組立ロボットハンドの研究*

(第2報, コンプライアンスハンドによるピン挿入時の負荷挙動)

松原武徳^{*1}, 水谷利弘^{*2}
板垣修^{*3}, 榎原昭^{*4}

Development of Compliance Hands on Assembly Works

(2nd Report, Characteristic Performances of Working Load on Peg-in-Hole Task through Compliance Hands with RCC Devices)

Takenori MATSUBARA^{*5}, Toshihiro MIZUTANI,
Osamu ITAGAKI and Akira SAKAKIBARA^{*5} Meijo University, Faculty of Science and Technology,
1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya-shi, Aichi, 468-8502 Japan

For a peg-in-hole task in order to achieve more quickly and automatically interpositioning the objects we have developed such kind of remote center compliance devices as the spring and rubber mechanisms cooperating with the feedback systems by sensing load on the manipulator hands. We have evaluated the experimental performances of the friction forces, the friction coefficient and the effectiveness for the size of chamfers in respect to the clearances between pin and hole through the compliance robot hands. These test results have been evaluated to derive a criterion of the spring stiffness of RCC devices in practical uses.

Key Words: Robot Hand, Remote Center Compliance, Spring Mechanisms, Peg-in-Hole Task

1. まえがき

これまでの報告^{(5),(11)}を通じて, ピン挿入課題(Peg-in-Hole Task)に対して, ロボット側の負荷フィードバックシステムの機能に加えて, 簡易ばね機構の工夫によるRCC(Remote Center Compliance)を有機的に適用させれば有効であることを述べてきた. その際, RCCのばね剛性をどの程度に選定するかが, 負荷フィードバックシステムとも関連し, ピン挿入の成功率あるいは自動高速化に大きく影響し, 簡易RCCの設計指針ともなるものである. しかし, それはロボットシステムとしての並進誤差, 角度誤差への対応のみならず, ピンとその穴との嵌め合い精度, 両者に付与された面取り形状などに大きく影響されることが実験的にもわかってきている^{(1),(2)}. これらピン挿入時に生じるピンと穴との接触条件などを考えた Sturges, Whitney 等の考察^{(6),(7)}, それらを基に導いた器用さ度に関する原^{(8),(9)}等の研究もある.

本報では, 厳しい嵌め合い, あるいは付与された面取り形状に対して, 効果的にピン挿入を達成する観点

から, ピン挿入時の負荷挙動の把握, RCCのコンプライアンスの大きさによる効果比較に関して基礎データを得たので, それについて述べる.

2. 実験装置

実験装置は, 第1報⁽⁵⁾および3報⁽¹¹⁾に述べると同様のシリアルマニピュレータ(MOVEMASTER RV-M2)と視覚センサ(IS-100)による画像処理システムを使用した. また, ピンと部材は新たに作成したものを使用し, 図1にそれを示した. ピンと穴には, 0.5mm, 1mmと2mmの3種類の面取りがそれぞれ施されている. 本実験ではロボットの作業ハンドを介して, x, y, z軸方向の力を6軸力覚センサ(IFS-50M31A25-125)により

Fig. 1 Assembly parts of pin and flange

* 原稿受付 2001年4月2日.

^{*1} 正員, 名城大学理工学部(☎468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501).^{*2} 三菱重工業(株)産業機器事業部(☎453-0862 名古屋市中村区岩塚町).^{*3} 中日本ダイカスト工業(株)(☎504-0957 各務原市金属団地188).^{*4} 名三工業(株)(☎464-0075 名古屋市千種区内山1-23-7).

E-mail: matsubar@ccfms.meijo-u.ac.jp

計測し、ピン挿入時にピンと穴の位置決め誤差からピンに加わる力、具体的には垂直方向の挿入負荷 F_z と水平方向のフィードバック検出負荷 F_x, F_y を検出している。それらの負荷検出を通じて、図2に示すように、水平方向の設定負荷 F_x, F_y を超えるとその負荷を解消する方向へロボットハンドを移動させて位置修正

