

# 上下動・左右首振りを許した移動カメラによる3次元空間の認識

3-D Motion Analysis of a Camera moving on a Plane by a Motion Stereo Method

北橋忠宏 小田 正 (豊橋技術科学大学)

T. Kitahashi, M. Oda (Toyohashi University of Technology)

This paper describes a motion-stereo method to analyze 3-D motion of a camera.

The camera is permitted to move on a plane, lifting head up-and-down and panning freely but keeping the lay-axis parallel to the plane.

Formulas are derived to calculate parameters including the location of referring points, a rotation angle and a translation vector of objects from the disparity of images in successive frames of an image sequence.

Experimental results of motion analysis of a moving camera are also presented.

## 1 まえがき

画像処理に基づく3次元空間情報の抽出に関する種々の観念に立つ研究が多数報告されている。単一画像から物体の3次元構造を抽出する研究や、単眼の系列画像から物体の3次元的な動きを解析しようとする研究も報告されている。

ここでは、これまで余り考察されていない単眼の移動カメラから得られる系列画像を処理することにより、3次元空間の認識についてはカメラの3次元運動を与える式を導出し、これを実験的情景に適用した結果について報告する。

移動カメラに許された運動はレンズ光軸に垂直な一軸のまわりの回転と3次元的な平行移動であるとし、カメラが動き回る世界は静止物体から構成されているものとする。すなわち、静止世界の中の一つの平面上を、これに対し光軸を平行に保ちながら、上下動・左右の首振りを許されたカメラが自由に動き回るという状況がその最も現実性のある状況である。

画面上での位置すれから3次元空間内での変位を算出するための式を導き、机上の模擬世界を巡る移動カメラからの出力画像に適用した結果を示す。

## 2 座標系

静止世界はレンズ系によって画像平面上に中心投影されるものとする。3次元空間は、レンズの中心を原点とし、レンズ光軸を $z$ 軸とする直角座標系 $(x, y, z)$ を用いて表わす。画像平面は便宜上レンズの前方・集光距離 $F$ の位置に $z$ 軸に垂直に置く(すなわち $z = F$ )。画像平面上には $x, y$ 軸と平行に $\xi, \eta$ 軸を定め、その原点を $(0, 0, F)$ に置く(図1参照)。

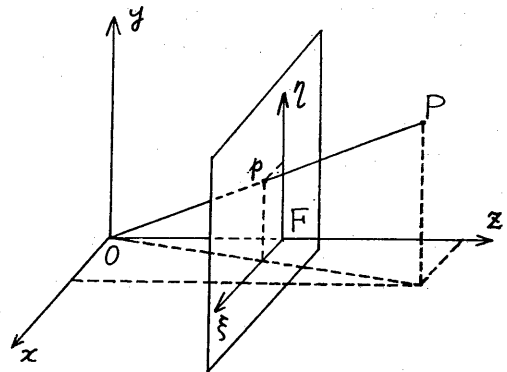


図1 空間・画像平面の座標系

3次元空間内の点 $P(x, y, z)$ とその画像平面上の像 $p(\xi, \eta)$ との間には次の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \xi &= F \frac{x}{z} \\ \eta &= F \frac{y}{z} \end{aligned} \quad (1)$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

したがって、式(2)より次の関係を得る。

### 3 カメラ移動と物体移動

3次元座標系  $(x, y, z)$  はカメラに固定されていると仮定しているため、カメラの移動に伴い座標系も移動する。カメラ・物体間の相対的位置関係に関する考察を行なう場合には、カメラおよび座標系を固定し、対象となる静止世界全体が同一の運動を行なうものと考えてよい。以下の議論はこのような観点に立っている。

一般に3次元空間での自由運動は式(2)のように回転と平行移動の2つの成分に分解できる。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $(x, y, z)^t$  及び  $(x', y', z')^t$  は移動前・後の物体の座標、 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)^t$  は平行移動量、 $R$  は回転を表わす行列で、その回転軸が原点を通り、方向余弦が  $(l, m, n)$  であり、 $\theta$  をベクトル  $(l, m, n)$  に対し反時計方向に向う回転量とすれば、次のように表わされる。

$$R = \begin{pmatrix} l^2 + (1-l^2)\cos\theta & lm(1-\cos\theta) - n\sin\theta \\ lm(1-\cos\theta) + n\sin\theta & m^2 + (1-m^2)\cos\theta \\ ln(1-\cos\theta) + m\sin\theta & mn(1-\cos\theta) + l\sin\theta \\ ln(1-\cos\theta) + m\sin\theta & mn(1-\cos\theta) - l\sin\theta \\ m^2 + (1-m^2)\cos\theta & \end{pmatrix} \quad (3)$$

