

## エピソード幾何を利用した呈示者視野復元に基づく模倣の実現

吉川 雄一郎<sup>\*1</sup> 浅田 稔<sup>\*1\*2</sup> 細田 耕<sup>\*1\*2</sup>

## Imitation based on Demonstrator's View Recovery Utilizing Epipolar Geometry

Yuichiro Yoshikawa<sup>\*1</sup>, Minoru Asada<sup>\*1\*2</sup> and Koh Hosoda<sup>\*1\*2</sup>

Imitation is an important capability for an intelligent robot to perform a variety of complicated tasks in the real world. It is one of the most interesting issues as a study of not simply accelerating behavior learning but also modeling the mechanism underlying human intelligence. From these viewpoints, a method for imitation based on the demonstrator's view recovery is proposed, in which the learner recovers the demonstrator's view that can be regarded as observing itself in its own view by assuming that the demonstrator's body structure is the same as the learner. The method is based on the opt-geometric constraint called "epipolar geometry" between the both views and on the adaptive visual servoing to follow the desired trajectory corresponding to the recovered demonstration in the learner's view. In order to estimate the parameters of epipolar geometry, we assume that the both initial postures are the same. It is shown that the learner can perform view-based imitation by the proposed method in the real robot experiment. Finally, we discuss our future work on imitation in the paradigm of demonstrator's view recovery.

**Key Words:** imitation, epipolar geometry, adaptive visual servoing, view recovery

## 1. はじめに

近年、知的に振る舞うロボットに必要な要素として模倣の能力が注目されている。多自由度・多種感覚を持つロボットの行動の強化学習において、状態行動空間の次元数の増加が学習に要する時間を指数的に増加させるという問題に対して、手本となる行動を模倣することから学習を始めることにより、学習に要する時間の短縮が期待できることが指摘されている [1]。また、模倣の能力が行為の実行と認識、他者の心的状態の推定、コミュニケーションの基盤となることなどが脳科学などから示唆されていること [2] [3] を受け、これらの実現の第一歩として、模倣能力を持った、あるいは獲得可能なロボットの実現を目指した研究が注目を集めている [4] [5]。

実ロボットにおいて模倣能力を実現した例として、Kuniyoshi et al. は観察により人間の呈示する行動を学習するシステムを提案している [6]。このシステムは人間の呈示行動をシンボリックに分節化することで、作業環境の変化に対してロバストな観察による学習が可能であるが、分節化のために、作業環境と行

動についての適切なモデルを設計者が与えなければならないという問題があった。また観察によるアセンブリタスク計画を扱った研究 [7] においても、設計者が用意した緻密な行動モデルに基づいて行動の分節化が行なわれていた。ロボット自身によって、呈示行動を分節化するためには、まず第一歩として呈示された運動を再現できる能力が必要となると考えられる。

明示的なモデルの付与を出発点としない従来研究では、見本となる運動をいかに分節化するか、あるいは内在化するか、という問題に焦点が当たっていたため、必ずしも実ロボットの観察による模倣の問題は扱われていなかった。そのため、モーションキャプチャシステムを用いたり、呈示者の身体にセンサを取りつけるなどして、再現のための運動指令をはじめから与えるものが多かった [8] ~ [12]。しかし観測から呈示者の運動指令を得るための変換は、一般にロボットにとって未知であり、視覚情報を用いて推定される必要がある。宮本、川人 [13] は実ロボットを用いて、人間の呈示の観察によって得られたエンドエフェクタの軌道の経由点を、躍度最小の最適化規範に基づきタスクレベル学習によって修正することで、人間とダイナミクスの異なるロボットが人間の呈示タスクを見まね学習をすることができることを示した。しかし観測から運動指令を得るための変換は 3 次元再構成に基づいてたため、すなわち 3 次元空間の座標変換と逆運動学/動力学によって構成されていたため、設計者がロボットの構造モデルを準備し、そのパラメータと座標変換マトリクスを校正しなければならなかった。

原稿受付

<sup>\*1</sup>大阪大学大学院工学研究科 知能・機能創成工学専攻

<sup>\*2</sup>阪大フロンティア研究機構

<sup>\*1</sup>Dept. of Adaptive Machine Systems, Graduate School of Engineering, Osaka University

<sup>\*2</sup>HANDAI Frontier Research Center

萬ら [14] は、高度な模倣へ発達する端緒となる模倣モデルとして、感覚パターンと運動パターンの対を記憶したエージェントが、観測したパターンに最も近い感覚パターンと対をなす運動パターンを反射的に生成するという原始模倣のモデルを提案している。このモデルでは設計者の関与なしに、呈示の観測に対して運動を生成することはできるが、呈示運動が再現できているわけではない。