Fig.2 Flow diagram of feedback system through sensing load on peg-in-hole task

を行っている。このように、通常の嵌め合い作業を円滑に行なわせるために、位置誤差の補正を行う負荷フィードバックシステムを採り入れている。

3. 簡易 RCC 機構の試作

ピン挿入における誤差は並進誤差と角度誤差に分けられる。今回試作のフレキシブルRCC機構はコイルばねや板ばねの柔軟性を用いる機構(RCC00-1, RCC00-2)に加え、ゴムの柔軟性を用いる機構(RCC00-3)、さらに、スポンジと3脚のたわみ棒による機構(RCC98)を工夫した。図3にその構成を示した。板ばね、コイルばねおよびゴムの柔軟性により並進誤差、角度誤差を吸収することを期待することができ、RCC機構が非常にシンプル化できるということである。それらの3方向に対するたわみ剛性について、ばね定数(k_x, k_y, k_z)の測定結果を図4に示した。ばね定数 k_x が0.2~0.6 N/mmに到る4種類を実験対象としたが、RCC98以外は概ね原点対称の均等なばねと言える。

4. ピン挿入時の負荷挙動把握

4.1 ピン挿入時の負荷 ロボットハンドでピンを掴み、対象の穴に挿入する際の負荷(荷重)を力覚

センサで計測してきた。ピン挿入時の負荷については、ピンと穴との接触状況が図5に示すように、穴の面取り部およびその入口に近いところでは一点接触(線接触を含む)にて滑り込み、更に深く入るに従い、二点接触(線接触、面接触)の状態に進む。その際のピンに加わる挿入負荷はピンと穴とのすきまの大きさ、

Fig.3 Grand view of RCC

Normal hand: $k_z=39.7$ [N/mm], RCC98: $k_z=22.0$ [N/mm]
 RCC00-1: $k_z=5.6$ [N/mm], RCC00-2: $k_z=7.5$ [N/mm]
 RCC00-3: $k_z=16.3$ [N/mm]

Fig.4 Spring stiffness of RCC

その摩擦係数などにより大きく影響される。特に、本研究ではコンプライアンスによる並進誤差、角度誤差を吸収して、より負荷抵抗が小さい状態でスムーズに挿入できることを目指している。そのために、ロボット側の力覚センサによる負荷フィードバックシステムによるハンドの位置修正に加えて、角度誤差の微調整をも含めて、簡易 RCC に求めているものである。

図 6 は、ピンの挿入深さ Z に対する負荷 F_z の典型的な計測例である。本計測例は簡易 RCC を搭載していない通常のロボットハンドによる挿入時の負荷の履歴を示したもので、ピン $\phi 10.0\text{H}7$ に対して、穴の径を $\phi 10.0\text{H}7$ から $\phi 10.05\text{H}7$, $\phi 10.10\text{H}7$ に変えて、そのすきまを変化させた事例を同時に示している。ここで、すきま率 C_l を図 5 の記号により $C_l = (R-r)/R$ とした。最も厳しい嵌め合い(すきま率 $C_l = 0.01/10$)では、ピンは入口の面取り部直後に引っかかり、負荷オーバー(20 N 以上)で挿入は失敗している。すきま率 $C_l = 0.05/10$ ($\phi 10.05\text{H}7$) では、穴入口から 10mm 程度の深さまで一点接触で滑りながら入り、極めて少ない負荷($F_z \approx 1\text{N}$)で挿入され、それから二点接触相当以上の摩擦滑りで、挿入が進んでゆく。深さ 20mm 近辺に到ると、負荷 F_z は最大 15N にまで達している。それ以上の深さに進むとピン自体の姿勢が穴の深さで案内、矯正されて、摩擦負荷は 10N 以下におさまっている。

Fig. 5 Two-point contact on chamfer for a peg-in-hole task

Fig. 6 Loci of measured load for interpositioning

よりすきまの大きいすきま率 $C_l = 0.10/10$ ($\phi 10.10\text{H}7$) では、より深い 20mm の位置で二点接触が始まり、摩擦負荷 F_z は 4N 程度と小さい値で挿入されている。このように、ピンの挿入負荷はすきま率によって大きく支配され、ピンの挿入深さによって、その接触状況は、一点接触から二点接触に移移してゆく。そこでは、どんどん負荷の摩擦力が増していくことになる。

