



# 能動運動視による絶対奥行き知覚 —拡張テレグジスタンスへの挑戦 第 1 報—

Absolute depth perception by active motion  
-Challenge for Advanced Telexistence I

松岡哲平<sup>1)</sup>, 黒川正崇<sup>1)</sup>, 宮本拓<sup>1)3)</sup>, 中谷内優人<sup>1)</sup>, 古川正紘<sup>1)2)</sup>, 前田太郎<sup>1)2)</sup>

Tepei MATSUOKA, Masataka KUROKAWA, Hiroki MIYAMOTO,  
Yuto NAKAYACHI, Masahiro FURUKAWA, Taro MAEDA

1) 大阪大学 大学院情報科学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘, (tepei-matsuoka ,masataka-kurokawa,hiroki-miyamoto, yuto-nakayachi)@hiel.ist.osaka-u.ac.jp)

2) 脳情報通信融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘, (m.furukawa,t\_maeda)@ist.osaka-u.ac.jp)

3) 日本学術振興会(DC2)

概要：人間の空間把握において両眼視と運動視がある。両眼視は図の理解，運動視は地の理解を得意としている。運動視，特に能動運動視が地の理解に必要な不可欠である。しかし，従来のテレグジスタンスにおいて，運動視は重視されておらず，奥行き知覚が十分にできなかった。そこで能動運動視による奥行き知覚の条件について整理し，実際に条件をそろえた場合，連続視点ではない映像提示でも絶対奥行き知覚が出来ることを示す。

キーワード：能動運動視, テレグジスタンス

## 1. はじめに

建設業において，作業員を現場に派遣するための時間的・経済的コストの低減や作業員の安全性確保のために，遠隔操縦への需要が高まっている。遠隔操縦技術の一つであるテレグジスタンス[1]は，人間の持つ判断能力と運動スキルを最大限に活かすことのできる技術である。ここで言うまでもなく操縦者はロボットに対して身体所有感を生起する必要がある，遠隔地の空間把握が必要不可欠である。そのため，空間把握には両眼視と運動視を十分行う必要がある。両眼視で奥行き知覚に用いられる両眼視差は自身の眼間距離によって 1 対 1 に，運動視で用いられる運動視差は運動速度と対象物までの距離によって可変に決まる。つまり，対象物までの距離が長くなるほど両眼視差は減少するが運動視は運動速度を適切に決めることで両眼視差ほどは減少しない。ここで建機操縦の時の作業を考えると目標物は操縦者の位置が 4m~9m 先と遠距離にある。よって，建機の遠隔操縦においては運動視を使用できる映像提示をすることが重要となる

そこで本研究では運動視に焦点を当てる。

しかし，運動視を可能とする遠隔操縦用の映像提示の問題点として撮像系と提示系の映像遅延の問題がある。操縦者の頭部運動を遠隔地に伝送しその動きを反映したカメラが撮像したものを操縦側に伝送するためである。その遅延を解決する方法として，撮像系において複数視点から撮像し，その映像を常に伝送して起き，頭部運動に合わせて映像を切り替えるという方法が考えられるが複

数視点の映像をリアルタイムに同時に伝送するのは映像伝送量が極めて多く，実現するのは難しい。

その問題を解決するため，黒川らが頭部能動運動時に 2 視点からの映像のみを用いて，映像を提示する WobbleStereo や輝度合成という方法で奥行き弁別が可能であることを明らかにした[2]。しかし，操縦の作業効率において重要である観測者から目標物までの距離という絶対距離知覚が可能かどうかは明らかになっていない。

そこで WobbleStereo や輝度合成において絶対距離知覚が可能であるかを論じ，実際に実験で検証する。このことにより，能動運動視を可能とする遠隔操縦システムにおける情報伝送量の削減についての可能性について提案する。

