

特異空間における視覚装置の研究開発 (第4報)

形状情報の抽出に関する研究

Research and Development of an Imaging System in a Fire Environment (Series 4)

Study of Determining a 3D Shape

加藤 俊之*

井越 昌紀**

概 要

煙環境下で消防活動に必要な視覚情報を得るために、赤外線レーザーを利用した視覚装置の研究開発を行っている。本報では、赤外線視覚装置により観測した複数枚の濃淡画像（2次元情報）から、形状（3次元情報）を再構成する手法について報告する。形状を求めるために照度差ステレオ法を利用し、これを赤外線画像に適応させるために、物体表面での反射特性の決定法と光源の配置計画について提案する。また、ノイズの影響を受けた画像から形状を再構成するための方法について検討を行った。そして、これらの手法を実現する実験的なシステムを構築し、実画像を対象にその有効性を示した。

本研究で適用した手法は、以下のものである。

- 1 非線型回帰を利用した物体表面の反射特性パラメータの算出方法
- 2 光源の配置計画
- 3 照度差ステレオ法による物体面の方向ベクトルの算出
- 4 ノイズによる誤差を考慮した形状復元のための積分手法

To obtain visual information that is used to perform firefighting in a smoke-filled environment, we have researched and developed an imaging system using infrared laser. In this paper we describe the result of the study we conducted in determining 3D shape from 2D shading Images observed by an infrared camera. To retrieve a shape of an object, we used a photometric stereo method. In order to adapt this method to the infrared images, we employed the reflectance characteristics determining method, and the planning of light source positioning. Further, we investigated the method of reconstructing the object's shape from images distorted by the noises. These methods were implemented, using experimental devices. Experiments with photographic images showed good results.

The methods we adopted are as follows.

- 1 Calculation method of reflectance characteristics parameters using non-linear regression.
- 2 Planning of light-source positioning.
- 3 Determining surface orientation of an object using the photometric stereo method.
- 4 Integral calculus to reconstruct an object's shape from images distorted by noises.

1 はじめに

様々な消防活動現場の中でも、煙の充満した建物内部は、危険要因、障害物に関する情報を収集することが最も困難な環境のひとつである。この環境における消防活

動で視覚情報を獲得することは、飛躍的に情報量が増大することとなり、活動の効率化、危険の低減を図ることが可能になる。これまで、この対策として、中性帯の活用、排煙活動のほか、熱画像カメラによる確認などの方法が行われている。前二者は、煙の状態や量による制約が大きいことが知られており、後者の方法は、周囲の環境温度に対して大きな差がある物体（高温の物体など）

* 第三研究室 ** 東京都立大学

については、確認することが可能であるが、温度の近いものの識別が難しくなる。例えば、火源や人などの熱を発生しているものについては、確認が容易であるが、倒壊した収容物、散乱した障害物を視覚化することは、困難である。そこで、赤外線レーザー等を利用したアクティブ型の視覚装置が有効となる。

アクティブ型であれば、煙環境においても透過性が高い赤外線を物体に照射し、その反射光を捉えることで、温度差の小さなものについても映像化が可能になる。

本研究では、赤外線画像を利用して、物体形状の復元に関する研究結果について報告する。

2 形状の抽出法

物体の形状を知る方法としては、タイムフライト法、三角測量法、照度差ステレオ法²⁾、構造化照明法³⁾などがある。これらを分類すると、タイムフライト法が直接的に距離を測定し、この距離情報から形状を復元するのに対し、他の方法が画像の中から各種情報を抽出する間接的手法である。実現の容易さを考慮すると、前者はソフト（計算）上の処理は単純であるが、装置の複雑さが増すことになる。また、後者の手法は、装置は単純であるが、処理が複雑になる。

本研究では、装置の複雑さを避け、処理は複雑であるが、自由度の高い後者の手法群から選択した。また、この中においても、実手順が複雑なもの、計算手順が複雑なものがあり、実手順を簡単にする手法とした。これは、計算手順の複雑さであれば、計算機で解消することができ、機械的要素を減少させることで、先と同様に実際上の複雑さを減少することが可能になる。この様な選択の結果から、照度差ステレオ法を利用することとした。この手法は、位置を変更することのできる照明と、カメラがあれば、形状を復元できるものである。しかし、先に述べたように計算手順は、複雑になるが、これは、計算機によってプログラム処理することで対処する。

