

Title	広域分散型ロボットを用いたユビキタステレイグジスタンスの研究
Sub Title	Ubiquitous Telexistence using widely-distributed robots
Author	廣多, 馨(Hirota, Kyo) 稲見, 昌彦(Inami, Masahiko)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2012
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	<p>本論文では, 日常的な生活空間から任意の遠隔地へ瞬間的に訪れ, また世界中の拠点を瞬時に飛び回るかのような体験を工学的に実装するための概念として, ユビキタステレイグジスタンスの概念と構成要件を提案し, そのプロトタイプの開発と評価を行った.</p> <p>創作の世界では瞬間移動のアイデアが度々登場するが, 現実の私たちの生活では, 遠くの場所まで全く時間をかけずに移動する方法はない. そこで, もし場所の遍在性, リアルタイム性, 没入感の3項目を満たすシステムがあれば, それは自分が遠くの場所に行って活動しているのと本質的に等価であると言え, 瞬間移動技術が実現できる. この考えに基づき, 1人のユーザーが, ネットワークに接続されたロボットの中から任意のロボットを選んでテレイグジスタンスすることで, その選択した遠隔地に訪れているような体験をすることができるプロトタイプシステムのTELUBeeを構築した.</p>
Notes	修士学位論文. 2012年度メディアデザイン学 第251号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002012-0251

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2012年度（平成24年度）

広域分散型ロボットを用いた
ユビキタステレイグジスタンスの研究

慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

廣多 馨

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

廣多 馨

審査委員：

稲見 昌彦 教授 (主査)

舘 暲 特任教授 (副査)

中村 伊知哉 教授 (副査)

修士論文 2012年度（平成24年度）

広域分散型ロボットを用いた ユビキタステレイグジスタンスの研究

論文要旨

本論文では、日常的な生活空間から任意の遠隔地へ瞬間的に訪れ、また世界中の拠点を瞬時に飛び回るかのような体験を工学的に実装するための概念として、ユビキタステレイグジスタンスの概念と構成要件を提案し、そのプロトタイプの開発と評価を行った。創作の世界では瞬間移動のアイデアが度々登場するが、現実の私たちの生活では、遠くの場所まで全く時間をかけずに移動する方法はない。そこで、もし場所の遍在性、リアルタイム性、没入感の3項目を満たすシステムがあれば、それは自分が遠くの場所に行って活動しているのと本質的に等価であると言え、瞬間移動技術が実現できる。この考えに基づき、1人のユーザーが、ネットワークに接続されたロボットの中から任意のロボットを選んでテレイグジスタンスすることで、その選択した遠隔地に訪れているような体験をすることができるプロトタイプシステムの TELUBee を構築した。

キーワード：

テレイグジスタンス、テレプレゼンス、ネットワークロボット、臨場感、遠隔コミュニケーション

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

廣多 馨

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2012

Ubiquitous Telexistence using Widely-Distributed Robots

Summary

In this paper, I propose the idea of ubiquitous telexistence which is to achieve the kind of experience to go any remote location in a moment from living space or home office, and I build the prototype system of Ubiquitous Telexistence. There are many ideas of teleportation in the world of fiction, however, there's no technology that have omnipresence and realtime presence. Therefore I think that we can get the technology of same as teleportation if that technology include those three factors. According this idea, I build prototype ubiquitous telexistence system named "TELUBee".

Keywords:

Telexistence, Telepresence, Networked Robots, Real-time Presence, Remote Communication

Graduate School of Media Design, Keio University

Kyo Hirota

目 次

第 1 章 序論	1
1.1. SF における移動手段	1
1.2. 研究の目的	7
1.3. 本論文の構成	7
第 2 章 関連研究	8
2.1. 遠隔コミュニケーションシステム	8
2.2. テレイグジスタンス	12
2.3. 空間アーカイブ技術	15
2.4. 現実空間とバーチャル空間の移動	17
2.5. 2 章のまとめ	18
第 3 章 ユビキタステレイグジスタンス	20
3.1. ユビキタステレイグジスタンスの提案	20
3.2. ユビキタステレイグジスタンス実現にむけた課題	23
3.3. ユビキタステレイグジスタンスシステムの構成要件	24
第 4 章 ユビキタステレイグジスタンスシステムの試作	28
4.1. 試作の概要	28
4.2. プロトタイプシステム Ver.1	29
4.2.1 システムの概要	29
4.2.2 ロボットの構成	31
4.2.3 コックピットの構成	32
4.2.4 システムの試作と考察	33
4.3. プロトタイプシステム Ver.2	35

4.3.1	システムの概要	35
4.3.2	ロボットの構成	36
4.3.3	コックピットの構成	37
4.3.4	検証	39
4.3.5	システムの考察	45
4.4.	プロトタイプシステム Ver.3	46
4.4.1	システムの概要	46
4.4.2	ロボットの構成	47
4.4.3	コックピットの構成	49
4.4.4	TELUBee	49
4.4.5	システムの性能評価	58
4.4.6	システムの試作と考察	65
第5章	結論	67
謝辞		69
参考文献		71
関連発表		75
国際学会		75
国内学会		75

目 次

1.1	漫画における瞬間移動 (1) (『ドラゴンボール』28巻 [1],154 ページより)	1
1.2	漫画における瞬間移動 (2) (『ドラゴンボール』42巻 [2] 97,98 ページより)	1
1.3	どこでもドア (『ドラえもん』34巻 [3] 90 ページより)	2
1.4	トランスポーター (上図：映画 ”Star Trek: The Motion Picture”, 1979) (下図：映画 ”Star Trek”, 2009)	2
1.5	『劇場版 マクロス F 恋離飛翼 ~サヨナラノツバサ~』 [6] におけ るフォールド航法による惑星間移動	3
1.6	物質転送装置 (KC スペシャル『鉄腕アトム』第6集 [7] 266,267 ペー ジより)	4
1.7	特命戦隊ゴーバスターズの物質転送技術 (上：送信側)(下：受信側) (共に『特命戦隊ゴーバスターズ』 [8] 第1話より)	4
1.8	みがわりテレビ A (『ドラえもん+』2巻 [11] 34 ページより)	6
1.9	みがわりテレビ B (『ドラえもん+』2巻 [11] 34 ページより)	6
1.10	みがわりロボットに搭載されているロボットを利用している様子 (『ドラえもん+』2巻 [11] 36,37 ページより)	6
2.1	Porta-person [13]	9
2.2	Joupi らのテレプレゼンスロボット [14]	9
2.3	Joupi らのシステム (操縦席) [14]	9
2.4	Anybot's QB [15]	10
2.5	VGO [29]	10

2.6	OB 降臨システムの小型ロボット [17]	11
2.7	Geminoid HI-2(右) とモデルの石黒浩氏 (左) [19]	12
2.8	Elfoid([20] より一部改変)	12
2.9	(a)Telesar4 [23] の操縦者 (b) 遠隔地のロボットが人とコミュニケーションする様子	13
2.10	TWISTER [24] の外観	13
2.11	Telesar5 [26]	14
2.12	Flying Head [27]	15
2.13	Flying Head におけるユーザの頭の動きとクワッドコプターの動きの対応関係 [27]	15
2.14	GoogleStreetView を利用して見た東京スカイツリーの画面キャプチャ	16
2.15	Time folloer’s Vision で得られるリアルタイムにアーカイブされた空間 [29]	17
2.16	『攻殻機動隊 2』 [36] におけるバーチャル空間内に提示される遠隔地の情報イメージ	18
2.17	縦軸に先行事例の種類, 横軸に評価項目をとったときの各事例毎におけるその達成度	19
3.1	ユビキタステレイグジスタンスのイメージ図	20
3.2	ユビキタステレイグジスタンスのアプリケーション例	22
3.3	Kinect [33]	24
3.4	Playstation Move [34]	24
3.5	構成要素を満たしたロボットのイメージ図	25
3.6	頭部の各回転軸の呼称の定義	25
3.7	構成要件を満たしたコックピットのイメージ図	26
3.8	ユーザインターフェースのイメージ図 (全体像)	27
3.9	ユーザインターフェースのイメージ図 (ロボット選択画面)	27
4.1	プロトタイプシステム Ver.1 のイメージ図	29

4.2	Segway(セグウェイ社)	30
4.3	Joyman [39]	30
4.4	ユビキタステレイグジスタンスロボット Ver.1 の外観	31
4.5	ユビキタステレイグジスタンスロボット Ver.1 の頭部アップ	32
4.6	映像伝送システムの概要	33
4.7	バランス Wii ボード (任天堂株式会社)	33
4.8	Personal 3D Viewer(SONY 株式会社)	33
4.9	プロトタイプシステム Ver.1 の試作結果 (左：ロボット 右：コック ピット)	34
4.10	プロトタイプシステム Ver.2 のイメージ図	36
4.11	プロトタイプロボット Ver.2	37
4.12	Ver.2 頭部機構の設計 CAD	37
4.13	プロトタイプロボット Ver.2 の頭部機構	37
4.14	プロトタイプシステム Ver.2 を利用している様子	38
4.15	Optitrack V120:Trio(SPICE Inc.)	38
4.16	Optitrack 計測用マーカー	38
4.17	Zeemote JS1 H(Zeemote Technology Inc.)	39
4.18	Ver.2 における移動台車の移動可能方向	39
4.19	臨港パークでの準備の様子	40
4.20	臨港パークでのユーザテストの様子	41
4.21	本検証においてユーザが HMD で見ていた映像 (左目)	42
4.22	屋内での検証の様子	43
4.23	遠隔地間での検証の様子 (河野ビル側)	44
4.24	遠隔地間での検証の様子 (協生館側)	44
4.25	検証のシステム構成の概要	44
4.26	プロトタイプシステム Ver.3 のイメージ図	46
4.27	プロトタイプロボット Ver.3 の頭部設計 CAD	48
4.28	プロトタイプロボット Ver.3 の外観と概要	48
4.29	プロトタイプコックピット Ver.3	50

4.30	製作したシースルー型 HMD	50
4.31	Dualshock3	50
4.32	TELUBee	51
4.33	TELUBee を公園に設置した様子	51
4.34	TELUBee を移動台車に乗せた様子	51
4.35	公聴会でのデモンストレーションの様子	52
4.36	TELUBee の体験の流れ (1)	53
4.37	TELUBee の体験の流れ (2)	54
4.38	TELUBee の体験の流れ (3)	55
4.39	TELUBee コックピット起動画面	56
4.40	TELUBee のロボット選択画面 (世界地図)	56
4.41	TELUBee のロボット選択画面 (日本地図)	57
4.42	TELUBee のロボット選択インターフェース画面に表示されるユーザへの指示	57
4.43	頭部追従性能計測の様子	59
4.44	TELUBee におけるパン (ヨー) 軸の追従性能計測グラフ	60
4.45	TELUBee におけるチルト (ピッチ) 軸の追従性能計測グラフ	60
4.46	TELUBee におけるロール軸の追従性能計測グラフ	60
4.47	TELUBee におけるロボット - HMD 間の映像遅延計測の様子	61
4.48	LED ディスプレイ側のセットアップ	62
4.49	HMD 側のセットアップ	62
4.50	実際に計測されたデータの 1 例	62
4.51	HMD の右目映像と左目映像計測のセットアップ	63

表 目 次

4.1	ロボットがユーザの頭部運動に追従した際の相互相関極大値と時間遅れ	61
4.2	ロボットー HMD 間の映像遅延計測結果	63
4.3	ロボットー HMD 間の映像遅延計測結果の平均と標準偏差	63
4.4	HMD に提示される右目映像と左目映像の映像遅延計測結果	64
4.5	HMD の右目, 左目映像間の映像遅延計測結果の絶対値の平均と標準偏差	64

第1章 序 論

1.1. SF における移動手段

私たちは日常的に様々な移動手段を利用している。徒歩はもちろんのこと、自動車や電車を毎日の通勤に利用したり、あるいは新幹線や飛行機を利用することで遠く離れた土地にも簡単に訪れることができる。しかし、様々な移動手段があるものの、離れた地点を移動するのにかかる時間をゼロになる移動手段は存在しない。地理的に離れた2地点間をまったく移動時間をかけずに移動する、いわゆる瞬間移動は様々な創作にも登場し、私たちがいかに瞬間移動に憧れているかということをおうかがい知る事ができる。

創作に登場する瞬間移動としては大きくわけて2種類ある。ひとつは超能力のように、個人の超人的能力によってモノや人を移動させるタイプ(図 1.1, 図 1.2), もうひとつは道具や乗り物の力を借りて遠隔地へ瞬間的に移動するタイプである。



図 1.1: 漫画における瞬間移動 (1)
(『ドラゴンボール』28巻 [1],154
ページより)



図 1.2: 漫画における瞬間移動 (2)
(『ドラゴンボール』42巻 [2] 97,98
ページより)



図 1.3: どこでもドア (『ドラえもん』34巻 [3] 90ページより)



図 1.4: トランスポーター (上図: 映画 "Star Trek: The Motion Picture", 1979) (下図: 映画 "Star Trek", 2009)

道具を使うタイプの瞬間移動技術で有名なものとしては 漫画『ドラえもん』に登場するどこでもドア [3](図 1.3) や映画『スタートレック』シリーズ [4] に登場するトランスポーター (図 1.4) 等があげられる. どこでもドアの特徴としては, ドアを開く事で任意の2地点間に空間的なつながりを生み出し, 移動前の空間と移動後の空間をシームレスにつなぐことができること, また利用したいと思った時にはその場からどの任意の遠隔地へも自由に行くことができることが挙げられる. どこでもドアのように任意の2地点間に空間的なつながりを産み出す技術としては, 『マクロス』シリーズ [5] に登場するフォールド航法による惑星間移動 (図 1.5) 等が挙げられる. 一方, トランスポーターはどこでもドアと違い, 移動の際に送信側, 受信側の区別がある. トランスポーターを利用する場合, トランスポーターのオペ



図 1.5: 『劇場版 マクロス F 恋離飛翼 ~ サヨナラノツバサ ~』[6]におけるフォールド航法による惑星間移動

レーダーが指定した座標からトランスポーターの転送装置の中への移動, あるいはトランスポーターの転送装置の中から指定した座標への移動のみが可能である. トランスポーターは大型の装置であり, 規模としては, 例えば大型の宇宙船 1 台につき 1 台前後設置されているような装置である. すなわち, トランスポーターを利用した遠隔地への瞬間移動ではかならずトランスポーターの存在する地点を出発地点か到達地点に選ばなければならないため, トランスポーターを利用しても任意の地点間をどこからどこへでも移動出来るわけではない. トランスポーターと似た種類のアイデアとしては他に, 『鉄腕アトム』[7]に登場する物質伝送装置(図 1.6), あるいは転送機能を一方向の送信に限定し, 受信側のマーカーを持ち歩いて転送開始のキューを遠隔地から転送装置に送る事で, あらかじめ用意した道具を遠隔地から瞬時にして取り寄せられる『特命戦隊ゴバスターズ』[8]の物質転送技術(図 1.7)等が挙げられる.

