

# 消防ロボットの研究・開発 (視覚機能の高度化)

加藤 俊之\*, 井越 昌紀\*\*

## 概 要

消防ロボットの行う作業において視覚機能は重要な意味を持つ。本研究では、消防ロボットが作業を行う上で必要な情報を獲得するための視覚機能について基礎的な検討を行った。

火災現場のような煙環境では、赤外線光源を利用した物体の映像化が有効である。この時、固定光源では物体を識別し形状を復元することが困難であるが、移動光源を利用することでこれを解決することができる。本報では、光源の移動に伴う影の変化から物体を識別し、照度差ステレオ法を利用して形状を復元しようとするものである。この手法を利用して、煙環境における赤外線画像から物体形状を復元するシステムを構築した。

## 1 はじめに

火災現場における煙環境では、光の透過性から可視光による映像よりも赤外光による映像を利用することが物体を視認する上で有効である。赤外線視覚装置(熱画像カメラ)は、この特性を利用して、物体が放射する熱エネルギーを赤外光としてとらえ、高温の物体を可視化することを可能にしている。

赤外線視覚装置の映像情報は、通常、平面的な2次元情報であるが、なんらかの作業を行うためには、対象となる物体の形状や奥行き、複数の物体の位置関係といった3次元情報の把握が必要となる。人がモニター画面に表示される2次元情報から3次元情報を理解することができるのは、様々な類推能力を活用して行っているわけであり、定性的な概念の積み重ねであると考えられる。そして、この人間の類推能力を補うための手法として、立体カメラを搭載したロボットの開発も進められている。

本研究は、3次元情報を数値情報として定量的に獲得する手法についてシミュレーションをとおして検討したものである。物体の形状と奥行きを求めるために、照度差ステレオ法を利用し、複数の物体の位置関係を求めるための手法として、光源の移動に伴う陰影の変化に着目した物体の識別法を提案する。さらに、複数物体の形

状、奥行き、位置関係を求める手法を統合したアルゴリズムを作成し、シミュレーションによって、有効性の検証を行った。

## 2 システムの概要

本システムは、複数の2次元画像から3次元情報を算出することを可能にするものである。図1(a)は、本システムが対象とする2次元画像の一例を示したものであり、このような画像群から物体の形状、奥行き、位置関係を求める。図1(b)には、(a)の画像を求めするために利用した模擬物体の形状と配置状況の説明図を示す。任意の空間中に、平板、円板、球体、円柱が配置されていると想定したものである。

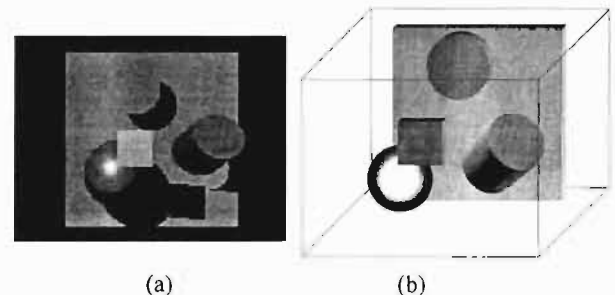


図1 模擬物体

\* 第三研究室 \*\* 東京都立大学工学部

(1) 光学条件の仮定

本論文では光学条件を次のように仮定する。

- ア 光源は物体から十分に離れた点光源である。(光源の照射条件は平行光に近似できる)
- イ 観測者の位置は物体から十分離れている。(撮像系は平行投影に近似できる)
- ウ 物体面の相互反射については考慮しない。(反射光は光源からの1次反射のみである)

(2) 座標系の設定

空間、視線、光源の座標系を図2に示す。

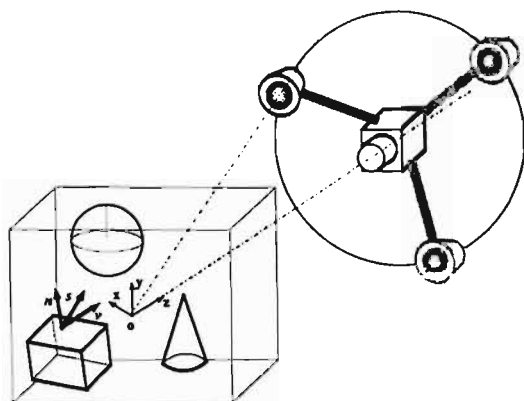


図2 空間座標系と視線、光源座標系

本論文では、視線上に空間原点Oをおき、視線をz軸とした左手座標系とする。空間原点近傍では、(1)の条件が成り立つものと仮定し、光源方向ベクトルは、原点Oに向くものとする。光源、視線、物体の位置ベクトルは、空間原点を含むxy平面が平行投影された画像面の1ピクセルを基準として取り扱うこととする。

