「動くこと」と「計測」 —視覚を通じて—

“MOTION” AND “MEASUREMENT” IN COMPUTER VISION & ROBOT VISION

浅田 稔, 辻 三郎*
Minoru Asada and Saburo Tsuji

1 はじめに

計測対象が時間的に変化する事や⁽¹⁾, 対象もしくは観測者が動くことによって始めて可能になる計測等⁽²⁾, 動くことと計測の間には深い関りがある。本特集号「ダイナミックフォトグラメトリ」—動くものの計測と動くものからの計測—では, 「動く」ということと「計測」に関する種々の応用例が扱われているが, 具体的な計測のメカニズム等はそちらを参照して頂くとして, 本稿ではビジョン研究(コンピュータ・ビジョン及びロボット・ビジョン等の分野)を通じて, 「動く」

ことと「計測」の関係を調べてみよう。

動くことと計測の関係は, 視覚を通じた計測分野に限らないが, 大体, 以下の4通り位の関係が考えられる。勿論, これらの関係は話を進める上での便宜的なもので, はっきり区別されている訳ではなく, 幾つかの側面を表わしているものと考えて頂きたい。これらの関係を模式的に表現すると図1のようになる。

- ①動きの計測
- ②動きによる計測
- ③動くための計測/計測のための動き
- ④動いている間の計測

①は運動計測一般を指す。時間的に変化する画像列中

図1 ビジョン研究における『動き』と『計測』の関係

* 「写真測量とリモートセンシング」特集号 I, 1986
大阪大学 基礎工学部

の対象物体の運動パラメータを計測することが目的であるが、対象が2次元的な動きか、3次元的な動きも許すかによって問題の複雑さが変わる。2次元運動の場合は、画面内の幾何学的処理だけで済む場合が多いが⁽³⁾、3次元運動の場合、コンピュータ・ビジョンの持つ基本的問題である曖昧さ、即ち2次元の画像からもとの3次元情報を導出することは数学的に不可能であるという問題点が生じ⁽⁴⁾、種々の物理的な制限条件や、対象に関する知識を駆使しなければ解決できない。^(5,6等)対象物体の3次元構造が不明の時、構造を先に求めるやり方と、運動を先に求めるやり方がある。前者の場合、運動情報のみを利用して物体の3次元構造を決定する方法があり⁽⁷⁾、②の動きによる形状計測に相当する。この分野の研究は知覚心理学の実験にヒントを得ている。

我々人間が物の動きを観察する時、物の3次元構造が事前に判っている場合が多い。このためその情報を利用して3次元的な動きを理解していると考えがちである。これに対し、対象物の形状を知らなくても動きを見ることによって初めて、その形状や構造が認識できるという説がある。Johansson⁽⁸⁾は人体の主な関節に発光ダイオードを付け、暗闇の中でその光だけが見える様にして、運動による3次元空間知覚の実験をした。人体が静止している間は無意味な2次元パターンとして映る発光点が、動き出すと直ちに(約0.1秒で)人体であること、動作内容、性別まで判別できたと報告している。この時、人間が使っていると思われる制限条件や知識を用いて、2次元の画像列から物体の3次元形状を計測する研究が多くなされている。

①と②に関連した研究では、主に固定されたカメラから動物体を撮影した画像列を処理するもので、実験室レベルの解析が多く、③、④に比べると理論的かつ受動的である。物体と観測者の間の運動は相対的であるから、運動や形状の計測時には、どちらが動いても理論的には同じである。しかしながら、観測者が動くとき、観測している世界の像は全体的に変化する。即ち、観測者が固定している間は、対象が個々の物体のレベルにとどまっているが、観測者が動く時、扱う対象は観測者の環境(世界)のレベルになり、実際のアプローチは異なる。後者の場合、特に、移動ロボットの視覚と深い関連があり、③や④の関係が生じる。

③では観測者が「動くこと」と「観測すること」との関係を示す。即ち、観測の目的が動き(移動)にある

のか、動きの目的が観測にあるのかという問題である。ニワトリが先かタマゴが先かという問題と同じで、どちらとも言えない。例えば、ロボットが「あの棚の後ろの机の上にある箱をとって来なさい。」という命令を与えられたとしよう。ロボットはまず自分の位置を確認するために部屋を見渡す。棚らしきものが見えるが、目的とする棚であるかどうか判らない。近づけば判るので移動命令を下す。次に安全に移動できるかを確認するために、経路上に障害物がないか調べる(観測する。)確認がとれれば移動を開始するが、移動中に他の動物体がぶつかって来ない様に観測を続けなければならない。この様に移動と計測のサイクルを通して、与えられた仕事が達成される。実際のシステムでこの様な観測と移動の有機的な結合によってタスクが実行される例は少く、観測のための移動のコントロールや、移動可能領域発見のための観測などがある。

