弾性ホースへの円筒の挿入スキル*
(定性理解モデルに基づく動作ルール)島 地 重 幸*¹, 服 部 博*², Akas Sleng BRATA*²Assembly Skill for Cylinder Insertion into Elastic Hose
(Motion Rule Based on a Qualitative Understanding Model)

Shigeyuki SHIMACHI, Hiroshi HATTORI and Akas Sleng BRATA

Cylinder insertion into an elastic hose accompanies with large and changing deformation. Precise analytical method is hard, in calculation load, to deal with the large deformation. A learning method needs large volume of teacher data and is limited to the field of the data. Authors propose a method where human understanding makes a qualitative model that meets with the phenomena of the objective job. Skill is expressed as a rule of motion that is functioned by sensor information. Based on the qualitative understanding model, the motion rule is designed with state variables of the model. Using some experiences, cylinder insertion skill of a walking type is modeled, and slip of the cylinder in the elastic hose is sensed. Operation based on the motion rule is designed as trajectories on the state variable space. The skill of walking type is succeeded for a few kinds of hoses.

Key Words: Assembly, Skill, Elastic Part, Cylinder Insertion, Qualitative Kinematics, Naïve Model, Qualitative Understanding Model

1. 緒 言

人間が行うような器用な動作で柔軟部品を組立てることへの要求が、近年、多くなっている。従来の研究の多くは^{(1)~(7)}、剛体部品を扱っている。これに対して研究例は少ないが、柔軟部品を扱ったものとしては次のようなものがある。Villarreal⁽⁸⁾はプラスチックカバがもつ変形の方向性を利用した組立てを試みている。山口⁽⁹⁾は弾性板穴への円筒の挿入において、有限要素解析結果に基づき円筒の挿入位置を議論している。島地⁽¹⁰⁾は弾性板穴への円筒の挿入における姿勢を表す変数空間での経路を、人間形の挿入スキルとして与える試みを行っている。松野⁽¹¹⁾は細長い棒を穴に挿入する際の棒の変形と挿入姿勢について考察している。これらの研究では定量的なモデルにより、種々の動作解析を行っている。

本報は弾性ホースへの円筒の挿入を扱う。Shweizer⁽¹²⁾は四つの挿入方策について挿入動作のいくつかの変数についての実用的な試験結果を報告している。平井⁽¹³⁾は力覚センサにより人間の動作におけ

るホースと円筒の三つの接触状態（非接触、接触、挿入）の認識を論じている。これらの研究では、いずれも挿入メカニズムについては論じていない。

柔軟部品の組立てメカニズムを考察するには、剛体のそれとは異なるいくつかの課題をもっている。その一つは、解析モデル作りの難しさである。人工ニューラルネット法や関数近似のような形での学習法では、種々の寸法、材質に、また種々の動作方策にいかに対応するか、また、多量の教師データをいかに得るかなどに難点がある。また、有限要素法でも、種々の寸法、材質、動作方策に適應するには、計算負荷が大きいという難点がある。これらの難点を避けるため、本研究では、定性モデルによるアプローチを試みる。

部品の組立てにおけるもう一つの論点として、組立て動作の器用さ、スキルの扱いである。スキルについて、末広⁽¹⁴⁾は部品の接触状態を変化させる動作要素として捉えている。この定義は、弾性部品の場合には接触状態の変化のようすが剛体の場合と異なり、このままでは適用は難しい。器用な動作を観察すると、工学的な系としてのスキルは次の性質をもつと憶測できる。すなわち、スキルはいくつかの方策の一つであること、動作としての最適性をもつこと、各種の状況に対応できる適應性をもつこと、さまざまな制約の下に

