



遠隔ロボットの回り込み動作における視点操作手法の基礎検討

A Preliminary Study of Camera Manipulation Methods for Orbiting by Remote Robot

佐々木智也^{1,2)}, 吉田英一¹⁾

Tomoya SASAKI and Eiichi YOSHIDA

1) 東京理科大学 先進工学部 (〒 125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)

2) 東京大学 先端科学技術研究センター

概要: 対象物を中心として周回軌道上にカメラを回転させる回り込み動作は、三次元空間における物体や状況の把握に有用な視点操作手法であり、3D CAD や CG 制作ソフトウェア、VR で用いられる。しかしながら、回り込み動作の遠隔ロボットへの実装は、物理的制約によって容易ではない。本研究では、遠隔ロボット向けの相対座標変化に着目した視点操作手法について、VR 環境を用いて面探索課題実験を設計し、評価のための予備実験を行う。視点操作条件による比較結果から、提案手法は従来手法に比べて面探索時間が 70%以上短くなることを確認した。

キーワード: テレイグジスタンス、相対座標変化、遠隔作業

1. はじめに

テレイグジスタンス [1] やテレプレゼンスといった遠隔ロボットシステムでは、操作者が離れた場所にいるにもかかわらず、その場所に存在しているかのように作業するための技術を扱っている。頭部搭載型ディスプレイ (HMD) を用いて、遠隔操作者の頭の動きと連動して視点映像を更新する手法は、遠隔ロボットに対する操作者の没入感を高め、遠隔地の状況や作業対象の把握を容易にする。しかしながら、遠隔ロボットで 3D CAD や CG 制作ソフトウェアでは一般的な視点操作手法として用いられる回り込み動作 (Orbiting) [2] を実現することは、物理的な制約から容易ではない。回り込み動作とは、カメラが対象物体を中心に捉えながらその周りを衛星軌道のように移動する視点操作手法である。VR 空間での実装 [3] は比較的簡便に行えるが、実空間では複数台のカメラを配置してそれらの映像を合成する方法 [4] など、実装が煩雑になる。遠隔ロボットでの実装では、移動機構によって本体が動く、または多軸の首機構 [5] を用いて視点を移動させる方法が考えられる。これに対して我々は、新たな視点操作手法として、回り込み動作時の対象物体とカメラ間の相対座標変化に着目する方法 [6] を提案した。ロボットに機構を追加するのではなく、回転台を用いて対象物体側を動かすことで実質的な視点操作を実現する。これまで、小型ロボットアームを用いたプロトタイプによる提案手法の実現可能性を検討したが、この手法が従来手法に対してどの程度優れているかは調査されていない。本研究では、VR 環境を用いて面探索課題を行い、視点操作手法による課題成績を比較する。本稿では、提案手法を定式化、VR を用いた実験設計について述べ、行った予備実験の結果と考察を報告する。

