

修士学位論文

論文題目 Interactive Floor Interface を用いた

教育支援システムの開発

ふりがな
氏 名 あかさか そうし
赤坂 総司

専 攻 機械工学専攻

指導教授 金丸 隆志 教授

修了年月(西暦) 2022 年 3 月

工学院大学大学院

論文要旨

社会の情報化に伴い、教育分野が見直されている。2017 年、日本の中等教育では約 10 年ぶりに学習指導要領が改訂された。その中では主体的・対話的な学びの視点を重要視しており、ICT 環境の充実に配慮されている。一方、2018 年には 90%を超える中学校がプロジェクタを導入していることが明らかになっている。先行研究では、ジェスチャーを用いて水面波の体験学習を行える ICT 教育支援システムとして「Interactive Floor Interface」を開発した。しかし、教科書との比較において有意差は認められなかった。

本研究では、このシステムの改善として動的ジェスチャーの実装・新たな教育コンテンツの開発を行った。その結果教科書との有意差は認められなかったが、システムを使用した学習前後での有意差は認められた。今後は教科書と併用した場合の学習等の検討が望まれる。

目次

論文要旨	1
1. 緒論	4
1.1. 近年の日本における中等教育	4
1.1.1 情報社会化	4
1.1.2 生徒参加型授業の普及	6
1.2. プロジェクタの授業内活用	7
1.2.1 授業内における新たなプロジェクタの活用方法	9
1.3. 類似研究	10
1.3.1 「2 台のプロジェクタを用いた Interactive Floor の構築」	10
1.3.2 「アクティブラーニングの学習効果に関する検証」	11
1.3.3 「Kinect を用いた AR による鏡像シミュレーション教材の開発と試行」	12
1.3.4 自動運転のための警察官の手信号の認識システム	13
1.4. 先行研究「Interactive Floor Interface を用いた教育支援システムの開発」	14
1.4.1 構成要素	14
1.4.2 教育コンテンツ	16
1.4.3 人のジェスチャー認識	17
1.4.4 IFI を用いた教育支援システムの評価	18
1.5. 本研究の目的	19
2. IFI を用いた教育支援システムの改善	20
2.1. 変更点	20
2.1.1 使用機材の変更	20
2.1.2 開発環境の変更	22
2.1.3 UDP 通信	22
2.2. 教育コンテンツ:波の干渉	24
2.2.1 問題点	24
2.2.2 新たなシステムの 3 つの機能	26
2.2.2.1 波源モード	27
2.2.2.2 グラフモード	30
2.2.2.3 経路差モード	32
2.2.2.4 目標の提示	34
2.3. ジェスチャー認識	37
2.3.1 従来のジェスチャー	37
2.3.2 DNN を用いた静的ジェスチャー認識	37
2.3.3 DNN を用いた動的ジェスチャー認識	38

2.3.4	利用したジェスチャー.....	39
3.	IFI を用いた教区支援システムの評価	40
3.1.	評価方法	40
3.2.	実験結果	41
3.3.	アンケート	44
4.	結論	45
	参考文献	46

1. 緒論

本章では、近年の日本において、情報社会化が教育現場に与えている影響についてまとめる。また、教育分野では授業形式の多様化が進んでいることを説明する。そして、この2つの事実から「プロジェクト」と「生徒参加型授業」に注目し、〈教育効果の高いプロジェクトを利用したシステム〉を目標としたことを述べる。

1.1. 近年の日本における中等教育

本節では、はじめに情報社会化が進む近況における学校への各 ICT^{*1} 機器の導入率を示し、続いて、生徒参加型授業が教育効果の高い方法として各学校で実施されていることを紹介する。

1.1.1 情報社会化

近年、IoT^{*2} が社会に大きな影響を与えるようになっている。2019 年における日本の IoT 市場全体の規模は約 6100 億円となっており、2023 年には市場規模がおよそ 3 倍に拡大することが見込まれている[1]。これにより、IoT が社会に及ぼす影響はこれからも拡大し、情報社会化が進行していくことが予想される。

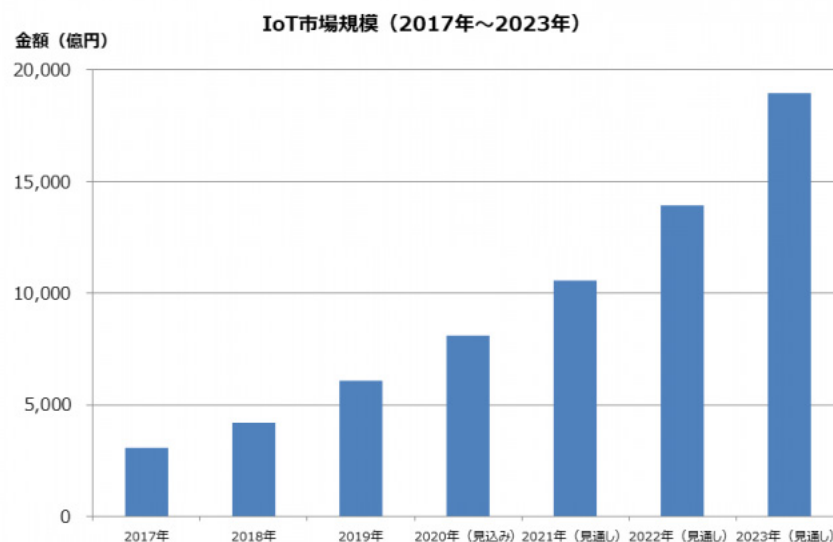


図 1-1 国内の IoT 市場規模（2019）【出典:[1]】

*1 Information and Communication Technology(情報通信技術)の略称であり、通信技術を活用したコミュニケーションを意味する。

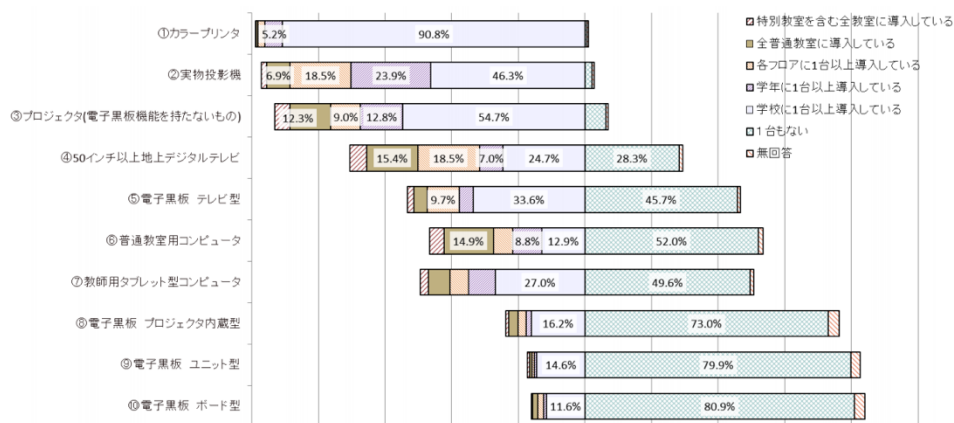
*2 Internet of Things の略称であり、モノとモノがインターネット経由で繋がっていること。

社会が情報社会化するに伴い、教育分野においても見直しは必須である。次節で述べるように情報社会では、今後の社会がどのように変化していくか予測することが難しいと言われている。しかし、次世代の子どもたちは義務教育の後、情報社会のなかで自立しなければならない。2017 年には、日本の中等教育現場で約 10 年ぶりに学習指導要領が改訂された[2]。その中では主体的・対話的な学びの視点を重視しており、その方法として ICT 環境の充実に配慮されている。

改訂以降、教育現場では ICT を活用した授業の実施が進められている。ICT を活用するとは、資料等を印刷することから、授業内で生徒がパソコンを使うことまでを含み、ICT を活用した授業は学力向上に繋がることが報告されている[3]。

本研究では〈ICT を活用した授業〉とは〈ICT 機器を使いながら教える授業〉であるとする。たとえば、書道の時間に、実物投影機を使って先生が書く様子を全体に見せながら説明することが挙げられる。そのため、プリンターで印刷したプリントを配布することは除く。言い換えると、教員が ICT 機器を使って〈リアルタイムで〉生徒に教えることを〈ICT を活用した授業〉と定義する。

〈ICT を活用した授業〉を実施するために各学校に整えられている ICT 機器のなかで、導入率が 90%を超える ICT 機器は実物投影機とプロジェクタである（図 1-2）。カラープリンターは導入率がもっとも高いが、今回の〈ICT を活用した授業〉を実施することができないため除外した。



* 上記の表・グラフは、「1台もない」「無回答」の値が小さい順に各機器の集計値を並べたものである。

図 1-2 中学校における ICT 機器の導入率【出典:[3]】

1.1.2 生徒参加型授業の普及

文部科学省は「新しい学習指導要領の考え方-中央教育審議会における議論から改訂そして実施へ-」[4]において、情報化の社会的変化が人間の予測を超えて進展するようになってきたため、予測できない変化に主体的に関わることが重要であると述べている。そこで、文部科学省は学校教育では知識や技能だけでなく、思考力や判断力の育成の充実を目指している。それを実現するために、新学習指導要領では主体的・対話的で深い学びを実現する生徒参加型授業を推進している。中原らが実施した2016年の調査【出典:[5]および[6]】によると、授業参加型授業に取り組んでいる教科がある高校は75.5%であり、生徒参加型授業が普及していることを示している。

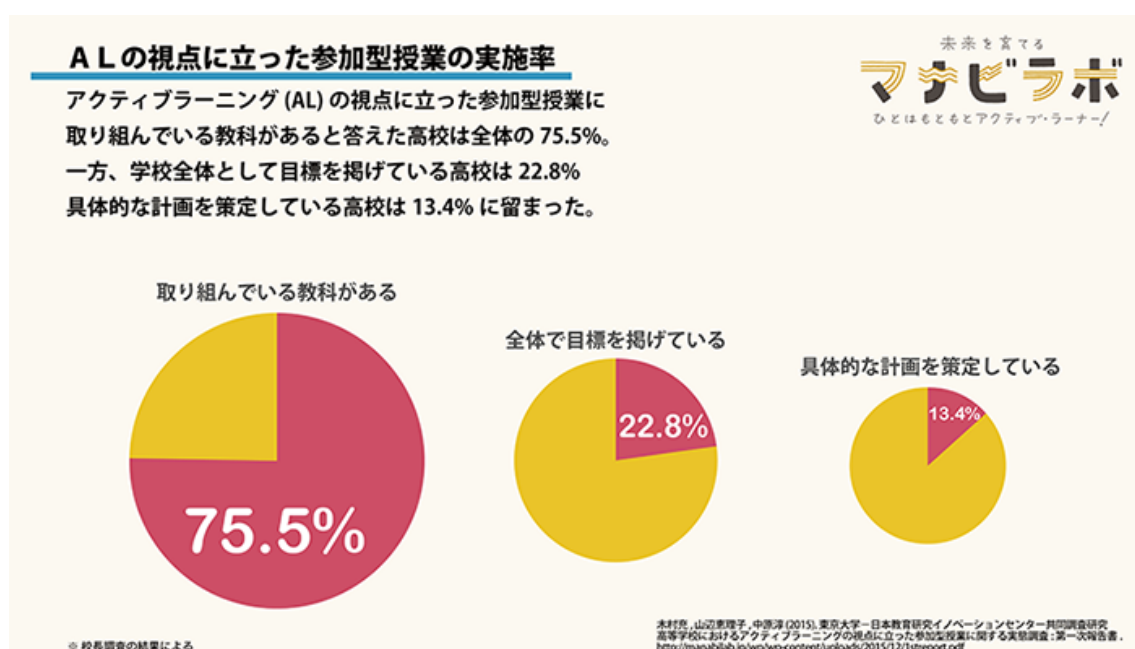


図 1-3 参加型授業に関するアンケート結果【出典：[5]および[6]】

1.2. プロジェクタの授業内活用

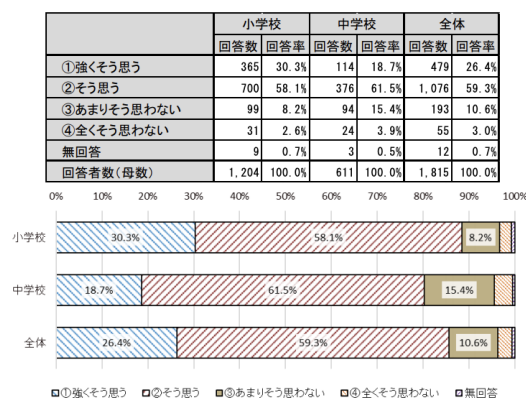
本節では 1.1 で触れた ICT 機器の中から、プロジェクタについて注目する。プロジェクタは大型提示装置の 1 種で最も利用されている機器であり、他には電子黒板、インタラクティブホワイトボード、電子情報ボードが大型提示装置に分類される。

『ICT を活用した授業』によく使われる ICT 機器は、大型提示装置と実物投影機、コンピュータである。これら ICT 機器とデジタル教材の導入により、教員は理解してもらいやすい講義が実施できると感じている。図 1-4 のアンケート結果では、85.7%の小学校・中学校の教員が大型提示装置とデジタル教材を活用することが授業にプラスになると答えている。すなわち、ICT の活用は教員が授業を進行する上で良い影響を与える。

大型提示装置のうちプロジェクタは、実際の授業内でスクリーンに映像を投影する方法で活用されている。図 1-5 および図 1-6 を見ると、プロジェクタの導入率は 7 割を超えており、使用率も高い。

プロジェクタは教室前に設置されたスクリーンに投影する目的で 사용되는ことが多い。生徒がプレゼンテーションする際や、情報の授業で教員自身の PC 画面を表示する際などに用い、教室全体に映像と音を使って説明するのである。

