プロジェクタを用いた仮想照明環境のための相互反射の解析と生成

西山 正志　向川 康博　尺長 健

岡山大学工学部情報工学科
〒700-8530 岡山市津島中3-1-1
E-mail: mukaigaw@chino.it.okayama-u.ac.jp

あらまし: 我々は，拡張現実感の枠組において，プロジェクタにより実世界に光学パターンを投影することで，仮想照明環境を実現する手法を提案してきた．本稿では，この手法に固有の問題として，プロジェクタによる投影光に起因する相互反射のため，必ずしも正しい見え方とはならない場合があることを示す．また，この問題を解決するために，投影光自体の相互反射を解析し，正しい見え方となるように相互反射成分を補償する方法を提案する．最後に，試作システムを用いた実験により，仮想照明環境における有効性を検証する．

キーワード: 拡張現実感，仮想照明，反射特性，陰影解析，プロジェクタ，相互反射

Analysis and Synthesis of Interreflection in Virtual Lighting Environment

Masashi NISHIYAMA　Yasuhiro MUKAIGAWA　Takeshi SHAKUNAGA

Department of Information Technology，Faculty of Engineering,
Okayama University
Tsushima-naka 3-1-1，Okayama，700-8530，Japan
E-mail: mukaigaw@chino.it.okayama-u.ac.jp

Abstract: We have been proposed a method for realizing a virtual lighting environment in the framework of augmented reality. In this method, photometric patterns are projected to the real world. We show that the photometric pattern can not always make suitable views because of interreflections caused by the projecting light itself. In order to solve this problem, we analyze the interreflection, and propose a method for the photometric pattern compensation. Experimental results show that the proper views are observed in the virtual lighting environment.

Keyword: augmented reality，virtual light，reflection property, shading analysis，projector，interreflection

1　まえがき

近年，実世界に対して仮想世界の情報を融合する拡張現実感に関する研究が盛んに行われており，新たな情報提示の手段の観点から注目されている．これまで，実世界と仮想世界の情報を融合するための装置として Head Mounted Display(HMD) が幅広く用いられてきたが，近年，プロジェクタを用いることで，仮想世界の情報を実世界に投影する手法も提案されている [1]．プロジェクタを用いることによって，ユーザが特殊な装置を装着する煩わしさがなくなるだけでなく，視点位置の変動に伴う実世界と仮想情報の位置ずれの問題が解消できる．

さらに，プロジェクタを用いて実世界に光学パターンを投影することで，実世界の光学的な見え方そのものを変化させる新しい発想の研究もいくつか報告されている [2, 3]．3 次元形状を持つ実世界の物体に対して仮想的な光学情報を与えることができるため，照明設計や仮想美術館など幅広い応用が期待できる．しかし，物体の反射特性や視点位置の変化による，光学的な見え方の変化を本格的に取り扱ったものは少ない．

我々は，実世界の幾何情報と仮想世界の光学情報を，実世界で融合し，光源位置や反射特性の違いによる見え方の変化を実世界で提示できる仮想照明環境を提案した [4]．仮想照明環境では，光源位置や反射特性を任意に変化させることができ，ユーザの視点位置変動による光学的な見え方の変化を表現できる．しかし，プロジェクタによって実世界で光学情報を融合すると，プロジェクタの投影光自体が相互反射を起こすため，必ずしも正しい見え方を得ることができない．

そこで，本研究では，プロジェクタによる投影光の相互反射を解析し，ユーザに対して正しい見え方を提示できるように光学パターンの相互反射補償を行う方法を提案する．

2　プロジェクタを用いた仮想照明環境

2.1　研究目的

本研究の目的は，実世界の幾何情報と仮想世界の光学情報を，実世界で融合し，光源位置や反射特性の違いによる見え方の変化を実世界で提示できる仮想照明環境を実現することである．そのため，図 1 のように，仮想光源によって実世界中の 3 次元物体（以下スクリーン物体と呼ぶ）上に生じるべき光学現象を，仮想光源とは異なる位置にあるプロジェクタから光学パターンを投影することにより実現する．これにより，仮想光源の位置だけではなく，スクリーン物体の反射特性を仮想的に変化させることもできる．なお，本研究で扱うスクリーン物体は白色の完全拡散反射面とし，プロジェクタ以外に実光源はないものとする．

