <https://conference.vrsj.org/ac2024/>

3. KMDforum³(図 4.3)

- 2024 年 10 月 12 日～14 日
- ポートシティ竹芝

参加者には実際に 2 分 30 程度のシステムの触覚提示や視覚的フィードバックを体験してもらった。これにより、システムの直感的な操作性や、音楽に対する興味や理解がどのように深まるかを評価するための多様な意見を収集することができた。



図 4.2 日本科学未来館での体験会（左）と VRSJ2024 での体験会（右）

3 KMDforum <https://forum.kmd.keio.ac.jp>



図 4.3 KMDforum でのデモンストレーション

参加者からのコメント

- ピアノ演奏時の動きが分かって面白い体験だった！
- ピアノ演奏時こんなに全身を使って演奏しているなんて知らなかった！
- 自分も揺れているような感じがする
- 演奏者側の動きを知れるのはとても面白いので、コンサート会場などの椅子もこれだと面白い鑑賞体験ができそう
- 背中も動いたらもっと楽しそう！

- 親子で体験できるのが楽しい
- ゾワゾワする
- ちょっと気持ち悪い感じ
- 演奏している感じがする
- 動いているのは分かるが不思議な感じがする
- 初めての感覚
- マッサージされている感じがする
- 結構強め
- 太ももがもぞもぞする
- 楽器演奏以外で試してみたい
- 普段演奏する時の身体はこうなっているのか！と新しい発見と驚きがあった
- 面白い体験で自分の演奏時の動きも収録してみたい
- 映像と触覚が反転しているので少し違和感(2台ピアノ用に反転したものをデモで使いました.)
- これからどんな風に進展していくか楽しみ
- 太ももの前側に刺激を感じる(ピアノは前屈みで演奏するため)
- 黒鍵の時がわかりやすかった
- 重心移動というより、演奏者の緊張感のようなものが伝わった(デバイスに座っている時に引っ張られるような感覚があった)
- このデバイスでもいいが別の触覚提示方法もあるかもしれない

- 目の前に自動演奏ピアノを置いて、演奏者の重心・映像と鍵盤が連動しているような体験があれば面白そう
- 他の作曲家や作品によってどんな違いがあるのか気になる。例えば、モーツァルトやバッハなど跳躍が少ない古典作品だと、あまり動かなそう

4.3.5 考察

検証後のコメントから、ピアノソロでは、力強く演奏する際に重心が前方に移動する場面で触覚提示がわかりやすいと評価され、触覚提示が演奏中の身体的変化を直感的に伝える手段として機能する可能性がある。一方で、触覚提示の感度が十分ではなく、微細な動きを感じ取るにはデバイスの反応を強調する必要があるとの指摘があった。特に、動きの少ない演奏者や繊細な重心移動の場合でも、認識しやすくするための調整が課題となる。また、重心の変化が演奏者の癖や演奏スタイルを反映している点については、演奏者自身や指導者が興味を持ち、練習や教育において活用できる可能性が示唆された。たとえば、門下生ごとの演奏スタイルの違いが可視化されることで、教育現場での新たな指導手法の一助となるかもしれない。

次に二台ピアノの検証結果では、1の条件が最もわかりやすく、触覚提示によって2ndピアノの演奏者が1stピアノの動きを認識しやすいことが示された。この結果は、一般的にリーダー役となる1stピアノの動きを2ndピアノの演奏者が直感的に把握することが、タイミングのズレ改善に寄与する可能性を示唆している。一方で、3の条件は、データが混合されることで情報が複雑になり、動きを認識するのが難しいとの意見から、1stピアノのデータを2ndピアノの演奏者に提示する方法が、二台ピアノの練習において特に有効である可能性が示された。

しかし、触覚提示の内容やデータが適切でない場合、情報量が多すぎることで逆に認識が難しくなる可能性も示唆された。触覚提示が視覚的フィードバックと組み合わせられても、必ずしも演奏と直結しない場面があるため、使用目的に応じた提示方法の調整が求められる。さらに、触覚提示がタイミングのズレ改善だけでなく、練習の効率化やアンサンブル全体の一体感向上にどのように寄与するか

について、追加の検証が必要である。

4.4. Iteration 4 : 視覚表現の検討

Iteration 4 では、演奏者の動きや相互作用を視覚的に捉えるためのフィードバックシステムを構築し、その有効性を検証した。

検証目的

本検証の目的は、二台ピアノ演奏における演奏者同士の動きや相互作用を視覚的に把握しやすくするために、どのようなフィードバックが有効であるかを明らかにすることである。特に、身体の動きやタイミングの取り方を視覚的に伝える手法を検討し、演奏者が相互理解を深め、演奏の一体感を高められるフィードバック方法の特定を目指す。またこの視覚的フィードバックは、音楽の物理的な同期や表現だけでなく、演奏者間に存在する見えない絆や緊張感をも可視化し、体験者が音楽のダイナミズムや協調のプロセスを深く理解する一助となることを目指している。

検証手法

このシステムでは、Kinect センサーを用いて演奏者の上半身の動きを精密に解析し、その輪郭を抽出した後、パーティクルエフェクトを用いて動的に加工することで、演奏の進行に応じた変化する視覚表現を生成した (図 4.4)。また、視覚的表現では、1st ピアニストを赤、2nd ピアニストを青の粒子状の輪郭で表現し、二人の動きやジェスチャーが音楽の進行に合わせて描き出され、演奏が完全に同期する瞬間には、青と赤の粒子が混ざり合い紫色へと変化し、音楽の一体感と協奏の美しさを視覚的に表現する。一方、ソロ演奏時には青と赤の輪郭が乖離し、それぞれの方向へ流れることで、演奏者間の役割や音楽的対話を直感的に伝える仕組みとなっている。



図 4.4 パーティクルエフェクトを用いた視覚表現

本検証は、パーティクル加工を用いた体験、リアルな演奏映像と混合した体験、の二つの条件のもと、現役のプロピアニストに触覚提示を体験してもらいフィードバックをもらった。

体験者からのフィードバック

- モザイクはもっと細かくしたほうがいい。
- ぼやけ過ぎてわかりづらい。
- 映像が遅れているのが気になる
- リーダーの方に触覚提示をフォーカスした方が分かりやすそう。
- リアルな映像と一緒に写すとわかりやすい

考察

フィードバックにおいて、映像におけるパーティクル表現が粗く、演奏者の細かい動きを捉えるのが難しく、映像がぼやけているため動きがわかりにくい、またタイムラグが演奏者の集中を妨げるといった指摘から映像処理の改善と、鮮明な映像提示が求められ、主要な情報提示にはリアルな演奏映像を活用する。また、肩や頭部の動きなど、タイミングの把握に重要な部位を明確に捉えるため、カメラの設置位置を背後に変更することにより、身体全体の動きを把握しやすくとともに、リーダー役の演奏者の動きが他の演奏者にとって理解しやすくなると思った。

4.5. アプローチ方法の再考

Iteration1～4 までの検証結果をもとにアプローチ方法の再考を行った。

4.5.1 リアルタイム共有から個人練習用システム

Iteration1 の検証では、二台ピアノ演奏におけるズレの改善を目指す体験において、リアルタイムでの情報共有の難しさが示唆され、Iteration3 では、1st ピアノと 2nd ピアノそれぞれにフォーカスした体験を実施した結果、リーダーである 1st ピアノに焦点を当てた体験が高く評価された。これを受け、リアルタイム共有というアプローチから、個人練習に特化したシステムへと方向性を見直し、体験やシステムデザインの再構築を行った。

4.5.2 システムの再構成

リアルタイム共有から個人練習用システムへの移行により、以下の手順 (図 4.5 で記録・再生を行う。

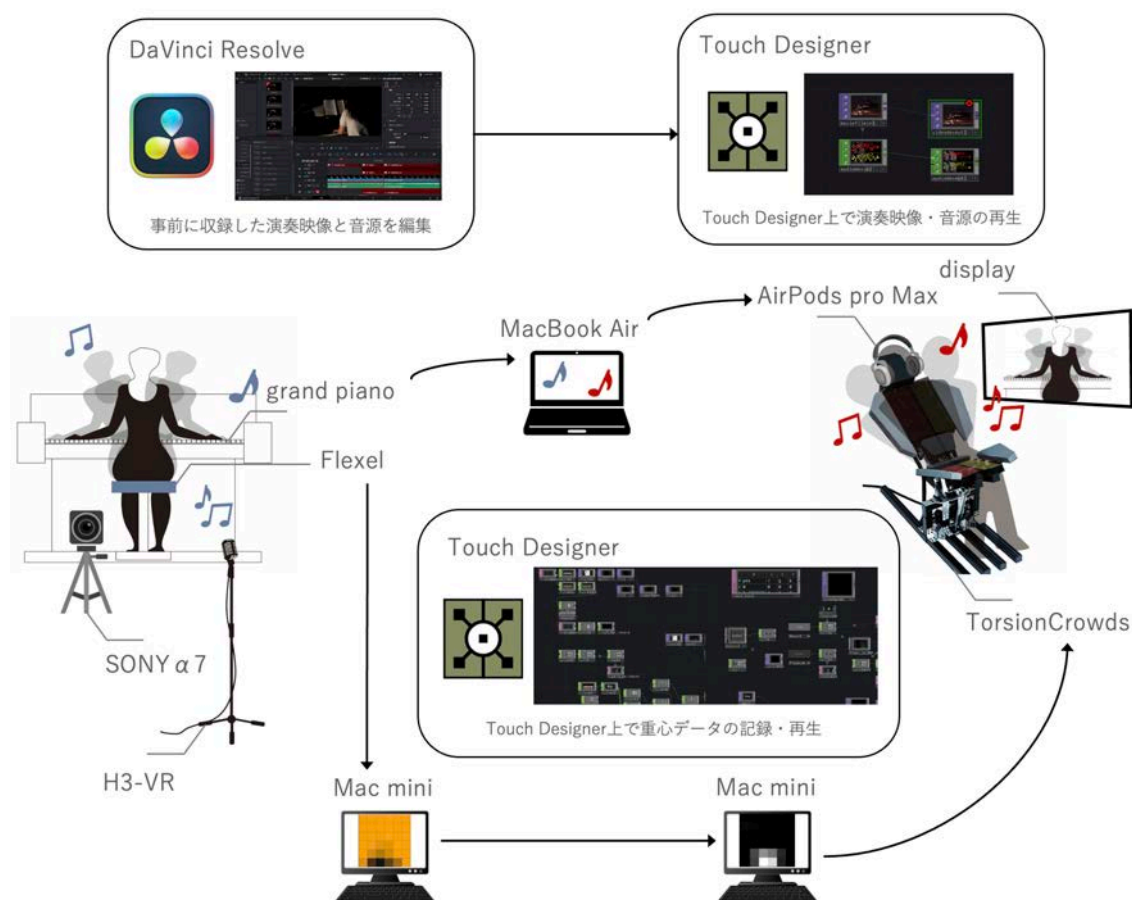


図 4.5 記録・再生用システムの構成図

4.6. 予備実験：二台ピアノ奏者の個人練習支援システム

4.6.1 概要

本実験では、リーダーである 1st ピアノのデータ（演奏映像・重心）を記録し、図 4.6 のような体験を通じて 2nd ピアノの演奏者が練習に用いる。この練習中の体験や合同練習の体験の主観評価を行い、さらに、システムを用いた練習後のズ

レの頻度の変化を調査する.



図 4.6 個人練習用システムを体験をする被験者

実験参加者

本実験では 1st ピアノを筆者が担当し，実験参加者として，音楽大学修士 1 年生のピアニスト 1 名に 2nd ピアノを担当してもらい，以下の曲で実験を行った．

- Brahms: Sonata for 2 Pianos, Variations on a Theme by Haydn Op. 56b, Choral St. Antoni - Andante

4.6.2 実験スケジュール

本研究では，2nd ピアノ演奏者向けの演奏支援システムの効果を検証するため，以下の手順で実験を行った．

1. 初回対面合同練習：1st ピアノと 2nd ピアノの演奏者が合同で練習を行い、ズレの箇所を記録
2. 1st ピアノのデータ記録：1st ピアノ演奏者の演奏映像・音源と重心データを記録
3. 2nd ピアノ演奏者による支援システムを用いた事前練習
 - (a) 視覚・触覚・聴覚情報を統合したシステムでの練習を実施
 - (b) 触覚・聴覚情報のみのシステムで複数回練習を実施
4. 二回目の対面合同練習：システムを用いた練習後に再度合同練習を実施し、ズレの箇所を再測定
5. 2nd ピアノ演奏者の主観的評価の収集

4.6.3 評価方法

また検証方法として、演奏者の主観的な認識に基づくズレの評価方法を採用し、技術的な計測では捉えきれない微妙な音楽的ズレを評価することを目的としている．具体的には、記録した演奏を元に、1st ピアノ奏者と 2nd ピアノ奏者の両者がズレを感じた箇所に楽譜上に印をつけた後、両者でディスカッションを行い、合意のもとで最終的なズレの箇所を決定する．この方法により、リズムだけでなくフレージングや表現のタイミングの不一致も含めた、微妙な同期のズレを評価することが可能となり、この結果から演奏精度の向上や練習の効率化に与える影響の可能性を検証する．

4.6.4 結果

本実験では、提案システムの効果を評価するため、1st ピアノと 2nd ピアノの間で生じるタイミングのズレをシステム使用前後で評価した．図 4.7 にあるように、システム使用前の初回合同練習では、タイミングのズレが 18 回観察された．これ

に対し、提案システムを用いた個別練習を経た後の二回目の合同練習では、タイミングのズレの回数が8回に減少した。

また、2nd ピアノ演奏者の主観的な評価として、「譜読み後の1番最初の時に体験すると良い」「演奏家にとっても、今後の自己研鑽にもつながる。アンサンブルすることの可能性を広げてくれるかもしれない」「それぞれの癖がわかるといい。門下生によっても弾き方が違う。弾き方が変わると重心も変わってくるから、それがわかると面白いかも」「音が大きすぎると触覚に集中できないので、音は最小にして欲しい」「触覚が足りない。重心がかなり動かないと感じない。演奏中はもっと繊細な重心、動かない人もいるからこそ、ちょっとした移動ももっとオーバーにデバイスが動いてくれるといい」「音大の室内楽やアンサンブルの授業に取り入れると面白そう」などの主観的フィードバックを受けた。

特に譜読み後の初期段階での利用が効果的であると指摘され、演奏家の自己研鑽やアンサンブルの可能性を広げることが示唆されたが、現状のシステムにはいくつかの改善点が挙げられ、触覚提示において、より繊細な重心移動も検知できるよう調整が必要とされた。

さらに、視覚情報と触覚情報の関係性については、演奏との直接的な結びつきは薄いものの、相手の動きを理解する上では有用であるとの見解が示され、聴覚情報と視覚情報の重要性のバランスが、練習の進行に伴って変化することも指摘された。

The image displays four pages of musical notation for the piece "Variationen über ein Thema von Jos. Haydn" by Johannes Brahms, Op. 50. The notation is arranged in two columns, representing the first round (top) and the second round (bottom) of a preparatory experiment. Each page shows the score for two pianos (Klavier I and II) and includes red and blue annotations. The first round (top) features red annotations, while the second round (bottom) features blue annotations. The annotations highlight specific musical phrases and structures, likely for analysis or comparison. The pages are numbered 1, 2, 3, and 4, corresponding to the first and second rounds of the experiment.

