

ProCams-Based Cybernetics — プロジェクタカメラ系による身体と環境のサイバー拡張 —

佐藤 宏介^{*1} 岩井 大輔^{*2} 池田 聖^{*3} 武村 紀子^{*4}

Abstract — 本稿では、著者らがここ数年の間に行ってきたプロジェクタと画像計測を組み合わせた身体と環境のサイバー拡張について概説する。

Keywords : プロジェクタカメラ系、身体と環境のサイバー拡張、複合現実感

1 はじめに

本稿では、著者らがここ数年の間に行ってきたプロジェクタと画像計測を組み合わせた身体と環境のサイバー拡張について概説を行う。ユーザに与える環境すべてを合成する仮想現実感（VR）では、あたかも巨人のようにユーザの身体スケールを変化させることもでき、ロボットになったかのように四肢を変化させることができる。着ている服飾を変化させることは最も容易であろう。例えば、ロケットを備えた金属製の巨大ロボットにも成り代わることができる。それに対して、現実世界と合成する複合現実感（MR）、特に光学シースルー型では、現実世界を変化させることが難しいという制約から、身体スケールの変化、四肢の変化、服飾の変化のいずれも困難となる。MRの中でも、映像処理にて現実世界を抹消し、仮想世界で上書きできるビデオシースルー型では、四肢と服飾は上書き可能で変化させることができるが、身体スケールはカメラ視点がユーザ視点と近接せざるをえないため、変化させることは難しい。

本稿で扱うプロジェクタを用いる投影型のMRでは、現実世界を抹消できないため仮想世界で上書きすることができない。つまり、光学シースルー型と同様に身体スケールの変化、四肢の変化、服飾の変化のいずれも困難となる。しかし、四肢に関しては適切な映像を環境に投影することができれば、あたかも手が伸びたかのように知覚させ、操作もできるようにすることができると、著者らは考えている。以上のユーザ身体の変換性についてまとめたものを表1に示すが、本稿では*の項目を、プロジェクタと画像計測を組み合わせた技術により、可変不可から可変可にすることを試みている。つまり、図1に示すように、物理的な身体である手をグラフィカルな手で継ぎ足し、ユーザ自身

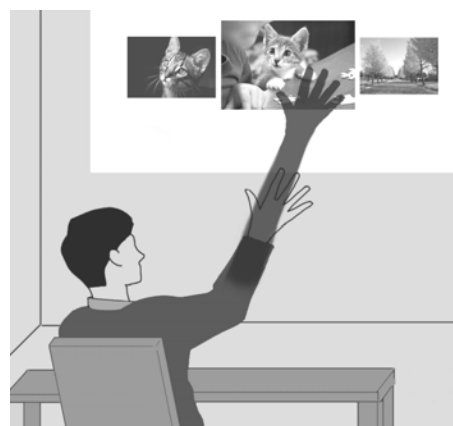


図1 拡張身体の投影

があたかも物理的身体とグラフィカル身体が一つの融合したサイボーグ身体になったかのように知覚させることで、新たな10フィートインタフェース（10 feet UI）を構築することを目指す。それにより、物理的身体がリーチできない範囲の対象へのアクセスに対してユーザの利便性を高めたい。

このユーザ身体のサイバー拡張の実現に必要な基盤技術には、プロジェクタカメラ系による環境の三次元形状計測等から身体の状態を得る観測系と、グラフィカル身体を投影するプロジェクタカメラ系による表示系からなる。後者のサイバー拡張提示像の高品質化には、高色再現化、高ダイナミックレンジ化に加えて、焦点ボケや解像度不均一の問題を解決しなければなら

表1 ユーザ身体の変換

	身体スケール変化 (巨人化等)	四肢変化	服飾変化
VR 環境	可	可	可
MR 環境 (ビデオシースルー型)	不可	可	可
MR 環境 (光学シースルー型)	不可	不可	不可
MR 環境 (投影型)	不可	不可*	不可

注：*が本研究での着目項目

^{*1}大阪大学基礎工学研究科

^{*2}大阪大学基礎工学研究科

^{*3}大阪大学基礎工学研究科

^{*4}大阪大学基礎工学研究科

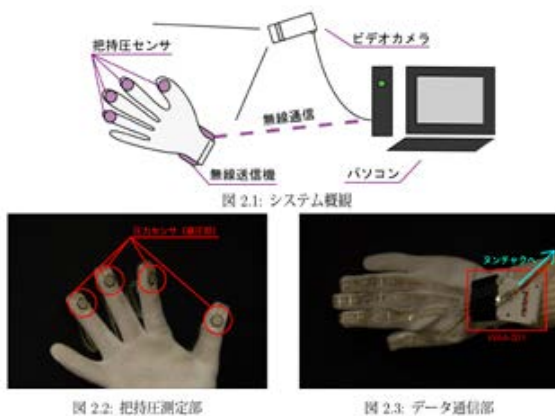


図 2 把持圧の計測

ない。また、用途に応じた様々なサイバー拡張の実現には、身体と環境の反射特性・透明度を可変にする、形状を可変にする、注釈を追加する、画面フレームを拡張する、物理現象を拡張するなど、各種要素技術も開発しなければならない。以降では、著者らが取り組んできたユーザ身体のサイバー拡張に関する各種要素技術について詳述する。

