

回転偏光フィルタにより情報の可視性を制御する テーブルトップ型ディスプレイ

櫻井 智史^{†1} 北村 喜文^{†1}
スリラム サブラマニアン^{†2} 岸野 文郎^{†1}

回転偏光フィルタによる情報可視性の制御手法を応用し、複数のユーザに対して異なる可視性で情報を提供するテーブルトップ型ディスプレイを提案する。本ディスプレイは、テーブル内部に設置されたプロジェクタからテーブル面へ投影される情報を、テーブルの周囲に立つ複数のユーザに対して、立ち位置などに応じて異なる輝度で同時に観察させることができる。さらに、あるユーザから観察される情報の輝度は、プロジェクタ前方に設置した偏光板を回転させることで、任意に制御することができる。また、実装したディスプレイを用いた情報提示法の例として、特定ユーザに対する情報の開示と隠蔽の制御、および情報の分類の制御について述べる。そして、アプリケーションの1つであるメディアアート作品「MysteriousPOND」について述べ、提案システムの有効性や今後の展望について考察する。

A Tabletop Display with Visibility Control Using Revolving Polarizer

SATOSHI SAKURAL^{†1} YOSHIFUMI KITAMURA^{†1}
SRIRAM SUBRAMANIAN^{†2} and FUMIO KISHINO^{†1}

We propose a tabletop display system that realizes the visibility control using a revolving polarizer. It allows applications to present information at different arbitrary levels of brightness to each of multiple users by controlling the angle of a polarizer attached in front of a projector. We describe two examples utilizing the implemented system: concealment and classification of information for specific users. Then we introduce an example application “MysteriousPOND” which is implemented as a media art work. Finally, we discuss usefulness and potential feasibilities of the proposed method in realistic cases.

1. はじめに

テーブルトップ型ディスプレイは、複数の人が一堂に集まり、顔を合わせて行う協調作業の場で重要な役割を果たす要素技術として注目を集めている。このようなディスプレイを囲んだユーザは、テーブルトップに表示された情報に対して対等にアクセスでき¹⁰⁾、電子的な情報だけでなく、ユーザ間のジェスチャや相手の存在感などを生かした形での作業をすることができる。そのため、多くの情報提示技術やインタフェースが研究されている²⁷⁾。

一方、複数人が場を同じくして協調作業などを行う際には、すべての情報を全ユーザ間で共有するだけでなく、一部の情報を特定のユーザやグループ間だけで保有することが同時に要求されることも多い²⁾。しかし、通常のディスプレイ上に表示された情報は全ユーザに平等に提示されるため、特定のユーザに限定して情報を提示することが難しい。そのため、いくつかの方法が提案されているが、共有される情報と個人用の情報の関連が希薄になったり、ユーザの視点移動が限定されたりといった制約が大きかった。また、作業を効率的に行うためには、ユーザが注目している情報を強調して表示したり、関連した情報どうしを集めたりして分類することが有効であるが、共有された情報に対して特定のユーザが分類操作を行うと、他のユーザの作業の妨害になる恐れがある。そのため、情報そのものだけでなく、こういった情報分類を特定のユーザに限定して提示するディスプレイを実現すれば、有用なインタフェースとなると考えられる。

そこで本論文では、複数のユーザに異なる可視性で情報を提示するテーブルトップ型ディスプレイを提案する。なお、本論文において、「情報の可視性」とは、可視または不可視の2値のみだけでなく、ユーザに観察される表示情報の輝度に応じた情報の見え方を表している。そのため、回転偏光フィルタを用いた情報可視性の制御手法²⁵⁾を応用する。これにより、ユーザの立ち位置などに応じて、表示情報を異なる可視性で認識させることができる。以下、提案ディスプレイを利用して特定ユーザに対する情報の開示と隠蔽の制御、および情報分類の可視化を実現する方法について述べ、実装したシステムを用いてその実現性を確認する。さらに、アプリケーションの1つである「MysteriousPOND」について述べ、より実用的な場面での応用や今後の課題などについて検討する。

^{†1} 大阪大学
Osaka University

^{†2} ブリストル大学
University of Bristol

2. 関連研究

テーブルトップ型ディスプレイは、顔を合わせて行う協調作業のための中心的な役割を担う技術としてさかんに研究されており、多くのシステムが提案されている^{1),3),7),8),13),14),16),19),26)}。また、これらを利用するユーザの認知や振舞いが調査され^{17),18),21),22)}、システム設計のガイドライン^{11),20)}も提案されている。一般にこれらに表示される情報は、全ユーザが共有すべき共有情報と、特定の個人または数人のみが参照すべき個人用の情報とに分類される。しかし、通常のディスプレイ上では、表示された情報を全ユーザが平等に観察できるため、個人用の情報を扱うことが困難である。

大型の共有ディスプレイを用いる環境では、個人用の情報はPDAなどの小型ディスプレイを併用して利用されることが多い^{6),9)}。しかし、このような状況では、共有情報と個人用の情報のためにディスプレイを複数用意する必要があり、これらディスプレイどうしが物理的に乖離してしまうため、ユーザが情報間の関連性を把握することが困難となることもある。また、あるユーザが個人用の情報を他のユーザに公開するためには、共有ディスプレイが相手ユーザのディスプレイにデータを転送する操作が必要となる。相手ユーザに小型ディスプレイを直接見せることも考えられるが、ユーザやディスプレイの位置関係が変化すると、ディスプレイ間で情報の関連性を保つためには複雑な制御が必要となる。これらのことから、単一のディスプレイ上でユーザごとに適切な情報を与えることが望ましいと考えられる。

単一のディスプレイ面を用いながらも、表示された情報の可視性を観察条件に応じて変化させるディスプレイがいくつか提案されている。Lumisight Table⁵⁾は、方向によって光の透過特性が異なるフィルムをスクリーンとして用いたテーブルトップ型ディスプレイで、テーブルの四方に着座した各ユーザに各々異なる情報を提示できる。しかし、ユーザの視点位置が動くと、他ユーザの情報が重なって表示されてしまう。テーブルトップ型ディスプレイの上方に穴の開いたマスクを設置し、各ユーザの視点が移動することで、個人的な領域と共有された領域を動的に作り出して利用する手法も提案されている²⁴⁾が、利用できるディスプレイ領域は広くはない。また、CRTディスプレイ上に2人分の情報を高速で交互に表示し、それに同期して開閉する液晶シャッター眼鏡をかけた2人のユーザに異なる情報を提示する手法¹⁵⁾では、情報の部分的な可視性の変更など、柔軟な制御を行うことができない。

