弾性板穴への円筒棒の挿入技能に関する研究*
(観測点挿入力についての整合性)島 地 重 幸*¹, AKAS SURENG BRATA*²Cylinder Insertion into Hole of Flexible Rubber Plate
(Consistency on the Insertion Force of Examination Point)

Shigeyuki SHIMACHI and AKAS SURENG BRATA

Recently, the robot assembly industry requires research that deals with flexible parts using human-like skills. We discuss cylinder insertion into a hole of a flexible rubber plate. We reported that the magnitude of the insertion force expresses a parabolic field in the three-dimensional space that is composed of position and posture of the cylinder. The parabolic field has a tunneling path from which we can obtain the local minimum insertion force. The tunneling path seems to correspond to the rationality of human skill. This paper proposes a new regression method for searching the tunneling path, using the insertion force of examination points without exceeding the minimax force of parabolic center. The method gives us a flexibility for many kinds of size of parts, and the consistency of the insertion task. An experimental results show that the regression method is a possible search method for the tunneling path.

Key Words: Robot, Assembly, Expert System, Cylinder Insertion, Flexible Object, Insertion Force

1. 緒 言

ロボットによる組立に関する基礎的な研究としては、二つの部品の瞬間的な相対運動、接触点位置の計測、多点接触の実現、組立動作の要素に関するもの、ブロックの組立手順の類のものなど多様なアプローチのものがある。

二つの部品を扱うロボット組立の代表的なものとして、円筒の挿入の問題⁽¹⁾⁽²⁾や角柱の挿入の問題⁽³⁾などがある。そこでは剛体部品が扱われているが、近年、ゴムや布などの柔軟部品、さらには弾性変形する棒や板などの取扱いが要求されはじめ、すでにいくつかの試みが報告^{(4)~(13)}されている。

本研究もそのようなものの一つとして、図1に示すように、厚さ t で直径 D の外周固定のゴム板の中央に開けた直径 Φ の穴に、直径 ϕ の円筒棒を挿入する問題を扱う。棒の傾きを γ 、先端面の中心のオフセットを e 、深さを d とする。この問題に関してはすでに有限要素法を用いた解析により、反力から挿入棒の位置を推定することについて報告⁽⁶⁾されている。しか

し、有限要素法には計算量がぼう大なものになるという問題がある。これに対して、本研究は、変形モデルを簡単にすることを提案した⁽¹⁴⁾。そして、円筒の挿入力は、傾き角 γ を一定とした d - e 面内では、図2に示すような双曲的場を成し、その谷線(破線)上の挿入力を、各傾き角 γ に対して求めると、図3に示すような双曲的場が得られることを得た。また、図2, 3を合せて考えると、姿勢座標 d - e - γ 空間内で挿入力は、値の大きい単葉双曲面に、値の小さい二葉双曲面がはまりこんだような双曲的場を作っていることを得た。さらに、ヤング率が約10 N/mm²の硬質ゴムの穴に塩化ビニール円筒棒を条件($t=1$ mm, $D=60$ mm, $\Phi=$

Fig. 1 Position and posture of cylinder

* 原稿受付 1997年4月17日。

*¹ 正員, 岩手大学工学部(☎020-8551 盛岡市上田4-3-5)。*² 岩手大学大学院。

Fig. 2 Contour lines of theoretical insertion force on a constant γ plane and its valley line ($\gamma=6$ deg.)

Fig. 3 Theoretical contour lines of insertion force on the d - γ plane that shows the point on the constant γ valley line and a tunneling path AHB

19 mm, $\phi=22$ mm) で実際に挿入し, 図 3 に対応する結果として図 4 を得, d - e - γ 空間内で挿入力値の小さい領域を通る図 3 のトンネル線 AHB があることを示した. 本研究では, さらに, ロボットに「挿入位置・姿勢空間における挿入力の場は双曲的場である」という知識だけを与える方法を提案し, 模式図 5(a) の場に対して同図 (b) のモデル (実際には図 6 のモデル) を当てはめる局所遷移回帰法によりトンネル AHB を推定しながら挿入作業を試み, 成功した⁽¹⁵⁾.

しかし, 小さな力で挿入する経路を求めるために, 図 7 に示すように, トンネル近傍の挿入力を大きく越える観測点を取らなければならないという問題があることがわかった⁽¹⁵⁾. これでは, 挿入力の小さい作業を目指す「器用な動作との整合性」が得られていないことになる. そこで, 本報ではこの問題を解決できる一つの方法を提案し, それを試みる.

