

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12034

研究課題名（和文）カメラが高速で移動する3DCGゲームの眼精疲労を防止するレンダリング手法の確立

研究課題名（英文）Research on Rendering Techniques for Reducing Eyestrain in Video Games with Fast Moving Camera Controls

研究代表者

井ノ上 寛人（Inoue, Hiroto）

東京電機大学・未来科学部・助教

研究者番号：40724604

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：三人称視点のビデオゲームでは、アバタが障害物に遮蔽される場面が頻繁に生じる。その対策として、（1）アバタをシルエット化する、（2）障害物を半透明化する、（3）障害物を半透明シルエット化する手法があるが、これらの有用性は定量的には不明瞭であった。本研究では、手法2、3が、手法1、対策なしに比べて視認性、操作性、心理的満足度を有意に向上し、カメラ操作量を10%程度削減する効果があることを示した。また、手法3には視認性向上、疲労軽減、瞬目回数削減の効果があることが示された。これらの効果は、アバタとカメラの移動速度が遅い場合に顕著で、手法3の視認性向上効果は手法2に比べて高いが、迫力感は低下する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、三人称視点の3DCGビデオゲームに実装されているオクルージョン対策の有用性を定量評価することで、CGカメラが高速もしくは低速に動く条件下でそれぞれ良好な視界を維持して眼精疲労や映像酔いを軽減すると共に、迫力感などの感性的な印象も向上できる新しいレンダリングパイプラインの確立の一助となる成果が得られた。本成果の応用先は、ビデオゲームに限らず、3DCGの基礎/基盤技術となり得るものであり、その学術的/社会的意義は高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In playing video games from a third-person point of view, we sometimes lose sight of an avatar that is occluded by other foreground objects. There are three measures against the occlusion problem: (1) to make a silhouette of an avatar, (2) to make semi-transparent occluders, and (3) to make semi-transparent silhouettes of occluders. However, it is not fully clear which is better quantitatively. In this research, it was shown that Method-2 and -3 significantly improved visibility, operability, and psychological satisfaction compared with Method-1 and no countermeasures and had the effect of reducing the amount of camera operation by approximately 10%. Also, was shown that Method-3 has the effects to improve visibility, to reduce fatigue, and to reduce number of blinks. These effects are most noticeable when the moving speeds of the avatar and camera are slow, enhancing the visibility improvement effect of Method-3 compared with Method-2, at the expense of a reduced sense of intensity.

研究分野：感性工学

キーワード：3次元コンピュータグラフィックス（3DCG） ビデオゲーム オクルージョン UI/UX 感性工学

1. 研究開始当初の背景

3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)を応用したビデオゲームの主要な形態の一つに、アバタと呼ばれる3DCGキャラクタの操作を三人称の視点で楽しむ冒険アクションゲームがある。この種のゲームでは、ユーザが操作するアバタと、ユーザの視点となるカメラの双方が操作可能な仕様が一般的であるが、アバタとカメラの間に障害物が入り込むと、ユーザの視点からアバタの姿が見えなくなるオクルージョンが発生することが多々ある。オクルージョンはビデオゲームの視認性や操作性の低下を招くため、開発者側が意図しない場面や頻度でオクルージョンが発生すると、ゲーム本来の楽しさに関わるユーザ体験の機会損失に繋がり、満足度が低下する要因となり得る。ビデオゲームを経験則に基づいてヒューリスティック評価した関連研究や、ビデオゲームのカメラシステムについて論じている関連文献においても、ユーザの視界を遮る障害物やオクルージョンは、ゲームシステム側で対策が求められる重大な問題として位置付けられている。

これまでに提案されているオクルージョン対策手法は主に二つの方針に分類できる。一つ目は、対策をカメラシステムに組み込む方針で、カメラの位置や角度を自動もしくは半自動制御してオクルージョンの回避を試みる。「NINTENDO64」およびそれ以前から採用実績が確認できる対策手法としては、カメラの位置をアバタに近接もしくは後退させる手法や、カメラをアバタの肩越しまで近づけて視点を擬似的な一人称とする手法(Over the Shoulder)、およびこれらを組み合わせた手法(Hybrid FP/TP Cameras)などが挙げられる。視点の切替えが可能なカメラシステムは、HMD(Head Mounted Display)を要するゲームでも検討されており、没入感の低下や酔いの悪化を抑える手段として有用である可能性が示されているが、視点を切替えるタイミングや効果の感じ方には個人差があるとされる。また、カメラが動的に振る舞うシステムは、障害物の位置や量によってはアバタを見失う状況や映像酔いを招くため、逆にユーザ体験を損なう要因にもなり得る。

