

## 遠隔操作のための3次元視覚システムに関する研究

高橋 裕之、堀 武司、澤山 一博

### A Study on 3D Vision System for Teleoperation

Hiroyuki TAKAHASHI, Takeshi HORI, Kazuhiro SAWAYAMA

#### 抄 録

中小製造業の生産工程は多品種少量生産工程が多く、その作業の多くは熟練を要することから作業者による手作業に依存しており、労働集約型の作業形態を呈していると言える。今後、熟練者不足などにより品質の維持管理および生産性の低下がますます深刻な問題になっていくことが予想され、企業競争力の低下が懸念される。多品種少量生産に対応可能な作業の自動化装置の開発は今後の課題として取り組まれているものの、現状では技術的、コスト的にも実用的ではない。このような状況において、人間の高度な能力を活用することを前提とした作業者の環境改善、軽作業化、複数の作業を同時に行うことによる効率化などを目的として、遠隔操作による複雑形状物ハンドリング作業支援システムの開発を進めている。本報告では、全体システムに搭載可能な視覚機能として、3次元視覚計測システム、視覚系マスタ・スレーブシステムの検討について報告する。

#### 1. はじめに

高齢化・少子化が進む社会的状況の中で、あらゆる産業分野において労働力の不足、特に熟練者不足が深刻化することが想定される。北海道内の中小製造業の生産工程は多品種少量生産工程が多く、その作業の多くは熟練を要することから作業者による手作業に依存しており、労働集約型の作業形態を呈していると言える。このような背景の中で今後、熟練者不足などにより品質の維持管理および生産性の低下がますます深刻な問題になることが予想され、企業競争力の低下が懸念される。多品種少量生産に対応可能な作業の自動化装置の開発は今後の課題として取り組まれているものの、現状では技術的、コスト的にも実用的ではない。このような状況から、人間の高度な能力を活用することを前提に、作業者の環境改善、軽作業化、複数の作業を同時に行うことによる効率化などを目的として、鋳物製造工程における遠隔操作による中子装着作業を対象とした複雑形状物ハンドリング作業支援システムの開発を進めている。その要素システムとして、3次元視覚システム、マニピュレータシステム、ハンドリングシ

ステムに関する研究開発を行っており、本報では、全体システムに搭載可能な視覚機能として、3次元視覚システムに関する研究について報告する。

#### 2. 3次元視覚システムの概要

遠隔操作での中子装着作業支援システムとして重要なのは、遠隔に居ながら作業状態を的確に認識・判断して円滑に作業を遂行することと言える。このとき、視覚システムによる動作として以下のことが想定される。

○中子、砂型は、それぞれ予め決められた場所・範囲内にあり、作業者はジョイスティックなどでマニピュレータを操作し、中子を砂型に設置する。このとき、中子および砂型の位置姿勢を求め、作業情報の提示、または、簡易な作業や操作が面倒な作業を自律的に行う。

○遠隔での視覚情報を取得することを目的として、作業現場に置いたカメラなどからの映像情報をHMD（ヘッドマウントディスプレイ）などを介して得る。このとき、頭部の動作を計測し、カメラ台を制御することで視界の移動を可能とする。

- これらを実現するために必要な視覚情報機能として、
- 1) 作業情報の提示および簡易作業の自律化のための3次元視覚計測
  - 2) 作業環境の取得・提示のための視覚系マスタ・スレーブ

が重要と考え、これらに関する要素技術およびシステムの検討を行った。3次元視覚システムは、1)の機能を実現するための中子、砂型の位置・姿勢計測を行う3次元視覚計測システム、2)の機能を実現するための視覚系マスタ・スレーブシステムから構成した。概念図を図1に示す。

