

Title	没入型空中スポーツのための飛行型テレイグジスタンスシステムの設計
Sub Title	Design of flight telexistence system for immersive aerial sports
Author	早川, 裕彦(Hayakawa, Hirohiko) 南澤, 孝太(Minamizawa, Kota)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2016
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2016年度メディアデザイン学 第482号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002016-0482

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 2016 年度（平成 28 年度）

没入型空中スポーツのための
飛行型トレイグジスタンスシステムの設計

慶應義塾大学大学院
メディアデザイン研究科

早川 裕彦

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。

早川 裕彦

審査委員：

南澤 孝太 准教授 (主査)

フェルナンド チャリス 特任講師 (副査)

砂原 秀樹 教授 (副査)

修士論文 2016年度（平成28年度）

没入型空中スポーツのための 飛行型トレイグジスタンスシステムの設計

カテゴリー：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

本稿では、体験者が日常的な生活空間にいながらにしてあたかも空を飛んでいるかのような身体拡張感を提供するための概念として飛行型トレイグジスタンスを提案し、そのプロトタイプの開発と評価について述べる。遠隔存在感、自在性、浮遊感を満たすシステムを構築することで、誰もが「空」という新しいフィールドを獲得し、空中スポーツ体験が実現できる。全天球カメラがドローンに取り付けられ、また体験者は頭部装着型ディスプレイ（HMD）を装着し、体験者の頭部の動きとドローンの視点がシンクロしている事で、体験者は没入型の飛行体験を経験する事ができる。また、身体運動の同期は、通常のスポーツをする時のように、ユーザ自身の手足を効果的に使用しながら、ドローンの自然な操作する事を可能にする。そして、コックピットを設計することで、飛行しているかのような身体拡張感をさらに演出する。この考えに基づき、体験者と飛行型ロボットを統合することで、身長や体格といった身体的な制限を飛び越えるような身体拡張感を体験することができるシステムとして飛行型トレイグジスタンスシステムを構築した。そして、飛行型トレイグジスタンスシステムを用いたアプリケーションとして没入型空中スポーツ「トリトリ」を提案し、システムの有用性を検証した。

キーワード：

トレイグジスタンス，身体拡張，人機一体，飛行体験，超人スポーツ

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

早川 裕彦

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2016

Design of Flight Telexistence System

for Immersive Aerial Sports

Category: Science / Engineering

Summary

Flight Telexistence provides a feeling of physical augmentation of flying in the air while staying on the ground. In this paper, we will discuss about its development and evaluation. A system that realizes telepresence, flexibility and anacat-esthesia, anyone can enjoy “sky” as a whole new field and experience aerial sports. An omnidirectional camera is attached to the drone and the player wears a Head Mounted Display (HMD), the user can experience the immersive flying experience with Drone's Point-of-view (PoV) synchronized with the users head motion. Then, the synchronization of the body motion allows the player to manipulate the drone naturally while he can use his limbs effectively for sports activities as he would do in ordinary sports. And, by designing a cockpit, it makes the experience of flying in the air. Based on that theory, by merging the user and the flight type robot together, we developed a Flight Telexistence system that overcome physical limitation cited previously. Moreover we proposed the immersive aerial sports “ToriTori” as an application using Flight Telexistence system, and verified an availability of the system.

Keywords:

Telexistence, Augmented Human, Human-Device Integration, Flying Experience, Superhuman Sports

Keio University Graduate School of Media Design

Hirohiko Hayakawa

目 次

第1章 序論	1
1.1. スポーツとフィールド	1
1.2. 超人スポーツ	5
1.3. 本研究の目的	9
1.4. 本論文の構成	10
第2章 関連研究	11
2.1. スポーツにおけるドローンの活用	11
2.2. VRを用いた飛行体験の演出	14
2.3. ドローンを用いた飛行体験	18
2.4. テレイグジスタンス	21
2.5. 本章のまとめ	25
第3章 飛行型テレイグジスタンス	27
3.1. 飛行型テレイグジスタンスの提案	27
3.2. 飛行型テレイグジスタンスシステムの構成要件	30
3.3. 本章のまとめ	31
第4章 飛行型テレイグジスタンスシステムの試作	33
4.1. 試作の目的	33
4.2. 第1プロトタイプ	33
4.2.1 システムの概要	33
4.2.2 システムの構成	34
4.2.3 評価と考察	39

4.3.	第2プロトタイプ	42
4.3.1	システムの概要	42
4.3.2	システムの構成	43
4.3.3	評価と考察	49
4.4.	本章のまとめ	52
第5章	飛行型トレイグジスタンスシステムを用いた没入型スポーツの提案	54
5.1.	岩手発超人スポーツ開発プロジェクトの概要	54
5.2.	アイデアソンにおける没入型空中スポーツの提案	55
5.3.	ハッカソンにおける没入型空中スポーツの提案	61
5.4.	没入型空中スポーツにおけるシステムの評価及び考察	67
5.5.	本章のまとめ	69
第6章	結論	71
	謝辞	76
	参考文献	78
	関連発表	81
	国際会議	81
	国内学会	81

目 次

1.1	ロンドンオリンピックにおける男子陸上 100m 決勝の様子 ¹	3
1.2	『Harry Potter [3]』における空中をフィールドとしたスポーツ「クイ ディッチ」 ²	4
1.3	スカイダイビングで上空から降下している様子 ³	6
1.4	超人スポーツの概念	7
1.5	超人スポーツ競技の1つである「Bubble Jumper」のデモンストレー ション	8
1.6	空中をフィールドとした未来のスポーツのイラスト(出展:超人ス ポーツイラスト大会)(左図:ウエタク,「Snatchgram」)(中央図: 小谷,「Airspace」)(右図:M.H,「ホバー・シューター(仮)」)	9
2.1	空中自由視点でのコンテンツ撮影手法である「Flying Eye [7]」 . . .	12
2.2	D'Andrea によるクアッドコプターを用いたデモンストレーション の様子 ⁴	12
2.3	球技におけるボールとしてドローンを活用した「Hoverball [9]」 . .	13
2.4	『Aladdin』の魔法の絨毯に乗っているかのような体験を提供する 装置 [11](左図:体験者がHMDを通して見ている映像)(右図: コックピットの全体像)	14
2.5	座席の宙吊りや前傾により浮遊感を演出するアトラクション「ソア リン [12]」	15
2.6	幽体離脱したかのような体験をするデバイス「Floating Eye [13]」	16
2.7	Hiyoshi Jump [14] で体験者が見る映像の一例	16
2.8	鳥になる体験を提供するインターフェース「Birdly [15]」	17
2.9	「座間味ロケットジャンプ [16]」を体験している様子	18

2.10	直感的な操作メカニズムを用いたドローンの制御メカニズムを提案している「Flying Head [19]」	19
2.11	古川ら [20] が提案したドローンを用いて身体スケールを変化させるイメージ	20
2.12	トレイグジスタンスの概念 ⁵	21
2.13	株式会社 Asics が構築した、遠隔地にいる観戦者が臨場感を得ながら観戦することができるシステム [24] (左図：現地にいる競技者)(右上図：遠隔地にいる観戦者)(右下図：観戦者が HMD で見ている映像のイメージ)	22
2.14	JackIn [23] における、Body ユーザと Ghost ユーザの概念	23
2.15	トレイグジスタンスのプラットフォームである「TELESAR V [25]」	24
2.16	可動型トレイグジスタンスロボット「TELUBee」[26]	24
3.1	飛行型トレイグジスタンスのイメージ	27
3.2	飛行型トレイグジスタンスのアプリケーション例	29
4.1	第1プロトタイプにおけるシステム概要	34
4.2	第1プロトタイプ システム設計 (a) レンダリング・モデル (b) アウトライン・モデル (フロント・ビュー) (c) アウトライン・モデル (トップ・ビュー)	37
4.3	第1プロトタイプを組み立てている経過	38
4.4	第1プロトタイプにおけるシステムブロック図	39
4.5	第1プロトタイプにおける運動情報の同期メカニズム	40
4.6	第1プロトタイプの試作結果 (左：ロボット, 右：体験者)	41
4.7	体験者が HMD で見ている映像のイメージ	41
4.8	第1プロトタイプにおけるシステムの試験の様子	42
4.9	第2プロトタイプにおけるシステム概要	43
4.10	第2プロトタイプにおける頭部機構の CAD を用いた設計	44
4.11	第2プロトタイプにおける頭部機構	45
4.12	第2プロトタイプにおけるロボット	45

4.13	第2プロトタイプ全体図	46
4.14	第2プロトタイプにおけるシステムブロック図	47
4.15	第2プロトタイプにおける運動情報の同期メカニズム	48
4.16	第2プロトタイプにおけるコックピット	48
4.17	体験者側PCで体験者が見ている映像を表示させている様子	50
4.18	第2プロトタイプにおける飛行性能の評価	50
4.19	実験に用いたコース	51
5.1	アイディアソンにおける会場の様子	55
5.2	個人アイディエーションで集まったアイディアの一部	56
5.3	「Tori-Tori」のアイディアイラスト	57
5.4	アイディエーションのためにクアッドコプターの操作練習をしている様子	57
5.5	クアッドコプターの操作を体験した際の感想や、ブレインストーミングで出たアイディア	58
5.6	空中をフィールドとしたスポーツに関するルールデザイン1	59
5.7	空中をフィールドとしたスポーツに関するルールデザイン2	60
5.8	アイディアソンにおけるラフスケッチ	61
5.9	アイディアソンにて提案された空中スポーツ「トップガン」のイメージ	62
5.10	2016年6月10日に行われたミーティングで出たアイディアの一部	63
5.11	鳥捕りのイメージ	64
5.12	ドローンがドローンを捕まえている様子	65
5.13	超人スポーツ「トリトリ」のロゴ	65
5.14	ドローンの下部に網が取り付けられている様子	66
5.15	ハッカソンにてトリトリのデモンストレーションを行っている様子	67
5.16	非対称型対戦形式にしたトリトリのイメージ	68
5.17	トリトリを用いた飛行型レイゲジスタンスシステムの検証実験をしている様子	68

5.18 飛行型トレイグジスタンスロボットでドローンの捕獲を試みている 様子	69
---	----

目 次

4.1	第1プロトタイプにおけるロボット側システム構成	36
4.2	第1プロトタイプにおける体験者側システム構成	37
4.3	第1プロトタイプの仕様	38
4.4	第2プロトタイプにおけるロボット側システム構成	43
4.5	第2プロトタイプにおける体験者側システム構成	44

第1章

序 論

1.1. スポーツとフィールド

私たちは、日常生活の中で日々スポーツを楽しんでいる。アスリートとして日々トレーニングしたり、レクリエーションとして仲間と遊んだり、リハビリテーションとして心身を養ったり、また自宅や公共空間で観戦したり、楽しみ方は十人十色である。しかしながら、私たちは何を目的として、それらのスポーツを行っているのだろうか。

スポーツとは、体験者や審判、使用する道具、空間等の定義を始めとし、勝敗の判定方法、制約事項、時間的・空間的な有効性の範囲、競技の進行等、極めて構造的であり、厳正に規定されている共通に理解されたルールの下に誰もが平等となり、心身を動かすことである。種目毎に決められた距離を駆け抜ける時間の速さを競うレース、ボールを相手のゴールまで運んで得られる得点の多さを競う球技、洗練された身体動作の芸術性や正確性を競う採点競技、自らの鍛錬された身体を用いて攻防を繰り広げる格闘技や武道、あるいは思考能力や計算能力を競うマインドスポーツ、または人間の身体ではない機械的な動力を用いた乗り物の速さを競うモータースポーツ等を含んだ運動競技の総称であり、多義性や多様性の要素を持つものである。2000年9月に文部大臣告示として策定された「スポーツ振興基本計画 [1]」では、「体を動かすという人間の本源的な欲求にこたえるとともに、爽快感、達成感、他者との連帯感等の精神的充足や楽しさ、喜びをもたらす」「体力の向上や、精神的なストレスの発散、生活習慣病の予防など、心身の両面にわたる健康の保持増進に資する」というスポーツの意義が論じられており、また社会的意義として「自己責任、克己心やフェアプレイの精神を培うもの」「仲

間や指導者との交流を通じて、青少年のコミュニケーション能力を育成し、豊かな心と他人に対する思いやりをはぐくむ」「言語や生活習慣の違いを超え、同一のルールの下で互いに競うことにより、世界の人々との相互の理解や認識を一層深めることができる」ことが言及されている。従って、スポーツにおける勝敗は、スポーツを行う上では二義的な目的であり、共通に理解されたルールの下で心身を動かすことを通じた体力の増加、心身の健康促進、健全な育成、コミュニティの形成、文化の交流と言った、人間の成長こそがスポーツの目的である。即ち、スポーツの結果ばかりを追い求めるばかりではなく、スポーツを行う過程の中にも意義を見出すことがスポーツを行うことの本質である [2]。一方、勝敗があることで競争意識が芽生え、仲間と切磋琢磨したり、自らの心身を鍛錬したり、スポーツ活動をより一層活発なものにすることも事実であり、スポーツにおける人間の成長を勝敗が促進させているという側面もあると言える。そして、スポーツを通じて成長していく過程に楽しさやドラマを人々が見出したことで、スポーツ産業が発達し、プロスポーツが成立している事もまた事実である。

現代には、広く一般的に普及しているメジャースポーツから、メジャースポーツと比較すると小規模であるマイナースポーツ、または特定の地域でしか普及していないローカルスポーツまでを含め、数えることのできないほど多くのスポーツ競技が世の中に存在している。19世紀末にフランスのクーベルタン男爵によって提唱された近代オリンピックで「より速く、より高く、より強く (Citius, Altius, Fortius)」という三語法が標語として謳われ、2012年に第30回目の大会としてロンドンで開催された夏季オリンピック大会¹ (以下、ロンドンオリンピック (図 1.1)) では、26競技 302種目が実施され、204の国と地域から 10,568人の競技者が参加し、また1日あたり18万人以上の観客を動員し、スポーツの祭典たる盛り上がりを見せた。地上で実施される競技における競技者は当然ながら地面に足をついた状態で地上にいることから、プレイの多くは地面に近い位置で展開される。一方、バスケットボールやハンドボール、またはサッカー等の球技は、敵に攻撃を阻まれることなくゴールに到達することを目指し、より可能性を高めるための戦術として人の身長よりも高い空間を用いた味方へのパスを行う局面が非常に多

¹ 「London 2012 Summer Olympics」, <http://www.olympic.org/london-2012-summer-olympics> (参照 2015-12-2)。

く見受けられる。また、棒高跳びや砲丸投げ、ないしはフィギュアスケートの様な競技では、試合に勝つことを目指し競技者自身が高く跳躍したり、遠方に用具を投擲したりする光景が見受けられる中で、観戦者はそうした競技者や用具が空中を華麗に舞う姿に魅せられている。これはスポーツにおいて空中を用いることが効果的な戦術であり、競技者だけでなく観戦者にとっても刺激的な体験が提供されていると言える。では、もし空中において体験者が自由に動き回ったり、敵や味方との攻防を繰り広げたりする様な試合の展開がなされたら、体験者と観戦者はどのような新しいスポーツ体験を得ることができるだろうか。



図 1.1: ロンドンオリンピックにおける男子陸上 100m 決勝の様子²

ところで、魔法という概念が存在する空想科学の世界を描いた、ファンタジー小説である『ハリー・ポッター [3]』では、箒にまたがった人間が空を自由に飛び回り空中を飛び交うボールを求め得点を競う、空中をフィールドとした「クィディッチ (図 1.2)」と呼ばれる球技が行われ、同シリーズの世界観を象徴するスポーツとして一般に知られている。ファンタジーの世界を飛び越えた現実世界でもクィ

²出展:「London 2012 Summer Olympics」, <https://www.olympic.org/london-2012> (参照 2016-6-11)。

ディッチを模したスポーツが広く展開されていることから，同シリーズの人気が見て取れるだけでなく，空中での活動や魔法と言った私たちが持たない能力への羨望が垣間見える．



図 1.2: 『Harry Potter [3]』における空中をフィールドとしたスポーツ「クィディッチ」³

近年ではより速く移動する能力を獲得するために，より高さを有したフィールドで競技を行うために，より強い身体能力が生み出すパフォーマンスを発揮するために，危険さや華麗さ，過激さを伴いながら私たちが有する潜在的な欲求の赴くままに競技を行うエクストリームスポーツと呼ばれるスポーツの分野が確立している．従来のスポーツとエクストリームスポーツの違いは，試合という仕組みで競技者が守られているか，あるいは命懸けの瞬間が次々と競技者に訪れるかという点である．エクストリームスポーツには，高度数千メートルの空から落ちるスカイダイビング(図 1.3)やバイクに乗りながら数十メートルの距離を飛んだり技を決めたりするフリースタイルモトクロス，水面から空に飛び上がるフライボード等の競技が含まれる．エクストリームスポーツを通じ人間の身体能力が飛躍的に向上させている要因として，フロー状態という概念が確立されたことが考えられる．『超人の秘密：エクストリームスポーツとフロー体験 [4]』の中では，フロー状態になるための中心的要素として「明確な目標」，「集中」，「自己意識の消失」，

³出展:「BUSTLE」, <http://www.bustle.com/articles/80743-how-to-play-quidditch-beer-pong-so-you-can-finally-ease-the-ache-of-never-getting> (参照 2016-6-11)．

「時間感覚の変化」,「直接的かつ即時のフィードバック」,「能力レベルと挑戦のレベルのバランス」,「状況を自分でコントロールしている感覚」,「その活動自体が内発的な報酬をもたらすため,動作がつかない」,「身体的ニーズへの認識の欠如」,「没頭」という10個の要素が挙げられている。競技者は,上に挙げた要素のうち幾つかの条件下に置かれたとき,集中力が極限まで研ぎ澄まされた結果得られる没入状態となり,過激なパフォーマンスを発揮することが可能となるフロー状態が引き起こされる。また,そうしたスポーツの台頭は,テクノロジーの発展と普及に依るところが大きい。例えば,スカイダイビングにはヘリコプターであり,フリースタイルモトクロスにはバイク,フライボードには水上バイクが,それぞれの競技を実現させている。前述したようなスポーツは,スポーツにおける境界線を三次元空間に併合することで,多くの身体拡張感を体験者に与える [5]。しかしながら,それらのエクストリームなスポーツは,同時に多くの人々が体験することは,非常に困難であると同時に,非常に危険である。もし私たちが,身体性を伴っていながらも安全であり,競技者にとって制限のない,高さを有するフィールドを提供することができるとしたら,新しいスポーツを体験することができる可能性を示唆している。

1.2. 超人スポーツ

2020年に東京でオリンピック・パラリンピックが開催されることが決まり,選手は自国大会への出場に向け大いに練習に励んだり,また企業や自治体等は大会実施に向けた様々な施策を導入したり,私たちのスポーツに対する関心は,日々高まっている。しかし,自国で開催されるオリンピック・パラリンピックに自らがアスリートとして参加する選手は,どれほどいるだろうか。前述したロンドンオリンピックでは293人の選手が参加するに留まっており,自国大会でも同様のものであることが予想され,日本国の人口と比較すると些か少ないと言える。自国大会への出場を目指す選手にとっては,限られた出場枠の中に名を連ねるため,より一層の努力を積み重ねるモチベーションに成り得る一方で,オリンピック・

⁴出展:「スカイダイビング」, <https://ja.wikipedia.org/wiki/スカイダイビング> (参照 2016-6-11)。



図 1.3: スカイダイビングで上空から降下している様子⁴

パラリンピックの競技水準とかけ離れている競技レベルの選手や、アスリートとして活動をしてない人には、甚だ関係のないことのように感じられる。2011年に改正された「スポーツ基本法 [6]」では、「スポーツを通じて幸福で豊かな生活を営むことは、全ての人々の権利であり、全ての国民がその自発性の下に、各々の関心、適正等に応じて安全かつ公正な環境の下で日常的にスポーツに親しみ、スポーツを楽しむ、又はスポーツを支える活動に参画することのできる機会が確保されなければならない」と、スポーツをする権利が明文化されている。

上述したような考えを更に一步推し進め、「すべての参加者がスポーツを楽しめる」、「技術とともに進化し続けるスポーツ」、「すべての観戦者がスポーツを楽しむ」という三原則に従い、既存スポーツの拡張を行うだけでなく、新たなスポーツをデザインし、また時代に適応した競技を生み出し、スポーツの得意不得意や年齢、障害、資格、体格、性別等、人と人の差により生じるあらゆる障壁を乗り越え、スポーツとテクノロジーの融合により人間の身体能力を補綴・拡張する人間拡張工学に基づいた「超人」としてフィールドで競技を行う、いつでも、どこでも、誰もが楽しむことのできる新たな「人機一体」の新領域のスポーツを創造

するチャレンジが「超人スポーツ(図 1.4)」であり，誰もが等しく超人アスリートとしてスポーツを行うことのできる可能性を示唆している．



図 1.4: 超人スポーツの概念

1964年10月10日に東京で実施された第18回夏季オリンピックの開会式から50年後という節目に当たる2014年10月10日に学術コミュニティである超人スポーツアカデミー⁵が発足し，さらに本格的なプロジェクトとして推進するため，超人スポーツアカデミーを母体とする超人スポーツ協会⁶が2015年6月2日に設立されたことを皮切りに，超人スポーツの創造や実現に向けた動きが各所で起きている．超人スポーツ協会は，デザインとエンジニアリングの両面からアプローチすることで，スポーツクリエイションの実現を目指している．スポーツデザインとは既存のスポーツ道具と様々なデバイスや素材を組み合わせながら，スポーツのルールに対して仮説・設計・試作・実行の4つのプロセスを行うことであるのに対し，スポーツエンジニアリングとは設計されたスポーツを実行するために必要なテクノロジーを開発することである．従って，スポーツデザインとスポー

⁵「超人スポーツアカデミー」, <http://superhuman-sports.org/academy/>(参照2015-12-11).