そこで二つ目の方針として、カメラシステムだけに頼らずに、レンダリングパイプラインにオクルージョン問題の緩和を狙ったシェーダを組み込む手法が活用されている。例えば、オクルージョンが生じた際にアバタの一部または全身をシルエット化して障害物の前面に表示する手法が挙げられる。この手法は「NINTENDO GAMECUBE」以降から採用実績が確認できる。別種としては、障害物を半透明化することでアバタおよびその近傍の視認性を向上する手法が挙げられ、「PlayStation 4」中期以降から頻繁に採用されている。また著者らは、前述した既存手法を組み合わせて、衝突時にカメラを自動旋回させる制御を入れると共にオクルージョンを引き起こす障害物を半透明化する手法や、アバタ近傍の更なる視認性向上のために障害物から稜線やテクスチャを除去した半透明のシルエットを描画する手法を新たに提案している。しかし、著者らの提案手法も含め、前述した各手法が操作性をどの程度改善できるかといったユーザビリティについては、定量的に十分に検討されていないのが現状であった。

また、前述した先行研究などでは、アバタおよびカメラの移動が比較的高速なシーンを評価の対象としていたことから、この観点からも更なる検討の余地がある。一般に、移動するオブジェクトの視認性はその速度によって変わり得る。移動する視標を用いて計測される動体視力は、通常、静止視力よりも悪いとされているが、視標が比較的ゆっくりと移動する場合はそれを滑動性追跡眼球運動(Smooth Pursuit Eye Movement; SPEM)によって網膜中心窩で捉えることが可能で、その際は良好な視力が維持される。そのため、半透明化した障害物がアバタの手前を高速で通り過ぎた場合、障害物が見辛くなる反面、重要な注視対象であるアバタの視認性は相対的に向上することが期待されるが、半透明化した障害物が比較的低速で通り過ぎた場合や途中で静止した場合は、半透明化した障害物の稜線やテクスチャとの重畳表示によってアバタの像が不明瞭に見えてしまい、オクルージョン対策としての機能が十分に発揮されない可能性が考えられる。一方で、障害物を半透明のシルエットにする処理が、この問題をどの程度解決できるかについては定量的に検証されていないのが現状であった。また、不明瞭な像を観視した場合や主観的疲労度が亢進した場合は、瞬目(まばたき)の回数が増加することが報告されているが、オクルージョン対策に用いられている半透明化処理の違いによって瞬目の回数がどの程度変化するかについては定量的に明らかでないのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究は、レンダリングパイプラインに組み込むタイプのオクルージョン対策手法の定量的な効用の解明を目的に、主に二つの実験を行った。実験1では、(a)アバタをシルエットで表示する手法、(b)障害物を半透明で表示する手法、(c)障害物を半透明のシルエットで表示する手法の有用性を、ユーザビリティの観点から定量的に明らかにすることを目的とし、各手法を適用した際の操作ログ解析と主観評価を行った。実験2では、(b)障害物を半透明にする処理と、(c)障害物を半透明のシルエットにする処理の効用の違いについて明らかにすることを目的に、アバタおよびカメラが高速または低速移動するゲーム映像の主観評価と、それらの映像の観視中に生じる生体反応(瞬目回数)を計測した。

3. 研究の方法

3-1. ビデオゲームのユーザビリティ評価 (実験 1)

評価の対象としたビデオゲームは Unity を用いて制作した。このゲームでは、フィールドを林の中を表現したものとし、地面に「猫」や「箱」といったアイテムを無作為に配置して、これらを 1 分の制限時間内になるべく多く獲得することを目標とした。

ゲームシーンのサムネイルを図 1 に示す。図 1 に示したように、本実験ではオクルージョンが生じた際に以下のいずれかの処理を適用した。

- a. Unity 標準のレンダリングパイプラインによる処理 (オクルージョン対策が何もない状態)
- b. アバタをシルエットで表示する処理
- c. 障害物を透明度 50% で表示する処理
- d. 障害物を透明度 50% のシルエットで表示する処理