2. 曲面 κ とその上での回帰モデル

実験から得られた挿入力の方向を調べた結果, 傾き γ と深さ d を一定とすると, 円筒棒の横方向力 F_h

Fig. 4 Contour lines of experimental insertion force on the d - γ plane that shows the point on the constant γ valley line

(a) Actual Phenomenal Field (b) Regression Model Field

Fig. 5 Deformed actual field and a regression model

Fig. 6 Regression model on D - E - Γ space

Fig. 7 Insertion forces of the examination points and the trace of the hyperbolic point H_M

がほぼ零となる点を結んだ線が、挿入力等値曲線の最大曲率の点を結んだ図2の波線とほぼ一致することがわかった。また、このことはゴム穴の直径に関係なく同じ傾向を示していることもわかった。そこで、挿入円筒の位置・姿勢空間内に横方向力 F_h が零になると位置が作る曲面を考えることにする。そして、これを曲面 κ と呼ぶ。曲面 κ 上での挿入力の等値線を $d-\gamma$ 面に射影して表すと図3に示すような双曲線の形になり、挿入力は双曲的な場を形成していると考えられる。また、トンネル AHB は、ほぼこの曲面 κ の上にあると考えられる。

次に、この射影面 $\kappa(d-\gamma)$ 上の双曲的な場に当てはめる回帰モデルを考える。図8に示すように a, d_H, γ_H で表される双曲点 H_M を原点とする回帰モデル座標系 ($D-\Gamma$) を設け、それが射影面 $\kappa(d-\gamma)$ 上を遷移すると考える。回帰モデル関数として図9に示すような $D-\Gamma$ 座標内の等値線が放物線となるような関数を考える。観測点 m における挿入力のモデル上での評価量 P_m は

$$\begin{aligned} D &\equiv d_m - d_H, \quad \Gamma \equiv \gamma_m - \gamma_H, \\ P_m &= P_H + b \cdot c, \quad b = \Gamma - aD^2, \\ P_m &= P_H + (\Gamma - aD^2) \cdot c \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ここで、

P_H : 双曲点 H におけるモデルの挿入力

a, c : 任意の定数

とする。観測点での挿入力の値を P_{mex} とすると、誤差 F は、

$$F = P_m - P_{mex} \dots \dots \dots (2)$$

であり、この誤差 F の二乗和を最小にするような六つの未知数 (d_H, γ_H, P_H, a, c) を求めることになる。

Fig. 8 $D-\Gamma$ coordinate on the projection surface $\kappa(d-\gamma)$

Fig. 9 Insertion force field on the $D-\Gamma$ space

3. 曲面 κ 上の点の推定

観測点が常に曲面 κ 上にあり、しかもその観測点がトンネル線の近傍、すなわち双曲的場の対称軸 D の近傍にあれば挿入力は局所ミニマムに近い値となり、観測点での挿入力が極端に大きくなることはないと思われる。本章ではこの考えにより、本論文の目的である“挿入力の整合性”を試みる。

曲面 κ 上の数点が与えられているとして、これらとは離れた位置の曲面 κ 上の点 m を求めることにする。このためまず、点 m の近似点 m_1 を推定し、点 m_1 をもとにさらに精度のよい点を逐次近似法で探し、決定する。

まず、近似点 m_1 を求める方法を述べる。深さ d を一定とした $\gamma-e$ 断面では挿入力の同値線は放物線の形を、また傾き角 γ を定とした $d-e$ 断面でも放物線の形をしているとモデル化することにする。具体的には、曲面 κ 上の点 m_1 のオフセット量 e_{m1} を次式で推定することにした。

$$e_{m1} = (\gamma_m d_m) (b_1 \gamma_m - b_2 d_m) + b_3 \gamma_m + b_4 d_m \dots (3)$$

ここに、 $b_i (i=1-4)$ は定数であり、既知の4個以上の点から決める。また、 d_m を γ_m から次のように決める。式(1)を書き換えて、

$$d_m = d_H - \sqrt{\left(\frac{P_m - P_H}{c} - (\gamma_m - \gamma_H) \right) / a} \dots (4)$$

ここに、傾き角 γ_m については、挿入モデルに当てはめるとき、観測点の分布はある程度幅をもったほうが収束性がよいので γ_m を遷移双曲点の傾き角 γ_H から $0 \sim 3 \text{ deg}$ 離れたところに置くことにした。

$$|\gamma_m - \gamma_H| \leq 3 \text{ deg}$$

また、 P_m については、測定開始後の最大挿入力を P_{mmax} とし、

$$P_m = P_{mmax} + k \cdot (P_H - P_{mmax})$$

で与えることにした。ここに k については、 $P_m < P_H$ の条件を満足するように試行錯誤的に、 $k < 0.5$ とすることにした。

式(3)で推定される点 m_1 は曲面 κ に十分に近いことが多く、係数 b_i の再計算は点 m_1 で $F_h \approx 0$ の条件が満たさなくなったときだけ行う。

