

# 消防ロボットの研究開発 (第6報)

(環境認識と移動計画)

加藤 俊之\*, 井越 昌紀\*\*

## 概 要

煙環境中に存在する物体を赤外線カメラの映像を利用して、立体的に認識するために、複数の2次元画像から、3次元情報(立体情報)を求めるための光源位置の移動と影の利用について研究を行い、その手法を確立してきた。今回は、光源の移動計画を最適化することを目的とした方法論の検討を行った。

これまで利用してきた、光源の移動計画が事前に決定した経路に従うことで、十分条件を満たすものであった。この方法では、不必要な画像も記録され、処理時間が長くなる傾向にある。そこで、一枚の画像の取得ごとに、次に必要となる最適な画像が得られるような新たな光源位置を逐次類推する手法を導入することにより、光源移動の最適化を目指したものである。

## 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。一般的な赤外線視覚装置(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。

本研究では、赤外線光源(赤外線レーザー、赤外線ランプ等)を利用したアクティブ方式の赤外線視覚装置を利用し、平面的な2次元情報である画像から、物体の形状や奥行き、複数の物体の位置関係といった3次元情報の把握を行ってきた。これによって、人がモニター画面に表示される2次元情報から3次元情報の類推を試みをコンピュータの計算能力によって、補うことが可能になる。

本報では、2次元情報である画像から3次元情報を求める上で必要となる画像の数を最適化する手法について検討した結果について報告する。これまで、複数の画像を取得するための光源の移動経路は、事前に決めた、適切であろう経路を移動することによって、十分条件を満たしてきた。具体的には、決められた光源の移動経路での撮影間隔のみを任意の条件下で変化させることによって、形状を復元するために必要な画像を撮影するものであった。

光源の移動経路を決定する際により多くの自由度を

もたせることにより、最適な経路を求められるわけであるが、自由度の増加は、より適切な制御方法が必要となる。今回、移動方向と移動量といった変数を導入することによって、自由度は、これまでの2から4に増加した。これを制御するために、移動方向については、球面三角形による類推方式、移動量については、角度成分と移動量の変換方式を導入した。そして、数値シミュレーションによって、有効性の検証を行った。

## 2 2次元画像と3次元情報の概要

本システムの基本概念は、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。

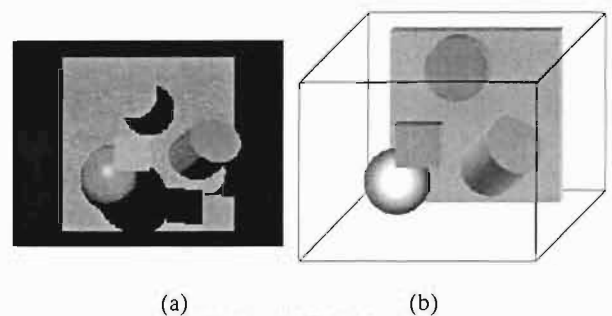


図1 模擬物体

\*第三研究室 \*\*東京都立大学工学部

図 1(b)には、(a)の画像を求め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。

(1) 前提条件

ア 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。

- (7) 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)
- (4) 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)
- (7) 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)

イ 座標系の設定

空間、視線、光源の座標系を図 2 に示す。

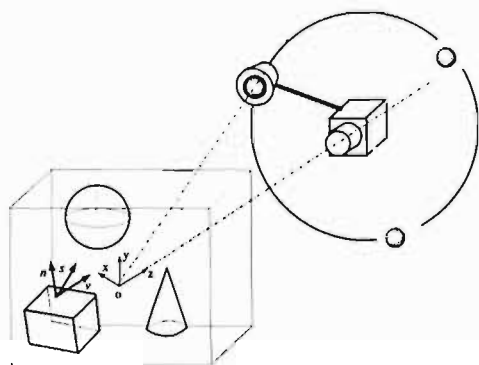


図2 空間座標系と視線、光源座標系

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。

(2) 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。

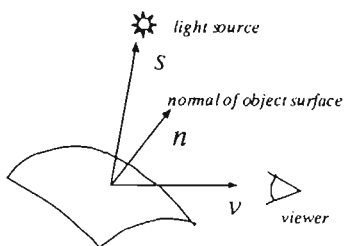


図3 反射モデル

ア 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。

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。

イ 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  $n$  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。

