仮想現実を用いた作業情報提示システムの開発

髙橋　裕之，鈴木　慎一

Development of Presentation System of Operating Information using Virtual Reality

Hiroyuki TAKAHASHI, Shinich SUZUKI

抄　録

遠隔制御作業において，作業状態や周辺環境を視覚情報として作業者に提示することにより，操作性が向上し，作業の効率化が図られる。様々な作業において遠隔制御が実現できれば，作業者の労働環境の改善および軽作業化による負荷の低減などに寄与することができる。本報では，三次元画像計測を用いて作業対象物の計測を行い，その結果を基に仮想現実（VR）環境を再構成し，作業情報として提示するシステムの開発を行い，遠隔制御マニピュレータによるハンドリング作業システムへ応用した。

キーワード：遠隔制御，仮想現実，三次元画像計測，マニピュレータ逆運動解析

Abstract

It is effective way to present the operating information to operator for improvement of the handling work at a remote control task. This paper describes the development of the presentation system, that reconstracts a Virtual Reality Environment from the situation of the task by 3D Image measurement, and application of this system to a remote controled manipulator.

KEY-WORDS : Remote Control, Virtual Reality, 3D Image Measurement, Inverse Kinematics of Manipulator

1．はじめに

地震や火山噴火などの災害復旧作業，宇宙空間や原子炉内など人が入ることのできない極限環境での作業，畑や草地などでの肥料散布作業や融雪剤散布作業などの劣悪環境での作業など，様々な分野において作業者の危険回避や劣悪環境の改善，軽作業化のための手段として遠隔制御に関する研究が行われている。

中小製造業などのものづくり現場では，多品種少量生産工程や対象が複雑な形状であることが多く，熟練作業者の手作業に依存することが多い。これらの現場では，今後，熟練者不足などから品質の維持管理や生産性の低下による企業競争力の低下が懸念される。しかし，これらの作業に対応可能な自動化装置は，コストや技術的な面において課題が多い。このような状況では，人間の高度な判断能力を最大限活用し，作業者の環境改善，軽作業化を実現可能とする遠隔制御による半自動化装置導入のメリットが大きい。

一方，近年，仮想現実（VR）技術が様々な分野で応用されてきており，製造業などでは三次元CADデータや数値シミュレーション結果などを基にVRを構築し，試作せずに製品性能の検証を行ったり，工程管理に用いられたりと，製品の設計や生産性の向上に利用されている。

事業名：経常試験
課題名：３次元画像計測による作業情報提示システムの開発

そこで，作業状態や周辺環境を認識して，作業者に視覚情報として提示し，作業者はその視覚情報に基づいて作業を進めることで，遠隔制御作業における操作性の向上が図られ，作業の効率化や作業者の労働環境改善，労働負荷の低減などに寄与できると考える。本報では，三次元画像計測により作業対象物の位置を計測し，その結果を基にVR環境を再構成して作業情報として提示することができる作業情報提示システムの開発を行い，遠隔制御マニピュレータによるハンドリング作業へ応用した。

2．仮想現実（VR）を用いた作業情報提示システムによる遠隔制御マニピュレータの開発

2.1　作業情報提示システムの概要

本システムでは，遠隔制御マニピュレータシステムの開発を行うため，以下に示す3つの要素システムを開発し，それぞれの要素システムをイーサネットにより接続し，情報通信を行うことで統合システムとした。

1）ステレオ視を用いた三次元画像計測システム
2）VR環境の再構成および提示のためのVR提示システム
3）5自由度のマニピュレータ制御のためのマニピュレータ制御システム

