

隠蔽物体の透過表現における輻輳に基づく表示制御の視認性評価

北嶋 友喜^{*1} 池田 聖^{*2} 佐藤 宏介^{*2}

Abstract — 我々は手前の物体（隠蔽物体）に奥の物体（被隠蔽物体）を重ねて提示する手法として、輻輳焦点距離に対応する奥行きを強調する手法を提案した。両物体を常時提示する手法と視認性を比較した結果、提案手法の有効性が認められる被験者もいたが、その効果は限定的であった。この実験においては、提示像を注視した際に輻輳焦点距離と水晶体調節距離が一致する光学構成であったため、両物体を常時提示していても両像を容易に分離して視認することができ、提案手法の効果が確認できない被験者がいたと考えられる。本研究では一般的な没入型ディスプレイと同様に、仮想物体の像を見る際に輻輳と調節が一致しない状況下において提案手法の視認性を確認する。具体的には、両眼立体視が可能なビデオシープスルーのヘッドマウントディスプレイを模した試作システムを用いて複数の提示像の模様を見比べる実験をし、提案手法における提示される隠蔽物体像および被隠蔽物体像の分離のしやすさを評価する。

Keywords : 隠蔽表現, 透過表現, 輻輳調節, 視認性評価

1 はじめに

拡張現実感および人工現実感においては実物体と仮想物体、仮想物体と仮想物体間での隠蔽関係を表現し、利用者に両物体の幾何学的情報（構造、配置）と光学的情報（色、模様）を同時に認識させることは重要な課題である。もちろん、こうした状況認識の過程において、特殊な操作や訓練は不要であるべきで、利用者が意図することなく認識できるべきである。また、利用者の頭部位置が制限され、運動視差による手がかりが不足する場合でも認識できることが望ましい。

隠蔽関係の表現手法を大別すると、隠蔽物体と被隠蔽物体を片方ずつ利用者に提示する方式と、両物体を同時に提示する方式が考えられる。前者の例としては、マウスやスイッチ、音声、ジェスチャで提示する物体を切り替えるスイッチング手法が考えられるが、それらの方法は切替の為の専用の動作が必要となり、何らかの作業を妨げてしまうことが考えられる。手による作業を妨げないスイッチング手法として、Blumらは隠蔽物体表面上の注視位置周辺にその位置に対応した被隠蔽物体像を提示する手法を提案した [1]。この手法では、注視していない箇所には隠蔽物体が表示され、注視することによりその部分の被隠蔽物体が現れるため、手を使わずに両像を切り替えることが出来る。しかし、被隠蔽物体しか注視することが出来ず、切替の動作は作業の妨げにならないものの、隠蔽物体を注視する行為を妨げる。

後者の例としては、手前の物体を透過表現することで奥にある物体を表現する透過合成手法が複数あげられる。この種の手法では、隠蔽物体と被隠蔽物体を同

時に視界に入れることができ、切り替えを行わないため作業を妨げることはないが、問題は両者を視認しやすいか否かであり、全画素に対して一定の透過率を割り当ててブレンドする単純な手法では、両像の位置関係や模様を視認することは難しい場合がある。これに対して両像を透過合成する上で、局所領域毎に透過率を変える手法 [2-6] が提案されている。これらの手法では、物体画像のエッジ [2, 5] や顕著性 [3, 4] を考慮し、被隠蔽物体を隠蔽物体に重畳することで隠蔽物体の存在と前後関係が認識しやすくなる。隠蔽物体自体の模様は単純なものでなければならず、詳細な認識も難しい。隠蔽物体および被隠蔽物体の模様を同時に視認しやすくなるため、隠蔽物体と被隠蔽物体の視認性のバランスを調節可能にした合成手法も提案されている [6]。しかし、これらの透過合成手法では両物体が複雑な模様を有する場合や多くの層状に重なる物体を表現する場合には、視覚マスキング効果 [7] の影響を強く受け、個々の物体を視認することが難しくなる。

運動視差 [8]、両眼視差 [9] の奥行き手がかりを与えることで、両物体の視認の正確性が向上することが確認されており、通常この効果を利用することが出来る。しかし、利用者の頭部位置が制限される場合では運動視差の効果を得ることはできず、また極めて複雑な模様を有する物体を表現する場合には、両眼視差による奥行き手がかりを得ること自体が難しい。

