センシングフォーラム予稿テンプレート

〇金谷　孝一郎[1], 山川　雄司[2]

[1] 東京大学, [2] 東京大学

Template for proceedings of Sensing Forum

〇 Koichiro Kanaya and Yuji Yamakawa

[1] University of Tokyo, [2] University of Tokyo

要旨. 日本語アブストラクト（本文が英語の場合は英語でも可）. 200 字程度で記載. 〇〇〇

1. 緒言

近年，医療分野では患者と医師双方にメリットがあるとして，低侵襲手術が注目されている．従来の開腹手術と比較し，低侵襲手術は小さな皮膚切開を介して手術を行う．これにより，患者にとっては手術リスクや感染症リスクの低下や入院期間，回復期間の短縮といったメリットがある．また，外科医にとっても手術時の肉体的疲労の低減や，x 線透視装置を用いた手術においては，放射線被曝の低減といったメリットがある．

しかし，低侵襲手術にもちいられる鉗子グリッパは，スペース的な制約や生体適合性の需要から，力センサを搭載することが難しい．この力センサの不在は，外科医の練習期間の長期化や，ロボットによる自動化を推進する上での課題となっている．鉗子グリッパへの力センサ搭載が困難である主な要因は，その小型化，生体適合性，殺菌処理への耐久性にある．鉗子グリッパ内の限られた空間内では，力センサとその計測に必要な配線を組み込む物理的なスペースが不足する．また，力センサが必ずしもチタンやステンレスといった生体適合素材で構成されるとは限らない．さらに，鉗子グリッパは高温の蒸気により殺菌され，数回の殺菌処理によりセンサの精度が低下する．これらの要因による力センサの不在を解決するために，鉗子グリッパに搭載可能な力センサの開発や，力センサを用いないで接触力を推定する研究が行われている．

センサはリアルタイムの触覚フィードバックに使用され，ロボットによる手術の自動化では，最低 0.5 kHz，理想的には，1 kHz の更新頻度が必要とされる．要求される更新頻度を満たすためには，反力推定では計算効率の高いアルゴリズムである必要があり，本研究では，臓器等の柔軟物をバネとダンパでモデル化し，バネ定数と粘性減衰係数を同定し，反力推定を行う．

2. 関連研究

センサを用いないで反力を推定する研究は，大きく 2 つ，１；内視鏡画像から反力を推定する研究，２；駆動用モータやワイヤから反力を推定する研究に分類できる．

まず，画像ベースの研究に関して，Chua らは RGB 画像とロボットの状態をニューラルネットワークの入力とすることで，画像のみやロボットの状態のみを入力とする場合より，汎化能力を向上させた．さらに，単一フレームごとに反力を推定することで，37.7 Hz の更新速度を達成し，リカレントニューラルネットワーク (12.4 Hz) と比較して，高速な反力推定を実現した．しかし，学習系を用いた手法では，1 kHz の更新頻度を達成することが難しいと考える．Wang らは変形前後の画像から変位を計測し，既知の材料特性と有限要素法を用いて，力の位置と大きさを推定した．変位の推定精度が反力推定精度に影響し，高制度な変位計測には，マーカが必要となるという課題がある．

3. 課題設定

グリッパに力センサを搭載しない場合，グリッパが目標位置に到達した際に，力入力は，0 [N] になるが，柔軟物からの反力は存在し，塑性変形が進行するにしたがって，柔軟物からの反力は減少する．本研究では，柔軟物の変形と反力の関係をバネとダンパを用いてモデル化し，グリッパの目標位置に到達した際の柔軟物の変形量を推定することを目的とする．

4. 提案手法

一般に，弾性と粘性の挙動を表現するには，バネとダンパの要素が4つ必要である [?]．4つの要素を用いた場合の組み合わせは，7種類存在し，リアルタイムで同定している研究 [?] と比較するために，図 ??を用いる．図 ??のモデルの接触力 f と，変形量 x の関係は以下のように表される．

$$p_1 x + p_2 \int x\,dt = p_3 \int f\,dt + p_4 \iint f\,dt\,dt + f \tag{1}$$

ここで，

$$\begin{aligned} p_1 &= k_1, \\ p_2 &= \frac{k_1 k_2}{c_2}, \\ p_3 &= \frac{k_1}{c_2}\left(1 + \frac{k_2}{k_1} + \frac{c_2}{c_1}\right), \\ p_4 &= \frac{k_1 k_2}{c_1 c_2} \end{aligned} \tag{2}$$

