

## 解説



## 単眼視画像からの3次元情報復元

—中心投影の逆問題とその解法—†

尺 長 健††

## 1. はじめに

人間は視覚系により、3次元世界の2次元平面への投影像として得られる画像から、元の3次元空間を復元し、容易に3次元世界を理解することができる。しかし、これはさまざまな3次元情報抽出原理を総合的にかつ柔軟に利用することにより実現できるのであり、同様の機能を計算機で実現するにはなお解決すべき問題は少なくない。視覚系は一つの単純な原理により支配されるのではなく、幾つかの原理を統合するシステムとして捉えるほうが妥当である。したがって、これを計算機上で実現するには、(a)3次元情報抽出に関わる基本原理の解明、および(b)各種3次元情報抽出原理の統合の二つのフェーズにわたる研究が必要である。このうち前者については、1970年代以降、機能指向型研究により多くの方法が提案されてきた。これらは次のように分類できる。

- (1) 三角測量原理に基づくもの(ステレオビジョン, パターン投影法)
- (2) 単眼視画像生成過程の逆問題を幾何的に解くもの
- (3) 単眼視画像生成過程の逆問題を光学的に解くもの(shape from shading, shape from focus)
- (4) 剛体性を仮定した動画像解析(shape from motion)

このほか、複数原理の組合せが種々考えられるが、原理的には上記分類で従来研究を整理できる。4つのアプローチはそれぞれ異なる原理に基づくものであり、いずれも視覚系の重要な要素であり、活発な研究が展開されているが、本稿では誌面の関係上(2)に焦点を絞り最近の研究を解説する。

この問題は、1枚の写真や絵画から元の3次元空間の状態を理解する問題の幾何的側面を対象としている。厳密にいうと、中心投影により生成された1枚の静止画像(単眼視画像と呼ぶ)から、対象物形状に関する仮定に従って3次元情報を復元する問題を論じる。これは対象物形状に関する知識と視覚情報とを融合させるという意味から重要な研究であり、CADベースビジョン・ロボットの視覚系の構成技術としての意義が大きいと考えられる。

## 2. 中心投影とその逆問題

## 2.1 中心投影—画像生成過程の幾何モデル

画像理解は画像生成過程の逆過程であり、画像理解問題を論じるにあたっては、画像生成過程すなわち撮像系を厳密に定義する必要がある。画像理解においては、撮像系のモデルとして、通常、直交投影か中心投影あるいはその中間的な投影を仮定することが多い。直交投影は対象が十分に遠く、視野が狭い場合には良い近似を与えるが、対象によっては、大きな歪みを生じるため、使用範囲がかなり限定される。一方、中心投影はピンホールカメラをモデル化したもので、数学的な取扱いが厳密にできるなどの長所が多い。ここでは中心投影を仮定する。なお、実際にはカメラの撮像系はこのように単純ではなく、種々の歪みを含む。歪みの補正自体が一つの大きな研究テーマであるが、ここではこれらはあらかじめなんらかの方法で補正されているものとして話を進める。すなわち、画像は次のようにして生成されるものとする。

3次元直交座標系を、図-1の $xyz$ 系(左手系)とする。ここで、視点は $xyz$ 座標系の原点 $O(0, 0, 0)$ にあり、視軸は $z$ 軸と一致し、対象世界は $z$ 軸の正方向に広がっているものとする。さらに、

† 3D Information Recovery from a Single View—Inverse Problems of Perspective Projection and Their Solutions by Takeshi SHAKUNAGA (NTT Human Interface Labs.).

†† NTT ヒューマンインタフェース研究所

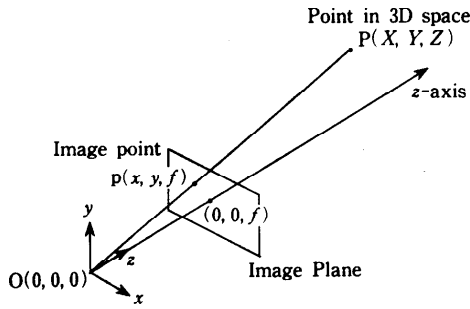


図-1 座標系とカメラモデル

$f$  でレンズの焦点距離を表し、3次元世界は視点を通して、 $z=f$  の画像面上に投影されるものとする。このとき、中心投影を仮定した場合、3次元空間内の  $P(X, Y, Z)$  とその画像面への写像  $p(x, y, f)$  との間には次式が成立する。

$$(x, y, f) = \left( \frac{fX}{Z}, \frac{fY}{Z}, f \right) \quad (1)$$

## 2.2 画像理解—中心投影の逆問題

(1)式で表される中心投影により画像が生成されるとき、各画素  $p(x, y, f)$  は、3次元空間内の直線

$$\frac{x}{X} = \frac{y}{Y} = \frac{f}{Z}$$

上の1点が投影されたものである。しかし、逆に、直線上のどの点  $P(X, Y, Z)$  の像として画素  $p(x, y, f)$  が得られたかを特定することは、画像のみからでは本質的に不可能である。すなわち、写真上の各点を見ただけでは、その点の奥行きに関する情報は得られない。

これは、単眼視画像理解には対象に関する知識が不可欠であることを示す。このような状況は、基本的には動画像に対しても同様であるが、特に静止画像においては対象物体の形状に関するモデルが重要になる。すなわち、単眼視幾何解析が取り扱う3次元情報復元は、対象物体形状に関するなんらかのモデルを仮定した上で成立するものであり、ステレオビジョン・照度差ステレオなどのように原理的には点単位で行う3次元情報復元とは異質である。言い替れば、幾何モデルによる3次元情報復元は、画像情報に対して知識に基づいた解釈を与えるという意味で画像理解にほかならない。

