人工現実感を用いたテレオペレーション環境 - 2 平面法に基づく位置計測の応用 -

正 員 吉 川 榮 和 (京都大学)

正 員 手 塚 哲 央 (京都大学)

非会員 井 上 隆 司 (京都大学)

Teleoperation Environment based on Virtual Reality - Application of Two-Planes Method for Position Measurement -

Yoshikawa Hidekazu, Member, Tezuka Tetsuo, Member, Inoue Ryuji, Non-member (Kyoto University)

A teleoperation system based on virtual environment (VE) is an emergent technology for operating a robot in remote or hazardous environment. We have developed a VE-based teleoperation system for robot-arm manipulation in a simplified real world. The VE for manipulating the robot arm is constructed by measuring the 3D positions of the objects around the robot arm by motion-stereo method. The 3D position is estimated by using two-(calibration) planes method based on images captured by the CCD camera on the robot-arm, since the two-planes method does not need pin-hole-model assumption to the camera system. The precision of this 3D-measurement is evaluated through experiments and then derived is the theoretical model to the error in the measurement. This measurement system is applied to VE-based teleoperation experiment for Peg-in-hole practice by the robot arm.

キーワード：テレオペレーション，人工現実感，2平面法，モーションステレオ，誤差分析。

1. 序 論

宇宙空間や原子力発電所などの人間の立ち入りが困難な場所における作業のためにロボットの遠隔操作に関する研究が活発に行われるようになってきている⁽¹⁾。従来、その多くはテレビカメラで撮影した現場の映像をオペレータが見てロボットを操作するシステムであったが、通産省の先導研究「アールキューブ」⁽²⁾に見られるように、ロボットの周囲の環境を仮想空間として構築する研究も進められつつある。この環境を用いることにより、ロボットの遠隔操作における問題となっている、ロボットの反応の時間遅れや視点移動の制約がもたらすインタフェース上の問題を解消することも期待できる。

このようなテレオペレーション環境の開発を考えた場合、所与の作業をロボットに行わせるためには、その作業の正しい遂行上、必要な精度を持った仮想環境の構築がまず問題となる。

複雑な実環境を仮想空間内に忠実に構築するための技術開発も進められているが⁽³⁾、仮想空間内での作業という点からみて十分な精度を持った仮想空間を構築することは未だ非常に困難な問題である。しかしながらロボットの作業

環境が、原子力プラント内部のように機械配置の詳細がよく分かっている場合には、複雑な物体認識の問題をある程度回避することができると期待される。そしてその場合に重要となるのは、3次元空間内における特徴点の位置計測精度である。

現在、3次元環境内における対象物の位置計測技術としてはレーザレンジファインダが比較的精度のよい技術として利用されることが多いが、対象物に対してビーム状あるいはスリット状のレーザ光を照射する必要があり、装置も複雑なものとなる傾向がある⁽⁴⁾。そこで、本研究ではロボットアームに CCD カメラを取り付け、異なるカメラの位置から得られる複数枚の画像より対象物の位置を推定するモーションステレオ法を取り上げ、仮想空間構築への適用を検討することとした。

一般に、ステレオ法は、平行に設置された 2 台のカメラを用いるパノプティクスステレオ法と 1 台のカメラを動かしながら対象物を異なった位置から撮像するモーションステレオ法とに大別される。いずれの場合にも、カメラ画像内の 2 次元座標と対象物の存在する空間の 3 次元座標との対応関係を求めるカメラキャリブレーションが重要となる。従来、ピンホールカメラモデルに基づいてカメラパラメー

図1 システム構成とデータの流れ

Fig. 1. System configuration and information flow.

タを求める手法がよく用いられてきたが、そのままではレンズの非線型歪みを取り扱えないという問題があった。それに対して、2平面法 (Two-calibration-planes method) によるカメラキャリブレーションの方法が提案されている⁽⁹⁾。それは、キャリブレーションに要する時間は多くなるものの、ピンホールカメラモデルの仮定を必要とせず、レンズの非線型歪みも同時に補正することができる点において、優れた方法と考えられる。しかし、2平面法に基づいたモーションステレオ法について、その位置推定精度を詳細に検討した例は見られない。

そこで、本研究では、まず、2平面法に基づくモーションステレオ法について、その3次元位置推定の精度を実験とモデルとの双方から分析し、本研究で用いた実験システムにおいて得られる仮想環境の精度を測定するとともに、仮想空間構築に必要な精度を確保するための実験環境の事前評価が可能であることを示す。そして、その位置計測手法を用いて、Peg-in-Hole というタスクをロボットアームに実行させるためのテレオペレーション環境を実際に構築し、仮想環境を介して確実にロボットアームにタスクを実行させられることを実験により確認する。更にこのテレオペレーション環境をヒューマンインタフェースの観点から評価し、この手法の将来における応用可能性について検討する。

本論文の構成は以下のとおりである。2章では、本研究で使用了実験環境の構成を述べ、次いで3章では、2平面法に基づく3次元位置計測手法の原理と本研究における具体的な計測方法について述べる。そして、4章では、その3次元位置計測の精度について理論と実験の両面から検討した結果について述べる。5章では、その位置推定法により構築された仮想空間における、ロボットアームにPeg-in-Holeのタスクを実行させるテレオペレーション実験の結果につ

