This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2022 年 9 月）

静止印象をもたらす運動立体視による空間知覚

Spatial perception through motion stereopsis that produces static impressions

李佰昂 [1)]，古川正紘 [1)2)]，前田太郎 [1)2)]
Baiang LI, 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 1-5, baiang-li@hiel.ist.osaka-u.ac.jp）
2) 脳情報通信融合研究センター (CiNet)(〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4, (m.furukawa, t_maeda)@ist.osaka-u.ac.jp）

概要: 本研究ではオプティカルフローと輝度混合を併用した運動印象の零化による等価点を利用することで，運動印象を伴わない運動視差提示手法を提案する．本研究において，経時的な輝度混合により空間輝度分布の空間位相級数が群位相として運動印象を形成し，この運動印象が運動視差量として解釈されると仮定した．そこで，観察点の連続移動時のオプティカルフローと，2 視点静止画像の輝度混合条件を併用し，受動運動視条件における奥行弁別閾を求めた．

キーワード： 運動印象，ベクション，オプティカルフロー，テレイグジスタンス

1. はじめに

近年，災害復旧などの危険を伴う現場での安全性確保や，労働者不足の解決や遠距離移動に伴う経済的コストの低減などを目的に，建設機械（以下，建機）の遠隔操縦が導入され始めている．しかし現状では遠隔操縦での作業効率は現場での作業効率に劣る．これを改善するため，遠隔操縦において操縦者が作業空間を正確に認識する必要があり，特に「奥行距離情報」の獲得が必須である [1].

本研究では，奥行距離情報を最も要する建機として，位置合わせ作業が頻出する油圧ショベルを対象とする．油圧ショベルの操縦では，効果器であるバケット (bucket) 先端のツース (tooth) と切削対象となる土面や廃土先のダンプとの距離を操縦者が正確に把握することが求められる．従って，油圧ショベルの遠隔操縦における要件を整理すると，空間を把握すべき作業領域はツースの到達範囲と考えてよいといえる．この範囲は 3〜9[m] であり，この視距離では，運動視差の感度が両眼視差のおよそ 2 倍と相対的に高い [2]. つまり，奥行距離情報を得る上で両眼立体視よりも運動立体視が優位である．

視点移動による運動視差を手がかりとする運動立体視において，奥行距離情報は次のように得られる．すなわち，観察者が得るオプティカルフロー (Optical Flow，以下 OF) の速度分布を，観察点と視覚対象との相対運動の結果として解釈することで，視覚対象の奥行距離の分布が再構築される．OF から視差が定義でき，かつその視差が自己運動による観察点の移動により得られるとき，OF と自己運動との間の幾何拘束が維持されている．このとき，自己運動は絶対距離・絶対速度手がかりとして解釈できるため，視覚対象までの奥行は絶対距離として得られる．しかし，遠隔操縦時の映像伝送遅延はこの幾何拘束を崩し，その結果操縦者は絶対距離を得られない．つまり，操縦者の自己運動に対し幾何拘束を維持していると解釈可能な OF を再現すれば，絶対距離が得られると考えられる．

既に我々は，映像更新周波数 (フレームレート) の低さは前記の映像遅延による幾何拘束の成立を妨げている要因であると仮定し，1.44[kfps] の高フレームレート化の効果をポインティングタスク実験により有用性を示した [3]．さらに，運動視差を遠隔地の観察点の移動によりの再現するのではなく，遠隔地に距離を隔てた複数の観察点を設けた上で，これらの複数観察点から得た映像の周期的な輝度混合を行うことで，視覚対象の奥行距離情報を再現する OF を生じさせる手法を提案した [4]．その結果，周期的な輝度混合が運動視差手掛かりを与えることが実証された．これは輝度混合が運動印象を生起させたことを意味する．

そこで本研究では，次の仮説を提唱する．すなわち，(a) 輝度混合によって生じた運動印象が，観察点の移動による運動印象と逆向き等量ならば観察点の運動印象は零化され静止印象をもたらす．(b) この条件下での静止印象は，必ずしも運動視差の零化を伴わず，静止印象と運動視差が知覚的に両立する，

