

柔らかい物体のマニピュレーションにおける技量の実験的解明

平井 慎一 (大阪大)

野口 英昭 (大阪大)

1 緒言

実世界には、柔らかく変形しやすい物体を対象とするさまざまなマニピュレーション作業がある。たとえば、生産現場では、板金、コード、皮革などを扱う工程が多く存在している¹⁾。食品作業や農業では、生地や食品、肉類など、医療分野では、筋肉や血管などの軟組織を扱う作業が見受けられる。また、人間の生活環境においても、紙や衣料など、柔らかく変形しやすい物体を扱うことは少なくない。このようなマニピュレーション作業は、人間の巧みさに頼っているところが多く、柔らかい物体のマニピュレーション作業をロボットに実行させるためには、作業における技量を解明することが重要である。

人間によるマニピュレーションにおいては、視覚、圧覚、力覚などの感覚と、手指や腕の運動とを統合し、外界との相互作用を制御することにより作業を達成する。本研究の目的は、柔らかい物体のマニピュレーションにおける技量を解明し、それをロボットに移植し、ロボットに柔らかい物体を扱うマニピュレーション技能を発現させることである。特に本報告では、変形しやすい管状部品を蛇口に挿入する作業を対象とし、人間の運動および作業状態遷移の認識則をマニピュレータに移植することを試みる。このような作業は、ホースやゴム管の挿入など生産現場や日常生活で多く見受けられる作業であり、1) 物体の初期形状のばらつきが大きい、2) 作業中に物体が変形する可能性が高い、などの点で、マニピュレーション技能を要する作業の一つである。

2 柔らかい部品の挿入過程

人間がホースを蛇口に挿入する作業を行うときには、ホースを蛇口に接触させ、手指で力を感じ、ホースの差し込み具合や曲がりを推測するとともに、ホースの接触状態に合わせて、ねじる、押す、引くといった動作を行い、作業を進める。ホースの挿入作業を達成させるには、図 1 に示すような、(a) 接近状態、(b) 接触状態、(c) 挿入状態、の 3 つの状態を経ることが必要である。接近状態とは、ホースを蛇口に接触させるまでの状態である。人間はホースを、上から押し当てるのではなく、ある適当な角度をもって斜めから蛇口に接近させる。この運動は、後の段階を容易にするためであり、人間が経験的に持っている技能の一部であると考えられる。接触状態とは、ホースが蛇口に接触してからホースの口が蛇口に入るまでの状態である。人間は、往復運動やねじり運動をホースに与えるとともに、力覚や圧覚によりホースの口が蛇口に嵌合しているか否かを判断する。与える運動のパターンや感覚からの状況判断に、人間の技能が存在する。挿入状態とは、あらかじめ定められた深さまでホースを差し込む状態である。挿入状態で人間は、ホースが蛇口と接触しつつ動く程度の力を、ホースに作用させる。

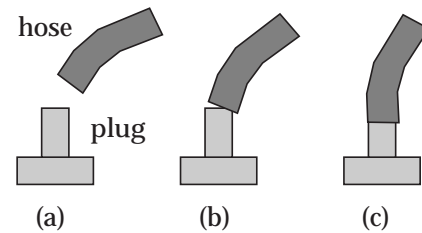


図 1: ホースの挿入過程

人間が作業を進めるときは、作業状態の遷移を認識しつつ、個々の状態に適した制御則を用いている。接近状態においては、おもに視覚を用いて適切な接触状態においてホースと蛇口とを接触させ、力覚により接触状態に達したことを認識する²⁾。接触状態では、ホースが折れたり蛇口から外れたりしないように力覚を用いて運動を制御し、力覚によって挿入状態に達したことを認識する。挿入状態においては、力覚によって運動を制御しつつあらかじめ定められた深さまでホースを差し込む。以上のように、ホースの挿入作業において、人間の作業制御則は、個々の作業状態において運動を制御するループと、状態の遷移を検知し、制御則を切り換えるループとから成ることがわかる³⁾。以上のような人間の運動制御則と人間の作業状態遷移の認識則の双方を、マニピュレータに移植することにより、スムーズな動作および確実に素早い作業が可能になると考えられる。