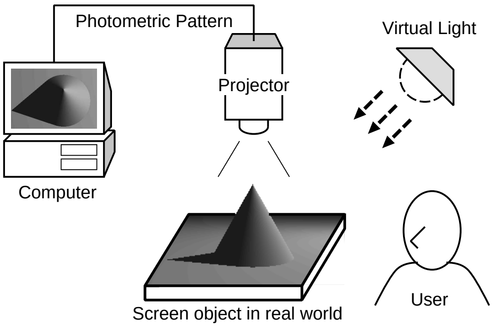


図 1: 仮想照明環境

2.2　光学パターン生成

光学パターンを生成するためには，スクリーン物体の 3 次元形状を獲得する必要がある．また，鏡面反射成分と相互反射成分はユーザの視点位置に依存するため，視点位置の推定が必要となる．スクリーン物体の形状はカメラとプロジェクタを用いたレンジファインダにより獲得することができ，ユーザの視点位置はカメラを用いて推定することができる [4]．

2.3　光学パターン投影

生成された光学パターンは，スクリーン物体上で観測されるべき光学現象を表したものであり，HMD などを用いたシステムでは，実世界に対してそのまま重ね合わせることができる．一方，プロジェクタを用いたシステムにおいて光学パターンを投影するためには，プロジェクタとスクリーン物体の位置関係を考慮して，光学パターン中の各画素を投影輝度へ変換することが必要となる．

例えば，図 2 に示すようなスクリーン物体では，A 面,B 面の法線方向に対して等しい角度を持つ仮想光源方向を想定した場合，光学パターン中の A 面と B 面は等しい輝度となる．この光学現象を，仮想光源とは別の位置にあるプロジェクタからの投影によって実現するには，法線方向とプロジェクタの投影方向の角度差，およびプロジェクタとスクリーン物体の距離を考慮しなければならない．スクリーン物体上で実現すべき光学パターンの輝度を i とすれば，プロジェクタの方向と距離に応じた投影輝度 p は式 (1) で表される．

