

時空間相関法に基づく3次元シーン中の奥行き情報の抽出

准員 野村 厚志[†] 正員 古賀 和利^{††} 正員 三池 秀敏[†]

Extracting Depth-Information from Dynamic Image by Spatio-Temporal Correlation Analysis

Atsushi NOMURA[†], Associate Member, Kazutoshi KOGA^{††}
and Hidetoshi MIIKE[†], Members

あらまし 移動するカメラがとらえたシーンを解析して得られるオプティカルフローのベクトル場にはシーン中の物体の3次元情報(奥行き, 形状)が含まれる. 本論文では筆者らが提案してきた動画像の時空間相関解析法による高精度のオプティカルフロー計測法を発展させると共に, 運動視(motion stereo)の理論に従い現実のシーンから3次元奥行きの情報抽出を試みた. オプティカルフローの計測に関しては, (1)平面波の伝搬も解析できるような計測法の改良, (2)高速化アルゴリズムの検討, を行いシミュレーションにより有効性を検討した. またテレビカメラがとらえたシーンより求めたオプティカルフローをもとに, 運動視の考えに基づき3次元奥行きを定量的に決定し, 提案した方法が現実のシーン解析にも有効であることが判った.

1. ま え が き

テレビカメラと3次元世界中の物体の相対的な運動に伴う動的なシーンを解析して得られるオプティカルフローには物体の奥行きや形状に関する3次元情報が含まれている⁽¹⁾. オプティカルフローとは物体の運動に伴う画像中での輝度パターンの流れを示す変位(あるいは速度)ベクトルのことである. 実際に1台のカメラを一定速度で動かして現実の世界をとらえた動画像を観察すると, テレビカメラから遠く離れているものほどゆっくり動き(小さな変位ベクトル), 近くに位置しているものほど速く動く(大きな変位ベクトル). すなわちオプティカルフローの大きさの情報より画像中の物体のカメラからの距離が決定でき, 3次元奥行きの計測が可能となる. この方法は“motion stereo”法^{(2),(3)}と呼ばれるものであるが, これを発展させた二つのカメラを使う“dynamic stereo”法⁽⁴⁾では対象物の空間的な位置とその物体の運動速度が同時に決定できることが知られている. 近年こうした試みが数多く報告さ

れるようになり⁽⁵⁾, 精度の高いオプティカルフローの解析法の確立とこれに基づく3次元構造の複元の問題が, オートナビゲーションやロボットビジョンに関連して注目されている. 本研究では筆者らが独自に開発してきた高精度のオプティカルフロー解析法を用いて現実の動画像からオプティカルフローを求め, 物体の3次元奥行きの計測を試みた結果について報告する.

3次元情報を得る上で重要な情報を与えるオプティカルフローを求める方法は, 従来多数の提案や改良が報告されている. 大きく分けて二つの方法が提案されている. 第1の方法はマッチング法^{(6)~(8)}と呼ばれ, 連続したフレーム間の特徴のある部位(特徴点)を追跡し, フレーム間で同一の特徴点に対応させることで変位ベクトルを求める方法である. この方法では基本的な問題点として特徴点の自動認識が難しいことや, 高密度のベクトル場が得にくいことが挙げられる⁽⁸⁾. 第2の方法はグラディエント法⁽⁹⁾と呼ばれるもので, HornとSchunckによって最初に提案された. これは画像内の1点における濃淡レベルの空間こう配(グラディエント)と濃淡の時間変化の割合との関係によりオプティカルフローの速度を求める方法である. 通常, 速度ベクトル場が連続であるとの仮定を置くことでオプティカルフローの速度ベクトル場が決定できる. この方法の間

† 山口大学工学部電気工学科, 宇部市

Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube-shi, 755 Japan

†† 山口大学工業短期大学部情報処理工学科, 宇部市

Technical College, Yamaguchi University, Ube-shi, 755 Japan

題点としては、濃淡レベルの時間的空間的滑らかさ、速度場の空間的連続性などが前提であり解析対象となる動画像に対する制約が多く、現実の画像への適用が難しいことが挙げられる⁽¹⁰⁾。いずれの方法もその後多くの研究者により解析法の改良やその応用に関する新しい提案がなされているが^{(11)~(15)}、いずれも決定的なものとは言えない。そこで特に物体の運動に伴う2次元速度ベクトル場の高精度の物理計測法としての観点から、我々は動画像中の各画素における輝度の時系列の相互相関解析を用いた時空間相関法を提案してきた^{(16)~(21)}。これは画像中のある画素とその近傍画素との濃淡レベルの時間変化の相互相関関数を利用し、得られた最大相関値の角度依存性より運動方向の情報を、その方向での最大相関値のラグタイムより速さを求めようとするものである。この方法の長所は、解析対象の画素を物体が一度でも通過すれば高精度でその点の速度ベクトルが決定できることである。短所としては解析に必要な動画像のフレーム数が多く(通常100枚程度)必要で、なおかつ計算量が膨大であることなどが挙げられる。また現実の3次元空間中をテレビカメラを移動させ、動画像としてそのシーンをとらえた場合、垂直な縁をもった物体が存在すればそれは平面波の運動として映る。従来の時空間相関法では画像中を曲率半径の大きい物体が通過する場合、解析誤差が大きくなる等の問題点も指摘されていた。

ところで、3次元認識を目指す場合には高精度でオプティカル・フローを求めることが重要となる。本論文では時空間相関法を基本とし、(1)高速処理可能なアルゴリズムを開発する、(2)現実の画像に出現する曲率半径の大きい物体(平面波など)が通過する場合も解析可能なアルゴリズムを開発する、の2点について改良法を提案する。また実際に求めたオプティカルフローより“motion stereo”法に基づき3次元奥行き測定を行う具体的方法を示し、現実の3次元シーンの解析を通して3次元認識への可能性について議論する。

