



スケールダウン環境下へのスキル伝達 -拡張レイグジスタンスへの挑戦 第 2 報-

Skill transfer to Scale-Down Environment
-Challenge for Advanced Telexistence II-

平山智貴¹⁾, 宮本拓¹⁾³⁾, 松岡哲平¹⁾, 大石つぐみ¹⁾, 古川正紘¹⁾²⁾, 前田太郎¹⁾²⁾

Tomoki HIRAYAMA, Hiroki MIYAMOTO, Teppei MATSUOKA,
Tsumumi OISHI, 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, (tomoki-hirayama,hiroki-miyamoto, teppei-matsuoka, tsumumi-oishi)@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 (JSPS) (〒102-0083 東京都千代田区麴町 5-3-1)

概要: 従来のレイグジスタンスは人間と等身大のフォロワを用いて実現していた。しかし人間と等身大という制約が利用可能な環境を制限しているといえる。本研究では、フォロワをスケールダウンしたレイグジスタンスシステムを構築した。本報告では、このシステムを用いて実空間で習得したスキルがスケールダウン環境下でも発揮されることを、習字スキルの伝達実験を用いて示すことで、レイグジスタンスの拡張可能性を提案する。

キーワード: レイグジスタンス, スケールダウン効果, スキル再現

1. はじめに

遠隔操縦ロボット技術は目覚ましい進歩を遂げており、人命救助や極限環境作業のみならず遠隔地にいる人とのコミュニケーションに用いられるなど、様々な場面で利用されるようになった。作業空間に存在する人間をロボットに置き換え、ロボットを遠隔操縦することは移動時間の短縮のみでなく、作業者の安全性向上にもつながる。遠隔操縦技術の一つであるレイグジスタンス[1]は、人間のも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。これは、操縦者は遠隔地にいながら、まるでその場にいるロボットに代わり操縦者がいるかのように感じられる技術である。

レイグジスタンスは、頭部および四肢について、ロボットに人の姿勢追従制御をかけることで実現している。これにより視野内のロボットの動きと自己の運動感覚が一致することで、ロボットに対して自己主体感が生起し、操縦者は高い臨場感を伴って、ロボットをまるで自分の身体のように直観的に操縦することができる。この時、操縦者はロボットに対して身体所有感を生起しており、

ロボットの手の位置が把握できることはもちろん、外界との接触の予測や危機回避などを可能にしている。

レイグジスタンスの研究において、すでに人と同寸法のロボットを通して物を見る、触る、掴む、運ぶといった動作が達成されてきた[2]。人とロボットの寸法を一致させることで、ロボットを通した視野内の四肢の動きが体性感覚と一致し、また作用先の物体の落下等の動きの予測が容易となるため、強力な没入感を与えることができる。しかし、人と同寸法という制約は、遠隔作業ロボットが可能とする作業を限定してしまう。そのため、レイグジスタンスが適用可能なロボットの範囲を、人と異なる寸法・形状にまで拡張する「拡張レイグジスタンス」を実現することは有用である。本研究では拡張レイグジスタンスのうち、人と代替ロボットの間での物理的な尺度変換関係を導入する、「スケール変換レイグジスタンス」に焦点を当てる。

Fig.1 にスケール変換レイグジスタンスにおけるシステム図を示す。従来のレイグジスタンスでは、リーダーの位置・制御を用いてフォロワを追従制御していた。し

かしながら「スケール変換トレイグジスタンス」では位置・姿勢に対して位置を $1/n$ にすることで運動スケール変換を行う。スケール変換トレイグジスタンスについて特に $n>1$ と設定した場合には、フォロワロボットのトルクウェイトレシオが改善することが示されている[3]。これは実空間の運動と見かけ上等価な運動再現に必要なトルクが低下するためである。これにより、従来の等身大トレイグジスタンスの課題であったトルク不足による位置速度追従性能低下問題を解決することができ、スキル再現・伝達性能の向上が期待される。本報告では $n>1$ の場合、つまりスケールダウンを行う場合について考える。

本研究では、スケールダウントレイグジスタンスシステムを構築した。これを用いて実空間で習得したスキルがスケールダウン環境下でも発揮されることを習字スキルの伝達実験を以って示した。

