

Limpid Desk : 投影型複合現実感による机上実物体の透過化

岩井 大輔† 花谷 佐和子† 堀井 千夏‡ 佐藤 宏介†
†大阪大学大学院基礎工学研究科 ‡摂南大学経営情報学部

概要 : 机上に積み重ねられた書類に関して、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。並びに、ユーザの手の上層の書類への接触を、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。提案システムでは、現実の机上空間でも仮想デスクトップ環境と同様、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、書類ベースから PC ベースへのパラダイムシフトの必要なしに、机上の書類探索作業の能率を向上させる。また、探索空間・操作空間・情報提示空間が一致し、ユーザは PC を介さずに直接書類に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、全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: Translucent Documents on Real Desk Using Projection Based Mixed Reality

Daisuke Iwai † Sawako Hanatani † Chinatsu Horii ‡ Kosuke Sato †
† Osaka University ‡ Setsunan University

Abstract: We propose “*Limpid Desk*” in which users can visually access to the lower layer of real documents multiply stacked on a real desktop using projection based mixed reality. Special pattern light which is photometrically compensated as if the upper documents would be translucent is projected to the stacked documents which users touch. We also propose a touch sensor, as an interface of the proposed system, which can recognize the users’ touch regions on the real objects, without any tools which users wear and hold, using thermal (far infrared) image. Like PC desktop graphics, in the proposed system, users can realize the lower layer of documents without physically moving the upper documents on the real desktop. In the proposed system, since the stack space, the manipulating space, and the display space are completely unified, users can directly access any documents without PC interface. We claim that this kind of consistency of the manipulation 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常に物が溢れている。PC、書類(雑誌・書籍・フォルダ等)、小物、文具類と、様々なものによって埋め尽くされた机上では、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、書籍が出版されてきているものの[1][2]、日々の多忙さに追われるユーザにとっては実践する余裕も少ない。

実世界の机上とは対照的に、仮想世界のデスクトップ上では、書類に見立てたウィンドウを必要

に応じて、容易に開閉できる為、実世界の机上のような混乱はない。近年ではそれに加え、簡単な操作で、起動中の任意のウィンドウに視覚的にアクセスすることのできるインタフェースが提案され、実世界における机上整理の煩わしさからユーザを解放することに成功している。

Apple 社の Mac OS X に標準搭載されている Exposé は、複数起動中のアプリケーションやファイルを視覚的に整理し表示することで、これらを直観的に把握することのできるソフトウェアである。これにより、デスクトップ上の作業空間を一々整理する必要がなくなり、ユーザは、作業そのものに没頭することが可能となる。さらに、同 OS デスクトップ環境では、上層のウィンドウを透明化させることで、それを移動させることなく下層のウィンドウに視覚的にアクセスできる。Microsoft 社の次期 OS である 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の搭載が発表されている。

実世界の机上環境から、仮想環境へ完全に移行することができれば、操作性が上がり、作業の能率が向上する。しかし、電子書類に比べ、物理的な書類の閲覧性の高さ、注釈・メモ・スケッチや並べ替えの容易さは、大きな長所であり、完全移行は現在のところ有効な解決策とはならない。

そこで本研究では、投影型複合現実感技術を用いて、下層の書類の映像を取得し、あたかも上層の書類が透過しているかのように処理した映像を、上層の書類へ直接プロジェクタ投影するシステム **Limpid Desk** を提案する。これにより、現実の机上空間でも、上に置かれた書類を物理的に移動させることなく、下層の書類の情報に視覚的にアクセスすることが可能となる。これによって、書類ベースから PC ベースへのパラダイムシフトの必要なしに、書類探索の作業能率を向上させる。

提案システムではさらに、机上の書類に直接接触して操作を行う入力法を提案する。これには、熱画像を利用して、ユーザの掌や指の書類への接触を、特殊な道具を把持・装着せずにセンシングすることを可能とする。これによって、机上の書類探索を行う空間(探索空間)、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)を一致させ、一貫性のある直観的なインタラクションを実現する。

