

# 論文の内容の要旨

論文題目 Adaptive Light Projection and Highlight Analysis Method  
for Measuring Three-Dimensional Scenes  
( 適応的光投影法による三次元シーン計測 )

氏 名 日置 尋久

最近、仮想現実空間ブラウザや CAD システムあるいはロボットビジョン、モーションキャプチャなど三次元データを直接扱うアプリケーションが増えてきている。しかし CAD など大きなシーンの三次元データを作成することは非常に複雑である。またロボットビジョン、モーションキャプチャなどでは、変化のあるシーンから短時間に三次元データを得なければならない。これらのアプリケーションにおいては、三次元シーンをカメラで撮影し、得られた二次元画像から三次元データを得る計測方法が不可欠である。三次元計測の手法においては、計測対象の形状や色の特徴あるいは動きや変形に影響されない、ノイズに対して頑強である、短時間の測定で多くのデータが得られるなどの条件が求められる。

三次元形状復元の代表的方法の一つに、パターン光投影法がある。これは、ある方向からプロジェクタでパターン光をシーンに投影し、それを別の方向からカメラで撮影し、観測されたパターン光上の点の三次元座標を求める能動的な方法である。カメラとパターンプロジェクタの座標系の間関係が既知で、画像で観測されたパターン光上の各点がそれぞれプロジェクタのどこから投影されたかが同定できれば、三角測量の原理から、それらの点に対応する三次元座標が計算できる。投影されたパターン光とそれ以外の部分とのコントラストが十分であれば、対象のテクスチャの有無に関わらず画像からパターン光を抽出する

ことは容易である。またパターン光投影法では、パターン光が観測された位置さえ分かればよいので、輝度値のノイズへの耐性も強い。しかしこれまでのパターン光投影法は、ある決まったパターン光のみしか利用せず、また得られた画像のそれぞれを独立に扱っているという意味で、一つの固定されたシーンを計測する方法であった。

そこで一般の変化のあるシーンをパターン光投影法の枠組みで扱うことを目的として、本研究では、ある画像でのパターン光の各要素の同定結果を利用して、次の画像でより多くのパターン光の要素を同定できるようにパターン光を適応的に変更する**適応的光投影法**を提案する。

本研究では、図1のようなシステムを用いた。垂直にならんだ CCD ビデオカメラと液晶ビデオプロジェクタがそれぞれホストマシンに接続されている。カメラとプロジェクタのそれぞれの座標系の間関係は予めキャリブレーションによって求められる。このシステムでは任意のパターン光を生成できるので、原理的には、プロジェクタを一台使うようなあらゆる種類のパターン光投影法をプログラマ的にシミュレートすることができる。またこのシステムは全体として可動である。本研究では、このシステム上に SPIKE という計測アルゴリズムを実現し、実際の三次元シーンの計測実験を行い、その有効性を確かめた。

SPIKE アルゴリズムでは、パターン光を構成する主な要素として stripe と呼ばれる水平な長い線分の集合を用いる。またこれらを同定する鍵として、プロジェクタスクリーン上のエピポーラ線の部分集合と stripe との各交点に spike と呼ばれる短い線分を配置する。spike を配置するエピポーラ線を probe 線と呼ぶ。また probe 線に対応する画像上のエピポーラ線を probe-echo 線と呼ぶ。このような構成から、画像において、ある probe 線上の spike に対応する像を探すには、シーンの構造に関わらず、対応する probe-echo 線のみを探せばよいことが分かる。ある spike と交差する stripe は一つしかないため、もし spike の像が同定され、それに stripe の像が交差していたとすると、同時にその stripe の像も同定できることになる。これが SPIKE 計測アルゴリズムの基本的なアイデアである。なお、パターン光の要素は白(点灯)か黒(消灯)の二値のみをとるようになっている。stripe は全て常に白にしておく。spike については、状況により白黒を適応的に決める。

SPIKE アルゴリズムでは、上記のエピポーラ線の拘束条件とあわせて、可視空間という概念を用いる。これは、カメラとプロジェクタの焦点深度から決まる計測可能な三次元空間、つまりカメラとプロジェクタの両方にはっきりと捉えられる空間である。この可視空間を適切に設定することにより、各 stripe および spike について、それらが出現する画像の領域をある程度限定することができる。たとえば1つの stripe は三次元空間では平面をなすものと考えられるが、この平面の可視空間内の部分の画像への射影が stripe の画像での出現領域となる。spike についても同様に probe-echo 線上での出現範囲を求めることができる。