(1) 照度差ステレオ法

この手法は、光源位置の異なった複数枚の画像から、画像中の物体の法線を算出するものであり、求めた法線を積分することで形状を復元することができる。

$$I(x, y) = R(\vec{n}, \vec{v}, \vec{s}, \rho)$$

I : 輝度, x, y : 画素位置,
 \vec{n} : 法線ベクトル, \vec{v} : 視線ベクトル,
 \vec{s} : 光源ベクトル, ρ : 反射率

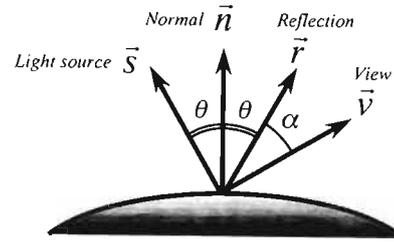


図1 照度差ステレオ法の概念図

(2) 原理

任意の光源で照射された物体の明るさ（輝度 I ）は、光源の方向 (s) 、物体面の法線方向 (n) 、物体を見る方向 (v) と物体面の反射率 (ρ) から決定される。

そのため、光源の方向、物体を見る方向、物体面の反射率が既知であるならば法線の方向を決定できる。

例えば、球体を考えると、光源の位置によって物体の見え方が図2のように変化する。ここで、画面上の任意の画素における明るさに注目する。この点と同一の輝度は物体上で曲線を描く。この曲線は、同一の輝度を示す法線の集合と考えることができる。そこで、光源の方向の異なる3枚の画像から、同一の画素における法線の集合を示す曲線を重ねあわせることで、求めようとする法線を一意に決定することができる。すなわち、1枚の画像では曲線となるが、2枚の画像があれば、2曲線の交点となり2点に絞られる。さらに3枚の画像を重ねあわせることで、3曲線の交差として1点に絞られる。これが注目した画素の法線となる。これを示したものが図3である。



図2 照度差ステレオ法による画像

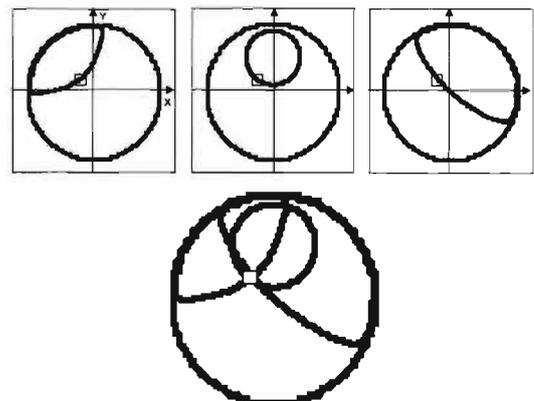


図3 法線画像による法線の決定

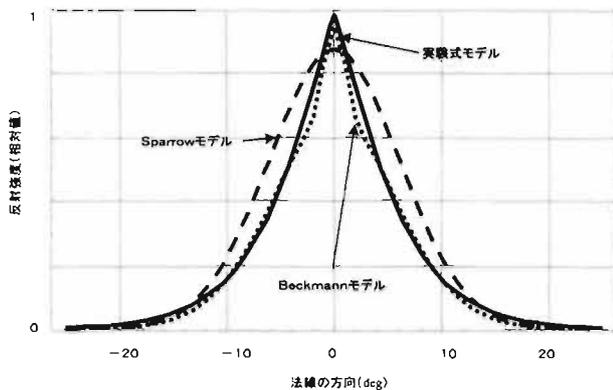


図5 反射モデルの比較

物理光学反射モデルにおいて、Spike成分が現れる条件下で考察すると、Sparrowモデルでは、急峻部が現れない。これは、考慮していないSpike成分の領域であるためである。これに対して、実験式モデルでは、物理光学モデルに沿うように変化している。これは、Specular成分の項で $\text{Exp}(\alpha^m)$ の項をもつことにより急峻な形状をとるようになるためである。すなわち、モデル式の中で $\text{Exp}(\alpha^2)$ 、 $\text{Exp}(\alpha^m)$ といった項の違いがグラフの形状に影響を及ぼしている。

赤外線反射は、可視光と比較して、より急峻に変化することを求められる。そのため、急峻部を表現できる実験式モデルが有効であるといえる。

そこで、実際の反射データを反射モデルの式に適合させ、反射モデル式の係数で物体面の反射を表現することができる。以下では、実験から係数を求め、各種物体の反射特性を同定する。