* 原稿受付 1998 年 2 月 5 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。

あることなどである。そこで、本報では、これらの性質に注意を払いつつ、スキルを動作のルールで表すことを試みる。

2. 弾性ホースへの円筒の挿入の方策

弾性ホースへの円筒の挿入では、円筒を単純にホース軸方向に進めたり、円筒をホース軸から傾けてホース軸回りに回転させながら押し込んだり等、いくつかの方策がある。方策によって、動作ルールは異なり、これらを同時には扱えない。そこで、本報では、図1に示すように、円筒軸とホース軸とともに含む平面内で、円筒軸を左右に振りながら挿入する方策だけを扱うことにする。正確には、円筒を回転させる位置を左右の壁に交互に設定しながら、壁を左右の足で歩くように進む方法について考察する。この方法を便宜上、“歩行法”と呼ぶことにする。

3. スキルの理解モデル

本研究では、挿入メカニズムを定性的なモデルで捉えることにする。スポーツ、工芸、機械操作などさまざまな分野にスキルがある。技能者のイメージの中では、その人がそれ以前に学んだ基礎的な経験要素を構造をもたせて結び付けた、スキルの“最適性を定性的に理解できるメカニズム構造”をもっていると憶測できる。これを便宜上“理解モデル”と呼ぶことにする。もし、技能者のイメージから理解モデルを取出すことができれば、それに基づいて動作ルールを作り得る可能性がある。この方法では、多大な計算量も膨大な実験データも必要とせず、また多種ある作業方策に混乱することもない。

技能者のイメージが深くかかわっている研究としては、ブロック積み立て作業において、作業手順についての人間の説明により“手順”を学習させる研究⁽¹⁵⁾があるが、この説明には最適性などを与えるメカニズムの理解が含まれていない。また、人口知能研究分野

の“定性物理”の方法では、物理現象を定性的に扱い、生じ得るメカニズムを列挙することに主眼を置いており、定性的な扱いをする点は同じであるが、最適性や動作ルール作りに注目していない。

4. 円筒挿入に対する理解モデルの作成

定性モデルや理解モデルを作る方法は確立されていない。試みとして、本研究では、まず技能者の初期段階のイメージである粗定性モデルをもとに、挿入現象を実験データとして採取し、定性的にまた概略において、そのデータに適合するようにモデルを作り直すことにする。ただし、人間のスキル・ルールは数式を用いるような複雑なものとは考えられないので、モデルを精緻化することは、定量的な扱いに近かづき過ぎることかもしれないという懸念は残る。

4・1 粗モデルと挿入力 離れている円筒が弾性ホースに接触し、挿入が始まる、過渡的な状態については考えないことにする。

円筒の挿入が進んだ状態を図2に示す。円筒の外径を Φ 、弾性ホースの外径を Ψ 、その肉厚を t 、円筒の挿入深さを d 、弾性ホースの固定端からの長さを L とする。同図において、円筒軸方向の力を挿入力 f_z 、円筒軸に垂直な方向の押し付け力を横方向力 P 、弾性ホースのA側、B側からの締め付け力をそれぞれ f_{pA} 、 f_{pB} とする。

試行錯誤を行い著者らがたどり着いた挿入動作イメージでは、弾性ホースを左A、右Bの二つのはりで代表させ、それらのはり円筒を挟み絞め付けているものとする。円筒を横方向力 P でB側に押し付け、B側の締め付け力を大きくする。大きい絞め付け力は摩擦力を大きくし、B側面で円筒を滑り難くする。逆に、A側面では円筒は滑りやすくなる。そこで、B側面を滑らせず、その上に定めた円筒の回転中心 O_B 回りの回転により、A側面で円筒を滑らせる。A側面での摩

Fig. 1 Walking method of insertion

Fig. 2 Rough image model of insertion

擦力は挿入力に対応するが、それは垂直に単純に挿入するときの挿入力と比べて小さくなると考えられる。

この粗モデルを参考に挿入動作を考えると、円筒の挿入では回転モーメント、横方向力、挿入力を必要とする。現実の作業では円筒の長さが長い場合が多く、回転モーメントを与えることは比較的簡単である。また、作業としては、挿入可能深さ限界が問題である。これは、後述するように最大横方向力限界と関係する。そこで、本研究では円筒軸方向の力を挿入力と呼び、これに注目する。

