

NAIST-IS-MT0651006

修士論文

VR技術を用いた幻肢リハビリテーションシステム

飯田 拓

2008年2月7日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

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。

飯田 拓

審査委員：

千原 國宏 教授 (主指導教員)

湊 小太郎 教授 (副指導教員)

眞鍋 佳嗣 准教授 (副指導教員)

池田 聖 助教 (副指導教員)

VR技術を用いた幻肢リハビリテーションシステム*

飯田 拓

内容梗概

幻肢とは、事故や壊疽が原因で四肢を切断された患者が、失われた手足がまだ存在していると感じることである。幻肢を持つ患者の中には、幻肢部位の麻痺や異常な動きに加え、難治性の激しい痛み悩まされる人も少なくない。幻肢のリハビリテーション手法として神経刺激療法や薬物療法、ミラーボックス療法が考案されている。しかし、神経刺激療法や薬物療法は機材が高価であり、また患者の危険を伴う。ミラーボックス療法は鏡を用いて視覚と体性感覚の不一致を引き起こすことで脳の可塑性を刺激する手法であり、安価かつ非侵襲でリハビリテーションを行うことが可能である。しかし、ミラーボックス療法では身体を拘束されるなどの問題があり、治療部位に制限がある。本研究では、鏡の代わりにVR(Virtual Reality)を利用するリハビリテーションシステムを提案する。まず、鏡像の代わりにCG(Computer Graphics)を利用するにあたって、CGにより視覚と体性感覚の不一致を引き起こすことが可能であるか検証を行い、VRの有用性を確認した。カメラとマーカーにより肢体の位置や角度の取得を行い、取得した位置や角度に応じたCGをディスプレイ上に提示するシステムを提案した。提案システムを体験してもらい、体性感覚に影響を及ぼすことが可能であるか実験し、本システムの有効性について考察を行った。健常肢の動きの移動量を変更して提示することで、CGを取得した肢体の位置や角度のままCGを提示する以上の影響を体性感覚に与えることが可能であるという結果を得た。

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0651006, 2008年2月7日.

キーワード

幻肢, リハビリテーション, コンピュータグラフィックス, 視覚, 体性感覚, バーチャルリアリティ

Rehabilitation System of Phantom Limb Using Virtual Reality*

Taku Iida

Abstract

Phantom limb is a phenomenon to feel that there is limb severed before. It is accompanied with a pain and the paralysis that are hard to be cured. Although a nerve irritation therapy and medication are devised as the rehabilitation technique of a phantom limb, these techniques are expensive and dangerous to a patient. It is effective to use mirror for rehabilitation of phantom limb pain. In using the mirror, participants feel disagreement between the sight and the somatic sensation, the plasticity of the brain is stimulated. However this method has problems that motion of body are restricted. In this paper, a rehabilitation system using VR(Virtual Reality) in substitution for a mirror is proposed. The experiment, which inspects whether VR can cause disagreement between the sight and the somatic sensation of the mirror, confirmed the utility of VR. Based on this confirmation, the system which presents CG(Computer Graphics) on a display according to the position and angle of the limbs acquired by camera and marker is proposed. Whether the proposed system could have an influence on somatic sensation is tested. The result reveals that the proposed system has an influence on somatic sensation by change of the presentation of the movement of the healthy limb.

* Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0651006, February 7, 2008.

Keywords:

Phantom Limb, Rehabilitation, Computer Graphics, Visual Sensation, Somatic Sensation, Virtual Reality

目次

第1章 序論	1
第2章 背景	3
2.1. 幻肢	3
2.2. 従来のリハビリテーション手法	6
2.2.1 神経刺激療法	6
2.2.2 薬物療法	8
2.2.3 ミラーボックス療法	9
2.3. VR や CG を用いたリハビリテーション手法	11
第3章 幻肢リハビリテーションシステム	15
3.1. 目的	15
3.2. 鏡とディスプレイの相違	16
3.3. 幻肢のリハビリテーションシステムを構築するための指針	17
第4章 CG による視覚刺激の体性感覚への影響評価	18
4.1. 目的	18
4.2. 実験装置	18
4.3. 実験手法	20
4.4. 検定手法	24
4.5. 実験結果	25
4.6. 考察	28
第5章 提案システムの構築	29
5.1. システム構成	29

5.2.	CG 提示	30
5.3.	座標定義	30
5.4.	マーカー位置・角度検出	32
5.5.	座標変換	32
5.5.1	幻肢側手首位置の推定	33
5.5.2	ワールド座標からみた腕位置推定	35
第 6 章	提案システム効果検証実験	36
6.1.	目的	36
6.2.	実験システム	36
6.3.	実験手法	38
6.4.	実験結果	40
6.5.	考察	43
第 7 章	提案システムに関する考察	45
第 8 章	結論	47
	謝辞	48
	参考文献	49
	付録	54
A.	Wilcoxon の符号付順位和検定	54
B.	正規分布表	55

目次

2.1	幻肢の分類	4
2.2	Penfield の脳地図	6
2.3	神経刺激装置	7
2.4	ミラーボックス	10
2.5	知覚 - 運動ループ	11
2.6	O'Neil らによる幻肢部位の CG 表示	13
2.7	Hobbs による幻肢部位の CG 表示	14
4.1	CG による体性感覚への視覚刺激検証システム	19
4.2	視覚刺激検証システム上部	20
4.3	視覚刺激の体性感覚に与える影響検証実験における目標位置と結果の差分	21
4.4	視覚刺激の体性感覚に与える影響検証実験条件	22
4.5	実験条件による視界	23
4.6	視覚刺激の体性感覚に与える影響検証実験時に用いた CG	24
4.7	視覚刺激の体性感覚に与える影響検証実験における目標位置と手を置いた位置の差分値の結果	26
4.8	視覚刺激の体性感覚に与える影響検証実験より算出した有意差	27
5.1	提案システム	30
5.2	座標系の関係	31
5.3	位置姿勢取得用マーカー	32
5.4	各座標軸の配置	33
6.1	CG の両腕提示の場合の視覚刺激の体性感覚への影響検証システム	37

6.2	提案システム効果検証実験において提示されたCG	39
6.3	提案システム検証実験における目標と右手を置いた位置の差分値 の平均 (左手固定)	41
6.4	提案システム検証実験における目標と右手を置いた位置の差分値 の平均 (左手移動)	41
6.5	提案システム検証実験より算出した有意差	43

表 目 次

4.1	CGによる視覚刺激の影響評価実験におけるハードウェア構成 . . .	20
4.2	視覚刺激の体性感覚に与える影響比較実験結果の平均と分散 . . .	25
6.1	ハードウェアの構成	37
6.2	提案システムによる影響比較実験の実験条件 (左手固定)	38
6.3	提案システムによる影響比較実験の実験条件 (左手移動)	38
6.4	提案システムによる影響比較実験結果の平均と分散	42

第1章 序論

切断手術や事故により腕などの肢体を失った患者は、喪失後も腕や脚が存在するかのように感じることもある。この本来失われていながらも存在するかのように感じることでできる肢体を幻肢という。幻肢を感じる患者は、術後麻酔から醒め、肢体が失われたと聞かされてもそこに肢体があると感じるため容易には信じることができず、実際に失われた姿を見てショックを受ける。しかし、それでも肢体があると感じ、その幻肢を動かすことや見えているように感じる事が可能だと言う [1]。

患者が感じる幻肢の形状は必ずしも切断以前の状態と同じであるとは限らない。手首や足首より先だけが遊離して存在している状態や、切断以前の形状と長さや太さが異なるという場合がある。患者は実際に幻肢を見ることはできないが、形状が異なるということを感じている。

そして、幻肢を感じる患者の一部は、幻の腕や手や指に自殺を考えたくなるほどの激しい痛みを感じる。この痛みを幻肢痛という。幻肢痛は例えば、幻の掌に指が食い込むという感覚や針で刺される、火箸を押し付けられる、やすりで削られるといった非常に不快な表現で示される痛みと言われている。治療をする上で、幻肢痛は痛み止めが効きにくく、更に実在する部位ではないため直接的な治療を施すことができないという問題がある。

現在、幻肢痛のリハビリテーションにおいて、中央に鏡を配置した箱を用いたミラーボックス療法が効果を上げている [2]。箱の側面から鏡を挟むようにして肢体を挿入し鏡を覗き込むと、存在する肢体が鏡に映りこみ、切断により失われた肢体も存在しているかのように見える。鏡を覗き込んだまま肢体を動かすことで、幻肢部位が動いているかのように視覚的に感じられる。ただし、脳は実際に筋肉などが動いていないということを体性感覚を通して認識している。このよう

に、幻肢部位が存在するという視覚情報と、実際には存在していないという体性感覚の情報が脳に送られることにより脳の可塑性が刺激され、幻肢痛が和らぐとされている。

しかし、ミラーボックスを用いた療法では、幻肢の形状が切断以前と異なるように感じる患者は、鏡を見ても幻肢部位が存在するとは感じないということや、鏡を覗き込む、肢体を箱に挿入するということによって身体を拘束されるという治療上の問題点がある。

本研究では、画像処理により肢体の位置や角度を取得することで、装置による拘束のないリハビリテーションの手助けを行うシステムを構築することを目的とする。提案システムでは、鏡で対応できない幻肢形状があるという問題やリハビリテーション部位が限られるという問題を解決するため、VR(Virtual Reality)技術を用いて存在しない肢体部位を視覚的に作成し提示を行う。

本論文では2章2.1節において幻肢について詳しく述べた後、2.2節と2.3節において幻肢痛を和らげるために行われている薬物療法やミラーボックス手法について述べ、更にVRを用いた関連するリハビリテーション法について述べる。3章ではリハビリテーションについて必要な条件を基に提案する手法について述べ、4章においてリハビリテーションシステムを構築する上で必要な条件を克服可能か検証を行った実験について述べる。次に5章では実装手法について述べる。そして6章において提案システムの有効性を検証する。7章において本システムについて考察を行った後、最後に8章において総括とする。

第2章 背景

現在，幻肢による痛みである幻肢痛を改善するためのリハビリテーションとして薬物療法など様々な手法が行われている．本章では，幻肢というものがそもそも何かということについて触れた後，現在行われている幻肢の治療やリハビリテーションの手法について説明する．また，現在行われているリハビリテーションの手法の一つであるミラーボックス療法を VR や CG(Computer Graphics) で実現した手法について説明する．

2.1. 幻肢

幻肢とは，肢体の切断，あるいは神経損傷により肢体への神経連絡が絶たれた後に，その切断あるいは損傷した肢体は目に見えないが，例え目を閉じた場合であっても体がそこに依然存在しているかのように肢体の動きや形状を感じることができるという現象である．幻肢は肢体切断患者の9割以上に発生するとされている [3].

実際に幻肢を感じる患者は，肢体がないことを知っているのに指を動かしたり，肢体が届く範囲のものを掴むあるいは触るといった感覚を持っていることがある [1] . また，幻肢という現象は肢体の切断後のみに限らず，鼻など身体の一部の切断後や抜歯後，さらに脊髄損傷や末梢神経損傷などの運動麻痺や感覚遮断によっても発症し，これらの場所においても触覚や動作を感じることもある．

患者が感じる幻肢の形状は千差万別である．大塚は幻肢を5種類に分類した [4] . 図 2.1 に示すように，幻肢は幻肢がほぼもとの四肢の形態を残している I 型，切断端より遊離し部分的に残っている II 型，縮小して切断端に密着している III 型，切断端に痕跡程度に残っている IV 型，切断端の中に陥入している V 型と分けら



図 2.1 幻肢の分類 ([4] を改変)

れる．ただし III 型に関しては，幻肢の手足関節部より末端が切断端に密着している III-i 型と幻肢の手足指部が切断端に密着している III-ii 型に分類される．

切断した肢体の感覚が残るという事実は十六世紀にフランスの外科医 Ambroise Pare により報告されており，幻肢を意味する “phantom limb” という言葉は 1871 年に Silas Weir Mitchell により提唱された [5]．しかし，近年まで決定的な原因は解明されていない．

幻肢の原因として考えられているものとして，心因説，末梢説，大脳説が考えられている．心因説とは，患者の不安やストレスにより幻肢が発症するという説である．しかし，幻肢はほぼ全ての四肢切断者に出現するため，現在は心因説は否定されている [6]．ただし，心理的状态によって幻肢痛が変化することや，切断前にケアが十分なされなかった患者において幻肢痛が発症しやすいことは言われている [7]．

末梢説は肢体切断後も残された神経に対する刺激が原因であるという説である。末梢神経が切断された場合、切断された神経断端から神経が再生され、断端に神経腫が形成されることにより、皮膚の温痛覚や触覚を司る神経が発達してしまうために幻肢痛が発症するという説である。しかし、この説では事故などにより肢体を引き抜かれて失った患者に幻肢痛が発症するという説明ができない。また神経腫が形成される以前より幻肢痛が存在することがあることや、断端の局所麻酔で消滅しないことから幻肢痛の原因とは考えにくいとされている [6]。

大脳説は、Melzack により提唱されたもので、肢体切断後に末梢の神経腫や脊髄、神経そのものより自発性放電が生じ、それにより幻肢痛が生じるというものである [3]。自発性放電という神経への入力に対し、出力として肢体部分に筋収縮が起きるため、その部位に疼痛を感じると推測されている。

また、Ramachandran は Melzack 同様に大脳説を唱えている [1]。Ramachandran は肢体が切断された場合、Penfield によって発見された人間の体性感覚野 (図 2.2) において切断された肢体近くにある部位の反応が肢体に対応している部位にも伝わり、幻肢に触れているという感覚を得ると推測した。人間の体性感覚野とは、人間の脳の中心溝の後方に表象される体表面の地図のことである。Penfield は、脳の中心溝を刺激することで、身体各部からの感覚を受け取る部位が脳の中心溝において脚、体幹、手、顔、唇、胸腔、喉腔の順にあり、重要な部位が実際の人間の身体の大きさに比べ、大きな場所を占めていることを発見した [8]。更に、Pons らは、Penfield の研究後、切断手術を受けた猿を用いた実験において、猿の脳を直接刺激することで猿の体性感覚野における顔面領域を刺激したときに切断されているはずの手領域も同時に刺激されていることを発見した [9]。このことから、Ramachandran は切断手術を受けた後に体性感覚野が再構成されており、その再構成と幻肢痛が関与していると考えた。