一方、ディスプレイに多数の情報が表示されている場合、ユーザの作業を支援するため、情報の所有者や属性に応じて、位置や向きで分類して表示することが有効となることが多

い^{4),12)}。しかし、これらの分類表現では動的な情報分類に対応することは難しい。たとえば、複数のユーザが共有ディスプレイ上で異なる意図を持って作業をしている場合などに、あるユーザが情報を探するために共有情報の配置や向きを変えると、他ユーザの妨害になる可能性が大きい。そのため、このような動的な情報分類を特定のユーザまたはグループのみに対して可視化できれば、単一ディスプレイ上で複数人が異なるタスクを行う場などで有効なインタフェースとなりうると考えられる。

これらから、単一面を用い、ユーザの視点位置を限定することなく、複数のユーザに対して異なる可視性で情報を同時に提示できるディスプレイが実現できれば、上記のような問題を解決でき、新たな展開を期待することができる。さらに、共有情報と個人用の情報を同時に表示できる機構を実現するためには、部分ごとに可視性を制御するといった柔軟な制御も必要である。また、可視と不可視の2値的な制御だけでなく、可視性を段階的に制御できれば、特定ユーザだけに情報を分類して表示することもできると考えられる。これらを実現するため、回転する偏光フィルタを用いた可視性制御を、テーブルトップ型ディスプレイに適用する。

3. 提案システム概要

本章では、回転偏光フィルタを用いた情報可視性制御手法²⁵⁾を応用したテーブルトップ型ディスプレイについて述べる。本手法は、光が2枚の偏光板を通過する際に、偏光板どうしの相対角度に依存して減衰するマリユスの法則²³⁾を応用し、複数のユーザに異なる輝度で情報を認識させるものである。提案するディスプレイの概略図を図1に示す。テーブル内部に水平に設置した2台のプロジェクタからPCで生成された映像情報を投光し、鏡で反射させてテーブルトップのディスプレイ面に投影する。このうち1台のプロジェクタ(プロジェクタ1)の前方には、PCからの信号で任意に回転を制御できる回転機構と偏光板を設置する。これは、回転偏光フィルタによる可視性制御²⁵⁾におけるプロジェクタ偏光板に相当する。また、位置センサを取り付けた眼鏡のフレームに偏光軸が鉛直方向となるよう偏光板を設置することで、視点偏光板とする。もう一方(プロジェクタ2)には何も設置せず、直接情報をディスプレイ面へ投影する。底面からスクリーンまでの高さは900mm、スクリーンサイズは1,200mm×900mmである。

なお、プロジェクタは東芝製プロジェクタTDP-TW350(J)(光出力:3,500lumen,解像度:1,600×1,200pixel)を用い、スクリーンは偏光による立体視に利用されるStewart社製Techplex 200を用いる。また、モータには2相ユニポーラ方式、単位角度7.5degの

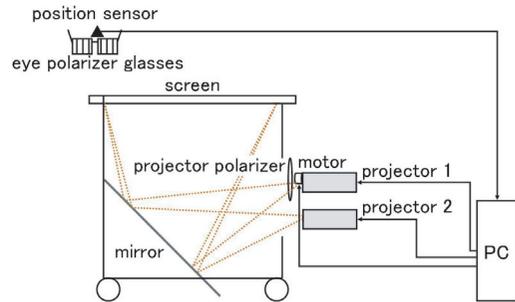


図 1 実装システム概観
Fig. 1 Overview of prototype system.

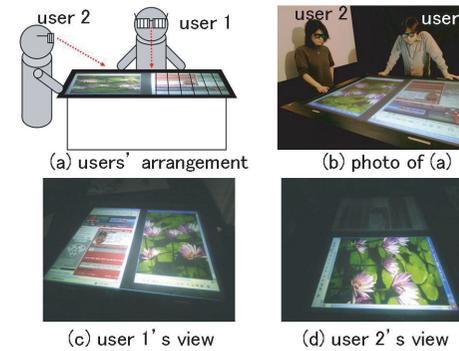


図 2 特定ユーザに対する情報の開示と隠蔽の制御
Fig. 2 Concealment of information from user.

ステッピングモータを用い、モータドライバと PC の通信には RS232C を利用する。位置センサには InterSense 社製 IS-600 Mark II SoniDisc を用いる。

4. 複数ユーザへの情報表示例

本章では、提案システムを用いた情報表示例として、特定ユーザに対する情報の開示と隠蔽の制御、および動的な分類の可視化について述べ、実装システムを用いて、これらの実現可能性を確認する。

4.1 特定ユーザに対する情報の開示と隠蔽の制御

4.1.1 輝度減衰を利用した情報の隠蔽

提案システムは、投影した情報の部分的な開示または隠蔽を制御することができる。その最も単純な例を図 2 に示す。この例では、視点偏光板を装着した 2 人のユーザが、図 2 (a), (b) に示すように互いに直交する位置に立っている。また、プロジェクタ 1 は、プロジェクタ偏光板を通して図 2 (a) に示すストライプと同方向の偏光軸で情報をスクリーン右半面へ投影しており、プロジェクタ偏光板を持たないプロジェクタ 2 は、左半面へ情報を投影している。このとき、ユーザ 1 の位置からは、プロジェクタ 1 からの投影情報と視点偏光板の偏光軸が平行であるため、図 2 (c) のようにプロジェクタ 1 に投影された部分を鮮明に観察できる。しかし、ユーザ 2 の位置からは、プロジェクタ 1 からの投影情報と視点偏光板の偏光軸が垂直であるため、視点偏光板に遮断され、図 2 (d) のようにプロジェクタ 1 からの情報（奥側の半面）は隠蔽されている。また、プロジェクタ 2 から投影された情報はあらゆる偏光成分を持つため、観察位置に依存せず平等に認識できる。ここで、プロジェクタ偏光板を

左または右方向に 90 deg 回転させれば、提示と隠蔽の関係を反転させることができる。すなわち、ユーザ 2 はプロジェクタ 1 の情報を観察できるようになり、反対に、ユーザ 1 は観察できなくなる。これは、一部の情報を特定ユーザに対して開示すると同時に、他のユーザに対して隠蔽しているといえる。また、この例では、眼鏡をかけないユーザはすべての情報を観察することができる。そのため、ユーザが作業に不要な情報を隠しておき、全体を見たいときに眼鏡を外すといったことができる。なお、本論文の写真は、ユーザからの実際の見え方に近くなるようカメラの露出などを設定し、撮影したものである。また、図 2 (a) では偏光方向の説明のためストライプを描いているが、実際にはこれらは表示されない。

