

ロボット動作の自動生成のための観察による組み立て作業の抽象化

高松 淳[†] 小川原 光一[†]
木村 浩^{††} 池内 克史[†]

ロボットの研究において、観察による行動獲得機能を有するロボットの実現が強く望まれている。本論文では、組み立て作業に絞って行動獲得機能の実現を目指す。組み立て作業を行うロボットの研究は重要な地位を占めており、また様々な応用が期待できる。我々は、2つの多面体の接触状態遷移に基づき、組み立て作業を解析する方法を提案する。具体的には、(1) 組み立て作業を接触状態遷移に基づき表現し、(2) ビジョンシステムから得られた誤差を含むデータから、正しい接触状態およびその遷移を推定し、(3) 動作プリミティブ（サブスキルと呼ぶ）の列として組み立て作業を獲得する方法を提案する。実際に、リアルタイムステレオビジョンと2本腕を有する、我々が開発したロボットに提案手法を実装し、システムの有用性を示す。

Abstraction of Assembly Tasks to Automatically Generate Robot Motion from Observation

JUN TAKAMATSU,[†] KOICHI OGAWARA,[†] HIROSHI KIMURA^{††}
and KATSUSHI IKEUCHI[†]

The ability of robots to learn human tasks from observation is one of the long-awaited demands in the field of robotics. Here, we limit the scope of the target tasks to assembly tasks because the domain is one of the central research areas in robotics and has a wide application area. We propose a method to recognize assembly tasks based on transitions of contact relations between two polyhedral objects. Concretely speaking, we propose a method for: (1) representing task models based on such transitions, (2) determining correct contact relations and transitions of them from noise-contaminated visual information, and (3) generating a corresponding sequence of movement-primitives (referred to as *sub-skills*) from those task models. We have implemented the system on our robot, with real time stereo system and a pair of arms with dextrous hands. In actuality, we have demonstrated the system's effectiveness.

1. はじめに

ロボットに組み立て作業を行わせるプログラムを自動生成することは、産業的応用として大きな可能性があるだけでなく、人工知能の観点からも大きなテーマであるといえる。しかし、組み立て作業は、物体どうしの干渉などの相互作用を考慮しながら作業を遂行しなければならないため、非常に困難な作業であり、従来から多くの研究が行われてきた¹⁾。それら従来の研究より、組み立て作業を行うプログラムの自動生成は、以下のようなステップを経てなされるべきであると考えられる：

- (1) 組み立て作業における物体どうしの接触状態の遷移をグラフを用いて表す。グラフの頂点は接触状態を、辺は接触状態間の可能な遷移を表している。
- (2) グラフの経路を探索することにより、実現可能な接触状態遷移の列を得る。
- (3) 得られた接触状態遷移の列を実現するロボットの動作プログラムを生成する。

まず(1)のグラフ表現を得る方法について考察する。平井らは接触状態が変化する瞬間の角度(これを臨界角と呼ぶ)の周辺を探索することにより、グラフ表現を効率良く獲得する方法を提案している²⁾。しかし、この方法ではすべての臨界角をあらかじめ知っておく必要がある。Xiaoらは、拘束の大きい接触状態をユーザがいくつか与えることにより、その近傍にある拘束の小さい接触状態、およびその間の可能な遷移

[†] 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

^{††} 電気通信大学

The University of Electro-Communications

を Randomized algorithm の手法を用いて獲得する方法を提案している³⁾。しかし、拘束の大きい接触状態を、適切に与えてやる必要がある。最近では、Growth distance⁴⁾ と非線形最適化手法を用いてグラフ表現を自動的に獲得する方法が提案されている^{5),6)}。しかしこれらの方法は、計算時間がかかるという問題と、非線形最適化時に解の収束が不適切な場合、適切なグラフ表現が得られないという問題がある。

次に (2) のグラフ表現から適切な接触状態遷移の列を獲得する方法について考察する。ある目標接触状態を実現する組み立て作業の手順を決定することは、グラフ上で現在の接触状態に対応する頂点と、目標接触状態に対応する頂点とを結ぶ経路を求めることに対応する。通常、そのような経路は複数存在するので、より実現が簡単な手順を選ぶことが望まれており、それぞれの接触状態遷移の難易度があらかじめ決定されていれば、その選択は非常に簡単である。実際、静力学的な特徴から難易度を決定する方法が提案されている^{7),8)}。また、内山らは、ある接触状態における動力学的な振舞いをシミュレータを用いて計算し、その結果を用いて、組み立て作業ルールを自動生成する方法を提案している⁹⁾。いずれの手法においても、あらかじめグラフ表現を得ておく必要がある。

(1), (2) に関する困難さを解消するために、「見まねによる行動獲得」¹⁰⁾ のパラダイムが注目されている。このパラダイムでは、作業教示者を観察することにより得られる情報を用いて、(1), (2) の問題を解決している^{11)~17)}。本論文ではビジョンシステムから得られるデータを用いる方法に注目する。なぜならば、一般的なロボットシステムは、何らかのビジョンセンサ（本論文で用いたステレオビジョンシステムもその1つである）を標準装備しているからである。

Kuniyoshi らは実時間で組み立て作業を認識するシステムを提案しており¹³⁾、組み立て作業認識のための情報を効率良く獲得するために、ビジョンセンサの使用戦略に様々な工夫を凝らしている。しかし、このシステムは、特定の動作（ピックアンドブレース動作）のみを対象としたものであった。Ikeuchi と Suehiro は、任意の組み立て作業を認識する方法を提案している。そのために、彼らはすべての面接触状態における対象物体の可動範囲を、ある指標（運動自由度と呼ぶことにする）に基づいて 10 種類に分類した。これは、あらゆる面接触状態を 10 種類に分類したことに

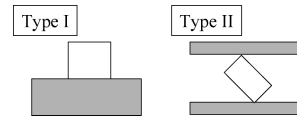


図 1 同じ自由度を持つ 2 つの接触状態
Fig. 1 Two contact relations with the same degrees of freedom (DOF).

なる。また、任意の組み立て作業において、10 種類の接触状態の間には 13 種類の遷移しかないことを示し、その 13 種類の遷移の意味を具体的に調べることにより、組み立て作業を認識する方法を構築した¹¹⁾。彼らはまた、ビジョンデータが持つ誤差を面接触状態を用いて修正する方法を提案している¹²⁾。しかし彼らの手法は、適用範囲が面接触状態のみであり、並進運動のみを対象としているため、回転運動を扱うことができないという問題があった。

本論文では、ビジョンシステムより得られた誤差を含んだビジョンデータから、組み立て作業を認識する方法を提案する。本論文の新規性は、(1) 面接触状態を含む任意の接触状態を扱うことができる、(2) 物体の運動に制限がない、つまり並進、回転運動とも扱うことができる、ということにある。これら 2 つの事柄を実現するためには、より多くの種類の接触状態、およびより多くの種類の遷移を扱う必要があり、これらを上手に扱うことが実現のための鍵となる。

本手法の特徴として、まずスキルに基づくマニピュレーションシステム¹⁸⁾ の考え方に基づいていることがあげられる。そのため、ロボットにおける実装の際、必要となるスキル（動作プリミティブ）を実装するのみでよいため、実装にかかる時間を大幅に削減することができ、構成の異なるロボットに対しても実装することができるという利点がある。また、回転軸の向きに関する指標を、解析の際に効率的に利用していることがあげられる。結果として、図 1 に示す接触状態を分けて扱うことができ、それにより解析の精度を向上させることができる。

本論文では組み立て作業を認識するための方法についてのみ述べ、ロボットによる実行に関しては論文 19) で扱うものとする。本論文の構成は、以下のようになっている：2 章では、論文 11) で提案されている運動自由度を回転運動まで扱えるように拡張し、与えられた接触状態から運動自由度を計算する方法について述べる。3 章では、通常組み立て作業中に現れるすべての接触状態遷移を具体的に解析する。この解析を通じて、我々は任意の組み立て作業の再現に必要な不可欠な動作プリミティブであるサブスキルと、組み立て作業

彼らは、ある物体の面と別の物体の面が接触している場合のみしか考慮していない。

の進行上、肝となる遷移である Critical Transition を定義する．我々の手法では、組み立て作業はサブスキルの列として記述され、Critical Transition の情報を用いてフィードバック戦略を立てることになる．4 章では、実際のビジョンシステムの実装について示す．特に、付加的な情報を用いて、ビジョンシステムより得られたデータの誤差を修正する手法を提案する．5 章では、実際にビジョンシステムより得られた組み立て作業を認識した結果を示す．6 章で本論文のまとめを行う．

