

トレイ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—

Study on Telexistence LXXVI

-Visual Transfer Design and Basic Implementation for Giant Experience-

- 正 古川正紘 (慶應大院) 学 MHD Yamen SARAJI (慶應大院)
 正 Charith Lasantha FERNANDO (慶應大院) 正 南澤孝太 (慶應大院)
 正 舘 暲 (慶應大院)

Masahiro FURUKAWA, Keio University, Graduate School of Media Design, m.furukawa@tachilab.org
 MHD Yamen SARAJI, Keio University, Graduate School of Media Design
 Charith Lasantha FERNANDO, Keio University, Graduate School of Media Design
 Kouta MINAMIZAWA, Keio University, Graduate School of Media Design
 Susumu TACHI, Keio University, Graduate School of Media Design

We propose a concept of giant experience to extend our bodily size limitation. In this paper, we address requirements including binocular vision and much wider pupillary distance(PD) to let users to feel surroundings smaller. As a result, it is expected to be felt as if being the giant. As a basic prototype to evaluate it, we report a basic implementation of the binocular vision under much wider PD.

Key Words: Giant Experience, Telexistence, Drone, UAV

1 はじめに

人間の身体能力は自身の身体寸法によるところが大きく、また取りうる行動範囲もまたこれにより定まっている。言うまでもなく既に人間の身体寸法を超越するための技術基盤が多数提案されている。例えば、無人偵察機 (Unmanned Aerial Vehicle) は目の機能の拡張であり、千里眼に相当する超人的な視機能を実現する。また、建設機械は総じて腕や手の拡張であり、同様に超人的な腕力を実現している。これらの事例は、身体機能の一部の能力を極端に拡張した事例と位置づけることができる。

一方で、身体寸法そのものを拡大したとしても、統合された身体として目や手を自身の一部のように取り扱うことができれば、超人的な身体を獲得することに匹敵すると考えられる。つまり、バーチャルな巨人化の実現である。これにより得られるメリットは大きく、例えば土木工事や災害対応などに適応するならば、巨人の視点で上空からの一人称視点を得ながら2台の建設機械を両腕として取り扱うことで1体の巨人化した身体を実現できる可能性がある。

また遠隔地から一人称視点映像に基づいて上空から探索行動を行う場合、3次元の移動が生じるため、操縦者には高度な操縦技術の獲得が要求される。これに対し、同様の探索を行う場合においても、巨人化した視点から足下を見渡すという身体感覚に基づいて行動することができるかと仮定する。すると地上での歩行と同様に、2次元平面を移動する身体感覚で行動することができるかと期待される。従って操縦技能の獲得コストを大幅に削減することができる可能性がある。

さらに、巨人化した身体を用いた新しいスポーツの創造も考えられる。例えば、実世界のフルマラソンコースを巨人化し30分で走破したり、サッカーフィールドの全体を好きな位置から観戦したりできるなど、体験および観戦の双方においてもたらされるメリットが大きい。

当然ながら、巨人のような巨大な身体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等価な巨人化した身体を得ることができればよいと考える。そこで本稿では、自分自身の体が非常に大きくなったように感じるという巨人化体験を実現する視覚伝送系の設計法を提案する。概念図を図1に示す。さらに、実時間の視覚伝送系について実装を行ったので報告する。

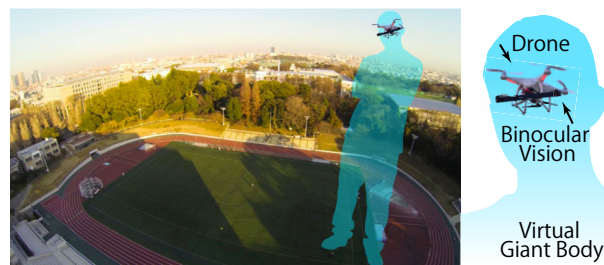


Fig.1 Concept Image of Giant Body (Drone and Virtual Body is Superimposed for Conceptual Sketch)

