Peg-in-hole 作業に対するマニピュレータの運動学的作業性能評価* (面取り面上でのつまり現象回避条件を考慮した評価法)

原 敬^{*1}, 横川 隆一^{*1}, 甲斐 義弘^{*2}

Kinematic Evaluation of Task-Performance of a Manipulator for a Peg-in-hole Task (A Method of Evaluation Including a Condition for Avoidance of Jamming on a Chamfer)

Kei HARA, Ryuichi YOKOGAWA and Yoshihiro KAI

The purpose of this paper is to present a graphical method for evaluating task-performance of a manipulator for a planar peg-in-hole assembly task. The manipulator has three revolute joints, including a compliant element, and performs the task in a plane. Further, an RCC (Remote Center Compliance) is mounted on the end-point of the manipulator. First, a force condition to avoid jamming on the chamfer is derived. A stiffness condition at the compliance center of the RCC is then obtained from the force condition. Under the stiffness condition, the manipulator can avoid the jamming on the chamfer. Second, a graphical method is proposed on the basis of the stiffness condition and a DMA (Dexterity Measure for Assembly) that was previously derived by the authors. Third, the method allows us to evaluate the task-performance of a manipulator (e.g. PUMA 560). Finally, the evaluation results show that the stiffness condition for avoidance of jamming on the chamfer is important in evaluating task-performance of a manipulator for a peg-in-hole task.

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

1. 緒 言

現在, マニピュレータの運動学的機構設計や作業空間内でのマニピュレータの作業位置・姿勢決定などに用いられる評価指標には, 到達可能領域, 条件数⁽¹⁾, 可操作度⁽²⁾など⁽³⁾がある。しかし, これらの指標では, 目的とする作業の達成条件が考慮されていないので, 作業の達成・不達成についての判定はできない。

そこで, 著者らは二次元平面の準静的なPeg-in-hole作業(円筒形Pegの面取り面を持った円筒形Holeへの挿入作業)におけるWhitneyの作業達成条件⁽⁴⁾をSturgesの定義した器用さ度⁽⁵⁾に適用することにより, 二次元平面のPeg-in-hole作業に対するマニピュレータの運動学的作業性能評価法を提案した⁽⁶⁾。

ところで, このWhitneyの作業達成条件には面取り面上でのつまり現象回避条件が含まれていない⁽⁴⁾⁽⁷⁾。したがって, Whitneyの作業達成条件のみを考慮した従来の評価法⁽⁶⁾では面取り面上でのつまり現象を回避できるか否かの判定ができない。

本論文では, まず, 面取り面上でのつまり現象回避

条件を導出する。つぎに, Whitneyの作業達成条件だけでなく, 面取り面上でのつまり現象回避条件も考慮したマニピュレータの運動学的作業性能評価法を提案する。ただし, 対象とするマニピュレータは, 二次元平面上を動作する3自由度回転関節型で, 各関節にコンプライアンスを有し, 手先にRCC(Remote Center Compliance)装置が装着されているマニピュレータである。Peg挿入過程は準静的なものとして取り扱う。最後に, マニピュレータ(PUMA560)の動作領域内での従来の評価法に基づく作業性能分布と本論文で提案する評価法に基づく作業性能分布を図示し, それらを比較することにより, 面取り面上でのつまり現象回避条件およびそれを考慮した評価法の重要性を示す。

2. Peg-in-hole 作業の修正作業達成条件

2.1 Whitneyの作業達成条件⁽⁴⁾⁽⁶⁾ Whitneyの作業達成条件は, 以下の3つの条件からなる。

(i) Peg先端がHoleの面取り面内に入るための条件(図1(a)参照)

$$|\varepsilon_0| \leq w \quad \dots\dots\dots (1)$$

(ii) くいつき現象を起こさないための条件(図1(c)参照)

* 原稿受付 1997年2月10日。

*¹ 正員, 同志社大学工学部(〒610-0321 京田辺市多々羅都谷1-3)。

*² 正員, 同志社大学大学院。

$$|\theta_2| \leq c/\mu \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし, $c = (R-r)/R$.