我々は、これまでに提示切替の専用動作が不要で、隠蔽物体と被隠蔽物体の双方の視認性を考慮した隠蔽表現手法として、利用者の輻輳に応じて提示物体の切り替える手法を提案 [10] し、隠蔽物体と被隠蔽物体を常時提示する手法と比較して視認性がより高いことを少数の被験者において確認した。しかし、一部の被

^{*1}大阪大学基礎工学部

^{*2}大阪大学大学院基礎工学研究科

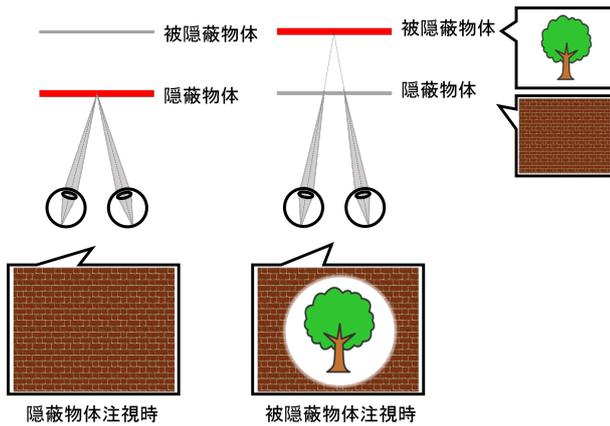


図1 輻輳に基づく表示制御
Fig.1 proposed method.

験者では効果が逆転するなど提案の方がユーザビリティが高いとする仮説に反する結果も複数得られた。これは、実験装置において被験者が提示像を注視した際に輻輳焦点距離と水晶体調節距離が一致するという、一般的な没入型ディスプレイとは異なる光学条件であり、両物体を常時提示していても容易に分離して視認することが出来たことが一要因として考えられる。

本稿では、物体提示面において輻輳焦点距離と水晶体調節距離が異なる没入型のディスプレイの内、ビデオスルー型のディスプレイを想定した光学条件の下で、いくつかの改良を加え提案手法の有効性について議論する。この光学条件下では、調節による奥行き手掛かりが少なくなり、両物体像を常時提示する手法において提示像の分離が不当に簡単化されなくなると考えられる。隠蔽物体と被隠蔽物体の双方の像を比較するタスクにより提案手法と常時提示手法を比較する。

2 輻輳に基づく隠蔽物体の透過表現法

2.1 輻輳に基づく表示制御

図1に提案手法における、利用者の輻輳焦点距離と提示される像の関係を示す。提案手法では、左図中のように隠蔽物体面を注視する場合には被隠蔽物体を抑制して表示する。被隠蔽物体面を注視するように輻輳焦点距離を変化させ、事前に決めた一定の閾値を超えた場合に、被隠蔽物体を提示する [1]。輻輳焦点距離は視線検出器によりセンシングする。ノイズ、及び瞬目データ除去のため 300 ミリ秒の視差データを $L_1 - L_2$ 型カーネルを用いた M 推定により移動平均することで時刻 i における瞬目を含まない輻輳焦点距離 F_i を得る。

提案手法では切替操作のために、奥行きの手掛かりがない位置へ輻輳焦点距離を変化する必要がある。輻輳の動きを意識して変化させることが難しい利用者

は提案手法を利用することで提示切替に時間がかかる問題があるため、次に述べる焦点合わせのためのガイドを強調表示された物体と共に提示する。

2.2 焦点合わせのためのガイド表示

焦点を合わせやすくするガイドは、隠蔽物体と被隠蔽物体の一方の物体を注視している際に、もう一方の物体が存在する奥行きを示すための手がかりとなるパターンである。このガイドは提示物体の視認性を下げることのないものを選択しなければならない。実験では、最も単純な手法として利用者が注視していない方（抑制された方）の物体位置にドットを表示する。ドットは物体に対して十分小さく、視認性を低下させるものではない。

