

## 接触状態を用いたビジョンの誤差修正のための線形解法

高松 淳<sup>†</sup>, 小川原 光一<sup>††</sup>, 木村 浩<sup>†††</sup>, 池内 克史<sup>††††</sup>

<sup>†</sup> 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  
<sup>††</sup> 科学技術振興事業団 <sup>†††</sup> 電気通信大学 情報システム学研究科 <sup>††††</sup> 東京大学 情報学環

〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 駒場 II キャンパス E 棟  
東京大学生産技術研究所 第 3 部 池内研究室  
03-5452-6242

j-taka@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし ロボットプログラミングの労力を削減する方法として、「観察による行動獲得」の手法が注目されている。その手法の実装のためには、人間や対象物の動きを獲得することができるビジョンシステムが必要となる。通常ビジョンシステムにより得られたデータには誤差が含まれており、その誤差が組み立て作業などの環境との相互作用をともなう行動を行うロボットプログラムの生成を困難にしている。その問題を解決するために、接触状態を用いて誤差を取り除く方法が提案されてきた。ある接触状態を満たす物体の相対位置関係を求めるためには非線形連立方程式を解く必要があり、従来はそれを非線形最適化手法を用いて解決していた。しかし正しく誤差が取り除かれるかどうかは、与えた初期解に強く依存しているという問題があった。そこで、本手法では初期解の問題を解決するために、線形解法のみを用いてビジョンの誤差を取り除く手法を提案する。

キーワード ビジョン誤差修正, 接触状態, 線形解法

## A Linear Solution for Vision Error Correction using Contact Information

Jun TAKAMATSU<sup>†</sup>, Koichi OGAWARA<sup>††</sup>, Hiroshi KIMURA<sup>†††</sup> and Katsushi IKEUCHI<sup>††††</sup>

<sup>†</sup> Department of Computer Science, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

<sup>††</sup> Japan Science and Technology Corporation

<sup>†††</sup> Graduate School of Information Systems, The University of Electro-Communications

<sup>††††</sup> Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 3rd Dept. Ikeuchi Laboratory  
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, JAPAN  
+81-3-5452-6242

j-taka@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** To reduce the effort needed for robot programming, a *Learning from Observation* method is focused on. The implementation of such a method requires a vision system which can observe human motion and target object trajectories. The obtained information usually includes some errors. This complicates the generation of robot programs for executing assembly tasks where interaction with the environment is necessary. To overcome this problem, a method to remove vision errors using contact relations has been proposed. To obtain visual data without errors requires to solve a system of non-linear equations. Usually this is done by non-linear optimization methods. However, using a non-linear optimization method, the success of removing errors deeply depends on the appropriateness of an initial solution. To avoid this problem, we propose a linear solution for vision error correction.

**Keywords** Vision Error Correction, Contact Relation, Linear Solution

# 1 はじめに

ロボットの動作プログラムを作成するためには、多大な時間と労力を必要とする。これらを削減するために、「観察による行動獲得」[1]の手法が注目されている。その手法においては、カメラの前で対象とする作業の実演教示を行うことにより、ロボットの動作プログラムを生成することを目標としており、その手法を実装したシステムでは、人間の動作の意図を理解し、そこから自動的にロボットの動作プログラムを生成することが可能となる。

この手法の実装のためには、人間や目標物の動きを記録することができるビジョンシステムが必要となる。特に外界との相互作用が発生する組み立て作業に対してその手法を適用するためには、できるだけ正確にそれらの動きが記録される必要がある。しかしながら、通常ビジョンシステムから得られるデータは多かれ少なかれ誤差が含まれてしまう。そこで、本手法では接触状態の情報を用いてビジョンデータの誤差を取り除く手法を提案する。

XiaoとZhangはビジョンデータの誤差の程度を定式化し、誤差を含むビジョンデータから接触状態を推定する方法を提案している[2]。また、与えられた接触状態を満たす物体の相対位置関係を代数的に求める方法を提案している[3]。ただし、平面運動にのみ適用可能である。与えられた接触状態を満たす物体の相対位置関係を求めるためには、非線形冗長連立方程式を解く必要があり、代数的手法では、3次元運動への適用は困難であると考えられる。そこで、SuehiroとIkeuchiは与えられた接触状態を満たす物体の相対位置関係を、非線形最適化手法を用いて求める方法を提案している[4]。非線形最適化手法のために必要となる初期解は、ビジョンデータから得られたものを用いている。

