



2 視点輝度混合手法における 主観的速度等価性測定と再現性の向上

匡龍輝¹⁾, 原彰良¹⁾²⁾, 古川正紘¹⁾²⁾, 前田太郎¹⁾²⁾

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 1-5,
{kuang.longhui, akiyoshi-hara, 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)

概要: 遠隔操縦において映像伝送遅延は運動視の成立を妨げるため、多視点映像を即時混合し等価的無遅延化させる手法が提案されている。しかし既存の時間的線形な関数に従う混合手法は、再現される速度の主観的等価性が未評価であった。そこで本稿では 2 視点輝度混合手法における主観的速度再現性を調整法により測定した結果、再現性低下が生じる場合があること示されたため、速度再現性を向上させる混合関数を再設計し効果を実証した。

キーワード: 輝度混合, 等価速度, 調整法

1. はじめに

近年、臨場感伝送技術は、遠隔地にいながら現地に実際にいるかのような体験を可能とする技術として注目されている [1]。具体的には、災害救助の現場で危険区域内への代理ロボットの投入および遠隔操縦を行うことで、操縦者の安全を確保しながら迅速かつ安全な搜索活動を実現することが可能である。また、大規模鉱山開発や建設現場においても、操縦者が遠隔拠点から複数の建設機械を効率よく操縦できるなど、多様な産業用途で実用化が進んでいる [2]。

しかしながら、この臨場感伝送技術を用いた遠隔操縦においては、空間把握の再現性に課題が存在する。特に操縦者が頭部運動を伴う能動的な運動視を行う場合には、映像提示におけるフレームレート不足や映像伝送遅延が問題となる。映像伝送遅延は操縦者の頭部運動と提示映像の視覚的な流れ (オプティカルフロー, Optical Flow; OF) との間で不一致を生じさせ、空間把握の困難をもたらすことが知られている [3]。

これを解決する手段の一つとして、単一視点映像のみを伝送するのではなく、視差 (parallax) を持つ複数視点映像を実時間で輝度混合し提示することで、視点運動に等価的に即時追従可能な OF を部分的に再現する手法が提案されている [3]。こうした輝度混合手法により、ある程度遅延の影響を軽減できることが示唆されているが、混合処理により得られる OF が、操縦者にどのような主観的な速度印象を与えるのかについては、これまで十分に検証されてこなかった。特に、時間的に線形な輝度混合関数により提示される OF が、操縦者の速度知覚に対しても時間的に線形に対応するかは未だ明らかになっていない。

本研究では、異なる輝度混合手法が映像視聴者の主観的な速度知覚に与える影響を検討する。特に、従来の線形な混合では、混合比の変化が一定であるがゆえに速度知覚

に周期的なムラが生じる可能性があると考えられる。そこで本研究では、混合比変化の時間プロファイルを非線形関数に置き換えることで、より滑らかで安定した速度知覚を実現できるのではないかと仮説を立てた。

そこで本研究では、遠隔操縦に用いる 2 視点輝度混合手法において、主観的速度再現性を調整法により評価することで、輝度が時間的に線形に混合されている条件下で知覚される主観速度の線形性を評価する。また、速度再現性を向上させる非線形な輝度混合関数を新たに設計し、その有効性についても検証を行うことを目的とする。

2. 実験

2.1 実験の目的

遠隔操縦時の映像伝送遅延はオプティカルフローの自然な再現を妨げ、線形な輝度混合でも速度知覚に非線形な歪みが生じることが予備実験で示された。そこで、本研究では輝度混合比率と主観的速度知覚の関係を検討するため、以下の二つの心理物理実験を行う。実験 1 では、線形輝度混合関数における知覚速度の時間的特性を定量的に評価する。実験 2 では、非線形な輝度混合関数を導入し、各被験者が主観的に速度知覚を最も安定して感じる混合比率を探索的に評価する。

