精密はめ合い作業の作業達成条件に基づくマニピュレータの 運動学的機構設計*

(与えられた作業領域に対する最適リンク長の設計)

甲 斐 義 弘^{*1}, 原 敬^{*2}
横 川 隆 一^{*2}, 横 川 明^{*3}

Kinematic Design of Manipulators Based on Conditions for a Successful Peg-in-hole Task (Design of the Optimum Link Lengths for Given Workspaces)

Yoshihiro KAI, Kei HARA,
Ryuichi YOKOGAWA and Akira YOKOGAWA

This paper presents a new method to design a manipulator kinematically suitable for performing a planar peg-in-hole task at some given task positions. The manipulator has three revolute joints including a compliant element, and an RCC (Remote Center Compliance) mounted on the end point. First, joint angular errors of the manipulator to be allowable for performing the task at all the task positions are obtained from the successful task conditions. Second, a map which represents the relation between the allowable joint angular errors and link lengths of manipulators is illustrated. The map enables us to evaluate the link lengths suitable for performing the task at all the task positions. Finally, it is shown that the method based on the conditions for the successful task is useful to determine the optimum link lengths for performing the task.

Key Words: Robotics, Kinematics, Design, Assembly, Peg-in-hole Task, Dexterity, Manipulator

1. 緒 言

現在, マニピュレータの運動学的設計手法には, 作業領域に基づくもの⁽¹⁾⁽²⁾やヤコビ行列の条件数⁽³⁾, 可操作度⁽⁴⁾など⁽⁵⁾の評価指標に基づくものがある。しかし, これらの設計手法には, 目標とする作業の達成条件が考慮されていない。そのため, これらの設計手法から得られた最適リンク長が, 果たして目標とする作業を達成する上で最適であるか否かについては疑問である。

例えば, 精密はめ合い作業においては, その作業達成条件より, マニピュレータの各関節には高い位置決め精度が要求される⁽⁶⁾⁽⁷⁾。とりわけ, 垂直多関節形マニピュレータでは, 各関節の角度誤差が微小であっても, リンク長が長くなれば, 手先先端では大きな誤差に拡大されるので, 他の機構(直角座標形マニピュレータなど)よりもさらに高い精度が各関節に要求される。したがって, 精密はめ合い作業に適した垂直多関節形マニピュレータの運動学的設計を行うためには, その作業達成条件において要求されるマニピュレータの関節精度を考慮した設計手法が必要である。

著者らは, これまでに, 3自由度垂直多関節形マニピュレータが精密はめ合い作業を達成する際に各関節において許容される角度誤差をその作業達成条件から導出している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本論文では, 精密はめ合い作業の作業達成条件から得られるこの許容関節角度誤差に基づいて, その作業に適したマニピュレータの各リンク長を求める手法を提案する。具体的には, マニピュレータの手先に作業をさせたい位置(以下, 作業位置と呼ぶ)が幾つか与えられたとき, そのすべての作業位置で精密はめ合い作業を実行するためには, 運動学的にどのようなリンク長が適しているのかという設計問題を取り扱う。また, その設計手法は, 次の手続きからなる。

まず, 与えられたすべての作業位置に到達可能なマニピュレータの各リンク長を求める。これらのリンク長は, 次章に示すような範囲で与えられる。本論文ではその範囲に属するすべてのリンク長をリンク長集合と定義する。次に, そのリンク長集合に属する各リンク長をもつマニピュレータがすべての作業位置で精密はめ合い作業を達成するための許容関節角度誤差を求める。そして, 各リンク長毎に, その許容誤差の分布図を示す。その分布図より, 許容関節角度誤差が最も大きくなるリンク長を求め, それを最適リンク長とする。

なお, 本論文で考察するマニピュレータは, 図1に示す

* 原稿受付 1997 年 10 月 13 日。

^{*1} 正員, 同志社大学大学院(☎ 610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3)。

^{*2} 正員, 同志社大学工学部。

^{*3} 正員, 高知工科大学工学部(☎ 782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 185)。

ような2次元平面上を動作する3自由度垂直多関節形マニピュレータであり、その手先にはマニピュレータの手先位置・姿勢誤差を補正するためのRCC(Remote Center Compliance)装置^{(6),(9)}が装着されており、各関節には関節コンプライアンスが存在するものとする。さらに、第3リンクは常にHoleへの挿入方向(本論文では鉛直下方向)に方向づけられており、各関節角度には制限がないものとする。

