

柔らかい管状部品の挿入作業における人間の技能動作の分析と マニピュレータへの移植

Transplantation of Human Skillful Motion to Manipulator in Insertion of Deformable Tubes

○正 平井 慎一 (立命館大学) 野口 英昭 正 岩田 一明 (大阪大学)

Shinichi HIRAI, Hideaki NOGUCHI, and Kazuaki IWATA

Ritsumeikan University, Noji 1916, Kusatsu, Shiga 525-77

Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565

Transfer of human motion and recognition laws to a manipulator is experimentally studied in the insertion of a hose into a plug. Human motion and force sensation are analyzed and the extracted human motion and recognition laws of process state transitions are transferred into a manipulator. It is found that the human recognition law is useful in the insertion by a manipulator.

Key Words: manipulation, insertion, recognition, process states, deformable parts

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⁽¹⁾。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い。

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、このような人間の技能を解明し、柔らかい物体を扱う技能をロボット上に実現することである。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。この作業は、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しやすい、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方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、Fig.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

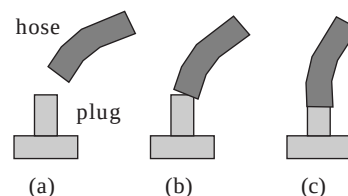


Fig.1 Process states in insertion of hose into plug

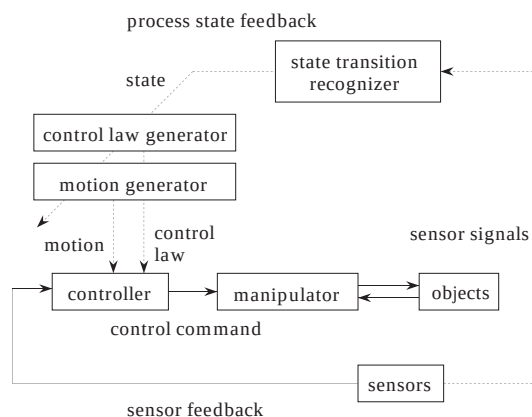


Fig.2 Sensor feedback and process state feedback

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。以上より、人間の作業制御則は、Fig.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と考えられる。

3. 人間による挿入作業の計測

本報告では、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、Fig. 3に示す

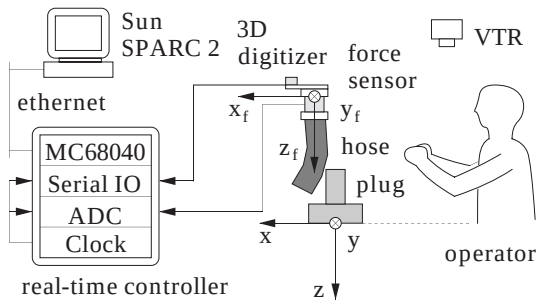


Fig.3 Apparatus for human motion measuring

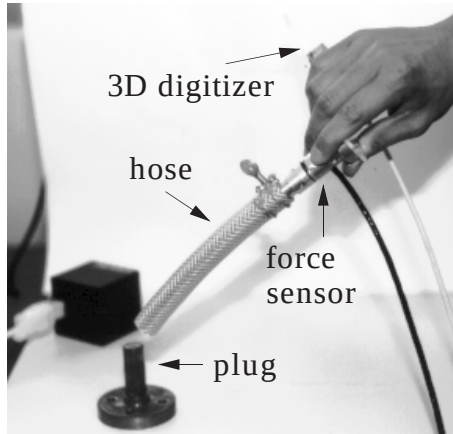


Fig.4 Appearance of measuring apparatus

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。Fig.4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知することができる。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40[Hz]であり、位置・姿勢信号のサンプリングレートは22[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。使用したホースの内径は1.5[cm]、長さは15[cm]、蛇口の外径は1.6[cm]である。Fig.3に示すように、座標原点と x, y, z 軸を設定する。手元の位置と姿勢は、この座標系で表す。手元位置に座標系 $C - x_f y_f z_f$ を設定し、各軸方向の力と各軸まわりのモーメントを計測する。これらの値はすべて、3次元ディジタイザと力覚センサの計測値から、計算することができる。

