

## 照度パターンから面の3次元的关系の推定

築山俊史

電子技術総合研究所

室内や廊下などの屋内シーンは、通常、蛍光灯のような線光源で照明されており、物の面には光源との位置関係で決まる照度分布が生じている。本報告では、見かけの照度分布の中心位置の違いから、隣接する二つ面の3次元的关系を推定する手法について述べる。屋内シーンの主要な物体や面の配置の3次元記述、即ち、シーンの骨格モデルは、自律的な移動ロボットの世界モデルとして有用であり、提案する手法は、このような3次元骨格モデルをTV画像から作成するのに有効である。実際の照明環境でこの方式の有効性を検証する。

## Finding the 3-D Relation between Plane Surfaces from Isolux Curves

Toshifumi Tsukiyama

Electrotechnical Laboratory

1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

A skeleton structure of a scene, three dimensional (3-d) configuration of primary objects and surfaces, can be used as a 3-d world model for an autonomous mobile robot. We describe a method for finding the 3-d relation between primary plane surfaces to describe such a 3-d model of a scene using TV images. Relatively large plane surfaces under ordinary lighting have the distribution of illumination. This distribution of illumination on each plane surface contains information on its surface normal. In our approach, the 3-d relation between two surfaces is identified by using the center position of the apparent isolux curves which are constructed from the distribution of illumination on each surface. Several experimental results are shown.

## 1. はじめに

室内や廊下などの屋内シーンの主要な物体や面の配置の3次元的記述、即ち、シーンの骨格モデルは、ロボットが最適な移動経路を探索し、自律的な作業するための世界モデルとして有用である。本報告では、3次元的骨格モデルを作成する時に有用となる、隣接する二つ面の3次元的関係を推定する手法について提案する。

物体の形状を表す完全な線画からは、制限条件が付くものの、シーンでの物体の存在ならびにその形状の認識が可能である。カメラモデルと物の位置に関する拘束条件が与えられていれば、逆透視変換によりその位置が計算できる。しかし、実際のシーンのTV画像では、線画解釈だけでモデル化に必要な情報が十分得られないことが多い。図-1は直方体状の物体の後ろに壁や柱がある室内シーンの線画の例である。この線画は、平行六面体を表す線分と垂直な線分で構成されており、垂直な線分は壁のクラックや柱の縁に対応している。頂点辞書を用いた線画解釈[1,2]では、平行六面体を形成している線分に関しては、その線分の接合関係から、その3次元的形状を記述することは可能である。残りの垂直な線分に関しては、他の線分との接合関係に関して十分な情報がなく、即ち、不完全さのために、その線分近辺の3次元形状が判定できない。しかし、このような垂直線分はシーン内に主要な物体が存在していることを示していることが多く、その線分の近辺の形状を推定することは重要な課題である。このような問題は屋内シーンの線画を解釈するとき、しばしば、遭遇する問題である。

シーンの3次元モデルを作成するためには物の位置情報が不可欠であることから、ステレオビジョンによるシーンのモデル化の手法が多く提案されている。ステレオビジョンでは、画像間の対応付けに、物体の縁に相当す

る線分が特徴点[3]として使われることが多い。ステレオビジョンで、位置情報が得られるのは、画像間で対応が付いた特徴点に関してである。言い変えるならば、線分の部分に関してのみである。シーンのモデル化には、この線分の接合関係を位置情報を基に調べることになるが、いずれにしても、孤立した線分に関しては、前記の頂点辞書のときと同様の問題が発生する。