白 spike(点灯する spike) の配置は、この可視空間から得られる拘束条件を利用して決定される。一般に、一本の probe 線について任意個の白 spike を配置したとすると、spike と画像内の spike 像との対応関係は一意には定まらない。一本の probe 線上にできるだけ多くの白 spike を同定が確実にできるように配置するには、可視空間によって決まる白 spike の出現範囲がお互いに重ならないようにすればよい。計測開始時の白 spike の配置は、この拘束条件と各 stripe の画像への出現確率とを考慮して決定される。二枚目以降の画像を取込む際には、その前のパターンの同定結果を用いて白 spike の再配置を行う。

パターン光をシーンに投影して、その反射光を撮影して画像を得たら、まず画像からパターン光の像の部分抽出する。そのために、まずノイズ除去処理と局所的な閾値処理により周囲より明るい点を全て取り出し、さらにそれらをラベリング処理によって、連結成分ごとにまとめる。区分的に滑らかな表面をもつ物体を対象とする場合、通常は各連結成分には stripe の像は一つしか含まれないものと期待されるが、

異なる複数の stripe の像が含まれると分かった場合には、その連結成分は分割されるか、うまく分割できない場合には除去される。以下各連結成分は、一つの stripe の像か、それに一つ以上の spike の像が交差したものであるとする。

stripe の像は、基本的には、それに最低一つの spike の像が交差している場合に同定可能である。システムの構成および stripe と spike の構成から、エピソード線の方向に関して、それらの像の幅は大きく異なると期待できる。このような幅の分布を調べ、判別分析法によって決まるある閾値以上の幅をもち、probe-echo 線に十分に近く、かつ周囲の点と較べて十分に幅が広い部分を spike の像として取り出す。またこのとき、各 probe-echo 線上の spike の像は、対応する probe 線上の spike の数以下であることも用いる。

取り出された spike の像に対応する白 spike は、その配置に対する拘束条件から一意に同定できる。またそれらの spike の像と交差している stripe の像も同時に同定できる。なお spike の像と交差していない stripe の像についても、他の stripe の像の同定結果から、対応する stripe を絞り込むことで同定ができる可能性がある。同定された stripe の像については、それと交差する各エピソード線方向の断面に関する中央点を使って、それらに対応する三次元の点の座標を計算する。これらは、中央点に対応する三次元空間での直線と stripe に対応する三次元空間の平面の交点として簡単に得られる。

同定のプロセスが終了したら、その結果を用いて、次の画像でできるだけ多くの stripe が同定できるように白 spike を再配置する。再配置にあたっては、シーンの変化が滑らかで次の画像に置いても今回の画像と似たようなパターン光の像が現れることを仮定する。この仮定は、もちろんシーンが急激に変化したときには無効であるが、そのような変化は基本的に予想不能であり、また仮にそのような変化が起った場合でも、このアルゴリズムでは誤った同定を行うことはない。ただし、白 spike の再配置が適切ではなく、同定できる stripe 数は減る可能性はある。しかしシーンの変化が緩やかになれば再配置アルゴリズムは有効に働き、再び多くの stripe が同定できるようになる。

白 spike の再配置は、各 spike に付与されるスコアに基づいて行われる。同定された stripe の像に対応する spike、あるいは同定できていない stripe の像に対応する可能性のある spike には、stripe の像の大きさも考慮して、正のスコアが与えられる。また、白 spike に関する拘束条件により、そのような spike とは同時には白にできない(同時に点灯できない)spike には負のスコアを与える。このようにして決められたスコアの高い spike から優先的に白 spike として配置していくことにより、より多くの stripe の像を同定できることが期待できる。

