

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

下顎運動認識に基づくハンズフリー操作手法

安藤 宗孝

指導教員 志築 文太郎

2017年 1月

概要

種々の顎の動き（以降、下顎運動）を認識するシステムおよびこれを用いた情報端末操作手法を示す。本手法は口を開ける、口を閉じる、および顎を左に動かすなどの下顎運動を認識し、認識結果を情報端末などに対する操作とする手法である。下顎運動による操作は手を使う必要がないため、情報端末に対して手を使った操作ができないような状況においても使用することが可能である。本手法を使用するにはユーザはイヤホン型のセンサ部を耳に装着しさえすればよい。本手法にて用いるセンサ部は市販の外耳道挿入型イヤホン、いわゆるカナル型イヤホンと同様の形状をしており容易に装着できる。本論文は、下顎運動を認識する方法を主題とし、その動作原理、実装方法、著者実験、下顎運動認識精度評価実験、および本手法を用いたアプリケーション例を述べる。また、提案手法の改善点を議論し、今後の課題を述べる。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的とアプローチ	1
1.3	貢献	2
1.4	本論文の構成	2
第2章	関連研究	5
2.1	ハンズフリー操作手法	5
2.2	外耳装着インタフェース	5
2.3	口周辺の動きの認識	6
2.4	気圧を用いた周囲の状況や動作の認識	7
2.5	本研究の位置づけ	7
第3章	MimiSense	8
3.1	認識原理	8
3.2	認識対象とする下顎運動	9
第4章	実装	12
4.1	イヤホン型気圧センサ	12
4.2	下顎運動認識プログラム	15
4.2.1	学習フェーズ	15
4.2.2	分類フェーズ	16
第5章	予備実験	17
5.1	実験設計	17
5.1.1	実験機器	17
5.1.2	実験環境	17
5.1.3	実験タスク	17
5.2	結果	18
5.3	考察	18
第6章	下顎運動認識評価実験	21
6.1	実験設計	21

6.1.1	被験者	21
6.1.2	実験機器	21
6.1.3	実験環境	21
6.1.4	手順およびタスク	22
6.2	結果および考察	24
6.2.1	Per-user Classifiers	24
6.2.2	General Classifier	25
6.2.3	アンケート	25
第7章	アプリケーション例	28
7.1	音楽プレイヤー	28
7.2	画像ビューワ	28
第8章	議論	30
8.1	気圧の変化による影響	30
8.2	外耳道の密閉性による影響	30
8.3	機械学習に利用する特徴量	30
第9章	今後の課題	32
9.1	下顎運動の運動量認識	32
9.2	黙声母音認識	32
9.3	下顎運動以外の認識	32
9.4	提案手法の利用可能性	33
第10章	おわりに	34
	謝辞	35
	参考文献	35
	著者論文リスト	41
付録A	被験者実験の際に用いた各種書類	43
A.1	実験同意書	44
A.2	ビデオ画像の公開についての承諾書・承諾変更書	46
A.3	実験前アンケート用紙	47
A.4	実験後アンケート用紙	48
A.5	実験手順書	49

目次

1.1	耳の部位の名称および位置.	2
1.2	MimiSense: a)MimiSense 全体, b) イヤホン型気圧センサ (イヤホンに気圧センサを内蔵) , c) イヤホン型気圧センサを装着した様子.	3
3.1	顎の構造.	9
3.2	認識対象とする下顎運動.	10
3.3	下顎運動ごとの気圧値の変化 (左耳).	11
3.4	下顎運動ごとの気圧値の変化 (右耳).	11
4.1	イヤホン型気圧センサの構造.	12
4.2	回路図.	13
4.3	イヤホン型気圧センサを装着した図.	14
4.4	気圧センサにて気圧値を取得している空間.	14
5.1	交差検定における分割数を変えた際の認識率.	19
5.2	3分割交差検定における認識率.	19
6.1	実験の様子.	23
6.2	Per-user Classifier の 12 分割交差検定における認識率.	24
6.3	General Classifier における認識率.	25
6.4	アンケート結果.	27
7.1	音楽プレイヤーの操作割り当て.	28
7.2	画像ビューワの表示画面.	29

表 目 次

4.1 機械学習に利用した特徴量	16
----------------------------	----

第1章 はじめに

1.1 背景

日常生活において手が使えず、スマートフォンなどの情報端末（以降、端末）を操作できない場合がしばしば発生する。例えば、満員電車において手を動かすことができず聴いている音楽の早送りなどの操作ができない場合、手袋をつけているためタッチパネルの操作ができない場合、および両手に荷物を持っており端末への通知に対応できない場合などである。また、腕を骨折しているなど身体的理由により手を使うことができない場合もある。

このような場合において端末を操作するために、手を用いない、すなわちハンズフリーな操作手法が提案されている。例として、音声 [App16b]、足 [深堀 16]、視線 [EVBG15]、口および顎 [ATM⁺16] を用いた操作手法が挙げられる。我々はこれらの中でも顎、特に下顎運動をハンズフリー操作手法に用いる。下顎は上下、前後、左右、および回転など、多様に動かすことができ、かつ顎を見なくても意図したように動かすことができるという特徴がある。

1.2 目的とアプローチ

本研究にて、下顎運動を用いた、新しいハンズフリー操作手法を実現する。そのために下顎運動を認識するシステムとして、下顎運動による外耳道内の気圧変化を利用した下顎運動認識システム MimiSense を示す。図 1.1 は鼓膜、外耳道、および外耳の位置を表す。外耳道とは耳の穴の鼓膜より外側の部分である。図 1.2a に MimiSense 全体を示す。MimiSense は気圧センサを埋め込んだ外耳道挿入型イヤホン（以下、イヤホン型気圧センサ）（図 1.2b）を用いて、外耳道をイヤホンにて密閉した状態における外耳道内の気圧（以降、気圧値）を取得する。気圧値は、下顎運動を行う際に、下顎運動ごとに特徴的に変化する。この特徴的な変化を機械学習を用いて分類することにより、MimiSense は、口を開ける、口を閉じる、および顎を左に動かす等の下顎運動を認識できる。これらを連続的に組み合わせた下顎運動も認識できる。

MimiSense を使用するにはユーザはイヤホン型気圧センサを装着しさえすればよい（図 1.2c）。MimiSense にて使用するイヤホン型気圧センサは市販されている外耳道挿入型イヤホンを利用して作製可能であり、市販のイヤホンと同じ形状にて作製することができるため、容易に装着する事ができる。また、下顎運動は、端末を見ることなく操作することができるためアイズフリー操作もできる。MimiSense を用いて下顎運動を認識することにより、下顎運動認識に基づくハンズフリー操作手法を提案する。



図 1.1: 耳の部位の名称および位置.

1.3 貢献

本研究の貢献を以下に示す.

- 下顎運動を利用したハンズフリー操作手法の提案およびそれを実現するためのシステム MimiSense の実装
- 下顎運動に伴う外耳道の形状変化による外耳道内の気圧変化を, 気圧センサを用いて取得し, 取得した気圧値を用いて下顎運動の認識を行う方法の提案
- 被験者実験による MimiSense の性能評価
- MimiSense を利用したアプリケーションの実装

1.4 本論文の構成

1 章では, 本研究の背景, 目的とアプローチ, および貢献を示す. 2 章では, 本研究に関連する研究および手法を述べ, 本研究の位置づけを行う. 3 章では, 本研究の提案手法の原理, 対象とする動作を述べる. 4 章では, 本研究の提案手法を実現するために作製したハードウェア, およびその実装方法を述べる. 5 章では, 提案手法を用いて著者実験を行うことにより, 提案手法が下顎運動を認識できるかの評価を行う. 6 章では, 提案手法を用いて被験者実験を

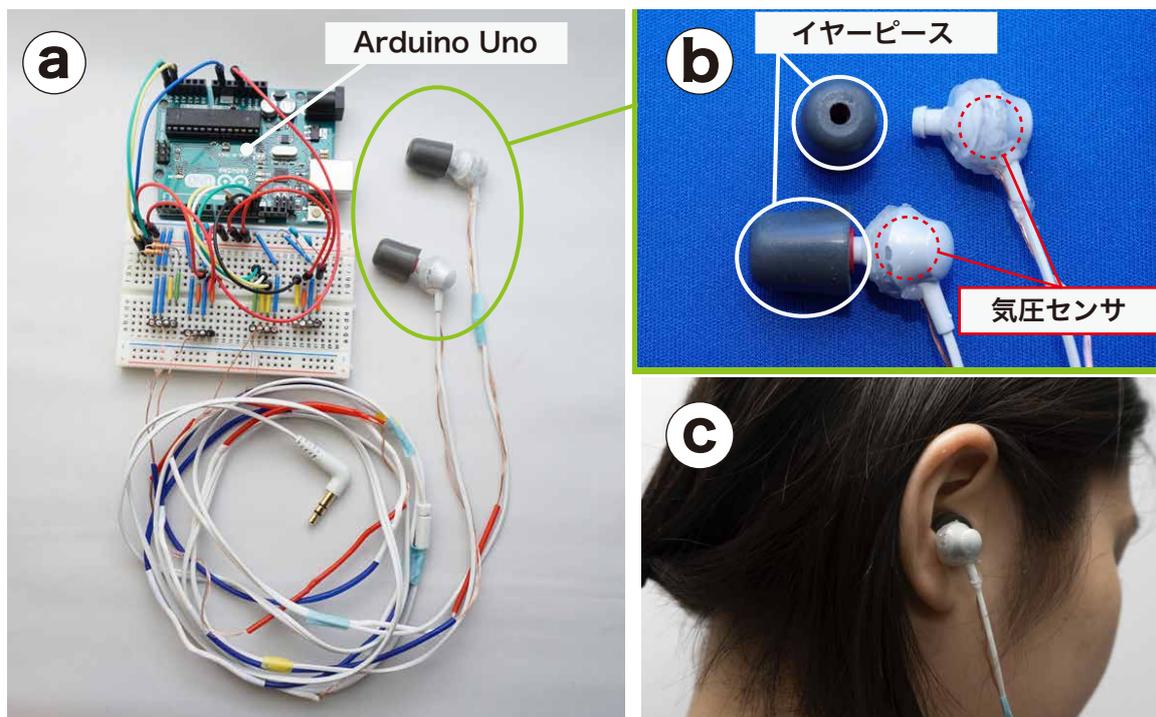


図 1.2: MimiSense: a)MimiSense 全体, b) イヤホン型気圧センサ (イヤホンに気圧センサを内蔵) , c) イヤホン型気圧センサを装着した様子.