(iii) 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1(b) 参照)

$$|F_x/F_z| \leq 1/\mu \quad \dots\dots\dots (3)$$

二点接触状態のとき (図1(c) 参照)

$$\left| (M + \mu r(1 + \lambda) F_x) / r F_z \right| \leq \lambda \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{ただし, } \lambda = l_{2p} / 2 r \mu \quad \dots\dots\dots (5)$$

2・2 面取り面上でのつまり現象回避条件 図2に示すように, Pegが左側の面取り面上で接触している状態を考える. Peg先端の各方向の力を F_x , F_z とし, 面取り面からの反力を f とする. ただし, Peg挿入中のPegの姿勢角 θ は微小であるとする. このとき, Pegが面取り面上を移動するための条件は,

$$F_z \sin \beta + F_x \cos \beta > \mu f \quad \dots\dots\dots (6)$$

である. 反力 f は,

$$f = F_z \cos \beta - F_x \sin \beta \quad \dots\dots\dots (7)$$

であるので, 式(7)を式(6)に代入し, F_x , F_z で整理すると,

$$F_z (\sin \beta - \mu \cos \beta) > -F_x (\cos \beta + \mu \sin \beta) \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる. ここで, 面取り面角度 β の範囲は,

$0 < \beta < \pi/2$ であるので, 式(8)は,

$$F_x/F_z > -\tan(\beta - \chi) \quad \dots\dots\dots (9)$$

と変形できる. ただし, χ は, $\chi = \tan^{-1} \mu$ である.

同様に, Pegが右側の面取り面に接触した場合,

$$F_x/F_z < \tan(\beta - \chi) \quad \dots\dots\dots (10)$$

が得られる.

したがって, Pegが左側の面取り面上で接触しているか, 右側の面取り面上で接触しているかが既知でないときの面取り面上でのつまり現象回避条件は, 式(9), 式(10)より,

$$|F_x/F_z| < \tan(\beta - \chi) \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる. また, 本論文では, 面取り面角度 β の範囲を $\chi < \beta < \pi/2$ とする.

以上より, Peg-in-hole作業の作業達成条件は, 前節のWhitneyの作業達成条件と式(11)からなる. 本論文では, Whitneyの作業達成条件に式(11)をつけ加えたものを修正作業達成条件と呼ぶ.

3. つまり現象を回避するためのマニピュレータの弾性中心における剛性条件

3・1 マニピュレータの弾性中心における剛性行列⁶⁾
図3に本論文で考察するマニピュレータのモデルを

Fig.1 Definition of Terms of Peg-in-hole Task

Fig.2 Forces Acting on Chamfer Surface

示す. マニピュレータは, 二次元平面上を動作する3自由度回転関節型マニピュレータであり, 各関節に関節コンプライアンスを有し, 手先先端にRCC装置が装着されているものとする. さらに, リンクは完全な剛体と仮定する. また, 本論文では, マニピュレータの手先先端に装着されたRCC装置の弾性中心をマニピュレータの弾性中心と呼ぶ.

3関節機構の各関節コンプライアンスを c_1, c_2, c_3 とすると関節座標系における関節コンプライアンス行列

C_θ は,

$$C_\theta = \text{diag}(c_1, c_2, c_3) \dots\dots\dots (12)$$

で表せる. ただし, $\text{diag}(c_1, c_2, c_3)$ は c_1, c_2, c_3 を対角要素とする対角行列である. この関節コンプライアンス行列 C_θ によって生じる絶対座標系でのマニピュレータの弾性中心におけるコンプライアンス行列 C_J は,

$$C_J = J C_\theta J^T \dots\dots\dots (13)$$

と書ける. ただし, J は関節座標系における関節速度ベクトルを絶対座標系におけるマニピュレータの弾性中心の速度ベクトルに写像するヤコビ行列である. また, J^T は J の転置行列である. Peg挿入中におけるマニピュレータの姿勢変化に伴う C_J の変化は微小であるため, これを無視する.

RCC装置のコンプライアンス行列 C_{RCC} は, 横方向の剛性を k_x , 縦方向の剛性を k_z , 回転方向の剛性を k_θ とすると,

$$C_{RCC} = \text{diag}(1/k_x, 1/k_z, 1/k_\theta) \dots\dots\dots (14)$$

である. したがって, マニピュレータの弾性中心におけるコンプライアンス行列 $C_{effector}$ は,

$$C_{effector} = C_J + C_{RCC} \dots\dots\dots (15)$$

となる. よって, マニピュレータの弾性中心における剛性行列 $K_{effector}$ は, 次のように表される.