4.1.2 ノイズ画像を利用した情報の隠蔽

アプリケーションによっては、裸眼のユーザに対しても情報を隠蔽したい状況が考えられる。提案システムは、2 台のプロジェクタから投光する画像を重畳することで、これを実現できる。図 3 は、視点偏光板を装着したユーザ 1 および 2 と、裸眼のユーザ 3 が互いに直交する位置からスクリーンを観察している状況で、図 4 (a) に示す半面のノイズ画像と図 4 (b) に示す本画像を、プロジェクタ 1 と 2 からそれぞれ投影したときの結果である。図 3 (a) の状況では、図 3 (b), (c), (d) のような観察結果となる。ノイズ画像と視点偏光板の偏光軸が平行であるユーザ 1 および裸眼のユーザ 3 はノイズにより文字 A を観察できない。一方、ノイズ画像と視点偏光板の偏光軸が垂直となるユーザ 2 だけはノイズが遮断され、プロジェクタ 2 から投影された文字 A を観察できる。文字 B にはノイズが重畳されていないため、全ユーザから観察できる。ここで、プロジェクタ偏光板を右または左に 90 deg 回転させる

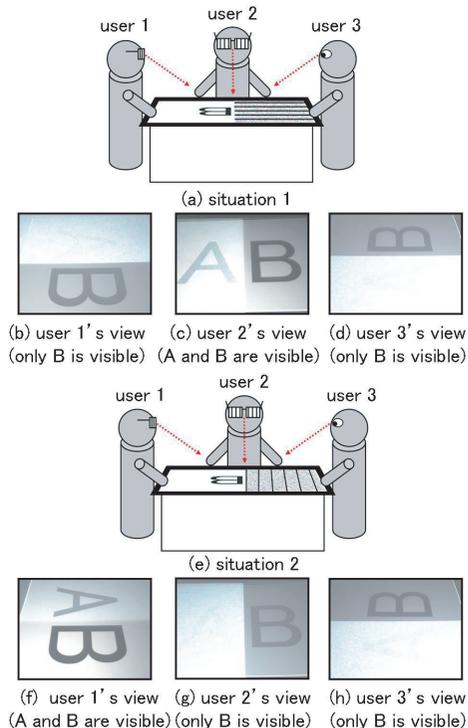


図3 ノイズを併用した例
Fig. 3 Example using noise image.

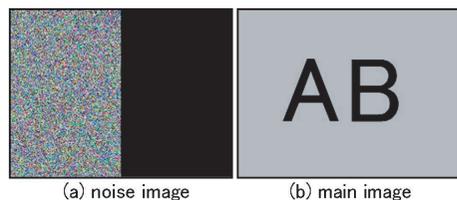


図4 ノイズ画像と本画像
Fig. 4 Noise image and main image.

と図3(e)に示す状況となり、投影情報は各ユーザから図3(f), (g), (h)のように観察される。この状況では、ノイズ画像の偏光軸が90deg回転しており、ユーザ1は文字Aを観察できるが、ユーザ2と3は観察できない。文字Bに関しては、変わらず全ユーザから観察されている。なお、図3において、観察結果はカメラで撮影した画像であるが、ノイズを重畳した部分がほぼ単色となっている。これはノイズの輝度が高く、ピクセルが小さいためであり、人間の目で実際に見た場合はノイズ画像として認識される。

4.1.3 ユーザの視点位置情報を利用した制御

提案システムは、ユーザの視点位置を計測する位置センサからの情報を利用することで、テーブルの周りを移動するユーザに対してつねに情報を開示したり、逆につねに隠蔽したりできる。図5は視点偏光板を装着した3人のユーザ1から3がいる状況で、ユーザ2の視点偏光板に対して、投影情報の偏光軸がつねに平行となるようにプロジェクタ偏光板を制御した場合の観察結果である。なお、この例ではプロジェクタ1からのみ情報を投影している。ユーザが図5(a), (b)のような位置関係のとき、図5(c), (d), (e)に示すように、ユーザ2とその隣に立つユーザ3は投影情報を鮮明に認識することができるが、彼らと直交する位置にいるユーザ1は、投影情報を認識することができない。ここで、静止しているユーザ1と3の間をユーザ2が図5(f), (g)に示す位置に移動すると、投影情報の偏光軸がユーザ2を追うように回転する。このとき、図5(h), (i), (j)のようにユーザ2は変わらず鮮明に情報を認識できるが、静止していたユーザ1と3は輝度の低い情報を認識することとなる。さらに、ユーザ2が図5(k), (l)に示す位置まで移動すると、図5(m), (n), (o)のようにユーザ2と1は鮮明に情報を認識でき、ユーザ3は情報を認識できない状態となる。

図5の例とは反対に、投影情報の偏光軸をユーザ2の視点偏光板に対してつねに垂直になるようにプロジェクタ偏光板を制御すれば、ユーザ2はつねに情報を隠蔽された状態となる。この場合、ユーザ1と3はユーザ2の対面または近くにいれば情報を認識することができず、ユーザ2に対して直交する位置にいれば情報を鮮明に認識することができる。なお、実装システムでは、テーブルの周りのユーザの移動速度は、走った場合でも最大180deg/s程度である。これに対し、プロジェクタ偏光板を回転させるモータの最大回転速度は360deg/s程度であり、ユーザの移動に対して十分な回転速度を有している。

4.2 特定ユーザに対する情報分類の可視化

提案システムは、特定のユーザに対して、プロジェクタ1と2の投影情報の間に輝度差が生じるようプロジェクタ偏光板を制御することで、情報の分類を可視化することができる。

図6(a)のように、視点偏光板を装着したユーザ1と2および裸眼のユーザ3が互いに直

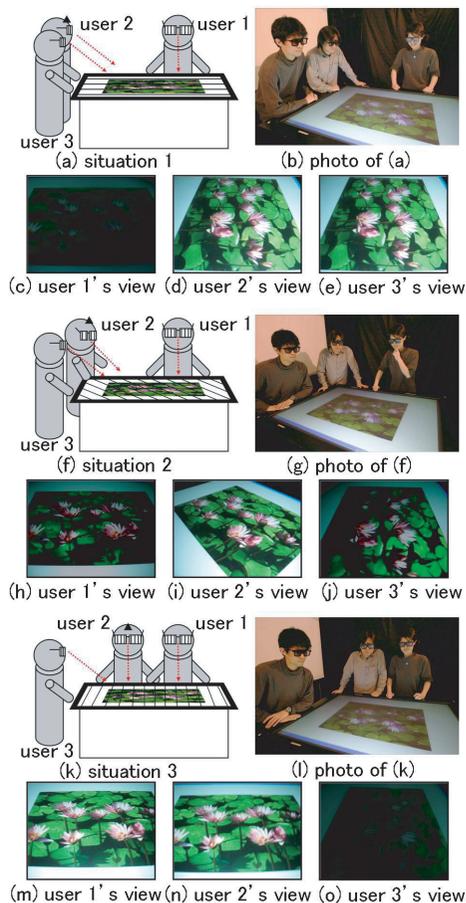


図 5 位置センサを併用した例

Fig. 5 Example using position sensor.