行うことにより，提案手法の認識精度の評価を行う．7章では，提案手法を用いたアプリケーション例を示す．8章では，提案手法の改善点を議論する．9章では，提案手法の発展案をのべる．また，今後の課題を示す．10章では，本研究の結論を述べる．

第2章 関連研究

提案手法はイヤホン型気圧センサを外耳に装着することにより外耳道内の気圧を取得し、気圧値の変化を用いて下顎運動を認識、認識結果を端末の操作に利用するハンズフリー操作手法である。これまでに本研究と同様にハンズフリー操作を行うためのシステムおよび手法は多数提案されている。また、MimiSenseと同様に外耳装着型のインターフェース、顎周辺の動作の認識、および気圧を用いた状況、動作認識の研究も多くなされている。本章にて、ハンズフリー操作手法、外耳装着インターフェース、顎周辺動作の認識、および気圧を用いた周辺状況や動作の認識の研究を述べる。最後に本研究の位置づけを述べる。

2.1 ハンズフリー操作手法

これまでにハンズフリー操作手法の研究がなされている。例えば、Orbits [EVBG15] はスマートウォッチの画面に一定の速度にて円周上を回るオブジェクトを表示し、そのオブジェクトを見る際のユーザの視線の動きを計測することにより、スマートウォッチに対するハンズフリー操作を行う手法である。Blinkbot [MIH10] およびこめかみスイッチ [谷口08] は眼鏡のつるの部分に追加した距離センサにより、瞬きした時に発生するこめかみ周辺の肉の盛り上がりを検知し、これをハンズフリー操作に利用した。Strohmeierら [SVG12] は曲げセンサを用いて手首の角度を取得し、これを端末に対する操作に利用した。Scottら [SDYT10] はズボンのポケットに入れたスマートフォンに内蔵されている加速度センサの値を用いて、足の動きを認識し、端末に対する操作手法として利用した。Crossanら [CMBMS09] は頭の傾きを用いてカーソルを移動させ、スマートフォンに対する操作として利用している。小森谷 [小森14] はマスクにタッチパネル、距離センサ、またはマイクを取り付けることにより、舌の動きを認識し、端末に対するハンズフリー入力手法を提案した。本研究は下顎運動認識を用いて、これらの研究と同じく端末に対するハンズフリー操作手法を提案する。

2.2 外耳装着インターフェース

イヤホン、ヘッドホン、もしくは様々なセンサを外耳に装着することにより、様々な操作および動作の認識を可能とする外耳装着インターフェースの研究がいくつか挙げられる。真鍋ら [真鍋14] はヘッドホンをタップすることによる操作手法を提案している。この手法は、ヘッドホンのスピーカーを用いてタップを検出するため、新たなセンサを追加することなくヘッドホンへのタップを認識する。EarPut [LHH⁺14] はタッチセンサアレイを耳の後ろに装着するこ

とにより耳へのタッチを検出し、端末への操作に利用している。Universal Earphones [MSII12] はイヤホンに距離センサを取り付けることにより、イヤホンとユーザの皮膚との距離を計測し、イヤホンの装着状況を認識した。Septimu² [HSJ⁺12] はイヤホンに3軸加速度センサ、ジャイロセンサ、温度センサ、LED、フォトダイオードおよび2つのマイクを追加することにより、これらのセンサから取得した値を用いて、心拍数計測および姿勢検知を可能にした。Heartphones [PKG⁺09] はイヤホンにフォトリフレクタを取り付けることにより、心拍数を取得している。また、田山ら [田山 14] は外耳道を密閉することにより鼓膜および外耳道の微細な動きによって発生する圧力変化を圧力が取得可能な生体情報センサを開発し、これを用いることにより外耳道の圧力変化を計測し、ウサギの心拍数を取得している。SweepSense [LCH16] はイヤホンのスピーカーから発せられた超音波をイヤホンのマイクを用いて取得することにより、イヤホンを装着しているかどうかの認識を行っている。みみスイッチ [谷口 10] は鼓膜の方向に向けた距離センサをイヤホン内に設置し、設置した距離センサを用いてイヤホンと鼓膜の間の距離を測定することにより、鼓膜の微細な動きを検知し、顎および舌の動き、目の動き、および表情の認識などを行っている。Bedriら [BBP⁺15, BVT⁺15] はイヤホンに別々の方向を向いた3つの距離センサを追加することにより外耳の動きを取得し、心拍数、舌の動き、顎の動き、および瞬きを取得した。また、これとジャイロセンサを取り付けた帽子を併用することにより、日常における食事動作の認識も行った。The Tongue and Ear Interface [SBR⁺14] は舌に取り付けた磁石の動きを磁気センサを用いて取得すること、および距離センサを用いて外耳道の変形を取得することによって音声を伴わない発話認識、すなわち黙声認識を行った。真鍋ら [MFY15] はイヤホン型の電極を用いることによって目の動作に伴う眼電位の変化から、目の動きを認識し、これをジェスチャ入力に用いた。InEar BioFeedController [Mat13] はイヤホンにジャイロセンサおよび電極を取り付けることにより、頭の動きおよび電位の変化を取得し、顔の上下左右、瞬き、および耳の動きを認識する。

MimiSense は機械学習によって様々な下顎運動の外耳道内の気圧の変化を分類し、下顎運動を認識する。さらに、認識した下顎運動を端末に対する操作に利用する。

2.3 口周辺の動きの認識

MimiSense と同様に顎やその周辺の動作の認識を行った研究の例として以下が挙げられる。例えば、Bitey [ATM⁺16] は噛んだ時の音を用いて噛む動作を認識し、ハンズフリー操作に利用した。On the Tip of My Tongue [COK⁺14] は頬の外側に装着した布製圧力センサアレイを用いて舌の動きを認識し、その動きを端末への操作として利用した。加藤 [加藤 08] は、外耳道に挿入したチューブが顎運動に伴って変形することを利用し、咀嚼運動の検出を行った。また、ネミロフスキー [ネミ 10] は空気圧センサを用いて、人が動作した際に耳が発する耳道音響と呼ばれる微少な空気の振動を取得することによって、耳道音響を伴う動作を認識する手法を提案している。若本 [若本 95] は咀嚼を行った際に外耳道が変形することを利用して、外耳道内に圧力センサを挿入することにより咀嚼回数を計測した。青木ら [青木 10] は咀嚼時に発生する音をイヤホン型ケース内に設置したマイクを用いて取得することにより噛み数を

検出する装置を提案した。酒井 [酒井 99] は内部に気室を設けた装置を外耳道内に挿入することにより、咀嚼に伴う外耳道の変形によって装置が押され装置内部の気室が変形することを利用した咀嚼センサを提案した。Tongue-in-Cheek [GZVP15] は口の前に設置したドップラレーダを用いて、舌の位置変化を認識し、舌の動きを認識した。Saponas ら [SKPT09] は口の中に距離センサを内蔵したデバイスを装着することにより舌の動きの認識を行い、これをコンピュータへの操作に利用した。

一方、MimiSense はこれらの研究に対しイヤホン型気圧センサを外耳に取り付け気圧値を取得し、これを用いて下顎運動を認識する。酒井の提案した咀嚼センサは装置内部に気室を設けているが、MimiSense は装置内部に気室は設けず、イヤホンによって密閉した外耳道の形状変化を利用している。これによって装置を小型化できるなどの利点がある。

2.4 気圧を用いた周囲の状況や動作の認識

気圧を周囲の状況および動作の認識に用いた研究がある。Wu ら [WPM15] はドアを開けると屋内の気圧が変化することを利用し、スマートフォン内蔵の気圧センサを用いてドアの開閉を認識した。Ye ら [YGTL14] は気圧センサを利用し、高度によって気圧センサの値が変化することから建物内における階数認識を試みた。Emoballoon [中島 13] は内部に気圧センサおよびマイクロフォンを設置した風船を用い、風船へのジェスチャ入力を認識している。BaroTouch [高田 16] は防水タッチパネル端末において内蔵された気圧センサの値の変化から端末への押下圧力を取得する手法である。

MimiSense は下顎運動時の外耳道内の気圧の変化を気圧センサを埋め込んだイヤホンを用いて取得することにより下顎運動の認識を行う。

2.5 本研究の位置づけ

本研究は 2.1 節にて示した研究と同様に、ハンズフリー操作手法である。本研究においては下顎運動をハンズフリー操作手法として利用する。また、このための下顎運動の取得方法として外耳道の形状変化を利用する。

Bedri らの研究、みみスイッチ等と外耳道の動きを用いて下顎運動を取得する点において本研究は同様であるが、気圧センサを用いて下顎運動を取得している点においてこれらの研究と異なる。外耳道内の圧力変化を取得している点においては、加藤らおよび若本の手法と同様であるが、これらの手法は接触した際の圧力を利用しており、本研究は空気圧を利用する点において異なる。また、空気圧を利用する点においては、酒井、ネミロフスキーの手法等と同様であるが、酒井の手法は装置の内部に気室を設け、その気室内部の気圧を取得するが、本研究は外耳道内の気圧を取得する点において異なり、ネミロフスキーの手法とは、取得する圧力変化が耳道音響とは違い、外耳道の変形によるものである点において異なる。

第3章 MimiSense

MimiSense は、装着したユーザの下顎運動の認識を行うシステムである。本研究においては、MimiSense によって認識した下顎運動を端末に対する操作に利用する。下顎運動による操作は手を用いないため、ハンズフリーである。本章においては、外耳道内の気圧変化を用いて下顎運動を認識する原理および、認識対象とする下顎運動を述べる。

3.1 認識原理

MimiSense では下顎運動に伴う外耳道の形状変化を利用する。下顎が動くと、下顎骨の位置の変化によって外耳道が圧迫され外耳道の形状が変化する [祁君 16]。下顎運動による下顎骨の位置変化を図 3.1 に示す。下顎骨は下顎の骨全体を指す。下顎骨の後方に位置する突起を関節突起と呼び、下顎頭は関節突起の上端を指す。図 3.1a は閉口時、図 3.1b は開口時の下顎骨の位置を示している。図 3.1a においては下顎頭が外耳道に近い位置にあるが、図 3.1b では図 3.1a と比べ下顎頭と外耳道の位置関係が前後に変化している。この位置変化は開口に伴う下顎運動によるものである。下顎頭と外耳道の位置関係の変化に伴い外耳道の形状が変化するため、外耳道内の体積も変化する。この時、外耳道が密閉されている場合、外耳道内の気圧も変化する。この変化は下顎運動ごとに変化の様子が異なる。

MimiSense はイヤホン型気圧センサを用いて外耳道を密閉しつつ気圧値の変化を取得することにより下顎運動を認識する。

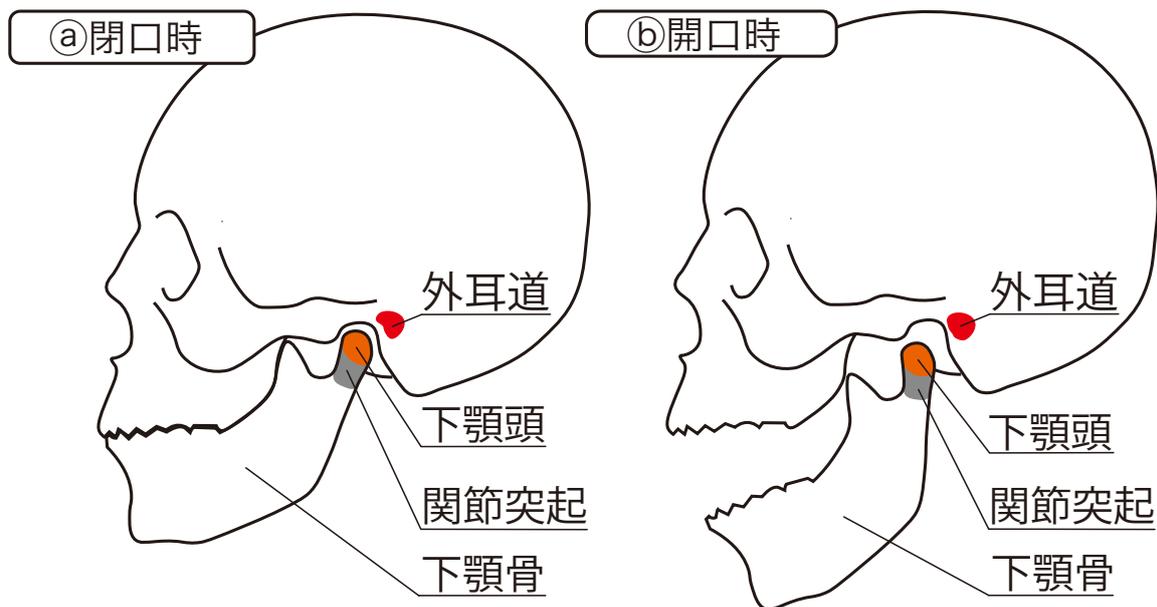


図 3.1: 顎の構造.

