

組立作業のための受動的コンプライアンスの設計手法

大阪大学 宋 在晟 立命館大学 平井 慎一 大阪大学 小野里 雅彦 大阪大学 岩田 一明

Design of Passive Compliance for Assembly Operations

Jae-Sung SONG (Osaka Univ.) Shinichi HIRAI (Ritsumeikan Univ.)
Masahiko ONOSATO (Osaka Univ.) Kazuaki IWATA (Osaka Univ.)

Abstract : Using compliance is of effect in assembly task with tight positioning error, so that it prevents excessive contact force and guides a part to its goal. In this paper, we calculate some candidates for desired contact interactions, the compliant motion of a part and the range of contact force including friction. The technique is provided for checking the practicability of passive compliance and designing the desired passive compliance.

Keyword : Assembly, Compliance, Design, Contact

1. はじめに

位置決め誤差を伴う組立作業では、二つの部品の間には接触が生じる。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。従来から、軸穴のはめ合い作業に対して、スカラロボットやRCC[3]が開発されてきた。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。

そこで本報告では、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を確立する。

2. 受動的コンプライアンスの設計過程

本報告では、受動的コンプライアンスの設計を、三つの段階に分けて行なう(図1)。ここでは、組立過程を接触状態の遷移としてとらえ、複数個の接触状態をコンプライアンスの設計のための入力として与える。また、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り、これらは接触によって幾何学的制約を受ける。そこで、コンプライアンス設計の第1段階(接触作用の設計)では、組立誤差に関する評価基準と接触制約の下で、組立のための部品の望ましい運動方向の候補を計算する。さらに、摩擦も含んだ接触反力の可能な範囲も求める。部品(マニピュレータの手先)でのコンプライアンスは、剛性行列 K で表すことができる。接触作用と剛性行列の性質を用いて、適切な剛性行列を設計する。これが、設計の第2段階(手先での剛性設計)である。最後に、設計された剛性行列から、必要なコンプライアンス要素の個数と、各要素の取り付け位置、および剛性を求める(配置設計)。本報告の範囲は、接触作用の設計から剛性設計までとする。

3. 接触作用の設計

与えられた接触状態から接触作用の候補を計算する過程を図2に示す。まず、各接触状態に対して、運動モード

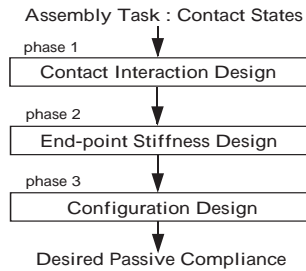


図1: 受動的コンプライアンスの設計過程

の分類を行なう。運動モード $\text{mode}[I]$ は [4]、ある接触状態におけるすべての接触点の集合 U の部分集合を I としたとき、 I に属する接触点は接触を維持するのに対し、他は接触から離れるような部品の運動を表す。組立のための部品の望ましい運動の候補 $\hat{t} = [d^T \ \delta^T]^T \in \mathbb{R}^6$ を求める問題は、 $\text{mode}[I]$ における部品の運動の許容可能な運動範囲の制約の下で、組立誤差 r を最小にするような最適化問題として定式化できる。

$$r = \zeta \|d - d_g\|^2 + \eta \|\delta - \delta_g\|^2 \rightarrow \min \quad (1)$$
$$\hat{p}_i^T \hat{t} = 0, \quad \forall i \in I \quad \text{and} \quad \hat{p}_j^T \hat{t} < 0, \quad \forall j \in I^c$$

ζ と η は、並進成分と回転成分の間の重みを与えるパラメータである。 $\hat{t}_{goal} = [d_g^T \ \delta_g^T]^T$ は目標状態、 \hat{p}_i は i 番目の接触点に対するレンチベクトルを表す。結局、部品の望ましい運動方向の候補は、式(1)で求めた \hat{t} の単位ベクトル $\bar{\hat{t}}$ として与えられる。

