

博士論文

映像が人間の遠隔操作型システムに  
関する移動予測に及ぼす影響の研究

Effects of vision on operator's prediction of  
movement for remote-controlled systems

横浜国立大学大学院  
理工学府  
Yokohama National University  
Graduate School of Engineering Science

河村拓実  
KAWAMURA Takumi

指導教員：藤本康孝 教授

2021年9月

## 要約

### ・背景

外出困難な障害者や高齢者(以下、当事者等と称する)が自律的かつ主体的に現実空間で営まれる社会活動へ参加することの支援は、少子高齢化が深刻な我が国において、当事者等の QOL や健康の増進については社会での活躍に繋がることが期待される重要な課題である。本研究の最終目標は、他律的な他者の支援でなく、自律的な社会参加手段となり得る遠隔操作型のシステムを介した体験の質を向上し、遠隔参加でも十分に自己実現に繋がる可能性があるとして当事者等自身が気づけること、もって、実際の外出体験と並び立つ支援の選択肢として社会実装されることである。

### ・目的

このうち本稿の目的は、当事者等の支援に重要なユーザビリティと感性的品質の双方から遠隔参加の質を向上するために遠隔移動体験に着目し、移動に関する操作者の予測の正確性を高め、より高い思い通りの移動操作性を得る(本稿では「より少ないやり直しあるいは操作時間でより良い移動の精度を得る」ことと定義する)ための基礎的検討およびシステム要件定義である。

### ・行った事柄

遠隔操作型の小型移動ロボットおよび視覚的な認知インタフェースを用い、操作者としてのユーザに対して遠隔のロボット側空間からの情報を複数の映像表現の条件で提示した。これに応じて出力されるロボットの移動に関する操作結果を計測し、映像表現の基本的な影響を整理した。

### ・手法

評価指標として、定量的な位置の予測誤差(移動のターゲット位置とロボットの停止位置との誤差)の指標を導入した。ターゲット位置とロボットの自己位置との同時視認や操作結果の修正等を妨げるとともに、他の誤差要因をなるべく小さくするように計測条件を工夫した。これにより、本稿では計測される位置の予測誤差がターゲット位置の認知と予測的な自己位置の認知との主観的な誤差に十分近似されるようにした。

### ・結果

大きく3通りの映像表現に関する計測を実施し、以下の結果を得た。(1)映像を通じて認知されるスケールが小さいと、正(行き過ぎ)の予測誤差(4章)、逆にスケールが大きいと負の予測誤差(5章)が生じた。(2)予測誤差を正方向に補償できる映像の誇張表現を見出し(4章)、ロボット視点の映像の利点を生かすべく実装によりその応用可能性を示した(5章)。さらに(3)ロボット視点の映像のみでは自己位置が視認できない原理的課題を解消する新しいインタフェースを提案し、予測誤差の低減機能が発揮できること、これが思い通りの移動操作性を向上することを検証した(6章)。

### ・結論

以上の検討を踏まえて思い通りの移動操作性の高い遠隔操作システムの機能要件を提案した。

【A】 現地サイトの自己位置を正確に予測可能な映像提示機能

【A-1】 知覚されるターゲット位置と自己位置との相対的スケールが同等となる映像表現

【B】 予測誤差変動の推定とこれを無意識のうちに補償する機能

【B-1】 映像に応じて適切なオプティック・フローを生じさせる機能

【C】 ロボット視点を用いながらも予測の難易度を低減する機能

【C-1】 注視点のより近傍で奥行き方向のターゲット位置と自己位置とを正確に表現する機能

---

# 目次

---

<b>第1章 序論：本研究の位置づけ</b> .....	<b>1</b>
1.1 概要 .....	1
1.2 研究背景と目的 .....	2
1.3 論文の構成 .....	19
1.4 結言 .....	21
<b>第2章 関連研究</b> .....	<b>22</b>
2.1 概要 .....	22
2.2 思い通りの移動操作と感性的要素との関連 .....	22
2.4 コンピュータモデルの工学的表現の検討 .....	31
2.5 結言 .....	44
<b>第3章 研究手法</b> .....	<b>45</b>
3.1 概要 .....	45
3.2 予測を用いた思い通りの移動操作性の向上の方法論 .....	45
3.3 位置の予測誤差の導入 .....	49
3.4 位置の予測誤差の計測方法 .....	51
3.5 結言 .....	52
<b>第4章 映像表現に起因する予測誤差の基礎検討</b> .....	<b>53</b>
4.1 概要 .....	53
4.2 緒言 .....	53
4.3 実験方法 .....	57
4.4 実験結果 .....	67
4.5 映像表現が予測誤差に及ぼす影響の解析および考察 .....	68
4.6 オプティック・フローの影響の解析および考察 .....	75
4.7 結言 .....	82
<b>第5章 予測誤差補償手法の基礎検討</b> .....	<b>84</b>
5.1 概要 .....	84
5.2 緒言 .....	84

5.3	実験方法	88
5.4	実験結果	97
5.5	予測誤差の偏りとオプティック・フローによる補償可能性の考察	98
5.6	結言	110
<b>第6章</b>	<b>予測支援手法の検討</b>	<b>112</b>
6.1	概要	112
6.2	緒言	112
6.3	提案手法	116
6.4	提案手法の特徴	118
6.5	機能要件の満足の確認	127
6.6	予測支援が小型ロボットの思い通りの移動操作性に及ぼす影響	132
6.7	予測支援が建設機械の思い通りの移動操作性に及ぼす影響	136
6.8	予測支援による思い通りの移動操作性向上に関する検証および考察	139
6.9	実用面での課題の整理	149
6.10	さらなる予測の支援に関する考察	155
6.11	結言	167
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>169</b>
7.1	概要	169
7.2	本稿の研究で明らかになった事項	169
7.3	【機能要件 A】 現地サイトの自己位置を正確に予測可能な映像提示機能	170
7.4	【機能要件 B】 予測誤差変動の推定とこれを無意識のうちに補償する機能	171
7.5	【機能要件 C】 ロボット視点をを用いながらも予測の難易度を低減する機能	172
7.6	結言	173
	参考文献	175
	発表文献	185
	謝辞	186



---

# 第1章

## 序論：本研究の位置づけ

---

### 1.1 概要

本章では、研究背景および最終的な目標、そのうちの本稿の研究の位置づけ、目的および構成について述べる。

外出が困難な障害者や高齢者等(当事者等)の自律的かつ主体的な社会参加を支援することは、少子高齢化の進展が深刻な我が国において、当事者等の QOL や健康の増進ひいては社会での活躍に繋がるのが期待され、重要な課題である。これを受けて研究の最終的な目標は、他律的な他者の支援ではなく、自律的・主体的な社会参加の手段となりうる遠隔操作型のシステムを用いた遠隔からの社会活動への参加(遠隔参加)でも、自分がやりたいことを実現できる(自己実現に繋がる)と当事者等自身が気づくことができ、もって遠隔参加を実際の外出と並び立つ選択肢として確立させることである。この目標において本稿の研究は、遠隔参加の体験の質を向上するアプローチをとる。ICT を用いた従来の遠隔コミュニケーション体験を超えた新たな体験を創造すべく、遠隔操作型の移動システムにおいてユーザビリティと感性的品質の向上の双方に関連する重要な要素である思い通りの移動操作性の向上を「より少ないやり直しあるいは操作時間でより良い移動の精度を得る」ことと定義して、この向上のためにシステムの移動に関する予測の正確性について調べることを目的とする。また、本稿の研究の位置づけをより明確にするために、下記のように射程を明確にする。

【射程 1】 外出が困難な当事者等を支援対象とする。

【射程 2】 現実空間で現に営まれている社会活動への参加を支援対象とする。

【射程 3】 遠隔操作型の移動システムを研究対象とする。

【射程 4】 思い通りの遠隔移動体験を目指す。以下、本稿では遠隔移動体験を、現地サイトでの移動型ロボットそのものの移動や、ロボットの手先(マニピュレータ)等の相対的な移動を含むものと定める。

【射程 5】 行為の自動化を最小限とする。

【射程 6】 思い通りの移動操作性を向上するため、現在の操作に対するシステムの移動に関する予測の正確性を調べる。

【射程 7】 なるべく少ないモダリティ情報入力から予測の特性を調べる。

## 1.2 研究背景と目的

### 1.2.1 研究の最終目標(ゴール)

外出に困難のある障害者や高齢者等(以下、単に当事者等と称する)の自律的かつ主体的な社会参加を果たすための支援は、当事者等の生活の質(Quality of life : QOL)や健康の増進、自己実現や社会での活躍の実現のために今後ますます重用になると考えられる。

高齢者や障害者等の外出を妨げる障壁(バリア)は多い。障壁は物理的なものに限られず、他に制度的なもの、文化・情動的なもの、意識上のものがあるといわれており(総理府障害者対策推進本部, 1993)、複雑な課題となっている。

これらの障壁は、当事者等が自律かつ主体的に社会活動へ参加する機会の損失を招いている。ここで参加(participation)はICF(国際生活機能分類, International Classification of Functioning, Disability and Health)の日本語版において、生活・人生場面(life situation)への関わりであり、社会的な観点から捉えた生活機能、と定義されている(厚生労働省大臣官房統計情報部, 2007)。社会参加を支援することはQOLを向上させ(今井, 2019)、医学的にも参加の機会損失により身体的・精神的な健康問題が引き起こされると考えられており、近年では社会参加の支援が認知症の改善に影響するとのエビデンスが得られている(Saito et al., 2018)。社会的あるいは福祉的な観点からは、我が国は近い将来、深刻な少子高齢化社会になることが確実視されている。この状況下において、社会参加の支援は当事者等の社会的孤立を防ぎ、個性を生かすことによる生涯を通じた生きがいの獲得、ひいては自己実現に資する重要な意義をもつ(日本学術会議社会学委員会社会福祉学分会, 2018)。厚生労働省は、ヒトのどのライフステージにおいても希望に応じて働き、学び、社会参加できることがそれらの担い手を増加させ、もって世帯所得の上昇等に繋がること、および要介護、障害、難病等の一人ひとりが抱える様々な事情に応じて必要な支援を受けながら就労や社会参加の機会を得て、尊厳が確保された生活が重要であることを指摘している(2020)。したがって社会参加の機会損失は当事者等の活躍の場の選択肢を狭めることを意味しており、これを防ぐことは社会的・福祉的、ひいては労働力の増加という経済的な面からも重要な課題と捉えられる。前述したICFが規定する個人の生活機能モデルでは、社会参加機会の制約そのものを障害と定めており、この定義も社会参加の重要性を反映したものと捉えられる。

ICFのモデルでは同時に、参加の制約を環境因子でカバーできれば、参加の障害を克服できることが表現されている。ここでICFのモデルは、個人の健康状態と背景因子(環境因子・個人因子)、および生活機能を構成する要素である心身機能・身体構造、活動、参加の各々の相互作用で表現され、そのうち心身機能・身体構造、活動、参加が健康状態等で制約された状態が障害に相当する。環境因子には、少なくとも物的環境(福祉用具、建築等)、人的環境(家族、友人、介護者等)、社会環境(社会福祉制度、サービス等)が含まれる。先端テクノロジーもこれに含まれ、工学的な環境因子のコントロールにより、社会参加の障害を取り除くことに寄与できる。

本研究の最終的な目的は、工学的な環境因子のコントロールにより当事者等の社会参加に関わる制約を取り払い、自律的で主体的な社会参加の機会損失を予防し、もって当事者等の社会参加支援に貢献することである。以下、本稿でははじめに、図1.1を参照しながらこれを最終的な目標とする本稿の研究の位置づけ(射程)を明らかにしてゆく。

はじめに、本研究の支援対象と、支援手法を明確にする。

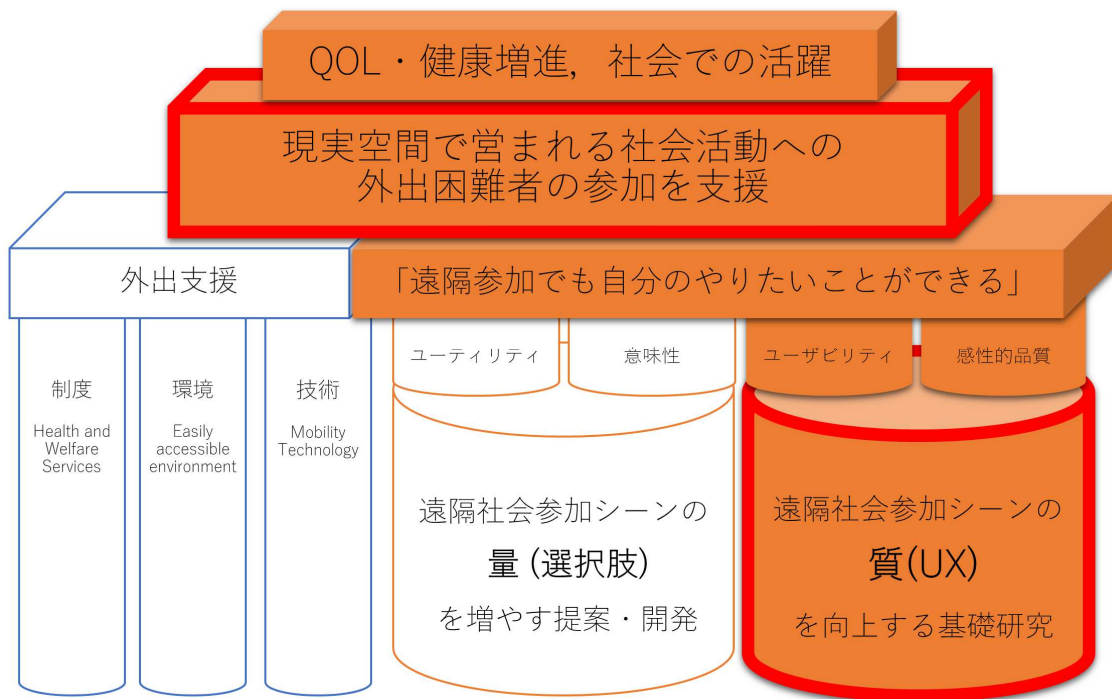


Fig. 1.1 本稿の研究の位置づけ

**【本稿の射程 1】 外出が困難な当事者等を支援対象とする。**

本研究が支援対象とする社会参加の主体の架空人物像(ペルソナ)は、外出が困難な当事者等と定める。重度の肢体不自由の障害当事者、高齢者等を含み、重度の肢体不自由の障害当事者には典型的には ASL、高位頸椎損傷、筋ジストロフィー等の重度の四肢麻痺の患者を含む。

**【本稿の射程 2】 現実空間で現に営まれている社会活動への参加を支援対象とする。**

本研究が支援対象とする社会参加の客体(活動)は、現実空間で現に営まれている社会活動である。

現在のところ、現実世界で営まれる物理的実体を伴った社会活動への当事者等の参加は、他者の支援なしでは非常に困難であり、リスクも高く、本稿の研究ではこれに起因する自律的で主体的な社会参加機会の損失に問題意識を持っている。遠隔地への移動の物理的障壁の解消や、公共交通機関とそれにまつわるサービスの充実、移動支援等を受けるための社会福祉法制上の多様な仕組みの整備も進む。近年では例えば公共交通機関から目的地までのラストワンマイルを担うパーソナルモビリティ(モビリティ・アズ・ア・サービス : MaaS)やそのサービスの仕組みの開発が行われている。当事者等の支援を念頭に車いす型のモビリティ (WHILL Inc., 2021)も採用されている。しかしながらバリアやリスクの完全な除去・回避は現実的には困難な課題であり、当事者等が他者の支援なしに外出するには相当のリスクを伴う。加えて重度の当事者等には医療的なケアも必要である。これらを小さくない要因として、当事者等が現実空間で営まれている社会活動に参加するには支援者(家族やヘルパー等の介助者)の付き添いが現実的には必須となっている。

しかしながら他者の支援を前提とする手段は、他者の都合等の他律的要因、経済的要因等が影

響するため、根本的に自らのコントロールの困難な(アウト・オブ・コントロールな)仕組みである。他に当事者等の心理的・精神的負担も考えられる。他者の支援を前提とする社会参加手段をとるには家族を含む他者の都合を抑える必要があるが、この依頼や都合の調整や段取りに負担を覚える当事者もいる。加えて、今後ますます少子高齢化が進展し人的リソースは深刻に減少しており、都合の調整が困難になったり、順番待ちになってしまったり、支援者を選べないといった繊細な心理的な問題が生じたりし、これらは社会参加の動機を削ぐ小さくない要因となる。

すなわち当事者等にとって、現実空間で営まれている社会活動への参加するための当事者主導型の(アンダー・コントロールな)手段の選択肢が存在していないことは重要な課題である。これによって、当事者等の社会参加の意欲に反し、その機会損失が生じていると推定される。

これに対して近年、ICT等の発達、社会的なDX(デジタル・トランスフォーメーション)の機運の高まりにより、コミュニケーションを主目的とする社会活動であれば、バーチャルな空間(典型的にはオンラインゲーム等の仮想空間)を超えて、現実空間で営まれている活動に外出なしで参加できるようになってきた。社会参加に際して現地までの移動がなくなるメリットは当事者にとって非常に大きい。また、遠隔でのコミュニケーションを支える技術的手段はスマートフォンをはじめインフラとして確立しており、当事者等にとってアンダー・コントロールな社会参加手段となっている。

本研究では、上記のような単なる遠隔コミュニケーションの範疇を超えた自律的・主体的な当事者等主導の遠隔参加体験を創出すべく、未だその手段の選択肢が存在しない身近な現実空間での些細な活動への参加支援を目指す。

### 1.2.2 遠隔操作型のシステム

射程2の実現には身体性を有するICTデバイスが必要である。すなわち、本稿ではさらに下記の射程3を明確にしておく。

#### 【本稿の射程3】遠隔操作型の移動システムを研究対象とする。

ICTシステムに物理的身体性を備えたロボットやデバイスを組み込んだIRT(Information and Robotics Technology)は、移動に困難を覚えており、他者のサポートを必要とし、そうでなければ社会的に孤立してしまいかねない当事者等の遠隔参加支援に有効に活用できる。上述のように単ある遠隔コミュニケーション体験を超えた自律的・主体的な遠隔参加体験の選択肢を新たに追加できれば、社会参加の選択肢が限定的である当事者等に特に大きな利得があると考えられる。ICTと同じくアンダー・コントロールな遠隔操作型の社会参加手段となり得るIRTは、技術的には十分に運用可能な水準にあるはずである。それにもかかわらずIRTの社会実装が進んでいる分野は、手術や、災害環境や、建築現場等、極めて専門的な活動を要する現場に限られる。福祉分野での社会実装が進まない理由としては、主にロボットのハードウェアに関するインフラ面の問題や、安全やスキル等の運用面の問題等があげられる。

本稿で重要視する遠隔操作型の移動システムの社会実装上の小さくない課題の一つは、当事者等やミドルユーザ(ヘルパーやセラピスト等)が「遠隔参加(リモート外出)でも自分のやりたいことができる(自己実現に繋がる)」という認識を持っておらず、恒常的に使用したいという動機(ニーズ)が顕在化されていないことである。これをIRT導入のコストやリスク等と見合うように顕在

化させることが社会実装上、非常に重要になると考えている。社会実装は、独立研究開発法人科学技術振興機構が最初に提案した用語といわれる。彼らは社会実装を、少なくともステークホルダーを自治体・企業・学校等の外部協力者とするものであって、技術等が実験を行った地域(部分的定着)およびそれ以外(波及)で受け入れられていること、と定義している(茅, 奥和田, 2015)。

### 1.2.3 遠隔操作型のシステムの課題と2アプローチ

当事者等に「遠隔参加でも自分のやりたいことができる」と気付いてもらうためには、図 1.1 に示すように少なくとも量と質の2つのアプローチが考えられる。

第一に、遠隔参加シーンを提案・実現して、その量(選択肢)を増やしていくアプローチ(以下、単に量的アプローチと称する)が考えられる。量的アプローチは、主に民間企業で当事者等の個人のニーズに基づいた社会実装が精力的に推進されているように見受けられる。当事者等の自己実現のための具体的なニーズは当事者等自身の経験や思いに応じて多種多様のため、これらを支援する遠隔操作型のシステムも自ずと多種多様となる。したがってオーダーメイドの開発体制が求められ、社会実装に向けてはコスト・ベネフィットの観点から必ずしも効果的ではない可能性もある。より本質的で汎用的な支援システムの開発は今後の重要な課題となると考えられ、本稿の研究と並行して検討を進めている。この検討成果の一部は、6章の検証のモデルとなっている。

第二に、遠隔参加シーンの体験の質を向上していくアプローチ(以下、単に質的アプローチと称する)が考えられ、本稿はこの立場で検討を進める。質的アプローチは既存の遠隔参加体験の魅力を底上げするアプローチである。後述するが、本稿ではこれらのアプローチをユーザエクスペリエンス(UX)の考え方を援用して整理する。

当事者等の日常遣いが可能で、当事者等の想像よりも質の高い遠隔参加体験ができる可能性があることを、当事者等に実感をもって気付いてもらうことが、当事者等自らのやりがいや生きがい、達成感や充実感等に繋がるような新たな自己実現の可能性の認識に資するはずである。現在のところ基本的な遠隔参加は技術的に十分確立していると考えられるが、当事者等のニーズに十分に訴求できているとは評価できない。その体験に、「遠隔参加でも自分のやりたいことができる」質があるということに当事者等に実感をもって気付いてもらえれば、自身が認識していなかった潜在的なニーズを顕在化(ウォンツとも称される)でき、より多くの社会参加の動機づけとなる可能性が考えられる。さらには、システムの運用の洗練化や、必要な機能の明確化等のユーザ主導の活動の多様化が期待できるようになる。遠隔操作型のロボットを活用した遠隔参加で訴求すべき特徴は、スマートフォン等の汎用的 ICT デバイスや固定のカメラを用いたビデオ会議とは異なり、現実空間(以下、現地サイト、ロボット側等と称する場合がある)での他の参加者との物理的実体を通じた交流を伴う体験を提供できる点である。射程 2 で示したように、現地サイトで現に催されている社会活動に、遠隔の自宅(以下、遠隔サイト、当事者等側等と称する場合がある)から当事者等が既存の ICT デバイスを介して一人で遠隔参加する場面を考える。重要な想定は、現地での参加者の中に、一人だけ(あるいは少数派が)遠隔参加をすることである。当事者等との議論では、このような体験は他の参加者の社会活動を(スマートフォンの)窓越しに眺めているだけであったとか、現地の参加者同士の会話を遮ってしまったとか、しばしばネガティブに表現される場合があった。このような問題は、遠隔から存在感を發揮できない **Social presence**(社会的存在感)の問題(Iwasaki et al., 2019) (小杉, 2015)、現地の対象の存在感を抱けない **Telepresence** の問題(村上

他, 2010), 作業の一体感を抱けない Connectedness(つながり感)の問題(IJsselsteijn et al., 2003)等と関連していると考えられるが, IRT は少なからずこれらの課題の解消に寄与するものと考えられ, 例えば, Social presence 向上の効果が検証されている(田中他, 2017).

#### 1.2.4 遠隔移動体験

様々な体験の実現が望まれる中で, 本稿ではその基本となると考えられる移動体験の向上を志向することで幅広く当事者等の社会参加支援に貢献することを目指す。

**【本稿の射程 4】遠隔移動体験に着目する。**以下, 本稿では遠隔移動体験を, 現地サイトでの移動型ロボットそのものの移動や, ロボットの手先(マニピュレータ)等の相対的な移動を含むものと定める。

遠隔移動体験の質の向上はスムーズな移動体験の実現に寄与し, 当事者等に少なからず遠隔参加体験の魅力を示すことができる可能性がある。例えば自動車の運転が趣味として確立しているように, 遠隔サイトからのスムーズな移動体験の実現そのものが当事者等に訴求できる魅力となる可能性がある。

これに加えて移動は, それに付随するコミュニケーション体験や, 景色を観察したりする体験, あるいはロボットを所望の場所に移動させることで実現が見込めるようになる多様な活動体験の実現の基礎となる活動である。したがって, 遠隔移動体験の質を向上することは多くの遠隔参加の質の向上につながると想定される。以下, 具体的に述べる。

まず射程 2 で明確にしたように, 遠隔操作型の移動システムを通じて, 現地サイトに実在する他の参加者との能動的なインタラクションのある社会参加の手段の選択肢の確立は重要な課題であるが, この場合, 参加者と移動システムとの衝突は安全上, 必ず避けなければならない。しかしながら, 少なくとも遠隔操作型の移動システムには, 現地サイトの状況の認知と, 操作結果の反映との間に通信遅延があり, このような要因に起因して操作者である当事者等は思い通りの位置に移動システムを停止させたり, 十分に回避移動させたりすることができない場合が生じる。また, 主に認知側のインタフェースの問題に起因して, 操作者がこれに気付くことも困難な場合もしばしばある。この場合, 操作者は衝突リスクを必要以上に高く見積もるため, 移動システムの移動は, 細かい停止や慎重な現地サイトの情報の観察を伴うことになる。

この移動システムの挙動は, 頻繁に停止して, 移動速度も遅く, ぎこちないものになる。このようなぎこちない移動体験の質は高いとは言えず, 体験としては途切れのないスムーズな移動が望ましい。また, 現地サイトの参加者から見ても, このようなぎこちない挙動を見せる移動システムに対しては注意を割かざるを得なくなり, 空間を共にするシステムとしての魅力は感じられない。

次に, 遠隔移動体験は他の様々な体験の基礎となり, 移動しながら体験したい活動も多い。例えば, 現地サイトの参加者と会話しながらともに共通の目的地に移動したり, 現地サイトの参加者に声をかけ呼び止めるとともにその対面に移動したり等, 「移動+コミュニケーション」の体験はこれまでの ICT 体験には見受けられないものであり, 十分に想定される。このとき遠隔移動体験の質が低く, 移動操作に際し常に細かな停止や慎重な操作が要求されるようであれば, コミュニケーションにリソースを割くことが困難になる。このことは, 注意資源量の配分概念として

も知られている。また例えば、現地サイトの参加者のパーソナルスペースに侵入してしまい、これに素早く気付くこともできず、対面や固定カメラを介したコミュニケーションでは生じ得ないコミュニケーション上の新たな質的問題が発生することに繋がる懸念もされている(例えば(青木他, 2011))。また例えば、移動しながらの景色の観察(典型的には散歩)のような「移動+景色の鑑賞」の体験も、後述する遠隔美術鑑賞の試みのように古くから IRT の目的となっており、十分に想定される。このとき遠隔移動体験の質が低く、移動操作に際し常に細かな停止や慎重な操作が要求されるようであれば、同じく景色の鑑賞に集中することはできない。停止してから景色や美術品を鑑賞する体験は、インターネットや本を介して写真を鑑賞するような体験との質的な差異に乏しい。また例えば、移動しながら現地サイトの対象物をピック・プレースする等の簡単な物理作業も遠隔操作型の移動システム(例えば(Yamamoto et al., 2019)のようなモバイルマニピュレータタイプのもの)の目的となっており、「移動+(簡単な)物理的作業」の体験も十分に想定される。遠隔移動体験を基礎として現地サイトの物体との十分な精度での接触が自在に可能になれば、例えばショッピングやごみ拾い、遠隔操作型のロボット同士での散歩体験、さらには産業界での活躍(杉原, 2018)等の実現が期待される。このとき遠隔移動体験の質が低く、移動操作に際し常に細かな停止や慎重な操作が要求されるようであれば、また、思い通りの移動の結果が得られていないことに操作者が容易に気付けないようであれば、簡単な作業であっても失敗し、何度もやり直さなければ実現できない。いずれの体験も魅力的な体験とは言えず、遠隔社会参加の意欲を削ぐ要因となり、遠隔移動体験の課題を解決しない限り自律的で主体的な社会参加の新たな選択肢にはなり得ない。

図 1.2 は広く遠隔参加体験の枠組みの中で、遠隔移動体験の質の向上の貢献を示そうとする概念図であり、遠隔移動体験の例として観光や散歩、美術鑑賞等が、さらに発展した例として現地サイトの参加者とのインタラクション体験が実現する可能性があることを表現している。図 1.2 の横軸はインタラクション情報の多様性・自由度・技術的難易度を示している。

比較対象となるのは図 1.2 の左側領域に配置された完全にバーチャルな(仮想の)環境への参加体験を提供する手段である。これらはプログラムによって書き下されることから明らかなように、サービス提供者の想定範囲内に収まるという意味で限定された(閉環境での)体験である。例えば、e-スポーツは当事者等が社会的に承認される可能性を秘めた魅力的な選択肢になってきた。しかし本稿ではこの体験が事前に何人かによって定められ、表現された仮想的な環境やルールの中での閉じたインタラクションとなることに注意している。

次に ICT を用いると、絶えず変化して誰の想定内にも収まらない現地サイト(開環境)の現実環境とインタラクションできるようになる。遠隔会議等の用途では、図や記号や言語で容易に表現が可能な知識の視聴覚情報を通じたやり取りが主要な目的になるため、インタラクションの制限の影響は深刻な課題にはなっていないようであり、有用な遠隔参加の手段としての活用が進む。ICT 技術ではアクセシビリティ等の十分な配慮がなされており(例えば(Apple Inc., 2021))、既に当事者等の社会参加を支援するツールとして、実際に外出する体験との比較の俎上に十分に乗る選択肢になっていると評価できる。しかしながら感染症の拡大を契機に急速に遠隔会議の社会実装が進む中で、ICT でのコミュニケーション体験には、対面での体験との比較において課題があることも明らかになりつつある。当事者等にとってコミュニケーションは非常に重要な活動であることに疑いはなく、ICT でのコミュニケーション体験の改善も今後の課題であるが、本稿では





Fig. 1.2 遠隔操作型の移動システムの質の向上に関する概念図

コミュニケーション体験は遠隔外出に付随する様々な活動の体験のひとつとして扱い、間接的な改善を進めるものと位置付ける。

文字や図表で表現が容易であり、したがって ICT での伝達が容易な知識は、心理学や認知科学およびこれらの周辺の分野で宣言的知識(declarative knowledge)といわれ、これに対して意識上に内容を想起できず、記号的な表現ができない行為に関する知識は手続き的知識(procedural knowledge)といわれる。分野によっては類似の概念が異なる用語で提唱されており、例えば哲学の分野ではポランニーが暗黙知(身体知、経験知)と顕在知とに分類している(2003)。脳科学の分野では陳述あるいは宣言的、対となる非陳述あるいは非宣言的、という 2 つのラベルで記憶が分類されている(鈴木、藤井、2014)。

この分類は体験の質を捉える上で役立つと思われ、IRT は意識上に内容を想起できず、記号的な表現ができない手続き的知識や非陳述記憶に関する情報を伝達するのに貢献していると考えられる。IRT を用いると、遠隔でのユーザの代理に物理的な身体が付与されること(身体性)に起因して、現地サイトで物理的インタラクションが可能になるためである。動作により手続き的知識に関する情報を伝達できるため、技能の伝達は遠隔操作型のロボットの重要な応用分野となっている(杉原、2018)。身体性に関する議論では、ヒトは外界の環境と相互作用を持つ身体によってはじめて知覚や体験を得ることができ、もって高度な知能を獲得していくことができるとの議論もなされ(Digital Advantage Corp., 2021)、身体性はインタラクション上で重要視されている。身体性の多様な影響の検討は認知科学関連分野で増加傾向にあるようであるが(例えば(岩崎、2004)で言及されている)、モダリティとしては触覚や力覚を含む体性感覚のインタラクション(アクティヴタッチ(岩村、2007))が可能になること、移動機能により能動的な視覚情報の取得(アクティブビジョン(久野、1995)(喜多、1995))が可能になることは本稿の目的において重要である。他にも身体



性は、ロボットが現地側の参加者の視界に入り込むことで操作者の存在を主張できたり、遠隔会議において注意を喚起できたりする(鈴木他, 2010)等, 特に非陳述的な情報を増加させることに寄与している。

また遠隔移動体験は、実際の外出や移動とは異なり、必ずしも多くの身体運動を伴わない。通常、社会参加支援の効果は身体的な運動のトリガーとして、あるいはコミュニケーションを含む地域との社会的な繋がり・役割獲得のトリガーとしての文脈でうたわれることも少なくなく、これらを欠くことはフレイル(健康な状態と要介護状態の中間の状態であり、身体的・認知的機能の低下が見受けられる段階)の要因になることが指摘されている(日本老年医学会, 2014)。

この観点では、遠隔移動体験の要は現地サイトから伝達される五感情報の入力、とりわけ映像を通じた視覚情報になるため、その効果としては主に認知機能に関する生理的な作用や、精神的・心理的な貢献が期待される。関連する効果として、例えば自然とのふれあいが健康増進に繋がるエビデンスが得られ始めている(Meredith et al., 2020)。あるいは融和ケアでの応用(Niki et al., 2019)も見受けられた。本研究の成果を用いれば、擬似的な外出体験と実際の外出体験との間での効果の比較が可能となり、各感覚情報が認知機能への影響のより精密な分析ができると期待され、このエビデンスの検証も今後の重要な課題となる。

なお図 1.2 の縦軸は、システムの社会性を示している。下側の領域ほど、社会的な利益が、上側ほど個人的な利益が想定されることを意味している。またシステムの利益としては、社会参加で得られる達成感や満足感、ひいてはやりがいや生きがいに繋がる自己効力感を想定している。図 1.2 では利益の絶対量を表現しておらず、その属性を個人的か、社会的かで定性的に分類している。遠隔移動体験をはじめ、遠隔外出体験の社会性にかかわる自己効力感の量もまた、今後検証していく必要のある重要な課題と考えられる。

### 1.2.5 遠隔移動体験の現状

遠隔移動体験は古くから提案されているが、未だ遠隔移動体験を提供するシステムの多くは実証テストの段階にあると評価できる。例えば、美術館での遠隔鑑賞体験や、旅行体験、近年ではテレワークへの応用等が期待されているが、これらの用途では、new me (avatar in Inc., 2021)、ROBOT VIEWING システム(Whatever Inc., 2020)が実証テストされていることが確認できた。後者のシステムは図 1.2 に示すように本稿のステークホルダに遠隔鑑賞体験の提供を実現しており重要な事例である。当事者等をユーザとする遠隔参加体験の提供には、オリィ研究所が OriHime (OryLab Inc., 2021)を通じて先駆的な試みを行っており、当事者等にとって意義のある様々な事例が創出されている。例えば、図 1.2 に示したカフェでの給仕業務への従事(森山, 2019)の他に、企業受付への従事(日本電信電話株式会社, 2019)、遠足体験(UBE CITY, 2020)等が確認でき、今後の社会実装段階への移行が見込まれる。また他に、据え置き型のシステムではあるものの、当事者等のテレバリスタ体験(長倉, 2020)が実現している。このように移動等の動作の多くが自動化されても遠隔参加体験に価値があるのは、現状では遠隔参加体験の魅力の大部分はコミュニケーションの延長上にあるためと考えられる。当事者等にとって、単なるコミュニケーションの範疇を超えた遠隔参加体験の選択肢はなく、これを創出していくことには意義がある。

### 1.2.6 遠隔移動体験と自動化技術との関係

本項では本稿の対象とする遠隔操作型の移動システムに対する先駆的な自動化技術の位置づけを明確にする。遠隔移動体験の事例では、障害物等を自動で回避することは既に可能であるから、目的地に安全に到達するという目的は既に達成されており、移動の操作にかかわる体験の質の向上は不要であるとする意見もある。しかし、これは下記の理由で本稿の目標には合致しない。

#### 【本稿の射程 5】 行為の自動化を最小限とする。

自動化は、ヒトが行為・判断に関与する機会(自由度や裁量)が減少することを意味している。同じく操作型の移動システムとして代表的な自動車を参考にすると、その操作(運転)そのものは独立して目的になるほど魅力的な体験である(宮木, 2019) (田中他, 2016)。したがって、同じく遠隔操作型の移動ロボットの操作そのものにも少なからず魅力的な体験が伴うと期待される。これに対して同じく自動車を参考にすると、自動運転機能の開発がますます進展しており、ヒトの行為の関与機会は重要な判断程度に限られ(横山他, 2015)、能動的な運転の体験そのものの魅力が失われる懸念もされ始めている。自律型の移動システムでの受動的な移動体験を楽しむことには、その技術的な真新しさを除けば、映画等の鑑賞や、VR 技術を活用した体感アトラクション、制限された仮想環境への能動的な関与が可能なゲーム、3D 地図等を通じた体験との明確な差異を見出すことは難しい。このように遠隔移動体験の意義はその能動性や関与の自由度に見出され、そうでなければ移動プロセスの体験は省略されることになる。自律型の移動システムには、移動先での別の体験が主たる目的であるからこそ、負担にもなり得る移動体験を省略できることに最大の意義がある。

加えて行為・判断の自動化はしばしば操作者の意図に反する体験を生じさせ、快適な体験を損なう要因となる。上述した自動的な回避行動は、操作者が異なる回避操作を計画していたり、予測していたりしていた場合に、操作者にとって意図に反した、突然の受動的体験となり得る。この体験は操作衝突と称され、操作者に違和感を生じさせ、2 章で詳説する主体感を減少させるといわれる(奥岡他, 2021)。また生理的には、動揺病を引き起こす要因となる(Adedemola, 2021)等、決して快適な体験とはいえない。主にコミュニケーション型の AI に関しての言及ではあるものの、「機械の知能や操作が複雑化しかえって人間の心的負担が増大するという問題(中嶋他, 2004)」も指摘されている。

この一方で、当事者等の主体的な社会参加を支援するためには、当事者等が何らかのタスクに挑み、成功する体験も重要と考えられ、自己効力感の獲得の観点から自動化を推進する意義が認められる。例えば、上述した当事者等のテレバリスタ体験(長倉, 2020)の実現事例はこの観点で捉えられる。当事者等の能力を超える部分について AI 等を用いた支援は重用であり、他にも例えば今日では一般的なスマートスピーカーが重度肢体不自由者のスイッチとして重要な役割を果たしている。この場合でも、上述したデメリットとのトレードオフ関係には留意する必要があると考えられる。フレーム問題の回避のため、自律型のシステムは予め想定された閉環境内での、予め想定された行為のみが実現される。このため、行為の自由度も、完全な操作型のシステムに比較すると原理的に少なくなる。この観点は、「自動化」と「自在化」との対比によって、稲見、橋本によって整理されている(2012)。

以上のように移動行為の自動化は当事者等に有益な場合もあるが、当事者等が移動行為に関与する機会を減少させ、また操作衝突を誘発するため、遠隔移動体験そのものを目的とする本稿の

研究では最小限にし、手足のように自在に操れる「自在化」(稲見, 橋本, 2012)を優先する必要がある。

### 1.2.7 ユーザエクスペリエンスの枠組みを援用した質的課題の整理

感性的な体験の質の検出は容易ではないので、質的課題をさらに下位の課題に還元する。体験の質的課題の整理には、ユーザエクスペリエンス(UX)の品質の捉え方が役に立つ。従来、遠隔操作システムの研究では高度で専門的課題の達成が主要な目的となり(例えば被災地等の不整地での情報収集やレスキュー、インフラの保守点検、外科手術、無人化施工等)、操作者はかなり困難なタスクを達成する困難なミッションを課されたプロフェッショナルのオペレータとして扱われてきた(5章)。このため暗黙のうちに訓練が前提となっていたものと考えられ、オペレータがロボットを介してタスクを実現するための機能上の工夫と並行して、訓練手法や運用の工夫が行われてきた。これに対して、非専門家ひいては当事者等のようなユーザが過度な訓練なく直感的に遠隔移動体験するための質的な指標の改善を直接的な目的とした遠隔操作型の移動システムの先行研究事例は管見の限り見受けられなかった。

本稿では遠隔操作ロボットのユーザとして、身体的・認知的機能の低下があったり、十分なメンタルを備えていなかったりと、当然に訓練を受けることができない当事者等を想定するので、当事者等をミッション達成が課された操作者(オペレータ)ではなく、ユーザと捉えることが適切と考えられる。遠隔移動体験においては何らかのタスクの達成は必ずしも目的にはならず、代わりにプロセスである体験そのものも重要な目的となる。

体験の質的向上には複合的な要素を用途に応じて全体最適となるように制御する必要があるが、UXはこれらの様々な要素を包括する概念として知られる。UXの統一的な定義は未だ定まっていないようであるが(Roto et al., 2011)、本稿では、UXを大きく4つの要因で捉えるフレームワーク(黒須, 2012)(Kurosu and Hashizume, 2014)(Kurosu, 2014)を援用して、多面的な要素をよりシンプルに捉えられるように還元し、課題を整理した。この概念図を図1.3に示す。UX評価手法は、現時点で少なくとも86にも及び(AllAboutUx.org, 2021)、適切な評価手法を明確にすることもまた、本研究にかかわる重要な課題と考えられるが、本稿ではなるべく定量的な評価を目指して要素還元を進める。

ユーザエクスペリエンスを構成する第一・第二の要素はユーティリティ(Utility, 機能性)と、ユーザビリティ(Useability, 有用性あるいは使用性)とされる。ユーザビリティの下位には、より狭義のsmall usabilityの概念が含まれている。ユーティリティの課題は、典型的には、システムが役に立たない状態と表現できる。ユーザビリティの課題は、典型的には、システムを使いにくい状態と表現できる。後者の課題は特に、高齢者の使用する製品開発において重要性が指摘されている(嶋田, 大浦, 2012)。第三の要素は、感性的品質(英訳は定まっていないようであり、本研究では(黒須, 2012)等を参考に *Hedonic quality* と表現する場合がある)である。感性的品質の課題は、典型的にはシステムを使いたくない状態と表現できる、少なくとも前述の *Social presence*, *Tele-presence*, *Connectedness*, *Self-efficacy* の課題を含むものと考えられる。第四の要素は、意味性(Meaningfulness)である。意味性の課題は、対象となる情報システムがそもそも必要ないという課題であり、システムを活用するモチベーションや理由に直接的に関連する。遠隔操作型のシステムの目的や機能は、専門化・細分化されていく傾向にある。必要

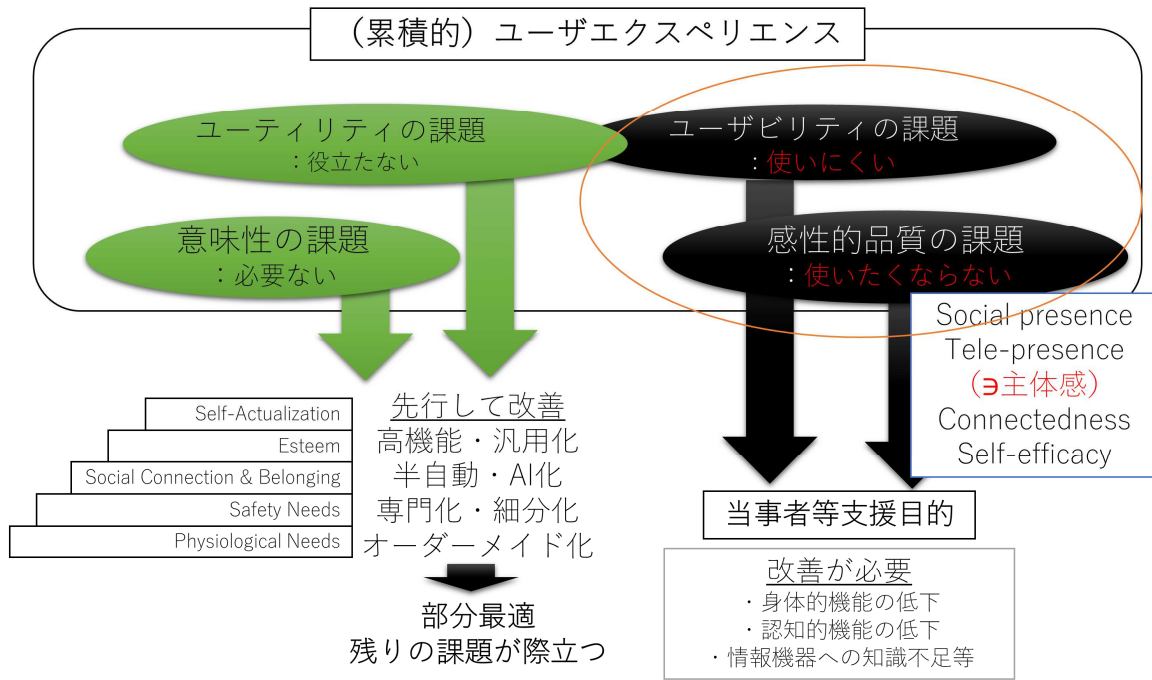


Fig. 1.3 本研究で参照する UX のフレームワークとその課題の整理

なシステムは当事者等の個人差によって大きく異なり、ある個人にとっての意味性の向上は、他の個人にとってそうであるとは限らない。したがって可能な限り意味性を底上げするような基礎的アプローチが望まれる。米国のロボット政策にも反映されるロードマップ(Christensen, 2020)には、意味性に関連の深いニーズの階層(Maslow, 1987. 図 1.3 左下部の階層図を参照)に基づいた福祉分野のロボットのロードマップが示されており、重要な観点となっている。

遠隔操作型のロボットの高ユーティリティ化は著しく進展している。ユーティリティの課題を解消する有力なアプローチは、ヒトの高度な技能を前提とし、極めて精緻な感覚情報をオペレータに伝達するレイグジスタンス技術(TELEEXISTENCE Inc., 2018)のアプローチである。このアプローチは、代表的には外科医師の極めて高度な手技を伝達するための遠隔手術ロボットシステムに見受けられるものであるが、当然にユーザに極めて高度な専門性を要求し、訓練が必須という意味でユーザビリティとのトレードオフ関係にある課題がある。ユーティリティ性能や意味性を向上させることは UX に関わる他の要素の課題を際立たせることに繋がり、UX の最大化には他の要素への影響を踏まえ、用途に合わせた全体最適化のアプローチが重要になる。

とりわけ当事者等の支援目的に用いる遠隔操作システムにおいては、残りのユーザビリティ、感性的品質の課題の克服が極めて重要と考えられる。これらの課題は、5G 通信網、xR 技術等により、間接的に解消に向かっていように見受けられる。しかしながら本稿では、当事者支援の目的においては、これらを直接的に解消する必要性があることを指摘する。

### 1.2.8 本稿の研究の目的(サブゴール)

ユーザビリティと感性的品質の課題の解消のために検討すべき項目は多岐にわたると考えられる中、本稿の研究では、1.2.4 項で述べたように遠隔移動体験のぎこちなさや、必要なリソースを低減し、思い通りの移動操作体験を実現することで多くの遠隔参加体験の質の向上に繋がる可能

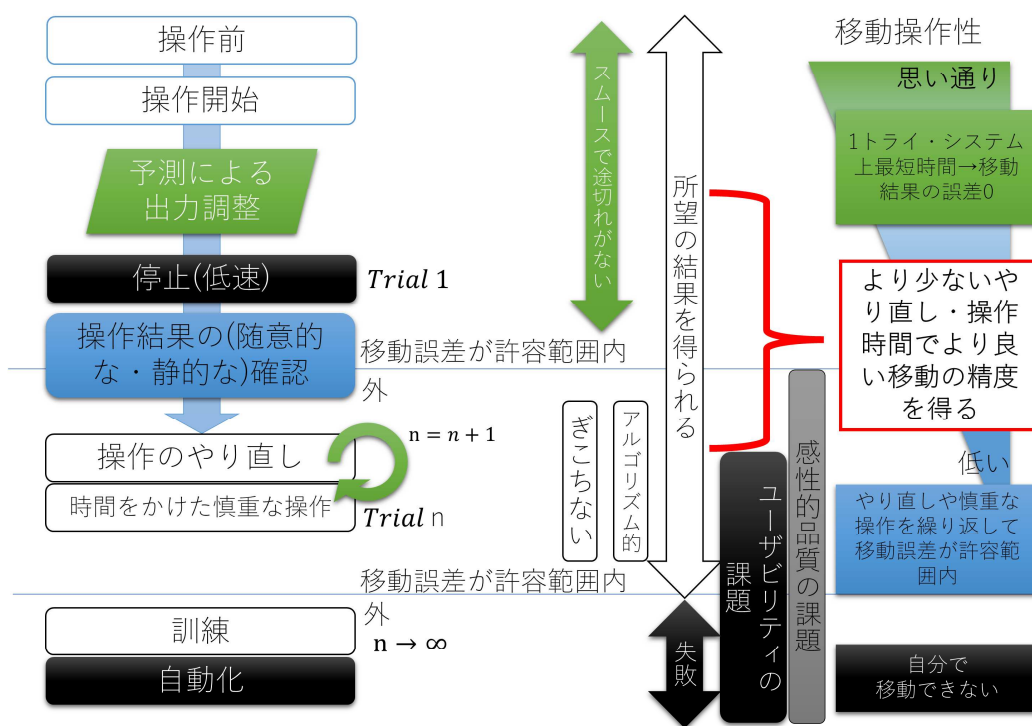


Fig. 1.4 本稿における思い通りの移動操作性の定義

性があり、これを重要な課題と認識している。

すなわち本稿では、遠隔操作型の移動システムにおける思い通り操作性の向上を目的とし、以下、図 1.4 を参照しながら本稿における思い通り移動操作性の向上の定義を明確にする。次いで、ぎこちなさの低減は感性的品質の課題、操作に必要なリソースの削減はユーザビリティの課題の解消にそれぞれ直接的に資すると考えられるので補足する。

#### (a) 本稿での思い通りの移動操作性の向上の定義

遠隔操作型の移動システムの移動操作を開始する前の時刻を  $T_0$ 、移動操作開始の時刻を  $T_1$ 、移動操作の停止の時刻を  $T_2$  とする。移動システムの停止は、一般に移動の目的となるターゲット位置に到達したとユーザが判断したときや、停止しなければならないアクシデント(移動操作が思い通りに実行できなかったり、障害物が急に出現したり、リスクが十分確認できなかったりする等)が発生したときに実行され、その移動操作の結果を確認(随意的に認知)するための時間を提供する。ターゲット位置は最終的な位置(例えば現地サイトの参加者の対面に移動して対話がしたい目的ではその参加者の手前の位置)とは限られず、例えば複雑な曲線経路での移動を行う場合はその経由点(サブゴール)になる場合もある(例えば、その参加者に到達するまでの経路の途中に存在する交差点や、障害物回避のための操作開始位置や、カーブの頂点等が経由点の典型的な候補と考えられる)。また、例えばユーザが衝突リスクを感知する等の場合に、そのリスクを避けられる位置が直近のターゲット位置になる場合もある。本稿では操作結果の確認のための時間を提供するという意味で、低速かつ等速での移動モードに移行した場合も、その時刻を  $T_2$  と表現する。

移動操作の停止( $T_2$ )ののち、操作結果を随意的に確認(現地サイトの他者から教えてもらう場合

も考えられる)した際に、移動に関する誤差(典型的にはロボットの代表位置の誤差)がユーザの許容範囲内であれば、移動操作は T2 で完了となり、所望の移動操作の結果を途中で途切れることなく実現できたと評価できる。その場合、ユーザが操作結果の確認に割くリソースは T2 の 1 度で済む。また、移動に関する誤差が 0 であれば、ターゲット位置に対して最も精度よく移動できたことになる。また、その移動操作にかかった時間がシステムの構成上の制約の中での最短であれば、すなわち高速で移動できていれば、その移動操作は極めてスムーズなものであったと評価できると考えられる。時間や精度に多少の幅はあるが、ヒト(健常者を想定する)が自らの身体や手先を移動させる際、極めて精密な手先作業でない限りは、通常 1 トライアルでの移動を達成できる。つまりこの基準は、ヒトらしい、ヒューリスティック的な制御に基づいて実行された操作に関するといえる。

このように、本稿では移動操作の繰り返しが無い状態である「1 トライアルで、かつ、システム上の最短時間で、移動に関する誤差が 0」であれば、思い通りの移動操作が実現できているものとする。

これに対して、1 回目のトライアルで移動の誤差が許容範囲に入らなかったことが確認できた場合は移動操作が失敗しており、移動操作をやり直す必要が生じる。すなわち、再び T0 の状態に戻り、T2 までの移動操作を繰り返すことになる。これを  $n$  回繰り返したときのトライアルをトライアル  $n$  とすると、 $n$  が大きくなるほど、一つの移動操作を達成するのに停止が繰り返されることになる。停止のあとの確認にも時間を要する。この際、1 トライアルあたりの移動を細かくしたり、移動を極めてゆっくり(慎重)にしたりするような移動操作も起こり得る。しかし有限の(実際上は少ない) $n$  で移動に関する誤差を許容の範囲内に抑えることができれば、所望の移動操作の結果を得ることはできる。

このように、「やり直しや慎重な操作を繰り返して移動に関する誤差が許容の範囲内に収まる」場合も、ユーザにかかる負担は大きいものの所望の移動操作の結果を得られるため、本稿では思い通りの移動操作性のある状態ではあるものの、水準としては低い状態にあると考える。

T0~T2 に至る「一連の移動操作の繰り返し回数  $n$  がユーザの許容限度を超えても移動に関する誤差が許容の範囲内に収まらない」場合には、移動の操作が実現できないということを意味する。この場合には、訓練をしたり、自動化をしたりして克服する必要があるが、もはや本稿の目標とする遠隔操作型の移動システムではなく、ユーザビリティおよび感性低品質の課題が顕在化していることになる。

以上を踏まえ、本稿における思い通りの移動操作性の向上の定義を、「より少ないやり直しあるいは操作時間でより良い移動の精度を得る」こととする。

## (b) ユーザビリティの要素としての思い通りの移動操作性

本稿の研究の思い通りの移動操作性の向上の定義は、移動の効率をその正確性を可能な限り維持しながら高めようとするものであり、遠隔操作型の移動システムのユーザビリティ面を重視した評価指標といえる。ヒトはツールを自在に操ることが可能であり、これは道具の身体化と称される。しかしながら、出力がヒトの身体から完全に離脱した通信システムになると、ツールのように自在に操ることは困難になる。遠隔操作ロボットの身体化は進展し辛いことも明らかにされている(Itaguchi,2020)。

遠隔からの移動操作の難しさは、操作そのものの難しさと、移動操作結果の正確な認知の難しさに分類できる。前者は、操作装置を巧みに操ったり、アクチュエータの性能を十分に発揮させたりするテクニック面での難しさであり、主にハードの制約に起因する。本研究のステークホルダである障害当事者にとっては大きな課題であるため様々な障害に応じた入力インタフェースに関して多くの研究がなされている。

後者は、センサから得られる環境情報やロボットの動作情報を知覚・認知して、操作計画・判断・実行(予測や修正)をする難しさであり、主に知覚の制約に起因する。人間は主に、視覚とともに体性感覚を駆使して環境から自己に関する様々な情報を取得する(乾, 2012)が、遠隔空間からは体性感覚がほとんど知覚できないことはこの難しさの一つの要因と考えられる。操作への習熟は、ロボットの動作結果の誤差を感覚フィードバックによって逐次修正することでなされると考えられる(川人, 1996)が、遠隔操作においては体性感覚をほとんど習熟に利用できないことになる。また通信遅延が操作性に及ぼす影響が課題として着目されており、後述する。

認知の困難性は、タスクの達成を最大のミッションとするような災害現場等での情報収集を担う遠隔操作ロボットの検討で指摘されている(Murphy, 牧田, 2003)(大野, 城間, 2010)(佐藤, 松野, 2010)。これらの操作者の遠隔体験はミッション失敗の許されない厳しい精神状態(古田他, 2014)での慎重な操作や、様々な訓練(川端, 2018)を伴い負担が大きいものとなっている。

### (c) 感性的品質の要素としての思い通りの移動操作性

他方、高い水準で遠隔操作型の移動システムを思い通りに操作できることは感性的品質の要素に分類できる。思い通りの移動操作性は Sense of agency(自己主体感あるいは運動主体感)とも密接に関連すると考えられるためであり、2章で詳述する。Sense of agency は、自己が行為の作用主体(Agent)である、という感覚といわれる。その上位概念には、自己所属感や、その場限りの自己意識がある。また、これと並び立つ概念に自己所有感(Sense of ownership)がある。遠隔操作型のロボットは、ユーザ(自己)の身体から空間的にも構造的にも乖離している。このような特性を持つ対象に対しても Sense of agency が想起できれば、その体験はあたかも自己をロボットに重ね、自身が現地サイトで実際に移動しているように感じられるような主観的にリアリティのあるものになる可能性が拓ける。認知神経学等の分野では、Sense of agency を出力の結果を予測する順モデルを含むモデルが検討されている。行為の結果を予測し、実際の行為と(意識的にも無意識的にも)照合した結果、これらの食い違いがなければ Sense of agency が生じると言われており、思い通りにシステムを操作できることが本稿で整理した感性的品質の観点においても重要であることを示唆している。

### (d) 思い通りの移動操作性向上における予測の重要性

ヒトは操作開始(T1)直後において得られる操作中の情報から、予測に基づいて素早く操作出力の調整をする機能を有しており、この機能が本稿の思い通りの移動操作性の向上に重要となる。そこで、本稿の目的を以下のように明確にする。予測に基づく操作出力の調整については2章および3章で詳説する。

**【本稿の射程 6】 思い通りの移動操作性を向上するため、現在の操作に対するシステムの移動**



に関する予測の正確性を調べる。

### 1.2.9 本稿の研究と既往研究との差異の整理

移動操作はシンプルなので、本稿は特に認知側(ユーザに情報を出力する側)のインタフェース(以下、単に認知インタフェースと称する)が予測に及ぼす影響を調べる。認知インタフェースは現地サイトからの入力情報のすべてになるから、遠隔参加体験の要となる。当事者等は様々な入力デバイスや自助具を駆使しているにも関わらず、こと視覚的な認知インタフェースに関しては、我々が日常的に使用するデバイスのアクセシビリティ以上の工夫が見受けられない。これらの難しさの克服、すなわち習熟にかかる負荷を減らすことは遠隔操作の難易度の軽減につながるとともに、ツールを操るように操作そのものを楽しめる体験の創出につながると期待される。

#### (a) 従来の遠隔移動操作の支援事例

従来から今日まで、遠隔操作型のシステムの最大の目的は、困難なタスクやミッションをそのユーザの代理として成功に導くことである。

従来、移動精度を要求するタスクにおいてはその成功のため、認知インタフェースには客観的にターゲット位置と自己位置との誤差を視認させる技術が用いられてきた。ターゲット位置と自己位置との誤差を正確に認知できれば、ユーザと遠隔操作型のシステム(いわゆる人間・機械系)にフィードバックループを構築することができ、逐次の操作結果の確認と、操作のやり直しあるいは慎重な操作の支援が可能となるためである。

最も実用的な手法は、移動システムの主たる映像に対して、客観的視点からの映像を並べて表示する手法であり、例えば(古屋他, 2012)(高橋他, 2015)(佐藤他, 2019)では遠隔で建設機械の手先を移動させるのに追加ディスプレイを用いて俯瞰映像等の客観的視点の映像を表示している。天間他は、ドローンの移動操作に際し、操作者が姿勢を調整可能な小型ドローン模型と2つのディスプレイとを備えたインタフェースを開発している(2019)。このインタフェースでは、一方のディスプレイがドローン視点の映像を表示して、他方が小型ドローン模型の姿勢の調整に連動するように制御されたもう一台のドローン視点の映像を表示する。他に、(齋藤他, 2007)や(高橋他, 2014)では移動ロボット視点の映像に隣接して、前者ではワールド・イン・ミニチュアと呼ばれる遠隔環境と移動ロボットの3DCGモデルを、後者は平面マップをそれぞれ並べている。既往の技術については6章でもさらに検討を加える。

しかしながら、これらの手法はいずれも、複数の映像の誤差を逐次確認し、それを低減するためにステップバイステップでの慎重で断続的な操作結果の確認と調整を繰り返す、アルゴリズム的な操作モードを前提としており、一時停止や減速等でその時間を確保するため、ぎこちない、ゆっくりとした移動が生じる場面が多かった。十分なステップ数を稼げれば理論的に誤差を0とすることのできるシステムティックな操作モードであるが、ある程度の直感的で素早い操作を実現するには、訓練によって新たな内部モデルを学習(習熟)することを要する。一方で、現地サイトの環境や、課せられるタスクやミッションにも依存するものの、その訓練は必ずしも容易ではない。またこれらの手法では、普段見ることのない視点や情報により体験がよりバーチャルになる。

そこで本研究ではぎこちない、ゆっくりとした移動の発生の低減に有効と考えられる、ヒトが元来備えている経験等の主観的情報(内部モデル)をそのまま利用できるような、直感的で素早く、



訓練(新たな内部モデルの獲得)の負担が少ない, ヒューリスティック的な操作モードを支援する手法を検討する. これには一人称視点のさらなる活用が重要となる. アルゴリズム的な従来手法にはタスクやミッションの成功に導く観点では極めて大きな利得があり, ユーティリティが重要となる極めて高度な遠隔作業の実現や, 意味性が大きく訓練を要してまで実施する社会的意義のある作業の実現に際して重要であった. しかしながら本研究で標榜する自律的で主体的な(些細な社会活動への)遠隔社会参加支援のように, 必ずしも困難なタスクやミッションの達成が遠隔操作型の移動システムの目的ではなくなっている. すなわち, 精度の要求(ユーティリティ)も, 社会的意義も, それほど高いとは言えないタスクを目的とするものの, 外出が困難な当事者等の自己実現に有用な(意味性の高い)遠隔操作型のシステムも登場し始めている. これは 1.2.5 項でも述べたとおりであり, ヒューリスティック的な操作モードを支援する手法が必要となる.

## (b) 従来のヒューリスティック的な遠隔操作の支援事例

遠隔移動操作に関するヒューリスティック的な操作モードの支援に関連すると考えられる事例としては, 映像の表示遅延に着目した検討がなされており, 遠隔操作型の自動車において遅延がその移動を乱雑にする影響をもたらすことが明らかになっている(水島他, 2019). しかしながらこれを十分に補償する手法は見受けられない. 現実空間での遠隔移動体験とは異なるが, VR 体験では首の動作に対して表示遅延が生じるとユーザの CG 没入体験に違和感を生じさせることが知られており, 一部のヘッドマウントディスプレイにはユーザの動作を検出した場合に表示遅延の小さい映像シフトの方法で擬似的に表示遅延を補償する手法が実装されている(Doanov, 2017). なお, 移動以外の繊細な手作業等の実行に際しては, このような通信遅延が操作に及ぼす影響への注目は大きく, 他にも映像遅延の影響をユーティリティやユーザビリティ低下の主たる原因と定めて評価し, 解消しようとする手法の検討例が見受けられた. 例えば, 遠隔手術での遅延の影響の補償(米田他, 2017), 時間遅れの影響を予測した倒立振子の制御(Yoshida et al., 2017)等, 手動・自動に関わらず遅延の影響は遠隔からの危機の操作に関する重要な課題として捉えられている. ただし表示遅延は通信技術の発展に伴い, 例えば 5G 等の環境下ではその影響は遠隔操作と実際の操作とでほとんどないといわれる場合もあるため, 慎重な検証が望まれる.

表示遅延に起因する違和感の影響を除くと, ヒューリスティック的な遠隔移動操作の支援事例としては, 遠隔から伝達される情報の絶対量が少ないことが操作に影響を及ぼしていると捉え, 現地サイトから伝達される情報を精緻化しようとする手法が見受けられる. これらの手法は, 視覚以外のモダリティ情報を追加する方針と, 主たる映像を精緻化する方針のものに大別できる.

### ・視覚以外のモダリティ情報を追加する手法

必ずしも移動システムを目的とした技術ではないが, 超高精細な五感情報の伝達による新たな体験の創出が検討されており, 予測の正確性の向上に寄与しているものと考えられる. 手先での繊細な作業での応用が進められるテレグジスタンス技術(TELEEXISTENCE Inc., 2018)で採用されているユーザの手先等の身体動作がそっくりそのまま等身大のロボットに反映され, 触覚情報がフィードバックされる構成や, 他者の体験を迫体験する等の用途に用いられる五感シミュレーション技術(Ikei Laboratory, 2019)での全身に向けた様々な感覚情報をフィードバックする構成は予測の正確性の向上の参考となり, これらの技術を現地サイトでの遠隔移動体験に応用していくこ

とが求められる。触覚情報については小型の遠隔操作型の移動システムにも応用され始めている(Motoi et al., 2019)。

しかしながら、比較的シンプルな体験である遠隔移動体験を目的とした場合に、ユーザに提示される情報の増加は必ずしも UX を向上させるとは限らないため、追加すべき情報を特定し、最適化することが重要と考えられる。予想外の冗長な情報の入力通信遅延を増加させたり、ユーザに驚きを与えたりし得るし、誤認(錯覚)・遅延、映像酔い、違和感、デバイス装着の煩わしさ・負担等の要因は、かえって累積的 UX(真新しさではない UX)を阻害する要因となり得る。また本研究のステークホルダは多くの感覚障害を抱えるため、単にモダリティ情報を増加させても、原理的に活用できない場合が生じる。例えば全身の感覚を要する五感シアター(Ikei Laboratory, 2019)の機能を完全に活用できるユーザは健常者に限定されるが、上肢の感覚・運動のみを要する上半身タイプのテレグジスタンス技術(TELEEXISTENCE Inc., 2018)の機能を完全に利用できるユーザの範囲は体感～下肢の肢体不自由者まで拡張できることになる。このように、使用するモダリティが少ないほどシステムが貢献できるユーザの母集団は拡大する。本稿は、さらに重度の肢体不自由者(四肢麻痺)のユーザの活用できる視覚モダリティ情報の単独の活用のように、より少ない情報の入出力での思い通りの移動操作性の向上から基礎的な検討をはじめものに位置付けられる。そこで本稿の射程を以下のように明確にしておく。

#### 【本稿の射程 7】なるべく少ないモダリティ情報入力から予測の特性を調べる。

##### ・主たる映像を精緻化する手法

現状、ユーザの主観的な遠隔移動体験の要となる主たる映像の表現に関しても、伝達される情報を精緻化する以外に有効とされる手法はなく、これに起因する違和感が遠隔移動体験に及ぼす影響は明らかになっていないため、ユーザに追加で伝達すべき情報も明確ではなかった。主たる映像を精緻化する手法の代表例としては、映像をステレオ化し、3D 映像としてユーザに視認させる手法があげられる。例えば伊藤他は建設機械の操作に 3D 映像を用いた結果、作業効率が向上した結果を報告している(2017)。しかしながら 3D 映像の観察には強い生理的な負担が伴うことは広く知られており、動揺病を誘発するリスクもあるため、単に移動の直観性を高める目的での採用は現在のところ現実的ではない。基礎疾患を抱えていたり、認知的・身体的機能の衰えが認められたりする本稿のステークホルダにとっては深刻な問題となる懸念もある。また通信速度の向上を背景に、映像の高解像度化、撮像範囲および表示範囲の広角化等の進展も進む。主観的な一人称視点かつ自由視点を移動ロボットに実装した事例(Okura et al., 2013)があるが、結局のところ観察が可能な範囲の拡大は、アルゴリズム的な操作モードに役立つ情報の提供という面での利得が大きい。これらのアプローチは通信量とのバランスを見ながら、できる限り映像を精緻化しているにとどまり、根本的に前述の通信遅延の影響を補償可能な手法にはならない。したがって通信遅延とのトレードオフ関係の小さい、情報量の増加とは独立性の高い手法の検討が望まれる。あるいは、実際に移動操作しながら現地サイトの環境やタスクに合わせて主たる映像の表現を調整する、というノウハウ的なアプローチにとどまり、主たる映像情報そのものの有効な提示方法に統一的な見解はない。

これに対して情報量への影響が比較的小さいと考えられる調整可能な映像表現の要因としては、

少なくとも映像の大きさ(撮像・表示倍率, デジタル・光学ズームの別), 奥行き(パースペクティブ)表現(視野角・焦点距離, 背景情報のぼかし方等), 視点配置(固定・非固定の別, 位置), 視点の動かし方, 色域, ベクシオン, MR 技術に見受けられるような主映像への CG 重畳(遠隔サイトでの画像処理)等があり, これらは映像の不随意の知覚あるいは随意的認知に大きく影響を及ぼす可能性がある。ベクシオン等の映像刺激から得られる主観的体験の評価は認知心理学の分野ですすめられており(妹尾, 2017), 観察者自身の移動に及ぼす影響の検討・応用もなされている(中嶋, 福地, 2013)(舟川, 2010)が, 観察者から遠く離れた遠隔操作型の移動システムの移動操作に対して, しばしば現地サイトの情報が誇張される場合さえあり得る映像の表現が及ぼす影響の検討例は管見の限り見受けられない。

したがって, 遠隔体験の要となる主たる映像の表現そのものの最適化に寄与する知見を得ることで, 他モダリティの感覚情報をはじめ付加的情報を追加する際に, いかなる情報を追加・強調すべきか等の方針を定める土台になると考えられる。

以上, 本稿は従来の研究に対して, アルゴリズム的ではなくヒトの主観を活用したヒューリスティック的な支援手法の方法論を, 主たる映像の表現に起因する移動操作の影響を調べることで提案することに貢献するものであることを明確にした。

最後に, 以上説明した本稿の研究の位置づけを明確にするための本稿の射程を表 1.1 にまとめて示す。

### 1.3 論文の構成

本稿の構成を図 1.5 に示し, 以下, 各章の概略を説明する。

#### 第1章 序論：本研究の位置づけ

本章では研究の最終的な目標を, 自律的かつ主体的な社会参加手段となり得る遠隔操作型のシステムを用いた遠隔からの社会参加が, 十分に自己実現に繋がる可能性がある手段として当事者等自身に気づいてもらえること, もって実際の外出体験と並び立つ社会参加の選択肢として社会実装されることとした。

その中で本稿の研究は当事者等の支援に重要なユーザビリティと感性的品質の双方から遠隔参加の質を向上するものに位置づけられ, その目的を遠隔移動体験に関わる当事者等の予測の正確性を高めることでより高い思い通りの移動操作性を得る(より少ないやり直し・操作時間でより良い移動の精度を得る)ための基礎的検討およびシステム要件定義と定めた。

従来, 遠隔移動操作の支援は客観的な視点の情報の逐次利用を前提としたアルゴリズム的な操作モードの支援に限定され, 遠隔移動体験の要となる主映像の表現に関して通信遅延とトレードオフ関係となる精緻化以外の有効な手段が見いだされていなかった。そこで本稿では, ユーザの主観的な経験を活かした直観的な(ヒューリスティックな)操作モードを支援するための認知側のインタフェースに関し, 情報量との独立性の高い映像表現の影響を検討した。

#### 第2章 関連研究

第2章では, ユーザビリティ面を重視した評価指標である思い通りの移動操作の実現が, 遠隔

表 1.1 本稿の研究の射程

---

【射程 1】	外出が困難な当事者等を支援対象とする.
【射程 2】	現実空間で現に営まれている社会活動への参加を支援対象とする.
【射程 3】	遠隔操作型の移動システムを研究対象とする.
【射程 4】	思い通りの遠隔移動体験を目指す. 以下, 本稿では遠隔移動体験を, 現地サイトでの移動型ロボットそのものの移動や, ロボットの手先(マニピュレータ)等の相対的な移動を含むものと定める.
【射程 5】	行為の自動化を最小限とする.
【射程 6】	思い通りの移動操作性を向上するため, 現在の操作に対するシステムの移動に関する予測の正確性を調べる.
【射程 7】	なるべく少ないモダリティ情報入力から予測の特性を調べる.