統合システムの概念図を図1に示す。

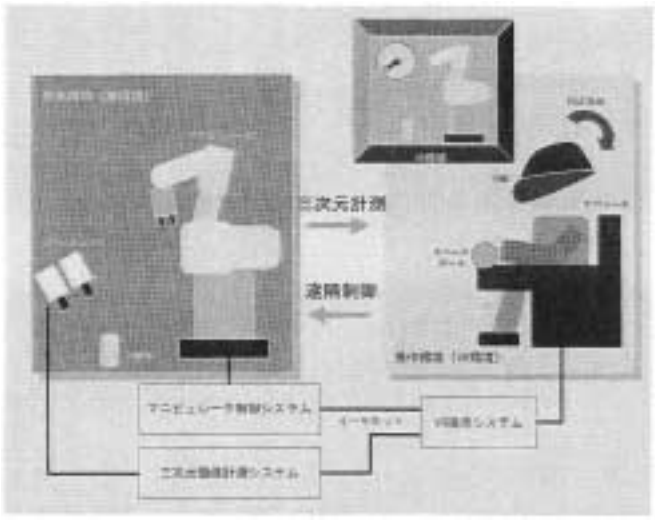


図1　システム概念図

2.2　ステレオ視による三次元画像計測システム

2.2.1　三次元画像計測手法

三次元計測では，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，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，システム構成がシンプルなため，重要な手法の一つと考えられる[1)]。

ステレオ視による距離計測では，複数のカメラで撮像した画像の同一観測点から距離情報を求めるため，それぞれの画像中から同一観測点を探索（対応点探索）する処理の信頼性が距離精度に影響を及ぼす。左右に配置したカメラから得られた片側（たとえば左）の画像で観測された点の空間中の位置は，その視線上に存在する。その視線は，別（右）の画像上ではある直線になる。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[2)]。

2台のカメラによるステレオ視では，ワールド座標上の点$M(X, Y, Z)$とその点の画像上の座標(u, v)は，それぞれのカメラの透視投影行列を用いて直接表すことができる。このことは，透視投影行列が分かれば，画像上で対応する点の位置座標の組からワールド座標を求めることができる。透視投影行列は，それぞれのカメラの焦点距離，画素サイズや画像中心などの内部パラメータおよびワールド座標系におけるカメラの位置，姿勢によって与えられるものである。これは，それぞれのカメラ座標$\boldsymbol{m}_1(u_1, v_1, 1)$, $\boldsymbol{m}_2(u_2, v_2, 1)$の間に$3 \times 3$の基礎行列$\boldsymbol{F}$によって，次式で表される。

$$\boldsymbol{m}_1^T \boldsymbol{F} \boldsymbol{m}_2 = 0 \tag{1}$$

この方程式を基礎方程式と呼ぶ。基礎方程式は，2つのカメラの画像におけるすべての対応点の間で成り立つ。したがって，内部パラメータなどが分からなくても，画像間で最低8個の対応点の組が与えられれば，行列$\boldsymbol{F}$を求めることができる。ステレオカメラにおけるカメラキャリブレーションは，行列$\boldsymbol{F}$を求める処理を行う。

片方の画像上の座標(u_1, v_1)が与えられたとき，この座標によって

$$\boldsymbol{m}_1^T \boldsymbol{F} = (a_1, b_1, c_1) \tag{2}$$

となるとすると，式(1)は，次式のようになる。

$$a_1 u_2 + b_1 v_2 + c_1 = 0 \tag{3}$$

この式(3)は，もう一方の画像上における画像座標(u_2, v_2)についての直線を表す。すなわち，ひとつの画像上の点(u_1, v_1)に対応する点が，もう1枚の画像上ではこの直線上にあることを表す。この直線がエピポーラ線となる。エピポーラ線は，ステレオ画像間で対応点探索処理に用いることができる[3)4)]。

カメラキャリブレーションを精度よく行うためには，行列$\boldsymbol{F}$を求めるための対応点の座標精度が重要である。そこで，本報では，座標の検出精度を上げることを目的として，立方体を複数回撮像して，その頂点座標を計測することにより対応点の組を8個求め，基礎行列$\boldsymbol{F}$を算出した。