しかし、この方法では発表者が投影映像の前に立って説明すると、発表者に映像が被ってしまい、参加者は投影映像の理解が困難となるという問題がある。



※ 全体で「①強く思う」「②そう思う」を合わせて 85.7%となっており、大型提示装置とデジタル教材でよりわかる授業の実践が進んでいるものと思われる。

図 1-4 質問「電子黒板やプロジェクタ等の大型提示装置、デジタル教材の導入で、よりわかる授業を実施できるようになった。」に対する回答結果（2017 年）【出典: [3]】

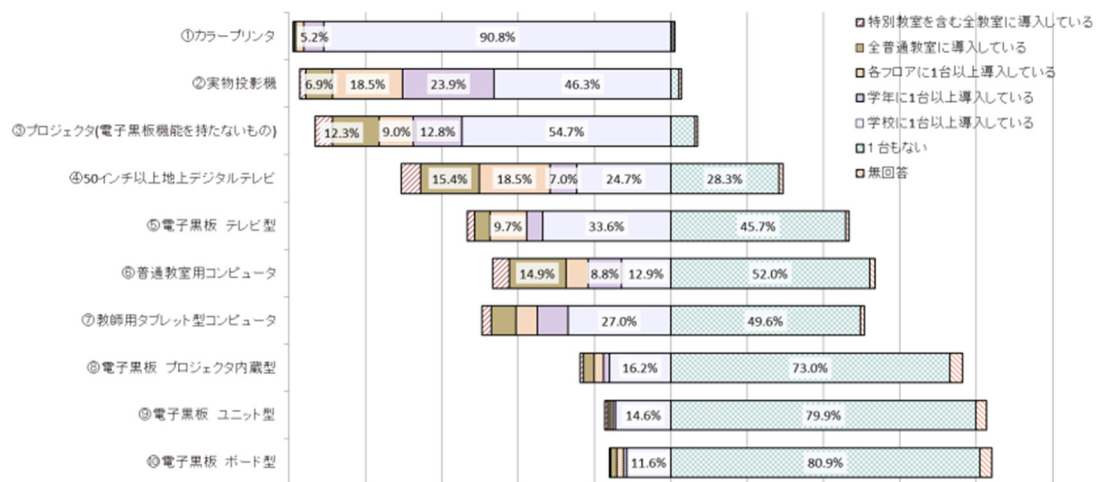


図 1-5 質問「ICT 機器の整備状況」に対する回答結果（2017 年）【出典: [3]】

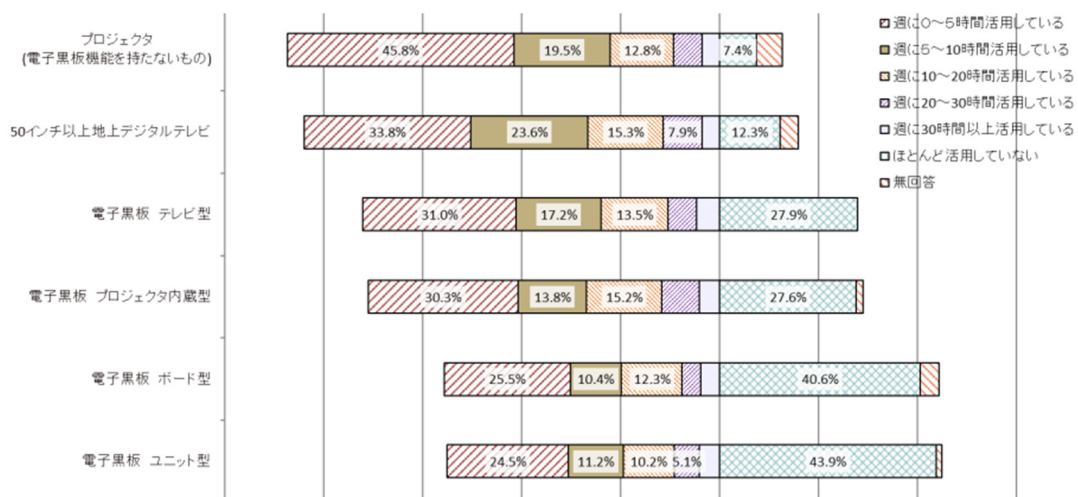


図 1-6 質問「整備されている大型提示装置の活用状況」に対する回答結果（2017 年）【出典: [3]】

1.2.1 授業内における新たなプロジェクタの活用方法

1.2 で述べた課題を解決するために、我々は〈床〉に注目した。スクリーンでは教員が前に立って説明すると影になって見えない問題がある。しかし、図 1-7 に示すように床に投影することで生徒は 360 度の周囲から映像を見ることができる。ただし床に映像を投影する場合でも教師の影で映像が見えなくなることはあり得る。例えば、生徒 A は教員の影で映像が見にくくなる。

そこで、次節で紹介する類似研究を参考にし＜完全に＞360 度の周囲から映像を見ることができるようにすることを目指す。

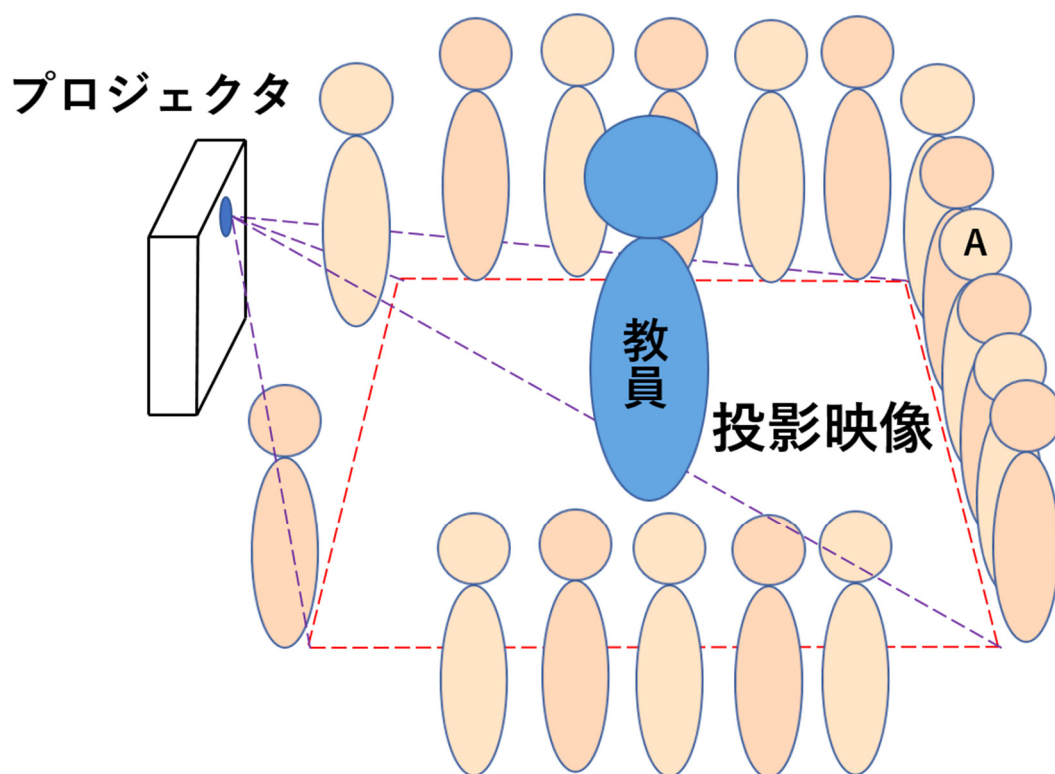


図 1-7 床に映像を投影し授業を行っている様子

1.3. 類似研究

1.3.1 「2 台のプロジェクタを用いた Interactive Floor の構築」

小西らは、人物の認識およびプロジェクションマッピング*1を行えるシステムを開発した[7]。複数のプロジェクタから投影されたフィールド内の人物を追跡し、その人物視点で3Dに見える映像を床面にマッピングすることで、動的な3Dトリックアートを実現することを目的としている。

図 1-8 のように、複数のプロジェクタから投影した映像を重畳させることによって、人物が投影領域内に入った際に光の遮蔽で映像が消えることを回避しているということを我々の研究の参考にする。しかし小西らのシステムでは、投影領域を黒のテープでマーキングし、Kinect とプロジェクタを予め天井付近に設置する必要がある。そのため使用できる環境に制限がある。そこで、我々は Kinect と 2 台のプロジェクタの相対位置を固定し、移動可能なハードウェアを開発することで様々な場所で Interactive Floor を使用できるようにする。

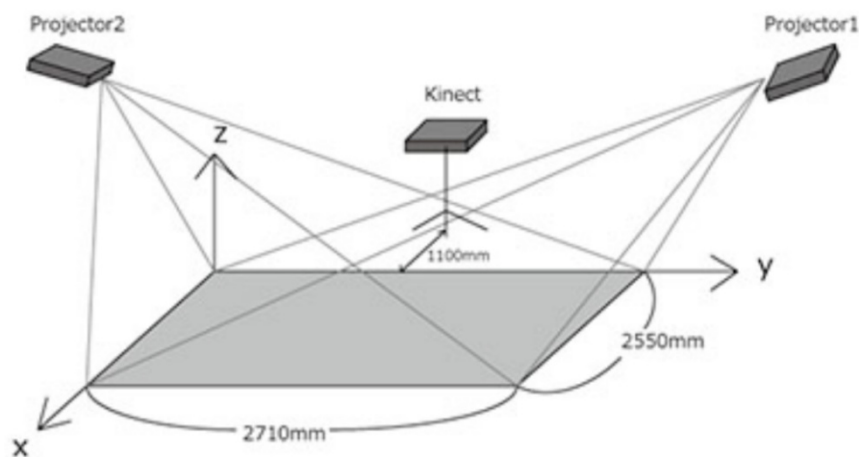


図 1-8 Interactive Floor の概略図【出典：[7]】

*1 プロジェクタを使用して空間や物体に映像を投影し、重ね合わせた映像に様々な視覚効果を与える技術及びパフォーマンス

1.3.2 「アクティブラーニングの学習効果に関する検証」

辻らの「アクティブラーニングの学習効果に関する検証」[8]、「アクティブラーニングの学習効果に関する検証（2）」[9]では、アクティブラーニング形式の授業での理解度が座学形式での授業の理解度を上回る結果になったと述べられている。これは学習者同士の議論や発表により、学習者の自学自習行動が促進されたためであるとされている。

そのため、生徒参加型授業が学習意欲や学習効果の向上を実現できると考える。

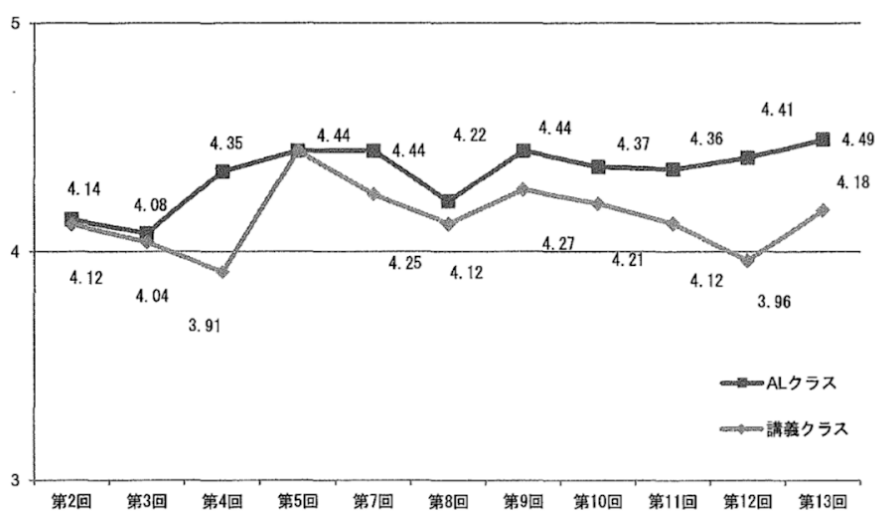


図 1-9 アクティブラーニングと座学の授業理解度【出典：[8]】

1.3.3 「Kinect を用いた AR による鏡像シミュレーション教材の開発と試行」

中野らは、AR と Kinect を組み合わせた鏡像シミュレーション教材を開発した[10]。イメージすることの難しい虚像と鏡像をコンピュータ上でシミュレーションすることにより、学習者に現実の現象と概念理解を結び付け鏡像に対する理解の向上を目的としている。図 1-10 に示すように、Kinect で人間の骨格座標を取得し、大型ディスプレイを用いることで骨格情報をリアルタイムにコンピュータのカメラ画像上に表示している。

生徒が参加し体験できるという点、Kinect とディスプレイを使用したインタラクティブな教育コンテンツ作成の 2 点を我々の研究の参考にする。なお、この研究では映像のみで数式の表示がなかった。そこで、映像と数式の両方を表示することにした。



図 1-10 Kinect を用いた AR による鏡像シミュレーション教材の概略図【出典：[10]】

1.3.4 自動運転のための警察官の手信号の認識システム

小野らは、過去の 2 秒間の映像から警察官の手信号による交通指示を認識する手法を開発した[11]。車載カメラ映像から指示者の骨格座標を連続的に推定し、深層学習を用いて手信号の現示を「赤」「青」の 2 値および「その他」を加えた 3 値に分類している。実験の結果「赤」「青」には類似の挙動が含まれており、それを「その他」として分離することで適切に判定できることが明らかになっている。

