実空間にマークを投影する インタラクティブハンドポインタの構成

非会員 佐 藤 信 (日本ユニシス)

正 員 坂 根 茂 幸 (中央大学)

An Interactive Hand Pointer that Projects a Mark in the Real Work Space

Sato Shin, Non-member (Nihon Uniyis, Ltd.), Sakane Shigeyuki, Member (Chuo University)

A human-robot interface system is under development that takes into account the flexibility of the DigitalDesk approach. The prototype consists of a projector subsystem for information display and a real-time tracking vision subsystem to recognize the human's action. Two levels of interaction using a Virtual Operational Panel and Interactive Image Panel have been developed. This paper presents the third subsystem, the Interactive Hand Pointer used for selecting objects or positions in the environment via the operator's hand gestures. The system visually tracks the operator's pointing hand and projects a mark at the indicated position using an LCD projector. Since the mark can be observed directly in the real work space without monitor displays or HMDs, correction of the indicated position by moving the hand is very easy for the operator. The system enables projection of a mark not only at a target plane with a known height but also to a plane with an unknown height. Experimental results of a pick-and-place task demonstrate the usefulness of the proposed system.

キーワード：拡張現実、ヒューマンロボットインタフェース、デジタルデスク、トラッキングビジョン、ハンドポインタ

1. はじめに

近年、ヒューマン ロボットインタフェースは、次世代ロボットシステムのための重要な技術の1つとして注目を集めている。産業用ロボットにおける従来のインタフェースには、オンライン教示のためのティーチング・ペンダントからオフライン教示のためのCADを用いたロボットシミュレータまで多様なインタフェースが利用できる。しかし、その多くは複雑な操作方法を必要とするために、専門的な知識をもたない初心者にとって適したものであるとは言い難い。従来の工場を中心とする産業用ロボットから、家庭、病院、オフィスといった幅広い分野において活躍するロボットを実現するためには、初心者にとって簡単で理解しやすいインタフェース技術の開拓が必要である。

一方、人間とコンピュータのインタフェースの分野では、Augmented Reality⁽¹⁾⁽²⁾あるいはMixed Reality⁽³⁾の技術が注目を集めている。これらの技術では、実空間と仮想空間を融合することにより、人間の日々の生活環境を情報的に強化することを可能にするので、人間とコンピュータのインタフェースとして新たな対話環境を開拓するものとして期待されている。この「実空間」をロボットの作業環

境にとるならば、AR技術を人間とロボットのインタフェースに適用することが考えられる。例えば、仮想的な物体や環境のモデルを実空間に重畳して、テレオペレーションにおける多様な情報提供を行うシステム化の例がすでに知られている。これらのシステムでは、仮想世界と実世界との融合をモニタディスプレイで間接的に観測したり、装着型のHMD(Head Mounted Display)により情報を重畳して観測するようなシステム構成が多い。しかし、前述のようなロボットの新たな適用分野を考えるならば、実空間で融合した状態を、より直接的に、また、特殊な機器を身体にできるだけ装着せずに見ることが可能なインタフェースの開発が望まれる。

筆者らは、この観点から、Wellnerらのプロジェクトを利用するDigitalDesk⁽⁴⁾のAR的な枠組みを取り入れ、ロボット用に拡張したヒューマン ロボットインタフェースを提案した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。そのプロトタイプシステムでは、仮想操作パネル(VOP: Virtual Operational Panel)と実画像教示パネル(IIP: Interactive Image Panel)による作業教示を実現した。

本論文では、前記2つの機能を補う第3のサブシステムとして新しく開発したインタラクティブハンドポインタシ

表 1 VOP, IIP, IHP の関係
Table 1. Relation between VOP, IIP and IHP

Space for teaching action Task level	2D space	3D space
Low Level	Virtual Operational Panel	Interactive Hand Pointer
High Level	Interactive Image Panel	

システム (IHP:Interactive Hand Pointer)^{(7) (8) (9)} について報告する。このシステムは、実空間上でオペレータの指さし行為によって示したオブジェクトや位置の選択のために用いることができる。従って、Table.1 に示すように、VOP と IIP はオペレータの 2 次元平面上に拘束された指示動作を用いるのに対して、IHP では作業空間における 3 次元的な指示動作が可能になっている。