これら幻肢はただ存在するだけでなく、痛みを発することがある。この痛みを幻肢痛と言う。幻肢痛は、「針でさされるような」「火箸を押し付けられるような」「やすりで削られるような」等の非常に不快な表現で示される。痛みは一般に四肢の遠位に感じることが多く、上肢では手袋をした場合の手袋の範囲 (手首、掌、手関節、指先)、下肢では長靴を履いた場合の長靴のある範囲 (甲、踵、足

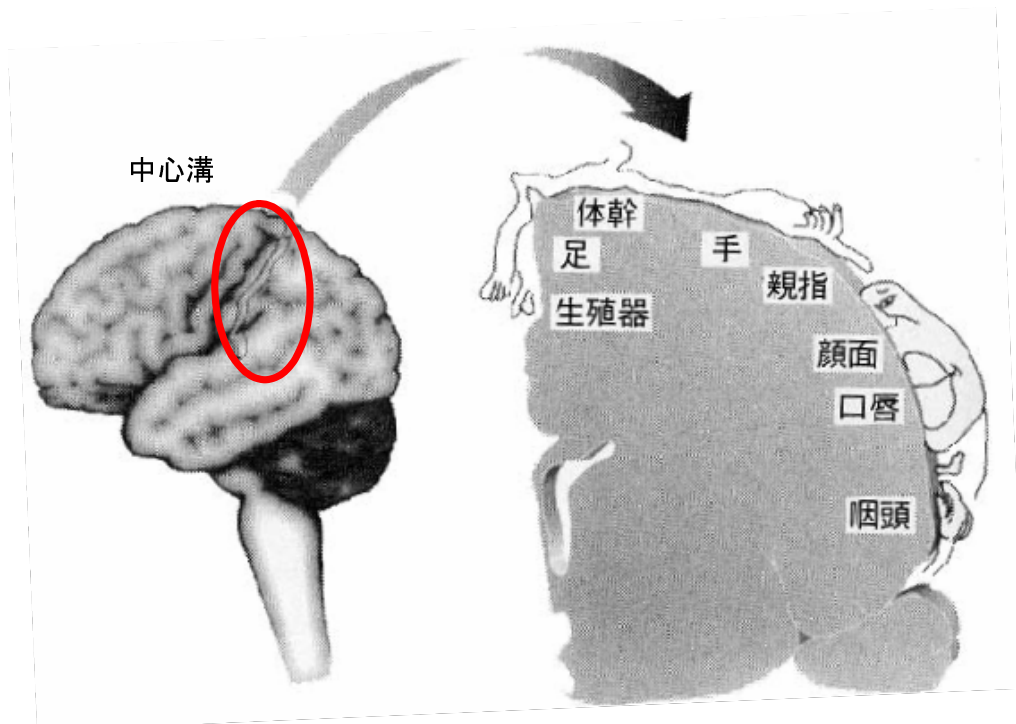


図 2.2 Penfield の脳地図 ([8] を改変)

趾)に感じると言われている [4]。また、切断前に痛みを伴う傷があった場合、同じ部位に幻肢痛が発生すると言われている。

幻肢痛は実際に存在しない部位で生じるため、直接的な治療を施すことが不可能である。このため、手術により直接的に治すのではなく、リハビリテーションによる治療が多く行われている。現在行われている幻肢痛の治療法として、神経刺激療法や薬物療法、ミラーボックスによる療法がある。

2.2. 従来のリハビリテーション手法

2.2.1 神経刺激療法

今日までに幻肢痛に対して、脊髄、視床知覚中継核、大脳皮質などの神経刺激が試みられてきた。神経刺激は、電極などを硬膜の外側に挿入、刺激装置を腹部

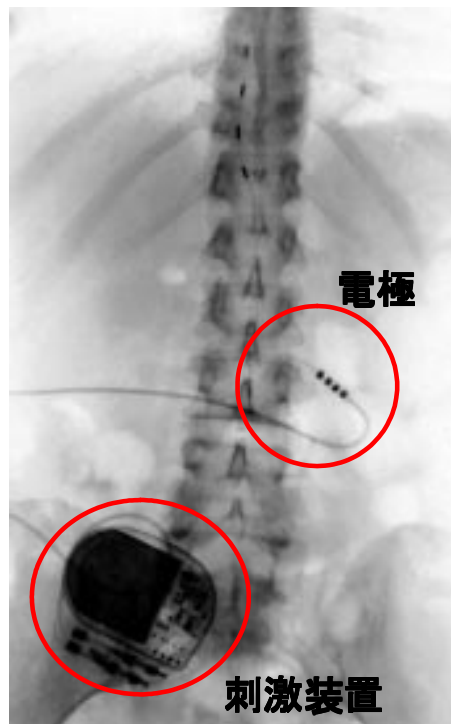


図 2.3 神経刺激装置 ([10] を改変)

や胸部に埋め込み、それらを接続して電気刺激を与えるものである (図 2.3) . これは、Ramachandran により提唱された、幻肢痛は体性感覚系の受容野分野において再構成がおきることにより緩和される、という考え方を基にしている . 再構成により異常をきたした体性感覚野における領域は近辺の領域の反応に影響されるが、幻肢部位からの神経への入力を神経刺激により与えることで体性感覚野の反応を正常に戻すというものである .

幻肢痛に対する脊髄刺激について現在までに報告されている幻肢に対する有効率は、14% から 83% であり、安定した結果が出ていない . ここで有効率とは、

$$\text{有効率} = \left(1 - \frac{\text{治療を施し痛みが緩和しなかった患者の割合}}{\text{治療を施さず痛みが緩和しなかった患者の割合}} \right) \times 100$$

で示される . Nielsen らの報告では、長期に追跡した症例も含めて有効率が 83% に達している [11] . 一方、最も多くの症例を報告した Kranick らは、長期の有効率を 14% としている [12] . また、刺激によって誘発される人工的な神経の入力と幻

肢からの異常入力が、患者にとって等価に感じられた場合、有効率が高くなるという結果も出ている [13,14,15] .

視床刺激については現在までに報告されている有効率は20% から 98% と広い幅があり、視床刺激も脊髄刺激同様に安定した結果が出ていない。41 の症例を診た Mazars らは、大部分の症例に幻肢痛の改善が得られたと述べているが [16,17] , Levy らは、多くの症例で初期にはよい効果が得られているものの長期の有効性は20% であったとしている [18] .

大脳皮質に対する刺激については Saitoh らや Carroll らによって報告されている [19,20] . しかし、大脳皮質に対する刺激は誤った部位を刺激した場合の危険が非常に大きく、脊髄刺激や視床刺激に比べ多く行われていない。大脳皮質に対する刺激を行うのは、脊髄刺激や視床刺激を行っても効果がなかった場合であり、症例が少ないため有効率が明確ではない。

神経刺激療法に共通して言えることとして、刺激によって幻肢部位に人工的に与えた神経入力と幻肢部分からの異常入力が患者にとって等価に感じられない場合に良い効果を得ることが難しいということがある。また、幻肢痛に対して劇的に奏効することはあるが、幻肢を喪失させるなど、幻肢そのものに変化をもたらすことは少ない [21] .

神経刺激療法は幻肢痛に対してある程度の効果は得られるものの、有効率にばらつきが大きいこと、長期の有効率が低くなるという問題がある。また、刺激する部位は脊髄や視床知覚中継核、大脳皮質と誤った部位を刺激することで大きな障害を招く危険性があり、神経を刺激するための施設や技術などこの病院でも行えるものではないという問題もある。

2.2.2 薬物療法

幻肢痛に対する薬物療法は、幻肢痛を神経因性疼痛の一部としてとらえて研究されてきた。しかし、多くの薬剤についての有効性について客観的に臨床証明された研究は少なく、幻肢痛に対する薬物療法の有効性を認めた報告がなされているのは、抗けいれん薬や抗うつ薬などわずかである [22,23] .

抗けいれん薬は鎮静作用以外の副作用がまれであるという利点があるが、鎮静作用が時間とともに消失するという欠点もある。神経因性疼痛に対する有効性が示されており、幻肢痛に対しても有効であるとする報告はされている [24]。しかし、有効性こそ報告されているものの投与量など条件について詳しい研究はなされていない。

抗うつ薬も抗けいれん薬同様に神経因性疼痛に対する有効性が示されており、幻肢痛に対しても有効性があるだろうと信じられている。しかし一方では、幻肢痛に対しては有効性が低いという報告があるなど、まだ実用化されるほどの効果は挙げていない [25]。

このように薬物療法は幻肢痛に対して効果が不明な点が未だに多く、系統だった処方手法は確立していない。このため、幻肢痛となる原因解明と共に、それより見出される新しい薬物療法の開発が望まれている。

2.2.3 ミラーボックス療法

神経刺激療法や薬物療法に比べ、安価かつ簡易に幻肢痛の緩和ができるものとしてミラーボックス療法がある。ミラーボックス療法は Ramachandran が考案したもので、上半分のフタが開いており、側面に二つ小さな穴があいている箱を用いるものである (図 2.4(A))。中央に鏡が設置してあり、側面より肢体を挿入し、健常肢を鏡に映すことで鏡の中に幻肢が実在しているかのように視覚的に感じることができる (図 2.4(B))。患者は、健常肢の指を自由に動かすことであたかも肢体が動いているかのような鏡像を観察する。同時に切断した側の肢体が鏡像と同様の運動をしているイメージを想像することで幻肢が消失したという例がある。Ramachandran はこの原因について、視覚フィードバックは肢体がまだ動いていると脳へと伝え、一方の筋肉は肢体がないと伝えるため、脳がこの感覚の衝突により幻肢を消失させたのではないかと述べている [1]。

肢体の運動は、脳からの指令に基づき実際の運動をした後、その運動結果を体性感覚や視覚により知覚して次の運動指令の準備を行うという段階を踏んで行われる。この運動の流れは知覚 - 運動ループと呼ばれている。肢体が正常な場合は、



(A) 鏡がない状態



(B) 鏡がある状態

図 2.4 ミラーボックス

脳からの指令に基づいた運動結果を体性感覚と視覚や聴覚によって比較し，脳へとフィードバックするループが存在する (図 2.5(A)) .

幻肢痛が起きている場合のこの知覚 - 運動ループの状態を考える . 幻肢痛というのは，脳から切断肢を運動させるという指令が行われており，体性感覚からのみの正確ではない情報が脳へとフィードバックされ，知覚 - 運動ループの整合性が取れていない状態と言える (図 2.5(B)) . Nico らは幻肢患者に視点や向きの変えられた腕を見せながら，知覚 - 運動ループを評価するための物理実験によって，幻肢痛や腕神経引き抜き損傷後疼痛において知覚 - 運動ループの異常が起きていることを明らかにした [26] . また，Schwoebel らにより病的痛みが軽減した状態において知覚 - 運動ループの異常が正常化すること [27] や，McCabe らにより鏡を用いて左右の肢体で違う動作を行い，鏡に映った視覚的身体経験と実際の被験者の動作である体性感覚的身体経験を分けることで健常者であっても病的痛みをはじめとする異常感覚が生じること [2] が明らかとなっている .

これらの知見より，McCabe らは知覚 - 運動ループが破綻する場合に幻肢痛が

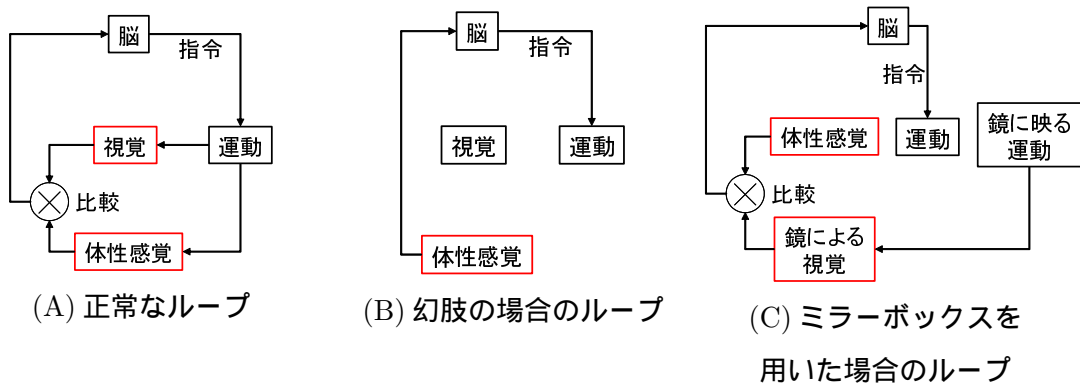


図 2.5 知覚 - 運動ループ

生じると考え、ミラーボックス療法を行うことで、幻肢への運動指令に対応した視覚や聴覚の欠損を鏡により視覚的に代償して体性感覚との比較を行い、脳にフィードバックする(図 2.5(C)) ことで知覚 - 運動ループが正常化し幻肢痛が緩和するという説を述べている [2] .