一般的に非線形最適化手法において、最適解が得られるかどうかは、与えた初期解が適切であるかどうかに関強く依存しており、必ずしも我々が求めたい解が得られるとは限らない。本手法は、高々線形方程式を解くのみで、ビジョンデータの誤差を取り除く手法を提案する。これにより、上述の初期解の依存性の問題を解決することができる。

本論文の構成は以下のようになっている。まず2章では、ビジョンデータの誤差を取り除くための大まかな流れについて述べる。次に3,4章で、誤差修正の基本となる拘束度の定義、および最適軌道生成の方法[5]について述べる。5章で実験結果を示し、6章で本手法の問題点およびその解決法について述べる。最後に7章で本論文のまとめを行う。

本論文では、以下の仮定を設ける：

- すべての物体は多面体であり、変形しないものとする。
- すべての物体の形状は既知であるとする。
- 2つの物体のみを扱う。

組み立て作業では、たいていの場合一時的に見れば2つの物体を対象として作業が進行していくので、3番目の仮定により、本手法の適用範囲が大幅に狭まるということはない。

# 2 本手法の概要

ビジョンにより得られた2物体の相対位置関係と、そのとき満たすべき接触状態を与えられたとする。このときビジョンデータの誤差修正前の両物体には接触<sup>1</sup>が発生していないものとしてよい。次に、視覚誤差修正前の状態から与えられた接触状態を実現するように、どちらか一方の物体を動かす。最終的に接触状態遷移した際の2物体の相対位置関係がビジョンデータの誤差を修正した結果となる。この軌道生成の際、ある種の最適性を満たす軌道生成法を適用すれば、誤差修正後のデータにもそれが反映される。本論文では、軌道生成法として、すでに著者らが提案している方法[5]を用いた。その手法は、線形方程式を解くだけで最適軌道を生成することができるという方法である。ここでいう最適軌道とは、接触により運動が拘束されていない自由度を変化させない軌道であるとする。後に改めて定式化する。

ただし、その手法を適用するためには、その接触状態を満たす1つの解が必要であるので、最終的には以下に示す方法を用いてビジョンデータの誤差修正を行った：

1. [2]の手法を用いて接触状態を推定する。
2. 非線形最適化手法[6]を用いて、その接触状態を満たす2物体の相対位置関係を求める<sup>2</sup>。
3. 2.で得られた解と接触状態を用いて、[5]の手法を適用してビジョンデータを修正する。

# 3 拘束度の定義

ここでは、最適軌道を導出するために必要となる拘束度を定義する。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[7]。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、 $\mathbf{F}_{ij} \in R^3$ は分離面の法線(例えば、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)を表し、 $\Delta \mathbf{X} \in R^3$ 、 $\Omega \in R^3$ はそれぞれ位置および姿勢の微小変位を、 $N$ は接触点の数、 $M(i)$ はある接触点 $i$ における分離面の数を表す。また $J_i \in R^{3 \times 6}$ は接触点 $i$ の微小変位と、物体の位置姿勢の微小変位との関係

<sup>1</sup>ここで言う接触とは接触状態を構成する接触状態要素(頂点、辺、面)間の距離が0であることをいい、物体同士の減り込み等の影響は無視して考える。

<sup>2</sup>ここでは、手法[5]で必要となる1つの解を求められればよいので、すべてのサンプリングされたビジョンデータにおいて誤差が修正される必要はない。

を表すヤコビ行列である。

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

本論文では、微小変位を screw 表現 [8] を用いて表す。screw 表現では、微小変位をある軸に沿った並進運動とそれと同じ軸を中心とする回転運動の組み合わせとして表現する。具体的には、軸の向きを  $\mathbf{S}_0$ 、軸の位置を  $\mathbf{P}$ 、回転運動に対する並進運動の割合を  $p$  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、 $\mathbf{S}_1 = \mathbf{P} \times \mathbf{S}_0 + p\mathbf{S}_0$  である。 $p=0$  のときは純粋な回転運動を表わし、 $p=\infty$  のとき、つまり  $[\mathbf{0}, \mathbf{S}_1]$  の時は、純粋な並進運動を表わす。

