

運動の 3 次元視

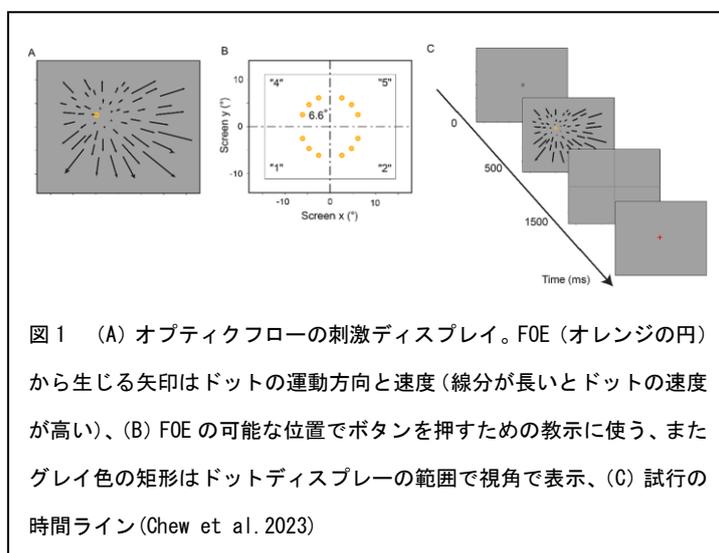
オプティクフロー

オプティクフローの眼球運動

オプティクフローは人間の知覚と歩行、および眼球運動の視覚の手がかりである。Chew et al.(2023)は、オプティクフローの方向知覚が限定されているか、あるいは眼球運動で促進されるかを実験で検討した。実験 1 では、23 人の被験者はオプティクフローパターンの拡大焦点 (FOE) を限定し、実験 2 では、18 人の被験者には FOE の視覚を短時間提示し検出させた。両実験とも自由観察と注視条件で眼球運動が記録した。

本実験ではオプティクフローパターンでの拡張した FOE に自然に起きる眼球運動の異なるタイプの効果、すなわちオプティクフローのドットの方向の知覚をしらべることにある。眼球運動とフローの方向の間を知覚するために被験者は自由観察と注視の異なる 2 つの課題で FOE を空間に定位するか (実験 1)、あるいは細かに FOE 位置に対する感受性を遂行するか (実験 2) を試みた。実験仮説として、第一に眼球運動は感覚的に FOE を追従し、円滑な追従、サッケードやマイクロサッケードのような空間スケールの眼球運動を保持するであろう、第二に FOE やドットの運動など眼球運動の遂行はオプティクフロー方向の知覚に利用し、したがって眼球運動の方向は試行ごとの知覚的精確につながると仮説を立てた。

実験に使用した刺激ディスプレイは図 1 の (A) に示す。オプティクフローパターンの拡大する焦点 (FOE) の範囲はオレンジの円内で、矢印はドットの運動方向と速度 (線分が長いとドットの速度が高い) である。図 (B) には FOE の可能な位置で被験者にボタンを押す教示に使い、また灰色色の矩形はドットディスプレイの範囲を視角で表示しさらに図 (C) には実験中の試行の時間ラインを示した。



実験 1 では、23 人の被験者はオプティクフローパターンの拡大焦点 (FOE) を限定し、実験 2 では、18 人の被験者には FOE の視覚を短時間提示し検出させた。両実験とも自由観察と注視条件で眼球運動を記録した。

実験 1 の手続きは、オプティクフローを提示し被験者に何も教示しないで自由に観察す

る条件 (free-viewing) と注視のマークを注視し続けるように教示する条件のどちらかを設定した。各トライアルは自由観察条件の間、中央の注視点から眼をそむけないように教示し、そのあと自由観察ではそれを解除した。アイトラッカーが作動して眼球の動きに正確なことを確認した後に、オプティクフロー刺激が 1 秒提示された。被験者には 4 選択肢でどの領域 FOE があったかをキーボードボタンで選択させた。選択の後中央の注視マークは 1 秒間色を変え、次に正しければグリーン色に間違いならば赤色に変わった (図の C)。刺激運動は試行の各ブロックでランダムにされ、また眼球の教示は被験者間で均等にブロックされた。

