

タブレット端末を用いたシースルービジョン時の運動視差が 奥行き知覚に与える影響

河内 駿[†] 北原 格^{††} 亀田 能成^{††} 大田 友一^{††}

^{††} 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
E-mail: [†]s1320812@u.tsukuba.ac.jp, ^{††}{kitahara,kameda,ohta}@iit.tsukuba.ac.jp

あらまし 本研究では、タブレット端末を用いたシースルービジョンにおいて、ユーザの奥行き知覚に運動視差が与える影響を解析する。シースルービジョンとはユーザが直視している物体（直視物体）によって視認できない物体（不可視物体）があるとき、不可視物体を複合現実型提示することで視覚支援を行う技術である。シースルービジョンを可搬性の高いタブレット端末で実現した際、不可視物体の奥行き知覚は運動視差によって得られる。本研究はユーザの視点とタブレット端末の移動によって生じる運動視差を考慮し、それぞれがユーザの奥行き知覚に与える影響を解明する。

キーワード 複合現実感, タブレット端末, 運動視差, シースルービジョン, 奥行き知覚

Depth Perception Analysis by Motion Parallax in See-Through Vision with Tablet Device

Shun KAWACHI[†], Itaru KITAHARA^{††}, Yoshinari KAMEDA^{††}, and Yuichi OHTA^{††}

^{††} Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8573 Japan
E-mail: [†]s1320812@u.tsukuba.ac.jp, ^{††}{kitahara,kameda,ohta}@iit.tsukuba.ac.jp

Abstract In this paper, we analyze the motion parallax effect to depth perception in see-through vision using a tablet device. If a user wants to see a object hidden by a blocking object, the see-through vision system displays the invisible object by seeing through the the blocking object. In the see-through vision using a tablet device, motion parallax is the most important depth clue because of its high portability. It has not been clarified that motion parallax by moving the tablet device affects user's perception. We classified the motion parallax on tablet-based see-through vision and analyzed its influence on user's depth perception.

Key words Mixed Reality, tablet device, motion parallax, see-through, depth perception

1. はじめに

シースルービジョン [1] は建物などのユーザが直接視認できる物体 (直視物体) によって、その後ろや中にある直接視認できない物体 (不可視物体) を可視化する手法である。

シースルービジョンの映像を提示するデバイスとして、タブレット端末を想定する。タブレット端末はHMD(Head-Mounted Display) 等のディスプレイに比べて可搬性が高く、移動の際にユーザへかかる負担が小さいため利用しやすいと言える。

シースルービジョンでは、直視物体と不可視物体への

ユーザの空間知覚が同等となることが理想的である。従って、タブレット端末を利用したシースルービジョンにおいても、このような空間知覚を実現することが望まれる。タブレット端末では運動視差による奥行き知覚がその手がかりとして期待できる。つまり、ユーザの奥行き知覚に対して運動視差が与える影響を解析することは、タブレット端末を用いたシースルービジョンの理想的な空間知覚を実現する手がかりになると推測される。

本研究では、タブレット端末を用いたシースルービジョンにおいて、ユーザの視点移動によって生じる直視物体の運動視差、及びタブレット端末のディスプレイに提示された不可視物体の運動視差がユーザの奥行き知覚に与

える影響の解析を目的とする。本研究では、ユーザの視点移動とタブレット端末の移動によって生じる運動視差に焦点をあてる。直視物体の運動視差はユーザの視点と直視物体の位置関係によって変化する。また、不可視物体の運動視差はユーザの視点と不可視物体、不可視物体の映像を提示するタブレット端末のディスプレイの位置関係によって変化する。ここで、ユーザの視点と不可視物体との間の距離は運動視差が十分知覚できる範囲とする。なお、ユーザの視点の移動に伴う運動視差を解析するため、直視物体と不可視物体は静止しているものとする。

タブレット端末のディスプレイに運動視差を提示する手法として、ユーザの視点位置に応じて幾何学的に整合性のとれた映像を提示する手法がある[2]。本研究ではこの手法を参考にして、直視物体と不可視物体の運動視差がユーザの奥行き知覚に与える影響を解析する。その際に、ユーザの視点移動が小さい場合においても不可視物体の見かけの変化を大きくさせる方法を提案し、ユーザが奥行き知覚する1つの手法として調査を行う。