3 物体の形状と奥行き

物体の形状と奥行きに関しては、照度差ステレオ法を利用し、画素ごとに物体面の法線方向を算出する。求められた任意の画素の法線が隣接画素と滑らかに接続していると仮定して、積分することで形状、奥行きを求める。

(1) 照度差ステレオ法

図3に照度差ステレオ法の基本概念を説明するために、画像生成における基本的な原理である反射モデルを示す。

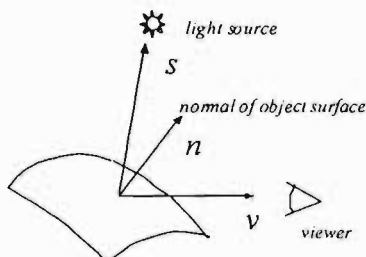


図3 反射モデル

画像面上における画像強度Iは光源方向ベクトルs、面の法線方向ベクトルn、視線方向ベクトルvの相対的關係と面の反射特性によって決定される。したがって、反射率関数をRとすれば、画像強度Iは、

$$I = I \cdot R(n, s, v)$$

と表すことができる。なお、Iは光源照度である。ここで、3方向から照射する光源の方向ベクトルが同一平面上にないとする条件のもとで、視線方向ベクトルvに対する三つの光源方向ベクトルsの相対的關係とそれらの光源照度が既知であれば、未知のnを求めることができる。これが、照度差ステレオ法の基本的な原理である。

(2) 形状復元のための積分法

照度差ステレオ法によって求められた法線ベクトルを積分することで奥行きを再構成を行う。積分操作は画像中の各物体について図心に最も近い、物体内部画素から行う。このとき、対象画像上の任意の画素p(x, y)での高さの変化量の推定値dzは次式によって与えられる。

$$dz = p_{x,y} dx + q_{x,y} dy$$

ここで、

$$p = -\frac{n_x}{n_z}, q = -\frac{n_y}{n_z}$$

積分の概念を図4に示す。

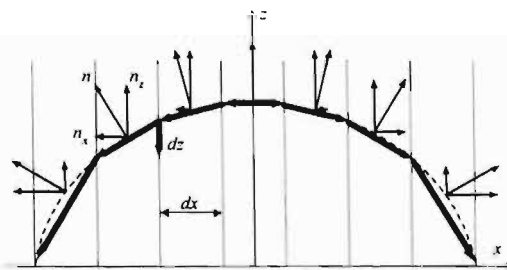


図4 形状復元のための積分方式

画素の明るさから求めた法線ベクトルnから、面の傾きp, qを求めて、画面上での画素の見込む長さで正規化することによって、求めるべき奥行き方向の変化量dzが求められ、これを積分することによって形状を復元する。

4 複数物体の識別

複数の物体が画像上で重なりあう場合、対象となる物体を識別、分離するためには、物体間の境界がどこにあるかを知る必要がある。そこで、複数物体間の幾何的な位置関係に起因している陰影部分に着目し、陰影がどの物体に属するかという問題を理解することによって物体の輪郭線を求める手法について検討を行った。

また、本研究では凸形状物体を基本単位として、陰影の情報を扱う。

(1) 陰影の定義

図5は光源1によって照射された、二つの物体間に生じる陰影画像であり、これを利用して陰と影の違いを説明する。

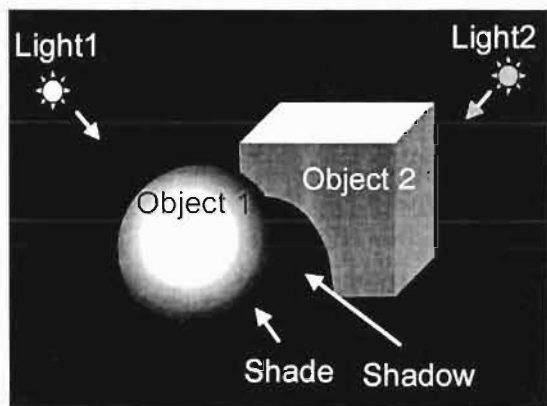


図5 陰と影が存在するシーン

陰(Shade)とは、光源位置から見て物体の裏側にあたる部分であり、光が照射されている物体の表面にできる暗部である。影(Shadow)とは、光が他の物体によって遮られることによって生じる部分であり、光を遮る物体の陰が投影されたものである。