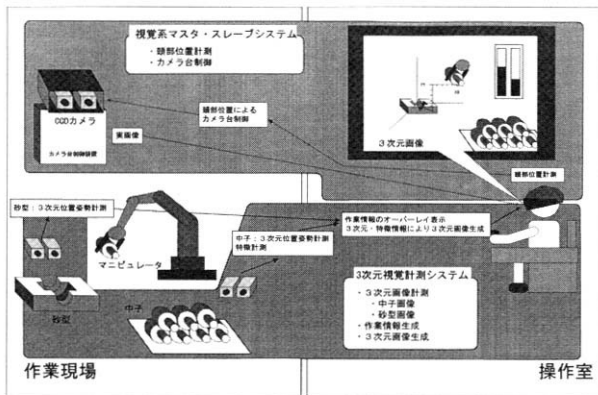


図1 3次元視覚システム概念図

### 3. 3次元視覚計測システム

#### 3.1 ステレオ視による3次元計測

3次元計測を行う手法として様々な方法が提案されているが、アクティブな光源を用いずに、カメラだけで計測する手法としてステレオ（両眼立体）視がある。ステレオ視は複数のカメラから得られたシーンの距離情報を三角測量の原理で求める基本的な方法であり、利用の簡便さから将来のロボットビジョンとして重要な手法の一つである<sup>1)</sup>。本報では、ステレオ視による計測手法に関して検討を行った。

ステレオ視による距離情報の取得は、1枚の画像の中で観測された点を、別の視点から見た画像中の点との三角測量の原理により確定することである。このときの対応点探索の信頼性が距離精度に大きく影響を与える。左右に配置された画像の片側（たとえば左）にある点が観測されたとき、その点に対する空間中の位置は、その視線上に存在する。その視線は別（右）の画像上では画像内のある直線にあたる。この直線のことをエピポーラ線、また、左右の投影点が満たすべき拘束をエピポーラ拘束（条件）と呼ぶ。

ステレオ視では、

1. 両カメラの光軸は互いに平行。
2. 両カメラの光軸中心を結ぶ線分は光軸と直交する。
3. 両カメラの画像面は光軸と直交する同一面上にある。

の3条件を満たす図2に示すような座標系の場合に、3次元空間内の点  $(X, Y, Z)$ 、左画像の投影点  $P_L(X_L, Y_L)$ 、右画像の投影点  $P_R(X_R, Y_R)$  であるとき、両投影点の幾何学的な関係から、 $Y_L = Y_R = y$  となり、処理が簡便になる。この  $Y_L = Y_R = y$  がエピポーラ拘束に相当し、これを基本ステレオカメラ構成と呼ぶ<sup>2)</sup>。

$$\begin{aligned} X &= \frac{bX_L}{X_L - X_R}, & Y &= \frac{by}{X_L - X_R} \\ Z &= \frac{bf}{X_L - X_R} = \frac{bf}{d} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $f$ はカメラの焦点距離、 $b$ は基線長（両光学系中心間の距離）である。

式(1)の、 $d = X_L - X_R$ は視差と呼び、 $b, f$ は既知であることから、奥行き $Z$ は、視差 $b$ から一意的に求まる。

以上のように、左右の画像上で対応する点が求められると、容易に距離情報を算出できる。しかし、画像のあらゆる部分において、正確に対応点付けをすることは容易ではない。この対応点探索を安定に精度良く行うことが、ステレオ視にとって非常に重要となる。

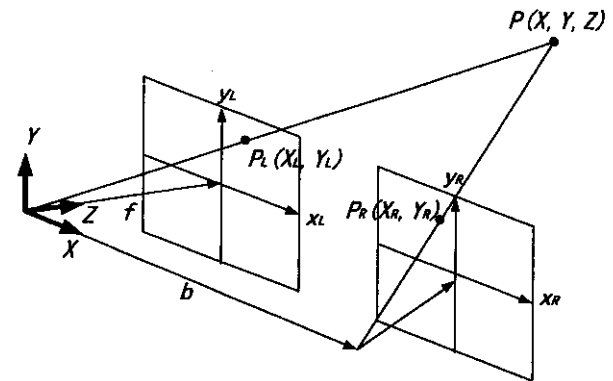


図2 基本ステレオカメラ構成原理図

#### 3.2 対応点探索

対応点の探索手法として、局所的相互相関を計算する手法、エッジ点の対応を弛緩法、粗密解析、動的計画法などにより求める手法など多くの手法が提案されている。その中で、画像の境界線表現から得られる領域とその境界線を用いる手法は、領域の特徴の他に境界線の連続性を対応の拘束として利用するものであり、図形の照合に平面拘束条件が付加され、信頼性の高い対応が得られる<sup>3)</sup>。