2. 関連研究

複合現実型提示による視覚支援の一つであるシースルービジョンにおいて、Furness[3]の研究が先駆けといわれている。この研究では、模型のコックピットの奥に仮想的な屋外環境が広がっているかのような映像提示を目標としている。Livingstoneら[4]は軍事的な状況下において、屋外空間で建物等の直視物体によって遮られている人物等の不可視物体を可視化する手法を提案した。Averyら[1]は屋外空間において、持ち運び可能なデバイスをを用いたシースルービジョンのユーザ評価を行った。これらの研究では、シースルービジョンの映像を提示するデバイスとしてHMDを想定しており、タブレット端末を用いた場合は詳しく言及されていない。

本研究では、ユーザにシースルービジョンの映像を提示するデバイスとしてタブレット端末を用いる。タブレット端末は可搬性が高く、これをかざすだけでシースルービジョンの映像を手軽に得ることができる。これは従来のHMD等と比較して手軽、かつ安全にシースルービジョンを利用できる。また、直視物体を直接視認することができるため、ディスプレイには視認できない不可視物体を提示するだけでよい。

タブレット端末を用いた複合現実型提示の実現のためには、ユーザの視点位置を基準とした映像を提示する必要がある。Tomiokaら[2]はユーザの視点位置を推定し、その位置から観測される実空間の映像をユーザの視点位置から見たかのようにするための手法を提案した。本研究ではこの手法を参考にして、タブレット端末を用いたシースルービジョンを実現する。その手法については3

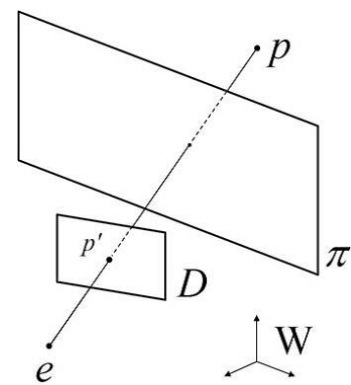


図1 タブレット端末を用いたシースルービジョンのモデル

章で説明する。

Tomiokaらの研究は、ユーザが直接視認できる直視物体の視認性を向上させたが、シースルービジョンでは視認できない不可視物体の空間知覚も対象とする必要がある。ユーザが知覚できる不可視物体の空間的位置の手がかりとして、奥行き知覚が想定される。タブレット端末にディスプレイとユーザの視線方向のカメラが1つずつあるとし、単眼視による運動視差を用いて立体視の実現が可能だとする。従って、本状況下ではユーザの奥行き知覚に対して運動視差が有効だと想定される。この運動視差を発生させる移動について解析することにより、シースルービジョンにおいて適切なユーザの視点とタブレット端末の移動方法を明らかにする。

3. タブレット端末上の運動視差の影響

本節では、タブレット端末におけるシースルービジョンの実現について述べ、その際に必要なユーザの視点位置を基準とした映像の提示手法について説明する。次に、ユーザの視点とタブレット端末の移動によって生じる運動視差の分類について述べ、分類された手法を用いた奥行き知覚の解析方法について説明する。

3.1 タブレット端末でのシースルービジョン

タブレット端末を用いてシースルービジョンを実現するために、ディスプレイ内に提示する映像とディスプレイ外の実空間を対応させる必要がある。本節では、タブレット端末におけるユーザの視点を基準とする不可視物体の映像の提示手法について説明する。

図1にタブレット端末を用いたシースルービジョンのモデルを示す。世界座標系Wにおけるユーザの視点位置を e 、不可視物体上の注視点を p 、タブレット端末のディスプレイ面を D とする。また、直視物体の表面は平面であると仮定し、その平面を π とする。不可視物体の注視点 p の像 p' を D 上に提示することにより、ユーザの視認する直視物体と不可視物体の映像との幾何学的整合性をとる。

表 1 ユーザの視点とタブレット端末の移動による運動視差の分類

	タブレット端末の移動の種類					
	運動視差			拡張運動視差		
	回転	並進	静止	回転	並進	静止
ユーザの視点：移動	a	b	c			
ユーザの視点：静止	d	e		f	g	