2.3 切り替えのための閾値決定方法

提案手法では、提示物体像の切り替えのために輻輳焦点距離の閾値を事前に決定しておく必要がある。単純には両物体提示面間の中央に輻輳焦点距離の閾値を設定する方法が考えられるが、目の輻輳、開散運動のしやすさは人によって異なり、中央に設定した閾値では切り替えづらくなることがあるため、予めセンシングされた輻輳焦点距離 F_i から最適な閾値を算出する。具体的な決定方法は、まず提示する物体提示面を 5 秒ごとに自動的に交互に切り替え、提示された物体像を注視するよう被験者に指示する。提示物体面の切り替えを 6 回繰り返した結果、物体像を切り替えたタイミングと被験者の輻輳焦点距離が記録された時系列データを得る。

具体的には被隠蔽物体が強調表示されている時に 1、そうでないときに 0 で示される提示位置 S_i を用いて、次の評価値 $E(th)$ が最小となる閾値 th を実験では使用する。

$$E(th) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |M_i(th) - S_i| \quad (1)$$

ただし、 n は全フレーム数で、 $M_i(th)$ は以下とする。

$$M_i(th) = \begin{cases} 1 & F_i \geq th \\ 0 & F_i < th \end{cases} \quad (2)$$

3 視認性評価実験

視線検出機能を有する没入型ディスプレイを模した装置を構築し、隠蔽物体と被隠蔽物体を常時提示する手法（常時提示型）と提案手法を比較するユーザスタディを実施した。実験を行うにあたって、輻輳焦点距離と水晶体調節距離が一致しない条件下において、提案手法の物体を認識するためにかかる時間が常時提示型と比較して短い、という仮説を立てた。

本章では、まず実験装置について説明し、次いで被験者によるユーザスタディの詳細を示す。

北嶋他：隠蔽物体の透過表現における輻輳に基づく表示制御の視認性評価

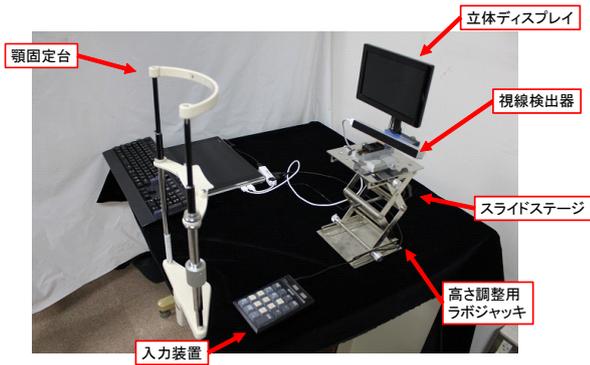


図2 実験装置
 Fig. 2 Experimental system overview.

3.1 実験装置

図2に示す実験装置は、タブレット PC (Intel Core i7 2.6GHz, 8.0GB), 視線検出器 (The EyeTribe, サンプリング周波数 30Hz), 裸眼ステレオディスプレイ (IO-DATA Rock Vision 3D, 800 × 480 画素, パララックスバリア方式), ディスプレイ位置調整用のラボジャッキ (ワーゼフ ラボジャッキ SUS304), スライドステージ, テンキーキーボード (Buffalo BTKU2H02), 顔面固定器具 (はんだや HE-284) からなる。

本実験装置において、利用者がステレオディスプレイに表示された視差画像を見る場合には、水晶体調節距離はディスプレイの表面に固定され、輻輳焦点距離は視差に応じた奥行きとなる。ステレオディスプレイに視差を付加せずに画像を提示すると、輻輳距離と調節距離が一致し、視差を付加して提示すると、両距離は一致しない。そのため、仮想物体提示に関しては両距離が一致せず、実物体提示に関しては一致する光学シースルー型ディスプレイに近い光学条件を作ることができる。また、全ての提示物体に対し両距離が一致しないビデオシースルー型ディスプレイ利用時と同じ光学条件にすることもできる。本実験は、ビデオシースルー型ディスプレイ利用時を想定した光学条件で行った。具体的には、隠蔽物体面をステレオディスプレイの表面から被験側に 25mm ずらした位置に、被隠蔽物体面を表面から奥に 150mm ずらした位置にあるように視差を付加して被験者に提示した。ステレオディスプレイに対する被験者の頭部位置は、顔面固定器具により固定し、クロストークを最小限にするため、スライドステージによりディスプレイ位置を前後左右に微調整した。

3.2 被験者

実験には、著者らの研究室の学生 9 名が参加した。本実験では、実験装置において視線検出に問題がなく

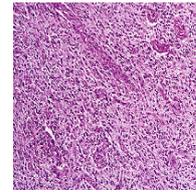


図3 評価実験に使用した隠蔽物体/非隠蔽物体用画像 (病理コア画像より)
 Fig. 3 Target image.