歩行法では左右で動作の対称性があるので、以下から5章までは、B側で回転させ、A側で滑らせる場合について考察することにする。

4.2 挿入力の実測とモデルの精緻化 図3に実験装置の概要を示す。本体は、平面の自由度である変位と回転の運動を、ステッピングモータの回転をウォームで減速して脚を回転させた平面平行機構で実現されている。動作の中心領域では、約0.1 mm/step, 約0.1 deg/stepの分解能をもっている。六軸力覚センサの性能は最大約50 N, モーメント最大約5 Nm, 分解能はそれぞれ約0.4 N, 約0.002 Nmである。本体やセンサはいずれも自作品である。

挿入円筒および弾性ホースの諸元は次のとおりである。挿入円筒：(外径 $\phi 27$ mm, 塩化ビニールパイプ, 旋削仕上げ, 角部は糸面取り), 弾性ホース：(外径 $\Psi 31$ mm, 肉厚 t 3 mm, 変形部分の長さ L 40 mm, 塩化ビニール, ヤング率：約4 N/mm²)。

Fig. 3 Experimental Device

図2における横方向力 P を一定とし、点 O_B 回りに角 α 傾けたときの挿入力 f_z を2回ずつ測定した結果を図4に示す。B側面で回転させる場合、挿入軸方向の力は、おおむねA側面の摩擦力に対応すると見なすことができる。粗モデルから予想されるように、(a)横方向力 P が大きいほど挿入力 f_z が小さくなっている。しかし、図4では、(b)円筒の傾き始めの領域では、直線的に力が増加し、ある点を境に力が上下している。これは、A側面のホースが軸方向にしっかりと圧縮され摩擦力に打ち勝つ点から滑りが始まっていると理解される。この点を粗モデルに加える必要がある。この滑り始めの円筒の傾き角を α_* とする。(c) B側面に大きな横方向力 P をかけると、A側面の摩擦力が小さくなり、滑り始め限界角 α_* が小さくなる。また、(d)挿入深さが深くなるほど滑り始め限界角 α_* が大きくなる。これらの点は粗モデルで理解できる。(e)滑り始めた後は、円筒の傾き角 α が大きくなると挿入力も大きくなる傾向にある。傾き角が大きくなるに従い、滑り面であるA側面の絞め付け力が大きくなる。この効果を粗モデルに付け加える必要がある。

Fig. 4 Insertion force under lateral force on rotational operation (Plastic Cylinder, Outer diameter $\phi = 27$ mm, Vinyl Chloride Hose, Soft type, Outer diameter $\Psi = 31$ mm, Thickness $t = 3$ mm, Length $L = 40$ mm)

る。

挿入実験を行って、機械には軸の傾き角の限界 α_* 、センサには横方向力の限界 P_* などの限界があることに直面した。5章では、この点を考慮して動作の最適性を議論する。なお、挿入力 f_z の方向については、センサ能力に余裕があり、具体的な限界値を設けなかったが、 f_z に制限を設ける場合については今後の課題とする。

4・3 定性理解モデル 4・2節(b), (e)の現象に合うように精緻化した定性理解モデルを図5に示す。

円筒が深さ d だけ挿入が進み、横方向力 P が零、挿入力 f_z も零の状態を基準状態とする。弾性ホースを左側の片もちばり A と右側のそれ B で代表させる。

円筒面は、深さ d に対して単調増加する量 C_1d の締め付け力を受けているものとする。以下 $C_1 \sim C_4$ を単調増加関係を表す正の係数とする。この関係が成立する範囲が存在することが前提となっているが、本報の場合には、図4の実験データがその存在を示している。