また、ミラーボックス療法は、神経刺激療法や薬物療法に比べ簡便である。鏡を用意するだけで患者はリハビリテーションを行うことができるため、特別な施設が必要ではなく安価であり、注射などを行う必要がないため非侵襲であるという利点がある。ただしミラーボックス療法もまた、全ての幻肢痛に効果があるわけではない。図 2.1 に示したように、幻肢の形状は切断以前の肢体の形状と必ずしも同じわけではない。患者の感じる幻肢の形状が II-V 型の場合、健常肢が鏡に映っても、患者は映った肢体を自身の幻肢に重ね合わせることができない。このため運動指令に対応した体性感覚のフィードバックの欠損を視覚的に代償することができず、幻肢痛が緩和しない。

2.3. VR や CG を用いたリハビリテーション手法

現在、コンピュータ内に構築した仮想環境を体験する「人工現実感」(VR) 技術は、医療やエンターテインメント、ロボット遠隔操作などさまざまな分野で活用

されている。VR 技術のインターフェースは主に視覚だが、聴覚や力覚も用いられることが多い。

VR 技術を用いてある感覚を刺激することで別の感覚に影響を与える研究もされている。奈良らは広視野スクリーンを用いた視覚刺激と、ヘッドホンを用いた聴覚刺激が平衡感覚に与える影響を検証した [28]。また、原らは対象物の形状や大きさという物理量に対しその物体の重さを不正確に知覚するという“見誤り”に着目し、視覚には大きさや置いてある位置の異なる CG を提示し、力覚には常に一定の重さを提示することで視覚による力覚への影響を検証した [29]。

VR 技術を用いることで感覚に影響を与えることが可能であることから、幻肢のリハビリテーションに対しても VR 技術を用いた研究がなされている。ミラーボックス療法では対応できない切断以前と形状の異なる幻肢に対し、VR を用いることで対応することが可能である。

O'Neil らはミラーボックスの形態を継承し、鏡の位置にディスプレイを置きディスプレイ上に CG による肢体の提示を行った [30]。CG により幻肢を表現するため、患者が感じる幻肢の形状に応じて提示する肢体を変化させることができる (図 2.6)。健常肢の動作はデータグローブにより取得し、鏡のようにディスプレイ上の CG も健常肢に同調して動作を行うように設計している。また CG による提示は自由度が高く、例えばミラーボックス療法であれば健常肢が鏡の方向を指差せば鏡に映された肢体も鏡方向を指差すが、O'Neil らの手法では健常肢と同じ方向を指差すという鏡では表現できないことも表現できる。

ただし、O'Neil らは健常者のみに対してアンケートにより効果を測定している。鏡で見られるような映し合わせの動きが VR により再現されていた、というアンケート結果を得たものの、それが本当に幻肢に効果があるのかを示しておらず、鏡のような拳動を実現できたというだけで知覚や体性感覚に影響を与えたかも不明である。更に、箱による位置の拘束はなくなったもののデータグローブを装着することによる新たな拘束感が生じているという問題点がある。

また、Hobbs は HMD(Head Mounted Display) 上に肢体だけでなく全身を VR で表現するという幻肢のリハビリテーションシステムを考案した [31]。HMD 上に取り付けられたセンサにより視点の変更を行い、視点位置に合わせた描画を行っ

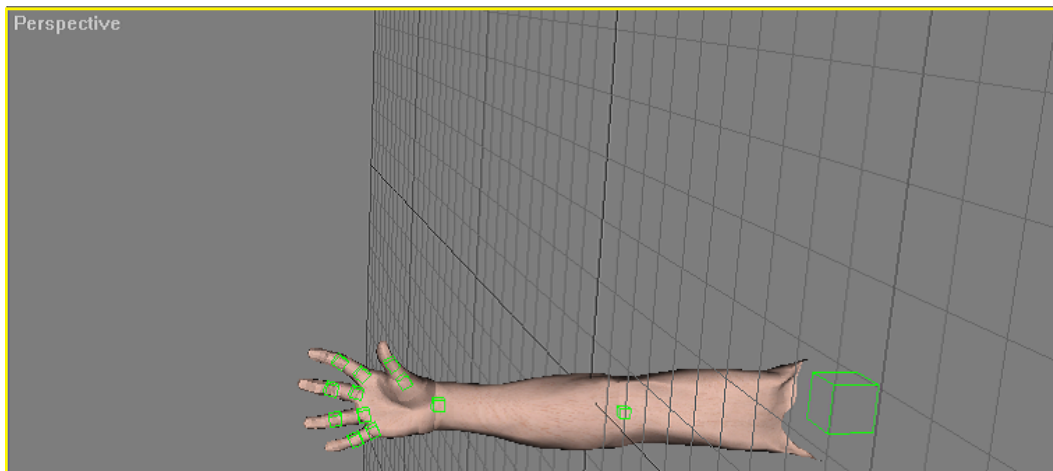


図 2.6 O'Neil らによる幻肢部位の CG 表示 [30]

ている (図 2.7) . 健常肢にはトラッキング用のデバイスを装着し , 位置や角度を計測し VR 空間上に反映させている .

幻肢部位に関しては , 健常肢を反転させたものを用いるのではなく , 筋電位を測定することで幻肢部位の動作データを取得し , ディスプレイ上への表示を行っている .

Hobbs の手法は実際にシステムの構築は行っておらず , 今後のシステムのデザインとして考案されたものである . また , 実現する上で動作の取得を行うために全身に装置を装着する必要がある拘束感が非常に大きいという問題点がある .

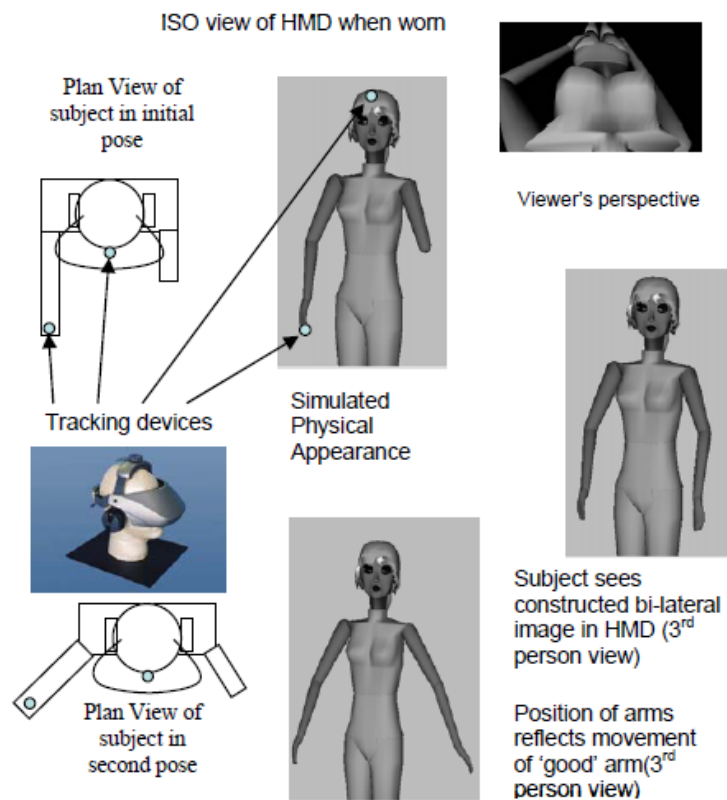


図 2.7 Hobbs による幻肢部位の CG 表示 [31]

第3章 幻肢リハビリテーションシステム

本章では、幻肢のリハビリテーションシステムを構築する上で要求される事項を整理し、本研究の目的を述べる。また、幻肢のリハビリテーションシステムを構築する上で問題となる点について述べる。

3.1. 目的

幻肢のリハビリテーションシステムを構築する上で必要となる条件として以下の要素が挙げられる。

- 拘束感がない
- 幻肢の形状の自由な設定が可能
- 多くの部位への対応が可能

ミラーボックス療法では肢体を挿入する、鏡を覗き込むというように拘束感が生じてしまい、更にリハビリテーションを行える箇所が限定されてしまう。また鏡に映し合わせるため、切断以前の状態と患者が感じている幻肢の形状が異なる場合、効果が生じない。

本研究では、CGを用いた幻肢のリハビリテーションシステムの構築を目的とする。CGにより描画を変更することで、幻肢の形状を患者が感じている幻肢形状に合うように自由に設定することが可能となる。また、身体部位のデータベースを用意することで様々な部位に対応できる。

更に本研究では拘束感のないシステムを構築するためにカメラと簡易に肢体に装着できるマーカーを使用する．カメラにより肢体の各部位の位置や角度を知ることによって、その位置や角度に応じたCGの提示を行うリハビリテーションシステムを構築する．

3.2. 鏡とディスプレイの相違

2.3節で述べたように、従来のVRを用いたリハビリテーションは、Ramachandranによって考案されたミラーボックス療法を基としたものが多い．しかし従来の手法では、CGにより提示された肢体画像によって体性感覚に影響が与えられるか検証がなされていない．

ミラーボックスにおいて提示を行う際には鏡が用いられ、VRを用いる上で幻肢部位の提示を行う際には鏡の代わりにディスプレイを用いる．それぞれの提示手法における特徴として、ディスプレイ上に表示する場合、

- 表示するものがCGであるため、形状を変化させることが可能である．
- データベースを用意することで、2.3節で述べたO'Neilらの手法にあったような映し合わせとは異なる動作を提示することが可能である．
- カメラやセンサにより健常肢の動作や位置・角度を入力し、出力するため、入出力間にタイムラグが生じる．
- 解像度がディスプレイに依存する．
- 表示されるものが平面的に見える．

という特徴が挙げられ、鏡を用いた場合、

- 即応性に優れており、タイムラグが生じない．
- 解像度が優れている．
- 視点位置を変えたとしても、その視点位置に応じた鏡像が表示され、立体視することが可能である．

- 健常肢を映し合わせるのみで異なる形状の肢体を表示することはできない。
- 映し合わせの動作を提示することしかできない。
- 患者は鏡を覗き込む必要がある。

という特徴が挙げられる。

3.3. 幻肢のリハビリテーションシステムを構築するための指針

ディスプレイに提示する幻肢のリハビリテーションシステムの構築で問題になるのは、入出力間にタイムラグが生じるためどうしても患者が思っている動作と異なるものが表示されてしまうという点である。また、ディスプレイに表示するために鏡に比べ解像度が劣ってしまう、ディスプレイ上には平面的にしか表示されないという問題点もある。これらの理由により、患者が表示されたCGに対し「作られたもの」という印象を抱き、CGが動いたとしても自身の運動の結果として受け入れられない可能性がある。

患者がCGを自身の肢体と知覚できない場合、体性感覚の視覚的欠損を補うことができないため、幻肢に対してリハビリテーションを行ったとしても効果が小さくなる。鏡による提示を行った場合とディスプレイ上にカメラによる画像の提示を行った場合の比較を行い、カメラによる画像の提示でも体性感覚に影響を与えるという研究はされているが[32]、CGの提示を行っても体性感覚に影響を与えることが可能であるかは検証されていない。したがって、幻肢のリハビリテーションシステムの実装を行う前に、CGが提示された場合でも自身の肢体であると認識し、体性感覚に影響を与えることが可能であるか検証する必要がある。

第4章 CGによる視覚刺激の 体性感覚への影響評価

本章では、前章で述べたCGによる体性感覚への影響に関し検証を行った実験について述べる。「ディスプレイ上にCGによる腕を提示した場合」、「ディスプレイ上にカメラにより撮影した腕を提示した場合」、「鏡に腕を映した場合」それぞれにおける体性感覚への視覚による影響を計測する。この結果より、CGによる肢体を用いた場合でも、幻肢のリハビリテーションを行うことが可能であるか検討する。

4.1. 目的

本実験では、CGの腕を提示した場合においても、鏡を用いたリハビリテーションシステムで生じるような体性感覚への影響を与えられるか検証することを目的とする。本実験では、静止した腕を提示するという視覚刺激を与えることで、腕の位置感覚や運動感覚などの体性感覚に影響を与えられるか計測を行った。

体性感覚への影響は、一般的な評価として考えられるアンケートを用いなかった。アンケートにより影響の評価を行った場合、先入観が入ってしまうことや、人により基準が異なるため影響の度合いを知ることが難しいという問題がある。客観的な評価手法として Nicholas らの手法 [33] に従って定量的な評価を行った。

4.2. 実験装置

CGによる視覚刺激により体性感覚に影響を与えることが可能か、Nicholas らの手法に基づいて検証を行った。Nicholas らは被験者に対し、鏡に映った動かな

い左手を見ながら右手を目標位置 4 点へと動かしてもらい、目標位置と右手を置いた位置との差分の計測を行った。Nicholas らはこの実験を鏡を覆って何も映っていない状態でも行い、差分値の大きさを視覚刺激の影響とした。

検証実験のために図 4.1 に示すシステムを構築した。

被験者は垂直に立てられた鏡の両脇に手を置き、システムの前に立つものとした。左手上部にはカメラが下向きに設置してあり、右手上部にはディスプレイを水平に設置した。ディスプレイにはカメラで撮影した画像や、肢体を描いた CG を表示した。システムの中には垂直に立てられた鏡があり、また右腕上部にはディスプレイが水平に置いてあるため被験者の視点からは自身の右手を見ることはできないようになっている (図 4.2)。

被験者から見てディスプレイ奥側には、視覚外の右手を移動する際の目標を設置した。目標はそれぞれ鏡に近い側から 5, 12, 19, 26cm の位置に設置した。被験者から見て鏡右側、ディスプレイの下には計測用目盛りが設置してあり、手を置いた位置を計測することが可能である。