ここで、処理 b は関連特許を、c および d の処理は著者らが先行研究で提案した手法を参考にレンダリングパイプラインを実装した。フレームレートは 60 fps で固定とし、いずれの処理においてもこのフレームレートが維持されていることを確認した。



図 1. 評価の対象としたゲームのサムネイル (実験 1)

アバタの CG モデルにはカバー株式会社が提供している「赤井はあと¹」を用いた。カメラの可動域は、アバタを中心とした制約のある半球面座標上とし、アバタとカメラの座標はコントローラ (DualSense, Sony Interactive Entertainment) の左右のスティックで操作する仕様とした。また、ボタン操作でアバタがアクションを取る仕様とし、アクション中に「箱」と接触した場合は得点を与えると共に「箱」を「猫缶」や「爆弾」といった別なアイテムに変化させ、移動中に「猫缶」や「猫」と接触した場合にも得点を与えた。但し、「爆弾」と接触した場合はアバタを吹き飛ばして操作不能な時間をペナルティとして与えた。

加えて、このビデオゲームのユーザビリティに関わる「効果」および「効率」を評価するために、ゲーム終了時に操作ログを出力する仕様とした。「効果」の評価指標はゲームスコアとし、「猫」の獲得回数や「箱」の破壊回数といった目標の達成度を記録した。また、このゲームではアイテムの探索およびオクルージョンを回避するためにカメラを操作すると考えられるため、「効率」の評価指標はカメラの操作量とし、アバタとカメラの座標値を 1 フレーム毎に記録してアバタを中心にカメラを旋回させた角距離の総量を算出した。

東京電機大学の「ヒト生命倫理審査委員会」の承認の下、本実験には 20 代の男性 10 名、女性 8 名の計 18 名が参加した。前述した四つの描画処理は Scheffe の一対比較法 (浦の変法) で評価した。このため、実験参加者は異なる描画処理を適用したゲームを 2 回プレイして印象を比較するという試行を逆順も含めて 12 回繰り返す、ゲームを計 24 回 (各描画処理で 6 回ずつ) プレイした。疲労感や習熟度の影響を除外するために、評価順序は実験参加者毎に無作為とした。一対比較に用いる評価語は、「見やすい」といった 7 語を選定し、「どちらの方が見やすいと思いましたが?」という形式で質問を構成した。質問の提示順序は無作為とし、最後に「どちらの方が総合的に良いと思いましたが?」という質問を加え、計 8 問に回答してもらった。ゲームは液晶モニター (CG2420-Z, EIZO) に表示した。画面のピーク輝度は 200 cd/m²、色域は BT.709 でキャリブレーションした。解像度は 1920 x 1080 px、画面サイズは 0.518 x 0.292 m、視距離は画面高 H の 3 倍にあたる 0.87 m 程度とした。照明には D₆₅ 光源 (Z-209PRO-6500K, 山田照明) を用いた。

3-2. 移動速度が異なるビデオゲーム映像の評価 (実験 2)

本実験では、直進するアバタを後方から見たシーンを評価の対象とし、ゲーム映像は Unity で制作した。フィールドは柱が等間隔で立ち並んでいる古代遺跡とし、カメラが旋回する途中で柱が障害物となり、アバタが柱の奥に描画されるオクルージョンが複数回発生する構成とした。

図 2 にアバタおよびカメラの軌跡を示す。この図の背景画像はフィールドの鳥瞰図を表し、黄色の線はアバタの軌跡を、黄色の矢印は各座標におけるアバタの向きを、青色の線はカメラの軌跡を、青色の矢印は各座標値におけるカメラの向きをそれぞれ示す。アバタおよびカメラの移動速度は次の 2 水準とした。

- A1. アバタがフィールド内を 2 m/s の速度で歩行すると共に、カメラが 60 °/s の速度で旋回する低速移動条件
- A2. アバタがフィールド内を 4 m/s の速度で走行すると共に、カメラが 120 °/s の速度で旋回す

¹ <https://3d.nicovideo.jp/works/td63647>

る高速移動条件

図 2 の矢印の間隔は、単位時間あたりのアバタおよびカメラの移動量を表す。図中の青色の線で示したように、カメラの偏角は $-50^{\circ} \leq \theta \leq 50^{\circ}$ の範囲で周期的に変動させ、左右に旋回を繰り返すようにカメラを移動させた。なお、ゲーム映像は 30 秒で統一した。そのため、A1 よりも A2 の方がカメラの角移動量が多くなり、オクルージョンの発生回数も多い。

