

透視角度変換による3次元情報抽出

3-D CONFIGURATION RECOVERY USING PERSPECTIVE ANGLE TRANSFORM

尺長 健 金子 博
Takeshi SHAKUNAGA Hiroshi KANEKO

(N T T 電気通信研究所)
ELECTRICAL COMMUNICATIONS LABORATORIES, N.T.T.

This paper discusses several types of 3-D configuration recovery from angles under perspective projection. We have discussed a relation, named Perspective Angle Transform (PAT), between the apparent and real angles under perspective projection. This paper summarizes PAT, and applies this to some types of 3-D configuration recovery problems. These problems are solved in this paper using PAT and some other relations under perspective projection. Some experimental results show effectiveness of our methods.

1. はじめに

我々^{[1][2][3]}は、中心投影条件での角度の見え方と実際の角度の関係として透視角度変換を導き、その画像解析への利用法を示してきた。ここでは、これらの結果を中心投影法の考え方により整理するとともに、新たに幾つかの利用例を示す。

第2章では、透視角度変換の基本形と一般形を簡単に説明するとともに、新たにPAT曲面の概念を提案し、透視角度変換の適用範囲の拡張を計る。第3章では、透視角度変換基本形を利用した形状復元法を3つ、また、第4章では、透視角度変換一般形を利用した形状復元法を3つそれぞれ示す。これらの中で、第3章で示す直交単位ベクトルの見え方からの面の勾配推定、第4章の3面頂点の見え方からの配置の復元、および散在する2つの角度の見え方からの平面の勾配推定は、今回初めて提案する方法である。どの議論も、中心投影法のもとでの議論であり、情景解析およびロボットビジョンに有効であると考えられる。

2. 透視角度変換

2.1 観測者中心座標系および中心投影法

本論文では、座標系の取り方を次のように定める。まず、3次元空間を、図1の直交座標系X-Y-Zで示す。ここで、X-Y-Z座標系は、左手系をなすものとする。また、X-Y-Z座標の極座標表示をR-θ-φ座標で表わす。このとき、両者の間には次の関係がある。

$$(x, y, z) = (r \cos \phi \sin \theta, r \sin \phi \sin \theta, r \cos \theta)$$

ここで、視点はX-Y-Z座標系の原点O(0,0,0)にあるとし、視軸をZ軸と一致させる。また、対象世界はZ軸の正方向に広がっているとす。さらに、fでレンズの焦点距離を表わし、3次元世界は視点を通して、Z=fの画像平面上に投影されるものとする。

画像平面上の座標系をU-Vで示し、その原点を画像平面とZ軸との交点とする。また、U軸・V軸はそれぞれ、X軸・Y軸に平行とする。

このとき、中心投影法により、3次元空間内の点P(x, y, z)とその画像平面への写像p(u, v)との間には次式が成立する。

$$(u, v) = (f \cdot x / z, f \cdot y / z)$$

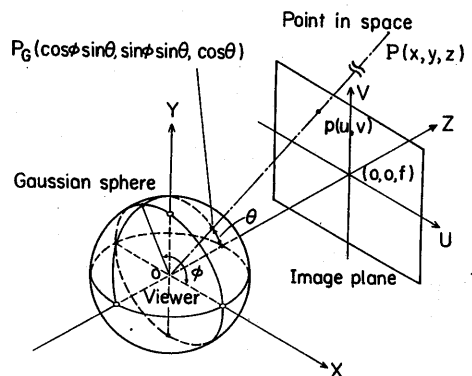


Fig.1 Coordinate systems and perspective transform

2.2 第一透視動座標系と透視角度変換の基本形^[1]

第一透視動座標系は以下のように定義される。3次元空間に物体が存在し、点P(x, y, z)が物体上の点であるとする。ここで、点Pにおける物体の接平面を Γ で表わし、こちら向きの法線ベクトル(単位ベクトル)を E_n で示す。このとき、点P(x, y, z)に対し、直交座標系A-B-Cを、以下に定義する単位ベクトル E_a, E_b, E_c を用いて定める。

$$E_c = (\cos\phi \sin\theta, \sin\phi \sin\theta, \cos\theta) \quad (1)$$

$$E_b = E_c \times F_c \quad / \quad |E_c \times F_c| \quad (2)$$

ただし、 $F_c = E_c - (E_n \cdot E_c) E_n$

$$E_a = E_b \times E_c \quad (3)$$

第一透視動座標系は平面 Γ と視線 E_c にのみ依存する。以下では、X-Y-Z座標系とA-B-C座標系を区別するため、X-Y-Z座標系での成分表示を $\langle \dots \rangle$ で、A-B-C座標系での成分表示を $\langle \dots \rangle$ でそれぞれ表わす。

第一透視動座標系を用いることにより、接平面 Γ 上で点Pを頂点とする角度の見え方が非常に簡単な方程式で表わせる。いま、 F_c と E_c のなす角度を ψ ($0 \leq \psi \leq \pi/2$)とする。ここで、平面 Γ 上に点Pを通り、 F_c と反時計回りに角度 α_i をなす(向きのある)直線 L_i を考える($i=1,2$)。いま、 L_i 上の単位ベクトルを E_i 、 L_i の点 $\langle 0,0,f \rangle$ を通るA-B平面(仮想画像面と呼ぶ)への正射影を l_i とする。また、 l_i がA軸から反時計回りで角度 β_i に位置するとする(図2)。このとき、 α_i, β_i, ψ の間には次の関係式が成立する。

$$\tan \beta_i = \tan \alpha_i / \sin \psi \quad (4)$$

式(4)を透視角度変換の基本形と呼ぶ。ここで、 E_n および E_i は次式で表わされる。なお、法線ベクトル E_n はこちら向き($E_n \cdot E_c < 0$)にとるとする。

$$E_n = \langle \cos \psi, 0, -\sin \psi \rangle \quad (5)$$

$$E_i = \langle \cos \alpha_i \cdot \sin \psi, \sin \alpha_i, \cos \alpha_i \cdot \cos \psi \rangle \quad (6)$$

