

博士論文

インタラクション主体の粒度に応じた  
人間情報センシングと相互交流基盤の構築

埼玉大学 大学院理工学研究科 博士後期課程  
理工学専攻 数理電子情報コース

大津 耕陽

令和3年3月

指導教員 小林 貴訓 教授

埼玉大学 理工学研究科・工学部  
小林研究室  
埼玉県さいたま市桜区下大久保255

# 概要

情報通信技術の発展によって人々が様々な形態で手軽につながることができるようになった一方で、「有意義な」相互交流を実現する支援の在り方に関しては議論が必要な課題である。情報コミュニケーションにおいては、現実世界での対話と比較して伝達される情報が欠落することで齟齬が発生する、逆に過度な情報収集がプライバシーの侵害への懸念をもたらすといった様々な問題がある。これらの情報コミュニケーションにおける問題は、単純に個人がインタラクションを進めていく上で障壁となるだけでなく、インタラクションに携わる個人の行動の意欲や参与を促進・抑制する大きな要素となりうる。このような背景から、人間同士のインタラクションを工学的に支援するにあたって、どのような情報をどのように伝達してあげることが、その価値の向上につながるのかに関しては議論が必要な課題である。

本研究においては、人間同士のインタラクションを支援する上での適切な情報獲得・伝達の在り方を考える上での1つの指針として、インタラクション主体のスケール、インタラクション主体の内部で伝達される情報の持つ情報量、という2種類の「粒度」に着目し、それらの違いに応じた情報獲得・伝達の課題について議論する。本論文ではこの課題のうち、インタラクション主体のスケールが小さい場合における「相手をより深く知るための内面情報センシング手法の実現」、インタラクション主体のスケールが大きい場合における「人々が集団として『創発的に』繋がるための技術支援の方法論の解明」の2点を特に重要な問題として捉え、そのそれぞれに対して解決方策を提案する。

第2章では、「相手の情報をより深く知るための内面情報センシング手法の実現」という課題に対応し、ユーザや環境への介入を伴わない非接触な方法で人の内部状態を計測する技術として、民生品のRGBカメラで撮影された顔映像を利用した心拍数計測手法に関して議論を行う。本論文では、比較的頑健な計測が可能だが計測速度が低速であるという特徴を持つランダムパッチを用いた心拍数計測手法に着目し、その高い頑健性を維持しながら計測速度の高速化を実現した取り組みについて報告する。先行研究での提案手法に対し、計測領域の選択法の改善と、実装の効率化・最適化を行うことで、従来法の精度を概ね維持しつつ約14倍の実行速度の高

速化を実現した。

第3章では、「人々が集団として『創発的に』繋がるための技術支援の方法論の解明」という課題に対応し、集団を構成する個々人の振る舞いの伝達と可視化に基づいて、その内部のつながりを促進する技術支援の方法について議論する。本論文ではその調査フィールドとして国内の大規模集団交流の事例である音楽ライブの現場に着目し、演者・観客間、観客同士の一体感・参加感・臨場感を促進するシステム開発・評価に取り組んだ事例について報告する。演者と観客の間の身体的な振る舞いを発光や振動を介して、双方向的に伝達・提示することが可能な双方向ライブ支援システム「Affinity Live」を開発し、プロの演者・実際のファンを対象とした50人規模での音楽ライブ形式の評価実験を実施した。結果として、提案手法が持つ「演者の身体的行動に同期した観客デバイスへの情報提示」「双方向的な振る舞いの伝達と可視化」が演者・観客間、観客同士の一体感を向上することを明らかにした。また、パブリックビューイングの現場を対象とした「遠隔ライブ参加支援システム」としてのシステムの拡張も実施した。

第4章では、遠隔でのグループコミュニケーションに着目し、その中で特有して発生する「相手がある場にいる感覚(身体的共在性)の欠落」に関する問題に対して議論する。本章では、これらの問題の解決方策として、映像通信とユーザデバイスを組み合わせることで、自他の映像や実世界環境に対して多様な粒度での情報獲得・提示を可能とした遠隔コミュニケーション支援基盤を提案する。本枠組みは、第3章の内容に関連し、双方向ライブ支援システム・遠隔ライブ参加支援システムと組合せて用いることで、演者・現地参加者・遠隔参加者の相互的な交流を実現する「汎用的ライブ支援プラットフォーム」を完成するものである。また、ライブイベント支援以外の文脈においても、立場の異なる様々な個人の集団への参加を促すシステムを設計するための汎用的な枠組みとなり得るものである。本枠組みの「汎用的ライブ支援プラットフォーム」としての利用可能性を検証するために、朗読劇イベントを対象とした現地・遠隔地の両方の参加者を対象として演者とのインタラクションを支援するシステムを開発し、実際のイベントで評価実験を行った。また、ライブ支援以外の文脈における本枠組みのさらなるユースケースとして、テレビ電話における空間連続性の向上への応用可能性に関する議論、アイデア出しの会議・遠隔授業の現場を対象とした参加者の交流支援システムの提案を行う。

第5章では本研究を総括した結論および将来展望について述べる。

# 目次

概要	i
図目次	xii
表目次	xiii
<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 人間同士のコミュニケーションとその支援・課題	1
1.1.2 インタラクション主体の持つ2つの「粒度」	4
1.2 本研究の目的	6
1.2.1 相手の情報をより深く知るための内面情報センシング手法の実現	7
1.2.2 人々が集団として「創発的に」繋がるための技術支援の方法論の解明	7
1.3 本論文の構成	8
<b>第2章 人間の内面情報を獲得するセンシング技術の開発</b>	<b>10</b>
2.1 背景	10
2.2 人間の状態の獲得に関する研究動向	11
2.2.1 人間が直接的に表出する情報の獲得	12
2.2.2 人間が直接的に表出しない情報の獲得	14

2.3	顔映像からの心拍情報推定 . . . . .	16
2.3.1	RGB カメラを用いた心拍数推定手法の原理 . . . . .	17
2.3.2	非接触心拍数推定手法の発展と現在の課題 . . . . .	18
2.4	解決したい課題・研究目的 . . . . .	22
2.5	顔映像中の局所領域を利用した心拍数推定 . . . . .	23
2.5.1	手法 . . . . .	24
2.5.2	評価 . . . . .	26
2.5.3	手法の有用性および課題 . . . . .	27
2.6	高速化・頑健化を実現する手法改良 . . . . .	28
2.6.1	統計的に計測に適した部位の調査 . . . . .	28
2.6.2	実装の最適化・高速化 . . . . .	29
2.7	組み込み容易な心拍数推定アプリケーション . . . . .	32
2.8	まとめと将来展望 . . . . .	32
2.8.1	本章のまとめ . . . . .	32
2.8.2	映像からの心拍数推定手法に関する将来展望 . . . . .	33
2.8.3	映像からの心拍数推定手法に関する技術的課題 . . . . .	35
2.8.4	推定手法の応用に際しての利点・欠点・限界 . . . . .	38
<b>第3章</b>	<b>多人数相互交流支援基盤の提案</b>	<b>39</b>
3.1	背景 . . . . .	39
3.2	解決したい課題・研究目的 . . . . .	41
3.3	解決方策：音楽ライブを題材とした多人数交流支援 . . . . .	42
3.3.1	背景と意義 . . . . .	42
3.3.2	コンサート市場の背景と技術支援の動向 . . . . .	44
3.3.3	求められる支援の在り方 . . . . .	49

3.4	演者と観客の間の一体感を向上する双方向ライブ支援システム . . . . .	51
3.4.1	提案法の概略 . . . . .	52
3.4.2	初期検討 . . . . .	53
3.4.3	実際のライブ環境下におけるデータ計測実験 . . . . .	55
3.4.4	計測データを用いた予備実験 . . . . .	56
3.4.5	双方向ライブ支援システムの開発：ハードウェア設計 . . . . .	59
3.4.6	双方向ライブ支援システムの開発：ソフトウェア設計 . . . . .	61
3.5	実際のライブ環境下における実証実験 . . . . .	61
3.5.1	実証実験（単方向システム） . . . . .	62
3.5.2	実証実験（双方向システム） . . . . .	66
3.5.3	実験(実際のファン・観客を対象とした実験) . . . . .	70
3.6	実証実験を受けての議論 . . . . .	87
3.6.1	演者から観客への演技情報の伝達の有用性 . . . . .	87
3.6.2	観客から演者への応援伝達・可視化 . . . . .	88
3.6.3	実験設定の妥当性および問題 . . . . .	88
3.6.4	将来展望と課題 . . . . .	89
3.6.5	他ドメインへの知見の適用の可能性・課題 . . . . .	90
3.6.6	映像解析から得られた観客の振る舞いに関する社会学的分析 . . . . .	90
3.7	実験結果を受けてのシステムの拡張 . . . . .	93
3.7.1	観衆の同期的行動の獲得 . . . . .	93
3.7.2	簡易的な開発を可能とするライブラリ設計 . . . . .	97
3.7.3	新たな通信システムの検討 . . . . .	98
3.7.4	新ペンライトシステムのハードウェア設計案 . . . . .	101
3.8	遠隔ユーザを対象としたシステムの拡張 . . . . .	102
3.8.1	実験用システム . . . . .	103

3.8.2	学内における評価実験 . . . . .	107
3.8.3	実際のイベントにおける実証実験 . . . . .	111
3.9	まとめと将来展望 . . . . .	112
3.9.1	まとめ . . . . .	112
3.9.2	本研究の貢献・将来展望 . . . . .	113
<b>第4章</b>	<b>遠隔コミュニケーションを対象とした多人数相互交流支援基盤の提案</b>	<b>115</b>
4.1	背景 . . . . .	116
4.1.1	オンラインでの集団交流の広がり～現状そして課題～ . . . . .	116
4.1.2	オンライン配信音楽ライブから見る遠隔交流における課題 . . . . .	117
4.2	解決したい課題・研究目的 . . . . .	118
4.3	遠隔配信視聴者の共創体験を促進する支援システムの開発 . . . . .	118
4.3.1	ユーザの様々な「粒度」の情報を獲得・提示できる相互交流支援基盤 . . . . .	120
4.3.2	テレビ電話を拡張するバックチャンネルによる通信体系の実装 . . . . .	121
4.3.3	自他の映像への介入を実現するアプリケーションの実現 . . . . .	122
4.3.4	配信ライブ環境に則した共創体験支援アプリケーションの実装 . . . . .	125
4.4	双方向ライブ支援システムとの融合 . . . . .	131
4.4.1	汎用型ライブ支援プラットフォームの実現 . . . . .	131
4.4.2	実際のイベント場面でのプラットフォームの予備的検証 . . . . .	133
4.5	他者環境へ様々な「粒度」で介入可能な汎用的相互交流基盤の実現へ . . . . .	144
4.5.1	多感覚相互交流支援プラットフォーム . . . . .	144
4.5.2	他ドメインへの開発基盤の応用および試作システム . . . . .	145
4.6	まとめ . . . . .	150
<b>第5章</b>	<b>結論</b>	<b>152</b>

5.1	本研究のまとめ・貢献 . . . . .	152
5.2	本研究で得られた知見 . . . . .	154
5.3	本論文で取り扱った領域・未議論領域 . . . . .	158
5.4	将来展望 . . . . .	159
	<b>謝辞</b>	<b>163</b>
	<b>参考文献</b>	<b>165</b>
	<b>公表論文等</b>	<b>178</b>



# 目 次

1.1	コミュニケーションメディアの発展 . . . . .	2
1.2	伝達される情報量の持つ細粒度 . . . . .	5
2.1	皮膚からの心拍成分の獲得 . . . . .	17
2.2	RGB カメラ映像からの心拍数計測の原理 . . . . .	17
2.3	画像からの独立成分分析を用いた心拍情報計測 ([64] より引用) . . .	19
2.4	ランダムパッチを用いた心拍数計測手法の概略図 . . . . .	24
2.5	MAHNOB-HCI-Database 上の動画の一例. 画像右上の数字は心電図 によって得られた心拍数 (BPM) を表わす. . . . .	26
2.6	(a) 統計的に計測に適した部位の調査 (b 実験で試行した 3 つの選択 領域 . . . . .	29
2.7	改良手法の概略図 . . . . .	30
2.8	顔の特徴点追跡処理・画素値の時系列変化信号生成処理の効率化 . .	30
2.9	(左図) 改良手法の実行時の様子. 赤点は局所領域の中心座標を示し たもの. (右図) 約 110 フレームの動画からの計測結果. 上部は複数 回の計測結果のヒストグラム, 下図は最終推定値を導出した心拍波 形に対し平均を取り算出した波形である. . . . .	31
2.10	リアルタイムでの心拍数計測アプリケーション . . . . .	32
2.11	提案手法を利用した R-R 間隔 (心拍変動) の推定例 . . . . .	34
2.12	ビデオ圧縮の強度の違いによる心拍信号および R-R 間隔の推定結果 の違い . . . . .	37

3.1	双方向ライブ支援システム「Affinity Live」の概略図	52
3.2	リストバンド型加速度センサ	53
3.3	ペンライト型デバイス	53
3.4	計測した映像データ・加速度データ・音声データの一例	55
3.5	実験風景(予備実験)	57
3.6	アンケートの平均スコアと p 値(予備実験)	58
3.7	システムの構成	59
3.8	改良型ペンライト型デバイス	60
3.9	試作した 24 本のペンライト	61
3.10	製作した電飾衣装	62
3.11	実験風景	63
3.12	実験設定	64
3.13	6.1 節の実験におけるアンケートの平均スコアと p 値	65
3.14	6.2 節の実験におけるアンケートの平均スコアと p 値	67
3.15	使ってみたいシステムに関するアンケート結果	68
3.16	単方向システム・双方向システムを用いた際の観客の振る舞い方に関する比較	69
3.17	実験の様子	70
3.18	実験会場の様子(ステージ)	70
3.19	実験会場の様子(客席側)	71
3.20	埼玉大学 70 周年シンポジウム「音楽・メディア・インタラクシオン」	74
3.21	本実験にあわせて製作したペンライト型デバイス	75
3.22	本実験にあわせて製作した電飾衣装	75
3.23	衣装の腰部に取り付けられる送受信機およびフルカラー LED 制御回路	76
3.24	アンケートの平均スコア (N=46)	78

3.25 システムを使ってみたい場面に関する自由記述回答のワードクラウドとしての可視化 . . . . .	81
3.26 演者の Twitter 上での投稿 . . . . .	83
3.27 実験参加者の Twitter 上での投稿 . . . . .	84
3.28 演者の動きの「振りコピ」の様子 . . . . .	91
3.29 歌唱中の演者の位置に応じたペンライトを振る方向の変化 . . . . .	92
3.30 2つのペンライトの動きと同調度の推移 . . . . .	95
3.31 観客の振りの同調の可視化 . . . . .	97
3.32 (a) 実際のコンサートにおける演者の移動を伴う演出 (b) 参加者の位置関係の変化を利用した演出のイメージ . . . . .	100
3.33 新型ペンライトシステムの機器構成図 . . . . .	101
3.34 新型ペンライトシステム・評価用試作機 . . . . .	102
3.35 遠隔参加支援システム . . . . .	103
3.36 遠隔参加支援システムのシステム構成 . . . . .	105
3.37 遠隔参加実験の様子 . . . . .	109
3.38 アンケートの平均スコアと p 値 (遠隔参加実験) . . . . .	110
3.39 遠隔参加支援システムの実証実験 (大泉町「活きな世界のグルメ横丁」イベント) . . . . .	112
4.1 分散遠隔環境における相互交流支援基盤 . . . . .	122
4.2 テレビ電話の他者画面に入り込むアプリケーション . . . . .	124
4.3 音楽ライブ現場を対象としたアプリケーションの概念図 . . . . .	125
4.4 ペンライトで描画した絵に基づく CG を画面越しに相手に伝送する「お絵描き」アプリケーション . . . . .	126
4.5 ペンライトの軌跡に基づく CG アイコン生成 . . . . .	128
4.6 ペンライトを介して同じ絵に対して複数人で色を塗ることのできる「塗り絵」アプリケーション . . . . .	130

4.7	ライブ参加支援プラットフォーム . . . . .	131
4.8	視聴環境の違いに依らず共通のインタフェースを通じた視聴体験を提供 . . . . .	132
4.9	新竹取物語 イベント告知 . . . . .	134
4.10	新竹取物語 イベント 実証実験システム . . . . .	135
4.11	実証実験システムのシステム構成図 . . . . .	136
4.12	実際のイベントにおける現地の観客の参加. (左図) 塗り絵によって場面を選択する様子 (右図) 朗読中にペンライトを使ってキーワードの短冊に触れる様子 . . . . .	137
4.13	演技前に観客の塗り絵によって場面を選んでもらうシーン. 現地参加者はスクリーンを見ながらペンライトで塗り絵をして演者に見たい場面を伝える. 遠隔参加者は手元の画面で現地参加者同様に塗り絵ができ, その様子はハート形のアイコンで現地スクリーンへ反映される. . . . .	138
4.14	演技中に台詞の書かれた短冊に触れるシーン. 現地参加者はスクリーンを見ながらペンライトで気になったキーワードに触れ, 拡大することができる. 遠隔参加者は手元の画面で短冊に触れることができ, その様子は星形のアイコンで現地スクリーンへ反映される. . . . .	138
4.15	現地のスクリーンに表示される画面の一例 (左図) 場面選択時画面 (右図) 演技中画面 . . . . .	139
4.16	遠隔地の観客側の専用ソフトウェアにおける視聴画面の一例 (左図) 場面選択時画面 (右図) 演技中画面 . . . . .	139
4.17	演者の腕の動きにあわせて舞い上がる台詞の短冊および YouTube 配信映像での見え方 . . . . .	141
4.18	ペンライト領域の見え方を調整するためのインタフェース . . . . .	142
4.19	本実験で使用した「蓬萊の球の枝」を模したペンライト型デバイス . . . . .	142
4.20	多感覚相互交流支援プラットフォーム . . . . .	144
4.21	グループビデオ通話の形態 . . . . .	146
4.22	会議支援への応用に向けた取り組み . . . . .	147

4.23 双方向遠隔授業支援システム . . . . .	149
------------------------------	-----

# 表 目 次

2.1	各心拍計測手法の計測結果の比較 [44]	27
2.2	選択範囲・回数と計測結果の比較 (N=469)	29
2.3	選択範囲・回数と計測結果の比較 (N=487)	31
2.4	各手法の利点・欠点	38
3.1	アンケートの設問 (予備実験)	57
3.2	実験時の曲順および再生された振動パターン	64
3.3	アンケートの設問 (実証実験)	65
3.4	実験時の曲順およびシステムの動作	66
3.5	当日のスケジュール	72
3.6	実験時の曲順およびシステムの動作	72
3.7	アンケートの設問 (実験型特別ライブ)	73
3.8	アンケートの設問 (実験型特別ライブ・自由記述のもの)	80
3.9	アンケートの設問 (遠隔参加実験・7段階評価)	109

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

### 1.1.1 人間同士のコミュニケーションとその支援・課題

人間は本質的に他者とコミュニケーションをとることで生きる生物である。英語における *Communication* という単語はラテン語の *communis* という語に由来するものであり、「分かち合うこと」を意味するものである。人間同士のコミュニケーションとは、他者に対して自身の思いを伝えるというだけでなく、他者から受け取った情報によって相手の心の状態を認知し、共感することで、相手とのつながりを見出すことであるといえる。

そのような人間同士のコミュニケーションやつながりを通信技術によって支援することは、情報工学における長年のテーマとされてきた。視聴覚によるコミュニケーションを例とすると、1876年にグラハム・ベルが音声電話を発明して以降、これまで、Skype[1]やZoom[2]に代表される視覚的な映像を拡張した「テレビ電話」へ発展したり、近年では、VRChat[3]のように、VR空間での視聴覚・身体表現を共有したコミュニケーション形態(ソーシャルVR)が登場するなど、情報通信技術の発展に応じて「分かち合える情報」を拡張する形で発展を遂げてきた(図1.1)。これは、文字を用いたコミュニケーションにおいても、その手段が手紙から電子メール、SNSへと広がっていったように同様に見られるものである。



図 1.1: コミュニケーションメディアの発展

人間同士のコミュニケーションに対する技術支援にあたっては、当初は物理的に離れた・会うことが困難な人間同士のつながりを作ることにより主眼が置かれていたが、大容量・高速な通信技術の発展・普及により、相手により詳細な情報を提供したり、新たな気づきを促すことへと支援の焦点が移り替わり、近年では多人数での交流の技術支援の在り方に関しても議論されるようになってきた。人間とコンピュータの関わりに関して研究を行う学問である Human-Computer-Interaction という分野においては、Social-Presence と呼ばれる人間の存在感を相手に伝える手段に関する議論が様々に行われている [112, 110, 19, 90, 72, 42]。相手に共有できる情報という観点からは、映像・音声・文字等の従来から遠隔コミュニケーションに用いられてきたものだけでなく、振動 [19] や身体表現 [105, 80]、味覚 [57] 等を共有することで相手とのつながりを見出す方法に関する研究が盛んに行われている。このように、情報通信技術の発展は人々の間で「分かち合える情報」の種類や量を増やすことを実現してきた。

このように、人間同士が様々な情報を様々な形態で共有できる (他者に対して情報を通じて働きかけ、他者から情報を受容できる) 時代になった一方で、人間同士のコミュニケーションを情報技術で支援するにあたり、どのような情報をどう伝達することが適切な在り方であるのかに関しては議論が必要な課題である。現代の情報コミュニケーションにおける課題として、主なものには以下が挙げられる。

環境や背景の違い等に応じたコミュニケーションギャップの発生 一つ目の問題は、主に遠隔コミュニケーションにおいて、コミュニケーションを取る個人間の環境の違いや、伝達される情報の不足によって現実世界での対話と比較して齟齬が発生しやすいという点である。バーチャルリアリティに関する分野では、現実世界と仮想世界 (情報コミュニケーション) の間のギャップを伝達さ



れる情報の不足ととらえ、視聴覚に加えて温度・触覚等の情報を加えることでギャップを埋める方法が提案されているほか [68], テレビ電話を対象とした研究では、相手の視線をはじめとする非言語的な情報を強調して伝達する技術 [63, 56] や、遠隔握手システム [105], 紙の受け渡しの支援 [111] 等、現実世界における物理的な行動を遠隔コミュニケーションにおいても再現する方法の検討等が行われている。一方で、個人間の環境の違いが依然コミュニケーションギャップを発生する起因となっており、より様々なケースに関する検討が必要となる。

**過剰な情報伝達に基づくプライバシーに関する問題** 伝達情報の不足によるコミュニケーションギャップの発生が問題となる一方で、様々な情報が手軽に獲得できる時代となったことから、人々の間で伝達される情報の扱い方に関する倫理的な問題がより顕在化している。特に近年では超多数を対象として個々人の細かい行動を獲得する様々な技術が登場 [21, 33] しているが、このような情報技術は治安維持や危険の把握等の安全な生活の実現への一助となる一方で、人々に対して行動を見られていることに対する懸念を与えるものである。そのような過度な情報センシングは、その活用の仕方によっては人々の積極的な行動を逆に妨げてしまう障壁となり、人々の行動を変容させることを主眼として置いて開発されたインタラクションシステムが逆にその意味をなさなくなってしまうことが危惧される。

**伝達情報と人々の行動の促進/抑制に関する問題** 2番目の問題に関連して、インタラクションの内部で伝達される情報が人々の行動を積極化・消極化させる要素となっている可能性がある。例えば、教育現場においてはオンライン授業においては、対面授業の場合と比較して学習意欲が持続されない傾向にあることが課題となっている。これらの情報コミュニケーションにおける伝達情報の欠落は、他者の存在感や臨場感を低下させ、体験の質を下げたり、人の行動を消極化させてしまう一つの要因となっている。一方で、在宅勤務中の社員の監視や、会議の録音等、過剰な情報獲得による監視感が人の行動を抑制している面もあるとされる。集団コミュニケーションにおいては、人々が集まることによってもたらされる付加価値や新たな体験が、集団で集う意味を形作る側面がある。そういった観点からいえば、個々人の活動を積極化させることへ障壁が生じてしまうことは、情報技術による集団インタラクションの支援を考える上で考慮すべき課題である。集団の有意義なつながりを形成する創発性を伸ばすようなコミュニケーション支援の在り方を考えていく上で、場面に応じた適切な情報伝達の在り方に関して検討は必須となる課題である。

### 1.1.2 インタラクション主体の持つ2つの「粒度」

このような情報コミュニケーションの課題に関して、本研究ではインタラクションが起こる主体のスケールと、その内部で伝達される情報の細粒度の2つの「粒度」に着目して議論を行う。本論文で述べるインタラクション主体の持つ2つの粒度に関して、以下で詳しく取り上げる。

#### インタラクションが起こる主体のスケール

情報コミュニケーションにおいて、どのような情報をどう伝達することが適切であるかを考えるにあたって、インタラクションが発生する主体のスケール(規模)は考慮すべき重要な観点であると考えられる。ひとえに、人間同士のインタラクションの形態は、個人面談や世間話といった1対1での対話から、イベント会場の観客といった多人数での交流までにわたるまで非常に多岐にわたる。ここで主体のスケールが小さいケース、具体的には1対1での対話や家族内コミュニケーション等に注目してみると、多くのケースにおいては集団コミュニケーションと比較してプライベートであり、「閉じた会話」であることが多い。また、インタラクションの対象となる相手が少ないことから、集団コミュニケーションと比較すると、相手との相対的な連結強度が大きく、対話相手個人に対して注意を向ける度合いが大きい。このような特性から、インタラクション主体のスケールが小さい場合には、より相手の細かい情報を伝達してあげる支援の在り方が必要であると考えられる。特に、ビデオ通話等の、非言語情報が欠落され、空間的な断絶性がある遠隔コミュニケーションの場面においてはその重要性は非常に大きい。

一方で、イベント会場に集う観衆や学校での授業、職場での会議等、集団でのインタラクションが発生する事例についてみると、1対1でのコミュニケーションと比較して、インタラクション対象となる相手が多岐にわたることから、相手との相対的な連結強度は小さくなる。また、集団の規模が大きくなるほど、個々人に対して認知し、注意を向けることへの負荷が大きくなることから、集団コミュニケーションにおいては、全体の雰囲気に関して広く浅く注意を向ける傾向がある。このような観点は、スポーツ観戦において観客が他の観客の歓声等の盛り上がりを通じて互いを認知し交流しあう、会議や授業において、場として進行している事柄や盛り上がり重要視されるといったように、実世界の集団コミュニケーションからも見出すことができる特性である。このように、インタラクション主体のスケールが大きい場合には、主体のスケールが小さい場合と異なり、全体の雰囲気の認知や、全体の雰囲気を形成する個々人の行動に着目した支援の在り方が求められる。この

ように、インタラクションの主体のスケールによって、個々人が各場面で注意を向ける情報は異なっており、このようなインタラクション形態の違いに応じて解決すべき課題や支援のためのアプローチが異なってくる。

## 伝達される情報の持つ細粒度

情報通信技術の発達や、センシングデバイス、情報提示デバイスの発展により人間の「五感」に代表される様々な情報を人々の間で伝達・共有できるようになった。その一方で、現実世界のコミュニケーションと比較した情報の欠落や、過剰な情報獲得・送信が情報コミュニケーションにおける問題を引き起こす要因となっていることは前述のとおりである。人間同士のインタラクションにおいては、映像・音声、文字・触覚等様々なモダリティを持つ情報がやり取りされるが、そのそれぞれが持つ情報の細粒度は異なっている。例えば、「在室中である」という情報を伝達する方法として、相手が部屋にいる様子を映像として送信する場合と、「在室中である」という情報以外の要素を削ぎ落とし、文字や光として様子を提示する方法がある(図1.2)。前者の場合は、相手がどのような部屋にいるか、どのような服装をしているか等相手の付加的な情報を伝達できるという側面がある一方で、相手が本来意図しない情報が発信されてしまうプライバシー上の懸念を持つ。また、付加的な情報が付与されているという観点から見れば、情報伝達の観点から言えば「冗長な」ものであり、情報通信における物理的な通信負荷、伝達相手の認知負荷が大きい情報であるともいえる。一方で、「在室中である」という情報を、文字や光・色として抽象的に伝達してあげる方法は、情報伝達における冗長な側面を削ぎ落とし、相手の認知負荷が少なく、匿名性や秘匿性を高めることもできる観点から、「やさしい」情報伝達に寄与するものである。このように、伝達される情報の持つ粗さ・細かさは情報コミュニケーションにおける相手の認知を促す、あるいは相手の認知負荷やプライバシーに関する問題を軽減するという観点から、考慮すべき課題である。

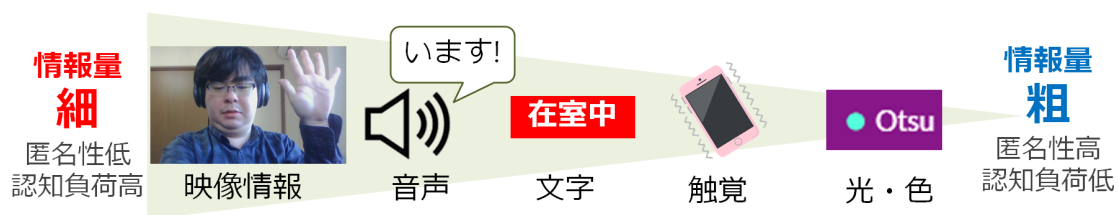


図 1.2: 伝達される情報量の持つ細粒度

## 2つの「粒度」の関係性

ここで、インタラクションの主体のスケールの違いに改めて目を向けてみると、主体のスケールに応じて、その内部でどのような細粒度を持つ情報を扱うべきであるかという観点が異なってくるのがわかる。主体のスケールが小さいコミュニケーション(1対1での対話等)の場合では、プライベートな空間であり相手に深く注意を向けてコミュニケーションを進めるという観点から、その支援のアプローチとして細粒度の細かい情報を用いた情報伝達がその支援に利用できる余地を持つ。

多人数間での交流では、場の全体的な雰囲気認知が、個々人の状況と比較して重要であるという側面がある。これは、人間が現実世界において多人数の状況を同時に知覚できないという認知の限界に伴うものである。一方で、近年の情報センシング技術の発達から、超多人数の詳細な情報を同時に獲得する様々な技術提案が提案されており、機械を介したコミュニケーション支援という観点から言えば、多人数の細粒度の高い情報を同時的に獲得することは容易な方策であるといえる。しかし、実際のインタラクションの場面においては集団の規模が拡大していくほど主体がよりパブリックになっていくという特性があり、プライバシーや監視感、付加的な情報を獲得・利用されてしまう懸念を生み出してしまふ観点が問題となる。このような他者からの監視感や、プライバシーに関する懸念は、集団を形成する個々人の行動心理にも影響を与えるものである。集団コミュニケーションにおける全体の雰囲気や場の進行は、それに向き合う個々人が活動を促進させることで生み出されるものであり、そのような集団に対する個人のアプローチを抑制する情報システムのデザインは、集団として集うことの価値を損ねてしまふ懸念を持つ。このような観点から、集団コミュニケーションにおいては、その集団の規模が大きくなるほど、細粒度の粗い情報を用いて全体的な雰囲気を知ることで個々人の匿名性や自発性に配慮したデザインが望ましいと考えられる。

## 1.2 本研究の目的

本研究は、インタラクションが起こる主体のスケールと、その内部で伝達される情報の細粒度の2つの「粒度」に着目して、人間同士が創発的につながることを支援する適切な情報の扱い方を考えることが大きな目的である。本研究で取り扱う課題は非常に膨大なものであり、その解明には様々な観点からの考慮、解決方策に基づいた検討が必要となるが、本研究では、インタラクションの起こる主体のスケール別に、主要な2つの課題の解決方策を提案することでその解明の前進に寄与することを目的としている。

- 相手の情報をより深く知るための内面情報センシング手法の実現
- 人々が集団として「創発的に」繋がるための技術支援の方法論の解明

### 1.2.1 相手の情報をより深く知るための内面情報センシング手法の実現

1対1での対話など、インタラクション主体のスケールが小さい場合でのコミュニケーション支援における一般的課題として、対話中の相手と自分の環境の違いに基づいて、相手の状況が深く伝わらないという側面がある。その解決策として、テレビ電話やソーシャルVRの分野において相手の状況(モーダル)を増強して伝達してあげる技術支援の方法が多数提案されてきた。しかし、それらの多くは表面上に表出される身体的な行動に基づくものが多く、相手の感情等の内面に踏み込んだ議論も必要になってくるものと考えられる。現実世界での対話の中で人は非言語的な情報を通じて相手の興味や注意の度合いを把握し、それらの状態の認知に基づいてインタラクションを進める側面があるが、このような人間の内部状態を共有することができれば、より円滑でつながる価値を高めたコミュニケーション支援の実現に寄与できる。人間の感情を獲得する技術として、表情認識 [75] 等の人間が直接表出する情報を利用したものがあるが、生体情報のように人間が直接表出しえない情報を用いたアプローチは、人間の本心(内部状態)を外部から知り得る手立てとして利用できる。本研究では、このような人間の生体情報(心拍情報)を映像からセンシングする技術に着目し、インタラクション場面での利用に適した形へ手法改良することを目指す。

### 1.2.2 人々が集団として「創発的に」繋がるための技術支援の方法論の解明

一方で、多人数での集団交流においては、また異なった形でのコミュニケーション支援における課題が存在する。人々が多人数で集い、交流する場面においては、バラバラな個人が集団に属することで初めて生まれる体験を求め、自身の参加を促進させるという側面がある。そのため、多人数での集団交流においては、分散した個々人が集団としてつながれるプラットフォームを提供するというだけでなく、その延長として、集団として集まるからこそ生まれる価値を高めるような支援の在り方が必要である。

本稿では、このような人々が集団で集うことによって生まれる新たな体験、成果、価値を総称して「創発」と表現し、人々が集団として「創発的に」繋がること(集団的創発)を促進する技術支援の在り方を考える。特に、多人数インタラクションの場面は公共性が高い場合が多く、そのような公共性の高い空間での情報交流においてはプライバシーの観点での考慮が重要である。近年の情報センシング技術の発展から、個人・グループにとどまらない、超多数の細粒度情報を同時に獲得する技術が数多く登場している。このような技術発展は集団行動認識のための主要なアプローチとして今後も発展が期待されるが、その一方で機械による監視の進展に関する懸念がある。機械による監視の懸念は、個人の意図しない形で冗長な情報が獲得されてしまうことそれ自体も問題であるが、インタラクションデザインの観点から言えば、「見られていること」がもたらす行動変容が問題となる。集団的創発を促進する技術支援を考える上では、その中の個々人がハードルを持つことなく参加を促進できる枠組みが必要となる。その観点から冗長さを含む個々人の細粒度の高い情報のセンシングと活用は、集団の状態の同時的把握に向いていたとしても、その集団の創発には不向きであると考えられる。また、人間の認知能力という観点から言えば、人間は超多数の細粒度情報をすべて知覚することが困難であるため、多人数交流空間においては概略を用いて状況を認知する場合が多く、個々人の状況の認知と比較して集団の状況の認知を支援することが、人間の主体的行動を促進するうえでまず有効となるアプローチとなりうる。

このことから、集団に属する個々人の匿名性を考慮した上で、それぞれが主体的に参加を促進できるような情報交流基盤に関する研究は、高度に発展した情報技術の利活用の方法を考える上で重要な意味を持つ。本研究では、超多数の人間が集い交流する国内の代表的事例である音楽ライブを対象とした研究を通じて、多人数のインタラクション支援の在り方を考える。集団に参加する個々人が集団的創発の実現に向けてどう貢献しているかについて、社会学における行動分析の手法であるエスノメソドロロジー[100]に基づく分析を交えつつ、集団的創発を実現する核となる要素に関して、工学的支援の枠組みを考案する。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

- 第1章 序論
- 第2章 人間の内面情報を獲得するセンシング技術の開発
- 第3章 多人数間の相互交流支援

- 第4章 遠隔コミュニケーションを対象とした多人数相互交流基盤の構築
- 第5章 結論

ここまで、第1章では序論として、研究全体における背景と、本論文で取り上げる問題と目的について触れた。

第2章では、主体のスケールが小さい場合のコミュニケーション支援における「相手の情報をより深く知るための内面情報センシング手法の実現」という課題に対応し、ユーザや環境への介入を伴わない非接触な方法で、人の内部状態を計測する技術として、民生品のRGBカメラで撮影された顔映像を利用した心拍数計測手法に関して議論する。本論文では、比較的頑健な計測が可能だが、計測速度が低速であるという特徴を持つランダムパッチを用いた心拍数計測手法に着目し、その高い頑健性を維持しながら計測速度の高速化を実現した取り組みについて報告する。

また、第3章では、主体のスケールが大きい多人数間のコミュニケーション支援における「人々が集団として『創発的に』繋がるための技術支援の方法論の解明」という課題に対応し、集団を構成する個々人の振る舞いの伝達と可視化に基づいて、その内部のつながりを促進する技術支援の方法について議論する。本論文ではその調査フィールドとして国内の大規模集団交流の事例である音楽ライブの現場に着目し、演者・観客間、観客同士の一体感・参加感・臨場感を促進するシステム開発・評価に取り組んだ事例について報告する。

第4章では遠隔でのグループコミュニケーションに着目し、その中で特有して発生する「相手がある場にいる感覚(身体的共在性)の欠落」に関する問題に対して議論する。本章では、これらの問題の解決方策として、映像通信とユーザデバイスを組み合わせることで、自他の映像や実世界環境に対して多様な粒度での情報獲得・提示を可能とした遠隔コミュニケーション支援基盤を提案する。

第5章では本研究の結論および将来展望について述べる。

## 第2章 人間の内面情報を獲得するセンシング技術の開発

主体のスケールが小さい場合のコミュニケーション支援において主要な課題である「相手の情報をより深く知るための内面情報センシング手法の実現」という課題に対応し、本章ではユーザや環境への介入を伴わない非接触な方法で人の内部状態を計測する手法である、映像からの非接触心拍数推定手法に関して議論する。本論文では、その一環として民生品のRGBカメラで撮影された顔映像から心拍数を非接触で計測する手法について、インタラクション場面での利用に適した形に頑健化・高速化を行った事例を報告する。

### 2.1 背景

1対1での対話に代表される主体が小さいインタラクションにおいては、集団を対象とした場合と比較して一般的に、相手との心理的な連結強度が高く閉鎖的であり、相手の状況に注意を払ってインタラクションを進めるといった特徴がある。そのため、主体スケールが小さいコミュニケーションにおいては、相手の状況を深く伝達するという情報支援の在り方が、非常に大きく求められる部分である。前述のように、特にこの問題は、対話空間の違いや、伝達情報の欠落が発生しやすい遠隔コミュニケーションにおいて起こりうるものであるが、現実空間・遠隔空間に限らず、前者においては相手の情報を拡張する、後者においては補完するといったようなコミュニケーション支援のあり方が、情報支援のための主要な指針となる。

一方で近年、情報センシング技術の発達や安価なセンサの普及から、人間の高度な行動情報を手軽に獲得することが可能となってきた。画像情報や音声情報から人間の表出する行動を分析する手法 [21, 18] や、これらの情報を用いることで人間の感情や行動意図を分析しようとする試み [81, 13, 75] が数多く行われている。人間の感情の認識という側面に着目すると、環境から与えられた情報のみから人間の内面状態を得るといった受動的 (Passive) な方法と、センサが人間に対して介入し情



報を獲得しようとする能動的 (Active) な方法の2種類がある。前者は、行動 (表情・瞬き・頷き等の行動), 発話 (会話内容・抑揚・韻律・発音) 等の人間が表出する情報から相手の状況を獲得しようとする方法が該当し, 人間に対して専用機器の装着等の直接的侵襲を必要としない点がセンシング上の利点である。一方で, 後者の能動的なセンシング手法には, 心拍情報や脳波, 筋電位等の生体情報の計測, 無音による音声認識 [40] 等が代表例として挙げられる。これらの方法は, 人間が直接的に表出しない, 見えない情報をセンサによる身体的介入に基づいて獲得しようとするアプローチである。身体的介入を伴うセンシングは, 生体情報に代表される人間が直接的に表出しない内部状態の変化を獲得できるため, 受動的なセンシング手法に比べて高度な感情推定の実現に寄与するものであると考えられる。一方で, センサの身体への装着は利用者に対して負荷をかけてしまうほか, 計測対象者への介入なしに情報を獲得することができないことから, インタラクション支援の枠組みにおいて他者の情報を獲得する手段として用いるには困難であるという課題がある。

一方で, このような人が直接的に表出しない情報を映像等の受動的なセンシング技術を利用することで非接触で可能とする方法が提案されている。その1つとしてRGBカメラ映像からの心拍情報計測技術 [64] が挙げられる。この方法では, 心臓の拍動に応じた血流量の変化に基づく肌の色の微弱な変化をビデオ映像上でとらえることで, 心臓の拍動情報を獲得しようとするアプローチである。この方法は, 人間の内部状態という従来身体装着が必要なセンサ (心電図等) でしか獲得しえなかった情報を, 人間の外界から侵襲なしに受動的に獲得できる。そのため, 対話相手の状況を獲得するといったインタラクション支援の枠組みにおいても応用が期待できる。一方で, 本手法においては精度面における課題が非常に大きく, 実世界における自然な対話場面において十分な精度やリアルタイム性を両立した上で実装することは現状における手法上の課題である。このため, 本研究では, 主体スケールの小さい場合のコミュニケーション支援における主要な課題としての「相手の情報の高度な獲得・伝達」を実現する上での, 先進的な情報獲得を実現するアプローチの1つとして, 人間の内面の状態を非接触・受動的に獲得する, 映像からの心拍数計測手法をインタラクション場面へ応用可能な形へと改良していくことを目指す。

## 2.2 人間の状態の獲得に関する研究動向

前述のように, 情報センシング技術の発達や安価なセンサの普及から, 人間の高度な行動情報を手軽に獲得することが可能となってきている。ここでは, 人間の状態を獲得するセンシング手法に関してそのアプローチをまとめ, 本研究の位置づけについて述べる。

## 2.2.1 人間が直接的に表出する情報の獲得

前述のように、人間の状態を獲得する手法は、人間が能動的・直接的に表出した情報を受容的に獲得する受動的なセンシング手法と、人間が意識的に表出しない内部的な変化をセンサによる介入に基づいて獲得する能動的センシング手法の2種類に大きく分けることができる。ここでは、前者の人間が意識的に表出した情報を受容的に獲得するセンシング手法についてその具体例と研究事例について述べる。

### 映像による行動情報の推定

コンピュータビジョンの分野においては、人間が視覚を通じて周囲の状況を知覚することと同様に、映像に映りこむ情報を通じて計算機上での状況の理解を実現しようという試みが長年にわたって行われてきている。そのうち、人間に着目したものとしては、2001年に Viora らが映像上から高速で顔を検出するアルゴリズム [87] を開発して以降、映像中に映りこむ人間の部位の検出 [86, 27, 21, 89]、検出した部位情報を用いたジェスチャの推定 [47]、ジェスチャを利用した人の感情状態の推定 [88] や、ロボットをはじめとするインタラクション支援への応用 [53] 等、様々な研究がなされている。

映像中に映りこむ人間の部位の検出に関しては、頑健・正確な推定を可能とするものとして、再帰性反射マーカ等を身体に取り付けたうえで人間の姿勢を推定するモーションキャプチャシステムが市場においても多く用いられているほか、RGBビデオ映像に加えて奥行情報の計測を可能とする RGB-D センサ (Microsoft KINECT [89], Intel RealSense [4] 等) を利用した姿勢推定技術の提案も盛んである。一方で、近年ではこれらの頑健な推定を可能とするアプローチで得られた膨大な姿勢データを利用した深層学習により、RGB カメラ映像 [21] や、遮蔽・湾曲のある映像から人間の姿勢を検出する技術に関する開発 [35] も盛んに行われており、多くの環境において、RGB カメラの情報のみから人間のジェスチャの検出が可能となってきている。顔検出に関しても同様に、RGB カメラ映像から、各部位の特徴点を求める方法に関する提案が数多くある [18, 16] ほか、2D 映像から 3D 空間上における特徴点の位置を推定することで、顔向きや、視線方向を推定するアプローチ [18] も提案されている。また、低解像度画像や、超多人数が写る画像を対象とした姿勢推定・顔検出技術 [21, 33] に関する提案も多くなされている。

また、これらの認識技術から、映像に映る人間の意図や状況を理解しようとする研究も同様に多くなされている [30]。また、映像と映像に関連した質問文がセット

になったデータからその質問に合う回答文を自動生成するという、画像処理と自然言語処理を組み合わせた VQA(Visual question answering)[14] と呼ばれるタスクに対するアプローチに対しても盛んに研究が行われている。映像による行動情報推定技術は、環境における詳細な情報の獲得を手軽に獲得する方法として利用できることから、シーン理解の手法としては非常に有用である。しかし、カメラを使った方法はプライバシーの問題があり、その利用のされ方に関しては倫理的な問題が指摘されている。また、深層学習等のモデルベースの手法が広がりを見せる中で、学習データの持つバイアスに基づく認識エラーが不当な差別を引き起こす「AIの公平性」に関する問題が指摘されている [61]。画像からの認識で得られる情報の多くは表面的な情報であり、認識のエラーを許容する仕組みが、手法を応用する際に考慮する必要がある。そういった観点では、ユーザとシステムとの間のインタラクションは、人間情報センシングにおける認識エラーが起きた際に、ユーザの追加情報を獲得して問題を解決する 1 つの手段として利用できる可能性がある。

#### その他センサを利用した推定手法

映像を利用した人間状態センシングは、手軽さと情報量の多さからシーン理解に有用である一方、プライバシーに関する問題からその利用の仕方に関する考慮が必要となる。これらの問題を解決するアプローチとして、音声・慣性計測データ・距離情報等の粗い情報を用いて人間の状態を獲得するセンシング手法がある。マイクを用いた音声による情報獲得は、その内容に基づいて人間の意図を理解する直接的なアプローチとして利用できるだけでなく、発音・抑揚等に基づいて人間の感情状態を間接的に推定する手段としても利用できる。一方で画像情報同様に匿名性を持たない細粒度の高い情報であり、直接的な伝達が個々人のプライバシーを侵害してしまうリスクは依然持ち合わせている。匿名性を考慮した環境理解に活用できるセンサとして、距離計測が可能な LiDAR (レーザ測域センサ)、明度・温湿度センサ、慣性計測センサ (IMU/加速度・ジャイロ・地磁気) 等がある。これらのセンサから得られる情報は、画像や音声と比較して匿名性を考慮したうえで環境の変化や行動情報を理解する手段として利用できる。

## 2.2.2 人間が直接的に表出しない情報の獲得

### 接触型センサを用いた内部状態の推定

人間が直接的に表出しない情報には、生体情報のような自ら知覚しえないものや、瞬き等のように無意識的に表出するものがある。医療現場をはじめとして、これらの情報の高精度な計測が必要な場面は、一般的に身体侵襲を伴う計測機器が利用されるケースが多い。例えば、脳のニューロンの活動状態を反映する脳波や、筋肉の活動を反映する筋電位、心臓の拍動を反映する心拍情報等の計測には、皮膚表面に電極を装着し、身体の運動を誘発する電位を計測するアプローチ(多くの脳波計、筋電センサ、心電図等が該当する)が多く採用されている。また、血圧の計測には、血管を直接的に圧迫することで血液の流れ方の変化を見る方法が用いられており、こちらも侵襲が必要な方法である。

心拍情報に関しては、心電図に依らないより手軽な方法で獲得を可能とするアプローチとしてPPG(Plethysmography, 光電容積脈波測定法)[24]がある。この方法では、心臓の拍動に伴う血管の容積変化に着目し、容積変化に伴う皮膚の発色の微弱的な変化をフォトダイオード等の受光器を用いて獲得しようとするアプローチである。LEDを用いて皮膚表面に光(近赤外線や緑色光が用いられるケースが多い)を照射しその反射光をフォトダイオードで計測することで、心臓の拍動をとらえることができる。この手法では心電図のようにQRS波形を含む正確な心臓の拍動をとらえることはできないが、心拍波形の概略を掴むことができるため、1分間あたりの拍動回数を表す心拍数[BPM]や、拍動間隔に基づく心拍変動の導出や、血圧の推定等に利用することができる。また、深層学習を利用したアプローチによりPPG信号波形から心電図波形を推定する手法の開発もなされている。また、PPGを利用した心拍波形の計測を行う際に、2種類の光源を当てた際の反射の仕方の違いを計測することで血中酸素濃度(SpO<sub>2</sub>)を計測することも明らかになっており[106]、こちらは呼吸状態の医療診断や、新型コロナウイルス(COVID-19)における重症化予測等、様々な医療診断のための指標として用いられる。

近年では、小型軽量安価な心電センサの開発および、スマートフォン等のRGB/IRカメラを利用したPPG計測アルゴリズム等の進展から、これらの計測ハード・ソフトをスマートウォッチ等へ搭載する事例([5]等)も増加しつつある。これらの多くは、ヘルスケアやスポーツ科学、エンタテインメント等の医療用途でない分野での利用を主目的としたアプリケーションであり、従来医療現場での診断の指標としてのみ使用されてきた生体情報が、自身の身体状況の把握のための身近な手段として利用できるようになりつつあるといえる。

生体情報は、人間の健康状態を反映するバロメータであり、健康状態や危険な状態の理解、慢性疾患の発見や進行および重症化リスクの把握等、ヘルスケアおよびその関連分野への情報技術支援において大きな利用価値を有する情報である。また、生体情報は健康状態だけでなく、人物の感情状態との強い因果関係がこれまで示唆されてきた。例えば、緊張状態であれば人間の心拍数には上昇が見られるほか、心拍変動の周波数成分に基づいた指標であるLF(低周波領域の分布)、HF(高周波領域の分布)およびLF/HFは、人間のリラックス状態や緊張状態、ストレス状態を反映して変化するとされる。また、心拍変動に関連した指標としては、疲労を反映するといわれるpNN50等の指標がある。脳波においても、 $\alpha$ 波、 $\beta$ 波と呼ばれる特徴量をはじめとし、人間の感情状態分析に利用できる様々な特徴がある。これらの生体情報は人間が意図をもって表出するジェスチャや表情、言語情報等と異なり、人間の内部状態や、いわゆる「本心」となる部分を反映することから、機械による高度な人間状態の推定に寄与できる余地を持っている。

一方で、これまで見てきたように、頑健な計測の実現には身体接触を伴うセンシング手法が必要であるという特徴がある。そのため、人間が意図をもって表出する情報と異なり、物理的な介入なしに外界からこれらの生体情報を獲得することは困難である。人間が意図をもって表出しない情報を外界から獲得し活用できることに関しては、倫理的な問題を持つが、機械が人間の状態を深く知覚する手段や、ユーザが自己表現を拡張するための手段として利用できる余地を同時に持ち合わせている。そのため、仮に生体情報を非接触で外部から獲得する方法があれば、健康状態の推定、ヘルスケア、スポーツ科学への利用ができるだけでなく、人間の状態に合わせて適切に振る舞う機械の実現等のインタラクション支援への応用にも応用が期待できる。

## 非接触による計測アプローチ

人間が表出する情報には、発話や表情、ジェスチャ等、意図を持って意識的に表出する情報、生体信号のような外界に表出されない情報があるが、一方で人間が普段の生活の中で知覚していない無意識的に表出されるシグナルがある。その代表的な例として瞬きがある。人間が無意識的に行う瞬きは人間の注意の状態を反映するとされており、相手との対話場面において、場面の区切りや対話相手の瞬きとタイミングが同期することが知られている。これらの示唆することは、瞬きのタイミングが対話相手とのインタラクションの成立の度合いによって無意識的に左右されるという側面である。実際に、コミュニケーションに不自由を感じる自閉スペクトラム症(ASD)患者を対象としてコンテンツ映像を視聴する際の瞬きタイミングを計

測する実験を実施したところ、ASD 患者でない人を対象とした場合と比較して有意にまばたきの同期現象が起こり得ないとする報告がある [101]. 瞬きの計測には筋電位を計測するセンサを瞼に装着して利用を行う EOG 法や、脳波のノイズ成分を用いた計測方法が高精度計測には利用されるが、民生品カメラの顔映像から検出することも可能である. このため、人間の内部状態を外部から獲得するための手段として利用できる可能性がある. 関連して、瞳孔の大きさは人間の注意の大きさを反映することが知られるほか、一瞬のみ表出される表情である微表情や無意識的な姿勢の変化も、これらの意図を持たずに無意識的に表出される情報といえる.

