

解 説**3次元シーンの理解****— 3次元情報の獲得について —**

浅 田 稔

大阪大学工学部電子制御機械工学科 〒565 吹田市山田丘 2-1

(1990年7月19日受理)

Understanding of Three-dimensional Scene

Minoru ASADA

Department of Mechanical Engineering for Computer-Controlled Machinery,
Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1, Yamadaoka, Suita 565**1. はじめに**

人間は網膜を通して、容易に3次元シーンを認識できる。このような能力をコンピュータで実現させるための研究を一般にコンピュータビジョンと呼ぶ¹⁾。コンピュータビジョンの研究が、通常の画像処理と大きく異なる点は、コンピュータビジョンでは、入力される画像(2次元)と元の世界(シーン:3次元)を区別していることである。2次元画像を処理して、元の3次元世界のモデルを作成し、そのなかにある物体の形や配置などの記述を得ることを目的としている。基本的な処理の流れを図1に示す。簡単に説明すると、シーン(3次元世界)を写した画像がシステムに送られ(画像入力)、それから明るさの急変する所などの画像上の特徴(2次元パターンの特徴)を抽出する。次に、これらの特徴をもとに、3次元世界の特徴(たとえば、距離や面の法線方向、辺の凹凸等)を復元する。最後に、前もってコンピュータに蓄積されている物体のモデルと照合し、どのような物体が、どの位置と向きにおかれているか、他の物体とどのような関係にあるかを知り、さらに必要に応じて、隠れている部分を推定したり、シーン全体の意味を推論する。

このように説明すると、いとも簡単にコンピュータビジョンのシステムが構築できるような印象を受けるが、実際には、2次元の画像から、3次元特徴を復元する手法や、コンピュータ内での3次元モデルの表現および実

データとの照合など、各段階で多くの困難な問題を抱えている。本解説では、3次元シーンの理解のために必要な3次元情報を、2次元画像から、どのように再構成するかについて、代表的手法を紹介する。

2. 2次元画像からの3次元情報の再構成

われわれ人間は、網膜を通して得られる2次元画像から元の3次元世界を容易に認識できる。物体の3次元形状を知覚するためにわれわれが使っていると思われる手がかりとしては、われわれが日常経験として無意識のうちに利用していると思われるある種の規則性(たとえば、物体の形に関するもの、照明方向や、面の性質に関するもの等)を利用して得られる物体の形状情報、両眼立体視による三角測量原理に基づく距離情報、また、観測者自身や対象物体の運動情報を利用した3次元運動や構造に関する情報が考えられる。表1に、これらの手法の分類を示す。

単眼視では、一枚の画像から、3次元情報を復元するので、シーンに対して、強い制限条件が必要となる。たとえば、濃淡情報からの形状復元では、対象物体の面の属性、照明条件などが既知でなければならない。また、テクスチャ(規則的な2次元パターン)による手法では、前もって、テクスチャの性質が既知でなければならない。これに対し、両眼立体視では、二つのカメラの間の幾何学的関係のみを与えれば、基本的には、三角測量の原理により、観測者から物体までの距離を計測でき

表 1 3次元世界の特徴を抽出する手法の分類

	手掛かり (Key word)	復元される 3次元特徴	対 象
単 眼 視	濃淡情報 テクスチャ	各点の法線ベ クトル	物体
両眼立体視	画面上の形状 対応付け問題	観測者からの 各点までの距 離	物体/世界
動 画 像	オプティカル フロー	運動 (回転, 並進) 相対的 距離	(物体)/世 界

る。ただし、左右画面間で、どの部分が同じ部分であるかを決定する「対応づけ問題」が焦点となる。動画像は、より一般的で、カメラ間の関係（もしくは、カメラ固定の時の対象物体の3次元運動）が未知であり、問題としては、「対応づけ問題」と「対応結果からの3次元運動の復元」の二つを解決しなければならない。