まえがきに述べたように、ここで対象とする運動は制限を加えられており、つぎのような簡単な式になる。

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \theta + z \sin \theta + \Delta x \\ y' &= y + \Delta y \\ z' &= -x \sin \theta + z \cos \theta + \Delta z \end{aligned} \quad (5)$$

画像平面上での物体像の座標を移動前・後について  $p(\xi, \eta)$ ,  $p'(\xi', \eta')$  とすると、式(1), (5)より

$$\begin{aligned} \xi &= F \frac{x}{z}, \quad \eta = F \frac{y}{z} \\ \xi' &= F \frac{x \cos \theta + z \sin \theta + \Delta x}{-x \sin \theta + z \cos \theta + \Delta z} \\ \eta' &= F \frac{y + \Delta y}{-x \sin \theta + z \cos \theta + \Delta z} \end{aligned} \quad (6)$$

が得られる。

### 4 3次元移動量の算出

系列画像中の2つの画像について、特徴点の対応付けが得られたとする。すなわち、式(6)において  $(\xi, \eta)$ ,  $(\xi', \eta')$  が既知であるとする。式(6)の変形によって、

$$\begin{aligned} &(F\eta' + \xi\eta'\sin\theta - F\eta\cos\theta)\overline{\Delta x} \\ &- ((F^2 + \xi\xi')\sin\theta - F\Delta\xi\cos\theta)\overline{\Delta y} \\ &= (\xi'\eta - F\eta'\sin\theta - \xi\eta\cos\theta) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{したがって} \quad \overline{\Delta x} &= \frac{\Delta x}{\Delta z} \\ \overline{\Delta y} &= \frac{\Delta y}{\Delta z} \\ \overline{z} &= \frac{z}{\Delta z} \end{aligned} \quad (8)$$

である。

式(7)において、未知数は  $\overline{\Delta x}$ ,  $\overline{\Delta y}$ ,  $\overline{z}$  の3個であり、これらは静止世界全体に共通するものである。したがって、

2つの画像において対応づけられた一対の点に対し、一つの独立した関係が導かれる。そこで、一般的な位置にある3点について移動前後の画像における対応関係を求め、これから導かれる3つの独立な式から、 $\overline{\Delta x}$ ,  $\overline{\Delta y}$  を消去すると  $\theta$  に関する次の方程式を得る。

$$A \sin^2 \theta + B \sin \theta \cos \theta + C \cos^2 \theta + D \sin \theta + E \cos \theta = 0 \quad (9)$$

ただし、

$$A = I_{12} K_3 + I_{23} K_1 + I_{31} K_2$$

$$B = I_{12} L_3 + I_{23} L_1 + I_{31} L_2 + J_{12} K_3 + J_{23} K_1 + J_{31} K_2$$

$$C = J_{12} L_3 + J_{23} L_1 + J_{31} L_2$$

$$D = H_{12} K_3 + H_{23} K_1 + H_{31} K_2$$

$$E = H_{12} L_3 + H_{23} L_1 + H_{31} L_2$$

$$H_{ij} = F \{ \eta_i \eta_j' (\xi_j - \xi_i) + \eta_i \eta_j (\xi_j' - \xi_i') \}$$

$$I_{ij} = (F^2 + \xi_i \xi_j') \eta_i \eta_j - (F^2 + \xi_i' \xi_j) \eta_i' \eta_j'$$

$$J_{ij} = F \{ \eta_i' \eta_j (\xi_i - \xi_j') + \eta_i \eta_j' (\xi_i' - \xi_j) \}$$

$$K_i = F^2 + \xi_i \xi_i'$$

$$L_i = F(\xi_i - \xi_i') = F \Delta \xi_i$$

$$(i, j = 1, 2, 3)$$

$\theta$  が求まると、 $\overline{\Delta x}$ ,  $\overline{\Delta y}$  は

$$\overline{\Delta x} = \frac{A_1 C_2 - A_2 C_1}{B_2 C_1 - B_1 C_2} \quad (10)$$

$$\overline{\Delta y} = \frac{A_1 B_2 - A_2 B_1}{B_2 C_1 - B_1 C_2} \quad (11)$$

で求められる。ただし

$$A_i = \xi_i \eta_i' \cos \theta + F \eta_i' \sin \theta - \xi_i' \eta_i$$

$$B_i = F \eta_i + \xi_i \eta_i' \sin \theta - F \eta_i' \cos \theta \quad (12)$$

