

SpaceRelighter: プロジェクタを用いた実照明環境再現システムにおける動的な影の除去

金成 幸司[†] 向川 康博[†] 大田 友一[†]

[†] 筑波大学大学院システム情報工学研究科 〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: †{kanari,mukaigaw,ohta}@image.esys.tsukuba.ac.jp

あらまし 我々は、プロジェクタ型複合現実感の一つとして、プロジェクタから仮想的な陰影パターンを現実空間に直接投影することで、実照明環境を擬似的に再現するシステム SpaceRelighter を提案してきた。しかし、プロジェクタ光を遮ってしまうと、再現した照明環境と矛盾する影が生じてしまうという問題がある。本稿では、この問題を解決するために、複数台のプロジェクタを用いることで実時間で影を除去する手法について述べる。シーンをカメラで撮影することで影を検出し、検出された影に対応する領域を別のプロジェクタで投影することにより影の除去を行う。プロジェクタの設置場所の違いによる投影の歪みは幾何補正によって解決する。また、プロジェクタとカメラの間で生じる色の違いについても逐次色補正を行うことで解決する。本研究では、カメラ 1 台とプロジェクタ 2 台を用いた試作システムを構築し、実時間での影の除去を確認した。

キーワード プロジェクタ, 複合現実感, 影の除去, 照明環境の再現

SpaceRelighter: Dynamic Shadow Removal for Real Illumination Reproducing System Using Multiple Projectors

Kouji KANARI[†], Yasuhiro MUKAIGAWA[†], and Yuichi OHTA[†]

[†] Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

Tennoudai 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8573 Japan

E-mail: †{kanari,mukaigaw,ohta}@image.esys.tsukuba.ac.jp

Abstract As an application of projector-based mixed reality, we have proposed the SpaceRelighter which reproduces pseudo real illumination by projecting virtual appearance pattern to real space directly. However, it has a critical problem that undesirable shadows occur when obstacles interrupt the projecting light. This paper proposes a method for real time removal of shadows by using multiple projectors for reproducing real illumination. During projecting patterns onto the real scene, a camera captures images of the screen, and shadow regions are detected. Some areas in the projecting patterns corresponding to the shadow regions are projected by the other projector. Then, the divided pattern for each projector is geometrically converted to compensate distortion and photometrically converted to compensate color difference. We constructed a prototype system including one camera and two projectors. We confirmed that undesirable shadows can be effectively removed in real time.

Key words projector, mixed reality, shadow elimination, reproducing real illumination

1. 序 論

近年、複合現実感技術の一形態としてプロジェクタ型複合現実感が注目されている。プロジェクタ型複合現実感とは、プロジェクタによって現実空間にパターンを投影することで仮想情報を重畳するものである。Raskar らは、現実世界の白色物体に対して、プロジェクタからの仮想的なテクスチャや陰影効果を

表現したパターンを投影するプロジェクタ型複合現実感の基礎となる Shader Lamps [1] を提案した。また、我々は、プロジェクタ型複合現実感の写実性の向上を目的として、仮想光学環境 [2] と SpaceRelighter [3] を提案した。仮想光学環境は、実物体の反射特性を記録し、パターン投影によって、その反射特性を白色石膏上で再現するシステムである。一方、SpaceRelighter は、現実世界の照明環境を記録し、それをプロジェクタのみで

再現するシステムである。

これらのシステムは、仮想のパターンを投影することで現実空間の照明環境を自在に変化させるシステムであるが、投影の対象となるスクリーンは平面ではないため、1台のプロジェクタでは投影できない面が存在してしまう。この問題に対し [3] では複数のプロジェクタを用いる解決法を示している。しかし、ユーザはそれぞれのプロジェクタからの投影は遮ってはならず、投影を遮蔽することによってスクリーン上に生じる影については考慮していない。この影は、再現した照明環境と矛盾するため、何らかの方法で除去する必要がある。一般には、スクリーンの背面から投影するリアプロジェクションは遮蔽への対策として有効であるが、これらのシステムでは現実空間に対してパターンを投影するという仕組みのため、フロントプロジェクションでなければならない。プロジェクタ型複合現実感において、プロジェクタを遮ってはいけないという制約は、円滑な作業、コミュニケーションを困難にするものである。