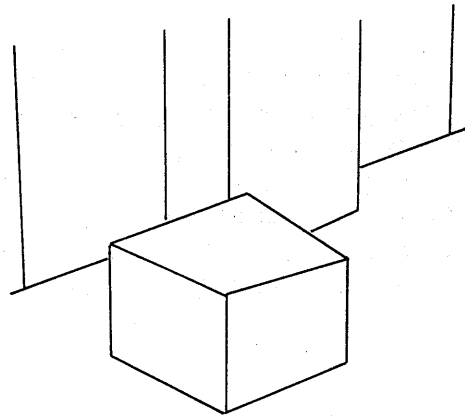


図1 室内シーンの線画の例

この問題は、画像データの線分化処理の過程で物の面の情報が欠落することによる。強力なビジョンシステムの実現のためには、線分に関する情報だけでなく、面の情報をも統合して、シーンの解析をすることが不可欠である。面の情報を得る直接的な方法として、レーザレンジファインダ[4]を使い、注目している線分の両側の部分の3次元計測をして、面の位置や傾きを計算する方式[5]がある。より自然な方法は、TV画像から得られる面の明るさの情報を活用することである。室内や廊下では、天井からの照明により、物の面に明るさの分布が生じている。この明るさの分布は、光源と面の位置関係により決まる。本報告で提案する手法は、面と面の3次元的関係を各々の明るさの分布の違

いから求める。この手法はいわゆる "Shape from Shading" 手法 [6] とは異なる。ここで対象としているのは、比較的大きな面であり、そして、照明は通常の室内の照明装置によるものである。それゆえに、シーン内の面は照明による照度分布が生じる。これは "Shape from Shading" による手法が要求する、一つの平面は一様な明るさを持つと言う仮定から大きく外れている。

## 2. 照明モデル

室内や廊下での照明器具は蛍光灯が一般的である。この節では蛍光灯で照明されたシーン内で物の面の明るさがTV画像でどのように観測されるかについて、モデル化する。まず最初に、点光源による面の照度とTVカメラで観測された面の見かけの明るさとの関係について述べる。図-2に示すように、面  $dA_o$  が距離  $r$  にある光源  $dA_s$  で照らされているとする。光源が十分小さくて点光源とみなすことができるとき、その光源による面の照度  $E_i$  は距離と入射角  $\theta_i$  の関数になり、その関係は以下の式で与えられる。

$$E_i = \frac{I \cos \theta_i}{r^2}$$

ここで、 $I$  は光源を点光源とみなしたときの光度を表す。光源からの光は面で反射し、ある輝度を持つ二次光源となる。物の面が完全拡散面であれば、その照度と輝度の関係は以下のような式で与えられる。

$$L_r = \frac{\rho E_i}{\pi}$$

ここで  $\rho$  は、面の反射係数を表す。

物の面を光源とみなし、これを図-2に示すようにTVカメラで観測すると、その撮像面の照度  $E_r$ 、即ち、見かけの明るさは以下の式で与えられる [7]。

$$E_r = L_r \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f_p}\right)^2 (\cos \alpha)^4$$

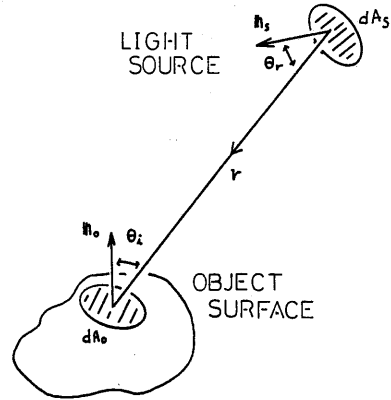


図2 光源と物の面との関係

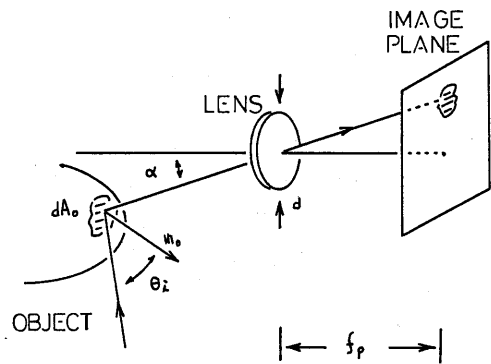


図3 TVカメラによる物体の観測

ここで  $f_p$  はレンズの焦点距離、 $d$  はレンズの直径、 $\alpha$  は光線の光軸からの偏角を表す。以上の関係式から、TVカメラで観測される面の見かけの明るさは、その面が完全拡散面であれば、その照度に比例したものである。ただし、観測する過程でカメラ系でのシェイディング  $((\cos \alpha)^4)$  による影響を受ける。これは一般に、補正可能なので、無視できる。

