



VR180 遠隔ロボット作業における ステレオカメラ基線長変更の効果検証

Verification of the effects of changing stereo camera baseline length
in VR180 remote robotic operations

宇佐美龍斗, 筒井秀斗, ジメネスフェリックス, 浦野健太, 米澤拓郎, 河口信夫

名古屋大学 (〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

{usami,tsutsui,jimenez}@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

{urano,takuro,kawaguti}@nagoya-u.jp

概要: 本研究では, VR180 映像を用いた遠隔ロボット作業を対象に, ステレオカメラの基線長変更が作業性能, 奥行き判断および主観的負荷に与える影響を検証した. pick & place 実験では基線長拡大により遠方作業の不快感と作業負荷が低下し, 近距離作業では増加する傾向がみられた. さらに, 操作を前後方向に限定した奥行き位置合わせ実験では, 視差なし条件で位置ずれが大きく, 拡大基線条件で小さい傾向がみられた. 以上より, 両眼立体視の重要性と, 遠距離かつ高精度な作業における基線長拡大の有用性が示唆された.

キーワード: 作業支援・評価, 視覚, 拡張・複合現実, ロボット

1. はじめに

遠隔ロボット操作では, 操作者が作業空間の位置関係を正確に把握する必要がある. 特にロボットアームによる pick & place 作業では, エンドエフェクタと対象物の奥行き関係の誤認が, 作業時間の増加や操作ミスにつながる. そのため, 両眼視差を提示できるステレオ映像の活用が有効と考えられる.

近年, 広視野角かつ高解像度な VR ヘッドセットの普及により, VR180 映像を用いた遠隔作業環境の構築が容易になっている. VR180 映像は, 操作者の視野の広い範囲に立体映像を提示できるため, 従来の平面ディスプレイよりも作業空間の把握に適している. さらに, 筆者らの所属研究室で実施されている METAWORK[1] では, VR180 映像と仮想ロボットアームを組み合わせたテレオペレーションシステム [2] を採用している. このシステムは, 操作者に遠隔地の作業空間を立体的に提示し, 仮想ロボットアームの重畳により操作支援を行うものである. 一方で, 実証実験では, 対象物やロボットアームの奥行き関係が把握しづらいという意見が得られており, VR180 映像を用いた遠隔作業環境においても, 奥行き提示の設計には課題が残されている. また, 遠隔カメラが固定されている場合, 操作者が頭部を動かしても実環境に対応した運動視差は得られない. そのため, 両眼視差による奥行き手がかりの設計が, 作業空間の立体感や操作性に大きく影響すると考えられる.

一般的な VR180 ステレオカメラでは, 人間の眼間距離に近い基線長が用いられる. しかし, カメラから作業対象までの距離が大きい場合, 標準的な基線長では十分な視差が得られず, 奥行き差を知覚しにくくなる可能性がある. 一

方で, 基線長を拡大すると遠方の奥行き分解能は向上するが, 過剰な視差やスケール感の変化により, 視覚的違和感や認知負荷が増加する可能性もある. したがって, 遠隔ロボット作業において基線長拡大が有効となる条件を明らかにする必要がある.

本研究では, VR180 映像を用いた遠隔ロボット作業を対象に, ステレオカメラの基線長変更が作業性能および主観的負荷に与える影響を調査する. 特に, 作業対象までの距離によって基線長拡大の効果が異なる可能性に着目し, 遠隔作業支援に適した基線長設計に関する基礎的知見の獲得を目的とする.

2. 関連研究

2.1 ステレオカメラ間隔と奥行き知覚

ステレオ映像では, 左右カメラの間隔が両眼視差の大きさを決定し, 奥行き知覚に影響する. Kytö[3] は, AR 環境, 自然シーン, 群衆シーン, 屋内シーンなどを対象に, ステレオシステムを介した奥行き判断性能や視聴体験を評価した. 特に, カメラ間隔の変化による奥行き弁別閾や視覚的快適性への影響を示し, ステレオカメラ設計におけるカメラ間隔選択の重要性を指摘している. 一方, 同研究は 2014 年にまとめられたものであり, 近年普及している広視野角・高解像度 HMD とは表示条件が異なる. HMD の視野角や解像度, レンズ特性の向上により, ステレオ映像に対する奥行き知覚や違和感の生じ方も変化している可能性がある. そのため, 現在の HMD を用いた VR180 遠隔作業環境において, 基線長変更の影響を改めて検証する必要がある.

