

令和 5 年度

卒業研究報告書

# 仮想筋電義手の開発に関する研究

指導教員 戸崎 哲也  
報告者 河合 将暉

神戸市立工業高等専門学校  
電子工学科

## (論文要旨)

上肢切断者が筋電義手を装着し、日常生活で扱えるようになるには相応の訓練が必要とされる。この筋電義手の訓練を代替するものとして、仮想筋電義手シミュレータが先行研究によって開発されてきた。本研究では、先行研究で一般的に使用されていた配布されている仮想筋電義手3Dモデルとは異なる3Dスキャナを用いた仮想筋電義手3Dモデルを使用することにより筋電義手装着訓練の訓練効果に影響があるかを検討した。また、入力インターフェースにFirstVRを採用することによる訓練効果への影響を検討するために、シミュレータのプロトタイプを提案した。健常者を対象にした6段階定性評価アンケート調査を行い、入力インターフェースをキーボード・マウスとしたシステムとFirstVRのシステムとを比較したところ、FirstVRのシステムがより没入感が高いという結果が得られた。しかし、操作性や遅延といった点では優位性がみられることはなく、さらにFirstVRの装着位置・ジェスチャ学習のプロセスなどの条件を加えて改善することが求められる。

## 目次

第1章: はじめに . . . . .	1
1.1 研究背景 . . . . .	1
1.2 関連研究 . . . . .	2
第2章: 理論:3D モデルの製作 . . . . .	3
2.1 EinScan HX . . . . .	3
2.1.1 製品仕様 . . . . .	3
2.2 Blender . . . . .	4
2.2.1 スムージング . . . . .	4
2.2.2 ボーン構成 . . . . .	4
第3章: 理論:Unity・FirstVR . . . . .	5
3.1 Unity . . . . .	5
3.1.1 シエーダー . . . . .	5
3.1.2 オブジェクト . . . . .	5
3.1.3 衝突判定 . . . . .	5
3.1.4 オブジェクト保持表現 . . . . .	6
3.1.5 ビルド . . . . .	6
3.2 FirstVR . . . . .	8
3.2.1 デバイス構成 . . . . .	8
3.2.2 トラッキング . . . . .	8
3.2.3 ジェスチャ認識 . . . . .	8
第4章: 研究手順 . . . . .	9
4.1 使用器具 . . . . .	9
4.2 VH の 3D モデル取り込み . . . . .	9
4.3 VH のスムージング処理・ボーン配置 . . . . .	9
4.4 オブジェクト保持表現 . . . . .	9
4.5 FirstVR の性能評価 . . . . .	10
4.6 シミュレータの構成 . . . . .	11
4.7 シミュレータの定性評価 . . . . .	11
第5章: 研究結果 . . . . .	12
5.1 VH の 3D モデル構成 . . . . .	12
5.2 オブジェクト保持 . . . . .	14
5.3 FirstVR の性能評価 . . . . .	15
5.4 シミュレータの構成 . . . . .	18
5.5 シミュレータの定性評価 . . . . .	20
第6章: まとめと今後の課題 . . . . .	24
謝辞 . . . . .	25
参考文献 . . . . .	26
付録 . . . . .	i

# 第 1 章 はじめに

## 1.1 研究背景

上肢切断者が筋電義手を装着する際、自在に扱うことができるよう訓練を行う必要がある。VR を用いた筋電義手トレーニングの効果については先行研究 [1][2] で検討されており、筋電義手操作の幻肢痛緩和やに効果があると立証されている。これらの研究では仮想筋電義手の 3D モデルについては長方形のオブジェクトや、腕を模して製作された 3D モデルを用いることが一般的であった。そこで本研究では、仮想筋電義手モデルのリアリティによる訓練効果や幻肢痛緩和効果に着目し 3D スキャナで取り込んだ仮想筋電義手 3D モデル (VH:Virtual Hand) を用いた VR トレーニングシステムを構成し、VH の見た目によって訓練効果に変化があるかを評価することを目的とする。加えて、このトレーニングシステムのインターフェースに “FirstVR” を用いることで、実際の筋電義手や高価な筋電センサ使用することなく、安価で訓練が行えると考えたため、FirstVR による訓練効果の影響を調べるために前段階として定性評価を行い、入力インターフェースによる没入感や操作性などの違いを調査することにした。また、近年では “カグラ”[3] という医療機器は上肢機能障害者のリハビリテーションのために運用されるなど VR トレーニングシステムは義手装具者以外にも需要が高まっている。本研究は 2023 年度、神戸高専 Digital Fabrication Lab に新規導入されたハンディ 3D スキャナ “Ein Scan HX”[4] の活用方法の一例として後続の研究に利用していただきたい。

本論文の構成として第 2 章、第 3 章で 3D モデルの製作や Unity・FirstVR について解説を行う。そして、第 4 章に研究手法を提示し、第 5 章に研究結果を示す。

## 1.2 関連研究

FirstVR を用いた関連研究としては足に FirstVR を装着することで足の筋変位による足の接地状態の検出を行う研究 [5] が行われている。この研究では図 1.1 の歩行状態を 7 段階に分割した姿勢を FirstVR にそれぞれ学習させ、加えてジャイロセンサを用いてどの姿勢が足の接地状態（立脚期）の検出に最適なのかを調査されている。

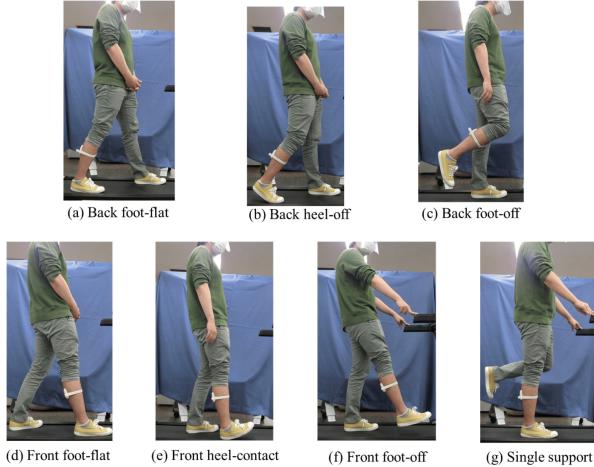


図 1.1: 歩行位相検出アルゴリズムのキャリブレーション姿勢

足の浮遊状態（遊脚期）の検出には体軸よりも足が後ろになっている状態が検出精度が高くなる傾向にあるということが報告されており、その姿勢状態を学習させて被験者 10 名（男性 6 名、女性 4 名）にトレッドミルを用いて歩行データを計測されていた。図 1.2 に男女別の遊脚期（Swing phase）と立脚期（Stance phase）の陽性率を示す。

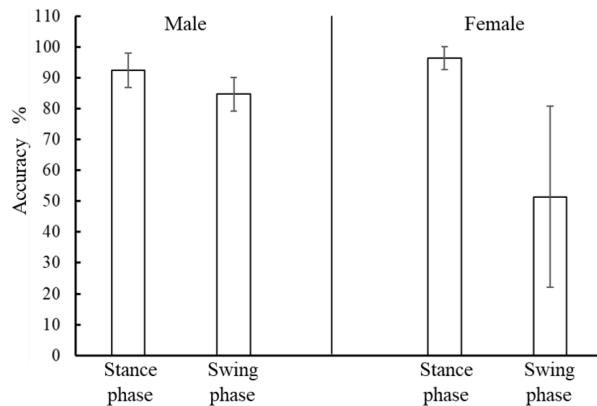


図 1.2: 男性（左）と女性（右）の立脚期と遊脚期の陽性率

図 1.2 の結果より、立脚期の検出精度中央値は 90 %であり、歩行位相検出システムとして十分な結果を得られている。しかし、この方式では女性の遊脚期の検出精度が低いことから個人の筋肉量に検出精度が依存しているといった課題が挙げられている。

# 第2章 理論:3D モデルの製作

本章では、3D モデル製作に使用した “Ein Scan HX” と “Blender” について解説する。また、それぞれの役割と機能についても説明を加える。

## 2.1 EinScan HX

EinScan HX は株式会社サンスティラが提供するハンディ 3D スキャナである。主な使用用途としては、工業製品などの比較的大きな物をスキャンし、リバースエンジニアリングや測定などに用いられている。図 2.1 に EinScan の外観を示す。



図 2.1: EinScan HX

### 2.1.1 製品仕様

[4] から参照した EinScan の製品仕様を図 2.1 に示す。

表 2.1: EinScan HX の製品仕様

スキャン形式	Rapid スキャン	レーザースキャン
スキャン精度	0.05 mm	0.04 mm
ポイント間隔	0.25~3.00 mm	0.05~3.00 mm
被写体長 3D 精度	±0.1 mm	±0.06 mm
シングルスキャン精度	420 × 440 mm	380 × 400 mm
光源	ブルー LED	ブルーレーザー 7 本
被写体深度	200-700 mm	350-610 mm
対象物との距離	470 mm	470 mm
テクスチャスキャン	あり	なし
安全性	クラス対象外	クラス 1
データ出力形式	STL,OBJ,PLY,ASC,3MF,P3	
本体サイズ	108×110×237 mm	
本体重量	710 g	

ここで、被写体長 3D 精度というのはスキャン時に取得するポイントの最大累積誤差を示したもので、測定する点数が増える場合や取得点の距離が大きい場合に誤差が累積し、大きくなっていく。

## 2.2 Blender

Blender とは、オープンソースの完全無料統合型 3DCG・2D・映像編集ソフトウェアである。本研究では“EinScan HX”によって出力した.obj 形式の 3D モデルを編集する目的で使用した。次項からは本研究で用いた Blender の機能について解説する。

### 2.2.1 スムージング

スムージング機能とは、[7] によると 3D オブジェクト等の点群データにおいて、ノイズを削減するために近傍データを用いて平均化処理を行い、データ点列をスムーズになるようにすることである。Blender では、この処理をペイントツールのようにオブジェクトをなぞるだけでその軌跡に従うように平均化処理が行われている。