2. 先行研究

スケール変換トレイグジスタンスの実用例としては遠隔外科手術用ロボット「Da Vinci」があげられる。

「Da Vinci」は操縦者の動きをロボットの鉗子を通して縮小させる「スケールダウントレイグジスタンス」である。これにより操縦者がすでに獲得している内視鏡手術スキルを用いて遠隔手術を可能にしている。しかしながら、手術用に特化しているため、汎用性が低い。また、距離感の把握が難しいという問題がある。これは、術者の移動距離に対するフォロワの移動距離の比率が可変であるにもかかわらず、内視鏡のカメラ間距離が固定であるからである。このために術者は Da Vinci システムに適応した内視鏡手術スキルを習得する必要があるのではないかと推察される。

そこで我々はシステムへの汎用性の高いトレイグジスタンスを「スケールダウントレイグジスタンス」において実現することを目指した。また、カメラ間距離の変換が可能な設計を行った。詳細は第3章に記す。

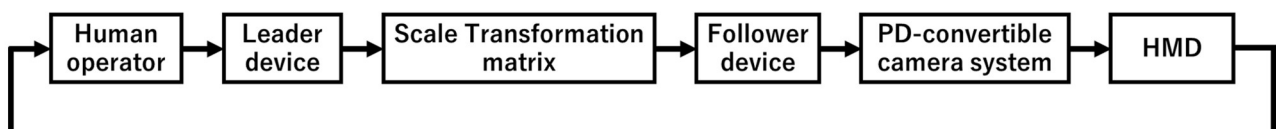
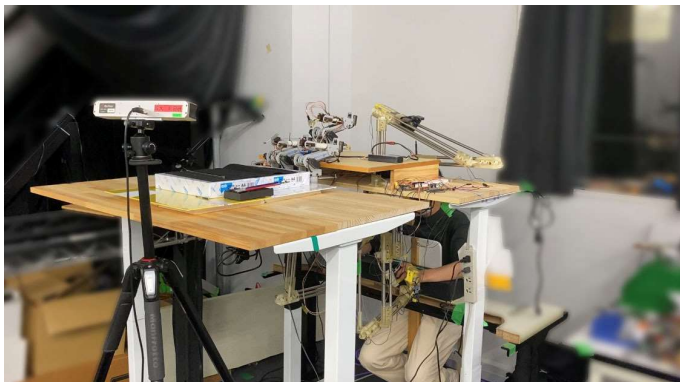


Fig. 1 テレイグジスタンスシステム図(下)および本実験で使用したテレイグジスタンスシステム(上)。

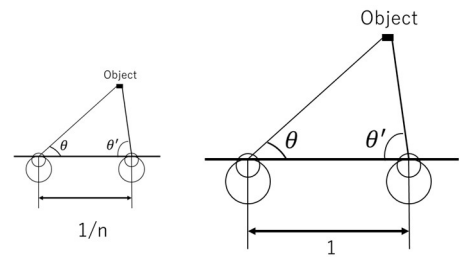


Fig. 2 PD 変化に伴う幾何学的な視空間の変換

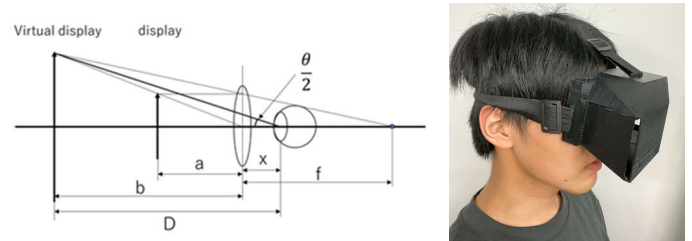


Fig. 3 虚像・モニタの光学関係(左)と作成したHMD(右)

3. スケール変換トレイグジスタンスシステムの設計

スケール変換トレイグジスタンスを実現するために構築したシステムを紹介する。本システムは視覚提示装置・リーダ装置・フォロワ装置の3つに大分される。

3.1 視覚提示装置 (Head Mounted Display, HMD)