本論文では、2 物体間の関係のみに注目する．組み立て作業は、基本的には 2 物体間の関係の列として表すことができる．また、組み立て作業で扱う物体は、すべて多面体かつ剛体であるとし、その形状は既知であるとする．さらに、2 つの物体のうち的一方（以後、把持物体と記述する）は、把持されており動かすことができるものとし、他方（以後、環境物体と記述する）は、固定されているものとする．

2. 接触状態の分類

組み立て作業において、スキルに基づくマニピュレーションシステム¹⁸⁾を効率的に構築するためには、接触状態のある基準（指標）を用いて分類する必要がある．なぜならば、すべての可能な遷移（これは無限に存在する）1 つに対して、1 つのスキルを定義することは現実的ではないためである．そこで、接触状態とその状態における物体の可能な微小変位には密接な関係があることに注目し、可能な微小変位を分類することにより、接触状態を分類する方法について記述する．

2.1 可能な微小変位の定式化

比留川らは、多面体物体間の接触における物体の可能な微小変位を、幾何モデルから導出する方法を提案している²⁰⁾．それによると、可能な微小変位は、式 (1) の形で表現することができる．ただし、 \mathbf{F}_{ij} は分離面の法線（たとえば、把持物体の点と環境物体の面が接触している場合、 \mathbf{F}_{ij} は面の外向き法線に等しい）、 $\Delta \mathbf{X}$ 、 Ω はそれぞれ位置および姿勢の微小変位、 N は接触点の数、 $M(i)$ は i 番目の接触点における分離面の数を表す．また J_i は、 i 番目の接触点の微小変位と物体の位置姿勢の微小変位との関係を表すヤコビ行列である．

$$\bigcap_i \bigcup_j \mathbf{F}_{ij}^T J_i \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{X} \\ \Omega \end{pmatrix} \geq 0 \quad (1)$$

本論文では、微小変位を screw 表現²¹⁾を用いて表す．screw 表現では、微小変位のある軸に沿った並進

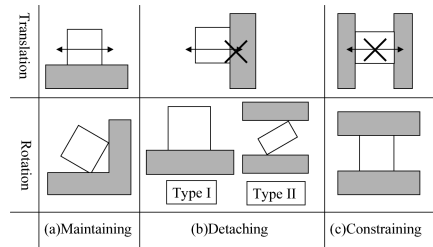


図 2 維持、離脱、拘束自由度

Fig. 2 Maintaining, detaching, and constraining DOF.

変位と、その軸を中心とする回転変位の組合せとして表現する．具体的には、軸の向きを \mathbf{S}_0 、軸の位置を \mathbf{C} 、回転変位に対する並進変位の割合を p とすると、その微小変位は、6 次元ベクトル $[\mathbf{S}_0, \mathbf{S}_1]$ として表現される．ただし、 $\mathbf{S}_1 = \mathbf{C} \times \mathbf{S}_0 + p\mathbf{S}_0$ である． $p = 0$ のときは純粋な回転変位を表し、 $p = \infty$ のとき、つまり $[\mathbf{0}, \mathbf{S}_0]$ のときは、純粋な並進変位を表す．

実際に screw 表現を用いると、式 (1) は式 (2) のように書き換えられる²¹⁾．ただし、 \mathbf{P}_i は i 番目の接触点の位置を表す．

$$\bigcap_i \bigcup_j \mathbf{F}_{ij} \cdot \mathbf{S}_1 + (\mathbf{P}_i \times \mathbf{F}_{ij}) \cdot \mathbf{S}_0 \geq 0 \quad (2)$$

2.2 微小変位の指標群

まず $\forall i, M(i) = 1$ 、つまり式 (2) が単なる連立線形不等式である場合（以後、非特異接触状態と記述する）と、それ以外の場合（以後、特異接触状態と記述する）に分けて物体の微小変位に関する指標群を定義する．

2.2.1 非特異接触状態における指標群

非特異接触状態の場合、把持物体の微小変位は、その変位にともなって接触状態がどのように遷移するかに基づき、以下に示す 3 種類に分類できる（図 2 参照¹¹⁾）：

- 維持変位 接触状態を遷移させない変位
- 離脱変位 接触状態を遷移させる変位
- 拘束変位 接触により消失した変位

並進変位における維持、離脱、拘束変位の自由度 m_t 、 d_t 、 c_t は、式 (3) のように定式化される¹¹⁾．ただし、 \mathbf{V}_t は式 (2) に $\mathbf{S}_0 = \mathbf{0}$ を代入したときの \mathbf{S}_1 の解領域、 $d(\mathbf{V}_t)$ は解領域 \mathbf{V}_t の face の最大次数²²⁾、 $\mathbf{R}_t = (\mathbf{F}_{11} \cdots \mathbf{F}_{N1})$ 、 $\text{Rank}(\mathbf{R}_t)$ は行列 \mathbf{R}_t のランクであるとする．

$$\begin{aligned} m_t &= 3 - \text{Rank}(\mathbf{R}_t) \\ d_t &= 3 - (m_t + c_t) \\ c_t &= 3 - d(\mathbf{V}_t) \end{aligned} \quad (3)$$

実際に $d(V_t)$ を計算する方法は、Kuhn ら²²⁾ や、Hirukawa ら²³⁾ により提案されている。我々はこれらの自由度をそれぞれ並進維持、並進離脱、並進拘束自由度と呼ぶ。次に回転変位に関する指標つまり自由度の定義を行う。

まず任意変位（並進と回転）における維持、離脱、拘束変位の自由度 m_a, d_a, c_a を式 (4) のように定義する。ただし V_a は式 (2) の $[S_0, S_1]$ の解領域、

$$R_a = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_{11} & \cdots & \mathbf{F}_{N1} \\ \mathbf{P}_1 \times \mathbf{F}_{11} & \cdots & \mathbf{P}_N \times \mathbf{F}_{N1} \end{pmatrix}$$

であるとする。

$$\begin{aligned} m_a &= 6 - \text{Rank}(R_a) \\ d_a &= 6 - (m_a + c_a) \\ c_a &= 6 - d(V_a) \end{aligned} \quad (4)$$

これらを全維持、全離脱、全拘束自由度と呼ぶ。

さらに作業理解の質を改善するために、我々は回転軸の向きに関して、次に示す 3 種類の指標群を定義する（図 2 参照）：

回転維持自由度 維持変位における回転軸の向きの自由度

回転離脱自由度 離脱変位における回転軸の向きの自由度

回転拘束自由度 拘束変位における回転軸の向きの自由度

実際にこれらの自由度を、式 (2) から計算する方法について述べる。

命題 1 空間 $V_r = \{S_0 | [S_0, S_1] \in V_a\}$ とすると、

$$c_r = 3 - d(V_r),$$

ただし c_r は回転拘束自由度である。

証明 定義より自明。 □

命題 2 m_r, d_r を、それぞれ回転維持、回転離脱自由度であるとする、

$$d_r = 3 - (m_r + c_r),$$

が成り立つ。

証明 回転軸の自由度は 3 であり、すべての自由度は維持、離脱、拘束のいずれかであるため。 □

命題 3 $m_r = m_a - m_t$ である。

証明 式 (5) のある適当な解の基底を $\{[s_{10}, s_{11}], \dots, [s_{m_a 0}, s_{m_a 1}]\}$ とすると、任意変位における維持変位はその線形和で表すことができる。

入力：基底 $B = \{[s_{10}, s_{11}], \dots, [s_{m_a 0}, s_{m_a 1}]\}$

(1) 集合 $\{s_{10}, \dots, s_{m_a 0}\}$ の中から、線形独立な最小の組合せ C を探す。ただし、すべての $s_{i0} \in C$ に対して $s_{i0} \neq 0$ である。ここで最小とは、式 (6) を満たす a_i が定数倍の違いを除いて一意に決定できることを意味する。もしこのような組合せが見つからなければ、集合 B を出力して終了する。

$$\sum_{s_{i0} \in C} a_i s_{i0} = 0 \quad (a_i \neq 0) \quad (6)$$

(2) 式 (6) を満たす a_i を決定する。

(3) 組合せ C に含まれる要素のうちの 1 つを集合 B から取り除く。

(4) 要素 $[s'_0, s'_1]$ を集合 B に加える。ただし

$$[s'_0, s'_1] = \sum_{s_{i0} \in C} a_i [s_{i0}, s_{i1}].$$

(5) (1) に戻る。

図 3 回転維持自由度を計算するためのアルゴリズム

Fig. 3 Algorithm to calculate maintaining DOF in rotation.