室内や廊下での一般的な照明器具である蛍光灯は線光源である。線光源による照度

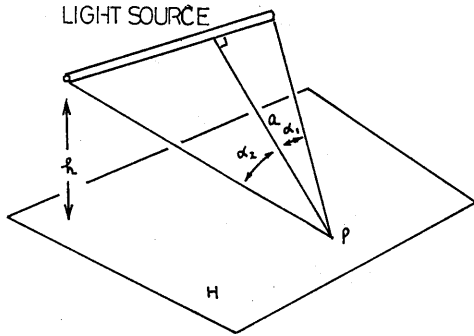


図4 線光源による照度

(図-4 参照) は以下の式で与えられる [8]。

$$E_i = I_l \frac{h}{a^2} (2(\alpha_2 - \alpha_1) + \sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1)$$

ここで  $h$  は光源の面からの高さを、 $a$  は面上の点  $p$  から光源までの距離を、そして、 $I_l$  は単位長さあたりの光源の光度をそれぞれ表す。この式は点光源による照度と異っているように見えるが、照明工学の知見 [8] によると、光源の高さが線光源の長さの2倍以上であれば、その照度は等価的な光度を持つ点光源をもとにした計算との誤差が、数パーセント以内であり、照度計算のうえでは、実用上、点光源とみなしてさしつかえない。また、完全拡散面は本来は概念的な反射面と考えられているが、実際のところ、ここで対象となる廊下とか室内の比較的大きな面、例えば、壁、ドアなどは、くすんだ表面で、光源に対して、傾きが急でなければ、完全拡散面とみなしても実用上問題がないと言われている。

以上のことから、室内や廊下では等価的に点光源で照明されており、シーン内の壁やドアなどの平面では距離の二乗に反比例し、入射角の余弦に比例するような照度分布が生じていると考えてよい。壁とかドアなどの面

は完全拡散面とみなせることから、TVカメラでは面上の照度に比例した輝度を見かけの明るさとして観測していることになる。

### 3. 照度パターン

前節の結果から、室内にある物の面には、等価的な点光源による照度分布が生じている。この照度分布 (図-5 a) からは、同じ照度を結ぶ等照度曲線 (図-5 b) を面上に描くことができる。光源が理想的な点光源であれば、等照度曲線は、中心が最も明るく、周辺にいくほど暗くなる同心円になり、その中心は光源からその面に降ろした垂線の足になる。このことから、等照度曲線はその面の法線方向の情報を含んでいる。

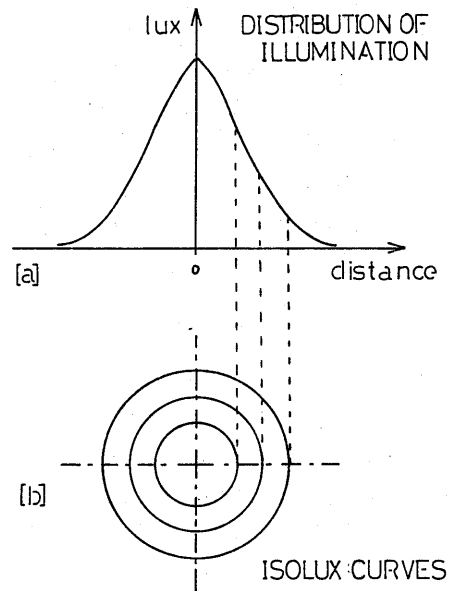


図5 照度分布から等照度曲線

実際の室内では、複数の蛍光灯で照明されていることと、さらに、壁などの面からの反射光が二次光源となることから、等照度曲線は真円ではない。しかし、近くにある一次光源がその面の照度分布に最も影響すると

