

画像処理を利用した三次元運動計測システムの開発

Development of 3 D Measurement System Based on Image Processing

技術本部 古 結 義 浩*¹ 濱 村 秀 彦*¹
宮 本 一 正*² 見 持 圭 一*³
中 山 博 之*⁴

高速運動体の運動解析や、剛体運動のリアルタイム計測を行うために、計測対象の運動に悪影響を与えず精度の良い計測が実現できる三次元運動計測システムが望まれている。本研究では、複数台のビデオカメラの画像処理により運動体に貼付(ちょうふ)された複数の特徴点(マークやLED)を識別し、ステレオ視の原理からその三次元座標を計算して物体の位置姿勢を計算する三次元運動計測システムを開発した。本システムによる非接触三次元運動計測の応用として、高速運動体の高速度撮影(500 フレーム/s)後のオフライン高精度運動解析と、剛体運動のビデオレート(30 フレーム/s)リアルタイム計測を実現した。

A 3 D measurement system which can perform accurate measurement without disturbing the natural movement of the target objects is desired for the analysis of high speed motion or the real time measurement of a rigid body. Accordingly a 3 D measurement system employing the image processing of multi-video images has been developed. This system recognizes the special points (i.e. marks or LEDs) attached to the target object, and calculates their position in 3 D space through the principle of stereo vision. As an application of this passive 3 D measurement system, the highly accurate off-line 3 D analysis of images captured by high speed cameras (500 frames per second) and the video 3 D measurement (30 frames per second) of moving object have been realized.

1. はじめに

航空機などの高速運動体の設計には、風洞試験による基礎データ取得が必須であり、その手段として、画像計測の応用例も多くあるが、高精度で効率的な三次元計測システムが要望されていた。

今回、風洞内の剛体運動の三次元計測をステレオ視の原理を応用した画像処理システムで実現した。

また、上記ステレオ視の原理を監視オペレータの頭部運動のリアルタイム計測へも適用した。

本報では、当社で従来から蓄積してきたステレオ視による三次元計測技術、画像処理技術⁽¹⁾をベースにして開発した三次元画像計測システムとその応用例について報告する。

2. 画像処理を利用した三次元運動計測システム

2.1 ステレオ視による三次元運動計測の原理

運動物体に貼付(ちょうふ)された3点以上の特徴点(マークやLED)を、相対位置姿勢が既知の2台のカメラで同時に計測し、三角測量の原理を用いれば三次元位置姿勢を計算することができる。その手順は以下のとおりであり、図1にその概念を示す。

- (1) 各カメラの画像から、物体に貼付された複数の特徴点を、二次元画像処理で抽出し、それぞれのカメラ画像上での二次元座標値を求める。
- (2) 複数の特徴点の幾何配置や前時刻の計測からの追跡情報等から、特徴点を識別(番号付け)する。
- (3) 2台のカメラで見えている同じ特徴点のそれぞれのカメラ画像上での二次元座標から、三角測量の原理を用いて特徴点の三次元座標を計算する。
- (4) 計算された3点以上の特徴点の三次元座標から、運動物体の位置姿勢(移動量、回転角)を計算する。

