

柔らかい管状物体の挿入作業の分析と実現

平井 慎一（立命館大学 ロボティクス学科）

1 はじめに

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。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。

昨年の報告では、変形しやすいホース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抽出し、人間の認識則によりロボットマニピュレータが状態遷移を検知できることを確認した^{1), 2)}。そこで今年度は、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殖、マニピュレータにホースの挿入作業を行わせた結果について報告する。さらに、著しく柔らかさ、変形しやすさが異なる物体を対象とする作業として、靴下履き作業における人間の運動を実験的に分析する。特に、作業過程がどのような作業状態から成り立ち、状態の遷移をどのように認識するかについて考察する。

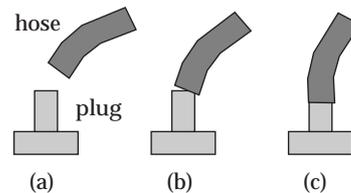


図 1: ホースの挿入過程

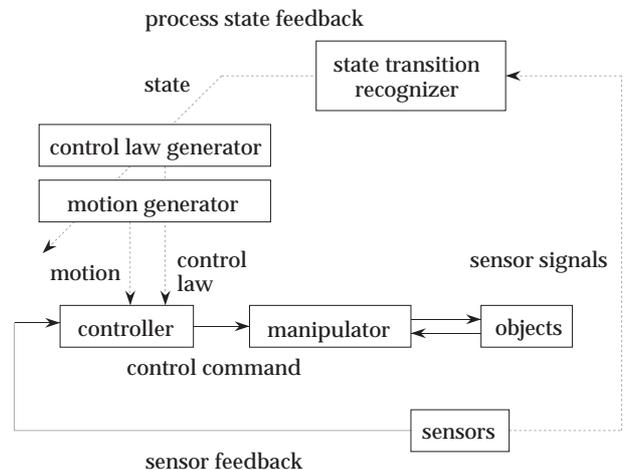


図 2: センサフィードバックと作業状態フィードバック

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等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。

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。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。以上の考察より、ホースの挿入作業において人間の作業制御則は、図 2 に示すように、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。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殖することにより、

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 運動・状態認識則のマニピュレータへの移殖

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 3 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 を通じて、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。

昨年の報告書で得られた人間の作業制御則を、マニピュレータに移殖する。被験者は、接近状態では直線運動、接

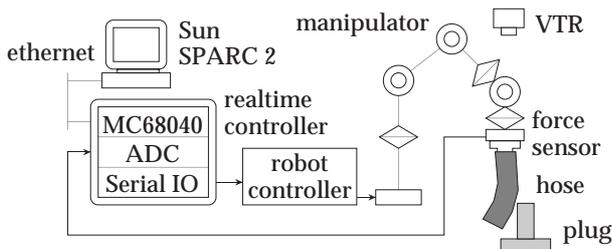
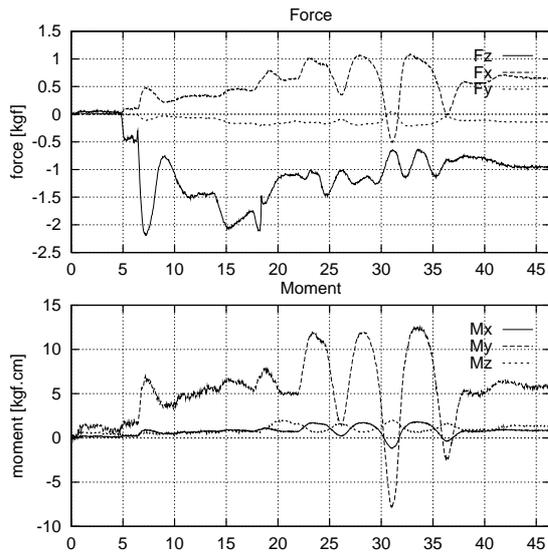
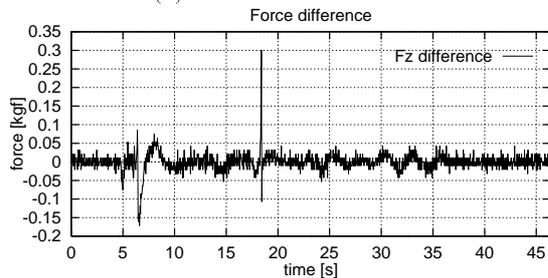


