



# 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

The Scale Decision Method for Improving Reality  
Using Scale-down Effect in Telexistence

平山智貴<sup>1)</sup>, 宮本拓<sup>1,3)</sup>, 古川正紘<sup>1,2)</sup>, 前田太郎<sup>1,2)</sup>

Tomoki HIRAYAMA, Hiroki MIYAMOTO, Masahiro Furukawa and 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, m.furukawa, t\_maeda}@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 1-4)
- 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** : テレイグジスタンスとは臨場感を持って遠隔地を体験できる技術概念である。しかし制御対象の追従性能不足は大きな臨場感の喪失をもたらす。そこで本研究では、操縦者・制御対象間の幾何学的相似を利用し、制御対象を操縦者の  $1/n$  倍に縮小することで主観的等価に追従特性を改善する手法を提案する。これをスケールダウンしたスレーブロボットの動特性を評価することで、臨場感の向上が可能であることを示す。

**キーワード** : テレイグジスタンス, 臨場感, スケールダウン効果

## 1. はじめに

トレイグジスタンス[1] (Telexistence) とは、生身の人間では到底解決することのできない課題を、人間の能力を拡張することによって克服する技術である。この技術は人間に代わって作業を行うロボットを用意し、人間とロボット間で感覚と運動を共有することで実現することができる。例えば危険地での作業を行う場合、現場にある人型ロボットを人間が遠隔地から操作することで、人間の安全を確保しながら作業を行うことができる。また、スレーブロボットとして人と同一寸法の人型ロボットを利用すれば、特殊な操縦方法を必要とせず人が生来獲得してきた運動能力を生かした操縦が可能となり、即時的な判断が要求される場合にも柔軟に対応できる。

近年この技術を応用し、スケール変換を用いた内視鏡手術支援用ロボット「Da Vinci」が開発されている。これはコンソールでの術者の手の動きをペイシェントカート

に設置されたロボット鉗子を用いて縮小再現することで、術野外からの遠隔手術を可能としている。これにより従来の内視鏡手術では困難であったより微細な空間での手術が可能となり、結果として人がメスで行う通常の手術よりも微細で器用な作業を行うことが可能となった。つまり、術者の運動を縮小再現するという点で「Da Vinci」はスケールダウントレイグジスタンスの好例である。

スケールダウントレイグジスタンスは、従来のトレイグジスタンスにおける問題であった制御対象の追従性能不足によって引き起こされる臨場感の喪失を解決できる[2]。これは操縦者と制御対象のスケール比によって、アクチュエータ駆動に必要なトルクが等尺下より小さくとも、主観的等価に操縦者と同じ動作を再現できるためである。つまり、応答性の高い設計が可能になる。この方法論は、模型実験や特撮技術の文脈でよく知られている。本稿ではこの効果を「スケールダウン効果」と呼ぶこととする。

ここで、時間伸縮を前提としない実時間トレイグジスタンス体験における知見を挙げる。スケール変換対象となる物理量における「距離」と「角度」との比較が行われた結果、角度よりも距離に対する変換の方が操縦者の順応時間が短いことが示された[3]。近藤らの結果は、臨場感を向上させるという観点からは操縦者とアバターとのスケールは、関節角度関係よりもむしろ並進距離関係を変換すべきであることを示している。

並進距離関係に対してスケール変換を行うにあたり、重量出力比に応じた要求トルク（トルクウェイトレシオ）の改善による追従性能の向上という観点から、縮尺比自体もまた積極的に設計可能なパラメータである。しかし、実時間トレイグジスタンスにおける操縦者に対する制御対象の縮尺比を設計するという観点での体系化がなされていない。そこで本研究では、トレイグジスタンスにおけるスケールダウン効果を数理的に示し、実際にスケールダウンした制御対象である 6 自由度ロボットアームの動特性を評価することによって縮尺決定法の妥当性を実証する。

## 2. スケールダウンを用いたトレイグジスタンス

### 2.1 スケールダウン効果

トレイグジスタンスにおいてスケールダウンを考える場合、単にロボットの機構学的な幾何学的相似だけを考えるのではなく、あらゆる物理量について相似関係を考える必要がある。これを数理的に示す。