---

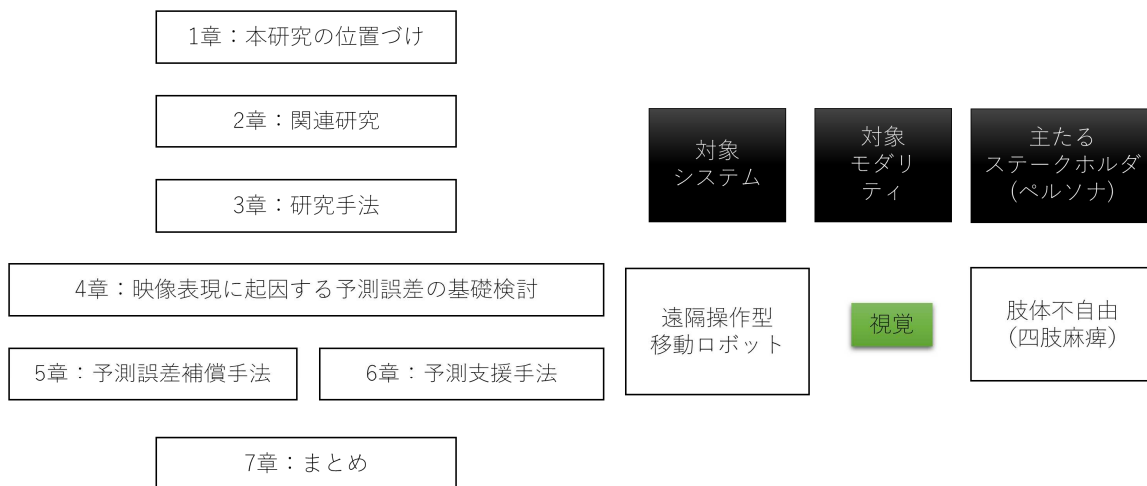


Fig.1.5 本論文の構成

移動体験の感性的品質の向上に寄与することを示唆する関連研究の知見を整理した。また, 思い通りの移動操作の向上と予測とを関連付けるコンパレータモデルを遠隔操作型の移動システムの検討に導入した。

### 第3章 研究手法

第3章では移動の予測の正確性を向上することにより, 本稿で定めた思い通りの移動操作性を向上する方法論について述べた。また, 移動の予測の正確性を評価する指標として位置の予測誤差を導入し, その計測手法について述べた。

### 第4章 映像表現に起因する予測誤差の基礎検討

第4章以降では, 遠隔操作型の小型の移動ロボットシステムの開発・評価を通じ, その位置の

予測誤差の計測を通じて予測の正確性に関する検討を進めてゆく。

第4章でははじめにネイティブな映像を用いた遠隔移動操作であっても大きな予測誤差が生じる事例を検出し、これを起点に映像表現が予測誤差に及ぼす影響を考察した。その結果、ターゲット位置の情報に対して、自己位置の情報が映像によって相対的に縮小して表現されることにより、移動の予測が過小評価される可能性を指摘した。同時に、移動の予測が情報量への影響が小さい映像表現の一つであるオプティック・フローの誇張表現手法により変調され、さらに過小評価される現象を見出した。

### 第5章 予測誤差補償手法の基礎検討

第5章では第4章での条件とは逆に、ターゲット位置の情報に対して、自己位置の情報が映像によって相対的に拡大して表現されることにより、移動の予測が過大評価されること、およびターゲット位置の情報と自己位置の情報とが一致したスケールで表現されることにより、移動の予測が高精度になることを明らかにした。

さらに移動の予測の過大評価は、第4章で明らかにしたオプティック・フローの誇張表現手法による予測の過小評価効果によって補償され、移動の予測の精度をユーザに気付かれないように高精度化できることを示した。

### 第6章 予測支援手法の基礎検討

第6章では、はじめに主観的かつ直観的な操作に有効であるロボット視点の映像のみでは、第5章で明らかになった移動の予測を正確にするためのターゲット位置の情報と自己位置の情報を一致したスケールで表現することが困難になることを指摘した。これを受けて、これらの情報を正確な指標で表現する、新たなロボット視点の映像を用いたインタフェース(ステレオマッチングインタフェース)を提案した。

さらに、ステレオマッチングインタフェースはターゲット位置への移動をユーザに正確に予測させることを確認した。また、移動の精度が要求される複数のタスクを通じて、ステレオマッチングインタフェースによる予測の支援が思い通りの移動操作性の向上に有効であること、スケール等の変動にロバストであることを検証した。

### 第7章 結論

本研究ではヒューリスティックな操作モードの支援のために重要である思い通りの移動操作性の向上に関する基礎的な知見を得るとともに、支援手法を提案・検証した。

第7章では、一連の検討結果から明らかになった事項をより一般性の高い、思い通りの操作性を向上する遠隔操作型の移動システムの機能要件として整理し、本稿の研究の結論として提案した。

## 1.4 結言

以上、第1章では研究背景および最終的な目標、そのうち本稿の研究の位置づけを明確にするとともに、目的および本稿の構成について説明した。

---

## 第2章

### 関連研究

---

#### 2.1 概要

本章では、ユーザビリティ面を重視した評価指標である思い通りの移動操作性が感性的品質(特に主体感)に関連する要素とどのような関係にあるか、関連研究の知見を整理する。また、思い通りの移動操作性の向上と予測とを結びつけるコンパレータモデルの知見を整理し、これを遠隔操作型の移動システムの検討に導入する。

#### 2.2 思い通りの移動操作と感性的要素との関連

1章で定義した思い通りの移動操作が実現できれば、感性的品質(1章)にも多様な影響を及ぼすと想定される。しかし感性は主観的で、複雑であり、遠隔移動体験にかかわる要素の明確な定義は見受けられない。工学的に感性的品質を向上するには、思い通りの移動操作にかかわる感性をなるべく定量的要素に還元してゆくことが有効と考えられる。従来、バーチャル・リアリティや認知心理学、哲学等の様々な分野では、様々な粒度での感性の表現や分類が行われており、本章では思い通りの移動操作性の向上に関連し得る感覚の要素について整理する。

便宜上、本稿ではユーザの情報処理の水準を、感覚、知覚、認知(文脈によっては認識、確認、推定等と表現する場合がある)、判断の各レベルで区別する。本稿ではコミュニケーションのような宣言的な情報の高度な情報処理を要する遠隔参加体験ではなく、移動やそれに伴う散歩のような些細で感覚的な遠隔参加体験の質の向上を重視している。このため本稿の研究には、特に意識的な(随意的な)プロセスが含まれるか否かを明確に捉える動機がある。本稿の想定する情報処理のレベルの整理には嶋崎の表現(2002)が役立つと思われる。本稿ではこれを参考に感覚、知覚、認知のレベルを下記のように捉えることとする。はじめに、感覚の情報処理のレベルは五感に直接入力されるレベルのものとする。この処理はいわゆる大脳感覚中枢で実行される意識を要さない。例えば視覚であれば、光の強度の大小の区別までの処理が含まれる。次に、知覚の情報処理のレベルは感覚のものよりも一段階高度なものと捉え、感覚入力を理解するための処理プロセスを含むものとする。乾は、知覚を感覚器から出力される感覚信号が生じた原因を推定することと表現している(2018)。知覚の情報処理のレベルでは、ヒトの一般的知識の情報が付加される。例えば視覚であれば、入力された光を青色光と感ずるまでの処理が含まれる。認知の情報処理のレベルはさらに高次であり、知覚の情報処理の結果にヒトの個々人の主観的情報(エピソード記憶)や注意(Attention)が付加されたものと捉える。例えば視覚であれば、知覚された青色光の光源がわか

るまでの処理が含まれる。認知のレベルでは明確に意識の志向性がある。本稿では、さらに高次の情報処理機能として判断の情報処理のレベルを定める。判断の情報処理のレベルには、コミュニケーションのように高度な言語処理や論理的な思考を伴う情報処理が含まれる。認知や判断は意識的な脳の情報処理であり、高次機能といわれる。これに対して上述のようにセンサである感覚器や知覚処理は高次脳機能に含まれず、一次機能あるいは低次機能のように分類される。障害福祉の分野では、高次脳機能障害の検討において高次機能が細分化されている。この背景には、障害を認定するための法律的定義の要請もあるものと思われる。国立障害者リハビリテーションセンターでは、高次脳機能を記憶、注意、遂行機能、社会的行動に分類して捉えている(2020)。高次脳機能障害診断基準ガイドライン(厚生労働省編, 2020)では、記憶を前向健忘、逆向健忘に、注意を全般性注意、半分空間注意に、遂行機能を目的に合った行動計画、目的に合った行動の実行に、社会的行動を意欲・発動性と情動コントロール、対人関係、人格、行動の転換に、それぞれ分類している。思い通りの移動操作性に関連して、上述の判断の情報処理のレベルに関係の大きい要素としては、目的に合った行動計画が該当する。認知の情報処理のレベルに明確に対応する要素は見受けられないが、そもそも高次脳機能障害は認知機能障害の下位概念の一つと定義されている。認知機能障害の巣症状としては失語・失行・失認があげられており、失認が認知の分類を含むものと考えられる。医学的には認知症の分類が参考になる。医学マニュアルのゴールドスタンダードといわれる MSD マニュアルでは、認知症が記憶機能と、注意機能に影響を及ぼすと述べている(Huang J., 2016)。同じく ICD-10 は認知症の定義の中で、高次脳機能を記憶、思考、見当識、理解、計算、学習、言語、判断等多数と分類している(WHO, 1993)(日本神経学会, 2017)。この定義では、陽に判断がプロセスとして含まれている。また脳科学と認知科学の境界分野と称されているメタ認知(中山, 四元, 2012)の研究においては、教育分野との関連が強いようであるが、認知活動を知覚、情動、記憶、思考等と表現している。また例えば、(Naoki. and Nishimoto, 2020)では、情報の粒度が細かいものの、脳の高次機能に関連する少なくとも以下の認知課題が設定されていることが見て取れる。すなわち動画判定、楽曲理解、動物音声、画像評価、動物写真、感情判断、まばたき、リズム認知、料理選択、地図記号、単語理解、眠気評価、過去想起、買い物、論理、文字記憶、計算があげられている。本稿で志向する低次機能の支援は、これらの高次機能の活用を支援し、快適にすることに資する。

### 2.2.1 臨場感

臨場感と表現される感覚は、本稿の研究で重視するロボットを通じてあたかも自分が移動していると感じられるような自己投影体験の実現のために重要な感覚要素の一つと考えられる。安藤他は、臨場感を「あたかも自分がその場にいるような感覚」と表現し、その評価指標としての要素を空間要素、時間要素、身体要素で分類している(2010)。さらに下位の要素の分類も含め、この分類例を図 2.1 に示す。空間要素には、さらに下位の感覚として立体感(奥行き感、形状感、以下、括弧書きはさらに下位の要素を示す)、質感(ざらつき感、硬さ感、光沢感)、包囲感(没入感、空気感)が含まれている。時間要素の下位には、動感(変化感、躍動感)、因果感(影響感、予測感)、同時感(同期感、実時間感覚)が含まれている。身体要素の下位には、自己存在感(身体感覚、自己運動感覚)、インタラクティブ感(物や他者との相互作用感覚)、情感(快・不快感、感動)が含まれている。

他に、xR 技術(AR(拡張現実)、MR(複合現実)、VR(仮想現実)各技術の総称)においては、臨場感を重視した体験のために主観的な大きさの整合性(等倍感)も重要な要素とされる(Canon IT Solutions Inc., 2021)。また、同分野では特に空間要素・包囲感の下位に分類されている没入感が

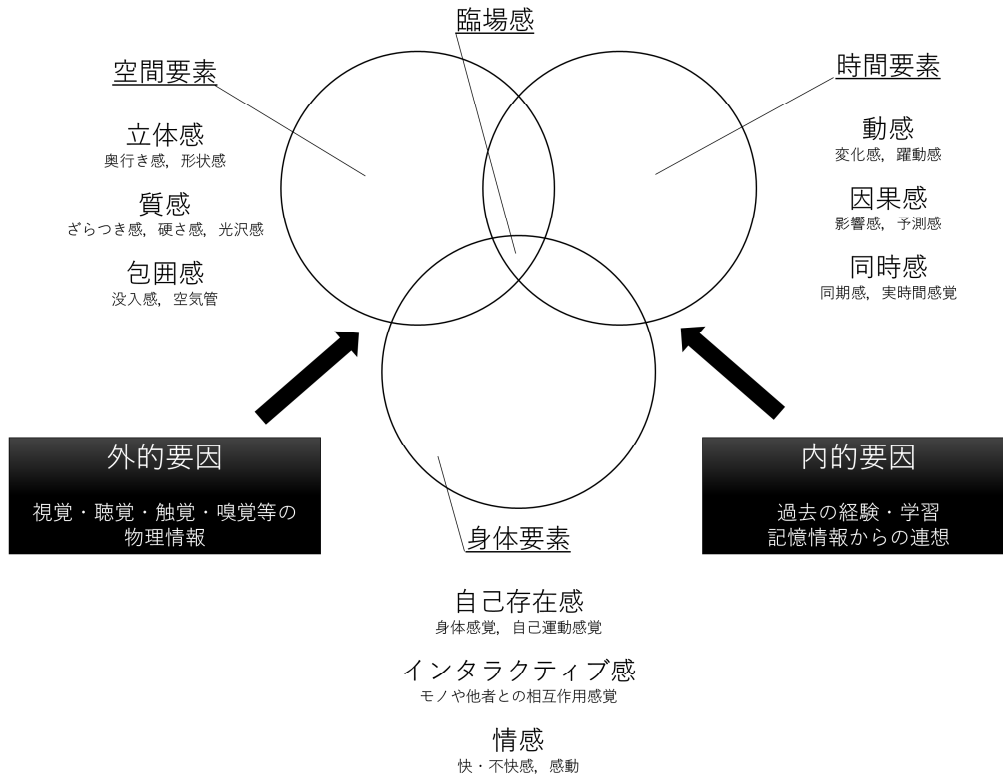


Fig.2.1 臨場感を構成する感覚要素((安藤他, 2010)より引用・作成)

重視されている(一般財団法人デジタルコンテンツ協会, 2016). ビデオシースルー型の HMD は広視野の映像でヒトの視野を覆うこと等により没入感を飛躍的に向上させたことで、ユーザの xR 体験の臨場感の向上に貢献している。

思い通りの移動操作性の向上は、上記の臨場感と関連する要素において、予測感、自己存在感(身体感覚, 自己運動感覚), あるいは没入感との強い関連があると考えられる。以下、自己存在感に関連する感覚要素についてさらに検討を進める。

### 2.2.2 主体感

主体感は遠隔移動体験の感性的品質のほか、ユーザビリティの向上にも資する可能性のある重要な感覚と考えられる。本稿の想定する主体感は、自己存在感の下位要素として挙げられている自己運動感覚に近い概念と考えられものの、臨場感の要素(安藤他, 2010)には明確に含まれていない。しかしながら主体感は、本稿の目的である現地サイトの遠隔操作型の移動システム(典型的には移動ロボット)に対して自己を重ね、ロボットを通じて得る移動体験を、あたかも自己が直接移動していると感じる体験にするのに必要不可欠な感性的品質の要素と考えられるので、さらに調査を進めた。主体感を意味する **Sense of (self-)agency** の和訳には行為主体感と運動主体感とが含まれ、これらの使い分けは必ずしも明確ではない場合があった。このため以下、本稿では行為主体感と運動主体感とを明確に区別せず、単に主体感と称する。

主体感は、「ある行為を自分自身で行っているという感覚(行為主体感)」(浅井, 丹野, 2007)とか、「この行為を引き起こしたのはまさに自分自身であるという感覚」(嶋田, 2019)と表現される。さらに主体感は、身体所有感(Sense of ownership)とあわせて最小限の自己(Minimal self)を構成する要因といわれる(浅井, 丹野, 2007)。身体所有感は、「ある行為が自分の身体で行われている



という感覚」(浅井, 丹野, 2007)とか, 「この身体はまさに自分のものである」(嶋田, 2019)感覚と表現される。これらの上位概念となる最小限の自己は, 「一時的なその場限りの自己」と表現される。最小限の自己はアイデンティティ(Narrative self, 物語的自己)とは区別されている(浅井, 丹野, 2007)(Gallagher, 2000)。また主体感, 自己所属感(Sense of Ownership)の下位概念ともいわれる(前田, 2019)。

遠隔操作型の移動システムにおいてロボットを通じて得る移動体験を, あたかも自己が直接移動していると感じられる体験とするには, ユーザがロボットに最小限の自己を感じる必要があると想定され, したがって主体感・身体所有感を生じさせる必要があるが, これは困難な課題と考えられる。これらの感覚の生起には, ユーザが自身の身体に関する情報を参照可能であることを要するためである(嶋田, 2019)。ユーザ(健常者)が自らの身体の情報参照するように直接的に遠隔操作型の移動ロボットの身体に関する情報を参照するのが困難な事例として, 道具の身体化が進展し辛いことが指摘されている(Itaguchi, 2020)。ロボットの身体に関して参照可能な情報が, 遠隔から伝達(通信)可能な情報に制限されることがその一因と考えられ, 例えば遠隔移動体験の要となるシンプルな映像を観察する体験をとってみても, 1章で論じたように, 映像を介した視覚情報の表現や知覚される情報は, 目視で得られる視覚情報のものとは様々な観点で相違する。体性感覚フィードバックによりロボットの身体に関する情報を自らの身体を通じて参照可能としようとするアプローチも実施されているが, 正確な身体情報の知覚には, ロボットの身体が得る情報とユーザの身体が得る情報が一致している必要がある。すなわちロボットとユーザの機能・構造とが厳密に一致する必要があり, この課題の改善に向けてはテレグジスタンス技術(例えば(TELEEXISTENCE Inc., 2018))の貢献が期待される。

一方で, 身体イメージあるいは身体図式は必ずしも実際の身体と一致していないため, 遠隔操作型の移動ロボットに対しても拡張・参照可能な近似的な身体関連情報は存在する可能性も考えられている。自分自身の身体に関する内部表象(脳内イメージ)を身体イメージといい, これは概念や感情等のより高次の脳の情報処理の影響を受ける(Gallagher, 2000)。身体イメージは, 必ずしも意識される必要のない身体図式(身体スキーマ)と明確に異なる(田中, 2013)ことに注意する。例えば, 幻肢は四肢麻痺の患者にしばしば観察される症状である。四肢を切断されたり四肢の感覚に障害があったりする患者が四肢の痛みを感じることは珍しくないといわれる。幻肢の現象は, 身体図式が生理的に感覚の失われた部位に拡張していることを示唆する。幻肢は視覚情報だけでも駆動できるといわれ(嶋田, 2019), 視覚情報が身体図式あるいは身体イメージに干渉する可能性を示唆している。もしそうであれば, 当事者等にとって非常に有益な体験の創出に繋がる可能性がある。当事者等が再び体験できない四肢を用いた活動の体験が, 活用可能な視覚情報により実現できることが期待されるためである。この体験はリハビリテーションや社会参加への小さくない動機となり得る。

続けて以下, 身体に関する情報の拡張や参照に関連する知見を整理する。

### (a) 道具の身体化

道具(ツール)の身体化は, 参照可能な身体に関する情報が身体の外に拡張されていることを示唆する現象である。ギブソンは道具について, それを使用している時には手の延長であり, ほとんど手の付属品, あるいは使用者自身の身体の一部であって, したがってもはや使用者の環境の一部ではないと述べた(1985)。この理論化(鍋島, 國吉, 2008)や, 運動学的なエビデンスの蓄積(Itaguchi, 2020)も進んでいる。またヒトは道具の運動を抽象化して表現(シンボル化)することが

できる(アフォーダンスの概念の援用)ため、島田はこれを身体そのものが着脱可能なイメージの対象になり得ると拡張している(2019)。ポランニーの盲人の杖のアナロジ(2003)からも、身体イメージの空間的な乖離は、環境因子によって埋められる余地があるように見受けられる。

一方で遠隔操作型のロボットに対しては道具の身体化が進展し辛いことが指摘されており(Itaguchi,2020)、この現象はユーザビリティのみならず主体感の獲得の課題にもなっていると考えられる。同じく前述したように、遠隔操作ロボットが操作者の身体から空間的に離脱しているため、体性感覚等の身体性に関する情報のフィードバックが乏しく、通信遅延等の影響が避けられず、直観的な参照が困難であることは身体化の困難性の要因の一つと考えられる。遠隔操作型の移動ロボットの身体化を実現できれば、ユーザビリティとともに主体感を向上できる可能性が考えられる。道具の身体化を工学的に再現することは本稿の目的を達成するための有力な手段となり得るため、そのメカニズムを考慮することは遠隔参加の確立に役立つはずである。

### (b) 自己のプロジェクション(投射)

道具の身体化は、自己の内部表象(本稿の上記の文脈では身体イメージ)あるいは脳の内部での情報処理の結果を外部の対象に定位させる心のはたらきといわれる自己のプロジェクション(投射)の概念(鈴木, 2016)(鈴木, 2019)で説明できる。これは典型的には前述の盲人の杖で例示され(鈴木, 2019)、ユーザが杖の操作に熟達してくると、杖の先に触れる対象(遠隔項, *distal term*)に対し、自らの手で触れているかのような情報処理(近接項, *proximal term*)が実行可能になる。この状態を、手のひらの感覚が対象に投射(プロジェクション)された、と表現する。

外部にプロジェクションされるユーザの内部表象は、ユーザ個々人の感情等の高次の意識的な情報あるいは物語的自己(アイデンティティ)を反映し得るため、変更・制御の余地がある。具体的には、ヒトは外部の対象に、自己の知識や経験のような陳述的な情報を投射でき、例えばヒトはその外部に存在する物理的対象である墓石に対し、内部表象された先祖が安置されているという知識を投影して、単なる石から荘厳さを感じることができる、という例で説明される。ヒトの感覚・知覚ひいてはより高次の認知が遠隔操作型の移動ロボットに投射できれば、より主体感の高い体験の実現に繋がり得る。関連する現象としてはラバーハンド錯覚やフルボディ錯覚の現象が有名である。

### (c) 予測モデル

対象となる外部の物理的物体が観察者の内部表象に基づいた挙動から逸脱すれば、前述した自己のプロジェクションを定位させ続けることは困難となる(嶋田, 2019)。この観察者の内部表象に基づいた挙動は予測に他ならない。

また1章で述べたように、行為の結果を予測して、それが実際の行為の結果と照合された結果、これらに食い違いがなければ(自己)主体感が生じると考えられる(浅井, 丹野, 2007) (Wolpert et al., 1995)。

### (d) コンパレータモデル

コンパレータモデル(Synofzik et al., 2008)は内部に予測モデルを含み、ヒトが自身の行為から主体感を得るメカニズムを説明するとともに、本稿で重要視しているユーザビリティの問題とも関連する重要なモデルと考えられる。本稿では最終的に工学的な検討を目指すことから、認知神

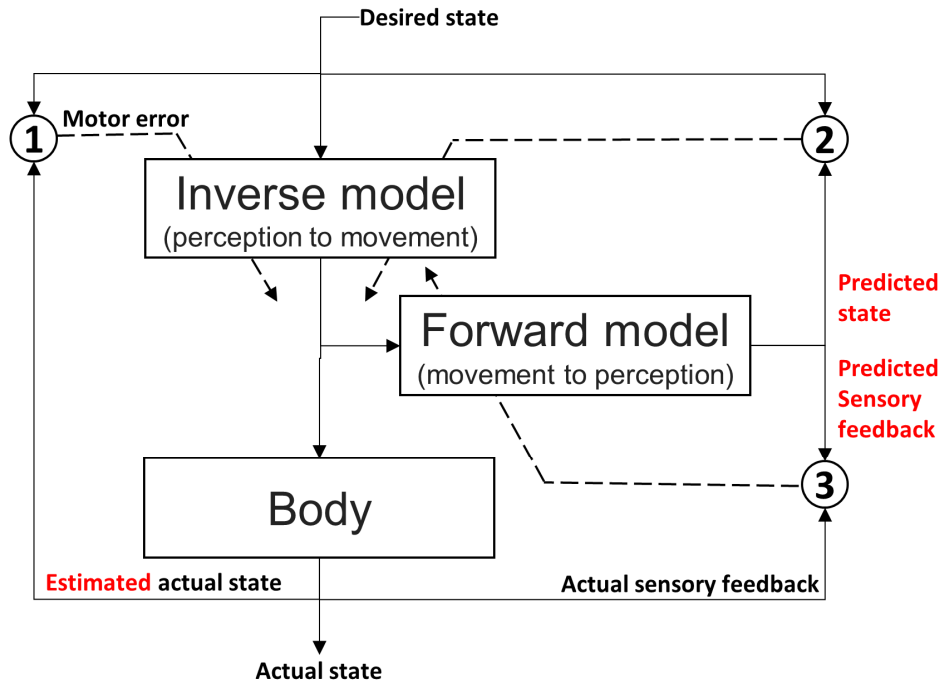


Fig.2.2 コンパレータモデル(Synofzik et al., 2008)の筆者によるブロック線図表現

経科学の枠組みで表現された Synofzik らのコンパレータモデル(2008)を、ノードを情報処理ブロック(伝達要素)とし、矢印をノード間の情報の流れを表すものとし、流れている情報の種類は矢印の近傍に付記することとする、いわゆるブロック線図の表現に改めた。これを図 2.2 に示し、以下これと(嶋田, 2019)とを参考に説明する。

コンパレータモデルは、知覚モダリティを介して理想的な状態(Desired state, 目標とする状態に相当する)の入力を受ける。遠隔操作型の移動システムを介した遠隔移動体験においては、ユーザがシステムを到達させたい位置や、移動したい距離や、所望の経路の経由点(サブゴール), あるいは速度や加速度等のよりダイナミックな規範(2.3.4 項)等の入力を受けることが想定できる。

理想的な状態に関する情報は、次に逆モデルによって処理される。逆モデルは、運動の最終的な目標から運動指令を逆算する。運動指令が筋肉等のアクチュエータを駆動すれば、実際の状態に関する情報が出力される。遠隔移動体験においては、例えばジョイスティックを倒す等の手先の運動が出力され制御指令値に変換され、これがシステムの現地サイトにおける実際の状態、例えば任意の時刻の位置等、を決める。

出力された実際の状態は、再び知覚モダリティを介した情報によって推定されることになる。遠隔操作型の移動システムでは、現地サイトでの実際の状態に関する情報をリモートセンサや通信デバイス、認知インタフェースを介して認知(確認)しなければならないため、条件によっては実際の状態とその確認の結果との間に誤差が生じる可能性があり、本稿の研究ではここに課題意識をもっている。

コンパレータモデルはさらに、目標から運動指令を出力する逆モデルに加えて、予測に関する順モデル(Wolpert et al., 1995)を含む。順モデルは、逆モデルから運動指令と同時に出力される運動指令の遠心性コピー(efference copy, あるいは随伴発射(corollary discharge))を、再び知覚できる情報に戻す情報処理を実行する。

コンパレータは比較器を意味する用語であり、コンパレータモデルは誤差を出力する 3 つの比

較器(コンパレータ)を含むこと、および各コンパレータの役割に特徴があるモデルである。

#### ・第一のコンパレータ

図 2.2 では①のノードで示している。第一のコンパレータは知覚情報により推定された実際の状態と、理想的な状態とを比較する。実際の状態の確認には後述する第二・第三のコンパレータのループよりも時間を要し、遠隔移動体験においては移動システムの停止や、減速の形で客観的に観察される。

第一のコンパレータから出力されるこれらの誤差は、次の操作や、逆モデルの学習に用いられる。したがって、第一のコンパレータから誤差が出力されることは、典型的には所望の行為の失敗や不器用さ、本稿の文脈ではぎこちなさが観察されることを意味している。失敗の情報を学習することでヒトの運動機能は向上できるといわれ(誤差逆伝播モデル)、これが訓練に相当する。誤差が行為の修正に用いられる場合、これは工学的にはいわゆる 2 自由度制御系のフィードバック制御系(閉ループ制御系)の再帰的な入力信号に相当する。例えばヒトのリーチング運動においては、2.3.4 項で述べる視覚フィードバックのメカニズムにより、動作主体が誤差に気付いてから手先の位置の修正が行われるが、この気づきを生成するコンパレータと考えることができる。

#### ・第二のコンパレータ

図 2.2 では②のノードで示している。第二のコンパレータは順モデルによって遠心性コピーから予測された状態(predicted state)と、予め知覚された理想的な状態とを比較し、これらの誤差を出力している。この誤差は同じく逆モデルの学習に用いられるが、予測は実際の状態の推定や、それに先立って実行される感覚情報のフィードバックよりもさらに先立って実行されるため、第一のコンパレータから出力される誤差よりも素早く逆モデルに反映され、次の状態(next state)の運動のフィードフォワード制御に活用される(Synofzik et al., 2008)。本稿の研究ではこれを予測に基づく運動出力の(素早い)調整と表現している。運動を一旦停止させる等して、第一のコンパレータにより実際の状態を(随意的に)知覚・推定し、逐次フィードバック型でアルゴリズム的な運動を実行するのは効率的ではないので、このように素早い予測情報が関与する。例えばヒトのリーチング運動においては、第二のコンパレータ(ダイナミック順モデル(forward dynamic model)とも称されている)は予測された次の状態と、理想的な状態とを、第一のコンパレータよりも先に比較し、自動(不随意的)かつ、高速の誤差の補正を実行しているといわれる(浅井, 丹野, 2007)。

以上の第一, 第二のコンパレータから出力される誤差は、主体感を損なうというよりもむしろ、運動の不器用さや、ミスが多さ、ぎこちなさの発生に関わる。これらのコンパレータから出力される誤差信号からは、自分の意図通りに自分の身体を制御できている感覚(sense of being in control)を高次の情報処理によって認知できる。一般的な主体感の検出には、異なる対象同士の間意図の付随性が検出されれば済み(Blakemore et al., 2003)、意図の付随性は自己の行為と結果との因果関係が事後的に認知できる(事後的な推論(ポストディクション))ため、例えば通信遅延がかなり大きくても主体感が完全に損なわれることはない想定される。

#### ・第三のコンパレータ

これに対して第三のコンパレータはより狭義の主体感の生起に重要と考えられ、順モデルによって遠心性コピーから予測された感覚情報フィードバック(Predicted sensory feedback)と、実際に入力される求心性の感覚情報フィードバック(Actual sensory feedback)とを比較し、これらの

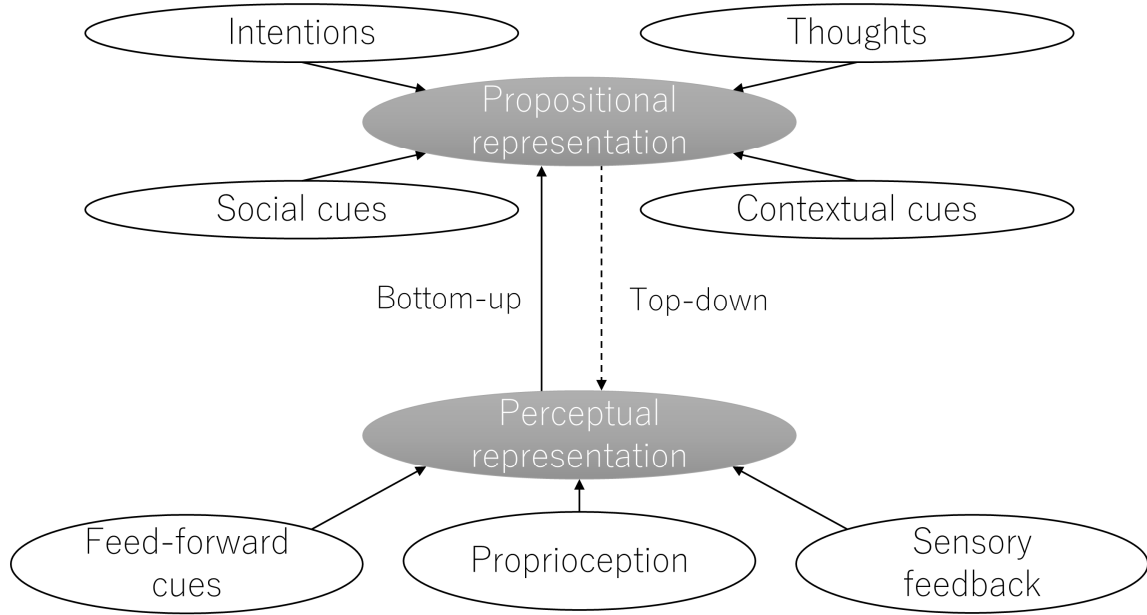


Fig.2.3 主体感の2段階のレベルの概念図((Synofzik et al., 2008)より引用・作成)

誤差を予測に関する順モデルの学習に用いている。図 2.2 では③のノードで示している。

第三のコンパレータにおいて、運動に伴い自己生成される求心性の感覚情報フィードバックと、遠心性コピーから予測された感覚情報フィードバックとの情報間に誤差が検出されなければ、前者の実際の感覚情報フィードバックの入力はキャンセルされる。感覚情報フィードバックがキャンセルされた状態においては違和感がなくなり、ヒトは行為を意識することなく自然に行っていると感じる(すなわち、主体感を得る)ことができるといわれる(浅井, 丹野, 2007)。典型的には、自己くすぐりの現象は、この第三のコンパレータの機能によってよく説明できるとされる。自己のくすぐり動作であれば感覚情報フィードバックが十分に予測でき、キャンセルされるため、くすぐったさを感じなくなる。

第三のコンパレータの出力誤差信号があまりに大きくなると、何らかの外的な要因によって引き起こされたとする高次の判断に繋がる。これによって、確認された結果(推定された状態)およびこれを引き起こした運動に対して自己への帰属感すなわち(運動)主体感が減衰または消失してしまう(嶋田, 2019)。訓練を繰り返すことでこの違和感が低減することが、第三のコンパレータの誤差信号による順モデルの学習に相当する。なお、この第三のコンパレータはアウトプット順モデル(forward output model)とも称される。

#### (d) 主体感の2段階のレベル

Synofzik らは、前述した意図の付随性が検出されれば生起される一般的な主体感と、少なくとも自己の感覚・運動システムから意図的な感覚・運動の付随性を知覚することを要する自己の行為に関する主体感とを区別しており、前者を判断の主体感(judgement of agency)、後者をフィーリングの主体感(feeling of agency)と整理している(2008)。主体感がフィーリングと判断との2段階のレベルで表現された概念図を図 2.3 に示す。

##### ・判断の主体感

判断の主体感を構成する要素は意図(Intentions), 思考(Thoughts), 社会的手がかり(Social cues), 文脈手掛かり(Contextual cues)等である(日本語訳は(佐藤, 2011)を参照). つまり, 判断の主体感はいずれも高次の認知機能によって得られる情報に基づいている. これらの情報は概念的表象(Propositional representation)を構築する点で, 内部表象を外界に投影する自己のプロジェクション, ポストディクションに関連する主体感といえる. 判断の主体感が失われるのは, 操作結果に対して自分が生み出したものではないという可能性が残る場合である. 典型的には行為が成功できないとか, 行為が完全に期待に反する操作衝突(奥岡他, 2021)の状態が含まれる. これは排他性(exclusivity)と呼ばれ, 自分の行為が結果の唯一の原因であることが(判断の)主体感には重要となる.

### ・フィーリングの主体感

フィーリングの主体感は判断の主体感よりも低次の感覚や知覚のレベルにある情報処理により喚起されると考えられ, ロボットを通じてあたかも自分が移動していると感じられる体験の実現に向けて, より重要な感性的品質の要素となると考えられる.

フィーリングの主体感の構成要素は, 順モデル(Feed-forward cues), 体性感覚等を主とする自己受容感覚(Proprioception), そして感覚情報フィードバック(Sensory feedback)であり, いずれも第三のコンパレータに関連する. これらの情報が構築する表象は, 感覚運動表象(Perception representation)と表現されている. ギブソンの提唱するアフォーダンス(2004, 2011)もこのレベルにある. 本稿の研究の射程では, なるべく少ない感覚モダリティ情報により, ユーザにフィーリングの主体感を想起させる必要がある. しかし例えば本稿の研究の射程に入る遠隔操作型の移動ロボットは体性感覚のフィードバックに乏しいため, 自己受容感覚の要素を決定的に欠く. この影響をどこまで視覚情報で補償できるのかを明確にした上で他モダリティ感覚を適切に追加していくことが本稿の重要な興味の一つであり, 本稿では視覚誘導性の自己受容感覚(ベクション)の応用に着手している(4章, 5章).

また本稿は思い通りの移動操作性を定義してその向上を目指し, これに付随して主体感が向上すると仮定するものであり, 主体感の直接的な検証は今後の重要な課題である. 判断の主体感は, 意図と結果の整合性を現象面で評価する第一・第二のコンパレータに強く関連し, 失敗の頻度を減らすことにもつながるからユーザビリティの問題により密接にかかわる. 一方で, フィーリングの主体感は感覚情報フィードバックの予測を含むので, より感覚的な第三のコンパレータに関連が強い.

思い通りの移動操作に起因するフィーリングの主体感の定量的な評価は今後の重要な課題となるが, このように主観的な心理量を測定するには心理学的尺度構成法, 精神物理学的測定法がある(谷口, 2017). 後者については分野によって呼び方が若干異なるようであり, 本稿では心理物理的手法と称する. より直接的にユーザの印象を捉えるには心理学的尺度構成法が有利と思われる. 例えば Sato and Yasuda は主体感を 0-100 の主観的スコアで実験参加者に回答させる評価手法を採用している(2005). 基準刺激(自らの行為と等しい刺激)と, 様々な水準の比較刺激とを実験参加者に次々に比較させ, 実験参加者に自らの行為であるかを回答させ, その確率で評価する, 心理物理的手法における恒常法, 極限法あるいは適応法の適用も可能である(津村, 1986). すなわち, 実験参加者が自己の行為ではないと判断する率が高まるほど主体感は減じていると評価される. これらの評価法は事後的に主体感を意識するため, 判断の主体感の計測にはなり得てもフィーリングの主体感を直接的に評価できるとは言えない手法であり, 実験参加者の認知バイアスの影響

表 2-1 マーの 3 レベル

---

I. 計算理論(Computational Theory)

計算の目標は何なのか, なぜそれが適切であるのか,  
そしてその実行可能な方略の論理は何であるか.

II. 表現とアルゴリズム(Representation and Algorithm)

この計算理論はどのようにすると実行することが可能になるのか.  
特に, 入力と出力の表現は何であるか. そして, 変換のためのアルゴリズムは何か.

III. ハードウェアによる実現(Hardware Implementation)

表現およびアルゴリズムがどのようにすると物理的に実現されるのか.

---

等, 考慮すべき課題も多い. 他にラバーハンド錯覚の発生を客観的に示すポインティング位置のドリフトや, 感覚減衰, あるいはダミー側に危害が加えられることが予測される等の嫌悪刺激に対する種々の生体反応(渡邊, 川合, 2016)等の指標も定量的な主体感の把握に役立つ可能性もあるが, 自己の身体から離れた遠隔操作型の移動システム, あるいは自己の運動に麻痺のある本稿のステークホルダに対してそのまま適用するのは容易ではなく, 定量的な評価指標に関しては今後の重要な課題となる.

### 2.2.3 その他の感性要素

トレイグジスタンス技術では身体所有感と行為主体感の他に, 自己の位置定位をその重要な要件としているようである. これは, 見当識と表現される感覚に含まれるものと考えることができる. 本稿の研究で扱う思い通りの操作は, 自己の位置の認識と遠隔操作型の移動ロボットの位置の認識とのずれに関するため, 少なくとも自己の位置定位が正確になされる必要がある. したがって, 本稿の研究では, 主体感の一つの要因として, 自己の位置定位に関するデータを扱うものにも位置付けられる.

他に前述したように, 遠隔側から存在感を発揮できない Social presence(社会的存在感)の問題(Iwasaki et al., 2019), 現地側の対象の存在感を抱けない Tele-presence の問題(村上他, 2010), 作業の一体感を抱けない Connectedness(つながり感)の問題(IJsselsteijn et al., 2003), 何もできないと感じる Self-efficacy(自己効力感)の問題には大きな改善の余地があると考えられる.

## 2.3 コンパレータモデルの工学的表現の検討

コンパレータモデルや 2 段階モデル(Synofzik et al., 2008)は思い通りの移動操作とユーザビリティ・感性的品質の課題とを結びつける重要なモデルであるが, 認知神経科学の分野で活発に議論されている影響もあり抽象度が高い. これらの知見の社会的実装のためには入出力の関係をより具体的に定め, ハードウェアの拘束に明確に配慮する工学的なモデルを考慮しておくことも重要と考えられるので, 本節では工学的知見を導入する. 工学的なアプローチの必要性は, マー(Marr

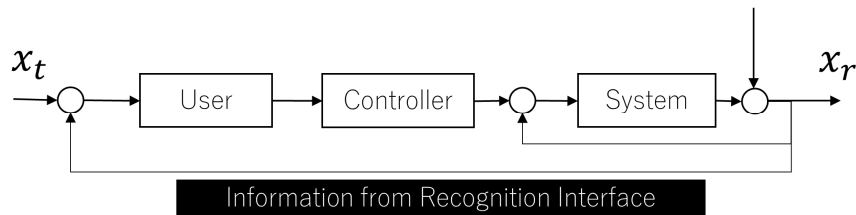


Fig.2.4 基本的な人間機械系のブロック線図

D.)の情報処理課題を実行する機械を理解するのに必要な3つの水準(1987)で指摘されている。これを表2-1に示す。最上位のレベルI(計算理論)は抽象的であり、ヒトの運動がある種の情報から、別の情報への写像として特徴づけられる。情報の入出力関係の特徴づけるコンパレータモデルはこのレベルIの検討に役立つ。一方でコンパレータモデルでは入出力の表現が抽象的である。例えば、本稿の射程では視覚や体性感覚を明確に区別する動機があるが、コンパレータモデルではこれを統一的に扱える。また例えば、遠隔操作で実行したい活動は様々にある中で、本稿の射程ではそれを移動に限定する動機がある。レベルII(表現とアルゴリズム)はこの入出力の表現と、変換するのに必要なアルゴリズムの決定である。本稿の心理物理的手法を用いた実験はこの水準に近づく。上記のアルゴリズムは脳のハードウェアとしての性質の拘束を受けるため、さらにレベルIII(ハードウェアによる実現)が導入される。これは情報処理を行うヒトや動物のハードウェアは、脳(神経系)1種類しかないためである。脳のメカニズムを工学的に解明していこうというのが、計算論的神経科学という分野における取組であり、川人は計算論的神経科学の定義について、脳の機能を、その機能を脳と同じ方法で実現できる計算機のプログラムあるいは人工的な機械を作れる程度に、深く本質的に理解することを目指すアプローチと述べている(1996)。本稿の研究の射程では、操作対象としての遠隔操作型の移動システムの拘束が加味される。

### 2.3.1 ヒトの操作するシステムを含むモデルの基本形

ユーザとしてのヒトを情報処理システムと捉えたと、入力される情報は遠隔の現地サイトから何らかのデバイスを通じて伝達されて知覚あるいは認知される情報、出力される情報は何らかのコントローラの操作のための身体運動を通じて生成される運動に関する情報と整理できる。図2.4はヒト自身を含むヒトの遠隔操作するシステムのモデルをブロック線図形式でシンプルに表現したものであり、(伊藤他, 2006)等で用いられている。

はじめに、入力される目標に関する情報(コンパレータモデルでは理想的な状態と表現される情報)を明確にする。本稿の研究では遠隔操作型の移動システムの移動体験を射程とするので、この場合はユーザがシステムを到達させたい位置(以下、単にターゲット位置と称する)がシステムの理想的な状態を端的に表現する。地面上を移動するシステムであれば2成分、ドローンのように空間を移動するシステムであれば3成分のベクトル表現がターゲット位置の表現に相当するが、本稿では簡単のため入力情報をターゲット位置 $x_t$ と表現する。各章で詳細に説明するが、本稿の実験では基本的な検討を進めるため、システムの移動を直線に拘束している場合がある。添え字の $t$ は、位置座標がターゲットに関する情報であることを明示するために用いた。

システムの操作結果の出力情報(コンパレータモデルではシステムの実際の状態あるいは推定された状態と表現される情報)には $r$ を付す。これは身体を有するシステムの典型例であるロボッ



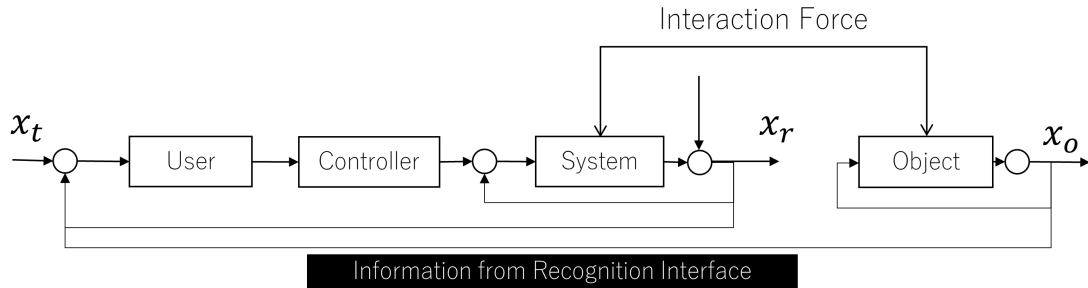


Fig.2.5 外部とのインタラクションの考慮

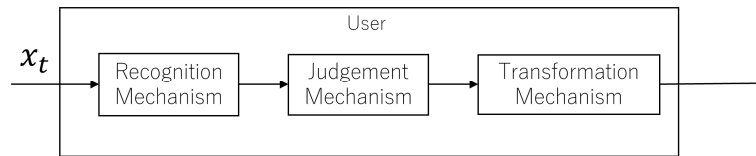


Fig.2.6 ヒトのメカニズムの考慮

トの頭文字を意味する。認知インタフェースを通じて確認される操作結果に関する情報は同じくシステムの移動に関するものであるからシステムの現在位置 $x_r$ の情報となり、以下、自己位置 $x_r$ と称する場合がある。

図 2.5 は(杉原, 2018)を参考に、ロボット等と外界との物理的な接触に伴う情報の流れを反映したモデルである。遠隔参加できる活動の選択肢を拡大するには、システムを介してユーザが遠隔の対象と物理的に接触できることが望ましい。接触が実現すれば、遠隔参加できる活動が飛躍的に拡大する(ユーティリティ, 意味性の課題の解消に資する)。ひいては自己効力感の向上を通じて、感性的品質への寄与も期待できる。このモデルの特徴は、遠隔の対象(遠隔サイトの物体も参加者も含む)を、固有のダイナミクスを有するシステムと同格の存在とし、その相互作用を扱う点にある。相互作用力は未知とされ、システムに組み込まれていない。また、オブジェクト  $o$  に関する情報 $x_o$ も、認知インタフェースを介してユーザにフィードバックされる。未知の相互作用力や対象のダイナミクスまで制御するのは非常に困難な課題と考えられ、今後の重要な課題となる。なお、本稿の研究の一部では現地サイトの対象との接触について検討を加える。

### 2.3.2 ヒトの運動モデルの基本形

ヒトのメカニズムは、大まかには入力された感覚情報を知覚～認知して随意的に判断する段階、判断に基づいて運動を不随意的に計画(座標変換)・実行および修正(制御)する段階のそれぞれに相当する情報処理を考慮する必要があると考えられる(川人, 1996)。本稿の研究ではシンプルな運動に関与すると思われる知覚～認知の処理と、複雑な操作に関与すると思われる判断との区別を要するところ、工学的な分野では、ヒトが各種タスクを実行する際の目的・目標を実現するためのプロセスを、認知、判断、行動の 3 ステップに分け、ブロック線図に落とし込んでいる例が見受けられた(荒金他, 2001)。各ブロックが相互に関連しているとする表現(小堀, 2011)も見受けられた。これらを参考に表現したブロック線図を図 2.6 に示す。以下、本章では各情報処理ステップに関連するモデルに関する計算理論として、ヒトの最も基本的な運動と考えられているリーチ

ング運動(手先の到達運動)に関する理論を中心とした調査結果を整理する。

### 2.3.3 知覚～認知・判断の段階のモデル

ヒトが自らの運動の実行によって外界に働きかけようとするとき、日常生活のほとんどにおいては、視覚に障害のあるヒト等の例外もあるものの、はじめに視覚情報を通じて何らかの目標を知覚～認知することになる。また視覚情報は網膜に投影される光に基づく二次元的情報であるのに、三次元での運動を実行するには三次元的な立体を把握しなければならない(Marr, 1987)。視覚情報は単純に物体や相手を認知する際には非常に重要な情報として用いられていると考えられるが、実際には、例えばヒトとコミュニケーションを行うようなケースを考えると、相手の動きを視覚的な情報だけではなく自らの運動に対応付けて認知することが知られる。自分が実際に運動をおこなうときと、単純に自分の運動をイメージするだけのときと、相手の動きを視覚的に認知する時の脳の活性部位は共通していて、ミラーニューロンがこの認知に多大な影響を及ぼすことが明らかにされている(Rizzolatti and Craighero, 2004)。しかしながら、ヒトの運動の説明を行うモデリングの体系においては、これらの運動の影響を考慮したものは少ないようである(門田, 2010)(小堀, 2011)。加えて、体性感覚情報等の他モダリティの情報を統合しなければならない。例えば習字等を手取り教える伝統的な受動型の教示の手法はこれに該当する。このような体性感覚を用いた体験は、視覚障害者の社会参加体験としても利用可能性が見込まれ、これに関する検討も進めている(河村他, 2014)。

認知モデルの構築にあたっては視覚情報が重要であるものの、古くから視覚ノイズを印加したり、視覚的注意をそらしたりするなどの巧妙な方法で、知覚、認知系における体性感覚統合の影響が指摘されている(Lanca M. and Bryant D. J., 1967)(Wapner S. et al., 1967)(Srinivasan M. A. et al., 1996)。視覚と体性感覚に限らず、多くの感覚モダリティがかかわる知覚はクロスモーダル知覚として近年検討が進んでいる分野であり(岡嶋, 2018)(田中, 2018)、例えばあるモダリティの情報により、他のモダリティの感覚を惹起するような錯覚現象が発見されてきている。しかしサイズや形状認知のような静的なタスク(開眼・非開眼に着目した(長尾, 出澤, 2002))あるいは完全に運動が完了した後で行う認知タスク(例えば(Wydoody P. et al., 2006)(熊崎他, 2006))による心理物理的な検討が多い。自己の運動と認知とは密接に関わるものであり(前述のアクティヴタッチやアクティブビジョン、ギブソンの生態光学(エコロジカル・オプティクス, 1986)等)、運動と分離されて考えられていることは課題と考えられている(小堀, 2011)。

本稿では、1章で述べたように単モダリティの情報の影響の検討から始めるが、視覚モダリティから入力される情報にも、様々な下位の要素が含まれる。例えば立体情報の知覚に必要な奥行き情報は様々な分類されており、相互に影響することもわかっている。これらの詳細は後の章で補足する。したがって視覚情報のみの影響の調査からは始める本稿の研究の位置づけにおいても、複数の下位要素の影響を考慮することは重用と考えられる。

#### (a) MLE モデル

Ernst and Banks は、触視覚情報各々の正規分布の分散を用いて、情報の重みづけを行う MLE (Maximum-Likelihood Estimation)モデルを提案している(2002)。対象物を視覚で捉えながら、手で対象物の空間的な特性(例えば、サイズ、形状、位置等の各因子)の認知を行う場合には、視覚情報と触覚情報が物体に関する知覚・認知(脳内表象)を生成する。多くの場合で視覚情報が優勢で

あるが、状況により明らかに触覚情報の影響を受ける場合が存在する。MLE モデルはこのような状況をよく説明するといわれる。統計学上の理論としては最尤推定法に分類されるため、MLE と冠される。

MLE モデルでは、最終的な物体の空間的な特性を知覚・認知するのに、視覚、触覚の各モダリティ情報の分散が最小となるように統合される。この統合の過程で、視覚情報、触覚情報のいずれが優勢であるか、およびその程度(各情報の重み付け)を決定する。視覚情報は視覚に関わる分散が触覚情報による推定にかかる分散よりも小さい場合に優勢であり、逆の場合に触覚情報が優勢になる。

$$\hat{S} = \sum_i \omega_i \hat{S}_i \quad (2-1)$$

式(2-1)における  $S$  は知覚・認知される物理特性を示す。また、添え字の  $i$  は、感覚の種類(由来するモダリティの別)を示し、視覚情報および触覚情報の 2 種類とする。さらに、 $\omega_i$  は感覚の重み付けを行う係数で、以下のように種々の独立の感覚情報の分散によって計算される。

$$\omega_i = \frac{\sigma_i^{-2}}{\sum_j \sigma_j^{-2}} \quad (2-2)$$

MLE モデルでは正規分布が仮定され、ベイズ推定における事前確率が均一であって、各々が独立であることが求められる(Bayesian prior is uniform)。式(2-2)によれば、重み付けは独立な感覚情報の分散の逆数(すなわち精度)により行われる。最終的な分散は、

$$\sigma_{VH}^2 = (\sigma_V^{-2} + \sigma_H^{-2})^{-1} = \frac{\sigma_V^2 \sigma_H^2}{\sigma_V^2 + \sigma_H^2} \quad (2-3)$$

と表される。ただし、 $\sigma_V^2$  は視覚情報単独の推定データにかかる分散であって、 $\sigma_H^2$  は触覚情報単独のデータにかかる分散である。 $\sigma_{VH}^2$  は MLE モデルによって計算された、視触覚情報を統合した後の空間特性の認知データにかかる分散である。

### (b) ロバスト統計的推定モデル(MWF モデル)

複数の感覚モダリティ間の情報の不一致(乖離)が大きいときに観察されるヒトの振る舞いは MLE モデルで説明できない。Landy らは奥行き情報の知覚に関する実験を通じ、ロバスト統計的推定モデルとして、MWF(Modified Weak Fusion)モデルを提案した(1995)。統計学上の理論としてはベイズ推定の手法が用いられる。

MWF モデルでは、使用できない情報、もしくは使用するにあたり信頼性の足りない情報は、その重み付けを小さくされる。MLE モデルでは感覚情報の分散の逆数が重み付けに利用されたが、MWF モデルでは最終的な推定に及ぼす影響の大きい情報が利用される。すなわち、種類の異なる認知の手掛かりたり得る感覚情報は可能な限り独立に処理されるが、信頼性が失われたり、矛盾したりしたパラメタを有する情報は認知の手掛かりとして相応しくないため、その情報の分散(精度)に関わらず、他の情報にとって代わられる。なお、このモデルは典型的には種々の視覚的な奥行き手がかりについて検討されたモデルであり、奥行き手がかりに関しては本稿の後半の興味である。

### (c) Shearing Model

複数の情報を独立して使用するモデルとしては、完全に独立して用いる Sharing Model と、

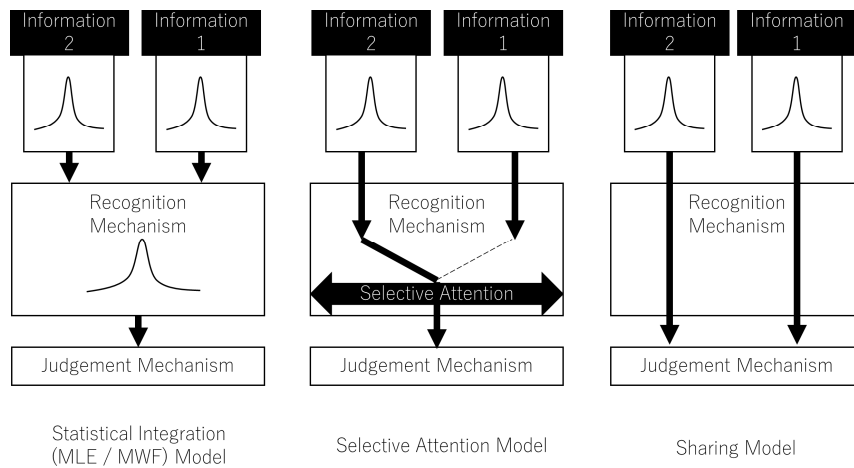


Fig.2.7 認知モデルの整理

Attention(選択的注意)によって情報を選択的に使用するモデル((Guest. and Spence, 2003)では便宜的に Type 1 Mixture Model と称される)と、が提案されてきた。Guest and Spence は、これらに上記 MLF や WMF モデルに代表される各情報を統合して用いるモデルを加えた 3 モデルの適用について、視覚と触覚に粗さ情報を提示する実験を行い、Sharing Model が結果によく当てはまることを報告している(2003)。

以上、Selective Attention を用いるモデルを含めて 4 つのモデルについて述べた。概念を図 2.7 にまとめる。

#### (d) 判断のモデルについて

判断はヒトの極めて高次元な情報処理である意識にかかわり、そのモデル化は困難な課題である。本稿の研究では判断をシンプルにするため、各実験において、実験参加者の判断を例えば停止のみ、のように極めて限定的にする工夫をしている。これにより、出力される状態の多様性は失われるが、実験参加者の個性や経験に大きく依存する判断の部分の影響を分離することができる。

#### 2.3.4 計画・実行および修正段階のモデル

運動計画は判断結果をコントローラの操作に関する何らかの運動に変換する自律性の高いメカニズム(順モデル)に支えられていると考えられる。視覚モダリティで得られた情報から判断された理想的な状態は、視覚座標系で脳内表象されるので、これに基づいて運動を生成するためには身体座標系における運動座標への座標変換を行わなければならない(例えば(乾, 2012))。遠隔操作では環境中心座標系で表現されることが多いと想定されるターゲット情報を、少なくとも身体中心座標系での表現に変換する必要があると考えられている。本研究での目的となる運動は、例えば、ヒトの操作するシステムのコントローラの操作するための手先を含む上肢の複雑な動きが想定される。このため、視覚情報で表現された目標を実現するための運動指令を計算する逆モデルが必要であり、計算論的神経科学の分野のモデルでは逆ダイナミクスを計算するモデルや、逆キネマティクスを計算するモデルが検討されている。しかしシンプルなリンク機構に近似される腕を用いた軌道計画でさえ冗長で、理論上は無限に近い軌道を取ることが可能であり、一意に運動を決めることは困難である。ヒトは外界のダイナミクスを学習してなめらかな運動ができるよう

になることから、逆ダイナミクスを仮定するモデルのほうがより支持されているようであるが、未だいかなる計算モデルで説明ができるのかは明らかでない(桐谷他, 2007)。

このように脳内で複雑な計算が行われているとすると、ヒトの脳の情報伝達にかかる時間の特性や、到達運動における普遍的な特徴等の生理学的な知見、あるいは心理物理学的に計測された実際の運動の性質に合致しないため、実際にはヒトは過去の経験により構築された内部モデル(フィードフォワード制御系)を用いて運動が実現されるといわれる(川人, 1996)。フィードフォワード制御は素早く効率的な運動の実行に必要である。精度良く(つまり修正なく)フィードフォワード制御できるようになることが、操作への習熟であるといえる。

一方で、ヒトは予想外の外乱に対しても、あるいはまったくはじめてのシチュエーションであっても、柔軟に臨機応変に、巧みな運動を学習・実現でき、この基盤はフィードバック制御のメカニズムであると考えられる。運動の実行には運動の計画によって予測されたものを実現するだけでは足りず、外界との相互作用が生じる以上、対象物や相手からの影響を受けるためこれを修正・学習することを要する。ヒトはある程度新奇な環境に対しても柔軟に運動でき、対象物や、ヒトと円滑なインタラクションを実現できる。このヒトらしい機能を支えているのがフィードバック制御のメカニズムと考えられる。運動を計算通りに、内部モデル通りに実現するためには、運動中に自らの運動結果を確認して、修正する必要がある。この段階では、コンパレータモデルにおける第一のコンパレータが直接的に関連するものと想定される。さらに素早い動作では、予測との誤差の情報が役立ち、これは第二のコンパレータが出力する。この情報はフィードバック的な行為の修正というよりも、前述のようにフィードフォワード制御の出力の精度を上げるための調整に用いられているものと解釈されている。

#### (a) リーチングの普遍特微量

ヒトのリーチングは以下の重要な普遍的特徴をもつことが明らかになっており(川人, 1996)、ヒトの不随意的な運動はこの特微量を出力するように拘束されているものと考えられる。これが乱されるときには、随意的な判断や、環境からの予測できない影響(外乱)を受けている等、別の事情を考慮する必要がある。

(不変特微量①)ターゲット位置に向かっておよそ直線軌道になる

(不変特微量②)速度波形が左右対称のベル型になる

以下のモデルでは、これらの特微量の再現を目指した評価関数の探索が行われている。

#### (b) 躍度(Jerk)最小モデル

これらの普遍的な特微量は、加速度を時間微分した躍度(加加速度, Jerk)を最小とする評価関数をもった躍度最小モデルによって実現が可能であるとされてきた。この評価関数  $C$  は式(2-4)で表現される。

$$C = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2) dt \quad (2-4)$$

なお、 $x(t)$ および $y(t)$ は平面上の手先の位置を、 $t_f$ は運動時間を表す。ここで、評価関数  $C$  の最小値は常に  $y=0$  のとき与えられ、これは直線軌道に相当する(普遍特微量①)。また、躍度最小モデルでは式(2-5)を満たす必要がある。

$$x^{(6)} = 0 \quad (2-5)$$

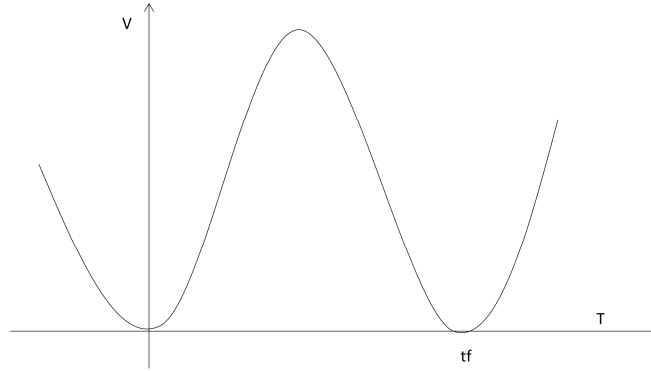


Fig.2.8 ベル型速度波形

式(2-6)は  $x(t)$  が  $t$  の 5 次関数となることを意味しており，すなわち，躍度最小モデルの速度波形は図 2.8 に示すベル型(普遍特徴量②)となる。

しかし実際のリーチングでは軌道が曲がったり，非対称となったりするように，理論的な軌道からのずれが観測される。また躍度最小モデルはヒトの運動計画が視覚情報のみで一意に定まるモデルになっており，ヒトが新奇力場でもリーチングできること，すなわち体性感覚を踏まえた運動計画が可能であることを説明できない点が指摘されていた。

### (c) トルク変化最小モデル

そこでトルク変化最小モデルが導入された。本モデルは，運動計画に身体的な体性感覚情報も採用されるといった双方向型の神経回路の議論と，視覚のみに基づく一方向性の神経回路の理論との対立にひとまずの結論をもたらしたと評価され，最もヒトのリーチングの結果をよく説明するといわれる(川人, 1996)。トルク変化最小モデルは，歴史的には躍度最小モデルを発展させたものに該当する。トルク最小モデルは，身体の運動力学特性を考慮した動力学に基づいたダイナミックなモデルである(Uno et al., 1989)。評価関数は式(2-6)で表現される。ただし，肩のトルクを  $\tau_1$ ，腕のトルクを  $\tau_2$  とする。

$$C_J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (\tau_1^2 + \tau_2^2) dt \quad (2-6)$$

### (d) 終点誤差分散最小モデル

前述したようないくつかのモデルを通じて，生物にとって滑らかな運動をすることにはいかなるメリットがあるか，という哲学的な考察もなされてきた。リーチングの目的は，手が目標の近傍にいるという結果を得ることに他ならない。リーチングの軌道はノイズによって毎回異なる者であり，軌道が直接的な評価関数の目的にはなっていない可能性が考えられた。ノイズの標準偏差は神経(シナプス)の平均発火頻度と単調な関係にあり，生体はこのノイズを避けることができない。したがって，生体にとってのリーチングの究極目標は，滑らかさの追求ではなく，ノイズによる誤差分散の生成をできるだけ小さくすることである可能性がある。このような趣旨に基づいて考案されたモデルを，終点誤差分散最小モデルという。

### (e) フィードバック・フィードフォワードモデル

ヒトのメカニズムにおいては，フィードフォワード制御で脳内逆モデル(誤差逆伝播等のメカニ

ズムで上述したような運動規範が経験的に学習されたもの)が表象され、これを用いていると考え、これはコンパレータモデルにも反映されていた。一般に、上肢運動、特に腕のリーチングにおいては専らフィードフォワード制御が行われていると考えられてきた(安部川他, 2004)。一方、リーチング中に到達目標の位置が変位しても、迅速な運動の修正が現れる現象が報告され、上肢運動の実行段階における視覚フィードバック修正メカニズムの存在も指摘されるに至った。視覚情報に誘導される運動は視覚情報の使い方により、以下の三つの運動モデルに整理できる(福井, 乾, 2002)。

#### ・フィードフォワードモデル

フィードフォワードモデルでは、目標へ向かう手が描く軌道は運動開始前にすでに計画され、フィードバックは運動の最後でのみ使用されるとする。しかしヒトのリーチングでは、運動の初期段階であっても、ターゲット位置の変化に対応して、新たな軌道に修正される現象が観察される。フィードフォワードモデルではこれを説明できない。

#### ・フィードバックモデル

フィードバックモデルは、フィードフォワードモデルとは正反対のモデルであり、運動の軌道は事前に計画されておらず、ターゲット位置と現在の手の位置の差を絶えず比較しながら、リアルタイムで到達運動が生成されると考える。しかし、一般に、手の到達運動にかかる時間はわずか数秒程であり、この間リアルタイムで誤差を修正しては運動が間に合わなくなる。また、手が見えない状況でも到達運動を行うことができるため、フィードバックモデルには問題がある。

#### ・ハイブリッドモデル

フィードフォワードモデルとフィードバックモデル両者の複合モデルであり、ヒトのリーチングを2自由度制御系と捉えたものに相当する。ハイブリッドモデルは、運動の初期段階では粗い運動計画の通りに運動がなされ(フィードフォワードモデルの要素)、その後軌道がリアルタイムにオンライン制御される(フィードバックモデルの要素)と提案している。しかし、運動の前半の何割がフィードフォワードモデルの要素で、後半の何割がフィードバックモデルの要素であるかは明らかにされていない。

### (f) 運動計画と実行・修正の関係

以上のように知覚・認知、運動計画、実行・修正の各段階には各々適用できると思われる様々なモデルが提案されている。本研究ではこれらを便宜的に区別して整理を進めてきた。

しかし、運動計画と実行・修正の段階を明確に区別して考えるか(計画・実行の逐次モデル)、区別しないか(最適フィードバックに基づく Todorov らの制御モデル)の2つの立場でのモデルが見受けられたので整理する。

一般的にリーチングでは、手先の現在位置(本章では $x_r$ と表現している情報)と、ターゲット位置(同じく $x_t$ )とのずれに気付いてから視覚フィードバックを行っている、随意的な制御を示唆する考え方がある。一方で、視覚フィードバックを制御工学における古典的なフィードバック制御と類似の枠組みで捉え、視覚フィードバックは自動的かつ離散的に繰り返されるものとする考え方も

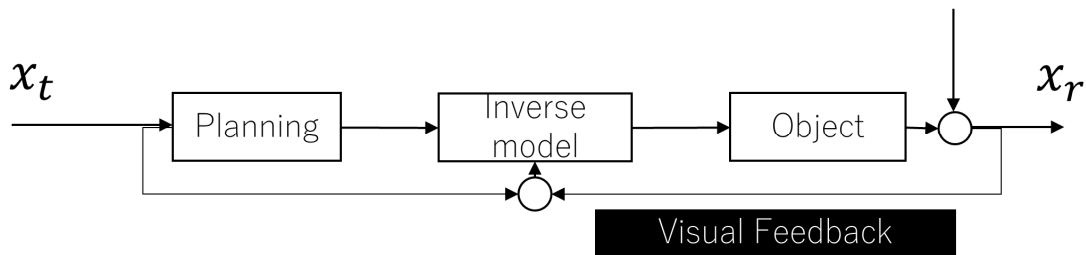


Fig.2.9 逐次モデル

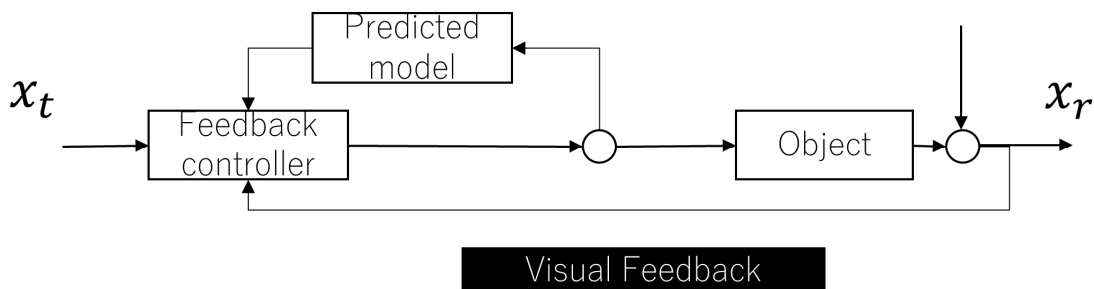


Fig.2.10 最適フィードバックモデル

ある。連続的と思われるヒトの情報処理を何らかのサンプリング周期を有する離散的と捉えるのは、脳の情報伝達に起因する時間遅れ(およそ 200ms 程度と言われている)があるためである。またこのために表面上、ずれに気付いてから行われるようなオンラインフィードバックにみえる。この考え方の問題は、時間遅れが大きいことと、生体ゲインが小さいことである。いずれにしても、以下の 2 つのモデルの適用が可能である。

#### ・軌道計画・実行の逐次モデル(森重他, 2004)

視覚情報は、ターゲット位置(森重らは経由点としてのターゲット位置を複数与え、これによりターゲット軌道进行评估している(2004)。本稿ではこれを複数のターゲット位置へのリーチングの繰り返しと捉えた)からの手先位置のずれを、逐次的に運動実行中にオンラインで修正すると考えるモデルである。図 2.9 にブロック線図で表現された逐次モデルを示す。

逐次モデルにおける特徴は、

- 計画(Planning Mechanism), 実行(Inverse Model)および修正(Visual Feedback)の順でターゲット物体(Object)へのリーチングが逐次実行される。
- 視覚情報は、ターゲット位置からの誤差を修正するためにフィードバック的に用いられる。である。なお Inverse Model(内部逆モデル)では視覚座標系で計画された運動が身体座標変換され、運動指令(Motor command)として出力される。視覚フィードバックは Inverse Model に作用している。

#### ・最適フィードバックに基づく Todorov らの制御モデル

図 2.10 に示す最適フィードバックに基づく Todorov らの制御モデルでは、運動中にも軌道計画(参照する規範)が変化していると解釈される(最適フィードバック)。つまり、軌道計画が実時間で変化し、その修正に関して運動計画段階と実行段階とを区別してしない。これは本章で参照した



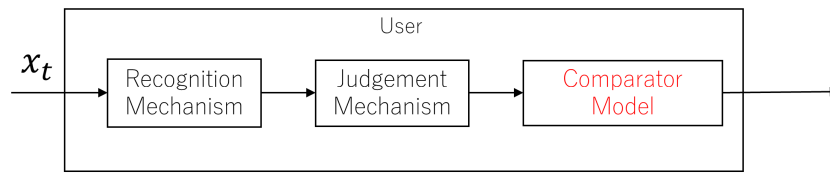


Fig.2.11 座標変換処理・制御ブロックにコンパレータモデルを導入する

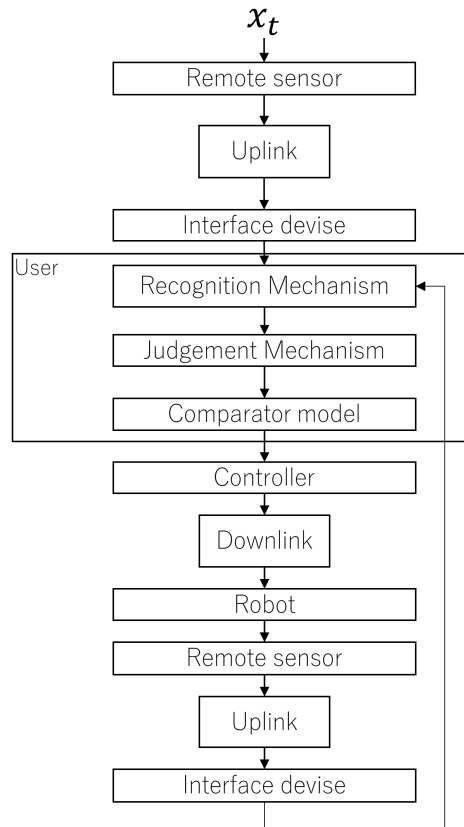


Fig.2.12 デバイスを反映する

コンパレータモデルを支持するモデルと考えられる。

### 2.3.5 センサおよびインタフェースデバイスおよびネットワークを考慮したモデルへのコンパレータモデルの当てはめ

本稿の研究に重要な示唆を与えるコンパレータモデルは逆モデルを陽に含み、運動の実行(・修正)段階の情報処理をモデル化したものに位置づけられる。本稿でははじめに、典型的には逆モデルで表現された図 2.6 の座標変換ブロックに、コンパレータモデルを当てはめる。これを図 2.11 に示す。

次に、図 2.4 や図 2.5 で表現されるように、操作の対象の遠隔操作型の移動システムを組み込むため、これらのユーザブロックを図 2.11 のものと置き換える。なお簡単のため、本稿では対象のダイナミクスは省略する。更に、本稿では現地サイトのロボットからの感覚フィードバック情報がデバイスによって変換されることに問題意識を持っている。例えば、ロボットに関する視覚

情報は、それを現地サイトで撮像するカメラや、遠隔サイトで表示するディスプレイによって変換された情報となる。この情報の変換の影響を明確に考慮するために、ここまでのモデルにさらに現地サイトのセンサ(例えばカメラや力センサ)および遠隔サイトの認知インタフェースデバイス(例えばディスプレイやハプティックインタフェース)のノードを陽に追加する。最後に、原理的に避けることができないと表現してきた通信に関する時間遅れの要素をモデルに反映することを考える。遠隔操作型の移動システムは、ユーザの身体から空間的に完全に分離するため、その間の情報の伝達には時間がかかる。遠隔サイトのユーザおよび操作インタフェースとしてのコントローラや認知インタフェースとしての種々のデバイスと、現地サイトのセンサデバイスを含むシステムとの間の情報処理はネットワークが担う。ネットワークには、遅延や離散化(符号・復号)、冗長性や信頼性、誤り、アップリンクとダウンリンクでの情報の重要性の差異等の特有の問題が生じる。これを遠隔操作型の移動システムに考慮することは将来的に重用と思われる。これらの問題を検討するフレームワークは既に確立しているようであり、多数の検討例が見受けられた。これに伴ってネットワークを考慮したブロック線図も多様に表現されているように見受けられた。本稿では、ネットワーク要素(アップリンク、ダウンリンク)の存在をシンプルに表現し、モデルに反映することにとどめる。以上を反映したものを図 2.12 に示す。

### 2.3.6 コンパレータモデルの拡張

モデルにシステムやセンサを明確に組み込むと、コンパレータモデルにおける各コンパレータから出力される情報の処理も影響を受ける。このため、コンパレータモデルを遠隔操作型の移動システムに適用するための拡張について検討をすすめる。図 2.13 にその結果を示し、以下、これを参照しながら説明する。

#### (a) 第一のコンパレータの拡張

第一のコンパレータと対応するコンパレータ 1'を想定すると、システムやセンサの考慮によって拡張が必要となる点は、比較対象となる実際の状態に対応するのが自己の運動(遠隔操作型の移動システムの場合はコントローラを操作する自己の手先の運動)ではなく、何らかの認知インタフェースを通じて知覚される移動システムの状態となる点である。本稿の課題認識では、この状態の推定に際し、インタフェースデバイスに起因して大きな誤差が生じる可能性があるため、この影響を無視できない。

そこで第一のコンパレータに入力される情報が、インタフェースデバイスの影響を受けていることを明確に表現するため、これを制約のある情報から推定された実際の状態(Actual state estimated using constrained information)と表現した。また、この情報は再度認知メカニズムの影響を受けることを明確にするため、あえて複数の Recognition Mechanism のブロックが表現されている。なおコントローラの操作のためのコンパレータモデルも表現する必要があると考えられたため、コンパレータは入れ子状の構造になっている。

#### (b) 第二・第三のコンパレータの拡張

第二・第三のコンパレータと対応するそれぞれのコンパレータ 2',3'を想定すると、システムの運動に関する予測を出力する順モデルが必要となる。この順モデルに自己の運動を予測する順モデルをそのまま用いることができれば、ヒューリスティックな制御方式の支援手法となる。しかしながら現状では、自己の運動を予測する順モデルがシステムの運動の予測にも共通して用いら



学習しているが、システムの予測のための順モデルは獲得されていないものと想定されるため、はじめての操作にはしばしば大きな違和感が伴うものと想定される。一般的に、これを解消するためにシステムの操作に先立って導入されるのが初期訓練であるが、本稿の研究には初期訓練が困難なユーザがステークホルダとして含まれており、これを前提としない動機がある。加えて、第三のコンパレータにも第一のコンパレータと同様に、デバイスを介した情報が入力される(制約のある実際の感覚フィードバックと称する)ので、情報が大きく変化する問題が生じる。理解しにくい情報がフィードバックされると、第一のコンパレータとは異なりこれをリアルタイムで解釈することは難しいので、予測される情報との誤差はさらに大きくなることが予想される。逆にいえば、はじめてのシステムを操作する際に、システムの運動から予測される感覚フィードバックと、制約のある実際の感覚フィードバックとを十分に近似できる条件を見出すことができれば、誤差信号はキャンセルされ違和感を生じず、ひいては自己に関するフィーリングの主体感を生起できる可能性が考えられる。

## 2.4 結言

本章では、思い通りの移動操作性の向上と、感性的品質の要素との関係に関する関連研究について整理し、思い通りの移動操作性が主体感と重要な関係を有することと、コンパレータモデルを導入した。さらに、コンパレータモデルをヒトの操作するシステムのブロック線図表現に組み込み拡張した。

---

# 第3章

## 研究手法

---

### 3.1 概要

本稿の研究では、思い通りの移動操作性を向上させるのに有効と考えられる予測に基づく移動の誤差の低減作用を活用するため、移動に関する予測の正確性等の特性を調べる。

本章でははじめに、思い通りの移動操作性を向上するのに予測が果たす役割について述べ、予測を正確にすることで思い通りの移動操作性の阻害要因の影響を調整する方法論について述べる。

次いで、予測の特性を定量的に検討するための指標として、位置の予測誤差を導入する。同時に、本稿の実験に共通する位置の予測誤差の計測手法について述べる。計測手法の要点は以下の3点である。

- ①ターゲット位置に関する情報を与え、操作を開始させる。
- ②操作中に自己(ロボット)の現在位置に関する情報を与え、その予測を可能にする。
- ③①と②の同時比較、あるいは修正が困難な状況下で停止させる。

### 3.2 予測を用いた思い通りの移動操作性の向上の方法論

1章で述べたように、本稿では思い通りの移動操作性の向上を「より少ないやり直しあるいは操作時間でより良い移動の精度を得る」と定義した。そして、思い通りの移動操作が実現できている理想の状態を、「1トライアルで、かつ、システム上の最短時間で、移動に関する誤差が0」である状態と想定した。

「1トライアルで、かつ、システム上の最短時間で、移動に関する誤差が0」を2章の図2.4等と同様にターゲット位置 $x_t$ 、および遠隔操作型の移動システムの自己位置 $x_r$ とを用いて表現すると、操作の確認の結果、第一のコンパレータによって再帰的に入力される誤差を $x_e$ とすれば、

$$x_e = x_t - x_r = 0 \quad (3-1)$$

が、トライアル(試行) $n = 1$ において実現されること、と表現される。

#### (a) 目標・自己位置認知の誤差要因

しかしながらターゲット位置 $x_t$ はその知覚～認知の段階で認知インタフェースの影響を受け、ユーザに入力されるターゲット位置 $x_t$ にはこれに起因する誤差が含まれている可能性があり、これは本研究の重要な課題認識である。いま、ターゲット位置の真値を $\hat{x}_t$ 、認知インタフェースを

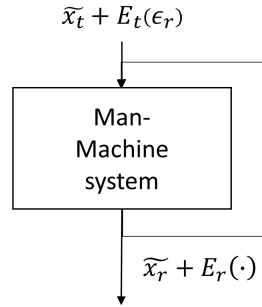


Fig.3.1 真値からの誤差を考慮した思い通りの移動操作の入出力関係

通じた認知メカニズムに起因する誤差要因を $\epsilon_r$ ，これに起因して生じるターゲット位置に関する誤差を $E_t(\epsilon_r)$ とし，ユーザに入力される(認知される)ターゲット位置を

$$x_t = \tilde{x}_t + E_t(\epsilon_r) \quad (3-2)$$

と表現することと定める．

これに対して，客観的に観測されるシステムの自己位置 $x_r$ にも同様に，ユーザの所望の位置という意味での真値 $\tilde{x}_r (= \hat{x}_r)$ に対し，何らかの要因により誤差 $E_r(\cdot)$ が生じる．ここで，誤差 $E_r(\cdot)$ の $(\cdot)$ には以下で定義してゆく誤差要因が入る．この場合，「1トライアルで，かつ，システム上の最短時間で，移動に関する誤差が0」である状態は，図3.1にシンプルに示すような入出力関係となり，式(3-1)は

$$x_e = (\tilde{x}_t + E_t(\epsilon_r)) - (\tilde{x}_r + E_r(\cdot)) = 0 \quad (n = 1) \quad (3-3)$$

と表現できる．図3.1の唯一のブロックには，図2.13の拡張コンパレータモデルが当てはまることが仮定できる．図2.13では，各情報処理ブロックにおいて何らかの誤差要因が生じることを，各ブロックに向かう矢印と，符号 $\epsilon$ とで表現している．これらの定義を，以下，図2.13を参照しながら説明する．

### (b) 操作量の事前判断の誤差要因

最終的にシステムの自己位置 $x_r$ が出力されるまでに，ユーザはまず，入力されたターゲット位置 $x_t$ に到達するためにいかなる操作をするか，少なくとも移動の操作量(入力)をその事前判断メカニズムによって定める必要がある．ユーザは様々な方略の下で操作の判断を行うと推定されるが，移動の操作量と移動操作の結果との対応関係を完全に学習(習熟)するのは極めて困難であり，その精度には限りがある．本稿では，ユーザビリティの観点から訓練をなるべく不要としたい動機があり，システムの習熟の影響は排除して検討を進める．すなわち，本稿ではユーザがシステムおよび遠隔環境に関していわゆる初見の状態であることを想定しており，思い通りの移動操作性の向上のためにはユーザは大きな誤差のある判断に基づいてとにかく操作を開始して，操作量(入力)と移動操作(出力)との関係を素早く予測，あるいは結果を確認する必要がある．

本稿では，この事前判断メカニズムに起因する誤差要因を $\epsilon_j$ と表現する．すなわちシステムの自己位置の誤差 $E_r(\cdot)$ は事前判断メカニズムに起因する誤差要因の影響を反映して誤差 $E_r(\epsilon_j)$ と改められ，事前判断メカニズムから出力された情報 $\tilde{x}_r + E_r(\epsilon_j)$ は，次工程の情報処理ブロックに入力される．

### (c) 操作運動の出力の誤差要因

操作量の事前判断メカニズムから出力される情報 $\tilde{x}_r + E_r(\epsilon_j)$ は、第一に、コンパレータモデルに入力され、これに含まれる逆モデルによりユーザの身体運動に変換され、移動操作のための運動の規範となる。この時、自己位置の情報 $x_r$ は逆モデルにより身体座標系で表現され出力されるが、身体運動の誤差(すなわち操作ミス等)があると最終的に出力される自己位置に影響が生じる。通常、自己の身体に対しては十分に習熟した逆モデルが獲得されていると考えられるが、本稿のステークホルダである当事者等は運動障害を有する可能性があるためこの限りではない。また、ヒトの操作には入力情報に依存しないレムナント(内部雑音)も存在するといわれる。

したがって、コンパレータモデルから出力される運動指令の誤差要因 $\epsilon_o$ を想定する。これらの誤差要因の相互関係は明らかではないので、コンパレータモデルから出力される自己位置に関する情報はシンプルに $\tilde{x}_r + E_r(\epsilon_j, \epsilon_o)$ と表現する。

#### (d) システム・外乱の誤差要因

コンパレータモデルから出力される自己位置に関する情報 $\tilde{x}_r + E_r(\epsilon_j, \epsilon_o)$ は次に遠隔操作型の移動システム(簡単のためにコントローラ、インタフェースデバイス、現地サイトの移動システム本体、センサデバイス等を含む総称とする。図 2.13 を参照のこと)に入力される。

システムには、1章で述べたように表示遅延の影響や、制御の影響、現地サイトの環境との相互作用に起因する外乱、通信ノイズ等、様々な誤差要因が想定され、これを包括的に $\epsilon_s$ と表現すると、システムの自己位置 $x_r$ は $\tilde{x}_r + E_r(\epsilon_j, \epsilon_o, \epsilon_s)$ と少なくとも3つの誤差要因に起因する真値からの誤差を反映したものになる。つまり、ユーザが十分に操作対象である遠隔操作型の移動システムの操作に対する挙動、あるいは遠隔操作型の移動システムと現地サイトの環境との相互作用等に十分に習熟していなければ誤差が生じる要因となり得る。

以上を踏まえると、式(3-3)は下記のようにアップデートされる。

$$x_e = (\tilde{x}_t + E_t(\epsilon_r)) - (\tilde{x}_r + E_r(\epsilon_j, \epsilon_o, \epsilon_s)) = 0 \quad (3-4)$$

これを成立させるには、4つの誤差要因の影響をそれぞれ0にする方法が考えられるが、現実的な手法とはいえない。

#### (e) 予測の誤差要因

そこで第二のコンパレータのはたらき、すなわち予測に関する順モデルの機能が重要となる。コンパレータモデルによれば、操作量の事前判断メカニズムから出力される情報は第二に、システムの次の状態(Next state, すなわち操作運動の出力に対応する自己位置 $x_r$ の次の状態)を予測する順モデルに入力される。遠隔操作型の移動システムの状態の予測は、システム等を初見で操作する想定では困難であり、モデル化誤差等が生じると考えられる。順モデルに起因する誤差要因を $\epsilon_p$ と想定する。

この時、予測される自己位置は実際の感覚フィードバック(Actual sensory feedback)と素早く比較され(第三のコンパレータ)、順モデルの学習に用いられるとともに、ターゲット位置 $\tilde{x}_t + E_t(\epsilon_r)$ とも素早く比較され(第二のコンパレータ)、操作出力の調整に用いられる。この調整は少なくともユーザにとっては自己位置に関する誤差 $E_r(\epsilon_j, \epsilon_o, \epsilon_s)$ を低減する作用を持つ処理であるから、この予測に基づく誤差の低減作用を $P(\cdot)$ と表現する。この時、低減作用は少なくとも、感覚フィードバック情報の認知メカニズムの誤差要因 $\epsilon_r$ および順モデルに起因する誤差要因 $\epsilon_p$ の影響を

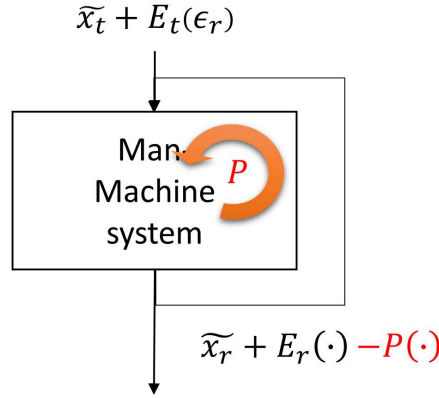


Fig.3.2 予測に基づく誤差の低減作用の概念図

受けるはずであるから、予測に基づく誤差の低減作用を $P(\epsilon_p, \epsilon_r)$ と表現することとする。また、この概念を図 3.2 に示す。

以上を踏まえると式(3-4)は下記のようにアップデートできる。式(3-5)は、ユーザの意図に反する移動の各誤差要因の影響をその正確な予測に基づく操作の調整(P の作用)により補償することで、移動に関する誤差を 0 にすること(理想的な思い通りの移動操作性の実現)を意味している。

$$x_e = (\tilde{x}_t + E_t(\epsilon_r)) - \{\tilde{x}_r + (E_r(\epsilon_j, \epsilon_o, \epsilon_s) - P(\epsilon_p, \epsilon_r))\} = 0 \quad (3-5)$$

