

タクトイルセンサを有する柔軟指ハンドを用いた物体ハンドリング

Soft-fingered Handling with Tactile Sensor

○ 柴田 瑞穂 前橋 みらい 平井 慎一

立命館大学ロボティクス学科

○ Mizuho SHIBATA, Mirai MAEBASHI, Shinichi HIRAI

Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

Abstract: This paper describes soft-fingered handling with tactile sensors. We will build the model of soft-fingered handling system to analyze the graspability by soft fingers. Using the simulation, we will investigate the graspability for finger stiffness and sampling time. Finally, we will verify the analysis experimentally.

Keywords: Soft-fingered Hand, Tactile Sensor, Control, Grasping

1 緒言

ハンドの研究は古くから多くの研究がなされている [1]. それらの研究の多くは, 物体と指先の接触を剛体点接触と仮定し準静的に解析を行っており, 指先の柔軟性が把持に与える影響についてはあまり研究が行われていない. そこで著者らは, 指先に柔軟体を有するハンドを用いて物体を把持し, 把持力制御を行うシステムを構築した [2]. 本論文では, 柔軟指を有するハンドの挙動をモデル化し, シミュレーションを行うことによって指先の特性が把持の安定性にどのような影響を与えるかを検証する. また, その結果の妥当性を評価するために, 指先に様々な柔軟体を使用して実際に把持を行い, 把持可能性の傾向を比較する.

2 柔軟指把持のモデル化

指先に柔軟体を有するハンドが剛体を把持する様子をあらわしたものが Fig.1 である. ここでハンドは各指とも独立に直動で可動する 2 指ハンドを対象とする. 2 指ハンドの例として, (株)NKE 製のハンド SK-CH-2 を示す.

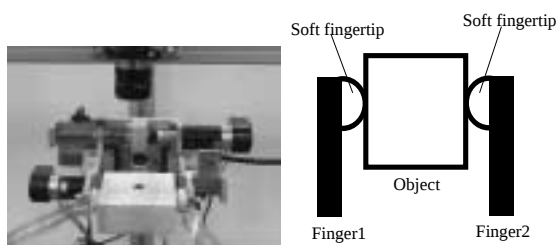


Fig.1: Grasping by soft-fingered hand

各指先全体をひとつの大きなフォークトモデルとしてモデル化した. この場合, モデルは Fig.2 のようになる.

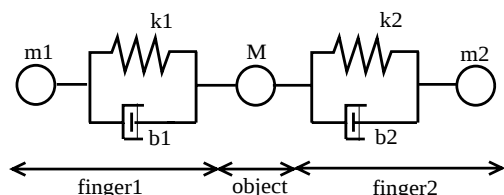


Fig.2: Total model

Fig.2 において, m_i, k_i, b_i はそれぞれ第 i 指 における, 全体の質量, 全体のバネ係数, 全体の粘性係数である. また, M は把持する対象物の質量である. ここで, 理想的に $m_1 = m_2, k_1 = k_2, b_1 = b_2$ とし, 両指ともに飽和 P 制御を同期して行うと仮定すると, 対象物は静止し続けると考えられるので, このモデルの第 1 指の部分は Fig.3 のように簡略化される.

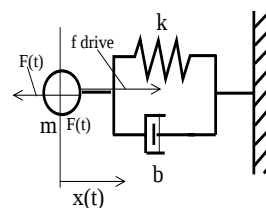


Fig.3: Simplified model

ここで, $x(t)$ は時刻 t の時の指先の位置を表し, Fig.3 の向きを正とする. また, 指と物体が触れてはいるが指先に変位がない状態を初期状態とする. つまり $x(0) = 0$ である. この時, $x(t)$ はこの柔軟体のへこみ量と等価となる. ここで, 時刻 t において, 指先に対して力学的に加わる力を $F(t)$, 力学的に加わる力とは別に加わる外力を f_{drive} とすると, 指先に関する力学システムは以下の式で表される.

