

記 念 講 演

サイバースペースの自動生成

東京大学生産技術研究所 第3部 池内 克史 教授

サイバースペース、仮想現実感システムが現在世の中で広く使用されつつあります。電子モールですとか仮想美術館、あるいはゲームといった応用分野でどんどん使われだしています。ところが大半の仮想現実感システムは、モデル自体は人間が手で書いています。そのために開発費用が非常に高く、開発期間が長くなるという問題があります。多くの仮想現実感システムでは仮想現実感の基になるようなモデルがあります。先ほど出てきました電子モールですと、これからネットワークを通じて売りたい商品ですとか、あるいは仮想美術館ですと、陳列したい美術品などです。そういった実物体から仮想現実感システムのためのモデルを自動生成することを考えております。この自動化により開発期間を短かく、開発コストをさげることで、仮想現実感システムの応用分野というのが非常に広まっていくのではないかと考えて、こういう研究をやっています。

(図1)

図1にありますように実物体をテレビカメラなりレンジセンサなりで観測します。開発した技術を用いてモデル化します。しかる後に、このモデル化されたものを用いて、仮想現実感システムをつくり上げます。

このプロジェクトを思いつきましたのは、今から6、7

年前で、その頃につくりました建物の中の廊下のシーンのビデオをまずやっていたきたいと思います。

(ビデオ)

このシーンは、私がおりましたカーネギーメロン大学の廊下へレンジセンサを持ち出し方向を変えながら、この場合40枚ほどの距離画像を取得しました。世の中は平面からだけからなるという仮定をおいて、計算を節略化しました。

これが取り出された平面領域です。これらをつなぎあわせて、仮想世界をウォークスルーできるシステムが出来ました。これは6、7年前の話です。その頃はまだこういうシステムが非常に珍しくて、いろんな人に見せました。その当時のわれわれ情報科学部の学部長でしたラージ・レディという先生に、見せたところ「なかなかおもしろい。大学の隣のカーネギーミュージアムをこのシステムでモデル化してみたらどうだ」と言われました。これにヒントを得て、考えなおしてみますと、このシステムにはほ二つほどの問題点がございました。一つは、このシステムは、世の中すべて平面から成り立っているという仮定を置いてます。確かに平面領域、すなわち壁の領域ですとか、絵画というふうなものは表現できるわけですが、カーネギーミュージアムの中には当然のことながら、恐竜の骨ですとか、あるいはアンドリューカーネギーの胸像というのがあります。そういった平面でないものをどうやってモデル化するかという問題がありました。

もう一つは、ビデオをながめると、確かにそれらしいのだけれども、もうひとつ実物らしくないという感じを受けるわけです。それはこの場合は正面から眺めた色のパターン、われわれの分野の言葉でいえば、テクスチャーというものを貼り合わせただけです。

一方物体というのは見る方向に応じて微妙な色合いや、光る点が変わります。そういった見えのモデル化がなされていない。そのために違和感があります。特に美術品はそういった微妙な色合いとか、スペキュラリティがどう変わるかというのが命です。そういった材質感を連続のカラー

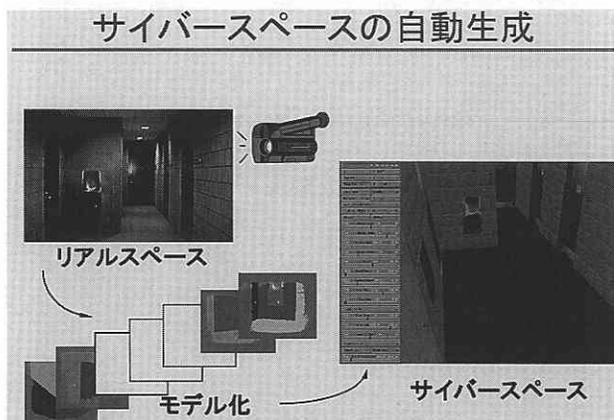


図1

レンジ画像からどうやって取り出すかという問題もあります。

(ビデオ終わり)

(スライド) (図 2)

図 2 に示しますように、こういうシステムを考える場合に二つの問題を考える必要があります。

一つは、どうやって連続の距離画像、あるいは画像から一つの統一的な形状モデルを得るかという幾何形状モデル取得の問題。形状モデルと連続のカラー画像とを混ぜ合わせて、どうやって実際らしく見えるような光学モデルを取得するという二つの研究が必要になります。

(スライド) (図 3)

図 3 に研究の経緯を示します。まずカーネギーメロン大学におりました頃から、どうやって幾何形状モデルを生成するかという研究を始めました。東京大学へ移ってから、後半の光学モデルをどうやってつくるか。あるいは光学モデルと実際の環境とをどうやってマージングするかというテクニックを開発してきました。そこで本日も、まず幾何モデルの生成法を説明いたします。それから光学モデルの

生成法、実環境とのマージング法についてお話ししたいと考えております。

(スライド) (図 4)

まず、前半の幾何形状モデルの構築に関して図 4 に示しますように、二つの問題を考える必要があります。一つは、実物体をいろんな方向からテレビカメラなりで画像を撮る際に、どうやって各々の画像の関係を復元するかという問題です。もう一つは、こうやって復元された画像に基づいて、どうやって統一的なデータ構造を生成するかという統合問題です。

まず第 1 の関係復元の問題を考えます。先ほどの平面領域だけで成り立っているというシステムですと、平面というものを計算の単位として関係を復元しました。そういった平面領域ではなくて、曲面物体をいろいろ方向からなめた画像から、どうやって画像の相互関係を計算するかということをご説明したいと思います。

(スライド) (図 5)

まず、簡単のために、図 5 に示しましたように二次元の形状があったとします。この場合問題はこの二次元画像を

サイバースペースの自動生成

◆ 形状モデルの構築



◆ 見えモデルの構築



図 2

幾何モデルの構築

◆ 相対関係の復元

◆ 統合

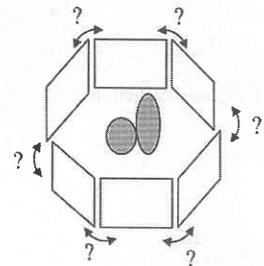


図 4

研究の経緯

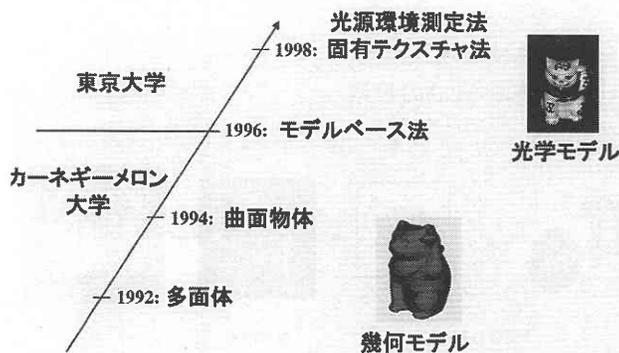


図 3

観測方向決定 (2D-SAI)