もし, トランスポーターやどこでもドアを利用するように, 一瞬で遠くの場所に移動する技術が現実のものとなれば 遠方への移動する際の時間的, 経済的コストが大幅に削減できる. もちろんビジネスシーンでの利用だけでなく, 観光や帰省, あるいは日常的な生活シーンでも気軽に利用することができれば, 私たちの生活は劇的に変化することが期待できる. しかしながら, どこでもドア, あるいはトラ



図 1.6: 物質転送装置 (KC スペシャル『鉄腕アトム』第 6 集 [7] 266,267 ページより)



図 1.7: 特命戦隊ゴースターズの物質転送技術 (上: 送信側)(下: 受信側) (共に『特命戦隊ゴースターズ』[8] 第 1 話より)

ンスポーターのどちらも現代の科学技術で実現することは容易ではない。

それでは一体どのようにすれば地理的に離れた場所へ瞬間的に移動する技術を実現できるだろうか。広瀬 [9] が指摘している通り、創作、特に SF の世界に登場するアイデアは科学技術の未来予想図ということができる。数多くあるアイデアから適切なアイデアを選び出し、実現することで今までは夢物語でしかなかったことが実現した、いわゆる「未来的」な世界を実現することができる。これは、瞬間移動に関する例外ではない。自分がどこか別の場所に一瞬にして移動したかのように感じるというアイデアのうち、実現可能性のありそうなものとして挙げられるのが、『ドラえもん』 [11] に登場するみがわりテレビのように、ロボットを遠隔地のアバターとして用いる方法だ。みがわりテレビとは、友人にみがわりテレビ A (図 1.8) を遠隔地まで運んでもらい、ユーザがみがわりテレビ B (図 1.9) を頭部にかぶると、ユーザはあたかもみがわりテレビ A の地点にいるように感じられるというものだ。また、みがわりテレビ A の地点の様子を見聞きするだけでなく、みがわりテレビ A は、みがわりテレビ B をかぶったユーザが考えた通りに動く小型のロボットを内蔵しており、自宅に居ながらにして実際には訪れていない遠隔地で自由に活動することができる (図 1.10)。このみがわりロボットのように、自分が遠隔地に移動したと感じられる遠隔ロボットアバターシステムが実現すれば、私たちはこの場にいながらにしてどこか遠くの場所の様子を見、聞き、またその場所の人やものとリアルタイムにインタラクションをおこすことができる。これは、ロボットの操縦者にとっても、遠隔地にいる人やモノにとっても、ロボットの操縦者が瞬間移動してきたのと同義と言えるだろう。すなわち、このみがわりロボットのようなシステムを実現することができれば、私たちは移動時間をかけることなく遠くの場所へ訪れるための移動手段を手に入れることができると言える。しかし、みがわりロボットの事例でひとつだけ実現困難と思われる部分がある。それは、「考えるだけで自分が遠隔地に行ったのと同じような働きをするロボット」である。自分の意のままに操縦できるロボットという観点でみるとアイデアは大山ら [10] も指摘している通り他にも数多く存在する。また、その一部はすでに実現しているものもあり、それらの事例をうまく組み合わせることで瞬間移動体験の工学的実装の可能性が見いだせる。そこで、本研究では自分が瞬間的に遠隔地



図 1.8: みがわりテレビ A (『ドラえもん+』2 巻 [11] 34 ページより)

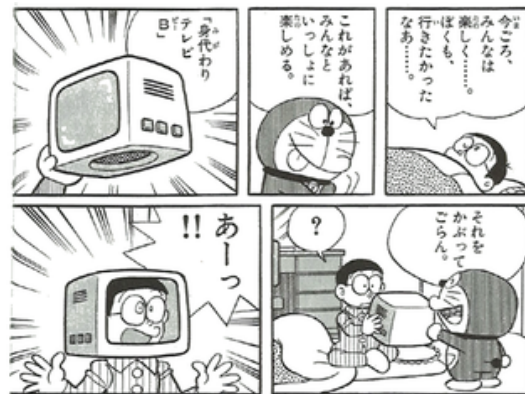


図 1.9: みがわりテレビ B (『ドラえもん+』2 巻 [11] 34 ページより)

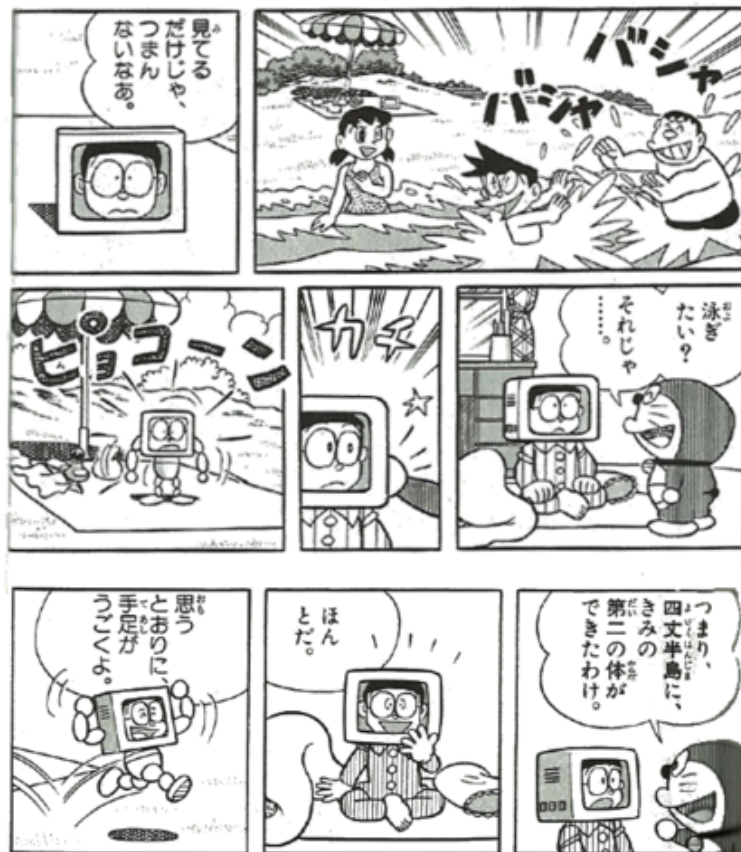


図 1.10: みがわりロボットに搭載されているロボットを利用している様子 (『ドラえもん+』2 巻 [11] 36,37 ページより)

に移動したかのような感覚を得ることができる技術を、既の実現しているいくつかの事例を組み合わせることで、瞬間移動体験の工学的実装を行うことを目指す。

1.2. 研究の目的

本研究の目的は、遠隔地へ瞬間移動するかのような体験を工学的に実現することである。前述のみがわりロボットのように自分がロボットになったかのような感覚で操縦できる遠隔のロボットアバターを実現できれば、操縦者はロボットへ接続することで、本当に操縦者がいる場所から、ロボットのいる場所へ瞬時に移動したかのように感じられるはずである。また、ロボットが1台ではなく様々な場所に設置されていれば、操縦者は瞬間移動できる場所が増えると考えられる。そこで本研究では、ロボットアバターを遠隔地に複数分散配置し、それらにログインできるようなシステムを実現することで、遠隔地への瞬間移動体験を工学的に実現することを目指す。

1.3. 本論文の構成

本研究では、本章で述べた背景を元に、瞬間移動の工学的実装について検討し、実際に体験可能なシステムを構築する。本論文の構成を以下に記す。第1章では、本研究の背景について述べる。第2章では、本研究に関連する先行事例を紹介する。主に遠隔コミュニケーション、トレイグジスタンス、空間アーカイブ技術の3つの観点から先行事例を取り上げ、本研究が瞬間移動の工学的実装を行うにあたって解決すべき課題を明らかにする。第3章では、その全体像をユビキタステレイグジスタンスと名付けて概念の提案を行い、システムを実現するための構成要素について議論する。第4章では、本研究で行ったユビキタステレイグジスタンスシステムの設計と実装について述べる。システムの詳細についてロボット、コックピットの視点から述べ、行ったユーザテストの結果とシステムの性能評価について述べる。第5章では、本研究の結論について述べる。

第2章

関連研究

2.1. 遠隔コミュニケーションシステム

1章において本研究の目的を瞬間移動の工学的実装と定めたが、瞬間移動する目的に注目してみると、既に瞬間移動の代替となる技術が実現されている。例えば電信技術が発達するまでは、人間が移動しなければ直接会話をすることはできなかった。しかし、現代では電話やビデオチャット等を利用することで、自分は移動することなく遠隔地の人間とリアルタイムに会話できる。これは会話という目的においては瞬間移動が成立したと言ってよい。昨今では遠隔コミュニケーション技術は非常に発達しており、その普及も進んでいる。さらに、衛星回線を用いることで、都市部に限らず砂漠やジャングルといった場所でも音声通話を行うことができる。また、Skype,¹やPolycom²に代表されるビデオチャットシステムの普及も目覚ましい。特にSkypeのソフトウェアは世界各国語版が無料で公開され、地球のどこにいてもリアルタイムに相手の顔を見ながら会話を行うことができる。

一方で、遠隔地の人があたかも自分の目の前にいるような臨場感を伴って遠隔コミュニケーションするために、音声通話やビデオチャットと比べてより臨場感の高いシステムの研究やビジネスがテレプレゼンス [12] の分野で行われ、Porta-person [13](図 2.1) や Jouppi らのテレプレゼンスロボット [14](図 2.2, 図 2.3), Anybot's QB [15](図 2.4) や VGO [29](図 2.5) に代表されるテレプレゼンスロボットが台頭してきている。これらのシステムでは遠隔地から会話に参加する人が見回しや移動を伴いながらコミュニケーションをとることができる。遠隔地のユーザはパソコンに表示される画面を見ながらロボットを操縦し、能動的に周囲を見渡すこと

¹<http://www.skype.com/>

²<http://www.polycom.co.jp/>

ができるため、音声通話やシンプルなビデオチャットと比べて臨場感が高まり、遠隔地でのコミュニケーションに自然に参加していると感じられるようになる。



図 2.1: Porta-person [13]



図 2.2: Joupi らのテレプレゼンスロボット [14]



図 2.3: Joupi らのシステム (操縦席) [14]



図 2.4: Anybot's QB [15]



図 2.5: VGO [29]

これらのロボットを利用することで、ユーザは自分の意志を伴った動きを遠隔地で再現することができるが、ロボットが遠隔地で人の意思を反映して動作する時、ロボット周囲の環境の間に何かしらのインタラクションが発生する。特に先に挙げたテレプレゼンスロボットは人間相手を想定したロボットであり、ロボットの存在感、すなわち現地の人間からロボットどう見られるかという点についても議論する必要がある。前述のテレプレゼンスロボットには画面がついていて、操縦者の顔が表示されている。これによりロボットと会話している人は操縦者の顔や表情を共有できる。存在感に注目した先行事例としては、OB 降臨システム³ [17](図 2.6) が挙げられる。Joupi らのシステムや Anybots QB のようなテレプレゼンスロボットが操縦者を開示することが前提であるのに対して、OB 降臨システムは、システムの匿名性を高めている。誰が利用している場合でも全く同じロボットや音声を利用することで、操縦者ではなくロボット本体の存在感を強調し、コミュニケーションにおける人間関係を崩して、気軽なコミュニケーションや議論に利用しようというものである。

³<http://masui.sfc.keio.ac.jp/ob/>

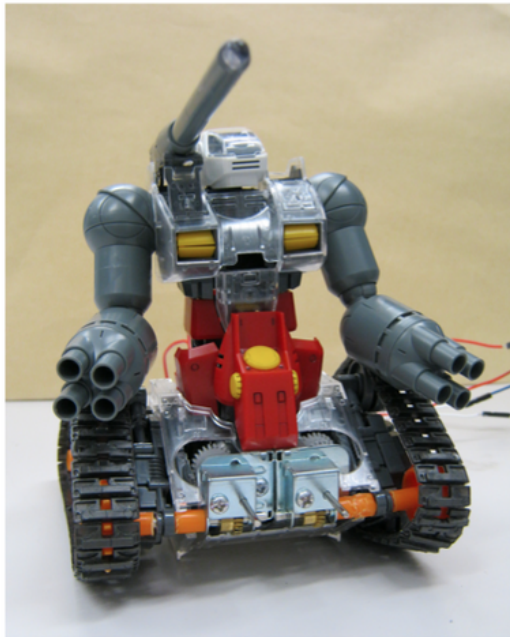


図 2.6: OB 降臨システムの小型ロボット [17]

一方, 遠隔コミュニケーション用のロボットの存在感を究極まで高め, 本人と遜色ないロボットとの自然なコミュニケーションに挑戦している研究として石黒らの Geminoid [18] [19](図 2.7) が挙げられる. Geminoid では本人「らしさ」というものを構成する要素について分析し, それを元にビジュアルだけでなく細かい動きや癖などを再現することで遠隔地の人間がまるで目の前に瞬間移動してきたのと同じようにコミュニケーションをとることができる. また, Geminoid の機能をそぎ落として小型化し, 量産することで携帯電話のようなコミュニケーションデバイスにしようという Elfoid(図 2.8) [20] の試みもある. Elfoid では年齢や性別の特定を難しくさせた人型のデバイスを通して, 会話している相手の「らしさ」を再現することに成功している.

これらの先行事例は, 離れた現実空間どうしを音声や表情を介してつないだ事例と位置づけられる.



図 2.7: Geminoid HI-2(右) とモデルの石黒浩氏 (左) [19]

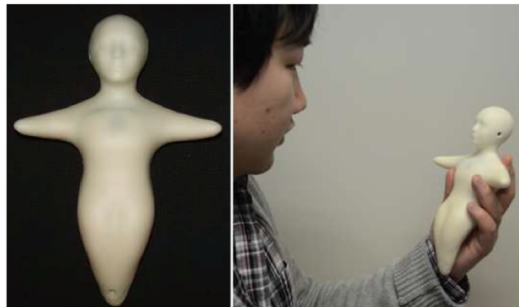


図 2.8: Elfoïd([20] より一部改変)

2.2. テレイグジスタンス

自分が遠隔地の様子を見たい, 体験したいという目的での瞬間移動を達成するための技術も存在している. 館らの Telexistence [21] [22] の研究では遠隔地に自身のアバターとなるロボットを配置し, あたかもそのアバターロボットをの中に入り込んでロボットを動かしているかのような体験をすることができる. テレイグジスタンスでは遠隔地から視覚, 聴覚等の感覚情報をリアルタイムに操縦者に伝

送し、また操縦者の運動情報を同じくリアルタイムで遠隔地へ伝送することで、操縦者に遠隔地で自分が活動しているかのような体験を実現する。例えば、テレプレゼンテーションシステムのひとつである Telesar4 [23](図 2.9) では、パーティー会場のような空間を多人数と共有し自由に動き回るため、TWISTER [24](図 2.10) と再帰性反射技術を用いた相互テレプレゼンテーションを実現している。相互テレプレゼンテーションとは、テレプレゼンテーションのうち、利用者がお互いに物理的に遠く離れていても、あたかも同一の空間を共有し、すぐそばにいるかのように顔を合わせて会話



図 2.9: (a)Telesar4 [23] の操縦者 (b) 遠隔地のロボットが人とコミュニケーションする様子



図 2.10: TWISTER [24] の外観

することができるもののことを言う。

また, Hasunuma らはモーションベースを用いて, ロボットの中に入り込んだかのような感覚で歩行し, 手元の作業を行う事ができるようなロボット操縦システムの開発を行った [25] また, Telesar5 [26](図 2.11) では視覚, 聴覚, 触覚を伴い, 細かな手作業を伴ったテレグジスタンスを実現している. 一方, 樋口らの Flying

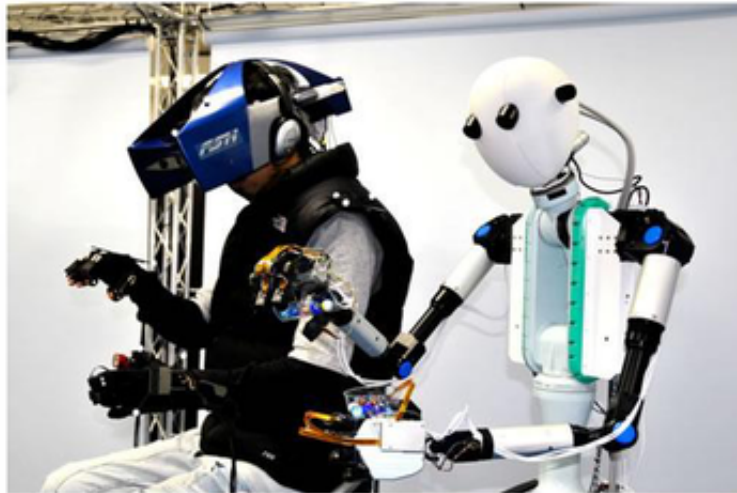


図 2.11: Telesar5 [26]

Head [27](図 2.12) では, クワッドコプターへのテレグジスタンスを試みている. Telesar4 や Telesar5 とは違い, 人と同程度の関節自由度を持たないアバターロボットへのテレグジスタンスの場合, 人の運動を全てアバターロボットに 1 対 1 の関係で対応づけることができない. Flying Head では, クワッドコプターのヨー軸を頭部のヨー軸回転に, 上昇下降を頭部の高さに, 前後左右への移動を頭部の並進運動に対応させることで, 頭部のテレグジスタンスシステムを構築した (図 2.13).

これらの事例は, 感覚や運動を介して, 遠隔の現実空間どうしをつないだ事例と位置づけられる.