いて述べる。そして6章では本システムをヒューマンインタフェースの観点から評価するとともに、その応用可能性について検討する。

2. 実験システム環境

本研究での実験システムの構成は図1に示すように、ロボットアームシステム PanaRobo KS-V20(松下電器), Polhemus 3SPACE FASTRAK(A Kaiser Aero-space & Electronics 社), パーソナルコンピュータ PC9801BA3 (日本電気), グラフィックワークステーション Indigo2 (Silicon-Graphics 社), CrystalEyes(Stereo-Graphics 社), 画像処理ボードひまわり (ライブラリー), CCD カメラモジュール XC-73(ソニー), カメラレンズ PHF3.5 1.6(キャノン) からなる。

本研究で使用するロボットアームシステムは、垂直多関節型のロボットアーム本体 (図2, 図3) と、パーソナルコンピュータ (PC) からのコマンドを解釈してロボットアームの動きを制御するコントローラから成り立っている。図3における J1 から J5 は各関節の回転軸を表す。ロボットアームの各関節の回転は、PC からコントローラにロボットハンドの先端の座標及び向きを指定するコマンドの送信により、そして先端に取り付けられたロボットハンドの開閉は対応するコマンドの送信により、それぞれ制御することができる。実現可能なハンドの位置と向きに対してロボットアームの姿勢は最大4通り存在するが、本研究では、操作の簡単化のためにその中の一つの姿勢を自動的に選択することとした。ロボットの動作が完了した時点でコントローラはPCに'READY'信号を送信し、次の命令の送信を待つ。

ロボットアームの先端部分に取り付けられた CCD カメラからの画像は、一旦 NTSC 信号に変換された後、同じ PC 内の画像処理ボードに送られ、そこで 512 × 512 の画素毎のデジタル信号に変換され、必要に応じてメモリに格納される。一方、カメラレンズとしては、広い視野角を確保する目的で焦点距離 3.5mm の広角レンズを用いているため、歪曲収差を無視することができない。

なお、仮想空間内の物体の構築には三次元図形用 CAD である AutoCAD を用い、その物体を仮想空間内に描画するためのソフトウェアとして C 言語ライブラリ WorldToolKit を用いた。

Peg-in-Hole の作業対象となるペグとホルルの仕様を図4に示す。ペグとホルルは、その認識を容易にするために全体が背景色と同じ黒色に着色され、その前面に白色円が描かれている。なお、図2に示したように、以下では、作業環境に固定された座標系をワールド座標系、ロボットハンドと共に移動する座標系をロボットハンド座標系と呼ぶ。

3. カメラを用いた3次元位置推定の原理と方法

本研究では第1章で述べたように、3次元位置推定手法として2平面法に基づいた方法を用いる。図5にその測定原理を示す。

図2 PanaRobo KS-V20 の全体写真
Fig. 2. The figure of PanaRobo KS-V20.

図3 PanaRobo KS-V20 の動作機構
Fig. 3. Structure of PanaRobo KS-V20.

まず、カメラから異なった距離にある2枚の平面A及びB上の点の座標(ロボットハンド座標系)とカメラ画像上の点の座標との対応関係を、予め実験で求めておく。以下ではこの2枚の平面を「キャリブレーション面」と呼ぶ。なお、キャリブレーション面は、特にモーションステレオの場合のようにカメラを移動させてキャリブレーションを行う場合には、必ずしも平面である必要はなく、カメラの運動によって定められる適当な形状の曲面であってもよい。次に、図5に示すように3次元空間内の1点Pに関する2枚の画像1, 2を取得したとする。ここで、「1枚のカメラ画像内のある1点の座標に対応する3次元空間における点の集合は直線となる」と仮定すると、2枚の画像内の点Pの像

図4 ペグとホールの仕様
Fig. 4. Specification of pegs and holes.

図5 2平面法による点Pの3次元位置推定
Fig. 5. 3-D position estimation based on two-planes method.

P_1 及び P_2 から、点Pを通る直線の方程式が平面A及びB上の対応する点を結ぶ直線としてそれぞれ一本ずつ得られる。そこでこの2本の直線の交点を求めれば、点Pの3次元座標を推定することができる。なお、実際には種々の測定誤差のためこの交点は存在するとは限らないことから、

2本以上の直線からの距離の2乗の和が最小となる点をPの推定点として採用する⁽⁷⁾。この方法によると、ピンホールモデルの仮定に基づいたカメラパラメータを推定する必要がなく、またレンズの歪曲収差などの非線形ひずみの影響も容易に補正できる点が特徴として挙げられる。

さて、以上に述べた3次元位置推定に必要な作業は、カメラ画像内の任意の1点に対応する二枚のキャリブレーション面上の点の3次元座標(ロボットハンド座標系)を求めることである。以下ではこの作業をカメラキャリブレーションと呼ぶ。

(3・1) カメラキャリブレーション 本節では、カメラキャリブレーションの方法について述べる。

まずロボットアームをあらかじめ決められた位置に移動させる。基準点をロボットハンドの先端とし、直径10mmの1個の白色円を描いた黒い紙を、その円の中心が基準点に触れるよう設置する。次にハンド(即ちカメラ)を水平に保ったまま、白色円から一定奥行き方向離れた平面(あるいは曲面)上を格子状に動かしては止めて、白色円をカメラで撮像する。ここでハンド部分の姿勢については水平となることのみを要求しているため、この操作におけるロボットアームの姿勢の実現可能性については問題は生じない。白色円は複数の画素により構成される画像としてとらえられるので、画像内におけるその重心の座標(U, V)と、実際の白色円の重心の基準点からの相対座標(ロボットハンド座標系における位置)(X, Y, Z)を求め、記録する。ここで、図2に示したように、カメラから見てX軸が右方向、Y軸が奥行き方向、そしてZ軸が上方向を指すものとする。この作業を、白色円がロボットに近い場合(ロボットハンドの先端からの最短奥行き距離10mm)と、遠い場合(最短奥行き距離160mm)の2通りについて行う。

