

## 修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院情報システム学研究科情報メディアシステム学専攻 博士前期課程		
氏名	宮内 将斗	学籍番号	1250039
論文題目	非接触舌認識手法の開発とダウン症児童の舌の筋力トレーニングへの応用		
要旨	<p>ダウン症患者の筋弛緩による舌の筋力が弱体化は、摂食障害や構音障害を引き起こす一因と考えられている。この対策として、ダウン症患者は子供の頃から舌のトレーニングを行うことが望ましいとされている。しかしながら、一般的に、知的障害特別支援学校に通うダウン症児童は、肢体不自由特別支援学校に通う児童とは異なり、舌のトレーニングを受ける機会に恵まれていない。</p> <p>そこで、これら児童に対し、安全に行え、先生の手間もかからず、そしてなによりダウン症児童が楽しんで舌のトレーニングを行えるようなシステムを開発し提案することが我々の目的である。</p> <p>まず我々は RGB 画像と深度画像を利用した非接触な舌認識の手法を開発した。その手法では、実際の教育現場において重要な、衛生面や誤飲に対する安全性、導入時の金銭コストの低さ、先生の手間のかからなさという点で他の舌認識の手法に対して優位性がある。</p> <p>さらにこの提案手法を使用したゲームを作成し、これによって児童がゲームをプレイすることで自ずと舌のトレーニングを行えるようになるシステムを開発した。</p> <p>そして我々は開発したシステムを実際に知的障害特別支援学校に持って行き、実際にダウン症児童に試してもらい、そこでのフィードバックと先生からの改良案を得ることで、システムの改良を重ねていった。</p> <p>そして開発したシステムによって、舌で操作することを理解できたダウン症児童は、上下左右に舌を動かし、楽しんでゲームをプレイすることが観察できた。プレイができなかった児童に関しては、操作方法が理解できなかった場合や、実験時の周りの環境の変化に不慣れでいたことが主な原因のようであったが、少なくとも彼らもゲームには非常に興味を持っていることは確認できた。今後はより多くのダウン症児童も利用できるように、理解しやすいようなシステムを開発し、また、より実用的なシステムのための長期的なユーザテストを行いたい。</p>		

平成25年度修士論文

非接触舌認識手法の開発と  
ダウン症児童の舌の筋力トレーニングへの応用

電気通信大学大学院 情報システム学研究科

情報メディアシステム学専攻

学 籍 番 号 : 1250039  
氏 名 : 宮内 将斗  
主任指導教員 : 野嶋 琢也 准 教 授  
指 導 教 員 : 小池 英樹 教 授  
指 導 教 員 : 末廣 尚士 教 授  
提出年月日 : 平成 26 年 2 月 20 日(木)

---

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本研究の目的	5
1.3	本研究の概要	5
1.4	本論文の構成	6
第 2 章	関連研究および提案研究の位置付け	8
2.1	インタフェースとしての舌の利点	8
2.2	舌を用いたユーザインタフェース	10
2.2.1	接触型の舌ユーザインタフェース	11
2.2.2	非接触型の舌ユーザインタフェース	15
2.3	求められる要件と提案手法	17
第 3 章	システム 1 の開発	20
3.1	ハードウェア構成	20
3.2	舌の認識手法 V1 (OpenCV+ Nearest Point 法)	21
3.3	舌認識アプリケーションの実装	25
3.3.1	顔・目認識の高速化	25
3.3.2	識別結果の平均化	26
3.4	ゲームアプリケーションの実装	26

---

第4章 システム1でのユーザテスト .....	28
4.1 概要.....	28
4.2 手順・内容 .....	28
4.3 見つかった問題点とその原因・および解決法 .....	29
問題点 1-1. 児童のディスプレイへの接近.....	29
問題点 1-2. 舌と顔の向きの一一致 .....	30
問題点 1-3. 顔認識の不安定さ .....	30
問題点 1-4. 顔の移動での舌操作.....	30
問題点 1-5. ゲームアプリケーションの操作のわかりにくさ .....	31
問題点 1-6. ゲームアプリケーションの魅力の不足.....	32
第5章 システム2の開発 .....	34
5.1 ハードウェアの改良 .....	34
5.1.1 より大きな外部ディスプレイの採用（問題点 1-1） .....	34
5.1.2 センサ配置の変更（問題点 1-2） .....	35
5.1.3 センサの小型化 .....	37
5.2 ソフトウェアの改良 .....	39
5.2.1 顔認識の改良（問題点 1-3） .....	39
5.2.2 顔の向きによる深度値の補正（問題点 1-4） .....	41
5.2.3 ゲームアプリケーションの改良（問題点 1-5, 問題点 1-6） .....	45
1. 概要・操作方法 .....	45
2. 魚の移動.....	46
3. 舌認識アプリケーションとゲームアプリケーションの連動 .....	47
第6章 システム2でのユーザテスト .....	48
6.1 概要.....	48
6.2 手順・内容 .....	48

---

6.3	結果.....	49
6.3.1	各ダウン症児童の結果.....	49
6.3.2	全体を通しての結果.....	50
6.4	システム2の問題点・改良点.....	51
6.4.1	見つかった問題点・児童の先生からの改善案.....	51
第7章	システム3の開発.....	57
7.1	ソフトウェア構成の改良.....	57
7.2	舌認識アプリケーションの改良.....	58
7.2.1	Facetrackerの正確性の向上.....	58
7.3	舌認識手法V3（Facetracker+ Nearest Area法）の開発（問題点2-1）.....	62
7.4	ゲームアプリケーションの改良.....	66
7.4.1	背景の単純化（問題点2-2）.....	66
7.4.2	輪から網画像へのカーソルアイコンの変更（問題点2-3）.....	67
7.4.3	新規ステージの作成（問題点2-8）.....	68
7.4.4	ステージのクリア条件の変更.....	69
7.4.5	各種視聴覚エフェクト・表示の追加（問題点2-4）.....	70
7.5	インストラクションの追加（問題点2-7）.....	71
第8章	システム3でのユーザテスト.....	76
8.1	概要.....	76
8.2	手順・内容.....	76
8.3	結果.....	77
8.4	システム3の問題点・改良案.....	78
	問題点3-1 インストラクションで使用したイラストの顔について.....	78
	問題点3-2 インストラクション手法の改良案.....	79
第9章	深度データ処理手法の評価実験.....	80

---

9.1	Nearest Point 法での舌認識の精度評価.....	80
9.1.1	実験概要.....	80
9.1.2	実験手順.....	82
9.1.3	実験結果 基準ドットパターンの計測.....	84
9.1.4	舌尖座標の計測.....	86
9.1.5	精度実験の考察.....	87
9.2	Nearest Point 法と Nearest Area 法の舌認識の安定性の比較.....	88
9.2.1	実験概要.....	88
9.2.2	実験手順.....	90
9.2.3	データ処理.....	90
9.2.4	実験結果と考察.....	90
第 10 章	まとめと今後の展望.....	92
10.1	本研究の達成の度合.....	92
10.2	解決すべき課題.....	94
10.2.1	インストラクションにおける操作方法の伝え方の改善.....	94
10.3	今後の展望.....	94
10.3.1	長期的・日常的なユーザテスト.....	94
10.3.2	システムのプレイと鍛えられる舌の筋肉に関する評価.....	95
10.4	結論.....	96
	参考文献.....	98
	発表文献.....	101
	謝辞.....	102

## 図目次

図 1	舌トレーニング例 1 リップトレーサー[8]	2
図 2	舌トレーニング例 2 スラップスワロー[8]	3
図 3	運動領域における舌の支配図[12]	10
図 4	Slyper ら[2]によるデバイス (左) とその使用イメージ (右)	11
図 5	電磁誘導を利用した舌デバイスの使用イメージ	12
図 6	電磁誘導を利用した舌デバイスの構成	13
図 7	赤外近距離センサによるジェスチャ認識デバイス	14
図 8	Tongue Drive system (TDS)	15
図 9	Liu らの手法での舌の認識の様子	16
図 10	Liu らの手法での認識可能な舌の状態	16
図 11	システム 1 のハードウェア構成	21
図 12	舌認識手法 V1 (OpenCV+ Nearest Point 法) の舌認識のフロー	22
図 13	OpenCV 2.3 付属の顔・目認識と木村らによる口の領域の推定の様子	24
図 14	鼻の深度を基準にした, 舌の突き出し判定	24
図 15	システム 1 のゲームアプリケーション	27

---

図 16	システム 2 で使用した外部ディスプレイ及びセンサ配置.....	36
図 17	システム 2 のハードウェア構成・配置 .....	36
図 18	Kinect (左) と Xtion PRO LIVE (右).....	37
図 19	Facetracker による顔認識の様子 (中心の赤い線や緑の線は, 認識された顔の傾きを表す xyz 座標軸) .....	40
図 20	舌認識手法 V2 (Facetracker+ Nearest Point 法) の舌認識フロー .....	40
図 21	顔の過度の傾き・向きが異常が検出された際の通知画面 .....	42
図 22	システム 2 のゲームアプリケーション .....	46
図 23	舌尖位置 (左) とゲームのカーソル位置 (右) の関係図.....	47
図 24	Kinect による赤外光ドットパターン[13].....	55
図 25	実験に使用したハードウェア構成と実験室内に入り込む太陽光 .	56
図 26	Facetracker での顔の誤認識例 .....	60
図 27	システム 3 の舌認識アプリケーション .....	60
図 28	顔の誤認識または顔が見つからない場合のエラー状態の様子 .....	61
図 29	顔認識の正確性が不確かな場合の様子.....	61
図 30	舌認識手法 V3 (Facetracker+ Nearest Area 法) の舌認識フロー .....	63
図 31	システム 3 のゲームアプリケーション .....	67
図 32	システム 3 のゲームアプリケーション .....	68
図 33	システム 3 のゲームアプリケーション .....	69
図 34	対象を捕まえた時の視覚エフェクト .....	71
図 35	インストラクションのステージで目的の操作を行った際の正解フィードバック .....	72



---

図 36	ステージ 1 : 口の開閉 .....	73
図 37	ステージ 2 : 舌の突き出し .....	74
図 38	ステージ 3 : 舌の左右の移動 .....	75
図 39	精度評価実験の構成 .....	81
図 40	アクリル板上のドットパターン .....	81
図 41	アクリル板のドットの表記 .....	84
図 42	Kinect で記録したドットパターン .....	85
図 43	輝度値計測による各ドットの座標 .....	85
図 44	目標地点に対する実際の舌尖位置 .....	87
図 45	Nearest Point 法と Nearest Area 法の安定性比較実験のハードウェア構成 .....	89
図 46	使用したドット (破線領域の内側) .....	89

---

## 表目次

表 1	関連研究と提案手法の比較（太字は優れている部分） .....	19
表 2	Kinect と Xtion PRO LIVE の比較.....	38
表 3	Nearest Point 法と Nearest Area 法の安定性比較実験の結果.....	91
表 4	作成したシステムの比較まとめ .....	97

---

# 第1章

## 序論

### 1.1 背景

舌の運動機能は、嚥下や発話といった、日常生活をおくる上で必要不可欠な活動に深く関わっている。例えば食物の摂食時の場合、まず歯によって咀嚼された食物を舌で収集し、咽頭へ送る。その後咀嚼物を舌の強力な筋力で押し出すことで食道へ送り込んでいる[9]。また、例えば母音の/i/の発声に際しては、舌尖付近を硬口蓋に近接して狭窄部を形成することで、発音を行っている[10]。さらにはアイスクリームを舐める場合など、外部の食物を口腔内へ運ぶ動作にも用いられている。このような舌の運動機能は、老化や疾患といった各種の要因により低下することが知られている。そして舌の運動機能が低下してしまうと、摂食・嚥下障害や構音障害を引き起こす恐れがある。

本研究で取り上げるダウン症という症状は筋弛緩を併発している。この筋弛緩によって他の筋肉と同様に舌の筋力も弱くなっているため、上記の摂食障害や構音障害等を引き起こすことが問題視されている。

これらの対策としては、舌を鍛えることでその筋力を向上させることが挙げられる。現在では口腔筋機能療法(Myofunctional Therapy : MFT) という、口や舌などの筋肉トレーニングのためのトレーニングセットが提唱されている。MFT とは口を大きく開ける、舌を左右に動かす等の各種口腔関連筋肉訓練法の集合体であり、これにより高齢者の嚥下頻度の増加や、嚥下時間の短縮といった効果があることが報告されている[11]. 具体的な舌のトレーニングとしては図 1 のように舌を突き出しながら上唇に沿ってゆっくり左右に動かすリップトレーサーと呼ばれるものや、図 2 のスラップスワローと呼ばれる、口唇は開けたままでストローを噛んだ状態で、スプレーからの水を飲むといった嚥下の練習のものなどがある。[8]

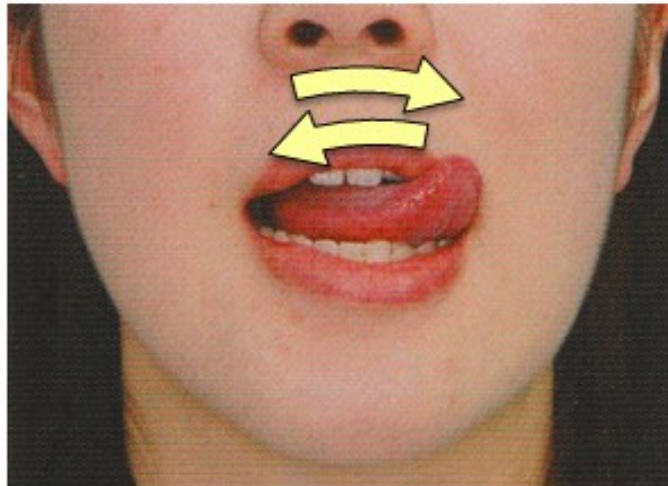


図 1 舌トレーニング例 1 リップトレーサー[8]



図 2 舌トレーニング例 2 スラースワロー[8]

これらの舌のトレーニングは咬み合いの矯正や摂食指導、構音障害の改善などのために歯科医や一部の特別支援学校で実際に利用されている。特に肢体不自由児の通う特別支援学校では、舌や唇などの動きを引き出し、正しい使い方を教える指導が自立活動等のカリキュラムにも取り込まれ、広く行われている。

しかし全てのダウン症児童が肢体不自由特別支援学校に通い、このようなトレーニングを受けるわけではない。比較的重度のダウン症児童は筋弛緩の影響も強く、移動等が困難になることから、肢体不自由特別支援学校に通うことが多いが、それ以外の比較的軽度・中度のダウン症児童は、知的障害特別支援学校に通うのが一般的である。

この知的障害特別支援学校では、肢体不自由特別支援学校と比べると、舌のトレーニングのような指導体制は一般的にまだ整っていない。つまり、肢体不自由特別支援学校に通うダウン症児童に比べ、知的障害特別支援学校に通うダウン症児童は、舌のトレーニングの必要性があるにも関わらず、その対策の機

会に恵まれていないと言える。

これを受けて、本研究では、ダウン症児童の通う知的障害特別支援学校での舌のトレーニングの実施をより容易にするシステムの開発を試みた。

舌のトレーニングが導入されていない知的障害特別支援学校にとって、既存の舌のトレーニングを導入するためには、次のような障壁が挙げられる。

- (1) 児童の人数分の器具の調達・それらの衛生管理
- (2) 器具を使う場合、児童の誤飲や誤使用等に注意しなければならないこと
- (3) トレーニングの各ステップで児童の面倒を見る必要があり、先生一人に対して児童を多くとるのが容易ではないこと
- (4) 基本的に単純動作の繰り返しのため、児童にとって面白みのない舌のトレーニングを、先生の技量でモチベーションを保たせ、児童に継続的に行わせなければならないこと

(1)から(3)については、舌のトレーニングのような専門のカリキュラムに特化した人材が揃っていない学校や、人手に限りのある学校にとって、深刻な問題であり、(4)は、自身の機能改善のために自発的に行うことが難しい児童などが対象の場合は監督者の負担を著しく増加させてしまう。これらの結果として、既存の舌のトレーニングはかかる手間や人手を考慮すると簡単には実施することができないと考えられる。

---

## 1.2 本研究の目的

本研究では、手間や人手がかからないトレーニング手法を考案し、実際にダウン症の児童が通う学校の教室で行うことが可能なシステムを構築することを目的とする。

## 1.3 本研究の概要

目的の達成のためのアプローチとして、非接触型の舌認識システムの開発を行った。そしてその舌認識システムを使い、舌でプレイする、舌トレーニングゲームを作成した。これによって先生の手間を抑えて、児童はトレーニングを楽しんで行うことが可能となる。作成したシステムは特別支援学校の協力を得て実際にダウン症児童に体験してもらい、フィードバックを得て改良を加えていった。その結果、初期導入に課題はありつつも、提案のシステムによるゲームを多くのダウン症児童が楽しみ、一部については自発的にプレイしたがる様子が観察された。

---

## 1.4 本論文の構成

本論文は以下の章により構成される。

### 第2章 関連研究および提案研究の位置付け

舌の認識手法の先行研究を紹介する。また、既存の研究との差分を述べ、本研究の位置付けを明確にする。

### 第3章 システム1の開発

最初の舌トレーニングシステムであるシステム1について紹介する。

### 第4章 システム1でのユーザテスト

システム1を用いて、8名の児童に自由に試してもらい、その様子を観察した。そこで発見した問題や改良点、そして児童の先生方からのフィードバックを紹介する。

### 第5章 システム2の開発

システム1でのユーザテストを経て、問題点の改良や新たな機能の追加を行ったシステム2を開発した。

### 第6章 システム2でのユーザテスト

システム2を使用した新たなユーザテストを行った。そこでの結果、新たな問題点、フィードバックについて触れる。

### 第7章 システム3の開発

システム2でのユーザテストで見つかった新たな問題に対しての改良や新規に追加した機能について述べる。



---

## 第 8 章 システム 3 でのユーザテスト

システム 3 を用いてのユーザテストを行い、その結果やさらなる改善案について述べる。

## 第 9 章 深度データ処理手法の評価実験

開発した 2 つの深度データ処理手法についての精度や安定性などの実験とその結果について述べる。

## 第 10 章 まとめと今後の展望

本研究で開発した舌トレーニングシステムとユーザテストについてのまとめを述べ、さらなる改良の余地や今後の展望について述べる。

## 第2章

# 舌の関連研究と提案研究の位置付け

## 2.1 インタフェースとしての舌の利点

舌は、その高い可動性により、構音や咀嚼・嚥下において最も重要なはたらきを担う器官である。この舌の可動性は、舌自体の形態を変える内舌筋と舌の位置を変える外舌筋によって成り立っている。

この舌という器官の身体的特徴には以下の様な点が挙げられる。

1. 神経系が手足等の筋肉のそれと異なるものであり、その舌の神経は損傷を受けにくいということ。
2. 筋肉が発達しており舌の可動自由度が高いということ。
3. 高い筋肉耐性があること。

これらの特徴は舌がユーザインタフェースとして十分有意であることを示している。例えば、重度の脳の外傷や脊髄の損傷（SCI）、筋萎縮性側索硬化症

---

(ALS) の患者は介助がなければ日常のタスクを行うことが困難である。このような重度の麻痺患者は、脳と身体を結ぶ神経が、外傷や病気の影響で破壊されてしまっている。しかし、上記の1のように、舌は舌下神経(hypoglossal cranial nerve) という、事故や病気によって損傷を受けにくい神経で脳と結ばれているため、手などの運動神経が損傷した場合でも使用できる可能性を持っている。

さらに、図 3 の各器官の脳の運動領域の支配図を見ると、舌を含めた口腔周辺の運動器官は、指や手に匹敵するほど多くの領域を支配しているのがわかる[14]。実際、舌は口の空間の 80~85%を占めているほど巨大であるにも関わらず、歯を一本一本触れることができるなど、高速かつ正確な運動を行うことができる[15]。さらに舌の筋肉は心臓の筋肉と同じように疲労しにくく、筋肉の過度の運動にて生じる障害も起きにくい。

以上の 3 つの身体的特徴に加え、舌という部位ならではの利点もある。舌を使ったユーザインタフェースの場合、眼電 (EOG) や筋電 (EMG), 脳波 (EEG) といった手法のような、見た目にも奇異な外部機器の接続を必要としないだけでなく、デバイスを口腔内に隠すこともできるため、ユーザは不自然に目立つことなく、周り安心して使用することができるという利点もある。他にも舌の運動は眼電、筋電、脳波にみられるような無意識なノイズが小さく、計測に適していると言える。このように、舌を用いたインタフェースは、機能やユーザの実際の使用に関して数多くの利点がある。