$$dz = p_x \cdot dx + q_x \cdot dy$$

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。

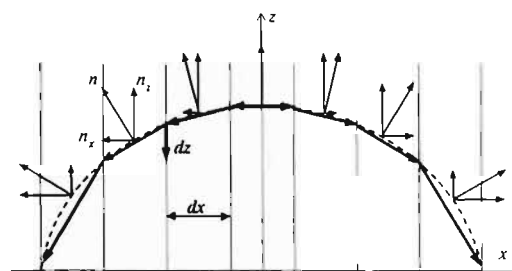


図4 形状復元のための積分方式

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。

3 移動光源を利用した照度差ステレオ法

3次元物体の形状を復元するために照度差ステレオ法を利用した。この手法は複数の濃淡画像から、物体の法線ベクトルを求めるものである。本研究では、カメラの位置を固定し、光源が任意に移動できるものとした。そして、複数の異なる濃淡画像を獲得し、得られた画像から、3画像を抜き出し照度差ステレオ法により画素毎

に物体の単位法線ベクトルを求める。部分的に求められた法線ベクトル群を重ね合わせることで、物体形状を復元する。

(1) 光源の移動と画像の関係

光源の移動にともなって、視野内の物体は光源によって照射される領域が変化することからその見え方が異なる。(図5)

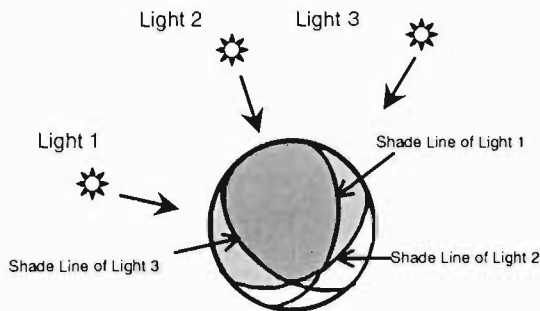


図5 移動光源による照射領域の変化

光源位置の変化と物体面の法線方向の関係から面の各部で明るさが変化し、物体が照射される領域が変化する。ここで、重要な点は任意の光源位置において視野内にある物体のどの部分が照射されたかを知ることである。これは、照度差ステレオ法が独立な光源位置によって照射された3枚以上の画像群を必要とするためである。十分な数の異なった光源位置を得るためには、照射された部分の明るさは必要とせず、図5に示すよう照射される領域を光源の位置データと関連付けることで十分である。すなわち、明るさデータを持たない、照射領域だけを示したマトリクスデータを利用することで、光源と照射領域の関係を特定することができ、後の経路算出処理コストを削減することができる。そこで、この関係を光源位置参照テーブルとして導入する。

照度差ステレオ法を実行するにあたって利用するデータは、画像群(Images)、光源位置参照テーブル(LRT)、光源位置リスト(LL)である。(図6)

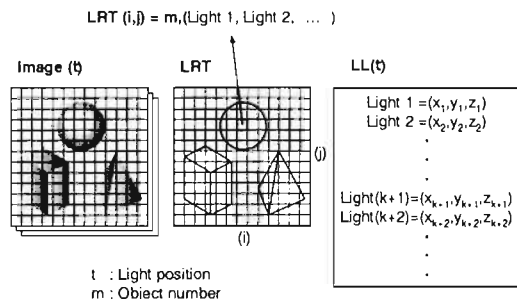


図6 準備するデータ形式

ここで、i, j は、画像上の画素位置を示し、t は撮影ごとの順序を示す画像番号である。

光源位置参照テーブルの実体は、画素に対応したマトリクスであり、そのマトリクスの各要素は対応する画素を照射する複数の光源位置をラベルとしてまとめたものである。光源位置を示すラベルは、実際の光源位置座標を指し示すポインタであり、実体は光源位置リストとして別に保存する。すなわち、形状の復元処理の第一段階である画像の記録時に、輝度情報を含んだマトリクス状のデータである画像とは別に、被照射領域と光源位置を関連づけたマトリクス状のテーブルを作成する。このことにより、照射すべき物体の被照射状態を一つのマトリクスによって表現することが可能となり、後の経路決定のための処理を効率化することができる。

