

# Limpid Desk : 投影型複合現実感による机上書類の透過化

岩井大輔<sup>†</sup> 佐藤宏介<sup>†</sup>

机上に積み重ねられた書類探索を支援するため、下層の書類の映像をカメラで取得し、あたかも上層の書類が透けるかのように処理した映像を、投影型複合現実感技術の色補正処理を施しつつ、上層の書類へプロジェクタ投影するシステム *Limpid Desk* を提案する。ならびに、ユーザの手の書類への接触を、特殊な道具を身につけたり持ったりせずにセンシングする手法を、熱画像を利用することで実現する。この入力インタフェースを利用して、机上の書類に触れることで書類の透過を操作するインタラクションを可能とする。提案システムでは、現実の机上空間で、上に置かれた書類を物理的に移動させることなく、下層書類の情報を視覚的に取得することが可能となる。これによって、探索空間・操作空間・情報提示空間が一致し、ユーザは PC を介さずに積み重ねられた書類に直接アクセスすることができる。我々は、この操作の一貫性に主眼を置き、すべて実世界の机上の同一空間で行うことのできる直観的インタラクションを目指す。

## Limpid Desk: Transparentizing Documents on Disorderly Desktop in Projection-based Mixed Reality

DAISUKE IWAI<sup>†</sup> and KOSUKE SATO<sup>†</sup>

We propose *Limpid Desk* which realizes intuitive document search on a real desktop with virtual transparentizing of the upper layer of a document stack in projection-based mixed reality (MR) environments. In the system, users can visually access a lower layer document without physically removing the upper documents. This is accomplished by projecting a special pattern of light that is calculated to compensate the appearances of the upper layer documents as if they are transparent. We also propose a touch sensing method using a thermal image for the input interface of the system. User touch areas on real documents are detected without any user-worn or hand-held devices in the method. This interface allows users to select the stack they would like to look through by their simple touch gestures. We present three intuitive document search interaction techniques in which the search, operation and display space are completely unified onto a real desktop. We claim that this kind of spatial consistency of the operations is the key for realizing the intuitive interaction.

### 1. はじめに

知的生産活動の中心に位置する机にはつねに物があふれている。PC、書類（雑誌・書籍・フォルダなど）、小物、文具類と、様々なものによって埋めつくされた机上では、作業に必要な物を探すことに多くの手間と時間が費やされる。特に、知的生産の中心的媒体である書類は、作業が長期化するうちに、重なって置かれ、整理されることなく散らかっていく。書類を探す行為によって、それまでの作業への集中が途切れ、能率的に作業を完遂することは困難となってしまう。このため、整理法に関する様々なノウハウが提案され、書籍が多数出版されているものの、日々の多忙さに追われ

る人々にとっては実践する余裕も少ない。

書類を探索するには、机上の書類スタックを一つ一つ調べていく。このとき、その所望の書類がある書類スタックは1つだけであるため、ほとんどの場合、探索している書類スタック内に探している書類はない。書類が存在していない書類スタックの探索を行うのは、時間と労力の無駄となる。このため、書類の山をかき分けて所望の書類を探す前に、スタックの内部が把握できれば、書類探索の効率が向上する。

そこで本研究では、デスクトップ上の書類を透過化させることで、このような環境下における人々の書類探索の効率化を目指す。通常、図1(a)に示すような書類スタックが机上にある場合、その上層の書類を取り除かなければ、下層にある書類を見ることはできない。しかし、図1(b)に示すように、上層書類が透明になると、それらを動かなくても、下層の書類が何で

<sup>†</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科  
Graduate School of Engineering Science, Osaka University



(a) 書類スタック (b) 提案書類透過環境

図 1 提案する書類探索環境

Fig.1 Basic concept of proposed environment.

あるのかをただちに把握することができる。

PC デスクトップ空間においては、ウィンドウの透過処理は、計算機内でのグラフィクスエフェクトとしてすでに実装されている。Apple 社の Mac OS X では、上層のウィンドウを透過化させることで、それを移動させることなく下層のウィンドウやファイルアイコンに視覚的にアクセスすることのできる機能が実装されており、Microsoft 社の Windows Vista のデスクトップ環境でも、ウィンドウを透過させる機能が搭載されている。しかし、このような仮想世界とは異なり、物理世界で書類を透過化させることは容易でない問題である。

近年、プロジェクタを用いて、対象となる実オブジェクトの背景の映像を直接対象に投影することで、これを仮想的に透過化させる研究が行われてきている<sup>1),2)</sup>。しかしながら、これらの対象は、単一白色のドアや再帰性反射材のように投影に適した物体に限定されている。一方、多様な反射特性を持つ投影対象上で、任意の色の見えを再現する投影画像の色補正手法が、投影型複合現実感の研究分野において提案されてきている<sup>3)~7)</sup>。そこで本研究では、これらの技術を統合し、プロジェクタ投影により机上の書類を仮想的に透過させることで、上に置かれた書類を物理的に移動させることなく、下層書類の情報への視覚的アクセスを可能とすることを旨とする。

我々は、視覚心理的側面から、透過後に表示される下層書類が書類スタック中の何層目にあるのかをユーザに直観的に認識させるようなヴィジュアルエフェクトを提案し、その有効性を評価する。これを透過化処理に組み込むことで、探している書類が見つけれられた場合、ユーザはその書類をすぐに書類スタックから取り出すことができるようになる。

さらに、机上の書類に直接触れることで透過化操作を行う、直観的な書類探索インタラクションを提案する。この直接操作を実現するために、我々は熱画像を利用して、特殊な道具をユーザが把持・装着することなしに、ユーザの掌や指の書類への接触を検出する

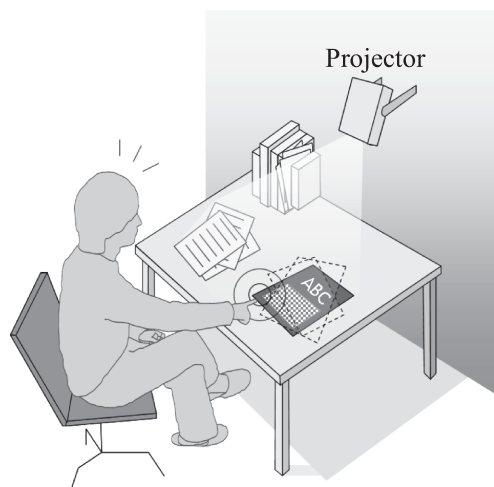


図 2 Limpid Desk 概念図

Fig.2 The concept sketch of Limpid Desk.

計測手法を提案する。これにより、書類探索を行う空間（探索空間）、システムの操作を行う空間（操作空間）、結果の表示を行う空間（表示空間）を机上で完全に一致させ、空間的にシームレスな直観的インタラクションを実現する。

以上の技術要素を組み込み、書類探索支援システム Limpid Desk を構築する。図 2 に、その概念図を示す。提案システムでは、ユーザが机上の書類に接触すると、システム側がこれを認識し、上層書類が投影光によって仮想的に透過する。我々は、2 種類のインタラクションを提案し、本システムに実装する。1 つ目は、書類スタック上に一度触れるだけで、そのスタック中のすべての書類を閲覧できる、というものである。2 つ目は、書類スタック中に気になる書類がある場合、その書類のスタックからはみ出ている部分に触れるだけで、スタックから取り出すことなくその書類が何であるかを確認することができる、というものである。

本論文では、まず、2 章で関連研究をもとに本研究の位置づけを明らかにする。次に、3 章で提案システムの構成について述べる。システムの技術要素として、4 章でプロジェクタ光による書類の視覚的な透過化手法、5 章で人の視覚心理を利用したヴィジュアルエフェクト、6 章で熱画像を用いたユーザの書類への接触計測手法について述べる。7 章ではシステムに実装する 2 種類の書類探索インタラクションについて述べ、8 章でユーザテストによりその有効性を評価する。最後に、考察と今後の展望を記す。

## 2. 関連研究

本章では、投影型複合現実感技術による実物体の透

過化と色補正, PC のインタフェースを用いた実書類探索, 投影型インタラクティブシステムの入力インタフェースそれぞれに関する従来研究をあげ, 本研究の位置づけを明らかにする.