$$C_i = F \xi_i \cos \theta + F^2 \sin \theta + \xi_i \xi_i' \sin \theta - F \xi_i' \cos \theta$$

$$(i = 1, 2, 3)$$

また、 $\overline{z}_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) も

$$\overline{z}_i = \frac{F(\eta_i' - F \Delta y)}{F \eta_i + \xi_i \eta_i' \sin \theta - \eta_i' \cos \theta} \quad (13)$$

から求められる。

結局、 $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ,  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) は  $\xi_i$  を媒介として求めることができる。式で表せば、

$$\Delta z = \frac{z_i}{\overline{z}_i}$$

$$\Delta x = \frac{\overline{\Delta x}}{\overline{z}_i} z_i$$

$$\Delta y = \frac{\overline{\Delta y}}{\overline{z}_i} z_i \quad (14)$$

$$z_i = \frac{\overline{z}_i}{\overline{z}_i} z_i \quad (i = 2, 3)$$

$$x_i = \frac{\xi_i}{F} z_i \quad (i = 1, 2, 3)$$

$$y_i = \frac{\eta_i}{F} z_i \quad (i = 1, 2, 3)$$

となる。

## 5 回転量 $\theta$ の決定

回転量  $\theta$  は式(9)より求めるのであるが、式(9)を満足する  $\theta$  は一般に4つ存在し、この中から現実の運動に対応する  $\theta$  を決定しなければならない。

式(14)から分るように媒介変数  $z_i$  はスケール・ファクタとしての性質を備えており、 $z_i$  の符号が変化しなければ、式(14)の左辺の各数値の符号も変化しない。

一方、カメラの性質から、画像面上に像を結ぶような空間内の点の座標は正でなければならない。

そこで、式(9)から得られる4つの回転量  $\theta$  の候補値の各々に対して、 $z_i$  を1とした場合の  $z_2$ ,  $z_3$  及び移動後の奥行き  $z_1'$ ,  $z_2'$ ,  $z_3'$  を求め、もし負になるものがあるれば、その時の  $\theta$  を候補から除くことができる。

しかし、これだけでは  $\theta$  を一意に決

定するに致らないことが多い。そこで、4対以上の対応付けられた点を用い、それらから3対ずつ組を組み、そのそれぞれに対して、 $\theta$ の候補を求め、その値を異にしない $\theta$ のうち、各組合せに共通する（実際は似通った値をとるものの平均の）値を定める $\theta$ の値とした。

## 6 カメラ移動量の逆算

以上のようにして求められたカメラに付随する座標系から見た見掛けの外景移動量に基いて、カメラの移動量を求めるには次の式を用いる。このとき移動後のカメラの位置は移動前のカメラに付随する座標系によって表示されるものとする。

式(2)をベクトル表示して、

$$x' = R x + \Delta x$$

と表わすとき、移動後のカメラからは点 $x$ が移動前のカメラの $x'$ の位置に見える。したがって、逆に考えると、移動のカメラの位置 $x'_c$ は点 $x$ から見て $R^{-1}(-x')$ の位置にあることになる。（図2参照）

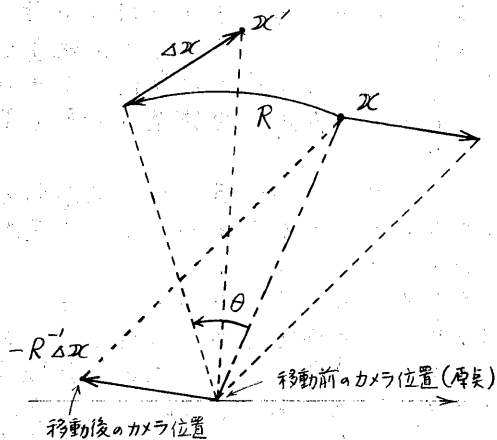


図2. 物体移動量とカメラ移動量

ゆえに、

$$x'_c = x - R^{-1}x'$$

が成立し、式(2)の両辺に $R^{-1}$ を乗じた関係を代入すると

$$\begin{aligned} x'_c &= x - (x + R^{-1}\Delta x) \\ &= -R^{-1}\Delta x \end{aligned}$$