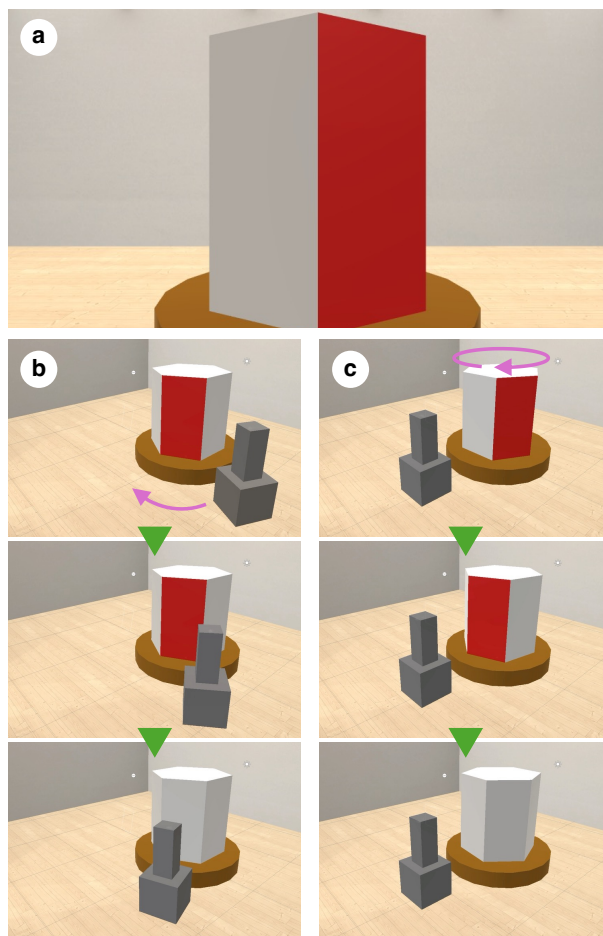


図 1: (a) 面探索課題中の参加者視点映像、(b) 移動ロボットによる一般的な回り込み動作 (ACM 条件)、(c) 相対座標変化による回り込み動作 (RCM 条件)

2. 実験設計

2.1 相対座標変化に着目した回り込み動作の定式化

遠隔ロボットのカメラ、回り込み動作の回転中心となる対象物体それぞれの座標系を考え、座標変換のための同次変換行列を考える。先行研究 [6] より、絶対座標系 $\{O\}$ 、カメラ座標系 $\{A\}$ 、対象物体座標系 $\{B\}$ とすると、カメラ座標系 $\{A\}$ と対象物体座標系 $\{B\}$ 間の同次変換行列は、

$${}^A\mathbf{T}_B = \begin{pmatrix} \mathbf{S}_r \mathbf{R} & \mathbf{S}_p \mathbf{d} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表せる。このとき、 \mathbf{R} 、 \mathbf{d} はそれぞれ回転行列と変位ベクトルであり、 \mathbf{S}_r 、 \mathbf{S}_p はそれぞれ拡大率パラメータである。拡大率 1 のとき \mathbf{S}_r は単位行列、 \mathbf{S}_p は各要素が 1 のベクトルである。なお、本実験では、簡単のために回転行列は Z 軸まわりのみを扱う。

2.2 面探索課題

回り込み動作が有益な状況として、一箇所の視点からでは物体全体の面を捉えることができず、複数箇所から対象物体面を探索する場合が考えられる。そこで本実験では、多面体の中で色が変化した面を探す課題を設定し、発見するまでの時間を比較する。実験参加者の正面には六角柱のオブジェクトが置かれる。課題開始時、六角柱の側面のうち、参加者の正面以外の 1 面がランダムに赤色に変化する。参加者は、赤色の面が視野内正面になるように移動または視点操作を行う。正面に赤色の面が来たらボタンを押し、課題達成までの時間を計測する。参加者の正面に対象の面があるかどうかは、面の法線ベクトルに対してカメラが 30° 未満かつカメラ視野内に赤い面があるかで判定し、条件を満たさない場合はブザー音で通知する。1 回の課題が達成したら、すぐに別の六角柱側面が赤色に変化する。参加者は既定回数に達するまで探索を繰り返す。30 回を 1 セットとして、各実験条件を交互に 2 セットずつ行う。実施する実験条件の順番は参加者でカウンターバランスをとる。図 1a に課題中の参加者の視点映像を示す。

2.3 実験環境および視点操作条件

実験は VR 環境で行われる。面探索課題の対象となる六角柱オブジェクトとそれを載せる台、移動ロボットを想定したオブジェクトで構成される。これらのオブジェクトは視覚的バイアスを避けるためシンプルな形状を採用する。ただし、背景には室内環境を模したモデルを用いる。六角柱の大きさは対角長を 1.0 m とする。六角柱を載せた台とロボットには衝突検出を設定し、台を中心に半径 0.6 m 以内には近づけないようにする。実験参加者は障害物のない室内で立位で課題を行う。

面探索課題中、参加者はコントローラーのスティック入力で自身の位置を操作することができる。二輪移動機構のロボットによる移動を想定しているため、スティックの上下で前進と後退、左右で旋回を行う。参加者の視点はロボットに搭載されたカメラの映像とする。ここで、ロボットの移動速度は生活環境で使用されるロボット HSR [7] を参考に最大速度 0.22 m/s、最大角速度 1.11 rad/s とした。後述