(1)は画像処理、(2)は幾何演算で計算できる。(3)、(4)の計算式について説明する。

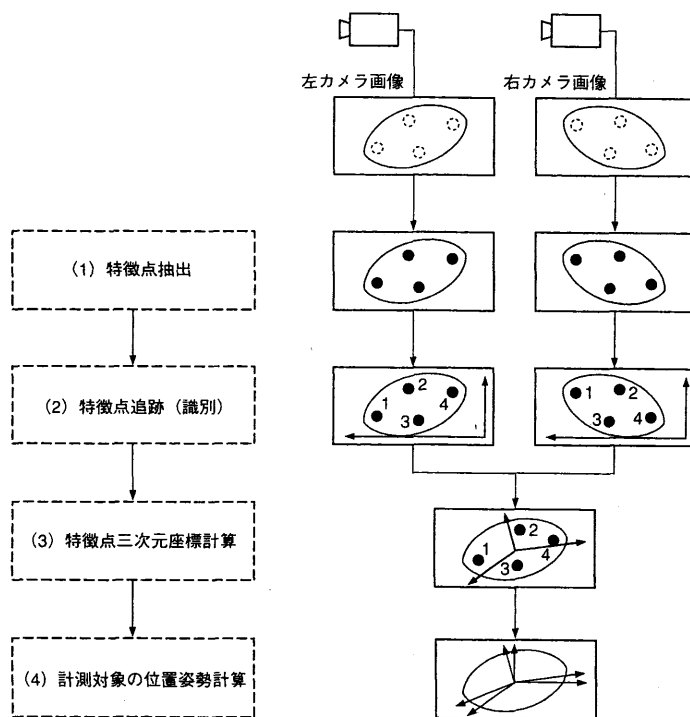


図1 三次元運動計測の手順
Step of 3 D motion measurement

(3)の三次元座標は、図2に示すカメラ配置の場合は、式(1)の変換で求める。

$$\left. \begin{aligned} x &= b \cdot x_L / (x_L - x_R) \\ y &= b \cdot y_L / (x_L - x_R) \\ z &= -b \cdot c / (x_L - x_R) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

(x, y, z) : 三次元座標

(x_L, y_L) : 左カメラ画像上の二次元座標

*¹ エレクトロニクス技術部システム技術開発センター
*² エレクトロニクス技術部システム技術開発センター主査

*³ 高砂研究所電子技術研究室主務
*⁴ 高砂研究所電子技術研究室

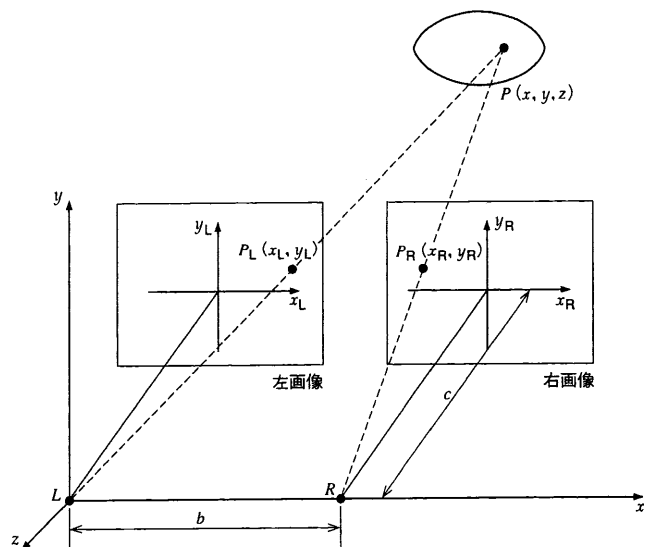


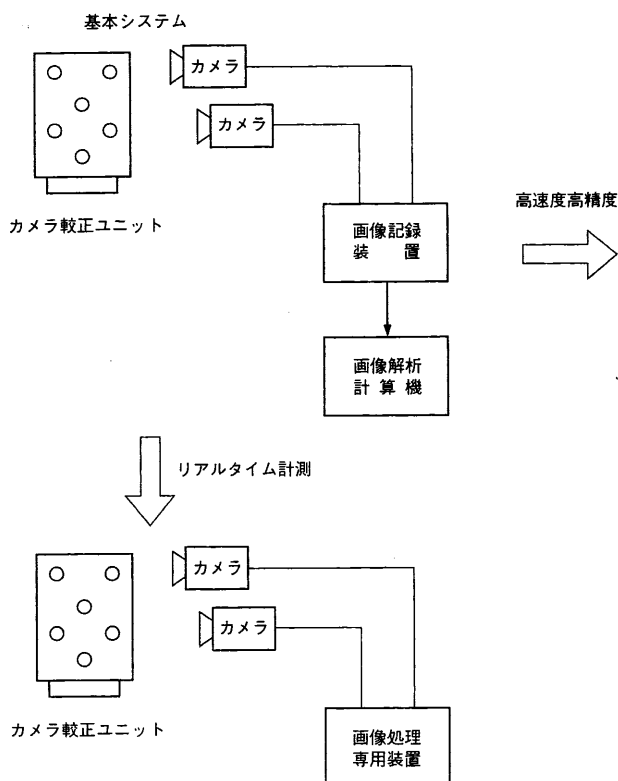
図2 2台のカメラによる特徴点の三次元座標計算
Calculation of 3D coordinate of feature points using 2 cameras