## 2.1 投影型複合現実感技術による実物体の透過化と色補正

奥にある実物体の映像を手前の実物体に投影重畳することで, 手前の実物体の見えを変更し, まるで透過したかのような効果を得る研究が行われている. 光学迷彩<sup>2)</sup>では, 実物体に塗布された再帰性反射材に, 視点と同位置より背景映像を投影する. この再帰性反射材からの反射光によって, 透過効果が得られる. しかし, この研究では, 透過する対象には再帰性反射材を貼付する必要があるため, 実物体そのものを透過させているわけではない. Bonanni らは, 冷蔵庫の扉に冷蔵庫の中の映像を投影することで扉を透過化させるシステムを提案している<sup>1)</sup>. 市販されている多くの冷蔵庫の扉は単一白色平面で投影面としても優れているため, 光学的に整合性のとれた質の高い映像表示が可能となっている. これらのシステムでは, 透過対象が投影に適した, 反射特性が一般的な物質に限定されており, 多様な反射特性を持つ対象を透過させることは考慮されてこなかった.

投影型複合現実感の研究分野では, 実物体の色やテクスチャ<sup>8)~10)</sup>, 形<sup>11)</sup>をプロジェクタ投影によって変更することを目指す研究が行われてきているが, これらのシステムにおいても同様に, 投影対象は単一白色物体などに限られており, 様々な反射特性を持つ対象物体上で任意の色の見えを再現することが技術的課題となっていた. これに対し, 近年, カラーカメラを組み込んで, あらかじめ簡易なキャリブレーションを行うことで, プロジェクタとカメラの色空間のアフィン変換を求め, この問題を解決する色補正技術が提案されてきている<sup>3)~7)</sup>.

雑誌や写真といった書類の表面は, 複雑な反射特性を持っており, 投影コンテンツの可読性や視認性を著しく低下させてしまう. 本研究では, 上層の書類上に, その RGB 反射特性に応じて色補正された下層書類のテクスチャ画像をプロジェクタ投影することで良好な透過効果を得ることを目指す.

## 2.2 PC インタフェースを用いた実書類探索

検索能力の優位性, 蓄積性能の高さから, PC 上で, 実世界の書類の探索作業を行う研究がなされてきている. 机の上に取り付けられたカメラによって机上の書類を認識し, PC 内に保存されている電子書類とリンクし管理することで, 物理書類と電子書類とを連携さ

せる作業環境の提案が行われている<sup>12)</sup>. このシステムでは, PC 上でのキーワード検索によって, ユーザは容易に所望の物理書類の位置を同定することができる. また, 引き出しの中に積まれた書類の履歴を画像として PC モニタから閲覧することのできるシステムも提案されている<sup>13)</sup>. カメラで新たに引き出しに投入された書類の写真を時系列に保持することで, ユーザは PC 画面に表示されるタイムスライドウィジェットを操作するだけで, 過去に引き出しにしまっておいた書類を容易に見つけることが可能となる.

前者の検索機能を利用した書類探索支援では, 高速に目標とする書類を見つけ出すために, 机上のすべての書類があらかじめ電子化され検索キーワードとなるテキストデータを付与されていることが必要となる. しかし, 机上には手書きメモやノート, 写真のような, この前処理が困難であるような書類が多く存在する. また, 書類を探索する際に, 必ずしもその書類を特定できる検索キーワードをユーザが思い出せるとは限らない.

一方, 後者のように画像ビューワとして PC を書類探索作業支援に用いる場合は, ユーザは目視によって探索を行う. ユーザは探したい書類の表紙の画像やレイアウト, 写真などの画像情報を手がかりに書類を探索する. この手法では, 前者のように探索する書類に制限はない. 本研究では, この目視による一致を書類探索の手がかりとするシステムの構築を目指す.

ところで, これらの従来システムでは, 物理書類は, 読む・注釈をつける・並べ替えるといった点において電子書類よりも優れていることから, PC モニタと入力デバイス(マウス, キーボード)を用いて書類を探索した後, ユーザがその書類を取りにいくことを想定している. つまり, 書類の探索を行う机上空間と, システムの操作・表示を行う PC 空間との間に空間的な継ぎ目(シーム)が存在する.

これに対して, 本研究では書類の透過操作を探索を行う机上で行い, かつ, 下層の書類の情報を書類スタック上へ直接投影することでユーザに提示する. これによって, 探索・操作・表示空間が一致し, ユーザは明示的に PC を介することなく, 直観的に所望の書類を見つけていることが可能となる. 我々は, このインタラクション空間の一貫性に主眼を置き, 直観的な書類探索支援システムを実現する.

## 2.3 投影型インタラクティブシステムの入力インタフェース

投影型インタラクティブシステムの研究分野においては, 直観的なインタラクションを実現するために入

出力空間の一貫性を重要視する研究が多くなされてきている．これを実現するため、投影された仮想オブジェクトの操作インタフェースとして、磁気トラッカ<sup>8),14)</sup>、投影面に埋め込まれたセンシング機器<sup>15),16)</sup>、画像処理による指先追跡技術<sup>17)~19)</sup>など、様々な手法が用いられてきている．

日常生活での書類探索作業を支援するシステムの入力インタフェースということを考慮すると、磁気トラッカを使用したものでは、ユーザは特殊なデバイスを把持してシステムを操作する必要がある、この物理的な拘束が自然なインタラクションを妨げてしまう．投影面に特殊なセンシング機器を埋め込む手法では、机上に様々なものが積まれている状況は想定されていない．画像処理による手法を用いた多くの研究は、特殊な機器を身につける必要なしに、ユーザの指先のジェスチャを認識する．しかしながら、これらの多くの手法では、投影対象への接触を認識できないため、クリックやペンダウンのようなトリガ機能を実装するためには、特別なジェスチャが必要となる．この問題点を解決するために、投影面に生じるユーザの手や指の影を計測することで指先の投影面への接触を検出する手法が提案されている<sup>19)</sup>．これによってトリガ機能は実現されるが、このアルゴリズムは机上のように様々な物体が散乱している状況で用いることは困難である．

我々は、背面投影型システムにおいて、熱画像を用いてユーザの投影面への接触位置を検出する手法を提案してきた<sup>20)</sup>．このシステムでは、取得された熱画像の高温変化領域を、投影面上のユーザの接触領域としている．

本研究では、この接触検出手法を発展させて、机上に積まれて散乱している書類上へのユーザの接触を検出する手法を提案する．そして、この入力インタフェースを提案システムに組み込むことで、入出力空間の一致した直観的インタラクションを実現し、積み重ねられた書類の探索を支援する．