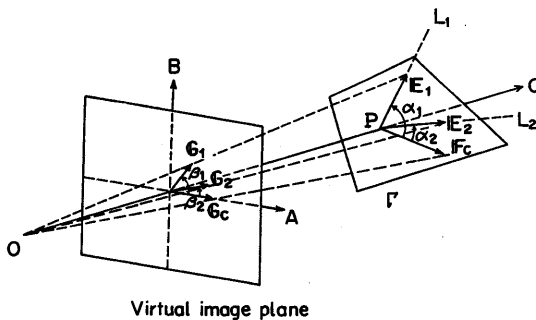


Fig.2 Relation between apparent and real angles

2.3 第二透視動座標系と透視角度変換の一般形^[2]

ここで、仮想画像面上の直線 l_1 および l_2 のなす角の二等分線をS軸とし、S軸およびC軸を含む左手直交座標系S-T-Cを考える(図3)。これは、直線の見え方のみから決定される座標系で、以下では(l_1 と l_2 に関する)第二透視動座標系と呼ぶ。このとき、実際の角度 $\Delta\alpha (= \alpha_1 - \alpha_2)$ とその見え方 $\Delta\beta (= \beta_1 - \beta_2)$ の間には、次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \tan \Delta\alpha & \left(\left((s^2 + t^2) + (s^2 - t^2) / \cos \Delta\beta \right) / 2 + f^2 \right) \\ & = f \sqrt{(s^2 + t^2 + f^2)} \tan \Delta\beta \quad (7) \end{aligned}$$

これは一般角 $\Delta\alpha$ に対して、 $\Delta\beta$ を一定としたときに得られる $p_{\infty n}$ の仮想画像面上での軌跡を示す。

同様に、 $\Delta\alpha = \pi/2$ のとき、式(7)はS-T座標系で、次式のように表わされる。

$$\left((s^2 + t^2) + (s^2 - t^2) / \cos \Delta\beta \right) / 2 + f^2 = 0 \quad (8)$$

即ち、 $\Delta\alpha = \pi/2$ のとき、点 $p_{\infty n}$ は双曲線(式(8))上にしか存在しないことが判る。式(8)は、斜め対称性の議論^[4]から求まる双曲線と本質的に等価である。^[2]

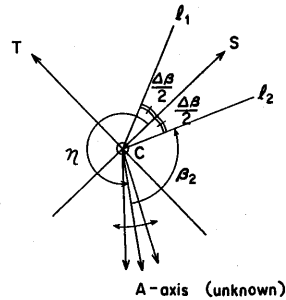


Fig.3 Second perspective moving coordinate system

2.4 PAT曲線^[2]とPAT曲面

文献[2]では、式(7)および(8)をPAT曲線と呼び、仮想画像面上での議論に有効であることを示した。

ここで、PAT曲線はカメラの焦点距離fの関数であるが、いま、焦点距離が連続的に変化する場合を想定すると、PAT曲線を次式で表される曲面と平面 $c = f$ の交線として解釈できる。

$$\begin{aligned} \tan \Delta\alpha & \left(\left((s^2 + t^2) + (s^2 - t^2) / \cos \Delta\beta \right) / 2 + c^2 \right) \\ & = c \sqrt{(s^2 + t^2 + c^2)} \tan \Delta\beta \quad (9) \end{aligned}$$

$$\left((s^2 + t^2) + (s^2 - t^2) / \cos \Delta\beta \right) / 2 + c^2 = 0 \quad (10)$$

今後、式(9)、(10)をPAT曲面と呼ぶことにする。

PAT曲面は、 $\Delta\alpha \neq \pi/2$ のとき、カメラのレンズセンタ(原点O)を頂点とする4次曲線錐面を示す(図4)。また、 $\Delta\alpha = \pi/2$ のとき、双曲線錐面を示す。ここで、PAT曲面は、中心投影法に対応する概念であり、 $\Delta\alpha$ および $\Delta\beta$ により決定される。即ち、PAT曲面は画像面の取り方に依存しないことが重要である。

PAT曲面を中心に見ると、仮想画像面上でのPAT曲線の議論は、画像面として平面 $c=f$ を用いた場合の議論として位置付けられる。ここで、 $c=1$ とすれば、勾配空間^{[4][6][16]}における等価な議論が展開できる。また、同様に、ガウス球面^{[7][8]}($s^2+t^2+c^2=1$)上での議論を行うこともできる。いま、S-T-C座標系の極座標表示をR- Λ -Hとする。即ち、

$$(s, t, c) = (r \cos \eta \sin \lambda, r \sin \eta \sin \lambda, r \cos \lambda)$$

このとき、ガウス球面上のPAT曲線は次式で表せる。

$$\cos 2\eta = \left(\frac{2 \cos \lambda \tan \Delta\beta}{\sin^2 \lambda \tan \Delta\alpha} - 1 - \frac{2}{\tan^2 \lambda} \right) \cos \Delta\beta \quad (\text{when } \Delta\alpha \neq \pi/2) \quad (11)$$

$$\cos 2\eta = - \left(1 + \frac{2}{\tan^2 \lambda} \right) \cos \Delta\beta \quad (\text{when } \Delta\alpha = \pi/2) \quad (12)$$