図 3 はオクルージョンが発生したシーンを表す。オクルージョンが生じた際には図に示したように柱に以下のレンダリング処理を適用した。

- B1. Unity 標準のレンダリングパイプラインによる処理（オクルージョン対策が何もない状態）
- B2. 柱を半透明化して描画する処理
- B3. 柱を半透明のシルエットで表示する処理

ここで、B2（半透明化）と B3（半透明シルエット化）の処理の適用にあたっては、先行研究を参考にした。具体的には、オクルージョン判定の直後から 0.2 秒かけて α 値（不透明度）を単調減少させるアルファブレンディング処理を適用し、判定を抜けてから 0.2 秒かけて α 値を戻す遷移時間を設けることで、半透明化によって画面上に生じる急激な輝度の変化を抑えた。

評価の対象とするゲーム映像は、前述した移動速度要因 A とレンダリング処理要因 B を組み合わせた計 6 パターンとし、これらを動画として書き出した。ゲーム映像のフレームレートは 60 fps、解像度は 1920 x 1080 px とした。また、ゲーム映像の開始と終了の際には、1.2 秒かけて画面を暗転させる遷移時間を設けた。

本実験は東京電機大学のヒト生命倫理審査委員会からの承認を得て実施し、20 代の男性 9 名、女性 9 名の計 18 名が参加した。実験参加者には、ゲーム映像を Scheffe の一対比較法（浦の変法）で主観評価してもらった。主観評価の際に対比較する 2 パタンのゲーム映像は連続再生し、先に見たパターンと後に見たパタンの印象を評価するまでの流れを 1 試行とした。また、1 試行毎に 1 分間の休息時間を閉眼座位の状態に設けた。瞬目回数については対比較中（映像観視中）の様子をカメラで録画することで計測した。ゲーム映像は液晶モニタ（CG2420-Z, EIZO）に表示した。画面のピーク輝度や照明環境は実験 1 と同様とした。