考えられることから、歪んではいないが、同心円状の等照度曲線が得られる。TVカメラでは、この照度分布を輝度分布として観測していることになる。反射面が完全拡散面であれば、照度と輝度は等価になる。しかし、カメラが光源とは異った位置にあることと、撮像面と対象面が必ずしも平行ではないので、画像から得られる等照度曲線はさらに歪んだものになる。一般に見かけの等照度曲線から面上の等照度曲線を復元して、その中心を求めることは困難が多い。

ここで注目しているのは、線分の両側にある二つの面の相対的な3次元関係である。二つの面が接していれば、凸か、凹に面が交わっているか、あるいは、平行になり接しているかのどれかである。後者の場合、面の境界線はクラックによる。画像中の孤立した線分とその両側の領域が、この三つの関係うちのどれに相当するか、即ち、凸か、凹か、あるいは、平行かを定めることができれば、シーンの3次元モデルを作成するのに有効な情報となる。一般に、屋内の人工的な構造物では、凸や凹に面が交われば、その角度は90度になることが多く、面の交わっている状態がTV画像から判別できれば、その交角は予測できる。

もし、近接した二つの面が同じ光源で照らされているとすると、等照度曲線の中心位置の関係から、その面の3次元的关系が推定できる。図-6は凹に交わった垂直面( $S_1$ と $S_2$ )が、点光源( $L$ )により照明された時の等照度曲線の中心の位置関係を示したものである。この図は、説明の簡略化のために、光源を通り床に平行な断面のみを表し、TVカメラは光源と同じ高さにしてある。 $S'_1$ と $S'_2$ は、二つの垂直面の画像上での領域を、 $V'$ はこの二つの垂直面によりできる画像中での線分を表している。垂直面上( $S_1$ と $S_2$ )の等照度曲線の中心位置は、光源 $L$ から各面

に降ろした垂線の足( $C_1$ と $C_2$ )となり、画像面での位置は各々 $C'_1$ と $C'_2$ となる。このことから、二つの面が交わり、凹になれば、観測される等照度曲線は垂直線分で分離され、その中心点は、図-7aに示すように、それぞれの面と同じ側に現れる。

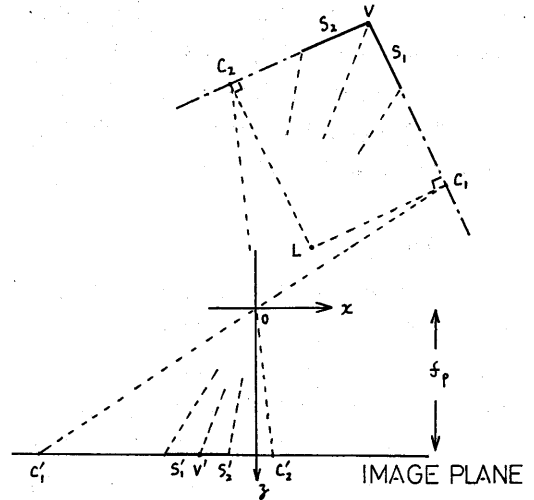


図6 点光源で照明された垂直面

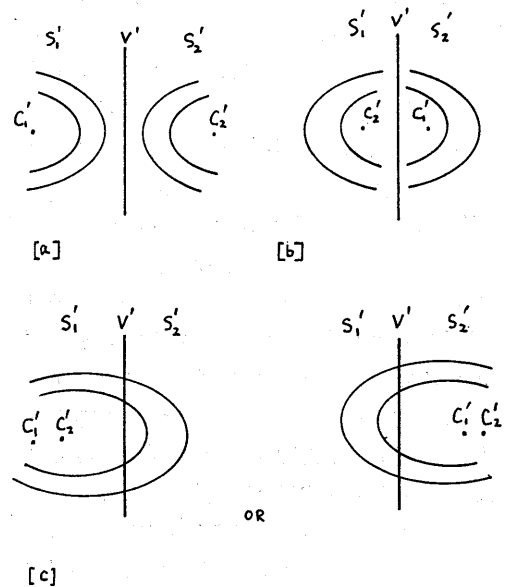


図7 等照度曲線の中心位置の関係

二つの垂直面が凸に交わっている場合も、等照度曲線の中心の画像での位置と面の傾きの関係は、同様な方法で求めることができ、等照度曲線の中心位置は、垂直線分を横切り、反対側の面に現れる傾向がある(図-7b参照)。そして、二つの面が平行、即ち、クラックが生じている場合、二つの等照度曲線が重なり、その中心点が一致する傾向がある(図-7c参照)。本報告で提案する方式は、等照度曲線の画像上での中心位置関係よりその面の交わりを推定する。

