

Title	空間転移型マルチテレグジスタンスライブビューイングの提案
Sub Title	Proposal of multi-telexistence live broadcast with space transition
Author	杉本, 将太(Sugimoto, Shota) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kōta)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2017
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2017年度メディアデザイン学 第581号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002017-0581">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002017-0581</a>

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 2017年度（平成29年度）

空間転移型マルチレイゲジスタンス  
ライブビューイングの提案

慶應義塾大学大学院  
メディアデザイン研究科

杉本 将太

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。

杉本 将太

審査委員：

南澤 孝太 准教授 (主査)

古川 享 教授 (副査)

加藤 朗 教授 (副査)

修士論文 2017年度 (平成29年度)

# 空間転移型マルチテレグジスタンス ライブビューイングの提案

カテゴリー：デザイン

## 論文要旨

本研究では、VR空間内で空間上の2点間を瞬時に移動することを空間転移と呼び、空間転移型マルチテレグジスタンスライブビューイングを提案する。このサービスは、ライブや試合を観戦・鑑賞したいユーザーが、テレグジスタンスロボットを通して、遠隔地からそれらのイベントに参加することを可能にする。そして遠隔参加したユーザーは、会場に設置された複数のテレグジスタンスロボット間を身体的なインタラクションを用いて自在に空間転移しながら試合観戦やライブ鑑賞を行うことで、様々な地点から多角的に試合やライブを見たり、普段見れない場所からこれらを味わうことができる。

そこで本論文では、空間転移型マルチテレグジスタンスライブビューイングの試作とVR酔いを抑えた空間転移インタラクションのデザインを行い評価した。

キーワード：

テレグジスタンス, ライブビューイング, 空間転移, 空間失調, VR酔い

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

杉本 将太

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2017

Proposal of Multi-telexistence Live broadcast  
with Space Transition

Category: Design

Summary

In this research, the instantaneous movement between two spatial points in the VR space is called spatial transition, and I propose Multi telexistence live broadcast with space transition. This service enables users who wish to watch sports games or music concerts from remote locations to participate on it thorough telexsitence robots. And, users who participate remotely perform watch those events while transferring space between a plurality of telexsitence robots installed at the venue with embodied interaction. This allows users to enjoy live and games more by watching from special places that you can not see in real venue, and giving them various perspectives while you are in a remote place . Therefore, in this paper, I designed prototype of Multi-telexistence live broadcast system and designed a comfortable space transition interaction which suppresses VR sickness.

Keywords:

Telexistence, Live Broadcast, Space Transition, Spatial Disorientation, Motion Sickness

Keio University Graduate School of Media Design

Shota Sugimoto

# 目 次

第 1 章 序論	1
1.1. 遠隔視聴から遠隔存在へ	1
1.2. 本研究の目的	2
1.3. 本論文の構成	3
第 2 章 関連研究	4
2.1. 遠隔からの観戦・鑑賞体験の拡張	4
2.2. テレイグジスタンス・テレプレゼンス	7
2.3. VR 空間における移動	13
第 3 章 空間転移型マルチテレイグジスタンスライブビューイングの提案	18
3.1. コンセプト	18
3.2. サービスモデル	19
3.3. サービスシナリオ	20
3.4. 簡易テレイグジスタンスロボットのプロトタイプ	23
3.5. TEDxHaneda における予備検証	24
3.5.1 予備検証の目的	24
3.5.2 検証手順	24
3.5.3 検証結果	25
3.5.4 考察	29
第 4 章 空間転移可能なマルチテレイグジスタンスライブビューイングの実装と評価	32

4.1. 空間転移インタラクションを使ったマルチレイグジスタンスライ ブビューイング . . . . .	32
4.2. 設計要件 . . . . .	33
4.3. 空間転移のインタラクションデザイン . . . . .	35
4.4. 実装 . . . . .	37
4.4.1 ユーザー体験の設計と実装 . . . . .	37
4.4.2 空間転移インタラクションの実装 . . . . .	40
4.5. 検証 . . . . .	43
4.5.1 検証の目的と方法 . . . . .	43
4.5.2 検証 . . . . .	44
4.6. 考察 . . . . .	45
<b>第5章 結論</b>	<b>47</b>
<b>参考文献</b>	<b>49</b>
<b>謝辞</b>	<b>51</b>

# 目 次

2.1	Intel FreeD テクノロジー	5
2.2	livelike イメージ図	5
2.3	Haptic Broadcast	6
2.4	Kirari! コンセプトモデル	7
2.5	テレイグジスタンスイメージ図	8
2.6	TELESAR V	9
2.7	Jack in	9
2.8	Telubee	11
2.9	Layered Telepresence	11
2.10	マラソンランナーの視点をリアルタイムに遠隔地のユーザーに共有するシステム	12
2.11	HUG PROJECT	13
2.12	GazeSphere における視点移動方法	15
2.13	Daydream Lab の Tunneling 手法	16
2.14	Daydream Lab の Implicit Motion	17
3.1	コンセプトスケッチ	19
3.2	サービスモデル	20
3.3	サービスシナリオ	22
3.4	簡易テレイグジスタンスロボット	23
3.5	会場の様子	25
3.6	TEDxHaneda におけるデモブースの様子	26
3.7	TEDxHaneda におけるステージ上の様子	26

3.8	体験者が鏡に映ったロボットを見ている様子 . . . . .	27
3.9	体験者から見たステージ上の様子 . . . . .	27
3.10	検証全体の様子 . . . . .	29
4.1	マルチテレイグジスタンスライブビューイングの全体像 . . . . .	33
4.2	ターゲットを捉え頭を振る様子 . . . . .	37
4.3	ターゲット表示 . . . . .	37
4.4	軌道表示開始 . . . . .	37
4.5	軌道表示完了 . . . . .	37
4.6	空間転移中のユーザーの視点 . . . . .	38
4.7	ロボットからロボットへの空間転移 . . . . .	39
4.8	上空からの俯瞰視点 . . . . .	39
4.9	上空への空間転移 . . . . .	39
4.10	スタジアムからみた風景 . . . . .	39
4.11	ユーザーがターゲットに向かって素早く頭を動かす様子 . . . . .	41
4.12	ユーザーがロボット間を空間転移する様子 . . . . .	41
4.13	空間転移中のユーザーの視点 . . . . .	42
4.14	検証を行っている様子 . . . . .	43
4.15	ロボット a へのテレイグジスタンス . . . . .	44
4.16	ロボット a からロボット b の補足 . . . . .	44
4.17	ロボット b への空間転移 . . . . .	44

# 第1章 序

# 論

## 1.1. 遠隔視聴から遠隔存在へ

どうしても観たいと思うライブやスポーツ競技が海外で行われるとしたら、どうするだろうか。人によっては、チケットを購入し、飛行機に乗ってその国を訪れ、会場に行くだろう。自分がその場で、その時にしかできない体験をするためだ。会場に足を踏み入れ、異文化に暮らす人々に混じり、場に充満する一体感を感じながら、自分が愛してやまない何かを鑑賞する。これが忘れがたい体験になることは自明であろう。しかしながら、ほとんどの人は、お金と時間を使ってそのライブを見ることを諦めるのではないだろうか。現代人は忙しい。会場にわざわざ行かずとも、それが注目されているライブや試合であれば、テレビやストリーミングサービスでリアルタイムに観れるかもしれない。近年はVR技術を使ったライブ映像を提供しているサービスも増加しており、その場にいるような臨場感や他の観客と一緒にいるような参加感を持って遠隔からライブ視聴できるような環境が整いつつある。

一方で、自分を遠隔に存在させる方法として、テレイグジスタンス (teleexistence) という概念が知られており、この概念は研究段階から社会展開のフェーズにあるといえる。テレイグジスタンスは、舘 [1] が考案した、人間が、自分自身が現存する場所とは異なった場所に実質的に存在し、その場所で自在に行動するという人間の存在拡張の概念であり、25年間研究されてきた。そして、5G次世代移动通信技術といった高速大容量・低遅延通信の登場やアクチュエーターやコンピュータの安価・高性能化が進む現状から、テレイグジスタンス技術を社会に展開していく土壌ができつつあり、多くのテレイグジスタンススタートアップが生まれて

いる。例えば、TELEXISTENCE inc. は KDDI open lab より出資を受け、テレイグジスタンスロボット及び、視覚・触覚情報の伝送・蓄積・解析するクラウドシステムを開発している。<sup>1</sup>また、ロボット開発技術や通信技術を持った企業間が連携を進めている。例えば株式会社 NTT ドコモと新日鉄住金ソリューションズ株式会社は、遠隔地から全身を操作できる人型の作業用ロボットを発表し、工場などでの危険を伴う作業をロボットが担うことを目指すことを発表した。産業形成に伴ってロボット開発、そしてプラットフォーム設計、さらに規格決定や開発人材確保などが目まぐるしく動き、今後どのようなサービスが生まれるか注目されている。

そこで本論文では、空間上の2点間を瞬時に移動することを空間転移と呼び、空間転移型マルチテレイグジスタンスライブビューイングを提案する。このサービスは、遠隔地からライブや試合を観戦・鑑賞したいユーザーが、テレイグジスタンスロボットを通してその場に参加し、さらに会場に設置された複数のテレイグジスタンスロボット間を身体的なインタラクションを用いて自在に転移することを可能にする。これによってユーザーは、遠隔地にいながらも、多角的に試合やライブを見たり、普段見れない特別な場所から選手やアーティストを見ることで、より深くライブや試合を味わうことができる。そのために空間転移型マルチテレイグジスタンスライブビューイングシステムの試作と VR 酔いを抑えた心地よい空間転移インタラクションのデザインを行い評価した。

## 1.2. 本研究の目的

遠隔地からライブやスポーツを観戦するライブビューイングは、単に視聴する体験から、参加感や臨場感を伴った新しい体験へと移り変わっている。一方でテレイグジスタンスは基礎的な研究段階を終え、社会に展開していくための環境的要件も整いつつあり、多くのスタートアップや企業連携が行われている。そこで試作とユーザーテストを通じて、テレイグジスタンスロボットを使ったライブビュー