2. 解析理論

2.1 時空間相関法の基本原理

解析の基本原理については既に詳細に報告しているので^{(16)~(21)}、ここでは本論文の論理を展開する上で必要な事項に限定して話を進める。動画像中では物体の輝度分布(画像関数と呼ぶ)が不変で、これが一定速度で移動しているものと仮定する。動画像中に $n \times n$ 画素の小領域を考え、その中心に存在する速度の解析対象画

素を中心画素と呼び番号を0と符す。ここでは提案する解析法の性格上小領域を 5×5 画素に限定して以下の話を進める。この場合、中心画素から1画素おいた16近傍画素が考えられるが、それぞれに図1のように番号を付ける^{(16),(17)}。この範囲内をある一定の画像関数をもつ物体が一定速度で通過するものと仮定すれば、中心画素とその近傍画素の輝度が時間と共に変化する。具体的に直径が1画素よりも大きく3画素よりも小さい粒子が通過する場合を考えよう。このとき粒子の中心が通過した画素とその両隣の画素でのみ輝度に変化し、その他の画素では輝度変化は生じない。粒子はこの小領域(5×5)では一定速度で移動していると仮定しているから、中心画素の輝度変化と、中心画素に関して対称な二つの画素での輝度は類似な変化を示すことが期待される。ただ物体が画素間を移動するのに必要な時間(伝搬時間)だけ波形がずれていることになる。ここで中心画素と近傍画素との間の相互相関関数 $M_0^k(\tau)$ を次のように定義する。

$$M_0^k(\tau) = \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{S} \int_{-T/2}^{T/2} \{E_0(t) - \bar{E}_0\} \cdot \{E_k(t + \tau) - \bar{E}_k\} dt \quad (1)$$

ここで、 $E(x, y, t)$ は画面上の座標 (x, y) における時刻 t での輝度を表し、番号 $0, k$ の画素での輝度の時系列を $E_0(t) = E(x_0, y_0, t)$ 、 $E_k(t) = E(x_k, y_k, t)$ で表現し直している。また \bar{E}_0 、 \bar{E}_k は $E_0(t)$ 、 $E_k(t)$ の平均値、 T は観測時間、 S は一種の規格化定数でここでは番号 $0, k$ の画素の時系列の分散のうち大きい方を採用している⁽²⁰⁾。式(1)に従って、時系列の相互相関を計算すると一般には τ を伝搬時間に等しくしたときに相関が最大となる。以下このときの τ をラグタイム、 M_0^k の値を相関値と呼ぶ。 M_0^7 、 $M_0^{7'}$ の値が他の近傍画素での相関値に比べて大きければ粒子が $7' \rightarrow 0 \rightarrow 7$ 番の画素を通ったことが推定できる。

しかし同様な輝度分布をもった異なる3個の粒子が $7', 0, 7$ 番の画素をそれぞれ独立に通っても同様に $M_0^7(\tau)$ 、 $M_0^{7'}(\tau)$ の相関値が他の画素との相関値よりも大きくなる恐れがある。同一粒子が通過した場合の特徴は、 $M_0^7(\tau)$ と $M_0^{7'}(\tau)$ とが一方の時間軸を逆にしたときほぼ一致することであり、異なった粒子が通過した場合にはそのような相関関数の対称性は期待できない。こうした特徴を反映する目的で次のような評価関数 $M_0^{k,k'}(\tau)$ を導入した^{(16),(17)}。

$$M_0^{k,k'}(\tau) = M_0^k(\tau) \times M_0^{k'}(-\tau) \quad (2)$$

この関数を計算することにより、同一粒子が7', 0, 7番の画素を通ったときのみ $M_0^{k,k'}(\tau)$ が明らかに最大値をもち、その他の場合は0に近づく。このことから粒子の運動の方向は7'→0→7、速さは(0番と7番の画素間の距離)/(ラグタイム)であるとわかる。実際に図1のように粒子が5×5画素の領域中を通過する場合の7', 0, 7番画素における輝度変化の時系列と式(1), (2)によって計算される $M_0^7(\tau)$, $M_0^{7'}(\tau)$, $M_0^{k,k'}(\tau)$ の変化の様子を図2に示している。

しかしこのままの方法では、デジタル画像の性格上時間・空間的なデジタル誤差により速さおよび角度の分解能が悪い。そこでまず速さのデジタル誤差を解消するために、横軸に τ 、縦軸に $M_0^{k,k'}(\tau)$ をとり、 τ の連続関数とみなし2次曲線補間法を用いることで近傍画素 k 方向での最大相関値を示す真のラグタイム τ_0^k と相関値 γ_k を推定する⁽¹⁷⁾。また角度についても横軸に角度、縦軸にその角度方向 (k 近傍画素方向) の相関値 γ_k をとり γ を角度 θ の連続関数とみなし、これも2次曲線補間法を用いることで真の運動方向 θ_0 を推定する⁽¹⁸⁾。すなわち

$$\tau_0 = \{\tau \mid M_0^{k,k'}(\tau) \rightarrow \max (= \gamma_k)\}$$

$$\theta_0 = \{\theta \mid \gamma_k(\theta) \rightarrow \max\} \quad (3)$$

であり、真の速度 v_t は

$$v_t = (d_k / \tau_0^k) \cdot \cos(\theta_0 - \theta_k) \quad (4)$$

ここで d_k は k 近傍画素と中心画素との距離、 θ_k は k 近傍画素角度である。この考え方の基本は相関最大の方向が運動ベクトルの方向と考えていることであり、時空間相関法を基礎として補間法を用いることで近似的に真の運動ベクトルを求める方法と言える。一方別の方法として、物体の画像関数不変という仮定を基本とし、(1)中心対称な画像関数をもつ運動物体に対する蔽密解が導けることや^{(19),(20)}、(2)画像関数の一種の空間的自己相関関数に一定の仮定を設け、画素時系列間の相互相関関数との関連を論理的に考察することで

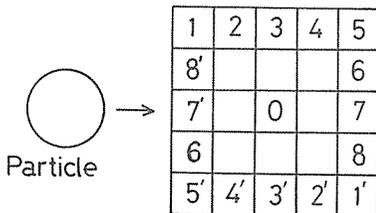


図1 解析対象画素とその近傍画素の配置

Fig. 1 Arrangement of a target pixel and neighboring pixels.