そこで本論文では、カメラにより観測した呈示運動を 3 次元再構成せずに再現するため、適応型ビジュアルサーボ [15] を利用した手法を提案する。ビジュアルサーボ系は視覚情報をフィードバックループに含む制御系であるが、通常 3 次元再構成のプロセスを含み、ロボットの構造やそのパラメータが既知であるか、またはオフライン同定されている必要があった [19]。一方、適応型ビジュアルサーボ系 [15] は、それらに関する先見の知識を必要とせず、カメラ座標系の対象物を目標軌道に追従させることができる。従って、観測した呈示者の運動が呈示者の視点から見ればどのような軌道を描くかを推定することができれば、適応型ビジュアルサーボにより同じ軌道を実現することで呈示運動を再現することができる。以下では、第 2 章において、他視点の視野を推定する機構として、エピポラ幾何を利用した視野間のマッピングである視野変換について述べた後、これを呈示者視点の視野復元に適用するためのパラメータの推定法について述べる。そして、復元した軌道を実現するための制御系について述べ、呈示軌道再現のプロセスを概観する。第 3 章において、提案する機構により模倣が実現可能であることを示すため、実ロボットに本手法を適用した実験結果を示す。第 4 章において本手法の特徴について討論し、最後に結論を述べる。

## 2. 呈示者視野復元に基づく模倣

行動を呈示するロボット（以下、呈示者と呼ぶ）とそれを模倣するロボット（以下、学習者）の身体構造が異なる場合、模倣を定義することが難しい問題となる。例えば、呈示者と学習者のリンクパラメータが異なるとき、同じ関節角の時系列を実現しても、生成された運動は異なる意味を持ちうる。そこで、ここでは簡単のため、両者の身体構造が同じである場合を考える。両者が 2 つのカメラ視野を有するとするとき、「呈示者の視点から呈示運動を観察したときに描かれる呈示者の身体部位の軌道と、学習者の視野に描かれる自分自身の身体部位の軌道とが同じになるときの運動」を模倣行動とする定義が可能である。

Fig. 1 は呈示者と学習者の視野を示している。 $[p]$  はカメラ  $p$  の画像平面を表わし、 $V_O^A$  はエージェント  $A$  の呈示する運動を観察するエージェント  $O$  の視野を表わす。ここで、エージェントとは学習者あるいは呈示者を指す。エージェントはカメラを 2 つ有しているため、 $V_O^A$  は 2 つのカメラの画像平面の両方を指し、以下ではこれを視野と呼ぶ。呈示者の運動を観察する学習者の視野  $V_L^L$  から、自身の運動を観察する呈示者の視野  $V_D^D$  を復元することができれば、復元した  $V_D^D$  上の呈示者の身体部位の軌道を、学習者が自身を観察する視野  $V_L^L$  における学習者の身体部位の目標軌道として再現することで、模倣行動を実現することができる。このとき学習者にとって未知である視野  $V_D^D$  をどのように復元するか、 $V_L^L$  上の目標軌道をどのよう

に再現するか、が問題となる。

本節では、まず、ある視野上の投影点に対する異なる視野上の対応点を求める手法（視野変換）による呈示者視野復元について述べる。視野変換の基礎となるエピポラ幾何について説明し、視野変換のメカニズム、および視野変換を呈示者視野復元に適用する際に必要になるパラメータの推定方法について述べる。続いて、 $V_L^L$  上の目標軌道を再現するための適応型ビジュアルサーボ系について説明し、最後に呈示者視野復元に基づく模倣実現のプロセスをまとめる。

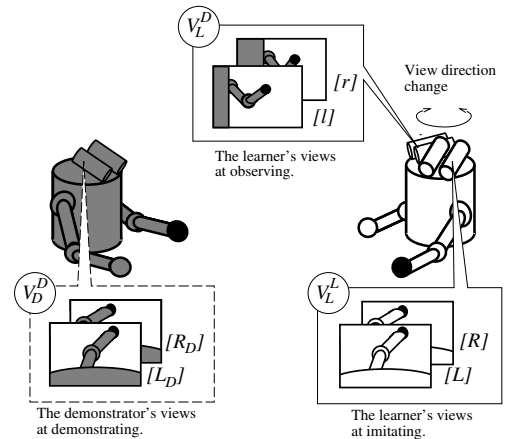


Fig. 1 Views

### 2.1 視野変換による呈示者視野復元

#### 2.1.1 エピポラ幾何

2 つのカメラがあるとき、3 次元空間上の注視点、それぞれのカメラの画像平面への投影点、およびカメラ中心は同一平面上にある (Fig. 2 参照)。この幾何学的関係はエピポラ幾何と呼ばれる。この関係から、片方の画像平面上の点は、エピポラ平面ともう片方の画像平面の交線であるエピポラ直線に拘束されることになる。

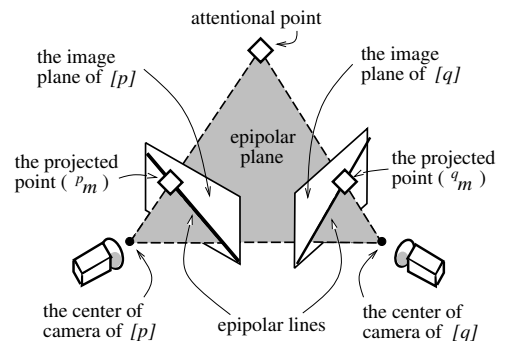


Fig. 2 Epipolar geometry.