2 サイバー拡張のための基礎技術

本章では、身体および環境のセンシング技術および品質の高い映像投影を実現する基礎技術を紹介する。

2.1 身体・環境のセンシング

2.1.1 身体の状態計測

身体の中でも掌や指先の動きはユーザが何をしようとしているかを直接把握することのできる部位である。著者らは、これまでに把持圧力、物体や掌上での指先の押下力および押下方向、掌および5本指の押下力パターンからのジェスチャなどをセンシングする技術を開発してきた。

把持圧力は、全ての指先に圧力センサを配置したグローブ(図2参照)によりセンシングし、ユーザが何かを握っているかどうか、握った物体の性質はどういうものであるのか、を判別することができた。また、上記判別機能を利用することによりなんらかの作業を記録する映像のラベリング、検索が可能であることを示した。

指先が剛体上を押下する場合、指先が押下された時に生じる爪のパターンから押下力および押下方向の判定の手がかりとなるためカメラで非接触なセンシングが可能となる(図3参照)。予め押下方法とパターンとの対応を与えて学習することにより、ポインティング・スティックに類似した入力が可能である。掌の上を押下する場合は、さらに掌のパターンの変化も利用することができる。指先を掌に押し付けると掌紋が押

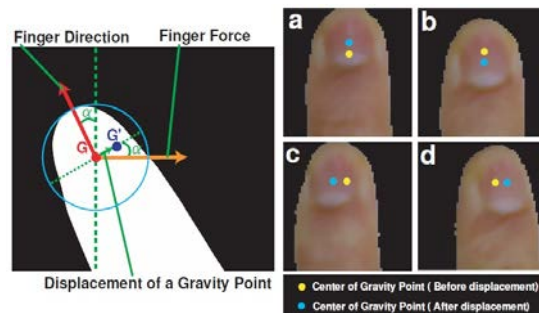


図 3 指先押下力方向の計測

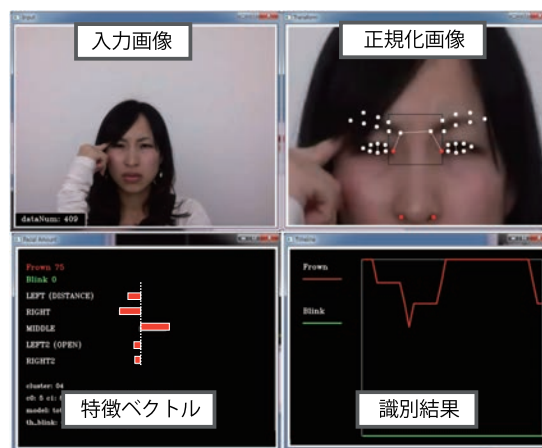


図 4 不快表情の分析及びその認識

下位置を中心に歪むため、この変化をセンシングすることで押下の成否に加えて圧力を算出することが可能となる。

5本の指それぞれに対して同様のセンシング手法を適用することにより、更に複雑な入力操作を検出することもできる。上記手法を用いれば小さな動きを検出できるため、ユーザは入力のために大きな動きをする必要がなく、疲労が生じにくいという特徴がある。これにより、例えば、机上ののせた手指のわずかな動きを増幅して、図1で示したような拡張された身体を自由に制御するための入力操作に利用するということが可能になる。

手指のセンシングとは対称的に、より間接的かつ抽象的な心身の状態のセンシングも試みている。

例えば、カメラでユーザの無意識な表情変化を捉えることにより、現在の環境を不快に感じているか否かの識別ができる。この研究では、照明や空調の状態がユーザにとって不快なものである場合、多くのユーザは「瞬き」や「顔を顰める」といった、不快表情を露呈することを明らかにした。顔画像に対して目領域周辺の特徴を用いて、その表情が不快表情か否かを識別する識別器を設計し、ユーザの不快度を時系列的に判別できるようにした(図4参照)。