3. 濃淡画像から物体上の各点の法線方向を求める方法

3.1 単一光源・照明条件既知の場合

TVカメラなどの視覚センサーを通して得られるデジタル画像の各画素の明るさは、照明条件（照明方向と光の強さ）、物体面の特性、面の反射係数、視覚センサーの受光部の特性等に依存する。これまでの研究では、物体面を一樣乱反射面と仮定して解析の条件を単純化している。一樣乱反射面とは、知覚される面の明るさが、観測者の方向には関係なく、照射条件と面の法線方向だけに依存し、照射方向と面の法線方向の余弦に比例するような面をさす。すなわち、画面上の明るさ E は、物体面が一樣乱反射面でその反射係数を ρ 、観測者からみたときの照明方向と面の法線方向を θ_s 、 θ_n とすれば、次式で表現される（図1参照）。

$$E = \rho I \cos(\theta_s - \theta_n) \quad (1)$$

この式は、面と明るさに関する一つの拘束条件を与え、これだけでは唯一には面の方向（パラメータ二つ）を決定できない。これを幾何学的に示すと図2のようになる。この図では半球（観測者から見えるすべての法線方向を含んでいる）に対してある方向から照明（無限遠方を仮定）を当てたときに出来る等明度線を示している。上式から明らかなように、照明方向と一定の角度をなす軌跡は、半球上の円になり、これらの円群は、照明方向からみた場合同心円を構成する。これらの等明度線を半

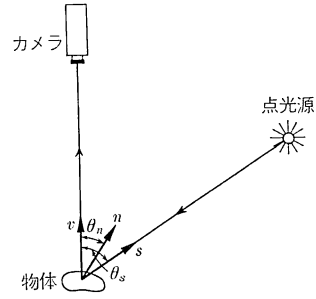


図 1 観測される明るさと、照明方向、面の法線方向の関係

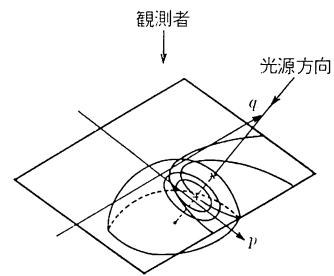


図 2 反射率地図の構成

球の中心からの極の接平面（画面と平行）に射影してできる二次曲線の集合が反射率地図と呼ばれているものである。この接平面は勾配空間（面の方程式を $px + qy + z = c$ とおいたときの面の勾配 (p, q) の空間）に対応し、照明条件による面の方向の拘束条件を示している。すなわち、いま、画像上のある点の明るさが E_i とすると、その点の勾配 (p_i, q_i) は、反射率地図上で明るさ E_i に対応する2次曲線上のどこかに存在する。

当初、勾配既知の点から出発して周囲の点の勾配を求めたが、誤差が重畳し、精度があまりよくなかった。そこで次に、輪郭線による拘束条件を付加した手法が開発された。すなわち、曲面物体の画像に現れる輪郭線上の各点では、面の勾配が一意に決定できる（画面に平行かつ、輪郭線に垂直）ことから、これらを境界条件として、内部の点の面の勾配を求める手法が開発された²⁾。

3.2 単一光源・照明条件未知

3.1 で述べた研究では、反射率地図が正確に与えられていることが必要条件であるが、照明条件や面の反射係数が正確に求められていなくても画像面上の明るさの局所的な解析から各点の法線方向が求められる手法が提案されている。条件としては、各点が局所的に球面に近似できる必要がある。この条件から、各点での明るさ、その1階偏微分（画面上での水平方向、および垂直方向）

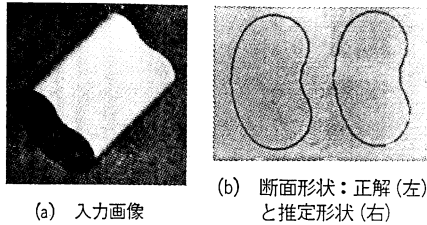


図3 筒状物体の断面形状の復元⁴⁾

および2階偏微分値の六つの値が与えられ、局所的に近似される球面での位置(すなわち勾配)、照明方向、照明光の強さと面の反射係数の積((1)式の ρI)の六つの未知数が推定される³⁾。また物体のクラスを円筒状物体に限定し、円筒面上の明るさと、切口の形状から、円筒面の垂直断面の形状を求める手法も提案されている⁴⁾。物体のクラスを限定しているため、照明条件や面の反射係数などの値は必要としない。図3にその解析例を示す。入力画像および垂直断面形状を示す。