(3) 反射特性パラメータ（係数）の算出法

先に、幾つかの反射モデルを紹介したが、これらのモデルに実際のデータを適合させることによって、始めて反射特性パラメータを同定することができる。

データをモデルに適合させる方法として、回帰分析がある。²⁾ これは、変数間の関係（相関）を知るためのものであり、ここでは、関係式が存在し、2変数が与えられていることから、2変数の関係式に適合した相関係数を求めればよいことになる。

ア 算出法（回帰曲線の適用法）

今回適用するモデル式は、非線形方程式であり、変数変換によっても線形とならないことから、逐次近似の方法を適用する。そのため、モデル式の偏微分と初期値が必要となる。

イ 原理

モデル式の一般形を

$$Y = f(a, b, c, X_i)$$

とすれば、

回帰関係は以下ようになる。

$$Y_i = f(a, b, c, X_i) + e_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

f の a, b, c に関する偏導関数を f_a, f_b, f_c とすれば、

$$f(a, b, c, X_i) \approx f(a_1, b_1, c_1, X_i) + (a - a_1)f_a + (b - b_1)f_b + (c - c_1)f_c$$

とすることができる。

従つてもとの回帰関係は近似的に以下ようになる。

$$Y_i \approx f(a_1, b_1, c_1, X_i) + (a - a_1)f_a + (b - b_1)f_b + (c - c_1)f_c + e_i$$

$a_1, b_1, c_1 : a, b, c$ の初期値

ここで、

$$Y_{res} \approx Y - f, \quad X_1 = f_a, \quad X_2 = f_b, \quad X_3 = f_c$$

とかけば、

$$Y_{res} \approx (a - a_1)X_1 + (b - b_1)X_2 + (c - c_1)X_3 + e_i$$

となり、 Y の普通の線形回帰となる。

これによって第一近似値を得ることができる。

さらにこれを初期値として同様に第二近似値を計算する。

これを繰り返すことにより $\sum Y_{res}$ の減少と a, b, c の減少が無視しうる程度に小さくなったときの値が求められるべき解となる。

この手法をモデル式に適用するわけであるが、物理光学モデルを適用するためには、変数の数が多く、式自体が複雑で、モデル化の意味がなくなる。そこで、実際には、幾何光学モデルと実験モデルについて適用する。

それぞれのモデルを、

Sparrowモデル

$$I = a \left(\frac{\exp(-b \cdot \alpha^2)}{\cos(\theta)} \right) + c \cdot \cos(\theta)$$

実験モデル

$$I = a \left(\frac{\exp(-b_1 \cdot \alpha^{b_2})}{\cos(\theta)} \right) + c \cdot \cos(\theta)$$

とすることにより、反射モデルを決定するパラメータ(a, b, c)を算出する。

4 反射特性測定実験

(1) 実験目的

物体の反射特性パラメータを算出することを目的として、実験を行った。

物体の反射特性とは、反射面の角度に応じた反射強度の事であるから、特定の物体の反射特性を求めるときには、既知の反射面角度列に対応した反射強度列を求め、両者の相関関係が反射分布特性となる。そこで、既知の反射角度列を生成するための方法を2通り示

し、これを利用した反射強度列の測定法を示す。

(2) 実験方法

ア 方法1

図6に概念図を示す。球、円筒の様な、一定の割合で反射面角度の変化する物体では、測定点を物体上で移動することによって求めることができる。実際には、画像として記録し、画素によって決まる反射角度とその画素の反射強度を測定することになる。

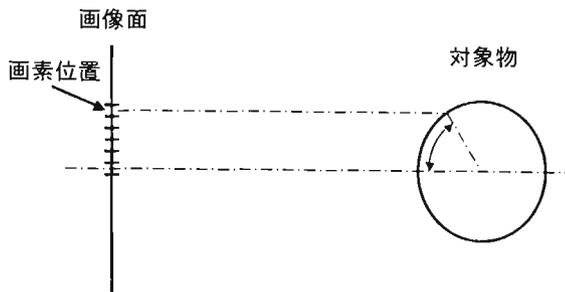


図6 測定方法1の概念図

イ 方法2

図7に概念図を示す。特定すべき物体表面のサンプルが、平面であるときは、平面を随時傾けることによって反射角度列とこれに対応する反射強度列を測定する。

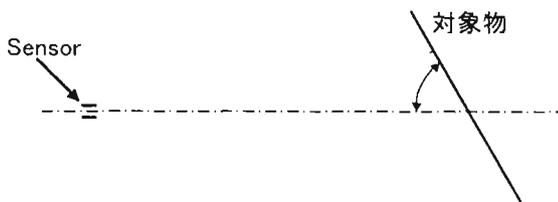


図7 測定方法2の概念図

以上の2つの方法で測定した反射面角度列と、反射強度値列の相関関係を算出し、これを反射特性とする。

相関関係の算出には、回帰分析の手法を取り入れて行う。すでにモデルは、決定されていることから、反射モデル式に上述の変数列を当てはめることで、反射特性パラメータを算出する。すなわち、この反射特性パラメータが、物体を特定する反射モデルとなる。

