

第2部

微小生物の運動状態定量化による 環境計測装置の開発

概要

近年地球上の自然環境の悪化は問題視されており、環境変化を定量化し、調査することは今後重要になると予想される。特に、環境の変化は、まずプランクトンなどの微小生物の生態変化に現れるため、これらの微小生物の状態を定量化することは、環境状態を知る上で有効である。例えば、海洋での赤潮の生態を定量的に計測し、その異常を早期に発見することが可能となる。

コンピュータによる画像処理は、これまで人間が行ってきた主観的な検査(判断)等を数値化し、定量的に解析することができることから工業分野を中心に広く利用され始めている。この技術は、環境計測など他分野への応用も期待できる。

本研究は、多数の微小生物の行動を画像処理によって定量化し、環境計測への利用可能性を探るものである。一般の水質検査においては、PH、残留塩素、重金属などの成分分析結果が定められた基準値内にあるか否かで飲料水や排水として、適不適の判断がなされている。しかし、水質の汚染度測定や毒物検定においては、成分分析のみでは、人体や自然環境への影響判断ができない。そのため、近年、水中生物を用いて水質検査を行い、希釈量などの条件を決定する実験が試みられている。その方法は、水中生物を対象溶液に投入し、生物の動き(めだかのあご上げ運動等)や数日後の生存率(微小生物の半数致死量)などを人間が観察することによって検査を行うものである。しかし、この方法は、人間の観測結果に基づいて行う検査のため、定量的な解析を行いにくいという問題がある。

本研究では、画像処理によって、微小生物の状態を定量化し、新しい水質検査装置として確立することを試みた。具体的には、溶液中で運動する多数の微小生物(淡水:ミジンコなど、海水:アルテミアなど)をコンピュータで一定時間追跡することで、微小生物の運動状態計測を自動的に行う装置を試作した。微小生物運動の特性を考慮したアルゴリズムを組み込むことで、リアルタイムで多数の微小生物をコンピュータで自動的に追跡することが可能になった。また、これを定められた時間間隔毎に行い、微小生物の運動状態変化を自動的に観察する装置を開発した。

目的

一般の水質検査においては、成分分析結果が定められた基準値内にあるか否かで飲料水や排水として、適不適の判断がなされている。しかし、水質の汚染度測定や毒物検定においては、成分分析のみでは、人体や自然環境への影響判断ができないことが多い。そのため、近年、水中生物を用いて、水質検査を行う実験が試みられている。その方法は、水中生物を対象溶液に投入し、生物の動きや生存率などを人間が観察することによって検査を行うものである。

本研究の目的は、この生物による水質検査を画像処理によって定量化することで、新しい水質検査装置もしくは環境検査装置として確立することである。具体的には、溶液中で運動する多数の微小生物をコンピュータで一定時間追跡することで、運動量計測と運動パターン分類を行い、これらの時間的变化により水質を判断するものである。特に、ミジンコなどの下等生物は、水質の汚染度が直接運動量や運動パターンの変化に現れることが分かっており、これらを数値化することで新しい水質検査装置として確立できる。

その他、多数の生物行動を一度に解析する本画像処理手法は、海洋での魚群行動の定量的解析など、水産の分野での応用範囲も広い。

微小生物の運動状態定量化による環境計測装置の開発

1. はじめに

コンピュータによる画像処理は、これまで人間が行ってきた主観的な検査(判断)を数値化し、定量的に解析することができることから工業分野を中心に広く利用され始めている。

近年地球上の自然環境の悪化は問題視されており、環境変化を定量化し、調査することは今後重要になると予想される。特に、環境の変化は、まずプランクトンなどの微小生物の生態変化に現れるため、これらの微小生物の状態を定量化することは、環境状態を知る上で有効である。例えば、海洋での赤潮の生態を定量的に計測し、その異常を早期に発見することが可能となる。

本研究は、多数の微小生物の行動を定量化し、環境計測への利用可能性を探るものである。一般の水質検査においては、成分分析結果が定められた基準値内にあるか否かで飲料水や排水として、適不適の判断がなされている。しかし、水質の汚染度測定や毒物検定においては、成分分析のみでは、人体や自然環境への影響判断ができないことが多い。

そこで、近年水棲生物を対象溶液に投入し、生物の動き(めだかのご上げ運動等)や数日後の生存率(半数致死量)などを人間が観察することによって検査を行う手法が注目されている。この手法は、バイオアッセイと呼ばれ数多くの研究成果が報告されている¹⁾。

しかし、従来行われていたバイオアッセイは、化学物質に数十時間暴露した後、微小生物の遊泳に及ぼす影響(遊泳阻害半数影響濃度 EC50、無影響濃度 NOEC)等を人間が観測する手法が主流であり、人力、時間、費用がかかるという問題点があった²⁾。

そこで、本研究では、この微小生物による水質検査を画像処理によって定量化することで、新しい水質検査装置もしくは環境検査装置として確立することを目的とする。

具体的には、溶液中で運動する多数の微小生物(淡水:ミジンコなど、海水:アルテミアなど)をコンピュータで一定時間追跡することで、微小生物の運動量計測と運動パターン分類(回転運動、分布状態など)を自動的に行う装置を開発する。この装置を用いて、定められた時間・間隔毎に自動的に計測を行い、

微小生物の運動状態変化を定量化するものである。

本研究の新規性は、溶液中で運動する多数の微小生物をコンピュータで一定時間追跡することで、微小生物の運動量計測と運動パターン分類（回転運動、分布状態など）を行う自動化手法にある。具体的には、連続して撮影された画像間でそれぞれの微小生物の対応を求め、その移動距離と姿勢変化を求めることで微小生物の運動状態を計測する。画像間での微小生物対応処理では、微小生物のこれまでの移動方向、移動速度から次画面での検索領域を決定する手法を用いる。

さらに、本研究の成果は、微小生物の運動量計測に限らず、空間内での生物分布、生物の異常行動、色変化を自動的に測定する装置の開発に応用できる。例えば、魚群を誘導・捕獲するにはどのようにすれば良いかという問題は水産学上重要な課題であるが、本研究を発展し魚群行動を定量化しモデリングを行うことでこの種の問題におおきな示唆を与えることになると考えられる。

*用語解説（環境庁ホームページより抜粋）

・半数影響濃度 EC50（Median Effective Concentration）とは、試験生物への影響が対照群（試験物質に暴露しない群）に比べ50%現れると算定される試験物質の濃度をいう。藻類の場合は、72時間後の細胞密度が半分となる濃度を指す。

・無影響濃度 NOEC（No Observed Effect Concentration）とは、試験生物への影響が、対照群と比べて有意な差を示さない無作用濃度のうちの最高試験濃度をいう。