## 2. 能動運動視における奥行き手掛かりについて

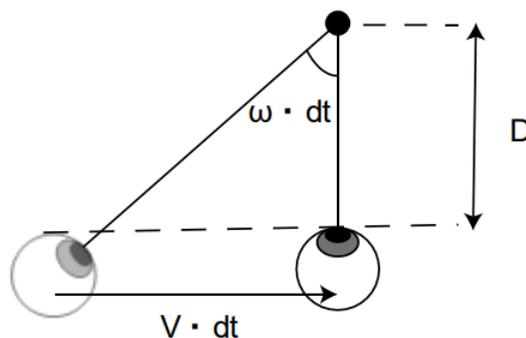


図 1:能動運動視による眼球回旋角速度  $\omega$  の獲得

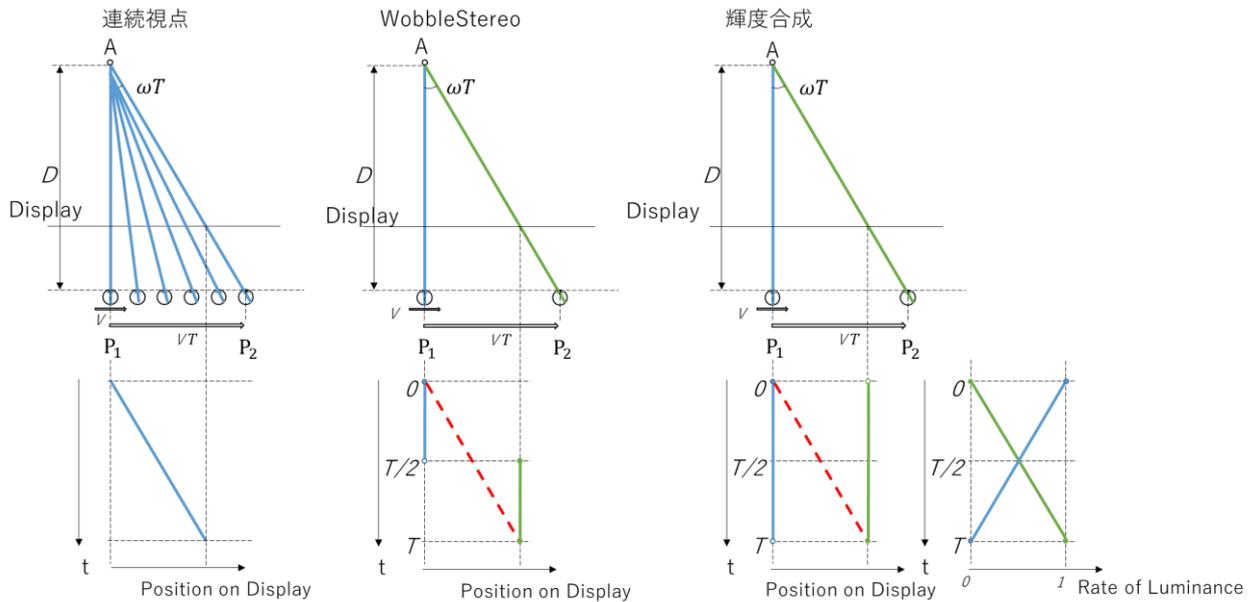


図 2:各映像提示法によるディスプレイ上の対象物提示位置

図 1 のように能動運動視で観察者自身の運動によって網膜中心から対象が移動することを防ぐために眼球が回転し対象を網膜中心にとどめる際に眼球回旋角速度  $\omega$  を獲得し、体性感覚により自身の運動速度  $V$  を獲得する。この  $\omega$  と  $V$  の 2 条件が得られる時に絶対奥行き距離  $D$  の知覚が可能となる。つまり、連続映像でなくとも  $\omega$  と  $V$  を得ることができれば絶対距離認識が可能となる。

3. 各映像提示法について

本研究では通常の映像提示（本研究において連続視点と呼ぶ）のほかに WobbleStereo と輝度合成と呼ばれる映像提示を行う。これらの映像提示法について説明し、手に入りうる奥行き手掛かりについて考える。

3.1 WobbleStereo について

2 視点から撮影された映像を切り替えて立体感や奥行きを提示する WobbleStereo と呼ばれる方法がある[2]。そこで図 2 の真ん中図のように 2 視点位置  $P_1, P_2$  からの映像を頭部の位置に合わせて時間 0 から  $T/2$  までの時間では位置  $P_1$  の映像を、時間  $T/2$  から  $T$  までの時間では位置  $P_2$  の映像を提示する。そのことにより赤い破線で表示した連続視点と同じ移動が知覚され、立体感や奥行きが提示できることを狙っている。しかし、ディスプレイ上の更新が対象物の移動が連続した物理現象として知覚されず静止画二枚の切り替わりとして知覚され、 $\omega$  の連続的な知覚が上手く成立しないと考えられる。

3.2 輝度合成について

WobbleStereo と異なり、ある視点  $P_1$  から別の視点  $P_2$  へと切り替わる際にすぐさま切り替えるのではなく視点  $P_1$  の映像の輝度を徐々に減少させつつ視点  $P_2$  の映像の輝度を徐々に増加させる輝度合成という方法がある[2]。図 2 右図のように常にディスプレイには位置  $P_1$  と  $P_2$  から観測された対象物  $A$  が表示され続けているが、位置  $P_1$  から  $P_2$  へ移動する頭部の位置に従って、図のように位置  $P_1$  から観測された  $A$  の輝度を下げ位置  $P_2$  から観測された  $A$