3.2 認識対象とする下顎運動

今回の実装において、MimiSense は、口を開ける (図 3.2a)、口を閉じる (図 3.2b)、顎を左に動かす (図 3.2c)、および顎を右に動かす (図 3.2d) という 4 つの下顎運動とこれらを連続的に組み合わせた下顎運動を主な認識対象とする。例えば、図 3.2a および図 3.2b を組み合わせた下顎運動、つまり、口を閉じた状態から口を開けその後、口を閉じる下顎運動 (図 3.2e) も認識できる。

実際に下顎運動を行った際の下顎運動ごとの左右の気圧値の変化を図 3.3 および図 3.4 に示す。図は連続した気圧値 16 フレームの変化を示す。16 フレーム = 1 秒間であり、1 フレームあたり、0.0625 秒である。図 3.3 および図 3.4 より、下顎運動ごとに気圧値の変化が異なることがわかる。具体的には、縦方向の下顎運動においては左右の気圧値が同時に上昇または下降する。これに対して横方向の下顎運動においては左右の気圧値の変化が異なる形に変化する (例：顎を右に動かすと、左の気圧値は上昇し始め、右の気圧値は下降し始める)。口を開けて閉じる下顎運動の気圧値の変化は口を開ける下顎運動および口を閉じる下顎運動の気圧値の変化の組み合わせである。

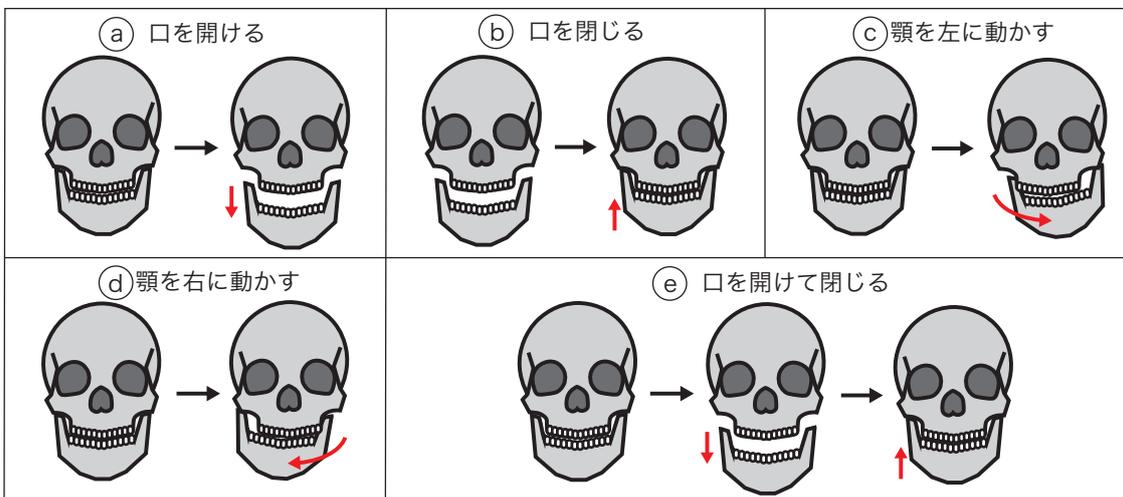


図 3.2: 認識対象とする下顎運動.

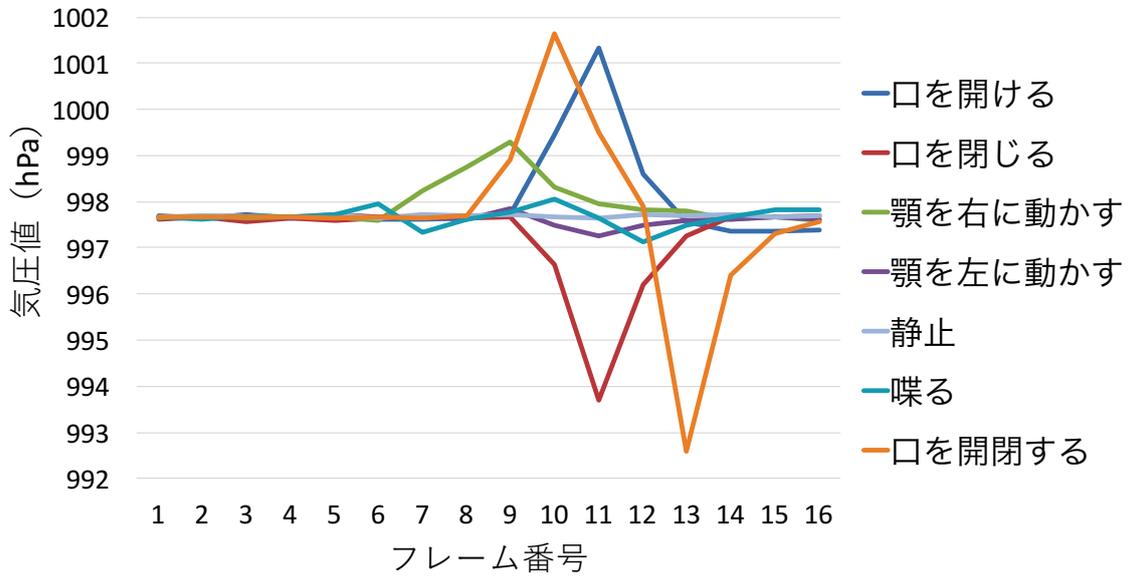


図 3.3: 下顎運動ごとの気圧値の変化 (左耳).

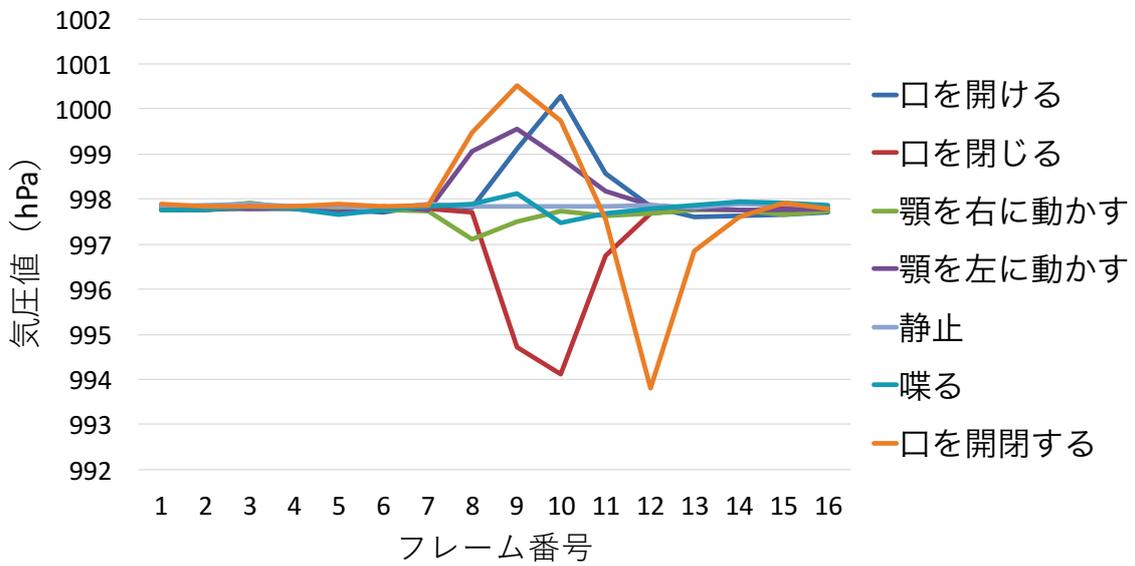


図 3.4: 下顎運動ごとの気圧値の変化 (右耳).

第4章 実装

MimiSense はイヤホン型気圧センサおよび下顎運動認識プログラムから構成される。

4.1 イヤホン型気圧センサ

下顎運動に伴う外耳道内の気圧変化を取得するために、イヤホン型気圧センサを作製した。図 4.1 にイヤホン型気圧センサの構造図を示す、また図 1.2b に作製したイヤホン型気圧センサを示す。これは市販の外耳道挿入型イヤホン（Panasonic 社製 RP-HJE260）の内部に気圧センサ（Bosch 社製 BMP280）を埋め込んだものである。図 4.2 に MimiSense の回路図を示す。気圧センサはマイコン（Arduino Srl 社製 Arduino Uno）に接続されており、マイコンセンサから読み取った気圧値を下顎運動認識プログラムに送信する。

外耳道内の気圧の変化を正確に把握するためには、外耳道を密閉する必要がある。そのためにイヤホン型気圧センサによって外耳道を密閉することにした。図 4.3 にイヤホン型気圧センサを装着した状態の外耳を示す。また、図 4.4 にこのとき気圧センサを用いて気圧値を取得している空間を示す。イヤホン型気圧センサの密閉性を高めるため、イヤホンの空気孔をホットグルーを用いて塞いだ。また、外耳道の形状には個人差があるため、外耳道の密閉性を高めるためにはユーザごとに適合したイヤピースを利用することが望ましい。そのため、今回作製したイヤホン型気圧センサにおいては、押しつぶした状態にて外耳道に挿入し、その後外耳道の形状に沿って膨らむフォームタイプのイヤピースを用いた。フォームタイプのイヤピースは、形状を変化させることが可能であるため、密閉性を高めつつ多くの人が装着可能である。

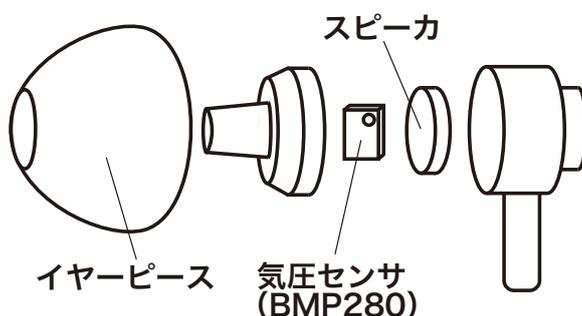


図 4.1: イヤホン型気圧センサの構造。

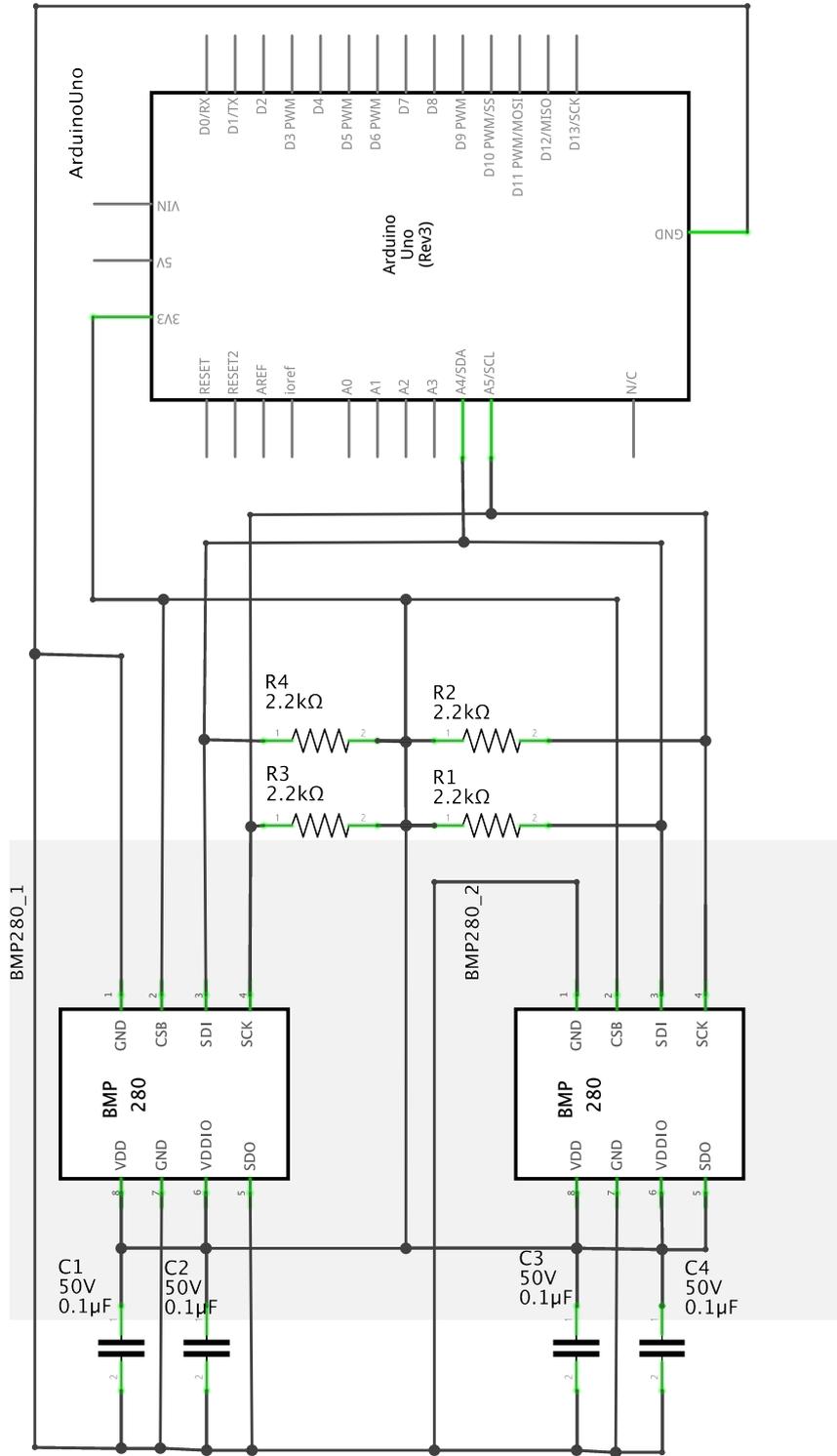


图 4.2: 回路图.