(2) 陰影の識別の基本的概念

光源方向、照射される部分、陰影部分の幾何的な関係から、陰影部分を陰(Shade)と影(Shadow)に識別する手法を示す。陰影を分離することができれば、2次元的には連続的な部分での不連続性を抽出することができ、複数物体を分離することが可能になる。陰影を識別するための基本概念を図6に示す。

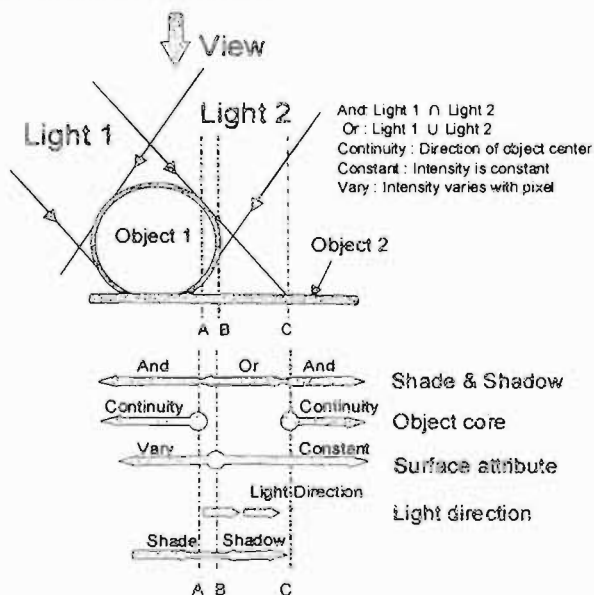


図6 陰影の識別

ABC間について着目し、陰影が生じる光の照射方向(Light1)と陰影が生じない光の方向(Light2)で照射された

2枚の画像を利用して陰影を識別する。

ア 陰影領域の抽出

2つの光源で照射された領域を And 領域とし、どちらか一方の光源で照射された領域を Or 領域として分離する。

イ 物体核の抽出

2つの光源で照射された領域で連続する領域を物体の核とする。

ウ 陰影部分の抽出

どちらか一方の光源だけで照射された領域が陰と影の候補となる。

エ 面属性の抽出

光源で照射された領域の明るさを隣接画素同士で比較して明るさの変化について調べる。このとき、明るさが増える場合は曲面であり、明るさの変化がない場合が平面となる。この例では、陰影部分に曲面と平面が接していることがわかる。

オ 陰影の識別

陰影が生じる場合の光源の照射方向を調べ、境界線に境に物体の連続する方向と光源方向が同方向であれば影であり、互いに逆向きであれば陰であることが分かる。

以上の陰影分離法は曲面と平面で行ったが、①平面と平面、②曲面と平面でも同様の方法が利用でき、③曲面と曲面では明るさの変化を調べる段階で、変化率の違いから境界を見つけることになる。

(3) 物体の識別の基本概念

物体の識別は、陰影の識別法と移動光源を利用して行う。複数の物体を識別するためには、画像面で重なりのある物体間に陰影が生じるように光源を設定しなければならない。平行光、平行投影の仮定のもとでは、視線上に光源を置くことで、陰影が生じなくなる。また、視線から離れすぎると、視線上、重なりのある物体以外に影が生じる結果となる。すなわち、視点に十分近い位置に光源を置くことで、画像面で隣接する物体に影を生じさせることができる。