## 2.3 対象物体モデルによる分類

単眼視画像を対象とした画像理解問題は、従来から多様な定式化で取り扱われてきた。これらを

対象物体の形状モデルの観点から整理すると、以下の3種類に分類できる。

1) 物体クラスの限定 個々の対象物体に関する具体的な形状モデルではなく、物体クラスを限定することにより、不良設定問題 (ill-posed problem) を解くというアプローチが従来、線画解釈において取られてきた。最も典型的なものが積木世界 (表面が平面であるような多面体 (積木) で構成される世界。各頂点は3平面の交点であることを仮定することが多い。) に関する各種の研究であり、このほかにはやや一般化された世界が対象とされてきた。これらは、抽出される情報の性質により次の2種類に分けられる。

1 a) 定性的解釈 物体の凹凸関係や相対位置関係などの定性的情報を求めるものであり、積木世界 (Huffman<sup>1)</sup>, Clowes<sup>2)</sup>, Waltz<sup>3)</sup>, 折り紙世界 (多面体以外に多角形平面を認める世界) (金出<sup>4)</sup>, 曲面体世界 (積木として曲面を含むものを認める世界) (Malik<sup>5)</sup>) などがある。

1 b) 定量的解釈 物体の3次元情報として、面の勾配・奥行きなどの定量的情報まで抽出しようとするもので、面の勾配に関する推論として、積木世界 (Mackworth<sup>6)</sup>, 折り紙世界 (金出<sup>7)</sup>) での解釈が取り上げられている。一方、杉原<sup>8)</sup>は、平面方程式により奥行き情報を陽に取り扱い、線形代数による多面体線画の解析を定式化した。これにより、線画解釈問題のマクロな構造が解明され、線形代数のさまざまな知見・技法の利用が可能になったが、他方で、この研究は線画のみでは情報不足になりがちであるという線画解釈の限界を明示した。最近、金谷<sup>9)</sup>は、直交性・平行性などの一般的規則性と線画の定量的解釈を組み合わせる方法を提案している。これは線画解釈の限界を一種の経験的常識により補おうとしている点で意味があるが、対象物体が限定的であるという問題をもつ。

2) 一般的規則性の利用 対象に関する一般的規則性を仮定し、解釈の重要な手掛かりを得ようとする試みが shape from... と呼ばれる研究で広く行われている。規則性としては、テクスチャ (肌目) の一様性 (Witkin<sup>10)</sup>, 金谷<sup>11)</sup>, Aloimonos<sup>12)</sup>, 平行性 (Kender<sup>13)</sup>, Nakatani<sup>14)</sup>, 直交性 (金谷<sup>15)</sup>, Barnard<sup>16)</sup>, 尺長<sup>17)</sup>, 対称性 (金出<sup>7)</sup>) などが用いられている。これらは、対象

に関する詳細な知識がない場合にも適用でき、仮定が満足される状況では強力な3次元の手掛かりを与えるという利点をもつ反面、一般対象に関する詳細な知識を利用するための枠組みとしては仮定が限定的すぎるという欠点をもっている。

3) 具体的3D形状モデルの利用 対象物体の具体的3D形状モデルを仮定して、画像とモデルの対応付けから空間内での物体姿勢を求める問題は、3次元物体認識の最も基本的な問題であり、Roberts<sup>18)</sup>以来多くの研究がなされてきた。この問題は、対応付け問題(3D形状モデルと画像上での点・線分・面などの対応付け)と、対応付けからの姿勢推定問題に分けて考えることができるが、後者に注目すると大きく二つのアプローチがある。

3a) 過剰対応付けによる最小二乗推定 形状既知の多面体に対して、多数の点对応付けから逐次推定により姿勢を復元する方法(Goad<sup>19)</sup>, Haralick<sup>20)</sup>, Gunnarsson<sup>21)</sup>, 洪<sup>22)</sup>。

3b) 最小対応付けに基づく姿勢推定 できるだけ少ない対応付けから考える姿勢候補をすべて求め、これをほかの対応付けにより検証するというアプローチ(Fischler<sup>23)</sup>, Lowe<sup>24)</sup>, Horaud<sup>25)</sup>, 尺長<sup>26)</sup>, 土肥<sup>27)</sup>。

ここで、3a)と3b)とは相補的關係にあり、3a)の初期推定法として3b)を用いることも可能である。両者を対比すると、3a)は基本的には最小二乗推定であり、対応付けの数が十分多い場合には、高精度の解を得ることができるという利点がある反面、多面体以外への拡張性や、十分に多くの点对応付けを必要とする点、あるいは初期推定が実際とかけ離れている場合の収束性など問題点も多く、これだけでは必ずしも実用的ではない。これに対して、3b)は少ない対応付けから3次元の手掛かりを得て、これを順次拡大していくというもので、形状モデルに含まれる情報を最大限利用できるという利点があり、CADベースビジョンとの親和性も大きい。また、多面体以外の対応付けの取りにくい物体への適用も期待できると考えられる。すなわち、3b)は単眼視画像理解の中でも、対象物体形状に関する知識と画像情報の融合という観点から、最も本質的な問題であると考えられる。このような意図から、形状モデルに含まれる基本要素の最小対応付けから3

次元姿勢を効率的に推定する問題が最近注目されつつあり、幾つかの結果が報告されている。3.ではこれについて詳しく解説する。

### 3. 基本構造の中心投影逆問題

#### 3.1 n点問題

物体モデルと画像の対応付けにおいて、最も簡単な対応付け要素としては点を考えることができる。従来、3D剛体モデル上のn点と画像上のn点の対応付けから物体の姿勢を推定するPnP(Perspective n-point)問題に対しては、解析がかなり行われている。以下では、(1)で最も基本的なP2P問題から生じる拘束を解説し、(2)でPnP問題について得られている結果をまとめておく。