画像によるセンシングのようにプライバシーを侵害

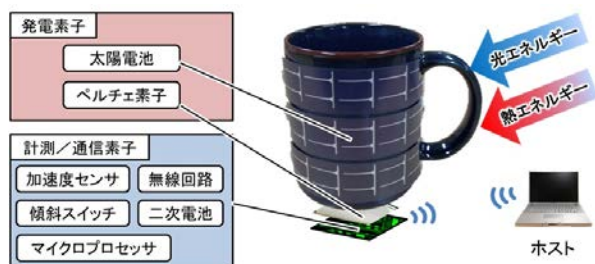


図5 インテリジェントコップ

する手段が適さない場合もある。これに対して、著者らはコップ、椅子、机にプライバシーの問題が生じにくい各種センサをとりつけ、高レベルな状態の抽出を試みた。

コップに加速度センサと無線通信モジュールを内蔵させれば、多人数の日常行動の習慣をセンシングすることができる。多人数用のコップを長期に渡って管理することを容易にするために、エネルギーハーベストのみによる電力共有する知的なコップ「インテリジェントコップ」を考案した(図5参照)。太陽電池と温度差を利用したペルチェ素子による発電のみで、無線通信における通信タイミングを最適化することにより、半永久的にユーザの行動をセンシングできることを示した。

図6に示すように机や椅子にセンサを取り付けることにより、ユーザ着座中の心理状態に関連した情報を抽出できる可能性がある。著者らは、椅子に加重とその重心位置を計測できるセンサをとりつけ、ユーザの着座中の揺動を静止状態、姿勢変化動作、周期性動作、非周期性動作の4状態に分け、着座状態の変遷を判別できることを示した。プレゼンテーション聴衆観測実験では、参加者が自分自身の発表前後に聴衆として着座している時の動作回数が、発表前の方が発表後に比べて多くなることを発見した。また、机にマイクロフォンを取り付けることで、筆記動作時に生じる振動音から心理的負担が推定できる可能性も見出した。

2.1.2 プロジェクタカメラ系による三次元形状計測

複雑な形状の身体や環境に対して正確に映像を投影するためには、複数の異なる視点から対象の三次元形状計測は必要不可欠である。ここでは、複数のプロジェクタを用いたプロジェクタカメラ系における三次元計測関連の技術を紹介する。

プロジェクタカメラ系では、投影対象上に投影対象そのものの影ができる問題がある。遮蔽が生じるプロジェクタを検出し、遮蔽のないプロジェクタより投影することで、この投影面の影を防ぐことができる。著者らは、複数のカメラ画像から物体の VisualHull を復元し、その形状情報を基に投影の遮蔽が起こらないプロジェクタを選択する手法を開発したこのような



図6 体位揺動と筆記動作のセンシング

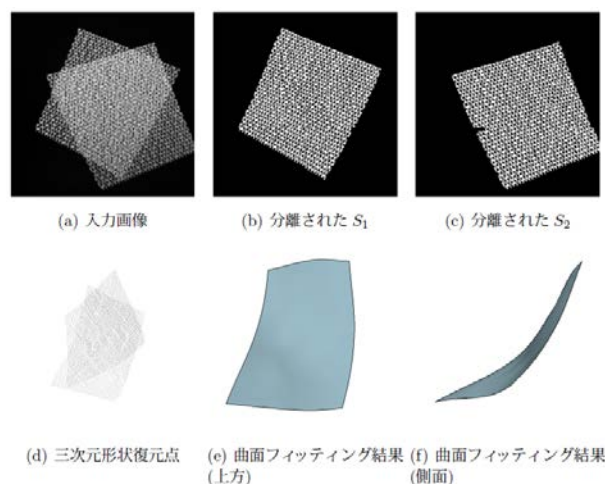


図7 多重コード投影パターンの分離

visibility の推定により対象物上に影が生じない映像の投影が可能になる。

コード化パターン光投影法により対象の三次元形状を計測する際は、分離可能なパターンを用いることにより、複数のプロジェクタから同時に重畳して投影し時間短縮を測ることができる。著者らは、図7に示すように、M系列をマンチェスタ符号化した信号列の2次元パターンとその分離法を設計した。

2.2 サイバー拡張提示像の高品質化

身体および環境があたかも拡張したかのような錯覚をユーザに与えるためには、リアルな像の提示は必要不可欠である。ここでは色およびコントラストという光学的側面と、解像度や焦点ボケといった幾何光学的側面から投影像の高品質化技術の例を示す。

2.2.1 高色再現性・高ダイナミックレンジ化

色再現性の低下は、プロジェクタのスペクトルバンドの不足、解像度の不足、投影光の相互反射が要因になることがある。投影対象自体がテクスチャをもつときにそのテクスチャをキャンセルするよう投影色補正し、目的の像を投影することができる。高い色再現性