本実験装置のハードウェアの構成を表 4.1 に示す。

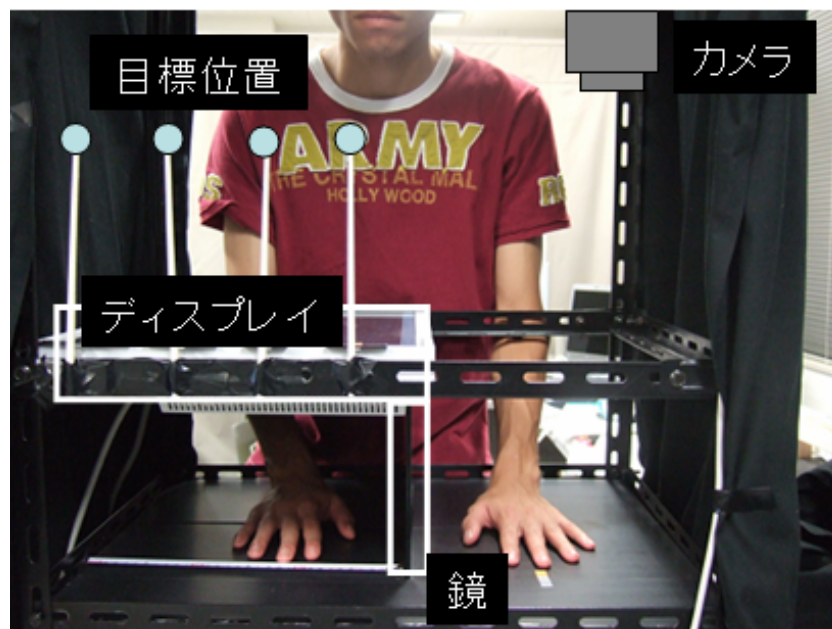


図 4.1 CG による体性感覚への視覚刺激検証システム

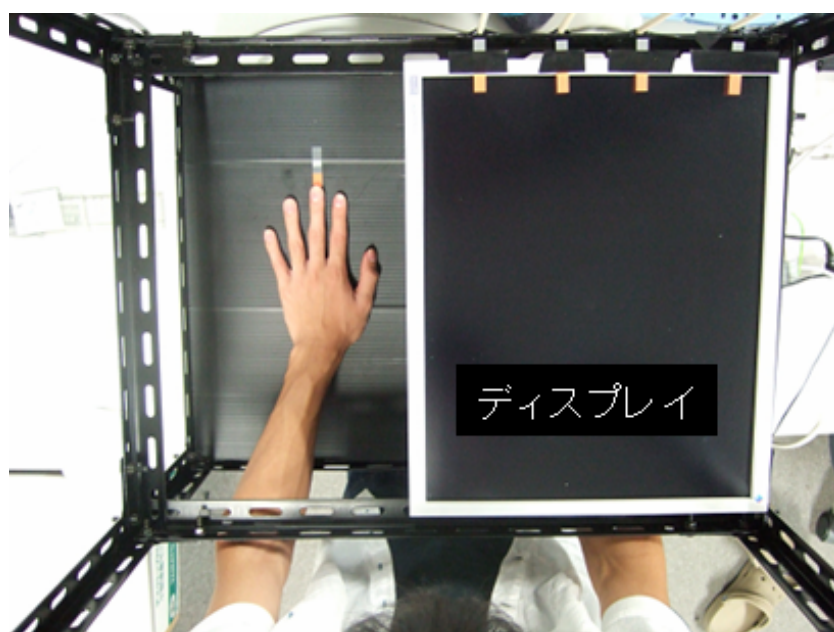


図 4.2 視覚刺激検証システム上部

表 4.1 CG による視覚刺激の影響評価実験におけるハードウェア構成

PC	CPU : Intel(R) Pentium(R) M processor 2.00GHz Memory : 512MB RAM
カメラ	Point Grey Research 社製 Dragonfly 解像度 : 1024[pixel] × 768[pixel] フレームレート : 15[fps]
ディスプレイ	ナナオ社製 Flexscan S190 解像度 : 1024[pixel] × 768[pixel]
鏡	30[cm] × 30[cm]

4.3. 実験手法

図 4.1 のシステムを用い，CG による視覚刺激の体性感覚に与える影響を検証した．被験者はまずシステムの前に立ち，鏡を挟み込むように手を置く．そして，

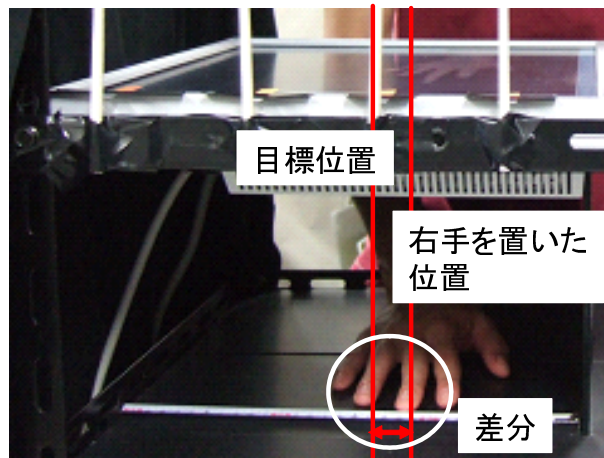


図 4.3 視覚刺激の体性感覚に与える影響検証実験における目標位置と結果の差分

左手を鏡左側 12cm の位置に固定したまま，鏡，あるいはディスプレイを見ながら右腕を指定された目標位置へと移動する．体性感覚に与える影響を検証するために，被験者が置いた手の位置と目標との差分値を計測する (図 4.3)．ただし，被験者が置いた手の位置は，右手中指の先端とし，全ての目標位置への移動を 1 セットとし計 5 セットずつ右利きの健常者 10 名に対して実験を行った．

被験者に与える実験条件は

M 鏡を覗き込む場合 (図 4.4(A))

NM 鏡を覗き込む姿勢だが鏡が覆われている場合 (図 4.4(B))

D ディスプレイ上にカメラで撮影した腕画像を反転したものを表示している場合 (図 4.4(C))

ND ディスプレイ上に何も表示していない場合 (図 4.4(D))

C ディスプレイ上に CG の腕を表示している場合 (図 4.4(E))

である．

M と NM の場合は前傾で鏡を覗き込む姿勢となり，D や ND，C の場合はディスプレイを見下ろす姿勢となる．また，M，C，D の全ての場合において表示され

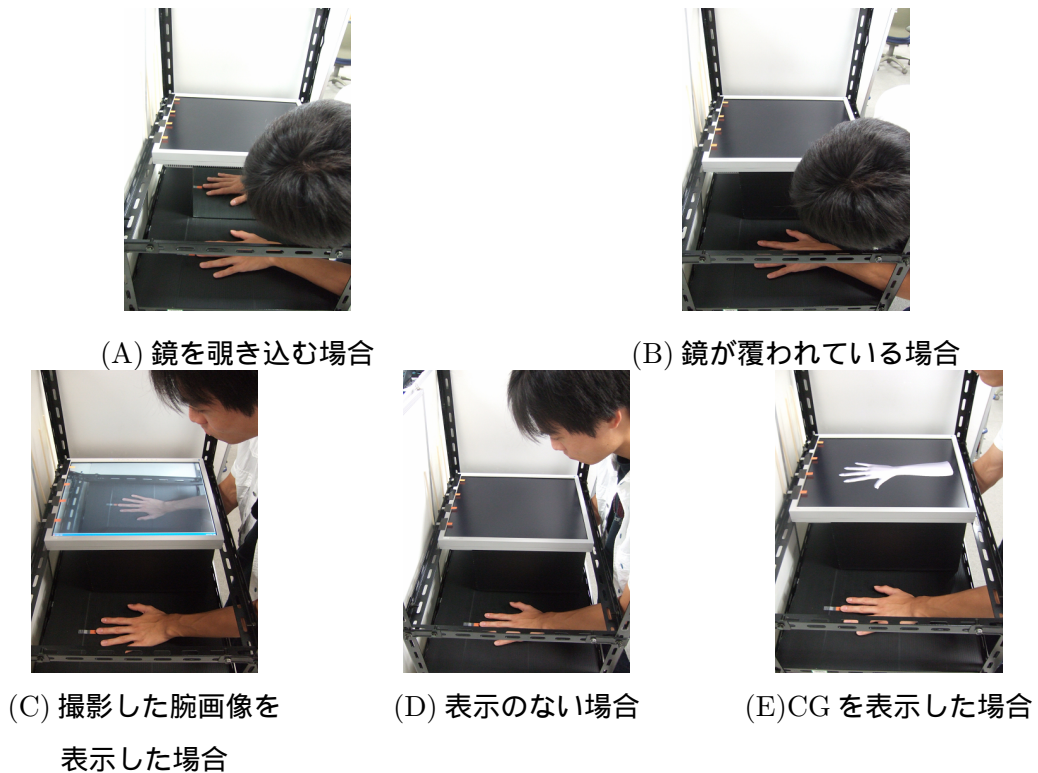


図 4.4 視覚刺激の体性感覚に与える影響検証実験条件

ている腕は、鏡の位置から右へ 12cm の位置に見えるようにした。また、それぞれの条件及び姿勢から見える景色は図 4.5 のようになる。表示されている腕画像は図 4.6 である。

比較した項目を以下に述べる。まず鏡やディスプレイ上に提示を行った場合の視覚刺激の体性感覚に与える影響を検証するために

M-NM 鏡による視覚刺激の体性感覚に与える影響の検証

C-ND CG による視覚刺激の体性感覚に与える影響の検証

D-ND カメラにより撮影された画像による視覚刺激の体性感覚に与える影響の検証

以上の比較を行った。

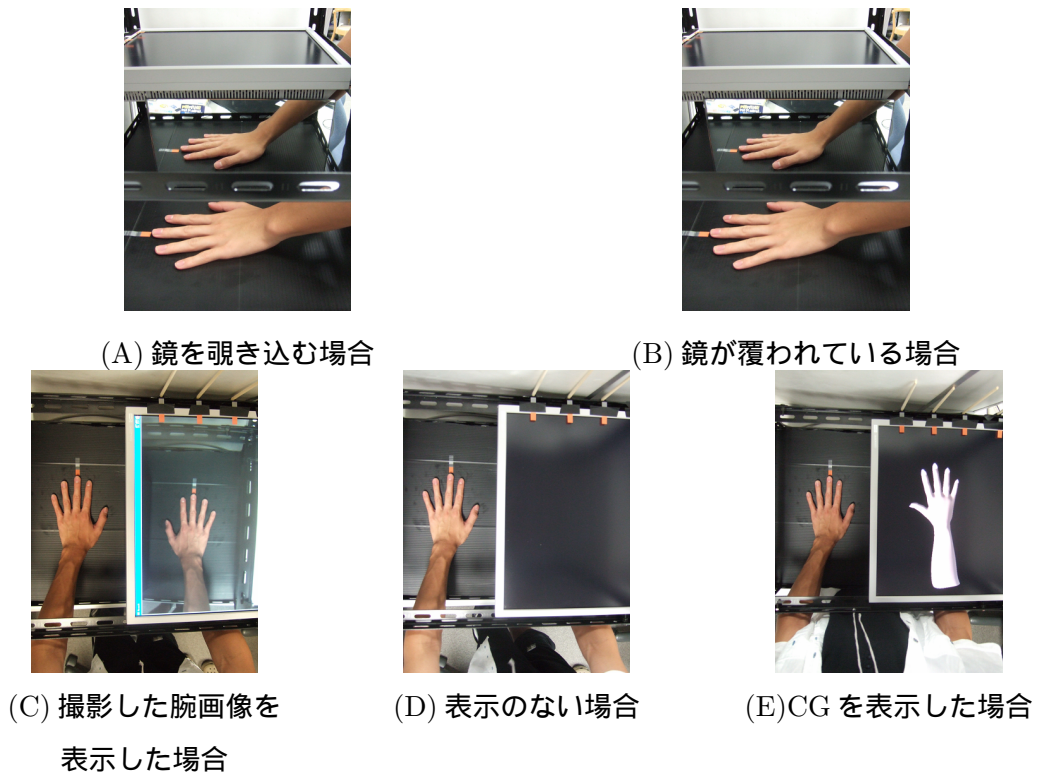


図 4.5 実験条件による視界

また姿勢の違いが右手を置く位置に影響を与えるか検証するために、
 NM-ND 鏡を覗き込む場合とディスプレイを見下ろす場合の姿勢による体性感
 覚への影響の検証

以上の比較を行った。

そして、それぞれの視覚刺激の影響の度合いを検証するために、

M-C 鏡とCGを提示した場合における視覚刺激の影響の差

M-D 鏡とカメラによる撮影画像における視覚刺激の影響の差

C-D CGとカメラによる撮影画像における視覚刺激の影響の差

以上の比較を行った。



図 4.6 視覚刺激の体性感覚に与える影響検証実験時に用いた CG

4.4. 検定手法

実験により得た差分値に対し，それぞれの場合における視覚刺激の体性感覚に与える影響の比較を行うため検定を行った．本実験では，検定に Wilcoxon の符号付順位和検定を用いた [34,35](付録 A,B)．

Wilcoxon の符号付順位和検定は，

- 2 群のデータが同一の対象から得られている．
- 対象群が正規分布をなすかわからない．
- 片方の事象の結果により，もう片方の事象の結果が変化しない．

という条件の場合に代表値に差があるか検定する際に用いられる．本実験では，同一の人物がそれぞれの実験条件に応じて実験を行っており，正規分布をなすかはわからない．また，例えば鏡を覗き込みながら手を移動させた結果がディスプレイを見下ろしながら手を移動させる結果に影響することはないため，本実験では Wilcoxon の符号付順位和検定が適用可能である．

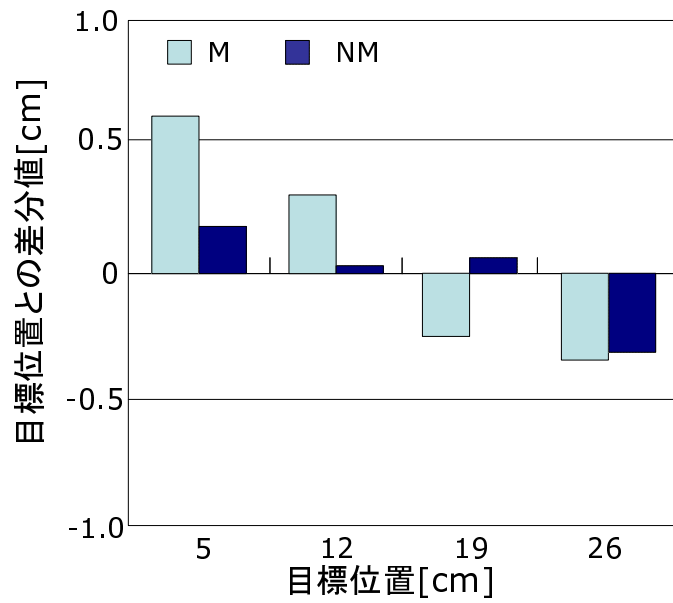
4.5. 実験結果

鏡を覗き込んだ場合における目標位置ごとの目標位置と右手を置いた位置との差分値の平均を図 4.7(A) に示す。ここで、右手を置いた位置が目標よりも手前であった場合、差分値は正の値をとり、目標よりも奥にあった場合、負の値をとるものとした。また、ディスプレイを見下ろす姿勢の場合における目標位置ごとの目標位置と右手を置いた位置との差分値の平均を図 4.7(B) に示す。また、平均値と分散を表 4.2 に示す。