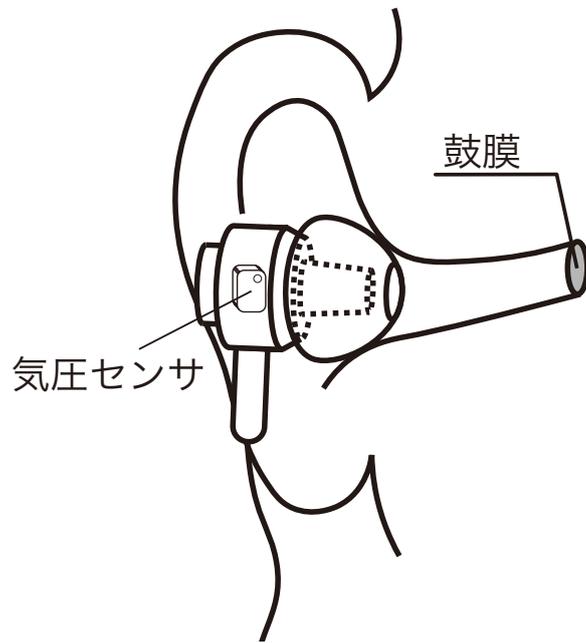


図 4.3: イヤホン型気圧センサを装着した図.

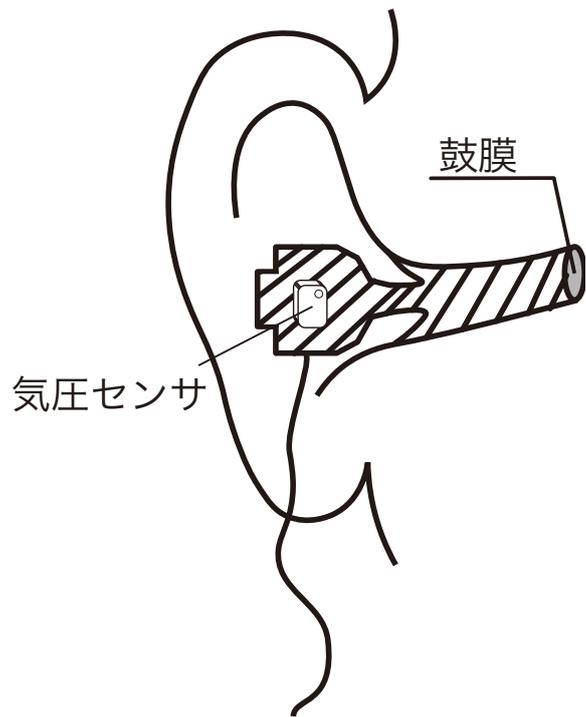


図 4.4: 気圧センサにて気圧値を取得している空間.

4.2 下顎運動認識プログラム

下顎運動認識プログラムは学習フェーズおよび分類フェーズの2つの処理にて構成される。これらの実装にはプログラミング言語 Python 3.5.1 および機械学習ライブラリ scikit-learn 0.17.1 を使用した。

4.2.1 学習フェーズ

学習フェーズでは、機械学習に使用する学習データを生成するため下顎運動ごとに以下の処理を行う。

まず、気圧値を片耳 16 フレーム、左右合わせて 32 フレーム分（以降、気圧変化パターン）を随時取得する。イヤホン型気圧センサから気圧値を読み出す取得周波数は 16 Hz であり、気圧変化パターンは 1 秒間の気圧値といえる。

次に特徴的な気圧変化パターンを検出するために、以下の式 4.1 を用いて、 $F(4, 8)$ および $F(8, 12)$ を両耳に対して計算する。

$$F(i, j) = \frac{\sum_{k=i+1}^j (g_k - g_{k-1})}{j - i} \quad (4.1)$$

g_k は直近 16 フレームの気圧データであり、最も古いデータが g_0 、最も新しいデータが g_{15} である。いずれかの耳の $F(4, 8)$ および $F(8, 12)$ が式 4.2 および式 4.3 を満たす場合、特徴的な気圧変化パターンが生じたとして気圧変化パターンを保存する。特徴的な気圧変化パターンとは、片耳あたりの気圧変化パターン 16 フレームのうち、中央となる第 8 フレームを境に気圧値の変化が発生しており、かつ第 4 フレームから第 8 フレームの気圧値の変化と第 8 フレームから第 12 フレームの気圧値の変化の正負が逆転しているパターンである。つまり、気圧変化パターンの第 8 フレーム付近にて山型または谷型の変化が発生しているパターンを検知する。

$$F(4, 8) > a \wedge F(8, 12) < -a \quad (4.2)$$

$$F(4, 8) < -a \wedge F(8, 12) > a \quad (4.3)$$

なお、本実装においては閾値 a を経験的に 0.1 と設定した。

また、前述の関数では対応しきれない気圧変化（例：4 フレーム以内に上下に変化するようなデータ）も存在するため、式 4.4 を満たす気圧変化パターンも保存する。

$$\max(g_k) - \min(g_k) > 2a \quad (4.4)$$

$\max(g_k)$ は g_k の最大値であり、 $\min(g_k)$ は g_k の最小値である。

4.2.2 分類フェーズ

分類フェーズでは、学習フェーズにて保存した気圧変化パターンから機械学習に利用する特徴量 (表 4.1) を生成する。特徴量として、各フレームに対する直前のフレームとの差分 (左右各 15 個, 合計 30 個), 左右の気圧変化パターンの差分値に対してフーリエ変換を行った振幅スペクトル (8 個), 標準偏差 (左右各 1 個, 合計 2 個), 最大最小値幅 (左右各 1 個, 合計 2 個), 第 0 フレームから第 15 フレームを引いた値 (左右各 1 個, 合計 2 個), 最大値から第 0 フレームを引いた値 (左右各 1 個, 合計 2 個), および最小値から第 0 フレームを引いた値 (左右各 1 個, 合計 2 個) の計 48 個を用いる。

生成した特徴量を利用して下顎運動の分類を行う。機械学習には機械学習ライブラリ scikit-learn 0.17.1 が提供する Random Forest を利用する。前述した特徴量を用いて生成した分類器を利用して直近 16 フレームのデータを随時分類する。最新 5 回分の分類結果のうち最も判定回数が多い下顎運動を最終的な分類結果として出力する。

表 4.1: 機械学習に利用した特徴量

特徴量	データの個数		
	右 (個)	左 (個)	合計 (個)
直前のフレームとの差分	15	15	30
左右差分の振幅スペクトル			8
標準偏差	1	1	2
最大最小値幅	1	1	2
第 0 フレーム - 第 15 フレーム	1	1	2
最大値 - 第 0 フレーム	1	1	2
最小値 - 第 0 フレーム	1	1	2
最大値 - 第 0 フレーム	1	1	2

第5章 予備実験

MimiSense の動作確認およびイヤホンから音を鳴らした状態において使用可能かどうかを検証するために、著者1名を被験者とした下顎運動認識実験を行った。

5.1 実験設計

予備実験の実験設計を述べる。

5.1.1 実験機器

実験には4章にて作製したイヤホン型気圧センサを使用した。イヤピースにはフォームタイプのもの（Westone社製 True-Fit Foam Eartips Red）を用いた。

5.1.2 実験環境

本実験中、被験者は椅子に深く腰掛けた。実験は、実験環境における大気圧の変化による実験結果への影響を避けるため、ドアや窓を閉め切った静かな室内にて行われた。さらに、日による大気圧の影響を避けるため、実験は同じ場所および時間帯（午後10時 - 11時）にて3日間連続して行われた。

5.1.3 実験タスク

被験者はイヤホン型気圧センサを装着した状態にて、口を開ける、口を閉じる、顎を左に動かす、顎を右に動かす、口を開けて閉じる、および喋るという6種類の下顎運動を行った。また、下顎運動を行っていない状態（静止）も行い、気圧変化パターンを記録した。すなわち、合計7種類の動作を記録した。喋る下顎運動に関しては被験者の前に設置したディスプレイに文章を表示し、その文章を音読させた。文章は「我輩は猫である」（夏目漱石）の冒頭3文である。また、静止については4.2.1節のパターンに該当しないため手動にて記録した。各下顎運動はランダムに1つずつ提示した。このとき、提示した下顎運動を実行することを1試行とした。また、6種類の下顎運動に静止を加えた7種類の動作を1試行ずつ行うことを1セッションとした。イヤホンから音を鳴らしている条件（以降、音あり条件）および音を鳴らしていない条件（以降、音なし条件）をそれぞれ12セッションずつ行った。なお、音あり

条件において使用した音源は Ludwig van Beethoven 作曲交響曲第 5 番-第 1 楽章ハ単調作品 67 である。また、このときの音量は [AVan10] において音量調整の目安としてあげられている、「ヘッドホン使用状態にて普通に話した自分の声が聞こえる程度」の範囲において最大の音量とした。

予備実験の総試行回数は

	2	条件
×	12	セッション
×	7	種類の動作
×	3	日間
=	504	試行

であった。

5.2 結果

実験によって得られた気圧変化パターンに対して交差検定を行った。分類には機械学習ライブラリ Weka[HFH⁺09] が提供する Random Forest を用いた。2 分割、3 分割、4 分割、6 分割、および 12 分割交差検定を行った際の認識率を図 5.1 に示す。分割数が多いほど多くのデータを学習に使用しており、分割数が多い時に分割数が少ない時と比べて認識率が低下している場合、過学習が発生している可能性がある。図 5.1 より分割数が 3 以上の場合、認識率が低下しているものがあることがわかる。次に最も高い認識率を示した、3 分割交差検定を行った際の結果を述べる (図 5.2)。1 日目は音なし条件の認識率は 96.4% であり、音あり条件の認識率は 89.3% であった。2 日目は音なし条件の認識率は 100% であり、音あり条件の認識率は 100% であった。3 日目は音なし条件の認識率は 98.8% であり、音あり条件の認識率は 100% であった。

5.3 考察

図 5.1 によると、1 日目の認識率が 2 日目および 3 日目に比べて低いことがわかる。この原因として実験 1 日目に実験実施場所付近を通過した台風 (2016 年 10 号, ライオンロック) による気圧値への影響、特に台風の移動および風に伴う気圧変化が気圧値に与える影響が大きかったと考えられる。実験開始時の気圧値は、1 日目 985.9 hPa, 2 日目 997.7 hPa, 3 日目 1005.0 hPa であり、1 日目は特に低かったことがわかる。

また、交差検定において分割数 3 以上の場合に認識率が低下している。これは過学習によるものと考えられる。よって MimiSense においては分割数 3 における学習セッション数、つまり 8 セッション分の学習データを用いることによって十分な精度を得ることができる可能性が示唆される。

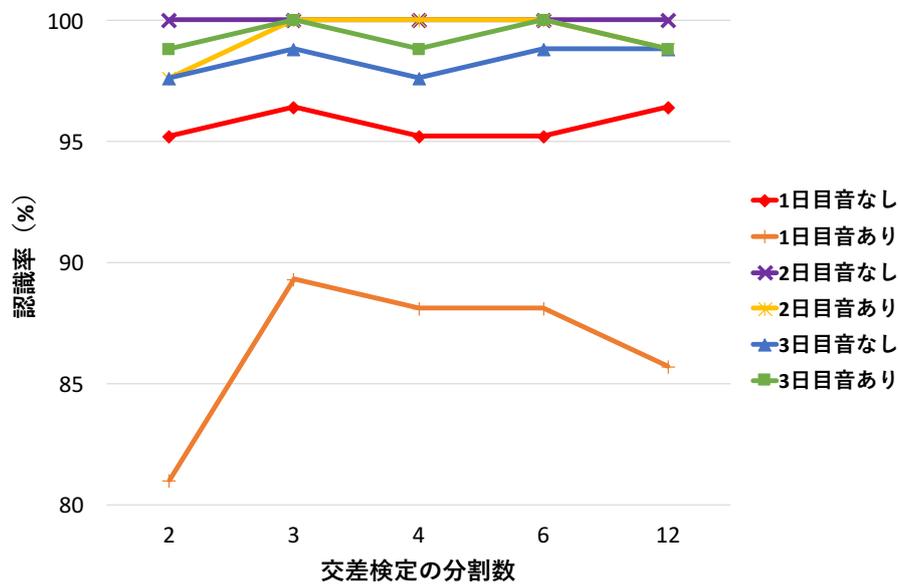


図 5.1: 交差検定における分割数を変えた際の認識率.

