

卒業論文 2022 年度(令和 4 年度)

これくらいデバイス  
身体尺度とジェスチャによるコンピュータ入力デバイスの  
提案と検討

明星大学 情報学部 情報学科  
尼岡研究室  
19j5-078 清水 海人

## 概要

人はものの大きさを表現する際に「これくらい」という言葉とともに人差し指と親指で表現するジェスチャを使用することが多くある。「これくらい」の長さは人それぞれの感覚によって異なるため、必ずしも正確な長さではない。しかし、実際の長さを再現しているため、数字を使用した大きさの表現よりも、より明確に大きさを表現することが可能である。

本研究では、M5stickC と距離センサーを用いて、人間が大きさを表すときに人差し指と親指を用いて行う「これくらい」のジェスチャを取得する「これくらいデバイス」を実装する。さらに、「これくらいデバイス」の実例として身体尺度によるモデリング手法「これくらいモデラー」を提案する。「これくらいデバイス」ではユーザーが行う「これくらい」で表現された大きさや傾きを取得し外部機器に送信する機能を実装する。「これくらいモデラー」ではデバイスから送信された情報を読み取り、ユーザーの身体尺度で表された大きさで 3D モデルの製作を行うことができる。本稿では、本研究の概要、提案手法の詳細について説明した後、本システムの評価及び考察を行い、その結果から提案手法の発展について議論する。

## キーワード

身体尺度, ジェスチャ, 手尺, 3D モデリング

## 目次

第1章	はじめに .....	6
第2章	関連研究 .....	7
2.2	ジェスチャを用いたモデリングの研究 .....	7
2.3	2本の指の幅から離れた物体の大きさを測る研究 .....	7
2.4	関連研究との差異 .....	8
第3章	目的 .....	9
第4章	これくらいデバイスについて .....	10
4.1	概要 .....	10
4.2	デバイスで取得するジェスチャの選定 .....	10
4.2.1	指の幅を使用したジェスチャ .....	11
4.2.2	両手の幅を使用したジェスチャ .....	11
4.2.3	形状を伝えるジェスチャ .....	12
4.2.4	検討結果 .....	12
4.3	デバイスのシステム設計 .....	13
4.3.1	「これくらい」を計測するシステムの検討 .....	13
4.3.1.1	Kinect を用いた検出 .....	13
4.3.1.2	LeapMotion を用いた検出 .....	14
4.3.1.3	距離センサを用いた検出 .....	14
4.3.1.4	検討結果 .....	16
4.3.2	手の傾きを測定するシステムの検討 .....	16
4.3.3	PC と通信するシステムの検討 .....	17
第5章	これくらいモデラーについて .....	18
5.1	これくらいモデラーの概要 .....	18
5.2	「これくらい」を使用したモデリングシステム .....	18
第6章	これくらいデバイスの実装 .....	20
6.1	使用機材 .....	20

6.2	これくらいデバイスの実装 .....	20
6.2.1	2本の指間の距離を測定するシステム .....	20
6.2.2	手の姿勢を取得するシステム .....	22
6.2.3	Bluetoothにより外部へと送信するシステム .....	23
<b>第7章</b>	<b>これくらいモデラーの実装 .....</b>	<b>24</b>
7.1	動作環境 .....	24
7.1.1	Processing .....	24
7.2	デバイスからの値を読み取る機能 .....	25
7.3	3Dオブジェクトを作成する機能 .....	25
7.3	3Dデータへの出力 .....	27
<b>第8章</b>	<b>システム評価 .....</b>	<b>28</b>
8.1	発表 .....	28
8.2	評価実験 .....	28
8.3	実験結果 .....	30
8.3	実験からの考察 .....	34
8.3.1	実空間での3Dモデルの大きさをイメージについての考察 .....	34
8.3.2	モデリングの敷居についての考察 .....	34
8.3.2	操作性についての考察 .....	35
8.4	評価実験全体の結果 .....	35
<b>第9章</b>	<b>今後の展望 .....</b>	<b>36</b>
9.1	新たなこれくらいデバイスの製作 .....	36
9.2	これくらいデバイスの活用 .....	36
<b>第10章</b>	<b>おわりに .....</b>	<b>38</b>
	謝辞 .....	39
	参考文献 .....	40

## 図表目次

図 2.1	モデリングの様子と製作されたモデル	7
図 2.2	実際に使用している様子	8
図 2.3	デバイスの構成	8
表 4.1	単位の発祥国と元になった長さ	10
図 4.2	人指し指と親指で表すジェスチャ	11
図 4.3	スパンの長さ	11
図 4.4	両手の幅で大きさを表すジェスチャ	12
図 4.5	包み込むように大きさを表現するジェスチャ	12
図 4.6	超音波センサー	15
図 4.7	赤外線距離センサー	15
図 5	製作手順	19
図 6.1	センサーケースの写真（左から L,M,S）	20
図 6.2	センサーを取り付けた写真	20
図 6.3	ピッチ（青）ロー（赤）ヨー（緑）のグラフ	21
図 6.4	補正後のグラフ	22
図 7.1	X 軸の設定画面	25
図 7.2	Y 軸の決定画面	25
図 7.3	Z 軸の設定画面	25
図 7.4	プレビュー	25
図 8.1	Q1	29
図 8.2	Q2	29
図 8.3	Q3	29
図 8.4	Q4	29
図 8.5	Q5	30
図 8.6	Q6	30
図 8.7	Q7	30
図 8.8	Q1	31
図 8.9	Q2	31
図 8.10	Q3	31

図 8.11	Q4	31
図 8.12	Q5	31
図 8.13	Q6	31
図 8.14	Q7	32
図 8.15	Q8	32
図 8.16	Q9	32
図 8.17	Q10	32

## 第1章はじめに

人は昔から身体の部位を使って数を表現してきた。マクルーハン『「数」は明らかに、元は指差したり手で分けたりする行為を通して成立する触覚の拡張であり、非常に身体的な起源を持つものと考えられる。』[1]と述べている。代表的なものとして指差しながら数える行為、指を折りながら数える行為がある。両者とも「数」を視覚的に捉えながら、どこまで数えたのかを記録することができるという利点がある。そのような身体を使用して数字を表現する行為や、人間の体の部位の長さをもとにしたフィート、寸、尺、などの単位が存在していることから身体と数の結びつきは密接で深いものであり、自然発生的に世界中で行われたことで、人類が「数」の概念を生み出すもとになっていると考えられる。しかし、体の部位を使用して表現される数の表現は個人差が生じる。曖昧さを回避するために、子午線の1千万分の1を基準とした世界共通の単位であるメートル法が1799年にフランスで生み出され現在でも広く使用されている[2]。自然界から採取された地球上どこでも変わらない長さであるメートルは絶対的な長さの表現として優れている。しかし、身体の一部に由来する長さの表現に比べてその大きさをイメージすることは難しい。これにより数の持つ身体性が弱まり、物体の実寸が直感的にイメージすることが難しくなってしまったと考えた。

現代でも身体の一部を使用して長さを表現するジェスチャは使用されており、さまざまな種類が存在する。多くの場合、物体の実寸のイメージを表現する際にジェスチャは使用される。そのようなジェスチャを活用できる状況の1つとして、3Dモデリング作業が挙げられる。一般的に3Dモデリングをする際にはモデリングソフトを使用する。しかし、大きさを確認する際、ディスプレイ上に表示されているモデルは実際の大きさではなく、あわせて表示される数字でしか大きさを知ることはできない。他方、実世界ではものの大きさを使った「これくらい」のジェスチャで相手に伝える場面が多くある。その際、正確な物の大きさを伝えることは難しいが、数字を使わずに大きさを表現することが可能である。また、実際の大きさをジェスチャで再現しているため直感的に伝えることができる。そこで、このジェスチャを使用してモデリングすることによって製作者のイメージするサイズのモデルを直感的に製作することができるとの着想に至った。

本研究では人間が大きさを表現するときに自然と行ってしまう「これくらい」のジェスチャをセンサやマイコンボードから構成されるデバイス「これくらいデバイス」を実装し、そのデバイスで読み取った情報を使用した3Dモデリングを行う手法「これくらいモデラー」を提案及び「これくらい」を使用したインタラクションの検討を行う。

## 第2章 関連研究

本章ではジェスチャを用いたモデリングの関連研究及び指の幅を取得する関連研究について述べる。

### 2.2 ジェスチャを用いたモデリングの研究

ジェスチャによるモデリングの実装では佐藤らの「ROKURO:ジェスチャを用いたモデリングインターフェースの実装と検討」[3]が存在する。現在のモデリングは主にマウスを用いたモデリングツールによって行われる。しかし、一般的に使われているモデリングツールはそれぞれ特殊な操作や幅広い機能が搭載されており、操作に慣れるまでに時間を要することで、Rokuro では3Dモデリングにかかる負荷を軽減させるために陶芸の製作で用いられる「ろくろ」の動きでモデリングをするインターフェースの製作、検討がされている。図2.1はモデリングしている様子と製作されたモデルである。