本システムでは、オペレータの指先を 2 台のカメラでビジュアル トラッキングを行い、そのさした場所を常時推定しながらプロジェクタによってマークを投影する。マークは実空間上に直接投影されるので、オペレータはモニタディスプレイや HMD を用いることなしに、指示した位置を容易に確認することができる。指示位置推定をリアルタイムで行うので、オペレータは、あたかもレーザポインタを手を持っているかのように、投影されたマークを実空間で見ながら修正できる。また、指示する対象面の高さが未知の場合についてもマークの投影が可能となる機能をもたせた。

本論文では、以下、2 章で従来の研究とそれらに対する本研究との位置づけを述べ、3 章では指差しポインタシステムの処理アルゴリズムについて述べる。4 章ではプロトタイプシステムの性能評価実験を行った結果について述べ、5 章において本論文の結論と今後の課題をまとめる。

2. 従来の研究

近年、ロボットへの教示を行なうために人間のハンドジェスチャを用いる研究が報告されている。Cipolla ら⁽¹¹⁾ は、カメラのキャリブレーションの負荷を軽減したステレオを用いて、指差しインタフェースを構成している。オペレータが作業空間において指差し行為を行ない、2 台のカメラ画像から求めた直線から指示位置を推定した。ただし、指差しによるロボットへの作業教示を行う際には、オペレータがモニタ画面で監視する必要がある。横川ら⁽¹³⁾ は、ロボティックルームにおける人間支援システムの一環として、指差し行動のジェスチャの理解のために色抽出によって顔・手・髪の毛を発見し、対象の幾何的位置関係および形状から顔の向き・手の指示方向の検知を行なった。また、これと同時に、発見した領域についてリアルタイムでステレオ追従を行い、手と頭部の 3 次元位置を計測して画面上の手の向きから被指示方向を 3 次元空間で推定した。林ら⁽¹⁴⁾ は、

図 1 システム構成
Fig. 1. The prototype system of IHP

アフィン不変量に基づき、カメラキャリブレーションが不要で、ユーザ中心座標系と絶対座標系でのユーザの手の位置の解釈が可能なシステムを構成した。オペレータはマークのついた手袋を装着し、移動ロボットに対して停止、前進、後退、右折、左折などを指示する実験を行った。

これらのシステムに共通する問題は、システムがオペレータのジェスチャを認識した結果については、オペレータがモニタ画面で確認するか、あるいは、ロボットが実際に稼働するまでは分からない点である。システムの誤認識が重大な結果を引き起こさないようにするためにも、オペレータはロボットが稼働する前に、自分の出したコマンドが正しく認識されているかを確かめる必要がある。従って、作業空間である実空間でそのようなインタラクションが直接的に可能になるハンドポインタシステムが必要と考えられる。

3. インタラクティブ ハンドポインタシステム

2 章で述べた従来のハンドポインタシステムの問題点を踏まえ、筆者らはインタラクティブ ハンドポインタシステム (IHP:Interactive Hand Pointer) を開発した。このシステムは、以下のような特長を持っている：

- (1) リアルタイムトラッキングビジョン装置とプロジェクタを用いて、実空間上の人間が指示した位置に連続的にマークを投影する。その結果、オペレータの指差し行為によって人間とロボットのより密なインタラクションを実現できる。
- (2) カメラとプロジェクタのモデル生成には平面上の点に対する透視変換を用いることにより、プロジェクタの変換行列もカメラと同様に容易に求めることができる。これにより、受け渡すデータを統一的に扱うことができる。
- (3) 未知な高さの対象面に対してもマークの投影が可能である。

以下の節では、これらの特長の中の (2) と (3) について、より詳細な内容を述べる。

〈3・1〉 指差しによる指示位置の推定 本システムは、指さしの方向を検出するためのビジョン装置と、マークを

投影するプロジェクタをその基本的な構成要素としてもつ (Fig.1). 画像入力に用いるカメラおよび情報投影のプロジェクタの幾何学モデル化には、文献⁽¹¹⁾と同様の平面上の点に対する透視変換行列を用いている。この理由は、通常の透視変換のモデルに比較して、カメラキャリブレーションの負担が軽減されること、また、指さし位置が机面などの平面の利用が多いので、指示位置推定の計算が容易になるためである。