$$\bigcap_i^N \mathbf{F}_{i1} \cdot \mathbf{S}_1 + (\mathbf{P}_i \times \mathbf{F}_{i1}) \cdot \mathbf{S}_0 = 0 \quad (5)$$

次に、その解の基底に図 3 に示すアルゴリズムを適用することにより、 $\{[0, s_{11}], \dots, [0, s_{t1}], [s_{t+1,0}, s_{t+1,1}], \dots, [s_{m_a 0}, s_{m_a 1}]\}$ で表される解の基底が得られる。ただし、 $\{s_{t+1,0}, \dots, s_{m_a 0}\}$ は線形独立である。このとき $\{[0, s_{11}], \dots, [0, s_{t1}]\}$ の線形和で表される並進変位は維持変位を表すことから、 t は m_t に等しい。また $\{s_{t+1,0}, \dots, s_{r0}\}$ は線形独立であることから、 m_r は $m_a - t$ に等しい、つまり $m_r = m_a - m_t$ 。 □

これに対し、 $d_r = d_a - d_t$ や $c_r = c_a - c_t$ はつねに成り立つとは限らない。これより次の事実が成り立つ。

命題 4 回転離脱自由度にあたる回転軸の向き s_0 について考えたとき、次に示す 2 つの場合が存在する（図 2 参照）：

- $s_0, -s_0$ の両方が空間 V_r に含まれる場合
- s_0 のみが含まれる場合

前者の場合、把持物体はその軸向きに対し両方向に回転でき、後者の場合、どちらか一方の方向にしか回転できない。ちなみに、回転維持自由度はその定義からつねに両方向回転可能であり、拘束自由度はつねに両方向回転不可能であるので、そのような区別を必要としない。

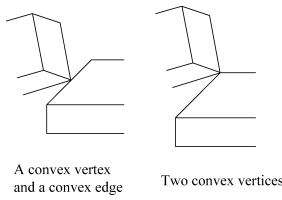


図 4 2 種類の特異接触要素

Fig. 4 Two kinds of singular contact elements.

そこでさらに、タイプ I、タイプ II 回転離脱自由度を次のように定義する：

- タイプ I 回転離脱自由度 離脱変位において、前者に対応する回転軸の向きの自由度
- タイプ II 回転離脱自由度 離脱変位において、後者に対応する回転軸の向きの自由度

命題 5 タイプ I 回転離脱自由度 d_{r1} は、次に示す手順を経て計算することができる：

- (1) 空間 V_r を解に持つ不等式 (7) を生成する。その生成の仕方はすでに提案されている^{22),23)}。

$$\bigcap_i G_i \cdot S_0 \geq 0 \tag{7}$$

- (2) 行列 $G = (G_1 \dots G_n)$ のランクを計算する。 d_{r1} は $3 - Rank(G) - m_r$ に等しい。

証明 式 (7) の解は可能な微小変位 (維持および離脱変位) における回転軸の向きを表しており、 $3 - Rank(G)$ は式 (8) の解の次元を表している。式 (8) の解は両方向回転可能な回転軸の向きを表しており、これより $3 - Rank(G) = m_r + d_{r1}$ がつねに成り立つ。

$$\bigcap_i G_i \cdot S_0 = 0 \tag{8}$$

□

命題 6 Type II 回転離脱自由度を d_{r2} とすると、 $d_{r2} = d_r - d_{r1}$ が成り立つ。

証明 自明。

□

2.2.2 特異接触状態における指標群

論文 20) によると、図 4 に示す 2 つの接触要素 (以後、特異な接触要素と記述する) を含むとき、複数分離面が存在し $\exists i, M(i) \neq 1$ となるため、微小変位を単なる連立線形不等式の形で表すことはできない。

このような場合、これらの特異な接触要素が存在しないものとして解析することにする。つまり、式 (9) に対して今までの解析を適用する。ただしこの場合、それぞれの自由度のことを、通常と区別して特異維持、特異離脱、特異拘束自由度と呼ぶ。

$$\bigcap_{\{i|M(i)=1\}} F_{i1} \cdot S_1 + (P_i \times F_{i1}) \cdot S_0 \geq 0 \tag{9}$$

ちなみに、特異接触状態では維持、離脱、拘束自由度は 0 であるとする。また、非特異接触状態では特異維持、特異離脱、特異拘束自由度は 0 であるとする。Ikeuchi ら¹¹⁾ による手法では、特異接触状態は明示的に扱われていない。

3. 接触状態遷移解析

この章では、任意の組み立て作業を再現するのに十分な動作プリミティブ (サブスキルと呼ぶ)、および作業の肝となる遷移 Critical Transition を定義し、教示された組み立て作業に対応するサブスキルの列を獲得し、Critical Transition を抽出する方法について述べる。

Ikeuchi ら¹¹⁾ は、並進維持、並進離脱、並進拘束自由度の違いにより、すべての面接触状態を 10 種類に分類できることを示した。そして、その 10 種類の接触状態の間に、13 種類しか可能な遷移がないことを示し、13 種類の遷移を具体的に調べることににより、組み立て作業の解析を行っていた。

まず、我々は並進および回転における維持、離脱、拘束自由度の違いにより、すべての非特異接触状態を分類しようと試みた。しかし 138 種類もあったため、その間の可能な遷移をすべて調べることは現実的ではないと結論づけた。そこで本論文では、接触状態の遷移にともない、前章で定義した運動自由度のうちの一つれかが増加し、一つれかが減少することに注目し、その情報を用いて組み立て作業の解析を行う方法を提案する。

3.1 組み立て作業中の運動自由度遷移

定義より、並進および回転における 6 種類の運動自由度の和はつねに一定、つまり 3 である。つまり、ある運動自由度が増加すれば、必ず別の運動自由度が減少することになる。この増加、減少した運動自由度の種類に注目すると、全部で 6 種類の運動自由度が存在するので、 ${}_6P_2 = 30$ 種類の組合せが存在する。この増加、減少のことを運動自由度遷移と呼ぶ。A 自由度から B 自由度への運動自由度遷移とは、A 自由度が 1 減少し、B 自由度が 1 増加する接触状態遷移のことを意味する。

理論的には、すべての 30 種類の運動自由度遷移は起こりうるが、本論文の目的は、人間の組み立て作業の認識であり、30 種類の遷移のうち実際に発生するもののみを対象とする。通常の組み立て作業では発生しない、取り除くべき遷移の候補は以下の 2 種類であ

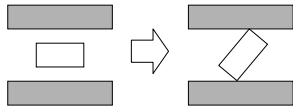


図 5 維持自由度から離脱自由度へ

Fig.5 Maintaining DOF to constraining DOF.

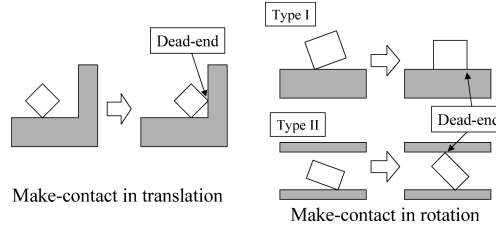


図 7 維持自由度から離脱自由度へ

Fig.7 Maintaining DOF to detaching DOF.

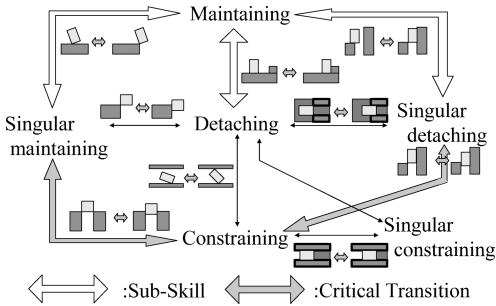


図 6 実際の組み立て作業で現れる遷移。この図に示されていない遷移は実際の組み立て作業ではめったに現れない

Fig.6 Practical transitions which appear in practical assembly tasks. Transitions which are not shown in this figure are so impractical that they seldom appear in the tasks.