を得る。

## 7 実験

上述の手法を用いて、移動カメラから得られる単眼の系列画像から、カメラの移動量を算定する実験を行なった。

### 7.1 入力画像

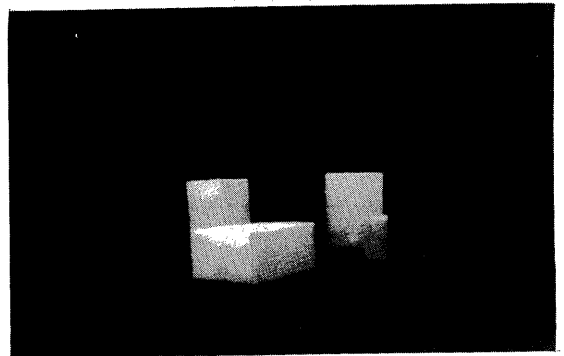
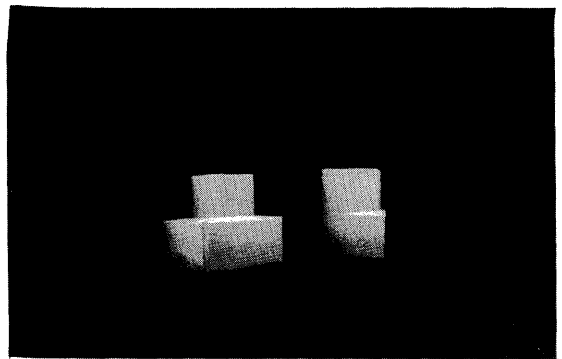


図3 入力画像

実験には直方体の箱を4つ台の上に置き、カメラを台から2~3mの位置で動かして撮影した系列画像を用いた。各入力画像の仕様は画素数  $256 \times 256$ 、濃淡 256 レベルである。

図3に系列画像の一部を示す。図3は濃淡8レベルで表示されており、処理の対象となる画像より粗い表示になっている。

以下、3次元情報抽出のために参照する点およびその対応付けについて述べるが、ここでは特に目新しい手法・考案の導入は行っていない。

## 7.2 参照点の抽出

各画像において、エッジ検出、細線化、さらに直線近似によるモデル化を行ない、直線成分の交点として頂点を求め、これを参照点とした。

## 7.3 対応付け

カメラ移動による系列画像においては、物体移動を記した系列画像よりも隠れ、出現が生じやすいと考えられる。しかも、画面全体が変化するため、参照点の対応付けには問題となる点が多い。したがって、この過程における処理は十分慎重でなければならぬが、ここでは、次のような簡単な処理で対応点の見付からない点は放棄した。

系列画像中の隣接する2つの画像間ではカメラの動きが余り大きくなく、画像上での参照点の動きは小さいものと考えた。

まず、2つの画像について、各参照点ごとに他の画像の参照点との距離を求め、その最小のものをそれぞれに対応候補点と考案。原画像に戻り、これらの点の周辺を切出し重ね合わせを行ない、一定以上の一致を見たとき、こ

れを対応点として採用し、それ以外は放棄した。

## 7.4 実験結果

実験結果を図示したものが次頁の図4である。カメラ・参照点間の距離の算出という観点からすれば精度の高い結果を得ているが、カメラ移動距離の算定という点では誤差の大きくなる場合が散在する。

計算過程は可成り複雑であるため、計算誤差の累積が懸念される。本実験において誤差が大きくなった場合も特に他の場合と実験的には大差は見出せず誤差の原因は現在のところ不明である。