図 2.12: Flying Head [27]

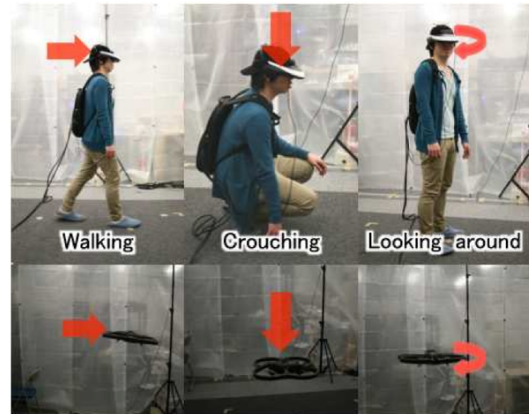


図 2.13: Flying Head におけるユーザの頭の動きとクワッドコプターの動きの対応関係 [27]

2.3. 空間アーカイブ技術

遠隔地の町並みや景色を楽しむことも、瞬間移動をしたいというモチベーションのひとつである。これは、空間アーカイブの技術によって実現されている。空間アーカイブ技術を利用することで、アーカイブされている空間になれば好きな時に好きな場所、好きな時間に入り込むことが可能になる。身近に利用可能な空間アーカイブのサービスとして、Google 社の提供する Google StreetView⁴がある。GoogleStreetView では、専用のカメラで大量に撮影した静止画像を位置情報に基づいてバーチャル空間内に配置することで、自宅にいながらにして世界中の好きな場所の景色を見たり、あるいは旅行先の下見をするような体験ををすることができる。同社のサービスでは、GoogleStreetView の技術を適用して、海中や山、あるいは建物の中を見ることも可能である。具体的な利用例を挙げるとするならば、例えば自宅のパソコンのブラウザから東京スカイツリーを見上げると、図 2.14 に示すような写真が得られる。また、池内らのバイヨン寺院アーカイブプロジェクト [28] では、より精彩な物体の形状データの記録に目的を絞ったセンサーを開発し、それらを利用することでカンボジアにあるバイヨン寺院を立体的にバーチャ

⁴<http://maps.google.com/intl/en/help/maps/streetview/>

ル空間に記録することに成功した。これらの空間アーカイブ技術では、図 2.14 で実際には完成しているスカイツリーがまだ建設途中であることからわかるように、リアルタイム性は欠けている。大野らの災害ロボット用の 3D 空間記録技術に関する



図 2.14: GoogleStreetView を利用して見た東京スカイツリーの画面キャプチャ

る研究では、開発した 3D レーザースキャナーを用いて周囲の環境を 3 次元的に計測し、ロボットがそれを認識することで、ロボットが遠隔地の操縦者には難しい細かい起伏を避けるような操作や狭い隙間の通り抜け操作の補助を可能にする。これは、バーチャル空間を自律制御のために利用した事例といえる。

一方、リアルタイム性を持たない空間アーカイブ技術に対し、リアルタイム性を担保しつつも局所的な空間アーカイブに成功した事例として杉本らの Time follower's Vision [29] は、車両に搭載したカメラで撮影した映像をリアルタイムに少し遅れた状態で操縦者に見せ、本来車両が存在するはずの場所に車両の映像を重畳表示することにより、車両の操縦に不慣れなユーザの車両操縦感覚を補う事ができる(図 2.15)。これにより、バーチャルな空間をリアルタイムで利用しながら現実空間の車両を操縦することができたといえる。また、木島らの ReflexHMD [30] [31] では、HMD 内に提示する画像よりも大きな画像をリアルタイムにアーカイブする事で、頭部の回転運動等に伴う遅延を補償する手法を提案している。



図 2.15: Time folloer's Vision で得られるリアルタイムにアーカイブされた空間 [29]

2.4. 現実空間とバーチャル空間の移動

前述のように、遠隔の現実空間どうしをつなぐための技術、また現実空間をアーカイブしてバーチャル空間を生成する技術に対して、バーチャル空間と現実空間の間を行き来するという考え方がある。例えば、漫画『攻殻機動隊』[35]では、自身の脳をインターネットに接続し、バーチャル空間内で様々な遠隔地の情報収集をした後、現実空間に戻って実際の行動に移すような描写が登場する(図 2.16)。

一方、研究の分野でも現実空間とバーチャル空間を繋ぎ、バーチャル空間の中に入って行こうという試みが存在する。藤井らのMIRAGE [37]では、現実空間からアーカイブされたバーチャル空間への移動を、ユーザに全く気づかせる事なく行うことに成功している。MIRAGEでは、シースルー機能を持ったヘッドマウントディスプレイ(HMD)を用い、ユーザのまわりで実験者が話しかけたり歩き回ったりする。ユーザは自由に実験者と会話したり周囲を見渡したりできるが、適切なタイミングで、HMDに提示される映像と音声をユーザが座っている場所で撮影しておいた全周囲映像に切り替えると、ユーザは切り替わった事に全く気づかずにそのまま再生されている映像の登場人物と会話し続ける。つまり、現実空間の行き来やバーチャル空間の行き来を実現しようとする際に、有用な知見が得られているといえる。



図 2.16: 『攻殻機動隊 2』 [36] におけるバーチャル空間内に提示される遠隔地の情報イメージ

2.5. 2章のまとめ

本章では、遠隔コミュニケーション、テレグジスタンス、空間アーカイブ、現実空間とバーチャル空間の移動という4つの観点から先行事例をとりあげた。

まず、遠隔コミュニケーションの事例では世界中の人と遠隔コミュニケーションができるビデオチャット等を取りあげた。これらの事例ではアクセスする拠点の多さやリアルタイム性がメリットとして挙げられる。次のテレグジスタンスの事例では、遠隔地のロボットの中に自分が入り込んだかのような臨場感を伴って、リアルタイムでロボットを遠隔操縦できる研究をとりあげた。また、空間アーカイブ技術では空間を記録することで好きな場所をいつでも見る事ができる GoogleStreetView 等の事例をとりあげた。これらの先行事例を、ユーザがアクセスすることが可能な拠点の数 (=場所の遍在性)、遠隔地の様子をリアルタイムに知り、あるいはインタラクションできるか (=リアルタイム性)、遠隔地に行ったように感じられるか (=没入感) の3つから分類すると図 2.17 のようになる。本研究では、この「場所の遍在性」、「リアルタイム性」、「没入感」の3項目を全て満たすことで、世界中

	リアルタイム性	遍在性	没入感
ライブカメラ ビデオチャット	○	○	×
テレグジスタンス	○	×	○
空間アーカイブ	×	○	○

図 2.17: 縦軸に先行事例の種類, 横軸に評価項目をとったときの各事例毎におけるその達成度

の様々なところへ、実際に今訪れているかのような体験を実現する。具体的には、テレグジスタンスにおける場所の遍在性を高めることで、好きな所へ瞬時に移動したかのような体験を実現する。一方、現実空間とバーチャル空間の移動に関する先行事例では、現実空間とバーチャル空間を切り替えを行ってもユーザーが自然に受け入れることが出来る事例をとりあげた。これらの先行事例にあるように、現実空間とバーチャル空間は自然に接続できることから、現在地から遠隔地へ直接テレグジスタンスするのではなく、一度バーチャル空間へのテレグジスタンスして目的のロボットを捜した後に実際の現実空間へといったことも可能と言える。

第3章

ユビキタステレイグジスタンス

3.1. ユビキタステレイグジスタンスの提案

本節では、ユビキタステレイグジスタンス (図 3.1) のコンセプトを提案する。ユビキタステレイグジスタンスの目的は、自宅やオフィスのような場所から遠隔地に移動したかのような体験を手軽に実現する事、また、行き先を変えることで世界中の任意の場所を渡り歩くような経験を 提供することである。

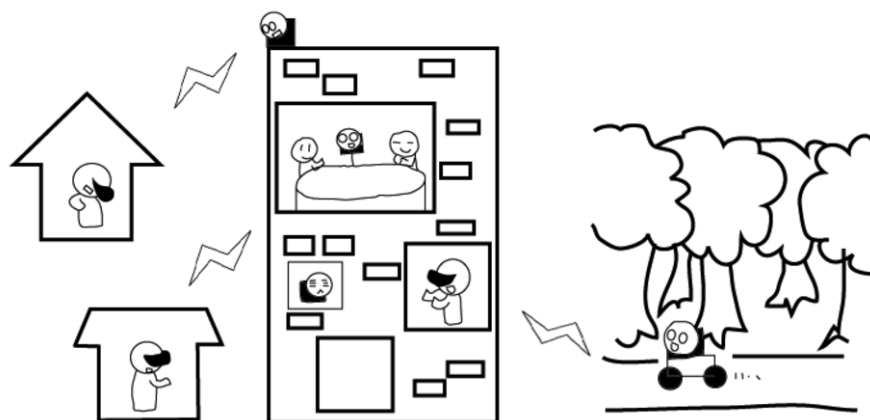


図 3.1: ユビキタステレイグジスタンスのイメージ図

ユビキタステレイグジスタンスは、大きく分けるとユーザ側のコックピットと遠隔地に接地されたテレイグジスタンス先となるロボットからなる。ロボットは複数のロボットが広域に分散配置され、ユーザは好きな時に好きなロボットを選択して、コックピットを介してログインすることで、世界中の任意の地点に瞬時に訪れたかのような体験をすることができる。ロボットは全てが同じ形状である必要

はなく、コミュニケーションに特化したロボット、景色を楽しむための観光ロボット、遠隔地を自由に走り回るロボット等、目的に合わせたさまざまな種類のロボットが遍在することで、汎用だが高価なトレイグジスタンスロボットを世界中に配置したのと同じような体験を、より安価に実現できる。

ここで、ユビキタステレイグジスタンスが実現することによって可能になるシナリオの1例(図3.2)を挙げる。

ある日、Mさんは久しぶりに少しだけ自由な時間が出来たので、ユビキタステレイグジスタンスシステムを使って、かねてから行きたいと思っていた場所へ観光に行くことにした。Mさんは移動型のロボットを使って観光地を散策している途中(a)、景色の良さそうなポイントを見つけた。そこでMさんは、見通しの良い所にあるロボットに乗り換えた(b)。見通しの良い所から景色を楽しんでいたMさんだったが、残念ながら会議の時間がきてしまったので一度観光地のロボットからログアウト、今度は、観光地から遠く離れた会議室のロボットにログインした(c)。会議室で議論を交わしたのも束の間、多忙なAさんはまた別のミーティングに行かなくてはならない。そこでMさんは時間ギリギリまで会議に参加した後、またロボットを乗り換え、次のミーティング場所に設置されているロボットへログインする(d)。無事開始時間に間に合ったMさんはミーティングをすませると、また観光地に戻り(b)、日が暮れるまで観光の続きを楽しんだ。

ユビキタステレイグジスタンスの環境下では、ロボットだけでなくユーザも複数同時に存在し、ロボットのリソースを何人ものユーザで共有することができる。ユーザが各ロボットにトレイグジスタンスするためのコックピットは、ユーザの目的や値段、あるいは好みによって、携帯電話の機種を選ぶように好きなものを選び、利用することができる。具体的には例えばXbox(Microsoft)やPlaystation3(Sony Computer Entertainment)に代表される家庭用ゲーム機のオプションとして家庭に普及したり、オフィスの一角に電話ボックスのように「トレイグジスタンスブース」として配置されたり、あるいはインターネットカフェのような業態のトレイグ



図 3.2: ユビキタステレイグジスタンスのアプリケーション例

ジスタンスコックピットの時間貸し等, 様々な場所で多くの人が同時に利用することが可能になる.

ユビキタステレイグジスタンスの環境下においては, 私たちの日常の生活空間に広く分散配置され, ネットワークに接続されたロボットとコックピットは, ユビキタステレイグジスタンスプラットフォームによって管理される. ユビキタステレイグジスタンスプラットフォームではロボットとコックピットの性能情報を一元的に管理し, ユーザがどのような性能のコックピットからシステムを利用しても不便のないように補償する. プラットフォームが管理する情報は, ロボットならばロボットの性能, すなわちどのようなカメラが搭載されているのか, 腕はついているのか, 移動可能かどうか, だれかが利用中ではないか, 利用に際して制限などはないかといったような情報で, コックピットであれば立体視可能かどうか, ユーザのどの部位の姿勢データを取得可能か, コックピットの所属は個人か組織かと言った情報である. プラットフォームはこれらの情報やそれぞれのネットワークスピード等を元に, コックピットとロボットのマッチングを行う. また, プラットフォームの提供する機能はマッチングのみに留まらない. ユーザのコックピットから機能的に制御不可能な部位をプラットフォーム側から自動で制御して, コックピットとロボットの機能の整合性を補完する機能を提供したり, あるいはユーザにログイン前に現地の様子のプレビュー映像を見せる, 数分間 3 人称視点でも確認可

能な練習時間を設けてログイン後にスムーズにトレイグジスタンス状態に移行するような機能を提供したりすることで、ユーザの体験をより充実したものにします。これにより、様々な形態のロボットやコックピットが同時に存在していて、たくさんのユーザがお互い自由に好きな地点のロボットへ好きな時にログインしてユビキタステレイグジスタンスを体験することができるようになります。

3.2. ユビキタステレイグジスタンス実現にむけた課題

本節では、上述したようなユビキタステレイグジスタンスの体験を実現するためにはどのような課題があるかを述べる。既に述べたとおり、ユビキタステレイグジスタンスは主にロボットとコックピットから構成される。以下にそれぞれの解決すべき課題を挙げる。

まず、ロボットについての課題を述べる。ユビキタステレイグジスタンスの最大の利点は、任意の地点へ移動したかのような体験が得られる点である。そのため、トレイグジスタンス先となるロボットを多く配置することが求められる。しかし、既存のトレイグジスタンスロボットをそのまま複数台用意しようとすると、没入間の高さを追及して非常に高価であったり、精密な部品を利用しているためにメンテナンス性に欠ける、駆動させるにあたって人員を必要とするといった問題があり、数多く配置するには適さない。多数配置するために既存のロボットの機能や性能を削ってコストダウンを狙う方法もあるが、没入間が損なわれてしまうと遠隔地に移動したかのような感覚を得る事ができなくなってしまう。このことから、ユビキタステレイグジスタンス用のロボットの設計における課題は価格、メンテナンス性、没入感の3要素を満たしたロボットの実現であると言える。

コックピット設計における課題としては、いかに生活空間に設置可能、容易に利用できるコックピットを設計できるかということが挙げられる。既存のトレイグジスタンス用のコックピットは、研究所レベルでしか利用できないような大型の設備が利用されていたり、セットアップに時間と人員を要するようなものが多く、普及可能性は低かった。しかし、ユビキタステレイグジスタンスの目指す「好きな時に、好きな場所から好きな場所へのトレイグジスタンス」を実現するためにはせ

めて1家に1台程度は導入可能なコックピットの実現が求められる。トレイグジスタンスのコックピットに使われるHMDやモーションキャプチャ用の機材は、今までは研究室レベルでしか目にする事ができなかった。しかし、昨今の時代背景として、それらの技術の一般家庭への普及が嗜好品レベルではじまっているという事実がある。HMDはSONYやEPSON等の大手電気メーカーから家庭用として発売されており、またモーションキャプチャ技術もMicrosoft社のKinect [32] [33](図3.3)やSony Computer Entertainment社のPlaystation Move [34](図3.4)等、簡易なものが既にリビングシーンで利用されている。この背景を踏まえると、日常的に入手可能な部品を組み合わせてコックピットを構成し、ユビキタステレイグジスタンスの体験を実現することができれば日常空間で容易に利用可能なコックピットの設計が可能であることを示したと言える。と考える。



図 3.3: Kinect [33]



図 3.4: Playstation Move [34]

3.3. ユビキタステレイグジスタンスシステムの構成要件

本節では、ユビキタステレイグジスタンスの概念に沿ったシステムを構築するための、システム要件について検討する。システムは、前節に述べたようおりコックピットとロボットから構成される。

まず、トレイグジスタンス先となるロボットの要件について述べる。ユビキタステレイグジスタンスを構成するロボット(図3.5)がクリアすべき課題は、前説で述べた通り価格、メンテナンス性、没入感の3つである。まず、価格であるがこれは構造を単純化していくことで解決できる。しかし、構造を単純化するあまり没入感

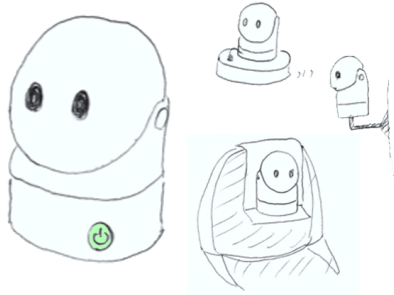


図 3.5: 構成要素を満たしたロボットのイメージ図

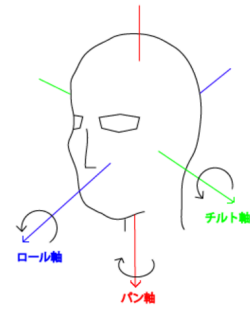


図 3.6: 頭部の各回転軸の呼称の定義

が損なわれないようにしなければならない。そこで、簡易な構造ながらも少なくともレイグジスタンスが成立する、ミニマムレイグジスタンスロボットの実現を目指す。また、メンテナンス性を高めるため、各部品をモジュールとして設計することで、故障してしまった箇所をすぐに交換して使えるようにすることで、メンテナンス性を担保することができる。

ロボットは高い没入感を持って遠隔地の様子をユーザが見聞きできるように、映像伝送用のカメラや音声を伝送するためのマイクを持ち、ユーザが自然な動きでロボットの周囲を見渡せるよう、ユーザの頭部運動を再現する機構を持つ。これにより、ユーザの頭部運動に追従した音声や映像を伝送する。両眼立体視を行うために、両眼に相当するカメラを用いる。また、バイノーラル音源を得るために、モノラルマイクをロボットの頭部の両端に外向きに設置することで簡易な構成でユーザの没入感を高める。

没入感を得るための立体視には、両眼視差を利用する立体視と運動視差を利用する立体視が存在する。高い没入感を得るためのロボットの設計には必ずしも両眼視差による立体視は必要とされない。しかし、前述のようにロボットは簡易な設計であることが望ましいため、ロボットの機構は単純に、ユーザの頭部運動を再生するためパン軸、チルト軸、ロール軸の3自由度で構成されていることが望ましい。しかし、ロール、パン、チルトの3自由度(図 3.6)の頭部ロボットから伝送される映像では、システムの没入感を高める上の要素のひとつである運動視差の情報をユーザが得る事が難しい。そのため、ユビキタステレイグジスタンスロボットでは両眼視差による立体視機能を付加することでユーザの没入感を高める。また、

ロボットは、移動台車や様々な場所へ設置して使うため、アタッチメントとロボットを固定するための汎用のコネクターを設計する。

次に、ユーザ側のコックピットの構成要件について述べる。コックピットは、モーションキャプチャ装置と、ユーザに没入間を与える為の HMD からなる (図 3.7)。

モーションキャプチャ装置は、最低でも頭部 3 軸の回転角を計算できればよい。なぜなら、ロボットの構成要件で頭部運動を 3 軸の自由度をもってして再現するロボットをミニマムなロボットと定めたので、そのロボットを制御することができればコックピットとしての機能を満たしているといえるからである。

HMD は前述の通り昨今では家庭用のものも手に入りやすくなった。しかし、日常の生活空間で利用することを考えたとき、HMD を使うことにはひとつ大きな問題がある。それは、HMD を装着すると周囲の環境が見えなくなってしまうことである。ロボットにログインしている間は見えなくて当然であるが、ロボットにログインするために HMD を装着する際、またトレイグジスタンス先から戻ってきた直後等、瞬間移動という文脈から考えると、本来ならばユーザ本人の周囲の環境が見えていていいはずである。そこで、この問題を解決するために HMD を選定する際にはシースルー機能のついた HMD を利用する。