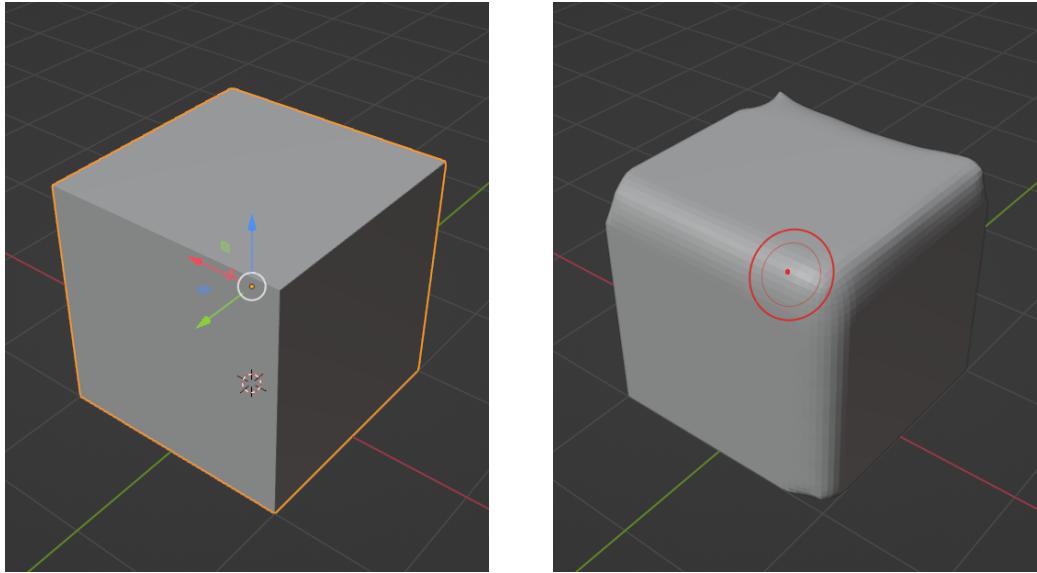


図 2.2: 頂点数 35000 点の立方体オブジェクトのスムージング処理比較

### 2.2.2 ボーン構成

ボーンは、3D オブジェクトを変形させる際に頂点の移動を制御する支柱の役割を果たす機能である。Unity にインポートした後に物体保持のアニメーションを作成する際に VH の変形を制御するために用いている。

# 第3章 理論:Unity・FirstVR

## 3.1 Unity

Unity は、Unity Technologies 社が提供するゲーム制作を中心とした統合開発環境のこと、主にスマートフォン向けゲームの制作に用いられている。特徴としては、他社製の開発環境よりも比較的簡単にゲームの制作をすることが可能で、プログラムを必須としない点に強みをもつ。本研究では VR トレーニングシステムを構築する上で利用した機能について解説を加える。

### 3.1.1 シェーダー

本研究では、Unity にインポートした VH の見た目をよりリアルにするため、標準搭載のシェーダーではなく、“Reflex Shader 2.2”というシェーダーを用いて表示した。このシェーダーは主に VRChat の 3D モデル表示に用いられ、標準のシェーダーと比較して鏡面光が抑制され、モデルのコントラストが強調されていることがわかる。

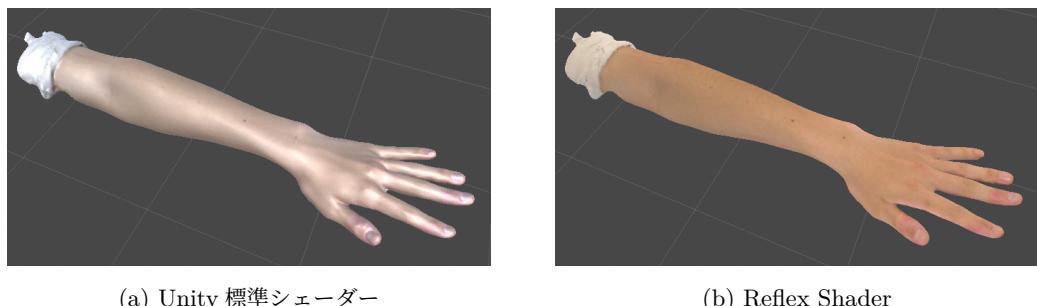


図 3.1: シェーダーによる 3D モデルの違い

### 3.1.2 オブジェクト

Unity におけるオブジェクトは Unity エディタ上に配置されるものを総称してオブジェクトと呼び、各オブジェクトにはシーンに配置された段階でシーン上のオブジェクトの座標を示す Transform というコンポーネントが付加されている。その他にも衝突判定を付加する Collider コンポーネントなど様々な種類のコンポーネントを付加することができる。

### 3.1.3 衝突判定

本研究では衝突判定に Unity に標準搭載されている Collider コンポーネントと Raycast コンポーネントを用いた衝突判定を行った。次項にそれぞれの衝突判定の違いについて解説する。

#### Collider

Collider コンポーネントにはオブジェクトの被衝突領域を設定する役割があり、異なる 2 つのオブジェクトに付加された Collider の領域が重なることで衝突フラグを立てる。本研究では PC 版シミュレータにこの方式の衝突判定を用いている。

## Raycast

Raycast コンポーネントはオブジェクトの中心から任意方向・任意長さに直線を引き, その直線と Collider コンポーネントを持つオブジェクトの被衝突領域が重なると衝突フラグを立てる. 本研究では iOS 版シミュレータにこの方式の衝突判定を用いている.

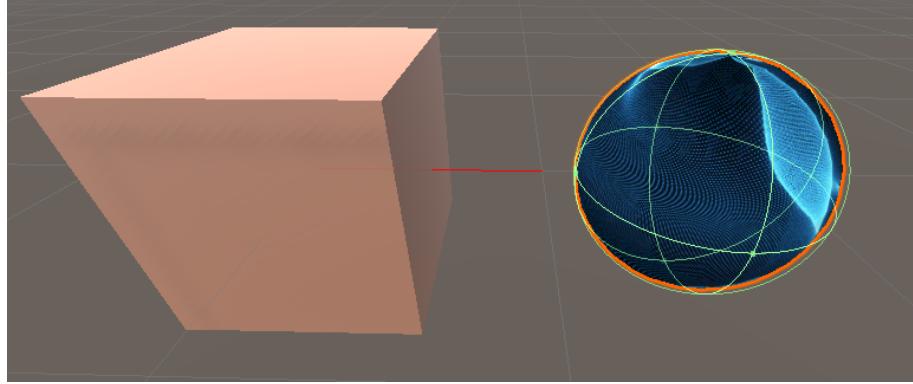


図 3.2: Raycast のイメージ図

図 3.2 のように左側の立方体オブジェクトの中心から射出されている赤い直線が Ray である. この直線と右側の球体オブジェクトを囲う黄緑の領域が Collider コンポーネントの被衝突領域となっている. なお, 図 3.2 の Ray や Collider は表示されないようになっている.

### 3.1.4 オブジェクト保持表現

オブジェクト保持状態を表現するために VH にオブジェクトごとの保持アニメーションを作製した. Unity におけるアニメーションは各オブジェクトの動きを記録し, 再生フラグが立った場合にアニメーションが再生されるようになっている. また, アニメーションを作製する際, 初期状態とアニメーションした後のオブジェクトの位置を記録することで自動的にその移動が補完されるようになっている. 図 3.3 にオブジェクト保持表現のアニメーションを示す.

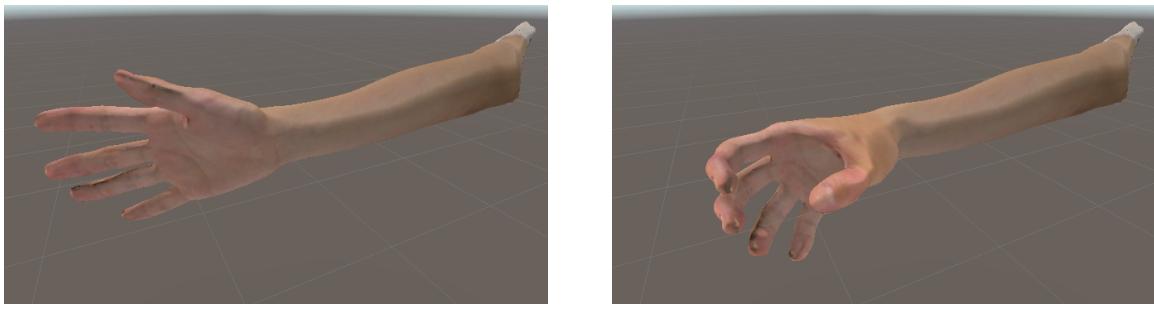


図 3.3: オブジェクト保持アニメーション

### 3.1.5 ビルド

本項では Unity で構成したシミュレータのビルド方法について解説する. 以下にビルドの手順を示す.

1. Unity エディタ上のツールバーから "File" を選択
2. "Build Settings" の項目を選択すると, 別ウィンドウに Build Settings が開かれる
3. 追加したいシーンファイルを Unity エディタ上で開いておき, Build Settings のウィンドウから "Add Open Scenes" を選択
4. Build Settings ウィンドウの左にある Platform から実行したい OS を選択し, ウィンドウ右下

の”Switch Platform”を選択

- Build Settings ウィンドウ右下の”build”を選択してビルド開始

以上の手順で Unity で作成したシーンのビルドが完了する。Windows,Linux などの OS ではビルドしたフォルダに実行ファイルが作成されているため、そのファイルからシミュレータを実行することができる。また、Android/iOS に関しても、作成した実行ファイルを Android/iOS に転送し、ファイル解凍することで実行できる。

