

修士論文

インタラクティブMRインテリアデザイン

石川 悠

2003年2月7日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

石川 悠

審査委員： 千原 國宏 教授  
横矢 直和 教授  
眞鍋 佳嗣 助教授

# インタラクティブMRインテリアデザイン\*

石川 悠

## 内容梗概

建築物やインテリアのデザインにおいては、対象となるオブジェクトの設計のみならず、周囲の環境を含めた概観のシミュレーションの道具として3次元CGが利用されている。しかし、実在するシーンや屋内環境にCGのオブジェクトを配置して、レイアウトや色調などを確かめるためには、実在環境のモデリングが重要であるが、困難な問題でもある。本研究では、実在する環境シーンの上にレイアウト対象となるCGオブジェクトを視覚的に融合するMixed Realityの技術を積極的に利用することで、周囲環境のモデリングを行うことなく対話的にレンダリングを可能にするフレームワークを提案する。鏡面球と2次元コードを有する立体マーカを対象となる実環境に配置することにより、現場での空間配置や光源環境をユーザのカメラ視点から読み取り、実時間処理によってMRシーンとして提示するものである。実験では、室内マーカを並べることにより対話的にシーンの色合いや空間配置を確認しながらCGオブジェクトをレイアウトすることができ、有効性が確認された。

## キーワード

居住空間デザイン, Mixed Reality, 照光条件計測, 2次元コード, 鏡面球, インタラクション

---

\*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0151006, 2003年2月7日.

# Consistent Presentation of Interactive Virtual Objects in Real Space with 3D Markers.\*

Yu Ishikawa

## Abstract

Using mixed reality (MR) techniques, presentation of virtual objects in a real space is very effective to simulate an overview of the scenery. For interior design, for instance, it is important to check the coordinates of the arrangements and the colors of the items in the real space while various trials. This paper proposes a new framework to achieve interactive handling and rendering of the virtual objects by means of manipulating physical 3D markers, which consists of 2D markers and a spherical mirror for acquiring both the geometrical and the lighting condition on the spot for the each item. Experimental results show the effective real-time rendering of the virtual object with real scene as background, according to the actual positions and the light conditions of the 3D marker in the real room.

## Keywords:

Interior design, Mixed reality, Lighting condition, 2D code, Spherical mirror

---

\*Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0151006, February 7, 2003.

# 目次

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第1章 序論                    | 1  |
| 第2章 関連研究                  | 3  |
| 2.1 居住空間のデザインとは           | 3  |
| 2.2 CGによる居住空間表現           | 5  |
| 2.3 CGによって表現される現実感        | 6  |
| 2.4 MRによる仮想物体表現           | 8  |
| 2.4.1 幾何学的整合性             | 9  |
| 2.4.2 光学的整合性              | 10 |
| 2.4.3 位置姿勢および照光条件の同時計測と統合 | 11 |
| 第3章 提案手法                  | 13 |
| 3.1 システム構成                | 13 |
| 3.2 立体マーカ                 | 14 |
| 3.3 2次元コード                | 15 |
| 3.4 鏡面球                   | 18 |
| 3.5 シェーディング               | 19 |
| 3.6 処理の流れ                 | 19 |
| 第4章 実験                    | 21 |
| 4.1 位置姿勢の計測精度             | 22 |
| 4.2 照光条件の計測精度             | 24 |
| 4.2.1 光源方向の精度測定           | 24 |
| 4.2.2 光源分布の取得             | 27 |
| 4.3 レンダリング                | 31 |
| 4.3.1 レイアウト作業の様子          | 31 |
| 4.3.2 局所的な照光条件を反映したレンダリング | 32 |
| 4.3.3 空間の照光条件を反映したレンダリング  | 32 |
| 4.4 実験全体の考察               | 38 |
| 第5章 結論                    | 40 |
| 謝辞                        | 41 |



# 目次

|      |                             |    |
|------|-----------------------------|----|
| 2.1  | モデリングツールの一例                 | 5  |
| 2.2  | Power Sketch                | 6  |
| 2.3  | MRLivingRoom                | 7  |
| 2.4  | Tangible AR Interface       | 8  |
| 2.5  | ARIS ツールキットと出力結果            | 8  |
| 2.6  | 座標系の関係                      | 11 |
| 2.7  | 環境マッピングを施したティーポット           | 12 |
| 3.1  | システム構成                      | 14 |
| 3.2  | 立体マーカ外観                     | 14 |
| 3.3  | 二次元コードの処理流れ図と概念図            | 16 |
| 3.4  | 使用する2次元コードの例                | 17 |
| 3.5  | 視点と光源の位置関係                  | 18 |
| 3.6  | 処理の流れとマーカのデータ管理概念図          | 20 |
| 4.1  | 2次元コードの位置姿勢計測誤差             | 22 |
| 4.2  | 2次元コードの姿勢計測誤差(カメラ絞りを固定した場合) | 23 |
| 4.3  | カメラと光源および立体マーカの位置関係         | 24 |
| 4.4  | 角度による鏡面球への写りこみ場所の変化         | 24 |
| 4.5  | 光源方向の計測結果(カメラと鏡面球の距離:1m)    | 25 |
| 4.6  | 光源方向の計測結果(カメラと鏡面球の距離:2m)    | 25 |
| 4.7  | 光源方向の計測結果(カメラと鏡面球の距離:3m)    | 26 |
| 4.8  | 光源方向の計測結果(カメラと鏡面球の距離:4m)    | 26 |
| 4.9  | 部屋の間取り図と座標系                 | 27 |
| 4.10 | 切り出した鏡面球画像                  | 28 |
| 4.11 | 分割数の違いによるサンプル画像             | 28 |
| 4.12 | 平均化画像からサンプリングした点光源群         | 28 |
| 4.13 | 光源分布計測結果                    | 29 |
| 4.14 | 実物体と仮想物体の比較                 | 30 |
| 4.15 | レイアウト作業の様子                  | 31 |
| 4.16 | 局所的な光源の変化                   | 32 |
| 4.17 | 早朝の外からの光(入力画像)              | 34 |

|      |                      |    |
|------|----------------------|----|
| 4.18 | 早朝の外からの光 (出力画像)      | 34 |
| 4.19 | 夕方の外からの光 (入力画像)      | 35 |
| 4.20 | 夕方の外からの光 (出力画像)      | 35 |
| 4.21 | 遠方の蛍光灯からの光 (入力画像)    | 36 |
| 4.22 | 遠方の蛍光灯からの光 (出力画像)    | 36 |
| 4.23 | マーカ上部の蛍光灯からの光 (入力画像) | 37 |
| 4.24 | マーカ上部の蛍光灯からの光 (出力画像) | 37 |
| 4.25 | 影による 2 次元コード検出失敗の例   | 38 |

# 表 目 次

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 4.1 使用した機材とモデルデータ . . . . . | 21 |
|-----------------------------|----|

# 第1章 序論

日常生活において、いろいろな国の文化を映し出す家具や装飾品，家電製品が空間に所狭しと並べられるようになって久しい．物があふれ便利になった反面，一見華やかに思える空間は，それぞれが好き勝手に自己主張して，全体としての統一感に欠け，ちぐはぐな印象を受けることが多い．最近の消費スタイルの変化は，物を揃えることで社会的地位を主張する時代から，物によって自分の感性や個性を表現しようとする時代への変化の現れであり，リフォームやインテリアコーディネートに関するテレビ番組が高視聴率を獲得していることは，居住空間デザインが人々の間で関心が高くなってきたことを示している．しかし、実際には専門的な知識や経験が必要とされる敷居の高いものと一般には受け止められている傾向がある．

家屋の新築やリフォームを専門家が行う場合，クライアントが持つ漠然とした考えの聞き取りから始め，幾度かのプランの提示と修正を経るのが一般的である．プランの提示はクライアントと専門家の間にある感性のギャップを埋めるために重要な要素であり，従来図面や手書きのパース，もしくは模型を用いて行われていた．しかし，図面を読むには専門的な知識と経験を必要とし，パースは作画者の主観や作風がクライアントへの印象に大きく影響を与えてしまう．またパースや模型は作成に時間がかかる点が問題であった．

計算機で仮想的な3次元空間を構築するVR(Virtual Reality)技術では，ユーザは任意視点から空間を眺めたり，空間内を歩き回ったりできる．VR技術を居住環境のデザインに応用することで，クライアントに対して，静止画だけでなく空間を歩き回る動画で表現する，分かりやすいプレゼンテーションが可能になった．例えば，CADソフトで作成したビル設計プランを，実際に建築される場所の地形データや周囲の建物のデータと共に表示して評価したり [1]，仮想的な空間に家電製品や家具をレイアウトして，リフォームを希望する顧客へのプレゼンテーションとして利用されている [2, 3]．

CGによって空間のレイアウトや色調などを可視化するためには，対象となる物体と周囲の環境の両方を予めモデリングしておくことが必要である．周囲環境は，照明モデルや空間に含まれる様々な実物体の幾何形状が複雑に作用しあって形成されており，そこで起

こる物理現象を正確にモデリングすることは困難である。

建物や個々の家具を全て新しくする新築やリフォームのデザイン案を可視化するにはVR技術が適しているが、新しい家具を既存の居住空間に追加した様子をシミュレートする場合、既に配置されている家具の全てを3次元形状としてモデリングすることは容易ではない。

一方で、実空間シーンを撮影した画像にCGによる仮想オブジェクトを重畳して提示するMixed Reality(MR)と呼ばれる技術が研究されている。自分の目の前に広がる空間に仮想的な家具があたかも存在するように表示されれば、次のような使い方が考えられる。「欲しいけれど高く触ったこともないあのソファが、今自分の部屋に置かれている。やっぱり高名なデザイナーが手がけているだけあって、このソファは本当に素晴らしい。でも、自分の部屋に置いてみると何かしっくりこない。今の自分の部屋の雰囲気とあってないのか。じゃあ、他のソファを置いてみたらどうだろう?単体では大して魅力的に感じなかったあのソファが、自分の部屋にぴったりじゃないか」。実際に買ったり部屋に運び込む前にその様子を見ることができれば、下手な買い物をしたと後悔することも少なくなるし、消費を促すことも期待できる。

ところで、CGによる仮想物体をディスプレイに表示する時、仮想物体の位置姿勢と色合いを現実空間に合わせなければならない。椅子が宙に浮いていたり、本棚が斜めに立っていたりすると不自然であるし、間接照明で照らされ落ち着いた雰囲気の部屋に、発光しているように明るいテーブルがあると違和感を感じてしまう

従来提案されていた手法では、周囲環境のモデリングや使用するセンサのキャリブレーションが、システムを利用する場所ごとに必要であった。そこで本研究では、面倒な前準備を必要としない手軽なシステムでありながら、実空間の状況と矛盾しない自然な仮想物体を表示可能な手法を提案する。提案手法により、誰もが手軽に居住空間のデザイン作業を楽しめると考える。

以下、第2章ではCG表現に関する先行研究についてまとめ、本論文における目的と技術的問題点を明らかにする。第3章で提案手法と、その具体的な実装法について述べる。第4章で実装したシステムの動作について検証し、第5章で結論を述べる。

## 第2章 関連研究

本章では、研究対象であるCGによる居住空間デザインについて述べる。次に研究や商業的に取り組まれている先行例を紹介し、それらをまとめる。

### 2.1 居住空間のデザインとは

ツァイゼルは、デザインとは 1) ユーザからの様々な要求や条件に基づいてイメージする, 2) そのイメージをスケッチや模型, 数値によって表現する, 3) 表現をもとにプランが適切であるかをテストする, という1~3の作業を繰り返して完成度を高めることであると述べた [4]。このシンプルなサイクルは、近年人々の価値観や生活スタイルが多様化し、また建物の用途が特殊化したことに伴う専門家とユーザの間にギャップによって、うまく機能しなくなってきた。専門家がユーザについて良く知らなかったり誤解していたりすることが主な原因で、専門家はユーザが持つさまざまな特性に関して研究的知見を参照する必要があるといえる。またユーザ側も的確な表現で要求を伝えたり、新しい提案に対して理解しようとする姿勢で接し、専門家とユーザの相互のコミュニケーションを図る努力が必要であるが、両者の知識や経験の差を埋める表現手法はなく、隔たりは大きい。ユーザのデザイン過程への参加を促すためにも、専門家には通常の業務の延長線上でユーザにとって分かりやすい表現が行えるツールが、ユーザには専門的な知識を持たなくても自分たちの意見を的確に表現できるようなツールが求められる [5]。