$$m\ddot{x} = f_{drive} - F(t) \quad (1)$$

指先にかかる力 $F(t)$ は Fig.3 の力学的な関係から,

$$F(t) = kx + b\dot{x} \quad (2)$$

となる. さらに, 把持力制御における把持力の目標値を f_d , 力フィードバックゲインを K_f , 時刻 t で計測する力を $f(t)$ として, P 制御を行うと f_{drive} は

$$f_{drive} = K_f(f_d - f(t)) \quad (3)$$

と表現される. ここで, 計測される把持力 $f(t)$ を離散時間的に表現し, そのサンプリングタイムを T とすると, 指先の運動方程式は式 (4) のように表現される.

$$\begin{cases} m\ddot{x} = K_f(f_d - f(t)) - kx(t) - b\dot{x}(t) \\ f(t) = kx\left(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T\right) + b\dot{x}\left(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T\right) \end{cases} \quad (4)$$

3 シミュレーション

3.1 シミュレーション方法とパラメータ設定

式 (4) の連立方程式をルンゲ・クッタ法で数値的に解き、シミュレーションを行った。ここで、ルンゲ・クッタ法の刻み時間は $0.1[\text{ms}]$ とし、サンプリングタイム T を変化させてその影響を検証した。具体的には、指の特性が把持力制御の安定性にどのような影響があるかを検証した。把持状態では物体を常に把持し続ける必要がある。つまり、計算上は $x < 0$ の状態が許されても実際には $x < 0$ の状態は許されない。そこで、 $x < 0$ が起こりうるかどうかをシミュレーションにより検証した。ここで、同じパラメータであっても T の大きさによって $x < 0$ が起こりうる場合と起こらない場合のグラフを Fig.4 に示す。パラメータとしては、実験を行う実機を参考に $m=0.11[\text{kg}]$ 、 $k=756[\text{N/m}]$ と設定した。粘性 b は計測が困難であるので、 $b=1[\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2]$ と適当に設定した。また、 $K_f=10$ 、 $f_d=1.108[\text{N}]$ とした。

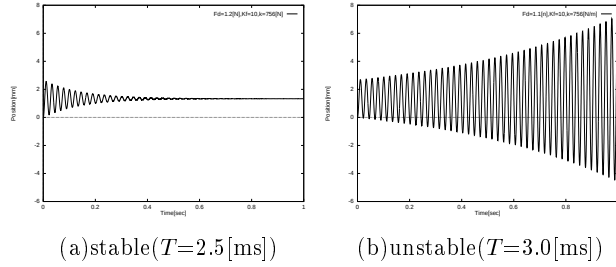


Fig.4: Simulation example

3.2 指先の特性がサンプリングタイムに与える影響

次に、詳しく検証するために k を $50[\text{N/m}]$ から $3000[\text{N/m}]$ まで $10[\text{N/m}]$ 刻み、 T を $0.1[\text{ms}]$ から $5.0[\text{ms}]$ まで $0.1[\text{ms}]$ 刻みで値を変化させ、それぞれの組み合わせで $x < 0$ が起こりうるかどうかを $K_f=10$ 、 $F_d=1.108[\text{N}]$ でシミュレーションした。また、 b の変化の影響もあわせて検証した。Fig.5 に、ある k において、はじめて $x < 0$ を記録した際の T の値をプロットしたグラフを示す。ただし、 $5.0[\text{ms}]$ 以内で $x < 0$ を記録しなかった場合には、 $5.0[\text{ms}]$ をプロットしてある。このグラフにおいて曲線より上の (k, T) の組み合わせでは、物体を安定に把持することができない。

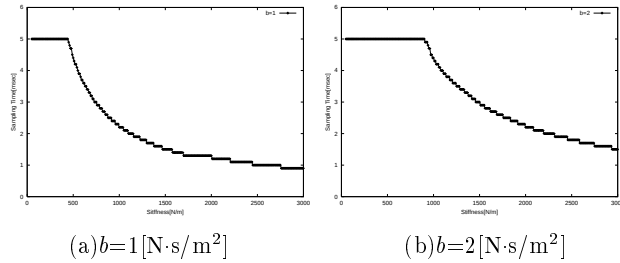


Fig.5: Grasability for stiffness and sampling time

Fig.5 より、指先にバネ係数が小さい材質を使用することによって、大きな T でも把持が可能であるという傾向が確認される。これは、大きな k の場合、小さな T でも指先が大きく動いてしまい、次のサンプリングを行う前に物体を離してしまうことが予想され、この結果は妥当といえる。また、指先の b の変化に着目すると b が大きくなるにつれて安定な状態を示す T の領域が大きくなっていることが確認される。

