

修士論文

指の制御訓練における
拡張現実感の効果に関する研究

森 諒介

2018 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

森 諒介

審査委員：

加藤 博一	教授	(主指導教員)
小笠原 司	教授	(副指導教員)
Christian Sandor	准教授	(副指導教員)
Alexander Plopski	助教授	(副指導教員)

指の制御訓練における拡張現実感の効果に関する研究

森 諒介

内容梗概

近年の高齢化社会に伴い世界的に広がっている高齢者の社会復帰や自立を促進する活動が行われている。食事等の日常的に使用する指の機能障害は特に大きく関わるため、改善の必要がある。本研究では、これまでの指の機能回復訓練においての問題点としてデバイスとディスプレイが離れていることによる集中力の低下や精神的負荷が生じると仮定し、拡張現実感 (AR) 技術を利用することによりこれら問題が改善した結果、訓練の効果を確認することとした。

そのため本論文では、指の機能回復訓練用デバイスであるPETSによるアプリケーションを中心に異なる訓練要素である力の知覚精度、対処能力、協調制御からなる3種類のアプリケーションの開発を行った。ただし現在、当研究室にはPETS本体がないため、アプリケーションごとに代用可能なハプティックデバイスやキーパッドを利用している。また、ARコンテンツをユーザーへ提示するため、ビデオシースルー型ヘッドマウントディスプレイ (VST-HMD) を使用することとした。

実験はARシステムの効果を評価するため、18名の学生に対して古典的な表示方法であるディスプレイと比較しながら開発したアプリケーションとアンケート調査を用いて行った。得られた結果からはディスプレイとARシステムには差が生じていないことが示された。私たちは、この発見と差が生じなかった理由について議論することとしている。

キーワード

拡張現実感, リハビリテーション, ハプティックAR, 力覚提示システム

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文,
NAIST-ISMT1651112, 2018 年3 月15日.

Study of the Verification of Augmented Reality in Finger Control Training

Ryosuke Mori

Abstract

With the increasing ageing of the society, it is necessary to promote independence of elderly. One major hurdle is the diminished control of fingers due to the ageing process, which increases a person's dependency on others. The ability to control the forces applied in the fingers can be restored through training with a Pressing Evaluation Training System (PETS). The training consists of the following tasks: 1) applying the desired force for a prolonged duration, 2) applying force to a varying degree, 3) ensuring that the power is applied only with specified fingers. Hereby, users are presented with visualization on a display and have to perform the task with their hands, while focusing on the display. This leads to a mismatch between the focus and task locations.

Augmented Reality (AR) presents virtual content spatially registered to the real world. It can thus be used to present the assignment of the PETS next to the user's fingers, instead of the display. In this work we investigate if this leads to reduce mental demand and thus better performance by the trainee. As we do not have access to a PETS, we have created a system that simulates the tasks performed during PETS training with a haptic device. To present the virtual content to the user, we use a video see-through head-mounted display (VST-HMD). This frees up the user's hands and allows users to focus on the task at hand. We recruited 6 participants to evaluate the performance of our AR system. Our results indicate that there is no difference between the performance of the traditional system and the developed augmentation. We discuss in detail the implications and possible reasons for this finding.

Keywords:

Augmented Reality, Rehabilitation, Haptic-AR, Force presentation

. *Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651112, March 15, 2018.

目次

図目次	v
表目次	vi
第 1 章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 リハビリテーション	2
1.3 AR 技術	2
1.4 AR と指のリハビリテーション	3
1.5 目的	3
1.6 本論文の構成	4
第 2 章 関連研究	5
2.1 手のリハビリテーションに関する研究	5
2.2 AR を利用したリハビリテーションとトレーニングに関する研究	7
2.3 ハプティックデバイスを用いたリハビリテーションとトレーニングに関する研究	8
第 3 章 制御訓練システム	11
3.1.1 Pressing Evaluation and Training System	11
3.1.2 Single digit ramp task (SDR)	12
3.1.3 Force-track testing	13
3.1.4 Sequential testing	14
3.2 課題点	15
3.3 本研究の位置づけ	15
第 4 章 事前準備	16
4.1 デバイス準備	16
4.1.1 ハプティックデバイス	17
4.1.2 ビデオシースルー型 HMD による AR システム	17
4.2 視覚化モデル	21
4.2.1 力の知覚精度向上のための訓練	21
4.2.2 力の変化への対処能力向上のための訓練	23
4.2.3 指の独立性向上のための訓練	24
第 5 章 実験	26

5.1	実験環境	26
5.2	実験条件	26
5.3	静的制御訓練に関する評価実験	29
5.3.1	実験手法.....	29
5.3.2	評価方法.....	30
5.3.3	実験結果及び考察.....	31
5.4	動的制御訓練に関する評価実験	34
5.4.1	実験手法.....	34
5.4.2	評価方法.....	35
5.4.3	実験結果及び考察.....	35
5.5	指の協調制御訓練に関する評価実験	38
5.5.1	実験手法.....	38
5.5.2	評価方法.....	39
5.5.3	実験結果及び考察.....	39
5.6	考察	42
第 6 章	結論	44
6.1	まとめ	44
6.2	今後	44
謝辞		46
参考文献		47

図目次

図 1	年齢層別人口増加率	1
図 2	AR によるリハビリテーション	8
図 3	ハプティックデバイス	9
図 4	ハプティックデバイスと AR によるトレーニングシステム	10
図 5	Pressing Evaluation and Training System	11
図 6	SDR task program.	12
図 7	Interface of force-track testing.	13
図 8	Interface of sequential testing.....	14
図 9	ハプティックデバイスと実験における使用方法	17
図 10	ビデオシースルー型 HMD.....	18
図 11	HMD-Camera.....	19
図 12	HMD・ハプティックデバイスのキャリブレーション	20
図 13	HMD を動かした際の仮想オブジェクトのずれ	21
図 14	力の知覚精度向上訓練のための視覚化モデル	22
図 15	変化への対処能力向上訓練のための視覚化モデル	23
図 16	指の独立性向上訓練のため視覚化モデル	25
図 17	配置図	28
図 18	静的制御訓練に関する評価実験	31
図 19	実験 1 実験結果	32
図 20	実験 1 アンケートによる結果	32
図 21	動的制御訓練に関する評価実験	35
図 22	実験 2 測定結果	36
図 23	実験 2 アンケート結果	36
図 24	指の協調制御訓練に関する評価実験	39
図 25	実験 3 回答時間	40
図 26	実験 3 誤答数.....	40
図 27	実験 3 アンケートによる結果.....	41

表目次

表 1	使用機器	16
表 2	使用機器並びに実験環境.....	27
表 3	アンケート内容.....	28
表 4	実験 1 不快感記述・自由記述	33
表 5	実験 2 不快感記述・自由記述	37
表 6	実験 3 不快感記述・自由記述	41

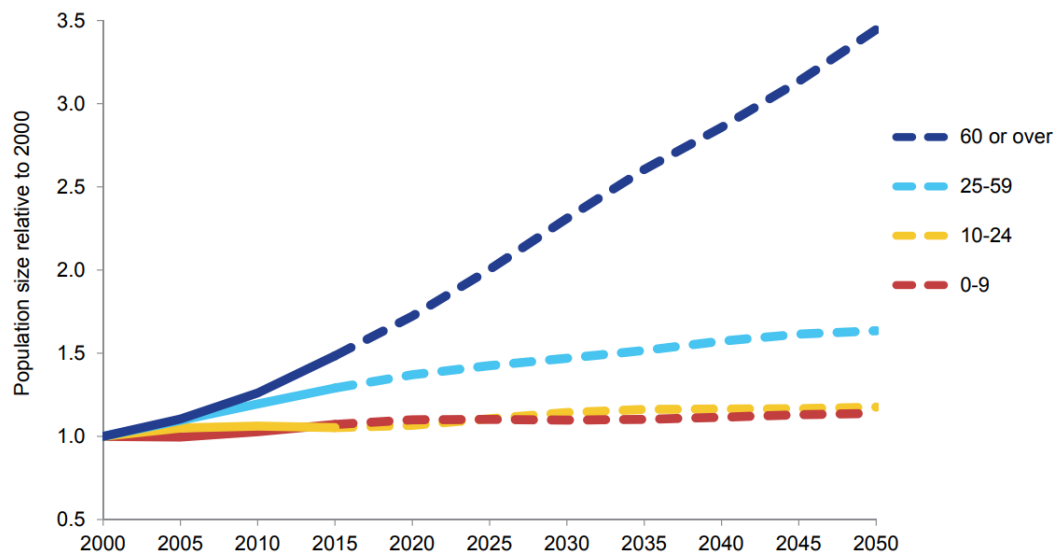
第1章 序論

1.1 背景

近年、アジアやヨーロッパを中心に医学の発達等による平均寿命の延伸や、出生率の低下が原因で少子高齢化が深刻化している。

2015 年の国際連合の報告[1]によると、60 歳以上の人口の割合は 2000 年と比較して 48%以上増加し、2050 年には 300%以上に増加すると予想されている(図 1)。近年では、保険政策や経済社会の開発の成功によって、増加する高齢者に対して再び社会参加を促す試みが世界的に広まっている。一方で、肉体的に若年層より劣る高齢者には医療システムの必要性が高くなり、結果としてそれらを支える医療技術やリハビリテーションの需要が高くなる。ただし、この問題は、労働者人口の減少を引きおこし最終的に人口全体への生活の質(QOL: Quality of Life)の低下につながると考えられている。

Figure II.12.
Increase in world population relative to 2000, by broad age group, 2000-2050



Data source: United Nations (2015). *World Population Prospects: The 2015 Revision*.

図 1 年齢層別人口増加率

QOLとは、人がどれだけ人間らしい生活を送り、人生に幸福を見出すことができるかを尺度としての概念である。この評価基準は文化や世代によって大きく変化するが、高齢者にとってのQOLは他の世代と異なる要素を持つ。この時期におけるQOLの特性に関してはNorcross[2]によって「健康（身体的・精神的）」、「独立性（経済的・人間的）」、「対人関係」、「組織活動への参加」、「宗教的信仰」、「環境（物理的・文化的）」があげられている。またこの中でも、「健康」と「独立性」が特に重要な要素として指摘されている。

1.2 リハビリテーション

QOLにおける「健康」は、高齢者の加齢に伴う生理的現象により筋力をはじめとする制御や安定性の低下から悪影響を生じさせる[3]。特に肉体能力の低下に伴い、食事をはじめとした生活の自立度合いを表す手段的日常生活(IADL)の低下は精神的な健康状態も悪化させる要因となる。

このIADLは上腕、手の機能による影響が大きく、リハビリテーションの分野ではこの部位の機能回復を目的として研究が盛んである。また、手の機能は高齢者であっても指の運動訓練によって改善することが報告[4]されており、指の制御を改善することが高齢者の「健康」を促す非常に重要な取り組みとなる。

[5]の研究を通して、視覚、皮膚等の感覚フィードバックは指の力を制御に重要な役割を持つことが知られている。そのため、指の制御の改善を目的としたリハビリテーションではこのような人体への感覚フィードバックを重視し、MusicGlove[6]やAMADEO[7]のような実際の指の曲げ伸ばしと連動した視覚フィードバックによるアプリケーションを中心に指のトレーニングのための製品が開発されている。

他方で、指への力覚による感覚フィードバックを与えることを目的としたデバイスの開発・研究もおこなわれている。

1.3 AR 技術

拡張現実感(AR: Augmented Reality)は、周囲の現実環境に情報を重畳することによって現実世界の情報を補足、強調させる技術である。一般にARが利用さ

れる背景として現実世界と仮想上の情報を直観的に紐づけることができるため、理解が容易でありかつ誤操作が発生しづらいために注目されている。また、近年の HoloLens[8]や Meta[9]のようなヘッドセット型の AR 製品の流通や、カメラから現実空間を復元する技術を用いたスマートフォンによる AR アプリケーションの作成ツールが一般に数多く公開されていたことから AR 技術の利用が身近な存在となり、作業支援やナビゲーションなど多くの分野での活躍がさらに期待されている[10]。

1.4 AR と指のリハビリテーション

これまでの研究により、視覚、聴覚、皮膚の感覚を含む感覚のフィードバックがリハビリテーションの分野に対して相乗効果により良い効果を与えることが知られている[11]。指の機能回復を目的としたデバイスは一般的に視覚フィードバックにおいてはディスプレイを用いて行われており、操作する指の数と同数の入力を持つ指の機能回復訓練において、入力の誤操作を避けるためにユーザーは常にディスプレイに対応する入力の位置を意識する必要がある。無意識的な誤操作ではなく、対応関係の誤認による誤操作は指の独立性を評価する指の訓練システムである PETS のような環境では正常な評価が行えなくなるため大きな問題となる。AR を用いることができれば、情報を指の上部に固定して確認することができるため、誤認による誤操作を減らすことに貢献できると考えられる。そのため、実際に指の制御訓練における AR の効果については、効率的なリハビリテーションを促進するためにも調査する必要がある。

1.5 目的

AR による表示方法は、単にユーザーにデバイスとフィードバック情報を同時に見せるだけでなく、位置を含めた対応関係の情報も同時に指定できることから既存のディスプレイによる表示方法と比較し、実際に作業の効率に関しての検証を行う必要がある。そのため、本研究では AR を利用することによってデバイスを操作する際にフィードバック情報が表示される位置の影響及び、複数の入力に対して反応時に正しい入力箇所へ操作が正確に行われるかの検証を行う。