この計測作業は、CCDカメラ画像(512×512画素)のうち、おおよそU座標: 38~469, V座標: 122~420の領域で行い、白色円が近い場合は、CCDカメラ画像におけるU方向に26点、V方向に27点の計702点、白色円が遠い場合についてはU方向に23点、V方向に20点の計460点について計測した。この様子を図6に示す。

この結果を用いて画像上の任意の点の座標に対する遠近2曲面上の点の座標を求めるためには、測定結果に対して補間操作を施す必要がある。補間には2次あるいは3次多項式を用いる方法、スプライン補間を用いる方法が提案されているが⁽⁵⁾⁽⁶⁾、ここではキャリブレーションにおいて、それらの報告よりもかなり多くの点についてデータを取っているため、線形補間で十分な精度が得られると判断した。

以上に述べた遠近2つの白色円についてのキャリブレーション結果から、CCDカメラ画像における $38 \leq U$ 座標 ≤ 469 , $122 \leq V$ 座標 ≤ 420 の領域内の任意の点について、実空間内の対応する2点の座標、即ち、対応する直線の方程式を決定できる。

(3・2) 3次元位置の推定 n 枚の画像より得られる n 本の直線からの距離の2乗和が最小となる点は以下のようにし

図6 遠近2箇所に設置された白色円に対するキャリブレーションの様子

Fig.6. Calibration for the reference circle at two different distances.

て求められる。ワールド座標系において、点 (p_i, q_i, r_i) ($i = 1, \dots, n$)を通り、方向余弦が (l_i, m_i, n_i) ($i = 1, \dots, n$)で表される n 本の視線を考える。方向余弦は、2枚のキャリブレーション面上の対応する点を結ぶ直線方向ベクトルに、点 (p_i, q_i, r_i) は、2枚のキャリブレーション面上の点のうちの一方の座標に対応する。ただし、前節で得られたキャリブレーション面上の座標を、ロボットアームの姿勢に応じてロボットハンド座標系からワールド座標系へ変換する必要がある。このとき、点 (x, y, z) からの各視線への距離の2乗和は次式で表される。

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^n [(x - p_i)^2 + (y - q_i)^2 + (z - r_i)^2 - \{l_i(x - p_i) + m_i(y - q_i) + n_i(z - r_i)\}^2] \quad (1)$$

$F(x, y, z)$ は凸関数であるので、その極値は最小値となる。そこで上式の (x, y, z) についての偏微分を求めると、

$$\frac{\partial F}{\partial x} = 2 \sum_{i=1}^n \{(1 - l_i^2)(x - p_i) - l_i m_i(y - q_i) - n_i l_i(z - r_i)\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = 2 \sum_{i=1}^n \{-l_i m_i(x - p_i) + (1 - m_i^2)(y - q_i) - m_i n_i(z - r_i)\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial F}{\partial z} = 2 \sum_{i=1}^n \{-n_i l_i(x - p_i) - m_i n_i(y - q_i) + (1 - n_i^2)(z - r_i)\} \quad (4)$$

となり、3次元連立1次方程式 $\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial F}{\partial z} = 0$ を満たす (x, y, z) が、求める点の座標である。

以上の手順により、3次元空間内の点Pに対して、ロボットハンドを動かして得られる複数枚の CCD カメラ画像を用いることにより、そのワールド座標系における位置が推定される。

4. 3次元位置推定の精度

対象物の3次元位置を測定する過程では、種々の要因による誤差の影響を受ける。本章では、2平面法による3次元位置推定の精度について、実験と理論の両面から検討した結果について述べる。

(4・1) カメラ位置と3次元位置推定誤差との関係の測定 3.2節で述べたように、対象物の3次元位置は複数の CCD カメラ画像から得られた直線（以下、これを視線と呼ぶ）群からの距離の二乗和が最小となる点として推定される。この時の複数の視線の間の角度が小さければ、推定誤差が大きくなると予想される。そしてこの視線間の角度は、カメラの対象物に対する相対位置で決まる。そこで様々な場所から対象物を撮像することにより、複数の視線の間の角度および、視線の数が推定誤差に及ぼす影響を調べた。

(4・1・1) 2本の視線ベクトルの角度と位置推定精度 ここでは2枚のカメラ画像から得られる2本の視線ベクトルの角度と3次元位置推定精度との関係について調べる。まず、直径10mmの白色円をロボットハンドの先端から奥行き方向55mmのところ置き、1枚のカメラ画像上で得られる白色円の重心座標のU座標の値と、もう1枚のカメラ画像上で得られる重心座標のU座標の値との差が約300画素となるようにロボットアームを水平に動かし、得られた2本の視線から白色円の3次元位置を推定する。試行を30回行った。同じようにして、白色円の重心U座標の差が約100画素、約20画素、約5画素となる場合についても30回づつ試行を行った。

結果を図7に示す。この図において、横軸は白色円の画像上の重心U座標の差、縦軸は白色円のワールド座標系における推定位置（単位はmm）の奥行き（y軸）方向の値の真値からの平均2乗誤差の平方根（Root of Mean Square Error：以下RMSEと略記する）である。なお、奥行き方向以外の誤差についてはその値が1mm以下であり測定困難であったため、図には示していない。以下では主として奥行き方向の誤差について検討する。