2.2.2 対応点探索

左右の画像上で対応する点を求めることができると，容易に距離を算出できる。しかし，画像のあらゆる部分において，正確に対応付けをすることは容易ではなく，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な技術要素となる。

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。ここでは，対象物が直線で囲まれているという前提条件を付加して，エッジ情報から直線を抽出し，線の分布情報を基に対応付けした線とエピポーラ線との交点を対応点として算出した。

左右それぞれの画像に対して，2値化処理後，微分処理を行い，エッジを検出した。微分画像からハフ変換処理により直線の抽出を行った。左右画像の直線の分布状態から左右画像間の対応直線を決定して，エピポーラ拘束を満たす線との交点を対応点として抽出し，三次元座標を算出した。

2.2.3 三次元画像計測システムの構築

三次元画像計測システムは，作業現場などへの設置を考慮して，PICMG規格のボードコンピュータシステム（CPU：MMXPentium233MHz，メモリ64MB搭載）により構成した。処理結果例を図2に示す。図2では，左ウィンドウに原画像（640×480画素）を表示，右ウィンドウの上部に左右画像に対する処理画像，下側左に対応点探索結果，下側右に三次元計測結果を表示している。処理結果から，左右画像の対応点が検出されており，対応点から三次元座標が求められることを確認した。

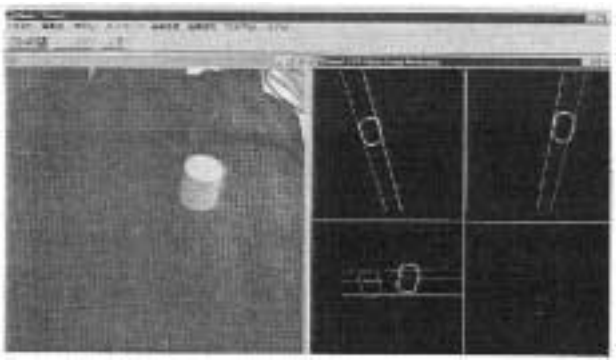


図2　三次元画像計測システム処理結果例

2.3 VR提示システム

2.3.1 VR提示システム構成

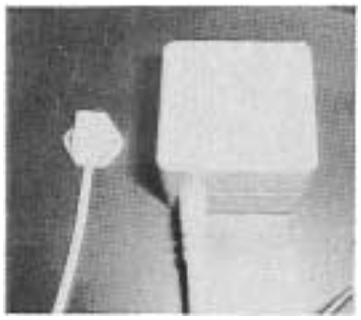
VR提示システムは，画像提示装置（図3-a，Mediamask MW-601；オリンパス光学工業製，以下HMD），頭部位置計測装置（図3-b，3SPACE FASTRAK;ポヒマス製，以下FASTRAK），三次元入力デバイス（図3-c，SPACEBALL 2003B；Spacetec IMC製，以下スペースボール），PC（TD-325：インターグラフ製）などから構成される。PCでは，VR構築ツール（Sense8製：World Tool Kit，以下WTK）を用いて，マニピュレータおよび対象物座標を再構成した。さらに，作業者の頭部の運動を検出するため，三次元位置姿勢計測装置（FASTRAK）を用いて，視点の移動によるビューの変更を行った。

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できる。また，FASTRAK内部で座標変換などのデータ加工を行うこともできる。

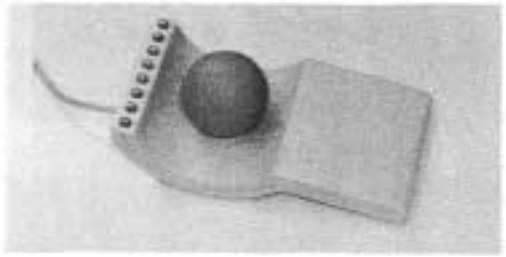
計測データの読み出しおよびFASTRAKに対する制御は，RS-232Cシリアル回線を経由して行った。