瞳孔間距離 (PD) を $1/n$ にした際には視空間全体が n 倍に拡大される[4]。Fig. 2 に PD と視空間変換の幾何学的関係を示す。PD が $1/n$ である撮像系で取られた映像を提示された場合に画面上の点がどの位置に知覚されるかを考えると、映像は画面上の点として記録され、両眼から見たそれぞれの角度が定義される。提示系においても角度は維持されるために撮像系における点の位置と提示系における点の位置は Fig. 2 のようになる。PD によらず両眼と点を作る三角形が相似形であることと眼間距離の比を考えると、 $1/n$ の PD を持つ撮像系を通して世界を見ると全てのものが n 倍になることがわかる。つまり、PD を $1/n$ にした際、 n 倍拡大された視空間が生成される。これにより、操縦者は世界が n 倍になったかのように感じるため、身体寸法が $1/n$ になることと等価となる。よって、トレイグジスタンスにおいて $1/n$ スケール変換を実現する際の眼間距離は人間の眼間距離の $1/n$ 倍した値とすればいいことがわかる。加えて、先行研究[4]で明らかになっているように視空間を歪まらずに提示する場合にはカメラの眼間距離を適切に設定し、カメラの視野角と HMD の視野角を一致させる必要がある。いま、レンズとディスプレイの距離を a 、レンズと提示像までの距離を b 、レンズの焦点距離を f とする。Fig. 2 の幾何学関係から虚像の像の大きさは実際のディスプレイの大きさの $(b+f)/f$ 倍となることがわかる。また、視野角を θ 、レンズから等価瞳位置までの距離を x 、ディスプレイの大きさを d 、目から提示像までの距離を D とする。カメラの視野角と HMD の視野角を一致さ

せるためには、視野角 θ について次の式が成立する必要がある。

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1}{D} \cdot \frac{D+f-x}{f} \cdot \frac{d}{2} \quad (1)$$

本システムでは市販の内視鏡カメラ (ROTEK 社製, 以降カメラ) を使用した。このカメラは視野角約 $67^\circ \times$ 約 37° で、ディスプレイサイズ縦 $98 \text{ mm} \times$ 横 55 mm である。これに対して式(1)とレンズの公式から、ディスプレイとレンズの距離を 75 mm , レンズの焦点距離を 80 mm とした。またモニタ同士の干渉を防ぐために左側を表面鏡により 90 度跳ね上げることで回避した。これにより $1/n$ スケール環境においても視空間を正しく提示できるようにした。材質は ABS 樹脂を利用して作成した。外装部が 300 g , 表面鏡とディスプレイ及び回路部が両眼合わせて 225 g となった。

3.2 Follower の両眼カメラ設計

3-1 で選定した視野角約 $67^\circ \times$ 約 37° のカメラを利用した。HMD 側では左側のディスプレイに表面鏡を 1 枚利用しているため、左ディスプレイに映る映像は鏡像反転した映像となる。このため、Follower 側のカメラ固定具にも左カメラ部に表面鏡を設置した。設置は左右のカメラの光軸が平行で光路長が等しくなるように行った。ただし、今回利用するカメラの径は 8 mm のため、カメラ同士の物理的干渉を考えるとカメラ間距離は最低でも 8 mm 必要となる。人間の PD はおよそ 64 mm であるため、一般にカメラ径を r とすると、幾何学的相似関係からスケール比には式(2)の制約が加えられる。

$$\frac{1}{n} > \frac{r}{64} \quad (2)$$

3.3 リーダ装置

作業時における操縦者の身体運動を計測するために、手先運動を計測する両腕アーム、及び頭部運動を計測する頭部アームを作成した。両腕アームの概略図を Fig4 に示す。両腕アームは医療用ロボット DaVinci の構造を模して設計された。ジンバル部には冗長自由度を加えることでジンバルロックを防ぎ、柔軟な操縦を可能としている。

頭部アームは両腕アームを基本として、HMD を支持しながら頭部回旋運動を計測できるジンバル構造になっている。ジンバル部の重量増加は慣性モーメントの増加を招き、頸椎に負担をかけてしまう。このため、 $1/4$ 円弧のアルミフレームで各回転軸を繋ぐこととした。これにより関節数を必要最小数の 3 つに抑えることができ、ジンバル部の機構重量が 800 g となった。これは関節を多数利用する平行リンクを使用する場合に比べて有利に働く。この構造は両腕アームと違って冗長自由度がないが、特異点を稼働範囲外に逃すことによってジンバルロックを防いでいる。

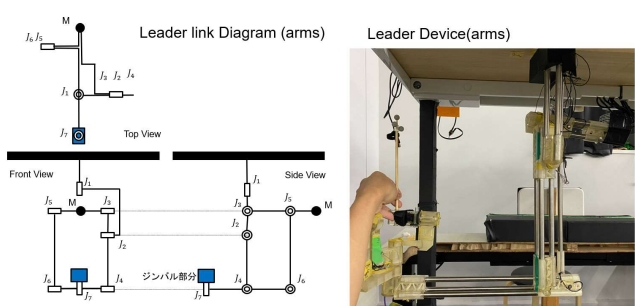


Fig4: マスタアームの自由度配置(左)と写真(右)