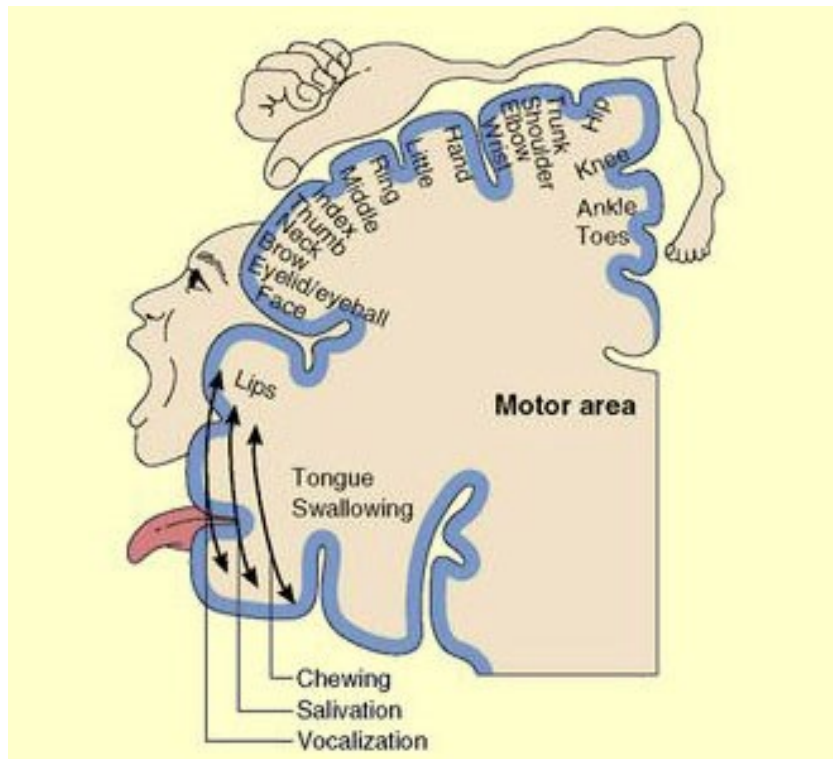


図 3 運動領域における舌の支配図[12]

## 2.2 舌を用いたユーザインタフェース

ここでは舌を使ったユーザインタフェースの先行研究を紹介する。舌を使うユーザインタフェースとしては、デバイスをユーザの口内に入れ、舌とデバイスが物理的に接触することで操作を行う接触型と、舌や口と接触せずに舌を認識する非接触型に大きく分けられる。

---

### 2.2.1 接触型の舌ユーザインタフェース

#### 物理的スイッチ

Slyper らは口で啜えて操作するデバイスを開発した[2]。図 4 にそのデバイスの外観と使用時の様子のイラストを示す。このデバイスは口に啜えて把持し、口をすぼめる、口腔内のスイッチを舌先で押すといったことができるようになっている。



図 4 Slyper ら[2]によるデバイス (左) とその使用イメージ (右)

---

## 電磁誘導

Struijk らは口腔内上部に設置する小型のデバイスを開発した[3]。これはファラデーの法則の電磁誘導を利用している。ユーザは舌先に小型の磁石を装着する。この磁石を口腔内上部のデバイスに近づけると、デバイス内に 18 個並んだコイルに電磁誘導による電位が生じ、それによってどのコイルに舌が近づいたかが分かり、舌でタイピングのような操作が行えるというものである (図 5, 図 6)。

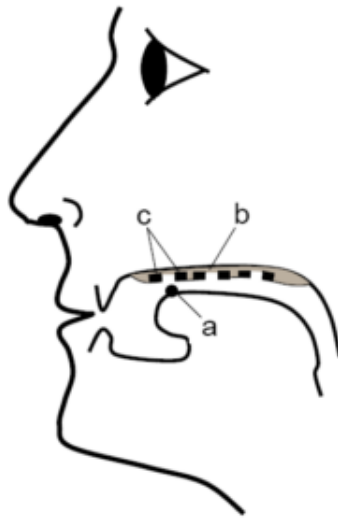


図 5 電磁誘導を利用した舌デバイスの使用イメージ

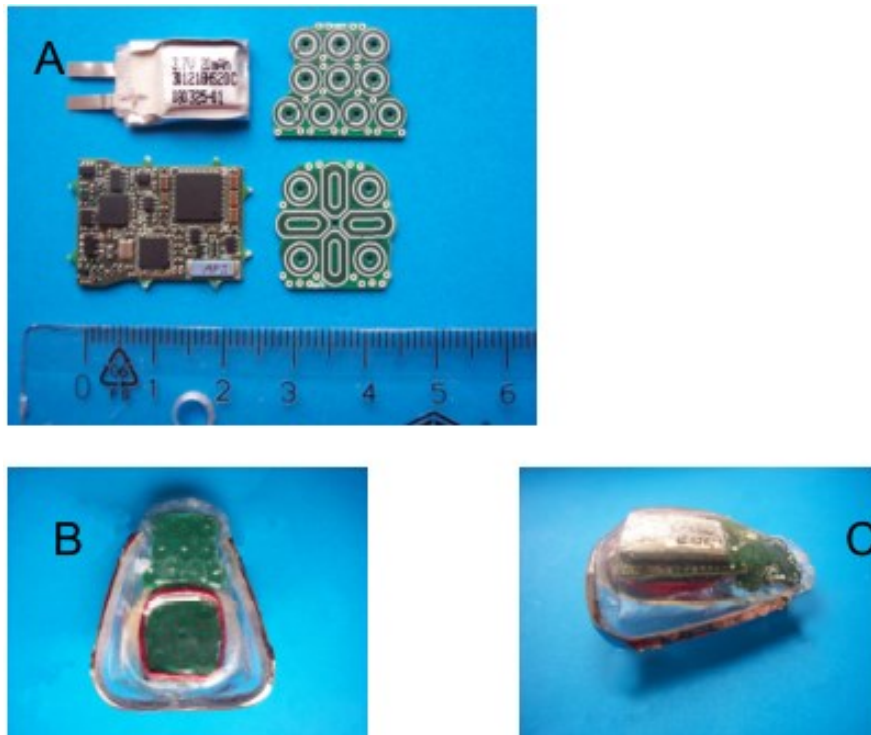


図 6 電磁誘導を利用した舌デバイスの構成

### 赤外線距離センサ

Saponas ら[4]の開発した舌で操作するデバイスでは、入れ歯等に使用される樹脂を用いて口内に設置する。このデバイスは4つのフォトリフレクタを使用している。これによって舌の位置ではなく舌の動きによるジェスチャを認識することが可能になっている（図 7）

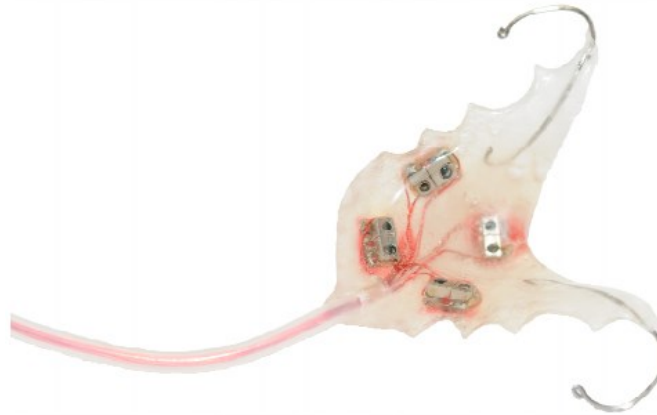


図 7 赤外近距離センサによるジェスチャ認識デバイス

## 磁力

Huo らは磁力による舌先の認識手法を提案した[5].

図 8 Tongue Drive system (TDS) 図 8 のように舌先に米粒大の磁石を糊やピアスで装着し，さらに口付近に磁力センサを配置するためのデバイスを頭部に装着する．左右両側に配置された磁力センサの値から磁力の中心を推定することで舌先の位置を認識している．口腔との接触は小型の磁石だけなので他の接触型のデバイスに比べて衛生や誤飲などの危険は少ないという長所を持つ．しかし，問題としては，口の周りにセンサを配置するため大型になり，目立ちやすくなっている．この手法では舌先の磁石の 3 次元位置座標を無段階で取得できるため，舌による入力操作の表現の幅は広いと言える．



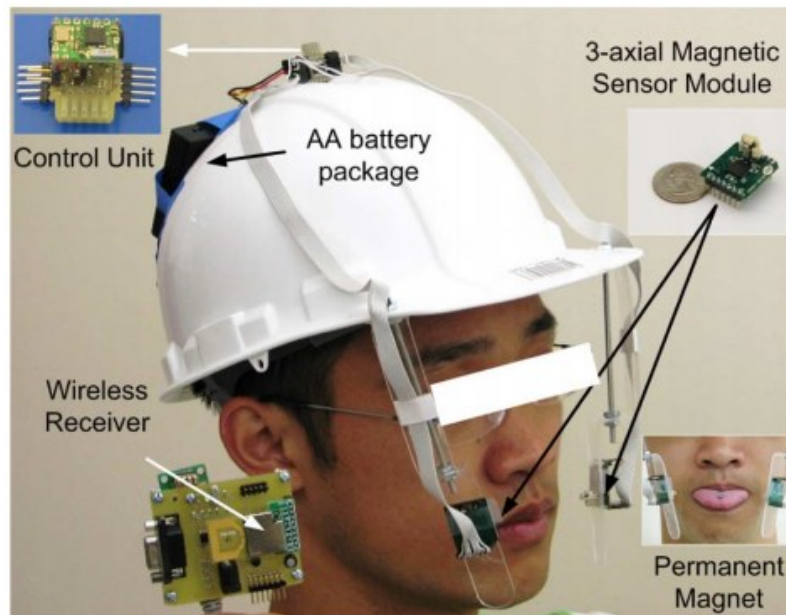


図 8 Tongue Drive system (TDS)

### 2.2.2 非接触型の舌ユーザインタフェース

#### RGB カメラ

Liu ら[6]はラップトップに備え付けられているような汎用の RGB カメラを使用し、そのカメラからの画像の解析を元に、舌の位置を非接触な手法で認識している (図 9)。

カメラ画像を使った非接触な舌の認識であるため、接触型の使用時に問題になる衛生面での危険性や、機器を誤飲してしまうような危険もない。そのため安全性が高く、身体への装着もないため使用者への負担が少ないといったメリットもある。しかしながらこのシステムで実現できる舌の動きは口を閉じたとき、舌を出さずに口を開いたとき、そして舌を上下左右

に出したときの合計 6 通りまでに限られている (図 10).

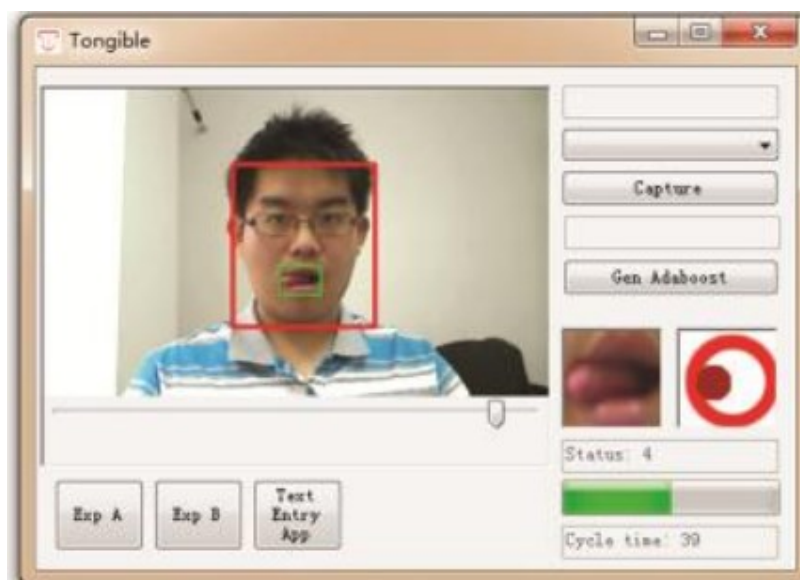


図 9 Liu らの手法での舌の認識の様子



図 10 Liu らの手法での認識可能な舌の状態

---

## 2.3 求められる要件と提案手法

手間や人手がかからず、実際に児童の教室で行うことが可能なシステムを構築するために、考えられるシステムの要件としては以下のようなものが挙げられる。

- (1) 誤飲の危険性がない
- (2) 衛生的に安全である
- (3) 準備・装着が容易である
- (4) デバイスの共用使用が可能である
- (5) 安価である（システム及びそのランニングコスト）
- (6) より多くの舌等の状態を認識できる

(1)と(2)に関しては、好奇心があり、まだ判断力のない児童が使用することを考慮すると通常の使用の想定よりもさらに安全である必要があるからである。

(3)に関しては、人員が割けない学校を想定すると、出来る限り手間がかからないことが望ましいためである。

(4)に関しては、一つのデバイスの導入で何人もの児童の使用ができるということがコストの面でも、維持や管理の手間の面でも望ましいためである。

(5)に関しては、将来導入する時にできるだけコストがかからない手法の方が、より多くの学校が導入でき、ひいてはより多くの児童の使用に繋がるからであ

る.

最後の(6)に関しては、今後、舌のトレーニングの種目の追加やゲームアプリケーションの拡充において有効であるからである。




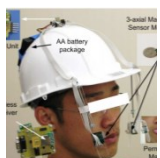
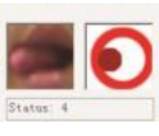
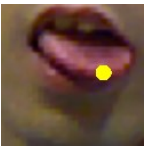
以上の 6 つの要件に対して、本論文で提案する舌のトレーニングシステムは舌の認識を非接触な RGB カメラと深度カメラを用いた手法で行う。そのため、衛生、誤飲などの危険性がなく、さらに、児童ごとの機材の準備・管理・装着などの手間もかからない。使用するセンサは一般向けに広く販売されており、安価で入手性が良い。そしてインタラクションとしても、Liu ら[6]の RGB カメラのみを用いた手法と異なり、無段階の舌の位置が取得できるため、将来的により複雑なトレーニングの実現も可能である。

次の

表 1 は関連研究で紹介した舌認識の手法と提案手法とを、上記 6 つの要件において、いかにそれらの要件を満たすかをまとめたものである。この表を見て分かる通り、他の舌認識手法に比べ、提案手法の方が多くの面で要件を満たしていることが分かる。

提案手法は、非接触という点で(1)から(4)までの要件を満たし、(5)のコストの面でも、一般向けに市販されているセンサを使用しているため、RGB カメラを用いた手法には劣るものの、専用のデバイスの製作が必要な他の手法よりは安価で導入可能であると考えられる。そして提案手法では、(6)の取得可能情報において、スイッチやジェスチャのような離散的な入力ではなく、3次元位置という連続的なデータが取得できるため、より詳細な舌の動きを認識でき、今後のトレーニング種目の増強にも対応できると考えられる。この点においては 6 つの状態のみ認識できる RGB カメラよりも優れている。

表 1 関連研究と提案手法の比較 (太字は優れている部分)

	物理的 スイッチ 	電磁誘導 	赤外線 距離センサ 	磁力 	RGB カメラ 	提案手法 
(1) 誤飲 の危険性	有	有	有	有	無	無
(2) 衛生 面の危険 性	有	有	有	有	無	無
(3) 装着 の手間	有	有	有	有	無	無
(4) 共用 可能	不可	不可	不可	一部可	可	可
(5) コス ト	高	高	高	高	低	低
(6) 取得 可能情報	4スイッチ	10スイッ チと2次 元入力	4つの ジェスチャ	<b>3次元 位置</b>	6種類の パターン	<b>3次元 位置</b>

---

## 第3章

# システム 1 の開発

最初のバージョンの認識手法とゲームアプリケーションを組み合わせたシステム 1 の説明を行う。尚、システム 1 とは 97 ページにある表 4 の通り、顔認識は OpenCV、深度データ処理は Nearest Point 法、そしてゲームアプリケーションはシューティングゲームで構成されている。

### 3.1 ハードウェア構成

システム 1 のハードウェア構成を図 11 に示す。舌認識に使用する RGB 画像と深度画像の取得には Microsoft 社の Kinect センサを利用した。さらにセンサから取得したデータを処理するラップトップを使用した。ユーザはそのラップトップに正対して座り、ラップトップのディスプレイ上部に設置されたセンサの方に向けて舌を出すことで舌認識をすることができる。

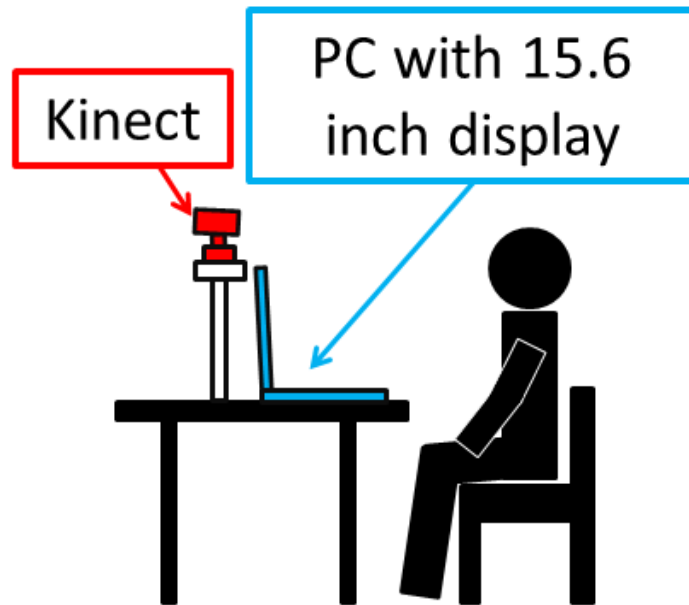


図 11 システム 1 のハードウェア構成

### 3.2 舌の認識手法 V1 (OpenCV+ Nearest Point 法)

最初の舌の認識手法を V1 と呼ぶ. V1 での舌の認識までの主要なフローは図 12 に示す. V1 では顔認識は OpenCV, 深度データ処理は後述する Nearest Point 法を用いている.