実験 1 の結果は、観察者が眼球運動 FOE 方向への動かしは粗く、注意が視野の全方向にあったので必ずしも効率的ではないことが示された。そこで、実験 2 では被験者に FOE に速やかに視線を変えるように要求し、FOE の中心窩での処理が必要になることを期待した。

実験 2 では FOE 領域での視えの変化に対応した眼球運動の検出を探った。オプティクフロー刺激を提示する間に被験者には自由に観察する教示 (観察自由条件) あるいは注視パターンを注視するような教示 (注視条件) をし、次いで各試行で中央の注意パターン視を維持したまま自由観察に移った。アイトラッカーが正確なことを確かめてから 1.5 秒の間オプティクフロー刺激を提示し、その間に 0.3° の大きさのディスクを 2 回提示するかあるいは 2 秒間の間隔で同じか、あるいは輝度の異なる刺激を提示した。被験者は 2 選択強制で同一あるいは輝度の異なるディスクが FOE 領域に再び見えたら判断してキーボードを押すように教示された。被験者は 5 通りの運動条件 (4 %, 8.7 %, 19 %, 41 %, or 90 %) で試行を完遂した。

実験 2 の結果、眼球の FOE 領域での検出感受性は自由観察条件の眼球運動はより良くなったし、運動が同じならば強くなった。FOE 領域での視えの変化を検出するためには被験者は初めに FOE を捉える必要がある。眼球運動が同じか低いと困難であり、運動の潜在的な効率が限定される。

この結果は、被験者が輝度の変化を手がかりとして FOE の位置を探知しているからと考えられる。被験者はサッケードが FOE を指していない限り FOE での視えの変化を良く探知できること、また眼球運動のトラッキングの方向と知覚的正確さの間には関係もみられず、これは多分に網膜上の運動方向に沿ったトラッキングの方向性が実際に FOE 領域から注意をそらし、眼球運動の良い点をキャンセルしているためと考えられる。

この研究では、オプティクフローパターンがサッケードのトリガーとなり、そして眼球の動きを教示していなくても動きをトラッキングすることを示した。自由観察と注視条件でもマイクロサッケードに一致する特性が眼球運動にあり、眼球運動の刺激研究のためにはオプティクフローパターンが有効なことが分かった。遅い運動刺激あるいは視えの瞬時変化の探知のような困難な課題でも眼球運動は知覚的行動を分析するのに都合がよく、眼球運動は中心窩が関係する視覚課題の研究では有効な情報を提供する。

運動視差による奥行の視差の一貫性、アイコンタクト、ズームの深刻な問題

現在のビデオ・コミュニケーション・システムは、視線やその他の方向に関する合図を視覚的に伝えられるが、しかしその情報は誤解を招く可能性がある。ここでは、問題の原因をより一般的な話者理解 (deictic) の一貫性の欠如と考え、ディスプレイの技術者に運動視差をシミュレートしてその状況を緩和することを提案したい。アバターを使った遠隔コミュニケーション・ソリューションを考案し、自然でダイナミックなアイコンタクトをとるようコンピュータを介した視聴覚コミュニケーションを提供したい。

現在の VR は、いくつかの奥行手がかり (例えば、眼球調節) をシミュレートすることに苦勞して話者との一貫性には効果がまだ無い。しかし、運動視差の導入で VR は真のアイコンタクトを再導入する可能性がある。両眼視差も他の奥行手がかりも話者との相互理解の一貫性を伝えることができない。ステレオカメラは、ヘッドセットにストリーミングすることで非常に強力な奥行体験を伝えることができる。しかし、仮想世界内の 2 つのカメラの位置が空間におけるユーザーの動きによって直接制御されない限り話者との一貫性を達成することはできないので運動視差手がかりを利用して場所の感覚を引き出す必要があると考える。