・半数致死濃度 LC50（Median Lethal Concentration）とは、試験生物の50%を死亡させると算定される試験物質の濃度をいう。

2 . 計測装置

微小生物の運動量を画像計測技術により計測するために、微小生物運動量計測装置の試作を行った。試作した装置の概要を Fig.1 に示す。

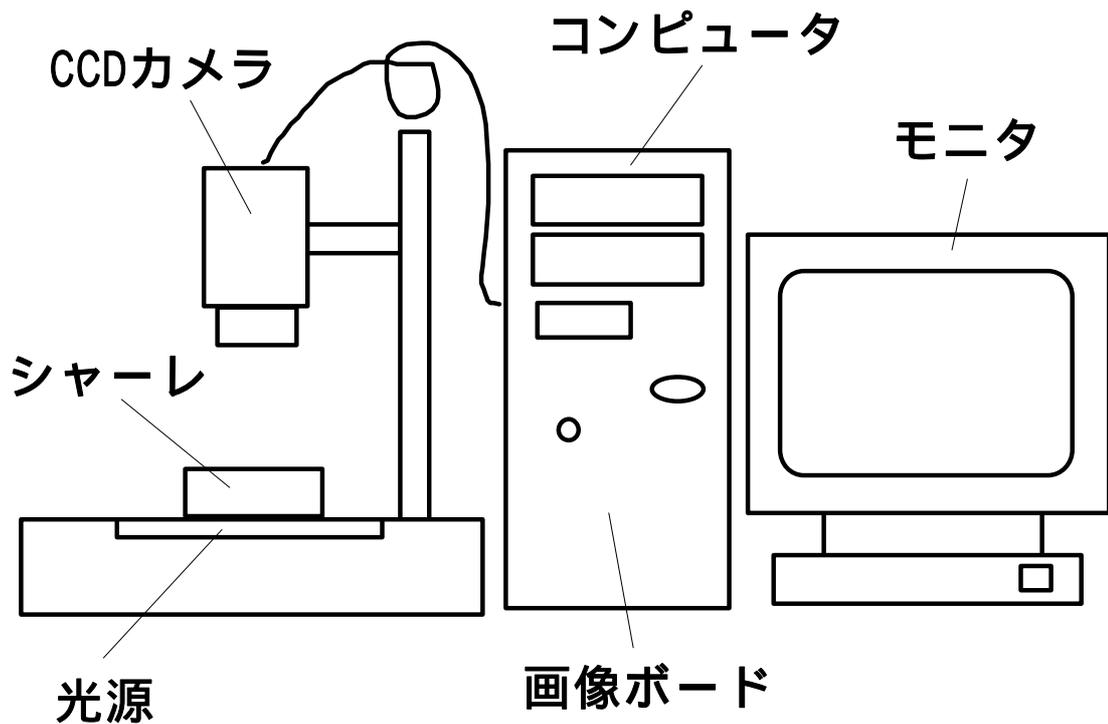


Fig. 微小生物運動量計測装置概要

この装置はCCDカメラ、画像処理ボード、コンピュータ、光源から構成されている。光源の上に、計測する水と微小生物を入れたシャーレを置き、CCDカメラで上方から観測し、コンピュータ処理を行うことで、微小生物の運動量を計測する。撮影時のちらつきを押さえるために光源はイメージスキャナの透過原稿ユニットを改造して使用した。CCDカメラ部の写真を Photo.1 にコンピュータ部の写真を Photo.2 に示す。シャーレ内の微小生物を真上からCCDカメラにより計測を行う。撮影した像を画像処理ボードを介してコンピュータに取り込み、プログラムを実行することで運動量を算出し、水質の良否を判断する。



Photo.1 計測装置 (CCD カメラ部)



Photo. 2 計測装置 (コンピュータ部)

微小生物の大きさは、0.2 mm ~ 0.5 mm ほどなので、CCDカメラにマクロレンズを取り付け、直径30 mm のシャーレが画面いっぱいに拡大表示されるようにして計測を行っている。

画像ボードとしては、NTCS 信号で512 × 512の解像度の画像取り込みができる(株)マイクロテクニカのMTPCI -CLと1024 × 1024の高解像度の撮影ができる日立電子(株)の産業用デジタルビデオカメラ KP F110 用画像ボード(株)グラフィン IPM -8500D を用いた。MTPCI -CL の写真を Photo.3 に、同仕様を Table.1 に示す。また、KP F110 の写真を Photo.4 に、同仕様を Table.2 に、IPM -8500D の写真を Photo.5 に、同仕様を Table3 にそれぞれ示す。

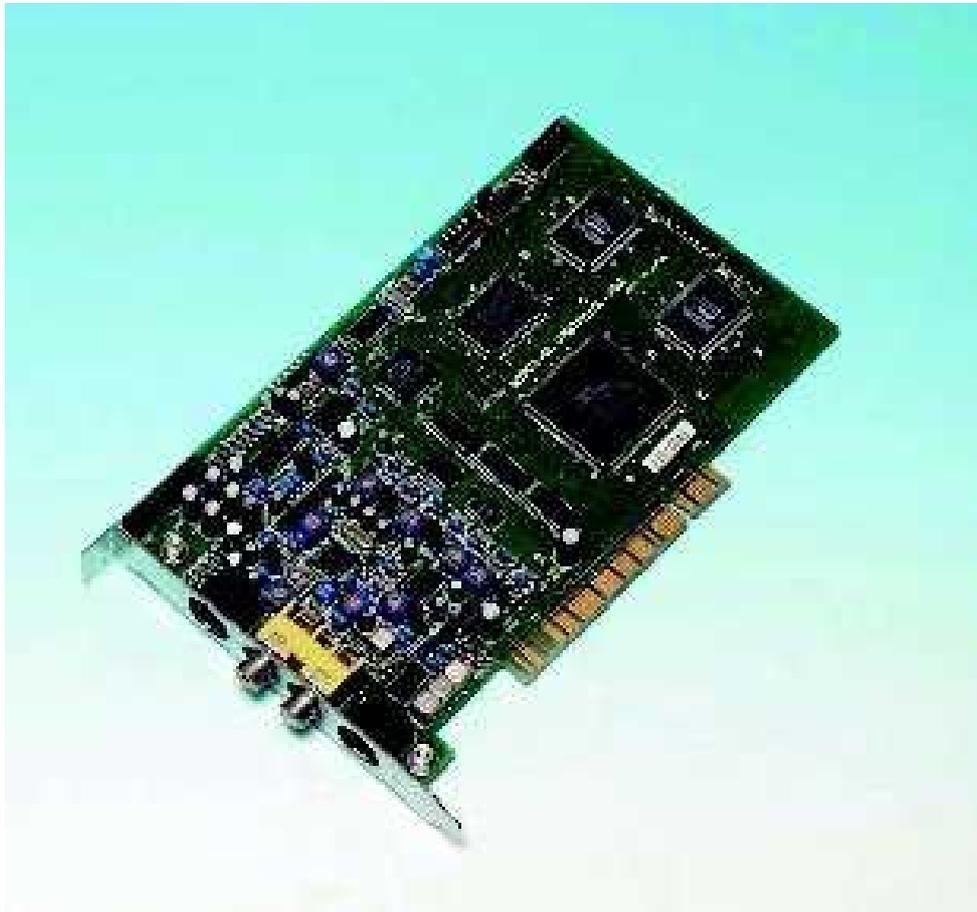


Photo.3 画像ボード (MTPCI -CL)

Table.1 MTPCI_CL 画像ボードの仕様

ボード名称	マイクロテクニカ MTPCI -CL
入力信号	NTSC コンポジット信号 (RCA ピンジャック) Y/C 分離信号 (S 端子)
出力信号	NTSC コンポジット信号 (RCA ピンジャック) Y/C 分離信号 (S 端子)
色 数	1 6 7 7 万色
画像表示	NTSC 方式のビデオモニター
フレームメモリ	1 0 2 4 × 5 1 2 × 2 4 ビット (R : 8 ビット、G : 8 ビット、B : 8 ビット) 2 面
メモリアクセス	1) I/O バンク方式 2 K B 占有 2) プロテクトモード 4 M B 占有
画像入力	フレーム (1/30 秒)、フィールド (1/60 秒)
画像出力	フレーム (1/30 秒)、フィールド (1/60 秒)
サンプリング	1 2 . 2 7 M H z
アスペクト比	1:1
対応バス	PCI バス
消費電力	+ 5 V ± 5 % 0.8A、 + 1 2 V ± 1 0 % 0.1A
外形寸法	175 × 106 × 16mm



Photo. 4 高解像度カメラ KP-F110

Table.2 高解像度カメラ KP-F110 仕様

撮像素子	2/3 インチインターライン型 全画素読み出し方式 CCD
有効画素数 (H×V)	1024×1024
画素サイズ (H×V)	6.7×6.7 μm
水平走査周波数	33.75kHz
垂直走査周波数	30Hz
映像出力	デジタル出力 RS-422A
データ	デュアルチャンネル 10bit 24.3MHz/チャンネル
アスペクト比	1 : 1
外形寸法 (W×H×D)	65×75×190mm
質量	約 700g