そこで本研究では、Sukthankar ら [4] が提案した、複数プロジェクタを用いた影の除去法を導入することで、プロジェクタによって実照明環境を再現する際に問題となる遮蔽物による影を除去する手法を提案する。遮蔽物による影は、スクリーン全体を撮影するカメラによって検出し、投影が遮られている部分の投影を別のプロジェクタからの投影に切り替えることで影の除去を行う。また、Sukthankar らが提案システムでは、動的な遮蔽物に対しては、時間遅れによって影が一時的にスクリーン上に投影されてしまうという問題がある。本研究ではそのような問題や画素単位で影の除去を行う際に生じるいくつかの問題を考慮し、グリッド状に分けられた領域に対し影の除去を行う。

2. システム概要

2.1 実照明環境の記録・再現の原理

本研究では、実照明環境の記録・再現ができる SpaceRelighter の原理 [3] に加えて、実照明環境が再現されたシーン上で、ユーザの介入などによって生じる影の除去を目的とする。

SpaceRelighter は、図 1 に示すように、面光源や近接光源など、様々な照明環境での見え方をいったん画像としてカメラで記録しておけば、それらの実光源を撤去した後も全く同じ照明環境をプロジェクタのみを用いて再現できるイメージベーストな手法である。図 2 は、実光源によって照らされたシーンと、実光源とは異なる位置にあるプロジェクタによって再現された見え方の例である。実照明環境の記録は、カメラによって撮影し、画像として保存することで行う。一方、実照明環境の再現は、記録した画像をプロジェクタから投影することで行う。なお、再現した照明環境に基づく動的な遮蔽物の影の再現については、協調型の作業においては作業の妨げになってしまうことが考えられる。そのため、本研究では記録した実照明環境のみを再現するものとする。

2.2 幾何補正・色補正の原理

実際に機材を設置する際には、カメラとプロジェクタの位置を厳密に等しくするのは困難であるため、カメラとプロジェクタ位置の対応関係を考慮した幾何補正を行い、投影する必要が

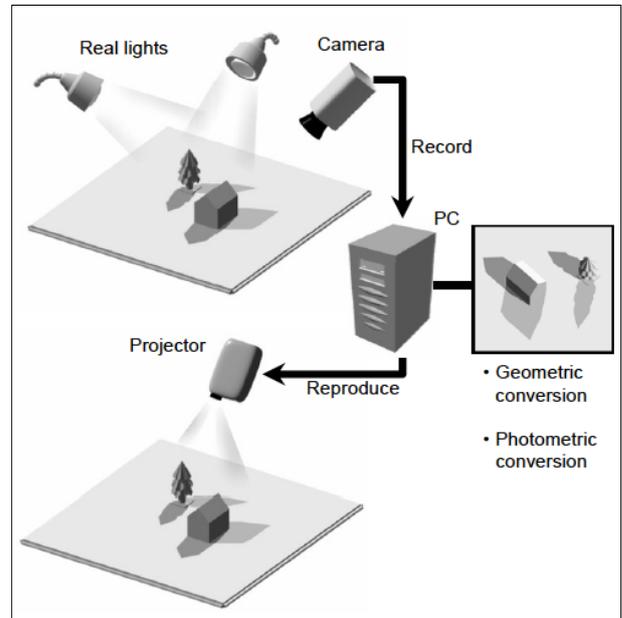
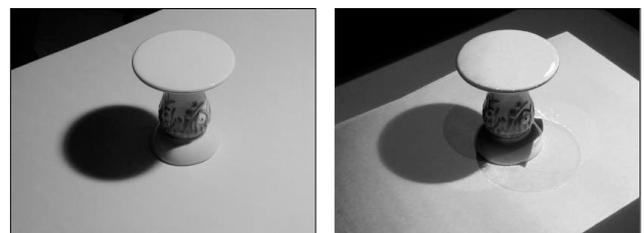


図 1 SpaceRelighter の概要



実光源での見え方

プロジェクタで再現した見え方

図 2 SpaceRelighter の例

ある。また、カメラとプロジェクタ間、複数のプロジェクタ間で色の違いが生じるため、記録した画像をそのまま投影しても、実照明環境と等しくなるとは限らず、不自然な結果となってしまう。そのため、色補正を行う必要がある。記録した実照明環境を、幾何補正・色補正し投影することで現実世界での実照明環境の再現を行う。

