

柔軟管状物体の挿入作業における 力覚を通じた作業状態遷移の検知

東口 岳, 平井 慎一
立命館大学 理工学部

Detection of Transitions among Process States by Force Sensing in Insertion of Deformable Tube

Gaku HIGASHIGUTHI, Shinichi HIRAI
Dept. of Robotics, Ritsumeikan University

Abstract - Human motion in the insertion of deformable a tube is analyzed experimentally. We will propose a method to derive functions to detect the transitions among process states by force sensing in inserting a tube to a plug.

Keywords: detection, force sensing, insertion, deformable objects, human motion

1. 緒言

人間が柔軟物を扱う場合には、長年の経験をもとに、どのように作業すればより速く確実に作業を達成できるかを直観的に体得している。たとえば、人間は、ホースの挿入時に、ホースの口を広げ挿入しやすくするとともに、ホースが折れ曲がらないようにしつつ、作業を進める。そこで、柔軟物のマニピュレーションにおける人間の巧みさを、ロボットマニピュレータで利用することにより、ロボットマニピュレータが柔軟物を扱うことが可能となると考えられる。そのためには、人間の柔軟物マニピュレーション作業を計測し、分析する必要がある。本報告では、柔軟管状物体の挿入作業を対象として、人間の作業を計測し、分析する。特に、力覚による作業状態遷移の検知を実験的に解明する。

2. ホースの挿入作業における巧みさの分析

本節では、柔軟物を扱う作業として、“ゴムホースに蛇口にはめる”という作業の人間の巧みさを分析する。ロボットマニピュレータにホースの挿入作業を実現させるためには、作業の成功や失敗を認識させ、失敗した場合は、適切な次の運動を行う機構が必要である。人間が行う“ゴムホースに蛇口にはめる”という作業では、ホースと蛇口との位置関係に着目すると、Fig.1のように (a) 接近状態、(b) 接触状態、(c) 挿入状態、の3状態からなることがわかる。接近状態とは、ホースを蛇口に接触するまでのプロセスである。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プロセスである。挿入状態とは、適切な深さまでホースを差し込むプロセスである。

人間は、ホースの挿入作業において、状態間の遷移を検知し、ホースによる運動を変えていると考えられる。人間がどのように遷移をしているかを調べるために、人間の作業過程を計測し、分析する必要がある。本報告では、人間の手先に作用する力とモーメントを計測し、力覚によって遷移を検知できるかを調べる。そのため、力覚センサ(ピーエルオートテック社製 NANO)、リアルタイムコントローラ、ワークステーション、LEDから成り立つ計測装置を構成した。このシステムにより、ホースの挿入作業時の手先に作用する力とモーメントを計測することができる。作業過程は、8mmビデオにより録画する。また、計測開始の瞬間にLEDを発

光させる。作業過程録画を分析することにより、作業開始時刻、接近状態から接触状態へ遷移した時刻、接触状態から挿入状態へ遷移した時刻を割り出すことができる。

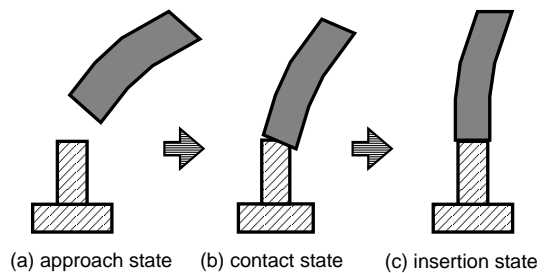


Fig.1: Process states

3. 作業状態遷移の識別関数の計算

本報告では、力覚を用いて作業状態遷移を検知できるかどうかについて調べる。力覚センサで計測された力とモーメントをまとめて6次元ベクトル f で表す。サンプリング間隔を T とし、時刻 $t = kT (k = 0, 1, \dots, n)$ における計測値を $f[k]$ で表す。一般に、状態遷移を検知する関数は、次のように表される。

$$h(f(k), f(k-1), \dots, f(k-n))$$

関数 h の値があるしきい値を超えたとき、状態遷移が生じたと判断する。以下の条件では、関数 h は、線形であると仮定する。すなわち、識別関数を次のように表す。

$$h[k] = a_0^T f[k] + a_1^T f[k-1] + \dots + a_n^T f[k-n]$$

ここで、 a_0, \dots, a_n は、6次元ベクトルである。識別関数は、ベクトル a_0, \dots, a_n により定められる。したがって、作業状態遷移を検知できる適切なベクトル a_0, \dots, a_n を求めればよい。

そこで、人間の作業実演から、ベクトル a_0, \dots, a_n を求める。人間の作業の計測より、力とモーメントの計測値 $f[k] (k = 0, 1, \dots, n)$ ならびに接近から接触への

遷移が起こる時刻 k_0T , 接触から挿入への時刻 k_1T が求められている．作業遷移を検知する関数を見つけるために, 次のような理想識別関数 $g[k]$ を定める．

$$g[k] = \begin{cases} 1/3\{t - (k - 3)T\} & (k - 3)T < t \leq kT \\ 1/3\{t - (k + 3)T\} & kT < t < (k + 3)T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

識別関数の係数ベクトル a_0, \dots, a_n は, $h[k]$ と $g[k]$ との差が小さくなるように定めればよい．そこで, 次のような目標関数を導入する．

$$E(a_0, \dots, a_n) = \max_{k=0, \dots, n} \{h[k] - g[k]\}^2$$

目標関数 E は, $h[k]$ と $g[k]$ のいずれの最大値を与える． E は係数ベクトル a_0, \dots, a_n に依存する．したがって, 関数 E が最小となるような係数ベクトル a_0, \dots, a_n を求めることにより, 理想識別関数に近い識別関数を求めることができる．

