



# VR におけるテレキネシス感を表現するシステムの構築

Development and evaluation of a system to express a sense of telekinesis in VR

廣田雄大<sup>1)</sup>, 中谷信吾<sup>1)</sup>, 櫻井翔<sup>1)</sup>, 野嶋琢也<sup>1)</sup>, 広田光一<sup>1)</sup>

Yudai HIROTA, Shingo NAKAYA, Sho SAKURAI, Takuya NOJIMA, and Koichi HIROTA

1) 電気通信大学情報理工学研究所 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1,  
{hirota\_yudai, shingo.nakaya, sho}@vogue.is.ucc.ac.jp, tnojima@nojilab.org, hirota@vogue.is.ucc.ac.jp)

**概要:** テレキネシスは、遠隔にある物体を直接触れずに操作できる能力である。フィクション作品では、テレキネシス使用者は、手等に力を込めて対象を思い通りに操作する描写が見られる。作品の描写からは、物体に触れているわけではないにも関わらず、対象に対する運動主体感を伴っていると予想される。本研究では、VR テレキネシス体験手法を構築し、テレキネシスを体験しているような身体感覚や行為主体感を得ることができるか調査した。

**キーワード:** テレキネシス, 運動主体感, VR 物体操作

## 1. はじめに

現実世界で物体を操作する時、直接的、あるいは操作対象と接する他の物体を通じて間接的に触れる必要がある。そして、多くの場合、物体や身体に生じる変化の知覚とともに、物体への運動主体感が生じる。運動主体感とは、「ある運動を引き起こしているのは他の誰でもない自分自身である」という感覚[1]であり、直接的か間接的かを問わず、操作者の入力動作から予想される操作対象物の動きと、実際の操作対象物の動きが一致していると感じられた時に生じる[2]。

一方、映画やアニメ、ゲーム等のフィクション作品では、物体に直接触れることなく操作できる能力が登場する。この能力は主にテレキネシスと呼ばれる。上記の作品では、操作対象の物体に触れていないにもかかわらず、思い通りに操作する様子が数多く描かれている。また、テレキネシス使用時は、視覚だけでなく、さまざまな感覚が操作者にフィードバックされるような描写が見られる。

テレキネシスは架空の能力であり、現実世界で体験することはほぼ不可能である。しかし、もし我々がテレキネシスを獲得し、触れていない物体を操作できた場合、現実で物体を操作する場合と同様の運動主体感を得られるのだろうか。また、運動主体感が得られた場合、どのようなフィードバックに起因しているのだろうか。

本研究は、以上の問いを明らかにし、直接物体に触れている時に準じた感覚を伴って触れていない物体を操作する感覚(以降、「テレキネシス感」と呼称)を生成する手法の実現を目指している。これまでに著者らは、多数のフィクション作品におけるテレキネシスの描写を分析し、バー

チャルリアリティ (VR) を用いてテレキネシス感の生成に必要なと考えられる複数の要素を表現するシステムを構築した。本研究の目的は、本システムがテレキネシス感を表現可能か検証することである。具体的には、本システムにおけるテレキネシス感の表現手法が適切かどうか、またその表現手法がテレキネシス感および運動主体感に及ぼす影響を調査する。本検証を通じ、各要素がどのようにテレキネシス感と運動主体感に寄与するのかを明らかにする。

## 2. テレキネシス感を表現するシステム

### 2.1 テレキネシスの使用描写の分析

テレキネシス感を表現するシステムの構築にあたり、著者等は、テレキネシスが登場する 72 のフィクション作品を調査し、物体の操作方法やテレキネシスの使用に伴うフィードバックの描写を分析した。

操作したい物体の選択方法は、視線を向けて選択する描写が最も多かった (53 作品)。また、テレキネシスによる物体の操作方法は、手を動かす描写が最も多く (64 作品)、特に手を開いて対象に腕を伸ばす描写が多かった (58 作品)。さらに、テレキネシスの使用者と操作物体の動きの関係性は、大きく分けて「手の動きと物体の動きが一致する」「手を伸ばすだけで物体が動く」「ジェスチャを用いて物体を動かす」の 3 種類に大別でき、後者 2 つの方法は、操作が限定的な状況で行われたことがまとめられた。テレキネシス使用に伴う操作者の感覚が見受けられる描写について、手が強張り小刻みに揺れる描写 (41 作品)、瞬きせず対象を凝視する描写 (45 作品) があった。加えて、遠隔にある対象に視線や手を向けた時、その干渉