画像平面  $[p]$  上の投影点を同次座標を用いて  ${}^p\tilde{m} = [{}^p x, {}^p y]^T$  と表わすとき、 $[p]$  と  $[q]$  の間のエピポラ幾何は、

$${}^p\tilde{m}^T {}^p q F {}^q\tilde{m} = 0, \quad (1)$$

というエピポラ方程式で表わされる。ここで  ${}^p q F \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は

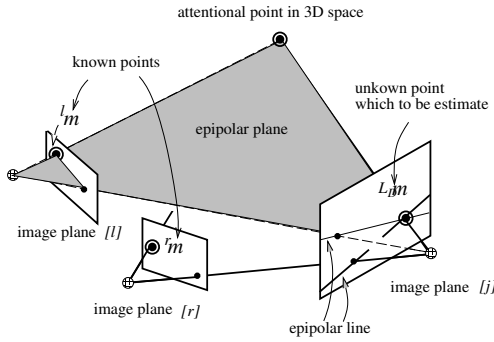


Fig. 3 Epipolar geometry among three views.

$[p]$  と  $[q]$  の間のエピポーラ方程式の基礎行列である．基礎行列は，カメラが透視射影でモデル化されるとき 8 点，アフィン射影でモデル化されるとき 4 点の投影点の組が与えられれば．線型解法により推定可能であることが知られている [16]．

### 2.1.2 エピポーラ幾何に基づく視野変換

画像平面  $[l]$  と  $[r]$  上の投影点の量子化座標が既知であり，画像平面  $[L_D]$  上の対応点の量子化座標が未知であるとき， $[L_D]$  上の対応点の量子化座標を推定する問題を考える．ただし，それぞれの画像平面間のエピポーラ方程式の基礎行列  ${}^{lL_D}F$ ， ${}^{rL_D}F$  は既知であるとする (Fig. 3 参照)．

対応点の組， $({}^l m, {}^{L_D} m)$ ， $({}^r m, {}^{L_D} m)$  はそれぞれエピポーラ方程式，

$$\begin{aligned} {}^l \tilde{m}^T {}^{lL_D}F {}^{L_D} \tilde{m} &= 0, \\ {}^r \tilde{m}^T {}^{rL_D}F {}^{L_D} \tilde{m} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

を満たす．これを变形して，

$$\begin{aligned} A({}^l m, {}^r m, {}^{lL_D}F, {}^{rL_D}F) \cdot {}^{L_D} m \\ = d_i({}^l m, {}^r m, {}^{lL_D}F, {}^{rL_D}F), \end{aligned} \quad (3)$$

を得る．ここで，

$$\begin{aligned} A({}^l m, {}^r m, {}^{lL_D}F, {}^{rL_D}F) &= \begin{bmatrix} a({}^l m, {}^{lL_D}F) & b({}^l m, {}^{lL_D}F) \\ a({}^r m, {}^{rL_D}F) & b({}^r m, {}^{rL_D}F) \end{bmatrix}, \\ d_i({}^l m, {}^r m, {}^{lL_D}F, {}^{rL_D}F) &= \begin{bmatrix} -c({}^l m, {}^{lL_D}F) \\ -c({}^r m, {}^{rL_D}F) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

ただし，

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a({}^p m, {}^{pq}F) \\ b({}^p m, {}^{pq}F) \\ c({}^p m, {}^{pq}F) \end{bmatrix} &= ({}^p \tilde{m}^T {}^{pq}F)^T \\ &= \begin{bmatrix} {}^{pq}f_{11} {}^l x + {}^{pq}f_{21} {}^l y + {}^{pq}f_{31} \\ {}^{pq}f_{21} {}^l x + {}^{pq}f_{22} {}^l y + {}^{pq}f_{32} \\ {}^{pq}f_{31} {}^l x + {}^{pq}f_{32} {}^l y + {}^{pq}f_{33} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

であり， ${}^{pq}f_{ij}$  は  ${}^{pq}F$  の  $i$  行  $j$  列の要素である．

従って  $A$  が正則であれば，

$$\begin{aligned} {}^{L_D} m &= A^{-1}({}^l \tilde{m}, {}^r \tilde{m}, {}^{lL_D}F, {}^{rL_D}F) \\ &\quad \cdot d({}^l \tilde{m}, {}^r \tilde{m}, {}^{lL_D}F, {}^{rL_D}F). \end{aligned} \quad (6)$$

として  ${}^{L_D} \tilde{m}$  を計算することができる．式 (6) の演算は， $[l]$  と

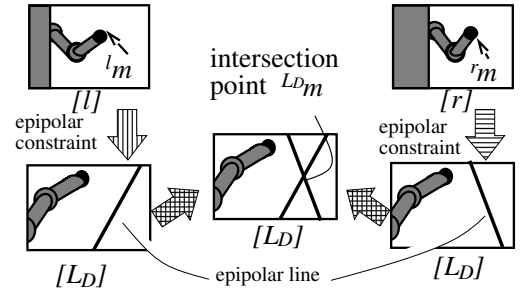


Fig. 4 A mechanism of the view transformation.