図 4.7 予備実験の結果：初回合わせ（上）2 回目の合わせ（下）

4.6.5 考察

本実験の結果から、提案システムが二台ピアノ演奏の同期性向上と演奏者間の理解促進に寄与する可能性が示唆され、特に相手の癖や息遣いをより理解できたという評価は、本システムが単なる技術的な同期だけでなく、芸術表現においての深い共感の醸成にも貢献し得ることを示している。また、息遣いの共感はアンサンブルにおいて極めて重要でありながら、従来言語化が困難であった要素であるが、本システムがこの感覚共有を促進できる可能性があることは、音楽教育や合奏練習の新たなアプローチを示唆している。

しかし、この結果は単一の試行に基づくものであり、有意性を主張するには更なる反復実験が必要であり、ズレの減少が純粋にシステムの効果によるものか、あるいは単純な練習効果や慣れによるものかを区別するためには、従来の練習方法との比較調査をする必要がある。例えば、システムを使用した場合と、使用しなかった場合のズレの頻度や、主観的評価を比較実験を行うことで、システムの効果をもっと明確に評価できる。

加えて、本実験で採用した主観的なズレの評価方法は、演奏者の音楽的感覚を反映する上で有用である一方、評価の客観性という点では課題が残るため、この主観的評価と客観的な音響分析や動作分析を組み合わせることで、より多角的かつ精密な評価方法を確立する必要がある。

4.7. 本章のまとめ

本章では、第3章で提案したコンセプトを基に、システムの検証と体験のブラッシュアップを複数回にわたって行った。まず、リアルタイム共有による重心の基礎検証を実施し、触覚提示が演奏者同士の動きやリズムの共有に対して一定の効果を発揮する可能性が示された。特に、触覚情報を加えることで、従来の聴覚や視覚に頼った演奏とは異なるアプローチが可能になり、演奏の同期精度向上への手がかりが得られた。一方で、リアルタイム共有システムには課題も浮き彫りとなり、システムの調整や改善が必要であることが明らかとなり、記録・再生機能を活用した重心提示システムを構築し、より効果的な演奏支援体験を目指した。

また、記録再生システムの構築により、システムの機能性と体験デザインの実用性について理解を深めると同時に、視覚表現の最適化についても検討を行った。その結果、リアルタイム共有から個人練習支援システムへとアプローチを見直し、予備実験を実施した。この予備実験では、演奏タイミングのズレが減少する傾向が見られたものの、あくまで単一の思考・条件下での検証に留まり、さらなる反復実験や多角的な検証が必要であると考えられる。本章を通じて、触覚情報を軸とした重心共有が演奏者のリズム感覚や動きの精度向上に寄与する可能性を示す一方で、システムの改善点や練習方法の深化に向けた課題も明確になった。

第 5 章

Proof of Concept

5.1. プロトタイプの再設計

5.1.1 Resonant Dialogues

4 章でのアプローチ法再考により，リアルタイム共有システムから個人練習用システムへと変更した．これにより，持ち運びが可能で，ピアノ奏者の特性に適したデバイス形状に再設計し，新たなプロトタイプの開発を行った．(図 5.1)



図 5.1 重心計測椅子 (左) と触覚提示椅子 (右)

5.1.2 重心計測椅子 (ピアノ椅子)

新たに設計された重心計測椅子は、従来のピアノ椅子の形状に倣い、(図 5.2) のように正方形から長方形へと改良された。

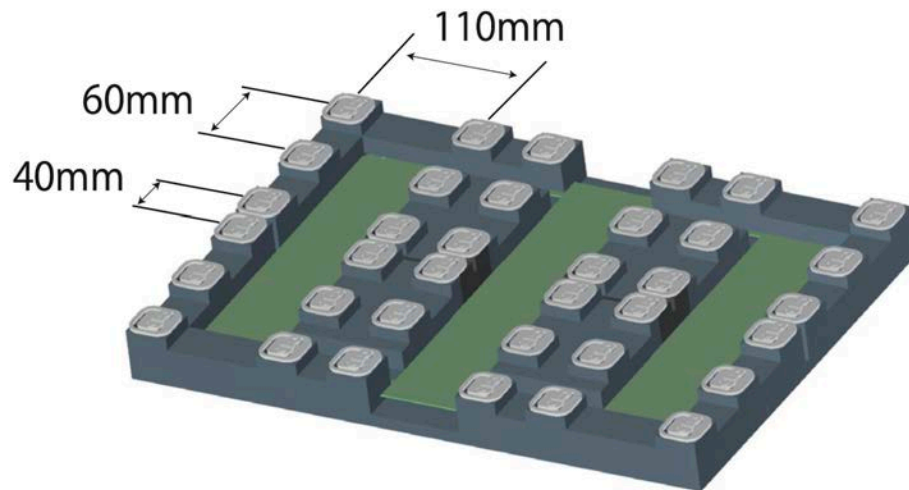


図 5.2 体重が均等に分散するよう再設計された座面の配置と構造

この形状変更により、圧力センサに体重が均等に分散するよう、図 5.3 の通り配置と構造を再設計し、さらには、椅子を持ち運び可能にするため、組み立て式の軽量の椅子脚を採用し、簡易的かつ実用的な仕様を実現した (図 5.4)。

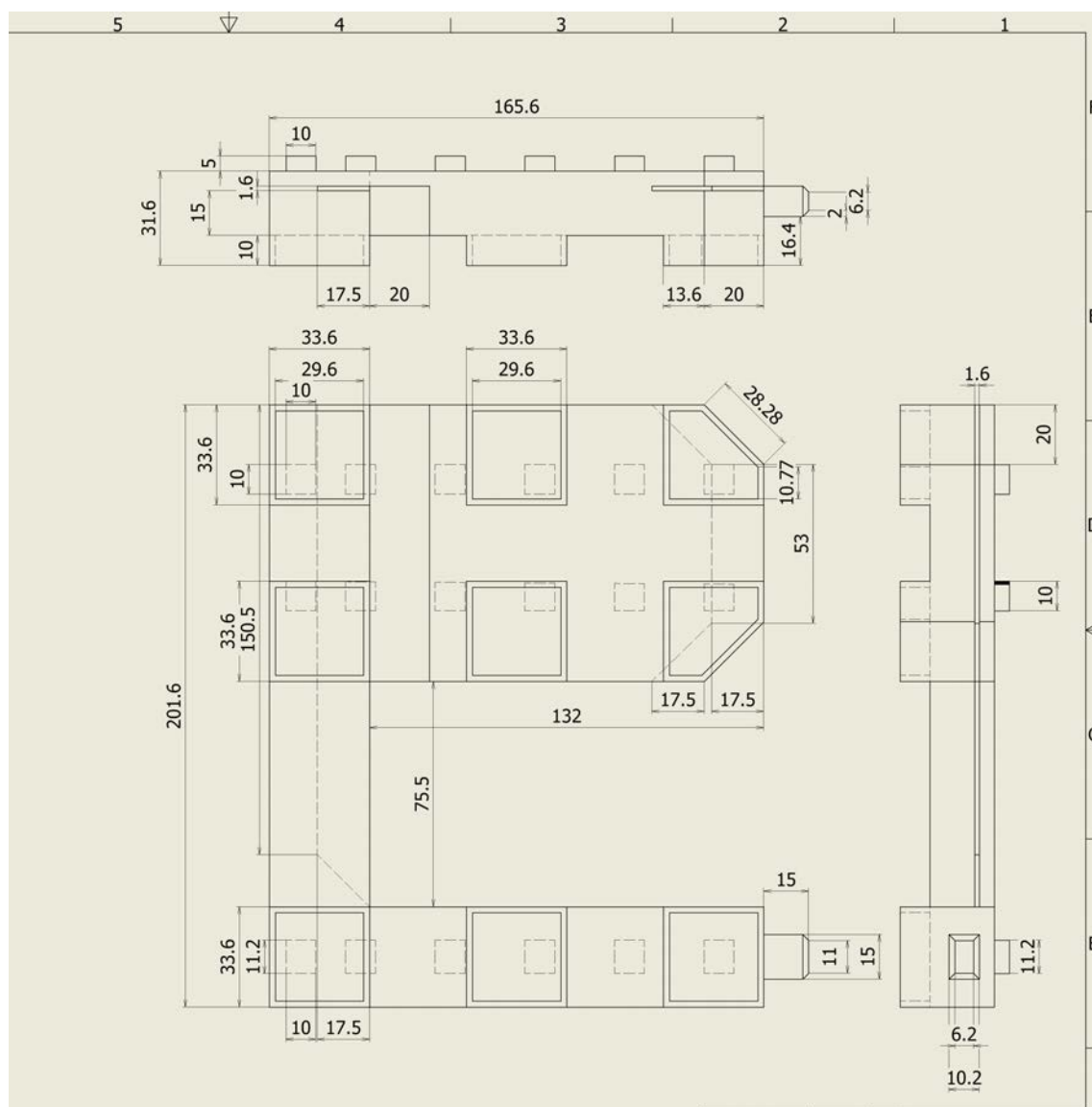


図 5.3 重心計測椅子の設計図

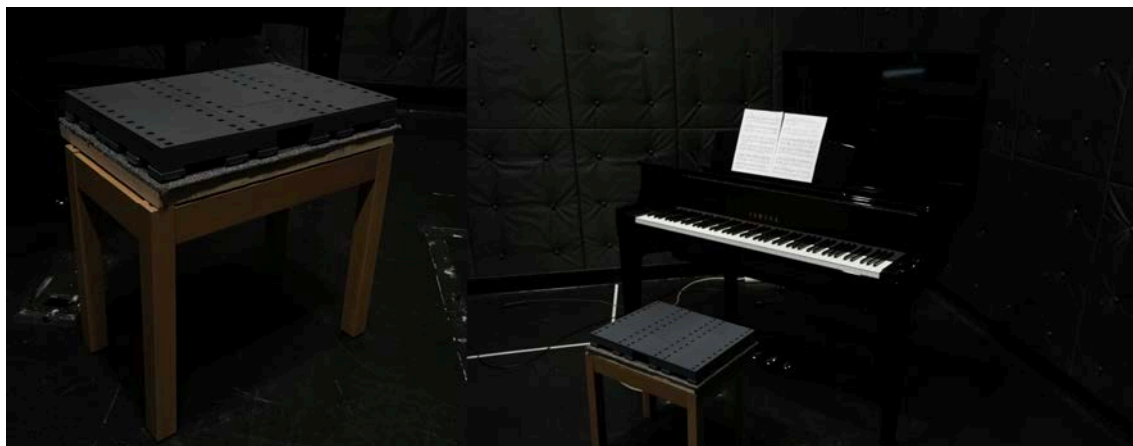


図 5.4 重心計測椅子 (ピアノ椅子)

5.1.3 触覚提示椅子

従来の触覚提示椅子は背もたれを備えた重厚な構造であったため、携帯性や実用性に課題があった。これを改善するため、背もたれを廃止し、座面部分のみを使用する構造に変更した (図 5.5)。さらに、ピアノ椅子としての機能を維持しつつ持ち運び可能なデザインとするため、組み立て式の簡易的な椅子脚を採用し、デバイスの装着も考慮した設計を実現した (図 5.6)。

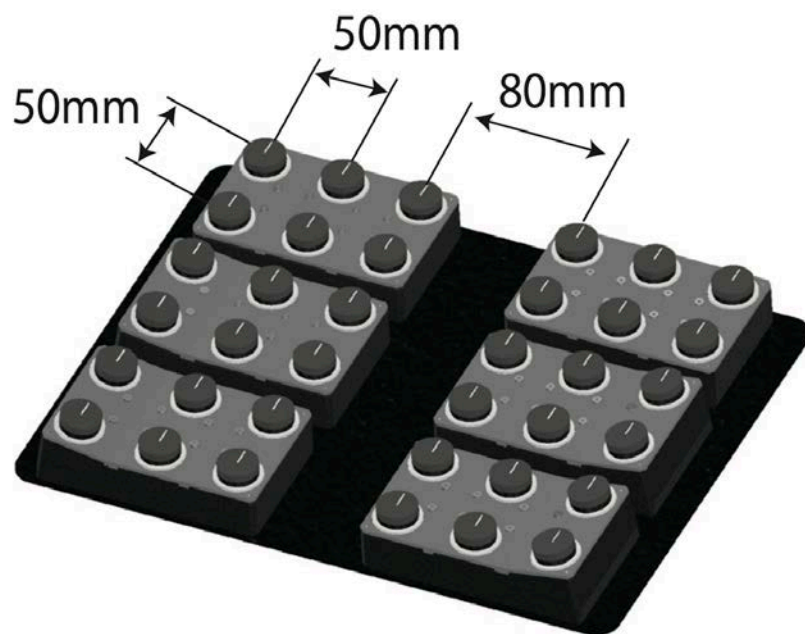


図 5.5 ピアノ椅子の寸法に合わせて再設計された座面の配置と構造

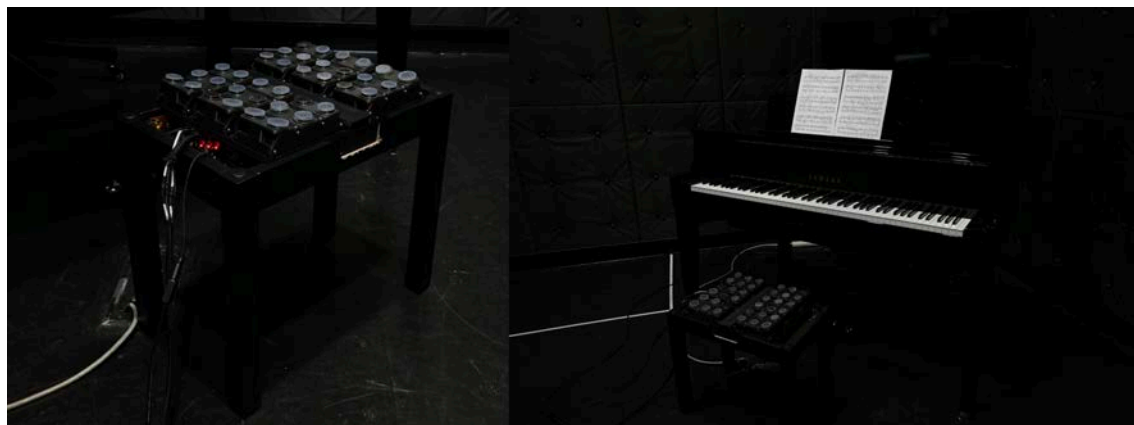


図 5.6 練習用触覚提示椅子

5.2. システム検証実験

システム検証実験では，開発したシステムが期待通りに動作しているかを確認し，その有効性や課題を明らかにするために行う．本研究での二台ピアノ演奏の同期を支援するシステムの上では，その効果を客観的に評価することが必要不可欠であり，システムの導入が体験者の動作共有やタイミングの同期にどのような影響を及ぼすかを定量的に観察する．

5.3. 検証1 マグニチュード推定法

5.3.1 実験目的

検証1では，被験者に提示される異なる強度の触覚刺激について，被験者が主観的に感じる強さを数值的に評価させる．これにより，システムが生成する刺激と被験者の感覚との対応関係を明らかにし，システムが意図通りの刺激強度を提示できているかを定量的に評価する．演奏時の微細な重心移動を共有させるために本実験では，刺激の提示がパフォーマンスに与える効果を定量的に観察・評価する．これにより，システムが動作共有および演奏精度向上に寄与するかどうかを明確にすることを目指し，定量的に分析する．

5.3.2 実験設定

実験時間 5～10 分/人

場所 慶應義塾大学日吉キャンパスメディアスタジオ

人数 10 人（20 代男女）

事前に用意した，5 段階の刺激強度（右×5，左×5）のデモをランダムで計 30 回再生し，被験者に答えてもらう．

5.3.3 触覚設計

標準 3 の回転角を $19.1[^\circ]$ とし, 5 段階の刺激強度を次のように設定する.

1: $6.4[^\circ]$

2: $12.9[^\circ]$

3: $19.1[^\circ]$

4: $25.6[^\circ]$

5: $32.0[^\circ]$

5.3.4 実験手法と条件

1. 実験説明
2. 被験者が触覚提示椅子に座り, 事前に収録した 1～5 段階のデータ (右のみ) をそれぞれ 2 回ずつ体験してもらう.
3. 左右の刺激 (L1～L5, R1～R5) をランダムに再生し, 各刺激の強度に対してどのレベル (1～5) に相当するかを回答してもらう. これを 10 回× 3 回, 合計 30 回行う.

5.3.5 評価方法

各刺激に対する被験者の評価 (L1～L5, R1～R5) を書き出し, 刺激強度と主観的評価を比較する. 刺激強度と被験者の感じた強度の対応関係を視覚化し, 左右の刺激がどの程度の強度で認識されるかの傾向を示す.

5.3.6 結果

検証 1 でのそれぞれの結果を (図 5.7) に示す.