相関値およびラグタイムと速度ベクトルの間の関係を導き、これよりオプティカルフローを正確に決定する方法⁽²¹⁾等を提案してきた。これらの方法によると画像関数が仮定に一致する場合は高精度でオプティカルフローを決定できるが、平面波のような曲率半径の大きい物体が画像中を通過するような場合は誤差が大きい等の問題点も残されている。そこで、ここでは特定の仮定を必要とせずより汎用性があると考えられる近似法を基本として解析法を改良していく。

2.2 平面波を含むシーンの解析

従来の時空間相関法では注目している画素とその近傍画素とを曲率半径の大きい物体が通過した場合は解析誤差が大きかった。この章ではその原因を明確にするとともに、そのような動画に対して有効なアルゴリズムを提案する。

曲率半径の大きい物体の例として一つの平面波を考え、これが画像中の注目している画素を通過する場合を考える(図3)。従来法に従えば、最初に中心画素とその近傍画素との相互相関値とラグタイムを計算し、

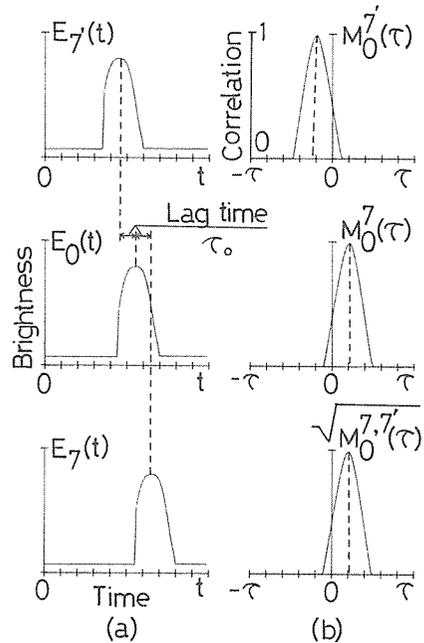


図2 粒子が画素7', 0, 7を通過していく場合の各画素の輝度の時系列(a)とその計算結果(b)

Fig. 2(a) Brightness change at a target pixel ($E_0(t)$) and at neighboring pixels 7 and 7' ($E_7(t)$ and $E_7'(t)$) by the passage of a moving particle.

(b) Mutual-correlation functions between the target pixel and neighboring pixels ($M_0^7(\tau)$ and $M_0^{7'}(\tau)$) and the evaluating function $M_0^{7,7'}(\tau)$ (see text).

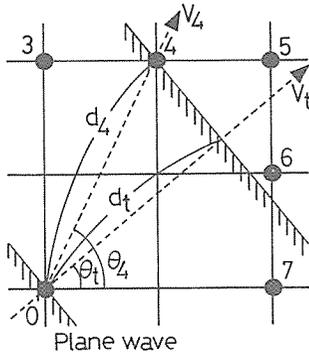


図3 平面波通過時の真の速度 V_t と各画素方向の見掛けの速さ V_k の関係

Fig. 3 Geometrical relation between apparent velocity V_k observed at a pixel site 4 and true velocity V_t under propagation of a plane wave.

中心画素に関して対称な画素の相関値を式(2)のように掛け合わせる。このとき通過した物体は平面波であるため、相関の最大値は16近傍のどの画素に対してもほとんど1に近い。従来法では方向の決定に相関値の角度依存性のみを用いているため、こうした平面波の場合その情報だけでは方向の決定が不可能となる。そこで相関値以外の情報も有効に用いて平面波の速度ベクトルを解析できるようなアルゴリズムを考える必要がある。平面波が通過する場合の大きな特徴としては、どの近傍画素との相関値もほぼ1となり、(見掛け上の速さ)=(距離)/(ラグタイム)は中心画素を通過して進行方向に引いた直線に近い画素方向ほど小さく、遠い画素方向ほど大きいことがわかる(図4(a))。つまり見掛け上の速さの角度依存性を用いれば、平面波が通過する場合真の速度ベクトルが決定できる可能性がある(但し、平面波は波面に垂直に伝搬すると仮定している)。図3を参考にして幾何学的に考えると k 方向(図では角度 $\theta_k = \theta_4$) への平面波の見掛け上の伝搬速度は、

$$v(\theta_k) = \frac{d_k}{\tau_k} = \left(\frac{d_t}{\cos(\theta_k - \theta_t)} \right) / \tau_k$$

$$= v_t / \cos(\theta_k - \theta_t) \quad (5)$$

となる。但し、 θ_t は真の伝搬方向、 $\tau_t (= \tau_k)$ は波面が垂直距離 d_t だけ伝搬するのに必要な時間、 $v_t = (d_t / \tau_t)$ は真の速度である。 k 近傍画素方向に固定されていた式(5)の角度 θ_k を一般的な角度 θ でとらえ直し、 $\theta = \theta_t$ においてテイラー展開し2次の項までで近似すると、