⁶「超人スポーツ協会」, <http://superhuman-sports.org>(参照2015-12-11).

ツエンジニアリングのサイクルを回していく中で、相互作用的にさらに適切なものとするを意図している。こうした活動は、デザイナーとエンジニアだけでなく、研究者やスポーツに関心を持って得意としてきたアスリート、あるいはスポーツに無縁だと考えていた人をも巻き込み、自らがスポーツを創造し、また自らがスポーツに参加することのできる可能性を示唆している。同年10月10日には、東京都北区荒川河川敷で行われた2015北区花火会⁷において一般の来場者を対象とした超人スポーツトライアル⁸を開催し、同年7月に行われた超人スポーツハッカソン⁹にて生まれた幾つかの超人スポーツのデモンストレーション及び体験会(図1.5)を行うなど、地域との連携を図りながら活動の規模を広げようと試みている。また、同年9月には日本デザイナー学院¹⁰と共同で超人スポーツイ



図 1.5: 超人スポーツ競技の1つである「Bubble Jumper」のデモンストレーション

⁷2015 北区花火会実行委員会,「北区花火会」, <http://www.hanabi-kita.com>(参照 2015-12-10).

⁸「2015年10月10日「超人スポーツトライアル」in「2015北区花火会」」, <http://goo.gl/nHC1CH> (参照 2016-6-12).

⁹「超人スポーツハッカソン開催のお知らせ」, <http://goo.gl/MK8ns6> (参照 2016-6-12).

¹⁰学校法人呉学園専門学校日本デザイナー学院,「日本デザイナー学院」, <http://ndg.ac.jp> (参照 2016-6-11).

ラスト大会¹¹が開催された。「あなたが考える未来のスポーツ」をテーマに、日本デザイナー学院のイラストレーション科の学生から100点の作品が集まり、日本デザイナー学院の学園祭内にて展示及び来場者による投票が行われた。様々な着眼点から未来の超人スポーツのイラストが描かれた中で、空中をフィールドとした作品(図1.6)が幾つか優秀賞を受賞した。こうした事実が示す様に、生まれながらにして空を自由に飛ぶことのできない私たちが、まるで鳥の様に空を飛び交うことのできるテクノロジーが開発されることを期待し、さらには空でスポーツが展開される未来が実現することを多くの人が夢見ている。



図 1.6: 空中をフィールドとした未来のスポーツのイラスト(出展: 超人スポーツイラスト大会)(左図: ウエタク, 「Snatchgram」)(中央図: 小谷, 「Airspace」)(右図: M.H, 「ホバー・シューター(仮)」)

1.3. 本研究の目的

上で述べた通り、私たちは生まれながらにして空での活動に憧れを抱き、さらに誰もが空でスポーツをプレイしている様な未来を多くの人が想像している。こうした背景を踏まえ、空中における没入型のスポーツを実現するため、図3.1の様に体験者があたかも空を自由に飛んでいるかのような身体拡張感を工学的に実現することを本研究の目的とする。本稿における空中スポーツとは、超人的な能力を獲得したプレイヤーが空中で行うスポーツを指す。そこで、「空中をフィールドとするスポーツであること」「身体能力を超えたパフォーマンスであること」

¹¹ 「超人スポーツイラスト大会 作品展示」, <http://goo.gl/u0zSUg> (参照 2016-6-11)。

「ルールの下で公正に競技が行われていること」に該当するものを空中スポーツとする。スポーツとテクノロジーの融合で身長や体格といった身体的な制限を飛び越えることにより、身体能力の拡張を行い、誰もが新しいフィールドで、新しいスポーツを楽しむことができる。さらに、それらの新しいスポーツを体験しているとき、超人的な力を手に入れる可能性を見出すことができる。一方、当然ながら私たちは鳥のような飛行能力を物理的に構築することは困難であることから、体験者にとって本質的に飛行しているかのような感覚を得ることができれば良いと考えられる。従って、本研究では体験者が地上にいながらにして空中にいるかのような遠隔存在感を得ながら、まるで体験者自身の身体能力が拡張された感覚を得ることのできるシステムを提案する。

1.4. 本論文の構成

本研究では、本章で述べた背景と目的を基に、没入感及び身体拡張感を伴った飛行体験の工学的実装について検討し、体験可能なシステムを構築し、システムを用いた空中スポーツの提案を行う。第1章では、本研究の背景及び目的について述べる。第2章では、本研究に関する関連研究について述べる。主に遠隔地における臨場感・没入感を伴う活動、感覚制御による身体拡張について、4つの要素に分けて示す。第3章では、本研究で提案する概念を飛行型トレイグジスタンスと名付け、システムを実現するための課題と構成要素について述べる。第4章では、本研究で行った飛行型ト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。また、実装したシステムの評価及び考察を行う。第5章では、本研究で実装した飛行型トレイグジスタンスシステムを用いた没入型空中スポーツの提案を行う。また、提案したスポーツを用いた本システムの評価及び考察を行う。第6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. スポーツにおけるドローンの活用

第1章で述べたように、近代スポーツはルールの改変に伴う競技内容の専門化に加え、技術の進歩による競技水準の高度化が日々進歩を遂げている。そこで、スポーツとテクノロジーを融合させた4つの事例を以下に挙げる。

フィールドを駆け回るようなスポーツを競技する場面において、競技者との位置関係を計測しながら追跡する自律飛行ヘリコプターによる空中自由視点でのコンテンツ撮影が提案されている [7]。図 2.1 では、フィールドの広さや路面状況等の環境に制約されることなく容易に利用できるカメラワーク手法を提案することで、機材を設置するための場所の安定感や撮影者のカメラワークの技量を問わず、競技者の身体動作を余すことなく記録するシステムを示している。

D'Andrea ら [8] は、モーショントラック技術を用いたアルゴリズムにより自動制御飛行されたクアッドコプターをスポーツにおける1人のプレイヤーのように考え、人間が投げたボールをネットを用いてキャッチしたり、それを正確に返球したり、あるいはバランスを取りながら機体の上に立てられた棒を倒すことなく飛行したりするシステムを示している。2013年に開かれた TED Global 2013¹ では複数台のクアッドコプターを用いたデモンストレーションが行われ、多くの観客がその光景の一部始終を興味深く見守った。

ドローン（無人航空機）を用いた FPV（First Person's View）レースは国内外で多数開催されており、空中で容易にできるモータースポーツという分野を開拓

¹ 「TED Ideas worth spreading」, <https://www.ted.com> (参照 2015-12-12)。

² 出展: 「Athletic machines: Raffaello D'Andrea at TEDGlobal 2013」, <http://blog.ted.com/athletic-machines-raffaello-dandrea-at-tedglobal-2013/> (参照 2015-12-12)。



図 2.1: 空中自由視点でのコンテンツ撮影手法である「Flying Eye [7]」



図 2.2: D'Andrea によるクアッドコプターを用いたデモンストレーションの様子²

し、ドローンをスポーツエンターテインメントとしてコンテンツ産業へと展開した実例を示している。また、ドローンの挙動は操縦者の指先の繊細な動きにより制御されているため、ドローンがスポーツのプレイヤーとなる可能性を示唆している。

Nittaら [9] は、空中に浮遊しているドローンを球技におけるボールとし、ボールの速さを意のままに変化させることで、身体や運動能力の差を乗り越え、誰もが豪速球を投げられたり、あるいは捕獲する前に速度を緩めることで、どんな速さのボールでも掴めたりするようなキャッチボールの提案（図 2.3）を行っている。また、ボールが空中を浮遊し続けることから、空中を使ったスポーツの意義や多様性を論じている。



図 2.3: 球技におけるボールとしてドローンを活用した「Hoverball [9]」

これらの事例から、ドローンは路面状況に依存することのない移動能力を活かした機動性により、空という空間を有効に活用することで、私たちの生活様式を変化させる可能性を示すだけでなく、実空間における空中をフィールドとしたスポーツ分野の出現を示唆している。

2.2. VRを用いた飛行体験の演出

一方、飛行体験の演出方法は以前よりVR (Virtual Reality [10]) の研究として行われている。本節では、以下に6つの事例を挙げる。

1996年にPauschら [11] は、The Walt Disney Company³ が製作したアニメーション映画であるアラジン⁴ に登場する魔法の絨毯に体験者が乗っているかのような体験ができるVRアトラクション(図2.4)を実現した。体験者は頭部搭載型



図 2.4: 『Aladdin』の魔法の絨毯に乗っているかのような体験を提供する装置 [11] (左図: 体験者がHMDを通して見ている映像)(右図: コックピットの全体像)

ディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) を通してアラジンの世界観の映像を見ることで、アニメーションの世界への没入体験を実現している。椅子に座りながら板型ハンドルを操作することで、魔法の絨毯を乗りこなすかのような体験をすることができる。2001年よりディズニーパークにてアトラクションとして展開されているソアリン [12] では、前方に設置された大型スクリーンにカリフォルニアの大自然を空撮した映像が表示され、宙吊り状態となった体験者の座席が前傾し、さらに風や匂いを呈示することで、カリフォルニアの空を飛んでいるかのような体験を提供している(図2.5)。視覚だけでなく身体感覚や皮膚触覚にも情報を呈示することで、浮遊感の演出を行っている。このような研究が行われている背景として、人間は潜在的に空を飛ぶという体験へ憧れを抱いていることが考

³ 「Disney」, <http://www.disney.co.jp/home.html> (参照 2016-6-12)。

⁴ 「アラジン」, <http://kids.disney.co.jp/character/s/aladdin.html> (参照 2016-6-12)。

えられる。



図 2.5: 座席の宙吊りや前傾により浮遊感を演出するアトラクション「ソアリン [12]」

同年に Iwata [13] は、空中に浮遊している飛行船に広角カメラを搭載し、ドーム型ディスプレイの内側で体験者が映し出された映像を見ることで、まるで幽体離脱したかのような感覚を体験することのできるデバイスである「Floating Eye」を提案している（図 2.6）。体験者は飛行船に繋がれた紐を引っ張りながら移動することで、視野の誘導を行っている。

一方、Oculus Rift⁵ やハコスコ⁶ の登場により VR 体験用ハードウェアの民主化が起きたことで、更に多くのコンテンツが提案されてきている。Itoh ら [14] は、無人航空機（ドローン）に積載された 6 台のカメラで撮影された 6 つの映像を統合することで全天球動画を作成し、HMD を装着した体験者が地上で跳ぶ動作に合わせてディスプレイ上の映像も上空に移動することで、まるで体験者自身が浮遊しているかのような錯覚を覚え、身体が拡張された感覚を生成することを実現している。図 2.7 は、体験者が見る映像の一例を示している。

⁵ 「Oculus Rift: Oculus」, <https://www.oculus.com/en-us/rift/> (参照 2016-6-17)。

⁶ 「スマホ VR のハコスコ: 360° 動画で手軽に VR 体験」, <http://hacosco.com> (参照 2016-6-17)。



図 2.6: 幽体離脱したかのような体験をするデバイス「Floating Eye [13]」



図 2.7: Hiyoshi Jump [14] で体験者が見る映像の一例

また，Birdly [15] では，HMD と運動制御ユニットを用いる事で体験者が飛行しているかのような感覚を経験することを可能にしている（図 2.8）. 鳥が飛行する時のように，うつ伏せの状態である体験者が腕全体を動かすことで VR の世界の中を飛び回ることができる．また，飛行に応じ体験者の前方に取り付けられた送風機により風が送られることで，体験者に浮遊感を提供している．しかし，体験者は HMD を通して見ている世界に対してのみ体験者の行動が反映され，システムを通じた体験者の行為が現実の世界に対し影響を与えることは不可能であり，制御ユニットに身体が固定されている事により，即時的且つ相互作用的な行為が要求されるスポーツ体験を創造することはできない．



図 2.8: 鳥になる体験を提供するインターフェース「Birdly [15]」

そして，座間味ロケットジャンプ [16] では全天球実写映像の中を体験者が飛行しているかのような体験をすることができる．体験者が実際に足でジャンプした後，体験者が見ている映像に合わせて背負ったジェットパックや前方の送風機から空気が噴出されながらハーネスが括り付けられた吊り上げ式のデバイスによって体験者が宙吊りされた状態となることで，ジャンプ，空中遊泳，そして着地の演出を行っている．

これらの事例で挙げたように，こうした技術の一般への浸透や技術の進歩に伴うコスト低下が起因し，VR 技術を用いることで体験者に容易に飛行体験を提供



図 2.9: 「座間味ロケットジャンプ [16]」を体験している様子

することを実現している。また、送風機を用い体験者に対して風を送ったり、体験者のコックピットを設計したりことで、浮遊感を創出している。しかし、VR 体験には予め記録された映像がを用いられ実時間性や実空間性を伴っていないため、インタラクティブなスポーツの競技に影響を与えることはできない。

2.3. ドローンを用いた飛行体験

VR 技術を用いた飛行体験には実時間性や実空間性を伴わせることはできない。そこで、上述した様にスポーツとテクノロジーを融合させた試みとしてドローンが活用されている様に、実時間性を伴いながら実空間に影響を与える飛行体験として、ドローンを用いることは一般に有用であると言われている。

1971 年、Vance ら [17] は固定翼機のドローンの操縦席にカメラを搭載し、遠隔地にいる操縦者が見ながらドローンの操縦を伝送することで、操縦者はドローンの操縦席にいるかのような感覚で機体の操縦を行うことを実現している。

2011年の東日本大震災の際には、カメラが搭載されたヘリコプタを遠隔操作することで、国際原子力事象評価尺度（INES）において最悪のレベル7に分類されながらも、誰も危険な状況に身を置くことなく、刻一刻と変化する福島第一原子力発電所の状況の撮影を行い、私たちの元にリアルタイムに情報を提供した。また、ニュージーランドのスタートアップ企業である Flirtey [18] は、遠隔操作された回転翼機のマルチコプターを用いた宅配便のアメリカ・バージニア州で行われた試験において、陸路では1時間以上かかる場所への配達を、僅か3分にまで短縮できることを実証し、空路を用いることがインフラ整備の解決策の一つとなり得る可能性を示した。

一方で、ドローンを正確に操作するためには、ジョイスティックや複数のボタンを伴った、プロポーション方式を用いた一般的な送受信機の使用方法を習得する必要があり、長期に渡り訓練をしなければならない。Higuchi ら [19] は、体験者の頭部をトラッキングすることで、体験者の頭部動作とドローンの制御を同期するより直感的な操作メカニズムの提案を行い、従来の操作手法より優位性を持つことを示した（図 2.10）。また、ドローンの制御に体験者の身体動作を伴うことにより、ドローンの移動距離を体験者自身の身体感覚から推定することを可能としている。

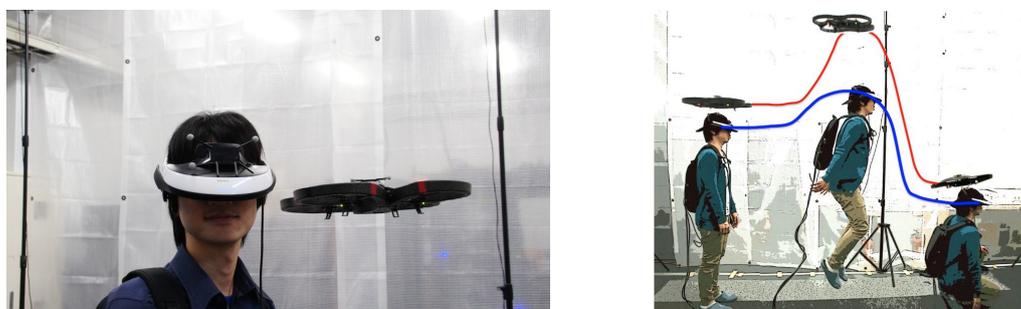


図 2.10: 直感的な操作メカニズムを用いたドローンの制御メカニズムを提案している「Flying Head [19]」

古川ら [20] は、ドローンの飛行高度の変化に応じ、搭載された両眼カメラの距離を変化させることで、体験者自身の身体スケールが変化したかのような感覚を提供するシステムの提案を行っている（図 2.11）。ドローンを操作する技能コスト

を大幅に削減するための手法を提案するに留まらず，体験者の視点が遥か上空に存在し，また体験者の身体そのものが巨人として遠隔地に存在し，あたかも巨人化したかのような感覚を体験するということは，超人的な身体能力を獲得できる可能性を示唆している．