また、従来の指の機能回復訓練に関する研究では、訓練機器や訓練の内容が主として研究対象とされており、訓練内容を伝える視覚フィードバックを行う手段には一般にディスプレイが用いられていた。本研究では、情報を伝える手段として AR が訓練において効果を発揮できるかどうかを研究対象として、その他の表示方法と比較することにより効果の分析を行う。分析には、PETS のアプリケーションを基に 2 種類の力の制御に関する実験と 1 種類の指の独立性に関する実験を行い、その効果を評価した。さらにアンケートの結果に基づいて、主観的に得られる情報と分析による客観的な評価との関連性について議論し、各訓練において解決すべき課題を明らかにした。

1.6 本論文の構成

本論文は 2 章で関連研究として現在のリハビリテーションやトレーニングの研究状況に関して拡張現実感や今回 PETS の代替機として利用するハプティックデバイスを利用した事例について述べる。3 章では、研究背景となった PETS を中心に、従来システムの利用方法並びに生じている問題点と解決のための方策について述べる。4 章では AR の効果を確認するための実験で用いる環境の準備のために実施した内容について述べ、5 章で被験者による実験を行い AR による手法が問題点の解決に有効かどうかの確認し、3 種類の実験を通しての意義及び得られた結果の評価と考察を行う。6 章では総括として本研究における結論と、今後の実施内容並びに課題を述べる。

第2章 関連研究

近年、リハビリテーションの分野は世界的な高齢化の影響により高齢者への自立や社会参加を目指そうとする社会の動きからこれまで以上に多くの注目を集めている。現在のリハビリテーションにおける取り組みには、新しい発想を基にしたデバイス開発や一般向けに使われることを目指したアプリケーションの開発などがなされている。

本研究においては、指のリハビリテーションに向けて AR を用いた新たな情報の視覚化手法に向けた作業の検討を行う。そのため、本章では以下の 3 節でそれぞれの技術を利用したリハビリテーションやトレーニングについて関連する研究成果やアプリケーションを紹介する。

- ・ 手のリハビリテーションについて
- ・ AR を利用したリハビリテーションとトレーニングについて
- ・ ハプティックデバイスを用いたリハビリテーションとトレーニングについて

2.1 手のリハビリテーションに関する研究

手は片側上肢に含まれ、この部位の治療は一般にハンドセラピーと呼ばれる。ハンドセラピーは現在ハンドセラピー認定委員会 (HTCC: Hand Therapy Certification Commission) によりその内容が定義されている [12]。定義においてハンドセラピーは作業療法と理学療法を併合し、さらに上肢機能、身体機能と活動に関する包括的な知識を統合させた実施することとされている。そのため、ハンドセラピーの目標として、障害を受けた手の機能の回復を目指すとともに自身の手の働きによって生活していける範囲の拡大を図ることにある。

また、手のリハビリテーションにおいて運動の学習には触覚を中心とした知覚が不可欠である。そのため知覚の教育による能動的な接触 (アクティブタッチ [13]) を獲得する必要がある。この手の働きによる対象の知覚には「対象の探索・識別」「手のフォームの決定」「把持力のコントロール」「物体の操作」「危険の回避」の 5 種類に大別されている。本研究では、この中でも「把持力のコントロール」を中心とした指の力の制御を中心に行う。把持力とは物体を握りつぶしたり、落と

さず持ち続けることを指し、重量や材質の変化によるこの力をコントロールは物体の操作の前段階としても重要である。

以前から物体の把持は材質によってその力の大きさが変化することが知られていたが、Westling[14]らの研究はその力の制御は物体を落とさないように調整されるだけではなく、その力が指先が器用な人ほど最小限の力で制御されていることを報告している。そのため、リハビリテーションにおいても指の制御を行う際には、最小限の力で把持の訓練ができるシステムが必要になる。

Olafsdottir[15]や Keogh[16]の研究では手や上肢に対して筋力トレーニングを行うことにより意識的・自発的に発揮する最大の力を表す最大随意収束(MVC: Maximal Voluntary Contraction)が増加したと同時に、指の相互作用の変化と作業において正確な力の生成がもたらされたことや、指で物をつまむ力の安定性の拡大、制御時の誤差の減少から指の機能が強化されることが証明されている。

把持力には、指の制御時に意識した指と異なる指が無意識的に動く現象が関与している。一般にこの現象は指の協調運動と言われ、筋骨格系と神経系の正常な相互作用によって発揮される。この作用は手の動作の安定性を向上させる効果があると考えられている[17]。この効果は解剖学的構造と人間の神経系の制御の結果によってもたらされており[18]、中枢神経系及び末梢神経系の障害が生じるとこの協調運動が困難になるとされている。Shim [19]らは若年者と高齢者に対して力の調整能力の調査を実施し、高齢者は必要以上の大きな力を掛けることと掛ける方向のズレが生じることが観測された。Wu[20]は指の力を調整することを目的に若年者と高齢者に対して 2 本の指で個々の力センサを調整して押す訓練を行った。1 時間による練習後、高齢者には指の協調運動の増加し改善が見られることが観測された。

加えて、手のリハビリテーションのためのトレーニングは高齢者のアルツハイマー病患者に対して認知機能の改善を目標とした Kwok[21]や Langlois[22]の研究では指の協調運動の訓練や筋力トレーニングによる訓練が、認知機能の改善を促したことが報告されている。そのため、指の制御を改善しようとする試みは回復による指を使った生活能力の向上の他、その他の分野でも認知機能に回復による能力の向上の可能性がある。

2.2 AR を利用したリハビリテーションとトレーニングに関する研究

AR は現実世界へ情報を重畳表示させることにより，ユーザーに対して指定した箇所への誘導や注意を促すことが容易となる．この技術は医療や工業分野において機器操作などの作業支援として使われるほか，現実世界の状態と組み合わせで表現できることからユーザーの活動に合わせたトレーニングにも利用される．そして，医療分野における機能回復トレーニングとしてリハビリテーションの分野でも有用であると考えられている．

工業分野を中心として，機械を扱う技術者は機器の組み立てやそのメンテナンスにおいて複雑な作業を要求される．Sabine[23]らはこれらの作業に対して効率的なトレーニングシステムが必要と考え，AR を用いたメンテナンスと組み立ての作業のためのトレーニングシステムのプラットフォームを開発している．医療分野においても，外科手術を中心として実施前にトレーニングが重要となる．Hamza[24]らは脳神経外科手術に対するトレーニングとして AR を用いた脳の 3 次元メッシュの表示と部位の強調表示により，手術手順のシミュレータシステムを作成している．

リハビリテーションにおいて複数の感覚のフィードバックが同時に与えられることは運動学習において有意な結果をもたらすことが報告されている．

Winyu [25]らは遠隔地から患者に対して理学療法を行うテレリハビリテーション分野において，AR を利用し患者が行う作業に治療者である理学療法士の行動を重畳表示させることによって直接対面して教える状況と同じ効果があることが認められた．

また，AR で表示されたターゲットに対して手や腕を動かす作業を行った Hossein[26]らのプロジェクターによる仮想オーディオビジュアルインターフェースシステム(図 2(a))や，Burke[27]らの上肢に障害がある患者に対象としたマーカーとカメラを利用したゲームシステム(図 2(b))をによるリハビリテーションシステムを提案している．

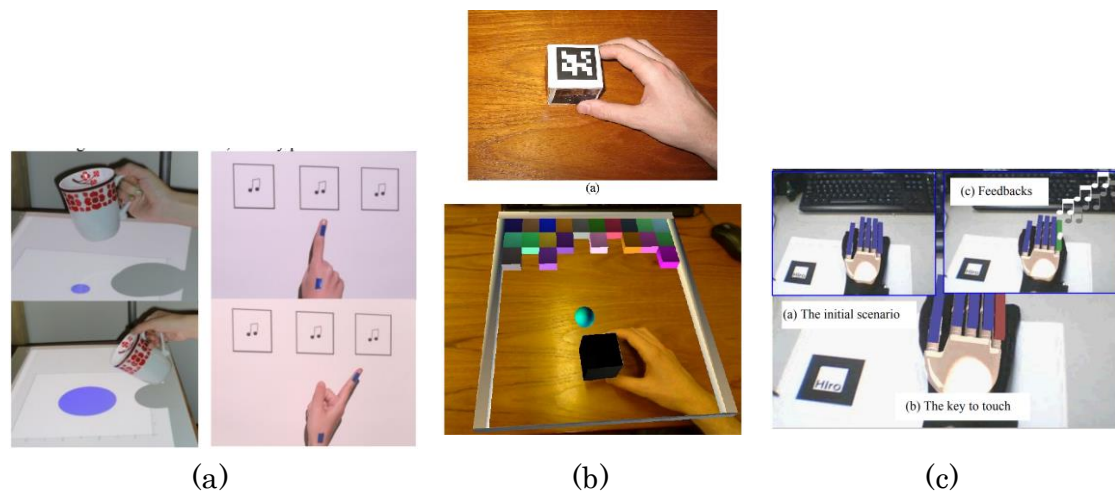


図 2 AR によるリハビリテーション

AR によってターゲットを生み出すここまでのトレーニングとは異なり，Shen[28]らは作業の対象としてデジタルグローブを用い情報を指に直接重畳させることで，指の動きに合わせたリハビリテーションシステムを構築した(図 2(c))．

2.3 ハプティックデバイスを用いたリハビリテーションとトレーニングに関する研究

ハプティックデバイスはデバイス内に組み込まれたアクチュエータ等による機械的制御によりユーザーへ力覚のフィードバックを与える．

ハプティックデバイスには CyberGrasp[29]や HIRO III[30]のような用途を指に限定し掴む動作のような実際の手の動きに合わせた作業に特化したデバイスの他に，PHANTOM Omni[31]や Haption Virtuouse[32]のようなデバイスを実際の環境における道具に模して操作することで利用されるものなど，目的に合わせて多種多様な形態で開発されている．(図 3)

ハプティックデバイスによる力覚のフィードバックにより仮想空間上でオブジェクトから現実世界同様に物に触る，形状を確かめるといった触覚の再現が可



CyberGrasp[29]



HIRO III[30]



Haption Virtuose[32]



PHANTOM Omni[31]

図 3 ハプティックデバイス

能となる．Atif[33]らは脳卒中によって手の障害を持った患者に対して、指のリハビリテーションを目的にハプティックデバイスを用いて 5 種類のトレーニングを用意し、デバイスを使用することの利点の可能性を示唆している．Carina[34]らは手の動きを取得するセンシング機器並びに各指と腕の動きに対応するハプティックデバイスをそれぞれ用いることによってリハビリテーションに用いる際のトレーニングの難易度の測定を行い、デバイスの使用に対する不快感の評価とその不快感を取り除く提案を行っている．

また、Hu[35]による研究の結果、リハビリテーションにおいて視覚情報量が小さくなると力の調整の適応力も低くなることが報告されている．このことから、触覚を含めた視覚や聴覚による感覚フィードバックを同時に与えることにより機能改善の効果に変化が現れることがわかっている、

Sergei[36]らは各指の動きに対応できるデバイス用い VR シミュレーションによるピアノのトレーニングを行い、被験者である片頭痛患者に対して視覚からのアプローチを提案している．

Siam[37]は各指の動きを制御できる外骨格型ハプティックデバイスの開発並びに AR 環境組み合わせるシステムを提案し、視覚と力覚フィードバックによるユーザーへ新たなアプローチを行った。Luo[38]らは脳卒中患者へのリハビリテーションのため、AR と外骨格型ハプティックデバイスを用いたシステムの有効性について評価を行い、実際の患者から有意義な結果が得られた(図 4(a))。

指の動きを制御できるハプティックデバイスに比べ、PHANTOM のようなデバイスは制御軸が少ないため自由な動きはできない一方で医療分野における道具を模倣したトレーニングとしての用途で数多くの利用例がある。Phattanapon[39]らは歯科外科の技術トレーニングのため VR や AR を組み合わせ、道具として重畳表示させたハプティックデバイスを操作することによりシステムを構築した(図 4(b))。トレーニングにおいては VR に比べて AR による手法に利点があることが示されている。

また、AR とハプティックデバイスを組み合わせた研究として、Benjamin[40]らはハプティックデバイスを用いたエンターテインメントへの拡張を目的として、そこに生じる安定性やレイテンシの問題点を解決したフレームワークを構築し、ピンポンゲームアプリケーションを提示した(図 4(c))。