3 人間による作業の計測装置の構成

前節で述べたように、人間は、接近、接触、挿入の各状態において、各状態特有の運動をホースに与えるとともに、力覚を巧みに利用して、手指の運動を制御する。人間のこのような運動や制御則は、作業を確実にしかも素早く実行する上で、有効であると考えられる。そこで本研究では、ホースを操作する手先の位置と姿勢、ならびに手に作用する力とモーメントを計測し、人間の運動と感覚との関係を調べる。そのために、図 2 に示すような装置を構築した。

ホースの手元の位置・姿勢、そこに作用する力とモーメントをそれぞれ、3次元ディジタイザ Polhemus 3Space Fastrack と小型 6 軸力覚センサ BL Autotec NANO 5/4 により計測する。図 3 に示すように、ホースはフランジに固定されており、力覚センサはフランジ上部に装着されている。3次元ディジタイザは力覚センサ上部に、アクリル板を介して装着されている。被験者は力覚センサを持ち、テーブル上に固定された蛇口にホースを挿入する。力覚センサの重量は 70[g] 程度と軽く、被験者は、ホース先端に作用する力を感じることができる。作業時の各計測値は、リアルタイム OS VxWorks が制御する、MC68040 ベースのリアルタイムコントローラに送られる。さらに、各計測値は、ethernet を通してワークステーション Sun SPARCstation 2 上に取

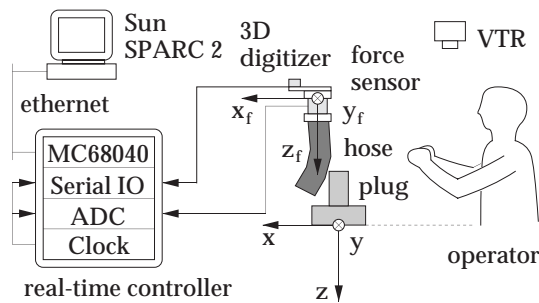


図 2: 計測装置の構成

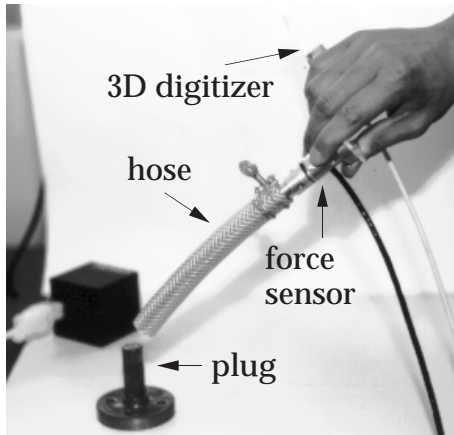


図 3: センサ部の構成

り込むことができる．力・モーメント信号のサンプリングレートは 40Hz であり，位置・姿勢信号のサンプリングレートは $22[\text{Hz}]$ である．計測を開始する時刻は，クロックボードにより制御される．また，ホースの変形，動作を確認するために，作業状況をビデオに録画する．

4 人間の挿入作業における作業状態の認識

前節で述べた計測装置を用いて，ホースの挿入作業を行ない，被験者の動作を計測した．使用したホースの内径は 1.5cm ，長さは 15cm ，蛇口の外径は 1.6cm である．図 2 に示すように，蛇口の根本に座標原点を置き，被験者から原点の方向に x 軸，被験者の右方向に y 軸，鉛直下向きに z 軸を設定する．手元の姿勢を x, y, z 軸まわりの角度で表し，それぞれ Angle $X, \text{Angle } Y, \text{Angle } Z [^\circ]$ とする．手元位置に座標系 $C - x_f y_f z_f$ を設定し，各軸方向に作用する力を $F_x, F_y, F_z [\text{kgf}]$ ，各軸まわりのモーメントを $M_x, M_y, M_z [\text{kgf} \cdot \text{cm}]$ とする．これらの値はすべて，3 次元ディジタル化と力覚センサの計測値から，計算することができる．