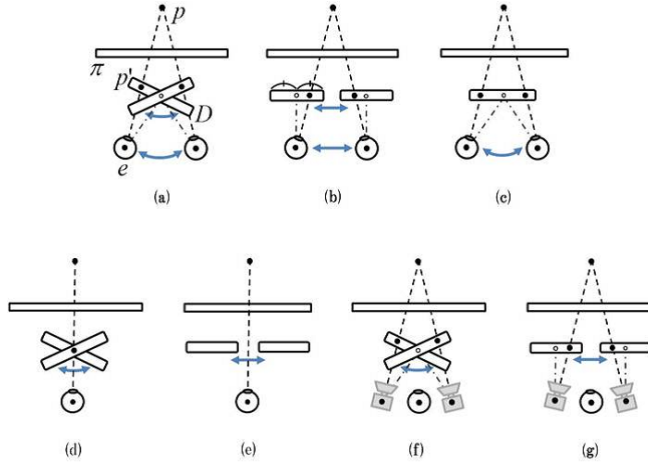


図 2 運動視差の分類の概略図

3.2 運動視差の分類

本節では、ユーザの視点とタブレット端末の移動の種類を大別し、その組み合わせによって生じる運動視差について分類と検討を行う。分類の際に、ユーザの視点移動が小さい場合でも不可視物体の見かけの変化を大きくする方法を加え、通常の運動視差と併せて検討する。

ユーザの視点とタブレット端末の間の距離は一定であると仮定する。すなわち、ユーザがタブレット端末を把持して利用する際に、その距離を大きくに変化させることはない想定する。以上の仮定を踏まえて、ユーザの視点とタブレット端末の移動による運動視差の分類を表 1 の左側に示す。ユーザの視点とタブレット端末の移動の種類によって、ユーザの視認する運動視差は変化する。そのため、運動視差を移動の種類で分類することにより、ユーザの奥行き知覚に対して有効な動かし方を解析する。

表 1 の概略図を図 2 に示す。図 2 の記号は図 1 に対応している。タブレット端末の移動の種類として回転と並進、静止が想定される。ここで、ユーザの視点とタブレット端末との距離は一定であると仮定したため、ユーザの視点移動に合わせてタブレット端末も一定距離で移動する。従って、ユーザの視点移動が円弧の時にタブレット端末は回転し、直線状の移動の時にはタブレット端末も平行移動する（図 2 (a),(b)）。(c) ではユーザの視点が円弧に移動しているが、タブレット端末は静止している。

次に、ユーザの視点は静止してタブレット端末が移動している (d) と (e) について説明する。タブレット端末が移動した時でもユーザの視点から見て幾何学的整合性が

とれるように p' は提示されることになるため、運動視差による奥行き知覚は得られない。また、タブレット端末とユーザの視点の両方が移動しない場合については、移動するものがないため視差は発生しない。

従って、運動視差を発生させるユーザの視点とタブレット端末の移動は (a), (b), (c) の 3 つが挙げられる。一方で、ユーザの視点移動が発生しない場合でもユーザに空間知覚を与えられる可能性がある。Dichigans ら [5] の実験により、自分自身が移動しない場合でも視覚情報によって自己移動感覚は発生すると確認されている。このことから、ユーザの視点の移動がない場合でもタブレット端末のディスプレイの映像に見かけの変化を与えることで、ユーザに自己移動感覚を発生させて運動視差に近い知覚を得られるのではないかと期待できる。この見かけの変化を本研究では拡張運動視差と呼称する。タブレット端末を動かすことで仮想カメラの視点を操作し、この仮想カメラから得られる不可視物体の映像をユーザに提示する。これにより、ユーザの視点が静止している場合でも不可視物体の奥行き知覚を与えられると推測する。

拡張運動視差の分類を表 1 の右側に示す。ここで、拡張運動視差を提示する際のユーザの視点とタブレット端末の移動の種類は、表 1 の (d),(e) に相当する。

拡張運動視差を提示する仮想視点の移動を図 2 の (f), (g) に示す。仮想カメラをタブレット端末から一定の位置に設定することで、(a) のユーザの視点のように仮想カメラの視点が移動する。(g) も同様に、仮想カメラは (b) のユーザの視点のように移動する。

3.3 運動視差の影響の解析手法

本節では、本研究の目的であるユーザの奥行き知覚に運動視差が与える影響の解析手法を説明する。解析するにあたり、表 1 で分類した運動視差と拡張運動視差の比較を想定する。表 1 の (a), (b), (c), (f), (g) を比較する。5 つの手法に対して、ユーザの不可視物体に対する奥行き知覚の測定とユーザの嗜好に関する主観評価実験を行う。