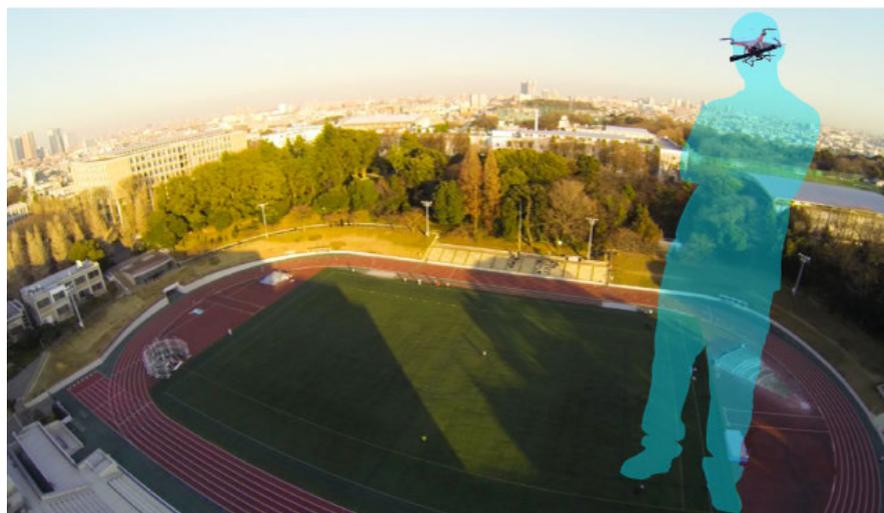


図 2.11: 古川ら [20] が提案したドローンを用いて身体スケールを変化させるイメージ

上述した事例は，ユーザの身体動作を用いたドローンの操作手法を提案することで，より直感的で簡易的な操作を実現するだけでなく，ドローンが体験者自身の身体の拡張であるかのような感覚を覚え，あたかも空中に浮遊しているかのような体験をすることができる．私たちが生活できる範囲は，私たち自身の身体による移動能力に依存し，一方で身体の安全を確保するため，私たちの身の危険が案じられる場所へは，立ち入ることが制限される．そこで，遠隔地や災害現場，あるいは地上から離れた空間で安全性と容易性，そして路面状況等の環境に依存しないシステムによる安定性を伴いながら自由に行動することを目的とし，遠隔コミュニケーションや災害救助支援，あるいはエンターテインメント等の分野でドローンが用いられている．路面状況に依存することのない移動能力を持つ遠隔操作ロボットの一種であるドローンに自己投射することで，私たちの身体能力や環境に依存することなく三次元空間を自由に行動できることを示している．

2.4. テレイグジスタンス

これまで述べてきた様な VR 技術を用いた没入感や遠隔存在感は，一般にテレイグジスタンス [21] と呼ばれている．テレイグジスタンスとは，遠隔地に居ながらにして，あたかもその場にいるかのような臨場感と没入感を得ながら，人間にとって自然な三次元空間をリアルタイムに自由に行動する事で，その環境とのインタラクションを生み出す概念である（図 2.12）．



図 2.12: テレイグジスタンスの概念⁷

1998 年に山澤ら [22] は，遠隔地の情景を体験者の視線に追従して提示することを目的とした，見回しに関する時間遅延がほぼ生じないテレプレゼンスシステム

⁷出展：「細やかな触感を伝えるテレイグジスタンス遠隔操作ロボットを開発」，http://www.jst.go.jp/pr/announce/20120711/index.html?utm_medium=twitter（参照 2015-12-13）．

を提案している．回転軸を持った機構のカメラを用いた際，視線方向と提示される画像の方向に映像遅延が発生してしまう．そこで，全方位画像を用いることで体験者の視線方向の透視投影画像を生成・提示することにより，実時間テレプレゼンスを可能としている．また，各体験者に対し生成する画像の方向を対応させることで，複数人が同時に異なる方向を見渡すことができるようなシステムへの拡張が容易であるという特徴を持っている．

株式会社 Asics [24] は，マラソンランナーの視点をリアルタイムに共有できるシステムを構築している．スポーツをプレイしている競技者が装着された全天球カメラで映像を撮影し，その動画を遠隔地に実時間性を持って配信することで，遠隔地にいる観戦者が臨場感を得ながら観戦することができる．

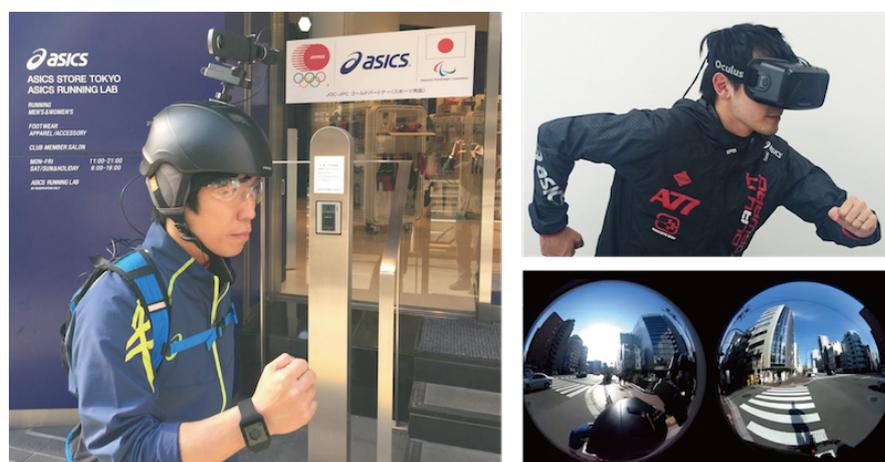


図 2.13: 株式会社 Asics が構築した，遠隔地にいる観戦者が臨場感を得ながら観戦することができるシステム [24]（左図：現地にいる競技者）（右上図：遠隔地にいる観戦者）（右下図：観戦者が HMD で見ている映像のイメージ）

Kasahara ら [23] は，他人が置かれている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プラットフォームとして，人間が他人に没入するインタフェースを提案している．Body と呼ばれる実環境にいる他人の一人称視点の映像を，Ghost と呼ばれる遠隔地にいる体験者が観測することで，実環境における Body ユーザの体験を Ghost ユーザに伝送するものである．さらに，SLAM に基づいたモデリングにより，Ghost ユーザは自由な視点位置で環境を観

測することを可能とすることで，擬似的な「体外離脱視点」を提供している．図 2.14 は，人間が他人に没入するインタフェースの概念を示している．

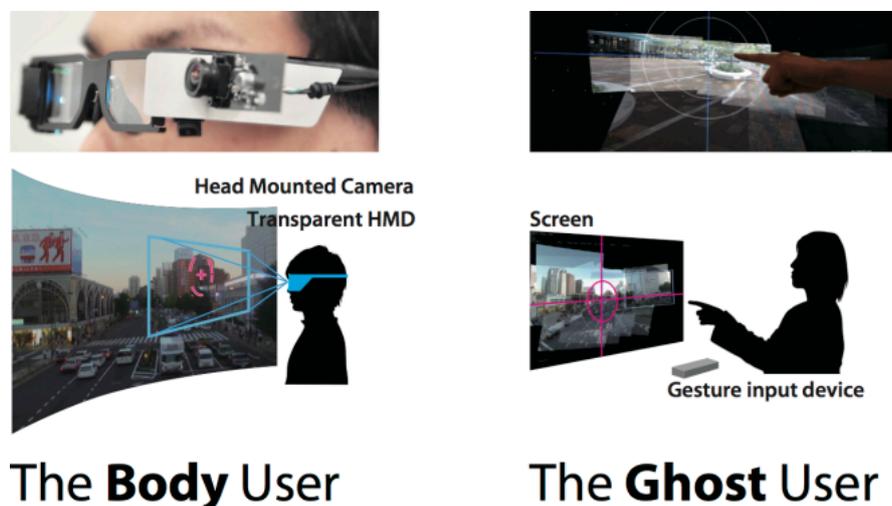


図 2.14: JackIn [23] における，Body ユーザと Ghost ユーザの概念

Charith らが開発した TELESAR V [25] では，オペレータがスレーブロボットに対して自己投射し，あたかも遠隔地に存在しているかのような臨場感を得ながら遠隔作業や遠隔コミュニケーションを行うため，視聴覚と触覚を融合させた情報をリアルタイムに遠隔地に伝送することで，「見たところを見たように触る」システム（図 2.15）を実現している．

廣多が提案した TELUBee [26] では，可動式ロボットを遠隔操作することで遠隔地で自由に動き回り，瞬時に移動したかのような感覚を体験することができる（図 2.16）．また，ロボットが 1 台だけでなく様々な場所に点在され，それらに対し意のままにログインすることで，遠隔地への瞬間移動体験を実現している．

Double Robotics 社⁸の Double は，遠隔地からインターネット経由でロボットを手元のデバイスのキー入力により遠隔操作し，またロボットに装着されたタブレット型 PC にユーザの顔をリアルタイムに表示させながら建物内を自由に移動したり会議に参加したりできるテレプレゼンスロボットであり，遠隔地に存在す

⁸Double Robotics, Inc., 「Double Robotics」, <http://www.doublerobotics.com/> (参照 2015-12-9) .

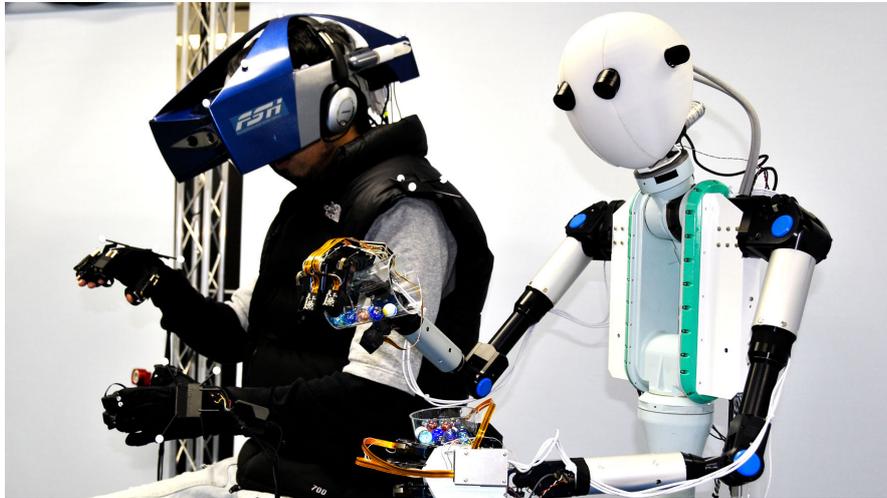


図 2.15: テレイグジスタンスのプラットフォームである「TELESAR V [25]」

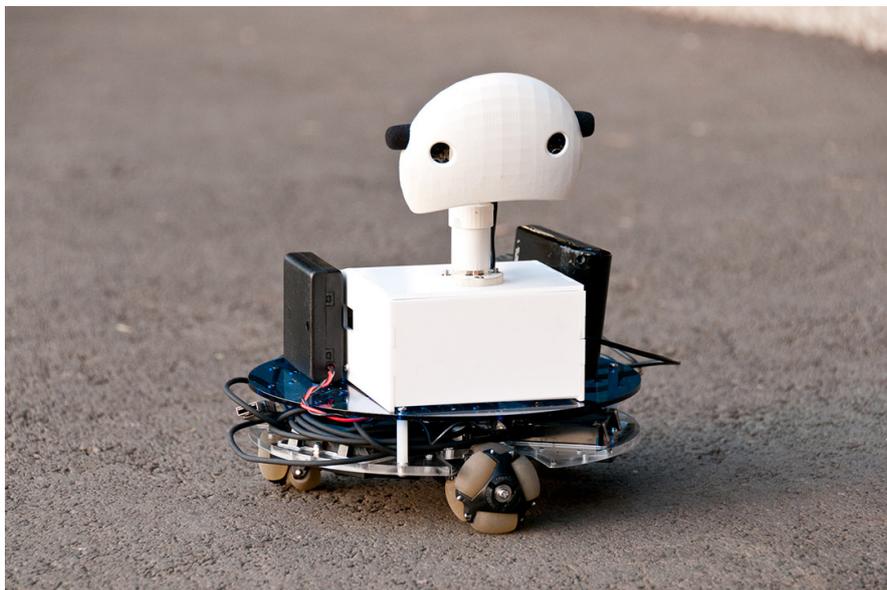


図 2.16: 可動型テレイグジスタンスロボット「TELUBee」[26]

る他者との円滑なコミュニケーションを可能としている。

これまで挙げた事例では、遠隔存在感を得ながら三次元空間をリアルタイムに自由に行動し、遠隔作業や遠隔コミュニケーションを実現するために、視聴覚や触覚、身体動作の伝送を行い、遠隔操作ロボット制御の精度や、コミュニケーションの質を向上を図っている。また、ユーザがロボットを遠隔操作するための方法として身体動作とロボット制御の同期によるものや、キー入力によるものを用いることで、遠隔地においてユーザが自然であると感じることのできる制御を実現している。しかし、人間の身体機能を模した容姿であるロボットの多くは常に地面に機体を接することで安定性や移動性を実現しているため、活動範囲は路面形状や建築物の構造に依存している。

2.5. 本章のまとめ

これまで、私たちが活動する空間の拡張を目的とした身体拡張に関する研究は多く行われてきた。可動式の座席を用い宙吊りや前傾をさせることで、浮遊感を提供するシステムが提案されている。遠隔存在感を得ながら三次元空間をリアルタイムに自由に行動し、遠隔作業や遠隔コミュニケーションを実現するために、視聴覚や触覚、身体動作の伝送を行い、遠隔操作ロボット制御の精度や、コミュニケーションの質を向上を図っている。また、ユーザがロボットを遠隔操作するための方法として身体動作とロボット制御の同期によるものや、キー入力によるものを用いることで、遠隔地においてユーザが自然であると感じることのできる制御を実現している。しかし、人間の身体機能を模した容姿であるロボットの多くは常に地面に機体を接することで安定性や移動性を実現しているため、活動範囲は路面形状や建築物の構造に依存している。一方で、体外離脱体験のような実空間を自由に動き回ることのできる視点を獲得したりするため、遠隔操作ロボットの一つであるドローンを用いることで、私たちの身体能力や環境に依存することなく、スポーツや災害救助支援等を目的とし、三次元空間をリアルタイムに自由に行動することを実現している。

そこで、本研究ではドローンを用いることで飛行する感覚を体験できるシステ

ムについて設計し，体験者が空中で活動しながら競技を行うことのできる新しいスポーツについて検討する．

第3章

飛行型トレイグジスタンス

3.1. 飛行型トレイグジスタンスの提案

第2章で述べた様に，スポーツの場面においてドローンを用いたトレイグジスタンスを行うことで，空中でのスポーツを実現することができる．そこで本節では，飛行型トレイグジスタンス（図3.1）の概念を提案する．飛行型トレイグジスタンスの目的は，体験者が地上にいながらにしてあたかも空を飛んでいるかのような体験を提供することである．



図 3.1: 飛行型トレイグジスタンスのイメージ

飛行型トレイグジスタンスは，遠隔地に存在するロボットと体験者側のコック

ピットから構成されている。ロボットは空中を飛行し、体験者がコックピットを介して飛行型ロボットにログインすることで、体験者自らが空中を飛行しているかのような体験をすることができる。体験者と飛行型ロボットが一体化することによって、身長や体格といった身体的な差を飛び越え、誰もが「空」という新たなフィールドを獲得することで、空中スポーツを楽しむことができるようになる。また、飛行型トレイグジスタンスにおける体験者とロボットの関係性は1対1であるが、複数人の体験者と同数のロボットが存在し、体験者がそれぞれのロボットにログインすることで、空中でのコミュニケーションや旅行、あるいはスポーツ等、目的に応じた飛行型トレイグジスタンスを用いたアプリケーションが考えられる。

例えば、1対1で行われる地上スポーツとして、卓球が挙げられる。卓球は体験者が卓球台を挟むような形で存在し、体験者は片手でラケットを持ち、ラケットでピンポン球を打つスポーツの競技である。相手体験者が左右に打ち分ける球を、体験者は卓球台の端を左右に動き回ることによって球に追いつき、打ち返すことができる。飛行型トレイグジスタンスロボット同士の場合、体験者の手は使わず飛行ユニットに取り付けられたラケットのみで球を打ち返す(図3.2(a))。飛行ユニットは左右だけでなく、垂直方向への移動も可能であったり、その他環境が多様に変化したりする事で、体験者だけでなく、観客にとってもエキストリームな体験ができる。また、飛行型トレイグジスタンスロボットと体験者が協力する卓球の場合、プレイの幅が広がるだけでなく、従来不可能であったような戦術によって試合が展開される可能性を示唆している。

トライアスロンは、1人の体験者が1つの試合の中で、自転車、水泳、長距離走の3つの異なるステージをプレイし、合計の時間で他の選手と競争するものである。1つの試合の中で異なるステージが存在し、1人の体験者が長距離走と飛行をそれぞれするために、人間とドローンとが協力する空中スポーツである(図3.2(b))。前半部分では体験者が通常のレースの様に自身の足を使い、地上で走る。後半部分では空中に設計されたコースを通り、ゴールに向かって飛行する。空中に設計されたコースを通るために、速さ、且つ正確さが要求される。体験者は、地上で見ることのできる街並みと空中からの景観をそれぞれ楽しみながらプレイする事が