まず，人間がホースに与える運動と，力覚との関係を明らかにするために，被験者の視覚を遮断し，ホースを挿入してもらった実験を行なった．作業開始時には，ホース先端が蛇口から 2cm 程度離れた，任意の位置および姿勢まで移動し，そこから視覚を遮断し作業を実行してもらった．そのときの計測値の一例を図 4 に示す．この計測では，ほぼ $8[\text{s}]$ で作業を終了している．また，図 4 から，被験者の動作が A, B, C の 3 段階に分かれていることがわかる．A においては，姿勢はほぼ一定で徐々にホースを蛇口に近付けている．B においては， z 軸に平行になるように，ホースを動かしている．また，C においては， x 軸方向への往復運動が中心となっている．作業プロセスを録画したビデオの分析から，ホースが蛇口に接触した時点およびホースが蛇口に挿入された時点において，動作が変化していることが判明した．こ

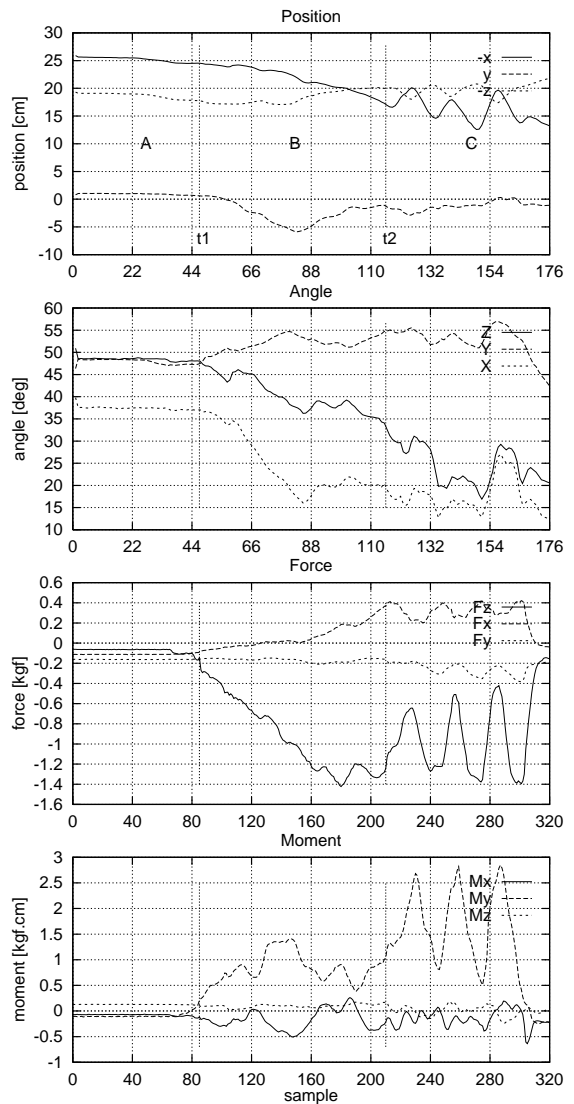


図 4: 人間による作業の計測例

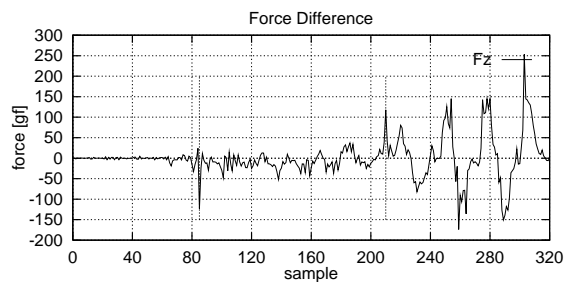


図 5: 力信号の時間差分

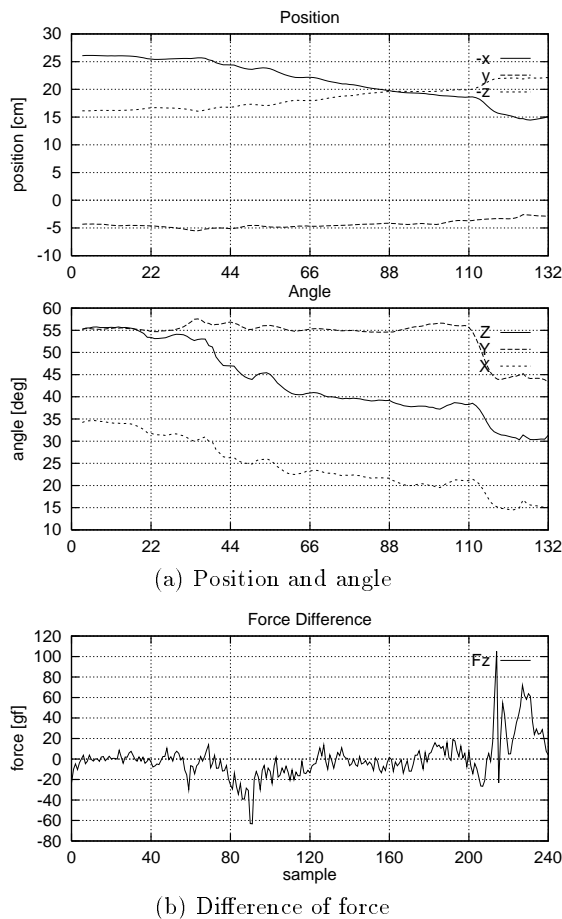


図 6: 接触状態における運動

れは A, B, C がそれぞれ, 接近状態, 接触状態, 挿入状態に対応していることを示している.

作業状態の変化と力覚との関係調べるために, z_f 軸方向の力の変化を計算したところ, 図 5 に示すようになった. 図 5 において, 力が急激に変化した時間を前から 2 つ選び, それぞれ t_1, t_2 とする. 時刻 t_1, t_2 を図 4 に示す. これより, 力が急激に変化した時点が動作が変化した時点にほぼ対応していることがわかる. また, ビデオを分析したところ, 時刻 t_2 の直前では, ホース先端が蛇口上面に引っかかっている状態であったが, t_2 の時点で引っかかりがとれると同時にホースが挿入されていることがわかった.