今、カメラ画像面およびプロジェクタの座標系を (u, v) で表し、基準平面上の紙の上にとった座標系 (以下では、ワールド座標系と呼ぶ) を (X, Y, Z) で表すとする。通常の透視変換を用いることによって、座標系は変換行列 $T = \{t_{ij}\}$ により次式のように表される：

$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

本研究では、指さしによる教示や仮想操作パネルなど平面の利用が多いため、最も利用しキャリブレーションを実際に行なう平面を基準平面とする。この基準平面の高さを $Z = 0$ としてこれを上式に代入する。この結果、変換行列 T の第3列は不要になる、変換行列 T を変換行列 $T_c = \{t'_{ij}\}$ に置き換えることにより次式の関係が成り立つ。以下ではこの平面上の点に対する変換行列を単に「変換行列」と呼ぶことにする。

$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t'_{11} & t'_{12} & t'_{14} \\ t'_{21} & t'_{22} & t'_{24} \\ t'_{31} & t'_{32} & t'_{34} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

左辺の変数 s を考慮すれば $t'_{34} = 1$ としてもよいので、未知数は8個となる。(2)式からは2個の式が得られるので、ワールド座標系における基準平面上の4点を観測すれば変換行列 T_c を求めることができる。変換行列が定まれば、 (u, v) から (X, Y) を (または、その逆) (2)式により直ちに求めることができる。以下では、カメラの変換行列を T_{cam1} および T_{cam2} とし、プロジェクタの変換行列を T_{prj} で表すことにする。

各画像において、指の指示している方向を表す指さし直線の推定にはブロックマッチングに基づくトラッキングビジョン装置⁽¹²⁾を用いている。各指さし直線は、カメラ画像から予め用意してある指先のテンプレート画像とのブロックマッチングにより求めた位置 Pe と、この位置から一定の領域内にある指のつけ根の中心 Pr を結ぶ直線として求める (Fig.2)。この際に、初期探索では指の指示している方向・位置は未知であるため、探索には指先を45度づつ回転したテンプレート画像 (計8個) を切替えながら全画面探索を行なう。ただし、初期探索以外の探索は指先の姿勢が連続的に変化するので、8個のテンプレートの代わりに、その前の探索において照合したテンプレートと、それに近

図2 指さし直線の推定
Fig.2. Search area for finger

図3 次フレームの候補テンプレート
Fig.3. Candidate templates for the next frame

い角度 (± 45 度) をもつテンプレートを用いて局所探索を行なうことにより、探索の効率化を図っている (Fig.3)。

こうして求めた各直線を、透視変換によりワールド座標系における直線に変換すれば、ワールド座標系における交点 (X_0, Y_0) が求まり、これがオペレータの指示位置となる。この交点に対してプロジェクタを用いてマークを投影することで、オペレータは指示位置を確認できるようになる。マークを投影するための投影入力 (u_0, v_0) は、ワールド座標系における座標を (X_0, Y_0) 、プロジェクタの変換行列を T_{prj} とすると (2)式から以下のように求められる：

$$\begin{pmatrix} su_0 \\ sv_0 \\ s \end{pmatrix} = T_{prj} \times \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Fig.4 は、この方法を用いて実空間上にマークを投影した様子を示している。なお、本システムにおける指さし位置の検出には背景が単色の参照画像を用いているが、より複雑な背景下で検出を行なうためには、肌色抽出あるいは赤外線カメラ画像の利用などが考えられる。

〈3・2〉 基準平面とは異なる高さの平面へのマーク投影
異なる高さに対応した変換行列の生成には、高さ以外のパラメータが同一である2枚の基準平面を用いる。マークを投影する平面の高さが既知の場合には、その2枚の基準平面に対して外挿あるいは内挿することによって、対象となる

図 4 基準平面へのマーク投影

Fig.4. Projection of a mark to the estimated position

平面の変換行列を近似的に生成することができる (Fig.5).