#### 3.3 3次元計測処理フロー

本報では、境界線表現による手法に基づき、鋳物の中子を対象とした処理手法の検討を行った。

最初に、左右それぞれの画像を捉え、2次元画像処理により、境界線により構成される各セグメントのデータリストを求める処理<sup>4)</sup>を行った。次に、求めた左右のセグメントデータからの位置関係から左右画像間の対応セグメントを決定して、それぞれ対応する直線から対応点を求めることにより、3次元距離の算出を行った。処理フローは、以下の通りである。

#### 1) エッジ抽出処理

原画像に対して一次微分処理、細線化処理を行い、しきい値処理により明確なエッジのみを抽出する。

#### 2) 端点延長処理

明確なエッジは必ずしも連続ではないため、途切れたエッジを復元して領域を囲む閉じた境界を求めるために、エッジの端点を求めてその端点を延長する。

#### 3) 領域抽出処理

エッジで囲まれた閉じた領域を抽出して、領域毎にラベリング処理によりラベル付けを行う。

#### 4) 境界の分割

領域の境界を簡単な形状のセグメントに分割するため、境界を追跡してチェーンコードを求める。

#### 5) 屈曲点抽出処理

セグメントにおいて注目点の近傍の傾きが大きく変化する点を屈曲点として求める。

#### 6) 直線の抽出

領域は直線により構成されていると仮定して、最小2乗法により屈曲点間に直線のあてはめを行う。

#### 7) 境界表現データの取得

撮像した画像を領域の集合として記述し、各領域を直線およびその始点、終点などのセグメントのリストとして記述する。

#### 8) 左右画像対応セグメントの抽出

左右画像に対して、セグメントの相対位置関係を求めることにより左右画像間での対応セグメントを抽出する。

#### 9) 3次元座標の算出

左画像のセグメントを構成するそれぞれの直線上の点とその直線に対応する右画像の直線を探し、エピポーラ拘束を満たす点 ( $y = Y_L = Y_R$  との交点) を対応点として抽出し、式 (1) により3次元座標を算出する。

### 3.4 計測試験および考察

まず、本処理の有効性を確認するためにパソコン (PC-H98modelU105) を用いて2次元画像処理 (処理フロー1~7) プログラムの作成を行った。

処理の確認が容易に行えるようにエッジが明確で単純な形状の対象物 (直方体: 図3) に対して処理を施した。本処理では、カメラからの入力画像 (512×512画素 256階調) に対して、125×100画素の領域を切り出して処理を行った。

処理結果例を図4に示す。この結果から、データの取得が確認できた。しかし、画素数が少ないためにノイズの影響が大きく、画像によっては、エッジ抽出処理でノイズが残り、端点延長処理において不要な延長線が求められることやセグメントの角が丸まってしまうために屈曲点の位置が実際の位置からずれてしまい、正確な直線が得られず、計測データの誤差が大きくなる場合があった。