(3) 実験装置

ア 方法1

方法1では、φ60mmの円筒を1200mm離れた位置から赤外線カメラ(波長:3~5μm, 画素:160×120, 分解能:12bit, 視野角:10×15°)で測定した。位置関係を図8に示す。

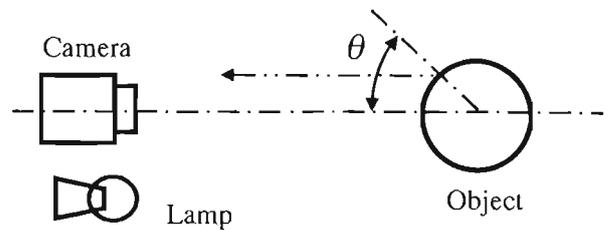


図8 測定方法1の装置配置図

イ 方法2

方法2では、平面板を1500mm離れた位置から、口径50mmのレンズによって集光した光を検出器で電気信号に変換させる。平面板は、回転テーブルの上に設定されており、これを回転させることによって反射面角度を変化させる。記録した強度データは、回転角度に対応させ、このデータ列が反射特性を求めるデータとなる。設定を図9に示す。

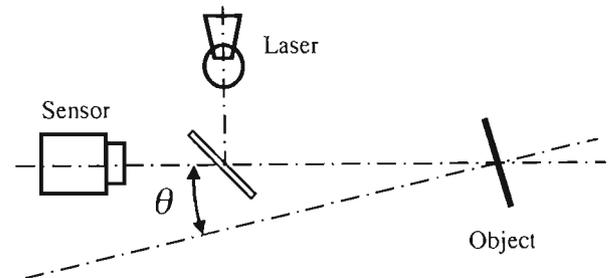


図9 測定方法2の装置配置図

(4) 実験結果(反射特性の測定)

図10に実験結果とそれぞれのモデルに当てはめた場合の反射特性曲線を示す。

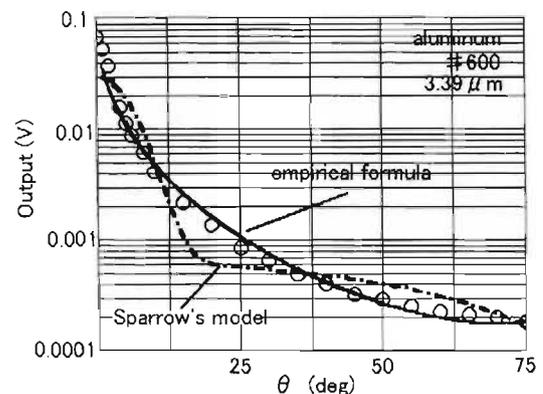


図10 反射強度分布と反射モデル

Sparrowのモデルでは、急峻な部分と変化の鈍い部分を平均化した曲線となっている。これは、Spike成分を表現することができないためである。

これに対して、実験式モデルでは、全体的によく適合している。これは、実験式モデルの係数がSparrowよりも一つ多いことから、形状的な自由度が高く形状

をよく近似することが可能であるためである。さらに、実験式モデルは、Spike成分のない反射条件では、Sparrowモデルと同様となり、広い条件を満たすモデルといえる。

5 画像の取得

形状を復元するためには、画像、光源情報、反射特性に関するデータが必要となる。

(1) 光源の設定要件

画像は、図11のように光源位置によって物体の見える部分が異なる。図中の 1、2、3の領域が、それぞれの光源によって照射される領域であり、それらの領域が重なった部分でのみ法線の情報を得ることが可能になる。ここで、異なる光源位置で共通に照射された部分を有効領域ということとする。そこで、この有効領域が物体全面を覆うように光源位置を設定しなければならない。

