825 動作計画を用いた2次元冗長アームの振動軽減(実験による検証) Vibration Reduction of Redundant 2D Robot Arm by Means of Motion Planning (Verification of Vibration Reduction Effect by Experiment)

正 花原 和之(神戸大工) 正 多田 幸生(神戸大工) ○学 松岡 圭(神戸大工)

Kazuyuki HANAHARA, Kobe University, Rokkodaityo 1-1, Nada-ku, Kobe
Yukio TADA, Kobe University
Kei MATSUOKA, Kobe University

1. 緒言

機構運動時の弾性変形に起因する振動を、冗長自由度を活用した動作計画により軽減する研究⁽¹⁾⁽²⁾が行なわれている。これらの研究では、動力学シミュレーションを通じて振動軽減効果を確認している。本研究では、振動軽減の効果を実験装置として試作したロボットアームを使って確認する。実際のロボットアームから得られる歪と動力学シミュレーションから得られる歪を比較し、その振動軽減効果を検証する。

2. ロボットアームのモデル

本研究で用いるモデル⁽³⁾は、簡単のため質量を関節に集中させている。また、関節は回転関節のみとしている。 i 番目の関節中心位置と関節変数を X_i と θ_i で表し、弾性変形をひずみ量 w_i とひずみ角 ψ_i で表す。 $i-1$ 番目のリンクに固定された座標系 Σ_{i-1} からみると、 i 番目の関節中心位置は ${}^{i-1}X_i = [l_{i-1}, w_{i-1}]^T$ と表せる。ここで l_{i-1} は、 $i-1$ 番目のリンクの長さを表している。これらより、全体座標系を参照した関節位置は以下のように表せる。

$$X = X(\theta; w, \psi), \quad (1)$$

ここで、 X は $[X_1^T, \dots, X_n^T]^T$ であり、全体座標系で表された各関節位置をまとめたものである。また、 θ 、 w 、 ψ はそれぞれ $[\theta_1, \dots, \theta_n]^T$ 、 $[w_1, \dots, w_n]^T$ 、 $[\psi_1, \dots, \psi_n]^T$ である。

3. Lagrange の運動方程式

本研究では、2次元での運動を想定しており、重力に関するポテンシャルエネルギーは考えない。リンク i に対し、 $M_i = \text{diag}[m_i, m_i]$ を慣性行列と言う。ここで m_i は i 番目の関節中心に相当する集中質量である。これをアーム全体でまとめ、 $M = \text{diag}[M_1, \dots, M_n]$ を得る。これにより、アーム全体での運動エネルギーは以下の式になる。

$$T = \frac{1}{2} \dot{X}^T M \dot{X}, \quad (2)$$

アーム全体のひずみ量とひずみ角をまとめた行列 U を $[w_1, \psi_1, \dots, w_n, \psi_n]^T$ とする。また、 K_i をリンク i の剛性行列⁽²⁾とすれば、アーム全体の剛性行列 K は $\text{diag}[K_1, \dots, K_n]$ となり、これらを用いて、歪エネルギーを表すと以下のようになる。

$$U = \frac{1}{2} U^T K U \quad (3)$$

以上のエネルギーを用いて、Lagrange の運動方程式を導く。一般化座標として θ, w, ψ を用いる。一般化力として、関節のトルクに起因する F を用いる。

$$(J^{X\theta})^T M J^{X\theta} \ddot{\theta} + (J^{X\theta})^T M J^{Xw} \ddot{w} + (J^{X\theta})^T M J^{X\psi} \ddot{\psi} = F^\theta \quad (4)$$

$$(J^{Xw})^T M J^{Xw} \ddot{w} + (J^{X\theta})^T M J^{Xw} \ddot{\theta} + (J^{Xw})^T M J^{X\psi} \ddot{\psi} + K^{ww} w + K^{w\psi} \psi = 0 \quad (5)$$

$$(J^{X\psi})^T M J^{X\psi} \ddot{\psi} + (J^{Xw})^T M J^{X\psi} \ddot{w}$$

$$+ (J^{X\theta})^T M J^{X\psi} \ddot{\theta} + K^{\psi\psi} \psi + K^{w\psi} w = 0 \quad (6)$$

ここで用いる K^{ww} 、 $K^{\psi\psi}$ 、 $K^{w\psi}$ は剛性行列 K を分解した行列である。また、 $J^{X\theta}$ 、 J^{Xw} 、 $J^{X\psi}$ はそれぞれ $\frac{\partial X}{\partial \theta}$ 、 $\frac{\partial X}{\partial w}$ 、 $\frac{\partial X}{\partial \psi}$ となるヤコビ行列である。

4. 動作計画問題

関節変数の増分 $d\theta(t)$ についての歪みエネルギーに関する評価規範を導く⁽¹⁾。機構運動に及ぼす過去の影響を減衰させるための減衰係数 γ を考慮し、次式を得る。

$$g_1(d\theta(t)) = (d\theta(t) - \gamma d\theta(t-dt))^T N \times (d\theta(t) - \gamma d\theta(t-dt)). \quad (7)$$