交する位置でスクリーンを観察している状況での例を示す．今，図 6(b) に示す 2 種類の文字 A または B が刻印されたオブジェクトが散在した状況を考える．オブジェクトの形状は円と角が丸くなった正方形の 2 種類であるが，文字または形状でこれらのオブジェクトを一見して分類することは難しい．そこで，これらの情報を，特定ユーザからのみ分類されてい

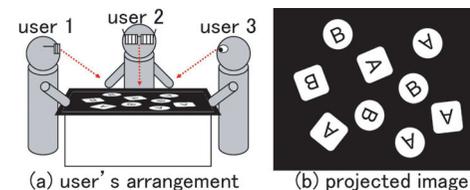


図 6 情報分類の例におけるユーザ配置と投影される画像

Fig. 6 Users' arrangement and projected image in example of classification.

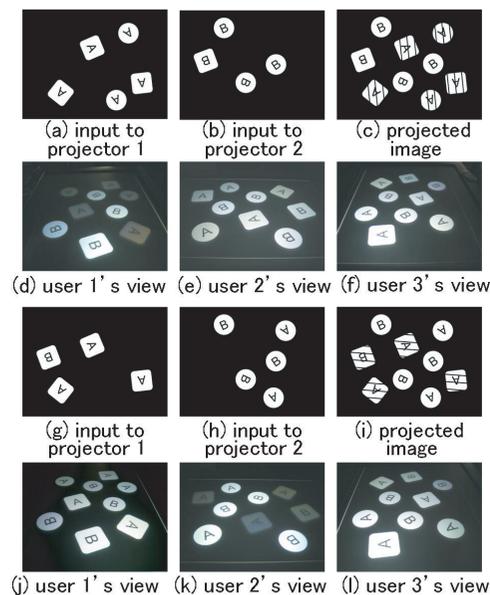


図 7 情報分類の例における入力画像と投影画像，および観察結果

Fig. 7 Input images to each projector, projected images, and users' views.

るように認識させる．

図 7 に各プロジェクタへ入力する画像とスクリーンに投影される映像のイメージ，および各ユーザからの見え方を示す．図 7(a), (b) のような部分画像をそれぞれプロジェクタ 1 と 2 へ入力し，プロジェクタ偏光板をユーザ 1 の視点偏光板に対して 82.5 deg (90 deg からモータを 1 ステップ動かした状態) に設定した場合，図 7(c) のような画像が投影される．

なお、ストライプは偏光されていることを示す概念図であり、実際には観測されない。この際、各ユーザからは図 7(d), (e), (f) のように観察される。ユーザ 1 からは視点偏光板によって A と刻印されたオブジェクトの輝度が大きく減少する一方、B と刻印されたオブジェクトの輝度はあまり変わらないため、これらに輝度差が生じ、明るい部分と暗い部分とに分類されて認識される。しかし、ユーザ 2 からは A と刻印されたオブジェクトも視点偏光板を減衰せずに透過するため、すべてのオブジェクトがほぼ同様に認識されている。視点偏光板を装着していないユーザ 3 からも全オブジェクトが同様に認識されている。なお、投影情報の輝度は、プロジェクタ偏光板を通過した際 50% に減衰するため、裸眼のユーザに対してプロジェクタ 1 と 2 から投影された映像の間には輝度差が生じる。しかし、ウェーバー・フェヒナーの法則が示すように、人間は刺激強度を対数的に感知するため、この輝度差は非常に小さなものと認識される。一方、図 7(g), (h) をプロジェクタ 1 および 2 へ入力し、プロジェクタ偏光板をユーザ 2 の視点偏光板に対して 82.5 deg とした場合、図 7(i) のような投影映像および図 7(j), (k), (l) のような観察結果が得られる。すなわち、ユーザ 1 と 3 からは全オブジェクトが同様に認識され、ユーザ 2 からは円形のオブジェクトだけが明るく強調されて認識される。

5. 情報の隠蔽性の検証

4.1 節では、ディスプレイ面に表示された情報の輝度を眼鏡で減衰させることで隠蔽する例を示したが、実際には位置センサの誤差や眼鏡の傾きなどから情報が漏れ、隠蔽できなくなる可能性がある。この場合は、偏光板を設置しないプロジェクタから外乱を与えることで、隠蔽性を向上できると考えられる²⁵⁾ が、必要な外乱の強さなどを実際に検証する必要がある。また、ノイズを用いた隠蔽において、隠蔽情報に対するノイズの強さに関しても同様である。そこで、実装システム上において、外乱とノイズの強さに対する情報の隠蔽性を測定する。

5.1 輝度減衰を用いた情報隠蔽

まず、輝度減衰による情報隠蔽における外乱の強さと隠蔽性の関係を測定する。そのため、PC から RGB 値で (255, 255, 255) の白色のリングをプロジェクタ 1 へ出力し、ディスプレイの中心に表示する。また、リングが白黒 2 値画像であるため、リングのエッジを目立たなくできると考えられる白黒 2 値の砂嵐を外乱として使い、プロジェクタ 2 からディスプレイ全体に投影する。砂嵐は $1,024 \times 768 \text{ pixel}$ の画像とし、RGB 値で (I, I, I) もしくは (0, 0, 0) のどちらかの色を 50% の確率で各ピクセルに割り振って生成する。ここでは、2

つの同型のプロジェクタを用いた際に、PC 側が出力として調整できる範囲内で情報を隠蔽できるかどうか重要であるため、実際の輝度ではなくプロジェクタへの出力値 I を外乱の強さとして用いる。次に、眼鏡を外した状態でリングを認識できることを確認した後、眼鏡をかけてもらい、投影されたリングと眼鏡の相対角度を 90 deg とし、リングを隠蔽した状態から相対角度を変化させる。そして、被験者がリングを見えるようになった時点で申告してもらおうことで、可視と不可視の境界となる角度を測定する。ここで、「見える」とはわずかにでもリングの存在を認識できる状態を指している。2 枚の偏光板の相対角度は、以下の 2 つの条件で測定する。

- (1) プロジェクタ前方の偏光板を固定し、被験者が移動した場合
- (2) 被験者は移動せず、プロジェクタ前方の偏光板を回転させた場合

(1) の条件において、鉛直上方から見た機器と被験者の配置を図 8(a) に示す。リングの偏光方向は x 軸方向に平行であり、被験者は y 軸と観察方位の差 $\alpha = 0 \text{ deg}$ となる位置から反時計周りに移動する。被験者の視点のディスプレイからの距離および高さは固定せず、被験者がディスプレイの縁に自然に立った状態とする。また、 α はディスプレイの縁に 5 deg 刻みで目盛りを表示し、被験者がリングを見えるようになったと宣告したときの立ち位置に最も近い目盛りを測定値とする。

次に、(2) の条件での機器と被験者の配置を図 8(b) に示す。被験者はディスプレイ中心から y 軸方向に立ち、リングの偏光方向を x 軸方向から逆時計周りに回転させ、その変化量 β を測定する。実装システムでは、リングの偏光方向は 7.5 deg 刻みで回転するため、リングが見えない最大の β を測定値とする。

これらの測定を 5 名の被験者に対して行った。被験者は男性 3 名と女性 2 名で、矯正視

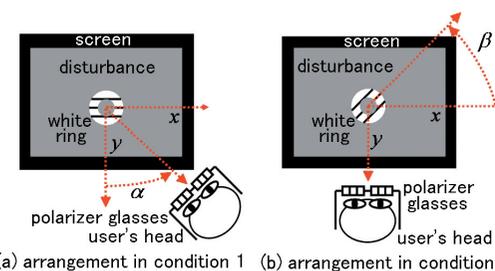


図 8 実験時の機器および被験者の配置
Fig. 8 Arrangement of apparatus and subject in experiment.