また、連続する領域ごとに独立した物体番号(m)を割り当てることで、物体を識別しておく。

(2) 移動光源

光源は、自由に移動できるものを想定しているが、現実的な面から空間を直線や回転によって移動することを前提とした。また、カメラによって表示される画面と認識対象となる物体の関係は平行投影法とし、空間座標系の点はz軸とは無関係に画面上の点に投影され、光源は平行光とする。(図7)

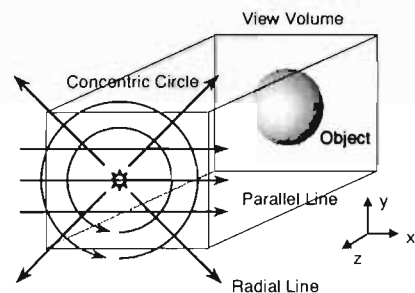


図7 基本的な光源の移動経路

光源の移動経路は、3次元空間を想定していることから、様々な経路が考えられるが、画像を撮影する光源位置の相互関係は、本質的には物体面に対する角度で関係付けられる。そのため、経路の種類による違いは、光源位置の順序の違いに相当することになり、画像を撮影する光源位置の問題を検討するうえでは、特定の経路問題を検討することで、他の経路についても類推することができる。また、光源経路の種類に関する最終的な決定は、製作される視覚装置に依存するといえる。

本研究では、空間を視野に対して直角な面で各経路が平行な関係となる場合(Parallel Line)の光源移動を対象にして今後の議論を進める。

形状を復元するために必要となる複数の画像は、光源の移動経路上における任意の位置で撮影されるものとする。そして、この経路と撮影間隔の適切な決定により、照度差ステレオ法が必要とする複数の画像を用意するための手法として、光源位置がLRTに格納される。

参照テーブルの役割は、記録した光源位置データと照射領域データから次の経路の指定と撮影間隔の決定に利用することである。また、経路と撮影間隔が必要とする画像として有効であるかを確認し、間隔の修正や新たな経路の決定を行うことにも利用される。

さらに、法線の算出コストを削減するためにも利用する。

### (3) 光源の移動経路

光源の移動経路は、任意の平面上を平行に移動するものとして、光源位置参照テーブルを利用した経路決定法を述べる。図8に光源経路を決定する要因の概念図を示す。

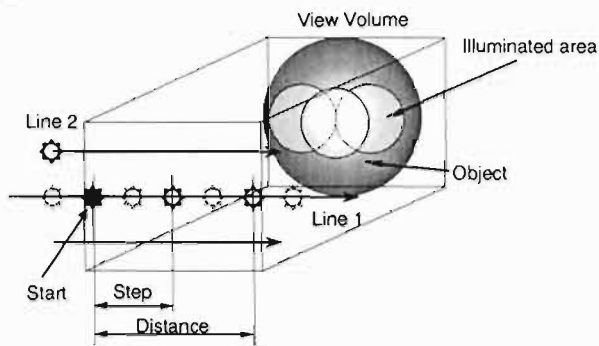


図8 光源の移動を決定する要素

光源は初期位置(Start)、等照射間隔(Step)、全移動量(Distance)に従って移動するものとする。そして、初期経路の妥当性を光源位置参照テーブルから判断して経路の修正、次の経路の指定を行う。

#### ア 移動経路の算出手法

ここで、光源経路を等照射間隔と全移動量に分離して、その妥当性の評価に関して検討を行う。

最終目標は照度差ステレオ法を利用するために必要となる、視野領域内の物体全面が独立した少なくとも3光源で、照射される条件を満たすことにある。そこで、光源の移動に伴って更新される光源位置参照テーブルを逐次確認することでこの問題を明確にする。

等照射間隔は同一経路上での照射領域の重複度に影響する。照度差ステレオ法の基本条件である独立の位置にある3光源を考えると、同一経路において任意の画素を照射する光源の数は2光源で十分である。そこで、同一経路上の隣接する光源間で照射領域の重なりをチェックすることによって、等照射間隔の妥当性を評価する(式1)。

$$\sum_j h_{i,j,i} \times \sum_j h_{i,j,i+1} \geq n \left( \sum_j h_{i,j,i} + \sum_j h_{i,j,i+1} - \sum_j h_{i,j,i} \times \sum_j h_{i,j,i+1} \right) \quad (1)$$