居住空間をデザインする目的は、過ごしやすい空間を実現するためである。WHO(世界保健機構)では人にとって良い居住空間を以下のように定義している [6]。

- 安全性 (Safety)
- 健康性 (Healthy)
- 利便性 (Efficiency)

- 快適性 (Comfort)

乾はマズローの欲求階層説に WHO の定義を対応させて、安全、健康、能率は欠乏欲求であり、快適とは成長欲求であるとした [7]。欲求階層説では、人間の欲求は階層をなして、ある層の欲求を満たすとさらに高度な欲求を満たすことを求めるとされる。成長欲求は欠乏欲求に比べて高度な位置づけで、安全、健康、能率を満たされた状態で初めて快適さに目が行くと述べている。安全、健康、能率が満たすべき数値として定性的に評価ができるのに対して、快適さをどう感じるかは個人や民族によってそれぞれ異なり、定性的な評価は難しい。なぜなら快適さは、「色使い、肌触り、静けさ、日差し、匂い」などの生理的な要素と宗教的文化的背景という様々な要素が関係しているからである。言葉や数値によって想起されるイメージと、個人が実際に感じるギャップを埋めるために、可視化は有効なアプローチである。

視覚によって認識される快適さは、光の採り込み方や照明、家具の選別と、それらのレイアウトで変わる。直接照明と間接照明、暖色系と寒色系、曲線と直線といった対立する概念を使い分けたり組み合わせたりしてデザインするが、それぞれの要因は独立であるのではなく、全体の組み合わせによって受ける印象は変わる。

- 色彩に関する評価のゆれ

素材と色彩が評価に及ぼす効果の間に、基本的には独立性があるとされる。しかし楨は、暖かさを感じさせる木肌に、寒色系の色彩である青、緑などを組み合わせた場合、非常に冷たいと評価されるという相互作用を見出した [8]

- レイアウトに関する評価のゆれ

使いやすいレイアウトであっても、それぞれの距離や向きなどの位置関係によって受ける印象が変わる。向かい合わせに椅子を置くときにも、テーブルを挟んで置く時と壁際に離して置くかで親密度は変化するし、円形のソファに内側へ向いて座る場合と外側に向いて座る場合では印象が変わる

以上のことから、視覚的な側面から居住空間デザインを支援するには、家具のレイアウトと色合いを簡単な操作で正確にシミュレートでき、ユーザと専門家の間にある知識や経験の差を埋めるツールが必要であるといえる。次節から、CG による居住空間デザインを行うには、どのように個々のアイテムや部屋の環境をモデリングすればよいかを考える。

## 2.2 CGによる居住空間表現

CGによって物体を表現するには、空間に物体と光源、カメラ(視点)を設定し、光源からの光が物体に反射されて目に届く強さを計算する。物体の形状は、ポリゴンで物体表面を表現する方法と、ボクセルで物体が占める空間の大きさを表現する方法がある。ボクセルによる表現は、物体内部の物理現象をシミュレートする用途で利用されるが、日常生活で空間に配置された家具の色合いをシミュレートするにはポリゴンによる表現で十分である。

物体は形状が同じでも材質によって入射光を反射する性質が異なり、見え方が違う。材質による反射の特性は反射モデルとして定義され、鏡面反射はPhongやBlinn, Cook-Torranceのモデルで、拡散反射はLambertの余弦則で表現される [9]。

形状モデリングには、実物体を計測して計算機に取り込む方法と、モデリングツールを使用して直接指定する方法がある。3次元形状計測には、レンジファインダや画像による計測など様々な種類がある [10, 11]。モデリングツールには、CADソフトやモデリングソフトウェアが用いられる。商用ソフトとして代表的なものとしてShade, AutoCAD, VectorWorks [12-14] が挙げられる。

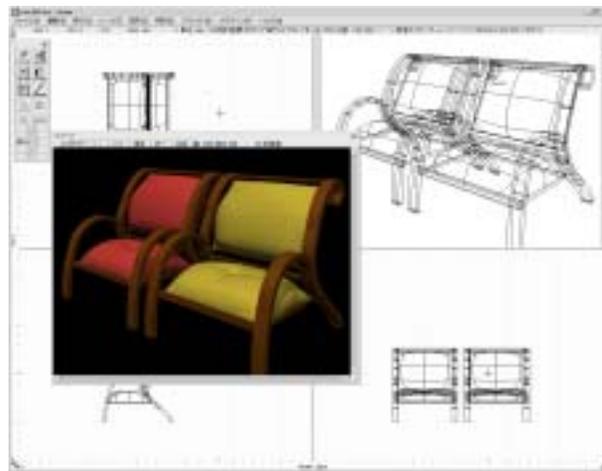


図 2.1 モデリングツールの一例 (Shade [12])

形状が与えられたモデルをCGとしてレンダリングするには、それぞれのアイテムを構成するパーツごとに反射特性を決定する必要がある。一般にはレンダリング結果を確認しながらデザイナーが反射モデルのパラメータを経験的に調整しながら入力する。一方、実物の素材計測に基づいて反射特性を求める方法としては、入力画像から鏡面および拡散反射成分を分離して計算する Photometric Image Based Rendering(PIBR)手法 [15, 16] がある。

PIBR は、さまざまな方向から光をあてながら反射光を計測し、入射光と反射光の対応表を生成する手法で、形状が未知であってもよい。

## 2.3 CG によって表現される現実感

モデリングしたデータを使用して、専門家がユーザへのプレゼンテーションを行ったり、高度な知識を有しないユーザでも自分のイメージを簡単に表現できる例を以下に挙げる。

実環境と存在する実物体を全てモデリングし、コンピュータのディスプレイ上に3次元空間をCGで表現するVR技術を応用した、VRML,ViewPoint,Cult3DなどのWeb3D [17]技術がある。仮想的な部屋の中を自由に移動したり、アイテムを移動・追加変更した様子を観察することができ、さらにデザイナーが作成したデータをクライアントがダウンロードし、比較検討や相談を自宅で行える。PowerSketch [2] は、間取りと照明が設定された3次元空間でのラジオシティを予め計算しておき、データ圧縮することで高品質かつ軽量のWeb3Dデータを配信可能なソフトウェアである。



図 2.2 Power Sketch [2]

レイアウト対象である実物体のみをモデリングし、実環境のシーンにCGでレンダリングした仮想物体を重畳するMR技術を応用した研究として、大島らのMRLivingRoom [18]がある。ジャイロセンサと赤外線発光マーカを併用することで、仮想物体を適切な位置に表示し、ユーザの視点移動とHMDへの出力に時間的な遅延をなくしている。また仮想物体と実空間の色合いを整合することを目標としているが、具体的な解決策は提案されていない。



図 2.3 MRLivingRoom [18]

また、南らによって共有 AR(Augmented Reality) 空間でのインテリアデザインに関する研究がなされている [19]。共有 AR 空間とは、デザイナーは VR 技術、クライアントは仮想物体によって現実空間がもつ情報を強調する AR 技術で共有される空間である。遠隔地のユーザとの協調作業において有効な一貫性制御プロトコル「複製-選択プロトコル」を提案することで、物理的な空間の隔たりを感じることなく、思いついたときにインテリアデザインを行うことができる。

加藤らによって提案された Tangible Augmented Reality(TAR) Interface [20] は、マーカの移動や回転を認識することで「すくう(持ち上げる)」「下ろす」「押す」「たたく」などの動作を認識し、直感的な操作を行えるインターフェースである。具体的なアプリケーションの一つとして、TAR Interface を用いたインテリアデザインシステムの「Magic Paddle」がある。

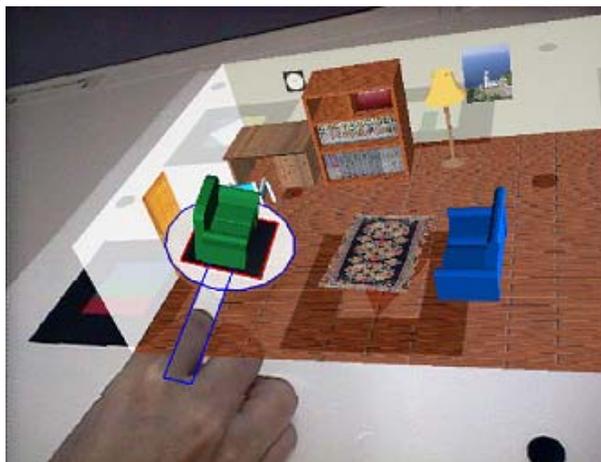


図 2.4 Tangible AR Interface [20]

ARIS [21] は、デザイナーとユーザの協調作業や e-commerce への展開を視野に入れたフレームワークを提案するプロジェクトである。ユーザは部屋の写真を 5 枚以上と、カメラのダイナミックレンジを変えながら撮影した鏡面球の写真を数枚用意する。それらの画像をもとに、システムが提供するツールで空間の 3 次元形状復元と、空間の照光条件をモデリングする。

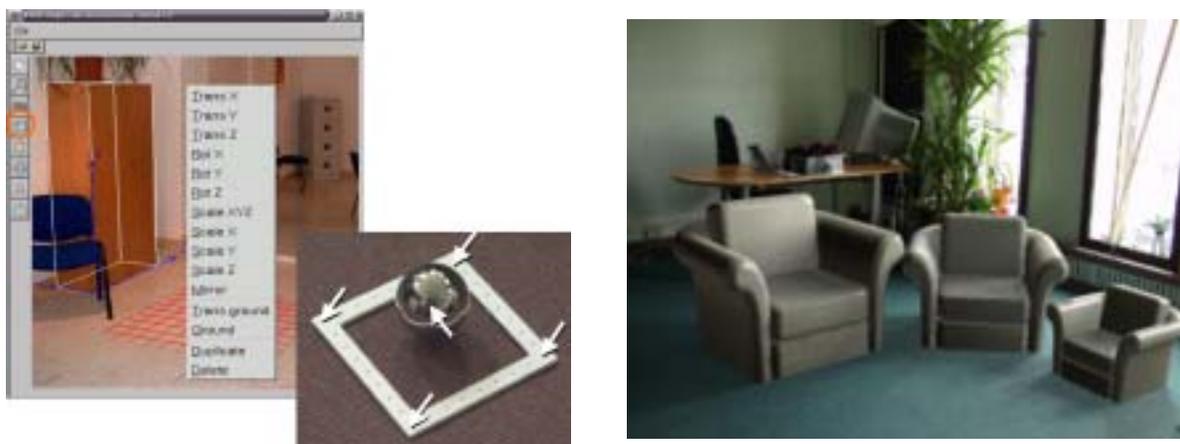


図 2.5 ARIS [21]:ツールキット(左)と出力結果(右)

## 2.4 MR による仮想物体表現

居住空間を新しく作り上げる新築やリフォームの場合、全てを計算機によって表現する VR 技術が適している。しかし、現在の部屋に新しいアイテムを追加する場合、部屋にあ

る全ての家具や照明器具，装飾品の形状や材質，レイアウトの全てをモデリングして VR 空間に表現することは消費者にとって難しく，また作業が煩雑であるため MR 技術が適している．VR によるプレゼンテーションは商用ソフトウェアが充実しているが，MR 技術を用いてユーザのいる空間に新しいアイテムを追加する手法は，未だ研究段階にある．さらに従来の研究ではアイテムの配置場所を決定することが重視され，空間と新しいアイテムの調和を見ることは難しい．照明条件を考慮している ARIS [21] においては，環境のモデリングをユーザが手動で行う必要があり，一般ユーザが気軽に試すことができる状況ではない．

MR 技術における仮想物体表現には，3 つの整合性を保つことが視覚的な違和感を与えないために必要であると言われる．

- 幾何学的整合性
- 光学的整合性
- 時間的整合性

幾何学的整合性とは，仮想物体が実空間の重力や慣性，反力に矛盾せずに表示されることである．光学的整合性は，実環境にある照明が仮想物体の色合いに反映されることを意味し，時間的整合性とは，ユーザの視線移動と描画に遅延が発生しないことである．

