

組立コンプライアンスの設計のための接触作用のモデリング

大阪大学 ○ 宋 在晟 立命館大学 平井 慎一 大阪大学 岩田 一明

要旨

位置決め誤差を伴う組立作業において、過度の接触力を防止し、部品を目的状態へ案内するためには、コンプライアンスを利用するのが有効である。本報告では、組立作業に適したコンプライアンス設計を目的として、組立誤差と接触という観点から、接触作用のモデリングを行なう。つづいて、コンプライアンス設計に必要な部品の望ましい運動と接触反力の情報を導く手法を提案する。

1. 諸言

位置決め誤差を伴う組立作業では、二つの部品の間に接触が生じる。このとき、部品に作用する接触力の一部を利用して、部品を目標とする状態に案内するとともに、過度な接触力を防ぐためには、適切なコンプライアンスの設計、利用が有効である [1]。従来から、軸穴のはめ合い作業に対して、スカルロボットや RCC [4] が開発されたきた。しかしながら、これらの機構は、特定の作業を対象としたものであり、コンプライアンスの系統的設計法は確立されていない。

本研究では、組立に適した受動的コンプライアンスを設計する一般的かつ体系的な手法の確立を目的とする。そのためには、作業中に起こりうる部品の運動と、その運動中に受ける接触反力に関する情報が必要である。そして、これらは部品間の接触によって制約を受ける。本報告では、部品間の接触 [2][3] という幾何学的観点から、接触作用のモデリングを行なう。そして、組立誤差最小化の基準を設け、望ましい運動の候補を求める。さらに、運動モードという概念を導入し、部品の運動による各接触点の接触維持の可否を明確にし、摩擦も含んだ接触反力の範囲の計算を行なう。

2. 接触状態と運動モード

ここでは、組立過程を接触状態の遷移として捕らえることとする。そして、各接触状態が複数個の点接触でモデリングできると仮定し、ある接触状態のすべての接触点 $CP_1, \dots, CP_{n_p}$ からなる集合を U とする。

コンプライアンスを設計するためには、部品の運動と接触反力を考慮することが必要である。部品の運動によっては、一部の接触点で接触を失うことがあり、これによって接触反力も大きく変わる。したがって、反力を計算するためには、部品の運動によって各接触点で接触を維持するか否かを区別しなければならない。また、組立を行なう上で望ましい部品の運動は、一通りに決まらないのが一般的である。そこで、接触を維持する接触

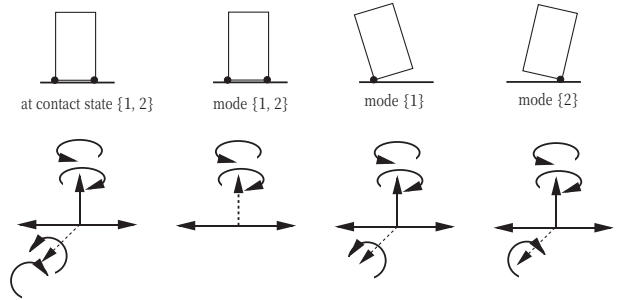


図 1: 運動モードの分類と許容可能な運動領域の一例

点と接触を失う接触点を区別するために、 U の部分集合を I を導入する。接触点 CT_i , $i \in I$ が接触を維持し続けるのに対して、残りの点 CT_j , $j \in I^c$ が接触から離れるような部品の運動を、 $mode[I]$ で表す。部品の運動が微小変位であると仮定すると、 $mode[I]$ における許容可能な運動 $\dot{\mathbf{t}} = [\mathbf{d}^T \ \delta^T]^T \in \mathbb{R}^6$ の範囲 $\mathcal{T}[I]$ は、次式で表される。ここで、 $\mathbf{d}$ は直交座標系での並進運動成分を表すベクトルであり、 δ は回転成分を表すベクトルである。

$$\mathcal{T}[I] = \{ \dot{\mathbf{t}} \mid \hat{\mathbf{p}}_i^T \dot{\mathbf{t}} = 0, \quad \forall i \in I \quad \text{and} \quad \hat{\mathbf{p}}_j^T \dot{\mathbf{t}} < 0, \quad \forall j \in I^c \} \quad (1)$$