以下では、従来研究を基に本研究の位置づけを明らかにした後、**Limpid Desk** の包括的な概念である、投影型透過インタフェースについて述べる。そして、熱画像を利用した接触センシング手法を紹介する。投影型複合現実感技術による実物体の透過効果と提案する接触センシング手法の動作確認実験について述べた後、これらを用いた書類探索インタラクションについて述べる。

2. 従来研究

実世界の書類探索を PC 上で行う研究、投影型複合現実感技術を用いて実物体を擬似的に透過させる研究、投影型複合現実感技術を用いた色補正手法の従来研究をそれぞれ挙げ、本研究の位置づけを述べる。

2.1 PC モニタを介した実世界の書類探索

検索能力の優位性、アクセスの容易さ、蓄積性能の高さから、PC 上で、実世界での書類探索作業を行う研究が行われてきている。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を連携させる作業環境の提案が行われている[3]。この研究では、物理書類、電子書類双方の長所を融合させることで、効率的な作業環境を実現することを目指している。

机上だけではなく、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が提案されている[4]。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、ユーザが PC 画面のタイムスライドを操作するだけで、過去に引き出しにしまっておいた目的の書類を容易に見つけることが可能となる。

これらのシステムでは、実世界では不可能であるような効率的な書類の探索を、PC 上で容易に所望の書類を見つけ出すことで可能としている。しかし、実世界での探索作業を、一度マウスやキーボード、PC モニタを介して行うため、探索空間・操作空間・表示空間が一致していない。

これに対して、机上に積まれた CD や DVD の中から目的の物を見つけるのに、ステレオカメラで取得される指の高さ情報を用いて、指の高さに積まれている CD のジャケットをユーザに提示するシステムも提案されている[5]。このシステムで

は、探索空間と同一空間で操作を行うことが可能であるため、操作の一貫性が保たれているが、探索結果の表示空間は一致していない。

提案システムでは、探索（透過）操作を、探索を行う机上でを行い、かつ、下層の書類の情報を、操作している空間へ直接投影することでユーザに提示する。これによって、探索空間・操作空間・表示空間が一致し、ユーザは明示的に PC を介すことなく、直観的に所望の書類を見つけ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、全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。

2.2 投影型複合現実感による実物体透過システム

奥にある実物体の仮想像を手前の実物体に重畳することで、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”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。再帰性反射材からの反射光によって、まるで手前の実物体が透過しているように見える[6]。しかし、この研究では、透過する対象には必ず再帰性反射材をつける必要がある。つまり、実物体そのものを透過させているわけではない。

冷蔵庫の扉に冷蔵庫の中身の映像を投影するシステムが提案されている[7]。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、幾何学的にも光学的にも整合性のとれた質の高い映像表示が可能であるが、透過領域は扉全体で固定されており、ユーザは透過領域を指定することはできない。

本研究では、後述する色再現手法を用いることで、様々なテクスチャを持った実物体に、光学的整合性を保つよう処理されたプロジェクタ投影して透過効果を実現する。

2.3 複合現実感色補正技術

複合現実感技術には、実物体と仮想像との重畳の方式として、大きく分けて、ビデオシースルー方式、光学シースルー方式、投影方式の3種がある。この中で、後者の2種は、実物体からの光を直接見ることが可能であることから、高い現実感を伴う。しかし、その反面、任意の色の見えの再現が容易ではなく、光学的整合性を保つことは困

難であった。

近年、この問題を解決し、投影型複合現実感の分野において、実物体の色の見えを任意に変化させる技術の提案が多くなされてきている[8][9][10]。また、対象の反射率が低い場合においても、人間の視覚心理特性を利用する事で補正を行い、色再現範囲が狭くなるという影響を抑える研究も進められている[11]。また、今後、プロジェクタの空間解像度や輝度、カメラの空間解像度やダイナミックレンジの改善による色補正精度の向上が期待できる。

