



VR テレキネシス環境における操作対象の 距離と速度がテレキネシス感に及ぼす影響

柴原寛大¹⁾, 野嶋琢也¹⁾, 櫻井翔¹⁾, 広田光一¹⁾

Kanta SHIBAHARA, Takuya NOJIMA, Sho SAKURAI 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,
{k.shibahara, sho}@vogue.is.uec.ac.jp, nojilab@nojilab.org, hirota@vogue.is.uec.ac.jp)

概要： VR 空間でテレキネシス操作を行う感覚（テレキネシス感）に運動主体感が寄与する可能性が示されている．運動主体感の強度は自身の行為の結果の時空間的な変化により左右される．本研究では，ユーザのテレキネシス操作行為の時空間的な変化を物体の速度と距離に対応させ，この 2 つの要因が運動主体感とテレキネシス感に及ぼす影響を調査した．実験の結果，物体の速度が運動主体感およびテレキネシス感に作用することが示された．

キーワード： テレキネシス，テレキネシス感，運動主体感，遠隔物体インタラクション

1. はじめに

テレキネシスとは，遠隔にある物体に直接触れずに操作する架空の能力である．テレキネシスは，映画やアニメなどのフィクション作品に登場する．その中のテレキネシスの使用者は，物体に直接触れていないのにも関わらず，自分の意図したとおりに物体を操作している様子が見受けられる．また，テレキネシスの使用者には，物体に直接触れて動かした時と同様の力学的な感覚がフィードバックされる描写も見受けられる．

先行研究[1,2]では，上述のような「遠方にある物体に直接触れずに思い通りに力を作用させて操作している感覚」を「テレキネシス感」と定義し，これを表現する VR システムを提案している．当該研究では，フィクション作品の描写からテレキネシスの使用者の「集中」と「力み」，フィードバックされる「エネルギー感」をテレキネシス感を構成する要素と仮定した．そして，「力み」をテレキネシス操作に使う手の前腕部分の力み具合を筋電位により定量化し，「集中」の状態をユーザの瞬きの間隔により定量化した．さらに，前腕や手のひら，額への温感提示およびテレキネシス操作の対象となる物体の輪郭と VR 空間上の仮想の手に対する視覚的なエフェクトにより「エネルギー感」を提示した．そして，被験者実験を通じ，「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に寄与することを示した．しかし先行研究[1,2]では，上述の 3 つの要素のそれぞれの有無によるテレキネシス感への影響の検証にとどまっており，テレキネシス感という本来人間が持たない感覚が生じるメカニズムは明らかにされていない．

フィクション作品のテレキネシスの描写では，自分の意図通りに操作している感覚，つまり運動主体感を伴っていることが分かる．ここで，運動主体感とは，「自分の意思によって自分の身体あるいは対象の動きを制御し，さらに外界に変化をもたらしているという感覚」を指す[3]．先行研究において[1,2]，運動主体感がテレキネシス感に寄与する可能性が示唆されていることやフィクション作品における運動主体感を伴う様子から，著者らはテレキネシス感の生成には，運動主体感が重要であると考えている．Frith[4]らは，運動主体感のメカニズムを運動制御に用いられていたモデルを用いて説明しており，自分の運動の結果もたらされるであろうと予測する感覚フィードバックと，実際の運動の結果もたらされた感覚フィードバックとが比較されて，一致していた場合に運動主体感が生成されると説明している．さらに，Synofzik ら[5]が提案した運動主体感を説明するモデルによると，時間的・空間的に離れた運動の結果に対しても，予測される感覚フィードバックと，実際に運動の結果もたらされた感覚フィードバックの比較が行われる．その比較の結果，予測が正しければ運動主体感が生成される．一方で，Michael ら[6]は，自分の行動の結果が遠くに生じる時，運動主体感が低下することを示唆した．また，Wen ら[7]は，自分の行動の結果が現れるまでの時間が長いほど，運動主体感が低下することを示唆した．つまり，Synofzik ら[5]のモデルによると，時間的・空間的に離れた運動の結果に対しても運動主体感が生成されるが，その強さは運動の結果の時間的または空間的な対応により変化する．