$$p = \frac{i}{cos\theta}\left(\frac{l}{\tilde{l}}\right)^2 \tag{1}$$

ここで，θ は法線方向とプロジェクタの投影方向がなす

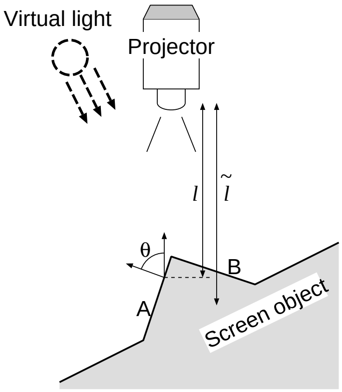


図 2: スクリーン物体への光学パターン投影

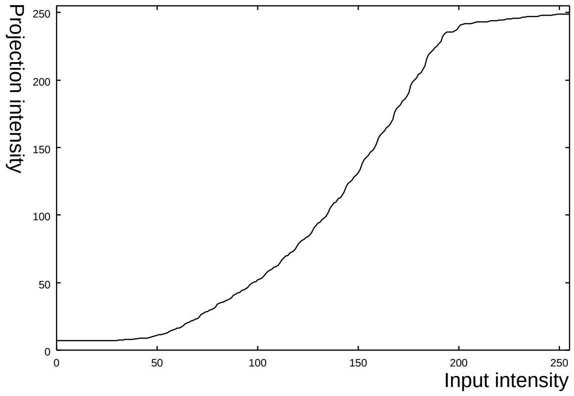


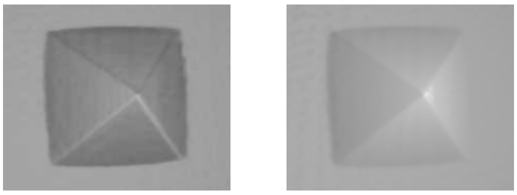
図 3: 入力輝度と投影輝度の関係

角度，l は投影面とプロジェクタの距離，$\tilde{l}$ はスクリーン物体とプロジェクタの基準距離である．

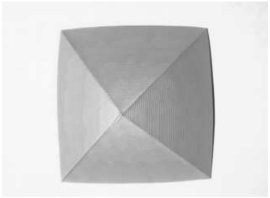
この投影輝度 p を実際にプロジェクタより投影するためには，プロジェクタに対する入力輝度と投影輝度のキャリブレーションを行う必要がある．多くの液晶プロジェクタでは，入力輝度と投影輝度が線形ではなく，個々のプロジェクタの特性の違いが大きいため，一般的に定式化することは難しい．そこで，本研究では，法線方向がプロジェクタの投影方向と一致する白色物体を基準距離 $\tilde{l}$ に配置し，実際に各入力輝度をプロジェクタに与えた時の白色物体の明るさをγ 補正をしないカメラで観測することで，図 3 に示すような入力輝度に対する投影輝度の関係を表す関数 f を獲得する．この f を用いると，実際にプロジェクタに入力する入力輝度 s は，式 (2) で表される．

$$s = f^{-1}(p) \tag{2}$$

プロジェクタとスクリーン物体の位置関係を考慮した光学パターン投影の例を示す．図 2 のように，プロジェクタに対して斜めに配置された四角錐を含むスクリーン物体が，四角錐の頂点方向にある仮想光源から照らされる場合を考える．この場合に，スクリーン物体上で観測されるべき光学パターンを図 4(a) に示す．(b) はこの光学現象を表現するためにプロジェクタに与えた入力輝度である．(b) を入力として投影されたスクリーン物体をカメラで撮影したものが (c) であり，各面の明るさが期待通りにほぼ等しくなっていることが確認できる．



(a) photometric pattern to be observed　(b) input intensity



(c) Observed reflection on the screen object

図 4: 光学パターン投影結果

3　相互反射補償

3.1　光学パターン投影における問題点

仮想光源位置，スクリーン物体の仮想反射特性，及び視点位置をもとに生成された光学パターンを投影輝度に変換し，プロジェクタによってスクリーン物体に投影しても，正しい輝度が得られるとは限らない．その原因として，プロジェクタ光による相互反射の影響が挙げられる．つまり，仮想光源によって生じる本来の相互反射成分は光学パターンに含まれているが，これをスクリーン物体に投影すると，プロジェクタ光自体が実世界で相互反射を起こすため，プロジェクタによる誤った相互反射成分が余計に付加されてしまう．これは，プロジェクタを用いたシステムに特有の問題であり，HMD などを用いて単に画像上に重ね合わせる場合には生じない現象である．そのため，本研究では，正しい輝度を実現するために，相互反射補償を行う．

3.2　プロジェクタ光による相互反射

相互反射とは，物体上のある面で反射した光が他の面で反射を繰り返すことにより，物体の陰影を変化させる

表 1: 相互反射の分類

DD 過程	B 点での拡散反射 (D_B) が A 点で拡散反射 (D_A)
SD 過程	B 点での拡散反射 (D_B) が A 点で鏡面反射 (S_A)
DS 過程	B 点での鏡面反射 (S_B) が A 点で拡散反射 (D_A)
SS 過程	B 点での鏡面反射 (S_B) が A 点で鏡面反射 (S_A)