---

1 TELEXISTENCE inc. プレス「資金調達の実施について」 <https://tx-inc.com/press> (2018-1-29 参照)

イングサービスを成立させるために必要な要素を明らかにし，その上で必要となるサービス設計とインタラクション設計を行い，プロトタイプの実装を行うことでサービス化を目指す。

### 1.3. 本論文の構成

本論文は全5章で構成される。本章では，研究の背景と目的を述べた。第2章では，本研究における関連研究として遠隔からの観戦・鑑賞体験の拡張，テレグジスタンス技術およびVR空間における移動インタラクションについて論じる。第3章では，トークイベントで行なった遠隔ライブビューイング体験についての予備検証から得られた考察を元に，空間転移型マルチテレグジスタンスライブビューイングを提案する。第4章では，前述のコンセプトを踏まえて実装したマルチテレグジスタンスライブビューイングと空間転移インタラクションについて述べる。第5章では，本論文における結論と今後の展望について述べる。

## 第2章

# 関連研究

### 2.1. 遠隔からの観戦・鑑賞体験の拡張

近年では映像技術やVR技術を用いて、遠隔からの観戦や鑑賞といった体験を拡張する動きが研究・サービス共に盛んである。

Intel FreeD テクノロジー<sup>1</sup>は、複数台の5Kカメラをスポーツが行われる会場全体をカバーするように設置し、リアルタイムにレンダリングを行うことで、会場内の映像を複数視点から捉えて提供する。この技術はテレビにおけるスポーツ中継に使われており、例えば視聴者は、ダンクシュートが行われる直前の選手を中心とした軌道上にカメラを動かしながら撮影したような映像を楽しむことができる。

また、livelike<sup>3</sup>は、VR技術を用いて360度映像のスポーツ動画を見れるサービスである(図2.2)。このサービスの特徴は一緒に観戦したい友人をFacebook経由で招待し、友人と同じVR空間を共有できる点にある。

観戦、鑑賞体験の拡張は視覚だけでなく、触覚にも及んでいる。Mizushina [2]らが提案する「Haptic Broadcast」(図2.4)は、テレビを通じたスポーツの観戦を、従来の映像と音声による受動的な「視聴」から能動的な「体験の共有」へと拡張することを目的としたシステムである。競技中のスポーツ選手が感じている触感情報を記録し伝送することで、スポーツ選手の一人称体験を多人数で共有し、追体

---

1 <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/sports/technology/intel-freed-360-replay-technology.html> (2018-1-29 参照)

2 PRO NEWS,<https://www.pronews.jp/news/20160525170547.html> より引用 (2018-1-29 参照)

3 <http://www.livelikevr.com/> (2018-1-29 参照)



図 2.1: Intel FreeD テクノロジー 2



図 2.2: lifelike イメージ図

験することができる。



図 2.3: Haptic Broadcast [2]

自宅からの視聴ではなく、パブリックビューイングのように、人々が集まる空間を作り、その中で高臨場感の体験を作ろうとする取り組みもある。

NTTが2020年東京オリンピックに向けて開発しているイマーシブテレプレゼンス技術「Kirari!」<sup>4</sup>は、遠隔の複数の体育館やライブ会場に向けて、競技空間から切り抜いたスポーツ選手の映像を伝送し、実空間にマッピングすることによって、観戦者が遠隔地にいながら、まさに目の前で、競技場などで繰り広げられる競技を観戦することができるシステムだ。

このように、映像技術やVR技術を用いて、臨場感のある遠隔からの観戦や鑑賞といった体験を拡張する動きが見られ、その多くが、共同観戦や、共感、一体感といったものをデザインしようと試みている。

---

4 あたかもその場にいるかのような超高臨場感をリアルタイムに世界へ配信,  
<http://www.ntt.co.jp/news2015/1502/150218b.html> (2018-1-29 参照)

5 Inforium,<https://inforium.nttdata.com/foresight/kirari.html> より引用 (2018-1-29 参照)



図 2.4: Kirari!コンセプトモデル<sup>5</sup>

## 2.2. テレイグジスタンス・テレプレゼンス

### 遠隔に存在する自分

テレイグジスタンス (telexistence) とは、舘 [1] が考案した、人間が、自分自身が現存する場所とは異なった場所に実質的に存在し、その場所で自在に行動するという人間の存在拡張の概念である。テレイグジスタンスを用いると、分身ロボットを自身のアバターとして遠隔地に存在させることが可能になる。舘によれば、人間が遠隔地において存在させるために、必要となる環境的条件として、(1) 等身大の空間性 (2) 実時間インタラクション (3) 環境への自己投射性の3つの要素があげられる。ひとつめの等身大の空間性とは、人間にとって自然に見える3D空間を提示することである。ふたつめの実時間インタラクションとは、ロボットと操作者がリアルタイムに遅延なく同期され、ユーザーとロボットがある環境とが、相互にインタラクション可能であるということだ。最後の環境への自己投射性とは、その環境と使用している人間と環境とがシームレスになっていて環境に入り込んだ状態が作られているということである。この3つの要素は、舘が、「バーチャルリアリティ学」[3]の中で述べた、バーチャルリアリティの定義である「みかけや形は原物そのものではないが、本質的あるいは効果としては現実であり原物であること」に必要と述べた3要素と同じである。

Fernandoら [4] は、このテレイグジスタンスの概念に基づいて、52自由度を



図 2.5: テレイグジスタンスイメージ図 [1].

持ち，ユーザーの身体の動作に合わせて操作でき，触感フィードバックを受けることができるテレイグジスタンスシステムである TELESAR V を開発した．ユーザーは HMD およびモーショントラッキング用マーカー，データグローブと触覚ディスプレイを装着する．ユーザーの身体の動きをユーザーの身体動作とロボットの動作をほぼ遅延なく同期させ，ユーザーに対して視覚と触覚のフィードバックを行うことで，遠隔地から臨場感をもって自身の手や指を用いて細かな作業を行ったり，コミュニケーションをとることが可能になった．

笠原ら [5] は，人間が他の人間の環境に没入し，その状況や体験を共有したり共同作業を行ったりする際のインタラクションの枠組みを提案している．このようなインタフェースは，現場の作業を遠隔地の専門家が支援したり，遠隔から作業者を誘導する，または現地での体験を他の利用者に伝送するなどの応用に適用できる．Body と呼ぶ，実環境にいる利用者の一人称映像を遠隔地の利用者 (Ghost) が観察し状況を共有する．さらに，Ghost が自由な視点位置で環境を観察することを可能にするために，一人称映像のシーケンスから SLAM に基づいて空間をモデリングし，擬似的に Body の視点外から状況を観察することを可能にする「体

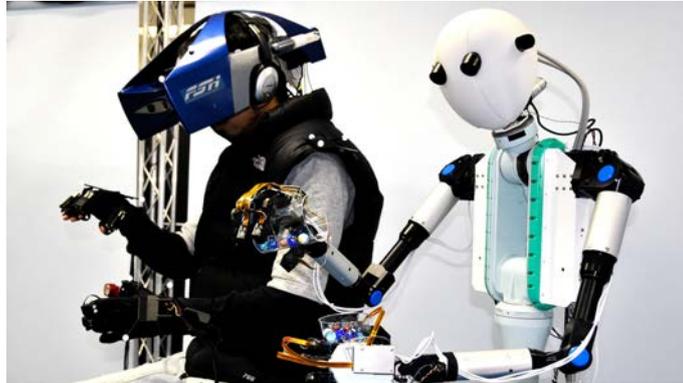


図 2.6: TELESAR V [4]

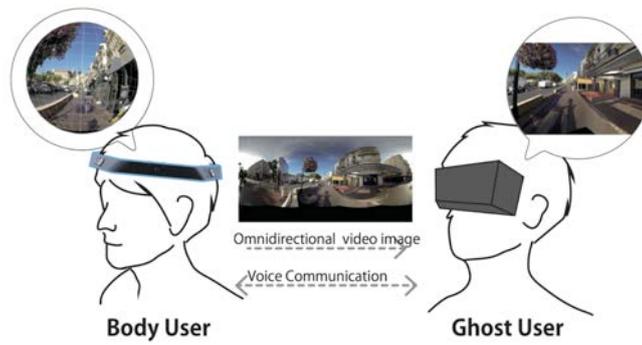


図 2.7: Jack in [5]

外離脱視点」を提供した。

## 広域に複数点在するテレグジスタンス

テレグジスタンスは、漫画『ドラえもん』[6]のどこでもドアのようなものと例えられることがよくある。どこでもドアはドラえもののひみつ道具のひとつであり、このドアは異なる2空間を繋ぎ、自分が今いる空間とは違う空間にシームレスに連れて行ってくれる。どこでもドアとテレグジスタンスロボットの大きな違いの一つは、行く先に自分が乗り移るためのロボットを設置しなければならないことである。では、すでにロボットが広域にたくさん点在していて、ユーザーが自由にロボットにログインできるようになったとしたらどうなるのだろうか。廣多[7]は、テレグジスタンスロボットを広域に複数台点在させることによって、操作者が遠隔にあるロボットを選んで自由にログインできるユビキタステレグジスタンスを提案し、小型可動式テレグジスタンスロボット Telubee(図 3.4)を開発した。ユーザーは Telubee を使うことによって、テレグジスタンスしたい場所を選び、その先で人と話したり、芸術を楽しんだり、旅行をしたりすることができるようになる。

今まで述べて来た通り、テレグジスタンスとは、操縦者を離れた場所にある別空間に存在させるための技術である。テレグジスタンスはロボットと操作者が一対一に対応することが前提で語られて来た。そこで Yamen [8]はこのテレグジスタンスの概念を拡張し、複数のロボットから得た映像を重ね合わせるように表示し、ユーザーの視線識別から、その重みづけを変化させることで、ユーザーを複数の場所に同時に存在させる Layered Telepresence(図 2.9)と呼ばれる概念を提唱した。

## サービス化するテレグジスタンス

テレグジスタンスが館に提唱されて25年以上経つ。アクチュエーター・カメラなどの構成パーツは安くなり、コンピューターの演算能力も格段に高くなった。テレグジスタンスに必要な不可欠な、高画質な映像をほとんど遅延なく送受信