##### (1) P2P問題から生じる拘束

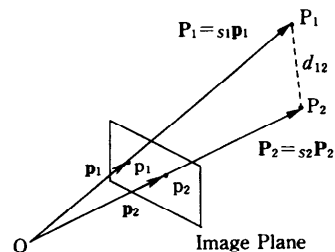
図-2(a)のように空間中の2点 $P_1, P_2$ の中心投影像を点 $p_1, p_2$ で表し、原点 $O$ から $P_i, p_i$ に至る有向ベクトルを、それぞれ $\mathbf{P}_i, \mathbf{p}_i$ で示すと、中心投影条件より次式が成り立つ。

$$\mathbf{P}_i = s_i \mathbf{p}_i, \quad s_i > 0 \quad (2)$$

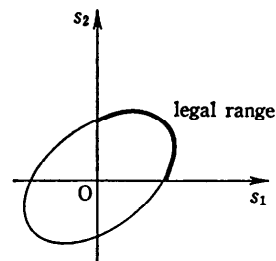
ここで、2点 $P_1, P_2$ の距離 $d_{12}$ が既知のとき、 $s_1, s_2$ は次式を満たさなければならない(島崎<sup>28)</sup>。

$$\mathbf{p}_1^2 s_1^2 - 2(\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2) s_1 s_2 + \mathbf{p}_2^2 s_2^2 = d_{12}^2 \quad (3)$$

$s_1 s_2$ 平面を考えると、(2)式は第1象限を示すから、(3)式で示される楕円の第1象限の部分の任意の点が解になることが分かる(図-2(b))。



(a) P2P問題



(b)  $s_1, s_2$ 平面上での拘束

図-2 P2P問題により生じる拘束

(2)  $P_nP$  問題について得られている結果

$P2P$  問題に対する拘束 (図-2 (b) の楕円) を二つ組み合わせることにより,  $P3P$  問題は二つの楕円の交点を求める問題に帰着できる. すなわち,  $P3P$  問題は1変数の4次方程式に帰着できる (島崎<sup>28)</sup>, Fischler<sup>23)</sup>). これは,  $P_nP$  問題に関する最も重要な結果である. さらに, 点の数が増えた場合についての結果として, 以下の結果が得られている. (a)  $P4P$  問題は1変数の3次方程式に帰着できる (出口<sup>29)</sup>). (b) 同一平面上にあるとき  $P4P$  問題は一意解をもつ (島崎<sup>28)</sup>, Fischler<sup>23)</sup>). (d)  $P5P$  問題は多義性をもつことがある (Fischler<sup>23)</sup>). (e)  $P6P$  問題は一意解をもつ (Fischler<sup>23)</sup>).

### 3.2 $n$ 有向線分問題

点対応付けに基づく姿勢推定では, 多面体など画像上で点抽出が容易な物体しか取り扱えない. ところが, 現実の剛体上には頂点は必ずしも存在せず, また, たとえ存在する場合でも, 画像処理によって頂点を安定的に抽出できるとは限らない. そこで, モデルを記述する要素として, 画像上でより安定的に抽出できる要素である線分に着目することが考えられる. すなわち, 3次元剛体上の線分は, 2頂点を結ぶものとして定義されるほかに, 稜線など必ずしも端点の位置が明確でない場合にも定義できる. ここで, 線分を有向線分として取り扱うことにすると, 3次元モデル内の  $n$  線分の角度関係 (厳密には, 対応する単位ベクトルの内積およびスカラー三重積) と有向線分の対応付けから, 物体の回転を推定することができる. なお, 回転推定のみを目的とする場合, 物体モデル中の有向線分は方向のみが意味をもち, 3次元空間内で自由に平行移動できるものと考えても差し支えない. したがって, この議論は完全剛体だけでなく, 複数の剛体要素が3次元平行移動を許されるような構造をもつ物体の姿勢推定に利用することもできる.

また, 剛体の3次元姿勢は回転と平行移動の各3パラメータで決まり, 一般に回転推定と平行移動推定を分離して考えることができる. 回転が既知のとき, 3次元距離が既知である2点の対応付けから平行移動を決定でき, したがって剛体の姿勢を復元できる. すなわち, 姿勢推定問題の本質は回転推定にあると考えられ, 以下ではこれに焦

点を絞って解説する. (1), (2)でこの問題の基本である1有向線分および2有向線分問題から生じる拘束を述べ, (3)で3有向線分問題の解法およびこれまでに得られている結果をまとめる.

(1) 1有向線分問題から生じる拘束

1本の有向線分の対応付けからでは, ほかの仮定を用いながざり線分勾配を有限個に特定することはできない. しかし, 画像中の有向線分と空間中の有向線分との対応付けによって, 次の2種類の拘束が生じる.

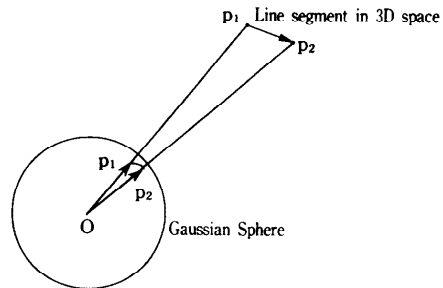
(a) 解釈平面拘束

$p_1$  および  $p_2$  が, 原点  $O$  から3次元空間内の有向線分  $L$  の始点および終点方向への単位ベクトルであるとする (図-3 (a)). また,  $\hat{L}$  で  $L$  を含む有向直線を示す. このとき,  $\hat{L}$  の勾配ベクトル  $\mathbf{l}$  は次式を満たさなければならない.

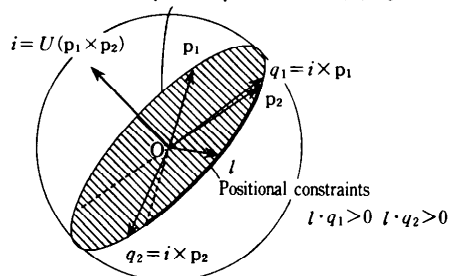
$$\mathbf{l} \cdot \mathbf{i} = 0, \tag{4}$$

ただし  $\mathbf{i} = U(\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2)$

ここで,  $U(\mathbf{p}) = \mathbf{p} / \|\mathbf{p}\|$  とする. (4)式は, Barnard<sup>30)</sup> が解釈平面 (Interpretation Plane) の概念で示した拘束である. これを解釈平面拘束と呼ぶことにする. この拘束により,  $\mathbf{l}$  はガウス球面上でベクトル  $\mathbf{i}$  を法線とする平面上に拘束されるから, 大円 (解釈円 (Interpretation Circle) と呼ぶ) 上に拘束される. ここで, ベクトル  $\mathbf{i}$  を解釈ベク



(a) 線分の中心投影像と始点・終点ベクトル  
Interpretation plane constraint  $\mathbf{l} \cdot \mathbf{i} = 0$



(b) 解釈平面拘束と線分位置拘束

図-3 線分像により得られる2種類の拘束

トルと呼ぶ (図-3 (b)).