予測が正確でなければ、あるいは予測が正確であったとしてもターゲット位置の認識が誤っていたとしたら(後述する式(3-6)を参照のこと)、予測に基づく誤差の低減作用 $P(\epsilon_p, \epsilon_r)$ が発揮されたとしても $x_e \neq 0$ になる。この場合は第一のコンパレータの機能により、 $x_e$ が確認され、再度操作のやり直し(途中から)や慎重な操作が実行される。トライアルを繰り返しても $x_e$ が許容範囲 $\delta$ に収まらなければ、思い通りの移動操作性が得られず、移動に関するユーザの所望のタスクは失敗する。この場合は、訓練や自動化の対策が必要となり本研究の目標である社会参加の支援にはならない。そこで、思い通りの移動操作性を向上する必要がある、本稿の研究では「より少ないやり直しあるいは操作時間でより良い移動の精度を得る」ことを目指す。

#### (f) 普遍的に思い通りの移動操作性を向上し得る方法論

すべての誤差の要因の影響を 0 に近づけるのは前述のとおり困難であるが、一方、必ずしもすべての誤差要因が小さくなくても、予測に基づく誤差の低減作用 $P(\epsilon_p, \epsilon_r)$ を活用し、より少ないやり直しあるいは操作時間で

$$E_t(\epsilon_r) \approx (E_r(\epsilon_j, \epsilon_o, \epsilon_s) - P(\epsilon_p, \epsilon_r)) \quad (3-6)$$

を達成することができれば、思い通りの移動操作性を向上させることができると考えられる。

すなわち、予測に基づく誤差の低減作用 $P(\epsilon_p, \epsilon_r)$ を有効に活用して式(3-6)を満たすように予測によってその他の誤差を補償することが、思い通りの移動操作性の向上につながる普遍的方法となる可能性がある。

本稿の研究は予測に基づく誤差の低減作用 $P(\epsilon_p, \epsilon_r)$ を有効に活用するため、感覚フィードバック情報の認知の誤差要因 $\epsilon_r$ を変調可能な要因(変数)としても解釈し、あえてユーザがシステムの自己位置を予測するための認知情報を工学的に変調することを目指す。

すなわち、本稿の研究の目的は 1 章【本稿の射程 6】で示した通り、思い通りの移動操作性の



向上に有効と考えられる予測に基づく誤差の低減作用を活用するため、その正確性等の特性を調べることである。

本稿では以下の2ステップで検討を進める。システムの社会実装が最終的な目標であるから、筆者は理論的な検討以上に社会実装に直接的に寄与する応用的なシステムの試作・開発や評価を最終的な目標の達成のための重要な手段とみなしており、以下のアプローチに反映している。

【ステップ1】遠隔操作型の移動システムの試作・評価を通じて、操作が予測通りに実行できなかった(思い通りの移動操作性の低かった)現象を検出する。

【ステップ2】この現象を、定量計測可能な位置の予測誤差で検討する。

以下、本章では適宜、2章で拡張したコンパレータモデル(図2.13)を参照しながら位置の予測誤差を導入する。なお単にコンパレータモデルと称する場合は認知神経科学における Synofzik らのモデル(2008, 図2.2)を意味している。

### 3.3 位置の予測誤差の導入

#### 3.3.1 位置の予測誤差の定義

本稿の研究は、遠隔移動体験をその射程としている。移動に関する思い通りの移動操作性を計測するため、最もプリミティブな位置に関する評価指標として位置の予測誤差を導入する。

以下、本稿では予測誤差を、①移動(停止)のターゲット位置の認知と、②予測的な自己位置(すなわち、システムの特定の部位の現在位置あるいは次の状態での位置)の認知との誤差、と定める。①②いずれも主観量であり、計測には心理物理的手法のうち調整法を用いることとする。検出される位置の予測誤差は、ユーザにとって、ターゲット位置と主観的に等しい(主観的等価値(Point of Subjective Equality: PSE)と称される)位置を表していることになる。調整法は主観的等価値を計測するのに適した手法といわれる。

#### 3.3.2 位置の予測誤差を検出するための方法論

本稿では、予測誤差を検出するために2つの異なる情報をユーザに提示した。これらは2章の拡張コンパレータモデルにおいて、それぞれターゲット位置の情報(コンパレータモデルの表現では理想的な状態)と、システムの自己位置に関してフィードバックされる制約のある実際の感覚情報(同じくコンパレータモデルにおいては第三のコンパレータにフィードバックされる感覚情報)とにそれぞれ対応する情報である。以下、詳説する。

##### (a) 第一の情報

第一の情報 $I_1$ は、ユーザに①移動(停止)のターゲット位置 $x_t$ を認知させるための情報である。簡単のため、本稿の研究では移動と停止を区別せず、所望の位置で停止できることは、所望の位置に移動できることと対応するとシンプルに捉える。なお、例えば移動プロセスでは速度や加速度の変化が生じ、リーチングにおいてヒトはこれらの情報を規範としている可能性が指摘されている(2章)が、本稿の研究では移動プロセスの目標を与えない。これらが規範となるか否かは次の操作量の事前判断のメカニズムに委ねられる。この意味で、本稿の研究における思い通りの移動操作性の定義は、最終的な移動の誤差が許容範囲に抑えられていれば、その移動プロセスも思い通

りに実施されているものと解釈していることになる。遠隔移動体験に関して、位置以外の目標設定に関する検討は今後の発展的な課題となる。

ターゲット位置の情報 $x_t$ は十分に正しく認知された( $E_t(\epsilon_r) \approx 0$ )と仮定する。位置の予測誤差は、前述のように②予測的な自己位置の知覚と①ターゲット位置の認知との差と定義するため、①と②それぞれに誤差要因があると、位置の予測誤差がシステムの予測にかかわる②に起因するのか、単に①ターゲット位置の認知に起因するのかを分離した考察が困難となるためである。

したがって詳細は各章で説明するが、①ターゲット位置の認知は十分に正確にできたと仮定するための工夫を施された情報 $I_1$ を提示するとともに、実験によってはその検証を追加で実施した。すなわち本稿では下式が満たされていることを仮定できるようにする。

$$x_t(\in I_1) \approx \tilde{x}_t \quad (3-7)$$

これにより、予測誤差の計測精度から、ターゲット位置 $x_t$ に関する認知の誤差の影響を排除することができると考えられる。

## (b) 第二の情報

第二の情報 $I_2$ は、ユーザに停止時の②自己位置 $x_r$ を予測的に認知させるための情報である。拡張コンパレータモデルでは、第二の情報 $I_2$ は操作開始後に制約のある実際の感覚フィードバック情報として第三のコンパレータに入力されると想定している。

本稿の研究では、第二の情報 $I_2$ の知覚～認知が自己位置の予測に及ぼした影響を検出する。第二の情報 $I_2$ は、1章や2章で検討してきたように、遠隔操作型の移動システムの活用の際に、認知インタフェースの影響( $P(\epsilon_p, \epsilon_r)$ )の $\epsilon_r$ 要因の影響を大きく受ける可能性があるためである。

いま、自己位置 $x_r$ は式(3-5)より

$$x_r = \left\{ \tilde{x}_r + \left( E_r(\epsilon_j, \epsilon_o, \epsilon_s) - P(\epsilon_p, \epsilon_r) \right) \right\} \quad (3-8)$$

とアップデートされたが、実験的な環境設定により予測に基づく誤差の低減作用 $P(\epsilon_p, \epsilon_r)$ 以外の誤差の影響が十分に小さい( $E_r(\epsilon_j, \epsilon_o, \epsilon_s) \approx 0$ )と仮定できれば、式(3-7)とから、予測に基づく誤差の低減作用 $P(\epsilon_p, \epsilon_r)$ は下式(3-9)で示されるように、物理量として計測が可能な実際のターゲット位置 $x_t$ と実際の自己位置 $x_r$ とで近似されることになる。

$$x_t - x_r \approx -P(\epsilon_p, \epsilon_r) \quad (3-9)$$

しかしながらユーザは当然に $x_t - x_r \approx 0$ を期待して操作を完了しているはずである。このため、式(3-9)の左辺の実際の計測値が大きければ、これは予測に基づく誤差の低減作用 $P(\epsilon_p, \epsilon_r)$ の誤差を示しているものと考えられる。

本稿では下式のようにこれを位置の予測誤差 $\Delta x_p$ と定義して、予測の特性に関して客観的な計測を実施する。

$$x_t - x_r \equiv \Delta x_p \{ E_t(\epsilon_r) \approx 0, E_r(\epsilon_j, \epsilon_o, \epsilon_s) \approx 0 \} \quad (3-10)$$

## (c) 計測条件

しかしここで、 $x_t$ および $x_r$ が同時に(静的な認知プロセスによって)確認できた場合、システムの予測モデルを介さない第一のコンパレータを経由したフィードバックのメカニズムがはたらくため、操作のやり直し毎に予測誤差 $\Delta x_p$ はキャンセルされてゆく。第一のコンパレータにより $x_t$ およ

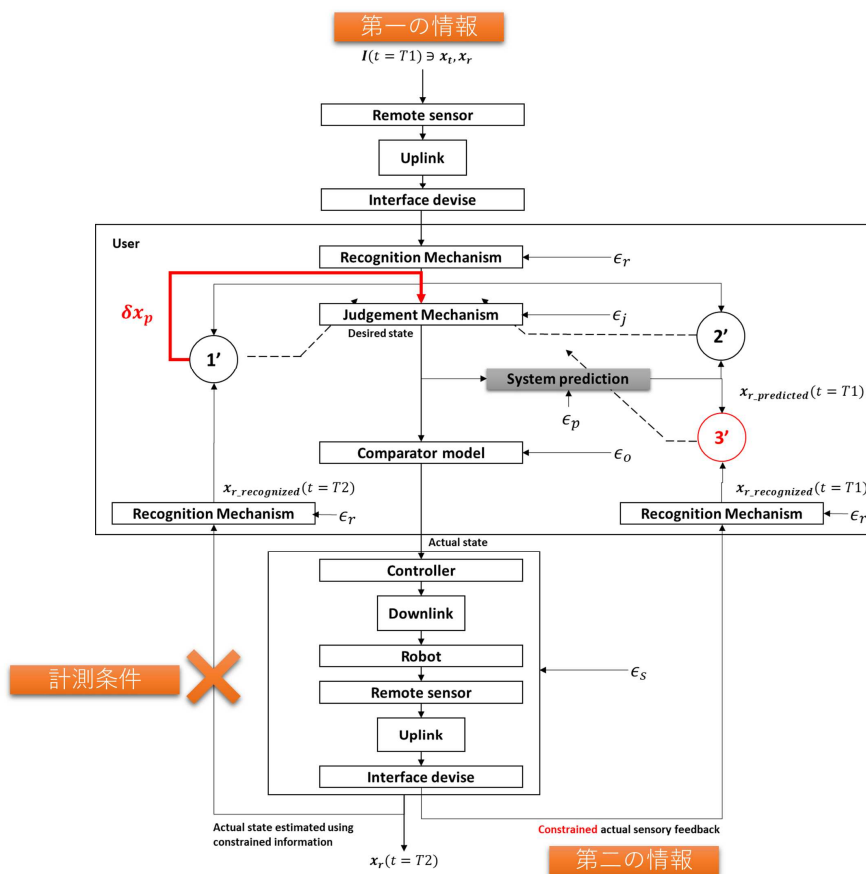


Fig.3.3 予測誤差の計測手法と拡張コンパレータモデルとの対応関係

び $x_r$ が同時に認知できる条件下で操作に十分に時間  $t$  をかければ、あるいは十分に試行  $n$  を重ねれば、

$$\Delta x_p \rightarrow 0 \quad (t \rightarrow \infty \text{ or } n \rightarrow \infty) \quad (3-11)$$

となるので予測について検討するための計測値としては意味がなくなる。

そこで、本稿では $x_t$ および $x_r$ の同時比較(同一条件での目視)が困難な状況を設定し、速度を統制したり試行のやり直しを禁じたりする等の方法で、操作結果の確認ひいては第一のコンパレータの駆動を阻害するよう工夫する。詳細は、各章の研究手法の節で詳細に説明する。

### 3.4 位置の予測誤差の計測方法

図 3.3 に示す、上記の方法論を反映した拡張コンパレータモデルを参照しながら具体的な位置の予測誤差の計測方法を説明する。

第一の情報 $I_1$ は、コンパレータモデルに入力される理想的な状態に対応する。移動ロボット(の代表位置。移動に関するタスクの目的に応じて変化し、例えば移動そのものが目的であればロボットの外形、接触が目的となればマニピュレータの先端(6章参照)が停止すべき位置(=ターゲット位置)である。ここで図 3.4 に示すように、第一の情報の入力時刻  $T_0$  をシステムの移動開始の直前と定める。

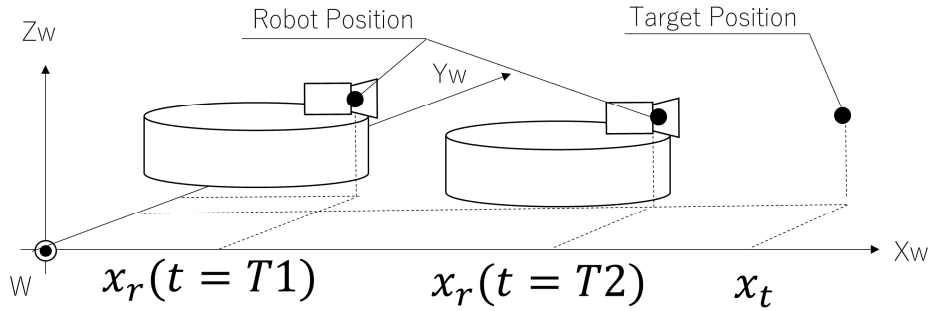


Fig.3.4 時刻の定義

第二の情報 $I_2$ は操作開始直後に制約のある感覚フィードバック情報として(不随意的に)入力され、その時刻を  $T1$  と定める。第二の情報は第三のコンパレータを通じてシステムの予測モデルに作用する。その結果、システムの状態を反映した自己位置の予測が可能となるように予測モデルが調整され、第二のコンパレータによる予測された自己位置と、予め認知されたターゲット位置との比較の精度が向上する。前述のように、第二のコンパレータから出力される情報は、操作のフィードフォワード的な出力の調整に用いられていると考えられている(Synofzik et al., 2008).

ここで、典型的には移動操作の一時停止( $t=T2$ )を伴う操作結果の確認に基づいて修正が行なわれる(第一のコンパレータから出力された誤差信号が随意的な操作のやり直しに用いられる)と予測誤差が消失してしまう。このため、本稿では制約のある情報実際の情報(システムの自己位置)と、理想的な状態(ターゲット位置)との 2 情報の直接的な同時比較ができないように計測条件を工夫し、操作のやり直しあるいは減速を伴う修正が困難な状況下でシステムの停止位置を計測した。予測誤差の計測条件は、第一のコンパレータの機能を妨げることを意味している。そして位置の予測誤差の測定は、第二のコンパレータの出力する誤差の近似的な測定値に相当する。

### 3.5 結言

本章では思い通りの移動操作性の向上に活用できる可能性のある、予測の変調を用いた普遍的な方法論を提案した。また、その基礎となる移動に関する予測の特性(特に正確性)を明らかにするための研究手法について述べた。

---

## 第4章

# 映像表現に起因する予測誤差の基礎検討

---

### 4.1 概要

本章では、本稿の研究で対象とする遠隔操作型の移動ロボットとその利点を明確にし、その操作にネイティブな映像を用いた場合に生じる位置の予測誤差に関する基本的な性質の検討を行った。その結果、従来映像の表現が遠隔操作型の移動システムの移動の予測に及ぼす影響は明らかではなかったところ、ネイティブな映像を用いるだけで大きな正の予測誤差が生じる基礎的な結果が得られた。また、その原因が映像の表示倍率や、奥行き表現に起因することが示唆された。これらの結果は、遠隔移動体験を提供するシステムにおいて思い通りの移動操作性を向上させるには映像表現に起因する位置の予測誤差の発生そのものを予防する設定が必要であることを示唆している。

また本章では同時に、ネイティブな映像に起因する位置の予測誤差の発生を、映像刺激を追加する表現上の工夫により変調できる可能性を示した。この結果は、映像表現に起因して生じる位置の予測誤差の発生そのものを予防することが困難である場合に、これをキャンセルできる可能性を示唆する。

### 4.2 緒言

#### 4.2.1 対象とするシステムとその利点

本稿の研究で対象とする遠隔操作型の移動システムは、小型の移動ロボットを含むシステムである。はじめに、想定するシステムの特徴について整理する。

##### (a) シンプルな移動機能

1章で述べたように、ロボットが現地サイトの広大な空間で自由に移動できれば、操作者としての現地サイトの参加者や環境とより能動的にインタラクションでき、自己の体験を現地サイトのロボットに重ねる自己投影体験のための主体感の向上に貢献できると考えられる。例えばロボットが現地側の参加者の視界に入り込むことで操作者の存在を主張でき、接近等の視点移動の Tele-presence 向上効果も検証されている(村上他, 2010)。移動機能だけでも、例えば現地側の物体に接近・接触して参加者に注目を促したり、押しやったり、食事等を乗せてもらい別地点まで運搬したりする程度の簡単な物理的作業であれば実現可能性も見込まれる。将来的にはさらに、

マニピュレータ等と連携する構成とすればインタラクションのさらなる多様化が期待され、検討が進められている(例えば(Yamamoto et al., 2019)を用いたもの)が、本稿ではその基本的な段階として、1章で述べた目的でシンプルな移動機能のみを検討対象とした。

二足歩行機構の採用は自己投影体験に有利と考えられるものの、その実用化は未だ困難な課題であり、多くの小型ロボットには車輪やクローラ等の機構が採用される。本稿の研究でははじめに走行面が比較的整った屋内での移動体験での検証・応用を目指して車輪により駆動するシンプルなロボットを採用している。

## (b) 汎用の操作インタフェース

移動ロボットの移動の操作インタフェースとしてはジョイスティックやメカニカルキーボードのような汎用的なシンボル入力のインタフェースを用いることができる。この特徴はコストや入手性の面で社会実装上、明確に有利と考えられ、本稿の研究でも採用している。

### ・汎用的なシンボル入力インタフェースの課題

一方で汎用的な操作インタフェースは、広くテレグジスタンス技術等(TELEEXISTENCE Inc., 2018) (Ikei Laboratory, 2019)(Motoi et al., 2019)で用いられるような体性感覚フィードバックのための機構を有さない。したがって、現地サイトから小型ロボットの移動に関する意味のある体性感覚情報のフィードバックをほとんど受けられない。汎用的なインタフェースを用いる限りでは、フィードバックを受けられるのはせいぜい指先の感覚程度となる。

また、汎用的な操作インタフェースと、シンプルな移動機能を有するロボットとの間の構造的な対応関係は希薄である。現地サイトのロボットの体験を遠隔サイトのユーザにリアルに伝達するための最もシンプルでヒューリスティックな操作手法は、同じくテレグジスタンス技術で採用されているような下記の構成である。はじめに、ロボットを等身大のヒト型に近い構造にすることである。次に、ユーザの動作(ジェスチャ)を計測して、これをそのままロボットへの操作信号とすることである。これにより、原理的には遠隔サイトのユーザと現地サイトのロボットの動作をほぼ1対1で対応させることが可能となる。二足歩行が未だ技術的に確立していないことに起因して、二足歩行をそのまま等身大のヒト型ロボットの操作信号とする移動機能に関しては見受けられなかったが、ユーザが人差し指と中指とを交互に動かして表現した歩行に類似した動きをロボットの操作に用いた例は見受けられた(稲見, 橋本, 2012)。このようにユーザとロボットとの構造および動作との対応の精度が高ければ、ユーザは現地のロボットをあたかもユーザの自身の身体あるいは分身(アバター)として直感的に操作できる。この相似あるいは等身大のヒト型構成・動作の直接入力システムでは、原理的にはユーザに実現にできるタスクであればすべて、現地サイトでも実現できる可能性がある。

したがって、構造がユーザと全く異なる小型ロボットにユーザ自らの移動動作を操作信号として直接伝達する意味は希薄になり、代わりにこれに対応するシンボルを入力することになる。例えばジョイスティックであれば、前進に対応するシンボル(コマンド)は一般的に、ジョイスティックを前傾させることに相当する。この場合、小型ロボットの前進とジョイスティックの前傾に意味的な共通点は認められるものの、ユーザの動作と小型ロボットの動作とは一致しないので、ユーザはシンボルに対する小型ロボットの動作を学習しなければならない。これらの特徴は、2章で説明したフィーリングの主体感のモデル(Synofzik et al., 2008)では、その要因の一つである自己受容覚が乏しくなることに相当しており、思い通りの移動操作をより困難にし、ひいてはこれ

に起因するユーザビリティの課題・感性的品質の課題に繋がるものと考えられる。この形態での直感的かつ主観的なヒューリスティック的移動操作の実現に接近するには、新たにシステムに関する内部モデルを学習しなければならず、これには操作を繰り返し学習し、習熟する必要がある。

#### ・利得

しかし、汎用の操作インタフェースには、本研究の最終的な目標を達成するにあたり大きな利得も見込まれ、本稿の研究で採用する大きな理由となっている。

第一に、本稿の研究のステークホルダが上述した相似あるいは等身大のヒト型構成・動作の直接入力システムを原理的に利用できない根本的な課題の解消に貢献できる可能性がある。上肢および下肢に運動・感覚障害のある重度四肢麻痺等の当事者に、トレイグジスタンス技術のコアである身体の広域に接触するタイプのバイラテラル型の操作インタフェースは、少なくとも下記の理由で利用困難である。

①上肢に触覚情報をフィードバックしても、感覚麻痺があれば知覚されない。

②ユーザの動作がそのまま現地サイトのヒト型ロボットに反映されるので、現地サイトのロボットもまた、重度四肢麻痺の症状を制約とする動作しか実現できなくなる。

③身体との接触のある装着タイプのインタフェースの着脱は、当事者の運動が困難のため煩わしく、介助を必要とする。

第二に、当事者等の体験における小型ロボットにまつわる上記の問題は、顕在化しない可能性が考えられる。重度の肢体不自由者は、当然障害の程度にもよるが、ジョイスティックやボタンのような汎用インタフェースで数種類の自由度の操作ができる。例えば、顎によって 1bit のバイナリ情報(on/off)を送信できる(チンスイッチと称される)。他に、視線の情報を用いれば平面上に配置された情報を制御でき、ASL 患者等の位置伝達支援を 50 音表上の注視点を弁別して行う機器があり、あくまで原理上は 50 種類もの操作信号の入力が可能といえる。デジタルな入力に限らず、アナログ情報の入力が可能な場合もある。障害像(ペルソナ)に応じて同時に操作可能な自由度は異なるが、例えば、高位脊椎損傷の患者(典型的には、電動車いすをジョイスティックで操るユーザ)は、一方の腕で少なくともジョイスティックの縦方向(前進と後退)・横方向(旋回)の 2 自由度をアナログ制御できるが、双腕を同時に用いると体幹のバランスが崩れる。操作入力の自由度の最適化は重要な課題となるが、ユーザの動作を入力信号として用いることができなければ、ユーザの意図する動作を完全に多い自由度のロボットに伝達することは難しく、この場合は自動化が必要となる等、UX の観点ではヒト型等の多自由度のロボットとシンプルな移動ロボットとの差はなくなる。ただし、現地サイトの参加者がロボットから受ける印象は大きく異なると考えられ、この観点では慎重な検討の必要がある。

#### (c) 小型

現地サイトで移動するシステムが小型であることは、現地サイトの対象との接触リスクを低減したり、込み入った環境を移動する体験をしたりするのに有利と考えられる。ローコストであり、入手性も高いことも小型の移動ロボットの利点であり、その UX を障害当事者に容易に試してもらうことができる。これにより魅力的な遠隔参加体験ができることを当事者等に気付いていただければ、そのまま小型移動ロボット日常的に活用していただくことは比較的低コストで済む可能性が高く、また新たなニーズの発掘に繋がると考えられる。本稿の研究はプロトタイプモデルの検討の側面もあり、小型の移動ロボットで基礎的な検討を進めるものである。

しかしながら、同じく現地サイトの参加者から見た小型ロボットを介するユーザの印象や、コミュニケーションの取りやすさ、センシングできる情報の種類(例えばロボットにカメラやマイク等を搭載すると、その測定点がロボットのサイズによって異なる)等に影響が出ると考えられ、今後の課題である。

#### 4.2.2 映像の課題

視覚情報はロボットや操作インタフェースの構造への依存が少ないため、以上のようなシステムの遠隔操作において重要性がさらに高まる。現地サイトを目視できない場合、視覚情報を得るには少なくとも映像を介する必要がある。この意味で、遠隔操作型の移動システムにおいて、映像は遠隔移動体験の要になる。外出に伴う身体の移動に関わる全ての負担を解消できる遠隔操作型の移動システムのメリットを最大限に生かすには、現地サイトを直接的に視認(目視)できない状況での活用がほとんどになるはずである。例えば、セルフケアのために目視可能な身の回りで稼働する遠隔操作型システムは役に立つと考えられるが、本稿のステークホルダは身の回りの観察動作にも困難を覚える場合があり(例えば首の動作や体幹の維持に困難を覚える等)、目視を前提としないことには意義がある。

映像化に伴う視覚情報の制約が、思い通りの移動操作を本質的に困難にしている可能性が考えられるが、特に、原理的に避けることのできない表示遅延の影響は大きいと予想され、その検討(米田他, 2017)(伊藤他, 2006)や、VR 分野での実装(Donovan, 2017)が進められている(1章)。

これに対して、映像ではシステムの構造等により、少なくとも視野・表示倍率・視点・解像度・色域・明るさ、奥行き情報等、目視とは異なる様々な表現をとることができる。逆に、システム間の構造上の差異に起因して、目視と全く同じ映像表現は原理上困難である。多様な表現ができることは、少なくとも遠隔移動体験の印象を大きく変え得る決して無視できない要因であるが、この本質的とも思われる要因が思い通りの移動操作性や、その下位の要因である予測に及ぼす影響は明らかではない。主たる映像表現に関する現状の統一的な見解は、1章で述べたように映像の精緻化等によりなるべく多くの視覚的情報を伝達することに留まるようであるが、前述の通信遅延とのトレードオフの問題があり、根本的な課題の解決には至らない。実用上は、現場での最適な映像表現の模索が重要となっている。主流な検討としては、主たる映像としてステレオ映像の活用を目指すものがあり、ユーザに3次元空間を知覚させることでタスク効率の改善(伊藤他, 2017)がなされている。この手法は思い通りの移動操作性の向上の観点では有効と思われるが、さらにその上位にある感性的品質の観点では、動揺病等を誘発する生理的な懸念(3DC, 2010)が大きく、本研究の目標においては慎重な検討を要する。性能面でも、立体映像によって必ずしも正確な3次元空間を認知できる訳ではなく(伊藤, 2010)、この理由の一つはステレオカメラによる撮像では原理的に空間が歪む(河合他, 2010)ためと考えられる。

一方で映像には、画像処理により様々な情報を追加する(ヴィジュアルエフェクトをかける)ことも、要約することもできる利点がある。例えば、オプティック・フロー等の速度情報を有効活用できる可能性が考えられる。オプティック・フロー(環境の包囲光配列の流動)は人間の低次の知覚機能に影響を及ぼす(ギブソン, 2004, 2011)(妹尾, 2017)。また従来、オプティック・フローによる速度感増強(中嶋, 福地, 2013)や、車速提示(舟川, 2010)がなされている。さらに、視覚的な速度情報が体性感覚に錯覚(Pseudo-haptics)を生じさせること(鳴海, 2017)が知られている。しか



し、その遠隔操作における活用の検討はなされていない。

映像表現の工夫による思い通りの移動操作性の向上が実現できれば、通信量の低減や、通信遅延と独立した影響をユーザに作用させることができ、もって通信遅延の悪影響のキャンセルに繋がる可能性が考えられる。

### 4.2.3 4章の目的

4章の実験の第一の目的は、汎用のWEBカメラから取得できる映像をそのまま汎用の2Dディスプレイに表示する、という最も基本的な未加工の映像(以下、ネイティブな映像と称する)を認知側のインタフェースに用いた場合にロボットの移動の予測が受ける影響を検出することを考察の起点として、映像表現が遠隔操作型の移動システムの移動の予測に及ぼす影響を調査することである。本章で検討する構成は、最も簡単に遠隔操作型のシステムに実装できる構成の一つであるにもかかわらず、その特性が十分に明らかでないまま用いられている可能性があり、この基礎的な影響を明らかにすることは重要な課題と考えられる。

第二の目的は、画像処理により追加した視覚的な速度情報が予測に及ぼす影響を計測すること、その活用可能性を検討することとした。本章の実験では、前述したオプティック・フローの情報について検討する。

## 4.3 実験方法

### 4.3.1 実験タスク

ユーザが遠隔操作型の移動ロボットをターゲット位置に停止(到達)させるタスクを用い、3章で説明したように位置の予測誤差を計測する。

本実験では、位置の予測誤差の計測条件にしたがって移動ロボットの移動の一部を視覚的にマスクしている。具体的には壁面で視線を遮っており、詳細は後述する。これにより、視覚でロボットの自己位置と、ターゲット位置との誤差を同時に捉えることを阻害して、いったん停止した位置からの移動操作結果の確認および操作のやり直しによる修正を防ぐ。

本実験では、ネイティブな映像の影響を検討するために、これを用いた遠隔操作型のシステムの移動に関する予測と、基準としての目視による予測との比較を行う。

図 4.1 に目視条件での実験環境の概念図を示す。実験参加者としてのユーザは座った状態で遠隔操作型の移動ロボットを観察する。ユーザは移動ロボットを X 軸正の方向に前進させ、ターゲットの位置で停止させる。ターゲット位置は常に目視が可能であるが、移動ロボットの現在位置はターゲット位置から 225mm 手前の地点からマスクされるように実験環境が構築された。

本実験では目視条件との比較のために、三人称視点の映像を用いた。以下、本稿では三人称視点は移動ロボット等の現地サイトの移動システムの全体像を観察できる視点と定める。例えば俯瞰視点は三人称視点の典型的な例である。観察に用いる視点の影響は認知科学、VR 分野をはじめ、遠隔操作ロボットに関しても検討されている(例えば安田他, 2016)。本研究では、ターゲットと遠隔操作ロボットの Y 軸(奥行き)方向の影響をなるべく抑えることで移動の予測に関する本質的な影響を探るべく、Y 軸正の方向に向けた視点を用いた。ただし後の章で定義するが、移動ロボットの 1 人称視点に相当するロボット視点のみを用いた方が、ユーザに馴染みがあるとともに、

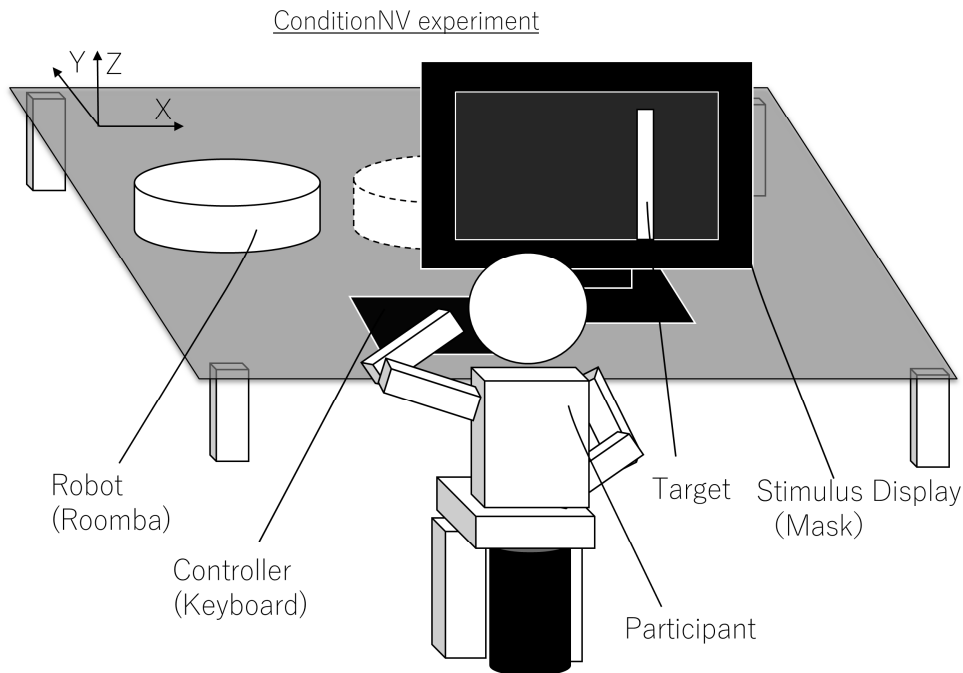


Fig.4.1 目視条件での実験環境の概念図

ユーザが自身の体験を現地サイトのロボットに重ね合わせることを目指す本研究の目標上も好ましい。しかしながら小型ロボットからの目視条件の構築は困難である。本章の位置づけはあくまでネイティブな映像とこれに基づく現地サイトの移動システムの移動に関する予測との本質的な関係の探索である。ロボット視点のみを用いた場合には特有の課題が発生し、本稿では次章以降で検討を加える。

### 4.3.2 実験装置

#### (a) 実験システム全体構成

実験に用いた遠隔操作型の移動システムの構成図を図 4.2 に示す。

入力(操作側)インタフェースには汎用的なメカニカルキーボードを用いた。実験参加者は汎用のメカニカルキーボードを用いて、制御用 PC に指令を与えた。コマンド入力は制御用 PC で処理され、現地サイトの移動ロボットに伝達された。

移動ロボットの自己位置に関する情報は、実験条件によって直接目視、あるいは三人称視点の環境カメラ(汎用 WEB カメラ)によって撮像された。撮像された映像は画像処理用 PC に伝達されるが、本章の実験では単にビューワを用いて WEB カメラからの信号を映像に変換して、汎用の 2D ディスプレイに表示した(ネイティブな映像の表示)。

以下、各要素について説明する。

#### (b) 移動ロボット

本章の実験では、移動ロボットとしてヒトよりもかなり小型の Roomba(536, iRobot 社)を適宜改造して用いた。直径は称呼寸法で 340mm, 高さは 92mm の円筒形状であった。Roomba の並進速度は等速(実測 90mm/s)とした。Roomba は本来、前進と後退と旋回が可能であるが、本実験

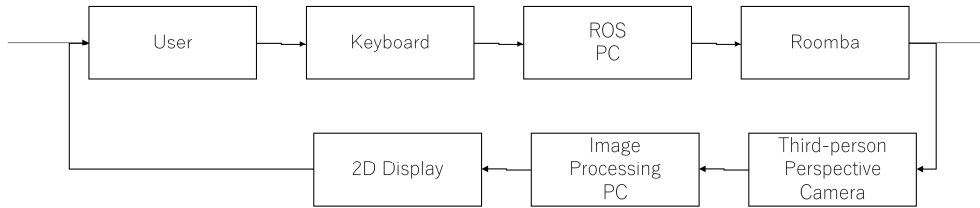


Fig.4.2 実験システム構成図

では前進(および停止)のみ実行できるように制限した. 制限はソフトウェア的に行い, 後述の ROS プラグラム上にて, 汎用のメカニカルキーボードに直進と停止の指令のみを割り当てることで実現した. なお誤操作を防ぐ目的で, 前進の指令はメカニカルキーボードの右手側の領域のキーに, 停止の指令は左手側の領域のキーにそれぞれ割り当てた. Roomba の後部には凸形状を 2 点設け, 試行ごとの進行方向のキャリブレーションをハードウェア的に実行する工夫を施し, 実験サイクルを短くし, 実験参加者の生理的な負担となる拘束時間を低減する実験計画とした. 本実験では後述するように, 多くの試行を繰り返すためである. 凸の先端 2 点を通る直線は, Roomba の進行方向に対して直交するように配置されている. ここで, Roomba の後部を壁面に倣わせると, 凸の先端 2 点が壁面に接触する. 2 点が床面と平行な平面上を移動すると仮定すれば, 2 点を通る直線は壁面上に一意に定まる(床面と平行な直線に一致する). したがって, その進行方向を定める法線も一意に定まる.

### (c) 制御用 PC のソフト構成

Roomba は, 汎用ミドルウェアの ROS(Robot Operation System Kinetic Kame)で制御された. Roomba の制御には, タートルボットの制御制御プログラムをベースに適宜修正を加えたものを用いた.

これらの制御ソフトウェアは仮想環境(Virtual Box)上の Linux ベースの OS(Ubuntu)上で構築された. 仮想環境を用いる利点はこれを駆動させるハードウェアを容易に変更できる点にある.

ROS のメインプログラム(ROS CORE)と, Roomba 側の制御ノード(エッジノード)とは同一のデスクトップ型 PC 上で構築した. Roomba への制御指令の通信は USB ケーブルを介した有線接続(USB 2.0)で実施した. エッジノードを Roomba に搭載可能な無線通信機能のある PC 等に構成すれば無線制御が可能となり社会実装上は必須の構成となるが, 本稿の研究はいずれも基礎的検討の段階にあり, 操作の確実性を重視して有線通信で実装した. なお社会実装上は, 受信機を備えるエッジコンピュータとして近年高性能化と低価格化の著しい進展があるボード型コンピュータ(Raspberry Pie 等)の採用が合理的手段と考えられ別途実装を進めている. この場合, 仮想環境上で基礎的なシステムを構築することが, ボード型コンピュータへのシステムの移植を容易にするのに大きく貢献する.

### (d) 三人称視点のカメラ

以下は, 後述する映像条件下でのタスクで用いる構成である.

三人称視点のストリーミングカメラとして, 汎用 UVC カメラ(c525, ロジクール社)を用いた. 本カメラは WEB カメラとして利用されることが想定されたカメラである.

### (e) 認知側インタフェース構成

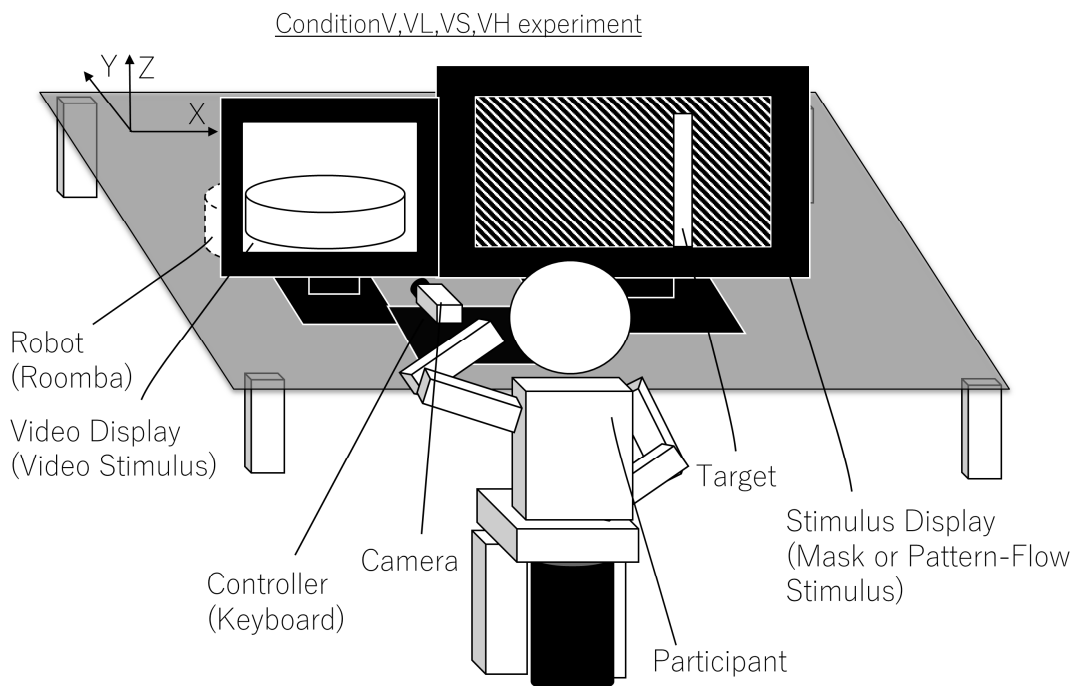


Fig.4.3 映像条件での実験環境の概念図

映像データは画像処理エンジン(OpenCV)によりキャプチャされて汎用 2D 映像ディスプレイ (17 型)を介してユーザに提示される. UVC カメラの撮影した映像を表示するのに必要最小限の機能のみを有するビューを用いており, 前述のように特殊な画像処理は加えなかった. ただし, 後述する目視条件と映像条件とにおける移動ロボットの見え方を統制するため, カメラ配置およびソフトズームの機能により表示倍率のみが微調整された. このため厳密には表示倍率によって映像の解像度が若干異なるが, この影響はわずかであり無視できる.

### 4.3.3 実験環境

#### (a) 目視条件

図 4.1 の実験環境では, 刺激ディスプレイ(31.5 型)によってタスク終盤での Roomba に関する視覚情報をマスクした状況を示している. この状況は, 後述する目視(肉眼)で Roomba の移動を直接的に知覚し, 停止位置を予測する条件(目視条件)で用いられた.

ターゲット位置は, 運動開始点から X 方向に 600mm の位置にある刺激ディスプレイ上にラインをひいて表現した. 刺激ディスプレイは, Roomba の運動開始点から 375mm オフセットして配置されたので, 実験参加者はタスク序盤 375mm の区間では Roomba の移動を目視でき, ターゲット位置の手前 225mm の区間では Roomba の移動を全く目視することができなかった.

#### (b) 映像条件

図 4.3 にネイティブな映像を用いた映像条件での実験環境の概念図を示す.

図 4.3 の実験環境では, 刺激ディスプレイをオフセットすることで Roomba の目視を許容した範囲を, 前述の映像ディスプレイ(17 型)でマスクした状況を示している. これによって実験参加者がタスク序盤でも Roomba を目視できないようにするとともに, 映像ディスプレイには三人称

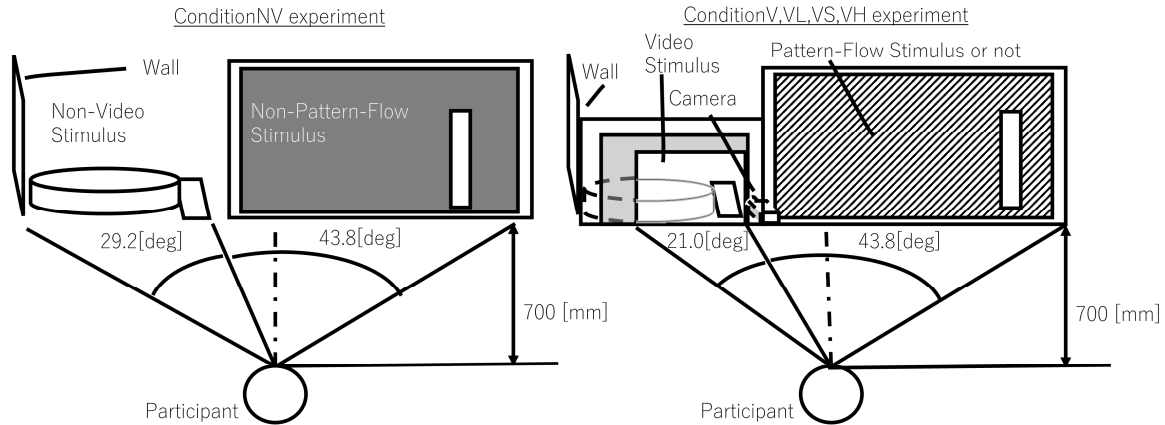


Fig.4.4 目視条件と映像条件の統制

視点のカメラからの映像を表示した。この状況は、後述する映像で Roomba の移動を知覚し、停止位置を予測する条件(映像条件)で用いられた。

ターゲット位置は条件間で同一であり、したがって、ターゲット位置の認知に関する誤差要因(3章の $\epsilon_r$ )は等しく肉眼に関するものである。実験参加者は自らの肉眼での認知に、当然に十分に習熟しているから、この影響は小さいものと予想された。

目視できる範囲と、映像により視認できる範囲とは等価となるように実験環境を統制した。図 4.4 は、図 4.1 および図 4.3 に示された実験環境におけるそれぞれの視覚情報の観察条件を示す。

本実験環境では、運動開始線を刺激ディスプレイによるマスク範囲の直前の床面上に実際に視認の容易なテープにより配置した。映像条件では、運動開始線が映像ディスプレイの端部に表示されるように調整した。実験参加者の視点と、三人称視点のカメラの視点との差や、映像表現するか否かの違い等に起因して、運動開始線の見え方は若干異なったが、これにより少なくとも図 4.1(図 4.3)に示す X 軸方向(すなわち Roomba の移動する方向)において Roomba が視認可能な位置の上限(X 軸上の座標の最大値)は、図 4.1 および図 4.3 に示された実験環境でいずれも同等に統制された。Roomba が前述のように等速であることを加味すれば、予想のために Roomba を観察できる時間が同一であることと等価である。なお、表示される映像の視点は、実験参加者の視点と同等になるように、観察範囲(図 4.4 左では 29.2 と示された範囲)の中央を注視する際の実験参加者の視線方向と、カメラの光軸方向とを Roomba の移動する平面上で一致させた。このため前述した視点の差異は、実験参加者が座った際の視点の高さと、カメラの配置された位置の高さとの差に帰着される。前述のように予測のための移動方向の範囲や移動時間を統制しているため、本実験ではこの視点の差異は十分小さいと考える。

#### 4.3.4 視覚刺激

実験参加者には、以下の目視条件で 1 種類、映像条件で 2 種類、計 3 種類の刺激を組み合わせ提示した。

##### (a) 目視条件

目視条件では、非映像刺激(Non-Video Stimulus : NV)のみを用いた。非映像刺激は、タスク序盤に映像を介さずに目視により、Roomba を視認させたことを意味している。映像を介さない観

Table 4.1 条件一覧

Conditions	NV	V	VL	VS	VH
Visual Stimuli	NON-Video Stimulus	Video Stimuli			
Pattern-Flow Stimuli	NON-Pattern-Flow Stimulus	NON-Pattern-Flow Stimulus	Given Pattern-Flow Stimuli		
			Low [45mm/s]	Standard [90mm/s]	High [135mm/s]

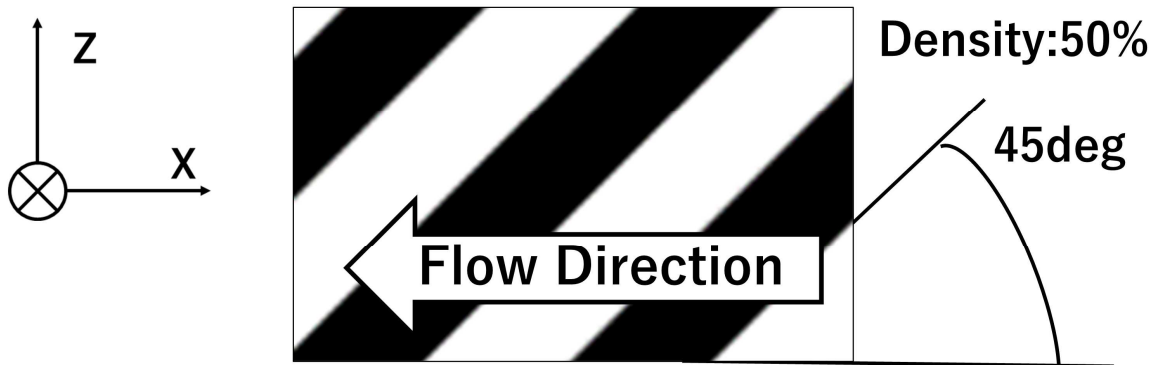


Fig.4.5 パターン流動刺激

察となるので認知に関する誤差要因(3章の $\epsilon_r$ )は十分に小さいはずであり、4.3.1項で述べたように映像の影響を明確に分離するための基準条件として設定された。

**(b) 映像条件**

映像条件では、映像刺激(Video Stimulus : V)とパターン流動刺激(Pattern-Flow Stimulus : PF)とが組み合わせて提示された。

映像刺激(Video Stimulus : V)は、タスク序盤で Roomba の移動を観察させるためのネイティブな映像を介して入力される視覚情報である。

Roomba の映像ディスプレイ上での見かけの大きさを、目視の場合と統制するために実寸大にする必要があった。このため、カメラ配置やデジタルズーム機能により表示倍率が微調整されたのは前述のとおりである。映像の表示倍率はディスプレイの大きさでも変化する上、本実験で用いたソフト的なデジタルズームの他、光学的なズーム等の機能の搭載は汎用 WEB カメラにおいても当然に搭載される機能であり、例えば現地サイトの参加者の表情を見るために拡大する等、ごく一般的にユーザが活用できる。

パターン流動刺激(Pattern-Flow Stimulus : PF)では、タスク後半に刺激ディスプレイから、図 4.5 に示すパターン流動刺激を視認させた。この刺激は前述のように予め撮像・調整された映像により提示された。具体的には、Roomba に鉛直下方向を向いたカメラを、床面の表示倍率が等倍となる高さに取り付け、床面にはパターンを配置して、実際にパターン上を、パターンを撮影しながら移動させることで構築した。パターンはオプティック・フローを模し、進行方向と逆(X 軸負の方向)に流動させた。この方向は、操作対象物(本実験では Roomba)を注視しつつトラッキングしたとき、その背景が流動する方向に一致しており、トレインイリュージョンと呼ばれるベク

ションを誘発する刺激の一つとして知られる。パターンが斜めである理由は、この方向への流動を表現するには図 4.5 に示す Z 軸方向と平行なパターンが最も直接的であるところ、これは X 軸方向の座標の目安となる懸念があったため、目安として縦方向のパターンが利用されるのを防ぐためであった。

流動速度は映像の再生速度で制御した。基準速度を Roomba と同一(基準速度 S:90mm/s)とし、0.5 倍速(低速 L:45mm/s)の水準、1.5 倍速(高速 H:135mm/s)の水準、計 3 水準とした。

以上の条件をまとめ、表 4.1 に示した。

#### 4.3.5 実験手続き

実験参加者は、30 代から 50 代の男女計 5 名(健常者)とした。実験参加者には事前に必要な説明をし、インフォームド・コンセントを得た。図 4.6 に実験手続きのフローを示す。

実験参加者は、Roomba を操作して、その先端部分をターゲットの位置で停止させること、Roomba は等速で運動すること、目を閉じないこと、実験環境の外に目をそらさないこと、を含む実験の説明をうけた。一方、パターン流動刺激の利用については(あえて明確に)指示しなかった。

実験参加者のキーボード操作への習熟を目的に、試行前に目視による操作の十分な練習を設けた。練習修了のタイミングは、実験参加者からの自己申告により判断した。なお、練習においてターゲット位置は一切示しておらず、自由に直進・停止をさせた。また映像を用いず、タスク結果に直結する移動の予測に関しては一切習熟できないように注意した。練習完了後、実験参加者は聴覚情報を排するためのヘッドホン装着した。ヘッドホンからはホワイトノイズが発せられた。

その後、実験参加者毎に目視条件(NV)で 3 試行、映像条件で計 24 試行(V・VL・VS・VH をランダムな順番で各 6 試行)、最後に目視条件と映像条件との順序効果を避けるため、カウンターバランスを考慮して目視条件(NV)で 3 試行を行った。すべての条件を完全にランダムにしなかったのは、本実験では実験環境の物理的な変更(映像ディスプレイの除去と設置)を頻繁に行うことで実験環境に意図しない変更が生じることや、実験参加者の拘束時間が増加してしまうことを考慮したためである。条件テーブルを図 4.7 に示す。映像条件に用いた各水準(テーブルの 2 行目の番号の付されていない項目)はランダムに並べられ、実験参加者毎に異なった。

以上、実験参加者毎に計 30 試行分のデータを取得する実験設計としたが、本実験は実験参加者の負担やリスクを考慮して実験を 1 時間以内に終わるように十分な余裕をもって計画された。映像ディスプレイが容易に移動可能なディスプレイアーム等で保持されていればこの問題を小さくすることができると考えられる。可能な限り実験参加者への負担の小さい実験設計は今後の課題である。

その他、実験に際しターゲット位置、および Roomba の並進速度および方向は一定に保たれた。仮に、すべての試行において Roomba を全く同じ運動時間で停止させる戦略を取れば、停止位置のばらつきは小さくなるが、後述するように停止位置に関するフィードバックは一切ないので、精度(ターゲット位置との誤差の小ささ)は保証されないことになる。したがって、精度を求める本タスクにおいてはこの戦略をとる合理性はない。また、これを防ぐために実験環境の外に目をそらさないように指示を出した。

実験者は、設定された条件下での試行の直前に実験参加者に Roomba の操作開始の合図を送る。聴覚は排されていたため、肩をたたく手段で合図した。実験参加者は、Roomba の移動を開始し、ターゲット位置に到達したと判断したら Roomba を停止させる。

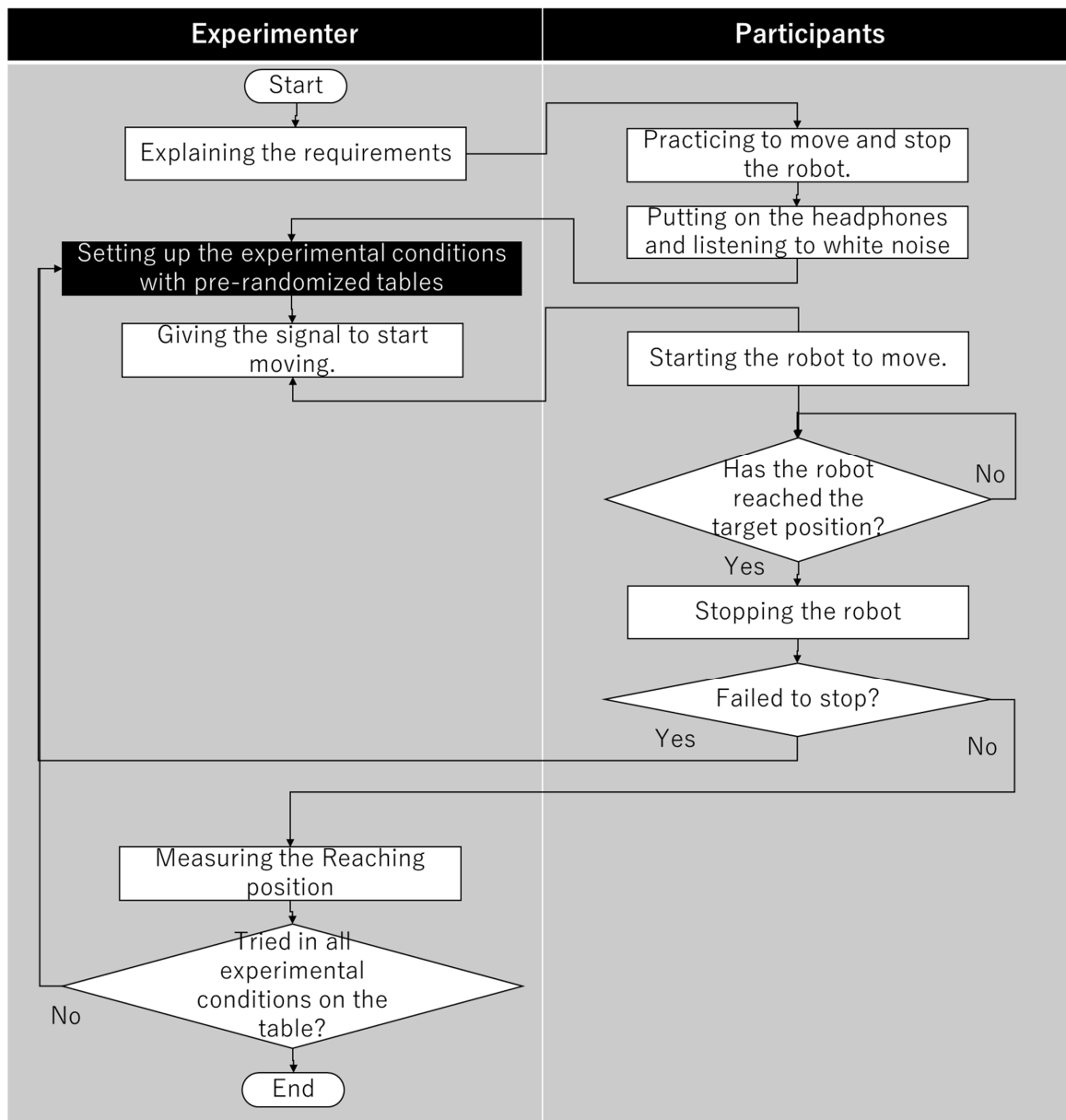


Fig.4.6 実験手続き

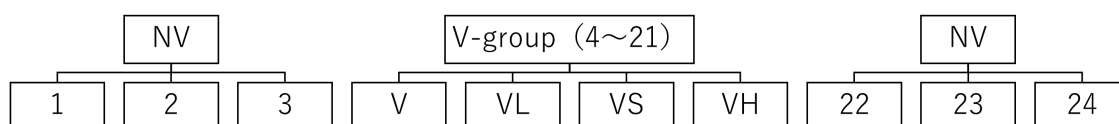


Fig.4.7 実験条件テーブル

本実験では予測誤差のより正確な計測のため修正操作を許さなかった。ただし実験参加者から誤操作の申告があった場合には、再度同条件にて試行をやりなおさせた。なお本実験では計3回の誤操作の申告があり、いずれもキーの押し間違えに起因するものであった。

実験者は、その後停止位置を計測する。なお、実験参加者には結果のフィードバックを与えなかった。このため、実験参加者が実験中に予測誤差に習熟することは困難であったと推定される。



なお、本稿の研究では千差万別に変化する遠隔環境の変動に対して習熟の負担のない認知側インタフェースが有効と考えており、種々の実験は習熟を防ぐために設計された。習熟については、6章で検討を加えた。

以上の手順を繰り返し、本実験では合計 150 試行分のデータを得た。

#### 4.3.6 データ処理

評価指標として、X 軸方向(すなわち進行方向)の位置の予測誤差(3 章)を用いた。正の値であればターゲット位置よりも行き過ぎの方向に、負であればターゲット位置よりも手前の方向に、それぞれ停止位置の誤差が生じたことを意味している。本研究では、同一の実験参加者の試行の対応を考慮して解析するため、各条件における 6 試行の平均値をデータとして取得した。また以下で説明する検定では等分散性の過程を要するパラメトリックな検定が含まれるので、事前に各条件における等分散性の検定(F 検定)を実施して、各条件における実験結果の等分散性を仮定できることを確認した(NV, V, VL, VS, VH :  $p = 0.15, 0.50, 0.50, 0.50, 0.50$ )。

##### (a) 上位検定

本実験では条件や水準の影響の統計的な解析に先立って、データの対応関係の考慮(同一の実験参加者のデータの考慮)のある繰り返しのない二元配置分散分析を行った(解析 1)。有意水準は  $p = 0.05$  とし、以下同様とした。この解析によって目視条件と映像条件の差(以下、単に条件差と称する場合がある)が有意であると認められた場合は、下位検定を行ってさらに詳細な解析を行うこととした。

##### (b) 下位検定

各条件差に有意差が認められた場合、下位検定として映像が予測誤差に及ぼす影響の解析(解析 2)、パターン流動刺激の各水準で異なる速度が予測誤差に及ぼす影響の解析(解析 3)を実施することとした。

##### (c) ベイズの手法による解析

さらに、解析 3 においては速度情報を用いた予測の変調の可能性を考察するため、階層的なベイズ統計の手法(Kruschke, 2017)に基づき、実験から得られたパターン流動刺激の速度情報 $x_i$ 、および対応する予測変調量 $y_i$ のデータセット $\mathbf{r} = \{x_i, y_i\}$ を用いて、速度情報  $x$  から予測変調量  $y$  の平均 $\mu$ を推定するモデル(回帰曲線)を導出した。なお予測変調量は、予測誤差が刺激によって変化した量である。一般に、ベイズの手法は少ないサンプルの解析に有効といわれており、実験参加者の負担に配慮した本実験の解析にも有効と考えられた。

本実験では推定モデルにバイアスがかからないように、予測変調量  $y$  の事前分布は無情報の  $t$  分布(平均:  $\mu$ , 標準偏差:  $\sigma$ , 自由度:  $\nu$ , 自由度が大のとき正規分布に近づき、外れ値に対してロバストな特徴を持つ分布)に従うと仮定した。同じく、 $t$  分布のパラメータである標準偏差  $\sigma$ , 自由度 $\nu$ はそれぞれ無情報の一様分布, 指数分布に従うと仮定した。

ベイズの手法は関連する実験の結果を仮定として事前分布に反映することで、実験結果を積み上げることができるメリットも備えているため、事前分布については今後の検証結果を踏まえてアップデートでき、モデルの高精度化や、後述する個人差への対応への活用を見込んでいる。

後述するが、本実験の結果からは予測変調量  $y$  の平均  $\mu$  の推定モデルとして式(4-1)で表される速度  $x$  の 2 次式を仮定することとした。この仮定は、予測変調量のピーク値(最大の効果を得られる速度情報)があることが推定され、この検討を行うために設定された。

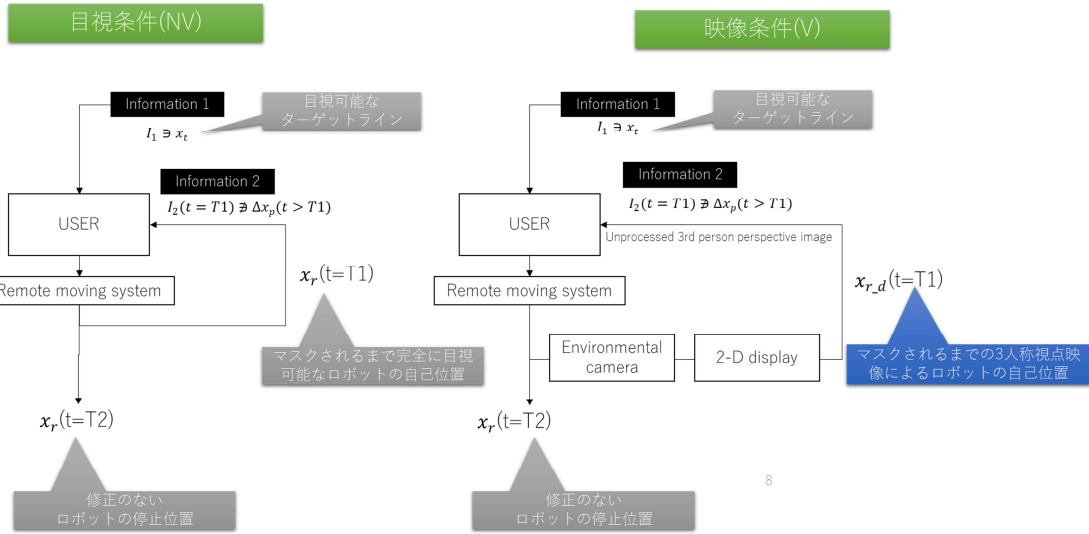


Fig.4.8 拡張コンパレータモデルに本実験の詳細な情報を補足した説明図

$$\mu = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 \quad (4-1)$$

$\beta = \{\beta_0, \beta_1, \beta_2\}$ は推定モデルのパラメータである．仮に $\beta_2 = 0$ が推定された場合は，式(4-1)のモデルは直線を表し，流動速度と予測誤差には線形のシンプルな関係があることが示唆されることになる．同様に， $\beta$ の事前分布には無情報のt分布(平均： $\mu_\beta = \{\mu_0, \mu_1, \mu_2\}$ ，分散： $\sigma_\beta = \{\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2\}$ ，自由度： $\nu_\beta = \{\nu_0, \nu_1, \nu_2\}$ )， $\beta$ の各々の平均，分散，自由度にはそれぞれ無情報の正規分布，一様分布，指数分布を仮定した．すなわち，本推定モデルは階層的ベイズモデルとなっており，式(4-2)に基づき事後分布を得ることができる．

$$p(\mu, \sigma, \nu, \beta, \mu_\beta, \sigma_\beta, \nu_\beta | r) \propto p(r | \mu, \sigma, \nu) p(\mu, \sigma, \nu | \beta) p(\beta | \mu_\beta, \sigma_\beta, \nu_\beta) p(\mu_\beta, \sigma_\beta, \nu_\beta) \quad (4-2)$$

式(4-2)に MCMC 過程(マルコフ連鎖モンテカルロ過程)の一種であるギブスサンプリングの手法を適用して，解析的には解けない問題を重み付きランダムウォークによって数値的に解くことで，実験データセット $r$ から尤も確からしいパラメータを導出した． $\beta$ の事前分布パラメータ $\mu_\beta, \sigma_\beta, \nu_\beta$ は周辺化され， $\beta$ を用いた式(4-1)の推定モデルを得ることができる．

なお，ベイズの手法による解析には(Kruschke, 2017)を参考に R 言語で記述したプログラムを用いた．

#### 4.3.7 拡張コンパレータモデル(2章)との対応

本節では本実験手法と，2章で述べた拡張コンパレータモデルとの対応関係を確認する．図4.8には拡張コンパレータモデルに本実験の詳細な情報を加えた説明図を示す．

実験参加者には，目視条件(NV 刺激)と，映像条件(V 刺激)とで共通して，第一の情報 $I_1$ として目視可能なターゲットラインが常に提示されている．ターゲットラインは進行方向である X 軸方向のターゲット位置 $x_t$ を客観的かつ明確に示す．したがって，ターゲット位置 $x_t$ の知覚に関して，条件間に差はない．知覚の絶対的な精度についても目視であるから，ターゲット位置は正確に脳内表象されることが期待された．後述する実験結果からは目視条件で極めて正確な予測がなされたことが分かり，この結果から間接的に，目視によるターゲット位置の知覚の絶対的な精度は仮定通りに十分正確だったと考えられる．すなわち， $E_t(\epsilon_r) \approx 0$ が満たされる(3章)．

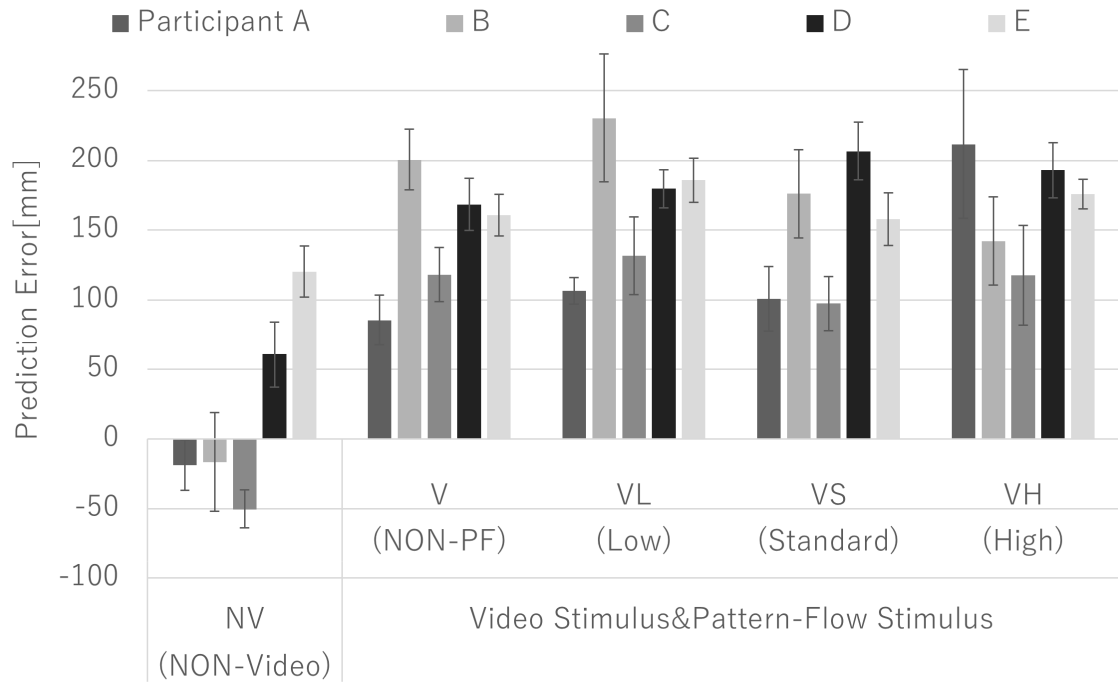


Fig.4.9 実験結果

本実験の設計では、条件によって予測に用いる第二の情報 $I_2$ が明確に異なる。なお映像条件の刺激の水準の違いについては4.6節で考察する。

目視条件(NV 刺激)では、Roomba がマスクされるまで(刺激ディスプレイでマスクされたターゲット位置の手前 225 mm の地点に到達するまで、 $t = T1$ )、目視により完全にロボットの自己位置 $x_r(t=T1)$ を知覚できる。これ以降( $t > T1$ )はロボットの自己位置 $x_r$ が知覚できないため、ターゲット位置 $x_t$ との誤差 $\Delta x_p(t > T1)$ を知覚できない(予測誤差の計測条件)。

映像条件(V 刺激)では、第二の情報 $I_2$ として少なくとも Roomba がマスクされるまで(刺激ディスプレイでマスクされたターゲット位置の手前 225 mm の地点に到達するまで、 $t = T1$ )の三人称視点映像によるロボットの自己位置 $x_{r,d}(t=T1)$ が入力される。これ以降( $t > T1$ )は三人称視点映像上のロボットの自己位置 $x_{r,d}$ が知覚できないことは目視条件と同様である。入力時間は前述したようにマスク開始位置の統制によって目視条件と統一されている(条件間で  $T1$  は等しい)ことに注意すると、入力時間以外の要件が予測誤差に影響を及ぼすものと想定された。

いずれの条件でも、実験参加者に修正を許していないこともあり、計測されるロボットの停止位置 $x_r(t=T2)$ には、誤差 $\Delta x_p(t > T1)$ の認知による修正が含まれない。

なお、本実験は判断( $\epsilon_j$ )は停止のみとシンプルであり、操作( $\epsilon_o$ )はキーの押下のみで同じくシンプルであり、システムには練習で習熟しており外乱の要因も少なく( $\epsilon_s$ )、したがって $E_r(\epsilon_j, \epsilon_o, \epsilon_s) \approx 0$ となるように工夫されている。これも同じく、後述の目視条件下での実験結果により支持される。

#### 4.4 実験結果

図 4.9 に条件および刺激水準別に、実験参加者毎の予測誤差の平均値とエラーバー(本実験では標準誤差 SE を表す、以下同様)を示す。この結果からは、予測誤差は少なくとも個人によって大きく異なることが見て取れる。目視の条件では、実験参加者 A, B, C, D の予測誤差の絶対値が

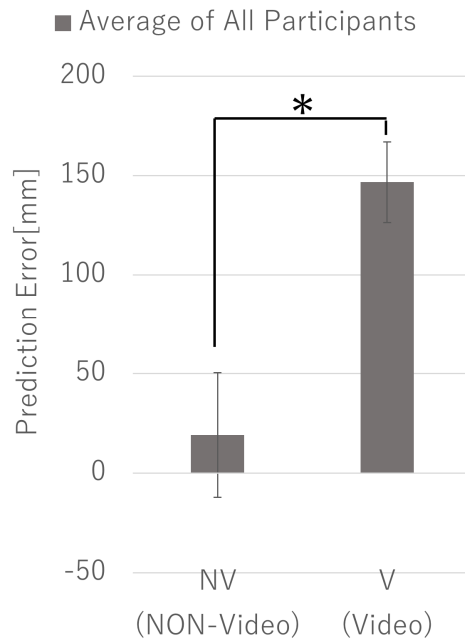


Fig.4.10 目視条件と映像条件における予測誤差の差

50 mm 程度以下の予測をしていることが見て取れる。うち、実験参加者 D は正の方向に偏って予測誤差を生じている傾向が見て取れる。一方、実験参加者 E の予測誤差は他の実験参加者に比較して正確ではなく、正の方向に 100mm 程度となっている。しかしそのばらつきは他の実験参加者ともあまり異なっていないように見受けられ、実験参加者 E は定常的に正の方向に大きな予測誤差を生じている可能性がある。本実験と異なる環境で、計測前に目視による Roomba の操作の練習をしているにもかかわらず、実験参加者 E は目視条件下の Roomba の目視操作において思い通りの移動操作性を得られない可能性を示唆している。このことは、目視操作においてもその操作の条件が変われば、ユーザによっては、少なくともタスクの成功のために別に練習(2章のコンパレータモデルにおいては第一・第二コンパレータによる逆モデルの学習)が必要であることを示唆しており( $E_r(\epsilon_j, \epsilon_o, \epsilon_s) \neq 0$ )、操作に関する(1章で述べたテクニック面での)ユーザビリティの課題と考えられる。映像条件でも個人差は大きいように見受けられる。認知に関するユーザビリティの課題に関しても、思い通りの移動操作性を向上するためには、個人差を検出し、認知インタフェースに反映する必要性を示唆している。この個人差への対応も重要な課題と考えられ、心理学の分野でも重要視され始めており、筆者もこれを重要な課題として最近の実験では検討を加えているところである。

本章の実験はより本質的な影響があるか否か、実験参加者全体の傾向から検討するように計画されたものである。このための各条件の解析に先立って解析 1 を実施した結果、有意な個人差( $p = 0.001 < 0.05$ )および有意な条件差( $p = 0.01 < 0.05$ )が確認された。このため、各条件の影響についての詳細は下位検定で検討する。映像条件群には予測誤差を拡大する傾向がみてとれる。各条件の影響については有意差が確認されたので、続けて下位検定で解析する。

#### 4.5 映像表現が予測誤差に及ぼす影響の解析および考察

#### 4.5.1 解析 2 の結果

本節ではネイティブな映像が予測誤差に及ぼす影響の検討を目的に、下位検定として設定していた解析 2 を実施する。解析手法としては対応ある t 検定を用いた。目視条件と映像条件のうち最もシンプルな V 水準との下で計測された予測誤差を比較した結果、有意差が確認された( $p = 0.01 < 0.05$ )。本解析の結果を図 4.10 に示す。

目視条件の下での予測誤差の平均値 19.0 mm であった。これに対して映像条件での予測誤差の平均値は 146.6 mm となり、目視条件下での予測誤差に比べ、かなり正の方向に拡大していることが明らかになった。正の予測誤差は前述のように、ターゲット位置を行き過ぎて停止したことを示す。これは移動予測の観点では、移動予測が実際の移動距離よりも過小評価されたことを意味する。遠隔操作型の移動ロボットの並進速度(本実験では等速)から逆算すると、これは停止操作のタイミングが理想的な停止タイミングより平均 1.63 s も遅れたことを意味しており、遠隔移動体験に看過できない影響を及ぼしているものと推定される。

#### 4.5.2 考察

解析 2 の結果からは、目視での現地サイトのロボットの移動に対する予測に対して、視覚情報を映像化する以外の条件をなるべく統制した映像条件では予測が正(行き過ぎ)の方向に大きく悪化する傾向を有する可能性がある、という基礎的な知見が得られたものと考えられる。目視条件の下では位置に関する正の予測誤差は平均 19.0 mm であり、これは映像条件に比べて十分に正確と評価できる。

##### (a) 本実験結果が遠隔参加体験に及ぼす影響

この結果が意味するのは、直進(停止)という極めて単純な遠隔操作であっても、ターゲット位置と、ロボットの自己位置との誤差を常に目視できなければ、正確に操作ができないということである。本研究では三人称視点の映像を用い、ロボットの現在位置をマスクする手法で予測誤差を測定可能としたが、この映像はロボット視点の映像を用いるとさらに顕著になることが予想される。ロボット視点の映像ではロボットの自己位置を目視できず、誤差も当然に凝視できないためである。この問題の解消にも寄与しているものと考えられるが、ロボット視点の映像を用いた遠隔操作では、これに合わせて三人称視点の映像や、これを加工した情報を補助的に並べて用いる手法が実用的である。ところが、遠隔操作ではターゲット位置と、ロボットの自己位置との誤差を常に目視できなければ、正確に操作ができないことを示唆する本実験結果は、正確な移動のためには常に、ロボット視点の映像ではなく補助的に並べられた映像を常に注視していなければならないことを意味している。正確な移動は、少なくとも現地サイトに参加者や物体との衝突を避けるのに必須であるから、遠隔参加にも当然必須である。以上を踏まえると予測誤差があれば、遠隔参加でロボット視点の映像をあまり注視できないことが示唆されるが、これは現地サイトの参加者の表情を見ながらのコミュニケーションや、移動に付随する景色の能動的な鑑賞等の実現を阻害する。したがって本研究の目的においては重要な問題である。

しかし本実験では前述したように特殊な映像を出力したわけではなく、一般的にユーザにも操作され得る倍率のみを微調整した映像(ネイティブな映像)を用いていた。これを起点に以下、正の予測誤差の生じた根本的な要因に関する検討を進める。

##### (b) 表示遅延の影響

正の予測誤差の原因と考えられたのが、第一に実測で最大 0.40 s の映像の表示遅延である。表示遅延の計測は、実験に用いたシステムをそのまま用いて実施した。具体的には、三人称視点のカメラでストップウォッチおよびカメラ映像を出力する映像ディスプレイそのものを撮像できる状態にした。さらに、異なるカメラで実際のストップウォッチと、映像上のストップウォッチとの表示時刻の静止画を同一フレームで撮影した上で、比較した。したがってこの遅延には少なくとも、撮像処理(イメージセンサからの情報の読み出し)、有線ネットワーク(USB2.0)の通信処理、そして表示処理(ビューワの処理)等の各プロセスにかかる時間を含んでいると考えられる。なおダウンリンクの遅延(Roomba の停止信号の伝達に関する遅延であり、少なくともキーボードの圧力センサから情報を読み出し、CPU に伝達し、ROS により処理し、ロボットに有線接続で通信する工程が考えられる)は、停止という極めて情報量の小さい処理やあるいはモータのイナーシャ等のハードに起因するものと考えられるが、情報量のはるかに多い映像に関する処理に起因するアップリンクの表示遅延よりも十分に小さいと考えられる。

しかしながら 0.4s の表示遅延では、前述のように停止タイミングが理想的なものから 1s 以上遅れないと発生しえない実験結果を説明できない。表示遅延の影響で、停止指令を出すのが 0.4 s 遅れた(ユーザによる認知は困難である)とすると、正の予測誤差はロボットの並進速度 $\times 0.4s$  分の 36.0 mm であり、平均オーバーシュート量の 25 %程度にすぎなかった。

この結果は、表示遅延以外の要因も思い通りの移動操作性の向上に重大な影響することを意味している。すなわち、1 章で述べたように遅延と独立した影響の検討が少ないことは重要な課題である、ということを示唆している。

### (c) 速度の予測の影響

映像条件と目視条件との実験条件の差異に着目すると、本実験では実験参加者に提示される映像上のロボットの速度と、目視で知覚されるロボットの速度とに大きな差異があった可能性が考えられる。

本実験における到達位置の予測には、ロボットの速度の予測が重要と考えられる。本タスクの後半部分においてはロボットがマスクされており、修正が禁じられているため、実験参加者はロボットの自己位置と、ターゲット位置との空間的な誤差を直接かつ静的に知覚することができない。このため、意識的か否かにかかわらず、動的な運動情報を用いてロボットの自己位置を予測する必要がある。ただし、実験手続きの章で説明したように、運動時間だけを用いる戦略は採用されていないと考えられる。

運動の予測において人間は、特に速度もしくは加速度を直接知覚していることが示されている(Rosenbaum, 1975)。近年の研究では、2 体の衝突の予測に関する問題(Predicted Motion 課題、あるいは Time to Contact 課題)において位置と速度が重要であるとの見解もある(Bennett and Benguigui, 2016)が、いずれにせよ、速度の情報は本実験タスクにおいても重要な情報と考えられる。

検討の結果、映像条件では本実験環境はディスプレイ上のロボットの像のサイズが実物より縮小して表示される条件であったことが明らかになった。これは Roomba の前進方向を統制していたものの、Roomba が前進を開始する奥行き方向(図 4.1 や 5.3 の Y 軸方向)の位置が統制できていなかったことに起因する。以下、ディスプレイ上の Roomba の速度が減少していた現象を説明する。