の輝度を上げてそれぞれの輝度を交代させることで、図 2 右図の赤い破線で表示した理想的な移動が知覚されることが期待される。ここで輝度の勾配から対象物の位置を理想的に知覚できた場合、連続視点の時と同様の  $\omega$  を知覚出来ると考えられる。

4. 絶対奥行き知覚についての検証

4.1 実験装置

畑田の研究では水平  $\pm 45$  度、仰角 35 度、俯角 50 度がある誘導視野と呼ばれる視野を確保した映像は高い臨場感が得られると報告している[3]。そこで実験装置は水平視野角が  $\pm 90$  度、仰角 20 度、俯角 70 度の映像提示が可能で高いフレームレートの映像提示ができる高視野・高 fps 円筒型ディスプレイを用いた装置を使用した[4]。建機操縦においては目標物が地上に存在するために下を自然に向くためにこの仰角で十分である。この装置により運動視に必要な十分広い視野を確保した。なお、本研究では建機の遠隔操縦について焦点を当てているため実験におけるリーチングタスクには油圧ショベルモデルを使用している。

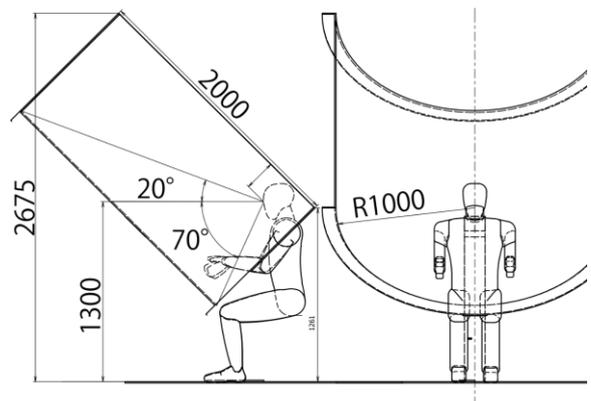


図 3:半円筒型スクリーン[2]

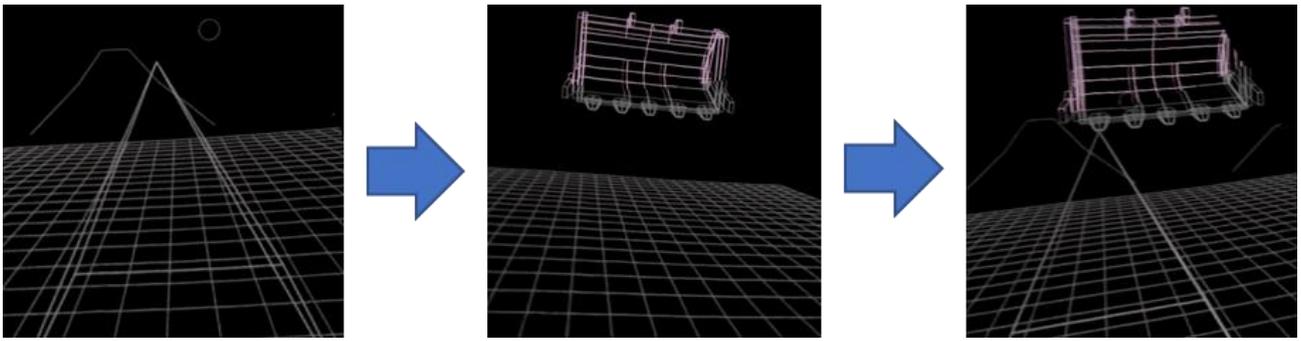


図 4: 実験における各シーケンス.