本研究では、任意のテクスチャを持つ上層の書類上に、下層書類テクスチャのサムネイル画像を表示させたり、上層書類を擬似的に透過させて下層書類のテクスチャ画像を表示させたりする効果を得る為に、必要に応じて、光学的整合性を保つよう補正されたプロジェクタ投影を行う。

3. 投影型透過インタフェースと Limpid Desk

我々は、投影型複合現実感技術を用いて、任意の実物体の透過効果を実現する投影型透過インタフェースというコンセプトを提案する。表1に示すように、投影型透過インタフェースのバリエーションは多岐にわたる。

今回我々の提案する Limpid Desk は、机上書類を透過対象とした、投影型透過インタフェースの概念の一応用である。今回、仮想透過率は、書類全体や指示領域にて自由に変更する。色補正を施したプロジェクタ投影によって、アノテーションや下層書類のテクスチャ画像を上層書類に表示する。そして、掌接触による入力を、熱画像を用いることで実現する。

表1：投影型透過インタフェース

仮想透過率	対象全体・指示領域
色補正	有・無
投影情報	アノテーション型・実画像型
複数層の情報提示手法	一層のみ上層から表示 全上層物体を α ブレンドし表示 全上層物体のワイヤフレームを表示
入力法	掌接触・マウス・キーボード
透過対象	机上書類・壁・収納箱

4. 熱画像を用いた実物体への接触センシング

従来、様々なタッチセンサが開発されてきているが、特殊な道具を把持・装着することなしに、ユーザの掌や指の実物体への接触領域を直接計測することのできるセンサを構成することは、未だ容易とはいえない問題である。

我々は既に、体温を利用して、ユーザの身体の一部の接触領域を、熱画像を利用して検出する入力デバイスを提案している[12]。このシステムでは、接触面に生じる温度変化を、接触面とユーザの掌や指などとの接触領域として認識する。本研究ではこれを応用し、特定のセンサ面ではなく、実物体への接触領域を計測するシステムを提案する。

ユーザが実物体に触れると、その接触領域には必ず熱の痕跡が残るという現象を、接触センシングの基本原理とする。熱画像を用いると、人が触れた領域が鮮明に高温領域として取得される。赤外線カメラと可視カメラを同軸に設置する。赤外線カメラは、熱画像を取得するために使用する。可視カメラは、後述する背景差分に用いる。なお、机上は平面のため、双方のカメラを同軸に配する必要はなく、双方の画像を幾何学補正することで、同軸に設置するのと同様の処理が可能である。

処理の流れを図1に示す。熱画像中では、操作中のユーザの身体や手なども、高温領域として取

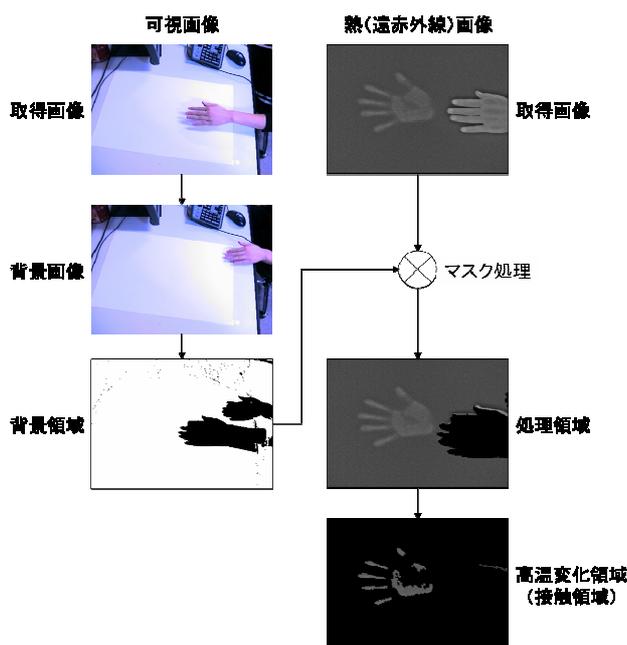


図1：接触領域計測の処理の流れ

得られるため、高温変化領域を全て接触領域とすることはできない。そこで、可視カメラを用いて背景差分を行い、背景として識別された領域に対応する熱画像中の領域で処理を行う。この処理領域において、高温変化領域を抽出し、それをユーザの接触領域とする。