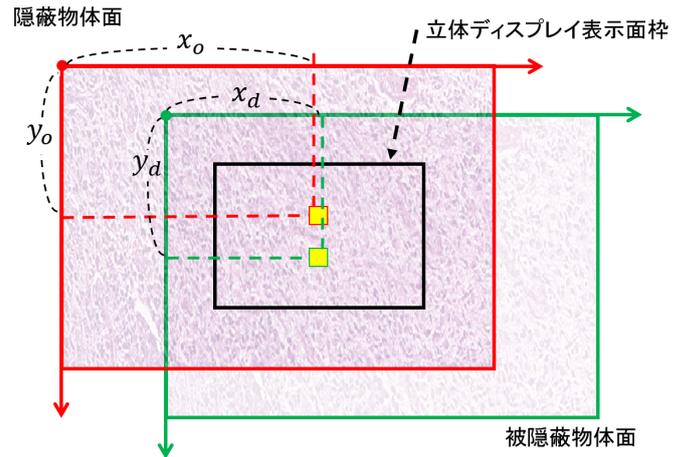


図4 両像, マーカの提示位置
 Fig. 4 Target images and markers.

立体視が可能な被験者を対象とするため、視線検出器のキャリブレーション後の閾値決定テストにおいて、評価値 $E(th)$ が 20% 以下の 7 名を対象とした。また、7 名の被験者に対して 2 分程度の提案手法の練習した結果、提案手法による物体切替が行うことができなかった 3 名の被験者は、タスクを行うことなく実験を終了した。

提示切替を任意に行う事ができた被験者 A-D (21 歳から 23 歳) の内、B, C, D が屈折異常を持っていたが、視力矯正することで提示画像の視認ができ、正常に視線検出ができた。

3.3 評価手法

被験者に異なる視差を付けて提示された隠蔽物体像と被隠蔽物体像の二つの立体像の模様を見比べて、二択の回答をさせるタスクを教示し、タスクにかかる時間と、回答の正誤を評価事項とした。

具体的には、図3に示す同一の画像を異なる視差を付けて二つ提示する。被験者は、それぞれの提示像に重ねられた黄色く点滅する点 (マーカ) の周辺の模様を見比べる。各マーカと各像との位置関係が一致するかどうかを判定し、手元の入力装置を用いて回答する。図4に両像とマーカの位置関係例を示す。両提示像上の

各マーカの位置 $\mathbf{v}_o = (x_o, y_o)$, $\mathbf{v}_d = (x_d, y_d)$ は、一致している場合と ($\mathbf{v}_o = \mathbf{v}_d$) と不一致の場合 ($\mathbf{v}_o \neq \mathbf{v}_d$) があり、それぞれ等確率でランダムに決定する。マーカのディスプレイ面上の座標は固定とし、マーカと物体像の相対位置を変化させる。ただし、位置が僅かにずれている場合などの判別し難い表示を避けるために、隠蔽物体像と被隠蔽物体像の位置関係は模様を視認できれば判別できる一定の範囲に ($30 > |\mathbf{v}_o - \mathbf{v}_d| > 20$) 制限した。被験者には、マーカ周辺の模様をできるだけ詳細に見比べてもらうために表示位置の制限に関することは伝えていない。上記タスク 20 回を両手法について行い、タスクは可能な限り早く正確に行うように指示した。疲労を避けるため 20 秒の時間切れを導入し、20 秒以内に回答がなければ、誤答とみなし、次の画像位置へと自動的に変わる。また本タスクにおいては、点滅するマーカが提案手法におけるドット型のガイドと同じであるため、マーカによりガイドの機能を兼ねることとし、別途ガイドは提示しなかった。両手法の差の検定には Welch の t 検定を用いた。被験者のグループを 2 組に分けて、提案手法と比較手法の評価実験の実施順序を変えて、実施順序による影響を相殺した。