④は移動中の観測で、上に述べた様に、計画されたある経路上に沿って移動する時、他の動物体や障害物と衝突しない様に実時間で観測、移動のサイクルを実行するのが望ましい。しかし実際には環境に対して強い制限を設けないと難しい⁽⁹⁾。移動中に観測した画像列から、自身の動きを推定する手法は、①で述べた3次元解析で、運動を先に求める手法に相当し、オプティカル・フローと呼ばれる3次元移動ベクトルの画像面

図2 粒子状の運動物体の追跡
(a) 入力画像の一部 (b) 重心の軌跡

への射影を基にした幾つかの研究がなされている。

以下では、今まで述べて来た①から④の関係を基にして、コンピュータ・ビジョンやロボット・ビジョンの分野における研究を紹介し、最後に、これらの分野の最終目標と計測との関連について述べる。

2 動くものの計測

2.1 運動計測と対応付け問題

時間的に連続した2次元の画像列から、運動パラメータを計測する際の最も基本的で困難な問題は、画面間の対応付けであろう。通常、良く見られる手法は、相関法を用いて、対応可能領域の明度分布(時にはエッジ強度分布)の類似度を調べる方法である。動画像に限らず、ステレオ法等でも良く使われているが、物体の見え隠れ(オクルージョン)によるパターンの変化に弱く様々な工夫が試みられている⁽¹⁰⁾。図2(a)に示す様に、物体が粒子状で、運動が2次元的なものに限られている時には、個々の物体の幾何学的パラメータを利用して図2(b)に示す重心の軌跡が得られる⁽⁹⁾。画像が線画で与えられる場合、弧や線分のセグメントで記述して、可変テンプレート照合法を利用するもの⁽¹¹⁾、

また輪郭線の部分的照合を行っているもの⁽¹²⁾などが見受けられる。これらの手法でも、オクルージョンに対して完全に対処できるものは少い。特に物体の3次元運動を扱う場合には、物体の見かけの変形が生じ、オクルージョンと合わせて、増々困難な問題となっている。

次節以降では2次元の画像から3次元運動や構造を復元する問題を扱うが、この時に用いられる画面間の対応付けの単位は特徴点が多い。特徴点の画面間の対応付けとして、特徴点を抽出してから対応を求める方法と、時空間微分を用いた直接法があり紹介する。

(a)特徴点ベース

曖昧さがなく正確に対応付けられる特徴点としては、スポットやコーナーポイントが考えられるが、その抽出法としてMoravecのInterest Operator⁽¹³⁾とNagelら⁽¹⁴⁾によるガウス曲率を利用した方法が知られている。特徴点が求まると、現画面の特徴点に対応する特徴点を次の画面内で発見する。この時、次画面全体を探索したのでは、偽の対応付けが生じる可能性が高い。動物体の最大移動速度が既知であれば、探索範囲を狭めることが可能である。また対象が剛体だと仮定すると、近傍の特徴点の移動ベクトルは良く似た

図3 くり返し法による特徴点の対応付け (Barnard ら⁽¹⁵⁾)

(a), (b) 連続場面から抽出した特徴点
(c) 4回くり返し (d) 10回くり返し

傾向を持つべきだという拘束を利用して対応の候補を絞ることができる。

Barnard ら⁽¹⁵⁾はくり返し法（弛緩法：relaxation method）を用いて、この様な特徴点の対応付けを提案した。図 3 にその結果を示す。(a), (b)は Moravec のオペレータで抽出した特徴点であり、(c), (d)にそれぞれ 4 回と 10 回くり返しを用いて得られた結果を示す。

(b)時空間微分法（オプティカルフローの算出）

オプティカル・フローとは、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速度を意味する⁽¹⁶⁾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かけの速度分布と解釈し、厳密な区別をしない。