4. 人間の作業状態遷移の認識

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。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

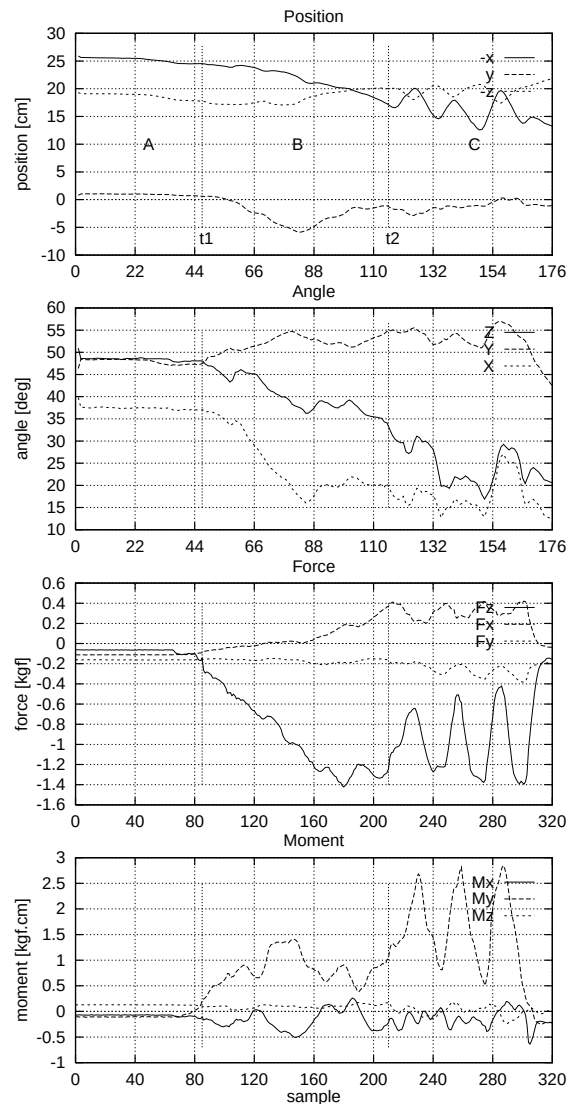


Fig.5 Example of human motion measurements

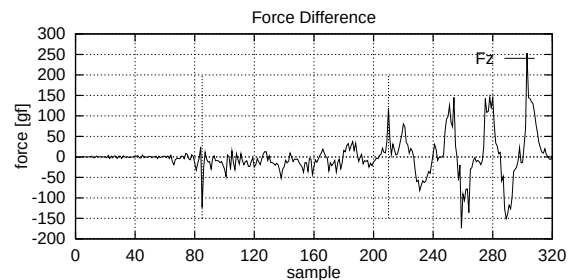


Fig.6 Difference of force with respect to time

験者の視覚を遮断し、ホースを挿入してもらう実験を行った。作業開始時には、ホース先端が蛇口から2[cm]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う。そのときの計測値の一例をFig.5に示す。この計測では、ほぼ8[s]で作業を終了している。また、Fig.5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。これより、段階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がわかる。

作業状態の変化と力覚との関係性を調べるために、 z_f 軸方向の力の変化を計算したところ、Fig.6に示すようになった。Fig.6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Fig.5に示す。これより、力が急激に変化した時点が、作業状態が遷移する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。

次に、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、Fig.7に示す。Fig.7に示す計測結果は、Fig.5のBの部分と同様の動作であることがわかる。また、Fig.6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。Fig.7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⁽²⁾。

以上の実験より、ホースの挿入作業において人間は、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ている可能性が指摘される。