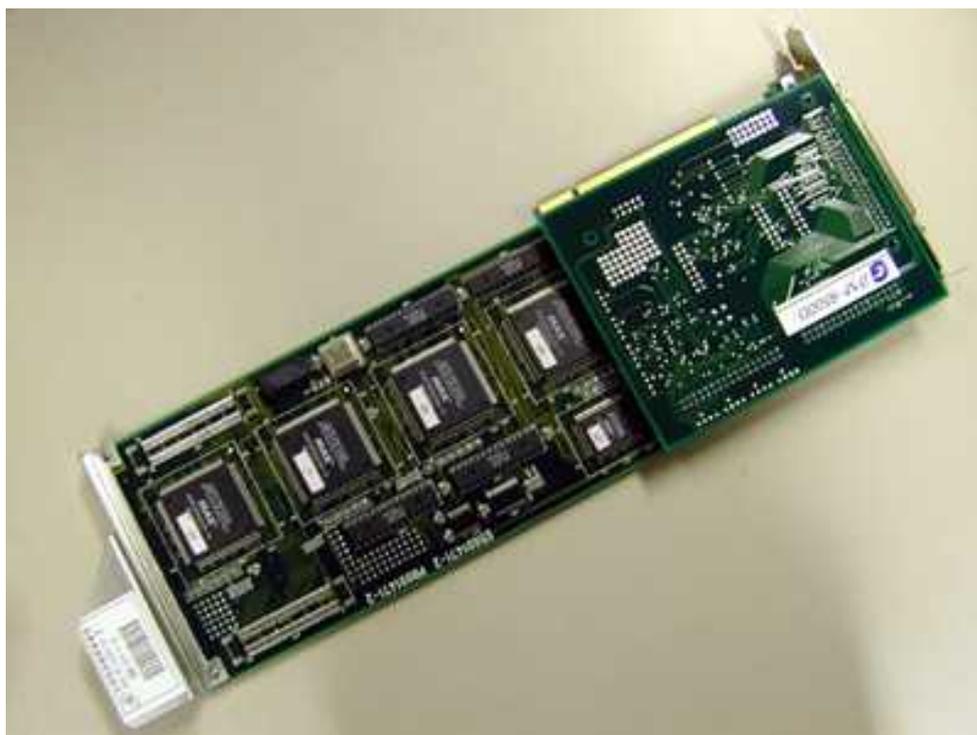


Photo. 5 高解像度画像ボード IPM8500D

Table.3 IPM8500D 画像ボードの仕様

ボード名称	グラフィック IPM-8500D
入力信号	16bit デジタル
対応カメラ	高分解能/高速フレームカメラ デジタルラインセンサカメラ
データフォーマット	8bit × 1 16bit × 1 8bit × 2TAP
対応クロック	MAX20MHz
連続 PCI 転送能力	50MB/sec
最大画像サイズ	H : 8、192 ドット V : 16、384 ライン または外部制御
画像処理回路	ランレングス変換 シェーディング変換 LUT 機能
サイズ	PCI フルサイズ
対応 OS	WindowsNT, Windows95

これら2種類の画像ボードを用いることにより、必要に応じ、通常解像度での解析と高解像度の解析を切り替えて行うことができる。なお計測プログラムのGUIは双方同じにしているため、どちらか一方の操作を覚えるだけでよい。解像度の違いにより計測時間、処理時間、読み込み速度に違いが生じる。この違いをTable.3に示す。

Table.4 画像ボードによる計測機の能力

画像ボード	MTPCI_CL	IPM8500D
解像度	512 × 512	1024 × 1024
処理速度	10画面/sec	2画面/sec
計測時間	連続60秒	連続15秒

この違いから、動きが早い生物の計測や、長時間の計測では通常解像度のMTPCI_CLを用い、細かい動きの計測を行う場合には高解像度のIPM8500Dを用いる事とした。なお、現在使用しているコンピュータのCPUはCeleron566、メインメモリは256Mbyteであるが、CPUやメモリを強化すれば処理速度の向上、計測時間の長時間化が望めることは言うまでもない。

3. 計測アルゴリズム

溶液中で運動する多数の微小生物をコンピュータで一定時間追跡することで、微小生物の運動量計測を行う自動化手法について述べる。具体的には、連続して撮影された画像間で、それぞれの微小生物の対応を求め、その移動距離と姿勢変化を求めることで微小生物の運動量を計測する。

微小物体運動の計測としては、流体中に混入したトレーサ粒子運動を計測することで流体の速度分布を間接的に測る P T V (Particle Tracking velocimetry) が有名である。P T Vでは、流体の性質から図2のように近傍のトレーサ粒子は同様な運動状態を示すため、粒子の対応が一つ決まれば、近傍の粒子の対応も比較的簡単に決定できる。しかしながら、微小生物の場合、図3のようにそれぞれの固体が自由に動き回るため、個別に対応を求める必要がある。そのため、次に述べるような対策を行った。

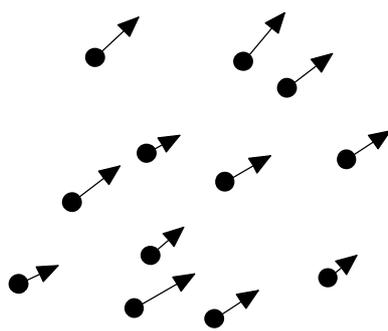


図2 P T V

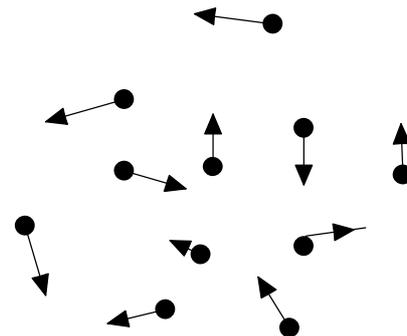


図3 微小生物の運動

水中の微小生物の動きを観察してみると、トレーサ粒子や水中のゴミなど非生物の物体とは明らかに違った特徴を持っている。図4と図5に非生物の動きと微小生物の動きの例を示す。例えば、水中を浮遊する木片はその向きを変えずにそのまま浮遊する。それに対し、水中を遊泳する微小生物は、その向きを刻々と移動方向に傾けながら移動する。

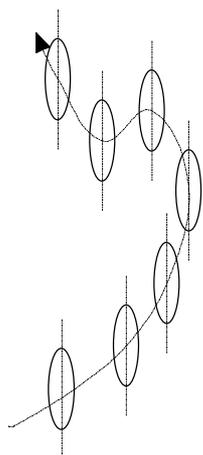


図4 非生物の動き

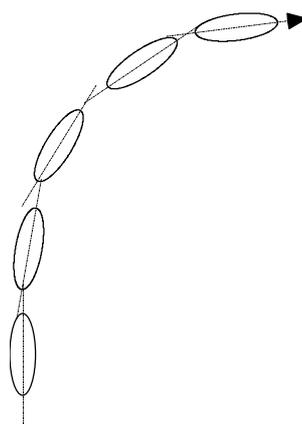


図5 微小生物の動き

以上のような微小生物特有の性質を考慮し、微小生物の体の方向から移動方向を推定する手法を自動追跡アルゴリズムに導入した。時系列的に一つの対応が決まると、微小生物の頭方向が判定されるので、以降は比較的簡単に微小生物運動を追跡することができる。よって、追跡の開始時にいかに確実に対応をとるかが重要なポイントとなる。そこで、図3のように取り込みの開始時のみ画像の取り込み間隔を短くすることで、誤対応を無くした。