$\hat{\mathbf{p}}_i$ は、 i 番めの接触点に対するレンチベクトルである。式 (1) の中で、 $\hat{\mathbf{p}}_i^T \dot{\mathbf{t}} = 0$, $\forall i \in I$ からなる線形空間を $\mathcal{L}[I]$ とし、その次元を $\dim(I)$ とする。また、 $\mathcal{L}[U]$ を張る基底ベクトルからなる行列を $T_1 = [\bar{\mathbf{e}}_1, \dots, \bar{\mathbf{e}}_d]$ とする。 $mode[I]$ においては、 $\dim(I) = \dim(U) + q_I$, $q_I \geq 0$ の関係があり、 q_I 個の追加の基底ベクトルからなる行列を $T_2^{(I)} = [\bar{\mathbf{b}}_1^{(I)}, \dots, \bar{\mathbf{b}}_{q_I}^{(I)}]$ とする。すると、 $mode[I]$ における部品の任意の運動 $\dot{\mathbf{t}} = [\mathbf{d}^T \ \delta^T]^T$ は、並進成分と回転成分とを区別して、次式で表される。

$$\dot{\mathbf{t}} = T_1 \boldsymbol{\alpha}_1 + T_2^{(I)} \boldsymbol{\alpha}_2^{(I)} \quad (2)$$

ただし、 $\boldsymbol{\alpha}_2^{(I)} > \mathbf{0}$

3. 組立のための望ましい運動

組立のための部品の望ましい運動は、式 (2) の範囲の中で、特に組立誤差を減少させる方向に向かなければなら

い。したがってここでは、目標状態を $\hat{\mathbf{t}}_{goal} = [\mathbf{d}_g^T \ \delta_g^T]^T$ とし、次のように組立誤差の最小化基準を設けて、望ましい運動の候補を求める。

$$r = \zeta \|\mathbf{d} - \mathbf{d}_g\|^2 + \eta \|\delta - \delta_g\|^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

ただし、 $\zeta + \eta = 1$, $0 \leq \zeta, \eta \leq 1$

ζ と η は、並進成分と回転成分との間の重みを与えるパラメータである。また、式(2)の $T_2^{(I)}$ は、 $mode[I]$ を特徴づける運動に関わる行列であることから、 $\alpha_2^{(I)}$ の各要素に適当な正の値を与える。すると、望ましい運動を求める問題は、式(3)の下で、次の一次方程式系を解く問題となる。

$$G T_1 \alpha_1 = G (\hat{\mathbf{t}}_{goal} - T_2^{(I)} \alpha_2^{(I)}) \quad (4)$$

$$\text{ただし、} G = \begin{bmatrix} \sqrt{\zeta} E & O \\ O & \sqrt{\eta} E \end{bmatrix} \quad (5)$$

G は、重み行列である。式(3)の下で式(4)を解くため、ここでは、特異値分解の手法を用いる。求まった解 α_1 は、距離テンソル G に基づいた2-ノルムをもつ式(4)の系の解となる。したがって、この結果を式(2)に代入して得られる $\hat{\mathbf{t}}$ は、 $mode[I]$ の下で、組立誤差 r を最小にしながら、最小変位で目標点に近付けるような望ましい運動の最適の近似となる。ここでは、 ζ と η の値を色々変えながら、複数の望ましい運動の候補を求める。

4. 接触反力の範囲

$mode[I]$ における接触反力は、 I に属する接触点だけを考慮すればよい。

$$\hat{\mathbf{w}}_j \begin{cases} \neq \hat{\mathbf{o}} & j \in I \\ = \hat{\mathbf{o}} & j \in I^c \end{cases} \quad (6)$$