被験者が, 力覚の変化から状態を認識し, 意識的に動作を変化させているか否かを調べるために, ホースが挿入されるまでの作業を計測する. 被験者の視覚を遮断し, 任意の接触位置から作業を行ない, ホースが挿入されたと感じた時点で作業を終了させる. その結果の一例を, 図 6 に示す. 図 6 に示す計測結果は, 図 4 の B の部分と同様の動作であることがわかる. また, 図 5 の t_2 の付近に見られる力覚の急激な変化も生じていることがわかる. 図 6 において, 力の急激な変化が 2 回生じているが, これは 1 回目の変化において状態の変化を認識し, その後動作を中止することにより, 2 回目の変化が生じるものと考えられる. また, 他の被験者に対して計測を行なったところ, 状態が変化する時点で, 急激な力の変化が生じていることが観察された³⁾.

以上のことから, 人間はホースの挿入作業において, 接近状態, 接触状態, 挿入状態の遷移を, 力の変化により認識し, それぞれの状態に応じた動作を行なっていることがわかる.

5 マニピュレータの構成

人間の作業制御則をマニピュレータに移殖するには, 前節で述べたように, 個々の状態において運動を制御する機構と, 状態の遷移を検知し, 制御則を切り換える機構が必要となる. そこで本研究では, 図 7 に示す装置を用いて人間の作業制御則を移殖する. 位置制御マニピュレータ Kawasaki Js10 の先端には, 6 軸力覚センサ Nitta UFS-3015 が取り付けられており, そこにフランジを取り付けてホースを固定する. 力覚信号は, リアルタイム OS を通して, サンプリングレート 30[Hz] で取り込むことができる. また, マニピュレータでは, 振動によるノイズが大きいため, フィルタボードを用いて, ノイズによる影響を減らしている. リアルタイム OS で作成された軌道は, シリアルラインでマニピュレータのコントローラに送信される. また, ホースの変形, 動作を確認するために作業状況をビデオに録画する.