(b) 線分位置拘束

直線  $L$  の勾配ベクトルは解釈円上に拘束されるだけであるが、有向線分  $L$  の勾配ベクトル  $\mathbf{l}$  は画像上の線分位置によっても拘束を受ける。この拘束を線分位置拘束と呼ぶ。

$$\mathbf{l} \cdot \mathbf{q}_j > 0 \text{ for } j=1, 2 \quad (5)$$

$$\text{ただし } \mathbf{q}_j = \mathbf{i} \times \mathbf{p}_j$$

ここで、 $\mathbf{q}_1$  および  $\mathbf{q}_2$  を線分  $L$  の線分位置拘束ベクトルと呼ぶ。なお、線分位置拘束ベクトルは上の式で線分像から一意的に決定される。

(5)式は、 $\mathbf{l}$  が解釈平面に対応するガウス球面上の大円のうち、 $\mathbf{q}_j$  成分を正とする半円上に拘束されることを意味する。 $\mathbf{l}$  は両端点に対応する二つの線分位置拘束を満たさなければならないから、ガウス球面上の長さ  $\pi - \text{Cos}^{-1}(\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2)$  の円弧上に拘束される。図-3 (b)に、線分位置拘束ベクトルと  $\mathbf{l}$  の関係を示す。

(2) 2有向線分問題から生じる拘束

2線分  $L_j (j=1, 2)$  の像が観測されたとき、2線分の像がガウス球面上でなす角度と空間内での実際の角度の関係は、透視角度変換 (Perspective Angle Transform) (尺長<sup>17)</sup>) と呼ぶ式で示される。これによる拘束を PAT 拘束と呼ぶ。ここで、各線分は(1)で述べた有向線分に対する拘束 (解釈平面拘束・線分位置拘束) と、PAT 拘束の両方を満たさなければならない。

(a) PAT 拘束

PAT 拘束は、次式で定義されるベクトル  $\mathbf{n}_{12}$  を用いることによりガウス球面上の曲線で表すことができる。

$$\mathbf{n}_{12} = U(\mathbf{l}_1 \times \mathbf{l}_2) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{n}_{12}$  は2ベクトルに直交するベクトル (2ベクトルが一平面上にあるときには法線ベクトルに対応) であるが、向きはベクトルの外積 (左手座標系) で定義される。いま、 $stc$  座標系は直交基底  $\mathbf{e}_s, \mathbf{e}_t$  および  $\mathbf{e}_c$  により、次式で定義されるものとする。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{e}_s \\ \mathbf{e}_t \\ \mathbf{e}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U(U(\mathbf{i}_1 \times \mathbf{e}_c) + U(\mathbf{i}_2 \times \mathbf{e}_c)) \\ \mathbf{e}_c \times \mathbf{e}_s \\ U(\mathbf{i}_1 \times \mathbf{i}_2) \end{pmatrix}$$

なお、 $xyz$  系から  $stc$  系への変換は次の直交行列で表せる。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_x \cdot \mathbf{e}_s & \mathbf{e}_y \cdot \mathbf{e}_s & \mathbf{e}_z \cdot \mathbf{e}_s \\ \mathbf{e}_x \cdot \mathbf{e}_t & \mathbf{e}_y \cdot \mathbf{e}_t & \mathbf{e}_z \cdot \mathbf{e}_t \\ \mathbf{e}_x \cdot \mathbf{e}_c & \mathbf{e}_y \cdot \mathbf{e}_c & \mathbf{e}_z \cdot \mathbf{e}_c \end{pmatrix}$$

ここで、 $\mathbf{R}$  は直交行列であるから、 $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$  が成り立つ。なお、ここで  $T$  は転置行列を示す。また、空間内の角度  $\Delta\alpha_{12}$  および中心投影像がガウス球面上でなす角度  $\Delta\beta_{12}$  は、それぞれ次式で表される。

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha_{12} \\ \Delta\beta_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cos}^{-1}(\mathbf{l}_1 \cdot \mathbf{l}_2) \\ \text{Cos}^{-1}(\mathbf{i}_1 \cdot \mathbf{i}_2) \end{pmatrix}$$

このとき、二つの角度  $\Delta\alpha_{12}$  および  $\Delta\beta_{12}$  によって、 $\mathbf{n}_{12}$  は次式で示される曲線 (PAT 曲線) 上に拘束される。

$$\cos 2\eta = \left( \frac{2 \cos \xi \tan \Delta\beta_{12}}{\sin^2 \xi \tan \Delta\alpha_{12}} - 1 - \frac{2}{\tan^2 \xi} \right) \cos \Delta\beta_{12}, \quad (7)$$

ここで、 $\xi$  および  $\eta$  は  $\mathbf{e}_c$  を極方向としたときの、緯度 ( $0 \leq \xi \leq \pi$  で、 $\xi=0$  は  $\mathbf{e}_c$  方向に対応) および経度 ( $0 \leq \eta \leq 2\pi$  で、 $\eta=0$  は  $\mathbf{e}_s$  方向に対応) を示す。

すなわち、PAT 曲線上の一点が選択されたとき、 $\mathbf{n}_{12}$  は  $stc$  系において次式で与えられる。

$$\mathbf{n}_{12} = \langle s, t, c \rangle = \langle \cos \eta \sin \xi, \sin \eta \sin \xi, \cos \xi \rangle$$