図7に光源の移動経路を示す。

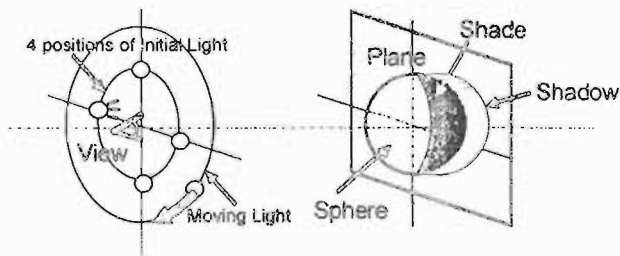
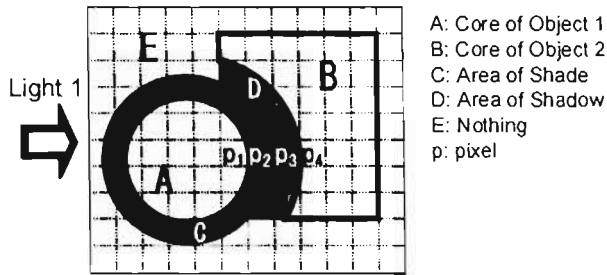


図7 初期4光源と移動光源の移動方向

本研究では、視線近傍で、視点面で90度ずつ回転した4点からの光源による画像で初期の識別を行い、物体の核となる部分を抽出した後、より移動量の大きな光源

経路で、物体の全体をとらえることとした。

図8に初期4光源(上下左右)に照射された物体群を先に述べた識別法によって画像領域を分類した結果を示す。



A: Core of Object 1  
 B: Core of Object 2  
 C: Area of Shade  
 D: Area of Shadow  
 E: Nothing  
 p: pixel

a) 全体画像

p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	p <sub>4</sub>
Object label	Surface label	Surface label	Object label
1	-1	2	2

Object label    Surface label  
 Object : 1,2,3    Plane : 1,2,3  
 Nothing : -1    Curve : -1

b) 注目する陰影画素列

図8 複数の画像から求めた画素情報

すべての光源によって照射された領域として A, B が抽出でき、これが独立した物体の核となる。C, D の部分は陰影部分であり、先に示した陰影識別法を利用して分離する。

ここで用いる用語として、物体ラベルと面ラベルを定義する。物体ラベルは、独立した And 領域を 1 以上の整数でラベル付けしたものをいう。また、面ラベルは、まず、注目する画素の隣接 8 画素をチェックし、同一光源で同一の明るさを示す画素が 2 画素以上ある部分を平面、それ以外の部分を曲面として分類する。次に、平面に関しては同一の明るさの部分をつなげさせ、独立した部分ごと 1 以上の整数でラベル付けを行ったものである。曲面に関しては、すべて -1 のラベルを付ける。

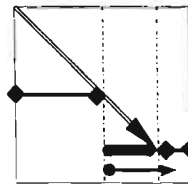
実際の手順は、以下ようになる。

- ① 連続する陰影画素とその両端の画素(p1, p2, p3, p4)からなるリストを作成する。
- ② 作成したリストの要素は、両端(p1, p4)が物体ラベルを陰影部分(p2, p3)は面ラベルを代入する。
- ③ リスト内のラベルの構成を判別ルール(後述)と比較することで陰影部を陰と影に分離し、陰影部分の画素を物体の核と連結させることで物体情報を更新する。
- (4) 初期光源による物体の判別ルール