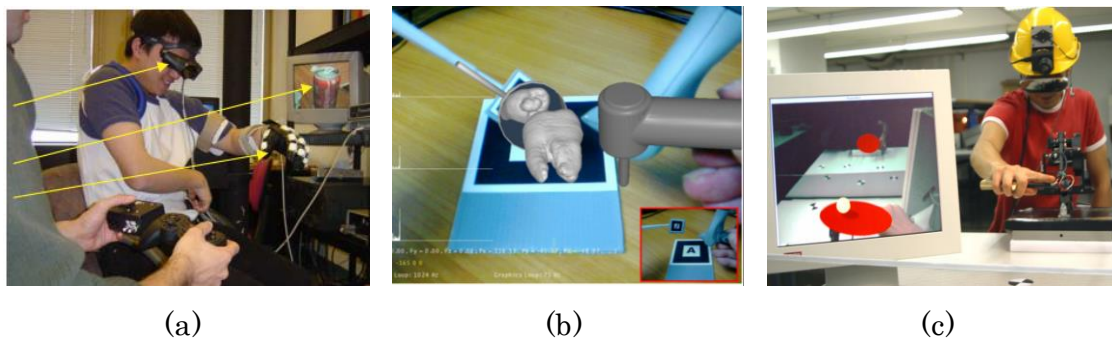


図 4 ハプティックデバイスと AR によるトレーニングシステム

第3章 制御訓練システム

3.1.1 Pressing Evaluation and Training System

Pressing Evaluation and Training System(PETS)は各指にかかる力の大きさを正確に出力するため、デバイスの各指に接続された力のトランスデューサと位置調整可能なパッドフレーム、バイオフィードバックシステムにより構成されている。各トランスデューサの位置は被験者の指から垂直に力が加わるように調整するために、ユーザーの手の長さや幅に合わせて変更可能である。(図 5)

PETS を用いたユーザーは臨床評価と Single digit ramp task (SDR) を用い評価が行われる。臨床評価には強度テスト及び手の機能テスト、感覚状態テストが含まれている。強度テストはデバイスからは握む力の大きさや掌の握み, three jaw pinch の強さが記録される。手の機能テストは, Action Research Arm Test (ARAT)や Box and Blocks Test (B&BT)が実施される。最後の感覚状態テストでは Semmes-Weinstein test (S-W test) と two-point discrimination(2-PD)が使用される。

PETSによる訓練効果の調査には Force-track testing 及び Sequential testing が提案されている。

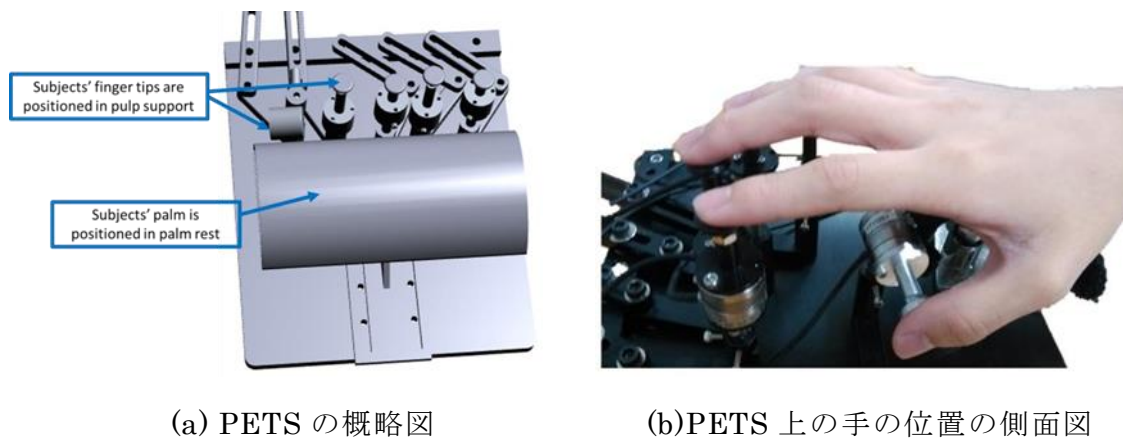


図 5 Pressing Evaluation and Training System

3.1.2 Single digit ramp task (SDR)

このタスクでは，一本の指を用い相対的な力の制御を行う．ユーザーは画面上に表示される白色の目標線に沿った力を加える．(図 6) 目標線は事前にユーザーから収集されたそれぞれの指に対して最大随意筋力(MVC)を基に作成される．実施時はタスクを行う指のトランスデューサの状態の記録だけではなく，その他の指のトランスデューサも同時に記録することによって各指の力の独立性(EN : Parameters of digit force independence)の算出に利用される．

指の独立性に関しては，Latash ら[41,42]の研究より健常高齢者とパーキンソン病患者との間で実験が行われ，パーキンソン病患者には指の独立性の低下が確認されている．また，脳卒中患者に対して PETS を用いて行われた指の独立性に関わる訓練[43]では，訓練後にほとんどの患者の手の機能並びに感覚状態テストで指の力の独立性の改善が示された．

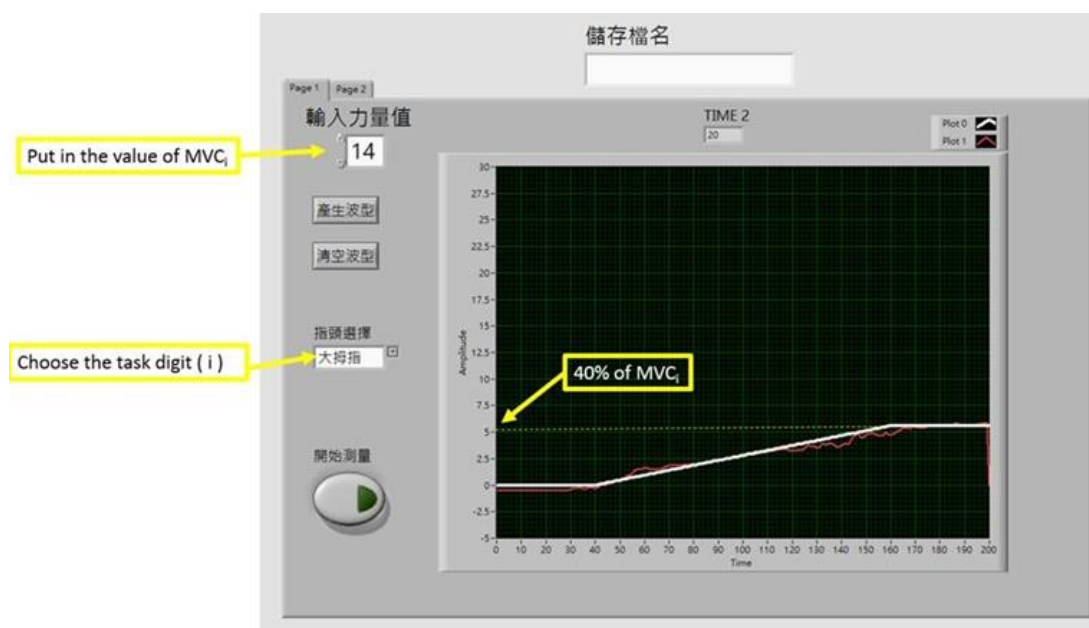


図 6 SDR task program.

3.1.3 Force-track testing

提案されているテストアプリケーションは，ユーザーが指定された一本もしくは複数の指から力を加え相対的な力の制御が可能であることを測定するために作成されたものである．図 7 に提案されているアプリケーションの訓練画面の一例を示す．

訓練では，SDR と同様にユーザーは予め設定された緑色の目標線を確認し，ユーザーの力を視覚化した赤線に合わせて力を加える．この時の力を加える指は一本または複数の指で行われ，掛けられた力の合計の値が訓練画面に反映される．また，訓練では指示されていない指が意思に反して動いてしまう現象を観測するため，その他の指が掛ける力についても計測を行っており，指の独立性に対しても評価の対象としている．

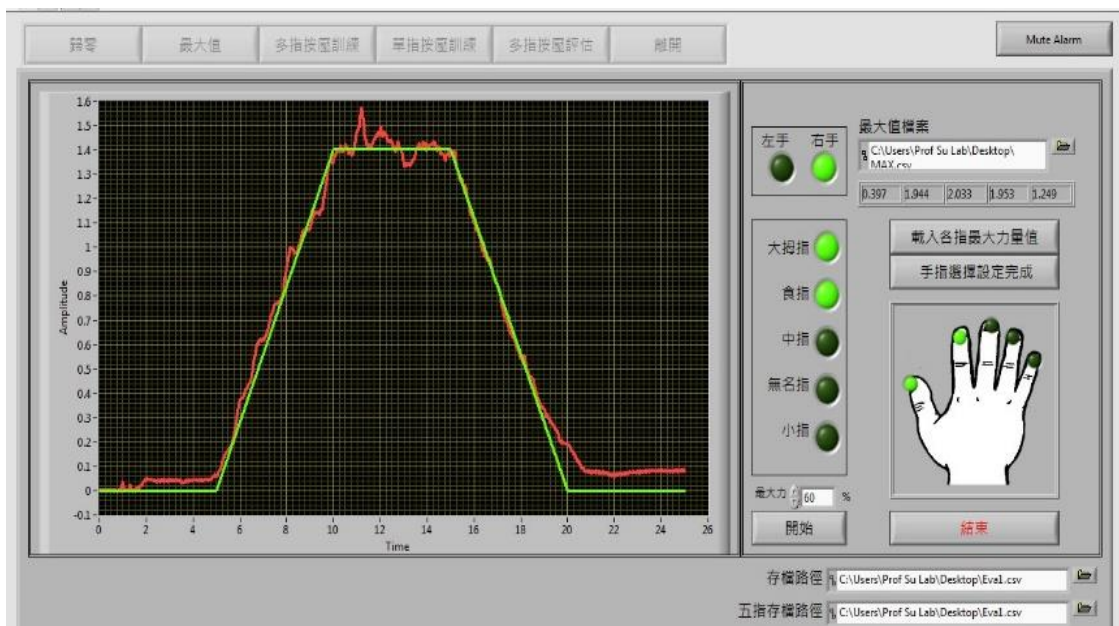


図 7 Interface of force-track testing.

3.1.4 Sequential testing

このテストアプリケーションでは、ユーザーに対して各指を指示通りの力を加え、絶対的な力の大きさを制御が可能であることを測定するために作成されたものである。図 8 にアプリケーションの訓練画面の一例を示す。

画面上は、各指に対応付けられた状態で描画されるバー上のラインと加えられた力の大きさを反映してバー上を上下に動く領域によって構成されている。

訓練では、指示される指のバー上で表示されるラインに従い、各指はラインまで力を加えラインと領域が重なるように調整する。また、パターンによって使用する指の本数やそれぞれに掛ける力の大きさが異なる。評価には、訓練前と訓練後の EN を比較することで使用される。また、Force-track testing と同様に各指に対して指定していない指の状態を同時に観測し、指の独立性に対する評価を行う。



図 8 Interface of sequential testing

3.2 課題点

PETS を用いた訓練では、被験者が訓練画面を確認し得られた情報を基にデバイスに対して操作を行う。この時利用されるデバイスは訓練の種類に依存するが、訓練の内容を指示する方法はディスプレイを通して行われる。

[35]より視覚的なフィードバックが伴う機能回復訓練において、デバイス単体で行われる訓練と比べて効果が高いことを証明している。ただし、現環境では視覚的なフィードバックを行うために予め設置されたディスプレイが使用されるため、ユーザーは異なる位置にある操作デバイスと訓練画面を同時に意識する必要がある。そのためユーザーが注意する内容が増え、作業効率の低下を引き起こす可能性があると考えられる。

加えて、**Sequential testing** のような力を加える指が変化するタスクにおいては、指定される指のパターンによって認識が曖昧になり誤認識による **EN** が低下で指の独立性が損なわれてしまうと考えられる。

3.3 本研究の位置づけ

現状の指の制御訓練における研究においては過去の慣例及び研究分野の違いから、視覚フィードバックにはディスプレイが主に用いられており、表示以外の技術を必要とする **AR** は効果が確認されておらず使用されてこなかった。

本研究では、意識の分散や操作位置の誤認などによる誤操作が訓練用デバイスとディスプレイの距離が遠いことによって生じると考え、**AR** を用いることによって指先に情報を表示できることから改善が可能であると見込んでいる。

表示の誤認による独立性の低下は正確な評価情報によって進められるべき訓練プロセスに悪影響を与えるため、訓練の非効率化を招く恐れがありこの問題が改善することにより訓練は効率化され、指の機能回復に要する期間や負担を低減できる可能性があると考えられる。そのために本研究では指の制御訓練における意識の分散により生じる力の絶対量の知覚や力の調節への対応の変化、並びに指の操作位置の誤認から生じる独立性の測定のために各々で **AR** インタフェースを作成、実験を行うことで各々の訓練に **AR** システムが有効に機能するかどうかについての確認を行う。

第4章 事前準備

本章では，実験で使用したデバイスについて，その作成並びに技術的な工夫について説明する．また，視覚フィードバックに利用するモデルについて，数個の製作コンセプトとともに使用したモデルを示す．

本研究では，諸事情により PETS 本体が用意できなかったため，PETS によって訓練される能力に合致した代用となる装置を用い実験を行った．実験は PETS の機能をベースに(1)力の知覚精度向上のための訓練，(2)力の変化への対処能力向上のための訓練，(3)各指の独立性向上のための訓練の 3 種類の訓練となるような実験を行い，AR インタフェースの効果についての確認を行う．

また各実験に用いるデバイスとして，(1)(2)では力の制御のための力覚を再現することが必要であると考え，ハプティックデバイスを利用した．(3)では指の独立性を観測するために手の形にフィットするように設計されたキーパッドを用意した．