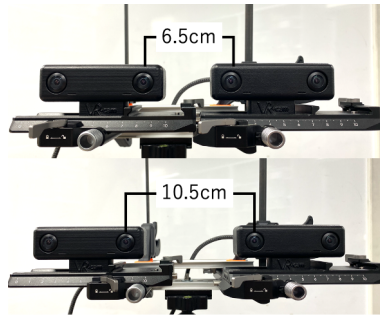


図 1: 基線長変更可能な VR180 撮影用機材

2.2 可変基線長ステレオ

ロボットビジョン分野では、奥行き推定精度を向上させるため、可変基線長ステレオが研究されている。MorphEyes[4]では、クアドロータに搭載したステレオカメラの基線長を飛行中に変更し、森林内飛行、狭隘部の通過、移動物体の三次元検出に応用した。シーン内の対象までの距離に応じて基線長を変更し、固定基線長のステレオカメラよりも頑健な奥行き推定を実現した。ただし、これらの研究は主にロボットの自律移動や環境認識を目的としており、人間がHMDを通じて遠隔環境を知覚し、ロボットアームを操作する状況は対象としていない。テレオペレーションでは、センサとしての奥行き推定精度だけでなく、提示映像が操作者の作業性能や主観的負荷に与える影響も評価する必要がある。

2.3 VRにおけるステレオパラメータ調整

VR環境においても、ステレオカメラの設定は奥行き感と視覚的快適性に影響する。Avanら[5]は、左右カメラ間隔と輻輳距離をステレオレンダリングパラメータとして扱い、シーン内の奥行き構成に応じて動的に調整する手法を提案した。その結果、視覚的快適性を維持しながら、知覚される奥行き感を向上できると報告した。この研究は、VRにおいて固定されたステレオ設定が常に最適とは限らず、シーンの奥行き構成や視点位置に応じて適切な設定が変化する可能性を示唆している。一方、対象は主に仮想環境内のウォークスルーやライド型体験であり、実映像を用いた遠隔ロボット作業は扱っていない。遠隔操作では、奥行き感の強調だけでなく、対象物の位置関係を正確に把握し、効率的に操作できるかを評価する必要がある。

以上の研究から、カメラ間隔やステレオパラメータの調整は、奥行き知覚、視覚的快適性、奥行き推定精度に影響すると示されている。しかし、VR180実映像を介して人間がロボットアームを遠隔操作する状況において、基線長変更が作業性能や主観的負荷に与える影響は十分に明らかにされていない。本研究は、実映像に基づく遠隔ロボット作業を対象に、基線長変更の効果を作業性能と主観評価の両面から検証する。

3. 実験1：pick & place

実験1では、VR180映像を用いた遠隔ロボット作業において、ステレオカメラの基線長変更が作業性能および主観

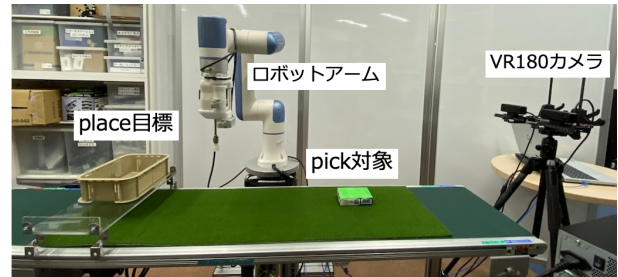


図 2: 実験環境

的負荷に与える影響を調査する。特に、カメラから作業対象までの距離によって基線長変更の効果が異なる可能性に着目し、手前側の把持作業と奥側の配置作業を分離して評価する。これにより、遠隔作業環境において基線長拡大が有効となる作業距離条件の解明を目的とする。

3.1 実験内容

実験には、遠隔操作可能なロボットアームと、図1に示すステレオ基線長を変更可能なVR180撮影機材を用いた。ステレオカメラにはVR.cam 02を用い、左右カメラの物理的な間隔を変更できるように撮影用治具に固定した。実験システムは、METAWORKにおけるVR180遠隔ロボット操作システムを基盤とし、本研究の評価目的に合わせて操作方法および実験環境を簡略化したものである。参加者はVRヘッドセットを装着し、ステレオ映像を通じて遠隔作業空間を観察しながらロボットアームを操作した。作業空間には、把持対象となる物体と、配置先となる箱を設置した。カメラから対象物体までの距離は60cm、配置先の箱までの距離は120cmとした。ロボットアームの初期位置は、対象物体と配置先の箱の間に設定した。