また、ユビキタステレイグジスタンスでは、コックピットから任意のロボット



図 3.7: 構成要件を満たしたコックピットのイメージ図

を選択する必要がある。そのため、ユーザがロボットを選択するためのユーザインターフェイスも重要な構成要素である。ユーザインターフェイスはコックピット毎にオリジナリティのあるインターフェイスでも、あるいはプラットフォーム側から提供されるものでもかまわないが、ロボットが様々な場所に配置されることを考えると、地図状のユーザインターフェイスが良いと考えられる(図 3.8, 図 3.9)。ユーザは GoogleMap のような地図インターフェイスを用い、行きたい場所のロボットを選択する。また、地図インターフェイスにすることで、ロボットからロボットへと次々に移動して行く時にも、自分が今どこにいるのかを見失うことなく、世界中を飛び回ることができるようになる。

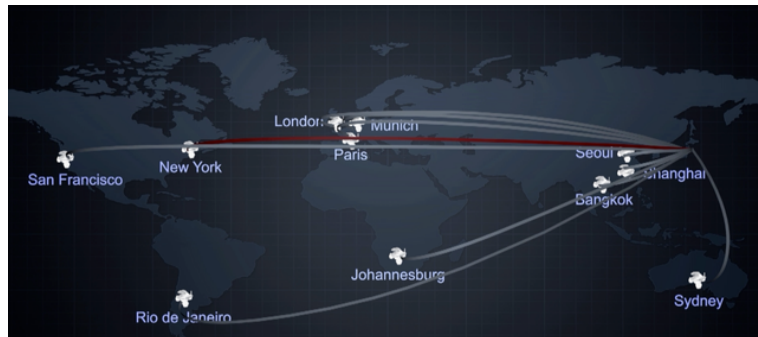


図 3.8: ユーザインターフェイスのイメージ図 (全体像)



図 3.9: ユーザインターフェイスのイメージ図 (ロボット選択画面)

第4章

ユビキタステレイグジスタンスシステムの試作

4.1. 試作の概要

本研究では2章で述べた課題設定, 構成要件を元にプロトタイプシステムの設計及び試作を行う。プロトタイプシステムの試作は Ver.1, Ver.2 及び Ver.3 の3種類のプロトタイプ構築を行った。

Ver.1 では, 構造が簡単で安価, かつ遠隔地の様子を自由に見渡すことができ, かつ移動台車に搭載できる2自由度をもつ頭部ロボットと, それを操縦するためのコックピットの構築を行った。

Ver.2 ではロボットの自由度の拡張と, より安定した移動台車の操縦を可能にすることで Ver.1 での問題を解決し, 加えてローカルエリアネットワークを用いたユーザテストを行った。

Ver.3 では, ロボットの各部品をモジュール化してメンテナンス性と拡張性を高めた。またコックピットはユーザが任意のロボットを自由に選択することのできるインタフェースを設計し, ユビキタステレイグジスタンスシステムの目指す一連の体験を, 限定的ながら実現可能なシステムを構築した。

4.2. プロトタイプシステム Ver.1

4.2.1 システムの概要

プロトタイプシステム Ver.1 では、構造が簡単で安価、かつ遠隔地を自由に見渡ることができるロボットと、コックピットの構築を行った。また、ロボットを搭載する移動台車とその操縦方法に関する試作も同時に行った。

以下に本システムの概要を示す。本システム(図4.1)では、HMDをかぶったユーザが、見回し動作を行うことで自由に遠隔地の様子を見渡ることができる。また、ユーザの重心移動を計測することにより、遠隔地の2輪倒立振り子型移動台車を操縦して任意の地点へ移動することができる。

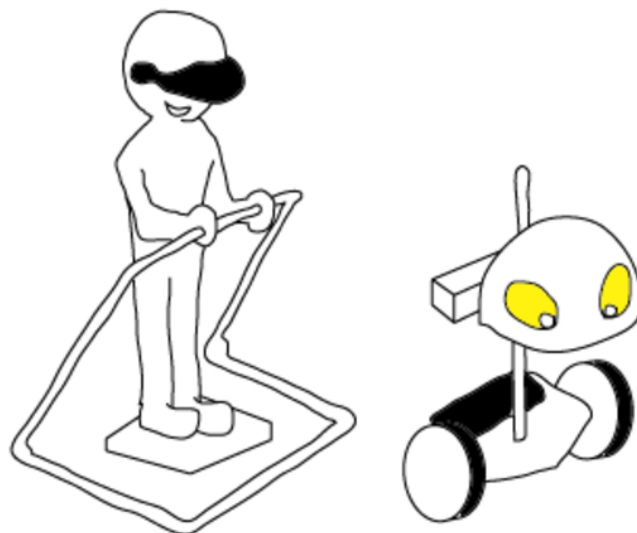


図 4.1: プロトタイプシステム Ver.1 のイメージ図

プロトタイプロボット Ver 1 は、ユーザの頭部運動を再現し、映像をユーザに伝送するとともに移動台車への搭載が可能なロボットを設計した。ロボットはユーザの頭部運動を再現するパン軸、チルト軸の2自由度と、ステレオカメラを搭載し、移動台車と接続するためのマウントを持ったロボットを設計した。また、バッテリーや制御用のコンピュータは全て移動台車上に配置し、コックピットと無線で

接続することで、移動台車を操縦し自由に走り回れるようにした。移動台車には2輪倒立振子ロボットを用いた。

プロトタイプコックピット Ver.1 は、ユーザの頭部運動を計測するためのモーションキャプチャシステム、ユーザにロボットから伝送される映像を提示するためのHMD、及び移動台車を操縦するための、ユーザの重心計測装置から構成される。ロボットとは無線のローカルエリアネットワークを利用して接続される。

本システムの Ver.1 において2輪倒立振子型移動台車を用いた理由として、Segway(Segway Inc.)(図 4.2) と Joyman [39](図 4.3) の存在が挙げられる。Segway は、足場をはさみこむような並行2輪台車、及びハンドルからなり、乗車したユーザの重心移動による倒立制御で移動する。同様に Joyman では、人間をジョイスティックのコントローラーに見立て、人間の重心移動によってバーチャル空間内を Segway に乗っているかのような動きで移動することができる。Joyman におけるバーチャル空間内の移動方法は、Segway 乗車時のユーザの動きと共通点が多く見られる。移動台車の形状と操縦方法として、現実空間及びバーチャル空間の両方で成立しているものは遠隔の現実空間でも成立すると推察した。このため、本システム Ver.1 の移動台車として2輪倒立振子型の移動台車と、重心移動による操縦方法を採用した。



図 4.2: Segway(セグウェイ社)

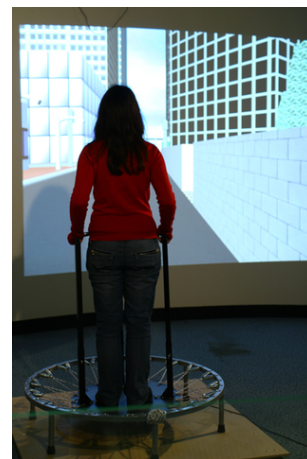


図 4.3: Joyman [39]

4.2.2 ロボットの構成

図 4.4 に本ロボットの外観を示す。本ロボットの頭部機構(図 4.5)では, ギア比 16:1 の Maxon 社製のギアドモーターとポテンシオメーター (RDC506002A, アルプス電子) を用いた各軸の PD 制御を行った。頭部ロボットの各パーツは 3D プリンタで造形した。モーターの制御には ikimo ボード (inMojo Inc.) を用い, 制御 PC とのシリアル通信を行い制御した。また, HMD を用いたトレイゲジスタンスにおいて, ユーザとロボットの眼間距離を揃え, カメラと HMD の視野角も揃えることが没入感を得る上で重要なことが知られている [38] ことから, 距離頭部には映像伝送のためのカメラ (MCM-15, ロアス株式会社) を, 中心間距離が 65mm になるように固定した。映像は両目の映像をそれぞれ縦の解像度を半分にした Motion Jpeg 形式でコックピット PC へ UDP を利用して伝送される。移動台車に搭載したバッテリーは, 1 台で複数の出力電圧を利用できる Energizer XP8000(日本トラストテクノロジー) を利用した。移動台車には, 倒立振り子型台車ロボットである Miniway Advanced(株式会社 JAPAN ROBOTECH) を利用した。

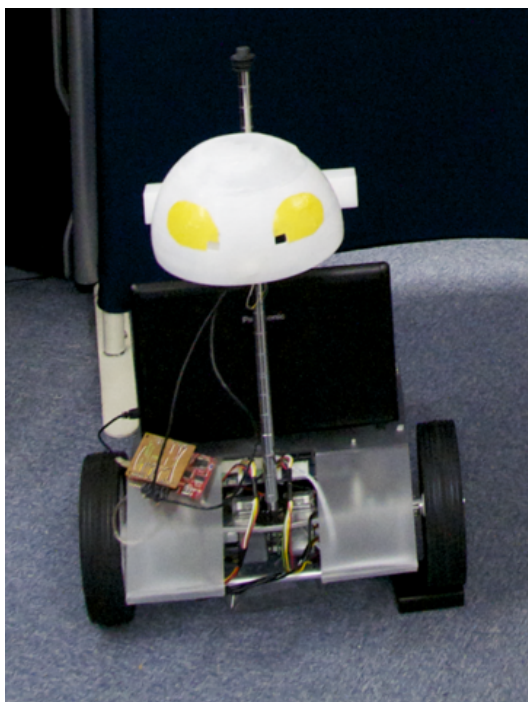


図 4.4: ユビキタステレイゲジスタンスロボット Ver.1 の外観



図 4.5: キビキタステレイグスタンスロボット Ver.1 の頭部アップ

4.2.3 コックピットの構成

本システムのコックピットは、頭部運動を計測するための装置とロボットからの映像を再現するための HMD、及びロボットの移動台車を操縦するための重心計測装置とコックピット PC からなる。HMD は、サイドバイサイド形式、及びトップアンドボトム形式の映像による立体視画像の提示が可能な "Personal 3D Viewer" (HMZ-T1, SONY 株式会社)(図 4.8) を利用した。HMZ-T1 の画角は水平 45 度であり、これはロボットに用いたカメラと一致している。

図 4.6 にシステムのブロック図を示す。ロボットから伝送されてきた映像はコックピット PC でひとつに統合サイドバイサイドではなくトップアンドボトムを採用した。理由は、見回し方向の解像度を優先するためである。頭部の姿勢計測には Wii リモコン (任天堂株式会社) を利用した。Wii リモコンをユーザの顔の前に設置し、リモコン先端の CMOS センサーで HMD に固定した 2 点の赤外線 LED の位置を計測した。計測されたデータは、回転角を算出し、後に、回転角は UDP 方式を用いてローカルネットワーク上に接続されたロボットに伝送した。また、移動台車をコントロールするためのユーザの重心位置の計測には、バランス Wii ボード

(任天堂株式会社)(図 4.7) を用いた。また、ワイヤレステンキー (Logicool Wireless Number Pad N305, 株式会社 Logicool) を用いたコントローラーも用意した。これはロボットに搭載された制御用 PC と bluetooth 接続され, 非常停止の際に割り込み制御を行うために使用した。

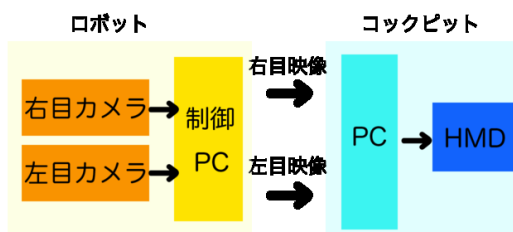


図 4.6: 映像伝送システムの概要



図 4.7: バランス Wii ボード (任天堂株式会社)



図 4.8: Personal 3D Viewer(SONY 株式会社)

4.2.4 システムの試作と考察

図 4.9 に試作したプロトタイプシステム Ver.1 の外観を示す。本プロトタイプシステムでは, 設計要件のうち両眼立体視映像の伝送が可能なロボットとコックピットを実現した。しかし, 同時にふたつの問題も明らかになった。ひとつめは, フェイスカバーを装着した際の重心を十分に考慮していなかったため, 頭部機構が不安定になり, 制御が非常に困難だった事である。これは, 後からカウンターウェイトを追加することで対応したが, 当初モーターの回転軸を, パン軸とチルト軸がなるべく直交に近い配置にするためにロボットの中心部にモーターを集中させる設



図 4.9: プロトタイプシステム Ver.1 の試作結果 (左: ロボット 右: コックピット)

計にしていた。これに対して、フェイスカバーはカメラまで含めてロボット全体をおおうようなサイズだったため、フェイスカバーが各軸にかかるモーメントが予想以上に大きくなり、今回の設計では頭部運動に十分に追従するような制御はできなかった。ふたつめの問題は、頭部ロボットの台車へのとりつけ位置がユビキタステレイグジスタンスに適さなかったことだ。本 Ver の試作では頭部ロボットは倒立振り子台車の支柱に固定されていた。しかし、倒立振り子台車の特徴として、動き出し時や停止時に大きく支柱が前後に揺れる。ロボットの頭部をその支柱に固定してしまった事で、ロボットや移動台車が正常に動いていたとしても、HMDを通して見ると操縦者の意図しない動きをしているように見えてしまった。Segwayの場合は、人が立っているのはタイヤの間にあるステップで、人間が自分で自分自身の傾きをスタビライズできる。しかし本ロボットの場合はそれができなかったため、大きな違和感を産んでしまったのではないかと考えられる。加えて、台車のコントロールについて、Wii ボードを利用した操縦方法が当初の想定よりも難し

く、思うように操縦できなかつたという問題が挙げられる。その原因として、コックピットからユーザへのフィードバックが視覚情報しかなかったことが挙げられる。Joyman の例では、身体を傾けた際に力覚のフィードバックが存在した。しかし、本コックピットではユーザへの視覚情報以外のフィードバックがなく、ユーザの体重の移動量に対して動き方の予想が難しい。そのためユーザは操縦が困難だったのではないかと考えられる。

4.3. プロトタイプシステム Ver.2

4.3.1 システムの概要

プロトタイプシステム Ver.1 の設計には、頭部の設計不具合、倒立振子台車へのロボットの固定位置、移動台車の操縦性の3つの問題があることがわかった。本プロトタイプでは、Ver.1 の結果を元にシステムを改善し、ユビキタステレイグジスタンスシステムの要件のうちの構造が簡単で安価、遠隔地の様子を見渡すことができるロボットと、そのロボットを搭載する、倒立振子よりも安定した操縦が可能な移動台車、及びそのコックピットについて設計、構築を行った。

本プロトタイプシステムの概要を以下に示す。本システム(図 4.10)では、Ver.1 と同様に遠隔地にあるロボット側でユーザの頭部運動をリアルタイムに再現する。また、頭部運動を再現するロボットは移動台車上に設置され、ユーザは手に持ったジョイスティックを操作することで遠隔地のロボットを操縦し、好きな場所へ移動することができる。ユーザは Ver.1 と同様、ロボットから伝送された映像を見ることで遠隔地の様子を自由に見渡すことができる。

本システムの設計にあたり、Ver.1 で明らかになった問題点を解決するため、まず、頭部機構の再設計を行った。Ver.1 で頭部の制御が不安定になっていた原因であるフェイスカバーをなくし、頭部ロール軸機構の追加をおこなった。また、コックピットの姿勢計測装置を、Wii リモコンから、より計測精度を向上させるためのモーションキャプチャシステムに変更した。

移動台車についての問題については、利用する移動台車と操縦法法を変更することで解決した。移動台車は、姿勢が低く、2輪倒立振子より安定して走行できる、

2 輪の駆動軸に加えて補助車輪を持った市販の台車ロボットを用いた。また、移動台車の操縦方法は、ジョイスティックを使って手元で操作するよう変更した。

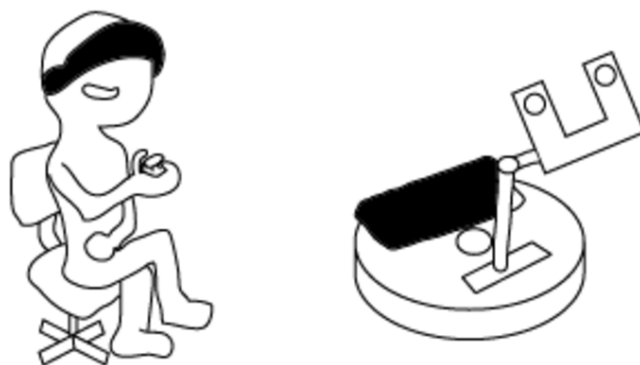


図 4.10: プロトタイプシステム Ver.2 のイメージ図

4.3.2 ロボットの構成

プロトタイプロボットの Ver.2(図 4.11) では、頭部機構のモーター及び制御ボードは Ver.1 と同じものを利用した。頭部機構(図 4.12, 図 4.13) は、みまわし方向の回転速度を担保するためにパン軸を最後に配置し、パーツは 3D プリンタで製作した。ロボットのカメラには、Ver.1 と同じく web カメラの MCM-15(ロアス株式会社) をレンズの中心間距離が 65mm になるように固定し、映像伝送は Ver.1 と同様 Motion JPEG 方式で行った。頭部の駆動用の電源は Ver.1 と同じバッテリーを用いた。移動台車には Roomba 537J(iRobot Corporation) を使用し、システムの Ver.1 で際に生じていた。移動台車に関する問題を解決した。Roomba はの制御は、Roomba 本体についているシリアルコネクタを利用して、Roomba 上に搭載したロボットの制御用ラップトップ PC から行った。