Limb ら⁽¹⁷⁾は動画の帯域圧縮の研究から、物体の移動方向と明るさの勾配に関する近似式を発見し、Horn ら⁽¹⁸⁾はこの近似式からオプティカル・フローを決定する基本式を以下の様に導いた。画像上の点 (x, y) の時刻 t における明るさを $I(x, y, t)$ とし、今、微小時間 Δt の間に物体が x 軸、 y 軸の方向に Δx 、 Δy だけ移動したとする。物体上の点の明るさが不変であると仮定すると次式が成立する。

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

右辺を Taylor 展開すると

$$I(x, y, t) = I(x, y, t) + \Delta x \cdot \frac{\partial I}{\partial x} + \Delta y \cdot \frac{\partial I}{\partial y} + \Delta t \cdot \frac{\partial I}{\partial t} + e$$

（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。

$$\frac{\partial I}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0$$

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 、時間的な変化を I_t とすれば、次の様に書き直せる。

$$I_x \cdot u + I_y \cdot v + I_t = 0 \quad (2.1)$$

(2.1)式は (u, v) に関する一つの制限条件を与える。

Cafforio ら⁽¹⁹⁾や Fennema ら⁽²⁰⁾は、動物体に対応する領域では「速度ベクトルが等しい」という仮定を置いた。この方法では画面に対して平行に移動する物体にしか適用できない。そこで Horn ら⁽¹⁸⁾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、誤差を最小にする様な (u, v) を各点の速度ベクトルとした。具体的には、(2.1)式と滑らかさを表わす式を加えた誤差の評価式を定義し、くり返し法を用いて各点のフローベクトルを求めた。図 4 (a)に入力画像を、(b)に 32 回くり返した後に得られたオプティカルフローを示す。この方法では回転も扱うことができる。しかし物体の境界上で速度分布が急激に変化し、本質的に誤差が大きくなる。これに対する改良や、応用例が幾つか報告されている^(21~22)が、画面全体の密なオプティカルフローを、実際の画像から求めるのは非常に難しい。

2.2 運動情報を用いた物体の 3 次元形状計測

2 次元の画像列から 3 次元世界を復元するには種々の制約が必要となる。現在までの研究に共通しているのは、対象物の剛体性とその中心射影像として画像が得られている点である。これらについてもう少し詳しく

図 4 滑らかさを利用したオプティカルフローの算出 (Horn ら⁽¹⁸⁾)

(a) 入力画像の一部 (b) 32 回くり返し後のフロー

く説明しよう。

(a)剛体性

物体の剛体性を仮定する事は、物体像が時間的に変化する時、その原因が物体自体の形状変化によるものでなく、物体あるいはカメラが動いた事によって生じる見か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全て画像面に直交する。即ち、下記の F が極めて大きい場合に相当し、 Z 成分に無関係に射影される。これに対し、中心射影は図5に示す様に、原点をレンズ中心とし、2軸方向を視軸方向と考え、画像面を原点から距離 F の所に $X-Y$ 平面に平行に置く。この時、空間内の点 $P(X,Y,Z)$ は画面上の点 $P(x,y)$ に射影される。ただし (x,y) は次式で与えられる。

$$x = F \cdot \frac{X}{Z}, \quad y = F \cdot \frac{Y}{Z} \quad (2.2 \sim 3)$$

従って、大きさに曖昧が生じる。しかし空間内で平行な2直線が、画面上に射影された時に構成する消失点(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りを与えてくれる。

以上の2つの制約を用いた3次元解析について調べる。3次元空間内で剛体は、適当な軸周りの回転運動 R と平行移動 T の合成によって、任意の位置の、任意の姿勢に移し換えることができる。図5に示した系においていま物体上の任意の点 $P(X,Y,Z)$ と移動後の点 $P'(X',Y',Z')$ との間には次式が成立する。このとき、

図5 射影変換と運動パラメータ

R, T は物体の剛性体の仮定からすべての点に共通である。

$$P' = RP + T \quad (2.4)$$

この運動が画像面($x-y$ 平面)上に中心射影されたとき、点 $P(X,Y,Z)$ とその像 $p(x,y)$ の間には(2.2~3)式が成立する。ここでは、いくつかの特徴点について、物体移動前後の像 p_i, p_i' の対応づけが判っている。すなわち、幾組かの $(x_i, y_i), (x_i', y_i')$ が既知であると仮定し、上式から導かれる代数方程式系を解き R, T を決定することができる。しかし、この方程式系を一般的に解くには複雑で、この問題に先鞭をつけた Ullman は、平面上を移動する物体をそれに平行な視軸をもつカメラによって撮影した場合について解を求めている⁽⁷⁾。

