

プロジェクタ・カメラシステムの概観と研究動向

日浦 慎作† 向川 康博‡

†大阪大学 大学院基礎工学研究科

560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

Tel +81-6-6850-6371 shinsaku@sys.es.osaka-u.ac.jp

‡大阪大学 産業科学研究所

567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

Tel +81-6-6879-8422 mukaigaw@am.sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし: プロジェクタとカメラを組み合わせたシステムに関する研究は近年大きな盛り上がりを見せている。その理由には、プレゼンテーション用の高性能なプロジェクタが安価で入手出来るようになったことや、3次元計測や複合現実感、イメージベースドレンダリングなど様々な応用が可能であることが挙げられる。しかしこの分野を概観すると、そのような実用上の要因だけでなく科学として見たときのプロジェクタとカメラの関係や組み合わせの面白さが、研究の大きな動機となっていることが理解されよう。本稿ではこのような観点からプロジェクタ・カメラシステムの研究について、その発展の経緯と最新の研究動向を紹介する。

キーワード プロジェクタ, ライティング, 双対性, 複合現実感

An overview and trend of researches on projector-camera systems

Shinsaku HIURA† Yasuhiro MUKAIGAWA‡

†Graduate School of Engineering Science, Osaka University

1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

Tel +81-6-6850-6371 shinsaku@sys.es.osaka-u.ac.jp

‡The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047 Japan

Tel +81-6-6879-8422 mukaigaw@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract Nowadays researches about projector-camera systems become popular. The cost and performance of projectors are much improved in the recent decade, and it realizes sophisticated computer vision and mixed reality applications. However, such versatility of projector is not the only reason of research interest, but scientific and theoretical relationships of projector-camera system motivates us when we notice such beautiful characteristics proposed by recent researches. Therefore, we tried to give an overview of studies about projector-camera systems with up-to-date results and applications.

Keywords: Projector, Lighting, Duality, Mixed Reality

1 はじめに

コンピュータビジョンに関する研究は、その研究が目指す究極の目的から、大きく2つの立場に分類されると考えられる。1つは人間の視覚が実現する機能を機械へ実装しようとする立場であり、それは人間がものを見る仕組みの理解につながるという点で生命科学的興味を動

機の1つとするものである。それに対し他方は工学的な有用性をより重視した研究であり、光を情報の担い手とするときの利点すなわち非接触・非侵襲性や、波長の短さに起因する高分解能性が画像センシングの応用範囲の広さを支えている。見方を変えると、前者は画像を用いることにより必然的に生じる不良設定性に対し前提条件や知識を組み合わせることで問題を解こうとする立場で

あり、後者は問題そのものを良設定化することを忌避しない立場であると言える。

後者の立場に立つとき、コストや環境など他の要因が許す限り問題の良設定化について検討することになるが、これにはシーンへの照明がどの程度統制できるかという点が大きく影響する。典型的な例の1つは能動型レンジファインダであり、これはスリット光や短時間パルス光等の幾何学的もしくは時間的に構造化された光により、三角測量法または光飛行時間測定法に基づく距離計測を行うものである [1]。これらの方法は受動的手法に比べあきらかに良設定的であり、同様に moire topography や photometric stereo [2] などの照明法に立脚した他の形状計測手法も提案されている。Photometric stereo では面の勾配とともに拡散反射率も推定する事ができ、これは任意照明下での物体の見えの再構成にも利用できる。Shashua は平行光源・完全拡散反射を仮定すれば、照明方向の異なる3枚の画像の線形結合で任意光源方向の画像が表現できることを示し、物体認識に利用した [3]。さらに向川らは、この線形性を画像生成に応用している [4]。このように他条件下での画像のレンダリングのために、様々な照明条件下での多数の画像を獲得・利用する研究もまた近年盛んになっている。他には少数の画像から影を含む任意照明条件下での画像生成を行う照明錐モデル [5] や、多自由度光源下で画像を収集することにより反射モデルによらずに任意照明下での物体の見えを再現する方法 [6][7] などが考案され、現在も発展を続けている。

しかしこのように各論的に様々な手法が提案される一方で、これら照明の制御とそれに伴う画像上の変化の関係を統一的に扱う理論的枠組みや一般的性質についての知見、信号处理的な観点での解析などが不足していることが意識され始めており、このような問題について取り組んだ研究も見られるようになった。特に従来、光源制御の自由度を増やすには多大なコストが必要であり、カメラのみを用いた研究に比べ実証的取り組みが困難であったところ、近年のプレゼンテーション用プロジェクタの急速な発展により様々な試みや提案がなされるようになってきている。そこで本稿ではそのような照明と画像の関係に関する統一的な枠組みについてまず述べたのち、プロジェクタとカメラを組み合わせた研究例について紹介する。また照明・投光と人間の知覚の関係や、プロジェクタを MR, HCI 分野へ応用した例についても述べる。

2 プロジェクタとカメラの双対性

レンズ系はプロジェクタとカメラの双方に用いられている重要なデバイスである。図1のように、カメラの

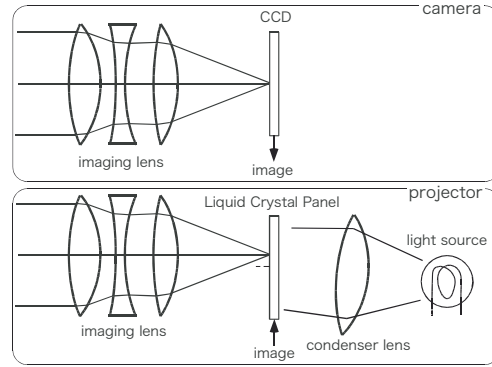


図1 プロジェクタとカメラの構造

像面には CCD や CMOS などの撮像素子が、またプロジェクタの像面には液晶パネルなどのディスプレイデバイスが設置されるが、絞りの有無や熱的設計を除きレンズの働きに差異はない。プロジェクタでは設置場所より上方のスクリーンに映像が投影される場合が多いため、ディスプレイデバイスの中心に対しレンズの光軸は上方へずらしてあるが（写真撮影技法の用語ではライズという）、これは後で述べるようにカメラ・プロジェクタの数式モデルにおいて統合的に取り扱われるため問題とはならない。DMD [8] や LCoS のような反射型ディスプレイデバイスを用いたプロジェクタでも光源の配置が異なるだけで同様である。