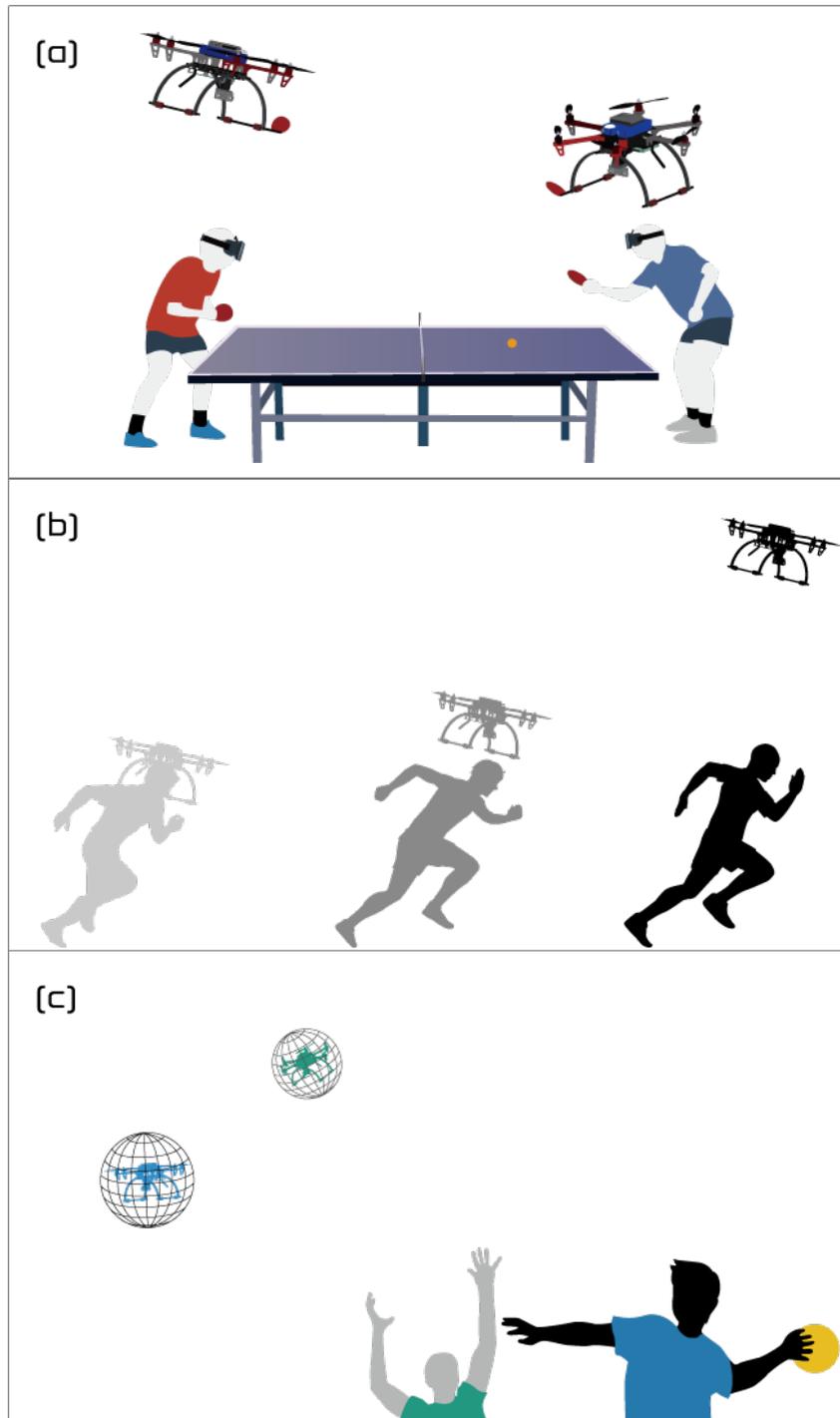


図 3.2: 飛行型トレイグジスタンスのアプリケーション例

可能となる。

ドローンは自らの機体を浮上させ自由に飛行する事を可能にする揚力を得るため、機体の上方から空気を取り込み、下方に対して吐き出す。この原理を利用し、球体状のプロペラガードを装着したドローンに対し体験者がボールを投げ、プロペラガードの表面に吸い付かせる。1人の体験者が、自身の手足を有効に使いながら、乗り移ったドローンでもプレイし、相手の身体とドローンの妨害を避けながらゴールへとボールを運ぶ空中スポーツである(図 3.2(c))。従って、ドローンがボールを運搬する時、自らの機体のみでボールを保持する事となる。スポーツを行うためのフィールドの中において、ボールを保持しながら自由に移動する事が可能となる。さらに、ボールを投げる体験者が HMD を装着し、ビデオシースルービューと FPV を切り替えながら、体験者の頭部動作でドローン进行操作する事によって、地上と空中を行き来する様な、フィールドを大きく使った白熱した試合展開が予想される。

3.2. 飛行型トレイグジスタンスシステムの構成要件

前節で述べた通り、飛行型トレイグジスタンスシステムは主にロボットとコックピットから構成される。そこで、飛行型トレイグジスタンスを工学的に実現するための構成要件を以下で述べる。

本研究における飛行型トレイグジスタンスの特徴は、地上にいながらにして空中にいるかのような感覚が提供され、空中スポーツを体験することができる点である。従って、飛行型トレイグジスタンスシステムの構成要件は、遠隔存在感、自在性、浮遊感の3要素であると考えられる。

体験者に遠隔存在感を提供し、あたかも自分がフィールドにいるかのような感覚を得ることができることで、体験者自身が空中でスポーツを行っているかのような体験をすることができる。そこで、遠隔存在感を創出するため、体験者の視野角とロボットの視野角の同期を行う。没入型の空中スポーツ体験を目的としていることから、撮影された映像が実時間性を持ち地上にいる体験者にフィードバックされることが求められる。飛行型トレイグジスタンスシステムにおける視覚情

報の伝送システムの目標は、我々が自身の目で直接見て得られる視覚と等価な感覚が伝送系を介して得られることである。

ゴールを目指す時やボールを用いたインタラクションを行う時、相手との攻防を展開する時等、スポーツの凡ゆる局面で競技者は速い、高い、強い身体能力を求められる。また第1章で述べた通り、スポーツの凡ゆる局面において体験者の意のままに自在に動くことで高い競技力を発揮することができる。従って、地上にいる体験者の能動的な身体動作によって正確にロボットが制御され、体験者が遠隔地を自在に動くことのできる必要がある一方で、移動するだけでなく、その場に留まり続けることのできる必要が求められるため、マルチコプター型のドローンを用いる必要がある。また、体験者の身体動作による飛行型ロボットの制御を行う事で、従来のような手元で操作する形のコントローラーが排除されるため、体験者の手足が自由となり、飛行型ロボットと他の体験者の関係性への関与に止まらず、飛行型ロボットと飛行型ロボットに乗り移っている体験者自身、あるいは飛行型ロボットに乗り移っている体験者と他の体験者とが協力して行うような、様々な形でのインタラクションが行われる可能性を示唆している。

また、飛行しているかのような身体拡張感をさらに演出するため、体験者が浮遊感を得られることが求められる。第2章で述べた通り、体験者が飛行している時に感じるであろう情報を提示することで、浮遊感を創出することができる。そこで、身体拡張感を創出することのできるコックピットの設計を行う。

3.3. 本章のまとめ

本章では、飛行型トレイグジスタンスの概念の提案を行った。飛行型トレイグジスタンスの目的は、体験者が地上にいながらにしてあたかも空を飛んでいるかのような体験を提供することである。しかしながら、私たちは鳥のような飛行能力を物理的に構築することは困難であることから、体験者にとって本質的に飛行しているかのような感覚を得ることができれば良いと考えられる。そこで、体験者自身の身体能力が拡張された感覚を得ることのできるシステムの提案を行った。

また、飛行型トレイグジスタンス実現におけるシステムの構成要件を述べた。

本研究における飛行型トレイグジスタンスの特徴は、地上にいながらにして空中にいるかのような感覚を提供し、空中スポーツを競技することができる点である。従って、飛行型トレイグジスタンスにおける構成要件は、遠隔存在感、自在性、浮遊感の3要素であると考えられる。遠隔存在感を創出するため、体験者の視野角とロボットの視野角の同期を行う。また、自在性を創出するため、地上にいる体験者の身体動作によるマルチコプター型のドローンを用いた制御方法を提案する。そして、飛行しているかのような身体拡張感をさらに演出するため、コックピットの設計を行う。

第4章

飛行型トレイグジスタンスシステムの試作

4.1. 試作の目的

本章では、第3章で述べた飛行型トレイグジスタンスの設計指針を基に試作を行ったプロトタイプシステムについて述べる。第1プロトタイプを試作した後に、その評価と考察を踏まえ第2プロトタイプの実装を行った。第1プロトタイプでは、頭部動作の追従による視野の移動ができる頭部機構と、身体性を伴ったロボットの操作システムの構築を行った。第2プロトタイプでは、より早い視野移動ができるシステム、及びより安定した身体性を伴ったロボットの操作システムの構築、及び浮遊感を創出するためのコックピットを設計することで第1プロトタイプにおける問題の解決を図った。

4.2. 第1プロトタイプ

4.2.1 システムの概要

前述した様に、第1プロトタイプでは頭部動作の追従による視野の移動ができる頭部機構と、身体性を伴ったロボットの操作システムの構築を行った。第1プロトタイプの全体の概要を、図4.1に示す。ロボットに搭載されたカメラの映像をリアルタイムに体験者のHMDで見せることで、体験者は空中に存在する遠隔存在感を体験することができる。また、体験者の頭部運動と飛行型ロボットの飛

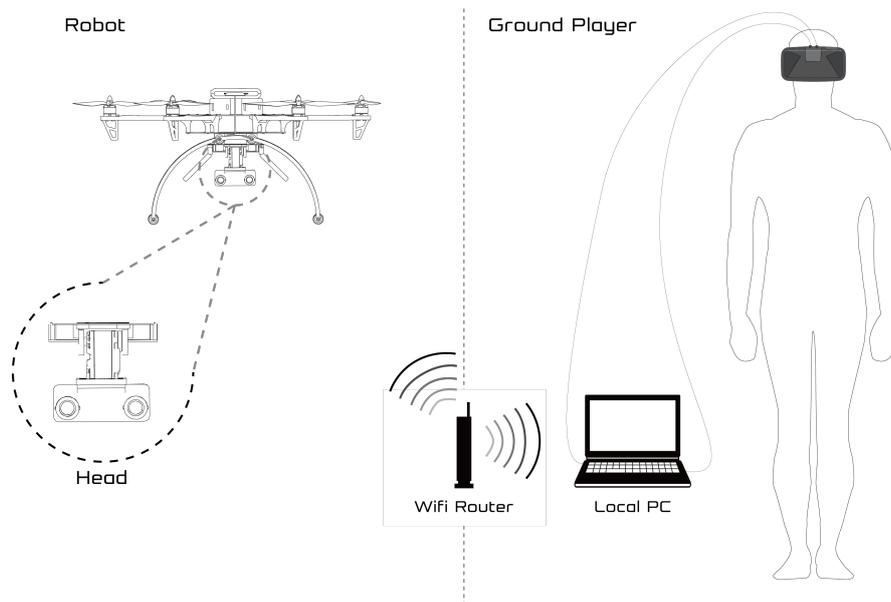


図 4.1: 第 1 プロトタイプにおけるシステム概要

行運動を同期させることで、自在に空中を移動することができる。

4.2.2 システムの構成

飛行型トレイグジスタンスロボットはロボットのフレームに視点の映像を取得するためのカメラや、取得した映像を地上に伝送するための PC、その他にも安全な離着陸と空中での自由で安定した飛行を実現するために必要な機材を搭載する。また、ロボットのフレームの下方にロボットヘッドを搭載することで、飛行型トレイグジスタンスロボット視点での上下方向の視覚情報を得る際に機体が動くことなく、その場の上下方向の情報を得ることができる。空からの広い視野 (Field of View: FOV) を撮影するため、カメラに広角レンズを装着する。

第 1 プロトタイプを構成しているロボット側の機材を表 4.1 に、体験者側の機材を表 4.2 にそれぞれ示す。高出力の無線 LAN ルータ (IEEE802.11ac ch110, BW:40MHz, Burst: 600Mbps) は、2.4GHz 用のアンテナを通じて飛行型トレイグジスタンスロボット視点の映像が送信され、体験者の HMD が接続されたローカ

ル PC が受信するために使用している。

また、飛行型レイトラッキングロボット自体、あるいは周囲の人や環境への安全を担保するため、また飛行体験への没入感を高めるため、空中スポーツにおける競技力を向上させるため、安定した離着陸、及び飛行が求められる。従って、第 1 プロトタイプを構成する機材を組み合わせた時の重心が機体の中心に正確に存在している必要がある。そこで、本システムの設計、及び構造の検証のため、3DCAD ソフトウェア¹⁷ を用いたモデリング(図 4.2)を行った後に機体の組み立て(図 4.3)を行った。組み立てられた第 1 プロトタイプの仕様を表 4.3 に示す。

視覚情報は、まずマルチコプターに搭載されたオンボード PC と USB カメラによって 30fps の映像を取得し、H.264 で符号化した後、ストリーミングアプリケーション¹⁸ の伝達経路を通し、地上の PC に送られ、体験者が装着している HMD に連続的に表示される(図 4.4)。

一方、運動情報は体験者の頭部、及び身体動作(位置、方向)は、体験者が装着している HMD のセンサー、及び体験者に向けられたカメラから Unity¹⁹ で情報を取得し、その情報がトランスミッターによって送信機に送られ、送信機から

¹DJI JAPAN 株式会社, <http://www.dji.com/jp> (参照 2014-9-5)。

²Turnigy ©, <http://www.turnigy.com/> (参照 2015-12-2)。

³Seed Technology Limited, <http://www.seedstudio.com/depot/> (参照 2014-9-5)。

⁴双葉電子工業株式会社, <http://www.futaba.co.jp/> (参照 2014-9-5)。

⁵Neewer Technology ltd, <http://www.neewer.com/> (参照 2014-9-5)。

⁶Intel Corporation, <http://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/homepage.html> (参照 2014-10-17)。

⁷Energizer © Holdings Inc, <http://www.energizer.com/> (参照 2014-10-17)。

⁸Digi International, <http://www.digi.com/> (参照 2014-10-17)。

⁹株式会社ロジクール, <http://www.logitech.com/> (参照 2014-10-17)。

¹⁰株式会社トダ精光, <http://www.toda-seikoh.jp/> (参照 2014-10-17)。

¹¹DST Robot Co., Ltd, <http://www.dongburobot.com/> (参照 2014-10-17)。

¹²株式会社セキド, <http://www.sekido-rc.com/> (参照 2014-9-15)。

¹³デル株式会社, <http://www.dell.com/> (参照 2014-10-17)。

¹⁴株式会社バッファロー, <http://buffalo.jp/> (参照 2014-10-17)。

¹⁵Oculus VR, LLC, <https://www.oculus.com/> (参照 2014-10-17)。

¹⁶Endurance R/C, <http://www.endurance-rc.com/> (参照 2014-10-17)。

¹⁷Robert McNeel & Associates. Rhinoceros. 5B161, 2015-8-10, <https://www.rhino3d.com/> (参照 2015-8-26)。

¹⁸「GStreamer.org」, <http://gstreamer.freedesktop.org/> (参照 2015-12-2)。

¹⁹「Unity」, <https://unity3d.com/jp> (参照 2016-6-17)。

表 4.1: 第1 プロトタイプにおけるロボット側システム構成

名称	型番
フレーム	DJI ¹ Frame Wheel 550
プロペラ	DJI E300 9450L セルフロック型プロペラ (CW + CCW)
モーター	DJI E300 2212 Brushless Motor (CW + CCW /920kv)
ESC	DJI E300 15A-OPTO 3-4S
MC	DJI Naza-M V2
GPS モジュール	DJI Naza-M V2 GPS Module
マルチコプター用バッテリー	Multistar High Capacity 4S 5200mAh Multi-Rotor Lipo Pack ²
降圧型電源モジュール	seeed ³ Adjustable DC/DC Power Converter (1.25V - 35V/3A)
受信機	Futaba ⁴ R7008SB(2.4GHzFASSTest)
ランディングギア	NEEWER ® ⁵ Fpv Landing Skid Set
PC	Intel ® ⁶ NUC [D53427RKE]
PC用バッテリー	Energizer ⁷ 外付けバッテリー XP8000A
SSD	Intel ® ソリッドステートドライブ [SSDMCEAW120A4]
アンテナ	XBee2.4GHz アンテナ (RPSMA タイプ) [A24-HASM-450] ⁸
カメラ	Logitech ® ⁹ HD Webcam C615 [V-U0027]
広角レンズ	Digital King ¹⁰ M-Power Wide Lens 0.5x
サーボモータ	HerkuleX ¹¹ スマートシリアルサーボ [DRS-0201]
LED	Light Wire LED Red[UP8003-R1] / Blue[UP8003-BLU1] ¹²

表 4.2: 第1プロトタイプにおける体験者側システム構成

名称	型番
PC	Dell ¹³ Precision M4800
ルーター	BUFFALO ¹⁴ 無線 LAN 親機 [WZR-1750DHP2]
頭部装着ディスプレイ	Oculus ¹⁵ Rift DK2
送信機	Futaba FX-22(2.4GHzFASSTest)
R/C トランスミッター	Endurance R/C ¹⁶ PCTx

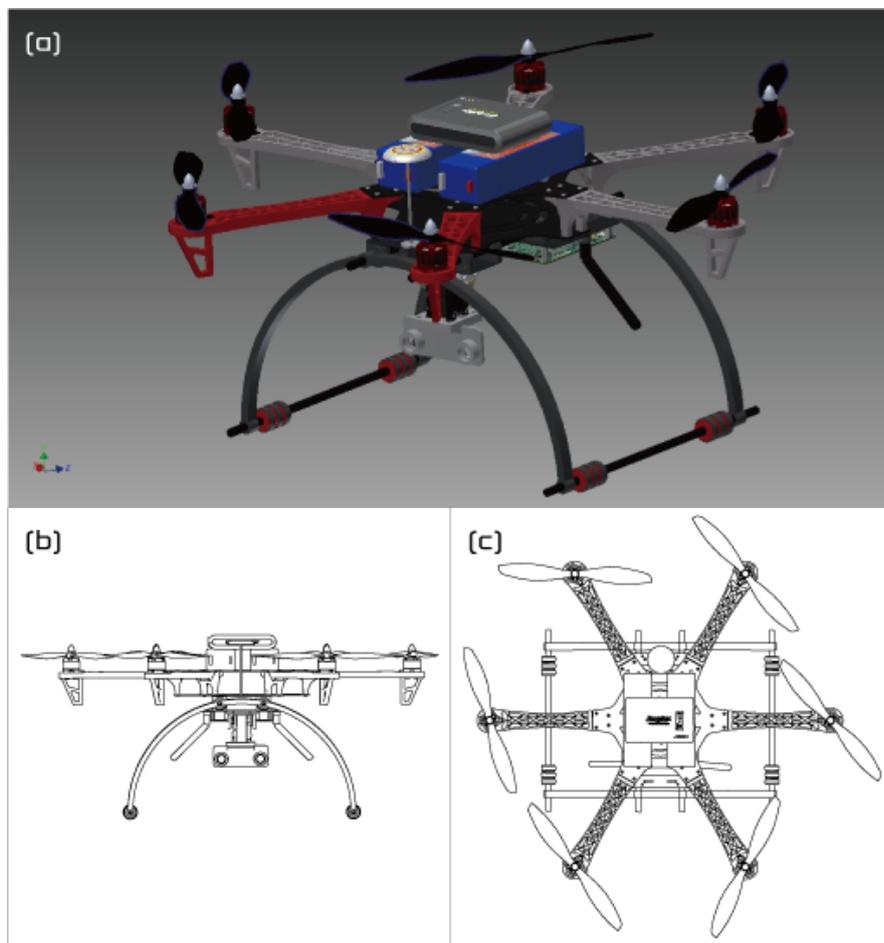


図 4.2: 第1プロトタイプシステム設計 (a) レンダリング・モデル (b) アウトライン・モデル(フロント・ビュー) (c) アウトライン・モデル(トップ・ビュー)