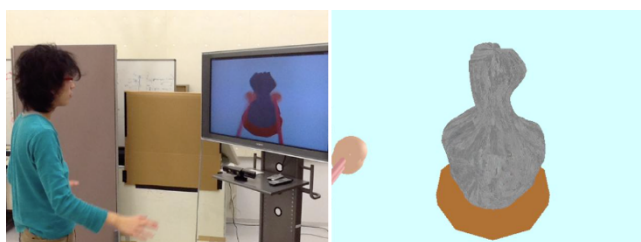


図 2.1 モデリングの様子と製作されたモデル

### 2.3 2本の指の幅から離れた物体の大きさを測る研究

指の間の距離を片手のデバイスで測定する研究として「Tale-FingerRuler」[4]がある。この研究は、デバイスを装着した2本の指で遠くにある対象物を挟むように見ること、対象物との距離や指の開いている間隔から対象物の全長を測定することができるものである。デバイスはArduinoと4つの距離センサ、ジャイロセンサで構成されている。指の幅、対象物までの距離、指の開いている角度などの値を計測しそれらをArduinoで処理し7セグメントLEDに出力する。これにより離れたところからでも直感的な操作で対象物の全長を図ることが可能となっている。本研究では「これくらい」の指幅を取得する必要があるため、指幅を取得し片手で扱えるデバイスを製作している点で類似している。測定している、実際に使用している様子を図2.2、デバイスの構成を図2.3に示す。





図 2.2 実際に使用している様子

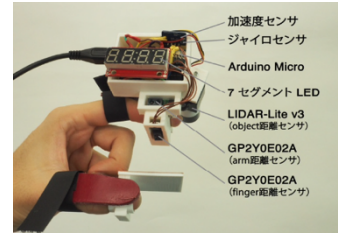


図 2.3 デバイスの構成

## 2.4 関連研究との差異

2.1では、陶芸で用いられる「ろくろ」の技法をモデリングの動作に取り入れ、ジェスチャにより 3D モデルの整形を実現している。本研究とはジェスチャを用いて 3D モデリングを実装する点で類似しているが、2.1の研究ではろくろの持つ「回転する物体を変形させる」という特性上、左右対称な 3D モデルの生成に適している。また、あらかじめ決められている範囲の中でしか操作ができないなどの制約がある。本研究では、ジェスチャをデバイスで読み取りモデリングを行うためデバイスと PC 間の接続が可能な範囲ならば空間的な制限なくモデリングをすることが可能となっている。

また、2.2の研究では片手で扱うことができ、持ち運び可能なデバイスを実装するという点で同じだが、遠距離から空間にかざすように測定する点、計測した値がセグメント LED によりセンチメートル単位で出力される点で差異が存在する。本研究では、物体にかざしながら測定することができ、使用者が表す「これくらい」の尺度を 1つの単位として 3D モデルを作成するため、数値での表現と比較して実際の大きさをイメージすることが容易である点に特徴を有する。手の形やジェスチャによりモデリングや計測を行う研究は存在するが人の表す「これくらい」のジェスチャに焦点を当て、それを入力とするデバイス及び使用するモデリング手法はない。

## 第3章 目的

本章では、本研究の目的及び新規性について述べる。

本研究の目的は2つある。1つは古くから人の会話の中で用いられる「これくらい」のジェスチャを入力動作として取得し活用することで長さの持つ身体性を高めること、2つ目は手軽にモデリングできるシステムを作ることによってモデリングの敷居を下げることである。

現在、広く一般的に使用されているメートル法は地球上どこで誰が測定しても変わることのない便利なものである。しかし、身体との結びつきが少ない長さを起源にしているため、メートル法で長さを伝えられても明確にイメージすることは難しい。そこで人が会話の中で行う「これくらい」を入力に活用することで数と身体との結びつきである身体性を高めることができると考えた。本研究で製作するこれくらいを取得するデバイス（以降、これくらいデバイスと略記）により「これくらい」のジェスチャを取得し外部へと送信することにより外部機器で「これくらい」のジェスチャを使用することができると考えられる。

また、現在使用されている一般的なモデリングソフトは機能が豊富に存在し、複雑な形状の物体を生成できる反面、UIが複雑で画面遷移も多岐にわたるため初心者が手軽に始めることは難しい。本研究で提案するモデリング手法（以降、これくらいモデラーと略記）によりジェスチャによる操作で3Dモデルを生成することができる。これにより、モデリングをよりカジュアルで気軽な行為にできると考えられる。

## 第4章 これくらいデバイスについて

本章ではこれくらいデバイスの概要について述べ、その概念や取得するジェスチャについて述べる。

### 4.1 概要

本研究で製作する「これくらいデバイス」はユーザーの行う「これくらい」のジェスチャを「これくらいの大きさ」と「手全体の角度」の2つに分けそれぞれの値を取得する。前者は指の開いている幅を数値として取得する。後者は手の傾きを度数法で取得する。また加速度と角速度の値から傾きを計算することが可能なためこの2つも取得する。

本デバイスはこれらの値を取得し、外部へと送信することができ、「これくらい」のジェスチャを使用した入力装置として使用することができる。また、ユーザーに気軽に使用可能なデバイスとするため、小型かつ軽量化し、無線通信によりPCへ接続が可能となっている。

### 4.2 デバイスで取得するジェスチャの選定

「これくらい」のジェスチャは人間が数の概念を生み出す以前より、数える対象物を可視化する手段として自然発生的に行われてきた。その動作は使用者のオリジナルでその中でも代表的な現代でも使われる身体の部位を用いた単位の例を下表4.1でまとめる。

表 4.1 単位の発祥国と元になった長さ

単位	発祥国	元になった長さ
尺	中国	手を広げた時の親指から中指までの長さ
寸	中国	親指の幅
掬	中国	両手で掬った水の量
フィート	古代オリエント	足の踵からつま先まで
インチ	ローマ	親指の幅

上記のように世界中では、先史時代より身体を用いた様々な単位が存在し、現代でも使われることがある。さらに現代では大きさを伝えるための様々なジェスチャがさらに存在している。本研究で製作するデバイスで使用するジェスチャの選定と検討を行う。

#### 4.2.1 指の幅を使用したジェスチャ

図 4.2 に示すように，片手の幅以下の大きさを示す際には，指を 2 本用いた幅により示すことがある．親指から小指までの長さが片手で表すことのできる最大の長さである．この最大長以下の長さであればこのジェスチャで大きさを表すことができる．また，図 4.3 で示すように，親指から小指までの長さとして「スパン」という単位が存在する．個人差があるがその長さは，9 インチ=0.2286 メートル=22.86 センチメートルである．つまり，0～約 22.86 センチメートルまでは片手の指を 2 本使用したジェスチャにより表せる．



図 4.2 人指し指と親指で表すジェスチャ



図 4.3 スパンの長さ

#### 4.2.2 両手の幅を使用したジェスチャ

図 4.4 のように片手の幅以上の大きさになると 4.2.2 の指 2 本で行うジェスチャでは表せなくなる．それ以上の大きさを表すジェスチャとして両手の幅を使って表す方法がある．個人差が存在するが人が両手を広げた幅は，大体その人の身長と同じだけの長さになる．この方法を使用すれば自分の身長程度の長さであれば表すことができる．



図 4.4 両手の幅で大きさを表すジェスチャ

### 4.2.3 形状を伝えるジェスチャ

4.2.1, 4.2.2 のジェスチャでは大きさを人に伝えるジェスチャであったが大きさだけでなく形状を人に伝えるジェスチャも存在する．図 4.5 で示すように両手で自分がイメージした形状を包み込むようにしてイメージした大きさを表現することができる．図 4.5 では円柱状の形状を再現し表現している．



図 4.5 包み込むように大きさを表現するジェスチャ

### 4.2.4 検討結果

上記 4.2.1 から 4.2.3 までのジェスチャの中から 4.2.1 の 2 本を使用したジェスチャを本研究で主に使用ことにした．本研究で製作するデバイスはユーザーに気軽に装着して使用してもらうことを目標にしている．その目標を達成するために，両手が塞がる，重量が重い，持ち運びができないなどのユーザーがデバイスを使用する際の障壁を取り除く必要がある．また，本研究のシステムは実世界の大きさに入力した 3D モデルを 3D プリンタで出力することを前提に設計している．大きなジェスチャでは 3D プリンタの印刷可能範囲を超えてしまう可能性がある．4.1.1 のジェスチャならば小型かつ邪魔にならず装着も円滑に行うことができるデバイスを実装でき，3D プリンタの印刷範囲内に収まる 3D モデルを製作できると考えた．よってこのジェスチャに焦点を置き「これくらいデバイス」を製作することにする．

## 4.3 デバイスのシステム設計

これくらいデバイスに 3 つのシステムが存在する.

