柔軟材料の粘性を利用した把持力制御における把持可能性の解析

Graspability Analysis for Grasping Force Control Taking Soft Material Viscosity into Consideration

○柴田 瑞穂　平井 慎一
立命館大学ロボティクス学科
○ Mizuho SHIBATA，Shinichi HIRAI
Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

Abstract: In this paper, we analyze grasping force control taking soft material viscosity into consideration in terms of graspability. For grasping force control with soft-fingered robotic hands, we have found that the minimum sampling time of sensor feedback depends on soft material viscosity of fingertip using simulation. However, this phenomenon did not have been described by general discrete or continuous equations. We investigated by equation that physical condition was considered as continuation.

Keywords: Soft fingertip, Viscosity, Grasping force control

1　緒言

本論文では，柔軟指ハンドによる物体把持について，指先に用いる柔軟材料の粘性を利用した把持力制御を把持可能性の観点から解析的に検証した．柔軟指を用いた把持力制御において，センサ情報をフィードバックするのに必要な最小のサンプリングタイムの長さが，柔軟材料の粘性の値に依存することがシミュレーションでは確認されていた [1]，[2]．しかし，従来の連続系や離散系の解析ではこの現象を表現することができなかった．そこで，本研究では物理系を連続，把持力の計測，把持可能かどうかの判断を離散的に行うという，実際の把持により近い形で解析を行った．

2　柔軟指把持

2.1　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簡略化したモデルを Fig.1 に示す [2]．使用するハンドは各指とも独立に直動で可動する 2 指ハンドであり，指先に用いる柔軟材料の特性は各指とも等しく，把持力制御を行う間に把持物体は静止していると仮定する．

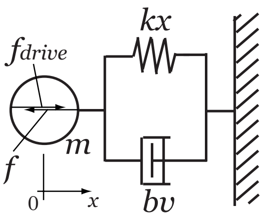

Fig.1: Model of a simplified soft-fingered hand

ここで，x，v はそれぞれ指の位置，速度であり，初期状態では指先と把持物体がちょうど接する状態であり，指先の変形による力は発生していないとする．また，m は指先を含めた指全体の質量，f は指先の変形による発生力，f_{drive} は指のモーターに与えられる駆動力である．k，b はそれぞれ指先に用いる柔軟材料の弾性係数，粘性係数である．

2.2　把持可能性

ロボットハンドが物体把持を持続するためには，指先の変形によって発生する力が，すべての時刻ですくなくとも正の値でなければならない．なぜならば，力が発生していない状態では物体を落としてしまうからである．逆に，指先に発生する把持力を目標力に収束させることができれば，物体把持を持続することができる．ここで，ハンドが物体を把持しつづけるかどうかを把持可能性と定義する．この把持可能性は，指先に発生する力がすべての時刻で正であるかどうかで判断する [1]，[2]．今回は制御則として把持力の P 制御を用いて物体把持を行う．よって駆動力 f_{drive} は，

$$f_{drive} = K_f(F_d - f) \tag{1}$$

となる．ここで，K_f は力フィードバックゲイン，F_d は目標把持力とする．把持力 f は力センサを用いて離散的に計測するため，この駆動力の決定はサンプリングタイム T ごとに行うことになる．

3　物理系を連続とした解析

ここでは，前節で示したモデルを基に解析を行う．把持力制御において，把持力の計測はセンサのサンプリングタイムごとに離散的に行われるが，指先の柔軟材料の物理系は連続的に動作している．よって従来の離散系，連続系の解析ではこの現象をうまく表現することができない．そこで，本研究では把持可能かどうかの判断をサンプリングタイムごとに行うとして，物理系を連続とした漸化式を解くことを考える．

3.1　定式化

時刻 $t \in [nT, (n+1)T](n = 0, 1, 2, \cdots)$ における，指の運動方程式は次のようになる．

$$m\ddot{x} = -kx - b\dot{x} - K_f(F_d - \hat{f}(t)) \tag{2}$$

ここで $\hat{f}(t)$ は，

$$\hat{f}(t) = kx(nT) + b\dot{x}(nT), \quad n = \left|\frac{t}{T}\right| \tag{3}$$

であり，時刻 nT に測定した指先の発生力とする．この値は次に計測を行う時刻 $(n+1)T$ まで変化しない．このとき，システム方程式は，

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = -\dfrac{b}{m}v - \dfrac{k}{m}x + \dfrac{K_f}{m}(F_d - \hat{f}(t)) \end{cases} \tag{4}$$

となる．ここで, $x(nT)$ を x_n, $v(nT)$ を v_n とし, $K_f k/m = K$, $K_f b/m = B$, $K_f F_d/m = F$ とすると,

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \\ \dot{v}(t) = -Bv(t) - Kx(t) + F - Kx_n - Bv_n \end{cases} \tag{5}$$

と表現できる．ここで, $\dot{v}$ の 3 項以下は時刻 $t \in [nT, (n+1)T]$ では一定値であるので，これを D_n とすると,

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = -Bv - Kx + D_n \end{cases} \tag{6}$$

となる．この式を行列で表すと,

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K & -B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D_n \end{bmatrix} \tag{7}$$

ここで,

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix}, \alpha = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K & -B \end{bmatrix}, \beta\mathbf{u(t)} = \begin{bmatrix} 0 \\ D_n \end{bmatrix}$$

とする．このとき，この式は $\dot{\mathbf{x}}(t) = \alpha\mathbf{x}(t) + \beta\mathbf{u}(t)$ と表現され，時刻 $(n+1)T$ におけるこの強制システムの解は,

$$\mathbf{x}((\mathbf{n+1})T) = e^{\alpha T}x(nT) + \int_{nT}^{(n+1)T} e^{\alpha((n+1)T-\tau)}\beta u(\tau)d\tau \tag{8}$$