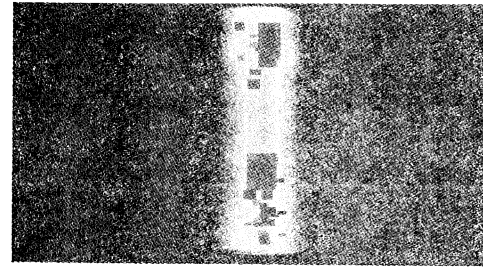
3.3 複数光源・照明条件既知

3.1-2で述べた方法は、理論的には、優れた手法であり、興味深い。解の精度について、必ずしも、満足できるものではなかった。工学的な応用の観点から考えると、照明条件は、既知である場合が多くかつ制御可能である。単一の照明条件は一つの反射率地図に対応し、それだけでは面の方向を一意に決定できないが、異なる方向から照明を与えることにより、別の反射率地図が構成でき、それぞれの画面での明るさに対応する2次曲線の交点としての面の方向を決定する手法が提案されている。通常3方向に対応する三つの2次曲線の交点として面の勾配を唯一に決定できる。この方法は、照度差ステレオと呼ばれ、ピンピッキングなどに利用されている⁵⁾。

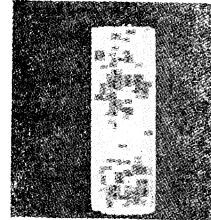
照度差ステレオを拡張して、多数(リング状に24個)の光源を利用し、面の反射特性、反射係数、面の法線方向を物体上の各点について求める手法も提案されている⁶⁾。一般の物体は一樣乱反射と鏡面反射の二つの反射特性を同時にもつと考えられ、それぞれの反射係数の大きさによって、実際に観測される面の明るさが決定されると考えられる。すなわち、画面上の明るさ E は、光源の明るさ I と一樣乱反射、鏡面反射のそれぞれの反射係数との積を A 、 B 、観測者からみたときの照明方向と面の法線方向を θ_s 、 θ_n とすれば、次式で表現される(図1参照)。

$$E = A \cos(\theta_s - \theta_n) + B\delta(\theta_s - 2\theta_n)$$

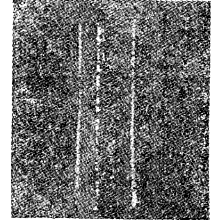
鏡面反射は δ (デルタ)関数で近似されている。光源方向 θ_s のときに観測される明るさ E の複数の組合せか



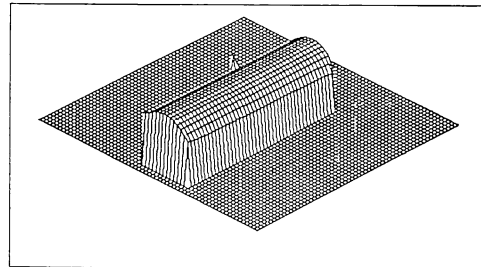
(a) 入力画像



(b) 一樣乱反射面の強さ



(c) 鏡面反射の強さ



(d) 距離図

図4 複数光源を利用した面の反射特性と形状の復元⁷⁾

ら、未知数 A 、 B 、 θ_n を各点独立に計算できる。図4にその結果を示す。(a)は、原画像を、(b)、(c)には係数 A 、 B の値を濃淡で表示している。また(d)に再構成された形状を距離に変換して図示している。最大で誤差角4度、平均2度程度である。

3.4 法線方向や物体形状を求めるそのほかの手法

画像の濃淡情報以外の情報を使って面の法線方向を求めたり、物体の形状を求める手法としては、物体のクラスを限定して線画から物体形状の定性的な記述を得るもの、物体面上に既知のパターンが規則的に描かれているとして、そのパターンの見かけ上の形の歪から面の傾きを得るもの、逆に既知のパターンを既知の方向から物体面に投影したとき、観測されるパターンの形状から面の方向を推察するものなどが提案されている。また物体面を正面から観測したときの統計上の性質が与えられているときにも、同様にして面の傾きが得られる。このような手法に関しては、すでにいくつかのよい解説がすでにあるのでそれらを参考にさせていただきたい^{7,8)}。