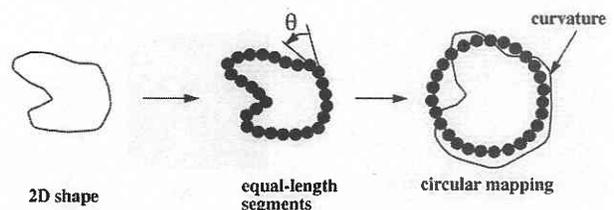


図 5

各種平面内の方向からながめた場合、各方向をどのように復元するかです。こういった二次元の形状を、同じ長さのアークに分割します。各アークで曲率を計算します。円を同様に分割しまして、先ほどの物体上のアークと対応づけします。対応する円弧の上に曲率をプロットします。二つの方向からの円弧上曲率を比較して関係を求めます。

(スライド) (図6)

これを三次元に拡張いたします。図6に示します数分割された球を物体の表面に張り付けることによって物体の表面を分割することができます。この際、各分割がなるべく同じ面積になるようにします。

(スライド) (図7)

各分割上で同様に曲率を計算します。これをもとの分割球上に蓄えることで物体上で曲率分布がどういふふうに変化しているかということを示す地球儀のようなものが計算できます。各方向での地球儀を比較することで相互関係が計算できるということになります。

(ビデオ)

ビデオにありますのはにぎりこぶしの3方向からの画像

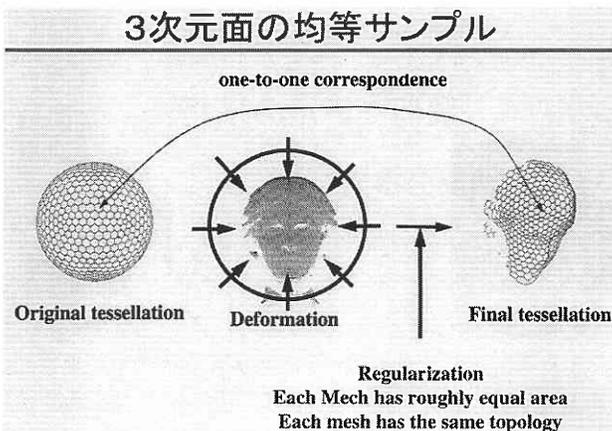


図6

SAI マップ

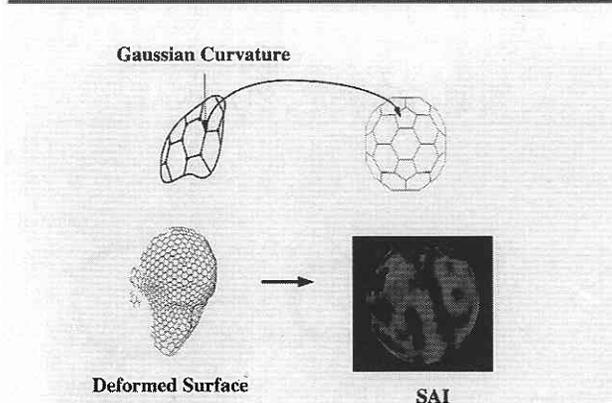


図7

です。こぶしの距離画像を先に述べました手法で同じ面積のパッチに割る。割ったものに対して曲率分布の地球儀をつくります。これが重なる方向を考えて、Views 1とViews 2との関係を計算するという手法を開発しました。

(ビデオ終わり)

(スライド) (図8)

次に、各方向からのデータを統合する必要があります。先の手法で各々の観測方向がわかりますので、それらを用いて部分観測データを同一の空間にならべます。この空間を単位ボクセルに分割します。各ボクセルでデータの重りぐあいから面らしいなとか、面らしくないなということを計算します。最後に最も確からしいところをつなぐことによって、モデルができるという方法を開発しました。

(ビデオ)

今からビデオでお見せするのは、こう言った手法で出来上がった曲面物体モデルで先ほど述べました方法を用いて、各々の方向から眺めた距離画像を張り合わせていきます。これに基づいて空間内では、この辺は面らしいなとか、この辺は面らしくないなというふうなボクセル表現を計算いたします。この結果に基づいて、一番もっともらしいところを三次元空間中でつないでいくことによって、最終的にこのような表面形状が計算できる。この場合ガチョウのおもちゃからこういった幾何形状モデルができました。

あるいはこのコップをいろいろな方向から眺めることによって、同じようにそれらのレンジデータを重ね合わせて、どの辺が最も確からしいかということを考え、その最も確からしい点をつなぐことによって、コップのモデルができた。

(ビデオ終わり)

こうやって曲面物体をモデル化することができました。この頃(1996年頃)は屋内の物体に対して、開発した手法を用いてモデル化を行っておりました。

屋内だけではなくに屋外の物体に対してもやってみようということ最近始めました。

統合法

- 体積表現
- 確からしさの投票

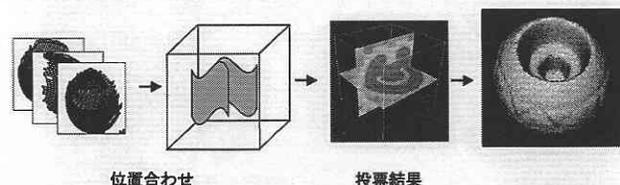


図8

(スライド) (図9)

例えば図9は生産技術研究所の玄関のカラー画像と距離画です。この建物は、旧麻布三連隊の宿舎で建築史上でも有名な建物らしいのですが、2、3年後には壊されてしまうということです。何とかこういう手法を用いて、デジタル生産技術研究所をつくりサイバー空間に保存することを考えております。

(スライド) (図10)

図10は鎌倉の大仏です。鎌倉の大仏に、お寺の許可を得てレンジセンサを持ち込み、夜中3日ほどかかって、いろんな方向からスキャンしました。それらに基づいて最終的な鎌倉の大仏のデジタルモデルをつくりました。

(ビデオ)

これはできたで、少しテクニックに粗いところがあるので、現在もう少しきちっとしたモデルが出るように手法を改良しつつあります。

(ビデオ終わり)

このような手法を各方面にアプライしようとして問題になりますのは、透明物体です。ダイヤモンドですかと、ワイングラスといったように身近に結構多くの透明物体があ

るわけで、こういう物体のモデル化をする必要があります。

透明物体の場合問題になりますのは、通常用いますような距離センサのレーザーですと、表面を突き破って向こう側へ通り抜けてしまうので、表面形状が得られません。物体の表面では偏光ぐあいに変化し、その偏光ぐあいを調べることによって面の傾きがわかるという理論がございます。

(スライド) (図11)

