

# ロボット教示高度化のためのセンシング手法に関する研究

柘植 英明      谷 和男\*      田中 等幸

## Study of Sensing Methods for Sophisticated Robot Teaching

Hideaki TSUGE    Kazuo TANI\*    Tomoyuki TANAKA

あらまし ロボットへの教示は、現在もティーチングペンダントを用いた方法が最も多く利用されている。しかし、ティーチングペンダントを用いた教示には、熟練と多くの時間が必要である。特に、バリ取り作業等の教示においては、連続的な経路教示が必要となるために多くの時間が必要となる。そこで教示時間の短縮のために、人が操作するツールの位置・姿勢を計測し、その計測データを基にして教示データを作成する手法に着目する。これにより、バリ取り等の経路教示が必要な作業における教示時間の短縮を目指す。ここで、人が使用するツールの動きから教示データを作成するためには、位置・姿勢を精度良く計測することが必要不可欠である。しかし、現在の計測方法においては、ノイズ等の影響により位置・姿勢を高精度にかつ安定に計測することは困難である。より精度を向上させるためには複数のセンサを用いて計測を行い、ノイズ等の影響による誤差を補正する必要がある。そこで本研究では複数のセンサを用いた計測において、それぞれのセンサに生じるノイズをカルマンフィルタにより除去し、真値を推定する手法を提案する。さらに、構築した教示システムにより計測実験を行い、本手法の有効性を示す。

キーワード ロボット教示, センシング, オブザーバ, カルマンフィルタ

### 1. まえがき

ロボット教示は、現在もティーチングペンダントを用いた方法が最も多く用いられており、依然として教示作業には多くの時間を費やしている。特に、バリ取り等の做い作業の教示においては、連続的な経路を指定する必要があるため、教示により多くの時間が必要となる。この問題に対し、対象物の動きを計測し、そのデータからスキルを抽出して教示データを作成する手法<sup>[1]</sup>や、作業における速度や押しつけ力から加工データベースを構築し、そのデータベースを利用した教示方法<sup>[2]</sup>、仮想環境内で教示を行う手法(オフラインティーチング)<sup>[3]</sup>が研究されている。また、鋳物製品などのバリ取り作業の教示において、レーザレンジファインダーにより、リアルタイムに形状を計測し、その計測したデータを基に教示データを補正する方法が提案されている<sup>[4]</sup>。しかし、これらの方法は、スキルの抽出やデータベースの構築に時間が必要となることや、センサの計測ミスによってロボットが異常な動作を行う危険性を有しているため、現段階では研究の段階に留まっている。また、オフラインティーチングでは、実環境とのキャリブレーションが問題となっている。

そこで、実際の作業現場で教示時間の短縮を行うためには、人が操作するツールや対象物の動きを計測し、その計測したデータを基に教示データを作成する手法が有効であると考えられる。現在、教示用ツールの位置・姿勢を計測して、教示データに利用する製品も存在するが、教示点を指定するためのツールであり、動きの計測は困難である。

一方、空間の位置・姿勢を計測する方法として、超音波センサや、ステレオ画像等を利用した製品が販売されている。しかし、これらの計測方法においても実際の計測環境では、ノイズやデータの欠け、さらには計測環境に左右される等の問題があるため、高精度に位置・姿勢を計測することが困難である。そこで本研究では、複数のセンサを組み合わせ、ノイズ等により生じる誤差をカルマンフィルタによって軽減する手法を提案する。さらに、構築した教示システムを用いて計測実験を行い、本手法の有効性を示す。

### 2. 計測データの処理方法

位置・姿勢を計測するセンサとしては、超音波センサや、ステレオ画像等の計測方法があり、製品として販売されている。しかし、これらのセンシング方法では、精度や計測環境が限定される等の問題があり、計測データを直接教示データとして利用することはできない。そこ

\*岐阜大学工学部応用情報学科

で、複数のセンサを組み合わせることで、ノイズやデータの欠け等の誤差を互いに補い合い、より精度を向上させる必要がある。

しかし、複数のセンサから得られた計測データから、どのように真値を推定するのかという問題がある。そこで、ノイズの除去を目的としてカルマンフィルタ<sup>[6]</sup>を構成することにより、観測出力(計測値)から状態量(真値)を推定することができる。