また，表示機器としての AR システムにはカメラとヘッドマウントディスプレイ(HMD)を利用したビデオシースルー型 HMD によって構築した．

4.1 デバイス準備

表 1 に使用した機器とそのデバイス名を示す．

表 1 使用機器

機器	デバイス名
ヘッドマウントディスプレイ(HMD)	Oculus Rift CV1 (Oculus)
カメラ	OVRvision Pro
ハプティックデバイス	PHANTOM Omni (SensAble)
キーパッド	Orbweaver Chroma(Razer)

4.1.1 ハプティックデバイス

本研究に用いたハプティックデバイスはデバイスの動きと同期した仮想空間上のカーソルが触れた仮想物体に対してデバイスへ力覚フィードバックを発生させることが可能である。また，本実験においてはデバイスの制御のために開発環境である Unity 上にて公開されているプラグイン[44]を利用した。加えて，本実験における力覚フィードバックは垂直下方向へ指の一本で力を掛けるため，図 9 のように予めデバイスを固定した状態で使用する。



図 9 ハプティックデバイスと実験における使用方法

4.1.2 ビデオシースルー型 HMD による AR システム

本実験における AR システムは図 7 に示されるようにカメラと HMD を組み合わせた状態で，カメラを通して得られた映像上に情報を重畳し HMD を通してユーザーに知覚させるビデオシースルー型 HMD による表示を採用していた。

ただし，得られた AR 映像は物理的及びシステム的原因から問題が生じたため，工夫を講じる必要があった。



図 10 ビデオシースルー型 HMD

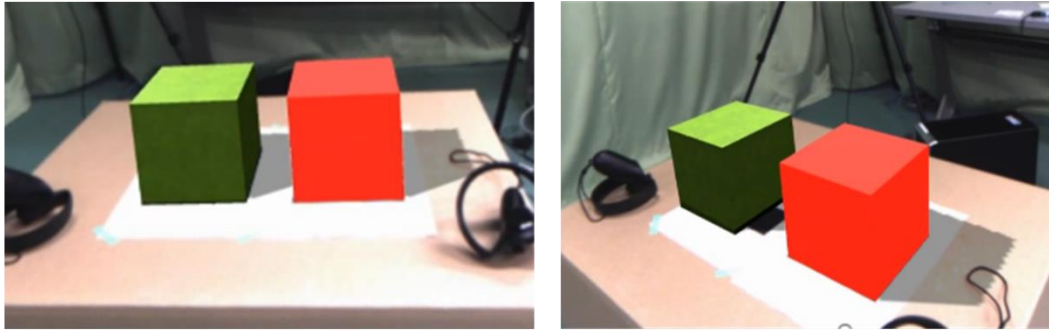
4.1.2.1 キャリブレーション

通常，装置には制作の過程や時間等により同一の工程で柵瀬された装置であっても性能の誤差が生じる．キャリブレーションはそれらの誤差に対してすべての機器が同等の性能を発揮できるように修正することを目的としている．尚，本実験で使用したカメラである OVRvision のキャリブレーションは付属ツール[45]で行われるため割愛する．

4.1.2.1.1 HMD-Camera

AR システムを構築する上で必要であった HMD とカメラによる誤差は，手作業でデバイスを作成したことに加え，開発環境内の制御プログラム上で視点の座標が実際の目の位置に設定されていたため，物理的な距離が生じ発生していた．

図 11(1)はマーカーを基準に Unity の仮想空間上で常に更新して再配置される仮想オブジェクト(a)とある位置からマーカーを基準に配置されたのちに仮想空間上に固定された仮想オブジェクト(b)である．カメラを通した視点位置が実際の人の動きと同じ場合，二つの仮想オブジェクトの位置はマーカー上から動くことはない(図 11(1))．しかし，HMD が動いた際に HMD とカメラの間に物理的な距離が考慮されていないため，HMD の移動距離とカメラの移動距離が異なり，本来の視点と異なる位置からマーカーを見た状態として認識されてしまうため，(b)のオブジェクトはマーカー上から移動してしまう(図 11(2))．



(1) 生成地点での仮想オブジェクト (2)HMD移動時の仮想オブジェクト
(a)赤色オブジェクト：マーカ位置依存 (b)緑色オブジェクト：HMDの座標依存

図 11 HMD-Camera

本研究において、HMD の動きに仮想オブジェクトが正しく追従しない問題は、特に指の独立性を確認する実験において、想定と異なる指の位置に視覚モデルが生成されてしまうなどの問題を引き起こす恐れがあるため対策が必要であった。

問題の修正には Hand Eye Calibration[46]を利用することにより、HMD とカメラの相対距離を測定し、HMD 中心となっていた仮想空間上の移動後の座標をカメラの移動後の座標へ座標変換することで、映像上の仮想オブジェクトを正しく HMD の動きに合わせた。

4.1.2.1.2 HMD-Haptic Device

Unity 環境下におけるハプティックデバイスの振る舞いは、仮想空間内での立方体の領域内で実際のデバイスの動きに作用し、仮想空間上の物体の接触に伴い力覚フィードバックを発生させる。

今回 AR の利用に当たり仮想空間上で HMD とハプティックデバイスの座標を取得する必要があったため、ハプティックデバイスの座標には HMD の座標取得に利用するトラッカーで位置取得可能な HMD 付属のコントローラーを利用することによって位置を取得した。

図 12 にコントローラーとハプティックデバイスの配置を AR 上に表示する。ただしこの時、プラグインの仕様上ハプティックデバイスの可動領域の座標は、全体座標系の原点を基準に固定されていたため、コントローラーが持つ座標系へ



青領域：ハプティックデバイスの可動領域

図 12 HMD・ハプティックデバイスのキャリブレーション

の座標変換が困難であった．そのため，本研究ではハプティックデバイスの起点を原点としたコントローラーとの相対距離を基準に，HMD 全体の座標系を変換処理を施すことによって AR 上でのハプティックデバイスを実現した．

また，可動領域は 3 次元方向に任意で変更できるため，今回は手動で実際のデバイスと AR 上の仮想デバイスが重なるように調整した．

4.1.2.2 遅延

今回の実験ではビデオスルー型の HMD により AR 表示を実現した．ただし，表示を行う際，カメラからの映像や HMD の座標取得，ハプティックデバイスの座標取得は情報の処理，伝送の都合から必ず遅延が生じる．

問題は HMD の視点を動かした際に本来追従するはずの仮想オブジェクトが映像から一時的にずれて表示されてしまうことである(図 13)．映像上の齟齬は AR の使用感に大きく影響し，ユーザーへの不快感を助長する原因となるため修正を施した．

ビデオスルー型 HMD は仕様上，カメラによる映像と HMD の動きに一定の遅延を生じさせていたが，問題の原因となったのは HMD の動きによる遅延が



図 13 HMD を動かしした際の仮想オブジェクトのずれ

カメラと異なる遅延によって入力が行われたため生じていた．Unity の座標系へ直接反映される HMD の座標はすべての仮想オブジェクトに影響を及ぼすため，カメラ映像からオブジェクトがずれる現象が発生した．

問題の修正において，最も大きな遅延を持つカメラ映像の遅延を小さくするためには処理性能の改善等の対処が必要であり時間的な都合から現実的ではないため，今回の実験では HMD の座標更新に対して意図的に遅延を加えることによって，映像と仮想オブジェクトの齟齬を修正した．ただし，映像による遅延は依然残るため，実際の使用に際して首の動きと映像の動きが異なることからユーザーが異常を感じる可能性がある．

4.2 視覚化モデル

AR インタフェースを作るにあたり，力覚の情報を利用した視覚フィードバックを与えるモデルを作成する必要がある．本研究では実験で力における相対的な制御及び絶対的な制御，指の独立性を確認するために 3 種類の実験を行う．ためそれぞれ用途に合致したモデルが必要となる．以下に各実験において考案した視覚化フィードバックモデルを示す．

4.2.1 力の知覚精度向上のための訓練

実験では，一本の指に対してかかる力の大きさを制御することを目的として行

われる．そのため，視覚化モデルには力の大きさ明示的に把握でき，異なる大きさの力と分離できる必要がある．以下に 2 種類の考案したモデル(図 14)を示す．

- Model 1 : Bar モデル

この視覚化モデルは，力覚フィードバックに対して大きな力が加わると上昇し，小さくなるにつれて下降する．上昇と下降の動きは力の大きさとの親和性が大きく，使用方法を知らないユーザーも直観的に理解ができると考えられる．一方で，力を変化させるたびに視線が大きく動くため，訓練においての効果が落ちることが危惧される．

- Model 2 : Circle モデル

このモデルは円状に力の大きさが反映され，大きな力が加わると緑色の領域が広がり，小さくなるにつれて狭まる．このモデルは円中心を起点としたとき，変化の確認に視線の移動が小さく，作業に集中できると考えられる．一方で，モデルのサイズが大きくなるため，複数のモデルを用意した場合，別のモデルや現実の映像を大きく隠してしまう問題がある．

本実験では，力を一か所で維持することが求められるため視線の移動が頻発しないと考え，また直観的に仕組みを理解することができるため，Model 1 の bar モデルを使用することとした．

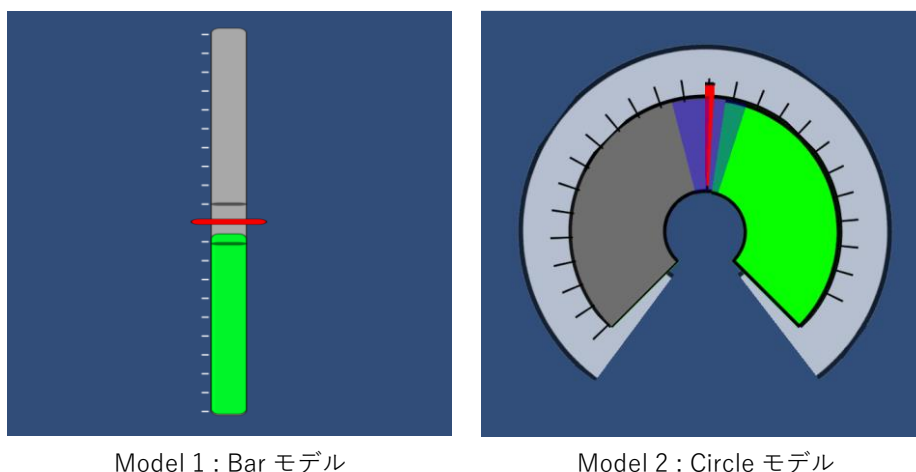


図 14 力の知覚精度向上訓練のための視覚化モデル

4.2.2 力の変化への対処能力向上のための訓練

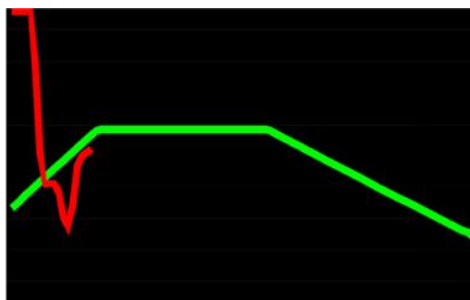
実験では、一本の指に対してかける力の変化を制御することを目的としている。そのため、視覚化モデルにはユーザーへ力が増加する状態を事前に通知することが必要である。また、静的制御訓練と異なり力の絶対量を記憶する必要がないため、変化を把握しやすい形状が求められる。以下に 2 種類の考案したモデル(図 15)を示す。

- **Model 1: 折れ線グラフモデル**

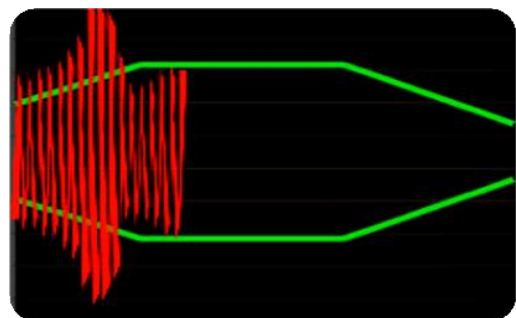
作成されたモデルは、SDR で使用されたモデルをベースとした形状を持ちユーザーへの指示を目的とした緑色のラインと視覚的フィードバックを行う赤のラインによって構成される。力を掛けることによって上下するため、直観的に理解できる一方で、ユーザーが力の加える方向とグラフの動きに予め関係性を見出している場合、逆方向の動きが生じるため、誤操作の原因となる。

- **Model 2: 面グラフモデル**

作成されたモデルは、折れ線グラフと面グラフの特徴を持つ。使用に際しては、2 本の緑のラインによって力を掛ける範囲が設定され、掛けられた力の大きさに応じて赤の面が形成される。このモデルは力が大きくなると面の範囲が広がるため、力を掛ける方向との関係性が薄く、誤操作の可能性が低い。一方で、各緑のラインは 2 本あるため変化が小さく、正確に力の大きさを知るため設定範囲によっては広い範囲を一度に見る必要がある。



Model 1: 折れ線グラフモデル



Model 2: 面グラフモデル

図 15 変化への対処能力向上訓練のための視覚化モデル

本実験では、力を変化の制御に視覚フィードバックを利用するためユーザーは変化を認識しやすくする必要がある。そのため変化の領域が広く、知覚しやすい Model 1: 折れ線グラフモデルを使用することとした。