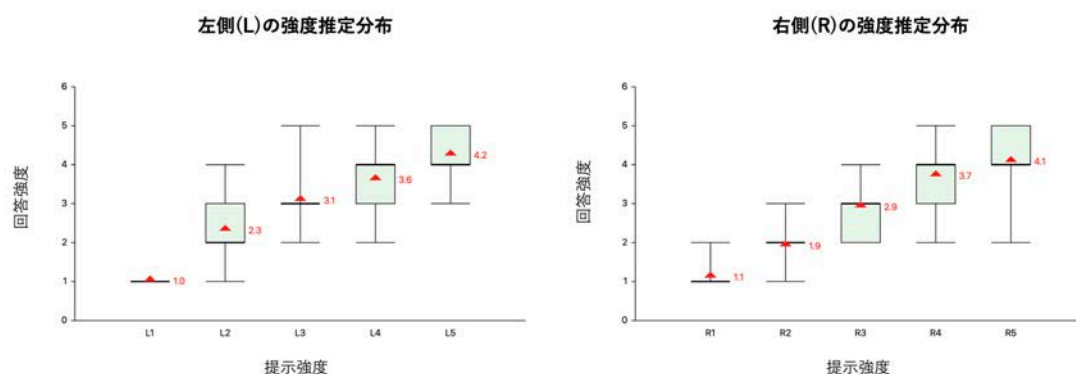


図 5.7 検証 1 の結果：左側の強度推定分布（左）と右側の強度推定分布（右）

まず、左右の正答率は 100 % であり、R1 および L1 といった最低刺激は多くの被験者において一貫して正確に評価される傾向が見られた。一方で、R3～R5 および L3～L5 といった中～高強度刺激については、試行間での評価のばらつきが各被験者において共通して観察された。右側では、提示強度の増加に応じて知覚強度の評価も段階的に上昇し、平均値は強度 1 から 5 に対して、1.1, 1.9, 2.9, 3.7, 4.1 と概ね線形に増加している。左側でも同様に、提示強度の増加に伴って知覚強度の評価が上昇し、平均値は 1.0, 2.3, 3.1, 3.6, 4.2 となっており、右側と同様の傾向を示している。両側とも、強度レベルが上がるにつれて評価のばらつきが大きくなる傾向が見られ、特に中間的な強度（レベル 2～4）で顕著であった。これらの結果から、左右ともに振動強度の段階的な知覚が可能であることが示されたが、強度が強くなるほど知覚の個人差が大きくなる傾向が確認された。

5.3.7 考察

本検証では、マグニチュード推定法を用いて、被験者が異なる刺激強度をどのように主観的に評価するかを確認し、全体的に安定した評価が得られた。一方で、中～高強度刺激の評価ばらつきや、刺激に対する主観的な感じ方には個人の感覚特性や感度の差が影響しているため、個人差や刺激強度の認識限界も明らかにな

り、今後は被験者個人に添った刺激強度の調整や試行回数と慣れの影響も考慮した上での評価実験が必要となる。

5.4. 検証 2 産出法

5.4.1 実験目的

本検証では、被験者が提示された簡単な動作（左右に揺れる動作）を模倣する際の精度を評価し、その動作の分析を通じてシステムの有効性を検証することである。具体的には、被験者に対して基準となる動作を提示し、その動作を模倣してもらう。模倣動作の精度は、撮影した映像を基準動作時の映像と重ね合わせることで比較・分析し、被験者の動きがどれだけ忠実に再現されているかを評価する。また、動作の軌跡やタイミングのズレ、重心移動の偏差といった要素を解析することで、システムが動作精度向上に寄与しているかを明確にする。この評価により、提示された動作情報が被験者に正確に伝わり、模倣動作が適切に再現されるかどうかを検証し、システムの動作支援機能の有効性を客観的に示すことを目指す。

5.4.2 実験設定

実験時間 10～15 分/人

場所 慶應義塾大学日吉キャンパスメディアスタジオ

人数 10 人（20 代男女）

被験者に事前に収録した簡単な動作（左右に揺れる）の触覚提示を行い、被験者に実際にその動作を模倣してもらう。その際の映像と事前収録した映像を重ね分析する。

5.4.3 触覚設計

実験では図 5.8 の通り 6 パターンの左右に揺れる動作を事前に収録し，触覚提示として出力する．

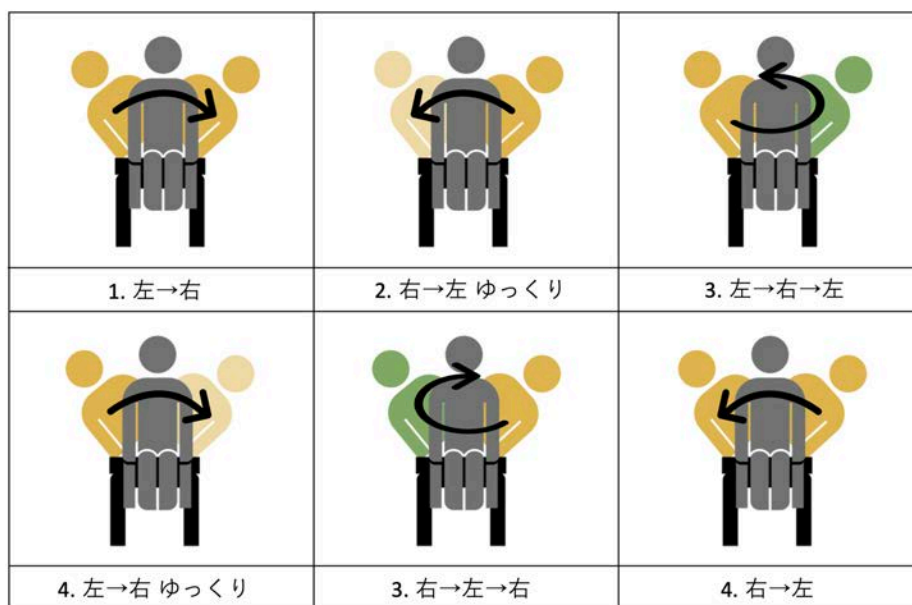


図 5.8 左右に揺れる動作の触覚提示

5.4.4 実験手法と条件

1. 事前に収録した簡単な動作 (左右に揺れる等) の体験練習を行う (30 秒)．練習は約 30 秒行い，動作と触覚提示がどのように結びつけられているかの理解を深めてもらう．
2. 実験用の 10 秒間の簡単な動作 (左右に揺れる等) を 2 回提示する．
3. 触覚提示した後，被験者に動作を模倣してもらい，その時の動きを正面からキネクトと Gopro で撮影する．これを合計 6 回行う．

4. 実験終了後、実験時に撮影した映像と本番用のデモ収録時の映像を重ね合わせ分析する。

5.4.5 評価方法

実験時に撮影した映像と本番用のデモ収録時の映像を重ね合わせ分析することで、被験者がどれだけ正確に動作を模倣したかを評価する。評価方法は、動作が同じ場合○、速度や動きが異なる場合△、左右の場合×とする。

5.4.6 結果

検証 2 でのそれぞれの結果を (図 5.9) に示す。

	①	②	③	④	⑤	⑥
	左→右	右→左・遅	左→右→左	左→右・遅	右→左→右	右→左
被験者A	○	○	○	○	○	○
被験者B	△	○	○	○	×	×
被験者C	○	△	△	○	△	○
被験者D	○	○	△	△	○	○
被験者E	○	○	△	○	○	○
被験者F	△	○	△	○	△	△
被験者G	△	○	○	○	○	○
被験者H	△	○	○	○	○	○
被験者I	△	○	○	○	○	○
被験者J	○	○	○	○	○	○

図 5.9 検証 2 の結果

動作パターン別に見ると、パターン 4 (左→右・遅) では 10 名中 8 名が完全な模倣に成功し、最も高い再現率を示した。一方、パターン 1 (左→右) では完全な模倣が 6 名、速度や動きの違い (△) が 4 名であることや、複雑な動作であるパターン 3 (左→右→左) では、完全な模倣が 5 名、部分的な違いが 5 名と、被験

者間でばらつきが見られた。また、パターン5（右→左→右）でも同様の傾向が見られ、動作が複雑になるほど正確な模倣が困難になることが示唆されたが、全体として、単純な動作や遅い動作の方が正確に模倣できる傾向があり、複数の方向変更を含む複雑な動作では、模倣の精度にばらつきが生じることが確認された。

5.4.7 考察

検証2の結果から、全体として動きの模倣は安定して行われ、システムが動きの提示および再現に一定の効果を持つことが示唆された。しかし、動きの速度が速くなる場合や、複雑な動作が提示された際に再現の誤差が増大する傾向が見られた。これは、被験者が視覚的または身体的に動きを正確に捉えることが難しくなることに起因すると考えられ、今後は速度や動作特性に応じて提示方法を調整し、被験者の認識を支援するためのシステム調整が求められる。具体的には、被験者ごとの認識力や運動能力に合わせたカスタマイズ機能やフィードバックシステムを導入することで、動作認識を可能にし、動きの認識が難しいケースに対しては、視覚的な提示だけでなく触覚フィードバックを組み合わせることで、被験者の動作模倣をより効果的に支援できると考えられる。

5.5. 二台ピアノ演奏者のための実験

5.6. 実験目的

本実験では、演奏者が相手の重心・姿勢の『癖』を知り、理解することで、自身の二台ピアノ演奏時における無意識の身体動作や習慣を意識的に変容させることを目指し、その結果、両者の身体動作や演奏のタイミングがより高いレベルで調和し、二台ピアノにおける演奏の同期精度を改善することを目的とする。

5.7. 実験手法と評価方法

本実験では、1st ピアノ（リーダー）の演奏データ（演奏映像および重心データ）を記録し、2nd ピアノの演奏者がそのデータを練習に活用する。練習中および合同練習における演奏者の体験を主観的に評価するとともに、システムを用いた練習後の演奏タイミングのズレ頻度の変化を調査する。

評価方法としては、演奏者の主観的な認識に基づくズレの評価を採用し、具体的には、記録した演奏をもとに 1st ピアノ奏者と 2nd ピアノ奏者がそれぞれズレを感じた箇所に楽譜上で印をつけ、その後ディスカッションを行い、最終的に合意を得たズレの箇所を決定する。この手法により、技術的な計測では捉えきれないリズムのズレに加え、フレージングや表現のタイミングといった音楽的な微妙なズレも評価可能となる。この結果を通じて、演奏精度の向上や練習の効率化に対するシステムの影響と有効性を検証する。

5.8. 全体の体験デザイン

実験は図 5.10 のような手順で行う。

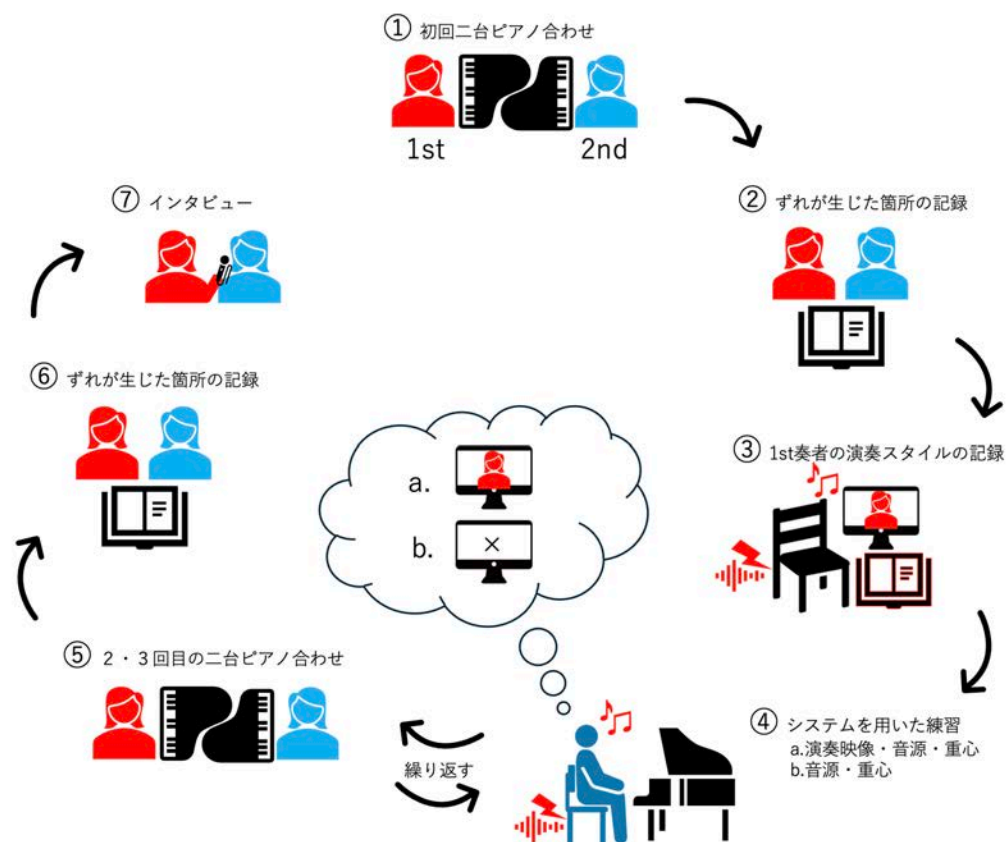


図 5.10 実験の手順

5.9. 実施期間と条件

本実験では 1st ピアノを筆者が担当し、2nd ピアノをピアニストの知人 3 名に担当してもらい実験を行った。被験者をそれぞれ A・B・C とし、詳細を以下に示す。

被験者 A ピアノ講師・ピアニスト (23 歳/女性)

被験者 B 武蔵野音楽大学大学院修士 2 年・ピアニスト (24 歳/女性)

被験者 C 武蔵野音楽大学大学院修士 2 年・ピアニスト (23 歳/女性)

使用した楽曲はそれぞれ、練習時にシステムを用いる A 曲・システムを用いない B 曲とし、以下の 2 曲で実験で用いた。（リピート記号は無視する）

A Brahms: Sonata for 2 Pianos, Variations on a Theme by Haydn Op. 56b,
Choral St. Antoni -

B Brahms: Sonata for 2 Pianos, Variations on a Theme by Haydn Op. 56b,
Choral St. Antoni -

また、実施期間としてはそれぞれ約 1 ヶ月とし、以下の方法で実施した。全体の合わせ（二台ピアノ演奏）は初回を含めた計 3 回とし、そのうちの第 1 回はシステムを用いない通常の初回合わせとする。実験内での個人練習は 2nd ピアノ奏者のみとし、1st ピアノ奏者は実験時間外で個人練習を行うとする。

期間 10/30～1/15

場所 武蔵野音楽大学・慶應日吉キャンパス内メディアスタジオ

全体の合わせ 3 回（第 1 回初回合同合わせ、第 2 回・3 回合同合わせ）

A 曲個人練習 3 回（1 回につき 1.5 時間程度）

B 曲個人練習 3 回（1 回につき 1.5 時間程度）

5.10. 実験実施

本研究では、2nd ピアノ演奏者向けの演奏支援システムの効果を検証するため、以下のスケジュールで実験を行った。

第 1 回二台ピアノ合同練習及び個人練習

1. 実験内容の説明及び署名
2. 初回合わせ（2 回）(図 5.11)

3. ズレが生じた所の確認・楽譜への記入

4. A・B曲の解釈について確認・楽譜への記入

- 楽曲全体の方向性を話し合う
- テンポ，リズム，強弱の基本方針を統一
- 難所やタイミングの課題を特定し，解決策を試す

5. セッション1

- システムの使用（A）
- 1st 奏者の演奏スタイルや癖などの記録（楽譜に記入）

6. セッション2

- システムを用いた練習（A）：システムを用いた 2nd ピアノ奏者個別練習（2～4 回/1，2 時間程度）
 - (a) 視覚・触覚・聴覚情報を統合したシステムでの練習を実施
 - (b) 触覚・聴覚情報のみのシステムでの複数回練習を実施
- システムの不使用の練習（B）：合同練習で確認した部分を重点的に，練習をしてもらう（30 分～1 時間程度）



図 5.11 初回二台ピアノ合わせの様子

第2回二台ピアノ合同練習及び個人練習

1. セッション3

- 2nd 奏者自身の演奏スタイルや癖などの記録（楽譜に記入）
- 1st 奏者の演奏スタイルや癖など再度記録（楽譜に記入）

2. セッション4

- システムを用いた練習（A）：システムを用いた 2nd ピアノ奏者個別練習（2～4 回/1, 2 時間程度）(図 5.12)
- システムの不使用の練習（B）：合同練習で確認した部分を重点的に、練習をしてもらう（30 分～1 時間程度）



図 5.12 触覚提示椅子を用いて個人練習を行う被験者

3. セッション 5

- 2回目の合わせ (A): セッション 1・3 の気づきを踏まえた A 曲の再演奏 (2回)
- 2回目の合わせ (B) (2回)

4. ズレが生じた所の確認・楽譜への記入

第 3 回二台ピアノ合同練習及び個人練習

1. セッション 6

- システムを用いた練習 (A): システムを用いた 2nd ピアノ奏者個別練習 (2~4 回/1, 2 時間程度) (図 5.13)