これらの知見から、テレキネシス感表現システム[1,2]においても、空間的に離れた物体への操作、つまり遠距離にある物体への操作や物体への操作の結果が時間的に離れた場合、つまり物体の動く速度が遅くなった場合でも仮想の手によってテレキネシス操作した際に運動主体感が生じるのではないかと考えられる。さらに、生起する運動主体感の強さは、物体の距離および速度によって変わるのではないかと考えられる。

本稿では、運動主体感に関する上記の知見を基にテレキネシス感（前述の定義に準ずる）のメカニズムについて検証する。テレキネシス感表現システム[1,2]において、物体の距離および速度の変化が運動主体感に寄与し、その結果としてテレキネシス感にも寄与するのではないかという仮説を立てた。この仮説を基に、テレキネシス感表現システム[1,2]において、テレキネシス操作の対象となる物体の速度と距離の変化により、VR 上の仮想の手とテレキネシス操作の対象となる物体の時間的・空間的対応を変化させ、それらの変化によって生じるテレキネシス感および運動主体感への影響を検証する。

2. 実験

2.1 実験目的

本実験では、VR 空間におけるテレキネシス操作について、テレキネシス操作の対象となる物体のユーザとの距離およびユーザの手を動かす速度に対する物体の動く速度の変化からテレキネシス感および運動主体感の違いを比較評価する。その評価を通じて、物体の距離と速度がテレキネシス感に及ぼす影響を調査する。

2.2 実験システム

廣田ら[1,2]が提案したテレキネシス感を表現するシステムの構成図を図 1 に示す。本システムは、HTC VIVE Pro Eye（以下、HMD）、PC、VIVE トラッカ、コントローラ、Leap Motion、筋電位センサ、温度センサ、ヒータ、マイコン（ESP 32、Arduino Duemilanove、M5stick-C）から構成される。また、VR 環境は、Unity を用いて構築された。

本システムの体験イメージを図 2 に示す。ユーザは、操作したい物体に視線を向けて集中し、力みながら手のひらを広げ、物体を動かしたい方向に手を動かすことでテレキネシス操作を行う。それと同時に、エネルギー感として温感が被験者の額・前腕・手のひらにフィードバックされる。さらに、エネルギー感として、仮想の手と物体の輪郭にオーラのようなエフェクトを与える。

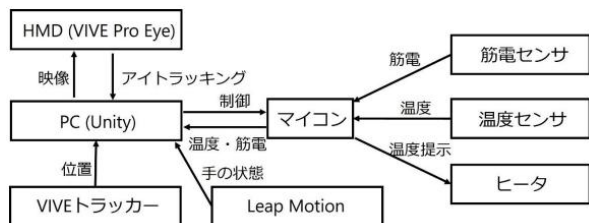


図 1 システム構成図[1, 2]

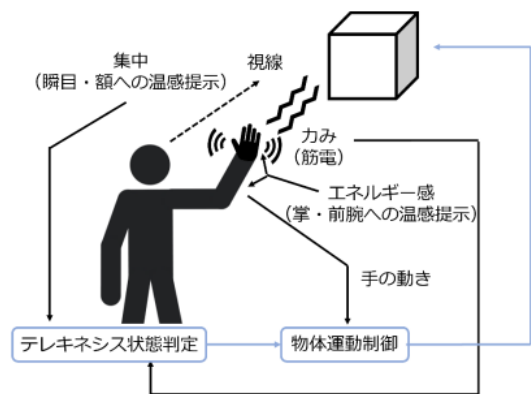


図 2 体験イメージ図[1, 2]

2.3 実験設計

本実験では、2.2 で示したテレキネシス感表現システム[1,2]を基にして、実験条件ごとに距離と速度が変わる比較物体と、実験条件によらず距離と速度が変わらず基準値で一定の基準物体を比較してテレキネシス操作を行うことができる実験システムを構築した。

被験者は、各実験条件において、テレキネシス操作を用いて基準物体（どの条件でも速度と距離が基準値で固定）と比較物体（条件により速度または距離および両者ともが変動）をそれぞれ指定された場所まで動かす、というタスクを行った。基準物体は青いブロックの上が目標地点で、比較物体は赤いブロックの上が目標地点である（図 3）。