#### (d) 表示倍率の縮小

前述したように、本実験におけるディスプレイの表示倍率は、Roomba がレンズから 100 mm の地点で、図 4.3 中の X 軸方向の長さ(サイズ)がディスプレイ上の像と実機とで等しくなるように設定された。並びに本実験環境では、レンズとロボットとの距離が奥行き方向に 100 mm よりも近づかないように、物理的制約(壁面)を設置した。レンズとロボットとが衝突し、ロボットの移動が大きく妨げられることを予防するためであった。

これに対して、レンズとロボットとの距離が離れすぎないようにするための物理的制約も設けていた。しかしながらこの物理的制約は、ロボットから十分離れた設置されていた。これは、物理的制約との衝突があると進行方向が変化してしまう懸念があったため、衝突をなるべく予防するマージンを確保するためであった。その結果、本実験におけるこれらの物理的制約との衝突は回避できた。しかしながらこのマージンのため、ロボットは多くの試行でレンズから 100 mm 以上奥行き方向に離れた場所で移動していた。

この場合、レンズの光学倍率はレンズとロボットとの距離が離れるほど小さくなるので、ディスプレイ上のロボットの像は小さく表示される。光学倍率は、レンズと被写体との距離のばらつきに敏感である。レンズの公式を変形して整理すると、光学倍率は、レンズと被写体との距離に反比例することが分かる。すなわち、レンズと被写体との距離を  $a$ 、レンズとイメージセンサとの距離を  $b$ 、レンズの焦点距離を  $f$ 、イメージセンサ上の被写体の像の高さ(水平方向でも同じ)を  $x$ 、被写体の実際の高さを  $h$  とすると、その光学倍率(像高比) $x/h$ は、 $b$  を消去する形で整理すれば、式(4-3)のように表現できる。

$$\frac{x}{h} = \frac{f}{a-f} \quad (4-3)$$

このため、レンズと被写体とが接近するほど、これらの距離の変動に対する倍率の変化(感度)は大きく変化することになる。

本実験におけるディスプレイ上の Roomba の像のサイズは、上述の 2 つの物理的制約の範囲内で、実測で最大 30 %縮小する条件であった。

#### (e) 倍率と予測誤差との関係

知覚される運動時間は不変と仮定する。この仮定によっても一般性は損なわれないものと考えられる。この場合、映像上の空間が小さく表示されると、映像上のロボットの運動速度が小さく知覚される。

図 4.11 に、ディスプレイ上の速度とサイズとの関係を示した。ロボットが運動開始線を越えるまでの時間は統一したので、図 4.11 のように、ディスプレイ上のロボットの像のサイズの縮小に比例して、ディスプレイ上の Roomba の実像の変位距離だけが小さくなり、速度が最大 30 %小さくなる。本実験で生じた正の誤差は計算上、ロボットの到達位置の予測のために用いられる映像刺激から実験参加者が知覚する速度(以下、単に予測速度と称する)が平均 19.7 %過小評価される(72.3 mm/s)と生じることになる。これは、ディスプレイ上の速度の減少が最大 30 %であることと整合性があるように思われる。

また、マスタースレーブ型のマニピュレータによる遠隔での手先の移動タスクは本タスクと類似しているものと考えられるが、このタスクにおいて、表示倍率の変化による映像上の速度変化が、実速度の変化と同様の影響を人間の知覚に及ぼすことが示されている(伊藤, 2006)。

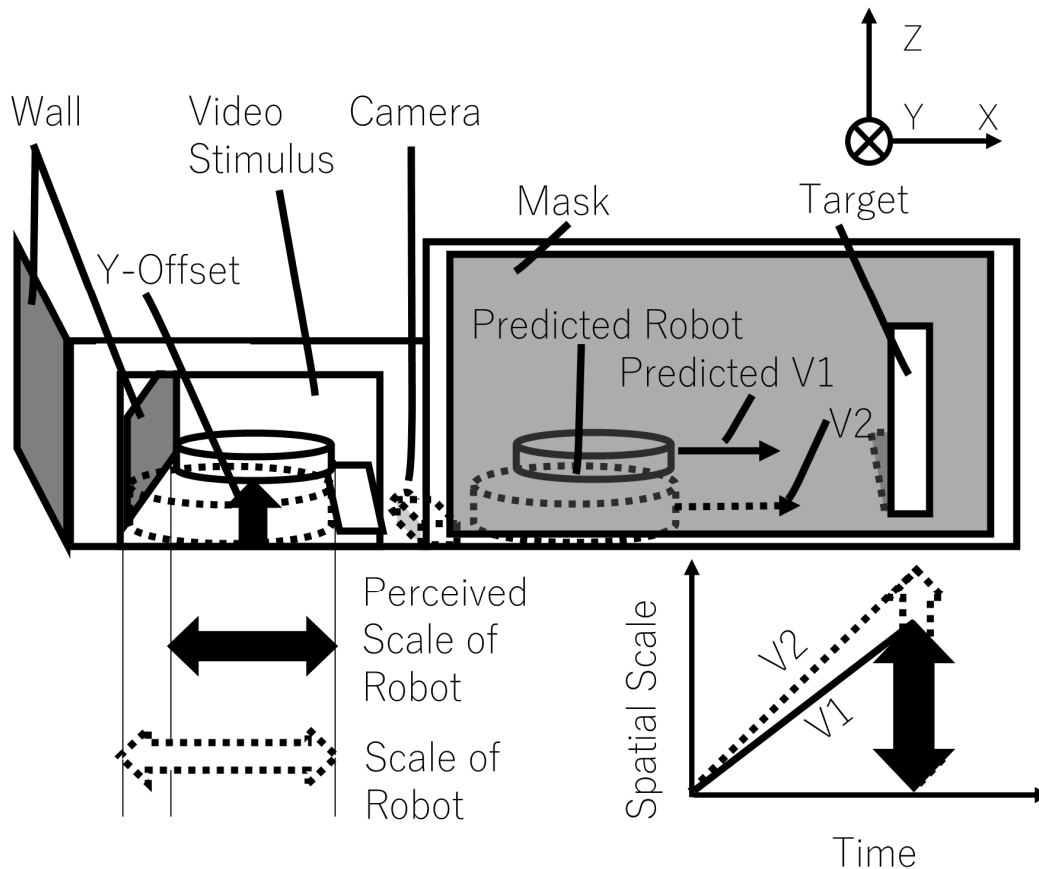


Fig.4.11 ディスプレイ上の表示サイズと速度との関係

#### (f) 倍率と大きさの恒常性との関係

また他の要因として、少なくとも映像条件と目視条件との条件間で奥行き手掛かり(河合他, 2010)(日本視覚学会編, 2017)(澤島, 2017)(出澤, 程, 2016)(塩入, 渡辺, 2009)の差異の影響が推定される。奥行き手掛かりは、大きさの恒常性(Tanaka and Fujita, 2015)のメカニズムに密接に影響を及ぼすとされる視覚的情報で、この機能によりヒトは本来、目視であれば網膜上に投影される対象の像高が縮小しても、同一サイズの対象が奥行き方向に離間したために小さく見えたものと(不随意的に)知覚できる。本章のロボットのサイズの変動に対しても同様のメカニズムが適切に機能すれば、ディスプレイ上のロボットの像のサイズが縮小しても、知覚される速度は実速度に比べて大きく変化しないと考えられた。

しかしながら 2D ディスプレイ上に表示した映像では、現地サイトの 3 次元の空間情報が、遠隔サイトでは 2 次元の平面情報となる。これに伴って様々な情報が削減されると考えられ、なかでも映像条件では目視条件に比較して奥行き手がかりが大きく減少するものと推定され、5.5.3 項で詳細に論ずる。

特に、両眼性の奥行き手掛かりに分類される両眼視差の情報(対象物の奥行き位置に応じて生じる各網膜上の 2 次元投影像のずれに関する情報)や輻輳の情報(各眼の視線の交差角度に関する情報)は、2D ディスプレイ上の映像刺激から損なわれている。両眼視差の情報は 2D ディスプレイ上のどの点においてもほぼ等しくなり、対象の表示のされ方による変化は微小である。同じく輻輳に関しても、2D ディスプレイ上ではほぼ一定であり、対象の表示のされ方による変化は微小であ



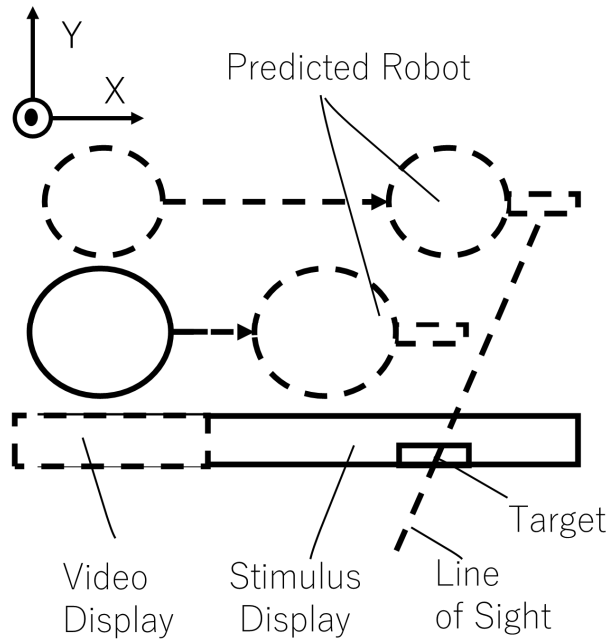


Fig.4.12 視方向の影響

る．したがって奥行き手掛かりの差も，大きさの恒常性が適切にはたらくのを妨げ，予測速度を変化させる要因になると考えられる．加えて，図 4.4 に示したようにディスプレイのベゼルや表示ソフトウェアの影響による視野の減少(28.1%の減少)も，奥行き手がかりを含む視覚情報を減少させる要因と考えられる．背景の情報や，Roomba と背景の情報との相対的な関係の影響の可能性があり，今後の課題である．

本実験で用いたロボットは Roomba であるが，これは広く一般に流通している市販品であり，日常的に Roomba を所有している等の理由で Roomba の大きさをよく把握しているユーザも存在していると予測される．したがって，自己の経験等に基づいて大きさの認知がトップダウンの影響を受けた可能性も考えられる．この高次の認知機能の影響の解明はきわめて困難であり，今後の課題である．しかし，少なくとも本実験の参加者に Roomba を所有している者は含まれていないことが後日追加で実施したヒアリングで明らかになっている．

したがって本章の実験における正の予測誤差の発生を主要因を検証するためには，少なくとも大きさの認知に関する 2 つの要因(倍率と奥行き手がかり)が実験参加者の予測速度に及ぼす影響を明らかにしなければならない．2 つの要因と予測速度との関係を定量的に明らかにできれば，本稿の目的のひとつであるオプティック・フローによる予測到達位置の補償が効果的にできるようになる可能性がある．

しかし，上述のようにディスプレイ上の速度と，奥行き手がかりとは相互に密接に予測速度の形成に影響していると考えられるため，明確な刺激の分離が困難である．今後，特に奥行き手がかりに関して慎重に刺激を統制して検証することは重要な課題と捉えており，検証を進めている．

#### (g) その他の要因

以下，その他の要因について検討する．これらの要因は前述の影響に比べて小さいものと考えられる．

モータの粘性起因のヒステリシス，慣性力等により，Roomba の運動開始直後と停止直前の速

度が等速とは若干異なることは、速度の予測を困難にするため何らかの影響があると考えられる。しかしながらこの影響は、本実験計画においては目視条件の結果にも内包されているから、予測誤差の有意差の要因としては無視できる。

また、図 4.12 に示す視線の方向(視方向)に起因するロボットとターゲットとの Y 方向位置ずれに起因する X 方向位置の見え方の幾何学的ずれも、正の予測誤差を生じる原因とおもわれた。しかし同様に、視方向に起因する X 軸正の方向へのずれの影響は、本実験計画においては目視条件の結果にも内包されているはずであるから、予測誤差の有意差の要因としては無視できる。ただし、目視条件では実験参加者によっては正の予測誤差が生じており(図 4.9, 実験参加者 E, D), その要因となっている可能性は考えられる。

他に、解像度や輝度、色域、フレームレート等は目視条件と映像条件とで異なるはずである。しかし、これらが知覚に対して微小に影響することはあっても、本実験で用いた巨視的な指標における有意差に対しては、その影響は顕在化しない可能性が高いと考えている。

また他に、自らの操作で遠隔操作ロボットが机上から墜落するイメージが想起される等、心理的なバイアスの影響も危惧される。心理的なバイアスの影響については、ヒトの操作するシステムにおいて重視する必要があると考えている。しかしながら仮に墜落するイメージが操作(あるいはその予測)に何らかの影響を及ぼしていたとしても、予測誤差を実験条件によらずに負の方向に偏らせるバイアスを生じると考えられる。このため、本実験環境では心理的に正の予測誤差のバイアスとなる要因は見受けられない。

## (h) まとめ

映像化による制約のある視覚情報によって生じる大きな正の予測誤差は、思い通りの移動操作性の低下に繋がる。ロボットの自己位置と、ターゲット位置との誤差が常に視認できなければ、不器用な移動の体験や移動の失敗の体験を誘発することになり、これは特にロボット視点を主に用いるシステムのユーザビリティを低下させる直接的な要因である。また、ユーザが現地サイトの体験に自己を重ねることを難しくし、感性的品質を低下させる可能性がある。

仮に訓練によってこの予測誤差を克服しても、たとえば遠隔鑑賞の用途では、環境が変化する度に予測誤差は変動する可能性が考えられる。とくに三人称視点の環境カメラの設定によりロボット自身の倍率等の見え方は大きく変化するため、この影響は大きいと考えられる。予測誤差が変動する度に、ユーザが予測通りのスムーズな操作をするためには訓練が必要となり、この面でもユーザビリティや、訓練を含めた体験の質の課題と捉えれば感性的品質の課題を生じてしまう。さらに考察を進めると、移動の失敗が続くようであればユーザにシステムのユーティリティも低いと判断され得る。そうすると、このようなシステムをあえて利用する意味性も低くなり、他の遠隔参加の選択肢と並び立つ魅力的な選択肢になることは難しくなるだろう。

環境変化に関わらずスケール感の変動を抑制できれば、少なくともこれに起因する予測の乖離が抑えられ、修正負荷を軽減できる。この観点では、ロボットに対するカメラの相対位置が大きく変化しない現地サイトのロボットの 1 人称視点に相当するロボット視点の映像の活用が有効と考えられる。ロボット視点の映像には感性的品質の面でも利得があるが、三人称視点の映像を用いた場合には発生しない新たな課題もあり、5 章および 6 章で検討を加える。

別の観点では、予測の乖離をユーザの意識に上らないうちに補償するような認知インタフェース上の対策や、予測に合わせた移動体の動作補正の対策も望まれる。前者は本章で考察を加える。後者は、たとえば予測に合わせた遠隔操作ロボットの速度制御(3 章の方法論では誤差要因 $\epsilon_s$ に積

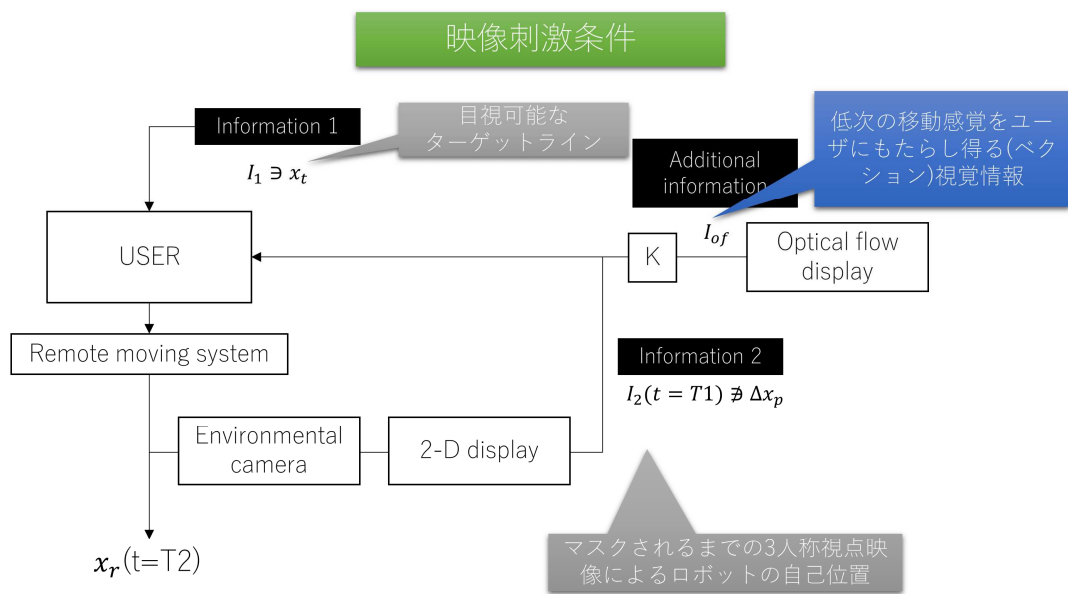


Fig.4.13 拡張コンパレータモデルに映像条件の下位水準の情報を補足した説明図

極的に介入することに対応)が考えられるが、ユーザに明確に知覚されない工夫が必要になると考えられる。この対策については、予測に働きかける普遍的な思い通りの移動操作性の向上手法(3章)と比較しながら7章で検討を加える。

## 4.6 オプティック・フローの影響の解析および考察

### 4.6.1 パターン流動刺激条件の拡張コンパレータモデル(2章)との対応

本節でははじめに、映像条件の下位水準に設定していたパターン流動刺激(VL,VS,VH)と、2章で述べた拡張コンパレータモデルとの対応関係を確認しておく。図4.13には2章で説明した拡張コンパレータモデルに映像条件の下位水準の情報を補足した説明図を示す。

実験参加者に第二の情報 $I_2$ として、少なくともRoombaがマスクされるまで(刺激ディスプレイでマスクされたターゲット位置の手前225mmの地点に到達するまで、 $t=T1$ )の三人称視点映像によるロボットの自己位置 $x_{r,d}(t=T1)$ が入力される点は共通している。

一方、刺激ディスプレイ上には常に、映像を介して目視可能なパターン流動刺激の情報が表示されていた。これは前述のようにRoombaの進行方向とは逆方向に流れ、オプティック・フローの情報を模していた。これは、オプティック・フローが誘発するベクション等の備えるユーザの低次の移動感覚への作用が、Roombaの自己位置の予測にあたり、Roombaの移動に関する追加の情報を提供できる可能性を検討するために設定されていた刺激である。この追加の視覚情報を $I_{of}$ と表現する。さらに、VL,VS,VHの各水準ではパターンの流動速度を変化させていた。これをゲインKで表現する。

すなわち拡張コンパレータモデル上では、ユーザには、第二の情報 $I_2(t=T1)$ および流動速度の

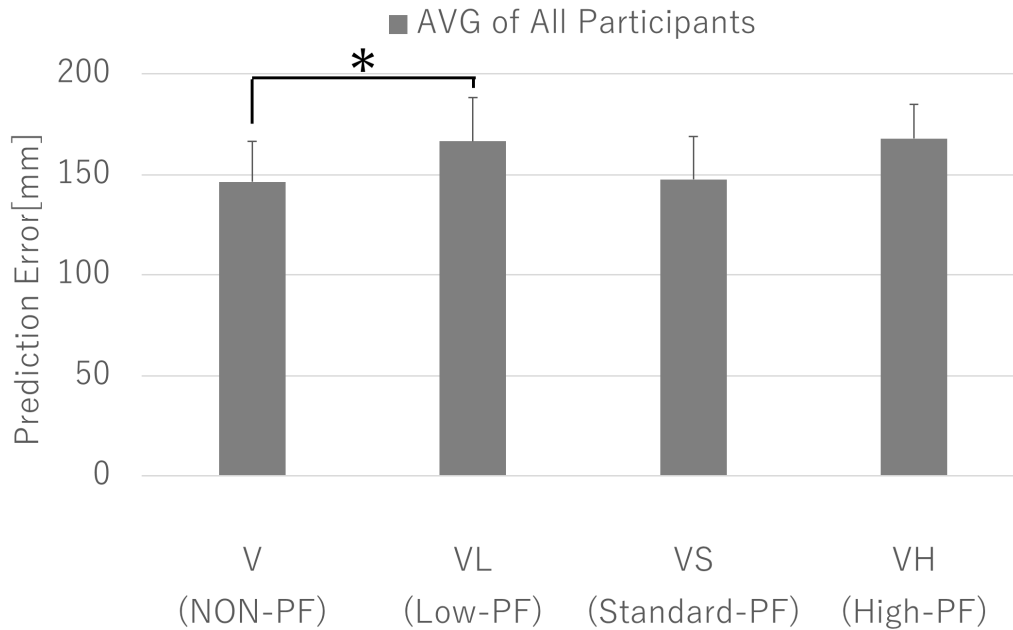


Fig.4.14 映像条件の下位水準での予測誤差

異なるオプティック・フロー $KI_{of}$ が入力されていたと整理できる。後者が最もシンプルな映像条件の水準である V 条件との差異であり、この影響を解析 3 で検討する。

#### 4.6.2 解析 3 の結果

解析 3 として、検定の多重性の問題(familywise error)を考慮して 4 章ではボンフェローニ補正した有意水準 0.017 を用い、対応のある t 検定により、V(パターン流動刺激なし)条件と VL(パターン流動刺激：低速)条件、映像条件と VS(基準速度)条件、映像条件と VH(高速)条件とをそれぞれ比較した。図 4.14 はその結果を示したものである。

本解析の結果、映像条件と VL 水準との間に有意差が確認された( $p = 0.004 < 0.017$ )。一方、映像条件と VS 水準との間( $p = 0.93$ )、および映像条件と VH 水準との間( $p = 0.51$ )には、有意差が認められなかった。

##### (a) 予測変調量の定義

以下、パターン流動刺激の効果量をより明確に表現するために、パターン流動刺激を与えた VL・VS・VH 水準下での予測誤差データから、それを与えなかった映像条件下での予測誤差データ(平均 146.6 mm)を差し引いた値を算出し、予測変調量と定める。

予測変調量の平均値はそれぞれ低速のパターン流動刺激で 20.1 mm、基準速度情報で 1.2 mm、高速のパターン流動刺激で 21.3 mm であった。いずれも正の値であり、映像条件下で生じていた正の予測誤差を、オプティック・フロー $KI_{of}$ の情報がさらに正の方向に拡大させた可能性が示唆される。これは、移動予測としては実際の移動よりも過小評価されていることを意味する。

##### (b) 検定結果の解釈

VL 水準および VH 水準での予測誤差の平均値は近しかった。それにもかかわらず、V 水準と VL 水準との比較でのみ有意差が認められた。

この原因のひとつは、対応のある t 検定が対応するデータの差(これは予測変調量と同じ値になる)を解析対象としていることに起因するものと考えられる。VL あるいは VH 水準での平均値から映像条件を引いた値の正負が実験参加者毎に大きく異なると、いかに影響が強かったとしても、統計的には一貫した傾向とはみなされないためである。以下、データを詳細に確認する(後述する図 4.14 も参照のこと)。

V 水準と VL 水準との予測変調量の標準偏差は小さい(7.8 mm)。これは、低速のパターン流動刺激の影響が、実験参加者によらず同様の傾向を生じさせたためと考えられる。一方、V 水準と VH 水準との予測変調量の標準偏差はかなり大きい(66.9 mm)。これは、高速のパターン流動刺激の影響が、実験参加者により大きく異なる影響を及ぼしていたためと考えられる。

そこで以下、個人差を確認するために、前述したベイズ推定モデルを応用する。

#### 4.6.3 ベイズの手法による解析

図 4.15-19 には実験参加者毎の予測変調量の推定モデルを実線で、測定値をドットで示す。図 4.20 にはこれらをまとめたものを示す。また、代表して図 4.19 での推定モデルを下式に示す。

$$\mu = 65.8 - 1.3x + 0.007x^2 \quad (4-4)$$

これらを参照すると、実験参加者ごとに推定モデルの形状は若干異なることが分かり、これは実験結果の個人差の影響を反映している。しかし推定モデルの形状は、低速のパターン流動刺激を受けた場合には実験参加者間での類似性を示しているように見受けられ、すべての実験参加者で正の値となっている。一方、高速のパターン流動刺激を受けた場合には、大きな影響を受けた実験参加者も認められる(実験参加者 B や E)が、正の値が 3 名、負の値が 2 名とかなりばらついており、傾向に類似性は見受けられない。

#### 4.6.4 流動速度の情報が予測に及ぼす影響の考察

そこで続けて、高速のパターン流動刺激と低速のパターン流動刺激の影響の差異を考察する。

ここまでの検討からは、タスク序盤で過小に予測されたロボットの移動速度(72.3 mm/s : 条件 V 結果の逆算値)が、タスク終盤まで知覚できるロボットの移動速度の予測に影響を及ぼし得る流動速度の情報(パターン流動刺激による速度情報)により更に過小に変調された可能性が示唆される。この変調には、第一・第二の情報間での速度変化(差)が重要である可能性が考えられた。

そこでこの仮定に基づき、推定モデルを予測速度の情報を含むように座標変換する。横軸の速度を予測速度(73.2 m/s)との相対的な速度で表現し、情報間の速度変化を明確に表現した。また、映像条件で推定された標準偏差および自由度を事前分布として用い推定モデルを更新した。

予測変調量を  $p$ 、その平均値を  $\mu_p$ 、速度変化を  $d$  としたとき、全体の推定モデルは式(4-5)の結果となった。また、図 4.21 に変更した実験参加者毎の推定モデルをドット、全体の推定モデルを実線で示した。

$$\mu_p = 6.2 - 0.32d + 0.0065d^2 \quad (4-5)$$

##### (a) 高速の第二の情報の影響

まず推定モデルのばらつきは、速度変化  $d$  の絶対値の増大とともに大きくなるが見て取れ

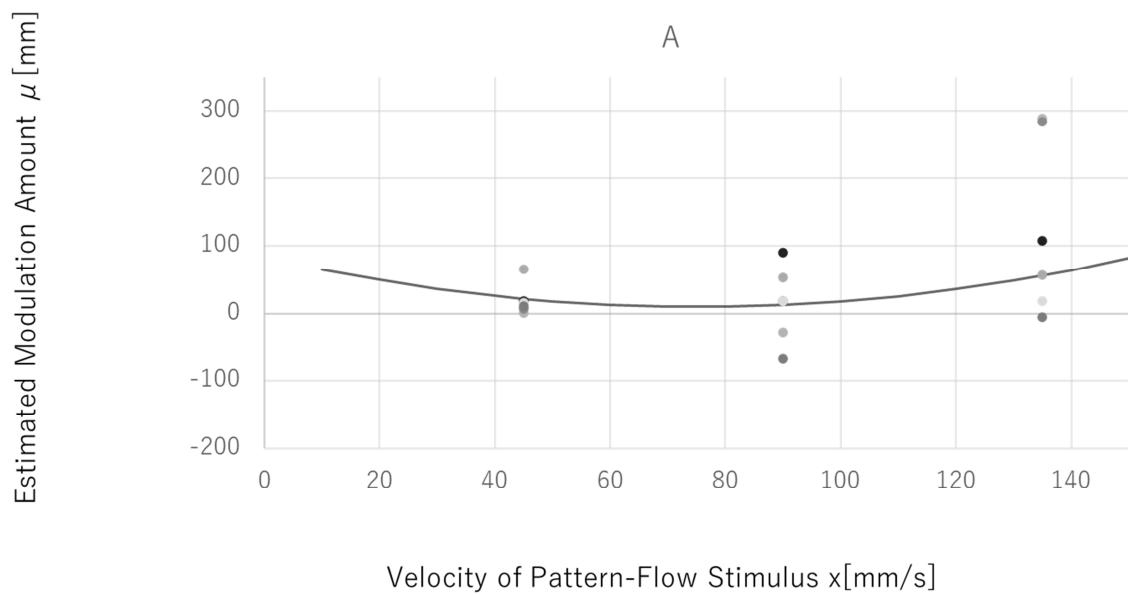


Fig.4.15 実験参加者 A の予測変調量推定モデル

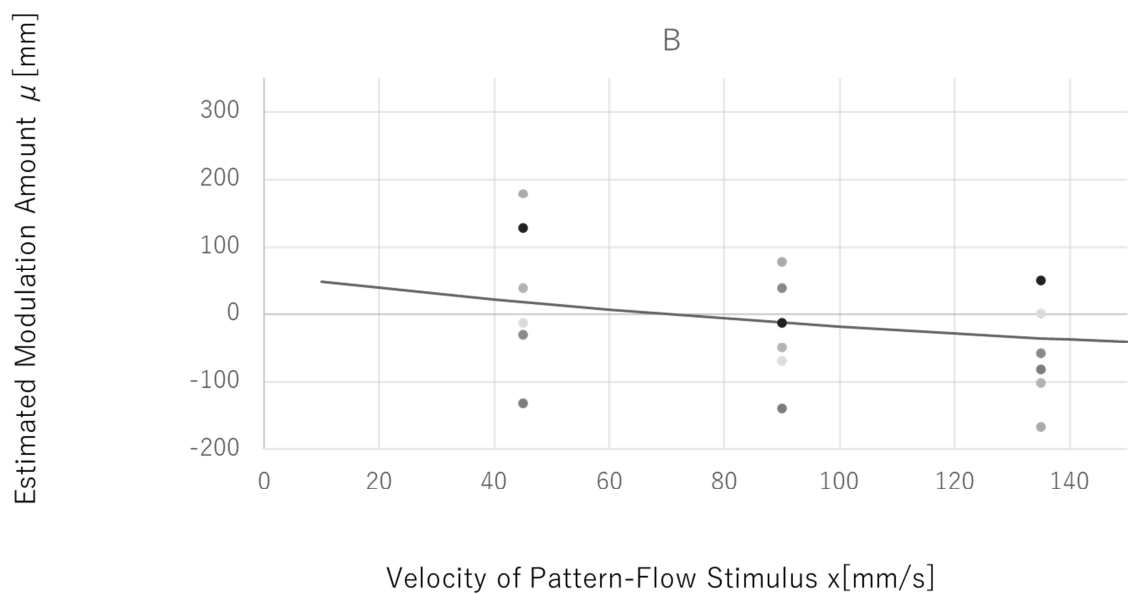


Fig.4.16 実験参加者 B の予測変調量推定モデル

る。速度変化  $d > 0$  の場合には特に大きい。

高速のパターン流動刺激 **VH** により提示された速度情報は、タスク前半で構築されたと想定される予測速度よりもかなり大きく、速度変化は  $d = 62.7 \text{ mm/s}$  と大きくなった。これは、予測速度が過小評価されたためである。

したがって、高速のパターン流動刺激 **VH** の情報から知覚できる速度は、ロボットに関する速度とは全く異なるものとして知覚された可能性が考えられる。換言すれば、情報の信頼性が相対的に低下し、予測の妨げとなった可能性が考えられる。このため、単なるノイズと類似のはたらしきをすることで、実験参加者毎あるいは試行ごとのばらつきを拡大させたものと解釈できる。こ

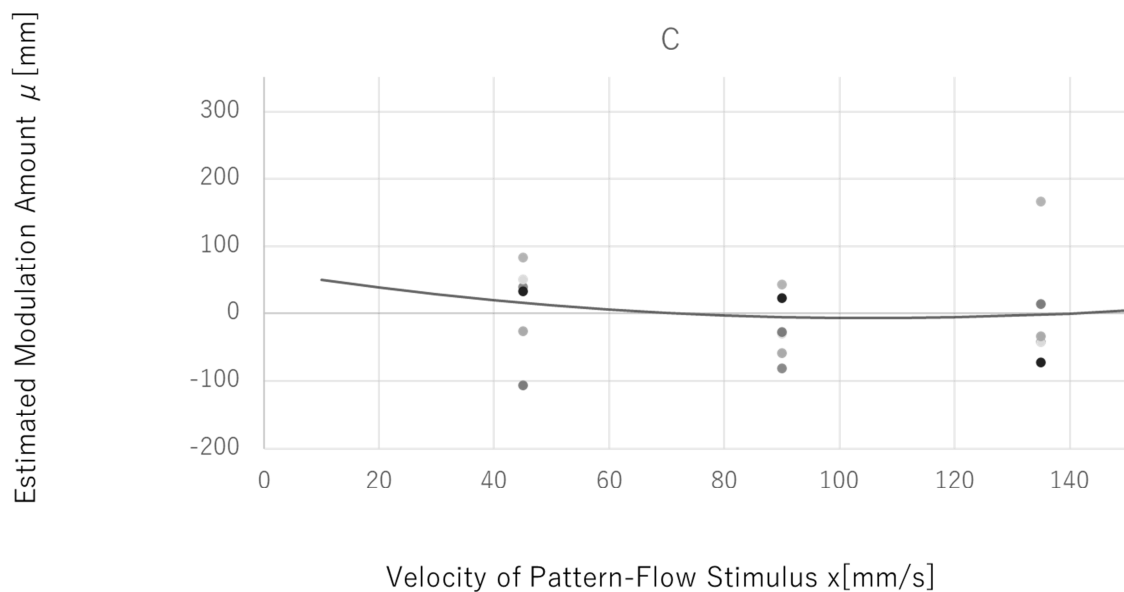


Fig.4.17 実験参加者 C の予測変調量推定モデル

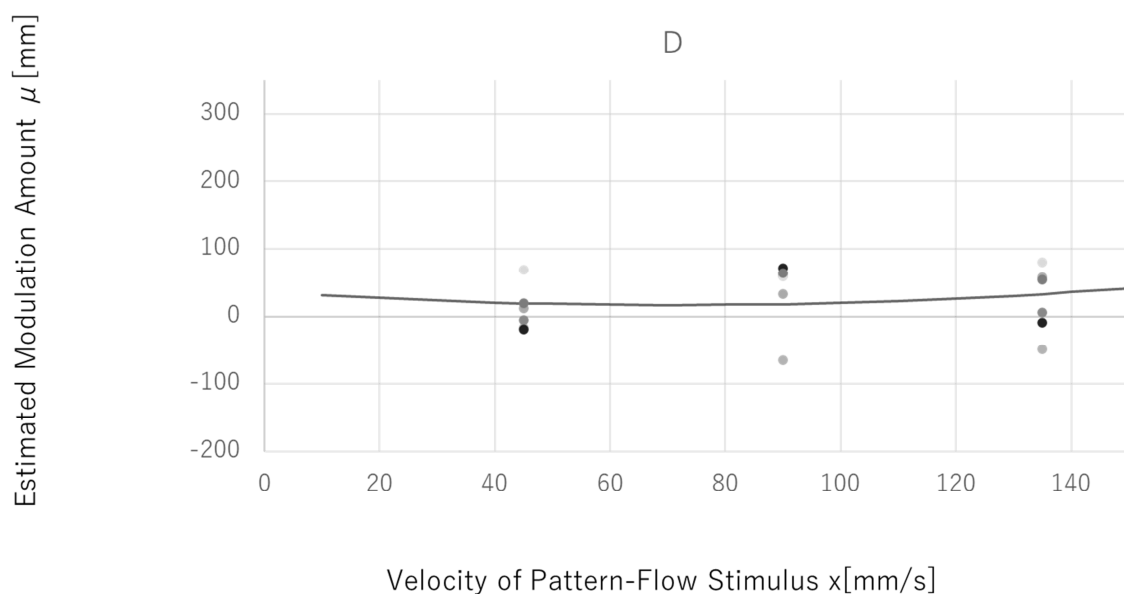


Fig.4.18 実験参加者 D の予測変調量推定モデル

の結果は、対象物の加速が動きの予測の正確性を低下させる知見(Rosenbaum, 1975)とも合致する。

別の観点では、我々が観察する移動体のオプティック・フローの流動速度が移動体の並進速度を上回るとは通常起こりえない現象である。ロボットの移動をトラッキングして観察する場合、背景のオプティック・フローの流動速度はロボットの速度に一致する。また、トレインイリュージョン刺激の最大速度は電車の速度を上回らない。一人称視点における観察においても同様で、最大値はロボットの移動方向に直交する方向を観察している場合で得られる可能性があり、ロボ

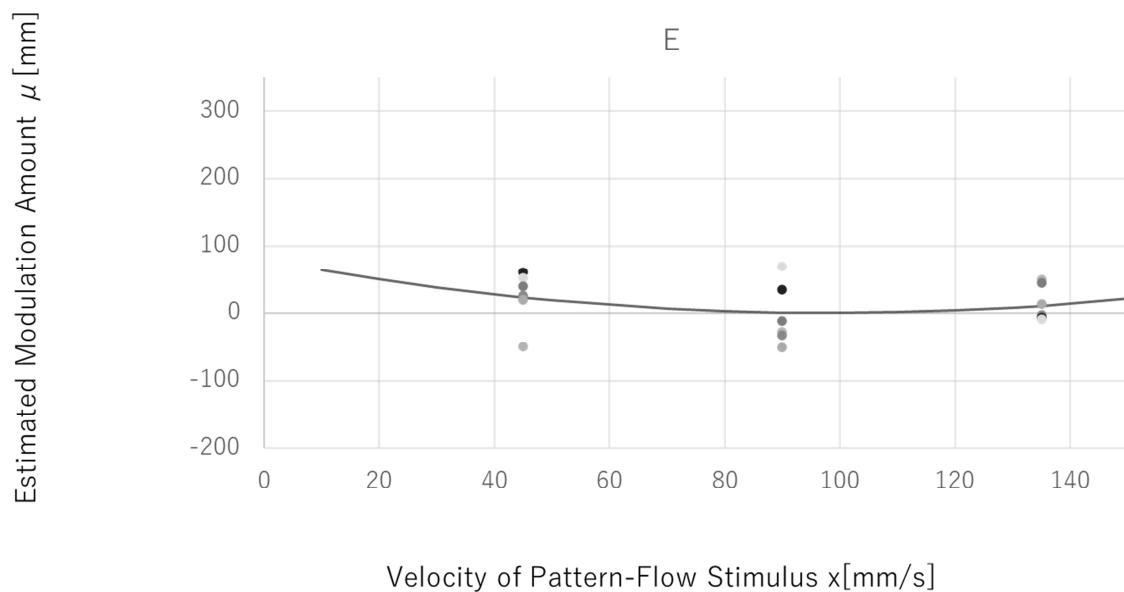


Fig.4.19 実験参加者 E の予測変調量推定モデル

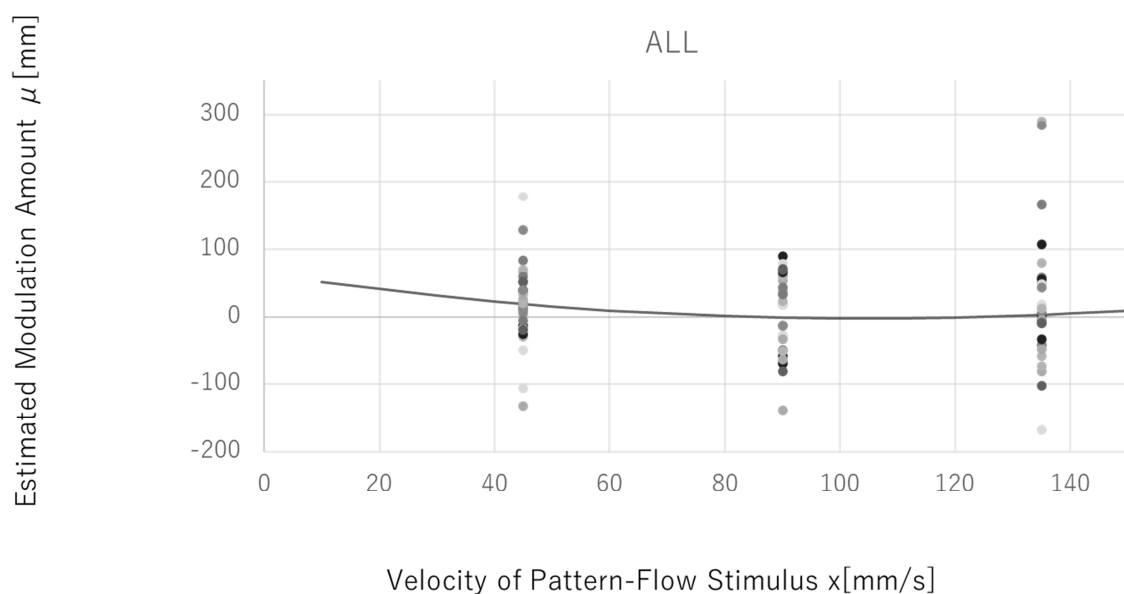


Fig.4.20 全データを用いた予測変調量推定モデル

ットの速度に一致する。したがって、高速のパターン流動刺激は実験参加者にとってまったく新奇の情報となり、予測の妨げとなった可能性も考えられる。

**(b) 低速の第二の情報の影響**

これに対して低速のパターン流動刺激 VL により提示された速度情報は、タスク前半での予測速度よりも小さくなるが、その速度変化は  $d = -27.3 \text{ mm/s}$  にとどまった。これは同じく、予測速度が過小評価されたためである。



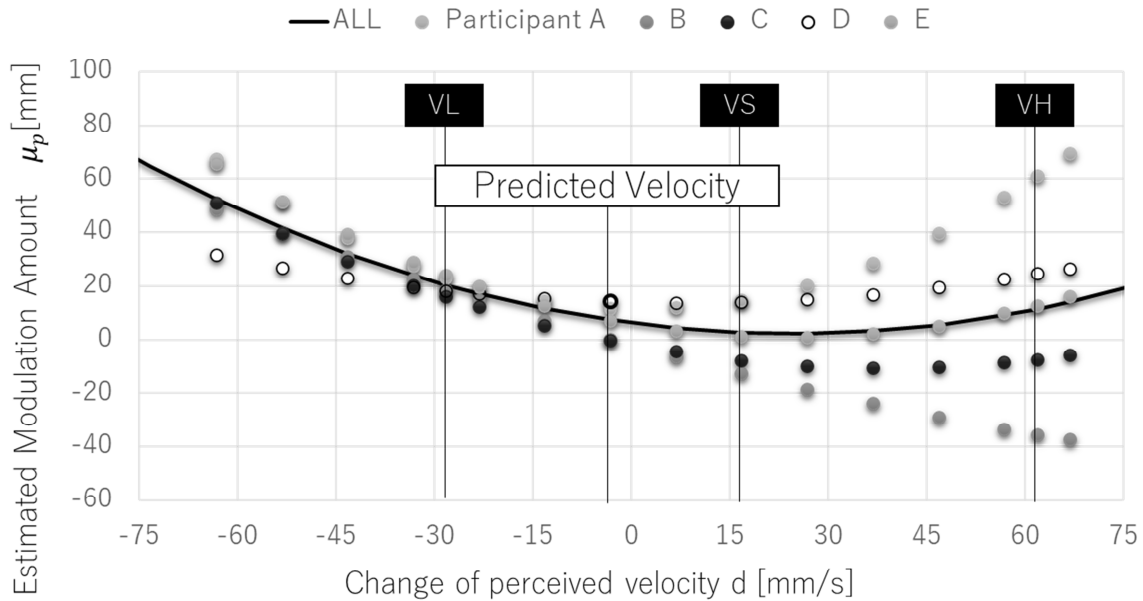


Fig.4.21 情報間の速度変化  $d$  から推定される予測変調量

速度変化  $d$  が VH 水準に比べて相対的に小さかったことは、予測変調量のばらつきを小さく抑えることに有効にはたらいた可能性がある。しかし、低速のパターン流動刺激 VL での予測誤差のばらつきは、基準速度のパターン流動刺激 VS (速度変化は  $d = 17.7$  mm/s であり VL 水準のものよりも小さい)での予測誤差のばらつきより小さい。したがって、低速のパターン流動刺激 VL は、予測に対して高速のパターン流動刺激とは異なる影響を及ぼしていることが見てとれる。

予測速度よりも低速になる(速度変化  $d < 0$ )の第二の情報の追加は、予測速度との乖離があっても、単なる予測の妨げではなく、一定の規則性を備えた変調効果を及ぼした可能性が示唆される。

予測変調量  $p$  の平均  $\mu_p$  は速度変化  $d < 0$  の範囲で大きい傾向にある。低速のパターン流動刺激での測定点(VL)では、予測変調量は  $\mu_p = 24.0$  mm(図 4.14 の映像条件における正の誤差の 16.4%)であった。一方、 $\mu_p = 7.3$  mm(図 4.14 の映像条件における正の誤差の 5%)を閾値として定めると、閾値以下の  $\mu_p$  を推定する速度変化  $d$  の範囲は  $-3.1$  mm/s  $< d < 52.5$  mm/s と、広く  $d > 0$  の範囲を含んでいた。つまり、速度変化  $d < 0$  の情報は、ばらつきが小さく、かつ大きな予測の変調効果を生じることが示唆される。この変調効果は、負の予測誤差が生じる(移動予測が過大評価される)条件を見いだせれば、応用できる可能性がある。

### (c) 頻度論を用いた推定モデルの検証

ベイズ統計の手法に基づく本推定モデルは、新たなデータを取得することで事前分布を更新できる利点がある。映像による予測誤差量や、速度情報による予測変調量は、個人に依存して変動する。本推定モデルを個人のデータで更新すれば、個人に対して量的に最適化された視覚情報や、ロボットの動作の生成に応用できる可能性が考えられる。

最後に、ベイズ統計の手法に基づく推定モデルの妥当性の検証として古典的頻度論に基づく推定モデルとの比較を行った。本章では前述のように、実験データからは予測変調量のピーク値が

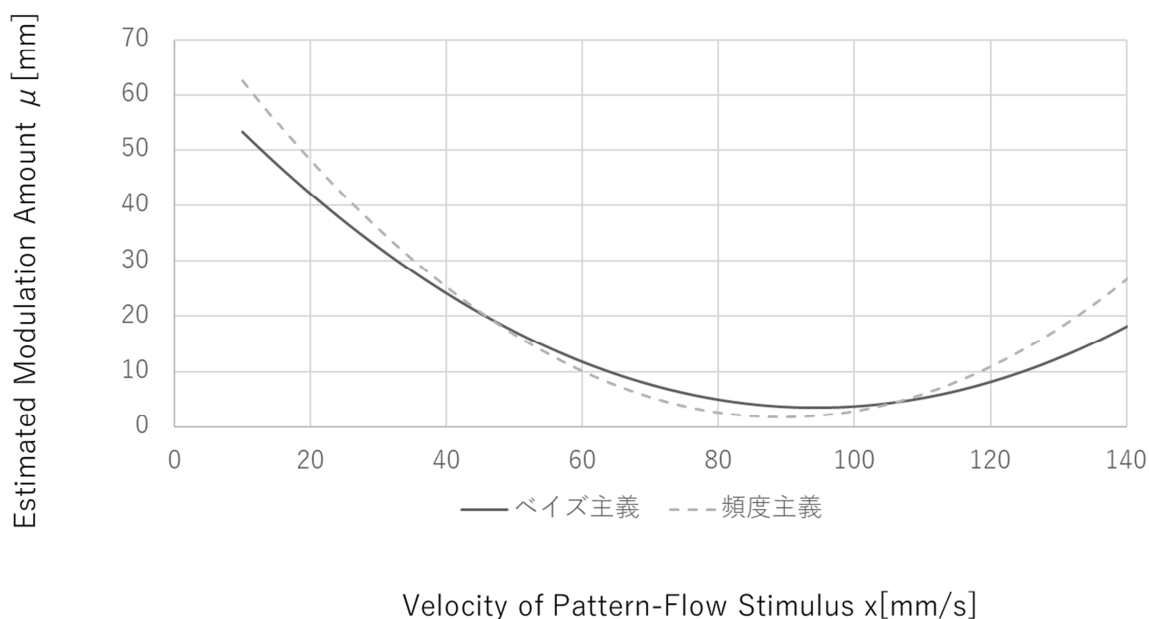


Fig.4.22 頻度論に基づく推定モデルとの比較

あることが推定され、この検討を行うために速度  $x$  の 2 次式のモデルが仮定された。

比較対象は図 4.20, 式(4-4)に示した結果とした。同じく 2 次式のモデルを仮定して同データに対して最小二乗法に基づく多項式回帰を行った結果、下式のモデルが得られた。

$$\mu = 78.8 - 1.72x + 0.010x^2 \quad (4-6)$$

これらを比較した結果を図 4.22 に示すが、推定された傾向は同様であり、ベイズに基づくモデルのピークは流動速度 94mm/s に対し変調量 3.5mm, 頻度論に基づくピークは流動速度 89mm/s に対し変調量 1.7mm と量的な差異も小さかった。したがって本研究では、上述の利得のあるベイズ統計の手法を有効と考え、図 4.20 の導出において推定モデルを更新したように、今後も積極的に活用して推定モデルの精度向上に活用する。

## 4.7 結言

以上 4 章の実験では、ネイティブな映像を通じた視覚情報が予測の正確性に及ぼす影響を明らかにすることを第一の目的とした。その結果、表示遅延で説明できないほど有意な位置の予測誤差が正の方向に偏って生じることが明らかになった。このように移動予測が過小評価された要因として、ネイティブな映像表現のスケール感(表示倍率および奥行き手がかりの表現)の影響を考察した。映像による遠隔操作ロボットの実際の運動と予測との乖離を抑制することが、予測の修正を減らし、遠隔操作の習熟にかかる負荷を軽減することに重要と考えられる。

したがって、本章の結果から、思い通りの移動操作性の向上のためには【機能要件 A】現地サイトの対象のスケールを正確に知覚可能な映像提示機能が有効である可能性が示唆された。具体的な実装としては、例えば予め、ユーザにとって位置の予測誤差を最も小さくする表示倍率等の設定を特定するアセスメント手段が考えられる。これを特定するには、本章で考察した通り、分

離が困難な表示倍率と奥行き手がかりの表現との影響を慎重に分離する必要がある。

また 4 章の実験では、遠隔操作ロボットの速度情報が予測に及ぼす影響を計測することで、その活用を検討することを第二の目的とした。解析の結果、速度情報が予測を変調させる可能性が明らかとなった。すなわち、位置の予測誤差の変動が推定できれば、これを無意識のうちに補償する映像表現が存在する可能性が考えられた。これは、思い通りの移動操作性の向上のための【機能要件 B】 予測誤差変動の推定とこれを無意識のうちに補償する機能の実現可能性を提案するものである。

本章では映像表現としてオブティック・フローを用い、これに誘発されるベクションを遠隔移動操作にも活用しようとした。その結果、オブティック・フローの流動速度とユーザに予測される速度との乖離が小さい領域では、意味のある位置の予測誤差の変調効果があることが示唆されたが、この変調効果は位置の予測誤差を拡大するように作用し、【機能要件 B】 を満たすにはさらなる検討を要することが分かった。すなわちこの変調効果は、位置の予測誤差が負の方向に偏る条件を見いだせば、その条件が発生し得る場面で予測の補償情報として活用できる可能性があることが明らかになった。

---

## 第5章

# 予測誤差補償手法の基礎検討

---

### 5.1 概要

5章では、4章で明らかになったオプティック・フローの予測変調効果を予測の正確性向上に応用できるか、さらに検討を進めることを目的に、探索的な検討を行った。すなわちこの変調効果は、位置の予測誤差が負の方向に偏る条件を見いだせれば予測の補償情報として活用できる可能性を見いだせることが4章の検討結果から示唆されたところ、本章での検討の結果、当事者等の社会参加支援に重要なロボット視点を用いたシステムにおいて、以下の結果を得ることができた。

(1)操作実行段階での映像の拡大により負の予測誤差(移動予測の過大評価)が生じることを明らかにした。

(2)映像の拡大が予測誤差に及ぼす影響を考察し、負の予測誤差が生じる応用上の場面を明らかにした。

(3)以上を踏まえて、オプティック・フローの予測変調効果(移動予測の過小評価効)が上記の場面で予測誤差をキャンセルし、予測の精度を向上するのに有効である可能性を明らかにした。

### 5.2 緒言

#### 5.2.1 5章で対象とするシステムとその利点

本章では引き続き遠隔操作型の小型の移動ロボットを対象とした検証を進める。

ただし本章では、当事者等の社会参加支援に重要なロボット視点を用いた、より応用的な下記の認知側のインタフェースを含むシステムを用いることとした。

##### (a) 拡大・縮小が可能なロボット視点の2D映像を表示する認知インタフェース

本研究では最終的に、操作者が自己を現地側のロボットに投影し、あたかも参加者と顔を合わせるようなリアリティのある擬似外出体験の実現を目指している(1章)。この実現のために、ロボット視点の映像での操作を想定することは重用である。

以下、ロボット視点をロボットの移動に追従するロボットの全体像が表示されない視点であって、いわゆる一人称視点や手先カメラの視点を含むものと定める。この定義から、俯瞰視点の映像は自身の前進の像を含むため、本稿ではロボット視点の映像とは区別する。

ロボット視点の利点のひとつは、ロボットの移動と視点の移動とが対応している点にある。こ

の利点を活かせば、ターゲット物体を任意の位置・角度から観察でき、詳細観察や拡大観察も容易である。固定のカメラでは困難な、死角の回避も大きな利点になる。これらの利点は、例えば衛星(小田, 1997)(尹他, 2001)や不整地でのレスキュー(幸村他, 2017), 無人化施工(古屋他, 2012)等に活かされていることが管見の限り確認できた。これらのシステムに要求されるタスクやミッションは非定型で、複雑で、精度も要求され、難易度が高い。ロボット視点の映像はこのような難易度の高いタスクで必要となり、この意味でも有用な視点と考えられる。

また 6 章では比較対象として構築するが、固定の環境カメラ視点(3 人称視点)の映像を移動ロボットの操作に用いると、その移動範囲はカメラで撮像可能な範囲に限定されてしまう。環境カメラを別ロボットに取り付ける提案(例えば(天間他, 2019))もあるが、この対策では別ロボットの追加操作が必要になるか、あるいは自動制御が必要となるために所望の映像を必ずしも得ることができないか、等の懸念がある。これに対してロボット視点の映像は、移動の自由度を制約しない。

これらの特徴は体験の質の向上に寄与し(村上他, 2010), 社会参加の支援に重要である。特に本稿の研究で重視するのは、自己の体験を現地サイトのロボット等の体験に重ね合わせるのに有利と考えられる点である。これは 2 章で述べた、自己のフィーリングの主体感の生起や、自己のプロジェクションの達成にも役立つものと考えられる。一般に、一人称視点での体験は没入感や臨場感が強いといわれる(一般財団法人デジタルコンテンツ協会, 2016)。ロボット視点の移動はロボットの移動と一対一対応でき操作の直感性も高い。3D 映像はリアリティ向上に極めて有効だが、映像酔い(動揺病)等の懸念があり(3DC, 2010), 本稿では操作者への負担低減を重視して 2D 映像を想定した。

他に、映像の拡大・縮小機能(デジタルズーム, 光学ズームを含む)は参加者の表情を見る等のコミュニケーション面で有用と考えられるので、活用を想定した。

## 5.2.2 5 章の目的

4 章の結果から示唆されたのは、映像によって予測される自己位置の認識と、ターゲット位置の認識との間に、これらを同時に注視し続け、逐次誤差を確認しない限り、移動結果には誤差(位置の予測誤差)が残ることである。注視による誤差の確認は随意的な情報処理であり時間を要し、動的な移動に関するタスクでは現地サイトの移動システムの断続的な停止となって現れたり、移動以外の体験に集中できないようなゆっくりとした慎重な移動となって現れたりすると考えられる(1 章)。

しかしながらロボット視点の映像ではその定義から、自己位置を直接視認できない。このため自己位置を予測する必要があるが、自らの移動体験や自動車操作体験等とは異なり、遠隔の移動ロボットから得られる遠隔移動体験では自己位置に関する体性感覚等情報がほとんど得られない。このことは、誤差の注視による移動結果の逐次的確認が必要となる要因の一つと考えられる。移動ロボットでも力情報の追加が試みられている(Motoi et al., 2019)が、本稿の研究ではペルソナを設定した上で、いかなる情報が映像表現では提供できておらず、それを力情報等の他のモダリティの情報でカバーする必要があるのかを明確化するアプローチをとることを 1 章でも述べた。

位置の予測誤差のもつ第一の重要な意味は、ユーザの意図しない位置への移動が許されない場面において、ユーザに少なくとも自己位置に関する情報を注視し続けて微調整していくような慎重な操作体験であって、ごちこない移動体験を強制することと考えている。

これは思い通りの移動操作性についてユーザビリティの観点から捉えた課題である。慎重な操

作体験は、繊細な手元作業の実現には必須のように思われる。しかしながら、移動機能は他の活動(コミュニケーションや景色の鑑賞等)の基盤として頻繁に実行されるため、あまり意識せず直感的に実行できることが望ましく、その方が体験としても自然である。移動に際して、例えばはじめての自動車運転のような慎重な周囲環境の注視や操作が頻繁に強いられれば、少なくともシステムのユーザビリティ、間接的には感性的品質の課題となる。そして、参加者とロボットとが現実空間を共有するような本稿の射程に入る遠隔参加形態では、ユーザの意図しない位置への移動は衝突リスクを高めるため、予測誤差の発生は許されない。したがってユーザには多くの移動場面で慎重さが要求されるか、しばしば冗長なリスクアラートや自動衝突回避機能等で主体感の低下した体験を強いられるが、いずれにしても本来の目的である体験を楽しむことへの集中を妨げることになる。これを現地サイトの参加者の観点で考えれば、ロボットが適切な位置に移動できない可能性があるとして、現地サイトの参加者に自身や他者との衝突リスクを慎重にケアすることを強いてしまい運用上の難易度を上げ、遠隔サイトのユーザだけの課題ではなくなる。

また、シンプルな移動機能であっても、現地側の物体に接近・接触して参加者に注目を促したり、押しやったり、食事等を乗せてもらい別地点まで運搬したりする等の、移動に伴う簡単な物理的作業であれば実現可能性が見込まれるところ、位置の予測誤差が発生するとこの等な単純な移動に関するタスクさえ実行できなくなる。これは6章で端的に示される。

位置の予測誤差のもつ第二の重要な意味は、上述の問題との明確な分離は困難であるが、感性的品質の低下である。

コミュニケーション面では、参加者から見てロボットは期待よりも遠すぎたり近すぎたりする。これらは対面や固定映像での会話ではあまりないパーソナルスペースの問題(青木, 渡邊, 2011)の要因になる等、参加者に違和感を生じさせる。違和感は参加者の反応を観察する操作者にも伝わり、体験の質の低下が懸念される。別の観点では、ロボットの行為をあたかも自分の行為と感じる自己主体感の低下は遠隔参加体験の質の面で重要だが、行為の予測と結果とが合致しないと損なわれるといわれる(浅井, 丹野, 2007)(Wolpert et al. 1995)。

#### **(a) ロボット視点の2D映像の課題**

自己位置を直接視認できないロボット視点の映像を専ら用い、自己位置と周囲の環境との相対関係を正しく認識し(見当識)、予測に用いるのは誤差の注視よりもさらに困難となる。4章で述べたとおり、ロボット視点の映像のみでは奥行き認知が極めて難しくなる課題が周知であり、この要因の一つと考えられる。ロボット視点の映像は基本的にロボットの進行方向の映像を撮影するため、自己位置はユーザが周囲を意識的に観察する操作(ロボット自身あるいはカメラの旋回、広画角映像の操作等)を実行しない限り、自己位置を奥行き方向にある対象の情報から推定することになる。奥行き認知が極めて難しい場合、表示された対象の絶対的な奥行き位置(座標)も、それに対する自己位置の相対的な奥行き位置の推定も同様に困難になる。ターゲット位置の正確な認知についても、同様の理由で困難になる。認知の困難性が災いして、ユーザが予測誤差の発生に素早く気付けないことも、遠隔移動体験のぎこちなさを増長する要因である。この場合、ユーザは移動に関するタスクの失敗や何らかのアラート機能、現地サイトの参加者からの声掛け等から移動の誤差の発生に気付かされることになり、ユーザビリティや感性的品質、とくに主体感や自己効力感が大きく損なわれる可能性がある。

## (b) ユーザが思い通りの移動操作性を欠く従来型システムを活用する動機について

自己位置と周囲の環境との相対関係の認知が映像を介すると極めて困難となる課題は、例えば災害現場で情報収集ミッションを担う移動型ロボットの遠隔操作において重要な課題として指摘されている(Murphy, 牧田, 2003)(大野, 城間, 2010)(佐藤, 松野, 2010). 俯瞰視点やロボットに搭載したセンサデータの追加表示等の手段は自己位置の認識を正確にする(佐藤, 松野, 2010)常套手段といえるが、前者は現地側の参加者の顔が見えない等の体験の質、後者は操作中に多様なデータ解釈が要求される等の理解しやすさの面で、彼らの遠隔参加の動機を効果的に高められないと考え、前述のように本稿の想定から外している。これらの遠隔操作体験に付随するユーザの主観的な体験は、ミッション失敗の許されない厳しい精神状態(古田他, 2014)での慎重な操作や、様々な訓練(川端, 2018)を伴い、負担が小さくない。しかしながら、同じくこれらの遠隔操作体験には、ミッション達成による大きな(社会的)意義、少なくともプロフェッショナルの業務として認められているという動機があるため、ユーザは負担の大きい体験も含めて、これらの体験を受け入れているものと推定される。

これに対して本研究のステークホルダである当事者等は、認知・身体的機能の低下が少なからず認められ、普段から情報機器へアクセスする機会が少ない等、情報機器の知識不足等の特性もしばしば認められる。加えて、当事者等の主体的で自立的な社会活動への参加を支援するという意味で、当事者等の社会参加には必ずしも、強制力となり得る強い動機ははたらかない。これらを考慮すると、慎重な周囲情報の収集と移動操作を要求する上に、実現される移動もごちなくなるような体験は、当事者等の自律的で主体的な遠隔参加の意欲を削ぐ深刻な課題となる。訓練を受け入れてもらうのも現実的ではなく、高齢者の利用を想定したシステムでのユーザビリティ向上の重要性も指摘されている(嶋田, 大倉, 2012)ように、システム側での問題解決を図る必要性が極めて高い。

## (c) 本章の目的

以上を踏まえて遠隔操作型の移動システムに望ましいのは思い通りの移動操作性をロボット視点の映像を活用した場合でも向上できることである。この実現はスムーズな移動体験の実現、および移動に付随する他の体験を楽しむ余裕を操作者に提供することに寄与するものと考えられる。そこで本章では、思い通りの移動操作性の向上の下位の要件と考えられる予測(3章)の特性について、位置の負の予測誤差(移動予測の過大評価)の発現条件を特定し、位置に関する認識のずれを補償することで、予測に基づく操作出力の調整の精度をユーザに意識させる(気づかれる)ことなく、向上するため、4章の結果から得られた機能要件を検証する。

すなわち、4章で明らかになったオプティック・フローの予測誤差の正の変調効果は、位置の予測誤差が負の方向に偏る条件を見いだせれば予測の補償情報として活用できる可能性を見いだせるため、本章では第一に、負の位置の予測誤差が生じる条件を特定することを目的とした。

さらに本章では第二に、4章で得られたオプティック・フローによる正の変調現象を、より本研究の目標化においては利得の大きいロボット視点の映像を用いて再現することで、実際に位置の予測誤差が無意識のうちに補償に寄与するように変調されたのか確認することを目的とする。

## 5.3 実験方法

### 5.3.1 実験タスク

4章のタスクと同様に、ユーザは遠隔操作型の移動ロボットをターゲット位置に直進および停止(到達)させるシンプルなタスクを用いた。ただし、3章で説明したように予測誤差を計測するため、停止後の修正は許されなかった。

また本実験ではロボット視点の映像を用いるため、移動ロボットの自己位置を直接視認することはできない。これにより、位置の予測誤差の計測条件(3章)が満たされており、すなわち視覚でロボットの自己位置と、ターゲット位置との誤差を同時に捉え確認することが阻害され、もって停止位置の修正が妨げられる。

#### (a) シンプルなタスク設定の意味

5章でも引き続きロボットの前進と停止のみを許すシンプルなタスクを用いたのは、移動ロボットがターゲット位置へ停止する直前のわずかな移動の操作(すなわち、移動に関するタスクにおいては現地サイトの対象に何らかの能動的関与をする直前を意味しており、本実験では500~900mmの移動と設定された)を模しており、これに伴う左右旋回や後退、速度調整を許すと、周囲環境の時間をかけた慎重な観察や、減速、後退による停止位置の微調整が許容され、本稿の目的である慎重さを要しないという意味でヒューリスティック的な操作の結果を検出できないと考えられたためである。また直線軌道については、ヒトの予測的な運動として基本的な到達運動(リーチング)の知見を参考に一般化を妨げないと考えた。リーチング軌道は、2章で述べたように直線になる普遍傾向を有する(川人, 1996)。これはリーチングの規範となる軌道計画が無意識に素早く実行されることを示唆する。停止直前のわずかな移動操作でも、障害物がある等の特殊な事情や実験参加者の特段の意図の介入がない限り、直線以外の軌道が選択されることは考えづらい。加えて、心理物理的実験ではなるべく早く・正確な操作を求め実験参加者毎の条件を統制することが一般的であるが(6章の動的な思い通り移動操作性の検証タスクでは実験参加者に要請している)、本実験では上記のように、慎重でアルゴリズム的な操作の典型といえる減速の操作の影響を分離する必要があったため、ロボットの並進速度を統制した。このような実験条件の統制がない場合、移動速度は操作者の個性や環境等に応じて大きく変動すると想定される。停止位置は移動速度と表示時間遅れの影響を受ける可能性があり(6章でその幾何学的モデルを導出している)、ロボットの並進速度が予測誤差に及ぼす影響を定量的に明らかにすることは実用上の課題となる。

### 5.3.2 実験装置

基本的構成は4章と同一である。以下、4章の実験システムとの差異を中心に説明する。

#### (a) ロボット視点のカメラ

Roombaにロボット視点の映像を撮像する主カメラ(BSW3KMW01, バッファロー社)および補助カメラ(c525, ロジクール社)を搭載した。

主カメラは主点の高さが走行面から150mmに保持した。このため、ロボットの移動範囲の全域で、後述する高さ210mmのターゲット物体を十分に視認できるよう、光軸方向を俯角8°に設



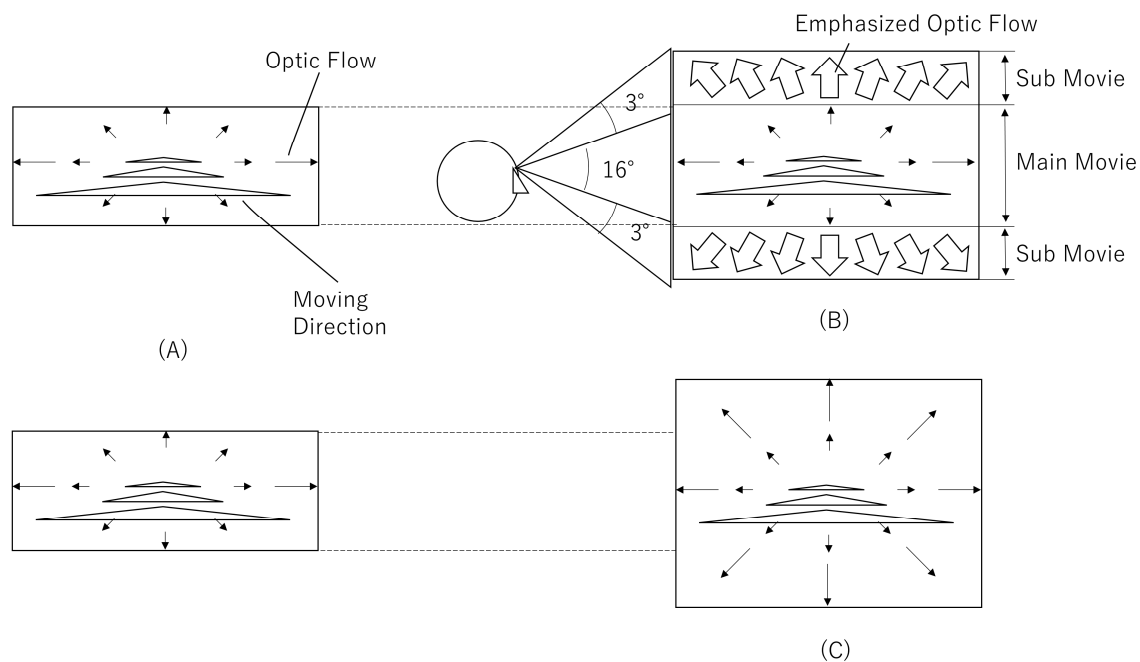


Fig.5.1 認知インタフェース構成

定した。また、補助カメラの光軸方向は鉛直下方向とした。理由は後述する。

### (b) 認知インタフェース構成

5章の実験では新たな認知インタフェースの基礎検討用プロトタイプを導入する。

ロボットが前進すると、ロボット視点の映像では図 5.1(A)に示すように主カメラの光軸方向を消失点として、主たる映像が周辺に湧き出すように流動する。この流動はオプティック・フローと称される。

5章ではオプティック・フローの流動速度を強調するために以下の2つの方法を用いた。

#### ・擬似手法：図 5.1(B)

ロボット視点の主たる映像の上下の領域に、流動速度がその映像よりも相対的に速くなるように擬似的な流動の映像(以下、補助映像と称する)を追加した。4章で得られた知見は直接的には、遅い速度のオプティック・フロー(より具体的にはトレイン・イリュージョン刺激)に応用の可能性があることであったが、これは3人称視点で観察した場合のロボットの並進速度と比較した速度であることに注意する。ロボット視点においては、注視点の停留する中心領域の映像の流れよりも、その周囲の流れが遅くなるのがより不自然となり、後述するように実装上の問題もあったこと、また5章の実験も引き続き探索的な性質のものであることから、ロボットの並進速度を超える強調手法を実験条件に加えた。

補助映像の表示範囲は、ディスプレイを700 mm離れた位置から観察した際の画角に換算して俯角・仰角とも8°~11°とした。視野の周辺では運動情報への感度が高く(福田, 1979)、ベクシオン(視覚追従性運動感覚)の誘因効果が強い(Brandt et al., 1973)とされる知見を考慮した配置となっている。

ヒトの視野は一般に、ゴールドマン型視野計を用いた測定において俯角70°~仰角60°が正常値

とされている。本実験で用いたのは後述する 17 型のディスプレイであり、700mm 離れた位置からの観察という条件も踏まえ、その表示範囲はこれに比べて十分に小さい。したがって補助映像は、ユーザがディスプレイ内に視線を停留している限りその全域が必ず視野に収まるように設定されている。

補助映像にはロボットの移動中の走行面を補助カメラで撮像したものを活用した。これは補助カメラを前述のように走行面に直交するように、一定の高さに保持することで、安定した流動の映像を得られ、流動がロボットの移動と連動し、表示倍率で流動速度を容易に変更できる利点があったためである。この方法は、実用上の有効な設計の一つと考えている。例えば、本稿の研究では主たる映像として俯瞰映像を採用することを直感性や感性的品質の観点から積極的に行わないが、俯瞰視点の映像を安全確保のために予備的に設けておくことは現実的に不可避であり、その映像を流用する等の利得も期待できる。

擬似手法では、補助映像の流動方向を主たる映像のオプティック・フローの流動方向と近似させるため、補助映像に透視投影変換を、補助映像のうち上側領域のものには上下反転の処理を施した。これらの画像処理により、補助映像の流動速度はディスプレイ水平方向中央の上下端における流動速度を基準に消失点に向けて減少し、流動の向きは図 5.1(B)の白抜きの矢印のようになり、消失点から湧き出すように観察される。消失点の pixel 座標はディスプレイ左上端を原点、右・下方向を各軸の正の方向としたとき、上部で(640, 260)、下部で(640, 700)とした。

さらに主たる映像と補助映像との境界の際立ちを抑え、なるべく映像間に連続性をもたせるため、補助映像にはブラー処理を加えた。

以上の処理は、オープンソースのコンピュータビジョン向けライブラリである OpenCV を用いて実装した。実際に構築したインタフェースは後述する図 5.4 に示している。

#### ・拡張手法：図 5.1(C)

補助映像の表示範囲と一致するように、シームレスにロボット視点の映像を追加した。

拡張手法では、擬似手法に比べて流動速度をあまり強調できない。このため、検出されるオプティック・フローの位置の予測度差を正の方向に変調する効果(4章)はあまり大きくないものと予想された。しかしながら、ロボット視点の映像と全く同質のオプティック・フローを追加できる利得がある。また、ロボット視点の映像の観察範囲が広がる利得がある。つまり、拡張手法は従来型の映像の精緻化の手法の一つに当たる。

### 5.3.3 実験環境

図 5.2 に実験環境を示す。実験参加者としてのユーザは 17 型ディスプレイ(1280×960 pixel)をその手前 700 mm から座って観察した。実験参加者のコックピット周辺は幕等の壁面で囲まれ、映像を介する以外の方法で現地サイトの空間を一切視認できないようにした。

現地サイトの空間には、ターゲット物体として広く一般に既知と考えられる無地の 500 ml ペットボトル(高さ 210 mm)を 3 つ配置した。これらのターゲット物体は、現地サイトの参加者等に相当する(ただし、この想定は移動操作結果に心理的なバイアスとして作用する可能性が考えられるため、5章の実験ではこのような想定を実験参加者に伝えていない)。これらに対して所望の相対位置で停止できる方が、例えば地面に描かれたマーカのような明確に指定されたターゲット位置に停止できることよりも、コミュニケーションや安全、さらには自己をロボットに重ね合わせるような体験の実現の面で意義がある。

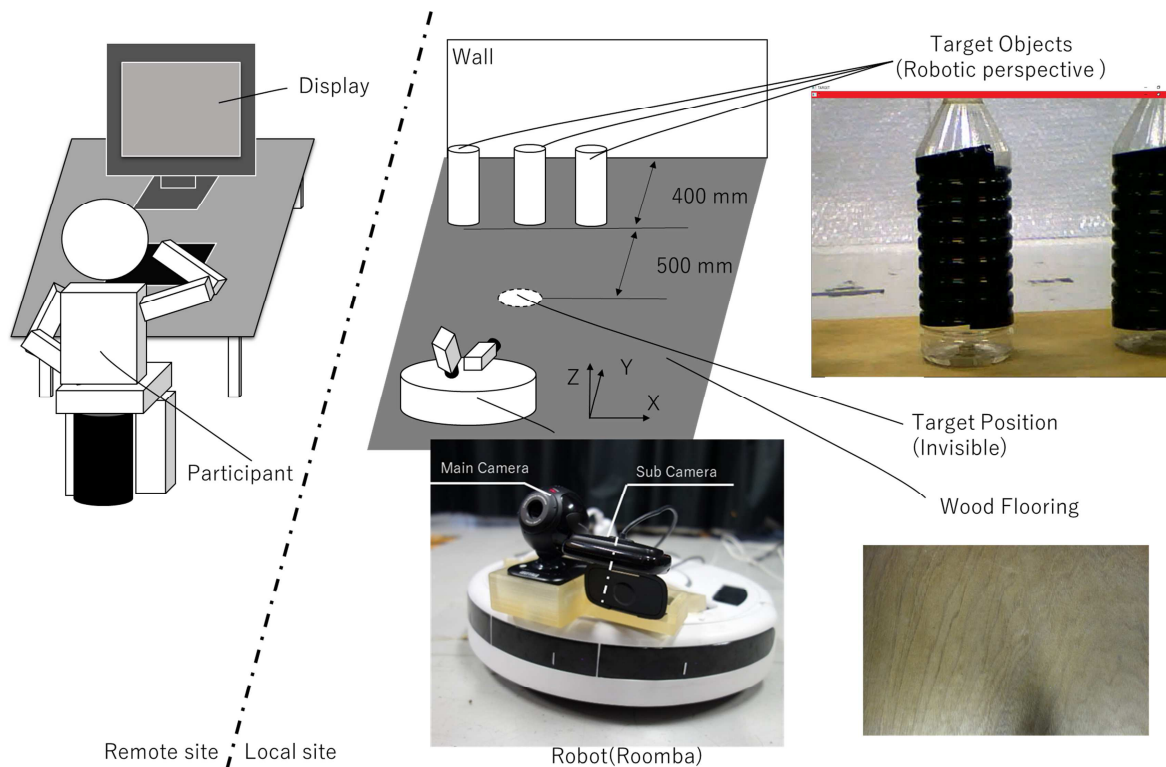


Fig.5.2 実験環境

ターゲット物体の 400 mm 背後には無地の壁面を設け、本実験で意図しない情報の映り込みを遮蔽した。4 章の実験では背景とロボットとの奥行き方向の相対的位置関係が映像の奥行き表現にも影響を及ぼしたことが示唆されたためである。

ターゲット物体の 500 mm 手前には、映像からも全く視認できない仮想のターゲット位置が設定された。実験参加者は、ターゲット物体を手がかりに、不可視のターゲット位置にロボットを移動(停止)させることになる。

走行面は木材とし、節や傷、汚れ等のターゲット位置に関する特異な情報がないことを確認した。木材には木目状の模様があり、上述した擬似手法による擬似的なオプティック・フローの映像が十分に生成可能であった。

### 5.3.4 実験手続き

5 章の実験は実験参加者の負担を考慮し、以下の手続きが 1 時間で完了するように計画された。実験参加者はインフォームド・コンセントの得られた健康な成人 5 名(30 代 1 名(女性), 40 代 3 名(男性), 50 代 1 名(男性))とした(健常者)。4 章と同様の現象を検出するためには事前検討(4 章のデータを参照した)データから、統計的に 5 以上のサンプルが必要であると見積もられた結果による。ただし本研究は試行を繰り返させ、試行全体を母集団としてその傾向を把握する基礎的な検討に位置付けられるため、実質的なサンプル数は見積もりより十分に多くなる。対応関係を考慮した検定を用いる場合にはサンプルが個人ごとに平均されて用いられるので、この解析にも対応した実験設計になっている。また、個人差については後述するが応用上ケアすべき課題であり、実験参加者の個人差についても検討を加える。

実験手続きは教示および操作の 2 段階からなる。この説明図を図 5.3 に示す。はじめに実験参

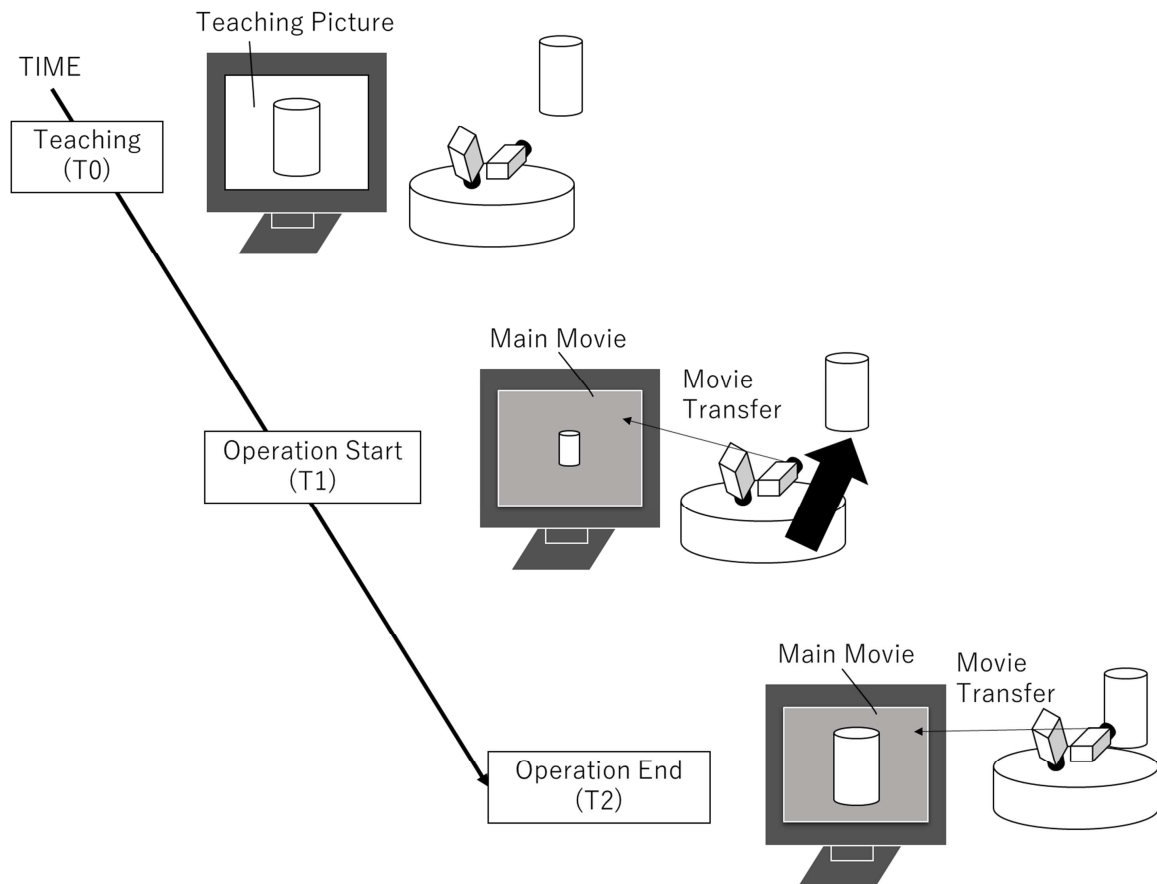


Fig.5.3 実験手続き

加者に以下の事項の説明あるいは指示を行った。

・各試行の直前には教示画像として、ロボットがターゲット位置に到達した際のロボット視点の静止画像が表示される。

- ・教示画像に基づきターゲット位置を記憶する。
- ・表示が映像に切り替わったらロボットを前進させる。
- ・ターゲット位置でロボットを停止させる。
- ・操作の修正は許さない(明確な操作ミスは自己申告する)。
- ・インターフェースから目を離さない。
- ・目を閉じない。