る：

- 特異な接触状態を維持したまま、把持物体を動かすことにより発生する 6 種類の運動自由度遷移
- 維持（特異）拘束自由度間の 4 種類の運動自由度遷移

前者を取り除く理由は、我々人間にとっても特異な接触状態を維持したまま把持物体を動かすことが困難であるからである。後者を取り除く理由は、たとえば維持自由度から拘束自由度への運動自由度遷移は、図 5 に示す 2 つの接触状態間を回転運動により直接遷移した場合にしか発生せず、このような遷移も実現が困難であるからである。

前者より、特異維持、特異離脱、特異拘束自由度間の 6 つの運動自由度遷移が、後者より、維持自由度 → 拘束自由度、維持自由度 ↔ 特異拘束自由度の 4 つの運動自由度遷移が取り除かれる。結果として、通常の組み立て作業では図 6 に示す 20 種類の運動自由度遷移しか現れないことになる。

3.2 運動自由度遷移の意味

接触状態が遷移する瞬間の把持物体の変位の方向と運動自由度遷移に対応する基底の方向との関係により、これらの 20 種類の運動自由度遷移は、次に示す 2 種類に分類することができる：1 つは、維持自由度 ↔ 離脱自由度、維持自由度 ↔ 特異維持自由度、維持自由度 ↔ 特異離脱自由度の 6 つ（図中、白抜き矢印に対応）である。この場合、2 つの方向は一致している。

我々は、この運動自由度遷移を引き起こす把持物体の動作を、組み立て動作における必要不可欠な動作プリミティブと見なし、サブスキルと定義する。

もう 1 つは、残りすべての 14 種類の運動自由度遷移である。もちろん、この場合 2 つの方向は一致していない。これらは、実行時の誤差が組み立て作業の進行にどのように影響するかを判断するのに有用である。特に、実行時の誤差が組み立て作業の進行に深刻な影響を与える遷移（たとえば、図 12 に示す遷移など）を、Critical Transition と定義する（図中、灰色矢印に対応）。はじめに、サブスキルとしてどのようなものがあるかについて記述し、次にどのような遷移が Critical Transition であるかについて記述する。

3.3 サブスキル

3.3 から 3.5 節に出てくる図において、白色および灰色の物体はそれぞれ把持、環境物体を表すものとする。

3.3.1 維持自由度から離脱自由度へ

図 7 の左側に、並進維持自由度から並進離脱自由度への運動自由度遷移を引き起こす動作の例を示す。この例では、水平方向の変位（これは動作方向に一致する）が、維持変位から離脱変位に変化する。結果として、この動作は前述の運動自由度遷移を引き起こす。我々はこの動作を並進つき当てサブスキルと定義する。

図 7 の右上および右下に、回転維持自由度からタイプ I およびタイプ II 回転離脱自由度への運動自由度遷移を引き起こす動作の例を示す。この例では、紙面垂直軸回りの変位（これは動作方向に一致する）が、維持変位から離脱変位に変化する。結果として、この動作は前述の運動自由度遷移を引き起こす。我々はこれらの動作をタイプ I およびタイプ II 回転つき当てサブスキルと定義する。ちなみに、図の右下の例では、垂直方向において、並進離脱自由度から並進拘束自由度への運動自由度遷移が同時に発生している。

これらのサブスキルは、遷移前の接触状態を維持しながら「つき当たり（Dead-end）」接触要素に接触するまで把持物体を動かすことで実現できる。この性質

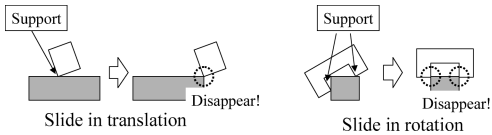


図 8 維持自由度から特異維持自由度へ

Fig. 8 Maintaining to singular maintaining.

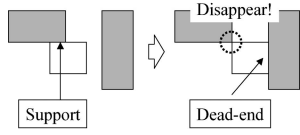


図 9 維持自由度から特異離脱自由度へ

Fig. 9 Maintaining DOF to singular detaching DOF.

はサブスキル実装の際に非常に役に立つ。

3.3.2 維持自由度から特異維持自由度へ

図 8 の左側に、並進維持自由度から並進特異維持自由度への運動自由度遷移を引き起こす動作の例を示す。この例では、水平方向において、その運動自由度遷移が発生している。我々はこの動作を並進すべしサブスキルと定義する。ちなみに、垂直方向において、並進離脱自由度から並進特異維持自由度への運動自由度遷移が同時に発生している。

図 8 の右側に、回転維持自由度から回転特異維持自由度への運動自由度遷移を引き起こす動作の例を示す。この例では、紙面垂直軸回りににおいて、その運動自由度遷移が発生している。我々はこの動作を回転すべしサブスキルと定義する。ちなみに、水平、垂直方向において、並進離脱自由度から並進特異維持自由度への運動自由度遷移が同時に発生している。

つき当てサブスキルと比較して、遷移後の接触状態には「つき当たり」接触要素がない。そのかわり、この運動自由度遷移は、つねに並進離脱自由度から並進特異維持自由度への遷移をとまなう。結果として、これらのサブスキルは、接触状態を維持しながら「支え (Support)」接触要素がなくなるまで動かすことで実現できる。

3.3.3 維持自由度から特異離脱自由度へ

図 9 に、並進維持自由度から並進特異離脱自由度への運動自由度遷移を引き起こす動作の例を示す。この例では、水平方向において、その運動自由度遷移が発生している。この動作は、並進つき当て動作にも並進すべし動作にも似ている。実際に、遷移前の接触状態には「支え」接触要素が含まれているし、遷移後の接触状態には「つき当たり」接触要素が含まれている。我々はこのような運動自由度遷移を引き起こす動作を、並進つき当てサブスキルで代用する、つまり新

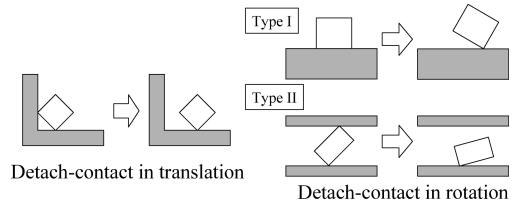


図 10 離脱自由度から維持自由度へ

Fig. 10 Detaching DOF to maintaining DOF.

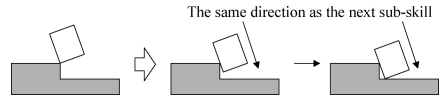


図 11 特異維持自由度から離脱自由度へ

Fig. 11 Singular maintaining DOF to detaching DOF.

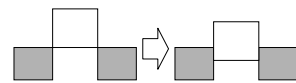


図 12 特異維持自由度から拘束自由度へ

Fig. 12 Singular maintaining DOF to constraining DOF.

たなサブスキルは定義しない。

回転の場合も同様に、回転維持自由度から回転特異離脱自由度への運動自由度遷移を引き起こす動作を、回転つき当てサブスキルで代用する。

3.3.4 その他の運動自由度遷移

図 10 の左側 (右側) に、並進 (回転) 離脱自由度から並進 (回転) 維持自由度への運動自由度遷移を引き起こす動作の例を示す。それぞれの動作は並進 (回転) つき当て動作の逆の動作である。我々はこの動作を並進 (回転) つき放し動作と定義する。しかし、組み立て作業は維持自由度が少なくなる方向に進行する傾向があるため、これらの動作はめったに現れることはない。また、並進 (回転) 特異離脱自由度から並進 (回転) 維持自由度への運動自由度遷移を引き起こす動作は、並進 (回転) つき放し動作で代用することにする。もちろんこれらの動作もめったに現れることはない。

図 11 に、特異維持自由度から維持自由度への運動自由度遷移を引き起こす動作の例を示す。この動作はすべし動作の逆の動作である。この動作は、その次の状態に移るための動作の一部と見なすことができるため、新たなサブスキルは定義しない。

3.4 Critical Transitions

3.4.1 特異維持自由度から拘束自由度へ

図 12 に、特異維持自由度から拘束自由度への運動自由度遷移をとまなう接触状態遷移の例を示す。この例では、水平方向と紙面垂直軸回りににおいて、前述の運動自由度遷移が発生している。

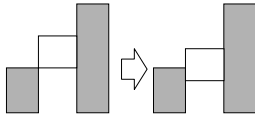


図 13 特異離脱自由度から拘束自由度へ

Fig. 13 Singular detaching DOF to constraining DOF.

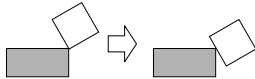


図 14 特異維持自由度から離脱自由度へ

Fig. 14 Singular maintaining DOF to detaching DOF.