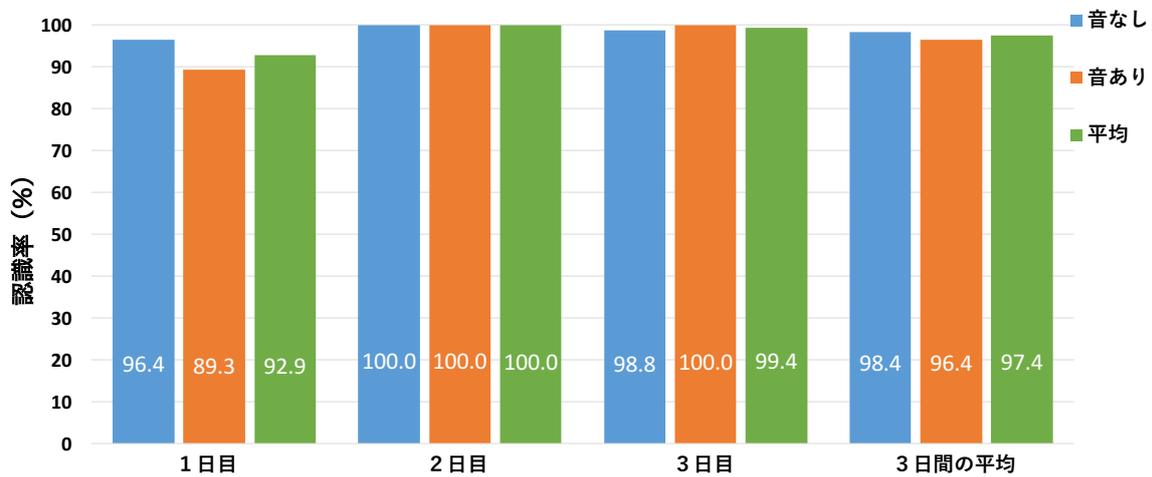


図 5.2: 3分割交差検定における認識率.

音なし条件および音あり条件の認識率を比較するために、分割数3の交差検定の3日分の認識率を対応のあるt検定を用いて比較した。結果、音なし条件と音あり条件に有意な差はなかった ($t(6) = .759, p = .527 > .05$)。よって、音による認識率への影響はない可能性が示唆された。

第6章 下顎運動認識評価実験

予備実験にて著者自身は MimiSense を用いて下顎運動認識を行うことができることがわかった。しかし、外耳道の形状は人によって違いがあり、祁が [祁君 16] 「個人個人によって下顎頭の動きと外耳道の容積の関係に相違が認められると考えられる」と述べているように、下顎運動を行った際の外耳道の形状変化および外耳道内の気圧変化にも個人差があると考えられる。そのため、MimiSense を用いて著者以外の人の下顎運動を認識できることを確かめるために被験者実験を行った。

本実験は、筑波大学システム情報系研究倫理委員会の承認（審査承認番号：2016R121）を得て行った。

6.1 実験設計

被験者実験の実験設計を述べる。

6.1.1 被験者

大学生および大学院生 6 名（男性 4 名，女性 2 名，年齢：20 – 23 歳）を被験者（P0 – P5）として雇用した。すべての被験者がイヤホンを日常的に使用していた。実験終了後、各被験者には実験への参加に対する謝礼として時給 820 円支払った。

6.1.2 実験機器

実験には 4 章において作製したイヤホン型気圧センサを使用した。イヤピースは予備実験と同じくフォームタイプのもの（Westone 社製 True-Fit Foam Eartips Red）を用いた。衛生面および被験者ごとの差異をなくすため、被験者ごとに新しいイヤピースを使用した。

6.1.3 実験環境

実験は、実験環境における大気圧の変化による実験結果への影響を避けるため、ドアや窓を閉め切った静かな室内にて行われた。

6.1.4 手順およびタスク

被験者には実験中常に着席しているように指示した。はじめに、実験実施者は被験者に対し、研究の概要、実験の目的、および個人情報の保護について等の説明を行った。また、実験中いつでも実験を中断でき休憩を取得することが出来ることを説明した。実験に使用した実験同意書、ビデオ画像の公開についての承諾書・承諾変更書、実験前アンケート用紙、実験後アンケート用紙、および実験手順書を付録 A.1 – A.5 に示す。続いて、実験に関するアンケートに回答するよう指示した。このアンケートにおいては、顎関節症等の病気の有無、顎を動かす際に動かすにくい方向があるか、および外耳道挿入型イヤホンの使用経験の有無などについて回答してもらった。この際、実験実施者が実験開始時の気圧として実験室の気圧を記録した。次に、実験手順書を用いて被験者に対して実験タスクについての説明を行った。まず、被験者に対してイヤホン型気圧センサの装着方法を説明し、被験者にイヤホン型気圧センサを装着するよう指示した。

実験タスクについて説明する。実験中は被験者の前方に配置されたディスプレイに行うべき動作を表示した(図 6.1)。最初にディスプレイには「クリックしてスタート」と表示される。被験者はマウスを用いてディスプレイをクリックすると、ディスプレイの中央に行うべき動作の指示(図 6.1 においてディスプレイに表示されている顎を右に動かす)が表示され、右下に現在の状態(以降、状態表示、図 6.1 においてディスプレイに表示されている 2)が表示される。状態表示は「3」、「2」、「1」、「Rec」と 1 秒ごとに変化する。被験者には「Rec」に状態表示が変化した際に表示されている動作を行うように指示した。「Rec」が表示された 3 秒後に表示が「3」に変わり、次に行うべき動作の指示が表示される。ディスプレイに表示されている動作を 1 度行うことを 1 試行とした。

行うべき動作の指示として、予備実験と同様に、口を開ける、口を閉じる、顎を左に動かす、顎を右に動かす、口を開けて閉じる、および喋るという 6 種類の下顎運動、また、これに加えて静止状態を表す、なにもしないが表示され、合計 7 種類の動作の指示がランダムな順番にて表示される。喋る下顎運動に関しては、予備実験と同様に、被験者の前に設置したディスプレイに文章を表示した上で、その文章を音読させた。文章は「我輩は猫である」(夏目漱石)の冒頭 3 文である。口を閉じる下顎運動は下顎運動を行う前に口を開けている必要があるため、状態表示が「Rec」になる前に口を開けておくよう指示した。動作の指示の表示順が実験結果に影響しないように行うべき動作の指示はランダムな順序にて表示した。7 種類の動作が終了するとディスプレイの中央に「クリックしてスタート」と表示される。これを 1 セッションとした。

音なし条件および音あり条件ごとに 12 セッションずつ行うように指示した。音なし条件および音あり条件の順番による被験者の学習効果を打ち消すため被験者を 2 つのグループに分け、音なし条件を先に行うグループと音あり条件を先に行うグループを設定した。予備実験と同様に、音あり条件の際、使用した音源は Ludwig van Beethoven 作曲交響曲第 5 番-第 1 楽章ハ単調作品 67 である。音あり条件の際の音量は JEITA ヘッドホンおよびイヤホン [AVan10] において音量調整の目安としてあげられている、「ヘッドホン使用状態にて普通に話した自分の声が聞こえる程度」の音量とし、被験者に調整させた。疲労軽減のために 1 セッションご

とに2分程度の休憩を取得するように指示した。

被験者には下顎運動を行った後、状態表示が「3」に変化するまで下顎運動を行った状態から動かないように指示した。意図せず顎を動かしてしまった、行う動作を間違ってしまった、動作を行うことができなかった等の場合には実験実施者に伝えるよう指示した。すべてのセッション終了後、5段階のリッカート尺度および自由記述を用いた実験後アンケートに回答するように指示した。

実験時間は1人あたり1時間程度であった。



図 6.1: 実験の様子。

実験の総試行回数は

$$\begin{aligned} & 2 \quad \text{条件} \\ \times & 12 \quad \text{セッション} \\ \times & 7 \quad \text{動作の指示数} \\ \times & 6 \quad \text{人(被験者数)} \\ = & 1008 \quad \text{試行} \end{aligned}$$

であった。

6.2 結果および考察

実験によって得られた気圧変化パターンに対して、ユーザごとの交差検定 (Per-user Classifiers) , および異なるユーザの気圧変化パターンを学習データとした交差検定 (General Classifier) を行った. Per-user Classifiers はユーザ自身のデータを利用して認識を行うため, 自分のデータを用いて下顎運動が認識できるかを表す. また, General Classifier は異なるユーザのデータを利用して認識を行うため, 他人のデータを用いて下顎運動が認識できるかを表す. その結果および考察を述べる. また, 実験の際に被験者に記述するように指示したアンケートの結果についても述べる.

6.2.1 Per-user Classifiers

音あり条件および音なし条件を合わせた平均認識率は 12 分割交差検定において最も高く, 88.8% (標準偏差 = 5.6) であった. 図 6.2 に 12 分割交差検定における各被験者ごとの認識率および平均認識率を示す. 音なし条件と音あり条件の認識率を比較するために, 音なし条件および音あり条件の平均認識率が最も高かった 12 分割条件における認識率を対応のある t 検定を用いて比較した. 結果, 音なし条件 (平均 = 87.7%, 標準偏差 = 5.45) と音あり条件 (平均 = 89.9%, 標準偏差 = 5.93) に有意な差はなかった ($t(5) = .958, p = .382 > .05$). よって, 音による認識率への影響はないと考えられる. 図 6.2 から P3 の音なし条件における認識率が 78.6% となっており, 最も低くなっている. P3 は実験後のコメントにて, 顎を左右に動かすことが難しかったと述べており, このことが原因だと考えられる.

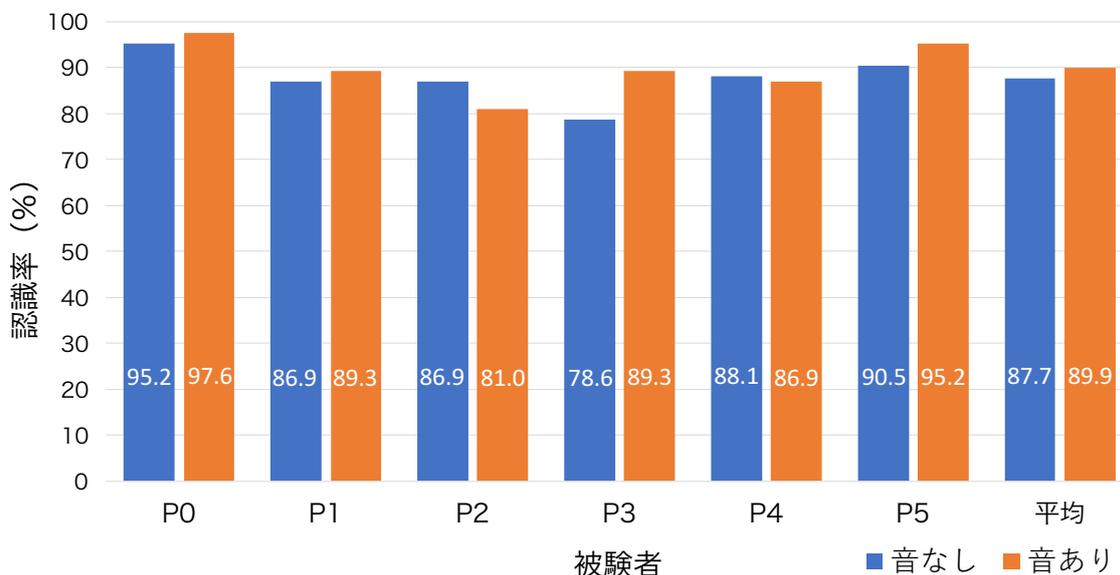


図 6.2: Per-user Classifier の 12 分割交差検定における認識率.