ここで、 $\Delta\alpha$ と $\Delta\beta$ を既知とすると、 $\cos 2\eta$ を λ の一個関数として扱える点が重要である。また、式(11)および(12)はともに次式で表される大円を漸近線として持つ。

$$\eta = \pi/2 \pm \Delta\beta/2 \quad (13)$$

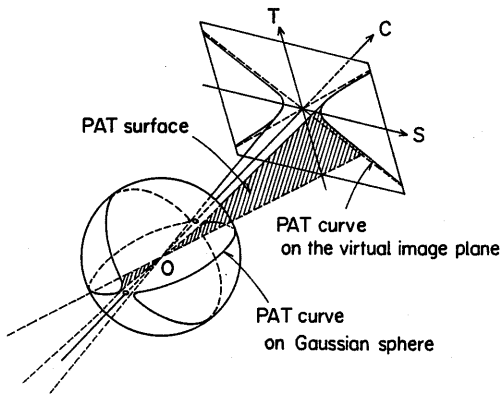


Fig.4 PAT surface and PAT curves

3. 透視角度変換の基本形による画像解析

3.1 E_n 既知の場合^[1]

透視角度変換の基本形の第一の利用法としては、法線ベクトル E_n が既知の場合の解析が挙げられる。何らか

の方法により E_n が既知の場合、2.2節の議論をそのまま適用できる。即ち、視線 E_v (式(1))と法線ベクトル E_n が既知であるから、式(1)~式(3)により透視座標系が求まる。これにより透視角度変換の基本形(式(4))を適用することができ、各直線の見え方から、平面 Γ 上での配置を一意的に決定できる。これは、3次元モデルに基づく画像解析において、強力なツールになる。

3.2 G_n 既知の場合^{[1][3]}

法線ベクトルの像 G_n が既知の場合、 E_n を次のように二義的に求めることができる。(なお、式(14)の導出に当たって文献[1]では平行投影を、また文献[3]では近似的な中心投影を用いているが、次式は厳密な意味で中心投影においても成立する。)

$$E_n = \pm G_n / |G_n| \quad (14)$$

このそれぞれに対して第一透視座標系が定まり、第一透視座標系とX-Y-Z座標系の関係も自動的に求まる。このとき、それぞれの座標系におけるこちら向き($E_n \cdot E_c < 0$)の法線ベクトル E_n は式(5)で示される。また、基本形(式(4))より求まる α を用いて、 E_i は式(6)で表わされる。これにより、法線ベクトル E_n および直線 E_i のX-Y-Z座標系表示が求まる。

3.3 平面上の直交単位ベクトルの像が既知の場合(1)問題

平面 Γ 上の、点Pを端点とする直交単位ベクトル E_1, E_2 (E_1 と E_2 の相対的な長さが既知)の像 G_1, G_2 が既知のとき、第一透視座標系を求め、透視角度変換の基本形を利用できる(図5)。

(2)方針

中心投影法において、角度と等長性のそれぞれについて得られる2つの式を連立させることにより Γ の法線ベクトル E_n を求める。ここでは、角度に関する関係式として、透視角度変換の基本形を用いた解法を示す。即ち、前節の問題と同様に、与えられた条件から第一透視座標系を決定できることを示す。

(3)中心投影条件での2つの関係式

図5のように、3次元空間内に端点Pを共有する直交単位ベクトル E_1, E_2 がある場合を考察する。このとき、仮想画像面上での E_1, E_2 の見え方 G_1, G_2 は、それぞれ図6で表され、次式で与えられる。

$$G_i = f (E_i - (E_i \cdot E_c) E_c) / r_i \quad (15)$$

$$= \langle f \cos \alpha_i \sin \psi / r_i, f \sin \alpha_i / r_i, 0 \rangle$$

但し、 $r_i = r + E_i \cdot E_c = r + \cos \alpha_i \cos \psi$

ここで、 G_1, G_2 の長さの比は、式(15)と基本形を用いることにより次式で表わせる。ただし、 G_1, G_2 が始線となす角度を β_1, β_2 とし(図7)、 β_2 を未知数として取

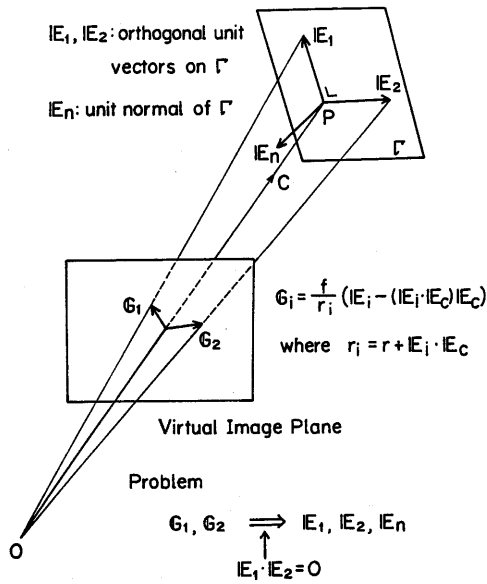


Fig.5 Configuration recovery from images of orthogonal unit vectors

り扱う。

$$\frac{|G_2|^2 r_2^2}{|G_1|^2 r_1^2} = \frac{\sin^2 \psi (1 + \tan^2 \beta_2)}{(\tan^2 \beta_2 \sin^2 \psi + 1)} \quad (16)$$

一方、 E_1 と E_2 が直交していることから、

$$\begin{aligned} \sin^2 \psi &= \frac{1}{-\tan \beta_1 \cdot \tan \beta_2} \\ &= \frac{1 - \tan \Delta \beta \cdot \tan \beta_2}{-\tan \beta_2 \cdot (\tan \Delta \beta + \tan \beta_2)} \quad (17) \end{aligned}$$

が成立する。

(4)第一透視動座標系の決定法

(47) $\Delta \beta \neq \pi/2$ ($0 < \Delta \beta < \pi$) の場合

$$\begin{aligned} q &= \tan \beta_2 \\ \mu &= \tan \Delta \beta \\ \nu &= r_2 |G_2| / r_1 |G_1| \\ \kappa &= -\nu^2 \mu^2 + \mu^2 - \nu^2 - 1 \end{aligned}$$

とおき、式(16)と(17)を連立させると、 q は2次方程式の根の公式から、次式で求められる。

$$q = \frac{-\kappa \pm \sqrt{\kappa^2 + 4\mu^2}}{2\mu} \quad (18)$$

即ち、式(18)により、常に2つの実根が求まる。ところが、2つの根のうち実際に意味があるのは複号が+の方のみであり、 q は常に一意に求まる。以下では、 $\Delta \beta < \pi/2$ の場合について説明するが、 $\Delta \beta > \pi/2$ の場合にも同様の議論が成り立つ。