(2) 光源の設定手法

初期光源として、一直線上の3点において画像を得る。この時、画像間差分を行い、重なりを調べる。

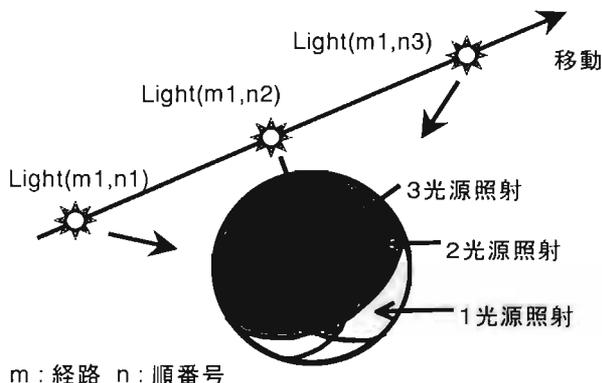


図11 有効領域の範囲

重なりを調べる部分は、照射領域の重心を通るライン上で重なりが2未満であった場合は、間隔を小さくして再度行う。これを重なりが2以上になるまで繰り返す。

次に、初期光源の経路と平行に移動した新たな直線上で同様のことを繰り返し、全体として照射領域全面で重なりが3以上となるまで、平行移動を繰り返す。これによって、全面が照射されたものとなる。以上の単純な概念を図12に示す。

(3) 領域の分割手法

物体領域の分割とラベル付け、面領域の分割とラベ

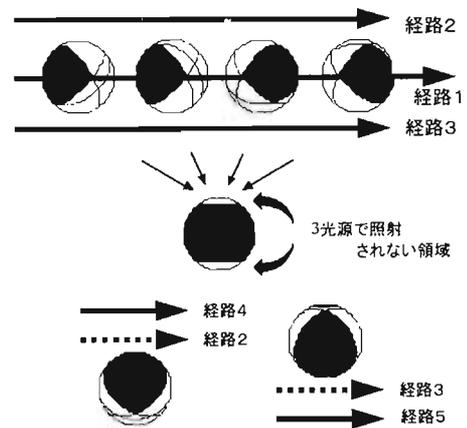


図12 光源の設定

ル付け、光源の位置情報リストと画素の関係のための画素のフラグ付けに関するデータを光源位置データベースに蓄積する。

(4) 光源設定に係わるアルゴリズム

光源設定手法のアルゴリズムを図13に示す。

6 法線の算出

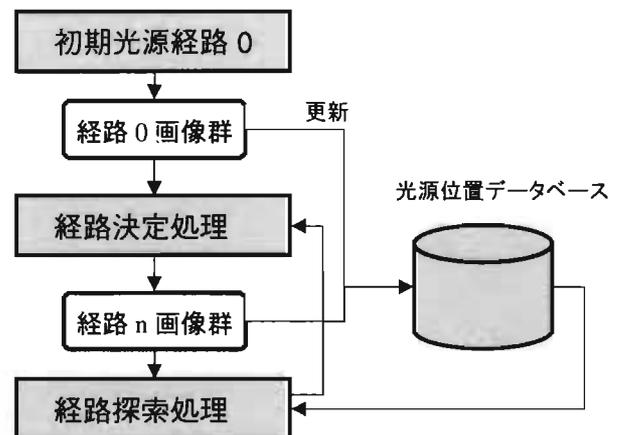


図13 光源の設定アルゴリズム

画素に対応する物体面の法線を求めるために先に紹介した照度差ステレオ法を利用する。

(1) 原理

物体面での明るさ (I) は、法線方向 (u) と光源方向 (s) の関数として以下のように表せる。

$$I = R(\vec{s} \cdot \vec{n})$$

このため、画像から (I)、光源方向 (s) が分かれば、法線方向 (n) が求められる。 n が x, y, z の3変数であるベクトルであることから、 I, s の3元連立方程式となり、これを解けばよいわけであるが、 R が非線形方程式であることから、一意に求めることができない。そこで、非線形連立方程式の解法として、ニュートン法、暗探法がある。それぞれの特性を示し、適用範囲を検討する。

(2) ニュートン法²⁾

ア 特徴

非線形方程式を高速に計算することが可能であるが、適切な初期値を用いないと収束しない。

イ 原理

求めるべき関係式を

$$f(x) = 0 \quad \text{-----1)}$$

とする。ここで、求めるべき根 (x_0) と近似根 (x_1) は、

$$x_0 \approx x_1 + h \quad \text{-----2)}$$

ここで、 h は微小量である。これを代入した式をオイラー展開すると

$$f(x_1 + h) = f(x_1) + \frac{\partial f}{\partial x} h + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} h^2 + \dots + f(0) \quad \text{---3)}$$

となる。

$$f(x_0) = 0 \quad \text{-----4)}$$

として、 x_1 に x_0 を代入して3) を変形すると

$$0 = f(x_1) + \frac{\partial f}{\partial x} h \quad \text{-----5)}$$

$$h = -\frac{f(x_1)}{f'(x_1)} \quad \text{-----6)}$$

6) を2) に代入すると

$$x_0 \approx x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)} \quad \text{-----7)}$$