の通り、視点操作条件によっては台も回転するため、ロボットアーム xArm¹ の関節軸の仕様を参考に台の最大角速度を 3.14 rad/s とした。

本実験では 2 つの視点操作手法を実験条件とする。ひとつめは、カメラが移動する従来の視点操作手法であり、Absolute Coordinate Motion (ACM) 条件とする。ふたつめは、2.1 で示した相対座標変化に着目した視点操作手法であり、Relative Coordinate Motion (RCM) 条件とする。ACM 条件では、参加者の頭の動きに応じてロボットに搭載されたカメラの視点が操作されるため、面探索はロボットによる移動と頭の動きを組み合わせで行う (図 1b)。一方で、RCM 条件では、ロボット上のカメラは固定され、参加者の頭の動きに連動して台と六角柱オブジェクトが回転するため、ロボットが移動しなくても面探索が行える (図 1c)。

2.4 実験装置

HMD には Meta Quest 3² を用いた。実験プログラムは Unity で実装し、CPU: Intel Core i7-13700H, GPU: NVIDIA GeForce RTX 4060 Laptop GPU, OS: Windows 11 のラップトップ PC で実行した。

3. 予備実験の結果と考察

3.1 実験参加者

参加者は健康な男性 4 名、平均年齢 24.25 歳 (標準偏差: 3.20)、平均身長 176.5cm であり、全員右利きであった。

3.2 課題達成時間

視点操作条件ごとの課題達成時間の結果を図 2 に示す。縦軸は達成時間、横軸はセット回数である。エラーバーは標準誤差を示す。1 回目、2 回目とも ACM 条件よりも RCM 条件の方が達成時間の平均が小さいことが確認できる。ACM 条件ではセット間の時間の減少が小さく、RCM 条件では平均課題達成時間が 1 秒以上短くなっている。それにより、ACM 条件と RCM 条件間では、1 回目においては 70% 以上、2 回目では 80% 以上 RCM 条件の達成時間が短い結果となった。

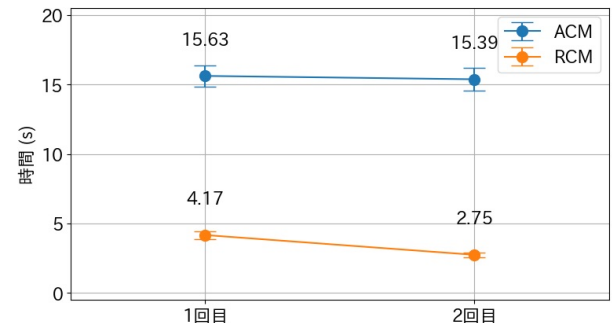


図 2: 課題達成時間

3.3 探索面角度誤差

課題達成時の対象面の法線ベクトルに対するカメラ角度誤差の結果を図 3 に示す。縦軸は角度、横軸はセット回数

¹<https://www.ufactory.cc/xarm-collaborative-robot/>

²<https://www.meta.com/quest/quest-3/>

である。エラーバーは標準誤差を示す。いずれの条件においても角度誤差平均は 3° 未満であり、視点操作条件による有意な違いはみられなかった。

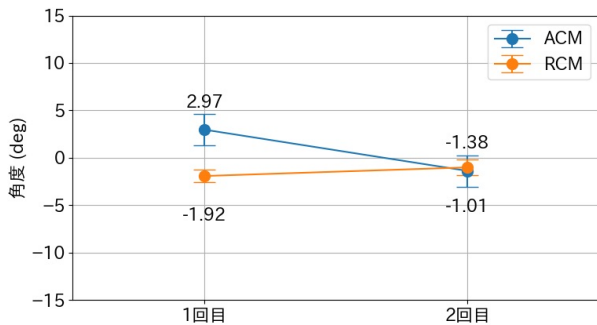


図 3: 課題達成時の対象面とカメラの角度誤差

3.4 主観評価

すべてのセット終了後、参加者に対して、「操作性」、「身体疲労」、「VR 酔い」の3項目について、視点操作条件のどちらが高いか質問し、その回答を簡易的な主観評価指標として用いた。操作性については、4人全員がRCM条件の方が高いと回答した。身体疲労は、ACM条件とRCM条件で2人ずつ高いと回答して意見が分かれた。VR 酔いについては、1名がRCM条件の方が高いと回答し、残り3名はACM条件が高いと回答した。