一方で、人間に見えない心拍情報を外界から獲得しようとする試みも行われている. 心拍情報を非接触で獲得する仕組みとして、ドップラーセンサやマイクロ波を利用した方式と、RGB カメラを利用した方法の 2 種類が近年提案されている. 前者の手法は、人体に対してマイクロ波を照射し、その微弱な反射成分を解析することによって心臓の拍動に伴う微細な体動変化を抽出し、心拍信号を獲得する仕組みである [99, 79]. 本手法は、身体侵襲がなく、プライバシーに配慮した測定が可能であるという利点を持つ一方で、専用の計測機器が必要であり体動に非常に脆弱であるという問題がある. RGB カメラを利用した方法では、PPG による計測と同様に、血管の容積変化に伴う皮膚表面の環境光の吸収・反射率の変化に応じた微細な見え方(発色)の変化をイメージセンサ上で画素値の時系列変化としてとらえることで心拍信号を推定する [64]. この方法の持つ利点は、民生品の RGB カメラからの計測が可能であることである. そのため計測システムの構成が安価・手軽であるほか、表情等の他の計測モードと一体的に利用できることや、現時点だけでなく過去の映像データからの推定が可能である点は他の手法にない利点である. しかし、PPG による計測と異なり、参照光がなく光源に環境光を利用すること、センサと身体が密着していないことを起因として、得られる心拍信号成分は非常に微弱であり、その抽出には照明変化や体動ノイズへの対応が必須である. そのため、インタラクション場面で表情等の他のモードの計測と同様に自然な場面での計測に利用するためには、手法的改良が必要である. 本研究では、インタラクション場面における非接触心拍数計測手法を、実世界環境において、頑健・高速に動作するものとして改良することで、本課題の解決を目指していく.

## 2.3 顔映像からの心拍情報推定

本研究では、人間の内的状態を直接的に獲得できる、身体的な侵襲性がなくインタラクションが発生する様々な場面に適用可能な方法、としてカメラを用いた映像からの心拍情報推定手法に関して議論する.

### 2.3.1 RGBカメラを用いた心拍数推定手法の原理

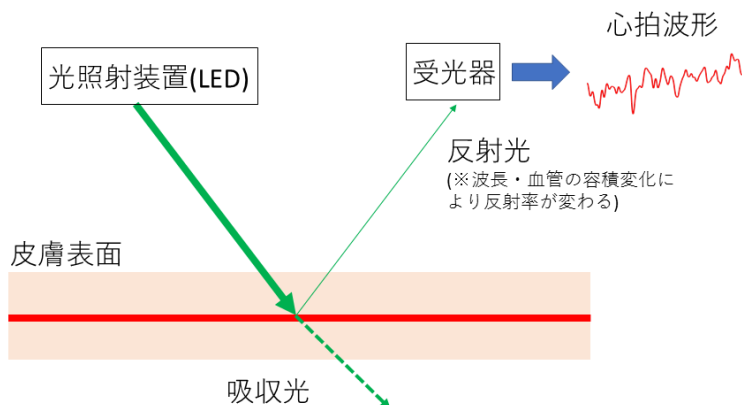


図 2.1: 皮膚からの心拍成分の獲得

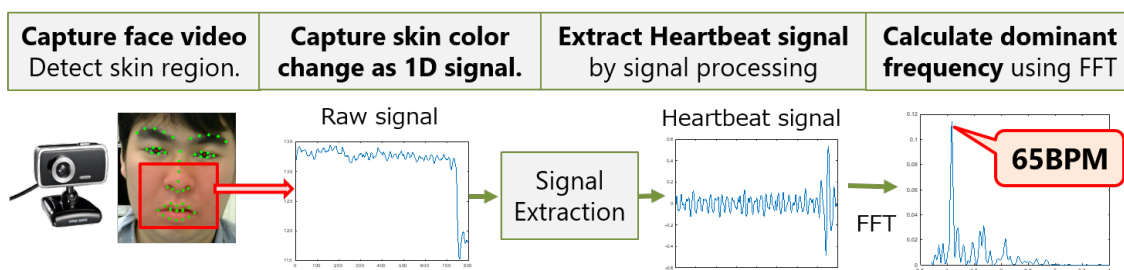


図 2.2: RGB カメラ映像からの心拍数計測の原理

図 2.1 および図 2.2 は RGB カメラを用いた心拍情報推定手法の一般的な原理の概略図である。生物の血管の容積は心臓の収縮・膨張といった拍動に応じて常に周期的に変動している。血管の容積が大きい場合と小さい場合では、環境光に対する血管上の色素成分 (ヘモグロビン) における反射・吸収量が異なり皮膚表面の色が微弱に変化するため、その微弱な色の変化をイメージセンサ上で獲得し、画素値の時系列的な変化として計測することで、心臓の拍動をカメラを用いて非接触で獲得できる。この画素値の時間変化信号の生成のために、Viola-Jhones らの手法をはじめとする顔検出器、Lucas-Kanade-Tracker [49] 等の顔追跡器、あるいは顔検出・特徴点抽出・追跡の 3 つを End-To-End で行う顔の特徴点追跡手法 (文献 [18, 15] 等) に基づく皮膚領域の追跡処理が組み込まれる場合が多い。

カメラ画像から獲得できる心拍成分は一般的に非常に微弱であり，イメージセンサによって獲得した画素値の生の時系列変化信号においては，照明変化や体動によるノイズ成分を多く含む．そのため，映像からの心拍情報の推定においては，ノイズ処理に基づく心拍信号成分の抽出処理が必須である．心拍信号の抽出処理には，バンドパスフィルタの利用等，信号処理分野における知見に基づいた様々な抽出方法の提案がある（これらの手法の詳細に関しては後述する）．信号処理によって抽出した心拍信号成分に対しては，高速フーリエ変換 (FFT) を適用して周波数解析を行い，主要な周期を計算することで最終的に心拍数を導出することができる．心拍数の評価には一般的に BPM (Beat Per Minutes) と呼ばれる，1 分間に何回振動があったかを表す単位が用いられることが多いが，心拍数 [BPM] の導出には心拍信号成分における主要な周波数 [Hz] に対して 60 倍を行うことで計算できる．

### 2.3.2 非接触心拍数推定手法の発展と現在の課題

#### 非接触心拍数推定手法の歴史

ビデオ映像あらの非接触での心拍数推定が可能であることを初めて示したのは Verkruysee ら [33] による取り組みである．Verkruysee ら [33] は血管の容積変化に伴って生じる皮膚表面の反射光量の変化をビデオ映像における画素値の時間変化信号として観察できることを示したほか，映像の R・G・B の 3 つの成分のうち，G 成分の時系列変化に心拍信号の成分が強く含まれることを明らかにした．しかし，ビデオ映像における画素値の時間変化信号は心拍信号成分だけでなく，動きや照明変化に起因する多くのノイズを含むため，そのまま心拍信号の推定に用いることは困難であった．

このため，画素値の時間変化信号から信号処理を用いて心拍信号成分を分離する手法がいくつか提案されている．手法としては，周波数フィルタリング，主成分分析を用いるもの等があるが，代表的なものは，ブラインド信号源分離 (Blind Source Separation, BSS) を用いたものである．なかでも，独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) は複数の信号源を入力として複数の信号成分に分離するもので，既存研究において多く用いられている．Poh ら [64] は，独立成分分析を用いて画素値の時間変化信号を心拍信号とノイズ信号へ分離することで，正面顔を映したビデオ映像から心拍信号を復元する手法を提案した．この手法では各フレームにおける顔検出により捉えた顔領域に対し，R, G, B 成分ごとに平均画素値の時間変化信号を求め，得られた 3 つの信号を入力して独立成分分析を行うことで，心拍



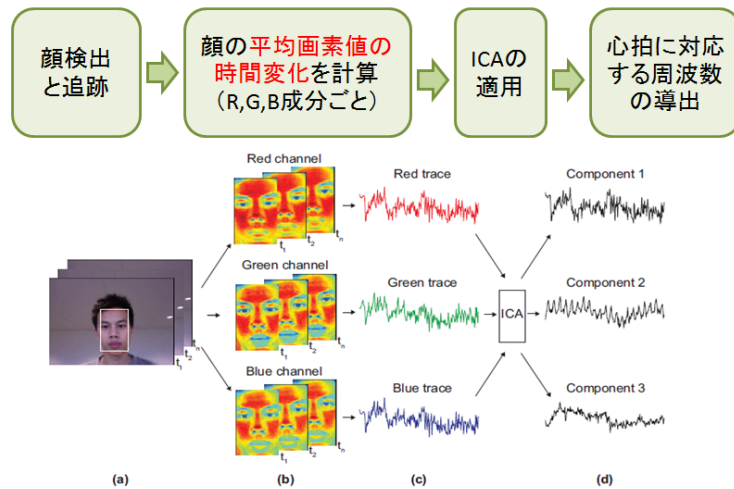


図 2.3: 画像からの独立成分分析を用いた心拍情報計測 ([64] より引用)

信号成分を抽出する (図 2.3). また、彼らは、後の研究において、バンドパスフィルタを用いた心拍数・呼吸数・心拍変動の推定手法も提案している [65].

kwon ら [43] は、スマートフォンで撮影されたビデオ映像中の G 成分のみを用いて心拍数を推定するアルゴリズムを提案している. そして、緑色成分のみを用いた場合に、RGB 成分すべてを利用した場合と比較して精度が向上することを示している. 画像処理により心拍に起因する微弱な体動を捉え、心拍信号を導出する手法も提案されている [17]. しかし、この手法はドップラーセンサを利用した手法と同様に体動の情報を利用して心拍情報を計測するため、使用時にはユーザが静止していることが必要条件となる. そのため、手法としての応用範囲が限られる.

これらの手法では、実験を被験者が静止した環境で行っており、実環境で起こりうる顔の動きや照明変化による計測への影響が考慮されていない. そのため、Li ら [46] は、文献 [65] を改良し、実環境下での使用に適した改善手法を提案した. 文献 [65] では、正面顔領域を特定するために Viola-Jones 顔検出器 [87] を利用しているが、頭部の回転等に対応して正確に正面顔領域を追跡することは困難である. そのため、彼らは顔の特徴点追跡手法を導入することで頭部の回転に対して頑健に正面顔領域を追跡できるようにした. また、心拍信号が高精度に計測できた場合には、その信号は周期性を伴っていることが推測される. そのため彼らは、図 2.4 に示すような信号をセグメントに分割し、セグメント毎に周波数解析を行うことで信号の妥当性を検証するアルゴリズムを提案し、信号中の動きの大きな部位を特定・除去できるようにした. また、明るさの変化の大きな環境においては計測に際し大きく

影響を受けることが推測される。そのため、彼らは背景の明るさ情報を利用して皮膚表面から得られた信号から光源による変化の影響を除去する手法を開発し、照明変化に対して頑健に動作するようにしている。また、心拍変動の導出に有効な、心拍信号のピークを頑健に検出することを試みた手法も報告されている [31]。

Hassan ら [32] は、顔の額部・顔下部を 32 個の矩形領域に分割したうえで、各領域においてウェーブレット変換に基づくノイズ除去を行うことで心拍信号成分を導出し、得られた信号の周波数成分に着目した多数決を行うことで心拍数・呼吸数を導出する手法を提案している。データベースを用いた実験・被験者実験から既存手法を上回る精度であることが示されているほか、10 秒程度の短い映像からの計測に有効であることが示されている。著者らは論文内において、ビデオの圧縮が皮膚表面の色の变化を抑制し、BSS に基づく信号分離の精度を落とすことに関して言及しており、BSS に依らないノイズ除去手法が少ないフレームによる心拍信号推定の精度を向上させる可能性を示唆している。Haan[25] らは、クロミナンス特徴(色成分の情報)を利用し、皮膚表面の色の变化を表現することで、心拍信号成分に近い信号のモデルを提案した。クロミナンス特徴に基づく信号表現は、映像からの心拍成分の推定に有効に作用する可能性が考えられる。また、Wang ら [91] は、皮膚画素の空間部分空間回転に基づく心拍数計測アルゴリズムを開発しており、実験から ICA ベースの手法と比較して有効であることが示されている。

近年では、映像におけるフレーム間の差や、画素値変化信号自体を入力として、深層学習に基づいて End-To-End で心拍信号を推定する方法が数多く提案されている [23, 92, 45, 60]。データベースを用いた検証では、これらの手法は従来手法を大きく上回る頑健性を示しているが、頑健な性能を実現するモデルは構造が複雑であり学習が困難であること、またデータセットによる影響を受けてしまうことや、計算に多量のリソースを必要とする点は手法の持つ課題であるといえる。

カメラによる心拍情報の非接触計測では、心拍数・心拍変動・呼吸数等、心拍波形と相関のある様々な心拍情報が計測できることがわかっているが、さらに加えて、パルスオキシメータで計測可能な値である動脈血酸素飽和度 ( $SpO_2$ ) の計測を実現した事例 [74, 34, 83] や、体の二か所の部位で心拍波形を計測し、その差(脈波伝搬時間, Pulse Transit Time) から血圧との相関を調査する研究も行われている。村上ら [59] は、左手・左足を撮影した映像から脈波伝搬時間を求め、身長・血圧・年齢との相関を調査した。脈波伝搬時間と身長の間には相関が見られなかったが、血圧、年齢との間には高い相関が見られている。また、杉田ら [77] もバルサルバ手技をしている 20 人の被験者のビデオ映像から、脈波のピークの時間差・位相差を計算し、脈波センサから求めた脈波伝搬時間、血圧センサによって得られた収縮期血圧変動との比較を行った。結果として、ビデオ画像から得られた心拍信号の時間差・位相

差と血圧変動の間には、手と頭部の部位を計測に用いた場合に高い正の相関が見られた。また、手法として心拍信号の時間差を用いた場合と比較して、位相差を用いた場合の方がより高い相関結果を示した。これらの研究結果は、ビデオ画像から、心拍数・心拍変動の推定だけでなく、血圧や動脈硬化の推定が可能であることを示唆させるものとなっている。

非接触な心拍数計測手法を用いた計測用のアプリケーションも提案されている。Jiang[39]らは、カメラ映像から心拍数をリアルタイムで計測する Android アプリケーションを考案した。リアルタイムな心拍数の計測には、アルゴリズムの高速性が求められるが、このアプリケーションでは、独立成分分析の代わりにカルマンフィルタを用いることで、リアルタイム処理を実現している。他にも文献 [65] のアルゴリズムをベースとした心拍数計測アプリケーションが市販化されている [6, 67]。

非接触による心拍情報計測手法を感情推定に応用するための基礎的な検討も行われている。McDuff ら [55] は、ビデオ映像から計測した顔画像から心拍数・心拍変動・呼吸数を計測し、そのストレスとの関係性を調査した。実験では、10 人の被験者に計算タスクを与え、計算タスク時・安静時の 2 種類の顔映像を撮影し、そこから得られた生体情報を比較した。結果として、図 6 のように、タスク実行時・安静時の間では、心拍数には有意差が見られなかったが、呼吸数や心拍変動においては、タスク実行時に低周波成分の大幅な増加が見られた。また、彼らは、ビデオ映像からの人の感情推定を目的とし、線形 SVM を用いて各生体情報からストレスの有無を予測する識別器を作成した。作した識別器によるストレス有無の予測精度は 85%であった。

複数の種類の生体情報を統合して人の感情を推定する試みも行われている。Burzo ら [20] は、表情変化・心拍数・熱画像・文章解析の 4 つを用いて、人が感情的であるかどうか、感情が肯定的か否定的か、の 2 つの分け方による自動分類を試みた。複数の情報の統合の結果、推定精度は前者において 92.85%、後者において 73.21%であった。加えて、彼らは、どの情報が分類に対しよく作用しているかについて合わせて調査を行った。その結果、感情の有無の判定に関しては、心拍数や温度といった生体情報が強く作用し、感情の状態の判定に関しては、表情や文章解析が強く作用しているとの結果が得られている。Zhou ら [93] らは、画像情報から得られる頭の動き・まばたき・瞳孔変化・心拍数・表情および SNS の文章解析・画像解析から、インターネット利用者の精神状態の判定を試みた。被験者実験から複数の情報の統合が感情推定に有効であることを示している。

## 現在の課題

映像からの心拍数の非接触心拍情報計測手法における現在の課題として以下の事柄が挙げられる。

- 照明変化・体動に頑健な測定の実現
- リアルタイム・高速な計測の実現
- インタラクシオン場面での応用に適したパッケージ化

**照明変化・体動に頑健な測定の実現** 顔映像からの心拍情報の計測における最大の課題は、照明変化や体動の影響を受けてしまうことである。顔の動き、特に頷きや横を向くといった動作は、インタラクシオン場面において起こりうるものであり、実用化に際して、これらのノイズをどう除去するか、あるいはどう扱うかに関しては、対処が必要な問題である。

**リアルタイム・高速な計測の実現** 頑健さを求める一方で、高速に動作することもインタラクシオン場面における応用を考える上では考慮したい点である。M.Z.Pohらの手法 [64] 等、アルゴリズムベースの方法の多くはリアルタイムでの動作をサポートしているが、精度の高い方法および深層学習をベースとしたモデル処理に基づく方法では、オフラインでの計測処理を前提としたものが多い。そのため、インタラクシオン場面での利用に即した形態として頑健なオンライン処理を実現可能な手法が求められる。

**インタラクシオン場面での応用に適したパッケージ化** 上記の2点と関連して、アプリケーションへの組み込みへ適した形への最適化は本手法の応用を考える上で非常に重要な側面である。頑健・高速・省メモリで動作するだけでなく、評価検証用でないアプリケーション実装に適した形へソフトウェアがライブラリ化されていること、組み込みシステムをはじめとする低消費CPUでの動作をサポートすることは、ロボティクス分野への展開等、様々な応用を可能とする。こういった観点から、他アプリケーションへの実装を考慮したパッケージ化はインタラクシオン分野へ展開していく上で重要な意味を持つ。

## 2.4 解決したい課題・研究目的

本研究では、インタラクシオン支援の分野への応用に適した形へ、映像からの心拍情報計測手法を改良していくことに主眼を置く。特に手法の課題である頑健性に関する問題、実行速度に関する問題を解決し、他アプリケーションへの組み込みへ

適した頑健・高速な方法として提案することで、従来の3つの課題の解決に取り組む。

このため、本研究では顔映像中のランダムな局所領域を用いて頑健な非接触心拍数計測を可能とする従来手法の改良に基づいて計測の効率化・最適化を図ることで、上記の問題を解決した頑健・高速な心拍数計測を可能とする手法を提案する。

## 2.5 顔映像中の局所領域を利用した心拍数推定

頑健・高速な非接触心拍数計測手法を実現するために、本稿では顔映像中の局所領域を計測に利用することで頑健な心拍数推定を可能とした従来手法 [44] をベースとして、処理の最適化・高速化の方法を検討するというアプローチを取る。本節では、本研究でベースとして用いた従来手法の概要と、ベース手法としての有用性・選定意義・課題について述べる。

## 2.5.1 手法

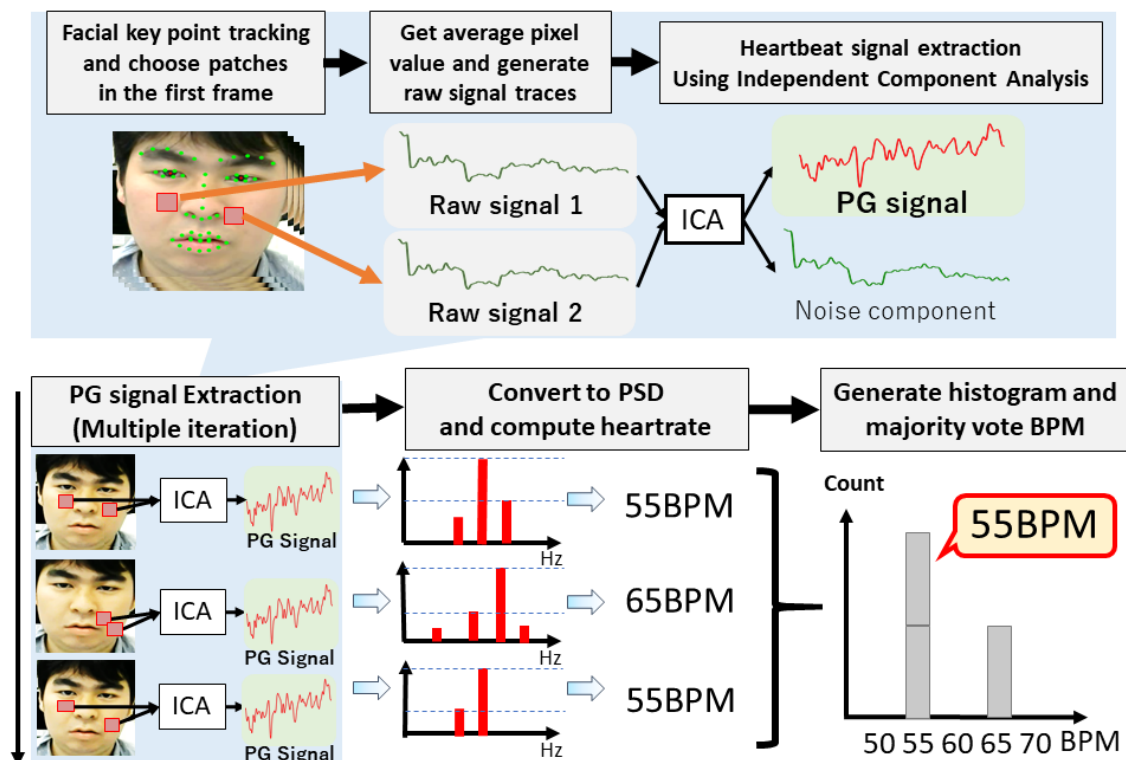


図 2.4: ランダムパッチを用いた心拍数計測手法の概略図

図 2.4 は、手法の概略図である。本手法は、顔の局所的な領域を計測に利用することで、部分的な照明ノイズや、遮蔽・体動による影響を軽減した計測を行うことを可能としている。また、異なる局所領域を用いた複数回での計測結果を用いて多数決を行うことで、最終的に尤もらしい結果を導出するアプローチを取っている。

本手法の詳細は文献 [44] および [109] に紹介があるが、本論文においても概略を紹介する。本手法においてはまず、顔の特徴点追跡器を利用して動画中の顔領域の検出と追跡を行う。文献 [44] においては追跡器として文献 [15] の実装 (Chehra Facial Tracker) を用いたが、本研究においてはより頑健・高速・省メモリで動作する顔追跡器である OpenFace[18] を実装上は利用した。

各フレームで得られた顔領域から、局所領域としてランダムに複数個の局所領域をペアとして選択し、各局所領域に対して時系列的な画素値の変化を計測する。この際、局所領域の選択位置は計測開始フレーム時点でランダムに決定し、その後の

フレームにおいては、顔の特徴点座標の変化量の情報に基づいて変換行列を作成する。そして、得られた変換行列を利用して局所領域の中心座標を変換することで、前のフレームおよび、各フレームの特徴点との相対的関係性を保ったまま、各フレームにおける局所領域の中心座標を計算していく。

その後、局所領域における画素値の平均値を各フレームにおいて計算し、各局所領域における時系列的な画素値変化を計測する。そして得られたペアの信号を用いて独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) を適用することで、信号を2種類の成分へと分離する。独立成分分析は、複数の入力ソース信号の情報を用いて、出力される信号成分が独立性を保つような成分方向を推定する処理である。カメラから得られる皮膚の画素値の時間変化信号は、時系列的な画素値変化に含まれる皮膚に含有されるメラミンに起因する皮膚色成分と、血液に含有されるヘモグロビンに起因する血流色成分から構成されていると見ることができ、本処理では2種類の画素値の時間変化信号を入力として信号を皮膚色成分と、血流色成分という独立した2種類の信号成分へと分離する処理を行っている。後処理として、得られた信号成分に対して心拍信号と比較して長期的な変化の傾向を除去するトレンド除去処理と、バンドパスフィルターを適用することで信号におけるノイズを除去する。本実装では、独立成分分析の方法として FastICA 法を利用した。

独立成分分析によって得られた2つの信号のうち、現在着目している信号成分が心拍信号成分を持つ信号であるか、尤もらしい信号であるかを判定するために、信号の周期性に着目した判定を行う。信号に対して周波数解析を行い、信号の含むパワースペクトルの密度を求めることで信号が強い周期性を持つものであるかを判定することができる。本手法では、パワースペクトルの持つ第1ピークと第2ピークの比を信号評価の指標として利用している。パワースペクトル密度の導出には、welch 法を活用した。

そして、上記の信号生成・分離・判定処理を複数回 (実験では500回) 繰り返して心拍信号の候補を生成し、周期性に基づいて反対された信頼度の高い信号群に対してそれぞれ心拍数の算出を行い、その結果に基づいてヒストグラムを作成する。心拍数の導出には、前述のパワースペクトル密度の情報を利用し、第1ピークとなる周波数 [Hz] を60倍して単位を [BPM] に変換することで導出した。作成されたヒストグラムに基づき最頻値を求め、最頻値となった心拍数を尤もらしい最終結果として決定する。



図 2.5: MAHNOB-HCI-Database 上の動画の一例。画像右上の数字は心電図によって得られた心拍数 (BPM) を表わす。

## 2.5.2 評価

本手法の性能評価として、文献 [44] では、MAHNOB-HCI-Database [7] を用いた実験に基づいて評価を行っている。実験には、公開データベースである MAHNOB-HCI Database [4] を用いた。MAHNOB-HCI Database は、Soleymani [76] らが作成した動画データベースであり、図 3.7 に示すような様々な国籍の人物が映像コンテンツを視聴している際の正面顔映像 (画素数:  $780 \times 540$ , 61fps) が収録されている。また、いずれの映像データにおいても心電図によって計測された心拍数情報がタグ付けされている。実験は、データベース上の動画データ 487 本、を用いて行われた。計測範囲としては、それぞれの動画の 306 フレームから 2156 フレーム (約 30 秒間) を採用している。手法の比較は、既存研究で提案された文献 [25], [19] に対して行われた。実験結果を表 3.1 に示す。このように、絶対平均誤差・二乗平均誤差、誤差が  $\pm 5$ BPM 未満のデータの割合を示す一致率において、既存手法を上回る計測結果が得られている。



表 2.1: 各心拍計測手法の計測結果の比較 [44]

Method	MAE	RMSE	Error(<5bpm)
Poh2011[65]	13.6	21.3	46.2%
Li2014[46]	7.8	15	68.1%
Lam2015[44]	4.7	8.9	75.1%

### 2.5.3 手法の有用性および課題

本アプローチでは、ランダムに選択された複数の計測領域での計測結果に基づく結果の多数決から最終結果を決定するため、顔内部における測定に適した領域が複数回の試行からヒューリスティックに発見され、最終結果に優先的に反映される。そのため、表情変化等の顔内部の局所的な動きに伴う計測ノイズの影響を除外することができ、頑健な計測を実現する。本手法は、他の同一の信号処理プロセスを持つ手法 [64] 等と比較してきわめて頑健であり、複数の領域選択および多数決による最良結果の優先的決定というアルゴリズムが、計測の頑健化に対して一定の効果をもたらすことを明らかにしている。

本手法のもう1つの利点として、モデルベースでないアプローチを取りながら高精度での計測を実現できている点が挙げられる。映像から心拍信号を推定する方法として、映像データと正解となる心電図データを利用して End-To-End による学習モデルを利用した方策から高精度な心拍信号復元を実現しようとする研究がある [23, 92, 45, 60]。これらのモデルベースの手法においては、学習に際し多量の映像および心電図データのセットが必要であり、また極端に心拍数が高い場合・低い場合といったサンプル数の少ないデータ等に対する復元精度が極端に低下する可能性を持つものである。モデルベースなアプローチと比較して、本手法はアルゴリズムに基づく推定手法でありながら、高精度による計測を実現している点で、データバイアスによる計測精度に対する影響を受けづらと考えられる。

本手法の欠点として、多くの領域の測定や、繰り返しの試行を伴う処理をアルゴリズムの内部に含むため、その計算に膨大なリソースが必要となり処理速度が非常に遅い点が挙げられる (実験環境 (CPU: Core-i7-4720K, RAM:32GB, MATLAB R2015b) において、30 秒の動画の処理に約 6 分の時間を要する)。インタラクション場面においてユーザの状況を把握するためには、リアルタイムで計測可能であることが重要であり、手法の高速化のための手法改良が必須である。一方で、本手法

においてヒストグラムの最頻値を構成する正解値に近いデータを優先的に獲得することができるように局所領域の選択方法を改善することで、現在の精度の高さを維持しながら手法の高速化を実現できると考えられる。

## 2.6 高速化・頑健化を実現する手法改良

前節では、顔領域中からランダムに選択された局所領域から得られる画素値の時間変化を利用することで、表情などの体動による影響を軽減した心拍数計測を可能とする手法について述べた。本手法は、アルゴリズムベースの方法でありながら、非常に頑健な計測が可能である点で他手法と比較して有用な計測手法である。しかし、本手法は多数の領域に対して計測を繰り返し行うことから処理速度が低速であるという問題がある。アプリケーションへの応用を考える上では、手法の頑健さを維持しつつリアルタイムで心拍数を導出できることが望ましく、処理速度の面からの改善が求められる。そのため本章では、本心拍数計測手法について、頑健さを維持しつつ高速化する手法について検討する。

### 2.6.1 統計的に計測に適した部位の調査

従来手法の欠点である処理速度の問題を解決するために、局所領域の選択方法の改良について検討した。顔の局所領域を選択する際に、測定に適した領域を優先的に取得できれば、少数の試行で正確な測定が実現できる。そのためまず、人間の顔に統計的に適切な測定部位があるのかについて調査を行った。MAHNOB-HCI-Database上の動画487ケースを対象として、各動画における計測時の局所領域の選択位置1000点および計測結果を記録し、統計的に計測に適した部位に関して調査を行った。個々の局所領域に対してECGデータより求めた心拍数の真値との誤差の逆数を有効度として重みづけを行い、各局所領域の座標を正規化することで有効度マップを作製した。図2.6(a)はマッピングの結果を示したものである。このように、正確な計測が可能であった局所領域は主に頬・鼻部に見られる結果となった。この結果を受けて、MAHNOB-HCI-Database上の動画469件に関して局所領域の選択範囲を図2.6(b-1)~(b-3)に示す、(b-1)顔全体、(b-2)顔の下部分、(b-3)頬・鼻部の3つに限定した場合に対して、計測回数と最終的な計測精度に関する影響を調査した。Table.1はその結果を示したものである。このように、(b-3)頬・鼻部を局所領域の選択範囲とした場合に、選択回数を500回から100回に削減した場合でも従来手法と同等の精度で計測可能であることを確認することができた。

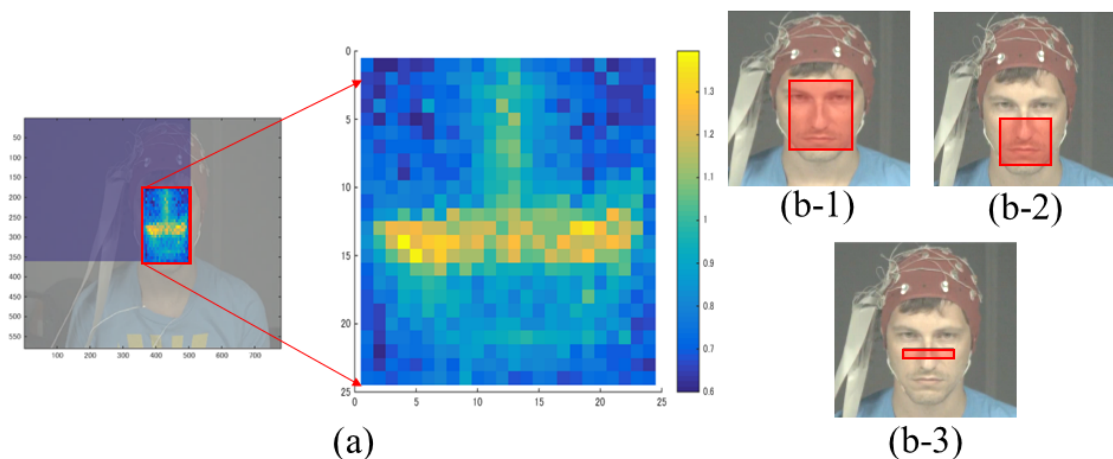


図 2.6: (a) 統計的に計測に適した部位の調査 (b) 実験で試行した 3 つの選択領域

表 2.2: 選択範囲・回数と計測結果の比較 (N=469)

選択範囲	選択回数	平均絶対誤差	平均二乗誤差	一致率 (<5BPM)	失敗数
(b-1) 顔全体	500	6.43	11.33	66.4%	0
(b-2) 顔下部	500	6.03	10.99	70.7%	0
(b-3) 頬・鼻部	500	5.84	11	73.3%	2
	100	5.93	10.81	72.0%	15

## 2.6.2 実装の最適化・高速化

従来研究 [44] および前節の検証では、MATLAB R2015b で実装されたソフトウェアをアルゴリズムの評価に用いた。しかし、MATLAB でのソフトウェアの実行は非常に低速であるほか、評価用ソフトウェアは精度の評価に重点を置いた冗長な実装であるため、これまで計測速度の最適化に関して考慮した実装を行ってこなかった。そこで、提案したアルゴリズムに関して、冗長な実装を削減した高速実行可能なソフトウェアとして再実装を行い、実行速度に関する評価を行った。

再実装においては、各フレームにおける特徴点の検出時に、局所領域の画素値の算出を同時に実施するといった処理の並列化の改良を行っている。顔の特徴点検出

および局所領域の時間変化信号の生成に C++ による高速実行可能な OpenFace[18] をベースとしたソフトウェアを利用し、入力信号をベースとした信号処理用アルゴリズムは Python および Python 用の数値計算処理ライブラリ sci-kit-learn を用いて実装した。

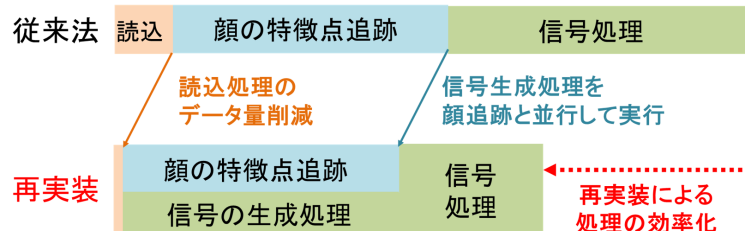


図 2.7: 改良手法の概略図

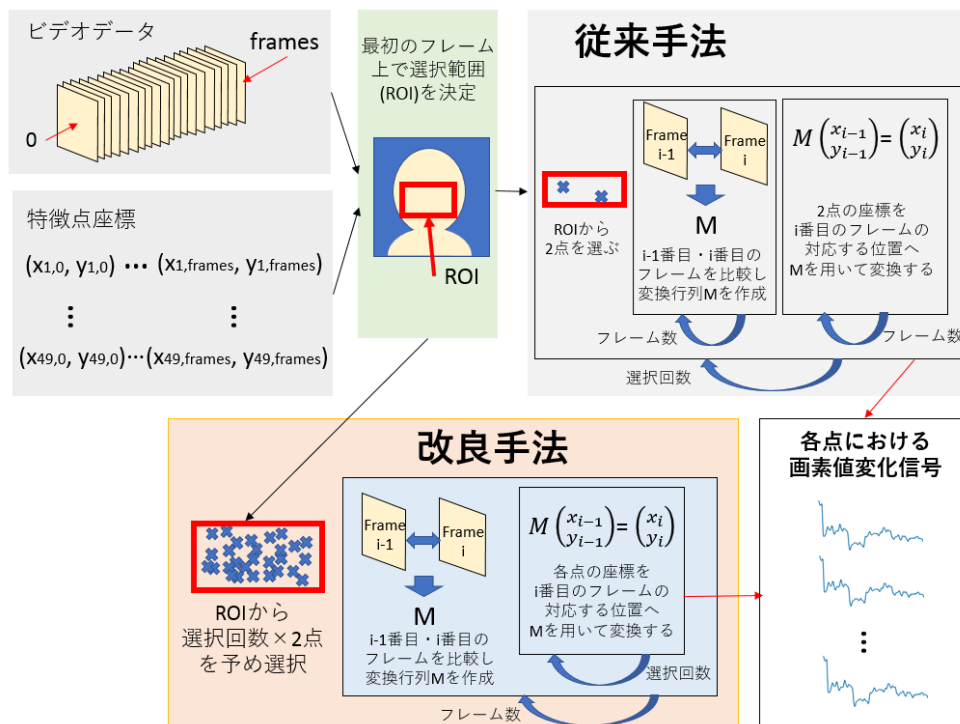


図 2.8: 顔の特徴点追跡処理・画素値の時系列変化信号生成処理の効率化

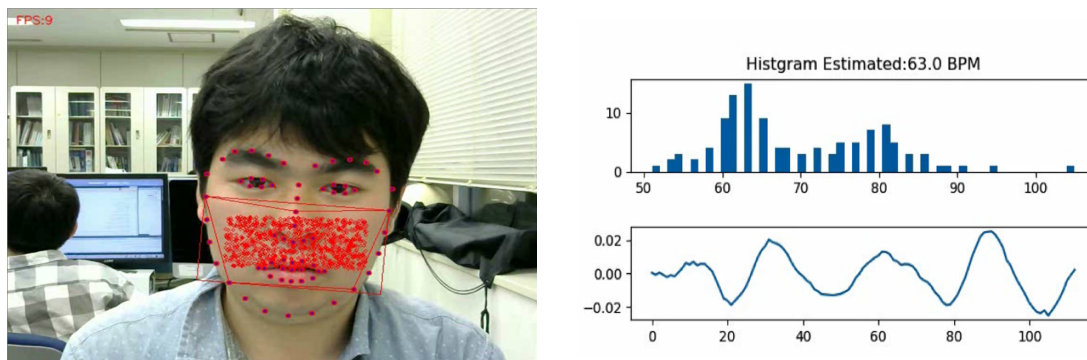


図 2.9: (左図) 改良手法の実行時の様子. 赤点は局所領域の中心座標を示したもの. (右図) 約 110 フレームの動画からの計測結果. 上部は複数回の計測結果のヒストグラム, 下図は最終推定値を導出した心拍波形に対し平均を取り算出した波形である.

これらの高速化の取り組みの効果を検証するために MAHNOB-HCI-Database 上の動画 487 ケースを対象とした実験を行い, その際の平均誤差, 一致率, 処理時間を計測した. 本実験においては, 局所領域の選択範囲は頬・鼻に限定した. 実験結果を表 2.3 に示す. 表 2.3 の実験結果における平均誤差においては, ランダムなパッチ選択による計測ごとの結果の違いに基づく評価への影響を軽減するため, 3 回計測したものの平均値を掲載している. 一致率についても同様に, 487 本のビデオに対して 3 回の計測を行った 1461 回の試行のうち, 誤差が  $\pm 5$ BPM 以内であったものを一致としてカウントした.

従来手法である再実装なし・選択回数 500 回の場合と比較して, 再実装あり・選択回数 100 回の場合では従来手法と同程度の平均誤差・一致率を維持しながら約 14 倍処理速度を高速化することができた. 500 回計測を行う場合においても, 従来手法と比較して約 12 倍の高速化を実現しており, 並列処理によるソフトウェア最適化に基づく高速化が計測パフォーマンスに大きな影響を与えることが明らかになった.

表 2.3: 選択範囲・回数と計測結果の比較 (N=487)

手法	選択範囲	選択回数	計測時間 (30 秒動画)	平均 絶対誤差	平均 二乗誤差	一致率 ( $<5$ BPM)
従来手法 改善手法	(b-3) 頬・鼻部	500	571 秒	6.07	11.3	72.1%
		500	47 秒	5.84	10.4	70.6%
		100	40 秒	5.91	10.4	69.9%

## 2.7 組み込み容易な心拍数推定アプリケーション



図 2.10: リアルタイムでの心拍数計測アプリケーション

前節までの取り組みを通じて改良を行った頑健・高速な心拍数計測を可能とする心拍数計測手法の実装を活用し、他のアプリケーションへの組み込みを考慮した形でのリアルタイムでの心拍数の推定が可能なソフトウェアを実装した。このソフトウェアでは顔画像中の局所領域における信号生成と生成された信号の処理を並列的に実行することで、直近の10～20秒間の平均心拍数を逐次的に算出・表示する。また、遮蔽等により顔領域の追跡に失敗した場合には局所領域の再定義を自動的に行い、自動的に処理を継続する。さらに、測定値が急激に変化する場合等、測定結果に誤りが予想される場合に前回の測定結果を利用して多数決ヒストグラムの結果を補正することで測定誤差を補正する機能を搭載している。前回の測定結果の信頼度の判定に顔の特徴点の移動量の情報を利用し、測定条件が良好な場合である場合に補正を実施する。

## 2.8 まとめと将来展望

### 2.8.1 本章のまとめ

主体のスケールが小さい、1対1でのインタラクション支援における主要な課題として「相手の情報をより深く知りたい」というものがある。映像を通じて人のジェ

スチャや表情等の外見的な振る舞いを計測する手法に関しては数多くの提案があるが、近年ではそこからさらに踏み込んで人の感情や心拍数等の生体情報を非接触で獲得する技術提案もなされている。本章では、自然なインタラクション場面において人の内部状態推定への応用が見込める技術として、民生品の RGB カメラで撮影された顔映像から非接触で心拍数を計測する手法に着目し、インタラクション場面で利用しやすい、頑健かつ高速で計測可能な計測手法への改良を実施した。本章で提案した手法は、局所領域を用いた複数回の計測とその推定結果の多数決に基づいて最終結果を決定する、先行研究のアルゴリズムを改良したものである。この手法は、表情等の体動ノイズによる影響に頑健であり、高精度な計測を実現するが、一方で処理速度が遅いという問題を抱えていた、本章では、「統計的に計測に適した領域の計測領域としての活用」および「並列処理を取り入れた実装の最適化」という2種類の改善策から手法改良を実施し、最終的に従来法の精度を概ね維持しながら約14倍の処理高速化を実現した。本手法は、頑健さと高速性を兼ね備えた手法であり、瞬時的なユーザの健康状態の把握や、意図理解を必要とするアプリケーション設計へ応用可能なものである。

## 2.8.2 映像からの心拍数推定手法に関する将来展望

### 健康状態の把握への応用

本手法の将来展望として、第一に、日々の手軽な健康状態の把握といったヘルスケア用途への応用が見込める。本手法の利点として、計測に特殊な機器が必要なく、計測が手軽であることが挙げられる。そのため、日頃の健康状態の計測を自然に習慣化する枠組みとして利用が見込める。心拍信号は不整脈等の心疾患を反映するものであり、日々の計測データの蓄積に基づき、慢性疾患の早期発見等の用途で利用できる可能性がある。また、心拍数の上昇は体温の上昇と関連して見られるとされ、発熱の検知等に活用できる可能性がある。

### 機械による感情推定への応用

健康状態の推定に限らず、心拍数は興奮や注意の度合い等に応じて変動することが知られており、緊張状態の把握・精神面での興奮度・興味度の把握といった人の感情状態の推定への応用可能性が考えられる。映像から得られる心拍数と、興味度・興奮・注意等の指標の関連性に関しては更なる検証が必要であるが、ロボットや機

械が対象者の状態を把握し、個人に対して最適化して振る舞うための1つの手がかりとして利用できる可能性がある。

一般的な感情推定においては、音声・表情等のモーダルがしばしば利用されるが、それらの認識モデルは若年者を対象としたデータセットで構築されたものが多く、認知症高齢者等感情の表出が少ないユーザを対象とした場合に既存の認識モデルの適用が困難であるケースがある。本手法は、外見上の感情表出が少ないユーザを対象とした情動計測において、他のモーダルと比較して有効に利用できる可能性がある。

### セキュリティ認証・作為的に生成された映像の判定

個人の内部状態を計測できる技術であることから、カメラに映る人間が本当の人間であるか、あるいは映像コンテンツがコンピュータによって作為的に生成された映像でないかを高精度に判定する手段として利用するために本手法が利用できる可能性がある。

### 心拍変動等の他のモーダルの高精度計測への応用可能性

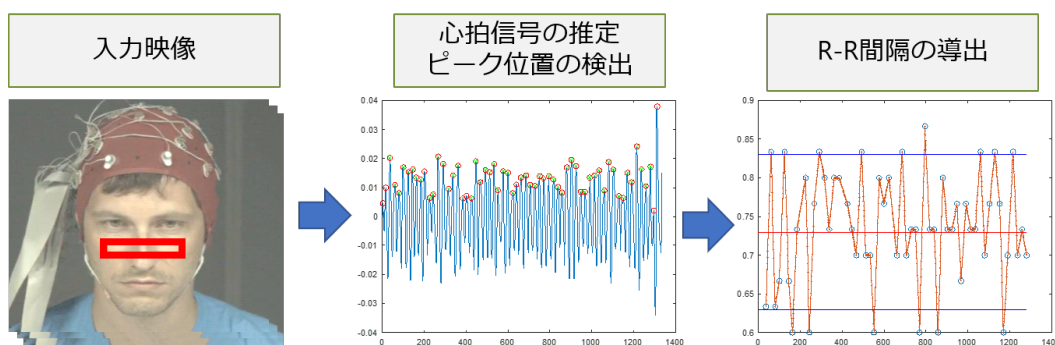


図 2.11: 提案手法を利用した R-R 間隔 (心拍変動) の推定例

本手法で推定される心拍信号から R-R 間隔を計測することで心拍変動の推定を行う事が可能である。図 2.11 に実際の推定例を示す。図 2.11 に示す心拍信号は、最終推定値を導出した心拍波形に対し平均を取り算出したものである。この波形に対してピーク検出を行うことで、心拍波形のピーク位置およびピーク間の間隔を導出する。ピーク検出のため、本試行では提案手法で得られた波形数値データを csv デー



タとして出力したものを MATLAB2015b へインポートし、findpeaks 関数を利用してピークを算出した。図 2.11 の右側に示す波形は、ピーク間隔の大きさの変動を示したもので、R-R 間隔と呼ばれるものである。R-R 間隔の時間変化および周波数領域での変化は、神経活動の度合いを反映するとされ、正しい R-R 間隔が映像から推定できれば、心拍数と比較して細粒度の高い心理状態の獲得に利用できる可能性がある。

心拍数の推定においては、心拍信号の周波数成分の分布に着目して結果を決定するため、体動や照明変化によるノイズ、またビデオの圧縮等に伴う情報削減がある場合においても主要な周期成分が顕著であれば正しい結果を求めることができる。しかし、心拍変動推定に当たっては、心拍波形のピークを検出する必要があるため、信号のピークの正確な復元が必須である。一般的に、画像から得られる心拍信号はノイズが大きく、心電図及び光電脈波センサから得られる心拍波形と比較して明確な信号ピークを得ることが困難である。そのため、復元された心拍信号の信号ピークを高精度・一様に復元できることが、映像からの心拍変動推定においては解決が必要な技術的課題である。

また、顔と手、顔と足といった体内の 2 箇所計測を行い、そこで得られた信号の位相差から脈波の伝搬時間を計測することで血圧や動脈硬化に相関のある値を推定できるとした報告 [77, 59] や、また、2 波長カメラ、マルチスペクトルカメラ等を利用して血中酸素飽和度 (SpO<sub>2</sub>) を非接触で獲得する方法に関する報告もある [34, 41]。本手法は、心拍信号を高精度で復元する手法として、これらの技術の高精度化に貢献できる可能性を持っている。脈波伝搬時間の計測には、体の 2 箇所の部位からのデータ計測が必要であること、各データの時刻同期を取る必要があるなど、心拍数のみを計測する場合と比較して自然な状況での計測を実現する上ではいくつかの課題を持っている。

心拍変動、血圧等の指標が画像から推定することができれば、健康状態・感情状態のより深い把握が映像から実現される。また、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) 等の感染症の脅威・リスクが世界的に再認識される中で、これらの情報を無人・非接触・非侵襲で計測できることは感染症の拡大防止等の観点からも有効な応用が見込めるものである。

### 2.8.3 映像からの心拍数推定手法に関する技術的課題

本論文で提案する映像からの心拍信号推定手法は、高い計測精度と高速計測を両立した手法であり、インタラクション支援・ヘルスケア支援への応用にあたって有

用なものである。しかし、本手法は原理的に接触式センサより計測精度が低く、また更なる計測精度向上に関してはいくつかの技術的困難がある。本節では、本手法および他手法を含め、映像からの心拍数推定手法が抱える技術的課題について取り上げる。

### 体動や照明条件の変動・遮蔽に対する対処

映像からの心拍信号推定手法は、その原理から体動・照明条件の変動による影響に基づき画素として得られる信号の劣化が必然的に発生する。そのため、暗所での計測、周期的な照明変化（特に心拍波形と類似した0.8～4Hz程度の周波数を持つもの）のある環境での計測は原理的に不利である。また、マスクを着用しているケース等においては、観測される心拍信号成分の強度は弱く、極端に信号抽出の精度が低下する。

また、画素値の時間変化信号からの信号抽出だけでなく、顔領域中の同一部位を各フレームで検出し追跡する処理の失敗が、計測精度に際し大きな影響を与えている。特に暗所・急な振りむき・マスクによる遮蔽等のある環境では、顔の特徴点追跡器による特徴点検出処理自体が失敗してしまうケースが多く、複数フレームにわたるそのような追跡処理の失敗が、計測の失敗や精度の低下に影響している。そのため、本問題の解決にあたっては、画素値の時間変化信号から心拍信号成分を高精度で復元する信号処理技術の開発と、高精度な顔の特徴点追跡という2種類のアプローチによる解決が必要となる。

### 映像の圧縮に伴うデータ削減の影響

本手法では、映像から得られる画素値の微細な時系列変化から皮膚の血流変化に基づく心拍信号成分を導出する。しかし、映像の非可逆圧縮手法の中には、フレーム間で類似した画素がある場合にそれらを同一のものとして置き換えることによってデータ容量の圧縮を実現するものがあり、圧縮が行われたビデオ映像においては、信号の復元精度が低下することが分かっている。

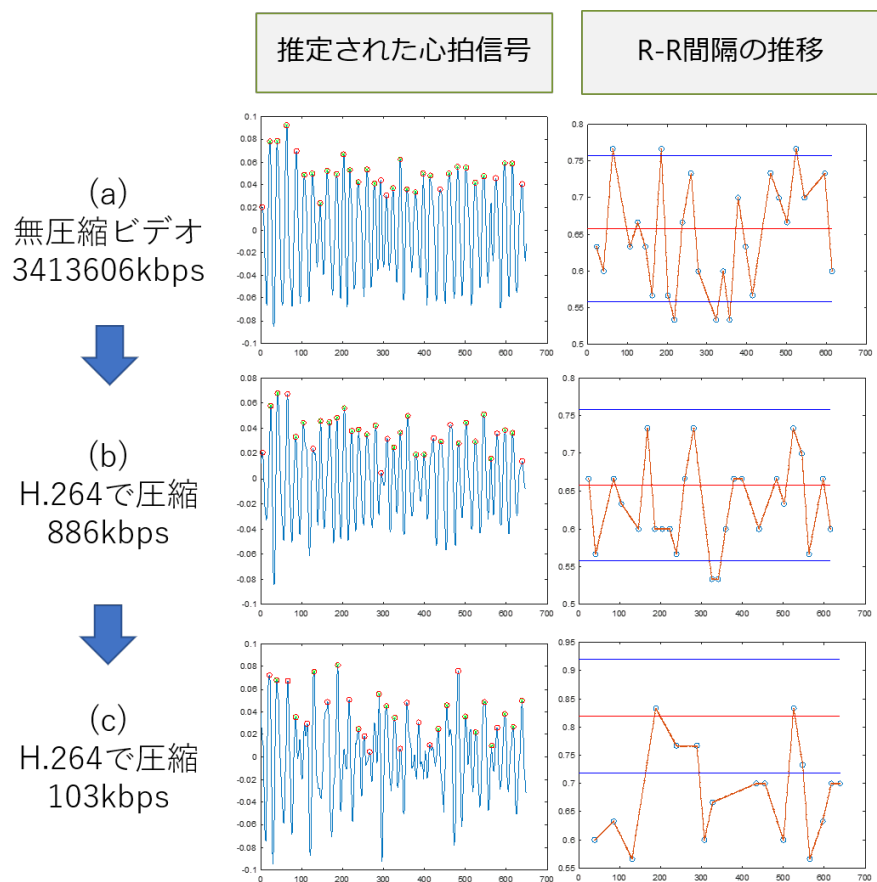


図 2.12: ビデオ圧縮の強度の違いによる心拍信号および R-R 間隔の推定結果の違い

図 2.12 は、無圧縮ビデオでの心拍信号の推定結果と、そのビデオに対して 2 種類の強度 (886kbps/103kbps) で H.264 コーデックによる圧縮処理をかけたものである。図に示すように、ビデオ圧縮を行うと推定される心拍波形はピークの高さの均一性を失うような劣化が見られた。ピーク高さの違いは、推定波形のピークが信号に基づくピークであるか、ノイズにもとづくピークであるかを判定することを困難とし、ピーク検出の精度を低下させる要因となる。

本研究において計測精度検証に利用した MAHNOB-HCI-Database 上のビデオは圧縮処理が施されたものであり、実験結果から、心拍数の推定にあたっては多少の圧縮が起こったビデオにおいても一定の精度での推定が可能であることが伺えるが、心拍変動 (R-R 間隔) の推定等、より細かい情報の推定を行うにあたっては、ビデオ圧縮による影響を考慮する必要がある。