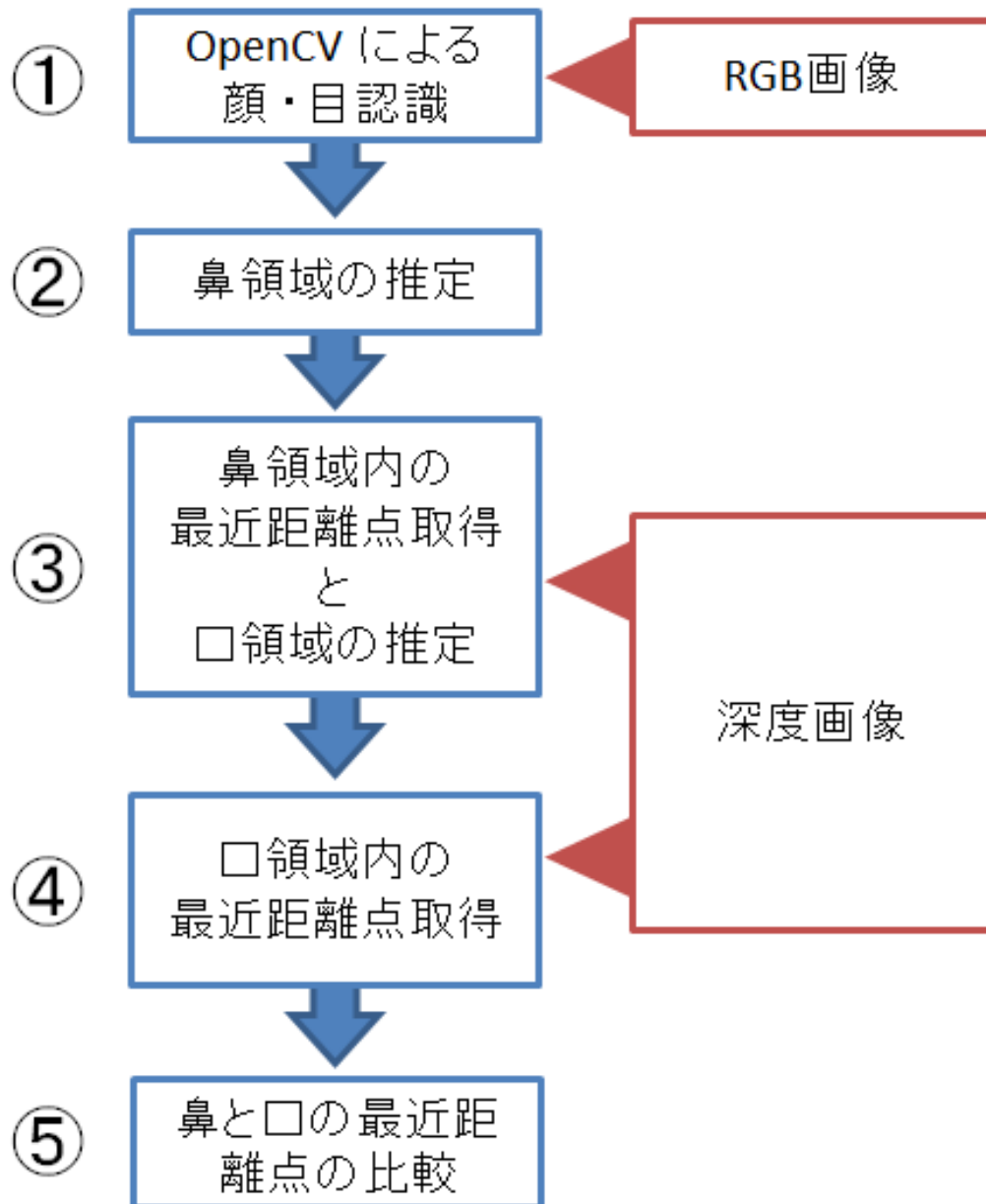


図 12 舌認識手法 V1 (OpenCV+ Nearest Point 法) の舌認識のフロー



図 12 の①では、センサからの RGB 画像 OpenCV 2.3 付属の Haar-Like 特徴量を用いた顔・目認識を行い、顔と両目の位置を取得する。ただし顔認識は目認識の際の誤認識による精度低下を防ぐために行なっている。また、OpenCV とは C++用の画像処理ライブラリである。[17]

②では、得られた両目領域から鼻のエリアを推定する。図 13 のように目の領域の高さを  $H$ 、幅を  $W$  とすると、目の領域の中心位置から下方に  $W/2$  の高さ、幅  $H$  の長さでの矩形を作成し、それを鼻領域とする。(  $H$  と  $W$  の入れ替えに注意)

③ではまず鼻領域内の全ての pixel の深度値を測定し、深度値が最も小さい座標、すなわち鼻の頂点座標を決定する。この後、鼻の頂点座標を基準としてその 20pixel 下方に  $70 \times 60$  pixel の矩形領域を口領域として作成する。

④では、口領域内の各 pixel の深度値を比較し、口領域内での最も近距離の点、すなわち最も突出している座標を舌尖の位置として暫定的に決定する。

⑤では舌の突き出しの判定を行う。③の鼻の頂点座標と④の口領域内の最も突出した点を比較し、図 14 の右図のように鼻よりも口の深度画素がよりセンサに近い値の場合、舌が突き出ていると判断する。

ただし、個人差によって鼻の高低や舌の長短があるため、鼻領域の頂点と口領域の頂点の比較に関しては、閾値の調整によって個人個人に柔軟に対応できるようにになっている。

この口領域内の深度データ処理部分を Nearest Point 法と称する。

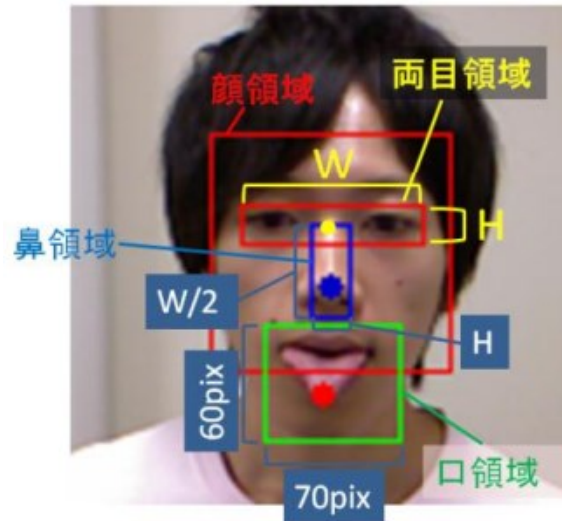


図 13 OpenCV 2.3 付属の顔・目認識と木村らによる口の領域の推定の様子

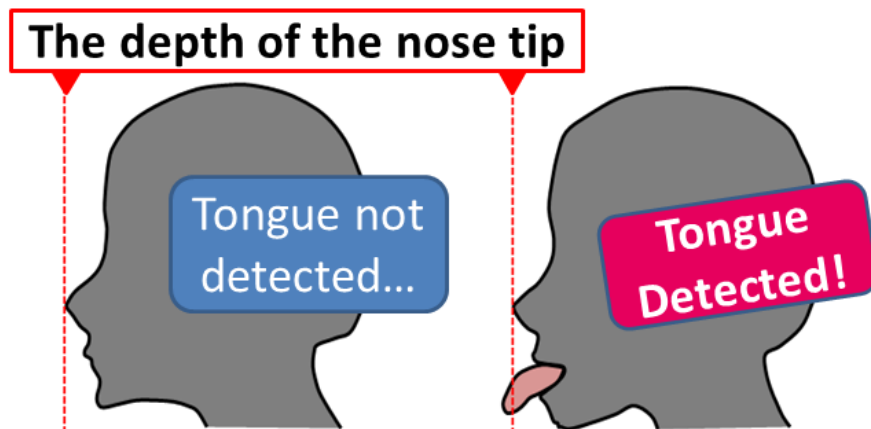


図 14 鼻の深度を基準にした、舌の突き出し判定

---

### 3.3 舌認識アプリケーションの実装

このシステム 1 では、舌認識部と後述するゲーム部が一つのアプリケーションとして実装されている。アプリケーションは `openFrameworks v007` をベースに構成されており、Windows 機で稼動しているがセンサである Kinect さえ使える状態ならば Mac 機などでもこのアプリケーションは稼動可能である。ここで `openFrameworks[16]` とは、C++用のクロスプラットフォームなゲーム・メディアアート用のフレームワークである。

舌認識部では、図 12 のメインフローの他に実装上の次のようなフローがある。

#### 3.3.1 顔・目認識の高速化

メインのループ内での顔認識では RGB センサの上限である約 30fps に届かない処理速度しか出すことができなかった。このため独立スレッドによる顔認識処理の運用と顔認識の対象画像の縮小を行った。前者は別スレッドを立てて非同期で顔認識の処理を行った。後者ではセンサからのオリジナルの RGB 画像 (640×480) を半分 (320×240) にリサイズした後に顔認識の処理にかけた。さらに、前フレームで顔が認識されていた場合、その認識された顔領域に周辺 10 ピクセルを足した領域以内を顔認識の処理対象とした。

これらの処理によって、安定して 30fps を越える速度で顔認識の処理を行うことが可能になった。

### 3.3.2 識別結果の平均化

センサや顔・目認識、舌認識の結果である各位置座標は、毎フレームで値が変動してしまう。そのままでも問題なく利用可能ではあるが、ゲーム画面に映るカーソルが常に細かく振動しており、ゲームとしての見栄えや操作のしにくさに影響がある。そのため、5フレーム分のカーソル位置を保存し、その位置の平均値をカーソルの描画に使うことでカーソルの振動を抑え、見栄えや操作への補償をしている。

## 3.4 ゲームアプリケーションの実装

システム1で使用したゲームアプリケーションを図15に示す。このゲームアプリケーションは中央のPlayer機から舌を突き出している間、一定間隔で弾が発射される。この弾は突き出した舌を右や左に向けることで発射角度を調節することができる。

発射角度  $rad$  は鼻の頂点の  $x$ 座標  $nx$  [pixel] と舌尖の  $x$ 座標  $tx$  [pixel] の差を使用し、次の式(3.1)を使って算出している。

$$rad = -\text{Tan}^{-1}\left(\frac{nx-tx}{5}\right) \quad (3.1)$$

ここで、式(3.1)の5 [pixel] という定数は経験的に調整・決定した値である。

以上のように決定された発射角度  $rad$  を元に弾を発射し、それを画面上部の赤い円に当てていくことで舌を動かす運動になる。

このゲームアプリケーションでは、一つ倒すごとに赤い円は隣に移っていき、結果的に左右にゆっくり舌を振る、リップトレーサーに似た動きに繋がるようになっている。

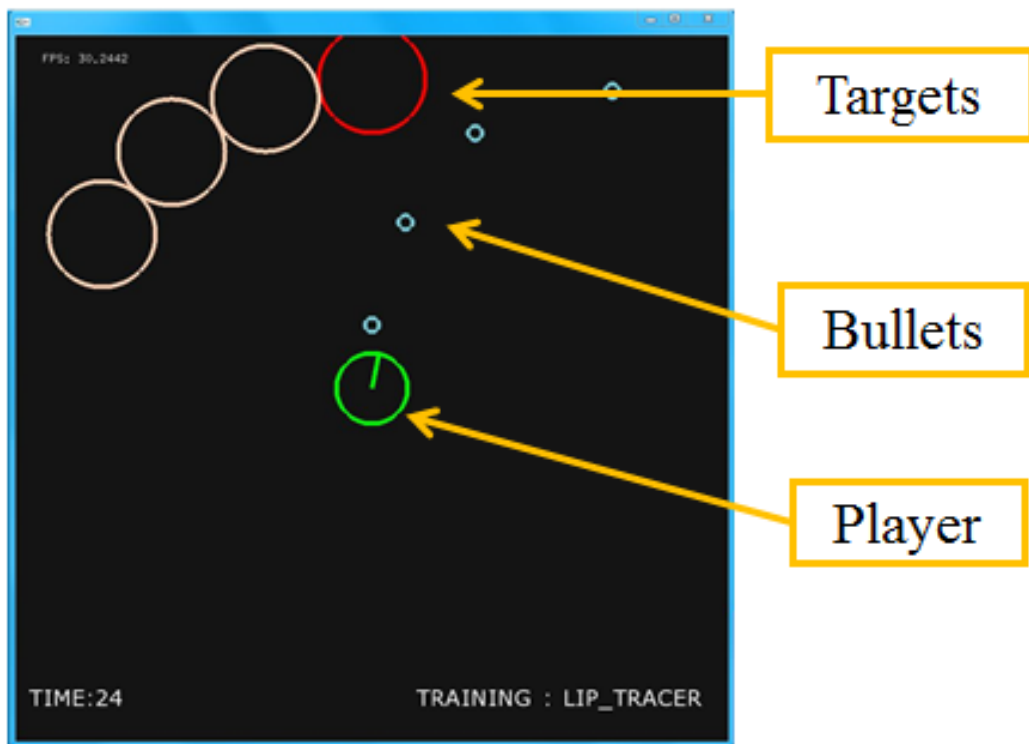


図 15 システム 1 のゲームアプリケーション

---

## 第4章

# システム 1 でのユーザテスト

### 4.1 概要

児童のシステム 1 の使用における有効な点と問題な点の発見のために、調布特別支援学校の協力を得て、計 8 名の児童（非ダウン症児も含む）に自由にシステムを使用してもらい、その様子を観察した。ただし、このユーザテストではプライバシーへの配慮から使用した生徒に関する情報は記録していない。尚このユーザテストの実施日は 2012 年 12 月 19 日である。

### 4.2 手順・内容

このユーザテストでは、児童とその担任をシステム 1（図 11）が設置された部屋に呼び、プレイ時間の制限をせず、飽きたり疲れたりするまで自由に体験してもらった。そしてその時の児童の体験の様子を観察し、問題点を洗い出した。それに加えて、担任の先生には児童の体験後にインタビューを行い、児童の様子や、改良点について伺った。

---

## 4.3 見つかった問題点とその原因・および解決法

このユーザテストにて見つかったシステムの問題点とその考えられる原因を以下にまとめた。また、ユーザテスト終了後に児童の担任の先生 2 名から募った感想・改善案も記した。

### 問題点 1-1. 児童のディスプレイへの接近

児童がラップトップの画面に近づいてしまい、深度カメラに最低限必要な距離（約 50cm）を満たせず、舌が認識できなくなることが度々あった。

これは使用したラップトップの 15.6 インチのディスプレイが 50cm 以上という距離に対して小さかったこと、そしてゲームアプリケーションで使用したプレイヤーのキャラクターのサイズも小さかったことが原因であると考えられる。

先生からは、“視力の弱い子供も多いので画面を大きくするなどして見やすくしてあげると児童がプレイしやすい” とのコメント得た。

つまりこの問題の解決法としては、可能な範囲でディスプレイや表示されるキャラクターのサイズを大きいものにするることである。それによって距離があっても十分に見えるようになり、結果として児童が画面に近づかなくなると考えられる。

---

#### 問題点 1-2. 舌と顔の向き不一致

ユーザの顔がカメラではなくディスプレイへと向いてしまった。そのため、舌認識のためのセンサが児童の顔を正面から捉えることができず顔認識に失敗することが頻繁に起きてしまった。

この問題の解決のためは、児童がゲームアプリケーションの体験中はディスプレイに顔を向けてしまうことを考慮する必要がある。そのため、顔がディスプレイに向いていても、顔認識が可能なセンサ配置にすることが重要である。

#### 問題点 1-3. 顔認識の不安定さ

顔が傾いている時や眼鏡の着用時は顔認識が全くできないか、できた場合も不安定か誤認識になってしまう場面が多く見られた。

この原因としては、使用していた OpenCV 付属の Haar-Like 特徴量による顔認識がそのままでは顔の回転や眼鏡への対応は特にされていないためである、

解決策としては顔の回転や眼鏡に対応できる顔認識の手法に改めることが挙げられる。

#### 問題点 1-4. 顔の移動での舌操作



ゲームのプレイに慣れてきた児童の中には、舌を突き出したまま、舌を左右に動かさず、代わりに顔を少しだけ左右に向けることで、ゲームの発射角度の操作をすることに成功している者もいた。

原因としては、このシステム1で使われている舌認識手法V1では、正面以外の顔の角度の対応ができていないことが挙げられる。

解決策は、顔の向きを検出を行い、それによって舌の認識結果に補正をかけるか、そもそも検出によって顔の向きがおかしい、つまり不正の可能性があるとわかった場合は、ゲームを中断させたりペナルティなどをつけたりすることで正面を向くように児童に注意するなどの方法が考えられる。

#### 問題点 1-5. ゲームアプリケーションの操作のわかりにくさ

システム1のゲームアプリケーションである、シューティングゲーム

.....

に関しての説明をしても、なかなか操作方法やゲームの目的が理解できず、児童はどうすればいいのかわからずに困惑してしまうという問題があった。

原因としては、このゲームアプリケーション全般に登場する物体がただの輪で、意味や意図が感じにくいものであったことが挙げられる。

先生方からのコメントは次の通りである。

“今回の輪でできたシューティングゲームは、児童の興味を惹きつけにくいと感じた。彼らにはカラフルな動物などの親しみやすいキャラクターを中心に展開されるゲームの方が興味をもちやすい。画像だけでなく音声などの効果があるとより児童の興味を惹きつけることができると思う。キャラクターは動物などを使い、見ただけでも分かりやすいゲームの方がいい。また、舌で操作するということを認識させる表示をゲームに取り入れると児童が理解しやすい。その場合は文字で表示するのではなく、絵の方が理解されやすい。”

この問題の解決策としては、先生方のコメントにもある通り、一目では分かりにくい輪よりも、キャラクターなどのイラストベースのゲームにすることで、そのゲームのストーリー、目的も理解しやすくなると考えられる。

#### 問題点 1-6. ゲームアプリケーションの魅力の不足

システム1のシューティングゲームの体験中に、児童がディスプレイに映ったゲームへよりも、機材や周りの様子の方に注意がいつってしまう場面が多く見られた。何人かの児童は顔だけでなく体全体を前後左右上

下に大きく動かしていた。この動きによって RGB カメラの視野範囲から顔が外に出てしまい、舌認識が中断されてしまうという問題も生じてしまった。このような場合、児童の体を静止させるために、実験中は常に担任の先生の協力を必要とした。

これはゲームアプリケーションの魅力の不足が原因と考える。先生によると、児童が何かに没頭している際は食い入るようにその物事に集中して取り組み、そのような時は、つまらなそうに体を大きく動かすようなことはないとのことである。

そのため、前述した分かりやすいゲームと関連し、児童が飽きずに食いつく、魅力的なゲームの製作がこの問題の解決策となる。

しかし一方で、先生からのコメントに次のようなものもあった。

“舌のゲームという珍しさもあり、児童は面白がって興味津々であった。システムの一部であるコンピュータそのものにも、ときどき触りたがるなど興味を示していた。そのためか目的のゲーム以外の方に興味が移ってしまう子もおり、余計なものは隠すなどの対策をした方がいいと思った。”

これによると、ゲームの魅力の強化だけでなく、余計な機材を隠すなど、児童の注意をゲーム以外に向けさせない工夫も必要である。

---

## 第5章

# システム 2 の開発

システム 1 を使ったユーザテストで判明した各問題に対して、以下のような改良を加えたシステム 2 の開発を行った。尚、各改良項目にはそれに対応する問題点がある場合はその番号（問題点 1-1 等）を振った。

尚、システム 2 とは 97 ページにある表 4 の通り、顔認識は Facetracker、深度データ処理は Nearest Point 法、そしてゲームアプリケーションは魚取りゲームで構成されている。

## 5.1 ハードウェアの改良

### 5.1.1 より大きな外部ディスプレイの採用（問題点 1-1）

先のユーザテストでは、児童が画面に近づいてプレイをしようとする事態が頻発した。この原因としてはラップトップ付属のディスプレイ（15.6 inch）が小さかったことにあると考え、このシステム 2 ではより大画面の外部ディスプレイ、Dell U2212HM（21.5 inch, IPS 液晶）を使うことで対処した。（図 16）

このディスプレイを選んだ理由としては、価格が安いこと（約 1 万 5 千円）、IPS 液晶を採用していること、ディスプレイの高さを無段階で変更可能なこと、ピボット（ディスプレイを縦にすること）が可能であることが挙げられる。価格の安さは、将来的に学校や家庭で本システムを導入する際に重要な要素であり、IPS 液晶は視野角が広いいためよく見えるようにするための角度調整の必要がなく楽であり、また、画面を縦向きに配置した場合も TN 液晶と違い、問題なく見ることができる。ディスプレイの高さが自由に変更できることは、ユーザの視線位置の調整を容易に行えるため利点がある。ピボットは、縦長の画面の使用に繋がり、縦長の画面を生かした縦スクロールゲームの製作など、今後のゲームアプリケーションの幅を広げる際に有利であると考えた。

### 5.1.2 センサ配置の変更（問題点 1-2）

システム 1 ではディスプレイ上部に配置していたが、この配置ではゲームをプレイする児童の顔の向きがセンサの方向に向かず、認識が失敗する場面が多く見られた。これに対しシステム 2 では、図 16 のようにセンサをディスプレイの前方に設置した。これによってゲームをプレイする際にディスプレイを見る顔の向きが自然とセンサの方向と同じになるようになると考えた。尚、センサは後述する Xtion に変更し、その Xtion の足場には透明なアクリル板を使用した。このアクリル板の足場の高さは 18cm であり、センサの背後はオクルージョンが生じるためその部分の表示は見えないが、足場は透明なため背後の表示も見ることが可能である。

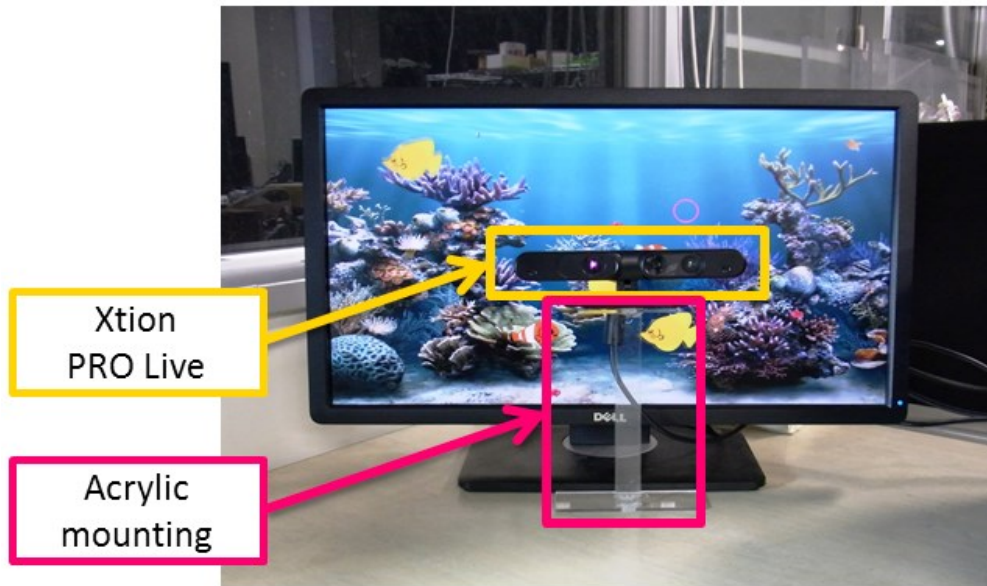


図 16 システム 2 で使用した外部ディスプレイ及びセンサ配置

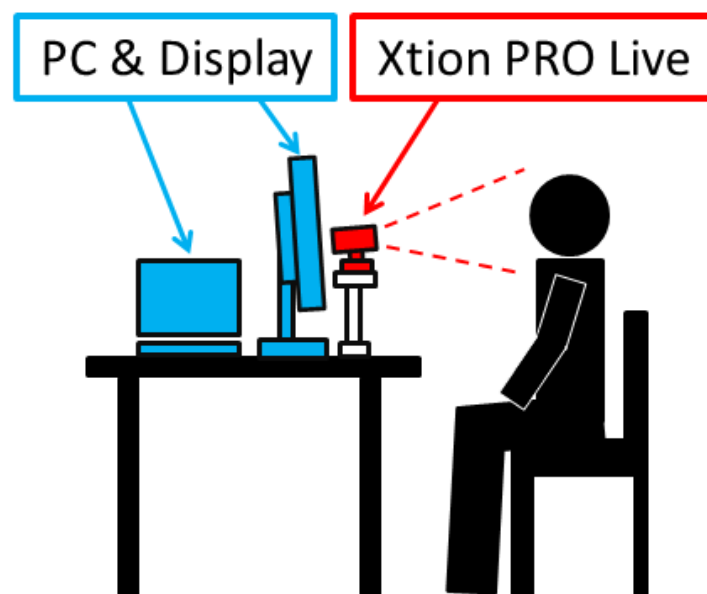


図 17 システム 2 のハードウェア構成・配置

### 5.1.3 センサの小型化

システム 1 で使用した Kinect センサの場合、ディスプレイの前面に配置すると大きすぎてしまうため、システム 2 では図 18 右側の ASUS 社の Xtion PRO LIVE を採用した。この Xtion は Kinect と同等の性能を有しながらも大幅に小型になり、かつ USB 端子のみでの使用が可能である。Kinect には角度調整用のモーターがあるが、このシステムではそれは使用しないため、Xtion にすることで不利になることはなく、USB 接続のみで稼動する点による実験での取り回しの良さなどの利点の方が大きい。サイズ等の比較は次の表 2 の通りである。



図 18 Kinect (左) と Xtion PRO LIVE (右)

表 2 Kinect と Xtion PRO LIVE の比較

(RGB カメラ・深度カメラ欄の太字は本研究で使用した設定)

	Kinect	Xtion PRO LIVE
サイズ	28cm×6.5cm×7cm	18cm×3.5cm×5cm
RGB カメラ解像度 (フレームレート)	1280×960 ( 12 fps ) <b>640×480 ( 30 fps )</b>	1280×1024 ( 15 fps ) <b>640×480 ( 30 fps )</b>
深度カメラ解像度 (フレームレート)	<b>640×480 ( 30 fps )</b>	<b>640×480 ( 30 fps )</b> 320×240 ( 60 fps )
有効距離	0.8m～4.0m	0.8m～3.5m
画角	水平 57° 垂直 43°	水平 58° 垂直 45°
重量	1360g	225g
外部 AC 電源	必要	不要 (USB バスパワー)
消費電力	12W	2.5W 以下
チルトモーター	有	無
マイク	4 個	2 個
商用利用	不可	可



---

## 5.2 ソフトウェアの改良

システム 2 は openFrameworks v0072 をベースに構成されており, Windows 機で稼動しているが, センサである Xtion PRO LIVE さえ使える状態ならば OS は問わず使用可能である.