点 m_1 の推定精度が悪いときは、 γ_m, d_m を固定し、初期の2点めの e_i 値を

$$e_{m2} = e_{m1} + 0.3 \text{ mm}$$

として、ニュートンの逐次近似法により、 $F_h \approx 0$ となる点 M を求めた。実際には、 m_1 点が十分に曲面 κ に近いので、2, 3回の試行で収束した。

4. 局所遷移回帰法による 双曲的点の推定実験

小形五軸ロボット(分解能:位置 0.1 mm, 角度 0.1 deg.)に自作の六軸力覚センサを介して円筒棒を取付けて挿入実験を行った。

実際の挿入力場では, 大きな雑音や測定誤差がある。そこで, 曲面 κ 上の点の条件 $F_h \approx 0$ を緩めることにした。ここでは, $|F_h| \leq 0.19$ N とした。

初期値として曲面 κ 面の上に, 次の範囲内で 6 個の点を与える。

深さ $d = 2.1 \sim 2.5$ mm, 傾き $\gamma = 13 \sim 18$ deg

また, オフセット e についてはその初期値を $e_1 = 0.5$ mm として, 3 章で述べたニュートンの逐次近似法により, $F_h \approx 0$ となる点を求める。

式(1)のモデル関数は六つの係数 ($d_H, \gamma_H, P_H, \alpha, a, c$) をもっている。この係数の初期値が収束点から離れすぎると, 収れんしなかったり, 他の点に収れんしたりすることがある。ロバスト性は今後の問題とし, この度は, 実験の測定値から推定した次の値を初期値とした。

$d_{1H} = 2.8$ mm, $\gamma_{1H} = 17$ deg, $P_{1H} = 0.84$ N,

$\alpha_1 = -5$ deg, $a_1 = 0.5$, $c_1 = 1$

観測点の個数については, 最初だけ 6 個とし, 以降は前の観測点に 4 個ずつ加え, 20 点以上になったら新たな観測点を加える代わりに最初の 4 点を消去し, 常に 20 点より多くならないようにした。これにより回帰は局所的にまた遷移しながら行われることになる。

- (1) Give 6 sets of d, γ
- (2) Search experimentally
the κ surface point where $F_h \approx 0$
initial value: give e_1
- (3) Calculate the surface κ parameters
($d_H, \gamma_H, P_H, \alpha, a, c$)
initial value:
give values for the first step
the last step values for the next step
data points: add 4 new points and omit
the oldest 4 points not to exceed 20
- (4) If the changes of d_H, γ_H, P_H
are larger than given values
then go to (5) else stop
- (5) Determine next initial value e_1 for 4 new points
 γ : give in the range $\gamma_H \pm 3^\circ$
 d : determine owing to the insertion force P
on the surface κ
 P_m : give to satisfy $P_m < P_H$ and
to get deeper insertion point
initial e_1 : determine on the surface κ
- (6) Go to (2)

Fig. 10 Process flow chart

双曲的点に達した条件, いわば収束条件として, 双曲的点の変移が十分小さいときと見なし, 次の許容量で実行した。

$$|\Delta d_H| < 0.5 \text{ mm}, |\Delta \gamma_H| < 1 \text{ deg}$$

また, 推定する双曲的点の変移が小さいにもかかわらず, 挿入力値が大きく変化することもある。そのため, 収束の条件として次の条件も加えることにした。

$$|\Delta P_H| < 0.25 \text{ N}$$

推定計算を行う際, 2 回めの推定で双曲的点の変移

Fig. 11 The d - γ trace of the hyperbolic point H_M on an insertion experience

Fig. 12 Sifting of inspection points on the d - γ space

Fig. 13 Insertion forces of the inspection points and the hyperbolic point H_M

が十分小さく、上述の条件を満足する場合があった。しかし 2 回の推定では観測点の個数は少なく、実際の現象との誤差が大きく、信頼性が低いと思われるので、ここでは収束条件は 3 回め以上の推定から適用することにした。