4.2.3 指の独立性向上のための訓練

実験では、各指に対しての独立性を確認することを目的としている。そのため、視覚化モデルにはユーザーは各指を分離して捉えることができる仕組みが必要である。以下に 2 種類の考案したモデル(図 16)を示す。

- **Model 1: 2 段組みモデル**

作成されたモデルは上段 5 個、下段 5 個で各指に対応した状態で合計 10 個の円形の出カイメージで構成されている。それぞれの出カイメージは設定されたパターン及びユーザーによる入力で状態を変化させる。ここでは上段に位置する出カイメージが発光することでユーザーへ入力を行うパターンが示す。下段は 2 色の発光状態から構成され、ユーザーが誤った回答をした場合に赤色となり、正しい回答の場合は青色に点灯することで、ユーザーは判断を行う。

テストパターンとなる部分とユーザーの入力が分離しているため、テストパターンが素早く把握できることに加え、入力においての判定がシンプルであり知覚しやすい。一方で、ユーザーは 10 か所を同時に認識する必要があるため指の誤認識や効率が悪化する恐れがある。

- **Model 2: 1 段組みモデル**

作成されたモデルは各指に対応した状態で合計 5 個の円形の出カイメージで構成される。各出カイメージは設定されたパターンとユーザーへの入力状態に応じて赤青黄色 3 種類の出カパターンを持つ。実験では複数の出力パターンが用意されており、ユーザーの入力がない状態では入力箇所が黄色に点灯する。ユーザーの回答により正しい箇所への入力が行われた場合青色に点灯し、誤った場合は赤色に点灯することによって、ユーザーは判断を行う。テストパターンとユーザー入力となる部分と一体化しているため、ユーザーは認識する箇所が少なく済み、各指同士の誤認識が減ると予想される。一方

で、

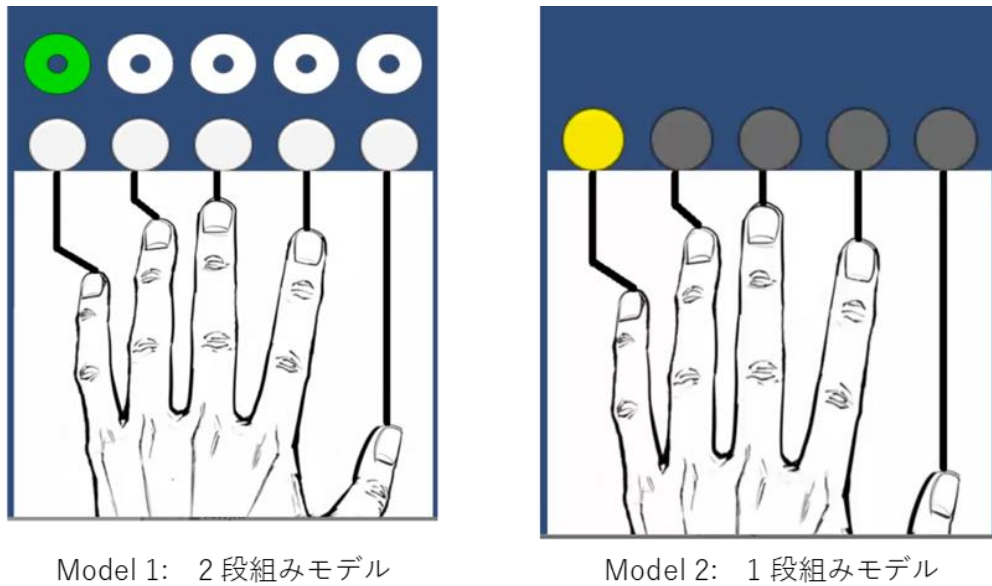


図 16 指の独立性向上訓練のため視覚化モデル

出力パターンが 3 種類あるため、ユーザーがそのパターンを覚えることがやや複雑になる。

2 種類の視覚モデルの内、本実験ではユーザーが異なる指を誤認識して発生する EN の低下が評価において望ましくない点から、その問題が発生しづらい Model 2: 1 段組みモデルを利用することとした。

第5章 実験

本実験では，PETS の機能回復内容をベースに 3 種類実験にて AR インタフェースの効果の確認を行った．事前準備時と同様に各実験においては，それぞれの機能回復内容に合致した機構を持つ機器を利用した．

また，表示機器にはビデオシースルー型 HMD を利用した AR システム及び既存の手法を再現するためのディスプレイを用意した．

5.1 実験環境

各実験では使用する測定機器にて対して 2 種類の表示機器を用いて同様の条件で実験を行い，評価した．

表 2 に実験で用いた機器および実験環境を示す．尚，4 章よりハプティックデバイス 及び HMD の各座標系における力点，HMD の座標はそれぞれのデバイスに予め搭載されているキャリブレーション機能により自動的に取得が可能である．また，ハプティックデバイスによる力覚フィードバックは内部計算により実行されるため，実験では実行時に出力される値を視覚フィードバックの値として反映させた．

5.2 実験条件

図 17 に実験における各機器の配置図を示す．

本実験では，被験者として 21 歳から 31 歳の学生 18 名(男性：17 名，女性：1 名)に対して実験を行った．被験者は指のリハビリテーションに関しては詳しくない人物であり，本実験においての目的である AR の効果を確認する旨を伝えずに実施した．また実験では，予備実験から得た知識を基に被験者の学習による慣れの影響が大きいと判断し，各被験者が使用する表示機器の順序並びに実験順序を組み換えることにより，使用する順序によって結果が偏らないように設定した．加えて慣れの影響が考慮するために，各実験において被験者へ使用するトレーニング及びテストデータはすべての表示機器で同値もしくは同一のデータを用い乱数処理を施したデータセットを利用した．加えて各表示機器による実験終了時

に被験者に対して実験の主観評価を集めるため、表 3 に示す内容と自由記述によるアンケートを実施した。また、アンケートには Google Form[47]を利用した。

評価の際は得られるデータに対して表示機器等による有意差が生じることを確認するため、初めに一元配置分散分析(one-way ANOVA)を利用した。

表 2 使用機器並びに実験環境

表示機器		
機器・システム	デバイス名①	デバイス名②
外付けディスプレイ	BenQ G2220HD	
AR システム	Oculus Rift CV1(HMD)	
		OVRvision Pro(カメラ)

入力機器	
機器・システム	デバイス名
ハプティックデバイス	PHANTOM Omni
キーパッド	Orbweaver Chroma(Razer)

開発環境	Unity 2017.1.1f1
プログラミング言語	C#

OS	Windows 10 Enterprise 64 bit
CPU	Intel® Core™ i7-5930K CPU 3.50GHz(12CPUs), ~3.5GHz
GPU	NVIDIA GeForce GTX 980
RAM	16GB



図 17 配置図

表 3 アンケート内容

不快感	トレーニング時、眩暈や吐き気などの不快感や違和感がありましたか
質問 1	作業の内容は簡単だった
質問 2	作業は正確に行うことができた
質問 3	作業に集中できた
質問 4	表示されたモデルは分かりやすかった
質問 5	あなたはこのトレーニングを日常的に行うことができる
質問 6	あなたはこの作業を日常的に行いたい
質問 7	高齢者はこのトレーニングは他者によるサポートを不要だと思いますか
質問 8	高齢者はこの作業の使用方法を容易に理解できるものだと思いますか

5.3 静的制御訓練に関する評価実験

本実験は、力の一般的な知覚精度の確認を目的として行われた。被験者は表示機器による視覚フィードバックとハプティックデバイスによる力覚フィードバックを用いて指示された力の大きさを記憶した後に、記憶された力の大きさを力覚フィードバックのみで正確に発揮できるかを確認した。

5.3.1 実験手法

実験では各表示手法によって特定の大きさの力を正確に記憶できるかについての確認を行った。そのため、実験時の作業内容は訓練パートとテストパートに分割し行った。

ただし、本実験では被験者が訓練パートを通して学習した力の大きさを計測することで被験者が表示機器の違いによって生じる学習速度の違いや傾向を把握するために、本実験開始前に正確な力の制御ができているかを確認するため事前計測を行った。また、作業内容を正確に把握してもらうためにチュートリアルを実施した。

本実験では、指への視覚フィードバックモデルとして 4 章で示された “Model 1: Bar モデル” を利用した。以下に訓練パートとテストパートの作業内容を示した後、事前計測を含めた実験手順を示す。

- ・ 訓練パート

表示機器を利用し、視覚フィードバックのモデルの描画を行う。描画されたモデルには予め設定した力の大きさの位置に横線とその力の大きさが表示される(図 18(a))。モデル内では被験者の加える力の大きさによって黄色もしくは緑色の領域が前後し、被験者は横線の位置まで力を加えることを目的に作業を行い、力の大きさの記憶を行う。また、加えられた力はモデルが表現できる 2.2N を最大値として $\pm 5\%$ ($\pm 0.11\text{N}$) の範囲を判定領域として領域内で可動部が緑色となり領域外で黄色となる。記憶には、この領域内で 3 秒間力を維持することによりこのパートが終了したこととした。

- ・ テストパート

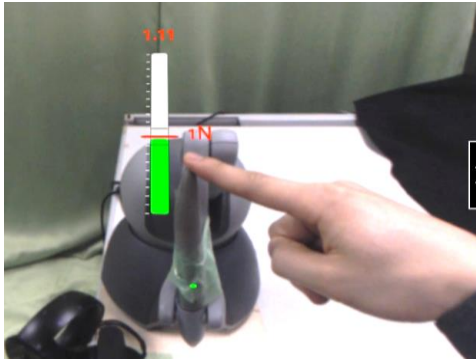
訓練パートで行われた力の大きさが正確に記憶されているかを測定する。そのために文字による指示(図 18(b))を行い、被験者が準備できた地点から 3 秒間計測を行う。

実験手順

1. (事前計測) 被験者は力覚フィードバックのみを利用して被験者が考える 1 N の力の提示してもらい、その大きさを計測する。これにはディスプレイを用いテストパートと同様の環境で計測を行う。また、この計測は 3 セット行う。
2. (操作確認) 一連の作業内容を伝えるため、チュートリアルとして 2N の力の把握を行う。そのため各一回ずつ訓練パートとテストパートを行う。
3. 【訓練作業】訓練パートにて、1 N の力の大きさの記憶を行う。実施に際しては、このパートを計 3 セット繰り返すことにより記憶ができたものとする。
4. 【テスト作業】被験者の表示機器ではモデルが不可視化され、テストパートが描画される。測定は訓練作業と同様の 1 N の力が表示されこのパートを計 3 セット実施する。
5. 終了後、使用した表示機器に対してアンケートを実施する。
6. 担当者は被験者に表示機器を変更することを指示し、変更された表示機器を用い 2 - 5 の実験を同様の条件で行う。

5.3.2 評価方法

評価のためにテストパートにおけるデータの収集を行った。収集されたデータはテスト作業時に発揮された被験者が掛けた力の大きさであり、被験者の客観的主観的な評価を合わせた各表示機器における有効性を確認できると考えた。また、訓練パートの許容値を $\pm 5\%$ の範囲としたことから事前計測で指示した力の範囲で正確に力を発揮した被験者のデータは評価に用いず、被験者ごとの傾向を確認する際にのみ利用した。



(a) 訓練作業

(b) テスト作業

上：AR による表示

下：ディスプレイによる表示

図 18 静的制御訓練に関する評価実験

5.3.3 実験結果及び考察

図 19 に表示機器ごとのテストパートで入力された力の入力誤差を示す。

この結果に対して、表示機器ごとで一元配置分散分析を行った結果、本実験においては表示機器による統計的な有意差は生じなかった。また、図 20 に示したアンケートの結果においても表示機器が変わることによる有意差は生じなかった。また、表 4 にアンケート時の自由記述内容を示す。自由記述より主観的には AR による同時表示の効果は出ていると考えられる。ただし、本実験における被験者が学生であったため、PC を普段から使うことによるディスプレイとキーボードの慣れから本実験における効果の確認が困難であった可能性がある。そのた