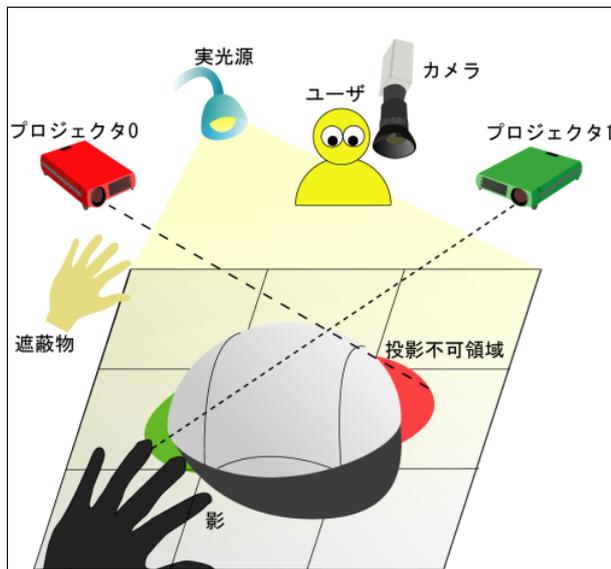
幾何補正の際に必要な、カメラとプロジェクタの対応関係には、空間コード化光投影法 [5] を用いる。空間コード化光投影法によって得られたコード画像を基に投影パターンの幾何補正を行う。

色補正は、幾何補正によって幾何的な整合を行った後、記録した画像と撮影された画像との差分を投影パターンにフィードバックすることで行う [6]。プロジェクタごとに色補正を行う必要があるため、あらかじめ色補正を行い、2台のプロジェクタごとにそれぞれ色補正された実照明環境の画像を用意しておく。わずかな環境光の変化などによって生じる色の違いは、その際に投影している領域のみを、逐次色補正を行うことで対応することができる。

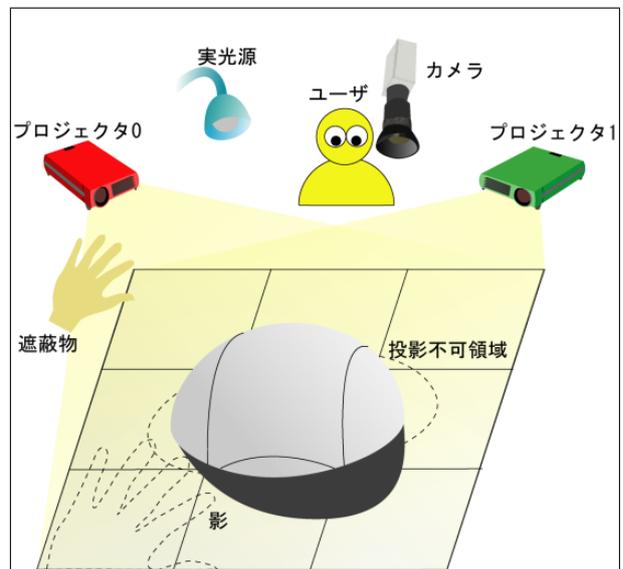
3. 影の除去

3.1 再現した照明環境に矛盾する影の除去

本システムの概念図を図 3 に示す。白色スクリーン上に 3 次



(a) 遮蔽物によって生じた照明環境と矛盾する影



(b) 複数プロジェクタの切り替えによる影の除去と実照明環境の再現

図 3 システムの概念図

元形状を持つ物体を置いた 3 次元スクリーンを投影の対象とする。図 3(a) の緑や赤で表される領域は、3 次元スクリーンの形状と、各プロジェクタの位置関係によって、ユーザの介入に関わらず、パターンを投影できずに影になってしまう領域（以後、投影不可領域とよぶ）である。これに加え、ユーザなどの遮蔽物によって投影が遮られることで生じる影がある。本稿では、これらの、本来再現される実照明環境に矛盾する影の除去について述べる。投影不可領域は、投影不可領域へ投影を行うことができる他のプロジェクタを用意することで対応することが可能である。影の除去は、カメラで撮影された画像を基に影の検出を行い、検出された影に対応する領域への投影を、影ができない別のプロジェクタに切り替えることで実現する。投影不可領域を考慮し実照明環境が再現された 3 次元スクリーン上で影を除去した模式図が図 3(b) になる。