ここで、 $h$  は画素に対応した照射に関するパラメータであり、同一の物体番号を持つものに着目し、照射されていれば1、そうでなければ0となる。また、 $i$  は画像のx座標、 $j$  はy座標、 $i$  は画像番号、 $n$  は隣接光源によ

って共通に照射される面積(画素相当)の重複度を制御するしきい値 ( $n \leq 1$ ) をそれぞれ示す。

$n$  に対して定性的な傾向を検討すると、 $n$  を減少させることによって光源の照射領域の重なる部分は小さくなり、増加させるとその逆の傾向を示す。すなわち、 $n$  が小さいと必要とする画像を得ることができず、また、 $n$  が大きすぎる場合には、必要以上の画像を記録しなければならない。このため、 $n$  を適当な値とすることが、光源経路、撮影間隔の適正化をはかるうえで重要な問題となる。

全移動量は、同一経路上での照射領域の範囲に影響する。これは、移動方向に平行な物体面の法線成分の範囲と対応することから、視線に対して傾きの大きな面があるほど全移動量は大きくなる。そこで、光源を移動することによって、新たな画素が現れなくなるまで、実行することですべての面成分に光を照射する。実際には、視線と一致する光源を起点として、直線的に並ぶ最も離れた2光源という条件が満たされた光源位置が発生した段階で照射領域についての比較を行う。このような2つの画像を、画像番号  $i$  と  $i'$  とすると以下のような条件式となる(式2)。

$$S_i \subset S_{i'} \quad (2)$$

$$S_i = \{h_{i,j,i} \mid h_{i,j,i} > 0\}$$

$$S_{i'} = \{h_{i',j,i'} \mid h_{i',j,i'} > 0\}$$

この式で示す内容は、複数の経路にまたがった、終了判定となる。

#### イ 移動経路の妥当性に関する検証

一経路上での妥当性を、各照射領域を重ね合わせた領域の重複度と光源移動による新たな被照射領域から検証を行った。

最低限必要となる3光源の方向成分は互いに独立の関係になくなくてはならないことから、1経路で2光源以上の重複を必要としない。これを満たすために、隣接する光源での被照射領域の重複度を検討した結果、 $n$  は0.5前後の値をとることが確かめられた(図9a)。実際の光源の移動においては、式(1)の条件が満たされなければ、等照射間隔が大きすぎる(図9b))と推定できることから、等照射間隔を減少させて、再度光源を移動させる。

また、全移動量に関しても一経路終了時に式(2)の条件を満たさない場合は、全移動量が小さすぎる(図9b))と判断でき、全移動量を増加させて再度光源を移動させる(図9a)。そして、識別された物体ごとに式(2)の条件を満たした場合に第2の経路に移動する。

第2の経路はY軸上を第一経路を等照射間隔で平行移動したものとする。このときの妥当性は初期位置に関してY軸方向の重複のみのチェックを行い、妥当であれば、先と同様に移動を行い、経路の妥当性評価を行う。さらに、照射領域すべての画素についてその重複度を調べて、照度差ステレオ法で必要となる光源の独立性条件が満たされるまで新たな経路で照射を繰り返す。

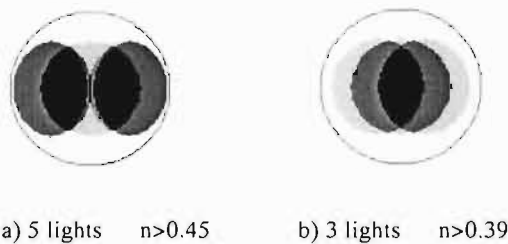


図9 光源の移動間隔と照射領域の重複度

(4) 複数光源から必要な3光源の選択

法線ベクトルを算出するための光源(画像)の選択には、多くの組み合わせがあるため、適当な光源の組を抽出しなければならない。

そこで、光源位置参照テーブルから照射領域の広い光源位置を基準に選定することで、計算量を減少させ、要素数を参照することで、算出漏れを避ける手法を適用した。以下にその手法を示す。(図10)