以下に陰影部の判別ルールを示す。ここで、図9 a)~ i)に用いられている記号の意味は次のようになる。

- 物体の核
- 陰影部分
- 連結する物体方向
- 光源の照射方向

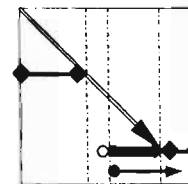
ア 平面と平面



陰影部分は右側の物体に連結する。

図9 a) 陰影の識別要素 1

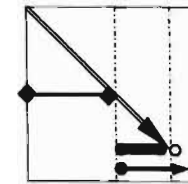
イ Nothingと平面



陰影部分は右側の物体に連結する。

図9 b) 陰影の識別要素 2

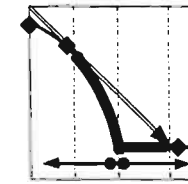
ウ 平面と Nothing



陰影部分は右側の物体に連結する。

図9 c) 陰影の識別要素 3

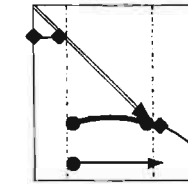
エ 曲面と平面



陰影部分の曲面は左側の物体に連結し、平面は右側の物体に連結する。

図9 d) 陰影の識別要素 4

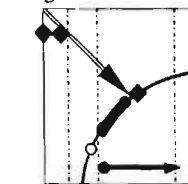
オ 平面と曲面



陰影部分は右側の物体に連結する。

図9 e) 陰影の識別要素 5

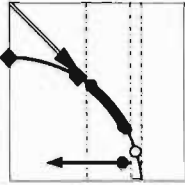
カ Nothingと曲面



陰影部分は右側の物体に連結する。

図9 f) 陰影の識別要素 6

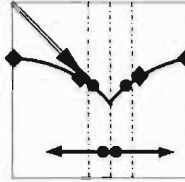
キ 曲面と Nothing



陰影部分は左側の物体に連結する。

図 9 g) 陰影の識別要素 7

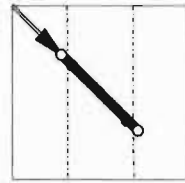
ク 曲面と曲面



陰影部分の曲面は左側の物体に連結し、平面は右側の物体に連結する。

図 9 h) 陰影の識別要素 8

ケ Nothing と Nothing



新規物体とする。

図 9 i) 陰影の識別要素 9

以上の9種類の識別情報によって初期4光源から物体核を抽出し、陰影情報から物体を識別した結果の一例を図10に示す。陰影によって判断できなかった物体の輪郭がとらえられたことがわかる。しかしながら、初期4光源だけでは、物体の全体像を把握することができない。

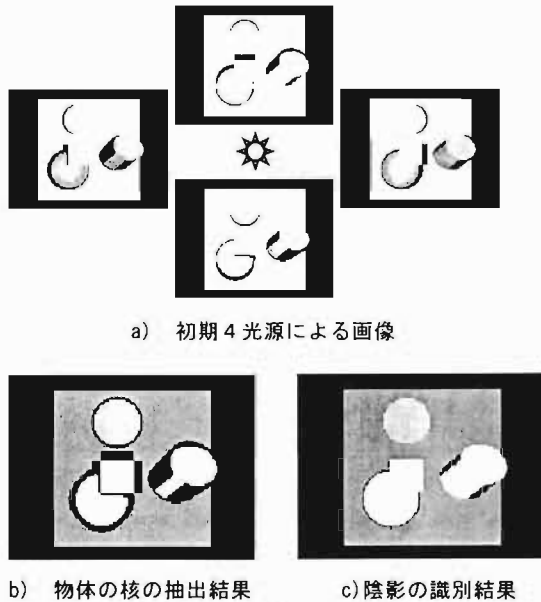


図 10 初期4光源による識別結果

しかしながら、初期4光源だけでは、物体の全体像を把握することができない。そこで、以下では、移動光源を

利用して物体の全体像の把握について述べる。

(5) 移動光源による物体の識別情報の分類

移動光源によって新たに照射された領域を物体の核と関連付ける。

ア 平面の場合

図11に新たに照射された領域が平面であった場合の分類アルゴリズムを示す。

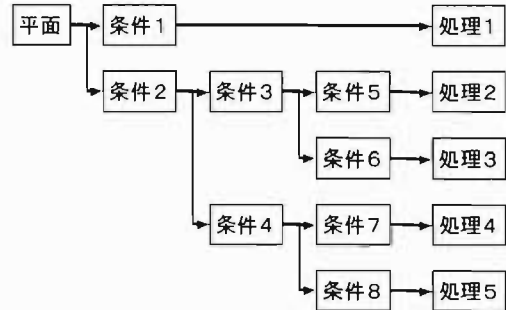


図 11 新たに照射された画素の識別

- 条件 1: 隣接する画素に同一面ラベルがある。
- 条件 2: 隣接する画素に同一面ラベルがない。
- 条件 3: 隣接する画素に面ラベルがある。
- 条件 4: 隣接する画素の面ラベルがない。
- 条件 5: 新たに照射された領域に物体ラベルがある。
- 条件 6: 新たに照射された領域に物体ラベルがない。
- 条件 7: 隣接する画素に物体ラベルがある。
- 条件 8: 隣接する画素に物体ラベルがない。
- 処理 1: 保留 (論理的に矛盾するため)
- 処理 2: 同一物体。
- 処理 3: 保留 (判断条件が満たないため)
- 処理 4: 同一物体とする。
- 処理 5: 新物体とする。