2 先行研究

巨人化体験とは、図1に示すように上空にある巨人の視点を一人称で体験するということである。

Saakesらは、上空の視点映像を利用して地上にある車両の操縦を行う手法を提案している [1]。その結果、車両周辺の環境と車両との相対姿勢を容易に把握できることを示している。しかしこれは車両に対する三人称視点を提供することで実現されており、一人称視点の提供を目的とする本研究とは異なる。

Higuchiらは、自由空間におけるスポーツコンテンツ生成のための飛行型カメラの制御手法を提案している [2]。この研究では飛行型カメラがスポーツ選手の動きを追跡し、自由なアングルから選手の撮影を行うことができる。しかしこれは映像の記録が目的であり、撮影中の動画は体験者にフィードバックされない。これに対しスポーツ中の自分自身のフォームを三人称視点からリアルタイムに観察できるようにすることで、熟練者が持つとされている身体運動の客観視を体験できる手法が提案されている [3]。これは、体験者はカメラ映像をリアルタイムで観察するが、三人称視点で観察することに意義がある。

岩田らは、飛行船に搭載された広角カメラの映像を地上にある広角ディスプレイに投影し、体験者が上空の視点を一人称で体験できる作品を発表している [4]。体験者は頭部を取り囲む広角ディスプレイ内で見渡し動作が可能ではあるが、飛行船の運動は頭部運動と対応していない。

これに対し、一人称視点を体験者にリアルタイムに提供した上で、ユーザの頭部運動に飛翔型カメラの姿勢を同期させる手法が提案されている [5]。これにより、カメラの動作を身体感覚と結びつけることができ、操縦に求められる多次元パラメータを身体運動で入力可能であることを示した。しかし研究では、概ね身長付近の高度を飛翔させており、また単眼カメラを用いている。

これに対し本研究では、身体感覚獲得のために両眼視が求められると考える。そこでバーチャルに巨人化した身体を実現するために、本研究ではトレイグジスタンスの概念を用いる。トレイグジスタンスとは、遠隔地にいながらにしてまるでその場に臨んでいるかのような高い臨場感をもたらすだけでなく、その場を自由に行動することができ、さらに自分の存在そのものを遠隔地に拡張を可能にする技術概念である [6]。本研究では特に、両眼視を行うことにより獲得される3次元空間性に注目している。

トレイグジスタンスシステムの多くは、ユーザの身代わりとなって行動する代理ロボットと、コックピットから構成される。例えば、TELESAR V はヒトと同等のサイズの両腕・両手をもつ上半身 53 自由度の代理ロボットから構成されるトレイグジスタンスシステムである [7]。ヒトと同等の大きさや自由度をもっていることに加えて、両眼カメラによる自然な距離感が得られることから、自分の手のように器用に把持や受け渡しなどの動作を行うことができる。

TELESAR V の例が示す通り、等身大の代理ロボット設計において、眼間距離は体験者と同等であることが前提であった [6]。これに対し、代理ロボットの大きさを小さくすることを試みた事例として文献 [8] が挙げられる。この事例を拡張し、本研究においても眼間距離と身体サイズの相関性に注目する。

3 設計

3.1 要求要件

本研究における目標は、上空を飛行しているかのように感じさせることではなく、地に足がついていて身体が大きくなったように感じさせることである。

まず前提として、本システムはユーザが利用するコックピットと、ユーザの動作に実時間で追従する飛翔型ロボットヘッドとのマスタスレーブ構成をもつものとする。マスタ側にいるユーザは、頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display:HMD) を装着することで、スレーブ側の飛翔型ロボットヘッドが撮影した映像を実時間で観察し、まるでロボットヘッドがある位置に自分の視点位置があるかのような一人称体験を得ることができる。同時に、ユーザの頭部の位置姿勢を HMD を用いて計測する。スレーブ側の飛翔型ロボットヘッドは、ユーザの頭部位置姿勢を次節のアルゴリズムに従って再現するように動作する。