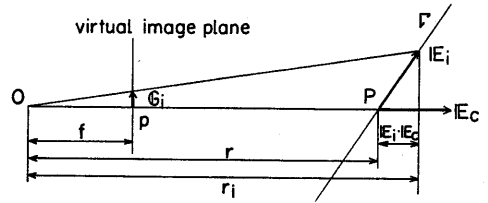


Fig.6 Relation among three vectors G_i, IE_i and IE_c

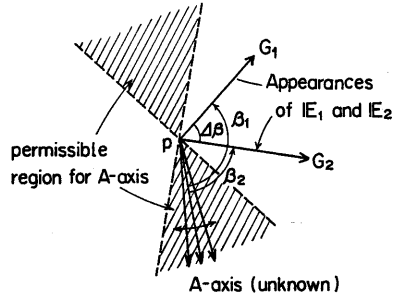


Fig.7 Definitions of β_1 and β_2 and permissible region for A-axis

$\Delta \beta < \pi/2$ のとき、文献[1][2]の議論より、 β_2 の存在領域は、図7の斜線部分で示される。即ち、

$$\begin{aligned} \pi/2 - \Delta \beta < \beta_2 < \pi/2 \\ \text{or } 3\pi/2 - \Delta \beta < \beta_2 < 3\pi/2 \end{aligned} \quad (19)$$

が成立する。一方、 $\Delta \beta < \pi/2$ であるから、 q は次式を満たさなければならない。

$$q = \tan \beta_2 > 0$$

いま、 $-\kappa + \sqrt{\kappa^2 + 4\mu^2}$ は κ の値に拘らず正になり、一方、 $-\kappa - \sqrt{\kappa^2 + 4\mu^2}$ は κ の値に拘らず負となるから、式(18)の2つの解のうち、式(19)を満たすのは、符号が+の場合のみということになる。即ち、 β_2 は次式で求まる。

$$\beta_2 = \text{Tan}^{-1} \frac{-\kappa + \sqrt{\kappa^2 + 4\mu^2}}{2\mu} + n\pi \quad (20)$$

一方、 $\Delta \beta > \pi/2$ のときにも、同様の議論により、結果としては同じ式(20)のみが有効になる。式(20)は、接平面 Γ 上の直交単位ベクトル E_1, E_2 の像 G_1, G_2 から、第一透視動座標系を二義的に決定できることを示す。ここで、 ψ は次式で与えられる。

$$\psi = \text{Sin}^{-1} \frac{\sqrt{(\mu q - 1)}}{\sqrt{q(\mu + q)}} \quad (21)$$

(4i) $\Delta \beta = \pi/2$ の場合

$|G_1|, |G_2|$ の小さい方、即ち短軸が法線とCOLLINEAR

になる⁽¹¹⁾。例えば、 $|G_1| > |G_2|$ とすると、 G_2 が G_n 方向を示し、 $\beta_2 = 0$ or π となる。ここで、 ψ は次式で与えられる。

$$\psi = \sin^{-1} \frac{r_2 |G_2|}{r_1 |G_1|} \quad (22)$$

なお、実在する配置に対しては、式(22)は必ず解を与える。一方、解が定まらないときには、 r_2/r_1 の値が実際の配置と異なることが判る。また、 $|G_1| = |G_2|$ の場合については、 $G_n = 0$ となるが、 $r_1 = r_2$ として式(22)を適用しても差し支えない。

即ち、 $\Delta\beta = \pi/2$ の場合にも、第一透視座標系は二義的に求まる。

(5) 距離比探索法による配置復元

(3)および(4)の議論は、距離比 r_2/r_1 が既知の場合に成立する。ところが、一般には、距離比を未知であると考えなければならない、何かの方法でこれを求める必要がある。

しかし、距離比は上記の議論では考慮しなかった、もう1つの制約を利用することにより簡単に求まる。即ち、上記の議論は、式(20)あるいは式(22)により、任意の距離比に対して、等長性(式(16))と直交性(式(17))を満たす配置が求まることを示す。ところが、こうして求まる解を実際に配置してみると図8のように、正しい距離比(実像および中心投影の意味での鏡像)以外では、 E_1 と E_2 は3次元空間上で異なる点を始点とすることが判る。従って、距離比をパラメータとして、次式で計算できる始点間の距離 $D(r_2/r_1)$ を評価関数とすることにより、正しい解釈を求めることができる。ここで、次式は各 r_2/r_1 に対して求まる2つの配置に対し別々に計算しなければならない。即ち、中心投影であるため鏡像関係を満たす解と正しいものとの配置では、 r_2/r_1 は異なる値をとる。

$$D(r_2/r_1) = (r_1 - E_1 \cdot E_c) - (r_2 - E_2 \cdot E_c)$$

ここで、 r_i は次式で与えられる。

$$r_i = f \frac{|E_i - (E_i \cdot E_c) E_c|}{|G_i|}$$

この方法を、今後、距離比探索法と呼ぶことにする。

(6) 実験結果

計算機で直交単位ベクトルを任意の方向に生成し、この中心投影像を対象として、距離比探索法により求まる2つの解釈のうち実像の解釈で、 ψ に対する評価誤差を調べた結果を表1に示す。比較のため、 $r_2/r_1 = 1$ (即ち、 $r_2 = r_1$)とした場合の評価誤差を示す。これは、従来、テクスチャからの勾配情報の抽出法として用いられる平行中心投影法^{[9][10]}に相当するもので、中心投影の近似的取り扱いである。