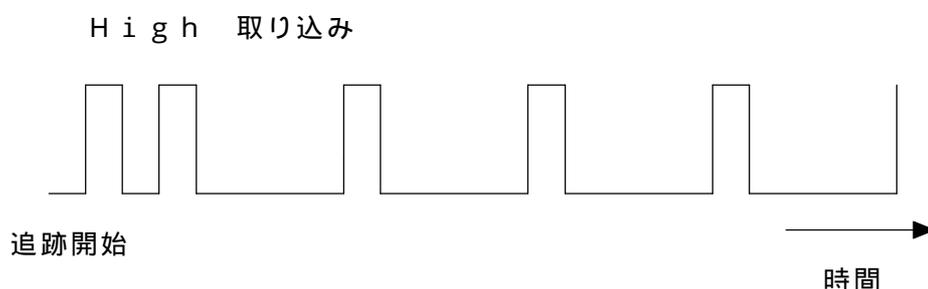


図3 画像の取り込みタイミング

追跡を開始して、最初の2画面を比較することでそれぞれの微小生物の移動方向を決定する。最初の2画面は、時間間隔が短いので、それほど大きな移動は無く、比較的簡単に対応付けを行うことができる。移動方向が決定されると頭の向きが判定されたことになるので、以降は、微小生物の形状（頭の向き）から、移動方向を判断し、次画面での検索領域を決定することが可能となる。また、台風の進路予報と同様に軌跡の連続性も考慮し、誤対応を無くす工夫を行った。

進行方向検索手法の概念を Fig.3 に示す。移動方向が決定された後の対応はこの運動方向と速度の情報を基に微小生物が動くであろう進行方向上の場所を中心に検索し、対応付けを行う。進行方向検索のとき、各微小生物ごとの運動速度、方向、姿勢を考慮し、検索範囲を狭める。このことにより、2回目以降は検索範囲が狭くなり対応付けが容易となる。

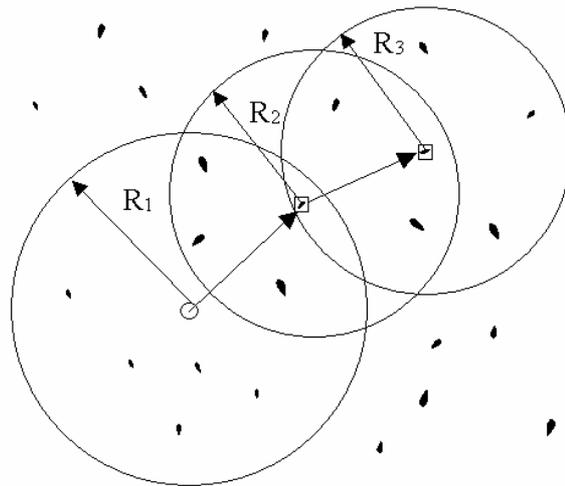


Fig.3 進行方向検査手法

検索範囲の決定後、対応付け作業をおこなう。対応付けの手法を Fig.4 に示す。Fig.4(a)において、1画面目と2画面目の対応で1のようにみじんこが進んだ時、次の対応に関して、A, B, Cの対応付け候補があったとする。そこで、1のベクトルに対し、A, B, Cの微小生物への方向ベクトルはそれぞれ A , B , C 傾いているので、Fig.4(b)のように基準となる微小生物の画像データを傾けて、パターンマッチングを行う。この場合、Cの微小生物が最も対応していると考えられる。

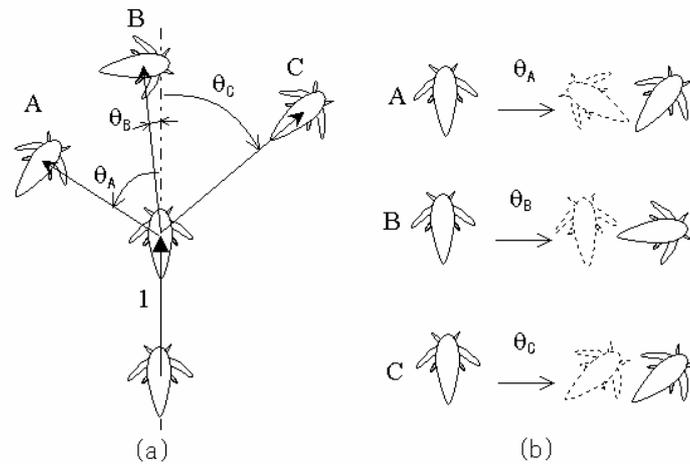


Fig.4 微小生物の対応付け

このように、微小生物の速度、運動方向、姿勢を考慮することにより、画面間の微小生物の関連付けを確実に高速に行うことができる。

微小生物の対応付けには画像相関法を用いた。比較する2枚の画像を読み込むと、初めに読み込んだ画像と後で読み込んだ画像の間で差分をとる。差分をとることにより動きがあった微小生物のみを切り出すことができる。切り出された微小生物に対しラベル付けを行った後、次式で相関を求めた。

$$\phi f g = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} |f_{ij} - g_{ij}| \quad (2)$$

ここで f, g は切り出された微小生物の画像上における各ピクセルの輝度値で、 i, j は各ピクセルの座標を示す。それぞれの微小生物の候補に対し相関計算を行い、最も ϕ が小さい微小生物を探すことで対応付けを行った。相関においては輝度値の差を計算しているが、これによって処理速度の大幅な向上が可能となった。

図3は、相関計算の過程における、 ϕ の増加状態をグラフで示した物である。計算を行うにつれて、 ϕ の値は増加するがその傾きは、画像の相関率によって異なる。すなわち、画像が一致していない場合は、 ϕ の成長曲線の傾きは大きくなる。そこで、相関計算に ϕ の浮動閾値を設け、最小の ϕ の値が見つかるごとに浮動閾値を更新した。 ϕ の計算過程で、この浮動閾値を超えた時点で対応していないことが判定できるので、その時点で計算を中断し、次の候補の検索を行うことができる。