6.2.2 General Classifier

異なる被験者の気圧変化パターンを学習データとした際の認識精度を評価した。各被験者の気圧変化パターンをテストデータとし、それ以外のすべての被験者のデータを学習データとした際の認識精度の評価を行った。結果を図 6.3 に示す。音なし条件において平均 52.9%、音あり条件において平均 62.4%であった。Per-user Classifiers と比較すると認識率が大幅に低くなっていることがわかる。これは祁が [祁君 16] 「個人個人によって下顎頭の動きと外耳道の容積の関係に相違が認められると考えられる」と述べているように人によって下顎運動と外耳道の容積の変化つまり、形状変化の相関に違いがあることが原因だと考えられる。

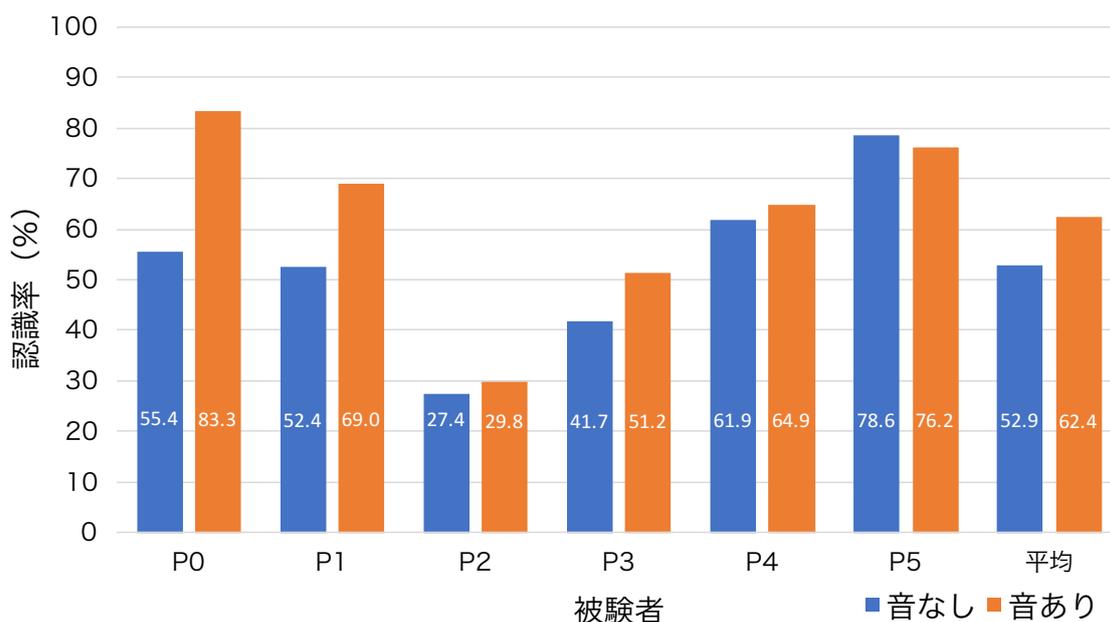


図 6.3: General Classifier における認識率。

6.2.3 アンケート

実験後に回答してもらったリッカート尺度および自由記述のアンケート（付録 A.4）の結果を述べる。図 6.4 に回答結果を示す。口を開ける動作および口を閉じる動作に関しては多くの被験者（P0, P2 – P5）が、簡単であると回答した。口を開く動作が簡単でなかったと回答した被験者（P1）は、実験日周辺に人と会話していなかったため口を開く動作に疲労感を覚えたと述べた。顎を右に動かす動作および顎を左に動かす動作は口を開く動作および口を閉じる動作に比べて簡単ではないと回答した被験者（P3, P5）がいた。これは、日常的に顎を意識して左右に動かす動作を行うことがあまりないためだと考えられる。

自由記述のアンケート（良かった点、改善すべき点、感想等）においては次のようなコメントが得られた。

良かった点として、「操作をするために物理的なスイッチや画面を見ることなく、また声を発せずにできるという点がよい」（P3）、「イヤホンでわかるのがすごい」（P4）などが挙げられた。

改善すべき点としては、「もっと小さな動きでも検知してくれるともっと使いやすい」（P0）、「くしゃみやつばを飲み込む動作をしても問題ないかどうか知りたかった」（P2）、「イヤホンのフィット感を改善してほしい」（P5）、「実際の使用ではそう連続して動かすこともないと思うが、顎への負担を減らす工夫があるとよい」（P3）、「顎が痛い」（P4）などが挙げられた。

そのほかのコメントおよび感想としては、「新しさを感じた」（P0）、「つかれた」（P1）、「さほど疲労はなかった」（P2）、「これを使って操作できるようになるのが楽しみと思えるデバイスだった」（P3）、「ずっと同じ音楽は飽きた」（P4）などが得られた。

「本手法を使用してどのくらい疲れましたか？」という質問の平均回答が3.67点であったことから、提案手法は個人差はあるものの、1時間程度の連続使用によりユーザーに疲労感を与える可能性が示唆された。そのため、今後、改善点としてあげられたように、顎への負担を減らす工夫を行う必要があると考えられる。また、今回は全員が装着可能であったため、同じイヤピースを用いたが、イヤホンのフィット感を改善してほしいというコメントがあったように、サイズを変更するなど、より個々人にフィットしたイヤピースを使うべきである。

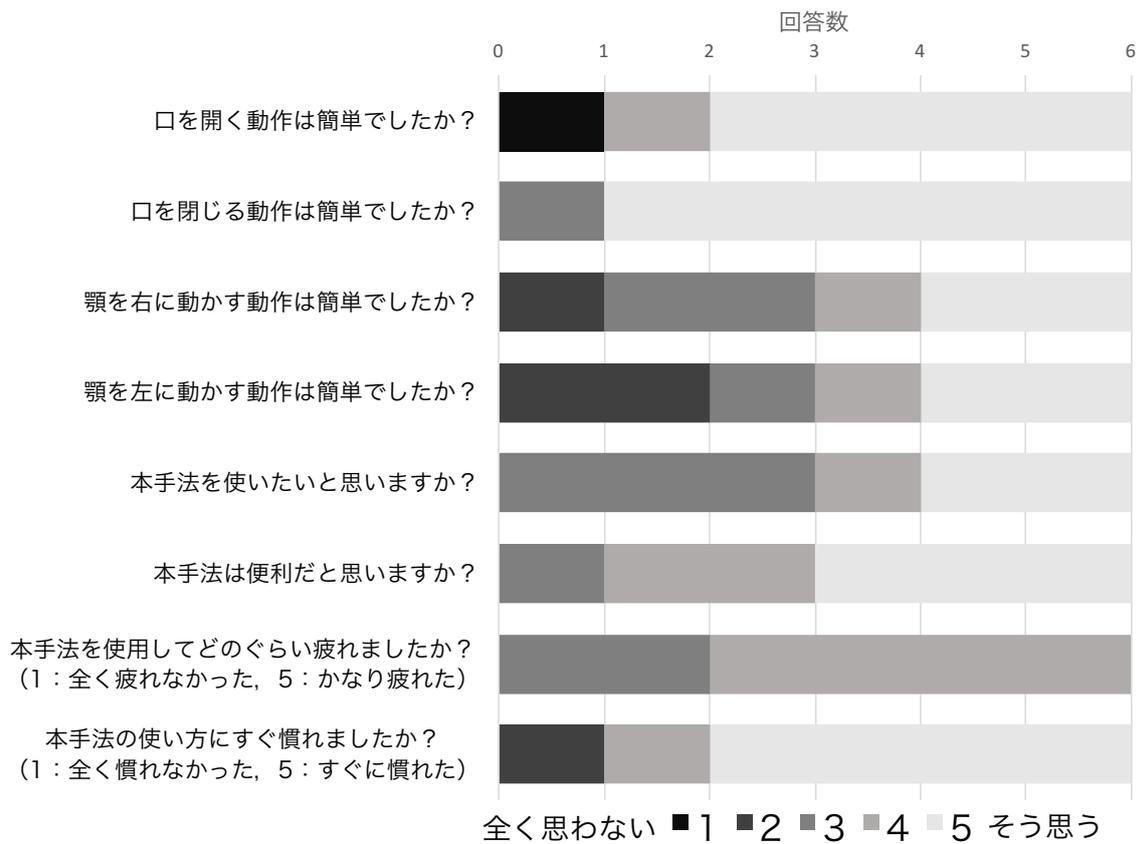


図 6.4: アンケート結果.

第7章 アプリケーション例

提案手法を用いたアプリケーション例を示す。これらのアプリケーションを用いるユーザーは、提案手法を用いることにより、ハンズフリー操作ができるため、両手がふさがっている場合においても、アプリケーションを操作することが可能である。

7.1 音楽プレイヤー

MimiSense を用いた下顎運動認識によって操作を行う音楽プレイヤーを作製した。再生/停止には顎を開けて閉じる動作、曲送りには顎を右に動かす動作、曲戻しには顎を左に動かす動作を割り当てた (図 7.1)。口を開ける動作および口を閉じる運動は、その後口を閉じる運動または口を開ける運動が付随して発生するため、口を開けて閉じる運動を再生および停止の切り替えに割り当てた。ユーザーはこの音楽プレイヤーを、両手に荷物を持っているなど手が塞がっている場合においても操作することが可能である。

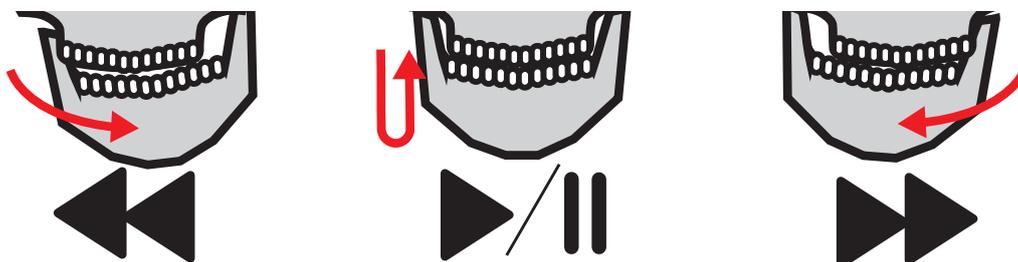


図 7.1: 音楽プレイヤーの操作割り当て。

7.2 画像ビューワ

MimiSense を用いた下顎運動認識によって操作を行う画像ビューワを作製した。作製には Python 3.5.1 および PyQt5 を用いた。画像の決定には顎を開けて閉じる動作、次の画像への移動には顎を右に動かす動作、前の画像への移動には顎を左に動かす動作を割り当てた (図 7.2)。ユーザーはこの画像ビューワを、両手を使えない場合においても操作することが可能である。



図 7.2: 画像ビューワの表示画面.

第8章 議論

本章にて、提案手法に関して議論する。提案手法に対する気圧の変化、外耳道の密閉性、および機械学習に利用する特徴量に関する議論を行う。

8.1 気圧の変化による影響

MimiSense は気圧センサを利用しているため、気圧が変化する場合において下顎運動が認識できない可能性がある。気圧が変化する場合とは、建物の内外を行き来する場合、地表面からの高さが変化する場合、および天候の変化が激しい場合などである。今回、センサから取得した気圧をそのまま利用したが、センサから取得した気圧にはノイズだと思われる小さな変動があった。ローパスフィルタやハイパスフィルタといった手法を用いることによってノイズを低減することにより、より正確に下顎運動が認識できると考えられるため、今後、ノイズ低減手法の検討を行い、実装を行う。

8.2 外耳道の密閉性による影響

外耳道の形状は人によって異なるため、ユーザごとの外耳道の形状にフィットするイヤープースを使用することが望ましい。ユーザが外耳道の形状にフィットせず、密閉性の低いイヤープースを使用した場合、外耳道の形状変化による気圧値の変化量が低下するため、下顎運動の認識率が低下する。一方、ユーザが密閉性の高いイヤープースを使用する場合、顎を動かした際の気圧変化が顕著になるため、下顎運動をより高い精度にて認識できると考える。さらに、耳の型を取り、それをもとに作製するオーダーメイドイヤホンを用いればより密閉性が確保出来ると考える。密閉性が高い状態であれば、田山らの外耳道内の圧力変化を用いて心拍数を計測する研究 [田山 14] に基づいて心拍数を取得することができる可能性がある。

8.3 機械学習に利用する特徴量

機械学習に利用した特徴量を最適化することにより下顎運動の認識率を向上させることができる可能性がある。現在特徴量として4.2.2節において述べた特徴量を利用している。しかし、利用した特徴量は取得した気圧変化パターンから経験的に利用できると考えたものであり、下顎運動の認識に最適になるように十分な検討を行ったものではない。このため、利用