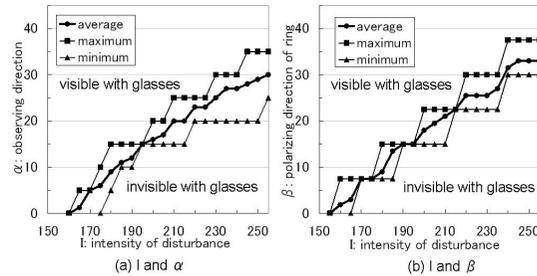


図 9 外乱の強さと隠蔽性の関係

Fig. 9 Relationship between intensity of disturbance and property of concealment.

力が 0.7~1.0 の正常色覚，視点の高さが 155~170 cm (ディスプレイ面からの高さ 65~80 cm) であった．条件 (1) および (2) での結果を図 9(a) および (b) に示す．なお，折れ線は，各輝度におけるユーザ間平均と，ユーザ間の最大値および最小値を表している．また，3本の折れ線の上部 (α が大きい値) が眼鏡をかけた状態でリングが可視となっており，下部 (α が小さい値) が眼鏡をかけた状態で不可視となっていることを示す．グラフに表示されていない横軸の範囲は，外乱が弱すぎるため， $\alpha = 0 \text{ deg}$ の場合でもリングを隠蔽できない状態を示している．

5.2 ノイズを用いた情報隠蔽

次に，ノイズを用いた情報隠蔽における隠蔽性を測定する．これには，PC で RGB 値が (255, 255, 255) および (0, 0, 0) の白黒 2 値の砂嵐をノイズとして生成し，プロジェクタ 1 へ出力してディスプレイ全体に表示する．また，RGB 値で (I, I, I) のグレースケールのリングをプロジェクタ 2 へ出力し，ディスプレイの中心に表示する．それ以外の機器配置，測定条件および被験者は前節と同様である．ただし，本実験で被験者は，まず眼鏡を外してリングが見えないことを確認した後，眼鏡をかける．また， α および β が 0 deg の状態でリングが被験者に見える状態であるため，リングが見えなくなった角度を測定する．図 10 は，各輝度におけるユーザ間の平均と，最大値および最小値を表している．また，3本の折れ線の上部 (α が大きい値) が眼鏡をかけた状態でリングが不可視となっており，下部 (α が小さい値) が眼鏡をかけた状態で可視となっていることを示す．グラフに表示されていない横軸の範囲は，リングの輝度が強く，眼鏡を外しても隠蔽されていない状態と，リングの輝度が弱く， α および β が 0 deg の状態でも見えない状態を示している．

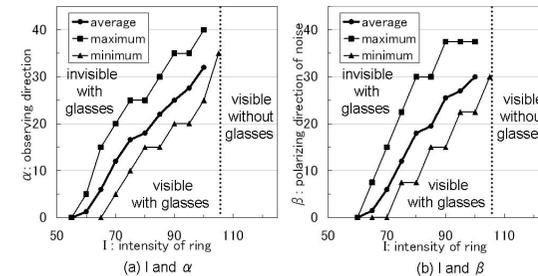


図 10 隠蔽情報の強さと隠蔽性の関係

Fig. 10 Relationship between intensity of hidden image and property of concealment.

6. 考 察

6.1 実験結果

図 9 において，同型の 2 台のプロジェクタを利用した場合，個人差はあるものの，PC で制御できる範囲内の外乱により，表示情報を隠蔽できていることが分かる．また， $I = 200$ 以上の場合，全被験者に対して α および β が 15 deg 以下で情報を隠蔽できていることが分かる．一方，実装システムでは，位置センサの誤差は最大で 1 cm 程度であり，観察方位にして 1 deg 未満である．また，プロジェクタ偏光板を回転させるモータの 1 ステップの回転角度は 7.5 deg であり，ユーザの観察方位に合わせて制御した場合の誤差は最大 3.75 deg である．さらに，ユーザが意図的に頭を傾けない限り，視点偏光板の傾きは 5 deg 以下程度と考えられる．そのため，これらの誤差がある場合でも，実装システムはユーザに対して情報を隠蔽できるといえる．ユーザが意図的に頭を傾けて視点偏光板を傾けた場合も，傾きセンサなどを用いれば対処は可能である．

また，図 10 から，利用したノイズに対して， $I = 85 \sim 95$ の範囲内では，眼鏡をかけた状態で α および β が 15 deg 以下であれば隠蔽情報が認識されていることが分かる．また，折れ線がプロットされている I の範囲では，眼鏡を外した状態で隠蔽情報を認識できないことを実験時に確認しているため，実装システムはセンサやモータの誤差，視点偏光板の傾きを考慮しても実用可能であると考えられる．

実験結果には個人差が含まれているが，これは 2 台のプロジェクタからスクリーンへの光路が異なるため，被験者の視点の高さとディスプレイからの距離の違いによって，プロジェクタ間の輝度比が異なることが理由の 1 つとして考えられる．そこで，図 8(b) の方位

から、高さ 170 cm および 155 cm の位置に色彩輝度計を設置し、各プロジェクタから白色光を投影してスクリーン中心の輝度を測定した。なお、ディスプレイの端から視点への水平距離は 15 cm とした。この結果、プロジェクタ 1 および 2 からの輝度は、高さ 170 cm の場合に 25 cd および 80 cd であり、高さ 155 cm の場合に 20 cd および 55 cd であった。そのため、プロジェクタ 1 に対するプロジェクタ 2 の輝度比は高さ 170 cm で 3.2、高さ 155 cm で 2.75 となり、投影情報の可視性に違いを生じていると考えられる。アプリケーションによっては、これらが問題となる可能性もあるため、プロジェクタの配置の改善や、ハーフミラーなどを用いた光路の統一などを検討する必要があるといえる。

6.2 応用

6.2.1 応用分野

提案ディスプレイは、特定ユーザに対して投影情報の部分的な開示と隠蔽を制御することで、共有情報と個人情報を単一ディスプレイ上で表示できる。これは、複数のプレイヤーが状況や役割に応じて異なる情報を利用するゲームや、個人用の情報と公共情報を同時に利用するグループウェアを実現する際に有用と考えられる。また、全ユーザの視点偏光板の偏光軸が同じであれば、隣または対面に位置するユーザ同士は投影情報を等しく観察することとなるため、これらをチームとした対戦ゲームなども考えられる。