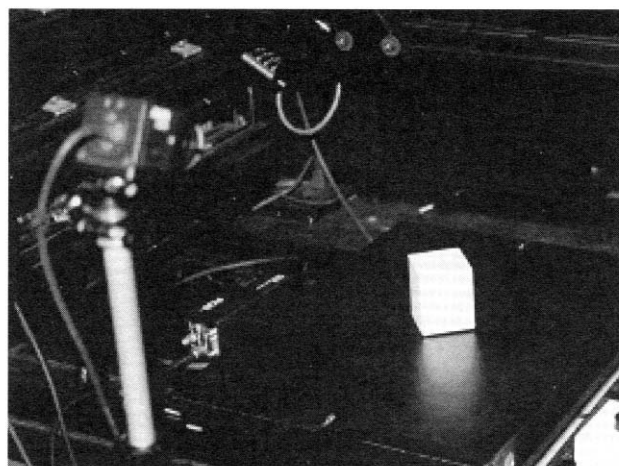


図3 対象物

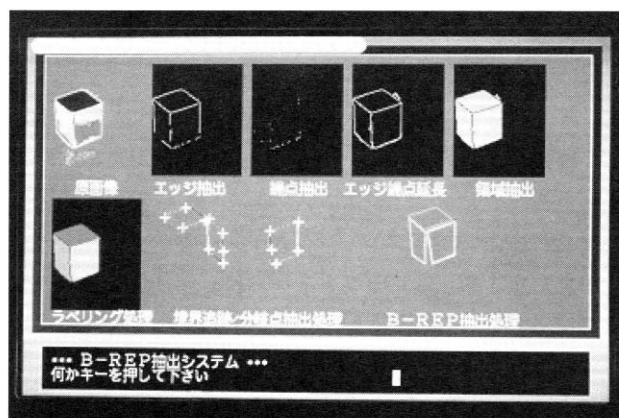


図4 境界表現処理結果

さらに、計測精度の向上などを検討するため、画素数を256×256画素とし、ステレオ視への拡張を行った。

ステレオ視システムは、作業現場などへの設置を考慮して、ボードコンピュータシステムにより構成した。システムの内容は、CPUにPentium133MHz、メモリ64MB搭載のPICMG規格のボードコンピュータ、フレームグラバボード、グラフィックアクセラータ、ハードディスク、フロッピーディスクから成る。OSとして、Microsoft WindowsNT4.0、開発環境はMicrosoft Visual C++5.0を用いた。

図3と同じ対象物により処理試験を行った。処理結果例を図5に示す。図5では、上側が左右原画像 (640×480画素×24ビットカラー)、下側が左側から左、右画像処理結果

および3次元計測結果を表示している。処理結果から、明確な画像では、セグメントデータおよび3次元座標が求められることが確認できた。しかし、エッジが鮮明でなかったり、隠れがある場合には、抽出したセグメントの形や数が異なり、正確な対応点を求められない場合があった。今後、本処理結果を基にセグメント抽出手法および対応点探索手法の改良により計測精度の向上を図り、中子、砂型を対象とした位置姿勢計測への対応を行い、遠隔によるハンドリング制御のための情報として活用したシステムの構築を行っていく予定である。

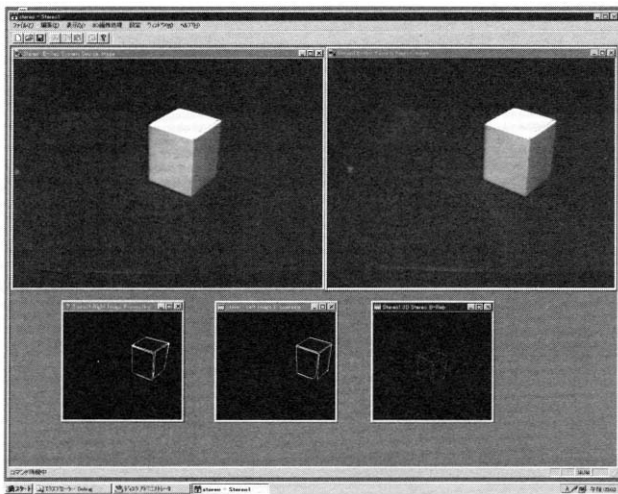


図5 ステレオ視処理結果

#### 4. 視覚系マスタ・スレーブシステム

##### 4.1 視覚系マスタ・スレーブシステム構成

視覚系マスタ・スレーブシステムは、頭部位置計測装置（図6、3SPACE FASTRAK；ポヒマス製、以下FASTRAK）、画像提示装置（図7、HMD、Mediamask MW-601；オリンパス光学工業製）、CCDカメラ2台（DXC-LS1；ソニー製）、カメラ台、カメラ台制御装置などから構成される。これらのシステム構成要素を統合することによって、マスタ・スレーブシステムを試作し、各構成要素およびシステム全体としての評価検討を行った。