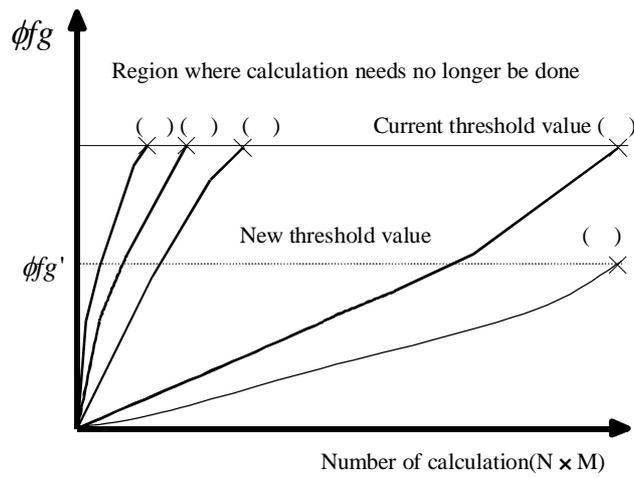


図4 相関計算における ϕ_g の変化

計測アルゴリズムのフローチャートを Fig.2 に示す。

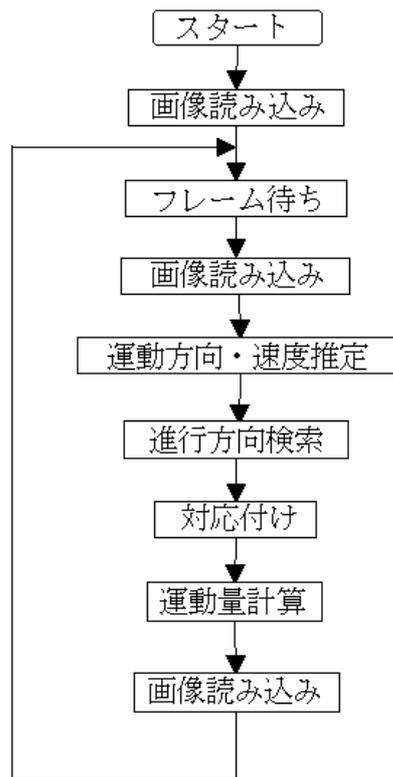


Fig.2 フローチャート

以上の手続きをまとめると、以下のようなになる。

(1) 追跡開始

1枚目と2枚目の画像の取り込み間隔をできるだけ短くする。これによって、

微小生物の移動距離は短くなるので，1枚目の微小生物の近傍に候補が存在すると考えられ，対応が取りやすくなる．

(2) 微小生物の方向決定および頭の位置の判別

微小生物の時系列的な対応が一つ求まると，以降の微小生物の進路が推定できる．

(3) 移動方向の許容範囲の決定

移動方向が決まるとその角度に許容範囲（左右にそれぞれ約60度）を与える．この領域内に存在している候補を絞り込む．

(4) 移動距離の決定．

最初の対応から，大まかな微小生物の移動速度が決定される．(3)の移動方向の内，移動距離を考慮し，検索領域を絞り込む．

(5) 相関による対応の決定

検索領域内に存在する候補から相関計算により，対応生物を決定する．

(6) (2)～(6)までを繰り返す．

以上の手続きにより95%以上の確立で対応が可能であったが，図5のように2匹の微小生物が重なった場合，対応を取り間違える場合がある．

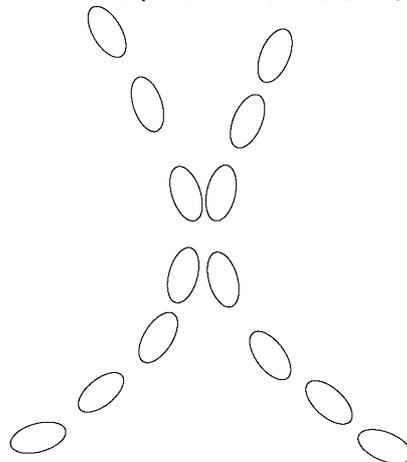


図5 微小生物が交差して場合

図6のように2通りの軌跡が考えられるが，どちらが正しいが判断することは，困難である．しかし，どの経路を通ったとしても，微小生物の移動距離の和として考えると運動量の計測結果にほとんど変わりはない．ましてや，全微小生物（数十匹）の移動距離総和ということになれば「影響なし」と判断できる．

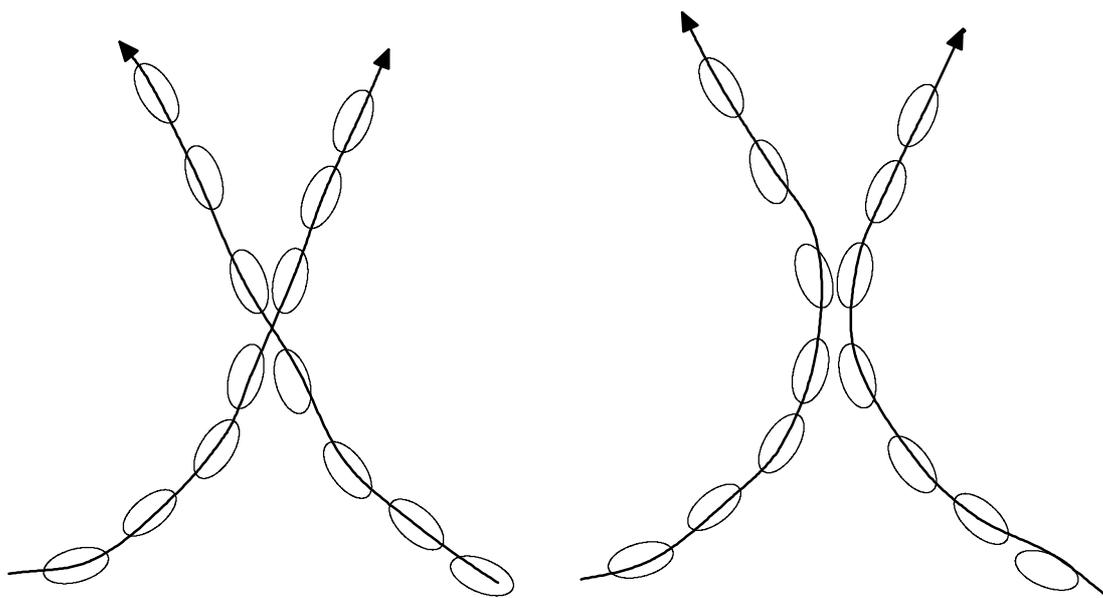


図6 微小生物の軌跡

4. 計測プログラム

上記アルゴリズムに基づいて微小生物の運動量計測プログラムを作成した。使用したコンピュータの仕様 Table.5 に示す。

Table.5 コンピュータの仕様

CPU	インテル Celeron566MHz
メモリ	2 5 6 Mbyte
ハードディスク	4 Gbyte
マザーボード	Aopen AX6B
ビデオボード	IO データ GA-7408/AGP2
OS	WindowsNT4.0

なお、プログラム開発に用いた言語は(株)インプライズのC++Builder Ver3.0である。

開発した計測プログラムの起動直後の画面をを Fig.に示す。この画面はNT S C用画像ボード MTPCL_CL を使用する場合も高解像度画像ボード IPM8500D を使用する場合も同じである。