め、本来の対象者である高齢者に対しても今後同様の実験を行い、その結果を確認する必要があると思われる。

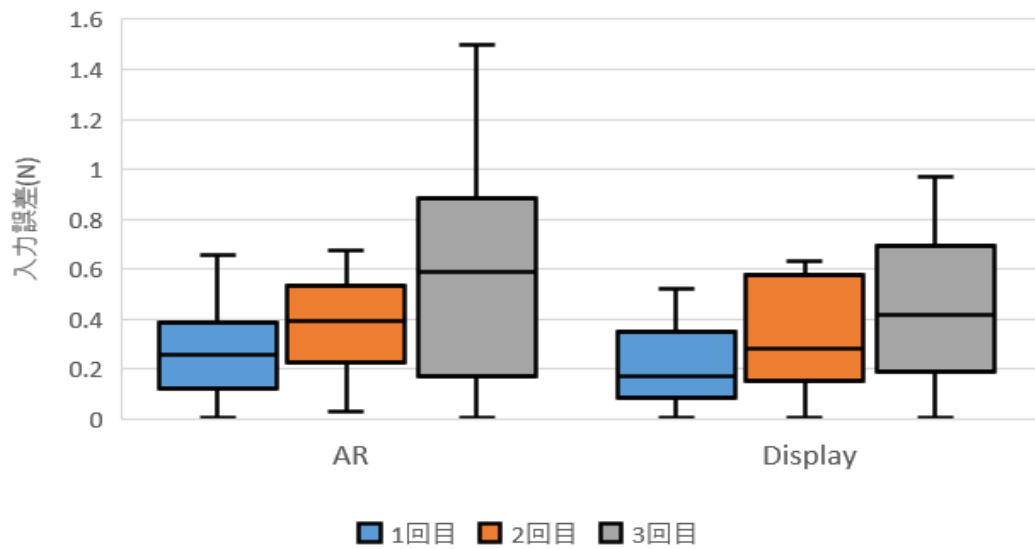


図 19 実験 1 実験結果

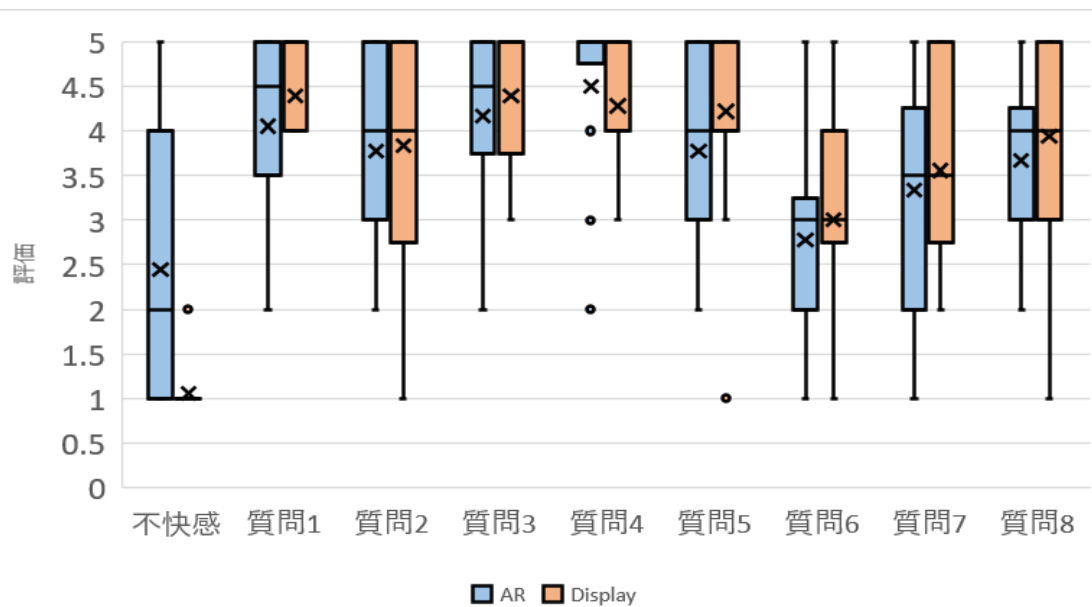


図 20 実験 1 アンケートによる結果

表 4 実験1 不快感記述・自由記述

不快感	映像の画質が悪い
不快感	画面の動きと体(首)の動きがずれていた
不快感	フレームレートが低い
不快感	機器の装着による圧迫感
AR	指の動きとメータの動きを同時に追えたのでよかった
AR	AR デバイスを用いた力の入っている様子を可視化することで、力の再現がうまくできている気になった
ディスプレイ	普段から見慣れているので集中できた
ディスプレイ	作業の簡単さは同じくらいであったが、指とメータが両方見える AR のほうが作業しやすいと思った
ディスプレイ	AR の時と比べ、全ての作業について長く感じた

5.4 動的制御訓練に関する評価実験

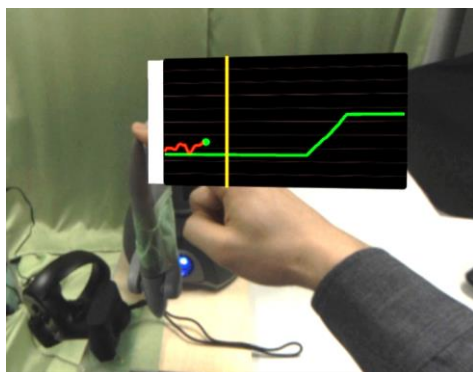
実験では、力の大きさの相対的な変化に際して被験者の対処能力向上を確認することを目的とした。実験用のアプリケーションとして SDR をベースに作成し、ハプティックデバイスによって力覚フィードバックとその力を可視化した視覚フィードバックを用いて行った。指に対しての視覚フィードバックモデルは 4 章で示された “Model 1: 折れ線グラフモデル” を利用した。

5.4.1 実験手法

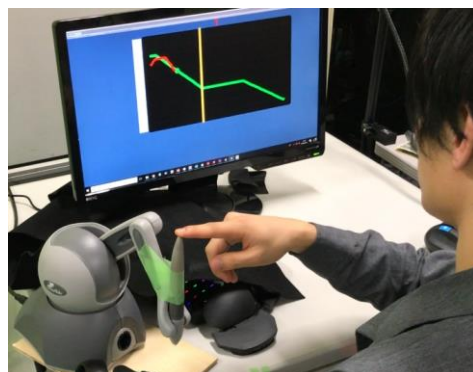
実験では、被験者に予め設定したラインに沿う形で力を掛けることを指示した。また、被験者には実験時の力覚フィードバックと視覚フィードバックの対応関係を自覚してもらうために、測定前に準備パートを用意した。また、予め設定したラインのパターンは 2 秒間の力の保持と 1 秒間の力の変化の繰り返しで構成し、その変化量は 0.5N から 2.0N の間で乱数を用いて設定した。設定されたラインは緑色で描画され、被験者の力によって変化するラインは赤色で描画される。緑のラインは赤ラインの 5 秒先まで描画されており、描画範囲内で垂直方向に動く赤ラインへ緑ラインが移動するように設定した。

以下に実験手順を示す。

1. (準備)被験者は力覚フィードバックとともに操作可能な赤ラインによる可動範囲とその力の大きさを確認するために、20 秒間の準備動作を行う。
2. 計測開始地点として垂直方向に延びた黄色のラインが緑のラインと並走する形で描画され、操作が可能な赤ライン描画位置から計測を開始する。
3. 被験者は赤ラインを緑ラインの形状に沿うように操作する。30 秒間の計測を認識させるため、再び黄色のラインが描画され通過地点で計測終了となる。(図 21)
4. 1-3 の手順でラインのパターンのみを変更し、合計 3 回の計測を行う。
5. 終了後、使用した表示機器と実験についてのアンケートを行う。
6. 担当者は被験者に表示機器を変更することを指示し、再度 2-5 の手順を行う。



(a)AR による表示



(b) ディスプレイによる表示

図 21 動的制御訓練に関する評価実験

5.4.2 評価方法

評価に際して、計測開始時からの被験者から掛けられた力の大きさと予め設定したデータを同時に取得した。このことから掛けられた力の揺らぎを検出することが可能であり、指示される状態(静止, 増大, 減少)及びその変化箇所の情報から各表示機器の傾向を確認できると考えた。また、アンケートによる主観的な感覚と実際の評価との間にある認識の違いも評価し、AR とディスプレイの効果を確認する。

5.4.3 実験結果及び考察

図 22 に表示機器ごとの被験者によって掛けられた力と設定された力の差の絶対値を示す。また、以下に各表示機器による一元配置分散分析の実験結果を示す。各表示機器における揺らぎ全体の平均を考慮した場合、分析の結果本実験においては表示機器による統計的な有意差は生じなかった。

また、図 23 にアンケート結果を示す。加えて、表 5 にアンケート時の自由記述内容を示す。実験 1 同様に AR に対して不快感を表す評価が高く、自由記述部からもビデオシースルー型 HMD の性能がボトルネックとなっている。また、常設アンケート部分において、質問 5, 6 で表示方法における差が生じていることから日常的な使用を考えた場合に AR の悪影響が出ていたと考えられる。

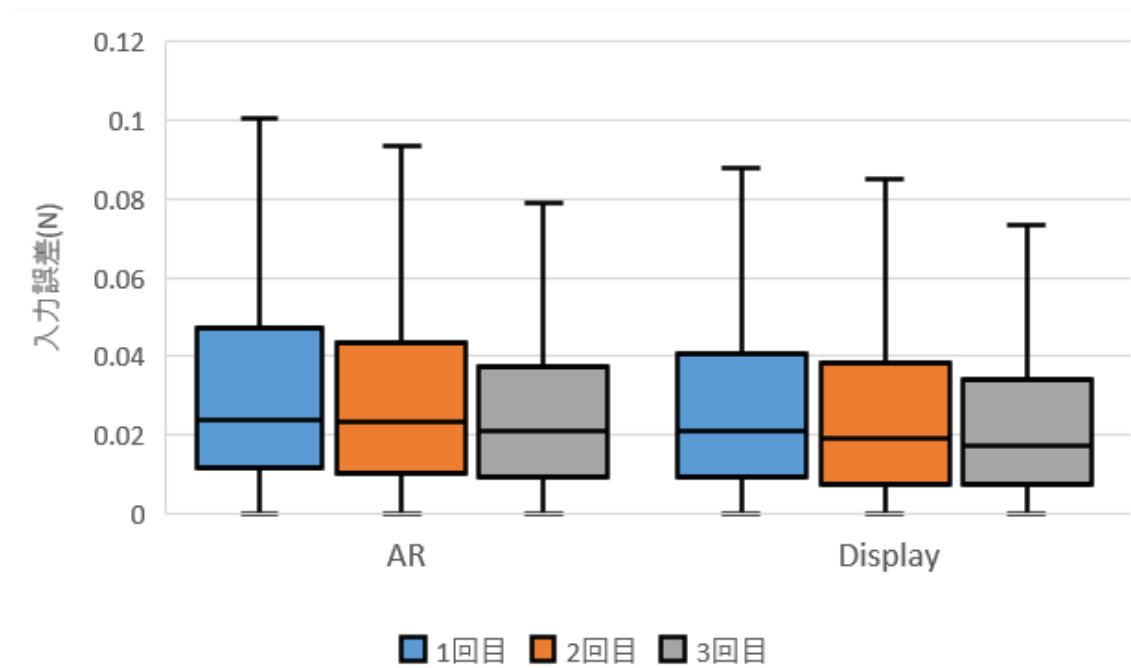


図 22 実験 2 測定結果

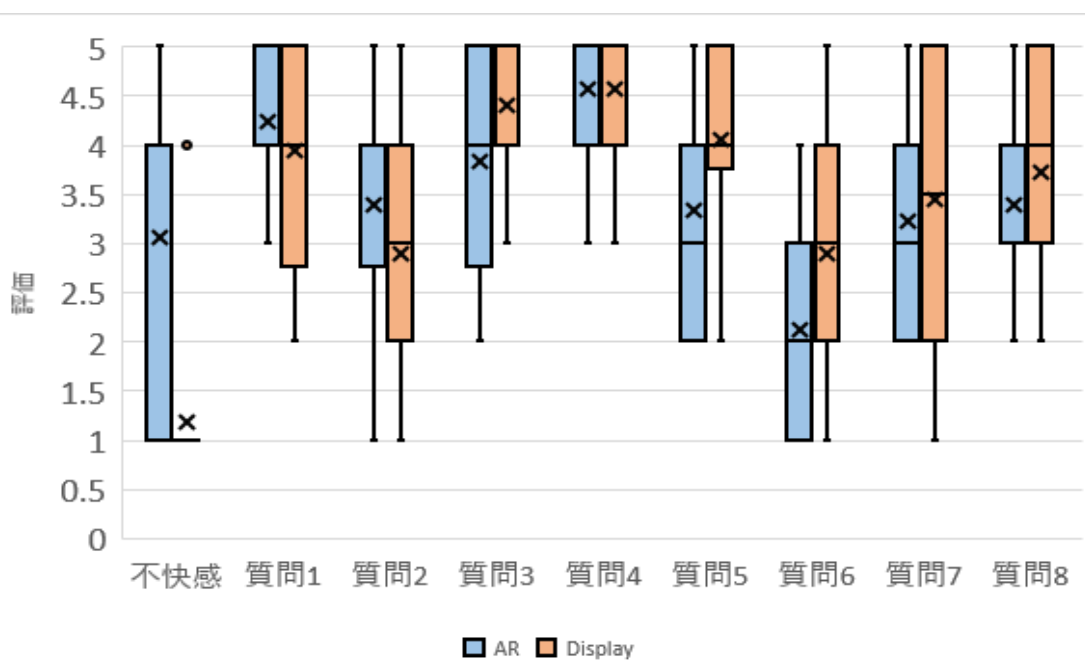


図 23 実験 2 アンケート結果

表 5 実験 2 不快感記述・自由記述

不快感	映像の画質が悪い
不快感	画面の動きと体(首)の動きがずれていた
不快感	フレームレートが低い
不快感	機器の装着による圧迫感
不快感	映像の遅延などのハードウェア的な要因が不快感に繋がっているように思える
AR	視点の違いで姿勢が変わり，多少操作しやすさが変わっていた
AR	グラフの表示位置が手に近い方が操作しやすかった
ディスプレイ	ディスプレイの方が集中できたのはディスプレイの方が難しかったからかもしれないと思った．
ディスプレイ	AR と比べて表示が大きく，ディスプレイの方が変動量が大きくなったため，作業の難しさが上がったように感じた
ディスプレイ	自身の指を見れないため力の入れ方の制御に，少し集中力を欠いた印象があった