4. 両眼立体視による距離情報の獲得

人間は両眼立体視により、三角測量原理に基づく距離測定を行っていると考えられる。この能力を機械で実現させるときに最も重要で困難な問題点は、左右の画面で対応している部分を見つけ出すことであり、対応探索問題と呼ばれている。見えかくれや、周期的なパターンによる誤対応を防ぐさまざまな手法が開発されているが、大きく分けて特徴点による手法と、特徴点の間の区間または小領域に着目した手法に分かれる。いずれの場合にもカメラの配置に関する拘束から、探索範囲が限定され、通常同じ高さの水平線（エピポーラ線と呼ばれている）がよく用いられている。特徴点による方法では、粗密探索が有名である¹⁰⁾。これは、最初に画像の分解能を粗くして特徴点の対応を容易にし、それを元により細かな分解能の場合の対応問題を可能にして、対応づけの問題と距離精度の問題を解決した手法である。また分解能を一定にして、視点間の距離（基線と呼ぶ）を制御することにより、同様に対応づけ問題と距離精度の問題を解決した手法もある¹¹⁾。これらの手法の関係を図5に示す。分解能の制御(a)の視点間距離の制御(b)による距離精度の向上の違いがわかるであろう。

特徴点間の区間による方法では、左右のエピポーラ線同士の1次元探索が可能で、動的計画を用いた方法が有名である。左右のエピポーラ線による拘束では不十分な場合があり、上下方向の拘束も利用した2段階の動的計画による手法も提案されている¹²⁾。この他にもこれらの手法の改良や、他の手法が多く研究されているが、完全には対応問題はまだ解決されていない。

5. 動画像解析：オプティカルフローの抽出と解釈

TVや映画など、人間は、2次元の時系列画像から容

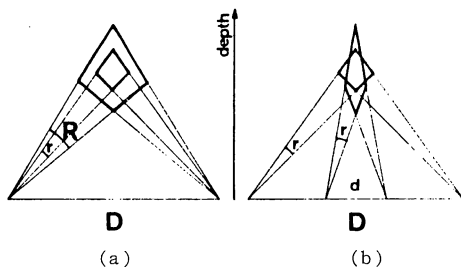


図5 分解能による粗密制御と基線長の粗密制御の比較¹¹⁾

(a) 分解能制御, (b) 基線長制御

易に、物体や観測者の3次元運動や構造を理解できる。これらの能力は、対象に関する知識（物体の3次元モデルなど）を利用できるから可能であると考えられるが、これらの知識がなくとも（ランダムドットで表示）、人間は運動情報（時系列画像の提示）だけで、対象物体の3次元運動や構造が理解できることが心理学の実験で示されている¹³⁾。このような能力をコンピュータに付与するためには、以下の二つの重要な問題を解決しなければならない。

(1) 対応づけ問題：両眼立体視と同様に、画面間でのどの部分が対応しているかを決定しなければならない。ただし、両眼立体視では、カメラ間の幾何学的な関係が既知から、対応探索範囲が1次元（エピポーラ線上）であるが、動画像では、カメラ配置（もしくは対象の3次元運動）が未知なので、2次元探索となり、問題はより困難である。この問題に対し、両眼立体視と同様に、特徴点や小領域の相関による直接対応発見と、時空間微分の拘束を利用した手法が提案されている。

(2) 対応結果からの3次元情報の復元：(1)によって、各点や小領域の対応が得られたとして、そこから対象の3次元構造や観測者との相対運動を再構成する。構造からさきに求める手法と運動からさきに求める手法に分かれる。

ここでは、対応づけの手法として時空間微分による手法を、また、3次元情報の復元としては、運動情報をさきに求める手法を紹介する。これらの手法では、対応づけの結果得られる各点の画面上での移動ベクトルの分布をオプティカルフローと呼ぶので、内容としては、オプティカルフローの抽出とその解釈ということになる。これら以外の手法については、文献⁹⁾などを参照されたい。