3.2 影の検出

プロジェクタを用いて実照明環境を再現する際に、ユーザの手などの遮蔽物によって生じる影を除去するためには、まずその影の位置を実時間で検出する必要がある。ここで、記録した実照明環境に影が含まれている場合には、その影を再現するためのパターンが投影されているため、遮蔽物によって生じる影とは区別する必要がある。そこで、遮蔽物によって生じる影の検出には、記録した画像と撮影された画像との差分を用いる。記録時には存在しなかった影がスクリーン上に生じると、この差分によって図 4 の例のように検出することができる。しかし、図 4 にみられるように、単に差分を用いただけでは、環境光の変化などによって観測される画素値に変化が生じると影でない領域でも差分値が大きくなってしまふことがある。この例では手によって生じた影の部分の差分値が大きくなっているが、環境光の変化によってそれ以外の部分でも差分値が大きくなっていることが分かる。そこで、差分に加えて輝度による閾値処理も併用する。まず差分が閾値以上となる領域を影候補領域として検出する。影は全体的に低い輝度値を持つことから、検出さ

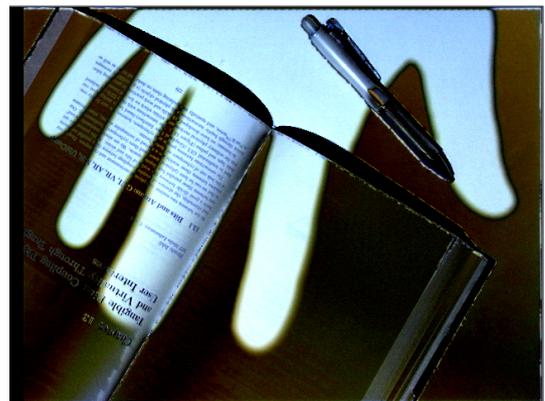


図 4 差分を濃淡値で表示した例



図 5 閾値処理による影の検出

れた影候補領域に対し照度値が閾値以下であれば影とみなす。差分値と輝度値による検出により図 5 のように影のみを検出することができる。

3.3 投影画像の分配

検出された影をもとにそれぞれのプロジェクタに対し投影の分配を行う。投影は互いのプロジェクタが投影できない領域を

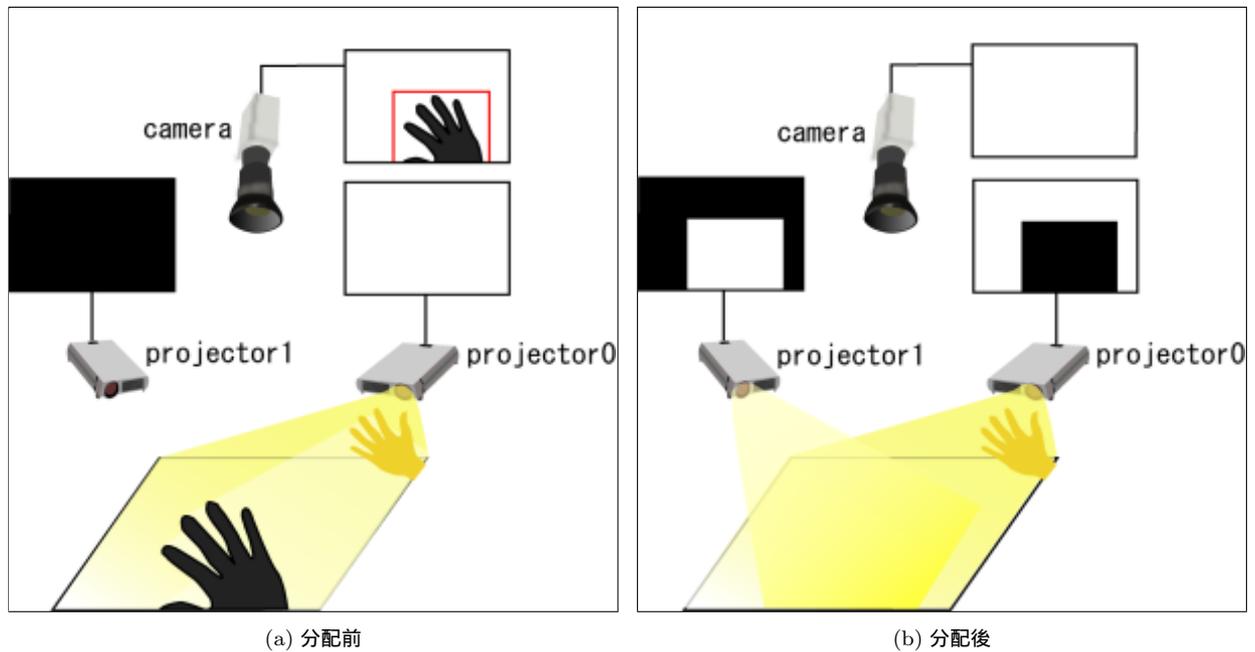


図 8 投影パターンの分配による影の除去の概念図

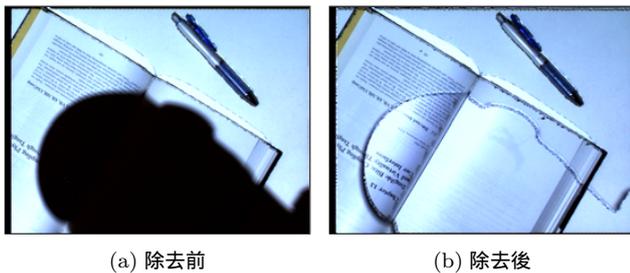


図 6 画素単位で影の除去を行った結果

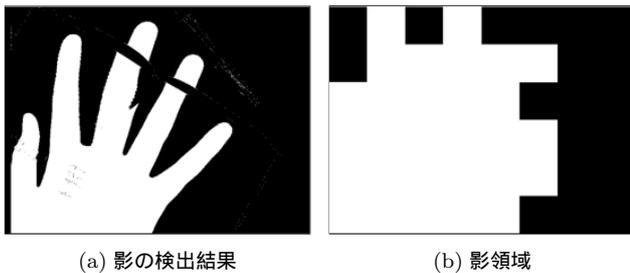