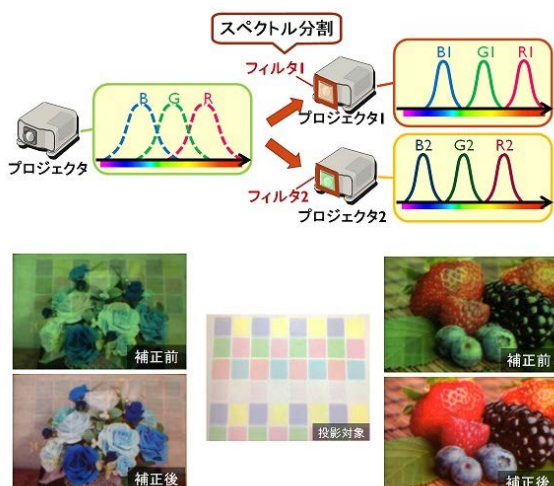


図 8 6 スペクトルバンドプロジェクタによる投影色補正

を得るために、著者らはプロジェクタのスペクトルを従来の3バンドからより細かい6バンドに分割することによって、精度の高い投影色補正法(図8参照)や、プロジェクタの解像度不足を補うために高解像度なカメラで投影対象のテクスチャを取得し、プロジェクタの1画素内での反射率の変化を考慮した投影色補正法を開発している。更に、投影像を直接反射成分と間接反射成分に分離し、間接反射の影響をキャンセルする投影法についても開発した。

次に、投影対象の反射率を制御してダイナミックレンジを高める2つの技術を紹介する。一つは、三次元カラープリンタ出力に対してプロジェクタ投影重畳を行うことで、高コントラストかつ立体感・実在感の高い表示をする手法である。三次元カラープリンタは対象物体を色付きで出力できるが、コントラストが低くその色情報を十分に表現できないことがある。三次元カラープリンタ出力上にプロジェクタによる投影を行うことで、三次元カラープリンタ出力のもつ立体感や実在感を損なわず、各デバイスを単独で用いる場合と比較して高ダイナミックレンジな表示が可能になった(図9参照)。また、三次元カラープリンタでは、反射率を動的に変えることはできないが、フォトクロミズムを利用し紫外線照射により動的な反射率制御についても試みている(図10参照)。

2.2.2 焦点ボケ・解像度不均一

汎用プロジェクタの多くは、被写界深度内の光軸に垂直な平面(焦点面)に対して像を投影したときに、焦点と解像度が一樣になるように設計されている。プロジェクタカメラ系を用いたサイバー拡張では、上記制限の解決も試みてきた。以下で紹介する3つ技術の共通点は、焦点ボケや解像度の不均一性を point spread function(PSF) で記述することにより、異なる減少を



図 9 マルチプロジェクション重畳による高コントラスト化

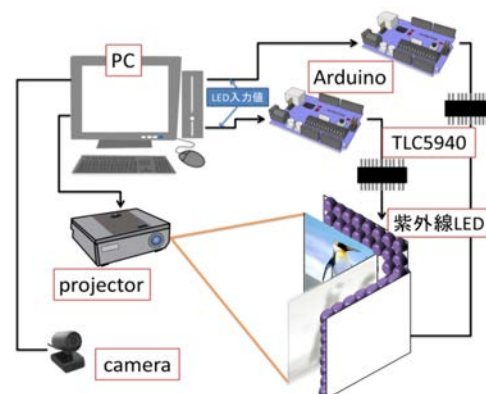


図 10 フォトクロミズムを用いたダイナミックレンジ向上

統一した枠組みで解決しようとするのである。

この問題は、投影対象の三次元形状が既知であれば、画像処理により解決策として、具体的にはプロジェクタからの対象物表面の奥行きおよび傾きから投影像がどのようなにボケるか投影前に PSF という形で算出することができる。PSF が分かれば最も鮮明に投影可能な最適なプロジェクタを選択することができる。

プロジェクタのレンズ自体の工夫によっても解決することができる。レンズの焦点距離をヒトの目の時間分解能よりも高速に前後させ、各投影箇所の奥行きに応じて像を鮮明に表示できる焦点を選択することで、全体として焦点ボケの少ない投影が可能になる。

時々刻々と焦点距離が変わり、受光側で時間的に積算された像の焦点ボケについても、単一の PSF で表現できることが知られており、この研究ではその PSF の算出結果を用いて投影する画像のデコンボリューションによる焦点ボケの補正を試みている(図11参照)。