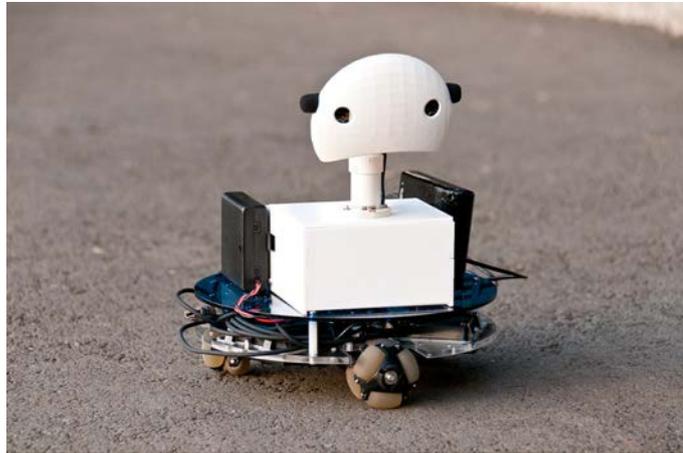


図 2.8: Telubee [7]



図 2.9: Layered Telepresence [8]

できる技術も出て来ている。トレイグジスタンスという概念が、エンドユーザーにまで届き、日常に溶け込む日は、すぐそこに来ているかもしれない。

たとえば、トレイグジスタンスという概念を応用すれば、自分はその場になくとも、特別なイベントに参加する経験を作ることができる。株式会社 アシックス [?] は、マラソンランナーの視点をリアルタイムに遠隔地のユーザーに共有するシステムを構築した。マラソンランナーの頭部に全天球カメラを装着し、その映像を遠隔地にいるユーザーに実時間性を持って配信する。ユーザーは提示された映像を見ながらトレッドミルの上で走ることで、単なるスポーツ鑑賞にとどまらず、自身がスポーツを擬似的に体験することができる。近年では、東京マラソンやサハラマラソンに参加する人も増えているが、どこにいても、身体能力に関わらずにスポーツを体感できることは、大きな価値だと言える。



図 2.10: マラソンランナーの視点をリアルタイムに遠隔地のユーザーに共有するシステム [?]

また、Ducklings inc. は、HUG PROJECT と呼ばれるトレイグジスタンスを用いて、結婚式に、遠隔地から参加できる体験を作った。このプロジェクトでは、新婦の祖母が、遠隔地から彼女の結婚式に参加した。なぜなら彼女は、自分の力で歩行することが難しく、遠方まで足を運ぶ体力が十分になかったからだ。心待ちにしていながらも、半ば出席を諦めていた孫娘の結婚式に、機械の身体で出席し、

5 HUG PROJECT, <https://hugproject.net/> (2017-12-14 参照)

新婦と抱擁した姿に心を打たれた人は少なくないだろう。このプロジェクトでは、ヘッドマウントディスプレイからユーザーの眼球運動を取得し、それをロボットの首振り動作にマッピングすることによって、体が思うように動かせなくても、自然に周りを確認できるように設計されている。



図 2.11: HUG PROJECT<sup>6</sup>

### 2.3. VR 空間における移動

トレイグジスタンスを用いてライブビューイングを考えたときに、ユーザーが会場内をどのように移動するかを考えることが必要である。ユーザーに行った検証からも、空間内を移動し、様々な角度から観戦・鑑賞したいという声が上がった。したがって本節では、VR 空間における移動インタラクションと、その中で起きる VR 酔いという課題、そしてそれを抑える移動方法に関する研究について述べる。

---

<sup>6</sup> HUG PROJECT, <https://hugproject.net/>(2017-12-14 参照)

## 歩行装置

遠隔地にあるロボットを身体性を持って移動させる方法として、最初に考えられるのは、ユーザーの歩行運動とロボットの移動運動をマッピングさせる方法だ。ここでは、VR空間における歩行方法について述べる。

Walther-Franksら [9] は、滑りのいい地面の上にユーザーをハーネスで固定し、その上を歩く動作を繰り返すことによってVR空間内を移動する手法を提案している。これによってユーザーは、地面の感触を足に感じながら動かすことで、あたかも自分がその場で歩いているような感覚を提示している。

一方で、滑らせるだけではなく、実際に歩く方が、移動している感覚が再現されるという考え方もある。しかし、VR空間と実空間の大きさは違うので、実空間で移動した量と方向を、そのままVR空間に反映させると、実空間の広さが幾らあっても足りないという問題がある。これを解決する方法として Redirected Walking [10] が知られている。Redirected Walking とは、HMD を装着したユーザの視界を気づかれない程度にVR空間を回転、また、スケールの調整を行うことにより歩行を誘導し、現実の空間よりも広いVR空間を歩行することを可能とするものだ。これを使って西 [11] は、安価なトレッドミルを使い、Redirected Walking を利用し、視界の回転や動作のスケールの変化によるユーザの誘導手法を採用することで、VR空間での被験者の移動を視界の回転を用いて直線に導く方法を提案した。

このように、人間の実際の移動とVR内での移動を一対一対応にさせ、人間の身体的な歩行行動をVR空間内の移動に使用することができる。

## 移動経験の拡張

一方でスポーツ観戦や音楽鑑賞での移動について考えると、人間の身体的な制約を超えて、移動する方法をとることによって、より良い視聴体験につながるかもしれない。そこで、ここでは、VR技術を用いた移動経験の拡張について述べる。

樋口ら [11] は、無人航空機 (UAV) に搭載したカメラの撮影位置をユーザーの頭部位置に一致させながら操作できるようにすることで、ユーザーがヘリコプターのような視点を得たかのように直感的に操作できるシステムを作り、エンタテイ

メントシーンにおいても使用できる可能性を述べた。これは、頭部移動量と UVA の移動量のマッピングを変更することによって、人間の視覚的な移動感覚を操作している。例えば人間が 1m 前進した際に、UVA が 2 m 移動するようなマッピングをすることで、人間とはことなるサイズ、移動速度をもつ UVA も自分の身体として操作できる可能性を示した。

また、Pai ら [12] は、VR 空間内での移動手法として、ユーザーの目線と、頭の動きに合わせて軌道のような動きが可能な移動方法を提案した。(図 2.12) まず最初にユーザーが見ている位置を特定し、その位置を中心とした軌道をユーザーの頭部の動きに合わせて移動することができる。これによって、ユーザーは、まるで CAD システムを使っているように、少ない身体動作で、VR 空間全体を見渡すことができるようになる。

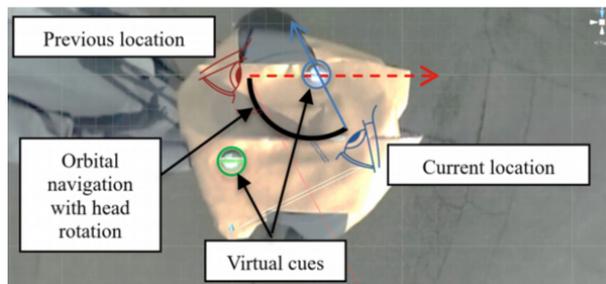


図 2.12: GazeSphere における視点移動方法 [12]

このように、VR 空間においては、人間と操作対象の動きを 1 対 1 にマッピングする必要は必ずしもないため、人間の身体動作を別の動作に対応付けすることによって、普段人間ができないような動きを行い、それによってイベントや音楽やスポーツの観戦、鑑賞体験を本来の一地点から視聴する体験とは異なるものに行える可能性がある。

## VR 酔いを抑える移動インタラクション

ここで、VR 空間内での移動を考えると、VR 酔いという問題が起こる。VR 酔いとは、VR を活用したシステムを利用した際に発生する、方向感覚の喪失及び

嘔吐感を誘起させる動揺病である.VR 酔いの原因は明確に解明されているわけではないが、人間が過去に経験した 視覚情報, 前庭感覚, 体性感覚の組み合わせの記憶と, 実際を取得されたそれらの 感覚の組み合わせ比較し, 記憶による予測とは異なる組み合わせを取得したためであるという説 [13] が有力である.

Google の Daydream Labs は, VR 開発者へ向けてブログの中で, VR 酔いを軽減させる方法として, Tunneling という手法<sup>7</sup>を提唱している (図 2.13).Tunneling とは, ユーザーが VR 空間を移動する際に, ユーザーの視野を狭めることによって, VR 酔いを抑える方法である. これは, 視野画面を小さくし, ユーザーに提示される周辺視野へのオプティカルフローを減らすことによって, 自分が移動している時に見た記憶を想起させずに移動させることによって, VR 酔いを抑える方法である.

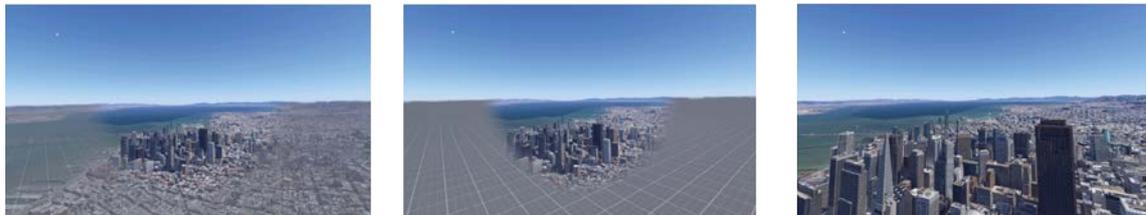


図 2.13: Daydream Lab の Tunneling 手法<sup>8</sup>

また, Bozgeyikli ら [14] は VR 酔いを回避する移動方法として「Point & Teleport」と呼ばれる新しい歩行技術を記述し、歩行場所とジョイスティックの2つの一般的に使用される VR 歩行技術と比較した。この技術では、ユーザーは移動したい点を指定することで、その位置にレポートできる。このシステムの利点として、目に見える形の運動を伴わないので、VR 酔いが起こらず、ユーザーにとって楽しい移動方法であったことが示された。一方で、このような方法を用いた場合、レポート先に自分がどこにいるのかわからないという問題があることが考

7 Daydream Labs: Locomotion in VR,<https://www.blog.google/products/google-vr/daydream-labs-locomotion-vr/>(2017-12-15 参照)

