

動きの無限遠点をを用いた自由な平面運動の解析

北橋忠宏 齊藤制海
(豊橋技術科学大学)

名倉道長
(日本電装)

1 まえがき

単眼視による3次元的空间情報の抽出は、ロボット・アイにおける画像処理への応用という観点からも意味があり、最近の画像処理研究の1つの課題になっている。

これまでに提案された方法としては①物体上の3点の画像面上での移動量から3次元の移動量を代数的に求めようとする方法^{(1),(2)}、② optical flow を利用して算出しようとする方法⁽³⁾ がある。本報告では、後者に属する方法を提案する。

よく知られているように、遠近法を利用することにより一枚の画像から相対的な3次元情報を得ることができ、これを利用し系列画像に収められた物体運動の3次元解析を行なおうとする。その一つの方法として、系列中の各々の画像について物体の3次元空間中での形状を求め、さらに物体を代表する点を一つ定め、その時間的な位置の変化を求めることによって、3次元の物体の運動を知る方法が考えられる。

これに伴う問題点は、各画像における物体の位置を、系列中の全ての画像に共通な座標系に属して知る必要があるにもかかわらず、遠近法の利用による方法では、各画像ごとに基準点を定め、この点との相対的な位置が求められるにすぎないことである。

これを解決する直接的な方法は各基準点の位置を実測により与えることであるが、これは余りにも安易である。ここでは、基準点を適当に選り、その軌跡を系列画像から求めることによ

り、その軌跡が時空間中に形成する仮想的物体の形状を認識し、その頂点を各基準点間の位置関係を求めようとしている。このとき、仮想的物体の複によって生成される無限遠点(物体移動に基づく動きの無限遠点と名付ける)を利用する。

2 直線的物体運動の数理的考察

まず、すでに報告している直線運動の場合について、数理的考察を行なう。

運動物体を含む3次元空間は、レンズの中心を原点とし、レンズ光軸をz軸とする図1のような直角座標系で表わされるものとする。画像面は便宜上レンズの前方、焦点距離fの位置にあり、光軸に垂直な平面(z=f)であるとする。画像面にも直角座標が与えられており、z軸との交点を原点とし、水平、鉛垂方向をそれぞれ、x、y軸

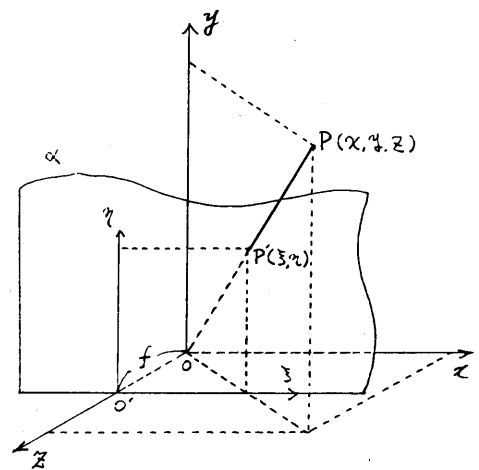


図1. 空間座標系と画像平面

としている。

これらの座標間には中心投影法の原理により、

$$\xi = f \cdot \frac{x}{z}, \quad \eta = f \cdot \frac{y}{z} \quad (1)$$

なる関係が成立する。

2.1 従来の成果

さて、2つの系列画像間における物体の直線的変位を $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ とし、物体上の一点 P の座標を (x, y, z) 、移動後の座標を (x', y', z') とする。

画像面上における点 P の像 p の位置 (ξ, η) および (ξ', η') と P の座標との間には、次の関係が成立する。

$$\xi' = \frac{f(x + \Delta x)}{z + \Delta z} = \frac{\xi z + f \Delta x}{z + \Delta z} \quad (2)$$

$$\eta' = \frac{f(y + \Delta y)}{z + \Delta z} = \frac{\eta z + f \Delta y}{z + \Delta z} \quad (3)$$

したがって、画像面上の点 p の座標 (ξ, η) および (ξ', η') が求められたとすれば、上式の変形によって、

$$\Delta \xi = \xi' - \xi = \frac{f \Delta x - \xi \Delta z}{z + \Delta z} = \frac{\Delta x' - \xi}{z + 1} \quad (4)$$

$$\Delta \eta = \eta' - \eta = \frac{f \Delta y - \eta \Delta z}{z + \Delta z} = \frac{\Delta y' - \eta}{z + 1} \quad (5)$$