### 5.2.1 顔認識の改良 (問題点 1-3 )

顔認識が顔の傾きに弱いという問題を受け, 使用する顔認識のアルゴリズムの変更を行った. それに伴い舌認識の手法を V2 とした. この V2 での顔認識は Saragih ら[7] による Facetracker を用いた. 図 19 に Facetracker を使った顔認識の様子を示す. この Facetracker の使用によって顔の傾きにも V1 の OpenCV での顔認識よりも広い角度の範囲で対応でき, 眼鏡の使用時も安定した顔認識が可能となった. さらに, V1 では鼻や口の位置を推定で決定していたが, Facetracker を用いることで認識による位置の把握ができるようになり, 特に顔が傾いて鼻の真下に口の中心が位置しない場合でも正確な口領域の決定が行えるようになる. 舌認識手法 V2 における舌認識の主なフローは図 20 のようになる.

V2 での深度データ処理部は V1 と同じく Nearest Point 法を使用している.

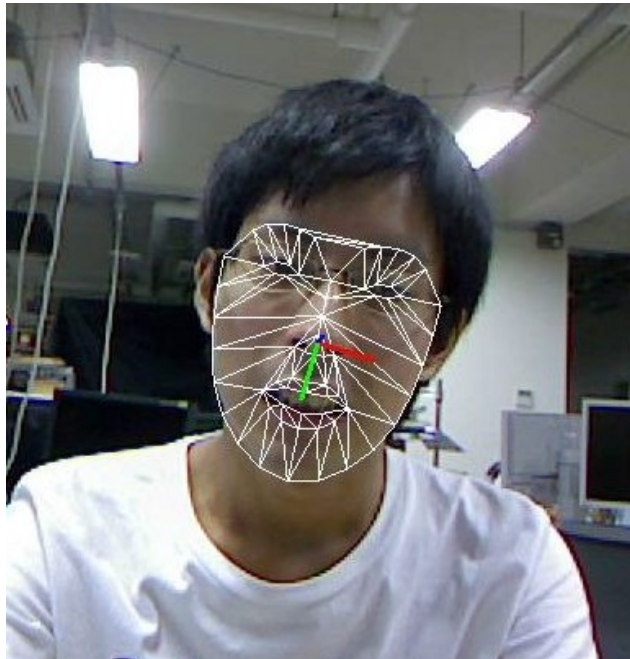


図 19 Facetracker による顔認識の様子（中心の赤い線や緑の線は、認識された顔の傾きを表す xyz 座標軸）

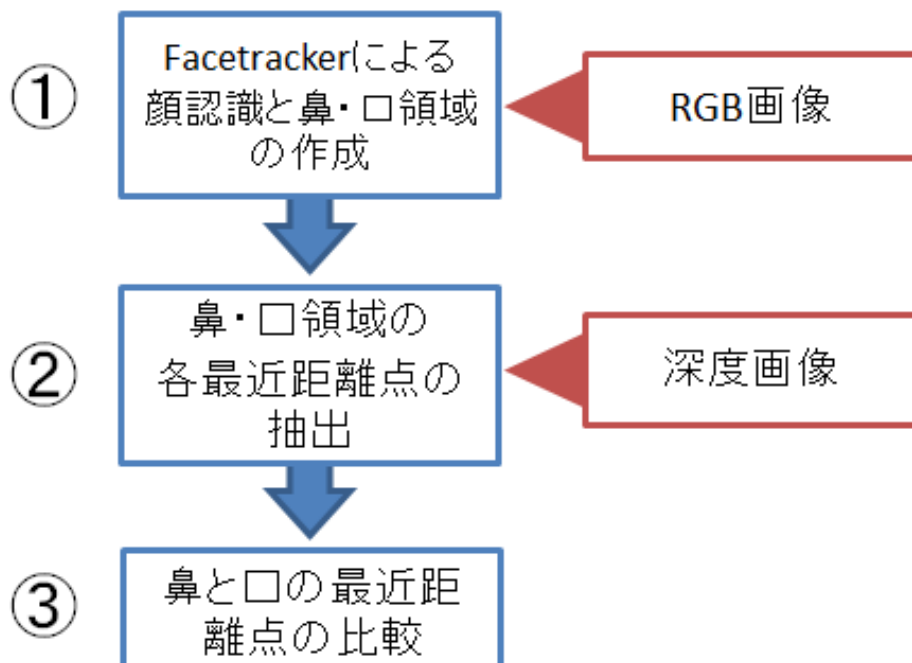


図 20 舌認識手法 V2 (Facetracker+ Nearest Point 法) の舌認識フロー

---

### 5.2.2 顔の向きによる深度値の補正（問題点 1-4）

プレイに慣れてきた児童の中には、舌を突き出したまま左右に動かさず、代わりに首を動かし顔の向きを変えることで、舌で操作しているように見せかけることに成功していた者もいた。そのためシステム 1 のままではこのような不正な操作を見破ることができず、トレーニングに繋がらない操作を児童にさせてしまうという問題があった。

そこでこの問題の操作を封じるべく、顔の向きによる深度値の変化をキャンセルできるプログラムを実装した。顔認識に使用している **Facetracker** では、顔認識のソースとなる RGB 画像から顔のロール角、ピッチ角、ヨー角を取得できる。図 19 の中心に映った座標軸はそれらの角度を示している。その顔の角度を元に、次のような回転行列を掛けて深度値の補正を行うことで舌を出したまま顔の回転等の動きでカーソルが操作されてしまうという操作を減らすことができる。その計算は 43 ページに示す。さらに、顔の角度が一定値以上傾いているときはゲームを一時停止させ、図 21 のような顔の向きの異常通知を表示させ、顔の向きを正面にするように促す機能も追加している。

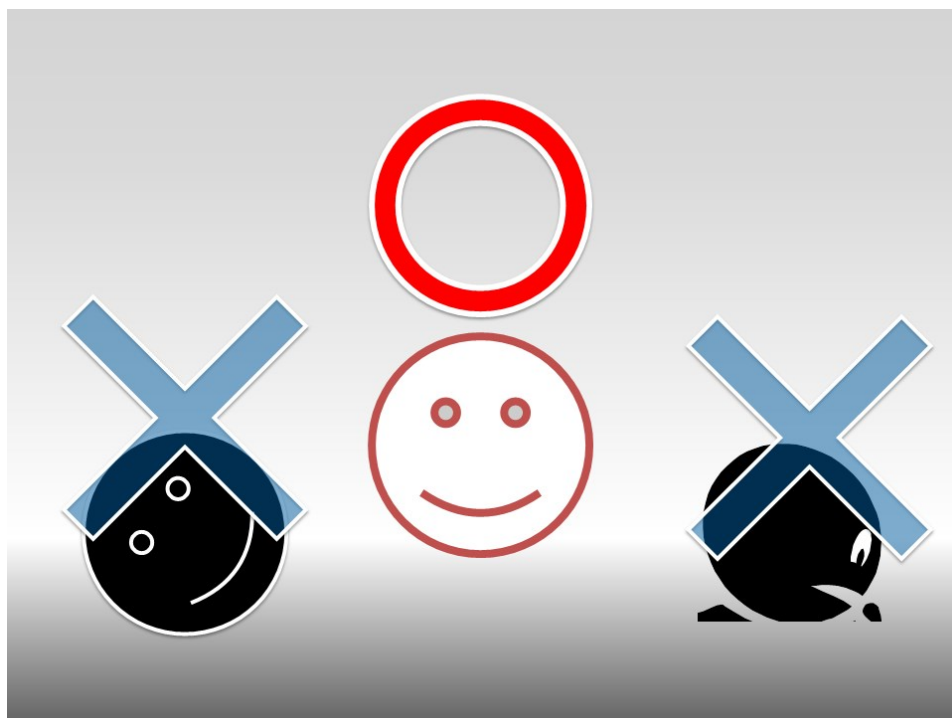


図 21 顔の過度の傾き・向き異常が検出された際の通知画面

・顔の角度に合わせた深度値の補正

Facetracker から取得した顔のロール角, ピッチ角, ヨー角をそれぞれ,  $\theta_{roll}, \theta_{pitch}, \theta_{yaw}$  とする. この角度をキャンセルするため, 回転行列,  $M_{roll}, M_{pitch}, M_{yaw}$  を用意すると, それぞれ次のように表される.

$$M_{roll}(-\theta_{roll}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\theta_{roll}) & -\sin(-\theta_{roll}) & 0 \\ 0 & \sin(-\theta_{roll}) & \cos(-\theta_{roll}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$M_{pitch}(-\theta_{pitch}) = \begin{bmatrix} \cos(-\theta_{pitch}) & 0 & \sin(-\theta_{pitch}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-\theta_{pitch}) & 0 & \cos(-\theta_{pitch}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$M_{yaw}(-\theta_{yaw}) = \begin{bmatrix} \cos(-\theta_{yaw}) & -\sin(-\theta_{yaw}) & 0 & 0 \\ \sin(-\theta_{yaw}) & \cos(-\theta_{yaw}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

ここで, 補正対象のピクセル  $p$  の座標とその深度値をそれぞれ  $x, y, d$  とすると,

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ d \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

と表わせ、補正後の同ピクセルを  $p'$  とし、同様に  $x', y', d'$  とすると、

$$p' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ d' \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

となる。

これらを用いて補正後のピクセル  $p'$  を求める式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} p' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ d' \\ 1 \end{bmatrix} = M_{yaw}(-\theta_{yaw}) M_{pitch}(-\theta_{pitch}) M_{roll}(-\theta_{roll}) \begin{bmatrix} p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

ここで求めた  $d'$  を補正前の  $d$  と置き換えることで深度の補正を完了する。

また、これらの行列計算は C++用の行列演算ライブラリである Eigen[18]を使用して行っている。

---

### 5.2.3 ゲームアプリケーションの改良（問題点 1-5, 問題点 1-6）

システム 1 のゲームアプリケーションとは大きく異なり，説明がなくとも見ただ目で何をするのが分かるようなゲームを目指した．図 22 にシステム 2 のゲームアプリケーションを示す．

#### 1. 概要・操作方法

このゲームアプリケーションでは，舌の操作によってカーソルを動かし，それによって魚を捕まえることが目的である．舌を突き出したまま上下左右に動かすと，輪状のカーソルもそのまま上下左右に動かすことができる．舌で動かしているカーソルが魚に一定距離以上近づいた時は，その魚が効果音とともに消滅し，捕まえたというフィードバックが得られるようになっている．前回のシステム 1 でのゲームアプリケーションは操作が左右のみの 1 次元しかなかったが，今回のゲームアプリケーションではそれが上下左右と 2 次元の動きが可能となり，よりインタラクションの自由度が上がったと言える．

画面上の全ての魚を捕獲するとゲームクリアの効果音が生じ，その後また新たな魚が出現するようになっている．これも前回のゲームアプリケーションにはなかった点であり，アクション時の効果音によって興味を惹きつけるとともに，児童がゲームをプレイしているという感覚をより感じられるようになっている．

## 2. 魚の移動

魚は生成時に初期位置，初期速度，向きもランダムで初期化されるようになっており，その値のまま直線的に移動する．画面端までくると速さは変わらず向きが反転する．

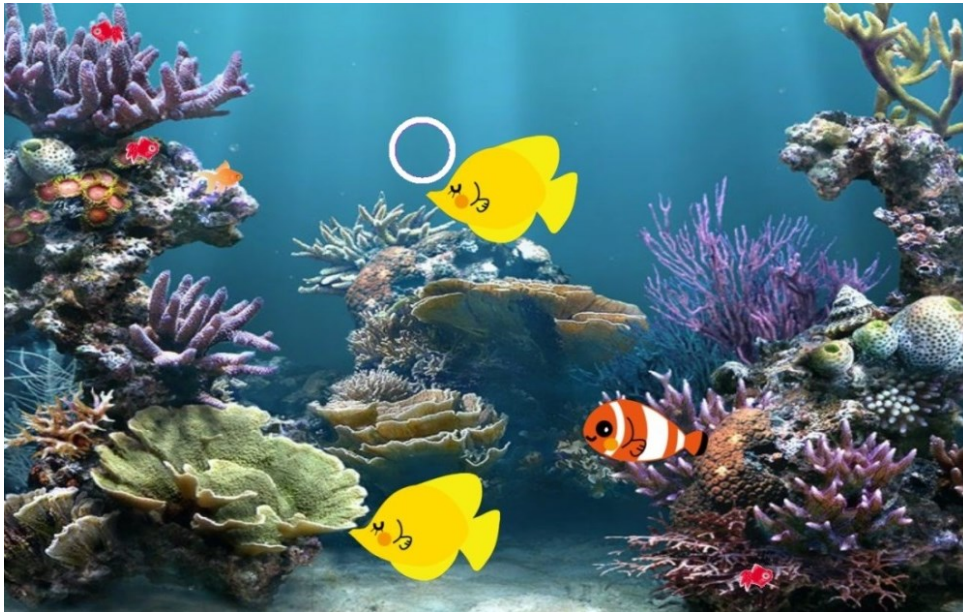


図 22 システム 2 のゲームアプリケーション



### 3. 舌認識アプリケーションとゲームアプリケーションの連動

舌認識アプリケーションで認識された舌尖位置とゲームアプリケーションでのカーソル位置の対応については、図 23 のように、緑色の口領域の最小矩形に対する舌尖位置を同じ位置の比率でゲームアプリケーションの画面サイズまで拡大することで対処している。

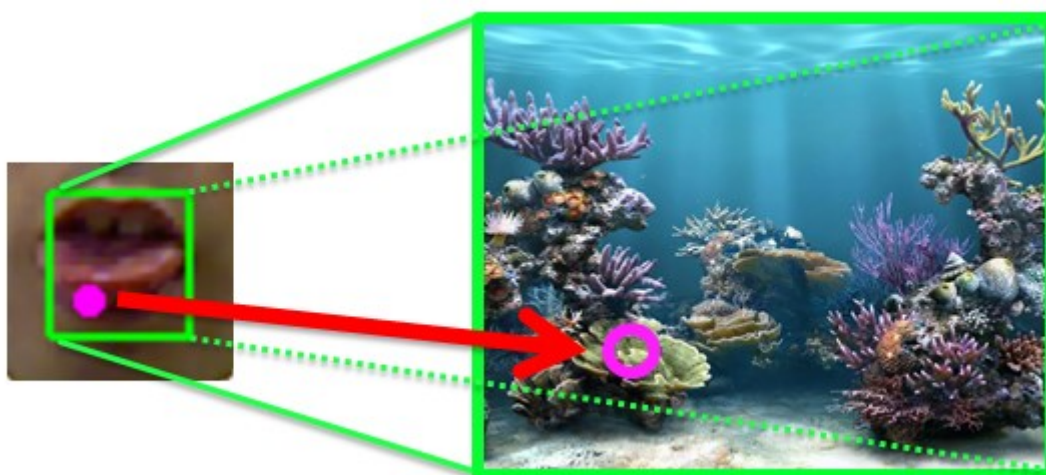


図 23 舌尖位置 (左) とゲームのカーソル位置 (右) の関係図

---

## 第6章

# システム 2 でのユーザテスト

### 6.1 概要

システム 1 でのユーザテストと同じく，調布特別支援学校とその児童の協力を得て，システム 2 でのユーザテストを実施した．体験者はダウン症児童 4 名であった．実施日は児童 1 と児童 4 が 2012 年 12 月 19 日，児童 2 が 2013 年 7 月 23 日，児童 3 が 2013 年 7 月 26 日であった．

### 6.2 手順・内容

まずゲームアプリケーションの遊び方を理解させるために 1 分程度試させ，その後 3～5 分の間ゲームをプレイしてもらった．児童のプレイ中に我々は行動観察を行い，児童の担任の先生には児童の性格，このシステムに興味を持って楽しんでいるか，児童が十分に舌を出してプレイできていたかを記入してもらった．

---

## 6.3 結果

### 6.3.1 各ダウン症児童の結果

#### 児童 1 (小学 5 年生・女子・中度のダウン症)

彼女はこのゲームアプリケーションに非常に高い興味を示しており、魚を一匹捕まえるたびに喜びのあまり叫んでいた。時々彼女はディスプレイに近づいてしまったため、顔認識が失敗することがあった。先生からはこの実験で彼女が確実に舌を動かしてプレイをすることができていた。そしてこのゲームアプリケーションを楽しんでいた。というコメントを得た。

#### 児童 2 (小学 1 年生・女子・軽度のダウン症)

ユーザテスト開始時、彼女は舌を出してゲームをプレイするのをためらっている様子であった。そこで、我々が実際に舌を出してゲームをプレイする様子を見せた所、彼女は楽しそうにゲームをプレイすることができ、全ての魚を捕まえてゲームをクリアすることができた。先生からは、彼女が楽しみながら舌を使ってゲームを体験していた、そしてゲームアプリケーションの操作、目的などについて理解できていたというコメントを得た。

#### 児童 3 (小学 1 年生・男子・中度のダウン症)

彼はこのユーザテストで全くゲームをプレイすることができなかった。彼は体験の時間中はずっと頭を抱えて下を向いてしまい、ゲームのプレイをするまでに至らなかった。担任の先生からは、彼は非常に恥ずかしがりやであ

り、今回のユーザテストのような、知らない人間に囲まれた状況で椅子に座って舌を出してゲームをプレイするという状況に慣れることができなかつたのではないかというコメントを得た。しかしながら、実験中に何度か顔を上げて、画面に映る魚を見て興奮を示していたため、ゲーム自体には興味はあったようだというコメントも得た。

#### 児童 4 (小学 5 年生・女子・重度のダウン症)

彼女はゲームに興味を示していたものの、3 分間のユーザテスト中に舌を突き出したのは数回だけであった。担任の先生からは、彼女の障がいの重さでは舌を突き出し、それを保持することが難しいというコメントを得た。加えて、彼女は体験時間中に何度か周りの人間の方に意識を逸らしてしまうことがあった。