8 Daydream Labs: Locomotion in VR,<https://www.blog.google/products/google-vr/daydream-labs-locomotion-vr/>より引用 (2017-12-15 参照)

えられる。このような問題を本論文では空間失調と呼ぶ。

テレポテーションにおける空間失調を抑える方法としては、Implicit Motion<sup>9</sup>と呼ばれる手法(図 2.14)が知られている。これはユーザーが移動先を選択した際に、提示している視覚情報を切り替えるエフェクトとしてモーショングラマーをかけることによって、暗黙的にユーザーに移動していることを伝えることで、相対的な2点間の関係をユーザーに伝えるというものである。



図 2.14: Daydream Lab の Implicit Motion<sup>10</sup>

このように、VR 空間で快適に移動する方法として、VR 酔いという問題を軽減あるいは回避するというアプローチが様々な方法で取られている。本論文では、トレイグジスタンスライブビューイングにおけるユーザーの移動方法として、空間失調と VR 酔いを抑制し、様々な角度からイベント・ライブ・スポーツ競技を観覧できるような空間転移インタラクションを設計し評価する。

9 Daydream Labs: Locomotion in VR, <https://www.blog.google/products/google-vr/daydream-labs-locomotion-vr/>(2017-12-15 参照)

10 Daydream Labs: Locomotion in VR, <https://www.blog.google/products/google-vr/daydream-labs-locomotion-vr/>より引用 (2017-12-15 参照)

## 第3章

# 空間転移型マルチテレグジスタンスライブビューイングの提案

本章では、テレグジスタンスを使ったライブビューイングサービスの設計を目的として、まずサービスのコンセプトを述べる。次にサービスモデルを構築したのちに、プロトタイプを実装し、1台のテレグジスタンスロボットを使ったライブトークイベントにてサービスを予備検証する。最後に、検証から得られた知見を考察する。

### 3.1. コンセプト

空間上の2点間を瞬時に移動することを空間転移と呼び、空間転移型マルチテレグジスタンスライブビューイングを提案する。このサービスは、遠隔地からライブや試合を観戦・鑑賞したいユーザーが、テレグジスタンスロボットを通してその場に参加し、さらに会場に設置された複数のテレグジスタンスロボット間を身体的なインタラクションを用いて自在に転移することを可能にする。これによってユーザーは、遠隔地にいながらも、多角的に試合やライブを見たり、普段見れない場所から対象を見ることで、よりライブや試合を味わうことができる。コンセプトスケッチを図3.1に示す。

これがあることによって、例えばサッカー観戦を愛してやまないユーザーは、自宅にいながらも、テレグジスタンスロボットを通じてバルセロナで友人と待ち合わせをして、メッシが出場する試合を楽しみ、シュート間近になればゴール近くに空間転移して決定的な瞬間をみたり、普段は見ることのできない場所から試合

を味わえる。そして、この空間転移は、トルクのあるスポーツカーで一気に走り出す時に感じるような、心地よい自己主体的な移動感をもって行うことができる。



図 3.1: コンセプトスケッチ

### 3.2. サービスモデル

前述のコンセプトを踏まえて、サービスモデル（図 3.1）を構築した。カラオケやネットカフェなどを運営するサービス提供者は、トレイグジスタンスライブビューイングプラットフォームを通じて、高速で低遅延のネットワークを保有するネットワークプロバイダー、ライブやイベントを開催し、コンテンツを保有しているコンテンツプロバイダー、イベントが行われる会場というリソースを組み合わせることによって、ユーザーに対し、遠隔地においてもイベントや音楽ライブ、スポーツ観戦に参加できる体験を提供する。

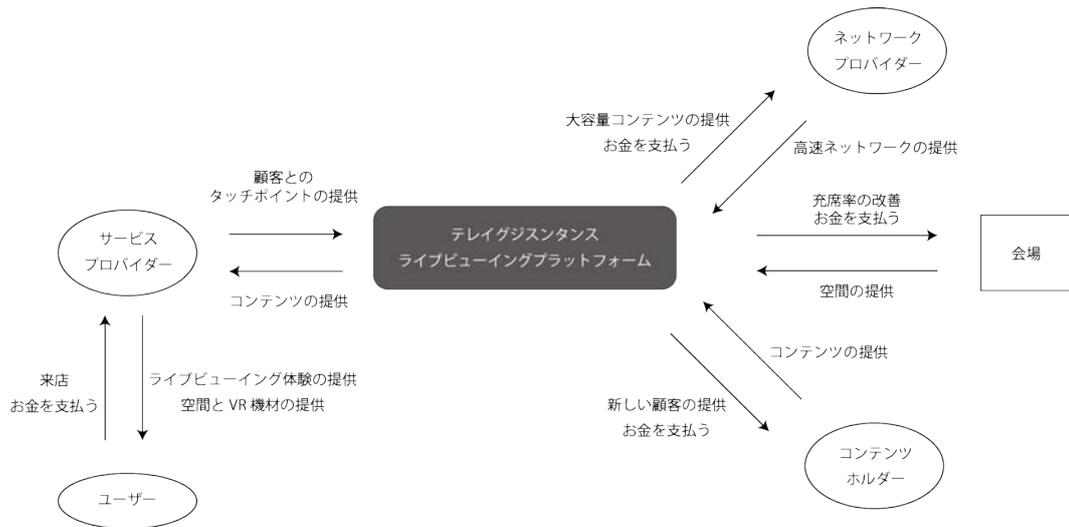


図 3.2: サービスモデル

### 3.3. サービスシナリオ

まず、サービス設計の上でターゲットユーザーとして、好奇心が強く、できる限り色々な試合やライブを自分がその場に行き行って楽しみたいと思っている一方で、ただ単に試合やライブを見るだけではなくて、自ら主体的に試合やライブを見たり、普段見られないような場所から選手やアーティストを見ることで、自分だけの体験としてより深く観戦や鑑賞を味わいたいと考えている人物を設定した。

次に設計したサービスシナリオについて述べる。サービス体験の流れのイメージ図を図 3.3 に示す。家電メーカーでプロダクトデザイナーとして働いている鈴木美沙希は、会社に勤め始めて3年が経っていた。仕事に充実感を覚え始めた最中であったが、最近ふとしたときに大学時代に活動していたフットサルサークルでの仲間たちとの思い出を振り返る。友人たちは海外転勤をしたり、忙しさで時間が合わず、会う頻度もおのずと減っていった。昔していたようにスポーツで汗を流したり、毎月のように仲間と楽しんでいたサッカー観戦に行くこともなくなっていた。そんなことを考えていると、今は商社に勤めロンドンで働いている山崎から久しぶりに連絡がきた。マルチテレグジスタンスライブビューイングというサービスを使って、昔の仲間たちと一緒にロンドンの有名クラブである

チェルシーの試合を来週見ないかという誘いだった。このサービスを使えば、現地に設置されたトレイグジスタンスロボットという分身ロボットを使って、まるでその場にいるかのように試合を観戦することができるらしい。しかも会場にはたくさんのロボットが設置されていて、そのロボット間を自分が瞬間移動するかのよう飛び移りながら試合を多角的に味わえるという話だった。少々値段ははるようだが、普段絶対に観戦できないような場所から本場の選手のプレーを見て応援するのは、わくわくするなと思った。

さっそくチケットを買って、当日都内の漫画喫茶に向かう。この漫画喫茶はサービスと連携していてVRを楽しめる新しい機材や環境が揃っているらしい。専用の部屋に向かい、事前に購入したeチケットの情報をかざし、用意されたヘッドマウントディスプレイを装着した。すると日本からロンドンを俯瞰的に移動しているような映像が写り、チェルシーの競技場が見えると、事前に用意されたトレイグジスタンスロボットにログインできた。会場はすでに観客で満たされていて、鈴木は一瞬にして興奮が高まったのを感じた。自分の右側を見ると、ロンドンで働いている山崎と、ちょうど旅行で訪れていた高木が席に座っている。二人とも大人びた様子で驚いたが、少しこれから始まる試合の話をするするとすぐに昔の頃のような安心できる感覚を感じた。試合が始まると、会場の色々な場所に緑色の丸いマークが出ていることに気がついた。どうやらこれが現在ログイン可能な他のトレイグジスタンスロボットを表示しているらしい。ガイダンスに従って、ゴールポスト近くのロボットの上に表示されたマークを見ながら頭を振ると、そのロボットに向かって吸い寄せられるように移動しているように感じ、周りの景色が流れるのが見えた。心地よく、まるで瞬間移動のようだなと思った。以前試しに遊んで見たVRゲームをプレイしている最中に感じたVR酔いは気にならなかった。試合中に何度も空間転移して、様々な角度から、そして普段見れないような地点から本場の選手のプレーや試合の流れを味わうことができた。試合が終わると満足して、次にまた会う約束をして、別れをつげた。



図 3.3: サービスシナリオ

### 3.4. 簡易テレグジスタンスロボットのプロトタイプ

本論文で提案するライブビューイングサービスを検証するために実装した簡易テレグジスタンスロボットについて述べる。

イベント会場に設置するロボットとして簡易テレグジスタンスロボット（図 3.4）を実装し，視聴覚情報の取得及び操縦者の頭部回転運動の再現を行った。このロボットは解像度:720 × 480px, fps:60[Hz] で視覚情報を取得することができ，頭部はロール:± 60 [°], ピッチ:± 60 [°], ヨー:± 100 [°] まで回転することができる。2つのカメラの距離は人間の目と近い6.4[cm]とした。また，左右のマイクからはそれぞれの音声を取得した。さらに，映像を提示するためのHMDとしてOculus社のOculus Rift Development Kit 2を使用した。