実世界でのユーザの奥行き知覚を測定するため、不可視物体と同じ位置においた対照物体をユーザに直接視認させる。対照物体は不可視物体と同じ形状のものを用意する。タブレット端末上には不可視物体の CG を提示し、対照物体と同じ見え方になるよう CG の位置を奥行き方向に操作する。操作後の CG の奥行き値を測定することにより、ユーザの直視による奥行き知覚と比較する。実験でのユーザの視点とタブレット端末のディスプレイ、直視物体、不可視物体の配置は図 5 に示す。

この測定手法と共に、利用しやすい手法と負担の小さい手法についての質問を一对比較による主観評価実験で行う。これにより、ユーザの不可視物体に対する奥行き

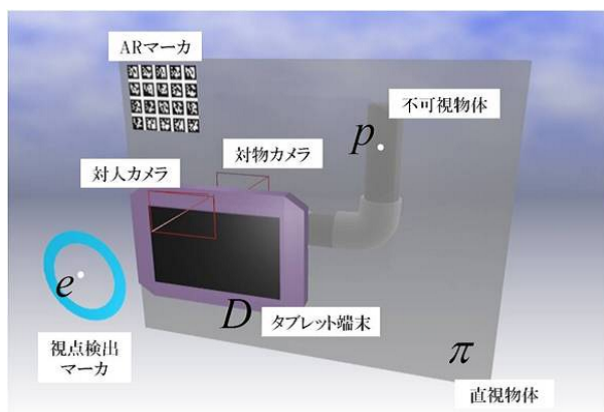


図3 タブレット端末を用いたシースルービジョンのシステムの全体像

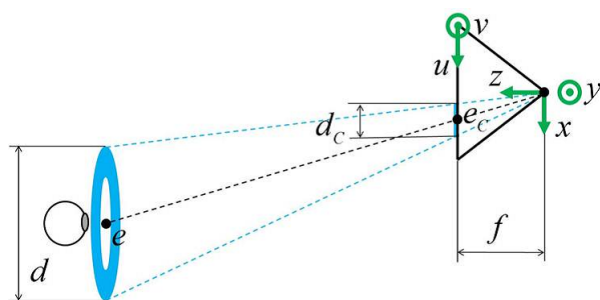


図 4 視点検出マーカを用いたユーザの視点位置推定手法

知覚とユーザにとって利用しやすい手法を解析する。

4. システム概要

4.1 システムの全体像

図3にシステムの全体像を示す。システムの要素としては、ユーザの視点位置を検出するための視点検出マーカとタブレット端末、タブレット端末に装着された2台のカメラ(対人カメラと対物カメラ)、AR(Augmented Reality)マーカが設置された壁状の直視物体、直視物体によってユーザから直視できない不可視物体(パイプ)がある。

タブレット端末と直視物体との位置関係は AR マーカを対物カメラで撮影することで求める．ユーザの視点位置はタブレット端末の対人カメラを用いて求める．詳細を 4.2 で述べる．

4.2 ユーザの視点位置の推定

ユーザの視点位置を推定するために、円環で単色の視点検出マーカを用いる。

視点検出マーカを用いたユーザの視点位置推定の手法を図4に示す．ここで e は視点検出マーカの中心であり，視点検出マーカは対物カメラの画像平面に対して少なくとも1つの軸が平行であると仮定する．また，視点検出マーカは特定色抽出によって対物カメラの映像から二値化画像として得られるものとする．これにより，二値化画像に対して楕円フィッティングを行うことにより，対物カメラの画像平面の座標系でのマーカの中心位置 e_C と

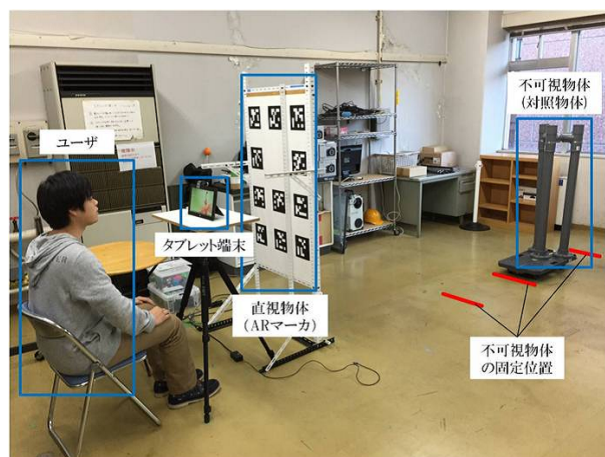


図 5 評価実験の環境

マーカの直径 d_G を推定することができる.