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。ただし、 $\mathbf{P}_i$  は接触点の位置を表す。

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

最適軌道生成の際には、ある接触状態を維持したままの軌道を生成することが要求される。その場合の可能な微小変位は式 (3) で表すことができる。

$$\bigcap_i^N \bigcap_j^{M(i)} \mathbf{F}_{ij} \cdot \mathbf{S}_1 + (\mathbf{P}_i \times \mathbf{F}_{ij}) \cdot \mathbf{S}_0 = 0 \quad (3)$$

$\cup$  が  $\cap$  に変わることにより、式 (3) は単なる連立線形方程式となる。式 (3) の Rank を拘束度と定義する。また、 $\mathbf{S}_0 = \mathbf{0}$  を式 (3) に代入して得られる式 (4)<sup>3</sup> の Rank を並進拘束度と呼ぶ。

$$\bigcap_i^n \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{S}_1 = 0 \quad (4)$$

Screw 表現では、回転軸の向きは  $\mathbf{S}_0$  で表されるため、線形独立でない  $\mathbf{F}_{ij}$  の全組み合わせを発見し、 $\mathbf{S}_1$  を消去することにより、 $\mathbf{S}_0$  のみからなる式 (5) を得ることができる。

$$\bigcap_i^n \mathbf{G}_i \cdot \mathbf{S}_0 = 0 \quad (5)$$

この式の Rank を回転軸向き拘束度と呼ぶ。

## 4 最適軌道生成法

本章では、2つの直接遷移可能な接触状態、およびその接触状態を満たす2物体の相対位置関係が与えられたとき、その接触状態遷移を実現する物体の最適軌道を生成する方法、特にビジョンの誤差修正に関係する部分のみを述べる。ここでは、遷移前に比べて遷移後の接触状態の拘束度の方が大きいとする。ビジョンデータの誤差修正に用いる場合、全く拘束のない状態からの遷移であるので、この仮定は問題ない。

<sup>3</sup>記述を簡単にするために、2つの  $\cap$  を一つにまとめてある。

ここでは簡単のため、固定した物体の座標系と世界座標系は一致しているものとする。つまり最適軌道生成のためには、もう片方の物体の世界座標系での位置姿勢や軌道のみを考えればよい。今後、特に記述のない場合は世界座標系で表されているものとする。

まず、与えられた接触状態遷移前後の並進、および回転軸向き拘束度の変化を調べる。回転軸向き拘束度に変化をとめない場合、並進変位のみでビジョンデータの誤差を修正することが可能である。この場合、並進変位のみにより実現された軌道のいずれかが最適軌道であると定義する。以下では並進変位のみでよい場合と、回転変位も必要な場合に分けて最適軌道生成方法を述べる。

### 4.1 並進変位

#### 4.1.1 最適軌道の定義

ある接触状態  $C_s$  からある接触状態  $C_e$  に並進変位のみで遷移する場合について考える。今、両接触状態を満たす把持物体の位置姿勢  $\mathbf{q}_s = (t_s, \Theta)$ 、 $\mathbf{q}_e = (t_e, \Theta)$  が与えられたとする。ただし、 $t_s \in R^3$  は位置を、 $\Theta \in SO(3)$  は姿勢を表す。

このとき、それぞれの接触状態における可能な変位  $\Delta t \in R^3$  は前述のとおり式 (6)(7) のような線形連立方程式で表すことができる。ただし  $F_s \in R^{l \times 3}$ 、 $F_e \in R^{m \times 3}$  であるとする。

$$F_s \Delta t = 0 \quad (6)$$

$$F_e \Delta t = 0 \quad (7)$$

並進変位のみでよい場合、物体が多面体であるという条件より、直線軌道で現在の接触状態を維持しながら次の接触状態へ遷移することができるので、物体の軌道が関数  $\mathbf{q}(s) = (t(s), \Theta(s)) (0 \leq s \leq 1)$  で与えられる。ただし、 $t(s) = s\Delta t_d + t_s$ 、 $\forall s, \Theta(s) = \Theta$  であり、かつ  $\mathbf{q}(s) (0 \leq s < 1)$  は接触状態  $C_s$  を  $\mathbf{q}(1)$  は接触状態  $C_e$  を満たす物体の位置姿勢であるとする。