## 2.8.4 推定手法の応用に際しての利点・欠点・限界

本手法はカメラを持ちいる方法であることから、映像撮影が禁止されている場所、プライバシー面での配慮が必要となるアプリケーション等においては、利用方法を工夫する必要がある。そのため、本手法の応用先としては既に画像が交流体系に組み込まれているシーンで活用することが望まれる。例えば、テレビ電話においてはカメラ映像をコミュニケーションにおいて活用することから、本手法と技術的親和性が高く、追加のハードウェアを設けることなく相手に対する付与情報を得る手段として利用できる。しかし、画像から得られる人間の内部情報を他者が許可なく獲得し、さらにその情報を利用する・見える形で提示することは倫理的な問題が懸念されるものであり、システム内部での本手法の利用方法・提示方法のデザインに関しては、倫理面やユーザの心理面に配慮した設計指針が必要となる。

また前述のように、本手法は照明条件が極端に悪い（変動が激しい・暗い）空間や、マスク等の遮蔽があるユーザへの適用が困難であるという原理的問題があり、さらにプライバシー面での映像の利用に制約があるユースケースにおいては、他手法による計測が適している場面が存在する。カメラを利用せずに非接触で心拍情報を獲得する技術として、ドップラーセンサやマイクロ波を利用した計測手法に関する提案もあるが、電波信号を人体に的確に照射する必要性があり、体動があるようなユースケースでの利用は困難である・専用の高価な計測ハードウェアが必要であるという課題がある。

人の内部計測状態を利用したインタラクティブシステムを実現する上では、獲得した情報の活用に関する倫理的課題についての考慮、手法の利点・欠点を視野に入れたうえでユースケースに応じて適した手法を選択することが望まれる。

表 2.4: 各手法の利点・欠点

	光電脈波センサ	映像による計測	電波を利用した計測
利点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・比較的安価</li> <li>・計測精度が高い</li> <li>・スマートフォンで利用する方法等の提案がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非接触での計測が可能</li> <li>・基本的に専用機器が不要</li> <li>・過去のデータからの計測が可能</li> <li>・Web 上等に偏在する映像からの計測が可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非接触での計測が可能</li> </ul>
欠点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・皮膚の部位への装着が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・体動による影響が大きい</li> <li>・照明条件の影響を受ける</li> <li>・圧縮のある映像で精度が低下</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・体動のある環境での計測が困難</li> <li>・専用の計測機器が必要</li> <li>・遮蔽に対して脆弱</li> </ul>

## 第3章 多人数相互交流支援基盤の提案

第2章では、1対1の個人間のコミュニケーションへの応用を主なユースケースとして想定し、映像からの心拍数推定手法の頑健・高速化に関する取り組みについて取り上げた。第3章では、インタラクション主体のスケールの大きい集団でのコミュニケーションに焦点を当てた議論を行う。

本章では、主体のスケールが大きい多人数間のコミュニケーション支援における「人々が集団として『創発的に』繋がるための技術支援の方法論の解明」という課題に対応し、集団を構成する個々人の振る舞いの伝達と可視化に基づいて、その内部のつながりを促進する技術支援の方法について議論する。本論文では、その実験フィールドとして音楽ライブの現場を対象とした研究を実施し、その主要な集団交流の要素である一体感・参加感・臨場感を促進するシステム開発・評価に取り組んだ事例を報告する。

### 3.1 背景

1対1でのコミュニケーションと異なり、集団でのコミュニケーションでは、集うことで生み出される価値に対して重きが置かれることが多い。例えば、ブレインストーミング等のアイデア出しの会議は3人以上の集団のなかで行われる場合が多いが、それはそれぞれ固有のアイデアを持つ各々が参加し、目的を果たすためにそれぞれがインタラクションして参加を促進させることで、集う人数分以上の創発性がもたらされることに起因している。同様に、音楽ライブやスポーツ観戦などのエンタテインメント分野においては、演者やチームの応援という共通の目的意識を持った人々が集い、個々人がその目的に向かって活動を促進させることで、その場限りの臨場感を持った交流空間が形成される。こういったエンタテインメント分野においては、主催者から提供されたコンテンツだけでなく、現場での他者とのインタラクション体験が、その価値を形成する重要な要素となっている。社会心理学の分野では、相手の存在を感じることで自身の行動が促進される「社会的促進」という概念

が提唱されている [120] が、集団コミュニケーションにおいては、集団としてつながることで他者の存在を感じ、それが自身の行動を促進させる要素となっている。

集団的創発によってもたらされる熱狂的な盛り上がりは、社会心理学の分野では「集団的沸騰」と称されることがある [26]。ライブ・エンタテインメントの分野では集団的沸騰を伴う集団での盛り上がり体験価値にそのまま結びついているが、政治集会や社会運動等の現場では、群衆の中での過度な集団的沸騰が、時に不要な対立・暴動を助長してしまうことがある。こんにちの社会では、映像配信サイトにおけるコメント欄を介したユーザ同士での盛り上がり [50]、SNS を介した社会運動 [84] 等に代表されるように、集団的沸騰を伴うつながりの構築にデジタルコンテンツは大きな役割を果たしている。集団的沸騰にまつわる問題はこれまで社会学や心理学の分野で中心的に議論されてきた課題であるが、その促進・抑制にはデジタルコンテンツおよびその設計が大きく関与しており、集団的沸騰の促進・制御を実現する技術支援の方法論の確立、そしてその原理の解明に関しては情報工学の分野からの議論も必要なものである。

相手の存在感や臨場感を伝達する手段について研究するソーシャルプレゼンスの研究分野では、触覚・聴覚・嗅覚等の感覚モダリティや物理的な身体行動を伝達するメディアによって相手の存在感や臨場感、相手との共感体験を促進する方法に関して盛んに研究が行われている [112, 110, 105, 68]。また、ゲームエンタテインメント等の文脈では、身体動作の同期をゲームデザインに取り入れる方法に関していくつかの研究がなされており、身体的に同期した行動を誘発する仕組みが、個々人のコミュニケーションにおいては親密さを高めるのに有効であることが示唆されている [37, 51, 69, 70]。このように（遠隔地の）相手と感覚的な情報を共有し、共感体験や同期的な行動を誘発するインタフェースにまつわる研究が多くなされている。しかし、これらの取り組みの多くは個人間の遠隔コミュニケーションに主眼を置いたものであり、現実世界における「集団の」創発に焦点を当てた研究事例は少ない。

このため、集団的創発・集団的沸騰の促進・制御を工学的に実現するにあたり、集団を形成する個人に対してどのような情報獲得・提示を行うシステムデザインが望ましいのかに関しては検討が必要な課題である。多人数での集団交流においてはその集団の中の個々人がつながれるプラットフォームを提供するというだけでなく、その延長として、集団として集まるからこそ生まれる価値としての創発性を高めるような支援の在り方が求められる。そのためには、「相手の存在を感じ集団としてつながりを感じられること」と、それに基づく「共通の目的に向けて自身の行動を促進させること」の2点の支援の仕組みが必要となる。ソーシャルプレゼンスの分野における個人間の身体感覚共有技術や同期的な行動を促すインタフェースは、集団を形成する個人間のつながりを強化し、バラバラな個人を創発的な集団としてつ

なげる手段として利用できる可能性を持っている。

研究背景においては、インタラクション主体の規模に応じてその内部で伝達される情報の適切な細粒度が異なるという仮説から、特に集団コミュニケーションにおいては集団の雰囲気（個人が孤独でなくつながりを持っていることを知覚させる感覚、他者との相互作用を通じた孤独では起こり得ないイベントが発生している場に身を置いている感覚、集団として目的を共通としている感覚）の獲得・伝達に焦点を当てて、かつ個々人の匿名性や認知負荷を考慮した情報交流基盤が望まれることを前述した。これは、人間は超多数の細かい情報を同時的に認知することが困難であることから、そのような場面においては一般的に概略(抽象化)を通じて物事を理解することに基づくものである。インタラクション支援の方法を設計するにあたって、このような集団コミュニケーションの特性に関しては考慮が必要となる。特に、相手の情報を伝達する際に認知負荷を与えないデザインとすることや、システムとのインタラクションに対してその監視感や情報流出等への懸念から、自身の行動を消極化させてしまうリスクへの考慮が必要となる。

## 3.2 解決したい課題・研究目的

本研究では、多人数による集団インタラクションを有意義な構成する集団的創発に焦点を当て、集団的創発を促進するインタラクションを実現するうえで情報技術がどのような役割を果たすことができるのか、どのような支援のアプローチが考えられるのかを明らかにする。

集団的創発を実現するにあたっては、まず個々人が集団に対して働きかけることに対する支援が必要である。そのためには、まず個人が集団の一員として他の人々と共通の目的を通じてつながりを感じられることや、一体感を感じられることが必要となる。そして、その集団を形作る個々人が、その集団を創発化させるよう行動を促進させることが必要となる。しかし、現実社会においては社会的抑圧や他者に行動を見られている感覚の存在、動機付けの不足等により、個々人が集団に対して行動を積極化させる要因に欠けることが多い。

一方で多人数を対象とした情報獲得や伝達・拡散は、情報技術の発展から安価・手軽に行えるようになった。多人数を対象とした情報獲得や伝達が容易になった一方で、伝達に用いられる情報の持つ粒度への不配慮がもたらす匿名性の問題や、ユーザが環境に起因した抵抗を感じずに積極的に活動できることに配慮した情報獲得・伝達のデザインの在り方に関してはいまだ議論の余地がある。本研究は、多人数を対象とした情報獲得および伝達の持つ匿名性の問題を考慮した上で、個人の集団へ

の没入や集団の持つ目的に向かう自己行動の促進を誘発するメディアを提案することで多人数インタラクションの創発性を高めることを目標としている。

### 3.3 解決方策：音楽ライブを題材とした多人数交流支援

本研究は集団的創発を促進する多人数インタラクションを実現するうえで情報技術がどのような役割を果たすことができるのか、どのような支援のアプローチが考えられえるのかを明らかにすることを目的とする。その実証フィールドとして本研究では、日本国内における代表的な大規模集団交流の事例である音楽ライブに焦点を当て、音楽ライブで起こりうる演者と観客が一体となって交流する価値を持った体験を高める支援法を議論することで、超多人数が集う空間で人間同士の円滑かつ有意義なインタラクションを実現するうえでの情報技術の利活用の在り方を検証する。

#### 3.3.1 背景と意義

人間が集団で交流する場面には様々なものがあるが、音楽ライブは、超多人数が集団として相互交流を行う代表的な事例である。ライブ事業を手がける企業で構成されるコンサートプロモーターズ協会（ACPC）の調査[94]によると、2000年の日本の音楽ライブの公演数は10500回であるが、2016年には29862回の公演が行われ、16年間で約3倍に増加している。特に、ライブを主体として活動するアイドルグループの登場は、公演数の増加を後押しする力強い要素となっている。国際的な動向に着目してみても、年間あたりの世界の音楽ライブの興行数はここ10年で増加傾向にあり[66, 36]、日本・アジア地域だけでなく、世界規模で見ても、音楽の楽しみ方としてのライブに近年注目が集まっていると言える。このようなライブの開催数の増加は、エンタテインメントとしての音楽を楽しむ方としての、ライブ会場へと自ら足を運んで生の演者と出会い、同じ価値観を持った観客と交流しながら非日常的な空間を堪能することへの価値が改めて見直されてきていることを示している。

音楽ライブ(特にアジア圏を中心に見られる「アイドル」のライブ)においては、演者の演技に対して観客が「応援」という形で参加することで、会場を共に盛り上げていこうとする様子が見られる。音楽ライブの観客は、自身の応援したい演者を応援するためにライブ会場へ足を運び、応援の意志を伝えることで演者との繋がり



を見出す。このような演者・観客間の繋がりは、コンテンツの発信者としての演者、受容者としての観客という垣根を取り払い、ライブを盛り上げる大きな要素となっている。そして、このような演者と観客が相互的・一体的に繋がり合うことによる「その場限りのインタラクション」を体感することが観客が音楽ライブに足を運ぶ主要な目的となっている。演者は、その目的を達成しうるために鍛錬に基づいた演技を力いっぱい観客に披露し、時にはMCを通じて感情を観客に働きかける。一方で観客は、そのような演者の努力に対して共感・感動しつつも、集った人々で目的意識を共通にして連帯感を高め、自身の声や応援グッズによるアクションを通じて集団的な応援に参加し、演者を精一杯支援する。このように、音楽ライブにおいては演者・観客自身・他の観客同士それぞれが、その場限りのライブ体験の創発に向けて、相手の存在を感じながら個人の行動を促進させる。

このような観点から、音楽ライブは、超多数の観客が共通の目的意識を持ち、その目標を達成するために相互交流し合う超大規模インタラクションの代表的事例ととらえることができる。これまで、個人対個人や、小規模集団を対象としたつながり感、チームコミュニケーションの創出に向けた提案は数多く行われてきたが、音楽ライブのような数100人～規模の大規模集団を対象としてそのつながり感や一体感を創発する方法に関する研究はあまり行われていない。そのため、超大規模集団を対象とした技術支援の方法を考えることが、多人数インタラクションにおけるつながりを見出す原理や支援方法の解明、多くの人々の集団への参加を実現する方法の解明に寄与できる知見となることが期待される。

ライブ・エンタテインメント市場を対象とした技術支援という観点に着目してみても、その体験の質を向上するべく多数の提案が行われているが、集団の内部で起こるインタラクションのダイナミクスに着目し、内的な創発的体験への参加を促進することに焦点を当てたものは限られている。また、一部の事例において音楽ライブ空間における演者・観客間、観客同士の交流に焦点を当てたシステム開発が行われているが、その多くがプロトタイプ開発にとどまっておりユーザを対象とした手法の有効性調査および体験としての妥当性に関する評価が行われていない。

社会学の分野では、個人間のインタラクション、オフィスの会議や政治集会等のインタラクションの起こる事例に対してエスノメソドロジーと呼ばれる手法を用いてインタラクションの内部で起こっていることの本質を分析する試みが数多く行われている。一方で、音楽ライブのような超多数が相互的に集う空間を対象とした社会学的分析の事例は不足しており、まずどのようなインタラクションが内部で発生しており、どういう支援が求められているのかに関しても体系化が必要となる。そのため、社会学的考察に基づいた超多数交流空間の分析に基づいた、集団的創発の実現に寄与するべく工学的側面からの支援の方法を考えるアプローチを持った

研究はこれまでにないもので、意義を有する。

### 3.3.2 コンサート市場の背景と技術支援の動向

#### ライブ・エンタテインメント市場の背景と課題

研究フィールドの背景として、本節では、ライブ・エンタテインメント市場の背景について触れる。前述のように、国内・海外の複数の統計調査によると近年ライブ・エンタテインメント市場は拡大傾向にあり [94, 66, 36]、多くの音楽を楽しむ人々が CD・テレビ等の媒体を通じてただ受容的に音楽を聞くだけでなく、演者や他の観客の集まる現場に足を運び自ら体験することの価値を重要視していることが伺える。

音楽ライブ開催は演者および主催者の興行的側面が強く、音楽ライブ自体に加えて関連グッズの販売等を通じて主催者が収益を確保する手段となっているほか、地方創成や「まちおこし」の側面からの効果に関する指摘もあり [114]、経済効果の面からも大きな影響力を持ったコンテンツである。また、人気な演者の音楽ライブにおいては会場のキャパシティに対して需要過多となるケースが多く、チケットが抽選販売されるケースが多い。一方でテレビ放送やインターネットを通じたライブ配信によるオンライン配信ライブ、異なる会場からライブ配信を鑑賞できるパブリックビューイングの開催等が行われるようになった。これらの音楽ライブの配信コンテンツは、音楽ライブにおけるキャパシティの問題を解決するだけでなく、時間的・地域的制約からライブに参加できない参加者がライブに参加できる機会および主催者が収益を確保する機会を創出していると言える。

2020年の新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の流行時においては、音楽ライブ自体が発声や密閉空間での密集を伴うことからその開催を自粛する動きが相次いだ。この「コロナ禍」をきっかけとした音楽ライブ開催の自粛を通じて、改めて現場で行われるライブにおける体験価値が見直されつつある。そのようなコロナ禍における音楽ライブの需要から、2020年においては、オンライン配信によるライブ配信や、演者による情報発信が数多く行われている [118]。

このように、音楽ライブは、エンタテインメントとしての音楽の楽しみ方として体験価値を有するものであり、経済面の影響を持つコンテンツとなっている。また、オンラインライブのように、観客が音楽ライブ自体を楽しむ方法も多様化しつつある。主催者側も、ライブの体験価値を向上させることに注力しており、近年のライブにおいては CG や光を用いた手の込んだ演出を取り入れたものや、演出の質的向上を図るために技術支援を取り入れる事例が多くみられている。コロナ禍以前より、

ライブ参加の形態は、現地参加・パブリックビューイングによる参加、自宅等からのオンライン配信による参加と多様化する傾向が見られており、感染症の脅威が過ぎ去った後の時代においても、参加の仕方の多様化が見られると考えられる。

オンライン配信によるライブ体験が広がりを見せているが、その体験の質を現地で体験するものに近づけていくこと、オンライン参加ならではの楽しみ方を開拓することも、音楽ライブにおける技術支援の抱える課題である。現在のオンライン配信によるライブにおいては、コメント機能や、Twitter等のSNSを使った交流が視聴者同士をつなぎコミュニティを形成する手段として用いられている [50]。しかし一方で、オンライン配信におけるライブにおいて既存のもの以外の交流体系が望まれているという報告 [48] や、ロックダウンが行われている地域で開催されたオンラインライブイベントの分析では、オンラインライブは所属意識の形成には寄与するが、横のつながりの形成するには不十分であることが指摘されている [85]。

このように、ライブの開催数増加、ライブへの参加の仕方や演出の高度化・多様化が進む中で、情報技術を用いた参加支援や体験価値の向上は音楽ライブコンテンツ自体の持つ継続的課題となっている。

## ライブ・エンタテインメントが持つ醍醐味

音楽ライブの体験価値の向上という課題に対する情報技術による支援の方法を考えるにあたり、本節では音楽ライブにおけるどのような体験が観客の参加を動機付けるのか（醍醐味）に関して議論する。概して、音楽ライブにおける醍醐味を言われるものには、音楽ライブの持つ以下の要素があげられる。

- 生の演者の演技の体験
- 価値観を共通とする他者との遭遇・交流
- ライブ自体の持つ自由さ・非日常性

**生の演者の演技の体験** 音楽ライブの醍醐味として挙げられる要素としてまず、「生の演者の演技を深く体験できること」があげられる。Liveという英単語が「生きる」という意味を持つように、音楽ライブはしばしば「生きた」もの、「なまもの(生物)」として捉えられる。それは、CD等の媒体を通じた音声や映像とは異なる「生きた」演者を通じて音楽を体験することが、音楽ライブを形作る特徴的体験であることを示している。観客は、「生きた」演者のその場限りの演技に対して、特別な体験としての価値を見出す。2000年代の日本のアイドルブームをけん引したアイドルグループ「AKB48」が「会いに行けるア

アイドル」というコンセプトで成功を収め、高頻度な音楽ライブの開催や「生きた」演者を体験できるもう1つのインタラクティブコンテンツとしての握手会が人気を集めたことも、実世界に「生きた」存在としてある演者と交流できることに、魅力を感じる観客が多いことを示している。

**価値観を共通とする他者との遭遇・交流** 音楽ライブにおける2つ目の醍醐味として「同じ価値観を持つ他者と出会い、交流すること」があげられる。人々が音楽ライブに集う目的は様々であるが、その1つとして同じ価値観を持ったファン同士の交流という側面があげられる。音楽ライブにおいては、生の演者を鑑賞し、自らの応援を通じて演者に働きかけるだけでなく、観客同士の交流、つまり同じ時間・同じ場所で共通の体験をしているファン同士でその魅力を分かち合うことは、特別な価値を有するものである。音楽ライブにおいては、「コール」のように観客同士が息を合わせて応援するような、協調的な応援を行うシーンが数多くみられる。このような観客同士の交流を伴う演者の応援は、「演者を応援したい」という共通した目的意識に動機づけられたものであり、自身の応援が他者を動機づけ、他者の応援から自身がより行動を促進させる側面を持っている。また、「音楽が好き」「特定の演者が好き」であるということは、個人の価値観を形作るアイデンティティの1つに過ぎず、実社会において共通の価値観を持った他者に出会うことは困難な課題である。そこで、「音楽が好き」「特定の演者が好き」という属性を持つ人々が集まる音楽ライブは、同じ価値観を持つファン同士のインタラクティブチャンネルとなっている。同じ価値観を持つファン同士のインタラクティブチャンネルの異なる例として、掲示板やSNS等のオンラインコミュニティの存在があげられる。しかし、オンラインコミュニティにおける交流は仮想的なもので、実体的なインタラクティブを伴わない。音楽ライブの存在は、「オフ会」に代表されるようにオンラインコミュニティメンバー同士が実世界で交流する機会をもたらす観点も持っている。こういった音楽ライブがもたらす副次的なファンコミュニティとしての役割は、個人の価値観の持つ肯定や、QOLの向上等、個人の「well-being」に対して強い役割を果たしている。

**ライブ自体の持つ自由さ・非日常性** 音楽ライブにおける3つ目の醍醐味として、「自由さ・非日常性」があげられる。同一の価値観を持った観客同士が演者と共にライブ会場という物理的に断絶された閉鎖空間に閉じ込めることは、日常空間とは異なる世界観のもとで音楽を楽しむという音楽ライブならではの体験価値をもたらしている。演者の演技に対して大声で叫んで応援する「コール」、演者と同じ動きをして踊る「振り真似」、ペンライト等の応援グッズを演技に合わせて振り回す、あるいは静かに鑑賞する等、音楽ライブにおいては多彩な参加のスタイルが見られる。音楽ライブにおいては、これらの応

援スタイルが、それぞれ自然に受け入れられている。これらの応援スタイルの多様性は、世俗と断絶された音楽ライブという空間の持つ自由さがもたらしているものであると考えることができる。一方で、集団での交流体系や個人の鑑賞体験を阻害する応援スタイル等、近年のライブにおいては観客のモラルが問題になっているが、これらは本来音楽ライブが世俗と比べて束縛の少ない自由な空間であるがゆえに起こりうる問題であるといえる。音楽ライブにおける会場を日常空間と異なる自由の少ない閉鎖空間として捉えることができることに関連して、音楽ライブの持つ「その場限りの体験(非日常性)」は、音楽ライブに観客を誘引する強い動機付けとなっている。同じ演者の音楽ライブであっても、メンバーの誕生日に行われるライブや、年末年始のライブ、メンバーの卒業に伴うライブ等、それぞれにおいてその意味合いには違いがある。このように、演者の演技に臨む姿勢(心理的背景)や、参加する観客、開催される場所等、その時々に応じた様々な環境の違いが、そのライブをその場限りの特別な体験として形作る重要な要素となっている。ライブの持つ「非日常性」という表現は、日常と対比したライブ環境を捉えた表現としても解釈することもできる。ライブ会場は、前述の「自由さ」を持った空間であり、同じ価値観を持った新たな観客との出会いがある。光や音声、映像による演出は、演者の演技をより魅力的に彩るだけでなく、特別な世界への没入する臨場感を高める上で大きな効果を持ったものである。こういったライブ会場特有の非日常性は、日々の日常生活に変化を与え、新しい気づきや彩りを与える、強いエンタテインメント性をもたらしている。

音楽ライブにおける集団的交流に対する支援法を提案する上では、これらの既存の音楽ライブにおける醍醐味を阻害したり・代替することなく、これらの醍醐味を伸ばしてあげるような支援の在り方が求められる。

## ライブパフォーマンスに対する技術支援の動向

本研究に関連して、ライブパフォーマンスの演出の質の向上を目指したシステムに関する提案がある。既に音楽ライブ現場で普及している演出システムとして、主催者による無線制御が可能なペンライトがいくつかの企業から製品化されている[96, 97, 58]。これらのペンライトシステムでは、自動制御による一体的な演出を実現しているが、観客に配信される情報は予め決められており、観客がペンライトの操作に介入することができない。発光強度を観客側が設定できる無線制御ペンライトも提案されているが[116]、こちらも配信される情報は曲に基づいて予め決められており、システムによって誘発される体験や応援行動は受動的なものである。

本提案と同様に、主催者による操作でなく演者自身の演技や観客の行動に同期して演出を行う手法も提案されている [119, 98, 28, 71, 52]。一例として、曾我ら [119] は、能楽の演者が演技を行いながら舞台上の CG 映像を操作できるシステムを開発し、能楽の舞台で使用した。このシステムは、能楽の演者の足に取り付けた加速度センサから役者の動きを計測し、計測データに連動して舞台上に CG 映像を投影するものである。役者の動きを演出に用いることでその時々の演技に応じて異なる演出を実現できるほか、役者が演技の一部としてシステムを利用できることは手法の利点となる。また、他の観客のペンライトの振りの情報を振動として提示することで、音楽ライブの初心者に向けて振りのタイミングの教示を実現したペンライトデバイスも提案されている [98]。振動による情報提示は、演技や音楽の視聴と異なる触覚刺激に基づくものであり、観客の視聴体験を拡張した上で情報伝達を行う有効な方法である可能性がある。

このように、ライブパフォーマンスの演出の質を向上させることを目的とした様々なシステムが提案されているが、演者・観客間の繋がりを増強する効果を期待したものではない。そこで、観客の応援の演者への伝達を支援することで観客と演者の間の繋がりを強化する試みも行われている。堂林ら [115] や小幡ら [103] は、観客が自身の持つデバイスにアクションを起こすことで演者の衣装や装飾を制御できるシステムを提案している。これらのシステムでは、観客が演者に対して応援の意思を伝達でき、発光から伝達を確認できる。しかし、観客側から演者側へ応援が単方向に伝達されるのみで、双方向性に欠ける。演者に応援を伝達した上で、さらにその逆となる演者からの反応を伝達することが両者の間の相互的な交流の質を高め、繋がりを深める。その点に関連し、演者と観客の間の双方向的な情報伝達から、演奏者・観客の間のインタラクションの増強を目指したシステムの提案もある [117]。このシステムは、演奏に合わせて観客のスマートフォンに映像を投影する機能・観客がスマートフォンを振ることで会場の映像が変化する機能を持ち、両者の間の情報伝達を支援している。しかしスマートフォンを利用したシステムは、演者を観賞するというライブ本来の視聴行動を妨げてしまい、本来の音楽ライブ体験が持つ体験を阻害してしまう側面がある。

本提案では、演者と観客の間の双方向的な情報伝達と提示に基づき、音楽ライブの視聴行動を妨げずに両者の間の繋がりと観客同士の協調的な応援を支援することを試みる。

### 3.3.3 求められる支援の在り方

これまで見てきたように、観客はライブを通じて演者や他の観客と繋がり、一体となって盛り上がることで体験の質を自ら向上させている。

前述のように、音楽ライブにおける個人の行動を動機づける要因には以下の3つのものがあつた。

- 生の演者の演技の体験
- 価値観を共通とする他者との遭遇・交流
- ライブ自体の持つ自由さ・非日常性

本研究においては、音楽ライブの持つこれらの3つの醍醐味に対してその体験を拡張する支援の枠組みを提案することで、演者・観客の一体感の向上を目指す。

音楽ライブにおいて、生の演者の演技をより深く体験し、演者・観客間、観客同士のつながりを見出す要素として、本研究では身体動作の同期（身体的共振）に着目する。集団的沸騰の概念を最初に提唱した心理学者デュルケームは、宗教について研究した自身の著書の中で、「宗教や教会を構成する個人は、共通の進行と共通の儀礼によって社会を形成する」と述べている [26]。これは、言い換えれば、同じ目的意識を持つ相手の認知と、共通した動作の模倣に基づく身体行動の同期が、集団行動を動機づける一因になっていることを示唆するものである。またミラーリングの概念に代表されるように、相手の動作を模倣は、相手との親密な関係の構築に寄与することが知られているが [22]、音楽ライブにおいても、相手の行動に影響された身体行動の「共振」が相互的な繋がり形成に寄与すると考えられる。

デュルケームの書籍の中で議論された共通の「儀礼」に基づく他者との関係の構築は、実際の音楽ライブの空間でも見られるものである。音楽ライブにおいてしばしば行われる「振り真似」は、演者と観客が同じように踊り、両者が協調しながら身体的に共振することで一体感をもたらす「儀礼」的な文化である。「振り真似」だけでなく、音楽ライブの空間においてはペンライトやグッズを使った独特な応援に代表されるように「儀礼」的な文化が多くあり、そういった共通の進行・儀礼は音楽ライブにおけるその場限りの体験を誘発する、個性を持った集団を構成する強力な要素となっている。ライブパフォーマンスにおける「現地」での参加者同士の共通の体験、そしてそれを誘発する「身体的な」行動の模倣や一体化は、参加者同士の連帯感を高め、熱狂的な交流を促進している [54, 73]。さらに、遠隔地のライブ配信環境においても、現地における参加者同士の共感体験・身体的な行動を伴う一体化を促進できれば、現地と遠隔の間の障壁を取り払ったうえで、多様な人々の一体的な集団への参加を促進できる。

ソーシャルプレゼンスの分野では、振動や電気刺激等を用いて行動や存在感を伝達する方法が数多く提案されている [107, 105, 42, 19, 82]. さらに、振動が、音声通話 [90, 42]・ビデオ会議 [112, 110] の場面で相手の存在感を高めることが示されている。これらの結果は、音声や視覚的な映像に加えて、振動という新たなモダリティを追加することが、相手との繋がりを強化する上で有効であることを示している。ライブにおいても、演者から観客へ演技を強調して伝達する手段として追加のモダリティを活用することで、両者の間の繋がりを強化できる可能性がある。

また、ゲームエンタテインメント等の文脈では、身体動作の伝達や、心理学におけるミラーリングの概念を取り入れたいくつかの研究がなされており、そのような身体的に同期した行動を誘発する仕組みは、個々人のコミュニケーションにおいては親密さを高めるのに有効であることが示唆されている [37, 51, 69, 70]. このような身体動作の同期を用いたインタフェースは、個人間だけでなく集団においても共感体験を誘発する仕組みとして利用できる大きな可能性を持っている。また、こういったインタフェースを音楽ライブという空間に取り入れることは、ライブ文化において新しい「儀礼」を構築することであるとも言え、新しいライブエンタテインメントの楽しみ方・体験価値を生み出す可能性を秘めている。

本稿では、音楽ライブにおける演者と観客の間の身体的な行動の同期（身体的共振）を促すインタフェースを取り入れたシステムを開発することで、両者の心理的な繋がりを強化する方法について議論する。演者と観客の間の身体的共振は互いの行動の認知に起因されるものであり、互いの行動（演技や応援）を強調して双方向的に伝えることは、両者の繋がりが深まるうえで有効である可能性がある。

また、演技や応援の伝達を支援するだけでなく、伝達された情報が、会場全体（伝達したい相手・自分自身・他の参加者）から見えるようにすることも重要である。特に、観客自身が応援の伝わりを実感できることは、応援による参加をより明確にし、応援したいメンバーとの繋がりを強化する。また、その過程が他の参加者からも見えるようにすることで、演者・観客間の繋がりでなく、観客の間での繋がりを強化できる可能性がある。個々の観客のライブ体験を共有できる仕組みを設けることで、観客同士での「演者を応援する」という目的意識での共有を促し、協調的な応援行動が促進されると考えられる。

さらに、音楽ライブにおける醍醐味を伸ばし、体験価値を高めることを考える上で、その技術支援が、既存のライブ体系を阻害しないシステムデザインの実現が求められる。これまで提案されてきた音楽ライブ支援の仕組みにおいては、視聴体験を画一化してしまい非日常性を損なうこと、スマートフォン等の新たなデバイスの導入が、ライブへの集中度を低下させてしまうこと等への懸念がある。前述のように、



集団的なつながり，集団的沸騰の促進においては，集団の中で構成される共通の「儀礼」がキーとなるとされている．デジタルテクノロジーの音楽ライブ体験への導入が既にある儀礼的行為を阻害してしまうことは，既に集団的沸騰が構築された現実世界の音楽ライブの現場において，その盛り上がりを促進してあげるような支援策を考える上では望ましいものではない．つまり，音楽ライブの支援システム開発においては，既存の応援体系を尊重したうえで，それを支援するアプローチが必要である．また，ユーザがシステムを使用する際に懸念を感じない，必要に応じて使用の有無を選択できるデザインも重要となる．

つまり，音楽ライブにおける集団的創発を支援するためには

- 演者・観客間の双方向的な情報伝達を支援すること
- 伝達された情報が視認できるデザインであること
- 本来のライブ体験を阻害しないこと

の3点がそれぞれ必要であると考えられる．本研究ではこの3点の要件を満たしたシステムとして演者と観客の間の一体感を向上する双方向ライブシステム「Affinity Live」を提案する．

### 3.4 演者と観客の間の一体感を向上する双方向ライブ支援システム

これまで音楽ライブにおける醍醐味として「生の演者の演技の体験」「価値観を共通とする他者との遭遇・交流」「ライブ自体の持つ自由さ・非日常性」の3つがあることを取り上げ，関連研究との比較を交えながら音楽ライブにおける集団的創発を実現する支援の在り方を検討してきた．そして，これらの考察から演者と観客の間の一体感を向上するシステムの要件として，「演者・観客間の双方向的な情報伝達を支援すること」「伝達された情報が視認できるデザインであること」「本来のライブ体験を阻害しないこと」の3つが必要となることを述べた．本研究ではこの3点の要件を満たしたシステムとして演者と観客の間の一体感を向上する双方向ライブシステム「Affinity Live」を提案し，プロトタイプ開発およびライブ環境における評価実験を通じて提案手法の有効性を評価した．

### 3.4.1 提案法の概略

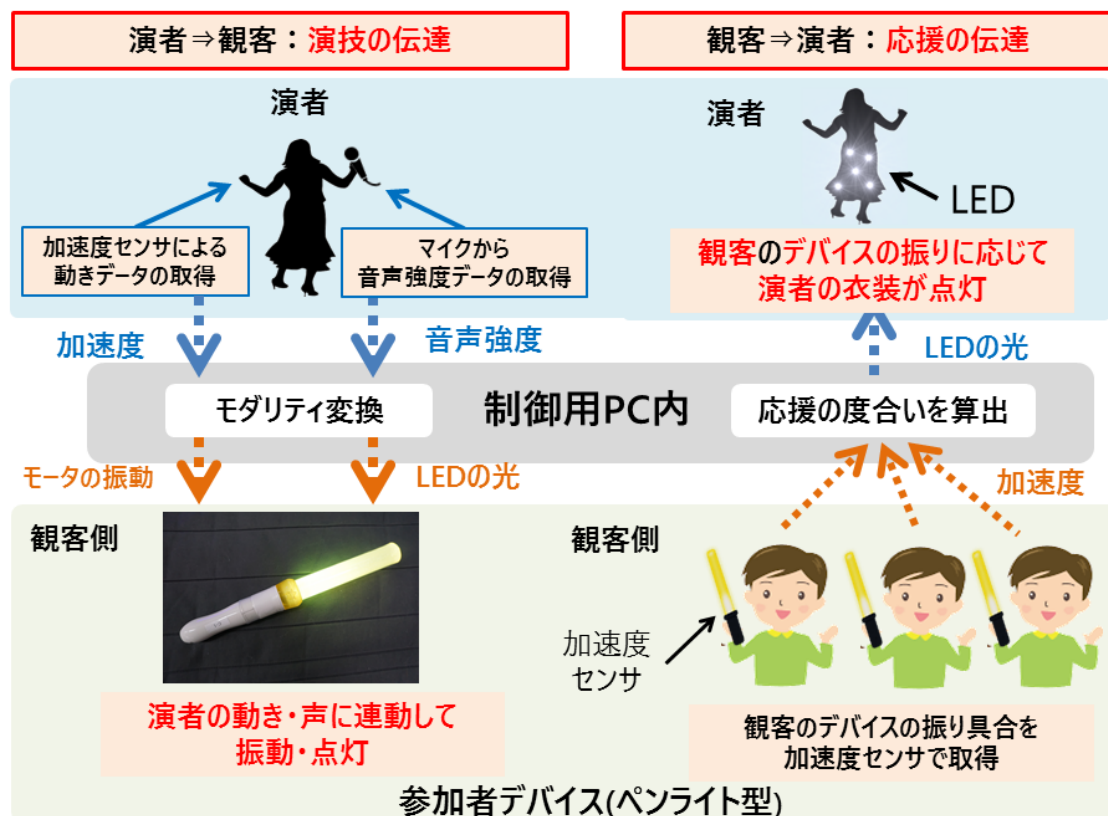


図 3.1: 双方向ライブ支援システム「Affinity Live」の概略図

図 3.1 は本稿で提案する演者と観客，観客間の一体感を向上するライブ支援システム「Affinity Live」の概略図である。本システムは，演者から観客へ演技の伝達を支援し，観客から演者へ応援の伝達を支援するように，演者・観客間の双方向的な情報伝達を支援していることを特徴とする。

演者の演技体験を拡張し，自身の応援を拡張的に演者に伝達するツールとして，音楽ライブにおいて一般的に応援のために利用されるユーザデバイスであるペンライトを利用する。ペンライトをユーザデバイスとして利用することによって，観客はシステムを利用した場合においても，従来のペンライトを用いた応援方法を変えずに参加することができる。本提案は，ライブの応援グッズ（ペンライト）と演者の衣装に対して通信と情報提示の機能を設け，観客の視聴体験を損ねずに両者の間の双方向的な情報伝達および感覚フィードバックを実現するものである。

演者から観客へは、演者の腕に取り付けた加速度センサおよびマイクで獲得した腕の動き・歌声を応援グッズの振動・光としてリアルタイムに伝達することで、音楽ライブにおける視聴覚体験に触覚・光による演者の演技感覚の体験を拡張する。一方で、観客から演者への逆方向の情報伝達として、観客の応援のアクションの情報を集約し、演者の衣装の光として参加者から見える形でフィードバックを行うことで、観客の応援による貢献を可視化する。これらの支援により、観客はデバイスの振動・発光を通じて演者の演技を体感でき、自身の応援をメンバの衣装に反映できる。さらに衣装の光を通じて観客は、他の観客の応援の状況を視認することができる。

本稿では、提案するコンセプトの有効性を検証するためにプロトタイプ開発と評価を実施したため、以後その経過と得られた結果に関して報告する。

### 3.4.2 初期検討

外部から無線で発光色を制御できるペンライトシステムに関する提案があるが、演者の演技に合わせて動作するものはまだ提案されていない。そのため、演者から観客への演技の伝達を実現する単方向のシステムを試作し、予備実験を通じて演者の演技を観客に伝達することがどのような効果をもたらすのかについて検証した。

#### 予備実験用単方向システムの開発



図 3.2: リストバンド型加速度センサ

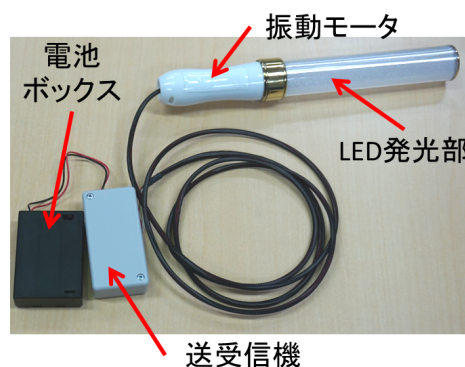


図 3.3: ペンライト型デバイス

最初に、演者の演技をリアルタイムに反映するペンライトシステムの試作を行った。本試作システムは、提案法である双方向ライブ支援システムの片側のみを実装

したものにとらえることができる。本システムは、演者が身に着けるリストバンド型の無線加速度センサとマイクと、観客が持つペンライト型デバイス、システムを統括する制御用 PC から構成される。無線リストバンド型加速度センサは、演者の腕の振りの情報を、マイクは演者の歌声の情報を獲得するために用いる。

演者の腕の振りの情報を獲得する無線加速度センサにはモノワイヤレス社の販売する無線通信可能なマイコン TWE-LITE と加速度センサが一体となった無線タグ TWE-LITE2525A を用いた。TWE-LITE は IEEE802.16 をプロトコルとする 2.4GHz の無線通信をサポートする 32bit マイコンである。IEEE802.16 は Zigbee に代表される様々な無線通信システムでもちいられるプロトコルであるが、TWE-LITE は筐体が小型 (2cm × 2cm) であり、低消費電力かつ高い応答性を実現するため、本システムのような無線でのフィードバックシステムの実現には適した無線通信ハードウェアである。

観客の持つペンライトデバイスは、市販のペンライト (Ruifan, KING BLADE X3) を改造して試作したもので、本体内部にフィードバック装置として、高輝度のフルカラー LED と振動モータを搭載したほか、TWE-LITE を用いた無線通信装置と、電池ボックスを別途取り付けている。後述する予備実験においては本システムを用いて実施している。

制御用 PC には、TWE-LITE の通信システムに対応した送受信機 (モノワイヤレス社・MONO-STICK を利用) および演者のマイクがオーディオインタフェースを介して直接接続されている。送受信機からのデータの取得およびコマンド送信はシリアル通信を介して行う。受信機によって受信した演者の加速度データをシリアル通信に基づいて獲得して加速度データパケットの解釈およびデータ変換を行う、ペンライトに搭載された RGB フルカラー LED および振動モータの振動強度の制御命令を生成しシリアル通信によって送信するプログラムを作成し、演者の動きデータの獲得とそれに応じたペンライトに搭載されたフィードバック装置を制御する枠組みを実装した。また、演者のマイク情報に関しても同様に Windows Direct Sound API を利用して複数の音声デバイスから音声強度を個別に獲得する枠組みを実装し、複数の演者の歌声データを同時に獲得すること、また得られた音声強度情報をペンライト型デバイスへのフィードバックへ利用することを可能とした。

本システムを用いた際の演者の運動からペンライトへのフィードバック時間は、Wi-Fi をはじめとする他の 2.4GHz 無線機器との電波干渉や物理的な遮蔽、壁の有無等の周辺環境に基づいて左右されるが、一般的な屋内環境においては 1 秒以内でのフィードバックが可能であることを確認している。

### 3.4.3 実際のライブ環境下におけるデータ計測実験

実験に先立って、ArcJewel所属のアイドルグループ「Luce Twinkle Wink ☆」のメンバー4名にご協力いただき、実際の演者が演技をしている際のデータを計測する実験を行った。提案システムを実際のライブで用いる場合には、実環境下で演者の動きや歌声のデータを正しく計測できることが望まれる。このデータ計測実験は、実験室環境下で実際の演者のデータを用いた実験や検討を行えるようにすること、実際のライブ環境下でシステムを利用できる見通しを得ることを目的としたものである。

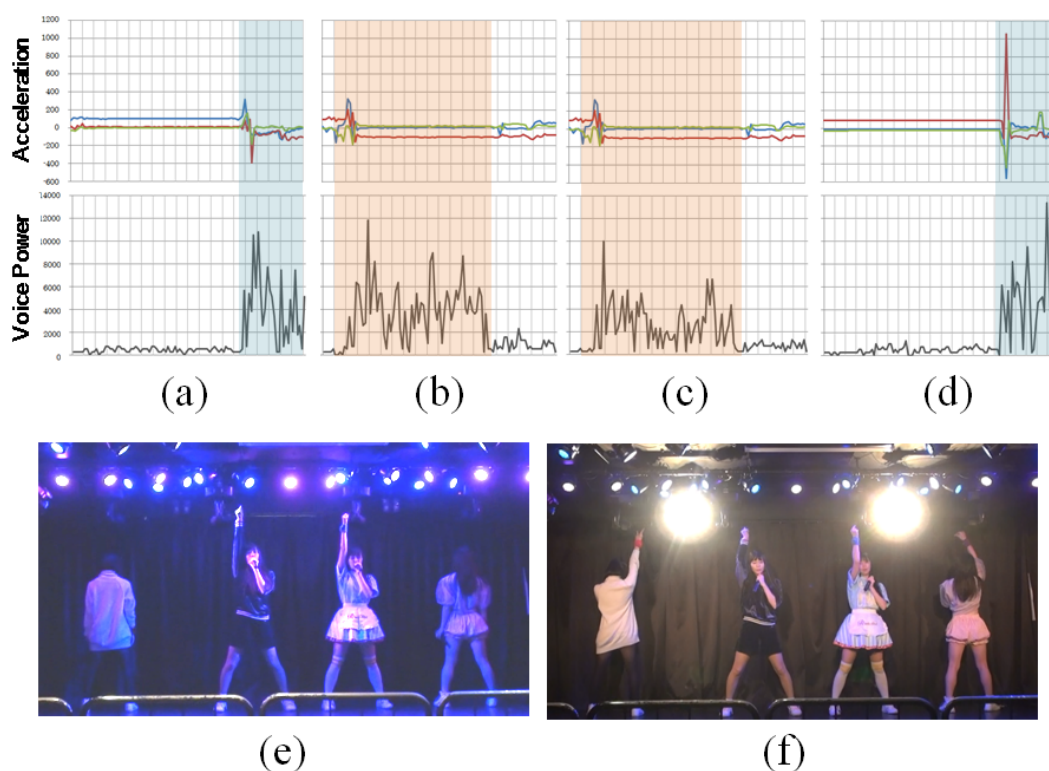


図 3.4: 計測した映像データ・加速度データ・音声データの一例

データ計測実験は、このアイドルグループが定期公演で使用する会場を使用し、公演前のリハーサルの時間（約1時間）を用いて行われた。メンバー4名の腕にリストバンド型の加速度センサを装着して演者の加速度を計測したほか、マイクから演者の音声強度のデータを計測し、ビデオカメラで撮影した映像と一緒に記録した。

演技中の実際の演者4名から得られた加速度・音声強度の変動のデータ（約10秒間分）を図3.4(a-d)に示す。このシーンでは図3.4(e)のように2人の演者が手を挙げて歌った後に、残りの2人が変わって歌う（図3.4(f)）というパート分けがなされているが、得られた加速度・音声データからは個々のメンバーのパートを区別することが可能である（図3.4(a-d)のグラフの背景色は各パート分けを示す。）。計測データを用いて、メンバーのうち1人の動き・音声の強度をペンライトに振動・光として提示するプログラムを作成し、映像とデバイスの動作から対応するメンバーを当ててもらった実験を行った。実験には埼玉大学に所属する学生8名が参加した。結果として、7人がデバイスに割り当てられたメンバーを当てることができ、システムを用いて個々の演者の声・動きを正しく計測できることを確認することができた[62]。

### 3.4.4 計測データを用いた予備実験

#### 実験設定

前述のデータ計測実験において計測した演者のデータを用いて予備実験を行った。この実験は、埼玉大学に所属する大学生32名が参加し、4人を1グループとして計8ケース実施した。なお、音楽ライブへ行ったことがある人は20名であった。4人の被験者に、前回の実験で収録したアイドルグループのメンバー4人の演技の録画映像（約1分30秒）を2回視聴してもらった。4人の被験者には、動画中に登場する4人のメンバーのうち特定の1人を「応援してほしいメンバー」としてそれぞれに割り当て、割り当てられた特定のメンバーを応援してもらうようお願いした。同時に、被験者にはペンライト型デバイスを持ってもらい、応援に使用してもらうよう指示した。

動画の再生と同期して、ペンライト型デバイスには振動パターンを再生した。本実験では、デバイスの振動による観客の印象の違いを評価するために、2種類の振動のパターンを検討している。ひとつは、割り当てられたアイドルメンバーの動きに連動して手元のデバイスが振動・発光する場合（動き連動）、もうひとつは、メンバーの動きに関係なく曲に合わせて手元のデバイスが一定の間隔で振動する場合（一定間隔）である。前者のケースにおいては、映像中のメンバーに同期してデバイスを振動させるために、データ計測実験の際に記録した加速度データを使用した。また、視認性を上げるために、応援するメンバーに対応した色を動きに連動して発光させた。後者のケースにおいては、メンバーに対応した色を常時一定の明るさで発光させている。図3.5は実験の様子である。図3.5に示すように、実験中は演者

表 3.1: アンケートの設問 (予備実験)

番号	設問
設問 (A-1)	システムを使用することで臨場感を感じましたか
設問 (A-2)	映像に集中することはできましたか
設問 (A-3)	応援したいメンバーとの一体感を感じましたか
設問 (A-4)	実験の参加者間で一体感を感じましたか
設問 (A-5)	観賞する際に個々のメンバーに注目しましたか

の映像をプロジェクターで壁面を投影することで疑似的にライブ環境を再現した。各映像再生後に表 3.1 に示される設問に対して、7段階評価のアンケート (どちらでもない場合を 4 とし、まったくそう思わない場合を 1, 非常にそう思う場合を 7) を実施した。



図 3.5: 実験風景 (予備実験)

## 実験結果と考察

被験者アンケートの結果に対してマン・ホイットニーの U 検定を行い、各項目の p 値を求めた。各設問ごとのアンケートの平均スコア (7 段階) と p 値を図 3.6 に示

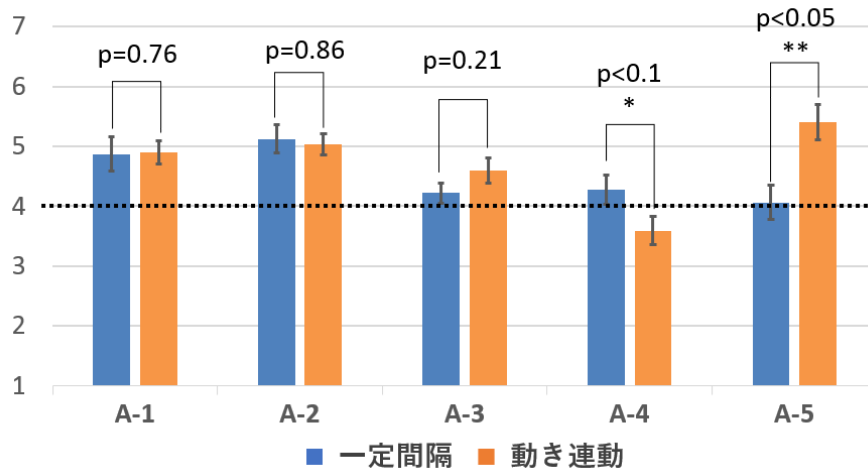


図 3.6: アンケートの平均スコアと p 値 (予備実験)

す。設問 (A-1)「システムを使用することで臨場感を感じましたか」、および設問 (A-2)「映像に集中することはできましたか」の項目では、いずれのケースにおいても中央値である 4 より高い評価が得られた。これから、振動するペンライトを用いた場合において高い臨場感・集中度が得られることが明らかになった。しかし、振動のさせ方には様々なバリエーションがあることから定量的な差はみられていない。

設問 (A-3)「応援したいメンバーとの一体感を感じましたか」では両ケースの間で有意差は見られなかったが、平均スコアは演者の動きに連動して振動するケースの方が高かった。設問 (A-5)「観賞する際に個々のメンバーに注目しましたか」においては、動きに連動するケースの場合の方が一定間隔で振動させるケースに比べ平均スコアに差が見られ、その差は有意であった。この結果から、演者の動きに連動してデバイスが振動することが、応援したいメンバーに注目して演技を観賞することを促進し、両者の間の関係性に影響を与えている可能性がある。

設問 (A-4)「実験の参加者間で一体感を感じましたか」の回答では、曲に合わせて一定間隔で振動する場合の方が、デバイスを演者の動きに合わせて振動させた場合と比較して平均スコアが高かった。応援する観客の間での一体感は、応援したいメンバーを他の観客と一緒に応援している感覚によってもたらされることが考えられる。しかし、デバイスが演者の動きに連動して振動する場合においては、4人の被験者が異なるメンバーを応援していたため、被験者が体感する振動は異なっている。一方で、デバイスが一定間隔で振動する場合においては、4人の被験者が同じ振動を体験することになるため、参加者間で一体感をより得やすい環境にあったと考えられ



る。このことから、演者の動きに同期して振動する場合においても、同じメンバーを応援する参加者が複数人存在する場合においては、同じメンバーを応援する参加者同士の一体感が形成される可能性がある。

### 3.4.5 双方向ライブ支援システムの開発：ハードウェア設計

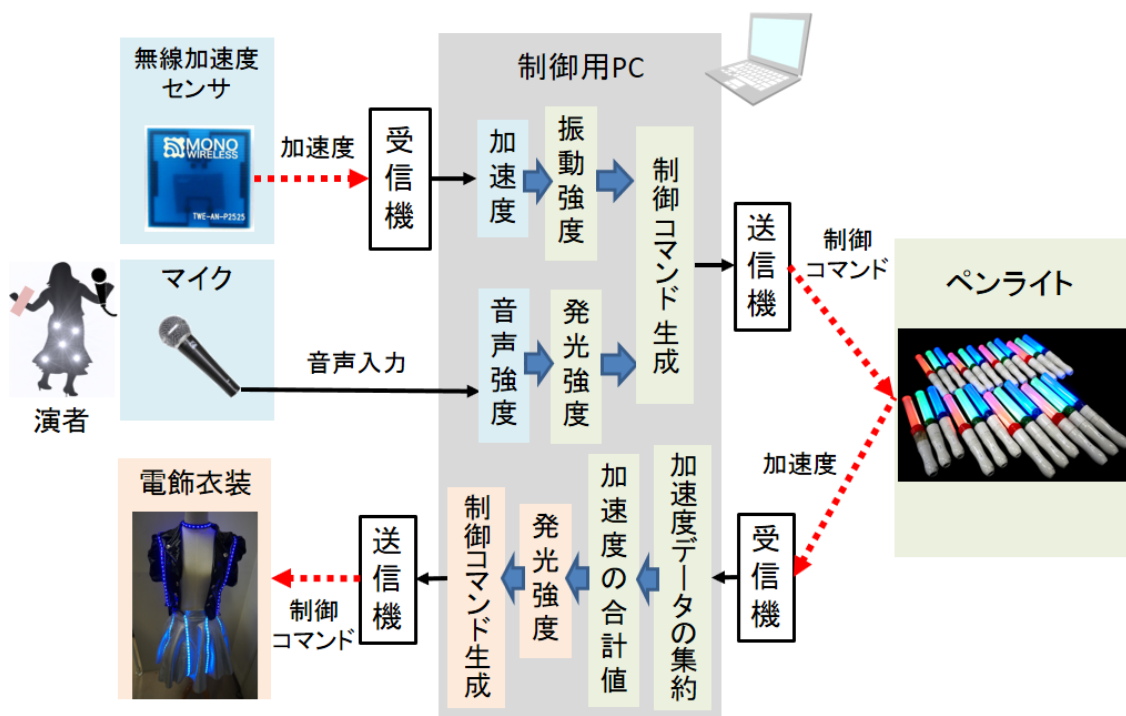


図 3.7: システムの構成

第3節での予備的な検討を踏まえ、図3.1に示す提案手法を実装した双方向ライブ支援システムを開発した。図3.7は開発したシステムの構成図である。本システムは、演者の演技の情報を観客の持つペンライトに振動・発光として伝達・共有する機能と、観客のペンライトの振りの大きさに応じて応援の大きさを演者の衣装に提示する機能の2つを持つ。