する特徴量を検討し，認識率を向上させるために効果的な特徴量を利用することができれば，下顎運動の認識率を向上させることができると考えられる。

第9章 今後の課題

提案手法を用いて実現できる可能性のあること，および提案手法の新たな利用先について述べる．

9.1 下顎運動の運動量認識

下顎運動による気圧値の変化量は，下顎運動をどれだけの大きく行うかによって変わる．したがって，この変化量から，下顎運動の運動量を推定することが可能であると考えられる．今後，気圧値の変化量と下顎運動の運動量の関係性を明らかにすることによって下顎運動の運動量の推定を試みる．

9.2 黙声母音認識

顎の動きをもとに黙声母音認識を行っている研究 [SBR⁺14] がある．本研究においても母音を発する際の下顎運動を学習することにより黙声母音認識を行うことができる可能性がある．黙声母音認識を行うことができれば，癌などによって声帯を切除したなど，様々な事情により声を出すことができない人が実際に声を出すことなく擬似的な音声出力を行うことができると考えられる．また，これを用いて，擬似的な音声入力を行うことができれば，音声入力のようなより柔軟なハンズフリー操作手法を提案することができると考えられる．

9.3 下顎運動以外の認識

イヤホン型気圧センサを装着した状態にて首を曲げると気圧値が変化する．これを用いて首を曲げる動作を認識することができると考えられる．現状においても，下顎運動認識プログラムを用いて，首を左右に傾けた際の気圧変化パターンを学習すると，首の動きと下顎運動を分類できることを確認した．今後，この分類精度を検証するとともに，その他の体の部位による動作を検出することができるか検討する．また，様々なセンサを内蔵したイヤホンが市販されており [App16a, Son16a, Son16b, Bos16]，これらのイヤホンに内蔵されているセンサから得られる値と気圧値の変化を組み合わせることにより新しい動作の認識および下顎運動の認識率の向上が可能か検証する．

9.4 提案手法の利用可能性

提案手法はスマートフォンおよびコンピュータといった端末に対する操作手法であるが、ハンズフリーかつアイズフリーである特性を生かし、ヘッドマウントディスプレイやスマートグラスへの入力装置としても利用できると考えられる。これらの端末は装着位置がずれることによる使用者への影響が大きいため、本体に直接触れる操作が難しいという問題がある。この問題に対して、本体に触れずに操作できるハンズフリー操作手法が有用である。また、非透過型ヘッドマウントディスプレイの場合、映し出されている空間以外を見ることができない、つまり自分の手を見ることができないため、アイズフリー操作ができることが望ましい。提案手法はハンズフリーかつアイズフリー操作が行えるため、これらの問題に対して有効である。

第10章 おわりに

本論文において、下顎運動認識に基づくハンズフリー操作手法を提案した。提案手法を実現するために、外耳道内の気圧変化を利用した下顎運動認識システムを実装し、その実装方法を示した。実装においては、市販のイヤホンに気圧センサを埋め込んだイヤホン型気圧センサを作製した。このイヤホン型気圧センサを用いることにより、下顎運動に対応する気圧変化パターンを計測を行った。さらに、気圧変化パターンから導き出した特徴量を利用した機械学習を行うことにより下顎運動の認識を行った。また、下顎運動の認識精度を示すために著者実験および下顎運動認識評価実験を行った。実験では下顎運動ごとの気圧値の変化を記録し、交差検定を行った。下顎運動認識評価実験における、ユーザごとの12分割交差検定において平均認識率は88.8% (標準偏差 = 5.6) となった。また、提案手法を利用したアプリケーション例を示した。今後、より詳細な下顎運動の認識として、下顎運動の運動量の推定および黙声母音認識を行う。また、実装したシステムを用いた下顎運動以外の動作認識も試みる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，高橋伸先生，嵯峨智先生には多くのご意見とご指導を頂きました。心から感謝いたします。特に志築文太郎先生には，研究の進め方，論文執筆をはじめとして研究に関することを基礎からご指導いただきました。また，研究に関する相談にも乗っていただき，多くのご助言を頂きました。重ねて感謝いたします。

インタラクティブプログラミング研究室の同期，先輩方には様々な面において多くのご助言を頂きました。特に WAVE チームの皆様にはチームゼミにおけるご意見だけでなく，研究室にて相談に乗っていただき多くのご意見，アドバイスを頂きました。深く感謝いたします。中でも，久保勇貴氏には研究方針，実験の方法など本研究における重要な部分において多くのアドバイスを頂き大変お世話になりました。ここに厚くお礼申し上げます。

また，研究生活に限らず，多くの面において支えて頂いた友人，大学生活にてお世話になった皆様に感謝申し上げます。最後に，私を育て，様々な面において大学生活を支えてくださった両親に深く感謝いたします。

参考文献

- [App16a] Apple Inc. AirPods, 2016. <http://www.apple.com/airpods/> 2017年1月20日閲覧.
- [App16b] Apple Inc. Siri, 2016. <http://www.apple.com/jp/ios/siri/> 2017年1月20日閲覧.
- [ATM⁺16] Daniel Ashbrook, Carlos Tejada, Dhwanit Mehta, Anthony Jiminez, Goudam Muralitharam, Sangeeta Gajendra, and Ross Tallents. Bitey: An exploration of tooth click gestures for hands-free user interface control. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '16*, pp. 158–169, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [AVan10] AVandIT 機器標準化専門委員会. 電子情報技術産業協会規格 JEITA RC-8140A ヘッドホンおよびイヤホン, 2010. 1998年3月制定, 2010年3月改正.
- [BBP⁺15] Abdelkareem Bedri, David Byrd, Peter Presti, Himanshu Sahni, Zehua Gue, and Thad Starner. Stick It in Your Ear: Building an in-ear jaw movement sensor. In *Adjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers, UbiComp/ISWC '15 Adjunct*, pp. 1333–1338, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [Bos16] Bose Corporaion. SoundSport Pulse wireless headphones, 2016. https://www.bose.co.jp/ja_jp/products/headphones/earphones/soundsport-wireless-pulse.html#v=soundsport_pulse_wireless_power_red 2017年1月20日閲覧.
- [BVT⁺15] Abdelkareem Bedri, Apoorva Verlekar, Edison Thomaz, Valerie Avva, and Thad Starner. Detecting Mastication: A wearable approach. In *Proceedings of the 17th ACM International Conference on Multimodal Interaction, ICMI '15*, pp. 247–250, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [CMBMS09] Andrew Crossan, Mark McGill, Stephen Brewster, and Roderick Murray-Smith. Head tilting for interaction in mobile contexts. In *Proceedings of*

the 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '09, pp. 6:1–6:10, New York, NY, USA, 2009. ACM.

- [COK⁺14] Jingyuan Cheng, Ayano Okoso, Kai Kunze, Niels Henze, Albrecht Schmidt, Paul Lukowicz, and Koichi Kise. On the Tip of My Tongue: A non-invasive pressure-based tongue interface. In *Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference, AH '14*, pp. 12:1–12:4, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [EVBG15] Augusto Esteves, Eduardo Velloso, Andreas Bulling, and Hans Gellersen. Orbits: Gaze interaction for smart watches using smooth pursuit eye movements. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '15*, pp. 457–466, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [GZVP15] Mayank Goel, Chen Zhao, Ruth Vinisha, and Shwetak N. Patel. Tongue-in-Cheek: Using wireless signals to enable non-intrusive and flexible facial gestures detection. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, pp. 255–258, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [HFH⁺09] Mark Hall, Eibe Frank, Geoffrey Holmes, Bernhard Pfahringer, Peter Reutemann, and Ian H. Witten. The WEKA Data Mining Software: An update. *SIGKDD Explorations Newsletter*, Vol. 11, No. 1, pp. 10–18, November 2009.
- [HSJ⁺12] Pan Hu, Guobin Shen, Xiaofan Jiang, Shao-fu Shih, Donghuan Lu, Feng Zhao, Dezhi Hong, Qiang Li, Shahriar Nirjon, Robert Dickerson, and John A. Stankovic. Septimu² - Earphones for continuous and non-intrusive physiological and environmental monitoring. In *Proceedings of the 10th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, SenSys '12*, pp. 387–388, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [LCH16] Gierad Laput, Xiang ‘Anthony’ Chen, and Chris Harrison. SweepSense: Ad hoc configuration sensing using reflected swept-frequency ultrasonics. In *Proceedings of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces, IUI '16*, pp. 332–335, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [LHH⁺14] Roman Lissermann, Jochen Huber, Aristotelis Hadjakos, Suranga Nanayakkara, and Max Mühlhäuser. EarPut: Augmenting ear-worn devices for ear-based interaction. In *Proceedings of the 26th Australian*

Computer-Human Interaction Conference on Designing Futures: The Future of Design, OzCHI '14, pp. 300–307, New York, NY, USA, 2014. ACM.

- [Mat13] Denys J.C. Matthies. InEar BioFeedController: A headset for hands-free and eyes-free interaction with mobile devices. In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, pp. 1293–1298, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [MFY15] Hiroyuki Manabe, Masaaki Fukumoto, and Tohru Yagi. Conductive rubber electrodes for earphone-based eye gesture input interface. *Personal Ubiquitous Computing*, Vol. 19, No. 1, pp. 143–154, January 2015.
- [MIII10] Pranav Mistry, Kentaro Ishii, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. Blinkbot: Look at, blink and move. In *Adjunct Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '10, pp. 397–398, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [MSII12] Kohei Matsumura, Daisuke Sakamoto, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. Universal Earphones: Earphones with automatic side and shared use detection. In *Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '12, pp. 305–306, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [PKG⁺09] Ming-Zher Poh, Kyunghye Kim, Andrew D. Goessling, Nicholas C. Swenson, and Rosalind W. Picard. Heartphones: Sensor earphones and mobile application for non-obtrusive health monitoring. In *Proceedings of the 2009 International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '09, pp. 153–154, Washington, DC, USA, 2009. IEEE Computer Society.
- [SBR⁺14] Himanshu Sahni, Abdelkareem Bedri, Gabriel Reyes, Pavleen Thukral, Zehua Guo, Thad Starner, and Maysam Ghovanloo. The Tongue and Ear Interface: A wearable system for silent speech recognition. In *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '14, pp. 47–54, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [SDYT10] Jeremy Scott, David Dearman, Koji Yatani, and Khai N. Truong. Sensing Foot Gestures from the Pocket. In *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '10, pp. 199–208, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [SKPT09] T. Scott Saponas, Daniel Kelly, Babak A. Parviz, and Desney S. Tan. Optically sensing tongue gestures for computer input. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '09, pp. 177–180, New York, NY, USA, 2009. ACM.

- [Son16a] Sony Corporation. Experia Ear, 2016. <http://www.sonymobile.com/us/products/smart-products/xperia-ear/> 2017年1月20日閲覧.
- [Son16b] Sony Corporation. SSE-BTR1, 2016. <http://www.sony.jp/b-trainer/products/SSE-BTR1/> 2017年1月20日閲覧.
- [SVG12] Paul Strohmeier, Roel Vertegaal, and Audrey Girouard. With a Flick of the Wrist: Stretch sensors as lightweight input for mobile devices. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '12, pp. 307–308, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [WPM15] Muchen Wu, Parth H. Pathak, and Prasant Mohapatra. Monitoring building door events using barometer sensor in smartphones. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '15*, pp. 319–323, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [YGTL14] Haibo Ye, Tao Gu, Xianping Tao, and Jian Lu. B-Loc: Scalable floor localization using barometer on smartphone. In *11th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, MASS '14*, pp. 127–135, Washington, DC, USA, 2014. IEEE Computer Society.
- [ネミ 10] ネミロフスキー, ゲルマンジー. 頭部の動きの検出およびそれに応答する出力生成を行うためのシステムおよび方法, 2010. 特許第 4582985 号, 2010-09-10.
- [加藤 08] 加藤隆史. 咀嚼動作検出装置, 2008. 特開 2008-48791, 2008-03-06.
- [祁君 16] 祁君容. 顎運動時に起こる外耳道のひずみと下顎頭運動の相関関係. 松本歯科大学大学院歯学独立研究科博士 (歯学) 学位申請論文. 松本歯科大学大学院, 2016.
- [高田 16] 高田峻介, 林威, 安藤宗孝, 志築文太郎, 高橋伸. BaroTouch: 防水タッチパネル端末に内蔵された気圧センサを用いた押下圧力取得手法. *インタラクティブシステムとソフトウェア研究会論文集, WISS 2016*, pp. 9–14. 日本ソフトウェア科学会, 2016.
- [若本 95] 若本重男. 咀嚼回数表示計, 1995. 特開平 7-213510, 1995-08-15.
- [酒井 99] 酒井正彦. 咀嚼センサ, 1999. 特開平 11-318862, 1999-11-24.
- [小森 14] 小森谷大介. マスク型ハンズフリー入力デバイス. 筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒業研究論文. 筑波大学, 2014.
- [深堀 16] 深堀孔明, 坂本大介, 五十嵐健夫. 靴下型圧力センサを用いた足裏ジェスチャ. *コンピュータ ソフトウェア*, Vol. 33, No. 2, pp. 116–124, 2016.