(7)式は経度の簡単な関数  $\cos 2\eta$  が緯度  $\xi$  の一価関数として表されることを示す。図-4 に  $\Delta\beta_{12} = \pi/4$  のときに、 $\Delta\alpha_{12} = n\pi/12$  ( $n=1, 2, \dots, 11$ ) に対する PAT 曲線を示す。PAT 曲線は、 $\Delta\alpha_{12}$  と  $\Delta\beta_{12}$  の組合せにより、ガウス球面上で1本の閉曲線となる場合 (図-4 では  $n=1, 2, 3$  およ

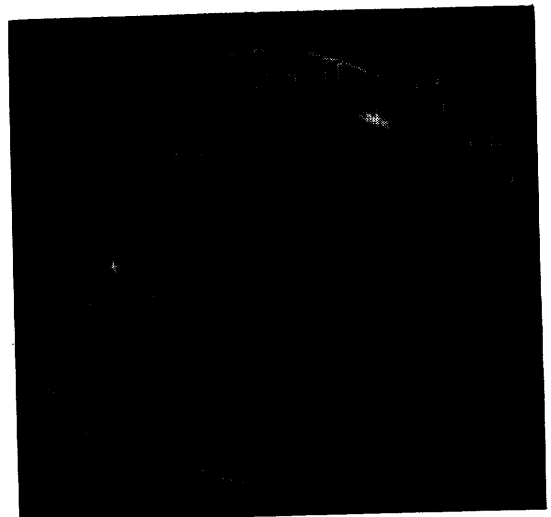


図-4 ガウス球面上の PAT 曲線の例

び  $n=9, 10, 11$ ) と2本の閉曲線になる場合 (図-4 では  $n=4, 5, 6, 7$ ) とがある. なお, PAT 曲線は画像上で取り扱うこともできる. この場合, 一般には PAT 曲線は4次曲線の一つの分岐 (ほかの分岐は  $\Delta\alpha_{12}$  が補角の場合に対応) となるが,  $\Delta\alpha_{12}$  が  $\pi/2$  に等しいときには, 双曲線が得られる. 詳しい解析は, 尺長<sup>31)</sup>を参考にされたい.

(b) 線分に対する拘束と PAT 拘束の関係

既知角度をなす2線分  $L_j(j=1, 2)$  の勾配  $\mathbf{l}_j$  は, (1)で述べた各有向線分に対する拘束 (解釈平面拘束((4)式)・線分位置拘束((5)式))を満たさなければならない. すなわち,

$$\mathbf{l}_j \cdot \mathbf{i}_j = 0 \quad (4)'$$

$$\mathbf{l}_j \cdot \mathbf{q}_{j,k} > 0 \text{ for } k=1, 2 \quad (5)'$$

ただし  $\mathbf{i}_j = U(\mathbf{p}_{j1} \times \mathbf{p}_{j2})$

$$\mathbf{q}_{j,k} = \mathbf{i}_j \times \mathbf{p}_{j,k}$$

ここで, PAT 拘束から相互間の拘束を観察すると以下ようになる. まず, PAT 拘束 ((7)式) を満足する  $\mathbf{n}_{12}$  が与えられたとする. このとき, (6)式より  $\mathbf{n}_{12}$  は  $\mathbf{l}_j$  と直交 ( $\mathbf{n}_{12} \cdot \mathbf{l}_j = 0$ ) し, 一方, (4)'式が成り立つから,  $\mathbf{l}_1$  の候補として次の二つが得られる.

$$\mathbf{l}_1 = \pm U(\mathbf{n}_{12} \times \mathbf{i}_1)$$

ここで, このうち少なくとも一方は線分位置拘束 ((5)'式) に反するから, 解の数は0または1になる. すなわち, 相互拘束により解の存在域が制限される. もし, 妥当な  $\mathbf{l}_1$  が存在する場合,  $\mathbf{l}_2$  の候補は次式で与えられる.

$$\mathbf{l}_2 = \cos \Delta\alpha_{12} \mathbf{l}_1 + \sin \Delta\alpha_{12} (\mathbf{l}_1 \times \mathbf{n}_{12})$$

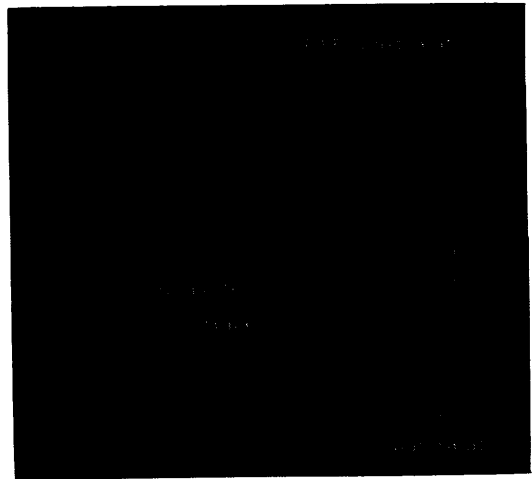
なお, この式により与えられる  $\mathbf{l}_2$  は線分  $L_2$  に関する線分位置拘束を満足する保証がない. 結局, これを満足するものが最終的に妥当な解として残る.

図-5 (a)(b)に, 各拘束の相互拘束の例を半球面ずつに分けて示す. 線分位置拘束により, PAT 拘束は濃い白線部分に制限される. また逆に, 線分位置拘束に対応する曲線 (円弧) も PAT 拘束により濃い白線の部分に制限される.

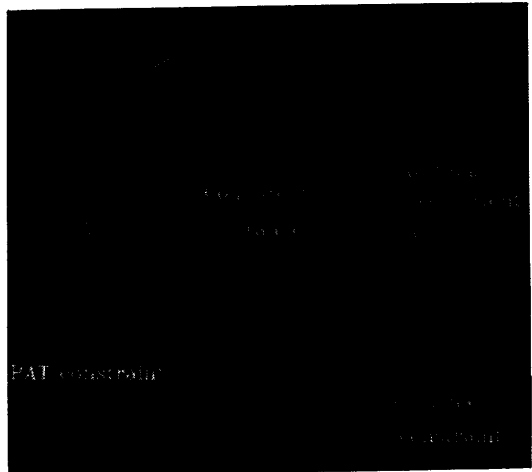
(3) 3有向線分問題の解法

3線分  $L_j(j=1, 2, 3)$  の像が観測されたとき, 3線分の勾配  $\mathbf{l}_j$  を, 既知の内積  $c_{ij} = \mathbf{l}_j \cdot \mathbf{l}_k (j \neq k)$  およびスカラー三重積  $c_{123} = (\mathbf{l}_1 \times \mathbf{l}_2) \cdot \mathbf{l}_3$  から推定する問題が3有向線分問題である.