1 枚目の基準平面 (Base Plane1) におけるカメラ画像面での座標を (u, v) で表し、ワールド座標系における座標を (X, Y) で表す。また、この基準平面より高さ方向に h だけ変位させた 2 枚目の基準平面 (Base Plane2) におけるカメラ画像面での座標を (u', v') で表す。このとき、高さのパラメータは変化するがワールド座標系における座標 (X, Y) は変化しない。従って、基準平面 (Base Plane1) より H だけ高い位置をもつ仮想的な対象平面 (Virtual Plane) の変換行列を生成する場合のカメラ座標系での座標は、値 H が h に近い範囲において、 $(u + \frac{H}{h}(u' - u), v + \frac{H}{h}(v' - v))$ で表される。つまり、両者は変換行列 T_{new} により次式の関係にある：

$$\begin{pmatrix} s(u + \frac{H}{h}(u' - u)) \\ s(v + \frac{H}{h}(v' - v)) \\ s \end{pmatrix} = T_{new} \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

これに基づき、基準平面 (Base Plane1) 上の 4 点 (A, B, C, D) とこの 4 点を既知の高さ方向に平行移動した 2 枚目の基準平面 (Base Plane2) 上の 4 点 (A', B', C', D') を観測して、カメラの変換行列およびプロジェクタの変換行列を求める。

実空間上の 8 点を用いるのであれば、数学的には通常の透視変換行列を生成することが可能である。本システムにおいて上述のような手法を用いた理由は、既存のシステム (文献⁽⁵⁾⁽⁶⁾) との整合性を考慮したためである。

〈3・3〉 高さが未知な平面に対するポイントの投影

マークを投影する物体の高さが未知な場合には、上記の方法をさらに拡張して変換行列を生成する。高さが未知である物体への指示は、文献⁽¹¹⁾のシステムにおいても実装している。そこでは指示する物体の上面の特徴点 (角の点) を検出し、これらの特徴点から平面を構成して高さのある物体に対するロボットへの指示を行った。しかし、この方式を用いる場合には、常に物体の上面の複数の特徴点がカメラ画像から確認できている必要があり、そうでない場合には対応できない。これに対して、IHP では物体上の特徴を使わないので、指示する物体の特徴点が確認できない場合でも指示点の推定が可能である。

Fig.7 に示すように、真の対象平面 T 上でオペレータの

図 5 対象平面の高さに対応した透視変換行列の生成手法

Fig.5. Exterporation of height of the target plane to modify the constrained perspective transforms

図 6 高さが未知な平面に対するマーク投影

Fig.6. Projection of a mark to unknown height plane

指し示す位置を P 、プロジェクタの投影位置を Q とすると、この 2 点は同一の位置を示すことになる。これをカメラから観測しても P と Q の間に誤差は生じない。しかし、高さが真値と異なる仮想的な対象平面 T' にポインティングを行なおうとすると、オペレータの指し示す位置は P' であるにもかかわらず、プロジェクタは真の平面上にマーク投影を行なうため、投影位置は Q' となる。これをカメラ画像面上で観測すると、 P' と Q' の間には θ の誤差が生じる。従って、以下の手順により高さ推定が可能になる：

- (1) 3.1 節で述べた方法を用いて、基準平面に対応する変換行列を用いて各指し直線から求められた指示点 (P') を推定し、カメラ座標系に変換する。
- (2) プロジェクタにより対象物上にポイント (Q') を投影し、カメラ画像上でこのポイントを観測する。
- (3) この P' と Q' のカメラ画像面上での位置誤差 E を求める。
- (4) 3.2 節で述べた方法で求めた面の高さを逐次的に変化させて得られる変換行列を用いて (1) ~ (3) の処理を繰り返す、位置誤差 E を最小にする高さを対象物の高さの推定値とし、対応する変換行列を定める。

本システムでは 2 台のカメラによるステレオ視を用いるので、1 平面に対して 2 個の変換行列が存在する。理論的には 1 台のカメラの画像のみで高さ推定を行なうことが可能であるが、精度を高めるために、2 台のカメラ画像から得られる誤差の和を総合誤差として用いた。

Fig.6 は、上述の方法を用いて高さを推定し、その高さ

図 7 推定位置と投影位置とのカメラ座標系での誤差計測

Fig. 7. The error in the camera coordinate between the projected mark position Q' and the pointed position P' which is estimated using the virtual target plane T'