2.1 幾何学的双対性

レンズによるぼけや歪みがないものとする、プロジェクタおよびカメラにおける像面・レンズ系・シーン間の関係はピンホールカメラモデルにより表現できる。物体上の点を $\tilde{P} = (X, Y, Z, 1)^t$ 、像面上的点を $\tilde{p} = (x, y, 1)^t$ とすると、ピンホールカメラモデルは以下の数式で表すことができる。

$$w\tilde{p} = \begin{pmatrix} f & sf & t_x & 0 \\ 0 & af & t_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tilde{P} \quad (1)$$

ここで右辺左側の行列を内部パラメータと呼び、 f は焦点距離、 s は剪断歪み係数、 a はアスペクト比、 (t_x, t_y) は画像中心を表す。また右辺右側の行列は外部パラメータであり、回転行列 R と並進ベクトル t により表される6自由度のパラメータである。先に述べたライズ効果は画像中心パラメータに含まれるため、特にモデルを変更する必要はない。つまりプロジェクタとカメラの双方について、シーンと画像の間の幾何学的関係が同一のモデルで表現できることになる。

2.2 測光学的双対性

CG レンダリングで古くから用いられるレイトレーシング法では、像面上の各点から視線方向へ光線を逆方向に辿り、到達した物体表面の属性と法線に従い反射や屈折の重み計算を繰り返すことで像面上の明度を決定する。本来であれば光源から射出された光線を順方向に辿り、反射・屈折された光の強さと方位を求めながらカメラへの入射強度を求めるべきであるが、反射や屈折の現象は光の入射と出射の方向を入れ替えても現象の解析が可能である。このように光の伝播方向を入れ替えた場合に成立する性質を光の相反性、または Helmholtz reciprocity[9] と呼ぶ。例えば図 2 の (a) と (b) のように、物体表面の微小領域を照明する光源と、照明された 1 点の輝度を観測するセンサを入れ替えたとき、それぞれの場合の物体の輝度は

$$\begin{aligned} I_a &= \rho(v_1, v_2) \ n \cdot v_1 \\ I_b &= \rho(v_2, v_1) \ n \cdot v_2 \end{aligned} \quad (2)$$

で表される。ここで関数 $\rho(v_l, v_s)$ を物体表面の BRDF と呼び、 v_l と v_s がそれぞれ光の入射方向と射出方向を表すベクトルである。ここで、光の相反性は $\rho(v_l, v_2)$ と $\rho(v_2, v_1)$ が等しいことを言う。この性質は他にラジオシティ法など大局照明を計算するための基礎ともなっている。

プロジェクタとカメラを組み合わせた場合では、さらに興味深い性質が出現する。この場合、シーンの形状(距離や傾き)により、両者の画素同士の対応関係が一对一になるとは限らない。つまり傾いた物体をプロジェクタにより照らしたとき、プロジェクタの 1 つの画素は物体表面上の比較的広い面積を照明する。これにより物体表面の輝度は低下するが、それが観測されるカメラ上の画素数は増加する。これにより式 (2) のうち法線と光源方向の内積の項を打ち消すことが出来る。すなわち、プロジェクタの各画素の出力を順に並べたベクトルを l 、カメラで観測した物体表面の輝度を同様に s とし、その関係を

$$s = T \cdot l \quad (3)$$

のように表したとする。この行列 T が観測により求められているとすると、プロジェクタとカメラを入れ替えたときの関係は

$$l = T^t \cdot s \quad (4)$$

で表される [9]。この性質は物体表面の 1 回の反射だけでなく、図 2(c) のように多重反射や透過・減衰、散乱などの現象を含んだシーンでも成立する。Sen らはこの性質を用いることにより、プロジェクタにより照明されたシーンを観測することで、逆にプロジェクタの位置か

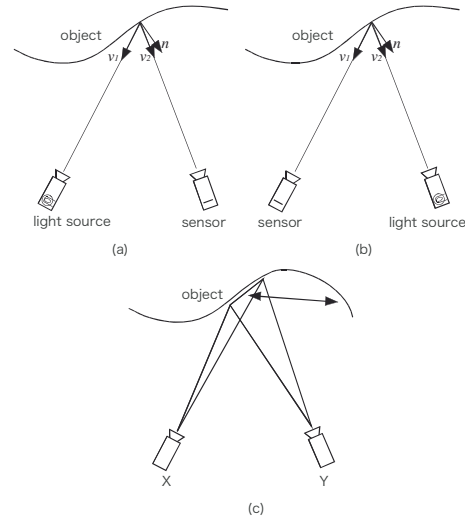


図 2 光の相反性

ら観測したときの画像を再構成する *Dual Photography* という手法を提案した [9]。

相反性は、まず音声について Helmholtz や Rayleigh により明らかにされ、また光(電磁波)については Lorentz[10] が証明した。この性質は非線形光学効果を持つ物質に関しては成立しないが、そのような物質や発生条件はまれであるため一般のシーンにおいては問題がない。

以上の性質は全て光の相反性から導出されるものであるが、プロジェクタとカメラを組み合わせたときに現れる式 (4) のような簡単な関係は特筆すべきものである。そこで本稿では Sen ら [9] が自らの手法を *Dual Photography* と呼んでいることから特に式 (4) の関係を測光学的双対性^{*1}(photometric duality) と呼ぶことにし、それにあわせ前節の性質を幾何学的双対性 (geometric duality) と呼ぶことにする。

3 プレノプティックライティング

1 章で述べたように、工学的有用性の見地からは問題の不良設定性を排除することが望ましい。そのためには照明の制御のほかに、カメラを動かす、レンズのパラメータを変更することなどが行われる。このように観測者の制御自由度について考えるとき、まずは最も自由度の高い観測者を定義し、次に実際の観測がどのような点でその観測者のサブセットになっているのかについて考

^{*1} 画像における「幾何学的」という語の対に「光学的」という語が用いられることも多いが、ここでは厳密性を期し photometric に対する訳語として「測光学的」を用いる。

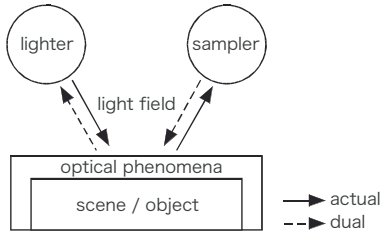


図3 光線空間とシーン, 照明者・観測者.