図 3: マニピュレータの構成



(a) Force and moment

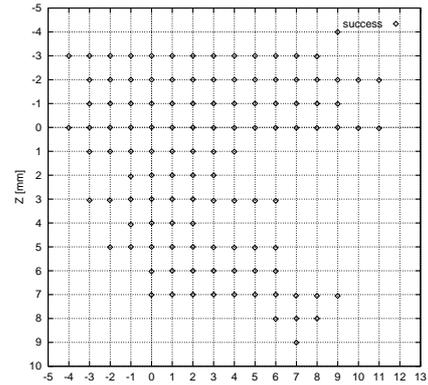


(b) Difference of force

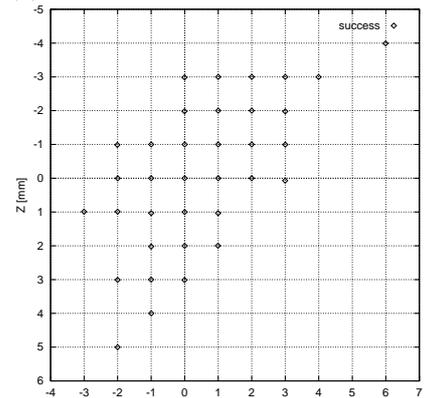
図 4: マニピュレータによる作業の計測値

触状態では回転運動, 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, 176 個の位置・姿勢から成る人間の運動軌跡より, 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 4 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] である.

図 4-(a) に示す力 F_z の時間差分を, 図 4-(b) に示す. 図 4-(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



(a) without recognition of transitions



(b) with recognition of transitions

図 5: 作業が成功する初期位置

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を検知できることがわかる.

次に, 初期位置に誤差がある場合に, ホースの挿入作業が成功するかどうかを調べる. 人間の運動軌道の初期位置を原点として, x 軸, z 軸方向に位置ずれを与え, ホースの挿入作業を実行させる. まず, 人間の運動のみをマニピュレータに移植し, 作業を実行させる. 作業が成功した位置誤差をプロットすると, 図 5-(a) が得られた. 位置ずれの方向にもよるが, 数 mm の誤差に対して, 作業が成功することがわかる. 次の, 人間の運動と作業状態遷移の認識則をマニピュレータに移植し, 作業を実行させる. すなわち, 作業中に状態遷移を検知したときには, 運動軌道を切り替える. 作業が成功した位置誤差を, 図 5-(b) に示す. 今回の実験においては, 後者の方が, 成功する範囲が狭いという結果が得られた. 人間の運動のみを実行した前者の場合, 作業が失敗する主な原因は, 1) ホースが蛇口に接触しない. 2) 作業中にホースが蛇口からはずれる. の二点である. 運動と認識則を移植した後者の場合は, 1) 作業状態遷移の検知に失敗する. 2) 遷移を検知したが運動の切り替えが間に合わない. という点が挙げられる. 特に, 接近状態から接触状態への遷移においては, 切り替えに時間がかかるために, ホースが蛇口に接触していても, マニピュレータは接近状態の運動を与えている. その結果, ホースが奥に進みすぎ, ホース先端の引っかかりが生じないため, 接触状態から挿入状態への遷移に失敗する. 以上のように, 今回の実験では, 作業状態遷移則を移植することの有効性は示されてい

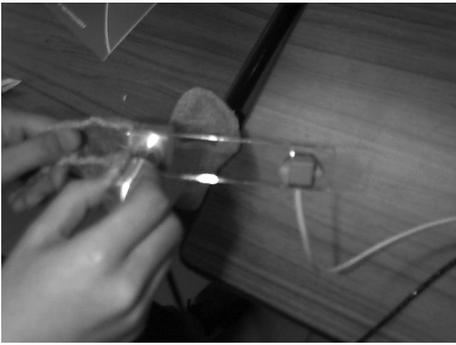


図 6: 靴下履き作業の計測装置

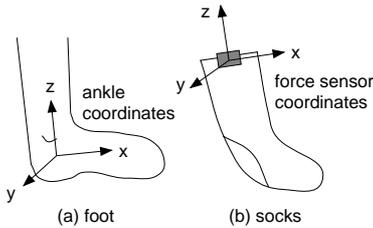


図 7: 座標系の設定

ない。この原因としては、1) マニピュレータの動作速度、通信速度が遅い。2) 位置・姿勢のみの制御を行っている。という点が考えられる。

4 靴下履き作業の分析

人間は、さまざまな特性の柔軟物を扱うことができる。したがって、柔らかい物体のマニピュレーション技能を解明するためには、さまざまな柔らかさ、変形しやすさを持つ物体を、研究の対象にする必要がある。そこで本研究では、靴下を履く作業を対象にする。靴下の変形は、ホースのそれと比較すると、著しく大きい。