5. 人間運動のマニピュレータへの移植

マニピュレータによる作業で、作業状態の遷移が識別可能か否かを、実験的に検証する。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。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。

まず、人間の動作軌道を、直接マニピュレータに移植して挿入作業を行なわせる。作業時の力とモーメントを計測し、解析した結果、接近状態から接触状態への遷移、接触状態から挿入状態への遷移ともに、人間の場合のような、ホースの軸方向の力の変化は検出でき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遅く、ホースの変形がゆっくり生じる、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

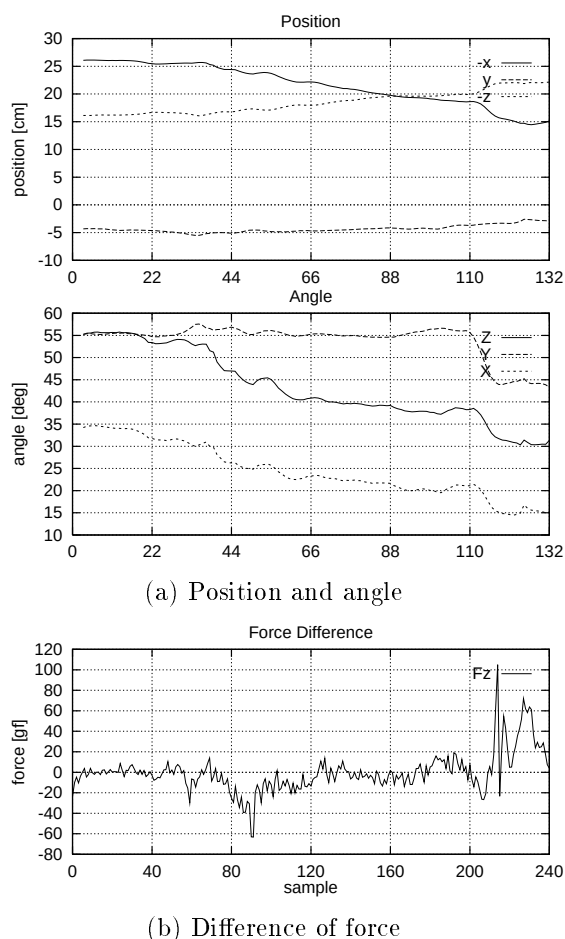


Fig.7 Measurements in contact state

こで、マニピュレータの動作を速くすることを試み、人間による作業と同様の、力の急激な変化が検出されるか否かを検証する。

Fig.5に示すように被験者は、接近状態では直線運動、接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。以上の近似により得られた軌跡を、Fig.8に示す。Fig.5に示す被験者の軌道は、176個のサンプル点から成っていた。Fig.8に示す軌道は、28個のサンプル点から成っており、サンプル数は約1/6に削減された。Fig.8に示す軌道を、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、Fig.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。

Fig.9-(a)に示す力 F_z の時間差分を、Fig.9-(b)に示す。Fig.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