Troj (2023) は、ヘッド・マウント・ディスプレイを介した VR の外部でコンピュータ画面上のフレームに視差を実装するシステムを考案した。そうすれば、3D 空間におけるユーザーの頭部位置をデバイスに取り付けられたセンサーで追跡してレンダリングに適用し、自己誘発的な運動視差をシミュレートするシステムを開発し、"MPDepth"(depth motion parallax)と名付けた。

MPDepth の主な使い方は、アバターベースの遠隔コミュニケーションである。スクリーンに取り付けられたセンサーでユーザーの位置を追跡し、それを使ってコミュニケーション相手のアバターを仮想カメラで操作するとスクリーンの前の頭の動きから直ちに視差と視点の変化をもたらすように、コミュニケーション相手のアバターをレンダリングする。2人の対話者が窓枠の反対側に座っている場合にはこれで予想される視差と視点の変化が生じる。ビデオ会議に参加している間、コンピュータの前に座っている静止したユーザーの小さな動きでさえ、奥行知覚と方向性が伝わる。バーチャルカメラを制御する同じセンサーは頭のポーズと顔の動きのトラッキングにも使用し、ユーザーのアバターをアニメーション化させる。現在のプロトタイプは、動的アイコンタクトの役割を体系的に研究できる。

現在、主な操作の視聴条件の切り替えの実験が行われ、一つは固定されたカメラの位置から相手のアバターをレンダリングすること、一方、もうひとつでは、話者との一定した話者理解の一貫性を提供することである。

両ユーザーの画面は、今や共通のウィンドウのように振る舞い、それを通して対話することができる。両者の間の空間はユークリッド的に振る舞う。視線は両者にとって同じであり、話者理解の一貫性を保証するように働く。話者理解、ジェスチャー、頭の向き、視線は、視覚システムが実空間でどのように解釈するか忠実に機能できる。その結果、アイコンタクト

も実際に近い振る舞いをしてユーザーXがユーザーYの視線を横切った場合、ユーザーYもアイコンタクトを経験していることを確実に知る。また、ユーザーXがユーザーYを画面中央に表示した場合、ユーザーYも自分を画面中央に表示していることがわかる。同様に、ユーザーYが画面の端で切れて見える場合にユーザーXは自分にも同じように見えることを知る。

現在使用しているズームとスカイプは、コミュニケーション相手が自分をどこでどのように見ているかをモニターできる人工的なフィードバックが必要となる。しかし、このシステムのスクリーン・レンダリングでは一人のユーザーの頭の位置にしか反応しなく、そのユーザーにとっては方向の一貫性は与えられるが、スクリーンを見る他のユーザーにとって表示は正しく見えない。ただし、2人以上のミーティングが可能なセットアップも可能で、三者面談の場合、各参加者は丸い机とユーザー用の椅子1脚、そして2つスクリーンが必要となる。同じようなセットアップは4人なら可能かもしれないが、大人数では無理だろう。しかし、1対1の会議であれば、MPdepthを使い市販のハードウェアで動くソリューションを作ることができる。

研究の結果、コンピュータを介した視聴覚コミュニケーションは、音声のみの電話に比べて多くの利点をもたらすが、しかし、その反面、話者との理解の一貫性となる、指さし、頭の向き、視線の向きなど自然なアイコンタクトのダイナミクスに影響を与える。これに対して、MPdepthは、スクリーン・ベースで頭を使わず、非常に実用的なソリューションである。現在のシステムはアバターベースであるが、視点合成技術の急速な発展、単眼ビデオストリームをリアルタイムで操作すれば写実的なフォトリアリスティックを実現できる。