##### 4.2 頭部位置計測装置

マスタ側において作業者の頭部の運動を検出するため、3次元位置姿勢計測装置（FASTRAK）を使用した。

FASTRAKは、磁場を利用した高速、高精度な位置姿勢計測装置であり、トランスミッタから発生した磁場をレシーバで検出し、レシーバの位置（ $x$ 、 $y$ 、 $z$ ）と姿勢（ヨー、ピッチ、ロール）の6自由度を実時間で計測することが可能である。計測精度は、レシーバトランスミッタ間の距離に依存するが、30インチ（約760mm）以内の範囲では位置に関し

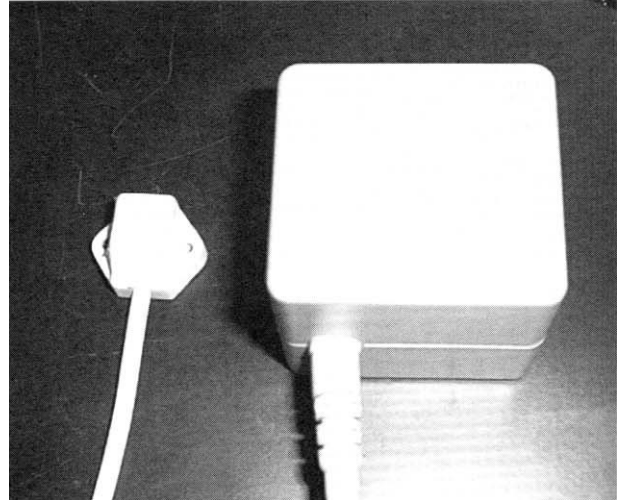


図6 FASTRAK（レシーバおよびトランスミッタ）

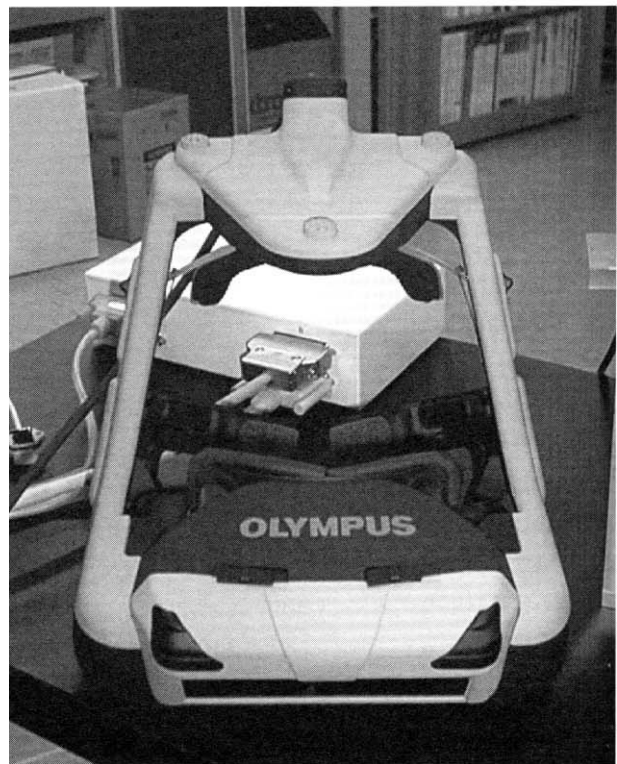


図7 ヘッドマウントディスプレイ

て0.03インチ（約0.8mm）RMS、方向に関して0.15度RMSの精度が保証されている。

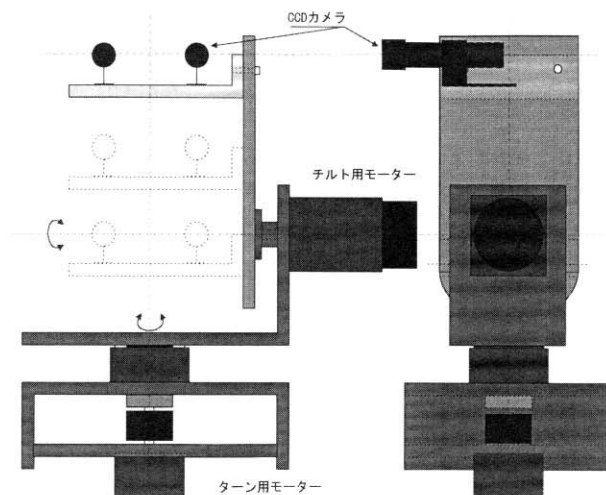
計測データの読み出しおよびFASTRAKに対する制御は、RS-232Cシリアルインターフェイスを経由して行った。出力データ形式は、用途に応じてASCII可読形式、IEEEフォーマット浮動小数点バイナリ、14bit固定小数点形式を選択出来る。また、FASTRAK内部で座標変換などのデータ加工を行うことが可能である。

#### 4.3 視覚スレーブ用カメラ台

カメラ台はスレーブ側における作業者の仮想的な頭部位置に設置され、マスタ側からの指令に従い作業者の頭部の動作をトレースし、搭載した2眼のステレオ CCD カメラにより作業環境の映像を取得する。