#### 2.4.1 幾何学的整合性

幾何学的整合性は，実空間座標系，ユーザ座標系，仮想物体座標系の関係を正確に計測することで保つことができる．

座標系の関係をセンシングする方法は，画像処理による手法と位置センサによる手法の二つに大別できる．画像処理を用いた方法は，さらにマーカを用いる手法と自然特徴点を追跡する方法に分類できる．また両者を併用するハイブリッド手法もある．併用することで精度は向上するが，システムは複雑になる傾向がある．

マーカ設置型は，形状が既知である実物体でユーザもしくは空間をマーキングする．環境に固定して設置する AR QUAKE [22]，仮想物体の位置を指定する ARTK,HOM,SCR [23-25]，ユーザに設置して環境側のカメラから撮影する手法 [26] がある．

自然特徴点追跡はユーザの視点移動を追跡するために，視野内にある物体の特徴点を連続フレームで追跡する方法 [27, 28] がある．

位置センサによる手法には、GPS による 2 次元位置計測と磁気センサやジャイロセンサによる 3 次元位置姿勢計測センサを使用した MARS [29]、画像処理と 3 次元位置計測センサを併用した研究 [18, 30, 31] がある。

- 画像処理
  - マーカ設置
    - \* 環境に設置，固定 [22]
    - \* 仮想物体の参照として使用，可変 [23–25, 32]
    - \* ユーザがマーカを装着 [26]
  - 連続フレームでの自然特徴点追跡 [27, 28]
  - ハイブリッド [33]
- 3 次元位置計測センサ (磁気センサ, ジャイロセンサ, GPS) [29, 34]
- ハイブリッド [18, 30, 31]

#### 2.4.2 光学的整合性

光学的整合性は、実環境の日照や照明器具から発せられる光を計測し、仮想物体のレンダリングに反映させることで保たれる。

双曲面ミラーや魚眼レンズをカメラに取り付けたり、環境に設置した鏡面球を離れた場所から撮影して実環境の全周囲画像を取得し、照光条件を計測する手法がある [35, 36]。これらの方法は一般にセンサを部屋の中央に固定し、大局的な照光条件を計測する。またカメラのダイナミックレンジは有限であるため、絞りを調整しながら広いダイナミックレンジの画像を撮影する。センサを複数使用して光源の位置を計算し、空間のラジオシティを計測する手法 [37] もある。

しかし、センサを中央に固定すると、衝立の裏側の画像を取得できないため、局所的にできる照光条件の変化を計測できない。また、鏡面球を移動させて空間全体の照光条件を計測しても、センサの移動量を測定し、複数の場所で撮影した画像を一つにまとめる必要がある。

また、3 次元形状が既知である物体により生じた明確な輪郭線を持たないソフトシャドウ内の明るさ分布を利用することで、一般の照明環境を推定する手法もある [38]。この手法では、双曲面ミラーを取り付けたカメラや、鏡面球を環境に持ち込まなくても、シーンの光源環境を再現できる利点がある。

実環境の照光条件が計測できない場合，光源を仮定して仮想物体をレンダリングしなければならない．仮定した照光条件と実空間の照光条件のずれが大きくなるほど，実空間と仮想物体の視覚的な違和感を感じるようになる．

### 2.4.3 位置姿勢および照光条件の同時計測と統合

位置姿勢および照光条件を同時計測する場合に取り扱う座標系の関係を図 2.6 に示す．MR 空間において仮想物体を幾何学的整合性を保って表示するにはマーカ座標系  $\leftrightarrow$  カメラ座標系 (図 2.6 の矢印 B, 以下で関係 B と表現する) もしくはカメラ座標系  $\leftrightarrow$  実空間座標系 (関係 C) の関係を計測すればよい．

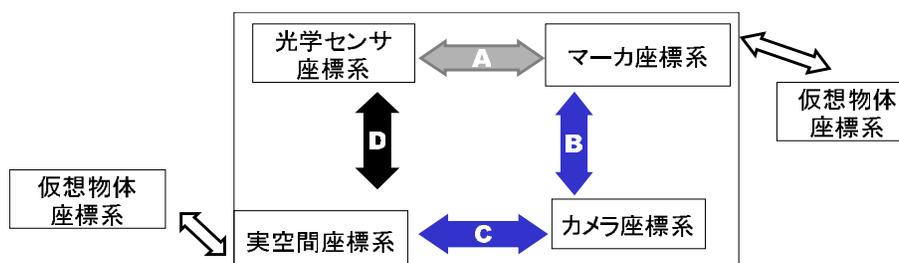


図 2.6 座標系の関係

光学的整合性を幾何学的整合性と同時に考慮する場合，一般に光学情報取得センサは実空間座標に固定されているため，カメラ座標系と光学センサの関係を，AB もしくは CD の関係で表現することになる．関係 A は不定であり，関係 B を計測している場合，新たなセンサで関係 C を計測する必要がある．関係 C を計測するには，前処理としてセンサのキャリブレーションが発生し，仮想物体と実空間の衝突判定を行うために環境の形状モデリングが必要になる．また大局的な光源推定しかできず，物影や壁からの反射など光源状況が局所的に変化する場面に対応するには限界がある．以上の要因から，位置姿勢と照光条件を同時に計測し，仮想物体のレンダリングに反映する MR 空間を構築する方法として決定的なものはない．

Andrei ら [30] は，マーカと磁気センサを併用して仮想物体表示の位置合わせを高い精度で実現した．この研究では，鏡面球を環境に設置して球の画像から金属の質感を持ったティーポットに環境マッピングを施しているが(図 2.7)，予め環境の形状をモデリングする必要があること，利用できる環境がデスクトップ程度の空間であるといった制限がある．



図 2.7 環境マッピングを施したティーポット [30]

神原ら [39] は、後述する本研究と同様の手法を用いているが、幾何学的整合性と光学的整合性を同時に保つことに注目しており、実際の使用目的や構成する機器についての考察はない。

本研究では、MR を積極的に用いることにより、実空間において仮想的にオブジェクトが配置される様子を可視化するだけでなく、従来一方的に提示されるだけであったプランを、その場で変更し、結果を確認できるようなインタラクティブ性を備えた技術を実現することを目的とする。この技術により、専門家と顧客(ユーザ)とのコミュニケーションにおいて、互いのアイデアや要求を具体的に表現することが可能になり、また、視覚的に認識される快適な空間を模索するユーザの試行を助ける新しい利便性を与えるものと考えられる。このために、ユーザ視点での幾何学的整合性と光学的整合性を満たしながら、実時間で動作する、居住空間スケールの MR 技術のフレームワークを提案する。

## 第3章 提案手法

幾何学的整合性および光学的整合性を同時に保つには、複数のセンサを組み合わせたり、シーンの形状をモデリングする必要があり、利用場所や環境による制限を受けにくい実時間レンダリングは困難であることを2章で述べた。本章では上述の問題を考慮したレイアウトシミュレーションに応用可能なフレームワークを提案する [40-42]。

2次元コードを用いて実空間における仮想物体の位置姿勢を計測し、鏡面球を用いて照光条件を計測する。従来手法では、鏡面球とそれを撮影するカメラの位置関係が既知でないと照光条件が計測できないため、鏡面球は環境に固定されていた。ユーザ視点が変わる場合、ユーザ座標系と実空間座標系の関係を計測し、環境にある鏡面球の中心座標を求めなければならず、システムが複雑になる。そこで、マーカと鏡面球の位置関係を既知となるよう対にしておけば、マーカから計測した位置情報から鏡面球の中心を計算できると考える。

### 3.1 システム構成

本システムは、カメラ、映像処理・CGレンダリング用PC、次節で定義する仮想物体を実空間に配置するための立体マーカ、出力画像を提示するディスプレイから構成される。ディスプレイはHead Mounted Display(HMD)だけでなくPDAや携帯型液晶ディスプレイなどでもよい。ディスプレイの背面にカメラを取り付け、ユーザの視線方向を撮影すれば、PDAや携帯型ディスプレイを用いた場合、MR空間をディスプレイ越しに覗き込むことになる(図3.1)。仮想物体座標系をカメラ座標系との相対関係で表すことにより、取り扱う座標系はユーザ座標系と個々のマーカ座標系のみである。計測に使用するセンサはユーザ視点のカメラのみであり、カメラ内部パラメータだけがキャリブレーションを要する。カメラ内部パラメータはシステム構築場所を変えてもキャリブレーションが不要である。この性質は、可搬型のPCやウェアラブルPCの導入により、場所を選ばない使い方を可能にすると考えられる。

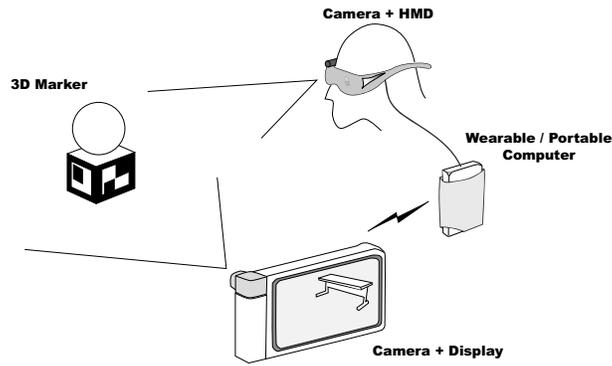


図 3.1 システム構成

## 3.2 立体マーカ

実空間における仮想物体の位置を指定するため、直方体の全側面に2次元コードを貼付し、天頂面中心に鏡面球を設置したマーカを用いる。このマーカを立体マーカと名づける。ユーザの装着したカメラによって2次元コードを映像に捉え、立体マーカのID番号と位置姿勢を取得する。鏡面球に映り込む遠景やライトを、仮想物体を照らす光源としてサンプリングすることで、立体マーカが置かれた場所での照光条件をユーザ視点から観測する。立体マーカがカメラの視野に入ったときにユーザは仮想物体を見ることになり、仮想物体をマーカ上に重ねてレンダリングすれば良い。



図 3.2 立体マーカ外観

仮想物体の配置に関して、キーボードやマウスなどの入力デバイス、身振り認識による指示 [43] は、遠隔からの操作ができる反面、操作方法を覚えたり家具の配置場所や姿勢の

指定に曖昧さが残る問題点がある．実際に家具を配置するように立体マーカを手で動かし，空間を歩き回って眺めながらレイアウトすることで，視覚的に合成された特別な空間にいるのではなく，日常生活の延長として仮想物体が混在する MR 空間を体感できるインタフェースを提供する．

2次元コードはそれぞれが固有のパターンを持っており，立体マーカの前後左右を判別可能である．そのため，立体マーカに使用する箱は幅・高さ・奥行きが既知であれば，3辺の長さが異なっても良い．2次元コードはコードの中心と面の中心が同じになるように貼り付け，鏡面球の中心は天頂面の中心を通る法線ベクトル上にあわせて固定する．このように構成することで，立体マーカの中心は，それぞれの2次元コードの中心から法線ベクトルと逆方向に辺の半分の長さの距離にあり，鏡面球の中心は立体マーカの中心から法線ベクトル方向に高さの半分と球の半径の距離にあることになる．

### 3.3 2次元コード

カメラ画像から2次元コード検出し，透視投影のモデルに基づいて，コードの位置姿勢を推定し，カメラ座標系で表現する [23, 32]．

入力画像を固定閾値で二値化する．二値化画像から連結領域の面積と外接長方形を計算する．面積値によって不必要な領域を除去し，連結領域の輪郭線追跡を行い，4本の線分によって十分な精度で近似できる領域をコード候補とする．コードの識別は，あらかじめ登録されたパターンとのテンプレートマッチングで行う (図 3.3)．さらに3次元位置推定では以下の処理を行う．