- システムの不使用の練習 (B): 合同練習で確認した部分を重点的に, 練習をしてもらう (30 分~1 時間程度)

2. セッション 7

- 3 回目の合わせ (A) (2 回)
- 3 回目の合わせ (B) (2 回)

3. ズレが生じた所の確認・楽譜への記入

4. インタビュー

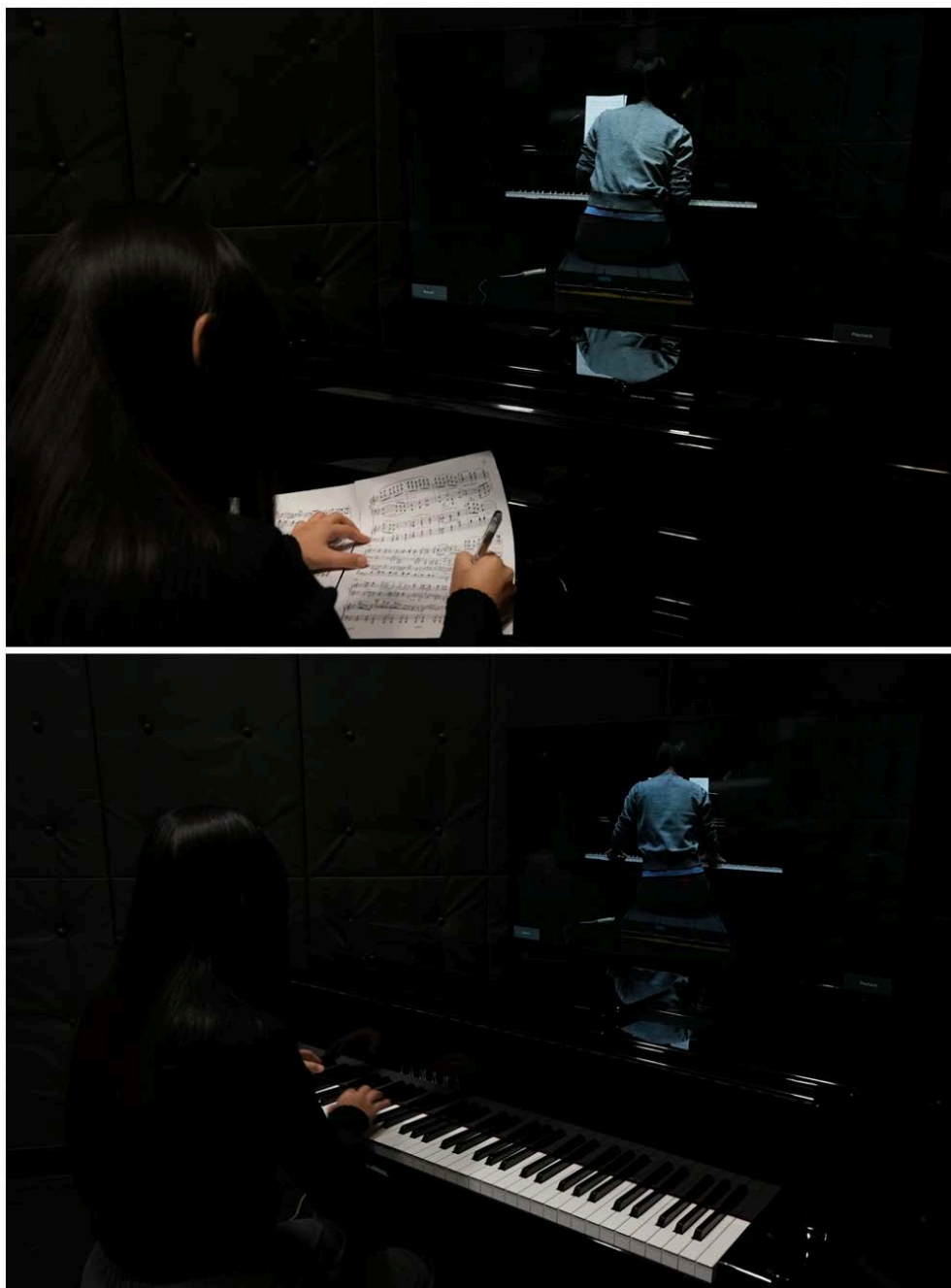


図 5.13 1st 奏者の演奏スタイルや癖など記録している様子（上）とシステムを用いた個人練習の様子（下）

5.11. 結果

技術的な計測では捉えきれない音楽的ズレを評価するため、演奏録音を基に主に 2nd ピアノ奏者がズレを感じた箇所に楽譜上で印をつけ、1st ピアノ奏者とディスカッションを通して客観的なズレと主観的なズレの評価を行った。譜面上のピンク部分（広範囲のピンクも含む）は、客観的に聞いていて分かるほどの大きなズレを示し、黄色は主観的に演奏者自身が感じた細かいズレを表している (図 5.14)。



図 5.14 ズレ評価結果の全体図

5.11.1 被験者 A : システムあり (A 曲)

A 曲 初回合わせ

以下の図 5.15 は、初回二台ピアノ合わせの際に生じたズレの箇所を示している。

図 5.15 被験者 A : A 曲 1 回目のズレ評価

初回合わせでは、客観的に聞いて分かるほどの大きなズレ（ピンク）と、演奏者が主観的に感じる細かなズレ（黄色）の両方が多くの箇所を確認された。ピンクのズレは主に特にフレーズの区切りや表拍など、確実に合わせる必要がある箇所でのズレが多い。特に 22 ページの冒頭や 2 段目後半から 3 段目にかけて、リズムやタイミングの不一致が明確に現れている。また、23 ページでは 2 段目で頻繁に出現し、3 段目では広範囲にわたってズレが見られ、演奏時、3 段目最初から最後まで 1st2nd がずれて終わった。これは、2nd 部分が付点とタイの混合したシンコペーションで、1st と 2nd が掛け合う A 曲の難しい箇所であるが、お互いの音

を聞けていない事や、曲全体を捉えられていないことがわかる。

一方、黄色の細かなリズムのズレは、広い範囲に分布している。主には、裏拍や付点8分音符後の16分音符の部分に多く見られる。22ページでは1段目から3段目まで均等に点在し、23ページではピンクのズレと並行して、2段目にかけて頻繁に見られた。特に中間部では黄色のズレが密集しており、演奏者が主観的に感じる微細なタイミングのズレが多く発生していることが分かる。この広範囲のピンクと黄色のズレから1stと2nd奏者のリズム感やフレージング、カウントの仕方など、曲の解釈への不一致が見られた。

A 曲 2 回目合わせ

システムを活用した個人練習を複数回繰り返した後、二度目の合わせを行った結果、図5.16のようになった。

図 5.16 被験者 A : A 曲 2 回目のズレ評価

1回目の合わせに比べ、全体的にズレが大きく減ったことがわかる。特に22ページ2, 3段目は大きなズレも細かなズレも広範囲にわたって分布していたが、二度目の合わせ時約半分に減った。初回時多く見られたピンクのズレも全体を通して半分以下に減り、表拍での大きなズレがほぼなくなった。黄色のズレも同様前回に比べ大きく減り、22ページでのずれは約半分にまで減った。また、初回合わせ時目立った23ページ3段目のリズムのズレは無くなり最終音があったため、これは大きく向上していることがわかる。

初回合わせに比べ全体的に数は減ったものの、大きなずれも細かなズレも広範囲に分布しており、中でも、最初の飾り後の音のズレはアンサンブルにおいて、大きなミスとして捉えられるため、アイコンタクトや呼吸感の調整が上手くいっていないことがわかる。それに続き、最初のズレから2, 3段目の流れに焦点を当てた際、お互いのリズム感や曲のテンポ感の不一致が見られ、互いに探り合いながらテンポを合わせていく様子が結果からわかる。さらに、全体的に裏拍での黄色いズレが目立つことから、タイや付点の音価への価値観の違いも明らかになった。

A 曲 3 回目合わせ

3回目の合わせでは図 5.17 のように、初回、2 回目と比べ大きくズレの箇所が減少していることがわかる。

The image displays two pages of a musical score for 'Var. 7. Grazioso.' in G major, 6/8 time. The score is for piano (p) and violin (I). The left page (numbered 22) shows measures 1 through 12. The right page (numbered 23) shows measures 13 through 24. The piano part is written in the bass clef, and the violin part is in the treble clef. The score includes various musical notations such as notes, rests, and dynamic markings like 'p' (piano) and 'molto dolce'. There are also performance instructions like 'Grazioso.' and 'molto dolce'. The score is annotated with vertical lines and numbers indicating timing or performance metrics. Specifically, there are pink vertical lines and numbers (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100) and yellow vertical lines and numbers (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100) indicating timing or performance metrics. The score is published by Edition Peters.

図 5.17 被験者 A : A 曲 3 回目のズレ評価

また、広範囲にわたって分布していた細かいズレも部分的なものに変化しており、特に 22 ページに関しては、当初より見られた 2, 3 段目のズレが大幅に減り、表拍でのずれは目立たなくなった。さらに、23 ページの 2 段目の対話的リズム部分もズレが大きく減少し、裏拍やタイなどの複雑な音価の部分以外でのずれはほとんど見られなくなった。

一方で、ピンクのずれの数は減ったものの誤差であり、最初の一音目がズレや、最終音が大きくズレたことから、リアルタイムでの同期ができていないことを示す。

5.11.2 被験者 A : システムなし (B 曲)

B 曲 初回合わせ

B 曲はシンプルナリズムと繰り返されるテーマの変容が特徴だが，図 5.18 のように，B 曲特有の難しさや，リズムが展開していく中での協奏の複雑さが結果からわかる．

図 5.18 被験者 A : B 曲 1 回目のズレ評価

A と同様初回合わせではピンク黄色共々広範囲に分布しており，特に，三連符と二連符の複雑な掛け合い部のズレが起きやすいことから，26 ページ 3 段目 27 ページ部分が B 曲の難しい箇所である．ピンクのズレについて，26 ページ 3 段目のような複雑な部分では裏拍が大きくズレやすく，26 ページ 1, 2 段目のようなシンプルナリズムの部分では表拍がずれやすい．これらはそれぞれ客観的な大きなズレに寄与しやすく，シンプル部分での表拍のズレも，複雑な箇所での裏拍の

ズレも全体のリズムのズレや大きなミスにも繋がる。

細かいズレはA曲とは異なり部分的に存在しており、特に26ページ2段目や27ページ1段目に集中し、この部分でのズレが目立った。特に、27ページ1段目はフォルテの記載もあることから、確実に合わせる必要があり、その他の部分に比べズレが目立ちやすく、ここでの細かなズレはその後のリズムのずれへと繋がりが、修復不可能なまでにズレていった。

B曲 2回目合わせ

2回目の合わせでは、図5.19のように初回と比べずれの箇所が変化し、決定的なりズムのズレは無くなったものの、初回時よりもズレが目立つ結果となった。

図 5.19 被験者 A : B曲 2回目のズレ評価

まず、初回合わせの時に複数箇所で見られたリズムの大きなズレは無くなり、新たに27ページ3段目の三連符と二連符の混合による、リズムが複雑化する直前の

部分が大きくずれた。黄色のズレは初回に比べ約半分以下にまで減り，前回目立った 27 ページ 1 段目のシンプルな箇所のズレも大きく減った。一方で，大きなズレが初回演奏時より増え，特にリズムが複雑な 26 ページ 3 段目や 27 ページ 1 段目部分でのズレが大きく目立った。それに加え，26 ページ 3 段目から 27 ページ 1 段目にかけてテンポが大きく変動したことで，27 ページ目の D に入る直前でズレが生じた。さらに，初回では目立たなかった，26 ページ 1 段目のシンプルなテーマ部分ではズレが目立つようになり。1st と 2nd のテンポ感に差異が生じていることがわかる。

B 曲 3 回目合わせ

3 回目の合わせでは A 曲同様，最もズレが少なかった (図 5.20)。

図 5.20 被験者 A : B 曲 3 回目のズレ評価

2 回目と同じく 27 ページ 3 段目の三連符と二連符が混じり合い，リズムが複雑

化する直前の部分が大きくずれたが、すぐに巻き返し2回目よりは軽症であった。また、2回目の合わせ時大きくズレが生じた26ページの1段目部分や27ページの二連符三連符の複雑化したリズム部分は、ほとんどミスが目立たなくなったが、最初の一音目から大きくずれたことにより、Aと同じくカウントの捉え方や、音価の価値観にズレが生じていることがわかる。さらに、前回と比べると細かなズレが増え、特に27ページ2段目の裏拍がずれたことで、曲全体の一体感が薄れてしまったことや、26ページでの3拍目の細かなズレが随所に現れている。

5.11.3 被験者 B：システムあり（A 曲）

A 曲 初回合わせ

まずシステムを用いた A 曲の初回は図 5.21 のような結果になった。



図 5.21 被験者 B：A 曲 1 回目のズレ評価

初回合わせでは、大きなズレと、演奏者が主観的に感じる細かなズレの両方が多くの箇所分散されていることが確認された。ピンクのズレは主に表拍など、確実に合わせる必要がある箇所でのズレが多く、特に冒頭の一音目や22ページ3段目の一音目でタイミングの不一致が明確に現れている。また、23ページ3段目で広範囲にわたってズレが見られ、最後まで1st2ndがずれて終わった。このことから、呼吸感やテンポ感が掴めず、お互いの音を聞けていないことや、曲全体を捉えられていないことがわかる。

一方、細かなズレは、広い範囲に分布している。主には、裏拍や付点8分音符後の16分音符の部分に多く見られる。22ページでは1段目から3段目まで均等に点在し、23ページでも頻繁に見られた。特にテンポ感が変わる展開部や、曲の盛り上がり部分（強弱部分）でズレが密集しており、演奏者が主観的に感じる微細なタイミングのズレが多く発生していることが分かる。この広範囲のピンクと黄色のズレから1stと2nd奏者のリズム感やカウントの仕方、音価の解釈への不一致が見られた。

A 曲 2 回目合わせ

個人練習を複数回繰り返した後の2回目の合わせの結果は、図 5.22 のようになった。

図 5.22 被験者 B : A 曲 2 回目のズレ評価

初回合わせに比べ、全体的なズレの数は減少したものの、その変化は緩やかであり、大きなズレも細かなズレも依然として広範囲に分布している。特に、22 ページ目から 23 ページ目 2 段目までの大きなズレは軽減されたものの、展開部の導入におけるズレは改善されず、呼吸感の不一致が見られた。このことから、アイコンタクトや身体の動きによるタイミング調整が十分に機能していないことが示唆される。また、全体的に分散していた小さなズレが特定の箇所を集約される傾向が見られ、特に 23 ページ 2 段目の付点とタイが混在する部分で顕著なズレが発生していた。この部分では、両者のリズム感やテンポ感の微妙なズレが影響し合い、テンポを探りながら演奏している様子が結果から読み取れる。さらに、裏拍におけるズレが目立つことから、タイや付点の音価に対する解釈の違いがアンサンブルの精度に影響を及ぼしている可能性がある。

A 曲 3 回目合わせ

3 回目の合わせでは，図 5.23 のようにズレが大きく減少し，大きなズレはほとんど目立たなくなった。

The figure shows two systems of musical notation for a piano piece. Each system consists of two staves, one with a treble clef and one with a bass clef. The first system is labeled 'Var. 7. Grazioso.' and 'molto dolce'. The second system is labeled 'molto dolce' and 'espress'. The score is marked with yellow vertical lines indicating alignment and pink vertical lines indicating misalignment. The misalignment is significantly reduced in the 3rd rehearsal compared to previous versions.