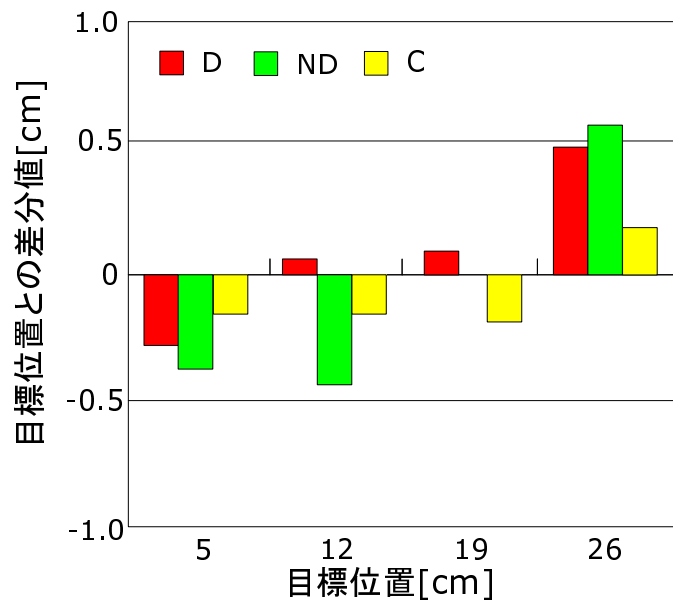
Nicholas らの手法同様に鏡を覗き込む姿勢の場合、目標位置が鏡から近い場合は手を置く位置が目標位置よりも手前になり、目標位置が鏡から遠くなるほど手を置く位置が目標位置よりも奥になっていることがわかった。また、ディスプレイを見下ろす姿勢の場合は、逆に目標位置が鏡から近い場合は手を置く位置が目標位置よりも奥になり、目標位置が鏡から遠くなるほど手を置く位置が目標位置

表 4.2 視覚刺激の体性感覚に与える影響比較実験結果の平均と分散

	M	NM	D	ND	C
5cm					
平均 [cm]	0.588	0.136	-0.304	-0.470	-0.170
分散 [cm]	1.932	1.394	0.559	0.753	0.378
12cm					
平均 [cm]	0.308	0.026	0.044	-0.450	-0.178
分散 [cm]	0.872	0.514	0.251	0.266	0.344
19cm					
平均 [cm]	-0.246	0.054	0.084	-0.006	-0.222
分散 [cm]	0.783	1.338	0.735	1.199	1.080
26cm					
平均 [cm]	-0.366	-0.316	0.472	0.538	0.140
分散 [cm]	3.316	4.371	1.076	1.284	1.821



(A) 鏡を覗き込んだ場合



(B) ディスプレイを見下ろす姿勢の場合

図 4.7 視覚刺激の体性感覚に与える影響検証実験における目標位置と手を置いた位置の差分値の結果

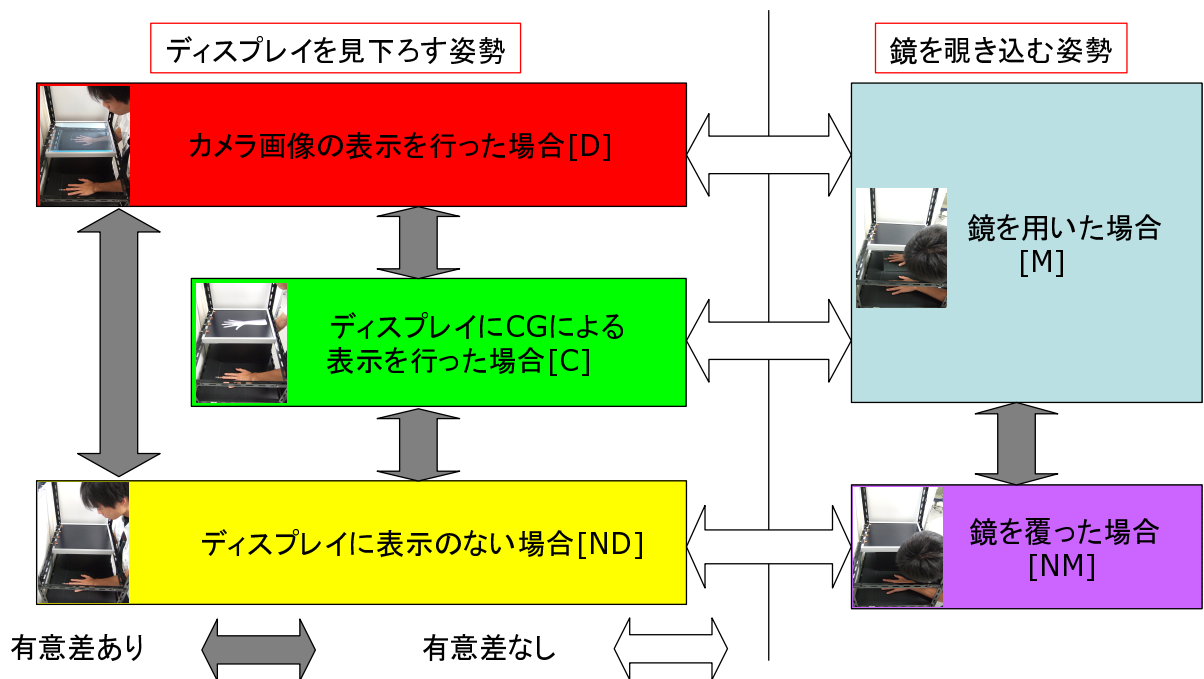


図 4.8 視覚刺激の体性感覚に与える影響検証実験より算出した有意差

より手前になっていることがわかった。分散値は大きく変動しているが、本実験では同一被験者内での条件間の比較が重要であるため、分散値による比較は行う必要はない。

また、鏡を覗き込む姿勢で行った二つの実験の比較から、鏡を見ながら手の移動を行った場合の方が鏡を覆った場合に比べ目標位置と手を置いた位置の差が大きいことがわかった。同様に、ディスプレイを見下ろす姿勢で手の移動を行った三つの実験の比較によって、ディスプレイにCGの提示を行った場合やカメラによる撮影画像による提示を行った場合の方がディスプレイに表示を行わなかった場合に比べ目標位置と手を置いた位置の差が大きいことがわかった。

次に、各実験条件における目標位置ごとの目標位置と手を置いた位置の差分値の結果を用い、4.3節に示した比較項目ごとに有意差を算出した結果を図4.8に示す。

まとめると、

M-NM 有意差あり ($T = 263.5$, $N = 39$)

C-ND 有意差あり ($T = 281$, $N = 40$)

D-ND 有意差あり ($T = 285.5$, $N = 40$)

NM-ND 有意差なし ($T = 309.5$, $N = 39$)

M-C 有意差なし ($T = 315.5$, $N = 40$)

M-D 有意差なし ($T = 394.5$, $N = 40$)

C-D 有意差あり ($T = 275$, $N = 40$)

となった。

4.6. 考察

まず、CGを用いた視覚刺激による指先の位置における体性感覚への影響を検証したところ、有意差があるという結果を得た。このため、CGを用いても視覚により体性感覚に影響を与えられ、CGを用いて幻肢のリハビリテーションシステムを構築した場合でも、視覚と体性感覚の不一致を与えられる可能性があると考えられる。また、NM-NDにおいて有意差がないという結果を得た。これより、姿勢は位置感覚という体性感覚に影響がないという結果が得られ、鏡を覗き込む姿勢時の実験結果とディスプレイを見下ろす姿勢時の実験結果において比較を行ったとしても、姿勢による影響は考慮にいれなくてもよいと考えられる。

第5章 提案システムの構築

前章において，CG を用いても体性感覚に影響を与えることが可能であり，CG を用いた幻肢のリハビリテーションシステムを構築することが可能である，という結果を得た．本章では3章で述べた目的に応じたCG を用いた幻肢のリハビリテーションシステムの提案を行い，システム構成や肢体を描画するための座標変換について述べる．

5.1. システム構成

本システムでは，腕に装着したマーカ―をカメラにより認識し，マーカ―の位置や角度に応じたCGの腕をディスプレイ上に提示する．マーカ―をカメラで認識することで拘束感が少ないシステムの構築が可能である．またCGの腕提示を行うため，今後幻肢のリハビリテーションを行う場合において肢体形状の変化を容易に行える．

図5.1に提案システムを示す．本システムでは，被験者正面に，5.4節において後述する被験者が装着したマーカ―及びワールド座標取得用マーカ―を認識するためのカメラを設置した．マーカ―は被験者が装着するマーカ―として3種類，ワールド座標取得用マーカ―として1種類用いた．被験者が装着するためのマーカ―は，健常肢用として上腕と手首にそれぞれ一つずつ，幻肢用として上腕に一つ用いた．また，ワールド座標取得用マーカ―はカメラ正面，被験者前方の床に敷いた．本システムでは，幻肢側の腕は肘で切断手術が行われた場合を想定しており，幻肢側の手首にはマーカ―を装着していない．幻肢側の手首位置及び角度は健常肢用マーカ―の位置関係より推定を行った．

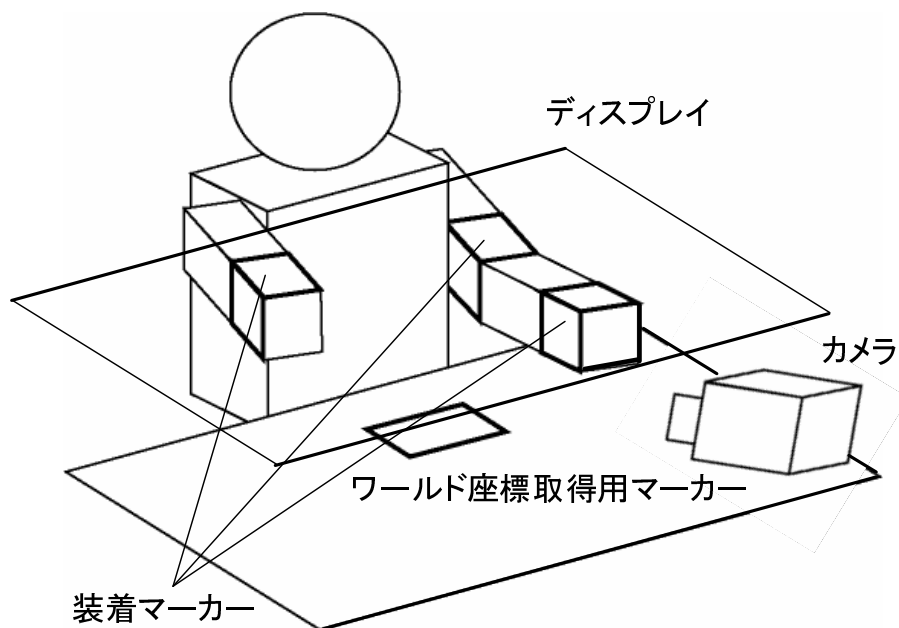


図 5.1 提案システム

5.2. CG 提示

ディスプレイ 2 台を、被験者の肩の高さとして床から 125cm の位置に設置した。ディスプレイがあることで被験者は自身の両腕を見ることはできず、ディスプレイ上に表示された CG により作成された両腕のみを見ることが出来る。CG は、カメラにより取得した被験者が装着したマーカーの位置や角度に応じて提示される。幻肢のリハビリテーションを行う場合でも、腕を動かすことでミラーボックス療法のような感覚を得ることが出来る。

5.3. 座標定義

本システムを構築する上で複数の座標間の変換が必要であり、本システムで扱う座標系の定義を行わなければならない。本システムで扱う座標系の定義を以下に示す。

装着マーカー座標系 被験者が装着したマーカーの中心を原点とし、原点から鉛

直上向きに Z_M 軸を取り，右手座標系で X_M 軸， Y_M 軸をとった座標を装着マーカー座標系とする．

カメラ座標系 被験者が装着するマーカーを認識するためのカメラにおいて，焦点 C を原点とし，光軸を Z_C 軸として，右手座標系で X_C 軸， Y_C 軸をとった座標をカメラ座標系とする．

ワールド座標系 提案システムにおいてワールド座標取得用として設置したマーカーの中心を原点とし，原点から鉛直上向きに Z_W 軸を取り，右手座標系で X_W 軸， Y_W 軸をとった座標をワールド座標系とする．

提案システムにおいて，健全肢及び幻肢を CG によって被験者視点としてディスプレイ上に適切に表現するために，腕の位置や角度などの装着マーカーの座標をワールド座標系上で表現する必要がある．本研究では，装着マーカー座標系，カメラ座標系，ワールド座標系より座標変換を行うことで装着マーカー座標系とカメラ座標系の関係及びカメラ座標系とワールド座標系の関係を算出し，装着マーカー座標系とワールド座標系の関係を導出することで，位置や角度に応じた CG の表示を行った．各座標系の関係を図 5.2 に示す．

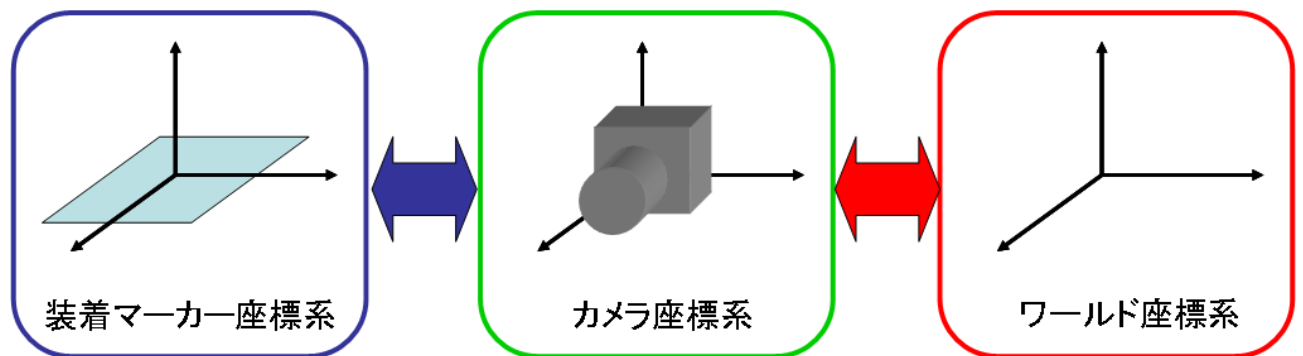


図 5.2 座標系の関係

5.4. マーカー位置・角度検出

本システムでは，図 5.3 のような既知形状のマーカーをカメラで撮影することで，マーカーの位置や角度の取得を行った．

ここで，位置や角度の取得には ARToolKit を用いた [36]．カメラ座標系における各装着マーカー座標系の位置及び角度とワールド座標系の位置を知ることによって，ワールド座標系と装着マーカー座標系の関係を求めることが可能となる [37]．