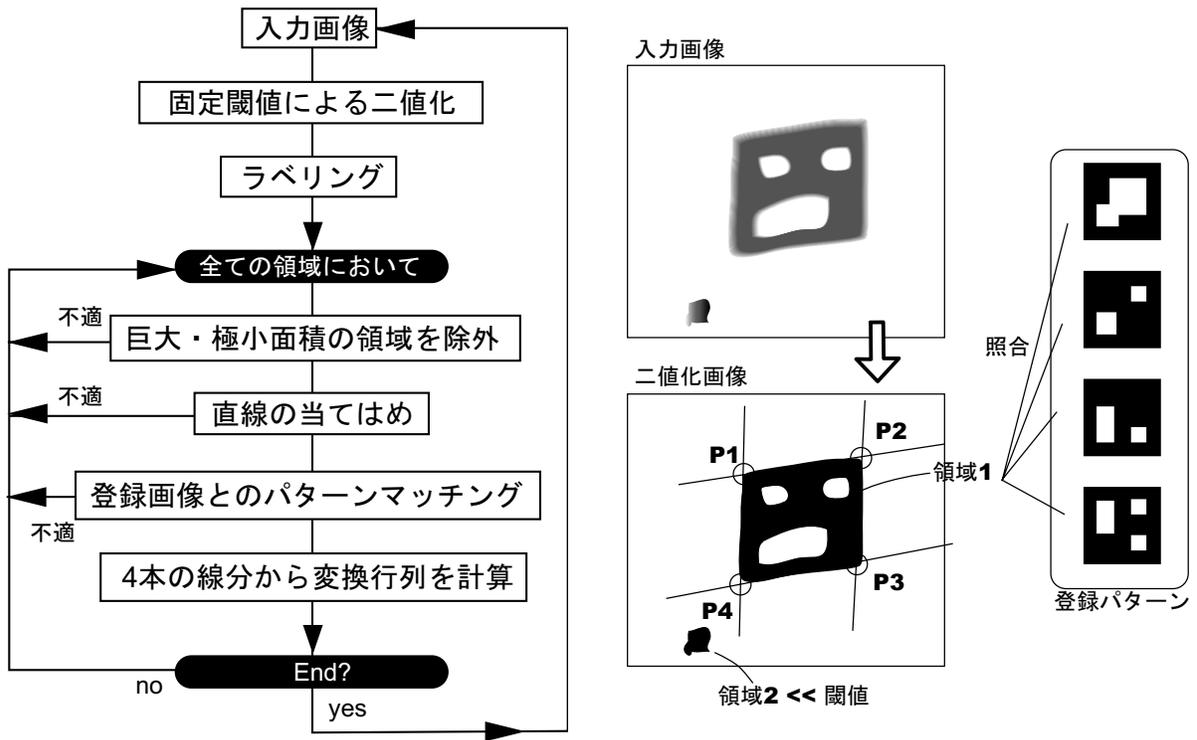


図 3.3 二次元コードの処理流れ図 (左) と 概念図 (右)

3次元位置推定は2次元コード座標系からカメラ座標系への変換行列  $T_{cm}$  を推定する問題である．この変換行列は、回転移動成分  $R_{3 \times 3}$  と平行移動成分  $T_{3 \times 1}$  からなる．画像座標系とカメラ座標系は透視変換モデルで表現でき、カメラキャリブレーションにより変換行列は求められる (式 3.1)．2次元コード座標系とカメラ座標系の関係は式 3.2 によって表現できる． $(X_c, Y_c, Z_c)$  はカメラ座標系の座標値、 $(X_m, Y_m, Z_m)$  は2次元コード座標系の座標値、 $(x_c, y_c)$  は画像平面における座標値である．

$$\begin{bmatrix} hx_c \\ hy_c \\ h \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 \\ 0 & 0 & P_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ X_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = T_{cm} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

2次元コード座標系の4隅の座標から (式 3.2) における  $T_{cm}$  を求める．その手順は、1) 回転移動成分  $R_{3 \times 3}$  の推定、2) 平行移動成分  $T_{3 \times 1}$  の推定、3) 変換行列  $T_{cm}$  の修正となる．まず、2次元コードの頂点位置から向かい合う2辺の直線の方程式が得られる．それを (式 3.3) のように表し (式 3.1) の  $x_c, y_c$  をこれに代入することで (式 3.4) が得られる．

$$a_1x + b_1y + c_1 = 0, \quad a_2x + b_2y + c_2 = 0 \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned}
 a_1 P_{11} + (a_1 P_{12} + b_1 P_{22}) Y_c + (a_1 P_{13} + b_1 P_{23} + c_1) Z_c &= 0 \\
 a_2 P_{11} + (a_2 P_{12} + b_2 P_{22}) Y_c + (a_2 P_{13} + b_2 P_{23} + c_2) Z_c &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

この式はカメラ座標系によって表現される3次元空間中の平面の方程式であるが、3次元空間中のコードの辺がこの平面内に存在することを意味する。向かい合う2辺は平行なのでその方向ベクトルは一致し、(式3.4)の2平面の面内方向となる。つまり(式3.4)の2平面の各法線ベクトルの外積として計算されるベクトルが、平行2辺のカメラ座標系における方向ベクトルとなる。この計算を2組の平行2辺に対して行うことで、マーカの隣り合う2辺の方向ベクトル  $V_1, V_2$  を求める。またこの  $V_1, V_2$  の外積を計算することでマーカ平面に垂直な方向の単位ベクトル  $V_3$  も得られる。(式3.3),(式3.4)を結合し、4頂点の2次元コード座標系での座標値を代入すると、 $T_1, T_2, T_3$  に関する1次方程式が8個得られる。行列  $P, R$  が既知なので、これらの式から  $T_1, T_2, T_3$  を計算できる [23]。

本実装では、2次元コードの検出および変換行列計算は公開されている ARToolKit [23] を利用し、2次元コードには正方形パターンを使用した(図3.4)。図3.4中の単位は、2次元コード幅に対する割合である。マーカは画像上での回転を判別する目的により点对称なパターンは同一コードとして扱う。また1つの立体マーカには側面に合計4枚の2次元コードを使用するため、パターンの総数は仮想物体数の4倍必要となる。正方形の2次元コードにおいて、縦横4ビットずつ合計16ビット分のパターンを用いる場合、点对称なパターン<sup>28</sup>通りを除外して上記を考慮すると、単純に  $(2^{16} - 2^8)/(4 \times 4) = 4080$  種類のオブジェクトが登録できることになる。

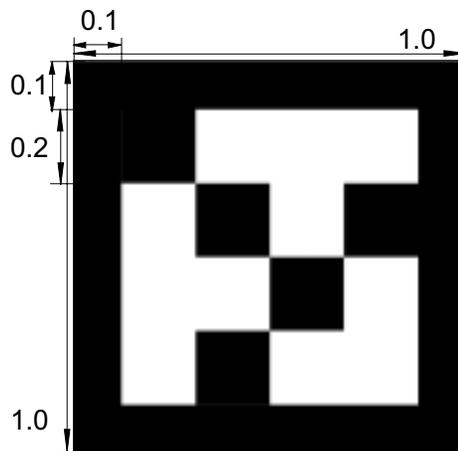


図 3.4 使用する2次元コードの例

### 3.4 鏡面球

光の照光モデルは遠景からやってくる光と、オブジェクトが置かれている局所で観察されるライトや周りの物体で反射された光の和の二つの要素で構成されているものとする [36,37] . 遠景からの光や周りの物体で反射された光を環境光として計測する .

まず、視点と光源の位置関係について述べる (図 3.5) . 鏡面球画像が半径  $r$  ピクセル、中心  $(x_c, y_c)$  に観察されたとき、あるピクセル  $(x, y)$  が示す鏡面球の法線ベクトル  $\vec{N}$  は、式 (3.5) となる .

$$\begin{aligned}\vec{N} &= [e_x, e_y, e_z] \\ e_x &= (x - x_c)/r, e_y = (y - y_c)/r \\ e_z &= \sqrt{1 - (e_x^2 + e_y^2)}\end{aligned}\tag{3.5}$$

カメラ焦点  $O$  から光源が写りこんでいるピクセル  $(x, y)$  を通る視線ベクトル ( $\vec{V}$ ) が、鏡面球の法線ベクトル  $\vec{N}$  によって反射され、光源方向ベクトル ( $\vec{L}$ ) になる (式 3.6) . それぞれのピクセルについて同様の計算を行うことで、鏡面球に様々な角度で入射する光源の色と方向が求めることができる .

$$\vec{L} = \vec{V} - 2(\vec{N} \cdot \vec{V})\vec{N}\tag{3.6}$$

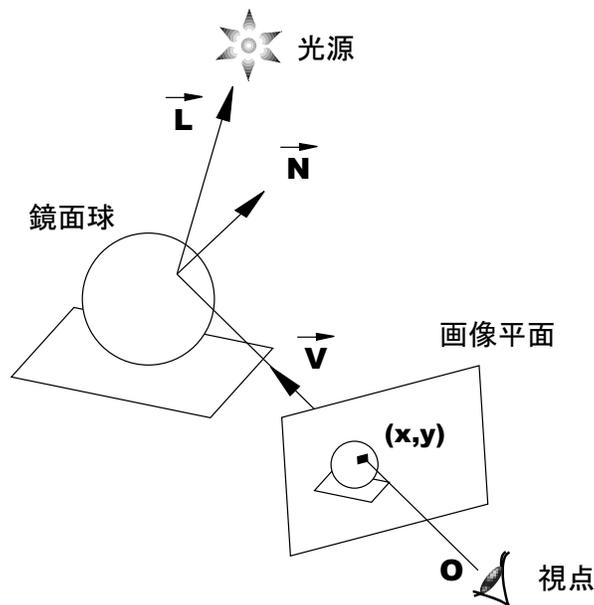


図 3.5 視点と光源の位置関係

次に、鏡面球画像から立体マーカを照らす照光条件をサンプリングするために、鏡面球画像を適当な方法で分割する。分割されたそれぞれの領域に入射する光を一つの光源としてサンプルする。光源の色は領域画素の RGB 値の平均とし、領域の重心を通る視線ベクトル  $\vec{V}$  が鏡面球の法線ベクトル  $\vec{N}$  で正反射されたベクトル  $\vec{L}$  を光源方向ベクトルとする。

### 3.5 シェーディング

鏡面球から取得した照光条件をもとに、仮想物体のシェーディングを行う。シェーディングに OpenGL を用いた場合、グラフィックボードの制約によって使用できる光源の数が限られ、室内の光源や光の差し込む窓がたくさんあった場合対処することができない。本実装では、サンプリングした光源をすべて使用することで環境光として観察されるすべての光源の影響を反映させるだけでなく周囲の物体が反射した弱い光をも照光条件に反映することができる。

仮想物体を構成する頂点の色は、Lambert と Phong のモデル (式 3.7) に従うと仮定する [9, 44]。視点ベクトルと頂点の法線ベクトル、光源の入射角をもとに鏡面反射と拡散反射との和をとる。それぞれの反射成分のうち入射光の輝度値に対する重みとして、拡散反射は入射角と法線ベクトルの内積を、鏡面反射は入射角と反射角の中間ベクトルと法線ベクトルとの内積をとる。

$$\begin{aligned}
 I &= \text{Specular} + \text{Diffuse} \\
 &= M_s \frac{\sum_r \sum_\theta I_s \left[ \frac{n \cdot h_{r,\theta}}{|n| |h_{r,\theta}|} \right]^\mu}{\sum_r \sum_\theta \left[ \frac{n \cdot h_{r,\theta}}{|n| |h_{r,\theta}|} \right]^\mu} + M_d \frac{\sum_r \sum_\theta I_d \frac{l_{r,\theta} \cdot n}{|l_{r,\theta}| |n|}}{\sum_r \sum_\theta \frac{l_{r,\theta} \cdot n}{|l_{r,\theta}| |n|}} \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

ただし、 $n$  は頂点の法線ベクトル、 $h_{r,\theta}$  は入射ベクトルと視線ベクトルの中間ベクトル、 $l_{r,\theta}$  は入射ベクトルである。また  $M_s$  および  $M_d$  は物体の鏡面および拡散反射成分であり、 $I_s$  および  $I_d$  は拡散および鏡面反射に寄与する光源の強度である。式中の *Diffuse* には、環境光が含まれる。

### 3.6 処理の流れ

図 3.6 にシステムの処理の流れを示す。キャプチャしたカメラ映像の各フレームにおいて、2次元コードを探索する。2次元コードが見つからなければ、そのフレームにおいて仮想物体は視野内に存在しないものと判断し、キャプチャした画像をそのまま出力する。2次