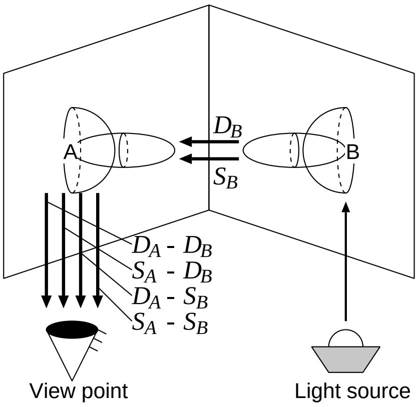


図 5: 相互反射

現象である．ここで，簡単化のために，図 5 に示すように，光源によって直接照らされた B 点での反射光が A 点で反射する 2 次反射のみを考える．反射を拡散反射と鏡面反射に分けて考えると，相互反射は表 1 に示す 4 種類の過程に分類できる [6, 7]．

これらの相互反射の影響を考慮すると，光学パターン上の A 点における輝度 i_A には，式 (3) のように，拡散反射成分 D_A と鏡面反射成分 S_A に加えて，仮想光源による相互反射成分 I_A^l が加えられる．

$$i_A = D_A + S_A + I_A^l \tag{3}$$

この光学パターンを投影すると，式 (4) のように，A 点で観測される輝度 o_A には，プロジェクタ光による相互反射成分 I_A^p が余計に付加されてしまう．これが，スクリーン物体が正しい見え方とならない原因である．

$$o_A = D_A + S_A + I_A^l + I_A^p \tag{4}$$

本システムを用いることにより，スクリーン物体の反射特性を仮想的に変化させることができる．しかし，実際のスクリーン物体は完全拡散反射面であり，鏡面反射を起こすことはできない．そのため，視点位置から見た時のみ，正しい明るさとなるような拡散反射成分を投影していることになる．従って，光学パターンにどのような反射成分が含まれていたとしても，式 (4) のプロジェクタ光による相互反射成分 I_A^p は，DD 過程による相互反射だけであることがわかる．

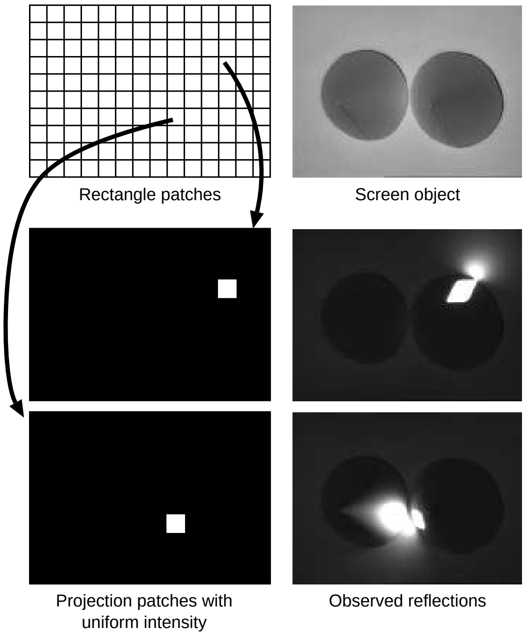


図 6: 矩形パターン投影画像

3.3 実画像に基づく相互反射補償

プロジェクタ光による相互反射成分 I_A^p は，実際にスクリーン物体上で起こる現象であるため，回避することはできないが，その値は通常の相互反射成分の算出と同様にレイトレーシング法で求められる．そこで，式 (5) のように，光学パターンから I_A^p に相当する値を除去しておくことで，相互反射を補償した輝度 c_A が得られる．この c_A を投影されたスクリーン物体は，式 (4) 右辺の第 4 項がなくなるため，正しい見え方となる．