2. 作業位置にマニピュレータの手先が到達するためのリンク長集合

与えられたすべての作業位置に対して、マニピュレータの原点0から最も近い作業位置の座標を (x_A, z_A) 、最も遠い作業位置の座標を (x_B, z_B) とすると、マニピュレータの手先が到達可能であるためのリンク長 l_1, l_2 の条件は、以下のようになる(図1参照)。

$$|l_1 - l_2| \leq \sqrt{x_A^2 + (z_A + L)^2}, \dots\dots\dots (1)$$

$$\sqrt{x_B^2 + (z_B + L)^2} \leq l_1 + l_2 \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 L は、第3関節の中心軸からPeg先端までの距離であり、マニピュレータの第3リンク長を l_3 、RCC装置の長さを L_{RCC} 、Pegの長さを L_{peg} とすると次式で表せる(図1参照)。

$$L = l_3 + L_{RCC} + L_{peg}$$

式(1)、(2)を満たすリンク長の組み合わせであれば、

Fig. 1 A manipulator and a set of task positions

与えられたすべての作業位置に到達可能である。しかし、生産工場などでは、マニピュレータを動作させる領域が他の機器や工場の天井などによって制限される。そこで、本研究ではその動作領域における制限値 σ を与え、マニピュレータの全長を式(3)により制限し、式(1)、(2)、(3)を満足するリンク長集合について検討する。

$$l_1 + l_2 + l_3 \leq \sigma \dots\dots\dots (3)$$

式(1)～(3)を満たすリンク長集合を図示すれば、図2のようになる。

Fig. 2 A set of link lengths (l_1, l_2) to determine a manipulator that is able to reach all the task positions.

3. 作業位置で精密はめ合い作業を達成するとき許容されるマニピュレータの関節角度誤差

3・1 精密はめ合い作業の作業達成条件 精密はめ合い作業を達成するためには、マニピュレータは以下の条件を満たさなければならない。

(i) Peg先端が面取り面内に入るための条件(図3(a)参照)⁽⁶⁾。

$$|\varepsilon_0| \leq w \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ε_0 はPeg先端の初期横方向誤差、 w はHoleの面取り面の幅である。

(ii) 面取り面上でのつまり現象を回避するための条件(図3(b)参照)⁽⁷⁾。

$$|F_x / F_z| < \tan(\beta - \chi) \dots\dots\dots (5a)$$

ここで、 β は面取り面の角度、 χ は $\chi = \tan^{-1} \mu$ であり、 μ は摩擦係数である。また、図3(b)、(c)、(d)における F_x, F_z, M はPeg先端に作用する力およびモーメントであり、 f, f_1, f_2 はHoleからの反力である。

式(5a)は、マニピュレータの弾性中心●(図1参照)における弾性行列 K

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xz} & K_{x\theta} \\ K_{zx} & K_{zz} & K_{z\theta} \\ K_{\theta x} & K_{\theta z} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} = (JC_\theta J^T + C_{RCC})^{-1}$$

の要素を用いて次式のように書き直せる⁽⁷⁾。

$$K_{zz} > |K_{xz}| / \tan(\beta - \chi) \dots\dots\dots (5b)$$

ただし, $C_\theta = \text{diag}(c_1, c_2, c_3)$, $C_{RCC} = \text{diag}(1/k_x, 1/k_z, 1/k_\theta)$ であり, $\text{diag}(a, b, c)$ は a, b, c を対角要素とする対角行列を表す. また, c_1, c_2, c_3 はマニピュレータの各関節におけるコンプライアンスであり, k_x, k_z, k_θ はそれぞれ RCC 装置の x 方向, z 方向, 回転方向の剛性要素である (図 1 参照). さらに, J はマニピュレータの弾性中心 $\bullet$ におけるヤコビ行列であり, 次式で与えられる.

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} - L_3 s_{123} & -l_2 s_{12} - L_3 s_{123} & -L_3 s_{123} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} + L_3 c_{123} & l_2 c_{12} + L_3 c_{123} & L_3 c_{123} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

ここで, L_3 は, 第 3 関節の中心軸からマニピュレータの弾性中心までの距離であり, 弾性中心から Peg 先端までの距離を L_g とすると,

$$L_3 = l_3 + L_{RCC} + L_{peg} - L_g$$

で表せる. また,

$$s_1 = \sin q_1, s_{12} = \sin(q_1 + q_2), s_{123} = \sin(q_1 + q_2 + q_3),$$

$$c_1 = \cos q_1, c_{12} = \cos(q_1 + q_2), c_{123} = \cos(q_1 + q_2 + q_3)$$

であり, q_1, q_2, q_3 は各関節の角度である (図 1 参照). J^T は, J の転置行列である.