解像度および視野角の異なるプロジェクタを組み合わせ、提示される像のうち高周波成分が必要な箇所の



図 11 可変焦点レンズを用いた非平面对象への全焦点像投影



図 12 影を介した掌インターフェース

みに高解像度ではあるが視野が限られたプロジェクタの像を投影することで、全体として広視野角かつ高解像度なプロジェクタで投影したのと同等の投影像を得ることができる。プロジェクタをパン・チルトする際に生じるモーションブラーについても、上述した時間的な積算画像における PSF と同様の手法で補正することができる。

3 様々なサイバー拡張対象例

3.1 身体のカイバー拡張

3.1.1 影を介した掌インターフェース

自然現象としての身体のカイは、太陽や既存の人工光源により身体のカイシルエットが物体に投影されたものであるが、プロジェクタにより人工的に手のカイを生成することで、自然現象のカイを受けずにより柔軟にカイを生成し、ユーザ・インターフェースとして利用することができる。著者らが提案する掌のカイシルエットを介したハンドジェスチャによるインタフェース(図 12 参照)では、手カイを模した掌シルエットをディスプレイに表示するもので、リーチングと掌の開閉、回転などのハンドジェスチャにより、ディスプレイに表示された仮想物体に能動的に働きかけ、任意に選択・移動・回転することが可能である。自然現象としてのカイと違い、ロータリースイッチのように離散的な状態を入力する際に、シルエットのカイを制約して、視覚的な抵抗感を与えることが可能である。

3.1.2 Extended Hand

2.1.1 節で述べたように、5 本指の指先押下時の爪色変化に基づく押下圧力センシングを利用することで、シルエットのセンシングよりも微細な動きで身体から離れた箇所を触るような大きな動きの拡張身体を表示

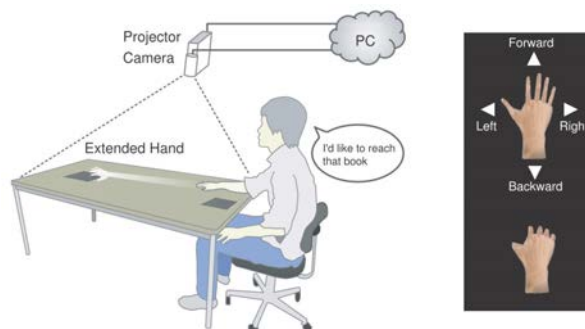


図 13 Extended Hand

し、入力のフィードバックとして利用できる。図 13 に示すように、Extended Hand は、影を介した手のひらインターフェースと異なり、ユーザ本人の手のように錯覚するようにテクスチャを用いる。また、仮想オブジェクトだけでなく、手の届かない位置にある実対象に対しても指示・把持といった操作を行うことを想定している。

3.2 環境のカイバー拡張

ここでは、プロジェクタにより環境の反射特性や透明度、形状を変える、コンピュータの操作画面や注釈を環境中に配置する、さらには物理現象を変えてしまうという挑戦的な試みも紹介する。

3.2.1 反射特性・透明度を変える

実物体の本来の色を別の色に変えたかのような錯覚を生じさせるためには、実物体の反射特性をセンシングした上で同じ反射特性の領域に対して反射特性だけを変えた時の見え方を再現する必要がある。反射特性は、複数のパターン光を投影し、カメラで撮像することでセンシングすることが可能である。これにより、環境光の影響を受けることなく、効果的な領域抽出ができ、実物体に対してインタラクティブに仮想的な彩色を行うことができる(図 14 参照)。こうした方法による“文化財の仮想的色修復”(図 15 参照)も可能であるため、これまで MR 技術を用いた新しい展示手法を提供する博物館や美術館である“複合現実博物館 Mixed Reality Museum”を提唱してきた。

図 3.2.1 は、色を変えるだけでなく、全く別の物理量を物体の色として着色する例である。このシステムでは、温度分布を三次元物体に実時間投影する可視化している。熱画像を利用する利点は、ユーザがある物体に接触する際に物体上に熱が残るという現象を利用することができ、これと組み合わせることにより新しいインターフェースを提供することができる。

Limpid Desk は、物体の透明度を変える例である。このシステムは、書類で溢れる実机上での書類探索作業を効率化するために、書類スタックを投影光によってその場で仮想的に透明化する。熱画像処理を用いて