元コードが見つかった場合、その位置姿勢を計測するとともに、符号化部分を復号化し2次元コードが持つID番号を得る。ID番号をもとに立体マーカの情報を検索し、立体マーカのID番号と立体マーカの方角とサイズ、鏡面球の大きさ、対応する仮想物体のモデルデータを参照する。仮想物体のモデルデータを読み込んでいない場合、別スレッドで記憶装置もしくはネットワークから読み込み、完了するまでカメラ画像をそのまま出力する。複数のコードが視野内に存在した場合、同じ仮想物体に対応するID番号を持つ2次元コードは統合し、2次元コードの座標系からマーカ座標系を得る。マーカの天頂面にある鏡面球の中心位置をマーカ座標系から得る。仮想物体を照らす仮想的な面光源の集合を鏡面球からサンプリングし、仮想物体の全頂点において鏡面反射および拡散反射成分を求め、入力画像に重ねてレンダリングする。全体の処理の流れと、それぞれの立体マーカの情報を管理する DataManager クラスの概念図を示す (図 3.6)。

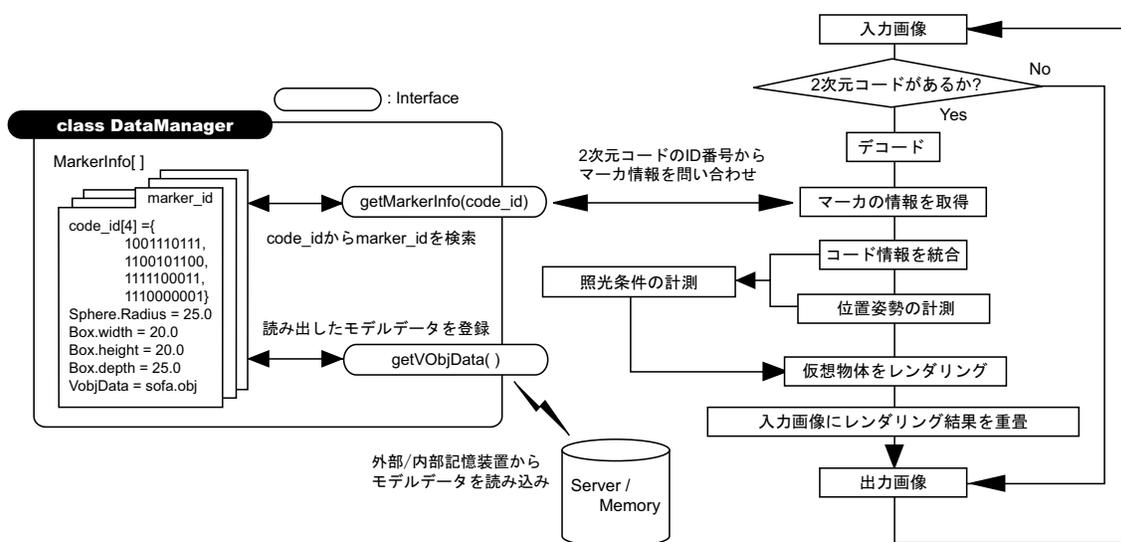


図 3.6 DataManager クラス概念図 (左) と処理の流れ図 (右)

## 第4章 実験

第3章で提案した手法が、周囲環境をどのようにモデリングしているか、ユーザインタフェースが使いやすいものであり基本的な作業を支障なくこなすことができるかを検証する。

まず、実験で使用した機材とモデルデータを表4.1に示す。2次元コードを紙箱の側面に貼り付け、鏡面球を天頂面に置いた。仮想物体のモデルデータには、それぞれの材質に応じて拡散および鏡面反射成分が予め設定されている。

表 4.1 使用した機材とモデルデータ

|       |   |   |   |  |   |   |
|-------|---|---|---|--|---|---|
| PC    | CPU: Intel Pentium4 1.8GHz  |   |   |  |   |   |
|       | Memory: 512MB   |   |   |  |   |   |
|       | Graphic Board: nVIDIA GeForce3  |   |   |  |   |   |
| カメラ   | WATEC 製 WAT-202D (F 値: 1.4, 焦点距離 6mm)   |   |   |  |   |   |
| 立体マーカ | 一辺 20cm の立方体の紙箱   |   |   |  |   |   |
|       | モノクロ印刷した 2次元コード (幅 20cm)  |   |   |  |   |   |
|       | 3種類の半径 (R=11.3, 10.3, 8.3cm) の鏡面球   |   |   |  |   |   |
| モデル   |  |  |  |  |  |  |
|       | PC  | 机   | 椅子1   | 椅子2  | ソファ1  | ソファ2  |
| 頂点数   | 6,100点  | 400点  | 8,300点  | 4,600点   | 1,000点  | 2,600点  |

## 4.1 位置姿勢の計測精度

使用した2次元コードで位置姿勢を計測する際の精度を測定した。カメラの光軸上に2次元コードの中心が位置するように設置し、カメラとの距離を1mから4mまで1m刻みで変化させた。それぞれの距離において、カメラに正対した状態から2次元コードを水平方向に10deg刻みで回転させ、法線ベクトルと距離の姿勢計測結果を記録した。なお、最適な二値化画像を得るためにカメラの絞りは手動で設定する。結果を図4.1に示す。

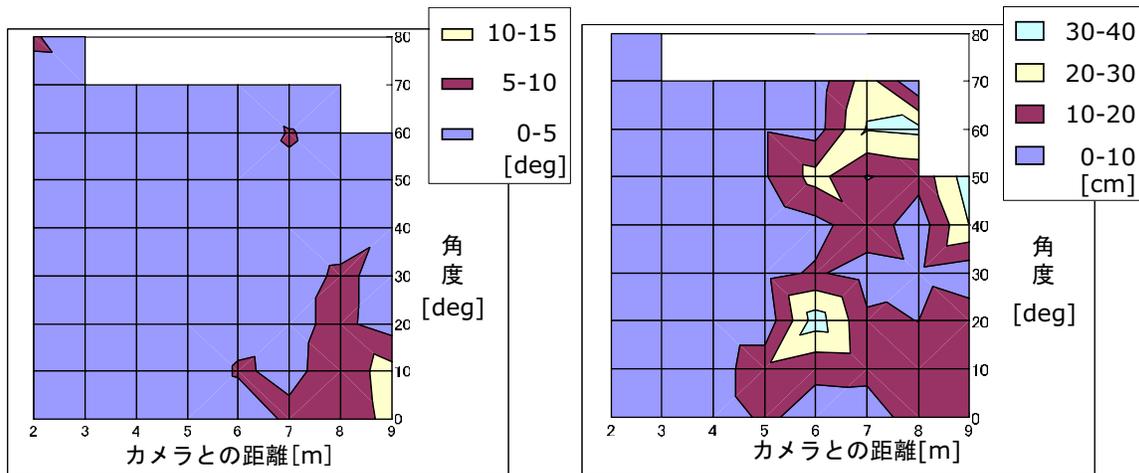


図 4.1 2次元コードの計測誤差:姿勢(右) および距離(左)

絞りや閾値を手動で設定し、最適な二値化画像を得ることで、姿勢および距離を高い精度で計測することが可能である。

一方、カメラの絞りを固定したまま姿勢計測を行った場合、2次元コードがカメラに正対した状態に近いと、計測誤差が大きくなる傾向が見られた(図4.2)。絞りを固定すると、二値化したマーカの輪郭が正しく検出できず誤差が大きくなると考えられる。本実装ではカメラ絞りと閾値を固定しているため、同じマーカに貼られた2枚の2次元コードがカメラの視野に入った場合、ユーザ視線に対して傾きの大きいマーカから計測される幾何情報を優先的に使用することで、計測精度の安定性向上を図っている。

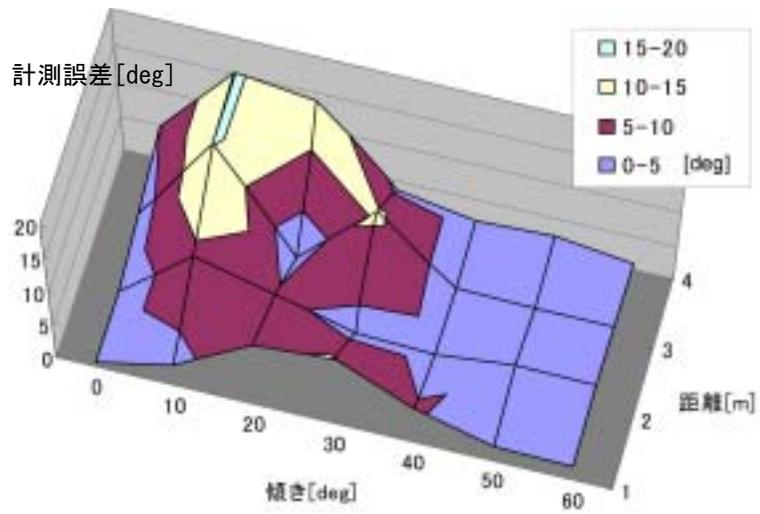


図 4.2 2次元コードの姿勢計測誤差 (カメラ絞りを固定した場合)

## 4.2 照光条件の計測精度

### 4.2.1 光源方向の精度測定

鏡面球による照光条件の計測精度を測定した。鏡面球を固定し、カメラを1mから4mの間で1m刻みで設置する。鏡面球の中心を通る水平面上で半径2mの円を描くように10deg刻みでスポットライト(40W)を設置し、光をあてた(図4.3)。観察されたライトのピクセル位置から光源の方向を計算し、真値と比較する。鏡面球による計測精度を測定するため、画像中の鏡面球の半径と中心は手作業で設定した。

カメラと鏡面球の距離ごとに、計測データをまとめた(図4.5-4.8)。グラフの横軸はライトの設置角度、縦軸は計測値の誤差を角度[deg]で示してある。折れ線グラフは誤差の平均を表し、各項目についている足は、誤差の最小値と最大値を示す。

カメラとマーカの距離が大きくなり、鏡面球画像が小さくなるほど、隣り合うピクセルで計測される光源方向の開きは大きくなる。また鏡面球画像で中心から離れるほど1ピクセルあたりが対応する立体角が広くなるため、計測精度は低くなると考えられる(図4.4)。実験データからもライトとの角度が90deg以上になると急激に誤差が大きくなる傾向が見られた。

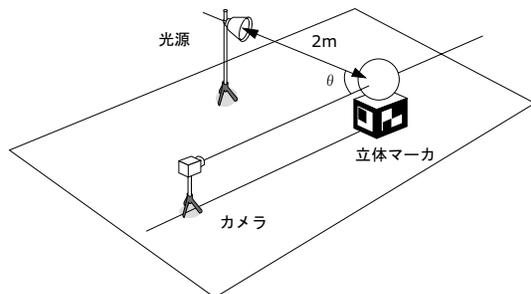


図 4.3 カメラと光源および立体マーカの位置関係

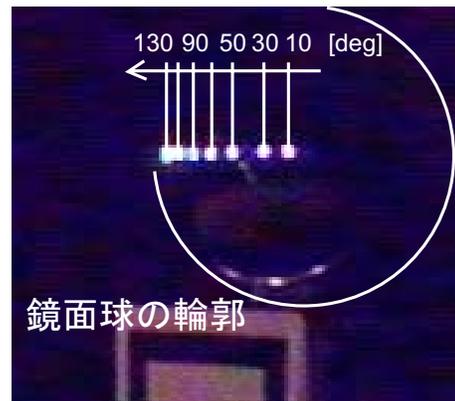


図 4.4 角度による鏡面球への写りこみ場所の変化

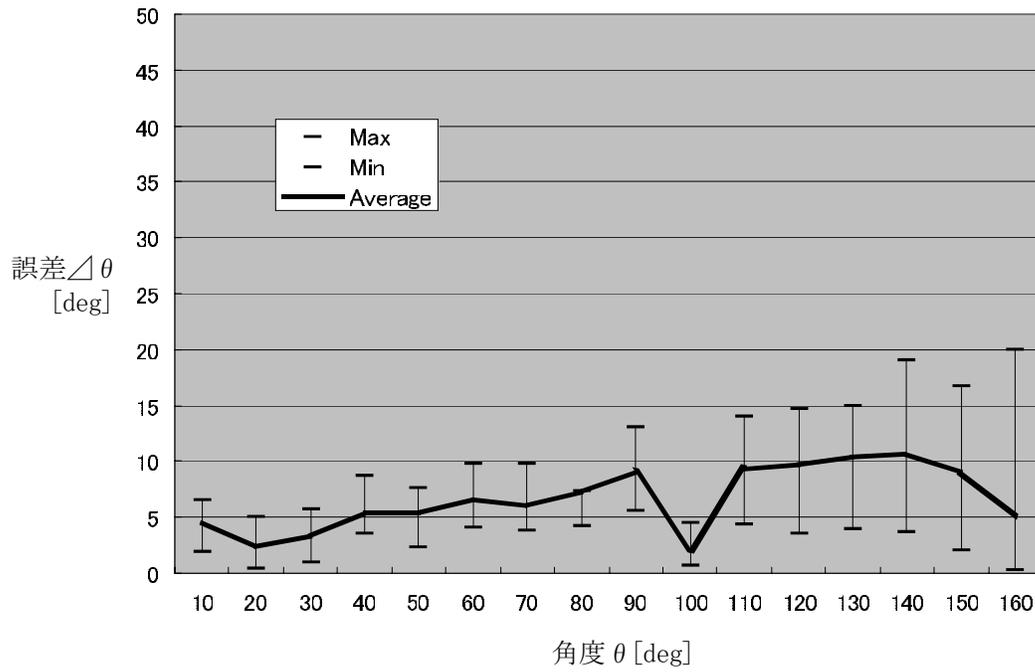


図 4.5 光源方向の計測結果 (カメラと鏡面球の距離:1m)