に対応した変換行列を用いてマークを投影した様子を示している。

4. プロトタイプシステムの構成

本プロトタイプシステムは、Fig.1 に示すように液晶プロジェクタとトラッキングビジョン装置を主要な構成要素として構成されている。IHP におけるオペレータの手の認識、および、VOP と IIP⁽⁵⁾ における動作の認識にはブロックマッチングに基づくカラートラッキングビジョン装置 (Fujitsu TRV-CU) を用いている。カラートラッキングビジョンは 33[msec] に最大で 500 個の並列相関演算が可能である。実画像の入力には CCD カメラ (SONY, EVI-G20) を用いており、2 台をオペレータのハンドポインティングジェスチャの認識のために、他の 1 台を VOP の監視用として使用している。CCD カメラは 0.25 [inch] の 41 万画素のカラー CCD 素子を用い、有効画素数は 38 万画素である。液晶プロジェクタ (POLAROID, COLORVIEW Light) は、指さした位置へのポイントの投影や VOP や IIP の仮想パネルの投影を行ない多様な情報をオペレータに提供することが可能である。プロジェクタの解像度は 800×600 [pixels] で、輝度は 500 [ANSI lumen] である。このプロジェクタを描画用コンピュータ (Sun Ultra5) に接続し、X ウィンドサーバーにより描画を行なう。X ウィンドウの描画を含む上位のプログラムは、EusLisp⁽¹⁵⁾ を用いて記述している。また、6 軸マニピュレータ (Kawasaki Heavy Industry, Js2) は、後述の作業教示の実験における pick-and-place タスクに用いている。

5. 実験

本プロトタイプシステムの有効性を評価するために、以下の実験を行なった。

(1) 高さの未知な対象物の高さ推定。

(2) IHP を用いたロボットへの教示実験。

今回のマークを投影するために用いたポイントの形状は直径 30 [pixels] の円形であり、実空間上の大きさは、30 – 35 [mm] である。ここで、円形のポイントを用いたのは、高さ推定処理の際にカメラ配置によってポイントの見え方が変化しても、1 つの参照画像で対応するためである。また、実空間上でのポイントの大きさの変化は、対象平面の高さの変化に伴い、プロジェクタとの距離が変化することによって生じる。画像中からこのポイントを探る際に、参照画像との関係からこの変化は探索の精度を下げる原因になる。このため、本実験ではいくつかの大きさのポイントを用意して誤差の少ない直径のものを用いた。

本システムでは、 640×480 [pixels] の画面中から 32×32 [pixels] の画像を 223.7 [msec] で探索することが可能である (Global search)。また、 62×62 [pixels] の画像中から 20 [msec] での探索が可能である (Local search) が画像入力は 1 フレーム毎となるので、1 サイクルの処理時間は 33 [msec] となる。

これらを用いた場合、指さしポイントは初期設定段階で約 2 [sec] を要とする。稼働中は全画面探索を必要としないため、1 画面に対する処理時間は、約 20 [msec] であるが、実際には 2 枚の画像処理ボードを切替えてステレオ視を行なっているため、2 フレームを必要とする。従って、通常の指を移動しながらポイントの位置修正を行なうサイクルは、この 2 フレームに納まるので、十分な速度である。

高さ推定に要する時間は 200 [mm] の高さまでを、5 [mm] の精度で約 1.76 [sec]、10 [mm] の精度で 1.21 [sec] で行なう。この精度は最大で 1 [mm] まで上げることが可能である。また、さらに高速な処理が必要な場合には、誤差推定を 1 つのカメラのみで行なうことで実現できる。

〈5・1〉高さの未知な対象物の高さ推定 本システムの高さ推定機能を評価するために以下の 2 つの実験を行なった。今回の実験で用いた対象平面は、ロボットアームに対象平面となる板を取り付けることにより、正確に高さを調整している。また、基準平面の高さ $ABCD$ および $A'B'C'D'$ は、0 [mm]、150 [mm] に設定している。

Fig.8 は、3.3 節で述べた手法を用いて高さが未知の対象の高さを推定した結果である。グラフは、2 台のカメラ画像から得られる 2 つの誤差の和を、 $Error = |P'_{Cam1} - Q'_{Cam1}|^2 + |P'_{Cam2} - Q'_{Cam2}|^2$ とし、逐次修正を行なった平面の高さを $Height$ [mm] としたときの関係を表している。実際用いた対象の真の高さは 100 [mm] である。このグラフより、 $Error$ は $Height = 100$ [mm] 付近で最小値となっていることがわかる。グラフに 2 次式をあてはめると、 $y = 0.00889x^2 - 17.865x + 917.02$ であり、この式に基づく高さの推定値は 100.478 [mm] となる。この誤差はカメラの歪みが原因となって変換が正確に行なわれないポイントが存在するために、近似曲線がそれらのポイントの影響を受けているものと考えられる。本来であれば、この値を推定値として用いることが妥当であるが、先に述べた理