上述した初期条件をもとに図 10 に示す手順で探索実験を行った結果を図 11~13 に示す。

図 11 に γ - d 面における遷移双曲的点の移動軌跡を示す。初期の段階では、遷移双曲的点 H_M は急激に移動するが、目標の双曲的点 H に近づくにつれて移動量は小さくなっていることがわかる。

図 12, 13 に観測点群の遷移を示す。新たな観測点は遷移双曲的点とともに深く遷移することが見られる。また推定双曲的点の遷移が小さいとき、「挿入力が小さく、かつ浅いところで測定を行い、深いところにある双曲的点を推定する」という目的に反しないように観測点が遷移していることがわかる。観測点における挿入力は常に推定双曲的点における挿入力よりも小さく、“器用な作業に要求される整合性”が満たされていることを示している。

5. 結 言

円筒棒の挿入力は、挿入姿勢空間で双曲的場を形成するが、その場の局所ミニマム点を連ねたトンネル線やその上の双曲的点 H を探索する際、場の minimax 点である双曲的点 H における挿入力よりも大きい挿入力となる観測点が現れるという矛盾が生じた。本報では、この問題点を解決するため、

(1) 円筒の挿入姿勢空間内において、挿入円筒横方向力 $F_h \approx 0$ となる位置が作る曲面 κ を考えた。上述のトンネル線は、ほぼこの曲面上にあり、トンネル線の近傍に観測点群がくるようにすることにより、観測点での挿入力を小さくできるようにした。

(2) これに付随し、この曲面上でトンネル線や双曲的点を推定する局所遷移回帰法も示した。

これらの方法により、観測点における挿入力を常に推定双曲的点 H_M のそれよりも小さい状態で、双曲的点を推定することができた。この方法には、まだ、回帰計算のロバスト性や探索速度の向上などいくつかの

問題が残されているが、これらは今後の問題であると考えている。

文 献

- (1) Shimachi, S., Nihei, S. and Yamauchi, M., Effect of Screw Motion in Inserting a Cylinder into a Hole, *Int. J. Jap. Society Precision Eng.*, 28-1(1994), 53-57.
- (2) Gustavson, R. E., A Theory for the Three-Dimensional Mating of Chamfered Cylindrical Parts, *J. Mech. Trans. Autom. Design*, Vol. 107(1985), 112-122.
- (3) 金子和政・古澤高志, 角形部品の挿入におけるコンプライアンス設定法, 精密工学会誌, (1986-6), 98-104.
- (4) Merlet, J. P., A Control Law for The Insertion of a Flexible, Cylindrical Peg using a Robot, *Proc. SPIE*, 449-1(1984), 297-304.
- (5) Gershon, D., Parallel Process Decomposition of a Dynamic Manipulation Task: Robotic Sewing, *IEEE Trans. Robotics Autom.*, 6-3(1990), 357-367.
- (6) 山口賢治・高野政晴・佐々木健・井上健司, ロボットによる柔軟対象物への挿入作業に関する研究, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1993-3), 761-762.
- (7) 小野栄一, ロボットハンドによる積層された布の 1 枚分離, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '92 講演論文集, Vol. B(1992), 61-62.
- (8) Paraschidis, K., ほか 6 名, A Robotic System for Handling Textile Materials, *IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1995), 1769-1774.
- (9) Nakagaki, H., Kitagaki, K. and Tsukune, H., Study of Insertion Task of a Flexible Beam into a Hole, *IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1995), 330-335.
- (10) Hirai, S., Noguchi, H. and Iwata, K., Transplantation of Human Skillful Motion to Manipulators in Insertion of Deformable Tubes, *IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1995), 1900-1905.
- (11) Villarreal, A. and Asada, H., A Geometric Representation of Distributed Compliance for Assembly of Flexible Parts, *IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1991), 2708-2715.
- (12) 野口英昭・平井慎一・岩田一明, 変形しやすい管状部品の挿入作業における作業状態の認識, 日本機械学会 ROBOMECH'95 講演論文集(1995-6), 161-164.
- (13) Schweizer, M., Weisener, T. and Herkommer, T. F., Robot Assembly of Pliable Hoses, *The Industrial Robot*, (1990), 201-205.
- (14) アカス・スレング・ブラタ・島地重幸・佐々木圭司, 弾性板穴への円筒棒の挿入技能に関する研究(棒の位置・姿勢と挿入力), 機論, 62-599, C(1996), 2773-2778.
- (15) 佐々木圭司・島地重幸・アカス・スレング・ブラタ, 弾性板穴への円筒棒の挿入技能に関する研究(局所遷移回帰法による局所最小挿入力経路の探索), 機論, 62-599, C(1996), 2779-2784.