人間のヘッディング(heading)知覚の時間的安定性

人間のヘッディング(heading)知覚は自己運動からのオプティクフローで正確に判断する。オプティクフローは通常一貫性があるにも関わらず視ているものの混乱や他の自然的フローで一定の変化が生じる。このような問題が起きるので知覚的ヘッディングを保持しなくてはならない。視覚システムは自己運動によるオプティクフローの変化に対応、あるいはそうでないものを捨てる感受性をもつに違いない。Ali et al.(2023)これに対応するには一時の変動を抑止安定するヘッディング信号を統合するメカニズムがあるはずだと考え、自己運動で変えた方向をシミュレートしヘッディングの安定性を実験し検討した。

計算モデル(Computational models, CM)は神経生理的な神経メカニズムがヘッディングの安定性を保存する場合の実証をどのように処理するかを提示する。しかし、神経生理的に触発したヘッディング知覚のモデルはオプティクフローのヘッディングを単一のベクトルの場で捉えるのでヘッディング知覚のダイナミックな変化を説明できない(Beyeler et al.2016)。この新たなCompetitive Dynamics CDモデル(CD)では他の側の初期背面野ストリームにおけるヘッディングの評価をmodelMSTd野のニューロンが蓄積しオプティクフローのシグナルから選好したヘッディングデータに基づいて提供する(Steinmetz et al.

2022)。CD モデルのヘッディングの感受性ニューロンはONとOFFの中心野で循環する。最強と最弱のシグナルの間で選好されてヘッディングの活動の“winning”を強め、一方そのほかのニューロンを弱める。運動する対象からの局所的な抗争刺激で実質の無いものは一時的に対応する。実験 1 では、観察者の自己運動によるオプティクフローからのヘッディング知覚の安定性をしらべた。図 16 に観察者が体験するシミュレートした自己運動を刺激パラダイムとヘッディングバイアス領域を図示した。初めにヘッディング方向のオプティクフロー(“preswitch heading”)のあと、750ms 後にヘッディング方向は異なる方向に切り替わる(“postswitch heading”)、そして 250ms あるいは 500ms 後にオプティクフローが再出現する(図 a)。また、もし preswitch の時にオプティクフローが postswitch のヘッディングの方向の知覚(青色)に影響して判断すれば、preswitch のヘッディング(赤色)の方にバイアスヘッディング(オレンジ色)をかける判断をする。ヘッディングバイアスは判断のスイッチ(オレンジ色)が入るトライアル(on switch)と入らないトライアル(no-switch、ピンク色)を区別してある(図 b、c)。したがって、積極的ヘッディングバイアスは(Positive heading bias) preswitch heading b;誘因効果)へのバイアスを指し、否定的ヘッディングバイアス(negative heading bias)は preswitch heading で、図 c のように反発効果をそれぞれ指す。実験では switch 系列と no-switch 系列を混ぜて被験者が次の試行を予測することや次の switch を期待することを避けた。

被験者は 12 人の学生で 18 から 21 歳齢でこの実験は初めて体験し、マウスボタンを押して試行を開始させた。

実験 1 の結果から、その条件に類似したオプティクフローによるデータをモデルにシミュレートを作成した。まず、バーチャルな理想観察者(視野 90°)に一致したオプティクフローを生成し、次に 18 個の別個の条件(0° and ±6° の preswitch heading angles および ±3, ±6°, ±12° switch angles)をシミュレートし、次に各条件を 10 回の反復を行い、その後各オプティクフローのシークエンスをデジタル化した。その結果、CD モデルの単純化したバージョンはビデオサンプルの各フレームでオプティクフローを直接に表し、各サンプルは各フレームでオプティクフローの水平と垂直方向の要素を処理した。図 2a に示しように、モデルの第 1 段階は MT 領域でオプティクフローの水平と垂直のベクトルを別々に rMT, σ MT (表 1) で特定化されたガウスフィルター(図)2b)によっフローを拡散する。このプーリング機能は粗く MT ニューロンの分集団は周辺領域を抑止することなくモデル化する。