実験課題は、図2に示す環境でロボットアームを操作するpick & place作業である。参加者は、対象物体を把持して持ち上げた後、奥側に設置された箱の中へ配置した。本研究では、作業距離による影響を分析するため、1試行の作業を2段階に分けた。第1段階は、ロボットアームを対象物体へ移動させ、把持し、垂直に持ち上げるまでの作業である。この段階は、主にカメラから60cm付近の手前側作業として扱う。第2段階は、物体を持ち上げた状態から奥側の箱へ移動し、箱の中に配置するまでの作業である。この段階は、主にカメラから120cm付近の奥側作業として扱う。

実験条件は、ステレオカメラの基線長を要因とした3条件である。基線長は、6.5cm、8.5cm、10.5cmの3種類とした。6.5cmは人間の眼間距離に近い標準条件として設定した。10.5cmは、事前調整により、カメラから約120cmにある配置先周辺の奥行き感が十分に得られると判断した拡大条件である。8.5cmは、標準条件と拡大条件の中間条件として設定した。

本実験では、これら3条件を被験者内要因として比較した。参加者は6名であり、条件提示順による順序効果を低減するため、3条件の提示順に参加者間でカウンターバランスした。参加者は、実験開始前に実験内容の説明を受けた

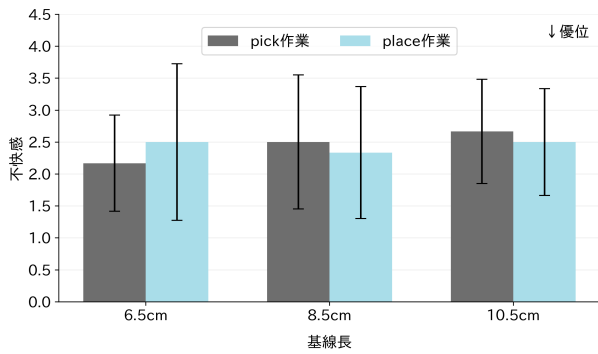


図 3: 手法ごとの不快感

後、各基線長条件において pick & place 作業を実施した。

3.2 評価指標

客観指標として、各作業段階の完了時間とロボットアーム操作時に押下するトリガーボタンの入力回数を計測した。第 1 段階では、試行開始から対象物体を把持して垂直に持ち上げるまでの時間を計測した。第 2 段階では、物体を持ち上げた状態から配置先の箱に入れるまでの時間を計測した。これにより、手前側作業と奥側作業における作業速度を評価した。

主観指標として、各作業後に NASA-RTLX (NASA Raw-TLX) [6][7] および独自に設定した質問項目への回答を求めた。NASA-RTLX は、NASA-TLX 本来の一対比較による重み付け手続きを省略し、Mental Demand, Physical Demand, Temporal Demand, Performance, Effort, Frustration の 6 項目の評定値を単純平均するものであり、作業に伴う主観的な負荷を評価するために用いた。また、独自質問項目では、奥行き分かりやすさ、操作のしやすさ、視覚的な不快感などを 5 段階のリッカート尺度で評価した。これらの指標により、基線長変更が作業速度だけでなく、操作者の認知的負荷や主観的な操作感に与える影響を分析する。

3.3 結果・考察

各評価項目に Friedman 検定を適用した結果、条件間に有意差は認められなかった (すべて $p > 0.05$)。一方、図 3, 4 に示すように、拡大基線条件では、手前の pick 作業と奥の place 作業で不快感と NASA-RTLX の傾向が逆転した。基線長拡大により、奥側では視差が強調され奥行き把握が容易になった一方、手前側では視差が過大となり、融像や注視が困難になった可能性がある。ただし、統計的有意差は認められておらず、傾向として解釈する必要がある。

所要時間と操作回数には一貫した条件差がみられず、一部の参加者では、他の参加者と比較して大きな値が確認された。位置差分操作への習熟度や微調整回数など、操作技術の個人差が影響した可能性がある。そこで、基線長変更による奥行き把握への影響をより直接的に評価するため、操作自由度を制限した実験 2 を行った。