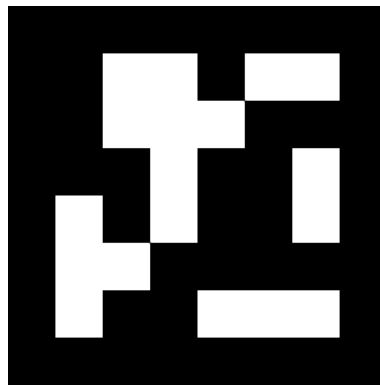


図 5.3 位置姿勢取得用マーカー [38]

5.5. 座標変換

各座標系における他の座標系の位置や角度の関係は，式 (5.1) で示される 4×4 行列で表される．

$$R = \begin{pmatrix} l_x & m_x & n_x & p_x \\ l_y & m_y & n_y & p_y \\ l_z & m_z & n_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

この行列 R は同次変換行列と呼ばれる．ある座標系 u_1 から別の座標系 u_2 への座標変換は同次変換行列 R を用いて，

$$u_2 = Ru_1 \quad (5.2)$$

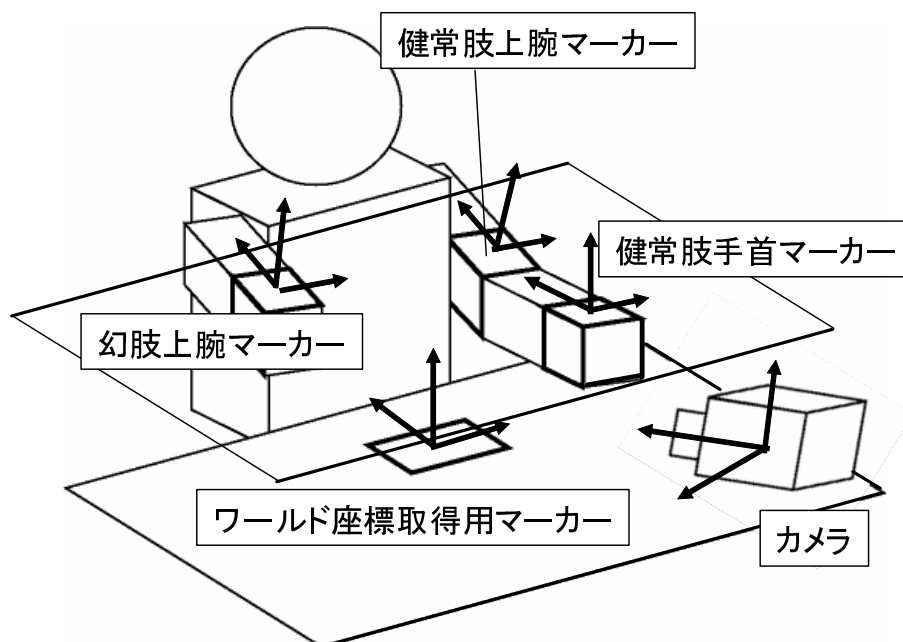


図 5.4 各座標軸の配置

で示される。

本節では、具体的な提示手法を図 5.4 の状態を例として考える。左手を健常肢と仮定し、左手上腕と左手手首にそれぞれマーカーを装着している。また、右手は肘部分において切断手術を行ったと仮定し、右手上腕にのみマーカーを装着している。カメラからは健常肢上腕、健常肢手首、幻肢上腕、ワールド座標取得用、全てのマーカーを撮影できているとする。

5.5.1 幻肢側手首位置の推定

カメラ座標系上の座標を $[X_C \ Y_C \ Z_C \ 1]^t$ とし、マーカー座標系上の座標を $[X_M \ Y_M \ Z_M \ 1]^t$ 、ワールド座標系上の座標を $[X_W \ Y_W \ Z_W \ 1]^t$ とする。ARToolKit を用いることで、カメラ座標系上の各マーカーの座標及び、カメラ座標系とマーカー座標系の同次変換行列が得られる。マーカー座標 $[X_{Mi} \ Y_{Mi}$

$Z_{Mi} \ 1]^t$ からカメラ座標 $[X_{Ci} \ Y_{Ci} \ Z_{Ci} \ 1]^t$ への変換行列は,

$$\begin{pmatrix} X_{Ci} \\ Y_{Ci} \\ Z_{Ci} \\ 1 \end{pmatrix} = R_i \begin{pmatrix} X_{Mi} \\ Y_{Mi} \\ Z_{Mi} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

で示される．ここで R_i はそれぞれのマーカー座標系とカメラ座標系の同次変換行列である．

ディスプレイ上にそれぞれの腕を CG として描画するために取得すべき情報として，幻肢側の手首位置情報が足りない．本手法では健常肢側の上腕と手首情報の位置関係を用い，幻肢側の上腕より手首位置の推測を行った．健常肢の上腕と手首の関係を示す行列は以下の流れで導出される．健常肢上腕において，マーカー座標をカメラ座標へと (5.3) を用いて変換すると

$$\begin{pmatrix} X_{M1} \\ Y_{M1} \\ Z_{M1} \\ 1 \end{pmatrix} = R_1^{-1} \begin{pmatrix} X_{C1} \\ Y_{C1} \\ Z_{C1} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

となる．健常肢上腕を原点としたときの手首の座標との関係を示す行列は式 (5.4) より

$$\begin{pmatrix} X_{M1} \\ Y_{M1} \\ Z_{M1} \\ 1 \end{pmatrix} = R_1^{-1} R_2 \begin{pmatrix} X_{M2} \\ Y_{M2} \\ Z_{M2} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

となり， $R_1^{-1} R_2$ として得られる．したがって幻肢側の上腕と手首の関係は，幻肢手首座標を $[X_P \ Y_P \ Z_P \ 1]^t$ とすると

$$\begin{pmatrix} X_{M3} \\ Y_{M3} \\ Z_{M3} \\ 1 \end{pmatrix} = R_1^{-1} R_2 \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

で示される．

5.5.2 ワールド座標からみた腕位置推定

被験者視点から見た腕の位置に CG の描画を行うため、カメラから取得した各マーカーの座標位置をワールド座標系へと変換する必要がある。

ワールド座標は、式 (5.3) より、

$$\begin{pmatrix} X_{CW} \\ Y_{CW} \\ Z_{CW} \\ 1 \end{pmatrix} = R_W \begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

で示される。これより、ワールド座標を原点とした場合のカメラの位置は

$$\begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{pmatrix} = R_W^{-1} \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

となる。したがって、式 (5.3) 及び式 (5.8) よりワールド座標を原点とした装着マーカーの各位置は

$$\begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{pmatrix} = R_W^{-1} R_i \begin{pmatrix} X_{Mi} \\ Y_{Mi} \\ Z_{Mi} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

で示される。幻肢手首の位置は式 (5.6) 及び式 (5.9) より

$$\begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{pmatrix} = R_W^{-1} R_3 R_1^{-1} R_2 \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

というワールド座標系上で示される。

得られたワールド座標に CG の描画を行うことで、ディスプレイ上に被験者の視点から見た腕の CG を提示することが可能となる。

第6章 提案システム効果検証実験

本章では5章で述べたシステムにより，実際に被験者に影響を与えることができるか検証を行った実験について述べる．マーカーにより取得した位置角度に応じたCGをディスプレイ上に表示した場合の位置感覚への影響を定量的に検証する．

6.1. 目的

本実験は，実装した提案手法が幻肢のリハビリテーションにおいて効果があるか検証を行うことを目的とする．本実験では5章で述べたシステムを用い，被験者に両腕のCGを提示して視覚刺激を与えることが可能であるか検証を行った．

本実験においても，4章同様に Nicholas らの手法に従って被験者の右手を目標位置へと動かしてもらい，目標位置と右手を置いた位置との差分値を計測することで視覚刺激による体性感覚への影響を定量的に評価した．

6.2. 実験システム

図6.1にシステムを示す．被験者はまずシステムの前に立ち，ディスプレイ下に腕を挿入する．ディスプレイ上にはカメラにより取得したマーカーの位置や角度に応じたCGの両腕の表示がされ，被験者自身の両腕を直接見ることはできない．

右手を移動する際の目標は，被験者から見てディスプレイの奥に設置した．目標は2台のディスプレイの中央を0cmとし，中央から右へ5，12，19，26cmの位置に設置した．被験者の左手は2台のディスプレイの中央から左に12cmの位置に置くものとした．ディスプレイの下には計測用目盛りが設置してあり，手を置いた位置を計測することを可能とした．

本実験装置のハードウェアの構成を表 6.1 に示す。

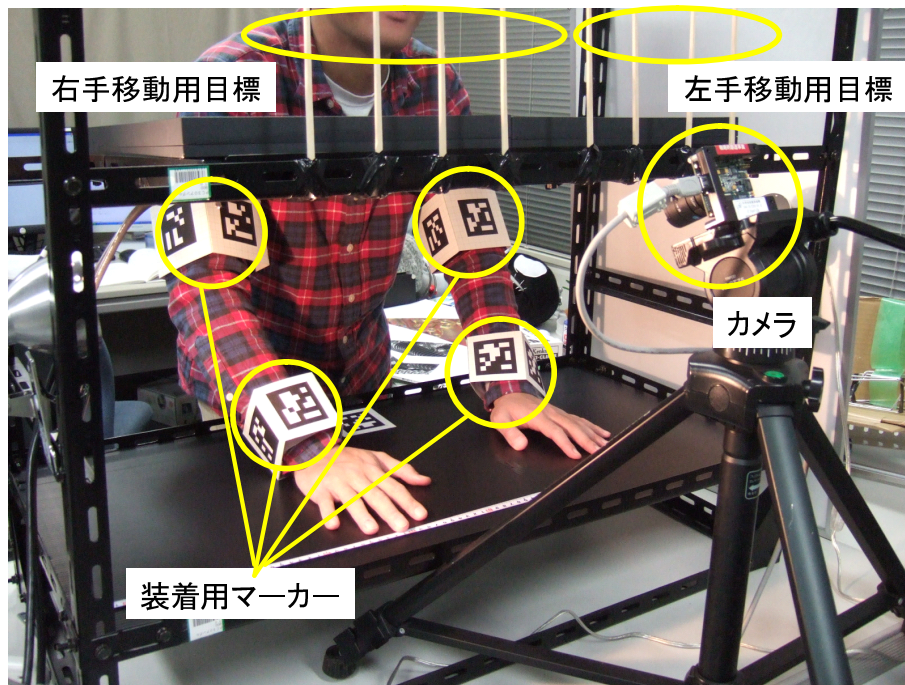


図 6.1 CG の両腕提示の場合の視覚刺激の体性感覚への影響検証システム

表 6.1 ハードウェアの構成

PC	CPU : Intel Core2 Duo E6300 CPU : 1.86[GHz],1.87[GHz] Memory : 1.00 GB RAM
カメラ	Point Grey Research 社製 Dragonfly 解像度 : 1024[pixel] × 768[pixel] フレームレート : 15[fps]
ディスプレイ	ナナオ社製 Flexscan S1961 解像度 : 1024[pixel] × 768[pixel]

6.3. 実験手法

図 6.1 のシステムを用い，両腕を CG で提示した場合の視覚刺激の体性感覚に与える影響を検証した．被験者には，右手あるいは両手をディスプレイ奥にある指定された目標位置へと動かしてもらった．そして図 4.3 に示したように被験者が置いた右手と目標との差分値を計測した．被験者が置いた手の位置は右手中指の先端とし，全ての目標位置への移動を 1 セットとし計 5 セットずつ右利きの健常者 10 名に対して実験を行った．被験者に与える実験条件を表 6.2，6.3 に示す．

実験条件ごとの比較は 4 章同様に Wilcoxon の符号付順位和検定を用いた．LRM と LRMM は左右の手の位置や角度が CG にそのまま反映されるが，LM と LMM

表 6.2 提案システムによる影響比較実験の実験条件 (左手固定)

	マーカー	被験者		CG	
		左手	右手	左手	右手
LRM	右上腕・手首 左上腕・手首	固定	移動	マーカー動作反映	マーカー動作反映
LM	右上腕 左上腕・手首	固定	移動	マーカー動作反映	左手動作反転
NM	左上腕・手首	固定	移動	マーカー動作反映	表示なし

表 6.3 提案システムによる影響比較実験の実験条件 (左手移動)

	マーカー	被験者		CG	
		左手	右手	左手	右手
LRMM	右上腕・手首 左上腕・手首	移動	移動	マーカー動作反映	マーカー動作反映
LMM	右上腕 左上腕・手首	移動	移動	マーカー動作反映	左手動作反転 移動量半分
NMM	左上腕・手首	移動	移動	マーカー動作反映	表示なし