4. 実験結果

人間の演技における力とモーメントの計測値の一例を Fig.2 に示す．この計測値から状態遷移の識別関数を求める．識別関数は, $a_0^T f[k] + a_1^T f[k - 1]$ とし, サンプリング間隔を $T=30\text{Hz}$ とした．まず, 接近から接触への遷移を識別する関数を求める．今回は, 録画による遷移時刻の割り出しが困難であったため, Fig.2-(a) の z 軸成分が変化した時刻を接触時刻と仮定した．その結果を Fig.3 に示す．理想識別関数 $g[k]$ と識別関数 $h[k]$ のピークは, おおよそ一致した．これは, 接触時刻を Fig.2-(a) の z 軸成分が変化した時刻を接触時刻と仮定したためであると考えられる．

次に, 接触から挿入への遷移を識別する関数を求める．録画を分析したところ, 接触状態において, ホースがいったん静止し, 急に動き始めた直後に, ホースが蛇口にはまるのが分かった．そこで, ホースが急に動き始めた時刻を挿入時刻と仮定した．Fig.2-(a) に示すように挿入時刻は, $k_1T = 120T$ である．識別関数を求めた結果を, Fig.4 に示す．理想識別関数 $g[k]$ と識別関数 $h[k]$ がおおよそ一致している．ただし, 挿入時刻以前にも, 識別関数はいくつかのピーク値を持っている．したがって, この識別関数では, 遷移の検知が明確にはできない．

また, 識別関数の係数ベクトル a_0, \dots, a_n は, サンプル作業によって異なる．すなわち, 係数ベクトルは, 一般性がない．この点は, 今後の課題である．

5. 結言

本報告では, 管状柔軟物体の挿入作業を対象として, 人間の作業を計測し, 力覚による作業状態遷移の検知を実験的に解明した．本報告の結論を以下に述べる．

- 接触状態ならびに挿入状態において, 遷移時刻の定義が重要．
- 識別関数の係数ベクトルは, 一般性がない．

作業状態遷移をより明確に検知できる関数を導くことが今後の課題である．

【参考文献】

- 1) Hirai, S., Noguchi, H., and Iwata, K., *Human Demonstration Based Approach to the Recognition of Process State Transitions in the Insertion of Deformable Tubes*, Proc. IEEE ICRA, pp.2006–2011, 1996

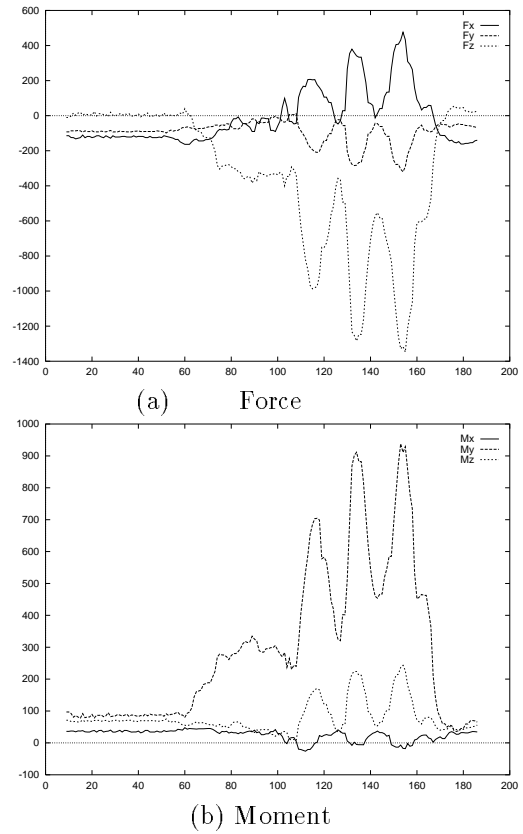


Fig.2: Example of measurements

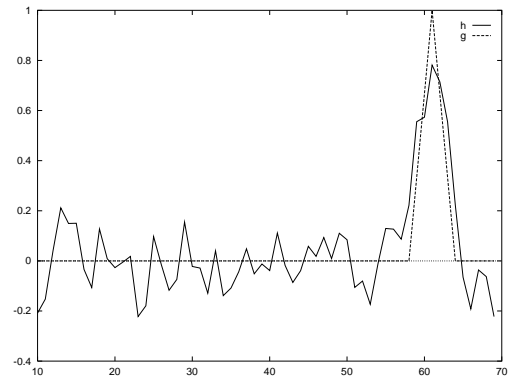


Fig.3: Detect of contact

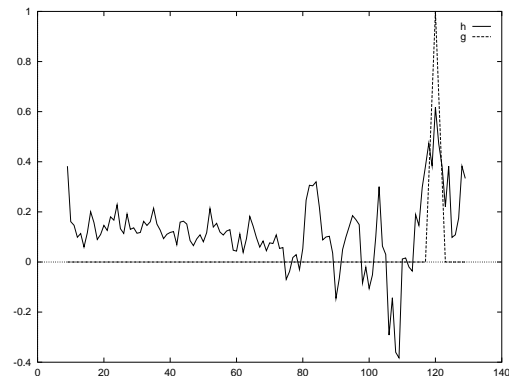


Fig.4: Detection of insertion