骨格座標を連続的に推定し、深層学習を用いてジェスチャーを分類するという手法を参考にしてジェスチャー開発を行う。

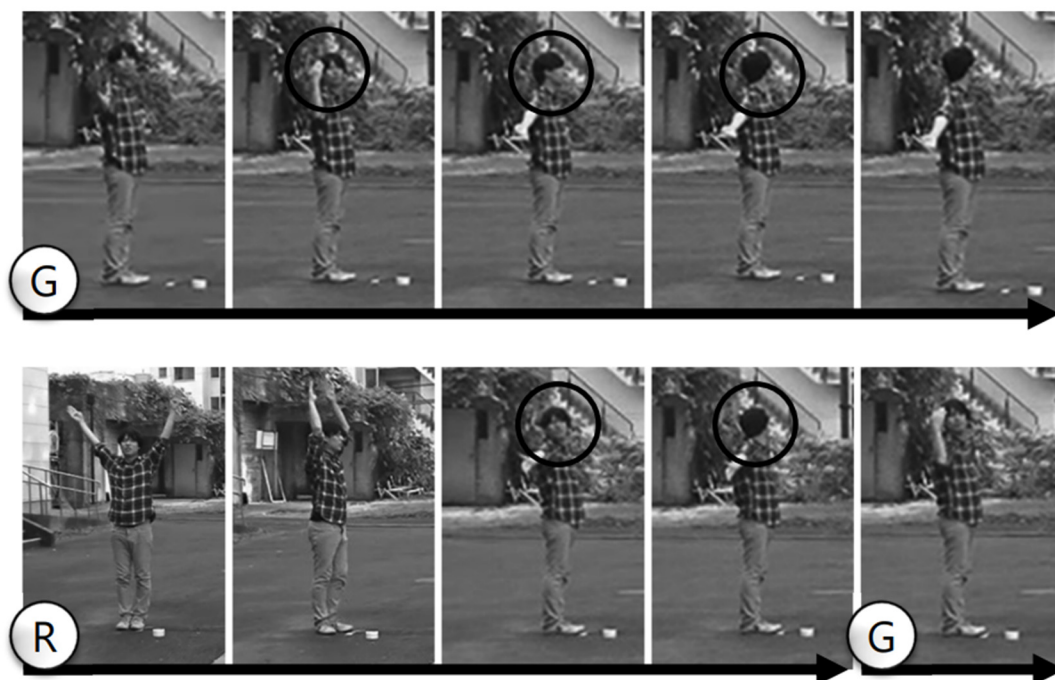


図 1-11 Red/Green の挙動【出典: [11]】

1.4. 先行研究「Interactive Floor Interface を用いた教育支援システムの開発」

本節では、1.3 の関連研究を参考に開発した Interactive Floor Interface(以下 IFI)の概要を説明する[12]。

1.4.1 構成要素

IFI の概要を図 1-12 に、フローチャートを図 1-13 に示す。IFI は床にプロジェクタで教育情報を提示するシステムである。センサで人の動作を読み取る認識部と、その上で動作する教育コンテンツが主な構成要素である。先行研究における IFI は Kinect v2、プロジェクタ 2 台、およびそれらを固定する装置から構成されている。

IFI に対する入力ユーザーの動作であり、出力はプロジェクタを通して床に投影される映像である。図 1-12 の Recognition Area でユーザーがあらかじめ登録された動作をすると、Kinect v2 を通してそれが認識され、動作に応じて提示する情報や機能がリアルタイムに変化する。

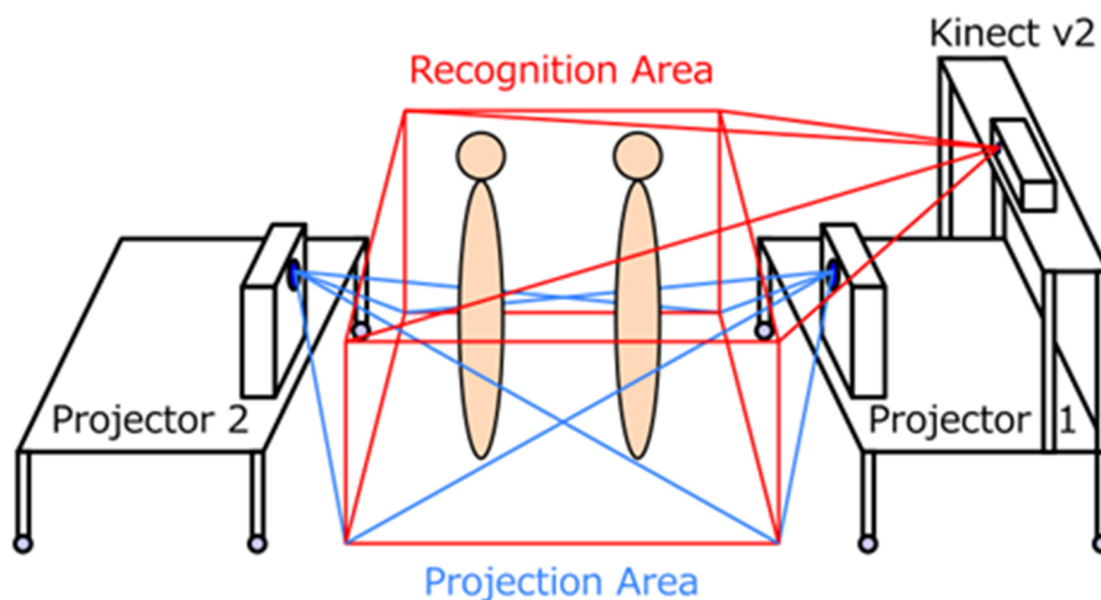


図 1-12 IFI の概要図

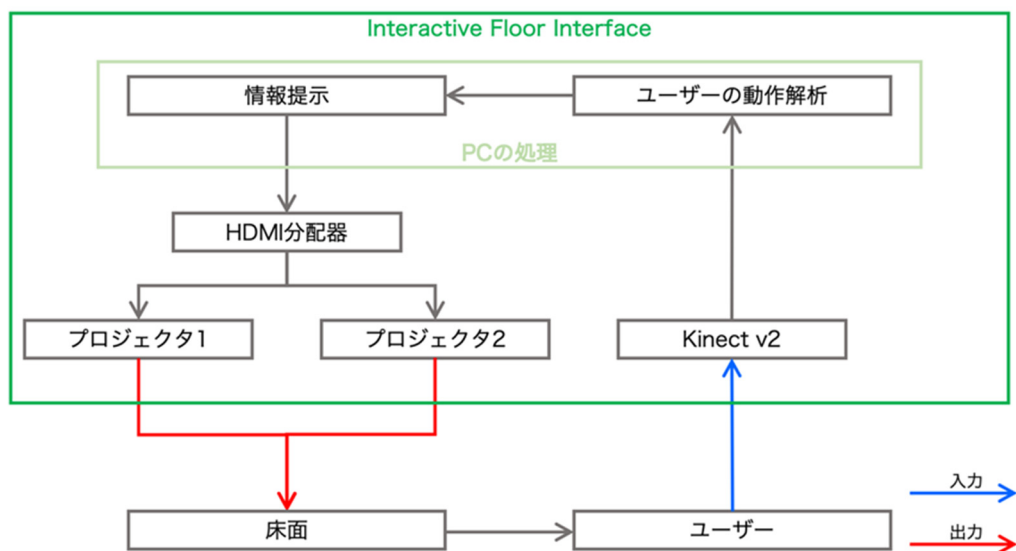


図 1-13 IFI のフローチャート

1.4.2 教育コンテンツ

IFI で動作する教育コンテンツとして、水面波の干渉に注目した。テキスト上で学習できる波は、波源から発生するすべての波が固定されている。しかし、実際の波は1つの波紋が連続的に広がっていくことになる。この差を本システムのアニメーション機能によって埋められるのではと考えた。ユーザーは本システムで以下の内容を学習することができる。

- 水面波の強め合いの公式： $|LA - LB| = n\lambda$
- 水面波の弱め合いの公式： $|LA - LB| = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$
- 干渉縞

図 1-14 の距離提示モードは Projection Area 内に立った複数の人の位置を波源として波が発生するモードである。ユーザーと観測点までの距離をもとに波の強め合い・弱め合いを理解することができる。Real モードは距離提示モードの背景を変え、現実の水面波に近づけたモードである。Moiré モードでは2つの波源を固定した時の強め合い弱め合いの点をそれぞれピンクと水色で表示している。

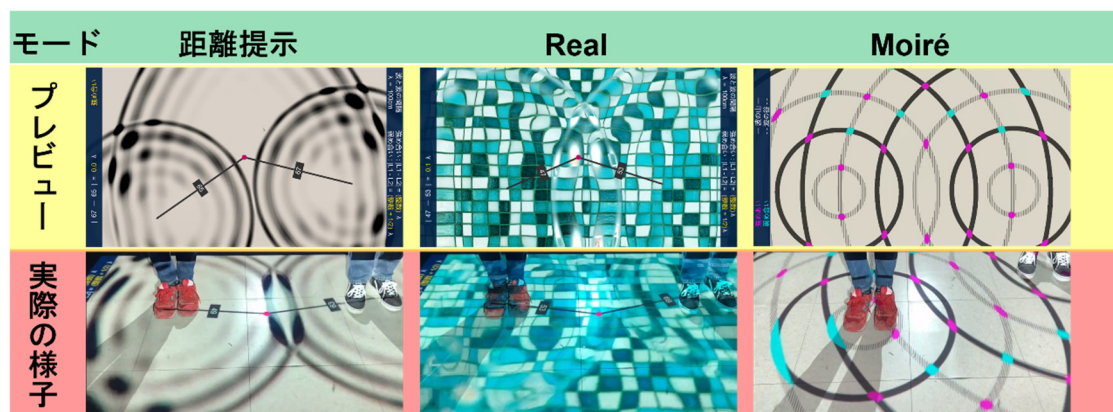


図 1-14 波の干渉を学習するための3つのモード

1.4.3 人のジェスチャー認識

IFI はユーザーの動作により教育コンテンツを操作できるインタラクティブ性をもっている。その機能には、Kinect により得られた骨格座標に基づくジェスチャー認識を利用している。

図 1-15 は実装したジェスチャーと本システムの機能の対応図である。これにより、ユーザーがジェスチャーを行うことによって1.4.2で述べた水面波の干渉アニメーションのモードを移行することができる。また、ユーザーの理解を深めるため、波の周波数の変更と波の一時停止機能を実装した。波の周波数を変更することによって、周波数の変更が波の強め合い・弱め合いにどのような影響を及ぼすのかを学習できる。また、波の一時停止をすることによってユーザーが波源の位置から離れて全体を観察することができる。

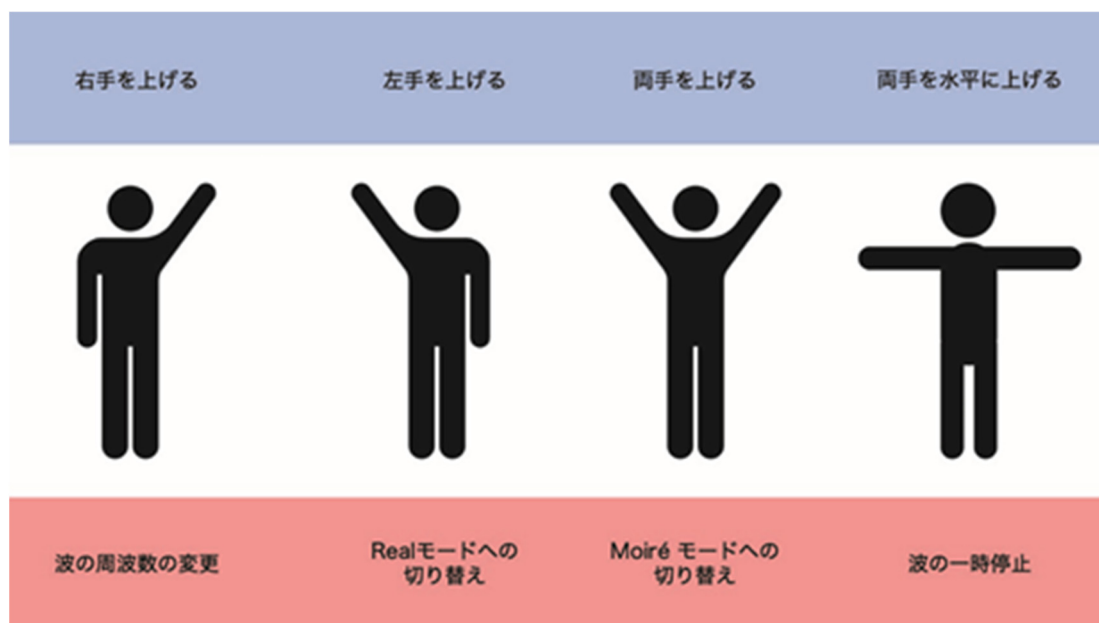


図 1-15 各機能とジェスチャーの対応図

1.4.4 IFI を用いた教育支援システムの評価

IFI を用いて開発した教育コンテンツの有効性を調べる実験を行った。実験手順を図 1-16 に示す。実験協力者 20 人に波の干渉のテストを事前に解いてもらった。その後、教科書で学習するグループと本システムで学習するグループに分かれてもらい、学習後再度同じテストを解いてもらった。