4 実験

シミュレーションで得た傾向を実験に実験することで確認する。本研究では、ハンドとして Fig.1 に示す、(株)NKE 製のハンド SK-CH-2 を使用する。また、把持力を計測するセンサとして、(株)ニッタ製のタクトイルセンサ I-SCAN を使用した。

各指とも 10×10 点の計測点情報から把持力を計算し、フィードバックを行う。使用した指先の種類と特性を Table 1 に示す。実験としては、各指先に対し飽和 P 制御を用いた把持力制御を行い、徐々に T を増加させ、指先から物体が離れ、物体の姿勢が大きくくずれた場合の T を計測した。Table 1 にシミュレーションと実験の結果を示す。ここで、シミュレーションでは $b=1[\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2]$ とし、前述同様、はじめて把持できなくなった場合の T を示している。実験値の T に幅があるのは、同じ条件でもうまく把持できる場合とできない場合があることによる。

Table 1: Experimental result

Material	$k[\text{N/m}]$	$T(\text{simulation})[\text{ms}]$	$T(\text{experiment})[\text{ms}]$
Cork	4431	0.5	7-10
Rubber	3550	0.8	35-40
Sponge	2455	1.0	25-30
Felt	1110	2.0	120-130
Polyurethane	756	2.9	130-140

シミュレーションから算出した T と実験値から算出した T の絶対値は大きく異なる。この絶対値が異なる要因には、指先の粘性の影響があると考えられる。先ほどのシミュレーションで確認した通り、粘性 b が大きくなれば把持可能な領域が増える。しかし、指先の b を測定することは困難であり、その影響がどの程度であるかは確認できない。しかし、絶対値は異なるが、その大小関係についてはほぼ合致しており、これらの傾向は一致していると考えられる。

Fig.6 に、実際に T を大きくとった場合の把持力の推移を示す。 $T=120[\text{ms}]$ のように T を大きくとりすぎると把持力が制御されているとはいえない状態となるが、 $T=33[\text{ms}]$ のようにある程度の大きさであれば、大きな T であっても安定把持かつ把持力がある程度制御可能であることが確認できる。ここでは、 $f_d=1.108[\text{N}]$ とし、ゲインは適当に調整した。

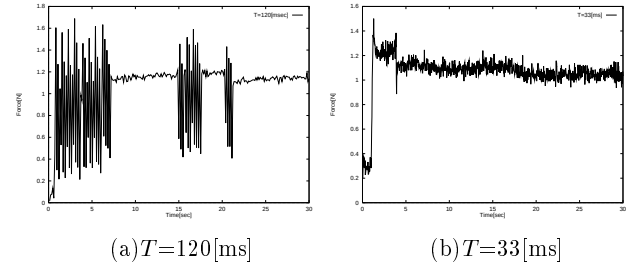


Fig.6: Grasping force

5 結言

本論文では、指先に柔軟体を有するハンドを用いた把持力制御をモデル化し、シミュレーションを行うことで、指先の特性が物体把持の安定性に与える影響について検証した。その結果、指先にバネ係数が小さい材質を使用することによって、大きなサンプリングタイムでも把持力が制御可能であるという結果が得られた。また、この傾向を実験によっても確認した。今後の課題としては、把持する対象物体が柔軟物である場合への拡張が挙げられる。

参考文献

- [1] 中村, "把持とあやつり", 計測と制御, Vol.29, No.3, pp.206-212, 1990
- [2] 柴田, 前橋, 平井, "タクトイルセンサを用いた2指ハンドによる把持制御", SICE SI 2002 講演論文集 (I), pp.89-90, 2002