### 3. Limpid Desk システム構成

提案システムの外観を図3に示す．本システムは、色補正を行いプロジェクタ投影を行う部分と、ユーザの書類への接触を検出する部分により構成される．前者の用途に用いるハードウェアは、ビデオプロジェクタ (NEC MT1075J, 輝度: 4,200 [lm]), IEEE-1394 カラーカメラ (Point Grey Research Scorpion) である．また後者では、熱画像を取得することのできる遠赤外線カメラ (Mitsubishi IR-SC1), カラーカメラ (Sony EVI-G20) を、光軸を同軸に設置する．これら

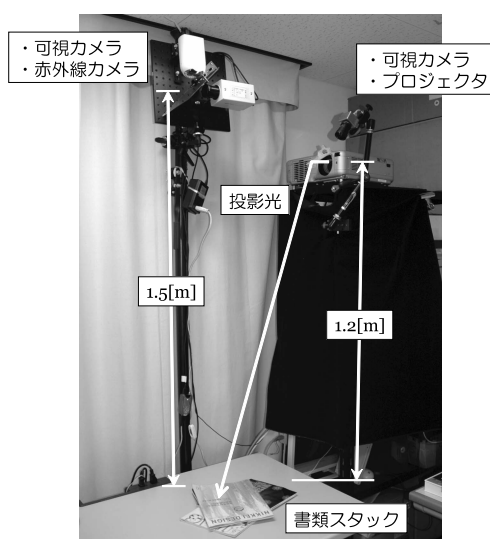


図3 Limpid Desk システム外観

Fig. 3 Outlook of experimental setup of Limpid Desk.

の各装置は、それぞれ机を見下ろすように頭上に設置され、1台のPC (CPU: Intel Pentium4 2.5 [GHz], メモリ: 1 [GB]) により制御される．

実験環境における机上での環境光の輝度値と、そこへプロジェクタより白色を投影した際の輝度値を測定した．分光放射計 (TOPCON SR-1) を用いて、机上に置いた標準カラーチャート (GretagMacbeth 社 ColorChecker) の white 上で測定を行った．その結果、環境光の机上での輝度値は  $124 [\text{cd}/\text{m}^2]$  であり、投影時では  $1,013 [\text{cd}/\text{m}^2]$  であった．また、カラーカメラとプロジェクタの入出力特性は、あらかじめ線形化しておく．

### 4. プロジェクタ投影による書類透過処理

プロジェクタを用いた書類の透過処理について述べ、基礎実験を行ってその有効性を確認する．まず、透過対象の透過率を制御することを可能とする書類透過手法について述べる．そして、投影画像の可読性や視認性を低下させない良好な投影結果を得るための投影画像の色補正に関して述べる．

#### 4.1 透過率制御可能な書類透過処理

書類透過の基本処理は、投影対象の背景の画像を対象へ投影することである．提案システムでは、投影画像を、透過させる上層書類の背後にある、机と下層書類の表面テクスチャ画像の組合せより生成する．この投影画像を書類スタックの上層書類へ投影することで透過効果を得る．

また、本研究では書類の仮想的な透過率を制御する．

従来の投影型透過システムでは、投影対象の透過率は考慮されてこなかった。しかし、実対象の透過率を自由に設定できるようになれば、Limpid Desk で実現されるインタラクションの可能性が大きく広がる。そこで我々は、投影光を適切に制御することで、対象の透過率を様々に変化させる。

ここまでで述べた、プロジェクタ投影による書類透過に関して基礎実験を行った。図 4 に、実際の透明・不透明なシートの両者を、それぞれ下層の紙の上に重ねて置いた様子を示す。つまり、上方に設置しているプロジェクタから投影光を同図 (a) に照射し、同図 (b) のようにユーザに見せることが、本研究の技術的要素である。

投影結果を図 5 (a1), (a2), (a3) に示す。このとき、プロジェクタから投影されている投影光を白色紙に映すことで可視化した様子を、同図 (b1), (b2), (b3) に示す。つまり、同図 (b1), (b2), (b3) のパターン光を図 4 (a) に対して投影すると、図 5 (a1), (a2), (a3) のように観測されるということである。投影画像は、机と下層書類を組み合わせた画像の輝度値を変化させて生成した。まず、図 4 (b) と図 5 (a3) の見えが同様であることから、提案する手法によって書類を仮想的に透過させることが可能であることが示された。また、図 5 (a1), (a2), (a3) より、上層の書類の透過率が変化し、徐々に下層の書類が透けて見えてくるような感覚を知覚できることが確認できる。これにより、プロジェクタ投影によって、書類の透過率を制御可能であることが確認できた。

#### 4.2 環境光を考慮に入れた投影光の色補正

先の基礎実験で使用した投影対象は、単一色紙であったため、投影画像の見えの視認性に問題は生じなかった。しかし実世界では、雑誌や写真といったほとんどの書類の表面は空間的に変化する反射特性を持っており、投影画像の色の見えを変更してしまう。そこで、文献 3) で我々が提案した手法を用いて色補正を施したプロジェクタ光を投影し、複雑なテクスチャを持つ上層書類に対して良好な透過効果を得ることを目指す。同手法では、環境光の影響をも考慮に入れた色変換行列を用いて、プロジェクタ投影色とカラーカメラで取得される対象からの反射色との色空間のアフィン変換を表現することができる。これを用いることで、対象上でプロジェクタ投影により任意の色の見えを再現することが可能となる。

図 6 に、空間的に変化する反射特性を表面に持つ雑誌を上層書類として、色補正あり・なしの双方で透過処理を行った基礎実験の結果を示す。同図 (a) に、投

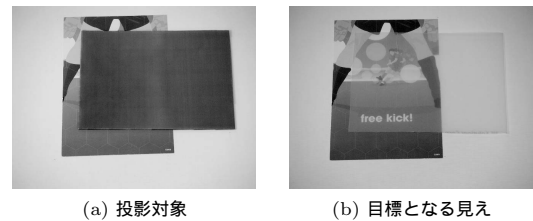


図 4 基礎実験対象書類スタック  
Fig. 4 Real document stack; the upper layer document is (a) opaque, (b) semi-transparent.

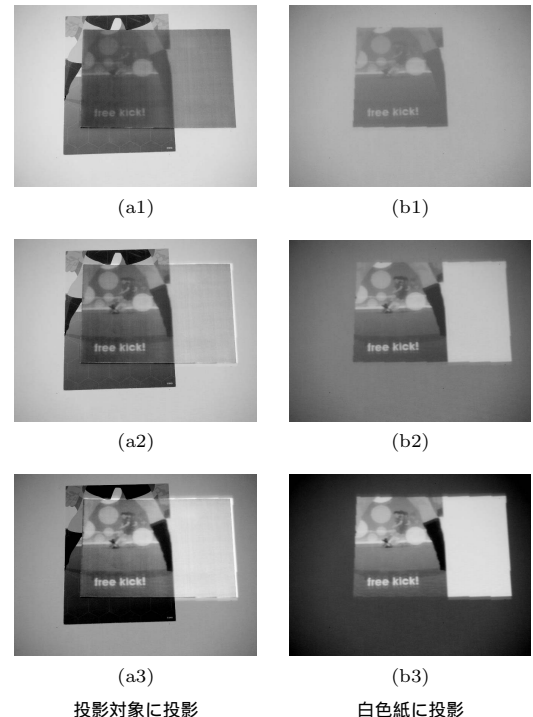


図 5 上層書類の背後にある書類と机の表面テクスチャ画像投影結果  
Fig. 5 Projection result; projecting the surface image of the lower layer document and the desktop under the upper layer document onto (a1)(a2)(a3) projection object, (b1)(b2)(b3) white paper.