このとき、式 (8) を満たす軌道を最適軌道であるとする。ただし、 $\mathbf{T}_e$  は式 (7) の解領域を表す。

$$\forall \mathbf{l} \in \mathbf{T}_e - \{\mathbf{0}\}, \mathbf{l} \cdot \Delta t_d = 0 \quad (8)$$

#### 4.1.2 最適軌道生成

最適軌道を生成するためには、 $\Delta t_d$  を決定してやれば良い。求めるべき変位  $\Delta t_d$  は、接触状態  $C_s$  を満たさなくてはならない。つまり、式 (6) を満たす必要がある。拘束度の条件より、 $\text{Rank } F_s < \text{Rank } F_e$  が成り立つので、それぞれの Rank のとり得る値は表 1 に示す 6 つの場合が存在する。

ただし、ビジョンデータの誤差修正では、遷移前は接触による運動の拘束がない、つまり  $\text{Rank } F_s = 0$  であるので、そのうちの 3 通りの場合のみを考えれば良い。

**場合 1.**  $\text{Rank } F_s = 0, \text{Rank } F_e = 3$

表 1: Classification based on rank

Rank $F_s$	Rank $F_e$	
0	3	… Case 1.
1		
2		
0	2	… Case 2.
1		
0	1	… Case 3.

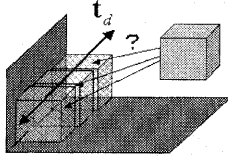


図 1: Redundant solution in translation

Rank  $F_e=3$  より、遷移後の接触状態を満たす把持物体の位置は一意に決定される。これより  $\Delta t_d = t_e - t_s$  となる。

**場合 2.** Rank  $F_s=0$ , Rank  $F_e=2$

Rank  $F_e = 2$  より  $T_e$  は 1 次元なので、 $\exists t_r \in T_e - \{0\}$  に対して、式 (9) を満たせば最適軌道の条件である式 (8) を満たす。

$$\Delta t_d \cdot t_r = 0 \quad (9)$$

遷移後の把持物体の位置姿勢は  $\mathbf{q} = (t_e + ut_r, \Theta)$  ( $u \in R$ ) と表すことができ、求めるべき変位は式 (10) で表される (図 1 参照)。

$$\Delta t_d = t_e + ut_r - t_s \quad (10)$$

式 (10) を式 (9) に代入することにより、

$$u = \frac{(t_s - t_e) \cdot t_r}{|t_r|^2}$$

が得られ、これより  $\Delta t_d$  を得ることができる。

**場合 3.** Rank  $F_s=0$ , Rank  $F_e=1$

今、式 (7) の解の基底を  $\{t_1, t_2\}$  とする。この時、最適軌道の条件式 (8) より、 $\Delta t_d$  は式 (11) と表すことができる。ただし、 $u \in R$  である。

$$\Delta t_d = u(t_1 \times t_2) \quad (11)$$

遷移後は接触状態  $C_e$  を満たすことを用いて、 $u$  を決定することができ、その結果  $\Delta t_d$  を決定することができる。

## 4.2 回転変位

通常、回転変位における軌道生成は、非線形冗長連立方程式を解く必要があり、困難な問題である。しかし、

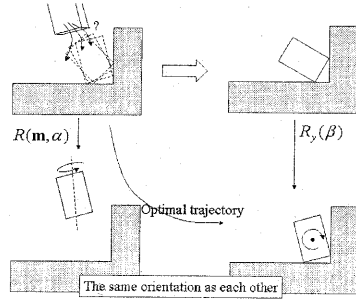


図 2: Redundant solution in rotation

回転軸向き拘束度の導出の際、回転軸の向きに関する関係式が求められているので、先に回転軸の向きと回転量を求め、次に求めた回転軸周りの回転量と物体の位置に関する関係式を解くことにより、この問題を解決することができる。