$$c_A = D_A + S_A + I_A^l - I_A^p \tag{5}$$

しかし，プロジェクタ光による相互反射成分 I_A^p をレイトレーシング法によって算出すると，計算時間がかかるだけでなく，スクリーン物体の形状の復元誤差に強く影響を受ける．そこで，本研究では，実際にパターンを投影したスクリーン物体を撮影した実画像を基に，相互反射成分を算出する．図 6 に示すように，パターンを小領域の矩形に区切り，特定の矩形のみを一定の輝度としたパターンを実際にスクリーン物体に投影する．このスクリーンをカメラで撮影することで，実世界でどのように相互反射が生じるかを示す矩形パターン投影画像を獲得する．これにより，光学パターンを投影する際に，光学パターン中の輝度が各矩形に含まれる割合を算出し，それぞれの割合に応じた矩形パターン投影画像の線形和により，DD 過程による相互反射成分を直接的に獲得できる．スクリーン物体の形状の複雑さに応じて矩形の大きさを変えることにより，十分な精度を保つことができる．

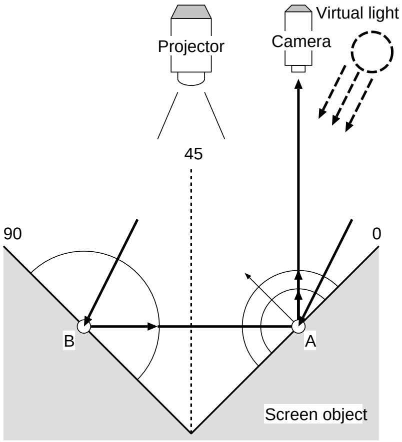


図 7: 相互反射補償の実験環境

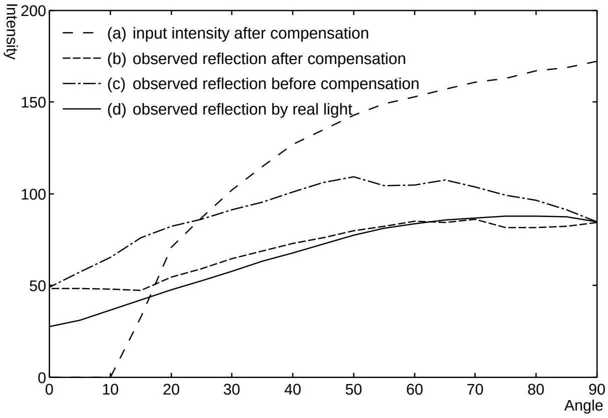


図 8: 相互反射補償の実験結果

一般にレイトレーシング法では，本来は無限に繰り返される相互反射を有限回の反射で近似する必要がある．しかし，提案方法では保持しておく画像が多くなるという問題はあるものの，計算時間が大幅に短縮でき，無限に繰り返される DD 過程による相互反射を正しく算出することも原理的には可能となる．また，提案方法は，プロジェクタ光による相互反射成分 I_A^p の算出だけでなく，仮想光源による相互反射成分 I_A^l に含まれる DD 過程の成分の算出にも用いることができる．

以上の方法により，原理的には誤った相互反射成分を取り除くことができる．しかし，実際上の問題として A 点に与えた仮想拡散反射率が小さい場合には，c_A の値が負になることがある．これは，式 (5) において，A 点に与えた仮想拡散反射率から算出される D_A と I_A^l が小さな値になるのに対し，白色であるスクリーン物体の本来の拡散反射率から算出される I_A^p は大きな値になることが原因である．このような場合には，プロジェクタで負の値を投影することができないため，正しく相互反射補償をすることができない．これは，明るいスクリーン物体をプロジェクタで暗くすることができないことに起因しており，プロジェクタを用いたシステムにおいて本質的に解決できない問題である．

4 実験結果

提案した相互反射補償法の有効性を確認するため，仮想光源の場合と実際にライトを照らした場合で，スクリーン物体の見え方の変化を調べる実験を行った．図 7 に示すように，互いに直交する 2 面を持つスクリーン物体に対し，A 面への入射角が $0°$ ~ $90°$ となるように仮想光源の位置を動かした時の A 点の明るさを調べた．