もし, 式 (5 b) が満たされない場合, Peg は面取り面に接触することなく Hole 内部に挿入されなければならないので, マニピュレータは, 次式を満たさなければならない

(a) Initial State

(b) One-Point Contact on Chamfer

(c) One-Point Contact within Hole

(d) Two-Point Contact

Fig.3 A peg-in-hole task

い (図 3 (a) 参照).

$$|\epsilon_0| \leq R - r \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで, R は Hole の半径, r は Peg の半径である.

(iii) くいつき現象を起こさないための条件 (図 3 (d) 参照)

$$|\theta_2| \leq c / \mu \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし, $c = (R - r) / R$ である. また, θ_2 は二点接触が始まる時の角度であり, Peg 先端の初期横方向誤差 ϵ_0 と初期角度誤差 θ_0 を用いて表すと, 次式⁽⁸⁾ になる.

$$\theta_2 = \theta_0 + s \epsilon_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで, s は,

$$s = A / B,$$

$$A = (K_{xz} K_{zx} - K_{xx} K_{zz}) L_g - K_{\theta z} K_{zx} + K_{\theta x} K_{zz}$$

$$B = \{K_{xz} K_{zx} \theta - K_{xx} \theta K_{zz} + (K_{xx} K_{zz} - K_{xz} K_{zx}) L_g\} L_g$$

$$+ (K_{\theta z} K_{zx} - K_{\theta x} K_{zz}) L_g + K_{\theta \theta} K_{zz} - K_{\theta z} K_{z \theta}$$

である.

(iv) Hole 内部でのつまり現象を回避するための条件

一点接触状態のとき (図 3 (c) 参照)⁽⁶⁾,

$$F_z > \mu |F_x| \quad \dots\dots\dots (9 a)$$

式 (9 a) は, 上述の弾性行列 K の要素を用いて次式のように書き直せる^{(8), (10)}.

$$K_{zz} > \mu |K_{xz}| \quad \dots\dots\dots (9 b)$$

二点接触状態のとき (図 3 (d) 参照)⁽⁶⁾,

$$|M / r F_z + \mu (1 + \lambda) F_x / F_z| < \lambda \quad \dots\dots (10 a)$$

式 (10 a) も, 上述の弾性行列 K の要素を用いて次式のように書き直せる^{(8), (10)}.

$$K_{zz} > [\mu (1 + \lambda) r K_{xz} + K_{\theta z} - K_{xz} L_g] / \lambda r \quad \dots\dots (10 b)$$

ただし,

$$\lambda = c R / r \mu \theta_2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

もし, 式 (9 b) が満たされないとき, Peg は Hole に接触することなく挿入されなければならない. Peg の長さ分だけ Hole に挿入されたときを作業完了とすると, マニピュレータは, 式 (6) と次式を満たさなければならない (図 3 (a) 参照).

$$|P_0| \leq R - r \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで, P_0 は Peg 上端における初期横方向誤差である.

3・2 精密はめ合い作業における許容関節角度誤差

マニピュレータの各関節に生じる最大関節角度誤差をそれぞれ dq_1, dq_2, dq_3 で表し, それらの比を $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3$

($\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1, \alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \alpha_3 > 0$) で表す. すなわち,

$$\left. \begin{aligned} dq_1 &= \alpha_1 dq_t \\ dq_2 &= \alpha_2 dq_t \\ dq_3 &= \alpha_3 dq_t \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

とする. ただし, dq_t はマニピュレータの関節角度誤差の単位値を示す.

このとき, ϵ_0 と dq_t , θ_0 と dq_t および P_0 と dq_t の関係はそれぞれ,

$$\varepsilon_0 = \sum_{i=1}^3 \alpha_i (J_{1i} + J_{3i} L_g) dq_t \dots\dots\dots (14)$$

$$\theta_0 = \sum_{i=1}^3 \alpha_i J_{3i} dq_t \dots\dots\dots (15)$$

$$P_0 = \sum_{i=1}^3 \alpha_i (J_{1i} + J_{3i} (L_g - L_{peg})) dq_t \dots\dots\dots (16)$$

となる。ここで、 J_{ji} は、ヤコビ行列 J の (j,i) 要素である。

Peg先端がHoleの面取り面内に入るための条件を満足する dq_t の上限値 $dq_{t_chamfer}$ は、式 (14) を式 (4) に代入することによって、次式で表せる。

$$|dq_t| \leq \frac{w}{\sum_{i=1}^3 \alpha_i |J_{1i} + J_{3i} L_g|} \equiv dq_{t_chamfer} \dots\dots\dots (17)$$