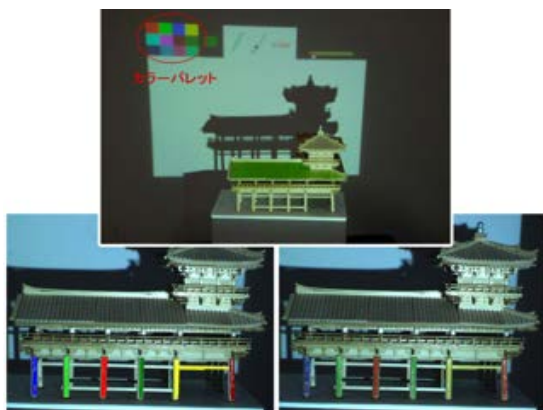


図 14 仮想彩色システム



図 15 文化財の仮想的色修復

実机上の書類スタックへのユーザの接触を検出し、その接触動作をトリガとして、あらかじめデータベースに蓄えられているスタック内の書類の表面テクスチャ画像を、あたかも書類が上から順に透明になるかのように処理して投影することで、積まれた書類を物理的に移動させることなくスタック内の書類を探索可能とした。

3.2.2 形状を変える

図 18 は、プロジェクタを用いた像の投影により立体感、実在感を保った実物体形状を視覚的に変形するシステムを示している。物体表面属性情報のみでなく、物体 3 次元形状情報の変更にも対応させる手法により、目視による高い立体感、実在感を保持しつつ容易に実物体形状を仮想的に変形することができる。また、リアルタイムに視覚的変形を行うアプリケーションを試作システムに実装し、モデリング時におけるディスプレイシステムとしての本提案システムの有用性を示した。これは、工業デザイン向け製品デザインシステムとしての利用を想定したものであるが、従来のコンピュータ支援設計 (CAD:Computer Aided Design)

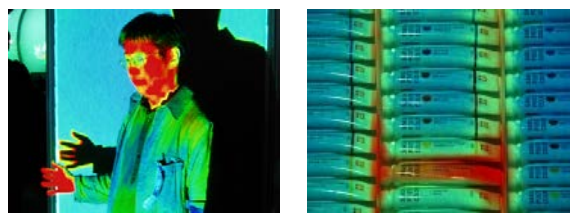


図 16 温度分布の可視化

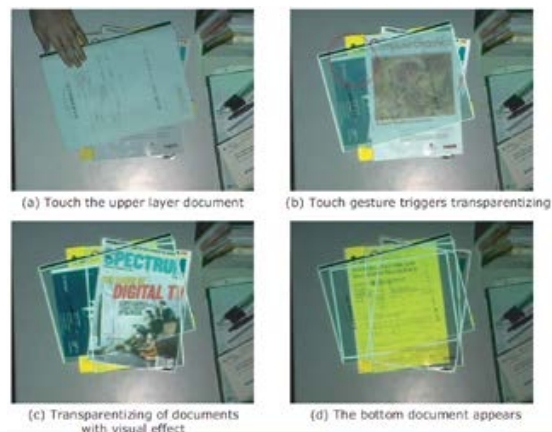


図 17 Limpid Desk

システムでは、ユーザが自由に形状を変形できる反面、表示は平面ディスプレイや両眼視差を利用したステレオディスプレイを用いており、最終製品の持つボリューム感、実在感を提示することは困難であった。このシステムでは、モックアップにバーチャルな陰影情報を付加することで、モックアップの実在感を損なわずにボリューム感を制御した微妙な形状操作を行えるようにし、従来の CAD システムの設計自由度とモックアップの実在感を両立させるシステムといえる。

3.2.3 コンピュータの画面を拡張する

図 19 は、環境の三次元形状を計測し、その形状に合わせて適切な場所にグラフィカルユーザインタフェースを投影するシステムを示している。光の投影に対して本来邪魔であるはずの凹凸の形状を利用し、その形にそって投影するととて、むしろ平面上のみに投影した場合よりもより自然な実世界指向インタフェースを実現することが狙いである。

図 20 に示す DelayingWindow 投影技術は、モバイルプロジェクタによりプロジェクションする投影画像を手姿勢変化に対して遅延投影させることにより、ウィンドウ投影を行いながらも手姿勢変化で投影ウィンドウ内を操作できるインターフェースを可能にしている。DelayingWindow 投影は、投影画像をプロジェクタの光軸に対してあえて遅延して追従する制御を行う一方で、ポインティング用のカーソルはプロジェクタの光軸から遅延なく提示することで、カーソルと投影画像の制御を一時的に分離し、投影画像内コンテンツのポ