情報の開示および隠蔽の制御は、ユーザに対して情報を隠すだけでなく、特定ユーザのみに追加情報を与える際にも利用できる。たとえば、複数のユーザが 1 つのディスプレイ上で異なる意図を持ったタスクをしている場合、共有の領域に情報が突然追加されると全員の注意を引きつけてしまうが、情報を他ユーザに対して隠蔽した状態で追加することで、タスクを妨害しないよう共有領域に情報を追加することができる。

ノイズ画像を用いた例では、ノイズ画像を本画像に重畳することで、視点偏光板を装着したユーザだけでなく、裸眼のユーザに対しても情報を隠蔽できることを示したが、隠蔽されるべき情報がわずかに漏れて観察される場合もある。これは情報の秘匿性が重視されるアプリケーションにおいては問題となるが、いくつかの改善法が考えられる。本論文ではノイズ画像として RGB 値をランダムに割り振った単純なノイズ画像を用いたが、隠蔽情報に近い色彩で構成されるノイズ画像や、隠蔽情報の反転画像と別の画像を加算した画像などをノイズとして用いれば、隠蔽情報の秘匿性は改善されることが考えられる。また、より輝度の高いノイズ画像を利用することや、隠蔽画像のエッジを少しぼかして認識されにくくすることも解決策としてあげられる。

位置センサを用いた例では、視点偏光板の移動に合わせてプロジェクタ偏光板を制御する

ことで、投影された情報を特定のユーザに対してつねに提示、または逆に隠蔽できることを示した。これは、トラッキングされたユーザが他のユーザに対して情報を隠蔽するように動くことで機密情報を守るゲームなどのアプリケーションも実現できる。ただし、視点偏光板が単純な眼鏡によって実現されている場合、眼鏡の縁外からスクリーンを見たり、頭を傾けたりすることで隠蔽された情報が覗かれてしまうこともあるが、これはノイズ画像や姿勢センサを併用することで改善可能である。

また、投影情報と視点偏光板の偏光軸の相対角度が 0 deg と 90 deg の間となるユーザからは、投影情報が薄暗く観察されており、比較的コントラストの小さな部分は認識しにくくなっている。そのため、投影情報のコントラストを制御することで、情報を認知可能な観察方位と認知不可能な観察方位の幅をある程度制御できるアプリケーションを構築できると考えられる。また、これはノイズを用いた例においても同様である。

一方、情報の分類の例では、視点偏光板を装着した特定のユーザに対して、プロジェクタへの入力画像およびプロジェクタ偏光板を制御することで、投影情報に輝度差を生じさせて動的な情報の分類を可視化した。これは、多くの表示情報を用いて複数人が異なる作業をする状況で、あるユーザが一時的に情報をフィルタリングする際などに有効と考えられる。たとえば、あるユーザが特定のデータだけに注目して作業を行ったり、異なるタスクを行っている他ユーザの注意を引きつけないように絞込みを行ったりできる。また、ゲームなどで特定ユーザだけに良い手を強調することでハンディキャップを与えるといった応用も考えられる。

この例において、輝度差が観察される観察方位は、プロジェクタ偏光板を回転させることで任意に制御できるため、本例においても位置センサを用いたモータの制御は有効であるといえる。この場合は、分類を認識できるユーザが移動するときに、分類を認識させたくないユーザに対する観察輝度も変化する可能性があるため、各プロジェクタからの出力輝度とプロジェクタ偏光板を適切に制御する必要がある。

6.2.2 表現の拡張と限界

提案システムでは、全ユーザが同じ偏光方向を持つ眼鏡をかけている場合、すぐ隣にいるユーザ同士、またはディスプレイを挟んで対面にいるユーザ同士に異なる可視性で情報を提供することができない。そのため、異なる可視性を与えたいユーザ同士は対面せず、なおかつ観察方位がある程度異なる位置にいる必要がある。2 名および 3 名の眼鏡をかけたユーザがいる場合では、図 11 のような配置が考えられる。なお、図 11 は鉛直方向の偏光軸を持つ眼鏡をかけたユーザと円形のテーブルを鉛直真上方向から見たイメージ図である。また、

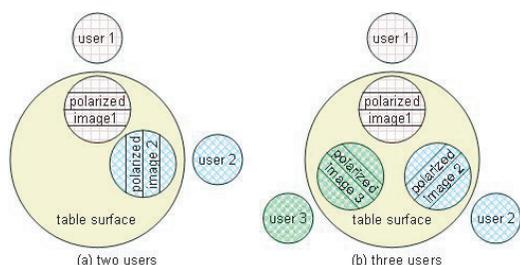


図 11 各々異なる個人情報を提供するためのユーザ配置例

Fig. 11 User arrangement for providing private information to each user.

6.3 節に後述する拡張システムなどを用い、テーブル面の部分ごとに異なる偏光方向を持つ画像を投影している。このとき、各ユーザからは、数字が対応する画像のみがカットされて認識される。そのため、各画像をノイズとして利用すれば、各ユーザそれぞれだけに観察可能な個人情報を提供できると考えられる。

さらに、眼鏡をかけたユーザが 4 名以上の場合でも、奇数角形の頂点位置にユーザを配置し、テーブル面の部分ごとに偏光方向を制御したノイズ画像を利用することで、各ユーザにそれぞれの個人情報を提供できると考えられる。しかし、図 11 (b) において、ユーザ 2 と 3 の眼鏡は、投影画像 1 に対して偏光方向の差 θ が 30 deg であり、画像の輝度を理論値で 75% に減衰させる。同様に、5 名のユーザが正 5 角形の頂点位置から観察する場合は、あるユーザの眼鏡に対して $\theta = 90 \text{ deg}$ の画像は、他のユーザからは $\theta = 18 \text{ deg}$ または 54 deg となり、輝度が約 90% または 35% に減衰する。そのため、人数の増加につれて、減衰を必要としないユーザに対して減衰が生じ、ノイズとして用いることが難しくなる。一方、図 10 の結果からは、 $\alpha, \beta = 40 \text{ deg}$ 程度でノイズに隠蔽された画像を認識できている。 $\theta = 90 - \beta, 90 - \alpha$ であるため、 $\theta = 50 \text{ deg}$ 以上では、隠蔽された画像が他のユーザに漏れる可能性がある。隠蔽する画像の輝度を下げることによって隠蔽性は向上するものの、各ユーザが移動しない場合でも視点位置や頭の傾きは完全に一定でないことから、各々異なる個人情報を提供できる人数は 3 ~ 5 名程度と考えられる。また、方形のディスプレイでは、90 deg ごとにユーザが位置するのが自然であるため、2 名が限界と考えられる。ただし、特定のゲームでの親など、特別な 1 名のユーザのみが知りうる情報だけがが必要な場合には、他のユーザが眼鏡を外しておくことで、観察方位に制限なく個人情報を利用できる。