- ・ 指の幅を測定するシステム
- ・ 手の傾きを測定するシステム
- ・ PC と通信するシステム

本章では, 上記 3 つのシステムそれぞれについて, 概略を述べた後, システム実現するためのセンサーやマイコンボードの選定について述べる,

### 4.3.1 「これくらい」を計測するシステムの検討

4.2 で述べた通り, 本研究で読み取るこれくらいのジェスチャは人差し指と親指を用いたジェスチャを使用し, 2 本指間の長さを計測する. これくらいデバイスを製作する上で, 人差し指と親指の 2 本指で取得するジェスチャの指幅の値を取得する必要がある. ここではいくつかの方法を選出, 検討しより適した方法を適用する.

#### 4.3.1.1 Kinect を用いた検出

2.1 で述べた「Rokuro」ではユーザーのジェスチャにより 3D モデルの大きさを変更している. そのジェスチャを取得するデバイスとして Kinect が使用されている.

Kinect とはジェスチャなどの体の動き, 音声によりゲーム機, コンピュータが操作することができる Microsoft から 2010 年に発売されたデバイスである. この入力装置は, RGB カメラ, 深度センサ, マルチアレイマイクロフォンを搭載する. 元々は Xbox360 の周辺機器として発売されたが, 非公式に PC 用ドライバが開発されたことからゲーム機のみならず一般の PC でも使用できるようになった. この Kinect により, 以前では大掛かりで高価であったモーションキャプチャや人体検出などの技術がより手軽かつ安価に行うことができるようになった.

Kinect ではマーカー付きのスーツなどを使用せずに人の体を読み取ることができる. また, 被写体と Kinect での距離を深度センサにより取得することもできる.

#### 4.3.1.2 LeapMotion を用いた検出

Kinect は体全体の動きや骨格を検知して値を取得することができる。他方で、手の動きに特化したデバイスとして LeapMotion[6]がある。

LeapMotion は 2012 年に LeapMotion 社より発売された手のジェスチャを読み取ることができる入力デバイスである。赤外線カメラと赤外線照射用の LED が搭載されており、1/100 ミリメートルの精度で両手 10 本の指や関節の位置を 3 次元空間座標として取得することができる。また、手のスワイプや空中をタッチするなどのジェスチャも読み取ることができる。Kinect との差異として、Kinect は体全体の動きや骨格を取得できることに對して、手や腕の動きを Kinect よりも正確に取得することができる。

#### 4.3.1.3 距離センサを用いた検出

Kinect や LeapMotion などのカメラで取得した画像から指の距離を取得する以外の方法として、距離センサを用いて測定する方法がある。距離センサの種類としては大きく分けて 2 つある。超音波を用いるセンサと赤外線を用いるセンサである。本稿では 2 本の指間の距離を対象として、超音波と赤外線での検証を行う。また、センサの制御は Arduino というマイコンボードを使用することにする。

Arduino とは、入力/出力ポートを備えたオープンソースのハードウェアである。ArduinoIDE というインターネットから無償でダウンロードできる専用の統合開発環境を使用することができ、コンパイルやボードへの書き込みなどができる。使用する言語は C 言語をベースとしている「Arduino 言語」を使用することができる。アウトプットピンには 5V を出力ができる。それ以上に必要なセンサやモーターがあれば外部から電源を供給することができる。また、有線接続することにより PC 本体と serial 通信を行うことができる。さらに、「シールド」と呼ばれる拡張ボードを Arduino 本体に取り付けることで USB 端子の増設や Bluetooth 通信、Wi-Fi 通信などを実装することができる。

### (1) 超音波センサ

超音波センサーとは超音波を使用し、対象物との距離を測定するセンサーである。センサヘッドから超音波を発信し、対象物から反射してきた超音波を再びセンサヘッドで受信する。発信から受信までに発生する時差を計測し、計算することで対象物までの距離を測定する。図 4.5 に超音波センサー（HC-SR04）を示す。

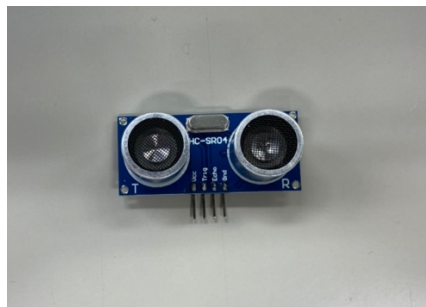


図 4.6 超音波センサー

### (2) 赤外線センサー

赤外線での距離センサーは赤外線を発光する発光側と発光を受信する受光側が一体となったセンサーである。超音波と同様に赤外線で光を発しており対象物に反射した光を受光側で受け取り PSD 方式を用いて距離を計測することができる。PSD 方式とは三角測量の要領で、受光側の入射角度から対象物までの距離を計算する方法である。計測した距離により出力電圧が変化し、電圧をマイコンで計算することで距離を検出することができる。図 4.6 に赤外線距離センサー（GP2Y0E02A）を示す。

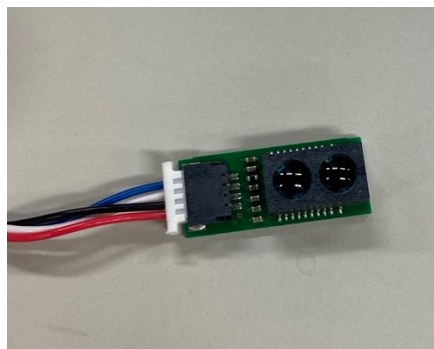


図 4.7 赤外線距離センサー



#### 4.3.1.4 検討結果

Kinect は骨格や手の形を認識できるが、指の値を一つ一つ認識することはできない。また、カメラの画角に認識範囲が限定されてしまうためユーザーが自由に任意の位置で「これくらい」を作ることができない。さらに、カメラの死角になる手の角度で「これくらい」のジェスチャを行った場合、正確な値を取得することはできない。LeapMotion では手の指の値 1 本 1 本の座標を取得することができるが、取得した座標は指の幅の中央に存在するため、ユーザーが作ったこれくらいと誤差が生じてしまう。また、Kinect と同様にカメラの画角によって認識範囲が限定されてしまう。以上の理由から Kinect と LeapMotion ではなく距離センサを採用した。

距離センサーを用いることで上記の認識範囲の問題を解決できると考えた。マイコン側で無線接続の条件がクリアすることができれば、ユーザーは手にデバイスを取り付け、自由な姿勢、位置で「これくらいデバイス」を使用することができる。ユーザーの作る「これくらい」を読み取るためには人間が示す指の幅を正確に読み取る必要がある。そのため、ユーザーが指を開いたときの限界の長さを最大測定長と考えセンサ選定する必要がある。また、指に取り付けるデバイスのためできる限りユーザの動きを阻害することなく測定することができる。そこで、全長が 2 センチメートルで 50 センチメートルまでの距離を 1 センチ間隔で測定することができるシャープ株式会社製シャープ距離モジュール GP2Y0E02A を採用した。

#### 4.3.2 手の傾きを測定するシステムの検討

これくらいデバイスは「これくらい」という手のジェスチャを取得するデバイスである。「これくらい」のジェスチャの中には指の幅で想像上の大きさを再現することだけでなく手の傾きにも意味が存在する。そのため、手の傾きや動きなどもデバイスにより取得する必要がある。具体的な取得する値は 3 次元空間内での角速度と加速度である。この 2 つを取得することで、手の傾き角度である姿勢角を計算により求めることができる。

手の動きを検出するデバイスとして M5stickC[4]を採用する。M5stickC とは、M5stack 社が開発・販売をしているマイコンである。全長が  $4.8 \times 2.4 \times 1.4$  センチメートルで Arduino と比較しても端末が非常に小型になっており、ArduinoIDE を使用してのコンパイル、書き込みができる。また、6 軸慣性センサー（加速度 3 軸 + ジャイロ 3 軸）、0.96 インチのカラー液晶ディスプレイ、マイク、LED、Wi-Fi と Bluetooth による通信機能、物理ボタン（3 つ）、バッテリーなどの様々な入/出力装置を搭載している。

M5stickC を採用した理由は 3 つある。小型かつバッテリーが内蔵されており単独で動作することができる点、4.3.1.4 で述べたセンサーとの接続が容易であり、値の取得がしやす

い点, Wi-Fi や Bluetooth 通信による無線接続が可能である点, 以上の 3 点より本研究で目標としているデバイスが製作できると判断した.

#### 4.3.3 PC と通信するシステムの検討

PC との通信は M5stickC に搭載されている Bluetooth モジュールを使用したシリアル通信で行う. M5stickC には Wi-Fi も搭載されているが, リチウムイオンポリマー充電電池の容量が 80mAh しかなく, 無線での使用を想定し Wi-Fi と比較してバッテリー消費の少ない Bluetooth により PC などの外部機器に接続する.