$[L_D]$  のエピポーラ方程式に  ${}^l m$  を代入して， $[L_D]$  上に得られる対応点  ${}^{L_D} m$  が存在するべきエピポーラ直線と， $[r]$  と  $[L_D]$  のエピポーラ方程式に  ${}^r m$  を代入して得られる，もう一本のエピポーラ直線との交点を求めていることに相当する (Fig. 3, 4 参照)．

### 2.1.3 基礎行列の推定

学習者が呈示者を観察する視野  $V_L^D = \{[l], [r]\}$  と呈示者が自分自身を観察する視野  $V_D^D = \{[L_D], [R_D]\}$  の間に成り立つエピポーラ方程式の基礎行列  ${}^{lL_D}F$ ， ${}^{rL_D}F$ ， ${}^{lR_D}F$ ， ${}^{rR_D}F$  が既知であれば，視野変換により， $V_L^D$  上の点を  $V_D^D$  に復元することができる． $V_L^D$  と  $V_D^D$  の間のエピポーラ方程式の基礎行列は  $V_L^D$  と  $V_D^D$  それぞれに投影された呈示者の身体部位の投影点の座標の組が十分な数だけあれば推定することができる．しかし， $V_D^D$  は学習者にとって未知の視野であるので，どのように基礎行列を推定すればよいか問題となる．

呈示者と学習者の身体構造が同じであるという仮定より，両者の姿勢（関節角）が同じであれば， $V_L^D$  上に投影される呈示者の身体と  $V_L^L = \{[L], [R]\}$  に投影される学習者の身体は完全に一致する (Fig. 5 参照)．これを利用して  $V_D^D$  と  $V_L^D$  の視野間のエピポーラ幾何の基礎行列を推定することができる．すなわち， $V_L^D$  と  $V_D^D$  上の呈示者の身体部位の投影点の組  $({}^l m_i, {}^r m_i, {}^{L_D} m_i, {}^{R_D} m_i)$ ， $(i = 1, \dots, N)$  を用いる代わりに， $V_L^D$  上の呈示者の身体部位の投影点と，これに対応する  $V_L^L$  上の学習者の身体部位の投影点の組  $({}^l m_i, {}^r m_i, {}^L m_i, {}^R m_i)$  を用いることで， $V_L^D$ ， $V_D^D$  の間のエピポーラ方程式の基礎行列を推定することができる．ただし， $N$  は推定に用いる対応点の組の数である．

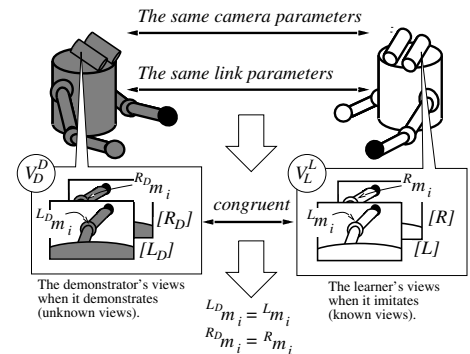


Fig. 5 The key idea of the method of the parameter estimation.

## 2.2 復元軌道実現のための適応型ビジュアルサーボ系

復元した呈示者の身体部位の軌道を再現するための制御系として、適応型ビジュアルサーボ系 [15] を構成する．適応型ビジュアルサーボ系は画像特徴量の速度とシステム記述変数（関節角）の速度の関係をあらわすヤコビ行列をオンライン推定しながら、画像特徴量を目標値に収束させるための制御系である．画像特徴量を学習者の身体部位、目標値を復元した呈示者の身体部位の軌道として適応型ビジュアルサーボ系を構成することにより、呈示者の身体部位の軌道を再現することができる．ここでは再現する身体部位として、手先を扱ったときの制御系について述べる．

$V_L^L$  の学習者の手先を  ${}^{LR}x_e = [{}^Lx, {}^Ly, {}^Rx, {}^Ry]^T \in \mathbb{R}^4$ 、関節角を  $\theta \in \mathbb{R}^m$  とする．ただし、 $({}^px, {}^py)$  は  $[p]$  の量子化座標であり、学習者は  $m$  自由度を有するとしている．復元した呈示者の手先の軌道  ${}^{LR}x_{ed} \in \mathbb{R}^4$  を目標軌道として追従するための制御則、

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) = & \hat{\mathbf{J}}(k)^+ \{ {}^{LR}x_{ed}(k+1) - {}^{LR}x_{ed}(k) \} \\ & + \{ \mathbf{I}_m - \hat{\mathbf{J}}(k)^+ \hat{\mathbf{J}}(k) \} \mathbf{k}_r \\ & + \mathbf{K} \hat{\mathbf{J}}(k)^T \{ {}^{LR}x_{ed}(k+1) - {}^{LR}x_e(k) \}, \quad (7) \end{aligned}$$

により、 ${}^{LR}x_{ed}$  が再現される．ただし、 $k$  は時間ステップ、 $\hat{\mathbf{J}}(k) \in \mathbb{R}^{n \times m}$  は画像上の手先速度と関節角速度の関係をあらわすヤコビ行列、 $\mathbf{I}_m$  は  $m \times m$  の単位行列、 $\mathbf{k}_r \in \mathbb{R}^4$  は任意のベクトル、 $\mathbf{K}$  は正定ゲイン行列である．第一項はフィードフォワード項、第二項は冗長性を表わす項、第三項はフィードバック項である．ただし  $\hat{\mathbf{J}}(k)$  はオンライン推定される．