次の処理段階は MST d 領域で、モデル MT の空間的に蓄積されたアウトプットがひと組のオプティクフローのテンプレートとマッチングされいくつかの FoE 位置からの放散的拡散に変えられる(図 2 の右パネル)。各テンプレートはその FoE 位置と符合するヘッディングに最大限感受性があることを表す。FoE 位置はオプティクフローの水平の正中線に沿ってピクセルごとに抽出されたテンプレートを生成する。各テンプレートは FoE の感受性を増ために距離の逆のウェイトをかけた。ロウ(raw)テンプレートは rMST(表 1)のように 1

次元のガウスフィルターで活性がスムーズ化され、このテンプレートが抑止され続けているヘディングシグナルを強化する「中心 o n 周辺 off」の受容野で連結された各ニューロンを周期的に競合活動に入らせた。すべてのニューロンは最大の活性強度をもつもの以外にもベクトルに変えられた。Xi はヘディング(hi)のベクトルヘディングの評価値群に調整された MSTd の活動で表され、次の計算式する。

$$i^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{temps}}} x_i h_i}{\sum_{i=1}^{N_{\text{temps}}} x_i}$$

モデルパラメータは以前に規定した値を表 1 で選択されて、サンプルパラメータ値に基づきモデルを計算し、エラーがあれば被験者のデータで修正した。これを繰り返し人間の判断に類似するまで計算しパラメータを見いだす。モデルには既知の神経生理の構造を基盤にして可能なパラメータを検索して用いた。

実験 1 の結果、CD モデルは人間の行動に類似したヘディングバイアスをする、人間の判断とモデルの評価は preswitch ヘディングに近い傾向を示すこと、バイアスは postswitch のオプティクフローが switch アングルテスト条件のより長い場合に減じることが示された。結局、少し長い時間のヘディングのデータを集めると人間の行動バイアスを説明できるモデルになった。

このように、実験 1 ではオプティクフローが持続した時、ヘディング switch の postswitch ヘディング後の影響が正確であることが実証された。そこで、実験 2 ではさらにこのヘディング switch が検討された。250ms の刺激停止を挿入し、ここでオプティクフローを一時的に停止する 3 条件、すなわち「前“preblackout”条件」「丁度“switchmidblackout”条件および「後” postblackout”条件」を設定した。

実験 2 の結果、ヘディング switch 事態が効いている時はオプティクフローの役割に効果があった。Blackout が switch の直前では人間の判断影響を与えないものの、switch が判断の直後になるまで Blackout 条件では preswitch ヘディングに向かってヘディングのバイアスを増した。これらの結果は postswitch の時間が長いとヘディングのバイアスを減少させ、ブラックアウトの時間を長くするように保つヘディングの信号が伴うことが立証され、これは CD モデルでシミュレートしていた。しかしながらこの結果は midblackout 条件でのバイアスの上昇を説明できく今後のモデル化時の課題である。

結局、神経生理モデル (Competitive Dynamics Model) のシミュレーションは、周期的な競合する相互作用のあるヘディングシグナルを生成するメカニズムを捉えている。これらの結果は、ヘディング知覚が視覚バランスを安定性させ、変化に対する高感度の感受性をもつことを示す。

継続的オクルージョンによる運動と奥行

オクルージョンと重ね合わせは絵画の手がかりであり、また新しく提示された物体によって前の物体が次々と遮蔽されることで奥行を感じさせる。この錯視に関連する知覚運動は研究されているが、奥行知覚は研究されていない。

そこで Lee (2023) は、実験 1 で円盤を連続して提示し運動錯視が誘発されるかどうかを図 1 に示すデザインで実験した。図 1 は、静的 (スタティック) 対 積み重ね (スタッキング) (上) とスタティック (下) 条件におけるトライアルの時間経過をみる刺激に使用した円盤で、実験条件は「静的」対「積み重ね」条件は一方の円盤の山はあらかじめ形成されており、試行の間、画面上で静止したままであり、もう一方の (スタッキング) 円盤の山はすべての円盤が揃うまで 200 ミリ秒ごとに新しい円盤が出現し、試行期間中に積み重なり、また新しい円盤が追加される位置は、図に説明のために破線の輪郭で示してある。この時点で、画面は空白になり被験者には応答させる。静的条件では、被験者は 2 つの静的な円盤の山を合計 3.4 秒間観察させた。これは、これまでに運動錯視を引き起こすことが示されている方法で、オクルードされた円盤を連続して提示し、円盤の「山」の高さの知覚に影響を与えるかどうかをみた。被験者は 11 人の経験豊かな心理物理学的観察者に、継続的に提示されたオクルードされた円盤の "積み重ね" の高さを同時に出現したオクルードした静的な円盤の積み重ねの高さと比較させた。