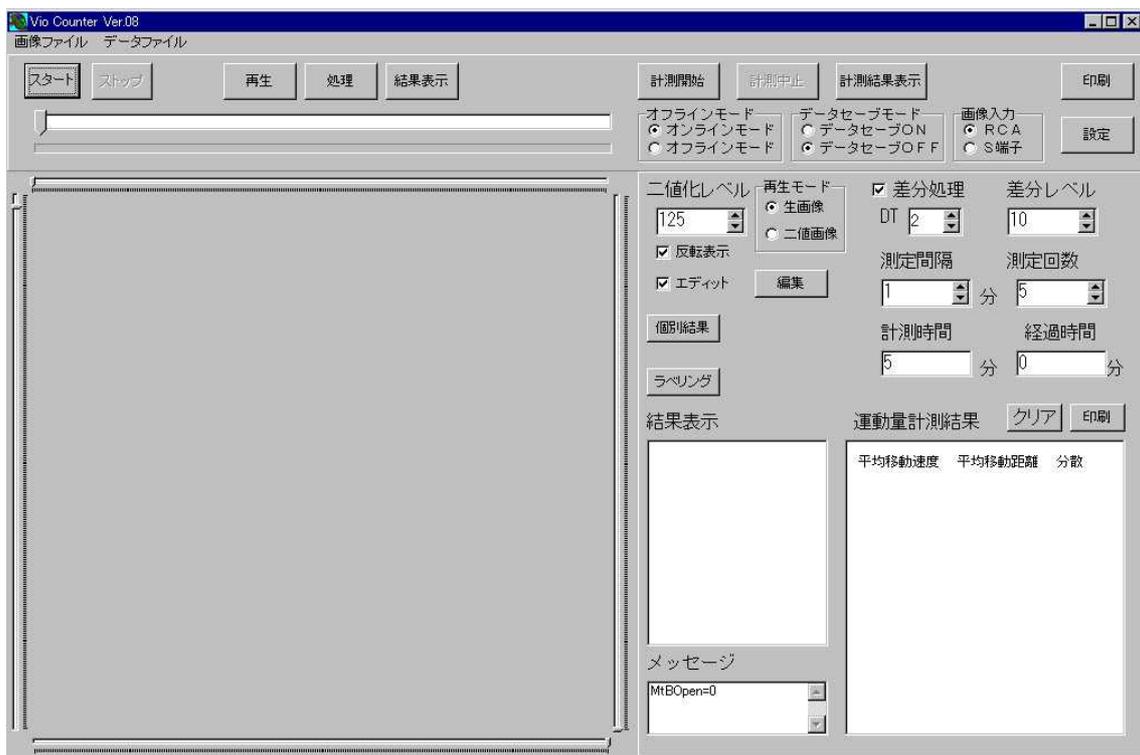


Fig. 計測プログラム（起動画面）

起動後左上のスタートボタンを押すことにより画像の読み込みを行うことができる。画像読み込み中のプログラム画面を Fig. に示す。

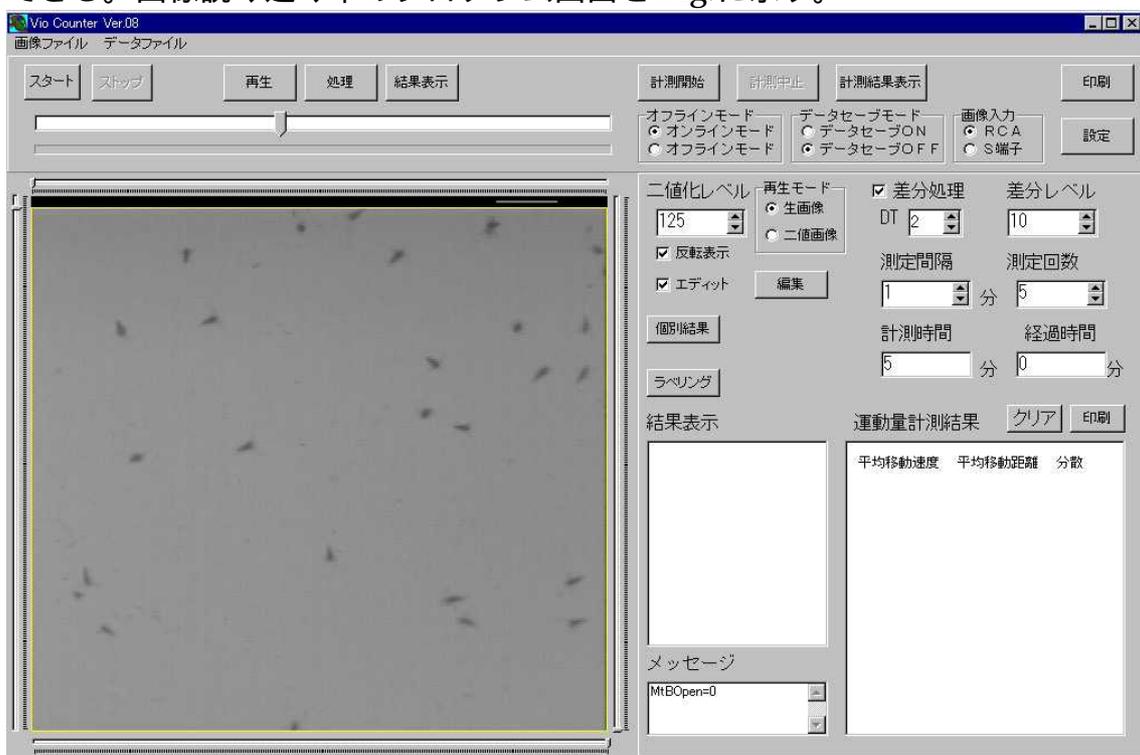


Fig. 計測プログラム（画像読み込み中）

画像読み込みが終わったあと、処理ボタンを押すことにより、ラベリング処理、関連付け処理を行い、微小生物の運動量を算出することができる。運動量算出後の画面を Fig に示す。また、結果表示ボタンを押すことにより微小生物の動きをアニメーション表示しながら軌跡を赤い線で表し、運動量の平均値、運動速度の平均値、分散を右下の画面に表示する。データセーブモードを ON にすれば読み込んだ画像をハードディスクに保存し、後で解析する事ができる。

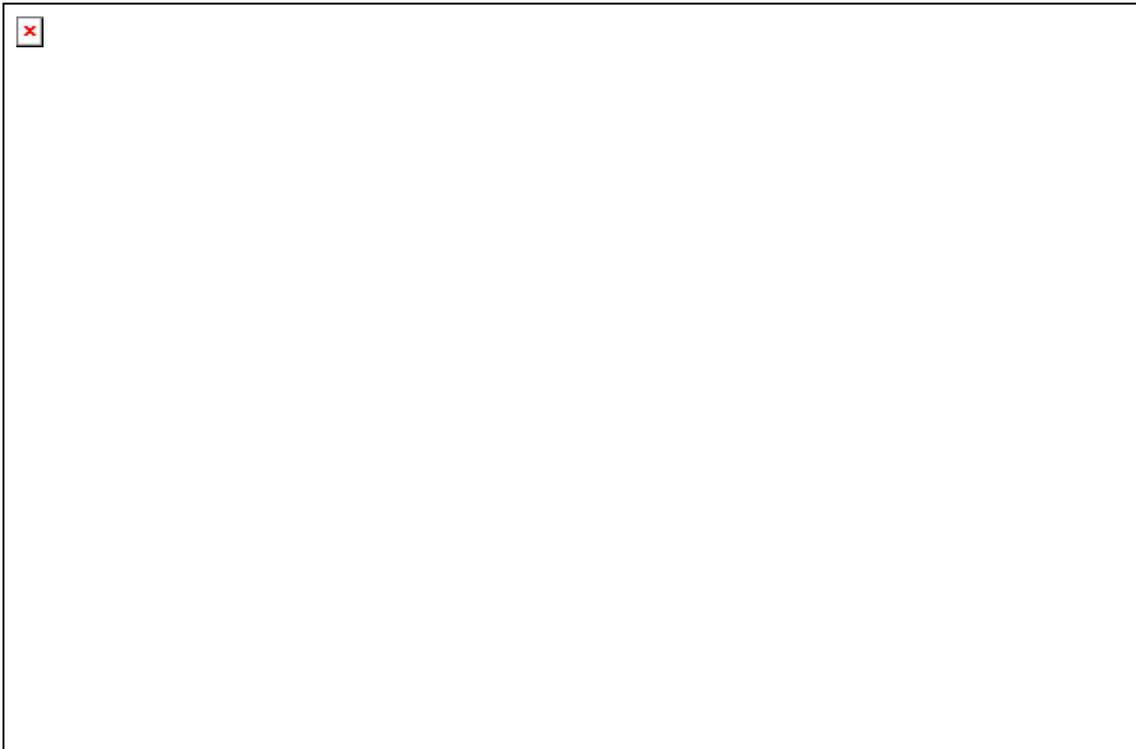


Fig. 計測プログラム（運動量算出）

一定の時間間隔で自動計測を行う場合は右側の測定間隔、測定回数を入力後、上部中央にある計測開始ボタンを押す。初期設定では1分ごとに10秒の計測を行い運動量を計算し、右側下の画面に表示する。計測時間は、メモリやハードディスクの容量に依存する。読み込んだ画像データを保存しなければ数分から数十日間の連続計測が可能である。自動計測を行っている画面を Fig. に示す。自動計測が終わると自動的に計測結果をグラフで表示する。結果表示の例を Fig. に示す。