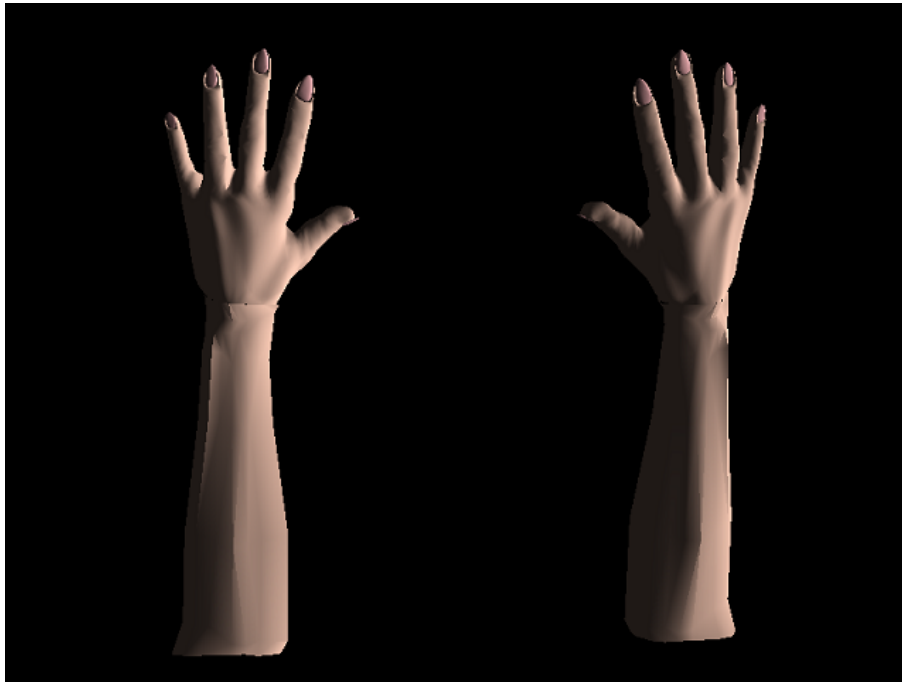


図 6.2 提案システム効果検証実験において提示された CG

は LM については左手を固定しているため，LMM については移動量を減らしているためどちらも CG の位置の変化が小さく提示される．また，表示された腕画像を図 6.2 に示す．

比較した項目を以下に述べる．まず，左手を固定した場合と移動した場合の視覚刺激の体性感覚への影響を検証するために，LRM-LRMM，LM-LMM，NM-NMM 間において左手の運動が右手の位置感覚に与える影響の比較を行った．

また，CG の右手の動きによる視覚刺激の体性感覚への影響を検証するために LRM-LM CG の右手が動く場合と動きが小さい場合の位置感覚に与える影響の比較

LRM-NM CG の右手が動く場合と全く見えない場合の位置感覚に与える影響の比較

LM-NM CG の右手の動きが小さい場合と全く見えない場合の位置感覚に与える影響の比較

LRMM-LMM CGの右手が動く場合と動きが小さい場合について、両手を動かした場合の位置感覚に与える影響の比較

LRMM-NMM CGの右手が動く場合と全く見えない場合について、両手を動かした場合の位置感覚に与える影響の比較

LMM-NMM CGの右手の動きが小さい場合と全く見えない場合について、両手を動かした場合の位置感覚に与える影響の比較

以上の比較を行った。

6.4. 実験結果

実験結果による傾向を知るため、各実験条件における目標位置ごとの目標と右手を置いた位置との差分値を統計的に解析した。左手を固定した場合の差分値の平均を図6.3に、左手を移動させた場合の差分値の平均を図6.4に示す。また、差分値の平均と分散を、表6.4に示す。ここで、右手を置いた位置が目標よりも手前であった場合、差分は正の値をとり、目標よりも奥であった場合、負の値をとるものとした。

図6.3, 6.4より、目標位置が被験者から遠くなるほど手を置く位置が目標位置より手前になっていることがわかった。また、手を置いた位置は左手を固定させた場合、移動させた場合、共にCGの位置の変化量が小さい場合に、目標位置による差分値の変動が大きいことがわかった。またCGの視覚刺激への体性感覚への影響評価実験同様、分散値は大きく変動しているが、本実験においても同一被験者内での条件間の比較が重要であるため、分散値による比較は行う必要がない。

次に、各実験条件における目標位置ごとの目標位置と手を置いた位置の差分結果を比較し、有意差を算出した結果を図6.5に示す。まとめると、

LRM-LRMM 有意差なし ($T = 382.5, N = 40$)

LRM-LM 有意差あり ($T = 224.5, N = 40$)

LRM-NM 有意差なし ($T = 278.5, N = 40$)

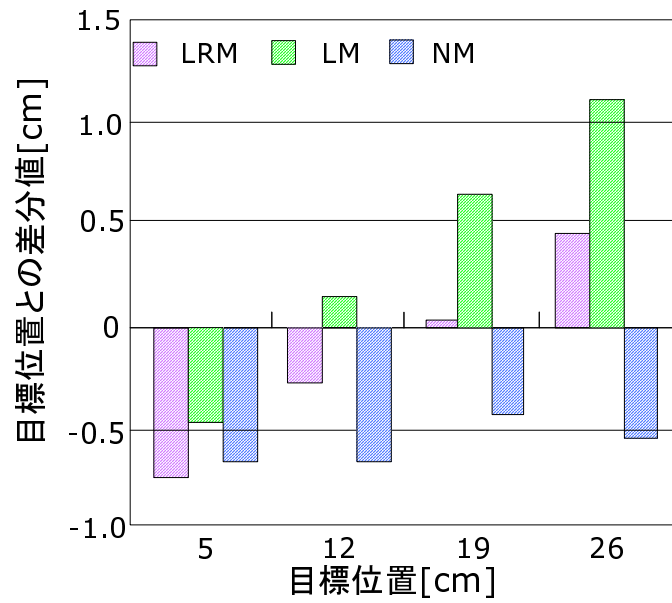


図 6.3 提案システム検証実験における目標と右手を置いた位置の差分値の平均 (左手固定)

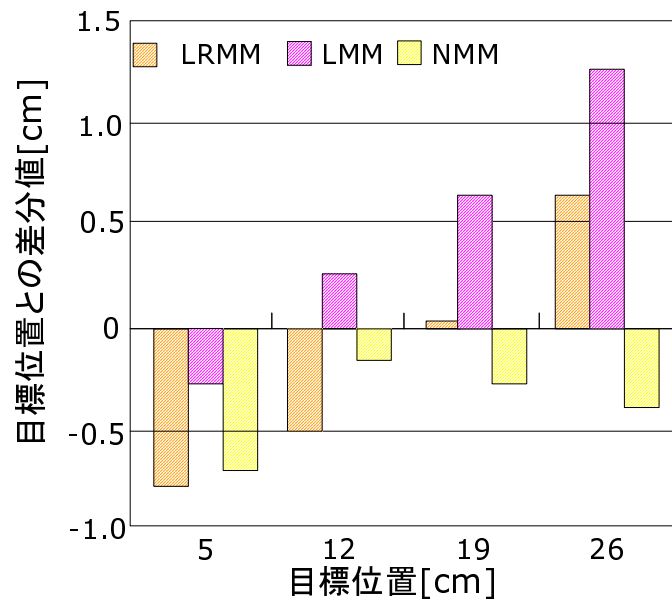


図 6.4 提案システム検証実験における目標と右手を置いた位置の差分値の平均 (左手移動)

LRMM-LMM 有意差あり ($T = 163.5, N = 40$)

LRMM-NMM 有意差なし ($T = 339.5, N = 40$)

LM-LMM 有意差なし ($T = 409, N = 40$)

LM-NM 有意差あり ($T = 174, N = 40$)

LMM-NMM 有意差あり ($T = 173.5, N = 40$)

NM-NMM 有意差なし ($T = 273, N = 38$)

となった。

表 6.4 提案システムによる影響比較実験結果の平均と分散

	LRM	LRMM	LM	LMM	NM	NMM
5cm						
平均 [cm]	-0.808	-0.880	-0.478	-0.340	-0.686	-0.742
分散 [cm]	0.791	1.902	1.848	2.803	2.170	1.556
12cm						
平均 [cm]	-0.354	-0.554	0.144	0.258	-0.714	-0.182
分散 [cm]	1.147	1.829	2.332	2.367	1.944	3.220
19cm						
平均 [cm]	0.040	0.038	0.648	0.640	-0.444	-0.386
分散 [cm]	2.258	1.385	3.561	4.062	2.507	4.791
26cm						
平均 [cm]	0.472	0.646	1.144	1.364	-0.506	-0.416
分散 [cm]	1.687	2.969	5.007	4.578	6.338	9.134

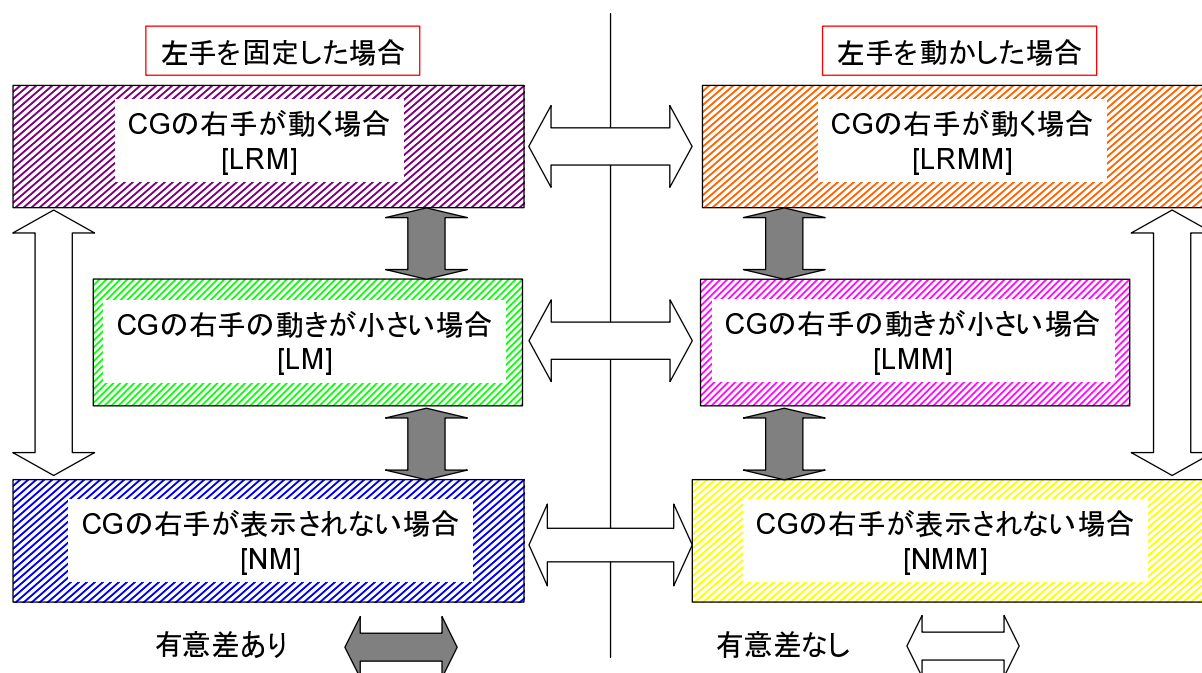


図 6.5 提案システム検証実験より算出した有意差

6.5. 考察

まず、図 6.3, 6.4 において、目標位置が被験者から遠くなるほど手を置く位置が目標位置より手前になっていることがわかった。これは、4.5 節で述べたディスプレイを見下ろした場合の傾向と同一である。見下ろす姿勢になる場合、このような傾向が現れると推測できる。

また、左手を固定させた場合、移動させた場合のどちらにおいても、左手の動きを反映しているが CG の右手の移動量が少ない試行を行った場合に被験者の手を置く位置に影響があった。右手の動きを追従している場合、被験者は提示された CG により右手の位置と目標位置との比較を行うことが可能であり、右手の CG が描画されない場合、被験者は視覚に影響されることなく右手を目標位置に置くことが可能である。しかし、右手が被験者の予想と異なる形で提示された場合、被験者は右手の位置を確認することができず、また視覚に影響されずに目標位置に右手を置くこともできない。このため、左手の動きを反映しているが CG の右

手の移動量が少ない試行を行った場合に被験者の手を置く位置に最も影響があったと考えられる。

またCGの右手の移動量が少ない試行を行った場合において、被験者の右手とCGの右手の初期位置は同じであった。しかし、被験者が右手を動かしたとしてもCGの右手は被験者の予想ほど追従しない。初期位置は同じ位置にあるが、その後の動作が一致しないため、視覚に影響があったと考えられる。これらのことから、幻肢患者に対して患者の肢体と思えない提示を行うのではなく、患者の肢体と思えるが予想通りの動作をしない、という提示を行うことが効果が高いと考えられる。

本実験では被験者の位置感覚に対し、被験者の考えている腕の位置と異なる位置に腕を提示した場合に最も視覚刺激を与えるという結果を得た。このため、今後幻肢のリハビリテーションシステムを確立する上で、健常肢の動きをただ反映させるだけでなく、移動量を変更するような変更を加えることでより一層の影響を幻肢患者に与えることができるのではないかと推測できる。

第7章 提案システムに関する考察

3.1 節にて幻肢のリハビリテーションシステムを構築する上で必要な条件として

- 拘束感がない
- 幻肢の形状の自由な設定が可能
- 多くの部位への対応が可能

という要素を挙げた。

本システムでは、簡易にマーカーを装着することで、肢体の位置や角度をカメラにより取得し、CGの肢体をディスプレイ上に提示する、拘束感が少ないシステムを構築した。しかし、カメラによりマーカーを取得する必要があるため、常にマーカーがカメラに映るように動かなければならないという問題があった。問題を解決するため、カメラを複数台設置し、マーカーの位置や角度を常に取得するということが考えられる。

本システムでは腕形状にのみ条件を限定し、健常者に対してのみの実験を想定したため、幻肢の形状の変化や多くの部位への対応は行わなかった。ただし、各部位のCGモデルを用意しておくことで多くの部位への対応は可能であり、更に指や手など各パーツのCGモデルを用意しておくことで、図2.1のII型のような遊離型やIV型の痕跡型やV型の断端陥入型に対応することが可能であると考えられる。更に、III型のように切断以前の状態と肢体の長さが異なる場合でも、CGの長さや大きさを変更することは容易であるため、対応することが可能であると考えられる。

次に、CGの描画に関して考察を行う。患者自身が提示されたCGを見て患者自身の肢体のように感じるために、ディスプレイの解像度の問題がある。鏡はディスプレイに比べ、高解像度である。解像度が劣るディスプレイを用いたこと