現在我々の研究室では図11に示すような道具を作りました。いろんな方向から光を投げ掛けて、各々の点でどういう偏光ぐあいが発生するかということを偏光板を用いて測定し、これによって透明物体の形状モデルをつくらうということをやっております。

(スライド) (図12)

図12が出てきた結果です。カメラのレンズの表面の形状を測ったものとか、これはアクリルのピラミッドですとか、円錐の形状を測った例です。

ここまでがどうやって物体の形状を取り入れるかという話でございました。

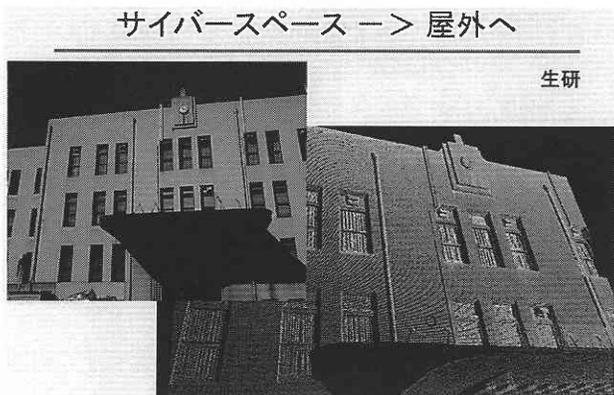


図9

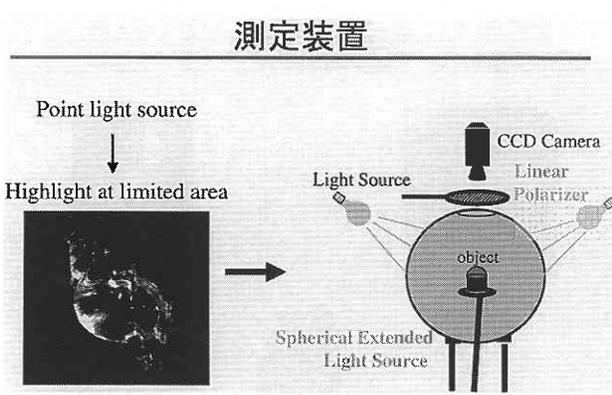
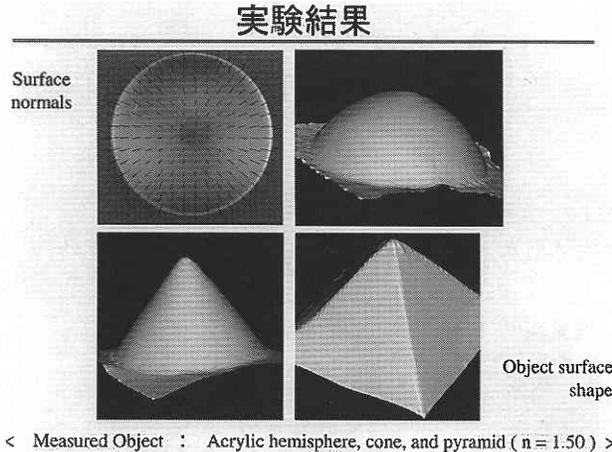


図11



図10



< Measured Object : Acrylic hemisphere, cone, and pyramid (n = 1.50) >

図12

(スライド) (図 13)

次の問題といたしまして、出来上がった幾何形状モデルというものは、テクスチャーも何もない、おもしろくも何ともない形状だけでございます。これとカラー画像をマージングすることによって実際に役に立つサイバーモデルをつくらうというのが今からお話しする話です。

(スライド) (図 14)

手法自体をご説明する前に、少し反射の理屈を話す必要がございます。物体の表面では入射光があつて反射光があります。反射光には二つの成分があり、第 1 番目の反射成分は、物体の表面で即空気中にはねかえってしまう表面反射成分。この表面反射成分は、入射角と反射角とが等しくて、入射光、面の法線方向と、反射成分の方向が同一平面上に載っているという特性がございます。

第 2 番目の成分は、物体の表面を突き破りまして、内部の色素と衝突を起こしながら、そこで光の波長が吸収されて最終的に空気中に出てきます。ランダムウォークをやりますので、内部反射の強さは、すべての方向に一様に分布するということが知られております。

表面反射成分の色は、入射光と同じ色をしていることが

光学モデルの生成

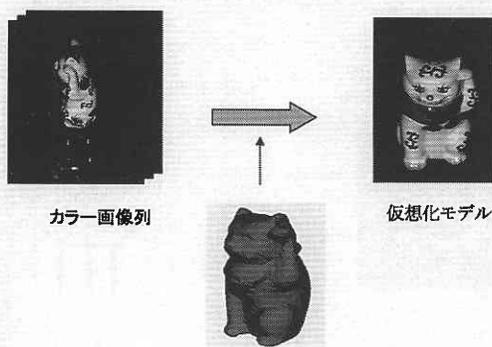


図 13

反射モデル

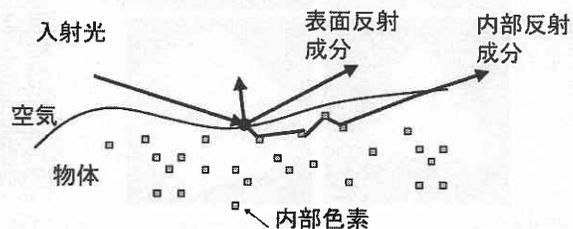


図 14

知られております。内部反射成分の色というのは、物体に特有な色であるということも知られております。

こういった色の違いに注目しまして、例えばカーネギーメロン大学では、次のようなドクター論文が出てきました。

(スライド) (図 15)

例えば図 15 に示す赤いプラスチックのマグカップを考えます。赤いコップの上にピカッと光った部分がある。先ほども申しましたように、光った部分というのは、表面反射成分なので、光源の色と同じ色をしています。それに対して内部反射成分は、マグカップならマグカップに特有の色、この場合ですと赤い色をしているということがわかっています。

色自体は変化する要素がございませんので、周辺部分では暗い赤になり、少し中央部へいくと少し明るい赤になり、中央部分へいくともっと明るい赤になりというふうな明るさの変化はございますが、それらはすべて同じ色ベクトル、例えばこの場合ですと、赤というベクトルにのってます。それから、表面反射の強い部分へくると、明るい赤の上に表面反射成分の色すなわち光源の色が乗ります。したがって、これらのヒストグラムをとると、RGB スペース上に T 字が出てくるということ Shafer が言い出しました。そのお弟子さんの Klinker は、こういった T 字が出るなら、T 字を RGB スペースで取り出し、T 字の折点で T 字を切つて、T 字の上の部分だけとか、T 字の下の部分だけといったような絵をつくれれば、内部反射成分だけの絵とか、表面反射成分だけの絵というもの、1 枚のカラー画像から出てくるのではなからうかということ言い出しました。実際にやってみたら、図 16 のような結果が出てきた。