上述の系が解をもつための条件は、Meiri⁽²³⁾の考察によれば、対応づけ既知の点 P 、画面数 c が、

$$P \geq 3 + \frac{2}{2c-3} \quad (2.5)$$

なる関係を満たす必要がある。

Roach ら⁽²⁴⁾は、5点2画面のときの計算式を示したが、彼らは物体ではなくカメラを移動させたため、カメラパラメーターの変数が加わり、結局18個の未知数に18個の条件式が得られた。非線形要素を含むため代数的には解けず、数値解を求めた。実験では合成画像の各点に1/4画素のランダム雑音を加えたが、正確な値を求めるためには、2画面で12~15点、3画面で7~8点が必要であると述べている。

Tsai, Huang らのグループ^(25~28)も中心射影の場合の再構成問題における解の存在や収束性、安全性について一連の定量的解析を行なっている。解の収束性と正確さを決定する要素として、特徴点の数、それらの配置、画像分解能、運動の種類などを挙げ、5000回の試行を通して各種の方法を検討した⁽²⁵⁾。ロボット・アームを使った実際の実験では、量子化誤差の影響を非常に受けやすいと報告されている⁽²⁸⁾。Tsai⁽²⁶⁾は点同士の対応では不利な点が多いとして、エッジに付随する特徴の対応を唱えている。剛体平面上の2次曲線、および曲線上にない1点の投影像が2画面間で対応づけられた場合、画面間の3次元運動が代数的に決定できることを示した。また Yen ら⁽²⁷⁾は線同士の対応が与えられているときに、運動パラメーターを求める方法を示したが、この場合、球面射影(Spherical projection)を利用している。

Nagel⁽²⁹⁾は、ベクトル方程式を利用して、未知数を減

(a)

(b)

図6 自動車の3次元構造の復元 (Nagel⁽²⁹⁾)

(a) 入力画像の一部と特徴点の対応付け

(b) 多面体近似

らす方法を提案し、道路上の自動車の画像を解析した。2.1で述べた特徴点抽出の手法を用いてコーナーポイントを検出し、ベクトル方程式を利用して3次元座標を求め、最後に自動車の凸多面体近似を行なった。図6にその結果を示す。

小田・北橋⁽³⁰⁾は先に述べた解の公式を利用し、映像中の静止物体の位置の変化を求め、これによって、平面上を移動するカメラの3次元運動を求めている。

3. 動くものからの計測

3.1 計測のための動き／動きのための計測

今まで述べてきた研究では固定したカメラから得ら

れる画像列を対象としており、観測者自身が動くことをあまり想定していない。ロボットビジョンの分野では目的を達成するために、ロボット自身が外界に対して働きかけることが可能であると想定している。最も基本的な働きかけは移動することであり、より詳しい計測のために視点を変えたり、逆に安全に移動するための障害物の発見などが挙げられる。

計測のための動きとして、ステレオ法の拡張が幾つか見られる。ステレオ法は3次元距離計測の手法として古くから研究されているが、困難な問題として、対応付けと精度の向上がある。これらを補う方法として、カメラを移動させた手法がある。Xuら⁽³¹⁾はMarr & Poggio⁽³²⁾のステレオにおけるオクルージョンの問題、広い視差範囲と高い距離の分解能のトレードオフの問

図7 右から左への移動による3次元画像の構成とエピポーラ平面の関係 (Bolles ら⁽³⁵⁾)

(a) シーンの像

(b) 水平断面画像, Y=70 (c) 垂直断面画像, X=45

題を解決する新しい Coarse-to-Fine 法としてカメラ間距離を変化させた移動ステレオを提案している。従来の移動ステレオ⁽³³⁾と異なり、小さいカメラ間距離における視差図を大きなカメラ間距離の場合のマッチングの際のプランとして利用した。これによりオクルージョンの予測と広い視差範囲が可能になった。これらの移動ステレオ^(31,33)では、3枚以上の画像を扱うが、処理の手法は通常のステレオ法の延長線上にある。これに対して、画像のサンプル間隔を非常に密にして、時間軸と xy 軸を持つ3次元 BOX 画像を構成した新しい手法が提案されている^(34,35)。