対人カメラの焦点距離 f とマーカの直径 d を既知とすることで，ユーザ視点の三次元位置を推定する．

5. 評価実験

表1で分類した(a),(b),(c),(f),(g)について, その手法によって提示される映像での奥行き知覚と, ユーザが直接視認したときの奥行き知覚を比較することで解析を行う. また, 手法毎のユーザの嗜好を主観評価実験によって明らかにする.

5.1 実験環境

評価実験を行った環境を図5に示す。この環境で、ユーザは直視物体と対照物体に対する運動視差を直接視認できる。対照物体が直視物体で隠された場合、不可視物体となる。タブレット端末のディスプレイで不可視物体のCG映像の見かけの変化が視認できる。これにより、ユーザは直接視認できる対照物体とディスプレイに提示された不可視物体のCGとの比較が可能となる。

運動視差の奥行き感度は10mまで一定で、それ以降は奥行きにつれて低下する[6]。また、運動視差の奥行き弁別閾は単位時間あたりに発生する視差量に依存し、個人差はあるが最適値は3～10°/秒である[6]。これをもとに、本実験ではユーザの視点位置が1秒で0.5m移動すると仮定し、視差量が約9.5°と5.7°となる3.0mと5.0mをユーザの視点位置から不可視物体までの距離に設定する。また、2つの視差量の中間の7.6°となる3.8mも用いる。

本実験で使用したタブレット端末 (Surface Pro) の仕様は CPU が Intel Core i5 1.7 GHz で、ディスプレイは 10.6 inch, 1920×1080 pixel である.

以上の機材を用いてシースルービジョンのシステムを実行したところ、平均 15 fps 程度で動作した。

5.2 予備実験

ユーザ毎の対照物体に対する奥行き知覚について調査

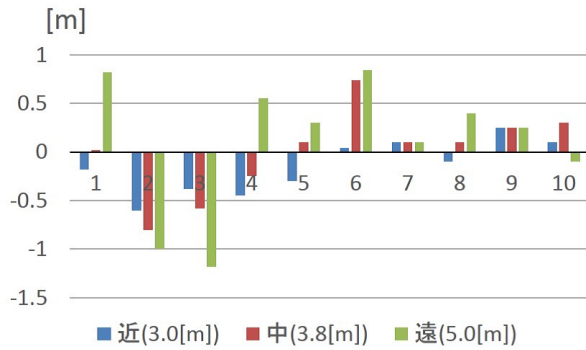


図 6 ユーザの奥行き知覚と実際の距離との差

を行った。実験は図 5 に示す環境で行った。この実験では、ユーザが不可視物体 (対照物体) を直視した際の奥行き知覚について、ずれほどの程度であることを明らかにすることが目的である。この実験は 22～26 歳の男性 10 名に対して行った。

ユーザの座る位置はタブレット端末を把持したときに最も負担が小さい地点とした。ユーザの座る位置に個人差を認めたため、ユーザの視点とタブレット端末の間の距離に個人差が生じた。そのため、ユーザの視点とタブレット端末の間の距離を測定し、環境に固定されたタブレット端末から対照物体までの距離に足し合わせたものを、ユーザの視点から対照物体までの距離を真値とした。

真値とユーザが対照物体を視認した際の奥行き知覚との差を比較するために、ユーザの視点からタブレット端末までの距離、並びに直視物体までの距離を知らせ、ユーザが対照物体を視認することで知覚された距離を答えさせた。この時のユーザの視点から対照物体までの距離を知覚距離とする。

知覚距離と真値との差をユーザ毎に示したグラフを図 6 に示す。横軸の数値はユーザの ID であり、ID に対して 3 種類の対照物体までの距離を表している。縦軸は知覚距離と真値の差を表しており、正の値はユーザが対照物体を真値より奥に知覚していることを表している。グラフより、どのユーザも対照物体までの距離が遠くなるほど差が大きくなる傾向が見れた。ユーザによって個人差があるが、一番大きい差で 1m 程度となった。従って、この環境ではタブレット端末のディスプレイを介さなくてもユーザによっては 1m 程度の奥行き知覚の誤差があると判明した。