さて、図より白色円の重心U座標の差が大きくなるほど、つまり目標に対する2本の視線の角度が大きいくほど、推定精度が良くなる傾向が理解される。そして、目標に対する角度が十分大きければ（この実験環境では重心U座標の差が100画素以上であれば）、2枚の画像を用いた場合でも推定誤差は1mm以下となることが示された。これは、ロボットハンド先端と目標との奥行き方向の距離（55mm）に対

図7 2枚のカメラ画像での白色円重心U座標の差と3次元位置推定値（奥行き方向）のRMSE[mm]との関係

Fig. 7. Relationship between the difference of white circle positions and the precision of position estimation.

図8 画像枚数と3次元位置推定値のRMSE[mm]との関係

Fig. 8. Relationship between the number of pictures and the precision of position estimation.

する比として相対誤差を求めると、2%以下と評価される。

(4・1・2) カメラ画像数と推定精度 次にカメラ画像の数と推定精度の関係について調べた結果について述べる。前の実験と同様、直径10mmの白色円をロボットハンドの先端から奥行き方向55mmのところ置き、カメラ画像内で白色円の重心が一辺約5画素の正方形上を移動するようにロボットアームを動かして合計4枚の画像を撮り、画像枚数が2枚から4枚の各場合について、それぞれ30回の位置推定を行った。

結果を図8に示す。この図において、横軸は位置推定に用いた画像枚数、縦軸は推定位置（奥行き方向）のRMSEを表す。この結果より画像の数を2枚から3枚にした場合には推定精度がかなり改善されるが、4枚以上にしてもあ

まり改善が見られないことが分かる。これは試行ごとに加わる誤差の期待値が0となっていないことが一因として考えられる(例えば関節におけるバックラッシュが例として挙げられる)。ただし、画像枚数を3枚以上にした場合にはカメラの移動方法の自由度が増すため、最適な移動方法の決定については検討の余地が残されている。

(4・2) 3次元位置推定の際の誤差要因 4.1節に述べた3次元位置推定に内在する誤差要因として、次の3項目について定量的に評価した。

- (1) 画像処理における量子化誤差
- (2) CCDカメラ画像信号伝送時における雑音
- (3) ロボットアームの位置決め誤差

1はCCDカメラで目標を撮像した後、その画像を2値化して重心座標を求める際に生じる誤差である。

2は、CCDカメラ画像がカメラから画像処理ボードへ送られる際に混入する雑音である。CCDカメラで捕らえられた画像はNTSC信号に変換され、画像処理ボードに送られた後に再び各画素の輝度信号に変換される。この信号処理の際に雑音を加わると、画像処理ボードにおいて本来の画像とは異なった位置に画像が得られる可能性が生じる。

3は、ロボットアームに制御用データとして与えた姿勢と、実際にロボットアームのとった姿勢との差である。ある目標位置をロボットに与えてその位置まで動かしても、正確にその位置までロボットが動いているのかどうかは保証されない。ここでは特に繰り返し誤差について、実験により評価を行った。

以下、各誤差に関する測定結果について述べる。

(4・2・1) 量子化誤差 ペグやホールに描かれた白色円のCCD画像における重心座標について、画像処理により求めた値に生じる誤差の特性を、計算機シミュレーションにより調べた。

まずCCDカメラ画像上における白色円を、その中心座標からの距離がその半径より小さい画素の集合として定義する。そして、円の中心座標を、 $(U, V) = (255 + 0.1 * i, 255 + 0.1 * j)$, $(i, j = 0, 1, \dots, 9)$ で与えられる 10×10 の格子点上を移動させたときの白色円の重心座標の計算を、円の半径を3から13画素まで1刻みに変化させて行った。半径の変域については、本研究の実験環境におけるペグやホールに描かれた直径10mmの円のカメラ画像の半径より定めた。

図9に半径3～13画素の円の重心についての誤差の標準偏差と最大値の分布を示す。ただし、 U 方向誤差と V 方向誤差は同じ分布を持つ。この結果から、円の半径が大きくなるにつれ、誤差の標準偏差は減少傾向を示しており、その値は高々0.2画素程度であることが分かる。なお、この結果は対象物の画像内での大きさに依存し、カメラから対象物までの距離には直接には依存しない。

(4・2・2) 信号伝送における雑音 画像伝送がアナログ信号であるNTSC信号で行われているため、伝送途中に混入する雑音により画像が歪む可能性がある。この雑音によるCCDカメラ画像への影響を以下の方法により調べた。

図9 円の半径と重心座標の量子化誤差との関係

Fig. 9. Relationship between the quantum error and the radius of circle.