実験タスクが開始されると、まず基準物体と青いブロックが提示される。被験者は、基準物体を青いブロックの上に運ぶ。基準物体が目標地点に運ばれると、基準物体と青いブロックが消え、比較物体と赤いブロックが出現する。次に、被験者は比較物体を赤いブロックの上に運ぶ。比較物体が目標地点に運ばれると、比較物体と赤いブロックが消え、基準物体と青いブロックが出現する。この操作をもう一度繰り返して、各物体に対して合計 2 回ずつ運搬タスクを行う。以上が一つの条件に対する実験タスクである。このタスクを各条件で行った。

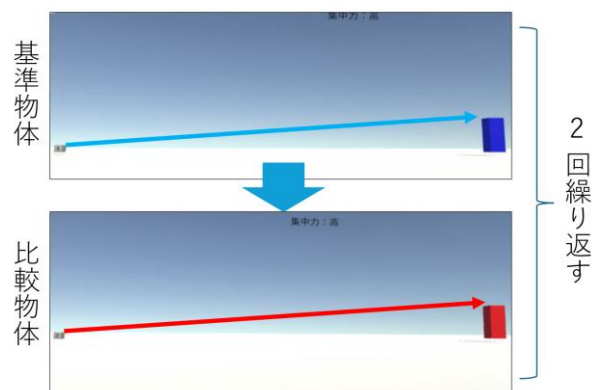


図 3 実験タスク

本実験における実験条件として、物体の速度 3 条件（図 4 の左）および物体のユーザの位置からの距離 3 条件（図 4 の右）を設定した。そして、速度 3 条件と距離 3 条件を組み合わせると計 9 条件を実験条件とし、被験者内計画で実験を行った。ただし、それぞれの条件は、予備実験において調査した、テレキネシス感が得られる物体のユーザからの距離および物体の速度の閾値を基にして設定した。

2.4 実験手順

被験者は椅子に座った状態で実験を行った。はじめに、実験前アンケートに回答させた。次に、被験者に利き手の前腕に筋電センサとヒータを、利き手の掌にトラックとヒータを、頭にヒータと HMD を装着させた。その後、システムのキャリブレーションとして、HMD のアイトラッキングのキャリブレーション、平常時の瞬目間隔の平均値の測定、利き手前腕の筋電位の最小値と最大値の測定、利き手前腕および額の皮膚温の測定を順に行った。

次に、操作練習として、基準物体に対して 3 分間テレキネシス操作を行った。練習が終わった後、HMD を外してアンケートで基準物体を操作した時の感覚について評価させた。その後、実験タスクと 7 段階リッカート尺度のアンケート（表 1）を計 9 試行分を行い、最後に実験全体に関する自由記述式のアンケートに回答させた。

被験者に提示する実験条件は、順序効果を考慮し、ランダムな順序で設定した。本実験は、20 代の男性 17 名（右利き 16 名、左利き 1 名）、20 代の女性 1 名（右利き）の計 18 名を対象に被験者内計画で実施した。