図 4.3: 第1プロトタイプを組み立てている経過

表 4.3: 第1プロトタイプの仕様

項目	内容
対角線寸法	880mm
離陸時総重量	3.3kg
FOV	114 °

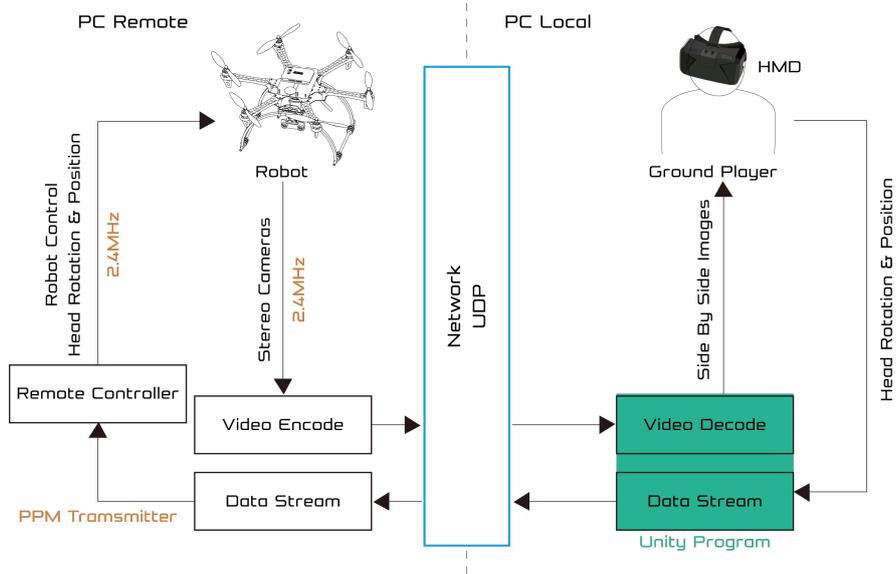


図 4.4: 第 1 プロトタイプにおけるシステムブロック図

PPS (Pulse Per Second) 信号としてロボットに搭載された受信機に送られることで、ピッチ軸・ヨー軸・ロール軸への制御を行う (図 4.5) , 体験者の頭部をピッチ方向への回転させることで、飛行型トレイグジスタンスロボットの下部に搭載されたロボットヘッドが同様にピッチ方向に回転する。また、体験者の頭部と飛行型トレイグジスタンスロボットのロボットヘッドのピッチ方向の移動量はそれぞれ一致している。

4.2.3 評価と考察

試作した第 1 プロトタイプにおける視覚伝送システム、及び運動伝送システムに対して実施した試験について述べる。

本システムで構成されている要素の全てが 100m の範囲内に存在している時、映像ストリーミングにおける 1 周期の遅延は 150 ミリ秒であると測定された。そこで、体験者テストを行った。図 4.6 はテストが行われている様子を示している。ここでは、第 1 プロトタイプにおける視点遅延は、さほど気にならないという知見を得ることができた。図 4.7 に、体験者が HMD を通して見ている映像の例を示

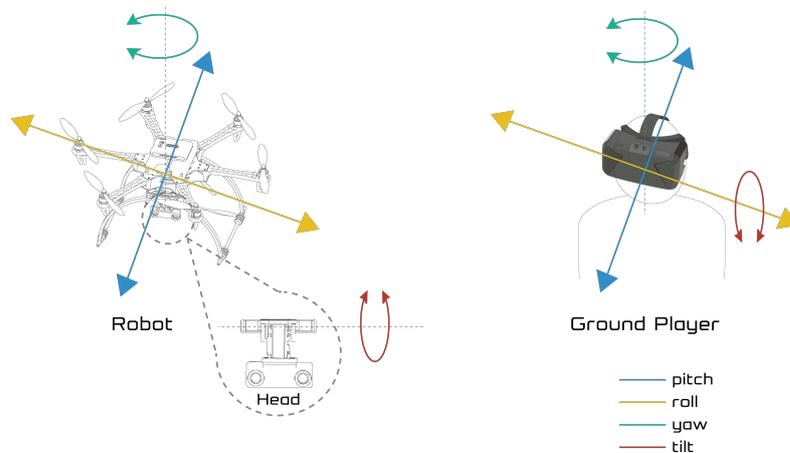


図 4.5: 第 1 プロトタイプにおける運動情報の同期メカニズム

す．しかし，チルト軸に頭部を回転させた際，ロボットの頭部機構を回転させるために遅延が発生したため，体験者に違和感が生じた．また，ヨー軸における視野方向の移動は，ロボット自体をヨー軸で回転させる手法を選んだ．しかし，クアッドコプターの飛行特性である初速が緩いこと，また頭部機構におけるモータの回転速度が十分ではないことが起因し，瞬発的な頭部動作に視野を追従させることが困難であった．

日本未来科学館（東京都江東区青海 2-3-6）研究棟 超人スポーツプロジェクトの研究室内にて，運動情報伝送システムの試験（図 4.8）を行った．本システムのキャリブレーションはシステム起動時に毎回行われるため，初期位置として体験者が HMD を装着して正面を向いた状態でシステムの起動が行われる．

体験者の頭部のヨー方向への回転は，第 1 プロトタイプのヨー方向への回転と同期している．体験者の頭部をヨー軸において左回りに 90 度，もしくは右回りに 90 度回転させることでコントローラーの値が最大値に達することから，他の動作より比較的变化量が大きいように感じてしまう．そこで，変化率を 100 分の 5 倍に設定したところ，違和感のなく移動することができた．体験者の頭部のロール軸，及びピッチ軸への移動によって，第 1 プロトタイプがそれぞれロール軸，及びピッチ軸へ制御されることで，機体は左右方向，及び前後方向への移動を行う．

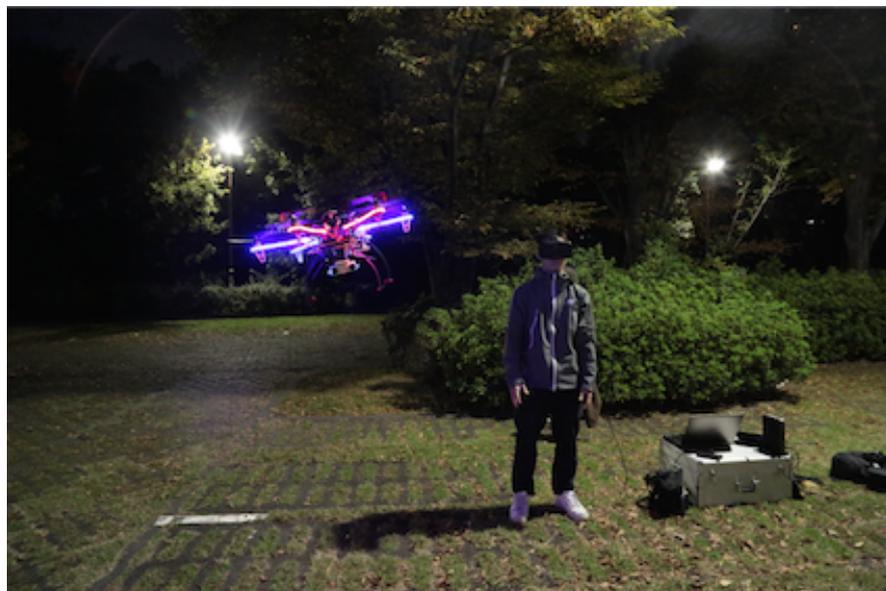


図 4.6: 第 1 プロトタイプを試作結果 (左: ロボット, 右: 体験者)



図 4.7: 体験者が HMD で見ている映像のイメージ

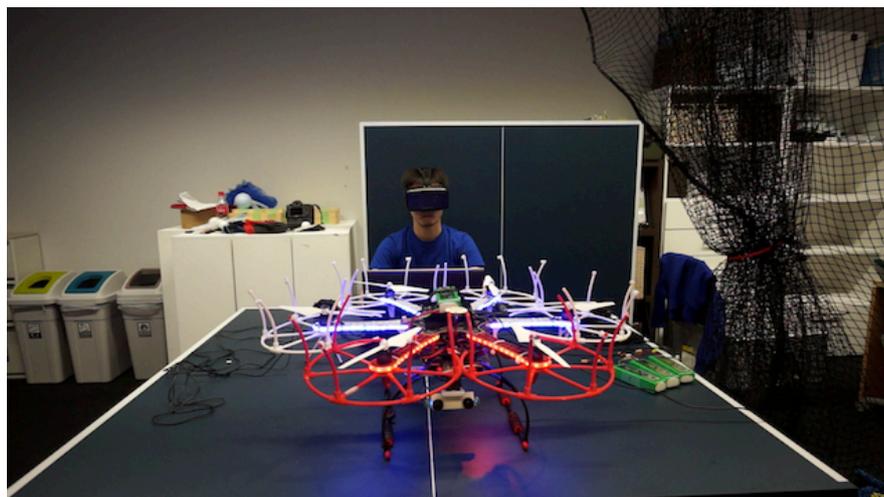


図 4.8: 第 1 プロトタイプにおけるシステムの試験の様子

ヨー方向への回転よりは移動速度に違和感を覚えなかったものの、急発進及び急停止と言った、安定した飛行の妨げになるような動きを排除するため、変化率を 10 分の 1 倍に設定することで適した移動速度となった。しかし、機体の姿勢を補正するためのシステムが欠如していたことから、機体の姿勢が常に不安定であり、視野角の正確な同期及び身体性を伴った移動が十分にできるとは言えない。

4.3. 第 2 プロトタイプ

4.3.1 システムの概要

第 1 プロトタイプの設計には、飛行における機体の安定性の欠如、視野角移動における遅延と言った問題が生じた。そこで、第 2 プロトタイプでは、より早い視野角の移動と、より安定した飛行を可能にすることで第 1 プロトタイプにおける問題を解決し、さらに浮遊感を創出するためのコックピットを設計することで、飛行型トレイグジシステムを構築を図った。第 2 プロトタイプの全体の概要を、図 4.9 に示す。

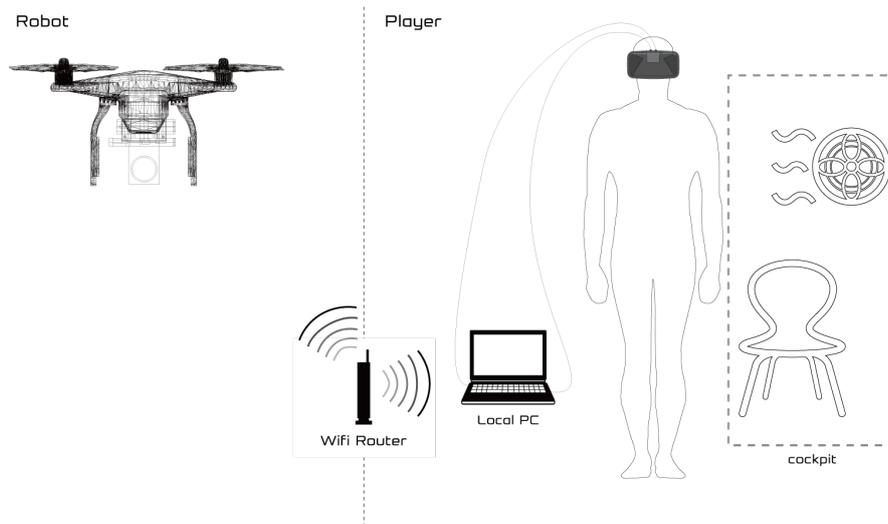


図 4.9: 第 2 プロトタイプにおけるシステム概要

4.3.2 システムの構成

第 2 プロトタイプにおけるロボット側のシステム構成を表 4.4 に、体験者側のシステム構成を表 4.5 にそれぞれ示す。飛行における安定性を向上させるため、ロボットの機体として DJI 社の Phantom3 Professional を使用した。また、見回しに関する時間遅延の解決を図り、全天球カメラである RICOH 社²⁰ の THETA S を使用した。

表 4.4: 第 2 プロトタイプにおけるロボット側システム構成

名称	型番
機体	DJI Phantom3 Professional
機体アクセサリ	DJI Phantom3 プロペラガード
PC	Intel Compute Stick [CSTK-32W]
PC 用バッテリー	ANKER ²¹ PowerCore 10000
カメラ	RICOH THETA S

²⁰株式会社リコー, <https://theta360.com/ja/> (参照 2016-6-14)。

²¹アンカー・ジャパン株式会社, <http://jp.anker.com> (参照 2016-6-14)。

表 4.5: 第 2 プロトタイプにおける体験者側システム構成

名称	型番
PC	Dell Precision M4800
ルーター	BUFFALO 無線 LAN 親機 [WZR-1750DHP2]
頭部装着ディスプレイ	Oculus Rift DK2
送信機	DJI PHANTOM 3 送信機
スマートフォン	Samsung ²¹ Galaxy S7

ロボット視点の映像を取得するため、カメラ及びカメラで取得した映像を体験者側の PC に伝送するための PC、また PC 用のバッテリーをロボットに搭載する必要がある。そこで、3DCAD ソフトウェアを用い第 2 プロトタイプにおける頭部機構の設計 (図 4.10, 図 4.11) を行い、第 2 プロトタイプにおけるロボットの試作を行った (図 4.12)。図 4.13 は、第 2 プロトタイプの構成全体を示している。

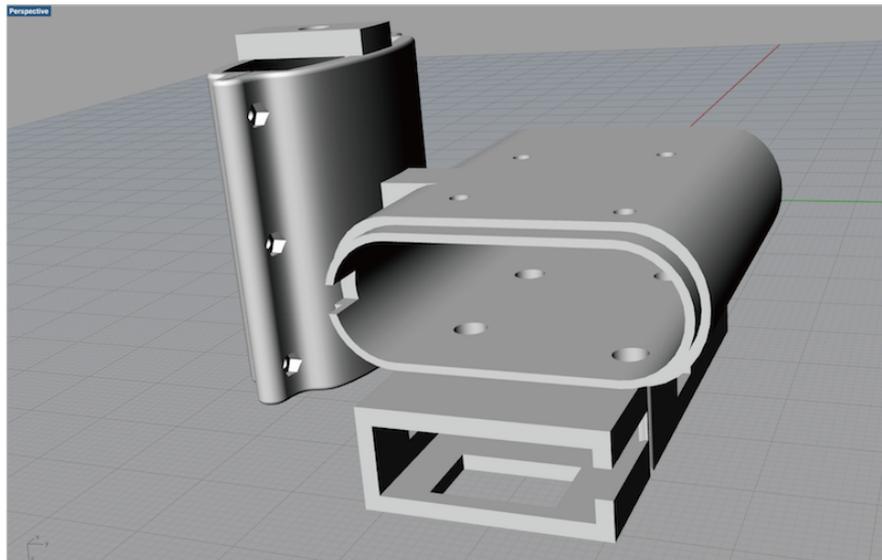


図 4.10: 第 2 プロトタイプにおける頭部機構の CAD を用いた設計

本プロトタイプにおけるシステムブロック図を、図 4.14 に示す。視覚情報伝送

²²Samsung Electronics Co., Ltd, <http://www.samsung.com/jp/home/> (参照 2016-6-14)。



図 4.11: 第 2 プロトタイプにおける頭部機構



図 4.12: 第 2 プロトタイプにおけるロボット



図 4.13: 第 2 プロトタイプ全体図

は、まずロボットに搭載された全天球カメラにより 20fps の映像を取得し、USB で接続された StickPC を用い WebRTC²³ の伝送経路を通り体験者側の PC に送られる。次に、Unity 上のプログラムにて全天球映像が取得され、全天球オブジェクトにテクスチャを貼り付けられる。そして、体験者が装着している HMD に映像がレンダリングされることで、体験者はロボット視点の映像を連続的に見ることが出来る。また、体験者が視野方向を移動する際、HMD のセンサ情報を用いることで頭部動作が検出され、その情報を基にレンダリングされる方向を変化させることで視野方向の移動を行う。従って、体験者の視野方向の移動に伴いネットワークを介す様な情報伝送は行われることがなく、体験者側の PC におけるソフト内での処理により表示される映像は変化されるため、視野角の移動に伴う映像遅延はほぼ生じることがない。しかしながら、伝送される映像の遅延は 200ms 程度生じている。

一方、運動情報は体験者の頭部及び身体動作（位置、角速度）は、体験者が装着している HMD に内蔵された加速度及びジャイロセンサー、そして体験者に向

²³ 「WebRTC」, <https://webrtc.org> (参照 2016-6-12)。

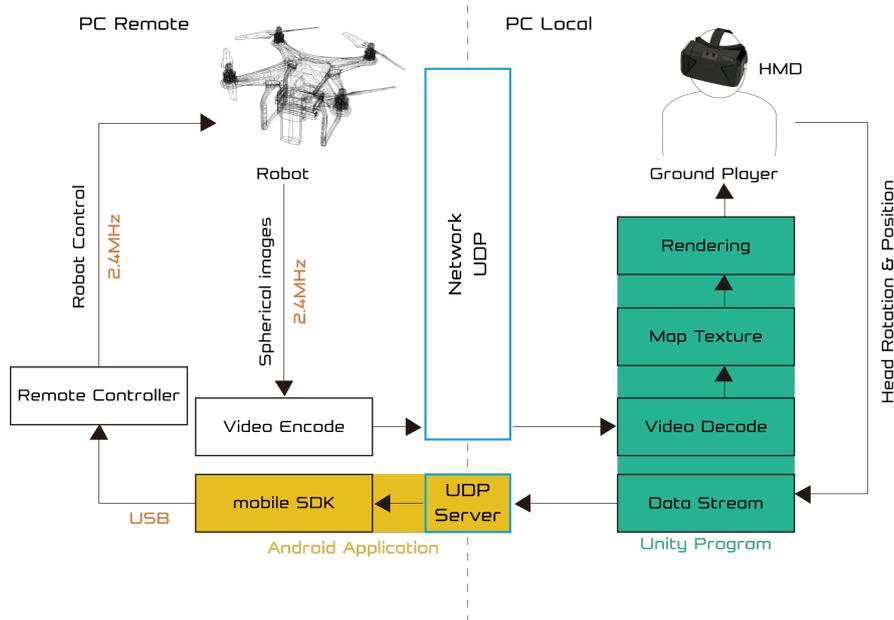


図 4.14: 第 2 プロトタイプにおけるシステムブロック図

けられた赤外線カメラから位置情報が取得される。その情報は Unity 上のプログラムにより UDP Server に伝送され、DJI 社が開発者向けに提供している mobile SDK²⁴ を用いて作成されたアプリケーションにより Android²⁵ 端末で取得される。そして、Android 端末に USB で接続された送信機にデータが送られ、送信機からロボットの受信機に伝送される。これにより、HMD を装着している体験者の頭部の位置や身体動作によりロボットのピッチ軸・ヨー軸・ロール軸への制御が行われる、図 4.15 は、第 2 プロトタイプにおける体験者の身体動作とロボットの動きの同期メカニズムを示している。

第 2.2 節で述べた通り、視覚情報だけでなく身体感覚や皮膚触覚にも飛行体験しているかのような情報を呈示することで、浮遊感を創出することができる。ゆえに、図 4.16 の様に、体験者が地上にいながらにしてまるで空中を飛んでいるかのような感覚を創出するコックピットの設計を行った。ロボットが空中を飛行する

²⁴ 「mobileSDK」 <https://developer.dji.com/mobile-sdk/> (参照 2016-6-17)。

²⁵ 「Android 6.0 Marshmallow」 https://www.android.com/intl/ja_jp/versions/marshmallow-6-0/ (参照 2016-6-17)。