で、患者が CG を患者自身の肢体のように感じない可能性がある。鏡や CG による視覚刺激の影響を検証した結果、ディスプレイを用いても視覚刺激を与えることが可能であるという結果を得た。実験で用いたディスプレイの解像度は 1024[pixel]×768[pixel] であり、一般的なディスプレイを用いても患者に CG を患者自身の肢体のように感じさせることが可能であると考えられる。

また、患者が CG の肢体を自身の肢体のように感じるには、CG のモデルのリアリティも重要であると考えられる。本システムでは図 4.6 に示した CG を用いたが、健常者の位置感覚に影響を与えることが可能であった。このことから本システムで用いた程度の CG のモデルのリアリティでも十分であることが考えられる。今後の課題として、CG のモデルのリアリティが変わることで視覚刺激による影響に変化があるか検証することが考えられる。

幻肢のリハビリテーションシステムとして、本システムでは CG の腕の位置や角度の表示を行うことが可能であった。しかし、リハビリテーションシステムとして活躍するために指などの細かい動作の提示も必要であると考えられる。指の細かい動作を計測するための手法として、データグローブにより CG へと反映させる手法 [39] や表面筋電図を用いた手法 [40] が挙げられる。幻肢のリハビリテーションを行う上で拘束感のないシステムが望まれるため、本システムで指の動作を計測するにはカメラを用いることがよいと考えられる。カメラを用いて指の動作を計測することで、より幅広い幻肢のリハビリテーションシステムが構築されると予想される。

第8章 結論

本論文では，CGの両腕を提示することによる幻肢リハビリテーションシステムの提案を行い，実装を行った．

まず，幻肢リハビリテーションの実装の前に，CGを用いた肢体の提示によって体性感覚に影響を与えることが可能であるか検証を行った．鏡やカメラ画像とCGを比較し，体性感覚の中でも特に位置感覚に影響を与えることが可能であるか検証を行い，CGを用いた場合でも体性感覚に影響を与えられるという結果を得た．このことから，CGを用いた場合でも幻肢のリハビリテーションを行う上で影響を与えられるという結論を得た．

CGにより体性感覚に影響を与えられるという結果より，CGを用いたリハビリテーションシステムの実装を行った．被験者の腕の位置や角度の情報を被験者が装着したマーカーをカメラで撮影することにより取得し，被験者の腕上部のディスプレイ上にCGの両腕の提示を行った．

幻肢のリハビリテーションに適応可能であるか，CGの腕が幻肢であると想定した腕に対して完全に追従した場合，CGの腕の移動量が少ない場合，CGの腕が見えない場合を比較する実験を行い，CGの腕と被験者自身の腕の動きが異なる場合に被験者の位置感覚に最も影響があるという結果を得た．このため，幻肢患者のリハビリテーションとして本システムを用いる際にも，患者にCGを自身の肢体であると認識させた上で，患者の想像している肢体の動きと異なる肢体の動きの提示を行うことで，効果のあるリハビリテーションが行えると考えられる．

本システムは，幻肢に悩まされる患者のためのリハビリテーションシステムとして大きな助けになると期待できる．今後は，指など細かい動作の計測を行いCGに反映させることで，より幅広く幻肢のリハビリテーションが行えるシステムを構築することが課題となる．

謝辞

本研究の機会や環境を与えて下さるだけでなく、数々の貴重な御指導，御助言を与えて下さいました情報科学研究科像情報処理学講座千原國宏教授に心より御礼申し上げます。

副指導教官として，本研究にとって数々の有意義な御助言を与えて下さいました情報科学研究科生命機能計測学講座湊小太郎教授に深く感謝致します。

副指導教官として，研究全般にわたって多く御指導，御鞭撻を与えて下さいました情報科学研究科像情報処理学講座眞鍋佳嗣准教授，池田聖助教に心より御礼申し上げます。

研究を進めるにあたり，医師の視点から数多くの御助言，御指導を与えて下さいました奈良県立医科大学諸井慶七郎医員に心より御礼申し上げます。

ミーティングにおいて数多くの有用な情報と貴重な御助言を与えて下さいました情報科学研究科像情報処理学講座安室喜弘元助教（現関西大学環境都市工学部情報システム工学科准教授）に厚く御礼申し上げます。研究全般にわたって様々な面での多くの御指導を頂き，本論文の執筆にあたって，内容の推敲と多くの御助言を頂きました情報科学研究科像情報処理学講座井村誠孝助教に心より深く感謝申し上げます。研究室での研究活動や発表の際，数多くの有益な御助言をいただきました情報科学研究科像情報処理学講座坂田宗之元特任助教（現東京都老人総合研究所ポジトロン医学研究施設所属）に深く御礼申し上げます。

研究室内での生活において温かい心配りをして頂いた情報科学研究科像情報処理学講座山田真絵秘書に感謝致します。

研究活動や日常生活において，大変お世話になりました情報科学研究科像情報処理学講座博士後期課程，博士前期課程の皆様にも深く感謝致します。

最後に，様々な面で私を支援してくれた両親に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] V. S. Ramachandran, S Blakeslee: “脳の中の幽霊” , 角川書店 (1998)
- [2] C. S. McCabe, et al.: “Simulating Sensory-Motor Incongruence in Healthy Volunteers: Implications for a Cortical Model of Pain” , Rheumatology, vol.44 no.4, pp. 509–516 (2005)
- [3] R. Melzack: “Phantom Limbs and The Concept of a Neuromatrix” , Trends in Neuroscience, vol.13, pp. 88–92 (1990)
- [4] 大塚哲也: “四肢切断による痛み . 痛み-基礎と臨床” , 朝倉書店 (1980)
- [5] S. W. Mitchell: “Phantom Limbs” , Lippincott’s Magazine for Popular Literature and Science, vol.8, pp. 563–569 (1871)
- [6] 石島武一: “幻肢痛 . 痛みの神経科学” , メジカルビュー社, pp. 109–116 (1997)
- [7] H Flor: “Phantom-Limb Pain: Characteristics, Causes, and Treatment” , Lancet Neurology, vol.1, pp. 182–189 (2002)
- [8] W. Penfield, T Rasmussen : “The Cerebral Cortex of Man. A Clinical Study of Localization of Function” , The Quarterly Review of Biology, vol.27 no.1, pp. 108–109 (1951)
- [9] T. P. Pons, et al. : “Massive Cortical Reorganization after Sensory Deafferentation in Adult Macaques” , Science, vol.252, pp. 1857–1860 (1991)
- [10] J. B. Thiebaut, et al. : “Techniques de Neurostimulation et Douleur Chronique” , Evaluation et Traitement de La Douleur 2003, pp. 143-160 (2003)

- [11] K. D. Nielsen, et al. : “Phantom Limb Pain. Treatment with Dorsal Column Stimulation”, *Journal of Neurosurgery*, vol.42, pp. 301–307 (1975)
- [12] J. U. Kranick, et al. : “Pain Reduction in Amputees by Long-Term Spinal Cord Stimulation. Long-Term Follow-up Study over 5 Years”, *Journal of Neurosurgery*, vol.52, pp. 346–350 (1980)
- [13] Y. Katayama, et al. : “Motor Cortex Stimulation for Phantom Limb Pain: Comprehensive Therapy with Spinal Cord and Thalamic Stimulation”, *Stereotactic and Functional Neurosurgery* 2001, vol.77, pp. 159–162 (2001)
- [14] J. Miles, S Lipton: “Phantom Limb Pain Treated by Electrical Stimulation”, *Pain*, vol.5, pp. 373–382 (1978)
- [15] F. A. Lenz, et al. : “Reorganization of Sensory Modalities Evoked by Microstimulation in Region of the Thalamic Principal Sensory Nucleus in Patients with Pain Due to Nervous System Injury”, *Journal of Comparative Neurology*, vol.399, pp. 125–138 (1998)
- [16] G. J. Mazars: “Intermittent Stimulation of Nucleus Ventralis Posterolateralis for Intractable pain”, *Surgical Neurology*, vol.4, pp. 93–95 (1975)
- [17] G. J. Mazars, et al. : “Comparative Study of Electrical Stimulation of Posterior Thalamic Nuclei, Periaqueductal Gray, and Man”, *Advances in Pain Research and Therapy*, vol.3, pp. 541–546 (1979)
- [18] R. M. Levy, et al. : “Treatment of Chronic Pain by Deep Brain Stimulation. Long Term Follow-up and Review of the Literature”, *Neurosurgery*, vol.21, pp. 885–893 (1987)
- [19] Y. Saitoh, et al. : “Motor Cortex Stimulation for Phantom Limb Pain”, *Lancet Neurology*, vol.353, p. 212 (1999)

- [20] D. Carroll, et al. : “Motor Cortex Stimulation for Neuropathic Pain. A Preliminary Study of 10 Cases”, *Pain*, vol.84, pp. 431–437 (2000)
- [21] 大島秀規, 片山容一 : “幻肢痛に対する神経刺激療法”, *痛みと臨床*, vol.7 no.1, pp. 8–17 (2007)
- [22] L. Manchikanti, V Singh: “Managing Phantom Pain”, *Pain Physician Journal*, vol.7, pp. 365–375 (2004)
- [23] J. Halbert, et al.: “Evidence for Optimal Management of Acute and Chronic Phantom Pain”, *Clinic Journal of Pain*, vol.18, pp. 84–92 (2002)
- [24] F. Elliott, et al.: “Carbamazepine for Phantom Limb Phenomena”, *The New England Journal of Medicine*, vol.295, pp. 678 (1976)
- [25] L. R. Robinson, et al.: “Trial of Amitriptyline for Relief of Pain in Amputees”, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol.85, pp. 1–6 (2004)
- [26] D. Nico, et al.: “Left and Right Hand Recognition in Upper Limb Amputees”, *Brain*, vol.127, pp. 120–132 (2004)
- [27] J. Schwoebel, et al.: “Pain and the Body Schema: Effects of Pain Severity on Mental Representations of Movement”, *Neurology*, vol.59, pp. 775–777 (2002)
- [28] 奈良博之, 小坂井敦, 井野秀一, 田中敏明, 伊福部達: “視聴覚刺激を用いた平衡機能訓練装置のための基礎的研究”, *日本機械学会ロボティクスメカトロニクス'99 講演会講演論文集*, CD-ROM(1999)
- [29] 原正之, 樋口貴広, 黄健, 藪田哲郎: “視覚的奥行き情報が大きさ重さ錯覚に及ぼす影響”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006 (ROBOMECH'06)*, CD-ROM(2006)

- [30] K. O’Neil , et al. : “An Investigation into the Performance of Augment Reality for Use in the Treatment of Phantom Limb Pain in Amputees”, Proceeding of Human-Computer Interaction International 2003, vol.4, pp.236-240(2003)
- [31] R. Hobbs: “Virtual Reality Aided Visualisation Therapy for Reduction of Phantom Limb Pain”; <http://www.inter-disciplinary.net/> (2003)
- [32] 飯田 拓, 井村誠孝, 池田聖, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: “幻肢リハビリテーションのための鏡とCGによる視覚刺激効果の比較”; 日本バーチャルリアリティ学会 第12回大会 2007 福岡 第12回大会論文抄録集, p.64(2007)
- [33] N. P. Holmes, et al. : “When Mirrors Lie: ‘Visual Capture’ of Arm Position Impairs Reaching Performance”, Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience. 2004 June, pp.193-200(2004)
- [34] H. B. Mann, D. R. Whitney: “On a Test of Whether One of Two Random Variables is Stochastically Larger Than the Other”, Annals of Mathematical Statistics, vol.18, pp.50-60(1947)
- [35] F. Wilcoxon: “WIndividual Comparisons by Ranking Methods”, Biometrics Bulletin, vol.1, pp.80-83(1945)
- [36] H. Kato et al: “Virtual Object Manipulation on a Tabletop AR Environment”, Proceedings International Symposium on Augmented Reality(ISAR 2000), pp.111-119(2000)
- [37] 飯田拓, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏, 諸井慶七郎: “バーチャルミラーを用いた幻肢リハビリテーション”, 第51回システム制御情報学会研究発表講演会 講演論文集, pp.535-536(2007)
- [38] D. Wagner, D. Schmalstieg: “ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices”, Proceedings of 12th Computer Vision Winter Workshop, pp.139-146(2007)

- [39] 山形積治, 山崎則明, 渡邊祐造: “データグローブを利用した3次元CGキャラクター動作へのメディア変換について”, FIT2002 第2回情報科学技術フォーラム, CD-ROM(2002)
- [40] 沼とう子, 井上浩, 小林瞭, 猪又八郎: “福祉機器利用のための筋ジストロフィー患者の指の微小動作計測”, 計測自動制御学会東北支部第203回研究集会, CD-ROM(2002)

付録

A. Wilcoxon の符号付順位和検定

Wilcoxon の符号付順位和検定は以下の手順で行われる。ただし、 n 番目の試行における対応する 2 変数をそれぞれ X_n, Y_n とする。

1. 2 変数での差 $d_n = X_n - Y_n$ をそれぞれ算出する。
2. 算出された d_n について小さい順に順位をつける。
ただし、 $X_n = Y_n$ の場合は順位をつけず、同順位の場合は順位の平均をつける。
3. $X_n \neq Y_n$ の組の数を N とする。
4. $X_n > Y_n$ の組の順位の和 S_1 と、 $X_n < Y_n$ の組の順位の和 S_2 を算出する。
5. S_1 と S_2 における小さい方の値を検定量 T とする。
6. 検定統計量 Z_0 を以下の式により算出する。

$$Z_0 = \frac{|T - N(N+1)/4|}{\sqrt{N(N+1)(2N+1)/24}}$$

7. 有意確率

$$P = Pr\{|Z| \geq Z_0\}$$

とし、 Z_0 の値より付録中の正規分布表 (付録 B) をたどり、有意確率 P を得る。

8. 有意水準を α として検定を行うとすると、

- $P > \alpha$ のとき, 差があるとは言えない (有意差がない)
- $P \leq \alpha$ のとき, 差があると言える (有意差がある)

α は多くの場合 1% か 5% が用いられる .

B. 正規分布表

Z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183

Z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010

正規分布表において、縦軸は算出された Z_0 の値の一の位と小数点第一位であり、横軸は Z_0 の小数点第二位である。