図 5.23 被験者 B : A 曲 3 回目のズレ評価

特に，冒頭から 2 段目まではわずかなズレが残っているものの，互いに探り合いながら調整している様子が見られ，その後は大きなズレがなくなり，呼吸感が合ってきていることが確認できる。また，小さなズレも大幅に減少し，23 ページ目の 2，3 段目で部分的に見られたものの，最後の方ではほとんど見られなくなった。

5.11.4 被験者 B : システムなし (B 曲)

B 曲 初回合わせ

初回合わせでは図 5.24 のように、ピンクと黄色のズレが広範囲に分布しており、全体的に大きなズレが目立った。



図 5.24 被験者 B : B 曲 1 回目のズレ評価

特に、26 ページ 2, 3 段目の三連符と二連符のシンコペーション部分ではズレが顕著に表れ、リズムの掛け合いが難しいことがわかる。これらの箇所は B 曲の中でも特に難易度が高く、アンサンブルの精度が求められる部分である。さらに、冒頭のシンプルな部分でもズレが発生しており、演奏者間のテンポ感が十分に共有されていないことが明らかになった。

ピンクのズレに関しては、26 ページ 3 段目のようなリズムが複雑な部分では裏拍が大きくズレやすく、26 ページ 1, 2 段目のシンプルなりズムの部分では表拍

のズレが目立った。このようなズレは、それぞれ演奏全体のリズムの不安定さに直結し、特にシンプルな部分での表拍のズレは、アンサンブルにおける基準となるリズムのズレを引き起こす要因となる。一方で、複雑な箇所での裏拍のズレは、より目立つ形で表れ、演奏全体の一体感を損なう結果となった。

細かいズレに関しては、A 曲とは異なり広範囲に分散するのではなく、部分的に集中して発生していた。特に 26 ページ 2 段目や 27 ページ 1 段目にズレが多く見られ、この部分でのリズムの不一致が演奏全体に影響を与えた。さらに、27 ページ 1 段目はフォルテの指示があることから、確実なリズムの一致が求められるが、ここでの細かなズレが積み重なり、その後のリズムの崩壊に繋がった。このように、ズレが修復不可能なほど大きくなったことから、曲の展開においてテンポやリズムの調整が十分に行われなかったことが示唆される。

B 曲 2 回目合わせ

2 回目の合わせでは、図 5.25 のような結果になった。



図 5.25 被験者 B : B 曲 2 回目のズレ評価

2 回目の演奏では、全体的なズレの発生箇所は初回と大きく変わらなかったものの、目立つズレが大幅に減少した。特に、初回に比べて大きなズレが極端に減少し、演奏の安定感が向上していることがわかる。しかし、初回と同様にリズムが複雑化する部分では依然としてズレが発生しやすく、特に 26 ページの三連符と二連符の掛け合い部分では、ズレが目立つ傾向が続いていた。

また、小さなズレの減少は緩やかであったが、冒頭から 2 段目までのズレが減少したことにより、演奏全体の違和感が軽減され、よりスムーズな流れが生まれた。これにより、演奏者同士のテンポ感の共有が初回に比べて向上したことが示唆される。一方で、27 ページ目における小さなズレは初回とほとんど変化が見られず、依然として分散して発生しており、演奏の終盤にかけて細かなズレが継続していることが確認された。このことから、特定の箇所では改善が見られるものの、全体のリズムの安定にはさらなる調整が必要であると考えられる。

B 曲 3 回目合わせ

図 5.26 被験者 B : B 曲 3 回目のズレ評価

3 回目では図 5.26 のように、これまでの中で最もズレが少なかったが、広範囲に分散していたズレが部分的に集中する形へと変化した。特に、大きなズレに関しては、発生回数や箇所にはほとんど変化が見られず、初回・2 回目と同様のポイントでズレが継続していた。一方で、小さなズレは全体的に減少したものの、26 ページの 2・3 段目に密集し、この部分では常にズレを感じる状態が続いていた。

一方、27 ページに関してはズレが大きく減少し、初めはテンポ感を掴みきれず若干のズレが見られたものの、演奏を続けるうちに徐々に調整され、最終的には呼吸感が合ってきたことが確認された。このことから、演奏全体の安定性が向上し、特に終盤に向かうにつれてテンポの共有がスムーズになったことがわかる。ただし、リズムが複雑な部分では依然としてズレが集中しており、さらなる細部の調整が必要であると考えられる。

5.11.5 被験者 C : システムあり (A 曲)

A 曲 初回合わせ

以下の図 5.27 のように、初回演奏では、大きなズレの発生が他の被験者と比較して最も少なかったものの、小さなズレが全体に分散しているのが特徴的であった。



図 5.27 被験者 C : A 曲 1 回目のズレ評価

楽曲全体を通して大きなズレがあまり目立たなかったことから、初回にしては比較的まとまりのある演奏であったが、冒頭の一音目、展開部付近、そして最後の部分でズレが生じたことにより、呼吸感の不一致やテンポ感のずれが見られた。また、細かいズレに関しては、特定の箇所集中するのではなく全体的に散らばっており、特に付点音符や裏拍の部分でのズレが多く発生していた。これらの小さなズレは、演奏の安定性に影響を与え、テンポやリズムの精度を高めるためにはさらなる調整が必要であると考えられる。

A 曲 2 回目合わせ

2 回目の演奏では，図 5.28 のように初回と比較して大きなズレ（ピンク）も小さなズレ（黄色）も大幅に減少した．



図 5.28 被験者 C : A 曲 2 回目のズレ評価

特に大きなズレはほとんど目立たなくなり，全体として安定した演奏となっていた．しかし，弱拍でのズレが残っていることで，テンポの揺らぎや音価の捉え方の不一致が発生している点が課題として挙げられる．また，小さなズレに関しても顕著に減少し，初回では全体的に分散していた細かなズレが，2 回目では主に弱拍部分に集中する傾向が見られた．その一方で，強拍でのズレは大幅に減少し，拍感の安定が向上したことが確認できる．このことから，演奏の一体感が増しつつあるものの，さらなる精度向上のためには，弱拍のズレを意識的に調整する必要があると考えられる．

A 曲 3 回目合わせ

3 回目の演奏では、図 5.29 のようにズレがほとんど見られなくなり、全ての実験内合わせの中で最も安定した演奏となった。

図 5.29 被験者 C : A 曲 3 回目のズレ評価

大きなズレはわずか 3 か所に限られ、細かいズレも大幅に減少している。全体として、演奏の一体感が向上し、テンポの安定が確立されたと考えられる。ただし、冒頭や 23 ページ 2 段目の付点とタイが複雑に入り混じる部分では、ややテンポ感を探りながら演奏していたような印象がある。このことから、演奏者同士の呼吸感やリズム感の最終的な微調整が行われた可能性が考えられる。全体を通して、これまでの試行を経たことで、細かなズレが減り、演奏の完成度が向上したことが確認できた。

5.11.6 被験者 C : システムなし (B 曲)

B 曲 初回合わせ

初回演奏では、図 5.30 のとおり A 曲が比較的まとまりのある演奏であったのに対し、B 曲では全体的にズレが多発した。

図 5.30 被験者 C : B 曲 1 回目のズレ評価

特に、B 曲の難所である 26 ページ 3 段目だけでなく、2 段目でも顕著なズレが見られ、弱拍部分での大きなズレに加えて、小さなズレも入り混じるように発生し、演奏全体を通して常にズレが生じていた。その結果、テンポ感やフレー징の解釈が最後まで一致しないまま進行してしまったことが課題として挙げられる。一方で、良かった点として、他の被験者がズレを生じやすかった 27 ページの 2・3 段目では、比較的安定した演奏ができていた。この部分では、徐々に互いの解釈を擦り合わせようとする姿勢が見られたことから、時間をかければアンサン

ブルの精度が向上する可能性があると考えられる。

B 曲 2 回目合わせ

2回目の合わせでは図 5.31 のように、初回と比較してズレの回数や箇所に変化は見られなかった。

[illegible]

図 5.31 被験者 C : B 曲 2 回目のズレ評価

特に、27 ページの強迫部分で大きなズレが目立った。この部分は楽曲の最も盛り上がる箇所であり、演奏のピークを迎える重要な部分であるが、ズレによりまるでミスをしているかのように聞こえ、聴衆への印象が大きく影響する結果となった。小さなズレに関しては、前回とあまり変化がなく、特に弱拍の箇所で見られる傾向が続いていた。弱拍でのズレは目立ちやすく、演奏全体のリズムに不安定さを与える原因となった。

B 曲 3 回目合わせ

3 回目の合わせでは、図 5.32 のようにズレの回数は減少したが、1 回目および 2 回目でズレが発生した箇所に関しては大きな変化は見られず、大きなズレは依然として随所で発生した。

図 5.32 被験者 C : B 曲 3 回目のズレ評価

特に 26 ページ 2 段目では、大きなズレだけでなく、小さなズレも頻繁に発生しており、この部分が引き続き演奏の中で問題となっていることがわかった。細かいズレが多発することにより、演奏全体のリズムの安定性に影響を与え、改善が必要であることが明らかになった。一方、27 ページ目では、前回までの合わせで問題となっていたズレが大きく減少した。この部分では、演奏中にテンポ感や呼吸感をうまく捉え、調整が適切に行われるようになったため、前回に比べてリズムのズレが少なく、よりスムーズに演奏できている印象を受けた。この改善により、演奏の質が向上した。

5.11.7 A 曲と B 曲の比較

A 曲と B 曲それぞれを小さなズレ大きなズレで比較した (図 5.33).

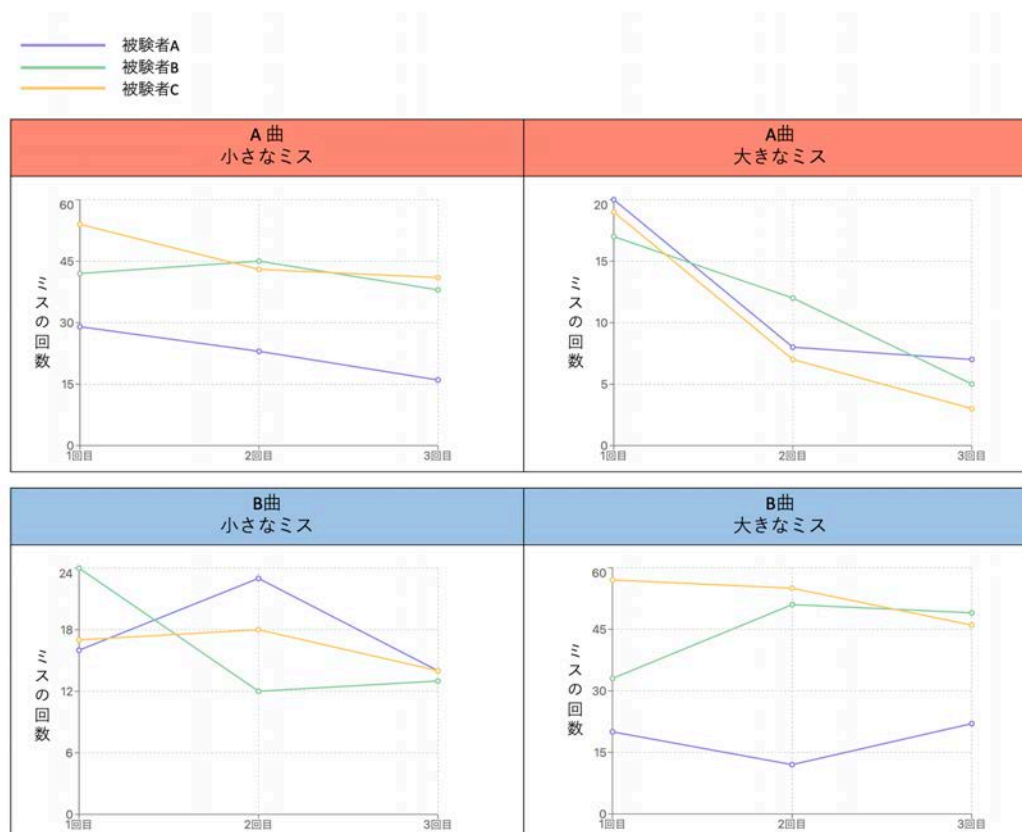


図 5.33 A 曲と B 曲のズレ回数比較

A 曲の初回合わせでは、広範囲にわたる大きなズレ（ピンク）と細かなズレ（黄色）が確認され、特にフレーズの区切りや表拍でのズレが顕著であり、リズムやタイミングの不一致が明確に見られたが、2回目の合わせでは、初回に比べズレが大幅に減少し、目立ったズレが改善された。しかし、依然として裏拍やタイ、付点音符における細かなズレが残り、リズムや音価に対する解釈の違いが見られた。また、最初の音や飾り音後のズレから、アンサンブルにおけるアイコンタクト不足やテンポ感の探り合いが課題として浮き彫りとなった。3回目の合わせでは、大

きなズレや細かなズレが部分的なものへと減少し、対話的リズム部分においても改善が顕著に見られたが、依然として最初の音や最終音にズレが残り、リアルタイムでの完全な同期には至っていないことが示された。A曲では広範囲に分布していたズレが部分的に収まったことから、お互いのリズム感やカウントの仕方が徐々に一致してきた可能性が示唆された。

また、B曲の初回合わせでは、シンプルなりズムの部分でも表拍がズレやすく、複雑な三連符と二連符の掛け合いでは裏拍が大きくズレる傾向が見られ、細かなズレは部分的に集中しズレがリズム全体の崩壊につながる結果となった。2回目の合わせでは、初回に比べ細かなズレが減り、シンプルな箇所も改善された一方で、リズムが複雑化する箇所での大きなズレが新たに目立ち、テンポの変動による差異が発生した。また、個人差があることから、1stと2ndのテンポ感の違いや楽曲解釈の相違が浮き彫りとなった。3回目の合わせでは、小さなミスは減少したが、複雑なりズム部分も改善が見られたが、最初の音からのズレや裏拍のズレが曲全体の一体感を損ない、細かなズレも随所に残った。これらの結果から、1stと2ndのリズム感やカウントの捉え方を一致させるために、お互い探し合いながら演奏をしていることがわかり、B曲では広範囲に分布していたズレが部分的になったものの、ずれの箇所が変化していることが明らかになった。

A曲（システムあり）とB曲（システムなし）の3回にわたる練習結果を比較すると、システムを用いたA曲では、回数を重ねるごとに広範囲に分布していたズレが部分的に減少し、リズム感やカウントの仕方が徐々に一致してきたことが示された。特に、A曲では表拍の大きなズレが大幅に改善され、2回目以降はタイや付点音符などの複雑な部分以外でのズレがほとんど見られなくなった。しかし、一方で初回や最終音でのズレが残り、リアルタイムでの完全な同期には課題が残る結果となった。

一方、システムを用いずに練習を行ったB曲では、初回に大きく目立ったズレ（シンプルな部分の表拍や複雑なりズムの裏拍）や細かなズレが徐々に改善されたものの、2回目、3回目でもミスが目立ち、システムを使用したA曲に比べて、B曲では練習を重ねても新たなズレが発生する傾向が見られ、特にリズムが複雑化する箇所や裏拍部分でのズレが残りやすく、テンポ感の差異や細かなズレが全体

の一体感を損なう要因となった。

以上の比較から、システムを用いた A 曲ではズレの改善が体系的かつ効率的に進み、広範囲なズレが部分的なズレへと収束していったのに対し、システムを用いなかった B 曲では練習回数の増加に伴う改善は見られたものの、新たなズレの発生や部分的な課題が残る結果となった。これは、システムによるリアルタイムまたは個人練習でのフィードバックが、奏者のリズム認識やカウントの一致をサポートし、より効率的な改善につながる可能性を示唆している。

5.12. インタビュー

すべての体験を終えた後、1 時間ほどインタビューを行なった。インタビューでは、総合的な体験について、システムに関して、演奏の動機に関して、練習の効率と精度に関して、改善点と今後の期待の 5 つの観点から質問し、質問内容及びコメントについて以下に示す。

総合的な体験について

- 今回のシステムを使った二台ピアノの体験について、率直な感想を教えてください

被験者 A

- 普通の椅子に座るときに比べて、ちょっと前のめりになることで姿勢が良くなる
- モーターが動くことで、びっくりして自然と体が左右上下に反応する
- 回転が同じ動き（強い刺激）をしているところに意識がいく
- 筆者の演奏中の癖がわかる。特にモモ裏から伝わる提示がわかりやすい

被験者 B

- 盛り上がるところで大きく動いていたことが印象的だった
- 低音のところは中止部分が動いてる感じがした

被験者 C

- イメージとしては、大きいところで大きいところで動いてるのかなと思ったが意外と綺麗なところで動いてたから自分もそうなのかも
- 満遍なく動いてる感じ

- システムを使う前と使った後で、演奏に対する感覚に何か変化はありましたか？
その中で、特に違うなと感じた点は？

被験者 A

- 変化はあった
- 筆者は演奏中カウントが体に出るけど、自分が出ないため、その違いに気づき、カウントの仕方を気をつけた（例：特に3拍伸ばすところ、伸びている時の体の動かし方もカウントの捉え方も違った）
- 表拍を体で取る人が多いのに対し、筆者は裏拍で動くため、そこを合わせる必要があった
- アンサンブルは体を動かした方が分かりやすいので、今後そこは気をつけたい

