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

1. 原稿の書き方

- 原稿枚数は A4 版で 4〜6 ページです．超過しないようご注意下さい．
- 用紙余白は上下 24mm，左右 15mm とし，本文を縦 250mm ×横 180mm の枠内に収めて下さい．
- 冒頭に以下の項目を書いてください．
  - 一行目：和文題目．
  - 二行目：和文著者名．登壇者の前に必ず〇をつけてください．
  - 三行目：和文所属名．
  - 四行目：英文題目．
  - 五行目：英文著者名．登壇者の前に必ず〇をつけてください．
  - 六行目：英文所属名．
  - 七行目以降：要旨（日本語．論文の本文が英文の場合，英語でも結構です)
- 原稿は PDF 形式で作成してください．印字の正確性を期すため，PDF ファイル作成時にフォントの埋め込みをお願い致します．
- 引用は文献 [1] のように記載してください．

参考文献

[1] 計測 太郎：センシングフォーラム予稿の書き方，第 39 回センシングフォーラム論文集，pp. 1-5, 2022.

2. 図の挿入例

以下に PDF 形式の図を挿入します。

図 1: サンプル図

図 1 はサンプル図です。

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，

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} & \int \boldsymbol{x} & -\int \boldsymbol{f} & -\iint \boldsymbol{f} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{p} &= \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{q} = \boldsymbol{f} \end{aligned} \tag{4}$$

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,

$$\mathbf{M}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{n-1} \\ \mathbf{m}_n \end{bmatrix} \tag{6}$$

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．