基本原理を図7に示す⁽³⁵⁾。通常のステレオ法では、左右画像どちらか一方の画像内の点の他方の画面内での対応点は、視点と空間内の点で構成するエピポーラ平面と画像面の交線上に位置する。今、カメラが等速で右から左へ移動した時、空間内のある特徴点の軌跡は、3次元画像内で水平な直線になる。この直線を含む水平面がエピポーラ平面で、この面内での直線の傾きが物体までの距離に相当する。

山本⁽³⁴⁾は、水平方向の移動だけでは、水平エッジへの距離がでないで、垂直方向にも移動させ、2つの3次元画像を構成して距離を得た。図8にその結果を示す。(a)は原画像の一部で、(b), (c)にそれぞれ3次元画像のスライスを示す。(d)(e)はスライスから直線を検出した結果で、最終的に(f)の距離図が得られる。

(d) 水平断面画像の線分図 (e) 垂直断面画像の線分図

(f) シーンの視差分布図

図8 2つの3次元画像の解析 (山本⁽³⁴⁾)

これらは計測のための移動であるが、移動のための計測もある。Tsuji ら⁽³⁶⁾は、建物内を移動するロボット

(a) 左画像

(b) 右画像

(c) (b)のエッジ画像

(d) 自由領域図

図9 ステレオ法を用いた自由領域の探索

の視覚システムで、床面上の障害物を発見し、ロボットが安全に移動できる領域図を作成した。床からカメラまでの高さは既知なので、右の画面上にある点が床面上にあると仮定すると、その点までの距離(視差)が計算できる。その点を左画面上で確認し、床面上の点か障害物かを決定する。図9に入力画像のペア、エッジ画像、自由領域図をそれぞれ(a)~(d)に示す。Bolles⁽³⁵⁾も、先の3次元BOX画像の解析で得られた距離図を基に自由領域図を作成している(図10参照)。隋門はエッジ位置の存在範囲を示し、黒く塗られた部分が

自由領域である。隋門の大きさから判る様に、遠方や移動中に隠された部分のエッジ点の距離の精度が近方より劣る。

3.2 動くものからの計測

前節では、自身の動きがコントロールできる場合を扱っており、データ構造に新規性がある^(34,35)が問題の設定自身は易しい。自身の運動が不明の場合、2次元の画像列から自己の3次元運動を推定しなければならない。これは2.で述べた3次元解析の後者、即ち、運

図10 3次元画像の解析から得られた自由領域図 (Bolles ら⁽³⁵⁾)

(a) 見かけの速度場

(b) 平行移動成分

図11 オプティカルフローの解析 (Prazdny⁽³⁸⁾)

動から先に求める手法で、オプティカルフローを用いた解析が多い。まず、オプティカルフローを用いた3次元運動解析の原理を述べる。

物体運動は図5に示すように各軸周りの角速度 $R(\alpha, \beta, \gamma)$ と各軸方向の平行移動成分 $T(U, V, W)$ とから成る。簡単のために焦点距離 $F=1$ 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。

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

いま点 P の運動が平行運動 T 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 $p'(x', y')$ は次式のように表わせる。

$$x' = \frac{X'}{Z'} = \frac{X + Ut}{Z + Wt}, \quad y' = \frac{Y'}{Z'} = \frac{Y + Vt}{Z + Wt} \quad (3.1)$$

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_∞ は式(3.1)で $t \rightarrow \infty$ とおくことによって、

$$(x, y) = (U/W, V/W)$$

が導かれ、空間内での点 P の位置とは無関係に運動方向によって決まる投影面上に1点に収束することが判る。この点は2.1(b)に述べた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⁽³⁷⁾。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.が求まり、観測者に対するシーンの平行移動速度が求められる。

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。そこでPrazdny⁽³⁸⁾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 x, y, z 軸周りの各成分 α, β, γ に(図5参照)に分解し、画面上での速度成分が画面上の

(a) 原画像の一部

(b) 見かけの速度場

(c) 静止環境に対する FOE

図12

位置によって唯一に決まることを示した。

図11にシミュレーションの一例を示す。8近傍の各点のベクトルを基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 $\pm 5^\circ$ の弧内に収まると報告されている。