イ 曲面の場合

図12に新たに照射された領域が曲面であった場合の分類アルゴリズムを示す。

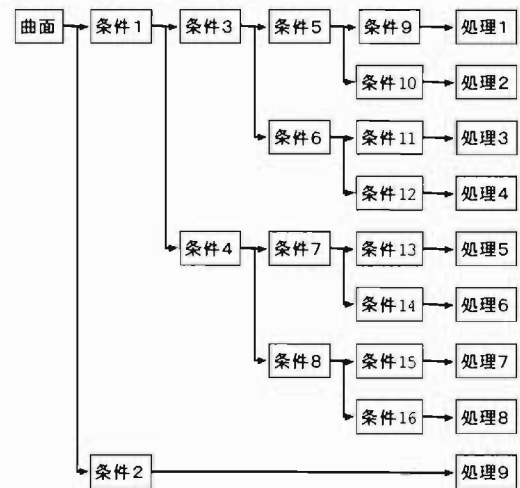
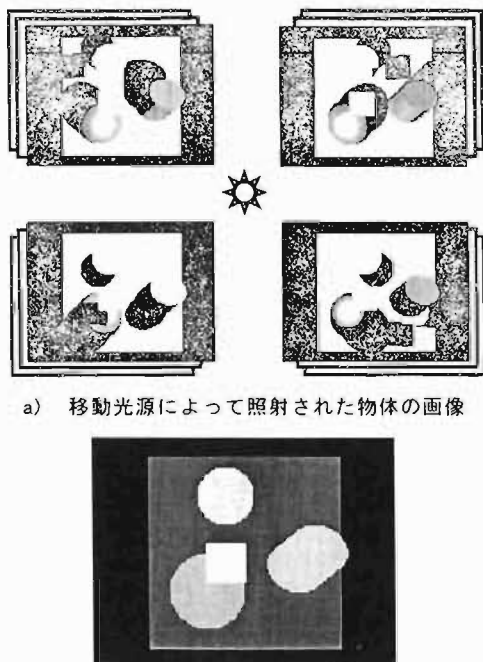


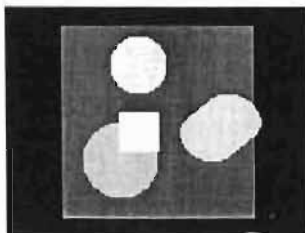
図 12 新たに照射された画素の識別

- 条件 1：隣接する画素のどちらかに物体ラベルがある。
  - 条件 2：隣接する画素のどちらも物体ラベルがない。
  - 条件 3：隣接する画素の両方に物体ラベルがある。
  - 条件 4：隣接する画素のどちらかに物体ラベルがある。
  - 条件 5、7：隣接画素の左側に物体ラベルがある。
  - 条件 6、8：隣接画素の右側に物体ラベルがある。
  - 条件 9、13：左側の画素が初期 4 光源で影でない。
  - 条件 10、14：左側の画素が初期 4 光源で影である。
  - 条件 11、15：右側の画素が初期 4 光源で影でない。
  - 条件 12、16：右側の画素が初期 4 光源で影である。
  - 処理 1、5：左側の物体ラベルを継承
  - 処理 2、4、6、8、9：保留（判断条件が満たないため）
  - 処理 3、7：右側の物体ラベルを継承
  - 処理 4、8：保留（判断条件が満たないため）
- ウ アルゴリズムの実行結果

図 13 に移動光源による物体の識別結果を示す。移動光源を利用することによって、初期 4 光源では、認識することができない物体の部分を認識することが可能となり、視野内における画像をすべてとらえていることがわかる。



a) 移動光源によって照射された物体の画像



b) 移動光源によって補完された物体ラベル画像

図 13 移動光源による識別結果

### 5 物体間の位置関係と相対距離の算出

物体間の位置、相対距離とは、どの物体がより観測者に近いにあるいは、遠いかといった関係を定量的にします。本研究では、物体間の位置関係と相対距離を求めるために、グラフ理論と三角測量法の原理を利用する。まず、グラフ理論から画像中での物体間の接続関係を求める。次に、隣接する物体間の前後関係を先に求めた陰影情報から決定する。これによって、定性的な