この前提に基づき、本章では巨人化体験のための視覚伝送系設計について述べる。設計要件は両眼立体視、眼間距離の拡大、視点高さの確保、両眼映像の姿勢安定化、能動的な頭部回転・並進運動の再現の5つである。

3.2 両眼立体視

巨人化のための設計要件としての両眼立体視では、次の点が最も重要である。すなわち、目の前に広がる空間が現実のものよりも極端に小さくそして近くに感じられるような視覚伝送系の構築である。言い換えると、両眼立体視を外界までの距離感を通して自己身体の縮尺を構築することが重要である。そのためには単眼視ではなく、両眼立体視が有効であると考えられる。

3.3 眼間距離の拡大

つまり本研究では、前述の目標を達成しうる両眼視差をどのように構築できるかが焦点となっている。そこで人間の視機能に着目するとき、制御可能なパラメータは、網膜像の大きさ・水晶体調節・輻輳角が挙げられる。ここでまず、前述の目標を達成しうる設計法として、網膜像の大きさに着目した両眼カメラの視野角を広角化が考えられる。両眼カメラの広角化は被写体の見込み角を小さくできることから、網膜状で被写体を小さく観察すること

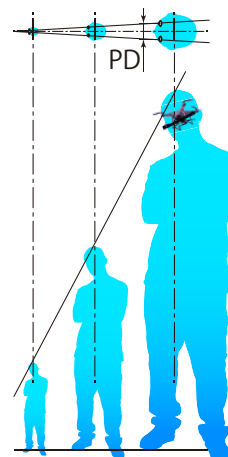


Fig.2 Hypothesis on Relationship between Height and Pupillary Distance

になる。一方で、これは被写体までの視距離を伸ばすことに相当するため、小さく観察できる反面、被写体をより遠くに感じられてしまうことになり、要求に反する結果を生む。

次に、両眼が被写体に対して張る角である「輻輳角」に着目するとき、両眼カメラの眼間距離の拡大が考えられる。輻輳角は眼球の内転運動として被写体の距離手がかりをもたらす。視距離 0.2~1m の範囲で水晶体調整に対し支配的であることが知られている [9]。被写体が近づくにつれ輻輳角が大きくなり、これが被写体への距離感をもたらす支配的な要因である。視距離を小さくするだけでなく、眼間距離を広げることで輻輳角が大きくなることは幾何学的に自明である。

そこで本研究では、図2に示す通り、眼間距離を拡大させることにより、巨人化時の見かけ上の頭部の大きさを相似的に拡大させることとする。

3.4 視点高さの確保

視点高さは身長を認識する上で支配的なパラメータである。バーチャルな身体像を構築するためには、視点位置もまた他のパラメータと相似的に操作されるべきであると考えられる。つまり本研究でも、先行研究 [8] でも述べた通り、身長は眼間距離に対しある正の相関関係を持つものとする (図2)。言い換えると、前述の眼間距離の拡大は、数 m 以内の近距離では大きな輻輳・調整矛盾をもたらすことから成立しない。すなわち一定以上の視点高さが必要なのである。このことから、視点高さや眼間距離の間に一定の相関性を維持させることが重要であることが分かる。

バーチャルな身体像構築のためには、視点高さに加えて、ユーザ自身の身体運動と対応関係のある視界映像が提供される必要がある。つまり、ユーザの能動的な身体運動である頭部の回転並進運動を、拡大された身体の視点位置で再現する必要がある。従って、両眼カメラを静止させたまま上昇させるのではなく、一定の運動性能を持たせる必要がある。そこで本研究では、能動的な視点移動を実現するために、多転翼機 (Drone) を用いる。

3.5 両眼映像の姿勢安定化

両眼映像の姿勢は、機体の姿勢によらず独立に、ユーザの頭部姿勢と一対一に対応していることが求められる。従って、両眼映像が機体姿勢と独立でない場合、機体の並進運動時にユーザの意図しない視野回転がもたらされ、ユーザ自身の見渡し動作との関連性が阻害される結果、自分で見渡しているという随意性が損なわれるものと考えられる。