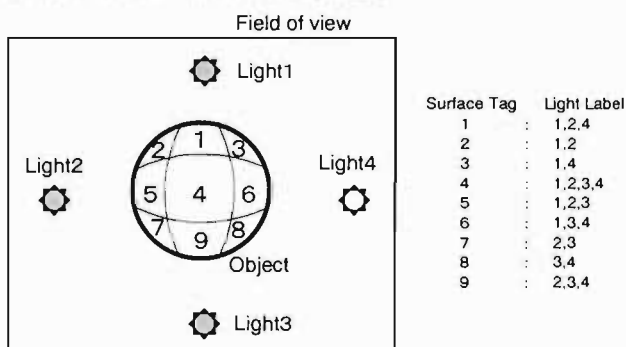


図10 タグ付けした照射領域

光源参照テーブルから、照射する光源群が同じものである領域ごとにタグをつける。これによって同一のタグを持つ領域は同一の光源の組からその法線方向を算出することができる。計算で利用する光源位置は3つの光源位置が同一直線上にないことが必須条件であり、この条件を満足するものの中から、計算精度を高めるために、輝度の高い3光源を利用することを第2条件として選びだし計算を行う。この理由は、法線方向の変化が輝度に直接的に関係することから、より高い輝度を示す光源を利用することで、計算中の有効桁を確保しようとするものである。

さらに、計算コストを減少させる方法を述べる。図11にその概要図を示す。

平面を有する物体はその同一平面上では、一つのタグが割り振られる。そして、このタグ内の各画素が同一の平面を構成していることを示すことがわかれば、その平面内の一つの画素を計算することによって他の画素の計算をすることがなくなり、計算コストが著しく減少することになる。

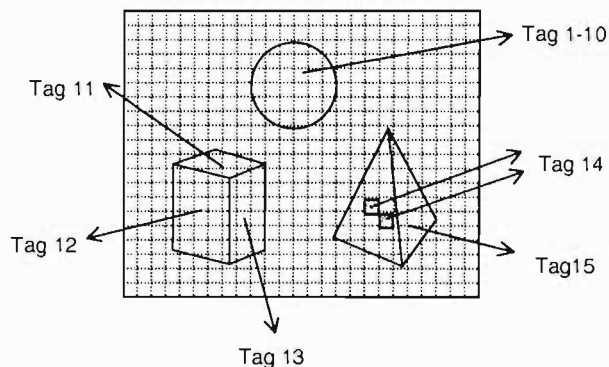


図11 面の種類とタグの関係

この同一平面を構成しているかどうかの判断は光源参照テーブルから対象となる画像を選び出し、この画像内で同一タグ内の画素が同一の輝度であるかを調べることでわかる。これによって、注目しているタグを割り振られた面が平面であるかどうかを判断できる。

4 最適化移動光源の検討

光源経路を最適化を具体化するためにあたって、初期光源(事前指定)と移動光源に分割して検討を行った。初期5光源によって、対象とするシーンに存在する物体形状を大略的に把握し、通常の移動光源によって、不足部分の探索を行う。

(1) 概念

ア 初期5光源

初期5光源で照射される部分を持つ物体について形状を復元する。

イ 通常移動光源

経路の決定は、初期5光源をもとに、2光源で照射されている部分を3光源で照射されるようにするものである。

(2) 方針

ア 初期5光源

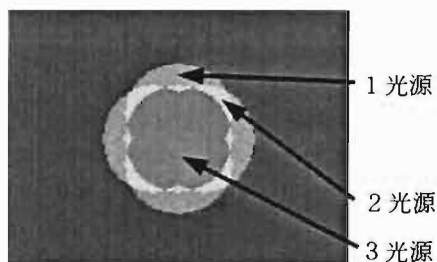


図12 初期5光源による球面に対する照射領域

初期5光源により照射光源の独立性を抽出した独立性画像(図12)から照射光源の数が2である部分に着目する。(照射光源の数が3で一次独立な位置関係があれば、法線方向が求められる)