- : Compliance Center of Manipulator
- l_1 : Length of Link 1
- l_2 : Length of Link 2
- l_3 : Length of Link 3
- c_1 : Compliance of Joint 1
- c_2 : Compliance of Joint 2
- c_3 : Compliance of Joint 3
- q_1 : Angle of Joint 1
- q_2 : Angle of Joint 2
- q_3 : Angle of Joint 3
- k_x : Lateral Stiffness of RCC
- k_z : Orthogonal Stiffness of RCC
- k_θ : Angular Stiffness of RCC
- L_g : Length of Peg
- L_{peg} : Length of RCC
- L_{RCC} : Length of RCC

Fig.3 Manipulator Model and RCC Device

$$K_{effector} = C_{effector}^{-1}$$

$$= \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xz} & K_{x\theta} \\ K_{zx} & K_{zz} & K_{z\theta} \\ K_{\theta x} & K_{\theta z} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

3・2 つまり現象を回避するための剛性条件式

マニピュレータの弾性中心位置の初期横方向誤差を U_0 , 初期角度誤差を θ_0 とする (図2参照). また, マニピュレータには, この位置から垂直下方向へ微小量 Δz_d づつ目標指令値が与えられるとする.

まず, ホールの左側の面取り面上でつまり現象が生じたときを考える. このときの弾性中心位置を $[U, z_r, \theta]^T$ とする. このとき, Peg先端での力のつり合い式は,

$$F_x + F_z \tan(\beta - \chi) = 0 \dots\dots\dots (17)$$

で表せる. また, その力とモーメントは,

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M \end{bmatrix} = -K_{peg} \begin{bmatrix} U - U_0 \\ z_r - z_d \\ \theta - \theta_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

で表せる. ただし, z_d はマニピュレータへの挿入方向の目標位置である. また, K_{peg} は, Peg先端における弾性行列であり, 式(16)の弾性行列の要素で表すと,

$$K_{peg} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xz} & K_{x\theta} \\ K_{zx} & K_{zz} & K_{z\theta} \\ K_{\theta x} - K_{xx}L_g & K_{\theta z} - K_{xz}L_g & K_{\theta\theta} - K_{x\theta}L_g \end{bmatrix} \dots\dots (19)$$

となる. 式(18)はマニピュレータが目標位置 $[U_0, z_d, \theta_0]^T$ までPegを挿入しようとしたが, Pegと面取り面との接触により, その位置まで挿入できずにマニピュレータ(RCCを含む)のもつコンプライアンスによって, x 方向に $U - U_0$, z 方向に $z_r - z_d$, θ 方向に $\theta - \theta_0$ の偏差が生じたことを示す.

マニピュレータにはさらに挿入方向に目標指令値 Δz_d が加えられる. この目標指令値 Δz_d が加えられることによって, この弾性中心位置 $[U, z_r, \theta]^T$ において, つまり現象が回避されるかどうかを調べる.

マニピュレータの目標位置が挿入方向に微小量 Δz_d だけ増加したとき, Peg先端における各方向の力およびモーメントは,

$$\begin{bmatrix} F_x + \Delta F_x \\ F_z + \Delta F_z \\ M + \Delta M \end{bmatrix} = -K_{peg} \begin{bmatrix} U - U_0 \\ z_r - (z_d + \Delta z_d) \\ \theta - \theta_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

となる. 式(9), (17), (20)より, つまり現象を回避するためには,

$$\begin{aligned} F_x + \Delta F_x + (F_z + \Delta F_z) \tan(\beta - \chi) &= \Delta F_x + \Delta F_z \tan(\beta - \chi) \\ &= \{K_{xz} + K_{zz} \tan(\beta - \chi)\} \Delta z_d > 0 \end{aligned} \dots\dots\dots (21)$$

が必要である。 Δz_{ij} は正であるので、式(21)を満足する条件は、

$$K_{xz} > -K_{zz} \tan(\beta - \chi) \quad (22)$$

となる。また、Pegが右側の面取り面上に接触する場合には、

$$K_{xz} < K_{zz} \tan(\beta - \chi) \quad (23)$$

となる。式(22)、(23)および $\tan(\beta - \chi) > 0$ ($\chi < \beta < \pi/2$)より、面取り面上におけるつまり現象回避条件は、

$$K_{zz} > |K_{xz}| / \tan(\beta - \chi) \quad (24)$$

となる。同様にして、一点接触・二点接触状態におけるつまり現象回避条件(式(3)、(4))は、

$$K_{zz} > |\mu K_{xz}| \quad (\text{一点接触状態}) \quad (25)$$

$$K_{zz} > \left| \left(\mu(1+\lambda)rK_{xz} + K_{\theta z} - K_{xz}L_g \right) / \lambda r \right| \quad (\text{二点接触状態}) \quad (26)$$