2.2 実験条件

各実験の条件と手続きは次の通りである。

実験 1: 線形輝度混合における速度知覚特性の計測。本実験の目的は、2 視点輝度混合映像における速度揺らぎの発生メカニズムを明らかにすることである。視差を持つ複数視点映像を一定比率で合成した輝度混合映像 (下側映像) と、周期的な速度変動を持つ物理的移動映像 (上側映像) を同時提示し、被験者が上下映像の速度感が一致すると感じる条件を調整法 (Method of Adjustment) [4] により測定し

た。調整法は被験者自らが刺激パラメータを調節し、基準刺激と同程度と判断するまで操作する古典的な心理物理手法である [5]。

下側映像には時間的に線形な輝度合成関数を適用した。上側映像の速度プロファイルは次式で定義される：

$$v(t) = V_0 + A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \phi_2) \quad (1)$$

ここで V_0 は基準速度、 A_1, A_2 は各周波数成分の振幅、 ϕ_1, ϕ_2 は位相、 ω は基本角周波数を示す。被験者はノブ操作により速度パラメータ ($V_0, A_1, \phi_1, A_2, \phi_2$) を調整し、上下映像の速度感が一致すると判断した時点のパラメータを記録した。実験は各被験者について 3 回繰り返し、得られたパラメータの平均値を後の解析に用いた。

実験 2：異なる混合プロファイルにおける安定した速度比率の探索。

本実験では、ノブ操作量 $x \in [0, 1]$ に対応して下側映像の片方の視点への輝度寄与率 y を四つの区間に分け、混合プロファイルを構成した。各区間では次の三種の関数を用いる：

まず、緩やかな S 字カーブにより滑らかな増減を実現する **Cosine Ease-In-Out** 関数は、

$$y = 0.5(1 - \cos(\pi x)) \quad (2)$$

で与えられる。

次に、混合比率が入力 x に比例して直線的に増加する線形関数は、

$$y = x \quad (3)$$

で表される。

最後に、急激な変化を伴うプロファイルを持つ **逆余弦関数** は、

$$y = \frac{\arccos(-2x + 1)}{\pi} \quad (4)$$

で定義される。ノブ値 x が $0.0 \leq x \leq 0.1$ の範囲では **Cosine Ease-In-Out** を適用し、 $0.1 < x < 0.5$ の範囲では **Cosine Ease-In-Out** と線形関数を直線補間する。 $x = 0.5$ では線形関数をそのまま用い、 $0.5 < x < 0.9$ の範囲では線形関数と逆余弦関数を補間し、 $0.9 \leq x \leq 1.0$ では逆余弦関数を適用した。各区間間では補間により関数値の連続性を保ち、速度知覚の安定化を意図した混合比率を実現している。輝度混合比の調整をより直感的かつ安定的に行うため、ノブ操作範囲を 4 つの区間に分け、それぞれに異なる関数 (**Ease-In-Out**、線形、**Acoss** など) を割り当てた。これにより、視覚的に急激な変化を避けながら、粗い調整と細かい微調整の両方を一つの操作系で実現し、被験者が主観的速度の一致点を安定して見つけやすくなるよう配慮した。

被験者は下側映像の速度変動が最も目立たず、速度感が安定していると感じるノブ値 x を探索した。

2.3 実験装置

実験は、輝度混合映像と可変速度映像を上下に提示する PC ベースの視覚呈示システム上で行われた (図?? 参照)。提示装置として、34 インチ湾曲ウルトラワイドモニター

(**LG 34UC97-S**、解像度 3440×1440 、曲率 **3800R**、アスペクト比 **21:9**) を使用した。観察距離は **50 cm** に設定し、被験者の頭部を安定させるために、竹井機器工業製顎台 (型番 **SR-HD**) を使用した。

入力装置として、被験者は左手で **ロータリーエンコーダ (M5Stack Angle Unit, 型番 U005)** を操作し速度関数 $v(t)$ のパラメータ (V_0, A_1, A_2, A_3, A_4) をリアルタイムに調整した。調整完了後は、右手でマウスを操作して「決定」入力を行った。