える方法がある. この章ではこのようなプレノプティックサンプリングの考え方を照明の制御に応用し, プレノプティックライティングを提唱する.

3.1 プレノプティックサンプリング

シーンは照明からの光の反射を繰り返し, 図3のように光に満たされた3次元世界 (light field) を構成している. この3次元世界は以下のような7変数の関数で記述する事が出来る.

$$I = P(X, Y, Z, \theta, \phi, \lambda, t) \quad (5)$$

ここで (X, Y, Z) は空間中の1点を, (θ, ϕ) は方位角を表す. λ は波長, t は時刻であるので, この関数により幾何光学的*2な光線の状況を完全に記述できる. これをプレノプティック関数 (plenoptic function) と呼ぶ.

カメラはこのような多変数関数の一部をサンプリングするデバイスであると言える. 2.1節のようにピンホールカメラモデルで考えると, これはある1つ位置・時刻 (X, Y, Z, t) において, ある範囲内の方位角 (θ, ϕ) をサンプリングするものであると考えられる.

プレノプティックサンプリング [11] とは, IBR (image-based rendering) において生成画像の品質とサンプリングレートの関係性を明らかにした研究である. また広義には, プレノプティック関数をカメラ等のセンサーでサンプリングすること, つまり「プレノプティック関数のサンプリング」を指す.

真空中や温度が一定の空中など, 屈折率の変化しない透明な媒質の中では, 光は優れた直進性を持つ. このことから一般に, プレノプティック関数は冗長性を持つ. つまり, ある直線に沿った光の強度は一定であるため, ある平面上でプレノプティック関数を取得すれば十分である. またシーンが拡散反射である場合, その点の輝度は観測方位によらず一定であるため, やはりプレノプティック関数は大きな冗長性を持ち, オクルージョンを無視すれば奥行きマップと表面輝度により完全な記述が可能となる.

*2 光の波動性や粒子性を取り扱う波動光学・量子光学に対し, これらを無視した考え方.

3.2 光源への拡張

プレノプティックサンプリングは, 光線空間の記録の立場で考えられたものである. 一方, 照明は光線空間を生成するためのエネルギー源となるものである. 従来光源には, 単なる点光源など単純なものが用いられてきたが, 本稿で述べるようにプロジェクタは多自由度に光線空間を制御する事が出来るデバイスであると言える. すなわち, プレノプティック関数において (θ, ϕ) に関する値の生成が可能である. また液晶ディスプレイ等の平面ディスプレイデバイスも多自由度照明の一種として用いることが出来る [6]. これは (X, Y, Z) 空間のうちある平面上の値を与えることになる. そこでこのような様々な照明を図3のlighterのように一般化したものを考え, これをプレノプティックライティングと呼ぶことにする.

プレノプティックサンプリングの議論と同様に, プレノプティックライティングはシーンの状況によっては冗長であり, 光の制御の自由度はより低いもので十分となる. 例えば, ある平面上の全ての点から全ての方位へ, 任意の強度で光が射出できれば, その平面の前後に存在すべき世界と同じ像を提示できる. これは理想的な立体視ディスプレイに相当し, 均質媒質中のプレノプティックライティングとして十分である. またプロジェクタにより照明される物体が拡散反射である場合, やはりオクルージョンや多重反射を無視すると, 物体表面上各点の輝度を自由に制御することが出来るため, その物体へ任意の異なる照明が施された像を提示できる [12].

2章で述べたようにプロジェクタとカメラには双対性があり, 互いに入れ替えが可能であるため, プレノプティックサンプリング [11] の研究と同様にプレノプティックライティングについてもサンプリングレート等について論じることが出来る. 実際に, 多自由度照明のエイリアシングについて解析を行った研究例もある [13][14]. より一般的な例や, 双対性を利用した様々な解析・応用については, 今後の研究が望まれるところである.

4 プロジェクタによるシーンへの情報提示

我々は光に頼って生活している. 植物は光をエネルギーとして利用するが, 動物にとっての光は情報の担い手に過ぎない. つまり動物は知るためのみに光を利用していると言うことが出来る. 我々人間は自発光することはできないが, 有史以前から火を利用することにより, 光が届かない洞窟に壁画を描き, 鑑賞した. 「明るい」という言葉が「詳しい」ということを意味し, 英語でも enlightenment と言うように, 光と知は不可分な関係にある. このように照明は情報を把握するために生まれた

ものだが、しかし依然として情報の提示と照明は融合を果たしておらず、照明は依然として環境を漠然と照らすだけである。人類の火の利用の歴史に比べるとプロジェクタはあまりに新しく、可能性は未知である。それゆえ将来、照明機器が情報提示デバイスを兼ね、それらが高度に統合される可能性があると考えられる。ここではそのような立場から、プロジェクタによる実シーンへの情報提示について論じる。

4.1 機械可読性と人間可読性

人間が認識できるものは全て、機械によっても認識することができる。機械可読性という考え方は必要がない。しかし1章で述べたように、問題の良設定化を考え人間向けと機械向けとで情報の付加・提示方法を変更することは現状では大変有効である。例えばバーコードは人間による視認と入力の手間を大きく削減している。この考え方を照明に応用すると、1章で述べたような距離計測のための投光方法は機械可読性だけを考えたものであると言える。それに対し可視光通信コンソーシアム [15] では、照明や信号機などの明滅により、それら本来の機能を保ったまま機械可読性の高い情報を送信する手法について検討している。このように必ずしも、機械可読性の情報は不可視である必要はない。先のバーコードの例でも分かるように、機械可読であるということが見て取れるということにより操作が容易になることがある。また、バーコードの例では人間にとって可読である情報と、機械可読の情報がまったく同一の印刷方法で、同一のメディア上に並んでいる点に特徴がある。このように機械可読性と人間可読性を単一のプロジェクタにより両立させることは、コストだけでなく、提示情報の位置合わせなど精度や画像処理時間の面でも有効である。

4.2 実環境への情報の重畳提示

MR (Mixed Reality) は、計算機が提示する情報が実シーンに重畳されたように見せることで、実環境の把握を高度化しようとするものである。Reality という語が使われているが、この技術は実際には現実感の高い情報を提示するためのみに使われるのではなく、リアリティとは無関係なアノテーション情報を提示するためにも使われる。