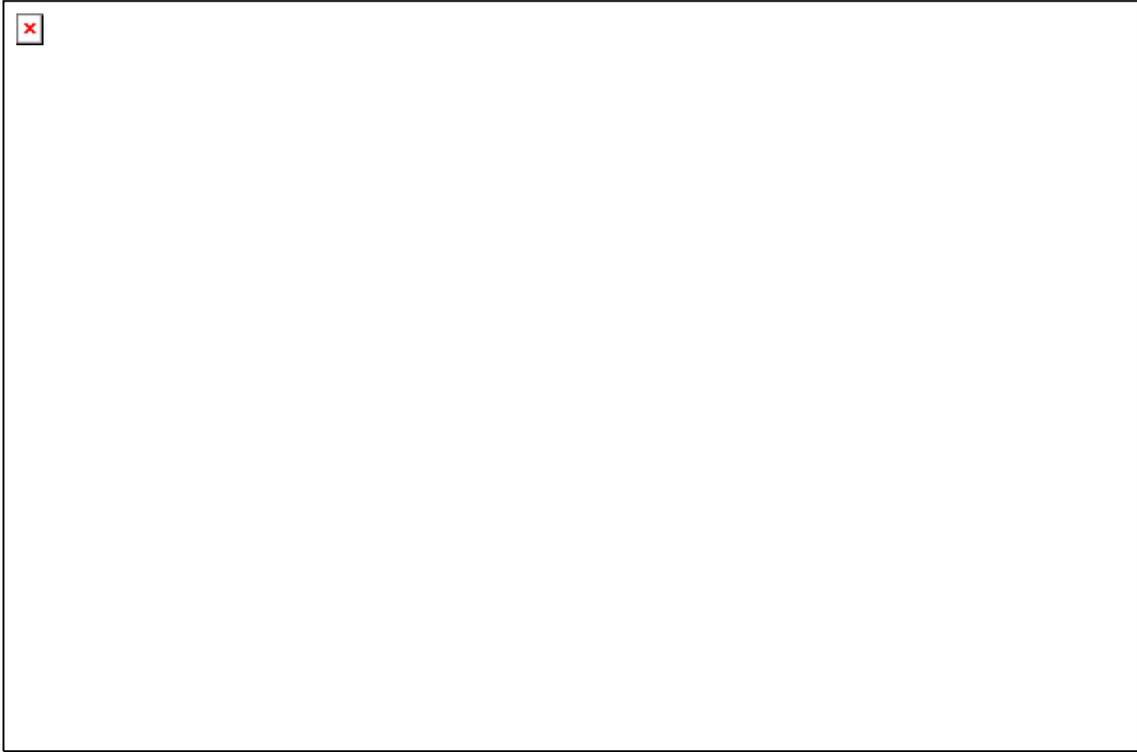


Fig. 計測プログラム（自動計測）

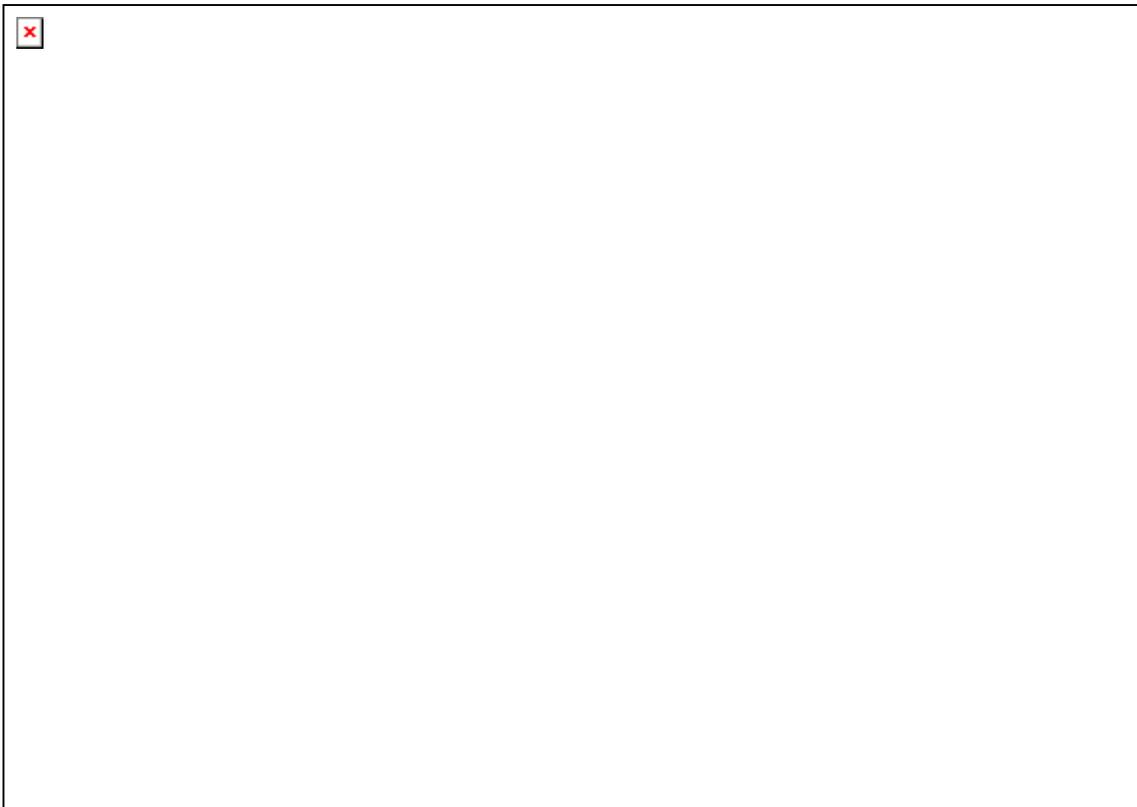


Fig. 計測プログラム（結果表示）

5 . 計測結果

本装置の有効性を確認するために実験を行った。直径30mmのシャーレに微小生物(アルテミア)を数十匹入れ、動きの計測を行えるかの実験をおこなった。計測後ラベリングを行い、微小生物の判別を行った結果を Fig.に示す。また、関連付けを行った後、微小生物の動きを線画で表示したものを Fig.に示す。実験の結果提案した計測アルゴリズムが有効に働いており、微小生物の動きを計測できることがわかった。