被験者 B

- 重さとかその人の支えがどこにあるか本来はわからないが、実験の中で色々な気づきがあり、2回目以降の合わせ時自分の体の動かし方に変化があった
- 神経質なのか、小さい音とかクレッシェンドのときに支えている方に力が入りやすいと思ったのと、フレーズやどこで歌いたいのかなどの方向性が分かりやすかったので、合わせの時にその部分が合わせやすかった
- 実験中呼吸の取り方、フレーズの取り方がその時々で違うのがわかりづらいつと思ったが、実際演奏してみると初回合わせなどに比べ気づいたら呼吸感やテンポ感を感じ取れていた気がする
- 変化はあったものの、ホールなどによっても響きの感じ方や演奏方法が違うため、本番のリアルタイムな重さの乗り方がわかるとバランスとか考えやすいかも

被験者 C

- 合わせというか体験の回数が増えるごとに相手の旋律を理解していく感じがした。それが自分の頭の中で音量とか（二台だけど一つの作品にしないといけない）どうするかが、自分の中で整理できてくる。
- 盛り上がって、戻ってきたところは戻ってきた安心感と変わる展開を聞かせたいから、焦らずに弾きたいなと思った。

- 演奏中相手（1st 奏者）の存在をいつもより近くに感じましたか？

被験者 A

- 近くはない。近いというよりむしろ、遠隔感があった
- 一緒に演奏してる感覚はある。前回の本番で一緒に演奏した時と感覚は全く変わらずリアルだった

被験者 B

- 空気感っていうのは伝わらない、やっぱり生の音の方がいい
- 呼吸感はわからないことで、存在を感じづらかった

被験者 C

- 近くにいるという感覚は呼吸感で感じてるからあまりない
- 映像にもっと呼吸を入れて欲しい。音源にいれるとか

- システムを使用した練習後、1st 奏者との合わせに対する不安や懸念は軽減されましたか？

被験者 A

- かなり軽減される

被験者 B

- 軽減されると思う。練習時場所や時間の制約で合わせるのが大変だから、これを使うことで臨機応変に対応できるかも
- 動きを予想できるところがいい。それによって不安も軽減される。

被験者 C

- 3回目の合わせ時になんとなく不安がなくなった気がしたが、効果は薄いかもしれない。「ここもっとこの音出すために、重心もっとこっちじゃない？」とか言えるから、合わせというよりも曲を作っていく上でのコミュニケーションのストレスは軽減される
- お互い探る感じがなくなった。不安がなくなってきた気がする。

システムに関して

- システムの使用により、音楽的表現や解釈の精度に変化を感じましたか？

被験者 A

- 1st に合わせる＝メロディーラインに合わせてるから、解釈の一致みたいなのはしてると思う
- 筆者がこうしたい、こう歌いたい、みたいなのはすごく伝わった

被験者 B

- カウントの仕方がより明確になったことで、フレーズの終わりなどが合わせやすくなった

被験者 C

- 2回目の合わせではあまり感じなかったが、3回目の時に同じ解釈で弾いてるなーと思った
- 曲の持って行き方が分かりやすくなった。特に順次進行の部分

- システムを使用することで、特に上達（ズレ・曲全体の構成。）を感じた点は何ですか？

被験者 A

- システムを使うことでカウントの仕方が分かった.
- システムを使った練習を繰り返していけばもっと合いそう

被験者 B

- 体験のときフレーズとフレーズの間が分かりづらかったけど、実際合わせてみると分かりやすかったし、ずれなかったので、一ヶ月二ヶ月繰り返すともっと合わせやすくなりそう

被験者 C

- 中間部はこう持っていきたいんだろうな、とかが分かり自分自身の演奏の方法も少し変えたところ、曲全体の流れが良くなった気がした
- 結局は、まだ目で見たり耳で聞いているから、それによる改善もありそう

- 課題箇所の発見や解決がしやすくなりましたか？

被験者 A

- なった. 1回目合わなかった理由に、付点の捉え方の違いがあった. システムを使ったことで、カウントの捉え方の違いがより明確になった
- 動かない人もいるから、そこは分かりづらいかもしれない

被験者 B

- 普段は楽曲の構成や解釈について、言語化してからディスカッションをするが、このシステムを使うことで、直接的ではないがカウントやテンポ感の理解促進につながることから、もっと感覚的な部分で話し合うことができる

被験者 C

- 盛り上がりの部分でテンポ感がお互い違って、その時の身体の使い方とかから、より課題が明確になった
- 呼吸感があまり伝わらなかったから、いつも耳で呼吸を聞いて合わせている、最初や最後の音はあまりうまくいかなかった気がする

- 視覚・触覚情報は、演奏のどの部分に影響を与えたと思いますか？

被験者 A

- 視覚的な情報は正直必要ではないかもしれない
- 正直実験中は映像はほとんど見ずに、音を聴いていた。音と下（椅子）から伝わる振動を感じていた。

被験者 B

- 初めての体験時は必要だと思う。
- 一度その人の癖を見て書き込んで、その作業を終えた後はない方が感覚がより分かりやすくなりそう

被験者 C

- 2回目以降は見てなかった。
- 視覚はあってもなくても関係なかったが、ない方が少し不安ではある。

演奏の動機に関して

- パートナーの演奏をより理解しやすくなりましたか？

被験者 A

- 筆者の演奏時の体幹は前のめりだと思った。自分は重心を後ろに置いており、そもそも浅く座ってる。
- そもそも座ってる場所も全然違う

- 筆者は高音に行く時も逆に重心があったため、不思議な感じがした。ただ、重心と目線の関係性をもっと理解すると、二台ピアノの時のアイコンタクトなどでも応用できるかもしれない
- 難しい曲で例えば、カンパネラとかピアニストは右に傾いてるかもしれないけど、実際は次の音の準備をしているかもしれない。（実際の重心と音の高さとの関係性は、次の音にもよる）

被験者 B

- カウントの仕方がわかりやすくなったことから、フレーズの終わりなどが特に合わせやすくなった
- 少し癖のある動きかな、結構動いている気がする
- 動いている分どこで盛り上がりを感じているかが分かりやすかった

被験者 C

- 盛り上がる部分や、フレーズの始まりで、さらさら弾いている感じがした。特にその部分は自分だと時間をかけてゆっくり弾くから、より明確に演奏の癖みたいなのを感じた
- 大きく揺れているから、分かりやすいんだけど、あまり動かない人だとどうなんだろう

- 2回目以降の合わせ時、自分の身体の動きがいつもと違うと感じた瞬間はありましたか？

被験者 A

- 全然違った。カウントの捉え方と溜めるとき、筆者は止まる癖があるので、そこから自分もここでためる！というのを気をつけた。
- 筆者の演奏が高音が鳴ってるのに左側に重心があったため、自分自身のフレーズの捉え方をいつもより意識した

被験者 B

- 揺らし方が自分とは全然違って驚いたが、そこでの気づきは自分にとって新しい材料になった。具体的には、付点やタイなどのリズムが複雑な部分での音価に少し気遣うことで、合わせやすくなった
- 一方で、7番の最後の部分は逆に探りながら演奏してしまって難しかった

被験者 C

- 参考にはなるけど、変わらないだろうと思っていたけど、実際合わせてみるとタイミングも合ってたし、動きが変わった気がする。

- 相手の演奏者の動きや呼吸を、いつもより意識できた瞬間はありましたか？

被験者 A

- カウントの仕方や、溜める時の体の動かし方

被験者 B

- 盛り上がるの時に早くなって、フレーズの終わりに落ち着く部分が特徴的だった
- その曲の中心をどういうふうに持っていくのかが、分かりやすかった一方で、フレーズとフレーズの間のカウントの取り方が曖昧でわかりづらかった

被験者 C

- 中間部とか、持っていきたいところが分かった
- 基本的に右手の持っていきたい感じがあるよね。でも、重心は左側にあって、そこがすごく不思議な感じ

- 特に改善を感じた部分（フレーズやセクション）はどこでしたか？

被験者 A

- 中でも一番分かりやすかったのは、最後のペダルの残し方など、今までは聞こえた音の長さに合わせていたが、システムからどのタイミングでペダルから足を離しているのかが分かった

- ラストの付点の取り方相手の重心に合わせて弾くことで、音量も合わせれることができた

被験者 B

- フレーズの終わりが分かりやすくなり、合わせやすかった
- 強拍のところに重みが来てることに気づき、カウントが取りやすくなった
- 不安や怖さがなくなった

被験者 C

- 盛り上がる部分とか、最初はかなりズレていたし、何よりも捉えるのが難しかったが、重心から身体の動きを感じ取ることで、全体のテンポの揺らし方を理解した

- 自分の体の動きや癖について、新たに気づいた点はありましたか？また、それらの癖が、相手の演奏とどう関係していると感じましたか？

被験者 A

- 基本動いていないことに気づいた
- 肘とか動かしてるつもりだったが、動いていなかった。カウントはほとんど表に出ない。
- 溜める時一瞬肘が動くくらい
- 大きい音を出す時はその方向に全部体を持ってくるが、小さい音の時は鍵盤に近づく、筆者は逆に離れていたの、そもそもが反対の動きをしている
- 動きに偏りがある事に気づいた
- 重心が大事、どっしり構えることが重要
- 無駄がない動きにしたい

被験者 B

- いつも支える側に重心を置いてることに気づいた
- 目立たせたい音に体が傾いてる

- 盛り上がるころは前に行きたくなるから、そこは重心かけてるかも
- 一番大きな気づきは、響きを聴くために大きい音の時うしろに重心をおいてる瞬間が多いこと

被験者 C

- 自分は、基本的に動いてないというのがよく分かった。動くとしても後ろに重心を持っていく
- 普段動きに着目しないから、自己分析に使えるし実際欲しい
- 動くときに変に力入るから良くないと思い動いてないが、もう少し力を抜いて弾きたい

練習の効率と精度に関して

- システムを使用することで、練習の進め方や考え方に変化はありましたか？又、具体的にどのように変化しましたか？

被験者 A

- 変わる。システムを使った練習は、従来の練習法よりメモが必須。
- 弾かずにシステムの体験をした時、カウントの仕方（筆者は右肘で取ってるなど）を楽譜に書いてから練習すると結構合わせやすい

被験者 B

- 変わる
- 椅子の動きから感じた癖を、合わせの時分かってるから、2回目以降の合わせ時「あ、やっぱりこうくるのか！」という状態になり、これを使うことで時間の使い方が変わる。プラスアルファこうしたい、ができる

被験者 C

- 1st の人がここをこう歌いたいんだな、というのがわかるので、それでいうと練習の進め方や方法も変わるのかも。特にテンポとか揺らし方とかについての議論ももっと効率よくできそう

- 従来の練習方法と比べてどのような利点・欠点がありましたか？それぞれ教えてください

被験者 A

- 曲に対しての捉え方がよりクリアになった感じはする
- 相手のクセを楽譜に記入し、練習の時からそのクセに合わせられるようになった
- 掛け合いの時はそもそもリアルでその人に合わせていく
- 1st だけに合わせるとなると、1st の解釈に依存すると思う
- お互いが使用すればいい
- その時の気分とかに寄っても違うと思うので、日々映像・音源・重心が更新されると良さそう
- リアルタイムで起こっていることに合わせていくのは難しそう
- 専用のイスがいること

被験者 B

- 従来の方法では場所と時間に縛られる。特に場所取りが大変だが、これを使うとそれらのストレスが無くなりそう
- 従来だと、楽曲の解釈を言語化してコミュニケーション取るけど、このシステムを使うことで、もっと感覚的な部分でのブラッシュアップができるかも
- このシステムは、その人の癖がわかることが面白くて新しいと思う。一方で、空気感や色彩感を感じ取ることは難しいと感じた

被験者 C

- どんなテンションエネルギーで弾きたいのか、言語化するよりも全然理解しやすかった
- 練習したところで、結局本番だと変わりそう
- 合わせとかよりも、ウィーンの先生とオンラインの時に、ここはこう弾くんだよみたいなのを伝える手段としていいのかも
- 二台ピアノじゃなくても一對一のレッスンとかの方が良さそう

改善点と今後の期待

- このシステムは、今後の二台ピアノ演奏にどう活用できると思いますか？

被験者 A

- やはりリアルタイムな呼吸感が欲しい
- リアルタイムで、且つ 1st だけでなく、お互いがシェアし合う方がいいかも
- これはアンサンブルの特性だが、ここはこう歌いたい！とか、ここなんか違うなー、がリアルで更新したい

被験者 B

- 癖が毎回微妙に変わるから、更新していった方がいい、1 回目のデータと 2 回目のデータを比べてその都度更新していくことでその人の音楽がよりわかる

被験者 C

- 合う合わないとか初期の段階ではなく、ある程度弾ける時点で、感覚を共有するといいかも
- 譜読み直後とかではなく、ある程度テンポ感とかを共有したあと

- 練習時に不便を感じた点はありませんか？

被験者 A

- 本当はボタンひとつで再生できると、家でも練習できたりするので便利
- ペダルがあればもっと違う。ペダルのタイミングとかが分かるようになると面白いかもしれない
- 二代ピアノの難しいところは、向かい合わせでの演奏であるが、もっと呼吸感が理解できるとより良い
- 持ち運べると練習時間は短くなるかもしれない

被験者 B

- 特にないが、実際に使うとなると作るのも大変だと思うし、修理も大変そう

被験者 C

- 情報過多で少し注意散漫になる
- 呼吸感がもっと欲しい。普段呼吸を耳で聞いているから、音源の中にブレスを入れてほしい。

- どのようなレベルの演奏者に特に有効だと思いますか？

被験者 A

- 音大生とか
- 音大までいなくても、かなり弾ける小学生（5，6年ピアノを続けてる子）とかからでもいいと思う
- 跳躍が間に合わない子が結構いるので、跳躍などの基礎の移動の部分で、これくらい早く動かないと演奏できない！というのが共有できる。エチュードやスケールなど、習いたての子供・学生向けのものがあるといいかもしれない

被験者 B

- 小さい頃は集中力がないから大人とか高校生中学生あたり
- 音楽の授業とか学校で先生が見せてるお手本とかで、わからない子もわかりやすくなるかも
- 訪問演奏のときに、その演奏家の人の重心などを収録して流すと面白い体験会になりそう
- 子供達はリズム感や音色の作り方が難しいため、これを使うとよさそう。カウントの取り方とか、どこに強拍なのかとかわかる

被験者 C

- 高校生以上の人がいいと思う。本格的にやってる人たち。
- 他門下の体の使い方が分かりそう。その先生達が大事にしてる部分とか

- 他の形態のアンサンブル練習への応用可能性はありますか？

被験者 A

- 伴奏者とか
- 歌や器楽のブレス時，重心がどこなのかわかると使えそう

被験者 B

- 門下によっても違うからそこは面白そう
- 近現代だと残ってるから，体験してみたい
- 木管とか座らない人たちの重心を感じれると面白そう．そこがわかると，え，そこそんなに力入れなくていいのでは？などアドバイスできそう
- キーとかに対する指の重さがわかると面白い

被験者 C

- 遠方のオンラインレッスンで使えそう

被験者は，システムを使用することで姿勢や演奏への意識に変化を感じ，特にモーターの動きによって自然と身体が反応することで，演奏中の癖や動きに対する気づきが促進された．また本システムの使用により，演奏者は自身と相手の身体的特徴（重心の置き方，フレージング，上半身の動き，カウントの仕方など）に対して深い洞察を得た．具体的には，表拍と裏拍の取り方の違い，高音時の重心の変化，音量と体の動きの関係性などが明確になり，これらの気づきにより，リズムの捉え方や体の動きに対する意識が改善されアンサンブルの精度と表現力の向上に貢献する可能性が示唆された．

さらに，視覚的な情報よりも，音や触覚的なフィードバックが重要だと感じた参加者は，演奏映像をあまり見ず，主に音と椅子からの振動を頼りにしていたことから，重心と音質やリズムとの関係を理解することが，アンサンブルやアイコンタクトにおける連携にも有用である可能性が示された．本システムは，従来の練習法における進め方や考え方にも変化をもたらし，システムを通じて，相手の演奏のクセを楽譜に記入し，それに合わせた練習が可能になるなど，より明確に合奏が進められたことから練習の効率化にも寄与されることが示唆された．