実験全体は、装置の校正、タスクと両手法の教示、練習、タスクの順に行い、それぞれ 7 分程度を要し、合計約 30 分を要した。実験後、視認性に関するコメントを収集した。

3.4 実験結果

全被験者の平均タスク達成時間 (平均 ± 標準偏差) は提案手法で 7854 ± 3694 ms, 比較手法で 9898 ± 2926 ms であった。提案手法が比較手法に対し有意 ($\alpha = 0.01$) に短かった。正答率はそれぞれの手法で 0.65, 0.94 となった。

図 5 は、全タスク回数 n に対する時間 t 内の回答数の割合 (以下、累積回答率) $F_t = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^t (C_t + W_t)$ と、全タスク回数 n に対する時間 t 内の正答数の割合 (以下、累積正答率) $G_t = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^t C_t$ を、全被験者の総計 (図 5(a)) 及び、被験者別 (図 5(b)-(e)) に示したものである。ただし、正答数を C_t , 誤答数を W_t とする。

表 1 タスク達成時間と正答率
Table 1 Task completion time and success rate.

被験者	常時提示型		提案手法	
	時間 [ms]	正答率	時間 [ms]	正答率
A	11396 ± 3711	0.60	7729 ± 3246	0.95
B	7530 ± 2240	0.75	7373 ± 2202	1.00
C	10938 ± 3179	0.60	8738 ± 2969	0.90
D	10289 ± 4542	0.65	7637 ± 3273	0.90

グラフより、どの時間においても提案手法における累積正答率が高いことが分かる。また、5 秒-10 秒にかけての累積正答率の変化に比べて 10 秒以降の変化は少なく、おおよそ飽和している。

各被験者の平均タスク達成時間、正答率を表 1 に示す。各被験者において提案手法のタスク達成時間は短く、正答率が高い。いずれも常時提示型では 8 割未満の正答率で、提案手法においては 9 割以上の正答率であった。また、各被験者のグラフからは、両手法が飽和し始める時間や立ち上がり時間に関して類似していることが分かる。以下に示す自由コメントを頂いた。いずれも常時提示型に関するコメントであった。

- 常時提示型において提示像を分離して見ることが難しかった。(全被験者)
- 常時提示型において物体像の判別ができないために一部粗雑に回答した。(A, C)

4 考察

全被験者の平均タスク達成時間においては、提案手法が常時提示型に比べて有意に短かった。物体の模様を認識するために二枚の立体像を切替ながら見比べるタスクでは、提案手法において、比較手法に比べ提示像の切り替えに関する時間が余計に必要であるため、両手法で提示像の認識にかかる時間が同じであるとすれば、提案手法におけるタスク達成時間は比較手法に比べて大きくなるはずである。しかし、提案手法におけるタスク達成時間が短い結果から、提案手法における提示像の認識にかかる時間は比較手法に比べてさらに短いことが言え、今回用いた提示画像に関しては仮説は確認された。

提案手法を用いた場合に常時提示型と比較して、より物体を正確に視認できると予想した。これについて常時提示型における視認の正確さが低いことを示す正答率と、複数のコメントが得られた。常時提示型においてはタスク時間は提示像を注視する時間と等しい。提案手法と比べて平均タスク達成時間が長いものに関わらず、正答率が 7 割以下であり、提案手法の正答率よりも低い。さらに、分離が難しいという被験者全員からの意見や、そのために粗雑に回答したというコメントからも、常時提示型において物体の認識が結像そのものが、困難であったと推測される。このことから、物体の認識の正確性について提案手法が優れているといえる。

グラフの時間が短い間では提案手法における切替時間が生じるため、比較手法に比べて提案手法の累積正答率が低くなり、時間が長くなるにつれて、提案手法の視認性が高いため、比較手法に比べて高くなると予想

北嶋他：隠蔽物体の透過表現における輻輳に基づく表示制御の視認性評価

した。しかし予想に反し、全被験者総計グラフにおいて両手法の線は交じることがなく、提案手法における累積正答率が常に高い結果となった。この結果は、常時提示型において提示像の認識に時間がかかり、常時提示型のグラフの立ち上がりが遅れたと考えられる。認識の時間がかかった要因としては、提示像の視認性が予想以上に低かったことが考えられる。