これ以降は、実験参加者には常にヘッドホンからホワイトノイズを聞かせた。この理由は、意図しない聴覚情報の影響を排除するためである。

**(a) 教示段階(操作直前 :  $t=T0$ )**

実験参加者は各試行の直前に教示画像を観察し、ターゲット位置を記憶する。

教示画像には実験と同環境のターゲット位置で、同システムにより予め撮像したターゲット物体の静止画像を用いる。

**(b) 実行段階(移動の操作開始後 :  $t=T1$ )**

ロボット視点の映像に切り替わった後、実験参加者はターゲット位置に向けロボットの移動を移動させる。停止タイミングの記憶を避けるため、ロボットはその 500~900 mm 手前のランダムな位置から移動を開始した。実験参加者は映像を観察し、ロボットがターゲット位置に到達したと判断したら停止させる。

### (c) 停止後( $t > T_2$ )

実験者は、ロボットの停止位置とターゲット位置との奥行き方向の誤差を位置の予測誤差として計測する。

すべての実験参加者に次で述べる 3 条件 5 水準での試行を各 5 回ずつ、ランダムな順番で実行させた(合計 125 サンプル)。なお、本実験でも実験参加者に予測誤差のフィードバックを一切与えなかった。

## 5.3.5 実験条件

本実験では大きく下記の 2 条件を設けた。図 5.4 に教示画像および各条件下でのインタフェースを、表 5.1 に実験条件をまとめたものをそれぞれ示す。

### (a) 拡大条件

予備的な探索の結果、本実験では、実行段階( $t = T_1$ )でのロボット視点の映像の表示倍率を、教示画像の 1.2 倍に拡大表示した。この条件は、本実験を通して常に適用された。表示倍率の拡大はデジタルズームの方法で主たる映像にのみ適用し、補助映像の表示倍率とは独立であった。

拡大条件は、5 章の目的である負の予測誤差を誘発する条件として仮定されたものである。この条件は、実験参加者には一切伝えなかった。

### (b) 強調条件

実験中に操作する条件として、まず基準となる Standard 条件を設定した。

Standard 条件は擬似手法を用いて実装された。本条件の基準として、ディスプレイの水平方向中央の上下端の点を選定し、この基準点近傍における上記の拡大後のロボット視点の映像の流動速度を基準速度とした。ロボット視点の映像では、下部の流動は主に走行面から、上部の流動はターゲット物体背後の壁面から得られる。ターゲット位置の直前では、基準点の近傍の流動速度はそれぞれ下部で 50 mm/s、上部で 10 mm/s であった。そこで本実験では、これらの平均値 30 mm/s を基準速度として実装した。なお本実験では補助映像に透視投影変換を施しているため、補助映像の流動速度はディスプレイ座標に応じて異なっていた。したがって、本実験における Standard 条件は流動速度 30 mm/s の絶対的な基準ではなく、他に設定された強調条件との相対的な基準として扱われる。

次に強調条件群として、擬似手法により流動速度が相対的に強調された Fx 条件(3 水準)、拡張手法により流動速度の強調された E 条件(1 水準)、計 4 水準を設定した。

Fx 条件の添字 x は上記の基準点近傍における流動速度を示しており、それぞれ F60:60 mm/s, F90:90 mm/s, F120:120 mm/s となるように、補助映像の表示倍率を調整した。なお、補助映像は格子状に敷き詰められた。この処理のため、図 5.4 に示す補助映像にはブラー処理を施してもなおその内部で格子状の境界が生じており、その肌理は流動速度で異なっていた。Standard 条件よりも低い流動速度の影響も明らかではなく興味ある課題である。しかしながら、補助映像の

Table 5.1 条件一覧

Conditions	Pseudo				Expansion
	Standard	F60	F90	F120	E
Interfaces	Main + Sub Movie				Main Movie
Emphasis of Optic Flow	None	Additional Velocity of Optic Flow			Expansion Display
		+30 mm/s	+60 mm/s	+90 mm/s	

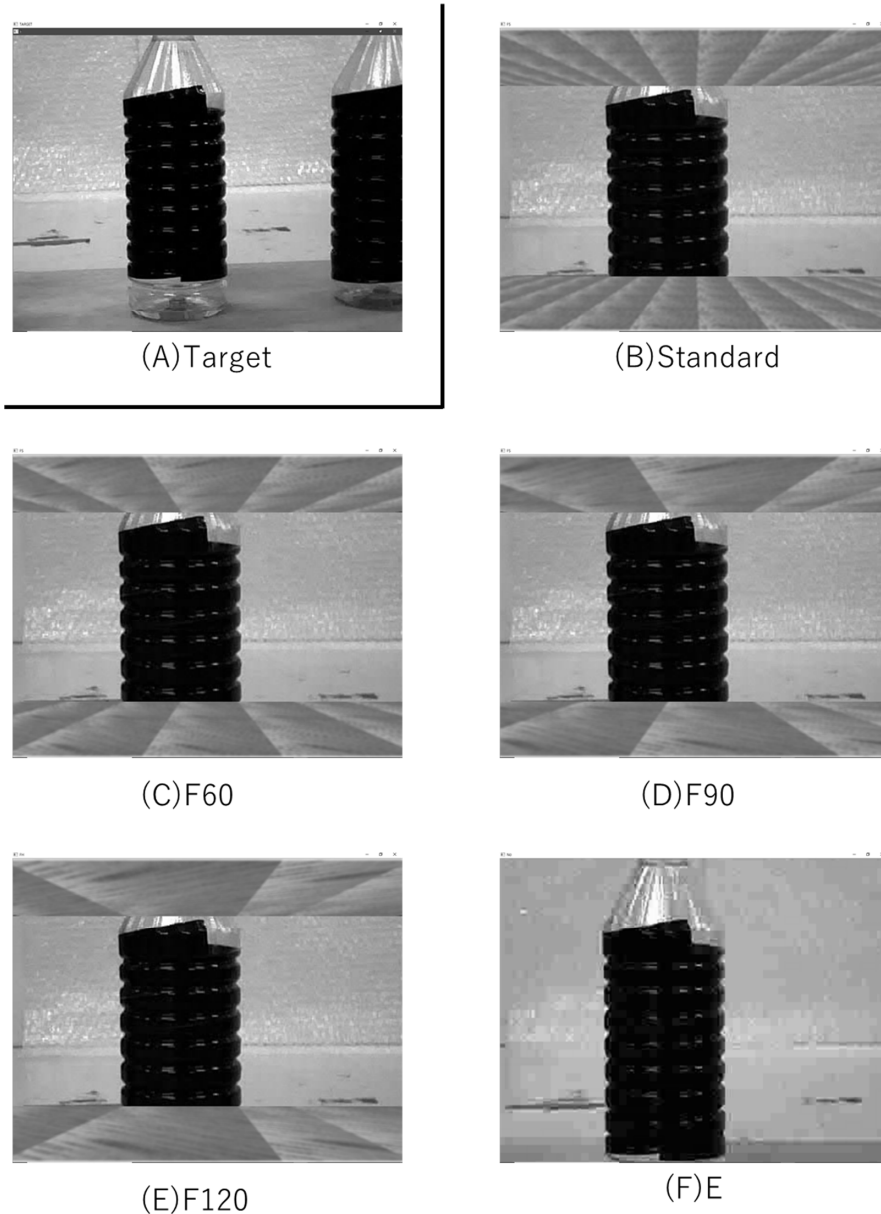


Fig.5.4 実験条件別の認知インタフェースの見える例

縮小表示でこれを実装する擬似手法では補助映像中の流動が視認し辛くなることが明らかになった。このため主たる映像の中央領域の流動よりも相対的に低速なオプティック・フローの影響は異なる方法で検討をすすめる必要があることが分かり、今後の課題である。

E 条件での流動速度は上部基準点で 10 mm/s, 下部基準点で 50 mm/s としたが, Standard 条件とは上下の領域で流動速度が互いに異なる点, 流動方向および速度勾配が本来のオプティック・フローに厳密に一致する点で異なる。

### (c) 検証条件

本章の実験では, 拡大条件の影響を明確化するために追加検証のための条件を設けた。

検証スキームは上述の実験スキームと同様とし, 実験条件は E 条件との比較のために垂直方向の表示画角が俯角 11°~仰角 11°のロボット視点の映像のみとした。また実行段階の映像の表示倍率を実行段階の 1.0 倍(等倍)とし, これ以外の条件を揃えた。実験参加者はインフォームド・コンセントの得られた 3 名(上記実験に含まれない 30 代 1 名(男性), 上記実験に含まれるが十分間隔をあけた 40 代 2 名(男性))とし, 生理的な負担等を配慮して 1 時間の間で可能な限り試行を繰り返させ, E 条件との比較に十分な計 46 サンプルを得た。

## 5.3.6 データ処理

### (a) 多重性の問題の回避

本章の実験には探索的な側面があり, 多くの条件間での比較が必要となる実験計画であった。このような場合には, 統計的に多重性の問題(familywise error)を考慮する必要があるとされている。同一の実験計画内で複数回の検定を繰り返すことによって, 有意水準が低下してしまうためである。

そこで本章では(森川, 2008)を参考に, 閉手順(closed testing procedure)の適用を試みた。閉手順に含まれる階層法(hierarchical method)では, 重要な仮説から検定を行うことで有意水準を一定に保つことができる。なお本実験でも有意水準は  $p = 0.05$  とした(以下同様)。

本実験で最も重要となる仮説は,

$H_1$ : 流動速度の強調が予測誤差の変調に意味のある影響をもたらすこと  
である。これを解析するため, はじめに Standard 条件と強調条件群とを比較することとした。本章ではウェルチの t 検定を用いた。

階層法では有意差が確認された場合にのみ, 次に重要な仮説の検定に移行する。次に重要な仮説は,

$H_2$ : 強調条件のうち絵画的な画像処理を含む擬似手法が変調量に有意な影響をもたらすこと  
である。これを解析するため, Standard 条件と Fx 条件との比較を行った。

以下, この手順を繰り返す。 $H_2$ で有意差が確認された場合にのみ, 次に重要な仮説の検定に移行するが, 優先順位を以下のように定め各々の結果を Standard 条件のものと比較する。

$H_3$ : F60 条件が予測誤差の変調に意味のある影響をもたらすこと

これは F60 条件が, 擬似手法の流動速度 3 水準(F60, F90, F120)のうち, 最も影響が大きいと推定されたためである。4 章の実験結果のピーク解析からは, 主たる映像と補助映像との速度乖離が大きい場合には意味のある変調現象の効果が見込まれないことが示唆されたことも参考とした。

$H_4$ : F90 条件が予測誤差の変調に意味のある影響をもたらすこと

$H_5$ : F120 条件が予測誤差の変調に意味のある影響をもたらすこと

$H_6$ : E 条件が予測誤差の変調に意味のある影響をもたらすこと

拡張手法の E 条件の影響が最も弱いと推定されたのは前述のとおりである。

有意差が確認されなかった時点で、それよりも下位に設定された仮説の検定を行わない。このため、有意差が主張されることもない。以上の手順により、本実験での検定の有意水準は  $p = 0.05$  以下に保たれる。

### (b) 効果量(Effect size)

また本章の実験では、有意差に合わせて効果量  $d$ (Cohen's  $d$ )を併記することとした。効果量  $d$  は近年重視されている影響の程度の目安を  $t$  検定において示す指標である。目安としては、 $d = 0.20$  で小、 $d = 0.50$  で中、 $d = 0.80$  で大程度とされている(水本, 竹内, 2008)。

### (c) 外れ値の処理

また本章の実験では、同一条件内のデータに外れ値が認められた場合は解析の対象からは除外することとした。本実験設計では修正を許さないこともあり、ばらつきが大きくなることも懸念されたためである。

外れ値の判定基準は、上の閾値を第三四分位数に四分位範囲の 1.5 倍を加えた値、下の閾値を第一四分位数から同じく四分位範囲の 1.5 倍を減じた値と定めた。

上記の処理の結果、Standard 条件で 2 つ、E 条件で 1 つ、検証実験条件で 4 つのデータが除外された。

### (d) 個人差の検討

以上、一連の実験結果の解析は、個人差を誤差として扱う心理物理学的手法(調整法)を用い、試行全体を母集団として捉えて、試行単位での傾向を考察することを意図して計画された。

しかしながら近年、心理学的な分野においても個人差の検討が重要視されてきているようであり(松吉, 2015)、工学的な要請としても、特に本研究のようにステークホルダに能力が様々である高齢者や、障害像が様々である障害者の支援を目的としたシステムの社会実装において、個人差への量的対応への期待が大きくなってきている。そこで最後に個人差について検討を加えた。

## 5.3.7 拡張コンパレータモデル(2章)との対応

5章の実験条件と拡張コンパレータモデルとの対応関係を図 5.5 に示す。

第一の情報は、ターゲット位置に到達した際のターゲット物体の見え方によって提示される。本実験では上述した様々な理由から 2D 映像を採用している。このため詳細は 5.5 節の考察で述べるが、映像情報からは多くの奥行き手がかりが削減される。残る奥行き手がかりのうち、移動に関するタスクに十分有効と想定されたのは、事前知識として教示されたターゲット物体のサイズの手掛かりであった。したがって本実験ではユーザはサイズの情報から、間接的にターゲット位置の情報を知覚していると想定された。

第二の情報はターゲット物体の見え方の変化によって提示され、移動中は常に入力される。すなわち Roomba がターゲット位置に接近するほど拡大していくターゲット物体のサイズの手掛かりは、操作中は常にロボットのターゲット物体との相対的な自己位置に関する情報をユーザに提供する。

本実験ではターゲット位置が不可視であり、ロボット視点の映像では Roomba 自身も不可視である。したがって予測誤差を直接視認することはできない。間接的なターゲット物体のサイズの



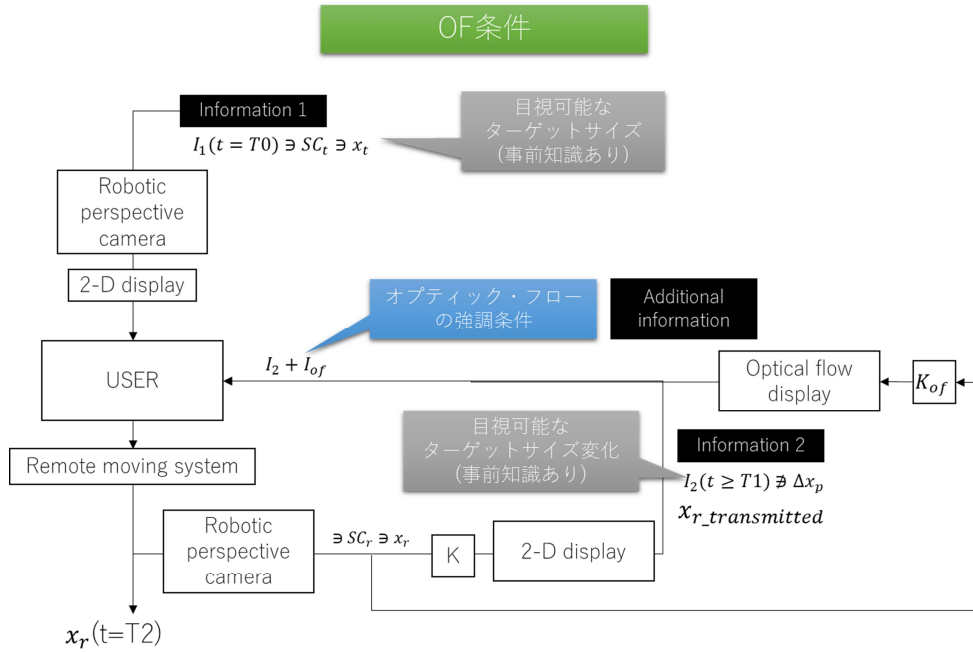


Fig.5.5 拡張コンパレータモデルに本実験の詳細な情報を補足した説明図

情報も、第一の情報と第二の情報とは時間的に区別して提示され、同時に比較できない。これらにより、位置の予測誤差の計測条件が満たされている。

## 5.4 実験結果

図 5.6 に実験結果を示す。縦軸は位置の予測誤差を示している。Roomba がターゲット位置で精度よく停止した場合、すなわち操作に対する自己の次の状態の予測が精度よく行えた場合、予測誤差は 0 となる。また特に断りのない限り、本稿では試行単位での母集団全体の傾向の探索に役立つためにエラーバーは SE を示している。全体的な傾向としては、位置の予測誤差は負の方向に偏っていることが明確に読み取れるが、これはターゲット位置よりも手前での停止を意味している。すなわち、移動予測は実際の移動距離よりも過大評価されている。

図 5.6(A)は $H_1$ に関する Standard 条件と強調条件群(Fx および E 条件)との比較を示す。位置の予測誤差の平均値は Standard 条件で $-86.5 \pm 11.1$  mm, 強調条件群で $-52.1 \pm 6.7$  mm であった。解析の結果、これらの間には統計的な有意差および中～大程度の効果量が認められた( $p = 0.02 < 0.05$ ,  $d = 0.57$ )。

図 5.6(B)は $H_2$ に関する Standard 条件と Fx 条件との比較を示す。Fx 条件での平均値は $-48.5 \pm 7.8$  mm であった。 $H_1$ で有意差が確認されたので、 $H_2$ の影響を統計的に評価したところ、有意差および中～大程度の効果量が認められた( $p = 0.02 < 0.05$ ,  $d = 0.62$ )。

図 5.6(C)は Standard 条件と、 $H_3$ に関する F60 条件、 $H_4$ に関する F90 条件、 $H_5$ に関する F120 条件、 $H_6$ に関する E 条件それぞれとの比較を示す。平均値はこの順に、それぞれ $-44.6 \pm 13.9$  mm,  $-52.2 \pm 14.9$  mm,  $-48.7 \pm 12.9$  mm,  $-69.7 \pm 10.3$  mm であった。変調の影響が大きいと予想された F60 条件で最も負の誤差が小さくなった。

閉手順に従って $H_3$ に関する F60 条件と Standard 条件と比較した結果、有意差および中～大程度の効果量が確認された( $p = 0.02 < 0.05$ ,  $d = 0.68$ )。これを受けて $H_4$ に関する F90 条件と

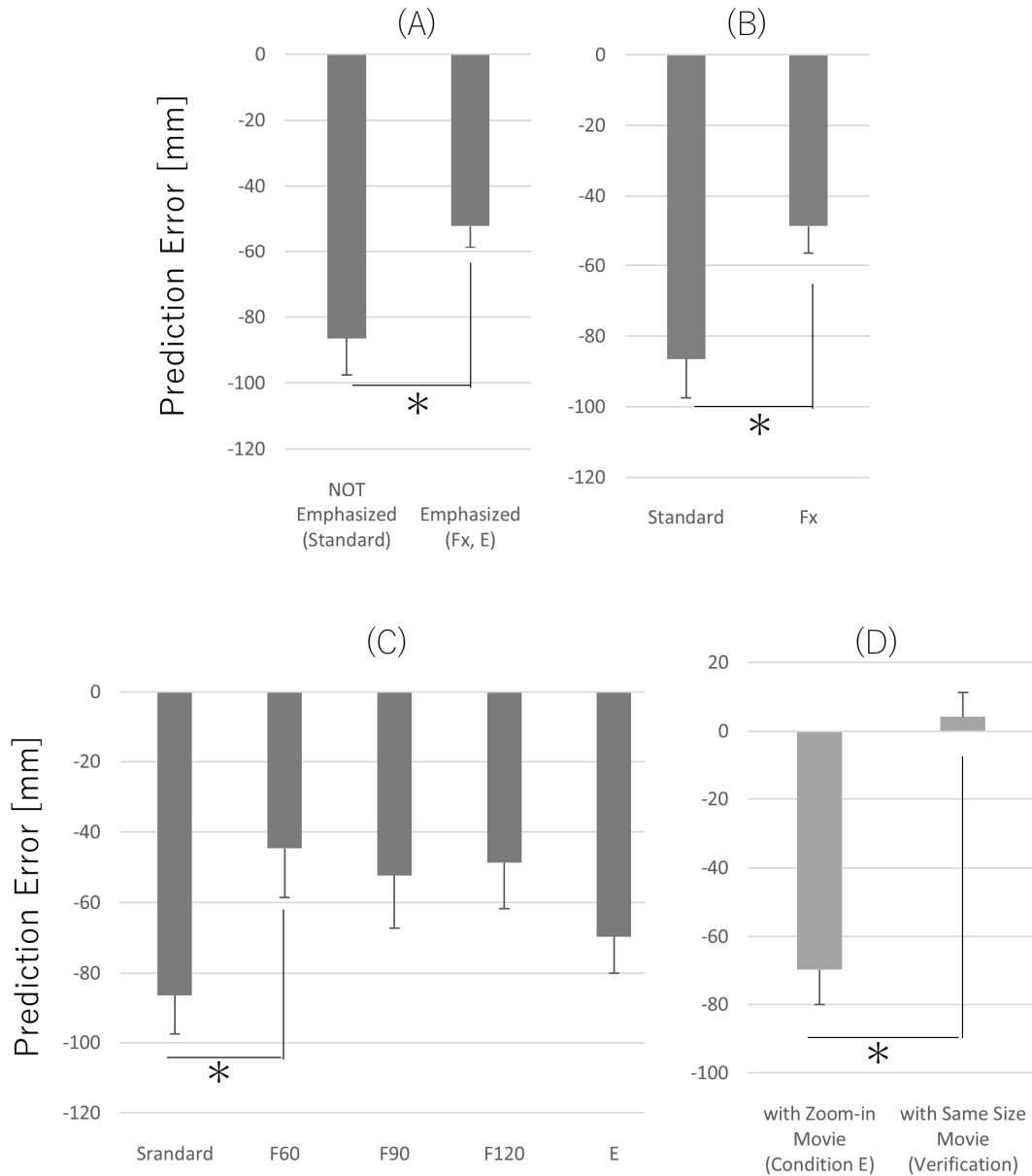


Fig.5.6 実験結果

Standard 条件との比較を行った結果、小～中程度の効果量は認められたものの有意差は確認されなかった( $p = 0.08 > 0.05$ ,  $d = 0.52$ )。このため、この時点で一連の検定を終了した。

以上の条件では、いずれも予測誤差が負の方向に偏る強い傾向が得られたが、これを明確にするために、図 5.6(D)にロボット視点の映像の拡大の影響の検証実験結果と E 条件の結果とを並べて示す。前者の平均値は  $4.2 \pm 7.1$  mm であり、E 条件と 79.5 mm の差が生じた。

検証については参考としてウェルチの t 検定を行った結果、有意差および大程度の効果量が確認された( $p < 0.01$ ,  $d = 1.53$ )。

## 5.5 予測誤差の偏りとオプティック・フローによる補償可能性の考察

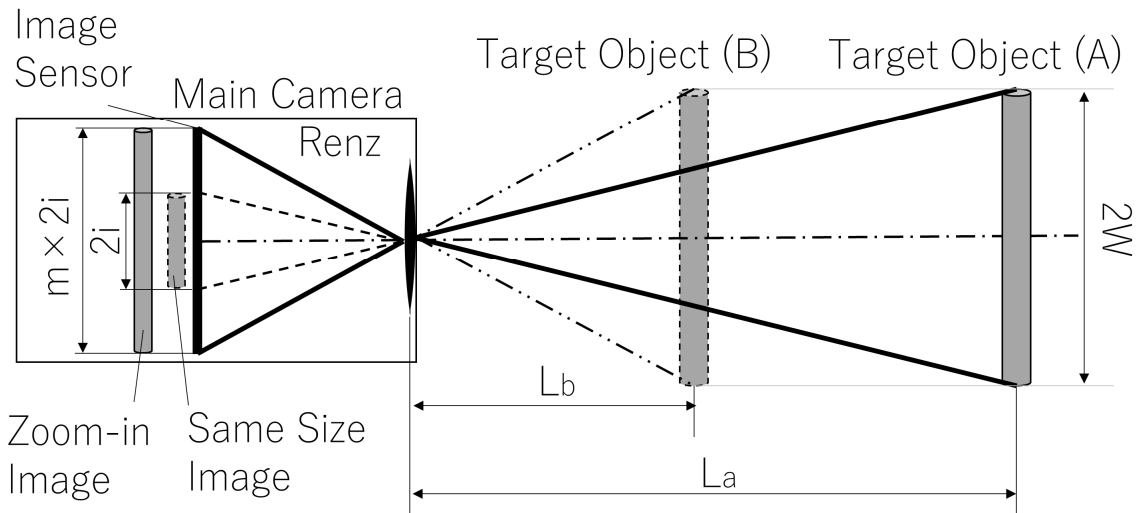


Fig.5.7 映像の拡大の幾何学的関係

### 5.5.1 ロボット視点の映像の拡大条件の影響

本実験結果は、負の予測誤差が実行段階におけるロボット視点の映像の拡大に起因することを示唆する。はじめにこのメカニズムについて検討を加える。

まず映像の拡大を幾何光学的に捉える。図 5.7 にターゲット物体の奥行き位置と、像のサイズとの幾何光学的関係を示す。

レンズの主点位置を自己位置の代表点とする。自己位置に対して奥行き方向に距離 $L_a$ の位置にあるターゲット物体を A, そのイメージセンサ上の投影像のサイズを  $2i$  とおく。この投影像のサイズを  $m$  倍したとき、この像を生成できる別のターゲット物体 B の奥行き位置 $L_b$ を検討する。

いま、ターゲット物体 A および B のサイズをいずれも等しく  $2W$  とすると、奥行き位置の差  $L_a - L_b$  は式(5-1)のように整理される。

$$L_a - L_b = (m - 1)L_b \quad (5-1)$$

本実験の設定値  $m = 1.2$ ,  $L_b = 500 \text{ mm}$  のとき、すなわちサイズが拡大された投影像に対応する(仮想の)ターゲット物体 B に対して予測が正確になされたと仮定した場合に、 $L_a - L_b \approx 100 \text{ mm}$  となる。なお図 5.7 では右方向を正(奥)の方向と定義している。これは、実際の(現地サイトの実空間上の)ターゲット物体 A は予測位置よりも  $100 \text{ mm}$  奥にあることを意味している。言い換えれば、ディスプレイに表示されるロボット視点の映像においてターゲット物体像を  $1.2$  倍に拡大することは、物理的空間でターゲット物体を  $100 \text{ mm}$  手前(ロボット側)に近づけることと幾何光学的に等しいことを意味している。なお、解釈を若干変えて、 $L_a = 500 \text{ mm}$  としても、 $L_a - L_b \approx 80 \text{ mm}$  と近い値になる。

以上の見積もりから、幾何光学的には、いずれの解釈をすとしてもターゲット物体の位置は  $100 \text{ mm}$  近く接近してみえる可能性が示唆された。このことは操作者がターゲット物体像のサイズの情報を活用していれば、ターゲット物体の位置が  $100 \text{ mm}$  手前に誤認され、 $100 \text{ mm}$  程度の負の予測誤差が生じ得ることを示唆している。本実験結果からは Standard 条件で平均  $-86.5 \pm 11.1 \text{ mm}$ , E 条件で平均  $-69.7 \pm 10.3 \text{ mm}$  のデータが得られているが、この結果は上記の幾何光学的な見積もりと矛盾していないように思われる。

一方で、実験条件には含めることのできなかつたターゲット物体像の縮小について考察する。幾何光学的には、ターゲット物体像の縮小は現地側の物理的空間でターゲット物体をロボットか

ら見て奥の方向に遠ざけることと等しくなる．例えば 0.8 倍とすれば， $L_a - L_b \approx -100 \text{ mm}$ と見積もられることになる．

この見積もりからは，一人称視点の映像においても，その縮小が正の予測誤差を生じる可能性が考えられる．映像の拡大・縮小の影響に関して系統立てて定量的な検証を行うことは今後の課題となるが，影響の定量化には切り分けの難しい奥行き情報の手掛かりの統制が課題になると推測される．

また本研究の目的上，本実験では操作のやり直しや慎重な操作(例えば極めて短い距離を断続的に移動させたり，低速で移動させたりする操作)を分離している．しかしながら，後進や左右旋回，減速等による周囲情報の慎重な観察を許せば当然，停止位置の手がかりは増加すると推測される．随意的にアクセスできる情報が増えるためであり，例えば並進方向と直交する方向には奥行き座標の手掛かりがある可能性もある．したがって，予測誤差は低減されると考えられる．

しかしながら，単なる移動に対してこのような随意的な注意のリソースを割かねばならないことはこれまで繰り返し主張してきたようにユーザの負担になると考えられ，ユーザビリティや体験の質とのトレードオフになる．そこで停止前に効果的に手がかりを追加できれば有効な対策となり得る．この特定は実用上重要であり，6章ではそのアイデアの一つを提案する．

#### (a) 4章の実験結果との比較

4章の実験結果も踏まえると，予測誤差はターゲット位置(物体)と，ロボットの自己位置とを観察する条件が異なる場合に生じていたと整理できる．互いの観察条件が異なると，映像の拡大や縮小の条件は，ターゲット位置の情報あるいは自己位置の情報の一方に偏って影響を及ぼす可能性が考えられる．

3章の図 3.2 をいま一度参照すると，式(5-2)で表される $x_e$ が1回の試行( $n = 1$ )での停止時に0になることが，本実験で測定される位置の予測誤差が0となることと対応する．なお式(5-2)は3章の式(3-5)の表現をシンプルにしたものであり，同様に $\hat{x}_t$ ， $\hat{x}_r$ はそれぞれターゲット位置とロボットの自己位置(の時間的変化)の予測とに関する情報の真値( $\hat{x}_t = x_r$ )， $E_t$ および( $E_r - P$ )はそれぞれの情報に関する誤差を表現するものとする．

$$x_e = (\hat{x}_t + E_t) - \{\hat{x}_r + (E_r - P)\} \quad (5-2)$$

式(5-2)の右辺第一項( $\hat{x}_t + E_t$ )は第一の情報と対応する．すなわち，教示されたターゲット物体(のサイズ)の観察を通じて構築されるターゲット位置とその認知の要因に起因するの誤差である．一連の実験では， $E_t(\epsilon_r) \approx 0$ となるように計画されている．これは3章で述べたように，本稿の研究は予測の計測を目的とするためであった．

これに対して右辺第二項( $\hat{x}_r + (E_r - P)$ )は第二の情報と対応する．すなわち，ロボット自身の観察を通じて構築される自己位置に関する予測と，その誤差である．これまでの一連の実験では， $E_r(\epsilon_j, \epsilon_o, \epsilon_s) \approx 0$ となるように計画されている．

式(5-2)では誤差 $E_t$ および $E_r$ の大きさに関わらず $E_t \approx E_r - P$ となれば(3章式(3-6)を参照のこと)， $x_e \rightarrow 0$ となることが分かる．これは，思い通りの移動操作性を得るための普遍的な方法となり得る(3章)．以下，各実験の観察条件を検討する．

#### (b) いずれも目視観察した条件(4章)

4章における目視条件下での位置の予測誤差は小さく，ユーザは目視であれば正確な次の状態の予測が可能であることが示唆されていた．

ここで4章における目視条件下では，ターゲット物体(ディスプレイ上に提示されたライン)も，ロボットも，等しく目視により観察できた．つまり観察の条件が目視で揃っており，認知された双方の情報の誤差の相対的な不整合が小さかった( $E_t \approx E_r - P$ )可能性がある．さらに目視観察は

我々が日常的に訓練されている観察形態に他ならないので、誤差の絶対値、あるいは予測による素早い調整後の誤差の絶対値も十分に小さいものと推定される( $|E_t| \ll x_t, |E_r - P| \ll x_r$ ).

#### (c) ターゲット物体は肉眼、ロボットは環境カメラ視点の映像で観察した条件(4章)

4章における映像条件下での位置の予測誤差は大きい上に、正の方向に偏っていた。

4章における映像条件下では、ロボットは映像上で観察された。これに対してターゲット物体は目視可能であった。4章で考察したように、ロボットの像は実験環境の物理的な制約で、最大で30%の縮小がある条件であった。これは5章の拡大条件とは逆の条件であった。

したがって、映像上の自己のサイズの縮小は、これに由来する $\varepsilon_t$ だけに影響した可能性が考えられる。目視条件と同様に $E_t \ll x_t$ を仮定できるとすれば、認知された情報の誤差には大きな不整合が生じた( $E_t \ll E_r - P$ )可能性がある。

像の縮小でロボットの速度が遅く認知され、停止タイミングの予測が遅くなれば、正の予測誤差が残るのは4章の考察で述べたとおりである。

#### (d) ターゲット物体はロボット視点の映像で観察できたが、ロボットは観察できなかった条件(本実験)

本実験ではロボット視点の映像を用いた。本章で定義したロボット視点の映像では自己位置の観察ができなくなる(図5.4を参照のこと)。当該条件では大きな負の予測誤差が計測された。

映像の拡大は、映像に自己の像が含まれないために、ターゲット物体像だけに作用する。そうすると、ターゲット物体像に由来する $E_t$ に影響が偏る。映像の拡大は、幾何学的に検討を加えたように大きな負の方向の予測誤差を生じる可能性がある。この場合、認知された情報の誤差には大きな不整合が生じる( $E_t \gg E_r - P$ )。

ターゲット物体像の拡大が上述のようにロボットの停止タイミングの予測を早めれば、負の予測誤差が残る。

#### (e) 議論

また補償ではなく、観察の条件を揃えて予測誤差の発生機会そのものを積極的に減らそうとするアプローチとしては、あえてロボットの全体(三人称視点)あるいは一部を表示する構図を採用することが考えられる。しかしながらこの手法はアルゴリズム的な操作を誘発し(1章)、操作者にとって親しみの薄い映像となり、体験の質の低下に繋がり得る。2章で整理したが、臨場感(寺本他, 2010)や没入感(一般財団法人デジタルコンテンツ協会, 2016)は互いに関連のある概念といえるが、それぞれ操作者自身がその場に身を置いているかのような感覚と表現されている。また、(運動あるいは自己)主体感や、身体所有感は、臨場感や没入感の下位概念となり、ロボット等への自己のプロジェクション(小鷹, 2018)に関する重要な感覚といえる。遠隔参加体験の主観的なリアリティ面の質を高めるために重要な感覚は、少なくとも没入感や臨場感に関しては、一般に一人称視点(本稿ではロボット視点と定義)での体験で強くなるといわれる(一般財団法人デジタルコンテンツ協会, 2016)。これに対して三人称視点ではより多くの環境の情報を得られ、なかでも俯瞰視点では心的回転を抑制でき(佐藤, 松野, 2010)、ユーザビリティ面での利得があるものの、少なくとも身体所有感を低減すると考えられている(Kiltenei et al., 2012)。つまり、三人称視点の体験ではリアリティ面の質とユーザビリティとのトレードオフを考慮することが本研究の目標においては重要となり、今後の重要な検討課題である。

### 5.5.2 実験的な再現条件(移動実行段階の映像の拡大条件)が成立する応用場面

思い通りの移動操作の実現には少なくともターゲット位置 $x_t$ の認知が必要である。本実験では教示画像の観察により、その視覚的な脳内表現が構築されている。本実験のように操作を伴わない静止画像による教示はその性質上、現地サイトとの相互作用の情報を含まないため、教示は移動操作開始の直前～直後の段階でのターゲット構築、いわゆる初見の環境での移動場面に相当する。

このような実験的な教示が応用場面でわざわざなされることはあまりないと思われる。この場合には、ユーザは自己の知識や経験等に基づいて、何らかのイメージを構築するか、あるいはランダムな入力を試してみ、その出力を観察することで、探索的に情報を得ようとするはずである。

これに対して移動操作の実行段階でのロボット視点の映像(に含まれるターゲット物体像)の相対的な拡大の状況は、例えば下記の場面で想定できる。

#### (a) ズーム機能(光学ズーム, デジタルズームを含む)の活用

例えば現地サイトの参加者の表情を見たい場合には、ズーム機能が有用になる。ソーシャルディスタンスやパーソナルディスタンスの問題からも、参加者にロボットで過剰に接近することは避けるほうが好ましい場合も多い。あるいは遠距離のターゲット物体を手がかりに移動したい場合にもズーム機能は有用である。ズーム機能は汎用の UVC カメラにも搭載されることが多くなり、もはや標準機能といえるが、操作中のズームはまさに本実験の拡大条件に相当する。

#### (b) 類似システムの操作経験

既に遠隔操作やこれに類似する経験を有している場合には、それよりも大きいサイズのディスプレイ、高倍率のカメラ等で構築されたシステムを用いる場面でのターゲット位置のイメージに対して、観察される物体のサイズが拡大されたように(意識的か否かを問わず)観察される可能性がある。この影響は、取り付け位置によって映像の表現が大きく変動する環境カメラよりも、本章で想定するロボット視点のカメラの方で小さいと想定されるが、カメラの光学仕様によっても映像表現は大きく変化する。例えば画角が異なることは、前述のズームの活用時と類似の効果を発生するものと推測される。

#### (c) ターゲット物体の接近動作

他に、ターゲット物体が可動であればそれ自身が(予想外のうちに)ユーザの操作するシステムに接近してくる場面も考え得る。参加者の接近を把握していなければ、参加者にとってはわざわざロボットに歩み寄ったにも関わらず、ロボットは参加者の遠くに停止してしまうような、通常のコミュニケーションでは生じない違和感のある体験が生じてしまう可能性がある。

#### (d) 大きさ錯覚

あるいはターゲット物体サイズを実際のサイズよりも大きいと錯覚する場面も考え得る。これは、奥行き手がかりの少ない 2D 映像を介して遠隔環境を観察することに起因する。

人間は大きさ恒常性のメカニズムを有している。このため、網膜上に投影される物体像のサイズが変動しても、物体の物理的なサイズを不変のものとして認知することができる。このメカニズムは後述する奥行き手がかりと密接に関係している。このため、ディスプレイ上で奥行き手がかりの認知が困難になればターゲット物体のサイズが誤認され得る。

### (e) その他の負の予測誤差の要因

本実験は実験参加者に具体的なタスクのイメージを提供しないよう計画された。例えば 1 章で述べたようなターゲットが現地側の参加者をイメージさせるタスクでは、予測誤差にさらに負の方向の心理的バイアスがかかる可能性がある。これは実行時の映像拡大とは独立した影響と想定される。この検出には慎重な実験統制が必要であり、今後の重要な課題である。

### 5.5.3 オプティック・フローの正の変調現象の再現

本章の実験では、ロボット視点の映像を用いた場合であっても、4 章の実験で見いだされたオプティック・フローの正の変調現象を再現することができた。オプティック・フローは観察者自身の低次の運動知覚に不随意に(感覚的に)影響し、視覚誘導性の運動の感覚であるベクションを誘発する(ギブソン, 2011)(妹尾, 2017)。この特性を活かし、管見の限りでは速度感増強(中嶋, 福地, 2013)や、自動車の車速を提示するインタフェース(舟川, 2010)、歩行者の誘導(渡邊他, 2013)等に応用されてきている。一連の探索的な実験の結果は、自己とは離れた遠隔の物理的実体を有するロボットにもオプティック・フローが影響したことを示唆する。この点で、本研究は従来議論を拡張する結果となっている。

ターゲット物体に正対して移動する場面が多くなるロボット視点の映像では、奥行き認知が難しくなることが周知の課題である。ターゲット位置や自己位置に関する奥行き認知は予測誤差の観点でも重要である。

一般に、視覚的な奥行き手がかりは単眼性のものと、両眼性のものとに区別されて議論されている。下位の要素の表現は様々であるが(日本視覚学会編, 2017)(澤島, 2017)(出澤, 程, 2016)(塩入, 渡辺, 2009)(河合他, 2010)、単眼性の奥行き手がかりは少なくとも下記のように整理できると考えられる。

- ・ 絵画的手がかり：遮蔽、(相対的)サイズ、視野内の高さ、(相対的)密度、線遠近法、空気遠近法の各情報
- ・ 運動性手がかり：運動の情報
- ・ 生理的手がかり：調節の情報

一方、両眼性の奥行き手がかりには、輻輳と両眼視差の各情報が含まれる。

2D 映像ではユーザのピント位置がディスプレイの物理的な位置に固定されてしまうため、ピントの調節に起因する生理的手がかりは見込めない。また同様に注視点もディスプレイ上に固定され、注視点の奥行き方向への変位に伴う両眼性の奥行き手がかりも見込めない。さらに実験的に背景をシンプルにした本実験環境では、絵画的手がかりもかなり抑制される。これらの理由から、2D 映像を通じた奥行き認知は困難になる。

このため 3D 映像が有力な代替手法といわれる。しかしながら、無視できない生理的負担や違和感があり(3DC, 2010)、筆者は移動体験において 2D 映像を活用することにはユーザビリティおよび感性的品質の観点から未だ大きな利得があるものと考えている(図 6.10)。

これに対してオプティック・フローの流動の情報は奥行き方向に関する運動の情報にあたりと考えられ、奥行き方向へ移動する自己位置の予測に影響し得る。ギブソンは運動の情報の中でも、運動視差(Motion parallax)の情報と、オプティック・フローの流動の情報(運動遠近法, Motion

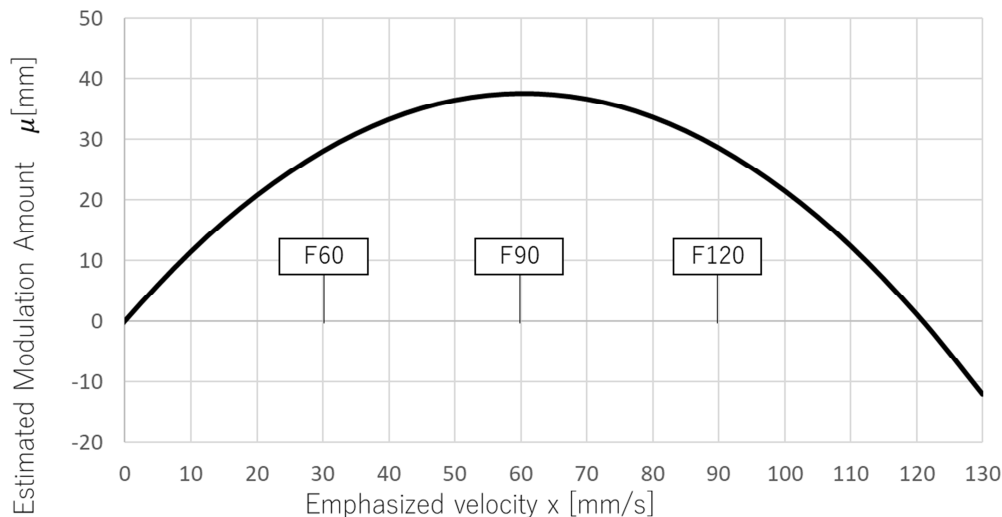


Fig.5.8 推定された変調効果

perspective の情報とを明確に区別している(2011)。本実験結果は、不随意に影響するといわれる オプティック・フローの流動の情報が、より見た目に明らかで認知判断が容易にできる点で優位と思われたサイズ(の時間的変化)の情報による負の予測誤差を補償したことを示唆する。各奥行き手がかりは排他的ではなく統合的に用いられるものと考えられており(日本視覚学会編, 2017)(Knill and Saunders, 2003)(Landy et al., 1995), オプティック・フローの流動の情報も統合されたものと推測される。また上述のように、オプティック・フローはベクシオンを誘発するから、操作者の移動感が変化した可能性がある。移動感は予測誤差やその変調効果、体験の質にも影響を及ぼすと予想される。オプティック・フローの追加によって停止操作が遅れた結果を単純に解釈すれば、操作者がロボットの移動距離を実際のものよりも短く感じた(過小評価した)可能性が示唆されるが、移動開始位置をランダムとし主観的な移動感の報告を求める等はしなかった本実験計画では移動感を直接評価できず、今後の検討課題である。

予測誤差を 0 に近づけるには変調量をさらに大きくしなければならないので、強調速度の量的な影響を考察する。考察にあたり、追加で 4 章と同様のベイズ推定的手法(Kruschke, 2017)を用いて検証した。なお、同じく 2 次式を仮定したが、これは 4 章の実験で得られた側後の乖離が大きいと有効な変調効果が得られないとする仮説を反映し、その効果量のピークを探るためであるとともに、実験結果のグラフからもその傾向が認められたためである。

図 5.8 に最尤推定結果を座標変換し、F30 条件を基準に横軸を相対的な強調速度、縦軸を相対的な変調量とし、これらの関係を明確にしたものを示す。また、相対的な変調量の平均値を $\mu$ 、相対的な強調速度を  $x$  とした場合の推定結果を下式(5-3)に示す。

$$\mu = 1.24x - 0.010x^2 \quad (5-3)$$

正の変調現象は強調速度 < 120 mm/s の範囲で得られ、60 mm/s をピークに低下となった。ベクシオンの影響量が刺激速度に 100 deg/s までの範囲で正比例するデータもある(Graaf et al., 1990)が、本手法ではロボット視点の映像と補助映像とが不連続であり、補助映像の流動速度が大



大きく乖離したことで一体的な情報としての信頼性が低下した可能性が考えられる。

効果的な応用には、最大の変調量を得るための流動速度の最適化と、さらなる変調量の増加とが必要である。ロボット視点の映像と補助映像との流動速度の乖離を、例えば前者の拡大表示等によって流動速度を高める手法で抑制できる可能性がある。これは補助映像の流動速度をさらに高めるマージンになるから、変調量を増加させられる可能性もある。しかしロボット視点の映像の拡大は同時に負の予測誤差の拡大を招くと予想され、補償に必要となる変調量もさらに増大することになる。操作者は様々な倍率の映像を観察するから、拡大率(縮小率)に応じた変調量と予測誤差との関係は実用上の重要な課題であり、系統的に調査する必要がある。

また本研究では E 条件のようなオプティック・フローの質的な向上(精緻化)よりも、F<sub>x</sub> 条件のような見た目に明らかで、絵画的な表現を採用した流動速度の強調で変調量が大きいたことが示唆された。例えば映像端部に向けて徐々に表示倍率を拡大する手法では主たる映像と擬似手法における補助映像に相当する領域の映像とで流動速度を滑らかに増加させることが可能となり、流動速度の乖離を抑制しながらも E 条件よりも大きな強調ができるので、さらに大きな変調量を得られる可能性がある。他に、オプティック・フローの表示面積を増加(Brandt et al., 1973)させたり、オプティック・フローを奥の位置に知覚(Ito and Shibata, 2005)させたりする方法はベクションを向上するといわれ、変調量を増加できる可能性が見込まれる。

しかし補助映像を追加する等により流動速度を極端に強調する手法は上で考察した没入感等のリアリティ面の遠隔参加体験の質とのトレードオフになる可能性がある。映像そのものの精緻さや視野が損なわれるから、強調領域の映像がなるべく主たる映像の情報を妨げないように、これらができる限り小さな面積で有効視野外に配置したいためである。一方で、予測誤差の補償はユーザビリティの向上の他、同じく上述した自己主体感の向上にも寄与すると考えられる(浅井, 丹野, 2007)(Wolpert et al. 1995)。このため変調量の向上とリアリティ面での体験の質の向上とは必ずしもシンプルなトレードオフ関係にはならないとも予想される。予測誤差の補償手法が各要因に及ぼす影響を体系的に整理することは今後の重要な課題と考えられる。

#### 5.5.4 量的な個人差の検討

本実験は実験参加者の生理的リスクに配慮して一人当たりの試行数が少なく計画されたので、少数サンプルの解析に適する側面も備えるベイズ推定の手法(Kruschke, 2017)を同じく用いて個人差を解析した。はじめにロボット視点の映像の拡大の影響について Standard および E 条件の結果を解析した。予測誤差の平均値 $\mu$ の推定には個人差の基準値となる $\beta_0$ ,  $\beta_0$ からの実験参加者 $x_{[j]}$ 毎の偏向を示す $\beta_{[j]}$ をパラメータとした $x_{[j]}$ の1次式(5-4)を用いた。

$$\mu = \beta_0 + \sum_j \beta_{[j]} x_{[j]} \quad (5-4)$$

推定にバイアスがかからないように事前分布はいずれも無情報とし、予測誤差は正規分布(平均： $\mu$ , 標準偏差： $\sigma$ )に、そのパラメータ $\sigma$ は一様分布に、 $\beta_0$ および $\beta_{[j]}$ は正規分布に、それぞれ階層的にしたがうと仮定した。

図 5.9 に推定結果を示す。ドットは予測誤差の最尤推定値を示す。エラーバーは 95%HDI(最高密度区間)を示し、この範囲内の予測誤差が生じる確率が 95%であることを直接的に意味している。これは解析法が古典的な頻度論に基づくものではなく、主観的な確率を反映できるベイズ主

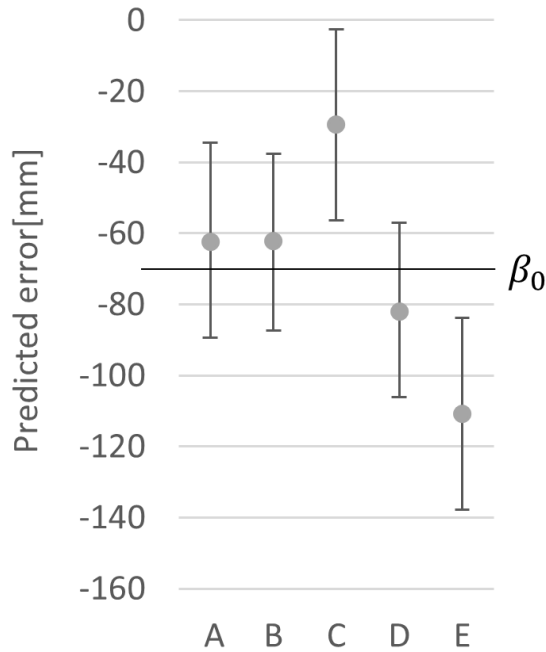


Fig.5.9 拡大の影響の量的な個人差

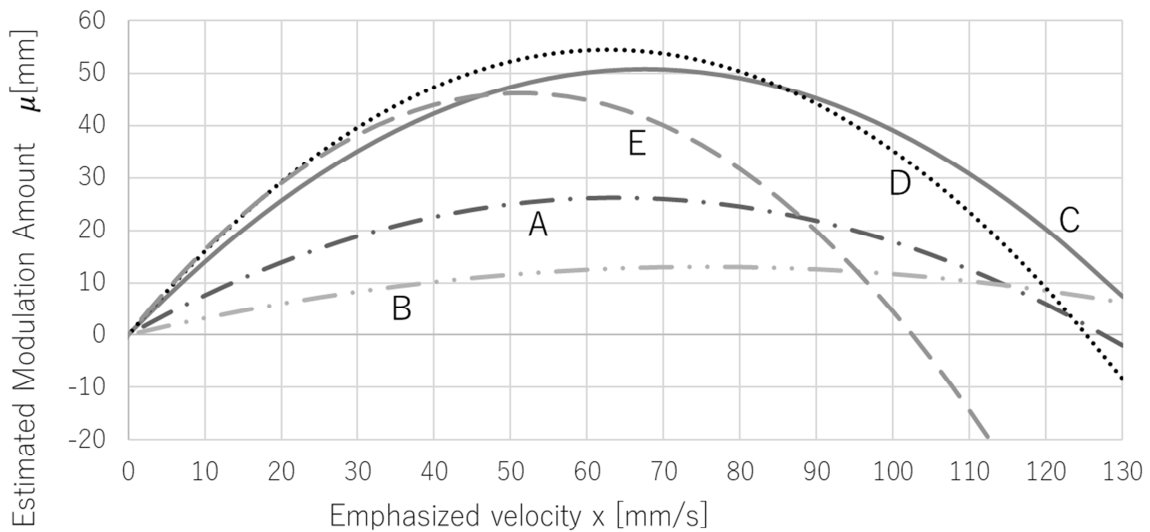


Fig.5.10 強調の影響の量的な個人差

義に基づくものであるためである(Kruschke, 2017). 母集団全体の推定値と同じく負の予測誤差が, HDI を含めてすべての実験参加者で推定された.  $\beta_0$ の推定値は-69.0 mm となり, 推定値が  $\beta_0$ から正の方向に偏向する実験参加者 C と負の方向に偏向する E では映像の拡大に対する感度が異なることが推察されるが, 本実験からは明らかにできない.

次に強調速度の影響について 4.3.6(c)と同様に推定した. 対象は Standard および Fx 条件とした. 図 5.10 に図 5.8 と同様の座標変換を施した最尤推定結果を示す. 母集団全体と同じく, すべ

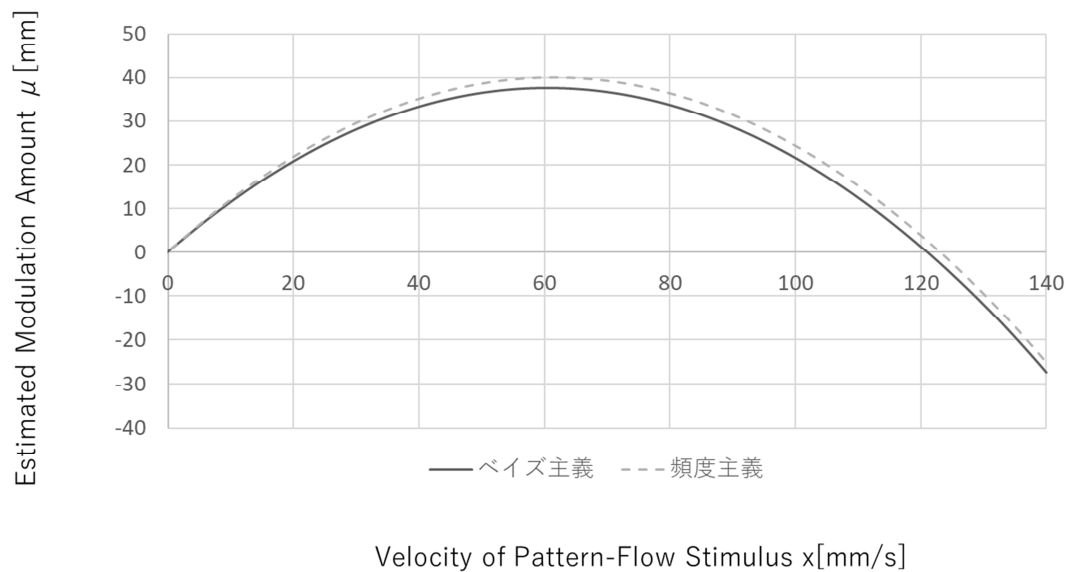


Fig.5.11 頻度論に基づく推定モデルとの比較

ての実験参加者の推定値のグラフは上に凸の形状となった。実験参加者 A(一点鎖線)および B(二点鎖線)は影響量のピーク値，強調速度に対する変化ともに小さい。C(実線)，D(点線)，E(長破線)は逆で，影響量のピーク値，強調速度に対する変化ともに大きい。さらに E ではピークの出現する強調速度が低速である特徴が見受けられる。強調速度に対しても個人によって感度が異なることが推察される。

少なくともロボット視点の映像の倍率に起因する個人差と，補償手法に起因する個人差とを適切に把握しなければ予測誤差の効果的な低減は難しい。このため例えば，装置側で取得した情報に基づき，リアルタイムで倍率や流動速度を調整する手段の実装が考えられる(7章)。また，情報への感度の事前アセスメントが有効な手段となり得る。仮に各情報への感度と，個人の能力や経験等の特性との関係が明らかにできれば，例えばオプティック・フローに対する感度が自動車の運転適性等の評価に展開できる可能性も考えられる。

#### (a) 頻度論を用いた推定モデルの検証

5章でも同様にベイズ統計の手法に基づく推定モデルの妥当性の検証として古典的頻度論に基づく推定モデルとの比較を行った。比較対象は図 5.8，式(5-3)に示した結果とした。同じく 2 次式のモデルを仮定して同データに対して最小二乗法に基づく多項式回帰を行った結果，下式のモデルが得られた。

$$\mu = 1.30x - 0.011x^2 \quad (5-5)$$

これらと比較した結果を図 5.11 に示すが，推定された傾向は同様であり，ベイズに基づくモデルのピークは想定的な強調速度 60mm/s に対し相対的な変調量 37.6 mm，頻度論に基づくピークは相対的な強調速度 62mm/s に対し相対的な変調量 40.0 mm と量的な差異も小さかった。したがって本研究では，上述の利得のあるベイズ統計の手法を有効と考え，今後も積極的に活用して推定モデルの精度向上に活用する。

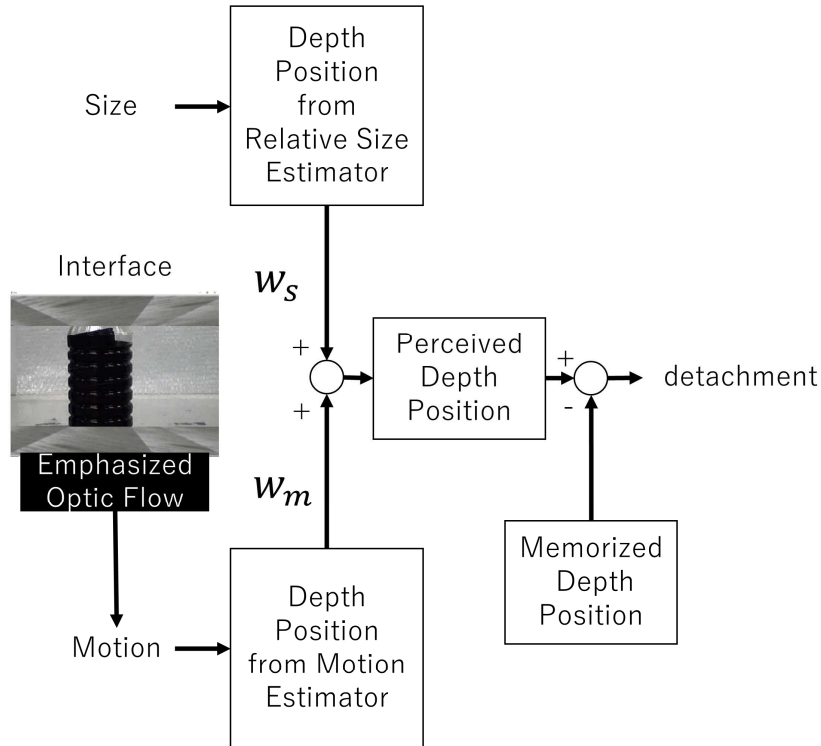


Fig. 5.12 MLE モデルにおける情報処理の概念図

### 5.5.5 メカニズムの議論

#### (a) MLE モデルの適用

従来，奥行き位置は独立したモジュールで処理された各奥行き情報が，線型統合された結果，最終的に知覚されるといわれる(MWF モデル, Landy et al., 1995). さらに，各奥行き情報をその精度(分散の逆数)で重み付けして統合すると，実際の知覚によく合うことも示されている(MLE モデル, Knill and Saunders, 2003). これらの枠組みは本実験タスクの議論に用いることができると思われる(2章). ここでは MLE モデルを検討する.

本実験において大きさ情報を主要な情報とする奥行き情報を  $s$ , 誇張されたと考えられる運動に関する情報を  $m$ , 各情報に基づく知覚位置の精度を  $1/\sigma_s^2$ ,  $1/\sigma_m^2$  とすると，情報  $s$  の重み  $w_s$  および情報  $m$  の重み  $w_m$  は下式(5-6)で表される. また，(Knill and Saunders, 2003)の表記を参考に図 5.12 に MLE モデルにおける情報処理の概念図を示す.

$$w_m = \frac{1/\sigma_m^2}{1/\sigma_s^2 + 1/\sigma_m^2} \quad w_s = \frac{1/\sigma_s^2}{1/\sigma_s^2 + 1/\sigma_m^2} \quad (5-6)$$

さらに，情報  $s$  および情報  $m$  に基づく停止位置の平均値をそれぞれ  $\mu_s$ ,  $\mu_m$  とすると，最終的に統合された各情報  $I$  が停止位置の平均値  $\mu_I$  はこれらの重みを用いて下式(5-7)で表される.

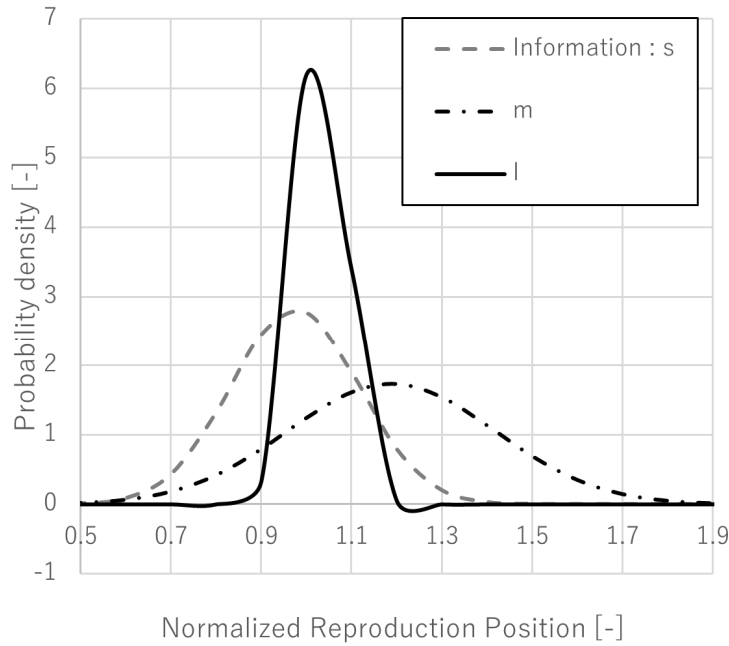


Fig. 5.13 停止位置のばらつきの確率密度関数による可視化

$$\mu_I = \frac{W_s \mu_s + W_m \mu_m}{W_s + W_m} \quad (5-7)$$

統合後の各情報 I に基づく停止位置の分散  $\sigma_I^2$  は下式(5-8)で表される. 右辺に示したように,  $\sigma_I^2$  は統合前の分散  $\sigma_s^2$ ,  $\sigma_m^2$  より小さくなる.

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{1/\sigma_s^2 + 1/\sigma_m^2} = \sigma_s^2 \cdot \frac{\sigma_m^2}{\sigma_s^2 + \sigma_m^2} < \sigma_s^2 \quad (5-8)$$

実験結果は, 情報 m の十分な誇張がある F120 条件でのばらつきが, 情報 m の誇張がなく, 情報 s が支配的と推測される Standard 条件のものよりも小さいことを示している. この結果は, 本タスクを MLE モデルの枠組みで議論できることを支持している.

さらに, 式(5-6)および式(5-7)と, 情報 s に関する値として Standard 条件の結果と, 最終的な停止位置に関する値として F120 条件下で得られた結果と, を用いて(いずれも正規化を行い, 位置の予測誤差が 0mm である場合に正規化後の指標が 1 となるように調整されている)情報 m に基づく停止位置のばらつきを推定する.

図 5.13 に各情報に基づく停止位置のばらつきを確率密度関数により可視化したものを示す. 情報 m を単独で用いた場合の推定値は一点鎖線で表される. 推定値は  $\sigma_m^2 = 0.05$  であり, 情報 s ( $\sigma_s^2 = 0.02$ ) よりも精度の低い情報となっていた. オプティック・フローからの情報 m による奥行き位置の知覚は, 大きさ情報を含む情報 s を用いた場合よりも明らかに困難であるから, 情報 m のもたらす奥行き情報の精度としては妥当に思われる.

つまり本効果は, 情報 m のもたらす奥行き情報は他の情報より相対的に小さいものの, 無視で

きない程度に誇張されたことで、その重み $W_m$ が相対的に大きくなったことで生じた可能性が考えられる。タスクの工夫により運動に関する情報  $m$  のみに基づいた停止位置を計測できれば検証ができる可能性があり、今後の課題である。

### (b) 太り効果

オプティック・フローの情報(図 5.13 では平均値 $\mu_m$ )が、予測誤差を正の方向にオフセットするメカニズムを検討すると、奥行き情報はターゲット物体のサイズやその変化の知覚にも影響を及ぼし得ると考えられる(大きさ恒常性, Tanaka and Fujita, 2015)。本実験では教示画像および主たる映像での手掛かりのサイズを互いに比較する方略を用いることができたため、本効果は運動情報の誇張によりサイズの知覚が変調された(小さく知覚された)結果生じたものと解釈することができる。これは、移動操作の実行時の映像の拡大という実験的な条件操作を直接キャンセルし得る作用といえる。

例えば、太り効果(fattening effect)は映像上の被写体が実物よりも太って知覚される現象であるが、運動情報の追加で解消されるといわれ(出澤, 程, 2016)、本仮説説明の糸口を与える現象の可能性があり、今後の検討課題である。

### (c) 移動感の影響

オプティック・フローの流動速度の増加は、自己の移動速度が速くなることで誘発される現象である。これに対して、位置の予測誤差が正の方向に変調される効果は、自己の移動速度が遅いと予測された場合(速度が過小評価された場合)にも生じるため、オプティック・フローの流動速度の増加(強調手法)の採用で見込まれる移動感に対する効果(ベクシオン)とは直感的には一致していないことになる。このため、他の予測に用いられる情報(第二の情報)との相互作用が生じている可能性がある。

例えば、ターゲット物体のサイズの拡大速度は、最も明確に知覚あるいは認知可能な自己の移動速度に関する情報である。不随意的に影響するオプティック・フローの流動速度が増加したにも関わらず、随意的に観察できるターゲット物体のサイズの拡大速度が期待される程度よりも遅ければ(強調手法によって主たる映像は拡大しないため、この状況が生じ得る)、後者の情報が誇張されてしまい、総合すると自己の速度が過小評価される可能性も考えられる。

これらの各仮説に基づいて検証をすすめる、メカニズムの理解に繋げることは応用上重要となり、今後検討を進めていく必要がある。

## 5.6 結言

5 章では、移動が大きな負担となる高齢者、重度の肢体不自由者等の積極的な社会参加を支援するため、ロボット視点を主として用いるシステムを通じた遠隔移動体験のユーザビリティの向上のため、その移動操作時の予測特性の検討を行った。

その結果、(1)遠隔操作の実行段階での映像の拡大が負の予測誤差を誘発することが明らかになった。少なくとも自己位置の予測に関する情報と、停止位置に関する情報との整合性が損なわれたときに、予測誤差が生じる可能性が考えられた。(2)上記の状況は、ターゲットの情報を詳細に

Table 5.2 一連の実験で用いた映像表現と移動予測に及ぼす効果

自己位置が相対縮小	相対拡大	一致
自己位置にオプティック・フロー		高精度
移動予測が過小評価	過大評価	高精度
ロボット視点では実装困難		

観察するズーム操作，光学デバイス構成の変更，ターゲット物体の移動，錯覚等，遠隔操作ロボットの応用場面で想定されるため，考慮が必要である．ここまでの一連の結果をまとめると，主たる映像の各表現が移動予測に及ぼす影響は表 5.2 のように推定される．ここで，映像の拡大による移動予測の過小評価効果と，オプティック・フローの絵画的な誇張表現手法による移動予測の過大評価効果とは互いにキャンセルし得る関係にある．5 章ではこれを検討し，(3)ロボット視点の映像を用いた遠隔操作では奥行き認知が重要となるところ，随意的な認知判断が容易なサイズの情報に対して，不随意に奥行き方向の運動知覚に影響すると考えられたオプティック・フローの情報に有意に影響することが分かり，上記の状況での予測誤差の補償へ活用できる可能性が示された．

以上の結果は，4 章で提示した各機能要件を下記のようにさらに具体化する．

すなわち(1)の結果からは，【機能要件 A】現地サイトの対象のスケールを正確に知覚可能な映像提示機能を実装するには，少なくとも【機能要件 A-1】知覚されるターゲット位置と自己位置との相対的スケールが同等となる映像表現が必要となることが示唆される．これは，本章のロボット視点を用いる構成のシステムでは困難である．自己位置を直視できない上，自己位置の推定に用いることのできる情報の奥行き成分の精度が低いためである．そこで，6 章では情報の精緻性の低下は認められるものの，この課題を直接的に解消し得る提案をし，検証を行う．

また，【機能要件 B】予測誤差変動の推定とこれを無意識のうちに補償する機能を実装するために，少なくとも【機能要件 B-1】映像に応じて適切なオプティック・フローを生じさせる機能(少なくとも表示倍率の拡大・縮小に応じたもの)が有効である可能性が示唆された．

---

## 第6章

# 予測支援手法の検討

---

### 6.1 概要

6章の基本的な着想は、難易度や生理的負担の大きいロボット視点のみでのターゲット位置の認知および自己位置の予測を、これらを正確に表現することで、精緻性とはトレードオフになるものの難易度の低いステレオマッチングの認知および予測にブレイクダウンすることである。

6章では、はじめに従来技術に見受けられない新たな特徴を備えた技術的選択肢を提案するため、機能要件を定義し、次いで、機能要件を実現するコンセプトの策定、基本設計を行ってステレオマッチングインタフェースの着想を導いた。

その後、提案するステレオマッチングインタフェースが原理的に予測の正確性を向上し、思い通りの移動操作性を向上するという基本機能を実現できていることを各機能要件の性能の計測、および移動精度を要するタスクを通じた検証を通じて確認し、実用化の上での課題や付加価値の考察を行う。最後に、応用に向けた具体的な設計方針を提示する。

### 6.2 緒言

#### 6.2.1 6章の目的

4章および5章で検出された予測の正確性の低下は、映像を介したロボットの自己位置の情報が、ターゲット位置に関する情報と乖離していることに起因していることが示唆された。

特に、ロボット視点の映像を用いた場合には自己位置の直接的な観察が困難となることに起因して、ターゲット位置に関する情報との乖離が大きな課題となる。自己位置の直接的な観察が困難な場合、自己位置を予測するには周囲の環境から自己位置を推定する必要がある。しかしながら、ロボット視点の映像は奥行き情報を欠くため、進行方向に表示されている映像上の手がかりとの相対的な奥行き位置の推定が特に困難になることが知られている。また、進行方向に存在するターゲット位置の奥行き方向座標を正確に認知することも同様の理由で困難となる。この認知は光学デバイスの仕様でも変動し、例えばレンズの焦点距離によるものは圧縮効果として知られる。

一方で本稿の研究においてロボット視点の映像の活用には大きな利得もあり、特に遠隔サイトのユーザの自己の体験を現地サイトのロボットに重ね合わせる(2章で整理した自己のフィーリン



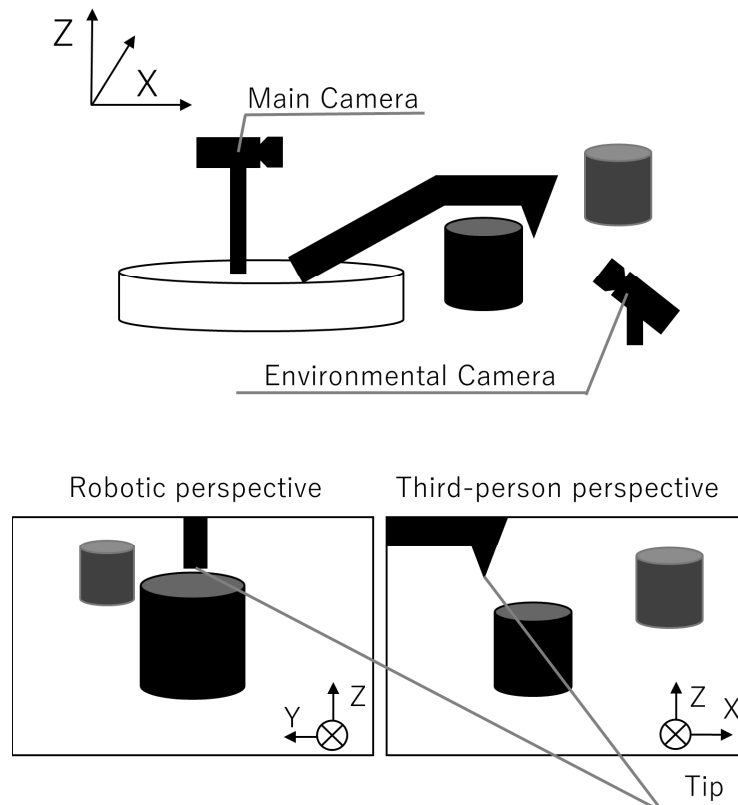


Fig. 6.1 複数視点併用系の概念図

グの主体感や自己のプロジェクションを含む)遠隔移動体験の実現に有益と考えられる。したがって、ロボット視点の映像を主たる映像として用いる遠隔操作型の移動システムの思い通りの移動操作性を向上させることには意義がある。

以上を踏まえて 6 章の目的は、本研究の最終目的において直感性や感性的品質の利得の大きいロボット視点の活用の際に、自己位置とターゲット物体との奥行き位置誤差を正確かつ容易に認知可能とし、予測通り操作を支援できる、あらたな特徴を備えた認知インタフェースを開発することである。

## 6.2.2 関連技術調査および機能要件の定義

以上の課題認識の下で、はじめに関連技術の調査を通じて機能要件を定義した。

### (a) 複数視点併用系

ロボット視点の映像のみでは奥行き認知が極めて困難になるのは 5 章において被災地等で駆動する情報収集用途の遠隔操作型の移動システム等で例示したように周知の課題であり、筆者の管見の限りでは特に、災害地の他、ヒトの立ち入ることにリスクのある不整地での様々な作業を担う遠隔施工の分野での検討が盛んであるように見受けられる。

遠隔施工の分野では複数の視点の映像や情報を主たる映像に並べて提示する手法は実用的な手法と考えられ、様々なシステムに採用されていた(1 章)。この手法を複数視点併用系と称する。複数視点は必ずしも空間的に並べられている必要はなく、例えば時間的に表示される映像を切り替える構成でも原理的には同様の効果が見込める。

複数視点併用系では、ロボットを上空から捉える俯瞰の映像がしばしば用いられる(佐藤, 松野,

2010)(古屋他, 2012)(佐藤他, 2019). ロボットを側面から捉える映像を含め, 三人称視点としての環境カメラ視点の映像を並べる手法とまとめられる. 複数支援併用系では映像をそのまま用いる手法に限られず, 三人称視点のマップを並べる手法も見受けられた(小林, 小島, 2005)(高橋他, 2014). マップとしては直上から眺める平面図タイプの他, 小さな 3DCG を映像の下部に並べるワールド・イン・ミニチュアの方式(齋藤他, 2007)も見受けられた.

環境カメラを用いた複数視点併用系の典型的な例の概念図を図 6.1 に示す. 複数の角度から自己位置あるいはターゲット位置を観察することで, その 3 次元的座標を一意に確定できる. 図 6.1 では 2 つの直交する方向から観察が可能な構成を示している.

環境カメラはロボットの移動範囲の制限となる欠点がある. これを解消するために, 他のロボットからの映像の活用(成瀬他, 2018)(天間他, 2019)や, 環境カメラなしで任意視点(岩滝他, 2018)や直上の視点(堀口, 1997)(佐藤他, 2014)(高橋他, 2015)の映像を生成する手法の検討も進められている.

複数視点を併用する手法にはユーザビリティや感性的品質の観点で向上の余地がある. 異なる視点の併用はユーザに有効視野外の映像・情報への頻繁な視線移動や表示切り替え操作を強いる. これらは移動の操作を完了させるのにいずれか一方の視点から移動の操作の結果を確認することを必須としており, アルゴリズム的な制御が前提となっているといえる. 逆に言えば, ヒトらしいヒューリスティックな制御を試みると情報の見落としが誘発されたり, 頭の中で平面情報を統合して遠隔空間を把握するのにリソースを割かせたりすることになる(4 章). 三人称視点の映像を一人称視点等の映像に脳内で変更するような心的回転(メンタルローテーション)の認知負荷は大きいといわれている.

以上を踏まえると, ヒトの経験や内部モデルを援用するようなヒューリスティックな制御の実現の観点で考えれば, 単一の視点の映像のみでなるべく多くの, 少なくとも主要な操作を完結できる程度の移動の精度を得られること(=思い通りの移動操作性を向上できること)が望ましい. 本稿での思い通り移動操作性はユーザビリティ面での評価の比重が大きい, 感性的品質の観点では, 三人称視点の映像やマップの併用はヒトになじみが薄く, ゲームのような体験のバーチャルな側面を強調し, 6.2.1 項で述べたようにその場で顔を合わせるような自然な体験が重要となる社会参加の支援には向かない.

## (b) 直上の視点や俯瞰視点

三人称視点の中でも, 真上の視点や俯瞰視点は単独でも用いられている. 周囲の状況の把握がしやすいことや, 心的回転の認知負荷が少ない利点があり, 遠隔操作型のレスキューロボット等に用いられている(佐藤, 松野, 2010). しかしながらこれらの視点を単独で用いることは, 例えばコミュニケーション等の体験の感性的品質を低下させるので, 6.2.1 項で述べたように本稿の研究の目的には合致しない.