部品の受ける接触反力は、各接触点での理想的な垂直反力と摩擦反力の合力である。集合 I の元の個数を n_I 、式(1)のレンチベクトルからなる行列を $W_n = [\hat{\mathbf{p}}_1, \dots, \hat{\mathbf{p}}_{n_I}]$ 、各接触点での垂直力の大きさを表すベクトルを β とすると、理想的な垂直反力の合力 $\hat{\mathbf{w}}_{CT,n}$ の範囲は、次式で与えられる。

$$\hat{\mathbf{w}}_{CT,n} = -W_n \beta \quad (7)$$

微小運動の仮定から、 $mode[I]$ に属する接触点の変位は必ず各々の接平面にそって生じる。この変位によって発生する各接触点での摩擦力は、その方向は変位の反対方向であり、大きさはその点での垂直力の大きさ β_j と摩擦係数 μ_t に比例する。前節で求めた部品の望ましい運動 $\hat{\mathbf{t}} = [\mathbf{d}^T \ \delta^T]^T$ によって接触点 CT_j の変位の方向は、次のように計算される。

$$\mathbf{d}_j = \mathbf{d} - \mathbf{p}_j \times \delta \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{p}_j$ は接触点の位置である。したがって、 $\mathbf{d}_j$ の単位ベクトルを $\bar{\mathbf{d}}_j$ とすると、摩擦反力の合力 $\hat{\mathbf{w}}_{CT,f}$ は、次式で与えられる。

$$\hat{\mathbf{w}}_{CT,f} = -W_f \beta \quad (9)$$

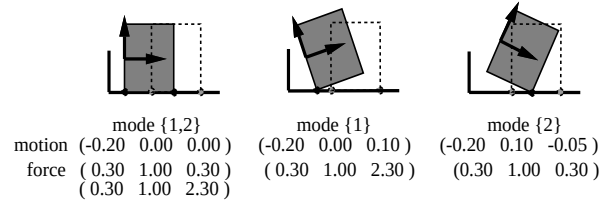
$$\text{ただし、} W_f = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{q}}_1 & \cdots & \hat{\mathbf{q}}_{n_I} \\ \mu_t \bar{\mathbf{d}}_j^T & \mu_t (\mathbf{p}_j \times \bar{\mathbf{d}}_j)^T \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

結局、全体的な接触反力の範囲は、式(7)と式(9)を用いて、次式で与えられる。

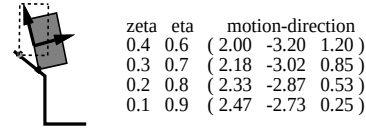
$$\hat{\mathbf{w}}_{CT} = -(W_n + W_f) \beta \quad (11)$$

5. 適用例

図1の2点接触状態における各運動モードに対して、望ましい運動方向の候補と、そのときの接触反力の範囲を求めた結果例を図2.(a)に示す。図2.(a)の例のように、目標状態が可能な運動範囲の中で与えられると、計算される運動は、重みパラメータとは関係なく、常に目標状態によって一意に決まる。これに対し、図2.(b)のように目標状態が可能な運動範囲にない場合は、望ましい運動方向の候補が重みパラメータによって変化する。



(a) Packing-at-corner task : 2-points contact state



(b) Peg-in-hole task : 1-point contact state

図2: 望ましい運動と接触反力の範囲の計算例

6. まとめ

接触という幾何学的な制約から、運動モードを分類し、各運動モードに対する可能な運動範囲を求めた。さらに、組立誤差の最小化基準を設けて、組立に適する部品の望ましい運動の候補を求める手法を提案した。運動モードの導入によって、摩擦も含んだ接触反力の範囲の計算が可能となった。

参考文献

- [1] Ang, M.H. et al., -Specifying and Achieving Passive Compliance Based on Manipulator Structure, IEEE Trans. on Robotics and Automation, pp.504-515, 1995
- [2] Hirai, S., -Analysis and Planning of Manipulation Using the Theory of Polyhedral Convex Cones
- [3] Ohwovoriole, M.S., Roth, B., -An Extension of Screw Theory, ASME J. Mechanical Design, pp.725-735, 1981
- [4] Whitney, D.E., et al., -Mechanical Behaviour and Design Equation for Elastomer Shear Pad Remote Center Compliance, ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, pp.223-232, 1986