である．k_1,k_2 は弾性係数であり，c_1,c_2 は粘性減衰係数である．接触力 f は，モータの力入力を用い，変形量 x は，グリッパの目標軌道を用いて，p_1,p_2,p_3,p_4 を同定し，k_1,k_2,c_1,c_2 を求める．式 (1) をタイムステップを行に格納し，行列形式で表すと以下のようになる．

$$\mathbf{M}\mathbf{p} = \mathbf{q} \tag{3}$$

ただし，

$$\mathbf{M} = \left[\boldsymbol{x}, \quad \int \boldsymbol{x}, \quad -\int \boldsymbol{f}, \quad -\iint \boldsymbol{f}\right], \qquad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{q} = \boldsymbol{f} \tag{4}$$

である．粘弾性係数 k_1,k_2,c_1,c_2 を同定することは，行列 $\mathbf{M}$ の擬似逆行列を算出する問題に帰着する．しかし，エンコーダの計測結果には，ノイズが含まれ，位置制御するモータの力入力には，制御係数倍されたノイズが現れる．このノイズにより粘弾性係数の同定精度が低下するという課題がある．

この課題を解決するために，まず，4.1 節では，行列 $\mathbf{M}$ の特異値に着目し，ノイズにロバストなグリッパの軌道生成方法と，その軌道に適した計算方法について述べる．次に，4.2 節では，粘弾性係数が 0 や無限大に近づくことを防ぐために，グリッパの軌道からデータを抽出する方法について述べる．

4.1 特異値分解を用いたグリッパの軌道生成と軌道に適した同定計算

グリッパの軌道生成において，特異値分解を用いることで，ノイズにロバストな軌道を生成する．ノイズを明示的に扱うために，$\mathbf{q}$ のノイズを $\mathbf{noise}$ とし，$\mathbf{p}$ を算出する式変形は，行列 $\mathbf{M}$ の擬似逆行列を算出し，

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\mathbf{p} &= \mathbf{q} + \mathbf{noise} \\ \mathbf{p} &= \mathbf{M}^{\dagger}(\mathbf{q} + \mathbf{noise}) \\ \mathbf{p} &= \sum \frac{1}{\gamma} v u^T (\mathbf{q} + \mathbf{noise}) \end{aligned} \tag{5}$$

のようになる．ここで，γ は行列 $\mathbf{M}$ の特異値であり，$O(\min(\mathbf{p})) \gg \frac{O(\mathbf{noise})}{O(\gamma)}$ のように γ を決定することでノイズの影響を抑えることができる．

次に，行列 $\mathbf{M}$ を QR 分解し，$\mathbf{Q}$ と $\mathbf{R}$ を独立して生成することで，$\mathbf{M}$ の特異値と 1 列目のグリッパの軌道を任意に決定する．QR 分解を用いた $\mathbf{M}$ の生成方法を図 ??に示す．

対角行列 $\mathbf{R}$ は，上記でパラメータ $\mathbf{p}$ の最小値と $\mathbf{noise}$ のオーダを考慮して決定した γ を対角成分とした 4×4 行列である．

直交行列 $\mathbf{Q}$ は，図 ??の上側ルートで生成される．1 サイクル前に同定したパラメータ $\mathbf{p}$ を柔軟物モデルに適応し，仮想的な 5 次関数形状の変形 x を与えることで一時的な行列 $\mathbf{M}_{\mathrm{temp}}$ を生成し，QR 分解することで Q を得る．最終的に，独立して得られて $\mathbf{Q}$ と $\mathbf{R}$ を掛け合わせることで，行列 $\mathbf{M}$ を生成し，その 1 列目をグリッパの軌道とする．

