

要 旨

運動機構における部品間の相対運動は、部品の機能面間の接触により決定される。しかし、形状誤差は接触に影響を及ぼすため、そのような組立品の設計支援を実現するには、形状誤差の運動機能に対する影響の定量化が必要である。そこで、本報では、形状誤差を考慮した配位空間を提案し、その配位空間における機能面の接触拘束表現と拘束間関係表現とにより組立品の運動可能領域の導出を可能とする組立モデルを提案する。

1. はじめに

運動機構に対する精度設計支援を実現するには、運動機能への機能面の設定誤差の影響を定量化する必要がある。高橋ら[1]は設定誤差の与えられた部品に対して推進力と重力を与え、摩擦を考慮してそれらの運動を求めるシミュレーション手法を開発した。しかし、部品数が二部品に限定されており、組立品の運動可能領域(部品の取り得る全ての位置と姿勢の範囲)を求めることは困難である。

そこで本研究では、多部品の運動機構を対象として、形状誤差を部品の機能面の変位として表現し、それら機能面間の接触拘束と拘束間関係との配位空間(configuration space)[2]における表現を用いることにより、組立品の運動可能領域の導出を可能とする組立モデルを提案する。

2. 組立モデル

図1に示すような多部品の運動機構の組立を考える。実形状の部品の組立を考慮する場合、公称形状に対して指定した面接触拘束( $FF_1 \sim FF_4$ )は厳密には満たされないため、機能面を構成する幾何要素(面, 稜線, 頂点)の間の接触拘束により、実形状間の面接触を近似することとする。例えば、図2(a)に示すように平面接触FFは、それぞれの平面を構成する図2(b)(c)(d)に示すような幾何要素間の接触拘束(FV, VF, EE)により近似し、式(1)で記述する。

$$FF = \text{OR}(FV_1, \dots, FV_{n_i}, VF_1, \dots, VF_{n_j}, EE_1, \dots, EE_{n_i n_j}) \quad (1)$$

ここで、ORは指定された拘束のうち少なくとも一つ以上が満たされる関係とし、 $n_i$ と $n_j$ はそれぞれ平面 $f_i$ と $f_j$ の頂点数とする。同様に図3(a)に示すように円筒面接触FFは、図3(b)(c)に示すように、一方の円筒

底面の円周と他方の円筒面との接触拘束(EF, FE)により近似し、式(2)で記述する。

$$FF = \text{OR}(FE_1, FE_2, EF_1, EF_2) \quad (2)$$

ここで、FVとVF, EFとFEは、基準となる部品が接触面を持っているか否かによる違いである。

図1の運動機構は、接触拘束全てが満たされなければならないので、式(3)により表現できる。

$$\begin{aligned} & \text{AND}(FF_1, FF_2, FF_3, FF_4) = \\ & \text{AND}(\text{OR}(FE_1, FE_2, EF_1, EF_2), \\ & \quad \text{OR}(FE_3, FE_4, EF_3, EF_4), \\ & \quad \text{OR}(FE_5, FE_6, EF_5, EF_6), \\ & \quad \text{OR}(FV_1, \dots, FV_4, VF_1, \dots, VF_4, EE_1, \dots, EE_{16})) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、ANDは指定された全ての拘束が同時に満たされる関係である。本報では、ANDとORを拘束間関係と呼び、式(3)を満たす組立品の運動可能領域を表現するために、配位空間を用いる。