によって生じるエネルギーの描写が散見され、エネルギーを操作対象や操作者へのオーラによって可視化する描写(40作品)も見られた。

以上の描写を整理した上で、(1)操作物体に視線を向け瞬きせず「集中」することで物体を操作するエネルギーが生成される点、(2)手で「力む」ことで操作対象にエネルギーを送る点、(3)操作対象や腕、手にエネルギーが集まる「エネルギー感」を知覚する点、がテレキネシス感を生成する重要な要素であり、これらを生起させるプロセスが必要であると考えた。

## 2.2 システムの実装

前節で述べたテレキネシス感を生成する要素を表現するシステムの構成と体験イメージを図1に示す。

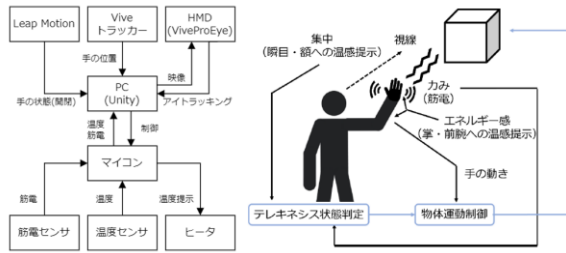


図1: テレキネシス感生成システム構成図  
および体験イメージ

操作者が操作対象に視線と掌を向けて集中しながら力むと、テレキネシス使用状態と判定される。この時、対象物体とアバタの腕に視覚的効果を施し、前腕、額、掌に熱刺激を提示し、エネルギー感を表現する。この状態で操作者が手を動かすと、それに追従するように対象物体が動くシステムとなっている。

### 2.2.1 物体操作

物体操作は、手の位置を ViveTracker (HTC 社) で、手の開閉を LeapMotion でトラッキングし、手を開いた状態で対象に手を向け動かすことによって、物体が手の動きに追従する設計とした。また、手の動きを停止させたときにテレキネシス使用状態であるならば、物体は直前の動作を続ける設計とした。1 フレームあたりの物体の変位 $\Delta x$ は、体験者が設定できる操作の感度係数 $k$ 、手と物体の距離によって決まる物体の速さ $s$ 、物体の移動方向 $dir(t)$ により、次の式(1)のように求まる。

$$\Delta x = ksdir(t) \quad (1)$$

また、物体の速さ $s$ は、手の移動量 $m(t)$ 、手と物体の距離 $dist_{hx}$ より式(2)のように定める。

$$s = m(t)dist_{hx} \quad (2)$$

本システムでは手の動きの速さに応じて物体の動きの速さも変化するようにする。そこで式(3)に示すように、時刻 $t-1$ と $t$ での手の移動量を比較し、移動方向が異なる場合は $m(t)$ を、移動方向が類似する場合は、移動量の多い方の手の運動を参照するようにし、体験者の操作意図を反映するようにした。

$$m(t) = \begin{cases} m(t-1) & (m(t-1) > m(t) \text{ and } sim) \\ m(t) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

また、移動方向の類似性には内積を用い、式(4)のように判定した。

$$sim = \begin{cases} True & dir(t) \cdot dir(t-1) > sim_{th} \\ False & dir(t) \cdot dir(t-1) < sim_{th} \end{cases} \quad (4)$$

物体の移動方向については式(5)のように決定した。

$$dir(t) = \begin{cases} D|x(t-1) - h(t)| & (m_d > m_{vh} \text{ and } m_d > m_{th}) \\ h(t) - h(t-1) & (m_{vh} > m_d \text{ and } m_{vh} > m_{th}) \\ dir(t-1) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $m_d$ は前後方向への手の移動量、 $m_{vh}$ は上下左右方向の手の移動量、 $m_{th}$ は被験者が実験前に設定した、手を動かしているか否かを判定する閾値、 $D$ は手の動きが前後どちらの方向かを表す符号である。

### 2.2.2 集中状態の計測

集中状態は、前節の分析による描写の傾向および人が集中する際に瞬きの頻度が減少する研究 [3]より、瞬きの間隔を指標として判定した。瞬きの計測には ViveProEye (HTC 社) を使用した。集中状態では瞬きの回数が40%減少した知見[4]に基づき、集中状態に移移するための瞬きの閾値 $C_{th}$ を、体験者の平常時の60秒間の瞬き間隔の平均値の1.67倍とした。