図 2 に実験例を示す。SPIKE アルゴリズムにより、図 2(a) の物体を台の上で回転させながら計測を行った。全部で 10 枚の画像を撮影した。図 2(b) はそのうちの一枚を示している。図 2(c) は、各画像において同定された stripe の像の点および同定されなかった stripe の像の点の数をグラフにしたものである。図 2(d) は、比較のため、パターン光の更新を行わずに計測を行ったときの結果を同様にグラフで示している。この場合平均しておよそ 22% の点が同定されないままだったが、パターン光を適応的に更新した場合には、同定されていない点は急速に減少し、画像 9, 10 において、小さな stripe の像が一つずつ同定されなかったものの、画像 3~画像 8 においては全ての stripe の像の点が同定された。この実験結果は、パターン光を適応的に変更することの有効性を示しているものといえる。

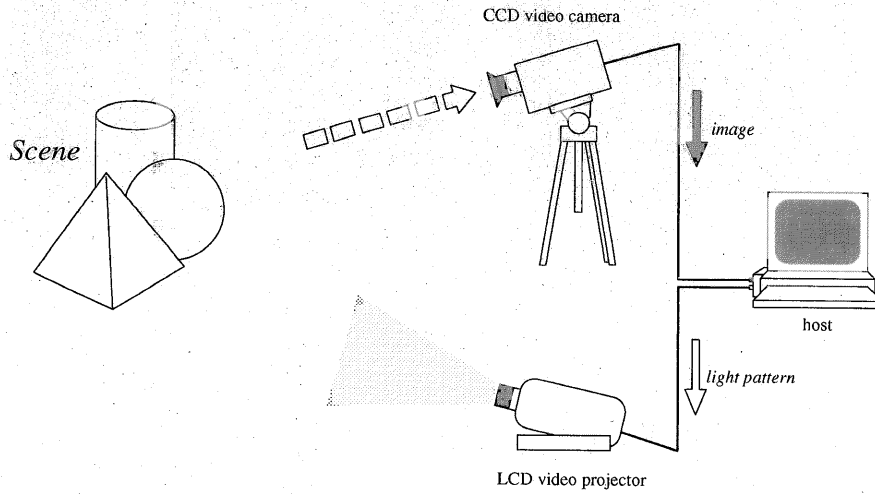
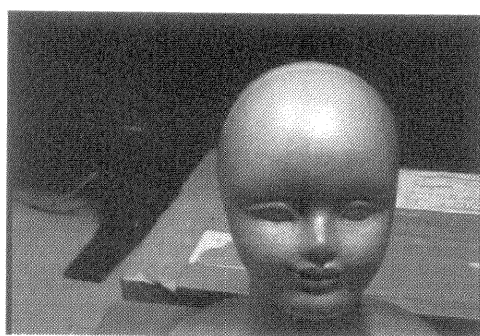
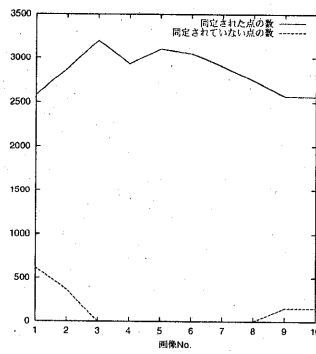


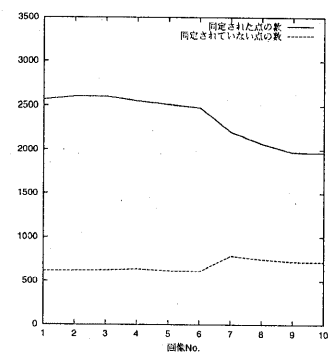
図 1: システム概念図



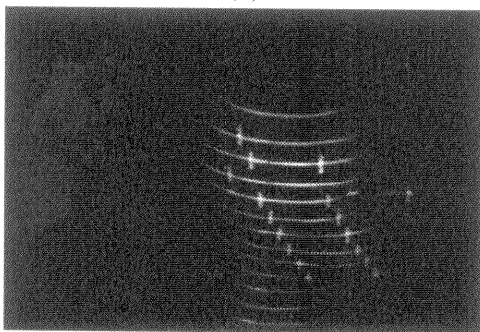
(a)



(c)



(d)



(b)

- (a) 計測した対象
- (b) 画像例
- (c) 同定された/同定されていない stripe の像の点の数 (パターン光を適応的に更新した場合)
- (d) 同定された/同定されていない stripe の像の点の数 (パターン光を更新しない場合)

図 2: 実験例