このような MR 情報提示を実現するには HMD (head-mounted display) や立体視ディスプレイが多く用いられているが、これらは実環境を光学的に透過するか、もしくは一旦カメラで撮影し、それに計算機からの提示情報を重畳して再表示する方法を採っている。しかしこれらの方法では必ず、実物体と頭部の間になんらかのデバイスが置かれることになり、しばしば作業の邪魔になったり、装着感や視界の狭さなどの問題が指摘される。それに対し、プロジェクタによる情報提示は図4に

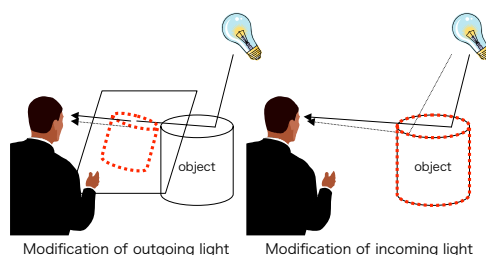


図4 MRの2方式

示すように、物体へ入射する光そのものを修正する事により像を提示するという点で根本的に異なるものである。この方法は不測の事態の際の安全性や装着感、像の揺れなどの問題の他に、多人数が同時に情報を視認できることや、情報提示が照明を兼ねることが出来る点などが特徴である。その反面、両眼視差を再現できないため物体表面から離れた空中像を提示することが難しいが(光再帰性反射材やシャッター眼鏡を用いることで可能)、単眼視でも物体表面の小さな凹凸であればシェーディングの修正により再現することが出来る [16]。

5 研究事例の紹介

プロジェクタとカメラを組み合わせることで、シーンの解析や人への映像提示を行う研究は近年大きな興隆を見せている。この要因の1つに、1990年代後半からのプロジェクタの高性能化・一般化が影響していることは否定できない。しかし我々コンピュータビジョン界の研究者にとっては、プロジェクタは決して他から与えられたものではなくシーン解析に有効な装置として自ら生み出したものであり、また当初より投影は平面的なスクリーンではなく奥行きのある実シーンへ行われるものであった [17]。そこでこの章ではまずこのような歴史的経緯について明らかにし、次に最新の研究動向を紹介する。

5.1 幾何学的双対性の利用

1章で述べたように、スリット光など構造を持った光のシーンへの投影はレンジファインダなど、シーンの幾何学的構造の解析に用いられている。しかしスリット光投影法ではシーンの距離画像を得るために数百枚の画像の入力が必要であり、計測に時間を要するという欠点がある。そこで井口・佐藤らは、本来スリットで区切られるべき多くの空間を光投影の有無により時系列にコード化することで計測を高速化する手法を提案した [18]。このときそれぞれの空間をコードに従った光の明滅パターンで照らすために、プロジェクタをシーンの解析に用いるという発想が生まれた。しかし当時(1980年初頭)は現在のような計算機制御可能なプロジェクタは市販され

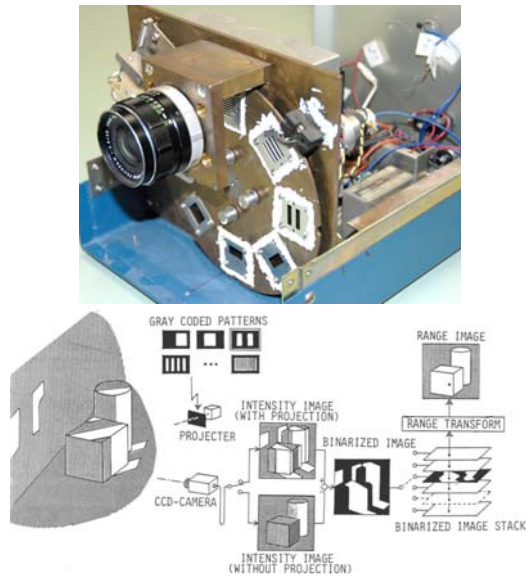


図5 機械式マスク交換型プロジェクタと動作原理図 [18]

ておらず、そのため図5に示すようにマスクパターンを機械的に入れ替える方法によるパターン光プロジェクタを制作した。

マスク切り替え式のプロジェクタはパターンの自由度や精度等に限界があるため、次に液晶パネルを用いたプロジェクタが開発された [19][20]。図6は佐藤らが松下電器産業と共同開発した液晶パネルを用いたプロジェクタであり、現在のプロジェクタのような(x,y)の2次元の自由度を持たず、各画素はスリット状となっている。また、このプロジェクタの定式化には式(1)に示したような同次座標変換を用いており [19]、これによりキャリブレーションや3次元座標の算出が容易となることが述べられている。

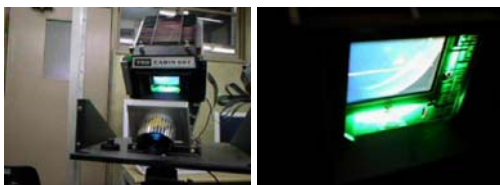


図6 液晶マスクを用いたプロジェクタ [19]

以上のようにプロジェクタとカメラの幾何学的双対性の発見と利用は歴史が古いが、その割に研究例は少ない。しかし近年新たな取り組みが見られるようになり、例えば西江ら [21] はプロジェクタ・物体・影の3者の位置関係を用いた画像解析手法に、また岡谷ら [22] はスク

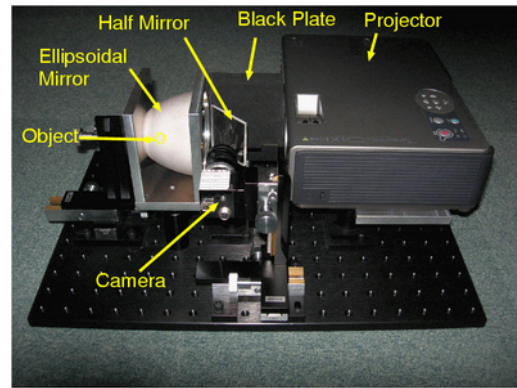


図7 プロジェクタと楕円鏡を組み合わせた高速BRDF計測装置 [24]

リーン面への複数投影像の位置合わせや歪みの除去などに最新のコンピュータビジョン幾何学の成果を取り入れた研究を展開している。

2章ではプロジェクタとカメラの双対性としてピンホールカメラモデルを用いて説明したが、これらは実際には有限の開口径を持つレンズを搭載している。Zhangら [23] は、プロジェクタのレンズによる投影像のぼけを解析することで、距離を計測できることを示している。ハーフミラーを用いてプロジェクタとカメラを同軸上に配置することで、カメラで撮影した画像のすべての画素について距離が計測でき、特に奥行が不連続となるエッジについても良好な結果が得られている。