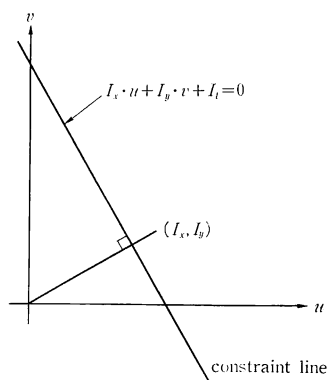
5.1 オプティカルフローの抽出

オプティカルフローとは、もともと視覚心理学や生理学の分野で用いられている言葉であり、正確には観測者の視線の回転角速度を意味するが、ここでは、観測者と物体との間の相対的な運動によって生じる画面上の見掛けの速度分布と解釈し、厳密な区別はしない。

オプティカルフローを決定する基本式は以下のように導ける。画面上の点 (x, y) の時刻 t における明るさを $I(x, y, t)$ とし、いま、微小時間 Δt の間に物体が軸 x 、軸 y の方向に Δx 、 Δy だけ移動したとする。物体上の明るさが不変であると仮定すると次式が成立する。

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \quad (2.1)$$

右辺を Taylor 展開すると

図 6 (u, v) に関する拘束直線

$$I(x, y, t) = I(x, y, t) + \Delta x \frac{\delta I}{\delta x} + \Delta y \frac{\delta I}{\delta y} + \Delta t \frac{\delta I}{\delta t} + e \quad (2.2)$$

(ただし e は $\Delta x, \Delta y, \Delta t$ の高次の項で無視できる) 両辺を Δt で割り $\Delta t \rightarrow 0$ として整理すると、次式を得る。

$$\frac{\delta I}{\delta x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\delta I}{\delta y} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{\delta I}{\delta t} = 0 \quad (2.3)$$

これは見かけの速度ベクトルを (u, v) , 空間的な明るさの勾配を I_x, I_y , 時間的な変化分を I_t とすれば、次のように書き直せる。

$$I_x \cdot u + I_y \cdot v + I_t = 0 \quad (2.4)$$

(2.4) 式は図 6 に示すように (u, v) 平面で直線を表し, (u, v) に関する一つの制限条件を与えるが, それらを唯一には決定できない。そこで Horn ら¹⁴⁾ は「速度分布は滑らかに変化する」というより一般的な仮定を設けて誤差を最小にするような (u, v) を各点の速度ベクトルとした。

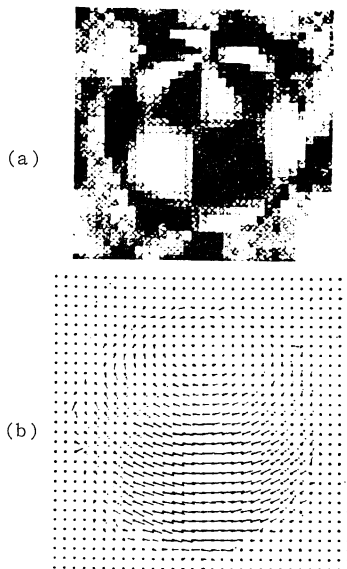
誤差の評価式 E は次式で与えられる。

$$E = \iint \left\{ \alpha^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + (I_x \cdot u + I_y \cdot v + I_t)^2 \right\} dx dy \quad (2.5)$$

$(\alpha^2$ は重み係数)

ラプラシアン和で定義される部分は, 実際には近傍の速度ベクトルの平均値との差の 2 乗和を使っている。そして (2.5) 式を偏微分した 2 式を利用して, 繰返しを用いて速度分布を求めている。図 7 (a) に 2 枚の入力画像のうちの最初の画像を, (b) に 32 回繰返し後に得られたオプティカルフローを示す。