しかし多転翼機は原理上、揚力の一部を並進運動のための推進力に割り当てるため、並進運動時に機体姿勢を進行方向に傾斜させる必要がある。つまり機体の並進運動と姿勢は独立していない。

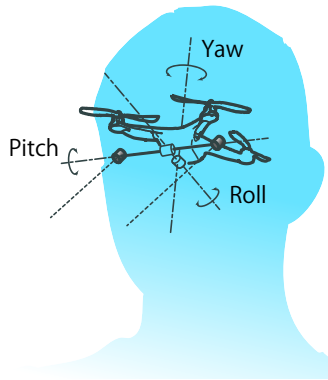


Fig.3 Gimbal as Stabilizer and Head 3-DoF

これを解決する方法として、画像処理により両眼映像のオプティカルフローを取り除く手法、もしくはジンバル機構に寄り機械的に両眼カメラユニットの姿勢を安定化させる手法が考えられる。前者は単眼で行われる回転成分の除去 [11] を両眼カメラで実施する方法である。具体的には、両眼カメラの視野角を広角化させ、外乱である機体の揺動による回転成分を取り除いた映像をユーザに与える。これは画像処理によるフレーム遅延の発生が発生しうだけでなく、次節で述べる通り、両眼立体視を維持したまま能動的な頭部運動を再現する場合に、まだ解決すべき課題が残されている。

後者のジンバル機構は空撮技術として一般的な手法であり、機体姿勢によらずカメラの姿勢を静止させる効果をもたらす。これは両眼カメラ間の相対姿勢を崩さず、つまり両眼視差の整合性を維持したまま視界映像の安定化が行えるという利点をもつ。本稿では、後者のジンバル機構を採用することを前提に設計を行う。ジンバルの軸配置としては例えば、図3の構成が考えられる。

3.6 能動的な頭部回転並進運動の再現

前述の通り、上空から眺めているのではなく、自らが能動的に見ているという体験を成立させることが求められる。つまり本研究においては、巨人化した際に自分で周りを見渡していると感じられることに相当する。そこで本システムでは、ユーザの能動的な頭部運動を上空で再現することでこれを実現する。

簡単のため、人間の骨格によってもたらされる回転並進運動の不可分性は無視し、頭部の回転運動は両眼中心点まわりに生じるものと簡略化する。すると、頭部運動は回転成分と並進成分に分けられる。

頭部運動への追従は次の2つの方法によって実現が可能である。まず、全天球型のカメラなど広視野をもつカメラを用い、頭部姿勢に応じて視線方向にある視界を一部切り出す方法である [10]。これに加えて、機上の姿勢センサ情報に基づき、外乱回転成分を補正することができる。しかし、演算処理に要するフレーム遅延が発生するだけでなく、両眼構成を取った場合、左右見渡しに相当する図3におけるYaw軸方向の運動に対して等価視差量を保つことが難しいなどの課題がある。

次に、多数の先行事例で用いられているように、両眼カメラユニットを頭部位置姿勢に追従させる方法である [12][7]。そこで本研究では、図3に示すような軸配置の多軸ジンバル機構を用いることとし、能動的な頭部回転運動を実現することとする。なお、前述の両眼カメラユニットの姿勢安定化も同一のジンバル機構によって実現する。

頭部の並進運動は、注視点を定めた際の見渡し動作などに有効である。先行事例 [5] を基盤とした制御アルゴリズムが適用可能であると考えられる。ただし、Droneの目標座標は、ユーザの頭部並進運動を身長に拡大率に応じて拡大させることで求まるとする。