ペンライト型デバイスは、図3.8に示される演者の動き・歌声に同期して振動・発光するデバイスである。ペンライト型デバイスには、LEDによる発光部と振動モータと、制御用PCと通信する送受信機(マイコン)が内蔵されている。このデバイスのLED・振動モータは、制御用PCから送信されたコマンドに基づいた制御が

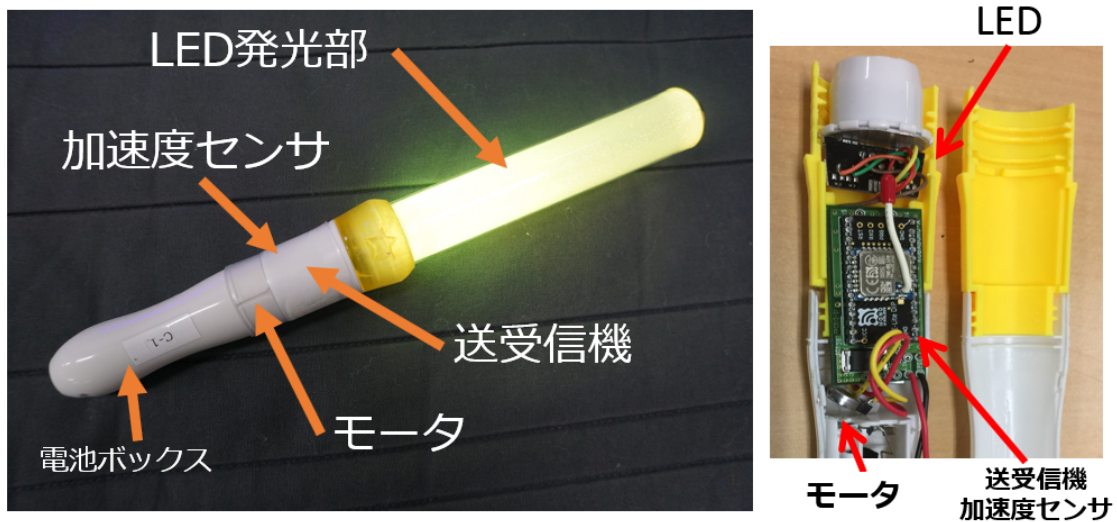


図 3.8: 改良型ペンライト型デバイス

可能であり、演者の動きや音声に基づいた発光や振動が実現される。また、後述する観客から演者へ応援を伝達する機能を実現するために、本デバイスには加速度センサが搭載されている。加速度センサから得られたデータは、ペンライトの振りが検出された際に制御用 PC に対し随時送信される。

本デバイスに関しては数種類の試作機を検討している。予備実験では図 3.3 に示すような、ペンライトの外部に電源と送受信機を接続した試作機を用いたが、実用上の堅牢性が問題となった。そのため、図 3.8 に示すように全ての機器をペンライトの内部に格納し、現場での実用に適した形へと改良した。このデバイスを 24 本製作し、ライブ環境下における多人数での実験に対応できるようにした (図 3.9)。

観客のペンライトの振りの大きさに応じて応援の大きさを演者の衣装に提示する機能は、観客の持つペンライト型デバイスの動きの大きさを応援の度合いとして集計し、図 3.10 に示す電飾衣装に LED の発光として提示するものである。アイドルメンバーの装着する電飾衣装 (図 3.10) は、市販のチョーカー・ジャケット・スカートに LED テープを貼り付けて製作し、腰部に無線信号の受信機を取り付けたものである。この衣装はペンライトデバイスと同様に、制御用 PC からメンバー毎・部位毎 (チョーカー・ジャケット・スカート) に個別に点灯パターンを制御することが可能である。本機能においては、各観客のペンライトから得られた加速度の合計値や振られている本数に応じて制御用 PC から衣装の光らせ方を制御し、観客の動作を演者の衣装に反映する。

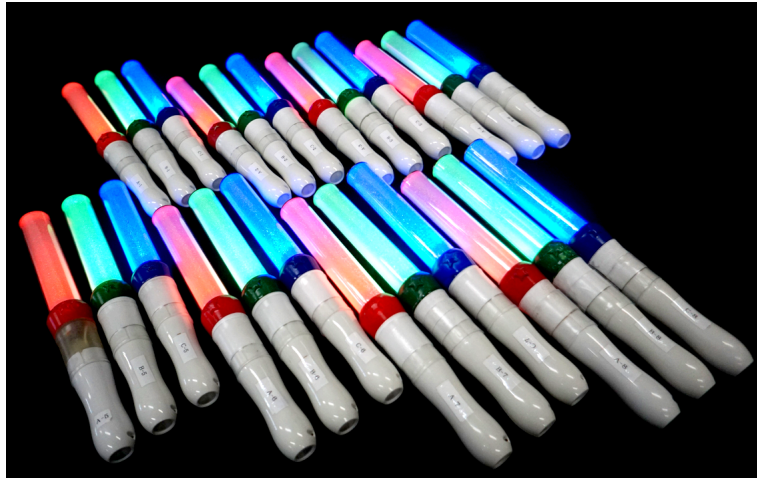


図 3.9: 試作した 24 本のペンライト

### 3.4.6 双方向ライブ支援システムの開発：ソフトウェア設計

制御用 PC 内で動作するソフトウェアに関しても開発を実施した。本ソフトウェアは、演者の腕の無線加速度センサ、観客のペンライト、衣装のそれぞれに対してデータ取得・データ変換・フィードバックを行うものである。C/C++によるシリアル通信を通じて、3種類の Mono-Stick で構成されるアンテナからの情報獲得・送信を行うほか、得られた加速度データ・歌声データを光・振動に変換する処理、ペンライトから得られた加速度データの合計値を衣装の輝度値に変換する処理をリアルタイムに実施する。

## 3.5 実際のライブ環境下における実証実験

開発したシステムを用いて、実際のライブ環境下において実験を実施した。この実験では2つの事項について検証を行っている。1つは、演者の身体動作に連動してペンライトが振動する単方向のシステムにおいて、演者と観客の間の一体感、観客同士の一体感にどのような影響を与えるかを明らかにすることである。予備実験においても同様の検証を行っているが、この実験では、演者の演技を直接視覚的に体験でき、同じメンバーを応援する観客が複数人いる実環境下に近い設定で実験を行い、演者・観客間、あるいは観客同士の関係性にどのような影響を与えるかを調査した。もうひとつは、本システムの特徴となる双方向的な情報伝達が演者・参加



図 3.10: 製作した電飾衣装

者間の一体感・参加者間の一体感にどのような影響をもたらすかである。そのため、単方向のシステムと双方向のシステムの比較に基づく評価実験を実施し、双方向的な情報伝達の有効性を検証している。

### 3.5.1 実証実験（単方向システム）

#### 実験の設定

本実験では、埼玉大学のコピーダンスサークル「SKR48」のメンバー5名にご協力いただき、24人の被験者の前で演技をしてもらった。被験者は埼玉大学に所属する学生であり、ライブに行ったことのある人を中心に学内で募集した。最終的に集まった24人の被験者のうち、ライブに行ったことがある人は19名、定期的にライブに通っている人(年1回以上ライブへ参加)は約半数の13名であった。図3.11は実験の様子を示したものである。24人の被験者を8人ずつ3グループに分け、5人のメンバーのうちの3人をそれぞれのグループに対して割り当てた(図3.12)。そして、被験者にはペンライト型デバイスを持ちながら、観客として割り当てられた

メンバーを応援してもらうようお願いした。演者には動きを計測する加速度センサを右腕に取り付けてもらい、動きのデータをリアルタイムで取得した。演者に2曲の演目を2回、計4回の演技をしてもらい、被験者には各曲目に対して、演者の動きに連動して振動する場合・曲のテンポに応じて一定間隔で振動する場合の2パターンを試してもらった。ペンライトの発光は振動パターンに合わせて設定し、演者の動きに連動して振動するケースでは演者の動いている間は発光が強まるように、一定間隔で振動するケースでは、振動と同様に発光の強度が一定間隔で変化するように設定した。表3.2は、実験時の曲順・振動パターンの再生方法を示したものである。各曲の演技終了後に、表3.8に示される設問に対して7段階評価のアンケート（どちらでもない場合を4とし、まったくそう思わない場合を1、非常にそう思う場合を7）を実施し、実験終了後には演者・被験者へのインタビューも実施した。アンケートの設問（B-1）～（B-4）は、予備実験の実験アンケートの設問（A-1）～（A-4）に対応するものである。



図 3.11: 実験風景

## 結果

予備実験と同様に、被験者アンケートの結果に対してマン・ホイットニーのU検定を実施し、各項目のp値を求めた。各設問ごとのアンケートの平均スコア（7段

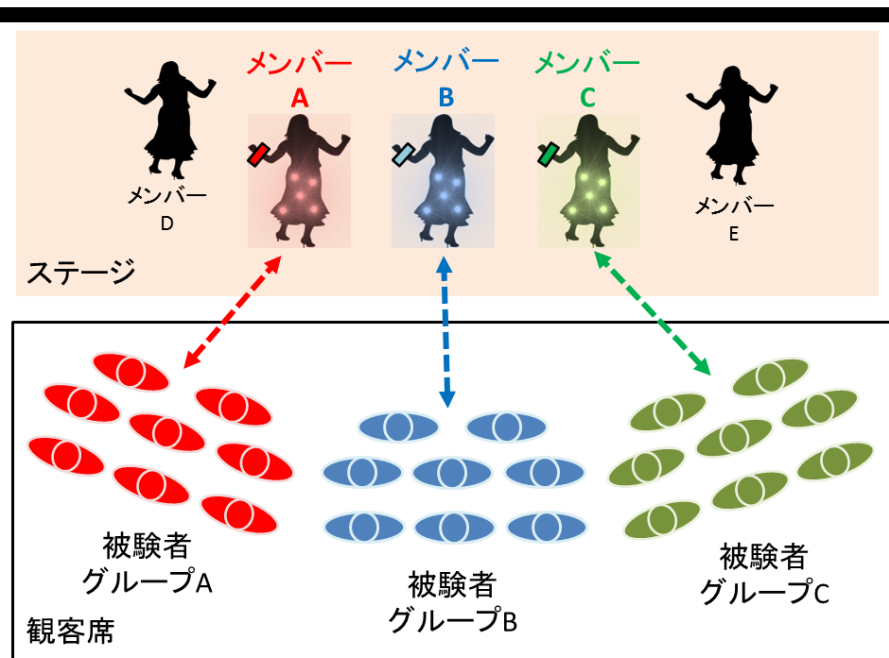


図 3.12: 実験設定

階)とp値を図3.13に示す。予備実験と同様に、設問(B-1)「システムを使用することで臨場感を感じましたか」、設問(B-2)「ライブに集中することはできましたか」では、いずれのケースにおいても4を上回る高い平均スコアが得られた。

今回の実験では、設問(B-3)「応援したいメンバーとの一体感を感じましたか」において有意な差が見られた。この結果から、ライブ環境下において演者の動きに連動した振動が演者と観客の間の一体感を高めることが明らかになった。被験者インタビューからは、メンバーの演技が振動として伝わることで、「アイドル自体の動きに注目するようになった」、「演者の頑張りを感ずる」、「他のメンバーよりも顔を

表 3.2: 実験時の曲順および再生された振動パターン

回数	曲	振動パターン
1 曲目	曲 A	動き連動
2 曲目	曲 B	一定間隔
3 曲目	曲 A	一定間隔
4 曲目	曲 B	動き連動

表 3.3: アンケートの設問 (実証実験)

番号	設問
設問 (B-1)	システムを使用することで臨場感を感じましたか
設問 (B-2)	ライブに集中することはできましたか
設問 (B-3)	応援したいメンバーとの一体感を感じましたか
設問 (B-4)	参加者全体での一体感を感じましたか
設問 (B-5)	同じグループの参加者間で一体感を感じましたか

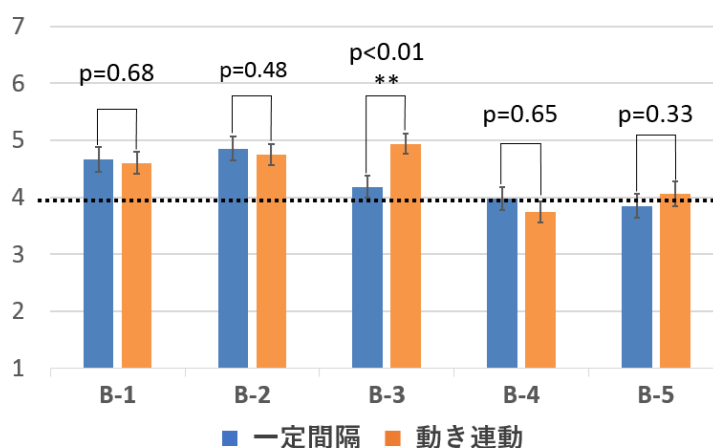


図 3.13: 6.1 節の実験におけるアンケートの平均スコアと p 値

覚え、親近感が沸いた」、「振動はあるとペンライトを振りやすい」等の感想が得られ、メンバーに対する注目度や親近感が高まることが確かめられた。

演者へのインタビューからは、「自身の演技が観客に伝わっているのを感じた。」といった感想が得られた。演者の演技は参加者のデバイスに振動・光として伝達されるが、それだけでなく演者側も参加者デバイスの発光を視認することで、自身の演技が参加者に伝達されている感覚がより増強されている。また、「観客に伝わるように、腕を大きめに振るように意識した。」とのコメントが得られた。演者の演技が参加者に伝わり、それが演者から見てわかることで、より参加者に伝わりやすい演技が行えるようになる。インタビューの結果は、演者がシステムを利用することで観客との繋がりを深めていける可能性を示している。

今回の実験では、同じメンバーを応援する観客間の一体感への影響を調査するために、設問 (B-4) の参加者全体での一体感の調査に加えて、設問 (B-5) において、同じグループの参加者間での一体感について分けて調査を行った。設問 (B-4) で

は、一定間隔で振動させた場合において、演者に連動して振動する場合と比較して高い平均スコアが得られた。この結果は予備実験で得られた結果と同様である。一方で、設問（B-5）の平均スコアは、演者に連動して振動する場合の方が高い。このことから、特定のメンバーの演技に連動した振動はあるメンバーへの注目をより引きつけ、同じ振動を体感するグループ内での一体感を高めていると考えられる。しかし、その差は有意ではなく、顕著な観客間の一体感の高まりは見られなかった。

### 3.5.2 実証実験（双方向システム）

#### 実験設定

この実験は、単方向システムの実証実験に続けて実施されたものであり、基本的な設定は同一である。単方向システムの実証実験と同様に、24人の被験者を8人づつ3グループに分け、演者である「SKR48」の5人のメンバーのうちの3人を「応援してほしい人」としてそれぞれのグループに対して割り当てた（図3.12）。割り当てられた3人のメンバーには、電飾衣装を着てもらい、右腕には動きを計測するリストバンドを取り付けた。電飾衣装を視認しやすくするため、この実験では会場の照明を消して実施した。

演者に同じ演目を2回行ってもらい、それぞれの演目で単方向のシステム・双方向のシステムの2つを被験者に体験してもらった（表3.4）。いずれの回においても、ペンライトは割り当てられた演者の動きに合わせて振動するように設定した。また、電飾衣装については、1回目では常に一定の明るさで点灯させ、2回目ではペンライトの振り具合に応じて明るさを変化させるように設定した。電飾衣装の光る部位は被験者によって変わるように設定し、各被験者がペンライトに対応して衣装が発光する様子を確認できるようにした。被験者には、2回目の演技の開始前に1人ずつペンライトを振ってもらうことで、双方向システムの挙動を予め確認してもらっている。演技終了後に表3.8に示す設問内容のアンケートを実施したほか、実験終了後に演者・被験者に対してそれぞれインタビューを実施した。

表 3.4: 実験時の曲順およびシステムの動作

回数	曲	システムの動作
5 曲目	曲 C	単方向システム
6 曲目	曲 C	双方向システム



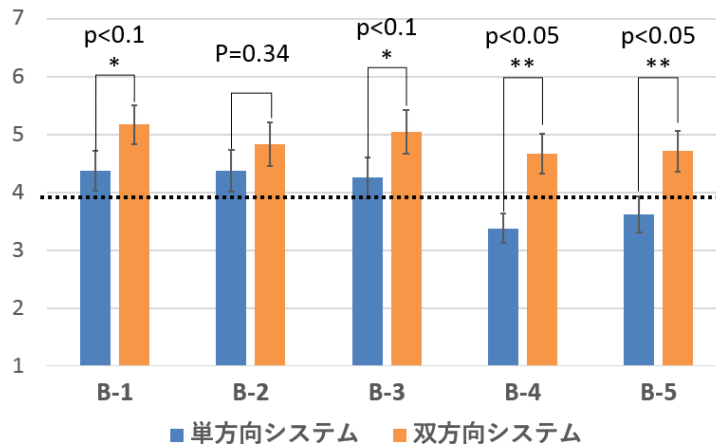


図 3.14: 6.2 節の実験におけるアンケートの平均スコアと p 値

#### アンケート・インタビューに基づく実験結果

単方向システム（1回目）、双方向システム（2回目）のアンケートにおける平均スコアと、マン・ホイットニーの U 検定により求めた p 値を図 3.14 に示す。平均スコアはすべての項目において双方向システムが単方向システムを上回り、設問 (B-2) 「ライブに集中することはできましたか」を除いてその差は有意 ( $p<0.05$ ) あるいは有意傾向 ( $p<0.1$ ) であった。被験者へのインタビューにおいては、「応援しているメンバーへの愛着が増す」、「ライブに対して参加している感じがより感じられる」といったコメントが得られた。単方向のシステムにおいては、観客の持つデバイスに光として反映された自身の演技を演者が視認することで、より参加者に寄り添っていくといった現象が見られた。双方向システムにおいてはそれに加えて、参加者が自身の応援を視認することで自身の応援の伝達を実感し、よりライブに集中していくという逆方向の現象が発生していると考えられる。これらの結果から、演者の情報が観客に伝わるだけでなく、観客の応援の状況が可視化されることによって、観客と応援したい演者の間の繋がりが強まることが確認された。また、特定のメンバーを応援するためにペンライトを振るという同一の行為を観客同士が協調しながら意識的に行うことで、観客間の一体感が高まったと考えられる。演者のインタビューから得られた感想としては、「光る衣装は楽しく、ずっと光っているとうれしい」といったコメントが得られた一方で、自身の衣装が光っていることがわかりづらいというものがあった。本システムを利用する際に観客は発光に加えて振動から演者の情報を受容できるが、演者側にはその仕組みがない。そのため、演者への観客の応援情報の提示の仕方を検討する必要がある。

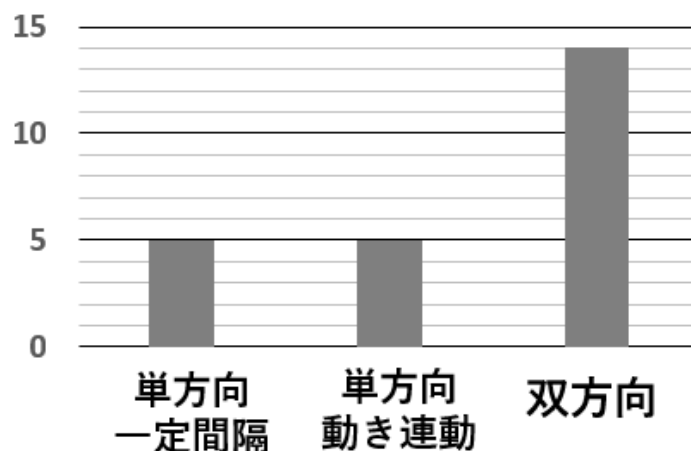


図 3.15: 使ってみたいシステムに関するアンケート結果

被験者 24 人に (1) デバイスが一定間隔で振動する場合 (単方向システム・一定間隔), (2) デバイスが演者の動きに連動して振動する場合 (単方向システム・動き連動), (3) デバイスが演者の動きに連動して振動し, さらにデバイスの動きがメンバーの衣装に反映される場合 (双方向システム) の 3 つのうち, どのシステムを再び使ってみたいかを聞いたところ, 図 3.15 に示すように, 14 人が双方向システムと回答し, 双方向システムが最も高いスコアであった. しかし, 単方向システムを使ってみてみたいと回答した被験者も合わせて 10 人いた. 被験者インタビューからは, 双方向システムに対する否定的な感想として「アイドルの衣装を光らせる場合, ペンライトを振ることを優先し, 曲に集中できなくなる」というコメントが見られた. 図 3.14 に示すアンケート結果においても, ライブへの集中度を問う設問 (B-2) では平均スコアは双方向システムの方が高いが, 他の設問と異なりその差は有意ではない. そのため, ペンライトを振って応援するという行為をシステムによって促すことで, 視聴体験により熱中できると感じた被験者と, 集中度が下がると感じる被験者の両方が存在したと考えられる. この要因として, システムがペンライトを振るという応援行動のみを支援していることにより自由な応援を制限してしまっていることが挙げられ, 観客の応援行動の提示の方法に関しては検討が必要となる.

## 観客の振る舞い方の分析

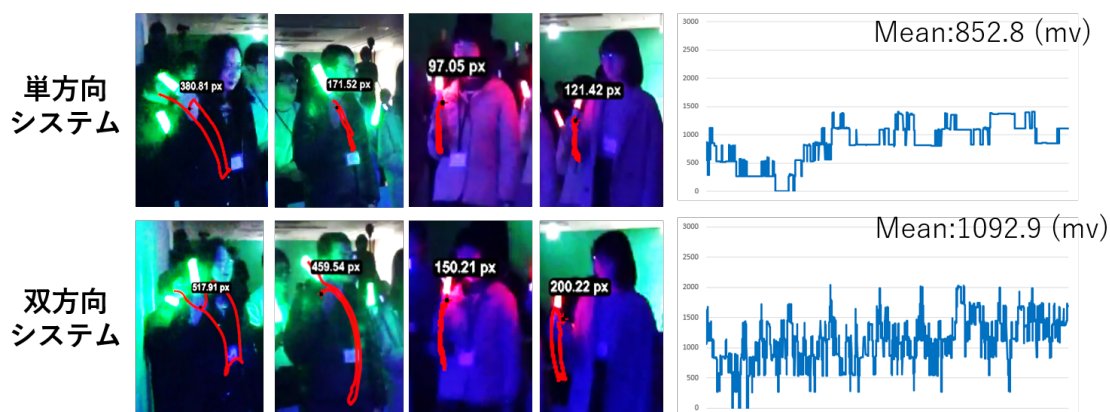


図 3.16: 単方向システム・双方向システムを用いた際の観客の振る舞い方に関する比較

観客の応援行動に対する本システムの影響を調査するために、観客のデバイスの使い方について実験中の観客を撮影したビデオ映像と、観客のペンライトから送信された加速度センサのデータのログを用いて定量評価を実施した。

映像を用いた分析では、映像に映る観客のペンライトの振りの軌跡を可視化することで、単方向システムおよび双方向システムを用いた場合における観客の応援行動の変化を分析した。この分析においては、実験中の観客を撮影した映像のうち、会場前方2箇所から撮影した映像を使用し、さらに遮蔽なく撮影ができた最前列の9名から得られたデータを利用した。図 3.16(左)は、単方向システム・双方向システムを用いた際の被験者のペンライトの振り方を可視化したものの一例である。この図において見られるように、分析に用いたすべての被験者において、双方向システムにおける実験ケースにおいてペンライトの振りが大きくなる傾向が見られた。また、図 3.16(右)に示すグラフは観客のペンライトから送信された加速度センサのx/y/z軸の変化量を合計して算出した総変化量の値を、参加者間で平均をとり時系列的にプロットしたものである。こちらに関しても、単方向システムを使用した場合と、双方向システムを使用した場合とでは、後者の場合の方が、総変化量は大きいという結果となった。これらの結果から、観客同士で強調しながらペンライトを振るといった応援行動への参加をシステムが促進できていることが明らかとなった。

### 3.5.3 実験 (実際のファン・観客を対象とした実験)



図 3.17: 実験の様子

3.5.1, 3.5.2 節で実施した音楽ライブ環境での実験は、アマチュアの演者を対象として本学学生を用いて実施したものである。そのため、本システムの実際のユーザとなるプロの演者およびそのファンを対象とした心理評価を行った場合には異なる結果となる可能性が考えられる。そのため、プロの演者と実際のファンを対象とした実証実験を実施した (図 3.17)。

#### 実験の設定



図 3.18: 実験会場の様子 (ステージ)



図 3.19: 実験会場の様子 (客席側)

本実験は、ArcJewel 所属のメジャーアイドルグループ「Jewel ☆ Naige」のメンバー 7 名に演者としてご協力いただき、2019 年 1 月 10 日に埼玉大学内にて「実験型特別ライブ」として実施したものである。被験者は、「Jewel ☆ Naige」の公式ファンクラブ会員限定 web サイト上で募集し、抽選で当選した 50 名を無料で招待した。本実験は会場として、埼玉大学大学会館 3 階の大集会室を使用した。これは、本会場が、ステージ・簡易的な照明・音響設備が用意されており音楽ライブ開催における水準を満たす環境であること、実験実施にあたり実験環境の確認（設備の状況や電波干渉の有無の確認）が容易な環境であることによるものである。また、実際の興行ライブに従事する音響スタッフにマイクおよびスピーカー・音楽の調整を依頼し、興行として実施される音楽ライブと同等の環境となるように条件を設定した。表 3.5 は、本実験型特別ライブにおける当日のスケジュール、表 3.6 は演目を示したものである。表 3.6 に示すようにアンコールと曲の間の MC を含め、5 曲の演目に関して演技を行ってもらい、被験者 50 名に関してはペンライトデバイスを持ちながら演者を応援してもらった。

前回の実験と同様に、本実験においても、演者 5 名に対して 10 人ずつランダムに被験者（ファン）を割り当てて応援してもらうように依頼した。今回の実験では、5 曲の演目のうち 1・2 曲目を通常のペンライトと同様の設定（均一の輝度で白色に光る・振動によるフィードバックなし）で実施し、MC による説明以降、3～5 曲目の演技において提案手法（双方向システム）としてシステムを動作させることで、提案手法と普段のペンライトに関して比較検証を実施した（表 3.6）。

今回の実験では、極力興行として行われるライブに形態を近づけるという観点か

表 3.5: 当日のスケジュール

時刻	内容
早朝	当日準備開始
12:00	演者・事務所スタッフ 到着
12:30	リハーサル開始 照明・音響・実験システムの動作確認
14:00	被験者・見学者 受付開始
14:45	コンサート 開始
15:30	コンサート 終了
終了後	特典会 (握手会・撮影会 ※有料)

表 3.6: 実験時の曲順およびシステムの動作

回数	曲	システムの動作
1 曲目	曲 A	通常のペンライト
2 曲目	曲 B	通常のペンライト
MC		
3 曲目	曲 C	双方向システム
4 曲目	曲 D	双方向システム
アンコール		双方向システム
5 曲目	曲 E	双方向システム

ら、被験者へのアンケート調査は実験終了後1回のみ実施し、インタビューに関しては自由記述欄を設けることで代替した。被験者へのアンケートは表 3.7 に示される設問 (C-1)~(C-7) に対しては7段階評価 (どちらでもない場合を4として、全くそう思わない場合を1, 非常にそう思う場合を7) を付けてもらう形で、(C-9) 以降は自由記述で回答してもらった。

その他に自然なライブとしての実験遂行にあたって留意した点として、5曲の演目は全て異なる曲目を採用し、実験途中で中断や曲目の繰り返しが発生することがない設定とした。また、前回の実験時には被験者へのインストラクションを、スタッフが用意した原稿を演者に読んでもらう形で実施したが、今回の実験ではMCにおける談話の流れの中で自然に説明してもらえるように依頼し、スタッフが実験進行に介入することで自然なライブ空間を壊してしまわないように留意した。

本実験は、埼玉大学創立70周年記念シンポジウム「音楽・メディア・インタラクション」と共催で行われたものである。このシンポジウム内では、本提案システム

表 3.7: アンケートの設問 (実験型特別ライブ)

番号	回答方式	設問
設問 (C-1)	7段階評価	アイドルの動きが、自分に届いていると感じましたか？
設問 (C-2)		自分の動きが、アイドルに届いていると感じましたか？
設問 (C-3)		自分の応援の仕方に変化を感じましたか？
設問 (C-4)		普段のペンライトより臨場感を感じましたか？
設問 (C-5)		普段のペンライトよりライブに集中できましたか？
設問 (C-6)		普段のペンライトより応援するアイドルとの一体感を感じましたか？
設問 (C-7)		普段のペンライトより参加者全員間での一体感を感じましたか？
設問 (C-8)		実際のライブにおいて、この応援システムを使ってみたいと思いますか？
設問 (C-9)	自由記述	どのような場面で本システムを使ってみたいですか
設問 (C-10)		(C-8にて1, 2を回答した方) 使いたくないと感じた理由はなぜですか？
設問 (C-11)		本システムに関して改善点がありましたらお聞かせください

に関する紹介や、音楽メディアと集团的創発に関する社会学的研究に関する講演、パネルディスカッション等が行われており、シンポジウム参加者約50名も実験見学者として会場後方に着席し、その様子を見学した。また、ファンクラブ会員サイトの抽選に外れたファン50名も実験に参加しない見学者として本実験を見学した。実験後の分析のため、観客を前方・後方から5台のカメラを設置して撮影し、後の映像解析に利用できるようにしたほか、演者5人の腕に搭載したリストバンドから得られる加速度データおよび、ペンライトから送信される加速度データのログを全50本のペンライトに対して実験開始から終了まで収集した。また、システムと同じ周波数帯(2.4GHz帯)を利用し、電波干渉を起こす可能性がある全ての電子機器の電源を切ってもらうよう全てのライブ参加者に指示した。

# 音楽・メディア・インタラクション

2019年1月26日(土)  
12:30 開始 (12:00 受付)  
会場 | 埼玉大学総合研究棟 1F シアター教室

※事前申込み不要、参加費無料

司会 | 松原 良輔 (埼玉大学人文社会科学部研究科教授)  
挨拶 | 井口 壽乃 (埼玉大学 副学長「広報・社会連携担当」)

登壇 | 小川 博司 | 私たちは音楽化社会の真ただ中にいる  
ノリと社会変動

陳 怡禎 | 日常的文化実践と社会運動をつなぐ身体  
台湾ひまわり運動・香港雨傘運動女性参加者を事例に

小林 貴訓 | コンサート体験の質的向上に向けた支援システムの開発  
アイドル応援システムの実演 (小林 貴訓・大津 耕陽・袁 景竜)

討論司会 | 山崎 敬一 (埼玉大学人文社会科学部研究科教授)

小川 博司 OGAWA Hiroshi  
関西大学社会学部教授  
埼玉大学教養学部卒業。東京大学大学院社会学研究科修士課程修了。専門はメディア文化研究、音楽社会学。主な著作に『音楽する社会』『メディア時代の広告と音楽』(共著)など。

小林 貴訓 KOBAYASHI Yoshinori  
埼玉大学理工学研究科准教授  
東京大学情報理工学系研究科修士。博士。情報理工学。2012年より現職。専門は、コンピュータビジョン、知能ロボティクス、ヒューマンロボットインタラクション。

陳怡禎 CHEN I-tsun  
埼玉大学人文社会科学部研究科産学官連携研究員  
東京大学大学院情報学府客員研究員  
東京大学大学院社会学府客員研究員  
人間情報学コース博士課程修了。専門はファン文化、エンターテインメント研究。著書に『台湾シャニースファン研究』(西野社、2014)。

埼玉大学は 2019 年に創立 70 周年を迎えます。教養学部・人文社会科学部研究科は節目の年を記念して「埼玉大学創立70周年記念リベラルアーツ連続シンポジウム」を2019年1月から11月にかけて開催いたします。第1回は「音楽・メディア・インタラクション」と題し、音楽社会学の小川博司先生をゲストにお招きし、音楽とメディアの変容を通してみる現代社会像について議論していきます。

70<sup>th</sup>  
Saitama University  
つなげよう  
未来へ

アクセス |  
埼玉大学までは、JR 京浜東北線「北浦和駅」、JR 埼京線「南与野駅」、東武東上線「志木駅」それぞれよりバス乗車(詳細はHPをご参照ください)。 <http://www.saitama-u.ac.jp/access/accessmap/>  
総合研究棟は、構内建物図の21番 (HPをご参照ください)。 <http://www.saitama-u.ac.jp/access/campusmap.pdf>

共催 | 埼玉大学人文社会科学部研究科、日本学術振興会 先導的人文社会科学部研究推進事業「観客と共創する芸術・光・音・身体」の共催の社会的・芸術的・工学的研究  
後援 | 環境とインタラクション研究会  
お問い合わせ | 048-858-3044

図 3.20: 埼玉大学 70 周年シンポジウム「音楽・メディア・インタラクション」



## 実験用ハードウェアの改良



図 3.21: 本実験にあわせて製作したペンライト型デバイス



図 3.22: 本実験にあわせて製作した電飾衣装

また、プロの演者および実際のファンを対象とした実験を実施するにあたり、ペンライト型デバイスを50本量産し、50人態勢での実験が可能な体制を整備した(図

3.20). 電波干渉やパケットロスによる実験への影響を最小限とするために、10本毎に異なる周波数チャンネル・通信グループで通信を行うように設定を行い、通信用・データ収集用のアンテナに関しても5本を用意することで無線通信負荷による影響が最小限になるように考慮した。また、電飾衣装に関しては、現場でのプロの演者を対象とした実験であることを考慮した上で、実際の演技に与える影響を極力最小限にするように設計を実施した。最終的に、10本のLEDテープによる発光部を持つケーブルと、送受信機・モバイルバッテリーによる電源を持つベルトから構成されるシンプルな構造の電飾衣装5着を演者側ハードウェアとして作成した(図3.21)。発光機能を持つケーブルは、アイドルグループのコンセプトが「雪」であることに基づき、同グループの既存の衣装のデザインを参考としつつ、併せて使用した際に違和感のないデザインとして設計している。実製作においては、市販のケーブルをベースとして、内側にフルカラーLEDテープ(NeoPixel 5050 WS2812B)を縫い付けることによって電飾衣装としての機能を実装した。従来の実験における衣装と異なり、LED発光部を衣装の内側に設けることで、発光した際には間接照明のように布越しに柔らかく伝わり、発光していない際には通常の衣装と同様にLEDが目立たないようなデザインとし、システムの外観が評価に影響することのないように留意した。

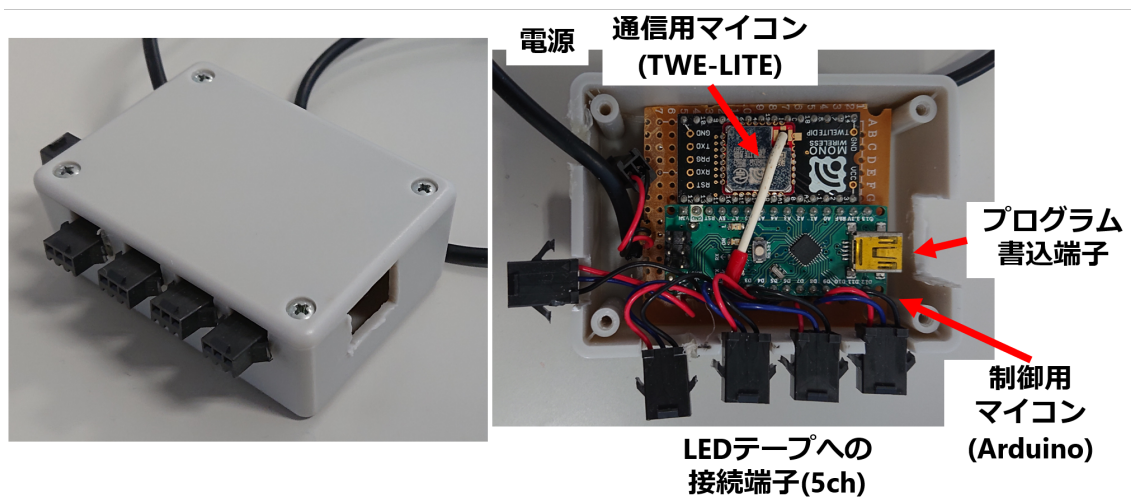


図 3.23: 衣装の腰部に取り付けられる送受信機およびフルカラー LED 制御回路

本実験で製作した衣装は、前回実験の衣装と異なり、RGB フルカラーLEDテープを採用しており、様々な色での発色が可能となっている。本実験では統制された評価を実施するため発光色は白色のみで動作させたが、将来的なシステムの展開や、様々な演出への対応が可能な実装としている。RGB フルカラーLEDテープの

制御を遠隔から行えるようにするために衣装のベルト部に装着する送受信機ハードウェアについても再設計を実施している。衣装の制御用の通信インタフェースとして TWE-LITE-DIP を使用する点は従来の衣装と同様であるが、RGB フルカラーテープの制御を実現するために Arduino Nano を追加で搭載し、TWE-LITE 上で受信した信号をシリアル通信によって Arduino へ入力することで、Arduino 上で、無線経由で受信した各種制御コマンドを起点とした、フルカラー LED の制御を行えるようにした。ハードウェア設計の観点から言えば、TWE-LITE-DIP のデジタル出力ピンを利用することで RGB フルカラー LED テープを制御することも可能である。しかし、TWE-LITE-DIP の内臓マイコン JN516X のファームウェアは独自の規格に基づくものであり、Arduino 等向けに開発された既存の組み込みシステム向けのライブラリ資産を流用できない点で非常に工数を要する。そのため、本評価実験用システムでは、TWE-LITE に加えて追加で Arduino を搭載することで、安定動作し、開発工数を削減できる Arduino 用の既存のライブラリを用いたフルカラー LED の制御を行えるようにした。

電飾衣装の操作用ソフトウェアは本実験用に特別に作成したものを利用し、観客のペンライトによる応援の衣装への提示方法として、「雪」をイメージした白色の LED の光が流れ落ちるエフェクトを採用した。電飾衣装における 10 列の LED テープの各列に 10 本のペンライトが対応し、その振りの大きさに応じて各 LED テープのラインを LED の光が流れ落ちていく実装とし、個人の振りが独立に演出として反映されるような仕様としている。

## 実験結果 (アンケートに基づく定量評価)

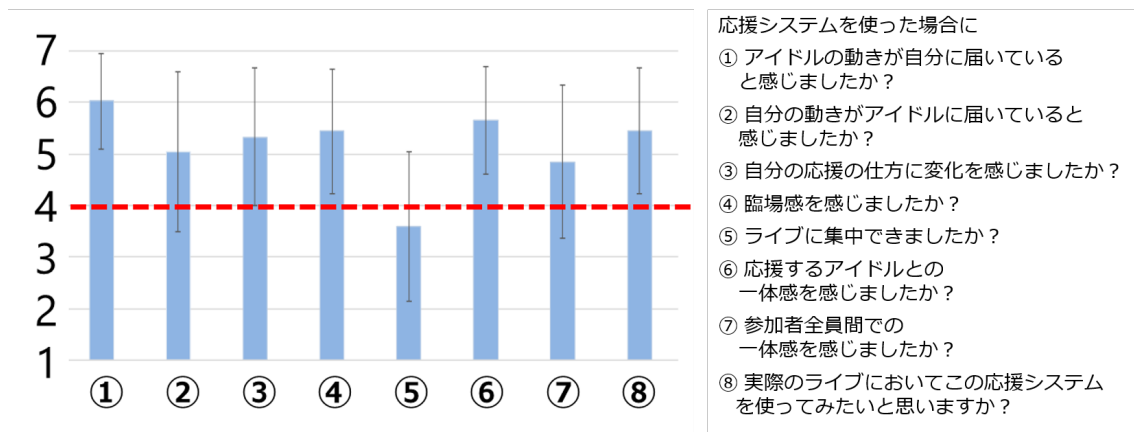


図 3.24: アンケートの平均スコア (N=46)

今回の実験では1回のみアンケートを実施し、「応援システムを使った場合に普段のペンライトと比較して」どう感じたかに関して感性評価を行っていただいた。アンケートの各設問における平均スコアを図3.24に示す。図3.24では、50人の被験者のアンケートのうち、有効回答が得られた46名(男性40名, 女性6名, 年齢: 16歳~57歳, 平均年齢30.4歳)のアンケート回答に対して集計を行っている。アンケートの結果をしてみると設問(C-5)「応援システムを使った場合にライブに集中できましたか」を除いて中央値の4を上回る, 高い平均スコアが見られた。集中度に対する評価が低く, その他の項目に対して評価が高いという傾向は, 前回のコントロールされた設定での実験での結果と一致するものである。以下では, 各設問に関して分散を含めて詳細を見ていく。

設問(C-1)「アイドルの動きが自分に届いていると感じましたか?」に関してはスコア分布が5~7の間に位置しており, すべての設問の中で最も平均スコアが高かった。またに関連して, (C-6)「応援するアイドルとの一体感を感じましたか?」の項目もスコア分布が4.5~6.5の間に位置しており, 設問(C-1)に続いて高評価であった。このことから, 提案システムにおける提示方法は, 演者の動きの認知を促進し, 応援するアイドルとのつながりを強化するという観点から有効に作用したことが伺える。

一方で, 参加者の応援の演者への反映に関する設問として, 設問(C-2)「自分の動きがアイドルに届いていると感じましたか?」についてみると, 平均スコア5

と全体的な傾向として「ややそう思う」と捉えられた一方で、スコア分布が3.5～6.5と広く、個人間で差があった。今回の演技においては、演者1人に対して10人の観客を割り当てて観客のアクションを衣装のLEDテープ1ライン分に反映するように設定したが、観客からその挙動を視認することは難しく、応援に応じて光っているということを知ることができたとしても、自身の振りが反映されているという実感は得づらかったのではないかと考えられる。現在のシステムの実装では、1人の演者の衣装に対して多数の観客を対応付けるほど、個人のアクティビティが反映される度合いが小さくなるような、情報提示に対するスケーラビリティの問題がある。個々人の行動による貢献が実際に伝わっていることが実感できる提示方法の設計が必要である点が本実験からも課題として浮き彫りになったといえる。設問「自分の応援の仕方に変化を感じましたか?」に関しては、スコア分布が4～6.5の間にあり、自身の行動変容への認知に関する度合いには個人差があるものの、ほとんどの被験者が自身の応援の仕方に変化を感じたことが明らかになっている。

設問では参加者全員での一体感に関して質問したが、こちらに関しては平均スコアが5を下回り、設問「ライブに集中できましたか」に次ぐ低い平均スコアであった。また、スコア分布が3.5～6.5と個人差が大きく、個人間で大きく差があったことが伺える。低いスコアとなった詳細な要因は分析しえない面があるが、実験設定で50人の被験者を10人ずつ5グループに分けたことが寄与した可能性は考えられる。

設問は、ライブに対する感じ方について質問した項目である。提案システムを使った場合には、設問のように臨場感を感じるという意見が多くみられた。逆に、設問のようにライブの集中度が下がるという意見も多く得られている。アイドルの衣装を光らせる、ペンライトの振動で演者の動きを感じるという体験は従来の音楽ライブを拡張するものであり、従来体感しえないインタラクションに臨場感を感じた観客がいた一方で、それらの体験に気を取られてしまいライブに集中できない人も一定数いたことが見受けられる。

設問「この応援システムを」使ってみたいと思うか」の設問では、平均スコア5.3、スコア分布4.2～6.5という結果となり概ねシステムが好意的に受け入れられたことがうかがえる。

## 実験結果 (アンケートの自由記述の分析)

本実験の終了後に実施したアンケートにおいては、自由記述欄を設け、観客の本実験ライブや実験システムに関する感想についていくつかの質問を行った。本アンケート調査にて実施した自由記述による設問を表3.8に示す(表3.8は表3.7の設問

C-9～C-11 を再掲したものである)。

表 3.8: アンケートの設問 (実験型特別ライブ・自由記述のもの)

番号	設問
設問 (C-9)	(表 3.7 の設問 C-8 にて 1, 2 を回答した方) 使いたくないと感じた理由はなぜですか?
設問 (C-10)	どのような場面で本システムを使ってみたいですか
設問 (C-11)	本システムに関して改善点がありましたらお聞かせください

システムを使ってみたい場面に関する設問 設問 (C-9) では、実際の音楽ライブの現場を経験しているファンに対する本システムに関する感想として、システムを使ってみたい場面について質問を行った。結果として、「盛り上がる曲」、「激しい曲」、「アンコール」、「ラスサビ」といった音楽ライブを代表する曲の盛り上がるシーンで利用してみたいという意見が数多く見受けられた。曲の盛り上がるシーンでは、演者の演技や観客のアクションのも大きくなる。曲の盛り上がるシーンでの活用は、双方向的なアクションの伝達支援による拡張の効果をより際立たせ、本システムで実現されるインタラクションの効果をより引き立てるものと考えられる。一方で「ソロパート」で使いたいという回答もあった。ある演者の演技が際立って演出されるソロパートにおいては、観客はその演者へより注目し、演者における演技の意味合いも変わってくる。そのような観点から、ソロパートはもとより演者・観客間のつながりを感じさせる演出であり、そのような場面において本システムを利用する有用性は高いと考えられる。

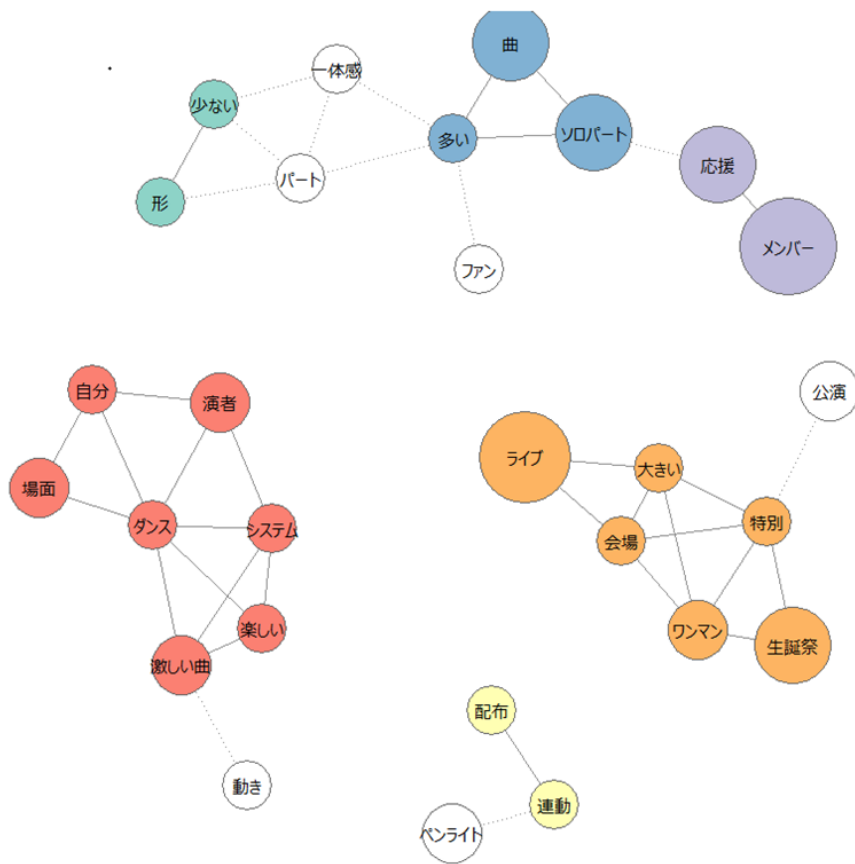


図 3.25: システムを使ってみたい場面に関する自由記述回答のワードクラウドとしての可視化

本システムを使いたくないと感じた理由 設問 (C-10) は、本システムを使いたくないと感じた参加者に対して聞いた質問である。まず得られた回答として「ペンライトを持つのが邪魔である」「ペンライトを持つことでクラブ (拍手による応援) がしづらくなってしまう」というペンライトを用いた応援スタイル自体への否定的な意見が見られた。本システムにおける参加者デバイスは、現行のアイドルライブの現場で汎用的に用いられるペンライト型のデバイスとして開発したが、音楽ライブの開催数やアーティストの数が年々増加し、応援スタイルが年々多様化していく中で、ペンライトを使った応援があくまでも応援の仕方の1つのスタイルでしかないことを示唆するものである。この課題に関してはデバイスをリストバンド型にする等のハードウェアの形態を変えていくことが1つの解決策となる可能性がある。また、「意味なくペンライトを振り回している人とかがいるとライブに集中できない」「ペンライトを振ることに集中しすぎて、本来のコールや応援ができない」という意見がみ

られた。この2つの感想はライブ中の集中度に関連する感想であり、今回および前回の実証実験における7段階アンケート評価における「ライブ中の集中」に関する設問項目の評価が低かった要因を示唆するものである。提案手法においては、ペンライトを振るという応援行動を「応援したい演者の衣装への反映」という形で動機付けているが、逆にそれがペンライトを振ることへの意味付けを曖昧化してしまい、特に他の参加者が感じるライブ体験の一体感を損ない、煩わしさを与えてしまう側面があることが推察される。また、ペンライトを振って応援する参加者自体に関しても、ペンライトを振ることによる応援に集中しすぎてしまうことは、本来のライブにおける視聴覚体験への没入を損なう側面がある。このため、観客の応援情報の収集・反映のさせ方に関しては、観客同士での一体的・協調的な応援を可能とするデザインとすること観客に認知的・身体的負荷の少ないデザインとすることの2点が、提案システムの改善すべき点であるといえる。

**本システムに関する改善点** 本アンケートにおいては、観客に対して本システムに関する不満点に加え、改善点に関しても質問を行った(設問(C-11))。システムに関する問題として「光るときと消えるときのレスポンスが遅かった」「どれくらい振れば光るのが分かりにくかった」といったシステムへの提示方法に関する感想が聞かれた。ペンライトおよび電飾衣装への発光提示は、光量の変化のみでの提示ではその変化を認知することが難しい点、また電飾衣装への応援の反映は、集団としての応援の貢献を伝達するデザインとしては有用であるが、個人としての応援の貢献がシステムの発光として反映される度合いは小さい。7段階アンケートにおいても、「自分の動きがアイドルに届いていると感じましたか?」に関する設問では、平均スコアは中央値の4を上回ったものの、スコアの分散は他質問項目と加えらつきが見られている。そのため、自身のペンライトの振りが演者に対して伝わった感じが実感として得られる提示デザインの方法に関してはさらなる検討が必要となる。また、要望点として、「押しメンバーの『メンバーカラー』に切り替え出来たらよかった」といった意見が見られた。本実験の実施段階においては、観客側からペンライト上のボタンを利用して応援対象を切り替えできる設定での実験実施を検討したが、前回の学内での実験と極力同一の設定とした比較考察が可能な設定での実験を行う観点から演者と観客の間の紐づけを実験実施者側で実施することとしている。システムの評価実験としては、統制した設定による実施が望ましいが、統制のない・自由さを持つことは音楽ライブの魅力の1つであり、音楽ライブ環境での評価実験は一種のジレンマを持つものであることが改めて明らかになった。そのほかの改善要望としては、「ペンライトシステムを小型化・軽量化してほしい」といったハードウェア面での改善に期待



する声が見られている。

## 実験結果 (Twitter 上で発信された本実験に関するツイートの分析)


また、本実験に関連して、実験終了後に演者および実験参加者を含むファンが本実験に関する感想を Twitter 上で多く投稿していたことから、本実験に関連したツイートを収集し、定性的な評価を実施した。ツイートの収集にはグループ名(「ねーじゅ」「Jewel Naige」等)や「埼玉大学」等のワードを使用したほか、演者自身の Twitter アカウントの投稿および、その投稿に対するリプライ(返信)ツイートのデータを活用した。