試作したカメラ台の構成図および全体図を図8に示す。カメラ台は2個のステップモータにより、ヨーおよびピッチ方向に関しての2軸の回転運動が可能とした。ただし、ロール方向に対しての自由度は持たない。

カメラ台上に、左右2台の CCD カメラを取り付けた。人間の視覚に近い撮像条件を得られるようにするため、左右カメラ間の間隔は人間の両眼の間隔と同様に 80mm とした。また、人間の眼球位置が首の回転軸に対してオフセットを持っていることを考慮し、カメラ台の各回転軸に対するカメラ取り付け位置のオフセットは任意に調整可能な構造とした。



a) カメラ台構成図

#### 4.4 マスタ・スレーブ制御システムの試作

システムの制御装置としては、北斗電子製 H8 マイコンボード HSB8/532-STU、開発環境として同社製 STUDY500 キットを使用した。

モータドライバへ出力するパルス信号は、タイマ割り込みを用いて 3kpps のパルスをソフトウェアにより生成した。モータの制御に関しては、与えられた目標位置を実現するようにオープンループ制御により駆動した。また、始動、停止、逆転時における加減速処理を考慮した。

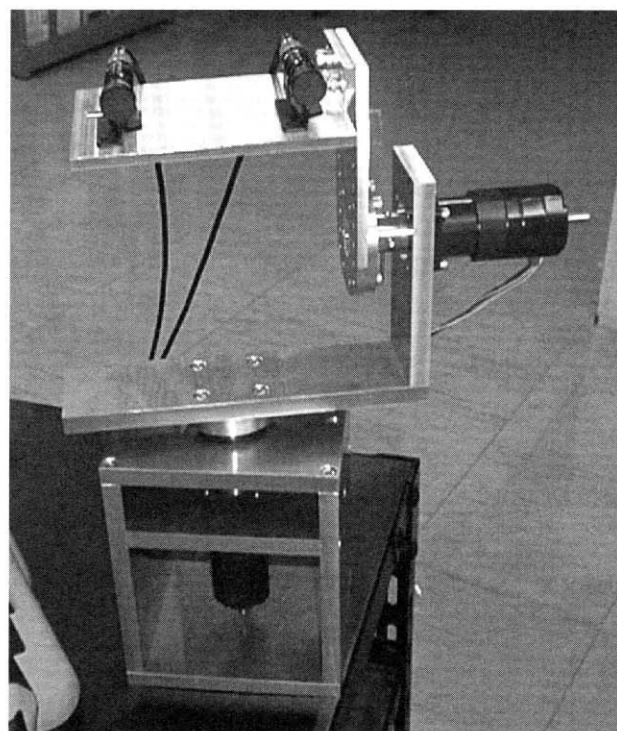
スレーブ側への目標位置指令の伝達方法は、H8 ボードのシリアルインターフェイスに FASTRAK を接続し、スレーブ側制御システムが直接データを取得する構成とした。