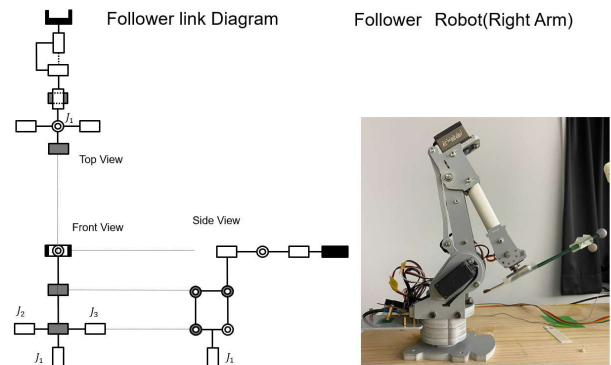


Fig5: フォロワロボットの自由度配置(左)と写真(右)

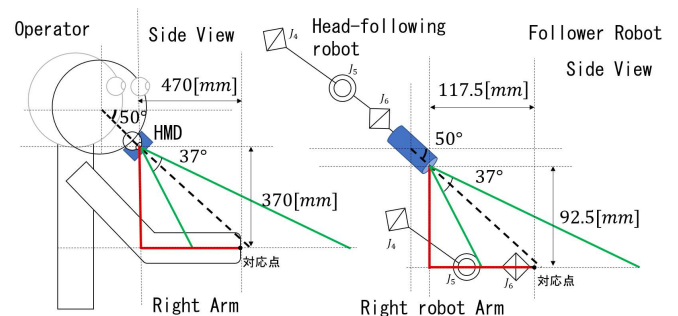


Fig6: 操縦者(左)とフォロワ(右)の位置関係($1/n=1/4$ の場合)

3.4 Follower 装置

操縦者の運動を再現する代替ロボットとして、Fig5 に示す SainSmart 社製の 6 自由度アームを利用した。このアームには MG996R が搭載されていたが、追従性向上のために近藤科学社製の Rsx3-Response と Rsx3-Power を利用した。操縦者の頭部と両腕に対応させるために同じロボットアームを 3 つ利用した。両腕に対応するロボットアームは、人間の両腕の間隔 430 mm の $1/n$ 倍となるように設置した。また、両腕に対応するフォロワロボットと頭部に対応するフォロワロボットは、Fig6 のようにスケール変換によって eye-hand-coordination が崩れないよう配置した。今回は習字を想定して頭の俯角を 50 度、手先位置は目から見て下方に 370 mm , 奥行き方向に 470 mm の地点に存在するとして設計した。

4. ヒトの習字スキル伝達実験

スケール変換下でスキル再現できるかを評価するために、作成した装置を利用し筆習字スキルの伝達実験を行った。筆習字では半紙に対して筆がなるべく直交するこ

とが求められる。また、筆の鋒は紙面との接触によってその形状を変えるため、筆記者はその形状を考慮した上で紙面に収まる軌道企画を行う必要がある。

4.1 実験方法

本実験で筆記させる文字は永字八法（「永」の漢字には書に必要な技法 8 種が含まれている）に着目し、「永」の漢字とした[4]。実験手順は 3 つのパートに分かれる。第 1 パートでは被験者は実空間において自身の手に直径 8 mm の筆を持って文字を書く。これを 5 回繰り返す。この時被験者の左手は半紙に沿えないよう指示した。第 2 パートでは被験者はスケールダウンシステムを通してマスターアームに設置された筆に見立てた棒を通してアームを操作し文字を書く。これを 5 回繰り返す。この時のスケール比は n=4 と設定し、リーダのエンドエフェクタには直径 8mm の筆を、フォロワのエンドエフェクタに設置する筆は幾何学的相似関係を合わせるために直径 2 mm のものを利用した。第 3 パートでは再び実空間において自身の手に直径 8 mm の筆を持って文字を書く。これを 5 回繰り返す。本実験は頭部の位置姿勢を固定した状態で行った。被験者は n=1 であり、20 代右利きの男性であった。

5. 実験結果

習字結果を Fig7 に示す。評価方法は表 1 に示すように永字八法を構成する 8 つの点に着目し、それぞれが作業結果において達成されているかないかで評価した。評価結果を表に示す。評価結果はパート 1 で[7,7,7,8,8],パート 2 で[6,7,6,6,6],パート 3 で[6,7,7,8,8]となった。