WTKでは，VR環境をステレオ画像として生成可能である。左右のそれぞれの画面をダウンコンバータを介してHMDに投影することで，奥行き感のあるVR画面が提示できる。

a）画像掲示装置（HMD）



b）頭部位置計測装置（FASTRAK）



c）三次元入力デバイス（スペースボール）

図3　HMD，頭部位置計測装置および入力デバイス

2.3.2 マニピュレータの逆運動学解析

VR環境でマニピュレータを制御する場合，アーム先端の動作に指令を与えることが，直感的であり，操作性が向上する。

マニピュレータの関節角が与えられたときにマニピュレータのアーム先端の位置と姿勢を誘導する手法が順運動学，また，アーム先端の位置と姿勢が与えられたときに関節角を求める手法がマニピュレータの逆運動学解析である。

VR環境のマニピュレータアームの先端位置，姿勢を直接操作するためには，逆運動学を解き，関節指令角を求め，そ

の角度と現時点のマニピュレータ関節角度との偏差値分関節角を回転させ表示する必要がある[5)]。

本システムでは，マニピュレータにムーブマスタ（三菱電機製：RV-M2）を用いた。ムーブマスタは，開リンク連鎖機構の5自由度のマニピュレータであるので，そのベクトル図を図4のように表記できる。

図4の手首の3自由度が1点で交わり球対偶機構からなる5自由度のマニピュレータのアーム先端を示すベクトル方程式は，次式で表せる。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{P_r} &= E^{k\theta_1}(l_1+l_1'+E^{j\theta_2}(l_2+E^{j\theta_3}(l_3+E^{j\theta_4}(l_4+E^{j\theta_5}(l_5))))) \\ &= E^{k\theta_1}(l_1+l_1')+E^{k\theta_1}E^{j\theta_2}(l_2)+E^{k\theta_1}E^{j(\theta_2+\theta_3)}(l_3) \\ &\quad +E^{k\theta_1}E^{j(\theta_2+\theta_3+\theta_4)}(l_4)+E^{k\theta_1}E^{j(\theta_2+\theta_3+\theta_4)}E^{i\theta_5}(l_5) \\ &= \boldsymbol{l}_1+\boldsymbol{l}_2+\boldsymbol{l}_3+\boldsymbol{l}_4+\boldsymbol{l}_5 \qquad (4)\end{aligned}$$

ただし，

$$\boldsymbol{l}_1=\begin{pmatrix}0\\0\\400\end{pmatrix},\boldsymbol{l}_1'=\begin{pmatrix}120\\0\\0\end{pmatrix},\boldsymbol{l}_2=\begin{pmatrix}0\\0\\250\end{pmatrix},\boldsymbol{l}_3=\begin{pmatrix}0\\0\\200\end{pmatrix},\boldsymbol{l}_4=\begin{pmatrix}65\\0\\0\end{pmatrix},\boldsymbol{l}_5=\begin{pmatrix}100\\0\\0\end{pmatrix}$$

式(4)のベクトル方程式から逆運動学解を求めると，マニピュレータの先端位置 $\boldsymbol{P_r}=(P_x,P_y,P_z,\phi_x,\phi_y,\phi_z)$ であるとき，それぞれの関節角は次式で求められる。

$$\left.\begin{aligned}\theta_1 &= \phi \ \text{ or } \ \pi+\phi \\ \theta_2 &= atan2(MA-NB,NA+MB) \\ \theta_3 &= atan2(S_3,C_3) \\ \theta_4 &= atan2(-a_z^{\sharp},a_x^{\sharp}) \ \ or \ \ atan2(-a_z^{\sharp},a_x^{\sharp})+\pi \\ \theta_5 &= atan2(-b_y^{\sharp},S_4b_x^{\sharp}+C_4b_z^{\sharp})\end{aligned}\right\} (5)$$