#### 4. 実験結果

ここで提案した手法を通常の室内照明のもとで検証した。図-8は実験に使用した室内シーンの一例である。このシーンは三つの垂直なパネル板をかぎがたに配置し、室内や廊下の壁の凹凸を模擬したものである。照明は室内の天井に、等間隔に取り付けられた蛍光灯による。その照度は約500ルクスであった。TVカメラの高さは約85cmで、その光軸は床にほぼ平行である。視野はおよそ17度で、映像化された壁の大きさは幅が約1mである。TV画像は512x480画素で、ビデオ信号は256レベルに量子化されている。画像データはSUNワークステーションで量子化され処理された。

等照度曲線を抽出する前に、sobelオペレータによるエッジ検出と、近接画素を見つけるために領域番号付けにより、壁に相当する平面領域を画像から抽出した。さらに、各平面領域の明るさを7x7のウインドウオペレータにより平均化し、0.5レベルごとに等照度領域を求めた。正確には、この帯状の領域を細線化したものが等照度曲線になるが、ここでは、この帯状の領域を等照度曲線とする。図-9に図-8から得られた平面領域の等照度曲線を示す。この場合、表示の便宜上、2レベルごとの等照度曲線になっている。

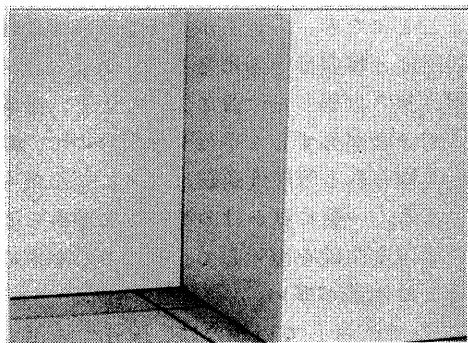


図8 実験に使用した室内シーンの例

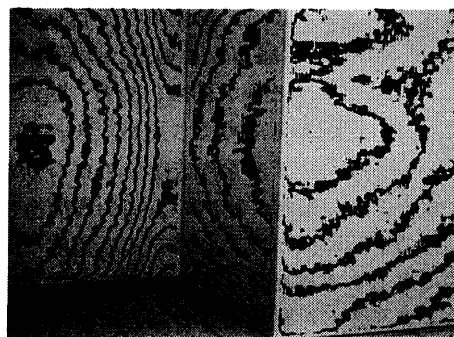


図9 室内シーンでの等照度曲線

実際のシーンから得られる平面上の等照度曲線は、他の面からの反射や、複数光源の影響で必ずしも真円による同心円とは限らない。また、映像化する過程で、平面領域がTVカメラと正対しているとは限らない。そのため、等照度曲線はかなり歪んだ曲線になる。提案している手法は、正確な等照度曲線の中心を求めることを要求しているのではない。隣接する領域間での、それぞれの等照度曲線の見かけの中心の相対的位置関係を知ることである。そのため、ここでは、照度曲線に円を当てはめ、その中心点を照度曲線の

中心とした。そして、直径が大きいものを主要な光源による照度曲線とみなした。図-10に、画像中の左端の平面領域の照度曲線の円による曲線のあてはめの結果を示す。この図では、円の中心は、画像の外にあるので表示はされていない。