## (c) 3D 映像系

同様の観点では, 3D(立体)映像の活用が検討されている(古屋他, 2012)(伊藤他, 2017). 3D 映像は直感性や没入感(一般財団法人デジタルコンテンツ協会, 2016)を大きく向上し得る一方で, 条件によっては強い違和感や不快感, 疲労感を伴う懸念があり(3DC, 2010)(山田, 2015), 現在のところは十分な訓練やアセスメントを要件としたり, 使用場面や時間を限定したりする等, 運用に慎重を期する必要がある. 少なくとも移動に際しては動揺病のリスクが大きい. これは, 本稿

Table 6.1 基本機能と機能要件定義

【基本機能】

ロボット視点を用いながらターゲット位置と自己位置との知覚を正確に表現する予測支援インターフェース

【機能要件】

- 1) ロボット視点の情報のみを表示する。
- 2) 映像上に奥行き情報を重畳する(映像と奥行き情報との表示領域を一致させる)。
- 3) 平面的(2D)映像を表示する。
- 4) 平行～仰角方向の奥行き情報を a)計測および b)提示する(地形に依存しない)。
- 5) 平行～仰角方向の任意の点の奥行き情報を選択的に利用させる。

のステークホルダである当事者等にとってはより重大な課題となる。

性能面でも、立体映像によって必ずしも正確な3次元空間を認知できる訳ではなく(伊藤, 2010), この理由の一つはステレオカメラによる撮像では原理的に空間が歪む(河合他, 2010)では幾何学的な計算モデルが示されている)ためと考えられる。移動の精度が高いことが要求されるタスクにおいては、その達成(1章で定義した最低限の思い通り移動操作性を意味する)には環境カメラ視点の映像の併用が必須といわれる(伊藤他, 2017)。

また別の観点では、しばしば3D映像の観察に用いられるヘッドマウントディスプレイ等、装着型デバイスを用いる場合に、映像以外への情報へのアクセス、例えば遠隔サイトのヒト(支援者等)とのコミュニケーション等が悪くなる場合もある。装着型デバイスが当事者等に及ぼす不利益の懸念については1章で述べた。

**(d) 2D 奥行き指標：空間固定系**

他に、奥行き情報を何らかの形で表現した指標を映像に重畳する手法が見受けられた。例えば無人化施工の分野では地形の映像上に奥行き距離を示すグリッドを固定する手法が検討されている(谷本他, 2015)。しかし、地形が常に表示されている必要がある手法では、視線が俯角方向に制限される。俯角映像のみでの遠隔参加体験は、6.2.1項で述べたように本稿の研究の目的に合致せず、すなわち視線が平行から仰角方向に向く場合のあるロボットでは活用できない場面が生じ得る。

**(e) 2D 奥行き指標：動的追従系**

地形に依存しない動的な指標としてはLRF(Laser Range Finder)で最寄りの障害物との距離を計測し数値で表示する手法が検討され、映像上に固定の指標に比べて衝突が減少したという報告がある(NEDO, 2013)。しかしこの手法を最寄りにない任意のターゲット物体や、任意の障害物との距離の予測に活用することは難しい。スムーズな移動の実現にはユーザの所望の点に対する相対的な自己位置を素早く予測する必要がある。また、この手法の検討者らは特に上下方向にある障害物の回避を課題にあげている。

**(f) 機能要件の定義**

以上を踏まえ本稿では、現地サイトのシステムの自己位置と、ターゲット位置との奥行き位置誤差を正確に認知可能とし、予測通り操作を支援する基本機能を実現するため、ユーザがロボット視点の情報のみからなる 2D 映像を常時観察しつつ、画面上の少なくとも平行～仰角方向の任意の点までの奥行きに関する情報を認知できるインタフェースの開発を行うことと定める。これらの機能要件を表 6.1 にまとめる。

なお、本研究ではタスクの主要な部分となるべくロボット視点の情報のみからなる単一の表示領域の映像で完遂することを目指しているが、システムとしての安全担保は特に現地サイトに実在する参加者と物理的なインタラクションが発生する可能性のある本稿の目的下では極めて重要である。このため安全確保等の目的で、追加の補助的な映像を併用する構成を妨げない。

## 6.3 提案手法

### 6.3.1 設計コンセプト

LiDAR(Light Detection and Ranging)やステレオカメラ等の広範囲の測距センサは、機能要件 4, 5 を満たすのに好適な手段と考えられた。しかし機能要件 5 にしたとすると、ユーザは認知したい箇所を例えばタッチパネル等で選択し、指定操作し、奥行き指標を表示させなければならない。例えば移動に際して重要となる衝突可能性の予測では、認知したい箇所が次々に入れ替わることになる。その度に選択・指定操作が生じることは負担増加や操作性低下を招き、時間がかかり、当事者等にとっては決して無視できない負担となり得るとともに、アルゴリズム的な操作・ぎこちない挙動を誘発してしまう。そこで選択・指定操作が視線の変更のみで済むように視線計測技術を検討したが、計測精度や振動のため現状では使いこなしが困難で、訓練を要すると考えられた。以上を踏まえると、本章の目的では細かな選択・指定操作が不要であることも有効と考えられ、以下のコンセプトの着想に至った。

すなわち提案手法では、観察範囲のあらゆる対象の奥行き指標を常に映像に重畳する(機能要件 2, 4)。その中で所望の箇所の選択・指定するのに必要なのは、ヒトに備わる視覚的な選択的注意(Selective attention)のメカニズムのみとする(機能要件 5)。ヒトは煩雑な情報からでも所望の情報を選択的に用いることができ、一般的には聴覚情報を用いた例としてカクテルパーティ効果が広く知られているところである。ユーザに求められるのは所望の対象に視覚的注意を割くことだけで、奥行き指標の表示のための選択・指定操作は不要になる。

### 6.3.2 基本設計検討

本コンセプトでは画面中に無数の奥行き指標が表示されることになるため、機能要件 5 を満たすには映像と奥行き指標との視認性を両立し、これらの弁別を容易にする必要がある。前述した LiDAR を用いれば、図 6.2((Mordvintsev and Abid, 2013) を参考に作成)に典型例を示すように、計測環境の 3 次元点群マップを取得し、奥行き距離をユーザにとってより直感的な表現と考えられる 2 次元カラーマップとして提示できる(鈴木, 藤崎, 2018)。しかしカラーマップ表現を同左の映像に重畳すると、色が混ざり、輝度やコントラストの低下等で視認性が損なわれる。つまり、遠隔移動体験の要となる映像の精緻性は全く損なわれることになる。視認性の低下は本稿の研究において重要な問題であり、例えば現地サイトの参加者の表情が見えない等の感性的品質の著しい低下につながる。

そこで 6 章の設計では、ステレオ映像の対応点の視差が奥行き距離に応じて変化する情報を利

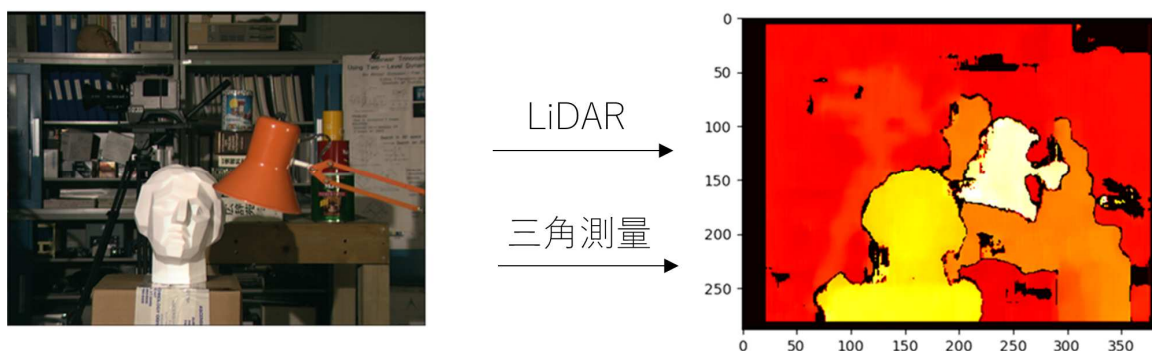


Fig. 6.2 奥行き情報のカラーマップ表現の例 ((Mordvintsev and Abid, 2013) を参考に作成)

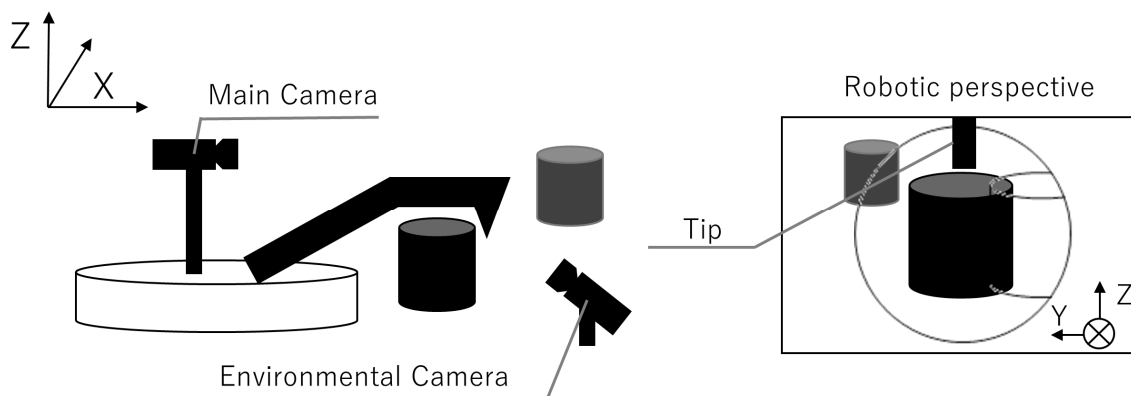


Fig. 6.3 ステレオマッチングインタフェースの概念図

用することとした. 図 6.3 に提案手法の概念図を示す. また図 6.4 に示すように主たる映像としてのロボット視点の映像(機能要件 1)を撮像するステレオカメラの一方をメインカメラ, 他方を指標カメラと称する. このように撮像されたステレオ映像のそれぞれをユーザの各眼に提示すれば, ユーザは両眼立体視の原理に基づく 3D 映像を知覚できる. しかしながら, 提案手法ではあえてこれらを表示領域の全域にわたって重畳して(機能要件 2), 平面的な 2 重像として提示する(機能要件 3). 本設計では, ユーザは 2 重像の重なりから, メインカメラと映像上の任意点との奥行き距離誤差の情報を認知でき, これが直接的に予測誤差の低減に寄与する.

当然, ステレオ映像をそのまま重畳するとやはり視認性が大きく低下する. ユーザは常に画面全体にわたる 2 重像を観察することになるためである. そこで, 提案手法では図 6.5 に示す画像処理を施す.

はじめに, 指標カメラで取得された画像からエッジを検出し, 描画(6 章では黒色)する処理を施した. これにより生成された指標を奥行き指標と称する. この処理は, オープンソースの画像処理ライブラリである OpenCV を用い, Canny の方法(Mordvintsev and Abid, 2013)で実装した.

生成された奥行き指標は, その後同時刻のメインカメラ撮像フレーム(画像処理を加えられていないネイティブな映像)に重畳され(機能要件 2), ユーザに提示される.

以上の処理により, 指標カメラが撮像した映像の情報は要約した表現に改められ, 奥行き指標

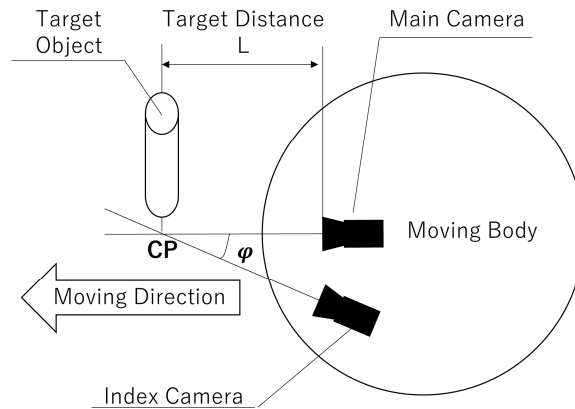


Fig. 6.4 交差法でのステレオカメラユニット構成の説明図

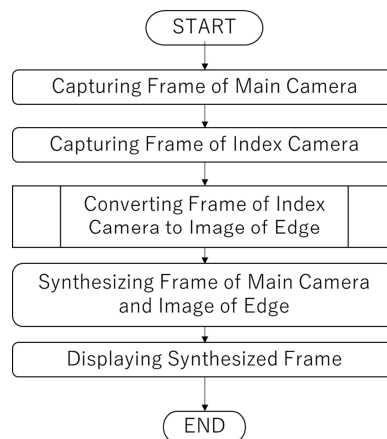


Fig. 6.5 画像処理フロー

による重畳後のロボット視点の映像の視認性低下が抑制される(機能要件 5). この要約が必要十分であるかは、後述する機能確認で検討する.

提案手法で生成される奥行き指標は、画像上の濃淡の変化のある点(特徴点)に基づいて生成される. このためターゲット位置の情報を有する物体(ターゲット物体)が撮像画角内に入っていれば、ノイズ等の影響は考慮する必要があるものの奥行き指標が生成される条件を満たすことができるため、地形が映っていないなくてもよい(機能要件 4).

以上の設計により実装されたインタフェースを図 6.6 に示す.

提案手法では、視野内のあらゆる特徴点が奥行き指標化されることに特徴がある. このため映像の精緻性とはトレードオフ関係が生じ、環境によっては上記の処理を経てもなお多くの情報が残る可能性がある. 例えば、複雑な背景がある現地サイトで、被写界深度の深いカメラを利用した場合に想定される. そこで視認性をさらに高めるための対策の一例として、指標カメラの映像の範囲を必要最低限に限定する設計方針が考えられる. 図 6.6 には、指標カメラの映像を円形にトリミングし、映像の中心近傍の情報を重視した設計例を示している. この影響は実用設計上の検討課題である.

## 6.4 提案手法の特徴

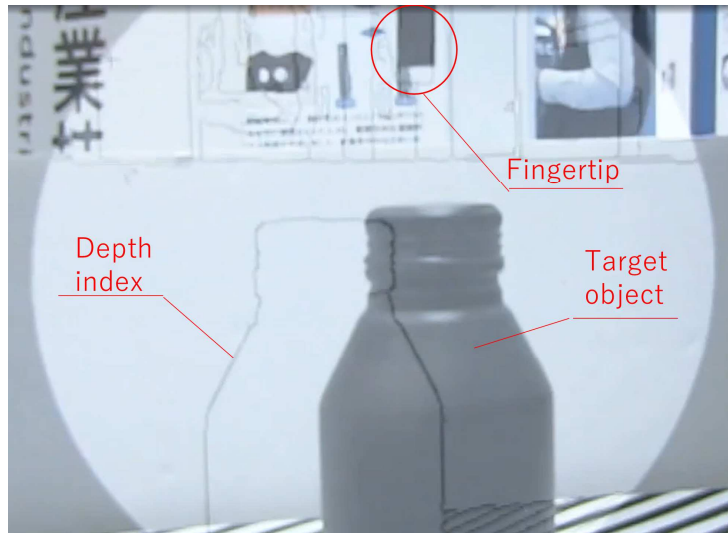


Fig. 6.6 提案するステレオマッチングインタフェースの実装例

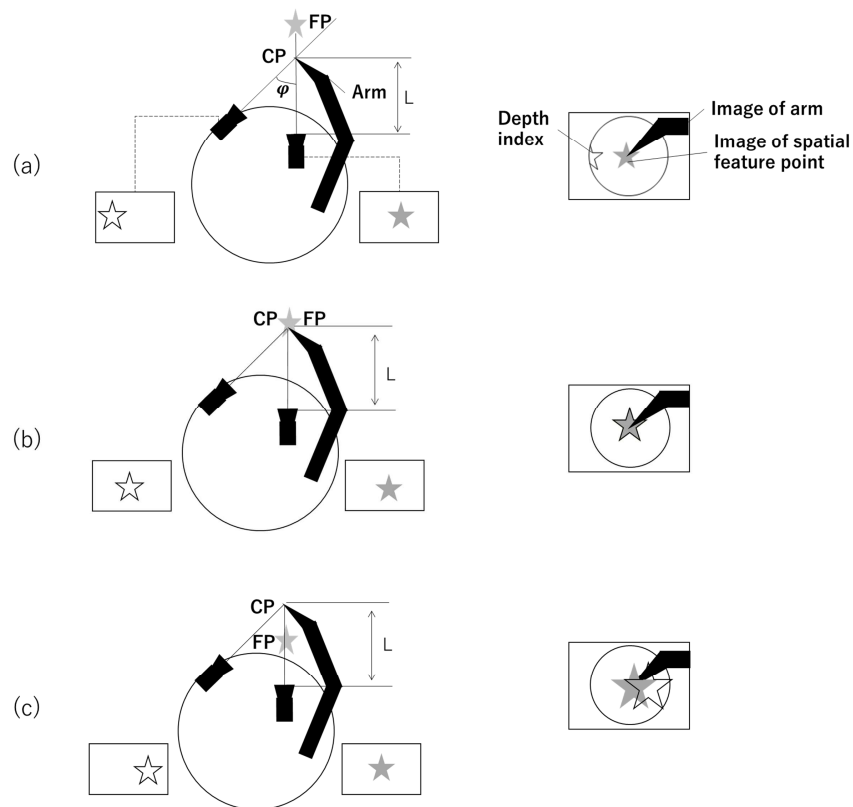


Fig. 6.7 ステレオマッチングインタフェースの動作原理の説明図

### 6.4.1 動作原理

次に、図 6.7 を用いて提案手法の動作原理を説明する。

提案手法はメインカメラ(ロボット視点)からターゲット距離(L)にある特徴点の水平方向の視差が 0 となるように構成される(図 6.4 も参照のこと). L はメインカメラと、所望の箇所にあるターゲット物体との相対的な奥行き距離の目標値となる。

すなわち、ターゲット物体(の実像)は、そこからロボット側に距離 L の点にあるターゲット位置の情報を提供する。例えばターゲット物体との接触の回避を主目的とすれば、L にはロボット

の最大外形や最大可動域とメインカメラとの距離(に十分なマージンをもたせたもの)を設定する。後述するが、ターゲット物体への接触を主目的とすれば手先等の作用点とメインカメラとの距離を設定する。本稿は要素開発フェーズにあり固定の  $L$  で検討を進めた。この構成でも接触を伴う作業が可能であることを 6.4.4 項で検討し、6.6 節以降で実証する。より作業の自由度を高めるには、作用点とメインカメラとの距離を  $L$  の値と連動させる設計が考えられる。この設計は構成や操作を複雑にするため、信頼性やユーザビリティとのトレードオフになることに注意する必要がある。

提案手法では特徴点の視差を 0 にするため、メインカメラから距離  $L$  の点で各カメラの光軸が互いに交わる構成を採用した。このカメラの保持手法は交差法、各光軸の交差角( $\varphi$ )は輻輳角、交差点(CP)は輻輳点と呼ばれる。各カメラが同一水平面上に並ぶ場合、ターゲット物体像とその奥行き指標とは、ロボット視点とターゲット物体との奥行き距離に応じて画面上で水平方向に相対変位することになる。各カメラは任意の平面に並べることが可能であり、例えば垂直面上に並べるとターゲット物体像とその奥行き指標とは画面上で垂直方向に相対変位することになる。遠隔操作型の移動システムにステレオカメラユニットを配置する空間的な制約がある場合等に有効な設計となり得る。また、本実験では交差法を用いたが、各光軸を平行に保持して、画像処理により視差をつける構成もできる。この構成は平行法と称される。

メインカメラは、その光軸方向がロボットの前進方向と平行になるように保持されることが好ましい。これにより、ターゲット物体への接近に伴うターゲット物体像の画面上の変位を小さく、その奥行き指標の変位を大きくできる有用な効果を得られる。

ユーザはターゲット物体像上の所望の特徴点(FP)に着目する。図 6.7(a)および図 6.7(c)に示すように、画面上のターゲット物体像の FP とその奥行き指標の対応する FP とが 2 重像のままであれば、遠隔環境の FP はメインカメラから距離  $L$  の点(CP 上)にないことを示している。これは、ロボットの自己位置としての CP と、ターゲット位置としてのターゲット物体像の FP との間に奥行き方向の誤差があることを表現している。

図 6.7(b)のように各 FP が重なって 1 重像で観察されれば、遠隔環境の FP はメインカメラから距離  $L$  の点にある(すなわち CP と FP の間に奥行き距離誤差がない)ことを示している。操作の修正なしでこの状態に至ることができれば、それに至るまでのユーザの操作には位置の予測誤差が生じなかったと評価できる。

このようにユーザは、ロボットの操作に応じて画面上で相対変位する 2 重像を観察し、これらが 2 重像である FP とは衝突しないことを素早く予測できる。また 2 重像の重ね合わせ、いわゆるステレオマッチング(Stereo matching)を行うことで、メインカメラをターゲット物体上の FP から手前に距離  $L$  のターゲット位置に移動・停止でき、ステレオマッチングに至るまでの奥行き指標の相対的な水平方向への変位の情報は、移動の予測情報としても有用であると考えられる。

またユーザは一連の操作でロボット視点の映像の表示領域内から視線を外さずに済み、中でも距離  $L$  近傍にあるターゲット物体ほどその像と奥行き指標とは互いに近接して表示されるから視線の移動は少なくなる。

提案手法はロボット視点のみからなる 2D 映像上では極めて困難な奥行き認知を伴う遠隔操作を、その難易度を低減するため、2D 映像上でも容易に認知・予測可能なステレオマッチングに落とし込んでいる。本稿ではこれをステレオマッチングインタフェース(SMI と省略する場合はあ



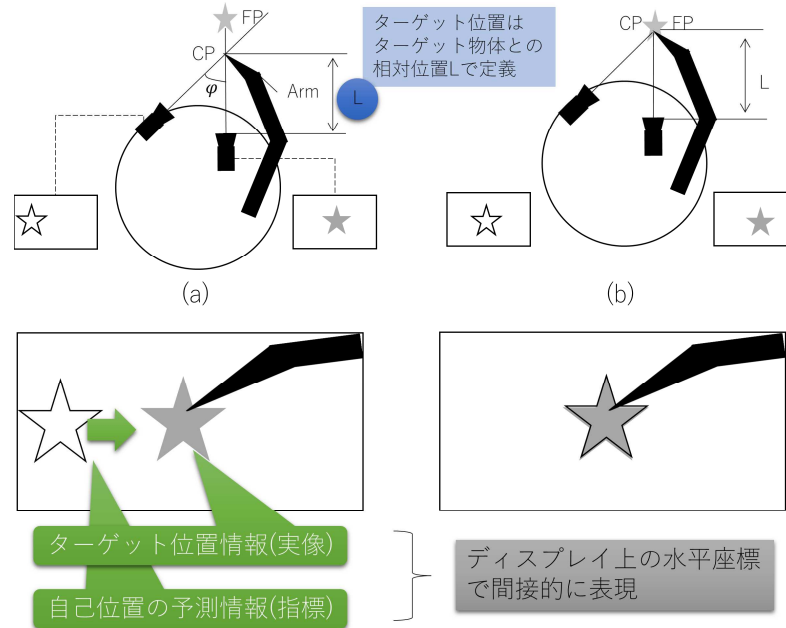


Fig. 6.8 ステレオマッチングインタフェースが提示する情報

る)と称する。ステレオマッチングインタフェースは奥行き距離を視差から算出する三角測量の原理を応用し、視差そのものを指標として活用しており、古くはレンジファインダカメラのフォーカス調整等に用いられてきた指標の応用といえる。この指標は視野(ファインダ)中央近傍の点に配置され、視野中央のフォーカス点とステレオマッチングされる。このように固定された1点との奥行き距離誤差であれば他にも、操作は難しくなるものの指標カメラに代えてレーザーポイントを搭載する極めて簡単な構成でも認知できる。

しかしステレオマッチングインタフェースの重要な特徴の一つは、画像処理を応用した視認性向上の設計により、画面の全域で広く選択的に、奥行き距離誤差が認知できると考えられることである(機能要件 4, 5)。複数箇所の同時視認もでき、指標の選択・指定操作も不要で、これらは操作中の衝突可能性をはじめ任意の被写体に対する相対的な自己位置の素早い認知(すなわち予測)に役立つ。

#### 6.4.2 ステレオマッチングに関する情報と拡張コンパレータモデル(2章)との対応

ステレオマッチングインタフェースが提供する情報を拡張コンパレータモデルの各情報と対応させて整理する。前項で説明したステレオマッチングインタフェースの提供する重要な情報を図 6.8 にまとめる。

現地サイトのターゲット位置に関する第一の情報は、前述のようにこれと距離  $L$  の相対位置関係にあるターゲット物体の像から入力される。すなわち、第一の情報は①ディスプレイ上のターゲット物体の実像の位置により間接的に入力される。

同じく現地サイトのロボットの自己位置の予測に関する第二の情報は、②ターゲット物体の実像上の特徴点と対応する奥行き指標の相対位置および相対接近速度によって入力される。前述したようにステレオカメラユニットの構成(幾何配置)によって変動するが、本章で述べる各カメラを床面と平行な面上に並べる構成では、奥行き指標の相対的な水平位置が重要な情報となる。以上の各情報の予測誤差モデルとの対応関係を図 6.9 に示す。



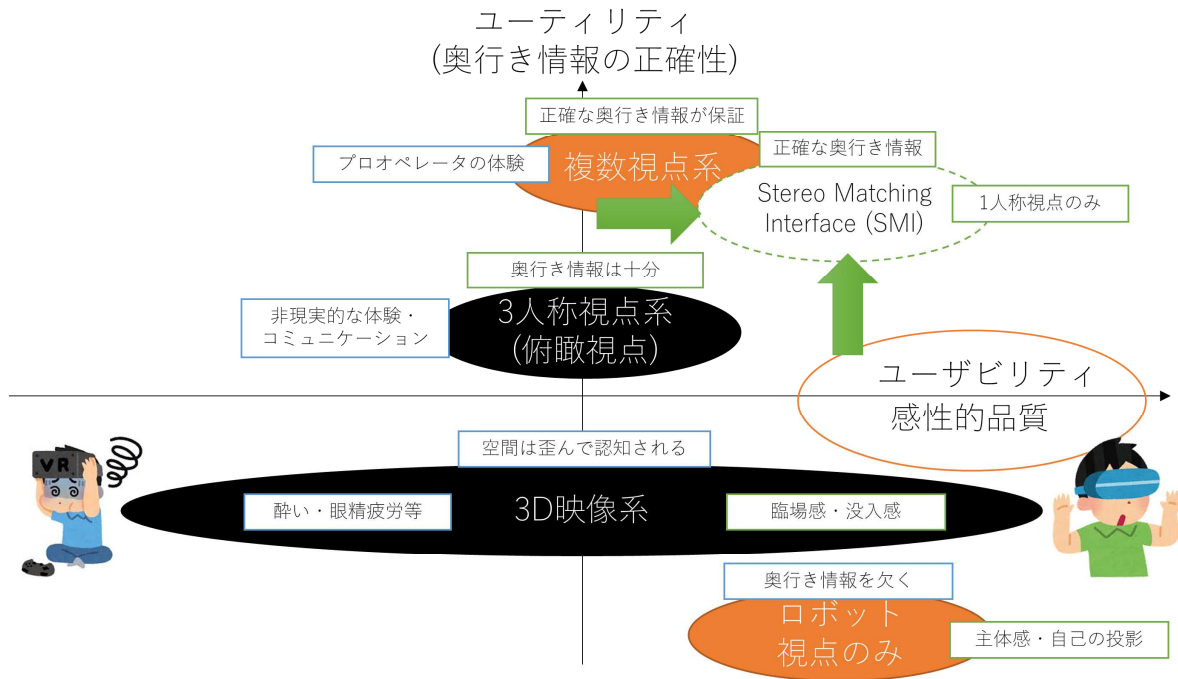


Fig. 6.10 ステレオマッチングインタフェースの定性的ポジショニングマップ

係で整理している。

**(a) ロボット視点の映像との比較**

ロボット視点の映像の問題は、前述のようにユーティリティ(奥行き情報の認知の正確性)が低いことである。このためタスクの達成が難しくなり、操作が視点の移動と一対一で対応可能という点で直感的である、というユーザビリティ上の利点を相殺してしまっている。

一方で直感性や、現地サイトでのユーザの目を代理する一人称視点としての特徴は、体験をロボットに重ね合わせるような自己投影体験に近づける点にあり、本稿の研究で最も重要視している感性的品質を向上している。

ユーティリティ向上には、後述する俯瞰視点(三人称視点に含まれる)の採用や、映像に各種の情報を示す計器を並べる、等の手法が一般的である(佐藤, 松本, 2010)。しかしながら、前者はユーザに本来なじみのない視点である。確かに目的とする活動の達成には有効であり、真新しさのある体験となる可能性はあるものの、フィーリングの主体感や自己のプロジェクションの向上には有効ではなく、支援を受けながらの実際の外出に並び立つような遠隔移動体験は目的にはならないと考えられる。後者は、情報の理解しやすさ(ノーマン, 2013)の点で課題が生じるため、ユーザビリティを減少させる。

またいずれの手法とも共通して、ロボット視点の映像の注視(ステレオマッチングインタフェースの機能要件 2 で克服を試みた項目)が困難になる。したがって、移動操作以外の体験にリソースを割くことが難しくなるという感性的品質の低下が誘発される。

以下、これをポジショニングマップの第四象限に配置して基準と定め、各軸に関する相対的な比較を行う。

**(b) ロボット視点の 3D 映像系との比較**

両眼立体視に基づく 3D 映像の観察は、ヒトの視覚情報を最も精緻に再現できる手法と考えられ、リアリティ観点の感性面の品質は非常に魅力的となる。

また、ユーティリティ面からでも、奥行き情報が付加されるため、ロボット視点の 2D 映像の活用に比較して奥行き認知が正確になる。これに伴って、タスクの達成可能性が向上し、本来一人称視点の有する直感性に加えてさらなるユーザビリティ面の品質の向上も期待できる。ただし、カメラとヒトの目の構造の原理的な差異等に起因して、認知される空間は少なくとも幾何学的に歪むことが分かっている(河合, 2010)。また、心理的にも歪むことが分かっており、心理物理的な計測も古くから行われている。このため、認知される奥行きは厳密には正確ではない場合もある。また、映像の精緻化等に伴って通信する情報量はますます増加しており、通信遅れも拡大する傾向にある。

これに対して、3D 映像には感性面の品質やユーザビリティを深刻に阻害する可能性のある要因も含まれる。3D 映像の長時間、繰り返し観察には、生理的リスク(いわゆる動揺病や眼精疲労等)の懸念がある(3DC, 2010)。本研究のステークホルダである当事者等は身体的・認知的機能が低下していたり、基礎疾患を抱えていたり、生理的リスクにはより一層の注意を払う必要がある。このため、追加の生理的リスクは回避する必要がある。なおこの生理的リスク(特に動揺病)は、本稿の研究で対象としている通信遅延や思い通りの移動操作性を欠くことの影響が大きいといわれる(Adedamola A. O., 2016)。

以上を踏まえると、ユーティリティに関してはロボット視点の映像に比較して明確に高くなるが、感性面の品質やユーザビリティに関しては主にリアリティ面の魅力と生理的リスクとが対立するので状況に応じて振れ幅が非常に大きく、単純な比較は難しい。したがって、当該手法は必要不可欠なシーンでのみ採用することが望ましいと考えられる。

### (c) 三人称視点(直上の視点や俯瞰視点)の映像との比較

三人称視点とはロボット自身の全身像を含む映像であり、前述した俯瞰視点の映像もこれに含まれる。

ユーティリティは上記 2 つの既往技術に対して明確に向上する。三人称視点の映像では、ターゲット位置と、ロボットの自己位置を直接的に視認可能になるためである。ユーティリティ面では、俯瞰映像やロボットを背後から捉える映像を採用すれば、心的回転(メンタルローテーション)が不要となり、直感性を最低限保つことができる。

しかし前述のように、ユーザがロボットに自己を重ね合わせることが難しい視点の映像である。三人称視点での自己のプロジェクトンに関しては、幽体離脱体験と称して検討が行われているが、一人称視点でのプロジェクトンよりも難しい課題とされている。

したがってロボット視点の映像に比較すると、ユーティリティは明確に向上するものの、ユーザビリティおよび感性面の品質は少なくとも本稿の研究の目的においては、感性面の品質が明確に低下するため相対的に低い位置に位置付けられる。

### (d) 複数視点併用系との比較

6.2.2(a)で述べたように、ロボット視点の映像等、主として観察される映像に、ロボットの自己位置とターゲット位置とを直接観察可能な三人称視点の映像や、マップ(俯瞰の表現が多く見受けられる)等を並べる手法であり、最も実用的な手法と考えられる。

ユーザビリティ面では、映像との空間的な対応がないため、心的回転操作、平面情報からの空

間推論等の認知的なリソースが必要となる。また、各情報を観察するのに、情報をまたいだ比較的大きな視線の移動を要し、複数の情報を同時あるいは迅速に視認することには困難を伴う。

感性的品質の面では、計器に囲まれたパイロットの体験と例えられる。情報の理解にリソースを要し、移動体験そのものや、景色の観察等のこれに付随する体験を楽しむ余裕は低減される。ゲーム的に楽しい体験となる可能性ももちろん指摘できるが、ゲーム体験の追求は本稿の研究のスコープからは外れる。訓練を積むことが困難なユーザにとっては、この体験の魅力を訴求しづらい懸念がある。

#### (e) ステレオマッチングインタフェース(SMI)

以上を受けてステレオマッチングインタフェースでは、多数の奥行き指標をロボット視点の映像に重畳することになるため、映像の精緻性は損なわれる。この意味で、リアリティ観点での感性面の品質は3D映像に比べて相対的に低下する。

しかしながら、ユーティリティは多視点映像と同等の性能が期待される。原理的に複数視点系と同様の構成となるためである。ユーティリティについては6章で続けて検討を加える。

またユーザビリティに関して、心的回転や空間推論、視点移動を削減でき、負数視点系や3人称視点系に比較して相対的に向上している可能性が考えられる。また、より多くのリソースを移動体験に関する情報(=ロボット視点の映像)の観察に割くことができ、遠隔移動体験を目的とする場合のUXを総合的に判断すれば、遠隔移動体験を目的とする場合のステレオマッチングインタフェースは図6.10の2軸において、全体最適に近づく可能性があるものと考えている。

#### (f) 2次元カラーマップ表現(不図示)との比較

奥行き情報の表現で典型的なのは2次元カラーマップであり、色によって3成分目を表現している。その典型的な例を前掲の図6.2に示した。しかし本表現では、ロボット視点の映像と色が交ざり、映像の観察が妨げられる。この場合、コミュニケーション相手の表情が見えなくなってしまうような体験の質を低下させる事態が生じ得る。また、色のグラデーションや違いに意味があるという点で名義尺度あるいは順序尺度であるカラーマップは、凡例等がなければ尺度の間隔を定量的に捉えることが困難である。また、凡例を用いたとしても、直観性の低い数値を用いなければその微小な差異を表現することは難しい。凡例を並べることは、多視点映像と同様の手法となり、2次元重畳表現の意義が損なわれることになる。

### 6.4.4 移動に関する物理的作業への展開可能性の検討

一般的に、ユーザがロボット視点の映像を用いて、遠隔のロボットの有する様々なエンドエフェクタを通じターゲット物体への何らかの物理的作業(例えば接触、押し・引き、把持、運搬、掘削、切断、書字、払拭等)を適切に実現するには、エンドエフェクタの作用点あるいはこれを含む作用領域の3次元座標(特に奥行き方向のもの)を、作用させたい点(特徴点)あるいはこれを含む領域の座標に移動させ、所定の精度で合わせこむ必要がある。所定の精度はエンドエフェクタや作業内容によって異なる。ステレオマッチングインタフェースではターゲット位置への移動に合わせて、エンドエフェクタの作用点を特徴点に合わせこむことができるので、遠隔移動体験だけではなく複数の接触を伴う遠隔活動を実現できる可能性がある。

以下、ステレオマッチングインタフェースを用いて各3次元座標を合わせこむための設計を、

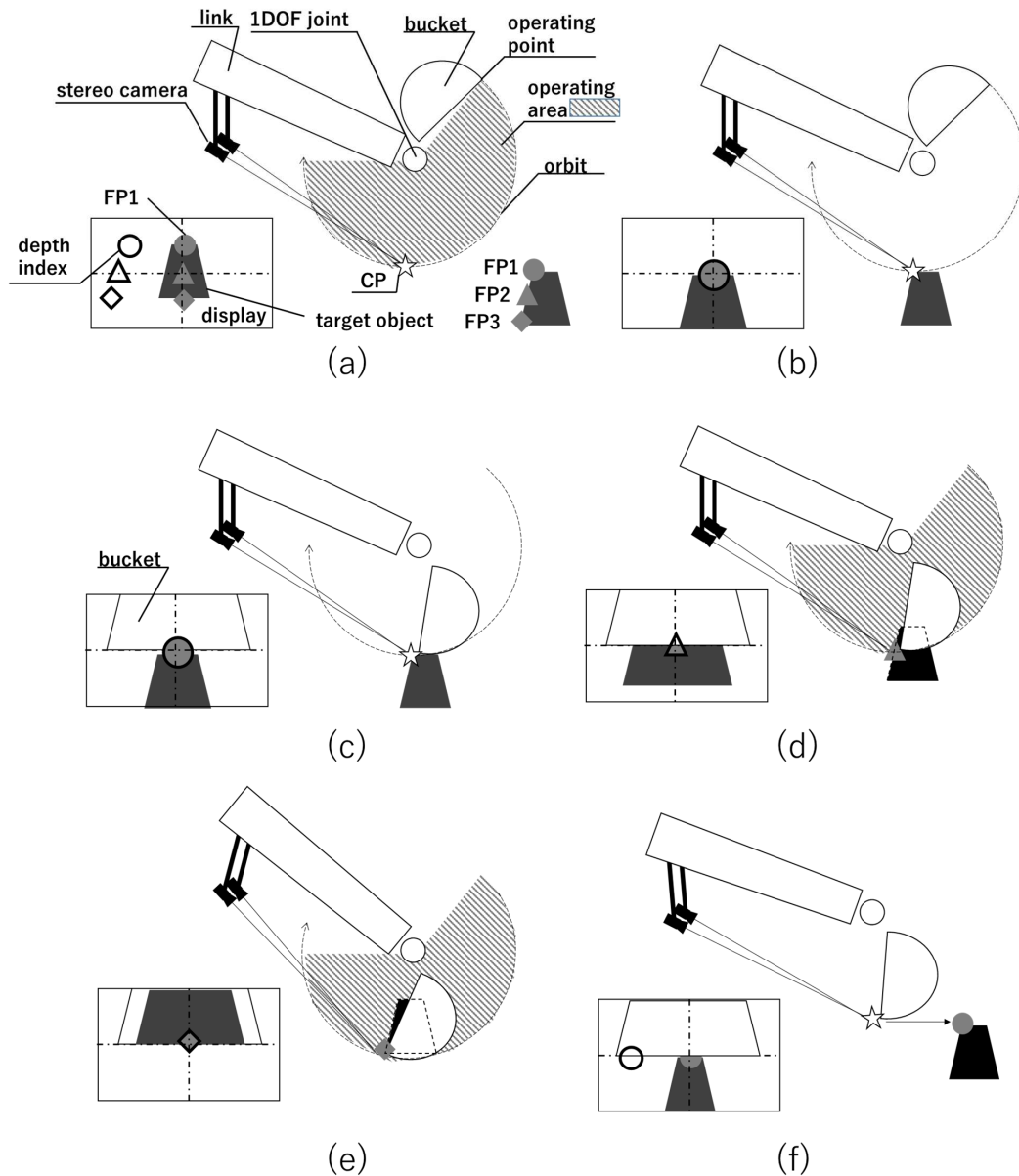


Fig. 6.11 ステレオマッチングインタフェースと手先作業とを連動させるための設計の説明図

エンドエフェクタとしてのロボットの手先やバケットの例(図 6.11)を用いて説明する。

ステレオマッチングインタフェースではロボットの手先等の作用点がメインカメラからターゲット距離(L)の位置に到達するように軌道を計画することで、手先を所望の特徴点(FP)に物理的に作用させることができる。これをシンプルに実装するには、図 6.4 に示したように手先と輻輳点(CP)とを一致させておく構成(手先カメラ構成)が考えられる。6章の検討は要素機能の確立フェーズにあり、この設計で後述の検討を進めた。画面上でターゲット物体像上のFPと手先の像との重ね合わせ(水平・垂直方向の位置合わせ)と、ステレオマッチング(奥行き方向の位置合わせ)とを順不同で行うと、FPに物理的に作用(接触)できる(図 6.7(b))。

手先を独立に動かす設計も可能で、図 6.11(a)のショベルの例では、ステレオカメラは手先(バケットの歯先)と1自由度回転関節で連結されたリンクに固定されている。破線の矢印はバケットの歯先の軌道を示す。軌道上の1点を作用点(図 6.11中の星印で表現された点)と定め、その画面上

での表示位置を固定する(図 6.11 では画面中央に一点鎖線で示す十字の照準上). またステレオカメラの CP を作用点と一致するように調整する. 図 6.11(b)に示す FP1 に対する水平・垂直および奥行き方向の位置合わせの後, 図 6.11(c)のようにバケットを回転させると, 歯先が FP1 を通る. このように作用点と FP1 との 3 次元座標の合わせこみが完了すれば, FP1 を起点に, 例えば, ターゲット物体が土砂ならばその高さを FP1 の高さに均す作業が実行できる.

作業は FP の選び方でも変更でき, 例えばバケットを回転させる前に, 十字の照準と図 6.11(a)の FP2 とを一致させる等の微調整をすれば, この作業は図 6.11(d)のように一定の作用領域(グレーの斜線でハッチングされた領域)の内部の物体の除去(掘削)になる. 例えばターゲット物体が石であれば, 図 6.11(a)の FP3 を選ぶことで作業は図 6.11(e)のような地面ごとの石の運搬になる. 図 6.11(f)のように歯先を予め作用点(照準上)で停止させてから奥行き方向の位置を FP1 に合わせこめば, 歯先やターゲット物体に加わる衝撃を抑えながらこれらを接触させることができ, この状態でさらに前進すれば押し作業が実行できる. なお衝撃を抑えるには, 前述の各作業よりも高い精度が要求されることになるが, 後述の移動精度を要するタスクではなるべく早く正確な接触を求めており, 精度は実用上の課題である.

## 6.5 機能要件の満足の確認

本章ではステレオマッチングインタフェースの設計が機能要件 1~3 を実現することは構成上明らかなので, 機能要件 4, 5 の実現の確認のために各性能を計測した.

### 6.5.1 機能要件 4

はじめに仰角方向を含む画面端部の奥行き距離を計測(機能要件 4a)および提示(機能要件 4b)できることを確認した.

#### (a) 計測方法

遠隔操作型の移動システムとしては前章までと同様の Roomba(536, iRobot 社)を含むものを用いた. ただし, メインカメラおよび指標カメラ(c920r, ロジクール社)はスペースの制約のため, 縦にして配置された. 表示時間遅れは実測で最大 0.4 s であった. ステレオカメラのパラメータは  $L = 380 \text{ mm}$ ,  $\phi/2 = 9 \text{ deg}$  で, 誤差がなければロボットはターゲット物体の 380 mm 手前で停止する.

計測環境を図 6.12(a), これをメインカメラで撮像したものを図 6.12(b)に示す. ターゲット物体として直径 12 mm, 厚さ 4 mm のマーカをブロックの高さ 50 mm(メインカメラから見て俯角方向), 200 mm(仰角方向)の 2 箇所固定した.

ロボットやターゲット物体を含む遠隔環境はボードで完全にマスクされ, 計測者がこれらを直接的に視認することは一切できなかった. 計測者はディスプレイを 700 mm 手前から観察した.

インタフェースを図 6.12(c)および図 6.12(d)に示す. このように映像は, 23.6 型ディスプレイには縦長(724×964pixel)のインタフェースとして提示された. 図 6.12(c)のアンマッチング状態ではターゲット物体の奥行き指標が右側に表示され, 背景の情報も奥行き指標化されていることが見て取れる. 図 6.12(d)のマッチング状態ではターゲット物体像とその奥行き指標とが水平方向に重なっている. 厳密にはマッチング状態でもターゲット物体の実像とその奥行き指標とが垂直方向にずれているが, 各カメラが水平方向に並ぶ構成では水平方向に高精度のステレオマッチング



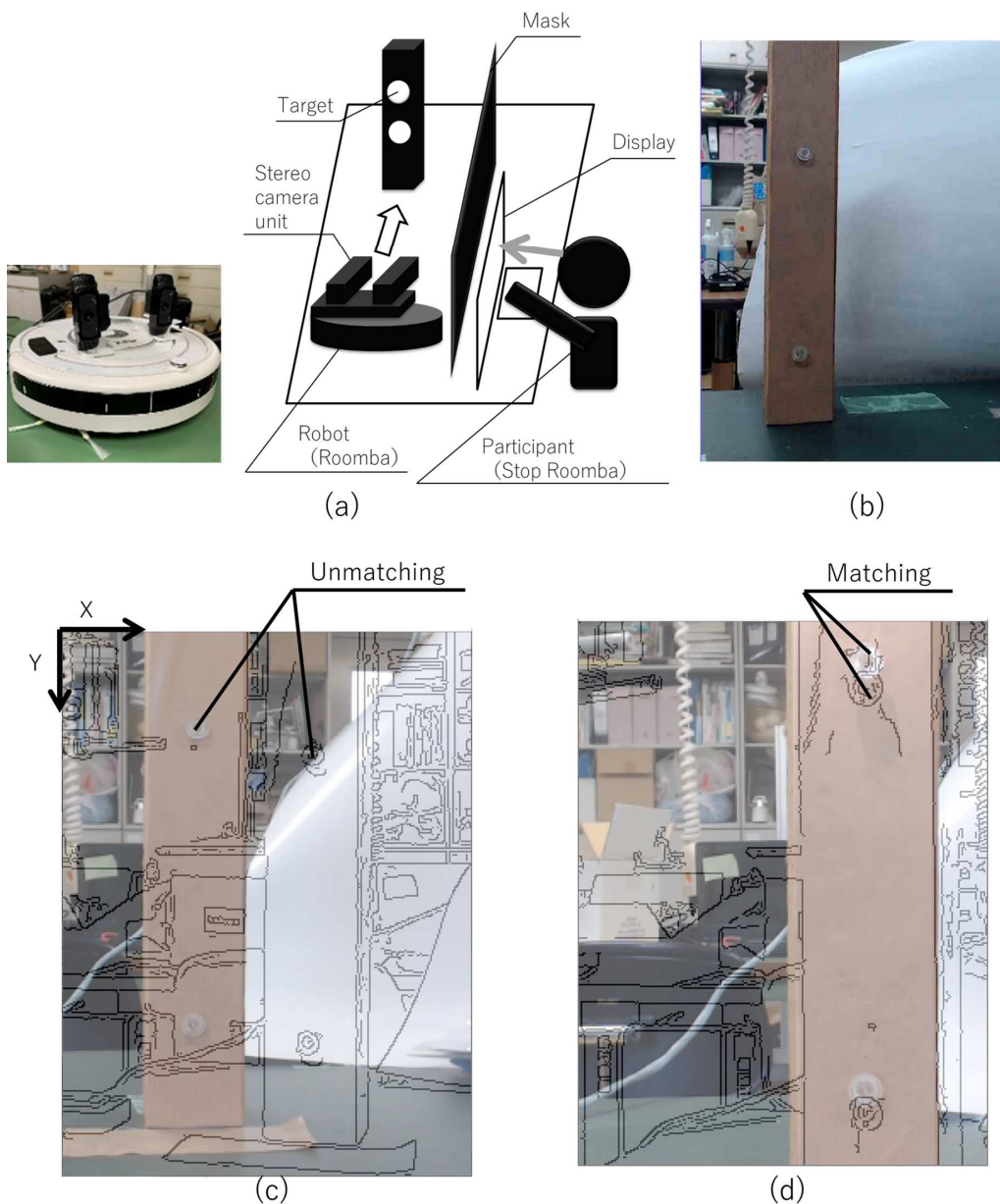


Fig. 6.12 計測環境およびインターフェース

および輻輳角(カメラ姿勢)の保持が要求される反面、垂直方向ずれは許容される。計測前にはメインカメラのレンズ表面がターゲット物体の手前 380 mm となる位置で、ターゲット物体像の特徴点(本計測ではマーカ中心と定める)とその奥行き指標の特徴点との水平方向ずれが 1pixel 以下となるようステレオカメラの輻輳角を調整した。

計測では、ランダムな位置からロボットをターゲット物体に向けて直進させ、互いの特徴点が水平方向にステレオマッチングしたら停止させた。本項での計測の目的はステレオマッチングインターフェースのデバイスとしての精度性能の確認であり、Roomba は 30mm/s の低速で移動し、計測者による微調整や後退を含む、移動操作の結果の確認を伴う修正の操作は許容された。したがって、計測者は表示時間遅れの影響を踏まえて十分に時間をかけた操作のやり直しができ、本計測における計測者に起因する操作や認知の誤り、表示時間遅れ等の誤差の影響は十分に分離されると想定された。



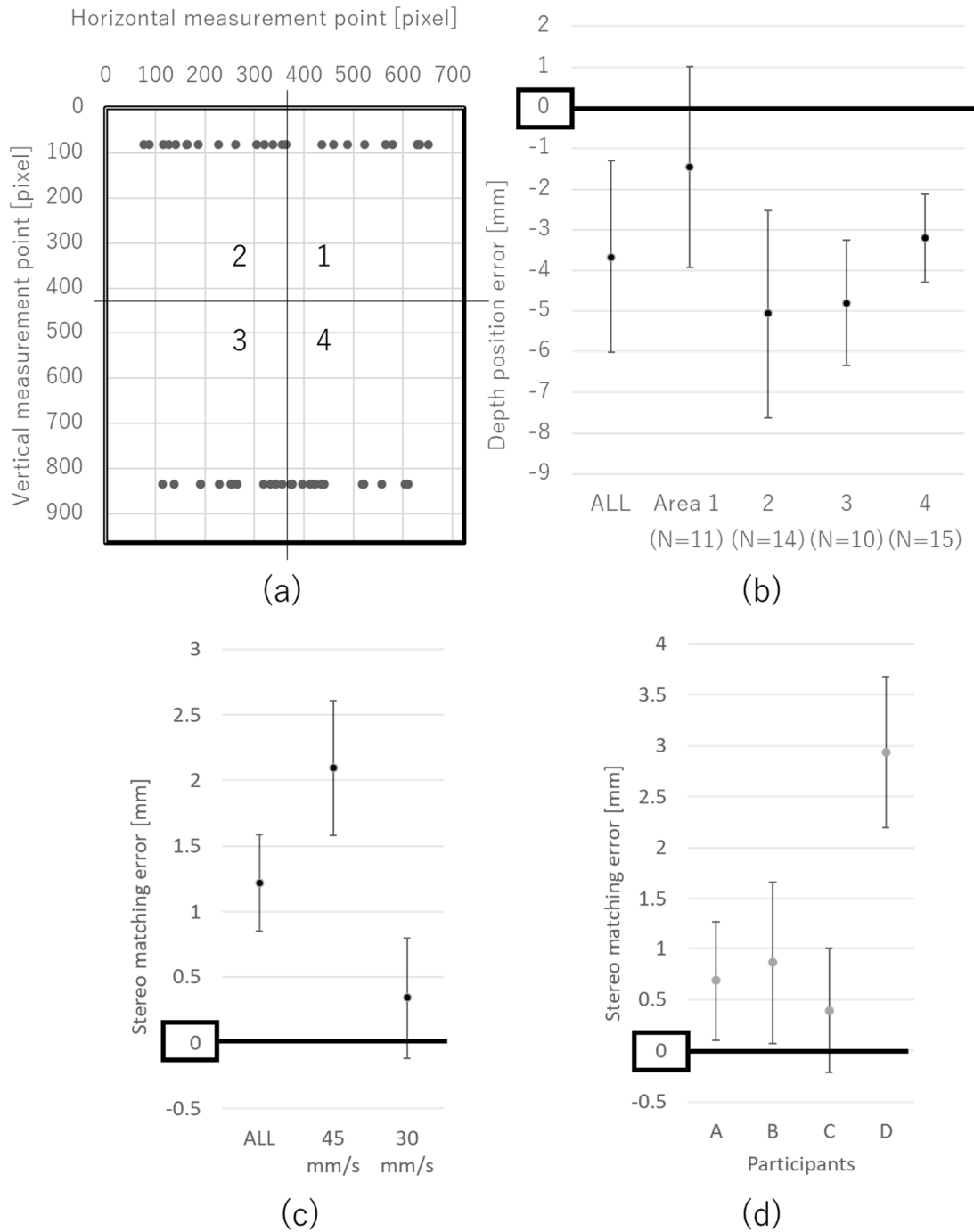


Fig. 6.13 機能確認結果

計測者はターゲット物体として上下のマーカのいずれか一方を交互に用いることで、画面上様々な範囲の精度を計測した。計測点は50点とし、後述する図6.13(a)にはその座標(図6.12(c)上に定義したディスプレイ座標)を示す。

計測値は、奥行き停止位置誤差(ターゲット物体とメインカメラのレンズ表面との水平距離からLを引いた値)とした。ステレオマッチングインタフェースが理想的な精度の奥行き情報を計測および提示できていれば、この値は0となる。位置の予測誤差の定義とは異なり、これが負であることはターゲット位置に対して行き過ぎていることを意味する。

併せて、奥行き停止位置誤差がステレオマッチングに際する計測者の操作や認知の誤り、表示時間遅れ等の大きな影響を受けていないことを確認するために、ステレオマッチング誤差も併せて計測し、これが十分に小さく抑え込めていることを検証した。ステレオマッチング誤差は、ターゲット物体像の中心点とその奥行き指標の中心点との画面上の水平位置ずれと定める。この値が正の場合は停止の遅れを意味している。

## (b) 計測結果

ステレオマッチング誤差の平均 $\pm$ SEは $-0.16\pm 0.14$  mm( $-0.65\pm 0.57$  pixel)であり、ディスプレイの分解能の限界(1 pixel)に迫る十分小さい値に抑え込めた。ただしこの計測値には、奥行き指標の提示精度の影響が含まれると考えられる。計測では、撮像フレーム毎にエッジが隣接するピクセルに移動したり一部検出できなかつたり等で奥行き指標の外形が不安定になる現象が一部で見受けられたため、計測値に影響を及ぼしたと考えられる。この現象はエッジ検出処理の性能や表示素子・撮像素子の分解能(解像度)の要因に起因するものと推定される。また、ディスプレイ上でのマーク像のサイズも小さく、ズーム機能やより大きなディスプレイを採用すればさらにステレオマッチング誤差を抑え込めるものと推定された。上記の計測行為と実際のステレオマッチングインタフェースの活用とは実質的に同じであり、応用設計上考慮を要する。

図 6.13(b)に奥行き停止位置誤差の計測結果を示す。エラーバーは SE を示す(以下同様)。奥行き停止位置誤差の平均は全領域で $-3.7\pm 1.1$  mm、4 分割した各領域 1~4(図 6.13(a)参照)すべてで絶対値 10 mm 以下となった。ステレオマッチング誤差の抑え込みにより、この計測値は主にステレオカメラによる三角測量の精度と、分離しきれなかった提示精度とを反映したものと解釈できる。また、計測値には負の値に偏る傾向が見受けられた。これは精度面での実用上の設計課題となる可能性があり、6.9,1(a)で考察する。

以上から、本システム構成および計測環境では奥行き距離誤差を平行~仰角方向に関して少なくとも 10 mm 以下の精度で計測(機能要件 4a)および提示(機能要件 4b)できることが確認できた。この結果は、性能面では、10 mm 単位のターゲット距離が設定される用途に必要な精度を備えていると評価できる。

しかし 50 回の操作後に輻輳角の確認を実施したところ、操作の繰り返しを経て水平方向に+4 pixel のずれが生じていたことが分かり、奥行き停止位置誤差に定常的に影響していた可能性も考えられる。この結果から、ステレオマッチングインタフェースの性能の向上には、少なくともカメラの姿勢の保持が課題となることが分かった。

## 6.5.2 機能要件 5

### (a) 計測手法

本項ではインフォームド・コンセントの得られた健康な 4 名の実験参加者(20 代 3 名(女性), 30 代 1 名(男性))が、画面端部のターゲット物体の奥行き指標を選択し、ステレオマッチングに利用できるか確認した。この実験的な機能確認は、前項の機能確認 4 と併せて、位置の予測誤差の計測に相当する。すなわち、原理的に避けられない表示時間遅れ等の影響を含む。

前項のシステムに追加でキーボードを組み込み、2 人同時に操作可能にした。パラメタは  $L=360$  mm,  $\varphi/2 = 8$  deg, その他は同様とした。

計測では、はじめに実験参加者に以下を指示した。

- ・合図のあと実験者がロボットを移動させること

- ・実験参加者は映像上のブロックの手前 360 mm でロボットの停止操作のみを行うこと
- ・停止位置の修正は認めないこと
- ・操作の誤りがあった場合には自己申告すること(その場合は再計測することとしたが、本計測での申告はなかった)

その後、ステレオマッチングインタフェースの使い方の詳細の説明ののち、1 度だけ実際に停止操作を訓練させた。

本稿の研究における予測誤差の計測では、一貫して習熟を分離した実験計画としている(6.8.8(b)). 本項の実験では、ロボットの移動開始位置はターゲット物体から 500 mm 以上手前の範囲でランダムとした。また、ロボットの並進速度は 30 mm/s と 45 mm/s とを、各速度での試行が同数となるようにランダムに切り替えた。

停止後、画面上のステレオマッチング誤差を計測した。実験参加者ごとに 10 試行、計 40 試行分のデータを取得した。

### (b) 計測結果

図 6.13(c)に実験結果を示す。実験参加者は、速度 30 mm/s の条件では  $0.3\pm 0.5$  mm ( $1.4\pm 1.8$  pixel)の精度で、画面上の様々な箇所を移動して上下端部に至る奥行き指標のうちターゲット物体像に関するものを選択し、ステレオマッチングに利用できた(機能要件 5)。この結果は性能面では数 pixel の誤差であり表示分解能の限界に迫っているものと評価できる。

しかし図 6.13(c)に併せて示すように速度 45 mm/s の条件ではステレオマッチング誤差は  $2.1\pm 0.5$  mm ( $8.3\pm 2.0$  pixel)と拡大した。実験心理学分野で議論される Time-to-Contact や Predicted-Motion 課題の認知モデルでは 2 対象の速度が互いのマッチング(衝突)の予測に影響することが分かっており(Bennett and Benguigui, 2016)、ロボットの並進速度の増加に伴う 2 体の相対的な接近速度の上昇により、ステレオマッチングのタイミングの予測の難易度が上がった可能性が考えられる。

また図 6.13(d)には実験参加者別の結果を示すが、すべての実験参加者でステレオマッチング誤差が正の方向に大きかった。この結果は、少なくとも表示時間遅れの影響を受けたものと考えられる。本計測では実験参加者は最大 0.4s 遅れた映像からマッチングのタイミングを認知することになり、ロボットの停止後 0.4s はステレオマッチング誤差の値が正の方向に増加する可能性があった。表示時間遅れに習熟できれば影響は小さくなると考えられるが、本計測はランダム化等によりマッチングのタイミングに慣れないよう計画されていた。この状況は、本稿では現地サイトの状況やシステム構成、通信距離等が千差万別に変化する遠隔参加体験においては必要な状況設定と考えている(6.8.8(b))。習熟を要することは操作の難易度の上昇に繋がり、表示時間遅れの影響を補償することは実用上の設計課題となる。

また、単位時間当たりのステレオマッチング誤差の増加はロボット速度が速いほど大きくなることが見込まれるため(6.10 節)、表示時間遅れも上述したロボットの並進速度が相対的に大きい条件(速度 45 mm/s の条件)での精度悪化の要因と考えられる。

個人差に目を移すと、実験参加者 D の精度は相対的に低い。このことは、ユーザによっては、ステレオマッチングインタフェースの挙動の予測により多くの訓練を割く必要になる可能性がある。

以上、実装したステレオマッチングインタフェースの構成は機能要件 1~5 をすべて満足し、原理的に基本機能を実現できることが確認された。性能のさらなる向上には、ロボットの速度や指

標の密度，個人差への最適化が課題となる。

### 6.5.3 思い通りの移動操作性の向上に関する考察

ステレオマッチングインタフェースはその構成のシンプルさや十分に高い精度が確認できた点から，5章で基礎的な効果を確認したオプティック・フローの絵画的な誇張表現手法よりも早期の応用可能性が見込まれた。そこで，6.4.4項で例示したような，思い通りの移動操作性が重要となる動的なタスク(以下，単に移動精度を要するタスクと称する場合がある)により，ステレオマッチングインタフェースによる予測支援が，本稿のより上位の目的となる思い通りの移動操作性の向上に資することを検証することとした。

1章において，本稿における思い通りの移動操作性の向上の定義は，「より少ないやり直しあるいは操作時間でより良い移動の精度を得る」ことと定めた。また2章では，予測を支援することが思い通りの移動操作を阻害する種々の要因の解消のための普遍的な手法となり得ることについて述べた。したがって予測支援手法の導入により，「やり直しや慎重な操作を繰り返して移動に関する誤差が許容の範囲内に収まる」という最低限度の思い通り操作性が得られるのであれば，従来，客観的視点の情報を追加する手法が用いられてきたタスクを，ロボット視点の映像のみを用いるステレオマッチングインタフェースでも安定して成功に導けると仮定できる。

そこで以下，本稿では思い通りの移動操作性の検証の第一段階として，ステレオマッチングインタフェースによる予測の支援により移動精度を要するタスクが成功できるか検証をすることとした。移動精度を要するタスクの詳細は後述するが，ユーザとしての実験参加者には，自己位置の予測に大きな誤差が生じると失敗するタスクをできるだけ早く正確に繰り返すタスクを課した。このため，このタスクはアルゴリズム的な慎重な操作をなるべく回避しながらも，移動の誤差が生じればタスクが失敗するという状況を誘発し，上で定めた移動精度を要するタスクとなる。

## 6.6 予測支援が小型ロボットの思い通りの移動操作性に及ぼす影響

### 6.6.1 検証システム

本節の検証では，機能確認に用いたものと同型の小型移動ロボットを用いた。検証環境を図6.14(a)に示す。動的な移動精度を要するタスクに対応するため，小型移動ロボットの汎用WEBカメラをc525，ロジクール社，横向き配置に変更にして，3Dプリンタにより制作したマウント上に固定した。また，移動ロボットの上面には剛体板で作成した非可動のアームを搭載した。アームは鉛直下向きに鋭角に尖った先端部(作用点)を備える形状であり(図6.14(a)に示すTipの写真を参照)，先端部の位置(各カメラの輻輳点と一致する)がステレオカメラから前方300mm，高さ200mm( $L = 300\text{ mm}$ ， $\phi = 17\text{ deg}$ )となるように固定された。先端部は図6.6上にFingertipとして示しているように，画面上端の水平方向中央領域に常に表示される設定であった。

前述した移動精度を要するタスクに用いるため，ロボットの並進速度は90mm/sに上げ，ワイヤレスコントローラのジョイスティックで前進・後退および旋回の操作が行えるようにした。一般に，並進速度が速くなると操作結果の確認までに情報を処理できる時間的な余裕が少なくなることになり，衝突等のリスクも増加して心理的プレッシャーになる等，その操作およびタスクの少ないトライアルでの成功は困難になると想定される。すなわち，思い通りの移動操作性を低下させていると想定される。

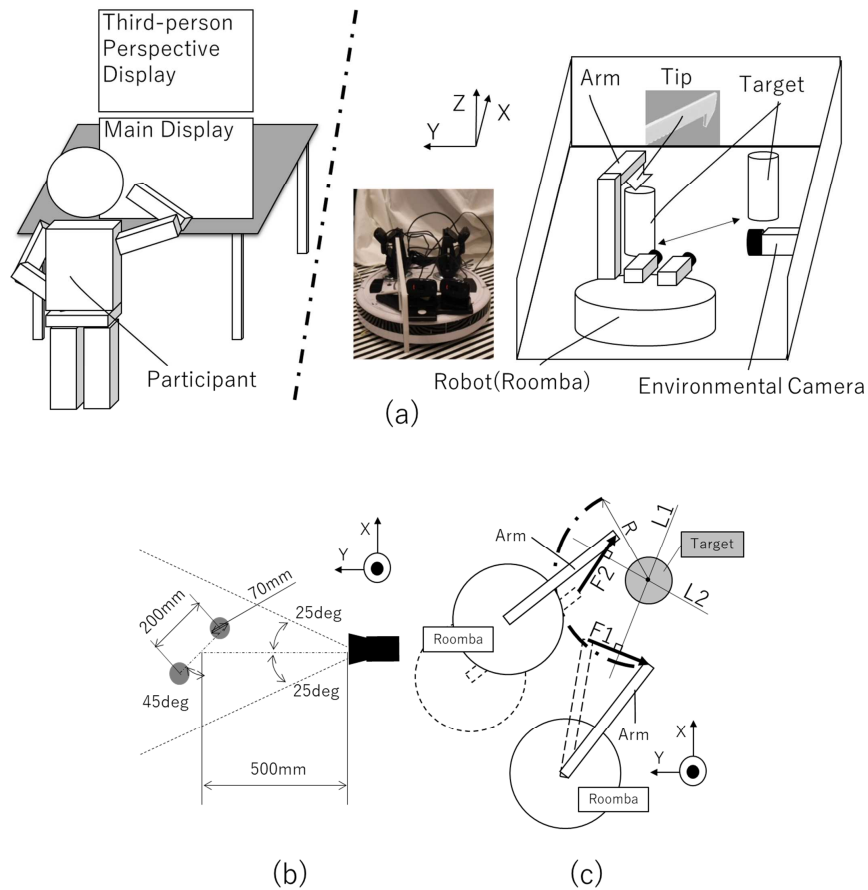


Fig. 6.14 小型ロボットでの検証の説明図

### 6.6.2 移動精度を要するタスク設定

奥行き方向に離間して配置されたターゲット物体のそれぞれに、できるだけ早く・正確にアームの先端部の接触を繰り返すタスクを設定した。遠隔から柔らかい容器を破壊せずに把持(本実験では接触)し、所定の場所まで次々に運搬する作業をシンプルにモデル化したものである。

このタスクで正の予測誤差が発生すると、ターゲット物体にアーム先端部が衝突し、ターゲット物体が転倒する可能性が生じる。

### 6.6.3 検証環境

ターゲット物体には表面が無地で黒色の 500 ml ペットボトル 2 個を用いた。これらの重さは 500g とし、ロボットの正面の方向に 45°で交差する直線上に 200 mm 間隔で配置した。アーム先端部はターゲット物体のキャップ部分(直径 30mm)に点接触する設定とした。

映像に意図しない奥行き情報が含まれないように遠隔空間の周囲を壁面で覆った。実験参加者としてのユーザは 23 型ディスプレイの 700 mm 手前から映像を視認したが、この位置から遠隔空間を直接的には一切視認できなかった。

### 6.6.4 基準手法

仮に奥行き距離誤差を全く認知できなかったとしても、試行を繰り返せばその何割かはタスクに成功する可能性も少なからず考えられる。このような偶然のタスク達成では思い通りの移動操作性の向上が確認できたとはいえないため、これを排除するために比較となる基準手法を設けた。

偶然のタスク達成の確率は、奥行き距離誤差が明瞭かつ直接的に認知できる場合に比べて有意に低いものと想定されたため、複数視点併用系の基準手法(図 6.4)を構築し比較に用いた。基準手法ではメインディスプレイにロボット視点の映像を、上部の同型ディスプレイに固定の同型環境カメラ視点(Y 方向正の向き)の映像を表示した。図 6.14(b)に環境カメラの設定を示す。なお、ステレオマッチングインタフェースを用いた移動精度を要するタスクの実行時にはメインディスプレイのみが用いられ、上部ディスプレイは消灯された。

基準手法では奥行き距離誤差の明瞭かつ直接的な視認が最低限保証されている。このため、少なくともアルゴリズム的な操作を用いることにより、タスクが成功する蓋然性は高い。この成功率と比較することにより、ステレオマッチングインタフェースを用いた場合のタスクの成功が偶然ではないことを示すことができると考えられるが、基準手法との性能の優劣の比較は直ちに行えないことに注意する。基準手法の性能は実装により変動するためである。

### 6.6.5 検証手続き

実験参加者はインフォームド・コンセントの得られた健康な 5 名(30 代 1 名(女性), 40 代 3 名(男性), 50 代 1 名(男性))であった。

事前に奥行き指標のないロボット視点の映像を観察させたが、全員が先端部とターゲット物体との奥行き距離誤差が分からないと回答した。このためシステムの故障等のリスクや、実験参加者の拘束時間の増加等に配慮するため、ロボット視点の映像のみでのタスクは計測対象とはしなかった。

はじめに実験参加者にタスクや操作、各手法の使用方法を教示するため計 5 分間の練習を設けた。ただしタスクそのものには慣れないように(6.8.8(b)), ターゲット物体を計測時とは異なる配置にした。

実験参加者は先端部が手前のターゲット物体に接触した状態から試行を開始する。まず基準手法を用いてロボットを並進・旋回操作し、奥のターゲット物体にアーム先端を接触させ一旦停止させる。接触したら再び手前のターゲット物体に接触させ一旦停止させる。接触の判定は実験者が目視で行い、接触したら直ちに口頭で合図する。以上を 1 往復として、5 往復繰り返す。したがって 1 往復あたり少なくとも 2 回の接触試行が生じる。続いて手法間のカウンターバランスに配慮し、ステレオマッチングインタフェース、ステレオマッチングインタフェース、基準手法の順で各 5 往復(計 20 往復)の操作を行う。なお本タスクではターゲット物体の見え方が並進・旋回操作に応じて常に変化するので、20 往復でタスクに習熟する(修正操作がなくなる)のは困難と考えられる。

本実験では実験心理学分野で一般的な方法を参考に実験参加者にできるだけ早く・正確なタスク遂行を求め、接触試行の成功(失敗)を計測した。失敗はターゲット物体の転倒と定める。この類の失敗は取り返しのつかない場合も多く、回避する必然性が高い。加えて、連続失敗回数が 5 回を超えた場合はタスクを達成できないと判断して、当該手法でのタスクを中止することとした。この基準は前述したロボット視点の映像のみでの予備実験を参考に定めた。

また正確さは操作時間とトレードオフになるので、1 往復毎にラップタイムを計測した。転倒が生じた場合はタスクおよびラップタイム計測を一時停止し、ターゲット物体を再配置して、他方のターゲットへの接触試行を再開させた。さらに、空振りの回数も併せて記録した。空振りの定義は図 6.14(c)に例示するように真上から見たアームの先端部が、ターゲット物体(アームと接

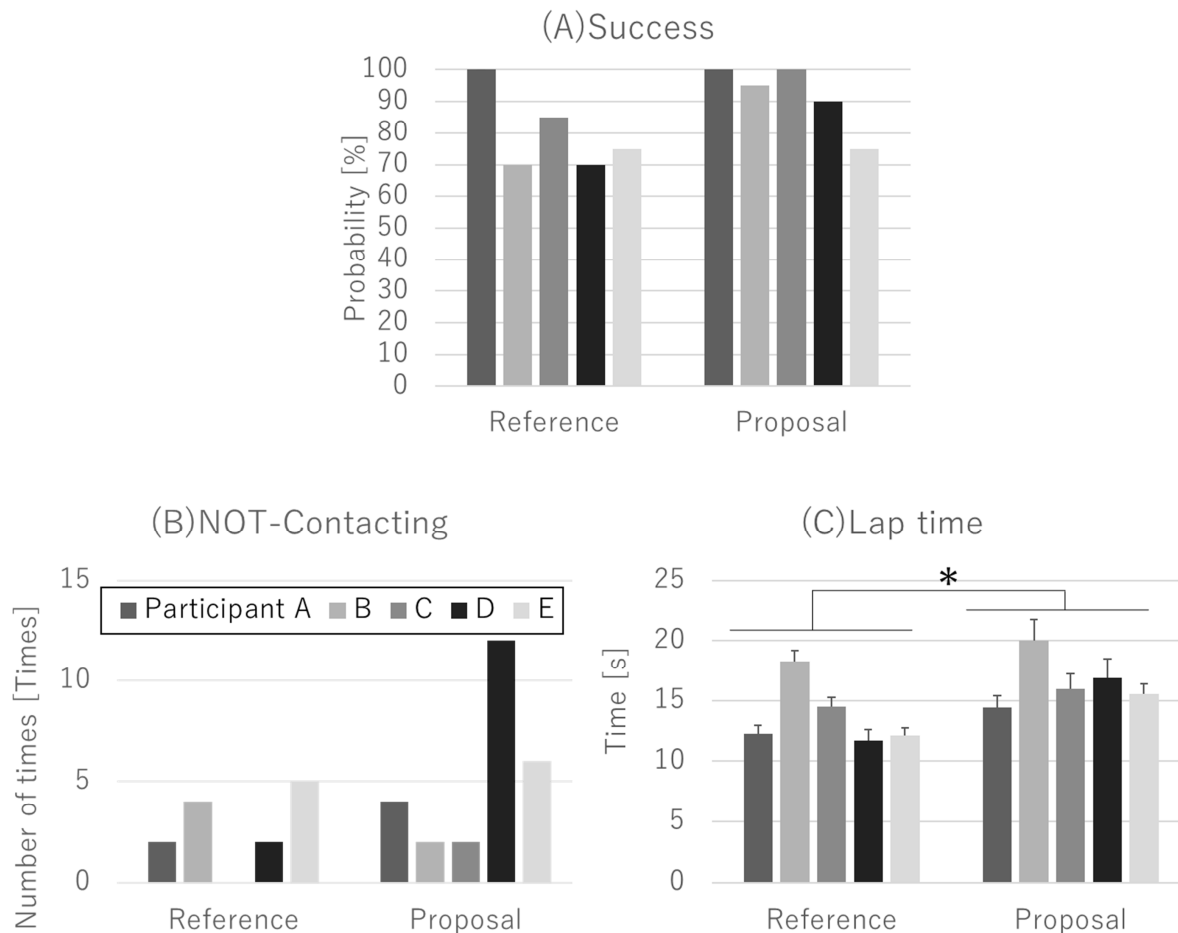


Fig. 6.15 小型ロボットでの検証結果

触するキャップ部分のみグレーで示す)の回転対称軸を中心とする半径  $R = 35 \text{ mm}$  の円(一点鎖線)の内部の領域で、回転対称軸を通り先端部の移動方向と直交する直線(例えば L1, L2)を通過することとした。例えば矢印 F1, F2 は空振り時の先端部の軌跡を示す。しかしながら空振りはアルゴリズム的な操作のやり直しとして出現した可能性も考えられ、失敗の定義には含めなかった。以上の計測値は、データの対応関係を考慮して対応のある t 検定により、全体の手法差に関して解析することとした。有意水準は同様に 0.05 とした。

### 6.6.6 検証結果

ステレオマッチングインタフェースでもタスク中止および大幅なラップタイム増加なしでタスクは達成された。図 6.15(A)は実験参加者別の成功確率を示す。データはいずれも 50%以上を示している。実験参加者 A は実験を通じて失敗をせず、B, C および D は基準手法、E は両手法で成功確率が低かった。成功率の全実験参加者の平均値は基準手法で 80.0%、ステレオマッチングインタフェースで 92.0%となった。

成功率の手法差を解析した結果、有意差は認められず( $p = 0.08 > 0.05$ )、この結果は、ステレオマッチングインタフェースの導入により成功確率が有意に低下するという対立仮説を棄却するものである。すなわち、ロボット視点の映像のみを用いたにもかかわらず、ステレオマッチングインタフェースを用いた移動精度を要するタスク成功は偶然ではないと推定される。

図 6.15(B)は空振り回数を示す。基準手法で平均 2.6 回、ステレオマッチングインタフェースで

平均 5.2 回と差があったが、実験参加者 D のステレオマッチングインタフェースでの空振りの顕著な増加が平均を押し上げていることが平均値の見かけを押し上げているものと推測され、手法間に有意差は認められなかった( $p = 0.08 > 0.05$ )。

図 6.15(C)はラップタイムを示す。いずれの実験参加者もステレオマッチングインタフェースでの増加が見て取れ、平均 2.8 s の増加となり、有意な手法差( $p < 0.001$ )が認められた。ただし 1 回の成功に要する操作時間で比較すると、17.3s から 18.0s のわずかな増加であった。

以上のデータから、1 回の成功に要する時間は基準手法で 17.3 s、ステレオマッチングインタフェースで 18.0 s と見積もられた。

### 6.6.7 考察

本来、主たる映像としてロボット視点のものだけを用いた遠隔移動操作では、ターゲット物体との接触を含むような高精度の奥行き認知が必要なタスクを実行できない。そのため、基準手法として採用した複数視点併用系の手法が実用されていることはこれまで繰り返し述べてきた。

ステレオマッチングインタフェースではロボット視点の映像のみを用いた。それにもかかわらず、基準手法に対してそんな確率で移動精度を要するタスクを成功できたと十分に評価できる結果を得た。したがって、ステレオマッチングインタフェースによる予測の支援は、最低限の思い通りの移動操作性の獲得に寄与しているものと考えられる。

一方でラップタイム増加の要因の一つは空振りの増加と考えられる。ただし、明確な空振りの増加は一人の実験参加者に限られた。別の要因として、ステレオマッチングインタフェースではわずかな奥行き距離誤差が最大 1 pixel 単位で認知できるので、微調整を含むアルゴリズム的で慎重な操作モードが支配的であった可能性が考えられる。心理学の分野では一般的に、反応時間の増加は心的処理に係る時間の増加と解釈される。これをより直感的なヒューリスティックな操作モードに移行させていくことが、今後の課題と考えられる。逆に、奥行き距離誤差を明瞭に視覚フィードバックできることが操作の習熟の効率化(コンパレータモデルにおいては予測に資する順モデルの学習)に寄与する可能性も考えられる。ステレオマッチングインタフェースを用いた場合のタスクの効率の経時変化は興味ある検討課題である。

## 6.7 予測支援が建設機械の思い通りの移動操作性に及ぼす影響

他の環境およびシステムも考慮した思い通りの移動操作性の評価のため、ステレオマッチングインタフェースの応用が期待できる建設機械の手先移動に関し、移動精度を要するタスクの成功率の検証を実施した。建設機械は動作範囲が広く、手先が高さ方向にも動く点で 6.6 節のロボットとは性質が大きく異なるものと考えられる。

### 6.7.1 検証システム・タスク設定・検証環境

以下、6.6 節(ロボット)の実験と同様の部分の説明は省略し、相違する部分を説明する。

図 6.16(c)に実験環境を示す。本実験では建設機械として、手先のバケットを、図 6.16(e)に示すブレーカに変更した小型の油圧ショベル(305ECR, 日本キャタピラー社)を用いた。ブレーカは尖った先端を有し、主に岩盤やコンクリート等の粉砕に用いられるエンドエフェクタである。

ショベルは、図 6.16(a)に示すコーワテック社製のアクティブロボ SAM(小松, 2017)を介し、遠隔から専用コントローラで遠隔操作できる構成とした。



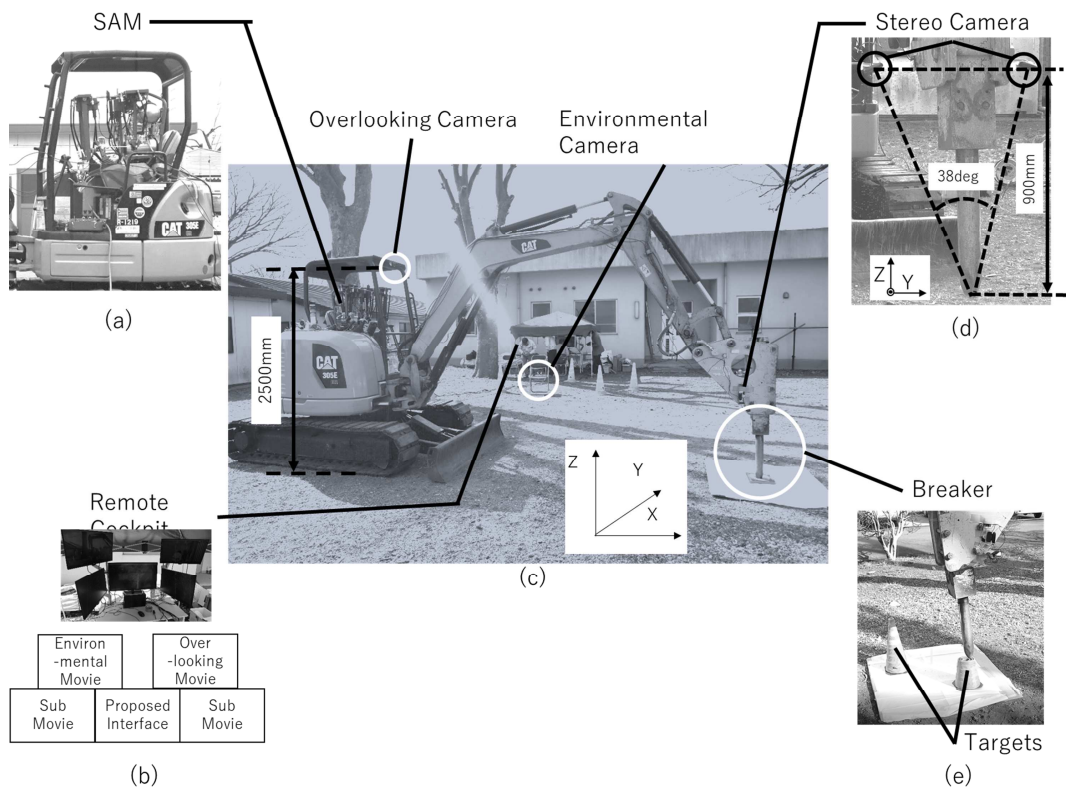


Fig. 6.16 建設機械での検証環境

すべてのカメラは6.6節(ロボット)の実験と同一で、メインカメラおよび指標カメラは図6.16(d)に示すように、ブレイカの先端部近傍に輻輳点がブレイカの先端と一致するように固定した(手先カメラ構成)。固定には、マグネットおよび3Dプリンタで設計した専用治具を用いた。さらに、安全を確保するためブレイカ近傍にサブカメラを追加するとともに、常時3名の実験補助者を配備した。

ターゲット物体には図10(e)に示すようにそれぞれ高さの異なるカラーコーン(250×250×200 or 450 mm, 赤色)を600 mm 間隔で配置した。

実験参加者としてのユーザは、7 m 離れたテント内に設営された遠隔サイトのコックピットでショベルに背を向けてディスプレイ(図10(b))を観察した。実験参加者の背後には幕が垂らされ、タスク中の現地サイトの直接的な視認を妨げた。

## 6.7.2 基準手法

6.6節(ロボット)の実験と同様、複数視点併用系の基準手法を構築した。

主たる映像を撮像する主カメラは、建設機械の遠隔操作において一般的な俯角カメラとし、コックピット天面(地上から2500 mm)に固定した。また、追加の環境カメラをブレイカの可動範囲を十分に避けることができる位置であって、ターゲット物体およびブレイカがY軸方向から観察可能なターゲット物体から5 m 離れた位置に設置した。これらの映像はメインディスプレイ上部のディスプレイに表示された(図10(b))。なお本実験ではさらなる安全の確保のため、環境カメラおよび左右のサブカメラ(メインディスプレイの左右に表示)からの映像を常に表示した。

## 6.7.3 検証手続き

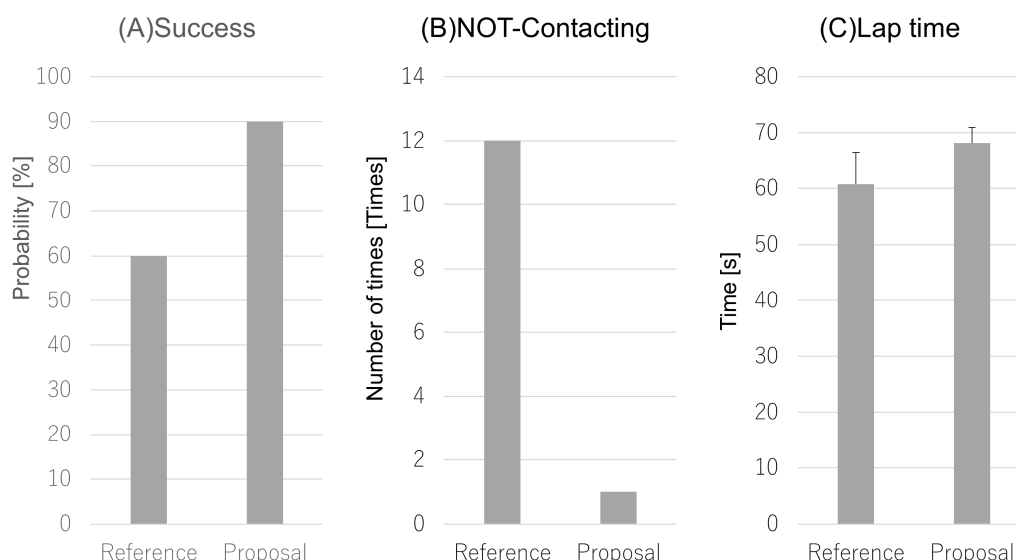


Fig. 6.17 建設機械での検証結果

実験参加者はインフォームド・コンセントの得られた健康な 40 代男性 1 名で、SAM を介した油圧ショベルの遠隔操作に関して 3 年の経験を有しておりコントローラの操作に十分習熟していたため、実験の安全面も配慮の上で選定された。

Z 軸方向の位置合わせを行わせるため、実験参加者にはブレーカでカラーコーンの先端(天面)を狙うように指示した。また油圧ショベル自身の駆動系の操作を許さず、アームおよびブレーカのみを移動させた。アームやブレーカの移動は制限しなかった。

安全のため練習時間は十分に確保した。また、実験参加者の体調を考慮し、練習後、各試行の間にはそれぞれ十分な休憩を設け、本検証では全体通して 1 時間以内に完了するように計画された。本検証では、各手法 10 往復、計 20 往復のデータを取得できた。

事前の検討において、ターゲット物体の高さ方向への潰れが発生することが分かったため、本実験では転倒と同様に失敗として扱った。実験参加者は 1 名のため、全体の統計的な解析は実施しなかった。

#### 6.7.4 検証結果

ステレオマッチングインタフェースでもタスク中止および大幅なラップタイム増加なしでタスクは達成された。図 6.17(A)に示す成功確率は基準手法で 60.0%，ステレオマッチングインタフェースで 90.0%だった。

ステレオマッチングインタフェースを用いた場合と基準手法とでは被写体サイズが大きく異なるため性能は比較できないが、基準手法は 6.6 節のものと同様に少なくとも奥行き距離誤差の明瞭かつ直接的な認知が保証される手法である。したがって、ステレオマッチングインタフェースを用いた場合での移動精度を要するタスクの成功は、偶然ではないと推定される。

図 6.17(B)に示す空振り回数は基準手法で 12 回に対し、ステレオマッチングインタフェースでは 1 回のみだった。

図 6.17(C)に示すラップタイムは、同様にステレオマッチングインタフェースで平均 7.5 s 増加した。ただし 1 回の成功に要する操作時間で比較すると、151.8s から 75.8s に大幅低下した。

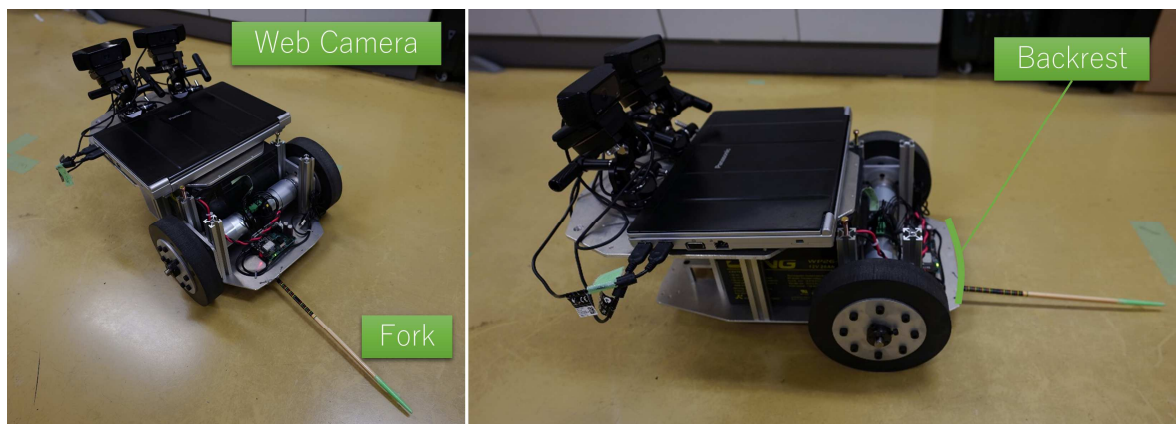


Fig. 6.18 検証に用いた遠隔操作型の移動システム

First person perspective (FPP)

Stereo matching interface (SMI)

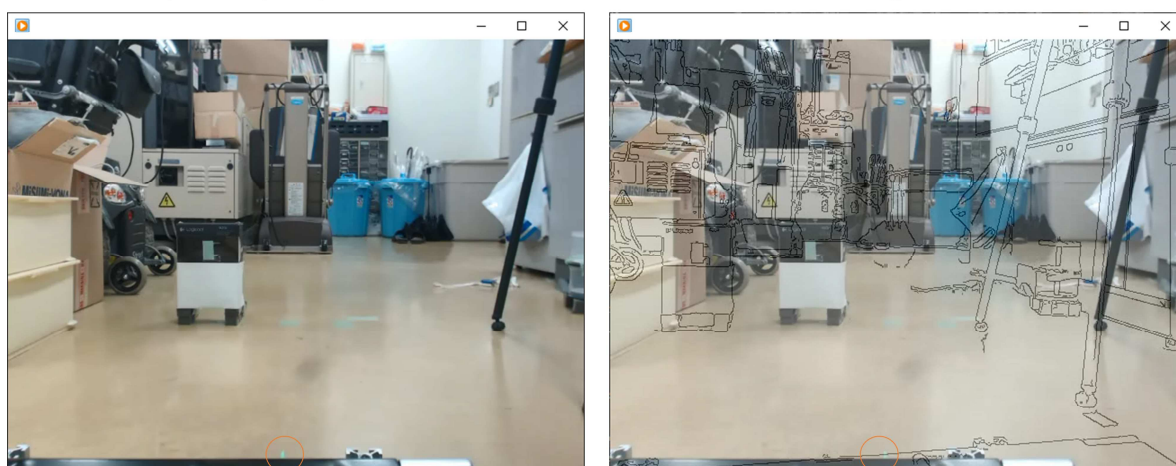


Fig. 6.19 検証に用いたインターフェース.