靴下を履く作業は、多くの成人にとって日常的であり、容易に達成することができる作業である。一方、幼い子供にとっては、容易な作業ではない。したがって、靴下履き作業のスキルは、成長にしたがって獲得されると考えられる。また、この作業で人間は、両手と足を協調的に動かし、靴下を所定の位置関係に案内する。案内においては、視覚のみならず手足の圧覚、すべり覚を利用して、靴下と足の位置関係を把握する。以上のように、靴下履き作業は、両手と足の協調運動、視覚による誘導、皮膚覚による靴下の認識を含む。これらの能力を分析することは、人間の技量を理解する上で重要である。

5 靴下履き作業の計測

靴下履き作業における人間の巧みさを分析するためには、人間の手と足の運動、ならびに手に作用する力感覚を計測することが必要である。そこで、Fig.6に示す計測装置を構築した。綿製の靴下に、3D デジタイザ (Polhemus 社製 Fastrak) と 6 軸力覚センサ (ピーエルオートテック社製 NANO) を取り付ける。さらに、被験者の土踏まずと膝直下に 3D デジタイザを取り付け、足の運動を計測する。計測データは、VxWorks で制御されるリアルタイムコントローラに送られ処理される。サンプリングレートは、40Hz である。また、作業の様子をビデオカメラで撮影する。手の位置は、Fig.7-(a) に示す足首座標系に対して、力・モーメントは、Fig.7-(b)

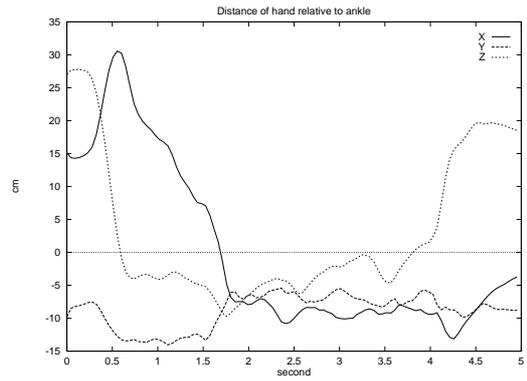


図 8: 膝に対する手の相対位置

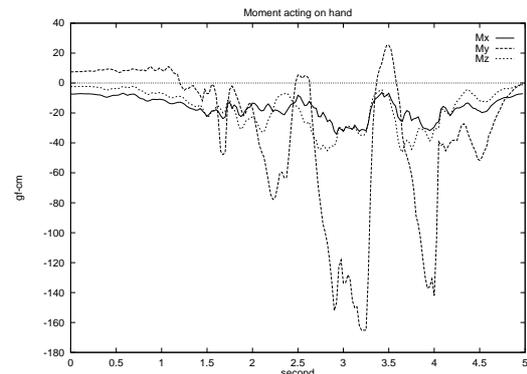
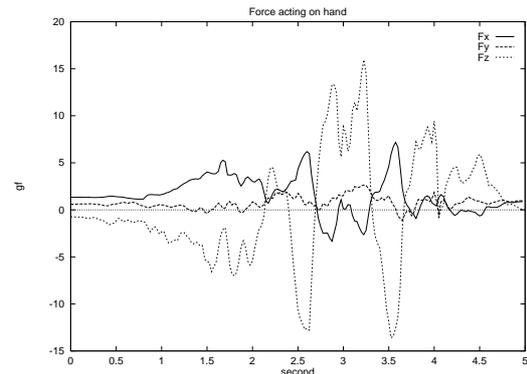


図 9: 手に作用する力とモーメントの計測値

に示す力覚センサ座標系に対して求める。足首座標系に対する手の位置は、膝に取り付けたデジタイザと靴下のそれから計算する。足首座標系は、関節の回転軸を原点、つま先方向を x 軸、膝方向を z 軸とする。

6 実験結果

本節では、靴下履き作業を実行させたときの結果を示す。以下の実験では、被験者に目をつぶってもらい、作業を実行させている。すなわち被験者は、視覚を用いずに作業を実行する。靴下履き作業の計測結果の一例を、Fig.8と Fig.9に示す。Fig.8は、足首に固定した座標系に対する、手の相対的な位置を示す。図より、作業開始直後、被験者は手を、 x 軸正、 z 軸負の方向に動かす。次に、 x 軸負の向き、すなわちかかとの方向に動かす。続いて、 $x-z$ 平面内で前後の運動を与え、最後に z 軸正の向き、すなわち膝方向の運動を行う。ビデオテープと比較すると、それぞれの運動は、(0) 動作開始から靴下を足先に当てるまでの運動、(1) 靴下がかか