FASTRAK で計測されるデータのうち、位置データはカメラ台制御には必要ないので、姿勢データのみを出力した。姿勢データはオイラー角の形で出力されるため、ヨー、ピッチ成分を取り出しスケールリングを施すことで、各モータへの目標位置指令値として直接対応づけることができる。ロール成分のデータは、カメラ台側に対応する可動部が存在しないため処理は行っていない。

#### 4.5 評価試験および考察

視覚系マスタ・スレーブシステムを装着して評価試験を行った(図9)。オペレータの動作に追従してカメラ台が駆動することが確認できた。しかし、急激な動作を行った場合には、カメラ台が遅れて追従した。この要因としては、モータのトルクに対してカメラ台の重量が大きいたことが挙げられる。

このためスレーブ側を十分な速度で駆動することが出来ず、マスタ側に対する追従性が悪化したものと考えられる。搭載している CCD カメラは極めて軽量であるため、これに合わせてカメラ台の構造を見直し、可動部分の軽量化を図る



b) カメラ台全体図

図8 視覚スレーブ用カメラ台

などの検討が必要である。

また、作業者が長時間、HMD を装着した状態で、めまい、頭痛などの身体への影響が懸念されている。これは、頭部運動に対する HMD 画像の遅れ、動作の不一致、肉眼視との視野角の違いなどの影響が想定され、システム開発において十分留意していく必要がある。

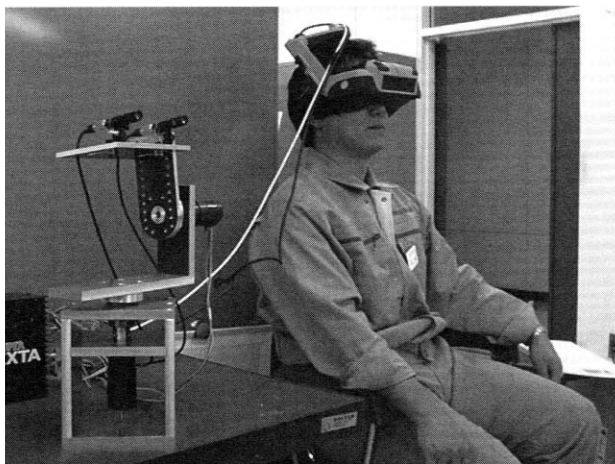


図9 視覚系マスタ・スレーブ評価試験

## 5.まとめ

視覚システムとして、3次元視覚計測システムおよび視覚系マスタ・スレーブシステムの検討を行った。3次元視覚計測システムでは、単眼による2次元境界表現のデータリスト計測処理の検討を行い、ステレオ視による計測実験を行った。今後は、処理の高機能化によりデータの計測精度の向上を検討する。さらに、モデル化した対象物とのマッチングを図り、高精度な3次元位置姿勢計測システムの構築を行い、中子、砂型を対象とした計測システムの構築を図っていく。

視覚系マスタ・スレーブシステムでは、カメラ台の軽量化を図り、また、作業者による装着試験を行うことでシステムの実証試験などを行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 波通隆、高橋裕之、松村信良、“データ・フロー型プロセッサによるステレオ画像処理”、北海道立工業試験場報告 No.286 (1987), pp.227-240
- 2) 奥富正敏、“ステレオ3次元画像センシング”、第4回画像センシングシンポジウムチュートリアル講演会基礎コーステキスト (1998), pp25-33
- 3) 富田文明、高橋裕信、“ステレオ画像の境界線表現に基づく対応”、電子情報通信学会論文誌 (D) vol.J71-D no.6, pp.1074-1082
- 4) 富田文明、高橋裕信、“画像のB-REPのためのアルゴリズム”、電子通信学会 PRU86-87、1987.1.16
- 5) 角保志、富田文明、“ステレオビジョンによる3次元物体の認識”、電子情報通信学会論文誌 (D-II) vol.J80-D-II no.5