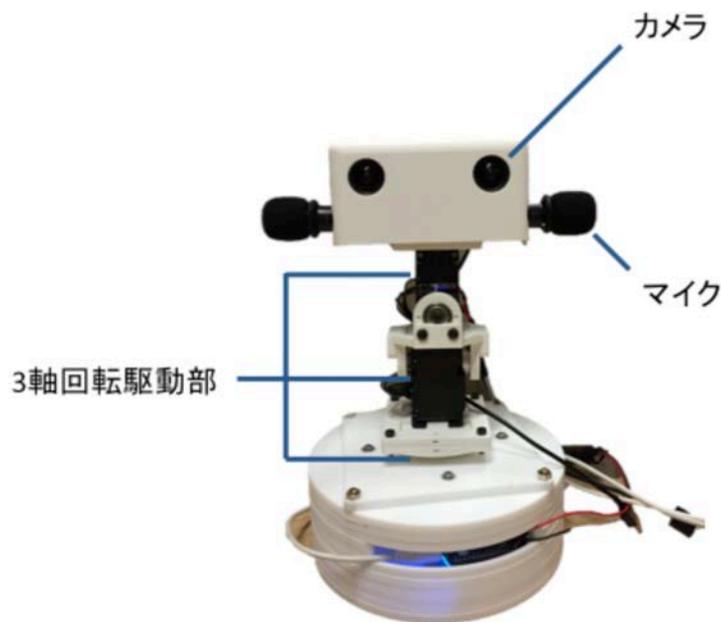


図 3.4: 簡易テレグジスタンスロボット

## 3.5. TEDxHaneda における予備検証

### 3.5.1 予備検証の目的

本予備検証は、テレグジスタンスロボット 1 台のみを使用し、遠隔ライブビューイング体験サービスがどのようにユーザーならびにイベント主催者に受け入れられるかを確認し、観戦・鑑賞体験価値を高めるために必要となる要素を洗い出すために行なった。

そこでテレグジスタンスロボットを用いたトークイベントのライブビューイングの試作を羽田空港利用客に対して提供した。この検証は TEDxHaneda と三菱商事株式会社<sup>1</sup>の協力の元に行った。

TED<sup>2</sup>とは、“IdeasWorthSpreading”の精神のもと、世界 130 カ国以上で発足しているコミュニティ・イベントであり、今回検証を行った TEDxHaneda は、羽田空港国際線ターミナルにて JAL<sup>3</sup>(JAL)の協力のもと開催された。TED はステージ上の収容人数が限られていることや、認知活動の一環といった理由から、新しいライブビューイングを模索していた中で検証に至った。

### 3.5.2 検証手順

TEDxHaneda は、スピーカーが壇上に上がって話すトークイベントと、スピーカーと聴衆が話をする交流イベントにて構成されている。今回の検証では公演が行われているホール内のステージ上に簡易テレグジスタンスロボットを図 3.7 のように 1 台設置した。ロボットをステージ上に置くことによって、普段は見れない距離と位置から公演を聞き、イベントに参加することを可能にした。また、体験者が、自分がロボットを操作していることを意識させるために、ロボットの前には鏡を設置した。

---

1 三菱商事株式会社 <https://www.mitsubishicorp.com/jp> (2018-1-25 参照)

2 TED <http://www.ted.com/> (2017-12-15 参照)

3 JAL <http://www.jal.co.jp/> (2017-12-15 参照)



図 3.5: 会場の様子

体験ブースは、空港やレストランを利用する通行者が多く通るターミナル内の通路に設置した。体験ブースのとなりには、パブリックビューイングスペースがあり、パブリックビューイングを見た後にイベントに興味を持ち、体験ブースに来た方もいた。

ロボットと体験ブースにあるコンピューターとの接続のためのインターネット環境は施設管理者が用意したものを使用し、映像・音声・体験者の頭部回転を送受信するプロトコルとしてWEB RTC<sup>4</sup>を使用した。

### 3.5.3 検証結果

この検証では3時間ほどのイベントの間に54名の体験者が壇上に設置した簡易テレレイグジスタンスロボットを操作した。体験しているユーザーが、不思議そうにあたりを見渡したり、スピーカーが近寄ると嬉しそうに見上げながら手を振り

---

4 WebRTC (Web Real-Time Communication) とは World Wide Web Consortium (W3C) が提唱するリアルタイムコミュニケーション用の API の定義



図 3.6: TEDxHanedada におけるデモブースの様子



図 3.7: TEDxHanedada におけるステージ上の様子



図 3.8: 体験者が鏡に映ったロボットを見ている様子



図 3.9: 体験者から見たステージ上の様子

ながらライブトークを聞く様子が観察された。

体験後に行ったユーザーに対するインタビュー結果には以下のようなものがあった。

- ステージ脇で見ているようで、面白い。
- ステージに寝転がって見ているような感じがして新鮮だ。
- (鏡に映ったロボットの様子をみて) 自分がロボットになっていると気づいてなかった。
- スピーカーだけでなく、会場にいて聞いている人たちの姿も見たい。
- 固定された場所からだけでなく、色々な視点から、イベントを見たい。
- (隣で行っている一般のライブビューイングと比べて) こちらの方が早いから先に内容が分かって面白い。
- 映像が、赤みがかって見えることがある。
- 解像度が低いため、照明が暗くなった時にスピーカーの表情がよく見えない。

また、TEDxHanedaを運営するチームからは以下のような声があった。

- 全地球カメラや一般的なライブビューイングと違って、一人しか体験できないところにプレミア感があって良いと思う。プレミア感とはTEDxコミュニティを発展させる上で大事にしていることのひとつで、そこに価値があると思う。
- ステージ上に置いてあるロボットが時々動いているのを見ると、誰かが来たんだなと思って見ていて面白かった



図 3.10: 検証全体の様子

### 3.5.4 考察

本検証は、羽田国際線ターミナル内のイベントホールで実施された、TEDx-Hanedaにて行った。ステージ上に簡易型テレイグジスタンスロボットを設置し、離れた場所に体験ブースを設置しライブビューイング体験を54名が試した。体験者、そしてTEDxHanedaの運営チームにインタビューを行った。

体験者から出た多くの意見が、ステージの近くから見ているようで面白いというものであった。スピーカーが近寄ると嬉しそうに見上げながら手を振る様子も観察された。これらからは、普段見ることができないような場所からの鑑賞にユーザーは喜び、価値を感じる事が示唆された。

次に、「スピーカーだけでなく会場にいて聞いている人たちの様子も見たい」という意見は、実装したロボットの頭部はロール:±60[°]、ピッチ:±60[°]、ヨー:±100[°]までしか回転できなかったため、多く出た意見であった。これは、会場全体の様子を見たり、普段みれないステージ上からの風景をみてみたいという動機によるものであった。また、「固定された場所からだけでなく、色々な視点からイベントを見たい」という意見もあった。これらの意見は、会場全体の様子

を確認したり、あるいは自分の見たい部分を選択したいという動機によるものであった。これらの意見からは、テレグジスタンスを使ったライブビューイングにおいては、多方向からの観覧や、見たいシーンの選択が求められていることが示唆される。

また、「ステージに寝転がって見ているような感じがして新鮮だ」という意見は、設置したロボットの位置が低かったため、発言されたものだと考えられる。また、「鏡に映った自分を見て、ステージ上のように感じて面白い」という意見は、映像が見えているが、自分の姿は見えていないので、自分がロボットを操縦しているという感覚がなかったからだと考えられる。これらの意見からは、このサービスプロトタイプが、身体性と遠隔存在感が伴ったライブビューイング体験を提供していると推測できる。

体験者からの映像に関する意見としては、「映像が、赤みがかって見えることがある」や「解像度が低いため、照明が暗くなった時にスピーカーの表情がよく見えない」があった。映像の赤みの原因に関しては、会場の光源として赤外線を多く放出するものを使用しており、カメラの中につけていたIRフィルターの性能が十分ではなかったことが考えられる。これは映像の色調を適切に変化させることによって軽減させることができる。解像度に関しては、テレグジスタンスにおいて快適に体験できるフレームレートである60fpsに近づけるために、会場の暗さや回線速度に応じて解像度を下げていたことが要因であると考えられる。この問題は、よりスピードの早いインターネット回線を用意することによって、改善できると考えられる。

また、TEDxHanedaの運営チームから得られたフィードバックである、「全世界カメラや一般的なライブビューイングと違って、一人しか体験できないところにプレミアム感があって良いと思う。プレミアム感やTEDxコミュニティを発展させる上で大事にしていることのひとつで、そこに価値があると思う。」という意見は、本サービスが他のVRを使ったライブ配信とは違った価値を提供しうることが示唆された。「ステージ上に置いてあるロボットが時々動いているのを見ると、誰かが来たんだなと思って見ていて面白かった」という意見は、ライブビューイングの体験者だけでなく、テレグジスタンスロボットの周辺にいる人も、他者の存

在を感じ、それを好意的に受け取っていることが示唆された。

以上の結果から、ユーザーが遠隔地からのライブビューイングを行う際に、以下の2点に価値を感じるようになった。

- 普段見れない場所からの観戦・鑑賞を行う
- より多くの視点から多角的に観戦・鑑賞を行う

よって、本論文で提案する空間転移型マルチテレラグジスタンスライブビューイングは、ユーザーが普段見られない位置からの観戦・鑑賞することを可能にし、より多くの視点から多角的に観戦・鑑賞ができるように、会場に複数台のテレラグジスタンスロボットを設置し、ユーザーが自身の転移先を身体的なインタラクションを行うことによって決定できるようにする。そのために、ユーザーが空間を心地よく身体性を伴って移動可能なインタラクションを検討する。

## 第4章

# 空間転移可能なマルチテレグジスタンスライブビューイングの実装と評価

本章では、第3章で述べたコンセプトと検証から得られた考察を元に複数のテレグジスタンスロボット間で空間転移が可能なマルチテレグジスタンスライブビューイングサービスを実装し評価する。まず、この実装の概要を述べ、それを実現するための設計要件を述べる。それらの要件をみたすサービスのユーザー体験と空間転移インタラクションの実装を行い、検証した上で、最後に考察を述べる。なお、この試作と検証はソニー株式会社との共同研究として実施した。

### 4.1. 空間転移インタラクションを使ったマルチテレグジスタンスライブビューイング

第3章のコンセプトと、検証結果からの考察で述べた通り、本実装では、イベント、ライブ、スポーツが行われる会場に複数台のテレグジスタンスロボットを配置することを想定して、ユーザーが遠隔地にいても、会場内のロボットに接続し、イベントやライブやスポーツを鑑賞できるようにする。さらにユーザーが自由にその空間内に設置されたロボット間を身体的なインタラクションによって移動できるようにする。これによってユーザーは、自分の身体の制約を超えて、普段見られないような好きなシーンから多角的に試合や音楽を鑑賞したり、また会