### 2.2.3 カミの計測

カミは、筋電センサ (MyoScan, ALTs 社) を腕に取り付け、筋電位を計測することで判定した。センサは M5Stick と接続し、そこで筋電位波形を筋電位の強さに変換、これを Bluetooth で Unity に送信した。サンプリングレートは2kHzであった。波形から強さへの変換の流れとして、まず波形から直流成分を除去した。次に、この値の絶対値を取り、筋電位の正負の変動を強さとして処理した。最後に移動平均法を用いて高周波ノイズを除去した。Unity に送られた筋電位の強さは次の式(6)によって規格化した。

$$F'_t = \frac{F_t - F_{min}}{F_{max} - F_{min}} \quad (6)$$

ここで、 $F_t$ は筋電位の波形から得た筋電位の強さ、 $F_{max}$ と $F_{min}$ は $F_t$ の最大値と最小値、 $F'_t$ は0~1に $F_t$ を正規化したものである。

### 2.2.4 エネルギー感のための熱刺激の提示

テレキネシスのエネルギー感を表現するために、テレキネシス使用状態の場合に熱刺激を提示した。この提示のために、前腕と額に Walfront 社製の、掌部分に Fence\_up 社製のフィルムヒータを使用した。また、温度センサに NTC サーミスタ (村田製作所製) を用いた。フィルムヒータは、温度を感じはじめの温度閾値の知見[5]に基づき、皮膚表面の温度が平常時の皮膚表面温度+2°Cになるように温度センサで計測しながら制御した。ただし、安全のため温度が40°Cを超えないように制御した。

### 3. 評価実験

#### 3.1 実験目的

本実験では、テレキネシス感を表現するために必要な構成要素と仮定した「集中」、「力み」、「エネルギー感」がテレキネシス感に与える影響を調査した。

#### 3.2 実験設計と手順



図2. 実験Aのタスクの様子

2.2 章で述べたシステム環境を用いて、被験者に VR 空間内に存在するブロックを、テレキネシスを使用して移動させるタスクを設計した。図2のように、操作対象となるブロックを VR 空間に3個配置し、被験者にこれらを目標位置に指定された順序で積み重ねさせた。

本タスクにおけるテレキネシスの発動条件として、「集中」あり/なし、「力み」あり/なし、「エネルギー感」あり/なし、の組合せ計8条件を設定した。

各条件下のデバイスの動作は、「集中」あり条件の場合、物体に視線を向けた状態で体験者の直近5回の瞬き間隔の平均値が閾値 $C_{th}$ を上回った場合、集中状態と判定した。

「集中」なし条件の場合、視線と対象の交差判定のみを判定基準に用いた。「力み」あり条件の場合、筋電位の正規化値 $F'_i$ が実験ごとに設定された閾値 $F_{th}$ を上回った場合に力んでいると判別した。「力み」なし条件の場合、筋電位を用いなかった。「エネルギー感」あり条件の場合、物体操作時に熱刺激を提示し、「エネルギー感」なし条件の場合、熱刺激を使用しなかった。

実験では、まず、利き手とHMDの使用頻度、テレキネシスのイメージおよびテレキネシスが登場する作品の知識の有無を尋ねるアンケートを実施した。次に、HMDを装着してもらい、筋電センサとフィルムヒータを取り付けさせた。その後、ブロックを移動させる練習フェーズを挟み、上記のタスクを反復5回ずつ実施した。タスク終了後、テレキネシス感に関する評価アンケート(表1)を実施した。身体所有感と運動主体感の評価は、7段階リッカート尺度(1:全く〜でない, 7:非常に〜である)を用いた。テレキネシス感と疲労感、操作性の評価には、VAS法を用いた。

本タスクとタスク後アンケートを一試行として、全条件計8試行を実施した。順序効果を相殺するため、条件順は被験者間でランダムに設定した。本実験は、被験者10名(男性9名, 女性1名)を対象に実施した。