現実世界で質量 $m_r$  [kg]の物体を力 $F_r$  [kgm/s<sup>2</sup>]で押したときの加速度が $\ddot{x}_r$  [m/s<sup>2</sup>]であったと考える。このとき運動方程式は(1)式で表される。ここで、物体の体積は $V_r$ 、密度は $\rho_r$ である。

$$F_r = m_r \ddot{x}_r \quad (1)$$

続いて、この現象を $1/n$ 倍にスケールダウンした没入世界で等しい加速度運動を観測する場合を考える。ここで $1 < n$ とする。現実世界から観測される没入世界内の加速度を $\ddot{x}_s$ とすると、距離は $1/n$ 倍されるので、加速度 $\ddot{x}_r$  [m/s<sup>2</sup>]は $1/n$ 倍される。

$$\ddot{x}_s = \frac{\ddot{x}_r}{n} \quad (2)$$

ここで、密度が縮尺比 $n$ によらず一定であるとみなすと、(3)式より現実世界から観測される没入世界での体積 $V_s$ は $1/n^3$ 倍され、質量 $m_s$ は $1/n^3$ 倍に縮尺される。

$$m_s = \rho_s V_s = \rho_r \frac{1}{n^3} V_r = \frac{1}{n^3} m_r \quad (3)$$

これより、没入世界内での運動方程式は(4)式となる。このとき(2)(3)(4)式から、現実世界で必要な物体を押す力 $F$ は没入世界では $1/n^4 F$ となり、見かけ上では現実世界で押した力よりも小さい力しか与えていないにもかかわらず、没入世界内において主観的等価に等しい加速度運動を観測することができる。

$$F_s = m_s \ddot{x}_s \quad (4)$$

$$= \frac{1}{n^3} m_r \times \frac{1}{n} \ddot{x}_r$$

$$= \frac{1}{n^4} m_r \ddot{x}_r = \frac{1}{n^4} F_r \quad (5)$$

スケールダウンにより等価な加速度生じさせる力を $1/n^4$ 倍に低減させることが可能だけでなく、等しい外力が与えられた物体の挙動は $n^4$ 倍の加速度が発生したかのように観察されることを意味している。

### 2.2 応答性と追従性能

従来のトレイグジスタンスにおいて、臨場感を喪失する原因の一つとして、制御対象の追従性能不足があった。これにはいくつかの要因がある。第一に、操縦者の関節の最大トルクと制御対象のサーボの出力可能な最大トルクの違いである。つまり、従来の $1/1$ トレイグジスタンスにおいてロボットと操縦者との比重と質量分布が等価と仮定すると、操縦者の関節の最大トルクが制御対象のサーボの最大トルクよりも大きい場合に制御対象が操縦者の運動に追いつくことができないため、操縦者が期待する挙動と制御対象の運動結果との間に著しい齟齬を生じさせる。その結果、操縦者は自己運動に対する自己主体感を直ちに喪失し、臨場感を失ってしまう。

第二に、人間の最大角速度と制御対象内のアクチュエータの最大角速度の違いである。これは、人間の関節の最大角速度 $w_h$ に対してアクチュエータの出力可能な最大角速度 $w_r$ が小さい場合、 $w_r$ よりも大きな角速度で行われる操縦者の運動に対して制御対象が追いつくことができないため、同様に自己主体感を喪失し、臨場感を失う。

スケールダウントレイグジスタンスでは、操縦者・制御対象間のスケール比を $1/n$ とすることで、追従に必要なトルクや角速度が低減可能である。ここで $1 < n$ とする。

例えば、等身大ロボットと小型ロボットにおいて、腕

を水平方向から鉛直上方に上昇させる際に必要なエネルギーを考える。このとき、必要なエネルギーは重心の位置エネルギー変化であると考えられるため、等身大・小型ロボットが出力する必要エネルギー $E_r, E_s$ はそれぞれ(6), (7)式で記述される。

$$E_r = m_r g h_r \quad (6)$$

$$E_s = m_s g h_s = \frac{1}{n^4} m_r g h_r \quad (7)$$

また、 $E_r, E_s$ はサーボの出力する回転軸のトルク $\tau_r, \tau_s$ を用いて(8), (9)式で記述される。

$$E_r = \frac{1}{2} \pi \tau_r \quad (8)$$

$$E_s = \frac{1}{2} \pi \tau_s \quad (9)$$

これにより、腕を上げるために必要な最大トルク $\tau_r, \tau_s$ が(10), (11)式で表され、これにより腕を動かすために必要なトルクウェイトレシオ $twr_r, twr_s$ を(12)(13)式のように計算することができる。

$$\tau_r = \frac{2}{\pi} m_r g h_r \quad (10)$$

$$\tau_s = \frac{2}{\pi n^4} m_r g h_r \quad (11)$$

$$twr_r = \frac{m_r}{\tau_r} = \frac{\pi}{2 g h_r} \quad (12)$$

$$twr_s = \frac{m_s}{\tau_s} = \frac{\pi n}{2 g h_r} \quad (13)$$

これらのことから、トルクウェイトレシオはロボットの小型化によって上昇するので、運動に必要なアクチュエータの等価加速性能がロボットの小型によって向上することがわかる。つまり、操縦者の運動に対して追従するために、等価的に操縦者の $n$ 倍の速度で制御対象が動くこととなり、十分な追従を実現できると期待される。