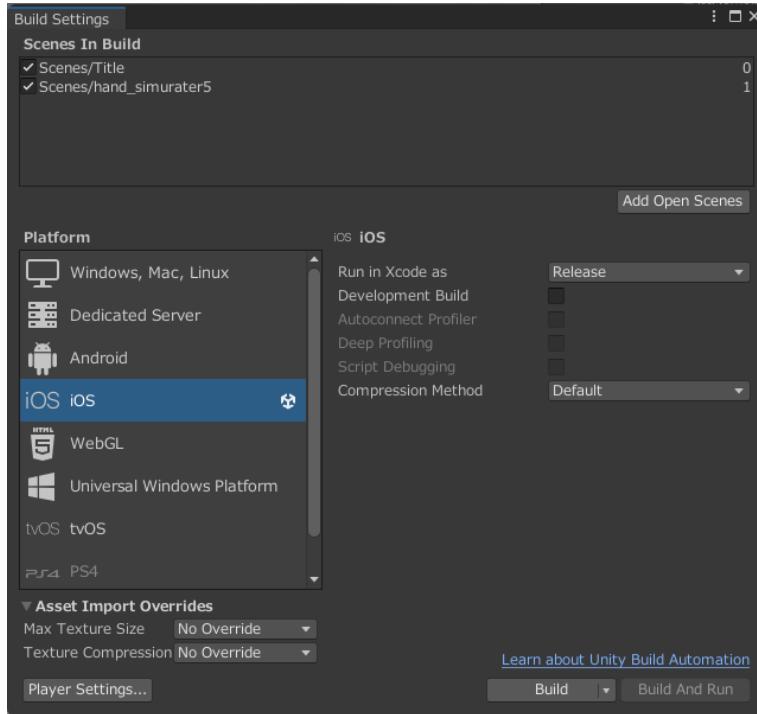


図 3.4: BuildSettings 画面

iOS に関してはビルド・実行方法が異なるため、以下に解説する。

## iOS

本項では、iOS 用アプリの実行手順を以下に示す。

- ビルドされたフォルダを MacOS に転送
- MacOS でビルドされたフォルダを開き、フォルダ内の “Unity-iPhone.xcodeproj” を Xcode で開く
- iOS 端末を接続し、端末の設定から端末をデバッグモードにする
- Xcode ウィンドウ上部の Any iOS Device を選択し、接続した端末を選択
- Signing & Capabilities を選択し、Team の欄に Apple ID を入力
- 本シミュレータでは Bluetooth を用いるため、info を選択し、Key の一覧に “Privacy - Bluetooth Peripheral Usage Description” を追加し、Value を “Uses BLE to communicate with devices.” にする
- iPhone にアプリがインストールされたら、端末の『設定』から『プライバシーとセキュリティ』を開き『Bluetooth』を選択
- インストールしたアプリに Bluetooth の権限を許可する
- アプリ一覧からインストールしたアプリを実行する

以上の手順で iOS 用のシミュレータをビルドして実行できる。この手順で一番重要なのが、6 の手順でこれがなければアプリを実行しても Made by Unity のポップがでた直後に動かなくなってしまう。これらのエラーは Xcode 上でログが残されているため、発生しているエラーを解消すれば実行することができる。大抵の場合、端末側の権限付与ができるおらずアプリが実行できないエラーが多発するためよく確認をすること。

## 3.2 FirstVR

FirstVR は H2L 株式会社 [6] によって開発・製造されている筋変位センサを用いたウェアラブルデバイスである。この製品は現状 iOS と Android のみ対応しており、アプリケーション開発をする際は H2L から公開されている “FirstVR sdk” という Unity 開発用 API が公開されている

### 3.2.1 デバイス構成

FirstVR の外観を図 3.5 に示す。



(a) 表面画像



(b) 裏面画像

図 3.5: FirstVR

裏面には近赤外線センサが 14 チャンネル配置されており、ここから装着した筋肉の変化を測定している。

### 3.2.2 トラッキング

FirtVR には 3 軸ジャイロセンサと加速度センサが搭載されており、Unity で作製したアプリ上で測定値を確認することができる。本研究ではこのジャイロセンサを用いて、腕のピッチ、ヨー、ロールの 3 軸の回転をシミュレータに反映させている。

### 3.2.3 ジェスチャ認識

FirstVR のジェスチャ認識方法は、ジェスチャ状態と非ジェスチャ状態における筋変位センサの各チャネルごとの値をサンプリングし、機械学習させることでジェスチャ状態のセンサ値をしきい値としてジェスチャ認識を行っている。

# 第 4 章 研究手順

## 4.1 使用器具

本研究での使用器具を表 4.1 に示す.

表 4.1: 本研究における使用器具

No	機器名	型番	シリアル No	備考
1	EinScan HX			
2	FirstVR	UHL-01		
3	スマートフォン 1	iphone SE2		iOS16.7.2
4	スマートフォン 2	iphone 13		iOS17.2.1
5	スマートフォン 3	HUAWEI Nova Lite2		AndroidOS 9
6	PC-1			Ubuntu22.04
7	PC-2	Mac mini2		MacOS

以下に本研究で使用したソフトウェアを表 4.2 に示す.

表 4.2: 使用ソフトウェア

No	ソフトウェア名	バージョン	使用 OS	備考
1	Blender	3.0.1	Ubuntu	
2	Unity	2022.3.11f1	Ubuntu	
3	Xcode	15.0.1	MacOS	

## 4.2 VH の 3D モデル取り込み

ハンディ 3D スキャナである EinScan HX を用いて左腕をスキャンした. 本研究では, VH にテクスチャを貼って用いることを前提としているため, スキャン形式を Rapid スキャンモードで, 3D モデルの精度を高めるために頂点数を 50 万点で出力し, 出力形式としてテクスチャがメッシュに割当されている obj 形式を選択した.

## 4.3 VH のスムージング処理・ボーン配置

obj 形式で取り込んだ 3D モデルは測定によるノイズが含まれており, 特に掌と手の甲の境界線上に段差のように途切れてしまう. このノイズを除去・補完するために, オブジェクト表面の凹凸を平坦にする効果があるスムージング処理を行った. また, アニメーション作製のために処理後の 3D モデルにボーンを配置した.

## 4.4 オブジェクト保持表現

オブジェクト保持表現として Unity のアニメーション機能を用いて保持可能な球体・円柱・立方体の 3 つのオブジェクトごとのアニメーションを作製した.

## 4.5 FirstVR の性能評価

本研究で構成するシミュレータの入力感度を検証するため、実験協力者として電子工学科の 31 名に以下の手順で FirstVR の評価を行った。また、ジェスチャ状態は物体保持のアニメーションと同期させるため、じゃんけんのゲームのジェスチャを学習させた。

### 1. 装着位置の決定

FirstVR の動作原理より、赤外線で筋変位を取得しているため、かなり密着させて装着する必要がある。そのため本研究では、筋肉量が一番多い位置を肘から前腕の 1/4 程度の距離と推定し、被験者の肘から手首までの長さを測定し、肘を原点に 1/4 の距離（約 7cm）で装着した

### 2. FirstVR の接続と学習

端末と FirstVR を接続し、測定する sample 数でジェスチャをしていない状態とジェスチャしている状態を学習させた。

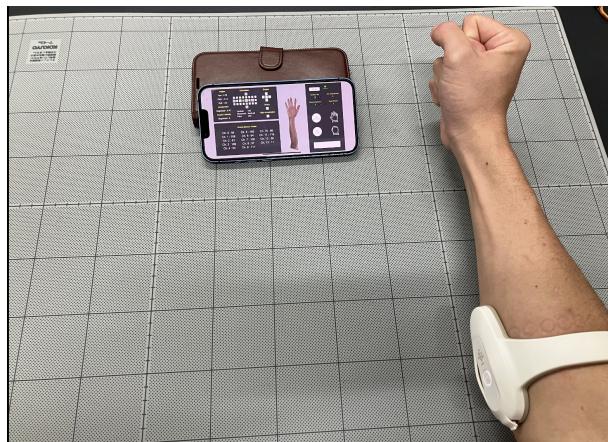


図 4.1: FirstVR の性能評価の様子

### 3. FirstVR の測定

ジェスチャをしていない状態の筋変位センサの値を 1 回測定し、手を握るジェスチャのセンサ値の変化量を 5 回測定した。

### 4. FirstVR のジェスチャ保持特性の検証

ノイズの少なかった sample 数を選び出し、ジェスチャ状態で手の角度を上下左右に動かした場合のジェスチャ状態の変化を動画に撮影して検証した。

ノイズの判定方法は実際の腕の動作とアプリケーションの表示が異なる場合にノイズと判定した。sample 数の選出はノイズの回数が同数だった場合はシミュレータの負荷軽減のために sample 数が少ない方を選出した。

最終的な sample 数の選定方法として FirstVR で筋変位を測定した 14 チャンネル光変位センサの測定値を用いてジェスチャ認識の精度を確認するため、各被験者・各 sample 数ごとの評価指標として総変化量  $X$  を定めた。総変化量の算出は測定回数  $s:1 \sim 5$ , チャンネル数  $r:0 \sim 13$  としてジェスチャ状態で測定した筋変位センサの値を  $M_{sr}$  とジェスチャしていない状態の筋変位センサの値  $N_r$  とすると

$$X = \frac{1}{5} \sum_{s=1}^5 \sum_{r=0}^{13} |N_r - M_{sr}| \quad (4.1)$$

と示すことができる。この評価指標を用いて各 sample 数ごとに分散を調べることにより、どの sample 数をシミュレータで用いるかを検討した。

## 4.6 シミュレータの構成

Blender で処理した VH を Unity にインポートし、保持可能オブジェクトを球体、円柱、立方体の 3 つ用意し、大別して player, stage, UI の構成にした。構成図は後日書きます。

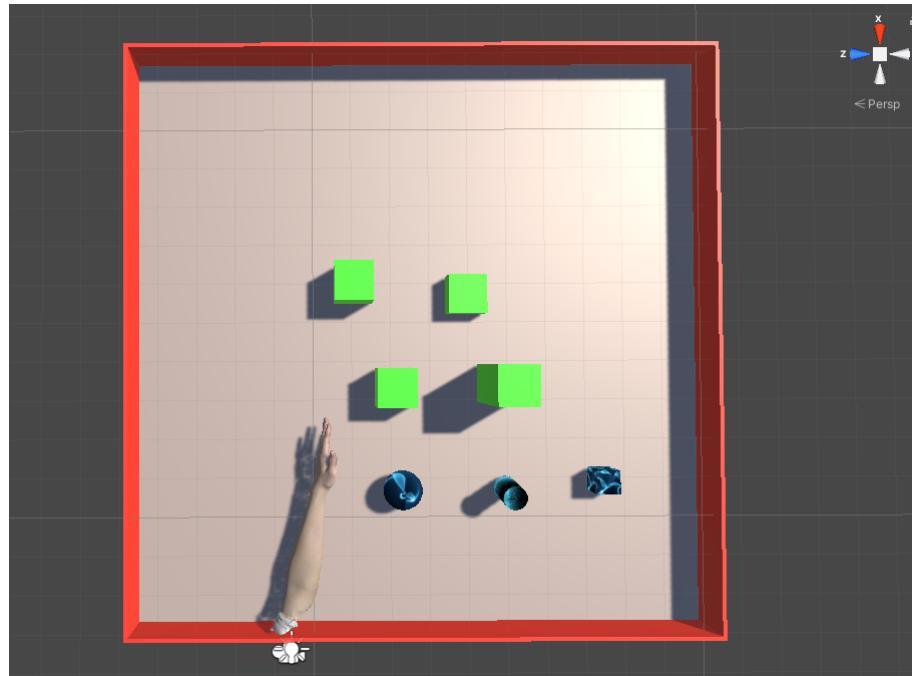


図 4.2: シミュレータ構成代替図

player オブジェクトには右腕オブジェクトの RightArm, 左腕オブジェクトの LeftArm とマウスカーソルを追従する target オブジェクトを含んでいる。また、各 Arm オブジェクトの掌には Collider オブジェクトを配置して衝突判定を作成した。

## 4.7 シミュレータの定性評価

電子工学科学生 10 名に協力していただき、PC 版シミュレータと iOS 版シミュレータの 2 種類を操作説明の後、5 分程度体験していただき、各シミュレータの①没入感②操作性③入力遅延の 3 項目について 6 段階の定性評価アンケート調査を行った。評価点数が高いほどそれぞれの項目において高得点の評価となるように設定している。

# 第 5 章 研究結果

## 5.1 VH の 3D モデル構成

3D スキャナで取り込んだ左腕 3D モデルと実際の左腕の比較を図 5.1 に示す.