図-8の真中と、右端の平面領域にも同じ処理を施し、等照度曲線の中心を求めた。図-11に真中、図-12に右端の領域の照度曲線の円によるあてはめと、その円の中心点を示す。この実験結果から、左端の垂直面と真中の面の見かけの照度曲線中心位置から、この領域はシーンの中では、凹に交わっていると推定できる。また、真中の領域と右側の領域の関係は、垂直線を挟んで、各々の中心点が反対側の領域にあり、このことから二つの領域は凸に交わっていると推定できる。

## 5. おわりに

本報告では、室内や廊下などの屋内シーンを構成する主要な面の3次元的关系を推定する方法として、照明による照度パターンを利用する手法を提案した。蛍光灯のような線光源で照明された室内シーンを照明工学の知見からモデル化した。照明により面上に生じた等照度曲線の見かけの中心位置と、面の3次元关系を明らかにした。実際の照明環境で、等照度曲線の見かけの中心位置から面の3次元关系を求める方式の有効性を検証した。

謝辞 実験で使用した円あてはめプログラムは高橋裕信氏(三洋電機)から提供されたものである。ここに感謝の意を表す。

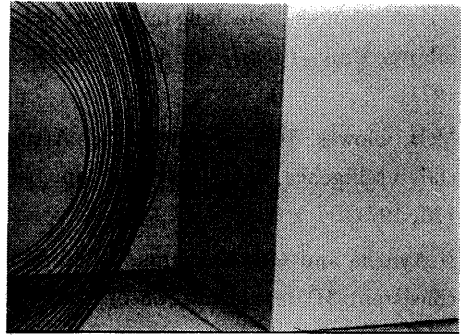


図10 左端の領域の照度中心

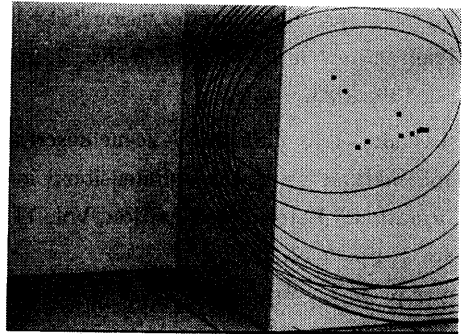


図11 真中の領域の照度中心

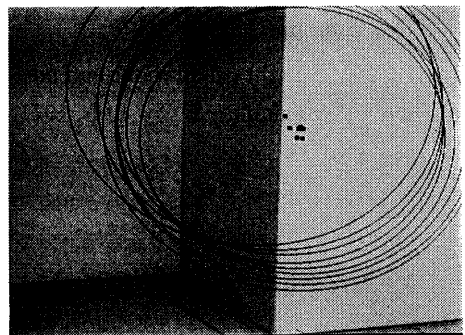


図12 左端の領域の照度中心

### 参考文献

- [1] D.A. Huffman, "Impossible objects as non-sense sentences," *Machine Intelligence* (Edinburge Univ. Press), Vol. 6, pp. 295-323, 1971.
- [2] M.B. Clowes, "On seeing things," *Artificial Intelligence*, Vol. 2, No. 2, pp. 79-116, 1971.
- [3] N.Ayache and O.D.Faugeras, "Building a consistent 3D representation of a mobile robot environment by combining multiple stereo views," *Proc. 10th IJCAI*, pp. 808-810, 1987.
- [4] R.A. Jarvis, "A perspective on range finding techniques for computer vision," *IEEE Transactions on PAMI*, Vol. 5, No. 2, pp. 122-139, 1983.
- [5] M.Oshima and Y.Shirai, "A scene description method using three-dimensional information," *Pattern Recognition*, Vol. 11, No. 1, pp. 9-17, 1979.
- [6] B.K.P. Horn, "Understanding image intensities," *Artificial Intelligence*, Vol. 8, No. 2, pp. 201-231, 1977.
- [7] B.K.P. Horn and R.W. Sjoberg, "Calculating the reflectance map," *Proc. DARPA IU Workshop*, pp. 115-126, 1978.
- [8] H.A.E. Keitz, "Light calculations and measurements," *Macmillan & Co. Ltd.*, 1971.