となる．ここで，$\beta\mathbf{u(t)}$ は一定値であるので，整理すると,

$$\mathbf{x}((\mathbf{n+1})T) = \mathbf{e}^{\alpha T}\mathbf{x(n}T) + \alpha^{\mathbf{-1}}(\mathbf{e}^{\alpha T} - \mathbf{I}) \begin{bmatrix} 0 \\ D_n \end{bmatrix}. \tag{9}$$

ここで，$\mathbf{I}$ は単位行列である．逆行列 α^{-1} は,

$$\alpha^{-1} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} -B & -1 \\ K & 0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

となり，$K \neq 0$ より必ず存在する．ここで，$\mathbf{x}(0) = [0, 0]^{\mathrm{T}}$ として実際に書き下すと,

$$\mathbf{x}(T) = \mathbf{e}^{\alpha T}\mathbf{x(0)} + \alpha^{\mathbf{-1}}(\mathbf{e}^{\alpha T} - \mathbf{I}) \begin{bmatrix} 0 \\ D_0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

となる．このように順次 $\mathbf{x}(nT)$ を求め，それぞれの場合で，把持可能性 $f(nT) = kx_n + bv_n > 0$ を判定する．

3.2 把持可能性の検証

ここでは，式 (9)，(11) を基に粘性とサンプリングタイムの観点から把持可能性を検証し，従来手法と比較する．把持力の時間推移は $f(nT)\,(n = 0, 1, 2, \cdots)$ で表されるので，把持可能性は，$f(nT) > 0\,(n = 0, 1, 2, \cdots)$ で表されるそれぞれの領域の和で表現することができる．Fig.2 に，指先の粘性とセンサフィードバックに必要な最小のサンプリングタイムの関係を示す．このグラフの上の領域にある (b, T) の組み合わせでは，どこかの時刻で $f < 0$ となり，把持を持続することができない．今回は $n = 100$ までの把持可能性を検証したが，これより大きい n まで検証してもグラフの概形は変わらないことが確認されている．用いたパラメータは，$m = 0.11$ [kg], $k = 2000$ [N/m]，$K_f = 10$，$F_d = 1.1$ [N] である．Fig.2 から，センサ情報をフィードバックするのに必要な最小のサンプリングタイムの長さが，柔軟材料の粘性の値に依存し，ピークが存在することが確認できる．これは，従来のシミュレーションと同様の結果である [1]，[2].

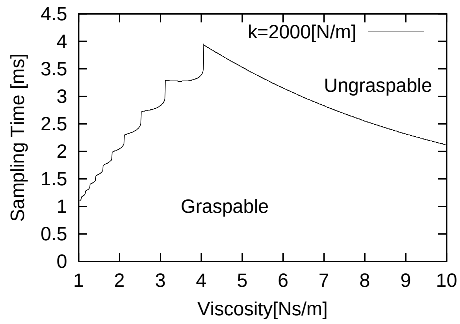

Fig.2: Relationship between soft material viscosity and sampling of sensor feedback

3.3 従来手法との比較

Table 1 に，従来のシミュレーション，離散解析，物理系を連続とした解析を用いて把持可能性を検証した場合の，それぞれのピークにおける粘性とサンプリングタイムの値を示す．従来のシミュレーションでは，式 (2)，(3) を Runge-Kutta 法で解いた [1]，[2]．また，離散解析では，式 (2)，(3) を物理系も離散的に考える通常の漸化式として解いた．$k = 2000$ [N/m] と $k = 20000$ [N/m] の場合について検証し，その他のパラメータは前節で使用したパラメータと同様のものを使用した．Table 1 より，Runge-Kutta 法で検証した把持可能性から算出したピークの値と，物理系を連続と考える漸化式を用いて検証した把持可能性から算出したピークの値が一致していることがわかる．これより，物理系を連続と考えた漸化式が柔軟指ハンドリングを表現する手法として有用であることが分かる．また，このピークの値は $f(2T) > 0$ と $f(3T) > 0$ のグラフの交点であることが確認されている．このことから，n をすべて検証することなく，ピークの値を知ることができる．

Table 1: Viscosity and sampling time on a peak

Stiffness k[N/m]	(Viscosity b[Ns/m], Sampling time T[ms])		
	Simulation	Discrete	Analytical
2000	$(4.05, 3.94)$	$(7.75, 3.87)$	$(4.06, 3.94)$
20000	$(12.81, 1.25)$	$(24.49, 1.20)$	$(12.82, 1.25)$

4 結言

本論文では，柔軟指ハンドを用いた物体把持における，柔軟材料の粘性を利用した把持力制御を物理系を連続，把持力の計測，および把持可能かどうかの判定を離散的に考えて定式化し，その式を用いて把持可能性を検証した．また，その結果を従来の離散解析，およびシミュレーションと比較することによって，今回提案した手法が柔軟指ハンドリングを表現する方法として有用であることを示した．次の課題としては，この手法を用いて柔軟指ハンドリングの把持力制御の収束値や安定性を解析することが挙げられる．従来の離散解析や連続解析に比べて精緻な結果が得られることが期待される．

参考文献

[1] 柴田，平井，”柔軟指ハンドを用いた把持力制御における安定性と把持可能性の解析”，ロボティクス・メカトロニクス講演会’04 講演論文集，2004

[2] Shibata, Hirai, ”Stability and Graspability Analysis in Grasping Task Taking Fingertip Dynamics into Consideration”，*IROS*’04, 2004