これを繰り返すことで求められる。

(3) 暗探法

ア 特徴

計算速度は遅いが、確実に解を導くことができる。

イ 原理

暗探法は総当たり法であり、条件を満たす解を全て抽出する方法である。これを図14に示す。

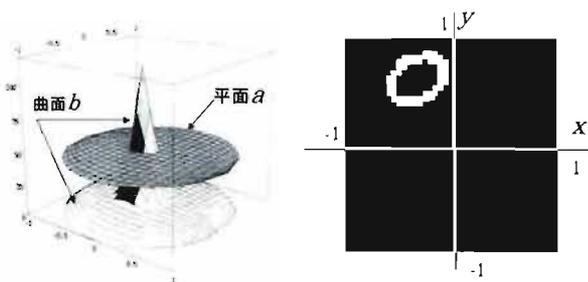


図14 法線座標上での求めるべき解と法線

任意の光源 (s) における画像上の1画素の明るさ (I) は、一定であることから、平面 a で示すことができる。これに対して、すべての法線と s で表現される明るさは、曲面 b で示すことができる。求める法線群はこの2面の交差する部分となり、この交差

する部分をすべての法線から求める方法を暗探法という。

さらにもう1枚の画像について同様のことを行くと、2曲線の交点として現れる。さらに3枚目の画像を重ねると1点で3曲線が交差する。この点が必要な法線となる。

(4) 適用結果

ニュートン法は、Sparrow のモデルに適用できるが、実験モデルで、収束性が悪い結果となった。暗探法は、両方で適用可能であった。ニュートン法が、実験式モデルに適用できなかったのは、実験式モデルでは、明るさの変化量が大きく、適切な(十分に近い)初期値を選定し、代入することが難しいため、他の局所解に落ちてしまったためである。そこで、今回は、確実に解を求めることができる暗探法を利用して、物体の法線ベクトルを計算し、形状の復元を行った。

(5) アルゴリズム

光源の設定から法線の算出、そして、形状の復元までのアルゴリズムを図15に示す。

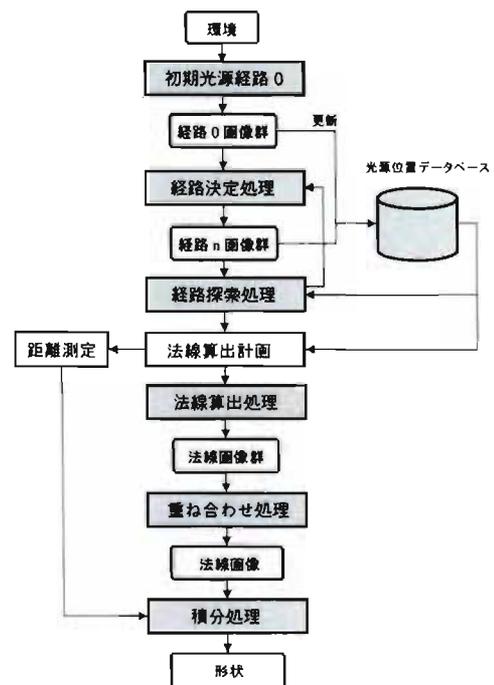


図15 物体形状を復元するためのアルゴリズム

7 形状の算出

求めた法線から、形状を復元するためには、積分処理を行わなければならない。なぜなら、法線は、方向を示すベクトルであり、大きさを持たないものであるため、隣接する画素についてなんの制約もない。そこで、本研究では、以下の制約のもとに形状を復元する。

- 制約 1 物体ごとの抽出は、完了している。
- 制約 2 物体は凸形状である。
- 制約 3 隣接する画素は、なめらかに接続している。

(1) 積分原理

法線からそれに直交する微小面を生成し、これを、画素領域に対応する空間にはられているパッチ(patch)に変換する。このパッチを任意の一点から、接続していくことによって形状を復元する。

(2) ノイズ対策

ア フィルタリング

この積分手法のみでは、一つのパッチであっても、それがノイズにより誤差が大きいと、積分経路の後方では、形状誤差がそのまま引き継がれてしまう。そこで、ノイズ除去手法の一つである。メディアンフィルタをかけ、これによって、突出した誤差成分を減少させることとした。