ユーザが自由に移動する場合は、各ユーザの位置を検知し、あるユーザの対面または近く

に他のユーザがいないときのみ個人情報を表示するといった制御が必要となる。逆に、あるユーザ同士が対面または近くにいる場合に共有情報を表示するといった利用方法も可能である。

提案システムでは、ノイズの形状および位置は自由に決めることができるため、共有している情報の一部分だけにノイズを重畳することで、その領域を個人情報として利用できる。そのため、個人情報と共有情報の提示領域を混在させることができる。また、あるユーザの個人的な情報の上に、それ以外のユーザに共有される情報をノイズとして重畳表示することで、共有情報と個人情報を重ねて表示できる。しかし、この場合は共有される情報が個人情報完全に覆い、なおかつノイズとして十分な輝度を持っていることが条件となる。

情報分類の例においては、あるユーザに対して暗く設定した部分を、対面またはすぐ隣に位置するユーザ以外に対して暗く設定することができない。そのため、完全に独立した情報分類を同時に実現することはできず、ある特定のユーザのみに必要とされるハンディキャップや、一時的に必要とされる情報の絞り込みなどに利用することが有効と考えられる。

眼鏡をかけたユーザが 3 名以上いる場合は、情報隠蔽の場合と同様に奇数角形の頂点にユーザを配置することで、情報分類を実現できると考えられるが、同時に複数人に対して任意の分類を表現することはできない。また、眼鏡をかけたユーザの人数が増えるにつれて、不適切なユーザに対して画像の輝度が減衰する。そのため、本例においても眼鏡をかけたユーザの人数は 3 ~ 5 名程度が限界と考えられる。ただし、どの程度の輝度差で情報が分類されているように認識されるかについては実際に検証する必要がある。

6.2.3 エンタテインメント用例

情報の隠蔽と開示の制御を応用した例として、メディアアート作品の「MysteriousPOND」を試作した。図 12 (a) は 3 名のユーザが MysteriousPOND を楽しんでいる様子である。ディスプレイ上には波打つ水面の映像が表示されており、ユーザは、眼鏡をかけてランタンで水面を照らすことで、図 12 (b) のように、水面に隠された水中に泳ぐ魚の映像を覗き見ることができる。ただし、ランタンを持たないユーザは、ランタンを持つユーザのすぐ近くか対面から、眼鏡をかけて水面を見たときのみ水中を見ることができるが、それ以外の場所では図 12 (c) のように水中を見ることができない。また、眼鏡をかけないユーザは、立ち位置に関係なく、図 12 (c) のように水中を見ることができない。

これは、提案ディスプレイに加え、位置センサを取り付けたランタンを用いて実現される。まず、水中に泳ぐ魚と、魚が生成する波の動きを PC がシミュレーションする。そして、図 12 (d) に示すような水面の映像をプロジェクタ 1 へ出力し、また、位置センサから取得

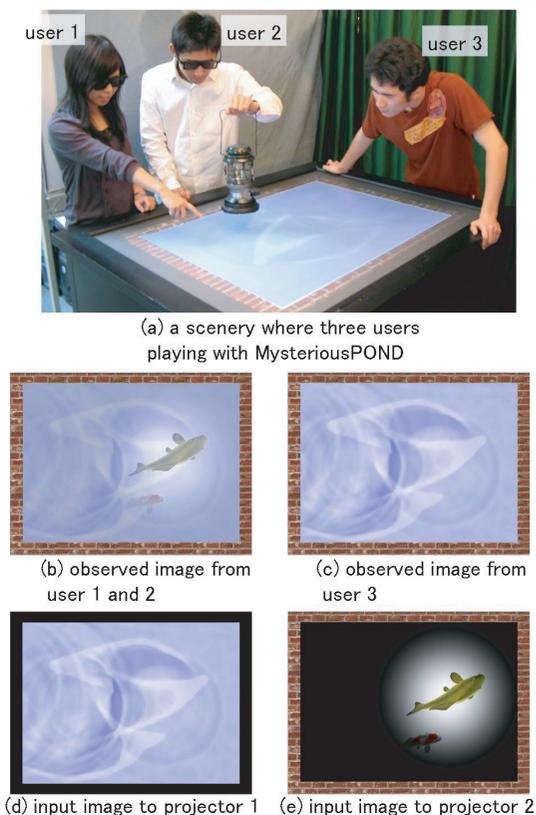


図 12 MysteriousPOND

Fig. 12 MysteriousPOND.

したランタンの位置を用いて、ランタンの周辺のみ水中の映像を図 12 (e) のように生成してプロジェクタ 2 へ出力する。同時に、ランタンから最も近くにある眼鏡の位置をランタンの所有者の視点位置として、この眼鏡の偏光板が水面の映像を遮断するように、プロジェクタの前に置かれた偏光板を回転するモータを制御する。これらの処理により、前述のような体験をユーザに与えることができる。

6.3 システムの拡張

本システムは、さまざまな構成の拡張²⁵⁾を適用することで、より複雑な可視性の制御を

実現できる。また、多人数に対する情報の開示または隠蔽の制御や、複数階調を持った情報の分類など、より発展的なアプリケーションを実現できると考えられる。

一方、実装システムでは、視点偏光板の観察方位を得るために 3 次元位置センサを用いたが、テーブルトップ型ディスプレイの周りの方位角のみを計測できればよいので、安価なタッチセンサやフット圧力センサ、カメラベースのトラッカなどで代用することもできる。「MysteriousPOND」では、ランタンの位置と視点の位置からランタンの所有者を推定していたため、所有者を誤認識することもあったが、カメラを利用したトラッカなどを用いて認識率を向上させることができれば、より質の高いコンテンツとすることができると考えられる。

また、本論文で紹介した利用例では、ユーザの位置などをもとに偏光板の回転を制御しているが、ユーザが直感的に操作できるハンドルを用意することも考えられる。たとえば、矢印などの方位を指し示す実物体をディスプレイ上に設置し、これに連動するようにモータを制御すれば、ユーザが手で向きを変えらることで、隠れた情報を観察できる立ち位置を容易に操作することができる。

7. ま と め

本論文では、回転偏光フィルタによる可視性制御を実現するテーブルトップ型のディスプレイシステムを提案した。また、その応用例として、特定ユーザに対する情報の開示と隠蔽の制御、および動的な情報分類の可視化を実現し、より現実的な状況における有用性や、今後の展望などについて検討した。今後は、さまざまなアプリケーションの検討および実現や、提案ディスプレイを用いた際のユーザの振舞いや作業形態の変化に関する調査などを行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム（研究拠点形成費）の補助によるものである。

参 考 文 献

- 1) Dietz, P. and Leigh, D.: DiamondTouch: A multi-user touch technology, *Proc. 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pp.219–226 (2001).
- 2) Elwart-Keys, M., Halonen, D., Horton, M., Kass, R. and Scott, P.: User interface requirement for face to face groupware, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp.295–301 (1990).