Brussら⁽³⁹⁾は画面全体に最小自乗法を適用して（すなわち、静止環境を想定）、運動パラメーターの精度を上げる事を提案している。

Riegerら⁽⁴⁰⁾は物体の境界などの距離不連続の部分では、投影面上の平行移動成分に差がでるが、回転成分は投影面上で近傍ならば類似していることを利用し、近傍ベクトルの差の成分から近似的にF.O.E.を求めている。金谷はオプティカルフローから対象を平面に限定し、その運動等を求めたがそれにとどまらず、求められた3次元運動の「解釈」がカメラ光軸の周りの回転⁽⁴²⁾（直交射影の場合には平行移動も許す⁽⁴¹⁾）に対して本質に不変であることに着目し、オプティカルフローがその合成によって表現されるような互に独立な不変要素を解析的に導入した。

オプティカルフローを用いた本節の解析法は密なオプティカルフローを前提としているが、このことは実際問題への応用を困難にする。第一にオプティカルフローを直接得られるような入力装置は現在のところ存在せず、動画像から求める必要がある。2.1に述べた時空間微分法を用いたとしても、実際のシーンを対象としたとき、密なオプティカルフローを算出することは非常に難しく、特徴点を基にした対応づけで得られる限られたフローを基に解析を進める必要に迫られる。第二に仮に得られたとしても、3次元運動を推定できる程の精度は期待できず、何らかの制限条件が必要である。

Tsuijiら⁽⁴³⁾は、この問題に対し、通常の相関法を用いた対応付けで特徴点の移動ベクトルを構成し、建物内に多く存在する垂直エッジを利用して回転運動によるフロー成分を抽出した。更に動物体を含む環境内での移動カメラ映像の処理も行っている⁽⁴⁴⁾。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12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、静止環境に関するF.O.E.の算出結果を示す。

4. 計測から認識行動へ

視覚を通じた「動き」と「計測」に関する研究を、コンピュータビジョンやロボットビジョンの分野から紹介してきた。この他にも色々な研究があるので、文献(49)等を参照されたい。コンピュータビジョンやロボットビジョンの研究では、2次元画像から得られる3次元情報を基に物体の認識や外界への働きかけを目標としており、計測自体はその過程の中のサブゴールである。現在、研究の流れとして、ロボットビジョン的なものが盛んに行われている。これは、コンピュータビジョンでなされた理論的な研究が、実際どの程度まで有効であるかを試す研究の場として、ロボットビジョンが適しているとの見方もできる。計測の問題も含めて、今後の課題を挙げてみよう。

〔1〕 計測の目的と精度

コンピュータビジョンでは、2次元の画面全体の3次元情報を計測し、そこから面や基本立体などを抽出して、物体の3次元モデルを作ることを目的としていた。これに対し、ロボットビジョンでは目的に応じた計測を目指し、画面内から必要な情報だけを抽出し利用している。例えば、移動ロボットの場合、安全に移動出来る付近の自由領域図が必要であり、必ずしも遠方の情報を必要としない。またステレオ法で得られる距離の精度は、能動距離センサに比べて優るとは云えない。視覚情報では、3次元計測の絶対的な精度よりも、大局的な情報によるシーンの記述が適している場合が多い。これらを含め、視覚による計測の目的と精度をはっきり見定めることが、実際のシステムを構築する時には不可欠である。

〔2〕 複数センサーの利用

上にも述べた様に、視覚センサーのみを利用して、実際のシステムを駆動するのは難しく、種々のセンサとの協同作業が必要である。実際の移動ロボットのシステム⁽⁴⁵⁾では、視覚センサー、ソナー等を利用しているし、視覚でも局所的なものとは大局的なものに2つのTVカメラを備えたものもある⁽⁴⁶⁾。視覚センサを有効利用するためにも、各種センサーの役割分担をはっきりさせ、それらのセンサー出力の統合が必要である。

〔3〕 高速高機能画像プロセッサの開発

自明ではあるが高速高機能画像プロセッサが必要である。従来の画像プロセッサでは、主に画像から

画像への変換処理が、前处理的にも必要であるし、ハードウェア化に適しているもの事で進められてきた⁽⁴⁷⁾。しかし画像から、大局的な情報を実時間で得るには、単なる画像変換プロセッサではなく、シーンの情報を獲得するプロセッサが必要である。最近、ダイナミック・プログラミング法を用いたステレオ法のハードウェア化が試みられており⁽⁴⁸⁾、画像認識用の個々の機能別プロセッサが期待される。