(x_R, y_R) : 右カメラ画像上の二次元座標

c : カメラの焦点距離

b : カメラの焦点間距離

式(1)は、カメラが空間座標軸と平行に設置された特殊な場合であり、実際はそうに置かれる保証はないので、一般変換式を用いる必要がある。一般変換式に用いる各種カメラパラメータの推定には、複数の特徴点を持つ校正ユニットをカメラで撮像し、画像処理で得られた特徴点の二次元座標値と校正ユニット固有の座標系で定義された特徴点の三次元座標を一般変換式に当てはめ、最小二乗法を適用する。これをカメラ校正⁽²⁾といい、カメラ配置時に一度実行しておく必要がある。このときにカメラのレンズひずみなども同時に補正できる。校正ユニットの座標系を三次元計測の基準座標系とする。



(4)の物体の位置姿勢計算は、 n 個の特徴点の、初期位置姿勢における基準座標系での三次元座標 Q_i ($i=1, n$) と、計測時の三次元座標 P_i ($i=1, n$) を式(2)に当てはめ、最小二乗法により R と T を求める。

$$P_i = RQ_i + T \quad (2)$$

ここで、

T : 平行移動ベクトル (位置)

R : 回転マトリックス (姿勢)

位置と姿勢の6自由度のパラメータ推定精度は特徴点の数に依存する。

2.2 計測システムの構成

前節で説明した三次元運動計測システムを構成する場合の基本システムを図3に示す。その構成要素は、以下のとおりである。

- ① CCDビデオカメラ2台
- ② 画像記録装置
- ③ 画像解析計算機
- ④ カメラ校正ユニット

④は計測対象と視野領域に合せた工作が必要となるが、その他は市販品を利用して構成できる。

この基本システムの場合、ビデオレート (30 フレーム/s) で運動を撮像し、その後オフラインで解析を行って三次元運動計測が実施できる。

この基本システムをベースとして、

- 高速運動の高精度オフライン解析
- 低速運動のビデオレートリアルタイム計測

を実現するための、2種類の三次元運動計測システムを開発した。

高速運動物体の高精度解析システムでは、下記システム構成を採用した。

- ① 高速度 (500 フレーム/s) 撮影ビデオカメラ4台
- ② 画像記録装置
- ③ 画像解析計算機

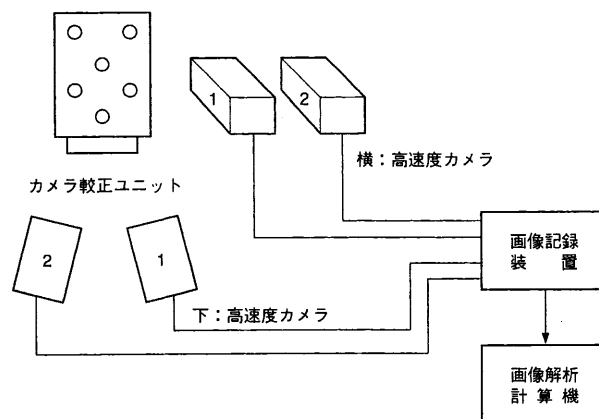


図3 ステレオ視による三次元計測システム構成
Configuration of 3D measurement system based on stereo vision