### 4.2.1 最適軌道の定義

ある接触状態  $C_s$  からある接触状態  $C_e$  に回転変位で遷移する場合について考える。今、接触状態を満たす物体の位置姿勢をそれぞれ  $\mathbf{q}_s = (t_s, \Theta_s)$ ,  $\mathbf{q}_e = (t_e, \Theta_e)$  とする。

このとき、それぞれの接触状態における可能な回転軸の向き  $\mathbf{a} (\in R^3)$  が、並進変位の時と同様に、式 (12)(13) のような連立方程式の形で表すことができる。

$$G_s \mathbf{a} = \mathbf{0} \quad (12)$$

$$G_e \mathbf{a} = \mathbf{0} \quad (13)$$

物体の軌道が関数  $\mathbf{q}(s) = (t(s), \Theta(s)) (0 \leq s \leq 1)$  で与えられたとする。  $\Theta(s)$  は軸  $\mathbf{a}_d (\in R^3)$  を中心とした等速回転運動、つまり式 (14) で表されているものとする。ただし、 $R(\mathbf{a}, \theta) (\in SO(3))$  は、軸  $\mathbf{a}$  の回りに  $\theta (\in R)$  回転した座標変換を表す。

$$\Theta(s) = R(\mathbf{a}_d, s\theta_d)\Theta_s \quad (14)$$

また、 $\mathbf{q}(s) (0 \leq s < 1)$  は接触状態  $C_s$  を  $\mathbf{q}(1)$  は接触状態  $C_e$  を満たす物体の位置姿勢であるとする。

このとき、式 (15) を満たす軌道を最適軌道であるとする。ただし、 $\mathbf{A}_e$  は式 (13) の解領域を表す。

$$\forall \mathbf{l} \in \mathbf{A}_e - \{0\}, \mathbf{l} \cdot \mathbf{a}_d = 0 \quad (15)$$

### 4.2.2 回転軸の向き $\mathbf{a}_d$ と回転量 $\theta_d$ の決定

並進の場合と同様に、行列  $G_s, G_e$  の Rank に基づいて 6 種類に分類することができる。ここでも、ビジョンデータの誤差修正に関係のある 3 種類について述べる。

**場合 1.** Rank  $G_s=0$ , Rank  $G_e=3$

並進の場合と同様に、遷移後の接触状態を満たす把持物体の姿勢は一意に決定される。これより求めるべき回転軸の向きと回転量は、 $\Theta_s$  と  $\Theta_e$  より求めることができる。

### 場合 2. Rank $G_s=0$ , Rank $G_e=2$

Rank  $G_e \neq 3$  より、図 2 に示すように、遷移後の接触状態を満たす姿勢は一意に決定できない。冗長な部分を取り除くことにより最適な回転軸を求める。

式 (13) の解の正規直交基底を  $\{a_1\}$  とし、式 (12) の解の正規直交基底を、一部重なるように  $\{a_1, a_2, a_3\}$  とする。基底  $a_1, a_2, a_3$  が、それぞれ  $z, y, x$  軸となるような直交座標系  $C_w$  を考える。その座標系において、遷移前後の物体の姿勢が  ${}^w\Theta_s, {}^w\Theta_e \in SO(3)$  と表されたとする。接触を維持する回転軸の拘束条件より、式 (16) が成り立つ (図 2 参照)。

$$R(\mathbf{m}, \alpha) {}^w\Theta_s = R_z(\beta) {}^w\Theta_e \quad (16)$$

この式より、 $\alpha, \beta, \mathbf{m}$  を求めることができる。 $R_z(\beta)$  は接触状態遷移には冗長な回転であるので、最適回転変位は  $R(\mathbf{m}, \alpha)$  で表される。