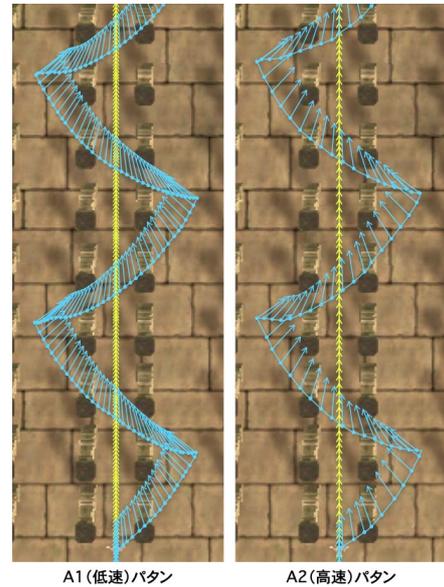


図 2. カメラとアバタの軌跡（実験 2）



図 3. 評価の対象としたゲーム映像のサムネイル（実験 2）

4. 研究成果

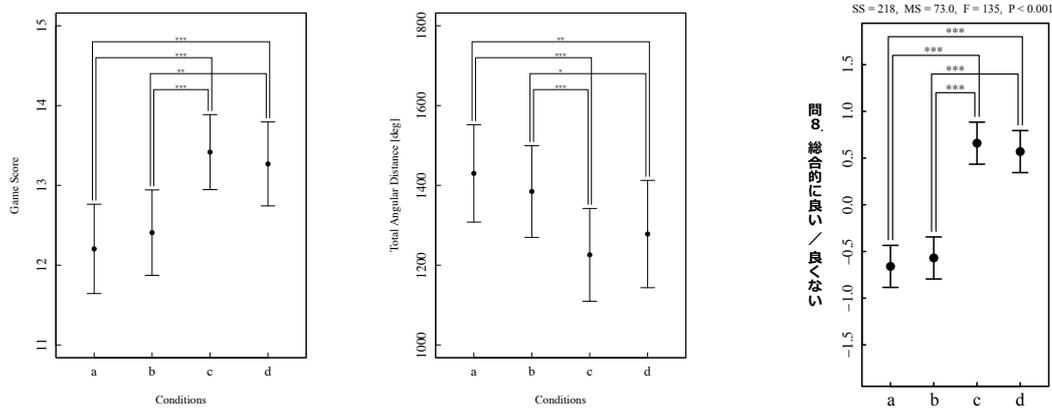
4-1. ビデオゲームのユーザビリティ評価（実験 1）

ユーザビリティを定量評価した結果、障害物を半透明化するオクルージョン対策手法は、対策が何もない状態と比較して、

1. 図 4a に示した通りに、アイテムを集めるというゲームの目標達成率を 9%増加させる有意な難度低減効果がある、
2. 図 4b に示した通りに、カメラの操作量を 14%減少させる有意な効率改善効果がある、
3. 図 4c に示した通りに、心理的な満足感を高める有意な印象向上効果がある（視認性や操作性、疲労感、スピード感といった印象を高め、総合的に良いと評価される）、

ということが明らかになった（論文発表成果[4-3-1]などで詳細を報告）。

したがって、障害物を半透明化するオクルージョン対策手法には、ビデオゲームのユーザビリティを全体的に向上する有用性があるといえる。一方で、アバタをシルエット化する手法のユーザビリティ向上効果は、前述した手法と比較して限定的であるものの、ゲームフィールド上での冒険や探索が簡単になり過ぎないゲームとしたい場合などでは有用といえる。但し、両者のいずれにしても、オクルージョン対策手法の実装にあたっては、ゲーミフィケーション要素やレベルデザイン要素との関係を吟味する必要がある。



(a) ゲームスコア (効果) (b) カメラの操作量 (効率) (c) 主観評価値 (満足)

図 4. ユーザビリティ評価の結果 (実験 1)

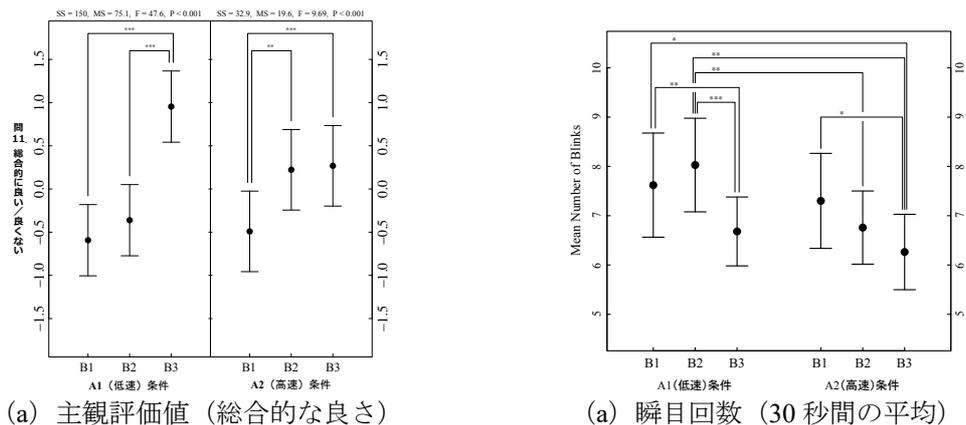
4-2. 移動速度が異なるビデオゲーム映像の評価 (実験 2)

障害物を単に半透明にする処理と障害物を半透明のシルエットにする処理の効用の違いを明らかにするため、一対比較法で得た主観評価の数量得点と瞬目回数の差を分析した結果、図 5 に示した通りに、

1. 障害物を半透明のシルエットにする処理には、視認性の向上や主観的疲労感を軽減するといった総合的な印象を向上する効果と、オクルージョン対策がない条件下よりも瞬目回数をやや低い水準にする効果を有する、
2. これらの効果はアバタやカメラの移動速度が遅い場合に顕著に発揮され、障害物を単に半透明にする処理の視認性向上効果を上回るが、迫力感については低下する、
3. アバタおよびカメラの移動速度が速い場合、これら 2 手法が有する視認性向上効果は同程度となる、

ということが明らかになった (論文発表成果[4-3-2]などで詳細を報告)。

したがって、これらのオクルージョン対策手法を実際のビデオゲームに導入する際には、制作者側の意図通りの情景が描画されるように、状況に応じた使い分けや、組み合わせて使用することが望まれる。但し、以上の知見はゲーム映像を一対比較法で主観評価すると同時に瞬目回数も計測するという実験条件下で得たものであり、観視するゲーム映像の前後関係に起因する順序効果の影響については完全に相殺できていない可能性がある。今後の課題として、ゲームを実際にプレイさせた際の瞬目回数を計測する追実験などを行うことが望まれる。