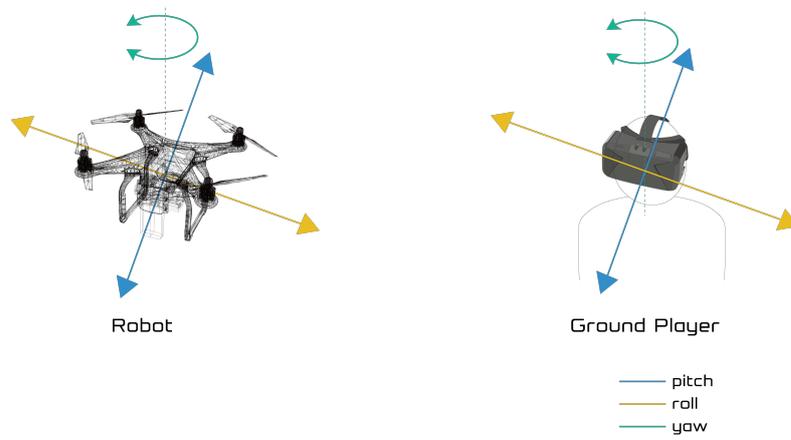


図 4.15: 第 2 プロトタイプにおける運動情報の同期メカニズム



図 4.16: 第 2 プロトタイプにおけるコックピット

とき、当然ながらロボットは機体を地面に接することなく空中に存在し、その場に留まり続けたり移動したりしている。従って、もし体験者が空中を飛行できるとしたら、同様に身体は地面に接することなく空中に存在していると考えられる。一般的に、下腿長が70cm以上ある人は存在しないと考えられる¹。そこで、座面が地面から70cm程度の高さにある椅子を用いることで、体験者の足を地面から離すことを図った。また、ロボットは大量の空気を上方から吸い込み下方に吐き出すことで、機体の揚力を得ている。それに加え、ロボットが空中を移動するとき、機体で風を受けながら進んでいる。従って、体験者が空中を移動するときも同様に、身体で風を感じながら進むことが考えられる。そこで、体験者の前方に送風機を設置し体験者に風を送ることで、浮遊感の創出を行った。

4.3.3 評価と考察

第1プロトタイプにおける評価試験と同様に、超人スポーツプロジェクトの研究室内にて、第2プロトタイプにおけるシステムの評価試験を行った。体験者がHMDで映像を見た時、映像の視野角は体験者の頭部動作に正確に追従されていたため、遅延はほぼ生じていないと言える(図4.17)。

次に、ロボットをその場でホバリングさせた際、誤差約10cm内に留まり続けていた。また、体験者の頭部をヨー軸で回転させたり、身体をピッチ軸及びロール軸に傾けたとき、ロボットも同様な移動をしていたため、身体動作の同期を行うことができたと言える(図4.18)。

そして、縦3.5m、横3.5m、高さ3mのフィールドを作り、設定したコース(図4.19)の上を進むことで体験者が周囲を見渡しながら自在に動くことのできる本システムを評価することを図った。見たい方向を見たいように見ることができ、遠隔地で周囲を見渡している感覚を得ることができた。行きたい方向にいくことができたということは、自在に移動できる操作方法が提案できたと言える。しかし、途中ドリフトしてしまう場面が見受けられた。ロボットに搭載されているポジショントラッキング用のカメラがマーカを捉えきれなかったことや

¹河内まき子, 持丸正明, 「2005 AIST 人体寸法データベース」, 産業技術総合研究所 H16PRO 287, <https://www.dh.aist.go.jp/database/91-92/index.html> (参照 2016-7-14)。

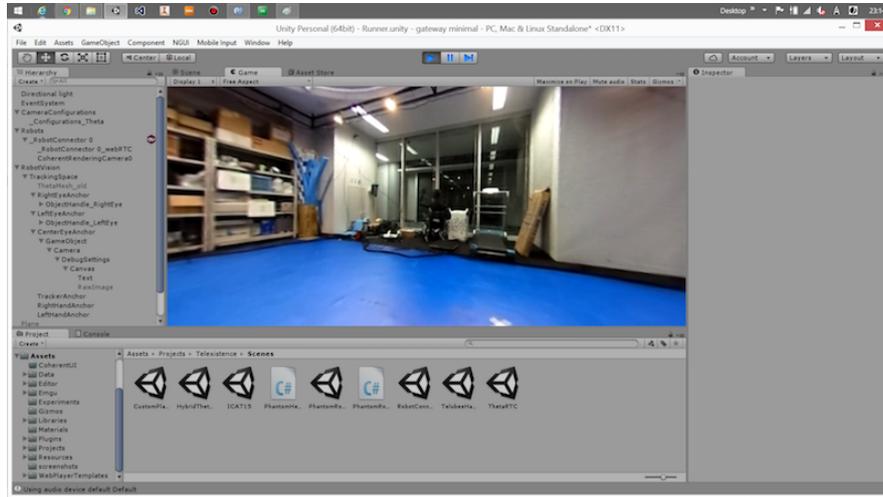


図 4.17: 体験者側 PC で体験者が見ている映像を表示させている様子



図 4.18: 第 2 プロトタイプにおける飛行性能の評価

気流の影響，あるいはドローンに標準で搭載されているコンパスがエラーを起こしたことが原因として考えられる．

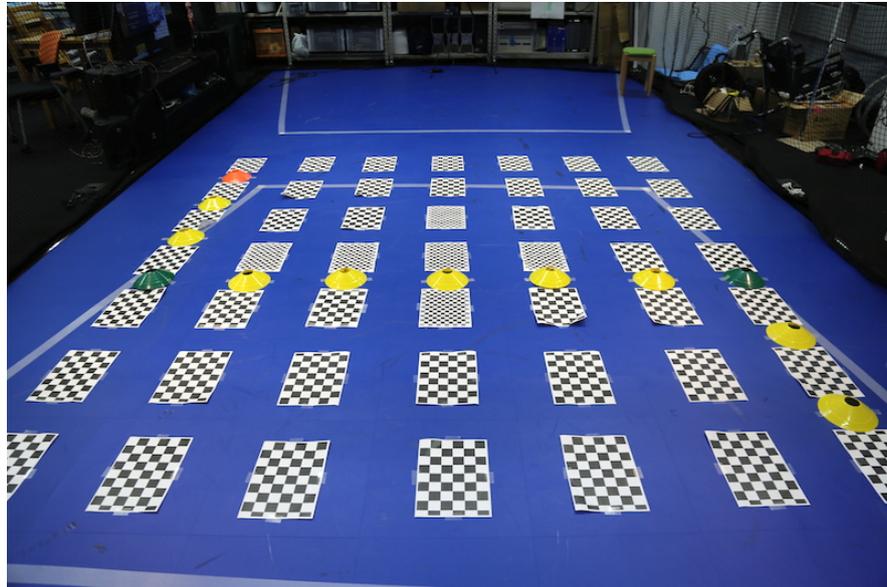


図 4.19: 実験に用いたコース

また，体験者が椅子を触った時，まるでドローン乗った状態でドローンに搭載されている椅子に触ったかのような感覚になったとの感想が得られた．実際にはコックピットの椅子を触っていたものの，ドローンのランディングギアを触っていると錯覚していたことを示唆している．風を感じることによって離陸しているかのような感覚が得られたとの評価を得ることができた．これは，ドローンの音を耳で聞き，風を皮膚で感じ，ドローン視点の映像を見たためだと考えられます．次に，足が接地していないため，姿勢の不安定さを感じたと言う評価は，地面を足の裏の触感で認識しているためだと考えられます．そして，下を見たとき，空中に存在しているかのような感覚を得ることができたとの評価を得た．何も接地していないことを体験者が確認したことが可能性として考えられる．

これらの結果を踏まえ，視野角の同期による遠隔存在感，身体性を伴った移動による自在性，コックピットの設計による浮遊感の3つの構成要件を満たす，空中における身体拡張感を実現する飛行型トレイグジスタンスシステムを構築する

ことができたと言える。

4.4. 本章のまとめ

飛行型ロボットに装着されたカメラの映像を，リアルタイムに体験者のHMDで見せることによって，視覚のシンクロを実現する．また，体験者の身体の動きと連動して飛行型ロボットが動き，運動のシンクロを実現することで，体験者にあたかも空を飛んでいるかのような感覚を提供する．そこで，第1プロトタイプ，及び第2プロトタイプの試作を行い，動作確認のための試験を行った．

第1プロトタイプでは頭部動作の追従による視野の移動ができる頭部機構と，身体性を伴ったロボットの操作システムの構築を行った．第1プロトタイプにおける視覚伝送システムは，構成されている要素の全てが100mの範囲内に存在している時，ビデオにおける1周期の遅延は150ミリ秒であると測定された．しかし，クアッドコプターの飛行特性である初速が緩いこと，また頭部機構におけるモータの回転速度が十分ではないことが起因し，瞬発的な頭部動作に視野を追従させることが困難であった．また，運動伝送システムは体験者の頭部動作によってロボットを移動させることで，体験者に飛行体験の提供ができるシステムを構築した．しかし，機体の姿勢を補正するためのシステムが欠如していたことから，機体の姿勢が常に不安定であり，没入感及び飛行体験が十分にできるとは言えない．

第1プロトタイプの設計には，飛行における機体の安定性の欠如，視野角移動における遅延と言った問題が生じた．そこで，第2プロトタイプでは，より早い視野角の移動と，より安定した飛行を可能にすることで第1プロトタイプにおける問題を解決し，さらに浮遊感を創出するためのコックピットを設計することで，飛行型トレイグジシステムを構築した．体験者が視野角を移動する際，HMDのセンサ情報を用いることで頭部動作が検出され，その情報を基にレンダリングされる方向を変化させることで視野方向の移動を行う．従って，体験者の視野方向の移動に伴いネットワークを介す様な情報伝送は行われることがなく，体験者側のPCにおけるソフト内での処理により表示される映像は変化されるため，視野角の移動に伴う映像遅延はほぼ生じることがない．また，体験者の頭部をヨー軸で

回転させたり，身体をピッチ軸及びロール軸に傾けたとき，ロボットも同様な移動をしていたため，身体動作の同期を行うことができたと言える．そして，体験者が地上にいながらにしてまるで空中を飛んでいるかのような感覚を創出するコックピットの設計を行った．これらの結果を踏まえ，視野角の同期による遠隔存在感，身体性を伴った移動による自在性，コックピットの設計による浮遊感の3つの構成要件を満たす，空中における身体拡張感を実現する飛行型トレイグジスタンスシステムを構築することができたと言える．

第5章

飛行型トレイグジスタンスシステム を用いた没入型スポーツの提案

5.1. 岩手発超人スポーツ開発プロジェクトの概要

2016年3月9日に行われた第3回超人スポーツシンポジウム¹において「地域文化とスポーツクリエイション-超人スポーツは地域にどう貢献できるか-」をテーマとした議論が行われたことが示しているように、2016年の超人スポーツの活動は地域連携や文化形成を目標として掲げている。

そうした活動の中で、「2016 希望郷いわて国体・希望郷いわて大会²」を機に岩手県で展開されるスポーツの枠を超えた取り組みの一環として、主体である岩手県庁に超人スポーツ協会が協力し、地域に根ざした「ご当地超人スポーツ」を創造することを目的とした「岩手発超人スポーツ開発プロジェクト」が始動した。9月24,25日に岩手県で開催される「いわて若者文化祭2016」にてデモンストレーションあるいは体験会を行うことを目標に、2016年4月24日に盛岡市で行われたキックオフミーティング³を皮切りとし、5月28日には新しい超人スポーツのアイデアを出すことを目的としたアイデアソン⁴が岩手大学にて行われ、主に岩手県内から40名近くの参加者が会場に集った(図5.1)。

¹「2016年3月9日超人スポーツシンポジウムのご案内」, <http://superhuman-sports.org/3rdsymposium/> (参照 2016-6-13)。

²「2016 希望郷いわて国体・希望郷いわて大会」, <http://www.iwate2016.jp/> (参照 2016-6-13)。

³「2016年4月24日「岩手発超人スポーツ開発プロジェクト」キックオフミーティング開催のお知らせ」, http://superhuman-sports.org/iwate_kickoffmeeting/ (参照 2016-6-13)。

⁴「2016年5月28日「岩手発超人スポーツ開発プロジェクト」アイデアソン開催のお知らせ」, http://superhuman-sports.org/iwate_ideathon/ (参照 2016-6-13)。

岩手発超人スポーツ開発プロジェクトアイデアソンでは、「実現可能な新しい超人スポーツの種を作ること」がゴール、またそのために「新しい超人スポーツの画像もしくはイラストを一枚作成」することをゴールとして掲げられた。個人アイディエーション（図 5.2）では参加者から約 100 点のアイデアが集まり、岩手県の文化や歴史とスポーツが融合されたものが大半であった。集まったアイデアに対し参加者による投票が行われ、最も投票数の多かった 6 個のアイデアを基にチームが形成され、各チーム内でアイデアのブラッシュアップを行った。



図 5.1: アイデアソンにおける会場の様子

5.2. アイデアソンにおける没入型空中スポーツの提案

前述した通り、岩手発超人スポーツ開発プロジェクトはご当地超人スポーツを創造することが目標である。投票数の多かった 6 個のアイデアの内の 1 個には、岩手県盛岡市を舞台に展開される宮沢賢治の童話作品である『銀河鉄道の夜 [27]』に登場する「鳥捕り」をモチーフにした「Tori-Tori（図 5.3）」が含まれていた。本



図 5.2: 個人アイディエーションで集まったアイデアの一部

アイデアを基にした超人スポーツの開発を目標とし、筆者を含めた9名でチームを形成した。

まず、空中をフィールドとしたスポーツを創るにあたり、空を飛行するドローンを鳥に見立てることで本アイデアを実現することができるのではないかと考えるに基づき、筆者がレクチャーしながらチームメンバーを対象としたクアッドコプターの操作体験を行った(図5.4)。次に、アイデアの発散及び共有を目的とし、クアッドコプターの操作を体験した際の感想や、空中でプレイしたいスポーツに関するアイデアに関するブレインストーミングを行った(図5.5)。クアッドコプターの操作を体験した際の感想として、「怖い」という感想や、「直感的に操作したい」、「レスポンス悪い」、「不安定」と言ったクアッドコプターの飛行特性に関するネガティブな意見を得ることができた。また「お互いがドローン視点のバトル」、「網的なものでドローンを捕まえる」、「ドローンをドローンでキャッチ」と言ったアイデアが出た。

また、ブレインストーミングで出てきたアイデアを基に、「なぜドローンを用いるのか」、「スポーツとは何か」と言った、チーム内における認識の共有が行われ

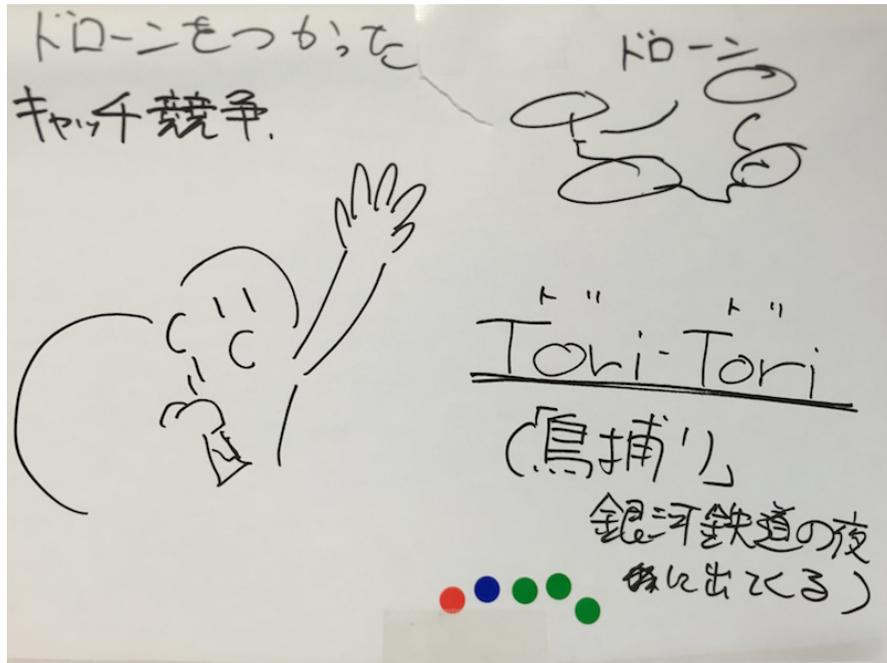


図 5.3: 「Tori-Tori」のアイディアイラスト



図 5.4: アイディエーションのためにクアッドコプターの操作練習をしている様子

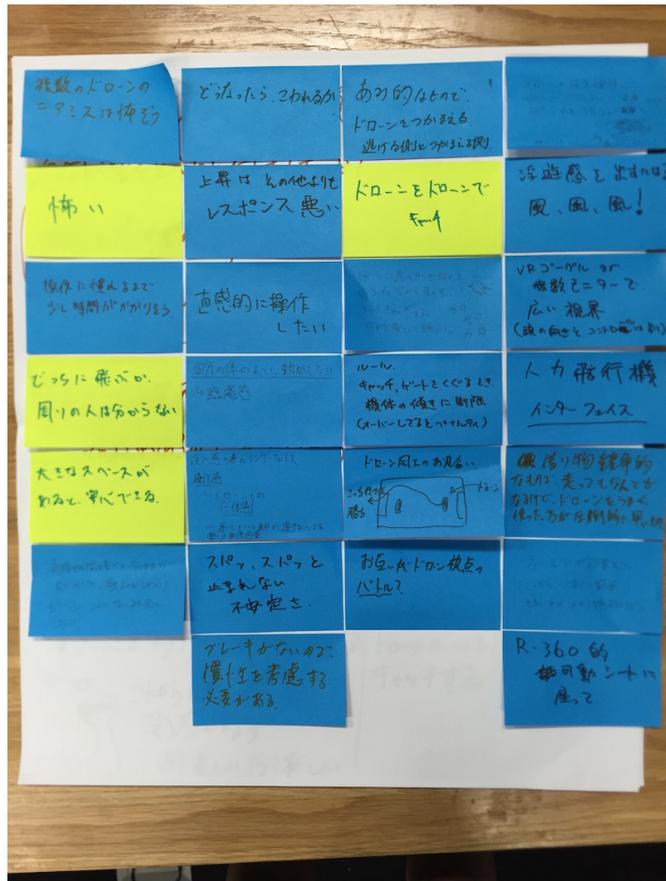


図 5.5: クアッドコプターの操作を体験した際の感想や、ブレインストーミングで出たアイデア

た(図5.6).ドローンを用いる理由として、「宮沢賢治の世界観」であることや、「身体能力に関係なく参加」できること、「人を超えるという実感」を持つことができる可能性があること、「岩手にしかできない,岩手でしかできない」という岩手らしさが表現できることと言った意見を得ることができた。「スポーツとは」という問いについて、「手先でコントロールするだけならゲーム,身体の動きを取り入れる」必要があることや、「今までのスポーツ」は競うことが前提であったが新しいスポーツであることから「競争にこだわらなくてもいい」、「レクリエーション,楽しめる」ことでみんなが参加できる可能性があること,そして「やり続けると上手くなる」ことと言った議論が行われた。