ただし、

$$\Delta z' \triangleq \frac{\Delta z}{f}, \quad \Delta x' \triangleq \frac{\Delta x}{\Delta z'}, \quad \Delta y' \triangleq \frac{\Delta y}{\Delta z'}, \quad z' \triangleq \frac{z}{\Delta z'} \quad (6)$$

を得る。上式は比をとることにより、

$$\frac{\Delta \xi}{\Delta \eta} = \frac{\Delta x' - \xi}{\Delta y' - \eta} \quad (7)$$

となるから、2つの未知数 $\Delta x', \Delta y'$ を求めるためには、画像面上の2点の座標およびその点における変化量 $\Delta \xi, \Delta \eta$ の値、 $\xi_1, \eta_1, \Delta \xi_1, \Delta \eta_1$ および $\xi_2, \eta_2, \Delta \xi_2, \Delta \eta_2$ を明らかにしておく必要がある。このとき、次の解を得る。

$$\Delta x' = \frac{-\Delta \xi_1 (\xi_2 \Delta \eta_1 - \eta_2 \Delta \xi_1) + \Delta \xi_2 (\xi_1 \Delta \eta_2 - \eta_1 \Delta \xi_2)}{\Delta \eta_1 \Delta \xi_2 - \Delta \eta_2 \Delta \xi_1}$$

$$\Delta y' = \frac{\Delta \eta_1 (\xi_2 \Delta \eta_2 - \eta_2 \Delta \xi_2) - \Delta \eta_2 (\xi_1 \Delta \eta_1 - \eta_1 \Delta \xi_1)}{\Delta \eta_1 \Delta \xi_2 - \Delta \eta_2 \Delta \xi_1}$$

この結果を式(5)に代入すれば、 z が求まり、 z をパラメータとして、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ が定められる。

物体上の多数個の点に関する対応関係が明らかになっておれば、多くの解を求めることができ、これらを基により信頼性の高い解を定めることも可能と考えられる。(4)

2.2 変位と動きの無限遠点

以上の議論は1対の画像に就しては一般的に成立する。しかし、一般の場合には、次の時系列における画像から導かれる $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は異なる値をとる。これに対し、これまでの議論は物体の運動を直線運動に限定して来た。それにもかかわらず、文献(4)の中ではこの条件は何ら用いられておらず、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ との関係も言及されていないので、これを含め、動きの無限遠点との関係について明らかにする。

$(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ は少くとも一つの直線方向を定める。したがって、

$$\frac{a}{\Delta x} = \frac{b}{\Delta y} = \frac{c}{\Delta z} \quad (a, b, c: \text{定数}) \quad (8)$$

なる関係が成立する。関係(6)より、

$$\Delta x' = f \cdot \frac{\Delta x}{\Delta z} = f \cdot \frac{a}{c} \quad (9)$$

$$\Delta y' = f \cdot \frac{\Delta y}{\Delta z} = f \cdot \frac{b}{c} \quad (10)$$