### 2.1 カルマンフィルタ

前報では、人の作業モデルをバネ・ダンパモデルのシステムとして表現し、計測データに生じるノイズやデータの欠けを考慮して真値を推定するオブザーバについて報告した<sup>[5]</sup>。本年度は、この手法を基に計測データに生じるノイズの大きさから真値を推定することができるカルマンフィルタを構成する。カルマンフィルタとは、システムに生じるノイズおよび観測ノイズが白色ノイズである場合、観測出力から真値(状態)を推定する手法である。図1にカルマンフィルタの構成を示す。システムの状態方程式を、

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw, \quad y = Cx + v \quad \dots$$

とする。ここで、 $A, B, C, G$ はシステムを表現するシステム行列である。このシステムの観測器であるカルマンフィルタのフィルタ方程式は次式となる。

$$\dot{z} = Az + Bu + K(y - Cz) \quad \dots$$

ここで、 $K$ はフィルタゲインであり、

$$K = \bar{X}C^T V^{-1} \quad \dots$$

となる。誤差共分散行列 $\bar{X}$ は、次式のリカッチ方程式の解として得られる。

$$A\bar{X} + \bar{X}A^T - \bar{X}C^T V^{-1} C\bar{X} + GwG^T = 0 \quad \dots$$

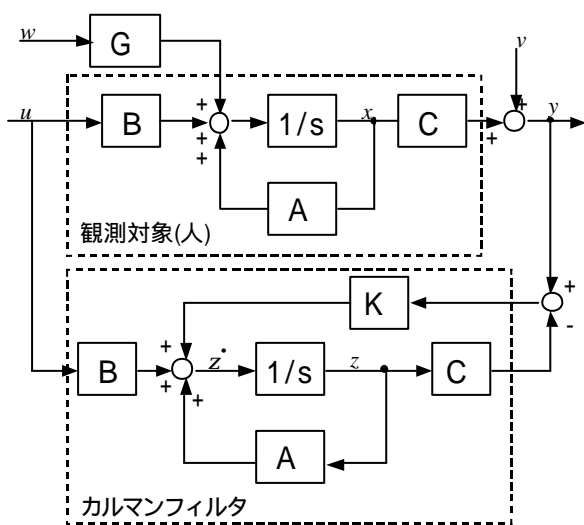


図1 カルマンフィルタの構成

よって、カルマンフィルタではシステムノイズ( $w$ )および観測ノイズ( $v$ )のパワースペクトル密度 $W, V$ によってフィルタゲインを決定することができる。

### 2.2 カルマンフィルタを用いた計測モデル

磁気による位置計測装置であるポヒマスと、PSDカメラによる赤外発光LEDの計測システムを用いた場合の、カルマンフィルタを用いた計測モデルを考える。これらのセンサが、図4に示すようなペン型教示ツールに取り付けられ、その動きを計測する場合は、それぞれの計測位置は完全に一致することが望ましい。しかし、実際にはノイズ等の影響によって両者の計測位置が一致することはほとんどない。よって、この計測結果から実際の位置を推定する必要がある。そこで、図2に示すようなカルマンフィルタを構成する。このモデルは、PSDの計測値は2次元であるため、カルマンフィルタによって推定された奥行き情報を用いて、3次元位置を求めている。それぞれの3次元位置を構成したカルマンフィルタにとおすことによって、1つの位置を推定することになる。

## 3. 教示システム

### 3.1 システム構成

図3に、構築した教示システムの外観を示す。教示システムにおける計測センサは、ポヒマス(ポヒマス社、3SPACE FASTRAK)および、PSDカメラ(浜松ホトニクス株, C5949)であり、図4に示すペン型教示ツールの動きを計測することができる。このペン型教示ツール