5. Limpid Desk 基礎実験

投影型複合現実感技術を用いた机上書類の透過効果と熱画像を利用したユーザの書類への接触領域センシングに関する動作確認実験を行う。まず、プロジェクタ投影によって机上の上層書類の透過率を書類単位で可変とすることが可能かどうかを調査し、次に、カラー反射率に基づいた色補正がなされたプロジェクタ光を投影し、その効果を確認する。最後に、ユーザの書類への接触動作に応じて机上の書類を透過させる実験を行い、熱画像を用いたユーザの書類への接触をセンシングするインタフェースの動作確認を行う。

5.1 Limpid Desk システム構成

図2に示すように、Limpid Desk は、処理用 PC と、机の上方に取り付けられた投影用のビデオプロジェクタ、可視カメラ、接触検出で用いる赤外線カメラによって構成される。なお、今回のシステム構成では、可視カメラと赤外線カメラはビームスプリッターを用いて同軸にするのではなく、双方の画像に幾何学変換を施し、机上平面において画像が重なり合うよう処理した。

5.2 机上書類の透過化基礎実験

図3に、実際の透明物体と不透明な物体の両者を物体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2：Limpid Desk システム外観

図(b)に照射し、同図(a)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。まず、上層書類の反射特性が一樣である場合について、色補正を施さない基礎実験を実施した。



(a) 実透明黄色体 (b) 実不透明黄色体

図 3 : 目標画像

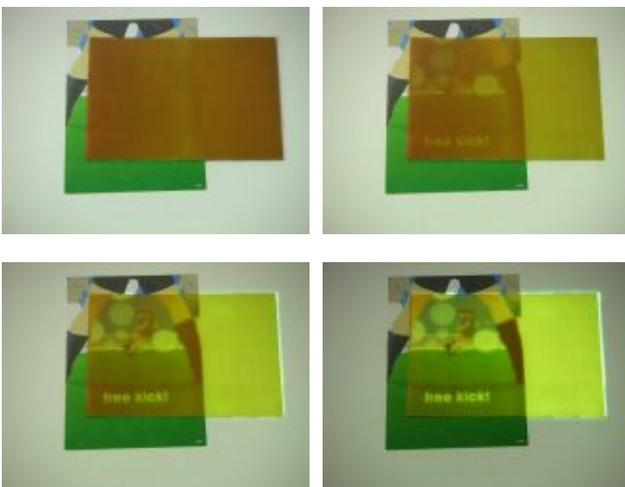


図 4 : 実物体の透過化
(上段左から透過度を 0~1 に連続可変)

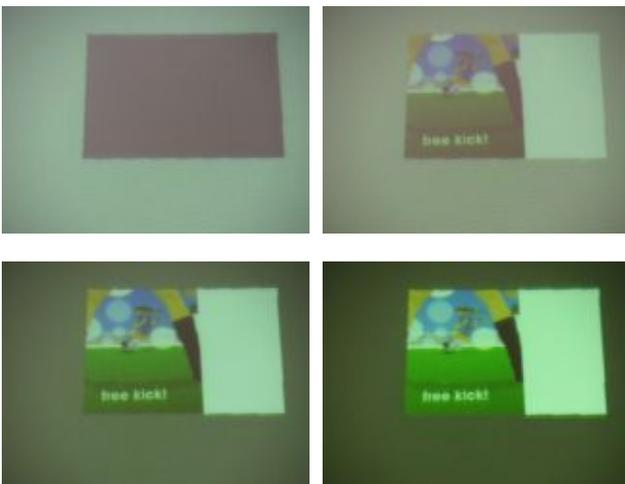


図 5 : プロジェクタ投影画像
(観察のために白色平面上に投影。
上段左から輝度値を連続可変)