基準状態から挿入円筒を B 側方向に横方向力 P で押し付けると、A 側の円筒面が受ける力は、 P に関する量 C_2P だけ少なくなり、B 側では逆にその量だけ増えるものとする。

基準状態での挿入円筒の B 側の端点 O_B の回りに円筒を α 傾けたとき、円筒と接触している A 側面の弾性ホースの部分（長さ： d ）のはりは曲げられる。これによって円筒面が受ける力は、円筒の端点 O_A では零、ホースの入り口に近いほど増加し、全体としては深さ d と傾き α の積 da に関する量 C_3da になるものとする。これで4・2節(e)を考慮したことにする。

また、円筒を傾けたとき、円筒と接触していない A 側面の弾性ホースの部分（長さ： $L-d$ ）は、滑りがなければ、傾き α に関する量だけ圧縮される。圧縮力

は定性的には $\alpha/(L-d)$ に関して増加すると考えられるが、 d と比べて L が十分に大きい場合を考えることにして、圧縮力を $C_4\alpha$ と評価することにする。この圧縮力は、摩擦を介して挿入力 f_z と釣合うものとする。圧縮力が摩擦力よりも大きくなった時点で、滑りが生じる。これで、4・2節(b)を考慮したことにする。

定性理解モデルとしては、機械の性能限界としての、軸の傾き角の限界 α_* 、軸の横方向力の限界 P_* を取入れる。

4・4 主要状態量空間における滑り始め限界面

円筒の挿入動作における主要な状態量として、挿入深さ d 、傾き角 α 、横方向力 P を取り上げ、挿入力 f_z に注目することにする。

円筒の挿入における主要な問題の一つは、可能な最大挿入深さである。円筒が挿入されるためには、滑らなければならない。滑り始め限界角 α_* が要点となるので、この限界角に注目する。

定性モデルによれば A 側面の締め付け力 f_{pA} は、定性的には

$$f_{pA} \sim (C_1d - C_2P + C_3da) \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここに、 $\sim$ は定性関係であることを示す。円筒が滑り始める時点では、A 側面での滑り摩擦係数を μ とすると、挿入力は $f_z \sim \mu f_{pA}$ で表される。また、この時点では、挿入力 f_z は弾性ホースの圧縮力と釣り合い、 $f_z \sim C_4\alpha$ が得られる。したがって、滑り限界角 α_* は d や P に対して、次の定性的関係をもつことになる。

$$\alpha_* \sim (C_1d - C_2P) / (C_4/\mu - C_3d) \dots\dots\dots (2)$$

図6(a)に滑り限界角 α_* の一例を、また同図(b)に、状態量 $d-P-\alpha$ 空間における滑り限界角 α_* が作る曲面を模式的に示す。定性的な可能性としては、(い)挿入深さが浅い点 A では横方向力 P がなくとも挿入できる可能性があること、(ろ)横方向力 P が大きい点 C では摩擦なしに挿入できる可能性があること、また、挿入深さ d が大きくなると分母が零で、(は) α_* が無限大となる可能性があることなどが予想できるので、それらも示した。試料の数は少ないが、(い)、(ろ)については人手操作により現実には生じ得ること、(は)については同様に傾きが大きくなると、傾き増しても滑りが全く生じない現象が起きることを確認している。これらについては、紙面制約上、省略する。

5. 状態空間内の スキル・ルールとしての軌道

5・1 動作の評価 挿入作業でのおもな要求は

Fig. 5 Corrected understanding model

(1)できるだけ深く挿入できることであり、副次的には、その際(2)少ない動作回数で、また(3)小さい挿入力であることなどが評価される。

5.2 スキル・ルールとしての特別な軌道

(a) 最深点へ到達するための基本的なルール

図6の滑り始め限界角 α_* が作る面の傾きに注意すると、基本的には、「歩行法において、滑りが生じなくなったら、横方向力 P を大きくする」というルールを用いれば、図6において機械の制約条件 α_* 面、 P_* 面および限界角 α_* 面との交点である最深点 G に到達できることがわかる。