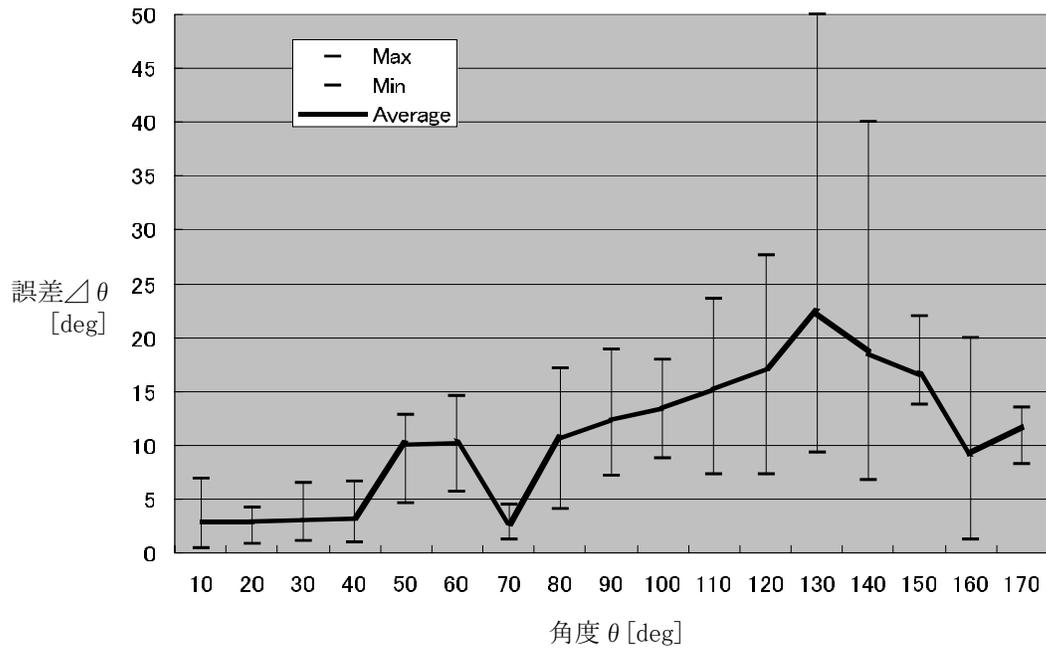


図 4.6 光源方向の計測結果 (カメラと鏡面球の距離:2m)

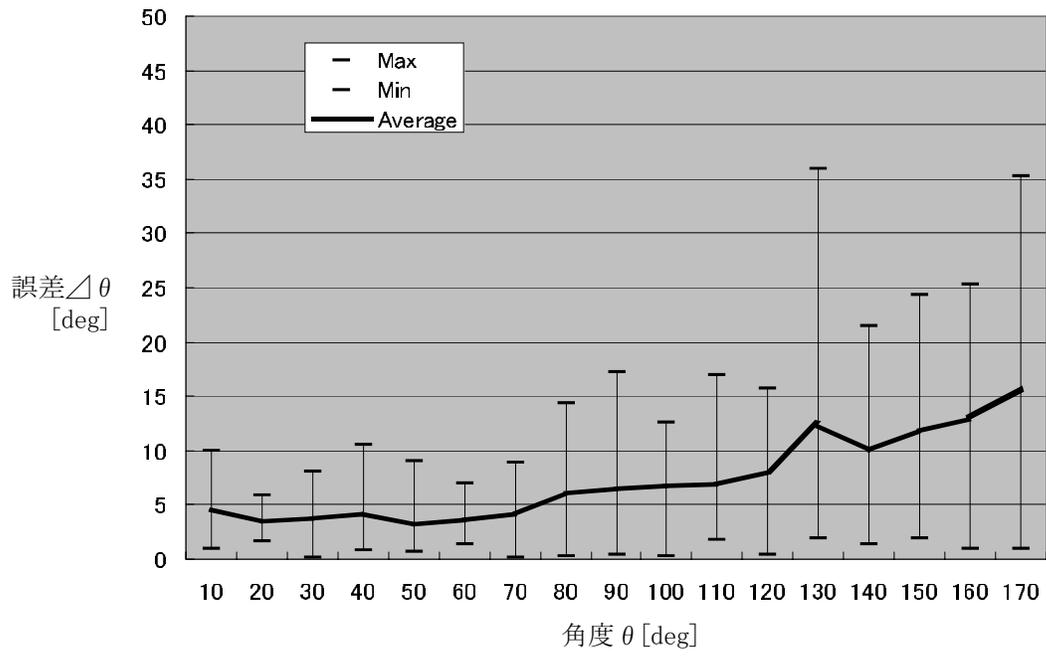


図 4.7 光源方向の計測結果 (カメラと鏡面球の距離:3m)

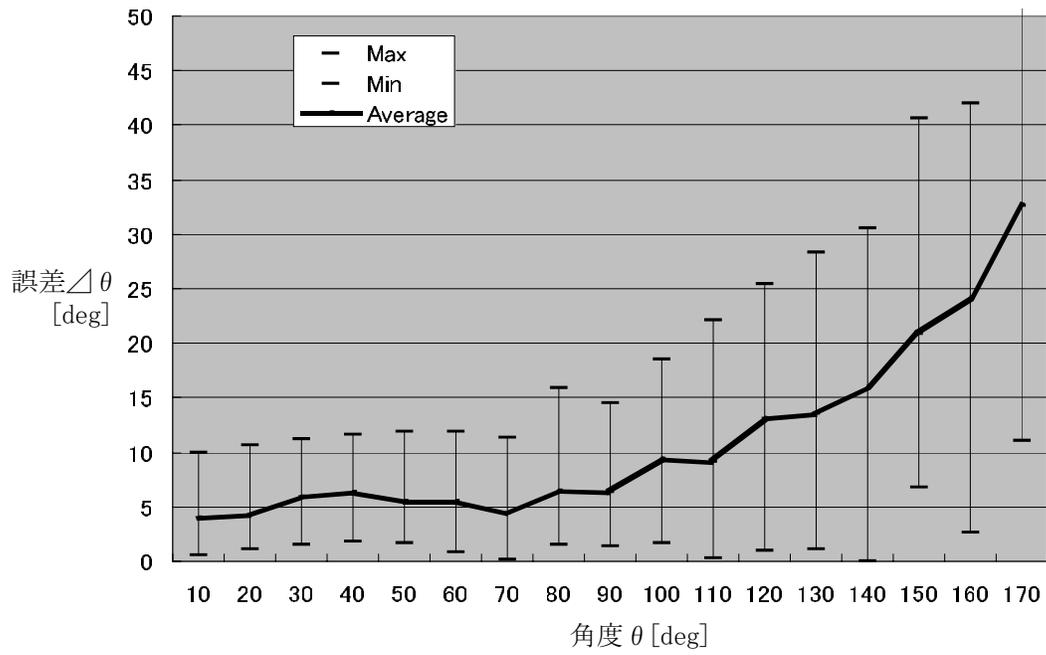


図 4.8 光源方向の計測結果 (カメラと鏡面球の距離:4m)

## 4.2.2 光源分布の取得

光源の位置が既知である床面積 $640 \times 640 \text{cm}^2$ 、高さ $280 \text{cm}$ 、天井に $28 \times 480 \text{cm}$  ( $120 \text{cm} \times 4 \text{本}$ )の蛍光灯が2つ設置された空間(図4.9)において、点灯させる蛍光灯を変化させ、三通りの照光条件を立体マーカで計測した。マーカ周辺における照光条件を計測し、得られた光源方向と光の強さを、空間の壁面および床にプロットする。

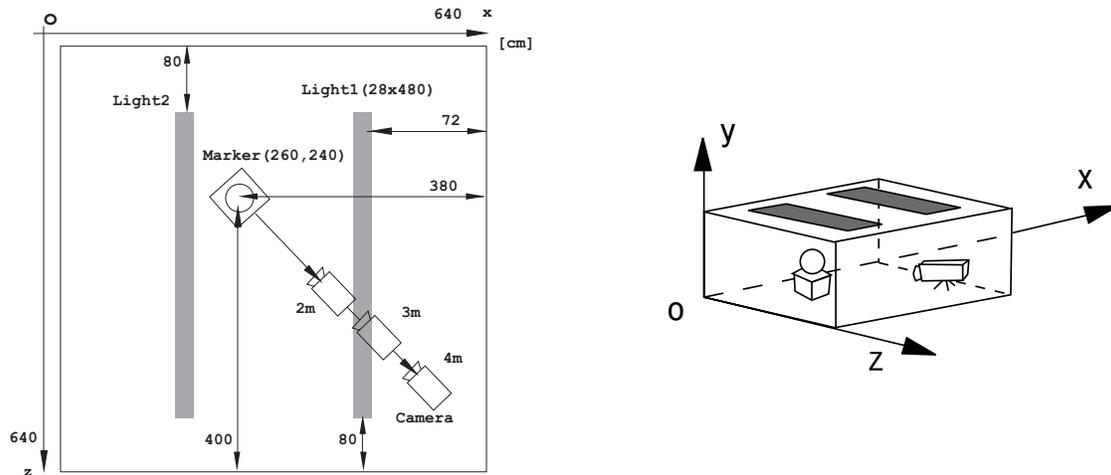


図 4.9 部屋の間取り図(左)と空間の座標系(右)

まず2次元コードの位置姿勢計測結果により取得した鏡面球画像を、複数の領域に分割し、領域内のRGB値を平均化した様子を図4.11に示す。分割は、球の半径を同心円状に $n$ 等分し、さらに $i$ 周目の同心円を $4i$ 等分した。半径を $n$ 等分すれば、分割領域は $2n(n+1)$ となる。次に、平均化した鏡面球画像からサンプルした点光源を天球上にマッピングし、鏡面球によって計測される光源分布を可視化する(図4.12)。なお、図4.10-4.12の列は天井にある蛍光灯の点灯数を変化させた例を示す。



図 4.10 切り出した鏡面球画像 (左:Light1 点灯, 中: Light2 点灯, 右:Light1,2 点灯)

|     |     |  |  |  |
|-----|-----|--|--|--|
| 分割数 | 112 |  |  |  |
|     | 220 |  |  |  |
|     | 840 |  |  |  |

図 4.11 分割数の違いによるサンプル画像

|     |     |  |  |  |
|-----|-----|--|--|--|
| 分割数 | 112 |  |  |  |
|     | 220 |  |  |  |
|     | 840 |  |  |  |

図 4.12 平均化画像からサンプリングした点光源群

図 4.13 に、鏡面球画像の分割数によって計測される光源分布の違いを示す。空間の光源分布は天井および側壁にプロットされた光源の点群を空間より高い視点から俯瞰するように表示している。また、天井にある蛍光灯は、図中では線分を用いて正確な位置が示されている。