参 考 文 献

- 1) 例えば E. A. Smith and D. R. Phillips : "Automated cloud tracking using precisely aligned digital ATS pictures", IEEE Trans. vol. C-21, no. 7, pp. 715~729 (July. 1972)
- 2) 例えば J. A. Webb and J.K. Aggarwal : "Visually interpreting motion of objects in space", Proc. PRIP'81, pp.516~521 (1981)
- 3) M. Yachida, M. Asada, and S. Tsuji : "Automatic analysis of moving images", IEEE Trans. vol. PAMI-3, no. 1, pp.12~20 (Jan. 1981)
- 4) 大田, 池内 : "3次元情報の再構成とモデル化", O plus E, no. 71, pp. 86~105 (Oct. 1985)
- 5) M. Asada, M. Yachida, and S. Tsuji : "Analysis of three dimensional motions in blocks world", Pattern Recognition, vol. 17, no. 1, pp. 57~71 (1984)
- 6) J. O' Rourke and N. I. Badler : "Model-based image analysis of human motion using constraint propagation", IEEE Trans., vol. PAMI-2, pp.552~536 (1980)
- 7) S. Ullman : Interpretation of Visual Motion, MIT Press, Cambridge, MA (1979)
- 8) G. Johansson : "Visual motion perception", Sci. Amer., vol. 232, pp.76~88 (1975)
- 9) 南方他 : "視覚情報を用いたロボットの移動制御", 昭和61年度電子通信学会全国大会, 講演番号1660 (Mar. 1986)
- 10) K. Mori, M. Kidode, and H. Asada : "An iterative prediction and correction method for automatic stereo comparison", CGIP, vol. 2, pp.393~401 (1973)
- 11) S. Tsuji, M. Osada, M. Yachida : "Tracking and segmentation of moving objects in dynamic line images", IEEE Trans. vol. PAMI-2, no. 6, pp.516~522 (1980)
- 12) W. N. Martin and J. K. Aggarwal : "Computer analysis of dynamic scenes containing curvilinear figures", Pattern Recognition, vol. 11, no. 3 pp.169~178 (1979)
- 13) H. P. Moravec : "Visual mapping by robot rover", Proc. 6th IJCAI, pp.598~600 (1979)
- 14) L. Dreschler and H. Nagel : "Volumetric model and 3D-trajectory of a moving car derived scene", CGIP, vol. 20, no. 4, pp.199~228 (1982)
- 15) S. T. Barnard and W. B. Thompson : "Disparity analysis of images", IEEE Trans., vol. PAMI-2, no. 4, pp.333~340 (1980)
- 16) K. Prazdny : "On the information in optical flows", CVGIP, vol. 22, pp. 239~259 (1983)
- 17) J. O. Limb and J.A. Murphy : "Estimating the velocity of moving images in television signals", CGIP, vol. 4, pp.311~327 (1975)
- 18) B. K. P. Horn and B. G. Schunk : "Determining optical flow", Artif. Intell., vol. 17, pp.185~203 (1981)
- 19) C. Cafforio and F. Rocca : "Methods for measuring small displacements of television images", IEEE Trans., vol. IT-22, pp.573~579 (1976)
- 20) C. L. Fennema and W. B. Thompson : "Velocity determination in scenes containing several moving objects", CGIP, vol. 9, pp.301~315 (1979)
- 22) B. G. Schunk and B. K. P. Horn : "Constraints on optical flow computation", Proc. PRIP'81, pp.205~210 (1981)
- 22) L. S. Davis, Z. Wu, and H. Sun : "Contour-based motion estimation", CVGIP, Vol. 23, pp.313~326, (1983)
- 23) A. Z. Meiri : "On monocular perception of 3-D moving object", IEEE Trans, vol. PAMI-2, no. 6, pp. 582~583 (1980)
- 24) J. W. Roach and J. K. Aggarwal : "Determining the movement of objects from a sequence of images", IEEE Trans., vol. PAMI-2, no. 6, pp.554~562 (1980)
- 25) J.-Q. Fang and T. S. Huang : "Solving three dimensional small-rotation motion equations", Proc. CVPR'83, pp.253~258 (1983)
- 26) R. Y. Tsai : "Estimating 3-D motion parameters and object surface structures from the image motion of curved edges", ibid, pp.259~266 (1983)
- 27) B. L. Yen and T. S. Huang : "Determining 3-D motion/structure of a rigid body over 3 frames using straight line correspondences", ibid, pp.267~272 (1983)
- 28) T. S. Huang and J. Q. Fang : "Estimating 3-D motion parameters : Some experimental results", Proc. 3rd Int. Conf. Robos Vision and Sensory Controls, pp. 229~231 (1983)
- 29) H. H. Nagel : "Representation of moving rigid objects based on visual observation". Computer, vol. 14, No. 8, pp.29~39 (1981)
- 30) 小田正, 北橋忠宏 : "カメラ映像による3次元的自己運動の認識", 信学論, vol. J68-D, no. 4, pp.570~575, (April 1985)
- 31) G. Xu et al. : "Precise Matching of Stereo Images Guided by Coarse Disparity Map", Proc. 9th IJCAI, pp.892~894 (Aug. 1985)
- 32) D. Marr and T. Poggio : "A computational theory of human stereo vision", Proc. R. Soc. Lond., vol. B204, pp.301~328 (1979)
- 33) R. Nevatia : "Depth Measurement by Motion Stereo", CGIP, vol. 6, pp.619~630 (1976)
- 34) 山本 : "直交移動連続ステレオ画像からの3次元情報の抽出", 昭和61年度電子通信学会全国大会, 講演番号 S15-8 (Mar. 1986)
- 35) R. C. Bolles and H. H. Baker, "Epipolar-plane Image Analysis : A Technique for Analyzing Motion Sequences," Preprints of the 3rd International Symposium of Robotics Research, pp.192~199, 1985
- 36) S. Tsuji, J. Y. Zheng, and M. Asada : "Stereo Vision of a Mobile Robot : World Constraints for Image Matching and Interpretation", Proc. Int. Conf,