これらの入力は USB 経由で PC に送信され、**Unity 2022.3** 上に構築された実時間描画モジュールにより即時に反映された。

2.4 実験参加者

実験には、20 代の男性 5 名が参加した。全員が正常または矯正視力を有し、視覚障害の既往はない。各被験者には実験の目的と手順について事前に説明を行いました。

3. 実験結果

実験 1：本実験で各被験者について、調整された 5 つのパラメータ ($V_0, A_1, \phi_1, A_2, \phi_2$) は 3 回の試行の平均値を算出し、それらを式 (1) に代入することで主観的な速度変化プロファイルを可視化した。得られた被験者 A~E の主観的な速度調整プロファイルを図 1 に示す。これらのプロファイルは、全て基本周波数成分とその 2 倍の高調波成分を含んでおり、純粋な正弦波から逸脱した波形を示した。これは提示した刺激が線形に輝度混合されたものであるにもかかわらず、知覚された速度には明らかな非線形な特性が存在していることを示唆している。

波形の全体的な傾向として、参加者全員が一定の周期内で二つの速度ピークを示すパターンを示した。このことは、刺激に含まれる基本周波数成分以外に、その二倍の周波数成分が主観的速度知覚に顕著に影響を及ぼしていることを意味している。具体的には、一周期内で速度の上昇と下降が単純な正弦波よりも急激に変化しており、速度の変化勾配が非対称になる傾向が確認された。

また、各被験者の速度プロファイルには定量的な差異が認められた。被験者 A および B は比較的単純な波形を示し、最高速度は約 2.0、最低速度は約 0.5~1.0 の範囲であった。特に被験者 A は速度上昇時の振幅が比較的大きく、下落時の変化はやや小さかった。一方、被験者 C および D は明瞭な二峰性パターンを示し、一周期内に二つの速度ピークが現れた。特に被験者 D は速度変動幅が最も大きく、最大速度が約 2.0、最低速度がほぼ 0 に近づく顕著な変動を示した。被験者 E は他の被験者と比較して最も変動が小さく、波形は緩やかであり、非線形性が最も弱かった。

これらの結果から、提示映像が輝度の線形混合であるにもかかわらず、人間の知覚速度は刺激の線形性に単純に従うことなく、明らかな非線形性を示すことが明らかになった。特に、速度感の周期内での複雑な変動パターン (高調波成分の存在) は、人間の視覚系が時間的線形性以上の複雑

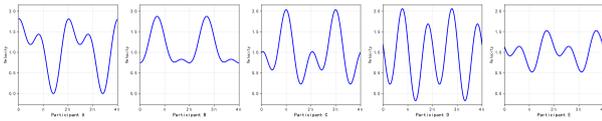


図 1: 時間的線形輝度混合における主観的速度応答

な情報処理を行っていることを強く示唆するものである。

実験 2: 本実験では、各被験者が最も安定した速度を感じた輝度混合比を探索的に選択した。その結果を図 2 に示す。本図では、実験参加者が操作したノブの値（縦軸）に応じて 4 区間に分けられた混合比領域と、それぞれに対応する 3 種類の輝度混合関数 (Cos, Linear, Acos) の関係を左側に示している。右側には、各被験者が 6 回の試行で探索した混合比の値を散布図としてプロットし、その中央値と 95% 信頼区間を重ねて表示している。

まず注目すべきは、全ての被験者が線形関数 ($y = x$) に相当する中間的な混合比率を選択していない点である。すなわち、いずれの被験者においても混合比率は Linear (線形) から明確に逸脱しており、非線形な輝度混合比率においてより速度の安定性を感じたことが示唆される。この結果は、実験 1 において確認された知覚速度の非線形性と整合しており、提示映像における物理的な輝度変化の時間的線形性が、主観的な速度知覚に対しては必ずしも線形に対応しないことを再確認するものである。