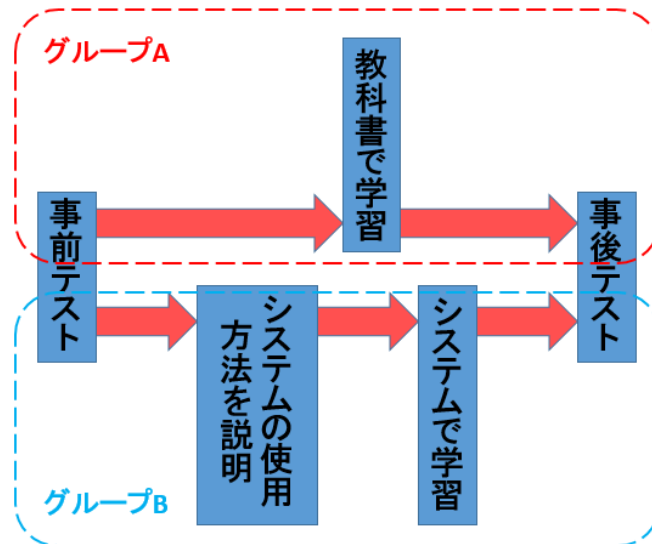


図 1-16 実験手順

実験の結果、両グループともに学習後に平均点が向上した(図 1-17)。t 検定を行ったところ、両グループの平均点推移には有意差があることが示された。しかし、2 つの学習方法の違いに対して有意差を示すことはできなかったため、システムの改善が必要であることがわかった。

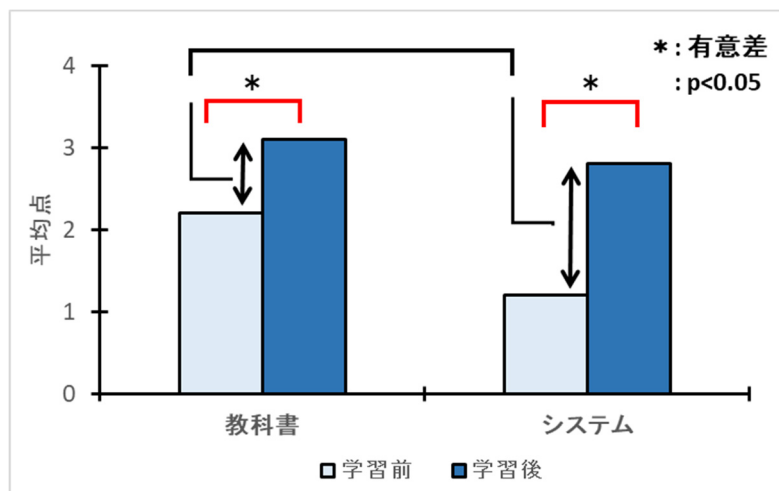


図 1-17 事前・事後テストの平均点推

1.5. 本研究の目的

1.4 より、先行研究では次の 2 つを達成することが出来た。

1. システムにインタラクティブ性を持たせること
2. システムを使用した学習前後の有意差を示すこと

しかし、波の現象の理解とジェスチャーとに関連性が低いことから、学習者が直感的に学習内容を理解することに至らなかった。また、教科書との比較では有意差を示すには至らなかった。

そこで、本研究の目的を次の 2 つと定める。

1. ジェスチャーと支援内容に関連性を持たせること
2. 数式を理解できるシステムを作製すること

2. IFI を用いた教育支援システムの改善

2.1. 変更点

本節では、1.4で述べた先行研究によるシステムと本研究のシステムとの変更点を述べる。表 2-1 は変更点を列挙したものであり、図 2-1 は変更後の IFI のフローチャートである。以降の節ではこの変更点について述べていく。

表 2-1 本研究における変更点

	先行研究	本研究
センサ	Kinect v2	Azure Kinect
データ取得・ジェスチャー認識	C# + Visual Gesture Builder	Python + Neural Network
通信		UDP 通信

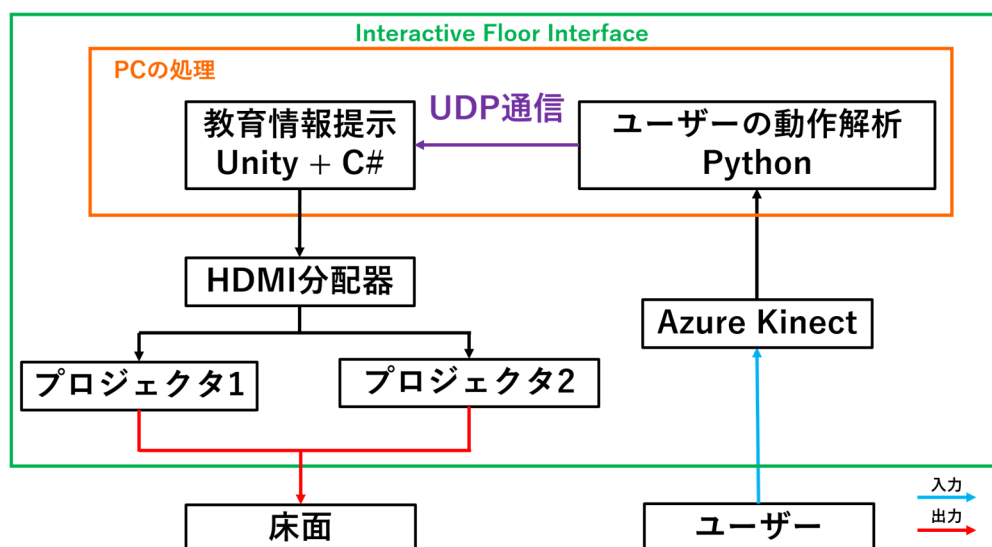


図 2-1 変更後の IFI フローチャート

2.1.1 使用機材の変更

先行研究では、モーションセンサとして Microsoft 社製の Kinect v2(図 2-2)を使用していた。しかし、2017 年に Kinect v2 は生産が終了しているため、後継機である Microsoft 社製の Azure Kinect(図 2-3)を使用する。詳しい仕様を表 2-2 に示す。

Azure Kinect を PC で利用するためには SDK である「Azure Kinect SDK」および「Azure Kinect Body Tracking SDK」をインストールする必要がある。



図 2-2 Kinect 【出典：[13]】



図 2-3 Azure Kinect 【出典:[14]】

表 2-2 Kinect v2 と Azure Kinect の仕様 【出典[14]】

		Kinect v2	Azure Kinect
RGB カメラ	解像度	1920 × 1080 px	3840 × 2160 px
			4096 × 3072 px
深度/IR カメラ	解像度	512 × 424 px	640 × 576 px
			512 × 512 px
			1024 × 1024 px
オーディオ		4つのマイク	7つのマイク
IMU		3軸加速度	3軸加速度 + 3軸角速度
接続性	通信	USB 3.1 Gen 1	USB 3.1 Gen1 /w type C
	電源	AC アダプター	AC アダプターまたは USB-C
筐体	サイズ	249 × 66 × 67 mm	103 × 39 × 126mm
	重量	970 g	440g

2.1.2 開発環境の変更

本研究では使用するセンサを Azure Kinect に変更するに伴い、開発環境も変更する必要がある。例えば、Kinect v2 ではジェスチャー認識用の GUI ツール Visual Gesture Builder を利用できたが、Azure Kinect では利用できないため、データ取得・ジェスチャー認識を Python で実装することにした。

しかし、Azure Kinect は公式では Python に対応していない為、hexops 氏が提供している Azure Kinect SDK を Python で使用可能にするライブラリ Azure-Kinect-Python[15]を用いた。教育コンテンツである水面波の干渉アニメーションは先行研究と同様に Unity + C# で実装する。

2.1.3 UDP 通信

本システムでは、Python 側で得られた座標データとジェスチャー結果を、描画を担当する Unity + C# 側に伝える必要がある (図 2-1)。そのために、UDP 通信を利用してデータの送受信を行う (図 2-4)。

水面波の干渉アプリケーションを使用するのに必要な情報は 2 つである。本通信ではこれらを文字列として送受信している。

- ① 人の中心座標
- ② ジェスチャー結果

Azure Kinect では人の関節座標を 32 個取得することが出来る (図 2-5)。人の中心座標として、Azure Kinect で取得した関節座標の中にある SPINE_NAVAL を使用した。この座標データとジェスチャー結果に基づいて教育コンテンツが操作される。

送信 : Python				受信 : Unity			
x座標	y座標	z座標	ジェスチャー結果				
144.981	79.242	906.771	Raising Right Hand	⚠	144.981	79.242	906.771 Raising Right Hand
145.454	79.377	908.056	Raising Right Hand				
146.122	79.434	908.977	Raising Right Hand	⚠	145.454	79.377	908.056 Raising Right Hand
146.154	79.418	909.214	Raising Right Hand				
146.596	80.015	909.769	Raising Right Hand	⚠	146.122	79.434	908.977 Raising Right Hand
147.113	80.565	911.002	Raising Right Hand				
147.315	81.229	910.881	Raising Right Hand	⚠	146.154	79.418	909.214 Raising Right Hand
147.788	82.012	912.658	Raising Right Hand				
				⚠	146.596	80.015	909.769 Raising Right Hand
				⚠	147.113	80.565	911.002 Raising Right Hand
				⚠	147.315	81.229	910.881 Raising Right Hand
				⚠	147.788	82.012	912.658 Raising Right Hand

図 2-4 UDP 通信の様子

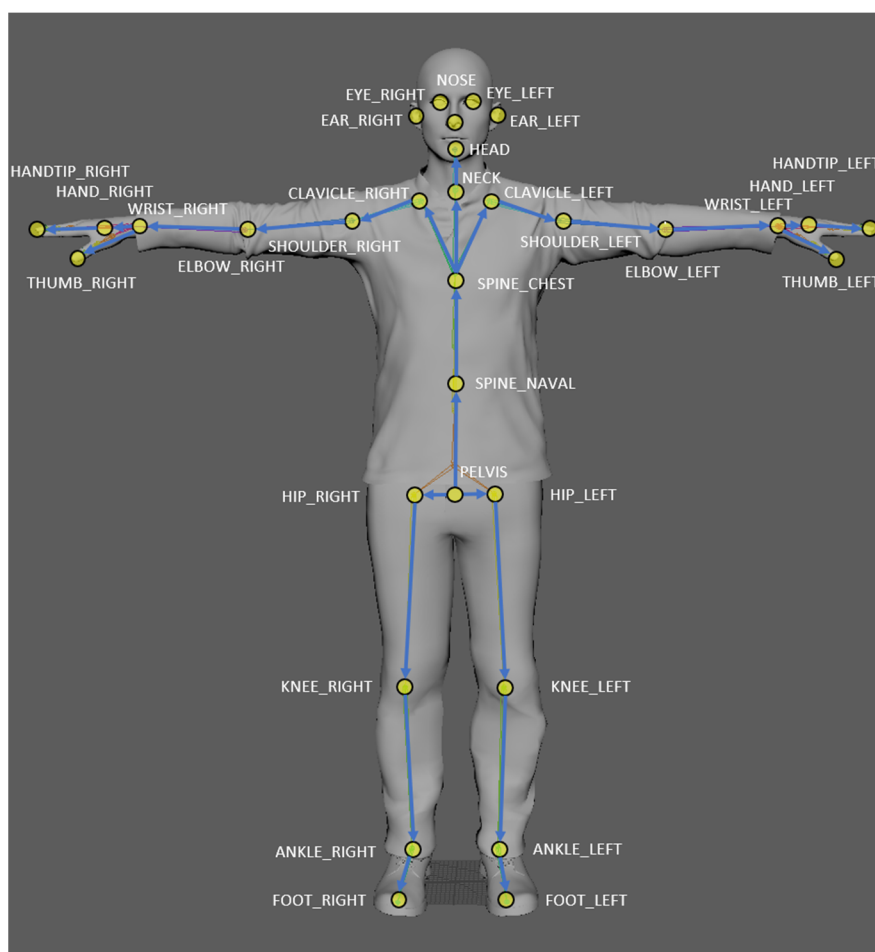


図 2-5 Azure Kinect で取得できる関節【出典:[16]】

2.2. 教育コンテンツ: 波の干渉

本節では、IFI に搭載されている教育コンテンツ<波の干渉>について述べる。先行研究では、Real, Distance, Moiré の 3 モードを搭載していたが、数式の理解には至らなかった。そこで本研究では、波を幾何学模様に変換した Moiré モードをベースにした新たなシステムを作成し、数式の理解を目指す。

2.2.1 問題点

従来のシステムでは、主に距離提示 (Distance) モードを使用し学習を行った(図 2-6)。このモードでは IFI 内に二つの波源が存在するときに、『波の強め合い、弱め合い』を示す干渉の状態を図示している。ユーザー2人が実際に動きまわることで、画面中央に固定されている中心点において波の強め合い、弱め合いを実現させるという教材である。

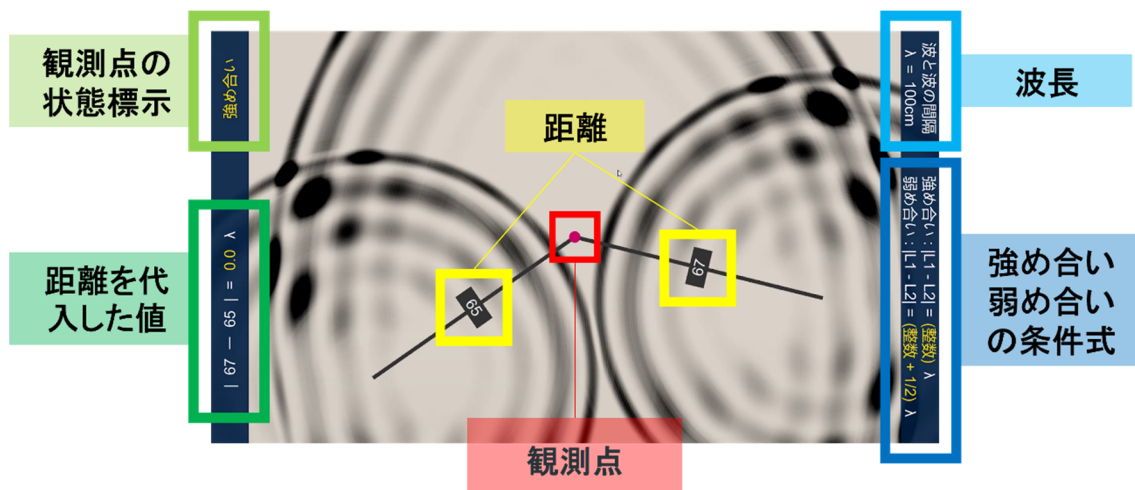


図 2-6 距離提示モード

しかし、このモードでは数式の理解には至らなかった。その理由として以下が考えられる。

1. 波の描画が現実に近いので、波の山と谷を区別できないこと
2. 観測点が固定であるため、微調整が必要であり学習に集中できないこと
3. 条件式を最初から提示しているため、条件式を導出できないこと
4. 目標がないため、十分な理解が出来たか不確かであること