図 3.26: 演者の Twitter 上での投稿

図 3.26 は演者自身の Twitter 上での投稿をまとめたものである。本実験においては演者を対象としたアンケート・インタビューによる評価を行う機会を設けなかったが、関連ツイートからは演者グループのコンセプトである「雪」をイメージした衣装への評価が見られたほか、「(観客と)一緒にライブをしているみたいだった」「神秘的で楽しかった」「みんなで作るライブだった」「ひとつになれた」等、概ねシステムに対して好意的な感想が見られた。また、ほぼすべての演者が、今回のライブで使用した衣装を着用した画像・動画を用いた発信を行っていたことは、本システ

ムハードウェア (電飾衣装) のデザインが演者に好意的に受け入れられたことを示唆するものとなっている。

<p>埼玉大学の実験！！ ファンの持つペンライトとメンバーの衣装(ライト仕込み)の連動！！ ペンライトを振ると衣装が光り、メンバーが動くと、ペンライトが振動する！！</p>	<p>今日は埼玉大学でのねーじゅ特別ライブでした あのシステム、<u>実用化されたら楽しいんじゃないかな</u> 今日のクリスターさんほぼ知ってる顔で何か安心した 😊 というわけで絡んで頂いた皆様ありがとうございました 😊</p>	
<p>マーガレットやスノーボールで光ってるケープはかわいい感じに見えるのに、リブラストで光るケープはビジュアル系みたいなかっこよさに見えるの不思議だった！</p>		
<p>渡されたペンライト振ったら演者の衣装光るし、演者が手を振ったらペンライトが震えるしで 普段ペンラ振らないけど<u>めっちゃ新鮮で楽しかった</u>な～～。</p>		

埼玉大学のキラキラ衣装可愛かった🌟🌟

図 3.27: 実験参加者の Twitter 上での投稿

図 3.27 は実験参加者の Twitter 上での投稿を匿名化処理を行いまとめたものである。システムに関する投稿としては、本システムの仕組みを発信する内容や、本システムに関する好意的な意見（「新鮮だった」「面白かった」「振動を感じた」「一体感を感じた」「埼玉大学すごい」）が寄せられた。また、本システムの衣装を着用したメンバーのイラストを描くファンや、ライブ終了後に開催された撮影会で衣装を着た演者と撮影した写真を掲載する、今回の実験のために用意した名札の写真を掲載する等、本システムの存在を起点とした SNS 上での発信やインタラクションが行われていた。

演者の Twitter アカウントにおける投稿に対するリプライ（返信）に関しても同様に分析を行った。結果として、図 3.27 に示すように多くのツイートは「システムに対する評価」「ライブの感想」「実用化に対する期待」「実験実施者・開発者への意見」分類することができた。システムに対する評価に関するツイートとしては、「見せ場でたくさん光るように頑張った」「メンバーの存在を感じた」「推しの振動を感じた」「物理的にメンバーの元気が伝わった」等本システムにおける情報伝達に基づく行動変容や視聴覚体験拡張の効果を裏付ける言及が見られた。ライブ自体

の感想としても「特別なライブだった」「ケープが素敵だった」等、普段からライブに参加しているファンの視点から見た際に、本ライブが特別な体験価値を有するものであったと感じるファンがいたことが推察される。また、「実用化されてライブに導入されたらよさそう」「レベルアップに期待」「実現するといいね」等、本システムの実用化に関する期待や、「実験にネージュを選んでくれてありがとう」「実装お願いします」等、実験実施者へのメッセージ等も見られた。

また、Twitter上から得られた特有の意見として、本ライブに参加できなかった人の「行けずに惜しいことをした」「見てみたかった」といった意見や、「動画上で光って見えた」といった感想が見られた。このような意見の存在は、本システムで提案するライブ体験の拡張は、既存のコンテンツと比較してもエンターテイメントとしての斬新さや体験価値を有するものであり、観客のコンテンツへの参加を促進する効果を持つことを示すものであるといえる。

一般的に、SNS上での情報発信は極めて公共性が高いことから、好意的でない意見を発信することは時に自身の立場を脅かしてしまう側面がある。その観点から言えば、ツイートに基づく感想は、閉鎖的なアンケート調査と比較してバイアスを持つものである。しかし、演者・観客双方のツイートから具体性を持つ好意的な意見が見られたことは、本システムが演者・観客に好意的に受け入れられたことを示す一つの証左であると言える。

## シンポジウム参加者の感想

本実験においては、ペンライト型デバイスを持って実験に参加したファンの他に、実験と共催された埼玉大学創立70周年記念シンポジウム「音楽・メディア・インタラクティブ」の参加者50名が後方の観客席より実験を見学した。このシンポジウムの参加者は直接の実験参加者ではないが、その多くが本研究課題をはじめとする「集团的創発」に関する社会学的課題や音楽メディアに関して興味を持つ参加者であり、見学者を対象とした自由記述アンケートからは本システムに関連した多面的な言及が多くみられた。そのため、本節では、シンポジウム参加者の参加者の感想について取り上げる。

以下は、シンポジウム参加者の感想から本研究および本提案システムに関連した言及を抜粋したものである。

- アイドルやエンターテイメントが大学で研究されていることに驚いた。
- アイドルに興味は無いが、音楽には興味があったので、シンポジウムに来たが、講演、システム実演とも、とても面白かった。浦和レッズのチャントも

同じ仕組みで起きていると思った。

- コンサートの盛り上げ方，システムの実演がとても興味深い．ライブ，コンサートの価値の革新が始まる予感がする．生きていく上での，自分自身も楽しむことの大切さを感じた．
- ライブに行ったことがないので，一体感とかノリとかはよく分かりませんが，新しいライブそのもののアピールとしては良いと思いました．
- 今回の光ったり，振動したりするシステムは一体感が出て，参加型の音楽という点で非常に良いと思った．
- アイドルコンサート，ペンライトを振った時のフィードバックとして，光以外，例えば音でも良いかと思うのですが，検討されたことはありますか？また，演者と観客がシンクロしないと動作しないなどの仕組みがあると，没入感が増すのではないかと感じました．
- 観客に振動を与えることは臨場感を増大させるのに有効であると感じた．曲のサビの前で曲が止まって，観客のペンライトの振りが視覚化され，一定のノルマを達成するとサビに突入するような演出も面白そうだった．
- ファンは自分の押しメンが目立つようにしかペンライトを振らないわけではないと思うので，実際のライブでは，ファンの振りがアイドルの衣装に反映される様子が分かり難いのではないかと感じた．一方で，近くの人とペンライトを接触させると強く発光するとか，ファンとファンが相互作用を及ぼすシステムができたら楽しいと思いました．
- 感情の市場化がさらに進んでいく方向は変わらないのでしょうか？観客の活動計測からその日のライブの1位のファンを見つけるのにも使えそう．そうすると，共創が競争になりそうだが，そういうことにあまりこだわらない日本のアイドルライブには取り入れやすそうだと感じた．
- 今回は50本のペンライトですが，最終的にはどこまで目指しているのでしょうか．
- コンサート支援では，今回のようなペンライトを「持つ人」と「持たない人」が出てきます．「持たない人」の疎外感などへの救済措置は無いですか？同様に，今回は好きなメンバーと繋がれませんでした，これはファンには不満だと思う．
- データ流出などを含め，誤動作時の災害が心配です．
- 実験ライブの試みはとても興味深かったが，学問的に何を実験，実証したいかが今一つピンと来なかった．
- ネットでも他者とつながる時代にリアルに顔を合わせて繋がるコンサートや社会運動が求められているのはなぜか気になった．
- 一体感を増強することが，洗脳や扇動に使われるとの議論がありましたが，邪

悪な人が悪用する前に，善良な先生が研究をすすめて，結果を公表することが，結果として悪用を避けることにつながるのではないかと感じました。

音楽ライブにおける体験価値を向上する本システムの改善案のアイデアとして，光以外のフィードバック手法（音声等）の利用，演者と観客の同期を利用した演出，観客のペンライトの振りや応援の視覚化（曲を止める等の演出によってアクションをより際立たせる），近くの参加者とのインタラクションを誘発する枠組み，活動計測によるファンのランク付け等に関する提案があった。また，本システムを使うことができない人への疎外感への懸念，データ流出への懸念の声もアンケートの中では見られた。

## 3.6 実証実験を受けての議論

本学学生を対象とした評価実験，実際の演者およびファンを対象とした評価実験の2つの音楽ライブ形式での実験における結果をふまえ，本節では提案手法の有効性・課題，得られた知見および将来展望について議論する。

### 3.6.1 演者から観客への演技情報の伝達の有用性

実験から，演者の演技に同期した振動が演者と観客の間の一体感を強めることが示された。第1節で述べたように，振動を用いて遠隔地へ感覚を伝達するデバイスが提案されている [19, 82]。そして，振動による疑似的な触覚が，遠隔地にいる相手の存在感をより感じさせるとする研究結果も報告されている。Wang ら [90] は，音声通話に振動を拡張し，振動を導入した場合に通話相手との繋がりがより深まることを示した。桑村ら [42] は，電話の音声振動として伝達することで相手の存在を身近に体感できる抱き枕型通信メディアとして「ハグビー」を開発した。音声通話と同様に，ビデオ会議においても遠隔触覚が相手の存在感をより感じさせることが示されている [112, 110]。これらの研究結果は，振動による遠隔触覚の導入が，音声や視覚的映像による視聴覚体験を拡張し，相手との繋がりをより強く感じさせることを示唆している。そして，提案手法でも同様に，演者の動きに同期した振動という新たなモダリティに基づいて旧来のライブ体験を拡張し，演者・観客間の繋がりの強化を実現した。ライブの応援グッズに振動を取り入れた例として，ライブ初心者への応援のタイミングの教示を目的としたものがあるが [98]，ライブの臨場感や演者との一体感の向上を目的とした例はない。そのため本稿の提案は，遠隔触覚

の分野における知見を音楽ライブに取り入れ、臨場感や一体感の向上を実現したもののとなっている。

### 3.6.2 観客から演者への応援伝達・可視化

実験から、観客のペンライトを振るという応援行動を衣装へ提示することが観客間の一体感を高めることを示した。2節で触れたように、観客の行動をアイドルの衣装や舞台に反映させる仕組みが提案されている [115, 103, 117]。他分野においても、卓球のラケットを振ることで卓球台に特殊効果を投影する「Ping Pong Plus」 [38] 等、身体的な操作に基づいてエンターテインメントの楽しみ方を拡張する試みが行われている。これらの身体的な動作を利用した演出の仕組みはコンテンツの受容者に対する参加を強く促し、娯楽体験の価値を向上させる可能性を持っている。しかし、聴衆の音楽ライブへの参加を支援する既存のシステムの多くはコンセプトの提案に留まっており有効性の検証が行われていない。本稿では、演者と観客の間での身体動作の双方向的な伝達が両者の間の繋がりを強め、さらにその様子をお互いに共有し合うことで観客同士の一体感が高まることを実験から検証した。演者が、観客の持つデバイスを見ることで自身の演技が伝達されていることがわかり、より観客に伝わるように演技をする。観客の応援が演者の衣装に提示されることで、自身の応援が伝達されていることがわかり、より応援に参加していく。本研究のように、演者・観客それぞれの行動情報を相互に伝達し合うことで両者の繋がりを強化することを試み、ライブ環境下での実験からその有効性を検証した例は今までにない。情報の発信者・受容者としての垣根を取り払い、一体感や参加性を高めることを支援する本提案は、音楽ライブに限らず、参加型コンテンツの質を高めていく上でも応用できる可能性がある。

### 3.6.3 実験設定の妥当性および問題

本システムの実証実験においては、大学のアイドルサークルの演者と学生、プロの演者とそのファンという2種類の設定で、本システムを組み込んだ音楽ライブを実際に行うことで評価を行った。このような実際の音楽ライブを通じた評価実験は、その企画・観客募集・準備・実施のすべての段階で非常に多くの労力を要すものである一方で、システムがもたらすインタラクションが実際に行われる環境における評価を実施できる。一方で、実験実施の段階においては、同じ曲目を使った比較実験や、観客への応援行動の制限等、被験者に対して統制を行う設定での実験が困難で

あるという問題があった。これは、実際のライブ環境においてこのような設定での演目が実施されることがないためである。大学のアイドルサークルと本学学生を対象とした実験においては、演者および被験者のご協力のもと、同じ曲目での比較実験を実施したが、プロの演者・ファンを対象とした実験においては極力現実のライブと同様の設定となるように行っている。一方で、被験者アンケートにおいて、応援する演者と観客を実験実施者側で紐づけた点に関して「他の演者を応援してみたかった」、ペンライトの光らせ方を実験実施者側で統制した点に関して「ペンライトの色が変えられるとよい」等といった実験設定における統制に起因したネガティブな感想が見られた。このため、音楽ライブ環境を対象とした実験では、その自由さを尊重しながら、評価のための統制を必要とするというジレンマを抱えていることがわかった。

### 3.6.4 将来展望と課題

本システムにおいて観客に与える振動は、ライブにおける臨場感・一体感を高める上で有効的に作用した。遠隔触覚の分野では、高精度なモータを使用して異なる振動を与えることで疑似触覚を実現する試みが進んでいる。ペンライトにおける振動提示の高度化は、演者の演技の多様な形での配信を実現することからライブ体験における一体感や臨場感をさらに向上させる要素となると考えられる。

システムをライブ会場で使用する上では、多数のペンライトでの通信の実現が課題となる。実験では、3人分の演者の加速度情報を24人分のペンライトへ配信し、24人分のペンライトから得た加速度情報を集約して3人分の衣装に反映させた。インタビューでは「演者の動きとの同期を振動から体感できた」、「演者を応援していることが光からわかる」等の回答があったことから実験時の通信の品質も良好であったと推察される。しかし、実際のライブ会場は小規模なものであっても100人規模であり、多人数環境下で利用可能な通信方式の検討が必要である。またシステムではペンライトの振りの大きさをを用いて観客の応援の度合いを判定しているが、観客同士の協調行動を支援する上では振りの同期に基づく提示も有効であると考えられる。しかし、多数のペンライトの振りの同期性を判定することは現状では困難であり、手法の検討が必要である。

### 3.6.5 他ドメインへの知見の適用の可能性・課題

本研究の最大の貢献は、数 100、数 1000 人で集うような超大規模集団交流を対象としてその一体感を高める一方法を提案できたことにある。交流ツールとしての個々人の持つユーザデバイス(応援グッズ)に焦点を当て、それに対してフィードバックを行うことで、集団として共に視聴し味わう体験を拡張する方法を提案できた。また、体験を促進する仕組みとして、集団に属する個々人の集団への貢献を明示的に可視化することで、個人が体験に対して行動を促進する仕組みを実装することができた。

これらの知見は、音楽ライブに限らず、舞台、スポーツイベント、政治集会等の他のエンタテインメントへの応用が期待できるほか、参加型授業やブレインストーミング等の創発性が求められる集団交流の支援に活用できる可能性を持っている。一方で、このような個人の集団への参加を促進させ集団的な沸騰を支援する仕組みは、群衆心理の操作や煽動、特定の思想の押し付け等に利用される懸念を持つものである。このため、本研究における延長にある長期的な課題として、集団を創発させる・抑制させる方法を工学的に支援するありかたに関して体系化していくことが挙げられる。

本論文では次の第 4 章において、本研究で提案するシステムを他分野および他のタイプのインタラクションの創発化支援へ活かす取り組みとして、落語の日本的伝統芸能における技術支援システム、アイデア出しの会議や教育分野等の他分野への応用システムの開発に取り組んだ事例を報告する。

### 3.6.6 映像解析から得られた観客の振る舞いに関する社会学的分析

また、システムに関する評価ではないが、実際の演者・観客を対象とした音楽ライブ実験を通じて、音楽ライブに参加するファン自体の行動特性に関して映像から社会学的分析を行っている。そこで得られた観客の特性に関する知見について述べる。





図 3.28: 演者の動きの「振りコピ」の様子

演者の動きの模倣に関する分析 音楽ライブ実験においては、演者の動きに合わせて観客がペンライトの振り方・身体動作の仕方を変える所謂「振り真似」の表現が見られた。その際の様子を実験中のビデオカメラ映像から切り出した2つのシーンを図3.28に示す。研究背景において、演者と観客の間の身体動作の模倣は「振り真似」とよばれ、対象となる相手と身体動作を同期させることで相手との心理的距離を減らし、つながりや親密さを向上させる効果をもたらしていることに触れた。実際のライブ場面についてみると、演者・観客が向き合って演技を行う場面において、観客が「振りコピ」をする際には、演者のアクションの方向と逆の方向にアクションを行っていることが図3.28からわかる。このような場面において、会場の一体感を形成するという側面から言えば、観客は演者と同じ方向を持ったアクションを行うことで相手と統一感のある動きを実現できるが、実際の観客は演者と違う方向、つまり演者と同一の動きを行っていることがわかる。これは、音楽ライブに参加する観客が、「振りコピ」を単なる演者の行動の真似ととらえているのではなく、意識的に同じことをすることで成立するものであると認識していることを示している。そのため、演者・観客間のつながりを強化するにあたっては、身体的な行動の同一性が重要視されていることを改めて示しているものといえる。

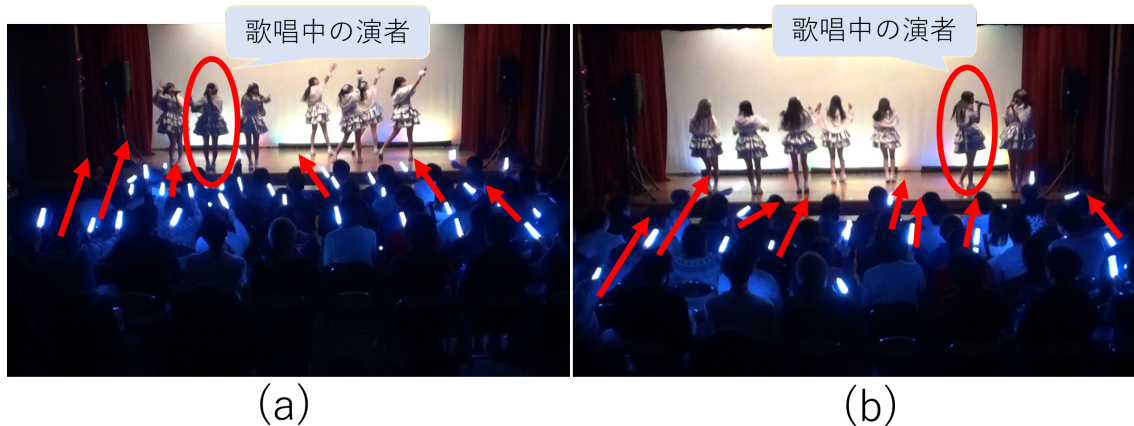


図 3.29: 歌唱中の演者の位置に応じたペンライトを振る方向の変化

**演者と観客の空間的位置の持つ影響・ソロパートの場面の分析** 図 3.29 も実験中のビデオカメラ映像から切り出したキャプチャであり、演者がソロパートで歌唱するシーンを示したものである。ソロパートは、参加者アンケートにおいても「本システムを使ってみたい場面」として回答されていた場面である。ソロパートでは、1人の演者に対して観客が協力して応援の様子が映像からみられる。ソロパートにおけるこのような観客の応援行動は、単に自分の好きな（自分に割り当てられた）演者を応援するだけではなく、他のファンと共同で応援行動を組み立てていることを示している。図 3.29 中で観客は、演者の舞台上の位置に応じてペンライトを振る方向を変えている。これは、演者の動きと観客の応援行動の間にはお互いの空間的位置が影響を果たしていることを示唆するものである。観客は演者の立ち位置・自身の配置に応じてペンライトの振り方・振る舞いを変容する側面がある。このことから、演者と観客、応援グッズの間の物理的距離や方向の関係性が演者と観客の間のコミュニケーションの成立に影響している可能性は高く、演者・観客の位置関係を利用したインタラクション支援の方法が、観客の参加を促進する手段として利用できる可能性がある。また、ソロパートにおいては、多くの場合演者は歌うのみで身体的行動を伴わないため、観客へは身体行動の伝達ではなく、歌声情報の伝達が、演者とのつながりを見出す上で特に有効に作用する可能性がある。

**アンコールの場面に関する分析** 本実験では、実際のアイドルライブにおいてしばしば取り入れられるアンコールによる演出を取り入れた。アンコールを伴う演出は、演者が演技を終えた後にいったん舞台裏に退場し、その後のファンの呼びかけに応じて再度登場して最後の演技を行うものである。アンコール

の場面は、アイドルライブにおいてはMCにおけるコール&レスポンスとあわせて、音楽ライブ内において観客が演者と直接的にインタラクションを行う象徴的なシーンである。本実験においては、演者が舞台裏に引き揚げた後のアンコールの場面で、演技中と同様に、演者側の腕を振りにあわせて観客に対して振動フィードバックを実施した。実験においては演者側から腕を振り、システムによる参加者デバイスへの振動提示機能を用いて観客とのインタラクションを取ろうとする様子が見られた。また、「私たちの振動、伝わっていますか？」と舞台裏からマイクで呼びかけ、観客がペンライトを振って対応するという、本システムを利用した場合ならではのコール&レスポンスが見られた。演者が舞台裏にいる状況で、演者の身体的な行動や歌声の情報が参加者デバイスに伝わることは、演者の存在感をさりげなく伝達するもので、再び演者を見ることができるというアンコールの場面での期待感・段階的な予兆演出を増強するものである。アンコールの予兆演出として演者の身体的行動情報のみが観客に伝わり、それに対して観客がペンライトを振って対応する（そして、ペンライトの振りの情報が衣装の発光として演者に伝わる）というこのフィードバックループは、アンコールのような互いが見えない場面において強力なインタラクション支援ツールとして作用する可能性を秘めている。

## 3.7 実験結果を受けてのシステムの拡張

### 3.7.1 観衆の同期的行動の獲得

実験の結果から、観客がペンライトを振るのに注意を向けすぎてしまい、ライブに対する集中力が低下してしまう（振ることに集中しすぎてしまう）という点がシステムの課題として明らかになった。また、システムでは演者と観客の間のつながりの支援に重きを置いたデザインとなっており、一部の実験では観客同士の一体感の向上にも寄与するという結果が得られているが、これらの結果は演者と交流するという目的意識の共有を促進するという副次的効果に基づくものである。このことから、観客同士の横のつながりを支援しつつ、ライブにおける振ることに集中しすぎてしまうという問題を解決する、新しい応援活動の反映のさせ方を検討した。

本稿では、観客の個人的な行動を促進させるだけでなく、その中から観客同士のつながりを強く見いだせる枠組みとして、観客同士の振りの総量でなく、観客同士の振りの同調をキーとした演出を解決策の1つとして提案する。先行研究に置いて

も、動きの同調に基づくインタラクティブな交流が互いの親密さを増強するという結果が得られているように、観客同士の同期的な行動に基づく演出は、観客同士の目的意識の共有を加速させるだけでなく、観客同士の一体感や親密さを増強するものであると考えられる。

### 時系列な加速度値の変化の比較に基づく振り行動の同調判定

このような背景から、2つのペンライトの振り方の類似度を判定する枠組みに関して実装を行った。式(3.1)は、実装したペンライトの同調度  $S_t$  の判定式である。2本のペンライト  $A, B$  の時刻  $t$  における加速度をそれぞれ  $a_t, b_t$  (単位:g) としたとき、同調度  $S_t$  は式(3.1)のように定義される。

$$S_t = \frac{(\vec{a}_t \vec{b}_t) \times \min(|\vec{a}_t| |\vec{b}_t|, C)}{(|\vec{a}_t| - |\vec{b}_t|) + 1} \quad (3.1)$$

2本のペンライトの加速度の単位ベクトルを計算し、その内積を計算することでペンライトの振り方向の一致度を獲得する。また、ペンライトが振られていない場合を同調として判定しないようにするため、加速度ベクトルのノルムの乗算を掛け合わせた判定を行う処理を実装した。 $C$  は定数であり、同調度における上限値をパラメータとして設定する(実験段階での実装では2本のペンライトのノルム積の上限値に近い値として  $C = 5$  を採用した)。本式で得られた時刻  $t$  において獲得した同調度  $S_t$  に対して、過去の値  $S_{t-1}$  の値を元に値の急激なぶれを補正する処理を加えて、制御用PC上のソフトウェア上に実装した。

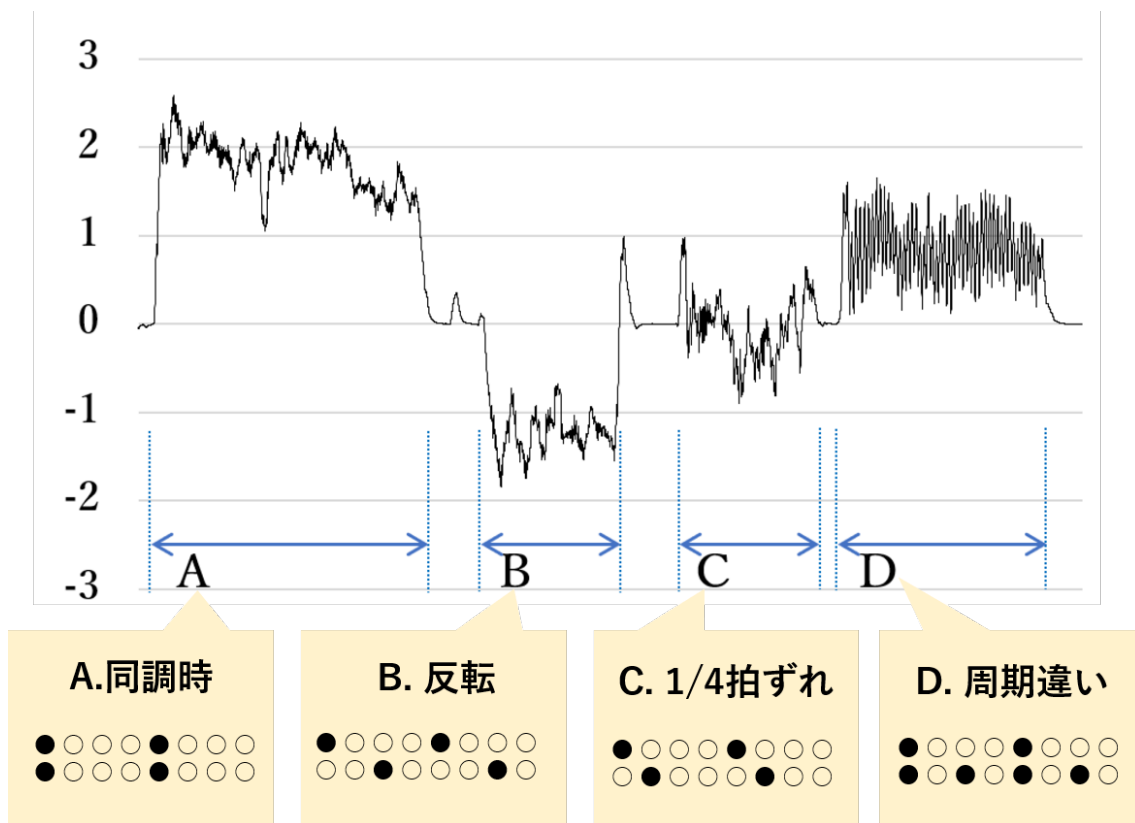


図 3.30: 2つのペンライトの動きと同調度の推移

図 3.30 は、4種類の振り方でペンライトを振った際と同調度  $S_t$  の値の推移を示したものである。ペンライトの振り方を同調させた場合には正の値、反転させた場合には負の値が観測されている。また、同じ周期で振られているがタイミングがずれている場合には、弱い正と負の値が交互に観測され、その平均値が 0 付近に収束する。振りの周期が異なる場合においては、動作の中で最も加速作用が起こる腕を伸ばす開始動作のタイミングが同一であることから値は正方向に振れるが、その後の振り方の違いから同調時のような値の上昇は抑えられ、弱い正の値として表現される。このように、提案式を用いることで2本のペンライトの振り方の違いを認識することができる。

本手法の利点として、ペンライトの振り周期が同一である場合に、その振り方のずれ（位相差）を把握することができる点が挙げられる。一方で、リアルタイムで同調度の値を更新するためには、ペンライトの振りに基づく加速度変化情報を高頻度で獲得する必要があるため、通信ノード数が多い環境、アンテナ・子機間に遮蔽がある環境、逆に反射が発生しない屋外等の広大空間においては精度の高い動作が期待

できない点が課題となる。ペンライトの振りによる加速度の変動の概略をシステム上で把握するために必要なサンプリングレートに関して詳細な調査は実施できていないが、秒間8パケット程度のサンプリングレートで加速度情報を獲得できれば、本評価式によるペンライトの同調評価は十分に作用することを確認している。

2020年1月にさいたまスーパーアリーナで行われた展示商談会「彩の国ビジネスアリーナ」にて本手法を用いたデモンストレーションを試行したところ、受信パケット数が研究室環境と比較して10分の1程度(秒間1パケット程度)に落ち込んだことから、本手法は正確に動作しなかった。これは、他の2.4GHz帯域を通信に利用する展示機器との電波干渉が発生したこと、ホール内という壁がなく反射の少ない広大空間を環境として動作させたことが要因として挙げられる。このことから、リアルタイムでペンライトから伝送されるパケットデータを利用した同調度計算は、実環境での動作に課題を残すものである。

#### ペンライト内部における振り状態の推定結果を用いた同調判定

上記においてペンライトの同調を獲得するための基礎的な枠組みに関して検討を行ったが、リアルタイム・高レートでペンライトから伝送されるパケットデータに依存して演算を行う手法であったため、通信状況が悪い環境においては正常に動作しないという問題があった。

そのため、あらかじめペンライト内部の計算資源を用いることで大まかなペンライトの振り方をペンライトの内部で推定し、得られた推定結果のみを粗い送信間隔で制御用PCへと送信することで、制御用PC上での計算負荷を削減しつつ、低レートでの情報送信を用いることで通信状況が悪い環境に耐えうる同調判定手法を新たに実装した。

ペンライト内部のTWE-LITE-DIPマイコンのファームウェア上に、加速度センサから獲得した加速度情報を蓄積し、得られた加速度データに基づいて高速フーリエ変換を行う処理を実装し、加速度センサから得られるx,y,zの各軸における振りの周波数の主成分およびその大まかな強度を算出できるようにした。TWE-LITEは32bitマイコンであり組み込み用途のMCUとしては高い計算能力を持つが、浮動小数点計算を伴う実装は非常に低速であり、データの送受信等の他プロセスの実行を停止してしまうことがあったため、近似値等を利用して浮動小数点による演算を減らした実装とした。送信パケットの末尾に演算の結果得られたx,y,zの各軸における振りのピーク周波数および強度を追記して制御用PCに送信することで、制御用PC上から各ペンライトの振りの方向・強度・速度を推定できるようにした。

現在の実装では、制御用 PC 上でのペンライトの振りの一致度の判定には、2つのペンライトから得られる上記の6つのパラメータの差の合計値を採用している。前節における同調度の評価式と異なり、本手法ではペンライトの周期および振りの強さの一致を判定できるが、ペンライト同士の振りの位相差を獲得することができないことが課題となる。これに関してはパケット送信タイミングにおけるペンライトの加速度情報を補完的に利用することで、改善できると考えられる。

### ペンライトの同調を利用したアプリケーションの検討

上記の同調判定手法に関連して、ペンライトの同調を利用したアプリケーション提案を行った。図3.31のように4人の観客が異なるペンライトの振り方をする際には異なる色でペンライトおよび電飾衣装が発光し、4人の観客のペンライトの振り方がそろった場合にはペンライトおよび電飾衣装の発色が揃い光量が増すというアプリケーション実装を行い、デモ動画を作成した。今後の展開として、有効性の評価を実施していきたいと考えている。



図 3.31: 観客の振りの同調の可視化

### 3.7.2 簡易的な開発を可能とするライブラリ設計

本提案システムにおけるペンライト型デバイスは、入力装置として加速度センサ、出力装置としてフルカラーLED・赤外線LED・振動モータを持ち、それぞれを無線制御できる観点から音楽ライブにおける様々な演出を可能とするものである。また、無線での入出力が可能な小型のハードウェアとして、音楽ライブに限

らず物理的な物体を用いた様々なインタラクション支援の枠組みに組み込み可能であることが期待される。このような背景を踏まえ、本ハードウェアと同様の構造を持つハードウェアに対する情報獲得や制御を、ハードウェア構造に詳しくないユーザが簡単に制御用プログラムを開発できるライブラリとして「EMOLib(エモライブラリ)」を開発した。EMOLibはC/C++言語で記述されたライブラリであり、MonoStickおよび遠隔で設置されたTWE-LITE-DIPからの情報獲得・制御を高速で実現するソフトウェアを短い行数で設計できる。EMOLibは2020年12月現在[http://yankee.cv.ics.saitama-u.ac.jp:50080/otsu/EMOLight\\_Library](http://yankee.cv.ics.saitama-u.ac.jp:50080/otsu/EMOLight_Library)にて研究室内部限定で公開している。

以下のListing3.1は、EMOLibを用いたペンライト制御アプリケーションの記述例である。

Listing 3.1: デバイスID1のペンライトに白色を送信するソースコードの記述例

```
1 //Send White Color.
2 #include "emo.h"
3
4 int main(void) {
5     DipPen pen("\\\\.\\COM23", 115200);
6     EmoColor white(255, 255, 255);
7     int send_to = 1; //送信先ID
8     pen.sendColor(send_to, white); //色を送信
9     return 0;
10 }
```

ペンライト型デバイス、電飾衣装コントローラ、加速度無線タグ(TWE-LITE2525)に対応したクラスとしてDipPen/DipCos/DipAccがあり、TWE-LITE-DIPおよびTWE-LITE2525からの無線でのデータ獲得・制御を簡易的に実現する汎用的なクラスも用意されている。

### 3.7.3 新たな通信システムの検討

本提案システムは、50人の被験者を対象として実証実験を実施した。本システムで通信システムとして採用しているTWE-LITEでは11~26chの各チャンネルに対して、子機のIDを0x00~0xEFの239種類を割り当てることができるため、理論上は約3800台の子機を識別して扱うことができる(TWE-LITEの上部レイヤーで



ある IEEE802.15.4 では、65536 台のノードを理論上扱うことが可能) が、数千台の子機と高頻度・双方向通信を同時に行い、情報獲得・伝送するために現行の枠組みを利用することは現実的ではなく、大規模会場での本システムの実用化に向けてはスケーラビリティの問題を考慮した通信形態を検討する必要がある。また、観客のアクションの反映に現在は衣装を用いているが、衣装に同時に反映できる観客のアクションの数にもスケーラビリティの問題がある。このため、通信基盤と情報反映のさせ方の両面からスケーラビリティの問題に取り組む必要がある。

本研究ではこのスケーラビリティに関する問題を解決するために、通信会社との産学連携による共同研究から、ペンライトに対して新たな通信システムを搭載することで数 100～数 1000 人規模の観客を対象とした場合においても安定動作するシステムの実現を目指した。本プロジェクトは、新型コロナウイルス (COVID-19) の影響により実証実験実施に関する目途が立っていないことから、2021 年 3 月現在では実験用ハードウェア設計を終えた段階で進行が停止している状態にある。このため、本節における内容は、未実現の内容を多く含むが、超人数が双方向で同時接続し交流するシステムの構築・実現に際して寄与する有用な知見となることを願い、本論文で紹介したいと考えている。

#### ルーティング不要なメッシュネットワークによる通信方式の活用

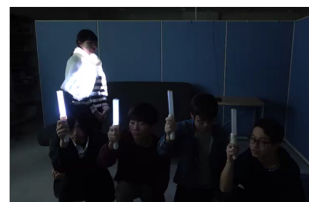
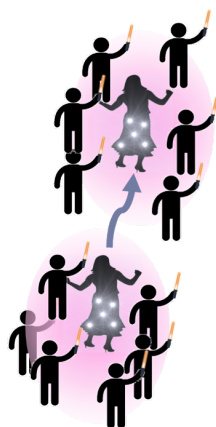
TWE-LITE で行われる通信は、1 台の親機と多数の子機の間でのスター型の通信方式であり、全ての子機の情報親機で集約する必要があり、親機側の処理負荷が非常に大きくなる。また、TWE-LITE は 2.4GHz 帯域の通信規格であり、ワイヤレスマイクや観客の持つ携帯電話・モバイルルータ等の電波干渉が発生することが現場での実用化にあたっての技術的課題であった。そのため、通信会社との共同研究の一環として、920MHz サブギガ帯域を採用するメッシュネットワークを持つ通信フレームワーク [78] を利用したペンライトシステムの設計を実施した。本通信フレームワークは、同時送信フラッディングと呼ばれる複数ノードからのデータ統一タイミングを同期させることで電波干渉を軽減するデータ搬送方式 [29] を採用するものであり、メッシュネットワークでありながらルーティングの複雑さを軽減した効率的なデータ通信を可能とするものである。

## 位置関係の変化を利用した演出

上記の通信システムの特徴として、各ノード間の電波強度の変化から、ノード間の物理的な位置関係を計算できることがある。TWE-LITEにおいてもLQIと呼ばれる電波通信品質にまつわる指標を参照することによって親機と子機間の距離を算出することができるが、周辺の電波状況による影響を非常に受けやすく、また各ノード間の距離を求めることが不可能であった。ノード間の物理的な位置関係がわかれば、演者に近いノードに対してのみシステムで扱う対象とすることで、システムの抱えるスケーラビリティにまつわる問題を解消する演出が実現できるほか、演者に近い距離にいる観客から光・振動が伝搬していく等、参加者の位置関係を考慮した特別な演出を実現することができる。大規模な音楽ライブにおいては、演者が会場を移動していく演出が多く取り入れられており、観客の近くに生の演者が近づいてくるともライブにおける醍醐味の1つとされている。そのため、演者と観客の位置関係を利用した演出は、単にスケーラビリティの問題を解消するだけでなく、ライブ体験の価値の向上や観客と演者の間のインタラクションやつながりを高める手段として利用できるものである。



(a)



(b)

図 3.32: (a) 実際のコンサートにおける演者の移動を伴う演出 (b) 参加者の位置関係の変化を利用した演出のイメージ

### 3.7.4 新ペンライトシステムのハードウェア設計案

研究の中では、前述の新たな通信方式を採用し、位置関係の変化を利用した演出が可能な新たなペンライトデバイスに関して設計を実施した。2021年3月時点においては、本デバイスの量産のめどは立っていないが、本研究に関連する参考情報として本論文にて記載する。

新たなペンライトデバイスは、通信機として従来の TWE-LITE(2.4GHz 帯)に加えて、920MHz サブギガ帯で通信を行う専用の無線通信システムの通信マイコンを搭載したものである。本ペンライトシステムでは、従来の実験で得られた課題を踏まえいくつかの設計改良を実施している。以下に新ペンライトシステムのハードウェア面としての改良項目についてまとめる。

- 通信機の増設 (920MHz サブギガ帯・専用無線通信マイコン)
- 振動モータの変更 (アルプス電子・ハプティックリアクタ)
- 内蔵赤外線 LED の発光強度の向上
- 搭載加速度センサを 9 軸 IMU(加速度・ジャイロ・地磁気)へ変更

図 3.33 は設計中の新型ペンライトシステムのハードウェア構成案、図 3.34 は図 3.33 に示すハードウェア構成を実装した評価用試作機である。

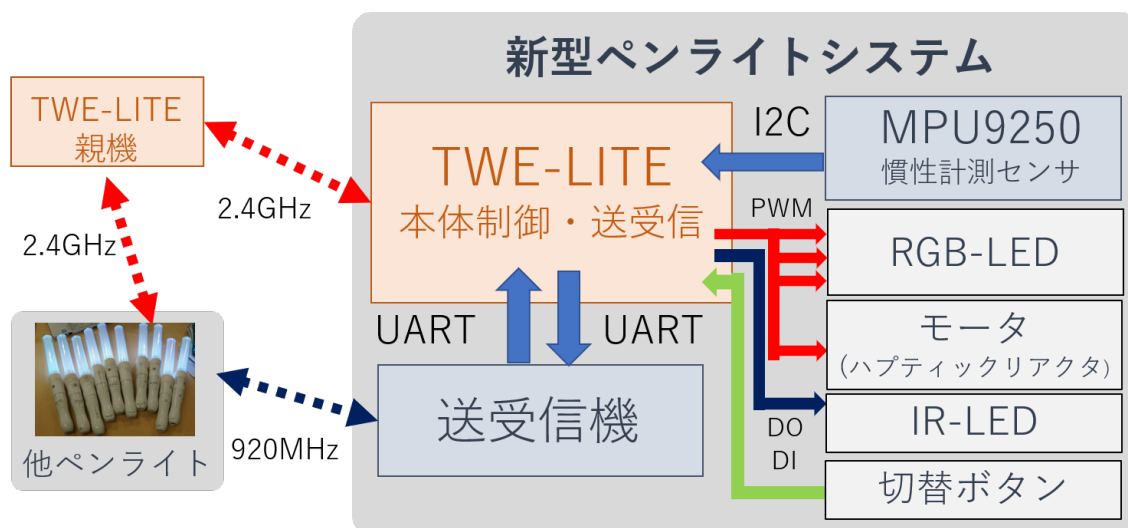


図 3.33: 新型ペンライトシステムの機器構成図

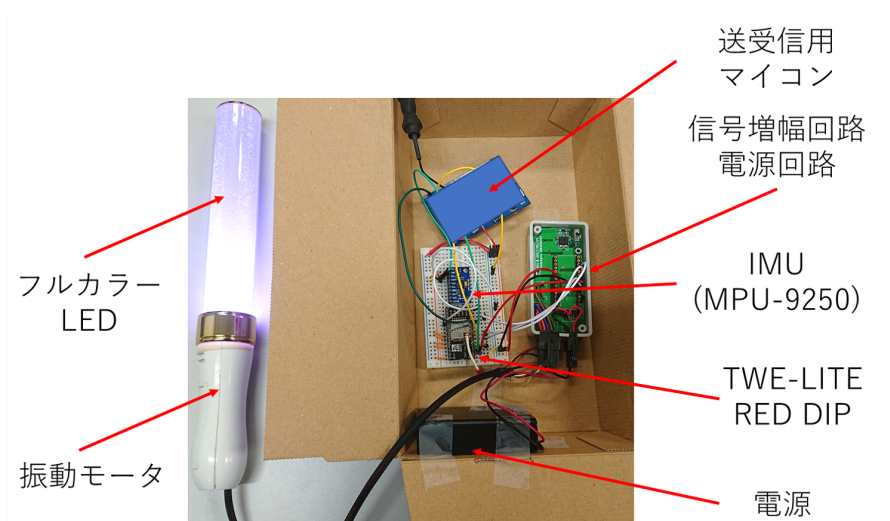


図 3.34: 新型ペンライトシステム・評価用試作機

### 3.8 遠隔ユーザを対象としたシステムの拡張

情報通信技術の発展・普及から、エンターテインメントとしての音楽の楽しみ方が多様化していく中で、パブリックビューイングや配信ライブを介しての遠隔地からのライブ参加も音楽の楽しみ方の1つとして急速に普及し一般化しつつある。音楽ライブの醍醐味として、実際の会場に自ら足を運び演者と交流することの価値が評価される一方で、パブリックビューイングや配信ライブは、場所的・時間的制約から音楽ライブに参加できない参加者がライブに参加する手段を提供しているといえる。また、近年音楽ライブの開催数が急速に増えているものの、特に人気のある演者の場合や特別なライブ(メンバーの引退日や誕生日に開催されるもの等)は参加チケットが抽選販売となるケースが多い。こういった観点から、遠隔地からのライブ参加は、参加者側としては特別なライブに参加できる機会を確実に享受できる、主催者側からすれば多くの参加者を動員できるという両面からのメリットを持っている。

遠隔での音楽ライブ視聴における最大の問題は、現地で参加する臨場感を体感できないことである。特に、一般的な遠隔ライブ参加においては、自身が演者の存在する環境に対して行動を起こすことができないため、自身が音楽ライブに対して参加・寄与している感覚が体感しえない、コンテンツの傍観者・受容者となってしまうことが課題となる。

これまで本研究で開発してきた演者・観客間の相互的な一体感を向上するライブ支援システムの枠組みは、演者・観客それぞれのアクティビティ情報をインターネット越しに配信することで、このようなオンラインライブにも柔軟に拡張できるコンセプトを持つ。本稿では、従来開発した双方向音楽ライブ支援システムをパブリックビューイングに参加する遠隔参加者に拡張した上で、遠隔参加者の参加性を向上に関する方法に関して検討を行った。最終的に、遠隔地参加者が現地の演者の演技をユーザデバイス上で光・振動として体感でき、逆に自身の応援を配信映像および現地の舞台装置に反映させる仕組みを構築することで遠隔地視聴者の現地への作用を支援するシステム開発し、評価実験を行った。

### 3.8.1 実験用システム

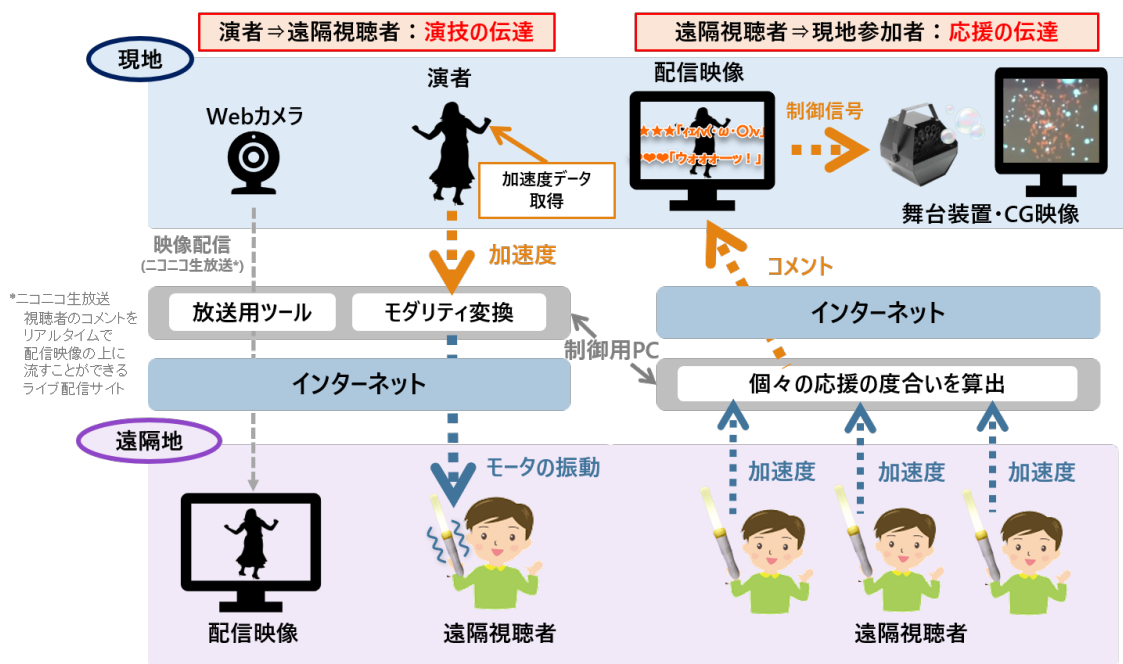


図 3.35: 遠隔参加支援システム

遠隔ライブ参加者の参加性を向上させる音楽ライブ支援を行うにあたっては、以下の3つの要件が求められる。

- 遠隔参加者および現地の観客のこれまでの視聴体験を阻害しないこと
- 遠隔視聴体験を現地に近づける支援を行うこと

- 遠隔参加者の現地環境への作用を提供すること

1つ目の要件は、「遠隔参加者および現地の観客のこれまでの視聴体験を阻害しないこと」である。これは、音楽ライブの現場の支援の場合と同様で、音楽ライブが持つ自由さ自体が、コンテンツの魅力を作り出していることに起因するものである。そのため、ITによる技術支援によって従来の音楽ライブ体験の楽しみ方を阻害してしまう懸念は、遠隔ライブ参加支援においても留意が必要な点である。特に、遠隔地から現地へのユーザの参加を支援することが、これまでの遠隔視聴による体験や、現地参加者のライブ体験を阻害しないシステムデザインが求められる。

2つ目の要件は、「遠隔視聴体験を現地に近づける支援を行うこと」である。遠隔視聴特有の課題として、現地で自身が演者と交流している感覚が得にくいという点があげられる。このような観点から、遠隔視聴体験において削ぎ落とされた視聴覚体験を補完し、演者をより身近に体感できる仕組みは遠隔ライブ参加における体験価値を高める上では重要な観点である。

3つ目の要件は、「遠隔参加者の現地環境への作用を提供すること」である。遠隔視聴者の視聴体験を強化すること(要件2)も必要な支援の形であるが、音楽ライブにおける現地参加と遠隔参加の最大の違いは、参加者が現地環境に作用できないことである。音楽ライブにおいては、演者と観客の交流によってその非日常性を持った体験が作り出される側面があるが、現地参加者と異なり、遠隔参加者は現地環境に対して自身の応援や演者への反応を伝達することはできない。この課題を克服する仕組みとして、ニコニコ生放送 [8] に代表されるコメント機能を持った遠隔配信ツールや、遠隔参加者の観客の声援を伝達する仕組みに関して提案がある。本研究においては、これらのツールによる現地参加の仕組みを遠隔参加ユーザの情報伝達の手段として用い、遠隔視聴体験を現地体験に近づけるモーダル拡張支援を組み合わせることで、3つの要件を満たした遠隔ライブ参加支援システムとして提案を行う。

図 3.35 は本研究で提案する遠隔参加支援システムの概略図である。演者から観客に対しては双方向音楽ライブ支援システムと同様に、演者の声を光、演者の腕の動きをデバイスの振動として伝達することで、音・映像による視聴覚体験を拡張することを目指す。遠隔視聴環境は、現地体験と比較して様々なモーダルが削減された環境である。そのため、現地環境と比較してモーダルが削減された環境である遠隔地環境においてモーダル拡張を支援することは、同一の支援の枠組みでありながら異なる意味を持つ。遠隔視聴体験を拡張する方法としては様々な方策があるが、本研究ではモーダル削減された遠隔地環境でのモーダル拡張支援の持つ意味合いに関しても、現地での研究事例とした比較検討を行うことで検討することを念頭に置いている。

一方で、遠隔ライブ参加者の支援にあたっては特に現地に作用する仕組みを設けることが重要であることから、現地の演者・観客から見てわかる演出として、遠隔参加者の応援を配信画面上にコメントとして重畳する仕組み（応援アクションに応じて「ニコニコ生放送」におけるコメントを発信できる機能）と、現地に設置された舞台装置（シャボン玉発射装置およびCG プロジェクション）に反映させる仕組みを設けている。

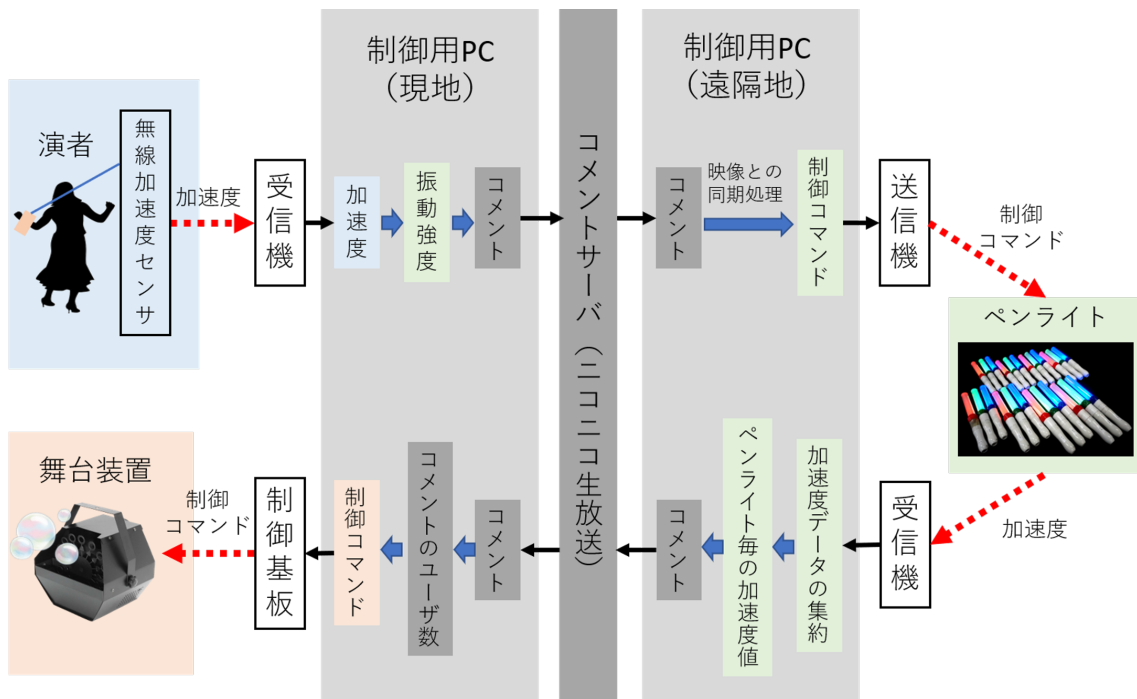


図 3.36: 遠隔参加支援システムのシステム構成

図 3.36 は提案システムのシステム構成図である。本システムは、映像配信サービス「ニコニコ生放送」を通信用プラットフォームとして利用する。

演者から観客への情報伝達には、従来の双方向音楽ライブ支援システムと同様に演者の腕に取り付けた無線加速度センサ TWE-LITE2525A およびマイクの音声情報を利用する。ライブ会場内に設置する制御用 PC で演者の加速度データおよび音声情報を獲得し、それらの情報をデータパッケージ化した上で遠隔地の視聴者環境へとインターネット経由で送信する。演者⇒観客間のインターネット経由でのデータ伝送には「ニコニコ生放送」の配信者コメント機能を利用して実装を行った。現地側制御用 PC では、演者の腕の加速度データおよび音声情報からデータパッケージを作成し、それを「ニコニコ生放送」API を介して配信者コメントとしてコメント