このような運動自由度遷移をともなう接触状態遷移では、把持物体は狭い「入り口」を通り抜けて次の接触状態へ遷移しなければならないため、運動自由度遷移に関する変位方向において正確な位置姿勢制御を必要とする。よって、この遷移は Critical Transition である。これは、論文 24) において Critical Dimension と定義されているものに対応し、彼らはビジュアルフィードバックにより位置姿勢制御を行っている。

3.4.2 特異離脱自由度から拘束自由度へ

図 13 に、特異離脱自由度から拘束自由度への運動自由度遷移をともなう接触状態遷移の例を示す。この例では、水平方向と紙面垂直軸回りに関して、前述の運動自由度遷移が発生している。

この場合も、次の接触状態に遷移するためには、運動自由度遷移に関する変位方向において正確な位置姿勢制御を必要とするため、この遷移も Critical Transition である。しかしこの場合、遷移前の把持物体は、その運動自由度遷移に関する変位方向において 1 方向にしか動けないため、位置姿勢制御は比較的簡単である。

3.4.3 特異維持自由度から離脱自由度へ

図 14 に、特異維持自由度から離脱自由度への運動自由度遷移をともなう接触状態遷移の例を示す。たしかに、特異接触状態を正確に実現することは難しいが、この場合、実行時に多少の誤差が発生したとしても次の状態へ遷移することができる。よって、この遷移は Critical Transition ではない。

3.4.4 特異離脱自由度 ↔ 離脱自由度および特異拘束自由度 ↔ 拘束自由度

図 15 に、特異離脱自由度と離脱自由度の間の運動自由度遷移をともなう接触状態遷移の例を示す。その運動自由度遷移に関する方向において、把持物体は遷移前後で 1 方向にしか動かさなため、誤差はめったに発生しない。また、この方向に関する誤差は、接触状態遷移に直接影響を与えない。よって、この遷移は

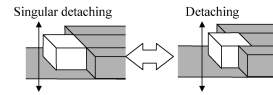


図 15 特異離脱自由度と離脱自由度の間の運動自由度遷移

Fig. 15 DOF-transitions between singular detaching DOF and detaching DOF.

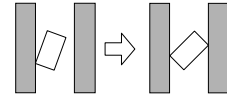


図 16 離脱自由度から拘束自由度へ

Fig. 16 Detaching DOF to constraining DOF.

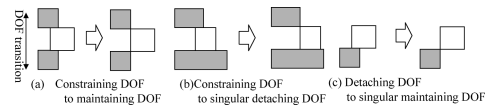


図 17 すべらしサブスキルにともなう発生する運動自由度遷移

Fig. 17 Transition occurring in slide sub-skill execution.

Critical Transition ではない。同様に特異拘束自由度と拘束自由度の間の運動自由度遷移をともなう接触状態遷移も Critical Transition ではない。

3.4.5 その他の運動自由度遷移

図 16 に、離脱自由度から拘束自由度への運動自由度遷移をともなう接触状態遷移の例を示す。この運動自由度遷移は、タイプ II 回転つき当てサブスキルを実行する際に発生する。この運動自由度遷移に関する方向において、遷移前、把持物体は 1 方向にしか動かさなため、誤差はめったに発生しない。また、この方向に関する誤差は、接触状態遷移に直接影響を与えない。よって、この遷移は Critical Transition ではない。

図 17 に、次に示す運動自由度遷移をともなう接触状態遷移の例を示す：

- (a) 拘束自由度から特異維持自由度へ
- (b) 拘束自由度から特異離脱自由度へ
- (c) 離脱自由度から特異維持自由度へ

この運動自由度遷移は、すべらしサブスキルを実行する際に発生する。1 番目と 2 番目の運動自由度遷移に関する方向において、遷移前、把持物体はまったく変位することができない、つまり誤差はまったく発生しない。よって、この遷移は Critical Transition ではない。3 番目の運動自由度遷移に関する方向において、遷移前、把持物体は 1 方向にしか変位することができないので、誤差はめったに発生しない。また、この方向に関する誤差は、接触状態遷移に直接影響を与えない。よって、この遷移は Critical Transition ではない。

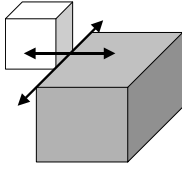


図 18 2種類の特異維持自由度

Fig. 18 Two types of singular maintaining DOF.

3.5 サブスキルの割付け, および Critical Transition の抽出

サブスキルの定義から, その割付けの方法は以下のようになると考えられる:

- 並進 (回転) 維持自由度から並進 (回転) 離脱自由度が並進 (回転) 特異離脱自由度への運動自由度遷移が発生したとき, 並進 (回転) つき当てサブスキルを割り付ける.
- 並進 (回転) 離脱自由度から並進 (回転) 特異離脱自由度へ, 並進 (回転) 維持自由度への運動自由度遷移が発生したとき, 並進 (回転) つき放しサブスキルを割り付ける.
- 並進 (回転) 維持自由度から並進 (回転) 特異維持自由度への運動自由度遷移が発生したとき, 並進 (回転) すべらしサブスキルを割り付ける.

1, 2 番目のルールは正しいが, 3 番目のルールは正しくない. 特異接触状態の解析における簡略化が, この結果を引き起こしたものと考えられる.

たとえば, 図 18 に示す平行な辺-辺接触 (特異接触状態である) について考える. 並進特異維持自由度は 3 であるので, 任意の並進変位は同じ性質を持つことが期待される. 辺に沿った並進変位は接触状態を維持し続けられるのに対し, 辺に垂直な並進変位は接触状態を遷移させてしまう. すべらしサブスキルの割付けのためには, これら 2 つの特異維持自由度を区別する必要がある.

そこで, 特異維持自由度から維持自由度に似た性質を有するものを分離することを考える. 維持自由度に似た性質を持たない特異維持自由度に関する方向の変位は, 接触状態を維持し続けられないことに注目し, 新たに束縛自由度を定義する.

束縛自由度は, 束縛変位の自由度である. 束縛変位は, 非特異, 特異接触状態の区別なく, 接触状態を維持できない変位であると定義する.

今, 物体の可能な微小変位が, 式 (2) の形で表現されているとする. 並進束縛自由度は, 並進変位における束縛変位の自由度であるとする. 定義より並進における束縛変位は式 (10) で定式化される.

$$\bigcap_i^N \bigcap_j^{M(i)} \mathbf{F}_{ij} \cdot \mathbf{S}_1 \neq 0 \quad (10)$$

これより, 並進束縛自由度 r_t は, $\text{Rank}(R_t)$ に等しい. ただし $R_t = (\mathbf{F}_{11} \cdots \mathbf{F}_{NM(N)})$ である.

同様に, 任意変位における束縛変位は, 式 (11) で定式化されるので, 全束縛自由度 r_a は $\text{Rank}(R_a)$ に等しい. ただし,

$$R_a = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_{11} & \cdots & \mathbf{F}_{NM(N)} \\ \mathbf{P}_1 \times \mathbf{F}_{11} & \cdots & \mathbf{P}_N \times \mathbf{F}_{NM(N)} \end{pmatrix}$$

である.

$$\bigcap_i^N \bigcap_j^{M(i)} \mathbf{F}_{ij} \cdot \mathbf{S}_1 + (\mathbf{P}_i \times \mathbf{F}_{ij}) \cdot \mathbf{S}_0 \neq 0 \quad (11)$$

回転束縛自由度は, 束縛変位における回転軸の向きの自由度と定義する. 命題 3 と同様な証明により, 回転束縛自由度 r_r は $r_a - r_t$ に等しいと結論付けられる.

束縛自由度を用いると, サブスキル割付けの正しいルールは以下ようになる:

- 並進 (回転) 維持自由度から並進 (回転) 離脱自由度が並進 (回転) 特異離脱自由度への運動自由度遷移が発生したとき, 並進 (回転) つき当てサブスキルを割り付ける.
- 並進 (回転) 離脱自由度から並進 (回転) 特異離脱自由度へ, 並進 (回転) 維持自由度への運動自由度遷移が発生したとき, 並進 (回転) つき放しサブスキルを割り付ける.
- 並進 (回転) 維持自由度から並進 (回転) 特異維持自由度への運動自由度遷移が発生し, かつ並進 (回転) 束縛自由度が増加したとき, 並進 (回転) すべらしサブスキルを割り付ける.

また, Critical Transition は以下に示す運動自由度遷移が発生した接触状態遷移である:

- 並進 (回転) 特異維持自由度から並進 (回転) 拘束自由度への運動自由度遷移をともなう接触状態遷移
- 並進 (回転) 特異離脱自由度から並進 (回転) 拘束自由度への運動自由度遷移をともなう接触状態遷移

定義より, 非特異接触状態の並進, 回転, 任意運動における束縛自由度は, 離脱自由度と拘束自由度の和に等しい. しかし, 特異接触状態において, 束縛自由度はそれらの和と必ずしも等しくない.

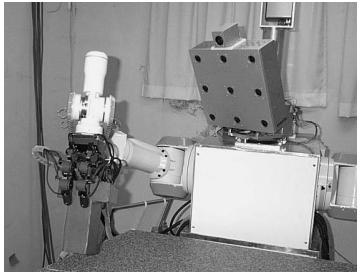


図 19 試作機
Fig. 19 Test bed.