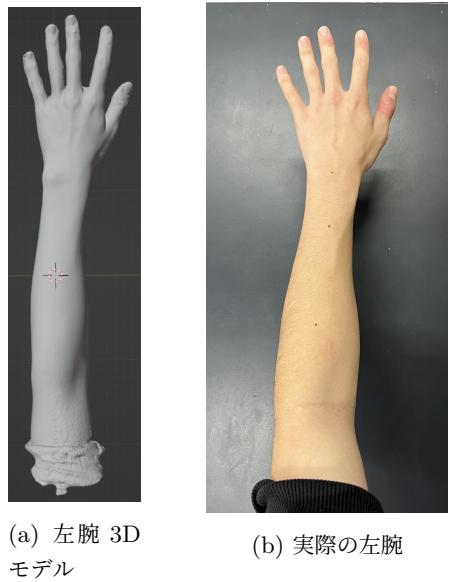


図 5.1: 取り込んだ左腕 3D モデルと実際の左腕の比較

実際の左腕と比較して, 手の甲の表現や筋の出方の表現がとても精巧に再現されているように感じられる. しかし, 少し腕周りの太さが細くなっているようにも見られる. また, 図 5.2a 取り込んだ直後の 3D モデルでは撮影時のノイズが含まれているため, Blender のスムージング機能を用いて図 5.2b のように 3D モデルを平滑化した.

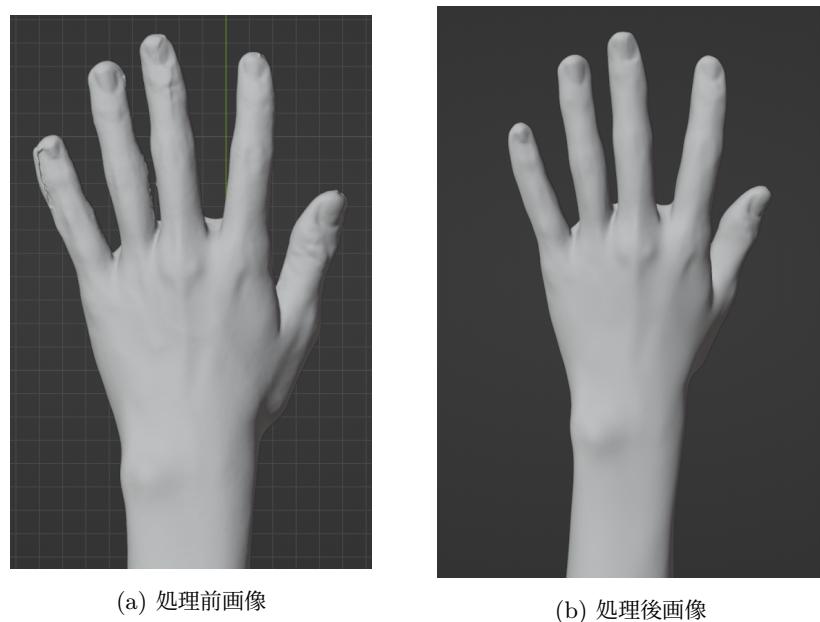


図 5.2: スムージング処理前後の 3D モデル比較

図 5.2 より, 図 5.2a では小指や人差し指の先端部分のノイズが見られるが, 図 5.2b ではスムージング処理によりノイズが解消されていることがわかる.

また,3D モデルを Unity にインポートする際, オブジェクト保持のアニメーションを作製するためにメッシュの制御を行う必要があるため, 図 5.3 のようにボーンを配置した.

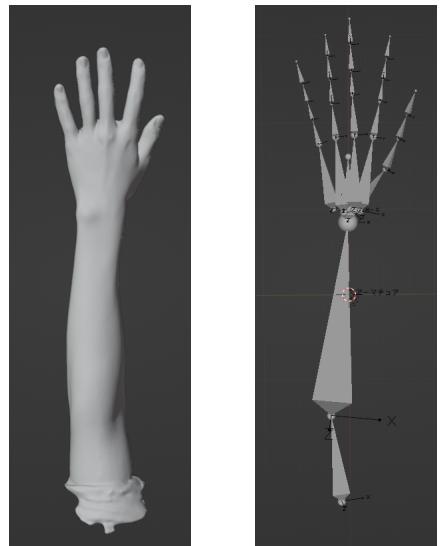
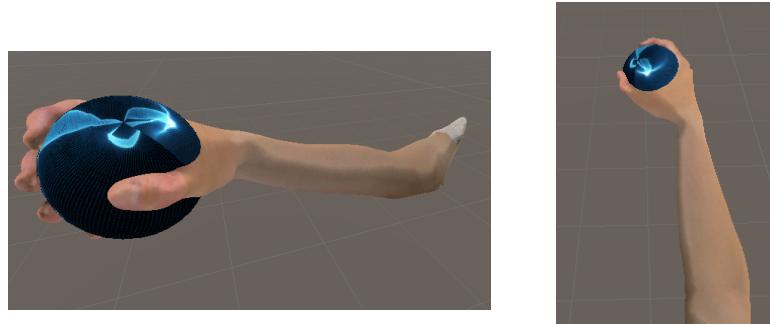


図 5.3: ボーン配置図

図 5.3 より, ボーンの配置は関節ごとに配置しており, 各指の先端にはエンドボーンと呼ばれるアニメーション制御用のボーンを追加している. このエンドボーンを移動させることでその指のボーンの変形を自動的に補完されるようになっている.

## 5.2 オブジェクト保持

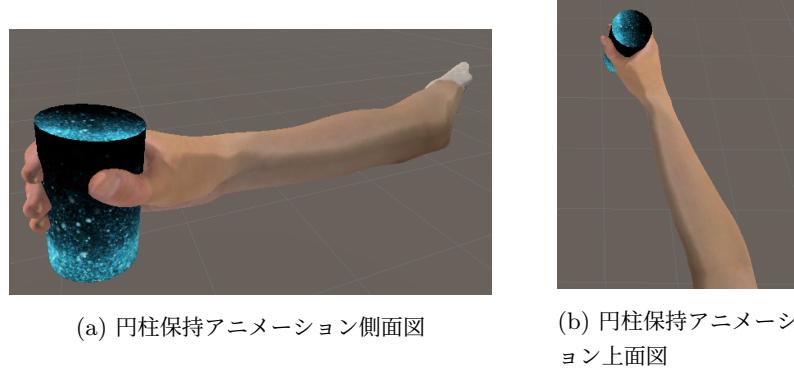
各オブジェクトごとの保持アニメーションを図 5.4~5.6 に示す。



(a) 球体保持アニメーション側面図

(b) 球体保持アニメーション上面図

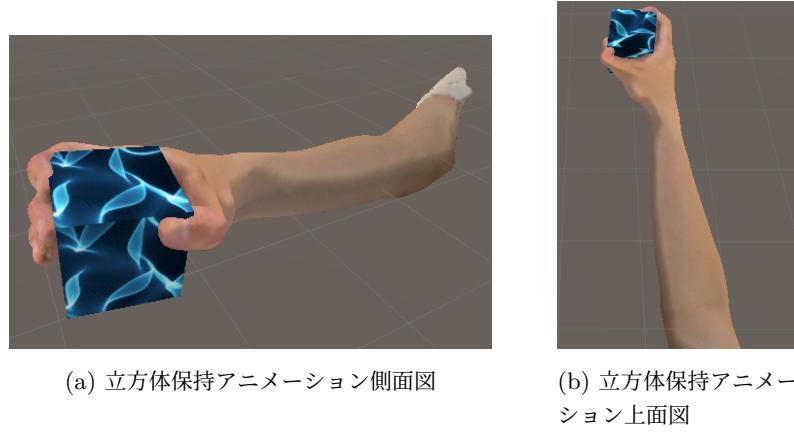
図 5.4: 球体オブジェクトの保持表現



(a) 円柱保持アニメーション側面図

(b) 円柱保持アニメーション上面図

図 5.5: 円柱オブジェクトの保持表現



(a) 立方体保持アニメーション側面図

(b) 立方体保持アニメーション上面図

図 5.6: 立方体オブジェクトの保持表現

オブジェクトが静止状態の場合でも動いている場合でも衝突条件を見たせばオブジェクトを保持することができる。実際にボールや水筒などの形の似たものを掴んでいる写真を参考にアニメーションを作製したため、かなり現実に近い掴み方をしているように見える。しかし、保持アニメーションを行う際、オブジェクトの位置は VH の位置に紐付けられるのだが、オブジェクトの回転までは制御していないので円柱や立方体は保持する角度によって指や掌を貫通するような掴み方になってしまう。

### 5.3 FirstVR の性能評価

FirstVR を装着する様子を図 5.7 に示す。



図 5.7: FirstVR 装着方法

机上に 5cm 四方のグリッド線が描かれたボードを用いて肘の設置店から手首までを測定し、その 1/4 の距離に FirstVR を装着させた。図 5.8 に測定時の様子を示す。