サーバへ伝送する。一方で、遠隔視聴者環境の PC では、「ニコニコ生放送」API を通じて配信者コメントを取得する処理を逐次実施することで、現地環境における演者の演技情報を獲得する。本提案システムにおいては、「ニコニコ生放送」を映像配信および通信用プラットフォームとして用いることで、配信環境のみを介して簡易的に利用できるものとして実装を行っている。遠隔視聴者側 PC では、獲得したコメントからペンライト型デバイスの制御用コマンドを生成する処理を行い、逐次到着した情報をペンライトに伝送することでペンライトの LED および振動モータの強度をリアルタイムに制御する。この際に、映像の遅延の大きさを考慮した上でパケットの送信タイミングを制御することで、遠隔視聴者から見た際に映像と光・触覚フィードバックが疑似的に一致するように調整する処理を実装している。ニコニコ生放送上での配信者コメントを介したパケット伝送に関しては、コメントサーバに負荷を与えることの無いように、データを蓄積した上でまとめて送信を実施する等の考慮を行っている。

遠隔視聴者⇒現地間の情報伝達には、遠隔視聴者の持つペンライトの振り情報を活用する。ペンライトから獲得した加速度情報を遠隔視聴者環境の PC で受信し、双方向音楽ライブ支援システムと同様に加速度から振りの強度を計算する。振りの強度の計算には x/y/z の各軸の加速度の合計値を利用し、約 10 パケット/秒での受信データに基づいて各ペンライトごとの振りの強度をリアルタイムに算出する。

本システムでは遠隔視聴者の応援アクションの反映のさせ方として、配信画面上へのコメントの重畳、現地環境の舞台装置への作用の 2 種類のフィードバック方法を用意した。は、画面上へのコメントの重畳をサポートする「ニコニコ生放送」の機能を利用したもので、観客は、あらかじめシステムに登録された定型文のコメントを、ペンライトを振ることで送信できる。実装においては、各ペンライトから獲得した振りの強度情報をもとに閾値判定を行い、一定の強度以上の振りがあった場合に定型文のコメントを「ニコニコ生放送」API を介してコメントサーバに伝送し、ユーザコメントとして配信画面上に重畳する。重畳するコメントは、他の遠隔参加者・現地参加者・演者等、そのライブの特性に応じて多彩な参加者が鑑賞できるものとして実装することができる。遠隔でのライブ参加を支援するという観点から言えば、デバイスを振って応援する遠隔参加者自身が自身の貢献が反映されていることが知覚できることや、他の参加者の応援が目に見えてわかることが重要である。そのため、ハンドルネームや絵文字による個人によって異なる ID をコメント定型文のヘッダーとして添付できるようにし、ユーザコメント自体も、参加者が自身のものであるか・他者のものであるかを認知しやすいデザインとした。

遠隔視聴者の応援アクションの 2 つ目のフィードバック方法として、現地環境の舞台装置への作用も実装を行った。本システムは、これまで開発してきた双方向音



楽ライブ支援システムによる現地環境支援と併用できるデザインとして設計されている。現地環境への作用の仕方には、これまでのシステムのように演者の身体(装飾)に直接表現する方法も考えられうるが、遠隔視聴環境においては現地環境と異なり十分な視認性が得られないこと、現地視聴者と比較して遠隔視聴者の方が観客の参加できるキャパシティが大きいこと、これまで開発してきた双方向音楽ライブ支援システムによる現地環境支援と併用できるデザインとして提案することの3点から、本システムにおいては、現地環境へのフィードバック方法として「舞台装置への作用」という方法を採用した。システムの試作においては、物理的に動作する舞台装置としてシャボン玉発生器、仮想的な演出として動作する舞台装置としてCG映像の2種類のフィードバック方法を作成し、それぞれが遠隔参加者のペンライトの振りの総量に応じて動作するように設計を行った。遠隔参加者⇒現地への情報通信は、配信画面上へのコメントの重畳によるフィードバックで利用した「ニコニコ生放送」によるコメント機能を介して行う。現地側制御用PCでは、APIを介してニコニコ生放送のコメントサーバに定期的に問合せを行い、コメントのユーザ数を獲得する。獲得したユーザ数に応じて応援アクションを行っている遠隔視聴者の人数の増減をリアルタイムに把握し、その量に応じてシャボン玉発生器およびCG映像の演出を制御する。シャボン玉発生器は市販のものの電源装置を改造し、PCから電源の制御を可能としたものをフィードバックシステムとして利用した。シャボン玉発生器の電源回路上にリレーを設置し、リレーのON/OFFをマイコン(Arduino UNO)を介したシリアル通信で制御PCから制御できるようにしている。また、CG映像は、シャボン玉発生装置のように泡が地上から噴き出る演出のものを用意した。本CG映像のレンダリングにはUnityで作成されたソフトウェアを使用しており、噴き出る泡の量が応援人数の情報に応じてリアルタイムで変動するよう実装した。

### 3.8.2 学内における評価実験

遠隔配信音楽ライブにおいて本システムを用いた際の遠隔参加者に与える現地の演者・観客との一体感およびライブへの参加感に関して調査を行うために評価実験を実施した。本実験は、双方向ライブシステムにおける学内における評価実験に準じるものとして学生を対象とした評価実験として実施したものである。本実験は埼玉大学の総合研究棟において実施し、1階シアター教室を現地のライブ環境に見立て、404室(実験室)をパブリックビューイングによる遠隔視聴環境に見立てた。この実験においては、演者として本学のアイドルサークル「SKR48」のメンバー2名にご協力をいただき、現地側環境において2回ライブパフォーマンスを行ってもらった。遠隔地側の観客(本実験の被験者)として本学学生4名2グループ、計8名(全

て男性)に協力いただき、4人1組で遠隔ライブ参加システムを利用してライブの視聴を行ってもらった。

また、現地側の観客役として本学学生8人2グループ、計16名にご協力いただき、現地側でペンライト型デバイスを持ち演者を応援してもらうようお願いした。また、この際に現地側では3.5節の実験と同様の設定で双方向システムを動作させ、観客ペンライト型デバイスおよび演者の衣装への光・振動フィードバックを実施した。

実験環境のセッティングおよび実験中の様子を図3.37に示す。実験は2グループに対して実施し、1回の実験に対して、遠隔地側の観客(被験者)4名、現地の観客8名がいるという設定で行った。図に示すように遠隔地環境においてはプロジェクタを利用して配信映像の上映を行った。配信映像のカメラの画角は演者・現地の観客・フィードバックされる現地の舞台装置(CG映像)が視認できるものとして設定した。現地側では、遠隔参加者の応援をフィードバックする仕組みとしてCG映像による泡の演出を用意し、4人の応援を4つの泡の吹き出しとして表現するように設定を行った。遠隔地・現地ともに前方・後方・左右方向からビデオカメラによる撮影を実施し、後の映像解析に利用できるようにした。

演者には1回の実験あたり2曲の演目を行ってもらい、1曲目においては遠隔地視聴者の左側2名、2曲目においては右側2名には提案手法の「ペンライト型デバイス」を持ってもらいシステムの挙動を体験してもらった。一方で、システムを体験しない2名の参加者には、普通のペンライトを持って応援してもらい、それぞれの被験者が提案手法・普通のペンライトを本実験の中で体験してもらえようにした。

実験終了後、被験者は表3.9に示す設問に対して、「通常のペンライト」を用いた場合と「提案手法」を用いた場合、それぞれについての7段階評価のアンケート(「どちらでもない」を4,「全くそう思わない」を1,「非常にそう思う」を7とする)を行い、自由記述による感想のヒヤリングも実施した。



図 3.37: 遠隔参加実験の様子

表 3.9: アンケートの設問（遠隔参加実験・7段階評価）

番号	設問
設問 (D-1)	ペンライトを使用することで臨場感を感じましたか.
設問 (D-2)	ライブに集中することはできましたか.
設問 (D-3)	応援するメンバーとの一体感を感じましたか.
設問 (D-4)	映像に映る遠隔地のライブ参加者との一体感を感じましたか.
設問 (D-5)	自分がライブに参加している感覚を感じましたか.
設問 (D-6)	自分の応援が応援するメンバーに伝わったと感じましたか.

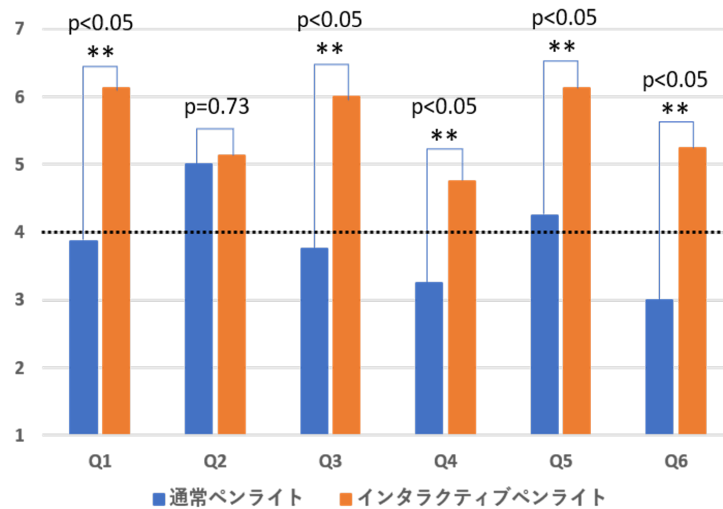


図 3.38: アンケートの平均スコアと p 値 (遠隔参加実験)

図 3.38 は、「通常のペンライト」「提案手法」に関する 7 段階アンケートの平均スコアおよび、t 検定により算出した p 値を示したものである。このように、すべての設問項目において提案手法の平均スコアは通常のペンライトの場合を上回り、ライブ中の集中度に関する設問 (D-2) を除き、その差は有意 ( $p < 0.05$ ) であった。このことから、本システムは遠隔地観客と現地の演者・観客の一体感向上・参加性向上・臨場感に寄与するものであることが示唆される。

自由記述によるアンケートの結果に関して、肯定的な意見としては以下のような回答が得られた。

- ペンライトの振動が演者と一体化しているような感覚を持たせてくれたように感じる
- ライブのフィードバックが視覚的なもの以外（振動）で帰ってくるのは革新的だと思った
- 振動があるペンライトを使った後に市販のものを使った際に物足りなさを感じた
- 自分の行動が画面に反映できるのが楽しかった
- 会場にいなくても一緒に盛りあがることのできるシステムでとてもよいと思う。

特筆すべき点として、ペンライトへの振動フィードバックに言及した回答が多いことが挙げられる。これは、演者の動きをユーザデバイスの振動としてフィードバックすることが臨場感や一体感を持った体験に寄与するというだけでなく、遠隔

配信ライブにおけるモーダルの欠落を補完する手段としても有効であることを示すものである。本実験は被験者4名2グループを対象とした小規模な実験であるため、より正確な評価には被験者を増やした評価実験が必要となるが、演者の動き情報のユーザデバイスへの伝達が、ユーザの体験や応援行動に与える影響が、現地の観客を対象とした場合よりも大きいことも考えられる。また、自身の振りが映像上のコメントとして反映される仕組みに関しても、自身の行動を表現する手段、他人と一緒に交流する手段として評価するコメントが見られた。

一方で、システムに対する否定的な意見としては以下のような回答があった。

- コメントはライブ感が無くなる気がした
- 動画とラグがあったので、少し没入感が減った気がする
- 実験中の人数が増えればもっと楽しそうなライブになると思う
- バブル（CG映像）はあんまり見えなかったなので、もっと映像で分かりやすくしたらいいかもと思った。

否定的な意見には「コメントはライブ感が無くなる気がした」、「動画とラグがあったので、少し没入感が減った気がする」などがあり、コメント反映のさせ方の見直しやタイムラグへの頑健性の改善が今後の課題である。「実験中の人数が増えればもっと楽しそうなライブになると思う」という意見に関しては、本実験が遠隔環境4名で実施したことに関連づいているが、一方で本システムによって支援される参加体験に参加環境における他者の存在が影響していることを示唆するコメントがあった（「人数が増えればもっと楽しそうなライブになると思う」）。本研究では、一緒に応援する他者の存在が見えるパブリックビューイングの環境を想定した支援形態を検討したが、自宅で一人で鑑賞する形態であるオンライン配信におけるライブの視聴環境での支援にあたっては、異なる枠組みの検討が必要となると考えられる。

### 3.8.3 実際のイベントにおける実証実験

「遠隔ライブ参加システム」の実用性を確認するため、群馬県大泉町で行われたイベント、「活きな世界のグルメ横丁」にて、実証デモを行った。同イベント内で行われるステージイベントを、「遠隔ライブ参加システム」を用いて埼玉大学建物内の一部屋に生配信し、一般の方にシステムを体験して頂いた。図3.39に遠隔地側（埼玉大学）、現地側（大泉町）の様子を示す。物理的に離れた実際のライブ環境でのテストとなったが、システムはおおむね良好に作動し、実用性を確認できた。



遠隔地側（埼玉大学）



現地側（大泉町）

図 3.39: 遠隔参加支援システムの実証実験 (大泉町「活きた世界のグルメ横丁」イベント)

## 3.9 まとめと将来展望

### 3.9.1 まとめ

主体のスケールが大きい多人数間のコミュニケーション支援における主要な課題である「人々が集団として『創発的に』繋がるための技術支援の方法論の解明」という課題に対応し、集団を構成する個々人の振る舞いの伝達と可視化に基づいて、その内部のつながりを促進する技術支援の方法について議論を行った。本章では、その実験フィールドとして国内の大規模集団交流の代表的事例である音楽ライブの現場を対象とした研究を実施した。演者と観客の間の身体的な振る舞いを発光や振動を介して、双方向的に伝達・提示することが可能な音楽ライブ支援システム「Affinity Live」を開発し、プロの演者・実際のファンを対象とした50人規模での音楽ライブ形式の評価実験を実施した。結果として、提案手法が持つ「演者の身体的行動に同期した観客デバイスへの情報提示」「双方向的な振る舞いの伝達と可視化」が演者・観客間、観客同士の一体感を向上することを明らかにした。

また、本システムを発展させた形として、遠隔視聴者を対象としたシステム拡張に関する提案を行い、プロトタイプ開発および評価実験・実ライブ環境でのデモを

実施した。学内被験者を対象とした実験から、遠隔視聴者を対象とした場合であっても、音楽ライブへの参与感や視聴覚体験を向上させることを明らかにした。特に振動フィードバックに関しては、現地環境を対象とした場合に比較してより強く作用する可能性が示唆された。一方で、孤独な視聴環境においては、他者と一緒に応援している感覚をどう支援するかが課題となった。

### 3.9.2 本研究の貢献・将来展望

本研究における提案は、超大規模集団における交流活動における創発性を向上する提案であり、集団の創発性を向上させる一解決策を提案できたことは、本研究における最大の貢献である。本研究は、1対1コミュニケーションにおける先行研究事例である感覚共有メディアや、身体行動の同期を促すインタフェースに関する知見を集団の創発化支援のメカニズムとして取り入れている。そして、そういった集団での感覚共有を実現するメディアの実現が、集団の一体化・創発化に寄与することを明らかにしたものである。このような集団を創発化させる、ないし集団的沸騰を促進・制御する技術支援の提案は、人々が集団としてつながり関係を形成するメカニズムおよび工学的支援法の解明に対して寄与するものである。

また、本研究においてはユーザデバイスとして音楽ライブにおいて応援グッズとして慣例的に用いられるペンライトを活用した。ペンライト等の応援グッズを振って応援するという行為は、音楽ライブという空間において集団としてのつながりを形成する「儀礼的な」行為として、既に音楽ライブにおける集団的沸騰を形成する行動として取り入れられているものである。本システムではこのような、ペンライトを振って応援するという儀礼的行為を阻害せず、拡張するような支援を取り入れている。つまり、集団としての盛り上がるの起点となるアクションをさらに促す支援が実現できていることが特色である。

また、本システムの持つ特徴として、演者と観客の間の体験の「共創」を支援していることが挙げられる。ライブイベント支援の文脈において従来提案された技術支援の方法は、新たな演出の実現に焦点を当てたものがほとんどであり、既存のライブ体験に取り入れられた演者と観客の間での体験の「共創」に焦点を当てて、それを誘発する支援法の提案は斬新さをもつものである。

また、実験映像を通じた観客行動の振る舞いの分析から、演者と観客の間の身体行動の忠実な同期が音楽ライブ体験において重要な意味を果たしていること、観客は演者の空間的な位置を意識して応援行動を進めること、ソロパート等、特定の演者が際立つ場面においては他の観客と協調し特定の演者へ注目を向けること等が

示唆された。これらの分析は、音楽ライブ空間における演者と観客の間の相互的な関係性の理解や、さらなる集団内部のインタラクション支援、システムの抱えるスケーラビリティ問題の解決に寄与するヒントとなる知見を有するものである。実際の研究の取り組みの中では、演者・観客の位置情報を利用した演出を取り入れることで、スケーラビリティ問題を解決した新たなインタラクション手法に関して提案を行った。スケーラビリティに関する問題は、本システムの実用化にあたり抱える大きな課題であるが、通信システムの改良に伴うアプローチに加えて、演出によって打開できる可能性のある課題であり、スケーラビリティの問題への対処と本システムの持つ特色を両立した演出を実現する枠組みの実現が期待される。

また、パブリックビューイング環境を対象としたシステムの拡張にも研究の一環として取り組んだ。本システムにおける応援グッズ型のユーザデバイスを利用した演者と観客の間での身体行動伝達の枠組みは、現地・遠隔地・VR 視聴環境等環境を選ばずに利用可能なものであり、視聴環境の違いに依存しないシームレスな参加体験の提供を実現できるものである。今回のシステム開発においては、パブリックビューイング環境を対象とした遠隔参加支援というユースケースを取り扱ったが、ひとりで自宅で視聴するライブ配信視聴環境においては一緒に参加している他者の存在が重要であり、空間的に離れた他者と交流する手段の提供や、そういった他者の存在感を自然に提示する情報提示の枠組みを検討する必要がある。本課題に関しては、第4章において引き続き解決策について議論していく。



## 第4章 遠隔コミュニケーションを対象とした多人数相互交流支援基盤の提案

前章では、音楽ライブのような現実空間での熱狂的な交流を伴う集団でのコミュニケーションを対象に、その内部でのつながりを増強するためにどのような技術支援のあり方が考えられるかについて議論を行った。本章では、また異なる着眼点として、テレビ電話等による個々人が分散した環境下におけるオンラインコミュニケーションに着目して、その集団的なつながりを支援する方法について考える。.. 情報通信技術の発展や、ワークライフバランスへの注目が高まっていること、また2020年の新型コロナウイルス(COVID-19)の蔓延によるオンラインイベントの普及等により、テレビ電話を用いたオンラインコミュニケーションは、現実世界のイベントを拡張・代替する手段として幅広く用いられるようになった。しかし、テレビ電話を用いたオンラインコミュニケーションにおいては、現実空間でのコミュニケーションとして「臨場感」が無いことが問題とされ、遠隔地環境においても現地のような体験価値を持ったインタラクションを実現することは長期的な課題である。その実現のためには、相手や現場といった対象と強力にインタラクションを進める仕組みが必要であり、それは前章で議論してきたような、既に交流体系が形成されている現場でのインタラクションを促進することと異なるアプローチに基づく考え方が必要となる。本研究では、特に2020年に新型コロナウイルス(COVID-19)の感染拡大により利用が広まったオンラインでの集団コミュニケーションに着目し、現実世界の「場」が持つ臨場感や、それらを形作る相手が今まさにそこにある感覚(身体的共在性)を高めるための技術支援のアプローチに関して議論する。

## 4.1 背景

### 4.1.1 オンラインでの集団交流の広がり～現状そして課題～

Skype[1]等を用いたビデオ通話によるコミュニケーションは、時間的・空間的な隔たりを解決し、遠隔地の相手に対して環境や表情を伴うコミュニケーションができるツールとして注目されてきた。拠点が多数あるオフィス同士の社内会議、関東・関西・北陸の複数会場をつないだオンライン勉強会等 [104] に代表されるように、大容量通信技術の発達から、多人数でのビデオチャットに関してもコミュニケーションの手段やコンテンツ実現のための枠組みとして用いられるようになった。また、ビデオ通話の発展は、場所を選ばない会議や勤務・学習環境を実現し、通勤通学を必要としないゆとりあるライフスタイルを実現する在宅勤務や、気分転換の旅行と仕事を両立するワーケーション [113] 等、新しいワークスタイルの創出に寄与している。

2020年に、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) が世界各地で拡大したことにより、このようなオンラインでのテレビ電話を通じたインタラクションはより身近なものとなった。感染症の拡大を防止するために、実世界における多人数が集う形でのインタラクションが感染リスクとしてとらえられるようになり、現実空間における様々なインタラクションを代替する手段として、テレビ電話を用いたオンラインインタラクションが用いられるようになった。本邦においても日本政府が新型コロナウイルスの感染拡大防止を兼ねたテレワークやデジタル・トランスフォーメーション (DX) を国家政策として推進しており、2020年においては多くの大学・企業において「オンライン授業」やテレワークの実施、イベントのオンライン開催への代替による対応が実施された。また、感染症予防を予防するための手段としてふるさとの家族とテレビ電話で交流する「オンライン帰省」や、飲食を伴い飛沫感染のリスクが増加する飲み会をテレビ電話上で代替する「オンライン飲み会」等、コロナ禍をきっかけとした新たなオンラインインタラクションの形が提案されている。人々の密集が発生するイベント分野においても例外ではなく、音楽ライブやスポーツイベント、学会等においてもオンライン配信による開催が増加している。

このような様々な物事のオンライン化の動きから、感染症の脅威が過ぎ去ったアフターコロナの時代においても、オンラインによる時間や場所を選ばないインタラクションの形態は、コロナ禍前の時代と比較してより身近なものとなることが期待される。一方で、テレビ電話における相手と自身の環境の違いや、伝達される情報量が対面でのコミュニケーションと比較して少ない点に起因したコミュニケーションに関する問題は改善されていない。

これまで、テレビ電話における相手の存在感を高める手法に関する様々な研究がおこなわれているが、様々な現実世界でのインタラクションがテレビ電話を介したインタラクションとして代替される中で、相手の存在感や臨場感を感じさせ、交流の質を高める方法に関する議論の重要性がより高まっている。これまでの研究においても、テレビ電話で表現できなかった相手の行動や、物理的な存在感の共有が相手の存在をより身近に感じさせることが示唆されているが、特に遠隔での集団交流の場面においてバーチャルによるイベント参加体験が、現実におけるイベント参加体験のような臨場感を持つにはどのような支援が必要であるのかについてはより深い議論が必要である。

#### 4.1.2 オンライン配信音楽ライブから見る遠隔交流における課題

前節で触れたように、本稿では現地の観客および遠隔地から参加するパブリックビューイングの観客を対象として、その体験価値の向上に取り組んできた。音楽ライブの文脈においては、新型コロナウイルスの流行により2020年は現地・パブリックビューイングによるライブの開催数が減少し、オンライン配信によるライブの開催数が増加した。このようなオンライン配信によるライブは、自宅等から個人で参加することを前提としているため、他人と一緒に応援している感覚がない、現地で応援している感覚に欠ける、といった「臨場感」に関する問題を持っている。

我々もこれまで、音楽ライブにおける遠隔参加に着目してその支援システムの開発に取り組んできたが、これまで取り組んできたシステムは、パブリックビューイングのような他の参加者が視認できる環境での利用を想定して開発したものであり、オンライン配信によるライブのような異なる環境から異なる個々人が参加するライブ視聴環境を想定しきれていない。演者の演技や歌声をユーザデバイスの振動や発光を用いて伝達することは、個人宅環境においても手軽さを持った臨場感増強体験を提供する上で有用であると考えられるが、現実世界やパブリックビューイングのライブ会場にある他の観客の存在感を完全に補完できるものではない。

また、自身のアクションを現地環境や演者に伝達する枠組みとして、配信映像上のコメントや現地の舞台装置への作用を提供する方法も提案した。観客の身体的作用を現地に伝え、自身のアクションが他人にも見える形で可視化されることは、他人の存在感やライブ配信での臨場感の形成に寄与するものであると考えられる。一方で、これらの手法は、音楽ライブの本質的要素である観客同士が共に創り上げる体験を直接支援するものではない。ニコニコ生放送においては多くのコメントで画面が埋め尽くされる現象は「弹幕」等と称され、これらの個々人の活動の連鎖に

よってもたらされる現象が「間接的に」観客同士な共創体験の実現に寄与している側面はあるものの、特に観客の存在が見えないオンラインライブにおいては、自身の貢献を通じて観客同士が共に創り上げる体験をより直接的に支援する手法は検討する余地がある。また、これまでのシステムにおいては、応援によって衣装が光る、応援によって舞台装置が稼働するといったように、観客同士の協調に基づく活動を提示することで間接的に観客同士の交流の機会を生み出しているが、これらの仕組みは観客の存在が視認できることが前提としてあり、個人参加によるオンライン配信ライブにおいては他の観客に対してより近い距離感を持ち、観客同士で直接的にインタラクションできる枠組みに関する支援が必要となる。

## 4.2 解決したい課題・研究目的

本研究の目的は、グループでのテレビ電話場面や Youtube Live 等のライブストリーミング視聴場面などの、遠隔地から個人がオンラインで参加し交流する場面に着目し、現実世界におけるイベント会場のように、集まった人々が共通して体験するコンテンツの「場」がもたらす臨場感や、それを生み出す要素として、相手がまさにそこにあり一緒にコンテンツを体験している感覚（身体的共在性）を高める方法を見出すことである。

音楽ライブ等のエンタテインメント、オンライン会議、オンライン授業等、テレビ電話を介した形態によるオンラインでの集団交流においては相手がまさにそこにいる感覚としての身体的共在性がないことに起因して、その臨場感や気配、さらに体験価値や能率を低下させている側面がある。このようなオンラインでの集団コミュニケーションにおいて相手の臨場感や気配を共有し、現地環境のような対話相手や対象コンテンツが今まさにそこにある感覚を実現することができれば、これまでにない質の高い遠隔コミュニケーションの実現に寄与することができる。

## 4.3 遠隔配信視聴者の共創体験を促進する支援システムの開発

本研究では、現実空間における集団コミュニケーションにおいてみられる、他者との直接的な交流体験と他人と共に創り上げる直接的体験の誘発を分散遠隔視聴環境において実現する方法に関して議論する。その一貫として、前章での音楽ライブを題材とした研究の延長として、音楽ライブにおける現地参加者・パブリックビュー

イング参加者と異なる，遠隔地環境で分散して視聴している映像配信視聴者の「共創」を伴う交流支援の実現方法について検討をおこなったため，本節にて報告する．

前述のように，遠隔環境におけるライブ配信視聴体験は，現地やパブリックビューイングの場で実現される他の視聴者との交流や臨場感に欠けるものである．また動画配信サービスにおけるライブチャット機能等を通じて他の映像視聴者との交流を実現する枠組みが既に実現されているものの，それは「ペンライトを振って演者を応援する」「声やジェスチャで応援の意思を伝える」といった既存の現地の音楽ライブにおける参加体系と異なるものであり，現地のような臨場感を提供するには至っていない．また，ライブ体験においては，特に観客・演者同士の交流を通じ，その場限りの体験を「共創」していくことが，その価値を高めていく上で重要な意味を持つが，ライブチャット機能における相互交流は，個々人のアクションの反映のされ方が基本的には独立的であり，共通の体験を「共創」することに主眼を当てたものではない．

また，現代の音楽ライブにおいては，現地・遠隔配信環境・パブリックビューイング環境・VR/AR環境からの参加といったように参加の仕方の多様化が進んでおり，これらの視聴環境が異なる視聴者同士が有機的に交流するための枠組みのデザインは今後に向けて必要となる課題である．多くのイベント参加支援に焦点を当てた研究では，現地参加者・遠隔参加者のいずれかに焦点を当てたものであり，現地参加者と遠隔視聴者が体験を「共創」できるインタラクション支援を実現するためのシステムデザインに関する指針は未解明な余地を残している．

本節では，他者との直接的な交流体験と他人と共に創り上げる直接的体験の誘発を実現するために，カメラとユーザデバイスを組合せた入出力体系を用いた，ユーザの様々な「粒度」の情報を獲得・提示できる相互交流支援基盤を設計する．また，音楽ライブにおける遠隔配信環境での観客同士の身体行動を伴う形での「共創」を促すデザインとして「お絵かき」と「塗り絵」のアプリケーションを提案・実装する．音楽ライブ支援の観点で言えば，本節で提案する枠組みは，前章で提案した現地環境を対象とした双方向ライブ支援システム，パブリックビューイング環境を対象とした遠隔ライブ参加支援システムを拡張するものであり，これまでのシステムと組合せて用いることで，分散した遠隔地で個人で視聴するユーザ同士の交流や，現地への行動の作用を実現する．

#### 4.3.1 ユーザの様々な「粒度」の情報を獲得・提示できる相互交流支援基盤

オンラインライブ配信に限らず、遠隔配信による視聴コンテンツは増加しているが、共に視聴している視聴者の存在感が薄いことは現地やパブリックビューイング環境と比較してその体験価値や臨場感を削ぐ一因となっている。特に、音楽ライブ体験支援の文脈においては、観客同士が共に交流しその場限りの空間を共創する点が、体験価値の実現に重要であるとされるが、個々人が遠隔地に分散しライブを視聴する環境において、分散環境に存在する遠隔参加者同士・あるいは現地の観客・演者と互いに交流しライブ体験を共創することを支援できるメディアコンテンツに関する提案は限られている。また、遠隔配信におけるライブコメント機能・アンケート機能などの既存の遠隔視聴コンテンツにおける観客参加機能は、現地のライブ会場と異なる参加体系とは異なるものであり、現地で参加しているような臨場感を観客に提供するという観点で言えば不十分である。

本節では、カメラとユーザデバイスを組合せた入出力体系を用いた、ユーザの様々な「粒度」の情報を獲得・提示できる相互交流支援基盤を設計する。本システムは、昨今のオンライングループ交流において用いられる Skype や Zoom 等の既存のグループテレビ電話システム、Youtube Live などの映像視聴コンテンツを拡張するものであり、それらに加えて、実空間上への物体への作用による体験モダルの拡張と、自他への映像への介入の仕組みの2種類の体系を支援している。

実空間上への物体への作用による体験モダルの拡張においては、遠隔参加者それぞれの環境に物理的に存在する物体をテレビ電話状況に同期して動作させることで、他者との空間連続性の向上を図るものである。また、双方向音楽ライブシステムにおけるユーザデバイスのように、環境に物理的に存在する物体を情報提示インタフェースとして利用することで、相手の存在感や視聴しているコンテンツ体験を拡張する手段とする。

自他への映像への介入の仕組みは、遠隔コミュニケーションにおいて参加者自身の意思や自己表現の伝達を支援するものである。Zoom等のテレビ電話システムで採用されているバーチャル背景は個人情報秘匿という目的で実装されているものであるが、2020年のコロナ禍において企業や個人がSNSやwebサイト上でバーチャル背景として利用できる画像を配布する動きが見られ、多くのユーザが自身の趣味嗜好や社会的属性等に基づいて選択をしたように、個人の自己表現の手段としての意味合いを強く持つツールである。本提案では、自己表現の方法としての映像への介入の仕組みをサポートし、それを自身の映像として他者へ共有できるようにすることで集団への自身の参加をサポートする。

また、自分の映像だけでなく、他者の映像や他者と一緒に視聴するコンテンツ映像・相手の実世界空間に対して「介入」する仕組みを設けることで、他者やコンテンツ自体との空間的な断絶性を低減したコミュニケーション体験を提供することを目指す。テレビ電話における通話においては、ユーザをとりまくあらゆる環境（エコロジー）がユーザ間で異なり、それが多重に存在するという「エコロジーの多重性」が問題となっている [95]。このようなエコロジーの多重性を考慮した上で、テレビ電話における臨場感や共感体験をサポートするためには、相手のエコロジーとの連続性の確保が必要である。自身の映像だけでなく、相手の映像やコンテンツ映像に対して介入ができることは、他者との空間的な断絶性を減らすだけでなく、相手のエコロジーとの連続性や重なりを生み出す作用をもたらすと考えられる。また、相手の映像や空間への介入が実現できることにより、CG のオブジェクトを複数人間で共有して編集しあうといった、共通の媒体を通じたインタラクションを実現できる。このようなテレビ電話を介した共通の媒体の共有は、相手との空間連続性を強く印象付けるだけでなく、同じ行為をしているという相手への一体感の実現や、他人と協調しながら貢献し共同で何かを創り上げるという体験を支援する枠組みとしても利用できる可能性がある。

自他の映像への介入に関しては、双方向ライブ支援システムにおけるユーザデバイスのように実空間上の物体に対するアクション情報を利用したり、テレビ電話映像の画像処理から得られるユーザの身体表現・感情情報を用いることができる。本枠組みは、実世界におけるユーザのアクションを入力とした、自身の映像、他人の映像、さらに視聴しているコンテンツ映像に働きかける仕組みをサポートするものである。

#### 4.3.2 テレビ電話を拡張するバックチャネルによる通信体系の実装

本研究における提案は、既存のテレビ電話システムに対して自他の環境へ介入する仕組みを設けることで他者との交流体験を増強することを目指している。その交流体系を実装するためには、自身の環境から遠隔地の相手の環境に対して通信を行う、テレビ電話と異なる通信体系が実装上必要となる。そこで、テレビ電話通信のバックチャネルとして参加者同士の情報交流を可能とする通信ソフトウェアの開発を行った。本ソフトウェアは、多人数テレビ電話システムを拡張する通信のバックチャネルとしての汎用的な利用ができるものとして設計されたものである。

本通信ソフトウェアは、TCP/IP プロトコルを用いたマルチクライアント・サーバ通信システムである。本システムにおけるサーバは、クライアント（テレビ電話

の各ユーザ) から獲得した情報を集約や、接続状況の管理を行うほか、クライアント同士の間を中継する機能を持つ。

本システムにおけるクライアントは各テレビ電話のユーザに相当するもので、ソフトウェア開始時にサーバとコネクションを確立させることで、サーバおよびサーバを介した他クライアントとの双方向的なテキスト通信を可能とするものである。本クライアントソフトウェアでは、サーバとのコネクション確立時にサーバから固有の ID が割り振られるようになっている。この固有 ID はサーバ上および自クライアント上で保持され、固有 ID をキーとして他のクライアントにデータ送信を行ったり、受信元を判定するために利用することができる。クライアントソフトウェアでは、あらかじめ決められたプロトコルに基づいて送信パケットを生成することで、送信対象の ID を指定した送信・全クライアントへの送信を選択することができ、多様な情報発信の形態をサポートしている。また、画像や音声データに関してもテキストデータに変換・送信することで、サーバ上にデータとして登録したり、クライアントソフトウェア間で共有を行うことができる。

本実験用ソフトウェアは Windows 用のソフトウェアとして開発され、通信体系は Windows のソケット通信 C/C++ 言語用 API である winsock2 を用いて実装した。

### 4.3.3 自他の映像への介入を実現するアプリケーションの実現

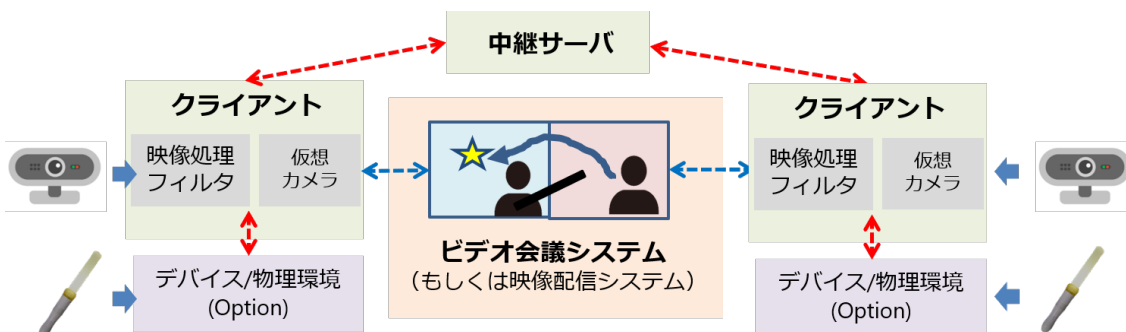


図 4.1: 分散遠隔環境における相互交流支援基盤

前述のテレビ電話のバックチャネルとして動作する多人数通信ソフトウェアを利用し、実際にテレビ電話映像を通じて自者および他者映像への間接的介入を実現す



る枠組みを持つアプリケーションを構築した(図4.1)。本アプリケーションでは、テレビ電話上に表示されたCGオブジェクトを他のテレビ電話映像に対して伝送する仕組みを設けることで、自身の映像の一部を他者に対して共有できるようにする。同じオブジェクトをテレビ電話画面を横断して共有する枠組みを実装することで、それぞれの環境の違いを考慮しつつも、相手の環境との空間的なつながりを感じさせることを目指す。また、本アプリケーションはテレビ電話システムで一般的に用いられる、参加者のカメラ映像がタイル状に並ぶ通信形態である「グリッドビュー」において、グリッドを伝搬して相手に情報を届けるといった、グリッドビューならではの、映像配置と連動した演出を可能とする。本研究ではこのような、グリッドビューにおける見え方の特性を利用した相手への介入作用の効果を検証することも目指す。

また、共有するCGオブジェクトの生成にあたっては、実世界におけるアクション等様々な入力の方法を採用することができる。本研究ではアプリケーションの実装例として遠隔音楽ライブのフィールドを対象として、ペンライトの動き情報を用いて自身の画面上に書いた絵を他人の映像に対して送信し、他者の映像に対して間接的に介入するペンライトを用いたアプリケーションを開発した。

## テレビ電話配信映像に対する演出の重畳

本提案ではまず、自身のテレビ電話映像に対してCG等の演出を重畳することで作用する仕組みを実装した。本システムにおいては、OS上において実カメラと同様に扱うことが可能な仮想的なキャプチャデバイス(仮想カメラ)を作成し、それに対して実カメラで取得した映像に対して処理を行った映像を送信することで、一般的なビデオ会議システム上で実カメラと同様にソフトウェアを扱えるようにしている。仮想カメラを用いた枠組みを利用することで、ビデオ会議システムに依存しない本ソフトウェアの利用が可能となるメリットを持つ。

試作したソフトウェアにおいては、実世界上のwebカメラから映像フレームを獲得し、映像フレームに対してCGのアイコンを重畳処理を行う。そして完成したフレームを仮想カメラデバイスに送信する処理を行う。webカメラからの映像獲得や処理には画像処理ライブラリOpenCVを利用したほか、CGの描画処理にはWindows用のCG描画ライブラリであるDXライブラリ[9]を利用した。仮想キャプチャデバイスの生成には、オープンソースソフトウェアであるyCapture[10]を利用した。本ソフトウェアは、C言語で記述されたものであり、WindowsのDirectShowAPIにおけるキャプチャデバイスドライバ生成処理を抽象化したものである。ビットマッ

配列表現によるフレームを仮想的なキャプチャデバイスのフレーム入力として扱う関数・枠組みがサポートされており、実装において活用している。

## 仮想カメラへの通信体系の実装

自身の映像に対して介入する仕組みに加え、自身の映像上の CG 演出を他者映像へ送信する枠組みを実装するため、映像に介入する手段となる仮想カメラに前段階で開発した通信クライアントを併合することで、仮想カメラ間でのテキスト情報 (CG オブジェクトのサイズ・位置等のメタデータ)、映像情報 (画像ビットマップデータ等) の双方向的な通信を行えるようにした。本提案ソフトウェアは、テレビ電話のバックチャンネルとなるソケット通信を利用して他者の仮想カメラに対して情報を送信することで他者映像への介入を実現する。そういった観点から言えば、本提案ソフトウェアはテレビ電話参加者の仮想カメラ同士の通信を可能とする枠組みと表現することもできる。

## 実装例：テレビ電話の他者画面に入り込むアプリケーション

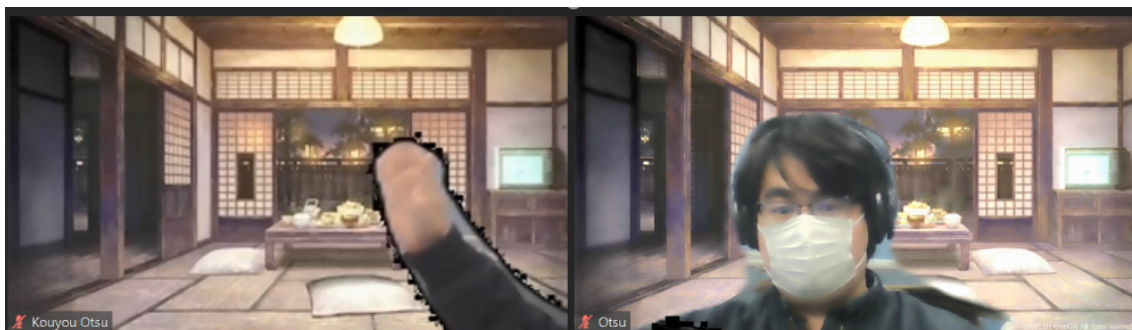


図 4.2: テレビ電話の他者画面に入り込むアプリケーション

本枠組みを用いた基礎的なアプリケーション実装例として、グリッドビューを採用するグループテレビ電話システムにおいて、他者の画面領域内への侵入を可能とするアプリケーションを試作した (図 4.2)。本アプリケーションでは広角の web カメラを利用してユーザの画面領域を広く撮影し、周囲をクロップしたものをテレビ電話システムの入力映像 (本人) として利用し、クロップされた周辺領域の情報を

隣接参加者に対してバックチャンネルを利用して送信することで、自身の画面領域外へのアクションを他者に伝達する。また、他者から受け取った画面外領域情報は、リアルタイムに自身の映像上にマッピングされる。人物領域の検出には、RGBカメラ映像から機械学習を利用してセグメンテーションを行う枠組みのうち、携帯電話向けに開発されCPU環境でも軽量動作する mobile-phone-human-matching と呼ばれる実装を本試作では利用した。

#### 4.3.4 配信ライブ環境に則した共創体験支援アプリケーションの実装

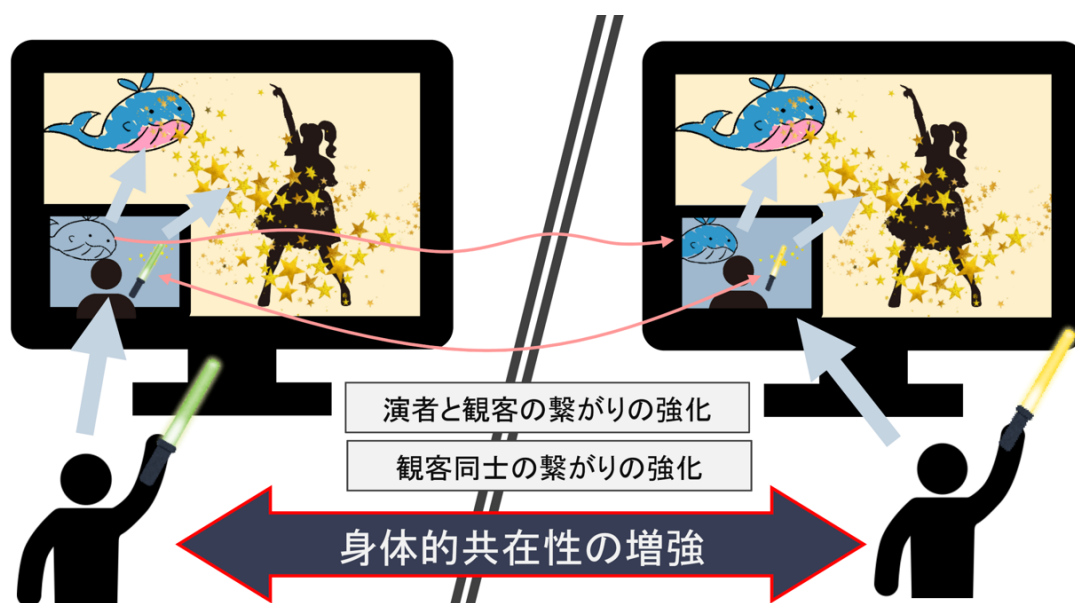


図 4.3: 音楽ライブ現場を対象としたアプリケーションの概念図

本研究では、開発したフレームワークを用いたデモアプリケーション開発もあわせて実施した。本研究はオンラインでの集団交流、とくに現地での交流と遠隔地での交流がハイブリットに実施されるものにおいて、集団を構成する個々人がどのような形でつながることを支援するのかを検討することに焦点を当てているため、前章に引き続きアプリケーション開発のターゲットとして音楽ライブの現場、特に遠隔ライブ配信の視聴環境に焦点を当てたものとして試作を実施した。

ここでは、遠隔配信音楽ライブ環境における主要な課題である、他人の存在感が感じられず、観客同士が交流する体系に欠いていること、現地やパブリックビューイング環境のような身体動作を伴う参加体系が遠隔地において支援されていないこ

との2点に着目し、その2点の問題を克服した上で、1 遠隔配信環境での観客同士の身体行動を伴う形での「共創」を促すデザインとして「お絵かき」と「塗り絵」のアプリケーションを提案・実装した。

#### 音楽ライブ現場を対象とした「お絵かき」アプリケーション

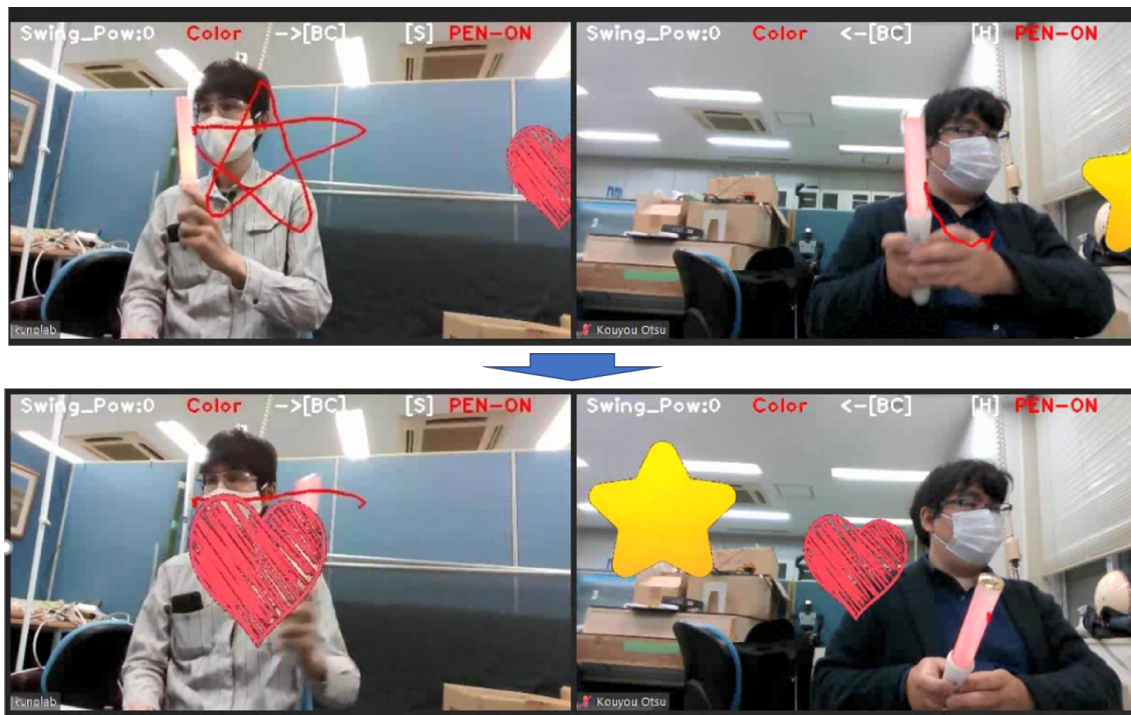


図 4.4: ペンライトで描画した絵に基づく CG を画面越しに相手に伝送する「お絵描き」アプリケーション

オンラインライブ参加者同士がライブ中に、自身の身体的アクションを通じて他の参加者（あるいは現地環境，配信画面上）へ作用をもたらす仕組みとして「お絵かきアプリケーション」を試作した。ペンライトを振っている様子を露光時間の長いカメラで撮影し、その軌跡を残すことで作品を創り上げるペンライトアートと呼ばれる芸術作品がある。本アプリケーションは、このペンライトアートから着想を受けたもので、配信カメラ映像上へのペンライトの動きを入力とした描画（お絵かき）をサポートするものである。ペンライトの光で描画された軌跡は、仮想カメラ配信画面上にリアルタイムに描画され、書いている様子が自分や他人から見て把握することができる。さらに、書かれた軌跡に応じて形状の判定を自動で行い、軌跡

にあったCGオブジェクトを自動生成する。これにより観客自身がアクションを通じて画面上に作用する枠組みを提供する。描かれたCGオブジェクトは他の観客の映像・コンテンツ映像・現地環境に対して送信することができ、自身が書いた絵を通じて他人の画面・映像コンテンツ・現地の舞台装置等に対して作用する手段を提供する。

本システムにおけるユーザデバイス（ペンライト）は、双方向ライブ支援システムにおけるペンライト型デバイスと同様のものを採用した。ペンライトの動きの軌跡を獲得するためには、ペンライトの動き情報を推定する必要がある。そのため、カメラ映像上からペンライトの中心座標を推定する枠組みを実装している。今回の実装では、ペンライトの発光部に使用される反射材を手がかりとして、RGBカメラ、IRカメラおよび赤外線照射レーザを持つRGB-Dカメラを用いてペンライトの位置を推定することで、ペンライトのおおよその中心座標を推定する実装とした。また、双方向ライブ支援システムにおけるペンライト型デバイスにおいては、赤外線カメラによる位置推定に利用することを目的として赤外線LEDを搭載している。本システムにおいては、赤外線反射光量を増やすためにペンライト型デバイスに内蔵された赤外線LEDも補助光源として利用している。本システムにおいては、ペンライトの追跡および配信映像生成用のRGB-DカメラとしてIntel Realsense D435を使用した。Intel Realsense D435は、RGBカメラと2台のIRカメラ、赤外線照射レーザがセットとなったカメラシステムであり、2台のIRカメラを用いたステレオビジョンと、赤外線照射レーザから照射されるドットマトリクスパターンを利用して距離計測を行うことができるものである。RealSenseのIRカメラは、その観測波長帯域として可視光領域に部分的に保持するため、IRカメラに対して可視光カットフィルターを装着することで可視広帯域の情報を遮断した。可視光帯域の遮断は、カメラシステムの深度情報計測性能に影響を与える可能性があるが、今回のシステムにおいてはカメラの深度情報を利用しないため影響がないものと考えられる。また、深度情報計測性能に対する影響も近距離計測に対しては影響が少ないことを確認している。

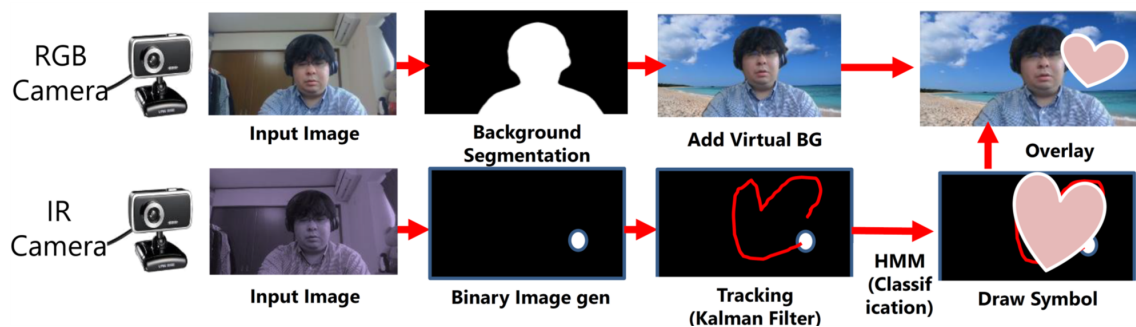


図 4.5: ペンライトの軌跡に基づく CG アイコン生成

図 4.5 は、ペンライトの軌跡に基づく CG アイコン生成の枠組みにおける一連の流れを示したものである。IR カメラから得られた映像においては、反射材が採用されているペンライトの発光部分の明るさが際立って高くなっている。この IR カメラ映像に対して、閾値を用いた 2 値化処理により一定の明るさ以下の要素を除外し、さらに、膨張収縮処理を利用して白色領域を結合することでペンライト領域を算出する。最後に、得られたペンライト領域に対して重心座標を算出することでペンライトの発光部のおおよその位置を算出する。本実装においてはペンライトの向きの多少の変化による見え方の違いを受けを確認しているが、見え方が同一である場合の値ぶれを防ぐために過去の座標値を用いた補正により外れ値を除外する処理を行っている。