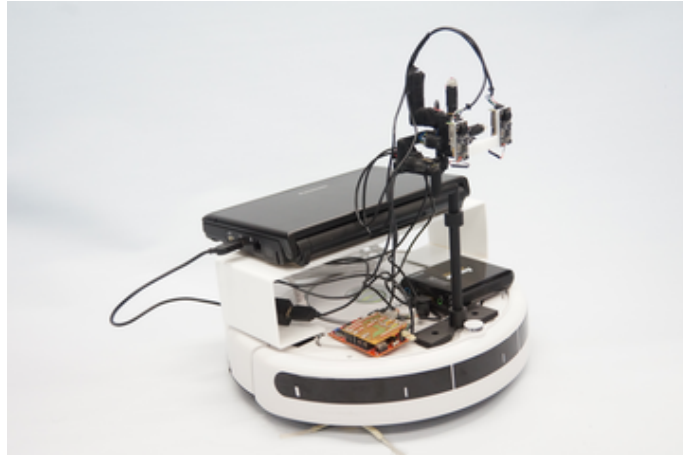


図 4.11: プロトタイプロボット Ver.2

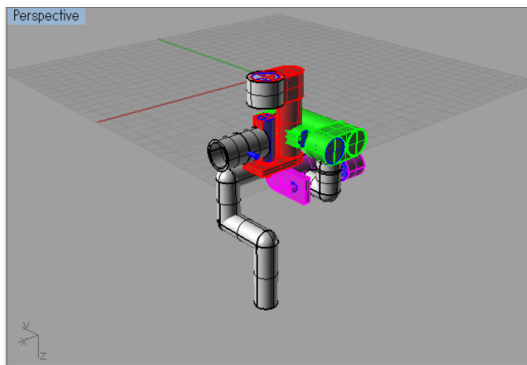


図 4.12: Ver.2 頭部機構の設計 CAD

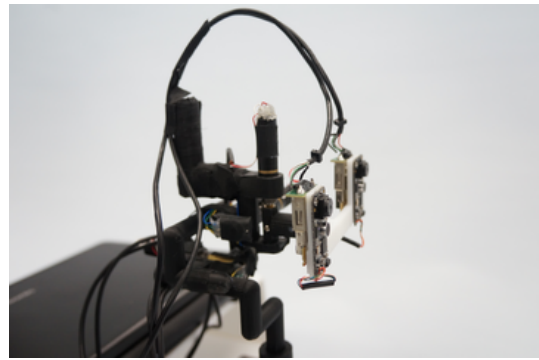


図 4.13: プロトタイプロボット Ver.2 の頭部機構

4.3.3 コックピットの構成

プロトタイプコックピット Ver.2(図 4.14) では, HMD には Ver.1 のコックピットと同じく SONY 社製の HMZ-T1 を用い, Ver.1 と同様の映像伝送方式を用いることでユーザは両眼立体視を行える. ユーザの頭部姿勢を計測するために用いたモーションキャプチャシステムは, モーションキャプチャカメラである Optitrack V120:Trio(SPICE Inc.)(図 4.15) を用いた. モーションキャプチャカメラは HMD に固定された再帰性反射素材を用いたマーカー (図 4.16) を計測し, 付属のソフトウェアから出力される頭部のパン, ロール, チルトの 3 軸の回転角度を UDP パケットとしてロボットに伝送する. ジョイスティックは, 小型のジョイスティックである Zeemote JS1 H(Zeemote Technology Inc.)(図 4.17) を用いた. ユーザは Zeemote

JS1 H を用いてロボットの移動台車を前進, 後退, 及び左右旋回を伴った前進と左右旋回を伴った後退の 6 方向 (図 4.18) について, それぞれ 4 段階のスピードで操作できる.



図 4.14: プロトタイプシステム Ver.2 を利用している様子



図 4.15: Optitrack V120:Trio(SPICE Inc.)

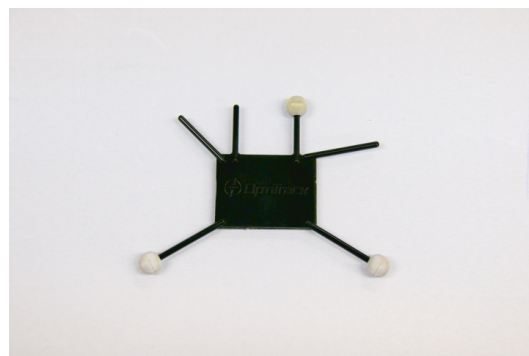


図 4.16: Optitrack 計測用マーカー



図 4.17: Zeemote JS1 H(Zeemote Technology Inc.)



図 4.18: Ver.2 における移動台車の移動可能方向

4.3.4 検証

本節では、本システムを用いたユーザテストについて述べる。ユーザテストを行った目的は、本システムの Ver.2 を用いて実際に様々な場所でトレイグジスタンスを行い、Ver.2 の改善点を明らかにすることである。検証は、(1) 屋外での検証、(2) 屋内での検証、(3) 遠隔地間での検証、の計 3 回実施した。

ユーザテストの基本的な流れを述べる。

- 被験者はコックピットの座席に座り、ジョイスティックを使ったロボットの移動台車の操作に関する説明を受ける。
- 被験者は HMD を自分で装着する。
- 被験者は自由にロボットを操縦し、周囲を見回したり、好きな所までロボットを操縦して移動する。
- 体験終了後、被験者の体験中のコメントを元に、システムについて被験者とディスカッションを行う

なお、(1) 屋外での検証、(2) 屋内での検証ではロボットの操縦を行ったが、(3) 遠隔地間での検証際はロボットの操縦は行わず、周囲の見回しに関するのみ行った。

(1) 屋外での検証

屋外での検証の様子を図 4.19, 図 4.20 に示す。本検証は, みなとみらいの臨港パークにおいて行った。本検証では, コックピットをレンタカーのワゴン内に設置し, また AirMac Extreme(Apple Inc,) と有線ルーターの LAN-BR/G8(ロジテック株式会社) を用いて無線のローカルエリアネットワークを用意した。EMOBILE(イー・アクセス株式会社) 等の既存の無線ネットワークサービスを利用しなかった理由は, 今回試作したコックピットが有線でなければネットワークに接続にできなかったためである。電源にはカセットボンベを燃料として駆動する MGC900GB(三菱重工株式会社) を用いた。また, 本検証は 4 人を対象にして行った。



図 4.19: 臨港パークでの準備の様子



図 4.20: 臨港パークでのユーザテストの様子

本検証では、臨港パークの路面が非常に荒く、ロボットの移動台車の車体が大きく揺れてしまったために映像が乱れ、十分に明瞭な映像を得られなかった。そこで、実験の後半ではロボットを移動させず、HMDを装着し周囲を見渡すことで、システムがユーザに没入感を与えられているかを確認した。屋外での実験だったため、実験の後半になると日が暮れてしまいロボットに用いているカメラではみなとみらいの景色はあまり明瞭に見る事はできなかった。認識できたのは、建物の明かりと輪郭程度だった(図 4.21)。しかし、体験したユーザのコメントから、本システムを用いて遠隔地の景色を見回すと、明瞭さや明るさについては気になるものの、自分がロボットの場所で見回しているかのような感覚が得られることを確認した。また、映像の遅延は主観的には 250[m] から 300[ms] 程度であるとのコメントを得た。



図 4.21: 本検証においてユーザが HMD で見ていた映像 (左目)

屋内での検証

本検証は、慶應義塾大学日吉キャンパスでおこなった。協生館3階のスタジオ前で行った(図 4.22)。本検証では体験者がソファに座って体験できるように、ソファの周りにコックピットを設置した。ネットワーク環境は、臨港パークと同様に Airmac Extreme と有線ルーター LAN-BR/8G を用いてローカルエリアネットワークを構築した。本検証は屋内で行ったため、電源は備え付けのコンセントを利用した。また、本検証は3人の被験者を対象に行なった。

屋内の検証では、臨港パークと異なり路面が絨毯のため安定していたため、ジョイスティックを用いた移動台車の操縦も伴う検証を行った。

見直し動作については、映像の遅延はユーザからのヒヤリングの結果、主観的に 300[ms] 未満程度という結果が得られた。ロボットの周囲に十分な明るさもあったためと考えられる。夜間に行った臨港パークでのユーザテストよりも良い反応が得られたが、屋外でのユーザテストの際よりも通信可能範囲が短かった。理由としては協生館の建物の構造や既存の無線ネットワークとの干渉の影響が考えられるが、これについては既存の安定したネットワークを利用してシステムを運用する



図 4.22: 屋内での検証の様子

ことで解決できる。ロボットの移動のコントロールについては、事前に細かい注意事項の説明や、HMD を装着せずにロボットを目の前で見ながらの練習を行ったとしても、HMD を被って操縦するという本システムの設計がユーザにとってとても難しいという結果が得られた。コントローラには簡易な小型のジョイスティックを用いた。ジョイスティックの操作方法として、ユーザからの入力量を中心からどれだけジョイスティックが倒れたかという方向と角度の絶対量で調節するというのが一般的である。しかし、本システムでは、コマンド入力による段階的な操作を採用していたため、ユーザの認識とコントローラの形状の整合性がとれていなかったのが原因と考えられる。

遠隔地間での検証

遠隔地間での検証として、日吉の河野ビル(横浜市港北区日吉本町1丁目2-15河野ビル)と日吉の協生館の間で、ワイドエリアネットワークを用いた検証を行った(図4.23, 図4.24)。検証は、2人の被験者に対して行った。本検証では、コックピットを有線でワイドエリアネットワークに接続し、協生館に設置したロボット1台へのテレグジスタンスが可能かどうかを確認した(図4.25)。

本検証の主眼は、ワイドエリアネットワークを用いてテレグジスタンス体



図 4.23: 遠隔地間での検証の様子 (河野ビル側)



図 4.24: 遠隔地間での検証の様子 (協生館側)

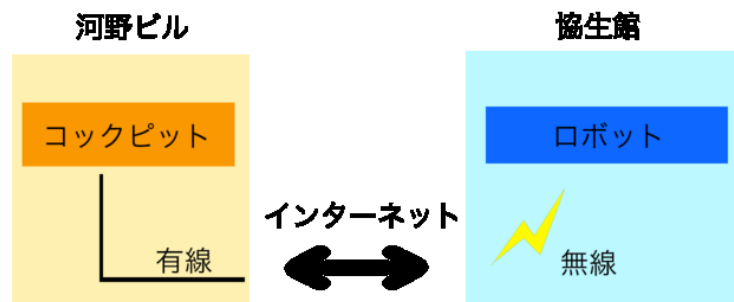


図 4.25: 検証のシステム構成の概要

験が成立するかどうかを確認することである。検証の結果、被験者からは遠隔地を見渡すことには成功したが、没入感はあまり感じないという意見をもらった。遠隔地間での検証では上述した2件と大きく変更された条件として、ネットワーク環境以外に空間的に隔絶された2地点でのテストだったためにロボット周辺の環境音をユーザは聞く事ができなかったことが挙げられる。ネットワーク遅延も発生し

ていたことが被験者のコメントからわかったが、頭部を動かさずに正面を向いたままの状態でも没入感が損なわれていたことから、音声伝送が可能な設計が重要であると推察できる。

4.3.5 システムの考察

まず、プロトタイプシステム Ver.2 では、Ver.1 で達成できなかった頭部追従性能の向上に取り組んだ。Ver.2 では、Ver.1 で問題となっていたモーターや機構の自重によって思うように制御できなかった問題を解決し、それぞれの回転軸毎について人間の頭部運動に追従する制御を行った。しかし、ロール軸、パン軸、チルト軸を同時に制御するには制御基盤の周波数が足りず、頭部が振動してしまう問題が明らかになったため、ロール軸、チルト軸の2軸のみについてユーザの頭部姿勢を再現するのみに留まった。

頭部機構の設計の妥当性については、検証の結果、ロボットのいる地点に訪れているように感じるのに概ね妥当であった。しかし、空間的に離れた地点にロボットにおいて運用する際は、音声伝送機能がないことに起因する没入感の低下が確認されたため、システム構成の要件に音声伝送を追加する必要があることがわかった。また、移動台車から見てパン軸を最も先端に配置した場合、ユーザが斜め下や斜め上を向いた際にロボットがユーザの頭部姿勢を再現できない問題があった。パン軸まわりの回転速度を優先した設計だったが、ユーザー該当方向を向いた際にロボットの伝送する視界の映像とユーザの姿勢に齟齬が発生することによる没入感の低下が認められたため、再設計を行う必要があることがわかった。

次に、Ver2 においては、Ver.1 で明らかになった移動台車の問題について、倒立振り機構の特性による問題と遠隔操作をしていることに関する問題を切り分けて考えるために、並行した2輪のタイヤと1つの補助輪を持ち、安定して走行する移動台車として市販の Roomba を用いた。移動台車については、検証の結果、ロボットにトレイグジスタンスしてからすぐに操縦可能になるようなトレイグジスタンス体験の流れや、移動台車の制御方法等、再検討する余地が大きく残っているということがわかった。

4.4. プロトタイプシステム Ver.3

4.4.1 システムの概要

本プロトタイプシステムでは, Ver.1 と Ver.2 の結果を踏まえ, 構造が簡単で安価, 遠隔地の様子を見たり聞いたりすることができるだけでなく, 様々な地点のロボットをユーザの意思に応じて使い分けることができるシステムの設計と構築を行った.

本システム(図4.26)は, コックピットと複数台のロボットから構成される. ユーザは本システムを利用するにあたってまず, コックピットのディスプレイに表示されたインターフェースを用いて自分がテレイグジスタンスしたい地点を選択する. その後, ユーザはHMDを装着し, ロボットにログインする. 計測されたユーザの頭部姿勢を遠隔地のロボットが再現し, ユーザはあたかも自分が遠隔地に行っている様子を見聞きしているかのような体験ができる. また, ユーザは体験中の好きな時にテレイグジスタンスを中止することができ, その後再び任意の地点を選んでテレイグジスタンスすることも可能である. また, ユーザがロボットにログインしていない状態でHMDを装着しても自分の周囲の状況を把握できるよう, HMDにはシースルーモードを搭載している.

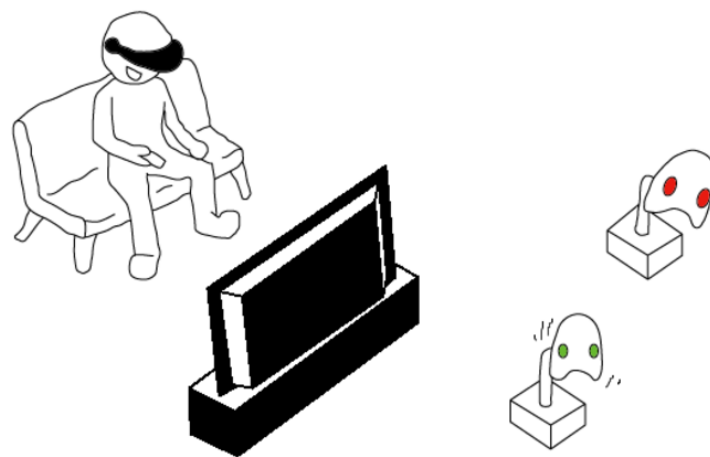


図 4.26: プロトタイプシステム Ver.3 のイメージ図

ロボットの Ver.3 は設計にあたり, Ver.1 と Ver.2 で明らかになった実装上の課題を解決し, さらに様々な地点にロボットを複数設置することを想定した設計を行った. まず, ロボットの自由度はロール, チルト, パンの3軸を, 十分な追従速度を持って動作させるために構造, 及び部品の再設計を行った. 頭部ロボットの各部品は, 複数製作する際のメンテナンス性を高める事を目的に, 部位毎にモジュールとして取り外すことができるような設計とした. 頭部ロボットのロール, パン, チルトの各軸の配置は, Ver.2 と異なり, パン軸を最初にした. これにより, ユーザーが斜め下や斜め上を向いた際にロボットが頭部姿勢をより正確に再現できるようにした. また, 構造を再設計するにあたって小型かつ十分なトルクを持つモーターを再選定した. 映像は以前のバージョンのロボットと同様にをふたつの web カメラをレンズ間隔 65mm で配置し, Ver.1 や Ver.2 と同様の手法を用いて UDP パケットとしてコックピットに伝送した. また, ステレオマイクを左右に向けて設置することで映像だけでなく音声もユーザの頭部運動にあわせて伝送可能なロボットの設計を行ったが, Ver.3 において音声は Skype を用いて伝送しているため, 両耳マイクのうち片方のみを利用している. 加えて, Ver.3 ではモジュール化を指向した設計を行ったため, ロボットの底面に汎用のネジ穴を設ける事で, 移動台車のみでなく椅子や壁といった様々な場所に固定することを可能にした.

コックピットの Ver.3 はリビングシーンでの利用をイメージし, Ver.2 の構成に加えて大型ディスプレイとシースルー HMD, ロボット選択用のコントローラーを追加した. 本バージョンでは移動台車関連の機能は全て廃しているため, ユビキタステレイグジスタンスコックピット Ver.2 に存在したジョイスティックは利用していない.

4.4.2 ロボットの構成

この設計に基づき構築したプロトタイプロボット Ver.3(図 4.27, 図 4.28) は, 頭部の制御のモーターに HS-GM21-ALG(S.T.L. Japan) とポテンシオメーターに RDC506002A(ALPS 電子) を用いた.