なる関係を得る。

式(9), (10)が示す一定値は一律何を意味しているのかは、以上の議論からは明らかではない。そこで、通常の手法とは全く逆の操作、すなわち、

$$\Delta x, \Delta y, \Delta z \rightarrow \infty$$

を式(2), (3)に適用する。式(9), (10)より、 $\Delta x/\Delta z, \Delta y/\Delta z$ は有限確定であるから、

$$\lim \xi' = \xi_\infty = \Delta x' = f \frac{a}{c}$$

$$\lim \eta' = \eta_\infty = \Delta y' = f \frac{b}{c}$$

このような種類の運動は現実の世界に多く見受けられ、かなり広範な実際的狀況を代表していると考えられる。ただ対象となる物体の形状が単純すぎるのが欠点であろう。

入力画像の一部を図3に示す。

3.3 移動物体の3次元構造の復元

このような入力画像を基にした具体的な実験過程を紹介する。

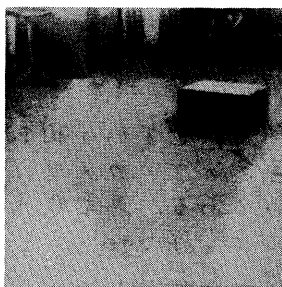
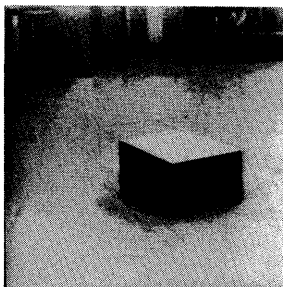
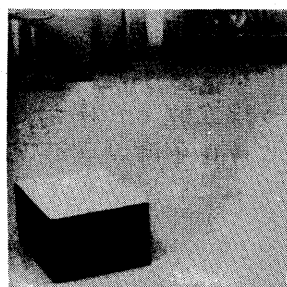


図3. 入力画像の一部

移動物体の抽出

各画像からの移動物体の抽出は背景消去法による。背景消去法とは、系列画像より移動物体を除いた背景を抽出し、各画像と背景との濃度差の大きい個所を移動物体であるとみなす物体抽出法である。影の影響が少し残ったがほぼ満足できる結果を得た。

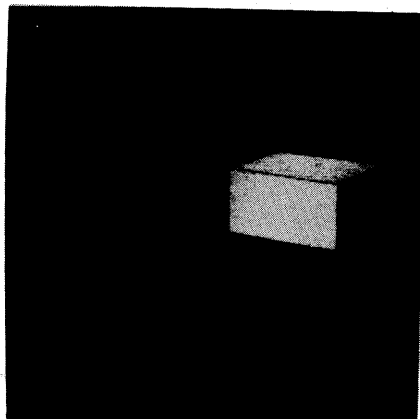
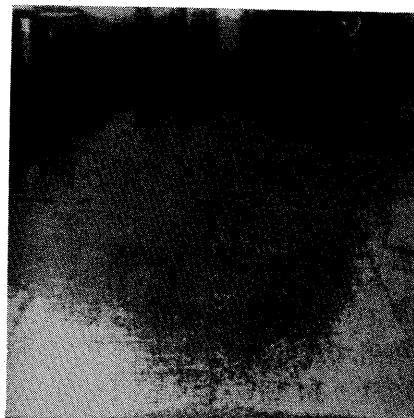


図4. 背景消去法による物体抽出

物体のモデル化と表現

物体の記述法として、頂点の座標と頂点の接続関係を用いようとした。このため、まず、物体の線図形化を行なった。

が得られる。 $\Delta x, \Delta y, \Delta z \rightarrow \infty$ の意味するのは、物体の変位を無限大、すなわち、無限の遠方に移動することである。この時の (ξ, η) は画像中の物体像の位置を示すものであり、画像上では定変 $(\xi_\infty, \eta_\infty) = (f \cdot \frac{x}{c}, f \cdot \frac{y}{c})$ への接近となって現われる。

これが、先に命名した無限遠変——物体移動に基づく動きの無限遠変——である。

したがって、我々がすでに提案していた系列画像に基づく物体の3次元運動の図的解析手法は上記のような考察を通じても等かされるものである。

3 自由な平面運動の解析

前章では、動きの無限遠変という概念を利用することにより、直線運動をする物体の動きを3次元的に算定できることを解析的に示した。本章では、さらに2つの自由度を許し、平面上を曲線に沿い平面に垂直な軸のまわりに回転しながら移動する物体運動、すなわち、平面上を転がることなく自由に滑走する物体の運動についても、同様の概念を用いて解析が可能であることを示す。

3.1 2種類の無限遠変の利用

すでに繰り返えし述べたとおり、移動物体が平行な線素をもっている場合には、これらの部分に関する3次元的位置を1つの変を基準として相対的に定めることが、系列中の各画像ごとに可能である。このために利用されるのは、物体上に実在する平行な線素によって形成される無限遠変である。これを明示する際には以下、実無限遠変と呼ぶことにする。

さて、物体移動を解析するためには、各画像ごとの空間中に位置づけられた物体を単一の空間に写さねばならない。

しかし、物体上の各変を一時に論じる必要はなく、物体上の一変（基準変が各画像について対応する変として取れば、基準変を用いればよい）の各時刻における相対的位置関係が求まればよい。