イ 積分経路及び、平均化

誤差の大きな部分は、凸形状物体であれば、その周辺部、すなわち、視線と法線のなす角が大きな部分であることから、物体の中心部、あるいは、平均輝度の大きな部分を積分経路の始点とすることによって誤算の伝播する範囲の抑制することができる。

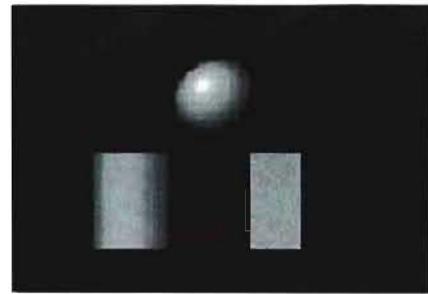
そこで、

- 条件 1 法線が視線方向
 - 条件 2 平均輝度が最大
- を判断基準として、ひとつの物体に対し、上述の度合いの高い所を始点として、
- 条件 1 基準線を水平としたもの
 - 条件 2 基準線を垂直としたもの
- の2経路で積分を行い、平均化することによって、形状を求めた。

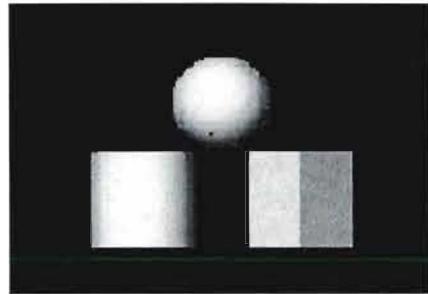
(3) 視覚情報としての形状

形状は、数値データばかりでなく、2次元画像であっても視覚的に形状を認識することを人間は行っている。そこで、画像から形状情報を、獲得出来るように可視画像への変換をおこなう必要がある。

具体的には、求めた法線から、可視光における反射モデルを適用した画像を生成する。これによって、ダイナミックレンジが広く見にくい画像であった赤外線画像を、可視画像に変換することが可能になる。この変換の実例を図16に示す。



a) 赤外線画像



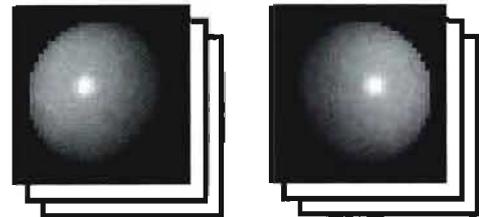
b) 可視画像

図16 反射モデルの変換

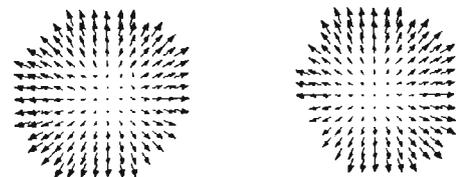
8 数値実験

数値実験では、任意の条件で、物体の画像を生成し、これから、法線を求め、可視画像への変換、及び、形状復元を行った。入力-出力の関係を図17に示す。

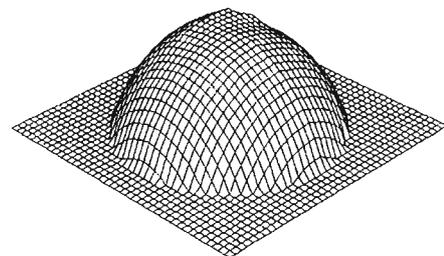
9 実験環境下での実験



a) 入力データ



b) 途中経過 (法線算出結果)



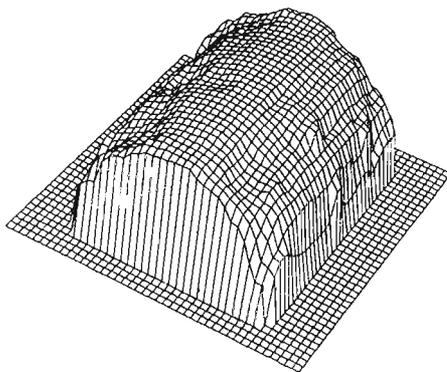
c) 復元結果

図17 入出力データ

実環境での実験では、赤外線カメラにより画像を記録し、この画像から、形状の復元、画像の変換を行った。この結果を図18に示す。(対象物は、アルミ缶(円筒状)を利用)



a) 入力画像



b) 復元形状

図18 画像からの形状復元状況

10 まとめ

本研究から、以下の結論を得た。

- (1) 物体を特定するための反射特性パラメータを求めるシステムを構築した。
- (2) 形状復元をする上で、必要となる画像を撮影するための光源設定法についてのその手法を示した。
- (3) 形状復元のための積分手法において幾つかの手法を組み合わせることにより、赤外線画像におけるノイズの低減を可能にした。
- (4) 反射モデル、復元システムについて、数値実験によりそのシステムの有効性を確認し、実際に装置を試作し、実際の画像から形状復元、反射モデル変換画像システムが有効であることを示した。