2. 輝度混合の基本概念

輝度混合は空間輝度分布の時間変調を用いて，任意視点間の速度印象を補間する方法である．運動立体視を成立させるには，カメラは 2 つ以上が必要である．輝度混合は操縦者が遠ざる視点 P_1 映像の輝度を徐々に減少させつつ，近づく視点 P_2 映像の輝度を徐々に増加させる．輝度混合を用いた類似の先行の研究として DFD 知覚 [5] が挙げられる．DFD 知覚では，奥行き差をつけて観測者から見て重なるように配置した 2 枚の 2D 画像の輝度を変化させ，2D 画像間の輝度比の変化に応じて知覚される深度が連続的に変化す

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会

ることが示されている．

2 視点間の輝度混合を例として説明する．

観測する空間として図 1 のように注視点を挟んで奥行きの異なる平面 2 つ (平面 A・B) があったとする．赤点は注視点 (Gaze Point) を表す．単眼の観察視点は注視点を注視しながら，視点位置 P1 から視点位置 P2 へ移動し，視点位置 P1 へ戻る一定周期 ($2\Delta t$) の往復運動を行う．この 2 つの平面を視点位置 P1 から注視点を見て，観測した際に見える映像が Image 1 である．また，視点位置 P2 から注視点を見て観測した際に見える映像が Image 2 である．

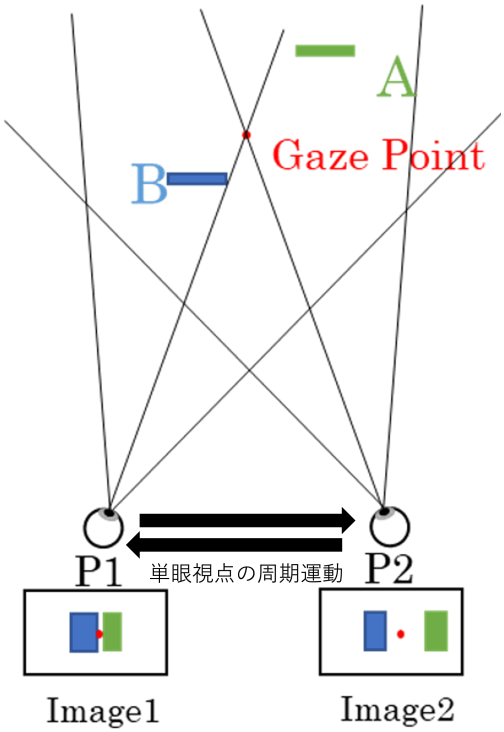

図 1: 注視点を挟んで平面が設置された空間と 2 つの視点位置から観測した際の視点映像

時刻 t_0 に視点位置 P1 に視点があったならば観測者が観測する映像は図 2(左) のようになる．この際におけるそれぞれに視点の映像の輝度の変化を図 2(右上) に，視点位置 P1 の座標を x_1，視点位置 P2 の座標を x_2 とした際における観測者に提示している映像の視点位置を図 2(右下) に示す．輝度混合では 2 つの視点位置の映像を提示しその輝度を交代するため，図 2(右下) に示されているように視点位置は x_1 及び x_2 の両方の映像が提示される．図 2(右上) のように，視点位置 P1 の映像の輝度は時刻 t_0 の時に 1 となり時刻が進むにつれ減少し時刻 $t_0 + \Delta t$ で 0 となり，その後に時刻が進むにつれ増加し時刻 $t_0 + 2\Delta t$ で 1 へと戻る．視点位置 P2 の映像の輝度は時刻 t_0 の時に 0 となり時刻が進むにつれ増加し時刻 $t_0 + \Delta t$ で 1 となり，その後に時刻が進むにつれ増加し時刻 $t_0 + 2\Delta t$ で 0 へと戻る．