(スライド) (図 16)

左側が 1 枚の画像です。右側が分離結果です。上が内部反射、下が表面反射のみの画像です。

ただ、この方法ではまだ各々の部分がどれぐらい光るか

色空間

Klinker/Shafer/Kanade 88

◆ Pixel color vectors are $aS + bB$

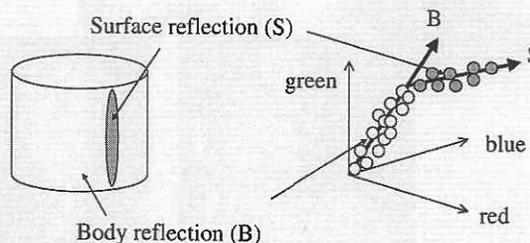


図 15

ということがわからない。そこでわれわれのグループでは、図 17 に示すようなシステムを考えました。

(スライド) (図 17)

物体とテレビカメラは固定しておいて、光源の方向を変えていきます。あるいは上空から物体をながめて、日の出頃の画像、10 時頃画像、12 時頃の画像、3 時頃の画像、日没頃の画像というふうに考えてもらっても結構です。これでこういった画像シークエンスが得られる。このタイムシークエンスを RGB 別に重ねあわせてゆきます。

このセットアップでの利点は、撮像中において、テレビカメラの位置と物体の位置は変化しておりません。例えば、画像列の 100 丁目 100 番地の画像をずっとタイムシークエンス上でプロットしますと、常に物体の同じ位置の色変化をサンプリングしたことになります。図 18 が明るさの変化のプロットです。

(スライド) (図 18)

これは RGB と光源の方向によって張られる四次元空間のカーブになっています。この四次元カーブを先ほどの三次元空間にプロットしますと、理論的には T 字があらわ

れるはずですが。したがって、この四次元空間において、内部反射成分ベクトルと光源方向ベクトルによって張られる超平面を定義し、その超平面に乗るカーブの部分だけを取り出します。するとこの超平面上で内部反射成分が光源の方向に応じて、どういうふうに変化していったかを示すグラフが得られます。同じような操作を表面反射色ベクトルと光源方向ベクトルを用いて行うことで表面反射成分が、光源方向に応じてどういうふうに変化していったかを示すグラフが得られます。したがって、これを見れば、特定のピクセルで、どの範囲で表面反射が見え、その強さというのは物体の内部反射成分とどういうふうな相対的な強さにあるかというパラメータが物体の各々のところで取り出せることとなります。したがって、このパラメータを物体の各点で蓄えておくことで、新しい光源下における画像が生成できるということになります。ビデオが生成された画像を示します。

(ビデオ)

これは先ほどから用いているマグカップです。これに対して先ほど言いましたような画像列を得ます。これから、各々の位置における反射パラメータを抽出することによって、新しい光源下でこの物体がどのように見えるかという映像が生成できます。

(ビデオ終わり)

このビデオを見せると、似てるようですが、どれぐらい似ているのかという意地悪というか正しい質問をされる方がよくあります。そこで図 19 のような比較を行いました。

(スライド) (図 19)

上側が入力の画像です。それに対して下側は、入力画像からパラメータを抽出して、そのパラメータに基づいて生成した画像です。どうしても多方向の画像をマージングしていますので、若干焦点がぼやけています。それから、少し表面反射成分が強く生成されているという欠点もございま

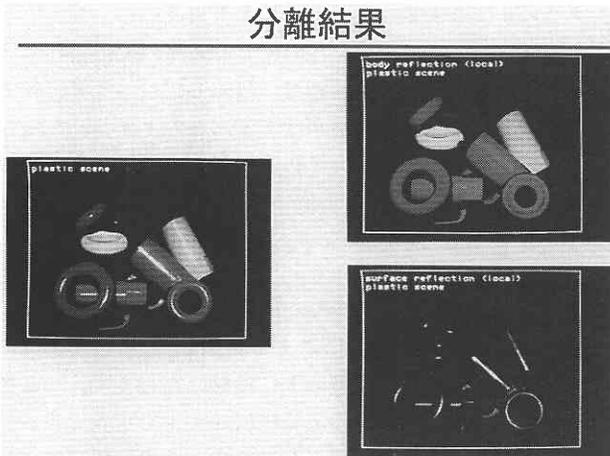


図 16

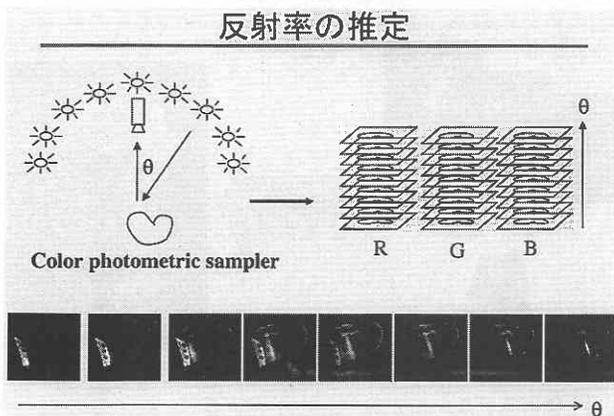


図 17

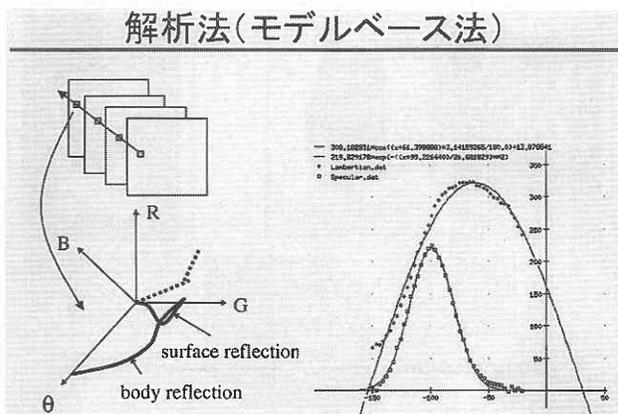


図 18

す。
 先のビデオのような映像はよくグラフィックスであるわけですが、たいいていのグラフィックスの映像は、プログラマーの方がマニュアル的に与えた画像なわけです。われわれの方法は、実際の物体を眺めて、パラメータが自動的に生成できるという点に大きなちがいがあります。

この方法の問題点は、内部反射成分と表面反射成分が別々の色をしているとか、あるいは内部反射成分が \cos のカーブに乗るとか、表面反射成分がエクスポネンシャルなカーブに乗るといふような解析的な反射モデルを使っています。果たして世の中、解析的なモデルに従う物体がどれくらいあるかということをおさえないことには、この手法が世の中でどれくらいのものにアプライできるかということがわからないわけです。