図 1 に、実験の刺激と手続きを示したように、静的 (スタティック) 対 積み重ね (スタッキング) (上) とスタティック (下) 条件を設定し、そのトライアルの時間経過を設定した。「静的」対「積み重ね」条件では、一方の円盤の山はあらかじめ形成され、試行の間、画面上で静止したままであり、もう一方の円盤の山 (スタッキング) はすべての円盤が揃うまで 200 ミリ秒ごとに新しい円盤が出現し、試行期間中に積み重なった。新しい円盤が追加される位置は、説明のために破線の輪郭で示されている。この時点で画面は空白になり被験者は応答を行うことができる。静的条件では、被験者は 2 つの静的な円盤の山を合計 3.4 秒間観察させた。

実験 1 では、(i)スタティックと(ii)スタティック対スタッキングの条件について比較した結果、すべての場合においてスタッキング条件の方で背が高いと報告され、また両条件間の平均相対 PSE に有意差があり、スタティック・パイル (山) が同じ高さに見えるには、静的な杭スタックは積み重ねられた杭より多くの円盤が必要であった。

実験 1 では、経験豊かな心理物理学的観察者は、スタッキングされた円盤の山の方がスタティックな円盤の山よりも高いとみることがわかったが、実験 2 ではこの結果が安定し、一般化できるかどうかをしらべた。

実験 2 では、63 人のナイーブな観察者を使った実験 1 の主要な結果を再現した結果、ナイーブな被験者を使った実験 1 の主要な結果を再現した。

そこで、積み重ねられた円盤の山をより高く見ようとするバイアスの別の説明としてスタック円盤が静的なまとまりよりも効果的に注意を引くのであれば、観察者は単により頻繁に選択したのかもしれないと考えた。

そこで、円盤の連続的な提示が、円盤の高さの知覚を高めたからではないという可能性を実験 3 で検証した。その結果、円盤のスタッキングパイルは円盤がスタティックパイルに追加されたとき、同等のスタティックパイルよりも高く感じられ、被験者の測定された PSE

低く感じていた。このことは高さの知覚に対するオクルージョンの連続提示の効果は、可逆的であることを示唆していた。しかし、これらの実験からオクルージョンの手がかりと円盤の逐次提示との間の相互作用の結果なのかどうかは不明でこの相互作用については実験 4 で検討した。

実験 4 では、図 2 に示したように静的条件と逐次条件（上図）および静的条件（下図）の試行を時間経過とともに行った。「静的」対「逐次」条件では、試行の間、画面の片側は静止、もう一方（逐次）の画面は（連続的な）画面で試行期間中に新しい円盤が追加され（説明のために破線の輪郭）、すべての円盤が揃うまで 200 ミリ秒ごとに新しい円盤を提示した。この時点で画面は真っ白に変え被験者に応答させた。また、静的条件では被験者には 2 つの静的な円盤の山を 1.6 秒または 2.8 秒間観察させた。

実験 4 の結果、「静的」対「逐次」条件のいずれでも、また 8 個あるいは 14 個の標準ディスクでも 2 つの要因の交互作用も現れなかった。これらの分析から、重ならない円盤を連続して提示することは円盤の枚数の知覚に影響を及ぼさず、また、円盤の枚数に関係なく同じであることを示唆している。しかし、スタティック条件の JND と「スタティック 対 逐次」条件の JND の間には有意な差があり、また、8 枚ディスクと 14 枚ディスク条件の JND の間には、わずかだが有意な差があっ