ただし，

$\phi\equiv atan2(P_{4y},P_{4x})$

$A\equiv\pm\sqrt{(P_{4x}-C_1l_1')^2+(P_{4y}-S_1l_1')^2}$

$B\equiv P_{4z}-l_1$

$M\equiv l_2+l_3C_3$

$N\equiv l_3S_3$

$P_{4x}=P_x-(l_4+l_5)a_x$

$P_{4y}=P_y-(l_4+l_5)a_y$

$P_{4z}=P_z-(l_4+l_5)a_z$

$a_x=cos(\phi_z)cos(\phi_y)$

$a_y=sin(\phi_z)cos(\phi_y)$

$a_z=sin(\phi_y)$

$b_x=cos(\phi_z)sin(\phi_y)cos(\phi_x)+sin(\phi_z)sin(\phi_x)$

$b_y=sin(\phi_z)sin(\phi_y)cos(\phi_x)-cos(\phi_z)sin(\phi_x)$

$b_z=cos(\phi_y)cos(\phi_x)$

$a_x^{\sharp}=C_{23}(C_1a_x+S_1a_y)-S_{23}a_z$

$a_y^{\sharp}=-S_1a_x+C_1a_y$

$a_z^{\sharp}=S_{23}(C_1a_x+S_1a_y)+C_{23}a_z$

$b_x^{\sharp}=C_{23}(C_1b_x+S_1b_y)-S_{23}b_z$

$b_y^{\sharp}=-S_1b_x+C_1b_y$

$b_z^{\sharp}=S_{23}(C_1b_x+S_1b_y)+C_{23}b_z$

$C_3=cos\theta_3=\dfrac{1}{2l_2l_3'}\{(P_{4x}-C_1l_1')^2+(P_{4y}-S_1l_1')^2+(P_{4z}-l_1)-l_2^2-l_3^2\}$

$cos\theta_i\equiv C_i\ ,\ cos(\theta_i+\theta_j)\equiv C_{ij}$

$sin\theta_i\equiv S_i\ ,\ sin(\theta_i+\theta_j)\equiv S_{ij}$

$atan2(\mathrm{A},\mathrm{B})\equiv tan^{-1}\left(\dfrac{\mathrm{A}}{\mathrm{B}}\right)$

式(5)により $\theta_1\sim\theta_5$ が求まるが，θ_1,θ_4 の解はそれぞれ2通り求まるため本マニピュレータでは合計4通りの解が求まる。これらの解のうちから，どの解を選択するかはアームの制御時に正しい設定をしなければならない。本システムでは，動作前の関節角との差が小さい値を採用した。

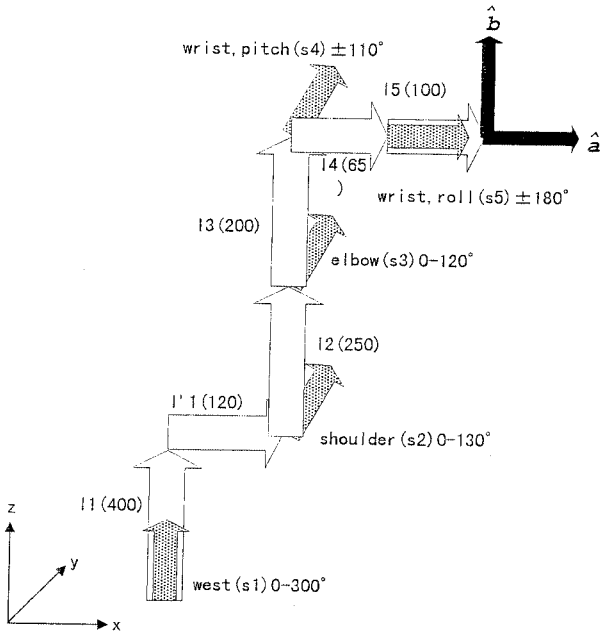


図4　マニピュレータベクトル図

2.3.3　VR提示システムの構築

VR構築ツール（WTK)を用いてVR環境を作成した。予め，3Dモデリングツールを用いて作成したマニピュレータの部品を読み込むことでマニピュレータを生成し，三次元画像計測システムからの三次元データを受信して，座標をVR環境内にプロットした。入力デバイスには，スペースボールを用いて，操作値から移動ベクトルを生成してマニピュレータのアーム先端位置を制御するように，各関節軸の回転角度を算出し，VR環境内のマニピュレータを操作した。スペースボールのスイッチ入力により，そのときのアーム先端座標情報をマニピュレータ制御システムに転送した。