非直線運動に対しては動きの無限遠変は無力のように見受けられるが、運動を折れ線近似することにより、近似的に解析可能である。このとき、回転運動が加わっていても、回転軸方向が一定であれば、この軸に平行な線上に存在する物体上の2変を比べれば、その軌跡はねじれを含まない。したがって、これを折れ線近似した場合、各直線区間では、軌跡は平行四辺形を形成する。したがって、これに基づく無限遠変を求めることができ、これを利用することによって相対的位置関係を求めることができる。

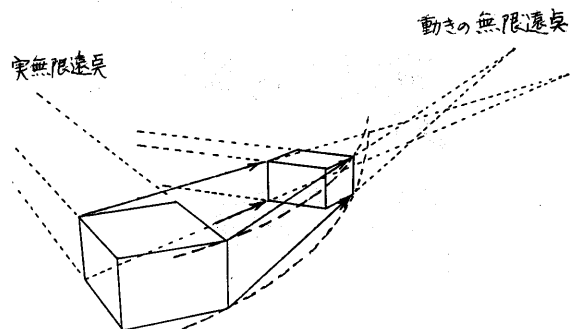


図5 実無限遠変と動きの無限遠変

3.2 実験

入力画像は、直方形の箱を移動対象物とし、固定のTVカメラによって撮影したものである。画素数は 512×512 、濃淡レベルは公称256である。

実験では、直方形の箱 ($45\text{cm} \times 30\text{cm} \times 25\text{cm}$) を実験室内の床面上を、レンズから約2mの位置から2m近く移動させ、その間に4枚の画像を取り込んだ。

エッジ検出法としては、すでに開発したパルス状雑音除去・形状保存能力を兼備したエッジ検出フィルタを使用した。このフィルタの適用結果から物体の正しい外縁を包含するように、二値化のためのしきい値は経験的に空間微分値の累積ヒストグラムの上位3%に設定した。これに細線化操作を施し、短線分の除去を行ない、線画像を得た。

現実の物体では稜にしても頂点にしても、理想通りの直線や点ではない。入力画像が良質であれば一層物体の形状が線画像に反映される。その結果、稜の直線性が失われ、頂点も歪をもつことは、図6に示されているとおりである。このため、稜は直線化し、頂

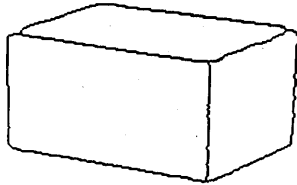


図6 線画化された物体

点はいこれらの直線の交点として求めるなど、線画像として得られた物体をさらにモデル化した。(図7参照)

以下の処理はこのモデル化された物体を基に行ない、検討を要する場合には入力画像を参照した。

物体の3次元構造の復元

直方体は一般に3つの無限遠点(三遠透視)を有する。モデル化された物体の各稜をその傾きによって3グループに分類し、各グループごとに無限遠点を得た。

3次元構造復元のための基準点としては、3.1の議論に基づいて、平面に垂

直な線上にもう1つの頂点をもつよう、図7、中の*印を付した頂点を選んだ。この基準点に連結している他の頂点の相対座標を順次求め、画像面に現われているすべての頂点の相対座標も算出し、同時に接続関係も明らかにする。これによってモデルの3次元構造を記述する。

以上の処理を系列中の各画像に対して行なう。このとき、他の画像における基準点はずきのようにして決定した。すでに基準点の定まった線画の重心と次に考察する線画の重心を結ぶ重心の移動ベクトルを求め、これに従って基準点を移動させ、その点に最も近い頂点を選んだ。本実験では、この手法によって正しい対応づけを得た。

3.4 平面運動の3次元解析

先の3.1に述べた条件を満たす2点を選び、回転を含む非直線運動の3次元解析を行なう。

基準点を物体上に取るため物体の移動につれて基準点も移動する。物体運動の解析に必要とされるこれらの相互位置関係を、画像面上での点群の軌跡から求めるために、基準点以外にもう一つ、図7、中の○印を付した点を選ぶ。これは、基準点から平面上に下る稜の他端であり、これは考察中の物体が直