(b) 動作回数の最小の軌道

限界面 α_* と限界面 α_* の間が滑り領域であり、限界角 α_* 面の傾きに注意すると、図6において1回当たりの滑り量が最大となる軌道($D-G$)が動作回数の最小の軌道であることがわかる。これは、いわば「最初

(a) An example of slide limit α_* (Same conditions as shown in Fig. 4)

(b) State variable space

Fig. 6 State variable space of the cylinder insertion

から一番滑りやすい最大横方向力 P を与え、滑り量が最大となる最大傾き角を与える」ということになる。

(c) 所要力が最小となる軌道

横方向力 P と挿入力 f_z の和は

$$P + f_z \sim \mu(C_1 d + C_3 d \alpha) + (1 - \mu C_2) P \quad \cdots (3)$$

である。ただし、A側で滑っている場合を考えているので $\alpha_* \leq \alpha \leq \alpha_*$, $0 \leq P \leq P_*$ である。摩擦係数 μ が無視できるほどに小さい場合、 $(1 - \mu C_2)$ は正であるから、横方向力 P が小さいほど力の和は小さくなる。この場合、図6における軌道($A-H-G$)が得られる。摩擦係数が無視できない場合、各係数 $C_1 \sim C_4$ の大きさがわからないので、最適軌道は議論できない。摩擦係数が大きい場合、係数 μC_2 の大きさによっては、 P を大きくすると力の和が小さくなる場合が存在する可能性も示されている。

また、単純に、傾き角を機械の限界 α_* にとり、横方向力 P だけを評価する場合、図6における軌道($E-H-G$)が得られる。これは、いわば「最大の傾き角を与えて、滑りが生じなくなったら、横方向力を大きくする」ということになる。

5.3 スキル・ルールの適応性に関して 定性モデルと同様な特性をもつ弾性ホースであれば寸法や材質などが異なっても、5.2節のスキル・ルールを適用できることになる。

6. スキル・ルールの試行

動作回数の最小の軌道($D-G$)は評価としても明快な軌道であり、これを試みる。所要力を評価したものに関しては、最深点へ到達するための基本的なルールとも共通の点があるので、軌道($E-H-G$)だけを試みる。軌道($A-H-G$)については操作回数が多くなりすぎるので試行しないことにした。

実験装置および挿入円筒、弾性ホースは、4.2節で述べたものと同じである。

挿入力 f_z は円筒の傾き角に比例して増加するが、さらに傾きを増すと、その比例係数が急に変化する点が検出できる。その点を限界点 α_* とした。

センサの負荷限界から横方向力限界 P_* を ± 10 Nとした。また、機械の傾き限界角 α_* を ± 4 degとした。限界角点 α_* では、A側面はホース軸方向に圧縮変形され、B側面は引っ張りも圧縮もされていない。逆向きに傾ける際、横方向力をA側面の方向に変えるだけでなく、A側面でホース軸方向に引っ張りも圧縮もされないように円筒の軸方向位置を制御することにした。

Fig. 7 An example that has the smallest number of swing operations (Plastic Cylinder, $\phi=27$, Vinyl Chloride Hose, Soft type, $\Psi=31$, $t=3$, $L=40$)

Fig. 8 An example that has the smallest magnitude of the insertion force (Conditions are same as those of Fig. 10)

Fig. 9 A flexibility for another kind of hose (Plastic Cylinder, $\phi=23$, Vinyl Chloride Hose, Hard type, $\Psi=26$, $t=2$, $L=40$)

図7に動作回数の少ない軌道(D-G)の例を示す。滑り角 α_* が限界角 α_s に近づいていることがわかる。傾き角 $\alpha=0$ に関しての左右の対称性が得られなかったが、セッティングや装置の精度の悪さによるものではないかと考えている。