$$v(\theta) = v_t \cdot \{1 + (\theta - \theta_t)^2 / 2\} \quad (6)$$

となる。式(5)、(6)からわかるように、真の速度ベクトルの角度成分は見掛け上の速さ $v(\theta)$ が最小となる位

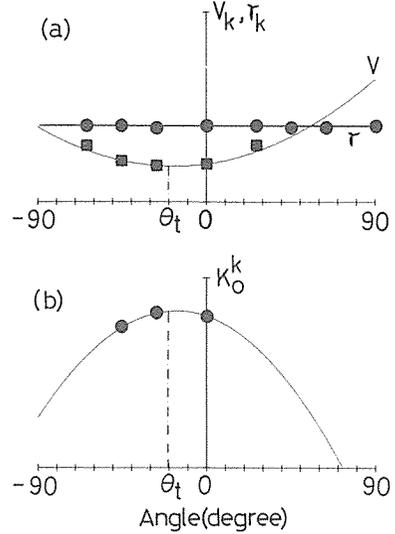


図4 平面波通過時のパラメータ γ , V , K の角度依存性
Fig. 4 Angular dependence of parameters γ (correlation), V (apparent velocity) and $K(\gamma/V)$ under propagation of plane wave.

置であり、その角度依存性は近似的に2次関数で表される。よって、角度成分を決定する場合は中心画素から各画素方向への見掛け上の速さを求めその中の最小値とその両隣の値を2次曲線で補間し、見掛け上の速さが最小となる角度を求めればよいことになる。

以上は、対象が曲率半径の大きい物体に対応するための見掛けの速さによる真の速度ベクトル方向の推定法である。一般的な画像に対して適用可能な解析法とするには、従来の相関値 γ_k による真の速度ベクトル方向の推定法も加味した新しい解析法を考察する必要がある。従来法で相関値の角度依存性を用いる場合はその最大値が、また平面波に対して見掛け上の速さの角度依存性を用いる場合はその最小値が速度ベクトルの真の方向を与えることを考慮すると最も簡単な表式として次のような新しい評価パラメータ K_0^k が定義できる。

$$K_0^k = \gamma_k / v_k \quad (7)$$

ここで、 γ_k は番号 k の画素に対する $M_0^{k,k'}(\tau)$ の相関値の最大値、 v_k はラグタイムから求められる各画素方向の見掛け上の速さを示す。一般にこのパラメータは方向 θ に依存した高次の項を含む複雑な関数になると思われるが、 θ が真の方向に近い領域ではこのパラメータが2次曲線で近似できるものと仮定すれば(図4(b))、その真の最大値を探すことによって運動物体の真の速度ベクトルを推定できることが期待される。すなわち

近傍画素 k での角度 θ_k と、中心画素から近傍画素 k までの距離 d_k およびラグタイム τ_k を用いて真の角度 θ_i および真の速さ v_i を表すと次式ようになる。

$$\begin{aligned} \theta_i &= \{\theta | K_0(\theta) \rightarrow \max\} \\ v_i &= d_k \cdot \cos(\theta_k - \theta_i) / \tau_k \end{aligned} \quad (8)$$

但しここでは、近傍画素 k の離散的な位置でのみ定義された K_0^k を、2次曲線補間を用いることで角度 θ の連続関数としてとらえ直し $K_0(\theta)$ としている。

2.3 高速化アルゴリズム

時空間相関法では高精度のオプティカルフローが得られるが、画像中の各中心画素において近傍画素との相互相関関数を求めるため膨大な計算量となる。従って、コンピュータビジョンによる3次元認識へこの方法を適用していくためには高速化アルゴリズムの開発が望まれる。

今回考察する高速化アルゴリズムには三つの方法がある。第1は解析原理で述べたように、(中心画素と近傍画素との距離)/(ラグタイム)により速さが求められるので、速さの精度を一定に保てば十分であるという観点から、大きなラグタイムの領域の相関計算を間引くという方法が考えられる。具体的にはフレーム数を100とした場合、従来法では τ を $0 \sim \pm 50$ の範囲で ± 1 ずつ変化させて式(1)を計算していたが、今回のアルゴリズムでは表1のように計算すべき τ を選択し計算量を減らすことで高速化を行っている(但し、中心画素と近傍画素との距離を2pixelとした)。すなわちラグタイムの大きな領域で計算する速さの段階はほぼ0.1pixel/frame(以下p/fと略記)一定に保たれており、単純に考えて計算量は約1/5に減少することが期待される。第2は速度ベクトルを求める場合に必要なのは最大の相関値とそのときのラグタイムであるから、 $\tau=0$ より相関計算を開始し相関が最大となったところで計算を打ち切るという方法が考えられる($\tau=0$ に最も近いピークを求める相関値であることは保証されている⁽¹⁸⁾)。これは、通常解析対象となる物体の運動の速さは解析法の特徴と現実に取り扱える画像の量から制限を受け0.1~2.0(p/f)程度となり、ラグタイムの大きな領域(速さの小さな領域)は実際にはあまり計算する機会が少ないことによる。第3は一般的な画像処理においては平滑化フィルタを掛けてデジタル誤差を解消して

いるが、時空間相関法の性格上少なくとも時間方向には既に一種の平均化操作が行われていると考えられるし、また時間・空間の両方に補間法を用いることでデジタル誤差を解消している⁽¹⁸⁾、平滑化フィルタを省くことが可能と考えられる。解析精度を落とさずに解析の前処理としての平滑化フィルタを省ければ計算時間短縮につながる。