- Robotics and Automation, pp.1594~1599 (1986)
- 37) H. Nakatani, S. Kimura, O. Saito, and T. Kitahashi: "Extraction of vanishing point and its application to scene analysis based on image sequence", Proc. 5th ICPR, pp.370~372 (1980)
 - 38) K. Prazdny: "Determining the instantaneous direction of motion from optical flow generated by a curvilinearly moving observer", CVGIP, vol. 17, pp. 238~248 (1981)
 - 39) A. R. Bruss and B. K. P. Horn: "Passive navigation", CVGIP, vol. 21, no. 1, pp.3~20 (1983)
 - 40) J. H. Rieger and D. T. Lawton: "Sensor motion and relative depth from difference fields of optic flow", Proc. 8th IJCAI, pp.1027~1031 (1983)
 - 41) 金谷健一: "平行射影オブティカルフローの解析", 情報処理学会研究報告 CV 35-4, (March 1985)
 - 42) 金谷健一: "中心射影オブティカルフローの解析", 同上, CV 36-1 (May 1985)
 - 43) S. Tsuji, Y. Yagi, and M. Asada: "Dynamic scene analysis for a mobile robot in a man-made environment", Proc. Int. Conf. Robotics and Automation, pp.850~855 (1985)
 - 44) S. Tsuji, Y. Yagi and M. Asada: "Finding of Objects Moving in a Pathway by a Moving Observer", Proc. 8th-ICPR (1986)
 - 45) 例えば R. Wallace et al.: "First Results in Robot Road-Following", Proc. 9-th IJCAI, pp.1089~1095 (1985)
 - 46) 大輪秀樹 他: "屋外を移動する視覚移動ロボット「晴信 3 号機」の開発", 第 3 回日本ロボット学会学術講演会資料 pp.113~116 (1985)
 - 47) 木戸出: "画像演算装置とソフトウェア", テレビジョン学会誌 vol. 39, No. 6, pp.526~533 (1985)
 - 48) 大田, 高野, 池田: "ステレオ画像における区間対応探索処理の高速化について", 信学技報 vol. 86, No. 47, PRU 86-1 (1986)
 - 49) 北橋, 浅田: "動画像処理", O plus E, No. 69, pp.72~86 (Aug. 1985)
- 出典略記
- I(J)CPR: International (Joint) Conference on Pattern Recognition
 - IJCAI: International Joint Conference on Artificial Intelligence
 - C(V)GIP: Computer (Vision,) Graphics and Image Processing
 - PRIP'xx: 19xx IEEE Computer Society Conference on Pattern Recognition and Image Processing
 - CVPR'xx: 19xx IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition
 - 信学論: 電子通信学会論文誌
 - 信学技報: 電子通信学会技術研究報告
 - 情報処理: 情報処理学会論文誌
 - 情報処理学会研究報告: 情報処理学会研究会資料