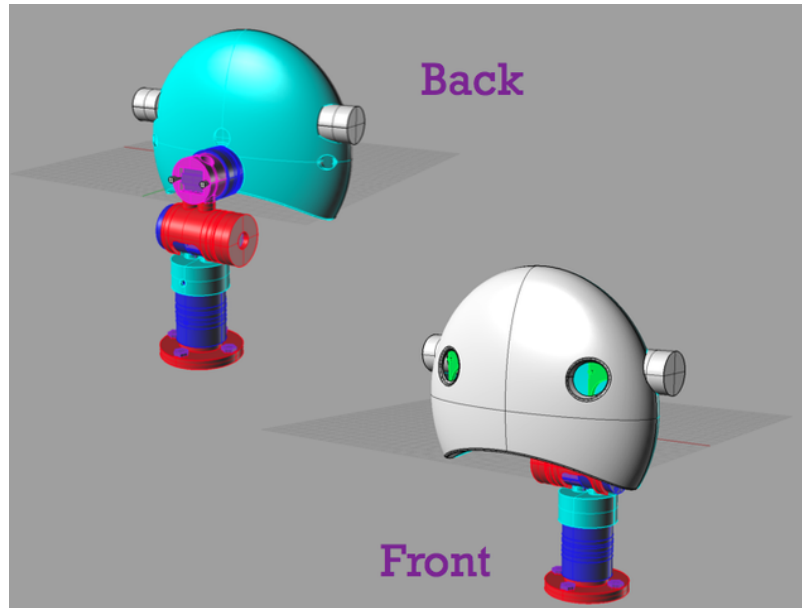


図 4.27: プロトタイプロボット Ver.3 の頭部設計 CAD



図 4.28: プロトタイプロボット Ver.3 の外観と概要

モーターの制御には chipKIT Uno32 (Microchip Technology Inc.) とモータードライバの MC33926 (Pololu Corporation) を用い、コンピュータとのシリアル通信

でコントロールする。音声はモノラルマイクの AT9904(株式会社 audio technica) を右耳, 左耳にそれぞれセットすることでユーザの頭部運動に追従した音声を伝送する。映像は Ver.1 で用いたものと同様の MCM-15(ロアス株式会社) をレンズ中心間距離が 65mm になるよう, 頭部に固定した。ロボットの底面には, 様々な場所にロボットを固定するためのアダプターとして, カメラの三脚に利用されているサイズである 1/4 インチナットを組み込んだ。

4.4.3 コックピットの構成

プロトタイプコックピット Ver.3(図 4.29) では, 前述の設計に則ってリビングシーンでの利用を想定したコックピットの構築を行った。ユーザインタフェースを表示するディスプレイはリビングにおかれているテレビを利用することを想定し, LC-60LV3(SHARP 株式会社) を利用した。ここにはロボット選択の際のユーザインタフェースを表示する他, システムからユーザへの指示を表示する。ユーザが装着するシースルーヘッドマントディスプレイは, Ver.2 でも用いた HMZ-T1 に, 画角の一致する MCM-15 を HMD の視点の高さに固定し (図 4.30), ユーザがどのロボットにも接続していない時は単眼のシースルーモードで稼働するようにした。ユーザインタフェースの操作にはコントローラ (Dualshock3, 株式会社ソニーコンピュータエンターテインメント)(図 4.31) を用いる。頭部の姿勢計測をするモーションキャプチャシステムとしては, Ver.2 のと同様の構成のものを利用している。現在の一般的な家庭のリビングには Optitrack のような精密なモーションキャプチャシステムは普及していないが, Kinect センサー (Microsoft Corporation) のような簡易なモーションキャプチャシステムは既に普及が始まっており, 本システムで利用しているような小型のモーションキャプチャならば近い将来に普及するのではないかと考える。

4.4.4 TELUBee

本節では, 実際に完成したプロトタイプシステム Ver.3 と, 実現している体験について述べる。本プロトタイプシステムは, 「Telexistence platform for Ubiquitous



図 4.29: プロトタイプコックピット Ver.3



図 4.30: 製作したシースルー型 HMD



図 4.31: Dualshock3

Embodied Experience」のうち、Telexistence の「TEL」、Ubiquitous の「UB」、Embodied と Experience からそれぞれ頭文字の「E」とって「TELUBee」と名付けた(図 4.32)。本バージョンの TELUBee ではレイグジスタンスプラットフォームと呼べるまでの一般化は行われてない。しかし、今後プロジェクトが進行することでゆくゆくはプラットフォームと呼べるまでに成長することを願い、プラットフォームという単語を含めた。

TELUBee では、3 章で提案したユビキタステレイグジスタンスの体験のうち、実際に 1 人のユーザが複数のロボットからログイン先を選びレイグジスタンスし、自由に遠隔地とユーザの本来いる場所を行ったり来たりする体験を実現して



図 4.32: TELUBee



図 4.33: TELUBee を公園に設置した様子

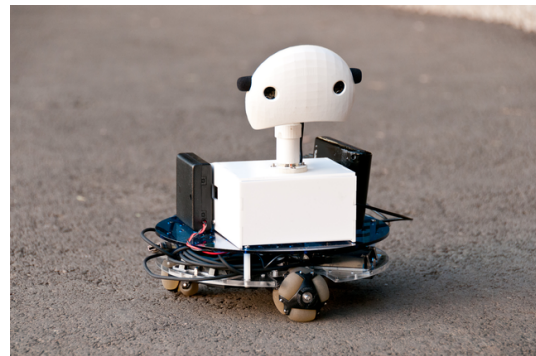


図 4.34: TELUBee を移動台車に乗せた様子

いる。

TELUBee は、3 軸自由度を持つ頭部ロボット複数と、コックピットからなる。それぞれの詳細の構成については、前述の通りである。ロボットには汎用のネジ穴がついているため、足をつけて様々な場所に固定したり (図,4.33), 移動台車の上に設置することもできる (図,4.34)。本システムは遠隔地のロボットとコックピット間で通信するために、稼働させる為にネットワークが必要となる。本システムはローカルエリアネットワークを用いて動かす事はもちろん、ワイルドエリアネットワークを用いて稼働させることも可能であり、実際にロボットを遠隔地に配置してユーザーがログインすることが可能である。慶應義塾大学日吉キャンパスで行われた

修士論文公聴会では, 実際に日吉の河野ビルから協生館に設置した TELUBee にテレグジスタンスする様子のデモンストレーションを行った (図 4.35).



図 4.35: 公聴会でのデモンストレーションの様子

図 4.36, 図 4.37, 図 4.38 に TELUBee を起動しロボットにログインするまでの流れ, またロボットからログアウトして別の地点にログインし直すまでの体験の流れを時系列順に示す.

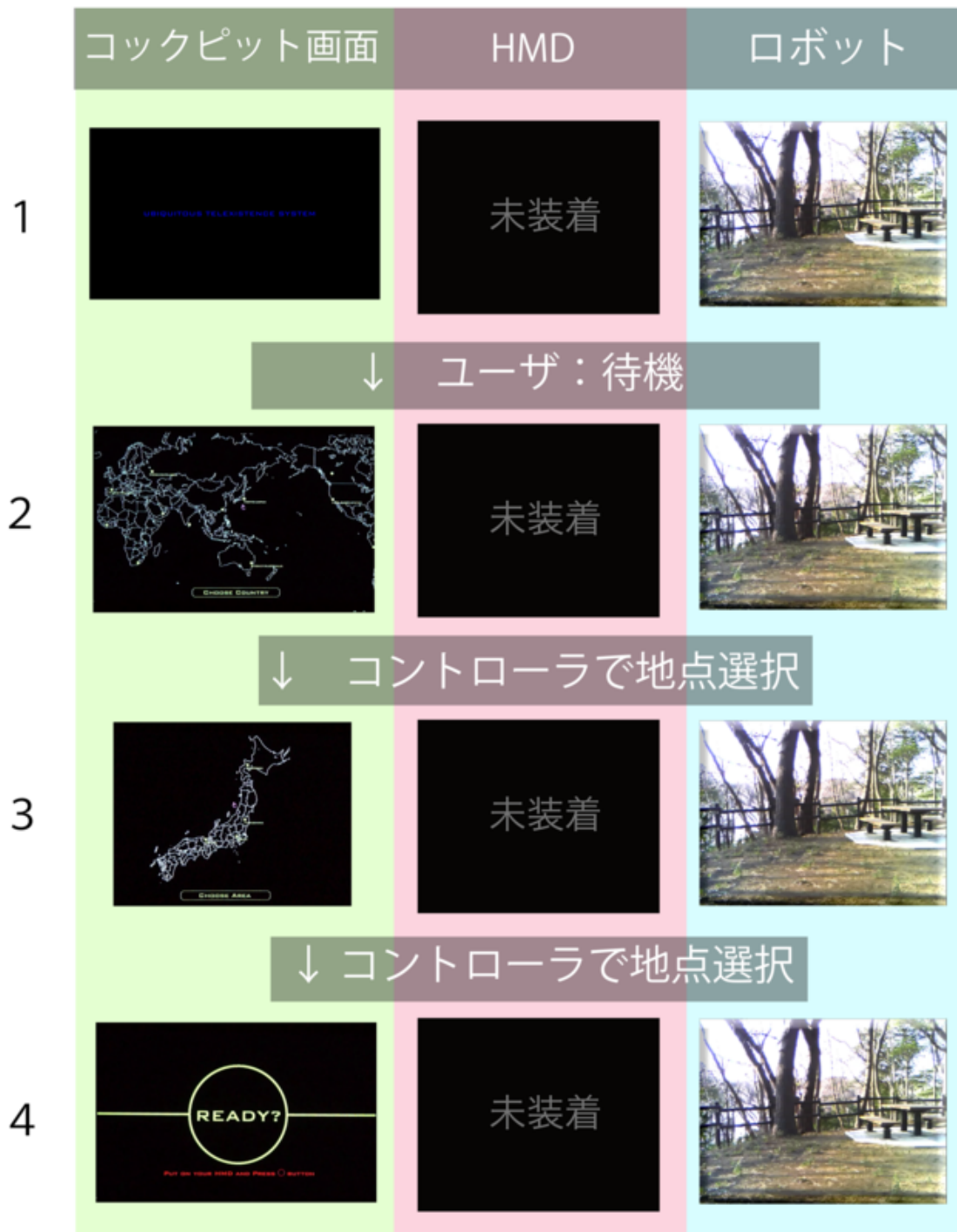


図 4.36: TELUBee の体験の流れ (1)

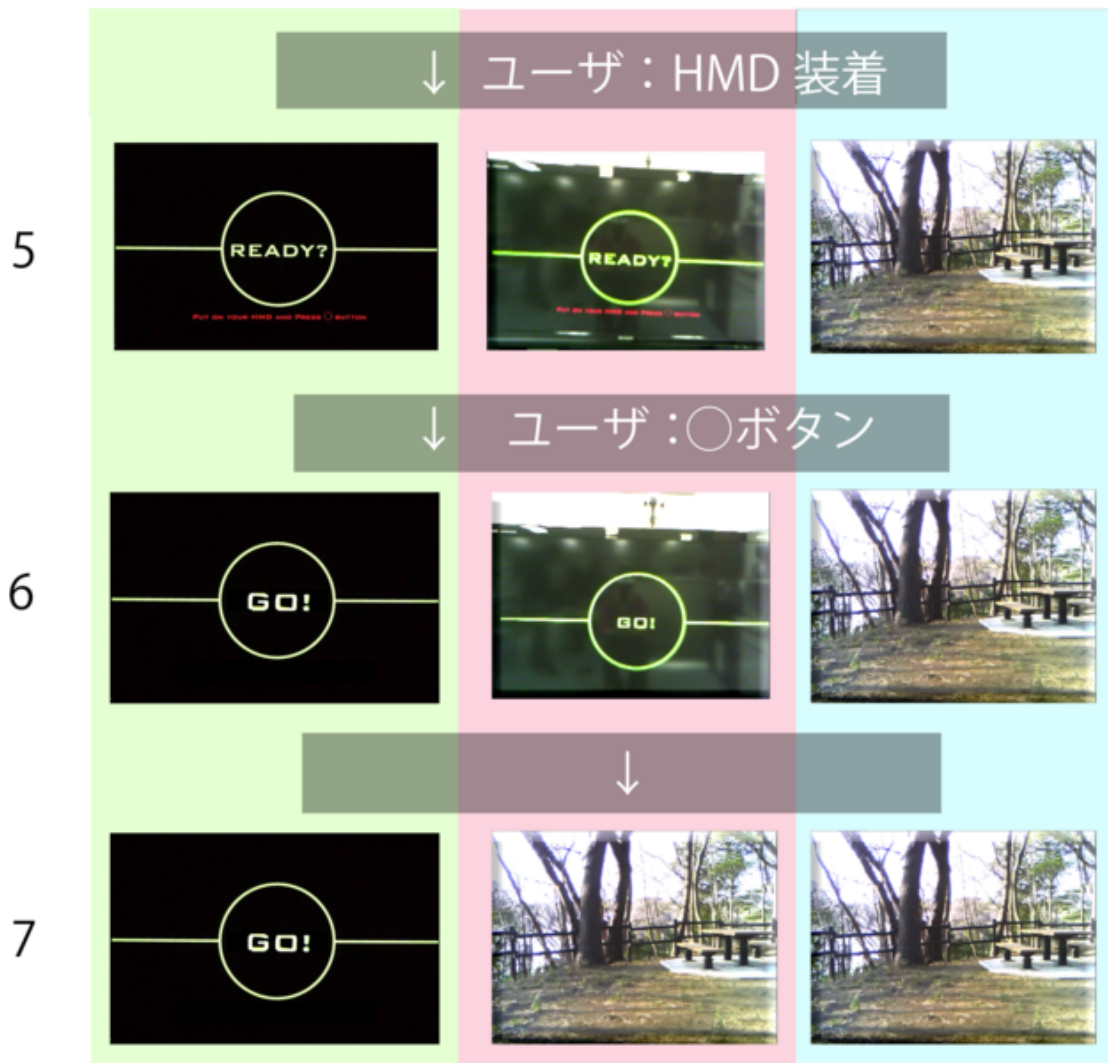


図 4.37: TELUBee の体験の流れ (2)

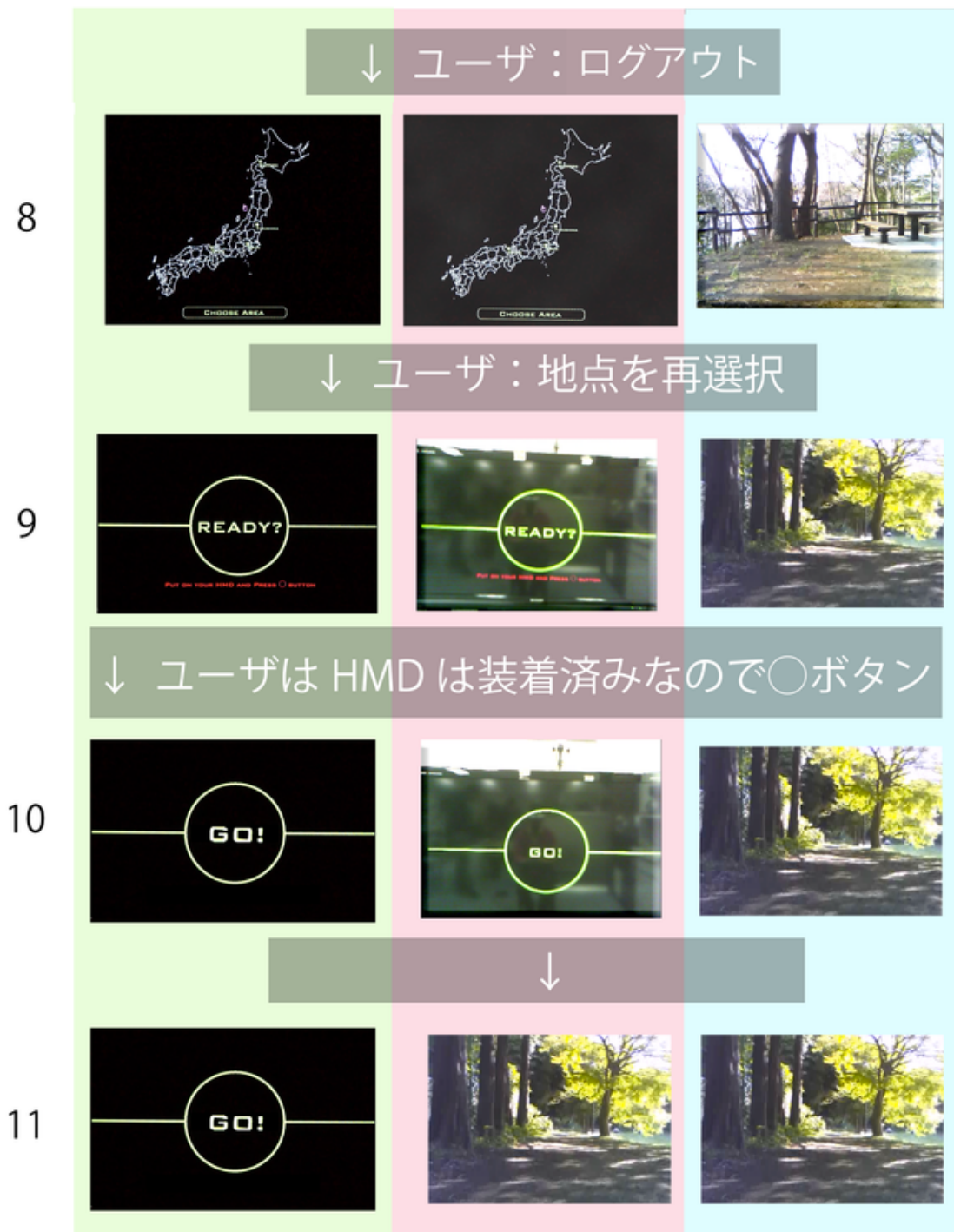


図 4.38: TELUBee の体験の流れ (3)

図 4.36, 図 4.37, 図 4.38 に示した各シーケンスについてより詳細に述べる. TELUBee の体験は, 既にロボットが接続待機状態で遠隔地に配置されている状態からはじめる.