影対象となる書類スタックを示す。同図 (b) は、この書類スタックの上層書類を取り除いた状態であり、これが投影後の目標画像となる。この書類スタックに、下層書類と机の表面テクスチャ画像より生成される投影画像 (同図 (c)) を、色補正を施さずに投影した際の色見えを同図 (d) に示す。同図 (e) は、同図 (c) の投影画像に色補正を施した結果である。これを同図 (a) に投影した結果を同図 (f) に示す。

目標画像 (同図 (b)) と、それぞれの投影結果 (同図 (d), (f)) との画素値の比較を行い、上層書類の領域において、色補正により、RGB 値 (各チャネル 8 [bit])



図 6 色補正を施した投影画像による上層書類の透過化  
Fig. 6 Transparentizing the upper document with projection of compensating light.

の 1 画素あたりの誤差平均が 19 から 10 に減少した。このことから、色補正によって、上層の色彩の違いによる影響が抑えられ、上層の書類がより透過されていることが分かる。ヒューマンインタフェースアプリケーションでの使用を考慮した場合、その透過効果は十分に高いといえ、投影画像の色補正の有効性が確認できた。

## 5. ヴィジュアルエフェクト

書類探索作業を支援するためには、表示された下層書類をすぐに書類スタックから取り出せるよう、それがその何層目にあるのかを、ユーザが直観的に認識することが重要となる。本研究では、上層の書類が透過していくという透過感をより強くユーザに感じさせることと、上層の書類を透過させる際に、何層の書類が透過処理されたのかをユーザに把握させることの 2 点に着目し、これらの目的を達する 2 種類のヴィジュアルエフェクトを提案する。

### 5.1 透過感を与えるエフェクト

机や下層書類の画像を投影してユーザに提示しただけでは、ユーザは単に上層の書類に何か画像が投影されているだけで、書類が透過したとは思えない可能性がある。そこで、書類が透過していくということを、

ユーザにより強く感じさせるためにフェードアウトエフェクトを採用する。上層書類の透過率が徐々に上昇していくことで、ユーザは書類が透過化していくことを直観的に認識できるようになる。

この直観性を評価するため心理実験を行った。実験では、2 枚の書類を机上に置き、フェードアウトエフェクト (0.5 [秒] に設定) あり・なしの場合に分けて、上層書類を前章で述べた手法に従って仮想的に透過させる。これを、大学生 7 人の被験者に見てもらい、書類が透過したと感じたかどうかのヒアリングを行った。この結果、フェードアウトなし、つまり、上層の書類に単に画像が投影された場合は、2 人の被験者が透過したと感じなかったと答えたのに対し、フェードアウトエフェクトを施した場合は、すべての被験者が書類が透過したように感じたと言った。このことから、フェードアウトエフェクトによって、書類の透過感をより高めることが可能となることが確認できた。

### 5.2 透過された書類数を把握させるエフェクト

上層書類が何層透過されたかをユーザに把握させるためには、それらを完全に透過させるのではなく、何らかの形でその存在をユーザに提示する必要がある。重なり合った画像の双方を同時に提示する方法としてはアルファブレンドが一般的に用いられる。しかしこのエフェクトは、2 層だけであれば問題はないが、重なり合う画像が増加するに従って、コンテンツの可読性・視認性を著しく低下させる。そこで我々は、上層の書類を 1 層ずつ透過させ、透過させる際には書類の枠を残していく、というエフェクトを提案する。

提案するエフェクトの直観性を確認するため、提案エフェクトも含めた計 6 種類のエフェクトを用意し、一対比較法に基づく心理実験を行う。エフェクトそれぞれに、A から F のアルファベットをラベルとして割り当てる。エフェクト A, D は、上層書類が特別なエフェクトなしに透過する。エフェクト B, E は、透過する上層書類すべてが下層の書類とアルファブレンドされる。エフェクト C, F は、上層書類が透過する際に、書類の枠だけは透過せずに残す。エフェクト A, B, C では、上層の書類がすべて一度に透過するのに対し、D, E, F では、上層の書類が 1 つずつ透過していく。ここで、エフェクト F が提案するヴィジュアルエフェクトである。PC 上で、書類の画像を 5 つ重ね合わせ、上層の 3 層を上記エフェクトに従って透過させるグラフィクスを生成し、モニタ上にそれを表示した。被験者は、モニタ上で何層の上層画像が透過したかということがより直観的に認識できると感じたエフェクトを一対比較によって選択する (図 7(a))。大

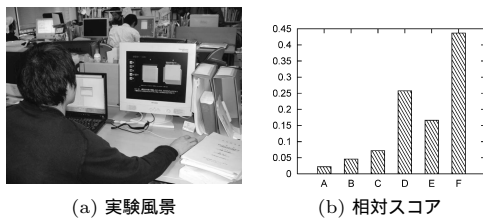


図 7 一対比較法

Fig. 7 Paired comparison method; (a) experimental view, (b) relative scores for each visual effect.

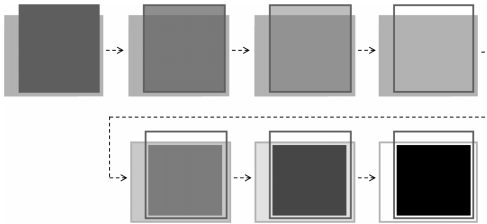


図 8 Limpid Desk に実装されるヴィジュアルエフェクト

Fig. 8 Visual effect for Limpid Desk; two upper layer documents are transparentized according to the proposed visual effect.

学生 15 人の被験者による実験結果を図 7(b) に示す。我々が提案するヴィジュアルエフェクト（エフェクト F）が最高スコアを獲得していることから、このエフェクトを用いることで、ユーザが最も直観的に上層書類が何層透過されたかを把握できることが示された。

### 5.3 ヴィジュアルエフェクトの実装

上記のエフェクトを図 8 に示すように、上層書類が一つ一つ、枠を残しながら徐々に透過していくというように統合し、システムに組み込む。本研究で提案するヴィジュアルエフェクトは決して特別なものではないが、これによって、表示された下層書類の書類スタック内での位置が直観的に把握できるようになり、効果的な書類探索作業の支援が可能となる。

## 6. 熱画像を用いた書類への接触検出手法

探索・操作・表示空間が机上で一致するシームレスなインタラクションを実現するために、机上で透過化の操作を行う必要がある。本研究では、ユーザの書類への接触を操作のトリガとして用いる入力インタフェースを構築する。ここで我々の求める入力インタフェースは、ユーザが特殊な道具を把持・装着することなしに、その掌や指の書類への接触を検出することができる、というものである。しかし、このようなセンサを構成することは、いまだ容易とはいえない問題である。

我々は、ユーザが実物体に触れた際に、物体上の接触部位に残る熱を計測することで、実物体への接触を

検出する手法を提案する。たとえば、ユーザがある物体に接触すると、その体温が物体へ伝達される。そして、ユーザが接触している手を物体から離しても、少しの間、熱が物体表面に残る。この実物体表面の蓄熱現象を計測することでユーザの接触位置を検出することができる。