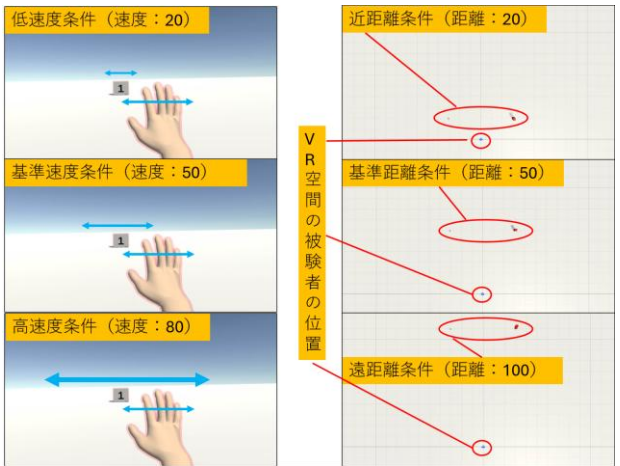


図 4 実験条件（左：速度条件，右：距離条件）

表 1 タスク後アンケート

No.	質問項目	評価対象
	比較物体を動かした時、基準物体を動かした時と比べて	
Q1	テレキネシスという力を使って物体を動かしている感覚	テレキネシス感
Q2	操作対象に対して力を作用している感覚	
Q3	自分の手と操作対象が繋がっている感覚	
Q4	より物体に集中する必要があると感じた	
Q5	より手のひらに力を入れる必要があるとかんじた	
Q6	フィードバックされるエネルギー感が強いと予想した	運動主体感
Q7	自分の意思により思い通りに操作している感覚	
Q8	自分の手と操作対象の動きがリンクしている感覚	
Q9	自分の手で操作している感覚	身体所有感
Q10	VR内の手が自分の体の一部であるような感覚	
Q11	操作対象が自分の体の一部であるような感覚	操作性
Q12	操作が難しかった	
Q13	手を大きく動かした	
Q14	重く感じた	重さ知覚
Q15	想像したよりも重く感じた	
Q16	重さ以外で何か物体の物理的特性について違いを感じたか	

2.5 評価手法

各条件における実験タスク終了後に、基準物体と各条件における比較物体を操作した時のテレキネシス感、運動主体感、身体所有感、操作性、物体に対する重さ知覚の違いをアンケートで比較評価させた（表 1）。Q1～Q3 および Q7～Q11 は、それぞれの感覚について「1：全くなかった」 - 「7：非常に強かった」という軸の 7 段階のリッカート尺度で回答させた。また、Q4～6 および Q12～Q15 は、それぞれの質問について「1：全くそう思わない」 - 「7：とてもそう思う」という軸の 7 段階のリッカート尺度で回答させた。さらに、Q16 は自由記述で回答させた。

2.6 実験結果

基準物体および比較物体を操作した時の感覚を比較する各条件下のタスク終了後アンケートの結果について、Shapiro-Wilk 検定で正規性の検定を行った。正規分布に従っているという帰無仮説が棄却される群がある質問項目については、整列ランク変換（ART）による補正を行った上で物体の「速度」と「距離」を要因とした 2 要因分散分析を行った。2 要因分散分析において主効果が有意に認められた質問項目の要因については、holm 法を用いた多重比較検定を行った。

テレキネシス感を評価する設問では、Q6 を除くすべての設問において、速度要因の主効果が有意であった（Q1： $p=0.0017$ ，Q2： $p=0.00033$ ，Q3： $p=0.019$ ，Q4： $p=1.1 \times 10^{-5}$ ，Q5： $p=3.5 \times 10^{-9}$ ，Q6： $p=0.058$ ）。さらに、Q1 と Q2 の速度要因において、有意に平均値が低速度 > 高速度，基準速度 > 高速度となった。また、Q3 の速度要因では、有意に平均値が低速度 < 基準速度となり、Q4 の速度要因では、有意に平均値が低速度 > 基準速度，低速度 > 高速度となった。さらに、Q5 の速度要因では、有意に平均値が低速度 > 基準速度，低速度 > 高速度，基準速度 < 高速度となった。また、テレキネシス感を評価するすべての設問において、1 次交互作用は非有意であった（図 5）。

運動主体感を評価する設問では、Q7，Q8 において速度要因の主効果が有意であった（Q7： $p=4.2 \times 10^{-7}$ ，Q8： $p=0.011$ ，Q9： $p=0.065$ ）。さらに、Q7 の速度要因において、

有意に平均値が低速度 < 基準速度, 低速度 < 高速度, 基準速度 > 高速度となった。また, Q8 の速度要因では, 有意に平均値が低速度 < 基準速度となった。また, 運動主体感を評価するすべての設問において, 1 次交互作用は非有意であった (図 6)。

一方で, Q12 以外のすべての設問において, 距離要因の主効果が有意ではなかった。つまり, 物体の距離はテレキネシス感や運動主体感に対して影響を与えなかった。

2.7 考察

実験結果より, テレキネシス操作の対象となる物体の速度は, テレキネシス感の生起に要する「力み」や「集中」の程度およびテレキネシス感の評価に有意に作用することが示された。具体的には, 物体の速度が速いと必要な「力み」や「集中」が少なくなり, 通常の現実的な物体操作のような感覚となりテレキネシス感が減少した。また, 物体の速度が遅いと必要な「力み」や「集中」が増え, テレキネシスという特別な力を使って操作しているような感覚となりテレキネシス感の評価値が増加した。このことから, テレキネシス感表現システムにおいて, 物体の速度に応じた, テレキネシス操作に必要な「力み」と「集中」の閾値を制御することで, テレキネシス感を向上させられる可能性がある。