5.2 反射の解析と Computational Photography

単一の画像から、シーン中の物体表面各点の反射特性を求めることは一般には不可能である。なぜなら物体表面の輝度は、その点の反射特性だけでなくその点の照度や光源方向、観測方向によっても変化するからである。そこで物体の反射特性の解析には照明条件を変化させた複数の画像を用いることが多く、この点で光の制御の自由度の高いプロジェクタは様々な応用が可能である。

ある表面のBRDFを求める場合、一般には光の入射方向と観測方向の各2自由度を制御しデータを取得する。つまり各方位からある1点へ入射する光を制御する必要があるが、プロジェクタは逆に1点から各方向へ光を射出する装置である。そこで角野ら [24] は、プロジェクタに楕円鏡を組み合わせることで、物体表面のBRDFを高速に計測する装置を提案している。楕円鏡は一方の焦点から射出された光をもう一方の焦点へ集める働きを持つため、これによりプロジェクタとカメラを各方位から1点を照明・観測する装置へと変化させ、BRDF計測から光源の物理的な移動を排除した。

このような物体の BRDF の計測は、様々な照明条件下でのその物体の見えを再現するために用いられるが、そのような目的のためには必ずしも BRDF の取得は必要ではない。例えば 1 章で述べたように、相互反射のない拡散反射物体は照明錐モデルにより、少数の照明条件の画像から他の条件下での画像を生成できる。このように複数の条件下での画像を用い、その間の演算により IBR 的に他の条件下での画像を生成することを *Computational Photography*^{*3} と呼ぶ。

Computational Photography における照明の制御では、Debevec らの一連の *LightStage* の研究 [7] や、それらの信号処理的解析 [6][14] の研究のように、光源の位置、すなわち物体への光の入射方向を問題にしているものが多い。しかしこれだけではスポットライトの照射や別の物体からの影の付与など、再現できない現象も存在する。そこで最終的には 3 章で述べたようにブレノプティックライティング環境下でのシーン映像の獲得が必要となり、プロジェクタを光源に用いた研究が *LightStage* [7] や平面ディスプレイ [6] を光源に用いた研究の対として重要となる。この点で大きな寄与を果たした研究は先述の *Dual Photography* [9] であり、カメラとプロジェクタとが置換可能であることを示した。また *Inverse Light Transport* [26] はシーン内部の light transport を光の照射を通して解析したものであり、任意の照明条件下での多重反射を解析・再現するために必須となるものである。

完全な light transport を画像から求めようとする事はシーンの計測時間と計算量の両方の観点で容易とは言いがたいため、同様にプロジェクタを用い、より簡単に反射の解析を行う手法も提案されている。Nayar ら [27] は、空間的に高周波なパターンを投影することで、直接照明と大域照明の成分を分離する手法を提案している。ここでいう大域照明とは、環境光や相互反射だけではなく、大理石などでみられる表面下散乱や、濁った材質などの拡散媒体による散乱もすべて含まれる。複雑なシーンでも比較的少数の画像しか必要としない手法である。

5.3 光による情報提示

我々は空間や物体の認識の大部分を視覚に頼っている。つまり眼球へ到達する光の分布によりシーンを把握しているという言うことができ、この光の分布をなんらかの手段により変更することで他の情報を重畳させることが出来る。従来このような目的のためには、物体から

^{*3} SIGGRAPH において、2005、2006 年と続いて *Computational Photography* についての course があつた他、2005 年には *Symposium on Computational Photography and Video* [25] が開催されている。

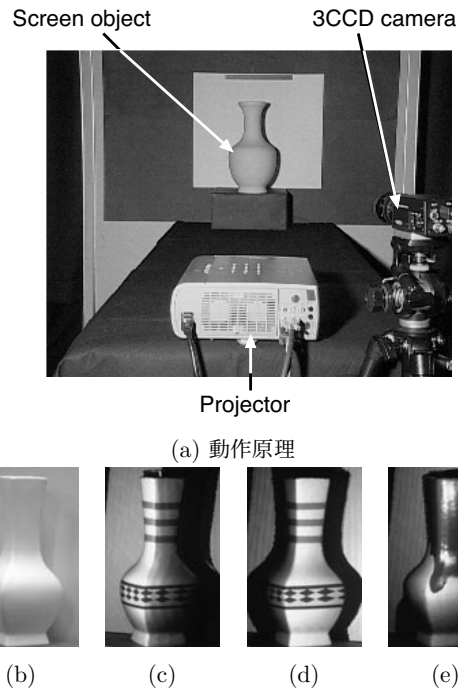


図 8 仮想光学環境 [12] (b): 白色石膏, (c)(d): テクスチャを変化させると同時に光源方向も変えた結果, (e): 鏡面反射成分を付加して表面の反射特性を変化させた結果

の反射光を HMD のようなデバイスで加工する手法が多く用いられてきたが、物体へ入射する光をプロジェクタ等で変更することによっても可能である。

Rasker らは *ShaderLamps* [28] と呼ばれる一連の研究により、プロジェクタを用いて白色物体を着色してみせられる事を示した。また向川ら [12] や楠本ら [29] はそれとは独立に、プロジェクタによる仮想光学環境を提案した。これは、実世界に存在する物体をスクリーンとみなし、光学パターンをプロジェクタから投影することで、物体の反射特性だけでなく光源位置をも仮想的に変化させた見え方を、実世界において提示することができる拡張現実感システムである。

また *SpaceRelighter* [30] は、現実世界の照明環境をカメラ記録し、それをプロジェクタで忠実に再現できるシステムである。プロジェクタが実光源を模倣することで、あたかも実光源で照らされているようにユーザに感じさせることができる。

もし投影対象物体が拡散反射であり、また再現したい物体の質感も拡散反射であれば、これらの手法により様々な照明条件下でのシーンと同一のシーンが再現可能である。また観測者の位置が既知であれば、再現したい