システムに組み込まれている遠赤外線カメラから取得される熱画像から、物体上の高温変化領域（約 30℃以上、画素値 125 以上に設定）を検出し、それをユーザの接触領域とする。このとき、接触領域だけでなく、ユーザの身体（接触している手や腕）も、熱画像中に高温変化領域を引き起こすということが問題となる。そこで、カラーカメラから取得される可視画像を用いる。可視画像に対して背景差分処理を行うことで、ユーザの身体領域を侵入領域として検知する。そして、可視画像の背景とされた領域に対応する熱画像の部分領域を処理領域として、その中から高温変化領域を検出する。高温変化領域の検出には、あらかじめ取得しておいた熱画像の背景画像を利用する。高温領域ではなく、高温変化領域を検出することで、机上に置かれたコーヒーカップのような動かない高温物体が接触領域として検出されてしまうことを防ぐ。なお、背景差分で利用される可視・熱双方の背景画像は、10 秒間シーンに変化がない場合に更新される。

処理の流れを、図 9 に示す。まず、可視画像で侵入検知を行い、熱画像中よりユーザの身体領域を取り除くためのマスク画像を生成する。次に、マスク処理により、熱画像より処理領域を切り出す。最後に、この処理領域において、熱画像の背景画像との比較により高温変化領域を抽出し、ノイズ除去処理を施してユーザの接触領域を検出する。

カメラ座標系間の空間的な対応を得ることで、マスク処理における位置ずれ問題を解決する。遠赤外線カメラとカラーカメラを、遠赤外光反射・可視光透過の性質を持つダイクロイックミラーを用い、光軸が同軸となるように設置する（図 10）。そして、机面でのホモグラフィを求めることで、カメラの光軸方向の任意の奥行きにおいて、双方のカメラ座標系間の位置合わせを可能とする。これによって、手が机上空間のどこにあっても、マスク処理によって熱画像の処理領域から除外され、また、どのような高さの書類スタックに対しても、安定に接触だけを検出することが可能となる。

提案する接触検出手法の動作確認を行った。重ねられた 2 冊の本の上層に接触すると、接触した領域が透過するという実験を行った（図 11）。同図 (a), (b) にそれぞれ、投影前の書類スタックと、その下層書類を

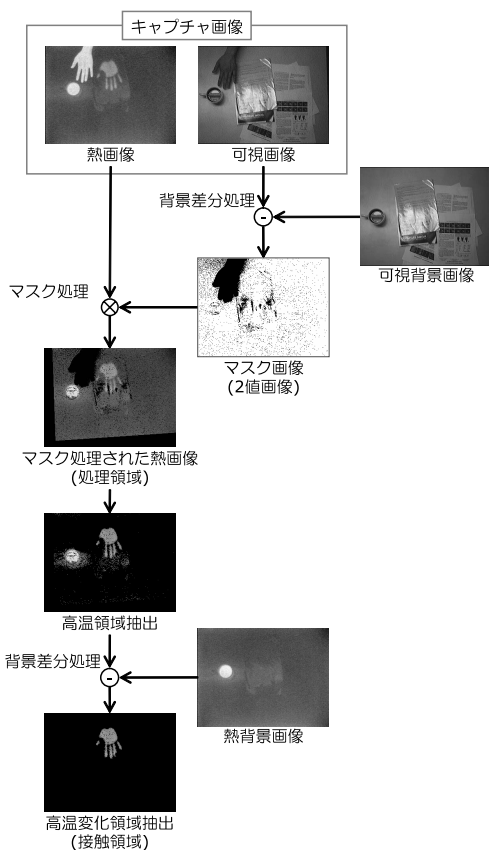


図 9 接触検出処理の流れ

Fig. 9 Flow of the touch area sensing.

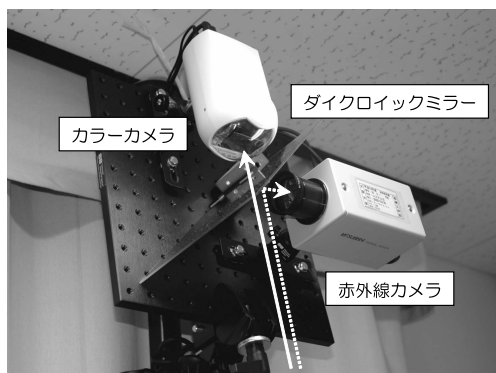


図 10 遠赤外線カメラとカラーカメラの光軸同軸設置

Fig. 10 A coaxial thermo infrared camera and color camera system.

示す．同図 (c) に示すように，ユーザが手を書類に接触させた後，その手を離すと，同図 (d) に示すように，掌の接触領域で上層書類の透過が生じ，下層の書類が表示されていることが確認できる．この実験結果は，熱画像を利用した接触検出手法が有効であることを示している．処理のフレームレートは約 10 [frame/sec]

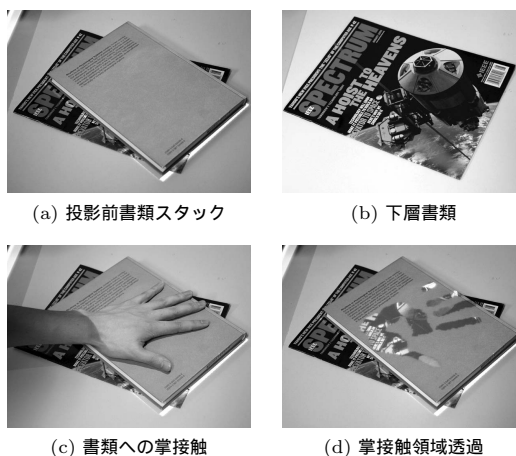


図 11 手接触領域へ下層書類画像投影による上層書類の透過化  
Fig. 11 Transparentizing the upper document with touched hand shape by projection of the lower layer document image.

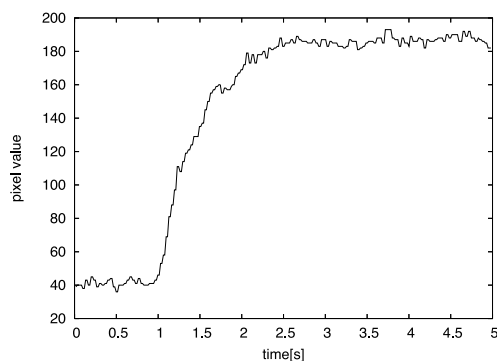


図 12 紙面上の指先接触部分の温度変化

Fig. 12 Temperature shift of a paper where a finger touches.

であり，提案する接触検出手法が，一般的な計算機上においてリアルタイムに動作することが確認できた．また，ユーザの手の熱が書類に伝達される時間を測定するため，気温 25 [°C] の室内で，A4 コピー用紙に指で接触した際の，その紙の裏側の温度変化を遠赤外線カメラで計測した結果を図 12 に示す．ユーザの接触によりコピー用紙の温度は，定常状態（画素値 40）から 0.43 [秒] で，我々が設定している閾値（画素値 125）に達している．これから分かるように，書類への熱伝導は接触判定の目的には十分早く起こり，書類への接触後すぐに手を離しても，接触領域検出は可能である．

## 7. 書類探索インタラクション

システムに実装する 2 つの直観的な書類探索インタラクションについて述べる．これらでは，探索・操作・表示空間が机上で完全に一致するシームレスな操作体

系を実現する．これらのインタラクションでは，ユーザは書類や書類スタックに触れるだけでそれらを透過させることができる．そして，実際に書類スタックの書類を取り出したりめくったりすることなく，下層にどんな書類があるのかを把握することができる．これによって，所望の書類を効率的に探索することが可能となる．

### 7.1 スタック閲覧型探索インタラクション

スタック閲覧型探索インタラクションは，ここまで述べてきた技術要素すべてを組み込んだインタラクションである（図 13）．ユーザが書類スタックの最上層の書類に触れると，システムがその接触を検出する（同図（a），（b））．同図（b）左上に投影表示されている丸枠はユーザがその位置に接触したことを示す．そして，提案するヴィジュアルエフェクトに従って，1 層ずつ枠を残しながらフェードアウトしていく（同図（c））．最下層の書類が表示されると，透過処理は終了する（同図（d））．