### 場合 3. Rank $G_s=0$ , Rank $G_e = 1$

前述の方法と同様に、式 (13) の解の正規直交基底を  $\{a_1, a_2\}$  とし、式 (12) の解<sup>4</sup>の正規直交基底を、一部重なるように  $\{a_1, a_2, a_3\}$  とする。基底  $a_1, a_2, a_3$  が、それぞれ  $x, y, z$  軸となるような直交座標系  $C_w$  を考える。その座標系において、遷移前後の物体の姿勢が  ${}^w\Theta_s, {}^w\Theta_e \in SO(3)$  と表されたとする。接触を維持する回転軸の拘束条件より、式 (17) が成り立つ。ただし、 $\mathbf{m}$  は  $xy$  平面上にあるとする。

$$R_z(\alpha) {}^w\Theta_s = R(\mathbf{m}, \beta) {}^w\Theta_e \quad (17)$$

この式より、 $\alpha, \beta, \mathbf{m}$  を求めることができる。 $R(\mathbf{m}, \beta)$  は接触状態遷移には冗長な回転であるので、最適回転変位は  $R_z(\alpha)$  で表される。

#### 4.2.3 回転量と位置姿勢の関係式の導出

前節の結果より、軌道を表す関数  $\mathbf{q}(s)$  のうち、関数  $\Theta(s)$  を決定することができた。ここでは関数  $t(s)$  を決定する方法について述べる。 $0 \leq s < 1$  のとき接触状態  $C_s$  を満たし、 $s = 1$  のとき接触状態  $C_e$  を満たすという条件がある。一般的にある接触状態を満たしているときの物体のとりうる位置姿勢は、連立非線形方程式の形で表すことができる [9]。

$$\bigcap_{i=1}^l f_i(t, \Theta) = 0 \quad (18)$$

$s$  の値が決定されたとき、関数  $f_i$  の非線形部分  $\Theta(s)$  は定数となるため、式 (18) は連立線形方程式となる。さらに、ビジョンデータの誤差修正には、 $s = 1$  の時の解のみを知れば十分であるので、その解を解くことは冗長性はあるものの容易である。

<sup>4</sup>  $R^3$  空間全体である。

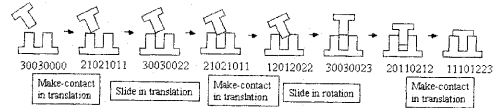


図 3: Target task: peg-insertion

## 5 実験

実際に非線形最適化手法および本手法を実装し、ビジョンの誤差を取り除く実験を行い、また非線形最適化手法と本手法の比較を行った。実験対象として、図 3 に示す、様々な拘束を持つ接触状態が現れるペグインサージョン動作を選んだ。

ビジョンシステムとして、秒間 30 フレームで動作を記録することができるリアルタイムステレオビジョン [10] を用いた。実際に得られたデータから画像の位置を推定する方法として 3D Template matching 法 [11] を用いた。得られた結果の代表的な例を図 4, 5, 6 の左に示す。

次に、[2] の手法を用いて接触状態を推定した。その結果、データの誤差は接触状態を構成する接触要素 (頂点, 辺, 面) 間距離でみると最大で 5mm 離れている程度であった。ちなみに挿入する穴の大きさが 35mm である。そして、推定された接触状態を元に、非線形最適化手法を用いてビジョンデータの誤差修正を行った [6]。この際、ビジョンにより得られたデータを初期解として与えたが、その正当性により、正しく修正される場合 (図 4 の右上参照) と、正しく修正しきれない場合 (図 5, 6 の右上参照) があった。

その後、本論文で提案した手法を適用した。本手法では、接触状態とその接触状態を満たす物体の相対位置関係がただ 1 つだけわかっているならば、非線形最適化手法で解が得られなかった場合でも、正しく修正することが可能であった。

図 4, 5, 6 の右下に本手法を適用して修正された結果を示す。図 4 において、非線形最適化手法と本手法の両方が、与えた接触状態を満たすように正しく修正することができたが、非線形最適化手法 (右上) においては、修正の際に、上下方向および紙面垂直方向の姿勢が変位してしまっているが、本手法では姿勢の変化が必要最小限にとどめられている。図 5, 6 の場合では、非線形最適化手法は様々な要因により修正が困難であるのに対し、本手法では正しく修正することができた。