#### 6.3.2 全体を通しての結果

このシステム 2 を使ったユーザテストでは、ダウン症の児童はゲームアプリケーションの操作ルールが分かればゲームをプレイすることができた。しかしながら、全ての児童がゲームの操作方法やゲームの目的で多かれ少なかれ躓く箇所があった。そのため、児童がゲームを楽しめるようにより適切なインストラクションが必要だと分かった。

児童 1 と児童 2 は中度と軽度なダウン症であり、彼らはゲームアプリケーションの操作方法や目的をよく理解しプレイすることができていたが、それでも追加の簡単なインストラクションは必要であった。児童 3 と児童 4 についてはゲームアプリケーションの理解がより困難であった。児童 3 のケースでは、彼の症状の重さよりも彼の恥ずかしがり屋という性格がゲームアプリケーション

の理解を困難にさせていたと言える。そのため、児童 3 の場合は回数を重ね、環境に慣れてもらうことで改善できると考えられる。また、児童 4 のような重度のダウン症向けに、口の開閉のような極めて基本的な動作から始めるインストラクションも必要と言える。

## 6.4 システム 2 の問題点・改良点

児童のゲームへの興味が前回に比べて飛躍的に良くなった。何人かの児童は終了後も“もっとゲームをやりたい”と言ってくる程であった。先生からも前回に比べて生徒がより楽しんでプレイできていた、このシステム 2 のままだも日常的な舌のトレーニングとして十分に使用できそうな児童もいた、という意見を貰うことができた。

興味を惹き、楽しませることができた一つの理由としては、最初の輪だけのゲームよりも親しみやすい魚のキャラクタを起用したことや、視覚だけでなく、効果音も用いたフィードバックによってゲームをプレイしているという実感をより与えることができたためであると思われる。

舌の操作としても今回のプレイを見て、先生からは顔ではなくちゃんと舌を動かしてゲームをプレイできていたという意見をもらった。

### 6.4.1 見つかった問題点・児童の先生からの改善案

実験時に分かった問題点と実験後のインタビューにて先生から得られたフィードバックを要約したものをまとめた。

---

**問題点2-1 認識された舌尖位置が毎フレーム移動する問題**

V1 では、舌尖の認識位置を最近の 5 フレーム分保存してその平均値をもって識別した舌尖の位置とした。システム 1 の時のゲームアプリケーションでは 1 次元操作しかなかったため、この手法でも対応することができていたが、今回のゲームアプリケーションは 2 次元的なカーソル操作のため、その平均化をもってしても細かい振動のようなカーソルのチラつきが目立ってしまった。平均に使うフレームを増やすことも試したが、今度は舌尖の移動に対するカーソル移動の反応が遅れるなどの影響がでてしまい、ゲーム操作に悪影響がでてしまった。

原因はこの舌認識手法 V1 にあると考える。この V1 ではセンサから最も近い一点のみを代表として舌尖と認識しているため、センサのノイズで簡単にその位置が変わってしまう可能性がある。

そのため、解決策としては舌認識の手法を、一点を舌尖の代表とするのではなく、より多くの点を使い、ノイズに強く安定した結果が出せる手法に変えることが考えられる。

**問題点2-2 背景の単純化**

今回のゲームアプリケーションで使用した背景などは見た目が綺麗で結構だが、いざ児童が使用する際はそこに映った細かいものなどを気にしてゲームにならなくなる可能性がある。そのため、極力無駄な描写は省くといい。

**問題点2-3 自機のアイコン化**

自分の舌の位置を示すものがただの輪では見えにくいし、魚に対して何をするのかが分かりにくい。そのためカーソルは網のようなものに変更したほうがいい。

#### 問題点2-4 視聴覚エフェクトの強化

児童の興味をより惹きつけ、飽きさせないような分かりやすい視聴覚エフェクトがあると、魚を捕まえたときの達成感も上がり、より好んで使ってくれるようになる。

#### 問題点2-5 他の種類のゲームのアイデア

例えば食べ物をテーマにしたゲームなら口や舌を使うことが明らかで児童にとって分かりやすいものになると思う。舌を動かして食べ物を取る（食べる）といった、舌に合うものもどうか。

また、舌と関係なくとも、マリオブラザーズのようなタイプのゲームを舌で操作できるようにするのも、既に面白さが磨かれたゲームという点で児童にとって魅力的だと思う。

#### 問題点2-6 太陽光の対策

ハードウェアの設置完了し、テストを試みるも、深度データが大きく荒れてしまい、全く舌の認識ができなかった。結論から言うと、この原因は太陽光であった。実験は午後 1 時頃に行われ、その日は快晴であったため、太陽光が実験部屋に侵入してしまった。(図 25) 使用した深度センサは、図 24 のように赤外光のドットパターンを照射し、それを赤外線カメラで取得するという処理を含んでいるため、太陽光のような強力

な赤外光の外乱が入ってしまうと全く機能しなくなってしまう。

この対策として、先生の協力を得てカーテンや黒い紙を窓に付けてもらい遮光を行った。実験時のセンサの向きも変更して再度試し、その結果、太陽光による舌認識の問題は解決した。

#### 問題点2-7 より分かりやすい操作方法の提示

今回のユーザテストで、前回以上に児童によって舌の動かせる度合にばらつきがあることが分かった。よく動かせる児童は慣れると短時間でゲームをクリアでき、時間内に何度もプレイしていた。しかしその一方で、舌を動かすのが得意でない児童は、舌を出すという段階すらいけず、殆どゲームをすることなく終わってしまった。

舌を出す段階まで達しなかった理由としては、障がいの重さというよりもゲーム操作方法の理解が大きいと先生からのコメント及び、プレイの観察によって分かった。

この解決には、操作を分かりやすく伝えることが重要である。そのための一つの案として、教示のための専用のステージを設けるというものが考えられる。

#### 問題点2-8 難易度の異なるステージの作成

各児童による舌操作のバラつきに対応するため、全員が同じステージを繰り返しプレイするのではなく、ゲームに難易度を設ける必要性が



あることが児童の観察と先生からのコメントで分かった。

舌がよく動き、ゲームアプリケーションを簡単にクリアできるような児童にはより難しいステージ（例えば捕まえる対象が速く逃げる、待っていても寄って来ないなど。）に挑戦させることでモチベーションを保たせることができるだろう。

舌をあまり動かさず、システム1でもシステム2でも満足にプレイができなかった児童に対しては、より簡単なステージ、例えばまずは口の開け閉めだけでクリアできるステージからやってもらい、クリアの体験をしてもらいながら、徐々に操作の種類やレベルを上げていくことが、モチベーションを保つためにも有効だと考える。



図 24 Kinect による赤外光ドットパターン[13]

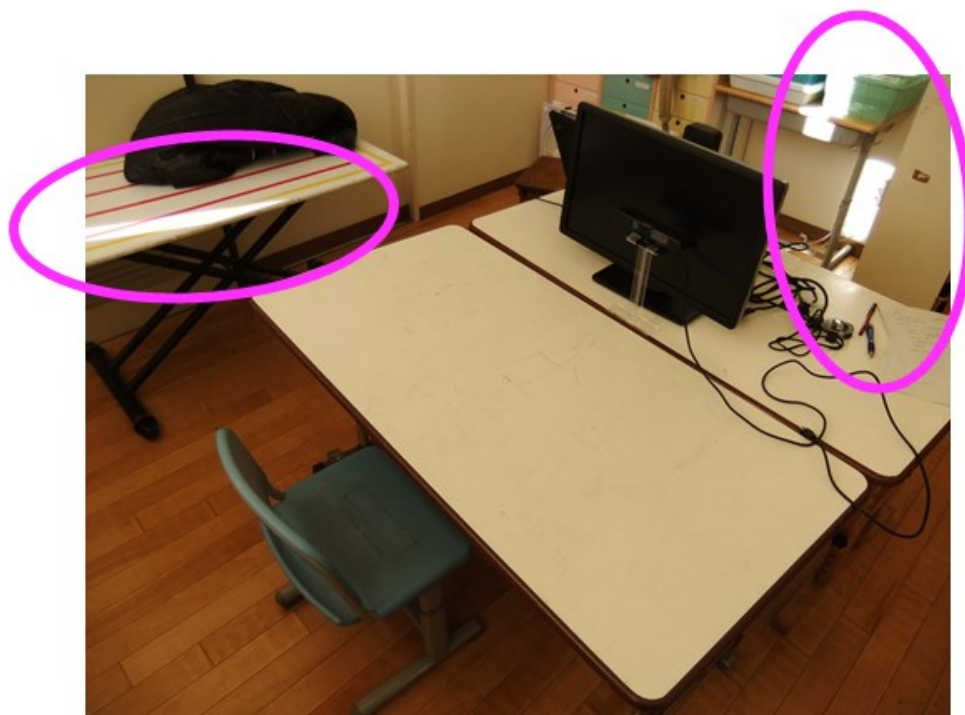


図 25 実験に使用したハードウェア構成と実験室内に入り込む太陽光  
(太陽光対策無しの時)

---

## 第7章

# システム 3 の開発

システム 2 の改良を行ったシステム 3 について述べる。このシステム 3 ではハードウェアはシステム 2 を踏襲しており変更はなく、ソフトウェアの変更が主である。

尚、システム 3 とは 97 ページにある表 4 の通り、顔認識は **Facetracker**、深度データ処理は **Nearest Area** 法、そしてゲームアプリケーションはシステム 2 の魚取りゲームの改良型で構成されている。

### 7.1 ソフトウェア構成の改良

システム 3 では舌認識アプリケーションとゲームアプリケーションを独立させた。これは外部ディスプレイの使用に際して実験を効率的に行うためである。児童が見る外部ディスプレイにはゲームアプリケーションのみをフルスクリーンで表示し、識別のパラメータなどの操作を行う舌認識アプリケーションはラップトップ付属のディスプレイに表示させる。

---

## 7.2 舌認識アプリケーションの改良

認識アプリケーションは `openFrameworks v0073` をベースに構成されている。図 27 にその舌認識アプリケーションのスクリーンショットを示す。このアプリケーションでは実験を行う者がゲームアプリケーションに用いるディスプレイとは別のディスプレイで RGB・深度センサの情報をモニタリングできる。

この舌認識アプリケーションで処理した舌認識の結果は、UDP 通信経由でゲームアプリケーション側に送信している。また、この舌認識アプリケーションのウィンドウをアクティブ状態にすることで、キーボードの入力を受け付けることができ、それによってゲームアプリケーションの操作をこれも UDP 通信経由にて行うことができるようになっている。図 27 の右下を見るとステージ進行の操作方法を提示しているのが分かる。

### 7.2.1 Facetracker の正確性の向上

顔認識に `Facetracker` を使用した場合でも、低くない頻度で顔認識の結果がおかしくなる場合がある。具体的には認識された口の位置が実際の口の位置と異なり、鼻に近過ぎる位置にきてしまい、縦に潰れたような形の顔認識結果になってしまうという症状である。(図 26) 顔認識は一度認識されると、その顔が画面から消えない限り基本的に修正されることはない。そして、この誤認識によって口領域が正しく認識されないと、舌と関係ない間違っただ部位が舌として認識されてしまうため、致命的な問題になりかねない。

これを解決するために、顔認識が成功した後も、その顔が正しいものなのかをチェックする機能を実装した。このチェック機能の原理は、鼻と口とのピクセル距離がある閾値以上あるかどうかを調べるというものである。閾値の設定はその時のセンサと顔との距離や、対象となる人間の顔によって変わるため、その場ですぐに変更できるように GUI のスライダー（図 29 の左側参照）を実装し、簡単に調整できるようにした。また、このチェック機能による顔認識の正確性は三段階に分かれている。

- 1, 値が閾値を十分に超えて正確な顔認識ができていると思われる場合は舌認識アプリケーションの背景が図 27 のように緑色になる。
- 2, 閾値に全く達していない状態で明らかに誤認識と思われる場合は、図 28 のように背景が赤色になり、下部には大きくエラー文が表示される。
- 3, これらのどちらでもない場合、つまり顔認識が正確かどうかの値が閾値周辺の場合、背景はオレンジ色になり、その状態では特定のキー入力による手動の再認識を行うことができる。（図 29）

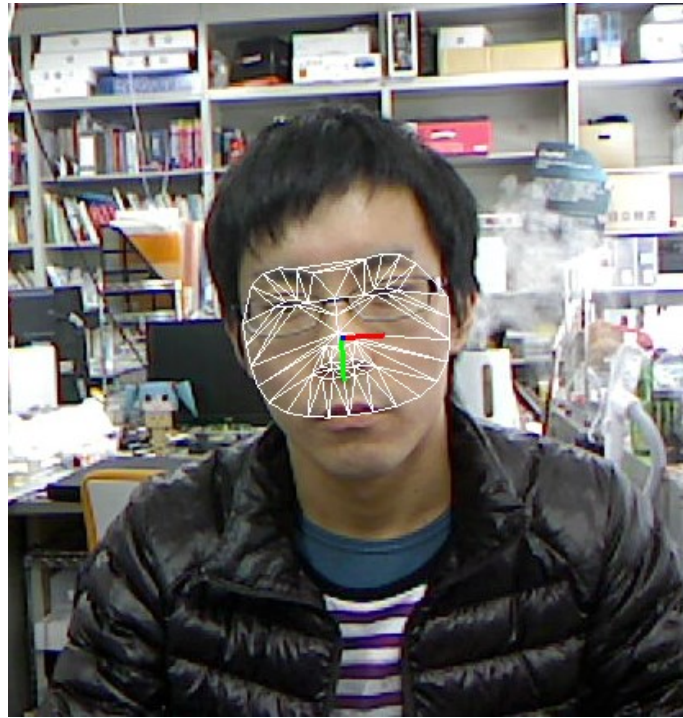


図 26 Facetracker での顔の誤認識例

図 27 システム 3 の舌認識アプリケーション  
(顔認識が正確と判断されている状態の様子)



図 28 顔の誤認識または顔が見つからない場合のエラー状態の様子

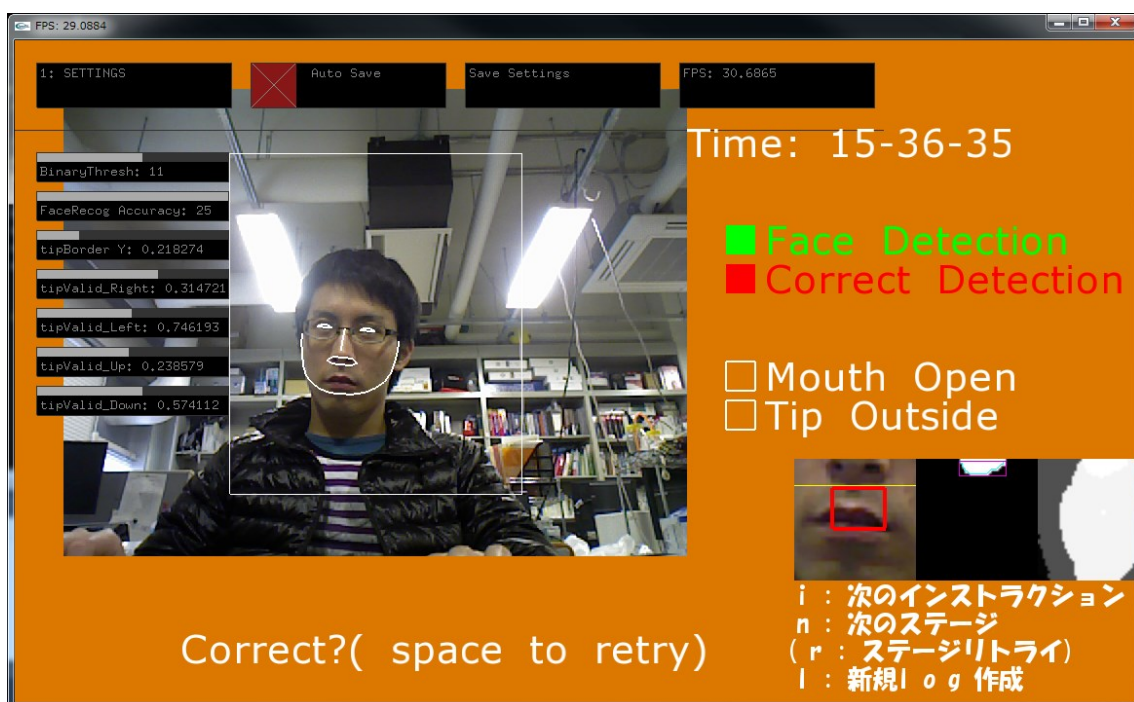


図 29 顔認識の正確性が不確かな場合の様子

(右側にパラメータ変更用の GUI を表示している時の様子)

---

### 7.3 舌認識手法 V3 ( Facetracker+ Nearest Area 法) の開発 (問題点 2-1 )

システム 1 およびシステム 2 で使用した深度データ処理手法 : Nearest Point 法の改良を行い, 新たな深度データ処理手法である Nearest Area 法を開発した. この Nearest Area 法を使用した舌認識手法を V3 とする. 尚, 顔認識は V2 と同じく Facetracker を使用している.

この Nearest Area 法は, センサからの距離が最も近い一点 (Nearest Point) を使うのではなく, 口領域周辺の平均深度値と, その平均深度値をある一定値以上超えた複数点の集合領域 (Nearest Area) を使っている. 図 30 に V3 (Facetracker+ Nearest Area 法) の舌認識のフローを示す.



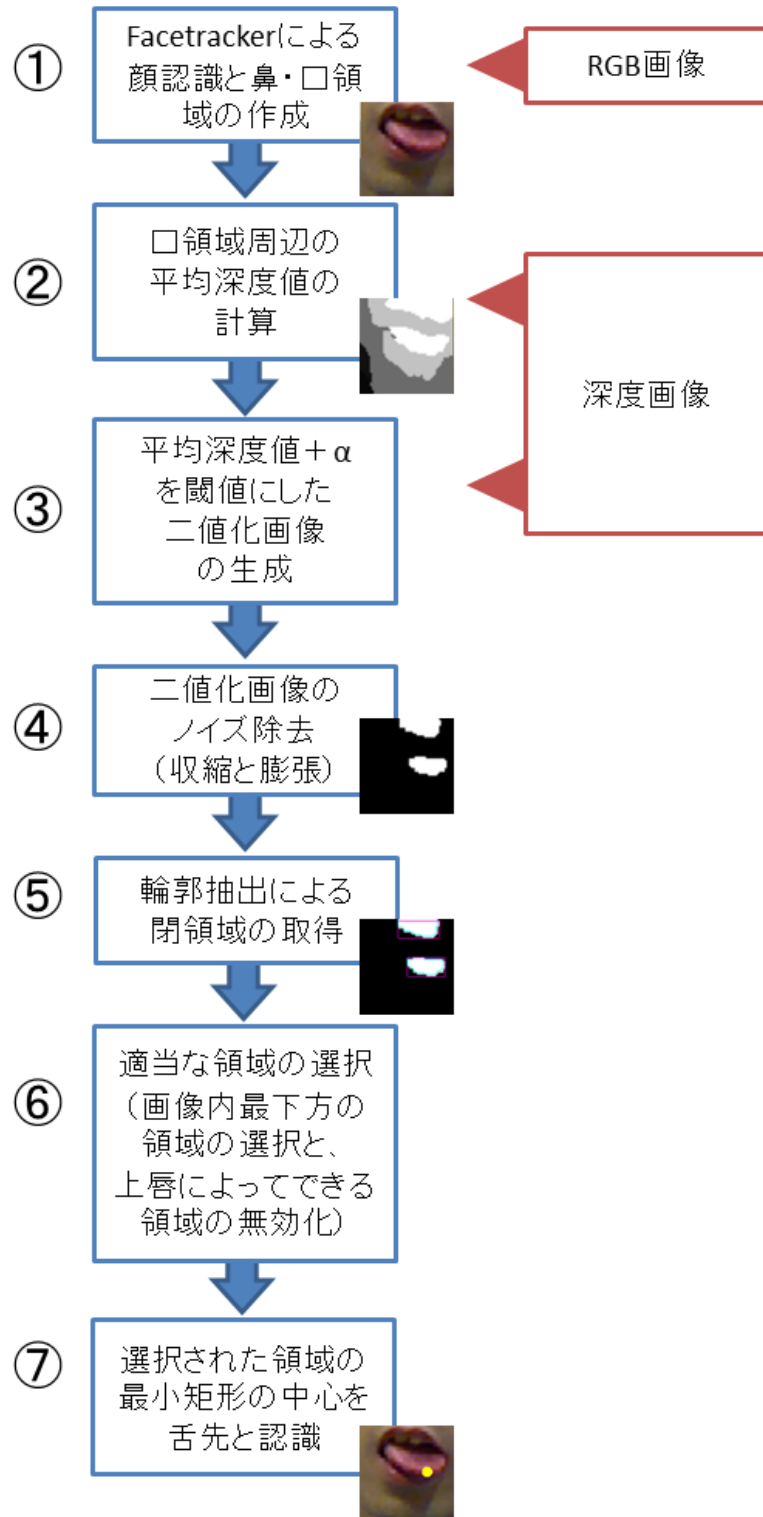


図 30 舌認識手法 V3 (Facetracker+ Nearest Area 法) の舌認識フロー

.....