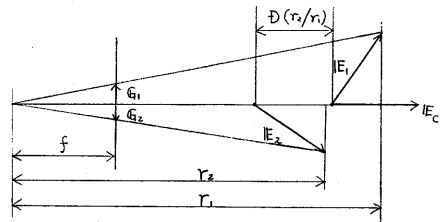


Fig.8 Incorrect configuration estimation by incorrect distance ratio

表1. 距離比探索法と平行中心投影法の比較

推定法	ψ の平均誤差 (単位:度)
平行中心投影法	1.865
距離比探索法	0.033

この実験から、平行中心投影法に比べ、距離比探索法が格段に良い結果を与えることが判る。

(7) 適用領域

距離比探索法を適用するには、予め G_1, G_2 を求めなければならない。この条件が満足される領域としては、次のものが考えられる。

(i) 規則的なパターンを要素とするテクスチャ

各要素パターンの直角の位置、あるいは直交軸が容易に抽出される場合に適用できる。例えば、正方形、辺の長さの比が既知である長方形、直角三角形などにはこの議論を直接適用できる。建物の窓の縦横の長さの比が既知のときなどがこれに相当し、窓の法線ベクトルを推定できる。また、菱形、等脚台形、正三角形など、直交軸がパターンに固有に一意的に求まるもので、斜め対称性^{[4][11]}が抽出できる場合にも適用できる。

(ii) 円

円は $r_1/r_2 = 1$ が成立する場合^[12]、画像面上で楕円として観測される。楕円において、長軸と短軸がみつければ、これを G_1, G_2 として用いることができる。ここで、楕円の長軸・短軸は常に画像上で直交することから、(4)の議論を適用できる。即ち、法線ベクトルの像 G_n は G_2 と COLLINEAR であり、 ψ は式(22)で与えられる。

(8) 二義性の解消法

距離比探索法によっても、3次元配置は、二義的にしか決定できない。これを一意的に求めるには、1枚の画像の1対のベクトルに着目するのではなく、何らかの方法で付加情報を得なければならない。これには、ステレオ・ビジョンの利用、単眼視における知識の利用などが有効と考えられる。

4. 透視角度変換の一般形による画像解析

4.1 画像中に散在する3線分の直交解釈⁽²⁾

(1)問題

図9のように、画像内に三線分 $\hat{l}_i (i=1,2,3)$ が散在する場合を考え、 L_i で \hat{l}_i に対応する3次元空間内の線分を示す。また、 L_i 上の単位ベクトルを E_i で示し、これらが次の関係を満たすものとする。

$$E_1 \cdot E_2 = E_1 \cdot E_3 = 0 \quad E_2 \cdot E_3 = \cos \Delta \alpha$$

このとき、 $\Delta \alpha$ を既知として、 $\hat{l}_i (i=1,2,3)$ から各 E_i を求める問題を取り扱う。 $\Delta \alpha = \pi/2$ の場合についてはBarnard^[14]に論じられている。

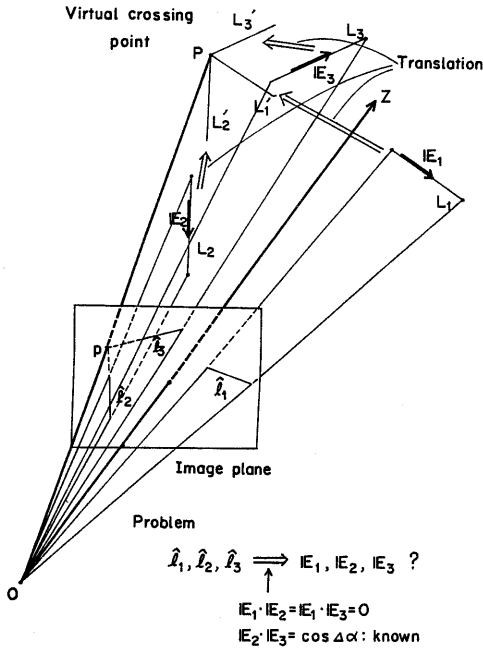


Fig.9 3-D configuration recovery by considering virtual crossing point P

(2)解法

実画像上で \hat{l}_2 と \hat{l}_3 をそれぞれ延長したときに得られる交点、点pに対応する仮想画像面を考えることにより、PAT曲線と直線の交点を求めることに帰着できる。

いま、第二透視動座標系で、 l_1 が次式で示されるとする。ここで、 r, δ は観測量である。

$$t = r s + \delta \quad (23)$$

このとき、 l_2 と l_3 により与えられるPAT曲線(式(7)あるいは式(8))と式(23)の連立解として得られ、次に示す方程式に帰着される。

$\Delta \alpha \neq \pi/2$ のとき

$$\tan \Delta \alpha (I s^2 + J s + K) = f \cdot \tan \Delta \beta \sqrt{(s^2 + (r s + \delta)^2 + f^2)}$$

但し、 $I = (1 + r^2)/2 + (1 - r^2)/2 \cos \Delta \beta$

$$J = r \delta (\cos \Delta \beta - 1) / \cos \Delta \beta$$

$$K = \delta^2 (\cos \Delta \beta - 1) / 2 \cos \Delta \beta + f^2$$

なお、3直線が実交点を持つ場合には、第一透視動座標系を用いて、二次方程式の根として解を求めることができる^[11]。

$\Delta \alpha = \pi/2$ のとき^[14]

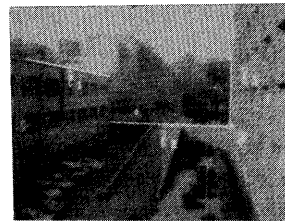
$$I s^2 + J s + K = 0$$

なお、3直線が実交点を持つ場合、問題を一次方程式に帰着できる^[11]。

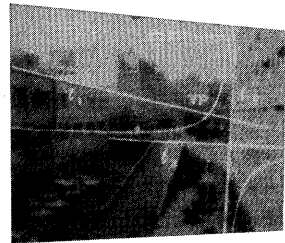
上記の議論は、従来提案されている平行性の利用、複比の利用^[15]、直線集合の直交関係の利用^[16]とは異なる新しい無限遠点抽出法として利用できる。

(3)実験結果

図10(a)は、焦点距離および中心点(図中の中黒丸)が既知のカメラで撮影した情景である。ここで、抽出された3本の線分(\hat{l}_i)に対して上述の議論を適用し、直交解釈を求めた例を示す。図10(a)で、2線分 \hat{l}_2 と \hat{l}_3 の延長線の交点p(図中の白丸)に対する仮想画像面は図10(b)のようになる。(実際の計算では、3本の線分の仮想画像面上の位置のみが必要であり、図10(b)を生成する必要はない。ここでは、説明を容易にする目的で仮想画像面を表示する。)