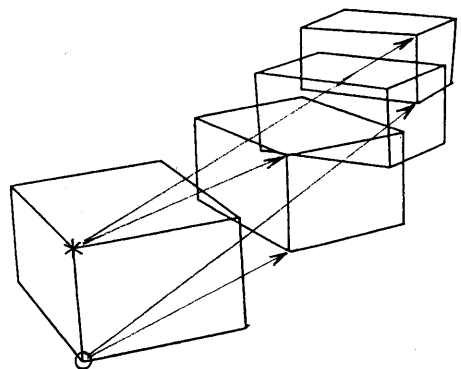


図7. モデル化された物体像

方形の箱であるという仮定に基づいている。これは各画像においても同じである。

基準点の相互関連を求める組み合わせは種々考えられるが、計算誤差などを考慮すれば図7の矢印で示されるような組み合わせが最も妥当であると考えられる。

運動の記述

運動は2種類のパラメータによって記述できる。一つは平行移動を定める移動ベクトルであり、他の一つは回転移動を定める回転軸と回転角である。

このうち移動ベクトルと回転軸の位置とは互に独立ではない。移動ベクトルが常に0になるよう回転軸を選ぶことも可能である。ここでは、直方体上面の重心を通る回転軸を用いる。その結果は図8に示すとおりである。

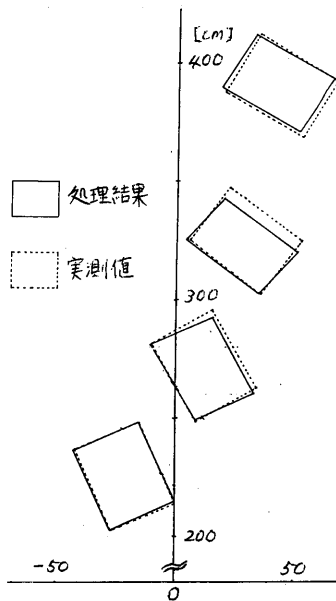


図8 運動解析一次結果

形状の補正

共通の座標系で表現しても、形状の歪が残る。そこで、画像中での見掛けの大きさが最大であったモデルを形状歪が最小であると判断し、他のモデル

の上面の重心を通る回転軸を重ね合わせ、頂点間距離の2乗誤差を最小にする位置を求め、これによって置き換える。

このようにして得た3次元モデルの系列を中心投影法にPって、画像面に再投影し、線画像と頂点に関して2乗誤差最小の位置を定める。

その結果を移動平面上に投影したものが図9である。実測との頂点間差異は数cm以下であった。これは奥行き方向の距離に対して1~2%程度である。現段階では一応満足の結果であると考えている。

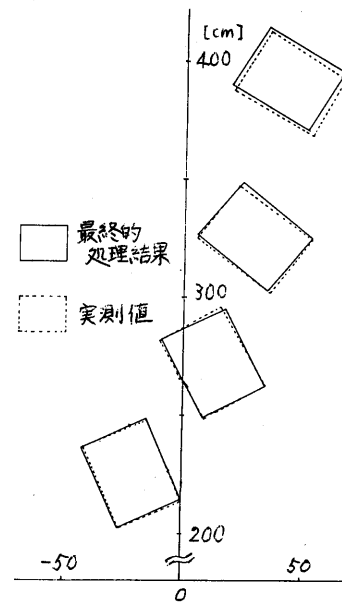


図9 最終的処理結果

謝辞 知的情報処理研・画像処理グループの修士学生 小田 正君の日頃の援助に深謝する。

参考文献

- (1) Ullman: The Interpretation of Visual Motion, The MIT Press, Cambridge/MA, 1979
- (2) 浅田, 谷内田, 辻; 物体の3次元運動の解析, 信学論D, Vol. J65-D No. 6, pp. 687-694 (昭57.6)
- (3) T.D. Williams: Depth from Camera Motion in a Real World Scene, IEEE Trans. PAMI, Vol. PAMI-2, (1980)
- (4) T.S. Huang ed.: Image Sequence Analysis, Springer, N.Y. (1981)
- (5) 北橋, 辰巳; 中央値フィルタの一般化とエッジ検出への応用, 信学論D, Vol. J64-D, No. 11, pp. 1061-1062 (昭56.11)