まず 1. の理由より、現実に近い波を描画する距離提示モードではなく、試験問題などで使用される幾何学模様を表現した Moiré モードの方が学習に適していると判断した。そこで、Moiré モードをベースにした新たなシステムを作成することにした。

また表 2-3 は各モードの比較である。旧 Moiré モードでは干渉点の表示のみ実装されている。新たなシステムには、距離提示モードで実装されていた機能を、ベースとなる Moiré モードに追加し、さらに上記で述べた問題点を解決するため機能を加えていく。

表 2-3 各モードの比較

	距離提示モード(旧)	Moiré モード (旧)	新たなシステム
距離提示	○	×	○
干渉点表示	×	○	○
波源の移動	○	×	○
周波数変更	×	×	○
波長変更	○	×	○
一時停止	○	×	○

2.2.2 新たなシステムの3つの機能

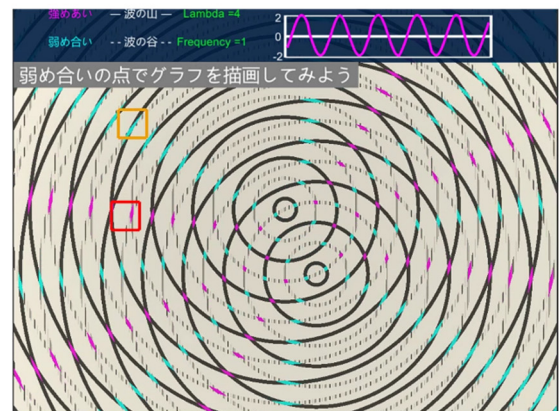
2.2.1の問題を改善するために、新たなシステムに3つのモードを追加する(図 2-7)。波源モードでは、「波源の移動」、「周波数の変更」、「波長の変更」を実装した。グラフモードでは「観測点における波の和のグラフ描画」を実装した。経路差モードでは「観測点と各波源の距離提示」、「観測点と各波源の経路差」、「同じ経路差を結んだ線の描画」を実装した。また、これらの各モードに目標を提示する機能を実装した。

以下で、それぞれについて解説する。

波源モード



グラフモード



経路差モード

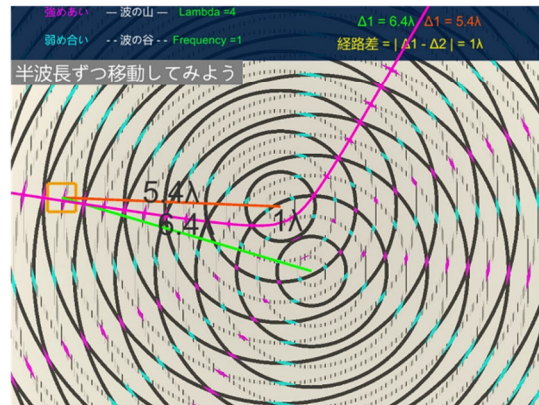


図 2-7 新システムの3つのモード

2.2.2.1 波源モード

波源モードの特徴は次の3つである。

- ・ 波源の移動ができること
- ・ 周波数の変更ができること
- ・ 波長の変更ができること

図 2-8 に示した波源モードでは、ユーザーの現在位置を波源とした幾何学模様の波がユーザーに追従する。また「強め合い・弱め合い」の位置に色を塗り強調表示することで、視覚的に「強め合い・弱め合い」の位置を理解することが出来る。さらに映像上部に現在の波長・周波数の値を表示し、ユーザーの学びやすい値に設定できる。

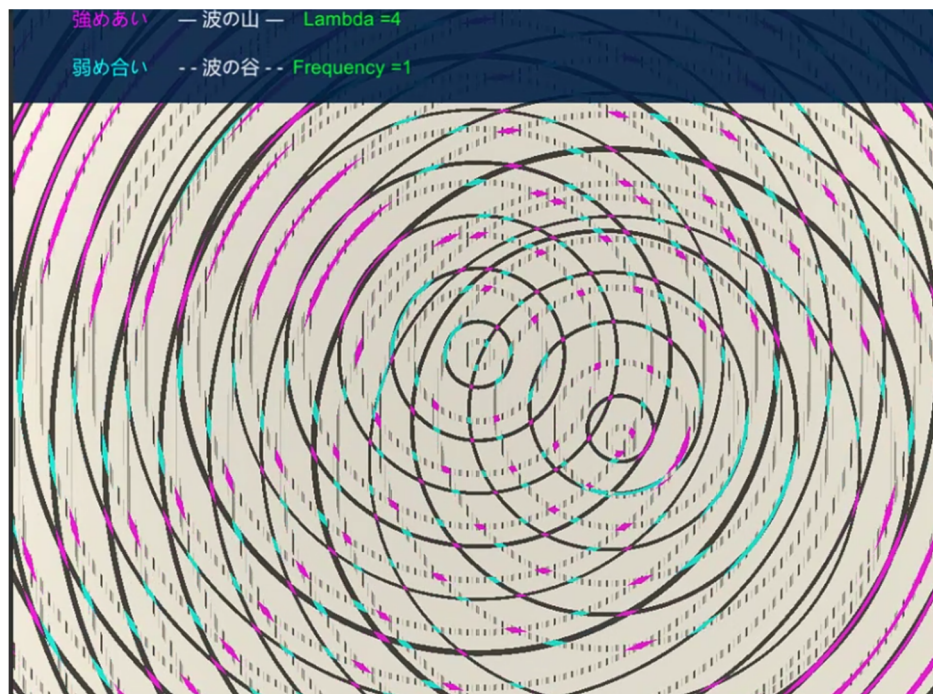


図 2-8 波源モード

旧システムの Moiré モードでは、距離提示モードからモード変更した際に波源が固定されており、波源を移動したい場合は距離提示モードを介する必要があった。また、初めからすべての波が描画されており、波の伝播が適切に再現されていないという問題も生じていた。この問題をどのように解決したのかを以下に述べる。

波源モードの仕組みは図 2-9 のようになっており、 $y = \sin t$ で表される波の場合 $y > 0.96$, $y < -0.96$ の値にそれぞれ実線と破線を描画している。また、重ね合わせられた波の値 y が $y > 1.92$, $y < -1.92$ である領域をそれぞれピンクと水色で強調表示している。

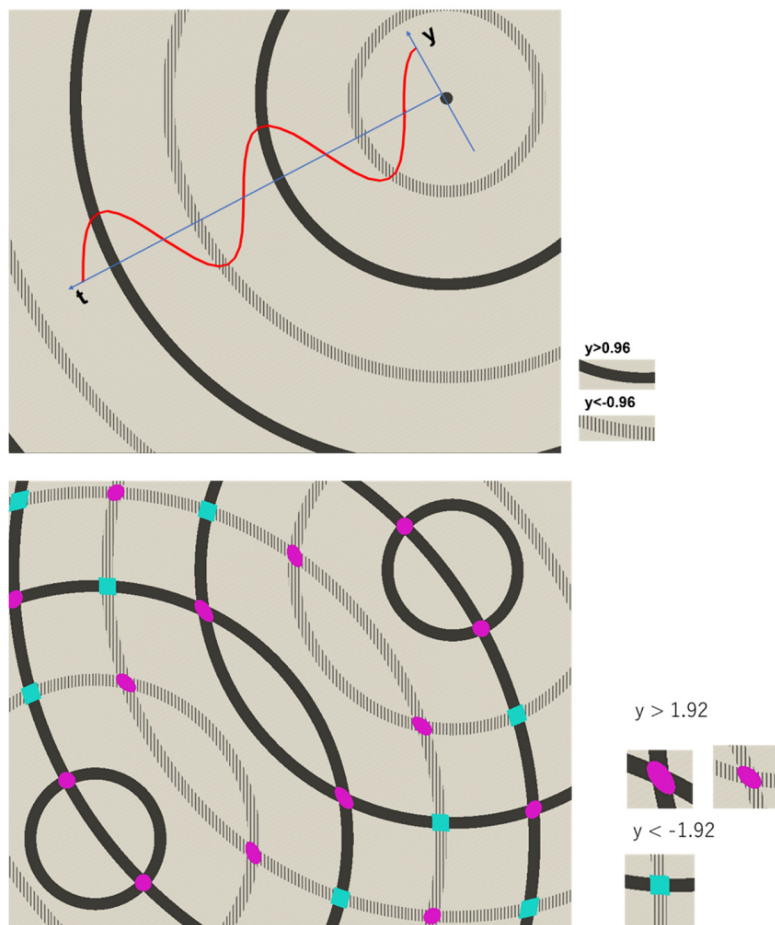


図 2-9 描画と色付けの仕組み

このとき、波源の位置はユーザーの移動によりリアルタイムに変化するのであるから、描画する波は、「波源から波が到達した範囲のみ」でなければならないし、また波源が移動した後はその位置からの波の描画は停止しなければならない。これを、図 2-10 に示すように「波の発生と削除」により実現した。

まず、波の発生に関しては、図 2-10（左）のように波が到達していない範囲を $y = 0$ に設定することで実現する。これにより、旧システムにおける初めから全ての波が発生している問題を解決した。また、波源の移動に伴う波の削除に関しては、図 2-10（右）のように以前の波源で新たに発生する波の値を 0 にすることで、波を消している。この動作を繰り返すことで新システムにおける波源の移動を実現している

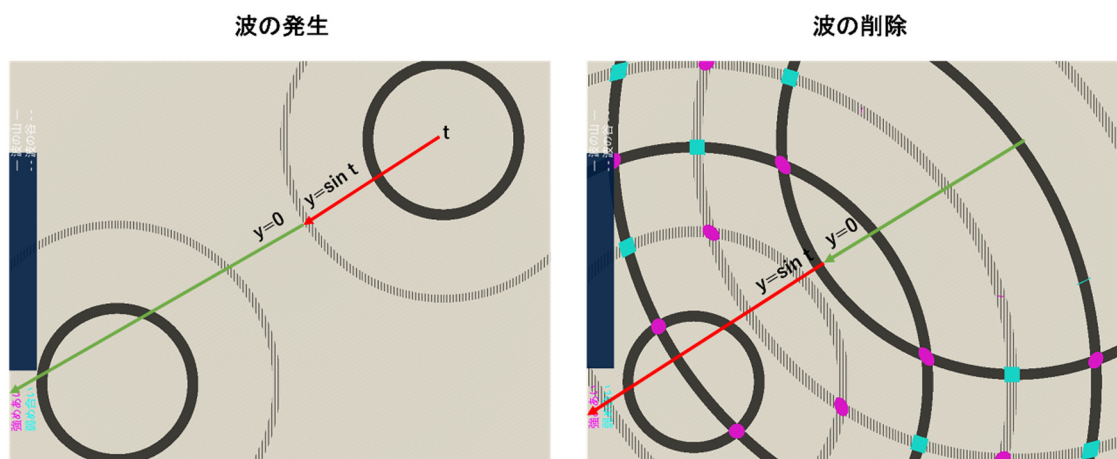


図 2-10 波の発生と削除

式(1)は使用している波の式である。波源モードでは、この式の周波数および波長をユーザーが自由に変更できる。図 2-11 は λ の値を変更した様子であり、画面上に表示される波の数と速さが変化する。

$$y = \sin 2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (1)$$

f 周波数、 λ 波長

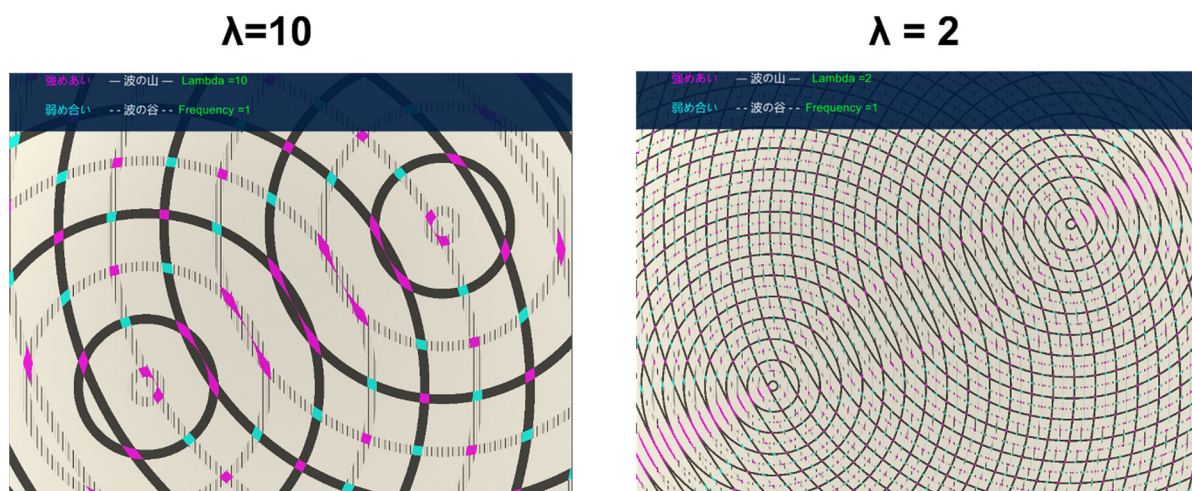


図 2-11 λ 比較

2.2.2.2 グラフモード

グラフモードの特徴は次の4つである。

- ・ 観測点における2つの波の和が時間の関数としてのグラフとして描画されること
- ・ 観測点をユーザーの現在位置に変更できること
- ・ 波源が固定されること
- ・ 周波数・波長の変更ができないこと