図8に、所要力 P が小さくなる軌道(E-H-G)の例を示す。滑り限界角 α_* が 3.5 deg を超えたとき、横方向力 P を増やした。 P が P_* に近づいていることがわかる。

図9は、動作回数の少ない軌道(D-G)を用い、

寸法の異なる条件に対して、全く初めての挿入試行で、滑り角 α_* を限界角 α_s に近づけた例である。その条件は次のとおりである。挿入円筒：(外径23 mm, 塩化ビニールパイプ, 旋削仕上げ, 角部は糸面取り), 弾性ホース：(外径26 mm, 肉厚2 mm, 変形部分の長さ L 40 mm, 塩化ビニール, ヤング率：約 4 N/mm^2)。これは、本研究のスキル・ルールが適応性をもつことを示していると考えられる。

7. 結 言

弾性部品の定量的解析の困難さを避けて、スキルがもつ最適性や適応性を扱う一つの方法として、人間のイメージ的な理解の方法に習って、最適性を発現する機構の要点だけを表した「理解モデル」とでもいえる定性モデルに基づいて、スキル・ルールを導出することを試みた。

弾性ホースへの軸の挿入においては、各種の挿入方策があるが、本研究では、便宜上「歩行法」と呼ぶ方法を取上げ、滑り限界傾き角 α_* が重要な働きをしていることを示した。理解モデルがもつ状態量空間での軌道として、スキル・ルールを表現した。挿入実験によりそのスキル・ルールが動作すること、さらに、異なる弾性ホースにも適応できることを確認した。

本研究の実験装置の一部は岩手大学工学部技官の山内誠氏によるものであり、ここに記し謝意を表す。

文 献

- (1) Ohwovoriole, M. S. and Roth, B., An Extension of Screw Theory, *J. Mech. Des.*, 103 (1981), 725-735.
- (2) 島地重幸・米沢幸治・野村武, 組立作業における多点同時接触の実現, 機講論 ROBOMECH '95 JSME, (1995-6), 744-749.
- (3) 林辰憲・金子真, 多指ロボットハンドと未知対象物との動的接触点検出, 日本ロボット学会講演論文集, (1991-11), 465-468.
- (4) Whitney, D. E., Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts and Its Application, *J. Dynamic Systems, Measurement, Control, Trans. ASME*, 104 (1982-3), 65-77.
- (5) Shimachi, S., Nihei, S. and Yammauchi, M., Effect of Screw Motion in Inserting a Cylinder into a Hole, *Int. J. Jap. Soc. Prec. Eng.*, 28-1 (1994-3), 53-57.
- (6) 金子和政・吉沢高志, 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, 52-6 (1986), 98-104.
- (7) 島地重幸・能登谷修, 組立作業の方策に関する研究, 機論, 58-555, C(1992), 3313-3319.
- (8) Villarreal, A. and Asada, H., A Geometric Representation of Distributed Compliance for the Assembly of Flexible Parts, *IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1991-4), 2708-2715.
- (9) 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, 精密工学会講演論文集, (1993-4), 761-762.
- (10) 島地重幸・アカス・スレンジ・プラタ・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, 機論, 62-599, C(1996), 2773-2778, 2779-2784.
- (11) 松野文俊・競基弘, Beam-in-Hole におけるタスク理解, 機講論 ROBOMECH '95, (1995-6), 165-168.
- (12) Schweizer, M., Weisener, T. and Herkommer, T. F., Robot Assembly of Pliable Hoses, *The Industrial Robot*, (1990-12), 201-205.
- (13) 野口英昭・平井真一・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, 機講論 ROBOMECH '95 JSME, (1995-6), 161-164.
- (14) 末広尚志・高瀬国克, スキルに基づくマニピュレーションシステム日本ロボット学会会誌, 8-5 (1990), 47-58.
- (15) 日本ロボット学会編, ロボット工学ハンドブック, (1990), 502, コロナ社. (Segre, A. M., Machine Learning of Robot Assembly Plans).