このインタラクションでは，ユーザは書類スタック中のすべての書類をワンアクションで閲覧することが可能となる．そして，書類スタック内に所望の書類がある場合は，その書類のスタック内での位置をヴィジュアルエフェクトによって把握することができるため，ユーザは即座にその書類を取り出すことができる．また，そこに探している書類がない場合はすぐに他の書類スタックを探索操作に移行することが可能である．つまり，書類スタックが机上に多く存在している場合や，多くの書類が積み重なってそれぞれの書類スタックを構成しているような状況では，無駄な労力と時間を割いて探索作業を行うことがなくなり，効率的に書類探索を行うことが可能となる．

### 7.2 直接指示選択型探索インタラクション

書類スタックからはみ出している書類が何であるかを確認したいとき，わざわざそれを抜き出して確認するのは手間がかかる．そこで，直接指示選択型探索インタラクションを提案する（図 14）．このインタラクションでは，書類スタックからはみ出している書類の一部に触れることで（同図（a）左上，同図（b）に拡大表示），それより上の層の書類をプロジェクト投影によって透過化し，触れた書類を表示する（同図（d））．

このインタラクションは，重たい書類の下などに置かれた書類を抜き出すような困難な状況や，あらかじめ書類スタックに積み上げる順番に意味を持たせていて，書類を抜き取ることで書類スタックが崩れて机上に散乱してしまうと都合が悪くなるような状況において効果が大きい．なお，このインタラクションでは，



図 13 スタック閲覧型探索法

Fig. 13 “Stack Browse” interaction.

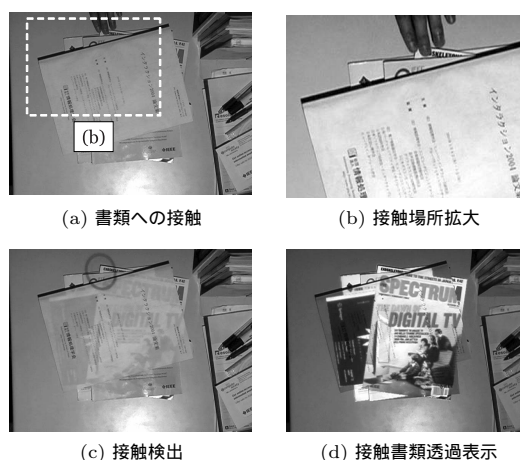


図 14 直接指示選択型探索法

Fig. 14 “Direct Select” interaction.

書類のスタック内での位置を，ユーザはすでに把握しているため，ヴィジュアルエフェクトとしてはフェードアウトを使用する．

## 8. 評価

提案するインタラクションによって書類探索効率が高まったかどうかを評価するユーザテストを行う．そして，従来の PC インタフェースを用いた書類探索支援手法<sup>12),13)</sup>との比較を行い，インタラクション空間一致の有効性を明らかにする．

### 8.1 手作業での書類探索との比較による評価実験

7.1 節で提案したスタック閲覧型探索インタラクションに関して，ユーザテストによる評価実験を行う．被験者に，提案する探索インタラクションによる支援がある場合と，支援のない手作業の場合とで，それぞ

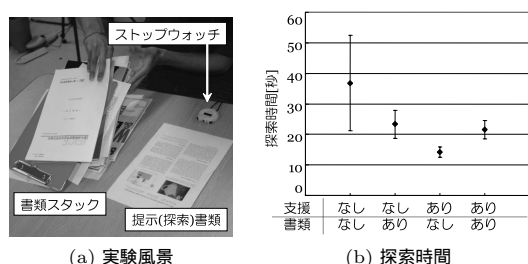


図 15 評価実験

Fig. 15 User test: (a) experimental view, (b) search time.

れ 1 つの書類スタックから 1 つの書類を探索してもらう。書類探索では、所望の書類が書類スタック中にある場合とない場合が存在する。そこで、「支援あり・書類なし」、「支援あり・書類あり」、「支援なし・書類なし」、「支援なし・書類あり」の 4 種の状況において、それぞれのタスク達成時間を計時して比較する。

各実験では書類スタックと探索する書類のコピーを用意する。まず、被験者に対してこの書類のコピーを提示し、これから探索する書類として確認してもらう。そして、被験者が探索を開始すると同時に計時を始める。探索の結果、提示した書類が書類スタック内にないと被験者が判断した場合、その時点で被験者自らが計時を止める（「書類なし」のタスク）。また、書類を発見した場合はそれを書類スタックから取り出して机の上に置き、被験者自身が計時を止める（「書類あり」のタスク）。つまり、提示した書類があるかないかは、ユーザに知らせておらず、探索を行いながらそれを判断してもらう。

図 15(a) に示すような 20 種の書類（A4 紙書類 10 [枚]・A4 雑誌 4 [冊]・B5 雑誌 4 [冊]・A4 バインダ 1 [冊]・A4 ファイルフォルダ 1 [冊]）から構成される書類スタックを 4 セット用意する。なお、実験ごとに書類スタック中の書類は変更する。被験者に探索してもらう書類は、A4 紙書類である。「書類あり」の実験では、この書類はスタックの上から 16 層目に差し入れておく。

大学生 6 人を対象に行った計時結果の平均と標準偏差を図 15(b) に示す。「書類あり」のタスク達成平均時間は、「支援あり」で 21.5 [秒]、「支援なし」で 23.3 [秒]であった。また、「書類なし」のタスク達成平均時間は、「支援あり」で 14.2 [秒]、「支援なし」で 36.8 [秒]であった。これより、「書類あり」では、「支援あり」と「支援なし」でのタスク達成時間にほとんど差が見られなかったのに対して、「書類なし」では、システムの支援によって 22.6 [秒]の探索時間の短縮が可能となっていることが確認できる。

「支援なし・書類なし」のタスク達成時間が長くなったのは、被験者が、見落とした書類はないかと何度も書類スタックを探索し直していたことが大きな原因である。これに対し、「支援あり・書類なし」では、透過処理によって、確実に書類スタック内の全書類を把握することができたため、透過表示時間の 10 [秒]（20 [冊] × 0.5 [秒]）程度で提示された書類がないことが判断された。

この結果をもとに、提案手法の有効性を評価する。今、机上に存在している  $L$  個の書類スタックから所望の書類を探索し、 $l$  番目の書類スタックでこの書類を見つけ出したとする。このとき、書類スタックごとの探索時間として、探索書類が紛れ込んでいる書類スタックからその書類を見つけ出す時間（「書類あり」の探索時間）を  $t^p$ 、探索書類がその書類スタックに存在していないことを判断するまでの時間（「書類なし」の探索時間）を  $t_i^n$  ( $i = 1, \dots, l-1$ ) とすると、所望の書類を見つけ出す総時間  $T$  は、以下の式で表すことができる。

$$T = \begin{cases} t^p + \sum_{i=1}^{l-1} t_i^n & (l > 1) \\ t^p & (l = 1) \end{cases} \quad (1)$$