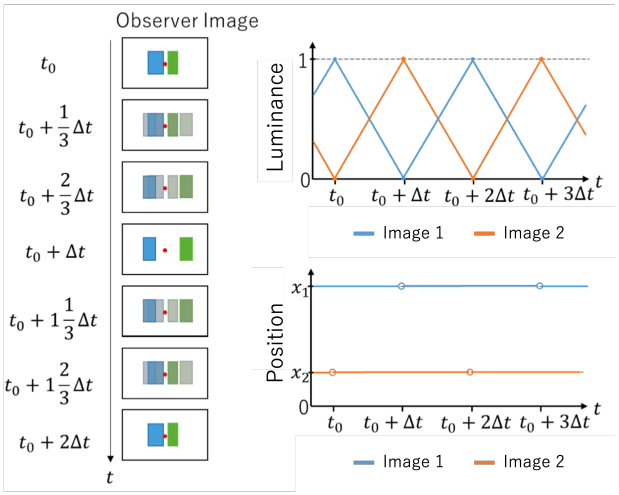

図 2: 輝度混合における観測者が観測する映像と輝度及び視点位置の変化

3. 輝度混合による運動印象の生起機序

本章では，第 2. 章で述べた手続きにより得られた視覚流動が，なぜ運動印象を生起しうるかについて論じる．そこでまず，仮現運動がなぜ運動印象を生起させるのかを説明する．次に，この仮現運動の生起機序が，本稿で取り扱う輝度混合もまた運動印象をもたらすことを示す．

仮現運動とは，継時提示された静止画像 2 コマの間に知覚される運動である．これらの静止画像はいずれもフーリエ変換可能であると仮定すると，静止画像は各空間周波数成分 f の振幅成分 A_f と位相成分 ϕ_f に分解できる．また全ての 2 次元映像も周波数成分にフーリエ変化可能であると仮定とする．画像はピクセル幅によって最大空間周波数が，ディスプレイのサイズによって最小空間周波数が決定される．ゆえに本研究で論じる輝度混合手法は，概念モデルとしては連続時間・連続空間における正弦波の重ね合わせとして数理モデル化が可能である．

例えば，視点 A と視点 B が存在する．視点間の距離を L とし，視点 A から視点 B に時間 Δt で移行する仮現運動を仮定すると，この際の輝度変調は $[A, B] = [1, 0] \Rightarrow [0, 1]$ の移行であり，これに相当する速度 $L/\Delta t$ の仮現運動に等しい．図 3 のように，視点間距離 L を波長の 1/4 のため，波長を 4L とする基底周波数成分の位相を $[0, \pi/4] \Rightarrow [\pi/4, 0]$ に運動させたことに相当し，位相速度 $\pi\Delta t/2$ の仮現運動に等しい．このとき上記基底の n 倍周期群でフーリエ級数展開を想定すると，任意輝度画像の各周波数成分で $(2n\pi \pm \pi/2)/\Delta t$ の位相速度での仮現運動となる．これが群位相による仮現運動の定義であり，相対位相関係＝波形を保持したままの全体移動の知覚印象が再現される原理の空間周波数成分に基づく説明である．すなわち視点 A，B の輝度変調ゲインの合成による輝度変調は $L/\Delta t$ の群速度を Abstract 間の位相速度 $\pi\Delta t$ に写像することで，時間補間を位相補間によって代替した運動印象を生成することができる．

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会

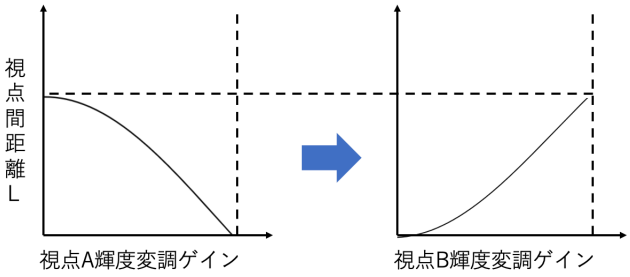

図 3: 輝度混合による運動印象の生起機序

4. 輝度混合が運動印象にもたらす影響

4.1 実験目的

受動運動視の時に視覚刺激であるオプティカルフローから運動印象を生起しているにもかかわらず，体性感覚には運動印象が存在しないため感覚の不一致が生じるため，没入感を下げてしまう．そこでカメラの移動による受動運動視を行っているにもかかわらず，静止印象を生じさせることができれば身体感覚の不一致を消し，運動視による奥行きを知覚できる．カメラ初期地点を中心にカメラを周期的に移動させた場合，時間平均値はカメラ初期地点になるため，運動印象を持たないはずである．空間的に移動する際に，網膜上の位相差からオプティカルフローが生じている．そのオプティカルフローの位相変化と逆位相の位相変化を輝度混合で再現することによって，運動印象を打ち消すことができるのではないかと考えた．