5.3 評価実験

ユーザの視点とタブレット端末の移動で分類した (a),(b),(c),(f),(g) の手法の比較を行った。具体的には予備実験と同様に、手法毎にユーザの視点から不可視物体の CG までの距離を測定し、知覚距離との差を取ること

質問1: (a)と(b)でCGの位置がわかりやすい手法はどちらですか。
質問2: (a)と(b)で負担を感じない方はどちらですか。

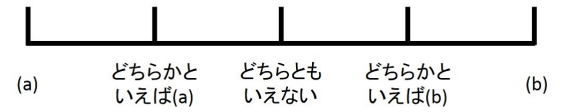


図 7 主観評価実験の質問

観評価を行い、手法毎のユーザの嗜好を調査した。ユーザの嗜好として、どちらが不可視物体の位置がわかりやすいかと、どちらが手法による負担を感じないかを 5 段階で評価した。主観評価にはシェッフェの一对比較法 [7] を利用した。これにより、手法毎の相対的な評価を行うことができる。図 7 にユーザの嗜好について調査するアンケート項目について示す。実験は 22～26 歳の男性 10 名に対して行った。

図 8 に (a), (b), (c), (f), (g) の 5 つの手法において、ユーザが視認する不可視物体の運動視差とタブレット端末のディスプレイに提示された見かけの変化との、奥行き知覚の差を示したグラフを示す。このグラフは縦軸が測定値と知覚距離の差を表し、横軸の数値はユーザの ID である。また 1 つの ID に対して 5 つの手法を横並びに示している。また、全ユーザの平均のグラフを図 9 に示す。このグラフから、ユーザが直接不可視物体を視認した場合の奥行き知覚に最も近いのは (b) であることがわかった。また、(a), (c) はほとんど変わらず、(g) に続いて (f) が奥行き知覚をする際に最も困難な手法だと判明した。この結果より、ユーザの視点移動が発生する手法のほうが奥行き知覚が向上するといえる。その理由として、運動視差による奥行き知覚を得る手法のうち、ユーザは視点移動による手法 (b) に慣れていたことが考えられる。また、タブレット端末の移動の種類を比較すると、(f), (g) に比べて (a), (b) のほうが低い数値となるため、ユーザの視点やタブレット端末は平行移動させた方がユーザの奥行き知覚は向上すると推測できる。

次に、シェッフェの一对比較法を用いたユーザの嗜好に関する一对比較の結果について説明する。5 つの手法に対して、不可視物体の位置のわかりやすさを相対的に評価した結果を図 10 に示す。この質問項目に対して分散分析を行った結果、p 値が 0.005 となって有意差が認められた。また、ユーザが負担を感じる手法について評価したグラフを図 11 に示す。これに対する分散分析の結果も p 値が 0.005 となり、有意差が認められた。

5 つの手法を比較した際の不可視物体の位置のわかりやすさについて、図 10 より、(c) がユーザにとって最もわかりやすい方法だとわかった。しかし、図 9 では (b) が最も良い手法となっている。(b) と (c) の差異は、ユーザ