## 2.3 模倣プロセス

呈示者視野復元に基づく模倣のプロセスは Fig. 6 のようになる

- (1)  $V_L^D$  から  $V_D^D$  へ視野変換を行なうための基礎行列を推定する．推定において  $V_D^D$  上の投影点  $({}^{LD}\hat{m}_i, {}^{RD}\hat{m}_i)$  を用いる代わりに、 $V_L^L$  上の投影点  $({}^L\hat{m}_i, {}^R\hat{m}_i)$  を代用する．
- (2) 推定した基礎行列を用いて、 $V_L^D$  上の呈示者の手先軌道  $({}^L\hat{m}_e(t), {}^R\hat{m}_e(t))$  を式 (6) の視野変換により  $V_D^D$  に復元する．
- (3)  $V_D^D$  上に復元した呈示者の手先軌道  $({}^{LD}\hat{m}_e(t), {}^{RD}\hat{m}_e(t))$  を  $V_L^L$  上の学習者の手先の目標軌道  $({}^{LR}x_{ed}(t))$  として制御則 (7) により、再現する．

## 3. 実験

提案手法の妥当性を示すために、実機を用いて実際に模倣行動が生成可能であることを示す．本論文では、2つの同じ構造 (PA10, MHI) のマニピュレータをそれぞれ呈示者と学習者の身体と見なす (Fig. 7 参照)．適用したマニピュレータは7自由度を有しているが、本論文では4自由度を固定し、残る3自由度のみを用いて実験を行なった．可動式のカメラヘッドに搭載された2つの CCD カメラ (CCB-EX37, SONY) を学習者の身体であるマニピュレータのそばにおき、これを頭部および目であるとみなしている (Fig. 8, 9 参照)．

ステレオカメラに得られた2枚の画像はフィールド多重化回路により垂直方向に半分のサイズに圧縮され、2枚の画像は統

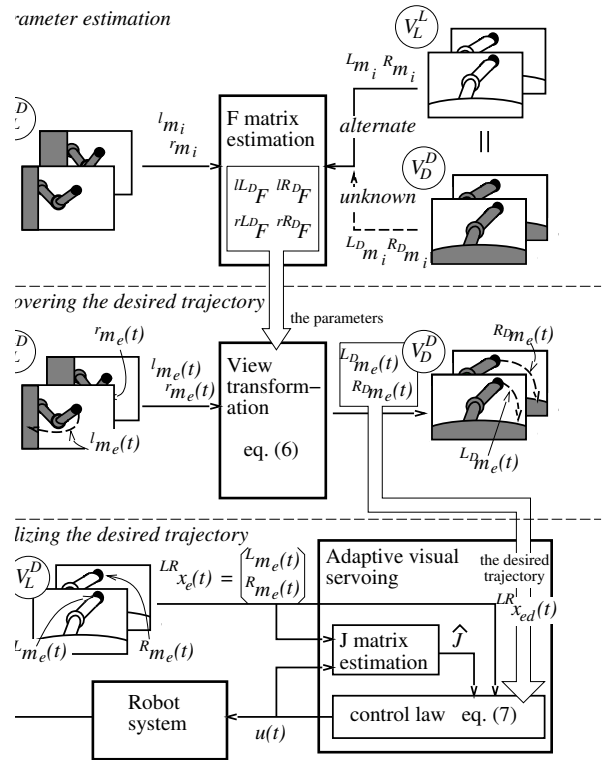


Fig. 6 An Overview of the imitation process.

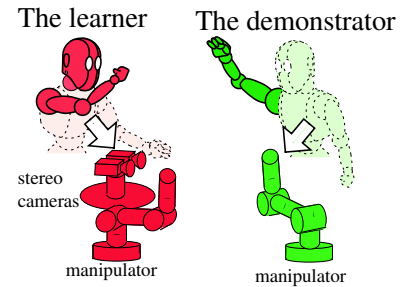


Fig. 7 The situation of the experiment using real robots.

合され、一枚の画像 (画像サイズ: 640[pixel] × 480[pixel]) として、SAD (Sum of Absolute Difference) による高速相関演算モジュール (Fujitsu) に送られる．追跡対象の画像はあらかじめ取り込んでおく．このモジュールは追跡対象の量子化座標を CPU に送る．CPU は関節角速度の目標値を計算し、リアルタイムネットワーク (ARCNET, 5.0 Mbps) を通じてマニピュレータのコントローラに送る．サンプリングタイムは 33 [msec] である．呈示者と学習者とは、異なるコントローラ、CPU が割り当てられている．

### 3.1 基礎行列の推定

手先のみにはマーカを貼付け高速相関演算モジュールに画像を記憶させ、両方のマニピュレータに 73 個の姿勢を取らせ、各姿勢において、画像の手先のデジタル座標の組を用いて基礎行列を推定した．推定においては、射影モデルは中心射影とし、推定された基礎行列を用いて導かれるエピポラ線とその対応点との画像上のユークリッド距離の二乗和を最小化する手法 [17]