## 6 本手法の問題点とその解決法

種々の実験を通じて、本手法において回転軸向き拘束度が 1 であるときにうまくビジョンデータの誤差を修正できない問題が発生した。ここでは、その原因と解決法を述べる。

回転軸の向きに関する方程式を得る際、非線形の式で表される物体の可能な変位を、線形近似して扱ってい

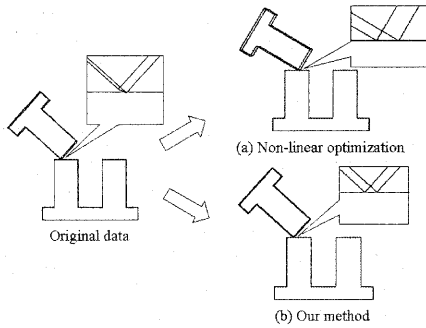


図 4: Result of Vision error correction 1

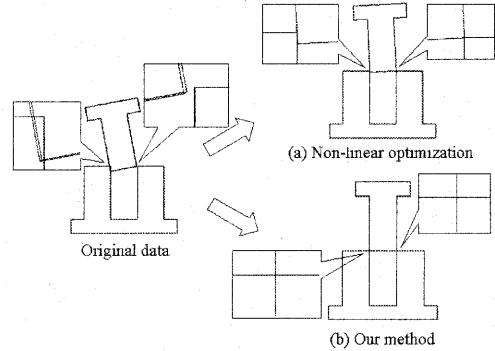


図 6: Result of Vision error correction 3

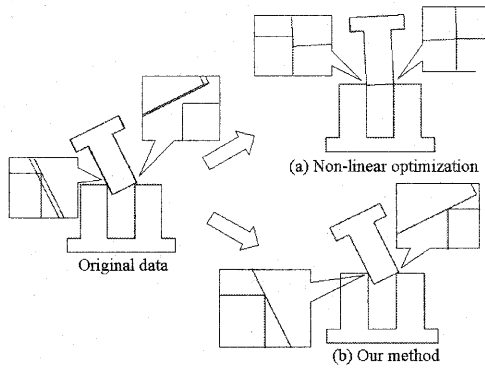


図 5: Result of Vision error correction 2

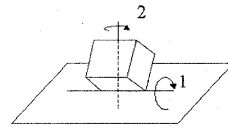


図 7: Edge-face contact

る。一般的に、線形近似により生じる誤差により誤った解が導き出される可能性が示唆されている [12]。前述のとおり本手法においても、回転軸向き拘束度が 1 であるところで問題が発生した。

例えば、図 7 に示す辺-面接触において、回転軸向き拘束度の解析により導き出された条件式は、辺と面の法線を含む平面に回転軸がある際、その回転により接触状態は維持されると解釈してしまう。これは明らかに間違った解釈であり、その結果正しくビジョンの誤差を修正できなくなってしまった。

間違った解釈を解決する方法として、我々は線形ではなく、2 次式で可能な変位を近似する方法を提案しており [13]、それをを用いることにより、辺と法線方向のみの回転軸しか接触を維持することができないと正しく解釈することができる。

正しい解釈を用いてビジョンの誤差を修正する方法を導くことは今後の課題となるが、今回は ad-hoc ではあるが以下のような方法で回転軸向き拘束度が 1 の際の問題を解決した。

まず、回転の拘束度が 1 になるのは、たいていの場合、辺-面接触か面-辺接触であるので、これ以外で回転軸向き拘束度が 1 にならないと仮定した。

次に、図 7 に示す辺-面接触の場合、式 (19) で示す姿勢変化後も接触状態を維持することができる。ただし、 $\mathbf{n}$  は法線の向きを、 $\mathbf{l}$  は辺の向きを表す。

$$R(\mathbf{n}, \alpha)R(\mathbf{l}, \beta) \quad (19)$$

また、図 8 に示す面-辺接触の場合は、式 (20) で示す姿勢変化後も接触状態を維持することができる。

$$R(\mathbf{l}, \alpha)R(\mathbf{n}, \beta) \quad (20)$$

これらを式 (17) の  $R(\mathbf{m}, \beta)$  の代わりに式 (19), (20) を用いることにより、回転軸向き拘束度が 1 の際でも問題なくビジョンの誤差を修正することができる。