図 7 影領域の検出

補う形で行い、投影の出力の ON/OFF をそれぞれ 1/0 とおいたとき、排他的論理和が 1 となるように振り分けを行う。すなわち、各領域はいずれか一方のプロジェクトで投影し、両方のプロジェクトで同時に投影することはない。

本システムでは、プロジェクトは 2 台で構成されており、投影不可領域へ投影できるプロジェクトは 1 台のみであるため、投影不可領域では影の検出は行わず、その領域を投影できるプロジェクトの出力を ON に固定しておく。そのため、3 次元スクリーン上の投影不可領域を除いた影に対してのみ、投影パターンの分配を適用する。影を除去した後は投影パターンはそのままにしておき、新たに影を検出された場合に再度投影パターンの分配を行う。

なお、3 台以上のプロジェクトが利用できる場合には、あるプロジェクトに対する投影不可領域を、他の複数のプロジェクトで投影できるため、原理的には投影不可領域についても影の除去が可能となるが、本システムはプロジェクト 2 台で構成されているため、投影不可領域に対しては影の除去は行わない。

3.4 領域単位での影の除去

Sukthankar ら [4] は、カメラでスクリーンを撮影して画素単位で影の検出を行い、影に対応する投影を他のプロジェクトに切り替えることで影の除去を行うシステムを提案した。しかし、このシステムでは画素単位で影の除去を行うため、動的な影に対しては時間遅れによって一時的に影の輪郭がスクリーン上に生じてしまうという問題がある。また、ソフトシャドウである場合、ふちの部分がグラデーションになっており画素単位で影の除去を行うと閾値処理だけでは影が薄い部分は残ってしまうという問題がある。さらに、投影が遮断されていても物体とスクリーンとの相互反射、環境光などの影響によって、画素値が大きくなる値となることがあり、影と認識されない画素が生じることも考えられる。これらの理由から、画素単位で影を除去すると、影の輪郭部で誤差が生じ、図 6 の例のように影が完全に除去できない結果になることがある。