これらの研究は, 画面全体の密なオプティカルフローを求めようとするので, ①計算時間がかかる, ②精度的

図 7 滑らかさを利用したオプティカルフローの算出¹⁴⁾

(a) 入力画像, (b) 32 回繰返し後のフロー

に問題が残るなどの欠点が挙げられる。②に対しては, 対応が既知の点の情報を利用する方法^{15,16)}が, また①に対しては, 画面全体でなく, 物体の輪郭線のオプティカルフローを求める方法^{16,17)}等が提案されているが, 実際の画像列から正確なオプティカルフローを抽出する問題は, 完全には解決されていない。

5.2 3次元運動の復元

2次元の画像列から3次元情報を復元するには, 種々の制約が必要となる。これまでの研究に共通しているのは, 対象物が剛体性を有し, その中心射影像として画像が得られているという制約である。二つの基本的な制約条件について説明する。

(a) 剛体性

物体の剛体性を仮定することは, 物体像が時間的に変化するとき, その原因が物体自体の形状変化によるものではなく物体あるいはカメラが動いたことによって生じる見掛けの変形であることを保証し, 解析に数学的手法を用いるために必要な最も基本的な前提条件である。

(b) 中心射影

通常使用されるカメラモデルとして, 直交射影と中心射影がある。直交射影では視線がすべて画像面に直交する。すなわち, レンズの焦点距離がきわめて大きい場合に相当し z 成分に無関係に点 (x, y) に射影される。これに対し, 中心射影は図 8 に示すように原点をレンズ中心とし, z 軸方向を視軸方向と考え, 画像面を原点から

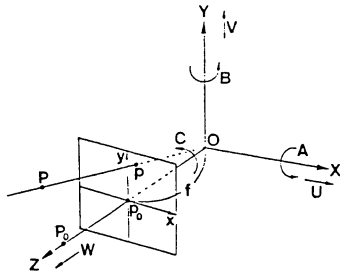


図8 中心射影と運動成分

距離 F のところに XY 平面に平行に置く. このとき空間内の点 $P(x, y, z)$ は画像面上の点 $p(Fx/z, Fy/z)$ に射影される, したがって大きさに関する曖昧さが生じる. しかし, 空間内で平行な2直線が画像面上に射影されたときに生じる消失点 (vanishing point) は単一の画像から3次元構造を復元するための有力な手掛かりを与えてくれる.

対象物体の運動は, 観測者との相対的なものであるから, 対象が一つの剛体の場合には, 対象の3次元運動を求めることは, 静止環境に対する観測者の3次元運動を求めることと等価である. よって以下では, 観測者の3次元運動を求める手法について説明する.

観測者の運動は, 観測者中心の座標系をもとに図8に示すように各軸周りの角速度 (A, B, C) と各軸方向の平行移動成分 (U, V, W) とから成る. 焦点距離を f とおけば, シーン中の点 $P(X, Y, Z)$ の投影像 $p(x, y)$ の関係は次式で与えられる.

$$x = f \frac{X}{Z}, \quad y = f \frac{Y}{Z} \tag{2.6}$$

いま, 点 P の運動が平行運動だけであると仮定すると, 時間 t だけ経過したときの位置 $P'(X', Y', Z')$ の投影像 $P(x', y')$ は次式のように表せる.

$$\begin{aligned} x' &= f \frac{X'}{Z'} = f \frac{X + Ut}{Z + Wt}, \\ y' &= f \frac{Y'}{Z'} = f \frac{Y + Vt}{Z + Wt} \end{aligned} \tag{2.7}$$

シーン中の点 P が観測者から遠ざかって行けば, 遂には点になり画面から消え去るが, この点 $P \infty$ は式(2.7)で $t \rightarrow \infty$ とおくことによって,

$$(x, y) = (fU/W, fV/W) \tag{2.8}$$

が導かれ, 空間的での点 P の位置とは無関係に運動方向によって決まる投影上の1点に収束することがわかる. この点は消失点と同じ背景をもつもので, F. O. E. (focus of expansion) とか動きの無限遠点等と呼ばれている. 運動が平行移動のみに限られておれば, オプティカルフローから F. O. E. が始まり, 観測者に対するシーンの平行移動の速度比が求められる.