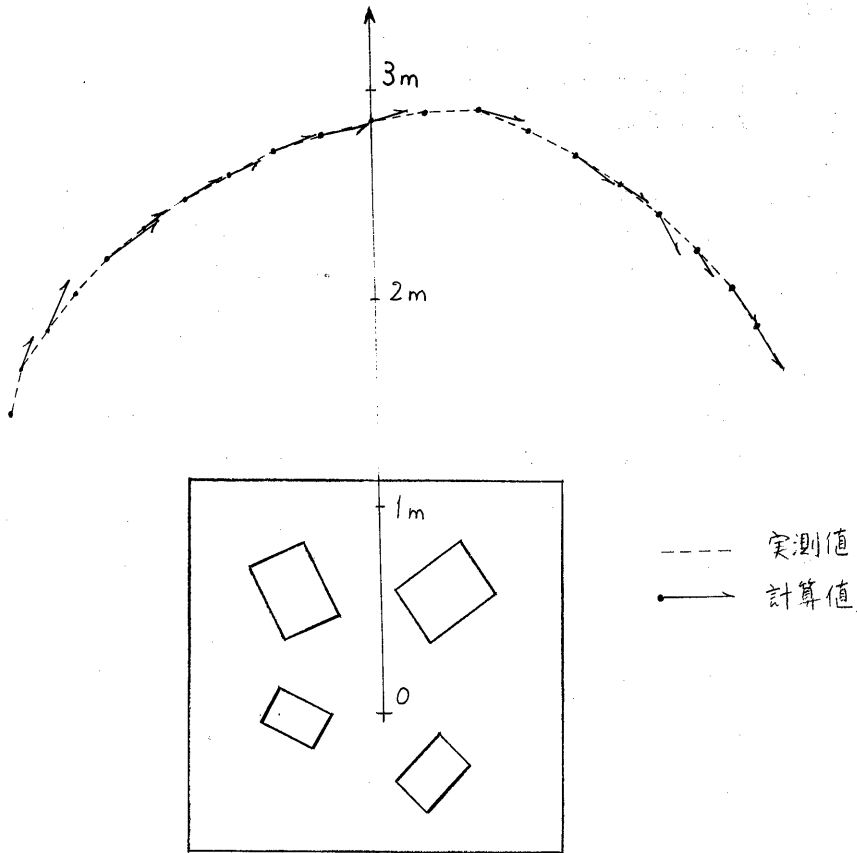
カメラ回転角に関しては、ほぼ20%以内であるが、40%程度のものも散在する。高さに関する計量は良好である。

## 8 まとめ

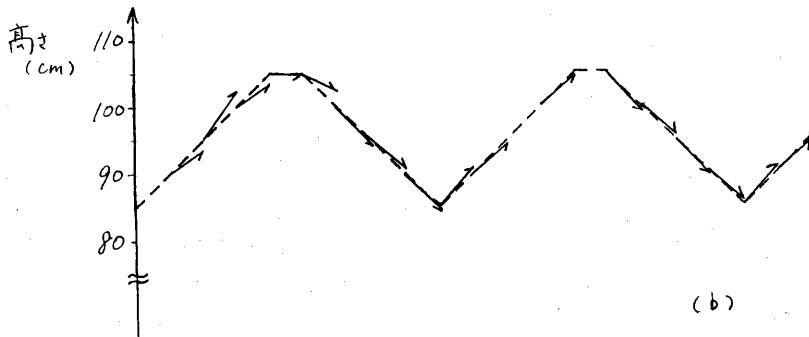
motion stereo 法と呼ばれているような解析的手法に基き、単眼の系列画像から3次元空間情報を求める実験を試みた。前回の報告も合わせて考えるとカメラ・対象物間の3次元的位置の計測という点では、この手法も5%以下の精度を保持しようと考案される。しかし、上に述べたように移動量を計測しようとする場合によっては、40%にも及び誤差が現われた。これは離れた位置にあるものを基準にして、比較的小さな変位量を算定しようとしていることからすれば考案されることである。

## 参考文献

- (1) 杉原：多面体形状の単眼画像からの再構成法、電気関係学会東海支部連大 p.467 昭57
- (2) 池内：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手法 信学論, J65-D, 7



(a)



(b)

図4 移動カメラの動き (実測値と計算結果)  
 (a) 平面的動き (b) 高さの変化

(3) 池内: 被写体表面上の小図形の幾何学  
 心算から3次元形状を再構成する1手法, 信学論  
 J65-D, 7, 850-857 昭57

(4) 中谷 他: 情景画像の知識利用による三次  
 元情報解析, 情処, 人工能対話技法, 18-2, 昭55

(5) Williams: Depth from Camera Motion in a Real  
 World Scene, IEEE Trans PAMI-2, 511-516, '80

(6) Ullman: The Interpretation of Visual Motion, MIT-Press

(7) 北橋, 木田, 遠藤: 連続画像に基づく3次元運動の解析,  
 情処, コンピ-タビジョン 22-3, 昭58