#### 4.2 実験方法

油圧ショベルモデルを使用し、油圧ショベルのツース(tooth)を目標物にどれだけ精度よく合わせることができるかという位置合わせ課題を行った。絶対距離を回答させるために一回の試行の中に 3 つのシーケンスを用意した。1 つ目のシーケンスでは、目標物のみが表示された。1 つ目のシーケンスは被験者に目標物までの絶対距離を把握させることを目的としたものであるため、操作対象であるツースは表示されなかった。2 つ目のシーケンスでは、操作対象であるツースのみが表示された。2 つ目のシーケンスは被験者にツースの位置を移動させることによって目標物までの絶対距離を回答させることを目的としたものであり、目標物とツースとの相対奥行きを判断しながらツース位置を移動させることを避けるために目標物は表示されなかった。3 つ目のシーケンスでは、目標物とツースの両方を表示した。

ツースの位置と目標物の位置は被験者の初期姿勢における正中面上にあるように設置し、ツースの先端と目標物の頂点の高さは初期姿勢における目の高さの位置に設定した。これによって、奥行き方向一軸のみの移動でツースの位置を目標物の位置に重ね合わせることができるため、ツースの動きを一軸のみに限定して実験を行った。ツースの前後移動は JIS 方式のレバーのブーム上げ・ブーム下げに割り当て、ツースの移動速度はレバーの入力角度に比例した。

被験者には目標物の位置とツースの位置を一致させるように 1 回の試行における目的を教示した。1 つ目のシーケンスで被験者に頭部を左右に並進させ目標物までの絶対距離を把握させた。被験者が絶対距離を把握するのに十分な観測を行ったと申告したのちに 2 つ目のシーケンスへ移った。2 つ目のシーケンスで被験者は頭部を左右に並進させツースまでの絶対距離を把握しながらレバーを傾け、先ほど把握した目標物の位置と思われる場所までツースを移動させた。被験者がツースの位置が先ほど把握した目標物の位置と一致したと申告したのちに 3 つ目のシーケンスへ移った。3 つ目のシーケンスでは、被験者は頭部を左右に並進させ 2 つ目のシーケンスで動かしたツースの位置と目標物の位置の両方を観測しながらツースの位置を目標物の位置と一致させた。このシーケンスによって回答した誤差を被験者に知らせ、施行ご

とに誤差が蓄積しないようにした。提示距離をカウンタバランスさせているため次の試行においてこのシーケンスによって次の試行を相対奥行きで答えることはできなかった。各シーケンスにおける頭部の並進において、頭部の振幅幅をそろえるため、椅子のヘッドレストの位置から左右に 15cm ずつ離れた位置に移動するとピープ音が鳴るように設定した。さらに、速度を統制するため、メトロノームを 4 秒で 2 回鳴らし(1 周期 4 秒)、被験者に対してピープ音が鳴るまで頭を移動させ、そのタイミングをメトロノームの音に合わせるように教示した。

目標物は被験者から 300cm, 350cm, 400cm, 450cm, 500cm 離れた 5 か所の位置のいずれかに置かれた。距離ごとに 10 回の試行を行い総試行回数は 50 回とし、順序効果を防ぐため試行順をカウンタバランスさせた。映像提示方法は連続視点と WobbleStereo、輝度合成を用いた。被験者は目視にて映像提示方法の弁別が可能であったため、映像提示方法はランダムにせず連続視点、WobbleStereo、輝度合成の順に 50 回ずつの試行を行った。連続視点では被験者は左右に 15cm ずつ頭部を並進させることができたため、輝度合成と WobbleStereo における映像は左右に 15cm ずつ離れた 2 か所の視点位置の映像を用いた。連続視点は色深度 1bit・フレームレート 1440fps で、WobbleStereo と輝度合成は色深度 7bit・フレームレート 180fps で映像の投影を行った。被験者は油圧ショベルの操縦経験のない 20 代の健全な男性 1 名であった。なお、被験者は実験シーケンスになれるために実験の前に 10 回程度練習を行った。

#### 4.3 結果

各映像提示方法において 2 つ目のシーケンスが終了した際のツースの位置の平均値と分散を目標物の位置ごとに算出した。2 つ目のシーケンスが終了した際のツースの位置を被験者が回答した絶対距離とみなす。図 8 にそれぞれの映像提示において絶対距離を回答した結果を示す。また、コントロールデータとして連続視点の条件で頭部を固定し視点を移動させない条件を測定した。水色の点は目標物の距離ごとの被験者が回答した絶対距離の平均を、水色の実線は目標物の距離ごとの被験者が回答した絶対距離の標準偏差を表す。