この問題は, Barnard<sup>16)</sup> が3線分の (三) 直交



(a) 半球上での拘束の両立範囲



(b) 反対半球上での拘束の両立範囲

図-5 PAT 拘束と線分拘束の間の相互拘束

解釈として取り上げ, 探索解法を示したのを発端としている. 尺長<sup>17)</sup>は, PAT 曲線を利用することにより, 三直交解釈問題が1変数の2方程式に帰着できることを示すと同時に, 二直交解釈問題 (残りの角度は既知) が4方程式に帰着できることを示した. また, 尺長<sup>32), 33)</sup>は一般問題に対し, (a)に示す PAT 曲線上での1次元探索解法を提案している. 一方, Dhome<sup>34)</sup>は一般の3有向線分問題が1変数の8方程式に帰着できることを示している. これについては(b)で詳しく述べる.

(a) 1次元探索解法

前節で述べたように, 2有向線分問題に対する PAT 拘束により, 2線分  $L_1, L_2$  の像から  $\mathbf{n}_{12}$  はガウス球上の PAT 曲線上に拘束される. また,

$\mathbf{n}_{12}$  が与えられれば,  $\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2$  は最大 1 個ずつ定まる. これより  $\mathbf{l}_3$  は次式で推定される.

$$\mathbf{l}_3 = U(\omega_1 \mathbf{l}_1 + \omega_2 \mathbf{l}_2 + \tau_{123}(\mathbf{l}_1 \times \mathbf{l}_2))$$

ただし,  $\omega_1 = \tau_{13} - \tau_{23}\tau_{12}$

$$\omega_2 = \tau_{23} - \tau_{13}\tau_{12}$$

ここで,  $\mathbf{l}_3$  が解釈平面拘束および線分位置拘束を満たせば, これが 3 有向線分解問題の解になる. 解釈平面拘束を次式の評価関数として取り扱うことにより, 問題は PAT 曲線上でのこの関数の零交差検出に帰着できる.

$$\zeta(\eta, \xi) = \mathbf{l}_3 \cdot \mathbf{i}_3 \quad (8)$$

なお, 線分位置拘束の判定は別途必要である.

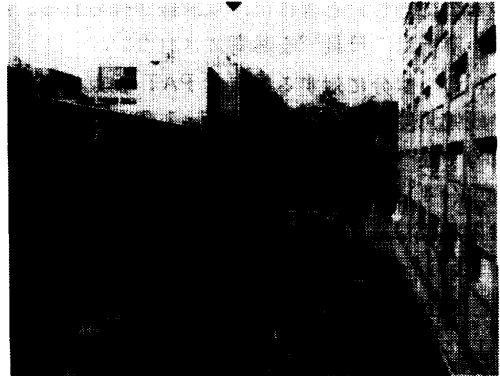
(b) 方程式解法

Dhome<sup>34)</sup> は Shakunaga<sup>17)</sup> の結果を一般化し, 一般の 3 有向線分問題が 1 変数の 8 次方程式に帰着できることを示している. この一般解は P3P 問題および P4P 問題に対する回転推定をも含む内容であり, 種々の条件において 1 変数方程式は表-1 のように簡略化できる. ここで, 3 有向線分問題は一般には 8 次方程式となり代数的には解けないが, 3 線分が共通交点をもつ場合, あるいは二つ以上の直交関係がある場合には方程式は 4 次以下になり代数解が得られる. これらの方程式は, 解の個数の上限値を与えるという意味で重要である. なお, この方程式は線分位置拘束を考慮していないため, これに関する判定が別途必要である.

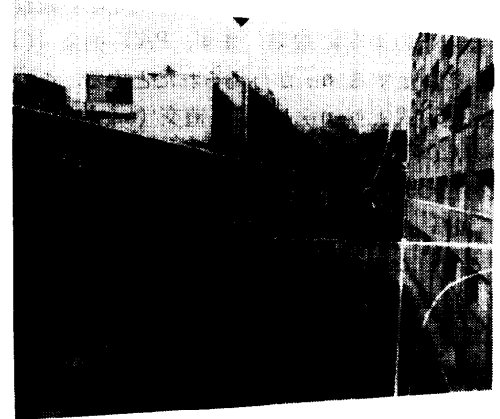
図-6 は三直交条件の場合の実際の画像への適用例を示す (Shakunaga<sup>17), 31)</sup>. 図-6 (a) のように, 検出された 3 本の線分  $\hat{l}_i (i=1, 2, 3)$  に対応する空間内の 3 線分が互いに直交すると仮定し, 3 線分の勾配を推定する問題は 1 変数の 2 次方程式に帰着される (表-1 参照). これは,  $\hat{l}_2$  と  $\hat{l}_3$  の交点  $\hat{p}$  方向に視軸を取ったときに得られる画像 (図-6 (b)) を用いると次のように説明できる. すなわち, 図中で,  $l_1$  の無限遠点は  $l_2$  および  $l_3$  (ただし,  $l_i$  は元の画像上の  $\hat{l}_i$  に対応) に関する PAT 曲線 (双曲線) と線分  $l_1$  の両方に拘束されるから, 交点を求めることにより  $l_1$  の無限遠点 (図中の  $v_1$ ) が求められる. なお, 実際に必要な計算は画像上の線分位置から求められる 2 次方程式を解くだけであり, きわめて容易に  $v_1$  を求めることができる.