図 30 の①では前回の V2 で使用した **Facetracker** による口領域の抽出と同じである。

②では, **Facetracker** で求められた口領域を深度画像と照らし合わせ, その領域内での深度の平均値を求める。このとき, ノイズや距離が近すぎるのが原因で 0 になっている深度値や, 明らかに他の値と異なる深度値 (例えばユーザの顔をはみ出して背景の深度を示す場合など) に関しては無視するようにしている。

③では, ②で求めた平均深度値+一定の値以上の深度値を持つ画素のみを抽出して, 二値化画像を生成している。ちなみに, この一定の値は舌の突き出し量に当たり, 舌認識アプリケーションの GUI のスライダーを使用することでその場での変更が可能になっている。

④では, 画像処理の基本的なモルフォロジー演算である, 膨張と収縮を使用している。ここでは収縮の後に膨張を一回のみ行っている。

⑤では, ノイズ除去を行った二値化画像にて輪郭抽出を行い, 閉領域を取得している。

⑥では, ⑤で得られたいくつかの領域に対し, 面積や位置などを考慮し, 最も舌と思われるものを選択する。この時の選択基準では次の通りである。

- 1, 二値化画像内において, ある閾値よりも上方にないこと
- 2, 輪郭の中で最も下方の輪郭であること
- 3, 面積が指定した範囲内であること

これらの内、1 の目的としては、上唇による舌尖の誤認識を防ぐことが挙げられる。経験的に、上唇は口領域周辺の平均深度値を超えて、突き出した舌と似たような面積の領域として二値化画像に存在することが分かっている。そのため、この上唇によってできた領域を誤認識しないために、その領域の位置座標を見て、画像上部に存在している場合は舌尖の候補から除くことで対処した。

2, 3 の目的は、主にノイズ対策である。2 は、1 でも除かれなかった複数の領域が出現してしまった場合、ひとまずどちらか一方の領域を決定する選択基準として機能している。

3 では、④のノイズ除去でも消すことができなかった領域を、面積(領域内のピクセル数)を見ることで排除することができる。

⑦では、最終的に選択された 1 つの領域の最小矩形を作成し、その中心位置を求め、それを舌尖位置として認識している。

以上の深度データ処理を Nearest Area 法と称し、この深度データ処理部と Facetracker による顔認識を組み合わせたものが舌認識手法 V3 となる。

---

## 7.4 ゲームアプリケーションの改良

システム 2 でのユーザテストからのフィードバックを得て、システム 3 では、システム 2 の魚取りゲームの改良を行った。ゲームアプリケーションは認識アプリケーションと同じく `openFrameworks v0073` をベースに構成されている。

### 7.4.1 背景の単純化（問題点 2-2 ）

システム 2 のゲームの見栄えやどんなゲームなのかの分かりやすさの向上のために使用した背景であったが、かえって魚やカーソルといったメインの物体への注意を逸らしてしまう原因に成りかねないと先生方から助言を頂いた。その結果、図 31 のような単色の背景への変更を行った。これによって児童がシステム 2 の背景の細かいものに注意を逸らされることなく、肝心の魚と自分のカーソルに集中することができると思われる。

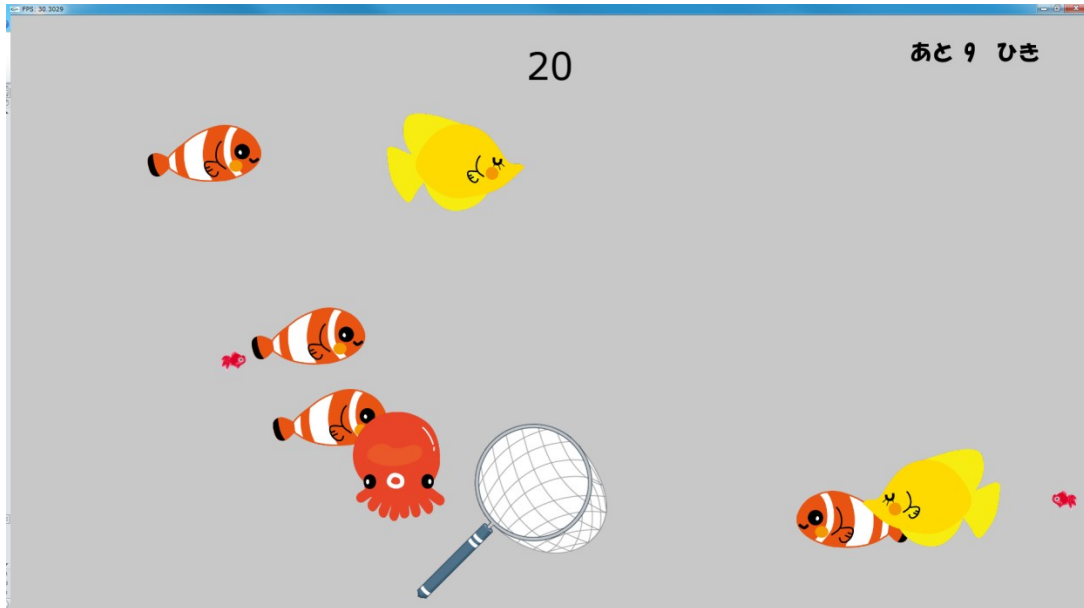


図 31 システム 3 のゲームアプリケーション  
(網が上下左右可動するステージ)

#### 7.4.2 輪から網画像へのカーソルアイコンの変更 (問題点 2-3 )

より直感的にゲーム内容を理解できるように、以前は単なる輪であった舌先で操作するカーソルを、図 31 の中心にあるように網のアイコンへと変更した。これによってカーソルが見やすくなることに加え、分かりやすくなる。どれが自分の舌先かという児童への説明も容易になる。尚、当たり判定の基準位置は、網の柄を除いた円形部分の中心としている。

### 7.4.3 新規ステージの作成（問題点 2-8）

舌で網を動かして魚を捕まえるというコンセプトはそのまま、始めのゲームプレイの慣らしや難易度選択を可能にするために、他のステージも作成した。これは、システム 2 でのユーザテストのフィードバックの一つに、段階的に操作を増やし、少しずつ慣らしていく方がより理解してもらえらるだろうという助言に基づいている。

新たに増やしたステージは次の 2 つである。図 32 では、舌を突き出して左右に振り、画面上方から下方へ直線移動する魚を捕まえるステージになっている。同様に図 33 では画面左方から右方へ直線移動する魚を、上下のみの移動をする網で捕まえるステージになっている。それぞれ舌での操作は左右、もしくは上下方向のみしか認識されないようになっており、斜めに舌を動かしても水平もしくは垂直成分しか操作に使用されない。

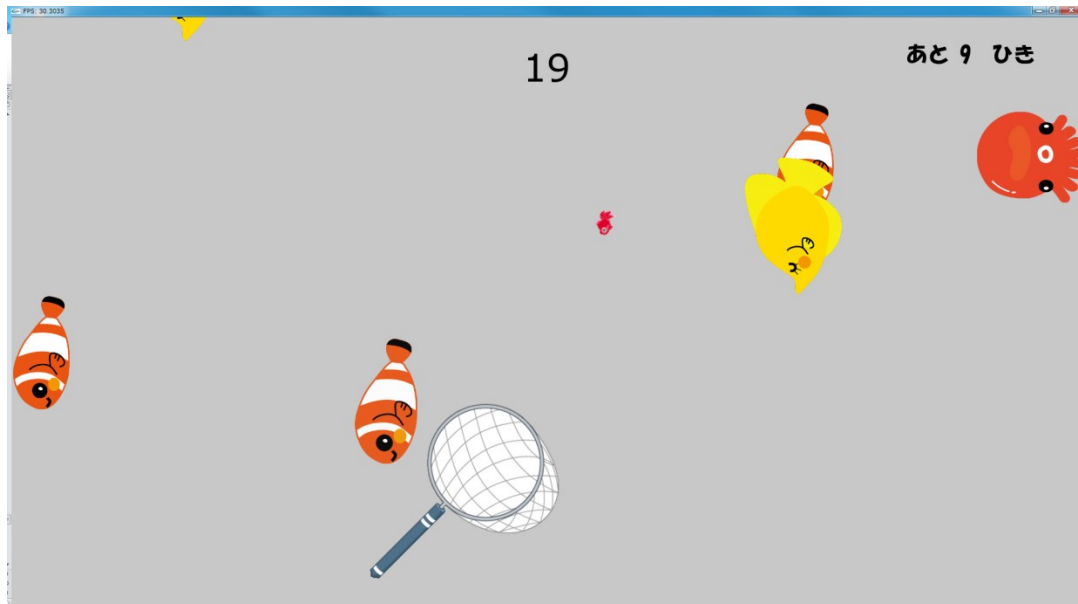


図 32 システム 3 のゲームアプリケーション  
(網が左右方向のみ可動するステージ)

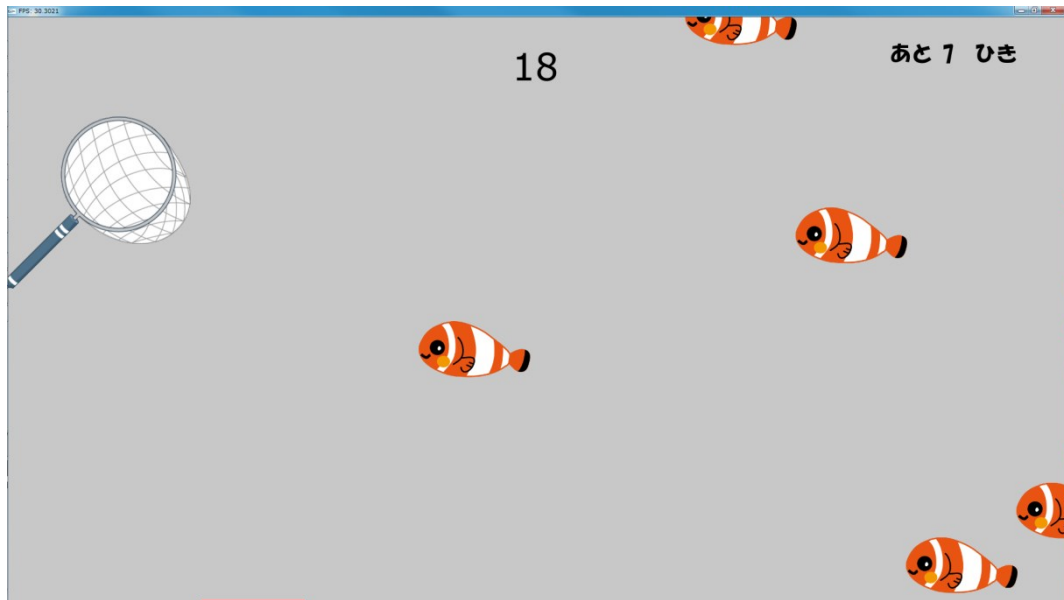


図 33 システム 3 のゲームアプリケーション  
(網が上下方向のみ可動するステージ)

#### 7.4.4 ステージのクリア条件の変更

前回の魚取りゲームでは、全部の魚を捕まえることでステージのクリアとしていたが、今回は一定のノルマの数の魚を捕まえるとステージクリアとなるように変更した。

さらに、今回から各ステージに時間制限を設けた。これは、各児童のゲームのプレイ時間を統一しやすくするという意図もあるが、制限時間によってステージを強制的に終了させ、短時間で多くの回数をプレイできるようにすることが主目的である。

舌での操作が難しい児童にとって、システム 2 のゲームで全ての魚を捕まえてクリアするのは非常に時間がかかってしまうものであり、最後の魚がなかな

か捕まえられず、諦めてしまったり飽きてしまったりすることが度々見られた。このような場面は児童のモチベーションの低下に繋がることから、制限時間という新たな終了条件を設けた。

ちなみに残りの魚の匹数や、制限時間については、図 32 などを見ると分かるように、画面の上部に参考として表示してある。

#### 7.4.5 各種視聴覚エフェクト・表示の追加（問題点 2-4 ）

システム 2 のゲームアプリケーションよりも視聴覚エフェクトを強化した。

図 34 は、捕まえた敵が消える際の視覚エフェクトを示している。前回のゲームアプリケーションでは、魚を捕まえた時のフィードバックとして、敵が一瞬で消え、その時に合わせて音が鳴るだけであった。システム 1 では音もなかったので、それに比べれば児童の反応は格段によくなったが、それでもシステム 2 のユーザテストでのフィードバックでは、さらに分かりやすいものが求められていた。

今回のゲームアプリケーションでは、音はそのまま、倒した時の視覚エフェクトを追加した。これは、対象を捕まえると、その対象が大きくなりながら透明になっていくというエフェクトである。これによって捕まえたというフィードバックが視覚的にもより強調されることになる。



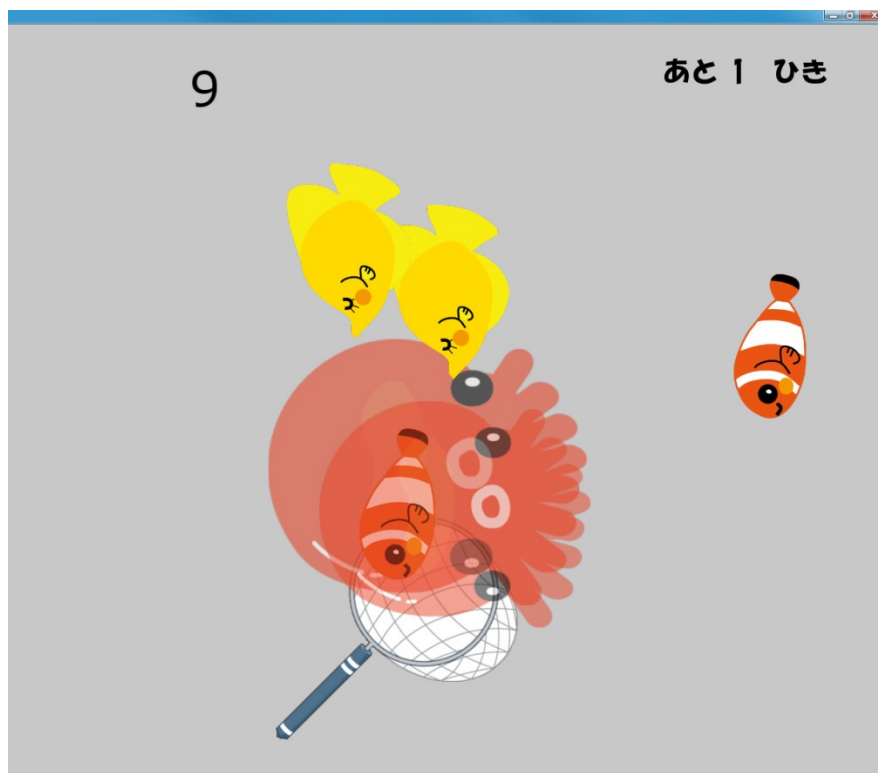


図 34 対象を捕まえた時の視覚エフェクト

## 7.5 インストラクションの追加（問題点 2-7 ）

システム 1, システム 2 のゲームアプリケーションにおいて, ゲームのプレイにまで至らない児童は, 舌の移動がゲームのカーソルの移動になっているということが理解できていないようであった. 実験中, 我々は先生と協力して言葉やジェスチャで絶えず舌で操作することを教えていたが, それでも理解には繋がらない児童もいた.

単純な操作でできる, インストラクションのステージによって児童にプレイを通して舌で操作するということを分かりやすく伝えることがこのインストラクションのステージの目的である.

このインストラクションでは、舌で操作することを次の 3 つのステージに分割して伝えている。

1. 口の開閉
2. 舌の突き出し
3. 舌の左右の移動

この各ステージでは、その操作を行うと次の図 35 のようなはなまるマークと正解を示す音声が出る。この正解を 3 回得ると次のインストラクション操作に移行する。最後のステージである、舌の左右の移動のインストラクションでは、3 回で終了ではなく無制限のプレイができる。この最後のインストラクションで十分に操作に慣れ、理解したと判断された場合は手動で通常のゲームアプリケーションに移行する。



図 35 インストラクションのステージで目的の操作を行った際の正解フィードバック

- ・ステージ 1：口の開閉

このステージでは、まず第一歩として口を開けることを理解させる。ステージ画面には、図 36 のように男の子が口を開けたり閉じたりしているアニメーションと画面上部に“くちをひらこう！”という文章が表示されている。この男の子の真似をすると正解のフィードバックが得られる。

口の開閉の認識は、顔認識に使用している Facetracker の口領域の上唇と下唇の距離から、口の開閉を検知することで行っている。



図 36 ステージ 1：口の開閉

- ・ステージ 2 : 舌の突き出し

このステージでは口を開いた次のステップである，舌を突き出すことを教える．まずこのステージ 2 では，ステージ 1 の口の開閉の画面から始まる．そして口を開いていることが認識されたときに，図 37 のような舌を突き出すような教示が出る．口を閉じてしまうとまた教示は口の開閉に戻る．



図 37 ステージ 2 : 舌の突き出し

- ・ ステージ 3 : 舌の左右の移動

舌の突き出しを三回達成すると最後のステージである舌の左右の移動を行うステージ 3 に移行する。ステージ 2 と同様に、始めは口の開閉の画面から始まる。そして口が開いているのが確認された後、舌の突き出しの画面に入り、さらに舌の突き出しが確認されると、舌の左右の移動の教示画面に移行する。図 38 のように、舌の移動方向は男の子のイラストと矢印にて示される。舌が右に移動し成功すると、次は左と、交互に移動方向が変わる。

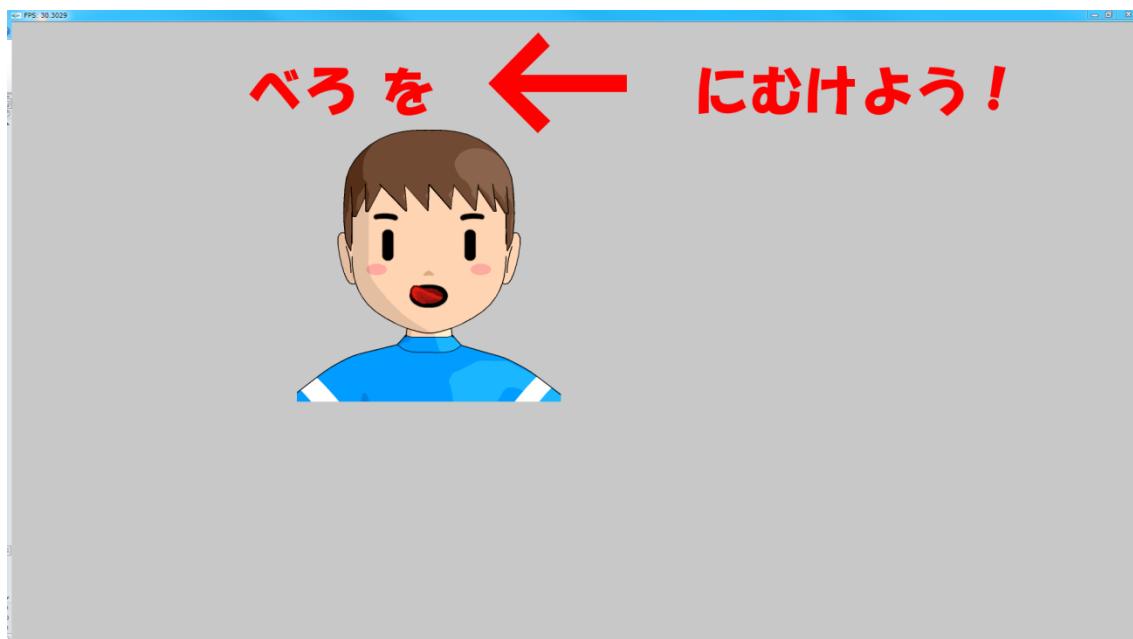


図 38 ステージ 3 : 舌の左右の移動

---

## 第8章

# システム 3 でのユーザテスト

## 8.1 概要

システム 1 とシステム 2 でのユーザテストと同じく，システム 3 でのユーザテストを調布特別支援学校の協力を得て行った．システム 3 の体験者はダウン症の児童 2 名であった．実施日は児童 1 が 2013 年 7 月 26 日，児童 2 が 2013 年 5 月 15 日であった．

## 8.2 手順・内容

まず始めにゲームアプリケーションの遊び方を理解させるためにいくつかのステージを 1 分程度プレイしてもらった．その時間で試してもらうと同時に，どのステージから始めるかをプレイ状況を見て決定した．ゲームの操作を理解し，舌によるカーソルの操作ができる児童は最初からゲームアプリケーション