となる。

4. Peg-in-hole 作業における器用さ度と従来の評価法

本章では、Peg-in-hole作業における器用さ度(DMA: Dexterity Measure for Assembly)と従来の評価法を簡単に示す(詳細は文献(6)参照)。

4・1 Peg-in-hole作業における器用さ度 Sturgesの器用さ度の定義式⁽⁵⁾より、幾何学的条件に関する器用さ度(DMGC)、力学的条件に関する器用さ度(DMFC)は、

$$\text{DMGC} = \log_2(dq_{t_g} / dq_e), \quad (27)$$

$$\text{DMFC} = \log_2(dq_{t_f} / dq_e), \quad (28)$$

となる。ここで、 dq_{t_g} 、 dq_{t_f} はそれぞれ幾何学的条件を満たす単位角度誤差、力学的条件を満たす単位角度誤差である。また、 dq_e は、実際のマニピュレータのもつ関節角度誤差の単位値であり、各関節角度誤差 dq_{1_e} 、 dq_{2_e} 、 dq_{3_e} の比を $\alpha_1:\alpha_2:\alpha_3$ (ただし、 $\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1, \alpha_i > 0$)で表すと、

$$dq_e = \frac{dq_{1_e}}{\alpha_1} = \frac{dq_{2_e}}{\alpha_2} = \frac{dq_{3_e}}{\alpha_3} \quad (29)$$

より求められる。

さらに、 dq_{t_g} は、

$$dq_{t_g} = \text{MIN}(dq_{t_{\text{chamfer}}}, dq_{t_{\text{wedging}}}) \quad (30)$$

より求められる。 $dq_{t_{\text{chamfer}}}$ は、Peg先端がHoleの面取り面内に入るための条件において許容される関節角度誤差の上限値であり、式(1)より、

$$dq_{t_{\text{chamfer}}} = \frac{w}{\sum_i \alpha_i |J_{1i} + J_{3i}L_g|} \quad (31)$$

で表せる。また、 $dq_{t_{\text{wedging}}}$ は、くいつき現象を起こさないための条件において許容される関節角度誤差の上限値であり、式(2)より、

$$dq_{t_{\text{wedging}}} = \frac{c/\mu}{\sum_i \alpha_i |J_{3i} + s(J_{1i} + J_{3i}L_g)|} \quad (32)$$

で表せる。 J_{ji} は、ヤコビ行列 J の(j, i)要素である。 s は、次式で与えられる。

$$s = A/B, \quad (33)$$

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

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

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

dq_{t_f} は、式(25)が成り立つとき、式(5)、(26)より、以下のような式で与えられる。

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

$$dq_{t_f} = - \frac{cR(K_{zz} + \mu K_{xz})}{\mu(\mu r K_{xz} + K_{\theta z} - K_{xz}L_g) \sum_i \alpha_i |J_{3i} + s(J_{1i} + J_{3i}L_g)|} \quad (34)$$

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

$$dq_{t_f} = \frac{cR(K_{zz} - \mu K_{xz})}{\mu(\mu r K_{xz} + K_{\theta z} - K_{xz}L_g) \sum_i \alpha_i |J_{3i} + s(J_{1i} + J_{3i}L_g)|} \quad (35)$$

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

$$dq_{t_f} = \infty. \quad (36)$$

以上より、Peg-in-hole作業における器用さ度DMAは、

$$\text{DMA} = \text{MIN}[\text{DMGC}, \text{DMFC}], \quad \text{ただし } K_{zz} > |\mu K_{xz}| \quad (37)$$