図 7 には、ピンとその穴とのすきま率 C_l に対するピン挿入負荷(摩擦力)の最大値 F_{z_max} の計測値をプロットし、その傾向を曲線でつないで示した。挿入時の最大負荷の増加はすきま率によって明確に増大していく傾向を示している。RCC の設置によってそれはより小さい値の方向になっている。すきま率が小さくても RCC の工夫によって、最大負荷が軽減されることを示している。これはオフセット量などによっても影響される。ここで、同じすきま率でも、ばね定数 $kx = 0.3\text{ N/mm}$ (RCC00-3) がばね定数 $kx = 0.2\text{ N/mm}$ (RCC00-1) よりも若干少ない負荷最大値で挿入を完遂していることを示している。

4.2 すきまの大きさと二点接触へ移行深さ ピンと穴とのすきま(すきま率)の大きさによって、挿入時の深さ Z に対するピンの傾き角度(すきま角) θ は一義的に決まってくる。図 8 に深さ Z に対するすきま角 θ の変化をすきま率 C_l 毎に曲線でまず表わした。

Fig. 7 Tendency of maximum working load against its clearance on peg-in-hole task

Fig. 8 Depth of becoming two points contact against the clearance angle on RCC00-3

前記4.1に述べたように一点接触の滑り摩擦から二点接触による滑り摩擦へ遷移し、急速に負荷が増大する。その遷移点の深さは、すきまの大きさ以外に両者の面取り、RCCによる微妙な修正機能によって大きく異なってくる。図5におけるその遷移深さ l_2 を挿入時の負荷履歴から、すきま率 C_1 毎に読み取って、図8のすきま率の曲線上にプロットした。遷移深さはすきま率の大きさによって異なり、しかもそれぞれの発生の深さに幅がみられる。従って、それに対応する遷移すきま角 θ_2 もある一定値に達すると、例えば、本計測例ではすきま角 $\theta=0.5^\circ$ 近傍で二点接触に移行するというような限界角度のような傾向は認め難い。特に、すきま率の大きい $C_1=0.10/10$ の例では、RCC00-3による調整効果が加わって、挿入深さが40mmに到っても遷移深さが生じていない。あたかも一点接触相当のままでピン挿入を完了することができており、挿入負荷の低減を達成している。

4.3 ピン挿入時の摩擦係数の評価について

力覚センサにより計測して求めたピン挿入深さ各位置での負荷 F_x, F_y, F_z 、そのモーメント M_x, M_y の各データをもとに、Whitneyが導いた次の(1),(2)式⁽⁶⁾によりピンおよび穴の一点接触および二点接触時の摩擦係数 μ について、図9に示した。バラツキはあるが、ピンと穴のすき間が大きくなるに従い、かつ、挿入深さが大きくなるに従い、摩擦係数 μ は0.1~0.2近傍に分布していると言える。穴の入口部での一点接触から二点接触に移る近辺では摩擦係数のバラツキも大きい。ピンが順次に深く挿入され、案内されるところでは、ピンが穴の深さに沿って方向が安定してくる。その結果、摩擦係数 μ も0.1~0.2の範囲に、むしろ0.1の方向に収束しているものといえる。

$$\left\{ \begin{array}{l} |F_{xy}/F_z| \leq 1/\mu \\ \left| [M_{xy} + \mu r(1+\lambda)F_{xy}] / rF_z \right| \leq \lambda \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left| [M_{xy} + \mu r(1+\lambda)F_{xy}] / rF_z \right| \leq \lambda \quad (2)$$

$$\lambda = l_{2_min} / 2\mu r \quad (3)$$

Fig.9 Evaluation of friction coefficient between pin and hole

なお、ここで、 F_x, F_y, F_z, M_x, M_y の計測値に対して、(1),(2)の各式のそれに代入するにあたって次の合成ベクトルを求めた。また、記号 $l_{2,r}$ は図5に示す諸元を用いた。

$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4)$$

$$M_{xy} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (5)$$

5. 面取り形状とその有効性

5.1 面取りの大きさ 挿入時のピンと穴との二点接触による滑り摩擦への移行はその深さが大きい程、挿入はスムーズに行われ、その負荷も小さいということを先に述べた。図10には厳しい嵌め合いであるピン $\phi 10.0h7$ に対して、穴 $\phi 10.0H7$ 、 $\phi 10.05H7$ および $\phi 10.10H7$ のそれぞれに対して、面取りCを0.5mm, 1.0mm, 2.0mmの付与を行い、その面取りCの組合せにおけるピン挿入の成功の効果を実験したものである。