④ カメラ校正ユニット

このシステムの場合、後述する解析の目的のために、500 フレーム/s で運動を撮像し、その後オフラインで解析を行って三次元運動計測が実施できる。

ビデオレートリアルタイム計測システムでは、下記システム構成を採用した。

- ① CCD ビデオカメラ 2 台
- ② 画像処理専用装置
- ③ カメラ校正ユニット

このシステムの場合、ビデオレート (30 フレーム/s) で三次元運動のリアルタイム計測が実施でき、計測結果を制御などに用いることが可能である。

2.3 高速高精度計測システム

風洞試験などでの物体の運動計測では、物体は高速運動するので、100 フレーム/s から 1000 フレーム/s といった高速なレートで計測を行う必要がある。

従来このような高速計測には、高速連続写真 (フィルム) やストロボ発光による多重露光写真などの方法が使われていた⁽³⁾⁽⁴⁾。

しかし、写真による解析は手作業を要し膨大な作業量が必要であることから、高精度で効率的な三次元計測の手段が要望されていた。最近、通常の CCD カメラと同等の解像度で高速撮像が行えるビデオカメラが製品化された。そこで、このような高速撮影カメラを採用したステレオ視の画像処理により三次元運動高速計測が可能になった。

今回、風洞内運動物体計測システムとして、500 フレーム/s が撮像可能なカメラを採用した三次元運動高速計測システムを開発した。採用した高速撮影カメラでは、数秒間の撮影画像をカメラメモリ内に保存される。それを、通常のビデオレートでスローモーション出力することにより、画像記録装置に保存した後、オフラインで運動解析を行う。

さらに、このシステムでは以下の手段により精度向上を図った。

- カメラ 4 台利用による奥行き精度向上
- 特徴点 (反射マーク) 数を増加させることによる位置姿勢計算精度向上

カメラ 2 台のステレオ視の場合、本応用では、奥行き方向の精度は奥行き方向と直交する方向の精度に比べて誤差が 2 倍程度になる。

そこで、図 4 に示すような横方向からの 2 台カメラによるステレオ視 1 と、下方向から 2 台カメラによるステレオ視 2 を組合せることにより精度向上を図ることとした。

すなわち、横カメラから見た奥行き方向計測座標値の代りに、下カメラから見た水平方向の計測座標値を採用することにより、横カメラから見た奥行き方向と直交する方向と同じ計測精度にすることができた。

位置姿勢計算は、3 点以上の特徴点の三次元座標値を、式 (2) に適用した最小二乗法により求める。したがって、2 台のカメラで同時に撮像できる特徴点が多いほど精度は向上する。しかし、多すぎると、抽出識別が困難になっていく。そこで、マークの貼付は一定のルールにより行い画像処理による抽出識別を容易にした。これにより、画像フレーム間での変化が微小であるという制約条件の下、最初に識別用の情報を教示するだけで、マークの自動追跡識別が可能になり、左右カメラでの特徴点の対応問題を解決するとともに精度向上が可能となった。