ここで N は、 $J^{X\theta}$ 、 J^{Xw} 、 $J^{X\psi}$ のヤコビ行列と剛性行列 K 、慣性行列 M で構成される行列であり、歪エネルギーを評価する式の係数にあたる行列である。機構的自由度をアーム全体に分散させるための評価規範 g_2 を以下に示す。

$$g_2(d\theta(t)) = d\theta(t)^T d\theta(t). \quad (8)$$

評価規範 g_1 、 g_2 を同時に評価するため重み係数 w_1 、 w_2 を用い、動作計画問題を定式化すると、以下のようになる。手先の位置を $p = [x, y]^T$ で表し、これを作業空間ベクトルとする。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } g(d\theta(t)) &= w_1 g_1(d\theta(t)) + w_2 g_2(d\theta(t)) \\ \text{with respect to } & d\theta(t), \\ \text{subject to } & J^{p\theta} d\theta(t) = d\mathbf{p}(t). \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{p}(t)$ はアームが達成すべきタスクとしての軌道を表し、 $J^{p\theta} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \theta}$ である。Lagrange 乗数法を用いてこの動作計画問題を解く⁽¹⁾と以下の式が得られる。

$$d\theta(t) = (J^{p\theta})^+ d\mathbf{p}(t) - \{(J^{p\theta})^+ J^{p\theta} - I\} \times (N_1 + N_2)^{-1} N_1 \gamma d\theta(t-dt) \quad (10)$$

ここで I は単位行列、 $N_1 = w_1 N$ 、 $N_2 = w_2 I$ である。また $(J^{p\theta})^+$ は $J^{p\theta}$ の一般化逆行列である。

5. 2次元ロボットアーム

本研究で用いた2次元ロボットアームの設計を述べる。実験に使用するロボットアームは関節にステッピングモータを用い、モータとリンクを連結することで自由度を簡単に換えられるように設計する。このステッピングモータは、基本ステップ角0.036度、許容速度フルステップ時0~15000Hzのオリエンタルモータ株式会社のUPK543AW-T20を使用している。また、ステッピングモータのコントローラには Melec 社のC-865を用いている。Fig. 1は製作した2次元ロボットアームの概観である。Fig. 2はアームリンクの形状を示している。図中記号 l 、 e 、 h はそれぞれリンクの長さ、厚み、高さを表し、曲げ剛性 EI はリンクの形状の調節により容易に変更できる。Table 1に設計したロボットアームの各パラメータを示す。ここで

m はステッピングモータの質量である。リンクの材質にはアルミニウムを用いた。

今回考慮したモデルは、2次元のため重力の影響を考慮しない。そのため、重力による影響が出ないよう、各モータの回転軸の中心を天井からワイヤで支え、アームが水平方向のみ動作し、垂直方向にはたわまないようにした。また、ワイヤの長さは1.5mである。

6. 実験

ロボットアームの根元リンクに歪ゲージを取り付け、取り付ける位置は第一リンクの根元から120mmの所とする。通常、歪はリンクの根元付近で検出する。しかし、今回の実験では歪ゲージを根元に取り付けた場合、測定許容量を超えてしまう。そのため、このような取り付け位置とした。歪ゲージから得られた結果にはノイズが含まれているため、得られた結果を周波数領域に変換し、ローパスフィルタをかけてノイズを除去する作業を行っている。フィルタをかける周波数は35Hzとした。アームには動作計画により求められた動作と、比較のためヤコビ行列 J^{pb} の疑似逆行列により求められた動作をさせる。Fig.3 にアームの初期姿勢、Fig.4 の (a)(b) にそれぞれ疑似逆行列により求められた動きと、動作計画により求められた動きをさせた場合の最終姿勢を載せる。手先の目標点は $[0.1m, 0.7m]$ としている。Fig.5 は、この時の実験結果である。破線が、動作計画より求められた動作の結果である。

歪ゲージから得られたデータから、アームの機構運動時の歪を求める。また、動力学シミュレーションから得られた歪を Fig.6 に示す。同様に、破線が動作計画より求められた動作の結果である。実験結果をみると、疑似逆行列より求めた動作時と比べ動作計画より求めた動作のほうが機構運動時の歪が少なくなっている。これにより、実際のロボットアームにおいても、振動軽減効果が得られることが分かる。

7. 結言

実験の結果とシミュレーションの結果とを比べると、誤差があるものの、同じような傾向の波形を描いているのが分かる。これから、シミュレーションとまったく同じ結果とは言えないが、シミュレーションと同傾向の効果が得られるのが分かる。ただし、今回用いたロボットアームはその2次元を実現するため、天井からワイヤでつるされている。シミュレーションの結果とのずれに、このワイヤによる影響が多分にあると思われる。この影響を考慮することが今後の課題となる。

Fig. 1 Two-dimensional robot arm

Fig. 2 Detail of a link

Table 1 Typical values of parameters

m	0.449kg	h	80mm
l	200mm	e	0.5mm
EI	0.154Nm ²

Fig. 3 Initial posture of robot arm

(a)pseudo-inverse (b)proposed method
Fig. 4 Final posture of robot arm

Fig. 5 Result of experiment

Fig. 6 Result of simulation

参考文献

- (1) 花原和之・他2名, 動的振舞いを考慮した適応トラスの動作計画 (冗長自由度の活用による振動の軽減), 機論, 63 - 608, C(1997-4), 1139-1145.
- (2) 花原和之・他2名, 冗長自由度を利用したロボットアームの振動軽減 (2次元アームによる実験), 第5回ロボティクスシンポジウム予稿集, (2000-3), 196-201.
- (3) 大川不二夫・他2名, フレキシブルアームの簡単化デジタル制御機論, 65 - 629, C(1999-1), 154-159