場にいる人とコミュニケーションをとることができる。概要図を図 4.1 に示す。

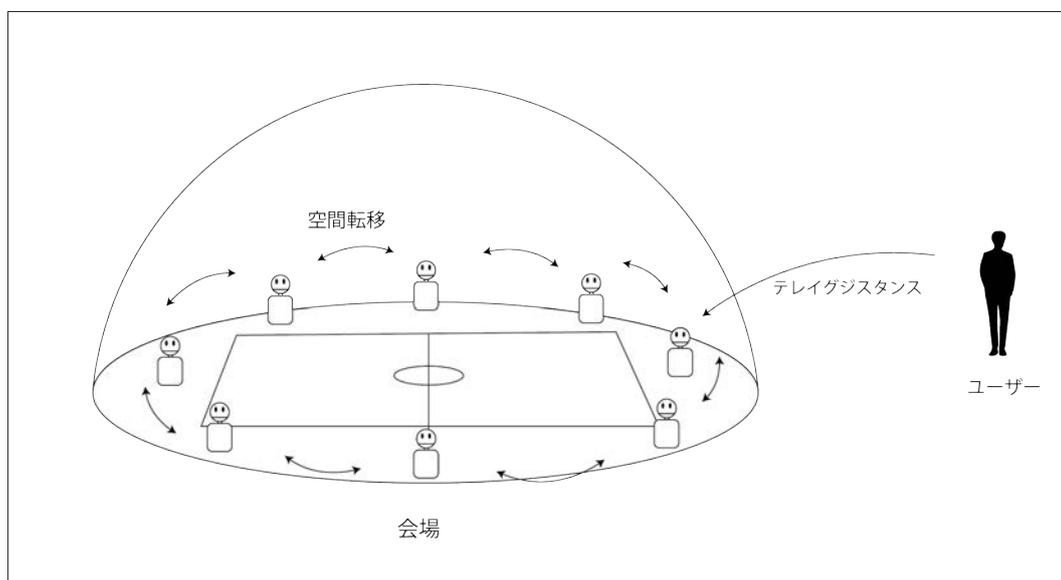


図 4.1: マルチテレグジスタンスライブビューイングの全体像

## 4.2. 設計要件

ここでは、第3章で検証したテレグジスタンスを使ったライブビューイングサービスから得られた考察を元に、複数のテレグジスタンスロボットを使ったマルチテレグジスタンスライブビューイングの実装として、以下の4つの設計要件を立てる。

- テレグジスタンスロボットを使った遠隔からのライブビューイングができる
- 俯瞰的な視点から、自分が次に行く場所を選択することができる。
- ユーザーの選択によって様々な位置にあるロボットに乗り移りながら操作できるようにする。

- ユーザーがテレグジスタンスロボットに乗り移った様子が、周りの人々から見ても分かる

まずテレグジスタンスロボットを使って遠隔地からライブビューイングできるようにすることによって、会場に自分の分身をつくり、その分身を通じてスポーツの試合や音楽ライブを視聴したり、他者とコミュニケーションを取れるようにする。これによって、動画によるライブ中継やVRを使った中継と比べ、より自分がその場にいるように感じて楽しみ、ロボットの周囲にいる人も、体験者の存在を感じることができる体験を作る。

次に、俯瞰的な視点から、自分が次に行く場所を決めることができるようにする。これは、広い敷地において、様々なイベントや競技が行われているようなシーンを想定し、ユーザーが俯瞰的に自分のいる位置を理解したり、次に行きたい場所を選択するためである。

3つ目に、ユーザーの選択によって、様々な位置にあるロボットに乗り移りながらライブビューイングができるようにする。これによってユーザーは、会場内の自分が行きたい場所に瞬時に移動しながらコンテンツを楽しむことができる。この要件は、第3章で述べた通り、TEDxHanedaで行った検証の中で、体験者がロボットが置かれたステージ上だけでなく、観客席を見たり、別のアングルからも見たいという課題をもとに実装に加えた。本論文では、ユーザーが操作しているテレグジスタンスロボットから、別の地点にあるテレグジスタンスロボットに乗り移ることを空間転移と定義する。操縦者が空間転移をする際の課題は空間失調とVR酔いであり、次節ではこれらを軽減させるための空間転移インタラクションについて述べる。

最後に、ユーザーがテレグジスタンスロボットに乗り移った様子が、周りの人々から見ても分かるようにする。検証のインタビューにもあった通り、テレグジスタンスロボットの周りにはいる人々も、体験者の存在を感じることで、一緒に鑑賞を楽しむことができる。

### 4.3. 空間転移のインタラクションデザイン

マルチテレグジスタンスライブビューイングを行うユーザーは、テレグジスタンスロボット間を空間転移することによって、会場内の自分が行きたい場所に瞬時に移動しながらコンテンツを楽しむことができるようになる。ユーザーが空間転移を行う際には、以下の2点を担保することによって、身体性を保ちながらストレスなく空間を移動することができると思う。

1. ユーザーが空間転移をした後に、空間失調をしないこと
2. ユーザーが空間転移している時に、VR酔いを起こさないこと

空間失調とは、空間転移後の自身の空間上の存在位置及び向いている方向を見失ってしまうことと定義する。例えば、ユーザーが遠隔地 P1 へテレグジスタンスしている場合、眼前に存在している対象物に興味を持ち別の方向からその対象物を見たいと思い、地点 P1 から地点 P2 へ移動した際、自分がどこに存在しているのか、その対象物はどこに存在しているのかを見失ってしまう可能性がある。このように、空間転移において、転移後の自身の空間上の存在位置及び向いている方向を見失ってしまうことを本研究では空間失調と定義する。

VR酔いとは、VRを活用したシステムを利用した際に発生する、方向感覚の喪失及び嘔吐感を誘起させる動揺病である。VR酔いの原因は人間が過去に経験した視覚情報、前庭感覚、体性感覚の組み合わせの記憶と、実際に取得されたそれらの感覚の組み合わせ比較し、記憶による予測とは異なる組み合わせを取得したためであるという説 [13] が有力である。

本研究で開発するマルチテレグジスタンスライブビューイングでは、操縦者が複数台のロボットへ転移できることを目指すため、ユーザーが転移したいロボットを選択・決定できるようにする。また、上で述べた通り、転移時には操縦者がVR酔いしないこと及び転移後に操縦者が空間失調しないことを満たす設計を行う必要がある。そこで、操縦者がHMDを通して現実世界を見た時、転移先として選択できる場所には図 4.3 のようなターゲット及び図 4.4, 4.5 のような転移軌道を表示した。これにより、ユーザーに現在地と転移先の相対的な位置関係を伝え

ると同時に、転移時の視覚情報の変化を予測させ VR 酔い及び空間失調の軽減に繋がると考えられる。

また、空間失調の一つの要因として、ユーザーが見ている画面が瞬時に切り替わることで、視覚情報に連続性がなくなり、自身の相対的な移動元と移動先の位置関係が分からなくなることが原因だと考えられる。テレイグジスタンスロボットや、全天球カメラ間における空間転移を考えると、カメラそのものを高速に動かすことは難しいため、ユーザーに連続的な視覚情報を与えることができない。これを改善する方法の一つとして、Implicit Motion<sup>1</sup>と呼ばれる手法が知られている。これはユーザーが移動先を選択した際に、提示している視覚情報を切り替えるエフェクトとしてモーションブラーをかけることによって、暗黙的にユーザーに移動していることを伝えるという方法である。しかしながらこの手法を HMD をつけた状態で使用すると、視野角の大部分に対してオプティカルフローが提示されるため、VR 酔いが起きる。

よって本インタラクションでは、VR 酔いを軽減させながらも、ユーザーに移動していることを伝えるために、Implicit Motion に加えて、転移先を決定する際、操縦者はそのターゲットを視線方向に捉えたまま、頭を前方に投げ出すように運動することで、ターゲット方向への転移を開始することとした。これは、転移先の決定をボタンの押下のようなただの操作ではなく、身体性を保った行動にすることで、視覚情報と前庭感覚のベクトルの方向成分を一致させ、VR 酔いの主要因である視覚と運動の不一致を軽減させることを意図している。最後に、操縦者の転移前後の視線方向を一致させることで、転移後の空間失調を軽減させる。

---

1 Daydream Labs: Locomotion in VR, <https://www.blog.google/products/google-vr/daydream-labs-locomotion-vr/>(2017-12-15 参照)

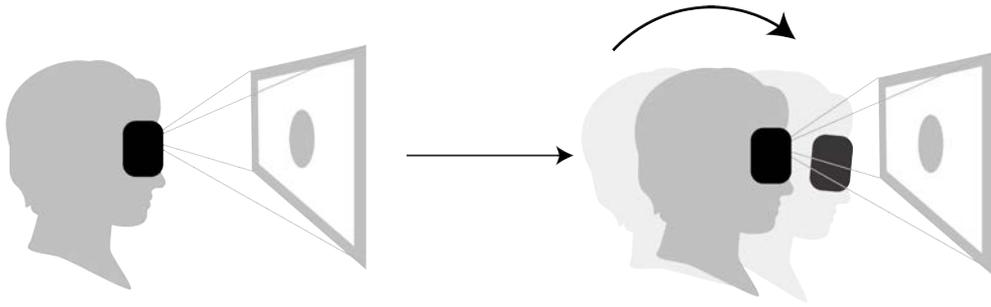


図 4.2: ターゲットを捉え頭を振る様子



図 4.3: ターゲット表示

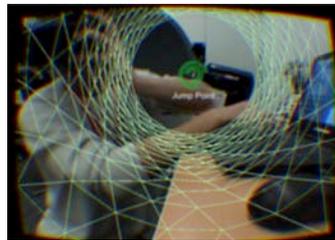


図 4.4: 軌道表示開始



図 4.5: 軌道表示完了

## 4.4. 実装

前述した設計要件，及びにインタラクションデザインに基づき，マルチテレレイグジスタンスロボットを使ったライブビューイングシステムを実装した．テレレイグジスタンスロボットとして，3章で実装した簡易テレレイグジスタンスロボットを用いた．なお，空間転移インタラクションの実装にはUnity5を用いた．