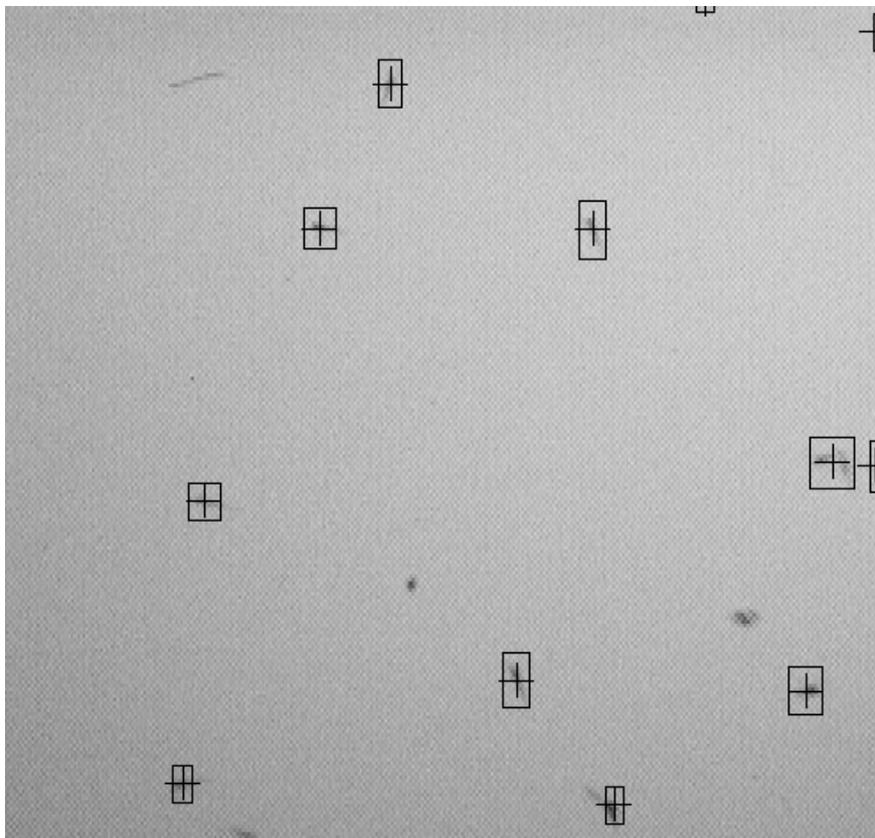


Fig.5 微小生物の判別結果

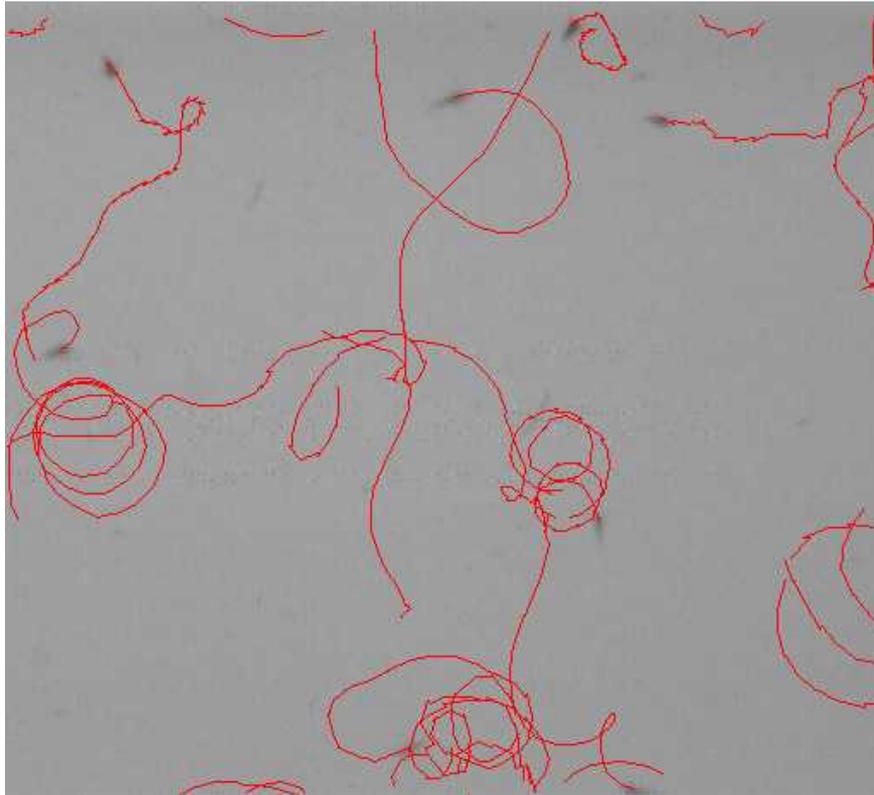


Fig.6 運動量計測結果

また、時間による微小生物の運動量の変化を計測する実験を行った。今回の実験では事前に微小生物の動きをデジタルビデオで録画しておき、その後運動量の計測を行った。ビデオの録画時間と計測を行った時間の関係を Table.6 に示す。また、計測結果を Fig.にしめす。

Table.6 録画時間と計測時間の関係

ビデオ録画時間 (分)	計測時間
0 ~ 5	投入直後
5 ~ 10	2 時間後
10 ~ 15	4 時間後
15 ~ 20	6 時間後
20 ~ 25	8 時間後
25 ~ 30	12 時間後
30 ~ 35	24 時間後
35 ~ 40	48 時間後
40 ~ 45	72 時間後



実験の結果、提案したアルゴリズムにより微小生物の運動量を画像処理を用いて自動的に計測できることがわかった。

6 . まとめ

画像計測技術を応用することにより、微小生物の運動量計測装置を開発した。また、微小生物の速度、運動方向、姿勢を考慮した対応付けアルゴリズムを提案し、実験によりその有効性を確認した。

今のところ、単に微小生物の動きを計測する機能しかないが、今後は水質等の環境状況と微小生物の動きのデータを充実させ、環境の状況を推測できる装置に発展させる予定である。

長崎県は、海洋県としての特徴があるため、海洋微生物やプランクトンなどを利用した海洋生物生産技術の開発に有利な位置にある。

本研究の成果は、微小生物の運動量計測に限らず、同時に、空間内での生物分布、生物の異常行動、色変化を自動的に測定する装置の開発に応用できる。例えば、魚群を誘導、捕獲するには、どのようにすれば良いかという問題は、水

産上，重要な課題であるが，本研究を発展し，魚群行動を定量化しモデリングを行うことで，この種の問題におおきな示唆を与えることになる．今後，水産学や生物学などの専門家にも開発協力を依頼し，より，高機能な装置として発展させる予定である．

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興事業団（地域研究開発促進拠点支援事業）および文部省科学研究（地域連携推進研究費）(No.11792013)の援助を受けた。記して謝意を表す。

今後の展開

現在のところ，シャーレ内のアルテミアやミジンコなどの微小生物の運動状態を二次元的に計測することを行っている．アルテミアやミジンコは，微生物としては，比較的大きく，顕微鏡を使わなくとも計測できる利点があるが，バイオセンサとしての感度を上げるには，さらに微小な生物を利用の方が望ましい．細菌などの微生物の行動を解析する場合，顕微鏡下の観察が必要とされるが，試験容器のサイズや形に制限が生じ，水量の問題で微生物の運動に影響を与える．近年の顕微鏡の改良により被写界深度が深くとれるようになったものの，運動領域を広げるために水量を増やすと微小生物が深さ方向に移動するため，三次元的な運動の計測が必要となる．

現在，合わせ鏡をレンズに設置し，これを回転させることで，三次元的に粒子の挙動を計測する手法を開発している⁽⁸⁾．本手法を用いると，1台のTVカメラのみを用いて，対象物の三次元的な位置と三次元速度ベクトルを同時に計測することができる．これを顕微鏡に設置することで顕微鏡下において微小生物の三次元計測が可能になるものと考えられる．

長崎県は，海洋県としての特徴があるため，海洋微生物やプランクトンなどを利用した海洋生物生産技術の開発に有利な位置にある．

本研究の成果は，微小生物の運動量計測に限らず，同時に，空間内での生物分布，生物の異常行動，色変化を自動的に測定する装置の開発に応用できる．例えば，魚群を誘導，捕獲するには，どのようにすれば良いかという問題は，水産上，重要な課題であるが，本研究を発展し，魚群行動を定量化しモデリングを行うことで，この種の問題におおきな示唆を与えることになる．今後，水産学や生物学などの専門家にも開発協力を依頼し，より，高機能な装置として発展させる予定である．

参考文献

- 1) 科学技術庁資源調査委員会編 1992: 環境と微生物, 微生物機能の環境保全への応用
- 2) 三宅: バイオエコモニタリング技術の可能性 1999、第11回バイオエンジニアリング講演会講演論文集、pp108-109
- 3) 菅谷: ヌカエビの行動解析を用いた河川水中有害化学物質のモニタリング、第11回バイオエンジニアリング講演会講演論文集 1999、pp120-121
- 4) 小林, 佐賀 他 1989: 二次元流れ場の実時間デジタル画像計測システムの開発、機械学会論文集(B編) 55巻 509号, 107-114
- 5) 畠中芳朗, 小林 修 1994: 急性毒性試験に対する動画解析システムの適用, 水環境学会誌, 第17巻 第1号, 60-63
- 6) 土戸 哲明, 1993: 細菌運動の動画解析とその細胞活動度・生存性評価への応用, バイオサイエンス研究報告書, 33-43
- 7) 松岡英明, 根本泰行 1993: 抗真菌活性自動評価システムの開発, *J. Antibact. Antifung. Agents*, 21, 99-105
- 8) 川末紀功仁, 石松隆和, 1996: “円形速度バイアス法を用いる流れ場の三次元計測法”, 日本機械学会論文集(C編), 62巻 594号, 213-218