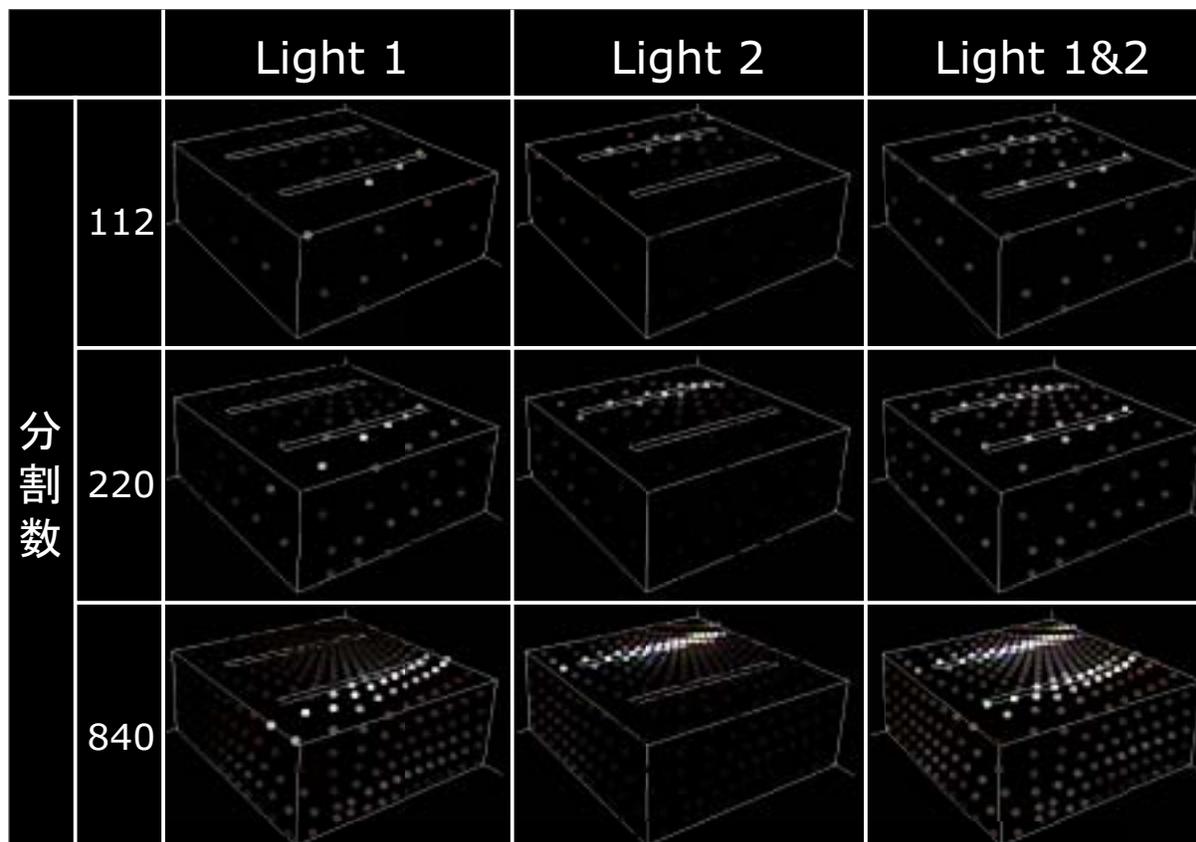


図 4.13 光源分布計測結果 (左:Light1 点灯, 中: Light2 点灯, 右:Light1,2 点灯)

サンプリングした照光条件で仮想物体をレンダリングし、実物体と比較する。同条件で撮影した直径 17.2cm の石膏球画像と、拡散反射成分のみを持つ仮想物体の球のレンダリング結果を図 4.14 に示す。

従来、ユーザの指示によりオフラインで設定されたり、仮定をもとに設定されていた照光条件は、提案手法によって動的にサンプリングされる。動的に計測した照光条件によって、実環境と矛盾しない仮想物体の陰影の方向を実時間で表現することが可能である。仮想物体と実物体を比較すると、レンダリングされた仮想物体は、輝度分布が実物体に比べて高い。これは入力画像から得られる光源のダイナミックレンジが限られているため、光源の強度を正確に計測できず、仮想物体の輝度分布を正規化できなかったである。ダイナミックレンジの異なる複数台のカメラを使用したり、輝度分布の正規化を手動で行えば、この問題は解決できる。異なる光源サンプリング数でのレンダリング結果を比較すると、拡散反射成分のみを持つモデルでは、比較的荒い光源サンプリング数でも描画結果に差異は認められない。レンダリング速度はサンプル数に依存するため、表示する仮想物体の種類や作業状況に応じてサンプル数を変化させて処理速度を調節することが可能である。

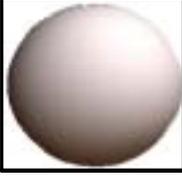
|          |     | Light 1   | Light 2   | Light 1&2  |
|----------|-----|---|---|--|
| 実物体画像    |     |   |   |   |
| レンダリング結果 | 112 |  |  |  |
|          | 220 |  |  |  |
|          | 840 |  |  |  |

図 4.14 実物体と仮想物体の比較

## 4.3 レンダリング

レンダリングの実験として、まず、実物体の机を二脚だけ配置した部屋において、机、椅子二脚、PCの4つの仮想オブジェクト(表4.1参照)を立体マーカにそれぞれ登録し、固定したカメラから見える範囲に配置して提案システムを稼働した。画像のキャプチャレートは30[fps]であり、描画レートは提示するオブジェクトの数に依存するが1~10[fps]程度であった。

### 4.3.1 レイアウト作業の様子

レンダリングされる様子を確認しながら対話的にレイアウトを試行することが可能であった(図4.15)。仮想オブジェクトの重心がマーカの鉛直線上にあるように描画されることに注意しておけば、オブジェクトどうしを整列させたり、向きを調整したりという作業はほぼ直観的に、描画結果を見ながら立体マーカの向きや位置を変えてゆくことによって達成可能であった。このことから、スペースの使い方や家具のレイアウトなどを視覚的に確認しつつ、色々なパターンを容易に試すことが出来ると考えられる。

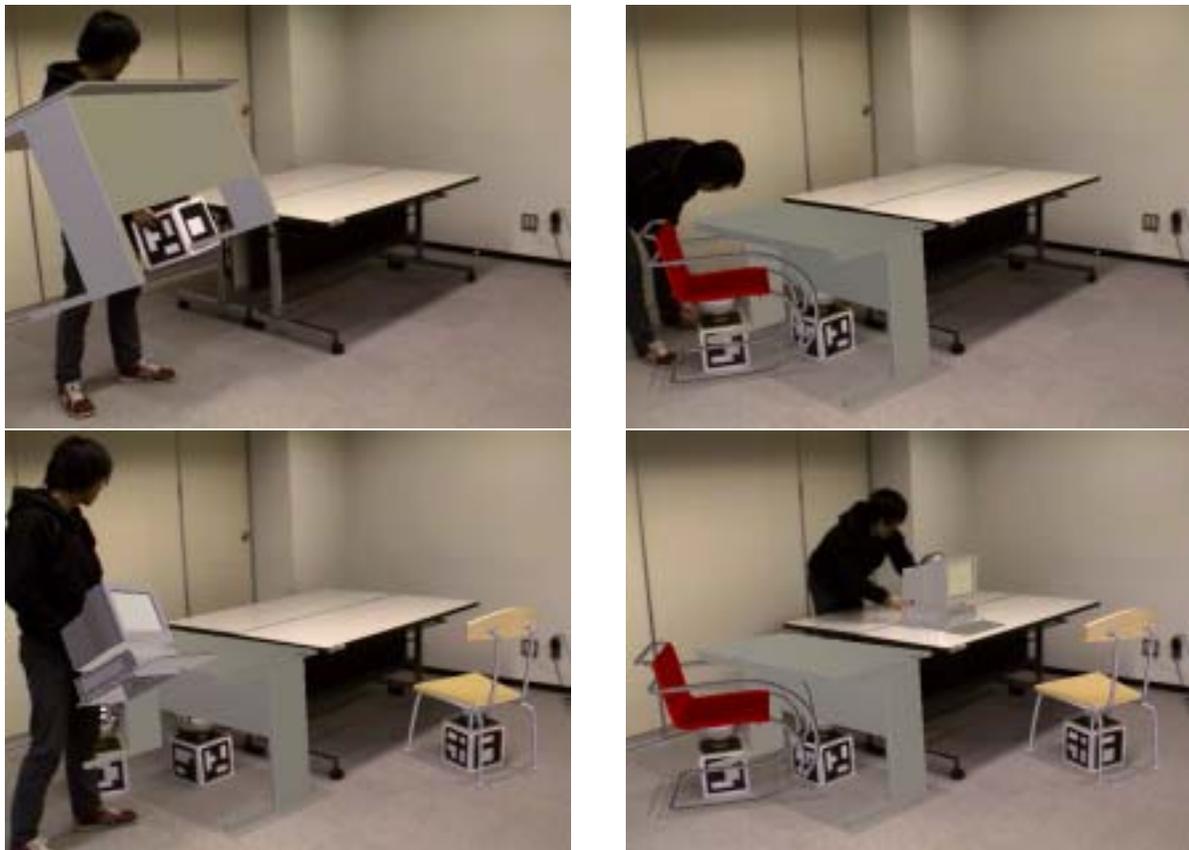


図 4.15 レイアウト作業の様子

### 4.3.2 局所的な照光条件を反映したレンダリング

局所的な照光状況の変化をレンダリングした例を図 4.16 に示す．実物体の衝突が影を落している場所で，仮想のソファを並べた場合である．位置が少しずれただけでソファに対する局所的な光源の状況は大きく変化する様子が表現されている．既にいろいろな家具が存在している複雑な照光条件のなかで，新しい家具を選んだり配置したりする際に有効な表現であると考えられる．



図 4.16 局所的な光源の変化

### 4.3.3 空間の照光条件を反映したレンダリング

4 つの立体マーカを部屋に配置して，照光条件の変化が仮想物体のレンダリングに及ぼす影響を観測した．部屋の外からの光によって照光条件が時間とともに変化し，室内の環境光の明るさや色合いが部屋の場所によって明らかに異なる窓際に立体マーカを設置した．レンダリング実験は太陽の位置が大きく違う日中と夕方，夜の 3 回行った．仮想物体とし

ては、机と椅子2脚を床の上に配置し、仮想のPCは実物の机の上に置いた(図4.17)。マーカの配置を動かさず、時間帯によって部屋の照光状況の違う環境でのレンダリングの様子を示す(図4.17-4.24)。

窓越しに差す光や部屋の壁やなどの多重反射などによって、画面全体の明るさや色合いが単純な光源分布モデルでは表現が難しい条件であるが、仮想物体の色が調和して実時間でレンダリングされた。



図 4.17 早朝の外からの光 (入力画像)



図 4.18 早朝の外からの光 (出力画像)



図 4.19 夕方の外からの光 (入力画像)



図 4.20 夕方の外からの光 (出力画像)



図 4.21 遠方の蛍光灯からの光 (入力画像)



図 4.22 遠方の蛍光灯からの光 (出力画像)



図 4.23 マーカ上部の蛍光灯からの光 (入力画像)



図 4.24 マーカ上部の蛍光灯からの光 (出力画像)

## 4.4 実験全体の考察

第4章では、2次元コードと鏡面球のそれぞれから得られるデータがどの程度信頼できるものかを調べた。また両者を組み合わせて立体マーカとして機能させたとき、どのように実環境を反映したレンダリングできるか、実際に居住空間のデザインツールとして使用できるかを検証した。以下に実験を通して得られた知見を述べる。

- 立体マーカでは床に対して垂直に2次元コードを貼り付けるが、コード検出処理においてラベリングした領域ごとに二次元コードかどうかを判断するため(図3.3参照)、立体マーカが逆光を受けて床に作った影と2次元コードの領域が重なるとき認識に失敗する(図4.25)。マーカが作る影の影響を抑えるには、2次元コードのサイズを小さくして外側の余白を大きく取ることが考えられるが、サイズが小さいほど認識可能な距離が短くなり、外枠を細くすれば、コードが回転したときに内側の白い領域と外側の余白が結合し認識できなくなる。



図 4.25 影による2次元コード検出失敗の例:入力画像(左), 成功(中), 失敗(右)