グラフモードへの移行は後述する特定のジェスチャーにより行う(2.3 参照)。グラフモードに移行した時点で波源は固定され、ユーザーの現在位置が図 2-12 の黄色の四角形で表示され追従する。また、特定のジェスチャーで観測点をユーザーの現在位置に変更が可能である。観測点を自由に変更し固定することで、ユーザーは学習に集中できる。以上より、グラフモードでは強め合い・弱め合いの現象の理解につながると期待できる。

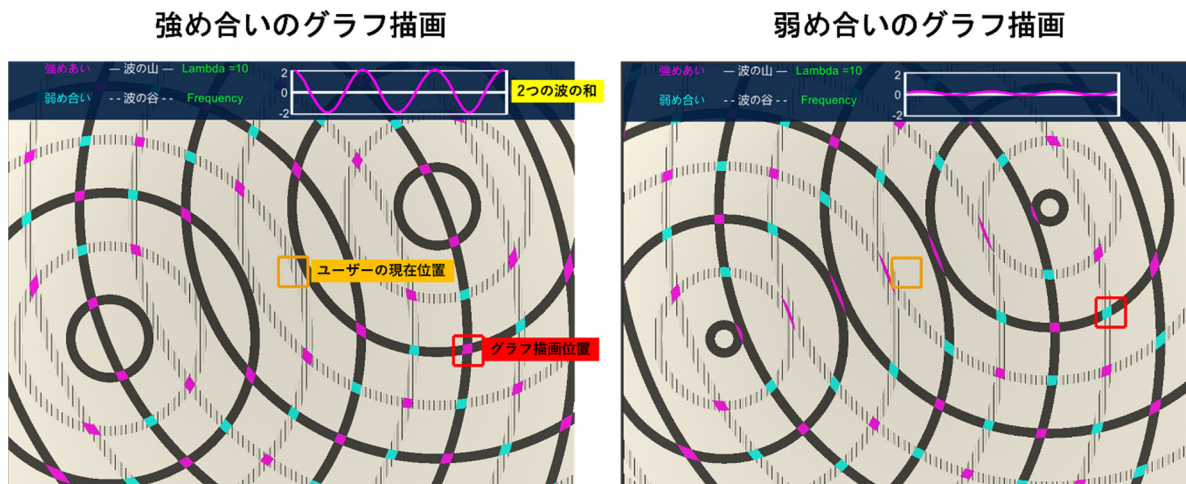


図 2-12 強め合い・弱め合いグラフ

グラフモードでは、波とグラフに矛盾が生じないように次の2つを調整している。

- ・ 波が到達してからグラフを描画すること
- ・ 波源モードとグラフモードにおける波の発生時刻の違いに注意すること

図 2-13 のように波が到達してからグラフを描画するため、以下の式で観測点までの到達時間を求め到達していない間は $y = 0$ としている。

2つの波源と観測点の距離

$$x_1, x_2$$

波の速さ

$$v = \lambda \times f$$

観測点までの到達時間

$$\frac{x_1}{v}, \frac{x_2}{v}$$



図 2-13 波とグラフの関係

また波源モードからグラフモードへの移行の際、波源モードで既に出ている波はリセットされ新たにグラフモードで波が発生する。そのため、グラフモードで発生する波にはディレイをかけ波源モードで発生していた波と同様の時刻に合わせている。ディレイは以下の式で求めている。

波源が発生した時刻

$$t_1, t_2$$

周期

$$T = \frac{1}{f}$$

必要なディレイ

$$(t_1 - t_2) \% T$$

2.2.2.3 経路差モード

経路差モードの特徴は、次の4つである。

- ・ 全ての波が停止すること
- ・ 2つの波源からユーザーの現在位置へと直線が引かれ距離が提示されること
- ・ 提示した距離の経路差が表示されること
- ・ 現在位置から最も近い強め合い・弱め合いの点と同じ経路差を結んだ線が表示される

経路差モードは、特定のジェスチャーを行うことで移行する。経路差モードでは、全ての波が停止しており新たに波も発生しない。波を停止させることで波の山と谷が固定され、「強め合い・弱め合い」の位置を確認しやすくなる。これにより、学習のポイントが明確になると考えた。経路差モードでは、2つの波源からユーザーの現在位置までの距離を提示し経路差を出している。さらに、同様の経路差の点を結んだ線(腹線・節線)を描画している。学習者が自ら「点」の位置を探すことは学習に参加する機会となり、強め合い・弱め合いの条件の規則性に気づくことが期待できる。

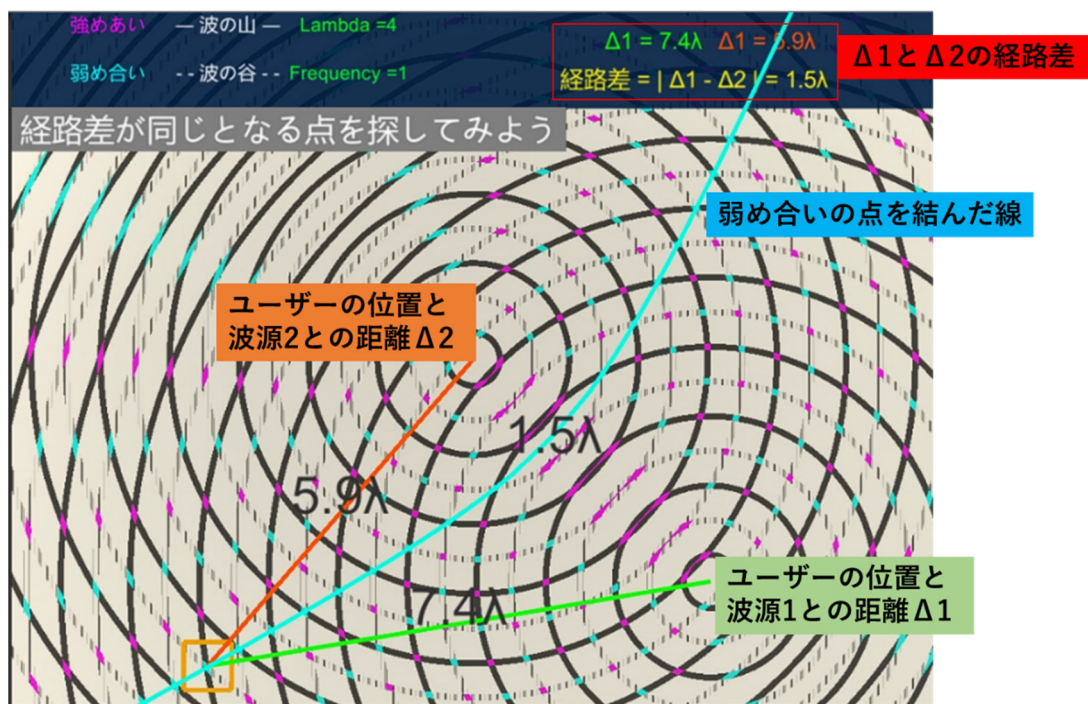


図 2-14 経路差モード

腹線・節線の描画は双曲線の方程式である式(2)を使用した。

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$$

$$y = \frac{b}{a} \sqrt{x^2 - a^2} \quad (2)$$

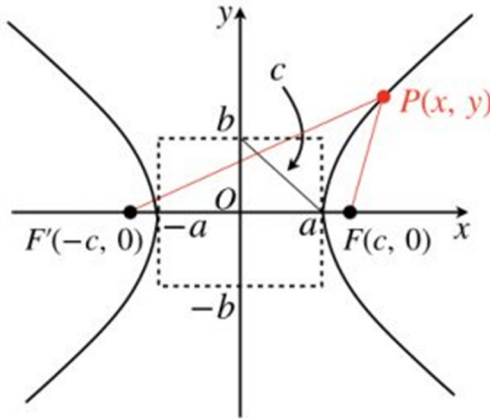


図 2-15 双曲線の方程式【出典:[17]】

2つの波源の位置を $F_1(x_1, y_1)$, $F_2(x_2, y_2)$ とし、2つの波源の距離 Δ を求める。

$$\Delta = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

$|PF - PF'| = 2a$ より、 $a = \frac{\Delta}{2}$ また、2つの波源の中点 M は

$$M = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2} \right)$$

次に、回転角 θ を求める。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

求めた θ , Mを使用し、 F_1, F_2 を回転の公式により回転させ $F'_1(x'_1, y'_1), F'_2(x'_2, y'_2)$ を求める。

$$x' = (x - M) \cos \theta - (y - M) \sin \theta$$

$$y' = (x - M) \sin \theta + (y - M) \cos \theta$$

また、焦点 c は F'_1, F'_2 の x 座標であることから求められる。求めた c と a から b を求められる。

$$b = \sqrt{c^2 - a^2}$$

以上より、双曲線の方程式を求めた。

2.2.2.4 目標の提示

実装した 3 つのモードを効果的に学習するために、各モードで目標を提示する機能を追加した。目標提示の条件は次の 2 つである。

- ・ 目標の提示・達成の判断は教育者が行うこと
- ・ 事象を確認できた後に、学習してほしい内容については、文字にして伝えること

条件からわかるように、目標の提示・達成の判断を手動で行う必要がある。これは、実際の教育現場でも次のステップに進む判断は生徒の人数や理解度などその環境にあった判断が必要であり、一元的に定められるものではないためである。目標を達成した際には、文字で説明や補足を提示することも重要だろう。本研究では、段階的に波の強め合い・弱め合いを学習することができるため、ステップに応じて学習した内容を言葉にすることで理解度が高まると考える。これにより、学習効果の向上が期待できる。

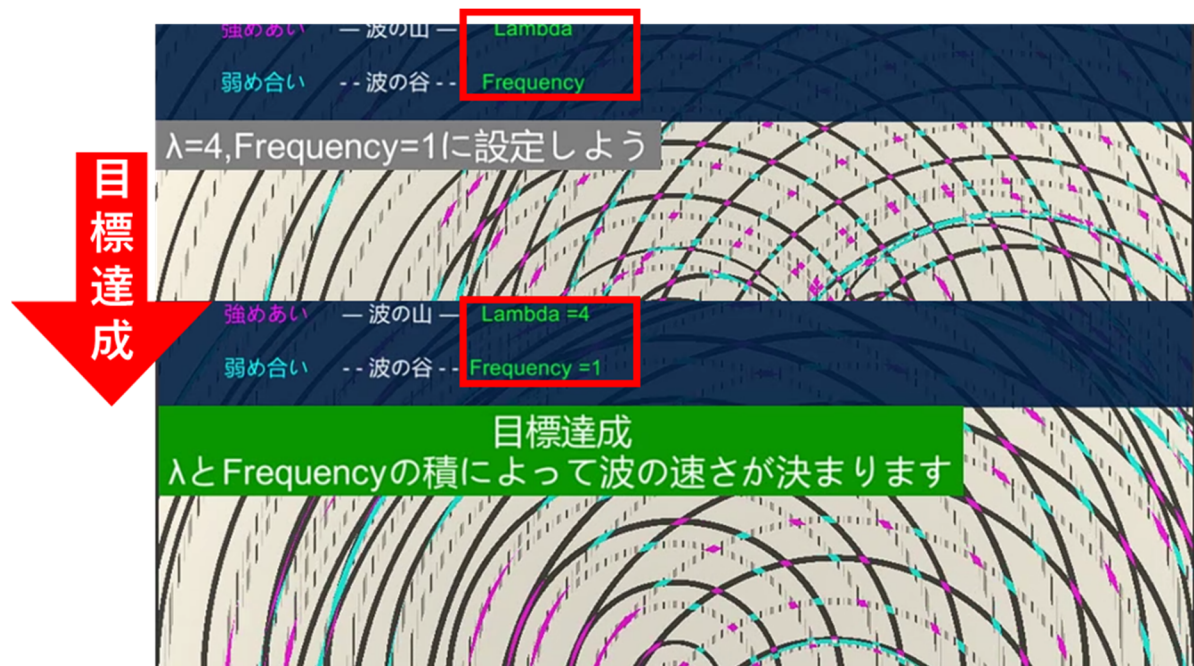


図 2-16 目標の提示・目標の達成

目標の提示・達成をすることで期待できる効果は次の3つである

1. 本システムの操作に慣れること
2. 強め合い・弱め合いの概念を理解すること
3. 強め合い・弱め合いの規則性に気づかせ、数式の理解を促すこと

以上を踏まえ、目標と目標達成時に提示する文章は次の表 2-4 のようにした。

表 2-4 各モードにおける目標

	目標	目標達成
波源モード	$\lambda=7, \text{Frequency}=1$ に設定しよう	λ と Frequency の積によって波の速さが決まります
	グラフモードに移行しよう	
グラフモード	グラフを描画してみよう	その点における2つの波の和が描画されます
	強め合いの点でグラフを描画してみよう	2つの波の山・谷どうしが重った点が強め合いです
	弱め合いの点でグラフを描画してみよう	2つの波の山と谷が重なった点が弱め合いです
	経路差モードに移行しよう	
経路差モード	半波長ずつ移動してみよう	1つの波の山から山・谷から谷が波長であり山から谷が半波長です
	経路差が 2λ の点を探そう	経路差が半波長の偶数倍は強め合いになります $2m \times \lambda/2$
	経路差が 0.5λ の点を探そう	経路差が半波長の奇数倍は弱め合いになります $(2m+1) \times \lambda/2$
	経路差が同じとなる点を探してみよう	強め合う点を結んだ線→腹線 弱め合う点を結んだ線→節線