以上により、500 mm 立方の視野範囲で精度 ± 2 mm を実現し

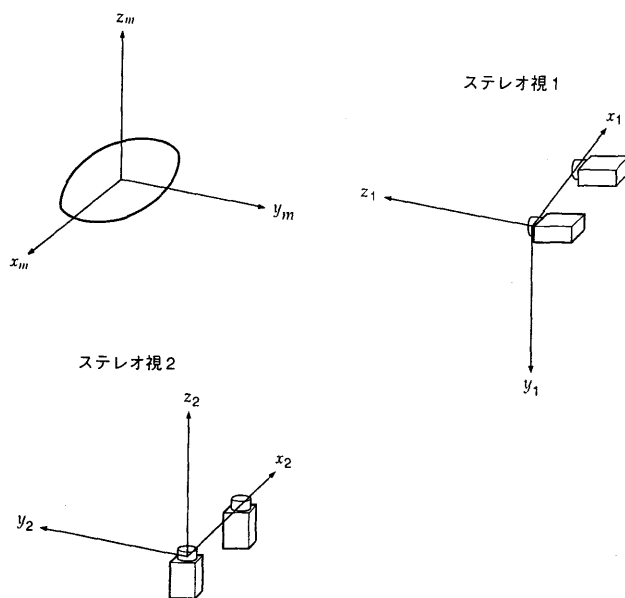


図 4 カメラ 4 台によるステレオ視
Stereo vision using 4 cameras

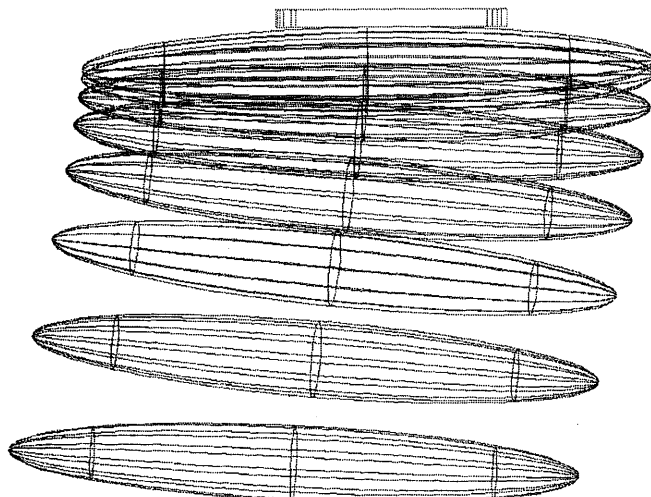


図 5 三次元運動計測結果のアニメーション表示 物体の落下運動計測値を基に、物体の CAD モデルを使って一定計測間隔で順に表示している

Animation of measurement result of 3D motion pictures are generated using CAD model from measured value of falling object sequentially in every constant period

た。

なお、三次元解析結果を図 5 のように運動物体の CAD モデルを用いてアニメーション表示することも可能である。

2.4 ビデオレートリアルタイム計測システム

人間などの運動体の三次元運動を計測する場合、運動に拘束を与えない非接触計測が有効である。

今回、遠隔監視カメラを監視オペレータの頭部の動きに追従させ、オペレータの手を煩わすことなく遠隔カメラを見たい方向に操作できるシステムを開発した。図 6 にその概念を示す。ディスプレイを Head Mount Display (HMD) とすることで VR 技術との組合せ応用も期待できる。

監視カメラをスムーズに制御するためには、33 ms ごとに得られる画像に対し、リアルタイムに計測結果を出力する必要がある。

そのためには、得られた画像から、計測結果を出力するための

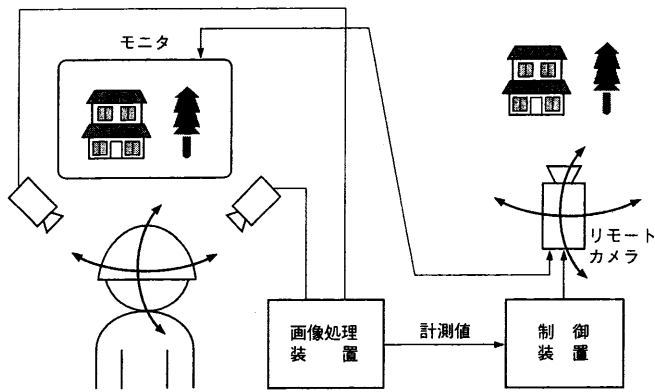


図6 遠隔監視カメラの頭部運動による制御システムの概念
Conceptual sketch of control system of remote monitoring cameras by head motion

以下の処理全体を 33 ms 以内で行うことが必要である。

- ① LED の抽出, 識別
- ② LED の三次元座標計算
- ③ 位置姿勢計算

②, ③ については, モトローラ 68040 CPU ボードを使用して約 15 ms である。①については, 512×486 ピクセルの画像全体のラベリング処理と特徴量計算が必要であり, 上記 CPU ボードのみでは 18 ms 以下にすることは不可能である。

そこで, 高速に LED (9 個) の自動識別を行うために, 2 色の LED を採用した。LED の色を多くすれば, 識別アルゴリズムは簡単になるが, 照明環境の変動により色識別が難しくなるので, 色は 2 色のみとし LED 配置パターンの知識を利用して左右カメラでの特徴対応を確実にした。

さらに, パイプライン型高速画像処理装置を採用し, 左右カメラ画像の並列処理を行うことにより, ①の処理時間を 18 ms まで短縮した。

図7に開発したビデオレトリアルタイム計測システムの構成を示す。

上記の左右カメラ画像の並列処理, LED の色識別を実現するた

めに, パイプライン型カラー画像処理ボードを 2 枚用いている。1 枚のボードに左カメラの画像, もう 1 枚のボードに右カメラ画像を入力して並列処理を行う。CPU ボードは, カメラ構成ユニットの制御, 三次元座標計算, 位置姿勢計算, 計測結果の制御処理への出力を行っている。