$\text{mode}[I]$ における接触反力は、 I に属する n_I 個の接触点だけを考慮すればよい。部品の望ましい運動 \hat{t} による接触点 CT_j の変位の方向を表す単位ベクトルを \bar{d}_j 、摩擦係数を μ_t とすると、部品の受ける接触反力の範囲は、次式で与えられる。

$$\dot{w}_{CT} = W \beta, \quad \beta \geq \mathbf{0} \quad (2)$$
$$\text{ただし, } W = - \begin{bmatrix} \hat{p}_1 + \hat{q}_1 & \cdots & \hat{p}_{n_I} + \hat{q}_{n_I} \\ \mu_t \bar{d}_j & \mu_t (\mathbf{p}_j \times \bar{d}_j)^T \end{bmatrix}^T$$

4. 手先での剛性設計

この節では、前節で求めた接触作用の候補に基づいて、手先での剛性行列を設計する過程(図2)について述べ

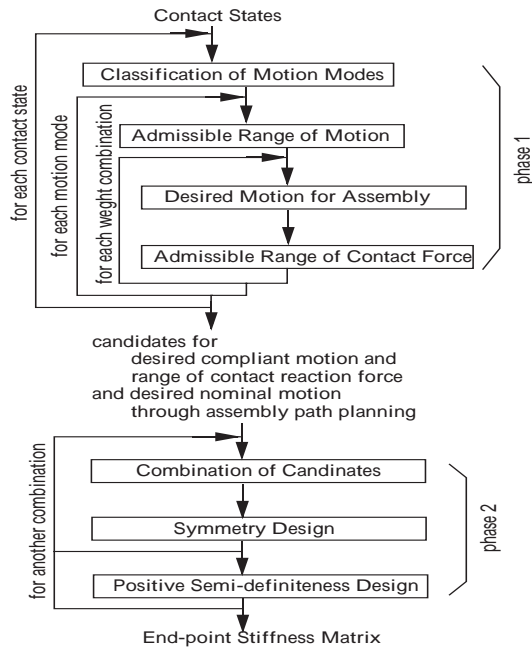


図 2: 接触作用の設計と剛性設計の過程

る。まず、 n_t 個の接触状態の各々に対して、一つの接触作用の候補を選んで、望ましい運動と接触反力を各々、 $\hat{t}_{AP} = \hat{t}_{AP}\alpha$ 、 $\hat{w}_{CT} = W\beta$ とする。さらに、誤差を無視した組立径路計画から求めた部品の正常的運動を $\hat{t}_{EE} = \hat{t}_{EE}\gamma$ とする。 α 、 β 、 γ は、各々の作用の大きさを表す未知数である。ここで、パラメータ $\omega = \frac{\alpha}{\gamma}$ を導入し、動的効果を無視した準静的な平衡条件式をたてると、次のようになる。

$$\gamma_i K \hat{t}_i = W_i \beta_i, \quad i = 1, \dots, n_t \quad (3)$$

$$\text{ただし、} \hat{t}_i = \omega_i \hat{t}_{AP,i} - \hat{t}_{EE,i}$$

式(3)は、ベクトル $\gamma_i K \hat{t}_i$ の取りうる領域を span 形式で表現した式であるとみなすことができる。凸多面錐理論[1][2]によって W_i に相当する face ベクトルを求め、この face ベクトルからなる行列を V_i とすると、式(3)は次式の face 形式に書き直すことができる。

$$V_i^T K \hat{t}_i \leq 0, \quad i = 1, \dots, n_t \quad (4)$$

既知の V_i と \hat{t}_i 、さらに K の対称性から、式(4)は、次の連立一次不等式にまとめられる。

$$Ak \leq 0 \quad (5)$$

ここで、 $k \in \mathbb{R}^{21}$ は、行列 K の要素 k_{ij} 、 $i \leq j$ からなるベクトルである。式(5)を k についての span 形式に変換し、ベクトル k を元の行列の形に戻すと、対称行列 K の範囲に関する次の式が求められる(対称性の設計)。