また遠隔操縦において高フレームレートの最新映像をリアルタイムで操縦者に伝送することは，奥行きが最も知覚できる方法である [3]．建設機械の遠隔操縦において，能動運動視が支配的である．しかし，能動運動視をうまく成立させるためには，視点移動が生じる操縦入力に対し，可能な限り短い時間遅延で移動に伴う視覚映像を提示しなければいけません．通信ネットワークで,「高フレームレートの最新映像」を再現するのは時間遅延が生じる．一方,「移動に伴う視覚流動 (Optical Flow) の再現」は通信を介せず，実現できる．本実験では輝度混合手法がオプティカルフローを再現する可能性を示し，生じた運動印象から被験者に運動視差を与えられるかどうかを検証する．また視点移動から生じるオプティカルフローの位相変化と逆位相の位相変化を輝度混合で再現することによって，運動印象を打ち消してみる．

4.2 実験設定

ノートパソコンの ASUS ROG Strix SCAR 17 G733QS (AMD Ryzen 9 5900HX，RTX 3080 Laptop GPU) により生成した視覚刺激を 27 インチのディスプレーに呈示する．画像の空間解像度は横 2560 画素，縦 1440 画素であった．ディスプレーのフレームレートは 165Hz であった．またディスプレーの周りの背景は実験結果に影響しないように，灰色のシートで周りの背景を隠した．

被験者は健康な 20 代男性 3 人 (視力矯正あり) であって，全員は事前に実験に参加したことがない．被験者は頭部を顎台に乗せ，視力矯正ありのままで屈折率が 4.0 の遠視メガネをかけることで水晶体調整を視距離 0.6m となるよう設定した．これは水晶体の焦点距離が奥行知覚の手がかりとなることを防ぐためである．ディスプレーは机と垂直し顎台まで 0.3m の位置に設置し，ディスプレーに視覚刺激を提示した．また被験者の視野中心がディスプレの中央となるよう，ディスプレーと顎台の高さと角度を調整した．計算上では屈折率が 4.0 の遠視メガネをかければ，0.3m 先前にあるものは 0.6m 先にあるように見える．

本実験はショベルカー (コマツ,PC-200) のバケットを操縦する環境を模擬した映像を視覚刺激として作成した．PC-200 のバケットの幅は 1.045m で，車体までの距離は 3m 9m である．またバケットの左右移動距離は 0.5m とする．視覚刺激は図 4 のように，画面の中央に注視点として赤いドットを設けた．また注視点の左右に二つの矩形を配置した．左の矩形は常に車体から 3m 先にあるバケット，右の矩形は車体から $3+\Delta D$ 先にあるバケットに相当する視差量を設定した．バケットは車体までの最大距離は 9m のため，ΔD の範囲は 0m-6m である．図 5 は図 4 から半周期後のフレームであり，両図の間が視差振幅を表している．

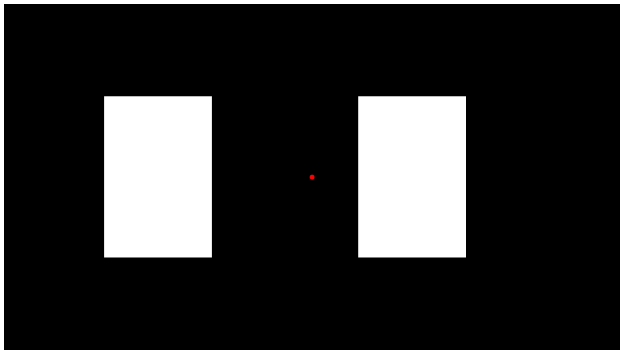

図 4: 実験条件 1 において最初のフレーム

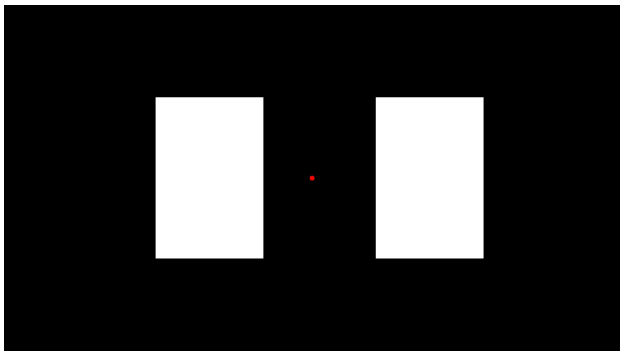

図 5: 図 4 から半周期遅れたフレーム

バケットの幅，バケットから車体までの距離，バケットの左右移動範囲と矩形から観察点までの距離により，矩形の幅と左右移動距離が求められる．左の矩形は 3m 先にあるバケットを表す場合において，矩形の幅は 0.209m で，左右移動距離は 10cm である．被験者は矩形の左右移動に対