- ある定位置にロボットを固定し、カメラの前にある白色円を撮像して像の重心を求める。この作業を、ロボットを動かさずに何度も繰り返す。ここで白色円はロボットハンド座標系で $(0.0, 54.0, 50.0)$ (単位は mm) の位置に設置する。

この実験結果より、この雑音の影響による白色円の重心位置への影響は、 U, V 方向ともに最大0.05画素程度、標準偏差で0.01画素程度であることが分かった。即ち、本実験環境においては、前述の量子化誤差に比べてこの雑音の影響は非常に小さいと結論される。

(4・2・3) 位置決め誤差 これは、ロボットアームに与えた位置データと、実際にロボットアームが移動した位置との差である。この誤差の評価には、次に示す手法を用いた。

- ある定位置にロボットアームを動かして白色円を撮像し画像内の重心の座標を求める。次に違う場所にロボットアームを動かし、再び定位置までロボットアームを動かして白色円を撮像し重心の座標を求める。この作業を複数回繰り返し重心座標の分布を求める。

この方法によると、ロボットアームの位置決め誤差のバイアス成分を求めることはできない。しかし、一般的にこの誤差の平均値を精度よく求めることは非常に困難なので、ここでは上記のように平均値からの偏差のみ評価することとした。

まず予備実験として適当な大きさの空間内にランダムに位置を決め、そこにロボットアームを移動させてから定位置に移動させ、白色円をCCDカメラで撮像してその重心を求めた。速度を変えながら何度も試行を行ったところ、次のような傾向が見い出せた。

- 重心座標の分布は運動方向に依存するが、運動速度にはほとんど依存しない。

図10 上下及び左右から定位置に戻した後に得られた白色円の重心座標の分布

Fig.10. Distribution of the white circle position after moving from different direction.

そこで、水平方向及び垂直方向の移動方向と位置決め誤差との関係について、4.1.1節と同じ実験環境で調べた結果を図10に示す。この結果より、ロボットの関節の運動にはバックラッシュが存在し、そのカメラ画像への影響は高々 ± 0.3 画素程度であることが分かる。なお、この結果は、対象物までの距離に依存する。

また、以上の3種類の誤差要因に関する測定結果より、位置決め誤差、及び量子化誤差の影響が無視できないこと、そしてその中でも位置決め誤差の影響が強く現れている可能性があること、が分かる。

なおその他にも、キャリブレーションの誤差、線形補間に伴う誤差等が考えられるが、それらの詳細な検討は今後の課題とする。

これらのカメラ画像における点の座標の誤差は、2枚のキャリブレーション面上の点の座標の変動を通して、視線ベクトルの方程式に影響を及ぼし、最終的に3次元位置推

定結果に影響を及ぼす。次節では、この影響を数理モデルを用いて定量的に評価する。

〈4.3〉 CCD カメラ画像上の誤差の3次元位置推定への影響 ここではCCDカメラ画像における重心座標の誤差が、実際の3次元位置推定にどのように影響するか、またその影響の度合いがカメラ位置によってどのように変化するかにについて、数式モデルを用いて評価する。

3.2節で述べたように、複数の視線からの距離の二乗和が最小となる点 (x, y, z) は、式(2)~(4)の値が全て0となる (x, y, z) である。これを次のように表す。

$$Ax = \sum_{i=1}^n B_i u_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

但し

$$x = (x, y, z)^T, \quad u_i = (x_i, y_i, z_i)^T$$

$$A = 2 \begin{pmatrix} n - \sum_{j=1}^n l_j^2 & -\sum_{j=1}^n l_j m_j & -\sum_{j=1}^n n_j l_j \\ -\sum_{j=1}^n l_j m_j & n - \sum_{j=1}^n m_j^2 & -\sum_{j=1}^n m_j n_j \\ -\sum_{j=1}^n n_j l_j & -\sum_{j=1}^n m_j n_j & n - \sum_{j=1}^n n_j^2 \end{pmatrix}$$

$$B_i = 2 \begin{pmatrix} 1 - l_i^2 & -l_i m_i & -n_i l_i \\ -l_i m_i & 1 - m_i^2 & -m_i n_i \\ -n_i l_i & -m_i n_i & 1 - n_i^2 \end{pmatrix}$$

ここで、 x は推定点の座標、 u_i は i 番目の視線が通るキャリブレーション面上の点(2点の内の一方)の座標(共にワールド座標)である。また、上付き添字 T は行列の転置を表す。

まず、誤差の影響を受けた i 番目の視線の方向ベクトルを近似的に (l_i, m_i, n_i) で表すことができるとすれば、式(5)において誤差の影響を受けるのはベクトル x 及び u_i のみとなり、キャリブレーション面上における u_i の分布から x の推定誤差の分布を求めることができる。厳密に言えば、カメラに近い方の平面上において u_i の分布を考えれば、それは3次元位置推定誤差の下限を与えることになり、カメラから遠い方の平面上において u_i の分布を考えれば誤差の上限を与えることになる。これは2平面の間隔を短くすることにより、推定誤差分布の精度を高められることを意味している。

キャリブレーション面上の点 u_i^0 が Δu_i だけ変化した場合に推定値が x^0 から Δx だけ変化するとすれば、次式が成立する。

$$A(x^0 + \Delta x) = \sum_{i=1}^n B_i(u_i^0 + \Delta u_i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで $Ax^0 = \sum_{i=1}^n B_i u_i^0$ であるから、 Δu_i と Δx との間の関係は、

$$\Delta x = A^{-1} \sum_{i=1}^n B_i \Delta u_i \quad \dots\dots\dots (7)$$

即ち、対象物の3次元位置の推定値の誤差 Δx の共分散行列は次式で求められる。

$$\begin{aligned}
E[\Delta x \Delta x^T] &= E \left[A^{-1} \sum_{i=1}^n B_i \Delta u_i \left(\sum_{k=1}^n B_k \Delta u_k \right)^T (A^{-1})^T \right] \\
&= E \left[A^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (B_i \Delta u_i \Delta u_k^T B_k^T) (A^{-1})^T \right] \\
&= A^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (B_i E[\Delta u_i \Delta u_k^T] B_k^T) (A^{-1})^T \quad (8)
\end{aligned}$$