位置関係が算出されることになる。最後に、陰影情報を三角測量法の原理に適用して相対距離を求める。

#### (1) 接続関係の算出

図 14 に先に述べた複数物体の識別結果の概念図（物体ラベル画像）を示し、これを利用して接続関係を算出する手法を述べる。図中の丸付き数字は識別された物体の番号を示している。この画像中には 7 つの物体がかさなりあって存在している。

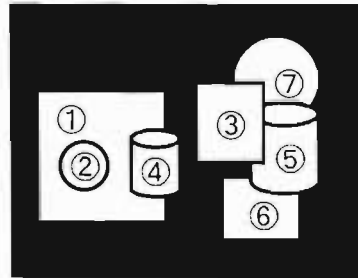
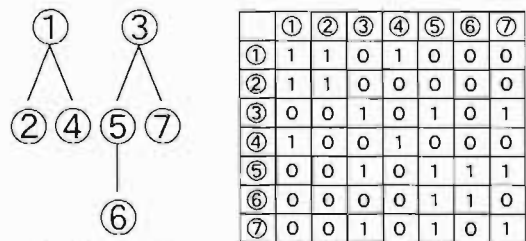


図 14 物体のラベル画像

#### ア 隣接行列の作成

図 15 にここで扱う接続グラフと隣接行列を示す。接続関係をグラフで表示すると図 15a) のように示すことができる。これを計算機処理するために、隣接行列図 15b) をつくる。丸付き数字が物体を示していて、隣接関係にある物体は 1、隣接関係にない物体は 0 が代入される。また、物体自身は 1 とする。たとえば、図 14 において③は⑤と⑦と隣接していることから、図 15b) の行列要素の(3, 5)、(3, 3)、(5, 3)、(3, 7)、(7, 3) は 1 となる。



a) グラフ表示

b) 隣接行列表示

図 15 物体ラベルの接続関係

#### イ 接続状態の探索

まず、縦形探索でグループ分けを行う。縦形探索とは一つの点から接続グラフの縦方向に隣接関係を探索し、行き止まりになったら戻って、新しい経路を探索する探索法である。このため、到達可能な点の組みを求めることに適しており、接続関係をもつ点のグループ化を可能にする。

次に、横形探索で隣接する 2 物体間の関係を調べる。横形探索は辺を一つ隔てた点をすべて訪ね、次に出発点から辺を二つ隔てた点をすべて訪ねる探索法である。このため、隣接する点の接続関係を明確にすることが容易で、辺の数といった深さのデータ対照とした探索目的に

適しており、2物体間の関係を調べることを可能にする。

図16に接続関係の探索結果を示す。

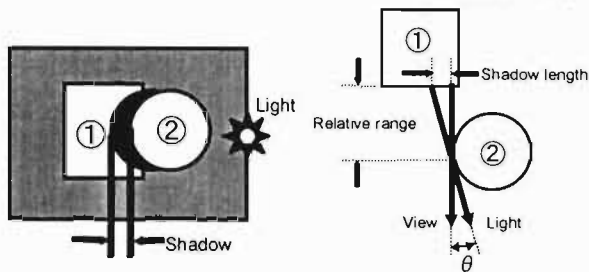
<pre> Depth-first search result Group 1: 1, 2, 4 Group 2: 3, 5, 6, 7 Breadth-first search result Object = 1, pre_object = 0, length = 0 Object = 2, pre_object = 1, length = 1 Object = 3, pre_object = 0, length = 0 Object = 4, pre_object = 1, length = 1 Object = 5, pre_object = 3, length = 1 Object = 6, pre_object = 5, length = 2 Object = 7, pre_object = 3, length = 1 </pre>	<p>Object: 対象とする物体のラベル</p> <p>pre_object: 対象となる物体と隣接する物体</p> <p>Length: 基準となる物体からの深さ</p>
--	--

図16 物体間の接続状態

縦形探索の結果から画像中の物体は、1、2、4と3、5、6、7の2つのグループに分けられ、横形探索の結果から、それぞれの物体に隣接している物体が抽出されたことを示している。

(2) 位置関係と相対距離の算出

図17に2物体間の位置と相対距離の概念図を示す。



a) 物体位置と影の関係      b) 相対距離と影の関係

図17 2物体間の位置・相対距離の関係

ア 位置関係の算出

先に平面上での物体間の接続関係を求めたが、これと影との関係から3次元空間での位置関係を算出する。

隣接する物体間における影の位置と光源の方向から物体間の前後関係を決定する。図17a)では、①の上に②があることがわかる。アルゴリズムで示すと次のようになる。すなわち、影がある側が後方にある物体となる。

```

if (Shadow ⊂ m)
    m = under object; l = upper object;
else
    m = upper object; l = under object;