これらの問題を考慮し、本研究では対象となるシーンをグリッド状の領域に分割し、領域単位で影の判定を行い影を包含する領域そのものの投影を切り替える。これにより、矩形領域単位でカメラとプロジェクトの 1 対 1 対応をとり、影が検出された領域における投影の切り替えを行うことができる。領域を大きく設定すれば、影の除去後、影が動いてもスクリーン上に影が生じる可能性は低くなり、影のふちも除去することができる。しかし、大きくするほどノイズによる影の誤検出が生じやすくなり、細かい切り替えができなくなるため、本研究では一つの領域を 80×60 pixels の大きさとした。領域をどのような

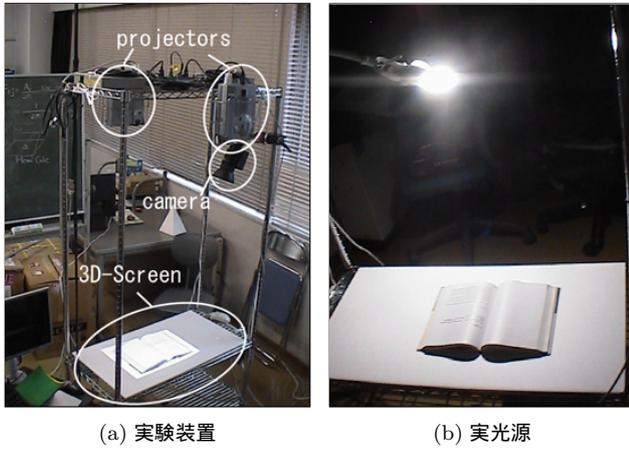


図9 実験環境

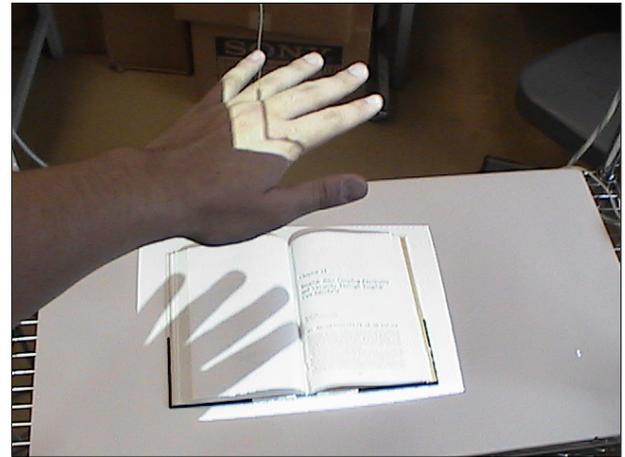


図10 影が生じた状態

大きさにするかは対象とする3次元スクリーン形状の複雑さや、物体の大きさや形状などによって変わるため、ユーザが指定できるものとする。以上の手法によって抽出された領域を影領域と呼ぶ。本研究では、影がわずかでも領域に入っていれば影領域とみなす。図7(a)の白で示すように、影がこのように抽出されたとすると、これを基に求めた影領域は(b)のようになる。これによって得られた影領域に対し、投影画像の分配を行うことで影を除去する。

影の除去の原理を図8に示す。(a)が、影がスクリーン上にできた状態を示している。スクリーン全体を撮影した画像によって抽出された影に対し、赤で囲んだように影領域を検出することができる。そして、(b)のようにこの影領域に対する投影を別のプロジェクタからの投影に切り替えることで、影を除去することができる。

4. 実験と考察

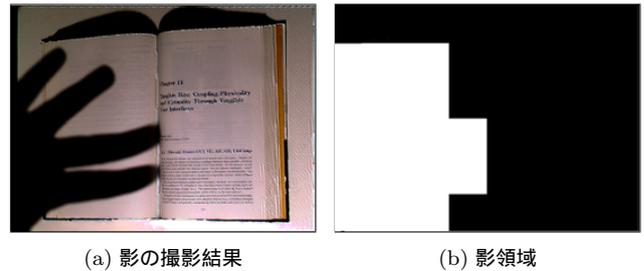
4.1 実験環境

実験に用いた試作システムを図9に示す。(a)が実験装置の全体図である。実験では、一様に白色なスクリーン上に、開いた本を置いたシーンを対象とした。実照明環境はいくつかの状況を記録しそれぞれ任意に切り替え、再現できるものとした。実験機器として、プロジェクタ(PLUS U4-136)2台と3CCDカメラ(SONY DXC-9000)1台、実照明としてライトを用い、(b)のような実照明環境の記録を行った。投影に関してはモニタをデュアルスクリーンに対応させることで1台のPCで2台のプロジェクタに出力した。