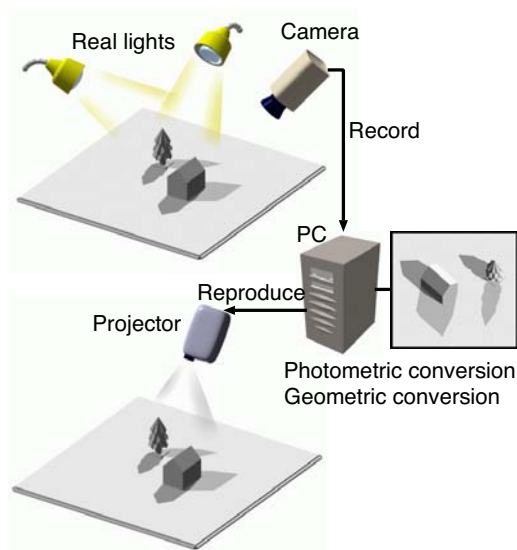


図9 SpaceRelighter[30]

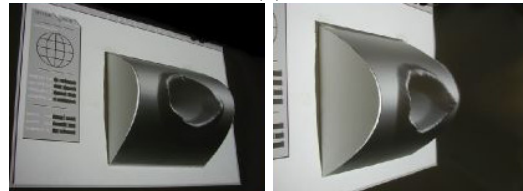
物体の質感に鏡面反射を付与する事が出来る。しかし実際にはこれらを満たす投影を行うために、物体表面の面の傾きだけでなく相互反射も考慮する必要がある。そこで相互反射の影響をラジオシティ法に基づいて補償する方法も提案されている [31]。

プロジェクタにより物体表面の色彩だけでなく、物体の形状をも変化したように見せる事が可能である [16]。物体表面のシェーディングは形状の知覚に及ぼす影響が大きく、両眼視差に矛盾しない程度であれば表面の凹凸が変化したように知覚されることが実験により示されている。図10はHYPERREALと呼ばれる形状変形システムであり、視点に応じて投影像を変化させることでより凹凸の変更が自然に感じられるようにしている。

物体表面のテクスチャを打ち消すような映像を物体上に投影することで、物体表面上に元のテクスチャとは異なる映像を再現するための研究も行われている。吉田らは所望のカメラ画像を得るための投影像を計算する際に物体の分光反射率の取得が不要であることを示し、数種類の光投影とその反射色の測定により色合わせを行うシステムを提案した [32]。また岩井らはこの手法を机上環境に応用し、積み上げられた書類に手を触れるだけでその書類が上方から順に透明化されたような視覚効果をプロジェクタにより実現し、書類の探索を容易化するシステムを提案した [33]。このようなプロジェクタ投影光による色合わせに関する研究も精力的に行われており、Ashdownらは人間の視覚特性を利用し単純な演算では暗くなってしまうがちな投影像の明度を自然さを保った



(a)



(b)



(c)

図10 HYPERREAL[16]により光学的に変形した物体の例。(a) 光学的に凹部を形成した物体(左)と、実際に同じ凹形状を持つ物体(右)。(b) マウス操作により自由に変形操作がなされた物体形状と、(c) それを別の視点から見たときの例(投影像は視点位置により修正される)。

まま向上させる方法について考察している [34]。

物体上に提示される情報は、必ずしも他の照明条件や反射特性など、物理的に存在しうるものやリアリティを感じさせるものに限る必要はない。物体の名称や作業手順など、いわゆるアノテーションと呼ばれる情報を重畳するためにもプロジェクタは有用であり、様々な研究がある。例えば東城らは実物に対する作業を遠隔地から指示・支援するために、プロジェクタとカメラを用いた手法を提案した [35]。この手法ではまず、プロジェクタとカメラにより作業対象の3次元形状を計測し、それを遠隔地の指示者へ伝送する。指示者側ではそのデータを元に自由視点CG映像を生成し、これにより対象物体を観察しながらその上へ作業指示をマウス等により書き込む事で指示を与える。同時にその指示は実物上にプロジェクタを用いて投影表示される(図11)。物体の形状計測と投影像の表示に同一のプロジェクタが用いられており、位置合わせが容易であるという特徴がある。

このようにカメラによるシーン情報の獲得を容易化・安定化することと、人に対する情報の提示とを同一のプロジェクタにより達成することは、コストや位置合わせの精度などの面で有利であることは4.1節で述べた。しかし場合によっては、機械可読性の情報を不可視とした

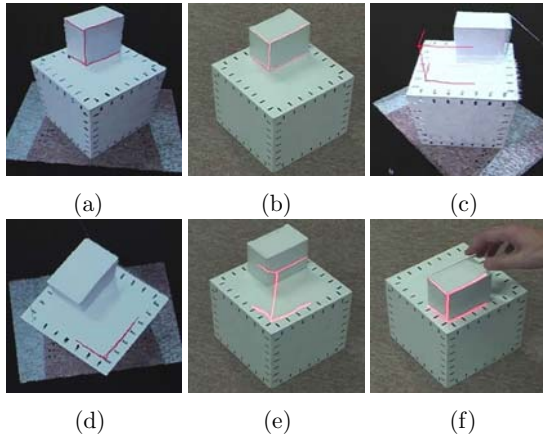


図 11 遠隔作業指示 [35]. (a), (c), (d) は遠隔地の指示者の画面であり、実物体の形状計測結果が 3 次元 CG としてレンダリング表示され、またその上に指示図形を書き込んだり移動したりする事が出来る。(b), (e), (f) は実作業空間の様子であり、指示図形の投影の結果、指示者の意図通りに作業がなされていることを示す。

い場合もある。秘映プロジェクタ [36] は携帯端末等でのアノテーション情報の取得のために、赤外光を用いることで不可視の情報を実環境に重畳する研究である。また中村らの研究 [37] は通常のコード化パターン光投影法を赤外線プロジェクタに実装することで、投影光が作業者に知覚され作業の邪魔になることなく作業過程を 3 次元的に記録するものである。また、赤外光を用いて投影光を不可視とする方法以外に、既に投影されている人間可読性の情報の中に知覚しにくいように機械可読性を高めるための情報を埋込む方法も提案されている。永井ら [38] は、人間の視覚とカメラでは色に対する感度特性が異なることを利用して、カメラには見えるが人間には見えにくいようなパターンを埋め込むことで、物体追跡と物体へのパターン投影を同時に実現する方法を示している。

6 最新の研究動向：ProCams2006 報告

6.1 ProCams について

2006 年 6 月にニューヨークで開催された ProCams2006 は、2003 年、2005 年に続いて第 3 回目となった CVPR2006 併催の IEEE 国際ワークショップである (2003 は ICCV 併催)。その名の通り、プロジェクタとカメラを組み合わせた研究が対象領域であるが、その分野はキャリブレーションや投影補償などの基礎研究から、レンジファインダや作業支援システムの提案、