4. ビジョンシステムの実装

4.1 システム概要

本論文で実装に用いたロボット²⁵⁾は、視差（距離）画像と、それと位置あわせされた色画像を同時に得ることのできる、マルチベースラインリアルタイムステレオカメラシステム²⁶⁾と、7自由度をもつマニピュレータ、およびその先端には3自由度を持つ3本指ハンドを搭載している（図 19 参照）。

本システムは以下のような手順を経て、人間の組み立て作業を観察、理解し、ロボットにより同じ組み立て作業を再現する：

- (1) 教示者が行う組み立て作業をステレオビジョンシステムを用いて記録する。
- (2) 記録された画像から組み立て作業物体を抽出し、3次元の位置姿勢を推定する。
- (3) 推定された3次元の位置姿勢と物体の幾何形状の情報を用いて、接触状態、およびその遷移を計算する。
- (4) 各接触状態における運動自由度を計算し、運動自由度遷移からサブスキルを割り付ける。
- (5) 割り付けられたサブスキルを順次呼び出すことにより、同じ組み立て作業を再現する。

(4)については、線形計画法を用いる方法²²⁾や、特異値分解および凸包により連立線形不等式を扱うツール²⁷⁾等を用いて運動自由度を計算した。また(5)の具体的な実装については論文 19)に示す。以下では、(2)と(3)について具体的に記述する。

4.2 組み立て物体の抽出

まず、ステレオビジョンシステムから得られた画像から、組み立て作業物体のみを抽出する。組み立て作業を教示している間、光源環境が大きく変化することはないとし、また簡単のため物体の色を白色として、背景差分法と白色抽出を用いて色画像上で組み立て作業物体のみを抽出する。色画像と視差画像はすでに位

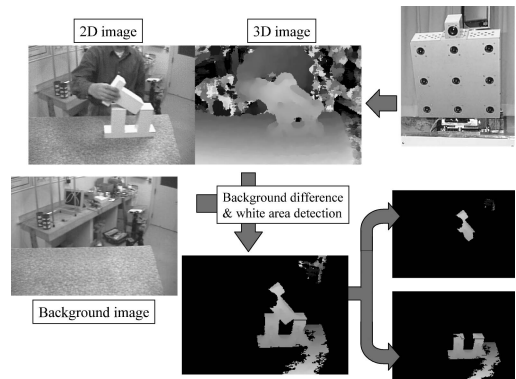


図 20 視覚処理システム
Fig. 20 Robot vision system.

置あわせされているため、組み立て作業物体のみの視差画像を得ることができる（図 20 参照）。

次に、把持物体と環境物体をヒストグラムを用いて分離する。それぞれのヒストグラムはあるピクセル上に物体が存在する（背景差分および白色抽出において除去されなかった部分を指す）頻度を表している。前述の、環境物体は移動しないという仮定から、ヒストグラムを用いて把持物体と環境物体を分離することができる。

さらに、上で得られた把持、環境物体を分離した視差画像に対して、3次元テンプレートマッチング（3DTM）法²⁸⁾を用いて、把持物体の軌道、および環境物体の位置姿勢を求める。3DTM法は、いわゆるIterative Closest Point（ICP）法の一種である。ICP法が単純な最小自乗法を用いているのに対し、3DTM法は重み付き最小自乗法を用いることにより、ロバストな解を得ることができるという特徴を有する。

4.3 接触状態およびその遷移の推定

4.3.1 接触状態の推定

一般的に、物体の位置姿勢および幾何形状が与えられれば、接触状態を計算することができる。しかし、前述の方法を用いて得られた把持物体の軌道および環境物体の位置姿勢には、通常誤差が含まれているため、結果として間違った接触状態を導き出す可能性がある。また、運動自由度の計算のためには誤差を含まない正確な物体の位置姿勢が必要となる。そこで本システムでは、まず誤差のあるデータから接触状態を大まかに計算し、次にそれを用いてデータに含まれる誤差を修正すること¹²⁾を行う。

接触状態を決定するために、まずすべての頂点、辺、面の間の最短距離を求める。その距離が適当な threshold 値以下ならば接触していると見なすことにより、接

触状態を推定する。

次に、推定された接触状態を用いて位置姿勢に含まれる誤差を修正する。一般的に、ある任意の接触状態を満たす物体の位置姿勢を求めることは、非線形冗長連立方程式を解くことに等しく、困難な問題である。本システムでは、非線形最適化手法を用いてこの計算を行う。通常、非線形最適化手法では、おおよその解をあらかじめ知っておく必要がある。本システムでは、ビジョンシステムにより得られた解を、おおよその解として用いることができる¹²⁾。実際に位置姿勢の誤差を取り除く方法は以下ようになる：

- (1) 接触状態を構成する要素（頂点、辺、面）間の距離 Δ_i と物体の位置姿勢 \mathbf{q} との関係式 $\Delta_i = f_i(\mathbf{q})$ を求める。
- (2) $\bigcap_i f_i(\mathbf{q}) = 0$ を非線形最適化手法を用いて解く。

本論文では、以下のような方法を用いて非線形最適化を行った。ただし \mathbf{q}_0 は初期解であり、ビジョンシステムから得られた位置姿勢であるとする。

- (1) $\mathbf{q}_c = \mathbf{q}_0$
- (2) $\max f(\mathbf{q}_c)$ が十分小さければ、 \mathbf{q}_c を解として返し、終了。
- (3) $f_i(\mathbf{q})$ を \mathbf{q}_c 付近でテーラー展開し、線形近似する。
- (4) 特異値分解を用いて線形近似された式がすべて（できるだけ）0 となる解を求め、その結果を用いて \mathbf{q}_c を更新する。
- (5) (2) に戻る。

詳細は論文 31) に示す。

4.3.2 接触状態間の直接遷移可能性

前項では、大まかに推定された接触状態から、得られた位置姿勢に含まれる誤差を修正する方法について記述した。しかし、誤差のある状況で得られた接触状態そのものに誤差が含まれる可能性もある。そこで本手法では、ビジョンシステムにより得られた接触状態の時系列が直接遷移可能かどうか（当然遷移可能でなくてはならない）を判定することにより、よりロバストな誤差修正能力を実現する。

Donald によると、与えられた 2 つの接触状態 A, B が直接遷移可能であるためには、A を構成する接触要素がすべて B に含まれている、もしくは、B を構成する接触要素がすべて A に含まれている必要があ

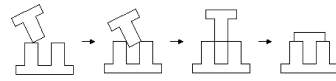


図 21 ペグインサージョン動作
Fig. 21 Peg-insertion operation.

る³²⁾。

ただし、この条件は必要条件であり、直接遷移可能かどうかを判定するためには、物体がある接触状態を維持しながらとりうる位置姿勢の範囲を示す c-surface³³⁾ の形状を計算しなければならない。通常その計算は NP-完全であることが知られている。そこで、本論文では図 6 に示す 20 種類の運動自由度遷移以外が発生した 2 つの接触状態は直接遷移不可能であると判定する。その根拠は、3 章で述べたように、この運動自由度遷移の表は、人間が組み立て作業を行う際に実際に表れる遷移のみを表しており、これ以外の遷移は、通常の組み立て作業では発生しないからである。運動自由度の計算は、c-surface の計算に比べて、非常に少ない時間で計算することができ、そこで行った計算結果が、そのままサブスキルの選択や、Critical Transition の抽出に用いることができる。

5. 検証実験

この章では、ビジョンシステムを用いた観察を通じて、サブスキルと Critical Transition を用いて組み立て作業を認識した結果の一例を示す。実際に、図 21 で示すような 2 次元的なペグインサージョン動作に適用した。この動作を検証実験として用いた理由は、1) 様々な接触状態およびその遷移が現れることと、2) 実際に得られた結果が、視覚的に見やすいこと、があげられる。実際に、3 次元的なペグインサージョン動作に対しても、色、視差画像から物体の位置姿勢を抽出する部分に困難さはあるものの、それ以外に関しては正しく認識することができる。

5.1 組み立て作業認識に必要な不可欠な情報の抽出

この節では、組み立て作業認識に必要な不可欠な情報（接触状態、その状態における物体の位置姿勢、接触状態遷移）をビジョンシステムを用いて抽出した結果を示す。

まず物体の位置姿勢の誤差を大まかに推定された接触状態から修正した結果を図 22 に示す。前述のとおり、正確な位置姿勢は運動自由度の計算に必要な不可

Xiao らはビジョンの誤差を数学的に定義したうえで、誤差のある状況下での接触状態を厳密に求める方法を提案している²⁹⁾。本手法では、計算時間との兼ね合いから単純な方法を用いた。ただし、平面運動に関しては解析的に求めることができる³⁰⁾。

このとき、接触状態は、頂点-面、辺-辺、面-頂点接触の組合せで表現されているものとする。一般的に、多面体物体の接触状態は、これら 3 つの接触要素の組合せで表現できることが知られている。

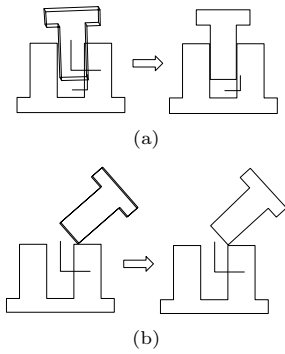


図 22 接触状態による視覚誤差修正：成功した例

Fig. 22 Vision error correction using a contact relation: success cases.