視線検出が動作するにもかかわらず、物体像に輻輳焦点距離が一致している状態で、ガイドを用いても、奥/手前を見ようとする動作が出来ない、もしくは極端に時間がかかってしまい、提案手法を用いることができなかった被験者が3名いた。この原因を、実験装置における立体視時のクロストークの発生、又は提示した画像が持つ性質と考えており、現在調査している。

5 まとめと今後の課題

本研究では、隠蔽物体の透過表示を行う際の切り替えの動作が作業を妨げる点と、物体の視認性が損なわれる点の二つの課題を解決する方法として、利用者の輻輳に応じて提示物体の切り替えを行う表示制御手法を提案した。輻輳焦点距離と水晶体調節距離に関して没入型ディスプレイを利用した場合と同じ光学条件を再現する実験装置を用いて、視認性の評価実験を行い、常時物体を提示する手法と比較して提案手法が物体認識がしやすく、より正確に物体を認識できる場合があることを示した。想定する実利用するシーンでは、タスクを行うための時間が重要となる場合、タスクの正確さが重要となる場合が考えられるが、そのどちらの状況においても提案手法が比較手法に比べて有効である可能性がある。今回の実験では、提示される像が極めて視認しにくい状況を想定し、一枚の画像のみを用いたが、提示像を変化させることで比較手法が有効となる状況も考えられる。今後、提示像を複数試すことで提案する手法が有効となる状況を明らかにしていく。

また、提案手法を用いて任意に提示切り替えを行うことができない被験者が複数確認されたが、その利用者に対して、原因を調査し、焦点合わせのガイドを、より被験者の輻輳を誘導する効果が高いと考えられるアニメーションを用いるものや、視認と二重像の結像が認識し易い画像にすることで解決する。タスクに参加した被験者においても、ガイドの効果の向上により被験者の負担を減らすことができると考えられる。

参考文献

[1] T. Blum, R. Stauder, E. Euler, and N. Navab. Superman-like X-ray vision: Towards brain-computer interfaces for medical augmented reality. In *Proc. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 271–272, 2012.

[2] B. Avery, C. Sandor, and B. H. Thomas. Improving spatial perception for augmented reality x-ray vision. In *Proc. IEEE Virtual Reality*, pp. 79–82, 2009.

[3] C. Sandor, A. Cunningham, A. Dey, and V. V. Mattila. An augmented reality x-ray system based on visual saliency. In *Proc. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 27–36, 2010.

[4] D. Kalkofen, E. Veas, S. Zollmann, M. Steinberger, and D. Schmalstieg. Adaptive ghosted views for augmented reality. In *Proc. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 1–9, Oct 2013.

[5] D. Kalkofen, E. Mendez, and D. Schmalstieg. Interactive focus and context visualization for augmented reality. In *Proc. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 1–10, 2007.

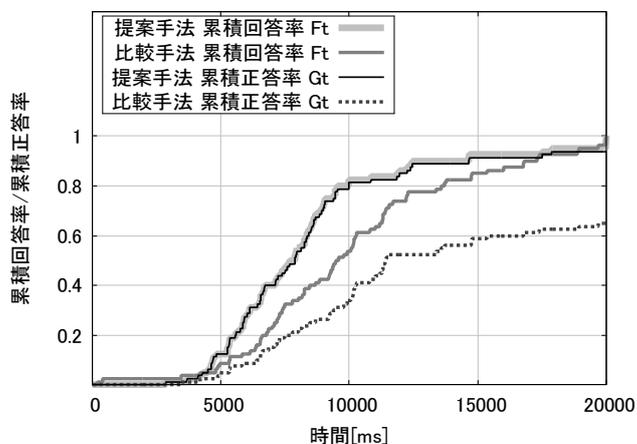
[6] T. Fukiage, T. Oishi, and K. Ikeuchi. Visibility-based blending for real-time applications. In *Proc. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 10–12, 2014.

[7] G. E. Legge. and J. M. Foley. Contrast masking in human vision. *Jour. of the Optical Society of America*, Vol. 70, No. 12, pp. 1458–1471, 1980.