4. 実験 2: 奥行き位置合わせ

前章の結果を踏まえ、実験 2 では、操作技術の影響を低減した条件下で、基線長変更が奥行き位置判断に与える影

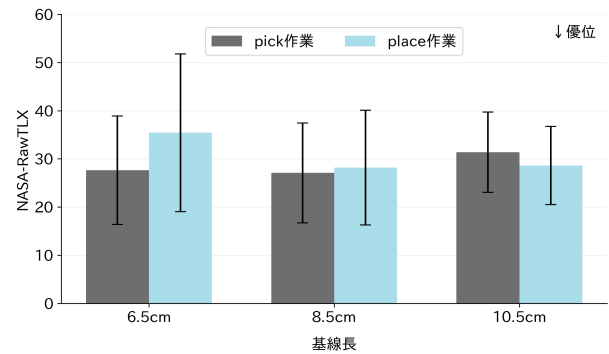


図 4: NASA Raw-TLX(主観的負荷)

響の評価をした。具体的には、ロボットアームの操作を前後方向のみに制限し、カメラから 120 cm の位置に設置された箱の奥行き中央にパネルを合わせる課題を設定した。これにより、実験 1 の pick & place 作業に含まれていた多自由度操作や把持・配置操作の影響を抑え、基線長条件による奥行き把握の違いをより直接的に評価する。

4.1 実験内容

実験では、ロボットアーム先端にパネルを取り付け、参加者にはパネルが箱の奥行き中央にあると知覚した位置で、ロボットアームを停止させる課題を課した。参加者は VR ヘッドセットを装着し、提示された映像を観察しながら、VR コントローラのスティック操作によりロボットアームを前後方向のみに移動させた。実験条件は、ステレオカメラの基線長を要因とした 3 条件である。条件は、人間の眼間距離に近い 6.5 cm の標準基線条件、視差を拡大した 10.5 cm の拡大基線条件、および左右眼に同一映像を提示する視差なし条件とした。視差なし条件は、遠隔操作における立体視提示の必要性を検討するために設定した。各参加者は 3 条件すべてを体験し、条件提示順による順序効果を低減するため、3 条件の提示順 6 通りを参加者間でカウンターバランスした。参加者は 6 名であった。

4.2 評価指標

客観指標として、箱の奥行き中央位置と参加者が停止させたパネル位置とのずれの絶対値を計測した。この値が小さいほど、参加者が箱の奥行き中央を正確に知覚できていると判断できる。主観指標として、映像を見た段階における位置判断への自信、位置決定後における判断への自信、および映像を見ながら作業を行う際の負担を 5 段階のリッカート尺度で評価した。これにより、基線長変更が奥行き位置合わせの精度だけでなく、判断の自信や主観的負担に与える影響を分析する。

4.3 結果・考察

主観評価と箱の中心からのずれの計測結果を図 5, 6 に示す。作業後の自信および作業負荷では、Friedman 検定により 3 条件間の有意差が認められた。一方、Holm 法による多重比較補正を適用した事後比較では、いずれの条件間にも有意差は認められなかった。この結果から、条件間で評価値が異なる可能性は示されたものの、差が生じた条件の組み合わせを明確に特定するには至らなかった。

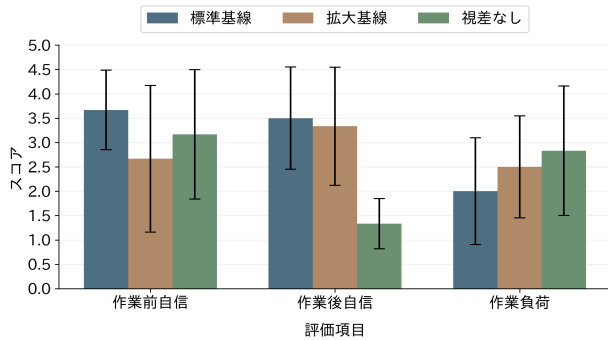


図 5: 主観評価の結果

箱の奥行き中央からの位置ずれでは、被験者 1 名の測定値が測定可能範囲を超え、欠損値となったため、Skillings–Mack 検定を実施した。その結果、3 条件間に有意差が認められた。同様に、Holm 法による多重比較補正を適用した事後比較では、いずれの条件間にも有意差は認められなかった。