## 第5章 これくらいモデラーについて

本章では「これくらいデバイス」から取得した値から 3D モデルを製作する手法「これくらいモデラー」の概要及びモデリングシステムについて述べる。

### 5.1 これくらいモデラーの概要

人が無意識のうちに「これくらい」を行っている場面の一つとしてもものづくりの現場が挙げられる。親指と人差し指の 2 本指の間で大きさを表現する場面を想定したときモデリングとの相性が良いと考えた。一般的なモデリングツールは大きさを表示する際、ディスプレイ上の 3D モデルの大きさやミリメートルなどの単位と数字を用いて表現する。しかし、ディスプレイ上の 3D モデルは実際の大きさではなく、数字で表現された大きさを実世界にあてはめてイメージすることは慣れが必要で難しい。他方、実世界で大きさを伝える際に指や手の幅を使った「これくらい」で相手に伝える場面が多くある。その際の大きさは正確ではないが実際の大きさをジェスチャで再現しているため直感的に伝えることができる。このジェスチャを入力としてモデリングし 3D プリンタで出力することにより、ユーザーが大きさをイメージしながら 3D モデルを製作できるとの着想に至った。本研究では「これくらいデバイス」の応用例として、デバイスを利用したモデリング手法を提案する。

本研究で製作した「これくらいデバイス」により取得した値（これくらいの長さ、加速度、角速度）を使用し、「これくらいモデラー」を応用の一例としてモデリングを行うことのできる機能を「これくらいモデラー」と命名し本研究及び本稿で使用する。

### 5.2 「これくらい」を使用したモデリングシステム

これくらいモデラーを実装する上で画面上の 3D モデルをどのように設計するのかを決める必要がある。また製作した 3D モデルは 3D プリンタなどでの印刷などユーザーによる利用を可能にするために 3D データのファイル出力機能も実装する。

本研究の目的として、「3D モデルの実空間での大きさをイメージしながらモデリングをする」がある。そのため「これくらい」で 1 つの長方形オブジェクトを生成し、そのオブジェクトを 1 つの単位としてボクセル的にモデリングすることで実空間での大きさのイメージがしやすいと考え、一連の流れでモデリングすることにした。製作手順は下記の通りである。

1. 直方体の X 軸の長さを「これくらい」の指幅により決定
2. 直方体の Y 軸の長さを同様の方法で決定
3. 直方体の Z 軸の長さを同様の方法で決定
4. 完成した直方体をプレビュー（直方体を 3D データへ出力）
5. 出来上がった直方体を使用したボクセルのようなモデリング（モデリングした物体を 3D データで出力）

以上の製作手順で 1 番から順番に 3D モデルを製作していく．各手順間を行き来する決定・キャンセルの操作として、手の捻りを使用する．これくらいの長さを維持したまま人差し指を軸に時計回り捻ると段階が 1 つ上がり，反時計回りに捻ることで段階を 1 つ下げることができる．どのくらい手の回転を認識しているかは画面右上のメーターで確認することができ，中央の針が青い部分に到達すると 1 つ進む，赤い部分に到達すると一つ戻るの処理が行われる図 5 に直方体各軸の決定からプレビューまでの製作手順を示す．

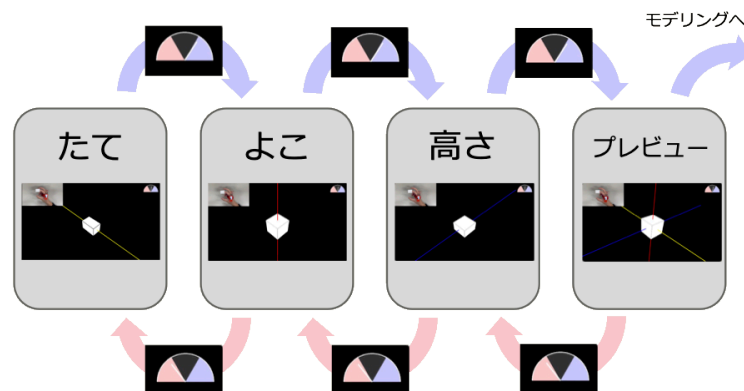


図 5 製作手順

## 第6章 これくらいデバイスの実装

本章ではこれくらいデバイスを実装する際の使用機材を述べ、これくらいを測定するシステム、手の姿勢を測定するシステム、取得した値を Bluetooth により外部へと送信するシステムの実装方法を述べる。その後、これくらいモデラーでのデバイスからの値を受け取るシステム、受け取った値を使用したモデリングシステムについて述べる。

### 6.1 使用機材

これくらいの距離を測定

- |                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| ・ GP2Y0E02A (赤外線距離センサー) | [指間の距離を測定]       |
| ・ M5stickC              | [センサからの電圧を距離に計算] |

手の姿勢、移動量の測定

- |            |                |
|------------|----------------|
| ・ M5stickC | [加速度, ジャイロセンサ] |
|------------|----------------|

取得した値を Bluetooth により送信

- |            |                   |
|------------|-------------------|
| ・ M5stickC | [Bluetooth モジュール] |
|------------|-------------------|

### 6.2 これくらいデバイスの実装

#### 6.2.1 2本の指間の距離を測定するシステム

「これくらい」の大きさを測定するにあたり、親指と人差し指のいずれかに赤外線距離センサー(GP2Y0E02A)を取り付ける必要がある。赤外線距離センサーで距離を求めるためには対象物が赤外線の照射を遮る必要がある。そのため、対象物が可能な限り大きい方が測定しやすいと考えた。人差し指にセンサーを取り付け、親指を対象物として長さを測定する。指の幅を正しく測定するためには指にセンサをしっかりと固定する必要がある。マジックテープのように布製のベルトを使用するとユーザーの指の外周に即座にフィット

させることができるが、たわみなどによって対象物に垂直に赤外線当てることができなくなってしまう。

たわみのない素材を使用することにより正確に指間を固定できると考え、3Dプリンターで指サックのようなセンサーケースを製作した。著者自身の指をはかり作成した M サイズ（内径 1.5 センチメートル）、指の細いユーザーを想定し、ひとまわり小さい S サイズ（内径 1.3 センチメートル）、太い指を想定した L サイズ（内径 2 センチメートル）の 3 つのサイズを用意することでユーザーは自分の指にフィットするケースを装着することができる。センサーケースの写真を図 6.1 にセンサーを取り付けた写真を図 6.2 に示す。

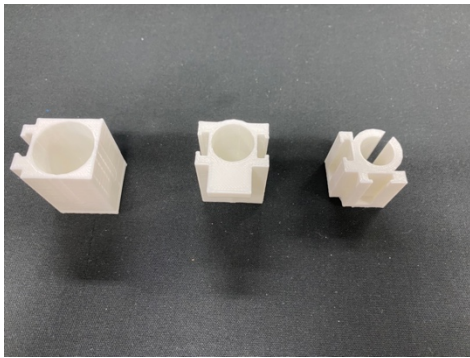


図 6.1 センサーケースの写真（左から L, M, S）

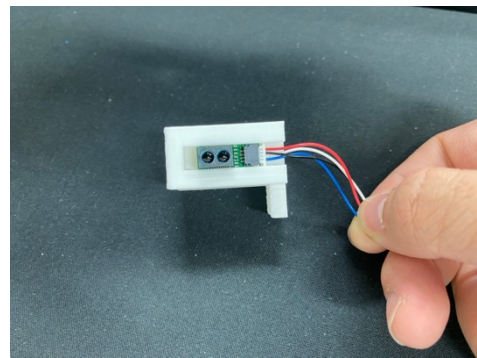


図 6.2 センサーを取り付けた写真

センサーからの配線を下記のように M5stickC と接続し、距離データを送信していく。

VDD — 3v3  
GND — GND  
Vout(A) — G26  
GPIO1 — 3v3

M5stickC 側では距離センサーから送られてくるアナログ出力を読み取っている。アプリケーションノート[7]より 50 センチメートルで 0.55V、4 センチメートルで 2.2V が出力されることがわかる。それらに対して、Map 関数を使用することにより電圧をセンチメートルに変換して変数に格納している。

## 6.2.2 手の姿勢を取得するシステム

手の姿勢を取得するシステムとして M5stickC に搭載されているセンサーを使用する。M5stickC には MPU6886 という 6 軸の加速度センサーが搭載されている。6 軸加速度センサーとは、加速度の X 軸, Y 軸, Z 軸の 3 つと各速度の X 軸, Y 軸, Z 軸の 3 つを足した 6 つの値を取得することができるセンサーである。手の現在の角度（姿勢角）は加速度と角速度のセンサーの値を使用することで計算によって出すことができる。今回は Arduino の M5stick ライブラリを include することで使える MahonyAHRSupdateIMU() 関数を呼び出すことで垂直方向 (pitch), 回転方向 (roll), 水平方向 (yaw) の姿勢角を計算している。しかし、この方法で姿勢角を計算すると図 6.3 のように水平方向の角度にずれ（ドリフト）が生じてしまう。なお、このグラフの横軸は時間、縦軸は角度を表しており時間の経過によりヨーが減少していることがわかる。