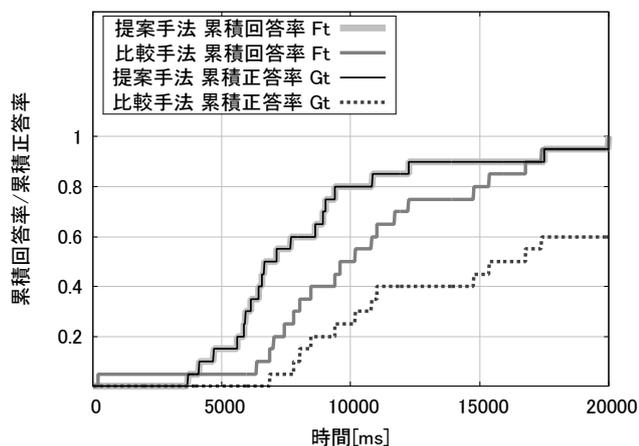
[8] J. M. L. Martin and P. Martijn. Stereoscopic segregation of transparent surfaces and the effect of motion contrast. *Vision Research*, Vol. 38, No. 5, pp. 659 – 668, 1998.

[9] D. P. Stephen, A. Magnus, and Stephen R. E. Objective and subjective assessment of stereoscopically separated labels in augmented reality. *Jour. Computers & Graphics*, Vol. 33, No. 1, pp. 22–33, 2009.

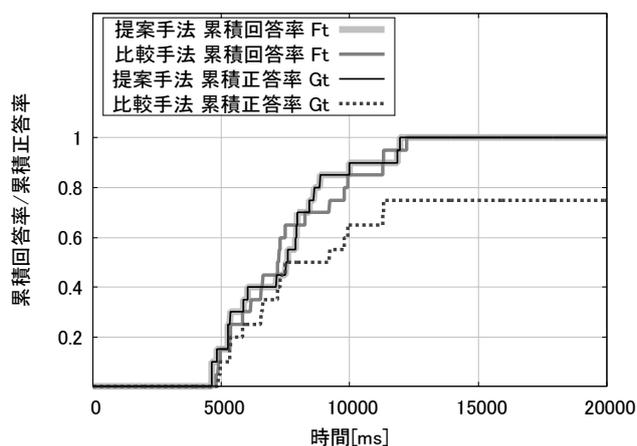
[10] 池田聖, 佐藤宏介. 注視動作反応型 x-ray vision. 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 第33B巻, pp. 541–544, 2014.



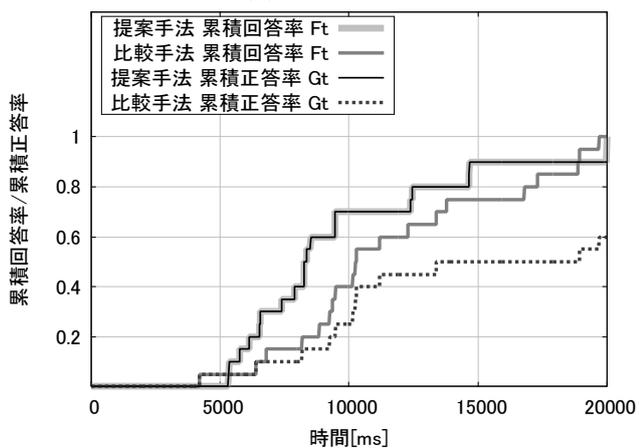
(a) 全被験者総計



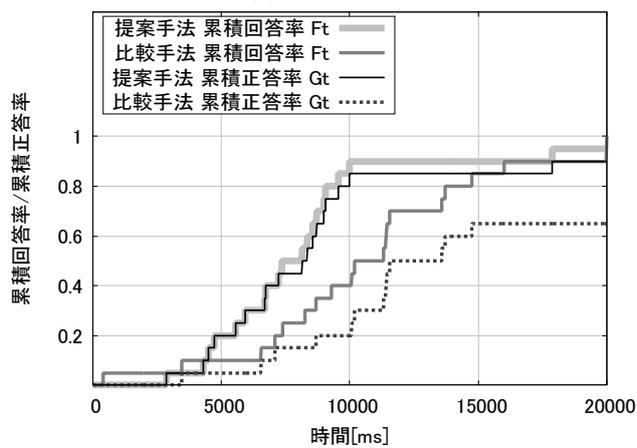
(b) 被験者 A



(c) 被験者 B



(d) 被験者 C



(e) 被験者 D

図5 視認性比較実験結果
 Fig.5 Experimental Results