2.4 "motion stereo"法

実際に得られたオプティカルフローから3次元奥行きを求めるためにはそれら両者の関係を知ることが必要である。これらの関係が最も簡単になる3次元シーン解析法の一つとして"motion stereo"法がある。これは静止した3次元シーンに対しテレビカメラを一定速度で既知方向に運動させながら撮影する方法である。図5に示しているように、移動するカメラがとらえたシーンにおいて点 P の奥行き D は

$$D = h \cdot (\Delta X / \Delta U) \quad (9)$$

で与えられる⁽²²⁾。ここに ΔX は一定時間中にカメラの平行移動する距離、 $\Delta U (= u_2 - u_1)$ はカメラの移動による画面内の点 P の位置の変化量を示す。また h は P が十分離れていればカメラのレンズの焦点距離に相当する。ところで式(9)をカメラの移動速度 V_0 、物体 P の平面内の移動速度 V (オプティカルフロー速度)を用いて表現すると

$$D = V_0 \cdot h / V \quad (10)$$

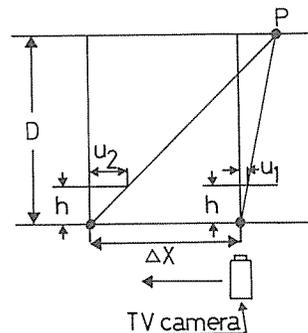


図5 "motion stereo"法におけるカメラの移動(ΔX)、画面内の物体の運動($\Delta U = u_2 - u_1$)と奥行き(D)との関係
Fig. 5 Principle of the "motion stereo". The relation among movement of a camera (ΔX), sight of object P in the image plane ($\Delta U = u_2 - u_1$) and depth (D).

表1 計算すべきラグタイムタイムの選択と対応速度(画素間隔を2 pixelとした)

τ (フレーム)	0	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 7	± 10	± 20	± 30	± 50
速度 (p/f)	∞	2.0	1.0	0.67	0.50	0.40	0.29	0.20	0.10	.067	.040

となる。すなわち3次元奥行き D とオプティカルフローの速度 V とは逆比例の関係にあることがわかる。

3. シミュレーションによる検討

本章では計算機シミュレーションによって作成した5種類の人工的な動画像を、今回提案した改良アルゴリズムによって解析しその有効性を確かめた。ここで利用した動画像のうち4種類は、ガウス関数的な輝度分布をもった三つの粒子がすべて $0.1(p/f)$, $0(deg)$, $0.5(p/f)$, $0(deg)$, $1.0(p/f)$, $0(deg)$

(degree), $0.5(p/f)$, $45(deg)$ の一定速度で並進運動を行うもので、残りの1種類は平面波が速さ $0.5(p/f)$, 角度 $45(deg)$ で伝搬するものである。

まず, 2.2 で提案した速度ベクトル方向の推定法の有効性を従来法による解析結果と比較することで確認する。利用した動画像は速さ $0.5(p/f)$, 角度 $45(deg)$ の粒子の並進運動画像と平面波の伝搬画像の2種類である。それぞれの解析結果を図6, 7に示している。黒丸は得られた速度ベクトルの画素の位置, 線の長さは速度の絶対値を, その方向(黒丸から線の方

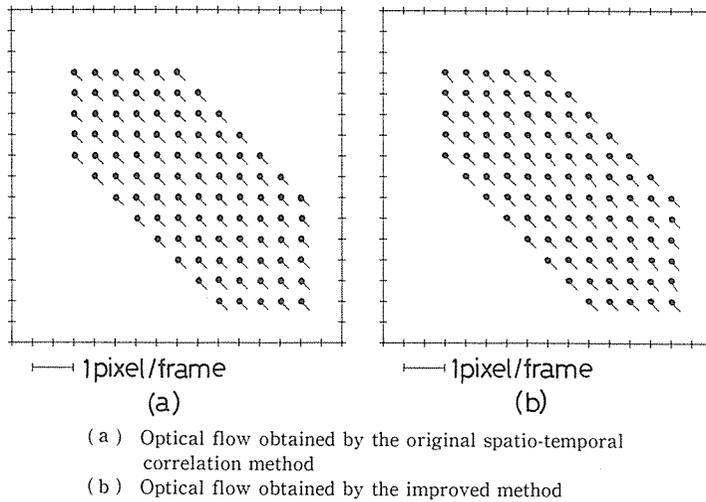


図6 粒子運動のシミュレーション画像の解析により得られたオプティカルフロー

Fig. 6 Analyzed optical flow for artificial image sequences. (translational motion of particles)

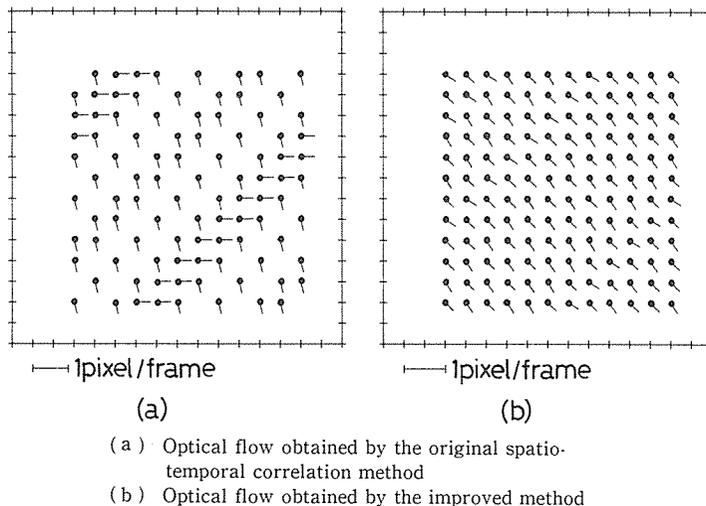


図7 平面波のシミュレーション画像の解析により得られたオプティカルフロー

Fig. 7 Analyzed optical flow for artificial image of plane wave propagation.