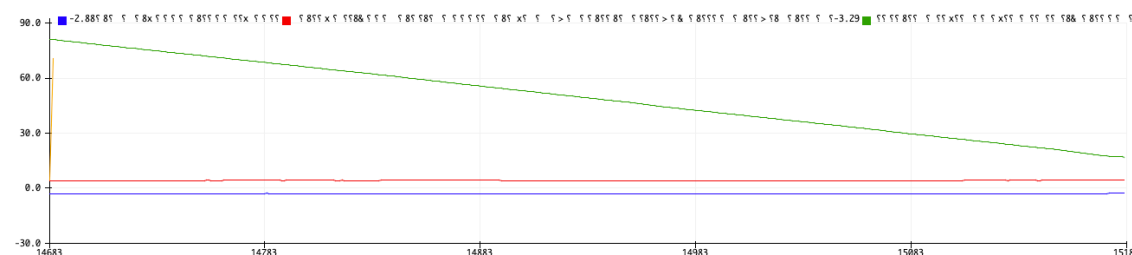


図 6.3 ピッチ（青）ロー（赤）ヨー（緑）のグラフ

このドリフトは、センサの誤差まで積算されてしまい、それが積み重なって起きている。ジャイロの値を観察したところ Z 軸のジャイロセンサに X 軸, Y 軸, よりも大きなずれを確認できた、ずれている値はおおむね一定なので、Z 軸のジャイロセンサの値に補正をかけてドリフトを解消していく。具体的には 10 回分の Z 軸ジャイロセンサの値を取得し、その平均値を取得したそのままの値に加算している。その結果、センサの値をそのまま使うよりもドリフトは収まり安定した数値にすることができた。図 6.4 に補正したデータのグラフを示す。

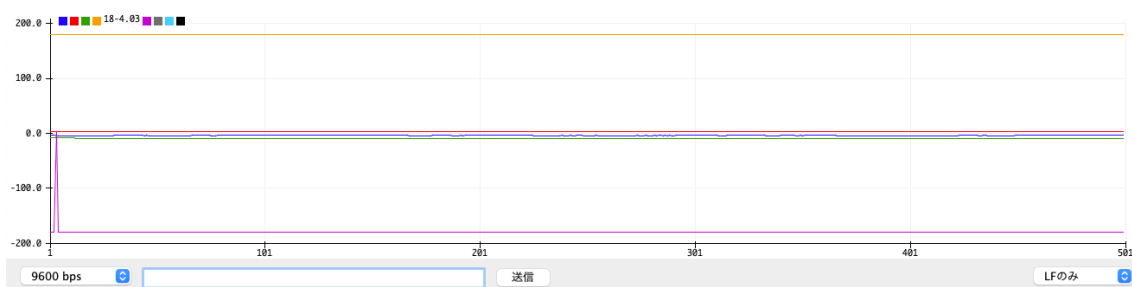


図 6.4 補正後のグラフ

### 6.2.3 Bluetooth により外部へと送信するシステム

6.2.1, 6.2.2 で取得した「指の幅の値」, 「加速度の値 (X 軸, Y 軸, Z 軸)」, 「角速度の値 (X 軸, Y 軸, Z 軸)」, 「姿勢角の値 (pitch, roll, yaw)」の値を M5stickC 外へ送信するために Bluetooth を利用したシリアル通信を行う。今回は Arduino のライブラリの 1 つである `BluetoothSerial` を使用する。このライブラリを使うことでシリアル通信を Bluetooth で行うことができる。送信する数列は読み取る側のことを考慮し、数値をカンマで区切った数列を送信する。



## 第7章 これくらいモデラーの実装

本章では、これくらいデバイスから送られてきた値をもとにしたモデリング手法である「これくらいモデラー」についての実装を述べる。使用する動作環境についてのべた後、「デバイスから送られてきた値を受け取る機能」、「3D オブジェクトを作成する機能」、「製作した物体を 3D データとして出力する機能」の 3 つの機能について述べる。

### 7.1 動作環境

実装する言語は Processing を使用する。Processing の 1 つのスケッチの中で「デバイスから送られてきた値を受け取る機能」「3D オブジェクトを作成する機能」「製作した物体を 3D データとして出力する機能」を実装する。

#### 7.1.1 Processing

Processing は Java をベースとしたプログラミング言語とその統合開発環境である。オープンソースのソフトウェアのため、公式ページ[9]から無償でダウンロードすることができる。1 つのファイルの単位は「スケッチ」と呼ばれており、グラフィックや音を使ったプログラムを手軽に作成することが可能である。そのため、プログラミングに親しみのない学生やアーティスト、デザイナーなどにも敷居の低い言語となっている。また、プログラミング初学者が扱うことが想定されているため、プログラミング習得が簡単にできるように設計されている。Processing は画像生成やアニメーション、インタラクティブアートをより制作しやすくする目的で開発がスタートしたため、短いコードで動画や画像、オブジェクトの描画をすることができ、様々な分野で利用されている。

以上のことから本研究での「これくらいモデラー」でのグラフィックの表現とインタラクションの実装を考慮し、Processing が適していると考え採用する。

## 7.2 デバイスからの値を読み取る機能

Processing がシリアル通信を受け取る方法として `processing.serial` ライブラリを使用する。このライブラリを使用することで Processing 側でのシリアル通信を書き込み・受け取りをすることができる。M5stickC からは 1 行ごとにカンマ区切りのセンサーの値が送信される。Processing 内では 1 行ごとに数列を読み取り `split()` 関数を呼び出すことで「,」の前の値を配列の 0 番目から保存していく。「これくらいモデラー」に使用する値は「これくらいの幅」, 「姿勢角の角度」を使用するのでその値を配列に格納し使用する。

## 7.3 3D オブジェクトを作成する機能

これくらいモデラーでは、ユーザーの「これくらい」のジェスチャを用いて 3D オブジェクトを生成することができる。Processing で 3 次元空間に長方形を描画する `box()` 関数を呼び出し描画していく。`box()` の引数は X 軸の長さ、Y 軸の長さ、Z 軸の長さの 3 つあり 5.2 のモデリングシステムで述べた通り X 軸→Y 軸→Z 軸の順番で直方体の 3 辺の長さを決定していき `box()` に必要な引数を取得していく。

また、各軸の決定、取り消しの操作は手の傾きによるジェスチャにより行う。そのため、デバイスから送信される姿勢角の値を使い、手の傾きを取得する。M5stickC のディスプレイ側が地面と水平になる位置を初期位置とし、右手の可動域を考慮しそこから、左に 90 度傾けたら取り消し（1 つ前の軸決定に戻る）、右に 45 度傾けたら決定とする。

初期画面では X 軸の決定から始まる（図 7.1）。これくらいを取得した値を Y 軸として決定した後に Y 軸の設定画面に遷移する（図 7.2）。同様に、Y 軸を決定すると Z 軸（図 7.3）の設定画面に遷移する。3 つの軸の長さが決定すると、作成した長方形のプレビュー画面（図 7.4）に遷移する。プレビュー画面で描画された長方形は姿勢角の値を使用し、右手の傾きと同期しており、手を傾けることで直方体を回転することが可能である。

また、ユーザーの手の傾きを視覚的に表示するため、右上には手の傾きを示すメーターを設置した。白い針が青い部分まで到達すると決定、赤い部分に到達すると戻るようになっている。

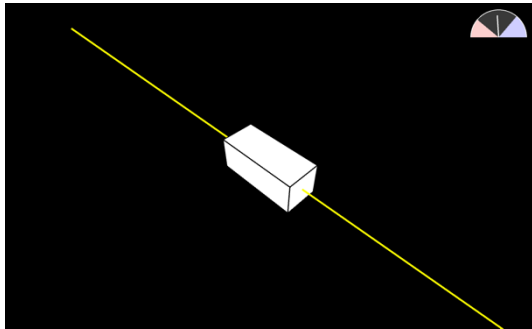


図 7.1 X 軸の設定画面

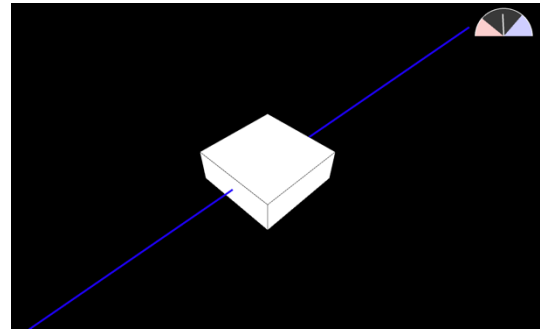


図 7.2 Y 軸の設定画面

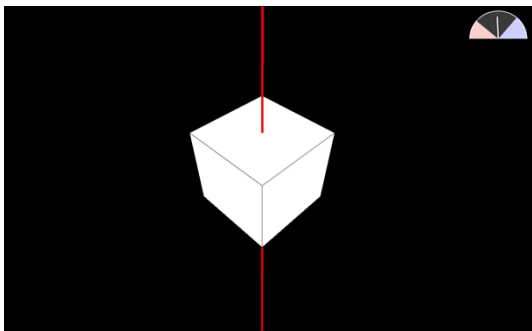


図 7.3 Z 軸の設定画面

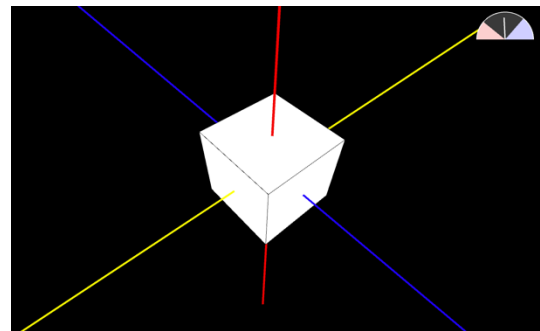


図 7.4 プレビュー

各軸の長さを決定していき、プレビューで決定することでモデリング画面に移行する。モデリング画面では生成した直方体を1つの単位として3Dモデルを製作することが可能である。腕を軸にして手を右に傾けると直方体オブジェクトは右に移動し、左に傾けると左に移動する。前方に傾けると前進し、後方に傾けると後退、水平方向右に回転させると上昇、左に回転させると下降させることができる。また、指幅を縮めることで移動させた先に長方形オブジェクトを配置することができる。3次元空間上に複数の長方形オブジェクトを配置することでユーザーが作りたい形を製作することができる。このモデリング方法は、積み木やレゴブロックなどから着想を得ており、一般的なモデリングソフトでのモデリング操作より、より直感的にモデリング方法を理解することが可能である。