図 8 高さを逐次修正した行列を用いた推定位置と投影されたマークとの誤差

Fig.8. Errors between the projected mark and the estimated position in accordance with iterative modification of the height of the plane

表 2 対象平面の高さ推定結果

Table 2. Estimated height of the target plane

True height	Avg	Max	Min	Std. dev
0	0.8	1	0	0.40
50	46.8	54	42	4.26
100	104.4	111	95	5.64
150	156.8	159	154	1.94

True height:The height of target plane [mm].

Avg:Average[mm],Max:Maximum Value[mm]

Min:Minimum Value[mm],Std. dev:Standard deviation

由と処理の高速化を図るという観点から、本システムでは、単純に *Error* が最小値となる *Height* を推定値として用いた。今回の実験におけるこの値は 101[mm] となる。なお、この誤差の最小値を求める処理は、例えば誤差がある一定のしきい値以下になることを検出して、処理を高速化することが可能である。

Table.2 は、4 つの高さにおける同一平面上の 5 点についての高さ推定を行ない、その平均・最大値 最小値 標準偏差を示したものである。これにより、高さ推定を行なう際の誤差は最大でも 11[mm] 程度であり、本システムは実用上十分な精度を持つといえる。この実験における誤差の要因には以下のことが考えられる：

- (1) 画面探索の際の探索誤差
- (2) カメラレンズの歪みによる誤差

本システムでは、(1) による影響が強いと考えられる。これに関してシュミレーション実験を別途行なった。その結果、左右のカメラ画像による探索位置で 1[pixel] ずれた場合、最大で 7[mm]、また、2[pixels] ずれた場合には最大で 13[mm] の高さの推定誤差が生じることがわかった。(2) については、厳密にはカメラの歪み補正をかけることが望ましいが、今回は行っていない

〈5・2〉 IHP を用いたロボットへの教示実験 IHP を用いたロボット教示の実験として、pick-and-place タスクを

行なった。Fig.9 は、pick-and-place タスクのために、IHP を用いてロボットへ移動対象と移動位置を教示している場面を示している。最初のシーンは、IHP を用いて掴み上げるカップを選択しており、最後のシーンは、マニピュレータがそのカップを目標位置に置く場面を示している。カップの選択については、カップ上にポインタを投影すると確認が困難になるため、目標となるカップの手前にポインタを投影している。

システムは 890 × 680[mm] の作業スペースにマークを投影することが可能である。また、本実験で用いた参照テンプレートサイズは、 $f_h = f_v = 32[\text{pixels}]$ で、初期設定時の全画面探索を除いて $s_h = s_v = 62[\text{pixels}]$ の探索領域を用いている。また、プロジェクタによって投影したマークと指さして指示した位置との誤差は約 10[mm] である。

この誤差には、以下のような要因が考えられる：

- (1) 各カメラからの指さし直線の推定誤差
- (2) カメラレンズの歪みによる誤差

(1) の指さし直線の推定誤差には、2 つの理由が考えられる。1 つは、高さ推定の実験でも生じた画面探索時における探索誤差である。もう 1 つは、指のつけ根の検出位置の変動が考えられる。これに対する対応としては、指のつけ根の検出の際にマスク等を掛けることによって、検出の変動を抑えることが考えられる。

本システムにおいては、ポインタはオペレータの指の定性的な動きに対して同一の動きをとるので、極度に誤差が大きくなればオペレータ自身によって誤差修正が可能になっている。従って、この約 10[mm] の誤差はポインタの利用上は差しつかえない範囲と考えている。

6. 結 論

従来の産業用ロボットの枠を超えて広範な分野にロボットを適用可能にしていくには人間とロボットの間における優しいインタフェース技術の開拓が必要である。この観点から、本研究では、人間とロボットの間のインタラクティブなインタフェースの 1 つとして、指さして指示しその場所にマークを投影することが可能なインタラクティブハンドポインタを構成し、評価実験によりその有効性を確認した。本研究で得られた成果を以下にまとめる：