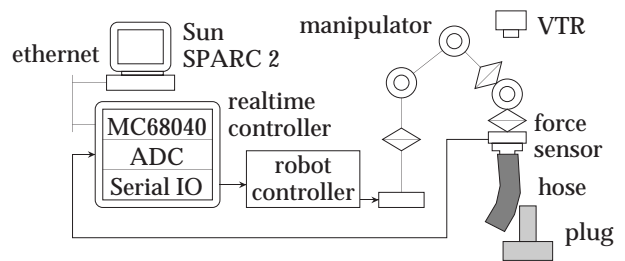


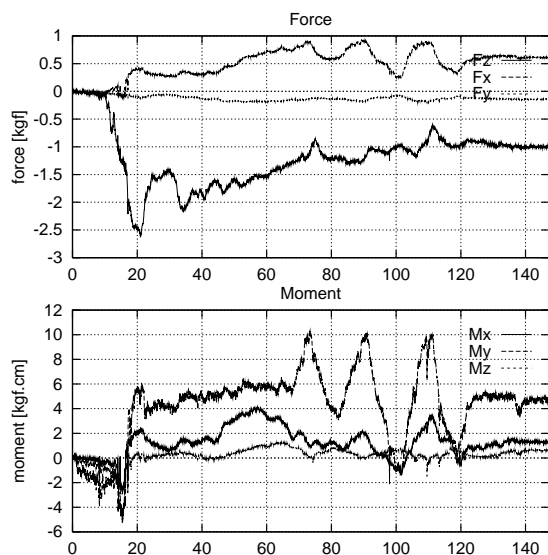
図 7: マニピュレータの構成

6 運動・状態認識則のマニピュレータへの移殖

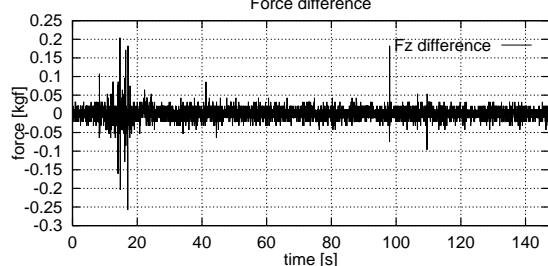
前節で述べた実験装置を用いて, 人間の作業制御則をマニピュレータに移殖する. まず, 人間の動作軌道を直接マニピュレータに送る. マニピュレータに移殖した場合の力とモーメントの計測値を, 図 8 に示す. 被験者の軌道は, 176 個のサンプルから成っており, それすべて移殖された. マニピュレータに移殖した場合には, 作業を達成するために 150[s] 以上要している. 人間が作業を行う場合と比較すると, 15 倍以上時間がかかっていることがわかる. この原因として, マニピュレータへの軌道の送信およびマニピュレータの動作に時間がかかること, 状態の遷移を認識していないため, 状態が遷移した後も直前の状態における動作を行っていることがあげられる.

図 8-(a) に示す力 F_z の時間差分を, 図 8-(b) に示す. 接近状態から接触状態への遷移に関しては, 人間の場合のような力の変化は検出できない. ただし, 力の大きさを考慮に入れることにより, 接近状態から接触状態への遷移をマニピュレータが認識可能であることがわかった. また, 接触状態から挿入状態への遷移に関しても, 人間の場合と同じような力の変化は検出できない. 図 8-(b) には, 力の変化が大きい箇所が現れているが, ビデオにより分析した結果, 状態の遷移とは関係がないことが判明した. 力の変化が検出できない原因として, 1) マニピュレータの動作が非常に遅いため, ホースの変形が徐々に起こる, 2) 位置制御マニピュレータであるため, 人間の場合と類似の挙動が得られない, という点が挙げられる. そこで, マニピュレータの動作を速くすることを試み, 人間による作業に見受けられる, 力の急激な変化が検出されるか否かを実験的に検証する.