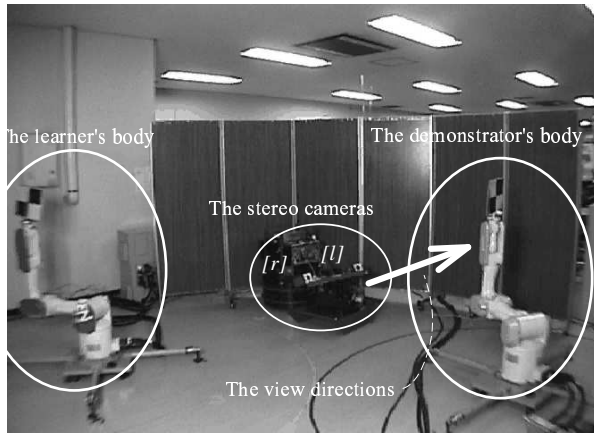


Fig. 8 An overview of the experimental setup.

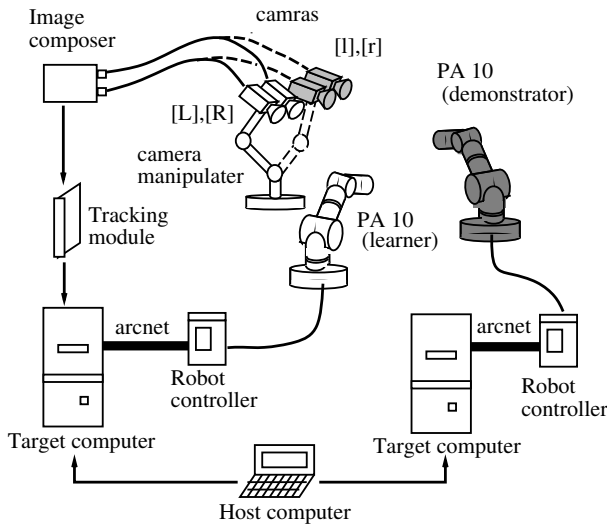


Fig. 9 Experimental setup.

を適用した. Tab. 1 に推定に用いた点と推定基礎行列により導かれたエピポラ線との距離の平均値と標本分散を示す.

Table 1 Average and standard values of the distances between points in the image planes and corresponding epipolar lines which is derived from the estimated fundamental matrices.

Views (estimated fundamental matrix)	Distances	
	Ave. [pixel]	Var. [pixel <sup>2</sup> ]
$[l]$ and $[L_D]$ ( ${}^{lL_D}\mathbf{F}$ )	1.8	2.0
$[r]$ and $[L_D]$ ( ${}^{rL_D}\mathbf{F}$ )	1.9	2.1
$[l]$ and $[R_D]$ ( ${}^{lR_D}\mathbf{F}$ )	1.9	1.9
$[r]$ and $[R_D]$ ( ${}^{rR_D}\mathbf{F}$ )	1.9	2.2

### 3.2 呈示者視野復元に基づく模倣の実現

学習者に模倣させる運動として, 呈示者に手先で三角形を描く運動を生成する関節角速度の系列を与える. 学習者は  $V_L^D$  上

の呈示者の手先を高速演算モジュールにより追跡し, 手先軌道 ( ) の量子化座標を得る (Fig. 10 参照). その観察軌道を視野変換により  $V_D^D$  上に復元して得た軌道 (・) を,  $V_L^L$  の画像に重ねて示す (Fig. 11 参照). Fig. 11 は呈示者に与えた関節角速度の系列を学習者に与えることで, あらかじめ測定しておいた正解の軌道 ( ) とともに示してある. 復元した軌道がこれと良く一致していることから, 提案手法により呈示者視野が復元できることがわかる.



Fig. 10 The learner's view observing the demonstration: the demonstrator's trajectory of the end-effector.

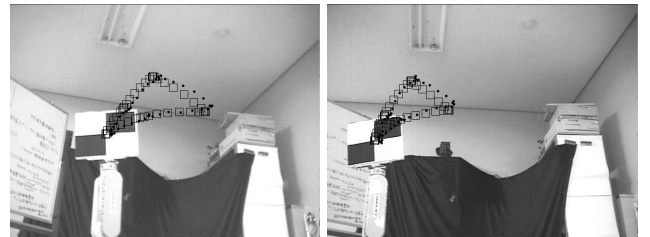
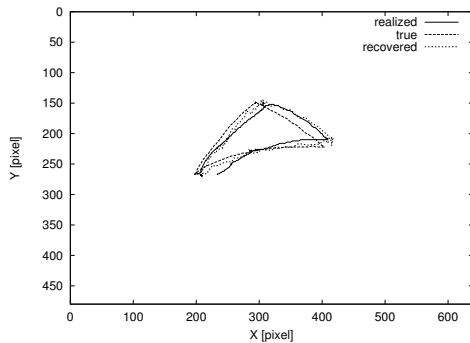


Fig. 11 The learner's view with a recovered trajectory and a true one measured in advance.