あるカラーをやっている研究者の方にお尋ねしたところ、世の中、60~70%のものがこういった解析的なモデルに従う。残りの40%なり30%のものは、そういうモデルに残念ながら従わない。それに従わない代表的な物体といつか表面というのは、布とか紙です。したがって布製品

とか紙というものをモデル化するのはどうしたらいいのかというのが次の話になります。

これを、例えばマイクロソフトにいて話すと、そんなものはイメージベースレンダリングを使用したらという意見が出ます。イメージベースレンダリングとは、いろんな方向から眺めた2次元の画像を、データベース化しておきます。動画が必要ならそれを順に表示してます。ウォークスルーなら全ての画像をモザイク手法によりつなぎ合わせ、一部分を順に見せてゆくことで仮想空間中にいるような感じができます。これをイメージベースレンダリングと呼んでおります。この方法は画像を表示するだけならいいわけです。しかし、後ほどご説明するようなこういった画像と実シーンとをマージングするような複合現実感システムのアプリケーションにはこの方法では問題が多く、適さないことがわかりました。

(スライド) (図20)

そこで、われわれのグループでは、図20に示しますような固有テクスチャ法という手法を開発いたしました。先ほどのイメージベースレンダリングの問題点は、幾何モデルを持っていないというところに起因しました。そこで幾何モデルとカラーイメージを用意します。

このカラーイメージを、この幾何モデルの上に張りつけていきます。張りつけておいて、幾何モデルの上で定義できる座標系に応じて圧縮をかけます。この圧縮された情報を各々の点で蓄積しておいて必要に応じて画像を生成するという手法です。

(スライド) (図21)

もう少し詳しく述べますと、まず入力画像と幾何モデルがあります。各々の入力カラー画像を幾何モデルの上に張りつけます。あるいは逆に考えて、図21に示したようにこの幾何モデルを入力画像の上に投影いたします。ここに現れますような入力画像の上に幾何モデルで定義できる三角パッチが重ね合わせられるわけです。この三角パッチを

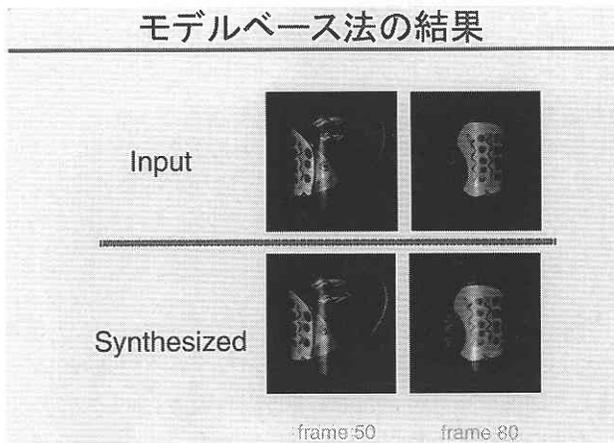


図19

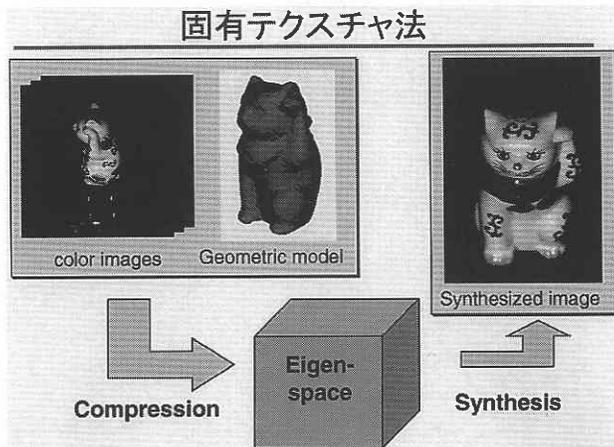


図20

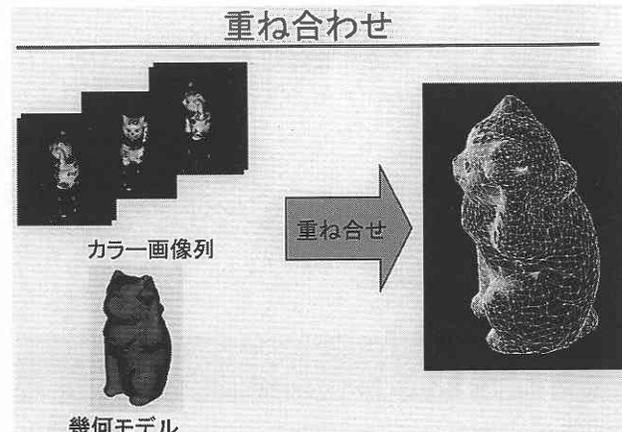


図21

用いて物体が回転していくときに、その各々の三角パッチがどういうふうに変化していきかということがわかります。

(図 22)

図 22 に示しますように、各々の位置で同一の三角パッチがどういうふうに変化していったかという画像シーケンスが得られます。図では左上が 0 度のときの三角パッチの色分布、以下 1 度のときの三角パッチの色分布です。2 度のときの三角パッチ……、359 度のときの三角パッチの色分布ということになります。

確かにこのシーケンス上では、色変化が発生しています。しかしながら色分布は常に同一の三角パッチからきてますから、もとの内部反射成分は変化していません。光源の変化による色変化です。従って一般の画像シーケンスに比較して非常に相関が高いこととなります。非常に相関が高いということは、逆に言えば、これを非常に高い率で圧縮することができます。

(スライド) (図 23)

数学的にいえば、図 23 に示しますように各々のセルを一次元ベクトルに展開します。1 度、2 度、3 度、4 度、5 度…… 360 度とあって、列はこの場合 360 あります。三角

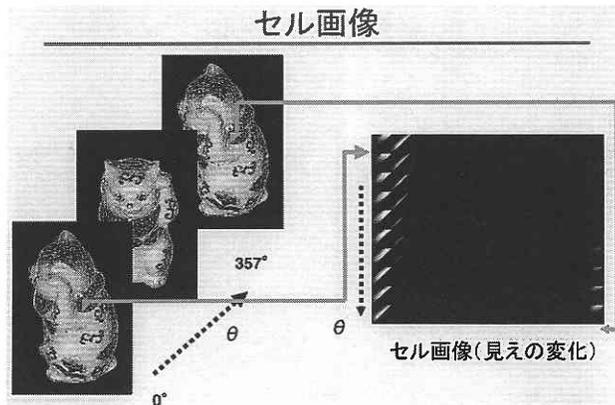


図 22

固有空間法による圧縮

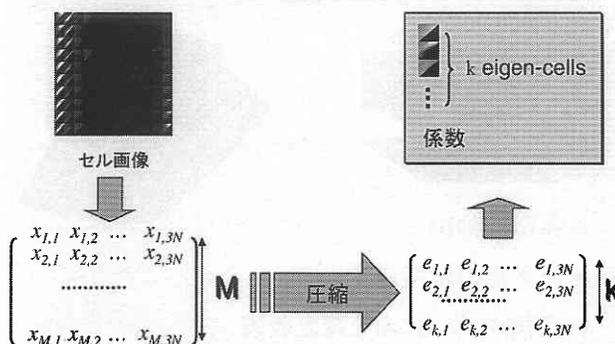


図 23

パッチ内で 1, 2, 3, 4, 5, 6……というふうにして、この場合だと 40 ぐらいの画像があるので 40 の行で得られます。360 × 40 のマトリックスが見えのマトリックスとして定義できます。この中から、固有空間法まで重要な、固有ベクトルを取り出し、これを、例えば 3 次元、3 × 40 とか 8 次元 8 × 40 の程度のマトリックスにして蓄えておくだけで元の画像が再生可能になります。