下層書類のテクスチャ画像を、輝度値を可変として投影した結果を図 4 に示す。上層の書類の透過率が、投影される下層書類テクスチャの輝度値に応じて変化し、徐々に下層の書類が透けて見えてくるような感触を知覚できることが確認できる。このとき、プロジェクタから発せら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、図 5 に示す。つまり、図 5 のパターン光を図 4(b)に対して投影すると、図 4 のように観測されるということである。

5.3 色補正を施した透過基礎実験

参考文献[8]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任意の透過効果が得られることを確認する。図 6(a)に、複雑なテクスチャを持つ雑誌を下層書類の上にのせた状態を示す。同図(b)に、机に置かれた下層書類のみを示す。同図(b)をそのまま目標色とし、色補正を施さずにプロジェクタ光を投影した結果を同図(c)に、色補正を施した結果を同図(d)にそれぞれ示す。同図(c)(d)より、色補正を施した方が、上層の色彩の違いによる影響が抑えられ、下層書類のテクスチャがより正確に再現されており、透過効果が高いことが確認できる。

5.4 熱画像を用いた接触センシング基礎実験

ユーザの接触領域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。温度と透



(a) 無投影時の見え (b) 下層書類のみ



(c) 投影時の見え (補正無) (d) 補正有

図 6 : 色補正を施した透過化

過率を比例関係とした。掌の接触領域として識別された領域において透過処理を行った結果を図7に示す。接触した掌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。接触後の時間経過を同図(e)に示す。時間軸に沿って上層書類上の掌接触領域の熱が冷めて行くに従い徐々に透過率が減少し、下層の書類が見えなくなっていく様子が確認できる。なお、ここでは色補正は行っていない。

熱画像を利用した接触センシングにより、ユーザが触れた任意の領域を認識することが可能であることが確認できた。従来、ユーザに特殊な道具をつけなければ検出することのできなかった、実物体への接触位置と領域をセンシング可能にしたことに加え、その属性情報として温度変化量をも同時に取得可能であることから、机上実物体の透過化だけでなく他の複合現実感アプリケーションへの適用が期待できる。

6. 書類探索インタラクション

実世界の机上の書類にユーザが直接触って、書



(a) 掌接触前の重畳書類 (b) 下層書類のみ



(c) 掌接触 (d) 接触領域が透過化



(e) 時間経過に伴う透過領域の減衰効果
図7：掌接触の領域検出と透過化処理

類探索や下層書類の表示を行うインタラクション技法を提案する。そして、実世界の書類上に投影されるコンテンツの可視性や書類探索効率を向上させるための視覚効果を提案する。

6.1 インタラクション技法

本研究では、スタックからの書類の探索（サムネイル型探索法）と、スタック中の書類の選択表示（直接指示選択型探索法）という2種類のインタラクション技法を提案する。

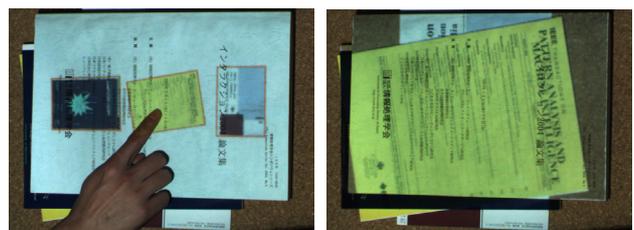
6.1.1 サムネイル型探索法

スタックにどんな書類が積まれているのかを簡単な操作で直観的に把握することができれば、書類探索の効率は向上することから、以下のような書類探索手法を提案する。図8に、オフライン処理による投影例を示す。