まず, リビングを想定したコックピットの椅子にユーザが座り, コントローラーのボタンを押すと, コックピットの全面にのテレビにシステムの起動画面が表示される (図 4.39). コックピットが起動すると, 画面には世界地図が表示される (図 4.40). 世界地図上にはロボットが設置されている地点が緑色のドットで表示さ

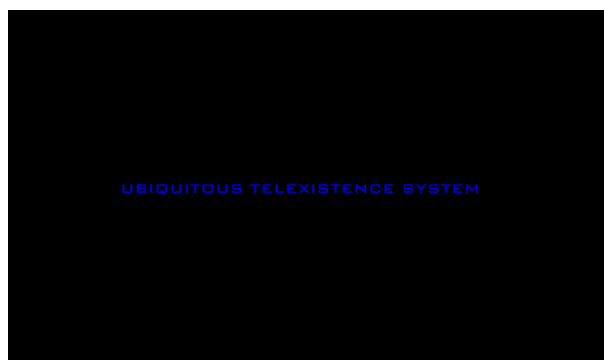


図 4.39: TELUBee コックピット起動画面



図 4.40: TELUBee のロボット選択画面 (世界地図)

れている. なお, 本論文における TELUBee の地図インターフェースに配置されたポイントのうち, 日本の日吉と横浜の 2 地点以外の地点はダミーポイントである. ユーザは手元のコントローラを用いて自分が行きたいと思った地点を選択する. 例

例えば日本を選択すると、画面には選択した地域の拡大された地図が表示される(図4.41)。ユーザーは同様の操作をくり返し、任意の地点を決定する。ユーザーがログインする地点を選択すると、画面に「READY」の文字と共にHMDを装着しろという指示が表示される(図4.42)。ユーザーは指示に従ってHMDを装着する。HMD



図 4.41: TELUBee のロボット選択画面 (日本地図)

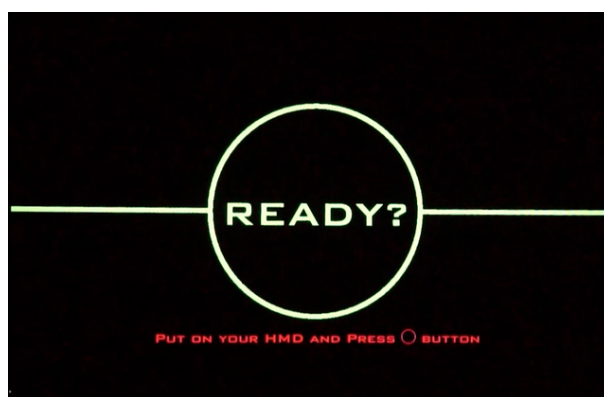


図 4.42: TELUBee のロボット選択インターフェース画面に表示されるユーザへの指示

はログイン時以外はシースルーモードで駆動するため、ユーザーはHMDを被った状態で、引き続きディスプレイに表示されたインターフェースを利用する。画面の指示に従いボタンを押すと、ディスプレイにはGOの文字が表示され、それと同時にHMDに表示されている画面はシースルーモードからトレイグジスタンスモー

ドへフェードインする。ユーザーの視界が遠隔地の映像に切り替わると、ユーザーの頭部姿勢データも同時にロボットに伝送されるようになり、遠隔地の様子を自由に見渡すことができるようになる。

ロボットからログアウトするには、コントローラのどれかのボタンを押す。ボタンを押す事でユーザのHMDに提示されている画像が遠隔地の映像からシースルーモードへとフェードする。コックピットのディスプレイの表示もGOから再びマップ画面に戻り、1回目と同様にログイン先を選択する。この際ユーザはHMDを装着したままだが、シースルーモードで動作しているため、ログインする度にHMDを着脱することなくログイン先を選ぶことができる。

4.4.5 システムの性能評価

本節では、TELUBeeについて行った性能テストと評価について述べる。今回本システムについて行った性能評価、ロボットのロール、パン、チルトの各軸における追従性能と、映像遅延時間の計測である。映像遅延の計測は、ロボットのカメラに入力される映像とHMDから出力される映像の間の映像遅延、及びHMDに提示されている右目映像と左目映像の間の遅延計測をおこなった。

TELUBeeにおけるロボットのユーザの頭部姿勢への追従性能

まず、頭部ロボットのユーザ姿勢への追従性能の評価について述べる。頭部ロボットの追従性能は、コックピットで計測されたユーザーの頭部のパン軸、チルト軸、ロール軸のそれぞれの回転角と、頭部ロボットがその姿勢に追従して動いた際の、ロボット内部のポテンシオメーターのデータを計測することで行った(図4.43)。

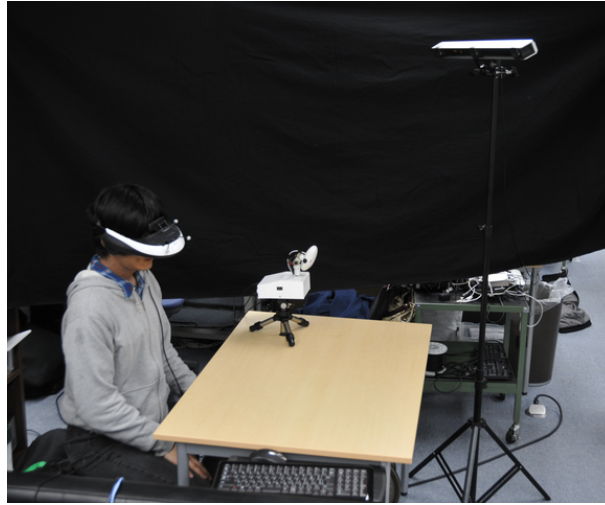


図 4.43: 頭部追従性能計測の様子

図 4.44, 図 4.45 図 4.46 にパン, チルト, ロールの各軸について, ユーザ及びユーザに追従して動いたロボットの運動波形と, その挙動を評価するために算出したユーザとロボットの回転運動角の運動波形, 及びその相互相関を示す. 算出方法は, 柳田らが HMD 型トレイグジスタンスシステムの頭部運動を評価する際に使用した手法 [40] を参考にした. 以下にその算出方法を示す. 相互相関関数は, ロボットの頭部回転角を $x(t)$, ユーザの頭部回転角を $y(t)$ として,

$$xy(r) = \frac{x(t)y(t+r)}{\sqrt{x^2(t)}\sqrt{y^2(t)}} \quad (4.1)$$

の値をパン軸, チルト軸, ロール軸について計算した. また, 相互相関関数の特徴量として, 極大値をロボット追従性能の正確さ, 極大値をとる時間遅れを TELUBee の追従性能についての遅延として比較を行った. なお, グラフ中の「master」はコックピットでの計測データ, 「slave」はロボット側での計測データを表している. また, グラフ中のパン軸のロボット側グラフの 0.5[s] ~ 1[s], 及びロール軸ロボット側グラフの 1[s] ~ 1.5[s] と 3[s] 以降に見られる極端な追従性能の低下は, ユーザの頭部回転角がロボットの頭部稼働範囲を超えてしまったことを示している.

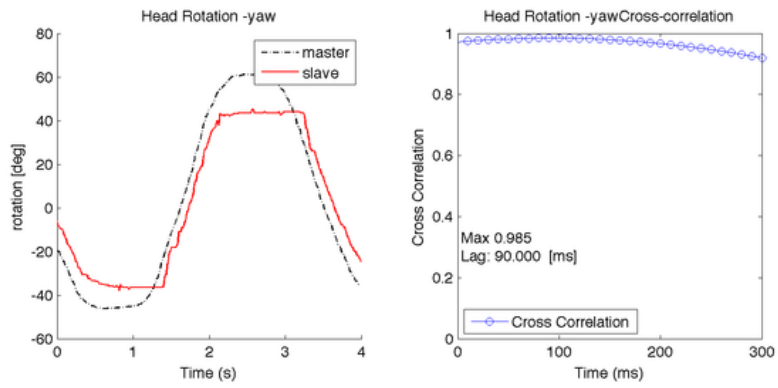


図 4.44: TELUBee におけるパン (ヨー) 軸の追従性能計測グラフ

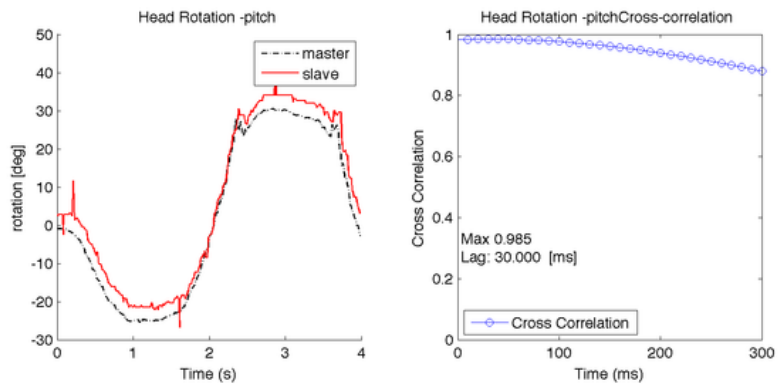


図 4.45: TELUBee におけるチルト (ピッチ) 軸の追従性能計測グラフ

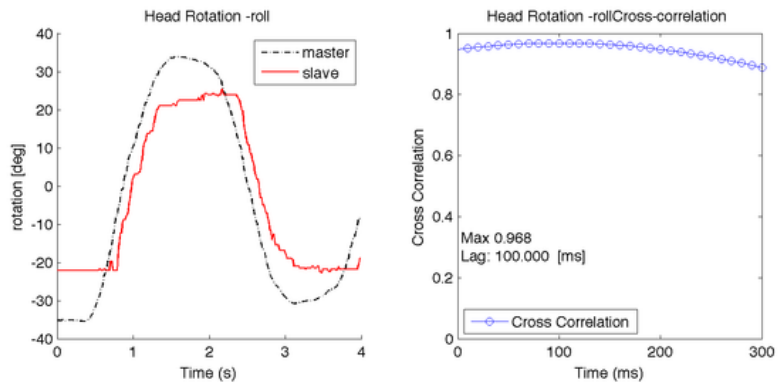


図 4.46: TELUBee におけるロール軸の追従性能計測グラフ

以上より得られたシステムの追従性能より得られた相互相関極大値と時間遅れを表 4.1 に示す. これより本システムの頭部追従の性能は十分に高速かつ正確に追従していると言えると考える.

表 4.1: ロボットがユーザの頭部運動に追従した際の相互相関極大値と時間遅れ

回転軸	パン	チルト	ロール
極大値	0.985	0.985	0.968
遅延 [ms]	90	30	100

TELUBee における映像遅延の評価

次に, TELUBee についておこなった映像遅延の計測について述べる. 映像遅延の計測は, ロボットへの入力映像と HMD からの出力映像間での遅延, 及び HMD から出力される右目映像と左目映像の間の遅延について行った.

まずはロボット-HMD 間の映像遅延について述べる. 図 4.47 に実験の様子を示す. 計測はフォトランジスタとオシロスコープを用いて行った. フォトランジ



図 4.47: TELUBee におけるロボット-HMD 間の映像遅延計測の様子

スタはHMDとLEDディスプレイの両方にセットし(図4.48, 図4.49), ディスプレイに白い画面と黒い画面を交互に表示した. ディスプレイに表示される映像をTELUBeeのシステムを用いてHMDに表示し, 画面を切り替えた際の電圧の変化の仕方をオシロスコープで計測した. 実際に計測したデータの例を図4.50に示す. 図中では画面上部に表示された左側の Δ が計測された遅延時間となり, この例では197[ms]の遅延があったことがわかる.



図 4.48: LED ディスプレイ側のセットアップ

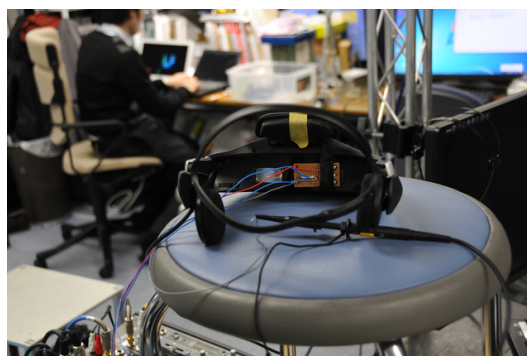


図 4.49: HMD 側のセットアップ

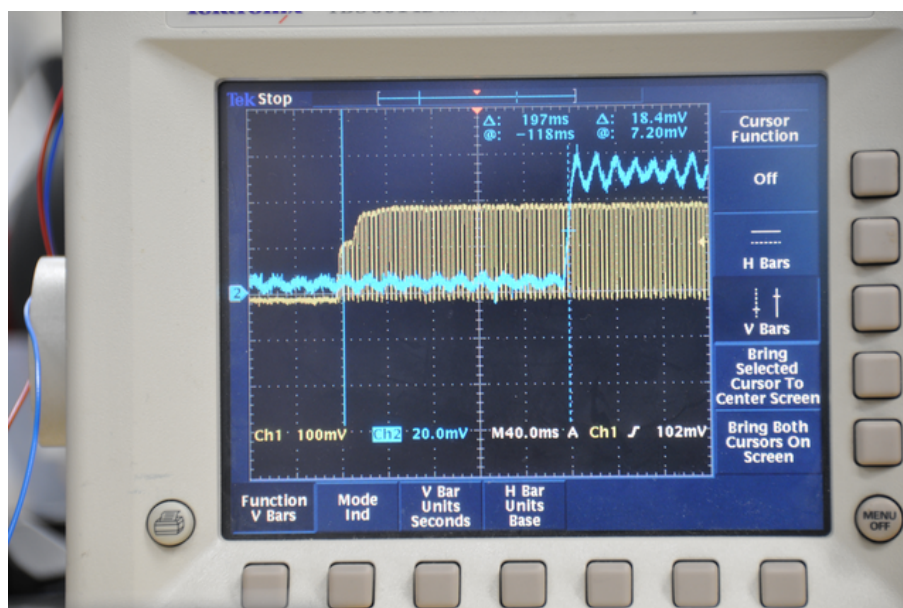


図 4.50: 実際に計測されたデータの1例

表 4.2: ロボットー HMD 間の映像遅延計測結果

試行回数 [回目]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
計測値 [ms]	234	197	181	227	236	180	209	190	208	168

表 4.3: ロボットー HMD 間の映像遅延計測結果の平均と標準偏差

平均 [ms]	標準偏差
203	22.645

本計測は、TELUBee 側で解像度を VGA に設定し、フレームレートは 20[fps] に設定して行った。本設定は、通常 TELUBee の運用の際に用いている設定と同等である。計測は 10 回行った。表 4.2 に計測したデータを示す。また、表 4.2 に示したデータを元に平均と標準偏差を計算すると、表 4.3 のようになった。表 4.3 に示したデータより、TELUBee において、ロボットが見ている映像がユーザの HMD に表示されるまでの遅延はおおよそ 200[ms] である。

次に、フォトランジスタを HMD の右ディスプレイと左ディスプレイにそれぞれ設置し、ロボット-HMD 間の計測と同様の方法によって HMD の右目映像と左目映像の間の遅延についても計測した (図 4.51)。計測したデータを表 4.4 に示す。なお、左目映像が先に表示された場合は正の値が、右目の映像が先に表示された場合は負の値が観測されている。左右で映像の提示されるタイミングが前後する理由は、現在行っている映像伝送方式は右目と左目の映像が別々にロボットから伝



図 4.51: HMD の右目映像と左目映像計測のセットアップ

送されており、お互いに同期をとっていないためである。また、計測したデータの絶対値についての平均と標準偏差を計算すると表 4.5 のようになった。これより、TELUBee における右目映像と左目映像の間の遅延は約 48[ms] であると言える。

表 4.4: HMD に提示される右目映像と左目映像の映像遅延計測結果

試行回数 [回目]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
計測値 [ms]	-59.2	39.6	6.8	91.2	-60.6	40.8	40.8	55.6	-25.2	-60.4

表 4.5: HMD の右目, 左目映像間の映像遅延計測結果の絶対値の平均と標準偏差

平均 [ms]	標準偏差
48.02	21.802

評価実験のまとめ

トレイグジスタンスシステムにおいて許容可能な主観的な遅延について、竹下らの報告 [41] [42] によれば 200[ms] 前後で遅延を認識するようになり、ユーザの動作に影響が出始める。今回行った評価実験の結果を見ると、映像遅延でおよそ 200[ms] かかっているため、頭部の追従にかかる遅延を考慮すると主観的には 250[ms] 程度の遅延を感じる事になる。しかし、映像伝送部分については、現在非圧縮の映像を伝送しており、映像の圧縮等によって大幅な遅延の改善がのぞめるため、ロボットの設計は十分にトレイグジスタンスロボットとしての性能を満たしていると考えられる。一方、現在左右の映像を同期させていない事による約 50[ms] の左右間の映像遅延は立体感の減衰を産んでいる可能性があり、高速化とあわせて、映像伝送部分の改善は今後の課題である。また、TELUBee はネットワークを利用するロボットである。従って、利用しているネットワーク状況によっては頭部追従性能、及び映像伝送について遅延が大幅に増大することも考えられる。TELUBee が十分に性能を発揮でき、ユビキタステレイグジスタンスをいつでもどこでも成立さ