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会

しての視差は約 9.3 度である．また大きさが奥行き知覚の手がかりにさせないために，左右にある二つの矩形を同じ幅 0.209m にする．右の矩形は 9m 先にあるバケットを表す場合において，矩形の幅は 0.209m で，左右移動距離は 3.347cm である．被験者は矩形の左右移動に対しての視差は約 3.2 度である．

4.3 実験方法

本実験では三つの実験条件で，どちらの矩形が手前にあるのかを被験者に回答してもらうことを通して，被験者の相対奥行き知覚を定量化する．実験条件 1 では二つの矩形は同期的に 1Hz で左右方向の往復運動のみを行う．実験条件 2 では二つの矩形は移動せず，2. 章で説明した輝度混合を行う．実験条件 3 では二つの矩形は同期的に左右方向の往復運動を行う上に，その運動と逆位相になる輝度混合も行う．各実験条件において，ΔD が 0.25m ごとに一つの映像を作成する．ΔD の範囲は 0m-6m であるため，計 3 条件 $\times$ 24 個の映像を作成した．すべての映像のフレームレートは 120Hz で，空間解像度は 2560×1440 画素である．被験者は心理物理測定法である上下法を用いて，ΔD が何メートルのときに被験者がどちらの矩形が手前にあるのか判断できないまでを調べて，相対奥行き知覚の閾値を特定する．また ΔD より二つの矩形の視差量を求める．

4.4 実験結果

実験の結果，二つの矩形の視差量は実験条件 1 においては約 4.3 度，実験条件 2 においては約 4.7 度，実験条件 2 においては約 5.2 度であった．つまり，実験条件 1 において二つの矩形に対しての視差量は約 4.3 度以上であれば，相対奥行きを弁別できる．実験条件 2 においては約 4.7 度以上，実験条件 3 においては約 5.2 度以上であることがわかった．

4.5 実験考察

視点移動のみの実験条件 1 において視差閾値は約 4.3 度，提案手法である輝度混合のみの実験条件 2 において視差閾値は約 4.7 度である．二つの実験条件で求めた視差閾値の差は約 0.4 度で，人間の水平視野角の 200 度と比べて小さい数値のため，輝度混合は視点移動に生じる OF を打ち消す可能性を示している．また視点移動とその移動の逆位相にある輝度混合の両方を行う実験条件 3 においての視差閾値は実験条件 1 と 2 と比べても 1 度以内に収まった．複合的な固定観測条件によっていつでも等価頭部運動を再現出来る可能性を示している．

5. むすび

本稿では視点移動の移動位相と逆位相になる輝度位相で輝度混合することによって，運動印象を伴わない運動視差提示手法を提案した．また輝度混合手法だけでは視点移動と同等のオプティカルフローを再現できることが明らかになった．その再現するオプティカルフローで，視点移動と変わらない運動視差が得られる．さらに観察点の連続移動時のオプティカルフローと，2 視点静止画像の輝度混合条件を併用し，受動運動視条件における奥行弁別閾を求めた．

謝辞 本研究は科研費基盤 A「身体意識の拡張技術」およびコマツみらい建機協働研究所との共同研究の成果である．

参考文献

[1] Susumu Tachi. “ Telexistence (2nd Edition).” World Scientific, 2015.

[2] James E. Cutting and Peter M. Vishton. “Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth ”. Perception of space and motion. Academic Press, 1995. 69-117.

[3] 黒川正崇, 古川正紘, 近藤大佑, 安藤英由樹, 前田太郎. “ 高フレームレートによる遠隔操縦の作業効率 ”. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2017.

[4] Masataka Kurokawa, Masahiro Furukawa, Taro Maeda. “ Can changing brightness with head movement deliver depth perception like as motion parallax? ”. The 15th Asia-Pacific Conferenceon Vision (APCV), 2019. Iperception. 2019

[5] Suyama, Shiro, et al. “Apparent 3-D image perceived from luminance-modulated two 2-D images displayed at different depths ”. Vision Research, Volume 44, Issue 8, Pages 785-793, 2004.

ⓒ 2022 日本バーチャルリアリティ学会