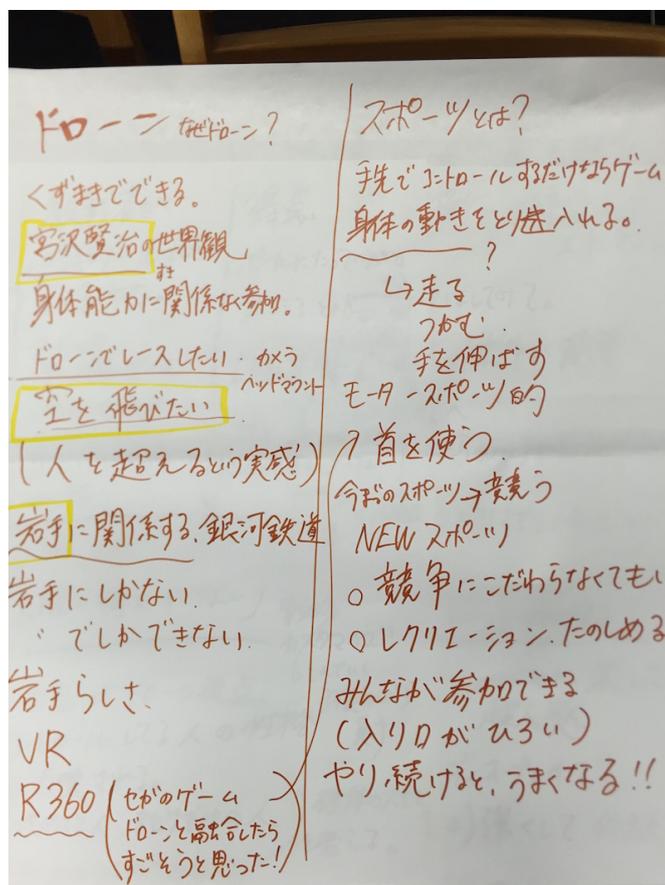


図 5.6: 空中をフィールドとしたスポーツに関するルールデザイン 1

次に, 空中スポーツを開発するためのルールデザインに関する議論が行われた

(図 5.7). そこでは、「観戦者が直感的にルールを理解できるもの」にする必要があることや、物理的な衝突を避けるためレーザーのようなものを使用すること、チーム内での役割を表現するため異なる大きさの機体を用いることについて意見を得られた。このような考えに基づき、図 5.9 に示すようなラフスケッチが描かれ、また戦闘機空中戦のようなアイデアを連想するものであったため、「TOPGUN⁵」と名付けられた。競技者は没入感を伴った空中戦を、観客者はドローンの接近戦による迫力をそれぞれ体験することができる。

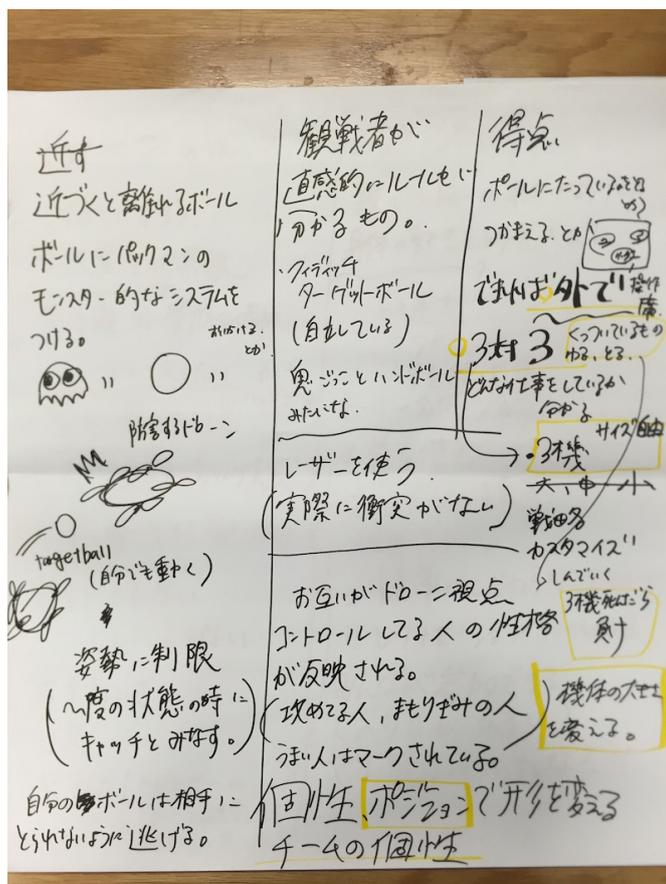


図 5.7: 空中をフィールドとしたスポーツに関するルールデザイン 2

そして、実現可能な新しい超人スポーツの種を作るための新しい超人スポーツ

⁵ 「トップガン (映画)」, [https://ja.wikipedia.org/wiki/トップガン_\(映画\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/トップガン_(映画)) (参照 2016-6-15).

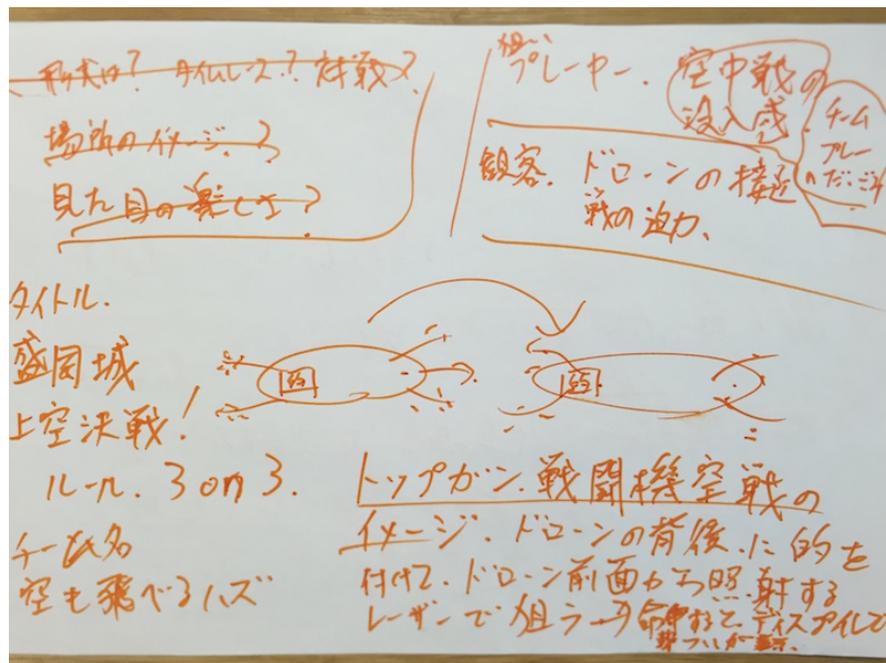


図 5.8: アイディアソンにおけるラフスケッチ

のイラストとして図 5.9 を提案した。審査員からの講評では、アイディアソンにおける審査員より、「よくありがちなドローンゲームになりそう」、「ドローンの飛行特性を生かした方が良い」、「体験の本質を見極めた方が良い」、「フォトジェニックさ、エンターテインメントとしてのスポーツさをデザインするべき」という評価を得られたことから、アイデアの内容に関し再考の余地が残る。

5.3. ハッカソンにおける没入型空中スポーツの提案

アイディアソンで得られた知見を基に、2016年6月10日に著者を含めた5名でハッカソンに向けたアイデアのブラッシュアップを目的としたオンラインミーティングを行った。図 5.10 は、オンラインミーティングにて出たアイデアの一部を示している。アイディアソンで提案を行った空中スポーツの本質とは何かを議論した結果、以下の2つの点が挙げられた。

- 身体拡張感を感じる

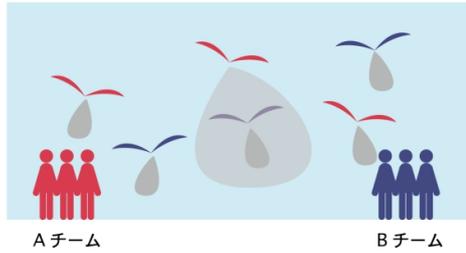


図 5.9: アイディアソンにて提案された空中スポーツ「トップガン」のイメージ

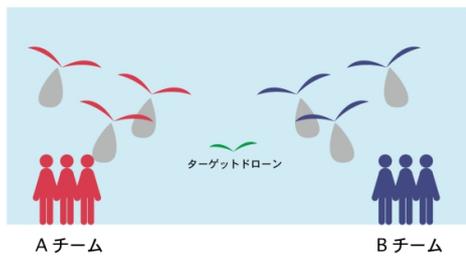
- 『銀河鉄道の夜』の世界観を踏襲すること

まず、本ハッカソンは超人スポーツの創造を目的としていることから、体験者が身体拡張された超人として競技を行うものである必要がある。次に、岩手ならではの当地超人スポーツの創造が目的であることから、『銀河鉄道の夜』に出てくる鳥捕りの世界観（図 5.11）を踏襲したスポーツの創造を目指すことが話し合われた。一方、ドローンが何らかの動作を起こすたびに地上に降り人間によるメンテナンスを要することは、試合の流れを断ち切り、競技者及び観戦者の集中を削ぐ要因となってしまう。スポーツの試合は、試合の勝敗を決着させるための一連の流れを円滑に進行させること、あるいは一連の動作ごとに局面を仕切り直すようなルールを規定することにより、長時間に渡る試合の中で競技者及び観戦者の集中を継続させることを実現している。試合の休憩時間、または天候や不意な事故により試合を中断せざるを得ない局面では、主催団体が企画するショーにより会場の雰囲気盛り上げたり、審判や実況による説明が行われたりするように、競技者や観戦者の興味が冷めることの無いような工夫がなされている。ドローンの

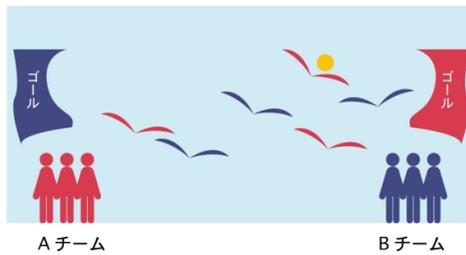
①網をつかう × 敵のドローンを捕まえる
 一台ひとつずつ網を持っている。的を捕獲する。



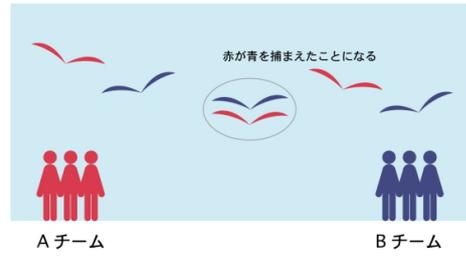
③網をつかう × ターゲットドローンを捕まえる
 一台ひとつずつ網を持っている。ターゲットドローンを捕獲する。



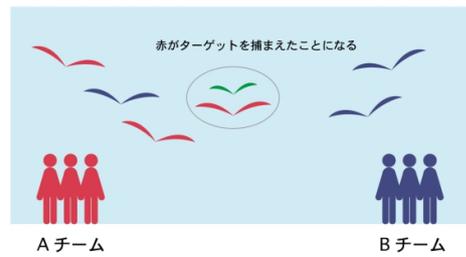
⑤ボールをゴールまで運ぶとポイント (new! 三浦君案)



②乗っける × 敵のドローンを捕まえる



④乗っける × ターゲットドローンを捕まえる



④落としたものを獲得した数で競う (小岩、 稲上案)

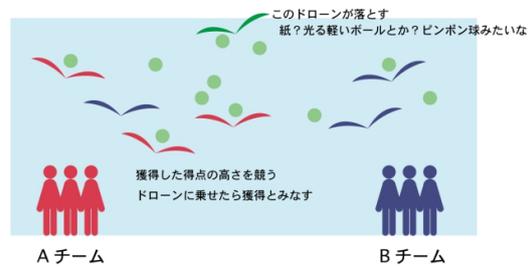


図 5.10: 2016 年 6 月 10 日に行われたミーティングで出たアイデアの一部



図 5.11: 鳥捕りのイメージ

飛行時間は搭載されるバッテリーの容量に依存し、バッテリーからの給電であるならば永久に飛行し続けることは不可能である。従って、ドローンの飛行時間を考慮したルール設計を行った。

こうした議論を経て、まるで鳥が鳥を捕まえるかのように、ドローンがターゲットとなるドローンを捕まえる（図 5.12）ことで得点を競い合う超人スポーツ「トリトリ（図 5.13）」を考案した。2名の競技者がそれぞれドローンを操作し、ドローンの下部に取り付けられた網（図 5.14）でホバリングしているターゲットドローンを捕獲することで、時間内により多くのドローンを捕獲できた方が勝利となる。競技者はドローンに取り付けられたカメラの映像を見たり体験者自身の目で見たりしながらドローンを自在に操作することで、競技者の身体としてドローンが空中に存在し、あたかも空を飛んでいるかのような感覚を体験しながら、空をフィールドとした新しい人機一体のスポーツを楽しむことができる。また、空中で試合が展開されている様子をさらに上空から空撮するドローンを配置することで、競技者だけでなく、審判、あるいは観客も空中からの視点を見ることができる。

ハッカソンの参加者に向けトリトリのデモンストレーション（図 5.15）をした



図 5.12: ドローンがドローンを捕まえている様子

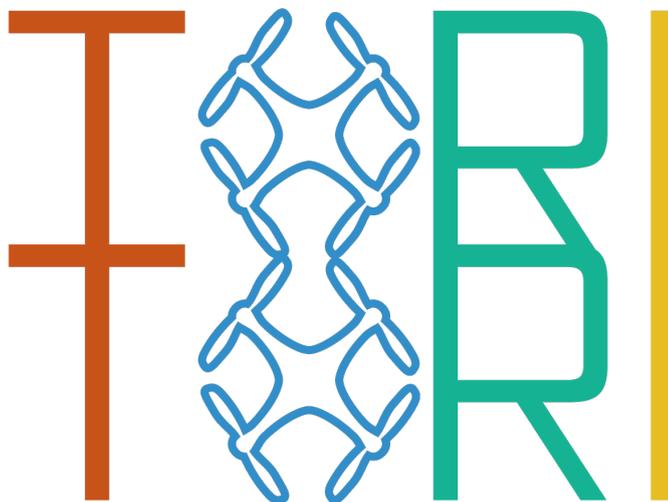


図 5.13: 超人スポーツ「トリトリ」のロゴ



図 5.14: ドローンの下部に網が取り付けられている様子

後、審査員による審査を受け、最優秀賞を獲得した。審査員からの講評では、「新規性、超人性を強く感じた」、「ドローンがドローンを捕まえる絵面が良かった」、というポジティブな評価の他に、「ドローン同士が衝突する恐れがある」、「プレイヤーも観客も危険を感じた」、「風の影響を考慮した競技設計ができていない」、「観客として、何を応援すればいいかわからない」ことが改善点として得られた。また、ハッカソンを終えたチームメンバーからは、「自分が空を飛んでいるような感覚を得られた」、「初心者でも簡単にドローンを扱えた」、「もっとプレイして練習したい」といった評価の他に、「網からドローンを外す作業に時間がかかる」という課題が挙げられた。

こうした評価を受け、ルールの下で公平に競技が行われていること、実空間における空中がフィールドであること、視覚の拡張や飛行体験など身体能力を超えたパフォーマンスが発揮されていることが考えられる。ゆえに、空中スポーツの定義を満たした超人スポーツを提案することができたと言える。しかし、今後こういった活動が展開されていく上で、非対称型対戦スポーツ(図 5.16)としたり、ドローンガードを開発したりするなど、安全性を考慮した競技設計をする必要が



図 5.15: ハッカソンにてトリトリのデモンストレーションを行っている様子

ある．一方，開発チームの中にいる葛巻町役場職員が好印象を抱いているため，葛巻町がドローンの盛んな街になるよう役場全体に働きかけている．こうした社会展開も，今後の展望として挙げられる．

5.4. 没入型空中スポーツにおけるシステムの評価及び考察

没入型空中スポーツにおいて本システムを用いることが有効であるかを評価するため，2016年7月29日から31日までの3日間で秋田県仙北市にて行われた「Drone Impact Challenge ASIA CUP 2016 Semboku Akita⁶」にて，トリトリにおける本システムを使用する実験を行った（図 5.17）．本実験にて初めて屋外における本システムの動作検証を行ったが，環境の影響を受けることなく正常に動作することを確認できた．空中に静的にホバリングさせたターゲットドローンを本システムのロボットで捕獲することを試みた（図 5.18）ところ，体験者が身体を動

⁶ 「Drone Impact Challenge」，<http://dichallenge.org>（参照 2016-7-29）

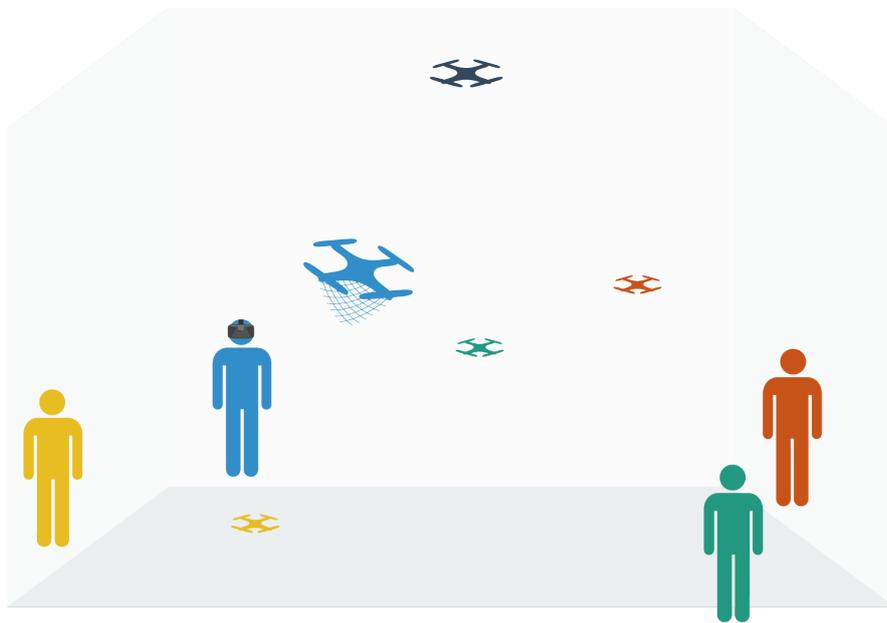


図 5.16: 非対称型対戦形式にしたトリトリのイメージ



図 5.17: トリトリを用いた飛行型トレイグスタンスシステムの検証実験をしている様子

かしながら捕まえることができた。しかし、本システムにおける映像伝送におよ



図 5.18: 飛行型トレイグジスタンスロボットでドローンの捕獲を試みている様子

そ 200ms の遅延があることから、動的なものを追うことは困難であり、風の影響により流れてしまうターゲットを追いながら捕まえることはできなかった。今後、本システムをトリトリのような空中スポーツだけでなく、様々なアプリケーションで展開されることが期待される。従って、瞬く間に目紛しく変化するスポーツの局面や凡ゆる場面に適応させる場合、映像の伝送に用いるシステムの改善が求められる。