(a) 3 line segments detected on the image plane



(b) PAT curves and solution on the virtual image

Fig.10 Experiment of right-angled interpretation

ここで、直線 l_2 および l_3 により求まる PAT 曲線（双曲線）を図 10(b) に重ねて表示しておく。この PAT 曲線と直線 l_1 の交点により、仮想画像面上での l_1 の無限遠点の候補が 2 点求まる。同様にして、 l_2 および l_3 に対しても無限遠点の候補を求めることができる。

次に、2 組の無限遠点の組合せのうち、どちらを選択するかが問題である。一般的には、この選択には他の情報を用いることが必要である。例えば、被写体に関する知識や画像の撮影条件を用いることができる場合、これに適合する組合せを選択することにより、一意的に解が求められることが多い。図 10 の場合、被写体がビル（即ち、地面に垂直に建っている）であり、原画像の V 軸が垂直方向とほぼ一致していることを用いることにより、一意解を得ることができる。これにより、 l_1 の無限遠点は図 10(b) 中に含まれる交点であることがわかる。

4.2 交角既知の三面頂点の見え方からの勾配推定

(1) 問題

図 11 のように、画像内に三線分 $\hat{l}_i (i=1,2,3)$ が共通の交点 p を持つ場合、即ち三面頂点を考え、 L_i で \hat{l}_i に対応する 3 次元空間内の線分を示す。また、 L_i 上の単位ベクトルを E_i で示し、これらが次の関係を満たすものとする。

$$E_i \cdot E_j = \cos \Delta \alpha_{ij}$$

このとき、 $\Delta \alpha_{ij}$ を既知として、 $\hat{l}_i (i=1,2,3)$ から各 E_i を求める問題を取り扱う。

(2) 解法

点 p に対応する仮想画像面上で、3 組の PAT 曲線が求まる。ここで、各 PAT 曲線により、 E_i と E_j で張られる平面 Γ_{ij} の法線の無限遠点の位置 $p_{\infty ij}$ が制約される。

一方、この仮想画像面上で点 p を取り扱う限りにおいて、平行投影像と中心投影像は重なる。これは、dual line^[17]（2 つの面の勾配は画像平面における面の交線に垂直な勾配空間内の線上に存在すること）の議論を適用できることを意味する。

即ち、仮想画像面上で、3 組の PAT 曲線が求められ、各 $p_{\infty ij}$ を PAT 曲線上に置き、かつ dual line の制約を満たす三角形の頂点にそれぞれが位置するように、解を探索すれば良い（図 12）。（ここで、平面を勾配空間で扱う場合と画像面で法線の無限遠点の位置で行う場合とでは、稜線の凹凸と dual line の方向の関係が逆転する。即ち、稜線を共有する 2 平面の画像上での位置関係とこれに対応する法線の無限遠点の位置関係とは、稜線が凸のときに反転し、凹のときに一致することに注意しなければならない。）これは、1 つの PAT 曲線に着目し、この上の各点から dual line 条件を満たす 2 方向に直線を考え、対応する PAT 曲線との交点を求め、これが第 3 の dual line 条件を満たすか否かをチェックす

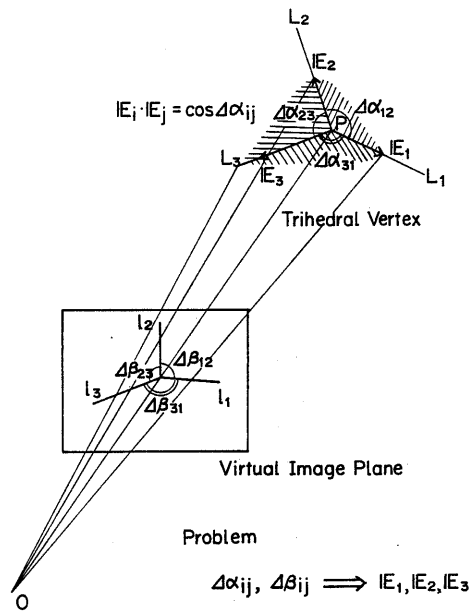


Fig.11 Configuration recovery from image of trihedral vertex

ることにより行える。

(3) 従来法との関係

この議論は斜め対称性による線画の解釈^[4]と解法としては同じ手順を踏む。しかし、両者は次の理由で似て異なるものと言える。即ち、斜め対称性の議論では、面の属性としての対称性を取り扱うため、中心投影を平行投影で近似できる場合（即ち、斜め対称性を容易に抽出できる場合）に適用範囲が限定される。これに対し、本節の議論では、点の属性としての角度を取り扱うため、中心投影を完全にカバーできる。また、斜め対称性の検出^[11]は単なる局所情報処理とは言えないのに対し、角度は局所情報のみから得られるという点も重要な相違点である。

なお、3 つの $\Delta \alpha_{ij}$ のうち 2 つ以上が直角の場合には、3.2 節の方法により議論を簡単化することができる。

(4) 解の数に関する考察

実在する配置をもとに得られた画像に上記の議論を適用した場合、求まる解（鏡像関係を除く）の数は下限が 1 であることは自明である。一方、その上限がいくつであるかは現在のところ不明である。ただし、2 つの解が存在する例を作るのは容易である^[1]。即ち、 $\Delta \alpha_{ij}$ のうち 2 つが直角であり、残りの $\Delta \alpha_{ij}$ について、次式が成立するとき、2 つの解が存在する例をつくることができる（図 12(b)）。