さらには VR/MR システムや芸術まで、幅広い内容を取り扱っている。プロジェクタを用いたコンピュータビジョン技術、および、その逆となるカメラを用いたプロジェクション技術、さらにそれらを複合した応用システムなど、新しい発想に基づく研究が次から次へと提案されている活気のある分野である。

6.2 基調講演

ワークショップは、コロンビア大学 Shree Nayar 教授の基調講演「Procams and Campro」で始まった。本節では、その講演内容を簡単に紹介したい。

まず、カメラとプロジェクタを融合する考え方として、以下の 3 通りの分類が示された。

- (a) Cameras for Projectors (CamPro)
- (b) Projectors for Cameras (ProCam)
- (c) Projector & Cameras for Applications (ProCamApp)

(a) は、投影が目的であり、より高度な投影のためにカメラを利用する技術である。例えば、非平面にゆがみなく投影したり、複数のプロジェクタで継ぎ目なくタイル状に投影したりする技術である。一方、(b) は、撮影が目的であり、より高度な撮影のためにプロジェクタを利用する技術である。例えば、ダイナミックレンジの改善や距離計測であり、コンピュータビジョンに近いと言える。(c) は、(a) と (b) の成果に基づく新しいアプリケーションの創造である。

より高度な撮影のためにプロジェクタを利用するという観点において、プロジェクタを「進化したフラッシュ」と位置づけている点に興味深い。マグネシウムを発光材として利用していた時代から比べると、フラッシュは高性能化しているが、光源としての役割、すなわちシーンを明るくするという目的はずっと変わっていなかった。しかし、プロジェクタは、任意の場所を任意の照度で照らすように制御できる高機能なフラッシュと見なすことができる。そのため、基調講演ではプロジェクタを“Programmable Flash”と位置づけている。

一般にコンピュータビジョンのためにプロジェクタを用いる場合、映像提示装置として開発されたデバイスを用いる場合、本来の目的とは異なる用途に使ってしまうという発想が多い。しかし、本講演では、フラッシュが進化したものにとらえ、その機能を説明しているのが興味深く、わかりやすい。

さらに、最新研究事例として、投影像のぼけ解析法 [23] と、プロジェクタを用いた直接照明と大域照明の分離法 [27] の二つが紹介された。前者 [23] の、ぼけ解析による距離計測や、任意の距離にフォーカスをあわせた画像の再合成法は、前述の (b) ProCam に分類される技術である。また、奥行の異なるスクリーン面に対して、

同時に擬似的にフォーカスをあわせて投影する方法は、前述の (a) の CamPro に分類される技術である。一方、後者 [27] は、前述の (b) の ProCam に分類される技術であり、複雑なシーンでも比較的少数の画像しか必要とせず、直接照明と大域照明の成分を分離する手法である。

6.3 今年の ProCams2006

今年は、「Projecting Off the Wall」と題した科学と芸術を融合させた作品の展示会も開催され、プロジェクトを活用した芸術作品が数多く展示されていた。カメラも併用したシステムでは、インタラクティブな作品に仕上がっており、プロジェクトとカメラの組み合わせが、芸術作品の展示機器としても活用されていることが良くわかる。

なお、今年は日本からの発表が比較的多かった。特に、東京大学生産技術研究所の Mark Ashdown 氏らのグループの研究が最優秀論文賞を受賞するなど [34]、日本からの貢献が感じられた ProCams2006 であった。

7 おわりに

本稿では、プロジェクト・カメラシステムに関する研究において意識されるべきそれらの性質について整理を試みた。プロジェクトとカメラはその構造の類似性から幾何学的な双対性を持ち、コンピュータビジョンの幾何学において問題とされるシーン上と画像上の点の位置関係について同様に取り扱う事が出来ることを指摘した。また測光学的性質についても同様に、光の伝播方向を逆にした議論が可能であることを紹介し、これらをあわせてプロジェクトとカメラの双対性とした。さらにこれら2次元の出力・入力デバイスをより多次元に拡張し、プレノプティブサンプリングに対するプレノプティックライティングという考え方を提唱した。このようなシーンの光学現象の抽象化と双対性の利用により、さらなる理論的解析や応用システムの提案が今後期待される。

ユーザインタフェースの1構成要素としてプロジェクトを見ると、これはHMDのようにシーン中の光環境を再加工するものではなく、視覚が認識すべき光環境を根本から創造し司るものであると考えることが出来る。既に色彩や質感、表面の小さな凹凸の変更やアノテーション情報の付加などについて様々な手法が提案されているが、多人数が同時に視認できる、作業の邪魔になりにくいなどこの手法が本来持つ特性を利用した実応用例が今後現れると考えられる。

記録・放送用の機材に端を発したカメラとは異なり、プロジェクトが高性能化・低コスト化し画像の認識・理解や複合現実感に利用されるようになったのはPCでのプレゼンテーションが一般化した極めて近年のことであ

る。この研究分野の活況はこのような状況に負うところが小さいとは言えないが、それだけに今後も思いもよらなかった応用や理論的提案がなされる可能性が大きく、目が離せない分野であると考えている。