5.5. 本章のまとめ

第4章で構築した飛行型トレイグジスタンスシステムを用いたアプリケーションの1つとして、岩手発超人スポーツ開発プロジェクトにおいて没入型空中スポーツの提案を行った。岩手発超人スポーツ開発プロジェクトの概要を述べ、プログラムの一環であるアイデアソン及びハッカソンにおける議論や提案について述べた。アイデアソンでは、岩手らしさを表現をするため、盛岡市を舞台に展開される宮沢賢治の童話作品である『銀河鉄道之夜』に登場する「鳥捕り」をモチーフに、空中をフィールドとする超人スポーツに関する議論を行った。競技者及び

観戦者が楽しむため、やりこむことで上達する要素があることや、直感的にルールを理解できること、身体能力に関係なく参加できることと言った要素が挙げられた。ハッカソンでは、「身体拡張感を感じる」と及び「『銀河鉄道の夜』の世界観を踏襲すること」を空中スポーツの軸とし、ドローンがターゲットとなるドローンを捕まえることで得点を競い合う超人スポーツ「トリトリ」の提案を行った結果、審査員による最優秀賞を受賞した。審査員からの講評を踏まえ、ルールの下で公平に競技が行われていること、実空間における空中がフィールドであること、視覚の拡張や飛行体験など身体能力を超えたパフォーマンスが発揮されていることが考えられる。ゆえに、空中スポーツの定義を満たした超人スポーツを提案することができたと言える。しかし、今後こういった活動が展開されていく上で、安全性を考慮した競技設計をする必要がある。一方、開発チームの中にいる葛巻町役場職員が好印象を抱いているため、葛巻町がドローンの盛んな街になるよう役場全体に働きかけている。こうした社会展開も、今後の展望として挙げられる。没入型空中スポーツにおいて本システムを用いることが有効であるかを評価するため、トリトリにおける本システムの評価実験を行った。その結果、空中に静的にホバリングさせたターゲットドローンを本システムのロボットで捕獲することをができた。しかし、本システムにおける映像伝送におよそ 200ms の遅延があることから、動的なものを追うことは困難であり、風の影響により流れてしまうターゲットを追いながら捕まえることはできなかった。今後、本システムをトリトリのような空中スポーツだけでなく、様々なアプリケーションで展開されることが期待されたため、瞬く間に目紛しく変化するスポーツの局面や凡ゆる場面に適応させる場合、映像の伝送に用いるシステムの改善が求められる。

第6章

結 論

本研究では、本章で述べた背景と目的を基に、没入感及び身体拡張感を伴った飛行体験の工学的実装について検討し、体験可能なシステムを構築し、システムを用いた空中スポーツの提案を行った。

第1章では、昨今のスポーツにおける空中を使った戦術やパフォーマンスの有効性を挙げ、またデザインとエンジニアリングの両面からのアプローチにより、実空間における三次元的な高さ方向を有したフィールドで試合を展開する新たなスポーツを実現するための身体能力が拡張された感覚を得ることのできるシステムを本研究の目的とした。私たちは生まれながらにして空での活動に憧れを抱き、さらに誰もが空でスポーツをプレイしている様な未来を多くの人が想像している。こうした背景を踏まえ、空中における没入型のスポーツを実現するため、体験者があたかも空を自由に飛んでいるかのような身体拡張感を工学的に実現することを本研究の目的とした。本稿における空中スポーツを、超人的な能力を獲得したプレイヤーが空中で行うスポーツであると定義した。そこで、「空中をフィールドとするスポーツであること」「身体能力を超えたパフォーマンスであること」「ルールの下で公正に競技が行われていること」に該当するものを空中スポーツの条件とした。スポーツとテクノロジーの融合で身長や体格といった身体的な制限を飛び越えることにより、身体能力の拡張を行い、誰もが新しいフィールドで、新しいスポーツを楽しむことができる。さらに、それらの新しいスポーツを体験しているとき、超人的な力を手に入れる可能性を見出すことができる。一方、当然ながら私たちは鳥のような飛行能力を物理的に構築することは困難であることから、体験者にとって本質的に飛行しているかのような感覚を得ることができれば良いと考えられる。従って、本研究では体験者が地上にいながらにして空中にいるか

の様な遠隔存在感を得ながら，まるで体験者自身の身体能力が拡張された感覚を得ることのできるシステムを提案すると述べた．

第2章では，第1章で述べた背景に関連した先行事例を紹介した．主に遠隔地における臨場感・没入感を伴う活動，感覚制御による身体拡張について，4つの要素に分けて示した．これまで，私たちが活動する空間の拡張を目的とした身体拡張に関する研究は多く行われてきた．可動式の座席を用い宙吊りや前傾をさせることで，浮遊感を提供するシステムが提案されている．遠隔存在感を得ながら三次元空間をリアルタイムに自由に行動し，遠隔作業や遠隔コミュニケーションを実現するために，視聴覚や触覚，身体動作の伝送を行い，遠隔操作ロボット制御の精度や，コミュニケーションの質を向上を図っている．また，ユーザがロボットを遠隔操作するための方法として身体動作とロボット制御の同期によるものや，キー入力によるものを用いることで，遠隔地においてユーザが自然であると感じることのできる制御を実現している．しかし，人間の身体機能を模した容姿であるロボットの多くは常に地面に機体を接することで安定性や移動性を実現しているため，活動範囲は路面形状や建築物の構造に依存している．一方で，体外離脱体験のような実空間を自由に動き回ることのできる視点を獲得したりするため，遠隔操作ロボットの一つであるドローンを用いることで，私たちの身体能力や環境に依存することなく，スポーツや災害救助支援等を目的とし，三次元空間をリアルタイムに自由に行動することを実現している．

第3章では，飛行型トレイグジスタンスの概念の提案を行った．飛行型トレイグジスタンスの目的は，体験者が地上にいながらにしてあたかも空を飛んでいるかのような体験を提供することである．しかしながら，私たちは鳥のような飛行能力を物理的に構築することは困難であることから，体験者にとって本質的に飛行しているかのような感覚を得ることができれば良いと考えられる．そこで，体験者自身の身体能力が拡張された感覚を得ることのできるシステムの提案を行った．また，飛行型トレイグジスタンス実現におけるシステムの構成要件を述べた．本研究における飛行型トレイグジスタンスの特徴は，地上にいながらにして空中にいるかのような感覚を提供し，空中スポーツを競技することができる点である．従って，飛行型トレイグジスタンスにおける構成要件は，遠隔存在感，自在性，浮

遊感の3要素であると考えられる。遠隔存在感を創出するため、体験者の視野角とロボットの視野角の同期を行う。また、自在性を創出するため、地上にいる体験者の身体動作によるマルチコプター型のドローンを用いた制御方法を提案した。そして、飛行しているかのような身体拡張感をさらに演出するため、コックピットの設計を行うと述べた。

第4章では、第3章で述べた飛行型トレイグジスタンスの設計指針を基に、プロトタイプシステムの設計及び試作を行った。飛行型ロボットに装着されたカメラの映像を、リアルタイムに体験者のHMDで見せることによって、視覚のシンクロを実現する。また、体験者の身体の動きと連動して飛行型ロボットが動き、運動のシンクロを実現することで、体験者にあたかも空を飛んでいるかのような感覚を提供する。そこで、第1プロトタイプ、及び第2プロトタイプの試作を行い、動作確認のための試験を行った。第1プロトタイプでは頭部動作の追従による視野の移動ができる頭部機構と、身体性を伴ったロボットの操作システムの構築を行った。第1プロトタイプの設計には、飛行における機体の安定性の欠如、視野角移動における遅延と言った問題が生じた。そこで、第2プロトタイプでは、より早い視野角の移動と、より安定した飛行を可能にすることで第1プロトタイプにおける問題を解決し、さらに浮遊感を創出するためのコックピットを設計することで、飛行型トレイグジシステムを構築した。体験者が視野角を移動する際、HMDのセンサ情報を用いることで頭部動作が検出され、その情報を基にレンダリングされる方向を変化させることで視野方向の移動を行う。従って、体験者の視野方向の移動に伴いネットワークを介す様な情報伝送は行われることがなく、体験者側のPCにおけるソフト内での処理により表示される映像は変化されるため、視野角の移動に伴う映像遅延はほぼ生じることがない。また、体験者の頭部をヨー軸で回転させたり、身体をピッチ軸及びロール軸に傾けたとき、ロボットも同様な移動をしていたため、身体動作の同期を行うことができたと言える。そして、体験者が地上にいながらにしてまるで空中を飛んでいるかのような感覚を創出するコックピットの設計を行った。これらの結果を踏まえ、視野角の同期による遠隔存在感、身体性を伴った移動による自在性、コックピットの設計による浮遊感の3つの構成要件を満たす、空中における身体拡張感を実現する飛行型テレ

イグジスタンスシステムを構築することができたと言える。

第5章では、第4章で構築した飛行型トレイグジスタンスシステムを用いたアプリケーションの1つとして、岩手発超人スポーツ開発プロジェクトにおいて没入型空中スポーツの提案を行った。岩手発超人スポーツ開発プロジェクトの概要を述べ、プログラムの一環であるアイデアソン及びハッカソンにおける議論や提案について述べた。アイデアソンでは、岩手らしさを表現をするため、盛岡市を舞台に展開される宮沢賢治の童話作品である『銀河鉄道の夜』に登場する「鳥捕り」をモチーフに、空中をフィールドとする超人スポーツに関する議論を行った。競技者及び観戦者が楽しむため、やりこむことで上達する要素があることや、直感的にルールを理解できること、身体能力に関係なく参加できることと言った要素が挙げられた。ハッカソンでは、「身体拡張感を感じること」及び「『銀河鉄道の夜』の世界観を踏襲すること」を空中スポーツの軸とし、ドローンがターゲットとなるドローンを捕まえることで得点を競い合う超人スポーツ「トリトリ」の提案を行った結果、審査員による最優秀賞を受賞した。審査員からの講評を踏まえ、ルールの下で公平に競技が行われていること、実空間における空中がフィールドであること、視覚の拡張や飛行体験など身体能力を超えたパフォーマンスが発揮されていることが考えられる。ゆえに、空中スポーツの定義を満たした超人スポーツを提案することができたと言える。しかし、今後こういった活動が展開されていく上で、安全性を考慮した競技設計をする必要がある。一方、開発チームの中にいる葛巻町役場職員が好印象を抱いているため、葛巻町がドローンの盛んな街になるよう役場全体に働きかけている。こうした社会展開も、今後の展望として挙げられる。没入型空中スポーツにおいて本システムを用いることが有効であるかを評価するため、トリトリにおける本システムの評価実験を行った。その結果、空中に静的にホバリングさせたターゲットドローンを本システムのロボットで捕獲することをができた。しかし、本システムにおける映像伝送におよそ200msの遅延があることから、動的なものを追うことは困難であり、風の影響により流れてしまうターゲットを追いながら捕まえることはできなかった。今後、本システムをトリトリのような空中スポーツだけでなく、様々なアプリケーションで展開されることが期待されたため、瞬く間に目紛しく変化するスポーツの局面や凡ゆる

場面に適応させる場合，映像の伝送に用いるシステムの改善が求められる．

以上のように，本稿では没入型空中スポーツのための飛行体験の工学的実装について述べ，飛行型テレプレゼンスの実現可能性を示すことができた．今後は飛行型テレプレゼンスシステムが実際に活用されていく中で，超人スポーツ「トリトリ」のような，目的に適応したアプリケーションの出現や展開が期待される．

謝 辞

本研究の指導教員である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は、幅広い知見からの確なご指導と激励を頂きました。また、研究活動を含む総括的な物事に取り組む姿勢に関し、多大な刺激を頂きました。本研究の副指導教員である慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科のフェルナンド・チャリス特任講師には、システム設計、開発に関し、ご指導やご助言を頂いただけでなく、他愛もない相談にも快く乗って頂きました。本研究の副指導教員である慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の砂原秀樹教授には、研究の方向性についてご指導やご助言を頂きました。

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の稲見昌彦客員教授には、研究の方向性についてご指導やご助言を頂きました。慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の中村伊知哉教授には、研究の方向性や論文執筆などに関しご指導頂きました。慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の奥出直人教授には、研究の方向性に関しご助言を頂きました。

研究におけるシステム設計、開発に関し、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科のサライジ・ムハマド・ヤメン氏にはご協力とご助言を頂きました。

研究に取り組む姿勢や私生活における立ち振舞に関し、北海道大学の仲谷正史氏にはご指導とご助言を頂きました。

DJI JAPAN 株式会社の下稲葉健児氏にはシステム開発におけるご助言を頂きました。エウレカコンピュータ株式会社の犬飼博士氏には研究に対しゲームデザインの観点からご助言を頂きました。FPV Robotics の駒形政樹氏には研究における実験に関し、ご助言頂き大変お世話になりました。株式会社セントラルウェルネスクラブ慶応日吉店の高林栄店長には研究における実験に関し、ご協力頂き大変お世話になりました。岩手発超人スポーツプロジェクトのドローンチームの

皆様は、スポーツクリエイションに関する議論や秋田県仙北市での実験を行った際、大変お世話になりました。慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の超人スポーツプロジェクトの皆様、リアリティメディアプロジェクトの皆様、慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の皆様、慶應義塾高等学校水泳部競泳部門OBの皆様には、暖かい心で実験にご協力頂きました。

最後に、私の家族には長きに渡る学生生活を凡ゆる面から支えて頂きました。

お世話になりました方々へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げたく、謝辞に代えさせていただきます。

参 考 文 献

- [1] 文部科学省, 「スポーツ振興基本計画(平成12年9月13日文部省告示第151号)」, http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/plan/06031014/001.htm (参照2015-12-3) .
- [2] 中西 純司, 「「文化としてのスポーツ」の価値」, 『人間福祉学研究』, 第5巻第1号, pp.7-24, 2012.
- [3] J. K. Rowling, “Harry Potter and the Philosopher’s Stone”, Bloomsbury, 1997.
- [4] スティーブン コトラー, 『超人の秘密: エクストリームスポーツとフロー体験』, 熊谷 玲美 訳, 早川書房, 2015.
- [5] アンディ クラーク, 『現れる存在 - 脳と身体と世界の再統合』, 池上 高志 監訳, 森本 元太郎 監訳, エヌティティ出版, 2012.
- [6] 文部科学省, 「スポーツ基本法(平成23年法律第78号)〔条文〕」, http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/kihonhou/attach/1307658.htm (参照2015-12-3) .
- [7] Keita Higuchi, Yoshio Ishiguro, and Jun Rekimoto, “Flying Eyes: Free-space Content Creation Using Autonomous Aerial Vehicles”, CHI ’11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.561–570, 2011.
- [8] Robin Ritz, Mark W. Müller, Markus Hehn, and Raffaello D’Andrea, “Co-operative quadcopter ball throwing and catching”, 2012 IEEE/RSJ In-

- ternational Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2153–0858, 2012.
- [9] Kei Nitta, Keita Higuchi, and Jun Rekimoto, “HoverBall: augmented sports with a flying ball”, AH’14 Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference, 2014.
- [10] 舘 暲, 佐藤 誠, 廣瀬 通孝, 『バーチャルリアリティ学』, コロナ社, 2010.
- [11] Randy Pausch, Jon Snoddy, Robert Taylor, Scott Watson, and Eric Haseltine, “Disney’s Aladdin: First Steps Toward Storytelling in Virtual Reality”, SIGGRAPH ’96 Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.193–203, 1996.
- [12] The Walt Disney Company, 「ソアリン・オーバー・カリフォルニア」, 『tdrnavi.jp』, <http://tdrnavi.jp/park/dca/attraction/764/> (参照 2016-7-9) .
- [13] Hiroo Iwata, “Floating Eye”, Ars Electronica Festival 2001, O.K.center, Linz, pp.1–6, Sep, 2001.
- [14] M. Itoh, Y. Yanase, M. Fufukawa, and MHD Yamen Saraiji, 「Hiyoshi Jump」, https://www.youtube.com/watch?v=SQ2tCMX0d_w (参照 2015-12-14) .
- [15] Max Rheiner, “Birdly an Attempt to Fly”, SIGGRAPH ’14 ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies Article, No.3, 2014.
- [16] 株式会社ハシラス, 株式会社 HOME360, 「座間味ロケットジャンプ」, <http://home360.co.jp/座間味島ロケットジャンプ/> (参照 2016-6-10) .
- [17] Hansen Vance L, Rue Richard O, USPatent 3,564,134 A (1971.02.16).
- [18] Flirtey, 「Flirtey」, <http://flirtey.com> (参照 2016-1-8) .

- [19] Keita Higuchi, and Jun Rekimoto, “Flying head: a head motion synchronization mechanism for unmanned aerial vehicle control”, CHI ’13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, 2013.
- [20] 古川 正紘, MHD Yamen SARAIJI, Charith Lasantha FERNANDO, 南澤 孝太, 舘 暲, “テレグジスタンスの研究 (第 76 報): 巨人化体験のための視覚伝送系の設計と実時間映像伝送系の実装”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2014, 2014.
- [21] S. Tachi, 『Telexistence』, World Scientific, 2010.
- [22] 山澤 一誠, 尾上 良雄, 横矢 直和, 竹村 治雄, “全方位画像からの視線追従型実時間画像生成によるテレプレゼンス”, 電子情報通信学会論文誌, D, Vol.J81-D2, No.5, pp.880–887, 1998.
- [23] Kasahara, Shunichi, and Rekimoto, Jun, “JackIn: Integrating First-Person View with Out-of-Body Vision Generation for Human-Human Augmentation”, AH ’14 Proceedings of the 5th International Conference, 2014.
- [24] 株式会社アシックス, 「ウェアラブルデバイスを用いた新たなスポーツ体験のシステムを公開」, <http://corp.asics.com/jp/press/article/2016-02-24> (参照 2016-6-17) .
- [25] Charith Lasantha Fernando, Masahiro Furukawa, Tadatoshi Kurogi, Sho Kamuro, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi, “Design of TELESAR V for Transferring Bodily Consciousness in Telexistence”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5112–5118, 2012.
- [26] 廣多 馨, 「広域分散型ロボットを用いたユビキタステレ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(未刊行), 2012.
- [27] 宮沢 賢治, 『銀河鉄道の夜』, 角川春樹事務所, 2011.

関 連 発 表

国際会議

1. Hirohiko Hayakawa, Charith Lasantha Fernando, MHD Yamen Saraiji, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi: Telexistence Drone: Design of a Flight Telexistence System for Immersive Aerial Sports Experience. In Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference (AH '15), Singapore, pp.171–172 (2015.3).

国内学会

1. 早川裕彦, サライジ ムハマドヤメン, フェルナンド チャリス, 南澤孝太, 舘 暲: テレイグジスタンスの研究(第 82 報) 没入型空中スポーツ体験のための飛行型テレイグジスタンスシステムの設計, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015(Robomec2015), 2A2-F10 (2015.5).