また、それぞれの条件における傾き・切片・決定係数は連続視点が [0.421, 238.450, 0.2957], WobbleStereo が

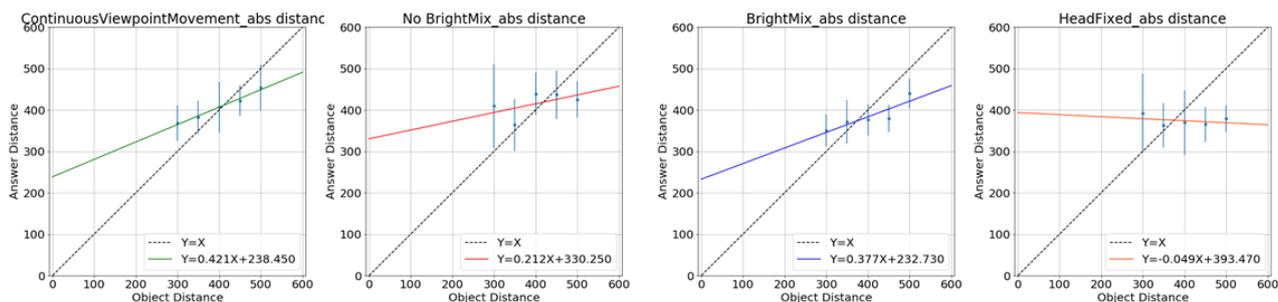


図 5:各映像提示法により回答した絶対距離.

左から順に、連続視点、WobbleStereo、輝度合成、頭部固定.

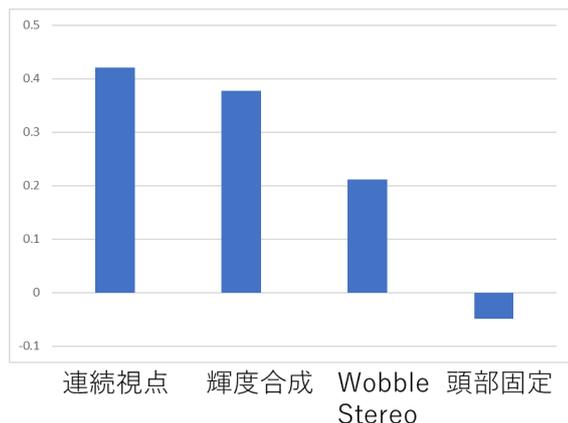


図 6:条件ごとの傾き

[0.212,330.250,0.047], 輝度合成が [0.377, 232.73, 0.3031], 頭部固定が[-0.045, 391.724, 0.0025]となった.

#### 4.4 考察

それぞれの条件でどのような距離認識がなされていたかを考える。まず奥行き知覚に関して 3 つのグループに分けることができる。絶対距離認識、奥行き弁別、知覚不定の 3 つである。ここで図 5 で示した条件ごとのグラフの傾きから各条件をグループ分けすると、連続視点(0.421)と輝度合成(0.377)、WobbleStereo(0.212)、頭部固定(-0.045)となる。連続視点と輝度合成と WobbleStereo はいずれも傾きが正であり、分け方が曖昧に思われるかもしれないが、決定係数が連続視点が 0.2957、輝度合成が 0.3031、WobbleStereo が 0.047 ということからもグループ分けが正しいことがわかる。

次はそれぞれのグループがいずれの知覚をなしていたかを考える。

まず、頭部固定は傾きが負であることから提示距離ごとの距離の弁別がついておらず、奥行き情報が不定、のグループに属することがわかる。また、絶対距離認識と奥

行き弁別のグループについてであるが、絶対距離を完全に把握し正確に回答した時は  $y=x$ 、つまり傾きが 1 になるため、傾きが 1 に近い方が絶対距離認識が出来るグループとなる。つまり、連続視点と輝度合成が絶対距離認識、WobbleStereo が奥行き弁別のグループとなる。

つまり人間は輝度の勾配によって対象物の移動が知覚でき、2 視点の映像からでも絶対距離認識が出来ることがわかった。

#### 5. むすび

本稿では、遠隔操縦における能動運動視を前提としたシステムの構築において、映像提示の際に必要な映像伝送量が極めて多くなることが問題点であると考え、2 視点からの映像によって映像提示を行うことのできる輝度合成で絶対距離認識が出来ることを確認した。今後は輝度合成による映像提示で絶対距離認識だけでなく実際に作業が出来るかの検証を進めていく。

#### 謝辞

本研究はコマツみらい建機協働研究所との共同研究の成果である。

#### 参考文献

- [1]S. Tachi, Telexistence (2nd Edition). World Scientific, 2015.
- [2]黒川正崇, 古川正紘, 近藤大祐, 安藤英由樹, 前田太郎, “高フレームレートによる遠隔操縦の作業効率”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017
- [3]畑田豊彦: VDT と視覚特性、人間工学、22-2、pp.45-52 (1986).
- [4]古川正紘, 近藤大祐, 安藤英由樹, 前田太郎:高 fps・高視野・高解像度プロジェクション可能な半円筒型スクリーン, 第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集,2016.