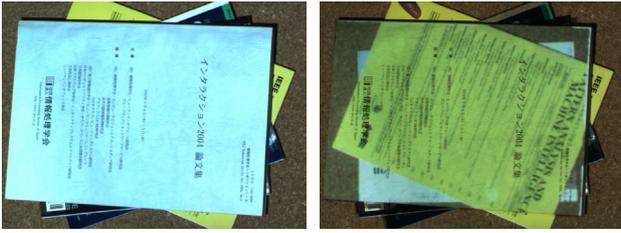
ユーザがスタックされた書類の最上層に触れると、最上層の書類上に、そのスタック中の全書類のサムネイル画像が投影表示される（図8: a, b）。これによって、ユーザはワンアクションでそのスタック中にどのような書類があるのかを直観的に把握する事ができる。次に、探している書類のサムネイル画像に触れて選択すると、その選択した書類よりも上層の書類をプロジェクタ投影によって擬似的に透明化し、その書類のスタック中での位置を直観的に把握させる（図8: c, d）。サムネイル画像の中に探している書類がない場合はそのまま放っておく。ある一定時間、最上層に接触しなければ、サムネイル画像は消え、「元通り」の机上



(a) 上層書類への接触 (b) サムネイル表示



(c) 表示書類選択 (d) 透過表示
図8：サムネイル型探索法



(a) 無投影時の見え (b) 透過表示 (左上：指接触)
図9：ユーザの書類選択に伴う上層書類透過

での作業に即座に集中することができる。

6.1.2 直接指示選択型探索法

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時、わざわざそれをスタック中から抜き出すのは手間がかかる、そこで、スタックからはみ出している書類の一部に触れる事で、それより上の層の書類をプロジェクタ投影によって透明化し、触れた書類を表示するというインタラクション技法を提案する。これにより、確認したい書類に、ワンアクションで視覚的にアクセスすることを可能とする。図9に、オフライン処理による投影例を示す。

6.2 ユーザビリティ向上の為の視覚効果

コンテンツの可視性を向上させる為、そして、書類のスタック中での位置情報を直観的に把握させる為、以下の2つの視覚効果を付与することで、投影型複合現実感技術の弱点を克服する。

6.2.1 投影コンテンツの微小運動

プロジェクタ投影による色補正技術では、文書中の反射率の低い黒文字を消す事ができない。このような文字が書類上を多く埋めているような文書が最上層にある場合、そこに投影された映像には、最上層の文字が混じり、表示するサムネイル画像や下層書類のテキスト画像が認識し難い状況となる。

そこで我々は、投影された画像を微小に運動させることで、最上層の文書の文字と表示コンテンツとを認知的に分離することを提案する。これにより、ユーザは直観的に、投影されているもののレイアウトのような文書構造を大まかに把握する事が可能となる。

6.2.2 下層書類位置把握の為の視覚効果

サムネイル型探索法において、上層書類を透明化して、サムネイル画像から選択された下層書類を可視化する際、上層書類上に下層書類のテキス

チャを表示するだけでは、立体感が伴わない。この為、表示されている下層書類のスタック中での位置（何層目か）を認識することは困難である。

そこで我々は、上層の書類を一つずつ透明化していく、という視覚効果を提案する。これによって、ユーザは、自分の選択した書類まで、何層の書類が重なっているかを把握することができ、書類探索効率の向上が可能となる。

7. 考察

5.3 において、上層書類に応じて色補正を施すことで、下層書類テキストをより正確に上層書類上に表示可能であることが示された。しかし、補正を行わない場合であっても、我々の主観では、上層書類が透明化され、半透明シートのように知覚されることが多かった。特に、反射特性が一般的な上層書類では、5.2 で示したように、十分な透過効果が得られている。

また、上層書類の中でもテキスト中に高周波成分を多く含んだ書類では、色補正無しの場合でも、非常に透明感を感じることができた。このことから、上層書類のテキスト情報の高周波成分のみを選択的に残しつつ、下層書類を表示させるような補正処理を行うことが考えられる。

6.1.1 において、下層書類のサムネイル画像を表示させるインタラクションを提案した。投影画像をこういったアノテーション型と、下層書類テキスト投影のような実画像型の2種類を効果的に複合することで、様々なインタラクションが可能となる。