#### 3.3 実験結果

分量の関係上、以降では、運動主体感とテレキネシス感の評価と分析に限定して記述する。

アンケートの各評価値に対し、Shapiro-Wilk検定を行った結果、一部の群において正規性が認められなかった。

表1. タスク後アンケート

身体所有感	
O1	VR 内の手が自分の体の一部であるかのように感じた。
O2	操作対象物が自分の体の一部であるかのように感じた。
O3	操作中、VR 内の手が正しく反応しないとき、対象物のコントロールを失っているように感じた。
運動主体感	
A1	操作対象物が、まるで自分の意思に従ったかのように、思い通りに動いたように感じた。
A2	操作対象物が、自分の手の動きと同じように反応することを期待した。
A3	操作は(1 難しかった、7 簡単だった)
A4	思い通りに対象物を操作することができたと感じた。
A5	操作対象物を自分の体の一部のように操作しているように感じた。
A6	操作対象物を自分の手で操作しているように感じた。
A7	自身の手と操作対象物がリンクしているように感じた。
テレキネシス感	
T1	操作にあたって、集中を必要とした
T2	操作にあたって、力みを必要とした
T3	操作にあたって、エネルギー感を感じた
T4	テレキネシスによる操作としての現実感(それらしき)を感じた
T5	操作中に感じた感覚は、テレキネシスを発動しているように感じた
T6	操作中、操作対象物に対して力を作用している感覚があった
T7	操作中、自身の手と操作対象物が繋がっている感覚があった
疲労感	
F1	操作中、肉体的な疲労を感じた
F2	肉体的な疲労は操作を続けていくことで変化した (非常に疲労が消耗された)-(非常に疲労が蓄積された)
F3	操作中、精神的な疲労を感じた
F4	精神的な疲労は操作を続けていくことで変化した (非常に疲労が消耗された)-(非常に疲労が蓄積された)
操作性	
M1	操作は楽しかった
M2	操作をしていて不満があった

そのため、それぞれの結果について ART による補正を行った上で3要因分散分析を行った。図3に、主効果が認められた要因ごとの結果を示す。

運動主体感については、A1 はエネルギー感 ( $F(1, 63) = 0.583, p = 0.448$ )、A3 は集中 ( $F(1, 63) = 4.88, p = 0.031$ )、A4 は集中 ( $F(1, 63) = 8.29, p = 0.005$ )、A6 は力み( $F(1, 63) = 5.78, p = 0.019$ )の主効果が有意であった。二次交互作用および一次交互作用は、ともに全て非有意であった。

テレキネシス感については、T1 は集中 ( $F(1, 63) = 164.3, p < 0.001$ )、T2 は力み ( $F(1, 63) = 195.1, p < 0.001$ )、T3 は集中 ( $F(1, 63) = 10.9, p = 0.002$ )、力み ( $F(1, 63) = 5.29, p = 0.024$ )、エネルギー感 ( $F(1, 63) = 5.36, p = 0.024$ )、T5 は力み ( $F(1, 63) = 4.01, p = 0.049$ )、エネルギー感 ( $F(1, 63) = 8.11, p = 0.006$ )、T6 は力み ( $F(1, 63) = 10.7, p < 0.001$ )、T7 はエネルギー感 ( $F(1, 63) = 5.46, p = 0.023$ )の主効果が有意であった。また、T2のみ、二次交互作用が有意であった(集中×力み×エネルギー感： $F(1, 63) = 4.76, p = 0.033$ )。ただし、一次交互作用は非有意であった。他の設問については、全要因の主効果が非有意であり、T2以外の設問では二