実験 1 と 2 でも、静的条件と静的対スタッキング条件の間で JND に有意な差が見られた。しかし、これらの実験では、参加者はスタティック条件の方が精度が低かったのに対し、今回の実験 4 では、参加者はスタティック条件の方が精度が高かった。したがって、円盤の連続的な提示と列挙は、実験 1 と 2 の条件間の JND の差を説明できない代わりに、オクルージョンと逐次提示の組み合を組み合わせることで、実験 1 と 2 のスタティック条件とスタッキング条件で精度が向上した理由が説明できる可能性が高い。同様に、PSE には静的条件と静的対逐次提示条件の間に有意差は見られなかった。このことは、円盤の連続提示だけでは実験 1~3 で観察された効果を説明できないことを示唆している。

4 つの実験の結果、円盤が互いに重なり合うように順次積み重ねられると被験者の高さの知覚が増大する結果はオクルージョンそのものより高さの知覚を生み出し動的奥行情報源を利用している。

これらの実験から、円盤の数が等しい静的パイルは円盤の数が同じであれば、高さは同じに見え、これに対して積み重ね条件における円盤を連続して静的な山と同じ高さにするためには、より少ない円盤が必要であった。また、被験者はスタッキングと静的な円盤の山を比較したとき円盤を追加するのではなく削除することで積み重ねを逆転させて知覚させ、数の単純な違いによるものではないことを示した。

まとめると連続的なオクルージョンの方が、オクルージョン単独よりも高さの感覚が大きいことを示し、またダイナミック・オクルージョンは、奥行情報の過小評価される可能性がある。

拡大するオプティックフローと側方の運動視差が正常視力と視力低下による奥行推定に及ぼす影響

観察者が空間内を移動すると静止している物体の網膜投影は、その動きが物体に向かうものであれば拡大し横方向の成分が含まれる場合は水平方向にシフトする。Liu (2023) は、拡大オプティックフローと側方運動視差が、正常視力または人工的に視力を低下させた観察者の奥行知覚の精度に及ぼす影響について検討した。

実験ではこの種の効果が連続的な運動によるものなのか、離散的な物体像の変位によるものなのかを

静止した被験者に観察させた。オプティック・フローや運動視差を観察する場合、2つの光源によって物体の奥行を明らかにでき、また物体の奥行は離散的な変位と運動視差によって明らかにできる。そこで観察者の動きに伴う対象のイメージの離散的な変位が連続的な物体の奥行に関する情報を提供するかどうかを検討するために連続的な運動視差やオプティック・フローの連続提示と、運動視差の最初と最後の動きの画像を別々に提示する場合と比較した。

実験1の前に、11人の被験者による予備実験が行われ、同じパラダイムを用いてZoomを介して実施された実験1の予備バージョンを作成し、実験1の指針として使用した。本研究では、運動に関連した2種類の奥行手がかり、拡大オプティック・フローと横方向の運動視差が奥行知覚を高めるかどうかを視力が正常な被験者と低下している者の間で違いがあるかどうか、および対象イメージの連続的な動きと離散的な変位との間にも違いがあるかどうかについても検討した。車の運転、車椅子での移動、仮想現実でのゲームなどの場面で被験者は運動視差と視差の視覚情報を利用でき身体運動を体験することなく、運動視差やオプティックフローの視覚情報にアクセスすることができた。仮想的な屋内シーンの3Dモデルを構築し、レンダリングして拡大視差と側方視差をシミュレートした。