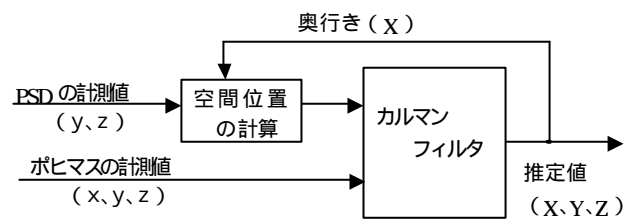


図2 カルマンフィルタを用いた計測モデルの概略



図3 教示システムの外観

には、磁気センサのレシーバと、PSDカメラによって計測される2つのLEDが取り付けられている。

### 3.2 計測データの処理

計測したデータから教示データへ変換するには、ツールの位置・姿勢データから、ロボット先端の位置・姿勢を表す同次変換行列へ変換し、ロボットの各関節角度を逆計算により算出することが必要となる。本研究に用いたロボットシステムにおいては、実ロボットが同次変換行列により動作可能であるため、ノイズ除去等の処理を施したデータから、ロボット先端の位置・姿勢を表す同次変換行列の作成のみを行っている。

### 3.3 動作シミュレーション

産業用ロボットにおいては、各関節角度を指定することによりロボットを動作させるため、位置・姿勢からロボットの各関節角度を求める逆計算が必要となる。この逆計算によって複数の解が求まるため、求めた解の中から適切な解を決定する必要がある。また、ロボットの特異点の問題等により動作可能な関節角度を算出できない可能性がある。従って、計算された各関節角度が適切な角度であるかどうかを、ロボットの動作シミュレーションにより確認することが安全性の面から望ましい。そこで、本システムにおいてはロボットの動作を確認するために、コンピュータ上でシミュレーションを行うこととした。図5に、シミュレーション画面を示す。

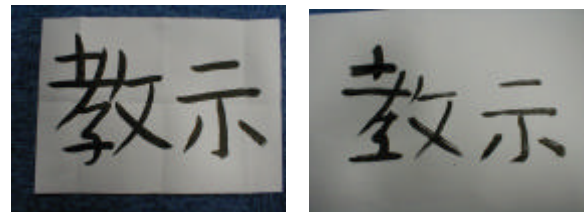
### 3.4 教示の実例

構築した教示システムを用いて、習字の教示を行った。本システムにおける教示では、実際の動作を計測し、そのデータを基に教示データを作成して、実際のロボットの動作を行う。図6にロボットが習字を行っている様子

を示す。教示に要する時間は、実際に習字を行う時間とデータの変換時間、さらにシミュレーション時間をあわせても、数十分程度となる。この習字の動作を従来のティーチングペンダントで行う場合では、教示に数時間程度必要である。図7に教示者の字体とロボット動作による字体を示す。今回の動作では、ロボットへの教示データとして、ペン型教示ツール中心の位置データのみを教示しているため、ツール姿勢の影響により教示者の字体がそのまま再現されていない。



図6 ロボットによる動作



(1)教示者の字体 (2)ロボット動作による字体

図7 教示およびロボットによる字体



図4 ペン型教示ツール

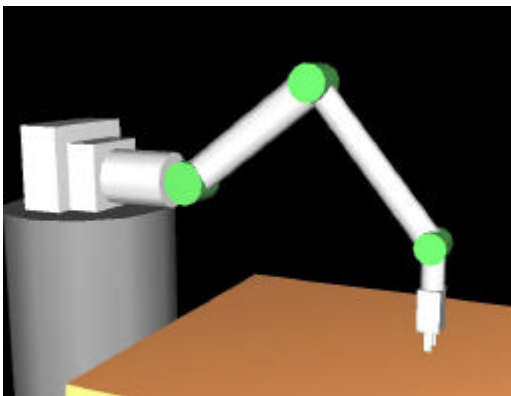


図5 CGによる動作シミュレーション

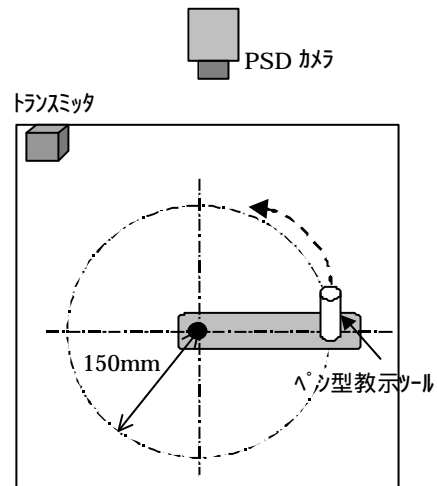


図8 実験方法

## 4. 実験および考察

### 4.1 実験方法

ポヒマスおよびPSDカメラによる計測データから、ノイズを除去し真値を推定する手法の有効性を検証するために、計測実験を行った。計測実験は、図8に示すように、ペン型教示ツールを半径150mmの円周を回転する治具に設置し、ペン型教示ツールを手動にて1回転させた。