となる。

4・2 従来の評価法 Whitneyの作業達成条件は、前節のDMAを用いると、

式(25)が成立し、かつ

$$\text{DMA} > 0 \quad (38)$$

と書き直せる。式(25)および(38)が満たされるとき、DMAの値が大きい程、マニピュレータはWhitneyの作業達成条件を満たしやすい。

したがって、従来のWhitneyの作業達成条件のみに基づいた評価法は、次のようになる。

(i) 式(25)かつ式(38)が満たされるとき、DMAの値が高いほどPeg-in-hole作業に対するマニピュレータの作業性能は良い。

(ii) 式(25)あるいは式(38)が満たされないとき、マニピュレータはPeg-in-hole作業を達成できない。

5. 修正作業達成条件に基づいた評価法

修正作業達成条件は、式(24)、(25)、(38)からなる。しかし、 $\chi < \beta < \pi/2$ であるので常に $1/\tan(\beta - \chi) > \mu$ となり、式(24)が満たされれば、式(25)も満たされる。すなわち、面取り面上でのつまり現象が回避されれば、一点接触状態におけるつまり現象も回避される。

したがって、修正作業達成条件に基づく評価法は、次のようになる。

(i) 式(24)かつ式(38)が満たされるとき、DMAの値が高いほどPeg-in-hole作業に対するマニピュレータの作業性能は良い。

(ii) 式(24)あるいは式(38)が満たされないとき、マニピュレータはPeg-in-hole作業を達成できない。

6. シミュレーション結果と考察

本論文で示した評価法と従来の評価法を比較するために以下のようなシミュレーションを行った。表1、2、3にシミュレーションで用いた作業部品、RCC装置(BARRY WRIGHT社製RCC, AST75-CR55)およびマニピュレータ(PUMA560)のパラメータ値を示す。PegとHoleの材質は鋼鉄であり、鋼鉄の摩擦係数は、0.1から0.3⁽¹²⁾であるが、摩擦係数の値が高いほど作業の達成が困難である。したがって、本シミュレーションでは摩擦係数の値には作業の達成が最も困難な値0.3を用いた。図4、図5、図6にそれぞれ面取り面角度30[deg]、45[deg]、52[deg]の場合のシミュレーション結果を示す。図4、5において、(a)は従来の評価法による作業性能分布であり、式(25)あるいは(38)が満たされない領域は黒色で示すことにする。(b)は、本論文で示した評価法による作業性能分布であり、式(24)あるいは(38)が満たされない領域は黒色で示すことにする。ただし、従来の評価法に用いられる条件式(式(1)から(5)および式(27)から(37))には面取り面角度 β が含まれていないので、図4(a)と図5(a)は同じ図である。図6は、本論文で示した評価法による作業性能分布である。また、各図とも、DMAの値が高くなるにつれてグラデーションを白くしており、その対応関係は各図の左上に示している。

図4(a)および図5(a)から、面取り面角度が30、45[deg]の場合でも従来のWhitneyの作業達成条件では、ロボットアームの到達可能領域内全域で作業達成可能であると判定される。しかし、図4(b)および図5(b)から、本論文で導出した面取り面上でのつまり現象回避条件を満たさない領域が存在することがわかる。このように、従来のWhitneyの作業達成条件だけでは、面取り面上でのつまり現象が回避できないために、作業が

達成できない領域でも作業が達成できると判定してしまう。

さらに、図4(a)から、従来の評価法では、図に示した領域Sが作業を達成しやすい領域であると判定される。しかし、この領域では、図4(b)より面取り面上でのつまり現象を回避できないために、作業が達成できないことがわかる。このことは、Whitneyの作業達成条件だけに基づいた従来の評価法では、Peg-in-hole作業に対するマニピュレータの作業性能を評価するには不十分であることを示している。図5においては、領域Sでも面取り面上でのつまり現象が回避可能であるが、本シミュレーションで用いたPUMA560以外のマニピュレータや他のRCC装置では、面取り面角度が45[deg]の場合でも図4の場合と同じことが起こる可能性があると思われる。

したがって、Peg-in-hole作業に対するマニピュレータの作業性能評価を行うためには、面取り面上におけるつまり現象回避条件も考慮しなければならず、本論文で示した評価法は有効である。

本シミュレーションでは、面取り面角度52[deg]で、到達可能領域内全域にわたって面取り面上でのつまり現象は回避されるようになり(図6)、面取り面角度

Table 1 Parameters of Peg-in-hole Task

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}	50.0 (mm)
Angle of Chamfer	β	30, 45, 52 (deg)
Coefficient of Friction	μ	0.3