- (1) マークを実空間上に直接投影し、モニタディスプレイや HMD を用いることなく指示した位置を確認することができるハンドポインタシステムを構成した。
- (2) 指さしによる指示位置の推定をリアルタイムで行うので、オペレータは投影されたマークを実空間で見ながらインタラクティブに指示位置の修正が行える。
- (3) 指示する対象面の高さが未知の場合については、高さのパラメータを含む変換行列の逐次修正を行い、誤差最小の高さを求めてマークの投影が可能になった。

なお、(3) では平面上の点に対する透視変換をそのまま拡張しているが、マニピュレータ座標系との整合性の点から

は、通常の透視変換の利用が今後の課題と考えている。その他の課題としては、ハンドポインタシステムの精度と処理時間の性能の向上、作業環境の認識機能との結合、音声認識などの多様なメディアとの結合を図ること、などが挙げられる。そして、人間にとってより優しいロボットインタフェース技術の開発を行っていく必要がある。

(平成 12 年 12 月 21 日受付)

図 9 IHP を用いた pick-and-place タスク
Fig.9. A pick-and-place task using IHP

文 献

- (1) 坂村健 訳: 脳強化環境, パーソナルメディア, 1995.
- (2) R.T.Azuma: "A survey of Augmented Reality," *PRESENCE*, Vol.6, No.4, pp.355-385, 1997.
- (3) Y.Ohta, H.Tamura: *Mixed Reality -Merging Real and Virtual Worlds*, Springer, 1999.
- (4) P.D.Wellner: "Interacting with Paper on the DigitalDesk," *Communications of the ACM*, Vol.36, No.7, pp.86-97, 1993.
- (5) 寺島, 坂根: 拡張デジタルデスクを用いるヒューマン・ロボットインタフェース, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.8, pp. 1091-1098, 1998.
- (6) M.Terashima, S.Sakane: "A Human-Robot Interface Using an Extended Digital Desk" *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2874-2880, 1999.
- (7) 佐藤, 寺島, 坂根: 実空間強化とヒューマン・ロボットインタフェース - 指しポインタの構成 -, 第 16 回日本ロボット学会学術講演会, pp.23-24, 1998.
- (8) 佐藤, 寺島, 坂根: 実空間強化とヒューマン・ロボットインタフェース - 指しポインタの構成 -, 電気学会システム制御研究会資料 SC99-12, pp.7-12, 1999.
- (9) 佐藤, 坂根: 実空間強化とヒューマン・ロボットインタフェース - 指しポインタの拡張 -, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会, pp.417-418, 1999.
- (10) S.Sato, S.Sakane: "A Human-Robot Interface Using an Interactive Hand Pointer that Projects a Mark in the Real Work Space" *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2000.
- (11) R.Cipolla, et al. "Uncalibrated stereo vision with pointing for a man-machine interface." *In Proc. IAPR Workshop on Machine Vision Applications, Kawasaki*, pp.163-166, 1994.
- (12) 森田, 沢崎, 内山, 佐藤: カラー-tracking ビジョン, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会, pp.279-280, 1996.
- (13) 横川, 森, 佐藤: 色抽出による発見とステレオ追従に基づく指示行為の理解, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会, pp.997-998, 1997.
- (14) K.Hayashi, Y.Kuno, Yoshiaki Shirai: "Pointing Gesture Recognition System Permitting User's Freedom of Movement" *Proc. Workshop on Perceptual User Interface*, pp.16-19, 1997.
- (15) 松井: 幾何モデリング機能を備えたマルチスレッド並列オブジェクト指向言語 EusLisp, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.5, pp.650-654, 1996.

佐 藤 信 (非会員) 1975 年生. 1998 年 3 月, 中央大学理工学部管理工学科卒業. 2000 年 3 月, 同大学大学院理工学研究科修士課程修了. 同年 4 月, 日本ユニシス (株) 入社, 現在, ハードウェアプロダクト部グラフィックプロダクト室勤務.

坂 根 茂 幸 (正員) 1949 年生. 1972 年 3 月, 東京工業大学工学部制御工学科卒業. 1974 年 3 月, 同大学大学院修士課程修了. 同年 4 月, 通産省工業技術院電子技術総合研究所入所. 1995 年 4 月, 中央大学理工学部教授. 知能ロボットシステムの研究に従事. 工学博士. 日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 人工知能学会などの各会員.