しかし, 一般には回転運動成分が含まれ, それらの和としてオプティカルフローが形づくられているので, どのようにして, 回転成分を補正し, 並進成分だけのオプティカルフローを求めるかが問題となる. Prazdny¹⁸⁾ は各点の見掛けの速度ベクトルから回転運動による速度成分を抽出することを考えた. ある瞬間の回転運動を x, y, z 軸周りの各 A, B, C 成分に (図8参照) 分解し, 画面上での各軸回りの回転速度成分が画面上の位置によって唯一に決まることを示した. そして残りのフロー成分 (並進成分に相当) は向きが一点 (F. O. E.) に集中することから, 局所的な演算によって3次元運動パラメータを求めた. 8近傍の各点のベクトルをもとに一種の最小自乗法で求めているが, 各フローの精度が10進法で7桁なければ F. O. E. は正確に求まらず, 4桁では F. O. E. が $\pm 5^\circ$ の括弧内に収まると報告されている.

Bruss ら¹⁹⁾ は画面全体に最小自乗法を適用して (すな

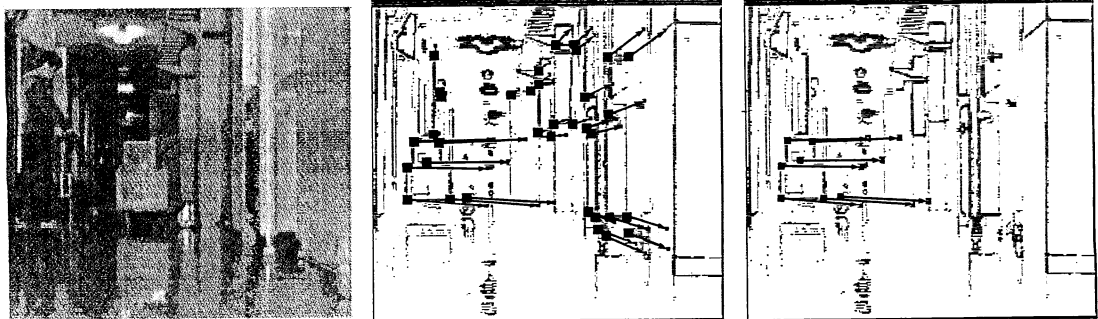


図9 移動物体を含む移動カメラ映像の解析²¹⁾
 (a) 8枚目の入力画像, (b) 見かけの移動ベクトル, (c) 動物体の移動ベクトル

わち、静止環境を想定)、運動パラメータの精度を上げることが提案している。金谷²⁰⁾は、平面上のオプティカルフローについて詳細な解析を行っている。

八木ら²¹⁾は建物内を移動するロボットに取り付けられたカメラから送られてくる動画像を処理して、ロボット自身の3次元運動のパラメータの解析を行った。そのなかで、動画像処理のなかで最も複雑な課題である移動物体を含むシーンの移動カメラ映像処理を行っている。彼らは廊下の一般的なモデルを利用して、移動ベクトルの相対的な大きさから動物体のフローと静止環境(廊下)のフローを区別している。図9にその結果を示す。(a), (b), (c)はそれぞれ原画像、見掛けの移動ベクトル、動物体の移動ベクトルの算出結果を示す。

6. おわりに

TVカメラなどを通して得られる2次元濃淡画像から元の3次元情報を再構成する代表的手法として、濃淡画像からの形状復元、両眼立体視、動画像解析についてその原理と応用について述べた。2次元画像から3次元情報を抽出するには、基本的に情報が欠落しており、画の滑らかさなどのなんらかの拘束条件が必要となる。コンピュータビジョンの分野では、これらの研究を理論的にまとめようとする動きがあり、正則化(regularization)と呼ばれている²²⁾。これに対し、正則化を用いずに、3次元情報を得る新しいパラダイムとして、「アクティブビジョン」が提案されている²³⁾。これは、観測者の動きによって、3次元情報を得やすくするもので、ロボットビジョンとも関連が深く、最近、注目されている。