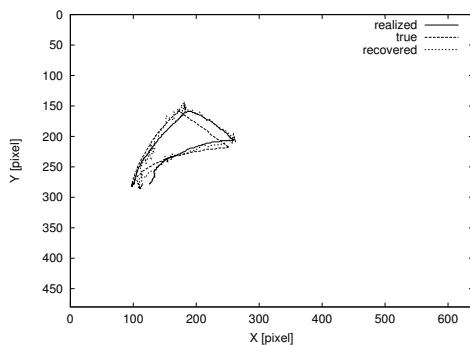
適応型ビジュアルサーボ系を構成して, 復元した呈示者視野の呈示者の手先軌道为目标軌道として再現することで模倣行動が実現できることを確認した. Fig. 12 は, 学習者の視野 ( $V_L^L$ ) 上の呈示者の手先の復元軌道 (recovered), 提案手法により生成した学習者の手先軌道 (realized), 正解軌道 (true), を示している. これらが良く一致していることから, 提案手法により模倣行動が実現可能であることが確認できた.

## 4. 討 論

視野間のエピポラ幾何を利用した視野変換は, 基礎行列のパラメータ, カメラ画像上の量子化座標を引数とする関数である. 呈示者視野復元の問題に適用するとき, 基礎行列は呈示者と学習者の両者の対応する身体部位の投影点の量子化座標を用いて推定されるため, 視野変換は身体部位の投影点の量子化座標の関数であると言える. カメラ画像の量子化座標の情報だけ



(a) [L]



(b) [R]

Fig. 12 The trajectories in imitation. The performed one, the true one measured in advance, and the recovered one.

では、カメラから遠くにいるスケールだけ大きくした呈示者と近くにいた呈示者とを区別することはできない。従って提案した呈示者視野復元の手法は、学習者と呈示者の身体構造が合同でなくても、両者の身体構造の違いがスケールだけであるならば、すなわち相似であるならば適用することができる。

実験では、呈示運動を観察した後、カメラヘッドを動かして視点を変え、学習者自身を観察する視野に軌道を復元してから、復元軌道の追従制御を行なわせているため、運動の呈示時間、視点移動の制御時間、および軌道復元の計算時間分だけ、呈示から模倣までのディレイがある。しかしここでは、手先の一点の軌道のみを復元すればよいだけであり、復元のための計算は式(6)のみであるので、軌道復元の計算時間は無視できる程短い。

適応型ビジュアルサーボの追従性能の詳細は文献[15]に譲り、ここでは、手先が大きな範囲にある程度で動く場合の注意点について簡単に述べる。ヤコビ行列推定においては、忘却係数を小さめにとっておくことで、局所的な情報を用いての推定が可能である。ただし、忘却係数を小さくしすぎると、ヤコビ行列の推定が不安定となるため、忘却係数の設定には注意が必要である。

提案手法では基礎行列の推定のために、身体構造の仮定の他に、姿勢が同じであるという仮定をおいていた。一般に姿勢が

同じであることを仮定しない場合を扱うべきである。筆者らは、両者の姿勢が異なる場合についての基礎行列の推定法も既に提案している[18]。

提案手法は、呈示運動を再現する機能の実現という意味では従来手法と変わらないが、観察から運動指令への変換に設計者が導入した座標系、すなわち3次元座標系を含まず、ロボットのセンサ・モータ空間の間のマッピングに基づいていることが特徴としてあげられる。変換に設計者が導入した座標系が含まれる場合、ロボットはその座標系を直接知覚することができないため、その座標系とセンサ・モータ系との関係の変化に適応することができないが、センサ・モータ空間どうしの関係であれば、適応することが可能である。一方、Asada et al. [4]が指摘するように、人間の認知発達過程を再現するロボットを構築することは、人間の認知発達過程の理解と知能ロボットの設計論の提案の両方に貢献する可能性がある。人間の場合、外部から座標系が導入されるとは考えにくいので、本研究のようにセンサ・モータ空間のマッピングに基づいたロボットの構築も考える必要がある。ただし提案手法では、センサ・モータ空間のマッピングを成立させるために、呈示者と学習者の身体構造が、スケールの違いは許容するものの、同じであることが仮定されている。しかしながら、この仮定が成立しない一般的なケースも考える必要がある。

提案手法は観察した呈示を再現するための手法であり、行動は画像上の軌道として表現されるのみで、それ以上の抽象化がない。模倣の目的は行動学習や行動理解にあるので、今後、再現した行動をどのように抽象化していくかという問題を考える必要がある。

## 5. 結 言

本論文では、観察した呈示軌道から再現運動への変換を設計者が明示的に与えることなしに、実ロボットの模倣を実現する手法として、呈示者視野復元に基づく手法を提案した。手法はロボットの視野間のエピポラ幾何を利用した視野変換、および適応型ビジュアルサーボ系からなる。実験において、手法を2台のマニピュレータ間の模倣に適用し、観察による模倣を実現することで、手法の有効性を示した。再現した行動の抽象化、身体構造が異なる場合の模倣の実現などが今後の課題である。