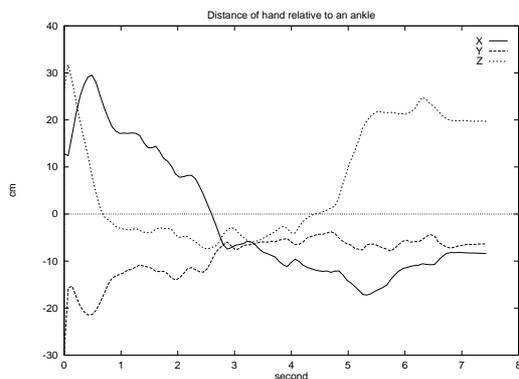


図 10: 足首固定時の手の相対位置

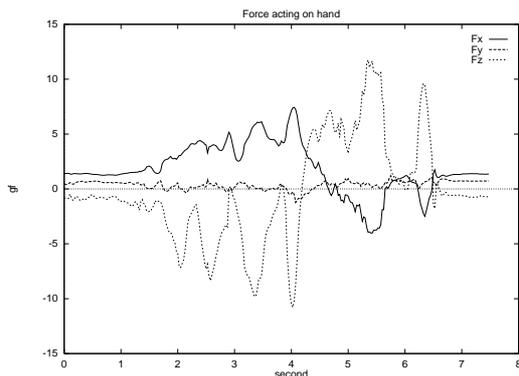


図 11: 足首固定時の力とモーメントの計測値

とを越えるまでの運動，(2) かかとからくるぶしを越えるまでの運動，(3) くるぶしから動作終了までの運動，に対応することがわかった。また，力覚センサ座標系の原点がかかとを通過するのは約 1.7[s]，くるぶしを通過するのは 3.8[s] の時点である。Fig.9は，手に作用する力とモーメントの計測値を表す。ステップ (0) では，力がほとんど作用していない。ステップ (1) では， z 軸方向の力が減少する。ステップ (2) では，力とモーメントが同期して増減を繰り返す。ステップ (3) では，特徴的なパターンは観察されていない。

次に，状態遷移をどのように認識しているかについて考察する。ステップ (0) から (1) への遷移においては，力の大きさが増大する。したがって，力の大きさを監視することにより，遷移を検出できる。ステップ (1) から (2) へ遷移する時刻 1.7[s] においては， x 方向の力 F_x に極大値がある。ステップ (1) では，靴下を足に沿ってかかと方向に案内する。靴下が深く案内されるにつれて，靴下が伸び，靴下に作用する引っ張り力が増大する。この引っ張り力により，適切な深さまで案内されたかどうかを検知していると考えられる。ステップ (2) から (3) への遷移に関しては，力覚データに特徴的なパターンは観察されない。したがって，力信号からこの遷移を検出するのは困難である。ビデオの録画によると，座標原点がくるぶしを通過する 3.8[s] 付近では，くるぶしに引っかかっていた靴下が，突然くるぶしを越えている。したがって，皮膚覚により，くるぶしの引っかかりが無くなったことを検知している可能性が考えられる。

さらに，足の運動が作業に与える影響を調べるために，被験者の足首をテーピングにより固定して靴下履き作業を行わせた。作業時の手の足首に対する相対的な位置を Fig.10 に，手に作用する力を Fig.11 に示す。足首を固定した場合，ステップ (1) に約 2 倍の時間を要している。また， z 軸方向の力が，負の方向にずれている。ビデオの録画によると，足首を固定しない場合に被験者は，ステップ (1) から (2) へ遷移するとき，つまさきを下に向ける。また，ステップ (2) の

間，その状態を保っている。足首を固定すると，この動きが妨げられるため，ステップ (1) から (2) への遷移が困難になり，結果としてステップ (1) に要する時間が長くなると考えられる。以上のように，靴下履き作業においては，足の運動が重要である。

7 おわりに

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，それ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。しかしながら，作業状態遷移の認識則をマニピュレータに移殖することの有効性は，示されていない。後半では，靴下履き作業における人間の運動を実験的に分析した。その結果として以下の二点がわかった。1) 靴下履き作業は，4 個の作業状態から成り立つ。2) 靴下履き作業においては，手のみならず足の運動が重要である。定量的な分析ならびにマニピュレータへの移殖が今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) 平井,野口, 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, 第 1 回重点領域研究「知能ロボット」シンポジウム予稿集, pp.49-52, 1996
- 2) Hirai, S., Noguchi, H., and Iwata, K., *Human-demonstration Based Approach to the Recognition of Process State Transitions in Insertion of Deformable Tubes*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.3, pp.2006-2011, 1996