5.5 指の協調制御訓練に関する評価実験

本実験では、意識していない指が動いてしまう現状を抑制するために指の独立性に関する確認を目的とした。そのため実験用の測定機器として、各指の入力は手の形状に考慮したキーパッドを使用した。

各指への視覚フィードバックモデルは4章で示された“Model 2: 1段組みモデル”を利用する。

5.5.1 実験手法

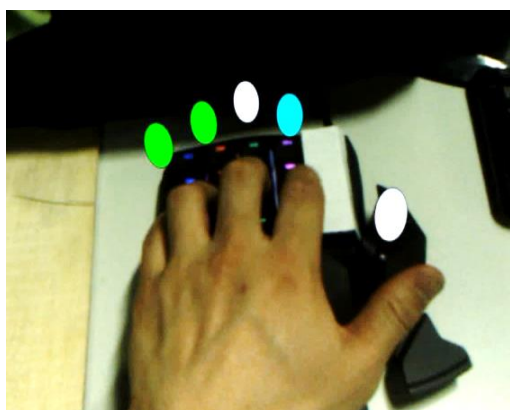
図24に実際の実験風景を示す。

ここでのモデルが示す表示内容は、各指に対応する表示が4色の変化で構成されており、入力を行う指の箇所は水色、それ以外が灰色で表示される。被験者の入力によって正しい入力が行われた場合、緑色に変化し誤った入力が行われた場合赤色に変化する。

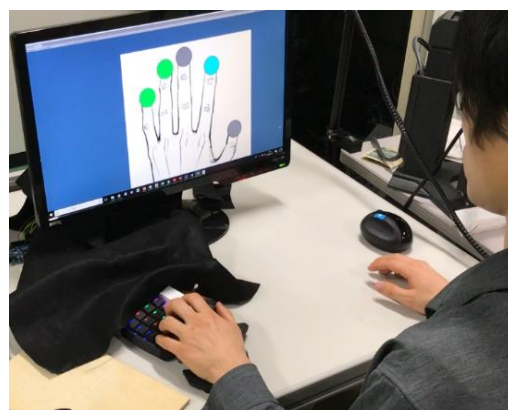
実験ではモデル状態を説明した後、計測を行うこととした。実行するパターンは5指で再現できる全31通りのパターンを計測ごとに乱数によって順序を入れ替えた。また、計測前に指の配置や説明を行うため固定された4パターンを設定した。

以下に実験手順を示す。

1. 被験者は各指に対応した5つの表示モデルを見ながら操作を行う。表示モデル上には予め設定されたパターンが示され、被験者から正しい入力が行われるまで繰り返す。正しい入力が行われたとき表示モデルが灰色となり、被験者からの入力がなくなると新しいパターンへ更新される。すべてのパターンが実施されると表示が消え、終了となる。
2. 終了後、パターンを変更し合計3回行う。
3. 他の実験と同様にアンケートを行う。
4. 担当者は被験者に表示機器を変更することを指示し、その機器を用い再び1-3の手順を実施する



(a)AR による表示



(b)ディスプレイによる表示

図 24 指の協調制御訓練に関する評価実験

5.5.2 評価方法

評価には、各パターンが生成されてから被験者が正しい入力を行うまでの時間及び、それまでに生じた誤った指とその指が入力された時間の記録を行った。これにより、表示機器によって生じる誤答率の計測のほか、生じる問題点についても言及可能であると考ええる。

5.5.3 実験結果及び考察

図 25,26 に各表示機器による時間及び誤答数を示す。また、一元配置分散分析の実験結果を示す。回答時間、誤答数による分散分析の結果、各表示機器による有意差の確認はできなかった。図 27 にアンケートの結果を示す。これより主観的評価においても表示機器が変わることによる有意差は認められなかった。また、表 6 にアンケート時の自由記述内容を示す。自由記述より本研究での問題として改善した AR による同時表示は、被験者の主観では一定の効果が出ていると考えられる。

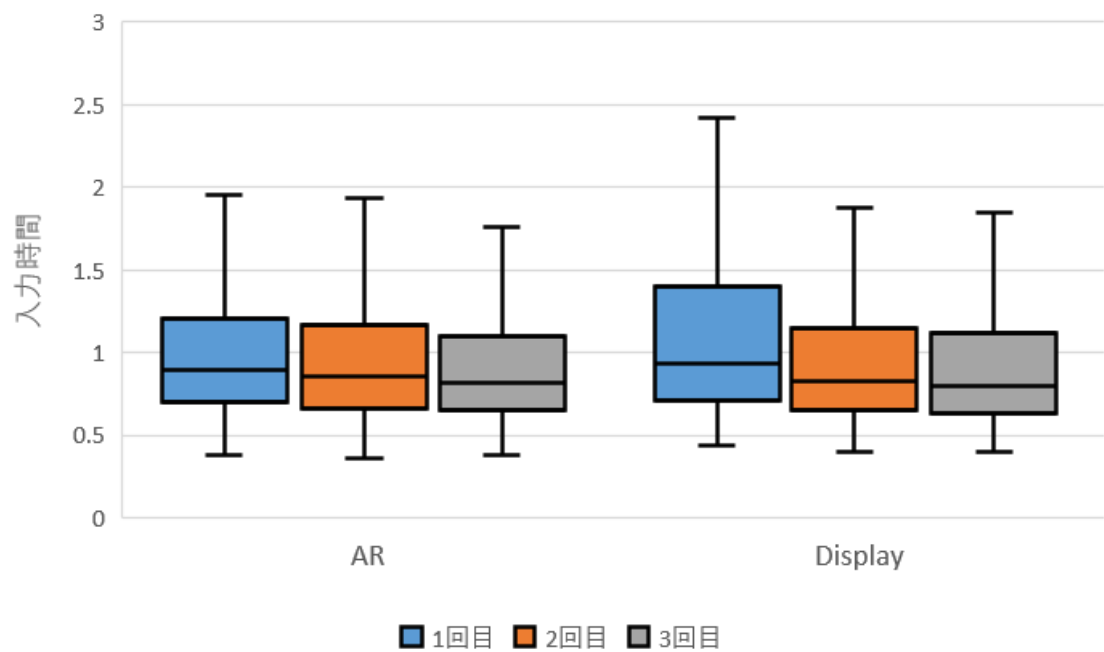


図 25 実験 3 回答時間

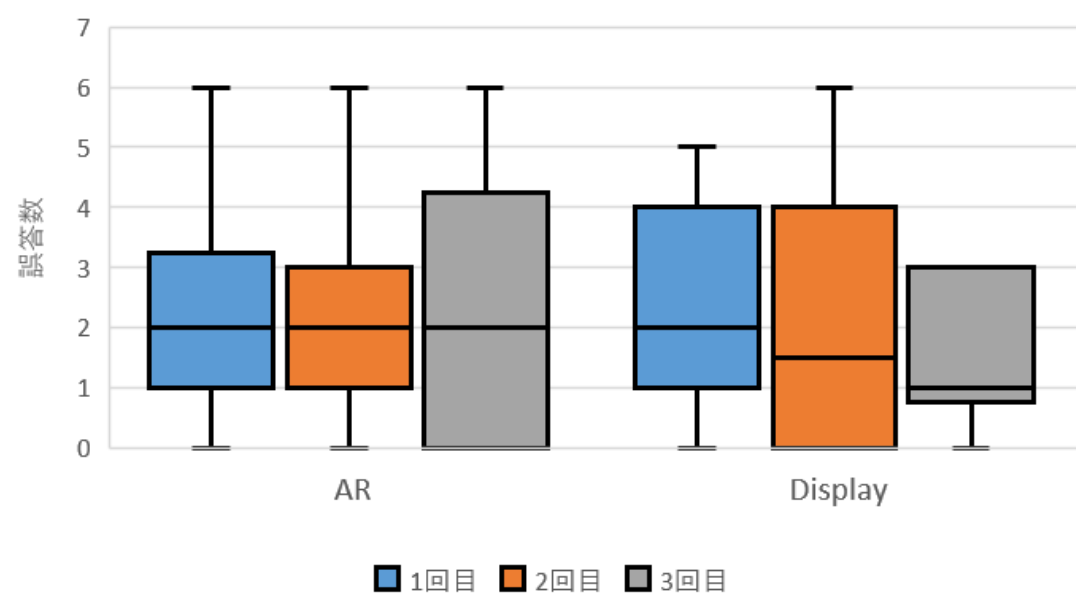


図 26 実験 3 誤答数

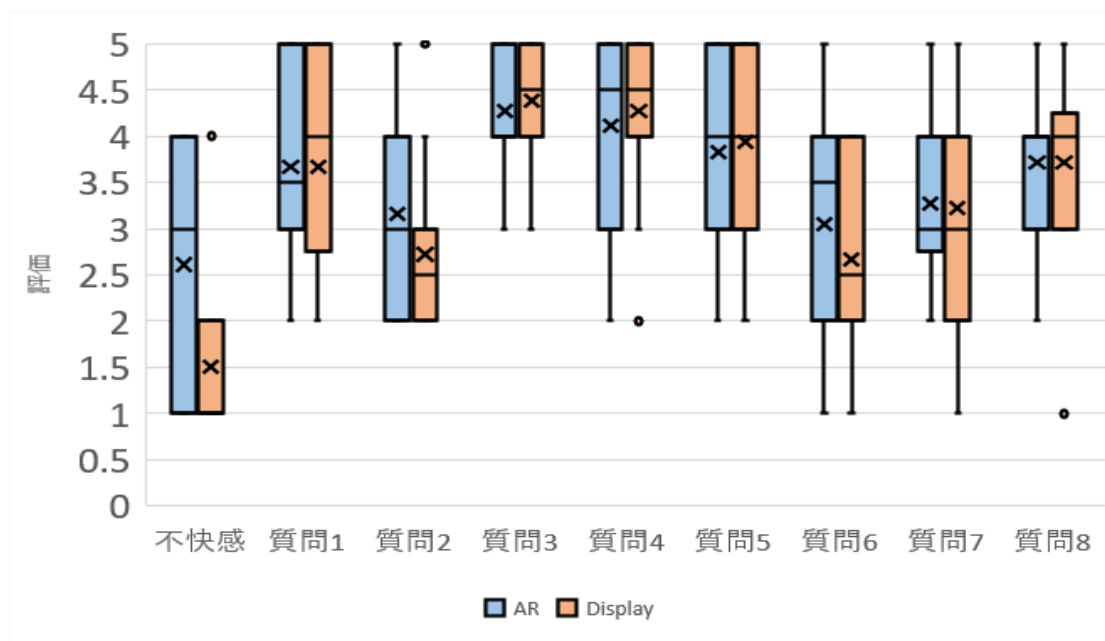


図 27 実験 3 アンケートによる結果

表 6 実験 3 不快感記述・自由記述

不快感	映像の画質が悪い
不快感	フレームレートが低い
不快感	機器の装着による圧迫感
AR	映像の遅延はあるが、 押す位置が現実空間に直接表示されているのでわかりやすい
AR	小指が隠れていて入力しづらかった、 モデルと指の対応が難しかった
AR	色が薄い感じがした。
AR	AR を用いると指を直接見ながら作業できる分、 より集中することができた。
ディスプレイ	正解したら音とか文字とかでもっとわかりやすいリアクションが欲しい
ディスプレイ	一度慣れるとマーカーの位置がずれない方(ディスプレイ)がわかりやすい
ディスプレイ	想像したよりミスが多く難しかった。

5.6 考察

本研究では、実験を通して AR とディスプレイの比較を行い表示方法の違いによる効果を確認しようとした。実験の結果、今回は AR に表示機器による有意差は認められなかった。アンケートで常設された質問に関しても同様であり、本研究に用いた実験システムでは AR の効果が確認されない結果となった。

ただし、すべての実験を通してアンケート結果での「不快感」に関する評価が AR において著しく低く、不快感の原因となった内容について「映像の画質が悪い」「映像の遅延が大きい」「機器の装着による圧迫感が大きい」というコメントが多く見受けられた。加えて、自由記述においては AR を使用した際に今回の研究における仮説の通り UI の位置が手に近い方が操作しやすいなどの肯定的な意見があり、実験時は AR 本来の利点が生かされていなかった状況があったと考えられる。そのため、今回 AR による効果が示されなかったのは使用したビデオスルー型 HMD による AR システムに原因の一端があると考えた。そこで、今後の検討材料として現実世界を映像機器を通さず見せることができるライトスルー型 HMD を用いた AR システムによって再度検討を行う必要があると思われる。

また、本実験においては被験者が 21 歳から 31 歳と本来の利用が想定される高齢者と比べると若いため、全体的に認知能力が高いと予想される。加えて、被験者は学生であり高齢者と比べてパソコンやテレビゲームといった画面を見ながら手元でコントローラーを操作する作業を日常的に行える環境にあるため、本研究の仮説とした使用するデバイスと表示部分のモニタが離れることによって作業に対して集中力が欠如するという現象が日常的な慣れから発生しづらくなっている可能性がある。そのため、被験者を高齢者として同様の実験を行った場合、今回の実験結果と異なり AR に対して効果を確認できる可能性は十分にあると考える。