$$\Delta \beta_{ij} < \Delta \alpha_{ij} < \pi/2$$

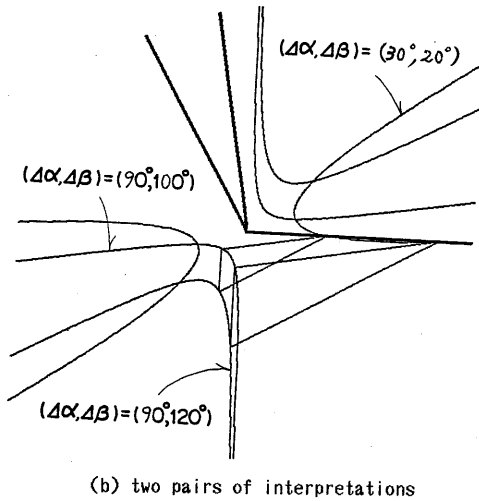
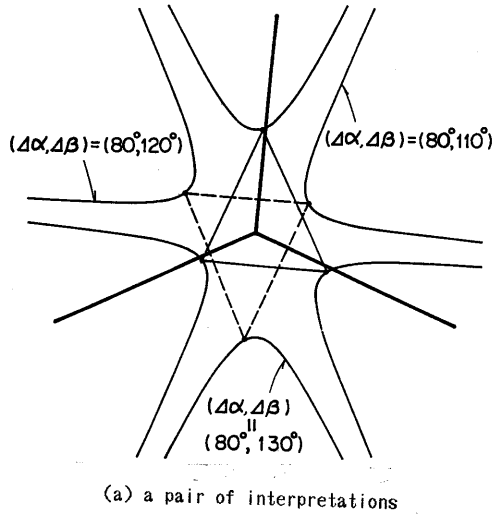


Fig.12 Configuration recovery of trihedral vertex by 3 PAT curves and dual line relations

4.3 散在する2角の見え方から平面の勾配推定

(1)問題

3次元空間内の勾配の等しい(法線ベクトル E_n が共通な)2平面 Γ_1 と Γ_2 (同一平面でもよい)上の既知の2角 $(\Delta\alpha_1$ および $\Delta\alpha_2)$ の見え方 $(\Delta\beta_1$ および $\Delta\beta_2)$ から平面の勾配(即ち、 E_n)を推定する(図13)。

(2)解法

ガウス球面を用い、2つのPAT曲面とガウス球面の交点を求めることにより、 E_n を求める(図14)。こ

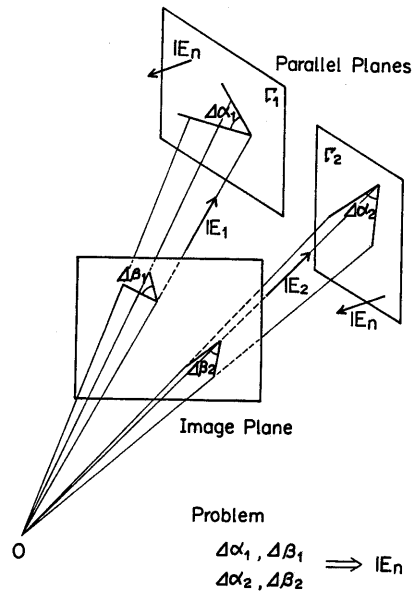


Fig.13 Configuration recovery from two angles on the parallel planes

の問題は、2つの4次式と1つの2次式の連立方程式を解くことに帰着できる。

ここでは、具体的計算手順として、①各PAT曲面とガウス球面の交線(式(11)あるいは(12))を求め、②一方のPAT曲線上の各点が他方のPAT曲線上にあるか否かを判定することにより、3曲面の交点を求める。

まず、 $\Delta\beta_i (i=1,2)$ の第二透視動座標系の極座標表示を $R-\Lambda_i-H_i$ とすると、式(11)より、 $\Delta\alpha_i$ と $\Delta\beta_i$ からガウス球面上のPAT曲線(PAT_i)が定まる。

$$\cos 2\eta_i = \left(\frac{2\cos\lambda_i \tan\Delta\beta_i}{\sin^2\lambda_i \tan\Delta\alpha_i} - 1 - \frac{2}{\tan^2\lambda_i} \right) \cos\Delta\beta_i$$

ここで、 λ_i を0から π まで適当な間隔で振らせることにより各 λ_i に対応する η_i を算出できる。ところで、2.4節の議論から、各PAT曲線は式(13)で表される漸近線(大円)を2つずつ持つ。従って、PAT₁とPAT₂の交点と漸近線の交点とは近接することを利用して、計算を効率化することもできる。即ち、漸近線の交点の近傍で λ_i の間隔を狭くすることも有効と考えられる。

次に、PAT₂上の各点の表示を $R-\Lambda_i-H_i$ に変換する。これは、3次元直交座標系($S_i-T_i-C_i$)の間での座標変換が1次変換であることから、容易に行える。

最後に、 $R-\Lambda_i-H_i$ 座標系においてPAT₁とPAT₂の交点を求めればよい。

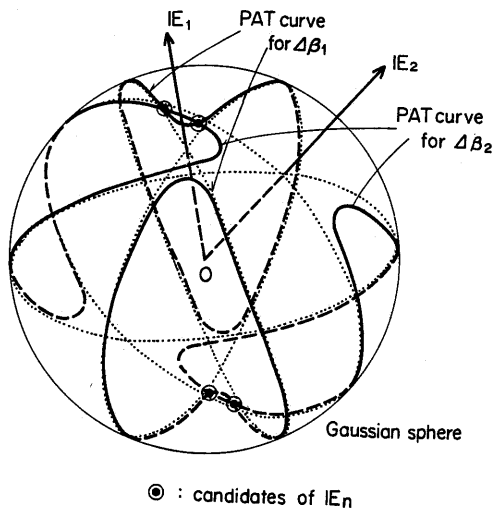


Fig.14 Estimation of IE_n on Gaussian sphere

(3)根の数についての考察

ガウス球面上での議論では、平面上での場合の2倍の根が求まる。即ち、1つの根に対し、それと対をなす根が必ずガウス球の裏側に存在する。ここで、任意の2角の見え方に対し、2つの4次曲面と球面の交点数の最大16対存在しうるが、実際には4対以下であることが多く、まれに6対あるいは8対の解が生じる。