### 7.3 3D データへの出力

描画された 3D オブジェクトを 3D データに変換するライブラリとして OBJExport を使用する。このライブラリでは、描画前に `beginRecord()`、描画後に `endRecord()` の関数を呼び出すことで描画された 3D オブジェクトを .obj ファイルの 3D データに保存することができる。このときのファイルの出力先は Processing の実行ファイルと同じフォルダ内に出力される。また、出力されるファイルは 2 つあり、プレビューまでで作成した長方形と長方形を組み合わせてモデリングしたオブジェクトが出力される。ファイル名はそれぞれ「korekurai.obj」（プレビューまでの長方形）、「made.obj」（モデリングしたオブジェクト）である。

## 第8章 システム評価

本章では、NICOGRAPH 2022 でデモ発表を行った際、本デバイス及び本モデリング手法を体験したユーザーから得られた意見や学内で実施した評価実験のアンケートを元に、モデリングしながら実際の大きさの感覚を得ることができたかの評価について述べる。また、モデリング手法の操作性についても評価を行いその結果について述べる。

### 8.1 発表

本研究は、NICOGRAPH 2022 で 2022 年 11 月 4 日から 6 日までの期間中 7.3 で述べた機能からプレビューまでの機能をデモ発表形式で行った。その際、参加者の方々から、実機を操作した上で、様々な意見をもらうことができた。その時の意見では「直方体を生成していることからモデリングを MagicaVoxel[10]のような手法で実装するといいいのではないか」という意見や「感覚的な尺度を入力としているのが面白い」等の意見を得ることができた。研究室以外の人から意見を得られたため、普段もらえない意見をもらうことができた。

### 8.2 評価実験

2022 年 12 月 13 日から 15 日の期間に明星大学 2 8 号館 1 2 8 教室で評価実験を行った。評価対象者は 20 代の明星大学の学生、男子 10 名、女子 2 名の計 12 名に実施した。「これくらいデバイス」を装着した状態で「これくらいモデラー」によるモデリングを行ってもらい、体験前と体験後にアンケートによる調査を行った。調査項目は以下の通りである。

● 体験前アンケート項目

- Q1. 会話の中でジェスチャを使用することはありますか
- Q2. 両手や指 2 本の幅で大きさを表現する「これくらい」のジェスチャを使うことはありますか
- Q3. 大きさを測るとき、体の部位の長さと比較して測定することはありますか
- Q4. 3D モデリングに興味はありますか
- Q5. 3D モデリングに興味はありますか
- Q6. 3D モデリングの経験はありますか
- Q7. 3D プリンタを使用して 3D データを出力したことはありますか
- Q8. 3D モデルを作る際に大変なことはなんですか。（未経験の方は予想で答えてください）

● 体験後アンケート項目

- Q1. 「これくらい」を使ったモデリングは楽しかったか
- Q2. 「これくらいモデラー」を使うことで一般的なモデリングソフトと比べてモデリングの敷居が低くなると思いますか
- Q3. 各軸を決める操作はやりやすかったか
- Q4. 「これくらいデバイス」の装着は簡単だったか
- Q5. モデリングする時のデバイス操作はやりやすかったか
- Q6. 実空間で 3D モデルの大きさをイメージしながら制作できましたか
- Q7. 自分が置きたい所に長方形のモデルを配置することができたか
- Q8. 自分が置きたい所に長方形のモデルを配置することができたか
- Q9. 操作画面は見やすかったか
- Q10. 3D モデルの大きさを感じながらモデリングができたか
- Q11. 傾きのメーターや UI があることで操作しやすいと感じるか
- Q12. 自由記述欄

### 8.3 実験結果

事前アンケート、事後アンケートの Q1 から Q11 までの各結果を評価ごとの割合を円グラフにて表す.