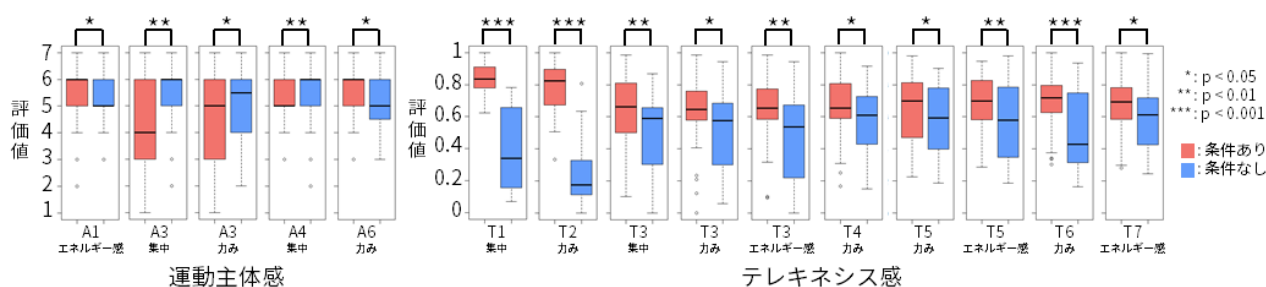


図 3. タスク後アンケートで主効果が認められた要因ごとの各条件下の評価値

次交互作用および一次交互作用も全て非有意であった。

### 3.4 考察

テレキネシス感の評価については、T1 では「集中」要因、T2 は「力み」要因、T3 は三要因全ての主効果が認められ、評価値はいずれの要因も有意にあり条件 > なし条件となった。この結果からまず、視線の向きおよび瞬き頻度の計測、筋電位計測、熱感提示によって「集中」「力み」「エネルギー感」のそれぞれを適切に表現できていたといえる。また、T2 に二次交互作用がみられたことから、「集中」や「エネルギー感」によって力んで物体を動かす状況の説得力が増すのではないかと考えた。T3 については物体に集中し力むことでエネルギーが生じることで物体を操作できるという手順があったために、エネルギー感がテレキネシス感の生成に寄与したのではないかと考えられる。

T4 と T6 では「力み」、T5 は「力み」および「エネルギー感」、T7 は「エネルギー感」の主効果が有意であり、各設問の評価値は全て有意にあり条件 > なし条件となった。T4 と T6 の結果からは、力みを必要とする設計により、テレキネシスで操作している感覚や触れていない物体に力を加える感覚が生じたことがわかる。また、T7 は、熱感が遠隔にある物体に触れた感覚に寄与したことを意味する。これらの結果から、力みとエネルギー感はテレキネシス感の表現に有用であったと言えよう。さらに、T5 の結果からは、力みとエネルギー感は単体でもテレキネシス感を表現できうるが、双方を組み合わせることで、テレキネシス感の表現のクオリティを向上できることが読み取れる。これらの結果については、手の力みをエネルギーを通じて対象に加えるという手順が、テレキネシス感を生成する上で重要であると考えている。

運動主体感の評価は、A1 では「エネルギー感」、A6 は「力み」で主効果が認められ、評価値はいずれの要因も有意にあり条件 > なし条件となった。これらについては、手に力を込めてエネルギーを感じながら、自身の手の動きに対応して対象が動く設計により、触れていない操作対象を自身の意図によって操作できていると感じさせることができたと考えられる。

一方、A3 では「集中」および「力み」、A4 は「集中」で主効果が認められ、評価値はいずれの要因も有意にあり条件 < なし条件となった。これらは、対象を凝視し、掌に力を込め続けながら物体を動かすという動作を行う機会が現実では少なく、こうした動作に慣れていないため、操作

の難易度が上昇したと考えている。

いずれの要因の主効果もみられなかった設問 A2、A5、A7 の結果から、3 つの要素は、手と物体の動きの同期や接続の感覚にはほとんど寄与していないことが示された。これは、本実験のテレキネシス感の表現では、実際に物体に触れたり、その物体を動かす時の感覚までは生成されなかったことを意味する。テレキネシス感がこれらの感覚によって変化する可能性もあるため、これらの感覚の表現方法やテレキネシス感への影響の継続的な検証が必要である。

### 4. まとめ

本研究では、フィクション作品の映像描写をもとに、VR を用いて、「集中」、「力み」「エネルギー感」という 3 つの要素からテレキネシス感を表現するシステムを構築した。また、本システムを用いて、これらの要素からテレキネシス感の表現および操作物体への運動主体感の生成が可能かを検証した。VR 空間で遠隔にある対象を移動させるタスクを採用した実験では、主に「力み」と「エネルギー感」がテレキネシス感および運動主体感の生成に大きく寄与する可能性が示された。一方で、「集中」の影響については不明な点も多く残った。今後は、各要因の影響のさらなる検証や、他の要因の検討を進め、テレキネシス感を生成する手法の実現を目指す。

### 参考文献

- [1] S. Gallagher, "Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science," *Trends in Cognitive Sciences* 4(1), pp.14-21, 2000.
- [2] Synofzik M et al, "Beyond the comparator model: A multifactorial two-step account of agency," *Consciousness and Cognition*, 17 (1), pp.219-239, 2008.
- [3] T. Gebrehiwot et al., "Analysis of blink rate variability during," *J. Telecommun. Electr. Comput.* 9, pp.139-142, 2017.
- [4] 福島 修, 斎藤 正男: バイオフィードバック法による瞬目の訓練, バイオフィードバック研究, vol.25, pp. 17-21, 1998.
- [5] 井口 拓海, 宮本 征一: 各部位における温刺激を知覚する温度および不快を知覚する温度に関する研究, 人間-生活環境系シンポジウム報告集, vol.43, pp.59-62, 2019.