このようにスケールダウンを行うことによる追従性能の向上は並進運動において最も顕著に表れると期待できる。一方で回転運動に関してはスケールダウンによる効果よりも質量による影響が大きく、スケールダウンすることによる追従性能の向上は見込めないと考えられる。よって、本実験では並進運動中の追従性能がスケールダウンによって向上することを検証した。

## 2.3 スケールダウンの限界

スケールダウンの導入によって、臨場感喪失の原因の一つであった関節のトルク不足を解消するが、決して無限にスケールダウンが行えるわけではない。スレーブロボットをスケールダウンする際の $1/n$ 倍サイズ作成可能性問題を考える必要がある。特に制御対象の縮小化により内界センサ系の位置・角度分解能が低下する場合、位置姿勢の再現精度が相対的に低下する。すなわち、過度なスケールダウンはこれらの要素が外乱となり、本来再現したい運動(Signal)に対するノイズとなることでSN比の低下を招き、従って臨場感喪失の原因になりうる。

以上の考察から、臨場感を維持するスケール比 $1/n$ は前述の複合要因によって上界が定まると考えられる。ただし、軸制御ロボット内界センサの位置・角度分解能が不変といえる場合か、外界センサの撮像距離を $1/n$ 倍化できる場合はこの限りではない。

## 3. 追従実験

### 3.1 実験装置

本実験では、前記のスケールダウン効果を検証するために以下のような実験装置を構築した。システム概観をFig.1に示す。Fig.1に示すようにスレーブロボットとして6自由度を持つロボットアーム(SainSmart社製,以下スレーブロボット)の台座を机に固定し、手先に再帰性反射マーカーを取り付けた。手先の座標はOptiTrack(Acuity社製,以下OptiTrack)を用いてマーカー位置を計測することで取得した。関節角の制御にはmbed NXP-LPC1768 (ARM社製,以下mbed)を利用し、各サーボモータへの角度指令値を60Hzの更新周波数で送信した。座標軸は差動関節が作用する方向をx軸として右手座標系で定義した。

### 3.2 実験方法

本実験では、 $1/n$ スケール( $n=4, 8, 16$ )の縮尺でスレーブロボットに円軌道の並進運動を行わせた。軌道は $1/1$ スケールで半径160mmの円であり、回転周期を0.2Hz~8.0Hzまで線形にスイープさせた。このときのスレーブロボ

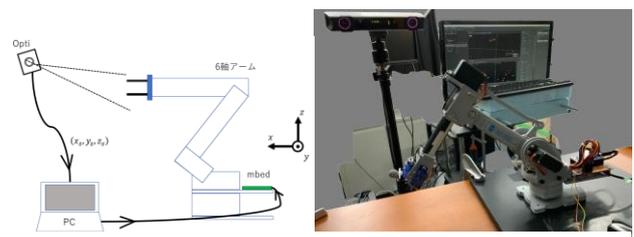


Fig. 1 システム図および実験環境

ットの運動軌跡を Opti Track により計測した。これにより  $1/n$  スケールに縮尺されたロボットの動特性を評価する。

#### 4. 実験結果

xy 平面内での  $1/n$  スケールでの運動軌跡を  $1/1$  スケールに変換し動作距離を等価にした等価運動軌跡を Fig.2 に示す。各スケールの運動の yz, zx 平面への射影から、スケール比に依らず x が大きくなるほど z が小さくなっている。これはアーム手先にあるサーボの自重による回転軸まわりのモーメントについて、差動関節を動かす 2 つのサーボのリンク長の違いから両者の間に差が生まれ、前方に倒れるほど z 軸方向に誤差が生じたと考えられる。

$1/16$  条件では円運動ではなく直線的な運動になっている。特に y 軸方向の動きが再現されていない。これはスケールダウンによって移動距離が縮小された結果、y 軸方向の回転を担うサーボモータの分解能を超える微小な角度が要求されたためであると考えられる。