#### 事前アンケート

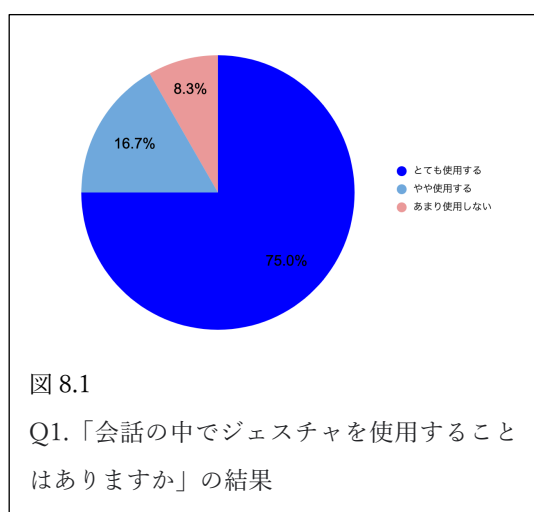


図 8.1

Q1. 「会話の中でジェスチャを使用すること  
はありますか」の結果

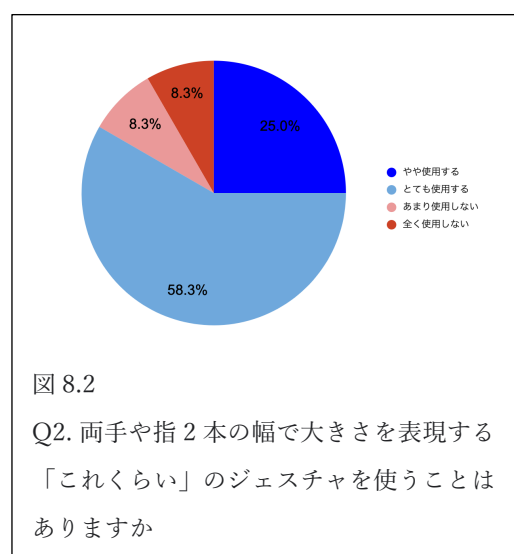


図 8.2

Q2. 両手や指 2 本の幅で大きさを表現する  
「これくらい」のジェスチャを使うことは  
ありますか

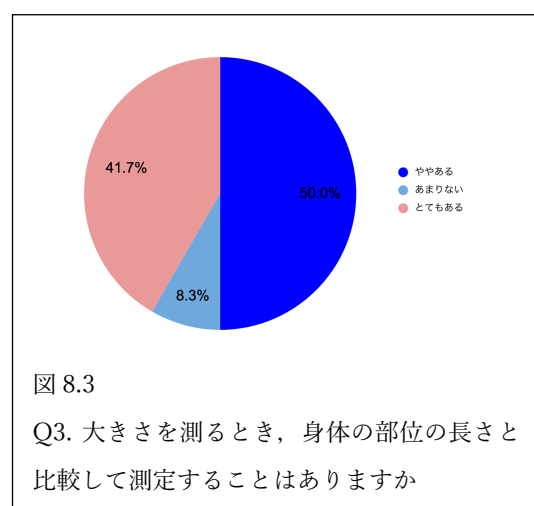


図 8.3

Q3. 大きさを測るとき、身体の部位の長さ  
と比較して測定することはありませんか

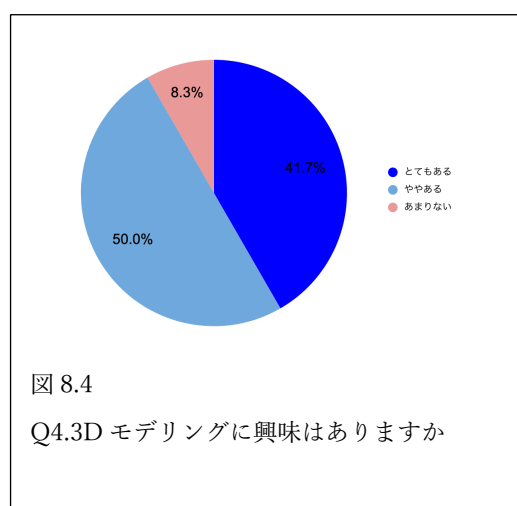
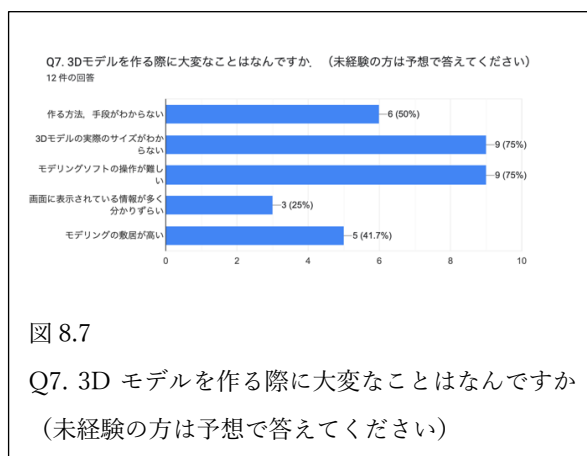
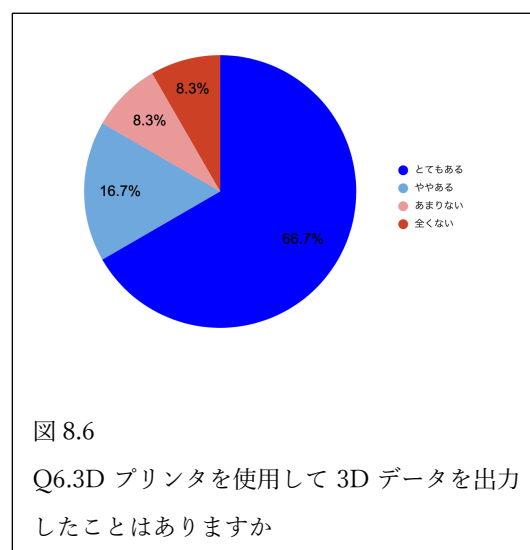
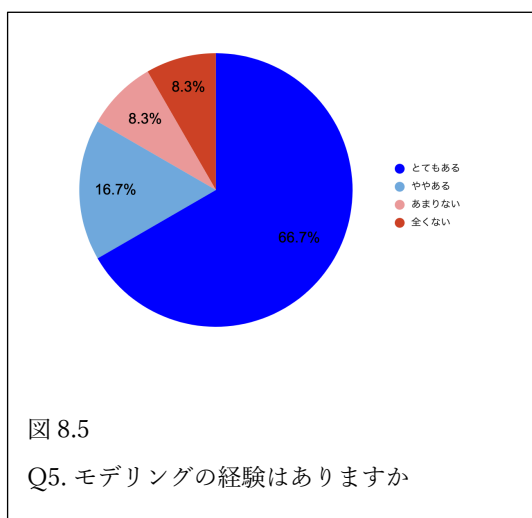


図 8.4

Q4.3D モデリングに興味はありますか





## 事後アンケート

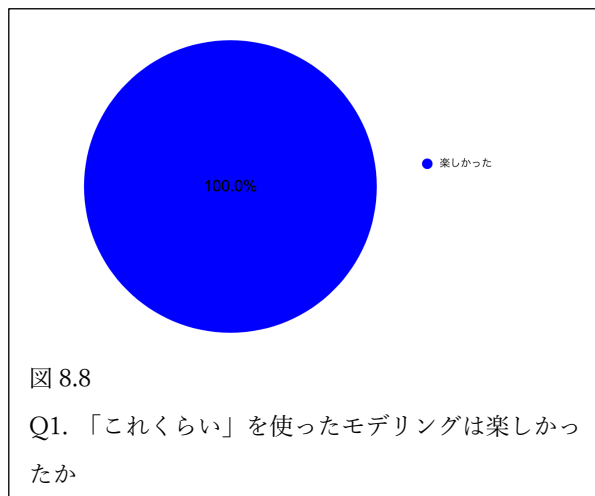


図 8.8

Q1. 「これくらい」を使ったモデリングは楽しかったか

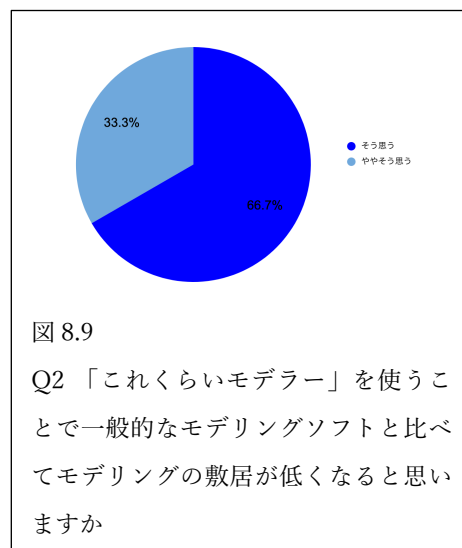


図 8.9

Q2 「これくらいモデラー」を使うことで一般的なモデリングソフトと比べてモデリングの敷居が低くなると思いますか

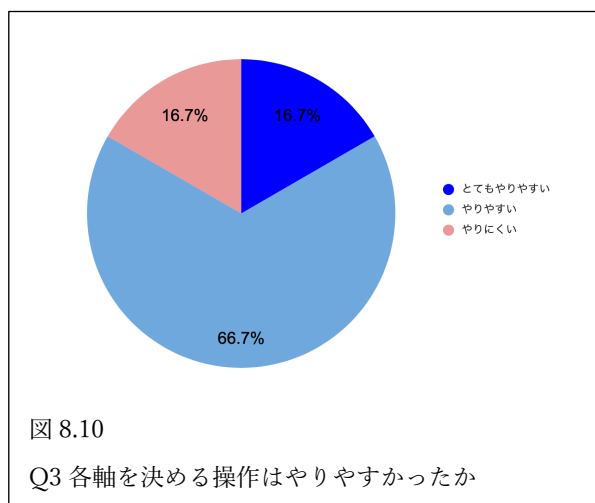


図 8.10

Q3 各軸を決める操作はやりやすかったか

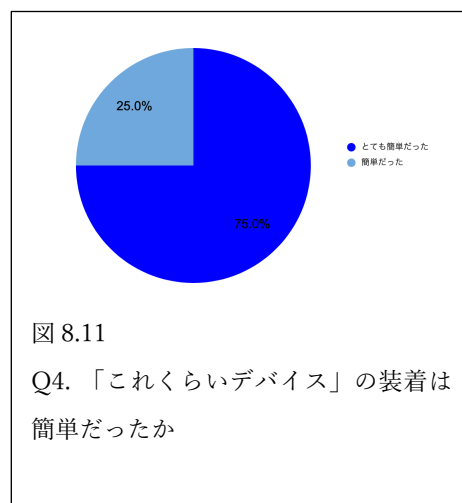


図 8.11

Q4. 「これくらいデバイス」の装着は簡単だったか

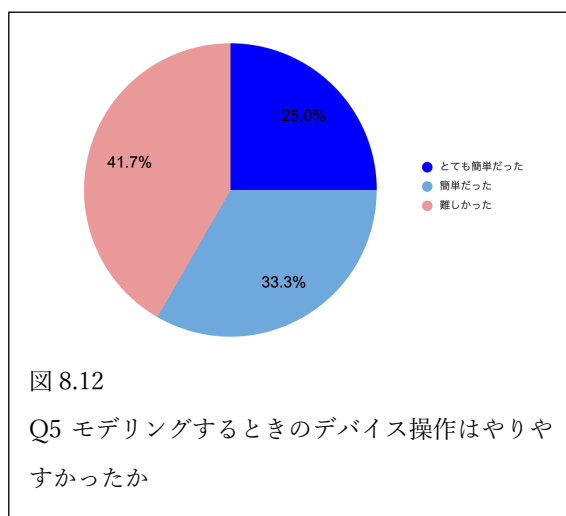


図 8.12

Q5 モデリングするときのデバイス操作はやりやすかったか

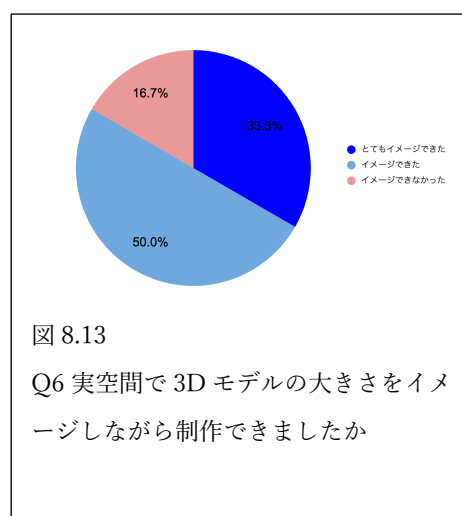


図 8.13

Q6 実空間で 3D モデルの大きさをイメージしながら制作できましたか

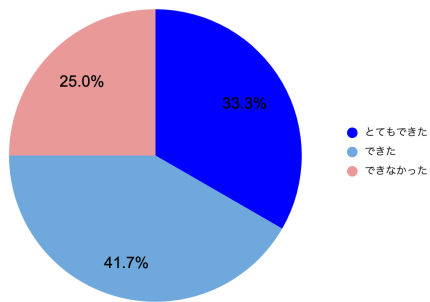


図 8.14

Q7. 自分がおきたいところに長方形モデルを配置することができたか

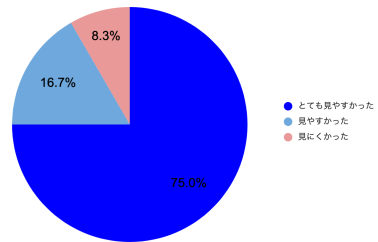


図 8.15

Q8. 操作画面は見やすかったか

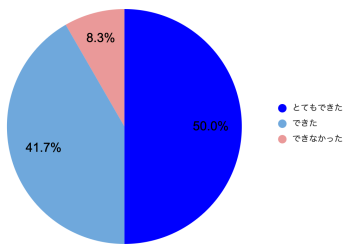


図 8.16

Q9. 3D モデルの大きさを感じながらモデリングができたか

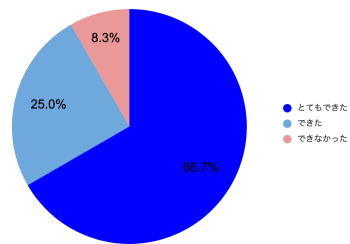


図 8.17

Q10. 傾きのメーターや UI があることで操作しやすいと感じるか

### 8.3 実験からの考察

評価実験で得られた結果から，3Dモデルの大きさを実空間でイメージすることができたか，モデリングの敷居を下げることが出来たか，本研究の目的を達成できたかを考察する．