- [真鍋 14] 真鍋宏幸, 福本雅朗. Headphone Taps: 通常のヘッドホンへのタップ入力. 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 4, pp. 1334–1343, 2014.
- [青木 10] 青木健, 三根匡. 噛み数検出装置, 2010. 特開 2010-154985, 2010-07-15.
- [谷口 08] 谷口和弘, 西川敦, 宮崎文夫. こめかみスイッチ: 瞬きパチパチでスイッチカチカチな常時装用入力装置. インタラクシオン 2008, pp. 25–26. 情報処理学会, 2008.
- [谷口 10] 谷口和弘, 西川敦, 小林英津子, 宮崎文夫, 佐久間一郎. みみスイッチ: 外耳の動きを入力情報とする常時装用型入力装置. インタラクシオン 2010, pp. 243–246. 情報処理学会, 2010.
- [中島 13] 中島康祐, 伊藤雄一, 林勇介, 池田和章, 藤田和之, 尾上孝雄. Emoballoon: ソーシャルタッチインタラクシオンのための柔らかな風船型インタフェース. インタラクシオン 2013, pp. 95–102. 情報処理学会, 2013.
- [田山 14] 田山愛, 山下紘正, 佐藤智夫, 北角権太郎, 千葉敏雄, 土岐彰. イヤホン式小型生体情報センサの開発と精度に関する検討. 昭和学士会雑誌, Vol. 74, No. 1, pp. 60–66, 2014.

著者論文リスト

参考論文

本論文の主内容は，下記 (1)，(2) として公表済みおよび出願済みである。

- **公表済み論文**

- (1) 安藤 宗孝, 久保 勇貴, 志築 文太郎, 高橋 伸. MimiSense : 外耳道内の気圧変化を利用した下顎運動認識システム. インタラクティブシステムとソフトウェア研究会論文集, WISS2016, pp. 1-6, 日本ソフトウェア科学会, 2016.

- **出願済み特許**

- (2) 安藤 宗孝, 久保 勇貴, 志築 文太郎, “信号処理装置”, 特願 2016-241032, 2016 年 12 月.

その他の論文

- 公表済み論文

- (1) 高田 峻介, 林 威, 安藤 宗孝, 志築 文太郎, 高橋 伸. BaroTouch : 防水端末に内蔵された気圧センサを用いた押下圧力取得手法. インタラクティブシステムとソフトウェア研究会論文集, WISS2016, pp. 9-14, 日本ソフトウェア科学会, 2016.

- 査読のない発表論文

- (2) 高田 峻介, 林 威, 安藤 宗孝, 志築 文太郎, 高橋 伸. 防水タッチパネル端末に内蔵された気圧センサを用いたタッチ圧力取得手法. 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション, 7 ページ, 2016.

付録A 被験者実験の際に用いた各種書類

被験者実験の際に使用した，実験同意書，ビデオ画像の公開についての承諾書・承諾変更書，実験前アンケート用紙，実験後アンケート用紙，および実験手順書を以下に示す。

A.1 実験同意書

同 意 書

筑波大学システム情報系長 殿

私は、「課題名：イヤホン型操作デバイスの設計および評価」について、研究概要、方法、研究対象者の必要性、研究対象者に対するリスクと安全性、研究に参加する上で想定される危険の回避、ビデオ録画を含めた個人情報の保護について十分な説明を受けました。

説明の際、本研究に協力することに同意しなくても何ら不利益を受けないこと、さらに、同意後も私自身の自由意思により不利益を受けず、参加の同意を撤回できることも理解しました。また、研究や実験の終了後であっても、枠下に指定の期日迄であれば、データ提供の同意を撤回できることも理解しました。私は、このことを理解した上で研究対象者になることに同意します。

平成 年 月 日

氏 名 _____ (署名)

「課題名：イヤホン型操作デバイスの設計および評価」の研究について、次の内容について平成 年 月 日に説明を行い、上記のとおり同意を得ました。

実施責任者 所 属 _____

氏 名 _____ (署名又記名押印)

データ提供の同意撤回の期限は同意書署名の日から 30 日後までとさせていただきます。

研究や実験に協力した結果、不都合があった場合の連絡先

実施分担者 (所属: _____ 氏名: _____ TEL: _____)

実施責任者 (所属: システム情報系 氏名: 志築文太郎 TEL: 029-853-5520)

筑波大学 システム情報系 研究倫理委員会 事務局

(システム情報エリア支援室 TEL: 029-853-4989)

(裏面)

① 研究の概要について

私たちは顎の動きを利用したハンズフリー入力手法を開発しています。これは顎を動かす際に外耳道が変形することを利用して、外耳道の変化から顎の動きを推測し、これをコンピュータや情報家電への入力に応用することを狙っています。

研究等を行う期間

研究倫理委員会承認後 ～ 2022年 3月31日

② 研究対象者の必要性、研究への参加におけるリスクと安全性、危険回避の方法について

私たちが設計・開発したシステムによって顎の動きを推測することが可能かどうか、そして、その使い勝手はどうかを知る必要があります。そのために、この実験では、設計・開発中のシステムを実験協力者に試用していただき、その後アンケートにご回答頂きます。

③ 個人情報の保護について

(研究対象者から得たデータの利用目的、保存の方法と期間、研究終了後のデータの処分方法、使用方法、研究結果の公表の仕方、及び個人情報の流出防止策等について分かりやすく記入すること。)

- 実験中に、写真やビデオの撮影を行う場合がありますが、これらは実験の様子を記録するために行います。その写真やビデオを発表において利用する場合は、実験協力者の確認を得た上で、研究目的においてのみ利用いたします。
- 実験への参加は、協力者の自由意思によるものであり、実験への参加を随時拒否・撤回することができます。
- 学会・論文などでデータを発表する際は、データおよびそれを統計的に処理したものだけを用います。実験参加者を表現するためには、記号・数字を用います。個人を特定できる情報は公表しません。ただし、実験参加者全体については、性別の実験参加者数、年齢の範囲、所属を公表することがあります。
- 実験において得たデータは全て暗号化された状態で論文発表後 10 年以上保存されます。暗号化に用いられるパスワードは本研究に関わる研究者のみが知っているものを使用します。なお、さらに安全を期すため、データに個人名が入ることはありません。個人名が記入された書類は研究期間の終了後シュレッダーにて粉砕されます。
- 上記以外のいかなる場合においても実験協力者のプライバシーは保全されます。

A.2 ビデオ画像の公開についての承諾書・承諾変更書

ビデオ画像の公開についての

承諾書・承諾変更書 (どちらかに○を付けてください。)

筑波大学システム情報系

(実施責任者) 志築文太郎 殿

私は、「研究課題：イヤホン型操作デバイスの設計および評価」におけるビデオ画像が公開されることについて

(該当する選択肢の□にチェックを付けてください)

承諾します。(どちらかにチェックを付けてください。)

顔が特定される形式のまま、画像が論文発表、Web への掲載、テレビ放映などで公開されることに異存ありません。

モザイク処理等をして個人が特定されない形式にした上で、画像が論文発表、Web への掲載、テレビ放映などで公開されることに異存ありません。

以下の条件付きで公開を承諾します。

条件：(具体的に記述してください。)

承諾しません。

平成 年 月 日

氏名 _____

A.3 実験前アンケート用紙

実験に関するアンケート

文責：安藤 宗孝

1. 年齢，性別についてお答えください。

年齢：__歳 性別：（男・女・その他）

2. 現在までに顎やその周辺部位に関して骨折したことや，顎関節症などと診断されたことがありますか。

ある・ない

- 2-1 質問 2 においてあると答えられた方に質問です，差し支えなければ具体的に教えてください。

3. 顎を動かしにくいと感じる方向があれば教えてください。

4. 外耳道挿入型イヤホンを使用したことがありますか？

普段から使用している・使用したことがある・ない

- 4-1. 普段使用している方・使用したことがある方に質問です。

使用している外耳道挿入型イヤホンの機種は何ですか？

- 4-2. 普段使用している方・使用したことがある方に質問です。

使用している外耳道挿入型イヤホンのイヤピースのサイズは何ですか？

S・M・L・それ以外 _____

5. 自分の耳の穴（外耳道）の大きさ（直径）について，小さいまたは大きいと思えますか

小さい・普通・大きい

以下，実験実施者欄

実験開始時の気圧 _____ hPa

実験協力者 # _____

A.4 実験後アンケート用紙

実験に関するアンケート

実施責任者：志築文太郎

1. 口を開く動作は簡単でしたか？
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
2. 口を閉じる動作は簡単でしたか？
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
3. 顎を右に動かす動作は簡単でしたか？
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
4. 顎を左に動かす動作は簡単でしたか？
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
5. 本手法を使いたいと思いますか？
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
6. 本手法は便利だと思いますか？
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
7. 本手法を使用してどのぐらい疲れましたか？
(かなり疲れた) 5・4・3・2・1 (まったく疲れなかった)
8. 本手法の使い方にすぐ慣れましたか？
(すぐに慣れた) 5・4・3・2・1 (まったく慣れなかった)
9. 本手法について、良かった点、改善すべき点、感想をご記入ください。

良かった点

改善すべき点

感想等

アンケートは以上になります。ご協力ありがとうございました。

A.5 実験手順書

実験に関する説明

文責 安藤 宗孝

- 本手法について説明します。
本手法はセンサを内蔵したイヤホンを装着することにより、顎を動かす運動（以下、下顎運動）を認識するものです。
- 本実験について説明します。
 - 我々が開発したイヤホン型センサをつけた状態にて、指示する下顎運動を行っていただきます。本実験では下顎運動時のセンサの値を取得しています。
 - 実験はイヤホンから音楽を鳴らさないで行うもの（以下、音なし条件）と、イヤホンから音楽を鳴らした状態でおこなうもの（以下、音あり条件）の2通りの条件において行っていただきます。
- 実験タスクについて説明します。
 1. 椅子に深く腰掛けてください。
 2. イヤホン型センサを装着してください。
 3. 前方のディスプレイに「クリックしてスタート」と表示されます。
 4. 準備が整ったら、マウスを用いてクリックしてください。
 5. 前方のディスプレイに行っていただく下顎運動が表示されます。
 6. 右下に表示される文字が「3」「2」「1」「Rec」と移り変わっていきます。Recになった時に表示されている下顎運動を行ってください。
 7. しばらくすると次の動作が表示されます。
 8. すべての下顎運動が終了すると「クリックしてスタート」と表示されます。
 - ◇ 4から8を1セッションとし、これを音なし条件にて12セッション、音あり条件にて12セッション、合計24セッション行っていただきます。
 - ◇ 1セッションごとに2分程度の休憩を取るものとします。
 9. 実験後にアンケートに答えていただきます。

■ 実験中の注意

- 下顎運動を行った後、次の動作が表示されるまで顎を動かさないでください。
- 不意に顎を動かしてしまった際は、実験者に申し出てください。
- 下顎運動はできるだけ大きく、すばやく行うようにしてください。（特に口をあけて閉じる）
- 音あり条件時の音量は声を出した際に出した声を十分聞き取れる音量に調整してください。
- タスクは前を向いて行ってください。
- イヤーピースのサイズが合わないときは申し出てください。
- 実験中は出来るだけ顎以外は動かさないようにしてください。
- 表示される動作は「口を開ける」、「口を閉じる」、「顎を左に動かす」、「顎を右に動かす」、「顎を動かさない」、「顎を開けて閉じる」、「次の文章を読み上げる：我が輩は猫である」の7種類です。
- 「口を閉じる」が表示された際は右下の表示が「Rec」になる前に口を開けておいてください。その後、「Rec」になった時に口を閉じる運動を行ってください。