被験者にはシーンを観察して物体の奥行を推定させ、実験1では正常な視力を持つ被験者を、実験2では人工的に視力を低下させた正常視力の被験者をテストした。実験での刺激は仮想の部屋の3Dモデルからレンダリングされた画像で部屋の幅は33フィート（西から東へ）、長さ52フィート（南から北へ）、高さ13フィート（床から天井まで）で壁は灰色、茶色の床で、窓はなく、部屋の中央には部屋の中央にエリアライトが置かれ、目立つ影ができないようにした。部屋には2つのオブジェの天井から吊るされた赤い六角形の標識とグレーの円柱が置きターゲット・オブジェクトにした。六角形の標識はすべての試行で部屋の中央にあり、柱は部屋の南から北の正中線に沿って8つの位置のうちの1つに置いた。シーンのバーチャルカメラは南側の壁と東側と西側の壁の中間点に設置し、カメラの高さは立っている歩行者の視点にシミュレートして調整した。

バーチャル・シーンは5つの条件、拡大連続運動、拡大変位、横変位、静止視変位、静止視である。拡大オプティックフローをシミュレートするために、モデル内の仮想カメラは正面に移動させた。横方向の運動視差のためにカメラは北から時計回りに80°移動し、回転さ

せ、どちらの場合も、カメラは2秒間に15フィート移動させた。この操作は、図2に示すように、(A) 刺激で提示された仮想シーンのレイアウトは鳥瞰図に示されるように、場所と物体の標識は見やすくするために不釣り合いに拡大、(B) 視力正常時の視差シーケンスで拡大オプティックフローと側方運動視差の開始フレームと終了フレームでシミュレートした場合、(C) 拡大オプティックフローと側方運動視差の開始フレームと終了フレームで軽度、中等度、重度の視力低下をシミュレートした場合であり、各画像の右上の数字は、解像度の最小角度の対数を単位である。対象物の奥行を推定するのに角度の大きさだけに頼ることができないように、対象物には3つの次元の組み合わせ（高さ、幅、厚さ）で被験者に提示した。

この実験の結果、動きに関連した手がかりの効果では被験者は静止視よりも横方向の運動視差の方がより正確な奥行推定が可能であり、拡大視差の効果は小さく、さらにオプティックフローの効果も小さかった。これらの結果から 側方運動視差は、静的視差よりも奥行知覚精度が向上し、また拡大オプティックフローは、静止視のフローよりも正確な奥行推定が可能であり、したがって連続的な運動は物体像の変位よりも効果的であった。

実験2では、人為的に低下させた視力が奥行知覚にどのような影響を与えるかをしらべた。実験2の装置、手順、データ解析方法は実験1と同じで、被験者はキャンパスから11人の学生（男性6名、女性5名で、平均年齢は 19.5 ± 1.4 歳）であった。実験に用いた変数は3段階の視力低下レベル、5つの視野条件、8つの奥行分離、2つの対象物が組み合わせられ、合計240の条件が与えられ各2回ずつ行われた。

実験2の結果、3つの視力レベルすべてで、拡大オプティックフローは回帰勾配が静的視力より有意に大きくなり、回帰の傾きも有意に大きくなり、側方運動視差は静止視力よりも有意に急な勾配を示した。これらの結果は、横方向の運動視差よりも正確な奥行推定が可能であることが示された。また、拡大オプティックフローは視力低下が激しい条件下では、静的視認条件と比較してオフセットバイアスを0に近づけることができ、全体として奥行推定精度の向上は、側方運動視差のそれよりも顕著ではなかった。連続的な側方運動視差は、軽度および中等度の視力低下においてのみ、側方変位よりも正確な奥行知覚をもたらした。実験1と2の結果、仮想空間内の2つのオブジェクト間の奥行を推定する際には動きに関連した手がかりは奥行知覚の精度を高めるのに役立つ。とりわけ、横方向の運動視差は、拡大オプティックフローよりも静止視差の方が奥行知覚の改善に効果的であり、それはフローよりもさらに効果的である。連続的な動きを伴わない視野内の物体輪郭の変位は、通常または軽度・中等度の視力低下条件で奥行知覚を向上させることができ、連続的な運動が見えるとさらに奥行知覚が増強される。しかし、視力が著しく低下した場合は増強されることはない。