今回の実験では、提案手法によって、 $t^p$  は短縮されなかったものの、 $t_i^n$  が短縮できることが示されている。このことから、 $l > 1$  では書類探索時間が短縮される。さらに、探索する書類スタック数  $l$  が増加すると、総探索時間  $T$  に対する  $\sum_{i=1}^{l-1} t_i^n$  の占める割合が大きくなることから、書類探索効率の向上が顕著となる。一般的に机上に書類スタックは複数存在しており、 $l > 1$  となる状況は多く存在する。このため、提案するインタラクションはコンピュータ支援のない手作業での書類探索に比べて有効であるといえる。

## 8.2 インタラクション空間一致の有効性

思考実験によって、従来研究<sup>12),13)</sup>で提案されている PC インタフェースを介する書類探索と、本研究で提案する書類探索との比較を行い、インタラクション空間一致の有効性を検証する。従来研究では、PC の入力インタフェースを用いて探索操作を行い、そのモニタ上に書類の画像情報が提示されるため、これら操作・表示空間と机上の探索空間とが一致していない。ここでは、スタック閲覧型探索インタラクションを、提案手法（Limpid Desk）と従来手法（PC）の双方に実装したと仮定し、その探索時間を比較する。なお、この思考実験では、一般的なオフィス空間のように、PC モニタと複数の書類スタックがユーザの手の届く範囲内に存在しており、オフィスワークがその書類ス

タック群から、1 つ所望の書類を探すという状況を想定している。

PC インタフェース上に実装されたスタック閲覧型探索インタラクションを、以下に示すように仮定する。PC モニタにはタッチパネルが取り付けられており、モニタ上には机の上方に取り付けたカラーカメラよりキャプチャされた机上の書類の映像が映し出される。ユーザはその書類スタック画像の上を指でタッチすることで、その下層の書類を、5 章で提案するヴィジュアルエフェクトに従って透過させて見ることができる。ユーザは、モニタ上で所望の書類を発見した後、その書類が含まれているモニタ上の書類スタックに対応する机上の書類スタックを同定する。そして、その机上の書類スタックから書類を取り出す。

提案手法と従来手法の双方とも、机上にある同じ書類スタックから同じ書類を探索し、その書類を見つけて取り出すとし、そのタスク達成時間を比較する。まず、探索している書類スタック中に所望の書類がない場合について考察する（「書類なし」）。この場合、透過処理を始動させるトリガとしての接触動作と、ヴィジュアルエフェクトによる透過処理が行われる。接触対象が実書類スタックかモニタ上の書類スタック画像かという違いがあるものの、双方に接触動作の差異はほとんどなく、また、ヴィジュアルエフェクトによる透過処理時間は同じである。このため、提案手法と従来手法では、探索時間は同じとなる。

一方、探索している書類スタックに所望の書類がある場合（「書類あり」）、以下に示すように探索時間は異なる。式 (1) の  $t^p$  は、以下の式のように分解することができる。

$$t^p = t^f + t^m + t^g \quad (2)$$

ここで、 $t^f$  は書類スタックもしくはモニタ上に表示されている書類スタック画像に接触してから所望の書類を目視で確認するまでの時間、 $t^g$  はその書類スタックから所望の書類を取り出す時間である。これらは、「書類なし」の場合と同様、双方で同一のヴィジュアルエフェクトを提示していることから同じ値となる。

$t^m$  は、PC インタフェースを用いる探索の場合にのみ生じるもので、ユーザが認知的に、モニタ上で確認した書類スタックと、机上の書類スタックとの対応付けを行うために必要な時間である。この対応付けにかかる時間は、机上の書類スタックの数が増えたり、それらの外観が似ていたりすると増加すると考えられる。これに対して提案手法では、操作・表示・探索のインタラクション空間が一致しており、対応付けの認

知プロセスは必要なく、 $t^m = 0$  となる。モニタを介在した探索では、短いとはいえ  $t^m$  だけ余分に時間を要するだけでなく、認知プロセスの負荷がユーザにかかることから、それを課さない提案手法のインタラクション空間の方が快適な書類探索をもたらすものといえる。

これは、PC モニタと書類とが近接して混在している状況のみを仮定した単純な思考実験であり、両者が隣接していない（たとえば、検索端末と書庫が離れているような図書館）のような場合にまで一般化できるものではない。このため、実環境へこれらの書類探索支援システムを導入する場合は、それぞれの特徴を考慮し、導入する状況に応じて最適な手法を選択していくことが重要であると考えられる。

## 9. 考察と展望

現状のプロジェクタの輝度範囲の狭さ、カラーカメラのダイナミックレンジの狭さより、表面が黒い（反射率の低い）書類やコントラストの強いテキストを持つ書類を色補正することは困難となる。この問題に対してはすでに、人間の視覚心理特性を利用して補正を行い、色再現範囲の狭さによる影響を抑える研究が進められている<sup>(6),(7)</sup>。これに加え、今後、プロジェクタの空間解像度や輝度、カラーカメラの空間解像度やダイナミックレンジの改善により、色補正精度の向上が期待できる。

我々の提案する熱画像を利用した接触検出手法は、ユーザが何も道具を保持・装着する必要なしに、様々な実物体上での接触領域を検出することができる。このためこの手法は、他の投影型インタラクティブシステムはもとより、実世界中でコンピュータとインタラクションするようなシステムに対しても適用することが可能である。またこの手法は、複数ユーザの複数の接触領域を同時に検出することや、その属性情報として温度変化量をも同時に取得することが可能である。このことから、複数人の協調作業や、接触判定だけではない豊富なインタラクションが可能となる。

特徴点照合の画像処理技術の発達により、頭上に取り付けられたカメラを用いて机上の書類を認識・追跡する研究が行われてきている<sup>(12)</sup>。Limpid Desk にも同様に文献 21), 22) などで提案されているような画像処理技術を組み込むことで、書類の移動や書類スタックの崩れが生じる動的な環境においても、自動的に、机上のすべての書類を認識することが可能となる。また、現在のシステムでは、複数の書類が最初から積み重ねられた状態で机上に置かれた場合、その下層書類を透過

表示させることはできない。しかし、書類が積まれる過程が記録されていれば、自分の机上にこれら複数の書類が一度に置かれても下層の書類を透過させることが可能となる。

PC デスクトップ上では、Apple 社 MacOS X の Exposé のように、簡易な操作ですべてのウィンドウをサムネイル表示しタイル状に整列させる機能が組み込まれており、デスクトップ上にある多層に重なり合ったウィンドウを一目で把握することができる。8.1 節での評価実験で明らかになったように、探索している書類がその書類スタック内にあるのかないのかを判断するまでの時間を短縮することによって、書類探索効率が向上するため、このようなヴィジュアル化を Limpid Desk に組み込むことで透過処理以上の効果が期待できる。しかし、書類スタック中の全書類のサムネイル画像を投影表示する際に、立体的な投影面である机上では、最適な投影位置を求めることは困難である。また、PC デスクトップ上に一度に開かれるウィンドウの数は、多くても 10~20 個程度であるため、サムネイル画像として表示した際にもそれぞれのウィンドウが何であるかを認識することは可能であるが、実世界の机上では 100 冊以上の書類が散乱している場合もあり、サムネイル化して机上に表示すると、個々のサムネイルが小さくなりすぎて、ユーザはそれを見ただけでは何の書類が投影されているのかを認識することは困難となる。このため、このようなインタラクションは Limpid Desk には適していないといえる。

Limpid Desk で提案した枠組みは、書類探索に限らない他の領域で利用できる。たとえば、図 11 で示したように、自分の見たい(透過させたい)部分に触れるというインタラクションを応用すると、生徒が様々な生物や機械の内部構造を、直観的な接触インタフェースによって覗き見ることができる、というような教育用コンテンツが考えられる。ほかに、物置にある段ボール箱のような普段は開けることのないものの中身を箱に触れて見ることや、家の外の環境を壁に触れることで見るという応用が可能である。