表-1 3 有向線分問題の 1 変数方程式の次数

直交関係の数	0	1	2	3
一般の位置	8	8	4	2
三面頂点	4	4	2	1
平面上	4	4	—	—



(a) 画像上の 3 線分



(b) 無限遠点に対する 2 種類の拘束

図-6 線分直交解釈の例

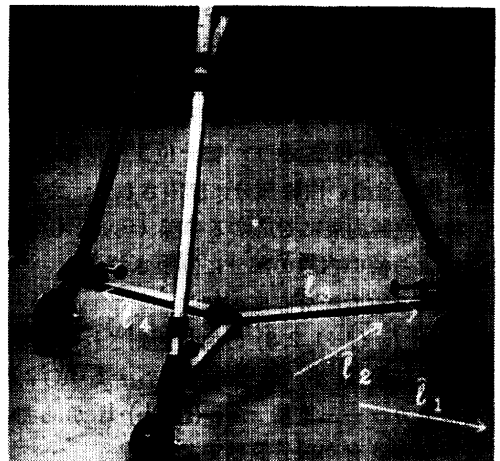


図-7 1 軸で拘束される 2 剛体の回転推定

### 3.3 関節で接続された複数剛体問題

有向線分の対応付けにより、3次元平行移動自由な剛体要素からなる物体の姿勢推定は可能となる。この議論は、1軸まわりの回転自由度をもつ関節を構成要素として含む物体についても適用できるように拡張できる(尺長<sup>35)</sup>)。ここで、重要なことは関節軸が画像上で見えなくても、関節の両側に適当に有向線分が観測できれば、この情報から関節軸の勾配を推定できるということである。解法としては、前節で示したのと同様にPAT曲線上の探索解法を構成することができる(尺長<sup>35)</sup>)。

このクラスの問題の最も簡単な場合として、図-7に示したような例があげられる。すなわち、床面上の既知の角度をなす2線分の像( $\hat{l}_1$ と $\hat{l}_2$ )と、三脚上で既知の角度をなす2線分の像( $\hat{l}_3$ と $\hat{l}_4$ )が観測される場合がこれに相当する。三脚は重力方向を軸として床面上で回転可能であるから、重力方向を仮想的な関節軸と考えることができる。ここで、重力方向の線分は観測されないが、床面上および三脚上の既知角度の見え方により拘束され、有限個の解候補が求められる。すなわち、4線分の像から、関節軸(この場合は重力方向)およびこれに接続された2剛体(この場合は床面と三脚)の姿勢を有限個(この場合は2個)に限定できる(尺長<sup>35)</sup>)。

### 4. 過剰決定問題の解法と対応付け

対応付けが多くの基本要素について行われるときの解法は、対応付けの正確さに依存する。まず、対応付けがかなり正確に行える場合には、2.3で述べた最小二乗誤差推定が有力になる。

一方、過剰決定問題ではあるが、対応付けの数がそれほど多くはない場合や対応付けに対する信頼性が低い場合には、3.の議論を仮説生成に用いる仮説検証的な方法の利用<sup>(19), (24)~(27), (34)</sup>が妥当と考えられる。検証法としては、普通、物体モデルの逆投影が用いられる。すなわち、3.の議論により回転が推定された各剛体において、3次元距離が既知である2点の物体-画像間対応付けが与えられると、平行移動が一意に定まる。この時点で物体モデルを画像上に逆投影することが可能になり、逆投影像と画像をなんらかの方法で照合することにより、仮説検証を実現できる。

また、3.の議論により回転が推定された段階で、回転推定に関する過剰決定問題を解くことも可能である。たとえば、PAT曲線上での探索問題を用いた場合には、(8)式を第4番目以降の線分に適用することにより、解の候補を少数に限定することなどが考えられる<sup>33)</sup>。(ただし、この際、測定誤差に対する配慮が別途必要である。)

### 5. おわりに

本稿では、中心投影の逆問題としての単眼視からの3次元情報復元法の現状を解説した。3.で示した解法は形状既知の物体姿勢復元問題、特にロボット視覚などに広く適用できると考えられる。また、これらの解法は形状モデルに基づくモデルベースビジョンの重要な基本推論ユニットになると考えられる。これと相補的な関係にある諸ユニットとの統合が今後の大きな課題である。

形状モデルに基づく物体認識の成否は、物体と画像の間で正しい対応付けが与えられるか否かにかかっている。本稿では、この問題に関しては深く言及することを避けたが、実用的な観点からは対応付け問題に関する研究の進展が期待される。これに関しての研究は数多く行われているが、たとえば、池内<sup>36)</sup>は物体と距離画像の対応付け手順を、物体形状・センサ特性を考慮したアスペクトグラフ解析をもとに効率的に生成する方法を提案している。

一方、3.の議論を対応付けに用いることも可能である。たとえば、対応付けをまったく仮定しない極端な方法として、対応付けをランダムに行い何度かの試行により解を求める方法(Fischler<sup>23)</sup>)が試みられている。また、あらゆる組み合わせから求められる姿勢をハフ変換により集積する方法なども考えられる。これらは、対応付けを姿勢推定の前提条件とせず、できるだけ多くの姿勢候補を平行して考え、計算の結果として、対応付けと姿勢を同時に求めようとするものであり、並列計算機構が十分に発達すれば有望な方法になるかもしれない。

### 参考文献

- Huffman, D. A.: Impossible Objects as Nonsense Sentences, in R. Meltzer and D. Mitchie Eds., Machine Intelligence, Vol. 6, Edinburgh Univ. Press, pp. 295-323 (1971).
- Clowes, M. B.: On Seeing Things, Artificial