カメラは1台のみであるため、カメラによって撮影できない領域があると、その領域では幾何変換が正常に行えないため、シーン上の物体によって撮影できない領域がなるべく少なくなるようにカメラを配置した。プロジェクタは、2台のプロジェクタの投影不可領域がなるべく重ならないように配置した。カメラパラメータや投影不可領域の検出における閾値、影の検出における閾値、影の判定を行う領域の大きさはそれぞれ手動で設定した。

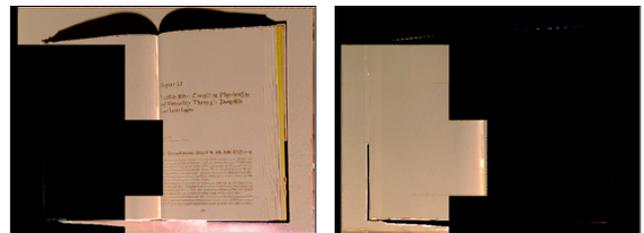
4.2 影の除去

試作システムを用いて影の除去の実験を行った。図10のよ



(a) 影の撮影結果 (b) 影領域

図11 影領域の検出



(a) プロジェクタ0 (b) プロジェクタ1

図12 投影パターンの振り分け

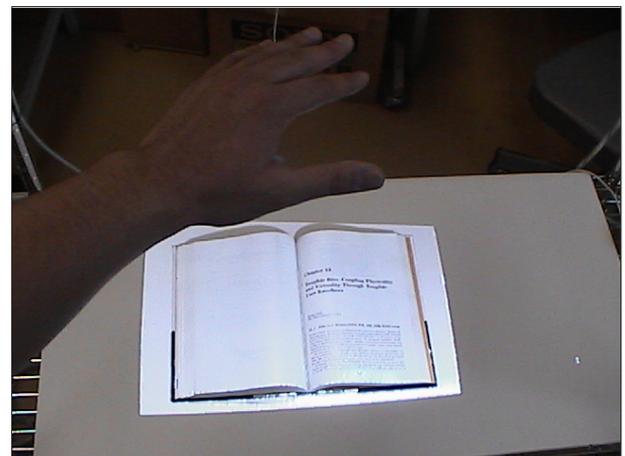
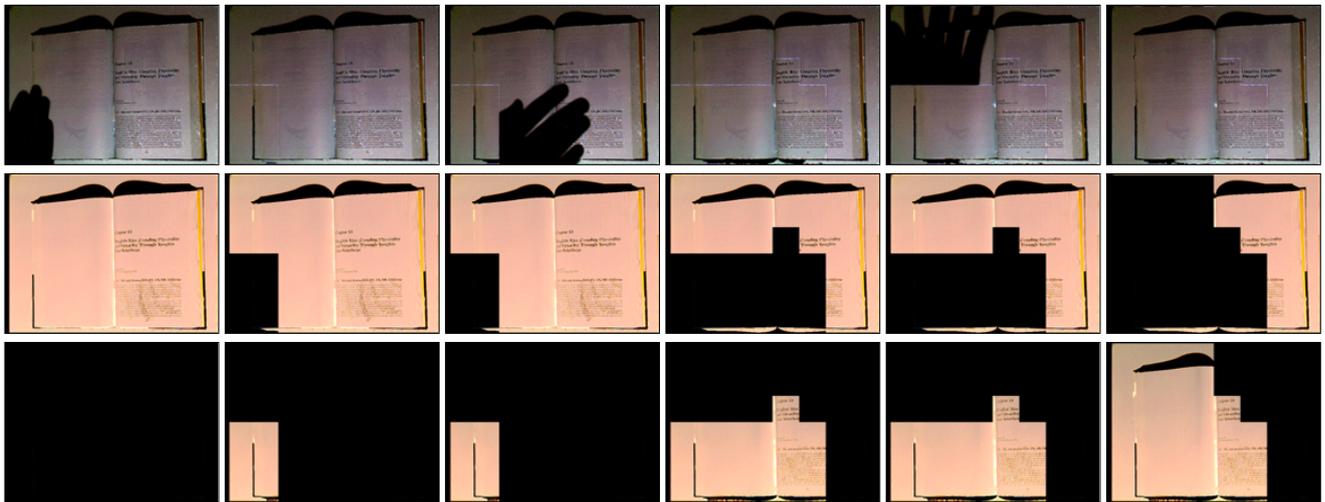