オフセット（ピンと穴の位置を調整後、更にずらすこと）を変えて、その挿入における面取りCの大きさに対して、成功の限界をまとめたものである。評価方法として、ピンおよび穴のそれぞれの面取り量Cに相当するオフセットを加えて（最大4mm）、挿入が成功か否かを試験したものである。その結果、以下のこ

(a) RCC00-1

(b) RCC00-3

Fig.10 Critical offset for its combinations of different chamfers on peg-in-hole task

とが明らかになった。

(1) 最も厳しい嵌め合いであるピンφ10.0h7, 穴φ10.0H7の組合せ(すきま率 $C_1=0.01/10$)では, 今回試作のRCC00-1を用いても, $C \leq 1.0\text{mm}$ 程度までが有効限界で, 双方に $C=2\text{mm}$ を付与しても, その範囲まで挿入を成功させる効果がないことがわかった。

(2) 次のピンφ10.0h7と穴φ10.05H7(すきま率 $C_1=0.05/10$)では双方の面取りは $C \leq 2\text{mm}$ 程度までの付与に対して, オフセット最大4mmまでピン挿入は成功した。その際の有効な面取り量は $C \leq 2\text{mm}$ といえる。

(3) 本来, 面取り C の付与すべき大きさはピン挿入作業をロボットハンドの並進誤差, 角度誤差の修正できる機能の範囲で与えるべきものと考ええる。これまでの画像処理, 力覚センサによる負荷フィードバックによる修正, 簡易RCCによる修正のすべての手段を用いても, そのすきま率の厳しい組合せ(すきま率 $C_1=0.01/10$)では面取り C の大きな値, 例えば2mmのところまで対応できないということである。

(4) すなわち, 本研究のコンプライアンスハンドのRCC機能の対応能力がより厳しい嵌め合い精度の場合に対してもより多くのオフセットに対応できることが望ましい。ばね定数 $0.2 \sim 0.3\text{N/mm}$ のRCC00-1およびRCC00-3に対する上記のオフセットへの対応限界は図10の(a)および(b)に見られるように, 同程度である。

(5) それぞれのすきま率に対して, 有効な付与すべき面取り C の値はすきま率 $C_1=0.01/10$ のφ10.0H7では1mm程度以下であり, それ以上のすきま率ではいずれのRCCもそれぞれ $C \leq 2\text{mm}$ 相当のオフセット(最大4mm)に対応可能となっている。また, ここでは面取り形状の有効性の観点ではRCC00-1とRCC00-3の明確な機能差はでない。

5.2 面取りの組合せ 面取りはピンと穴の双方にどの程度付与するのが効果的であるかという課題について, 前記5.1のように, 厳しい嵌め合い精度の場合には $C \leq 1\text{mm}$ 以下を選ぶべきであることを示し, それ以下のすきまの嵌め合い精度では $C \leq 2\text{mm}$ を付与しても有効であることを示した。一連の実験では, ピン側に, あるいは穴側により大きな面取り C を付与した方が効果的であるかといったことを判定するデータには到っていない。図11には, ピンとその穴の面取り C を0.5mmと2mmの両者を取り替えた組合せで, ピン挿入時の負荷の差を計測したものである。殆ど有為な差は認められなかった。

6. 簡易RCCの機能と評価

本研究においては, 力覚センサによる負荷フィードバックシステムの機能に加えて, 簡易RCCのフレキシビリティがその微妙な並進誤差および角度誤差を修正して, 負荷フィードバックシステムに依存する程度を少なくし, 組立作業の調節に要する時間の短縮に役立てる, あるいは, それにより加工精度の厳しさを緩和に対応することにある。

本報では, これまでにピン挿入時の負荷挙動について, すきま率, 一点接触から二点接触への遷移深さ, 面取り量の効果などを中心に述べてきた。試作したRCC00-1,2,3の個々の機能については, その形式, ばね定数を対比しながら, 特にフィードバック検出用の設定負荷と関連させて, そのあり方を求めてゆくものである。ここではまず, RCCの挿入時の負荷挙動への効果について概観してみることにした。