(スライド) (図 24)

図 24 が 3 次元の結果です。もともと 360 枚あったのが、そのうち 360 枚から 3 枚だけ取り出して、その 3 枚に基づいて元の 360 枚を生成したのが次のビデオでございます。

(ビデオ)

ある意味においては錬金術をやっているわけです。もとの画像を 3 枚だけにして、その 3 枚から元の 360 をつくった訳です。

(ビデオ終わり)

理論的には、実は物体が乱反射物体であれば 3 枚だけでいいということがわかっております。ところが当然この物体は乱反射物体ではありません。スペキュラーの領域において少しぼやけることがわかります。もう少しビジョンがおわかりの方に対しては、照度差ステレオと呼ばれる手法です。その理論に従えば、同一の物体を違う 3 つの光源下で撮った画像 3 枚があれば、その 3 枚の画像から物体各部での面の傾きが計算できます。面の傾きが計算できれば、任意の画像が生成できるというのが実は 3 枚の意味です。3 枚ですと乱反射しないところでは具合が悪いということで、もともと 360 枚あったのだから、3 枚なんてケチなことを言わずに 8 枚ぐらいにしようではないかというのでやったのが次の図 25 です。

(図 25)

(ビデオ)

もともと 360 枚あったのを 8 枚だけ持っておいて、その 8 枚だけから元の 360 枚を再生してみるとこういうふうな

結果 (3 次元)

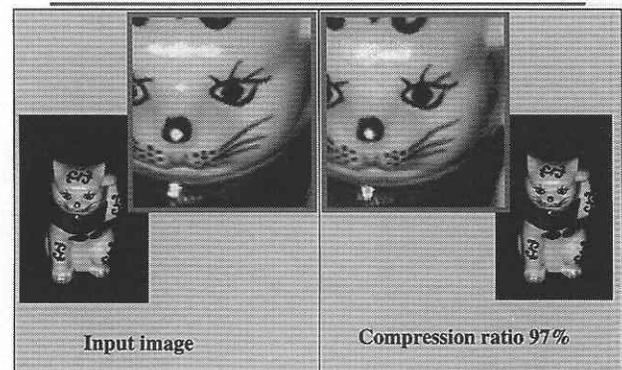


図 24

画像列になります。確かに額の付近の反射もきちっと生成できてます。

(ビデオ終わり)

今までお話してきた手法で任意の物体が与えられたときに、その見えのモデルを生成することができたわけです。

(スライド) (図 26)

ある物体を与えられたら、その物体の仮想物体モデルをつくることのできるようになったわけです。これからお話しするのは、この仮想物体と現実空間とをマージングすることによって、複合現実感画像を生成する手法についてです。

この場合に三つほどの整合性を考える必要がございます。一つは、物体がきちっとテーブルの上に座っているという幾何学的整合性。2番目の整合性としては、生成された物体が周りと同じような光源環境下の画像になっているという光源整合性。それから、もしこの物体が運動すると、その運動が外界の時間と一致しているという時間的整合性です。ここでは特に2番目の明るさの整合性について考えます。

結果 (8 次元)

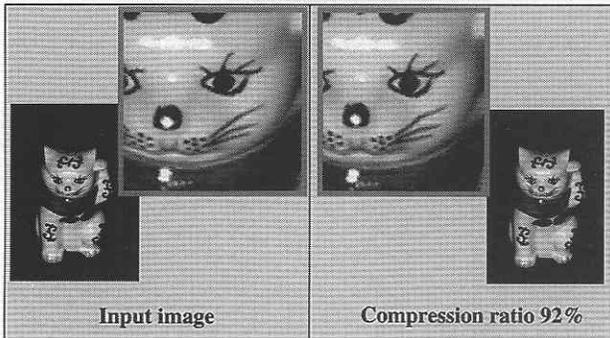


図 25

複合現実感へ

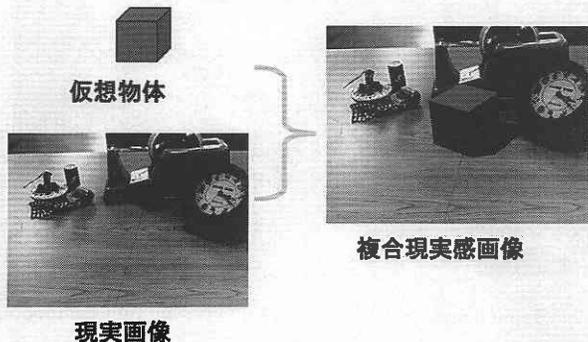


図 26

(スライド) (図 27)

図 27 をご覧下さい。この二つの物体は、幾何学的整合性に関しては同一条件です。すなわちこの2つの物体は同じ位置に生成されています。

しかしながら、なぜか左側の物体は空中に浮いているように見えて、右側の物体はテーブルの上に座っているような感じがいたします。それは右側の物体が周りと同じように影があり、一方左側の物体には影がない。すなわち光学的整合性がとれていない。幾何学的整合性というのは、人間の視覚にとって非常に重要な要素であることがわかりましたので、光学的整合性をとることを考えてみました。

(スライド) (図 28)

最初にやりましたのは、光学的整合性をとるために、図 28 に示しますように光源の環境を測定しました。テレビカメラに魚眼レンズをつけます。2枚の画像を2カ所の地点でとります。二組の魚眼画像によりステレオを構成して空間内のメッシュ構造をつくります。そのメッシュに応じてどこに光源があって、壁の色は何であって、天井の色は何であるかというふうな光源環境マップをつくります。

(スライド) (図 29)