以上により, 33 ms ごとに頭部の運動を計測して, 遠隔カメラを追従させるシステムを実現した。

3. おわりに

三次元運動の高精度計測やリアルタイム三次元運動計測が望まれているが, 計測対象の運動に影響を与えるような計測では, 運用が制約され, 正しい運動計測が困難である。

そのような場合には, ステレオ視の原理を用いた非接触三次元計測システムが有効であると考えられる。

本報は, ステレオ視の原理を用いた三次元計測システムとして, 高速運動体の高精度計測を実現するシステムと, 低速運動体のビデオレトリアルタイム計測を実現するシステムの事例を紹介した。その他の応用として, 例えば, 水槽試験での非接触運動解析や, 構造物の振動変位解析などがある。そのための課題としては, 以下が挙げられる。

- (1) 個々の応用における照明環境に合せた調整の容易化
- (2) 高解像度カメラへの対応のため, 画像データ処理の高速化

また, 今回開発したシステムの構成要素であるコンピュータの高性能・低価格化傾向や高速度撮像カメラや高解像度カメラの普及により, より手軽に利用できる計測システムとして各種用途に活用されることを期待している。

参考文献

- (1) 見持圭一ほか, 三次元視覚センサの研究, 三菱重工技報, Vol.25 No.3 (1988) p.241~246
- (2) 井口征士ほか, 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990) p.91
- (3) 森田義郎ほか, XT-4 スピン風洞試験, 第 25 回飛行機シンポジウム講演集 (1987)
- (4) 森田義郎ほか, 航空機の動特性風洞試験技術, 三菱重工技報 Vol.25 No.4 (1988)

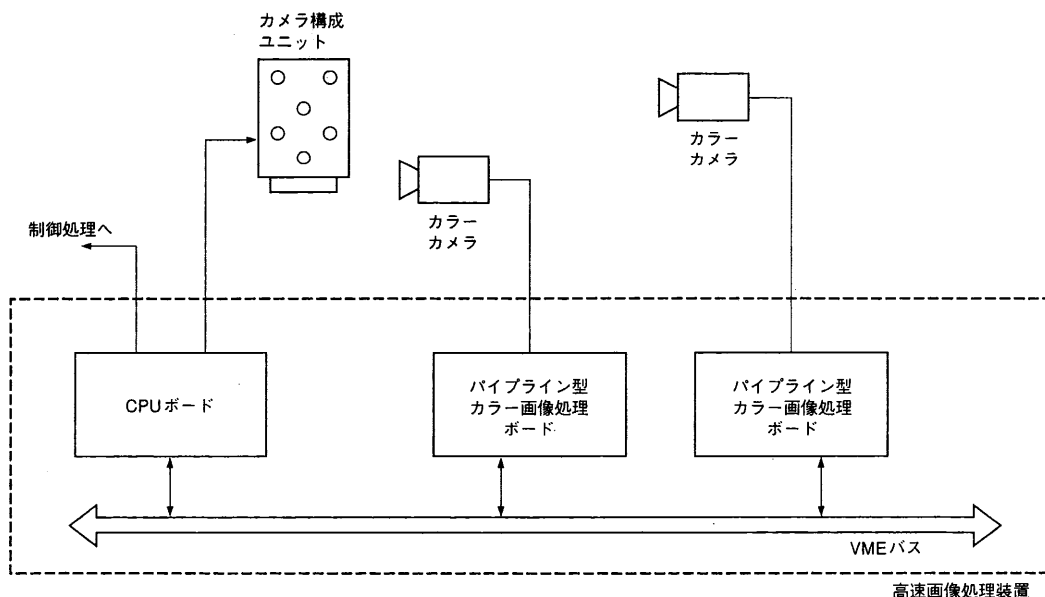


図7 ビデオレトリアルタイム計測システム構成
Configuration of real time measurement system