```

ここで、l、mは物体ラベルである。

イ 相対距離の算出

図17b)で示されるように、影の長さは物体間の距離に比例することが三角測量法の原理から示される。ここで、光源方向、視線方向から既知であることから画素を基本単位とした相対距離を求めることができる。すなわち、画像中の物体の大きさを基準とした奥行きを求めることが可能となる。算出式は以下のようになる。

$$Relative\ range = Shadow\ length / \tan(\theta)$$

6 統合

以上の手法を統合した本システムのフローチャートを図18に示し、算出される最終的な3次元情報の一例として、本論文で説明に用いた模擬物体群による出力結果を図19に示す。プログラム言語はC言語を用い、画像表示のためにOpenGLの関数ライブラリを利用した。

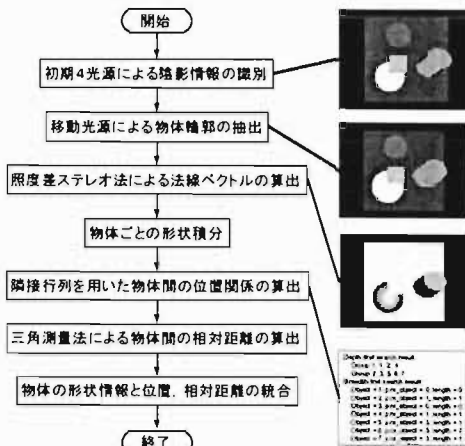


図18 本システムのフローチャート

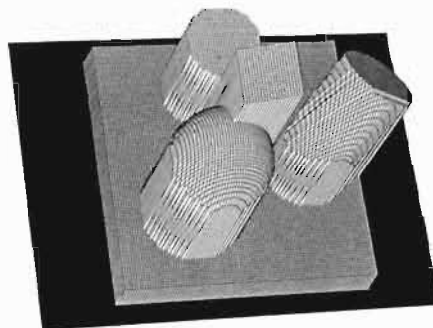


図19 物体の形状及び位置関係

7 まとめ

本研究から、以下の結論を得た。

- (1) 光源情報、明るさ情報を利用して面情報を抽出し、これらの情報を統合して陰影を分離する方法を示した。
- (2) 陰影の識別結果を利用し、複数物体の識別が行えることを示した。
- (3) 移動光源による複数の画像から、物体の形状を復元し、相対距離を算出するシステムを構築した。

[参考文献]

- 1) 池内克氏: "反射率地図に基づき、二次元濃淡画像より三次元形状を再構成する2手法", 電子通信学会論文誌, Vol. J65-D, No. 7, 842, 1982
- 2) 新本浩一, 本多庸悟, 金子俊一: "テクスチャパターンをもった物体の形状再構成とその評価", 電子通信学会論文誌, Vol. J78-D-II, No. 8, 1157, 1995
- 3) N. Kolagani, J. S. Fox, D. R. Blidberg: "Photometric Stereo Using Point Light Sources, Proc. IEEE Robotics and Automation, 1759, 1992
- 4) 奥村晴彦: "C言語による最新アルゴリズム辞典", 技術評論社, 1997

# RESEARCH AND DEVELOPMENT OF FIREFIGHTING ROBOTS (ADVANCEMENT OF A VISUAL FUNCTION)

Toshiyuki KATO\*, Masanori IGOSHI\*\*

## Abstract

Visual capacity of a firefighting robot plays a significant role in its emergency operations. In this research we conducted a basic study on the visual feature of a firefighting robot through which it obtains information necessary for firefighting.

In a smoke-filled environment of a fire scene, visualization of an object using an infrared light source is very effective. However it is difficult to classify or reconstruct the object if the light source is fixed in a certain position. If a moving light source is used, this problem can be solved. This report describes the method to classify an object from the changes of its shadows and shades as the light source moves, and to reconstruct its shape by using the photometric stereo method. With this, we established the system to reconstruct the object shape from the infrared images taken in a smoke-filled environment.

---

\* Third Laboratory \*\* Tokyo Metropolitan University