また、被験者ごとの選択結果には大きく二つの傾向が見られた。被験者、A (中央値: 0.615), B (0.734), C (0.583) は比較的高い混合比率を選択しており、これは Acos 関数 (加速的な立ち上がり・立ち下がり) に近いプロファイルである。一方、D (0.316) と E (0.218) は Cos 関数 (減速的な立ち上がり・立ち下がり) 寄りの低比率を選択しており、明確に分かれた傾向を示した。これにより、参加者間で速度安定性に対する主観的評価基準に違いがある可能性が示唆される。

特に、Acos 寄りの比率を選択した A, B, C は、映像の速度変動をより滑らかに感じるために初期および終期の輝度変化が緩やかなプロファイルを好んだと考えられる。一方で、Cos 寄りの比率を選択した D, E は、最初と最後の変化が急で中央部分が安定しているプロファイルにより安定感を感じた可能性がある。このような違いは、個人の知覚特性、調整タスクにおける判断戦略、あるいは速度変動のどの側面 (最大値, 最小値, 変化速度) を重視したかに起因するものと推察される。

さらに、5 名中 3 名 (60%) が Acos 側の高比率プロファイルを選択している点において、非線形混合プロファイルの中でも Acos のような滑らかに立ち上がる関数が知覚的に有利である可能性がある。この傾向は、今後の混合関数設計において、主観的速度安定性を最大化するための指針となるだろう。

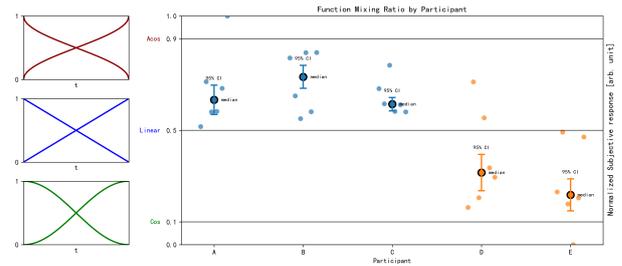


図 2: 輝度混合比率探索実験の結果

4. 考察

本研究では、2 視点の輝度混合による映像提示手法において、従来用いられてきた時間的に線形な混合関数が必ずしも主観的に自然な速度印象を再現できないことを、心理物理的調整法を用いた実験によって示した。特に実験 1 では、従来の線形混合関数を用いた場合でも、被験者の主観的な速度知覚が物理的な刺激の線形変化に対して非線形的な応答を示すことを明らかにした。すべての被験者において速度プロファイルには 2 倍の周波数成分が含まれており、これは視覚系の基本的な運動処理メカニズムに由来すると考えられる。Reichardt 検出器 [6] や Motion Energy Model [7] が示唆するように、視覚運動の処理は空間・時間周波数の非線形的な統合に強く依存しているため、こうした高次周波数成分が顕在化するの自然である。

また、実験 1 で観察された周期的な速度変動は、視覚系が周期的な加減速や振動を「不自然」あるいは「不安定」として敏感に検出する傾向と一致するものである [8]。つまり、知覚される速度の「安定性」とは速度の平均値だけでなく、その変動幅や周期性の少なさが重要な要素であることが示唆された。このため、物理的に線形な輝度変化が必ずしも安定した速度印象を提供しないことが確認された。

そこで、本研究では混合比変化の時間プロファイルを非線形関数に置き換えることで、より滑らかで安定した速度知覚を実現できるのではないかと仮説を立て、実験 2 において非線形な輝度混合関数の効果を探的に検討した。その結果、すべての被験者が線形混合関数を最適とは評価せず、一部の被験者において主観的な速度の安定性が非線形関数によって向上する可能性が示唆された。しかし、同時に被験者間で最も自然に感じられる混合関数のタイプに統一的な傾向はなく、Acos 寄りのプロファイルを好む被験者と Cos 寄りのプロファイルを好む被験者とに明確に分かれ、個人差が大きいことも判明した。これは、被験者ごとの視覚系の感受性や内部モデル (予測処理) [9] が異なることを示唆している。また、被験者が過去に経験した運動刺激の質的特徴が、今回の主観的評価に影響を与えている可能性も考えられる。