### 4.2 実験結果および考察

図9に計測結果およびカルマンフィルタを用いた場合の結果を示す。なお、カルマンフィルタの設計に必要なシステムノイズ( $w$ )および観測ノイズ( $v$ )のパワースペクトル密度 $W$ ,  $V$ は実際の計測結果を考慮し、MATLABによるシミュレーションによって、試行錯誤的に調整を行って決定している。システム行列 $A$ は、空間を移動する質点の運動と捉えて設計した。

本実験における環境では、ポヒマスによる計測値は環境内にある金属物の影響により誤差を生じている。一方、PSDカメラによる計測値には、赤外発光LEDの反射によって生じる計測ノイズのためにばらつきが生じている。半径150mmの円を真値として平均誤差および分散を求めた結果(表1),ポヒマスによる計測値の分散は 34.08, PSDカメラによる計測値の分散は 122.82となった。これ

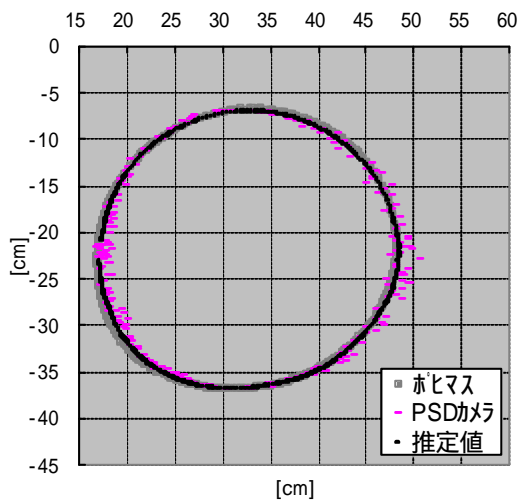


図9 実験結果

表1 計測値および推定値の平均誤差、分散

	ポヒマス	PSDカメラ	推定値
平均誤差[mm]	5.77	5.95	4.32
分散[mm]	34.08	122.82	23.16

に対し、カルマンフィルタをとおした推定値の分散は 23.16となり、カルマンフィルタを用いることによって、誤差の大きさが軽減されていることがわかる。しかし、本実験ではカルマンフィルタの設計に必要なパラメータをシミュレーションにより設定しており、これらのパラメータによって推定値は変わってくる。このため、どの様にパラメータを適切に設計するかということが重要な問題となり、今後更なる検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究では、人が操作するツールの動きを計測し、その動きを容易にロボットに教示することができる、教示システムの構築を目指し、本年度は以下のような研究を行った。

- 1) ペン型教示ツールの動きを計測し、その計測データを基に教示データを作成し、実際のロボットを動作させることができる教示システムを構築した。一例として、習字の教示を行い、その動作を確認した。
- 2) カルマンフィルタを用いた計測モデルを提案し、計測実験を行った。その結果、本提案モデルにおいて誤差が軽減されていることを確認した。

今後の課題としては、カルマンフィルタの設計に必要なパラメータをどの様に設計するかをさらに検討し、測定精度を踏まえて検討を行う必要がある。

## 文献

- [1] 池内克史, カンS.B., “視覚によるハンドの教示”, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5, pp599-602, 1995.
- [2] 下倉健一郎, 浅田春比古, 劉申, “バリ取り作業におけるヒューマンスキルの教示方法に関する検討”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp144-149, 1996.
- [3] 川崎晴久, 中山寛二, グラハム パーカー, “VR環境での人間の動作意図に基づくロボット教示”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.2, pp899-906, 2000.
- [4] 草地良規, 加藤晃市, 奥平雅士, “自動倣い作業ロボットシステムのための断面形状認識”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.6, pp882-889, 2000.
- [5] 柘植英明, 谷和男, 稲葉昭夫, 棚橋英樹, “ロボット教示高度化のためのセンシング手法に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, pp21-24, 2001.
- [6] 野波健蔵, 西村秀和, 平田光男, “MATLABによる制御系設計”, pp75-82, 東京電機大学出版局.