6.2.2 にて提案したスタック中の下層書類の位置を把握させる為の情報提示手法として、他には、複数の上層書類を α ブレンドして、それを表示することや、上層書類のワイヤフレーム（枠）だけを残して、透明化する、といった手法が考えられる。

入力法として、今回は、掌や指といった身体の書類への直接接触を提案した。この他にも、応用分野に応じて、マウスやキーボード、ジェスチャといった、様々な入力法と組み合わせることが可能である。

今回は机上書類を投影対象として、書類探索作業の効率化を目指したが、他にも、物置にある段ボール箱のような、普段は開けることの無いもの

の中身を、5.4 で示したように、自分の見たい部分に触れるという直観的操作で透過させて見ることや、家の外の環境を、壁に触れることで見るという応用が考えられる。

8. おわりに

本論文では、投影型透過インタフェースとして、書類が積み重なった実世界の机上環境における作業能率向上のため、上層の書類を透過させて下層の書類に視覚的にアクセスすることのできるシステム *Limpid Desk* を提案した。

投影型複合現実感技術を用いることで、書類を透過させる効果が可能となることを確認した。また、提案システムでは、探索操作から結果の表示までの空間を一致させ、直観的なインタラクションを実現することを目指した。ユーザの書類への接触を入力法として用いて、サムネイル型探索法、直接指示選択型探索法を提案した。実物体へのユーザの接触領域を、熱画像を用いて計測することのできるセンシングシステムを構築した。

今後は、6 章で提案したインタラクション技法について、書類探索効率の向上が見られたかどうかを調べる為のユーザテストを行う。また、同時に提案した視覚効果が有効であるかどうかの評価実験を行う。

参考文献：

- [1] 梅棹忠夫, “知的生産の技術”, 岩波新書, 1969.
- [2] 野口悠紀雄, “「超」整理法—情報検索と発想の新システム”, 中公新書, 1993.
- [3] J. Kim, S. M. Seitz, and M. Agrawala, “Video-Based Document Tracking: Unifying Your Physical and Electronic Desktops”, In Proc of UIST, pp. 99-107, 2004.
- [4] 椎尾一郎, James Rawan, 美馬のゆり, Elizabeth Mynatt, “Digital Decor: 日用品コンピューティング”, WISS 2002, 日本ソフトウェア科学会研究会資料シリーズ, No. 22, pp. 117-126, 2002.
- [5] K. Fujii, J. Shimamura, K. Arakawa, and T. Arikawa. “Tangible search for stacked objects”, In Proc. of CHI, pp.848-849, 2003.
- [6] M. Inami, N. Kawakami, and S. Tachi, “Optical Camouflage Using Retro-reflective Projection Technology”, In Proc of IEEE ISMAR, pp.348-349 ,

2003.

- [7] Bonanni, L. and Lee, C.H. “The Kitchen as a Graphical User Interface”, In Proc of SIGGRAPH Electronic Art and Animation Catalog, pp. 109-111, 2004.
- [8] T. Yoshida, C. Horii, and K. Sato, “A Virtual Color Reconstruction System for Real Heritage with Light Projection”, In Proc of VSMM, pp.161-168, 2003.
- [9] O. Bimber, F. Coriand, A. Kleppe, E. Bruns, S. Zollmann, and T. Langlotz, “Superimposing Pictorial Artwork with Projected Imagery”, IEEE MultiMedia, pp. 16-26, January-March issue 2005.
- [10] S. K. Nayar, H. Peri, M. D. Grossberg, and P. N. Belhumeur, “A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections”, In Proc of PROCAMS, 2003.
- [11] D. Wang, I. Sato, T. Okabe, and Y Sato, “Radiometric compensation in a projector-camera system based on the properties of human vision system”, In Proc of PROCAMS, 2005.
- [12] 岩井大輔, 金谷一朗, 日浦慎作, 井口征士, 佐藤宏介, “ThermoPainter: 熱画像を用いたタブレット型入力装置とそのインタラクティブ描画システム”, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.7, pp. 1582-1593, 2005.