2.4　マニピュレータ制御システム

マニピュレータは，ホストとなるPCとRS-232Cシリアル通信により接続し，命令コマンドを受信することで制御を行う。マニピュレータ制御システムでは，VR提示システムより送信されたメッセージを受け，マニピュレータへの命令としてシリアル回線に送信することで制御した。

マニピュレータ制御システムでは，VR提示システムで操作した座標位置へ移動を行う。このため，VR提示システムで指示したVR環境での座標位置と実環境でマニピュレータが移動した座標位置は，演算性能に依存するが，誤差の累積がなく，常に同一座標となる。

2.5 統合システム

要素システム間の情報通信には，厳密なリアルタイム性は必要ないことから，それぞれの要素システムをイーサネットで接続して，統合システムとした。これにより，作業環境と操作環境が離れている場合に，無線LANシステムや広域通信網などを利用することが可能となる。

作業者は，VR提示システムからの指令により，三次元画像計測システム，マニピュレータ制御システムを制御する。動作フローとしては，VR提示システムから三次元画像計測システムに対して，計測開始コマンドを送信し，処理終了後，計測データの送信要求を出す。三次元画像計測システムでは，送信要求コマンドに対して，計測した三次元座標値を x，y，z 座標の順に送信する。VR提示システムにおいて，プロットする座標数が多くなると動作が不安定になる。本システムでは，最大座標数を30に設定し，それ以上座標数が在る場合には受信しない。受け取った座標値から，VR環境を再構成した。作業者がVR環境のマニピュレータを制御して，スペースボールに設置されたスイッチを押すことで，マニピュレータ制御システムへ動作指令を送信し，現実環境のマニピュレータを動作させる。

3．評価試験および考察

最初に三次元画像計測評価試験を行った。対象物としては，計測点がわかりやすいことから立方体を用いて，その頂点座標の計測を行った。計測結果のX－Y座標を図5に示す。誤差の平均値，最大値はカメラに対して奥行き方向で6.5㎜，11.2㎜，左右方向で2.9㎜，6.7㎜であった。誤差の要因としては，キャリブレーションの精度やレンズの歪みの影響と考えられ，画像中心部に対して周辺位置に対象物がある場合や，対象物が遠方にある場合などに，誤差が大きくなる傾向が見られた。VR環境での対象物の位置は，画像処理システムで計測した結果を基にしており，ハンドリング位置が厳密でなくてもハンドリング可能な単純形状物などは本処理精度で十分であるが，ハンドリング位置精度が要求されるような複雑形状物などは，より高精度な三次元画像計測が求められる。キャリブレーションデータの高精度化，エピポーラ線が消失点で一点に交わるなどの条件設定を加味することなどにより，三次元画像計測の高精度化が図られる。