それぞれの目標の提示・達成の意図は次のようになっている。

1. λ と Frequency の設定をすることによって波の速さが決まることを実感させる。波がある程度見やすい値である $\lambda=7, \text{Frequency}=1$ を目標値とした。ジェスチャーに慣れてもらうという意図もある。
2. 学習を進めるため、グラフモードへ移行する。
3. ユーザーの好きな位置でグラフを描画することで、グラフモードについて理解を促す。また、達成時にはどのようなグラフとなるかを説明することで、波の干渉に触れていく。
4. 強め合いの点でグラフを描画することで、強め合いについて理解してもらう。達成時には強め合いの点の説明を入れることで見落としやすい谷と谷も強め合いであることについても学ぶ。
5. 弱め合いの点でグラフを描画することで、弱め合いについて理解してもらう。達成時には弱め合いの説明をすることで、強め合いと弱め合いの違いを理解してもらう。
6. 学習を進めるため、経路差モードへ移行する。
7. 半波長ずつ移動することで、半波長を学習する。これによって強め合い・弱め合いの条件式を理解しやすくなると考えた。また、目標達成時には波長の説明も入れてある。
8. 経路差が $m\lambda$ (表では 2λ) の点を探してもらう。目標達成時には強め合いの条件式と説明を入れている。これによって強め合いの条件式の理解を促す。
9. 経路差が $(m+1/2)\lambda$ (表では 0.5λ) の点を探してもらう。目標達成時には弱め合いの条件式と説明を入れている。これによって弱め合いの条件式の理解を促す。
10. 経路差が同じとなる点を探してもらう。これによって、強め合い・弱め合いの条件式が正しいことを確認してもらう。また、目標達成時には同じ経路差どうしを結んだ線の名称を載せている。

2.3. ジェスチャー認識

本節では IFI に搭載されているジェスチャー認識について述べる。初めに先行研究時に利用した動きのないジェスチャー(静的ジェスチャー)について述べる。次に支援内容を直感的に理解するために導入した、動きのあるジェスチャー(動的ジェスチャー)について述べる。

2.3.1 従来のジェスチャー

1.4.3 で述べたように、先行研究では「右手を上げる」、「左手を上げる」、「両手を上げる」、「両手を水平に上げる」の 4 種類のジェスチャーを利用していた。これらは、手の動作が終了して静止した状態が認識される静的ジェスチャーである。先行研究ではジェスチャー認識に Visual Gesture Builder を使用しており、これらの静的ジェスチャーのみ認識できた。そのためジェスチャーの種類に限りがあり、直感的に使用できるジェスチャーではなかった。

そこで本研究では、動的ジェスチャーを実装し、作成できるジェスチャーを増やす。波を連想させるジェスチャーを多数作成していくことで、多くの人が直感的に使用できるジェスチャーを作成する。

2.3.2 DNN を用いた静的ジェスチャー認識

2.1.2 で述べたように、Azure Kinect では Visual Gesture Builder を使用することができない。そこで本研究では、中間層が 2 層のディープニューラルネットワーク(DNN)にジェスチャーを学習させジェスチャー認識を行う。

ジェスチャー作成の手順は以下のとおりである。

- ① 認識させたい静的ジェスチャーの骨格座標を 1 フレーム分記録し、ジェスチャーデータを作成する
- ② ジェスチャーをしていない状態のジェスチャーデータを①の手順で作成する。その際に、①で作成したジェスチャーと誤認識させたくないポーズもデータに含める
- ③ 作成した N 種類のジェスチャーデータに基づき、N クラスのジェスチャーを分類する 4 層ニューラルネットワーク(中間層×2)を学習させる。「N 種類」には「ジェスチャーをしていない状態」も含むものとする

利用したジェスチャーが図 2-17 である

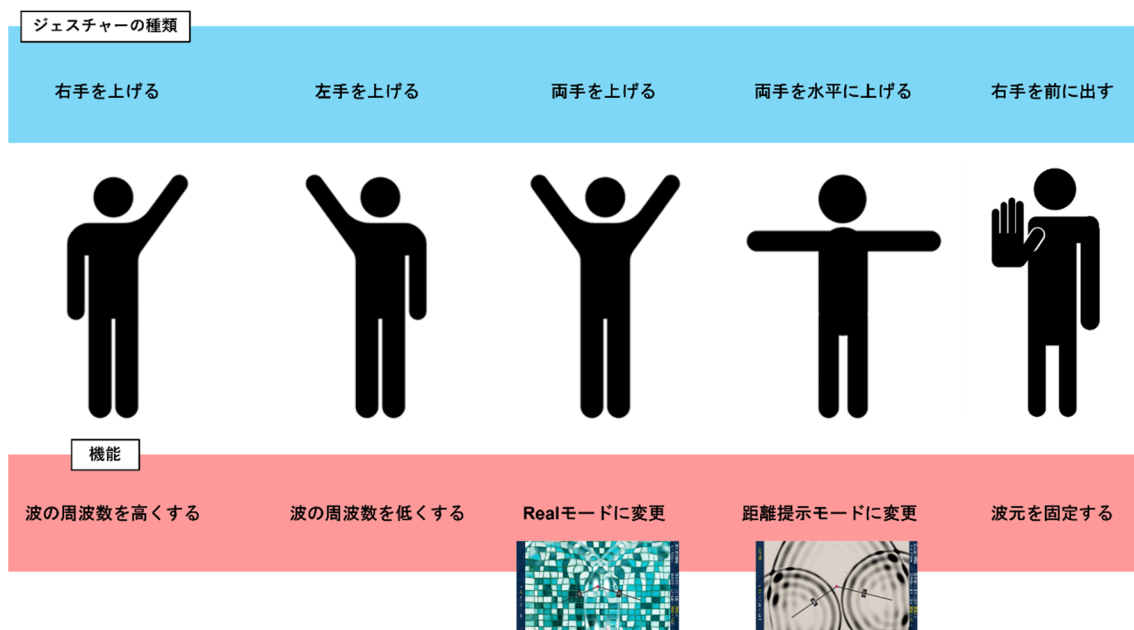


図 2-17 作成した静的ジェスチャー

これらのジェスチャー結果を 2.1.3 で述べた UDP 通信にて Unity に送信することで、IFI を Azure Kinect で操作することが可能となる。

2.3.3 DNN を用いた動的ジェスチャー認識

2.3.2 で DNN を用いて静的ジェスチャーを認識することができた。しかしこれらのジェスチャーは機能と関連性がなく、直感的に使用できるジェスチャーではない。そこで、動きのあるジェスチャーを作成し、ジェスチャーと機能に関連性を持たせる。

動的ジェスチャーの実装手順は以下のとおりである。

- ① 認識させたい動的ジェスチャーの骨格座標をランダムに 10 フレーム分記録し、ジェスチャーデータを作成する
- ② ジェスチャーをしていない状態のジェスチャーデータを①の手順で作成する
- ③ 作成したジェスチャーデータを中間層が 2 層の DNN に学習させる

静的ジェスチャー認識では 1 フレーム分のみ記録していたが、動的ジェスチャー認識では 10 フレーム分記録している。そのため、認識できる動的ジェスチャーはどの位置から切り出しても同じジェスチャーの一部となるよう、「周期的に繰り返す動的ジェスチャー」である必要がある。

2.3.4 利用したジェスチャー

利用したジェスチャーを図 2-18 に示す。

波の周波数と波長の変更は、「左右の手を横にうねらせる」ことで変更する。これらは、腕を正弦波に見立てたジェスチャーであり、左右の手で機能を逆にするものとした。

グラフモードへの切り替えは「両手を横にうねらせる」ことで切り替える。グラフモードは2つの波の和をグラフ化するモードであるため、両腕で2つの波を表現している。

グラフの描画位置の切り替えは「右手を前でうねらせる」ことで切り替える。空中でグラフを書くように右手をうねらせることで直感的に使用できると考えた。

経路差モードへの切り替えは「左手を前に出す」ことで切り替える。経路差モードは2つの波が停止するモードであるため左手を前に出すジェスチャーとした。

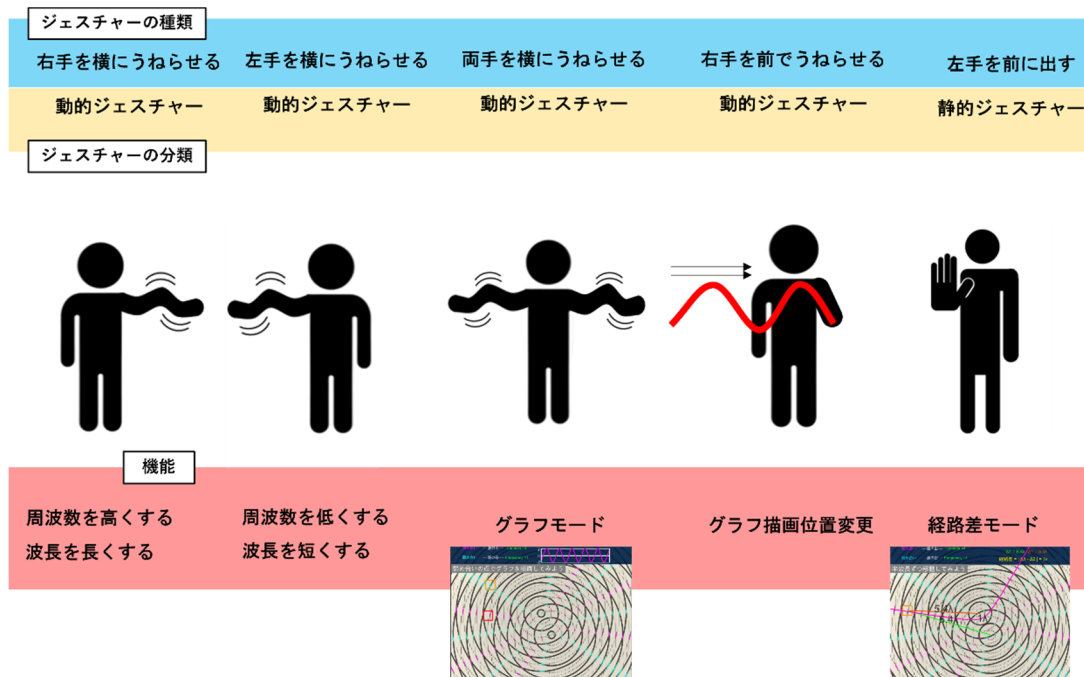


図 2-18 作成したジェスチャー

3. IFI を用いた教区支援システムの評価

本システムが水面波の干渉の学習に効果があるかを示すために評価実験を行った。

3.1. 評価方法

評価実験を2つのグループ(以下グループA・グループBとする)に分けて行った(図3-1参照)。今回の実験では、グループA及びグループBをそれぞれ10人ずつとした。

- I. グループA・グループB共に我々が作成した高校物理の水面波の干渉に関する問題を解いてもらう。問題は各10点で6問出題した。なお実験協力者には問題の正誤及び解答は伝えない。
- II. グループAには高校物理の教科書*1を用いて学習を10分間行ってもらう。
- III. グループBには本システムの使用方法的説明をし、本システムを用いて学習を10分間行ってもらう。
- IV. グループA・B共に学習前に行った試験と同じ問題を再度解いてもらう。
- V. 得られた試験結果を元にt検定を行うことで、統計的に評価する。

t検定とは、2つの正規分布の母集団の平均が等しいかを検定する際に使われるものである。t検定を行うと、それぞれの平均の差以上の差が発生する確率を示すp値を算出することができる。一般に $p < 0.05$ 未満(pが5%未満)であると、2つの母集団の間に有意差が認められることになり、同じ傾向を示していないということになる。

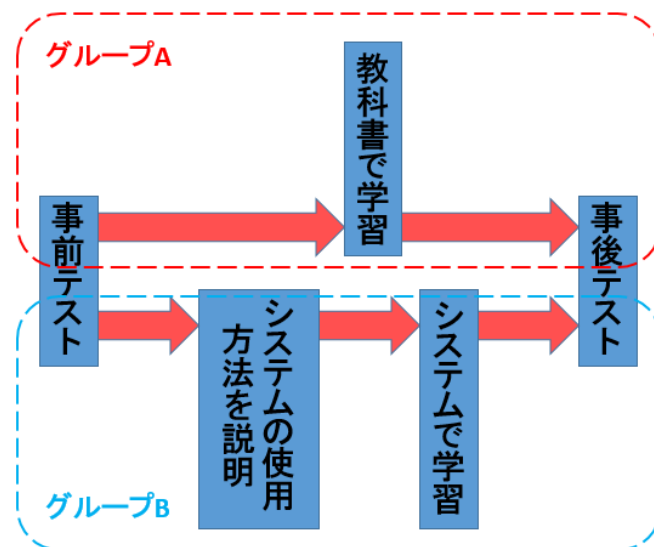


図 3-1 実験手順

3.2. 実験結果

実験結果を表 3-1 に示す。システムおよび教科書における学習前と学習後の得点分布を示したのが図 3-2 である。この結果を元に t 検定を行い学習によって得点が増加したかを判定した。