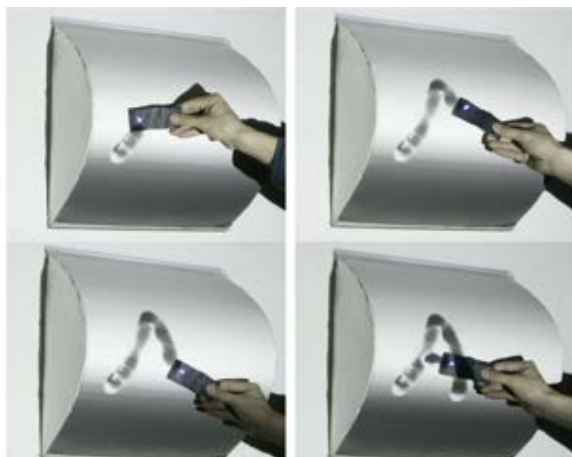


図 18 三次元形状デザイン支援システム

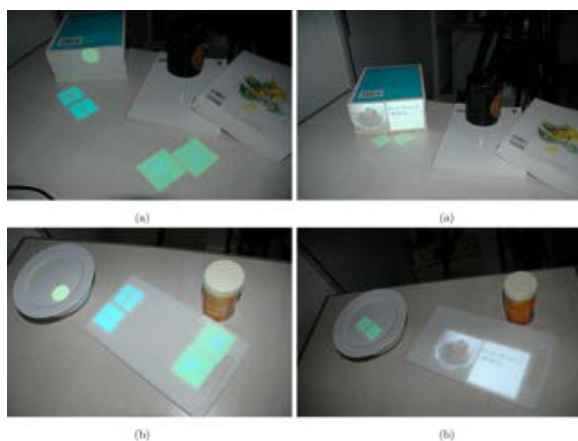


図 19 GUI のサイバー拡張

インテリングによるターゲット選択を可能とする。また、投影画像の遅延が安定化制御の役割も担い、手振れの問題も同時に解決可能である。

図 21 は、体肢を用いて机上に影を作ることで初めて視覚的情報へのアクセスできる、テーブルトップインタフェースを示している。3 台のプロジェクタ（うち 2 台はテーブルトップ上方に、残り 1 台は背面に設置されている）より補色画像を投影し、影以外の領域（影を作る遮蔽物・テーブルに置かれた書類・影以外のテーブル表面等）には、単一白色光を投影表示することでこの効果を実現をしている。この仕組みは、一切の画像認識を用いていないので、ユーザの入力動作に対するフィードバックの遅延がなく、誤認識による問題が発生しない点が利点である。

3.2.4 注釈を加える

図 22 は、ユーザが他のユーザに文章中の特定の単語を示したい場合、机上のドキュメントを人差し指でその単語を指し、指先にある単語を OCR で読み取った上で、異なる場所の人間が視認しやすい位置に投影するインタラクティブシステムである。

図 23 に示す Interactive Bookshelf Surface は、以前

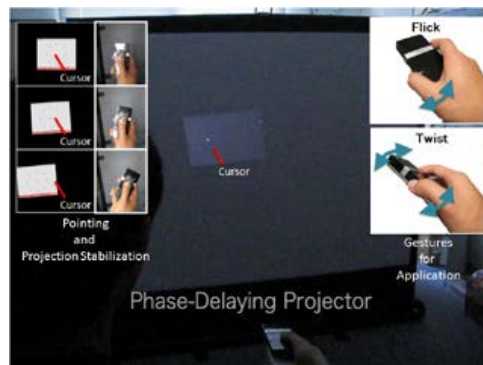


図 20 DelayingWindow 投影

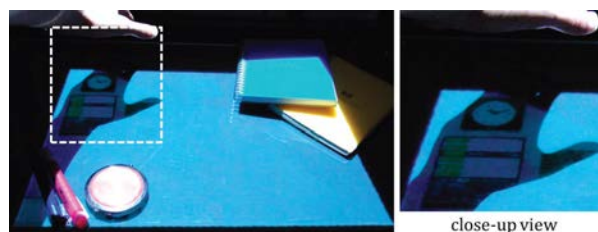


図 21 補色多重化偏光投影による影ディスプレイ

読んだことのある書類を本棚から探索する際に、ユーザに本棚に関する情報を提示することで探索の支援を行うシステムである。投影型複合現実感技術を用いてユーザが書類を取り出す前に書類の表紙画像や出し入れの頻度を可視化した情報を本棚に表示することで、ユーザの負担となる書類を取り出す動作の回数を減らすことができる。また、特別な撮影手順やタグ付けを用いることなく本棚に収納される書類の表紙画像や位置情報をリアルタイムに取得する。

図 24 は、投影型 MR 技術を用いたアノテーションの提示システムである。投影面の状態に応じて投影像の可読性が損なわれないようにするため、対象の三次元形状・表面テクスチャの反射率といった情報をもとに、投影面の状態に適応的なアノテーション情報のレイアウトを求めることができる。投影像の読みにくさの度合いが高い面を避けてアノテーションを投影することができることを確認している。