続いて，統合システムによるハンドリングの作業性，操作性などに関する動作試験を行った。対象物にハンドリングが

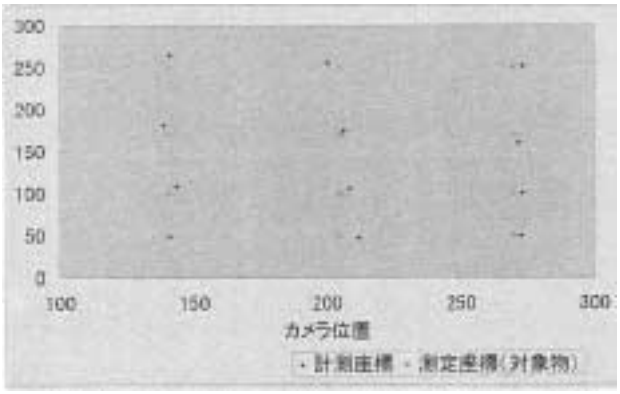
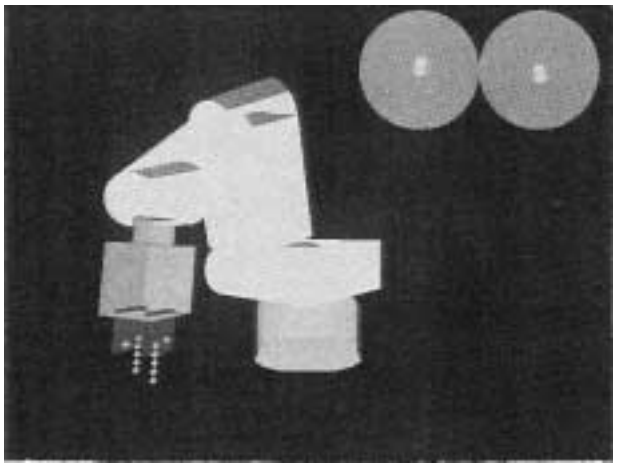


図5　三次元画像計測処理結果



a）ＶＲ提示システム表示例

b）ステレオカメラおよびマニピュレータ

図6　作業情報提示システム動作試験

容易な円柱体を用いた。図6に示すように対象物を計測した結果を基にVR環境を再構成し，VR環境内のマニピュレータを制御してハンドリングが可能であることが確認できた。視点が変更でき，通常では見ることができない場所からでも，操作の確認を行うことができた。しかし，VR提示システムでのマニピュレータ制御や，視点の移動などの複雑な操作に修得時間を要した。また，VR環境がマニピュレータと対象物だけで構成されているため，距離感が把握しづらい印象を受けた。周辺に操作のための目印となるような表示，または，壁や床，机などを表示して，実際の作業環境を詳細に再現することで距離感がつかみやすくなると考えられる。

4．ま と め

作業者の環境改善，軽作業化を目的として，人間の高度な判断能力を最大限活用した遠隔制御システムの取り組みを行った。

対象物の計測を行うための三次元画像計測システム，作業情報を提示するためのVR提示システム，マニピュレータを制御するためのマニピュレータ制御システムの要素システム開発を行い，それらをイーサネットにより接続し，統合システムとして遠隔制御マニピュレータへ応用した。

本システムにより，対象物を三次元計測し，その結果からVR環境を再構成し，作業者はVR環境内でのマニピュレータを制御することで実環境でのマニピュレータによるハンドリング作業を実現できた。また，本システムでは，実作業環境をVR環境に再構成し，VR環境内で操作を行うため，通信による時間遅れなどが問題にならず，様々な通信媒体が利用可能となる。

今後は，カメラキャリブレーションの見直しなどにより三次元計測の精度向上を図る。また，VR環境で臨場感を付加するなどにより操作性の向上を目指し，様々な作業における遠隔制御の応用を進めていく予定である。

引用文献

1）髙橋　裕之・堀　武司・澤山　一博：“遠隔操作のための3次元視覚システムに関する研究”，北海道立工業試験場報告 №297, pp.125－130,（1998）

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, pp.25－33,（1998）

3）澤山　一博・高橋　裕之他：“複雑形状物のハンドリング作業支援システムの開発”，北海道立工業試験場報告 №298, pp.151－161,（1999）

4）出口光一郎：“ステレオの仕掛けを解き明かす”，情報処理学会誌，vol 137, №7, pp.662－670,（1996）

5）広瀬茂雄，“ロボット工学－機械システムのベクトル解析－（改訂版）”，東京裳華房，244PP.,（1998）