濃煙内視覚装置に関する研究として、平成6年度から平成9年度まで行い、以下の項目について成果を得た。

- (1) 煙環境中の赤外線透過性
- (2) 試作機の作成
- (3) 画像処理プログラムの作成
- (4) 形状復元プログラムの作成

これによって、現在ある装置を組み合わせることで、濃煙内視覚装置のシステムを構築することが可能であることと、これによって、様々な情報を獲得することが可能であることを明らかにすることができた。しかしながら、課題である小型化については、今後の技術の進歩により各装置の小型化が進むことによって、可能になると考えている。

参考文献

- 1 K.Ikeuchi, "Determining Surface Orientations of Specular Surfaces by Using the Photometric Stereo Method", IEEE. Trans. Pattern. Anal. Machine. Intell., vol.PAMI-3, no.6, pp.661-669, Nov.1981
- 2 S.K.Nayar, A.C.Sanderson, L.E.Weiss and D.A.Simon, "Specular Surface Inspection Using Structured Highlight and Gaussian Images", IEEE Trans.on Robotics and Automation, vol.6, no.2, pp.208-218, April, 1990
- 3 F.Solomon and K.Ikeuchi, "Inspecting Specular Lobe Objects Using Four Light Sources", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1707-1712, 1992
- 4 N.Kolagani, J.S.Fox and D.R.Blidberg, "Photometric Stereo Using Point Light Sources", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1759-1764, 1992
- 5 清水辰次郎, 実用数学, 朝倉書店, 1977
- 6 近藤次郎, 数学モデル, 丸善, 1983
- 7 畑村又好, 奥野忠一, 津村善郎, 統計的方法, 岩波書店, 1972
- 8 蓮沼宏, 光沢, コロナ社, 1957

救出用台車の研究開発



乗車時の状況



車両積載の操作状況

水流駆動式水中ポンプの研究開発



水中ポンプ本体



性能確認実験

感震自動開放ドアの研究開発



装置一式

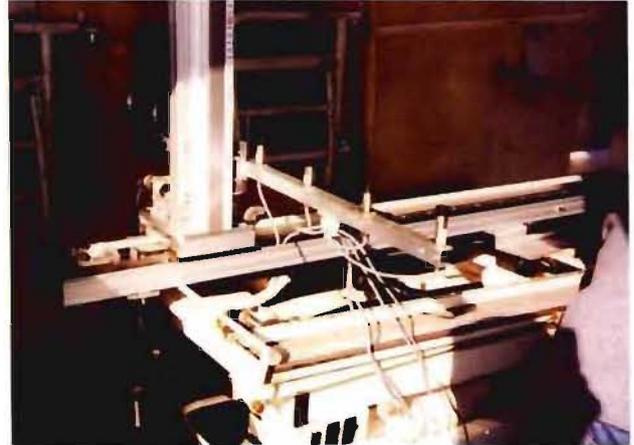


ドアノブ周囲の状況

救急車内に伝播するサイレン音の減衰に関する研究開発



救急車にサイレンを設置した状況



救急車内で音圧測定中の状況

水損防止型スプリンクラーの研究開発



水損防止装置と既存スプリンクラーヘッド

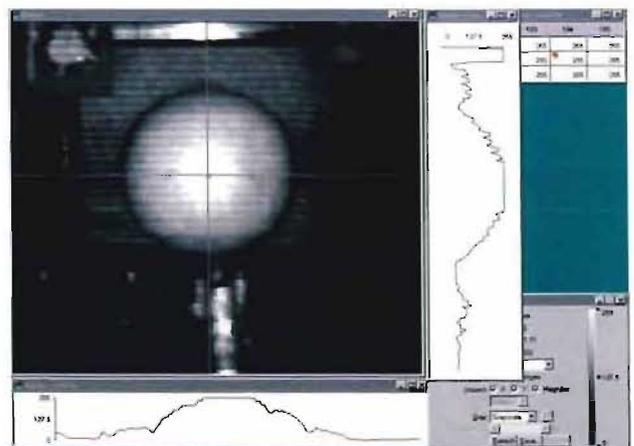


放水時の状況

特異空間における視覚装置の研究開発



試作した視覚装置による実験状況



映像処理プログラムによる出力結果