#### 8.3.1 実空間での3Dモデルの大きさをイメージについての考察

モデルのイメージについての質問は事前アンケートのQ7と事後アンケートのQ10である．事前アンケートのQ7の回答では75%の人がモデリングをする際に3Dモデルの実際のサイズがわからなくて大変だと感じていることがわかる．また，この回答をした人は7人おり，そのうち6人がQ5のモデリング経験を問う質問で「ややある」「とてもある」と回答している．そのことから，経験者は3Dモデルの大きさがイメージできないことが大変だと感じていることがわかる．事後アンケートのQ10の回答では，本研究の手法を使うことで91.7%の人が3Dモデルの大きさを感じながらモデリングすることが出来たことがわかる．

以上の考察から，モデリングする際に大きさのイメージができないと感じている人も本研究のシステムを使うことで3Dモデルの実際の大きさをイメージしながらモデリングすることができると考えられる．

#### 8.3.2 モデリングの敷居についての考察

モデリングについての質問は体験後アンケートのQ1とQ2である．Q1では全員が体験を楽しかったと回答していた．楽しく使用できないデバイスでは再度使用する際に使用する意欲が減少すると考えられる．楽しく使用できるデバイスを使用することで再度使用する意欲が増加し敷居が下がると考えられる．またQ2では「そう思う」「思う」と別れてはいるが全員が本研究のシステムを使用することでモデリングに対する敷居が下がると回答している．

以上のことから，本研究の手法を使うことで再度使用する際の意欲を下げず，モデリングに対する敷居を下げることができると考えられる．

### 8.3.2 操作性についての考察

操作性についての質問は事後アンケートの Q3, Q5, Q7 である。Q3 の直方体オブジェクトの長さを決める操作では「やりやすい」「とてもやりやすい」の回答は全体の 83.3% を占めており使用した人の大半はやりやすいという回答を得られた。しかし、Q5 と Q7 での質問で操作を「難しかった」や「できなかった」と答えた人の割合が増加していることがわかる。

以上のことから、直方体オブジェクトを生成する際には操作がしやすかったが、モデリングでの操作が難しくなっていると考えられる。考えられる原因としては直方体を生成する段階では「進む」「戻る」「指で長さを示す」という 3 つの要素であったが、モデリングをする段階では「前進」「後退」「右進」「左進」「上昇」「下降」「配置に決定」と 2 倍以上の操作を要求されるため初めて使う人は覚えることが多くなっていることが考えられる。

## 8.4 評価実験全体の結果

本研究で製作したデバイス及びモデリング手法の評価実験を行った結果、本研究の目的である「これくらいデバイス」を使用することで数の身体性を上げることが出来た。しかし、これくらいモデラーを使用したモデリングでは体験者の思ったような操作が行えないなど操作性に課題が残った。使用者がこれくらいモデラーを使用し思い通りの 3D モデルを作ることができるよう操作性の向上が必要となる。

## 第9章 今後の展望

本章では本研究の今後の展望について述べる。

### 9.1 新たなこれくらいデバイスの製作

8.3.1 で操作性を上げることが課題であると考察をすることができた。操作性を向上させる手段として、デバイス自体を改良することができる。「これくらいデバイス」は手軽に利用してもらうことを目的としているため、片手での装着を想定してジャイロセンサと距離センサを搭載した。しかし、手の傾きと指間の距離では入力に使える要素が少なく操作方法が限定されてしまう。また、片手のみの操作のため操作方法によってはアクロバティックな動きを要求されてしまう。それらの課題を解決する方法として、新たなセンサーやスイッチを追加することが考えられる。例えば、指の先に圧力センサーを取り付けることで指をどれくらいの力で閉じているかを測定することができる。現在では手の傾きや指の幅などユーザーの感覚を使用した操作になっているが、スイッチを取り付けることで感覚的ではない操作を実現できる。

### 9.2 これくらいデバイスの活用

本研究では「これくらいデバイス」の活用例として「これくらいモデラー」を実装した。これくらいのジェスチャはものづくりにおいてよく使われていると考えモデリングの機能を実装した。しかし、これくらいのジェスチャは実世界の多くの場面で使われており、モデリング以外にも活用することができると考えられる。現在考えられる「これくらいデバイス」の使用例として以下が挙げられる。

#### (1) 測定

これくらいのジェスチャは実空間での長さを再現する以外にも指の幅が何個分かを調べることで大まかに長さを測定することができる。これくらいデバイスに取り付けられた M5stickC により長さを記録していき「これくらい」のジェスチャを使って長さを測定することができる。また M5stickC での計算も可能なので測定した長さを使い立体の体積や容

積を測定することもできる。また角度も取得することができるため分度器のように角度を測定することも可能であると考えられる。

## (2) 音楽

音楽を演奏する際、長さを使用する楽器がある。トロンボーンなどの楽器は、スライド管と呼ばれる管を動かすことで音程を変えることができる。これくらいデバイスでは指の長さを測定することができるため、長さと音程を組み合わせることで演奏デバイスとしても使用できることが予想される。

## (3) 外部デバイス

これくらいデバイスは指の距離と手の角度を取得することで「これくらい」の動作を読み取っている。これくらい以外で取得できるジェスチャとして「つまむ」という動作がある。実世界では、コンロの火力調整やダイヤル式の音量調節など、つまむ動作を使った入力装置が数多くある。これくらいデバイスで使用しているマイコンの M5stickC には Bluetooth や Wi-Fi が搭載されており遠隔での操作が可能である。距離的な制約を持たず、ジェスチャで利用できるデバイスとしても使用することができると思われる。

## 第10章 おわりに

本項では、数の持つ身体性を高めるため、人が大きさを表す際に両手や指の幅を使い行う「これくらい」のジェスチャーを取得するデバイスを製作した。さらに、そのデバイスを使用してモデリングする手法であるこれくらいモデラーを提案した。評価実験の結果から、モデリングする際の実空間での大きさのイメージを明確にすることができたと考えられる。しかし、改善点としてモデリングする際の操作性などの精度に問題があることが確認できた。今後、これらの問題点を改善していき操作性の向上していくことができると考えられる。また、これくらいデバイスにさらにセンサーやスイッチを取り付けることでより幅広い場面で使用できるデバイスにすることができ様々な場面で数のもつイメージをより明確にすることができると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導ご鞭撻いただきました尼岡先生には大変お世話になりましたこと，深く感謝すると共に，厚く御礼申し上げます．また研究室の先輩方，共に頑張ってきた研究室の皆様，ご指導いただきました他教員の皆様にも感謝の気持ちと御礼を申し上げたく，謝辞にかえさせていただきます．



## 参考文献

- [1] 服部桂, マクルーハンはメッセージ, イースト・プレス, 2018, p46.
- [2] Henri Moreau 高田誠二 訳, メートル法の起源 4P.
- [3] 佐藤慧太, 山本敏雄, 松山克胤, 今野晃市, "ROKURO: ジェスチャを用いたモデリングインターフェースの実装と検討"
- [4] 山田光一, 登山元気, 油井俊哉, 橋田朋子, Tele-FingerRuler: 離れた対象の長さを 2 本の指で直感的に測るシステム, 情報処理インタラクション 2018.
- [5] 賢くなれる単位の部屋 . <https://www.hitachi-hightech.com/jp/channel/units/index.html>.
- [6] LeapMotionController. <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>
- [7] GP2Y0E02A, GP2Y0E02B, GP2Y0E03 アプリケーションノート.  
[https://jp.sharp/products/device/doc/opto/gp2y0e02\\_03\\_appl\\_j.pdf](https://jp.sharp/products/device/doc/opto/gp2y0e02_03_appl_j.pdf)
- [8] M5STACK. <https://m5stack.com/>
- [9] Processing. <https://processing.org/>
- [10] MagicaVoxel. <https://ephtracy.github.io/>