---

をやってもらい、そうでない児童の場合はインストラクションのステージを先に試した後にゲームアプリケーションへ移行した。

慣らしのプレイの後は、3～5分間インストラクションやゲームをプレイしてもらった。児童のプレイ中に我々は行動観察を行い、児童の担任の先生には児童の性格、このシステムに興味を持って楽しんでいるか、児童が十分に舌を出してプレイできているか、といった項目を用意した紙に記入してもらった。

## 8.3 結果

### 児童1 (小学1年生・男子・中度のダウン症)

普段は活発で行動的な性格であるという。

慣れない環境のためか緊張しており、舌を使ってのプレイはほとんど何もできなかった。先生からは、今回は緊張してしまっていたようだが、慣れて緊張しなくなれば、彼の障がいの重さであれば使えるようになるだろうというコメントを得た。ただし、舌を使って操作するということの理解はあまりできていないようだったというコメントもあった。

ゲームアプリケーションのプレイでは、どのステージも誤認識等で偶然魚を取れたに過ぎなかった。インストラクションのステージも実施したが、最初のステージである口の開閉が偶然と故意で一回ずつ認識されたのみであった。ゲームアプリケーション自体には十分興味を示しており、魚を見て喜ぶなどの様子を示していた。

## 児童2 (小学6年生・女子・中度のダウン症)

彼女は好奇心旺盛な性格であるという。

彼女は緊張などはしておらず、ゲームに強く惹かれている様子で、終始楽しんで取り組んでいた。しかし舌による操作に関しては、舌は出せたが、出したまま維持することができずにすぐに口の中に戻ってしまった。そのため一瞬しか舌が認識されないため、ゲームでは偶然による魚の捕獲がほとんどであった。舌を使ってプレイできていたかという項目では、先生からの評価は不十分という結果になった。

インストラクションにおいても、口の開閉のステージは偶然の操作も含めてクリアできたものの、舌の突き出しのステージでは一度も達成することができなかった。

## 8.4 システム3の問題点・改良案

### 問題点3-1 インストラクションで使用したイラストの顔について

インストラクションの舌を出すステージは図 37 のように、画面に映るイラストの男の子が斜めを向いているが、その顔の向きまで真似してしまう児童がいた。このイラストを斜めにした理由としては舌を突き出している様子が正面からでは見た目が分かりにくかったためであるが、このような事態を回避するためには例えわかりにくくなくても、正面から見たイラストを使用すべきと言える。



### 問題点3-2 インストラクション手法の改良案

今回初めてのインストラクションのステージを設けて実験に望んだが、2名のダウン症の児童の様子から、インストラクションの効果としては十分ではなかったと言える。

今回のインストラクションではイラストを使ったアニメーションで指示を表現したが、別の方法として、イラストではなく実際の人による舌の移動などの動画を提示するという案もあり、こちらの方法でも試してみる価値がある。

今回のインストラクションのステージでは、口の開閉、舌の突き出し、舌の左右への振りという3ステップに分けたが、このように1ステージにつき一個の指示に絞ったことは、児童の理解力を考慮すると適していると先生から評価された。

## 第9章

# 深度データ処理手法の評価実験

開発したシステムで使われている深度データ処理手法である, Nearest Point 法と Nearest Area 法に関する評価実験を行った.

### 9.1 Nearest Point 法での舌認識の精度評価

#### 9.1.1 実験概要

ここでは Nearest Point 法による舌尖位置の検出精度について, アクリル板に当てた舌尖の位置を測定することで評価する. 実験の概要図を図 39 に示す. 実験装置は Kinect, アクリル板, 顎台で構成されており, Kinect とアクリル板間の距離は 70cm で固定している. 図 40 に示すように, アクリル板には縦 4×横 7 のドットが刻まれており, ユーザはこのドット上に舌尖を当てて位置を測定する. なお各ドットの間隔は 10mm であり, アクリル板の縁とそれに隣接するドットとの間隔は 5mm である. なおアクリル板は赤外線透過するため, Kinect の深度測定に対してはほぼ透明な存在として扱うことが可能である.

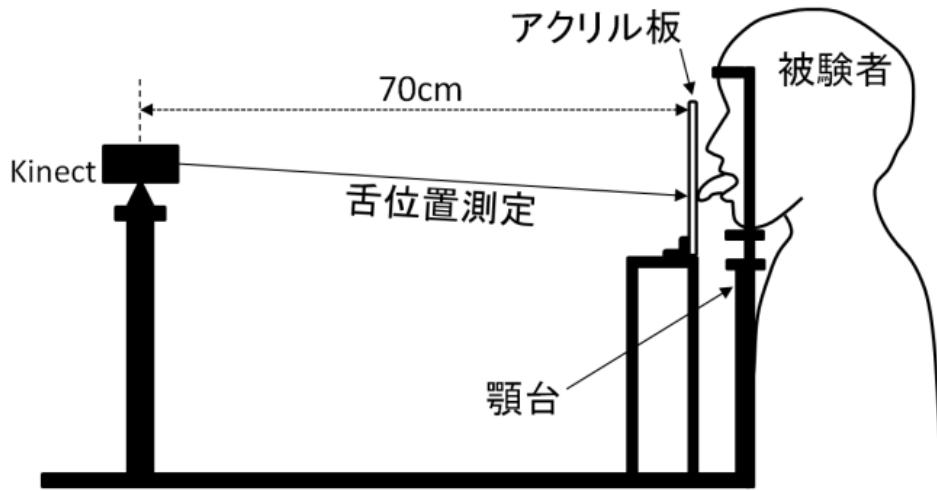


図 39 精度評価実験の構成

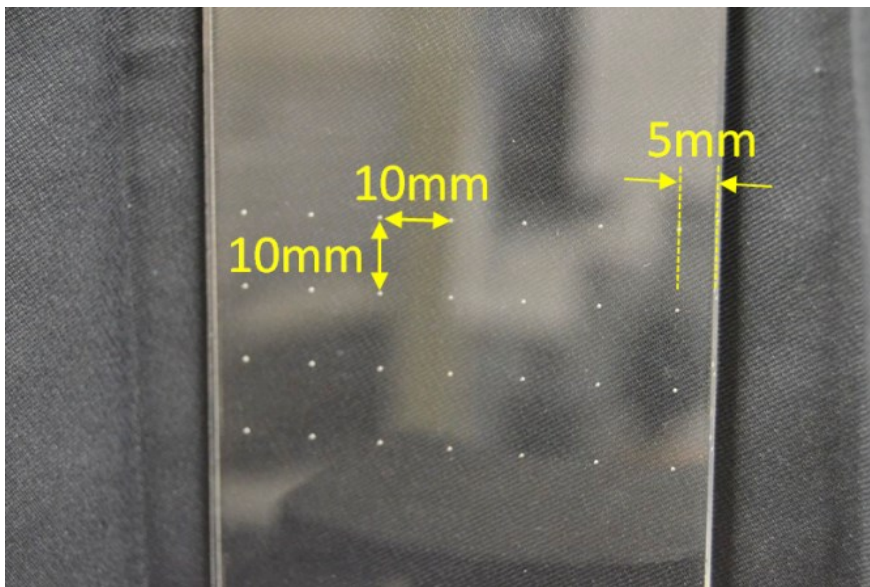


図 40 アクリル板上のドットパターン

---

### 9.1.2 実験手順

実験は以下の方法で行う。

1. 顎台を用いて被験者の頭部を固定する。
2. 舌先をアクリル板上のドットに当てて固定する。
3. Kinect で舌先の位置座標(ピクセルデータ)を 150 フレーム(約 5 秒間) 記録する。
4. 2~3 の操作をアクリル板上の全てのドットにおいて行う。なお、舌先を当てる順番はランダムである。また被験者の舌がアクリル板に到達しないドットは測定を行わないこととした。
5. アクリルのドットパターンを、Kinect からの RGB 画像にて記録する。

なお本実験では、顔及び目の認識を省略し、目領域を手動で設定している。目領域の手動設定以降は、本システムに準拠した処理で測定を行なっている。これは、顎台やアクリル板等の影響で顔及び目認識が困難になることと、頭部が完全に固定されていることを踏まえた上で決定した。

計測精度は、Kinect で得られた舌の座標と理論値との誤差を cm 単位で求めることで評価する。具体的には、まず図 41 に示すように、ドットパターンの左上を原点に置く。次にアクリル上の各ドットの実際の空間座標(単位:cm)を

$$M_{ij} = \begin{pmatrix} M_{x_{ij}} \\ M_{y_{ij}} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9.1)$$

とする。次に、RGBカメラで得られる各ドットの pixel 座標(単位:pixel)を

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} A_{x_{ij}} \\ A_{y_{ij}} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9.2)$$

とする。このとき、pixel 座標を cm 座標へ変換する行列 $T$ を考えると、以下の式が成り立つ。

$$M_{ij} = T \cdot A_{ij} \quad (9.3)$$

ここで $(i,j)$ 番目の要素が $A_{ij}$ であるような行列 $\mathbf{A}$ を考える。そしてこの行列 $\mathbf{A}$ の擬似行列より変換行列 $T$ が得られることとなる。この変換行列 $T$ を用いて Kinect が得る舌先の pixel 座標 $P_{ij}$ を空間座標 $S_{ij}$ に変換し、 $S_{ij}$ と $M_{ij}$ を比較する。

$$S_{ij} = T \cdot P_{ij} \quad (9.4)$$

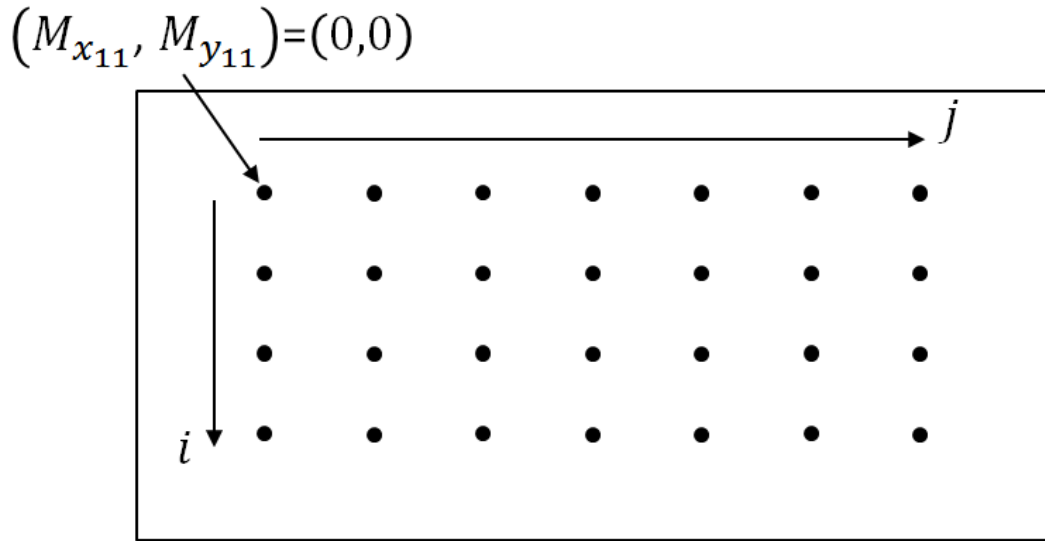


図 41 アクリル板のドットの表記

### 9.1.3 実験結果 基準ドットパターンの計測

変換行列を導出するために、ドットパターンの全てのドットについて、RGB 画像上の pixel 座標を計測する。RGB 画像の撮影は暗室内でアクリル板上部から LED 照明を当てて各ドットの明度を強調させた上で行った。実際に記録された画像を図 42 に示す。この画像を用いて各ドット付近の輝度値を調べ、その最大値をドットの pixel 座標とした。この時の分布を図 43 に示す。アクリル上の実際の空間座標は既知であるので、これらの値から変換行列  $T$  を得ることができる。

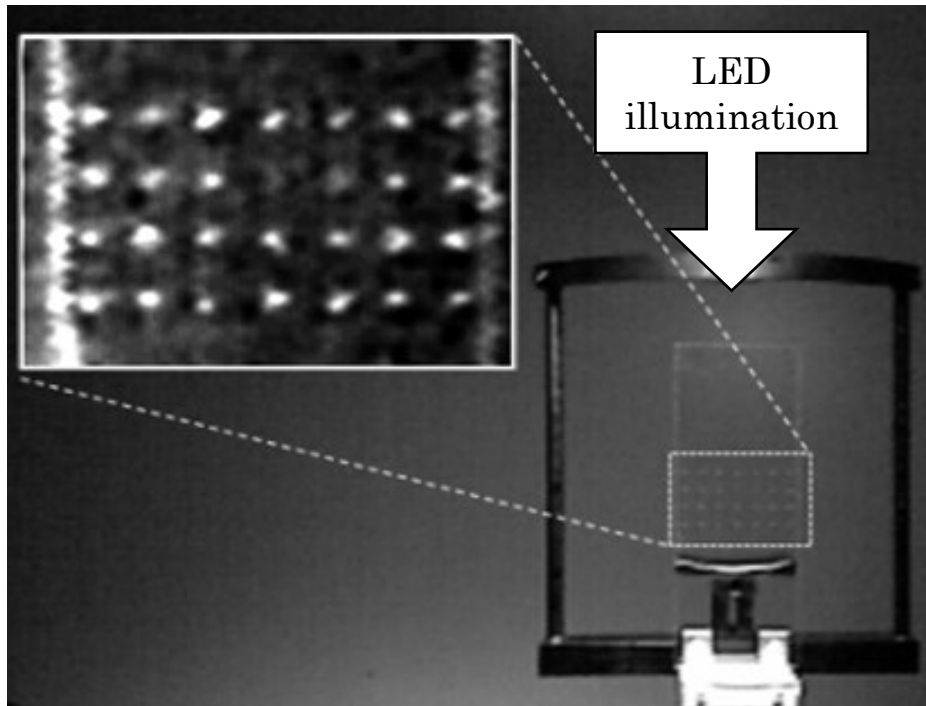


図 42 Kinect で記録したドットパターン

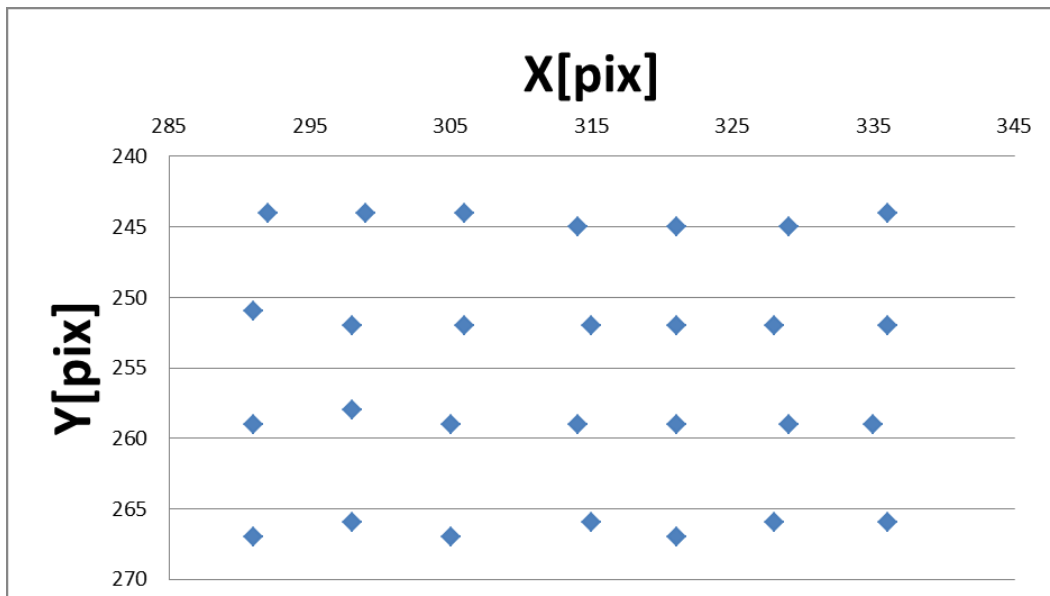


図 43 輝度値計測による各ドットの座標

#### 9.1.4 舌先座標の計測

舌先座標の計測は 20 代の健康な男性 5 名によって行われた。なお、顎台とアクリルとの距離は被験者によって 1~3cm の範囲で調整した。これは舌の物理的長さに個人差があることを考慮したためである。ただし Kinect とアクリル板の間の距離は固定している。また、ノイズなどの影響により測定が安定しない可能性を考慮し、1 点につき 3 回の測定を行った。最終的な舌先座標の決定は、得られた 3 つの測定データ群において最も安定しているデータ群を採用した。実験手順に示しているように、図 41 に示した  $i$  行  $j$  列目のドットの 1 回の測定について、150 フレーム分の  $(x, y)$  座標、計 150 個分が記録される。この 150 個の  $(x, y)$  座標の分散が最も小さいデータ群を最も安定なデータとした。次いで、この安定なデータ群について、記録されている 150 個の座標の平均値を舌先の pixel 座標  $P_{ij}$  とした。これを測定した全てのドットについて行い、得られた変換行列  $T$  によって舌先の空間座標  $S_{ij}$  を求めた。図 44 にアクリル上の目標地点(実際のドットの座標)と、空間座標に変換した舌先座標を示す。なお、舌先の各位置は全被験者の空間座標  $S_{ij}$  の平均値を用いた。また、被験者によって舌の到達範囲に個人差が生じており、図 44 は全被験者が到達できたドットの範囲のみの結果である。



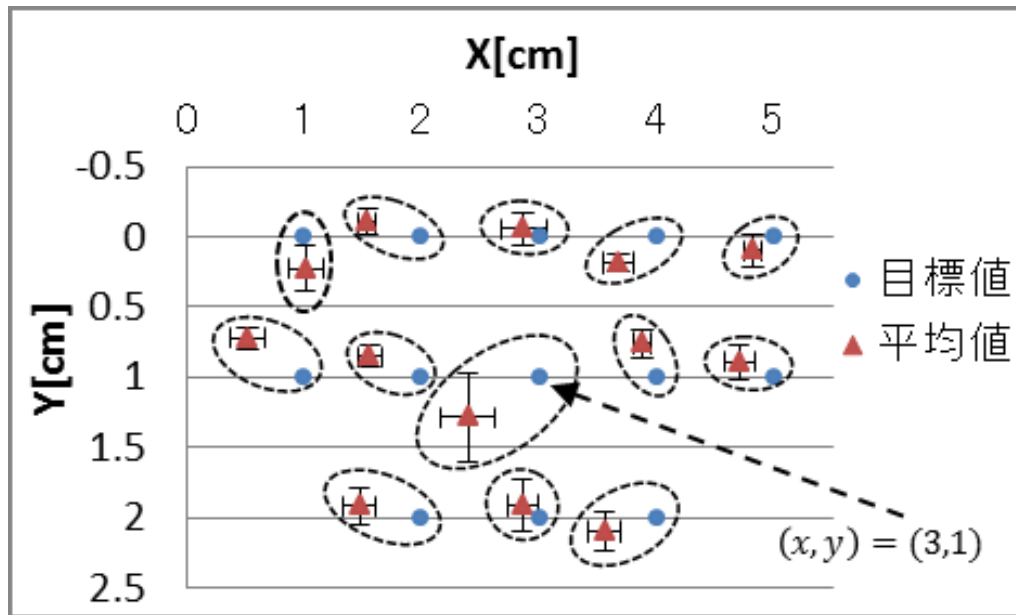


図 44 目標地点に対する実際の舌尖位置

#### 9.1.5 精度実験の考察

図 44 の結果から、全体的に 0.5cm 程度の精度で舌尖の計測ができていたことがわかった。舌の運動を捉えるという観点において、十分な位置精度が実現できているものと考えられる。また、図 44 中の  $(x, y) = (3, 1)[\text{cm}]$  付近が今回の実験環境で最も容易に舌を到達させることができる点であったが、この点において大きな分散が生じているのがわかる。これは、舌を最も到達させ易いために舌が変形し、アクリル板との接触面積が大きくなってしまふことが原因と考えられる。さらに、舌をアクリルに接触させている際に、舌との温度差により接触点付近が微小ながらも曇ってしまう現象が見られた。従ってこれらの現象が Kinect の計測誤差に悪影響を及ぼした可能性も考えられる。

---

## 9.2 Nearest Point 法と Nearest Area 法の舌認識の安定性の比較

### 9.2.1 実験概要

本研究で使用した舌認識手法に関して、システム 1・システム 2 で使用した Nearest Point 法と、システム 3 で使用した Nearest Area 法の安定性の比較を行った。