- 3) Koike, H., Sato, Y. and Kobayashi, Y.: Integrating paper and digital information on EnhancedDesk: A method for realtime finger tracking on augmented desk system, *ACM Trans. Computer Human Interaction*, Vol.8, Issue 4, pp.307–322 (2001).
- 4) Kruger, R., Carpendale, S., Scott, S.D. and Greenberg, S.: Roles of orientation in tabletop collaboration: Comprehension, coordination and communication, *Proc. ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp.501–537 (2004).
- 5) Matsushita, M., Iida, M., Ohguro, T., Shirai, Y., Kakehi, Y. and Naemura, T.: Lumisight Table: A face-to-face collaboration support system that optimizes direction of projected information to each stakeholder, *Proc. ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp.274–283 (2004).
- 6) Myers, B.A., Stiel, H. and Gargiulo, R.: Collaboration using multiple PDAs connected to a PC, *Proc. ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp.285–294 (1998).
- 7) Omojola, O., Post, E.R., Hancher, M.D., Maguire, Y., Pappu, R., Schoner, B., Russo, P.R., Gershenfeld, N. and Fletcher, R.: An installation of interactive furniture, *IBM Systems Journal*, Vol.39, Issue 3-4, pp.861–879 (2000).
- 8) Patten, J., Ishii, H., Hines, J. and Pangaro, G.: Sensetable: A wireless object tracking platform for tangible user interfaces, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp.253–260 (2001).
- 9) Rekimoto, J. and Saitoh, M.: Augmented surfaces: A spatially continuous work space for hybrid computing environments, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp.378–385 (1999).
- 10) Rogers, Y. and Lindley, S.: Collaborating around vertical and horizontal displays: Which way is best?, *Interacting with Computers*, Vol.16, Issue 6, pp.1133–1152 (2004).
- 11) Scott, S.D., Grant, K.D. and Mandryk, R.L.: System guidelines for co-located collaborative work on a tabletop display, *Proc. 8th European Conference on Computer Supported Cooperative Work (ECSCW)*, pp.159–178 (2003).
- 12) Scott, S.D., Carpendale, M.S.T. and Inkpen, K.M.: Territoriality in collaborative tabletop workspaces, *Proc. ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp.294–303 (2004).
- 13) Steurer P. and Srivastava, M.B.: System design of smart table, *Proc. 1st IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, p.473 (2003).
- 14) Shen, C., Lesh, N. and Vernier, F.: Personal digital historian: Story sharing around the table, *ACM Interactions*, Vol.10, No.2, pp.15–22 (2003).
- 15) Shoemaker, G.B.D. and Inkpen, K.M.: Single display privacyware: Augmenting public displays with private information, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp.522–529 (2001).
- 16) Tandler, P., Prante, T., Tomfelde, C.M., Streit, N.A. and Steinmetz, R.: Connectables: Dynamic coupling of displays for the flexible creation of shared workspaces, *Proc. 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pp.11–20 (2001).
- 17) Tang, A., Tory, M., Po, B., Neumann, P. and Carpendale, S.: Collaborative coupling over tabletop displays, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp.1181–1190 (2006).
- 18) Tse, E., Shen, C., Greenberg, S. and Forlines, C.: How pairs interact over a multimodal digital table, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp.215–218 (2007).
- 19) Ullmer, B. and Ishii, H.: The metaDESK: Models and prototypes for tangible user interfaces, *Proc. 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, pp.223–232 (1997).
- 20) Vernier, F., Lesh, N. and Shen, C.: Visualization techniques for circular tabletop interfaces, *Proc. Advanced Visual Interfaces (AVI)*, pp.257–263 (2002).
- 21) Wigdor, D., Shen, C., Forlines, C. and Balakrishnan, R.: Perception of elementary graphical elements in tabletop and multi-surface environments, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp.473–482 (2007).
- 22) Yamaguchi, T., Subramanian, S., Kitamura, Y. and Kishino, F.: Strategic tabletop negotiations, *Proc. 11th IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT)*, pp.169–182 (2007).
- 23) 大坪順次：光入門，コロナ社 (2002).
- 24) 北村喜文，大澤 渉，竹村治雄，岸野文郎：SharedHole：個人情報と公共情報を共存表示できる対面型協調作業ディスプレイ，情報処理学会論文誌，Vol.44, No.11, pp.2598–2607 (2003).
- 25) 櫻井智史，北村喜文，スリラム・サブラマニアン，岸野文郎：回転偏光フィルタによる情報可視性制御(1)—原理提案と試作システム構築，ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集，pp.259–264 (2007).
- 26) 新西誠人，伊賀聡一郎，桜井 彰：Interactive Station：デジタル情報に手書きできるテーブルトップコンピュータ，ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集，pp.245–248 (2007).
- 27) 松下光範，土方嘉徳，杉原敏昭(編)：技術展望(小特集)「テーブル型システムの現状」，ヒューマンインタフェース学会誌，Vol.9, No.1, pp.69–92 (2007).

(平成 20 年 4 月 11 日受付)

(平成 20 年 10 月 7 日採録)



櫻井 智史

2006年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了。同年同専攻博士後期課程入学，現在に至る。ヒューマンインタフェースの研究に従事。ヒューマンインタフェース学会，日本バーチャルリアリティ学会各学生会員。



北村 喜文（正会員）

1987年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年キャノン株式会社情報システム研究所，1992年ATR通信システム研究所，1997年大阪大学大学院工学研究科助教授，2002年より同大学大学院情報科学研究科助教授。2007年より准教授。ACM，電子情報通信学会，日本バーチャルリアリティ学会等各会員。博士（工学）。



スリラム サブラマニアン

1999年インド科学研究所修士課程修了。2003年サスカチュワン大学（カナダ）助教授。2004年アイントホーフェン工科大学（オランダ）博士後期課程修了。2006年大阪大学招聘研究員。2007年フィリップスリサーチ上級研究員。2007年ブリストル大学（英国）講師，現在に至る。ヒューマンコンピュータインタラクションの研究に従事。ACM等会員。博士（工学）。



岸野 文郎

1971年名古屋工業大学大学院電子工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社（現NTT）電気通信研究所入所。同ヒューマンインタフェース研究所において，高速・広帯域通信システムの研究・実用化，画像処理の研究に従事。1989年ATR通信システム研究所知能処理研究室室長。臨場感通信，画像処理等の研究に従事。1996年大阪大学大学院工学研究科教授，2002年より同大学大学院情報科学研究科教授。電子情報通信学会，映像情報メディア学会，日本バーチャルリアリティ学会等各会員。博士（工学）。