6. 考察

表 1 に示すように、1/4 スケール環境下において、実空間でのスコアと同等のスコアを得ることができた。第 2 パートでは回を重ねるごとに線が太くなり、実空間での筆の太さとほとんど等しくなっている。1,2 回目で字が細かったのはシステムに対して未順応であり、筆を半紙に近づけ過ぎないように書こうとしたためだと考えられる。

第 3 パート 1 回目のスコアが第 1 パート 5 回目のスコアよりも低くなっている。これは、操縦者は 1/4 スケール環境下での習字に順応しており、1/4 スケール環境下と同じように筆記しようとしたためだと考えられる。一方で 2 回目以降スコアが改善したことから、1/4 スケールから脱順応したと考えられる。

7. むすび

本報告ではスケール変換トレイグジスタンスシステムの設計と構築、及びそれを利用したスケールダウン環境下へのスキル伝達実験を行った。これにより、1/n スケール環境下へのスキル伝達が可能であることがわかった。今後は見かけの物理定数の変化が操縦者の運動に与える影響や、操縦者が 1/n の環境へ順応する過程について明らかにしていく。

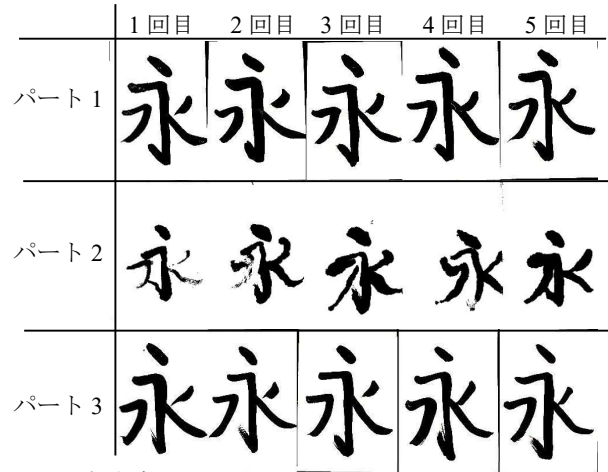


Fig7:実験結果

表 1:永字八法の評価方法とその結果

何回目か	説明	パート1					パート2					パート3					
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
永字八法の評価ポイント	1画目	点	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2画目	左から右への横画	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		上から下への縦画	○	○	○	○	○	○ ²⁾	○ ²⁾	○	○	○	○	○	○	○	○
		縦線からのはね	○	○	○	○	○	○	○	○	○ ⁵⁾	○	○	○	○	○	○
	3画目	左下から右上へのはね	○	○	○	○	○	○	○	○ ³⁾	○	○ ³⁾	○	○	○	○	○
右上から左下へのはらい		○	○	○	○	○	○	○	○ ⁴⁾	○	○	○ ⁴⁾	○	○	○	○	
4画目	右上から左下への短いはらい	○ ¹⁾	○ ¹⁾	○ ¹⁾	○	○	○ ¹⁾	○	○	○	○	○ ¹⁾	○ ¹⁾	○ ¹⁾	○	○	
5画目	左上から右下へのはらい	○	○	○	○	○	○	○	○	○ ⁶⁾	○ ⁶⁾	○	○	○	○	○	
スコア		7	7	7	8	8	6	7	6	6	6	6	7	7	8	8	

- 1)5画目のはらいに接していない 2)太さがまばら 3)2画目と重なっている
- 4)はらわれていない、線もしくははねになっている 5) はねがかすれている
- 6) はらいが半紙外にはみ出している

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 基盤研究(A) 19H01121 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] S. Tachi, Telexistence (2nd Edition). World Scientific, 2015.

[2] 舘 暉, 井上康之, 加藤史洋, Charith Fernando, Yamen Sarajji, “トレイグジスタンスの研究 (第 96 報) — TELESAR VI:67 自由度を有するトレイグジスタンス AVATAR システム—”, 第 15 回トレイグジスタンス研究会 2020.

[3] 平山智貴, 宮本拓, 古川正紘, 前田太郎, “トレイグジスタンスにおけるスケールダウン効果を用いた臨場感改善のための縮尺決定法”, 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会論文集(VRSJ),2020

[4] 柳田康幸, 舘暉, ” HMD 型トレイグジスタンスシステムの頭部運動時における視野角不整合の影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌(VRSJ), Vol.7, No.1,pp69-78,2002.

[5] 山崎聡, 藤本真作, 逢坂一正, “書道運筆時における速度パターンの抽出”, 岡山理科大学紀要 A 自然科学, 34 号, 443-450, 1998