ここで、 $E[\Delta u_i \Delta u_k^T] = 0$ ($i \neq k$) と仮定すると、

$$E[\Delta x \Delta x^T] = A^{-1} \sum_{i=1}^n (B_i E[\Delta u_i \Delta u_i^T] B_i^T) (A^{-1})^T \quad (9)$$

となる。この仮定は、異なる CCD カメラ画像に加わる誤差は互いに独立なランダム雑音であると考えることを意味する。

さて、CCD カメラ画像における誤差について、ある等確率密度関数が (U, V) を中心とする円となると、一般にキャリブレーション面上（厳密には接平面上）では (U, V) に対応する点 u を中心とする楕円となる。

即ち、CCD カメラ画像上の誤差 Δp (2 次元ベクトル) が

$$E[\Delta p \Delta p^T] = \sigma^2 I \quad (2 \times 2) \quad (10)$$

の共分散行列を持つと仮定すると、キャリブレーション面上の誤差 Δu は、座標 (U, V) 及びキャリブレーション面上の対応する点における法線ベクトルによって定まる 3×2 の行列 Φ_p を用いて

$$\Delta u = \Phi_p \Delta p \quad (11)$$

と表現されるため、 Δu の共分散行列は

$$E[\Delta u \Delta u^T] = \sigma^2 \Phi_p \Phi_p^T \quad (12)$$

と求められる。但し、以下では簡単のために、CCD カメラ画像上の半径 σ の円がキャリブレーション面上の半径 σ_m の円に写像されると仮定する。この近似は、3 次元位置推定の際のカメラの回転角が小さい場合に十分な精度で成立すると考えられる。式 (12) を式 (9) に代入することにより誤差 Δx の共分散行列を求めることができる。

〈4・3・1〉 2 枚のカメラ画像を用いたときの推定誤差の評価 図 7 は、2 枚のカメラ画像を用いたときの推定誤差を実験により求めた結果であった。この際、画像上の白色円の重心の U 座標の差が約 300 画素、約 100 画素、約 20 画素、約 5 画素の各々について 30 回づつ試行を行ったが、それら全てに対して上記の誤差モデルに基づいた標準偏差の推定を行った。この誤差モデルから得られた結果のうち、特に誤差の大きな y 方向（奥行き方向）の誤差の標準偏差と測定値の RMSE との比較結果を図 11 に示す。ここでは両者の横軸の変化に対する縦軸の変化を比較するために、300 画素における両者の値が一致するように σ_m の値を定めた。

図 11 重心 U 座標の差と、測定値の RMSE (実線) および誤差モデルから得られた値 (菱形) との関係

Fig. 11. Relationship between the circle position and its RMSE, measured and estimated values.

図 11 において、実線で結ばれているのが測定値から得られた RMSE の値であり、その上下にプロットされているのがモデルから得られた値である。測定値とモデル値が類似した傾向を示していることが分かる。また、 σ_m の値は 0.17 であり、これを CCD 画像上の分布の標準偏差に換算すると 0.05 画素から 0.1 画素程度となり、4.2 節で計測した誤差の分布から見て妥当な値が得られていると考えられる。

以上より、構成された誤差モデルが、2 平面法に基づいた 3 次元位置推定結果の特性をよく表現したものであり、種々の異なった観測条件に対する 3 次元位置推定の誤差評価を事前に行う場合に有効に利用することができると結論される。即ち、事前に σ_m の値を推定しておくことにより、タスク遂行に必要な精度に応じて、仮想環境を構築するための 3 次元位置推定の実験環境を定めることができる。

5. 人工現実感インタフェースを用いたテレオペレーションシステムの構築

本章では、前章までに述べた位置計測技術を用いて構築したテレオペレーションのためのインタフェースについて説明する。

本システムでは、ペグ及びホール形状及び大きさは既知であるものとし、更にペグ及びホールはロボットの水平方向の回転軸 (J1 軸) に対して正対しているものとする。前者の仮定は、物体認識を容易にするためのものであり、どこにどのような機器があるかが事前に分かっている状況を想定したものである。一方、後者の仮定は、本研究で使ったロボットアームの土台が移動できないことによるものである。

〈5・1〉 テレオペレーションシステムの動作 本システムにおいてオペレータがロボットアームに対して指示する

動作内容は大きく、

- (1) ロボットの周囲を探索し、ペグ及びホールの位置を推定する。
- (2) ペグを引き抜き、オペレータが指定したホールにペグを挿入する。

に分けられる。それぞれについて以下で説明する。

(1) ロボットの周囲の探索と対象物の3次元位置推定

まず、オペレータは作業環境の情報を取得するようにシステムに命じる。指示を受けると、システムは周囲の探索を自動的に行う。

ロボット周囲の環境は、数個の領域に分けられて探索される。この分け方は、カメラの視野角、目標のおおよその位置などを考慮して決められる。本実験では簡単のため、ロボットアームの前方の領域のみを探索することとし、さらにホールが各領域内に1つずつ納まるように配置している。即ち対象物の数は各領域につきホールが1つある場合、ホールとペグの組が1つある場合、もしくは何も無い場合の3通りに限定されている。

まずオペレータは環境を探索するように、ワークステーションのキーボードのあるキーを押して指示を出す。指示を受け取ると、システムはロボットから見て一番左の領域から環境の探索を開始する。