## 7 まとめ

本論文は、非線形最適化を用いず、単なる線形方程式を解くのみで、ビジョンデータの誤差修正を行う方法を述べた。まず、本手法によるビジョンデータの誤差修正法の大まかな流れを述べ、その修正法の根幹をなす拘束度の定義、および最適軌道生成法について説明した。

次に、実際に提案手法を実装し、その有用性を検証した。非線形最適化手法では、正しい解が得られるかどうか初期解に強く依存するため、必ずしも解が得られるとは限らないが、本手法では、その接触状態を満たす 2 物体の相対位置関係が高々 1 つわかりさえすれば、必ず修正することができる。さらに、最適軌道生成の特徴により、得られた視覚誤差修正の結果は、位置変化や姿勢変化が小さな解を導き出すことができた。

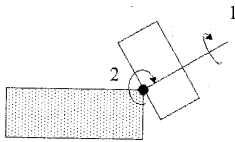


図 8: Face-edge contact

本手法では、拘束されていない自由度の情報をまったく失っていないという性質がある。今後、クランク回しのような可能な動きがある程度拘束されていて、かつそのダイナミクスも動作理解に重要であるような運動解析に対して本手法を適用することを考えている。また、実行時のビジュアルフィードバックの際、動作の進行状況から接触状態が推定できることが多いので、本手法を適用することにより、よりよいビジュアルフィードバックが行えるかどうか検討してみたいと考えている。

#### 謝辞

なお本研究は、文科省科研費補助金特定領域研究(C)課題番号 14019027 及び、科学技術振興事業団・池内CRESTプロジェクトの補助を受けている。

## 参考文献

- [1] S. Schaal: "Is imitation learning the route to humanoid robots?," Trends in Cognitive Sciences, **3**, pp. 233 - 242 (1999).
- [2] J. Xiao and L. Zhang: "Toward obtaining all possible contacts - growing a polyhedron by its location uncertainty," IEEE Trans. on Robotics and Automation, **12**, 4, pp. 553 - 565 (1996).
- [3] J. Xiao and L. Zhang: "Contact constraint analysis and determination of geometrically valid contact formations from possible contact primitives," IEEE Trans. on Robotics and Automation, **13**, 3, pp. 456 - 466 (1997).
- [4] T. Suehiro and K. Ikeuchi: "Towards an assembly plan from observation: Part ii: Correction of motion parameters based on fact contact constraints," IEEE Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2096 - 2102 (1992).
- [5] J. Takamatsu, H. Kimura and K. Ikeuchi: "Calculating optimal trajectories from contact transitions," IEEE Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 232 - 237 (2002).
- [6] J. Takamatsu, K. Ogawara, H. Kimura and K. Ikeuchi: "Correcting observation errors for assembly task recognition," IEEE Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1208 - 1213 (2002).
- [7] 比留川, 松井, 高瀬: "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, **9**, 4, pp. 415 - 426 (1991).
- [8] M. S. Ohwovoriole and B. Roth: "An extension of screw theory," Journal of Mechanical Design, **103**, pp. 725 - 735 (1981).
- [9] H. Hirukawa: "On motion planning of polyhedra in contact," WAFR (1996).
- [10] 金出, 蚊野, 木村, 川村, 吉田, 織田: "ビデオレイトステレオマシンの開発," 日本ロボット学会誌, **15**, 2, pp. 261 - 267 (1997).
- [11] M. D. Wheeler and K. Ikeuchi: "Sensor modeling, probabilistic hypothesis generation, and robust localization for object recognition," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **17**, pp. 252 - 265 (1995).
- [12] 比留川: "組立作業過程における拘束の表現と解析," 日本ロボット学会誌, **11**, 2, pp. 192 - 200 (1993).
- [13] J. Takamatsu, H. Kimura and K. Ikeuchi: "Improved screw theory using second order terms," IEEE Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1614 - 1618 (2002).