スクリーン物体に与えた仮想反射特性を完全拡散反射とし，拡散反射率は A 点を 0.5，B 点を 1 とした．全体を 6×7 に区切った矩形パターン投影画像を用いて光学パターンの相互反射補償をした．この補償後の光学パターンを投影するためにプロジェクタに与えた入力輝度を図 8(a) に示す．ここで，$0°$ 付近では補償後の輝度が負の値となったため，投影輝度は 0 としている．光学パターンを投影した A 点をカメラで撮影した輝度を (b) に示す．また，補償をしなかった場合の A 点の輝度を (c) に示す．比較のために，実際の拡散反射率が 0.5 となるように A 点を着色し，計算機で回転角を制御できるターンテーブルに取り付けたハロゲンライトを仮想光源と同じ位置になるように動かして，A 点をカメラで撮影した輝度を (d) に示す．補償後の投影輝度が負になる $0°$ 付近では (b) と (d) のずれは大きいが，その他の仮想光源位置ではほぼ一致していることがわかる．また，補償をしなかった (c) は，正解である (d) とのずれが大きいことから，提案手法によって正しく相互反射補償ができていることが確認できる．

次に，仮想照明環境の応用例として，図 9(a) のような白色の壷をスクリーン物体とし，仮想光学情報を投影する実験を行った．このスクリーン物体の形状を復元した結果が (b) であり，プロジェクタで投影できない領域以外は，ほぼ正しく形状を復元できていることがわかる．(c) と (d) は，仮想反射特性として拡散反射のみを持つテクスチャを与え，仮想光源の位置をそれぞれ左方向，右方向に配置した時の結果である．壷の裏側の形状が得られていないために一部の cast shadow が不完全であるが，テクスチャや光源方向を自由に変化させることができている．(e) と (f) は，鏡面反射特性を変化させることにより，質感の違いを表現した結果である．(f) は視点位置に合わせて鏡面反射成分が付加されており，スクリーン物体の材質が仮想的に変化していることが分かる．