表 3-1 学習前後の得点

システム				教科書			
実験協力者	学習前	学習後	差分	実験協力者	学習前	学習後	差分
1	40	40	0	1	40	40	0
2	10	10	0	2	40	40	0
3	20	40	20	3	20	20	0
4	20	50	30	4	60	60	0
5	40	50	10	5	40	50	10
6	20	20	0	6	0	10	10
7	20	30	10	7	20	20	0
8	20	40	20	8	20	20	0
9	0	20	20	9	20	50	30
10	10	10	0	10	10	30	20
平均	20	31	11	平均	27	34	7

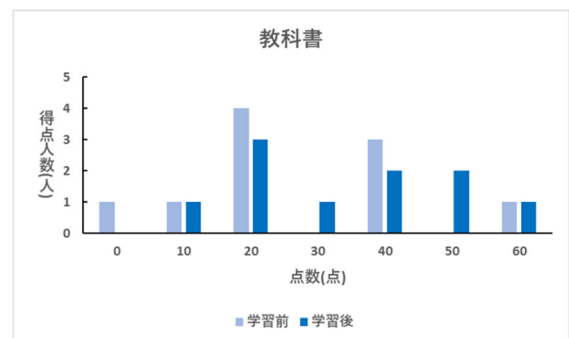
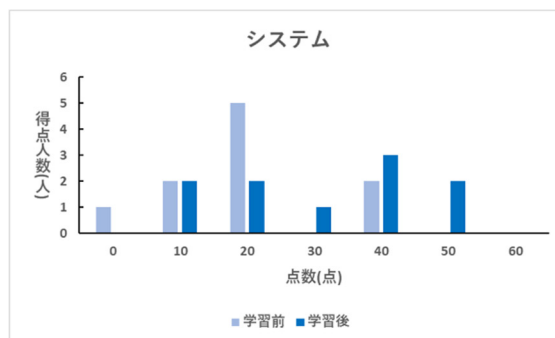


図 3-2 学習前後の得点分布

表 3-1 より、システムおよび教科書のどちらも平均点が向上したことがわかる。これらの結果を元にシステムと教科書の学習前後の得点を使用し、それぞれ t 検定を行った(図 3-3)。その結果、システムの p 値が $p(T \leq t) 0.005$ 、教科書の p 値が $p(T \leq t) 0.03$ となり、どちらも 0.05 を下回っていたため有意差が認められた。

システム			教科書		
	変数 1	変数 2		変数 1	変数 2
平均	20	31	平均	27	34
分散	155.556	232.222	分散	312.222	271.111
観測数	10	10	観測数	10	10
ピアソン相関	0.70153		ピアソン相関	0.80963	
仮説平均との差異	0		仮説平均との差異	0	
自由度	9		自由度	9	
t	-3.1608		t	-2.0896	
P(T≤t) 片側	0.00577		P(T≤t) 片側	0.03311	
t 境界値 片側	1.83311		t 境界値 片側	1.83311	

図 3-3 平均点の t 検定結果

次に、システムと教科書の差分を使用し t 検定を行う。しかし、システムと教科書では異なる人物が実験を行っていることから、2 つの標本が異なる対象から抽出された「対応の無いデータ」となっている。そこで、f 検定を行い分散が等しいかどうかを検定する必要がある。分散が等しい場合は「2 標本の等分散が仮定できる t 検定」、分散が等しくない場合は「2 標本が非等分散の t 検定」を行う。f 検定の結果は図 3-4 であり、 $p(F \leq f)$ が 0.05 を上回ったため、分散が等しいことは認められなかった。

	システム	教科書
平均	11	7
分散	121.111	112.222
観測数	10	10
自由度	9	9
観測された分散比	1.07921	
P(F≤f) 片側	0.45573	
F 境界値 片側	3.17889	

図 3-4 差分の f 検定結果

システム・教科書の差分では分散が等しくなかったため、2 標本が非等分散の t 検定を行った。その結果は図 3-5 であり、 $p(T \leq t)$ は 0.20 となり 0.05 を上回ったため、有意差は認められなかった。

	システム	教科書
平均	11	7
分散	121.111	112.222
観測数	10	10
仮説平均との差異	0	
自由度	18	
t	0.82808	
$P(T \leq t)$ 片側	0.20924	
t 境界値 片側	1.73406	

図 3-5 差分の t 検定結果

以上の結果をまとめたのが図 3-6 である。教科書・システムそれぞれで学習前後の平均点の推移は有意差が認められた。しかし、教科書・システムの学習前後の得点差分では有意差は認められなかった。

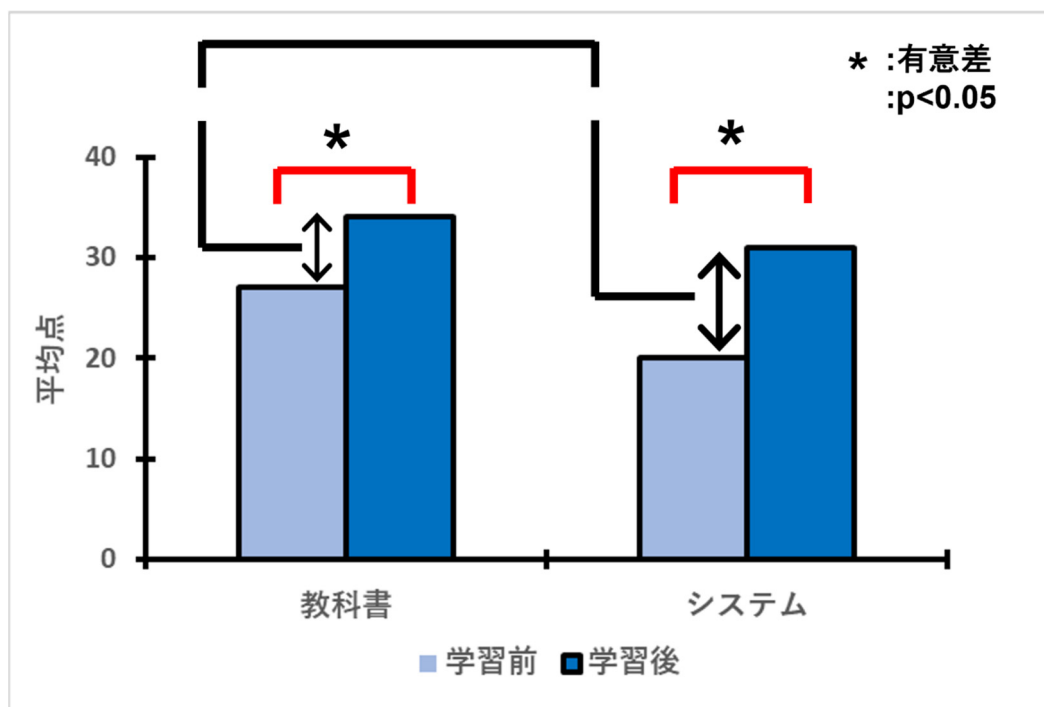


図 3-6 t 検定結果

3.3. アンケート

システムを使用した実験協力者 10 人にアンケートを行った。

表 3-2 を見ると 10 割が「直感的にジェスチャーを使用できた」に回答しており、ユーザーに負担の無いジェスチャーを作製することができたと言える。

しかし、システムの操作感では 4 割の「よくない」との回答が得られた。これは周波数と波長を変更する際に、連続して値を変えたい場合に、一度ジェスチャーをしていない状態を経由しないと再度値を変更できない仕様などが原因であると考えられる。

また、「波についての理解」はどれも 7 割を超える「理解できた」の回答が得られた。これによって論理的な理解や数式を理解する支援ができたと考えられる。

表 3-2 システムアンケート

	はい	いいえ
直感的にジェスチャーを使用できましたか	10	0
システムの操作感はよかったですか	6	4
波の現象を理解しやすかったですか	7	3
波の強め合い・弱め合いについて理解できましたか	8	2
経路差と波の強め合い・弱め合いの関係性を理解できましたか	7	3
論理的な理解はできましたか	7	3

4. 結論

本研究では、以下の2つを満たすシステムの開発を目指した。

1. ジェスチャーと教育支援内容に関連性を持たせること
2. 数式を理解できるシステムを作成すること

1については、動的ジェスチャーを実装することで、各機能とジェスチャーに関連性を持たせることができた。また、3.3のアンケート結果より直感的に使用できるジェスチャーにすることが出来たと判断している。

2については、3つのモードを含む新たなシステムを開発し、「波の強め合い・弱め合い」を段階的に学習することができる教育コンテンツを開発した。3.3のアンケート結果では7割が「波の現象を理解できた」と回答していた。

以上より、2つの条件を満たすシステムを開発することができた。また、システムを使用した前後での有意差が認められた。しかし、教科書との有意差は認められなかった点は今後改善すべきである。

参考文献

- [1]. IoT 技術の国内利用動向調査(2019 年 11 月実施)|MMRI 株式会社 MM 総研
<https://www.m2ri.jp/news/detail.html?id=387>
- [2]. 新学習指導要領総則|文部科学省
https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/_icsFiles/fieldfile/2019/03/18/1387017_001.pdf
- [3]. 一般社団法人 日本教育情報化振興会. “第 11 回 教育用コンピュータ等に関するアンケート調査 報告書|一般法人日本教育情報化振興会
<http://www2.japet.or.jp/info/japet/report/ICTReport11.pdf>
- [4]. 新しい学習指導要領の考え方-中央教育審議会における議論から改定そして実施へ-|文部科学省
https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/newcs/_icsFiles/fieldfile/2017/09/28/1396716_1.pdf
- [5]. 高等学校におけるアクティブラーニングの視点に立った参加型授業に関する実態調査 2015 第一次報告書, 東京大学 大学総合教育研究センター 中原淳研究室, 日本教育研究イノベーションセンター <http://manabilab.nakahara-lab.net/wp/wp-content/uploads/2015/12/1streport.pdf#page=19>
- [6]. 初のアクティブラーニング全国調査の結果を大公開!|マナビラボ
<http://manabilab.nakahara-lab.net/article/357>
- [7]. 小西 由香理, 藤田 悟, “2 台のプロジェクタを用いた Interactive Floor の構築”, 情報処理学会全国大会講演論文集, vol.77, no.4, pp.4.247-4.248 (2015).
https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/index.php?action=pages_view_main&active_action=repository_action_common_download&item_id=164916&item_no=1&attribute_id=1&file_no=1&page_id=13&block_id=8
- [8]. 杉山 成, 辻 義人, “アクティブラーニングの学習効果に関する検証:グループワーク中心クラスと講義中心クラスの比較による”, 小樽商科大学人文研究, vol.127, pp.61-74 (2014).
https://barrel.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=530&file_id=19&file_no=1
- [9]. 杉山 成, 辻 義人, “アクティブラーニングの学習効果に関する検証(2)—学習者の自尊感情が社会人基礎力の獲得に及ぼす影響に注目して—”, 小樽商科大学人文研究, vol.130, pp.109-138 (2015).
https://barrel.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=506&file_id=19&file_no=1
- [10]. 中野 博幸, 久保田 善彦, 小松 祐貴, 大崎 貢, “Kinect を用いた AR による鏡像シミュレーション教材の開発と試行”, 日本教育工学会論文誌, vol.39, no.Supp, pp.105-108 (2016).
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjet/39/Suppl/39_S39066/_article/-char/ja/

- [11].小野 晋太郎, 木田 侑, 渡邊高之進, カークミシエル, 須田義大,”自動運転のための警察官の手信号認識システム”, 生産研究, vol.72, no.2, pp.101-106 (2020).
https://www.jstage.jst.go.jp/article/seisankenkyu/72/2/72_195/_pdf/-char/ja
- [12].赤坂 総司,大野 智也,大原 広暉,金丸 隆志”Interactive Floor Interface を用いた教育支援システムの開発,” 情報科学技術フォーラム講演論文集, vol.19, no.3, pp.377-378 (2020).
https://www.ieice.org/publications/conferences/bin/pdf_link.php?fname=K-015.pdf&year=2020&ConfCd=F&id=FIT0000014467&lang=J
- [13].Kinect 2.0 for Windows Available July 15 | Time <https://time.com/2962269/kinect-v2-0-for-windows/>
- [14].Azure Kinect Dk 徹底解説 https://eventmarketing.blob.core.windows.net/decode2019-after/decode19_PDF_CM04.pdf
- [15].Azure-Kinect-Python <https://github.com/hexops/Azure-Kinect-Python>
- [16].Azure Kinect ボディ トラッキングの関節 <https://docs.microsoft.com/ja-jp/azure/kinect-dk/body-joints>
- [17].双曲線の知識まとめ(焦点・漸近線・方程式・媒介変数表示・接線公式)
<https://rikeilabo.com/hyperbolic-curve>
- [18].エクセルで t 検定を使おう！ 分析ツールを使った簡単な方法を紹介
<https://udemy.benesse.co.jp/business/office/t-test-excel.html>
- [19].エクセルを使った t 検定のやり方(関数と分析ツール)<https://office-hack.com/excel/t-test/>

謝辞

最後に、4年間指導教員としてご指導頂いた金丸隆志教授に心より感謝します。修士に入ってから、オンライン主体でしたが、いち早くオンラインに切り替えて頂く等の、様々なサポートのおかげで、研究に集中できました。また、学会や学内発表における資料の作成では、私の至らぬ部分が多々あったため、大量の添削をして頂きありがとうございました。ご指導頂いた内容を今後に生かせるよう精進していきたいと思います。

また、学部時代は研究活動以外の集まりにも積極的に参加していただき、とても充実した時間を過ごせました。今後も帰省した時などお誘いさせていただきたいと思います。