以上の結果は、視覚系が入力される物理的刺激をどのように統合し、知覚的に安定した運動印象を形成するかという問いに対して、「輝度混合関数の設計」が重要なパラメータになりうることを示唆している。これは視覚運動処理に

おける非線形性を実証的に示したものであり、基礎的な視覚心理学の知見とも整合する。特に、映像提示遅延の影響が顕著となる VR 環境や遠隔操縦などの実用場面において、本研究で提案した非線形な輝度混合関数の導入が、知覚的な速度の自然さ・安定性を補完する重要な指針となりうる。

しかし、同時に個人差が顕著であることから、今後は個人ごとの知覚特性や嗜好性を考慮した輝度混合プロファイルのパーソナライズ化を検討する必要があると考えられる。これにより、視覚刺激設計の精度を向上させ、幅広いユーザーにとって主観的に自然かつ安定した速度感知を提供するための基盤が整備されることが期待される。

5. おわりに

本研究では、遠隔操縦における映像提示遅延の影響を低減するために提案されている 2 視点輝度混合手法において、主観的速度再現性を心理物理的調整法を用いて定量的に評価した。その結果、従来用いられてきた時間的に線形な輝度混合関数では、視覚系の非線形特性により主観的な速度印象の再現性が低下する場合があることが明らかになった。一方で、非線形な輝度混合関数を適切に設計することで、主観的な速度の安定性が一部の被験者において改善される可能性が示唆された。しかし同時に、最適な混合関数のタイプには明確な個人差が存在することも示された。

これらの知見は、視覚運動知覚の特性と個人差を考慮した輝度混合手法の設計が、臨場感を伴う遠隔操縦や VR 環境など、実用的な応用分野での活用に向けた重要な指針になることを示唆している。今後は、実際の遠隔操縦システムへの適用検証や個人の知覚特性に応じた輝度混合関数のパーソナライズ化に加えて、実験条件（例：刺激速度、周波数特性、輝度変化の勾配）のより細かな制御を行うことによって、さらなる精度の向上を図り、より確かなデータを得ることが求められる。このような詳細な実験条件の検討を通じて、視覚運動知覚の理解を深め、応用的な実装における汎用性と実効性をさらに高めていきたい。

参考文献

- [1] Susumu Tachi: Telexistence and retro-reflective projection technology (RPT), Proceedings of the 5th Virtual Reality International Conference, IEEE, pp. 69–74, 2004.
- [2] Sidi Lu, Ren Zhong, Weisong Shi: Teleoperation Technologies for Enhancing Connected and Autonomous Vehicles, Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Connected and Autonomous Vehicles, Detroit, USA, 2022.
- [3] 李信昂, 古川正紘, 前田太郎: 静止印象をもたらす運動立体視による空間知覚, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol. 2022, pp. 3D4–2, 2022.
- [4] Susan Hillier, Maarten Immink, Dominic Thewlis: Assessing proprioception: A critical review of methods, Journal of Bodywork and Movement Therapies, Vol. 19, No. 3, pp. 424–433, 2015.
- [5] City University of New York Open Educational Resources: 1.3 Psychophysical Methods – Sensation and Perception, Accessed: 2025-07-18, 2023, 2023.
- [6] Werner Reichardt: Autocorrelation, a principle for the evaluation of sensory information by the central nervous system, Sensory Communication, Vol. 1, pp. 303–317, 1961.
- [7] Edward H Adelson, James R Bergen: Spatiotemporal energy models for the perception of motion, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 2, No. 2, pp. 284–299, 1985.
- [8] Paolo Pretto et al.: Perception of ego-motion from visual optic flow, Vision Research, Vol. 49, No. 25, pp. 3179–3188, 2009.
- [9] David C Knill, Alexandre Pouget: Bayesian approaches to perception, Bayesian Brain: Probabilistic Approaches to Neural Coding, ed. by Kenji Doya et al., MIT Press, pp. 255–272, 2007.