Table 2 Parameters of RCC Device (AST-75 CR-55)⁽⁸⁾

Lateral stiffness of the RCC	k_x	49.2 (N/mm)
Orthogonal stiffness of the RCC	k_z	2820 (N/mm)
Angular stiffness of the RCC	k_θ	196980 (N-mm/rad)
Length of the RCC	L_{RCC}	46.0 (mm)
Distance from Tip of Peg to Compliance Center	L_g	0.0 (mm)

Table 3 Parameters of PUMA560⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

Length of Link 1	l_1	432 (mm)
Length of Link 2	l_2	433 (mm)
Length of Link 3	l_3	56 (mm)
Resolution of Joint 1	$dq_{1,e}$	0.00007285 (rad)
Resolution of Joint 2	$dq_{2,e}$	0.00011699 (rad)
Resolution of Joint 3	$dq_{3,e}$	0.00008736 (rad)
Compliance of Joint 1	c_1	0.00000074 (rad/N-mm)
Compliance of Joint 2	c_2	0.00000115 (rad/N-mm)
Compliance of Joint 3	c_3	0.00000626 (rad/N-mm)
Range of Joint Angle 1	q_1	$-35^\circ \leq q_1 \leq 215^\circ$
Range of Joint Angle 2	q_2	$-135^\circ \leq q_2 \leq 135^\circ$
Range of Joint Angle 3	q_3	$-100^\circ \leq q_3 \leq 100^\circ$

Fig.4 Comparison between Old Evaluation and New Evaluation ($\beta = 30[\text{deg}]$)

Fig.5 Comparison between Old Evaluation and New Evaluation ($\beta = 45[\text{deg}]$)

Fig.6 New Evaluation ($\beta = 52 [\text{deg}]$)

52 [deg]以上であれば到達可能領域内全域で式 (2.4) が満たされる (式 (2.4) 以外の条件式には面取り面角度が含まれていない) ので、全領域で作業が達成可能であると判定できる。

本評価法で示したグラデーションによって、面取り面上でのつまり現象の回避条件を考慮した作業位置の最適設定が可能となっている。

また、本評価法はPeg-in-hole作業に適したマニピュレータの運動学的機構設計にも適用可能である。

7. 結言

(1) 従来のWhitneyのPeg-in-hole作業の達成条件には含まれていなかった面取り面上でのつまり現象回避条

件を導出し、それをWhitneyの作業達成条件につけ加えた修正作業達成条件を用いることにより、Peg-in-hole作業の達成判別がより厳密に行えることを示した。

(2) 修正作業達成条件に基づくマニピュレータの運動学的作業性能評価法を提案した。

(3) 従来の評価法に基づいた作業性能分布と本論文で提案した評価法に基づいた作業性能分布をマニピュレータ (PUMA560) の動作領域内で図示し、それらを比較することにより、面取り面上でのつまり現象回避条件およびそれを考慮した本評価法の重要性を示した。

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) Salisbury, J.K. & Craig, J.J.: Articulated Hand, Force Control and Kinematics Issues, Int. J. Robotics Research, 1-1(1982), 4.
- (2) Yoshikawa, T., Manipulability of robotic mechanisms, Int. J. Robotics Research, 4-2(1985), 3.
- (3) 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.
- (4) Whitney, D.E., Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts, Trans. ASME, J. Dyn. Sys. Meas. Contr., 104 (1982), 65.
- (5) Sturges, R.H., A Quantification of Machine Dexterity Applied to an Assembly Task, Int. J. Robotics Research, 9-3 (1990), 49.
- (6) 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.
- (7) Whitney, D.E., Gustavson, R.E. and Hennessey, M.P., Designing Chamfers, Int. J. Robotics Research, 2-4 (1983), 3.
- (8) アステック Remote Center Compliance カタログ, ニッタ (株), 1989
- (9) 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.
- (10) Corke, P.I., The Unimation Puma servo system, CSIRO Division of Manufacturing Technology, MTM-226(1994), 44.
- (11) 周桑完・前田浩一, 垂直多関節型ロボットマニピュレータの関節剛性測定一同時測定と独立測定による比較一, 日本ロボット学会誌, 13-3, (1995), 390.
- (12) 淵上正朗, ロボットを導入した生産システム—ハンドリングと組立を中心に—, 日刊工業新聞社, (1996), 132.