図 4 に示すように被験者は, 接近状態では直線運動, 接触



(a) Force and moment



(b) Difference of force

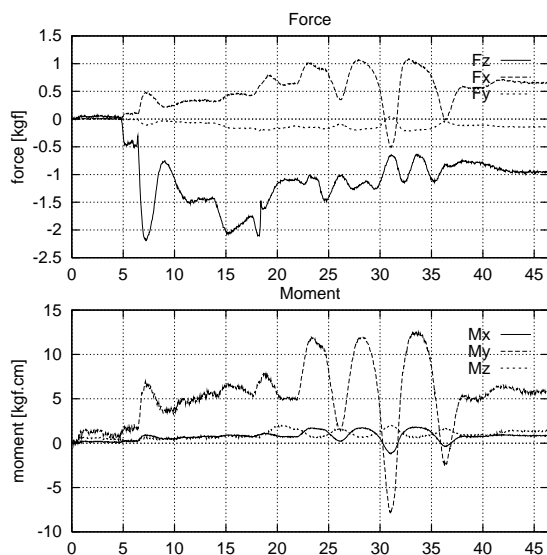
図 8: 運動軌跡を直接移植した結果

状態では回転運動，挿入状態では x 軸に沿う往復運動をホースに与えている．そこで，接近状態の運動を，時刻 0 と t_1 における位置・姿勢を結ぶ直線で近似する．接触状態の運動は，時刻 t_1 と t_2 における位置・姿勢を結ぶ直線により近似する．また，挿入状態において，位置 x が極大値あるいは極小値を取る位置・姿勢を抽出し，それらを順次直線近似することにより，挿入状態における軌跡を近似する．結果として，図 4 に示す運動軌跡より，28 個の位置・姿勢が得られた．それらを順次，マニピュレータに実行させた際の力とモーメントの計測値を，図 9 に示す．この場合，作業を達成するために要する時間は，約 40[s] であり，直接移植した場合の 1/4 程度に短縮された．

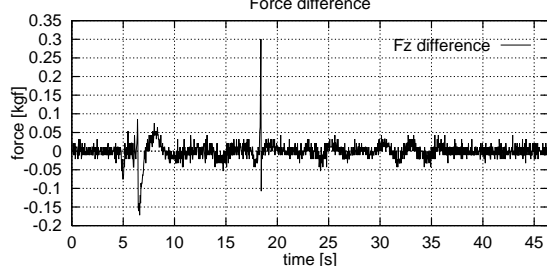
図 9-(a) に示す力 F_z の時間差分を，図 9-(b) に示す．図 9-(b) に示すように，時刻 18[s] において，力差分のピークが現れる．作業を録画したビデオを分析した結果，この時刻で，接触状態から挿入状態への遷移が生じていることが判明した．動作開始位置を，人間による作業の開始位置から 2[mm] ずらして実行させた場合においても，同様のピークが観察された．したがって，人間による作業と同様に，マニピュレータによる挿入作業においても，力差分のピーク値を観察することにより，接触状態から挿入状態への遷移が検知できることがわかる．

7 結言

本報告では，ホースの挿入作業における人間の動作を計測し，力覚と運動の関係を分析した．人間が作業を行なう時，感覚により作業状態を認識し，それぞれの状態に応じ



(a) Force and moment



(b) Difference of force

図 9: 運動軌跡の代表点を移植した結果

た動作を行なうことにより，巧みに作業を進めていることがわかった．特にホースの挿入作業については，1) 接近状態，接触状態，挿入状態の 3 つの状態において，異なる動作を行なっている．2) 力覚の変化によりそれぞれの状態の遷移を認識している．ということがわかった．また，人間の動作軌道をマニピュレータに移殖し，状態遷移の認識則の適用に対する可能性を考察した．その結果，人間による作業と同様に，力覚の変化を通して，接触状態から挿入状態への遷移を検知できることがわかった．

現在，マニピュレータの制御則として，位置制御を用いている．しかしながら，ホースの挿入作業において，人間が位置制御のみで物体を操作しているとは考え難い．したがって，今後の課題として，1) 人間の力制御則，あるいはその他のセンサフィードバック則の抽出，2) 抽出した制御則の力制御型マニピュレータへの移植，があげられる．

参考文献

- 1) Taylor, P.M. et al., *Sensory Robotics for the Handling of Limp Materials*, Springer-Verlag, 1990.
- 2) 平井, 野口, 岩田, 柔らかい管状部品の挿入作業における人間の感覚と運動の分析, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.459-460, 1994.
- 3) 野口, 平井, 岩田, 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, ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集, pp.161-164, 1995.