- Intelligence, Vol. 2, pp. 79-116 (1971).
- 3) Waltz, D.L.: Understanding Line Drawings of Scenes with Shadows, The Psychology of Computer Vision, McGraw-Hill (1975).
  - 4) Kanade, T.: A Theory of Origami World, Artificial Intelligence, Vol. 13, No. 1, pp. 279-311 (1980).
  - 5) Malik, J.: Interpreting Line Drawings of Curved Objects, International Journal of Computer Vision, Vol. 1, pp. 73-103 (1987).
  - 6) Mackworth, A.K.: Interpreting Picture of Polyhedral Scenes, Artificial Intelligence, Vol. 4, No. 2, pp. 121-137 (1973).
  - 7) Kanade, T.: Recovery of the Three-Dimensional Shape of a Object from a Single View, Artificial Intelligence, Vol. 17, pp. 409-460 (1981).
  - 8) Sugihara, K.: Machine Interpretation of Line Drawings, MIT Press (1986).
  - 9) Kanatani, K.: Reconstruction of Consistent Shape from Inconsistent Data: Optimization of 2 1/2 D Sketches, Proc. ICCV 88, pp. 508-512, (1988).
  - 10) Witkin, A.P.: Recovering Surface Shape and Orientation from Texture, Artificial Intelligence, Vol. 17, pp. 17-45 (1981).
  - 11) Kanatani, K.: Detection of Surface Orientation and Motion from Texture by a Stereological Technique, Artificial Intelligence, Vol. 23, pp. 213-237 (1984).
  - 12) Aloimonos, J. and M. Swain: Shape from Patterns: Regularization, International Journal of Computer Vision, Vol. 2, pp. 171-187 (1988).
  - 13) Kender, J.: Shape from Texture, Proc. 6th Int. Joint Conf. Artificial Intelligence (1979).
  - 14) Nakatani, H. and T. Kitahashi: Inferring 3-d Shape from Line Drawings Using Vanishing Points, Proc. 1st International Conference on Computers and Applications, Peking, pp. 638-688 (1984).
  - 15) Kanatani, K.: The Constraints on Images of Rectangular Polyhedra, IEEE Trans. PAMI, Vol. 8, No. 4, pp. 456-463 (1986).
  - 16) Barnard, S.T.: Choosing a Basis for Perceptual Space, CVGIP, Vol. 29, pp. 87-99 (1985).
  - 17) Shakunaga, T. and Kaneko, H.: Perspective Angle Transform and Its Application to 3-D Configuration Recovery, Proc. CVPR '86, pp. 594-601 (1986).
  - 18) Roberts, L.: Machine Perception of Three-Dimensional Solids, in J. Tippett Eds., Optical and Electro-Optical Information Processing, MIT Press, pp. 159-197 (1965).
  - 19) Goad, C.: Special Purpose Automatic Programming for 3d Model-Based Vision, Proc. Image Understanding Workshop, Arlington, VA, pp. 94-104 (June 1983).
  - 20) Haralick, R.M. and Y. H. Chu: Matching Wire Frame Objects from Their Two Dimensional Perspective Projections, Pattern Recognition, Vol. 17, No. 6, pp. 607-618 (1984).
  - 21) Gunnarsson, K. T. and F. B. Prinz: CAD Model-Based Localization of Parts in Manufacturing, IEEE Computer, pp. 66-74 (Aug. 1987).
  - 22) 洪海, 川島稔夫, 山本強, 青木由直: 回転行列の正規直交性拘束を用いた多面体の同定, 信学論(D), Vol. J72-D-II, No. 3, pp. 404-415 (1989).
  - 23) Fischler, M. A. and R. C. Bolles: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, Comm. of ACM, Vol. 24, No. 6, pp. 381-395 (1981).
  - 24) Lowe, D.G.: Perceptual Organization and Visual Recognition, Kluwer Academic Publishers (1985).
  - 25) Horaud, R.: New Methods for Matching 3-D Objects with Single Perspective Views, IEEE Trans. PAMI, Vol. 9, No. 3, pp. 401-412 (1987).
  - 26) 尺長健, 金子博: 三次元モデルに基づく単眼視物体認識—四面体配置推定法, 電子情報通信学会情報・システム部門全大, Vol. 1, pp. 395-396 (1987).
  - 27) Dohi, H. and Ishizuka, M.: A Design of a 3-D Vision System Based on Geometric Knowledge, Proc. International Workshop on Industrial Applications of Machine Intelligence and Vision, pp. 217-222, Tokyo (1989).
  - 28) 島崎眞昭: 投影変換の逆変換に関する 2, 3 の考察, 電子通信学会技術報告, Vol. IE-79-15 (1979).
  - 29) 出口光一郎: 射影幾何学による PnP カメラ補正問題の統一的解法, 情報処理学会コンピュータビジョン 90 シンポジウム論文集, pp. 41-50 (1990).
  - 30) Barnard, S.T.: Interpreting Perspective Images, Artificial Intelligence, Vol. 21 (1983).
  - 31) Shakunaga, T. and Kaneko, H.: Perspective Angle Transform: Principles for Shape from Angles, International Journal of Computer Vision, Vol. 3, No. 3, pp. 239-254 (1989).
  - 32) 尺長健, 金子博: 単眼視画像による三面頂点の配置推定—代数解と法線像仮説検定法, 信学論(D), Vol. J71-D, No. 9, pp. 1669-1681 (1988).
  - 33) Shakunaga, T. and Kaneko, H.: Shape from Angles under Perspective Projection, Proc. ICCV '88, pp. 671-678 (1988).
  - 34) Dhome, M. et al.: The Inverse Perspective Problem from a Single View for Polyhedra Location, Proc. CVPR '88, pp. 61-66 (1988).
  - 35) 尺長健: 角度情報に基づく 3次元物体の単眼視姿勢推定, 情報処理学会コンピュータビジョン 90 シンポジウム論文集, pp. 51-60 (1990).
  - 36) Ikeuchi, K.: Generating an Interpretation Tree from a CAD Model for 3D-Object Recognition in Binpicking Tasks, International Journal of Computer Vision, Vol. 1, No. 2, pp. 145-165 (1987).

(平成 2 年 9 月 26 日受付)



尺長 健 (正会員)

1953 年生。1976 年京都大学工学部情報工学科卒業。1978 年同大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年 NTT 入社。現在、ヒューマンインタフェース研究所主幹研究員。画像理解、人工知能に興味をもつ。IEEE, 電子情報通信学会各会員。