3.2.5 物理現象を拡張する

ここでは、本来見えないものを単なる可視化というより物理現象そのものを変えたかのように錯覚させようとする挑戦的な応用を紹介する。

まずは、本来不可視な物理量を可視化するシステムである。このシステムでは、ユーザがブロックによるインタラクティブなモデリングを行い、それに応じた物理量を色で表現する（図 25 参照）ことで、物理現象の振る舞いを色の変化によって表すことができる。物理現象のイメージをユーザに与えることができ、インタラクティブにブロックを立体構成することで、あ

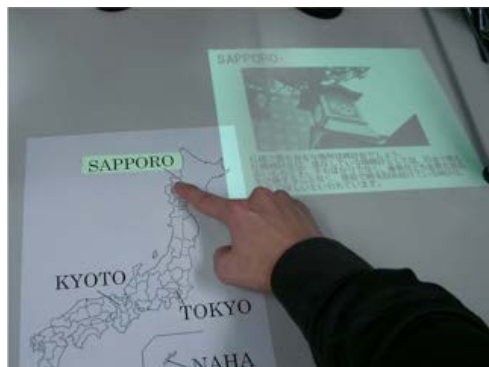


図 22 ドキュメントポインティングシステム



図 23 Interactive Bookshelf Surface

る物理現象に対する理解が増すことが確認された。

図 26 に示す Snail Light Displays は、光速度という物理量をサイバー拡張した例である。例えば速さ $10[\text{cm/s}]$ のように非常に低速な光である “超低速度光” を考え、それらが存在する仮想空間を MR 技術を用いて構築した。超低速度光の伝播では、観測者は物体のリアルタイムな状態を観測できず、物体との距離に応じて遅延した状態が観測される。また、物体と観測者の間の空間に様々な時刻に放出された光が存在するという現象が生じる。このため、観測者の空間位置の変化させることで、観測される光の時刻を変化させることができ、このインタラクションにより、ユーザは超低速度とのインタラクションを知覚すると考えられる。超低速度光の存在する仮想空間を表現する技術として、時間経過によって各フレームの位置が移動していく伝播性を持った時空間映像を適用した。時空間映像を切る面をスクリーンや液晶ディスプレイなどのユーザが把持する表示デバイスとした。Snail Light Displays では、様々な時刻のフレームが空間中に存在するので、ユーザは表示デバイスを動かすことで表示されるフレームの時刻を変化させることができる。

4 まとめと今後の展望

以上、本稿では、プロジェクタと画像計測を組み合わせた身体と環境のサイバー拡張に関する基礎技術、

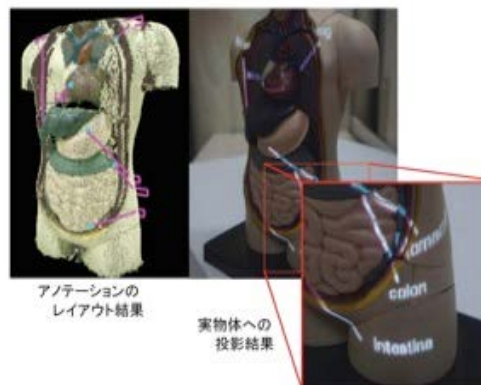


図 24 投影型アノテーション提示システム

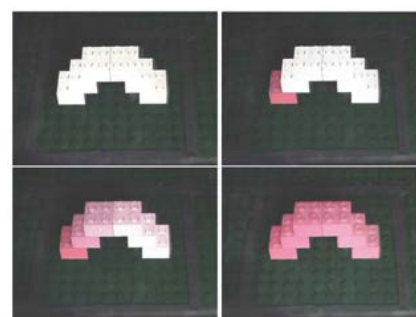


図 25 物理量可視化システム

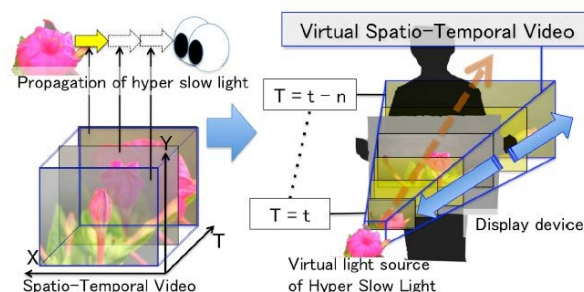


図 26 Snail Light Displays

および応用事例を紹介した。四肢に適切な映像を環境に投影することができれば、あたかもユーザ自らの手が伸びたかのように知覚させ、その錯覚現象を利用することで操作もできるようになる可能性がある。今後も、この新たな 10 フィートインタフェース (10 feet UI) を構築することで、ユーザの利便性の向上を追求するとともに、新たな課題の発見につなげたい。

参考文献

- [1] 大阪大学基礎工学研究科 佐藤宏介研究室 HP:
<http://www-sens.sys.es.osaka-u.ac.jp/research/>