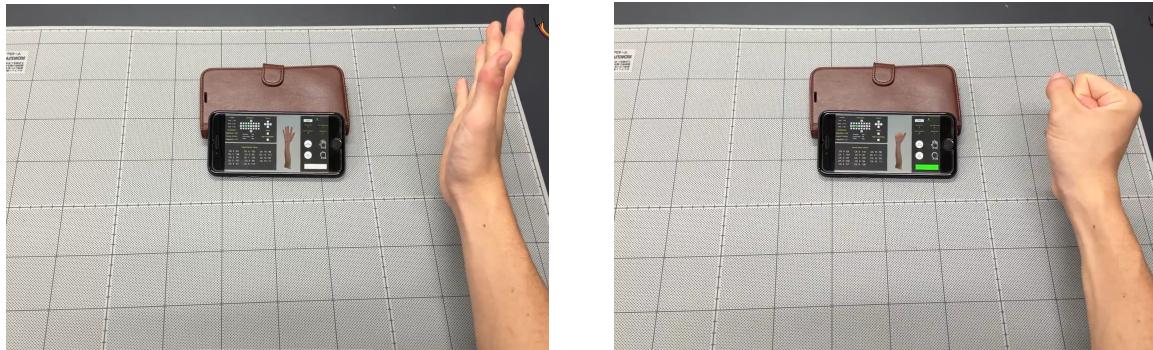


図 5.8: FirstVR 性能評価の様子

図 5.8 のようにジェスチャ状態を 1 回、ジェスチャしていない状態を 5 回測定し、それを各 sample 数で繰り返した。全員分のデータは記載することができないため付録にある QR コードから FVRDataFiles を開いてもらうと各被験者のデータが閲覧できるようになっている。データの傾向としては、ジェスチャ状態の登録の際、強く握りすぎない方がジェスチャ認識のノイズが低減した。

## FirstVR の性能評価用アプリケーションの構成を図??

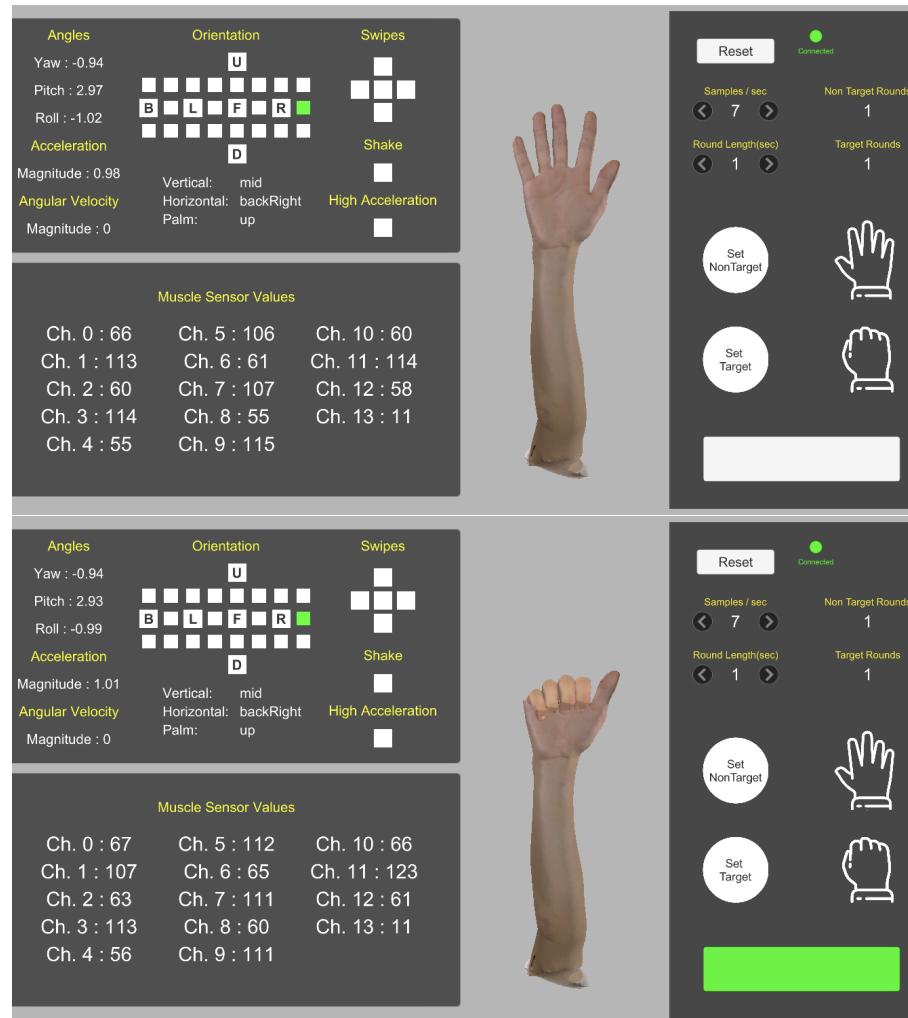


図 5.9: FirstVR 性能評価用アプリケーションの構成

表 5.1: 各被験者における sample 数ごとの総変化量一覧

num/sample	7	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	44.4	25.6	21.8	19.4	12.2	12.6	13.4	22.4	8.2	11.8	27.2
2	37.0	23.4	30.2	17.2	27.2	31.8	45.4	26.2	29.4	19.2	18.2
3	23.4	20.2	28.4	20.6	21.8	30.4	17.2	23.6	39.0	17.4	22.0
4	49.0	69.8	108.8	100.6	78.0	62.2	61.4	40.8	60.6	36.6	37.6
5	38.2	53.2	51.2	34.6	35.4	43.6	46.6	48.2	47.4	32.0	37.6
6	31.8	15.6	17.6	38.4	23.2	23.4	32.0	37.8	14.8	22.4	22.0
7	69.2	44.8	57.0	25.8	33.2	39.6	23.0	33.6	53.8	29.8	40.0
8	67.0	66.0	55.4	65.0	67.0	78.6	93.6	59.0	66.8	59.4	65.4
9	44.4	25.6	21.8	19.4	12.2	12.6	13.4	22.4	8.2	11.8	27.2
10	20.8	13.8	15.4	16.4	13.2	17.8	43.8	17.6	12.0	83.6	14.4
11	24.8	22.8	26.2	21.0	27.8	48.8	41.2	15.6	23.2	14.2	19.4
12	34.2	29.8	19.8	25.8	24.0	18.2	32.4	25.4	35.4	35.6	25.2
14	20.6	17.4	21.6	29.0	19.0	22.8	27.6	32.2	56.8	44.0	31.2
16	19.8	22.0	11.6	10.0	16.8	17.4	12.4	17.6	21.6	15.8	11.4
17	50.8	58.4	51.2	56.6	67.4	37.6	45.8	52.4	51.6	59.6	56.2
18	35.2	50.2	62.6	36.4	27.2	39.6	38.8	43.4	45.4	52.4	48.8
19	49.4	42.2	41.2	36.4	49.4	34.4	33.2	34.4	22.2	13.8	36.0
20	23.8	26.8	36.2	38.0	28.0	35.2	34.0	24.4	29.2	39.6	25.8
21	33.6	11.8	10.4	16.8	17.8	11.0	19.4	13.6	24.4	13.2	9.6
23	32.6	36.4	33.0	17.6	22.6	26.8	32.2	25.2	20.8	30.4	13.8
24	32.8	42.6	36.6	30.6	26.4	41.4	32.6	20.2	25.0	15.8	17.6
25	42.2	27.6	37.8	33.8	39.2	50.0	34.6	38.0	38.8	26.8	24.2
26	51.8	40.4	44.0	44.6	41.4	39.2	42.8	38.4	41.6	43.0	30.0
27	38.0	30.6	38.2	35.6	23.8	20.4	24.4	24.2	22.6	30.6	16.8
28	25.2	33.0	32.0	23.8	28.0	20.0	31.4	13.6	19.6	19.4	21.2
32	39.8	32.8	30.2	38.2	34.8	22.6	30.4	24.0	24.0	12.6	20.6
34	68.8	78.0	50.4	51.6	44.2	50.8	40.0	48.2	46.4	48.8	62.0
35	20.4	29.8	40.6	45.0	23.8	25.2	27.4	39.0	25.2	28.8	39.6
36	32.6	29.8	21.6	19.0	22.4	17.6	21.2	28.2	41.4	35.6	20.8
38	23.2	8.0	13.6	23.2	21.2	25.4	24.0	12.6	16.0	24.4	17.8
41	44.4	25.6	21.8	19.4	12.2	12.6	13.4	22.4	8.2	11.8	27.2