また、ペンライトの点灯領域および中心座標を検出するもう 1 種類の安価な方法として、RGB カメラから得られる画像のみから計算される各画素値の HSV 値に対して予め設定した閾値を利用して高強度領域を検出する方法の利用も検討した。RGB カメラ映像の HSV 値のみを用いたペンライトの点灯領域検出は、周囲にペンライト以外の類似色領域がある場合にそれがノイズになってしまうという課題があるが、民生品の RGB カメラのみで実現されるものであるため、安価かつ手軽にアプリケーションを利用出来るようになる点が手法上の利点である。しかし、周辺に類似色の光源・背景オブジェクトがない環境であれば、RGB-D 画像を用いた場合と大きな差のない形でペンライト領域を検出することができる。

ペンライトの中心座標の追跡はカルマンフィルタを利用して行い、その後得られた軌跡データから対象となる CG オブジェクトを予測する。軌跡データからの CG オブジェクトの推定には、時系列データからのデータ予測に優れる隠れマルコフモデル (HMM) を利用し、描かれた軌跡データがあらかじめ登録されたどのクラスに分類されるのかに関して推定を行う。隠れマルコフモデルの学習においては、軌跡データとクラスの対応関係を記述したデータを利用した。最終的に、隠れマルコフ

モデルを通じて推定されたクラスに基づく CG オブジェクトを生成する。この際に、軌跡の大きさや長さを考慮し、軌跡にフィットしたサイズ・縦横比を持つ CG オブジェクトデータを生成する実装とした。

CG オブジェクトは、画面端に向かって移動していくモーションを持ち、画面外に消失したタイミングでそのアイコンの種類・大きさ・座標・縦横比の情報がサーバを介して別クライアントへとテキストデータで送信される。クライアントでは、常に他のクライアントからの画像情報の受信を待機しており、他のクライアントからの受信があった際には、アイコンの種類・大きさ・座標・縦横比・送信元 ID の情報をもとにアイコンを再生成する、このような一連の枠組みから、ペンライトの軌跡から生成された CG オブジェクトが他者のテレビ電話映像へ流れていくという演出が実現される。

また、配信ライブ視聴という場面を想定した設定として、観客がペンライトを通じて描画した絵 (CG オブジェクト) を配信画面上に送信し、配信画面上に同じ形の CG オブジェクトが集約すると拡大し爆発するというエフェクトを持った演出デモを作成した。本デモは、観客のアクションをコンテンツ映像に対して作用する仕組みを提供するだけでなく、複数の観客のアクションの情報を統合した情報提示を行うことで、一緒に応援している感覚を増強することを図っている。

本実装においては、コンテンツ映像を撮影する実カメラに対しても、実カメラの映像を取り込んで編集する仮想カメラ、他者からの情報を獲得して映像編集の情報として提供する通信クライアントを設け、観客の生成した CG オブジェクトデータをコンテンツ映像に重畳できる枠組みを実装している。

## 音楽ライブ現場を対象とした「塗り絵」アプリケーション



図 4.6: ペンライトを介して同じ絵に対して複数人で色を塗ることのできる「塗り絵」アプリケーション

分散環境で視聴する観客同士の体験の共有を実現するもう1つのデザインとして、複数人でCGオブジェクトを共有しつつ、ペンライトの発光色・アクションに基づいてCGオブジェクトを塗ることで共同で作品を作ることができる「塗り絵アプリケーション」を実装した。本アプリケーションにおいては、クジラを模したCGの絵が参加者の画面領域を横断するように移動する。画面端への移動時には、次の遷移先に対して座標情報と画像データを送信し、次の遷移先においても、受信情報に基づいて前ユーザと同じ見え方でCGの絵が重畳される。ユーザは、ペンライトをCG映像に重ねることで、CG映像に対して色を付けることができ、他のユーザが塗った絵に対して重畳して色を重ねることができる。

本アプリケーションの実装においては、ペンライトの点灯領域の検出には、RGBカメラ映像に対してHSV値による閾値処理を行って得られる高輝度領域情報（前述の「お絵かき」アプリケーションと同様のもの）を利用した。画像中の高輝度領域とCGオブジェクトの重なる範囲を塗られた領域としてペンライトの発光色をCGオブジェクトに対して重ねて描画することで、ペンライトによる塗り情報をオブジェ



クトに対して反映する。

このアプリケーションは、共通の対象に対して視聴者同士が共同で塗り絵を行う仕組みを設けることで、色を塗る他の参加者の存在を知覚させ、相手と一緒に楽しむ体験を増強することを図っている。このような仕組みは、相手の空間との連続性を確保するものであり、物理的に離れた相手との心理的な距離の感じ方に影響を与える可能性が考えられる。

## 4.4 双方向ライブ支援システムとの融合

### 4.4.1 汎用型ライブ支援プラットフォームの実現



### 多様な立場の視聴者の体験・参加を拡張する 音楽ライブ参加支援プラットフォーム

図 4.7: ライブ参加支援プラットフォーム

本論文では、3章からこれまで、音楽ライブの参加者支援のためのいくつかの仕組みについて提案してきた。第3章では、現地環境における演者と観客の間の双方向での身体動作を伴う交流を支援する「双方向音楽ライブ支援システム」を提案し、

既に集団的な沸騰が形成されている現地環境において、その形成要因となっている集団の内部での個々人のつながりを促進する枠組みを提案することができた。また、遠隔のパブリックビューイング視聴環境での利用を想定した拡張として「遠隔ライブ参加支援システム」を提案し、演者の演技情報の手元のデバイスへの発光・振動フィードバックや、自身のアクションの配信映像上・現地の舞台装置への作用を提供することで、現地環境の演者や観客とのつながり、参加性の向上に寄与できた。

本章で提案する分散遠隔視聴環境でのオンライン交流支援の枠組みは、前章で提案したこれらの枠組みを拡張するものであり、これらのシステムを組合せて用いることで、視聴環境の異なる多彩な視聴者同士が交流し、現地環境や演者に作用することを可能とする汎用型ライブ支援プラットフォームを実現する。

本ライブ支援プラットフォームでは、現地・パブリックビューイング環境・分散した遠隔視聴者といった様々な視聴環境での利用に対応しており、様々な立場の参加者が、様々な粒度の情報を発信できることから、参加者の立場の違いや、匿名性・プライバシー面への影響を考慮しながらその時々のライブの特性に応じた多彩な演出を実現することができる。

また、本システムでは一貫してペンライト型のユーザデバイスをユーザの情報入力手段・情報提示手段として用いている。現地のライブにおいて慣例的・儀礼的に用いられるペンライトを参加のためのインタフェースとして遠隔地環境でも共通して利用できるようにすることで、環境の違いを軽減したシームレスな情報提示・情報集約を実現できる。例えば、演者の腕の振りの情報は、現地視聴者・遠隔地で画面を通じて視聴する視聴者・パブリックビューイングの参加者・VR/AR環境での視聴者のペンライトに対して一様に同一の体系で伝達できるほか、各参加者はその参加形態の違いにとらわれずにペンライトに対するアクションを通じてライブ演出に参加することができる。このように、現地・遠隔地に対して現地のような共通の参加体系を提供し、立場の異なる各参加者の情報を統合的・体系的に獲得でき、多彩な形で提示できるプラットフォームは従来に例のないものである。



図 4.8: 視聴環境の違いに依らず共通のインタフェースを通じた視聴体験を提供

#### 4.4.2 実際のイベント場面でのプラットフォームの予備的検証

3章で提案した双方向音楽ライブ支援システムおよび本章で提案する分散遠隔視聴環境でのオンライン交流支援基盤を組み合わせた「汎用型ライブ支援プラットフォーム」の実際の現場での利用可能性・課題を探るため、現地・Youtube Liveでのオンライン配信(分散視聴環境)という2種類の視聴方法での参加が可能なイベントを題材として予備的な実証実験を実施した。

##### 実験設定および背景

本実験は2021年3月7日14:00-16:30に埼玉県越生市の酒蔵「越生ブルワリー」で開催されたイベント「新・竹取物語」内で実施した。このイベントは、本学人文社会学研究科のビュールク研究室・電気通信大学児玉研究室等と共同で実施したものであり、竹取物語を原作とするオリジナル脚本の演目を、舞踏家・落語家・狂言師・演劇役者という様々な役者が演じる朗読劇型のイベントである。本イベントのうち、「黄の場」と呼ばれるセクションにおいて、本システムを利用した検証を実施した。「黄の場」は10本のオリジナル脚本によるエピソードを落語家が説明するものである。そのため、本イベントでの実証実験は、プラットフォーム自体のライブイベント現場での利用可能性を探るという観点に加え、落語という日本の伝統芸能という現代の音楽ライブとは異なるタイプのライブイベントに対する本システムの応用方法を検証をするという側面を持っている。



技の特性を保持しつつ、演者と観客の間での自然な交流を支援すること、現地・遠隔地という異なる立場の観客が体験を「共創」できるものを作ろうというところにこれまでにないチャレンジ性を持つものである。

落語は400年の歴史の中で様々な要素が削ぎ落され、最終的に扇子と手ぬぐいのみを持ち、座布団に正座をして物語を語る「削ぎ落された」演技となったという。落語においては言葉だけで語り、あえて見せないことで観客に想像して聞いてもらう芸として発展してきた、そのような背景を持つ落語の舞台へ技術支援を行うことは、演技に対して「冗長さ」を持たせることである一方で、新たな表現による落語の世界観の開拓する可能性を秘めたものである。そのため、本実験においては、落語の語りによる従来の体験を極力阻害せずに、観客の物語への想像や、落語の核となる「台詞」への関心を想起させることで新たな体験価値を生み出すことを目的とした演出を取り入れた専用のシステムを開発した。



図 4.10: 新竹取物語 イベント 実証実験システム

開発したシステムでは、観客は演技の始まる前に、画面上に表示されるエピソードに関連したイラストをペンライトで塗ることで、10本のエピソードのうち見たいエピソード・興味のあるエピソードを投票することができる。演技中は、落語家の語った台詞が短冊型のCGとして画面上に現れ、視聴者は画面上の短冊に対してペンライトを介してアクションすることで、気になった単語を際立たせることができるようになっていく。これらの仕組みを利用することで演者は、観客の興味に応じて語りを進めたり、キーワードにちなんだ解説を通じて視聴者との交流を実現できる。また、落語家の腕にリストバンド型の加速度センサを装着し、演者から視聴者

に対する逆方向へのフィードバックとして、扇子を振るアクションをCGの映像演出や観客のペンライトの振動として配信することで演者とのつながりを身近に感じられるような演出を取り入れている。

実験にあたり、現地環境では1回の語りにつき2人にペンライトを持って演出に参加してもらい、遠隔地環境からは6人の参加者にペンライトおよび後述の視聴用ソフトウェアを用いながら、YouTubeにおけるライブ配信機能であるYoutube Liveを用いて配信される本イベントを視聴してもらった。

## 検証用システム

本実験においては、落語での視聴体験・演者・観客の間の交流体験を支援する専用のシステムを、前述の汎用型ライブ支援プラットフォームをベースとして構築した。本システムは、双方向ライブ支援システムおよび、分散視聴環境におけるペンライトを用いた「塗り絵」を利用した観客参加支援の枠組みをベースとしたもので、現地・分散遠隔視聴環境の2種類での視聴体験を同時にサポートするものである。

本実験システムを設計するにあたり、落語本来の体験である「演者による語り」に焦点を当てて、観客の物語への想像や、落語の核となる「台詞」への関心を想起させることで新たな体験価値を生み出すことを念頭に置き、演出デザインを検討した。

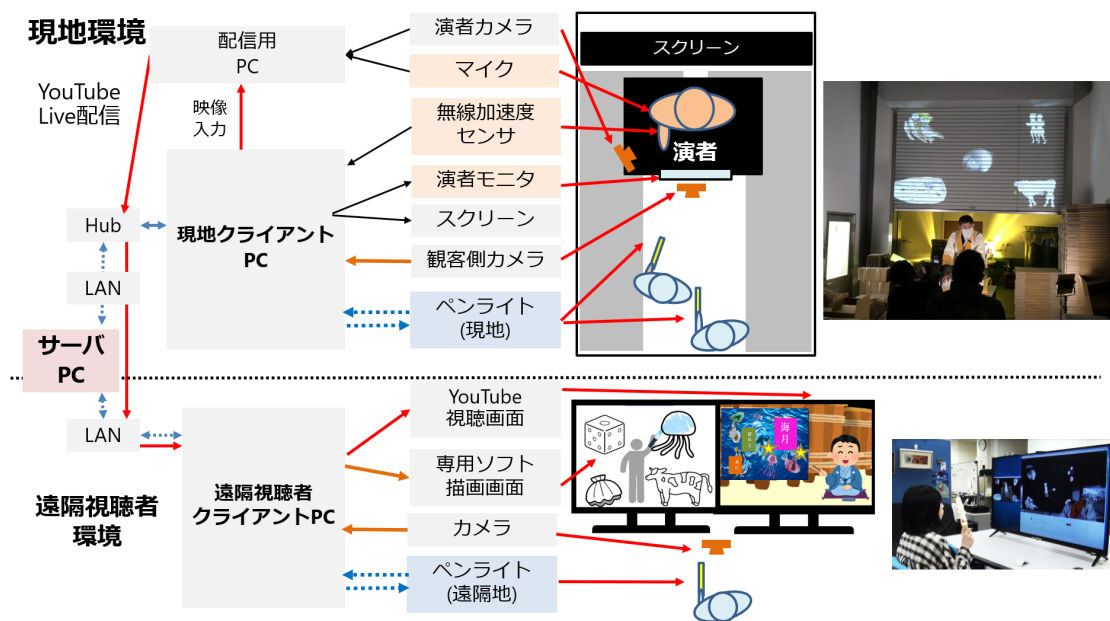


図 4.11: 実証実験システムのシステム構成図



図 4.12: 実際のイベントにおける現地の観客の参加。(左図) 塗り絵によって場面を選択する様子 (右図) 朗読中にペンライトを使ってキーワードの短冊に触れる様子

現地環境および遠隔視聴環境におけるシステム構成図を図 4.11 に示す。現地環境には、演者の座る高座台の後ろに酒蔵のシャッターを用いたスクリーンがあり、CG による映像演出が投影される。現地の観客は、演者の生の落語による語りを聞きながら、ペンライトを利用してスクリーンの映像演出に対して介入することを可能とする。スクリーンに投影される映像は、演者の映像と合成されて YouTube Live を通じて遠隔視聴者へと配信され、遠隔参加者も視聴できる仕組みとなっている。遠隔視聴者もブラウザで Youtube Live による現地映像を視聴しつつ、専用開発されたソフトウェアを起動することで、ペンライトを介して現地のスクリーン・YouTube Live で配信される映像上への介入ができる。このため、本システムでは、現地の観客・遠隔地の観客が共にスクリーン（配信画面）の CG 演出という共通する枠組みへ参加する体験を提供している。



図 4.13: 演技前に観客の塗り絵によって場面を選んでもらうシーン。現地参加者はスクリーンを見ながらペンライトで塗り絵をして演者に見たい場面を伝える。遠隔参加者は手元の画面で現地参加者同様に塗り絵ができ、その様子はハート形のアイコンで現地スクリーンへ反映される。



図 4.14: 演技中に台詞の書かれた短冊に触れるシーン。現地参加者はスクリーンを見ながらペンライトで気になったキーワードに触れ、拡大することができる。遠隔参加者は手元の画面で短冊に触れることができ、その様子は星形のアイコンで現地スクリーンへ反映される。

開発したシステムは、演技の開始前と演技中で2種類の動作フェーズを持っている。演技の始まる前の段階で観客は、スクリーン上に表示されるエピソードに関連したイラストをペンライトで塗ることで、10本のエピソードのうち見たいエピソード・興味のあるエピソードを投票することができる。現地のスクリーンおよび配信映像上には、観客を映したwebカメラの映像と、10本のエピソードのうちの5本の物語に対応するモノクロのイラストが表示される。現地の観客は、物語に対応する





図 4.15: 現地のスクリーンに表示される画面の一例 (左図) 場面選択時画面 (右図) 演技中画面

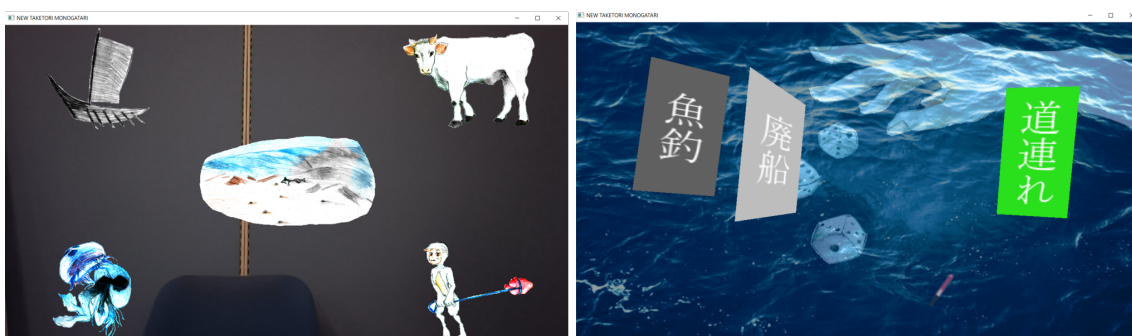


図 4.16: 遠隔地の観客側の専用ソフトウェアにおける視聴画面の一例 (左図) 場面選択時画面 (右図) 演技中画面

モノクロのイラストに自身の持つペンライトを重ね合わせることで、絵に対して色を付けることができ、これにより見たいエピソードを投票することができる。画面上のイラストは物語のキーとなる動物や物をピックアップしたものであり、観客の物語の中身への関心を促すことを意図したデザインとなっている。

遠隔地側の観客側では、YoutubeLive の配信画面と別に専用ソフトウェアを起動することで、現地の演技の進行にあわせて別に描画ウィンドウが表示されるようになっている。演技の始まる前の段階では、遠隔地側の観客の描画ウィンドウには、現地スクリーン映像と同様に自身の web カメラ映像と 5 種類のイラストの情報が表示され、塗り絵を行うことで、聞いてみたいエピソード情報を投票することができる。遠隔地の観客から投票されたエピソードの情報は、中継サーバを介して現地環境に送信され、リアルタイムに現地の演出に反映される。遠隔地の観客から投票されたイラストには、現地スクリーン映像（配信映像）のイラスト上にハートマークの

アイコンが付与され、現地・遠隔地からどのアイテムがどの程度塗られた（投票された）かが、現地の演者・観客・他の視聴者からも相互にわかるようになっている。

この投票の枠組みに用いられているペンライトを用いた塗り絵の枠組みには、前述した「塗り絵」アプリケーションで取り入れた枠組みと同様に、RGBカメラ映像のHSV値を用いて画面中のペンライトの中心座標および発光領域を検出するアルゴリズムを採用した。前述の「塗り絵」アプリケーションでは、オブジェクトと発光領域の交差領域をそのまま特定の色で塗りつぶす実装としていたが、本システムでは、オブジェクトのカラー画像・モノクロ画像を予め保持し、塗られた領域をカラー化することで塗られていることがわかるような演出とした。

本システムを用いることで演者は、投票の結果に参考にしながら語りたいエピソードを決定することができる。演者の高座台には、スクリーン映像・配信映像と同様の内容が表示されたタッチパネルディスプレイが設けられており、演者はエピソードに応じた画面上のアイテムをタッチすることで、各エピソードに応じた演出を任意のタイミングで開始できる。

演技中は、現地のスクリーンおよび配信映像には、エピソードにあったアイテムを背景とする映像が投影され、演者の語った台詞にあわせて、語りに含まれるキーワードが短冊型のCGとして画面上に現れる。これらの台詞の短冊は、画面の上部から下部へ降ってくるように流れ、観客は、ペンライトを用いて画面上の短冊に対して触れることによって気になった単語の大きさを拡大できるようになっている。本視聴画面中の観客のペンライトの画像上の位置は、前述の塗り絵のアプリケーションの場合と同様にwebカメラの映像から検出したものを利用し、検出されたペンライトの中心座標に対してペンライト型のアイコンを表示することで観客のペンライトの位置を視覚的にわかるようにしている。画面上に描画される語りのキーワードに関しては、予め演者と相談の上話を膨らませやすそうなものを台本からピックアップし、画像化してシステム内で保持している。キーワードの短冊CGの描画は、現地クライアントPC（制御用PC）へのキーボード入力に応じてなされるように設計されており、イベント当日は、演者の語りにあわせてキー入力で演出のタイミングを指定する形で運用した。

遠隔地の観客側では、YoutubeLiveの配信画面と別に、専用ソフトウェアによって起動される描画ウィンドウに対してモノクロの台詞の短冊が左側から右側に流れるように現れるようになっている。遠隔地の観客は、専用ソフトウェアのウィンドウを流れる台詞の短冊に対してペンライトを近づけることによってモノクロの短冊に対して色を付与することができる。色が付与された短冊の情報は、中継サーバを介して現地へ送信され、現地スクリーン映像（配信映像）の対応する短冊上に星型

のエフェクトとして演出に反映される。この枠組みにより、現地からペンライトを使って短冊に対してアクションを行うと大きさを拡大でき、遠隔地からペンライトを使ってアクションを行うとエフェクトを付与できるという形で、現地・遠隔地の観客の反応がお互いにわかる形で付与される。ペンライトと短冊の接触の判定には、画像から得られるペンライトの中心座標と短冊の中心座標の間の距離の情報を利用し、接触時間(フレーム数)に応じて短冊にテキストチャとして描画されるメッセージのモノクロ画像・カラー画像のブレンド比率を調整することで、カラー画像へと近づけていく処理として実装した。

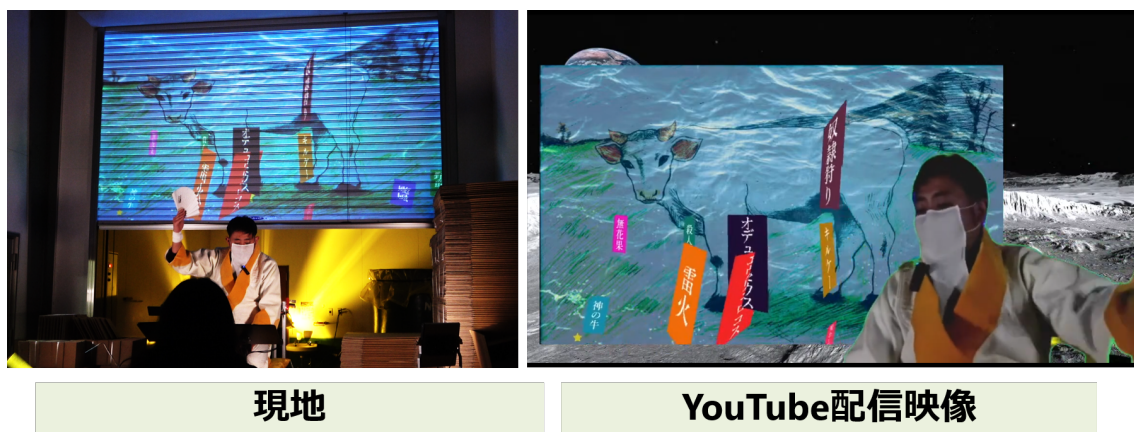


図 4.17: 演者の腕の動きにあわせて舞い上がる台詞の短冊および YouTube 配信映像での見え方

また、演者から視聴者に対する情報伝達支援の体系として、双方向ライブ支援システムと同様に、演者の腕にリストバンド型の加速度センサ (TWE-LITE 2525A) を装着して演者の扇子を振る・手を上げるといったアクションを検出し、現地・遠隔地の視聴者のペンライトに対して動きの強度に連動した振動提示を行った。また、演技中は演者の腕の振りに応じて下に落ちた短冊が重力に反して画面上を舞い上がるという演出を取り入れ、既に落下したキーワードを再度際立てることで、解説のきっかけを作ったり、現地の観客が再度アクションを起こす機会を構築できるようにした。

本実験においては、遠隔視聴者には実験前に事前に視聴用のソフトウェア・ウェブカメラおよびペンライト型デバイスを郵送で配布し、使い方に関する講習会をオンラインテレビ通話にて実施した。遠隔視聴者の視聴環境が個人によって異なることから、ペンライト通信用の dongle (Mono-Stick) および Web カメラの接続情報を自動で検出し、エラーがある場合は自動警告を行う機能を持ち、ペンライト領

域を抽出するための HSV 値の閾値を，個人環境に適合した形へ調整できる専用の GUI を持った本実験専用のソフトウェアを設計した。

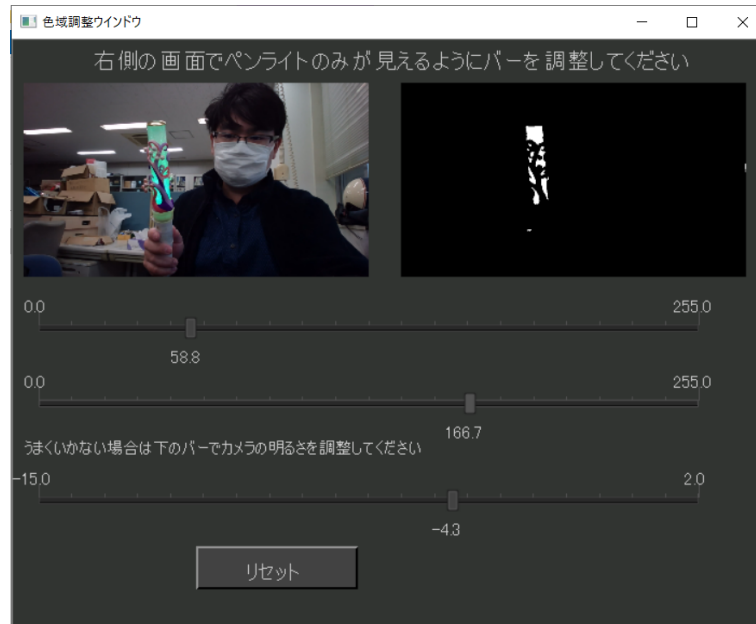


図 4.18: ペンライト領域の見え方を調整するためのインターフェース



図 4.19: 本実験で使用した「蓬莱の球の枝」を模したペンライト型デバイス

また、本実験では双方向音楽ライブ支援システムにおけるペンライト型デバイスをユーザデバイスとして利用しているが、作中に登場する「蓬萊の球の枝」をイメージした装飾を施したデザインのカバーを電気通信大学 児玉研究室と共同で製作し、作品世界に寄せたデザインのデバイスとして使用した。

## 実験から見出された知見および課題

実験時には、現地の演出用ソフトウェアは不具合無く動作し、現地視聴者・遠隔地視聴者の場面の投票・気になる単語に対する投票の枠組みは、落語家の語りを構築するきっかけとなり、本舞台における演出として一定の役割を果たすことができた。一方で、遠隔視聴者の視聴ソフトウェアにおいては、YouTube Live における配信映像と、専用ソフトウェアにおける通信体系が別チャンネルであることから、映像の遅延時間の同期が取れずタイミングずれが起こってしまう問題や、描画処理の負荷・通信処理の負荷に起因して視聴環境によっては遠隔地の視聴用の専用ソフトウェアが停止してしまう等の問題があった。本実験での遠隔地からの参加者は10人以内と比較的小規模な設定で実施したが、より大規模な設定での実験や実用化を進めていく上では、今後フレームワーク内での通信処理の安定化等を進めていく必要がある。

また、前述の「お絵かき」「色塗り」を題材としたアプリケーション試作においては、(Zoom等のテレビ電話システムを介した形で)観客同士での交流を実現することを視野に入れて開発を実施した。しかし本実験では、通信基盤の実運用上の課題を探ることに焦点を置いたことから、分散環境で視聴する観客同士の横のつながりを直接的に支援する枠組みを取り入れた演出は実施しなかった。CGの描画が観客の映像を渡り歩いていく等、アプリケーション試作の段階で議論したような観客同士の交流を支援する枠組みの持つ効果や、そのために適した演出のあり方については別途さらなる検証が必要である。

本実験は本論文の提出直前の2021年3月7日に実施された最新の報告であり、今後、本実験で得られたデータおよび追加の実験を通じて、本実験で取り入れた演出の持つ効果、観客の行動や反応等の詳細な分析を進めていく予定である。

## 4.5 他者環境へ様々な「粒度」で介入可能な汎用的相互 交流基盤の実現へ

### 4.5.1 多感覚相互交流支援プラットフォーム

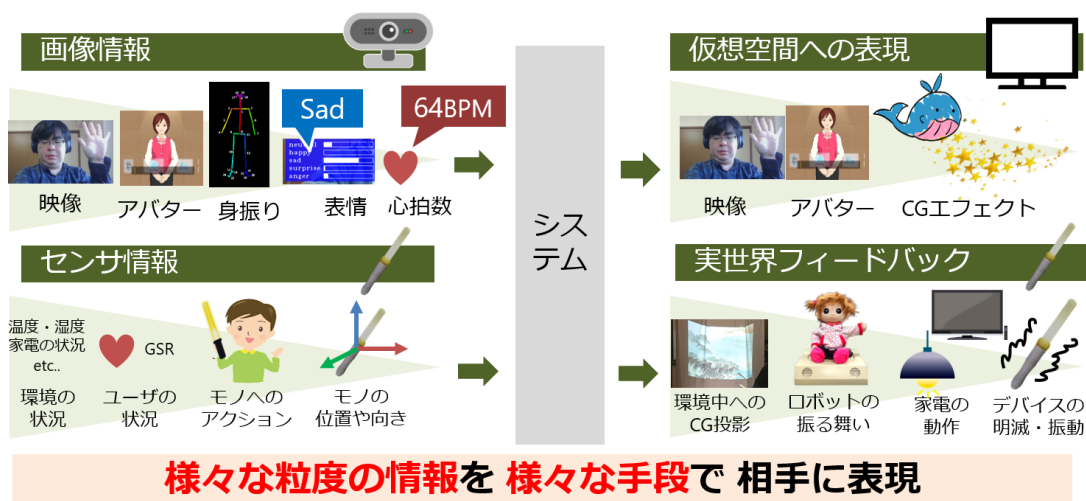


図 4.20: 多感覚相互交流支援プラットフォーム

これまで、多人数相互交流支援のあり方を検討する題材として主にライブイベントの現場に着目したシステム開発およびフィールド実験に関して報告してきた。本研究の成果として、現地・パブリックビューイング・遠隔視聴環境からのあらゆる形での参加・演出を実現する汎用的ライブ支援プラットフォームとして完成させることができたことがある。一方で、本プラットフォームは、参加者の参加特性に合わせて様々な情報量を持つ情報を、相互に通信できるという特徴を持っている。そのため、様々なユースケースに対して、インタラクション主体のスケールおよびその内部で伝達される情報の情報量という2つの「粒度」を考慮した情報交流を支援できるものである。そのため、オンラインライブイベントに限らず、様々なオンライン交流、現地とオンラインイベントを組み合わせた形でのハイブリットでの交流を支援するための礎として本研究における提案が利用できる可能性がある。

## 4.5.2 他ドメインへの開発基盤の応用および試作システム

本研究の一環として、開発した相互交流基盤を、他の「粒度」の異なるインタラクション事例に応用・汎化する方法について議論を進めている。これらの取り組みは、現段階では発展の途上にあるものであるが、本論文ではこれらの取り組みに関する今後の将来展望とあわせて、他のドメインにおける本プラットフォームの応用可能性について報告・議論する。

### 他者とダイレクトな交流を実現する「つながるカメラ」

本章で提案するテレビ電話による自他の映像への介入を可能とする相互交流支援プラットフォームは、現在のオンライングループ会議における一般的なユーザインタフェースとして用いられるグリッドビュータイプのテレビ電話システムにおいて、相手のグリッド内にまたがって作用を及ぼすような、これまでにないインタラクションをそのまま実現できるものである。アプリケーション試作の段階では、他者の映像空間への物理的な侵入、アイコンや自身の塗った絵を相手の空間へ飛ばすといった間接的な侵入の2種類のものを作成したが、テレビ通話の形態が多様化するなかで、このような相手のグリッド領域に侵入出来るテレビ電話システムの持つ有用性に関してはさらなる議論が必要な課題である。

遠隔コミュニケーションにおいて相手と画面上で接触したインタラクションが取れることは、本手法の持つ利点である。従来研究として、テレビ電話において画面越しの相手との物理的接触を実現したものとして遠隔握手ロボットシステム [112] があるほか、VRchat[3] に代表されるソーシャル VR 空間においては、現実世界のように相手と仕切りのないコミュニケーションを実現することができる。しかし、これらのシステムは導入に対して特別なハードウェアの用意や装着が必要であり、2020年現在の多くのオンライン会議がグリッドビュータイプのテレビ電話システムを採用していることを考慮すると、ユーザの利用コストが大きい。本手法は、テレビ電話の手法として一般的に用いられるグリッドビュータイプのテレビ電話の機能をそのまま「拡張」する形で他者との接触したインタラクションの手段を提供していることが新規性としてある。

グループビデオ通話において、相手と画面上で接触したインタラクションが可能となることは、相手との空間連続性や、親密さ、共在性の観点から様々な影響を与えることが推測される。オンラインで懇親会を開く際に相手とグラスを間接的に接触させた形での乾杯への参加を実現する、相手あるいは相手の環境中の物体を指差

しによって指示する等は，本手法を用いて実現される，これまでのテレビ電話ではなしえなかったインタラクション形態の一例である．また，本手法では同一のデータを共有する枠組みを提供することから，「お絵かき」「塗り絵」のデモアプリケーションで試作したように，共同作業の支援ツールとしても利用できる可能性を持っている．そのため，3D オブジェクト・画像等のデジタルデータを，現実世界の紙のように自然な形で共有したり，編集するためのインタフェースとしても有用な手段となり得る．ゲームエンタテインメントの文脈では，ビデオ通話をつなぎながらオンラインゲームを行うことに関心が広まっているが，本枠組みは自他の映像画面上への介入を実現できることから，オンラインビデオ通話自体を一種の「遊び」の手段として用いることができるものである．そのため，ビデオ通話をしながら手軽に遊べるゲームの実現や，主題となるコンテンツとバックチャンネルとしてのテレビ電話上でのコンテンツを組み合わせた新たなゲーム表現を実現する手段としても利用できる可能性がある．

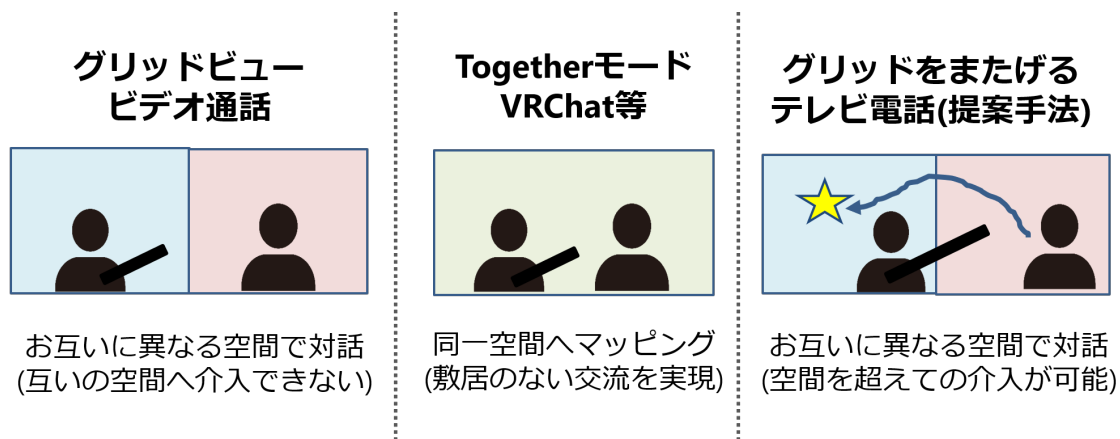


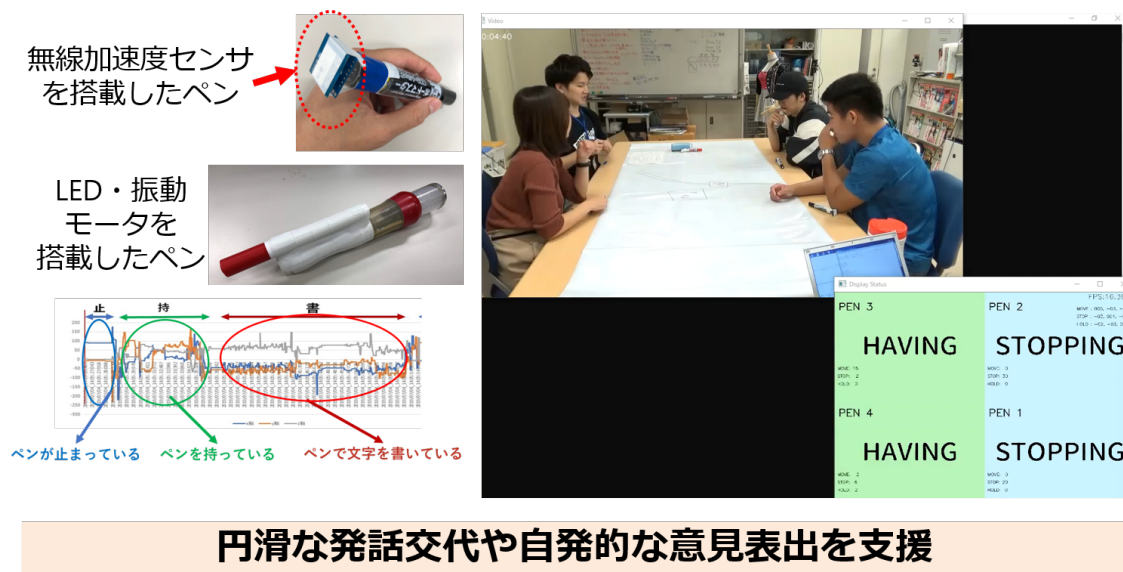
図 4.21: グループビデオ通話の形態

グリッドビュータイプのテレビ電話自体の有用性に関しては議論の余地が残るものである．グリッドビュータイプのテレビ電話の欠点として，視聴環境の異なる多くの参加者の映像が並列的に表示されることから認知負荷が大きいことが指摘されている．これらの問題を解消する手段として，本手法とは異なるアプローチとして Microsoft Teams[12] で採用されている Together モードがある．Together モードでは，背景映像を切り抜いた参加者映像が同一背景の映像にマッピングされるものである．個々人の背景映像が削除することで画面上の冗長さを削減し，また同一空間に所属している感覚を強化してユーザに提示しているという側面がある．また，背景映像およびグリッドがない画面構成であることから，提案手法のように，隣の参加者との間接的接触を伴うインタラクションも行うことができるという特徴も持つ．



本手法は、VR空間でのインタラクションのように、参加者を同一空間にマッピングすることで従来のグリッドビュータイプのテレビ電話の問題を解決したものであると言える。提案手法と Together モードの違いは、グリッドという自己領域を保持しているかどうかという点にある。Together モードが VR での交流と同様に、同一空間に参加者を引き込むインターフェースを採用している一方で、提案手法では個々人が互いに異なる視聴環境にあることを許容した上で空間連続性を拡張しようとしているところに違いがある。提案手法は、個々人を同一空間に没入させるのではなく、あくまで相手と異なる空間にいるという事実を尊重した上で、相手とのつながりを形成する手段を提供するものであり、相手との適切な心理的距離感担保した上での遠隔でのインタラクションの実現へ応用できる可能性を持つ。関連して、現実世界でのインタラクションでは、他人との不適切な距離感が、本能的な他者への不快な感情を抱かせることが指摘されている(所謂「パーソナルスペース」の概念 [102])。テレビ電話において自己領域が設定されていることは、空間が断絶していることによるユーザへの心理的安心感や、不安感の軽減に影響を及ぼす可能性が考えられる。

#### デバイスによる粒度の低い認知：会議支援



### 円滑な発話交代や自発的な意見表出を支援

図 4.22: 会議支援への応用に向けた取り組み

音楽ライブ等と比較してインタラクション主体のスケールが小さいケースでの技術支援として、ブレインストーミング等のアイデア出しの会議での会話支援システ

ムに関する研究を進めている。アイデア出しの会議は、意見の多様性がその会議の質を高めるという側面があり、これはライブイベント等と同様に、バラバラの孤独な個人が集団として集うことで創発される価値をもたらす活動である。会議の質を高める取り組みとして、ボイスレコーダを用いた議事録自動作成支援システム等が存在するが、会議に参加する個人の活動を積極的に促すような情報獲得・提示のあり方に焦点を当てて、その支援を図ろうという提案は少ない。会議における個人の活動を消極化する要因として、参加者の間の社会的立場の違いや、「誰かに見られていること」が挙げられる。会議に参加する個人のアクティビティ情報を収集し可視化する方法として、ボイスレコーダやカメラを用いて個人の活動を獲得・可視化する方法も考えられ得るが、これらのきめ細かな情報に基づく個人状態の獲得・記録は、「見られている」「見返される」感覚を強力に個人に植え付けるものであり、個人の活動を消極化してしまうことへの懸念がある。本研究の目指すところは、個人情報を「粗く」獲得し、そこから「集団全体の状況」を知ることで会議の盛り上がりや停滞を知り、円滑な発話の交代や、自発的な意見表出を促すことである。

このため、オフィス会議の現場で用いられるマーカーペンやイレイサーに対して無線加速度センサ (TWE-LITE2525A, Mono Wireless Inc. ) を取付け、個人のペンの使い方から会議への参加の仕方を粗く獲得する技術開発を行った。ペンから獲得される加速度データの平均・分散値および、スコア (ペンが置かれている・保持・筆記) を三層パーセプトロンで学習し、複数台のペンから送信される加速度データに基づいて個人の状態を分類する方法を開発した。

また、個人に対する情報の与え方も、会議に対して自発的な参加を促す上では議論が必要な項目である。取り組みの一環として、双方向ライブ支援システムにおいて用いたペンライト型デバイスを改造したLED/振動モータを搭載するペンを作成し、個人に対して会議中に振動・発光を通じたフィードバックが可能なシステムを開発した。

これらのデバイスは、オンライン会議の現場においても個人のアクティビティを計測したり、相手に自己の状況を伝える手段として利用できるものであり、会議の盛り上がり・盛り下がり時に参加者・また会議の外にいる人に対してフィードバックを行う手段として活用できる。本提案において採用している粒度の低い参加者情報センシング方法の会議支援への活用の有用性、および会議参加者へどのような場面でどのようなフィードバックを行うことが望ましいのかという観点での検討は必要な課題であり、今後調査を進めていく予定である。

## 適度な粒度での情報伝達：遠隔授業支援

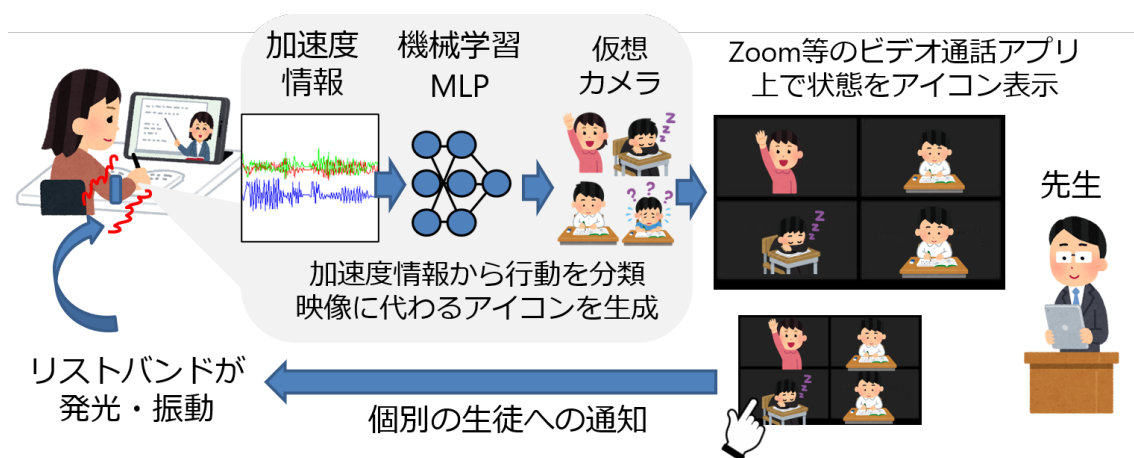


図 4.23: 双方向遠隔授業支援システム

また、音楽ライブや会議とはまた異なる集団交流の事例として、遠隔授業に焦点を当てた授業支援システムの開発を行っている。2020年の新型コロナウイルス(COVID-19)の流行に伴い、日本の教育機関においてもオンラインによる遠隔授業が本格的に採用されるようになった。しかし、オンライン授業は、先生・学生・他の学生の間でのつながりが対面授業と比較して薄く、多くの授業において先生から学生に対する一方的なものとなってしまうことが課題としてある。さらに、オンライン授業においては、Zoom等のオンラインビデオ通話システムが用いられるが、日本国内の大学の講義においては、学生はカメラをオンにせずに講義を聴講するケースが多い(少なくとも教員側から学生に対してカメラオンを強制することは、学生のプライバシー保護の観点等から埼玉大学をはじめとし、多くの大学において推奨されていない)。このように先生・学生共にお互いの様子が「わからなすぎる」状況は、先生が学生のリアクションがない中で授業を進める必要があることに加え、学生の側からも先生に質問をしたいタイミングで質問できない等の問題を抱えるものであり、教育効果の観点からも改善の余地があるものである。

そこで、オンライン授業という集団の内部で相互に伝達される情報の最適な「粒度」が現在の学習支援システムの枠組みとマッチしていないことが、オンライン授業における教員・学生双方の授業能率・満足度に影響しているという仮説の元に、学生の活動情報を適度な粗さで計測・提示でき、教員側からも個々の学生に対して明確に指示を送ることができる双方向のオンライン授業支援システムの実装を進めている。

このシステムでは、双方向ライブ支援システムにおけるペンライトデバイスを改造してリストバンド型にしたもの学生用デバイスとして利用し、学生の挙手・筆記・睡眠等のアクティビティをデバイスで獲得した加速度データに基づいて推定する。ステータス推定においては、前述の会議支援の枠組みで用いた、加速度の平均・分散からステータスを推定する三層パーセプトロンのモデルを利用した。さらに、教員や他の学生への情報提示のための枠組みとして、オンライン学習支援システムにおける自己画面の代わりに、アクティビティに対応したイラストを提示する枠組みを提示する仕組みを開発した。イラストの提示には、仮想カメラライブラリ `ycapture`[10] を利用しており、Zoom 等のオンライン授業ツールにおいて一般的な代わりの代用として設定することができる。

また、教員側から学生に対して個別に指示を送る機能についても試作を行った。現在のシステムの実装では、教員側の端末から特定のキーを押すことで、対応する ID の学生・全ての聴講学生のリストバンド型デバイスに対して発光・振動による指示を送ることができるようになっている。このように、本システムでは、教員・学生の間で遠隔での双方向でのやりとりを強化するシステム構成になっている。

遠隔授業の支援という文脈では、参加者の注視対象を共有するもの、参加者の生体情報を計測して教員から確認ができるもの等の手法提案がある。授業という文脈においては、基本的に教員は学生より社会的立場が上であり、このようなシステムの導入が教員による学生の監視につながってしまうことへの懸念がある。本手法では、各個人の行動を粗く伝えることから、そういった「見られていること」への懸念を軽減することを念頭に置いている。しかし、デバイスを利用した教育支援は、学生に特定のデバイスの装着を強いているという側面があり、学生側から受け入れられる・学生側から自発的に使いたくなるようなデバイスデザイン上の工夫が必要となる。

## 4.6 まとめ

本章では遠隔でのグループコミュニケーションに着目し、その中で特有して発生する問題点である、相手がある場にいる感覚(身体的共在性)の欠落に関する問題に対してその支援法を検討した。映像通信(テレビ電話・ライブ配信ツール)と、ユーザの状態獲得・情報提示を担うユーザデバイスを組み合わせることで、自他の映像や実世界環境への多様な粒度での情報提示を可能とした遠隔コミュニケーション支援の枠組みを提案した。本枠組みを用いたデモアプリケーションとして、グリッドビュー型のテレビ電話システムにおいて他者のグリッド領域への侵入が可能なイン

タフェース，ペンライト型デバイスとテレビ電話映像を組み合わせた複数人間での共同「お絵描き」「塗り絵」アプリケーションを実装した。

本枠組みは，第3章の内容に関連し，双方向ライブ支援システム・遠隔ライブ参加支援システムと組合せて用いることで，演者・現地参加者・遠隔参加者の相互的な交流を実現する「汎用的ライブ支援プラットフォーム」を完成するものである。また，ライブイベント支援以外の文脈においても，本枠組みは，現実空間の群衆・遠隔地に点在する個人等，多様な人々を対象とした情報獲得・提示を一元的に実現するものであり，立場の異なる様々な個人の集団への参加を促すシステムを設計するための汎用的な枠組みとなり得るものである。

本章ではさらに，本枠組みの「汎用的ライブ支援プラットフォーム」としての利用可能性を検証するために，朗読劇イベントを対象とした現地・遠隔地の両方の参加者を対象として演者とのインタラクションを支援するシステムを開発し，朗読劇イベント「新竹取物語」で評価実験を行った。本イベントは日本的伝統芸能である落語家による語りを主体としたものであることから，落語における「語り」の体験を向上させる，現地・遠隔地のユーザの協同による聞きたい場面選択の支援，ユーザデバイスを用いた台詞に触れる体験の支援をシステム内部の演出デザインに取り入れている。結果として，遠隔地への情報伝送において，既存の配信ツールとの遅延時間の同期の必要性，多様な遠隔視聴環境での視聴ソフトウェアの安定動作に対する課題が見られたが，本取り組みを通じて，現地および遠隔地からのユーザデバイスを用いた演出への参加を実現する一方策を提案できた。

また，ライブ支援以外の文脈における本枠組みのさらなるユースケースとして，グリッドビュー型テレビ電話における他者との空間連続性・共在性の向上への応用可能性に関する議論，アイデア出しの会議・遠隔授業の現場を対象とした参加者の交流支援システムの提案を行った。

# 第5章 結論

## 5.1 本研究のまとめ・貢献

本研究においては、人間同士のインタラクションを支援する上での適切な情報獲得・伝達の在り方を考える上での1つの指針として、インタラクション主体のスケール、インタラクション主体の内部で伝達される情報の持つ情報量、という2種類の「粒度」に着目し、インタラクション主体の「粒度」に応じた情報獲得・情報伝達の課題について議論した。本論文ではこの課題のうち特に重要な問題である、インタラクション主体のスケールが小さい場合における「相手をより深く知るための細粒情報センシング技術の開発」、インタラクション主体のスケールが大きい場合における「集団の状態をとらえ、集団的創発を促進する支援方策の体系化」という2種類の課題に対して、それぞれ解決方策を提案した。本論文を構成する各章について、その成果をまとめる。

### 第2章：インタラクション場面で利用可能な内部状態(心拍情報)計測手法の実現

第2章では、主体のスケールが小さい場合のコミュニケーション支援における「相手の情報をより深く知るための内面情報センシング手法の実現」という課題に対応し、ユーザや環境への介入を伴わない非接触な方法で、人の内部状態を計測する技術として、民生品のRGBカメラで撮影された顔映像を利用した心拍数計測手法に関して議論した。本論文では、比較的頑健な計測が可能だが、計測速度が低速であるという特徴を持つ顔内部の局所領域を用いた心拍数計測手法に着目し、その欠点である処理速度に関する問題を改善する方法を検討した。最終的に、計測に用いる局所領域の選択法の改善と、実装の効率化・最適化を行うことで、従来法の精度を概ね維持しつつ約14倍の実行速度の高速化を実現した。本論文で提案した手法は、300フレームのビデオを対象とした場合5秒程度で計測が可能であり、その高い頑健性を維持しながら瞬時・連続的な計測が可能である。これまで、心拍数の計測を非接触で行う手法に関する多くの提案があるが、高精度・高速な計測が可能であり、

またインタラクション支援を伴う他のアプリケーションで利用しやすい形でのパッケージ化された手法の提案は少ない。本手法は、対話システム等様々なインタラクティブシステムにおいて人物の詳細な状況を獲得する手段としての発展を見込めるものである。