表2 計算時間に関する高速化アルゴリズムの有効性

データ	0.1 (p/f), 0.0 (deg.)	0.5 (p/f), 0.0 (deg.)	1.0 (p/f), 0.0 (deg.)
(1)	27 (%)	26 (%)	26 (%)
(2)	49	26	24
(3)	98	99	99
合計	16	11	10

が進行方向を示している。両図ともに(a)が従来法、(b)がここで提案した方法による解析結果である。どちらの場合も画像中の左上から右下へと粒子または平面波が進行している。粒子運動の解析結果(図6(a),(b))は両方法とも大差がないが、平面波が伝搬する例では従来法の解析結果(図7(a))は速度ベクトルが設定した方向には向いておらず予想されたように正しい結果が得られていない。一方、新しく提案した方法では平面波についても方向の多少のばらつきは見られるものの、ほぼ良好な結果が得られており(図7(b))解析法の妥当性が確認できる。

次に、2.3で提案した三つの高速化アルゴリズムの有効性を定量的に調べる。すなわち、

(1) 速さの精度を一定に保てばよいという観点から、大きなラグタイムの領域の計算を間引く

(2) ラグタイム=0より相関計算を開始し相関が最大となるとところで計算を打ち切る

(3) 時空間相関法の特徴上平滑化フィルタを省くという三つの方法を取り入れたプログラムを用いて、速さ0.1(p/f)、0.5(p/f)、1.0(p/f)、角度0(degree)の速度をもった粒子の並進運動のシミュレーション画像を解析対象とし従来法と計算時間について比較した。解析結果を表2に示す。この表は従来法による解析時間を100%として(1)、(2)、(3)のそれぞれの方法を取り入れた場合の計算時間を示している。三つの方法を併用した場合、3種類の粒子の並進画像に対していずれも計算時間が1/5以下になっており、計算時間の短縮化に有効であることがわかる。

4. 実画像の処理

本章では改良した時空間相関法によりオプティカルフローを決定し、それを用いた3次元奥行きの測定法の手順を示し有効性を確認する。2.4で述べたように“motion stereo”法によってとらえた動画画像中のオプティカルフローの速さ V と、実際の3次元奥行きとは逆比例にある。まずこのことを確認するためと、実際のカメラレンズ系での D と V との関係を明らかにする

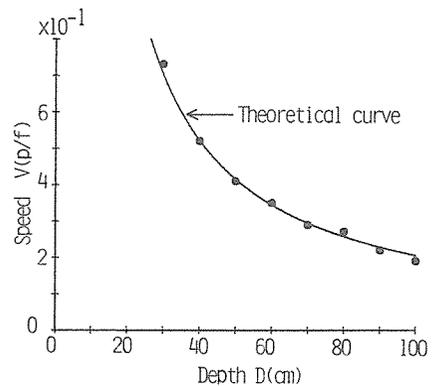
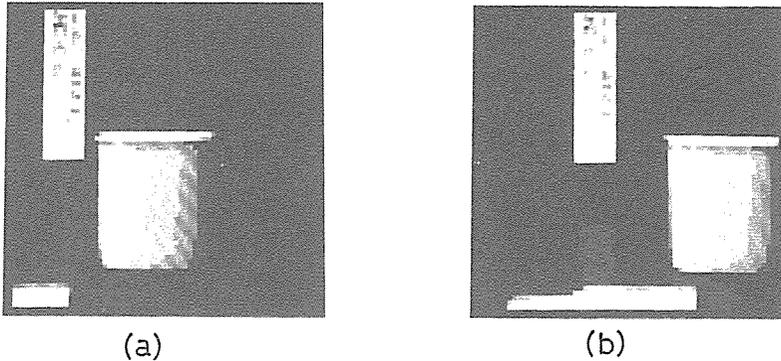


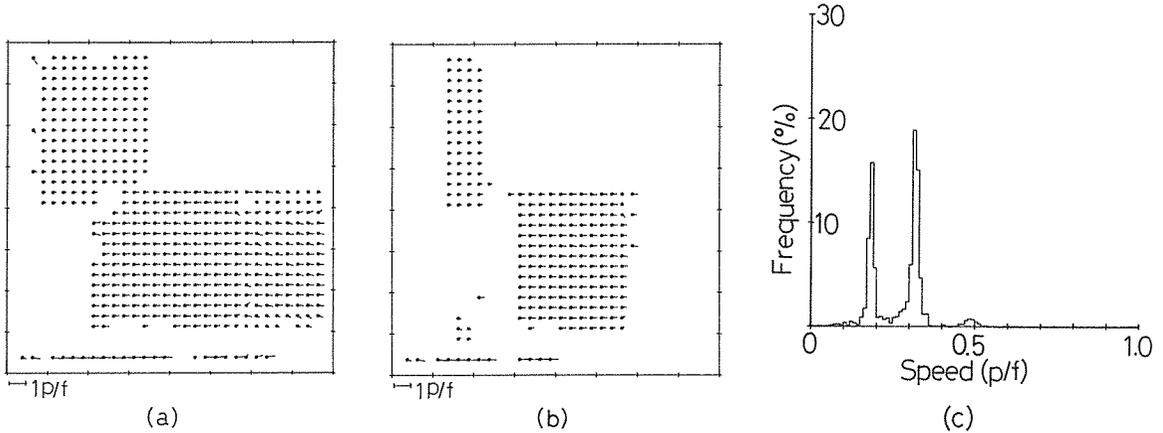
図8 物体の奥行きとオプティカルフロー速度との関係(黒丸は実験結果を示す)

Fig. 8 The relation between depth (D) and optical flow velocity (V). Solid circles show experimental result obtained by actual scene analysis.