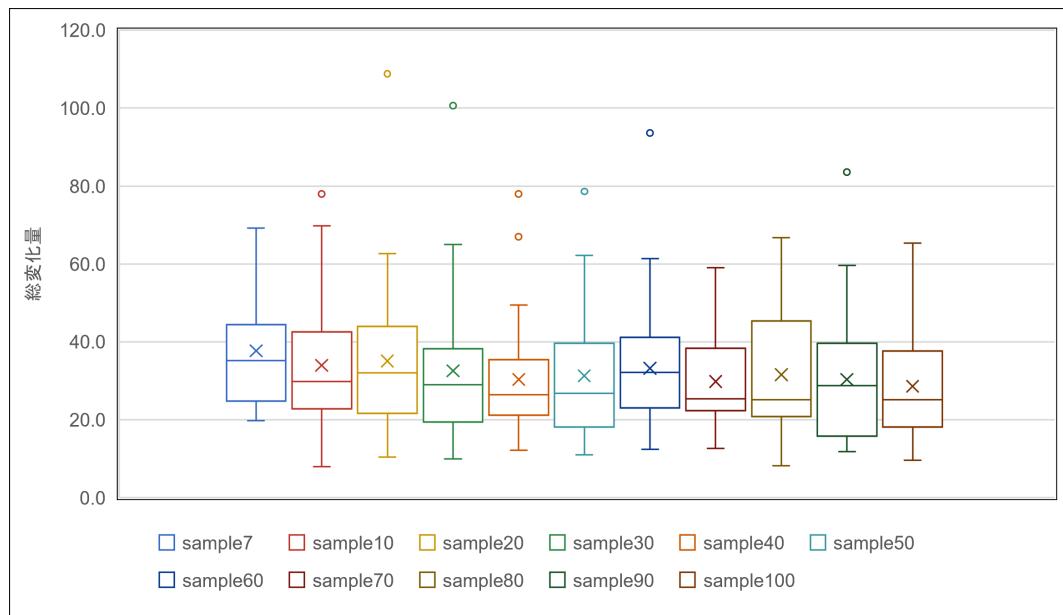


図 5.10: sample 数ごとの総変化量分散

## 5.4 シミュレータの構成

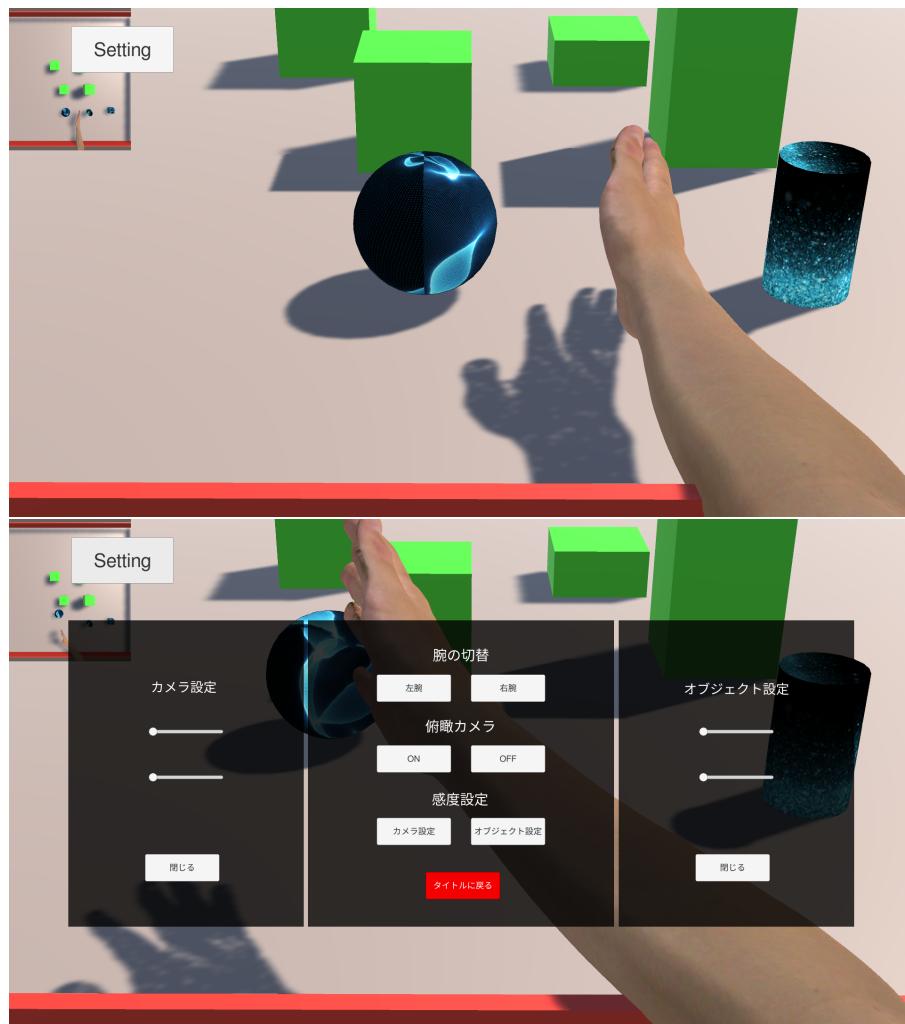
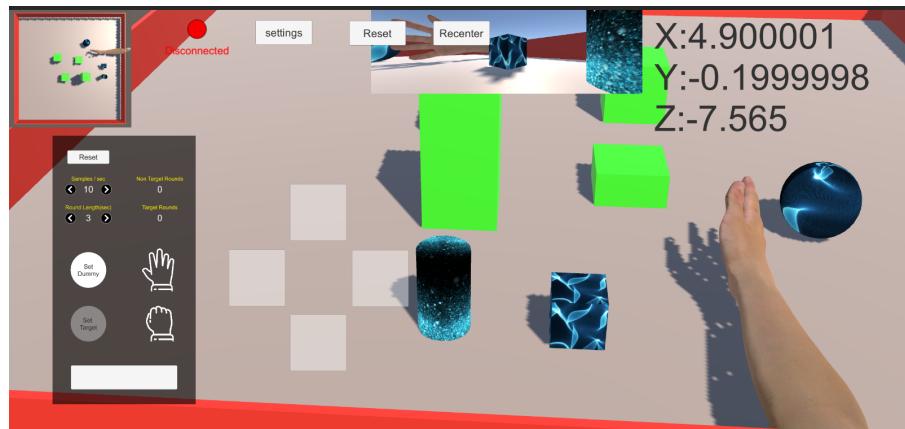