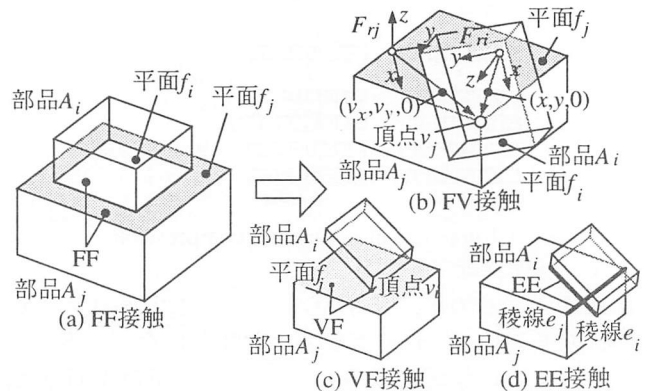


図2 平面間の接触

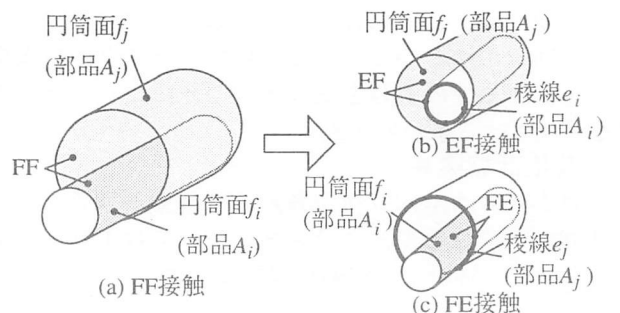


図3 円筒面間の接触

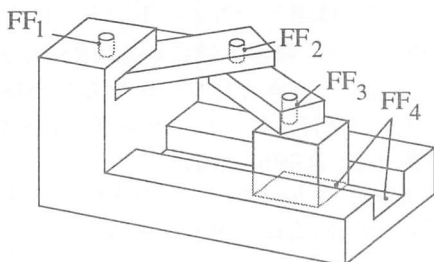


図1 運動機構

h 近似的に運動機能の拘束表現  
有効な領域

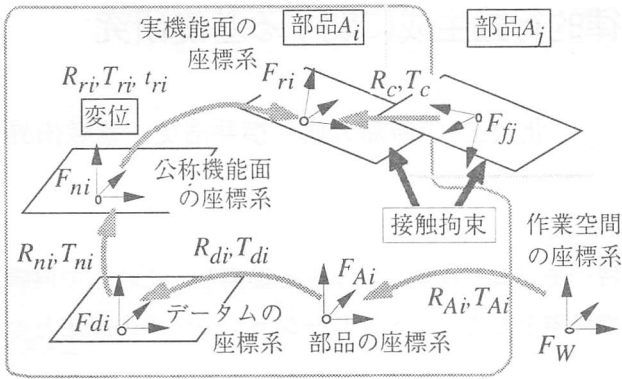


図4 座標系の設定と配位の定義

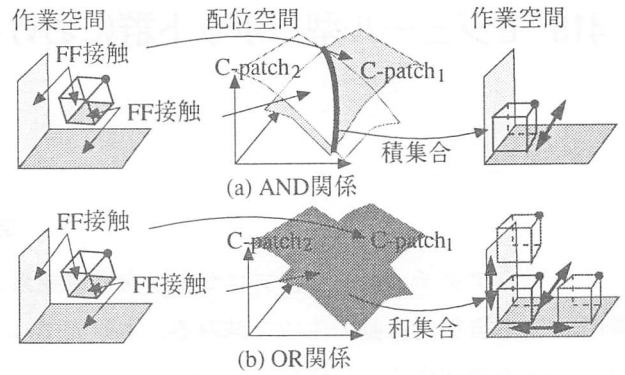


図5 拘束間関係と運動可能領域

### 3. 配位空間の拡張

機能面の変位を考慮した配位空間を以下のように定義する。作業空間  $W$  に  $N$  個の部品  $A_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) が存在する場合、部品  $A_i$  の位置と姿勢は、図4に示すように、 $A_i$  の座標系  $F_{Ai}$  の作業空間の座標系  $F_W$  に対する並進  $T_{Ai}$  と回転  $R_{Ai}$  により表現する。また、部品  $A_i$  の機能面の変位は以下のように表現される。すなわち、図4に示すように、 $T_{di}$  と  $R_{di}$  を部品  $A_i$  の座標系  $F_{Ai}$  に対するデータムの座標系  $F_{di}$  の位置と姿勢、 $T_{ni}$  と  $R_{ni}$  を  $F_{di}$  に対する公称機能面の座標系  $F_{ni}$  の位置と姿勢、 $T_{ri}$  と  $R_{ri}$  を  $F_{ni}$  に対する実機能面の座標系  $F_{ri}$  の位置と姿勢 ( $t_{ri}$  は円筒の場合の半径の増加量) とした時の、 $T_{ri}$ 、 $R_{ri}$ 、 $t_{ri}$  を機能面の変位とする。従って、機能面の変位を考慮した部品  $A_i$  の拡張配位  $\mathbf{q}_i$  を式(4)で定義する。

$$\mathbf{q}_i = (T_i, \Theta_i, V_i) \quad (4)$$

ここで、 $T_i$  と  $\Theta_i$  はそれぞれ  $T_{Ai}$  と  $R_{Ai}$  に相当するベクトル、 $V_i$  は  $T_{ri}$ 、 $R_{ri}$ 、 $t_{ri}$  に相当するベクトルとする。

次に、部品の集合  $A$  を式(5)で定義する。

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\} \quad (5)$$

部品の集合  $A$  の配位を式(6)により定義する。

$$\mathbf{q} = (\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_N) \quad (6)$$