### 第3章：群衆の熱狂的交流を促進・制御する一方策の提案

第3章では、「人々が集団として『創発的に』繋がるための技術支援の方法論の解明」という課題に対応し、集団を構成する個々人の振る舞いの伝達と可視化に基づいて、その内部のつながりを促進する技術支援の方法について議論した。本論文ではその調査フィールドとして国内の大規模集団交流の事例である音楽ライブの現場に着目し、演者・観客間、観客同士の一体感・参加感・臨場感を促進するシステム開発・評価に取り組んだ事例について報告した。研究の一環として、演者と観客の間の身体的な振る舞いを発光や振動を介して、双方向的に伝達・提示することが可能な音楽ライブ支援システム「Affinity Live」を開発し、プロの演者・実際のファンを対象とした50人規模での音楽ライブ形式の評価実験を実施した。結果として、提案手法が持つ「演者の身体的行動に同期した観客デバイスへの情報提示」「双方向的な振る舞いの伝達と可視化」が演者・観客間、観客同士の一体感を向上することを明らかにした。また、パブリックビューイングの現場を対象とした「遠隔ライブ参加支援システム」としてのシステムの拡張も実施した。学生を対象とした調査から、提案手法が遠隔参加者の参加感および現地の演者や観客との一体感を向上することが示唆された。本研究における取り組みは、大規模集団において形成される「沸騰的」なつながりを促進する一方策を提案するものであり、実世界において見られる様々な集団の創発的交流、多様な人々の参加を促すインタラクティブシステムの設計に対しても多くの知見を提供するものである。

### 第4章：個々人の参加体系の違いを考慮したグループ交流支援基盤の提案

第4章では、遠隔でのグループコミュニケーションに着目し、その中で特有して発生する「相手がある場にいる感覚(身体的共在性)の欠落」に関する問題に対して議論する。本章では、これらの問題の解決方策として、映像通信とユーザデバイスを組み合わせることで、自他の映像や実世界環境に対して多様な粒度での情報獲得・提示を可能とした遠隔コミュニケーション支援基盤を提案した。

本枠組みは、第3章の内容に関連し、双方向ライブ支援システム・遠隔ライブ参

加支援システムと組合せて用いることで、演者・現地参加者・遠隔参加者の相互的な交流を実現する「汎用的ライブ支援プラットフォーム」を完成するものである。ライブエンタテインメント支援の分野では、演者とのつながり、観客同士のつながり、臨場的演出を実現するための様々な技術支援の提案がなされているが、本研究での取り組みのように、多様な視聴環境にある参加者を一元的に取り扱うことのできる支援プラットフォームは限られている。また、現地と共通のユーザデバイスを遠隔地で利用することで同一の参加体系を提供したり、現地・遠隔地の参加環境の違い・各ライブイベントの特性にあわせて、自他の身体的アクションの多様な反映のさせ方をシステム内で取り扱うことができることも大きな特色である。

ライブイベント支援以外の文脈においても、本枠組みは、現実空間の群衆・遠隔地に点在する個人等、多様な人々を対象とした情報獲得・提示を一元的に実現するものであり、立場の異なる様々な個人の集団への参加を促すシステムを設計するための汎用的な枠組みとなり得るものである。本研究においても、実際のユースケースとして、アイデア出しの会議・遠隔授業の現場を対象とした参加者の交流支援システムの提案を行った。情報通信技術の発達および2020年の新型コロナウイルス感染症の拡大等の影響から、オンラインを通じた交流は身近なものになってきており、今後も人が時間や場所を選ばずに多様なイベントへ参加できる社会への発展が考えられる。本研究において提案した多人数間でマルチモーダルな情報を共有可能な支援体系は、そのような社会を実現する上での一つの礎となるものであり、様々なオンライン交流における体験価値や他者とのつながりの向上を、手軽・身近な形で実現し得るものである。

## 5.2 本研究で得られた知見

本論文では一貫して「人と人のインタラクション」に焦点を当てて議論を行ってきた。人と人のインタラクションを機械が支えてあげるために必要な「人を見る」技術、ならびにインタラクションに携わる主体が自身の行動を変容させるシステムデザインのあり方に関して、多様なテーマの研究を並行して進めることで見出してきた。

本論文で扱ったテーマは、個人間のインタラクションから群衆を対象としたインタラクションまで幅広く、現実世界の様々なインタラクションの現場に焦点を当てたものである。また各章においては、これらのインタラクションを実現する上での要素技術として、人の状態の獲得、人への情報提示の方法に関しても掘り下げて議論を行っている。こういった本論文の側面から、本節では各研究を横断して得られ



た知見についてまとめる。本研究ならびに本研究の延長線上の目標として、人と人の「価値のある」インタラクションを支援するシステムを実現しようというものがある。本節ではこういった本研究の趣旨に鑑み、今後の人と人のインタラクションを支援するシステム設計に際して有用な知見に関して中心的に述べる。

## 入力・出力の両方の側面での「粒度」に着目した設計の必要性

本研究を通じて得られた知見として、人と人のインタラクションを支えるシステムを実現する上では、システムの入力と出力の両方の側面でインタラクション主体の持つ2つの「粒度」に着目することの重要性がある。インタラクション支援のために「人を見る」、「人に伝える」ために利用できる方法論は多様であり、インタラクション主体の持つ特性（規模・現場）に応じてその適切な細粒度を選択してあげることが、その内部での人の積極性やかかわり方に対して影響を与え、他者やシステムとのつながり、一体感・体験価値を変容させる可能性を持っている。

システムへの入力側面は、人を対象としたセンシングの技術である。近年では画像・音声・文章等の細粒度の高い情報から、その背景となる文脈を推定する技術に関して注目が高まっており、そういった細粒度の高い情報センシングは人間の詳細な状況の理解に今後も有用な手段となり得るものである。一方で、これらの手段は監視社会の広がりやプライバシーの問題が社会問題として注目されているように、利用できる場面を選択した上での議論が必要な問題である。今後も人間の細かい情報を機械が獲得していく方法については発展が見込まれるが、その一方で匿名性や個人のプライバシーの問題を考慮した情報の取り方に関する考慮はより重要性を増してくると考えられる。細粒度の高い情報を用いて相手の情報を獲得するだけでなく、加速度や明るさ、色等の粗い情報から人の状況を知る方法に関する技術提案も数多くなされている。これらの方法は、上記の問題を解決し、人にやさしく、集団の中で個人が情報システムへの疑念を抱かずに振舞うことができる社会の実現に寄与できる可能性を持っている。また、個人に着目したセンシングだけでなく、集団に着目したセンシングも、個人の匿名性を守った情報獲得のひとつの手段となり得る。個人から収集した粗い情報の組合せは、集団コミュニケーションにおいて重要性の高い雰囲気や盛り上がり、場の進行等の集団の状況のみに焦点を当てたセンシングの実現に寄与出来る可能性がある。音楽ライブの支援システムにおいては、ユーザのペンライトの振りの情報を入力としたユーザの活動情報計測を行った。音楽ライブにおける観客のペンライトを振るという行動は、既にインタラクション場面に組み込まれた儀礼的な行動である。このように、ユーザからのデータ獲得の方法として、そのインタラクションの内部で既に組み込まれている儀礼的な行動に着目した

方法は、ユーザに過度な負担を強わず、またシステムに対する受け入れやすさを向上させるものである。

システムの出力の側面は、人に対する情報提示のあり方である。こういった情報をどういったインタラクション主体に伝達してあげるかに応じて、人に伝達してあげる情報の粗さ・細かさを吟味する必要がある。画像等の細かい情報を利用した提示は、本来意図していなかった情報を偶然知り得る機会を提供する等、時に相手に有益な結果をもたらすものである。しかし、細粒度の高い情報を利用した提示は、認知に対して負荷を強いるものであり、またそのような細粒度の高い情報がシステム内で扱われている事に対して時にユーザの不安感を増長させてしまう可能性がある。そのため、情報提示の方法に関しては、直感的でかつユーザが不安を感じないものである必要が求められる。「ペンライトを振ると衣装が光る」といったように、ユーザの行動によって達成される出力（フィードバック）は、ユーザの行動に対する意味付けをより明確にするものであり、ユーザの行動を積極化させる手法として利用できる。他のユーザとの協調作業による達成、他のユーザとの同期による達成といった達成条件の設定のように、個人に対して特別な行動を強いるインタフェースは、無意識的に相手とのつながりを形成する手段を構築する有用な方法である。このような、ユーザに対して特別な行動を強いるインタフェースは、ユーザに対して達成のために「遠回り」を強いるものである。システムデザインの一つの指針として、人にあえて普段より少ない情報を提示することで積極的探索を促す「不利益」という概念 [108] があるが、そのような「遠回り」を強いるインタフェースは、自然な形で人の行動を変容させる1つの手段となり得るものである。しかし、過度に少ない情報の提示はユーザに対して、本来得たい情報を獲得するために負担を与えるものであり、情報提示や行動達成のフィードバックを行うにあたっての適切な情報提示のあり方は、各場面において慎重な検討を必要とするものである。

## 現場に根付いた観察とそれを取り入れた開発

本論文では、インタラクション主体のスケールという概念を導入し、現実世界で見られるインタラクションの形態を分類して議論を進めたが、人と人のインタラクションの形態は、それが起こる現場や規模に応じて千差万別である。そのため、インタラクション主体のスケール等の指標を用いて粗くインタラクションの形態を体系的に分類し、それらに応じた支援のアプローチを議論することは可能であるものの、最終的にはユースケースに応じて特化した方法を選択することが望まれる。また、逆に各現場において有効に機能したインタラクティブシステムにまつわるデザインの知見は、似たようなインタラクション形態を持つシステムの実現に応用でき

る側面を持つことも多い。そのため、各現場での観察の積み重ねから人と人のインタラクションを支援するシステムの実現に向けた方法論を構築していくことは、本分野における知見・理論の体系化に向けて取り得るアプローチである。

本研究では、特に第3章・第4章において音楽ライブ・落語による日本的芸術空間・オフィスでの会議・遠隔授業等の現場を対象としたシステム開発に取り組んできた。システム設計・開発およびその有効性評価においては、実際の現場でのユーザとの対話や観察から見出されるものが多くあった。音楽ライブの支援システムでは、ペンライトを振るというライブ現場で行われる慣例的な行為を拡張する形での支援を取り入れた。また、落語家と観客のインタラクション支援に当たっては落語の特性としてある「語り」を協調して伝える演出をシステム内に取り入れた。これらのシステムでは、各インタラクション現場の持つ儀礼・文化・アクションをシステム内で取り入れることで、既存のインタラクションの持つ性質を極力破壊せずに伸ばすような支援を実現できた。これらの実験システムの開発にあたっては、音楽プロデューサーや落語の演者等にもプロジェクトに参画してもらい、実際の現場の要望をヒヤリングするというアプローチを取っている。このように、実際の現場に携わる専門家やユーザを対象としたインタラクション特性の観察に基づき、その内部における儀礼・文化・アクションを尊重し伸ばしてあげる支援システムの開発は、これまでにない新たな技術支援を実現する一つ的手段として有益なものである。

また、これらのシステムの評価に当たっては、実際にイベントを開催して検証を行う等、システムが社会実装された際のユースケースを考慮した実験を実施している。これらの実験は非常に大がかりなものであり、実施には困難が伴うものであるが、実際の現場での実際の利用スタイルに基づいた評価は、開発システムやその内部で取り入れられているアイデアの学術的有効性、さらに社会に受け入れられるシステムを構築する上での多くの知見を与えるものである。エンタテインメント支援のシステム開発においては、人の心を動かすための新しいアイデアの提唱に重点が置かれており、プロトタイプ開発のみで終わってしまう提案も数多く存在する。本研究で提案した音楽ライブ支援プラットフォームにおいては、実際のライブ現場で採用しての実証実験からのそのアイデアの有効性を検証することで、実際にライブに行き慣れたファンを対象とした場合においても演者や他の観客とのつながりを見出せる提案であることを確認することができた。システムの設計・開発・評価・社会実装と全ての段階で現場を念頭に置いたうえでの検討を行うことは、これまでにないアイデアの実現、アイデアの妥当性を社会や世に問ううえで有用なアプローチである。

### 5.3 本論文で取り扱った領域・未議論領域

本論文では、インタラクションのスケールおよびその内部で伝達される情報量という2つの粒度という概念を導入し、1対1での対話場面や集団での交流場面におけるインタラクション支援の在り方について議論を進めてきた。本節では、この2つのスケールを持つ粒度に応じて、本論文で取り扱った領域と、本論文で未議論の領域についてまとめる。

本論文では、1対1での対話場面における主要な課題として「目の前にいる相手をよく知りたい」という問題を取り上げ、その有用なセンシング(入力)の手段として利用できる人の内部状態(心拍信号)を非接触で計測できる手法の改良という研究課題に関する取り組みを報告した。本論文における議論は、獲得手法の頑健化・高速化に焦点をあてたもので、獲得した人の感情にまつわる情報を個人に対してどう伝達してあげるべきであるのかに関しては、未だ議論の余地を残すものである。将来展望として、このような人の感情にまつわる情報を、ユーザないし他者にたいしてどのように提示するべきか、認知負荷や倫理的観点を踏まえた上での議論が求められる。

また、群衆での集団交流における主要な課題として、「個人が集団としてつながって盛り上がる場面での促進や制御」という問題を取り上げ、音楽ライブの現場を対象とした支援システムの開発に取り組んだほか、本開発を通じて提案した現地・パブリックビューイング・分散遠隔視聴環境という異なる参加形態の参加者をつなげる相互交流支援プラットフォームを通じて、オンライン講義やアイデア出し会議といった小規模集団を対象とした支援法の提案も行った。

本研究で未議論の領域として、現実空間ないしSNS等での超大規模集団における社会的運動等が挙げられる。このような世界規模でのムーブメントが起こりうる・発達しうるメカニズムないし、促進・抑制のための支援法に関しては未確立な部分が多く、人類の対立を生み出す要因となっているという観点からも、倫理面での技術の使い方とあわせた議論が今後求められる。小集団に関しても、集団として集まっていることの意義や価値を高める上では、音楽ライブ等の群衆とは異なる集団としてのマスな盛り上がりだけでなく、個々人の活動の多様性や、希少な行動を際立たせるような支援のあり方も検討していく必要がある。

また、インタラクションの規模が最小のケースとして自己から自己へのインタラクション(自己認知)が挙げられる。自己への気づきは、予定や出来事に関するリマインドにより本来すべきであった事を思い起こさせたり、新しい気づきを個人に与えて行動の変容を促すものである。認知症高齢者支援の分野では、過去の記憶

について語ることで記憶の想起を促し、認知機能の活性化を図る「回想法」という方法が進行予防のための方法として取り入れられている。また、リモートワークの進展等により、個々人が時間と場所を選ばずに分散して活動する社会の進展により、孤独に基づく精神面でのケアや、個人の well-being に対する注目が高まっている。このような観点からも、個人から個人に対して気づきを与え、積極的な活動を促す枠組みに対する重要性は高まっている。自己から自己へのインタラクションは個人の内部で完結するものであることから、他者との交流の場合と比較して細粒度の高い情報を個人の背景の獲得に利用できる余地をもっているが、一方で情報提示の内容・適切な粒度・タイミング等に関しては慎重な検討が必要な課題である。

## 5.4 将来展望

本論文で議論した、インタラクション主体の「粒度」に応じた情報獲得・情報伝達の課題、そして個々のインタラクション主体の規模に応じた解決策（センシング手法・情報提示手法）の提案は、機械が「人を見る」ものさしを増やす、機械が人間同士のつながりの豊かさを高めるという観点から、多様な応用可能性を秘めたものである。本論文では最後に本研究を総括して今後の主要な課題・将来展望について述べる。

### 非接触・非侵襲な心拍数推定手法の感情指定への応用

本論文では、人間の情報を細かい情報（内部状態）を計測するための方策として、映像からの心拍数推定手法に関する技術開発を行った。機器の装着が要らず、リアルタイムでの計測ができることから、インタラクション場面での利用に適した方法であり、ロボットや情報システムが個人の状況に合わせてサービスを行ったり、個人の興味を推定する手段として様々なインタラクティブシステムにおける情報獲得に利用できる可能性を持っている。ただし、本論文で提案した手法の精度は接触式センサによる計測と比較して依然低いものであり、体動や環境による影響を以前受けやすい点で課題が残っている。そのため、心拍変動等の心拍信号から得られる細部情報の計測も念頭に入れた上で、映像からの信号復元の精度を向上させる信号処理手法の開発できれば、更なる応用可能性を開くことができる。

また、獲得した情報をどう機械が用いるべきかに関してはさらなる議論が必要が必要である。映像から獲得される心拍数と感情状態への関連、獲得した心拍情報・

感情情報に応じた機械の適切な振る舞い方に関しては、本論文で議論できなかった領域であり、今後さらなる検討が必要である。

### 熱狂的集団の創発性向上/抑制の両面の支援法の体系化

第3章では、群衆が熱狂的に交流することで体験価値を向上させている例として音楽ライブを題材として取り上げ、演者と観客の双方向的なインタラクションに対する技術支援を行うことで集団の一体感を高める支援システムを提案した。本章における研究は、群衆の集団的沸騰を促進するための一方策を提案するもので、現実空間での群衆における集団的沸騰がどのような原理で起こり得るものなのかという原理の解明という社会学・心理学的な課題に対して、共通の儀礼的行動を促進することの支援という形で貢献するものである。集団の創発性を高めるこのような枠組みは、音楽ライブに限らず様々な集団の一体化や、個人の積極的活動の動機づけの手段として利用できる可能性を持つが、一方で政治的暴動やSNSでの誹謗中傷等に代表されるような過度な集団的沸騰をもたらしたり、煽動や対立を助長する技術として利用されかねない負の側面を持っている。このため、集団的な沸騰を促進するだけでなく、制御・抑制するための技術提案に関する社会的重要性は大きく、工学的な技術開発、そして社会学・心理学的観点からのインタラクション設計のガイドラインの必要性は高まっている。

### 様々な立場の参加者が混在する環境での相互交流のデザイン

第3/4章では、音楽ライブの現場を対象として現地・パブリックビューイング参加者・分散遠隔視聴環境という様々な立場の参加者の存在するイベントにおいて参加者間の双方向的な交流を実現するライブ支援プラットフォームを完成させた。本ライブ支援プラットフォームは、多様な立場の参加者のユーザデバイスなし映像を通じた参加を支援するものであり、現地の観客は現地で見ていることの価値を高め、遠隔地の観客は現地で見ているような臨場感を感じられるものである。本枠組みの汎化・他ドメインへの展開として、本論文では落語のイベント・オフィスでの会議・遠隔授業等を題材として取り扱ったが、これらのものに限らず現地・遠隔でハイブリットで開催される多数の集団活動への展開を見込めるものである。また、現地・遠隔地・VR環境等でも本枠組みでは、共通のユーザデバイスを利用することで環境にシームレスな共通した参加体系が実現される。そのため、現実空間のアイテムであるユーザデバイスをVR空間でも使える、といったように、現実世界とバーチャルな空間の垣根をまたぐインタフェースとして本提案におけるユーザデバ

イスが利用できる。本枠組みのように、現地の参加者・リモート参加者を一括にシステム内で取り扱い、立場の異なる多数の参加者を対象として、共通して活動を促す・体験を拡張する支援を行うことができるものは限られており、多様な現場における様々な背景を持った個人を集団としてつなげる枠組みとして意義をもつものである。今後に向けた課題として、異なる視聴環境にいる参加者が混在する中で、参加特性の違いを考慮した相互交流のデザインを検討していく必要が考えられる。遠隔地からの参加形態においては、現地で活動している参加者と異なり、映像を利用した視覚的な情報提示との親和性が比較的高く映像を利用した演出が活用しやすい。一方で、遠隔地からの参加にあたっては通信回線の制約等により現実空間と比較して遅延が発生するため、現地と遠隔地の参加者による共同活動をデザインするにあたっては遅延の影響を考慮する必要がある。また、現地ならではの、遠隔地ならではの、VR/AR 視聴環境ならではの表現・演出の形態が存在することも事実である。これらの参加特性の違いを考慮した上で、またこれらの参加特性の持つ特徴を活かした演出を取り入れたうえで、それぞれの演出が干渉せず、参加特性の違いをまたいだうえでの集団の一体化を実現する情報提示の在り方については今後検討が必要となる。

#### 遠隔コミュニケーションにおける他者との身体的共在性の増強

第4章では、テレビ電話に対してユーザデバイスを組み合わせ、自他の映像・環境への様々な粒度での介入を可能とする遠隔相互交流支援のための枠組みを提案した。このような既存のテレビ電話システムを介して他者および他者の空間とインタラクションができる枠組みは、手軽に導入が可能であり、また相手と一緒にいる感覚（身体的共在性）や相手の存在する空間との連続性への知覚に変容をもたらす可能性を持っている。本論文では、手法の提案と、ユースケースの例示のみに留まっているが、本手法の身体的共在性や空間連続性への知覚への影響、コミュニケーションのしやすさ等に関する指標に基づくユーザ評価から、手法の利点・欠点を明らかにしていく必要がある。

## 今回の研究での未議論領域における議論

「本論文で取り扱った領域・未議論領域」で前述のように、本論文で扱えていないインタラクション主体のスケールを対象とした未議論領域における議論も本研究の将来展望である。主体のスケールが最小である「自己の認知」に関する支援や、主体のスケールが最大である「世界規模のムーブメント」に対する促進・抑制方法の検討等は本論文の未議論領域であり、これらのインタラクション現場を対象とした支援法の提案・支援の理論の提案は、人と人のインタラクションを支援する工学的支援システムの開発のための体系的な方法論の実現に近づく、更なるあゆみを与えるものである。



# 謝辞

本論文は、筆者の埼玉大学大学院 理工学研究科 久野・小林研究室に在籍中の研究成果をまとめたものです。本研究は多くの研究者・協力者のご協力により成り立っています。ご協力を賜りましたすべての方々はこの場を借りて深く感謝いたします。

指導教員として本研究を行う機会を与えてくださいました同研究科 小林貴訓 教授・久野義徳 名誉教授に大変深く感謝いたします。小林貴訓 教授・久野義徳 名誉教授には、私が学部生の頃より研究面から生活面に至るまで多大なるご指導を賜り、先生方の日々の親身なご指導は、自身の博士課程進学に対する原動力となりました。また、博士課程での研究の進め方を考えるにあたり、アルゴリズムの提案という理論研究と、システムの提案という応用研究の2つに並行して取り組むことに関して背中を押していただき、その全ての過程において前向きなご助言を賜りましたことは博士課程の研究を進めていく上での大変強い心の支えとなりました。ここに深く感謝の意を表します。

同研究科 福田悠人 助教には、研究室の先生として、研究室の博士の先輩として、研究の進め方から生活面に至るまで長きにわたり多大なるご指導を賜りました。また、2018年度まで本研究室に在籍しておりました Antony Lam 助教には、心拍数計測手法の開発・改良および論文執筆に関しまして多大なるご指導・ご助言を賜りました。深く感謝申し上げます。

久野研究室・小林研究室の皆様には、学生生活ならびに研究遂行において多くのご協力を賜りました。同じ研究グループにおけるメンバーとして、実験用システムの開発および評価実験の遂行に際して長い時間の苦楽を共にしました、福島史康氏、寺内良太氏に深く感謝申し上げます。

本研究は、工学と社会学・芸術の境界領域として研究が進められてきました。評価実験の遂行、論文の執筆に関しまして異分野の立場からご指導を賜りました 同大学人文社会学研究科 山崎敬一 教授、電気通信大学 児玉幸子 准教授 および 評価実験の遂行に際しご協力を賜りました両研究室の皆様には深く感謝いたします。

更に、実際のイベント環境での実験の遂行にご協力を賜りました株式会社アクア

ルナエンタテイメントの皆様，埼玉大学学生サークル「SKR48」のメンバーの皆様，落語家の林家はな平様，各実験における参加者の皆様に深く感謝申し上げます。

最後に，博士の学位取得や進学に際してご理解いただき，私の研究活動を暖かく見守って下さいました両親をはじめとする家族の皆様に感謝の意を表しつつ，本論文の結びといたします。

令和3年3月10日  
大津 耕陽

## 参考文献

- [1] Skype - Skype, <https://www.skype.com/>.
- [2] Zoom - Zoom, <https://zoom.us/>.
- [3] VRChat - VRChat, <https://hello.vrchat.com/>.
- [4] Intel RealSense Technology - Intel WebSite, <https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/realsense-overview.html>.
- [5] Fitbit - Fitbit, <https://www.fitbit.com/>.
- [6] PaceSync, <http://pacesync.com/>.
- [7] MAHNOB-HCI Database, <http://mahnob-db.eu/hci-tagging/>.
- [8] ニコニコ生放送 - ニコニコ生放送, <https://live.nicovideo.jp/>.
- [9] DX ライブラリ - DX ライブラリ置き場, <https://dxlib.xsrv.jp/>.
- [10] ycapture - やざわラボ, <http://yzwlab.net/ycapture/>.
- [11] 超歌舞伎公式サイト - 超歌舞伎公式サイト, <https://chokabuki.jp/>.
- [12] Microsoft - Teams, <https://www.microsoft.com/en-au/microsoft-teams/group-chat-software>.
- [13] Stanislaw Antol, Aishwarya Agrawal, Jiasen Lu, Margaret Mitchell, Dhruv Batra, C Lawrence Zitnick, and Devi Parikh. Vqa: Visual question answering. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, pp. 2425–2433, 2015.

- [14] Stanislaw Antol, Aishwarya Agrawal, Jiasen Lu, Margaret Mitchell, Dhruv Batra, C. Lawrence Zitnick, and Devi Parikh. Vqa: Visual question answering. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, December 2015.
- [15] A. Asthana, S. Zafeiriou, S. Cheng, and M. Pantic. Incremental face alignment in the wild. In *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1859–1866, 2014.
- [16] Akshay Asthana, Stefanos Zafeiriou, Shiyang Cheng, and Maja Pantic. Incremental face alignment in the wild. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 1859–1866, 2014.
- [17] Guha Balakrishnan, Fredo Durand, and John Guttag. Detecting pulse from head motions in video. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference on*, pp. 3430–3437. IEEE, 2013.
- [18] Tadas Baltrušaitis, Peter Robinson, and Louis-Philippe Morency. Openface: an open source facial behavior analysis toolkit. In *Applications of Computer Vision (WACV), 2016 IEEE Winter Conference on*, pp. 1–10. IEEE, 2016.
- [19] Scott Brave, Hiroshi Ishii, and Andrew Dahley. Tangible interfaces for remote collaboration and communication. In *Proceedings of the 1998 ACM conference on Computer supported cooperative work(CSCW 1998)*, pp. 169–178. ACM, 1998.
- [20] Mihai Burzo, Daniel McDuff, Rada Mihalcea, Louis-Philippe Morency, Alexis Narvaez, and Veronica Perez-Rosas. Towards sensing the influence of visual narratives on human affect. In *ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI)*, 2012.
- [21] Z. Cao, T. Simon, S. Wei, and Y. Sheikh. Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields. In *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1302–1310, 2017.
- [22] Tanya L Chartrand and John A Bargh. The chameleon effect: the perception–behavior link and social interaction. *Journal of personality and social psychology*, Vol. 76, No. 6, pp. 893–910, 1999.

- [23] Weixuan Chen and Daniel McDuff. Deepphys: Video-based physiological measurement using convolutional attention networks. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, September 2018.
- [24] CP Criée, S Sorichter, HJ Smith, P Kardos, R Merget, D Heise, D Berdel, D Köhler, H Magnussen, W Marek, et al. Body plethysmography—its principles and clinical use. *Respiratory medicine*, Vol. 105, No. 7, pp. 959–971, 2011.
- [25] Gerard De Haan and Vincent Jeanne. Robust pulse rate from chrominance-based rppg. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 60, No. 10, pp. 2878–2886, 2013.
- [26] Emile Durkheim. *The elementary forms of the religious life*. University of Alabama Press, 1912.
- [27] Hao-Shu Fang, Guansong Lu, Xiaolin Fang, Jianwen Xie, Yu-Wing Tai, and Cewu Lu. Weakly and semi supervised human body part parsing via pose-guided knowledge transfer. *arXiv preprint arXiv:1805.04310*, 2018.
- [28] M. Feldmeier and J. A. Paradiso. An interactive music environment for large groups with giveaway wireless motion sensors. *Computer Music Journal*, Vol. 31, No. 1, pp. 50–67, 2007.
- [29] F. Ferrari, M. Zimmerling, L. Thiele, and O. Saukh. Efficient network flooding and time synchronization with glossy. In *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 73–84, 2011.
- [30] Xin Guo, Bin Zhu, Luisa F Polanía, Charles Boncelet, and Kenneth E Barner. Group-level emotion recognition using hybrid deep models based on faces, scenes, skeletons and visual attentions. In *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction*, pp. 635–639, 2018.
- [31] Mohammad A Haque, Kamal Nasrollahi, and Thomas B Moeslund. Estimation of heartbeat peak locations and heartbeat rate from facial video. In *Scandinavian Conference on Image Analysis*, pp. 269–281. Springer, 2017.
- [32] MA Hassan, AS Malik, D Fofi, N Saad, and F Meriaudeau. Novel health monitoring method an using rgb camera. *Biomedical optics express*, Vol. 8, No. 11, pp. 4838–4854, 2017.

- [33] Peiyun Hu and Deva Ramanan. Finding tiny faces. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 951–959, 2017.
- [34] Kenneth Humphreys, Tomas Ward, and Charles Markham. Noncontact simultaneous dual wavelength photoplethysmography: a further step toward noncontact pulse oximetry. *Review of scientific instruments*, Vol. 78, No. 4, p. 044304, 2007.
- [35] Dong-Hyun Hwang, Kohei Aso, Ye Yuan, Kris Kitani, and Hideki Koike. Monoeye: Multimodal human motion capture system using a single ultra-wide fisheye camera. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 98–111, 2020.
- [36] Ifpi. global music report 2019, 2019.
- [37] Katherine Isbister. How to stop being a buzzkill: Designing yamove!, a mobile tech mash-up to truly augment social play. In *Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Companion, MobileHCI '12*, pp. 1–4, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [38] Hiroshi Ishii, Craig Wisneski, Julian Orbanes, Ben Chun, and Joe Paradiso. Pingpongplus: design of an athletic-tangible interface for computer-supported cooperative play. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems(CHI'99)*, pp. 394–401. ACM, 1999.
- [39] Wen Jun Jiang, Shi Chao Gao, Peter Wittek, and Li Zhao. Real-time quantifying heart beat rate from facial video recording on a smart phone using kalman filters. In *e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom), 2014 IEEE 16th International Conference on*, pp. 393–396. IEEE, 2014.
- [40] Naoki Kimura, Michinari Kono, and Jun Rekimoto. Sottovoce: an ultrasound imaging-based silent speech interaction using deep neural networks. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–11, 2019.
- [41] John HGM Klaessens, Herke Jan Noordmans, Rowland De Roode, and Rudolf M Verdaasdonk. Non-invasive skin oxygenation imaging using a multi-spectral camera system: Effectiveness of various concentration algorithms ap-

- plied on human skin. In *Optical Tomography and Spectroscopy of Tissue VIII*, Vol. 7174, p. 717408. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [42] K. Kuwamura, K. Sakai, T. Minato, S. Nishio, and H. Ishiguro. Hugvie: A medium that fosters love. In *2013 IEEE RO-MAN*, pp. 70–75, 2013.
- [43] Sungjun Kwon, Hyunseok Kim, and Kwang Suk Park. Validation of heart rate extraction using video imaging on a built-in camera system of a smartphone. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 Annual International Conference of the IEEE*, pp. 2174–2177. IEEE, 2012.
- [44] Antony Lam and Yoshinori Kuno. Robust heart rate measurement from video using select random patches. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 3640–3648, 2015.
- [45] Eugene Lee, Evan Chen, and Chen-Yi Lee. Meta-rppg: Remote heart rate estimation using a transductive meta-learner. In *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 392–409, 2020.
- [46] Xiaobai Li, Jie Chen, Guoying Zhao, and Matti Pietikainen. Remote heart rate measurement from face videos under realistic situations. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 4264–4271, 2014.
- [47] Yunan Li, Qiguang Miao, Kuan Tian, Yingying Fan, Xin Xu, Rui Li, and Jianfeng Song. Large-scale gesture recognition with a fusion of rgb-d data based on the c3d model. In *2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pp. 25–30. IEEE, 2016.
- [48] Zhicong Lu, Haijun Xia, Seongkook Heo, and Daniel Wigdor. You watch, you give, and you engage: A study of live streaming practices in china. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [49] Bruce D. Lucas and Takeo Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2, IJCAI'81*, pp. 674–679, San Francisco, CA, USA, 1981. Morgan Kaufmann Publishers Inc.

- [50] Mufan Luo, Tiffany W. Hsu, Joon Sung Park, and Jeffrey T. Hancock. Emotional amplification during live-streaming: Evidence from comments during and after news events. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 4, No. CSCW1, May 2020.
- [51] Elena Márquez Segura, Annika Waern, Jin Moen, and Carolina Johansson. The design space of body games: Technological, physical, and social design. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 3365–3374, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [52] Dan Maynes-Aminzade, Randy Pausch, and Steve Seitz. Techniques for interactive audience participation. In *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Multimodal Interfaces*, ICMI '02, p. 15, USA, 2002. IEEE Computer Society.
- [53] Osama Mazhar, Sofiane Ramdani, Benjamin Navarro, Robin Passama, and Andrea Cherubini. Towards real-time physical human-robot interaction using skeleton information and hand gestures. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1–6. IEEE, 2018.
- [54] Heath McDonald and Adam J. Karg. Managing co-creation in professional sports: The antecedents and consequences of ritualized spectator behavior. *Sport Management Review*, Vol. 17, No. 3, pp. 292 – 309, 2014.
- [55] Daniel J McDuff, Javier Hernandez, Sarah Gontarek, and Rosalind W Picard. Cogcam: Contact-free measurement of cognitive stress during computer tasks with a digital camera. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4000–4004. ACM, 2016.
- [56] Kana Misawa and Jun Rekimoto. Chameleonmask: Embodied physical and social telepresence using human surrogates. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 401–411, 2015.
- [57] Homei Miyashita. Norimaki synthesizer: Taste display using ion electrophoresis in five gels. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–6, 2020.
- [58] Glow Motion. Glowmotion technologies, 2021.



- [59] Kenta Murakami, Mototaka Yoshioka, and Jun Ozawa. Non-contact pulse transit time measurement using imaging camera, and its relation to blood pressure. In *Machine Vision Applications (MVA), 2015 14th IAPR International Conference on*, pp. 414–417. IEEE, 2015.
- [60] X. Niu, S. Shan, H. Han, and X. Chen. Rhythmnet: End-to-end heart rate estimation from face via spatial-temporal representation. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 29, pp. 2409–2423, 2020.
- [61] Cathy O’neil. *Weapons of math destruction: How big data increases inequality and threatens democracy*. Crown, 2016.
- [62] Kouyou Otsu, Hidekazu Takahashi, Hisato Fukuda, Yoshinori Kobayashi, and Yoshinori Kuno. Enhanced concert experience using multimodal feedback from live performers. In *the 10th International Conference on Human System Interactions (HSI)*, pp. 290–294. IEEE, 2017.
- [63] Mai Otsuki, Keita Maruyama, Hideaki Kuzuoka, and Yusuke Suzuki. Effects of enhanced gaze presentation on gaze leading in remote collaborative physical tasks. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–11, 2018.
- [64] Ming-Zher Poh, Daniel J McDuff, and Rosalind W Picard. Non-contact, automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation. *Optics express*, Vol. 18, No. 10, pp. 10762–10774, 2010.
- [65] Ming-Zher Poh, Daniel J McDuff, and Rosalind W Picard. Advancements in noncontact, multiparameter physiological measurements using a webcam. *IEEE transactions on biomedical engineering*, Vol. 58, No. 1, pp. 7–11, 2011.
- [66] Pwc. global entertainment & media outlook 2020-2024, 2020.
- [67] Hamidur Rahman, Mobyen Uddin Ahmed, Shahina Begum, and Peter Funk. Real time heart rate monitoring from facial rgb color video using webcam. In *The 29th Annual Workshop of the Swedish Artificial Intelligence Society (SAIS), 2–3 June 2016, Malmö, Sweden*, No. 129. Linköping University Electronic Press, 2016.
- [68] Nimesha Ranasinghe, Pravara Jain, Shienny Karwita, David Tolley, and Ellen Yi-Luen Do. Ambiotherm: enhancing sense of presence in virtual reality by

- simulating real-world environmental conditions. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1731–1742, 2017.
- [69] Raquel Breejon Robinson, Elizabeth Reid, James Collin Fey, Ansgar E. Deppe, Katherine Isbister, and Regan L. Mandryk. Designing and evaluating ‘in the same boat’, a game of embodied synchronization for enhancing social play. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’20, pp. 1–14, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [70] Raquel Robinson, Zachary Rubin, Elena Márquez Segura, and Katherine Isbister. All the feels: Designing a tool that reveals streamers’ biometrics to spectators. In *Proceedings of the 12th International Conference on the Foundations of Digital Games*, FDG ’17, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [71] Gerard Roma, Anna Xambó, and Jason Freeman. Handwaving: Gesture recognition for participatory mobile music. In *Proceedings of the 12th International Audio Mostly Conference on Augmented and Participatory Sound and Music Experiences*, AM ’17, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [72] Hooman Aghaebrahimi Samani, Rahul Parsani, Lenis Tejada Rodriguez, Elham Saadatian, Kumudu Harshadeva Dissanayake, and Adrian David Cheok. Kissenger: design of a kiss transmission device. In *Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference*, pp. 48–57, 2012.
- [73] Sebastian Schuler. *Aesthetics of Immersion: Collective Effervescence, Bodily Synchronisation and the Sensory Navigation of the Sacred: A Connective Concept*, pp. 367 – 388. 12 2017.
- [74] Christopher G Scully, Jinseok Lee, Joseph Meyer, Alexander M Gorbach, Domhnall Granquist-Fraser, Yitzhak Mendelson, and Ki H Chon. Physiological parameter monitoring from optical recordings with a mobile phone. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 59, No. 2, pp. 303–306, 2012.
- [75] Caifeng Shan, Shaogang Gong, and Peter W McOwan. Facial expression recognition based on local binary patterns: A comprehensive study. *Image and vision Computing*, Vol. 27, No. 6, pp. 803–816, 2009.

- [76] Mohammad Soleymani, Jeroen Lichtenauer, Thierry Pun, and Maja Pantic. A multimodal database for affect recognition and implicit tagging. *IEEE Transactions on Affective Computing*, Vol. 3, No. 1, pp. 42–55, 2012.
- [77] Norihiro Sugita, Kazuma Obara, Makoto Yoshizawa, Makoto Abe, Akira Tanaka, and Noriyasu Homma. Techniques for estimating blood pressure variation using video images. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE*, pp. 4218–4221. IEEE, 2015.
- [78] Makoto Suzuki, Chun-Hao Liao, Sotaro Ohara, Kyoichi Jinno, and Hiroyuki Morikawa. Wireless-transparent sensing. In *Proceedings of the 2017 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks, EWSN '17*, p. 6677, USA, 2017. Junction Publishing.
- [79] Satoshi Suzuki, Takemi Matsui, Hayato Imuta, Maki Uenoyama, Hirofumi Yura, Masayuki Ishihara, and Mitsuyuki Kawakami. A novel autonomic activation measurement method for stress monitoring: non-contact measurement of heart rate variability using a compact microwave radar. *Medical & biological engineering & computing*, Vol. 46, No. 7, pp. 709–714, 2008.
- [80] Kazuaki Takeuchi, Yoichi Yamazaki, and Kentaro Yoshifuji. Avatar work: Telerwork for disabled people unable to go outside by using avatar robots. In *Companion of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 53–60, 2020.
- [81] Ryuji Tanaka, Chika Oshima, and Koichi Nakayama. Intention inference from 2d poses of preliminary action using openpose. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, pp. 1697–1700, 2019.
- [82] TapTap. Taptap. TapTap.
- [83] L Tarassenko, M Villarroel, A Guazzi, J Jorge, DA Clifton, and C Pugh. Non-contact video-based vital sign monitoring using ambient light and autoregressive models. *Physiological measurement*, Vol. 35, No. 5, p. 807, 2014.
- [84] Cristian Vaccari, Andrew Chadwick, and Ben O’Loughlin. Dual screening the political: Media events, social media, and citizen engagement. *Journal of Communication*, Vol. 65, No. 6, pp. 1041 – 1061, 10 2015.

- [85] Femke Vandenberg, Michael Berghman, and Julian Schaap. The 'lonely raver': music livestreams during covid-19 as a hotline to collective consciousness? *European Societies*, pp. 1–12, 09 2020.
- [86] Gul Varol, Javier Romero, Xavier Martin, Naureen Mahmood, Michael J Black, Ivan Laptev, and Cordelia Schmid. Learning from synthetic humans. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 109–117, 2017.
- [87] P. Viola and M. Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001*, Vol. 1, pp. I-511–I-518 vol.1, 2001.
- [88] Kai Wang, Xiaoxing Zeng, Jianfei Yang, Debin Meng, Kaipeng Zhang, Xiaojiang Peng, and Yu Qiao. Cascade attention networks for group emotion recognition with face, body and image cues. In *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction*, pp. 640–645, 2018.
- [89] Qifei Wang, Gregorij Kurillo, Ferda Ofli, and Ruzena Bajcsy. Evaluation of pose tracking accuracy in the first and second generations of microsoft kinect. In *2015 international conference on healthcare informatics*, pp. 380–389. IEEE, 2015.
- [90] Rongrong Wang, Francis Quek, Deborah Tatar, Keng Soon Teh, and Adrian Cheok. Keep in touch: channel, expectation and experience. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI2012)*, pp. 139–148. ACM, 2012.
- [91] Wenjin Wang, Sander Stuijk, and Gerard De Haan. A novel algorithm for remote photoplethysmography: Spatial subspace rotation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 63, No. 9, pp. 1974–1984, 2016.
- [92] Zitong Yu\*, Wei Peng\*, Xiaobai Li, Xiaopeng Hong, and Guoying Zhao. Remote heart rate measurement from highly compressed facial videos: an end-to-end deep learning solution with video enhancement. In *International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2019.

- [93] Dawei Zhou, Jiebo Luo, Vincent MB Silenzio, Yun Zhou, Jile Hu, Glenn Currier, and Henry A Kautz. Tackling mental health by integrating unobtrusive multimodal sensing. In *AAAI*, pp. 1401–1409, 2015.
- [94] 一般社団法人コンサートプロモーターズ協会. 基礎調査報告書. 一般社団法人コンサートプロモーターズ協会.
- [95] 葛岡英明, 山崎敬一, 上坂純一ほか. ロボットを介した遠隔コミュニケーションシステムにおけるエコロジーの二重性の解決: 頭部連動と遠隔ポイントの評価. *情報処理学会論文誌*, Vol. 46, No. 1, pp. 187–196, 2005.
- [96] 株式会社ソニー・ミュージックコミュニケーションズ. Freflow (フリフラ). 株式会社ソニー・ミュージックコミュニケーションズ. <http://www.smci.jp/s/smci/discography/S00007>.
- [97] 株式会社ルイファン・ジャパン. Freflow (フリフラ). 無線制御ペンライト KING BLADE-RAVE(キングブレード レイブ). <http://ruifan.co.jp/rave/rave.html>.
- [98] 岩本祐磨, 岩井将行. 音楽イベント初心者の応援行動の同期性の向上する無線通信機能搭載型ペンライト. *エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2016 論文集*, Vol. 2016, pp. 311–312, 2016.
- [99] 久保肇, 森武俊, 佐藤知正. マイクロ波ドップラーセンサによる移動・呼吸信号検出. *生体医工学*, Vol. 48, No. 6, pp. 595–603, 2010.
- [100] 山崎敬一 (編). 『実践エスノメソドロジー入門』. 有斐閣, 東京, 2004.
- [101] 中野珠実. 瞬きにより明らかになったデフォルト・モード・ネットワークの新たな役割. *生理心理学と精神生理学*, Vol. 31, No. 1, pp. 19–26, 2013.
- [102] 渋谷昌三. 人と人との快適距離 パーソナル・スペースとは何か. *アドレナライズ*, 2018.
- [103] 小幡朱, 串山久美子. ステージパフォーマンスにおいて観客と演者のコミュニケーションを支援する led を使った衣装の提案. *インタラクション 2017 論文集*, pp. 458–459, 2017.
- [104] 松村耕平, 尾形正泰, 小野哲雄, 加藤淳, 阪口紗季, 坂本大介, 杉本雅則, 角康之, 中村裕美, 西田健志ほか. Chi 勉強会 2017: ネットワーク連携した勉強会とその支援システム. *研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI)*, Vol. 2017, No. 13, pp. 1–8, 2017.

- [105] 西田惇, 鈴木健嗣. biosync: 人々の運動覚体験を融合するウェアラブルデバイス. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No. 1, pp. 51–60, 2017.
- [106] 青柳卓雄. パルスオキシメータの誕生とその理論. 日本臨床麻酔学会誌, Vol. 10, No. 1, pp. 1–11, 1990.
- [107] 石川恵理奈, 米谷竜, 平山高嗣, 松山隆司ほか. Gaze mirroring による注視模倣効果の分析. 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 12, pp. 3637–3646, 2011.
- [108] 川上浩司. 不便の効用に着目したシステムデザインに向けて. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 125–134, 2009.
- [109] 大津耕陽, 福田悠人, Antony Lam, 小林貴訓 and 久野義徳. 映像解析に基づく頑健な心拍数計測手法. 画像ラボ, Vol. 30, No. 6, pp. 20–26, 2019.
- [110] 田中一品, 加藤良治, 中西英之. 鏡型ビデオ会議における視触覚相互作用によるソーシャルテレプレゼンスの強化. 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 5, pp. 946–954, 2017.
- [111] 田中一品, 大城健太郎, 山下直美, 中西英之ほか. 遠隔窓口システム: 手書きの紙書類共有によるソーシャルテレプレゼンスの強化. 情報処理学会論文誌, Vol. 60, No. 2, pp. 411–418, 2019.
- [112] 田中一品, 和田侑也, 中西英之. 遠隔握手: ビデオ会議と触覚提示デバイスの一体化によるソーシャルテレプレゼンスの強化. 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 4, pp. 1228–1236, 2015.
- [113] 田中敦, 森田裕子. ワークেশョンの導入と拡大に向けた課題に関する一考察: テレワークにおける労務管理上の課題との比較を中心に. 日本観光研究学会全国大会学術論文集 Proceedings of JITR annual conference, 第 34 巻, pp. 477–480. 日本観光研究学会, 2019.
- [114] 田島悠来ほか. 「アイドル」文化を活用した地域振興に関する一考察: 「ご当地アイドル」のパフォーマンスを事例に. 評論・社会科学, No. 119, pp. 19–40, 2016.
- [115] 堂林まどか, 沖真帆, 塚田浩二. Sync ☆ idol: ライブアイドルとファンを盛り上げるライブ支援装置. WISS2015 論文集, pp. 155–156, 2015.
- [116] 内山萌, 塙大. ライブ映像と連動する無線制御ペンライトシステムの提案. インタラクション 2015 論文集, pp. 805–807, 2015.

- [117] 平林真実, 清水基. Cryptone:音楽会場におけるパフォーマと観客の相互インタラクションのためのシステム. インタラクション2013 論文集, pp. 302-306, 2013.
- [118] 片桐悠貴. コロナ禍のライブ市場と大規模集客施設の展望: 過去10年の総括と施設整備・運営のこれから. NRI パブリックマネジメントレビュー= NRI public management review, Vol. 204, pp. 2-13, 2020.
- [119] 曾我麻佐子, 芝公仁, ジョナサルズ. 3次元モーションデータを活用した創作能パフォーマンス. 映像情報メディア学会誌, Vol. 65, No. 2, pp. 218-223, 2011.
- [120] 末永俊郎, 安藤清志, 大島尚. 社会的促進の研究. 心理学評論, Vol. 24, No. 4, pp. 423-457, 1981.

## 公表論文等

学術雑誌に掲載された論文 (査読あり)

- K.Otsu, Q.Zhong, D.Keya, H.Fukuda, A.Lam, Y.Kobayashi and Y.Kuno, "Robust and Fast Heart Rate Monitoring Based on Video Analysis and Its Application," , International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics(AHFE2020), Advances in Artificial Intelligence, Software and Systems Engineering, vol.1213, pp.250-257, Springer, July 2020.
- 大津耕陽, 福島史康, 高橋秀和, 平原実留, 福田悠人, 小林貴訓, 久野義徳, 山崎敬一 「Affinity Live : 演者と観客の一体感を増強する双方向ライブ支援システム」, 『情報処理学会論文誌』, vol. 59, No.11, pp. 2019-2029, November 2018.

学術雑誌における解説・総説

- 大津耕陽, 福田悠人, Antony Lam, 小林貴訓, 久野義徳, 「映像解析に基づく頑健な心拍数計測手法」, 『画像ラボ』 Vol.30, No.6, pp. 20-26, 2019.

国際会議における発表 (査読あり)

- K.Otsu, J.Yuan, H.Fukuda, Y.Kobayashi, Y.Kuno, K.Yamazaki, "Enhancing Multimodal Interaction Between Performers and Audience Members During Live Music Performances," the International SIGCHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA'21), On-line, May 2021. [Late-breaking Work(Poster)]
- K. Otsu, H. Takahashi, H. Fukuda, Y. Kobayashi and Y. Kuno, "Enhanced Concert Experience using Multimodal Feedback from Live Performers," the 10th International Conference on Human System Interaction (HSI2017), pp.5941-5946, Ulsan, Korea, July 2017.
- K. Otsu, H. Fukuda, Y. Kobayashi and Y. Kuno, "Remote monitoring and communication system with a doll-like robot for the elderly," the 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society



(IECON2016), pp.5941-5946, Florence, Italy, September 2016.

- W.Yanjing, K.Otsu, H.Fukuda, Y.Kobayashi and Y.Kuno, “ Interest Estimation Based on Biological Information and Body Sway,” the 27th International Workshop on Frontiers of Computer Vision (IW-FCV2021), pp. PS2-4, On-line, February 2021.
- A.Lam, K. Otsu, K. Das and Y. Kuno”Towards Taking Pulses Over YouTube to Determine Interest in Video Content.”, 2018 The International Workshop on Frontiers of Computer Vision (IW-FCV) ,pp.O5-1, Hakodate, Japan, 2018.
- K. Das, S Ali, K. Otsu, H Fukuda, A. Lam, Y. Kobayashi and Y. Kuno”Detecting Inner Emotions from Video Based Heart Rate Sensing.”, 2017 International Conference on Intelligent Computing ,pp.48-57, Liverpool, UK, 2017.

#### 国内会議・シンポジウム等における発表(査読あり)

- 大津耕陽, D. K. Tilottoma, 福田悠人, A. Lam, 小林貴訓, 久野義徳, “映像解析に基づく頑健・高速な心拍数計測手法,” 第24回画像センシングシンポジウム(SSII2018), 横浜, June 2018. (査読あり・デモ発表)
- 大津耕陽, 倉橋知己, D. K. Tilottoma, 福田悠人, A. Lam, 小林貴訓, 久野義徳, “環境変化に頑健なビデオ映像による心拍数計測手法,” 第23回画像センシングシンポジウム(SSII2017), 横浜, June 2017. (最優秀学術賞 受賞)
- 大津耕陽, 松田成, 福田悠人, 小林貴訓, 久野義徳, “テレビ電話と連携した人形型デバイスを用いた高齢者の遠隔見守りシステム,” 第22回画像センシングシンポジウム(SSII2016), pp. DS2-08, 横浜, June 2016.

#### 国内会議・シンポジウム等における発表(査読なし)

- 大津耕陽, 小林貴訓, 久野義徳, “対話状況の観察に基づく高齢者遠隔見守りシステム,” 2016年電子情報通信学会総合大会, pp. D-22-10, 福岡, March 2016.
- 大津耕陽, 小林貴訓, 久野義徳, “高齢者の状態センシングに基づく遠隔見守りシステム,” 第20回パターン計測シンポジウム, 滋賀, November 2015.
- 柿本涼太, 大津耕陽, 福田悠人, 小林貴訓, “遠隔学習の動機づけを支援するインタラクティブデバイス,” 2021年電子情報通信学会総合大会, オンライン, March 2021.

- 王燕京, 小林貴訓, 久野義徳, 大津耕陽, 福田悠人, “マルチモーダル情報に基づくユーザの興味度推定,” 2020年電子情報通信学会総合大会, オンライン, March 2020.
- 寺内涼太, 福島史康, 大津耕陽, 福田悠人, 小林貴訓, 久野義徳, 山崎敬一, “一体感を増強する遠隔ライブ参加システム,” 情報処理学会インタラクシオン2019, pp.308-312, 東京, March 2019.
- 福島史康, 大津耕陽, 福田悠人, 久野義徳, 平原実留, 山崎敬一, 小林貴訓, “演者と聴衆の一体感を増強させるインタラクティブペンライト,” 2018年電子情報通信学会総合大会, 東京, March 2018.
- 鈴木亮太, 歌田夢香, 大津耕陽, 細原大輔, “ディープラーニングフレームワークの調査,” 第22回パターン計測シンポジウム, 香川, November 2017.
- 長嶺洋佑, 大津耕陽, 福田悠人, 小林貴訓, 久野義徳, “玄関での日常会話を援用した徘徊抑止システムの提案,” 2017年電子情報通信学会総合大会, 名古屋, March 2017.

#### 特許等

- 特開 2019-080894 「情報伝達補強システム, 情報伝達補強方法, 情報伝達補強プログラム」
- 特開 2019-080899 「演者動作・音声と観客動作・音声との類似度計算装置、類似度を利用した演出方法、演者と観客のペアリング方法」