せられるためのネットワーク要件を明らかにすることも、今後の課題のひとつである。

4.4.6 システムの試作と考察

プロトタイプシステム Ver.3 では、Ver2 までで明らかになった問題を元に、十分な追従速度をもってユーザの頭部姿勢に追従し、映像を伝送する 3 軸頭部ロボットとそのコックピットを構築した。本ロボットは移動台車や三脚等にロボットを設置するためのジョイントを持ち、ワイルドエリアネットワーク上でも動作する。本研究では Ver.3 を TELUBee と名付け、性能評価をおこなった。

本システムの構築、評価をする過程で、2 つの知見を得た。この知見について、考察を次に述べる。

まず、ひとつめに得た知見は、ロボットにログインする前にシースルーモードを介することで、ログイン後の没入感が高まったように感じられたことである。Ver.3 において利用されているシースルー HMD とロボットの目に用いられているカメラは同一の製品である。ヘッドマウントディスプレイのシースルーモードでは、映像はネットワークを介さずに提示しており、また、当然ながらロボットにログイン後はロボット頭部の遅延が伝送される映像にも関与してくるため、システムの構築段階の予想では、ロボットにログインすることでユーザの没入感下がると予想していた。しかし、実際にはシースルーモードからロボットへのレイグジスタンス状態に移行することで没入感が高まったように感じられた。これは、通常私たちが生活している状態を最も没入感が高い状態と定義すると、HMD 装着前から HMD(シースルーモード) を装着した状態へ移行した際の没入感の低下が原因ではないかと推察される。シースルーモードの状態で見えている環境は、ユーザが HMD を装着する直前まで最高の没入感をもって体験していた空間であり、シースルー HMD を装着することでユーザは解像度や視野角等が大きく制限されることになる。その結果、ユーザはシースルーモード HMD を被った状態を「(相対的に)没入感が大きく損なわれた状態」というネガティブな捉え方をしていると予想される。一方、シースルーモードからレイグジスタンス状態に移行した際、本来ならばシステム全体の遅延によって没入感がより低下している。しかし、ユーザはテ

レイグジスタンス先の環境の没入感が最大の状態を知らないため、レイグジスタンスモードと比較することができず、没入感の高さについて現実と比較して「没入感が減損した状態」という捉え方をしない。そのため、没入感が損なわれていると感じている空間から減損していないと感じている空間に移動することで、相対的に見て没入感が上がったと錯覚しているのではないかと考える。

2つ目に得た知見としては、レイグジスタンスした状態で手や足の欠損が気になるという知見である。TELUBeeを利用した際、ユーザは周囲を十分な追従速度を持ってみまわすことができ、研究の当初に定めたミニマムレイグジスタンスに成功していると言える。しかし、実際に何度もシステムを体験しているうち、手や足が欠損していることがとても気になるようになった。Ver.2やVer.1を利用してこの知見は得られなかったことから、2つの考察をすることができる。ひとつはその原因である。Ver.1やVer.2は、頭部の追従性能について違和感無くレイグジスタンスすることが可能であるというレベルにはなかった。しかし、Ver.3で十分な追従性能を得たために、頭部の見回し運動についてはユーザの意識から操縦していると言う感覚が失われ、レイグジスタンスしている状態、すなわちロボットの中に自分が入り込んで見回しているかのような感覚になったと考えられる。そのため、ユーザが目の前に見えている環境に対して自然にインタラクションを起こそうとして体が動いてしまった時に、実際に遠隔地でインタラクションを起こすことができず、大きな違和感を感じるのではないかと推察される。ふたつめは、ミニマムレイグジスタンスの設計は妥当であったかという評価である。これはひとつめの考察にも関連してくるが、上に述べたとおりTELUBeeを用いてユーザは頭部のレイグジスタンスに成功していると言える。本研究にあたって設定したミニマムレイグジスタンスロボットは、頭部のレイグジスタンスが可能であれば良いとしていた。しかし、本知見の通り、レイグジスタンスの体験全体で見ると、頭部だけのロボットだけでは頭部以外の場所で大きな違和感が残ることがわかった。そのため、頭部ロボットとしてのミニマムスペックは少なくとも満たしていたが、レイグジスタンス体験としてはミニマムな設計ではなかったと言える。このことから、体験としてのユビキタスレイグジスタンスに必要なミニマムスペックを明らかにすることの重要性が、今後の課題として明らかになった。

第5章

結 論

本研究では、オフィスや自宅のような環境から、一瞬にして好きな遠隔地へ行った感覚を得るだけでなく、様々な遠隔地を自由に行ったりきたりするような感覚を得るための概念としてユビキタステレイグジスタンスを提案した。また、その設計要件を示すとともに、実際にユビキタステレイグジスタンスの設計要件のいくつかを見たしたシステムである TELUBee を構築した。

第1章では、創作に登場する瞬間移動というアイデアについて概説した。また、その中で実現可能性のある手法をとりあげ、一瞬にして自分が遠隔地に移動したように感じられるような瞬間移動の工学的実装を本研究の目的と定めた。

第2章では、第1章で述べた背景に関連して、先行事例を紹介した。先行事例はまず遠隔コミュニケーションシステム、テレイグジスタンス、空間アーカイブ技術の観点から概説し、場所の遍在性、リアルタイム性、没入感の3点を満たしたシステムを構築する必要があることを示した。また、自分が今いる場所とそれ意外を直接つなぐための知見として、現実空間とバーチャル空間の間の移動についての先行事例にも触れた。

第3章では、第2章で述べた場所の遍在性、リアルタイム性、没入感の3つを満たす新しい概念として、ユビキタステレイグジスタンスの概念を提案し、その構成要件を示した。ユビキタステレイグジスタンスは、主にユーザが利用するコックピットと、様々な箇所に設置されるロボットからなる。ロボットは多数設置する必要性から、没入感を確保しながらも簡易かつ安価な構成をもつ。また、テレイグジスタンス用コックピットに必要となる HMD やモーションキャプチャ技術の一般家庭への普及をうけ、ユビキタステレイグジスタンス用コックピットの構成要件として一般家庭でも利用可能な構成と定めた。

第4章では、3章で定めた構成に基づき、ユビキタステレイグジスタンスのプロトタイプ構築を行った。プロトタイプはVer1からVer3まで段階的に行い、Ver.3のシステムをTELUBeeと名付けた。TELUBeeではひとりのユーザがネットワーク上に配置されたロボットの中から任意のロボットを選び、そこにテレイグジスタンスすることでその場に自分が移動したかのような感覚を得ることができる。また、次々とログインするロボットを変更することで、世界中を飛び回っているかのような体験をすることができる。3章では、構築したシステムの説明に加え、TELUBeeについて行った性能評価についても記述した。性能評価は頭部の追従性能と映像遅延についておこなった。

これらの試作と評価により、本論文では瞬間移動の工学的実装、すなわちユビキタステレイグジスタンスの実現可能性を示すことができた。今後、TELUBeeプロジェクトが継続していく中で、細かい課題を解決し、より精度が高く、暮らしの中へ入り込んでいくようなシステムになることが期待できる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、慶應大学大学院メディアデザイン研究科リアリタイムメディアプロジェクトの皆様には多大なご協力を頂きました。

指導教員である館暉特任教授には、輪講や研究室でのお話を通して、コンセプトから研究の進め方に至るまで、非常に貴重なアドバイスをたくさん頂きました。研究を無事進めることができたのは、ひとえに館特任教授のおかげと感じています。

同じく指導教員である稲見昌彦教授には、リアリタイムメディアミーティング等の機会に館暉教授とは違った視点からの意見を沢山頂きました。また、研究に直接的に関係することだけでなく、バーチャルリアリティやオーギュメントドリアリティについての理解を深めるために様々なことながらをご教示頂きました。

南澤孝太特任講師には、研究が遅れ気味で大変ご心配をおかけしましたが、辛抱強くご指導いただきましたことを感謝いたします。また、研究の方向性を見失いかけた際には何度も助けて頂き、何とか論文執筆までたどりつくことができました。

古川正紘特任助教には、研究の立ち上げ時から1年以上にわたり、昼夜を問わず大変細かな指導を頂きました。概念の提案、ロボットの製作からシステム全体の構築から学会への投稿に至るまで、古川特任助教に助けていただかなければ実現することはできませんでした。

研究の終盤でシステムの再設計に深く携わって頂き、研究のラストスパートに夜遅くまでつき合って頂いた博士課程の Charith 氏と研究員の Yamen 氏、また研究面だけでなく、プロデューサーのなんたるか、またベルトの使い方を身を持って教えて頂いた東京大学大学院情報理工学系研究科の家室氏には大変お世話になりました。色々と至らないところがあるにも関わらず、暖かい心遣いを頂き、感謝しています。また、KMD リアリタイムメディアプロジェクトのトレイグジスタンスチーム、ハプティックメディアチームのみなさまには、毎日楽しみながら研究に打ち込

むことができる環境を作って頂き、大変感謝しています。

研究の終盤で行き詰まったとき、研究から離れた日常生活の面で大きく支えてくださったプリキュアおじさん氏、さかき氏をはじめとするニチアサナイトの皆様、猛士の日高仁志氏、戸田山登巳蔵氏そして財津原蔵王丸氏には感謝しています。日高氏には自分を日々鍛えるべし、今の自分を超えていくことが大事という、単純ながら非常に重要な教えを大切な時期に頂くことができました。戸田山氏のがむしゃらな姿や財津原氏の厳しい指導の姿には非常に心を打たれ、最後まで研究をやりきろうという強い心を最後まで持ち続けることができました。また、毎日の厳しい戦いを一緒に過ごしてきた本田未央氏にも感謝しています。彼女の努力が実を結ぶまで地道奮闘する姿は、私の大きな活力となりました。皆様すべてのご尽力を頂くことができなければ、研究の途中で投げ出してしまっていたかもしれないことを考えると、最も感謝すべき方々と言っても過言ではないかもしれません。

修士課程の2年間だけという短い期間で、全く知識も技術もなかった私を暖かく迎えてくださり、また辛抱強く指導して下さった皆様には感謝してもしつゝ事ができません。本当にありがとうございました。

参 考 文 献

- [1] 鳥山明: ”ドラゴンボール (28) 未来から来た少年”, 集英社, 1991
- [2] 鳥山明: ”ドラゴンボール (42) バイバイ ドラゴンワールド”, 集英社, 1995
- [3] 藤子・F・不二雄: ”ドラえもん (34)”, 小学館, 1985
- [4] Star Trek Homepage, <http://www.startrek.com/>
- [5] Macross Official Web Site, <http://www.macross.co.jp/>
- [6] 劇場版 マクロス F 恋離飛翼～サヨナラノツバサ～, <http://www.macrossf.com/movie2/>
- [7] 手塚治虫, ”鉄腕アトム 第六集”, 講談社, 1987
- [8] 特命戦隊ゴーバスターズ, <http://www.tv-asahi.co.jp/go-bus/>
- [9] 廣瀬通孝: バーチャルリアリティ(VR) とSF, Journal of the Society of Instrument and Control Engineers 43(1), 59-64, 2004
- [10] 大山英明, 前田太郎, 館暲: F と科学技術におけるレイグジスタンス型ロボット操縦システムの歴史, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 7(1), 59-68, 2002
- [11] 藤子・F・不二雄: ”ドラえもん プラス (2)”, 小学館, 2005
- [12] Marvin Minsky: Telepresence: OMNI magazine, 1980, <http://web.media.mit.edu/~minsky/papers/Telepresence.html>

- [13] Nicole Yankelovich, Nigel Simpson, Jonathan Kaplan, Joe Provino: Portaperson: telepresence for the connected conference room, CHI '07: CHI '07 extended abstracts on Human factors in computing systems, 2007
- [14] Norman P. Jouppi: First steps towards mutually-immersive mobile telepresence, CSCW '02: Proceedings of the 2002 ACM conference on Computer supported cooperative work, 2002
- [15] Anybot's QB, <http://www.anybots.com/>
- [16] VGO, <http://www.vgocom.com/>
- [17] 廣多馨, 橋本翔, 増井俊之: 0B 降臨システム, インタラクション 2011, 2011
- [18] S Nishio, H Ishiguro, N Hagita : "Humanoid Robots: New Developments", Book edited by: Armando Carlos de Pina Filho, pp.582, I-Tech, Vienna, Austria, 2007
- [19] Geminoid, <http://www.geminoid.jp/projects/kibans/resources-j.html>
- [20] Minato, M., Sumioka, H., Nishio, S., and Ishiguro, H., "Studying the Influence of Handheld Robotic Media on Social Communications", In Proceedings of workshop on social robotic telepresence in IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp.15–16, 2012
- [21] S.Tachi: Telexistence, World Scientific, 2010
- [22] 館暲, 阿部稔: テレイグジスタンスの研究 第 1 報, 第 21 回計測自動制御学会予稿集, pp.167-168, 1982
- [23] Susumu Tachi, Kouichi Watanabe, Keisuke Takeshita, Kouta Minamizawa, Takumi Yoshida and Katsunari Sato: Mutual Telexistence Surrogate system: TELESAR4 -telexistence in real environments using autostereoscopic

- immersive display -, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, USA, 2011
- [24] Kenji Tanaka Junya Hayashi Yutaka Kunita Masahiko Inami Taro Maeda Susumu Tachi: TWISTER: A Media Booth, Conference Abstracts and Applications of SIGGRAPH 2002, San Antonio, U.S.A, p.271, 2002
- [25] Hasunuma, Hitoshi, et al. "Development of teleoperation master system with a kinesthetic sensation of presence." Proc. of the International Conference on Artificial reality and Telexistence, Waseda University. 1999.
- [26] C. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, K. Hirota, S. Kamuro, K. Sato, K. Minamizawa and S. Tachi: TELESAR V: TELEExistence Surrogate Anthropomorphic Robot, ACM SIGGRAPH 2012, Emerging Technologies, Los Angeles, CA, USA, 2012
- [27] Keita Higuchi, Jun Rekimoto: Flying Head: Head-synchronized Unmanned Aerial Vehicle Control for Flying Telepresence , Siggraph Asia 2012 Emerging Technologies, 2012
- [28] K. Ikeuchi, K. hasegawa, A. Nakazawa, J. Takamatsu, T. Oishi, T. Masuda: Bayon Digital Archival Project, 10th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, 2004
- [29] Maki Sugimoto, Georges Kagotani, Hideaki Nii, Naoji Shiroma, Masahiko Inami, Fumitoshi Matsuno : Time follower's vision, SIGGRAPH '04: SIGGRAPH 2004 Emerging technologies, 2004
- [30] 木島竜吾, 山田英治郎, 小鹿丈夫: -Reflex HMD- 前庭反射機能を備えたHMDの開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 6(2), 107-114, 2001
- [31] 加納浩行, 北林一良, 木島竜吾: Reflex HMDの実装と評価, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 vol.8 p.131-134, 2003

- [32] Kinect -Xbox.com, www.xbox.com/ja-JP/kinect
- [33] Kinect for Windows, <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>
- [34] Playstation Move, <http://www.jp.playstation.com/ps3/move/about/index.html>
- [35] 土郎正宗: ”攻殻機動隊”, 講談社, 1991
- [36] 土郎正宗: ”攻殻機動隊 2”, 講談社, 2001
- [37] MIRAGE, <http://mirage.grinder-man.com/>
- [38] 前田太郎, 荒井裕彦, 舘暲: 頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価, 日本ロボット学会誌. vol. 10, no. 5, pp. 655-665, 1992
- [39] Julien Pettre, Oriane Siret, Maud Marchal, Jean-Baptiste de la Riviere, Anatole Lecuyer: Joyman: an immersive and entertaining interface for virtual locomotion, SIGGRAPH ASIA 2011 Emerging Technologies, 2011
- [40] 柳田康幸, 舘: HMD 型トレイグジスタンスシステムの頭部運動時における視野角不整合の影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌. vol. 7, no. 1, pp. 69-78, 2002
- [41] 竹下 佳佑, 渡邊 孝一, 佐藤 克成, 南澤 孝太, 舘 すすむ: テレイグジスタンスの研究 (第 62 報) TELESAR3 システムの遅延の評価, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomec2010) 論文集, 1A1-F28, 2010
- [42] 竹下佳佑, 渡邊孝一, 佐藤克成, 南澤孝太, 舘暲: テレイグジスタンスの研究 (第 63 報) -TELESAR3 において許容される通信遅延の検討-, 第 15 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2010

関 連 発 表

国際学会

1. Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Kyo Hirota, Sho Kamuro, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa and Susumu Tachi: TELESAR V: TELEXistence Surrogate Anthropomorphic Robot, ACM SIGGRAPH 2012, Emerging Technologies, Los Angeles, CA, USA (2012.8)
2. Kyo Hirota, Charith Lasantha Fernando, MHD Saraiji Yamen, Masahiro Furukawa, Kouta Minamizawa and Susumu Tachi: TELUBee - TELEXistence platform for Ubiquitous Embodied Experience -, Laval Virtual ReVolution 2013, Laval, France (to appear in 2013.3)

国内学会

1. 廣多 馨, 古川 正紘, 南澤 孝太, 館 : テレイグジスタンスの研究 (第 69 報), 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012(Robomec2012) 論文集, 2A2-P02 (2012.5)
2. 廣多馨, SaraijiYamen, Charith Fernando, 古川正紘, 南澤孝太, 館: テレイグジスタンスの研究 (第 72 報) -複数のスレーブロボットを用いた広域分散型テレイグジスタンスの試作-, 日本バーチャルリアリティ学会 第 17 回大会, 32A-3 (2012.9)