本論文では、書類探索の限定的な状況のみを扱っている点を改めて述べる。今回我々が想定していたような煩雑な積み方がなされている書類スタック以外にも、整えられて書類がスタックされている場合もある。このように、書類スタック中の書類の煩雑度のようなパラメータを変化させた際に、提案するインタラクション技法とヴィジュアルエフェクトがどの程度有効かどうかを調査する必要がある。また、今回の被験者実験では、スタック閲覧型探索インタラクションに関して

のみ評価を行ったが、今後は直接指示選択型探索インタラクションに関する評価を行い、双方のインタラクション技法がそれぞれどのような状況で有効であるのかを明らかにする必要がある。

## 10. おわりに

我々は、投影型複合現実感技術を用いて、無造作に散らかった机上の書類スタック群の中から所望の書類を探索する作業を支援するシステム Limpid Desk を提案した。提案システムでは、上層書類を仮想的に透過させることで、それを動かすことなく、ユーザは視覚的に下層書類にアクセスすることができる。環境光と投影対象の反射率を考慮した投影画像の色補正を行うことで、空間的に複雑な反射特性を持つ書類表面上において、任意の色の見えを実現し、良好な透過効果を得ることができた。ユーザに透過表示する下層書類が書類スタック中の何層目に位置しているのかを直観的に把握させるには、上層書類が一つ一つ、枠を残しながら徐々に透過していくというヴィジュアルエフェクトが最適であることを明らかにした。探索・操作・表示空間を一致させるという、インタラクション空間の一貫性に主眼を置いた、直観的なインタラクションを Limpid Desk に実装した。このインタラクションでは、書類スタックや書類に触るだけで透過操作を行うことを可能とした。そして、評価実験を通じて、このインタラクションによって書類探索効率が向上することを示した。このようなインタラクションを実現するための入力インタフェースとして、我々は実オブジェクトへのユーザの接触を、熱画像を用いることで検出することを可能とした。今後は、提案するシステムを発展させ、仮想世界のデスクトップ空間と物理世界の机上空間をシームレスに統合することを目指す。

## 参 考 文 献

- 1) Bonanni, L., Lee, C. and Selker, T.: CounterIntelligence: Augmented Reality Kitchen, *Proc. CHI'05*, ACM, pp.2239-2245 (2005).
- 2) Inami, M., Kawakami, N. and Tachi, S.: Optical Camouflage Using Retro-reflective Projection Technology, *Proc. ISMAR'03*, IEEE/ACM, pp.348-349 (2003).
- 3) Yoshida, T., Horii, C. and Sato, K.: A Virtual Color Reconstruction System for Real Heritage with Light Projection, *Proc. VSMM'03*, pp.161-168 (2003).
- 4) Bimber, O., Wetzstein, G., Emmerling, A. and Nitschke, C.: Enabling View-Dependent

- Stereoscopic Projection in Real Environments, *Proc. ISMAR'05*, IEEE/ACM, pp.14–23 (2005).
- 5) Nayar, S.K., Peri, H., Grossberg, M.D. and Belhumeur, P.N.: A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections, *Proc. PROCAMS'03*, IEEE (2003).
  - 6) Wang, D., Sato, I., Okabe, T. and Sato, Y.: Radiometric Compensation in a Projector-Camera System Based Properties of Human Vision System, *Proc. PROCAMS'05*, IEEE (2005).
  - 7) Ashdown, M., Okabe, T., Sato, I. and Sato, Y.: Robust Content-Dependent Photometric Projector Compensation, *Proc. PROCAMS'06*, IEEE (2006).
  - 8) Bandyopadhyay, D., Raskar, R. and Fuchs, H.: Dynamic Shader Lamps: Painting on Movable Objects, *Proc. ISAR'01*, IEEE/ACM, pp.207–216 (2001).
  - 9) Mukaigawa, Y., Nishiyama, M. and Shakunaga, T.: Virtual Photometric Environment using Projector, *Proc. VSMM'04*, pp.544–553 (2004).
  - 10) Raskar, R., Welch, G., Low, K. and Bandyopadhyay, D.: Shader Lamps: Animating Real Objects with Image-Based Illumination, *Proc. EGRW'01*, EuroGraphics, pp.89–102 (2001).
  - 11) Hisada, M., Nakano, Y., Kanaya, I. and Sato, K.: Visual Forming of Real Object Using Virtual-Shade Projection, *Proc. VSMM'04*, pp.93–98 (2004).
  - 12) Kim, J., Seitz, S.M. and Agrawala, M.: Video-Based Document Tracking: Unifying Your Physical and Electronic Desktops, *Proc. UIST'04*, ACM, pp.99–107 (2004).
  - 13) Sio, I., Rawan, J. and Mynatt, E.: Finding Objects in “Strata Drawer”, *Proc. CHI'03*, ACM, pp.982–983 (2003).
  - 14) Sato, K., Kusumoto, T., Uchida, T., Horii, C. and Inokuchi, S.: Real Objects with Virtual Texture on A MR Table — Projection Based Mixed Reality, *Proc. IEEE VR Research Demonstrations*, p.9 (2001).
  - 15) Dietz, P. and Leigh, D.: DiamondTouch: A Multi-User Touch Technology, *Proc. UIST'01*, ACM, pp.219–226 (2001).
  - 16) Rekimoto, J.: SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces, *Proc. CHI'02*, ACM, pp.113–120 (2002).
  - 17) Koike, H., Sato, Y. and Kobayashi, Y.: Integrating Paper and Digital Information on EnhancedDesk: A Method for Realtime Finger Tracking on an Augmented Desk System, *ACM TOCHI*, Vol.8, No.4, pp.307–322 (2001).
  - 18) Letessier, J. and Berard, F.: Visual Tracking of Bare Fingers for Interactive Surfaces, *Proc. UIST'04*, ACM, pp.119–122 (2004).
  - 19) Wilson, A.D.: PlayAnywhere: A Compact Interactive Tabletop Projection-Vision System, *Proc. UIST'05*, ACM, pp.83–92 (2005).
  - 20) Iwai, D. and Sato, K.: Heat Sensation in Image Creation with Thermal Vision, *Proc. ACE'05*, ACM, pp.213–216 (2005).
  - 21) Lepetit, V., Laguerre, P. and Fua, P.: Randomized Trees for Real-Time Keypoint Recognition, *Proc. CVPR'05*, IEEE, pp.775–781 (2005).
  - 22) Lowe, D.G.: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, Vol.60, No.2, pp.91–110 (2004).

(平成 18 年 6 月 16 日受付)

(平成 18 年 12 月 7 日採録)



岩井 大輔

2003 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。2005 年同大学大学院博士前期課程修了。2006 年日本学術振興会特別研究員。現在、大阪大学大学院博士後期課程在学中。

投影型複合現実感、ヒューマンコンピュータインタラクションに関する研究に従事。IEEE, VR 学会, HI 学会ほか各会員。



佐藤 宏介 (正会員)

1983 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1985 年同大学大学院修士課程修了。1986 年同大学助手。1988～1990 年カーネギーメロン大学ロボット工学研究所客員研究員。

1994 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。2003 年大阪大学大学院基礎工学研究科教授。画像計測、仮想現実感、デジタルアーカイブ等の映像情報メディアの研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, VR 学会, 色彩学会, IEEE ほか各会員。