ため既知の位置に物体を置いた時のオプティカルフローの速度ベクトルを計測した。測定結果を図8に示す。図中実線で示した理論曲線は式(9)に従い付録1.に示した方法により装置定数を決定して得たものである。測定結果はほぼこの曲線上にあり式(9)の実際的な妥当性が確認できた。以下この理論曲線を用いて任意の位置に複数の物体を置いたときの奥行きを計測を試みる。対象とした動画画像の例を図9(a),(b)にそれぞれ示す。この写真は画像中に三つの物体(コーヒーカップ、スティックのり、インク消しのびん)が存在する場合についてであり、解析により得られたオプティカルフローのベクトル場を図10(a)に示す。また同図(b)は動画画像中の第45フレーム目の画面上で輝度がある一定値以上の部分のベクトルのみを書かせている。同図(a)中の実線内の領域や同図(b)中の各物体に対応するオプティカルフローの速度ベクトルは奥行きの違いをよく反映している。この様子を定量的に示すために、得られた速度ベクトルのヒストグラムを図10(c)に示す。図10(a)の3物体の位置に対応するオプティカルフローのピークが見られる。実際に得られた速さより図8の理論曲線を用いて個々の物体のテレビカメラからの距離



(a) (b)
 図9 3物体を含む解析対象となった現実のシーン(カメラの左水平方向への移動に伴い物体は右水平方向に並進していく((a)から(b)))
 Fig. 9 An example of actual dynamic scene. By translational motion of the camera, three objects move from left to right.



(a) Analyzed optical flow field
 (b) Velocity field which is limited with a brightness threshold in 45th image frame
 (c) Frequency distribution of amplitude of the velocity vectors in Fig. 10(a)

図10 テレビカメラの運動による3物体のオプティカルフローの速度場とその頻度分布
 Fig. 10 Velocity vector field and frequency distribution of three objects.

を求めた。動画像中の3物体は各々テレビカメラより44, 63, 103 (cm)の位置に置いたが、解析結果では40, 62, 105 (cm)となり設定値とほぼ一致している。すなわち理論曲線に基づいて画像中の物体とカメラとの距離を求める方法は基本的に有効であることがわかる。しかし、速度ベクトルが求められた部分と求められなかった部分との境界では、速度ベクトルに乱れが生じている(図10(a))。これらの部分は、動画像中で物体が運動し始めるところと運動が停止する部分に相当する。このように最初のフレームで物体が既に存在

している部分や、最後のフレームで物体が存在する部分では、式(2)を導入する際の仮定である相関関数の対称性が満足されず適切な相関値 $M_0^{h,k}(\tau)$ が求まらない。速度ベクトル場の乱れはこのようなエッジの効果の影響だと思われる。

5. む す び

本論文ではコンピュータによる3次元認識を目指し、第1段階として実際の3次元シーン中の物体のカメラからの距離つまり3次元奥行きを、その動画像から求

めたオプティカルフローを用いて計測することを目標とした。このためまず従来提案してきた時空間相関法によるオプティカルフローの解析法を高速化する手法、および従来法では解析困難であった曲率半径の大きい物体の運動に伴うオプティカルフローの計測法について検討し解析アルゴリズムの改良を行った。また実際に並進運動(水平方向に)するテレビカメラがとらえた動画像に対し、改良したアルゴリズムを用いて解析し、得られたオプティカルフローから3次元奥行きを推定することを試みた。結果としては従来法の1/5以下に計算時間が短縮化され、かつ曲率半径の大きい物体も解析可能となることがシミュレーションによって確かめられた。また静止物体の3次元の奥行きも図8のような理論曲線によって基本的に測定可能であることが示された。しかし物体の運動の始点と終点に当たる位置でのエッジの効果による解析誤差は従来から問題となっており、その原因についても議論されてきているが、それを除くような具体的な方法は示されていない。このような問題も含めて、より正確でなおかつ高速処理可能なアルゴリズムを開発することは今後の課題である。

今回は“motion stereo”を用いて、1台の運動するカメラがとらえた画像より静止物体の奥行きの計測を試み基本的に解析法の有効性を確認した。しかし対象とした画像は明暗のはっきりした単純なものであり、ロボットビジョンなどの応用を考えると今後自然なシーンの中での物体の位置決定や運動する物体の運動速度と3次元位置を同時に決定する問題を対象としていく必要がある。2台のカメラを用い、1台は既知方向に運動させ1台は固定して速度と位置を同時に決定する“dynamic stereo”の手法は魅力的であり、カメラの多眼視による3次元シーン解析もまた今後の検討課題である。

謝辞 本研究を進めるにあたり実験上の協力を頂いた山口大学工学部電気工学科の田辺敦君ならびに同学科電気基礎工学講座の各位に謝意を表します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金(一般研究C:1987, 1988 および1989年度)による。