このとき、 $A$  の配位空間は、配位空間  $C_i$  (部品  $A_i$  の全ての  $\mathbf{q}_i$  の集合) の直積空間であり式(7)で定義する。

$$C = C_1 \times C_2 \times \dots \times C_N \quad (7)$$

### 4. 接触拘束表現の拡張

部品の幾何要素間の接触拘束を満たす領域は、配位空間における C-patch[3] と呼ばれる領域を拡張することにより表現できる[4]。更に、この C-patch を上述の配位空間に対して拡張すると式(8)となる。

$$C\_patch_{ij} = \{\mathbf{q} = (\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_i, \dots, \mathbf{q}_j, \dots, \mathbf{q}_N) \mid \mathbf{q}_i = X_{ij}(\mathbf{p}_{ij}, \mathbf{q}_j), \mathbf{p}_{ij} \in S_{ij}\} \quad (8)$$

$$\mathbf{p}_{ij} = (\mathbf{p}_c, \mathbf{p}_v)$$

ここで  $\mathbf{p}_{ij}$  は、実機能面間の接触に対するパラメータベクトル  $\mathbf{p}_c$  と、実機能面の変位に対するパラメータベクトル  $\mathbf{p}_v$  とからなるパラメータベクトル、 $S_{ij}$  は両方の拘束を満たす  $\mathbf{p}_{ij}$  の集合、 $X_{ij}$  は  $\mathbf{p}_{ij}$  と  $\mathbf{q}_j$  から  $\mathbf{q}_i$  への変換関数である。例えば、図2(a)のFV接触を満たす拡張 C-patch の変換関数は以下のようになる。

$$\mathbf{q}_i = X_{ij} = (T_i, \Theta_i, V_i) \quad (9)$$

$T_i, \Theta_i$  はそれぞれ式(10)の  $T_{Ai}, R_{Ai}$  に相当する。

$$T_{Ai} \cdot R_{Ai} = T_{Aj} \cdot R_{Aj} \cdot T_{dj} \cdot R_{dj} \cdot T_{nj} \cdot R_{nj} \cdot T_{ri} \cdot R_{ri} \cdot T_c \cdot R_c \cdot R_{ri}^{-1} \cdot T_{ri}^{-1} \cdot R_{ni}^{-1} \cdot T_{ni}^{-1} \cdot R_{di}^{-1} \cdot T_{di}^{-1} \quad (10)$$

$V_i$  は式(11)の  $T_{ri}$  と  $R_{ri}$  に相当する ( $V_j$  は  $i$  が  $j$  とする)。

$$T_{ri} = \text{Trans}(\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i), R_{ri} = \text{EA}(\delta \alpha_i, \delta \beta_i, \delta \gamma_i) \quad (11)$$

ここで、 $\text{EA}$  は Euler 角の変換マトリクス、 $\text{Trans}$  は並進の変換マトリクスとする。図4に示すように、実機能面の座標系  $F_{ri}$  の他方の実機能面の座標系  $F_{rj}$  に対する位置  $T_c$  と姿勢  $R_c$  は式(12)となる。

$$T_c \cdot R_c = \text{Trans}(v_x, v_y, 0) \cdot \text{EA}(\phi, \pi + \theta, \psi) \cdot \text{Trans}(-x, -y, 0) \quad (12)$$

ここで、 $(v_x, v_y, 0)$  は接触点  $v_j$  の  $F_{rj}$  に対する座標値、 $(x, y, 0)$  は  $F_{ri}$  に対する座標値とする。

他の幾何要素間の C-patch も同様に定式化できる。

### 5. 運動可能領域の導出

式(3)において、個々の拘束は C-patch に置き換えられる。図5(a)に示すように、AND 関係については全ての C-patch の積集合を求め、図5(b)に示すように、OR 関係については全ての C-patch の和集合を求めることにより、組立品の運動可能領域が配位空間において求められる[4]。

### 6. おわりに

本研究では以下のことを行った。

- (1) 拘束間関係による実機能面間の接触拘束の表現方法と、それに基づく組立モデルを提案した。
- (2) 部品の機能面の変位を考慮した配位空間を提案した。
- (3) 配位空間における接触拘束と拘束間関係との表現に基づいて組立品の運動可能領域の導出法を示した。

### 参考文献

- [1] 高橋他：動力学シミュレーションによる接触部品の運動解析、精密工学会誌、60, 4 (1994) 530
- [2] Latombe, J. C.: Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers, (1991).
- [3] Liu, Y. H., and Onda, H.: Constructing an Approximate Representation of a Configuration Space without using an Intersection Check, Proc. of the 1993 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, (1993) 644.
- [4] 徳永他：配位空間による運動拘束表現を用いた組立品の表現 (第二報)、1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、(1996) 425