- ユーザの装着した単眼カメラによって、仮想物体の位置姿勢および環境の照光条件を計測した。これにより、環境のモデリングやセンサキャリブレーションが不要となり、いろいろな場所で手軽に居住空間のデザインが可能となった。一方で、鏡面球を限られたダイナミックレンジで撮影するため、照光条件計測の精度が不十分であった。
- 位置姿勢計測に2次元コードのみを利用した。前述と同様にシステムがシンプルになったが、マーカ検出は照明の影響を受けやすいため、暗すぎる照明や逆光により

マーカ検出自体が失敗し，照光条件を計測できないことがあった．照明の変化にロバストな2次元コードを使用するハード面での対応と，入力画像への前処理部分を改良するソフトウェア面での対応が必要であると考える．

- マーカごとに局所的な照光条件を毎フレーム計測した．サンプルする光源の数は任意で設定できるものの，環境光を含めたサンプリングを行うには一定数の光源を必要とする．使用する光源サンプル数が多いと処理速度が遅くなり，ユーザの視点移動に描画するフレームが遅延するようになる．処理での最大のボトルネックは，各頂点ごとにサンプルした光源を掛け合わせる部分 (式 3.7) である．時間的整合性を保つために，グラフィック専用プログラミング言語である Cg [45] などのハードウェア処理によるレンダリングを行うことや，描画のクオリティを変更できるモードを設けて，使用する光源の数や描画する頂点数を変化させる工夫が必要である．

## 第5章 結論

VR 技術を応用したインテリアデザイン案の可視化は、家屋の新築やリフォームに関する専門的な知識を持たないユーザに対して分かりやすい表現が可能であり、商業的にもさかんに利用されている。しかし、ユーザが日常過ごしている環境に新しい家具を配置した様子をシミュレートするには、空間とそこに配置されている実物体の形状モデリングや反射特性のモデリング、さらに空間の照光条件モデリングという煩雑な作業が必要であり、誰もが手軽に体験することは困難であった。

本研究では、2次元コードと鏡面球から構成される立体マーカを用いて、カメラ単体のキャリブレーションとマーカから得られる情報のみから、ユーザ視点から見えるオブジェクトの位置姿勢とその場の照光条件を計測し、両者を反映した仮想オブジェクトの表示を実時間で行える手法を提案した。

2次元コードによる位置姿勢計測の精度と鏡面球による照光条件計測の精度を測定し、それぞれが持つ性質を考察した。また、異なる照明条件における仮想物体のレンダリングの変化を観察し、2次元コードと鏡面球を組み合わせた立体マーカが有効に機能していることを確認した。

提案手法によって、複数の立体マーカを一般的な居住空間に配置し、仮想物体が実空間とどのように調和しているかをユーザに対話的に提示するフレームワークを実現した。ユーザは仮想物体と実物体が混在する MR 空間を自由に歩き回ったり、材質や反射成分の変化がどのように印象を変化させるかもシミュレートできる。今後、新たにデザインされた家具や調度品のモデルデータが広くネットワークを通じて公開され、提案したフレームワークを用いることで、専門的な知識を持たない消費者にとって困難であったデザイン過程への積極的な参加が促進されることを願う。

# 謝辞

本研究の機会を与えて下さり，数々の有益な御指導を与えて下さいました像情報処理学講座 千原國宏教授に深謝の意を表します．

副指導教官としてご助言頂いた視覚情報メディア講座 横矢直和教授，像情報処理学講座 眞鍋佳嗣助教授，先端科学技術研究調査センタ 大城理助教授に御礼申し上げます．

御指導を賜わり，また，数々の有益なご助言を与えて下さいました像情報処理学講座 安室喜弘助手，井村誠孝助手，金谷一郎博士（現大阪大学大学院大学院基礎工学研究科），村上満佳子教務員に謝意を表します．

研究指針に対し御指導，ご助言をして下さった像情報処理学講座 佐々木博史氏，南広一氏，小島佳幸氏（現松下通信工業株式会社）に厚く御礼申し上げます．

実験補助など日頃からお世話になった像情報処理学講座博士後期および前期課程のみなさまと，いつもあたたかい心配りを頂いた川本桂子秘書，そして学生生活における最大の発見をもたらしてくれた櫛本季子さんに心より感謝申し上げます．

# 参考文献

- [1] O. R. Ojeda and L. H. Guerra. *Hyper-Realistic Computer Generated Architectural Rendering*. グラフィック社, 1997. ISBN4-7661-0962-7.
- [2] M. Corporation. Power Sketch. <http://www.magic-hour.co.jp/>.
- [3] HOUTEC. B-MOS. <http://www.houtec.co.jp/>.
- [4] Zeisel. *Inquiry Design : Tools for Environment-Behavior Research*. Cambridge University Press, 1981. 根建金男ほか監訳：デザインの心理学：調査・研究からプランニングへ, 西村書店, 1995.
- [5] 日本建築学会. 人間環境学 よりよい環境デザインへ. 朝倉書店, 1998.
- [6] WHO. WHO Technical Report Series. Technical Report 225, WHO, 1961.
- [7] 乾正雄. やわらかい環境論. 海鳴社, 1988. ISBN4-87525-121-1 C1052.
- [8] 武藤浩, 榎究, 中村芳樹, 乾正雄. 街路景観評価に与えるテクスチャの影響 (その1 テクスチャの印象評価). 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp. 37-38, 1989.
- [9] J. Francis S. Hill. *Computer Graphics Using Open GL*. Prentice Hall, 2nd edition, 1999. ISBN:0023548568.
- [10] 井村誠孝, 田畑慶人, 金谷一朗, 黒田知宏, 眞鍋佳嗣, 大城理, 千原國宏. 異種計測手法の統合による亀形石のデジタル保存. 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, Vol. 2000, No. 17, pp. 131-138, Dec. 2000.
- [11] MINOLTA. VIVID. <http://www.minolta-rio.com/vivid/index.html>.
- [12] ExpressionTools Inc. Shade. <http://www.ex-tools.co.jp/>.
- [13] Autodesk Inc. AutoCAD. <http://www.autodesk.co.jp/>.
- [14] A&A CO.,LTD. VectorWorks. <http://www.aanda.co.jp/>.

- [15] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H.-P. Duiker, W. Sarokin, and M. Sagar. Acquiring the Reflectance Field of a Human Face. in *SIGGRAPH 2000*, 2000.
- [16] 河内洋介. 質感表現のための物体面の光沢計測. Master's thesis, 奈良先端科学技術大学院大学, 1997.
- [17] Web3D Consortium. <http://www.web3d.org/>.
- [18] 大島登志一, 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行. MR リビングルーム - MR 空間の幾何的・画質的整合性に関する考察. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol. 3, pp. 309-312, 1998.
- [19] 南広一. 共有 AR 空間における協調デザイン作業のための空間管理プロトコル. Master's thesis, 奈良先端科学技術大学院大学, 2001.
- [20] 加藤博一, M. Billinghurst, I. Poupyrev, 鉄谷信二, 橘啓八郎. 拡張現実感技術を用いたタンジブルインタフェース. 芸術科学学会論文誌, 第 1 巻, pp. 97-104, 2000.
- [21] ARIS - Augmented Reality Image Synthesis Through Illumination Reconstruction. Augmented Reality for interior furniture decoration. <http://arisist.intranet.gr/>.
- [22] B.Thomas. ARQuake: An Outdoor/Indoor Augmented Reality First Person Application. in *4th International Symp. Wearable Computers (ISWC 2000)*, No. 139-146, 2000.
- [23] H.Kato and M.Billinghurst. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. *IEEE International Workshop on Augmented Reality*, pp. 125-133, 1999. ARToolKit. [www.hitl.washington.edu/research/shared\\_space/download/](http://www.hitl.washington.edu/research/shared_space/download/).
- [24] N.Navab, E.Cubillo, B.Basclé, J.Lockau, K.D.Kamsties, and M.Neuberger. CyliCon: a software platform for the creation and update of virtual factories. in *7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 459-463, Barcelona, Spain, 1999.
- [25] R.M.Haralick, C.Lee, K.Ottenberg, and M.Nolle. Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 13, No. 3, pp. 331-356, 1994.

- [26] W. Mark, R. Azuma, R. Bennett, S. Gottschalk, and H. Fuchs. A Demonstrated Optical Tracker With Scalable Work Area for Head-Mounted Display Systems. in *Proceedings of 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp. 43–52, Cambridge, MA, Mar-Apr. 1992.
- [27] 佐藤智和, 神原誠之, 横矢直和, 竹村治雄. マーカと自然特徴点の追跡による動画像からのカメラパラメータの推定と三次元復元. Technical Report II, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2002) 講演論文集, Aug. 2002. pp.7-12.
- [28] 佐藤清秀, 穴吹まほろ, 山本裕之, 田村秀行. 屋外装着型複合現実感のためのハイブリッド位置あわせ手法. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 129–137, 2002.
- [29] T.Höllner, S.Feiner, T.Terauchi, G.Rashid, and D.Hallaway. Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System. *Computers and Graphics*, Vol. 23, No. 6, pp. 779–785, 1999. <http://www.cs.columbia.edu/graphics/projects/mars/>.
- [30] A. State, G. Hirota, D. T. Chen, W. F. Garrett, and M. A. Livingston. Superior Augmented-Reality Registration by Integrating Landmark Tracking and Magnetic Tracking. *Proceedings of SIGGRAPH 96*, pp. 429–438, 1996.
- [31] 藤井博文. 拡張現実感のためのビジョンセンサとジャイロセンサの組合せによる位置合わせ. 奈良先端科学技術大学院大学 修士論文, 1999.
- [32] D. L. de Ipiña, P. Mendonca, and A. Hopper. TRIP: a Low-Cost Vision-Based Location System for Ubiquitous Computing. *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol. 6, No. 3, pp. 206–219, 2002.
- [33] B. Jiang, S. You, and U. Neumann. Camera Tracking for Augmented Reality Media. in *IEEE International Conference on Multimedia and Expo 2000*, Vol. 3, pp. 1637–1640, Jul.-Aug. 2000.
- [34] K.Satoh, K.Hara, M.Anabuki, H.Yamamoto, and H.Tamura. TOWNWEAR: An outdoor wearable MR system with high-precision registration. in *Second International Symposium on Mixed Reality*, pp. 210–211, 2001.

- [35] 田中法博, 梶本めぐみ, 富永昌治. 鏡面球を用いた光源の全方位分布の推定. 日本色彩学会誌, Vol. 125, No. 2, pp. 92–101, 2001.
- [36] P. Debevec. Rendering Synthetic Objects Into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-Based Graphics With Global Illumination and High Dynamic Range Photography. in M. Cohen, editor, *Proceedings of SIGGRAPH 98*, Annual Conference Series, pp. 189–198. Addison Wesley, July 1998. ISBN 0-89791-999-8.
- [37] I.Sato, Y.Sato, and I.Ikeuchi. Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 5, No. 1, pp. 1–12, 1999.
- [38] 佐藤いまり, 佐藤洋一, 池内克史. 物体の陰影に基づく光源環境の推定. 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア「Physics-based Vision と CG の接点」特集号, Vol. 41, No. SIG 10, pp. 31–40, Dec. 2000.
- [39] 神原誠之, 横矢直和. 光源環境の実時間推定による光学的整合性を考慮したビジョンベース拡張現実感. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 102, No. 555, pp. 7–12, Jan 2003.
- [40] 石川悠, 南広一, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 立体マーカを用いた実空間での調和的な仮想物体表現. システム制御情報学会, pp. 317–318, 2002.
- [41] 石川悠, 南広一, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 光源推定可能な立体マーカを用いた仮想物体表現. 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol. 7, pp. 95–98, Sep. 2002.
- [42] 石川悠, 安室喜弘, 南広一, 井村誠孝, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 実環境光源下における仮想物体のレイアウトシミュレータ. 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解 (PRMU) 研究会技術研究報告, Vol. 102, No. 555, pp. 13–18, Jan. 2003.
- [43] 桐島俊之. プロトコル学習による身振りの実時間画像認識. Master's thesis, 奈良先端科学技術大学院大学, 1997.
- [44] B.-T. Phong. Illumination for Computer Generated Images. *Communications of the ACM*, Vol. 18, pp. 311–317, 1975.
- [45] nVIDIA. Cg. <http://developer.nvidia.com/>.