ある探索領域について自動的に対象物の位置を推定する方法を、(a) 対象物の発見、(b) ロボットが対象物を CCD カメラで撮像する位置の決定、の2段階の手順に分けて説明する。

(a) 対象物の発見と認識

もし、CCD カメラ画像内の白色円の数が0であれば次の領域の探索を開始する。

白色円の数が1個の場合、システムはここにはホールがあると判断する。円の数が2個の場合、ここにはペグとホールがあると判断する。

(b) 対象物を CCD カメラで撮像する位置の決定

3次元位置推定に最小二乗法を用いているので、CCD カメラから対象物への複数の直線がもし互いに近ければ、推定誤差が大きくなる。そこでロボットが対象物を撮像する位置、即ち対象物が CCD 画像上のどこに現れるかを予想することが重要となる。そこで、CCD 画像内に白色円が捉えられた後、CCD 画像上の所望の位置に対象物を撮像できるように、まずロボットアームを微小距離動かし、大まかな対象物の位置を推定することとした。

その後、精度よく位置推定できるように、CCD 画像内の白色円の重心が広範囲に移動するように、具体的には重心が (90,170), (420,170), (420,350), (90,350) の4点の近傍にくるように、ロボットアームを移動して画像を4枚取得する。そして、その画像より4本の直線の方程式を求め、最小二乗法により対象物の3次元位置を推定する。これは、前章の結果に基づいて、3次元位置の推定精度を最大限に向上させることを意図したものである。

(2) ペグの引き抜きと挿入

オペレータは仮想空間を通じて、ペグをホールから引き抜き、別のホールに挿入する指示をシステムに伝える。その仮想空間内における操作方法について説明する。

(1) のプロセスによって実空間作業環境の情報がシステムに取り込まれ、仮想空間内にホールとペグがその推定された位置に出現する。この様子を図12に示す。オペレータは必要に応じ、マウスを用いて視点を変えることによりロボットアームと対象物との位置を確認することができる。

仮想空間内での操作は次のようにして行う。

- (a) オペレータの手の甲に取り付けられた Polhemus センサの位置・向きを、仮想空間内のロボットアームのハンドの位置・向きに対応させることにより、オペレータは仮想空間内のロボットアームを操作することができる。ただし、手の動きに対するロボットアームの動きの感度は、操作し易いように試行錯誤により決定した。
- (b) オペレータは仮想空間内のロボットアームを Polhemus センサを用いて操作し、適当なキーを押してペグをつかませた後にホールから引き抜き(図13)、次に別のホールを選んでそのペグを挿入する。この間、実空間のロボットアームは動かない。
- (c) 仮想空間のホールの中でペグを放すようキーを押したところで、実空間のロボットアームがペグを引き抜き(図14)、指示されたホールにペグを挿入する。この間のロボットアームの移動経路については、事前に指定されたものを組み合わせて作成される。

仮想空間内のロボットアームは、手の動きに対して速やかに対応するため、実空間内のロボットアームに比べて姿勢の操作は容易である。しかし、現状では触(力)覚フィードバックが無いため、仮想空間において立体視をしている状態でもロボットハンドでペグをつかむことはそれほど容易ではない。そこで補助的な機能として、ハンドの先とペグとの距離があるしきい値以内になると、自動的にハンドがペグに吸着する機能を付加した。

同様に、ペグをつかんだ状態でホールに入れる際にも、つかんだペグがある程度ホールに近付くと自動的にホールに入る機能をつけた。また、ペグが自動的にホールに入った時点ではまだ実際のロボットアームは動作せず、オペレータが適当なキーを押して挿入の命令を出すことにより初めてロボットアームがその動作を実行することとした。なお、そのホールにペグを入れたくない場合には、ハンドをホールから遠ざけるよう操作すればペグがホールから離れる。

6. テレオペレーションシステムの評価

仮想空間の構築時の物体位置の推定誤差は奥行き方向で1mm以下であり、Peg-in-Holeのタスクの成功率はシステム起動直後ではほぼ100%であった。即ち、このタスク実行のための仮想環境がモーションステレオ法を用いて十分

図 12 仮想空間に描かれたホール (中央のホールにペグがささっている)

Fig. 12. Holes in VE.

図 13 仮想空間内のロボットアームによるペグの把持

Fig. 13. Robot-arm grasping a peg in VE.

図 14 実空間のロボットアームによるペグの把持

Fig. 14. Robot-arm grasping a peg in real environment.

な精度で構築されたといえる。なお、タスク失敗の原因としては、タスクを反復実行することにより、ペグやホールの向きのずれることがその一因として挙げられる。本システムでは、ロボットの土台自体は移動できないため、対象物の向きが変わるとタスクが実行困難となる。

本研究で構築した Peg-in-Hole 作業のためのテレオペレーションシステムでは、オペレータがまずシステムに環境の探索を命令し、システムはその命令を受けて、ロボットに取り付けられた CCD カメラを用いてペグとホールの位置を検出し、仮想空間に描画する。オペレータは仮想空間内のロボットシミュレータを操作して、ホールにはめられているペグを抜き、別のホールに入れるように指示をする。システムは指示を受けた時点で、ロボットを動かしてタスクを実行し、次の指示を待つ。このシステムを用いれば、物体の 3 次元位置推定や物体の把持はロボットの自律的機能に任せ、作業の指示・監督のみをオペレータが行うという人間とロボットの分業が実現され、人間が微妙なロボットの操作に習熟していなくても Peg-in-Hole のタスクを実行することができる。