被験者は健康な 20 代男性 4 名であり、今回の実験では 9.1 節と同じく顎台を使用したため、顔認識は行わず、口付近の画像を 50pixel×50pixel を手動で設定した。このため、Nearest Area 法の舌先の検出に関しては、顔認識や回転への対応が追加されている点以外は Nearest Point 法と同じ処理をしているので、この実験では Nearest Point 法と同じものと見なせる。

この実験は 9.1 節の実験と基本的に同じ構成である。実験では 1cm 刻みでドットの付けられたアクリル板、顎台を使用する。使用する深度・RGB カメラは Kinect から Xtion PRO LIVE に変更した。Xtion PRO LIVE のカラー画像から見える pixel 上での各ドットの位置座標は、9.1.3 節と同じく、暗室にてアクリル板上部から光源を当てて得られた画像の輝度値の高いものを選んだ。実験の様子を図 45 に示す。

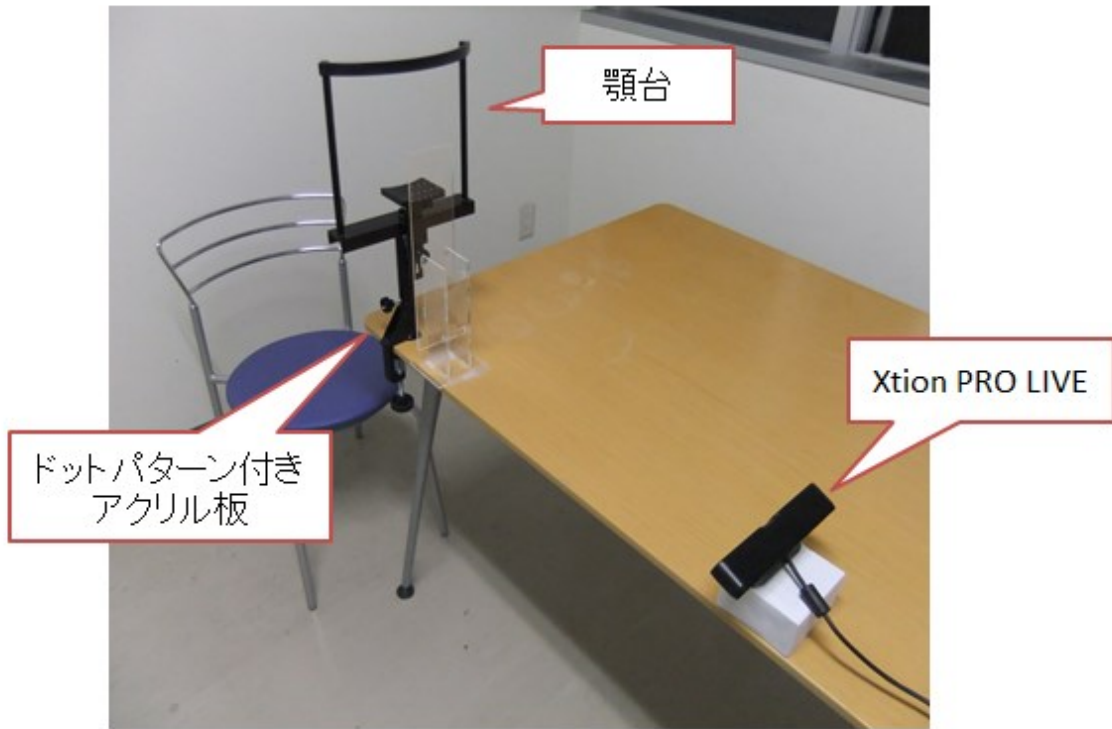


図 45 Nearest Point 法と Nearest Area 法の安定性比較実験のハードウェア構成

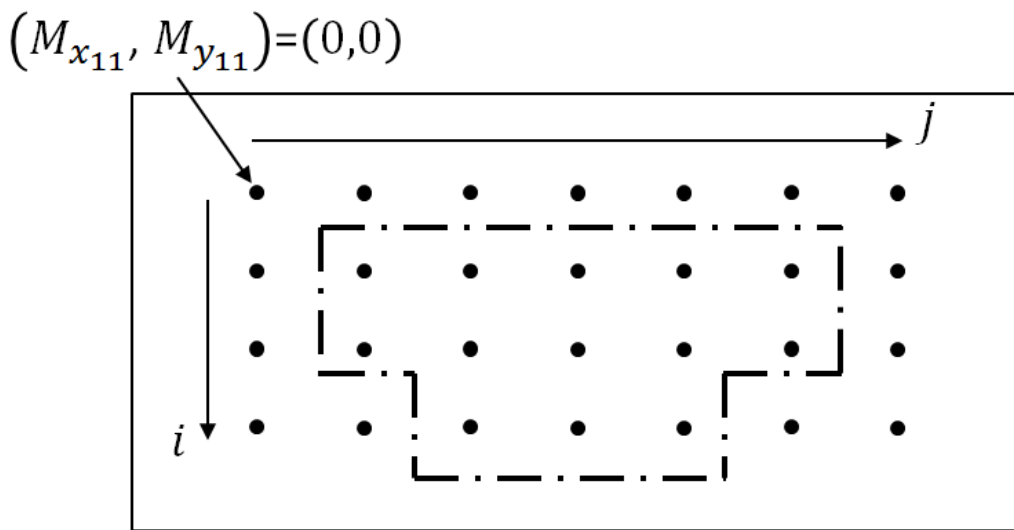


図 46 使用したドット (破線領域の内側)

### 9.2.2 実験手順

実験手順は以下の通りである。

1. 被験者の舌がアクリル板に届く位置に顎台を調節したのち、被験者の顔を顎台にて固定する。
2. ランダムに指定されたドットに舌を置き、Nearest Point 法と Nearest Area 法の両手法で検出された舌先の pixel 位置を 150 フレーム分(約 5 秒間)同時に記録する。
3. 1~2 を繰り返し、各ドットにつき 3 回の計測を行った。

使用したドットは全被験者が届いた 12 点を使った。図 46 に使用したドットを示す。

### 9.2.3 データ処理

各ドットにつき各手法で 450 個の位置データが保存され、対応するドットと検出された舌先の pixel 座標での距離とその距離の分散を求め、被験者ごとに全ドットの平均を求めた。

### 9.2.4 実験結果と考察

表 3 に Nearest Point 法と Nearest Area 法の安定性比較実験の結果を示す。尚、両手法を比較して優れている方の値を太字で示している。この表から見て分かる通り、Nearest Area 法の方が Nearest Point 法よりも平均距離、分散ともに良いデータがとれているのが分かる。

この実験結果での、Nearest Point 法および Nearest Area 法の両手法において、被験者によって値が大きく変わる原因としては、被験者の舌の形状によるものが大きいと考えられる。被験者 2, 3 は舌尖の形状が比較的太く、被験者 1, 4 は舌尖が比較的細かった。舌尖が太い場合、細い場合に比べて深度値で候補を絞ることが難しくなるため、精度が悪くなる傾向があると考えられる。

表 3 Nearest Point 法と Nearest Area 法の安定性比較実験の結果

	平均距離 [pixel]		分散 [pixel <sup>2</sup> ]	
	Nearest Point	Nearest Area	Nearest Point	Nearest Area
被験者 1	4.2	<b>3.1</b>	4.8	<b>1.0</b>
被験者 2	5.2	<b>2.1</b>	<b>7.6</b>	7.9
被験者 3	5.9	<b>5.3</b>	17.2	<b>12.0</b>
被験者 4	7.3	<b>3.9</b>	15.3	<b>3.1</b>
被験者平均	5.6	<b>3.6</b>	11.2	<b>6.0</b>

---

## 第10章

### まとめと今後の展望

#### 10.1 本研究の達成の度合

本研究では、目的として“手間や人手がかからないトレーニング手法を考案し、実際にダウン症の児童の教室で行うことが可能なシステムを構築すること”を掲げた。この目的に対しての達成の度合を述べる。

- ・ 提案手法によって、非接触な舌認識が可能になった。これによって特別な装置の装着などの準備、衛生管理、誤飲などの注意という手間の必要がないまま、舌のトレーニングが行えるようになった。
- ・ 提案手法による舌認識手法とコンピュータを使ったゲームアプリケーションとの連携によって、児童は単純でつまらない舌のトレーニングを行わずに済み、むしろゲームのプレイによって楽しく、モチベーションも高い状態で行うことができるようになった。同時に先生は児童にとって

.....

退屈な舌トレーニングを行ってもらったための鼓舞などから解放されるようになった。

- ゲームアプリケーションについて理解し、舌で操作するということがわかった児童は先生の補助もなく、単独でゲームのプレイをすることができた。しかしながら、舌による操作を理解するまでには少なからず先生の補助が必要だった。
- この舌トレーニングシステムに必要なものは汎用のパソコンとディスプレイ、そして 2 万円程度のセンサのみであり、また、システム一台で何人もの児童が使用できるため、他の手法よりも導入コストは比較的低い。
- このシステムは太陽光の対策さえすれば実際に学校の教室で使用することが確認できた。
- 現状のこの舌トレーニングシステムを十分に利用できるダウン症の症状の重さのレベルとしては、舌を口の外に突き出したまま維持ができ、そのまま舌を上下左右に動かせる程度のものである。この舌の運動ができない児童に関してのゲームアプリケーションやインストラクションのコンテンツは今後の課題の一つである。

---

## 10.2 解決すべき課題

本研究ではシステムの開発と実験を繰り返し、改良を加えていったが、ここでは現時点で未解決の課題について述べる。尚、表 4 に本研究で開発した 3 つのシステムの機能の比較を載せた。

### 10.2.1 インストラクションにおける操作方法の伝え方の改善

システム 3 で導入したインストラクションは、児童への視覚的な操作方法の説明として、口頭での言語的な説明よりも児童の関心・注意を惹きつけるため、より説明の効果があることは分かった。しかしながら、現在のままでは注意は惹きつけられても肝心の操作方法に関しては十分に伝えることができていない。そのため、実際の人でのプレイ映像を見せるなどの方法を試し、より効果的な説明方法の模索が必要である。

## 10.3 今後の展望

### 10.3.1 長期的・日常的なユーザテスト

現段階では児童 1 人につき 5 分程度の体験のみであるため、環境の違いなどで緊張してしまう児童や、短時間のため操作等が理解できないまま終わってしまう児童が多く見られた。このような児童には慣れのために複数回のシステムの体験が必要である。また、これとは反対に、5 分程度の体験の中で、舌による操作を理解し、十分にゲームを楽しんでいた児童でも、複数回のプレイでは簡



単に飽きてしまう可能性も十分にある。

これらの理由から、システムを日常的に使用できる状態にしておき、多くの体験の機会を与え、より信頼性・実用性のあるユーザテストを行うことが望ましい。

また、その際は客観的なデータの取得も行いたい。例えば体験ごとの舌の突き出し時間などを計測することで、回を重ねることでその時間の長さがどう変化するかが分かり、舌トレーニングの一成果として使えるだろう。

### 10.3.2 システムのプレイと鍛えられる舌の筋肉に関する評価

本研究では、非接触な舌認識手法を開発し、それをゲームアプリケーションと組み合わせることで、ダウン症児童が楽しく自発的に舌をトレーニングできる可能性までは提示することができた。この先の目標としては、このゲームをプレイすることによって、舌の筋肉はどの程度適切にトレーニングされているのかを調べ、よりトレーニングにふさわしい運動になるようなゲームアプリケーションの製作を行いたい。そのためには言語療法士などの専門家の協力を得て、10.3.1で述べたユーザテストと並行して評価を行っていくことが望ましい。

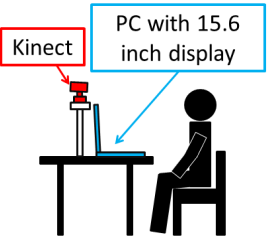
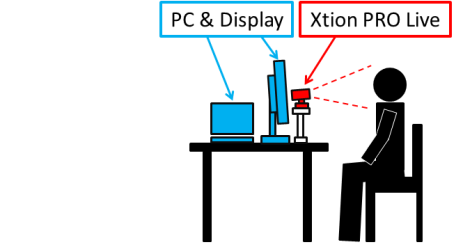


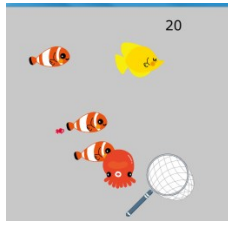
---

## 10.4 結論

本研究では、非接触による舌認識手法を提案し、さらにその手法を使用したダウン症児童用の舌トレーニングシステムを開発した。提案した舌認識手法は、実際の教育現場において重要な、衛生面や誤飲に対しての安全性、導入時の金銭コストの低さ、先生の手間のかからなさという点で他の手法よりも優れている。そしてその提案手法を使用したゲームを作成し、これによって児童がゲームをプレイすることで自ずと舌のトレーニングを行えるようになるシステムを開発した。そして我々は開発したシステムを実際に知的障害児童の通う特別支援学校のダウン症児童に試してもらい、そこでのフィードバックと先生からの改良案を得ることで、システムの改良を重ねていった。

そして開発したシステムによって、舌で操作することを理解できたダウン症児童は、上下左右に舌を動かし、楽しんでゲームをプレイすることが観察できた。プレイができなかった児童に関しては、操作方法が理解できなかった場合や、実験時の周りの環境の変化に不慣れでいたことが主な原因のようであったが、少なくとも彼らもゲームには非常に興味を持っていることは確認できた。今後はより多くのダウン症児童も利用できるように、理解しやすいようなシステムを開発し、また、より実用的なシステムのための長期的なユーザテストを行いたい。

表 4 作成したシステムの比較まとめ

	システム 1 (V1)	システム 2 (V2)	システム 3 (V3)
RGB・深度センサ	Kinect	Xtion LIVE PRO	
ディスプレイ (サイズ)	ラップトップ付属 (15.6 インチ)	外部ディスプレイ (21.5 インチ)	
ハードウェア構成			
顔認識	OpenCV 付属顔認識 (Haar-Like 特徴量)	Facetracker	
顔認識精度の確認	無		有
深度データ 処理手法	Nearest Point 法		Nearest Area 法
その他の機能	無	顔の回転に対する深度値の補正機能 顔の角度異常の通知機能	
ゲーム アプリケーション			
ステージ数	1	1	3
インストラクショ ンのステージ	無	無	有 (口の開閉・舌の突き 出し・舌尖左右移動)

---

## 参考文献

- [1] 木村堯, 野嶋琢也: SITA:深度情報を利用した舌運動検出手法, 情報処理学会 インタラクション 2012, pp.641-646, 2012
- [2] Slyper, R., Lehman, J., Forlizzi, J. and Hodgins, J. A Tongue Input Device for Creating Conversations, In Proc. UIST 2011, ACM Press (2011), 117-126.
- [3] Struijk J.J., Lontis, E.R., Bentsen, B., Christensen, H.V., Caltenco, H.A., Lund, M.E., "Fully integrated wireless inductive tongue computer interface for disabled people", Engineering in Medicine and Biology Society 2009. EMBC 2009. Annual International Conference of the IEEE , 3-6 Sept. 2009, 547-550.
- [4] Saponas, T.S., Kelly, D., Parviz, B.A. and Tan D.S. Optically Sensing Tongue Gestures for Computer Input. In Proc. UIST 2009, ACM Press (2009), 177-180.
- [5] Xueliang Huo, Wang, Jia, Ghovanloo, M., "A Magneto-Inductive Sensor Based Wireless Tongue-Computer Interface," Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on , vol.16, no.5, 2008, 497-504, DOI: 10.1109/TNSRE.2008.2003375

- 
- [6] Liu, Li., Niu, S., Ren, J. and Zhang, J. Tongible: a non-contact tongue-based interaction technique. In Proc. ASSETS 2012, ACM Press, (2012), 233-234.
- [7] Saragih, J., Lucey, S. and Cohn, J. Deformable Model Fitting by Regularized Landmark Mean-Shift, International Journal of Computer Vision 91, 2 (2011), 200-215.
- [8] わかば出版株式会社, 山口 秀晴, 大野 肅英, 嘉ノ海 龍三: MFT 入門—初歩から学ぶ口腔筋機能療法, 第1版, 2007
- [9] 井出 吉信: いつまでもおいしく食べよう: 摂食・嚥下のメカニズム, 歯科学報, vol.111, no.3, pp.307-312, 2011
- [10] 高橋 宏明, 苦瓜 安彦: 口の構えと舌の形が日本語母音明瞭度に及ぼす影響について, 音声科学研究, vol.2, pp.71-82, 1962
- [11] 大岡 貴史, 拝野 俊之, 弘中 祥司, 向井 美恵: 日常的に行う口腔機能訓練による高齢者の口腔機能向上への効果, 口腔衛生学会雑誌, vol.58, no.2, pp.88-94, 2008
- [12] Penfield W, Rasmussen T (1950): The Cerebral Cortex of Man: A Clinical Study of Localization of Function, 248 pp. Macmillan, New York.
- [13] “Hasso-Plattner-Institut: IT-Systems Engineering”, [http://www.hpi.uni-potsdam.de/studium/lehrangebot/itse/veranstaltung/masterprojekt\\_hci\\_project\\_motion\\_capture\\_using\\_multiple\\_kinect\\_dept\\_h\\_cameras.html](http://www.hpi.uni-potsdam.de/studium/lehrangebot/itse/veranstaltung/masterprojekt_hci_project_motion_capture_using_multiple_kinect_dept_h_cameras.html), 最終アクセス日時 2014 年 1 月 17 日

- 
- [14] E.R. Kandel, J.H. Schwartz, and T.M. Jessell, Principles of Neural Science, 4th ed., New York: McGraw-Hill, 2000.
- [15] R.G. Oliver and S.P. Evans, "Tongue size, oral cavity size, and speech," The Angle Orthodontist, pp. 234-243, 1986.
- [16] "openFrameworks", <http://www.openFrameworks.cc/>, 最終アクセス日時 2014 年 1 月 23 日
- [17] "OpenCV", <http://opencv.org/>, 最終アクセス日時 2014 年 1 月 23 日
- [18] "Eigen", [http://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main\\_Page](http://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page), 最終アクセス日時 2014 年 1 月 23 日

---

## 発表文献

- [1] Masato Miyauchi, Takashi Kimura, and Takuya Nojima. 2012. Development of a non-contact tongue-motion acquisition system. *UIST Adjunct Proceedings '12*. ACM, New York, NY, USA, 75-76. DOI=10.1145/2380296.2380329  
<http://doi.acm.org/10.1145/2380296.2380329>
- [2] Masato Miyauchi, Takashi Kimura, and Takuya Nojima. 2013. A tongue training system for children with down syndrome. *UIST '13*. ACM, New York, NY, USA, 373-376. DOI=10.1145/2501988.2502055  
<http://doi.acm.org/10.1145/2501988.2502055>

---

## 謝辞

本研究は多くの方のご協力によって成し遂げることができました。

野嶋研究室の木村堯先輩にはこの舌の研究の礎を築いて頂きました。木村先輩の舌認識の成果がこの研究の芽となり、ここまでの進展に繋がりました。また、研究を引き継ぐに当たり、プログラムや実験に関しての助言には大変お世話になりました。

本研究のユーザテストは調布特別支援学校の先生方及び児童と親御さんのご協力がなければ行うことはできませんでした。特に倉田真夕教諭、桐山知行教諭からは、多くの改善案や助言を頂き、そのお陰でより良いシステムの開発を進めることができました。皆様、研究にご協力して下さい大変ありがとうございました。

この研究は野嶋琢也准教授の的確な助言・添削等のご協力があったものです。その協力のお陰で、2012年は採択率4割未満のUISTのポスター発表、2013年では採択率2割未満のUISTの口頭発表という素晴らしい成果を得ることができました。そして、野嶋准教授のお陰でこの二年間の大学院生活では、日常の研究やデモ・特別支援学校での実験・国際学会での発表・ベルギー留学と、数多くの刺激に満ちた貴重な体験を経験することができました。今後の人生においてもこれ以上の体験はなかなかできないと思います。改めて心より感謝致します。



---

普段の研究生活において、小池教授・野嶋准教授・佐藤助教には、研究室の雰囲気も含めて、快適な研究環境を提供して頂き、大変感謝しております。また、苦楽を共にした同期のみんなと先輩・後輩の皆さんのお陰で、毎日の研究生活は飽きることはありませんでした。ありがとうございます。

また、UIST2013 の口頭発表は情報科学国際交流財団（IISF）からのご支援のお陰で、何一つ不自由なく順調に行うことができました。大変感謝しております。

学会や留学などの手続きでは、電気通信大学の事務員の皆様によくお世話になりました。ありがとうございました。

ベルギーの University Hasselt での研究留学では、Johannes Schöning 教授には大変お世話になりました。研究以外でも非英語圏での生活で不自由や不安なことも多くありましたが、いつも親身になって接して下さったお陰で、充実した留学生活を送ることができました。心から感謝しております。

最後になりますが、私の大学院進学を応援し、支えてくれた家族に心から感謝申し上げます。