しかし、現時点でのシステムではリアルタイムでの呼吸感は得られず、今後は十分なリアルタイムの呼吸感再現が可能なシステムや体験を再考する必要がある。

5.13. 考察

ズレや同期に関して

A 曲（システムあり）と B 曲（システムなし）の結果を比較すると、ズレや動機の発生および改善の傾向に明確な違いが見られた。A 曲では初回に広範囲に分布していたズレが、2 回目以降で大幅に改善され、特にフレーズの区切りやシンプルな部分でのズレが減少した。しかし、細かなズレは裏拍や付点音符など複雑なリズム部分に残り、演奏者同士のタイミングや音価解釈の違いが課題として浮き彫りとなった。一方、B 曲ではシンプルなテーマの部分でも表拍がズレやすく、リズムが複雑化する部分（例：三連符と二連符の掛け合い）では裏拍が大きくズレる傾向が確認された。2 回目、3 回目ではズレの傾向が変化し、大きなズレは改善されつつも新たなズレが発生し、曲全体の一体感に影響を及ぼした。この差異の要因として、演奏者間のカウントやリズムの捉え方の不一致が挙げられる。A 曲においては、システムを使用することで、練習を重ねるにつれてズレが部分的に減少し、リズム感やカウントが一致しやすくなった。特に、表拍における大きなズレが改善されたことは、システムが奏者に視覚的・触覚的なフィードバックを提供することで、リズム感の一致がサポートされることを示唆している。

一方、B 曲ではシンプルなリズム部分でもズレが残り、特に複雑なリズムや掛け合い部分でのズレが目立つ結果となった。さらに、B 曲のシンプルなテーマはわずかなズレが目立ちやすく、修復が困難になる要因となった。これは、リズムの「揺れ」を修復するためには相互の意識の共有が重要であることを示しており、アイコンタクトや演奏者間の動的な同期がカギであることがわかった。また、A 曲と B 曲の比較から、リズムの複雑さもズレの発生に関与していることがわかる。A 曲は複雑な掛け合いやタイのリズムが多いため、システムを介した練習によりリズムの整合性が改善された。一方、B 曲はシンプルだからこそ、テンポ感や表拍のズレが顕著に表れ、微細なズレが全体のリズム崩壊へと繋がりがやすい。この

ことから、ズレや動機の改善には、奏者間のカウントの一致だけでなく、リズム構造に応じた練習方法の選択が重要であると考えられる。

システムを使用することで演奏者は自分と相手の体の動きに対する意識が高まり、癖や動きの不一致を認識する機会が増えた。特に重心やフレーズ、音量と体の動きとの関係について意識が高まり、リズムのズレを改善するための動機が強化されたと言える。これらの結果から、ズレを解消するためには、視覚だけでなく、身体的な感覚と相互作用を深く理解することが重要であると考えられる。

練習効率に関して

練習効率において、システムを使用した A 曲では体系的かつ着実にズレが改善され、リズム感やカウントの一致が進んだ。一方、B 曲では新たなズレが発生する場面もあり、システムを使用しない場合、練習の効果は相対的に低くなる傾向が見られた。これは、システムによるフィードバックが奏者にとって効果的な改善手段であり、特に複雑なリズムパターンにおいてその効果が顕著であることを示しており、システムが奏者のリズム認識をサポートし、演奏者間のカウントの違いを減らすことに寄与したと考えられる。

A 曲においては、初回の合わせから徐々にズレが減少し、特に表拍のズレが大きく改善されたが、最初の音や最終音でのズレは依然として残った。これは、リアルタイムでの完全な同期には時間がかかることを示唆しており、システムが一定の効果を発揮するものの、演奏者間の動的な呼吸感やアイコンタクトの重要性も依然として高いことがわかった。したがって、システムの使用により練習効率は向上したものの、完全な同期には他の要素（例えば演奏者の直感的な反応）も必要であると言える。

B 曲では、シンプルなリズム部分でも新たなズレが発生し、リズムが複雑になると大きなズレが目立つようになった。この結果から、シンプルな楽曲での細かなズレを修正することが難しく、複雑なリズムのパターンにおいてシステムがより効果的に作用する可能性があることが示唆される。また、B 曲では練習回数が増えても新たなズレが発生し、改善には限界があることから、練習方法の工夫とシステムによる補助の重要性が浮き彫りになった。

これらの比較から、システムを使用することで、練習効率が向上する可能性が示された。システムはパートナーのズレを具体的かつ視覚的・触覚的に示すことで、問題点の認識と修正を効率化し、練習の質を高めることができるが、システムを用いない場合は練習者の主観的な判断に依存するため、問題点の把握や修正が非効率的になる可能性があると考えられる。

システムについて

システムの有効性について、A曲におけるシステム使用時にはリズム感やカウントのズレが減少し、演奏者間の同期が進んだことが確認された。システムは視覚的、触覚的フィードバックを提供することで、奏者にタイミングのずれを自覚させ、リズム感を向上させる効果があった。一方、B曲ではシンプルなりズム部分でもズレが目立つ結果となり、システムなしでは効率的な改善が難しいことがわかった。特に、B曲においてはテンポの揺れやリズムの複雑化が問題となり、シンプルな部分でも新たなズレが生じることが示された。

インタビューからは、システムによって演奏者が自分と相手の身体的特徴に対する意識を深め、演奏のクセを認識しやすくなったという意見が得られた。これにより、演奏者はリズムやフレー징の不一致を減らし、アンサンブルの精度を高めることができるようになった。このように、システムは単なるタイミングの同期だけでなく、身体の動きや演奏のクセに対する深い理解を促進するツールとしても有用であることが示唆される。

しかし、現状のシステムではリアルタイムでの「呼吸感」が十分に再現できていないという課題も浮き彫りとなった。アンサンブルにおいて、呼吸感やテンポ感の共有は非常に重要な要素であり、今後はリアルタイムでのより高精度な呼吸感の再現が可能なシステムの改良が求められる。この点において、システムのさらなる進化と、演奏者間の相互作用をより深くサポートするための技術的な工夫が必要とされる。

今後の展望について

本研究において、システムを使用した練習が奏者のリズム感やタイミングの向上に大きな効果をもたらすことが確認され、視覚的および触覚的なフィードバックを通じて、演奏者は自分の演奏と相手の演奏とのズレを認識しやすくなり、リズムの一致やカウントの共有が進んだことがわかったが、一方でリアルタイムでの動機については、システムのさらなる改善と実用化に向けて模索する必要がある。

システムの精度を向上させるためには、リアルタイムでの「呼吸感」や「テンポ感」の再現を強化する必要がある。現状では、演奏者が感覚的に共有すべき「呼吸感」や「テンポの揺れ」について、システムによるフィードバックが十分に反映されていないという課題が浮き彫りとなったため、今後はシステムが提供するフィードバックをさらに細かく、より自然に演奏者に伝えられるような改良が求められる。例えば、より精密なセンサー技術や、演奏中の微細な動きに反応するインターフェースの開発が必要となる。また、リアルタイムで「今この瞬間のフレージング」を共有させるために、練習用システムの見直しや、体験の再設計が必要となる。

さらに、システムが奏者の身体的な癖や演奏の特徴に対してより深い洞察を与えることができる点に注目し、システムを通じて得られる身体的フィードバックを他の楽曲や演奏スタイルにも適用できるようにすることが、今後の展望の一つとして挙げられる。インタビュー結果からも、システムを使用することで奏者は自分の演奏の癖を認識しやすくなり、フレージングや重心、音量との関係性について意識が高まったことが示唆された。これにより、演奏者は個々の身体的特徴に応じた改善策を見つけ、より表現力のある演奏を実現する可能性が広がったと言える。今後は、このようなシステムを演奏者の個性に応じてカスタマイズし、各奏者がより効率的に自分自身の演奏を向上させるサポートを提供することを目指す。

5.14. 本章のまとめ

本章では、デバイスの再設計を行った後、2つのシステムの検証実験および二台ピアノの練習支援システムの実験を行った。二台ピアノの実験では、システムを

用いた A 曲と、システムを用いなかった B 曲の練習結果を比較し、リズムのズレや演奏同期、練習の効率化などの視点からシステムの有効性について考察を行った。このシステムは、視覚的・触覚的フィードバックによって、パートナーの演奏時の身体動作や癖を学習することで、自分自身と相手のリズム感やテンポ感、カウントの捉え方などを認識しやすくなることが明らかになり、アンサンブルの精度と表現力を向上させる可能性が示唆された。

しかし、完全な同期を達成するためには、システムによるフィードバックの精度向上と共に、リアルタイムな呼吸感やテンポ感の共有を促進する技術的改良や体験デザインの再考が必要であり、今後は、システムの改良と実験結果を基に、より多様な楽曲や奏者に対応したシステム開発が重要であり、音楽の表現力向上と練習効率の向上に寄与することが期待される。これらを踏まえ、本研究の二台ピアノ演奏におけるタイミング同期を円滑にし、演奏者間の理解と協調を深める環境構築の目的に対し、本システムは有用なツールであることが確認された。

第 6 章

Conclusion

本論文では、二台ピアノ演奏におけるタイミング同期の向上および演奏者間の協調を深める新たな練習支援システム「Resonant Dialogues」を提案し、開発と評価を行なった。

第一章では、デュオ演奏の本質や二台ピアノにおける役割などについて言及した。また、二台ピアノはソロ演奏や連弾とは異なり、演奏者間の視覚的制約や役割分担が存在するため、タイミングのズレが生じやすい課題を抱えていることや、練習環境の制約についても述べた。本研究の目的として、これらの課題を解決するため、触覚提示を用いた重心移動の共有を軸にした練習支援環境をデザインし、演奏者間の理解と協調を促進することを目指した。

第二章では、ピアノ演奏における身体動作やアイコンタクト、チームスポーツや舞踊での協調動作の研究を踏まえ、演奏者間の感覚共有の重要性を明らかにした。また、触覚技術やデバイスを用いた感覚共有の先行事例を調査することで、視覚・聴覚に加え触覚情報がタイミング同期の支援に有効である可能性を示した。

第三章では、課題設定を裏付けるため、音楽大学生やピアニストを対象にフィールドワークを実施し、二台ピアノ演奏時における重心移動の共有が、演奏の精度向上に有効であるという仮説を立た。さらに、この知見を基に、触覚を介した重心共有という新たなコンセプトを構築し、コンセプトの体験を具現化するため、触覚フィードバックを提示する椅子型触覚デバイスおよび圧力センサを用いたシステムを設計・開発した。

第四章では、有用なシステムを構築するため、複数回検証と体験及びシステムの再考を行なった。まずは、リアルタイムで演奏者の重心移動を相手に伝えることを可能とし、複数回の基礎検証を通じてその効果と課題を明らかにした。また、

触覚提示により視覚や聴覚の限界を補完し、触覚情報が演奏者同士のタイミング同期を支援する可能性が示された。さらに、リアルタイム共有における課題（遅延や認識精度）を受けて記録・再生機能を活用したシステムへとアプローチを見直し、演奏の振り返りや個人練習での取り入れを可能にする新たなシステムを提案した。

第五章では、再設計したシステム「Resonant Dialogues」を用いて2つのシステム検証実験を行った後、二台ピアノ奏者のための個人練習用システムの実験を実施した。この実験では、演奏のズレが減少し、パートナーのリズムやテンポ感、身体動作をより明確に認識できることが示された。また、触覚フィードバックを通じて、演奏者は自身の動きと相手の動きを同時に意識しやすくなり、触覚を取り入れた練習は、演奏者自身の動きに対する気づきを促し、従来とは異なるフィードバックを提供することで、練習の効率化が期待された。以上のことから、本研究の目的は達成されたと結論づける。

結言

二台ピアノは、音楽の世界における対話の極致である。その音は、二人の演奏者が共に紡ぎ出す壮大な会話であり、時に激しく、時に優しく交わりながらひとつの作品を形作っていく。しかし、独特の難しさを伴い、視野の制約と限られた練習環境は、演奏者たちの協調を妨げ、時に互いの音楽がすれ違うこともある。自身も、友人との二台ピアノ演奏において、何度もズレに苦しみ、息を合わせることの難しさを痛感したことがある。楽譜通りに弾いているはずなのに、何かが合わない。音だけを頼りに合わせようとすればするほど、心の焦りがリズムを狂わせていく。そんなもどかしさと苛立ちを何度も経験すると同時に、わずかな瞬間でも息が合ったときのあの喜びと高揚感は、何ものにも代えがたいものであった。

触覚を介した感覚共有は、これまで視覚や聴覚に頼ってきた演奏者たちにとって、相手の呼吸を、身体の動きを「感じる」ことであり、言葉や音を超えた深い理解と共鳴をもたらす。触覚を通じた新しい協調の形が、共鳴の喜びをより確かなものにし、音楽の新たな地平を切り拓くことで、心と共に音を紡ぐ芸術へと昇華する。

謝 辞

本研究の指導教員であり，幅広い知見からの的確な指導と暖かい励ましやご指摘をしていただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の南澤孝太教授に心から感謝いたします。さまざまな視点からアドバイスをいただき，研究の方向性を見失うことなく進めることができました。本当にありがとうございました。

副指導教員である同研究科の佐藤千尋准教授には，研究の方向性についてアニストならではの視点から多くの助言や指導をいただきました。心から感謝いたします。

また，副査である同研究科の陳敦雅准教授には，本研究の遂行にあたり，的確かつ丁寧なご助言を賜るとともに，温かくご支援いただきましたことに，感謝申し上げます。

同研究科の堀江新特任助教には，本研究のメンターとして，研究の軸や体験について様々なアドバイスをいただきました。鋭い視点と豊かな経験に基づくご助言は，研究の方向性を明確にし，体験デザインの深化に大いに役立ちました。深く感謝いたします。

本研究は JST ムーンショット型研究開発事業「身体的共創を生み出すサイバネティック・アバター技術と社会基盤の開発」（Grant number JPMJMS2013）の支援を受けて実施されました。

同研究科の脇坂崇平特任助教には，検証方法や体験デザインについての具体的なアドバイスをいただきました。的確なご指摘と実践的な視点は，研究の信頼性を高めるとともに，より効果的な体験デザインの構築へと導いてくださり，サポートのおかげで，検証プロセスの精度を向上させることができました。心から感謝いたします。

同研究科の吉田貴寿特任助教には，常に温かなサポートと励ましをいただきま

した。温かいお言葉と細やかなご助言は、研究を進める中での心の支えとなり、困難な局面でも前向きに取り組む力を与えてくださいました。深く感謝いたします。

同期の朱宇凡さんにはシステム開発や体験のデザインの面でサポートをいただきました。正確且つ迅速なシステム開発のおかげで、研究が円滑に進みました。深く感謝しています。

同期の森田迅亮さんには技術面で大変お世話になりました。精密かつ実用的なハードウェア設計のおかげで、実験を無事に進めることができました。心より感謝しています。

本研究の遂行にあたり、快く収録や長期間にわたる実験に参加いただいた、ピアニストの志水茜さん、中嶋夏歩さん、安里咲紀さんには心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

また、実験に協力してくださった友人やピアニストの皆様にも心より感謝申し上げます。多忙な中、貴重な時間を割いてご協力いただき、現場の実践的なご意見やフィードバックを得られたことは、研究の質を大きく向上させる糧となりました。深く御礼申し上げます。

2年間多くの時間を共にした Embodied Media の同期たちには、研究室でもプライベートでも精神的に支えて頂き、濃い時間を共に過ごせたことを心より嬉しく思います。

最後に、2年間の学生生活を経済面・精神的面ともに支えてくれた両親と姉、そして関わっていただいた全ての方に、心より感謝を申し上げ、謝辞に返させていただきます。

参 考 文 献

- [1] 松永晴紀. さあ、弾こう!ピアノ・デュオ：ふたりでピアノを楽しむためのガイドブック. カワイ出版, 2020. URL: <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BC02065093>.
- [2] Alexander Refsum Jensenius, Marcelo M. Wanderley, Rolf Inge Godøy, and Marc Leman. Musical gestures: concepts and methods in research. 2010. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:141002866>.
- [3] Emma Allingham and Tekij Allingham. *Motion in musical sound: The role of music performer bodily gesture in creating expressive sounding music*. PhD thesis, 08 2018.
- [4] Catherine Massie-Laberge, Marcelo M. Wanderley, and Isabelle Cossette. Kinetic analysis of hip motion during piano playing. In *Proceedings of the 5th International Conference on Movement and Computing, MOCO '18*. ACM, 2018. doi:10.1145/3212721.3212878.
- [5] Craig Turner, Peter Visentin, Deanna Oye, Scott Rathwell, and Gongbing Shan. Pursuing artful movement science in music performance: Single subject motor analysis with two elite pianists. *Perceptual and Motor Skills*, Vol. 128, No. 3, pp. 1252–1274, 2021. PMID: 33775176. doi: 10.1177/00315125211003493.
- [6] Sarah Vandemoortele, Kurt Feyaerts, Mark Reybrouck, Geert De Bièvre, Geert Brône, and Thomas De Baets. Gazing at the partner in musical trios: a mobile eye-tracking study. *Journal of Eye Movement Research*, Vol. 11, , 2018. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:229293458>.