しかし、インタフェースの観点から見ると、マウスによる視点移動及び Polhemus センサによる仮想ロボットアームの操作は、初心者にはそれほど容易ではない。特に後者については、作業の内容は限定されているものの、触覚・力覚フィードバックが無いために微妙な操作の実行にやはり難点がある。これらの点が今後検討すべき課題として残されている。

次に本研究の将来的な展望について述べる。本システムは、ある程度何がどこにあるかがわかっているが、作業対象の正確な位置については計測が必要であるような環境における作業を想定して構築したものである。

このシステムの可能な作業の内容を広げること考えた場合、以下の改善を施す必要があると考えられる。

(1) より複雑な環境に対する仮想空間構築

ペグやホールの正面がロボットアームの J1 軸に正対するという条件はロボットの構造に起因する制約であるため、ロボットの土台が移動でき、さらに対象物の向きが正確に測定できれば解消されるものである。また作業対象物の向きを検出するには、陰影を用いるなど、より高度な画像処理を用いることも考えられるが⁽⁴⁾、本研究で用いた手法を拡張し、1つの対象物に目印となる図形 (現在は白色円が1つずつ) を3つ描き、それらの位置を精度よく検出すれば、対象物の位置と向きを検出できる。その際、目印となる図形と対象物との関連付けが重要となる。これに対しては、物体ごとに目印を色分けしたりバーコードなどを利用することにより、より多くの物体の判別も可能となる。また、CCD カメラ画像を間欠的にオペレータ側に送ることにより、オペレータの判断を含めた仮想環境構築も可能となる。

(2) 障害物の回避

障害物も仮想空間に取り込むことができれば、仮想空間内

のロボットシミュレータを操作し、ロボットの姿勢を確認しながら障害物を回避させつつ作業を行わせるようロボットに指示することも可能となる。但し、仮想ロボットの操作の際に、関節角の指示ができるなどの工夫を加える必要がある。

7. 結 論

本論文では、2平面法を利用して構築された仮想空間におけるテレオペレーションシステムについて、実験結果とその考察結果を述べた。

まず、2平面法に基づいた3次元位置計測精度について、実験と理論との両面から検討を行い、実験環境の事前評価が可能であることを示した。

次に、その計測技術を用いて Peg-in-Hole のタスクをロボットアームに実行させることができる仮想環境を構築し、実験を通して確実にタスクを遂行できることを確認した。更に本システムの評価と今後の課題について検討し、操作性の改善と、ロボットとオペレータとの対話性の向上が必要であることを指摘した。

複雑な現実空間をそのまま仮想空間内に描画することは計算時間の点からみて不可能といえよう。しかし、作業に必要な情報を先験情報に基づいて獲得する、という観点に立てば有用な仮想空間を構築できる可能性がある。本研究で試作したシステムは、一般には困難とされる仮想空間構築も、そのような特定の状況下においてはテレオペレーションの有用な道具となり得ることを示すものである。

(平成9年10月6日受付、同10年4月3日再受付)

文 献

- (1) 高野 政晴：極限作業ロボットプロジェクト，日本ロボット学会誌，Vol.9 No.5，pp.614-618，(1991)
- (2) 館：バーチャルリアリティの新しい進展，情報処理，Vol.37，No.8，pp.711-716 (1996)
- (3) 廣瀬通孝，宮田亮介，谷川智洋：二次元実写像を用いた三次元仮想空間の生成，Human Interface N&R，Vol.11，No.2，pp.209-214 (1996)
- (4) 井口 征士，佐藤 宏介：三次元画像計測，昭晃堂 (1995)
- (5) H.A.Martins, J.R.Birk, and R.B.Kelley: Camera Models Based on Data from Two Calibration Planes, Computer Graphics and Image Processing, Vol.17, pp.173-180, (1981)
- (6) Alberto Izaguirre, Pearl Pu, John Summers: A New Development in Camera Calibration: Calibrating a Pair of Mobile Cameras, The International Journal of Robotics Research, Vol.6, No.3, pp.104-116, (1987)
- (7) 高橋 章，石井 郁夫，牧野 秀夫，中静 真：多視点画像からの3次元情報抽出と誤差分布推定法，電子情報通信学会論文誌 D-II，Vol.J78-D-II No.11，pp.1618-1626，(1995)

吉 川 榮 和 (正員)

1942年10月7日生。1970年7月京都大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学工学研究所助手。74年動燃事業団勤務。81年京都大学原子エネルギー研究所助教授を経て、92年同教授。96年同大学大学院エネルギー科学研究科教授。原子力工学及びマンマシンシステムの研究に従事。計測自動制御学会、日本原子力学会などの会員(工学博士)。

手 塚 哲 央 (正員)

1956年2月27日生。1983年3月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年4月京都大学工学部助手。93年同大学原子エネルギー研究所講師。96年同大学大学院エネルギー科学研究科助教授。工学博士。人工現実感技術のヒューマンインタフェースへの応用、エネルギーシステムの分析などの研究に従事。計測自動制御学会、エネルギー資源学会、日本原子力学会、IAEEなどの会員。

井 上 隆 司 (非会員)

1971年8月7日生。1995年3月京都大学工学部電気工学科卒業。97年3月同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年、松下電器産業(株)入社。現在、マルチメディア開発センター勤務。在学中は、人工現実感技術のヒューマンインタフェースへの応用に関する研究に従事。