図 5.11: PC 版シミュレータの実行画面



(a) 通常時の画面構成



(b) メニュー起動時の画面構成

図 5.12: iOS 版シミュレータの実行画面

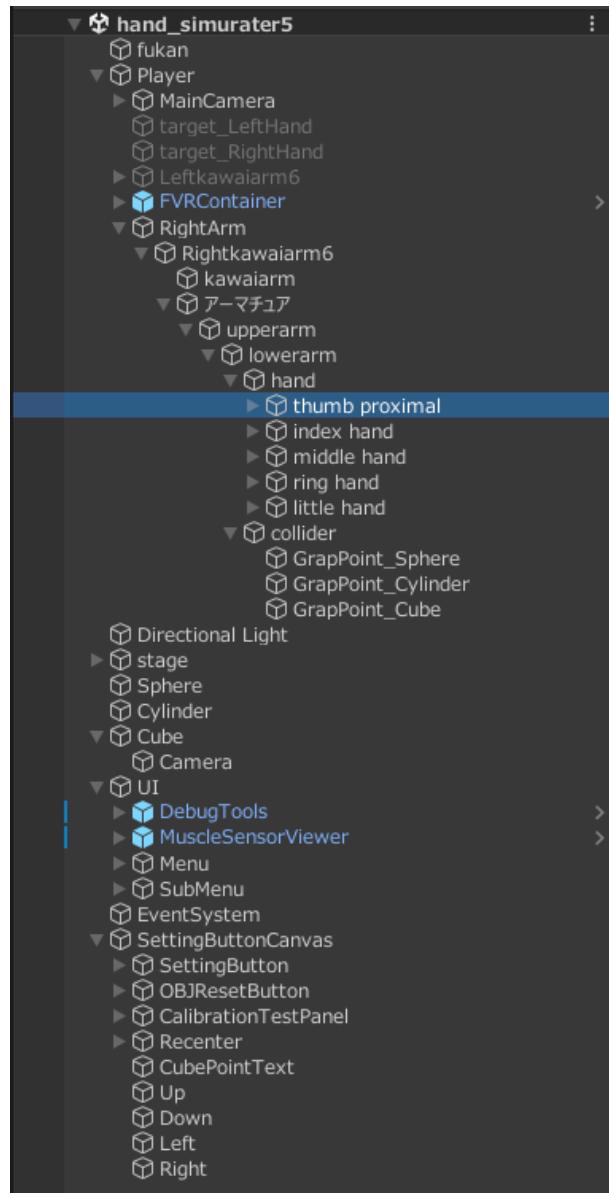


図 5.13: シミュレータのオブジェクト構成

## 5.5 シミュレータの定性評価

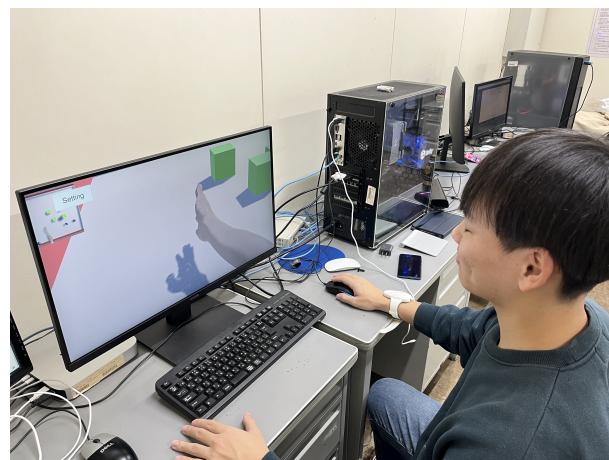


図 5.14: PC 版シミュレータ定性評価の様子

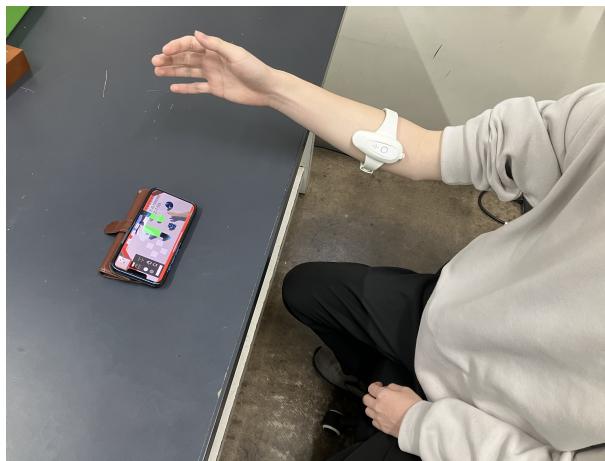


図 5.15: iOS 版シミュレータ定性評価の様子

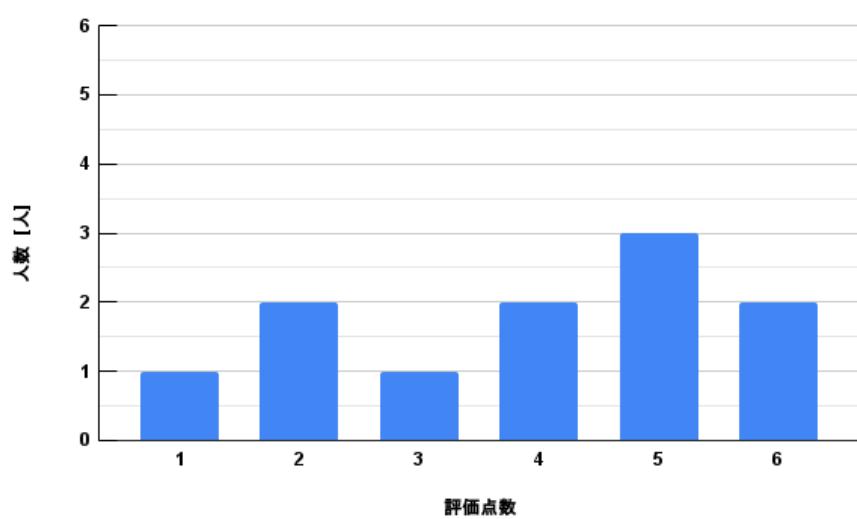
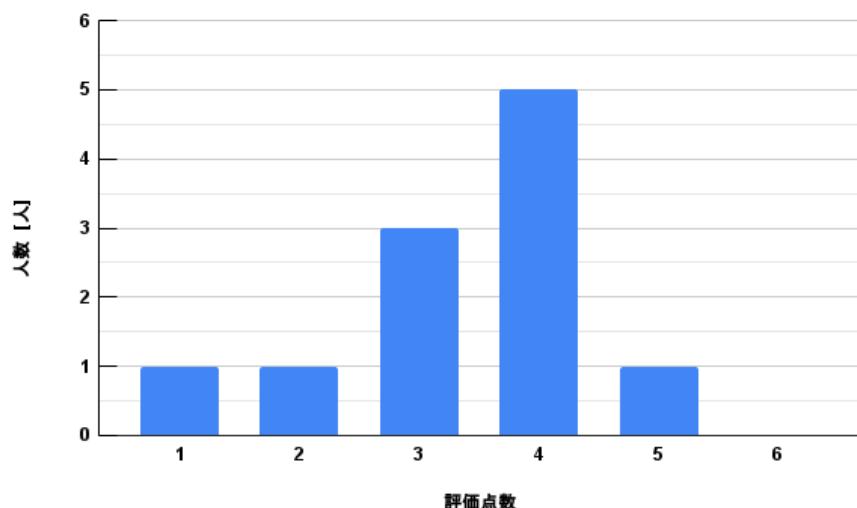


図 5.16: 没入感の評価比較

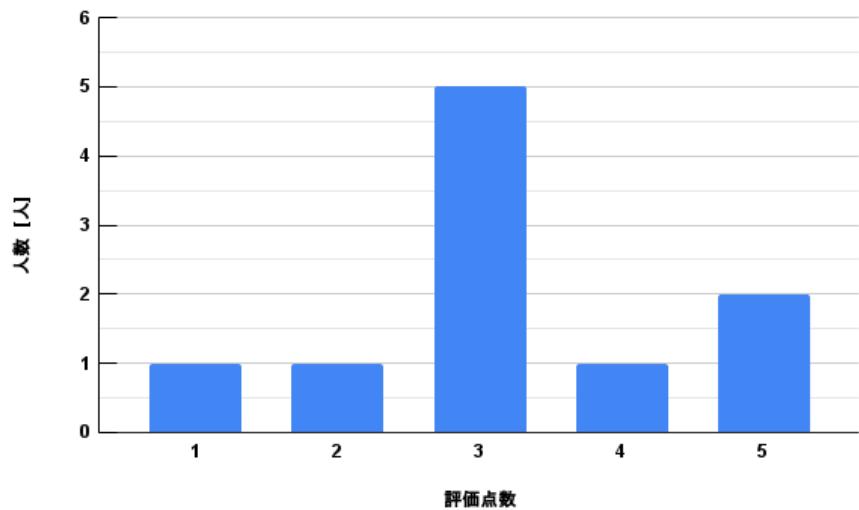
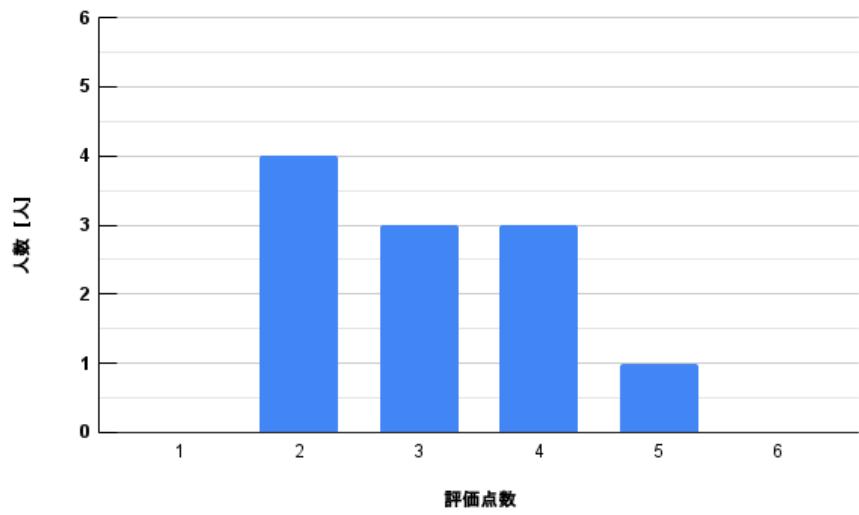


図 5.17: 操作性の評価比較

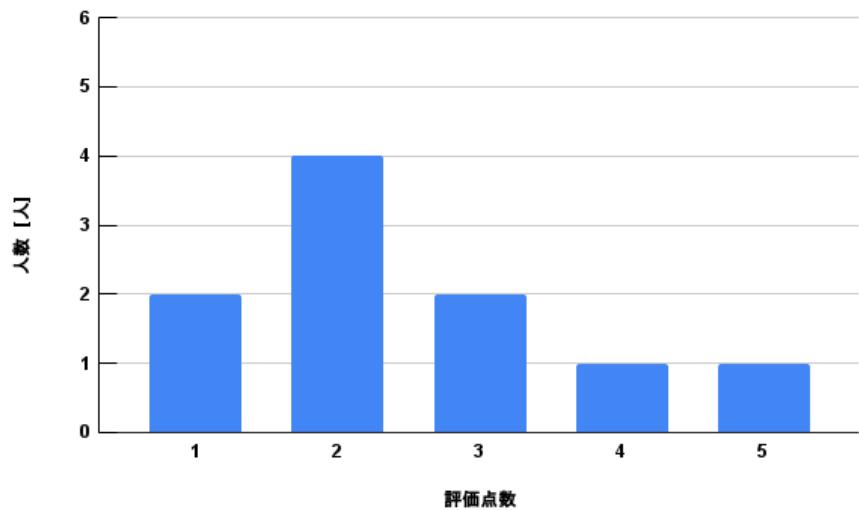
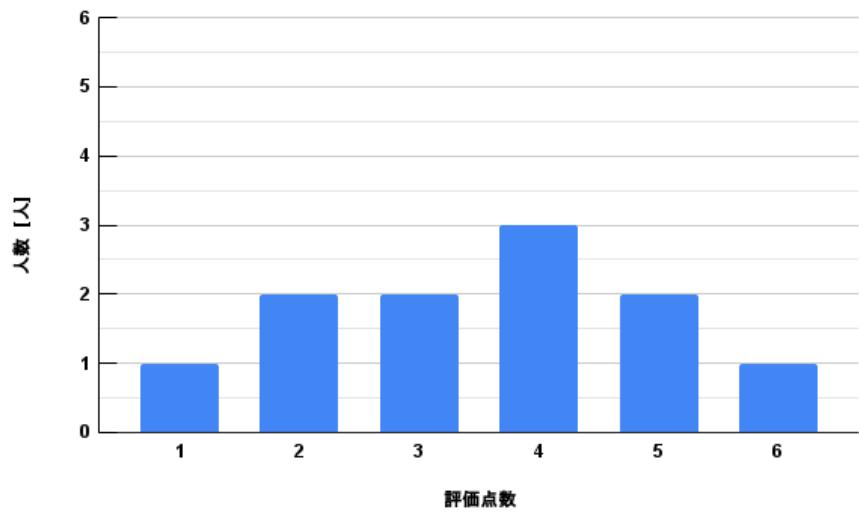


図 5.18: 操作遅延の評価比較

## 第6章 まとめと今後の課題

本研究では PC 版のシミュレータと iOS 版のシミュレータの 2 種類を作製し、健常者に体験してもらい、その定性評価を行うことで FirstVR を用いたシミュレータの方が没入感が高い傾向があることを示した。しかし、操作性の点ではキーボード・マウスと明確な差は見受けられず、遅延に関しては PC 版の方が少ないという課題点も見つかった。また、表示するモニターの違いで没入感が違ったという意見も挙げられており、実験方法を再検討する必要がある。

今後の課題としては、FirstVR の性能評価が不十分であったため、シミュレータのオブジェクト保持状態がノイズで保持されていない場合が多く、操作性の評価が低くなってしまったと考えられる。そのため、FirstVR の条件を以下に挙げる。

- 装着位置
- 使用者の筋肉量
- 学習時間
- 学習回数

これらの観点から条件を分けて実験を行う必要がある。また、FirstVR の内部回路の学習システムについての理解が不足しているためどのような条件が最適なのかということについては公式 HP のリファレンスを詳しく調べていく必要があると考えられる。加えて、FirstVR がスマートフォンデバイスでしか使用できない点についても BLE 通信のスクリプトファイルを解読することで PC との通信ができる可能性もある。そして、当初の目標であったオブジェクトの違いによる訓練効果の評価については作成したシミュレータのオブジェクトの機能を引き継いだままモデルだけ置き換えてシミュレータを実装することで定性評価を行うことは可能であると考える。定量的なデータを取得するためには脳波測定を用いての測定やシミュレータと現実空間の移動量の誤差などを検討していくことになるだろう。最後に、シミュレータの没入感をあげる方法として、VR ゴーグルを用いたシステムにできるとより訓練効果などに影響を与えるのではないかと思われる。