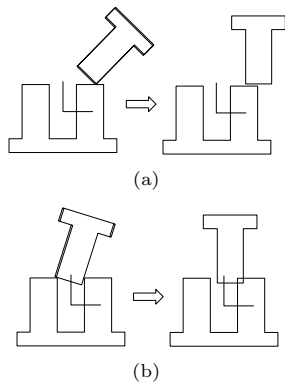


図 23 接触状態による視覚誤差修正：失敗した例

Fig. 23 Vision error correction using a contact relation: failure cases.

欠である．大まかな接触状態の推定では，より多くの接触要素を含む接触状態を推定する傾向があるため，図 22 (b) に示すように，組み立て作業解析に必要な特異な接触状態を発見することができた．

ただし，接触状態の誤推定や，非線形最適化に用いた初期解の不適切さのために，図 23 (a), (b) に示すように，誤差修正に失敗することがあった．特に，図 23 (b) に示すように，挿入前後のあたりで誤差修正に失敗する例が多く見られた．幸い，実際の組み立て作業の認識の際には，作業中に現れる各々の接触状態において，それを満たす物体の位置姿勢がたかだか 1 つあれば十分である．

さらに，上の方法で得られた接触状態間の時系列遷移の正当性を調べた．実際にシステムが獲得した接触状態遷移を，図 24 において白抜き矢印で示す．ちなみに，Donald の手法³²⁾のみを用いて発見された他の可能な遷移を両矢印で示し，さらに我々の提案手法に

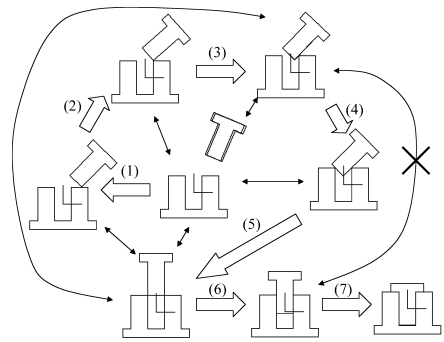


図 24 可能な接触状態遷移

Fig. 24 Possible transitions of contact relations.

より棄却された遷移を × 印で示す．

5.1.1 組み立て作業の認識

図 25 に，ビジョンシステムにより得られた情報から，組み立て作業を認識した結果を示す．ちなみに，各接触状態の下の数字列は，左から，並進維持，離脱，拘束，回転維持，離脱，拘束，並進束縛，回転束縛自由度を表す．ただし状態 C, F は特異接触状態であり，数字は並進特異維持，特異離脱，特異拘束，回転特異維持，特異離脱，特異拘束，並進束縛，回転束縛自由度を表す．また白抜き矢印は Critical Transition を表す．

(1) の遷移では，並進，回転維持自由度がそれぞれ 1 減少し，並進，回転離脱自由度がそれぞれ 1 増加していることより，並進，回転つき当てサブスキル が割り付けられる．この回転離脱自由度はタイプ I であることより，さらにタイプ I 回転つき当てサブスキルであることが分かる．(4), (7) の遷移でも，同様の自由度の変化が見られるため，並進，タイプ I 回転つき当てサブスキルが割り付けられる．

(2) の遷移では，並進，回転維持自由度がそれぞれ 2 減少し，並進，回転特異維持自由度がそれぞれ 2 増加しており，かつ並進，回転束縛自由度がそれぞれ 1 増加していることより，並進，回転すべらしサブスキル が割り付けられる．ここでは，さらに並進，回転離脱自由度がそれぞれ 1 減少し，並進，回転特異維持自由度がそれぞれ 1 増加する変化が見られるが，これはすべらしサブスキルに付随して発生した遷移である．

同様に (5) の遷移でも，並進，回転維持自由度がそれぞれ 1 減少し，並進，回転特異維持自由度がそれぞれ

ここでは，視覚により得られた接触状態のみを対象として，遷移の可能性を調べた．
ベグの辺とホール面の面を合わせる動作に対応．
ベグの辺とホール面の辺を合わせる動作に対応．

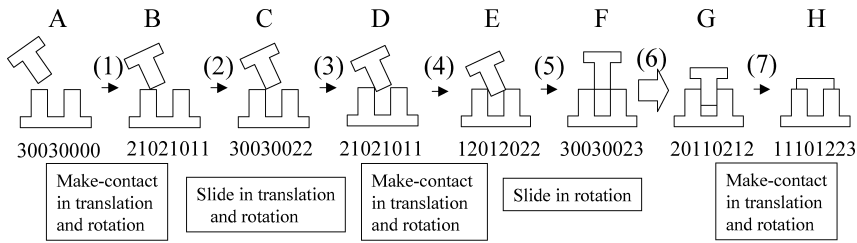


図 25 組み立て動作認識結果

Fig. 25 Result of assembly-task recognition.

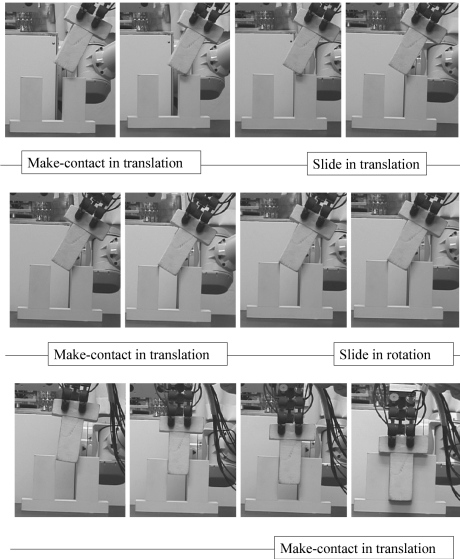


図 26 ロボットによる実行

Fig. 26 Execution by our robot.

れ 1 増加する変化が見られるが、この場合回転束縛自由度のみが 1 増加しているため、回転すべりサブスキルのみが割り付けられる。

(3) の遷移では、並進、回転維持自由度がそれぞれ 2 減少し、並進、回転維持自由度がそれぞれ 2 増加していることより、この動作は次のサブスキルの一部であると見なせることが分かる。また、並進、回転特異維持自由度がそれぞれ 1 減少し、並進、回転離脱自由度がそれぞれ 1 増加しており、それ以外の変化が見られないことから、この遷移は Critical Transition ではないことが分かる。

しかし (6) の遷移では、並進特異維持自由度が 1 減少し、並進拘束自由度が 1 増加していること、および回転特異維持自由度が 2 減少し、回転拘束自由度が 2 増加していることから、この遷移は Critical Transition

であることが分かる。

参考までに、その結果を用いてロボットが同じ組み立て動作をする様子を、図 26 に示す。その際、視覚により得られた情報（接触状態、その状態における物体の位置姿勢、接触状態遷移）のみから、1. 接触状態遷移を実現するの把持物体の軌道を生成し、2. 実行時の誤差を吸収するための各種センサプランニングを行うことにより、動作を再現することができる¹⁹⁾。

6. まとめ

本論文では、回転動作を含めた、観察による組み立て作業理解の方法について提案した。まず、論文 11) で定義されている運動自由度を回転運動を扱えるように拡張し、実際に運動自由度を接触状態および幾何形状を用いて導出する方法について述べた。

次に、組み立て作業中に現れる運動自由度の遷移に注目して、組み立て作業を記述するうえで必要不可欠となるサブスキル、および組み立て作業の進行上、肝となる遷移である Critical Transition を定義し、実際の接触状態遷移が与えられたときにそれらを導出する方法を示した。

そして、実際にビジョンシステムを用いて、誤差にロバストに組み立て動作理解を行うための実装上の工夫について記述し、実際にベグインサーション動作に適用した例を示した。ベグインサーション動作のような様々な接触状態が表れる組み立て作業を扱えることから、本手法は多くの組み立て作業に対して有効であると我々は考えている。