## イ 処理 1

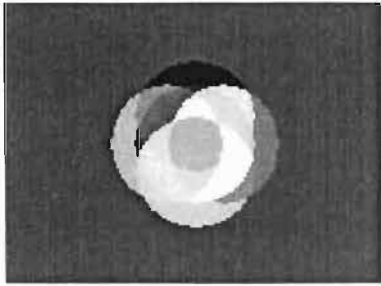


図13 同一の光源群で照射された領域

同一の光源の組み合わせによって照射された部分を抽出した物体面ラベル画像（図13）と独立性画像と関連付けをして、照射光源が2である部分の分類、抽出を行う。

## ウ 処理 2

分類された照射領域が2である部分の平均光源位置（2光源の中点）が、第5光源に最も近い2光源照射領域を選択し、注目する領域的には3番目で、トータルで6番目の光源位置を求める。

すなわち、既に照射されている2光源位置と独立した新たな光源位置を類推し、これを第6番目の光源位置とする。

## エ 処理 3

実際には、既に照射している2光源間の中点からの垂線を求め、空間原点の外側に位置する新たな光源位置とした。この新たな光源位置は、3光源の独立性を主目的とするために、球面正三角形を構成する光源位置となっている。

## (3) 結果

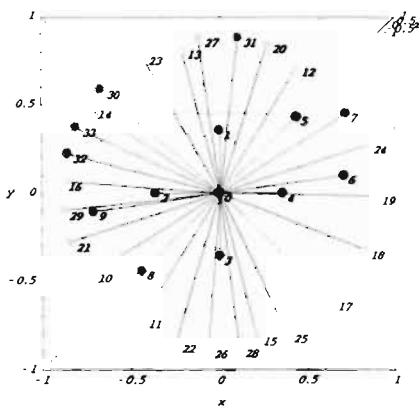


図14 視線方向から見た光源の配置状況

光源経路の最適化手法により、部分的な光源の偏りがなくなり、全体的に分散した位置関係にあることが図3（視線方向から光源位置をプロット）、図4（光源位置の移動を3次元的にプロット）に表現されていることがわかる。

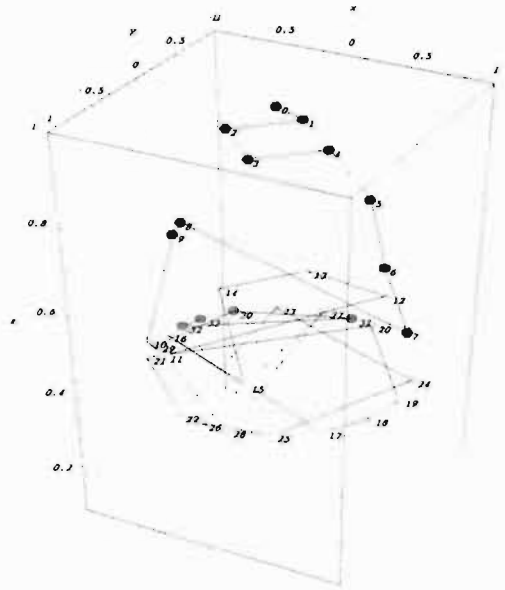


図15 3次元的（俯瞰的）に表示した光源位置

## 5 まとめ

本研究から、以下の結論を得た。

- (1) 光源の移動に対する自由度を増加させたことにより、必要とする画像の総数を抑制することができた。
- (2) 光源位置データベースを生成することにより、光源経路の導出、計算の効率化を可能にした。
- (3) 移動光源を利用した物体形状復元システムを構築し、シミュレーションを通してその有効性を確認した。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 新本浩一, 本多庸悟, 金子俊一:"テクスチャー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

# RESEARCH AND DEVELOPMENT OF FIREFIGHTING ROBOTS (SERIES 6) (MOTION PLANNING FOR ENVIRONMENT RECOGNITION)

Toshiyuki KATO\*, Masanori IGOSHI\*\*

## Abstract

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 in a smoke-filled environment. 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 optimized the method of the planning of light source positioning using light source position lists. These methods were implemented in personal computer. Experiments with computer simulation showed good results.

Key words: shape from shading, moving light source, photometric stereo method, infrared images

---

\*Third Laboratory \*\*Tokyo Metropolitan University