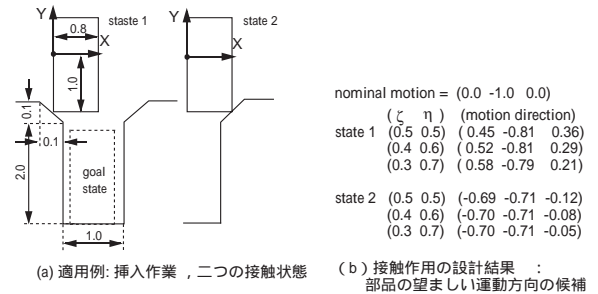
$$K = B_1 \lambda_1 + B_2 \lambda_2 + \dots + B_{n_s} \lambda_{n_s} \quad (6)$$

コンプライアンスは、外力の作用によって変形の形でエネルギーが蓄えられることを意味する。線形ばねで拘束された力学系としてモデリングしたコンプライアンスの変形エネルギーは、ある拘束を欠くときには、正半定となり、したがって、変形エネルギーが零となるような変位 $\hat{t} \neq \hat{o}$ が

存在することがある。ここでは、この正(半)定の性質を考慮するため、式(6)の n_s 個の未知数 λ_i の値を色々変えながら、正(半)定になるような剛性行列を探索する(正(半)定性の設計)。

5. 適用例

円筒軸の挿入作業に対して、接触作用の設計と手先での剛性行列の設計を行なった結果を図3に示す。図3(a)の結果は、運動の並進成分と回転成分の間の重みによって部品の望ましい運動方向が変化の様子を示す。しかしながら、いずれの運動方向に対しても、部品は z 軸回りに回転し、同時に面取りにそって滑りながら挿入される。図3(a)は、剛性行列の範囲を表す式(5)の行列 A と、式(6)によって計算された二つの剛性行列の結果を示す。前者の剛性行列は対称、正定であるのに対し、後者の行列は対称、正半定である。



(ζ η) (motion direction)	(force range)
state 1: (0.5 0.5) (0.45 -0.81 0.36)	(0.79 1.21 0.79)
state 2: (0.5 0.5) (-0.69 -0.71 -0.12)	(-0.79 1.21 0.18)
$\omega = (0.2 \ 0.2)$	

$\lambda = (2.0 \ 1.0 \ 4.0)$	$\lambda = (3.0 \ 2.0 \ 5.0)$
stiffness matrix K	stiffness matrix K
= 4.18 0.09 1.54	= 5.18 0.11 2.03
0.09 0.99 0.42	0.11 1.24 0.54
1.54 0.42 1.00	2.03 0.54 1.00
rank (K) = 3	rank (K) = 2

(c) 手先での剛性行列の設計結果

図 3: 受動的コンプライアンスの計算例

6. まとめ

接触という幾何学的制約と組立誤差の観点から、部品の望ましい運動の候補と、摩擦も含んだ接触反力の範囲をもとめた。その結果に基づいて、対称かつ正(半)定である剛性行列を設計することが可能になった。本報告での正(半)定性の設計には、より体系的な手法の確立が必要であり、今後の課題として残されている。さらに、配置設計のための研究も重ねて行く予定である。

参考文献

- [1] Hirai, S., -Analysis and Planning of Manipulation Using the Theory of Polyhedral Convex Cones
- [2] Ohwovoriole, M.S., Roth, B., -An Extension of Screw Theory, pp.725-735, ASME J. Mechanical Design, 1981
- [3] Whitney, D.E., et al., -Mechanical Behaviour and Design Equation for Elastomer Shear Pad Remote Center Compliance, pp.223-232, ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1986
- [4] Song, J.S. et al., -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, 1996年精密工学会秋季大会投稿中