文 献

- (1) M. David: "Vision", Freeman Press, San Francisco (1982).
- (2) R. Navatia: "Depth measurement from motion stereo", *Comput. Graphics Image Process.*, 9, pp. 203-214 (1976).
- (3) T. D. Williams: "Depth from camera motion in a real world scene", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, PAMI-2, pp. 511-516 (1980).
- (4) A. M. Waxman and S. S. Sinha: "Dynamic stereo: Passive ranging to moving objects from relative image flows", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, PAMI-8, 4, pp. 406-412 (1986).
- (5) A. Scheuing and H. Niemann: "Computing depth from stereo images by using optical flow", *Pattern Recognition Letters*, 4, pp. 205-212 (1986) など.
- (6) S. T. Barnard and W. B. Thompson: "Disparity analysis of images", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, PAMI-2, 4, pp. 333-340 (1980).
- (7) J. M. Prager and M. A. Arbib: "Computing the optic flow: The MATCH algorithm and prediction", *Comput. Graphics Image Process.*, 24, pp. 271-304 (1983).
- (8) P. Anandan and R. Weiss: "Introducing a smoothness constraint in a matching approach for the computation of displacement fields", *COINS Technical Report*, 85-38 (1985).
- (9) B. K. P. Horn and B. G. Schunck: "Determining optical flow", *Artificial Intell.*, 17, pp. 185-203 (1981).
- (10) H. -H. Nagel and W. Enkelmann: "An investigation of smoothness constraints for the estimation of displacement vector fields from image sequences", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, PAMI-8, 5, pp. 565-593 (1986).
- (11) M. Yachida: "Determining velocity maps by spatio-temporal neighborhoods from image sequences", *Comput. Graphics Image Process.*, 21, pp. 262-279 (1983).
- (12) K. Kanatani: "Tracing planar surface motion from projection without knowing the correspondence", *Comput. Graphics Image Process.*, 29, pp. 1-12 (1984).
- (13) D. Terzopoulos: "Image analysis using multigrid relaxation methods", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, PAMI-8, 2, pp. 129-139 (1986).
- (14) 飯間 昇, 小野木克明, 西村義行: "時空間微分法によるオプティカル・フローの検出可能性と3次元運動推定の一方法", 計測自動制御学会論文誌, 24, 1, pp. 76-82 (1988).
- (15) H. -H. Nagel: "On a constraint equation for the estimation of displacement rates in image sequences", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 11, 1, pp. 13-30 (1989).
- (16) H. Miike, Y. Kurihara, K. Koga and H. Hashimoto: "Velocity-field measurement of a vortex by dynamic image processing", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 25, 5, pp. L409-412 (1986).
- (17) H. Miike, Y. Kurihara, H. Hashimoto and K. Koga: "Velocity-field measurement by pixel-based temporal mutual-correlation analysis of dynamic image", *Trans. IECE Japan*, E69, 8, pp. 877-882 (1986).
- (18) 三池秀敏, 栗原 靖, 古賀和利: "画素時系列の相互関解析を用いた動画像処理による速度ベクトル場計測法の改良", 信学論(D), J70-D, 4, pp. 836-839 (昭62-04).
- (19) K. Koga, H. Miike and M. Momota: "Exact

determination of optical flow by pixel-based temporal mutul-correlation analysis”, Trans. IEICE, E70, 8, pp. 719-722 (1987).

- (20) 古賀和利, 三池秀敏: “動画像からのオプティカル・フローの検出”, 信学論(D), J70-D, 8, pp. 507-516 (昭62-08).
- (21) 古賀和利, 三池秀敏: “動画像の時空間相関に基づくオプティカル・フローの解析”, 信学論(D), J72-D, 4, pp. 1-10 (平1-04).
- (22) 服部哲朗, 中田 誠, 久保克巳: “単眼移動視による三次元処理用リアルタイムプロセッサ”, 第19回画像工学コンファレンス論文集, 5-10, pp. 157-160 (1988).

付 録

理論曲線式の求め方

本論文で取り上げられている動画像はPC-9801を中心とした, 画像取込み装置(フォトロンFDM98-4)とテレビカメラ(パナソニック産業用固体撮像カメラWV-CD60)によってコンピュータ内に取り込まれている。さてテレビカメラの仕様書によると撮像素子上での実際のイメージサイズは2/3インチ(8.8(H)×6.6(V)mm)であるが, 画像取込み装置はイメージサイズ中の取込み可能範囲である約6.6×6.6(mm)の範囲の内1/4(3.3×3.3(mm))を64×64画素の解像度でサンプリング周波数15Hzにより動画像として取り込んでいる。よって動画像中の1(pixel)と1(pixel/frame)は次式によって計算できる。

$$1(\text{pixel}) = 3.3/64 = 5.16 \times 10^{-2} (\text{mm})$$

$$1(\text{p/f}) = 5.16 \times 10^{-2} / (1/15) = 0.773 (\text{mm/s})$$

この変換パラメータを用いれば式(10)より解析から得られるオプティカルフロー速さと奥行きとを関係づける理論曲線の式が求められる。

今回の画像取込み法では結局次式のような理論曲線の式が得られる。

$$\begin{aligned} D &= V_0 \cdot h / V \\ &= (12.5 \times 10^{-3}) \cdot (12.5 \times 10^{-3}) / (0.773 \times 10^{-3} \cdot V_p) \\ &= 0.202 / V_p \end{aligned}$$

但し

D : 奥行き (m)

V_0 : カメラの移動速度 (m/s)

h : 焦点距離 (m)

V : 撮像素子上でのオプティカルフローの速さ (m/s)

V_p : 画像上でのオプティカルフローの速さ (p/f)

図8はこの式に基づいている。

(平成元年9月19日受付, 12月8日再受付)



野村 厚志

平1山口大・工・電気卒, 現在同大大学院工学研究科修士課程(電気工学専攻)在学中, 動画像処理の研究に従事。



古賀 和利

昭49山口大・工・電気卒, 昭51同大大学院修士課程了, 同年同大助手, 昭54同大工業短期学部講師, 平1同助教授, 現在に至る。その間, 昭53東北大電子工学科に内地留学, 生体情報工学, 動画像処理などの研究に従事, 工博, 日本ME学会会員。



三池 秀敏

昭46九大・工・電子卒, 昭51同大大学院博士課程了, 同年山口大・工・電気助手, 現在同助教授, 60年度および63年7月~9月西独マックスプランク研究所(ドルトムント)招聘研究員, 動画像処理による物理計測, 非平衡化学反応系の非線形パターンダイナミクス, 流体現象等に関する研究に従事, 工博, 電気学会, 日本ME学会, 日本物理学会各会員。