光学的整合性

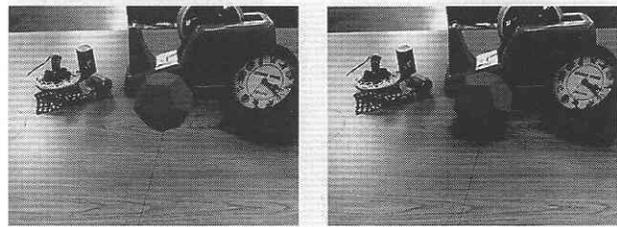
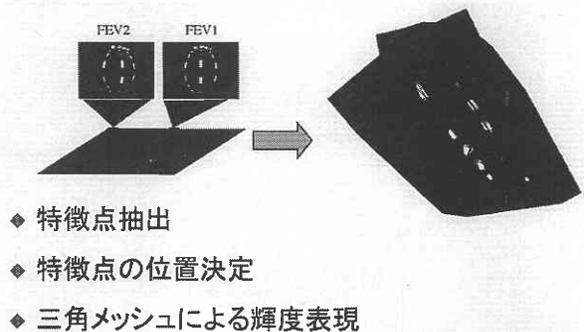


図 27

光源環境の測定



- ◆ 特徴点抽出
- ◆ 特徴点の位置決定
- ◆ 三角メッシュによる輝度表現

図 28

こういった光源環境マップをいったん作ってしまえば、ソフトシャドウの計算は、図29に示しますように例えば仮想物体がないと、この点はすべての方向からエネルギーを受けますから E^1 の光エネルギーを受けます。ここで、 L_i というのが i 番目の光源の強さで、 $\cos \theta_i$ というものがその方向がどれくらい傾いているかというパラメータです。したがってすべての方向、0から N までを全部足してしまえば、仮想物体がない場合のこの点のエネルギー総和が求まります。

それに対して仮想物体が存在すると、ある方向はオクルードされ、ある方向はオクルードされていないというふうな情報を表現するパラメータ S_i というものを導入します。オクルードされている方向では0、オクルードされていない方向では1という値を表現します。0か1かというのは、仮想物体の位置と問題にしている点の位置がわかれば計算出来ます。この式を用いて部分エネルギー E_2 というものが計算できます。 $\frac{E_2}{E_1}$ というものを実画像に投げ掛けることによって図30に示すような画像が生成出来ます。

(図30)

(ビデオ)

これが幾何的整合性のためのキャリブレーションボード、これが2枚の魚眼画像です。これが3階のわれわれの研究室の光源環境マップです。これが生成された仮想物体

ソフトシャドウの計算法

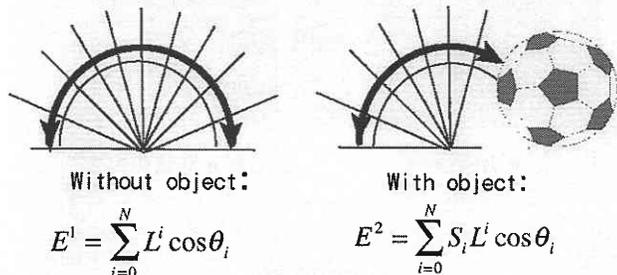


図29

複合現実画像の例

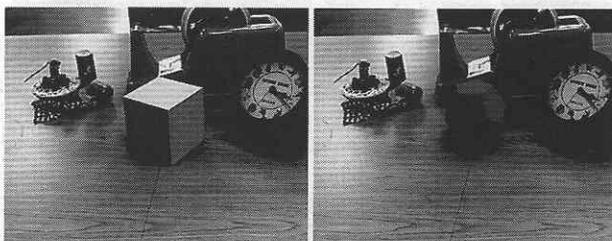


図30

でございます。この実験というのは屋内だけにかかわらず屋外でもできます。これは生研の正面の花壇の前の写真です。これが生研、これは物性研、これが空です。この光源環境マップを使用してこのような映像ができました。

(ビデオ終わり)

この方法は、現場に魚眼レンズを持ち込んで、測定する必要があります。ところが、時々持ち込まれる課題に、昔の映画の中から、例えば寅さんの映画の中から渥美清の画像だけを切り取って、そこを別な俳優さんに置き換えたいという要望があります。

そういった場合に、渥美清のセットアップをつくるというわけにはいきませんので、何とか1枚の画像から光源環境を推定できないか。要するに一枚の画像が与えられると、その画像内における、例えば物体形状がわかった物体があるとして、その周りに存在する影から、何とかこの物体周りの光源環境が推定できないかという問題が発生するわけです。

(スライド) (図31)

結論から先に申しますとこれは可能です。先ほどソフトシャドウを計算した際の方程式を、図31に示しました。この場合は、物体の形状は既知としています。それから、各点の明るさがわかるという条件です。そうした条件下で先ほどの方程式が成り立ちます。すなわち点Pの明るさというのは、特定の方向がオクルードされているかオクルードされていないかというパラメータ S_i と、この場合はオクルードされているかされていないかというのは物体の形状がわかって、この点の位置がわかればわかるパラメータです。これと光源の強さ L_i 、これは未知数です。これから求めようとしているパラメータです。その方向が、水平方向について、どれくらい傾いているかというパラメータ $\cos \theta_i$ 、これは、この光源方向が定義できればわかるパラメータです。すなわち既知のパラメータに、未知の変数をかけて、それをすべての方向に総和するとこの明るさ P_m になるという方程式が成立します。(図32) したがってこの方

光源方程式

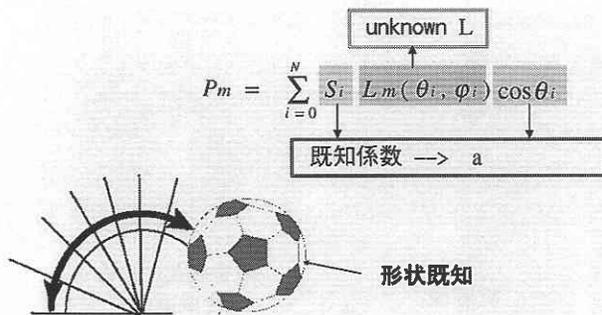


図31

式を画像の各々の点でつくっていけば、 L_1 から L_n が未知数で、 a_{11} から a_{mn} というのが先ほど言いました既知のパラメータで、 P_1 から P_m というのは各々を測定値とする連立方程式が成り立ちます。この連立方程式を解くことによって L_1 から L_n までの値がわかります。

(スライド) (図 32) (図 33)

図 33 の左の画像に用いて、この画像上の光源分布を計算しました。その光源分布に基づいてシャドウを生成した結果が図 33 の右の画像です。

(スライド) (図 34)

これを実際のシーンに適用したのが図 34 の左の絵です。現在生研は駒場第二キャンパスに新しい建物を造ってまして、これが入口の写真です。この中で先ほどの条件を満たすためには、この物体の三次元形状を知る必要があります。最近写真から簡単なものであれば、三次元形状を測定するようなソフトウェアがございまして、それを用いて三次元形状を測定したのが図 34 の右の絵です。

(スライド) (図 35)