図13 影を除去した結果

うにユーザの手によって影が生じたときに検出された影領域を図11に示す。検出された影領域に対して投影の振り分けを行った結果が図12である。それらを投影した結果が図13であ



時間の推移

図 14 影の除去結果：上段はカメラで撮影した画像，中段はプロジェクタ 0 から投影する画像，
下段はプロジェクタ 1 から投影する画像

る．この結果より，影が除去できているのが分かる．また，影を矩形領域単位で除去することにより，影の輪郭も消えていることが分かる．矩形領域の境界と影の輪郭が重なってしまうと影の輪郭が残ってしまうが，色補正によってほぼ消すことができた．図 14 が影を除去する様子とその際の投影画像を時間軸に沿って表したものである．どのような位置に影ができて除去できていることが分かる．さらに，各プロジェクタごとに色補正を行っているため，投影が切り替わっても撮影画像上の色にはほとんど変化がみられなかった．しかし，矩形領域の境界面で画像の不連続性がみられた．これは，空間コード化光投影法によって対応関係を求める際にスリット画像がモアレ状に観測されてしまうことがあり，このため幾何補正がずれることで生じたものである．また，今回の実験では，背景差分が比較的容易に行える環境で実験を行ったが，照明環境によっては影となっている部分の画素値が必ずしも低い値を持つとは限らない状況も考えられる．その場合は，影の検出精度が落ちるため他の手法を用いる必要がある．

5. 結 論

本研究では，よりリアリティのあるプロジェクタ型複合現実感として，あらかじめ記録した実照明環境が再現された 3 次元スクリーン上で，ユーザが作業をする際に投影を遮ることで生じるスクリーン上の影の除去を行うシステムの構築を行った．また，影の除去を矩形領域単位で投影を切り替えることを行うことにより，画素単位で影の除去を行う際に生じるいくつかの問題に対しても対応した．さらに，試作システムによる実験を行うことで本システムの有効性を示した．

今後の課題としては，3 次元形状が未知であるスクリーンへの対応，動的なシーンへの対応などが挙げられる．また，境界面の不連続性を解消するために，プロジェクタの光量の違いを考慮したレンディングを行っていく予定である．さらに，今回の実験ではカメラやプロジェクタのパラメータは手動で設定

しており，矩形領域の大きさも今回の実験に特化したものである．そのため，様々なパラメータにおける評価実験を行い，自動でパラメータを調整できるようにシステムを改善していく予定である．

文 献

- [1] R.Raskar, G.Welch, K.Low and D.Bandyopadhyay, "Shader Lamps: Animating Real Objects With Image-Based Illumination", Proc. Eurographics Rendering Workshop (ERGW2001), pp.89-102, 2001 .
- [2] Y.Mukaigawa, M.Nishiyama, T.Shakunaga, "Virtual Photometric Environment using Projector", Proc. International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), pp.544-553, 2004.
- [3] Y.Mukaigawa, H.Nagai, Y.Ohta, "SpaceRelighter -Recording and Reproducing Illumination in a Real Scene-", Proc. International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), pp.109-118, 2004.
- [4] R.Sukthankar, T.Cham, G.Suktahankar, "Dynamic Shadow Elimination for Multi-Projector Displays", Proc. Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR2001), pp.151-157, 2001.
- [5] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元計測, 昭晃堂, 1990.
- [6] S.K.Nayer, H.Peri, M.D.Grossberg and P.N.Bellhumeur, "A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections", Proc. ICCV Workshop on Projector-Camera Systems(PROCAMS), 2003.