6.1 試作RCCによる負荷挙動 一連の試作RCCによるピン挿入時の負荷の比較について, 図12に示した。ピンの挿入深さ Z に対する各挿入負荷 F_z の履歴をみると, ばね定数の最も小さい ($k_x=0.2\text{N/mm}$)

(a) Chamfer of 0.5mm on Pin and its 2mm on Hole

(b) Chamfer of 2mm on Pin and its 0.5mm on Hole

Fig.11 Loci of measured Load for interpositioning at combination of different chamfers on Pin and Hole

Fig. 12 Loci of measured Load on interpositioning for each RCC

RCC00-1 が最も大きな抵抗負荷の山を形成しており、ばね定数 ($k_x=0.3\text{N/mm}$) の RCC00-3 がなだらかで小さな負荷で挿入が達成されている。この図 12 のピン挿入条件はピン $\phi 10\text{h7}$ に対して、穴 $\phi 10.05\text{H7}$ の嵌め合い精度で、ピン側、穴側の面取りはそれぞれ $C=0.5\text{mm}$ で最小限の場合のデータである。図 12 の実験結果の傾向からは、ばねの柔軟性が弱すぎても検出負荷に的確に伝えられないきらいがあり、連携が不十分と考えられる。

次に、挿入条件の更に厳しいオフセットを強制的に与えて、各 RCC のピン挿入時の負荷を計測比較した。図 13 に、RCC00-1 と RCC00-3 のそれぞれについて、

(a) RCC00-1

(b) RCC00-3

Fig. 13 Loci of measured Load on interpositioning for RCC00-1 and RCC00-3

オフセット 0~1.5mm ずらした際の履歴を記録した。いずれの RCC の場合もオフセットが 1.5mm から少なくなるに従い負荷も小さくなり、スムーズに挿入されることが明確に示されている。ばね剛性が高い RCC00-3 の方が相対的に負荷 F_z が少ない状態でピンが挿入されていることがわかる。

6.2 RCC のばね定数の選定と評価

RCC のばね定数の選定にあたっては、本研究の目的であるロボット側の負荷フィードバックシステムと簡易 RCC との連携、補完を全うさせるところにあり、負荷フィードバックシステムのために検出する水平方向の負荷設定値 F_x , F_y との密接な関係で求めてゆく必要がある。それらの纏めについて、第 3 報⁽¹⁾に集約した。

そこには、RCC の各ばね定数 k_x に対して、負荷フィードバックシステムを通した修正頻度の発生度合い f および挿入負荷の最大値 F_{z_max} の両者を評価基準とし、それに水平方向の設定負荷 F_x をパラメータとして纏めた評価図を導入している。本実験で用いた RCC の該当データについてもそれに基づいて評価するために、その評価データを、図 14 に示した。それによれば、設定負荷 F_x に対して修正頻度 f と挿入負荷の最大値 F_{z_max} は相反する増減傾向を示すが、その交叉するところが両者の妥協点として、設定負荷の値 $F_x=3\text{N}$ が実験的に求められたことになる。

それに対応するばね定数はここでは $k_x=0.3\text{N/mm}$ (RCC00-3) が選ばれている。

なおここで、ばね定数 K_x に対する値の選び方について若干の考察を加えたい。ロボット側の挿入の限界負荷能力が 20N でもあるので、かなりの余裕をみて、挿入負荷の最大値 F_{z_max} を 10N 以下に抑えたと、次のピン挿入時の摩擦力の関係式からも設定負荷 F_x

Fig. 14 Evaluation of setting load F_x for spring stiffness k_x of RCC coil (RCC00-3)

は2~7Nの範囲が算出され、現実的であると言える。

$$F_x = \tan(\beta - \chi) F_{z_max} \quad (6)$$

$$F_x = \tan(\theta - \chi) F_{z_max} \quad (7)$$

ここで、 $\chi = \tan^{-1} \mu$ 、 μ は摩擦係数0.1~0.2

β は面取り角度45°、 θ はすきま角

次に、ばね定数の見積もりでは、次の(8)式に相当する。

$$kx \leq F_x / \Delta x \quad (8)$$

ここで、 Δx は修正移動量に相当すると考えると、挿入初期の面取り量、すきま角の大きいところを含めて1mm程度を考える必要がある。そこで、ばね定数 kx の算定では0.1~1.0N/mmの範囲が求められる。