また、くいつき現象を起こさないための条件を満足する dq_t の上限値 $dq_{t_wedging}$ は、式 (8), (14), (15) を式 (7) に代入することによって、次式で表せる。

$$|dq_t| \leq \frac{c/\mu}{\sum_{i=1}^3 \alpha_i |J_{3i} + s(J_{1i} + J_{3i} L_g)|} \equiv dq_{t_wedging} \dots\dots\dots (18)$$

さらに、

条件[A-1]: 式 (9 b) が満たされるとき、二点接触状態でのつまり現象回避条件を満足する dq_t の上限値 $dq_{t_jamming}$ は、式 (8), (9 b), (10 b), (11), (14), (15) より、次の3つの場合に分けられる。

[1] $\mu r K_{xz} + K_{\theta z} - K_{xz} L_g < 0$ のとき、

$$|dq_t| < - \frac{cR(K_{zz} + \mu K_{xz})}{\mu(\mu r K_{xz} + K_{\theta z} - K_{xz} L_g) \sum_{i=1}^3 \alpha_i |J_{3i} + s(J_{1i} + J_{3i} L_g)|} \equiv dq_{t_jamming} \dots\dots\dots (19)$$

[2] $\mu r K_{xz} + K_{\theta z} - K_{xz} L_g > 0$ のとき、

$$|dq_t| < \frac{cR(K_{zz} - \mu K_{xz})}{\mu(\mu r K_{xz} + K_{\theta z} - K_{xz} L_g) \sum_{i=1}^3 \alpha_i |J_{3i} + s(J_{1i} + J_{3i} L_g)|} \equiv dq_{t_jamming} \dots\dots\dots (20)$$

[3] $\mu r K_{xz} + K_{\theta z} - K_{xz} L_g = 0$ のとき、

$$dq_{t_jamming} = \infty \dots\dots\dots (21)$$

また、式 (5 b) が満たされるとき、Pegが面取り面上に接触することなくHole内部に挿入されるための条件を満足する dq_t の上限値 $dq_{t_clearance}$ は、式 (6), (14) より、次式で表せる。

$$|dq_t| \leq \frac{R-r}{\sum_{i=1}^3 \alpha_i |J_{1i} + J_{3i} L_g|} \equiv dq_{t_clearance} \dots\dots\dots (22)$$

条件[A-2]: 式 (9 b) が満たされないとき、Pegが面取り面上およびHole内部と接触することなく挿入されるための条件を満足する dq_t の上限値 $dq_{t_notcontact}$ は、式 (12), (16) および (22) より、次式で表せる。

$$dq_{t_notcontact} = \text{Min}[dq_{t_chamfer}, dq_{t_hole}] \dots\dots\dots (23)$$

ただし、 dq_{t_hole} は、

$$dq_{t_hole} = \frac{R-r}{\sum_{i=1}^3 \alpha_i |J_{1i} + J_{3i} (L_g - L_{peg})|}$$

である。

以上より、精密はめ合い作業の作業達成条件を満足する dq_t の上限値 dq_{task} は、次の3つの場合から求められる。

[1]: 式 (5 b) が満たされるとき (式 (5 b) が満たされれば式 (9 b) も満たされる¹⁷⁾、

$$dq_{task} = \text{Min}[dq_{t_chamfer}, dq_{t_wedging}, dq_{t_jamming}] \dots\dots\dots (24)$$

[2]: 式 (9 b) は満たされるが式 (5 b) が満たされないとき、

$$dq_{task} = \text{Min}[dq_{t_wedging}, dq_{t_jamming}, dq_{t_clearance}] \dots\dots\dots (25)$$