これらの実験結果より，プロジェクタを用いてスクリー

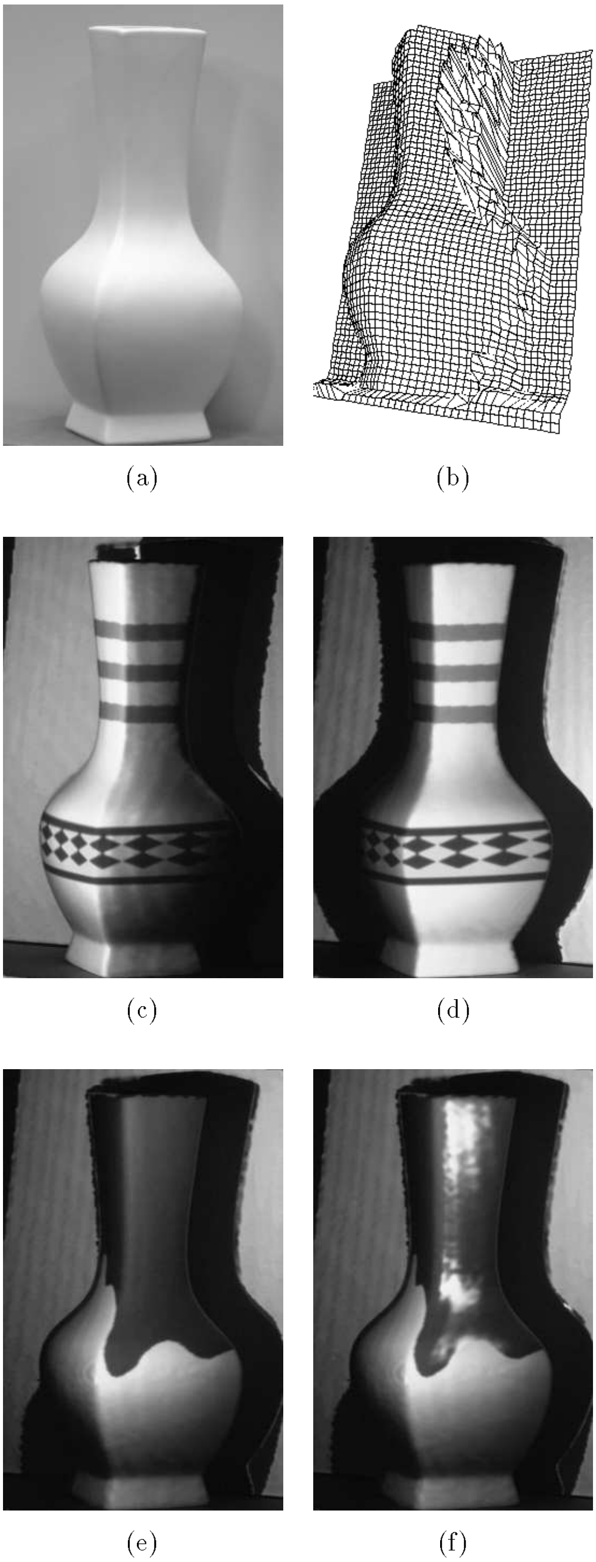

(a) (b) (c) (d) (e) (f)

図 9: 壷へのパターン投影結果

ン物体に光学パターンを投影することで，仮想光源や物体の反射特性を任意に変えることのできる仮想照明環境を実現できることを確認した．本システムは，様々なスクリーン物体を用いることで，仮想美術館などへの応用が期待できる．

5 むすび

本稿ではプロジェクタを用いた仮想照明環境において，CG 技法によって生成された光学パターンを実世界に投影しても，プロジェクタ光による相互反射の影響で正しい見え方とならないことを示した．そのために，実画像に基づく相互反射補償法を述べ，実験によって有効性を確認した．一方，スクリーン物体に与えた仮想反射特性によっては，正しく補償ができない場合があるというプロジェクタを用いたシステムの限界を明らかにした．

また，試作システムを用いた実験により，実世界に光学パターンを投影することで，光源位置や反射特性を自由に制御できるだけでなく，単なる CG では得られない現実感を得ることができることを確認した．今後の課題として，複数プロジェクタへの拡張による適用領域の拡大が挙げられる．

本研究は，科学技術振興事業団 CREST 池内プロジェクトの援助を受けて行った．

参考文献

[1] J.Underkoffler, B.Ullmer and H.Ishii: “Emancipated Pixels: Real-World Graphics In The Luminous Room”, Proc. SIGGRAPH’99, pp.385-392, 1999.

[2] R.Raskar, G.Welch, W.C.Chen: “Table-Top Spatially-Augmented Reality: Bringing Physical Models to Life with Projected Imagery”, Proc. International Workshop on Augmented Reality’99 (IWAR’99), pp.64-71, 1999.

[3] 楠本拓矢, 佐藤宏介, 井口征士: “実物体へのテクスチャ像投影による混合現実感システム”, 電子情報通信学会基礎・境界講演論文集, pp.318, 2000.

[4] 西山正志, 向川康博, 尺長健: “実 3 次元形状への光学パターン投影による仮想照明環境の実現”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2000), Vol.1, pp.451-456, 2000.

[5] 井口征士, 佐藤宏介: “三次元画像計測”, 昭晃堂, 1990.

[6] 眞鍋佳嗣, 佐藤宏介, 井口征士: “光源移動による相互反射の検出”, 信学論 D-II Vol. J78-D-II, No.1, pp.86-93, 1995.

[7] 富永昌治, 岡山敏之: “ハイライトや相互反射の影響を含むカラー画像の解析法”, 信学論 D-II Vol. J80-D-II, No.6, pp.1360-1369, 1997.