これは、漸近線について考えることにより、容易に説明できる。即ち、ガウス球面上のPAT曲線は2つの大円を漸近線として持つ。一般に、同一でない2つの大円は2つの交点を持つことから、2つのPAT曲線に対応する漸近線の交点は4対存在することになる。ところで、PAT曲線は $\Delta\beta < \Delta\alpha < \pi/2$ のときを除いて、漸近線と交差せず、また任意の経線と1対以上の交線を持たない⁽²⁾。従って、2組ともがこの条件を満たす場合、PAT曲線の交点は最大4対となる。

同様に、1組がこの条件を満たさない場合については交点は最大8対、また2組ともこの条件を満たさない場合には交点は最大16対になる可能性がある。しかし、これらの場合にも交点が4対を越えるのは非常に限られた場合であることが予測される。

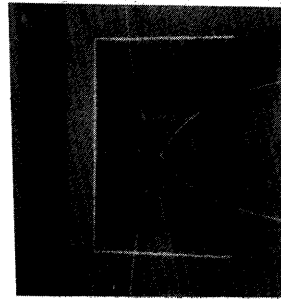
逆に、交点数の最小値は0であり、これは設定条件が満たされていないことを示す。

(4)多義性の解消

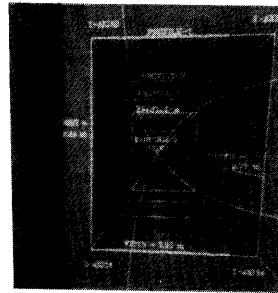
上記の議論から、平行平面上の既知の2角の見え方からの平面の勾配推定には、多義性が残されることが判る。これは、対象に関する知識あるいはステレオビジョンの利用により解消できる。また、3角以上の見え方から多義性を解消することも可能である。

(5)実験結果

廊下シーンの解析⁽¹⁶⁾により抽出された廊下の断面に対して、本節の議論による検証を試みた。この結果、図15(a)に示したように断面の法線の無限遠点を求めることができた。この結果は、平行性から求まる無限遠点と2角の見え方から求まる無限遠点が一致する(図15(b))ことを示し、本節の議論の有効性を示す。



(a) Vanishing point of z-axis estimated by two PAT curves



(b) Coincidence of vanishing point with its 3-D interpretation

Fig.15 Experiment of vanishing point detection by two couples of real and apparent angles

5. まとめ

本論文では、先に提案した透視角度変換を用いた画像解析の議論を進め、幾つかの手法を提案するとともに、実際の適用例を示した。以下に内容をまとめる。

- (1)透視角度変換一般形に対応する概念としてPAT曲面を導入し、同時にガウス球面上でのPAT曲線を示した。これにより、透視角度変換の適用範囲を拡張できた。
- (2)平面上の直交単位ベクトルの像からの平面の勾配推定問題に対し、距離比探索法を提案した。この議論は、透視角度変換基本形をベースとしている。
- (3)三面頂点の見え方からの配置復元問題に対し、仮想画像面上で3つのPAT曲線とdual lineを用いた方法を提案した。

(4)散在する2角の見え方からの平面の勾配推定問題に対し、ガウス球面上の2つのPAT曲線の交点を求める方法を提案した。

本論文の議論はすべて、厳密な意味で中心投影法を取り扱っている。これらの手法は、実際の画像理解において広く適用可能と考えられる。

〔謝辞〕日頃御指導戴く島田情報通信基礎研究部長、塚本統括、増田第三研究室長に深謝致します。また、日頃討論頂く第三研究室の諸氏に感謝致します。

〔文献〕

- [1] 尺長、金子, "透視動座標系による3次元空間の認識", 信学研資, PRL85-31, 1985.
- [2] 尺長、金子, "透視角度変換による画像上に散在する3線分の配置復元", 情処学研資, CV39-1, 1985.
- [3] Shakunaga, T. and Kaneko, H., "Perspective angle transform and its application to 3-D Configuration recovery", Proc.CVPR'86, 1986.
- [4] Kanade, T., "Recovery of the Three Dimensional Shape of an Object from a Single View", Artificial Intelligence, Vol.17, 1981.
- [5] Huffman, D.A., "Impossible Objects as Nonsense Sentences", in Meltzer and Michie Eds., Machine Intelligence, Vol.6, (Edinburgh Univ. Press), 1971.
- [6] Clowes, M.B., "On Seeing Things", Artificial Intelligence; Vol.2, No.1, 1971.
- [7] Barnard, S.T., "Interpreting Perspective Images", Artificial Intelligence, Vol.21, 1983.
- [8] 稲本他, "球面写像による線分の3次元方位と距離の計測", 情処学研資, CV45-2, 1986.11
- [9] Ohta, Y., Maenobu, K and Sakai, T., "Obtaining surface orientation from texels under perspective projection", Proc.IJCAI, 1981.
- [10] Aloimonous, J., "Detection of surface orientation from texture I: The case of planes", Proc.CVPR '86, 1986.
- [11] 呉、浅田、辻, "図形中に存在する斜め対称軸の抽出", 信学研資, PRL85-87, 1986.
- [12] Ikeuchi, K., "Shape from Regular Patterns", Artificial Intelligence, Vol.22, 1985.
- [13] Kanatani, K. and T.C.Chou, "Shape from texture: General principle", Proc.CVPR'86, 1986.
- [14] Barnard, S.T., "Choosing a Basis for Perceptual Space", CVGIP, Vol.29, 1985.
- [15] 遠藤博之、北橋忠宏, "物体の自由な3次元運動の認識", 信学論, Vol.J68-D, No.4, 1985.
- [16] 尺長健、金子博, "単眼視による概略シーンからの個別モデルの生成—屋内シーンのモデル化", 信学研資, PRL84-52, 1984.
- [17] Mackworth, A.K., "Interpreting Picture of Polyhedral Scenes", Artificial Intelligence, Vol.4, No.2, pp.121-137, 1973.