この三次元形状と、この物体の周りに存在する影から、光源環境を推定して、それに基づいて仮想物体、この場合

はギリシャの彫刻を駒場キャンパス入口に置いたらこう見えるというふうな合成画像をつくったのが図 35 です。

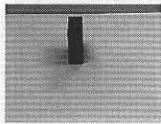
今後は、これまで開発した手法を用いて文化財保存のプロジェクトを、立ち上げたいと思っております。文化財の幾何形状を精密に測定する。光学といいますか、錆のぐあいはどうだとか、本当の色はどうだということを測定する。あるいは本日鎌倉の大仏像を撮ったときに曇っていたから色はこういうふうに見えたけれども、本来の色はこうであるとか、あるいは現在の錆はこうであるから、たぶん、造られた当初はこういうふうに見えたということが実際にデジタル的に表現できればおもしろいのではないかと考えております。

日本の文化財というのは、鎌倉の大仏は青銅でございまして、大部分は木材あるいは紙でできています。従っていつ何時台風、雷などでなくなってしまうかもしれない。そういう文化財を、こういう手法を用いてデジタル化しておいて、永遠に保存していくというのも特に日本国民にとっては重要な課題ではないかと考えています。

本日お話しした研究は多くの方々協力のもとになりました。幾何モデルに関しては CMU 時代の学生さん、

光源連立方程式

$$\begin{aligned} a_{11}L_1 + a_{12}L_2 + a_{13}L_3 + \dots + a_{1n}L_n &= P_1 \\ a_{21}L_1 + a_{22}L_2 + a_{23}L_3 + \dots + a_{2n}L_n &= P_2 \\ a_{31}L_1 + a_{32}L_2 + a_{33}L_3 + \dots + a_{3n}L_n &= P_3 \\ &\dots \\ a_{m1}L_1 + a_{m2}L_2 + a_{m3}L_3 + \dots + a_{mn}L_n &= P_m \end{aligned}$$

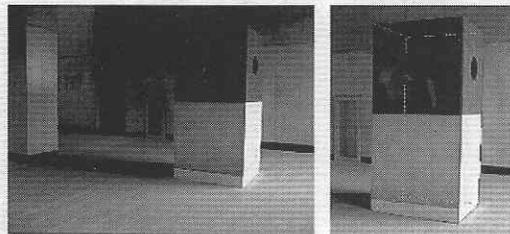


$$P_m = \sum_{i=0}^N S_i L_m(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i$$

a

図 32

実空間での応用(駒場II)

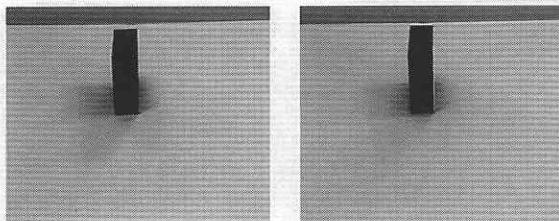


入力画像

3次元形状の推定

図 34

実画像と合成画像の比較

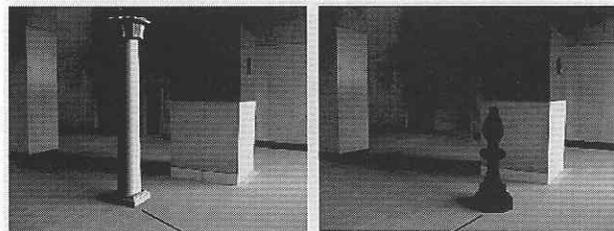


実画像

推定結果による
合成画像

図 33

合成画像



仮想物体

図 35

たとえばマイクロソフトにいる Shum 君, サイラにいる Wheeler 君, INRIA にいる Delingette 君や CMV の Hebert 君, 光学モデルに関しては現在生研の講師をしている旧 CMV 時代の学生だった佐藤洋一先生とか, 東大の現在の学生である西野恒君, 環境モデルに関しては佐藤いまりさん, 文化財保存に対しては, 西川拓君, 川崎洋君らがいろいろ手伝ってくれました。

まとめといたしまして, 本日, 「サイバースペースの自動生成」というタイトルで幾何モデルの生成法, 光学モデルの生成法, 実空間と仮想空間の融合のための光源環境の測定ということをお話ししました。なお参考文献としまして [1] ~ [4] までが幾何モデルに関するもので, [1] は廊下のシーンのビデオに関するもの [2] は曲面の場合の関係復元, [3] は統合法です。[4] は偏光を, 使用した透明物体形状推定法です。[5] ~ [8] が光学モデルに関するもので [5] はモデルベース法, [6] は固有テクスチロ法です。[7] は光源分布の直接測定法で [8] は間接法です。

蛇足ですが今お配りしましたフライヤーには, われわれの研究室の活動を示しております。これ以外にも物体認識プログラムの自動生成とか, ロボットプログラムの自動生成ということもやっております。特にロボットプログラムの自動生成というのは, 人間の行動を連続的に観察して, それと同じことをロボットに再現させるというプロジェクトでございますが, これも先ほど申しましたように, 文化保存という面から, 例えば人間国宝の方の陶芸の技というものをテレビカメラから撮像して, それでロボットが陶芸師の真似ができる。さらにロボットの真似を見て, また人間が実行できるというふうにしていけば, 例えば人間国宝の方の技も永久保存できるのではないかと, 夢は大きく考えております。

ご静聴ありがとうございました。

参 考 文 献

- 1) H. Y. Shum, K. Ikeuchi, and R. Reddy (1995): "Principal Component Analysis with Missing Data and Its Application to Polyhedral Object Modeling," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.17, No.9, pp.854-867, September.
- 2) M. Hebert, K. Ikeuchi, and H. Delingette (1995): "A Spherical Representation for Recognition of Free-Form Surfaces," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.17, No.7, pp.681-690, July.
- 3) M. D. Wheeler, Y. Sato, K. Ikeuchi (1998): "Consensus surfaces for modeling 3D objects from multiple range images", Proc. Six Intern. Conference on Computer Vision, Bombay, India, pp.917-924, January.
- 4) M. Saito, Y. Sato, K. Ikeuchi, and H. Kashiwagi (1999) "Measurement of surface orientations of transparent objects using polarization in highlight," Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'99), June.
- 5) Y. Sato, M. D. Wheeler, and K. Ikeuchi (1997): "Object shape and reflectance modeling from observation," Computer Graphics Proceedings, SIGGRAPH 97, pp.379-387, Los Angeles, CA, August.
- 6) K. Nishino, Y. Sato, K. Ikeuchi (1999): "Eigen-texture rendering," Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'99), June.
- 7) I. Sato, Y. Sato, K. Ikeuchi (1999): "Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene," IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, 5 (1).
- 8) I. Sato, Y. Sato, K. Ikeuchi (1999): "Illumination distribution from brightness in shadows," Proc. Seventh Intern. Conference on Computer Vision, Greece, September.