一連の本実験のばね定数0.2~0.3N/mmではその追従性、ハンドの保持系としての剛性からも、 $kx=0.3N/mm$ のRCC00-3が総合的によい結果となった。

表1にピン挿入試験で得た各RCCの挿入成功率について纏めた。

Table 1 Interposing achievement on using each RCC

	Spring stiffness	Test times	Achievement times	Percentage of achievement
Normal hand	N/mm	8	6	75.0%
RCC00-1	0.2	116	98	84.5%
RCC00-2	0.2	16	10	62.5%
RCC00-3	0.3	115	101	87.8%

7. まとめ

本報ではピン挿入時の嵌め合いのすきまに対する負荷挙動の特性データ、面取りの有効性などに関するデータを得るとともに簡易RCCの評価を実験的に求めた。

(1) ピン挿入時の摩擦負荷の履歴は、その嵌め合いすきまの大きさ(すきま率)により大きく影響され、その最大負荷の値も増加するが、簡易RCCにより軽減され、その負荷挙動に関するデータをえた。

また、一点接触から二点接触への遷移の深さはすきま率あるいはRCCの調節機能によって差があり、すきま角では整理できるところまでっていない。

(2) 特に、一点接触から二点接触に到る負荷履歴の計測値から相当の摩擦係数を評価したところ、0.1~0.2の範囲に分布している事を確認し、むしろ、0.1に収束するといえる。

(3) 面取り付与の有効性について、その大きさは最も厳しい嵌め合いでは1mm以下が、すきまが大きく

なるに従い、ピン、穴ともに2mm程度でも有効で、オフセット4mmまで追従できた。

(4) 簡易RCCのばね定数の選定に対する考え方では、負荷フィードバックシステムとの連携、補完をさせるために、水平方向の検出負荷の設定値との相関で求める必要がある。実験による修正移動の頻度および最大挿入負荷の増減傾向の評価から、ばね定数に対応する水平方向の設定負荷とをともに求める、その方法を確認した。

今後、更に、ピン挿入時の負荷履歴の特性について、一層の定量的かつ論理的な検討を加えていきたい、また、組立作業の全体的な観点からロボットの作業姿勢、力覚センサなどの情報、簡易RCCとの協調のあり方について定量的な取り組みが必要であると考えている。

文 献

- (1) 山本欣市・柿倉正義、極限作業ロボットそのメカニズムと設計技術、工業調査会、1992。
- (2) 中野英二、小森谷清、新井健生、ロボット工学応用技術、養賢堂、1985。
- (3) 松原武徳、鈴村靖、新村太志、組立ロボットハンドの研究、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会98、1998-6。
- (4) 松原武徳、中根寿幸、村澤陽一、組立ロボットハンドの研究、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会99、1999-6。
- (5) 松原武徳、水谷利弘、鈴村靖、村澤陽一、沼倉昌之、組立ロボットハンドの研究、第1報：画像処理および負荷フィードバックシステムを用いたコンプライアンスハンド、名城大学理工学部研究報告第41号、2001-3、26~30。
- (6) Whitney, D.E., Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts, Trans. ASME, J. Dyn. Sys. Meas. Contr., 104(1982), 65.
- (7) Sturges, R.H., A Quantification of Machine Dexterity Applied to an Assembly Task, Int. J. Robotics Research, 9-3(1990), 65.
- (8) 原敬、横川隆一、甲斐義弘、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)、日本機械学会論文集(C編)、64、618、(1998)、604。
- (9) 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、日本機械学会論文集(C編)、62、694、(1996)、585。
- (10) 精密機械学会・組立データベース分科会、組付け要素技術マニュアルはめあい編、日刊工業新聞社、(1989)、137-153。
- (11) 松原武徳、水谷利弘、鈴村靖、村澤陽一、沼倉昌之、高坂寿一、組立ロボットハンドの研究、第3報：負荷フィードバックシステムと協調させたRCC、日本機械学会論文集(C編)投稿中。