[3]: 式 (9 b) が満たされないとき、

$$dq_{task} = dq_{t_notcontact} \dots\dots\dots (26)$$

3・3 与えられたすべての作業位置で精密はめ合い作業を達成するためのマニピュレータの許容関節角度誤差

上記で示した dq_{task} は、ある作業位置でマニピュレータが精密はめ合い作業を達成するための許容関節角度誤差の単位値である。与えられたすべての作業位置で精密はめ合い作業を達成するためには、マニピュレータの関節角度誤差の単位値 (dq_t) が各作業位置毎に求められる許容関節角度誤差の中での最小値よりも小さくしなければならない。したがって、与えられたすべての作業位置における許容関節角度誤差の単位値 dq_{task_w} は、 p 番目の作業位置における許容関節角度誤差の単位値を dq_{task_p} とすると次式から求められる (図4参照)。

$$dq_{task_w} = \text{Min}_p [dq_{task_p}] \dots\dots\dots (27)$$

Fig. 4 A set of task positions

4. 適用例と考察

図5に示すように、

$W = \{(x, z): 300 [\text{mm}] \leq x \leq 500 [\text{mm}], 0 [\text{mm}] \leq z \leq 200 [\text{mm}]\}$ という領域 W 内において、作業位置が x および z 方向に $10 [\text{mm}]$ の等間隔で与えられているとする。また、各作業位置におけるマニピュレータの姿勢は、同図に示すように上腕姿勢であるとする。本研究では、この領域 W 内のすべての作業位置に到達可能なリンク長とそのリンク長で精密はめ合い作業を達成するための許容関節角度誤差の単位値 dq_{task_W} との関係を表(27)より求めた。計算に用いたパラメータを表1, 2, 3に示す。また、垂直多関節形マニピュレータの場合、各関節に生じる角度誤差は、マニピュレータの自重や関節コンプライアンスなどによりマニピュレー

Fig. 5 An example of a set of task positions.

Table 1 Parameters of a peg-in-hole task⁽⁶⁾⁽⁹⁾

Chamfer Width	w	2.5 (mm)
Radius of Hole	R	12.705 (mm)
Radius of Peg	r	12.672 (mm)
Length of Peg	L_{peg}	50 (mm)
Angle of Chamfer	β	45 (deg)
Coefficient of Friction	μ	0.2

Table 2 Parameters of an RCC device (AST-75 CR-55)⁽⁹⁾

Lateral Stiffness of RCC	k_x	49.2 (N/mm)
Orthogonal Stiffness of RCC	k_z	2820 (N/mm)
Angular Stiffness of RCC	k_θ	197000 (N/mm)
Length of RCC	L_{RCC}	46.0 (mm)
Distance from Tip of Peg to Compliance Center	L_r	0.0 (mm)

Table 3 Parameters of a manipulator⁽¹⁰⁾

Compliance of Joint 1	c_1	1.30×10^{-7} (rad/N-mm)
Compliance of Joint 2	c_2	6.25×10^{-7} (rad/N-mm)
Compliance of Joint 3	c_3	1.00×10^{-6} (rad/N-mm)

Fig. 6 A simulation result.

タの原点0に近い関節ほど大きくなる傾向にある。したがって、各関節に要求される許容関節角度誤差は、原点0に近い関節ほど大きい方が望ましい。そこで、本研究では一例として、その誤差比 $\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3$ を $5:2:1$ とした。式(13)より、各関節の許容角度誤差 dq_i は次式から求められる。

$$\left. \begin{aligned} dq_1 &= \frac{5}{5+2+1} dq_{task_W} \\ dq_2 &= \frac{2}{5+2+1} dq_{task_W} \\ dq_3 &= \frac{1}{5+2+1} dq_{task_W} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

また、マニピュレータの第3リンク長は、 $l_3 = 56 [\text{mm}]$ ⁽¹¹⁾ (固定)とし、式(1)、(2)、(3)を満たす範囲で第1、第2リンク長をそれぞれ $1 [\text{mm}]$ づつ変化させた。ただし、マニピュレータの全長は、 $1000 [\text{mm}]$ 以下(式(3)において $\sigma = 1000 [\text{mm}]$)とした。

図6に領域 W 内のすべての作業位置に到達可能なリンク長とそのリンク長で精密はめ合い作業を達成するための許容関節角度誤差の単位値 dq_{task_W} との関係を等高線で示す。図6において、横軸・縦軸はそれぞれリンク長 l_1, l_2 を表し、 (l_1, l_2) 座標系内の四角形の内部は、領域 W 内のすべての作業位置に到達可能なリンク長集合である。また、その四角形内部の等高線は、各リンク長で精密はめ合い作業を達成するための許容関節角度誤差の単位値 dq_{task_W} を表している。同図におけるA点は、許容関節角度誤差の単位値が最も大きいリンク長の組み合わせ ($l_1 = 412 [\text{mm}]$, $l_2 = 412 [\text{mm}]$)であり、B点は、許容関節角度誤差の単位値が最も小さいリンク長の組み合わせ ($l_1 = 640 [\text{mm}]$, $l_2 = 304 [\text{mm}]$)である。