## 謝辞

一年間丁寧に指導していただいた戸崎哲也教授、および同研究室の村岡君に深く感謝いたします。また、実験に協力していただいた電子工学科の31名にも感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 芝軒 太郎 他.“VR を利用した筋電義手操作トレーニングシステムの開発と仮想 Box and Block Test の実現”. JRSJ. 2012 July.
- [2] Osumi M, et.al. “Characteristics of Phantom Limb Pain Alleviated with Virtual Reality Rehabilitation”. Pain Med. 2019 May.
- [3] mediVR.Inc.,<https://www.medivr.jp/> 閲覧日 2023/07/04
- [4] 株式会社サンステラ, <https://www.einscan.jp/einscan-hx>
- [5] Tamon Miyake, et.al.“Gait Phase Detection Based on Muscle Deformation with Static Standing-Based Calibration”. MDPI. 2021 Feb
- [6] H2L.Inc.,Tokyo106-0032,Japan;satoshi.hosono@h2l.jp
- [7] JEOL,“平滑化 (スムージング)”  
<https://www.jeol.co.jp/words/emterms/20121023.094657.html#gsc.tab=0>

# 付録

ソースコード 6.1: CalibrationManager

---

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.XR;
using UnityEngine.UI;
using UnityEngine.Animations;
using System.Linq;
using FVRlib;
public class CalibrationManager : MonoBehaviour
{
    public Animator animator;
    public GameObject Collider;

    public Transform GrapPoint_sphere, GrapPoint_cylinder, GrapPoint_cube;

    // FVR
    public FVRConnection fvr;
    public FVRGesture gesture;

    //Control variables
    int samplesPerSecond = 0;
    int roundLength = 0;
    int tCalibRounds = 0;
    int ntCalibRounds = 0;

    // Texts
    public Text samplesPerSecondTxt;
    public Text roundLengthTxt;
    public Text tCalibRoundsTxt;
    public Text ntCalibRoundsTxt;

    // Images
    public Image targetImg;
    public Image nonTargetImg;
    public Image testImg;

    //Buttons
    public Button targetBtn;
    public Button nonTargetBtn;
    public Button resetBtn;
    public Button[] varBtns;

    bool cube_col;
    bool cylinder_col;
    bool sphere_col;

    // int grap;
```

```

// Start is called before the first frame update
void Start()
{
    fvr = FindObjectOfType (typeof(FVRConnection)) as FVRConnection;

    // Create a new custom gesture
    gesture = fvr.gestureManager.RegisterCustomGesture ("gestureName");

    // Display the default settings
    samplesPerSecond = fvr.gestureManager.calibrationSamplesPerSecond;
    roundLength = (int)fvr.gestureManager.calibrationRoundLength;
    UpdateTexts ();

    // Button control
    targetBtn.interactable = false;
}

void Update()
{
    Vector3 origin = Collider.transform.position;
    Vector3 direction = -Collider.transform.forward;
    Ray ray = new Ray(origin,direction);
    Debug.DrawRay(ray.origin, ray.direction*0.2f, Color.red, 0.01f);
    if(Physics.Raycast(ray, out RaycastHit hit, 1.0f))
    {
        Debug.Log(hit.collider.gameObject.name);
        if(hit.collider.gameObject.name == "Cube")
            cube_col = true;
        if(hit.collider.gameObject.name == "Cylinder")
            cylinder_col = true;
        if(hit.collider.gameObject.name == "Sphere")
            sphere_col = true;
    }

    if(gesture.held == true)
    {
        animator.SetBool("grap_null",true);
        testImg.color = Color.green;
        if(cube_col == true)
        {
            testImg.color = Color.blue;
            animator.SetBool("grap_cube1",true);
            GameObject cube = GameObject.Find("Cube");
            Rigidbody rb = cube.GetComponent<Rigidbody>();
            rb.isKinematic = true;
            cube.transform.position = GrapPoint_cube.position;
            cube.gameObject.transform.parent = GrapPoint_cube;
        }
        if(cylinder_col == true)
        {
            testImg.color = Color.red;
            animator.SetBool("grap_cylinder1",true);
            GameObject cylinder = GameObject.Find("Cylinder");
            Rigidbody rb = cylinder.GetComponent<Rigidbody>();
        }
    }
}

```

```

rb.isKinematic = true;
cylinder.transform.position = GrapPoint_cylinder.position;
cylinder.gameObject.transform.parent = GrapPoint_cylinder;
}
if(sphere_col == true)
{
    testImg.color = Color.yellow;
    animator.SetBool("grap_sphere1",true);
GameObject sphere = GameObject.Find("Sphere");
Rigidbody rb = sphere.GetComponent< Rigidbody>();
rb.isKinematic = true;
sphere.transform.position = GrapPoint_sphere.position;
sphere.gameObject.transform.parent = GrapPoint_sphere;
}
else if(gesture.held == false)
{
    testImg.color = Color.white;

animator.SetBool("grap_null",false);
animator.SetBool("grap_sphere1", false);
animator.SetBool("grap_cylinder1", false);
animator.SetBool("grap_cube1", false);

cube_col = false;
cylinder_col = false;
sphere_col = false;

//sphere
GameObject sphere = GameObject.Find("Sphere");
Rigidbody rb_sphere = sphere.GetComponent< Rigidbody>();
rb_sphere.isKinematic = false;
sphere.gameObject.transform.parent = null;

//cylinder
GameObject cylinder = GameObject.Find("Cylinder");
Rigidbody rb_cylinder = cylinder.GetComponent< Rigidbody>();
rb_cylinder.isKinematic = false;
cylinder.gameObject.transform.parent = null;

//cube
GameObject cube = GameObject.Find("Cube");
Rigidbody rb_cube = cube.GetComponent< Rigidbody>();
rb_cube.isKinematic = false;
cube.gameObject.transform.parent = null;
}
}

public void ChangeSPS(int dir){
samplesPerSecond += 1 * dir;
samplesPerSecond = samplesPerSecond < 1 ? 1 : samplesPerSecond;
fvr.gestureManager.calibrationSamplesPerSecond = samplesPerSecond;
UpdateTexts ();
}

```

```

/// <summary>
/// You can change the length of the calibration round.
/// This length should always be higher than 0 and making it too long might affect the
/// results in a negative way.
/// Recomended values are 1~3
/// </summary>
public void ChangeRL(int dir){
    roundLength += 1 * dir;
    roundLength = roundLength < 1 ? 1 : roundLength;
    fvr.gestureManager.calibrationRoundLength = (float)roundLength;
    UpdateTexts ();
}

public void SetTargetPress(){
    StartCoroutine (Calibrate (true));
}

public void SetNonTargetPress(){
    StartCoroutine (Calibrate (false));
}

// Reset the calibration data and start all over again
public void ResetCalibrationPress(){
    fvr.gestureManager.ResetPatternData (gesture);
    tCalibRounds = 0;
    ntCalibRounds = 0;
    UpdateTexts ();
    targetBtn.interactable = false;
    nonTargetBtn.GetComponentInChildren<Text> ().text = "Set\nDummy";
    foreach (Button b in varBtns) {
        b.interactable = true;
    }
}

// Updates the display texts
void UpdateTexts(){
    tCalibRoundsTxt.text = tCalibRounds.ToString ();
    ntCalibRoundsTxt.text = ntCalibRounds.ToString ();
    samplesPerSecondTxt.text = samplesPerSecond.ToString ();
    roundLengthTxt.text = roundLength.ToString ();
}

/// <summary>
/// Calibrate the gesture with target or non-target values.
/// Calibration requires time, and it's best to let the user know what's going on, so
/// this process is best done in a coroutine.
/// </summary>
IEnumerator Calibrate(bool target){
    if (target) {
        // Setting target values
        fvr.gestureManager.SetTargetData (gesture);
        tCalibRounds++;
    } else {
        // Setting non-target values
    }
}

```

```

fvr.gestureManager.SetNonTargetData (gesture);
/// The first time we set a target or non-target value, the round length and
samples per second are ignored and the SVM takes only one value with dummy
data then
/// the dummy data is replaced with real data.
/// After the first round the FVRGesture.calibrated flag is set to true and you
are ready to start calibrating with real data
if (gesture.calibrated) {
    ntCalibRounds++;
} else{
    nonTargetBtn.GetComponentInChildren<Text> ().text = "Set\nNonTarget";
    foreach (Button b in varBtns) {
        b.interactable = false;
    }
}
// We dont wan't multiple coroutines taking the same data so it's good to block the
user from starting a new one before this round is done
targetBtn.interactable = false;
nonTargetBtn.interactable = false;
resetBtn.interactable = false;
float t = 0;
while (gesture.registering) {
    /// While the target or non-target data is being set, the FVRGesture.registering
    flag will be set to true.
    /// A count down or a image fill loading bar is a good way to let the user know
    your app is doing something.
    /// Once the porcess is done, the FVRGesture.registering flag will be set to false
    , and we will exit this while loop.
    t += Time.deltaTime;
    if(target)
        targetImg.fillAmount = t / (float)roundLength;
    else
        nonTargetImg.fillAmount = t / (float)roundLength;
    yield return null;
}
UpdateTexts ();
targetImg.fillAmount = 0;
nonTargetImg.fillAmount =0;
// After the process is done you can enable whatever buttons you need to proceed with
the calibration or move on with your app.
targetBtn.interactable = true;
nonTargetBtn.interactable = true;
resetBtn.interactable = true;
}
}

```

---

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class Movemanager : MonoBehaviour
{
    public Vector3 Up_speed,Down_speed,Left_speed,Right_speed;
    bool forwardmove;
    bool backmove;
    bool rightmove;
    bool leftmove;

    public void forwardButtonDown(){
        forwardmove = true;
    }
    public void forwardButtonUp(){
        forwardmove = false;
    }
    public void backButtonDown(){
        backmove = true;
    }
    public void backButtonUp(){
        backmove = false;
    }
    public void rightButtonDown(){
        rightmove = true;
    }
    public void rightButtonUp(){
        rightmove = false;
    }
    public void leftButtonDown(){
        leftmove = true;
    }
    public void leftButtonUp(){
        leftmove = false;
    }
    void Update()
    {
        if(forwardmove == true){
            transform.position += Up_speed;
        }
        if(backmove == true){
            transform.position += Down_speed;
        }
        if(rightmove == true){
            transform.position += Right_speed;
        }
        if(leftmove == true){
            transform.position += Left_speed;
        }
    }
}
```

---

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using FVRlib;

public class handtrack : MonoBehaviour
{
    public FVRConnection fvr;

    // Update is called once per frame
    void Update()
    {
        this.transform.rotation = fvr.centeredRotation;
    }
}
```

---