### 4.4.1 ユーザー体験の設計と実装

今回の実装はオリンピックなどといった，広域の敷地内で，様々な競技が同時に行われていることを想定し，図4.6のような体験の流れを実装した．大きな流

これを図 4.7 から図 4.10 に示す。

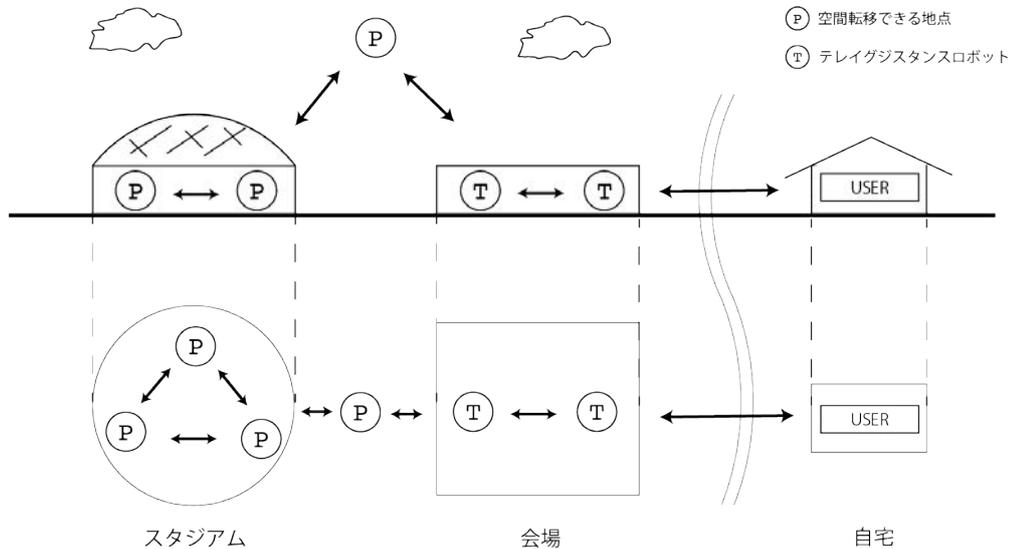


図 4.6: 空間転移中のユーザーの視点

最初にユーザーは、自分が現在座っている位置で Richo Theta で撮影した全天球画像が表示されている VR 空間を HMD を通じて見ている。ユーザーがいる空間にはテレプレゼンスロボット A とテレプレゼンスロボット B がある。まずユーザーは、テレプレゼンスロボット A に接続する。テレプレゼンスロボット A に接続すると、自分と、そしてテレプレゼンスロボット B がある様子がテレプレゼンスロボット A の視点から見える。そして、次に、テレプレゼンスロボット B に空間転移する。ユーザーが現在いる空間から、別の空間に移動したい時には、天井にあるマークに向かって空間転移する。するとユーザーは、空から俯瞰して、自分がいままでいた地点と、別の競技が行われている地点を確認することができる。今回の実装では、別空間として VR 上にスタジアムを再現し、そこに空間転移したユーザーは、擬似的にスポーツを観覧できるようにした。また、体験の流れとして、ユーザーがこれらの実空間・VR 空間、そしてテレプレゼンスロボット間を自由に往復しながら空間転移できるようにした。



図 4.7: ロボットからロボットへの空間転移



図 4.9: 上空への空間転移



図 4.8: 上空からの俯瞰視点

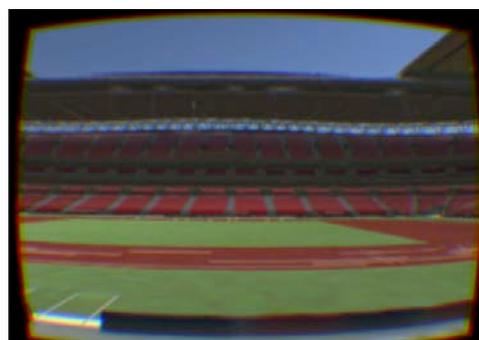


図 4.10: スタジアムからみた風景

#### 4.4.2 空間転移インタラクションの実装

前述の通り、マルチトレイグジスタンスライブビューイングを行うユーザーが、身体性を保ちながらストレスなく空間を移動できるようにするには、以下の2点が必要となる。

1. ユーザーが空間転移をした後に、空間失調をしないこと
2. ユーザーが空間転移している時に、VR酔いを起こさないこと

空間失調を抑えつつも、ユーザーに暗黙的に移動している感覚を提示するため、本実装では図4.13のように、徐々に転移方向に向かって画像を拡大することにした。一方で、視野角の大部分に対してオプティカルフローが提示されるため、VR酔いが起きてしまう。

そこで、前述の通り、転移先を決定する際、操縦者はそのターゲットを視線方向に捉えたまま、図4.12のように、頭を前方に投げ出すように運動することで、ターゲット方向への転移を開始することとした。頭部の運動の検知として、ユーザーが装着しているHMDからターゲット方向への加速度情報を取り出し、その値が一定値を超えた際に空間転移が行われるようにした。ユーザーがロボット間を空間転移している様子を図4.12に示す。

これによって、転移先の決定をボタンの押下のようなただの操作ではなく、身体性を保った行動にすることで、視覚情報と前庭感覚のベクトルの方向成分を一致させ、VR酔いの主要因である視覚と運動の不一致を軽減させることを意図している。

また、空間転移における空間失聴を軽減させるために、操縦者の転移後の絶対的な視線方向を転移前の絶対的な視線方向と一致させることで、転移後の方向の空間失調を軽減させる。



図 4.11: ユーザーがターゲットに向かって素早く頭を動かす様子



図 4.12: ユーザーがロボット間を空間転移する様子



図 4.13: 空間転移中のユーザーの視点

## 4.5. 検証

### 4.5.1 検証の目的と方法

本検証は、実装したシステムを用いて、空間失調とVR酔いを減らした空間転移を行いながら試合を鑑賞することによって、ユーザーが多角的に鑑賞を味わえるようになることを確かめること、そして本インタラクションがVR酔いを軽減するかを確かめ、事業化を検討する目的で行なった。

検証では、体験者にプロトタイプを体験してもらい、その後インタビューを行った。またこれは、ソニー株式会社内<sup>2</sup>にて研究チームとともに行った。検証の様子を4.14図に示す。操縦者が中央に座り、その左右にそれぞれロボットaとロボットbを配置した。ロボットbは、空間全体が見渡せるように三脚をたて、その上に設置した。

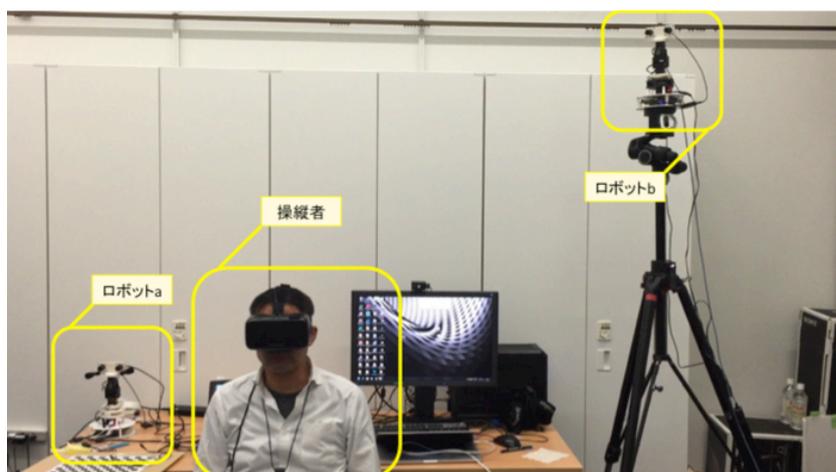


図 4.14: 検証を行っている様子

2 ソニー株式会社, <https://www.sony.co.jp/> (2017-12-14 参照)

## 4.5.2 検証

図4.15において、体験者は自身の左に存在しているロボット a にテレグジスタンスしており、図4.16において転移先のロボット b を視線方向に捉え、図4.17において、頭をロボット方向に投げ出す運動をすることによって、ロボット b に転移している。

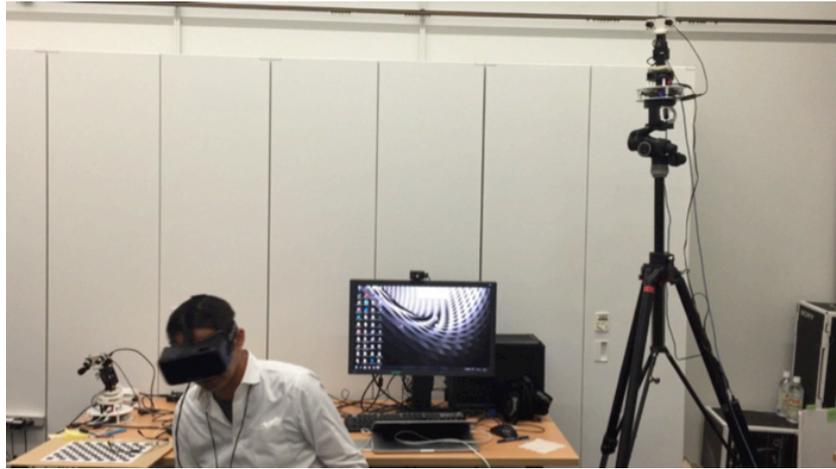


図 4.15: ロボット a へのテレグジスタンス

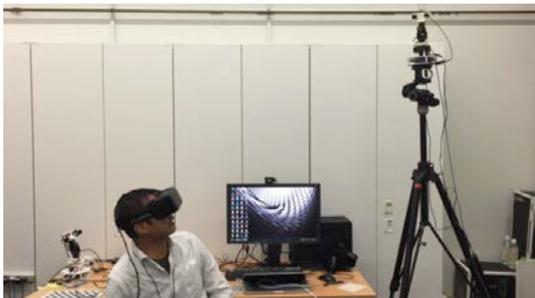


図 4.16: ロボット a からロボット b の補足



図 4.17: ロボット b への空間転移

体験中の様子として、体験者が空間転移をしながら、ロボットの周りにいる人と会話をしたり、高い位置にあるロボットから空間全体を興味深そうに見渡す様

子が観察された。また VR 上で再現されたスタジアム内において、遊ぶように何度も空間転移を繰り返していた様子が観察された。

体験者のインタビューには、以下のようなものがあった。

- 今いる空間やスタジアムを空間転移しながら往復するのが瞬間移動のようで楽しかった。スタジアムの中での移動も気持ちがよく、何度もしたくなった。
- 空間転移をする時に、見ている動画が動くので、そっちに向かっていくという感じが分かって面白かった。
- 空間転移において、空間失調は特に感じなかった。VR 酔いについては、そこまで気にならなかった。
- 普段とは違う、高い目線から見る風景が新鮮で面白かった。
- 時々意図していないのに、空間転移してしまうことがある。トリガー判定の精度をもう少し高いほうがいい。
- 頭を素早く動かすと、気持ちが悪くなった。時々映像が頭の動きについてきていないことを感じた。