### 6.7.5 考察

6.6 節と同様に，ステレオマッチングインターフェースではロボット視点の映像のみを用いたにもかかわらず，基準手法に対してそんな確率で移動精度を要するタスクを成功できたと十分に評価できる結果を得た．したがって，ステレオマッチングインターフェースによる予測の支援は，最低限の思い通りの移動操作性の獲得に寄与しているものと考えられる．また同じく同様にラップタイムは増加しており，アルゴリズム的で慎重な操作モードが支配的だったものと推定される．ただし，ステレオマッチングインターフェースは1成功あたりに要する時間を大きく減らせており，時間的な要素と精度の要素との複合指標である思い通りの移動操作性の向上(1章)に総合的に貢献していることが示された．また空振りを大きく減少させることができ，この観点でも思い通りの移動操作性の向上への一定の貢献が示唆された．

## 6.8 予測支援による思い通りの移動操作性向上に関する検証および考察

6.6 節，6.7 節ではそれぞれ異なるシステムにおいて，ステレオマッチングインターフェースによる予測の支援が，移動精度を要するタスクを既存の手法とそんな達成できることを示した．この結果は，ステレオマッチングインターフェースにより，最低限の思い通りの移動操作性が得ら

れたことを示している。

本節ではさらに、ステレオマッチングインタフェースによる予測の支援が思い通りの移動操作性の向上に資する効果をさらに普遍的に示すため、第二段階として、ステレオマッチングインタフェースの導入によりどの程度の「より少ないやり直しあるいは操作時間でより良い移動の精度を得る」ことができるか、新たなシステムおよびタスクにより移動途中の停止回数および移動操作時間の評価指標を追加して定量的な計測を行った。

### 6.8.1 検証システム

検証に用いた遠隔操作型の移動システムを図 6.18 に示す。システムの基盤として、これまでよりも若干大型で、移動出力が大きい移動ロボット(メガローバーVer2.1, ヴインストン社)を用いた。本検証では、並進速度 300 mm / s とかなり高速域での移動について検討した。

移動ロボットの最前部には細長い棒を、ロボットから 250mm 突き出すように固定した。後述するが、本システムは当事者等が操作することを想定し、当事者等も入居する介護現場等での介護士の助手としての業務を支援するコンセプトで開発を進めているフォークリフト型の社会参加支援システムのプロトタイプである。この細長い棒は、そのフォークに相当する機能を担当する構造である。以下、これを単にフォークと称する。

移動ロボットの天面の前進方向に向かって最後部の領域には、それぞれ 3 自由度の高精度自由雲台を固定した。各雲台にはそれぞれ UVC カメラ(C920r, ロジクール社)が固定された。この設計により、これらのカメラが構成するステレオカメラユニットのパラメータ調整が高精度かつ容易となっている。本検証では、輻輳点はフォーク部分を除いた移動ロボットの最前面から 10mm 先の床面に垂直な平面上の、フォークの直上部分に配置されるように設定した。

天面には他に、ノート PC を搭載した。当該ノート PC は各カメラと有線接続(USB 3.0)され、各映像を画像処理してステレオマッチングインタフェースを表示する。このノート PC は遠隔サイトのコックピットに配置された PC と無線接続(IEEE802.11ac)され、遠隔サイトの PC のディスプレイには現地サイトのノート PC の表示画面が OS のリモートデスクトップ機能により表示されるようになっている。本検証では、通信遅延の影響をなるべく抑えるため映像の解像度は 640×480 ピクセル(遠隔サイトのディスプレイでの表示サイズ 200mm×150mm)、フレームレートは 30fps とした。実測の結果、本構成での表示遅延は最大で 0.2 s であった。

移動操作信号は、汎用無線コントローラ(Bluetooth)から前進・後退・旋回(いずれも定速)の信号が移動ロボットに搭載されたボードコンピュータに入力される構成とした。

実際の操作画面および検証環境を図 6.19 に示す。

### 6.8.2 移動精度を要するタスク設定

検証タスクとして、フォークリフト型の遠隔操作型移動システムを用い、パレット上に置かれたターゲット物体を運搬する作業のうち、フォークをパレットに差し込む部分を用いた。

ターゲット物体としては、パレットに相当するフォーク部分の通過できる十分な隙間(100mm)を設けた足部を備えた 2 物体を用いた。これらを図 6.20 に示す。一方は幅 150mm の箱形状、他方は直径 140mm の円筒形状であった。

ステレオマッチングインタフェースの原理上、ターゲット物体の表面の模様等のエッジ情報は極めて重要になる。しかしながら、意図しない情報の活用による習熟を予防するためターゲット物体のネイティブな模様等はマスクし、幅 20mm のテープ(図 6.20 の緑部あるいは茶部)を模様の



Fig. 6.20 検証に用いたターゲット物体

代替として添付した。したがって、マスクによる情報量の低下そのものは思い通りの移動操作性の向上の観点からは不利にはたらく。また、特に円筒形状のターゲット物体に関しては、模様等の位置が誤差を生じさせる可能性があり(6.9節)、本検証のように予め最も手前側にある部分を強調する等の実用上の工夫が必要となる可能性があり、実用上の課題である。

また、ターゲット物体に接近するにしたがって、パレットの部分は表示画角から外れ、注視できない設定となっていた。これは本稿では検討しない課題であるが、遠隔操作型のシステムでは、現地側のロボット自身のサイズに関する感覚(自動車の運転でいうところの車幅感覚)が希薄となるため、ロボット自身のなるべく多くの部分をロボット視点の映像内に収めるべく、WEBカメラをロボットの後部に配置したことがその一因である。図 6.19 に示されるように、この対策によってもロボット自身の像の映り込みはわずかでありその幅が確認できる程度である。より上下方向に広画角のカメラの採用や、あえて高さのある構造をロボットの前方に配置する設計上の工夫が考えられ、実用上のその他の課題とのトレードオフを踏まえた検討が必要である。ステレオカメラユニットの最適配置については後の章で検討を加えるものの、車幅感覚の観点でも実用上の課題となる。なお 5 章では三人称視点のひとつである俯瞰視点を採用する場合とのトレードオフ関係について論じたが、本稿の研究の定義では、ロボット自身の全身の像が含まれないものをロボット視点の映像と定義していることに注意する。すなわち、本構成はロボット視点の映像のみを用いるとするステレオマッチングインタフェースの機能要件を満たす。パレットが見えないと、パレットがターゲット物体よりも手前に突き出していた場合に衝突のリスクが高まるので、そうならないような事前のパレット配置等の現場での工夫や、パレット部分を逃げるような形状のロボットを設計する工夫が求められ、今後の課題である。

フォークの先端は、図 16.9 に示すように、画面の下部(丸で強調している部分)に表示されている。この条件は本タスクにおいては重用であり、後述する表示倍率の条件によらず満足されている。

また本タスクの実行に際して、ユーザとしての実験参加者には事前に応用場面の想定に基づいた本タスクの条件を説明している。

- i) なるべく早く正確にフォークをパレットに差し込むこと。
- ii) 安全な運搬が困難となるため、ロボットのフォークを除いた最前面(フォークリフトにおいてはバックレストと呼ばれる部分)に荷物としてのターゲット物体を接触させること。



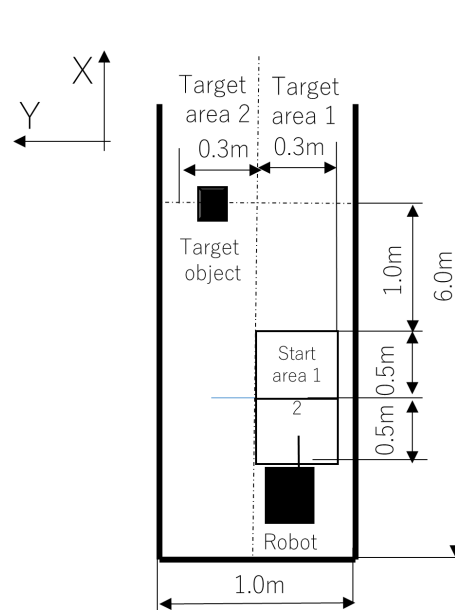


Fig. 6.21 検証に用いた現地サイト環境設定の模式図

iii) 同時に、荷物や現地サイトの環境に傷をつける可能性があるため、ターゲット物体を押し込まないこと。

これらは本コンセプトのシステムの運用上、必要な想定であるが、ユーザに慎重な操作をさせる心理的なバイアスとしてはたらくと考えられ、思い通りの移動操作性の向上の観点では不利な条件となる。

また、本コンセプトでは固定の環境カメラや俯瞰カメラを用いることができない想定で開発を進めている。第一の理由は、俯角での撮影では死角の頻繁な発生が想定されるためである。フォークリフトを用いてパレット上に置かれたターゲット物体を運搬する作業のニーズとして天板のある棚へのアクセスがあげられている。また、ピックプレースする場所が変動するような現地サイトの介護者や介護利用者の行き交う環境での様々な目的での作業を当事者等の経験等に基づく観点で機転を利かせて担えることが、当事者等の遠隔参加の動機(自己効力感)や、介護者の支援に繋がると考えている。第二の理由はプライバシー保護上の観点であり、常設の固定カメラは心理的な障壁も大きいためである。実用上、これらのカメラが必要となる場面は十分に想定されるが、現状のシステムは機能要件の定義の段階にあり、プロトタイプではこれらなるべく用いずに運用できる可能性を模索している。

### 6.8.3 検証環境

実験参加者としてのユーザはタスクが実行される環境(現地サイト)と壁面で隔てられたスペース(遠隔サイト)のコックピットで、移動ロボットの遠隔操作を実行した。このため、移動ロボットを直接目視することは一切できなかった。

図 6.21 に示すように現地サイトでは幅(Y方向)1m, 奥行き(X方向)6m の移動可能な空間(図 6.19 も参照のこと)が確保された。ターゲット物体は、その奥行き方向中央の領域に配置された。

### 6.8.4 基準手法

本検証では、ロボット視点の映像のみを用いる手法(以下、一人称視点という意味で FPP 条件と称する)を基準とし、ロボット視点の映像のみを用いる場合の予測支援手法であるステレオマッ

チングインタフェース(以下、SMI 条件と称する)の導入による思い通りの移動操作性の向上効果を検証する。

FPP 条件は操作に際して心的回転を要しない等、直感性が高く、ヒトの移動に関する内部モデルを活用したヒューリスティックな操作ができる余地があるといったユーザビリティ面の利得や、主体感、コミュニケーションへのシームレスな移行等のような感性的品質面での利得が大きい。これに対して、自己位置の予測が困難であり、移動操作の結果の確認に時間を要したり、確認が十分にできずに移動の誤差が残ったりする懸念がある(1 章他)。上述のように環境カメラの使用が困難である想定のため三人称視点を併用する手法との比較は今後の課題であるが、本タスクのように移動の精度を要するタスクにおいては、6.6 節や 6.7 節で計測したラップタイムの結果から、少なくとも本稿で定義したような効率をはじめとするユーザビリティの側面を重視した思い通りの操作性の指標においては、主に直感性に関する指標に大きな差が生じない可能性が考えられ、将来的には主に感性的品質の観点からの比較も重要となると考えられる。比較対象は主観的なデータとなるため、さらに慎重な実験設計や測定手法の選定が今後の重要な課題となる。

### 6.8.5 検証条件

本検証においては主にタスクへの習熟を避ける目的で、ターゲット位置およびタスク開始位置のランダム化(大きく 2 水準)、ターゲット物体(2 水準)の他、4 章および 5 章で予測誤差に悪影響を及ぼす影響を明らかにしてきた表示倍率の条件(0.8 倍、1.0 倍(基準: ネイティブな映像)、1.2 倍の 3 水準)を設けた。

図 6.21 を再び参照しながらターゲット位置およびタスク開始位置のランダム化条件について説明する。はじめにターゲット物体の配置を Y 方向にランダム化するため、予めターゲット領域を設定し、その範囲内でターゲット物体をランダムに配置することとした。ターゲット領域は 2 分割されており、ターゲット領域 1 は Y 方向中央から正の側に 0.3m まで、ターゲット領域 2 は Y 方向中央から負の側に 0.3m までとした。また、図 6.21 に示すように移動ロボットのタスク開始位置(フォーク先端を基準とする)をランダム化するため、同じく予めタスク開始領域を設定し、その範囲内でタスク開始位置をランダムに決めることとした。タスク開始領域が 2 に分割されていることも同様で、タスク開始領域 1 はターゲット物体から X 方向負の側に 1.0m~1.5m まで、Y 方向中央から負の側に 0.3m までとした。タスク開始領域 2 は、ターゲット物体から X 方向負の側に 1.5m~2.0m まで、幅方向中央から右側に 0.3m までとした。

これらに割り振られた領域番号(1, 2)はさらに、タスク毎にランダムな順で指定された。領域番号 1 が指定された場合は、ターゲット領域 1 にランダムに配置されたターゲット物体に対して、タスク開始領域 1 内のランダムな位置からタスクを開始した。領域番号 2 が指定された場合は、ターゲット領域 2 とタスク開始領域 2 内のランダムな位置を用いて同様にタスクを開始した。図 6.21 は領域番号 2 でのタスク開始直前の状態の一例を示しているが、この条件ではタスク完了までに、領域番号 1 の条件に比べて相対的に大きく Y 方向への移動操作が必要となる。この意味で、ターゲット位置およびタスク開始位置のランダム化条件は大きく 2 水準を有する条件となっている。

また表示倍率の条件は、4 章および 5 章で得られた知見に基づいて設定された。すなわち、操作中のズームイン・ズームアウトの機能は便利で一般的であるが、ターゲット位置の認知との予測との間に乖離を生じさせる可能性がある。表示倍率はソフトウェア的なデジタルズームにより実装し、いずれの倍率でもフォーク先端が見えるようにトリミング範囲を調整した。

本検証では習熟を避ける目的で、手法条件(FPP 条件, SMI 条件の 2 水準)と合わせて、全 24 通りの条件の組み合わせをランダムな順で適用し、実験参加者のタスクを評価した。また同様の目的で、カウンターバランスにも考慮した。すなわち、全 24 通りの組み合わせ条件下でのタスクが終了したのち、試行を逆の順番で再実施した。したがって、実験参加者は全 48 試行のタスクを実行すると、すべての組み合わせ条件でのタスクを 2 度ずつ実行する設計となっていた。本検証では実験参加者の生理的リスクに配慮し操作時間の制限を 1 時間とした。この中で可能な限り試行を繰り返させ、48 試行を超えた場合は別のテーブルに移行させることとした。

### 6.8.6 データ処理

本検証では思い通りの移動操作性の向上の定義に基づいて下記指標を計測し、手法条件間でウェルチの t 検定を行うこととした。

- I) 移動操作の誤差：ターゲット物体と移動ロボットの最先端部(バックレスト)との最短距離
- II) 移動途中の停止回数：移動操作の結果の確認の発生が客観的に現れる指標と考えられる。計測開始時の停止と、最終的な停止を含まない。
- III) 移動操作時間
- IV) 平均移動速度
- V) タスクの失敗：上で定義した通り。

本稿ではタスク終盤に着目し、フォーク先端が完全にパレット内に侵入した後の停止(停止回数には計上しない)を計測開始点、実験参加者の口頭でのタスク完了の合図までを計測完了点と定めた。ターゲット物体を 10mm 以上押し込んだ場合(フォークとパレットが接触した場合も含む：典型的にはパレットの空間に対してフォークが斜めに侵入する等)は、上述した条件 iii に反するため、失敗と判定することとした(指標 V)。これに対して条件 ii に関しては指標 I の移動操作の誤差として計測した。リフトアップや旋回の段階での失敗に繋がる恐れがあるためである。

指標 I の移動操作の誤差、および指標 V のタスクの失敗が、思い通りの移動操作性の向上の定義における「より良い移動の精度を得る」の評価に関連する。指標 II の移動途中の停止回数、指標 III の移動時間、あるいは指標 IV の平均移動速度はヒューリスティック的な操作モードへの移行の手掛かりになると考えられ、直感性に関する「より少ないやり直し、あるいは操作時間」の評価に関連する。

### 6.8.7 検証実験手続き

実験参加者はインフォームド・コンセントの得られた健康な 4 名(20 代 2 名(女性), 40 代 2 名(男性, 女性)であった(健常者)。実験参加者は、事前に目視でのロボットの操作の練習(5 分程度)、ステレオマッチングインタフェースの使い方およびタスクの説明受け、前述した本タスクの応用場面の想定とデモンストレーションの目視観察、本実験とは別の条件での各インタフェースでの操作(1 回ずつ)を行った。なお、結果の数値的なフィードバックは事前にも検証中にも一切与えなかった。

実験者の合図の後、実験参加者はタスクを開始し、タスクが完了したと判断したら直ちに口頭で合図をすることを求められた。タスク完了の判断(移動操作結果の確認)も、本稿で想定する思い通りの移動操作性を阻害する誤差要因であり(2 章を参照のこと)、上述の本タスクの応用場面の想定を除いて実験参加者に委ねたものである。このため、実験参加者にはバックレストとターゲット



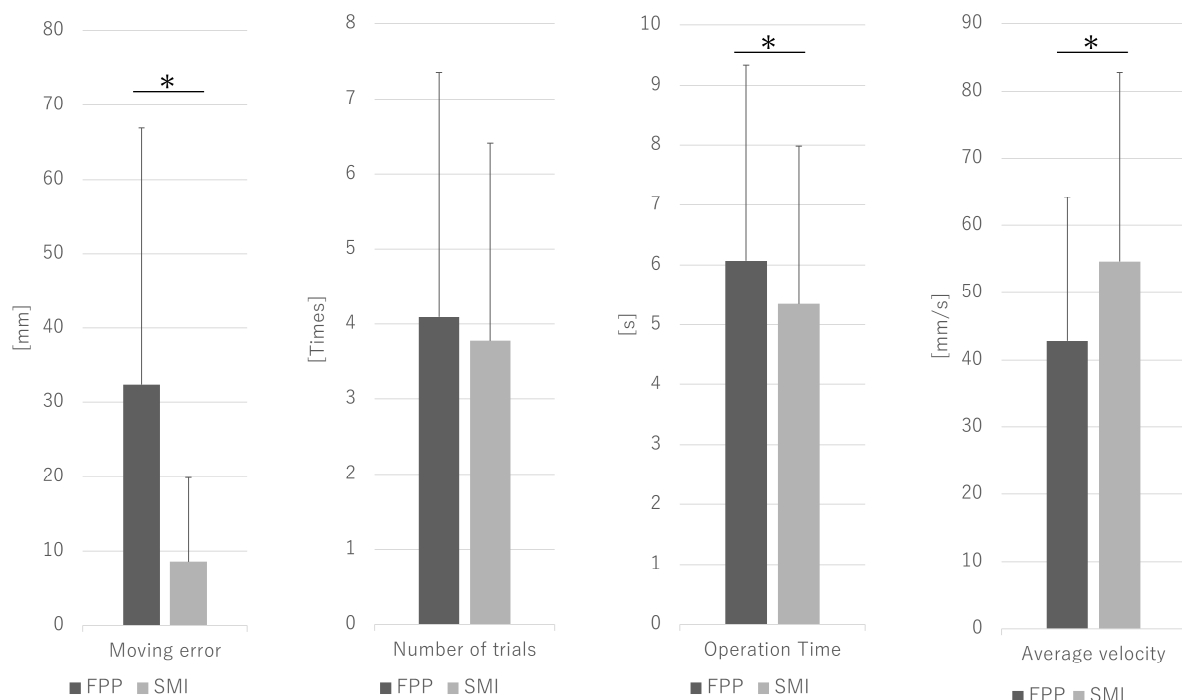


Fig. 6.22 思い通りの移動操作性の向上に関連する指標の計測結果

ト物体との接触の確認までをタスクとして課したことになる。

前述のように、本検証では実験参加者の生理的リスク等に配慮し操作時間の制限を1時間とした。実験参加者はこの制限内でタスクを繰り返した。ただしタスクの間には実験条件設定等のため、最大30s程度のインターバルがあった。

ロボットの移動は検証を通じて俯瞰カメラおよびステレオカメラユニットを通じて録画・録音されており、実験完了後に各試行でのデータを計測した。

## 6.8.8 検証結果および考察

### (a) 思い通りの移動操作性の向上に関連する指標

本検証では、全169のタスクを計測できた。このうち(指標V)タスクの失敗について、16タスク(FPP条件で10, SMI条件で6)で計測された。失敗率は6.6節で行ったタスクにおける3人称視点を併用する手法を用いる場合のよりもかなり小さく、本タスクの応用場面の想定における心理的なバイアスの影響が少なからず生じたものと考えられる。

以下、本タスクの範疇では明確には失敗とは判断できない、残りの153タスクに関する結果について述べる。図6.22に(指標D)移動操作の誤差、(指標II)移動途中の停止回数、(指標III)移動操作時間、(指標IV)平均移動速度の平均値±SD(標準偏差)を示す。検証の目的であるFPP条件とSMI条件との差に着目するため、これらの手法条件別で整理されている。

移動操作の誤差はFPP条件では $32.3 \pm 3.7$  mmとなった。さらにその最大値は130 mmに及び、このことはフォークの半分もパレットに差し込まれていないことを意味している。この主因は、本章でも指摘しているように移動操作結果の確認が困難となるためであると考えられる。

これに対してSMI条件では $8.6 \pm 1.2$  mm, 最大値40mmとなった。手法条件間には有意差が認められ( $p = 2.5 \times 10^{-8} < 0.05$ ), SMI条件の導入によって移動操作の誤差が有意に低減されたと考

えられる。

操作のやり直しの回数は、FPP 条件で  $4.1 \pm 0.4$  回、SMI 条件で  $3.8 \pm 0.3$  回となり、手法条件間には有意差は認められなかった ( $p = 0.48 > 0.05$ )。実験参加者は FPP 条件下でも、ある程度の安定したタスク完了の判断基準を獲得していたことが示唆される。例えば、FPP 条件下でも奥行きに関する(相対的)高さの手がかり等は認知可能である。しかしながら高さの手掛かりは、少なくとも表示倍率の条件により変化するため、この影響を実験参加者が知覚・認知できなかったことが移動操作の誤差の影響したものと考えられる。このように FPP 条件下では遠隔環境の見え方(遠隔環境やデバイス等に応じて容易に変化し得る)に応じて認知が困難な影響が生じ得るところ、SMI 条件下では少なくともスケール感の変動(表示倍率の変化)に対してに対してロバストな手掛かりを明確に表現できたため、移動操作の精度が向上した結果が得られたと考えられる。また SMI 条件下では上で考察したように、ピクセル単位での移動操作の調整が可能であるから、移動操作の誤差を最小限に抑えるための細かい調整に起因する操作のやり直しの増加は想定されていた。しかしながら、SMI 条件下での操作のやり直しは、FPP 条件下でのものに比較して有意に増加しなかった。

移動操作時間の指標に対しては、FPP 条件下で  $6.1 \pm 0.3s$ 、SMI 条件下で  $5.3 \pm 0.3s$  であり、SMI 条件の導入による有意な低下が認められた ( $p = 0.04 < 0.05$ )。これは、FPP 条件下で想定される操作結果の確認の困難性に起因するものと推定される。SMI 条件下では上で考察したように、ピクセル単位での移動操作の調整が可能であるから、移動操作の誤差を最小限に抑えるための細かい調整に起因する移動操作時間の増加が想定されていた。したがって、SMI 条件下での精密な移動操作の誘発よりも、FPP 条件下での移動操作結果の確認の方が、最終的な移動操作時間の増加に及ぼす影響が大きかった可能性が考えられる。

更にダイナミックな指標として、フォーク部がパレット部に挿入されてからの、タスクの完了間際の平均速度を比較したところ、SMI で平均  $11.8 \text{ mm/s}$  早い有意な結果を得た ( $p = 0.002 < 0.05$ )。この指標も、操作が慎重になる(すなわちアルゴリズム的に慎重な操作結果の確認を要する)タスクの最終盤でも、予測に基づいた効率的な操作を支援できたことを示唆している。

本節でも個人差について検討を加える。図 6.23 に各実験参加者別の検証結果を示す。

個人の性質や経験等に起因すると思われる個人差は生じていることが見受けられ、例えば実験参加者 D は操作を慎重に行い(移動途中の停止回数、移動操作時間ともに大きい)、高い精度で移動を実現していることが見て取れる。ヒアリングしたところ、実験参加者 D はいずれの条件でも、接触の直前では接触が生じたことが確認できるまで、非常に短い間隔での停止を細かく繰り返す操作を行っていたと回答した。このアルゴリズム的な操作方略であれば、ターゲット物体を押し込むことを避けることができた(条件 iii)。なお残りの実験参加者からは、前述した高さの手掛かりに関連する情報を活用した操作を行っていた旨の回答を得た。

しかしながら図 6.22 に認められる傾向は、全実験参加者に共通していることが確認できる。アルゴリズム的な操作モードを採用していた実験参加者 D においても、SMI 条件下でヒューリスティック的な操作モードへの移行を示唆すると考えられた移動中の停止回数あるいは移動操作時間の各指標の低減が認められたのは、上述のアルゴリズム的な操作モードを開始する接触の直前に至るまでの移動(粗調整)が、SMI 条件によって支援されたためと考えられる。この効果も思い通り移動操作性の向上への寄与を指示するものである。

したがって以上の結果は、FPP 条件に対し、SMI 条件の適用で、思い通りの移動操作性の向上を客観的に支持している。

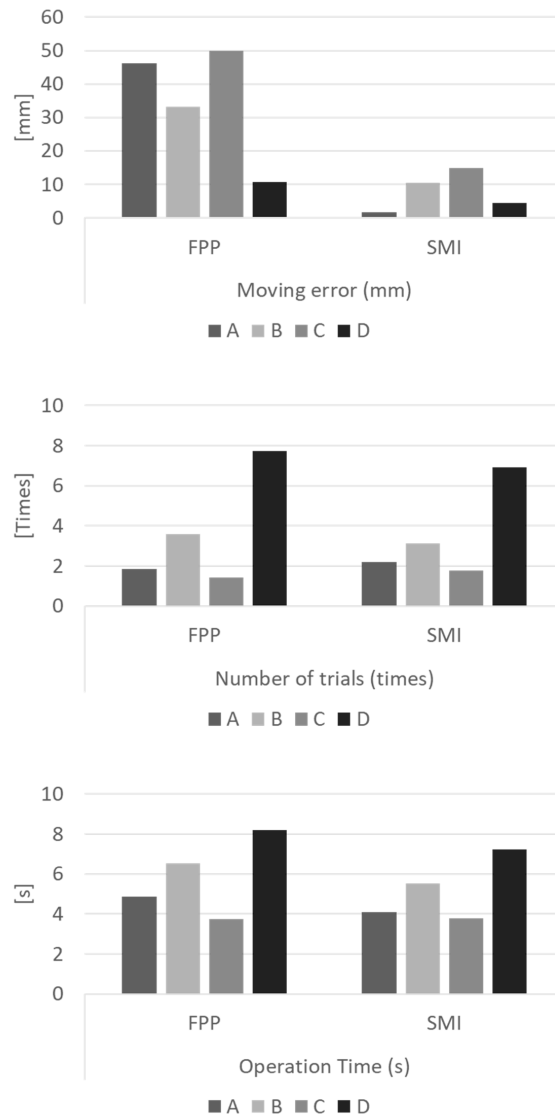


Fig. 6.23 実験参加者別の思い通り移動操作性の向上の検証結果

### (b) 習熟の指標

本研究の最終目標の一つは訓練(習熟)なく思い通りの移動操作性を向上させることであり、本検証では実験的な環境が予測に対する習熟の影響を抑えるために、5章までの検討で明らかになった操作実行時の映像の拡大・縮小等、実際の遠隔移動体験で予測を困難にする影響を及ぼすと想定された条件を試行毎にランダムな順で切り替えたり、カウンターバランス法により順序効果を低減したりする工夫を施した。図 6.24 には、タスクの前半と後半との移動操作の誤差の平均値  $\pm$ SE の比較を示す。

FPP 条件では試行回数が浅い前半では各指標の値の拡大傾向が見受けられるが、検証では移動精度を要するタスクの訓練を FPP・SMI 両条件下で 1 度しか実行させなかったことに起因して初回近傍の評価指標の値は大きく、操作結果の確認の方略が定まるまでに時間を要した可能性がある。しかしながら、後半に至っても試行毎のばらつきは依然大きい。参考に FPP ウェルチの t 検定を行った結果、タスクの前後半でも精度に有意差は認められなかった( $p = 0.16 > 0.05$ )。SMI 条件でも同様に、精度に有意差は認められなかった( $p = 0.50 > 0.05$ )。これは指標の経時変化から

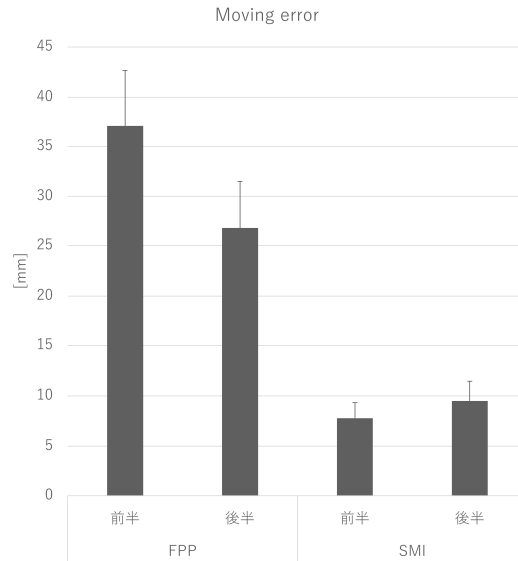


Fig. 6.24 タスクの前半と後半との移動操作の誤差

は習熟の影響を無視できるデータが得られたことを示唆している。

SMI 条件下では操作結果の確認方法は相対的に明確で、現地サイトの情報に関する条件変動に対してもロバストであることから、各指標のばらつきが小さくなっているものと考えられる。ばらつきを小さくする特性は習熟を容易化に寄与する可能性も考えられる。ステレオマッチングインタフェースの応用上の利用価値を高めることに繋がるため、今後の検討課題である。

### (c) 考察

2 章で述べたように、本稿の研究では思い通りの移動操作性を阻害する情報処理の誤差の要因を、少なくとも 5 要因に整理した。そして本検証では、上述した種々の条件により、様々な環境において利用される様々な遠隔操作型の移動システムによって生じ得る、思い通りの移動操作性の低い体験を実験的に再現した。

具体的には、FFP 条件下の遠隔移動操作において生じる思い通りの移動操作性を阻害する 5 つの情報処理の誤差要因として、下記を想定した。

- A) **目標・自己位置認知の誤差要因( $\epsilon_r$ )**：一人称視点(FFP、本稿の研究ではロボット視点に含まれる)においては、奥行き方向の認知困難性が広く知られているのは 5 章および本章で述べたとおりである。このため、移動に関する目標や自己位置の情報のうち、奥行き成分の情報の認知が難しくなり、これに起因する移動操作の誤差が生じる可能性が考えられた。
- B) **操作量の事前判断の誤差要因( $\epsilon_j$ )**：種々の遠隔環境の条件のランダム化により、試行毎に判断する必要があるため、類似の環境でのタスクの繰り返し(訓練)の条件に対しても習熟は困難であり、思い通りの移動操作性は阻害されると考えられた。
- C) **予測の誤差要因( $\epsilon_p$ )**：中でも、5 章までの検討で明確にした映像の拡大・縮小表現のランダム化の影響は、ターゲット位置の認知との齟齬があれば予測誤差を生じるため、類似の環境でのタスクの繰り返し(訓練)の条件に対しても思い通りの移動操作性の向上の阻害要因となると考えられた。
- D) **システム・外乱の誤差要因( $\epsilon_s$ )**：少なくとも表示遅延の影響があり、ロボットの移動速度も増加しており、思い通り移動操作性の向上の阻害要因になると考えられた。

- E) **操作運動の出力の誤差要因( $\epsilon_o$ )**: 本検証で要求される操作はシンプルかつ、実験参加者は自身の手先の運動の遂行に何ら問題のない健常者であったから、本要因の影響は小さかったと想定される。

したがって少なくとも V を除く 4 つの誤差要因の複合的な影響により、FFP 条件下での思い通りの移動操作性は阻害されていたと想定される。

これに対して SMI 条件では、本章で確認されたステレオマッチングインタフェースの機能要件(表 6.1)から、誤差要因 I およびこれに起因する誤差要因 III が低減され、予測の精度が向上すると想定された。言い換えれば、誤差要因 II および IV が残っても、予測に基づく調整により、思い通りの移動操作性が向上すると考えられた(3 章)。

その結果、FFP 条件下では、移動操作に 6 秒かければ、30mm 程度、最大で 130mm 程度の移動の誤差が許容できるタスクであれば、最低限も思い通りの移動操作性が得られることが明らかになった。

これに対して SMI 条件の実装により、0.7 秒はやく、20mm 以上の高精度でタスクが実現できるようになった。この結果は本稿の研究で定義した「より少ないやり直しあるいは操作時間でより良い移動の精度を得る」ことを示しており、SMI 条件の実装は思い通りの移動操作性の向上の機能要件として有効であることが示唆された。この定義はユーザビリティの側面からの効果を強調したものであり、感性的品質の観点からの評価は今後の重要な課題である。

## 6.9 実用面での課題の整理

続けて一連の実験から得られた、ステレオマッチングインタフェースの主に精度に関する実用上の課題を整理する。

### 6.9.1 計測・提示精度の課題(特にハードウェアに起因するもの)

#### (a) 旋回時の奥行き位置合わせ精度

はじめに、ステレオマッチングインタフェースでは各カメラの幾何学的なレイアウトが、旋回時の奥行き位置合わせ精度(システムの誤差要因)に影響を及ぼすことが明らかになった。

図 6.25(a)はロボット(Roomba の例)を上から見た模式図である。ステレオ映像上で視差が 0 となる点の集合は、一点鎖線で示された XY 平面上の円となる。この円は幾何学的ホロプタと呼ばれ(國吉, 1995)(喜多他, 1995)、輻輳点と各カメラ主点とを通る。このため視差が 0 となる特徴点はメインカメラの撮像画角の端ほどターゲット距離  $L$  よりも手前に存在し、奥行きの測定精度としては負の誤差が生じる。高精度の奥行き位置合わせの場面や広画角のカメラを採用した構成ではこの誤差を無視できない可能性があり、6.6 節(ロボット)の実験の事例で考察する。

図 6.25(a)左側に示した遠隔空間の各特徴点(星印)A, B および C は、画面上では図 6.25(a)下側の模式図のように表示される。特徴点 B は輻輳点 CP 上にあるから、この像は画面上では奥行き指標と重なって表示され、アームの先端部と接触する。特徴点 A は CP よりも手前にあるが幾何学的ホロプタ上にあるから、A の像も画面上では奥行き指標と重なって表示される。一方、特徴点 C は CP より手前にあり幾何学的ホロプタ上にないから、C の像と奥行き指標とは重ならず 2 重像が表示される。アームの先端部はメインカメラから距離  $L$  の点(CP)に固定され、ロボットとともに旋回する。旋回中心とメインカメラとの距離を  $\delta$  とすると、先端部の旋回半径  $D/2 = L + \delta$  となる。

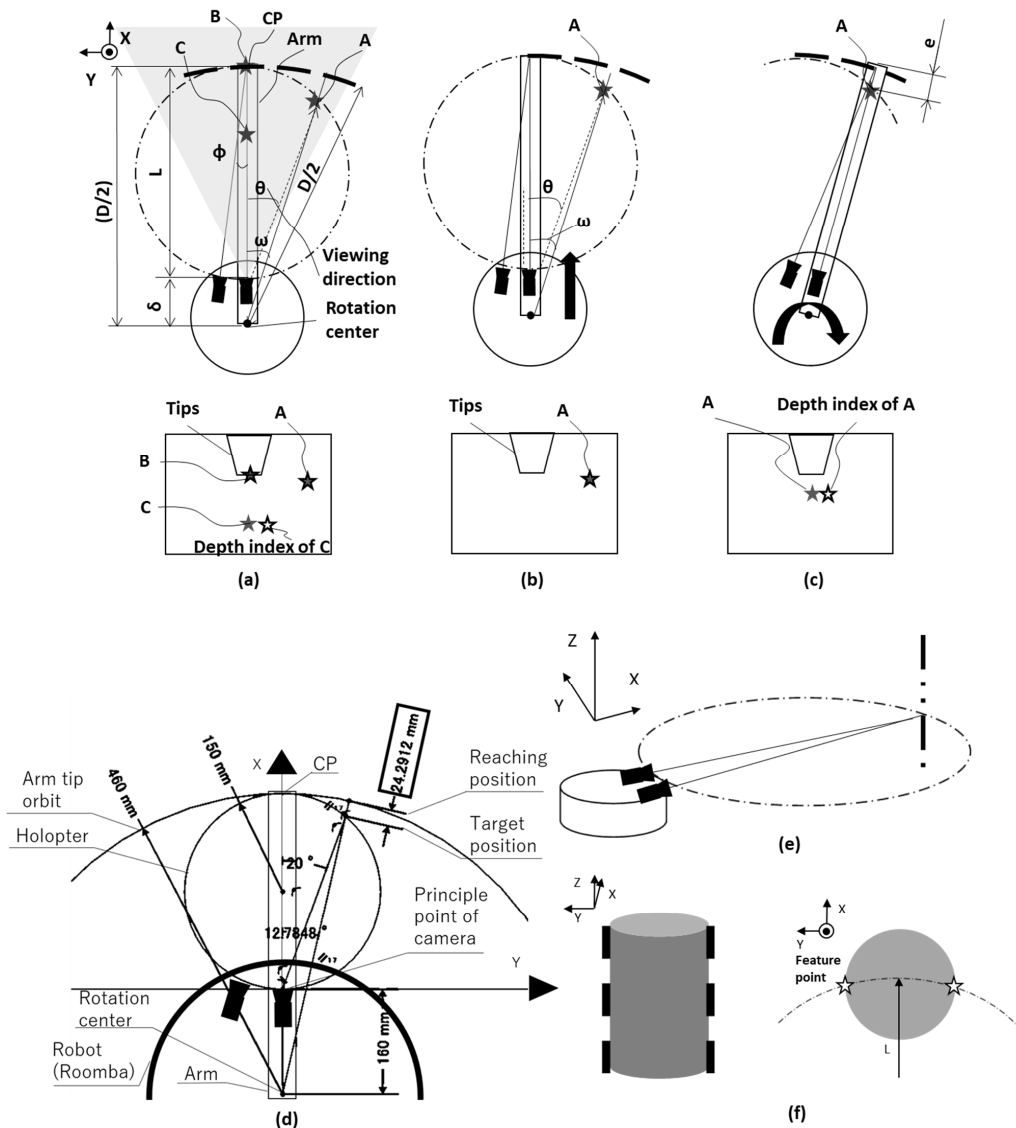


Fig. 6.25 ステレオマッチングインタフェースの計測・提示精度の課題

図 6.25(b)は特徴点 A に対して X 軸方向(並進方向)の位置合わせが完了した状態である. 特徴点 A はメインカメラから水平角度 $\theta$ の視方向にある. ユーザは Y 軸方向(旋回方向)の位置合わせのためにロボットを角度 $\omega$ 旋回させる必要がある. このように並進・旋回の順で操作を行った場合, 図 6.25(c)は角度 $\omega$ の旋回後の状態を示すが, 先端部と特徴点 A との間には奥行き位置合わせ誤差  $e$  が生じることが分かった. 誤差  $e$  は負(手前)の方向に生じ, この影響は 6.5 節の図 6.13(b)でも示唆されている.

誤差  $e$  は, 幾何学的に CP で接する 2 つの円(図 6.25(a)(b)(c)において一点鎖線で示された幾何学的ホロプタおよび長破線で示されたアームの先端部の旋回軌道)と, 旋回後のメインカメラの光軸との各交点のずれに相当する. これを CAD ソフト(FreeCAD 0.18)により作図して図 6.25(d)に示す. 実験に用いたシステムでは, 先端部, 旋回中心がメインカメラの光軸(X 軸)上に並ぶ. 旋回前のターゲット物体の位置は幾何学的ホロプタ上の角度 $\theta$ の点, 旋回後のアーム手先の位置は旋回軌道上の角度 $\omega$ の点となる. 作図に実システム的设计値である旋回半径 $D/2 = 460 \text{ mm}$ , 幾何学的ホロプタ半径 $L/2 = 150 \text{ mm}$ ,  $\theta = 20 \text{ deg}$ (最大値)を反映すると奥行き位置合わせ精度  $e$  の数値

解が得られ、 $e = 24.3 \text{ mm}$ であった。6.6節(ロボット)の実験でアームの先端部と接触できたのはターゲット物体のうち奥行き方向に  $30 \text{ mm}$  のキャップ部分に限られたため、この実験環境では空振りを防ぐのに十分余裕のある設計ではなかった可能性がある。またこの誤差 $e$ は各カメラ間隔(基線長と呼ばれる)が十分小さい時、式(6-1)および式(6-2)で幾何学的に見積もることができる。

$$e \cong \frac{L}{2} \sin 2\theta (\tan \theta - \tan \omega) \quad (6-1)$$

$$\text{ただし } \omega = \tan^{-1} \left( \frac{L \sin \theta}{L \cos \theta + D - L} \right) \quad (6-2)$$

設計値( $L = 300 \text{ mm}$ ,  $D = 460 \text{ mm}$ )での誤差 $e$ は $\theta$ の大きい画面端ほど大きい。本構成では  $-20 \text{ deg} < \theta < 20 \text{ deg}$  の範囲を奥行き指標化できたため、最大  $24.1 \text{ mm}$  の奥行き位置合わせ誤差 $e$ が生じ得たが、数値解の値とよく一致している。

対策には基線長を長くする等幾何学的ホロプタの曲率を小さくしたり、旋回中心とメインカメラとの距離 $\delta$ を小さくしたりする設計が有効と考えられ、後の節で検討を加える。

なお垂直方向の幾何学的ホロプタを図 6.25(e)に 2 点鎖線で示すが、本実験で用いた構成では視方向の垂直角度が変化しても視差 0 の点はメインカメラから水平距離  $L$  に保たれる。

#### (b) 輻輳角ずれ

各タスクは最大 1 時間にもおよび、タスク中に輻輳角ずれが生じた可能性が考えられた。

本稿の実験では輻輳角の調整のため、トルクヒンジを備えたカメラや自由雲台を用いたが、接触の衝撃、ケーブル等からうける引張力等でこれらの保持力を超えるトルクが生じ得た。6.6 節(ロボット)の実験の設定値( $\phi = 17 \text{ deg}$ )の近傍では輻輳角のずれ  $1 \text{ deg}$  で  $18.8 \text{ mm}$  の奥行き距離誤差が見積もられる。

ステレオカメラユニットの調整の容易性にはシステムを構成する上で利得があるので、調整後に可動部分を接着する等の対策が考えられる。

#### (c) ステレオマッチング誤差への感度

基線長が短くなるほど、画面上のステレオマッチング誤差に対する奥行き距離誤差が大きくなる(誤差の変動が敏感になる)。上述した輻輳角ずれの影響も大きくなる。ステレオマッチング誤差をなるべく吸収するためにも、基線長を長くする設計が有効と考えられる。

基線長の伸長はロボットのサイズやカメラの撮像画角の拡大とトレードオフになるため、用途に最適な設計仕様を策定する必要がある。後の章で検討を加える。

#### (d) 表示時間遅れ

表示時間遅れは従来から着目されてきたように(1章)最終的に移動精度に影響を及ぼす。より高い移動精度を要するタスクの用途では、表示時間遅れを補償したり、これをユーザに陽に認知させたりする工夫が必要と考えられる。

例えば、計測された表示時間遅れに応じて予め奥行き指標のディスプレイ上の表示位置をオフセットする等の構成は、マッチングのタイミングの補償に有効である可能性がある。

### 6.9.2 ステレオマッチングのユーザビリティ面の課題

本稿では間接的な奥行き認知に関し、確かにロボット視点での奥行き認知に変えて、これよりも高精度な認知ができる基準手法と有意に異なる精度を備えたステレオマッチング認知へのタスクのブレークダウンを提案した。これにより、奥行き認知に関する難易度の低減に関しては確からしい結果を得た。

しかしながら、ステレオマッチングの認知に関する本手法特有の課題も無視することができないので考察する。

#### (a) 表面に特徴点がないターゲット物体の奥行き指標の生成

ステレオマッチングインタフェースではその原理上、正確な奥行き位置合わせを行うには、大きさのない理想的な点(あるいは直線)同士のステレオマッチングを行う必要がある。交差法では特に顕著となるが、ステレオカメラの各カメラの視点の違いに起因してターゲット物体の各投影像の外形が異なり、完全なマッチングができなくなるためである。6.5節の計測条件では、ステレオマッチング時の奥行き指標の幅がマーカー像よりも平均  $2.7 \pm 0.5$  pixel (計測点 50 箇所)狭くなっていたことが確認された。マッチング対象の形状が互いに異なることには違和感があり、精度に影響する懸念がある。また、大きさのある形状を奥行き指標として用いると、ターゲット物体への接近に伴って奥行き指標が拡大し、注視すべき点が増える等ステレオマッチングが難しくなる懸念がある。ただし各投影像の形状に差異があっても、例えば6.7節(建設機械)の実験のカラーコーンのようにターゲット物体が尖ったり角張ったりしていれば、かえって対応点(線)を弁別しやすくなる場合もある。

また、ターゲット物体の表面に必ずしも理想に近い特徴点が存在するとは限らない。6.6節(ロボット)の実験のようにターゲット物体の表面が無地かつ滑らかであれば、マッチングにはその外形が用いられやすくなるが、上述した問題が出てくる。また、6.6節(ロボット)の実験のターゲット物体のように表面が無地で、滑らかで、かつ手前にボリュームのある物体の例では、手先との衝突を誘発されることも分かった。図 6.25(f)を用いて説明する。ターゲット物体の手前に凸の部分は指標化できないため、ターゲット物体像の外形(斜視図の長破線)とその奥行き指標とがステレオマッチングに用いられる。ターゲット物体の形状が水平面で回転対称のため形状に関する視差が損なわれ、仮にユーザがターゲット物体像の重心と、その奥行き指標の重心とを想定して点同士のマッチングに落とし込む工夫をしても、外形のステレオマッチングと結果は変わらない。そうすると、手先は上面図の星印を通る一点鎖線で示した幾何学的ホロボタの近傍のいずれかの位置に到達する。ユーザが到達の過程で衝突に気づかなければ、手先が最大 15 mm 程度干渉する可能性があった。

以上のようにステレオマッチングインタフェースでは画像処理で視認性向上の利益を得られる代わりに、表面に明瞭な特徴点のないターゲット物体の情報が削減されることが分かった。厳しい精度が要求される用途では、このような事例に備えて微調整のための補助的な測距手法の併用が必要となる。広範囲で素早く奥行き距離誤差を認知できるステレオマッチングインタフェースは、衝突を回避した効率的な移動や位置の粗調整には役立つので搭載するメリットは残るから、接触直前の微調整の段階でのみ、機能要件 1, 2 や視認性、操作性のメリットを損なわないように、補助的に作用点 1 点のみの距離をスポット確認する機能の追加が有効と考えられる。例えば作用点へレーザー光を照射し、特徴点(線)を直接的に生成できるようにする対策はシンプルで、ステレオマッチングインタフェースと相性が良い。投影像の外形の差異は平行法でステレオカメラを構成したり基線長を短くしたりして軽減できるが、後述するようにトレードオフを踏まえて検



討を進めている。

### **(b) 奥行き指標の視認性**

屋外では外光の影響を受けて奥行き指標の視認が困難になることが分かった。また 6.9.1 項で考察した旋回時の奥行き位置合わせ精度の低下は視差に現れるため、指標の重なり具合の変化を見逃さなければ空振りは生じなかったはずである。変化が見逃された要因として、奥行き指標がターゲット物体と同じ黒色で描画されたため目立たなかった可能性が考えられる。

対策として、例えばインタフェースの遮光性の向上、奥行き指標の色の変更(例えば背景色の補色)・画面上の変位の拡大等による強調が考えられる。奥行き指標の強調は映像の現実感とトレードオフになると予想され、指標を一時的に非表示にする機能の搭載等も考慮する必要がある。

また実用環境では背景の情報によっては過剰な奥行き指標が生成され、弁別が困難になる可能性がある。対策として被写界深度の浅いカメラの採用(背景の情報をぼかすことができる)が考えられる。

### **(c) 定量的な奥行き位置の認知**

ステレオマッチングインタフェースは、奥行きに関する情報のうち、任意点までの奥行き距離誤差の有無の情報を、認知が容易なディスプレイ平面上の 2 点の視差(ステレオマッチング誤差)の有無の情報に変換することで、ユーザに間接的に認知させる。

ステレオマッチング誤差の有無の認知は平面的な一人称視点の映像を用いた奥行き距離誤差の直接的な認知よりも容易であるが、定量的な奥行き距離誤差の認知は必ずしも容易とは言えない。一方で、さらに複雑な用途ではこの定量的認知の機能も要件になると考えられる。

ステレオマッチングインタフェースで奥行き距離誤差を定量的に認知するには、ステレオマッチング誤差量と奥行き距離誤差量との対応関係をユーザが学習する必要がある。しかし、学習には相当の訓練が必要になると考えられる。

そこでこれを補助するために、例えばディスプレイ平面上のずれを奥行き距離誤差に直感的に変換するための基準(例えば地図に用いられるような縮尺を表すスケールバー)を脇に表示する等の設計上の工夫が考えられる。この工夫は、機能要件 2 の視線移動の抑制効果、直感性とのトレードオフになると予測される。

## **6.9.3 感性的品質に関する課題**

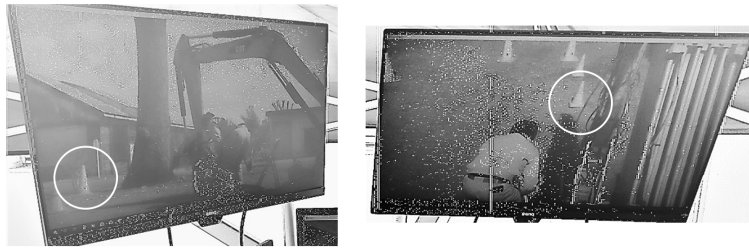
本節の実験結果からは、視線の移動の抑制(機能要件 2)等が抑制されて「快適な移動体験が実現した」とするような直接的な効果は検出できなかった。またロボットの速度や指標の密度がステレオマッチングの認知の難易度に影響すること、ユーザによって操作・訓練にかかる負担が異なることも示唆された。今後は難易度低減が重要な高齢者や障害当事者等の協力を得て、直接的な難易度や操作・訓練にかかる負担の評価、最適な用途の特定と最適化等を行う必要がある。

## **6.9.4 その他の付加価値**

### **(a) 転倒および潰れの失敗の抑制**

転倒および潰れはターゲット物体にダメージを与えるため対策の優先順位が高い。6.6 節(ロボット)の実験では 6.9.2(a)で検討したようにアームの先端部とターゲット物体との衝突が生じやすい不利な条件であったが、転倒の有意な増加は認められなかった。これは機能要件 1, 2 の相乗効

### (a)Reference Method



### (b)Stereo matching interface

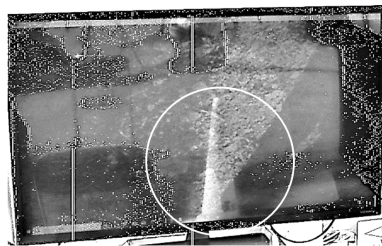


Fig. 6.26 ターゲット物体の像サイズの手法間比較

果と考えられる。

転倒および潰れはターゲット物体への過度な接触が生じているにもかかわらずそれを素早く認知できない場合に生じる。ロボット視点の映像ではターゲット物体の拡大観察ができ(機能要件 1)、ターゲット物体像から視線を逸らさずに済む(機能要件 2)ので、接触の情報を見逃すことなく操作の修正や停止が速やかに行えた可能性がある。

#### (b) 大スケール空間での相乗効果

6.7 節(建設機械)の実験では空振りも少なかった。これは、機能要件 1 が建設機械の大スケールの作業空間と相乗効果を発揮したためと考えられる。

作業空間のスケールが大きいと、基準手法の少なくとも固定の環境カメラの映像ではターゲット物体や手先の像のサイズは小さくなる。複数のターゲットを同時に表示するためにカメラを遠方に配置したり、広画角のカメラで撮像した映像を縮小表示したりする必要があるためである。しかしステレオマッチングインタフェースではロボット視点のみの情報を用いる(機能要件 1)ため、手先の操作と連動して拡大された映像だけで作業を行える。

このため基準手法とステレオマッチングインタフェースとではターゲット物体および手先の像サイズに大きな差が生じており、成功確率の差に影響したと考えられる。参考に、各カメラからの映像を同じ縮尺で並べたものを図 6.26 に示す。丸印で囲まれた部分がターゲット物体像である。基準手法の枠組みでターゲット物体を拡大表示するには、6.6 節(ロボット)の実験のようにターゲット物体の近傍に環境カメラを設置したり、ズームしたりする必要があるが、難易度低減には必ずしも有効でない懸念がある。ターゲット物体が広範囲におよぶ建設、遠隔鑑賞等の用途や、動的なヒトをターゲットとするコミュニケーション用途ではターゲットの位置が予め設定された特定の範囲内に収まるとは限らず、これらを追跡するための追加操作等が必要となるためである。逆に言えば、ステレオマッチングインタフェースはこれらの用途に適している可能性がある。

また、機能要件 2 も相乗効果を発揮したと考えられる。6.7 節(建設機械)の実験参加者は基準手

法を用いた際、俯瞰カメラの映像のみでは Z 方向の奥行きを十分に認知できず、俯瞰カメラで Y、環境カメラで X および Z 方向の位置情報を得る方略をとっていたと回答した。そして、いずれか一方の映像を注視している際にブレーカ操作をあえて停止させることはなかったため、他方の映像に視線を戻すまでの間に失敗が発生したことがあったと回答した。同様の失敗は小型ロボットのスケールでも起こり得るが、作業空間のスケールが大きいほど映像上ではわずかな誤差が実空間ではより大きく拡大され、情報の見逃しの影響が甚大になる。

### (c) 既存機器への搭載容易性

本稿の研究では既存の建設機械にステレオマッチングインタフェースを搭載した。これは比較的容易に実現された。高精度で各カメラの輻輳角を調整・保持するためのマウントには留意する必要があるが、建設機械への着脱のためのマグネットを備え、3D プリンタで造形されたマウントでタスクに必要な精度が得られた。

汎用 WEB カメラが少なくとも 2 台と、計算負荷の少ない画像処理用の制御装置と、汎用のディスプレイが少なくとも 1 台と、からなるシステム追加もシンプル・ローコストであり、高信頼性や低レイテンシにも繋がると考えている。

### (d) ターゲット指定操作の削減

機能要件 4, 5 を満たすには、制御可能な雲台の採用によりターゲット物体に測距センサを向けるような設計や、タブレットでターゲット物体を指定するような設計も考えられた。

これに対してステレオマッチングインタフェースでは、ヒトの選択的注意のメカニズムを積極的に生かしてターゲットの選択・指定にかかわる操作を省くことができた。このことは操作・訓練負担の軽減に意義のあるものと考えられる。また、スムーズな移動の実現に寄与する。特に、本稿の研究のステークホルダに含まれる身体動作に制約のある重度の肢体不自由者の支援にとって有益と考える。

## 6.10 さらになる予測の支援に関する考察

特に 6.5.2 項での検討結果から、ロボットの並進速度が増加したり、これをひとつの要因として奥行き指標(第二の情報)の速度が増加したりする場合に、位置の予測誤差が拡大する可能性が示唆された。これは、通信遅れの影響の拡大や、ステレオマッチングタスクの難易度が増加していることに起因する可能性が考えられた。

### 6.10.1 ステレオマッチングの予測に関する関連研究

ステレオマッチングのタスクは、ターゲット物体の実像と、その奥行き指標との 2 体の重なるタイミングを予測するタスクといえる。このようなタスクは、心理学等の分野では Time-to-contact(TTC)課題や、Predicted-motion(PM)課題として検討が進められている。

これらの課題では、観察の途中で見えなくなる(マスクされる)物体とターゲット物体との 2 体の運動(衝突)の予測メカニズムが機能すると考えられている。例えば、物影に隠れてしまった自転車との衝突を避けたい場合に、2 体の運動予測メカニズムが駆動する。また例えば、自動車でジャンクションに合流する場面では、ユーザとしての運転手は前方の車両と合流車線の車両とを交互に観察する必要がある。このため一方からはいったん目が離され、2 体の運動予測メカニズムが

表 6.2 TTC や PM タスクに影響を与える可能性のある因子

---

眼球運動戦略
マスクの期間(サッケードのタイミング等)
観察可能な時間
指標のサイズ
背景テクスチャの存在
Motion After Effect
背景コントラスト
視覚的デストラクタ
周辺視野の速度知覚特性

---

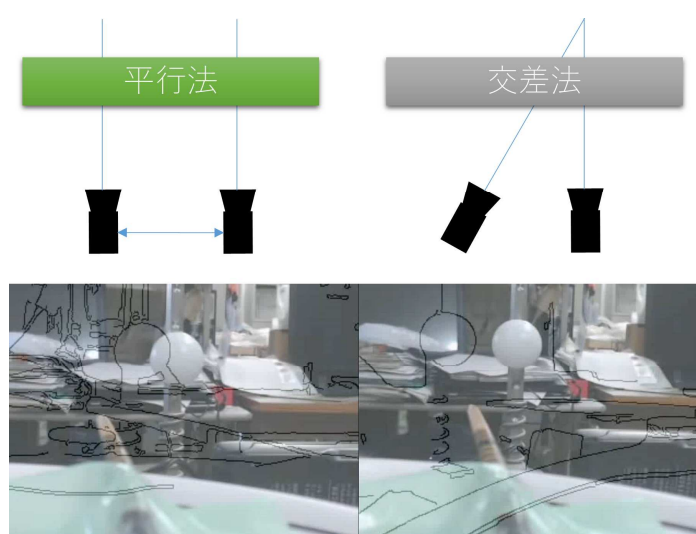


Fig. 6.27 異なるカメラレイアウトでは同じ位置から観察しても指標の見え方が異なる

駆動するものと考えられている。一般的な動体の追跡においても、サッケード(急速性眼球運動)が生じるため、物体が見えなくなる時間が生じる。最も典型的な例は、野球選手が変化球をヒットできる事例である。

ステレオマッチングインタフェースでは、ロボット視点の映像を観察するために奥行き指標のみを注視することはできず、したがって少なくとも奥行き指標あるいはターゲット物体の実像とのいずれか一方から目をはなす必要があり、この特徴は互いの課題で共通しているものと推定される。なお前提として、これらのタスクにおいて、複数の物体の運動を予測するのに明確な注意(Attention)を割く必要がないことが実験的に示唆されており(Baurès et al., 2014)、上述した例よりも多くの物体が存在するステレオマッチングインタフェースにおいても、予測的な TTC や PM のメカニズムを発揮できる余地が十分にあると想定される。ヒトは加速度の変化は敏感であるが、TTC や PM では、物体の運動を、マスク時点の位置と速度とで予測している可能性が高いことが示されている(Bennett and Benguigui, 2016)。さらに相対的な移動に関しては、2体近づいたり(相対速度が正)、離れた(負)することでバイアスを受けるとされ、とくにステレオマッチングインタフェースに関連の大きい正の相対速度は非線形効果が予想される(Flavell et al., 2018)。他に、表 6.2 に列挙する要因等が 2 体の運動予測に関連すると考えられ (Bennett and Benguigui,

平行法

交差法

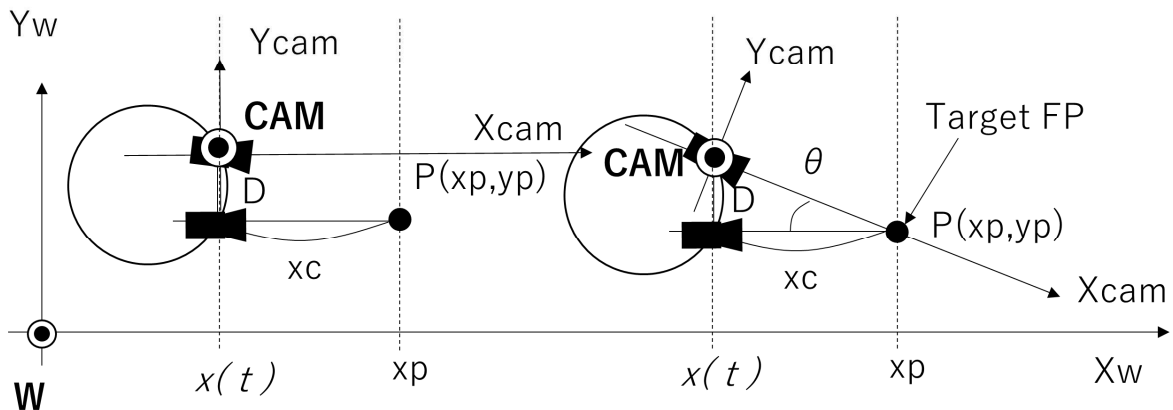


Fig. 6.28 カメラの幾何学的配置を決めるパラメタ

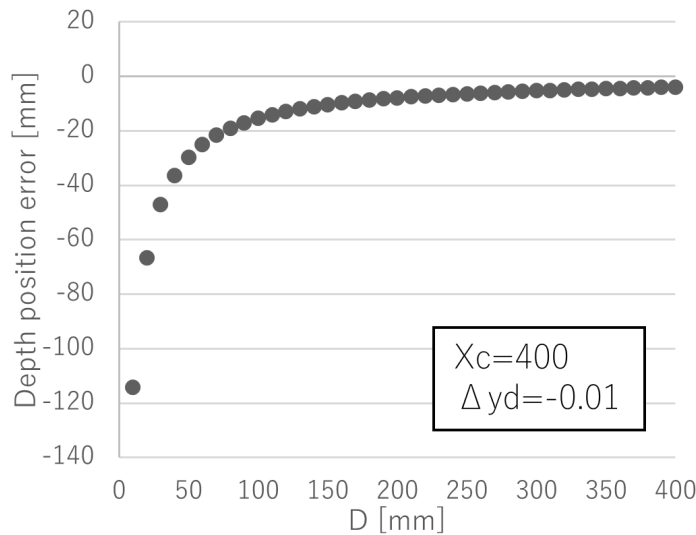


Fig. 6.29 ステレオマッチング誤差 $\Delta y_d$ に対応する奥行き位置誤差の感度

2016)将来的には考慮する必要があるが、本稿ではまず、シンプルな奥行き指標の位置や速度に着目する。

### 6.10.2 設計制約を考慮した予測誤差の比較実験

ステレオマッチングインタフェースの実装を通じ、カメラの幾何学的配置(メカ設計)によって、ターゲット位置の実像と、その奥行き指標との位置関係(以下、簡単のために単に奥行き指標の位置と称する場合があります)が大きく変化することが分かってきた(6.9.1(a)~(c))。

前述したように、ステレオマッチングインタフェースは交差法と、平行法でも構成することができる。図 6.27 は、同じ位置から、ターゲット位置に配置されたターゲット物体(白い球体)を、異なる幾何学的配置のステレオカメラユニットで構築したステレオマッチングインタフェースで表示した画像の表示倍率を揃えたものである。右側の交差法では、ターゲット物体の実像と、その奥行き指標との相対距離が長くなっていることが見て取れる。同じ速度でロボットを並進させた場合、いずれの配置でも同じ時間でターゲット位置に到達するので、同時刻におけるターゲット物体の実像と、その奥行き指標との相対距離が長いほど、並進に伴う水平方向への変位速度が

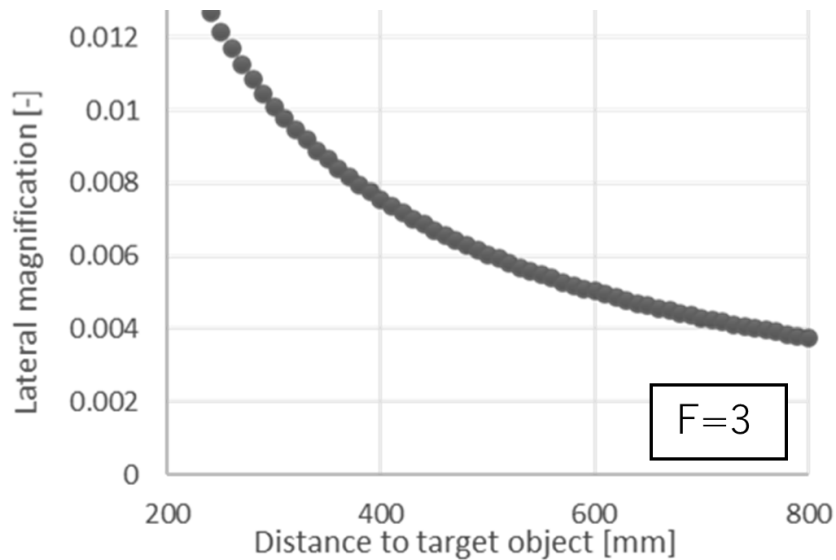


Fig. 6.30 像高比の変化( $f=3$ )

速いことになる。図 6.27 では、公差法の奥行き指標の(相対的)接近速度の方が速いことを意味している。

したがって、思い通りの移動操作性のさらなる向上(=予測誤差の低減)のためには、ステレオカメラの幾何配置の設計に応じて 2 体の位置と速度が変化するため、この挙動や予測誤差に及ぼす影響を確認する必要がある。これを明らかにできれば、時間遅れから生じる予測誤差を推定して補償したり、2 体の相対速度を低減する設計方針が策定できたりする可能性がある。

以下、具体的なステレオカメラユニットのメカ設計における予測誤差の特性を検証する。

### 6.10.3 設計制約の検討

小型ロボットには福祉分野での社会実装上の利点があり、十分に活用が見込めること前述した。そこで本稿では引き続き小型ロボット(他の実験と同様に **Roomba**)を具体的な設計の対象とし、ステレオカメラユニットの設計制約を検討し、もって実現可能性のある範囲内でのカメラの幾何学的配置が予測誤差に及ぼす影響を検証する。

カメラの幾何学的配置を決めるパラメタを図 6.28 および以下に示す。

- ①  $D$  : 基線長
- ②  $x_c$ (あるいは $\theta$ ) : 輻輳距離(あるいは輻輳角)
- ③ ステレオカメラの構成法 : 公差法あるいは平行法

また、カメラの幾何学的パラメタとは異なるものの

- ④  $\frac{dx}{dt}$  : ロボットの並進速度

も奥行き指標の速度に影響を及ぼすことは明らかであり、あわせて考慮する。

#### (a) 基線長 $D$ の設計制約

はじめに、基線長  $D$  の設計制約について検討する。基線長は、メインカメラと指標カメラとの可感度である。

- ・【設計制約 1】 基線長  $D$  は可能な限り長い方が好ましい。

基線長  $D$  が大きくなるほど、ステレオマッチング誤差(=ターゲット物体の実像に対するその奥行き指標のずれ) $\Delta y_d$ に対する実際の奥行き位置誤差が大きくなるためである。これはステレオマッチングインタフェース上でのわずかな予測誤差(=ステレオマッチング誤差)が、現地サイトでみるとさらに大きな予測誤差に拡大されていることを意味している。例えば、わずかなステレオマッチング誤差で大きな奥行き位置誤差が生じるような高い感度の設計を採用すると、わずかな予測誤差が現地サイトでのターゲット物体や現地の参加者への衝突のような甚大な影響を及ぼす可能性が出てくる。

図 6.29 にステレオマッチング誤差 $\Delta y_d$ に対応する奥行き位置誤差の感度を示す。図 6.29 では、輻輳距離 $x_c=400\text{mm}$  で固定したときに、ステレオマッチング誤差 $\Delta y_d = -0.01\text{mm}$ という極めて微小なステレオマッチング誤差が生じた場合の感度の例を示している。基線長  $D$  が小さい領域では、わずかなステレオマッチングの失敗が、現地サイトの現実空間では非常に大きな興之市誤差を生じさせていることが分かる。

・【設計制約 2】メインカメラはロボットの旋回中心に配置される必要がある。

第一に、6.9.1(a)で考察したように旋回時の予測誤差の発生を回避する実用上の目的のためである。

第二に、同じく上述したように、ロボットが奥行き方向に存在するターゲット物体に向けて直進する場合、ロボットの中心にメインカメラを配置しておけば、ディスプレイ上のターゲット物体の実像の水平位置があまり変化しない利得があるためである。このメリットは予測の難易度の低下に有効と考えられ、6.7 節の建設機械の実験参加者からも具体的に要望をうけた。また、ターゲット物体の実像と奥行き指標とが両方大きく動く場合には、2 体のマッチングの予測にバイアスがかかり(Flavell et al., 2018)予測がより難しくなるためである。

・実装結果

以上の設計制約 1 および 2 を踏まえると、円筒状の Roomba のステレオカメラユニットが配置可能な空間は $\phi 300\text{mm}$  の平らな天面領域であるから、設計制約 2 により  $D \leq 150\text{mm}$  が導かれる。本設計ではカメラを保持するためのマウントを 3D プリンタにより造形したが、カメラの位置が変動しないように十分大きな土台を設ける必要があり、より詳細の設計の余地はあるものの、今回の検討では  $D=100\text{mm}$  が実現できた。

(b) 輻輳距離 $x_c$ の設計制約

次に輻輳距離  $x_c$  の設計制約について検討する。

・【設計制約 3】輻輳距離 $x_c$ は小さいほど利益が大きいと考えられる。

輻輳距離 $x_c$ は、ステレオマッチングインタフェースにおいて端的にはターゲット位置に到達した際のターゲット物体との相対的な距離  $L$  を規定する。したがって輻輳距離 $x_c$ が小さいほど、メインカメラはターゲット物体に接近できる。図 6.11 を用いて検討を加えたように、アーム等によりターゲット物体に接触して何らかの作業を実行する必要がある場合に、アーム等の作用点によって輻輳距離 $x_c$ は制約される。しかしながら本設計では移動ロボットとしてアーム等は考慮しないこととする。

ここでレンズの公式から、ターゲット物体の像高は、ターゲット物体とレンズとの距離に反比

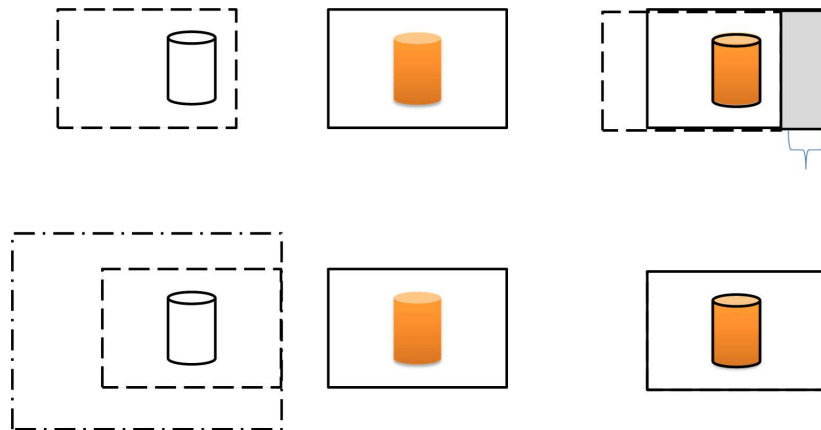


Fig. 6.31 平行法で仮想的な輻輳距離を設定するためのデジタルトリミングの概念図

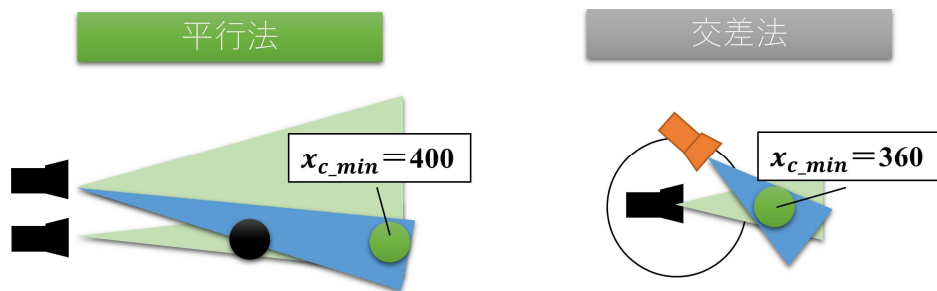


Fig. 6.32 同じ画角のカメラにおける交差法と平行法での輻輳距離の差異の概念図

例する．これを下式(6-3)に示す(式(4-3)と同様)．ここで  $x$  はイメージセンサ上の被写体の像のサイズ， $h$  は実空間上の被写体のサイズ， $a$  は被写体とレンズとの距離， $f$  はレンズの焦点距離をそれぞれ示している．

$$\frac{x}{h} = \frac{f}{a-f} \quad (6-3)$$

図 6.30 は焦点距離  $f = 3 \text{ mm}$  とした場合の像高比(ターゲット物体の実際の大きさに対する撮像素子上の投影像の大きさの比)の変化を示す．なお、本設計でも用いたが安価な汎用 UVC カメラにもオートフォーカス機能が搭載されることが多くなっている．この場合、オートフォーカスによって焦点距離は変化することになることに注意する．

ターゲット物体の像が小さいと、観察が困難になったりステレオマッチングの認知が難しくなったりする懸念がある．ターゲットが現地サイトの参加者の表情であった場合は表情がよく見えないことになり、体験の質も損なわれる懸念がある．これはデジタルズーム(表示倍率)の機能で補償できるが、解像度の低下や予測誤差の変動の問題が生じると考えられる(4 章および 5 章)．さらに現地サイトの参加者から見た遠隔サイトのユーザ(ユーザ)の代理であるロボットと、逆に遠隔サイトのユーザから見た現地サイトの参加者との距離の想定は大きく異なることになり、移動ロボットとのパーソナルディスタンスの問題(青木, 渡辺, 2011)等、通常のコミュニケーションではあまりない違和感が生じる懸念が大きい(5 章)．

#### ・平行法での実装

以上のように最適な光学倍率は詳細に検討の必要があるが、ひとまず設計制約 3 を考慮して設



計を進めた場合、指標カメラの撮像画角が同一であれば、公差法の方が輻輳距離 $x_c$ を小さくできることが分かった。

平行法では、仮想的な視差をつけるために、映像をソフトウェア上でデジタルオフセットさせる必要がある。このため、輻輳距離 $x_c$ は指標カメラの撮像画角に制約される。この説明図を図 6.31 に示す。

指標カメラの映像すべてをオフセットしてメインカメラの映像に重ねると、奥行き指標の表示範囲がオフセットの分だけ狭くなり(グレー部)、表示領域も偏るので機能要件 4 の十分な満足が難しくなる。これを避けるためには、指標カメラでは予め広範囲を撮像しておき(一点鎖線)、メインカメラの映像に合わせて所定の量をオフセットした点を中心に、メインカメラの映像と同サイズの指標カメラの映像をトリミングする(鎖線)手法が有効である。このトリミング可能なマージンの範囲(=指標カメラの撮像画角)によって、輻輳距離 $x_c$ が決定される。

一方、公差法では撮像画角に関わらず、カメラを物理的に回転させることで所定の視差をつけることができる。しかしながら、基線長  $D$  を保ちながら指標カメラの配置を前方にずらす必要が生じる。輻輳角 $\theta$ が大きくなるほど指標カメラを前方に配置しなければならない。これは指標カメラとターゲット物体との距離が、メインカメラとターゲット物体との距離よりも遠くなり、各映像にサイズの違いが生じるためである。これも指標カメラの光学ズームあるいはデジタルズームで解消すると考えられるが、今後の課題とする。これらの比較を図 6.32 に示す。

#### ・実装結果

本稿では、平行法で輻輳距離 $x_c=400$  mm の実装をすることができた、これに対して、公差法の構築では奥行き指標の見え方(解像度)の条件を揃えるためにズームを用いないこととし、輻輳距離 $x_c=360$  mm の実装をすることができた。

#### 6.10.4 カメラの幾何学的配置設計が予測に及ぼす影響の計測

以上の 2 設計に加え、④ $\frac{dx}{dt}$  : ロボットの並進速度の影響を考慮して、計測条件を表 6.3 に示す A~B の 4 条件とし、ステレオマッチングインタフェース上での予測誤差(=ステレオマッチング誤差)の計測を実験的に実施した。実験参加者は 4 名(20 代 3 名(女性), 30 代 1 名(男性))とした。いずれの条件も同数が完全にランダムな順番で提示された。

計測結果を図 6.33 に示す。2 要因分散分析で解析したところ、並進速度の条件間で明確な有意差が認められた( $p=0.00004 < 0.05$ )。これに対して幾何学配置設計の条件間では認められなかった( $p=0.10 > 0.05$ )。

これらの比較では共通して、ターゲット物体の実像と、その奥行き指標との相対接近速度が小さくなると考えられる条件で予測誤差が小さくなる可能性が見受けられた。参考に、ターゲット位置の手前 20mm の区間で平均速度を求めたところ、図 6.33(a)の並進速度の大きい条件では約 9mm/s、小さい条件では約 5mm/s であり、速度の大きい前者で有意に予測誤差が大きい。ただし通信遅れの影響は並進速度の大きさによって異なるから、並進速度の条件間の予測誤差の差異の主たる要因は通信遅れと考えられる。一方、図 6.33(b)の交差法の条件では約 8mm/s、平行法の条件では約 6mm/s であり、速度の大きい前者で予測誤差が大きくなる可能性が示唆された。

以上の結果から、ターゲット物体像とその奥行き指標との 2 体の相対接近速度を何らかの手段によって遅くすることができれば予測誤差を抑制できる可能性が考えられる。シンプルには、並進速度を小さくすれば予測誤差は小さくなる。

Table 6.3 カメラの幾何学的配置が予測に及ぼす影響の計測条件

(D, Xc)\④並進速度	27mm/s	47mm/s
交差法(100,360)	A	B
並行法(100,400)	C	D

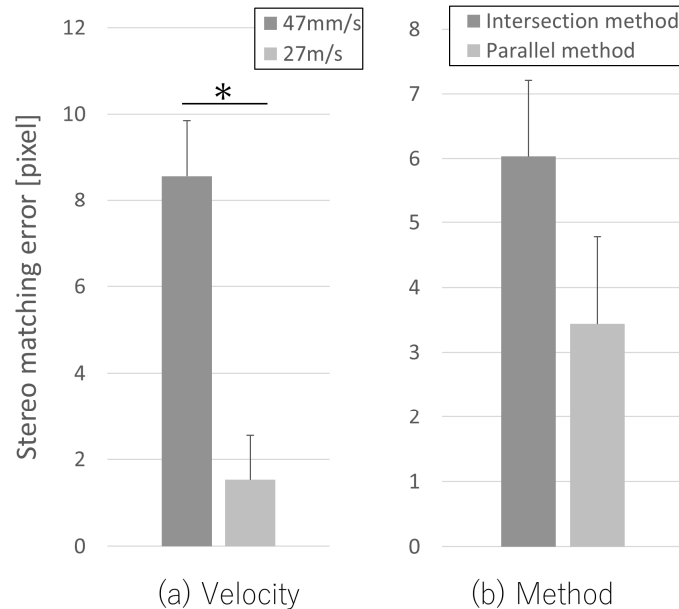


Fig. 6.33 計測されたカメラの幾何学的配置設計の差異に起因する予測誤差の差異

しかしながら、本稿のフォーカスである遠隔移動体験において、並進速度が遅いことは感性的品質の観点で好ましくない。他の手法で、すなわちステレオカメラユニットの設計により相対接近速度を抑制することができることがより好ましいと考えられ、本稿では単純な幾何学モデルを用いた相対接近速度低減設計の方策の検討を加える。幾何学モデルの構築は、通信遅れと予測誤差との関係の推定にも応用できると考えられ、通信遅れの影響をキャンセルする手法の構築に役立つ可能性もある。

### 6.10.5 設計方針策定のための幾何学的モデル化

ステレオマッチングインタフェースでは、世界座標系におけるターゲット位置までの距離を、カメラの外部パラメタ(姿勢)を用いてカメラから見た距離に変換して、さらに内部パラメタを用いて撮像素子、ディスプレイ上の距離に変換する処理を実行している。この座標変換プロセスは透視投影変換ともいわれる。

以下、公差法および平行法によってこの変換を幾何学モデル化するとともに、モデルの妥当性を検証する。

#### (a) 交差法のモデル化

平行法は交差法の輻輳角 $\theta=0$ の特別な場合と整理できる。ここではじめに交差法をモデル化する。各パラメタを図 6.34 および図 6.35 のように定義する。図 6.34 は、ロボットに搭載された交差法のステレオカメラの輻輳点(各カメラの光軸の交差する点、これをロボットの自己位置と代表する)がターゲット位置に到達する前( $t=t_1$ )の状態と、到達時( $t=t_2$ )の状態とを表現している。図 6.34 の点 P はターゲット位置を示す。現地サイトの座標は世界座標系 W で表現され、ターゲット

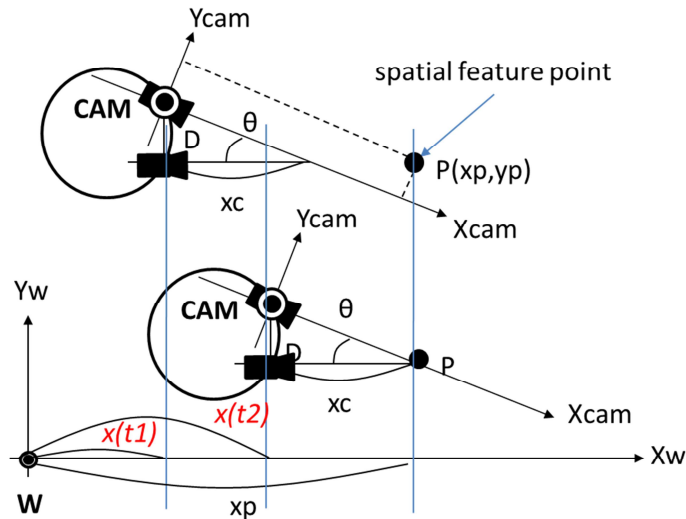


Fig. 6.34 現地サイト側の各パラメタの定義(交差法)

perspective projection transformation.