作業後の自信について、視差なし条件では作業後の自信が相対的に低く、対象物を箱中央に配置した際のずれも大きい傾向がみられた。この傾向から、遠隔ロボットアーム操作において視差情報が欠如すると、操作者が対象物の奥行きや位置関係を把握しにくくなり、操作の確信度や配置精度が低下する可能性がある。したがって、遠隔ロボットアーム操作では、両眼立体視による奥行き情報提示の重要性が示唆される。

また、標準基線条件と比較して、拡大基線条件では、対象物を箱中央に配置した際のずれが小さい傾向がみられた。基線長の拡大によって両眼視差が強調され、対象物と箱との奥行き関係を把握しやすくなった可能性がある。この結果は、高い位置精度を要する作業や奥行き判断が難しい作業において、ステレオカメラの基線長拡大が操作精度の向上に寄与する可能性を示唆する。ただし、事後比較では有意差が確認されていないため、今後は被験者数を増やすとともに、より高精度な操作を必要とするタスクを用いて検証する必要がある。

5. まとめ

本研究では、VR180 遠隔ロボット作業におけるステレオカメラ基線長変更の影響を検証した。pick & place 実験では有意差は認められなかったが、基線長拡大により奥側作業の不快感と負荷が低下し、手前側では増加する傾向がみられた。操作を前後方向に制限した位置合わせ実験では、視差なし条件で自信が低く位置ずれが大きい一方、拡大基線条件では標準基線条件より位置ずれが小さい傾向がみられた。以上より、遠隔ロボット操作における両眼立体視の重要性と、高い位置精度が求められる作業に対する基線長拡大の有用性が示唆された。今後は参加者数を増やすとともに、作業距離やタスク難易度の異なる条件を設定し、基線長拡大が有効となる条件を詳細に検証する。

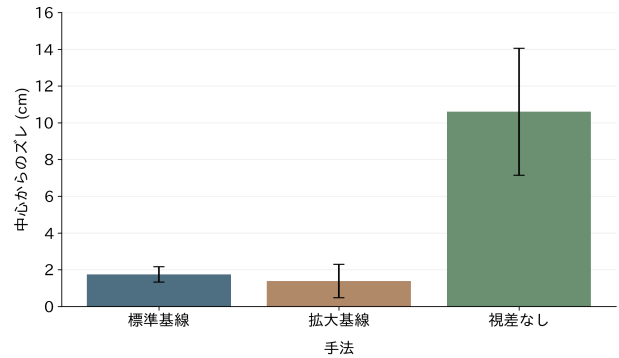


図 6: 箱の中心からの位置ずれ

謝辞

本研究の一部は、内閣府 SIP3 (JPJ012495) に支援いただきました。

参考文献

- [1] 名古屋大学 工学部/工学研究科河口研究室. 新たなハタラクがメタワークではじまる, 2025. <http://sip3-metawork.com>.
- [2] Shuto Tsutsui, Kisho Watanabe, Ryuto Usami, Yuki Gushi, Yoshiki Watanabe, Kaiya Shimura, Nozomi Hayashida, Felix Jimenez, Kenta Urano, Takuro Yonezawa, et al. Mitigating latency effects in vr180 teleoperation via virtual robotic arm overlay. In *2025 Fifteenth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)*, pp. 1–8. IEEE, 2025.
- [3] Mikko Kytö. Depth perception of augmented and natural scenes through stereoscopic systems. 2014.
- [4] Nitin J Sanket, Chahat Deep Singh, Varun Asthana, Cornelia Fermüller, and Yiannis Aloimonos. Morphes: Variable baseline stereo for quadrotor navigation. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 413–419. IEEE, 2021.
- [5] Emre Avan, Tolga K Capin, Hasmet Gurcay, and Ufuk Celikcan. Enhancing vr experience with rbf interpolation based dynamic tuning of stereoscopic rendering. *Computers & Graphics*, Vol. 102, pp. 390–401, 2022.
- [6] Sandra G Hart and Lowell E Staveland. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology*, Vol. 52, pp. 139–183. Elsevier, 1988.
- [7] Sandra G Hart. Nasa-task load index (nasa-tlx); 20 years later. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, Vol. 50, pp. 904–908. Sage publications Sage CA: Los Angeles, CA, 2006.