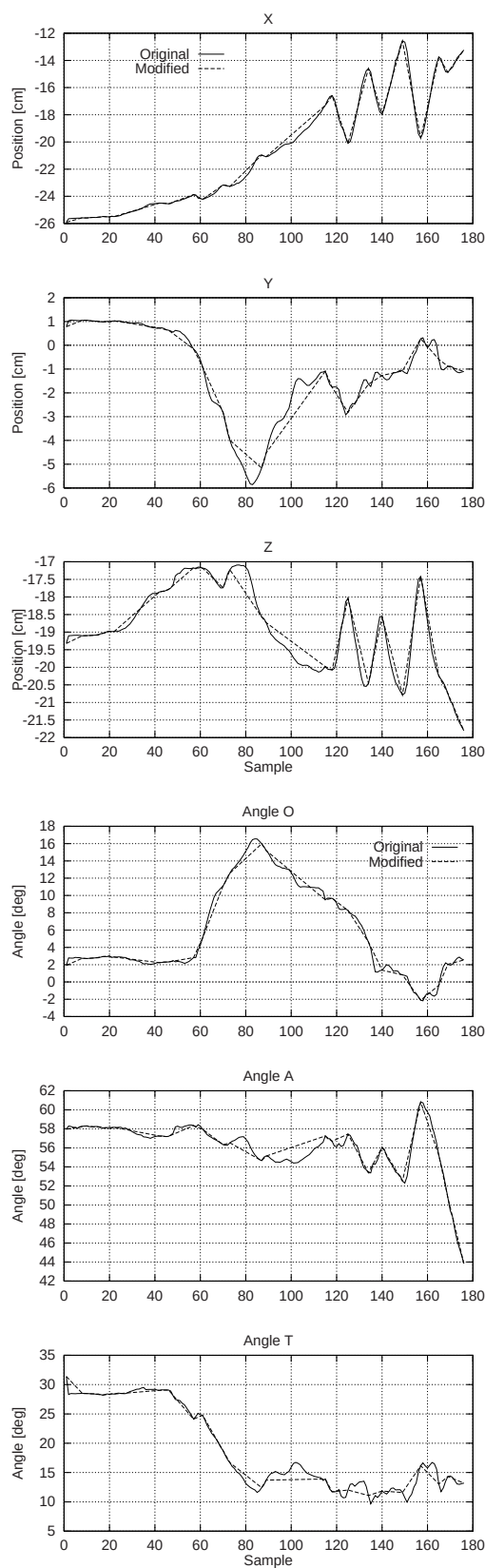


Fig.8 Original trajectory and approximated trajectory

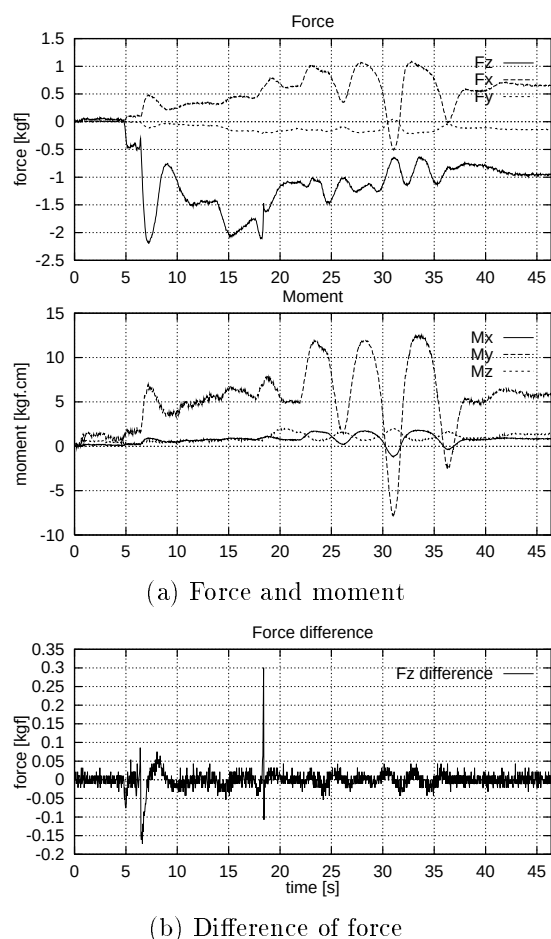


Fig.9 Measurements in insertion performed by mechanical manipulator

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。

6. 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。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、異なった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、状態遷移認識則の有効性を実験的に検討した。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、状態遷移則の抽出は、経験的に行なっている。今後は、系統的な状態遷移則の抽出に関する研究が必要である。また、人間の力制御則の抽出と力制御型マニピュレータへの移殖も課題としてあげられる。

【参考文献】

- (1) Taylor, P.M. et al.: Sensory Robotics for the Handling of Limp Materials, Springer-Verlag, 1990
- (2) 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, 日本ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1995