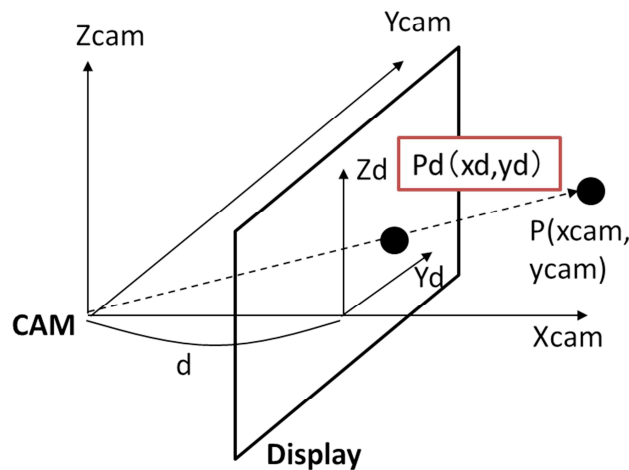


Fig. 6.35 遠隔サイト側の各パラメタの定義(交差法)

ト位置  $P$  の  $X_w$  座標および  $Y_w$  座標を、それぞれ  $x_p, y_p$  とする。

$X_w$  軸上に配置された  $x(t)$  は世界座標系におけるロボットの自己位置を表す。簡単のため、ロボットの移動を  $X_w$  軸方向への並進のみに限定する。また、図 6.34 では便宜上表現できていないが、同じく簡単のため、ロボットのメインカメラ(光軸が軸  $X_w$  と平行なカメラ)の主点は  $X_w$  軸上を並進することとする。

$D$  はこれまで同様に、メインカメラと指標カメラ(光軸がメインカメラ光軸あるいは軸  $X_w$  に対して輻輳角  $\theta$  で交差している方のカメラ)との間隔を意味する基線長である。基線長  $D$  と輻輳角  $\theta$  が決まれば、輻輳距離  $x_c$  が一意に定まる。

次に、指標カメラの座標系をカメラ座標系 CAM として、軸  $X_{cam}$  とこれに直行する軸  $Y_{cam}$  を定める。ターゲット位置  $P(x_p, y_p)$  を指標カメラ座標系で表現した  $P_{cam}(x_{cam}, y_{cam})$  は、次にディスプレイに投影される。

ディスプレイ座標系に関わるパラメタの定義は図 6.35 に示される。 $P_{cam}$  は、焦点距離  $f$  の指標カメラの撮像素子に、レンズの公式で定まる光学倍率で投影され(不図示)、任意の表示倍率でデ

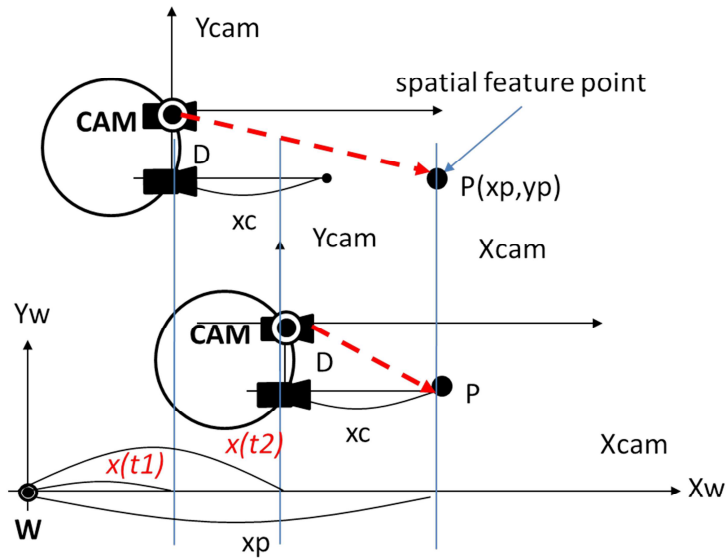


Fig. 6.36 現地サイト側の各パラメタの定義(平行法)

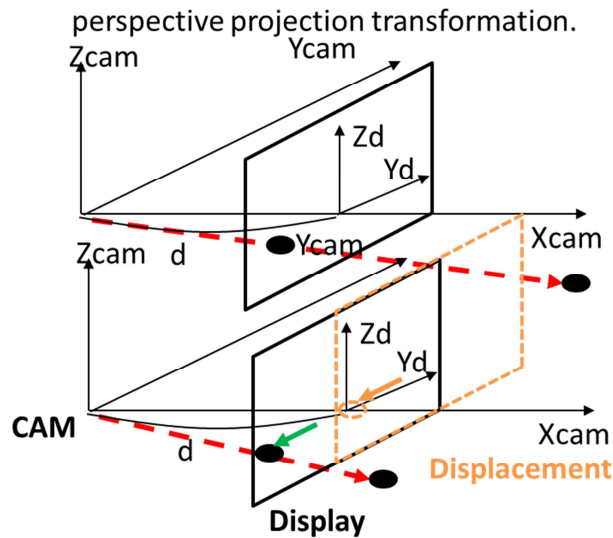


Fig. 6.37 遠隔サイト側の各パラメタの定義(平行法)

ディスプレイに投影される。表示倍率にはディスプレイサイズの影響も含まれる想定である。この時のディスプレイ上に表示された基準物体の光学倍率、表示倍率を加味した倍率(以下、単に倍率)を簡単のために  $M$  と統一して表現し、同じく簡単のためにカメラから見て光軸上の距離  $d$  にあるターゲット物体の大きさ(光軸と直交する成分)が、ディスプレイ上のターゲット物体像のサイズと一致する( $M=1$ )設定を仮定する。この定義は、本稿の実験でも用いられた設定である。

ディスプレイ座標系 **Display** は水平軸  $Y_d$ 、垂直軸を  $Z_d$  とし、簡単のため、原点の水平方向座標が指標カメラの光軸  $X_{cam}$  上にあり、軸  $Y_d$ 、軸  $Z_d$  のいずれとも直交するものとする。

以上の定義を用いて幾何学的な座標変換を行い整理すると、ターゲット位置に関する奥行き指標のディスプレイ座標  $P_{display}$  上の水平成分( $y_d$ )が得られ、下式(6-4)のように表現される。

$$y_d = dM \sin \theta - \frac{dMD \cos \theta}{x_p - x(t)} \quad (6-4)$$

式(6-4)は、メインカメラの主点移動を  $X_w$  軸上に固定することで並進が行われてもターゲット物体のディスプレイ上の位置は固定されるように定義されているから、奥行き指標の水平方向の変位のみを表していることになる。

式(6-4)を時間微分すると、ディスプレイ上の奥行き指標の水平方向の変位速度が得られる。ここで  $x(t)$  も  $t$  の関数であることに留意すると、ディスプレイ上の奥行き指標の水平方向の変位速度  $\frac{\delta y_d}{\delta t}$  は、下式(6-5)のように表現できる。

$$\frac{\delta y_d}{\delta t} = -\frac{dD \cos \theta}{(x_p - x(t))^2} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (6-5)$$

ただしこれまでの記載と同様に、 $\frac{dx}{dt}$  はロボットの並進速度を示す。

## (b) 平行法のモデル化

各パラメタ定義を図 6.36 および図 6.37 に示す。

前述のように、式 6.2 および 6.3 において  $\theta=0$  とすればその幾何学的関係が算出できるが、そのままではターゲット位置に到達しても、奥行き指標が対応するターゲット位置の実像と重ならない。そこで、図 6.23 を用いて説明したデジタルトリミングの手法を用い、これを反映する補正項を導入する。デジタルオフセットは図 6.37 に示される形式で行われる(図 6.31 も参照のこと)。補正項は、仮想の輻輳距離  $x_c$  を用いて  $\frac{D}{x_c}$  に前述の倍率の調整を加味したもので与えられる。

以上の処理により、平行法におけるディスプレイ上の奥行き指標位置  $y_d$  および並進速度  $\frac{\delta y_d}{\delta t}$  は、以下に示す式(6-6)および式(6-7)のように表現できる。

$$y_d = -dMD \left( \frac{1}{x_p - x(t)} - \frac{1}{x_c} \right) \quad (6-6)$$

$$\frac{\delta y_d}{\delta t} = -\frac{dMD}{(x_p - x(t))^2} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (6-7)$$

### 6.10.6 モデルの検証

続いてステレオマッチングインタフェース上でのターゲット位置と奥行き指標との変位を撮影することで、奥行き指標の変位を実測しモデルの  $y_d$  と比較した。実測の対象は、図 6.19 に示された画像のもとの動画とした。ターゲット物体像は映像の実測には、オープンソースの動作分析ソフトウェア KINOVEA を用いた。

図 6.38(A)に交差法での比較の結果を示す。実機パラメタは、 $x_c=450$  mm,  $D=280$  mm,  $\theta=0.56$  rad,  $M=1$ ( $d=450$  mm),  $x_p=150$ mm であった。画素単位で計測したのちに、実機ディスプレイ上のサイズ(mm)に変換している。図 6.27 上のドットは実測値を、実線はモデルによるシミュレーション値をそれぞれ示している。

ターゲット位置到達前 150mm( $t < t_2$ )での挙動における実測とシミュレーションとの誤差は最大 5mm であり、設計方針の策定の用途では十分な精度を備えていると評価できる。しかしながら、ターゲット物体に到達した後( $t > t_2$ )では精度が悪化した。このため、後者の範囲は検討には用いないこととした。後者の要因の一つに、撮像素子(特にレンズ)の光学的な影響が考慮できていない可

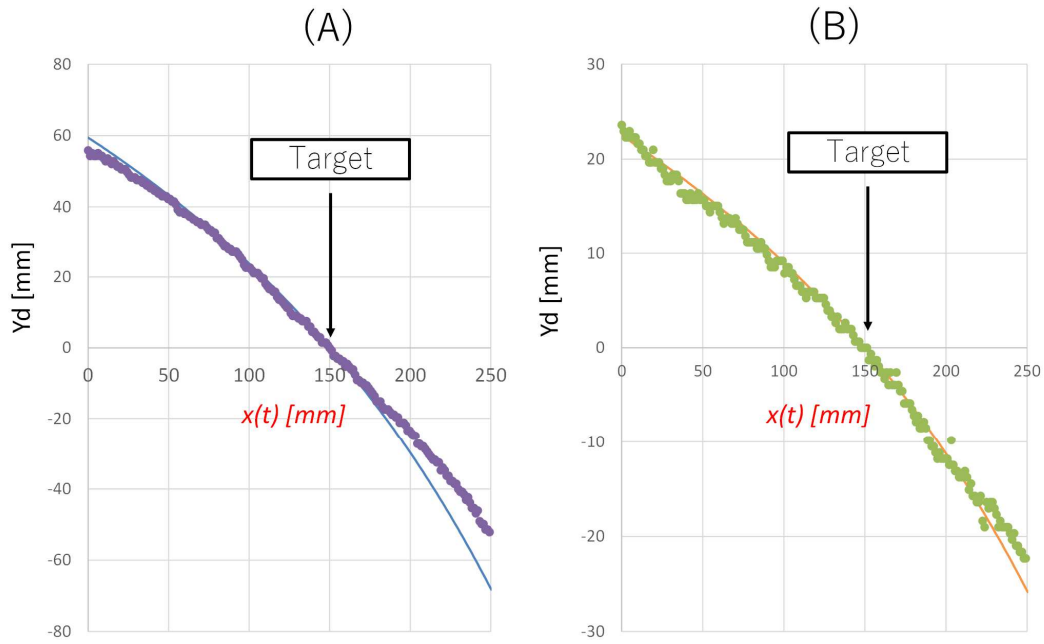


Fig. 6.38 (A)交差法および(B)平行法のシミュレーションと実測値の比較

能性が考えられる。レンズの公式によるとターゲット位置に接近するほど像高は非線形に拡大するので、これを考慮して焦点距離  $f$  やオートフォーカスの影響をモデル上に組み込めばさらに高精度なモデルとできる可能性がある。モデルの精度のさらなる検討については今後の課題であるが、本稿では次なる設計の方針策定に資する仮説をたてる目的のため、以下の検討では倍率に関する仮定が成立すると考えられるターゲット位置到達前 150mm～ターゲット位置到達までの範囲で幾何学的モデルを用いることとする。

図 6.38(B)に交差法の比較の結果を示す。実機パラメータは、 $x_c=450$  mm,  $D=90$  mm,  $M=1$ ( $d=450$  mm),  $x_p=150$ mm とした。同じくターゲット位置到達前 15mm の誤差は最大で 2mm あり、本稿の検討の目的においては十分な精度と思われた。

### 6.10.7 シミュレーション

図 6.39 に並進速度を 27mm/s の場合のステレオカメラユニットの幾何学的配置設計に関する数種類のシミュレーション結果を示す。

図 6.39 の横軸は、ターゲット位置への到達時刻を 0s としたときの相対的時刻であり、例えば -5s はターゲット位置への到達 5 秒前を意味している。-5s～0s の範囲は、上述したターゲット位置到達前 15mm～ターゲット位置到達までの範囲を満たしている。

図 6.39 は、平行法あるいは交差法に関わらず、基線長  $D$  を小さくした場合(シミュレーションでは 1/2)、輻輳距離  $x_c$  を大きくした場合(シミュレーションでは倍)に、相対接近速度をかなり減らせる可能性を示唆している。したがって、これらはひとつの有力な設計方針となり得る。

しかしながら、基線長  $D$  を小さくする設計は前述した【設計制約 1】に、輻輳距離  $x_c$  を大きくする設計は同じく前述した【設計制約 3】に反する。このため、用途に応じて各設計制約とのトレードオフでの利得を判断しなければならないことが明らかになった。

いずれの制約にも反しないようにするには、図 6.40 に示すように少なくとも指標カメラを広画面角化する設計が有効となる可能性が考えられる。基線長  $D$  を大きくとりつつ【設計制約 1】、輻輳

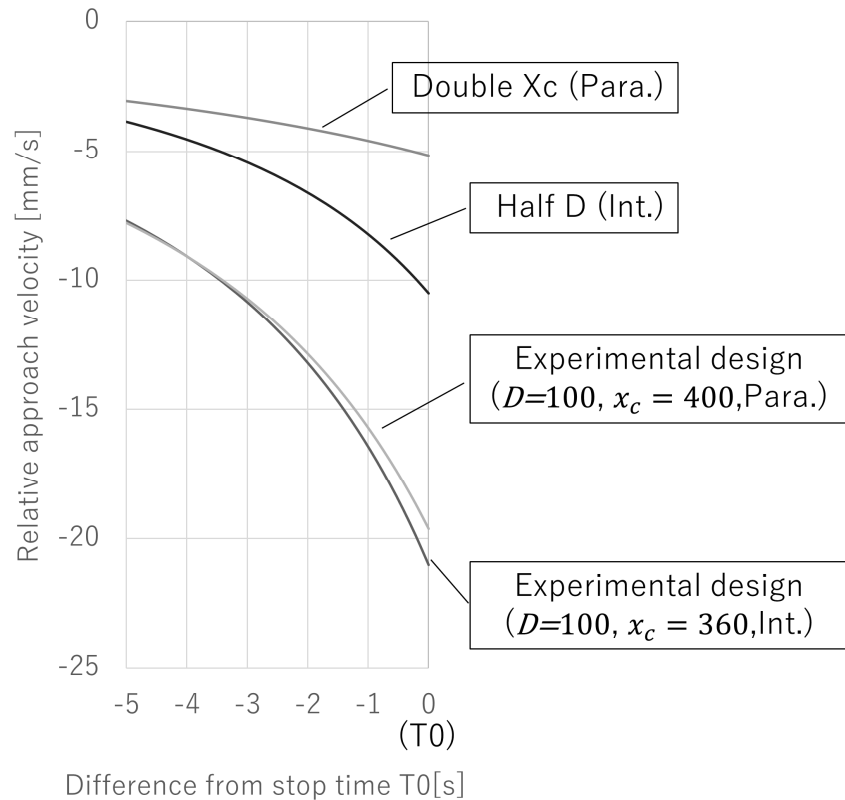


Fig. 6.39 カメラの幾何配置設計シミュレーション

距離 $x_c$ を小さく【設計制約 3】できる可能性があるためである。例えば指標カメラに魚眼レンズやワイドコンバージョンレンズを構成する、あるいは360度カメラを採用する等の詳細設計が考えられ、今後検討を進めていく。

一方、奥行き指標の変位速度が遅くなると、衝突リスクに気づきにくくなる懸念がある。ヒトは特に周辺視野においては、動的なものに敏感といわれているが、この特性の活用が遅い対象に対しては相対的に困難になる可能性が考えられるためである。奥行き指標が多量に表示されてしまうような背景の情報が多いシーンにおいては、動きの情報を欠くとさらに衝突リスクを予測し辛くなると思われる。

したがって、衝突リスクの予測を支援するには、速度によらない強調も有効な手段となると考えられる。例えば、前述したようなカラーマップの応用はユーザの視覚的注意を引くのに有効な情報と考えられ、ステレオマッチングインタフェースにカラーマップの情報を追加した図 6.41 のようなアラートの検討を進めている。

## 6.11 結言

6章では、ロボットの自己位置の予測そのものを、より難易度の低い別の形態の予測に変更する提案をした。すなわち思い通りの移動操作性の向上の観点では、【機能要件 C】ロボット視点を言いながらも予測の難易度を低減する機能を提案した。

この機能を具体的実現するために、さらに下記の機能要件を定め、【機能要件 C-1】注視点のより近傍で奥行き方向のターゲット位置と自己位置とを正確に表現する機能を実現し、機能を確認した。その結果、予測難易度を下げることで、少なくともロボットの自己位置に関する予測誤

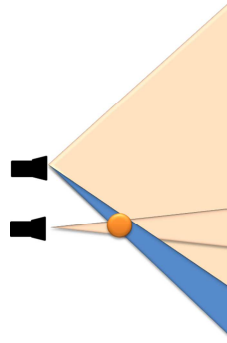


Fig. 6.40 候補となり得る設計コンセプト



Fig. 6.41 カラーマップの情報を追加したステレオマッチングインタフェース

差は低減されることが明らかになった。

6章ではさらに、本稿の研究の重要な方法論である予測支援により思い通りの移動操作性が向上することを、3つの異なるシステムによる3つのタスクを通じ、二段階で検証した。

最後に、奥行き指標の変位速度を下げる設計をした方が予測誤差を低減できる可能性が示唆されたので、モデルに基づく設計シミュレーションにより設計指針を提示した。



---

# 第7章

## 結論

---

### 7.1 概要

本章では一連の検討で得られた、思い通りの移動操作性を向上した遠隔操作型の移動システムを実現するための機能要件をまとめる。並びに、それを実現するための将来的な設計や課題について検討する。

### 7.2 本稿の研究で明らかになった事項

本稿の研究では、第一に、映像表現がユーザによる遠隔操作型の移動システムの自己位置の予測の正確性に及ぼす影響を明らかにできたと考えている。

4章および5章の検討からは、現地サイトの手掛かり(被写体等)の映像上のスケールの知覚に影響する表現(少なくとも表示倍率や奥行き表現)に起因して、ターゲット位置に関する情報と、自己位置に関する情報との間に齟齬が生じれば、予測の正確性に影響が生じることが明らかになった。この影響は、従来注目されてきた通信遅延の影響よりも大きい可能性も示唆された。これらの結果は、従来統一的な見解がなく、情報の精緻化や広範囲化といった通信遅延とのトレードオフ関係にある支援手法、あるいは客観的な視点の映像の追加といったアルゴリズム的な操作を前提とした支援手法の他に有効な手段が提示されてこなかった主たる映像表現の設定に関し、ユーザビリティや感性的品質の観点からの基準の策定に繋がる。

また6章ではロボット視点の映像の奥行き方向のターゲット位置と自己位置とを正確に表現するステレオマッチングインタフェースによる新たな予測支援手法の提案を通じ、自己位置を直接視認できず、2つの情報間の齟齬の回避が困難であったロボット視点の映像のみであっても、また現地サイトの情報の変動があっても、自己位置の予測の正確性を向上できることが示唆された。

また第二に、慎重で、断続的で、アルゴリズム的な操作モードを前提とした従来の遠隔操作型の移動システムに対し、ヒトが元来備えている経験等の内部モデルをそのまま利用できるような、直感的で素早く、訓練(新たな内部モデルの獲得)の負担が少なく、ヒューリスティック的な操作をより多くの場面で実行可能とする知見が得られたと考えている。

4章および5章では、従来のアルゴリズム的な操作モードでは活用されてこなかった誇張されたオプティック・フローという不正確な情報をあえて追加することにより、ユーザの予測をユー

ずに認識されないうちに補償できる可能性を見出した。この手法は通信遅延への影響が小さく、随意的な確認を不要としており、ヒューリスティック的な操作モードでの移動の正確性を向上させるのに有益と考えられる。

またより応用的な 6 章の検討では、ヒューリスティック的な操作モードに重要なロボット視点の映像だけを用いる構成のシステムに新たな予測支援手法を導入することで、「より少ないやり直しあるいは操作時間でより良い移動の精度を得る」という意味で思い通りの移動操作性が向上していることを確認した。

これらの成果は、映像表現の工夫により予測の正確性や思い通りの移動操作性が向上し、もって遠隔操作型の移動システムのユーザビリティ品質および感性的品質の向上に貢献できる可能性を示すものである。本章では、これらの知見を【基本機能】思い通りの移動操作性を向上するための遠隔操作型システムを実現するための、一般的な方法論(=機能要件)としてまとめる。

### 7.3 【機能要件 A】現地サイトの自己位置を正確に予測可能な映像提示

#### 機能

4 章では第一に、映像を通じて現地サイトの空間そのものや、当該空間に存在する何らかの対象が小さく知覚されることで、正の予測誤差が生じる可能性が示唆された。現地サイトの空間のスケールに関する知覚の変化は、映像化により自己位置に関する視覚情報の倍率が変化することや、背景に含まれる手がかりの観察を通じて得られる(相対的な)奥行き情報が損なわれること等、映像の表現の問題で生じる可能性を指摘した。

以上の結果は、遠隔操作型の移動システムの思い通りの移動操作性の向上には、【機能要件 A】**現地サイトの自己位置を正確に予測可能な映像提示機能**が必要であるという基本的な要件を示唆している。特に、映像表現がスケールの知覚に及ぼす影響を配慮した設計をする必要がある。この観点では、生理的な問題を克服できれば、立体感によりヒューリスティックに利用が可能なスケールに関する情報を追加可能な 3D 映像も有効な手段となってくるはずであり、今後の課題である。ただし 5 章で述べたように、3D 映像を通じて知覚される空間は幾何学的に歪むため、必ずしも正しいスケールの映像表現が可能とはいえない。映像表現がスケールの知覚に及ぼす影響の重要性は 5 章の検証でも確認された。5 章のスキームではターゲット位置の情報を正確にする(予測誤差の計測条件(3 章))ために、ターゲット物体の大きさという絶対的な情報を提示した。しかし本来、ユーザはターゲット物体としての現地サイトの対象のサイズに関する正確な知識や、それに対する所定のターゲット位置への到達の明確な経験を必ずしも有しておらず、スケールの知覚はさらに難しくなる。映像表現としては、少なくとも表示倍率(あるいは表示画面に対する注目対称の占有割合や画角等の影響も想定される(松田, 2002))と、奥行き表現とに着目する必要があることが示唆され、これらの影響を明らかにすることが今後の重要な課題となる。

さらに 5 章の検討では、ターゲット位置に関する情報と、自己位置に関する情報との間に少なくともスケールの違いに関する齟齬が生じない条件では、予測誤差が低減されることが示された。すなわち、機能要件 A を実現するには、【機能要件 A-1】**知覚されるターゲット位置と自己位置との相対的スケールが同等となる映像表現**を満たすことが有効な手段となると考えられる。自己位置と、ターゲット位置の情報とを同時に客観的に捉えることのできる環境カメラの視点の映像を

用いる手法では比較的容易にこの条件を満足できる。しかしながら、環境カメラ視点の映像の頻繁な利用はユーザがロボットに自己を重ね合わせるような体験には不利であり、アルゴリズム的な操作モードが前提となっており、これに習熟するにはシステムに関する新たな内部モデルの獲得(訓練による習熟)が必要であるため、本研究の最終目的には不十分であることは繰り返し述べてきた。したがって本研究の目的において将来的に重要となるのは、ロボット視点の映像を設計制約として、自己位置に関する奥行き方向手前側に存在する空間のスケールと、ターゲット位置に関するより奥側の空間のスケールとが同等に知覚されることと考えられる。例えば、遠隔操作型の移動システムに構成するロボット視点のカメラの視野(撮像面角)はレンズの特性によって大きく異なり、視野によって手前側の像(自己位置の予測に関わる)と奥側の像(ターゲット位置の認知に関わる)との見え方(撮像素子上の相対位置やサイズ)、背景の情報も大きく変動するため、各条件が予測誤差に及ぼす影響を検討する必要がある。ヒトの水平方向の視野角は全体で約 200°, 安定注視野は最大 90°, 有効視野は約 30°といわれている(清川, 2007)が、これらと対応する仕様のレンズ・ディスプレイを用いる設計は有効な手段となる可能性がある。手前と奥とを独立した表現の映像として表示する手法も考えられる。感性的品質の向上のためには、映像から知覚される現地サイトの手掛かりの絶対的スケールの考慮も重用な課題と考えられる。ユーザがロボットに自己を重ね合わせるような自己投影体験であれば、等身大の体験(特に視点(カメラ)の高さには注意する必要がある)が望ましいと想定されるためである。また、ロボット視点の映像内になるべく、システム自身のサイズを知覚できる(自動車の運転でいえば車幅感覚を得られる)情報として、システムの一部の情報を映し込むのも有効と考えている。

## 7.4 【機能要件 B】 予測誤差変動の推定とこれを無意識のうちに補償する

### 機能

4章および5章で検討したように、予測の正確性は移動操作の実行段階での情報(すなわち自己位置の予測に用いる第二の情報等)に応じて変動する。5章では、実行段階でのロボット視点の映像(に含まれるターゲット物体像)の拡大の出現する応用場面を考察したが、この場面は、例えば現地のヒトと顔を合わせたり、遠距離のターゲット物体を手がかりにして移動したりするため、ロボットの操作中に映像をズームして拡大する場面で想定できる。コミュニケーション上非常に便利な機能であり、考慮が必要と考えられる。また、既に遠隔操作やこれに類似する経験を有しており、以前の予測構築の際に用いたものよりも大きいサイズのディスプレイ、高倍率のカメラ等で構築されたシステムを用いる場面でも想定される。映像を提供するディスプレイ等の認知インタフェースのサイズや視野角(ヘッドマウントディスプレイを使用する場合等)は現地サイトの空間の知覚をゆがめる要因の一つである。遠隔移動体験の度に、提供されるシステムのディスプレイサイズが変わるようであれば、それに応じて予測誤差が変動する可能性がある。カメラの取り付け位置や姿勢によっても現地サイトの対象の見え方は変動すると考えられる。他に、ターゲット物体が可動であればそれ自身が接近してくる場面も考え得る。典型的な場面は現地サイトの参加者がユーザとしての遠隔操作型の移動システムに接近してくることであり、この場合に5章と同様の予測誤差が生じれば、現地サイトの参加者はユーザに近付きたいのに、ユーザは参加者から離れた位置で停止し、しかもユーザはそれにすぐに気づけない、といった通常のコミュニケーションでは生じ辛い違和感の原因になる。あるいはターゲット物体サイズを実際のサイズよりも

大きいと錯覚する場面も考え得る。これは、映像を介して遠隔環境を観察することに起因する。通常、人間は大きさ恒常性のメカニズムにより、網膜上に投影される物体像のサイズが変動しても物体の物理的なサイズを不変に認知できる。しかし、このメカニズムは後述する奥行き情報の認知と密接な関係があり、ディスプレイ上で奥行き認知が困難になればターゲット物体のサイズは誤認され得る。このような状況下では、特定の状況での操作に習熟したとしても、多くの場面での思い通りの移動操作性を向上するのは困難である。

この知見からは、基礎的な検討を積み上げて予測誤差の発生を予め推定したり、あるいは本研究ではベイズの手法を用いたが操作に応じて推定したりする手段による【機能要件 B】予測誤差変動の推定とこれを無意識のうちに補償する機能が要求されると考えられる。

これに対して 4 章の実験で基礎的な検討を行い、5 章でその応用可能性を確認したように、画像処理(ヴィジュアルエフェクト)による予測誤差の補償効果が有効な手段となり得る。本稿の研究ではオプティック・フローの情報を加えることにより、ユーザの予測誤差を少なくとも正の方向に無意識のうちに変調できる可能性を指摘した。この変調効果は、予測誤差が負になる条件を特定できれば、その補償のために応用できる可能性があったところ、5 章ではそれを明らかにした。すなわち、【機能要件 B-1】映像に応じて適切なオプティック・フローを生じさせる機能の検討が今後の課題となる。少なくとも、表示倍率の拡大・縮小に応じたオプティック・フローの追加はヒューリスティック的な自己位置の予測に有効と考えられる。このためには、個人差を踏まえた上で映像表現およびオプティック・フローが予測の正確性に及ぼす影響を定量的に明らかにする必要がある。今後さらなる応用に繋げるには、予測誤差の変調量を増加させ、また変調量のばらつきが自己のプロジェクトの許容範囲に収まるように安定させ、さらには個人のベクション感度に対する最適化が重要な課題となる。他に、スケール感を錯覚させるヴィジュアルエフェクトは主として芸術の分野で知られており、これらの工学的応用も興味深い課題と考えている。

#### ・システムの適応的な移動の修正について

機能要件 B ではユーザの予測を変調することを提案しているが、システムの側で適応的に移動を修正する手段によっても、見かけ上の予測誤差は小さくなる。しかしながら、この修正はユーザに認知され、予測を裏切ったり、予測に基づく素早い出力の調整に影響を及ぼしたりする可能性がある。このため、予測誤差に関してはシステムの修正に起因する誤差(3章の $E_r$ )と、予測(3章の $P$ )との2要因が変化することになり、これらが互いに衝突してかえって思い通りの移動操作を妨げてしまう可能性がある。この衝突は操作衝突と呼ばれ、主体感を損なう原因といわれている(奥岡他, 2021)。このため、自動と手動とのバランスが課題となる。

これに対して予測の1要因に介入することが、思い通りの移動操作性の向上のためにシンプルな手段となり得る。介入手段に適応的な修正の機能を持たせることは、予測を変調するためのオプティック・フロー等の刺激を表示するインタフェース(5章)の個人差への対応に生かせる可能性があり、検討を進める。

## 7.5 【機能要件 C】ロボット視点を用いながらも予測の難易度を低減する

### 機能

4 章では、ターゲット位置とシステムの自己位置との誤差を直接視認できない限り、大きな予

Table 7.1 基本機能と機能要件定義

<p>【基本機能】</p> <p>思い通りの移動操作性を向上するための遠隔操作型の移動システム</p>
<p>【機能要件】</p> <p>【A】 現地サイトの自己位置を正確に予測可能な映像提示機能</p> <p>    【A-1】 知覚されるターゲット位置と自己位置との相対的スケールが同等となる映像表現</p> <p>【B】 予測誤差変動の推定とこれを無意識のうちに補償する機能</p> <p>    【B-1】 映像に応じて適切なオプティック・フローを生じさせる機能</p> <p>【C】 ロボット視点を用いながらも予測の難易度を低減する機能</p> <p>    【C-1】 注視点のより近傍で奥行き方向のターゲット位置と自己位置とを正確に表現する機能</p>

測誤差が生じてしまうことが明らかになった。このことは一人称視点の映像(すなわちロボット視点の映像)と三人称視点の情報とを並べて用いる従来手法で正確な移動が必要となれば、後者を注視しながらのアルゴリズム的な操作モードが支配的となり、自己をロボットに重ね合わせるのに有利な前者の映像の観察が妨げられることを示唆している。予測の正確性が向上するほど、誤差認知のために割かれるリソースが低減でき、ひいてはヒューリスティック的な操作モードの占める時間的な割合が増加するものと考えられる。そして本研究の最終目標を達成するには、ロボット視点の映像のみを用いてより多くの体験が完結することが望ましい。三人称視点の操作を行う場合は、訓練によってシステムに関する新たな内部モデルを獲得し、効率的な操作を実行できるようになる可能性はあるが、これは本稿の研究で重要視しているユーザが現地サイトのロボットに自己の体験を投影できるような魅力的な体験(感性的品質)に繋がりにくい。

しかしロボット視点の映像のみでは自己位置の直接的な視認ができないため予測の難易度が高くなり、大きな予測誤差が発生することが懸念される。したがっていかに、**【機能要件 C】 ロボット視点を用いながらも予測の難易度を低減する機能**を実現できるかが重要になると考えられる。6章では、この機能を実現するための具体的な認知インタフェースを開発し、その予測誤差を計測した。具体的には**【機能要件 C-1】 注視点のより近傍で奥行き方向のターゲット位置と自己位置とを正確に表現する機能**を実現するために、既存の技術の調査を通じてさらに下位の機能要件を定義し、ステレオマッチングインタフェースとして実装した。そしてこの機能確認を通じ、**【機能要件 C-1】**が予測誤差の低減に有効であることを検証した。そしてこの**【機能要件 C-1】**の提案が、「より少ないやり直しあるいは操作時間でより良い移動の精度を得る」という基本機能の機能要件として正しいかどうか検証を行い、思い通りの移動操作性が向上していることを確認した。6章ではさらに、予測誤差をさらに低減するためにステレオマッチングインタフェースで用いる奥行き指標の相対的な変位速度を減速させるための設計方針を考察した。今後はこの設計を具体の用途のシステム(例えば 6.8 節で言及したシステム)に実装して、その効果を検証する計画である。本稿の研究では思い通りの移動操作性の指標に陽に反映できなかった、感性的品質(主体感)のより直接的な評価も今後の重要な課題である。

## 7.6 結言

以上、本稿の研究では、思い通りの移動操作性を向上した遠隔操作型の移動システムに関する

基本的な機能要件を提案できたと考えている。これを表 7.1 にまとめて示す。

また、【機能要件 C-1】に関しては、これが「より少ないやり直しあるいは操作時間でより良い移動の精度を得る」ことを確認できた。他の機能要件についてはさらなる検証が、機能要件 C については応用が、今後の重要な課題となる。

---

## 参考文献

---

- 3D Consortium(3DC), 3DC Safety Guidelines for Dissemination of Human-friendly 3D(2010), pp.10-18.
- 安部川直稔, 西田眞也, 五味裕章, 視覚刺激に誘発される反射的腕応答, TECHNICAL REPORT OF IEICE NC2003-216, 2004, 第 134 頁
- Adedamola A. O., 動揺病 - 22. 外傷と中毒 - MSD マニュアル プロフェッショナル版(2016), <<https://www.msdmanuals.com/ja->>
- AllAboutUx.org, All UX evaluation methods (2021). < <https://www.allaboutux.org/all-methods> >
- 安藤広志, カラン明子, Nawa N. E., 西野由利恵, Liu J., 和田充史, 坂野雄一, 臨場感の知覚認知メカニズムと評価技術, 情報通信研究機構季報, Vol. 56, Nos. 1/2(2010), pp. 157-165.
- 青木美優, 渡邊朗子, 成年男子における立位と椅子座位の小型移動ロボットに対する個体距離に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 76, No. 664(2011), pp. 1093-1100.
- Apple Inc., Human interface guidelines, 2021, <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/>
- 荒金陽助, 辻ゆかり, 吉開範章, ドライバ情報処理能力配分モデルの提案とその評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 7(2001), pp. 1770-1780.
- 浅井智久, 丹野義彦, 自己主体感における自己行為の予測と結果の関係・行為主判別に対する学習課題を用いた検討, パーソナリティ研究, Vol. 16, No. 1(2007), pp. 56-65.
- avatar in Inc. (2021), <<https://avatarin.com/avatar/newme/>>
- Baurès, R, Bennett, SJ and Causer, J, Temporal estimation with two moving objects: overt and covert pursuit, Experimental Brain Research, Vol. 233, No. 1(2014), pp. 253-261.
- Bennett, S. J. and Benguigui, N., Spatial estimation of accelerated stimuli is based on a linear extrapolation of first-order information. Experimental Psychology, Vol.63, No.2 (2016), pp. 98-106.
- Brandt, T., Dichgans, J. and Koenig, E., Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception, Experimental Brain Research, Vol. 16, Issue 5(1973), pp 476-491.
- Canon IT Solutions Inc., MR (2021), <<https://www.canon-its.co.jp/solution/mr/>>
- Christensen, H. I., A Roadmap for US Robotics from Internet to Robotics(2020). <

- <https://www.hichristensen.com/pdf/roadmap-2020.pdf> >
- Digital Advantage Corp., 身体性 (Embodiment)とは？, AI・機械学習の用語辞典 (2021).  
<<https://www.atmarkit.co.jp/ait/articles/2102/10/news019.html>>
- Donovan, J., *Mastering Oculus Rift Development*, Packt Publishing(2017).
- Ernst, M. O., Banks, M. S., “Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion,” *Nature*, Vol. 415(2002), p429-433.
- Flavell, J. C., Barrett, B. T., Buckley, J. G., Harris, J. M., Scally, A. J., Beebe, N. B., Cruickshank, A. G. and Bennett, S. J., Temporal estimation in prediction motion tasks is biased by a moving destination, *Journal of Vision*, Vol. 18, No. 5(2018), pp.1–11. doi: <https://doi.org/10.1167/18.2.5>
- 福田忠彦, 運動知覚における中心視と周辺視の機能差, *テレビジョン学会誌*, Vol. 33, No.6(1979), pp.479-484.
- 福井隆雄, 乾敏郎, 視覚情報の到達把持運動に及ぼす影響, *Cognitive studies*, Vol. 9, No. 4(2002), pp. 487-489.
- 舟川政美, 車速伝達装置および車速伝達方法, 特開 2010-173492 (2010).
- 古田貴之, 吉田智章, 西村健志, 大和秀彰, 原発内作業・調査ミッション用ロボットの開発と改良, *日本ロボット学会誌*, Vol. 32, No. 2(2014), pp. 92-97.
- 古屋弘, 栗生暢雄, 清水千春, 3D 画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」, *大林組技術研究所報*, No.76 (2012), pp. 1-10.
- Gallagher, S., Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.4, No.1(2000), pp. 14-21.
- Iwasaki, M., Zhou, J., Ikeda, M., Koike, Y., Onishi, Y., Kawamura, T. and Nakanishi, H., “That robot stared back at me!”: Demonstrating perceptual ability is key to successful human-robot interactions, *Frontiers in Robotics and AI*, Vol.6, No.85(2019), pp.1-12.
- Kruschke, J. K., *ベイズ統計モデリング*, 共立出版(2017).
- NEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構), *NEDO ロボット白書*(2014), pp.4-1 - 4-89.
- ギブソン, J. J., *生態学的知覚システム*, 東京大学出版会(2011).
- ギブソン, J. J., *直接知覚論の根拠*, 勁草書房(2004).
- 伊藤崇之, 技研における立体テレビの研究成果, *NHK 技研 R&D*, No.123 (2010), pp.48-55.
- ギブソン J.J., *ギブソン生態学的視覚論*, サイエンス社(1985).
- Graaf, B., Wertheim, A. H., Bles, W. and Kremers, J., Angular velocity, not temporal frequency determines circular vection, *Vision Res.*, Vol.30, No.4(1990), pp.637-46.
- Guest, S. and Spence, C., What role does multisensory integration play in the visuotactile perception of texture?, *International Journal of Psychophysiology*, Vol.50(2003), pp.63-80.
- 平野純弘, 超長距離からの遠隔操作実証実験, *西松建設技報*, Vol.36 (2013), pp.1-2.
- 久野義徳, アクティブビジョン：歴史と展望, *人工知能学会誌*, Vol. 10, No. 4(1995), pp. 493-499.
- 堀口明伯, 車両後方視界支援装置, 特開平 10-211849(1997).



- Huang J., 認知症 - 07. 神経疾患 - MSD マニュアル プロフェッショナル版(2016), <<https://www.msdmanuals.com/ja>>
- 出澤正徳, 程暁宏, 両眼視・運動視における体積感知覚と 3D 映像の表示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.21, No.1(2016), pp. 85-92.
- IJsselsteijn, W., Baren, J. and Lanen, F., Staying in touch: Social presence and connectedness through synchronous and asynchronous communication media communication media, HCI International (2003), pp.924-928.
- Ikei Laboratory, 超臨場感ディスプレイとテレプレゼンスの開発研究 (2019). <<http://reality.sd.tmu.ac.jp/research.html>>
- 今井忠則, 作業参加が健康関連 QOL に及ぼす影響の 1 年間の変化—健康中高年者のコホート研究—, 作業療法, Vol.38, No.3(2019), pp.304-313.
- 稲見昌彦, 橋本直, ロボット操作インタフェースの新展開-JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクトでの試み-, 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 6(2012), pp. 592-594.
- 乾敏郎, 感覚・知覚・認知の基礎, オーム社(2012).
- 乾敏郎, 知覚・認知・運動・感情・意思決定をつなぐ自由エネルギー原理, 日本神経回路学会誌, Vol. 25, No. 3(2018), pp. 123-134.
- 一般財団法人デジタルコンテンツ協会, 没入型映像システムに関する戦略策定報告書(2016), pp. 7-8.
- Itaguchi, Y., Toward natural grasping with a tool: effects of practice and required accuracy on the kinematics of tool-use grasping, Journal of neurophysiology, Vol. 123, No. 5(2020), pp. 2024-2036, DOI : 10.1152/jn.00384.2019.
- Ito, H. and Shibata, I., Self-motion perception from expanding and contracting optical flows overlapped with binocular display, Vision Res., Vol.45(2005), pp.397-402.
- 伊藤禎宣, 坂野雄一, 藤野健一, 安藤広志, 無人化施工において遠隔操縦の映像環境が作業効率に与える影響について, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol. 73, No. 1 (2017), pp. 15-24.
- 伊藤友孝, 弓達孝治, 松井隆, 人の操作特性を考慮した人間機械協調テレロボティック作業支援システムの構築に関する実験的考察, 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No. 1 (2006), pp. 70-79.
- 岩村吉晃, 能動的触知覚 (アクティヴタッチ) の生理学, バイオメカニズム学会誌, Vol. 31, No.4(2007), pp. 171-177.
- 岩滝宗一郎, 孫蔚, 藤井浩光, 淵田正隆, アレッサンドロモロ, 野田隆司, 久禮一樹, 中沢浩一, 吉灘裕, 山下淳, 浅間一, ブルドーザの位置姿勢変化および周囲危険領域を提示可能な任意視点映像提示, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 866 (2018), DOI: 10.1299/transjsme.18-00196.
- 門田浩二, 潜在的な視覚運動制御からみたスポーツ動作, スポーツ心理学研究, Vol. 37, No. 2(2010), pp.123-131.
- 川端邦明, 檜葉遠隔技術開発センターにおける廃炉のための遠隔技術開発および操作訓練を支援する技術開発の取り組み, 日本ロボット学会誌, Vol. 36, No. 7(2018), pp. 460-463.
- 河合隆, 盛川浩志, 太田啓路, 阿部信明, 3D 立体映像表現の基礎, オーム社(2010).

- 河村拓実, 松永和樹, 藪田哲郎, 閉眼受動型教示した線分の描画再生における機械的な負荷に対する視覚の有無が及ぼす影響, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J97-A, No.9(2014), pp.604-613.
- 川人光男, 脳の計算理論, 産業図書(1996).
- Kiltner, K., Groten, R. and Slater, M., The sense of embodiment in virtual reality, Presence, vol. 21, no. 4(2012), pp. 373-387.
- 桐谷賢治, 五味裕明, 阪口豊, 川人光男, 脳の計算機構, 朝倉書店(2007).
- 喜多信之, Rougeaux, S., 國吉康夫, 坂根茂幸, 仮想ホロボタを用いた実時間両眼追跡, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5 (1995), pp.683-690.
- 喜多伸之, 人間に学ぶアクティブ・ビジョン・システム, 情報処理, Vol. 36, No. 3(1995), pp.264-272.
- 清川清, バーチャルリアリティにおける視覚提示技術, 日本知能情報フuzzy学会誌, Vol. 19, No. 4(2007), pp. 318-325.
- 小林太, 小島史男, ロボット遠隔操作のための近接センサを用いた適応的環境提示システムの開発, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.712 (2005), pp.160-167.
- 小堀聡, 人間の知覚と運動の相互作用—知覚と運動から人間の情報処理を考える—, 龍谷理工ジャーナル / 龍谷大学理工学会 編, Vol. 1, No. 60(2011), pp.24-31.
- 小鷹研理, HMD による構成的空間を舞台とした「三人称的自己」の顕在化, 人工知能学会全国大会論文集(2018), 3D1-OS-7a-04.
- 国立障害者リハビリテーションセンター, 高次脳機能障害を理解する (2020). <[http://www.rehab.go.jp/brain\\_fukyu/rikai/](http://www.rehab.go.jp/brain_fukyu/rikai/)>
- 小松智広, 油圧シヨベル用無線遠隔操縦ロボット, 油空圧技術, Vol.56, No. 8 (2017), pp.44-47.
- 河野仁, 田村雄介, 山下淳, 神村明哉, 富田康治, 鈴木剛, 浅間一, ロボット遠隔操作のためのポテンシャル法を用いた注意環境の記録と提示手法, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集(2016), 1P1-15a6.
- 厚生労働省大臣官房統計情報部, 生活機能分類の活用に向けて(案)-ICF(国際生活機能分類): 活動と参加の評価点基準(2007), <<https://www.mhlw.go.jp/shingi/2007/03/dl/s0327-51.pdf>>
- 厚生労働省, 令和 2 年版厚生労働白書-令和時代の社会保障と働き方を考える-(2020). <<https://www.mhlw.go.jp/stf/wp/hakusyo/kousei/19/index.html>>
- 厚生労働省編, 高次脳機能障害診断基準ガイドライン (2020), <[http://www.rehab.go.jp/brain\\_fukyu/data/](http://www.rehab.go.jp/brain_fukyu/data/)>
- 熊崎晶規, 寺田和憲, 伊藤昭, 触運動による長さ知覚における視覚の役割, 電子情報通信学会技術研究報告 HIP ヒューマン情報処理, Vol.106, No.328(2006), pp.1-6.
- 國吉康夫, ステレオトラッキング視覚を搭載した小型移動ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.3 (1995), pp.343-346.
- 黒須正明, ユーザエクスペリエンスにおける感性情報処理, 放送大学研究年報, No.30(2012), pp. 93-109.
- Kurosu M. and Hashizume A., Concept of satisfaction, Proceedings of the 5th KEER(2014), pp 1103-1112.

- Kurosu M., User Interfaces That Appeared in SciFi Movies and Their Reality, DUXU(2014), Part I, LNCS8517, pp.580-588.
- Lanca M. and Bryant D. J., “Effect of orientation in haptic reproduction of line length”, Perceptual and motor skills, Vol.80(1967), pp. 1291-1298.
- Landy M. S., Maloney L. T., Johnson E. B., Young M., “Measurement and Modeling of Depth Cue Combination: in Defense of Weak Fusion,” Vision res.vol.35, pp.389-412, 1995.
- 前田貴記, Sense of Agency: 自己意識の神経心理学, 神経心理学, Vol.35, No.4(2019), pp. 178-186.
- Marr D., ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現, 産業図書(1987).
- Maslow A. H., 人間性の心理学-モチベーションとパーソナリティ, 産業能率大学出版部(1987).
- 松田隆夫, 二次元画像上の人物に対する距離の知覚, 立命館人間科学研究, No.3(2002), pp. 47-54.
- 松吉大輔, 個人差・連続と異質が交錯するヒト認知の多様性, 基礎心理学研究, Vol.34 ,No.2(2015), pp.276-281.
- Meredith GR, Rakow DA, Eldermire ERB, Madsen CG, Shelley SP and Sachs NA, Minimum Time Dose in Nature to Positively Impact the Mental Health of College-Aged Students, and How to Measure It: A Scoping Review, Front. Psychol. 10:2942(2020). doi: 10.3389/fpsyg.2019.02942
- 宮木由貴子, 自動車の日常的な利用目的 ～人口 30 万人未満の都市規模の 60 代では約 4 割が「通院」に利用～, 第一生命経済研究所 LIFE DESIGN REPORT WINTER(2019) , pp. 23-25.
- 水本篤, 竹内理, 研究論文における効果量の報告のために : 基本的概念と注意点, 英語教育研究, Vol.31(2008), pp.57-66.
- 水島知央, 神蔵貴久, 大前学, 遠隔型自動運転システムにおける遠隔操作時の映像遅延が操舵の操作に与える影響の研究, 自動車技術会論文集, Vol. 50, No. 3(2019), pp. 970-956.
- Mordvintsev, A. and Abid, K., OpenCV-Python tutorials, image processing in OpenCV, Canny edge detection (2013). <<https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io>>
- 森川敏彦, 臨床試験における多重性問題への統計的接近法, 計量生物学, Vol. 2008, No.1(2008), pp. S15-S32.
- 森重健一, 宮本弘之, 大須理英子, 川人光男, 経路点到達運動の位置分散は軌道計画・実行の逐次モデルを支持する, 電子情報通信学会和文論文誌 D-II, Vol. 87, No.2(2004) ,pp716-725.
- 森山和道, 重度障害者が遠隔操作ロボットで接客するカフェ「DAWN ver.」が期間限定オープン, 日本機械学会誌, Vol. 122, No. 1204 (2019), pp. 40-41.
- Motoi, N., Kobayashi, M. and Masaki, R., Remote control method for mobile robot based on force feedback generated using collision prediction map, IEEJ J. Industry Applications, Vol. 8, No. 4(2019), pp. 727-735.
- 村上友樹, 中西英之, 野上大輔, 石黒浩, ロボット搭載カメラの移動がテレプレゼンスに与える影響, 情報処理学会論文誌, Vol.51, No.1(2010), pp.54-62.
- Murphy, R.R., 牧田忍, ニューヨーク世界貿易センター (WTC) でのレスキューロボット (<特集>災害対応のためのロボティクス) , 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1019 (2003), pp. 794-802.

- 鍋島厚太, 國吉康夫, 対象同定に基づく道具身体化の計算論, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6(2007), pp. 99-107.
- 長倉克枝, 双腕ロボットがバリスタやコンビニ店員に、外出困難者に就労の道を開く, 日経クロステック(2020), <<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/04579/>> ,
- Nakai, T. and Nishimoto, S., Quantitative models reveal the organization of diverse cognitive functions in the brain, Nature Communications, Vol 11, No. 1142(2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14913-w>
- 中嶋慶輔, 福地健太郎, 周辺視野の動的知覚特性にもとづくスポーツ映像の速度感増強システム, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション(HCI), No.8(2013), pp.1-7.
- 中嶋宏, 森島泰則, 山田亮太, Scott Brave, Heidi Maldonado, Clifford Nass, 川路茂保, 人間-機械協調システムにおける社会的知性, 人工知能学会論文誌, Vol. 19, No. 3 (2004), pp. 184-196,
- 中山遼平、四本裕子, メタ認知, 脳科学辞典(2012), DOI : 10.14931/bsd.2412
- 鳴海拓志, Pseudo-haptics 応用インタフェースの展望, システム/制御/情報, Vol. 61, No. 11 (2017), pp. 463-468.
- 成瀬継太郎, 河野智也, 阿部文明, 中村啓太, 矢口勇一, 小川純, ロボット遠隔操作エッジネットワークと物理=情報現実空間を用いたロボットの遠隔操作システム, 2018 年度精密工学会秋季大会(2018), pp.105-106.
- NEDO, 災害対応無人化システム研究開発プロジェクト 作業移動機構の開発 遠距離ヒューマンインターフェイスの開発, 平成 23 年度~平成 24 年度成果報告書, P11018 (2013), pp.65-72.
- 日本電信電話株式会社, 障がい者の活躍推進に取り組む国際イニシアティブ「The Valuable 500」への加盟および遠隔操作型分身ロボット「OriHime-D」を活用した障がい者による受付業務トライアルの実施について, NTT 持株会社ニュースリリース(2019), available from <<https://www.ntt.co.jp/news2019/1912/191219a.html>>, (参照日 2020 年 5 月 20 日).
- 日本学術会議社会学委員会社会福祉学学科会, 社会的つながりが弱い人への支援のあり方について -社会福祉学の視点から-, 学術の動向, Vol.23, No.11(2018), pp.11-91.
- 日本老年医学会, フレイルに関する日本老年医学界からのステートメント(2014), < [https://jpn-geriat-soc.or.jp/info/topics/pdf/20140513\\_01\\_01.pdf](https://jpn-geriat-soc.or.jp/info/topics/pdf/20140513_01_01.pdf)>
- 日本視覚学会編, 視覚情報処理ハンドブック(2017), pp.283-333, 朝倉書店.
- 日本神経科学学会, 認知症疾患診療ガイドライン, 医学書院(2017), pp.1-23, < [https://www.neurology-jp.org/guidelinem/nintisyo\\_2017.html](https://www.neurology-jp.org/guidelinem/nintisyo_2017.html)>
- Niki K, Okamoto Y, Maeda I, Mori I, Ishii R, Matsuda Y, Takagi T and Uejima E., A Novel Palliative Care Approach Using Virtual Reality for Improving Various Symptoms of Terminal Cancer Patients: A Preliminary Prospective, Multicenter Study, J Palliat Med, Vol. 22, No. 6(2019), pp. 702-707. doi: 10.1089/jpm.2018.0527. Epub 2019 Jan 24. PMID: 30676847.
- ノーマン D. A., 誰のためのデザイン? 認知科学者のデザイン言論, 新曜社認知科学選書(2013)
- 小田光茂, 衛生搭載ロボットアームの遠隔操作模擬実験-通信時間遅れや通信容量制約等の環境を模擬した実験-, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.4 (1997), pp.581-589.
- 岡嶋克典, 視覚情報によって誘発されるクロスモーダル効果, 映像情報メディア学会誌, Vol. 72,

- No. 1(2018), pp. 8-11.
- 奥岡耕平, 大澤正彦, 今井倫太, 遠隔操作と自律操作を適応的に切り替える半自律テレプレゼン  
スロボットアーキテクチャ, 人工知能学会論文誌, Vol. 36, No. 2D(2021), pp. 1-12.
- Okura F., Ueda Y., Sato T. and Yokoya N., Teleoperation of mobile robots by generating  
augmented free-viewpoint images, 2013 IEEE/RSJ International Conference on  
Intelligent Robots and Systems, 2013, pp. 665-671, doi: 10.1109/IROS.2013.6696422
- 大野和則, 城間直司, レスキューロボットの遠隔操作支援技術, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No.  
2(2010), pp. 160-163.
- OryLab Inc. (2021), <<https://orihime.orylab.com/>>
- ポランニー M., 暗黙知の次元, 筑摩書房(2003)
- Rizzolatti G. and Craighero L., The mirror-neuron system, Annual Review of Neuroscience,  
Vol.27(2004), pp.169-92.
- Rosenbaum, D.A., Perception and extrapolation of velocity and acceleration, Journal of  
Experimental Psychology: Human Perception and Performance, Vol. 1, No. 4 (1975), pp.  
395-403.
- Roto V., Law E., Vermeeren A. and Hoonhout J., USER EXPERIENCE WHITE PAPER(2011).
- Saito, T., Murata, C., Saito, M., Takeda, T. and Kondo, K., Influence of social relationship  
domains and their combinations on incident dementia: a prospective cohort study, J  
epidemiol community health, Vol.72, No.1(2018), pp. 7-12.
- 齋藤研作, 清川清, 竹村治雄, 移動ロボットの遠隔操縦インタフェースのための全方位映像と三  
次元形状モデルを用いた情報提示手法, TVRSJ, Vol. 12, No. 4(2007), pp. 537-547.
- 阪口豊, 上肢到達運動制御の計算モデルとその課題, VISION, Vol.16, No.2 (2004), pp.93-110.
- 佐藤徳, 何が自己を自己たらしめるか? 運動主体感の研究から, 認知科学, Vol. 18, No. 1(2011),  
pp. 29-40, DOI: <https://doi.org/10.11225/jcss.18.29>.
- Sato A. and Yasuda A. Illusion of sense of self-agency: discrepancy between the predicted and  
actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the  
sense of self-ownership. Cognition, Vol. 94, No. 3(2005), pp. 241-255. doi:  
10.1016/j.cognition.2004.04.003. PMID: 15617673.
- 佐藤徳孝, 松野文俊, レスキューロボット遠隔操縦インタフェース技術, 日本ロボット学会誌,  
Vol. 28, No. 2 (2010), pp. 156-159.
- 佐藤貴亮, アレッサンドロモロ, 藤井浩光, 杉本和也, 野末晃, 三村洋一, 小幡克実, 山下 淳, 浅  
間 一, 無人化施工における擬似俯瞰映像提示システムの開発, ロボティクスシンポジウム予稿  
集, Vol.19 (2014), pp.346-352.
- 佐藤貴亮, 藤井浩光, Alessandro Moro, 杉本和也, 野末晃, 三村洋一, 小幡克実, 山下 淳, 浅  
間 一, 無人化施工用俯瞰映像提示システムの開発, 日本機械学会論文集, Vol.81, No. 823(2014),  
DOI: 10.1299/transjsme.14-00031.
- 佐藤隆哉, 亀崎允啓, 山田充, 橋本毅, 菅野重樹, 岩田浩康, 無人化施工の掘削・リリース作業に  
おける側面カメラの最適および好適配置の実験的導出, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.876  
(2019), DOI: 10.1299/transjsme.19-00066.

- 澤島康仁, 空間認知特性に基づいた自然なインテグラル立体表示技術, NHK 技研 R&D, No. 164(2017), pp. 56-67.
- Knill D. C. and Saunders J. A., Do humans optimally integrate stereo and texture information for judgments of surface slant?, *Vision Res.*, Vol.43(2003), pp. 2539-2558.
- 妹尾武治, ベクシオンとは何だ!?, 共立出版(2017).
- 嶋田智和,大倉典子,高齢者を対象としたユーザビリティ評価方法に関する国内の研究動向,ヒューマンインタフェース学会論文誌,Vol.14,No.4(2012),pp.101-112.
- 嶋田総太郎, 脳のなかの自己と他者: 身体性・社会性の認知脳科学と哲学, 共立出版(2019).
- 嶋崎裕志, ジェームズ・ギブソンの視知覚論と般化, 人文科学論集 人間情報学科編, Vol.36(2002), pp.17-29.
- 塩入論, 渡辺裕士, 奥行き運動知覚と二つの手がかり, 視覚の科学, Vol.30,No.3(2009), pp.65-74.
- 総理府障害者対策推進本部, 障害者対策に関する新長期計画 (1993).  
<<http://www.ipss.go.jp/publication/j/shiryu/no.13/data/shiryu/syakaifukushi/462.pdf>>
- Srinivasan M. A., Beaugard G. L. and Brock D. L., The impact of visual information on the haptic perception of stiffness in virtual environments, *Proc. ASME Dynamic Systems and Control Div.*, Vol. 58(1996), pp555-559.
- 杉原知道, 運動知能・運動から迫る実世界に開かれた知能, 日本ロボット学会誌, Vol.36,No.9(2018),pp.609-615.
- 鈴木淳, 藤崎昭孝, 自動車の安全運転を可能にするセンシング技術, 東芝レビュー, Vol.73, No.6 (2018), pp.8-12.
- 鈴木宏昭, プロジェクション科学の展望, 日本認知科学会第33回大会論文集(2016), pp. 20-25.
- 鈴木宏昭, プロジェクション科学の目指すもの, 認知科学, Vol. 26, No. 1(2019), pp. 52-71.
- 鈴木麻望, 藤井俊勝, 陳述記憶・非陳述記憶, 脳科学辞典(2014). DOI : 10.14931/bsd.2566
- 鈴木雄介, 福島寛之, 深澤伸一, 竹内晃一, 遠隔会議ロボットシステムの注意喚起能力評価, 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 1(2010), pp. 25-35.
- Synofzik M., Vosgerau G. and Newan A., Beyond the comparator model: A multifactorial two-step account of agency, *Consciousness and Cognition*, Vol. 17, No. 1(2008), pp. 219-239, DOI: 10.1016/j.concog.2007.03.010
- 舘暲, テレイグジスタンス, 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 4 (2015), pp. 215-221.
- 高橋雅彦, 土屋陽介, 成田雅彦, 加藤由花, 移動ロボットを利用した案内サービスの構築を支援するプラットフォーム環境, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.2 (2014), pp.761-772.
- 田中彰吾, 運動学習におけるコツと身体図式の機能, バイオメカニズム学会誌, Vol. 37, No. 4(2013), pp.205-210.
- 田中章浩, クロスモーダルな情動知覚, 映像情報メディア学会誌, Vol. 72, No. 1(2018), pp. 12-16.
- 田中克則, 佐久間壮, 見澤英明, 宮下由佳, 感性工学に基づく Driving Pleasure に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol. 47, No. 5(2016), pp. 1147-1152.
- Tanaka, S. and Fujita, I., Computation of object size in visual cortical area V4 as a neural basis for size constancy, *Journal of Neuroscience*, Vol. 35, No. 34 (2015), pp. 12033-12046.
- 谷口高士, 心理評価実験における尺度構成の方法, 日本音響学会誌, Vol. 73, No. 12(2017), pp.

774-782.

谷本貴頌, 深野亮, 篠原啓, 吉灘裕, 倉鋪圭太, 近藤大祐, 建設機械の遠隔操作における三次元環境地図作成と地形情報重畳表示を用いた作業効率化の研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集(2015), 2P1-O06.

TELEEXISTENCE Inc., TELEEXISTENCE MODEL-T (2018). <<https://tx-inc.com/>>

寺本渉, 吉田和博, 浅井暢子, 日高聡太, 行場次朗, 鈴木陽一, 臨場感の素朴な理解(<特集>VR 心理学 4), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No.1(2010), pp. 7-16.

津村尚志, 聴覚実験における軽量心理学の応用-適応法の応用-, 日本音響学会誌, Vol. 42, No. 10(1986), pp. 801-805.

UBE CITY, 分身ロボット OriHime(オリヒメ)を使った OriHime 遠足を行います(2020). <<https://www.city.ube.yamaguchi.jp/shisei/kouhou/kishahappyou/1008059/1010974/1008418.html>>

Uno Y., Kawato M., and Suzuki R., Formation and Control Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement – Minimum Torque-Change Model, Bio. Cybern., Vol. 61(1989), pp.89-101.

Wapner S., Weinberg J., Glick J.A. and Haggard P., “Effect of speed of movement on tactual-kinesthetic perception of extent”, American Journal of Psychology, Vol.80, No.4(1967), pp.608-613.

渡邊紀文, 森文彦, 大森隆司, 周辺視へのオプティカルフロー刺激と身体動揺を利用した歩行者の誘導モデル, 映像情報メディア学会誌, Vol. 67, No. 12(2013), pp. J434-J440.

渡邊翔太, 川合信幸, 自己身体と操作対象の身体図式の一致はより強い運動主体感・身体所有感を喚起する, 日本認知科学会第 33 回大会発表論文集(2016), pp. 31-40.

Whatever Inc. (2020), <<https://whatever.co/ja/work/robot-viewing/>>

WHILL Inc (2021), <<https://whill.inc/jp/maas>>

WHO, ICF Browser (2017). <<https://apps.who.int/classifications/icfbrowser/>>

WHO, International Statical Classification of Diseases and Related Health Problems 10th Revision (1993).

Wolpert, D., M., Ghahramani, Z. and Jordan, M., I., An internal model for sensorimotor integration, Science, Vol. 269, No. 5232, pp.1880-1882.

Wydoody P., Gentaz E. and Streri A., Role of force cues in the haptic estimations of a virtual length, Brain Res., Vol. 171(2006), pp.481-489.

山田宏尚, 建設機械の遠隔操作のためのヒューマンインタフェース, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.6(2015), pp.400-403.

Yamamoto, T., Terada, K., Ochiai, A., Saito, F., Asahara, Y. and Murase, K., Development of Human Support Robot as the research platform of a domestic mobile manipulator, Robomech Journal., Vol.6, No. 4(2019), <https://doi.org/10.1186/s40648-019-0132-3>.

安田福啓, 荻谷浩史, 瀬沼隆遠, 松日楽信人, 移動ロボットの遠隔操作時における座標系の組合せと操作性との関係性の分析, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集(2016), 2P1-03a1.

- 横山利夫, 藤田進太郎, 武田政宣, 自動運転技術の現状と今後, 安全工学, Vol.54, No.3(2015), pp.169-176.
- 米田巖根, 小木哲朗, 当麻哲哉, 遠隔手術を想定した映像遅延が上肢の微細な位置決めおよび押し下しに与える影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No. 1, (2017), pp. 61-69.
- 尹祐根, 御所園敏彦, 川辺洋, 木南匡敬, 妻木勇一, 内山勝, 小田光茂, 土井利次, ハプティックインタフェースを用いた技術試験衛星 VII 型搭載ロボットアームの遠隔操作, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4 (2001), pp.518-527.
- Yoshida H., Kumagai T. and Satoda K., Dynamic state-predictive control for a remote control system with large delay fluctuation, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)(2018), pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCE.2018.8326072.
- 幸村貴臣, 桐林星河, 永谷圭司, 不整地狭小空間における不整地移動マニピュレータの遠隔操作支援システムの構築, 計測自動制御学会論文集, Vol.53, No.1 (2017), pp.2-12.



---

## 発表文献

---

### ・論文

河村拓実, 藤本康孝, 遠隔操作の実行段階での映像拡大に起因する予測誤差と補償可能性の考察, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.898(2021), DOI: 10.1299/transjsme.21-00161.

河村拓実, ロボット視点の情報のみからなる 2D 映像を常時観察しつつ任意点までの奥行き誤差を認知できるインタフェースの提案と実用上の課題, 日本機械学会論文集, Vol. 87, No. 896(2021), DOI: 10.1299/transjsme.20-00269.

河村拓実, 水矢亨, 映像刺激を用いた移動体の到達位置予測に関する検討, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.874(2019), DOI: 10.1299/transjsme.18-00390.

### ・国際会議論文

Kawamura, T. and Fujimoto, Y., Experimental validation of interface aiding human depth prediction on images in terms of usability, Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics (ICM) (2021), pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICM46511.2021.9385644.

Kawamura, T. and Fujimoto, Y., Analysis of stereo camera parameters effect on stereo matching performed by remote operator, Proceedings of 2020 IEEE 2nd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech) (2020), pp. 212-213, DOI:10.1109/LifeTech48969.2020.1570618948,2020

Kawamura, T., Using depth map as interface to predict collision risks in remote participation assist system, Proceedings of 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech) (2021), pp. 371-372, DOI: 10.1109/LifeTech52111.2021.9391801.

---

## 謝辞

---

本論文は筆者が横浜国立大学 大学院 理工学府 数物・電子情報系理工学専攻 情報システム教育分野 博士課程後期に在籍時の藤本研究室における研究成果です。本研究の遂行にあたり、多くの方のご協力を賜りました。

指導教官として本研究を進める貴重な機会と細部に至る直接のご指導を賜った横浜国立大学大学院 工学研究院 教授 藤本康孝先生に深謝の意を表します。ご指導を通じ、近年の私の活動が単なるものづくりに終始してしまっていたことを自覚でき、モデルや理論に立脚した根拠のある繊細な検討の重要性を改めて認識することができたと考えています。貴重なお時間をさき、審査・ご助言いただいた同教授 赤津観先生、濱上知樹先生、同准教授 下野誠通先生、辻隆男先生に深謝の意を表します。

また視点の凝り固まった私に臆せず新鮮な角度から様々な質問・指摘をしてくださり、ともに活発な議論をさせていただいた藤本研究室メンバー諸氏に感謝します。もっと実機を作成しながらの議論の機会を得たかったところでしたが、本学在籍中はなかなか通学の許されない状況となってしまうました。状況が落ち着いたら再び研究室に足を運び、藤本先生をはじめ皆様から、実機をいじりながら引き続き多くの技術を学ばせていただければと考えております。

また藤本先生の下で研究活動を行う重要なきっかけを賜った、神奈川県立産業技術総合研究所 宮澤以鋼氏、研究に関する総合的なご指導はもとより研究に対する姿勢を学ばせていただいた同 水矢亨氏、実現までの道のりが大変険しかった 6.7 節の実験に快くご協力いただいた同 阿部顕一氏をはじめ、同研究所のメンバーの皆様には公私とも大変お世話になりました。厚くお礼を申し上げます。

また社会に出る前の博士課程前期の在籍時に研究の直接のご指導はもとより社会での生き方を教えてくださった横浜国立大学名誉教授 藪田哲郎先生、当時の藪田研究室メンバー諸氏に感謝の意を表します。一度研究から離れた私が再び研究をしたいと思えたのは、藪田先生の教えや皆様との研究経験があったからであり、これらは今でも私の研究者としての礎です。

また進学に際し快く支援を賜りました国立障害者リハビリテーションセンター研究所 研究所長 小野栄一氏、同研究所 障害工学研究部 部長 東祐二氏、同研究部 自立支援ロボット技術等研究室 室長 中山剛氏をはじめ、度々相談させていただきました同部メンバー諸氏に感謝の意を表します。今後は、本研究の成果を余すことなく同部の研究の進展に活かしてゆく所存です。

最後に、日々の多忙な生活において私の力強い支えであり、同じ研究者を志す者としての立場からも尊敬している妻と、絶えず私にエネルギーをくれる存在である子どもたち、様々に支援してくれた両親をはじめ親族の皆様、友人に、この場を借りて改めて感謝いたします。