また, 運動主体感について, 物体の速度が極端に遅いまたは極端に速い場合, 運動主体感が低下することが分かった。本実験において, 物体の速度の基準を, テレキネシス操作した際に, 常に物体が VR 内の仮想の手の延長線上を動く速度とした。これらのことから, 手と物体の位置が視覚的に一致する速度において最も強い運動主体感が生じることが示された。そして, テレキネシス操作の対象となる物体の速度は, 自分の手と物体の動きの対応に作用し, 自分の手と物体の動きが対応する感覚と自分の意思により思い通りに操作する感覚を変化させ, その結果として運動主体感に作用していると考えられる。しかし, この結果は, 速度が基準速度～高速度においてはテレキネシス感の結果と一致するものの, 基準速度～低速度ではテレキネシス感の結果と一致しない。つまり, 速度変化について, 運動主体感はテレキネシス感に対して, 単純に比例した影響を与えるわけではないと考えられる。

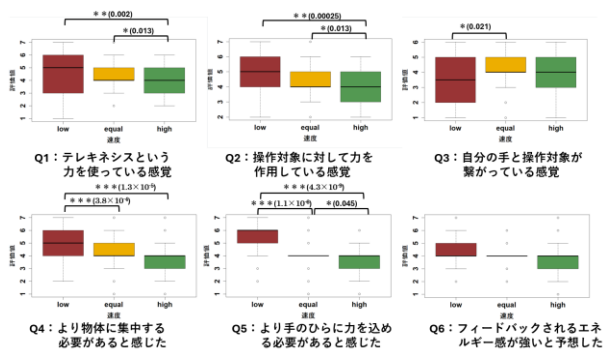


図 5 速度要因によるテレキネシス感への影響の評価結果

(*p<.05, **p<.01, ***p<.001, () の中の数字は p 値)

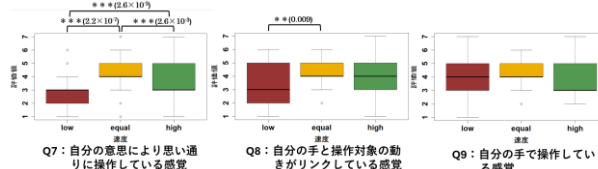


図 6 速度要因による運動主体感への影響の評価結果

(*p<.05, **p<.01, ***p<.001, () の中の数字は p 値)

3. おわりに

本稿では, テレキネシス感表現システムにおいて, 物体の速度および距離が運動主体感やテレキネシス感に与える影響について検証した。その結果, 物体の距離はテレキネシス感や運動主体感に寄与しなかったものの, 物体の速度はテレキネシス感や運動主体感に寄与することが明らかになった。ただし, テレキネシス感では低速度で向上するのに対し, 運動主体感では基準速度で最大となった。今後は, テレキネシス感に寄与すると考えている運動主体感について, テレキネシス感にどのように寄与するのか, 両者の関係性を検証する予定である。

参考文献

- [1] 廣田ら, “VR におけるテレキネシス感を表現するシステムの構築”, 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2024 年, 1E2-09.
- [2] Y Hirota et al, “Development and evaluation of a system to express a sense of telekinesis in VR,” Part of proceedings of 6th International Conference AsiaHaptics 2024, 2024.
- [3] S. Gallagher, “Philosophical conceptions of the self : Implications for cognitive science,” Trends in Cognitive Sciences, 2000, vol. 4, no 1, pp.14–21.
- [4] S. Blakemore et al, “Abnormalities in the awareness of and control of action,” Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences, 2000, vol. 355 , no. 1404, pp. 1771-1788.
- [5] M. Synofzik et al, “Beyond the comparator model : A multifactorial two-step account of agency,” Consciousness and Cognition, 2008, vol. 17, no. 1, pp. 219-239.
- [6] M. Jenkins, S. Obhi, “Exploring the relationship between perceived Action-Outcome distance and Agency : Evidence from temporal binding,” Consciousness and Cognition, 2021, vol. 94.
- [7] W. Wen, A. Yamashita, H. Asama, “The influence of action-outcome delay and arousal on sense of agency and the intentional binding effect,” Consciousness and Cognition, 2015, vol. 36, pp. 87-95.