「3次元シーンの理解」の次の課題は、得られたシーンの情報を利用して、コンピュータ内に蓄えられたモデルとどのように照合するかという問題である。得られたシーンの情報を目的にしたがってどのように記述するかという問題も含み、さまざまな手法が提案されている。ここでは、紙面の制約上紹介できないが、文献²⁴⁾などを参照されたい。

文 献

- 1) 辻 三郎: “コンピュータビジョンへの道”, 情報処理, **24** (1983) 1414.
- 2) K. Ikeuchi and B. K. P. Horn: “Numerical shape from shading and occluding boundaries,” *Artif. Intell.*, **17** (1981) 141.
- 3) A. P. Pentland: “Local shading analysis,” *IEEE Trans. PAMI*, **6** (1984) 170.
- 4) M. Asada: “Cylindrical shape from shading and contour without knowledge of lighting conditions or surface albedo,” *Proc. of 1st ICCV* (1987) p. 412.
- 5) 池内克史, 長田茂美, B. K. P. ホーン, K. ニシハラ: “照度差ステレオとプリズムステレオを用いたピンピッキングタスク中のグリッパの姿勢決定”, 電子通信学会論文誌, **J65-D** (1985) 546.
- 6) S. K. Nayar, *et al.*: “Shape and reflectance from a image sequence generated using extended sources,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1988) p. 28.
- 7) 大田友一, 池内克史: “3次元情報の再構成とモデル化”, 別冊 O plus E, 画像処理アルゴリズムの最新動向 (1986) p. 108.
- 8) 杉原厚吉, 金谷健一: “数理的手法による三次元情報抽出”, 人工知能学会誌, **14** (1989) 13.
- 9) 北橋忠宏, 浅田 稔: “動画像処理”, 別冊 Oplus E, 画像処理アルゴリズムの最新動向 (1986) p. 128.
- 10) D. Marr and T. Poggio: “A computational theory of human stereo vision,” *Proc. R. Soc. London, Ser. B*, **204** (1979) 301.
- 11) 徐 剛, 浅田 稔, 辻 三郎: “階層的制御による移動ステレオ”, 電子通信学会論文誌, **J69-D** (1986) 1765.
- 12) Y. Ohta and T. Kanade: “Stereo by intra- and inter-scanline search using dynamic programming,” *IEEE Trans. PAMI*, **7** (1985) 139.
- 13) S. Ullman: *Interpretation of Visual Motion* (MIT Press, Cambridge, 1979).
- 14) B. K. P. Horn and E. G. Schnk: “Determining optical flow,” *Artif. Intell.*, **17** (1981) 185.
- 15) L. S. Davis, Z. Wu, and H. Sun: “Contour-based motion estimation,” *Comput. Vision Graphics Image Process.*, **23** (1983) 313.
- 16) M. Yachida: “Determining velocity maps by spatio-temporal neighborhoods from image sequences,” *Comput. Vision Graphics Image Process.*, **21** (1983) 262.
- 17) E. C. Hildreth: “Computations underlying the measurement of visual motion,” *Artif. Intell.*, **23** (1984) 309.
- 18) K. Prazdny: “Determining the instantaneous direction of motion from optical flow generated by a curvilinearly moving observer,” *Comput. Vision Graphics Image Process.*, **17** (1981) 238.
- 19) A. R. Bruss and B. K. P. Horn: “Passive navigation,” *Comput. Vision Graphics Image Process.*, **21** (1983) 3.
- 20) 金谷健一: 画像理解—3次元認識の数理 (森北出版, 東京, 1990).
- 21) 八木康史, 浅田 稔, 辻 三郎: “移動カメラで撮像した環境内の運動物体の検出”, 電子情報通信学会論文誌, **J69-D**, **5** (1986) 794-801.
- 22) 坂上勝彦, 横矢直和: “弛緩法と正則化”, 小特集: コンピュータビジョンにおける手法, 情報処理学会誌, **30**, **9** (1989) 1047.
- 23) J. Aloimonos, I. Weiss and A. Bandyopadhyay: “Active vision,” *Proc. of 1st Int. Conf. on Computer Vision* (1987) p. 35.
- 24) 白井良明: “記述と照合”, 電子情報通信学会誌, **71**, **11** (1988) 1142-1148.