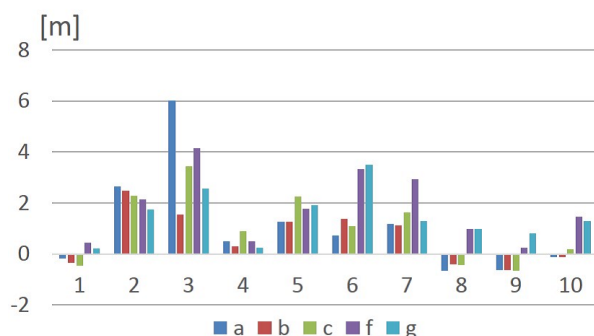


図 8 ユーザ毎の 5 つの手法による奥行き知覚の比較

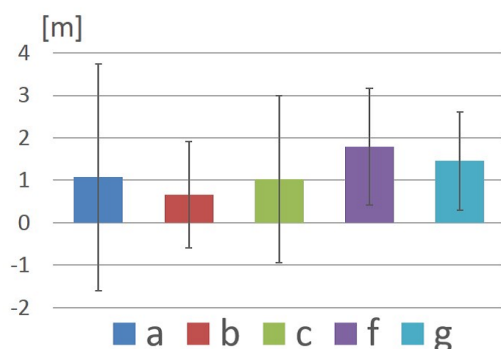


図 9 奥行き知覚に対する 5 つの手法の比較

の視点移動に対して、タブレット端末が平行移動しているが静止しているかである。ユーザの視点とタブレット端末と共に動くより、タブレット端末を静止させて視点だけ移動したほうがディスプレイに提示される映像の変化は大きくなる。実験で用いたシステムの動作周波数は 15 fps 程度であったため、(c) の方が見かけの変化が大きく提示されてしまい、わかりやすいが直視した時の奥行き知覚と少しずれてしまったと推測される。タブレット端末の移動については (a), (f) より (b), (g) が優位であるため、平行移動の方が好まれていることがわかった。これは奥行き知覚の測定と同じように、回転の方が不可視物体にタブレット端末をかざしにくかったからと推測される。拡張運動視差である (f), (g) の両者は他の方法と比較し、不可視物体の位置がわかりにくいことがわかった。これは、ユーザがこれらの手法に慣れておらず、仮想カメラの位置を把握しにくかったからだと考えられる。

ユーザへかかる負担に関しては、図 11 より (c) が最も負担の少ない方法であることがわかった。次いで平行移動に関する (b), (g) となり、回転に関する (a), (f) と続いていた。これはタブレット端末を移動させない静止が最も負担が小さく、次いで不可視物体にタブレット端末をかざしやすい平行移動の評価が高くなったと考えられる。

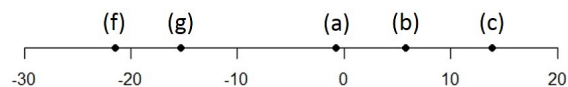


図 10 5 つの手法での不可視物体の奥行き知覚に関する相対評価

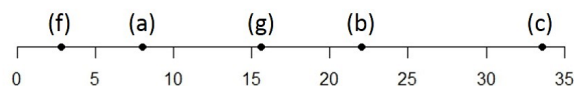


図 11 5 つの手法でのユーザが感じる負担に関する相対評価

6. おわりに

本研究では、タブレット端末を用いたシースルービジョンを実現し、ユーザの視点とタブレット端末が移動する際の運動視差が不可視物体への空間知覚に与える影響について解析した。解析のためにユーザの視点とタブレット端末の移動の種類を分類し、ユーザが視認する見かけの変化に差異をもたせた 5 つの手法を提案した。これらの手法を比較すると、ユーザの視点移動に合わせて運動視差をタブレット端末のディスプレイに提示する手法が好まれることがわかった。その際にタブレット端末を静止させる方法が、提示映像中の物体の位置が最もわかりやすく、かつユーザの負担を小さくする傾向があるとわかった。

今後の予定として、ユーザから直接視認できる直視物体や視認できない不可視物体に移動が生じた場合、ユーザの空間知覚に対してそれらの運動視差がどのような影響を与えるかについて解析することが挙げられる。

本研究は JSPS 科研費 23300064 の助成を受けたものである。

文 献

- [1] B.Avery, B.H.Thomas, W.Piekarski "User Evaluation of See-Through Vision for Mobile Outdoor Augmented Reality," ISMAR, pp.69-72, September 2008.
- [2] M.Tomioka, S.Ikeda, K.Sato, "Approximated User-Perspective Rendering in Tablet-Based Augmented Reality," ISMAR, pp.21-28, October 2013.
- [3] T.A.Furness, "The Super Cockpit and its Human Factors Challenges," Human Factors and Ergonomics Society, vol.30, no.1, pp.48-52, September 1986.
- [4] M.A.Livingston, J.E.Swan II, J.L.Gabbard, T.H.Höllerer, D.Hix, S.J.Julier, Y.Baillet, D.Brown, "Resolving Multiple Occluded Layers in Augmented Reality," ISMAR, pp.56-65, October 2003.
- [5] J.Dichigans, T.Brandt, "Visual-Vestibular Interaction: Effects on Self-Motion Perception and Postural Control," Handbook of sensory physiology VIII, pp.754-804, 1978.
- [6] 長田 昌次郎, "視覚の奥行き距離情報とその奥行き感度," 映像情報メディア学会 テレビジョン, vol.31, no.8, pp.649-655, October 1977.
- [7] 佐藤信, "統計的官能検査法," 日科技連出版社, 1985.