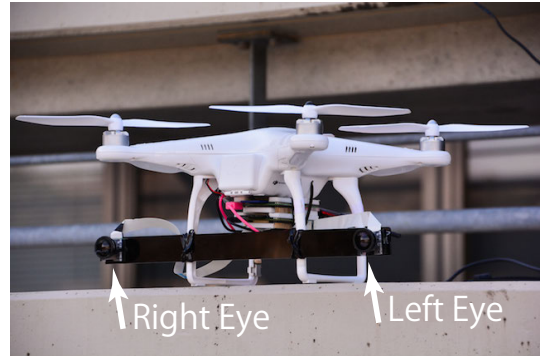


Fig.4 Drone with Binocular Camera

4 実時間両眼映像伝送系

4.1 飛翔型ロボットヘッド

本稿では上記設計に基づき、実時間両眼映像伝送の実装を行ったので報告する。飛翔型ロボットヘッドは上空へ飛翔させつつ能動的な頭部運動を実現可能な運動性能が求められる。そこで本稿では4機の駆動軸をもつ多軸翼機であるDJI社製 Phantomを用いた(図4)。本稿の飛翔型ロボットヘッドは、この多軸翼機、両眼カメラ、画像処理部、ネットワーク部により構成される。

映像伝送系は低遅延かつ高フレームレートであることが求められる。さらに同ロボットヘッドに搭載するため小型軽量である必要がある。そこで両眼カメラモジュールとしてRaspberry Piカメラモジュールを2台用いた。これは、画像処理部として用いたRaspberry Pi上のSoCであるBroadcom社製VideoCore IV(BCM2835)に内蔵されたハードウェアH.264ビデオエンコーダを用いることで、1080p/H.264形式にて30fps撮影およびストリーミングが可能である。Raspberry Piは片眼に1台ずつ、計2台を用いており、両眼間の映像の同期は行っていない。

本稿ではHMDとして対角110度の広視野角をもつOculus VR社製Oculus Developer Kitを用いた。そこで前述のカメラモジュールの視野角をHMDに対応づけるため、を0.4倍のワイドコンバージョンレンズLumen社製LM-FMSWを用いて広角化を行った。

両眼カメラの眼間距離は335mmであった。これは機体の安定性を損なわない範囲でより広い眼間距離を持たせた結果によるものである。一般的な眼間距離として用いられる65mmを基準に考えると、約5倍の眼間距離に相当する。ただし、本稿ではまず両眼視覚伝送系の実装を行うため、ジンバル機構を省略している。従って、図4に示すように、両眼カメラユニットは多軸翼機に直接固定されている。また機体の並進・回転運動は標準的なプロポによる操縦により行っている。

バッテリーを含まない乾燥重量は857gであり、バッテリー搭載時は1030gである。駆動軸間距離は対角350mmである。

4.2 ネットワーク構成

本システムのネットワークをWi-Fi回線上で構築した。飛翔型ロボットヘッド上のWiFiモジュールとして、Logitech社製LAN-WH300NU2を片眼1台ずつ、計2台を用いた。このモジュールはRaspberry Piに直結されている。地上アクセスポイントとしてBuffalo社製WZR-1750DHPを1台用いた。

低遅延性、高解像度という観点からは業務用映像伝送設備の利用が考えられる。例えばTeradek社製Boltなどは公称ゼロフレーム遅延であるが、設備自体の重量が大きく両眼構成とするためには2台必要となり、本稿で構築するロボットヘッド上に搭載することが難しい。同社から提供されているDrone用小型モジュールClipは低遅延・高解像度かつ小型軽量で搭載が可能である。しかしながら、同社独自の通信プロトコルを用いていることから、両眼構成のためのストリームを独自に構築することが難しい。



Fig.5 Flight Test (over view)



Fig.6 Flight Test (close up)

4.3 通信プロトコル

動画圧縮形式として H.264 を用い、ハードウェアエンコーディングを行った。実時間の両眼映像伝送のため、マルチメディアフレームワークとして gstreamer を用い、UDP 接続の Real Time Proctol (RTP) ストリームを構築した。本システムは、片眼で 1 本、計 2 本のストリームを持つ。単眼の解像度は 1280×800、フレームレートは 20fps で映像を送り出した。