(a) 主観評価値 (総合的な良さ)

(a) 瞬目回数 (30 秒間の平均)

図 5. 主観評価と瞬目計測の結果 (実験 2)

4-3. 主な論文発表成果 (査読付き学術誌論文) :

1. 直原寿々花, 井ノ上寛人, 鉄谷信二, ビデオゲームのユーザ体験を向上するオクルージョン対策手法の検討, 電子情報通信学会誌, Vol.J107-D, No.08, 2024 年 8 月 (2024 年 4 月 16 日 早期公開), DOI:10.14923/transinfj.2023JDP7040
2. 直原寿々花, 井ノ上寛人, 鉄谷信二, ビデオゲームの視認性を向上するオクルージョン対策手法の検討, 日本感性工学会論文誌, Vol.23, No.1, pp.61-68, 2024 年 4 月, <https://doi.org/10.5057/jjske.TJSKE-D-23-00064>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 直原寿々花, 井ノ上寛人, 鉄谷信二	4. 巻 Vol. J107-D
2. 論文標題 ビデオゲームのユーザ体験を向上するオクルージョン対策手法の検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transinfj.2023JDP7040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 直原寿々花, 井ノ上寛人, 鉄谷信二	4. 巻 23
2. 論文標題 ビデオゲームの視認性を向上するオクルージョン対策手法の検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本感性工学会論文誌	6. 最初と最後の頁 61 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5057/jjske.TJSKE-D-23-00064	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 直原寿々花, 井ノ上寛人, 鉄谷信二
2. 発表標題 ビデオゲームの視認性を向上するオクルージョン対策手法の検討
3. 学会等名 第19回日本感性工学会春季大会予稿集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 松永 力, 井ノ上寛人, 鉄谷 信二
2. 発表標題 ランダムドットパターンを用いた三人称視点映像の感性評価に関する基礎的検討
3. 学会等名 第19回日本感性工学会春季大会予稿集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中友也, 井ノ上寛人, 鉄谷信二
2. 発表標題 ヒットストップと効果音を伴うシルエット錯視の運動知覚に関する基礎的検討
3. 学会等名 第19回日本感性工学会春季大会予稿集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 直原寿々花, 井ノ上寛人, 鉄谷信二
2. 発表標題 3DCGゲームにおけるオクルージョン対策手法のユーザビリティ評価
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中友也, 井ノ上寛人, 鉄谷信二
2. 発表標題 ヒットストップを伴う両義的運動錯視の知覚に関する基礎的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福田翔悠, 井ノ上寛人, 鉄谷信二
2. 発表標題 ビデオゲームのユーザ体験の向上を目的としたヒットストップ演出の最適時間に関する基礎的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 直原寿々花, 井ノ上寛人, 鉄谷信二
2. 発表標題 三人称視点3DCGビデオゲームの疲労感を軽減するレンダリング手法の検討
3. 学会等名 第24回日本感性工学会大会予稿集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 直原寿々花, 井ノ上寛人, 鉄谷信二
2. 発表標題 三人称視点3DCGアクションゲームにおけるアバタをシルエット化する手法と障害物を半透明化する手法の比較
3. 学会等名 第17回日本感性工学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中友也, 井ノ上寛人, 鉄谷信二
2. 発表標題 オクルージョンを伴う多義的アニメーションの運動知覚に「ヒットストップ」が及ぼす効果の基礎的検討
3. 学会等名 第17回日本感性工学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安河玲雄, 井ノ上寛人, 鉄谷信二
2. 発表標題 3Dアクションゲームにおける「ヒットストップ」の視覚効果に関する研究
3. 学会等名 第16回日本感性工学会春季大会予稿集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川端友未香, 井ノ上寛人, 鉄谷信二
2. 発表標題 障害物が半透明化する三人称視点3DCGアクションゲームのユーザビリティ評価
3. 学会等名 第22回日本感性工学会大会予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石橋侑宜, 井ノ上寛人, 鉄谷信二
2. 発表標題 遮蔽検出時に障害物を動的に半透明のシルエットとする3DCGゲームのための表現手法の提案
3. 学会等名 第19回情報科学技術フォーラム講演論文集
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関