また、体験者がロボットを操縦している姿を周りから見ている人からは、以下のようなコメントが出た。

- 転移後のロボットが立ち上がる様子が、何か入ってきている感じがする。
- ロボットの動きをみて、(操作している人が)可愛いく感じる
- 転移した際のモーター音が気になる

## 4.6. 考察

「今いる空間やスタジアムを空間転移しながら往復するのが瞬間移動のようで楽しかった。スタジアムの中での移動も気持ちがよく、何度もしたくなった。」と

いう意見や、遊ぶように何度もロボット間やVR空間内を転移していた様子から、実際の鑑賞、観戦においても多角的に試合を観戦し、より味わえる可能性が確認された。また、定量的な検証には至っていないが、研究チームメンバー内で検証におけるユーザーフィードバックの結果、操縦者は転移先のターゲットを視線方向に捉えたまま頭部を前方に投げ出す運動をすることで、VR酔いをほとんど生じずに、任意のロボットあるいはVR空間へ転移できることを確認した。さらに、ユーザーが部屋の天井に近い高い位置に設置したロボットにログインし、全体を興味深そうに見渡している様子が観察された。予備検証で明らかになった普段見れないような近さからの視聴体験提供だけでなく、ロボットの設置場所を普段の鑑賞場所とは全く違った位置、高さに置くなどといった工夫をすることによって、よりユーザーの興味をひく体験を作ることができることが示唆された。

## 第5章

# 結 論

テレグジスタンスロボットを使ったライブビューイングサービスを成立させるために必要な要素を明らかにし、サービス化を目指し、空間転移型のマルチテレグジスタンスライブビューイングを提案した。

第1章では、遠隔ライブ視聴体験の変化から、テレグジスタンスライブビューイングの目的と動機を示した。

第2章では、VR技術を用いた遠隔ライブによる視聴体験の質的变化について言及した。さらに遠隔にいながらあたかも存在しているかのようにロボットを操作する技術であるテレグジスタンスに関する研究について述べ、この技術を用いたロボットが広域に広がった際に関する研究を示した後、テレグジスタンス技術が実社会でサービスとして使われようとしていることを示した。2章の最後では、テレグジスタンスライブビューイングにおける移動方法の検討として、VR空間内を移動する研究を示し、VR空間内の移動にはVR酔いと空間失調という問題があることを明らかにし、本論文で実装した空間転移インタラクションの設計に役立てた。

第3章では、空間転移型マルチテレグジスタンスライブビューイングのコンセプト述べた。ターゲットとサービスシナリオについて述べ、サービスモデルを設計した。テレグジスタンスを用いた遠隔視聴サービスを実現させるための要件を洗い出すために、トークイベントにおいて予備検証を行い、ユーザーが普段みないような視点から観戦・鑑賞することに価値をおくことと、様々な視点から多角的な視聴を求めていることを明らかにした。また、ユーザーが長時間さまざまな視点へ移動しながら観戦・観覧できるようにVR酔いを起こしにくい空間転移インタラクションを設計した。

第4章では、3章で得られた考察を元に、空間転移型マルチトレイグジスタンスライブビューイングの実装と検証を行った。コンセプトから導き出された設計指針を元に、空間転移型マルチトレイグジスタンスライブビューイングを実装した。まず、体験の想定シーンとしてオリンピックなどに代表される、広域において同時に様々なイベントが行われるような場面における遠隔観戦を想定した。その上でユーザー体験を設計し、インタラクション設計の指針に基づいて空間転移を行えるように実装し検証した。検証の目的は、実装したシステムを使い、空間失調とVR酔いを減らした空間転移を行いながら試合を擬似的に鑑賞することによって、ユーザーがマルチトレイグジスタンスライブビューイングを楽しみに繋がるかを確認するというものであった。検証は、体験者にプロトタイプを体験してもらい、その後インタビューを行った。検証の結果、実装したインタラクションはVR酔いと空間失調を軽減し、トレイグジスタンスを使ったライブビューイング体験そのものも、空間転移を行うことによって、より味わえるようになる可能性があることを確認した。

今後の課題としては、カメラの解像度や通信速度から、観戦・鑑賞の対象が限られてしまうという問題があげられる。また、観戦・鑑賞の際にユーザーが転移したい場所にあるロボットがすでに使用されていて、自由に空間転移が行えないという問題もあげられる。多人数がサービスを利用することを考えるとユーザーが転移する対象をトレイグジスタンスロボットだけでなく、全天球カメラなどのデバイスと組み合わせることやトレイグジスタンスロボットを複数人で共有するようなシステムを考えていく必要がある。このような取り組みを経て、実イベントにおけるさらなる検証を行い、サービスを改善し、トレイグジスタンススタートアップと連携し、社会展開を目指したい。

## 参 考 文 献

- [1] 舘暲. テレイグジスタンス. 計測と制御, Vol. 30, No. 6, pp. 465–471, 1991.
- [2] Yusuke Mizushina, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Haptic broadcasting. In *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 8619, pp. 466–468, 2014.
- [3] 舘暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝. バーチャルリアリティ学. 日本バーチャルリアリティ学会, 工業調査会, 東京, 2010.
- [4] Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Sho Kamuro, Kouta Minamizawa, Susumu Tachi, et al. Design of telesar v for transferring bodily consciousness in telexistence. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012)*, pp. 5112–5118. IEEE, 2012.
- [5] 笠原俊一, 暦本純一. Jackin：一人称視点と体外離脱視点を融合した人間による人間のオーグメンテーションの枠組み. 情報処理学会論文誌, Vol. 56, No. 4, pp. 1248–1257, 2015.
- [6] 藤子・F・不二雄. ドラえもん 一卷. 小学館, 1994.
- [7] 廣多馨. 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修士論文, 2012.
- [8] MHD Yamen Saraiji, Shota Sugimoto, Charith Lasantha Fernando, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. Layered telepresence: Simultaneous multi

- presence experience using eye gaze based perceptual awareness blending. In *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, pp. 14:1–14:2. ACM, 2016.
- [9] Benjamin Walther-Franks, Dirk Wenig, Jan Smeddinck, and Rainer Malaka. Suspended walking: A physical locomotion interface for virtual reality. In *Entertainment Computing – ICEC 2013: 12th International Conference*, pp. 185–188, 2013.
- [10] Mary C. Whitton Sharif Razzaque, Zachariah Kohn. Redirected walking. In *The Eurographics Association 2001*, 2001.
- [11] 樋口啓太, 曆本純一. 移動感覚の拡張が可能なフライングテレプレゼンスプラットフォーム. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 19, No. 3, pp. 397–404, 2014.
- [12] Yun Suen Pai, Benjamin I. Outram, Benjamin Tag, Megumi Isogai, Daisuke Ochi, and Kai Kunze. Gazesphere: Navigating 360-degree-video environments in vr using head rotation and eye gaze. In *ACM SIGGRAPH 2017 Posters*, pp. 23:1–23:2. ACM, 2017.
- [13] 中川千鶴, 大須賀美恵子. Ve 酔い研究および関連分野における研究の現状. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 3, No. 2, pp. 31–39, 1998.
- [14] Evren Bozgeyikli, Andrew Raij, Srinivas Katkoori, and Rajiv Dubey. Teleport locomotion technique for virtual reality. In *the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play, CHI PLAY '16*, pp. 205–216. ACM, 2016.

# 謝 辞

本研究の指導教員であり、幅広い知見からの的確な指導と暖かい励ましを賜りました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の南澤孝太准教授に心から感謝いたします。研究室の一員になれたことを、嬉しく感じております。

研究の方向性について様々な助言や情熱的な指導を賜りました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の古川享教授に心から感謝いたします。

研究指導や非常に親身な論文執筆など数多くの助言を賜りました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の加藤朗准教授に心から感謝いたします。

研究に関する指導や様々なジャンルの興味深いお話を賜りました東京大学大学院情報理工学系研究科 稲見昌彦教授に心から感謝いたします。

リアルプロジェクトにおいて、たくさんの助言を賜りましたソニー株式会社の梨子田辰志様、そして鈴木誠司様に心から感謝いたします。

プロジェクトについての助言やビジネスの世界を見せてくださいました Telexistence 株式会社 CEO の富岡仁様に心から感謝いたします。

研究方針や生活について暖かく親身に数多くの助言をくださった Beyond Vicinity の Charith さん、Yamen さん、そして黒木さんに心から感謝いたします。

学生生活を一緒に送り、貴重な時間を過ごした Embodied Media の全てのメンバーと私たちを支えてくださった児島さんに心から感謝いたします。

GID で一緒に学んだ慧さん、直也さん、護さん、萬崎さん、冴子さん、康喜さんに心から感謝いたします。そして一緒に遊んだり、研究について議論をしてくれた善紀さんに心から感謝いたします。皆がいてくれたおかげで、楽しく贅沢な時間を過ごすことができました。

最後に心の支えとなり、常に応援してくれた母、父、そして弟に心から感謝します。