受信側では 2 つの異なるポートを介して RTP ストリームを受信し、Oculus Rift で観察するため歪曲収差を逆補正した。使用した機材は Dell 社製 Precision T5500 (CPU Xeon E5645, Memory 12GB), OS は Windows 7 Professional (SP1, 64-bit) である。

4.4 飛行実験

飛行時の飛行安定性・映像遅延・解像度・通信距離を評価するため、飛行実験を行った。実験環境の全景を図 5 に示す。また図 6 に飛行中のロボットヘッドを示す。図 7 は HMD である Oculus Rift 内に提示される映像のスナップショットである。

受信地点から距離約 10m の範囲を 3～5 分程度 3 回飛行させ



Fig.7 Rendered Video displayed in HMD(Oculus Rift)

た。飛行中、両眼映像のストリームは途切れることなく維持されていた。視距離 100m 程度にあるグラウンド対岸を観察した際、両眼の実時間映像を HMD 内で確認し両眼融像させることができた。また、両眼の遅延時間は、概ね 200～350ms 程度であった。これは 29.97fps にて記録された実験記録映像から求めている。なお、機体の揺動による解像度の低下が生じていたが、これはジンバル機構を用いた安定化により改善可能であると考えられる。

5 おわりに

本稿では、身体能力の拡張として、巨大化体験のための視覚伝送系実現における基本設計と試験的実装を行った。今後は視界映像の安定化および能動的頭部運動の再現のための要素技術を構築し、巨人化体験にむけたシステム構築を行っていく。同時に、身長・眼間距離間の相関仮説を検証していく。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (23240017) の支援を受けて行われた。

References

- [1] Daniel Saakes, Vipul Choudhary, Daisuke Sakamoto, Masahiko Inami and Takeo Igarashi. A Teleoperating Interface for Ground Vehicles using Autonomous Flying Cameras
- [2] Keita Higuchi, Yoshio Ishiguro, 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.
- [3] Keita Higuchi, Tetsuro Shimada, Jun Rekimoto, Flying Sports Assistant: External Visual Imagery Representation for Sports Training, Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference, pp. 7:1-7:4, 2011.
- [4] Hiroo Iwata, "Floating Eye", in Ars Electronica Festival 2001 at O.K.center, Linz, 1-6, Sep, 2001
- [5] 樋口 啓太, 曆本 純一, "Flying Head: 頭部動作との同期による無人航空機の操作メカニズム", 情報処理学会 インタラクシオン 2013, pp. 87-94, 2013
- [6] S. Tachi, "Telexistence". World Scientific Pub Co Inc, 2009.
- [7] C. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, S. Kamuro, K. Sato, K. Minamizawa, and S. Tachi, "Design of telesar v for transferring bodily consciousness in telexistence," in Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.5112-5118, 2012.
- [8] 新井瑛子, 古川正紘, 南澤孝太, 館 暲, "レイグジスタンスの研究 (第 73 報) —ミニチュア・ドールハウスの世界を体験するための視覚伝送系設計—", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013.
- [9] 館 暲, 荒井裕彦, "レイグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価", 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.4, pp.314-326, 1989.
- [10] Florian Boehm, Stefan Schneemilch, Axel Schulte, "The Electronic Camera Gimbal", American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [11] Hiroki Mori, Dairoku Sekiguchi, Shigesumi Kuwashima, Masahiko Inami, and Fumitoshi Matsuno. "MotionSPHERE", In ACM SIGGRAPH 2005 Emerging technologies (SIGGRAPH '05), Article 15, 2005.
- [12] K. Watanabe, I. Kawabuchi, N. Kawakami, T. Maeda, and S. Tachi, "Torso: Development of a telexistence visual system using a 6-d.o.f. robot head" Advanced Robotics, vol. 22, no. 10, pp. 1053-1073, 2008.