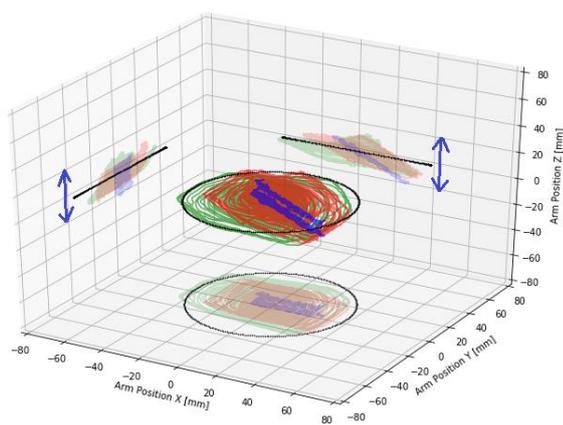


Fig. 2 xy 平面等価運動軌跡. 黒い円はマスタ軌道でありスケールはそれぞれ緑:  $1/4$ , 赤:  $1/8$ , 紫:  $1/16$

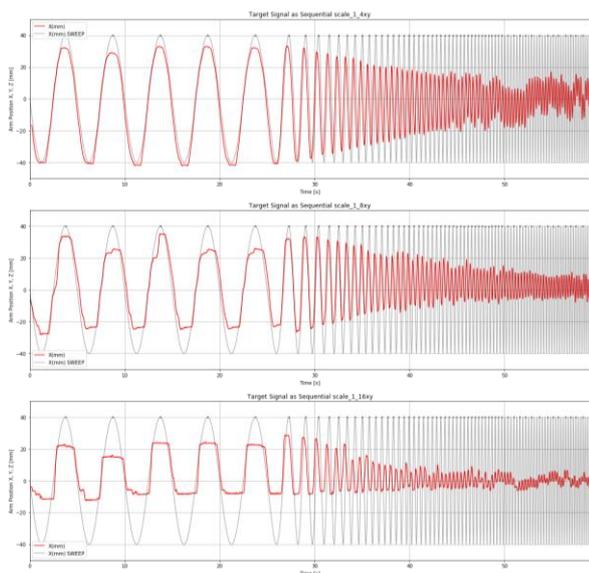


Fig. 3 xy 平面運動における x 軸方向の等価運動軌跡

また、x 軸方向の運動軌跡を Fig.3 に示す。時刻 0~25 s の低周波領域では、 $n$  が大きくなるにつれて sin 波が崩れ、台形波に近づいていることがわかる。これは摩擦力がサーボモータのトルク出力を上回ったためだと考えられる。(5)式からスケールダウン効果により力は  $n^4$  倍となる。一方でトルクウェイトレシオは(13)式から  $n$  倍となる。つまりスケールダウンすればするほど摩擦力による影響力が支配的となる。また、時刻 25 s 以降は、振幅が周波数が上がるに伴い線形に減衰している。これは粘性抵抗力が速度の上昇の伴い増大したためであると考えられる。

#### 5. 考察

スケールダウン効果により、 $n$  が大きくなると追従特性は向上するが、一定以上  $n$  が大きくなると軌道の再現性は低下するといえる。これは、(5)式で示したように、摩擦力や粘性抵抗力が支配的になるためである。スケールダウン効果により各アクチュエータに要求される最大角加速度および最大トルクが小さくなる。一方で、摩擦力や粘性抵抗力は大きくなる。つまりスケールを小さくすることによるサーボモータの角加速度・トルク不足の解消と、摩擦力や粘性抵抗力による追従性能の低下はトレードオフの関係にあるといえる。

#### 6. むすび

本稿では、6 自由度アームを用いてトレイグジスタンスにおけるスケールダウン効果をスケール比  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$  の 3 つの場合について評価した。その結果、スケールダウン効果による追従性能向上のためのスレーブロボット設計法を示すことができた。

#### 参考文献

- [1] 舘暲, 安田賢一: テレイグジスタンス・マニピュレーション. システムの設計と評価, 電気学会論文誌, Vol. 1, No. 2, pp. 201–206, 1996.
- [2] 古川正紘: テレイグジスタンスにおけるスケール変換, 日本ロボット学会誌 Vol.36 No.10, pp. 678–681, 2018.
- [3] 近藤, 飯塚, 安藤, 前田: “全身鏡像アバターを用いた拡張トレイグジスタンスの研究”, 第 18 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.285–288, 2013.