このグリッパの軌道生成に適したパラメータ $\mathbf{p}$ の計算方法について述べる．粘弾性モデルの変形と反力の関係式 (1) を行列形式である式 (4) に変形する際，$\mathbf{q}$ は $\boldsymbol{x}, \int \boldsymbol{x}, \int \boldsymbol{f}, \iint \boldsymbol{f}$ の 5 通りの選び方がある．上記で述べたグリッパの軌道は，$\mathbf{q}$ のノイズの影響を抑える軌道になっており，$\mathbf{q}$ にもっともノイズの大きい $\boldsymbol{f}$ を用いることで提案した軌道生成が有効に働く．

4.2 粘弾性係数の妥当性を向上させるためのデータの抽出

式 (3) は不能であり，求める解 $\mathbf{p}$ が 4 要素であるのに対し，方程式の数が過剰であり矛盾する式が含まれる．一部の矛盾する式より粘弾性係数が負になり，物理的に妥当性を失う．そこで，式 (3) の擬似逆行列の算出方法を逐次的に行い，粘弾性係数が物理的に妥当でないデータは除外する．まず，擬似逆行列の逐次的な算出方法について述べる．タイムステップが $n-1$ までの行列 $\mathbf{M}$ を

$\mathbf{M}_{n-1}$ とし，n 番目のタイムステップのデータ $\mathbf{m}_n$ として，タイムステップ n での行列 $\mathbf{M}_n$ を，

$$
\begin{aligned}
\mathbf{M}_n &= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{n-1} \\ \mathbf{m}_n \end{bmatrix}, \\
\mathbf{m_n} &= \begin{bmatrix} x_n & \int x_n & -\int f_n & -\iint f_n \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{6}
$$

とする．このとき $(\mathbf{M_n}^T\mathbf{M_n})^{-1}$ を $\mathbf{J}_n$ とし，$\mathbf{J}_n$ の更新式は Woodbury の公式を用いて，

$$
\begin{aligned}
\mathbf{J}_n &= (\mathbf{M_n}^T\mathbf{M_n})^{-1} \\
&= (\mathbf{M_{n-1}}^T\mathbf{M_{n-1}} + \mathbf{m_n}^T\mathbf{m_n})^{-1} \\
&= \mathbf{J}_{n-1} - \frac{\mathbf{J}_{n-1}\mathbf{m_n}\mathbf{m_n}^T\mathbf{J}_{n-1}}{1+\mathbf{m_n}^T\mathbf{J}_{n-1}\mathbf{m_n}}
\end{aligned}
\tag{7}
$$

と表せる．$\mathbf{p}$ の $n-1$ 番目と n 番目の関係は，

$$
\begin{aligned}
\mathbf{p}_n &= (\mathbf{M_n}^T\mathbf{M_n})^{-1}\mathbf{M_n}^T\mathbf{q_n} \\
&= \mathbf{J}_n\mathbf{M_n}^T\mathbf{q_n} \\
&= \mathbf{J}_n(\mathbf{p}_{n-1} + \mathbf{m_n}^T\mathbf{q_n})
\end{aligned}
\tag{8}
$$

となる．この更新式 (7)， (8) とタイムステップ n で計測されたデータ $\mathbf{m_n}$ と $\mathbf{q_n}$ を用いて $\mathbf{p}_{n\_temp}$ を算出し，$\mathbf{p}$ の更新に利用するか，除外するか判断する．

次に，除外するデータの決定方法について述べる．式 (2) を変形し $\mathbf{p}$ から k_1，k_2，c_1，c_2 は，

$$
\begin{aligned}
k_1 &= p_1, \\
k_2 &= \frac{p_2}{p_3 - \frac{p_4 p_1}{p_2} - \frac{p_2}{p_1}}, \\
c_1 &= \frac{p_2}{p_4}, \\
c_2 &= \frac{p_1}{p_3 - \frac{p_4 p_1}{p_2} - \frac{p_2}{p_1}}
\end{aligned}
\tag{9}
$$

のように算出できる．さらに，更新に用いる $\mathbf{p}_{n\_temp}$ の条件は，

$$
\begin{gathered}
10^{-7} < \mathbf{p}_n < 10^{7}, \\
10^{-7} < \left(p_3 - \frac{p_4 p_1}{p_2} - \frac{p_2}{p_1}\right)
\end{gathered}
\tag{10}
$$

とした．