謝辞 なお本研究は、独立行政法人科学技術振興機構戦略的基礎研究事業 (CREST) 高度メディア社会の生活情報技術および、文科省科研費補助金特定領域研究 (C) 課題番号 16016218 の補助を受けている。

参考文献

- 1) 特集：組立作業計画，日本ロボット学会誌，Vol.11, No.2 (1993).
- 2) 平井慎一，浅田春比古，得丸英勝：組立作業に

(2) の遷移と異なり、姿勢が決定されれば、位置は一意に決定されることから、並進すべりサブスキルが割り付けられていない。

- おける物体の接触状態遷移に関する運動学的解析とそのネットワーク表現の自動生成, 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.4 (1988).
- 3) Xiao, J. and Ji, X.: A Divide-and-Merge Approach to Automatic Generation of Contact States and Planning of Contact Motion, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.750–756 (2000).
 - 4) Ong, C. and Gilbert, E.G.: Growth Distance: New Measures for Object Separation and Penetration, *IEEE Int. Trans. Robotics and Automation*, Vol.12, No.6, pp.888–903 (1996).
 - 5) Goeree, B.B., Fasse, E.D. and Marefat, M.M.: Determining Feasible Contact State of Pairs of Spatial Polyhedra, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1396–1401 (2000).
 - 6) Pan, F. and Schimmels, J.M.: Efficient Contact State Graph Generation for Assembly Application, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2592–2598 (2003).
 - 7) 横小路泰義: 接触状態の分類と組立順序, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.2, pp.185–191 (1993).
 - 8) 余 永, 吉川恒夫: 物体間の接触の安定性に関する評価, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.7, pp.1026–1033 (2000).
 - 9) 内山 勝, 今橋晃一: ルールベースト人工技能システムの計算機援用ルール作成, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.3, pp.459–465 (1994).
 - 10) Schaal, S.: Is Imitation Learning the Route to Humanoid Robots?, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.3, pp.233–242 (1999).
 - 11) Ikeuchi, K. and Suehiro, T.: Toward an Assembly Plan from Observation Part I: Task Recognition with Polyhedral Objects, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.10, No.3 (1994).
 - 12) Suehiro, T. and Ikeuchi, K.: Towards an Assembly Plan from Observation: Part II: Correction of Motion Parameters based on Fact Contact Constraints, *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2096–2102 (1992).
 - 13) Kuniyoshi, Y., Inaba, M. and Inoue, H.: Learning by Watching: Extracting Reusable Task Knowledge from Visual Observation of Human Performance, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.10, No.6 (1994).
 - 14) Maeda, Y., Ishido, N., Kikuchi, H. and Arai, T.: Teaching of Grasp/Graspless Manipulation for Industrial Robots by Human Demonstration, *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1523–1528 (2002).
 - 15) 津田雅之, 高橋友一, 小方博之: 実演教示による組み立て作業モデルの生成, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.4, pp.535–544 (2000).
 - 16) Fukuda, T., Nakaoka, M., Ueyama, T. and Hasegawa, Y.: Direct Teaching and Error Recovery Method for Assembly Task based on a Transition Process of a Constraint Condition, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1518–1523 (2001).
 - 17) 音田 弘, 小笠原司, 比留川博久, 北垣高成, 中村晃, 築根秀男: 実環境行動計画機能に基づく作業ロボットシステム, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.7, pp.979–994 (2000).
 - 18) Suehiro, T. and Takase, K.: Skill Based Manipulation System, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.8, No.5, pp.551–562 (1990).
 - 19) 高松 淳, 小川原光一, 木村 浩, 池内 克史: ロボットによる実行を目的とした人の組み立て作業の理解—接触状態遷移からの最適軌道の生成, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.6, pp.752–763 (2004).
 - 20) 比留川博久, 松井俊治, 高瀬國克: 多面体間の接触による拘束条件を幾何モデルから導出する一般的なアルゴリズム, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.4, pp.415–426 (1991).
 - 21) Ohwovoriole, M.S. and Roth, B.: An Extension of Screw Theory, *J. of Mechanical Design*, Vol.103, pp.725–735 (1981).
 - 22) Kuhn, H.W. and Tucker, A.W.: Linear Inequalities and Related Systems, *Annals. of Mathematics Studies*, Vol.38 (1956).
 - 23) Hirukawa, H., Matsui, T. and Takase, K.: Automatic Determination of Possible Velocity and Applicable Force of Frictionless Objects in Contact from a Geometric Model, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.10, No.3, pp.309–322 (1994).
 - 24) Miura, J. and Ikeuchi, K.: Task-Oriented Generation of Visual Sensing Strategies in Assembly Tasks, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.20, No.2 (1998).
 - 25) Ogawara, K., Takamatsu, J., Iba, S., Tanuki, T., Sato, Y., Saegusa, A., Kimura, H. and Ikeuchi, K.: Acquiring hand-action models in task and behavior levels by a learning robot through observing human demonstrations, *The 1st IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots* (2000).
 - 26) 金出武雄, 蚊野 浩, 木村 茂, 川村英二, 吉田收志, 織田和夫: ビデオレートステレオマシンの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2, pp.261–267 (1997).
 - 27) 比留川博久, 松井俊治, 高瀬國克: 多面体間の接触による拘束条件の高速解法とその離脱動作計画への応用, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.7, pp.841–848 (1991).
 - 28) Wheeler, M.D. and Ikeuchi, K.: Sensor Model-

ing, Probabilistic Hypothesis Generation, and Robust Localization for Object Recognition, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.17, pp.252–265 (1995).

- 29) Xiao, J. and Zhang, L.: Toward Obtaining All Possible Contacts - Growing A Polyhedron by its Location Uncertainty, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.12, No.4, pp.553–565 (1996).
- 30) Xiao, J. and Zhang, L.: Contact Constraint Analysis and Determination of Geometrically Valid Contact Formations from Possible Contact Primitives, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.13, No.3, pp.456–466 (1997).
- 31) Takamatsu, J., Ogawara, K., Kimura, H. and Ikeuchi, K.: Correcting Observation Errors for Assembly Task Recognition, *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1208–1213 (2002).
- 32) Donald, B.R.: A Search Algorithm for Motion Planning with Six Degrees of Freedom, *Artificial Intelligence*, Vol.31, No.3, pp.295–353 (1987).
- 33) Lozano-Perez, T., Mason, M.T. and Taylor, R.H.: Automatic Synthesis of Fine-Motion Strategies for Robotics, *Int. J. of Robotics Research*, Vol.3, No.1, pp.3–24 (1984).

(平成 16 年 9 月 1 日受付)

(平成 17 年 3 月 4 日採録)

(担当編集委員 山澤 一誠)



高松 淳

1974 年生 . 1999 年東京大学理学部情報科学科卒業 . 2004 年東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻博士課程修了 . 情報理工学博士 . 知能ロボットの動作

獲得に関する研究に従事 . 日本ロボット学会会員 .



小川原光一

1975 年生 . 1997 年東京大学工学部機械情報工学科卒業 . 2002 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了 . 工学博士 . 2002 年より科学技術振興機構博士

研究員 , 東京大学生産技術研究所博士研究員 . コンピュータビジョンを利用した人間の動作理解 , 知能ロボットの動作獲得に関する研究に従事 . 日本ロボット学会 , IEEE の会員 .



木村 浩 (正会員)

1961 年生 . 1983 年東京大学工学部機械工学科卒業 . 1988 年東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻博士課程修了 . 工学博士 . 東北大学工学部助手等を経て , 現在 , 電気通信

大学情報システム学研究科助教授 . 1996 年カーネギーメロン大学客員研究員 . 脚式ロボット , 知能ロボットの研究に従事 . 1989 年 , 2003 年度日本ロボット学会論文賞 , 2004 年船井情報科学振興賞 , SAB2004 Best Technical Paper Award 等を受賞 . 日本機械学会 , 計測自動制御学会 , IEEE 等の会員 .



池内 克史 (正会員)

1973 年京都大学工学部機械工学科卒業 . 1978 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了 . MIT 人工知能研究所 , 電総研 , CMU 計算機科学科を経て , 1996 年

より東京大学生産技術研究所教授 . 2000 年より東京大学大学院情報学環教授兼任 . 人間の視覚機能 , 明るさ解析 , 物体認識 , 人間行動観察学習ロボット , 高度交通システム等の研究に従事 . 工学博士 . D. Marr 賞 (ICCV : 1990 年) , IEEE 優秀論文賞 (CVPR : 1991 年) , 最多引用論文賞 (AI Journal : 1992 年) 等受賞 . IEEE Distinguished Lecturer (SPS 2000-2001 , CS 2004-2006) , IEEE Fellow .