参考文献

- [1] 日浦慎作, 真鍋佳嗣:高機能画像センシング, 情報処理学会研究報告 2005-CVIM-147, pp. 35-50, 2005.
- [2] R. J. Woodham, "Photometric Stereo: A reflectance map technique for determining surface orientation from image intensity," Proc. SPIE, Vol. 155, pp. 136-143, 1978.
- [3] A. Sashua: Geometry and Photometry in 3D Visual Recognition, Ph.Dthesis, Dept. Brain and Cognitive Science, MIT, 1992.
- [4] Y. Mukaigawa, H. Miyaki, S. Mihashi, T. Shakunaga, "Photometric Image-Based Rendering for Image Generation in Arbitrary Illumination", Proc. of International Conference on Computer Vision (ICCV2001), Vol.II, pp.652-659, 2001.
- [5] P.N. Belhumeur and D.J. Kriegman: What is the Set of Images of an Object Under All Possible Lighting Conditions?, Proc. CVPR'96, pp.270-277, 1996.
- [6] 酒田善史, 佐藤宏介, 井口征士, DCT パターン照明による表面光沢の計測とその情報圧縮, 2002年電子情報通信学会総合大会講演論文集 pp.A-16-26, 2002.
- [7] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H.P. Duiker, W. Sarokin and M. Sagar, "Acquiring the Reflectance Field of a Human Face", Proceedings of SIGGRAPH 2000, pp. 145-156, 2000.
- [8] Texas Instruments, <http://www.dlp.com/>
- [9] P. Sen, B. Chen, G. Garg, S. R. Marschner, M. Horowitz, M. Levoy and H. P. A. Lensch, "Dual photography," ACM Trans. Graphics, Vol.24, No.3, pp.745-755, 2005.
- [10] H. A. Lorentz, "The theorem of Poynting concerning the energy in the electromagnetic field and two general propositions concerning the propagation of light," Amsterdammer Akademie der Wetenschappen 4 pp. 176, 1896.
- [11] J. X. chai, X. Tong, S.C.Chan and H.Y.Shum, Plenoptic sampling, Proc. SIGGRAPH 2000, pp.307-318, 2000.
- [12] 向川康博, 西山正志, 尺長健, "スクリーン物体

- への光学パターン投影による仮想光学環境の実現”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J84-D-II, No.7, pp.1448-1455, 2001.
- [13] 岡部孝弘, 佐藤いまり, 佐藤洋一, “影に基づく光源推定の周波数解析と Haar ウェーブレットを用いた適応的手法の提案”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2004) 論文集, pp.I-21-26, 2004.
- [14] 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一, 池内克史, “拡散光源を用いた物体の見えの標準化”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2005) 論文集, pp.88-95, 2005.
- [15] 可視光通信コンソーシアム,
<http://www.vlcc.net/index.html>
- [16] Ichiroh Kanaya, Masaru Hisada, Keiko Yamamoto and Kosuke Sato, “The HYPERREAL Design System — Visual Forming of Real Object Using Virtual-Shade Projection,” HCI International, 2005.
- [17] S. Hiura, K. Sato and I. Kanaya, “Germination of the Active Lighting: An Introduction and Brief History of Our Research,” Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2006), pp.36-43, 2006.
- [18] Seiji Inokuchi, Kosuke Sato and Fumio Matsuda, “Range-Imaging System for 3D Object Recognition,” Proc. of 7th International Conference on Pattern Recognition, 806-808, 1984.
- [19] Kosuke Sato and Seiji Inokuchi, “Range-Imaging System Utilizing Nematic Liquid Crystal Mask,” Proc. of 1st International Conference on Computer Vision, 657-661, 1987.
- [20] 佐藤宏介, 井口征士, “液晶レンジファインダー液晶シャッターによる高速距離画像計測システム”, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J71-D No.7 pp.1249-1257, 1988.
- [21] 西江 圭介, 佐藤 淳, “未校正カメラと未校正プロジェクトによる 射影復元と仮想キーボードの実現”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005), pages 40-47, 2005.
- [22] Takayuki Okatani and Koichiro Deguchi, “Auto-calibration of an Ad Hoc Construction of Multi-Projector Displays,” Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2006), pp. 44-51, 2006.
- [23] L. Zhang and S. K. Nayar, “Projection Defocus Analysis for Scene Capture and Image Display,” ACM Trans. on Graphics (Proc. of ACM SIG-GRAPH), 2006.
- [24] 角野皓平, 向川康博, 八木康史, “楕円鏡を用いた双方向反射率分布関数の高速計測”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006), pp.261-268, 2006.
- [25] Symposium on Computational Photography and Video,
<http://photo.csail.mit.edu/>
- [26] S. M. Seitz, Y. Matsushita and K. N. Kutulakos, “A Theory of Inverse Light Transport,” Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV), Vol. 2, 1440-1447, 2005.
- [27] S.K. Nayar, G. Krishnan, M. D. Grossberg, R. Raskar, “Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination,” ACM Trans. Graphics, Vol. 25, No. 3, pp.935-944, 2006.
- [28] R. Raskar, G. Welch, and K.-L. Low, “Shader Lamps: Animating real objects with image-based illumination,” Proc. Eurographics Workshop on Rendering, 2001.
- [29] 楠本拓矢, 内田貴之, 佐藤宏介, 井口征士, “テクスチャプロジェクト方式複合現実感ディスプレイ”, 日本 VR 学会第 5 回大会論文集 pp.419-420, 2000.
- [30] 向川康博, 永井悠文, 大田友一, “SpaceRelighter:パターン投影による照明環境の再現”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.2, pp.155-162, 2005.
- [31] Y.Mukaigawa, T.Kakinuma, Y.Ohta, “A Fast Compensation Method of Inter-reflection for Pattern Projection onto a Non-planar Surface”, Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2006), pp9-10, 2006.
- [32] 吉田壮伸, 堀井千夏, 佐藤宏介, 複合現実感のための反射色計測に基づくプロジェクト投影テクスチャ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 1, pp. 97-104, 2004.
- [33] 岩井大輔, 花谷佐和子, 堀井千夏, 佐藤宏介, “Limpid Desk: 投影型複合現実感による机上実物体の透過化”, 情報処理学会, インタラクシオン 2006 論文集, pp.259-266, 2006.
- [34] M.Ashdown, T.Okabe, I.Sato and Y.Sato “Robust Content-Dependent Photometric Projector Compensation,” Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2006), 2006.

- [35] 東城賢司, 日浦慎作, 井口征士: プロジェクタを用いた 3 次元遠隔指示インタフェースの構築, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.7, No.2, pp.169-176, 2002.
- [36] 白井 良成, 松下 光範, 大黒 毅: 秘映プロジェクタ: 不可視情報による実環境の拡張, WISS2003, pp. 115-122, 2003.
- [37] 中村太祐, 日浦慎作, 佐藤宏介: 赤外光の投影による作業過程の三次元形状計測, 計測自動制御学会第 22 回センシングフォーラム予稿集, pp. 151-156, 2005.
- [38] 永井悠文, 向川康博, 大田友一, “パターン埋め込みによる動的シーンへの適応的投影”, 信学技報 PRMU 2004-159, pp.31-36, 2005.
- [39] 三田雄志, 日浦慎作, 加藤博一, 井口征士, ” 投影パターンの戦略的変更による多面体追跡”, 情報処理学会論文誌 Vol.39 No.6 pp.1953-1964, 1998.