3.5 考察

課題達成時間の結果は、相対座標変化に着目した視点操作手法であるRCM条件が面探索において有用であることを示唆している。本実験では、ACM条件の達成時間の制約になるのはロボットの最大移動速度であり、RCM条件では台の最大角速度である。探索対象面と課題開始位置の条件にもよるが、人によってはACM条件下での平均達成時間が13秒以下の場合があるため、課題の習熟によって時間が減少する可能性はある。しかしながら、十分に習熟した状態でもRCM条件の1回目の時間よりも達成に時間がかかる。RCM条件の台の最大角速度は 3.14 rad/s のため、2秒でオブジェクトが一回転すると考えると、2回目は妥当な結果であるといえる。角度誤差は条件による差がほとんどみられなかったことから、参加者はいずれの場合も正面で探索面を捉えられていたことがわかる。

参加者の主観評価では、操作性においてRCM条件が好まれている傾向が確認された。これにはRCM条件の課題達成時間が短いことが寄与していると予想される。身体疲労においては、課題時間が長くなることからACM条件の疲労が高いと回答する参加者がいた一方で、RCM条件では参加者がその場で頻繁に回転するために疲労したという回答があった。VR 酔いについては、ACM条件では参加者自身の動きとロボットが連動せずに移動して視点が変わるために強く酔うという回答が多かった。RCM条件の方が酔いが大きいと回答した参加者は、オブジェクトの回転速度が速いために映像の変化が激しいことを理由に挙げていた。

4. むすび

本稿では、遠隔ロボットの回り込み動作におけるカメラと対象物体間の相対座標変化に着目した視点操作手法について、VR環境で面探索課題を設定して予備実験を行った。視点操作条件による比較結果から、提案手法は従来手法に比べて面探索時間が70%以上短くなることを確認し、手法の有用性を示した。今後は、本稿で定式化したパラメータを用いた複数の条件の設定、および実験参加者を増やして本実験を行う。客観的な課題の成績だけでなく、課題中の参加者の認知的負荷等も計測して詳細なユーザビリティ評価も行う。

謝辞 本研究は、科研費 研究活動スタート支援 23K20010, JST SICORP JPMJSC2309 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Susumu Tachi. Teleexistence. In *Virtual Realities: International Dagstuhl Seminar, Dagstuhl Castle, Germany, June 9-14, 2013, Revised Selected Papers*, pp. 229-259. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [2] Desney S Tan, George G Robertson, and Mary Czerwinski. Exploring 3D navigation: combining speed-coupled flying with orbiting. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '01, March 2001.
- [3] Benjamin I Outram, Yun Suen Pai, Tanner Person, Kouta Minamizawa, and Kai Kunze. Anyorbit: orbital navigation in virtual environments with eye-tracking. In *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, June 2018.
- [4] 大田友一, 北原格, 斎藤英雄, 秋道慎志, 尾野徹, 金出武雄. 仮想化現実技術による自由視点映像スタジオの構築. 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 25.76, pp. 57-62, 2001.
- [5] Kouichi Watanabe, Ichiro Kawabuchi, Naoki Kawakami, Taro Maeda, and Susumu Tachi. TORISO: Development of a teleexistence visual system using a 6-d.o.f. robot head. *Adv. Robot.*, Vol. 22, No. 10, January 2008.
- [6] 佐々木智也, 吉田英一. 多軸回転台を用いた相対座標変化による遠隔ロボットカメラの回り込み動作. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2024, pp. 2P2-R03, 2024.
- [7] Takashi Yamamoto, Koji Terada, Akiyoshi Ochiai, Fuminori Saito, Yoshiaki Asahara, and Kazuto Murase. Development of human support robot as the research platform of a domestic mobile manipulator. *ROBOMECH Journal*, Vol. 6, No. 1, p. 4, April 2019.