-
- [7] Laura Bishop, Carlos Cancino-Chacón, Werner Goebel. 182beyond synchronization: Body gestures and gaze direction in duo performance. In *Together in Music: Coordination, expression, participation*. Oxford University Press, 11 2021. arXiv:<https://academic.oup.com/book/0/chapter/350540608/chapter-pdf/57781539/oso-9780198860761-chapter-23.pdf>, doi:10.1093/oso/9780198860761.003.0023.
- [8] Satoshi Kawase. Gazing behavior and coordination during piano duo performance. *Attention, Perception, Psychophysics*, Vol. 76, No. 2, pp. 527–540, 2014.
- [9] Wei Qin and Junying Meng. The research on dance motion quality evaluation based on spatiotemporal convolutional neural networks. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 114, pp. 46–54, 2025. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.11.025>.
- [10] Birgitta Burger and Petri Toiviainen. 217time and synchronization in dance movement. In *Performing Time: Synchrony and Temporal Flow in Music and Dance*. Oxford University Press, 07 2023. arXiv:<https://academic.oup.com/book/0/chapter/443057505/chapter-pdf/58221938/oso-9780192896254-chapter-21.pdf>, doi:10.1093/oso/9780192896254.003.0021.
- [11] Antonio Camurri, Barbara Mazzarino, Matteo Ricchetti, R. Timmers, and Gualtiero Volpe. Multimodal analysis of expressive gesture in music and dance performances. pp. 20–39, 04 2003. doi:10.1007/978-3-540-24598-8_3.
- [12] Derrick D. Brown and Ruud G. J. Meulenbroek. Effects of a fragmented view of one’s partner on interpersonal coordination in dance. *Frontiers in Psychology*, Vol. 7, , 2016. doi:10.3389/fpsyg.2016.00614.

-
- [13] Xiuxia Liu, Bo Wu, Xinghe Weng, and Qi Shan. The effect of the partnership between dancesport couples on competitive performance: the mediating role of athlete engagement. *Frontiers in Psychology*, Vol. 14, , 2023. doi:10.3389/fpsyg.2023.1278874.
- [14] Carlota Torrents, Nat lia Balagu, and Robert Hristovski. *Interpersonal coordination in performing arts: inspiration or constraint*, pp. 85–93. 01 2016.
- [15] Maximilian Krug. Temporal procedures of mutual alignment and synchronization in collaborative meaning-making activities in a dance rehearsal. *Frontiers in Communication*, Vol. 7, , 2022. doi:10.3389/fcomm.2022.957894.
- [16] Courtney A Fernandes, Grant E Norte, Sarah M Schwab, Alli Gokeler, Amanda Murray, David M Bazett-Jones, and David A Sherman. Interpersonal Coordination between Female Soccer Players: Leader-Follower Roles within a Collision-Avoidance Task. *International Journal of Sports Physical Therapy*, Vol. 19, No. 5, pp. 548–560, may 1 2024. doi:10.26603/001c.116156.
- [17] Roger Bartlett, Chris Button, Matthew Robins, Aviroop Dutt-Mazumder, and Gavin Kennedy. Analysing Team Coordination Patterns from Player Movement Trajectories in Soccer: Methodological Considerations. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, Vol. 12, No. 2, pp. 398–424, August 2012. doi:10.1080/24748668.2012.118.
- [18] Germain Poizat, Jrme Bourbousson, Jacques Saury, and Carole Sve. Understanding team coordination in doubles table tennis: Joint analysis of first- and third-person data. *Psychology of Sport and Exercise*, Vol. 13, No. 5, pp. 630–639, 2012. A Sport Psychology Perspective on Olympians and the Olympic Games. doi:https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2012.03.008.

-
- [19] Joo Carvalho, Duarte Arajo, Bruno Travassos, Orlando Fernandes, Fernando Pereira, and Keith Davids. Interpersonal dynamics in baseline rallies in tennis. *International Journal of Sports Science Coaching*, Vol. 9, No. 5, pp. 1043–1056, 2014. doi:10.1260/1747-9541.9.5.1043.
- [20] Donald Glowinski, Maurizio Mancini, Roddy Cowie, Antonio Camurri, Carlo Chiorri, and Cian Doherty. The movements made by performers in a skilled quartet: a distinctive pattern, and the function that it serves. *Frontiers in Psychology*, Vol. 4, , 2013. doi:10.3389/fpsyg.2013.00841.
- [21] Werner Goebel and Caroline Palmer. Synchronization of timing and motion among performing musicians. *Music Perception*, Vol. 26, No. 5, pp. 427–438, 06 2009. doi:10.1525/mp.2009.26.5.427.
- [22] Auriel Washburn, Matthew J. Wright, Chris Chafe, and Takako Fujioka. Temporal coordination in piano duet networked music performance (nmp): Interactions between acoustic transmission latency and musical role asymmetries. *Frontiers in Psychology*, Vol. 12, , 2021. doi:10.3389/fpsyg.2021.707090.
- [23] Anja Lender, Dionysios Perdikis, Walter Gruber, Ulman Lindenberger, Viktor M. Müller. Dynamics in interbrain synchronization while playing a piano duet. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 1530, No. 1, pp. 124–137. doi:https://doi.org/10.1111/nyas.15072.
- [24] Auriel Washburn, Iratxe Román, Madeline Huberth, Nick Gang, Tysen Dauer, Wisam Reid, Chryssie Nanou, Matthew Wright, Takako Fujioka. Musical role asymmetries in piano duet performance influence alpha-band neural oscillation and behavioral synchronization. *Frontiers in Neuroscience*, Vol. 13, , 2019. doi:10.3389/fnins.2019.01088.
- [25] Xiao Xiao, Paula Aguilera, Jonathan Williams, and Hiroshi Ishii. Mirrorfugue iii: conjuring the recorded pianist. In *CHI '13 Extended Abstracts*

- on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, p. 2891–2892. Association for Computing Machinery, 2013. doi:10.1145/2468356.2479564.
- [26] Akira Maezawa and Kazuhiko Yamamoto. Muens: A multimodal human-machine music ensemble for live concert performance. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, p. 4290–4301. Association for Computing Machinery, 2017. doi:10.1145/3025453.3025505.
- [27] Luca Turchet, David Baker, and Tony Stockman. Musical haptic wearables for synchronisation of visually-impaired performers: a co-design approach. In *Proceedings of the 2021 ACM International Conference on Interactive Media Experiences*, IMX '21, p. 20–27. Association for Computing Machinery, 2021. doi:10.1145/3452918.3458803.
- [28] 五十嵐直人, 鈴木健嗣, 河本浩明, 山海嘉之. 下肢運動状態の認知を支援する着用型発光センサスーツ. 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 4, pp. 1360–1371, 04 2012. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1050282812878551808>.
- [29] 山田雅之, 遠山紗矢香. 可視化システムを用いた協調学習での身体動作と理解レベルの関係性の検討. 日本教育工学会論文誌, Vol. 42, No. Suppl., pp. 093–096, 12 2018. doi:10.15077/jjet.s42049.
- [30] Naoyuki Houri, Hiroyuki Arita, and Yutaka Sakaguchi. Audiolizing body movement: its concept and application to motor skill learning. In *Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference*, AH '11. Association for Computing Machinery, 2011. doi:10.1145/1959826.1959839.
- [31] 柏野牧夫. 可聴化による身体運動の表現と調節. 日本音響学会誌, Vol. 76, No. 7, pp. 385–391, 07 2020. doi:10.20697/jasj.76.7_385.
- [32] Moe Sugawa, Taichi Furukawa, George Chernyshov, Danny Hynds, Jiawen Han, Marcelo Padovani, Dingding Zheng, Karola Marky, Kai Kunze, and

- Kouta Minamizawa. Boiling mind: Amplifying the audience-performer connection through sonification and visualization of heart and electrodermal activities. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '21. Association for Computing Machinery, 2021. doi:10.1145/3430524.3440653.
- [33] Zhuoqi Fu, Jiawen Han, Dingding Zheng, Moe Sugawa, Taichi Furukawa, Chernyshov George, Hynds Danny, Padovani Marcelo, Marky Karola, Kouta Minamizawa, Jamie A Ward, and Kai Kunze. Boiling mind - a dataset of physiological signals during an exploratory dance performance. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2021*, AHs '21, p. 301–303. Association for Computing Machinery, 2021. doi:10.1145/3458709.3459006.
- [34] Jiawen Han, George Chernyshov, Moe Sugawa, Dingding Zheng, Danny Hynds, Taichi Furukawa, Marcelo Padovani Macieira, Karola Marky, Kouta Minamizawa, Jamie A. Ward, and Kai Kunze. Linking audience physiology to choreography. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, Vol. 30, No. 1, March 2023. doi:10.1145/3557887.
- [35] 渡邊淳司. 情報を生み出す触覚の知性：情報社会をいきるための感覚のリテラシー. DOJIN 選書. 化学同人, 2014. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000796395092736>.
- [36] 渡邊淳司, 川口ゆい, 坂倉杏介, 安藤英由樹. 心臓ピクニック：鼓動に触れるワークショップ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 3, pp. 303–306, 2011. doi:10.18974/tvrsj.16.3_303.
- [37] Tadatoshi Kurogi, Yuji Yonehara, Roshan Lalintha Peiris, Takeshi Fujiwara, and Kouta Minamizawa. Haptic plaster: soft, thin, light and flexible haptic display using dea composed of slide-ring material for daily life. In *ACM*

- SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '19. Association for Computing Machinery, 2019. doi:10.1145/3305367.3327983.
- [38] Arata Horie, Yunao Zheng, and Masahiko Inami. A wearable system integrating force myography and skin stretch feedback toward force skill learning. In *2023 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 190–196, 2023. doi:10.1109/WHC56415.2023.10224440.
- [39] Taichi Furukawa, Nobuhisa Hanamitsu, Yoichi Kamiyama, Hideaki Nii, Charalampos Krekoulitis, Kouta Minamizawa, Akihito Noda, Junko Yamada, Keiichi Kitamura, Daisuke Niwa, Yoshiaki Hirano, and Tetsuya Mizuguchi. Synesthesia wear: Full-body haptic clothing interface based on two-dimensional signal transmission. In *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, SA '19, p. 48–50. Association for Computing Machinery, 2019. doi:10.1145/3355049.3360524.
- [40] 花光宣尚, 田井秀昭, 元木龍也, 佐藤文彦, 清水啓太郎, 神山洋一, 南澤孝太, evala, 水口哲也. Synesthesia x1-2.44 : 聴覚・触覚・視覚を活用した共感覚体験装置. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 27, No. 1, pp. 51–64, 03 2022. doi:10.18974/tvrsj.27.1_51.
- [41] 王七音, 花光宣尚, 水口崇平, 南澤孝太. 歩行に伴う触覚刺激と環境音を組み合わせた心象風景を想起させる全身触覚体験のデザイン. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 28, No. 4, pp. 339–348, 2023. doi:10.18974/tvrsj.28.4_339.
- [42] 堀江新, 下林秀輝, 齊藤寛人, 稲見昌彦. 回転の皮膚せん断変形に基づく分布型触覚ディスプレイの設計. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 402–411, 12 2020. doi:10.18974/tvrsj.25.4_402.
- [43] Arata Horie, Hideki Shimobayashi, and Masahiko Inami. Torsioncrowds: Multi-points twist stimulation display for large part of the body. In *ACM*

- SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '20. Association for Computing Machinery, 2020. doi:10.1145/3388534.3407303.
- [44] Arata Horie, Yunao Zheng, and Masahiko Inami. A wearable system integrating force myography and skin stretch feedback toward force skill learning. In *2023 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 190–196. IEEE, 2023.
- [45] Arata Horie, Zendai Kashino, Hideki Shimobayashi, and Masahiko Inami. Two-dimensional moving phantom sensation created by rotational skin stretch distribution. In *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 139–144. IEEE, 2021.
- [46] Takatoshi Yoshida, Narin Okazaki, Ken Takaki, Masaharu Hirose, Shingo Kitagawa, and Masahiko Inami. Flexel: A modular floor interface for room-scale tactile sensing. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22. Association for Computing Machinery, 2022. doi:10.1145/3526113.3545699.

付 録

A. 検証1（マグニチュード推定法）の記録

検証1で行ったユーザテストの結果を以下に示す.

尚被験者は10人とし, それぞれ被験者A・B・C・D・E・F・G・H・I・Jとする.

被験者A	1 回目	2 回目	3 回目
R1	R1	R1	R1
R2	R1	R2	R2
R3	R2	R3	R3
R4	R3	R5	R4
R5	R4	R4	R4
L1	L1	L1	L1
L2	L2	L3	L2
L3	L3	L4	L3
L4	L4	L5	L5
L5	L5	L5	L5

被験者B	1 回目	2 回目	3 回目
R1	R1	R1	R1
R2	R2	R1	R1
R3	R2	R2	R2
R4	R2	R3	R3
R5	R3	R2	R4
L1	L1	L1	L1
L2	L4	L3	L3
L3	L4	L4	L5
L4	L3	L3	L4
L5	L3	L4	L4

被験者C	1 回目	2 回目	3 回目
R1	R1	R1	R1
R2	R2	R2	R2
R3	R2	R2	R4
R4	R3	R4	R5
R5	R3	R4	R4
L1	L1	L1	L1
L2	L3	L1	L2
L3	L2	L2	L4
L4	L3	L3	L3
L5	L3	L4	L4

被験者D	1 回目	2 回目	3 回目
R1	R2	R1	R1
R2	R1	R2	R2
R3	R2	R2	R3
R4	R3	R3	R4
R5	R3	R4	R4
L1	L1	L1	L1
L2	L2	L2	L2
L3	L2	L3	L3
L4	L4	L2	L3
L5	L3	L4	L4

被験者E	1 回目	2 回目	3 回目
R1	R1	R2	R1
R2	R2	R1	R1
R3	R4	R4	R3
R4	R3	R2	R4
R5	R3	R5	R4
L1	L1	L1	L1
L2	L2	L1	L3
L3	L3	L4	L3
L4	L2	L2	L3
L5	L3	L5	L5

被験者F	1 回目	2 回目	3 回目
R1	R1	R1	R1
R2	R3	R2	R2
R3	R3	R3	R3
R4	R4	R5	R5
R5	R5	R5	R5
L1	L1	L1	L1
L2	L2	L2	L1
L3	L3	L3	L3
L4	L4	L3	L3
L5	L4	L5	L4

被験者G	1 回目	2 回目	3 回目
R1	R1	R1	R1
R2	R2	R3	R2
R3	R3	R3	R3
R4	R3	R3	R4
R5	R4	R4	R4
L1	L1	L1	L1
L2	L3	L3	L2
L3	L3	L3	L3
L4	L3	L4	L3
L5	L4	L4	L4

被験者H	1 回目	2 回目	3 回目
R1	R1	R1	R1
R2	R3	R2	R2
R3	R4	R3	R3
R4	R4	R3	R3
R5	R4	R5	R3
L1	L1	L1	L1
L2	L2	L2	L3
L3	L3	L2	L2
L4	L4	L4	L4
L5	L5	L5	L3

被験者I	1 回目	2 回目	3 回目
R1	R1	R1	R1
R2	R1	R3	R2
R3	R3	R2	R4
R4	R4	R4	R5
R5	R5	R4	R4
L1	L1	L1	L1
L2	L2	L3	L3
L3	L3	L3	L3
L4	L4	L4	L5
L5	L4	L4	L5

被験者J	1 回目	2 回目	3 回目
R1	R2	R1	R1
R2	R2	R2	R2
R3	R4	R3	R3
R4	R5	R4	R4
R5	R5	R5	R5
L1	L1	L1	L1
L2	L2	L2	L2
L3	L3	L3	L3
L4	L4	L5	L5
L5	L5	L5	L5

図 A.1 検証 1 の記録