最後に、本実験では PETS を基に評価すべき機能の点でアプリケーションを組み立てたため、表示させる内容が既存の PETS によるアプリケーションと近似する形となった。そのため、アンケートの質問 6 における「あなたはこの作業を日常的に行いたい」の評価がすべての実験、表示機器問わず低いという点からも本実験に用いたアプリケーションはユーザーのモチベーションをあげることがで

きないと考えられる．今後のアプリケーション開発は，ゲーム性や使用するユーザーの日常生活に紐づくような形を加えるべきと考える．加えて，今回の実験ではディスプレイと AR の比較を行うため，表示機器以外の条件をすべて同じ形にするといった手段を講じたが，ディスプレイで表現できる形態を AR で模倣して行う必要はなく，AR の利点を最大限生かせるようにするため，現実の手に直接描画するというような AR でしか表現できない技術で以って効果の確認を行う必要があると思われる．

第6章 結論

6.1 まとめ

本研究では、手のリハビリテーションについて訓練の表現方法として拡張現実感(AR)の有効性を確認することを目的とした。そのため、既存の訓練システムである PETS を基に 3 種類のアプリケーションを作成し、実験を通して効果を確認した。

このことは従来のディスプレイを通した訓練の方法において、訓練用デバイスとディスプレイが異なる距離あるために 2 種類の状態をユーザーが同時に視覚的に知覚する必要があり、作業の効率を下げる要因になると考えた。そこで、研究では拡張現実感を用いることによって、訓練画面とユーザー自身の指を同時に観察できるようになることから訓練の効率や使用に際しての混乱や誤操作の発生が少なくなると仮説を立てた。仮説を検証するために、既存の手法と比較しつつの指で入力を行う 3 種類のアプリケーションを作成し、被験者実験を行うことにより評価を行った。実験の結果、AR を用いたアプリケーションは優位性を示すことができなかったが、複数の結果を妨げる要因と次に検討すべき内容を知ることが確認できた。

6.2 今後

今回 3 種類の実験を通して、AR を用いることによる手のリハビリテーションにおける効果の確認を行った。しかしながら実験結果からは AR の優位性を確認することはできなかった。この原因として、訓練を進めるに当たりユーザーは訓練デバイスを見なくともディスプレイを操作することで正しい表現ができてしまうことが考えられる。また、アンケートを通して AR には映像のカクツキや映像の解像度が悪いなどの不快感が生じさせることに多くの意見があり、結果として技術的な問題が効果の低下を招いていたのではないかと考えられる。そのため、現実世界に対して情報を重畳する光学シースルー型 HMD による AR システムを利用することによる効果を確認する必要があると思われる。

また、本研究の最終目的として高齢者に日常的に使用してもらうことを想定し

ているため、アプリケーションに日常生活感やゲーミング性を追加することによって利用者のモチベーションを上げることも必要と思われる。そのため今後はエンターテインメントや日常生活に寄ったアプリケーションの作成を検討する他、視覚以外にも音などを使った別の感覚器官を複合したアプリケーションを作成できればより効果の改善や、モチベーションを維持し日常的に取り組めることで精神的な負担が少ないリハビリテーションが実現できると考えられる。

謝辞

本論文は著者が奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 博士前期課程在学中において行った研究成果をまとめたものとなります。

研究を通じて様々な活動において、熱心なご指導，ご鞭撻を頂いた本学情報科学研究科インタラクティブメディア設計学研究室の加藤博一教授には心よりお礼申し上げます。研究方針の変更の際，研究順序の構築や本質見誤っていた際，その他進捗による柔軟な研究の進行をご指導いただいたことで，目標を持つ上で数々の重要な要素を身につけることができました。教えていただいたこと，学んだことをこれからの人生においても生かしていきたいと考えています。

また，同研究室 Alexander Plopski 助教授には各進捗における細かな行動指針の提示や論文の執筆などでの的確なご助言，御指導いただいたことに対して心から感謝申し上げます。

また，共同研究室である国際成功大学(NCKU: National Cheng Kung University)の皆様には，PETS の今後や将来望む展望などをご教授頂き，自身の研究において大変お世話になりました。

進捗報告や発表練習の機械に多くの助言をくださいましたインタラクティブメディア設計学研究室の Christian Sandor 准教授，武富貴文助教授に心よりお礼申し上げます。皆様のおかげで，研究において必要な様々なテクニックや新しい観点を身に着けることができました，また研究活動以外にもいろいろな形でアドバイスやお力添えをいただきありがとうございました。

Alexander Plopski 助教授には論文の執筆の他，発表時の指導や，論文執筆や研究で手が止まった時に多くのアドバイスを頂き，丁寧に相談していただきました。教えていただいたことや考え方，心構えは今後に必ず活かしていこうと思います。

また，上野真紀子秘書には研究活動を遂行するための諸手続き等，長年にわたって多くの場面で支えていただきましたこと，心から感謝申し上げます。

最後に，本学に在籍している間，支えていただいた NAIST の皆様，両親，家族そして友人たちに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 国際連合 2015world population:
"ageing:http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WPA2015_Report.pdf, p.24 Figure II.12."
- [2] Norcross, J.C., "Quality of Life of Older Adults, A Qualitative Study".
U.M.I., 1990
- [3] 日本内科学会雑誌 第 103 巻 第 8 号 :
"https://www.jstage.jst.go.jp/article/naika/103/8/103_1765/_pdf, 2016"
- [4] Ranganathan, V.K., et al., "Skilled Finger Movement Exercise
Improves hand function". J Gerontol A Biol Sci Med Sci,.56(8): p.
M518-22, 2001
- [5] J.K., et al., "Tactile feedback plays a critical role in maximum finger
force production". J Biomech. 45(3): p. 415-20, 2012.
- [6] MusicGlove:" <https://www.flintrehab.com/musicglove/>"
- [7] AMADEO: "<http://tyromotion.com/en/products/amadeo>"
- [8] HoloLens: "<https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens>"
- [9] Meta:" <http://www.metavision.com/>"
- [10] R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, B. MacIntyre,
"Recent Advances in Augmented Reality". IEEE Comput. Graphics
Appl. 21,34–47, 2001.

- [11] Y., et al., “Cutaneous Sensory Feedback Plays a Critical Role in Agonist-Antagonist Co-activation”. *Exp Brain Res.* 229(2): p. 149-56, 2013.
- [12] Hand Therapy Certification Commission. “Definition of Hand Therapy and Scope of Practice of Certified Hand Therapists”. American Society of Handtherapists, 2002.
- [13] rink. EE, Mackel,. R, “Sensorimotor Performance of the Hand during Peripheral Nerve Regeneration”. *J Neurol Science.* 77, 249-266, 1987.
- [14] estling. G, Johansson. RS, “Factors Influencing the Force Control during Precision Grip”. *Exp Brain Res.* 53, 277-284, 1984.
- [15] Olafsdottir, H. B., Zatsiorsky, V. M. and Latash, M. L. “The Effects of Strength Training on Finger Strength and Hand Dexterity in Healthy Elderly Individuals”. *Journal of Applied Physiology*, 105: 1166–1178, 2008.
- [16] Keogh, J.W., S. Morrison, and R. Barrett, “Strength Training Improves the Tri-Digit Finger-Pinch Force Control of Older Adults”. *Arch Phys Med Rehabil.* 88(8): p.1055-63, 2007.
- [17] Zhang, W., et al., “What do synergies do? Effects of Secondary Constraints on Multidigit Synergies in Accurate Force-Production Tasks”. *J Neurophysiol.* 99(2): p. 500-13, 2008.
- [18] Kim, S.W., et al., “Finger Inter-Dependence: Linking the Kinetic and Kinematic Variables”. *Hum Mov Sci.* 27(3): p. 408-22, 2008.

- [19] Shim, J.K., et al., "Age-Related Changes in Finger Coordination in Static Prehension Tasks". *J Appl Physiol* (1985). 97(1): p. 213-24, 2004.
- [20] Wu, Y.H., et al., "Improving Finger Coordination in Young and Elderly Persons". *Exp Brain Res*. 226(2): p. 273-83, 2013.
- [21] Kwok, T., et al., "Effectiveness of Coordination Exercise in Improving Cognitive Function in Older Adults: a Prospective Study". *Clin Interv Aging*. 6: p. 261-267, 2011.
- [22] Langlois, F., et al., "Benefits of Physical Exercise Training on Cognition and Quality of Life in Frail Older Adults". *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*. 68(3): p. 400-4, 2013.
- [23] Webel, S., et al., "An Augmented Reality Training Platform for Assembly and Maintenance Skills. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*", 61, 398–403, 2013.
- [24] Ghandorh, H., et al., "Development of Augmented Reality Training Simulator Systems for Neurosurgery Using Model-Driven Software Engineering". *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2017.
- [25] Chinthammit, W., Merritt, T., Pedersen, S. et al. "Ghostman: Augmented Reality Application for Telerehabilitation and Remote Instruction of a Novel Motor Skill". *BioMed Research International*, 2014:646347, 2014.

- [26] Hondori, H. et al., "A Spatial Augmented Reality Rehab System for Post-Stroke Hand Rehabilitation". *Studies in Health Technology and Informatics*.184,p. 279-285, 2013
- [27] Burke, J.W, et al., "Augmented Reality Games for Upper-Limb Stroke Rehabilitation". *Second International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES 2010)*.p75-78, 2010.
- [28] Y. Shen, S. K. Ong and A. Y. C. Nee, "Hand Rehabilitation based on Augmented Reality", *International Convention for Rehabilitation Engineering and Assistive Technology, i-CREAtE*, 22–26 April, Singapore 2009, CDROM.
- [29] CyberGrasp <http://www.cyberglovesystems.com/cybergrasp/>
- [30] Endo, T, Kawasaki, H, Mouri, T, Ishigure, Y, Shimomura, H, Matsumura, M, Koketsu, K, "Five-Fingered Haptic Interface Robot: HIRO III". *IEEE Transactions on Haptics*. 4(1): 14–27, 2011.
- [31] PHANTOM Omni: <http://www.delfthapticslab.nl/device/phantom-omni/>
- [32] Haption Virtuouse <https://www.haption.com/fr/products-fr/virtuose-6d-fr.html>
- [33] A. Alamri, M. Eid, R. Iglesias, S. Shirmohammadi, A. El Saddik, "Haptic Virtual Rehabilitation Exercises for Poststroke Diagnosis", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 9, pp. 1876-1884, Sep. 2008.

- [34] Teixeira, C. D. C. , Marx, F. C. , and De Oliveira, J. C., “A Haptic Rehabilitation System,” 18th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR), Gramado, Brazil, June 21–24, pp. 188–192, 2016.
- [35] Hu, X., M. Loncharich, and K.M. Newell, “Visual Information Interacts with Neuromuscular Factors in the Coordination of Bimanual Isometric Force”. *Exp Brain Res.* 209(1): p. 129-38, 2011.
- [36] Adamovich, S. V. et al. “Design of a Complex Virtual Reality Simulation to Train Finger Motion for Persons with Hemiparesis: a Proof of Concept Study”. *J. Neuroeng. Rehabil.* 6, 28, 2009.
- [37] Charoenseang. S., Panjan. S., “5-Finger Exoskeleton for Assembly Training in Augmented Reality”. In: Shumaker R (ed) *Virtual and mixed reality-new trends*. Springer, Berlin, pp 30–39, 2011.
- [38] Luo X, Kenyon RV, Kline T, Waldinger HC, Kamper DG. “An Augmented Reality Training Environment or Post-Stroke Finger Extension Rehabilitation”. *Proceedings of the 9th IEEE international conference on rehabilitation robotics*, June 28–July 1, Chicago, IL, USA, pp 329–32, 2005.
- [39] P. Rhienmora, K. Gajananan, P. Haddawy, M. N. Dailey, S. Suebnukarn, "Augmented Reality Haptics System for Dental Surgical Skills Training", *Proc. 17th ACM Symp. Virtual Reality Softw. Technol.*, pp. 97-98, 2010.
- [40] B. Knoerlein, G. Szekely, and M. “Harders. Visuo-Haptic Collaborative Augmented Reality Ping-Pong”. *Proc. of Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, 2007.

- [41] Stein, J., et al. "A Pilot Study of Robotic-Assisted Exercise for Hand Weakness after Stroke". IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. 2011
- [42] Wu, Y.H., et al., "Learning to Combine High Variability with High Precision: Lack of Transfer to a Different Task". J Mot Behav. 47(2): p. 153-65, 2015.
- [43] Manepalli, J., A. Desai, and P. Sharma, "Psychosocial-Environmental Treatments for Alzheimer's Disease". Primary Psychiatry. 16(6): p. 39, 2009.
- [44] Unity 5 Haptic Plugin for Geomagic OpenHaptics 3.3 (HLAPI/HDAPI) School of Simulation & Visualization - Glasgow School of Art
- [45] Introduce how to use the tool attached to OvrvisionPro SDK.
<http://ovrvision.com/files/docs/page1.html#calib>
- [46] F.Dornaika and R.Horaud, "Simultaneous Robot-World and Hand-Eye Calibration", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998
- [47] Google form "https://www.google.com/intl/ja_jp/forms/about/"