図6より, 各リンク長の組み合わせ(l_1, l_2)において, 与えられたすべての作業位置で精密はめ合い作業を達成するのにマニピュレータの関節精度がどの程度必要であるかがわかる。例えば, A点($l_1 = 412[\text{mm}]$, $l_2 = 412[\text{mm}]$)を選択した場合, その許容関節角度誤差の単位値は $8.00 \times 10^{-3}[\text{rad}]$ であり, 式(28)より, 第1, 第2, 第3関節における許容関節角度誤差を求めると, 第1関節では $5.00 \times 10^{-3}[\text{rad}]$, 第2関節では $2.00 \times 10^{-3}[\text{rad}]$, 第3関節では $1.00 \times 10^{-3}[\text{rad}]$ であることがわかる。一方, B点($l_1 = 640[\text{mm}]$, $l_2 = 304[\text{mm}]$)を選択した場合, その許容関節角度誤差の単位値は $5.86 \times 10^{-3}[\text{rad}]$, 第1, 第2, 第3関節における許容関節角度誤差はそれぞれ, $3.66 \times 10^{-3}[\text{rad}]$, $1.47 \times 10^{-3}[\text{rad}]$, $0.73 \times 10^{-3}[\text{rad}]$ であり, A点を選択した場合よりも各関節に高い精度が要求されることがわかる。

また, 同図より, 本例においては, A点から遠ざかるほど許容関節角度誤差の単位値は小さくなっており, 運動学的機構設計においてはこのA点におけるリンク長の組み合わせが最適であると考えられる。一般に, リンク長が短いほど, より精密に作業を行うことができると考えられるが, A点はリンク長の総和が最小となるリンクの組み合わせ(図6における線分CD)から離れた位置にある。このことから, 作業を行う位置が固定されている場合, その作業位置におけるマニピュレータの作業姿勢も考慮して, リンク長を決定することが必要であることがわかる。

また, 本研究で示したリンク長の組み合わせに対する許容関節角度誤差の分布は, マニピュレータの運動学的機構設計だけでなく, その後に続く動力学的機構設計および制御系設計における1つの設計目標となると考えられる。

5. 結言

(1) 与えられた作業位置で精密はめ合い作業を達成するためのマニピュレータの許容関節角度誤差の計算式を示した。

(2) 許容関節角度誤差—リンク長集合の関係を等高線図で示した。

(3) 許容関節角度誤差—リンク長集合の等高線図を用いることにより, 与えられた作業位置で精密はめ合い作業を達成するのに最適なリンク長が得られることを示した。

なお, 本研究の一部は同志社大学学術奨励研究費により行われた。

参考文献

(1) Paredis, J.J.C. and Khosla, K.P.: Kinematic Design of Serial Link Manipulators From Task Specifications, Int. J. Robotics Research, 12-3(1993), 274.

(2) 吉村允孝・吉川尚宏・人見勝人, 作業環境を考慮した産業用ロボットの最適設計(第1報, 二自由度回転関節形ロボットを対象とする設計法), 機論, 54-503, C(1989), 1620.

(3) Salisbury, J.K. and Craig, J.J.: Articulated Hand, Force Control and Kinematics Issues, Int. J. Robotics Research, 1-1(1982), 4.

(4) Yoshikawa, T., Manipulability of Robotic Mechanisms, Int. J. Robotics Research, 4-2(1985), 3.

(5) Klein, C.A. and Blaho, B.E., Dexterity Measures for the Design and Control of Kinematically Redundant Manipulators, Int. J. Robotics Research, 6-2(1987), 72.

(6) Whitney, D.E., Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts, Trans. ASME, J. Dyn. Sys. Meas. Contr., 104(1982), 65.

(7) Hara, K., Yokogawa, R., and Kai, Y., Evaluation of Task-performance of a Manipulator for a Peg-in-hole Task, proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, (1997), 600.

(8) 原敬・横川隆一・甲斐義弘, Peg-in-hole 作業における弾性要素を含むマニピュレータの運動学的評価, 機論, 62-594, C(1996), 169.

(9) アステック Remote Center Compliance カタログ, ニッタ(株), 1989

(10) Pai, D.K. and Leu, M.C., Uncertainty and Compliance of Robot Manipulators with Applications to Task Feasibility, Int. J. Robotics Research, 10-3, (1991), 200.

(11) Corke, P.I., Helouvy, B.A., A Search for Consensus Among Model Parameters Reported for the PUMA 560 Robot, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1994), 1608.