謝辞 本研究は科学技術振興事業団の戦略的基礎研究推進事業「脳を創る」中村プロジェクトの援助を受けた。

## 参 考 文 献

- [1] S. Schaal: "Is Imitation Learning the Route to Humanoid Robots?," Trends in Cognitive Science, vol.3, no.6, pp.233-242, 1999.
- [2] G. Rizzolatti and M. A. Arbib: "Language within our grasp," Trends in Neuroscience, vol.21, pp.188-194, 1998.
- [3] V. Gallese and A. Goldman: "Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading," Trends in Cognitive Science, vol.2, no.12, pp.493-501, 1998.
- [4] M. Asada and K. F. MacDorman and H. Ishiguro and Y. Kuniyoshi: "Cognitive Developmental Robotics As a New Paradigm for the Design of Humanoid Robots," Robotic and Autonomous System, vol.37, pp.185-193, 2001.
- [5] 國吉 康夫: "模倣ロボットは人間的知能を獲得するか?," 学術月報,

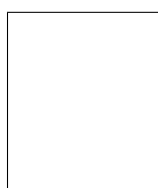
- Vol.53, No.9, pp.11-18, 2000.
- [6] Y. Kuniyoshi and M. Inaba and H. Inoue: "Learning by Watching: Extracting Reusable Task Knowledge from Visual Observation of Human Performance," IEEE Trans. on R & A, vol.10, no.6, pp.799-821, 1994.
- [7] K. Ikeuchi and T. Suehiro: "Toward an Assembly Plan from Observation Part I: Task Recognition With Polyhedral Objects," IEEE Trans. on R & A, vol.10, no.3, pp.368-385,1994.
- [8] S. Schaal: "Learning from Demonstration," Advances in Neural Information Processing Systems 9, pp.1040-1046, 1997.
- [9] T. Inamura, Y. Nakamura, H. Ezaki and I. Toshima: "Imitation and Primitive Symbol Acquisition of Humanoids by the Integrated Mimesis Loop," In Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp.4208-4213, 2001
- [10] A. Billard and M. Mataric: "Learning human arm movements by imitation: Evaluation of a biologically-inspired connectionist architecture," Robotics & Autonomous Systems 941. pp.1-16. 2001.
- [11] A. J. Ijspeert, J. Nakanishi and S. Schaal: "Trajectory Formation for Imitation with Nonlinear Dynamical Systems," In Proc. of the 2001 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.752-757, 2001
- [12] 鮫島和行, 銅谷賢治, 川人光男: "強化学習 MOSAIC : 予測性によるシンボル化と見まね学習", 日本ロボット学会誌, vol.19, no.5, pp.551-556, 2001.
- [13] 宮本 弘之, 川人 光男: "作業レベルのロボット学習のための見まねによる教示", 電子情報通信学会論文誌, J81-D-II, no.10, pp.2401-2410, 1998.
- [14] 萬 恭明, 國吉 康夫, 稲葉雅幸, 井上博允: "視覚・運動融合学習に基づく腕動作の原始模倣モデル", 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.403-404, 2001.
- [15] 細田 耕, 浅田 稔: "構造やパラメータに関する先験的な知識を必要としないフィードフォワード補償器を持つ適応型ビジュアルサーボ系の構成", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.2, pp.313-319, 1996.
- [16] H. C. Longuet-Higgins: "A computer algorithm for reconstructing a scene of from two projections," Nature, vol.293, pp.133-135, 1981.
- [17] 徐 剛, 辻 三朗: "3次元ビジョン", 共立出版, 1998
- [18] Y. Yoshikawa, M. Asada and K. Hosoda: "View-Based Imitation Learning by Conflict Resolution with Epipolar Geometry," In Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1416-1427,2001
- [19] K. Hashimoto: VISUAL SERVOING Real-Time Control of Robot Manipulation Based on Visual Sensory Feedback. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1993.



細田 耕 (Koh HOSODA)

1993年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。同年大阪大学工学部助手。1997年同大学大学院工学研究科助教授となり現在に至る。この間1998年から1年間スイスチューリヒ大学客員教授。ビジュアルサーボ、知能ロボットの研究に従事。博士(工学)。IEEE, 計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

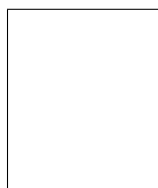
会員。



吉川 雄一郎 (Yuichiro YOSHIKAWA)

1977年9月6日生。2002年大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻博士前期課程終了。同年、同大学博士後期課程に進学。2003年4月より日本学術振興会特別研究員(DC2)。ロボットの模倣メカニズムの研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)



浅田 稔 (Minoru ASADA)

1982年大阪大学大学院基礎工学研究科後期課程修了。同年、大阪大学基礎工学部助手。1989年大阪大学工学部助教授。1995年同教授となり現在に至る。この間、1986年から1年間米国メリーランド大学客員研究員。日本ロボット学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, 人工知能学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本赤ちゃん学会, IEEE R&A, CS, SMC societies などの会員。NPO ロボカップ日本委員会会長, ロボカップ国際委員会副会長。(日本ロボット学会正会員)