

柔軟線状物体の力学モデリングにおける粘弾性同定

松原 健二 松山 吉成 平井 慎一 (立命館大学)

Viscoelasticity identification in dynamic modeling of flexible linear objects

Kenji Matsubara, Yoshinari Matsuyama, and Shinichi Hirai (Ritsumeikan Univ.)

Abstract: In this paper, we show viscoelasticity identification and modeling method of flexible linear objects. First, we measure bending deformation of spring steel objects and identify their bending rigidity. Secondly, we measure free oscillation of spring steel objects and identify bending viscosity. Finally, we model flexible linear objects and simulate their dynamic deformation using viscosity and rigidity coefficients.

1. 緒言

近年、工場では無人化・自動化が活発に進められており、特にフレキシブルケーブルやフレキシブル基盤に代表される柔軟部材の組み立て作業の自動化に関する技術研究が行われている。柔軟線状物体の操作には線状物体のモデリングが重要であり、線状物体の動的シミュレーションの研究¹⁾などが行われている。

本稿では、柔軟線状物体のモデリング方法にパーティクルベースモデリングを用いモデル化すると共に、柔軟線状物体の対象とするバネ鋼 (SUP3) のモデルに即した粘弾性同定を行う。そして線状物体の動的シミュレーションを行い実際の変形と比較することによって、この粘弾性同定方法がパーティクルベースモデリングに適した手法であることを検証する。

2. 柔軟線状物体のモデリングと粘弾性同定方法

バネ鋼の形状変化を表現するためにパーティクルモデリングを用いる²⁾。対象とするバネ鋼 (厚さ:0.1[mm], 幅:4.2[mm] 長さ:200.0[mm]) を64点の質点に近似し、各質点間を曲げ Voigt モデルでつなぐ。そしてその Voigt モデルの弾性項と粘性項を設定することにより、線状物体の柔軟な形状変化を表現する。

線状物体の曲げ弾性同定は Fig.1 よりバネ鋼を自重により全長に等分布荷重を受ける片持ち梁として考える。バネ鋼の長さを l 、当分布荷重を ω とすると、変位量 v と曲げ剛性 EI の関係式は、

$$v = \frac{\omega l^4}{8EI} \quad (1)$$

となり、曲げ剛性 EI が計算できる。

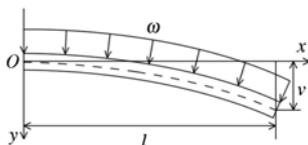


Fig.1 Uniformly-distributed loaded cantilever

線状物体の曲げ粘性同定はバネ鋼に自重による落下の自由振動を与えることで粘性減衰係数を測定する。Fig.2 より振動の山 (極大値) に着目して隣り合う振幅の大きさを順次、 $a_1, a_3, \dots, a_i, a_{i+2}$ で表し、 T は周期、 m はバネ鋼の質量、 c は粘性減衰係数、 ε は単位質量あたりの粘性減衰係数を示す。各振幅の間には、

$$\frac{a_i}{a_{i+2}} = e^{\varepsilon T} \quad (2)$$

なる関係があり、

$$\varepsilon = \frac{\ln e^{\varepsilon T}}{T} \quad (3)$$

と

$$c = 2m\varepsilon \quad (4)$$

から粘性減衰係数 c が計算できる。バネ鋼の振動とシミュレーションの振動を比較するために、隣り合う振幅の山と周期を比較する対数減衰率 δ を用いる。 m は周期数である。

$$\delta = \frac{1}{m} \cdot \ln \frac{a_i}{a_{i+m}} \quad (5)$$

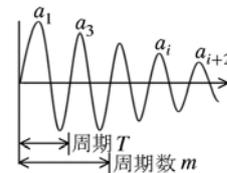


Fig.2 Free oscillation

3. 粘弾性同定実験

2 節の弾性同定方法を用いてバネ鋼の弾性同定を行う。バネ鋼の長さ l を 10.0[mm] 刻みで 50.0[mm] ~ 150.0[mm] の間で変化させ、その時の変位量 v を逐次測定する。以上の測定を計 3 回繰り返し、式 (1) を用いて曲げ剛性 EI を算出した結果を Fig.3(a) に示す。そして算出した曲げ剛性 EI をモデリングに適応させるため、 EI を各質点間の長さ n で割ることによって質点間の曲げ弾性係数 k_{bend} を求める。

$$k_{bend} = \frac{EI}{n} \quad (6)$$

次にバネ鋼の粘性同定を行う。2 節の粘性同定方法を用いて、バネ鋼の長さ l を 10.0[mm] 刻みで 90.0[mm] ~ 150.0[mm] の間で変化させる。そして自重による自由振動を起こし、バネ鋼先端の位置をレーザー変位センサを用いて計測する。以上の測定を計 3 回繰り返し、式 (2), (3), (4) を用いて粘性減衰係数 c を算出した結果を Fig.3(b) に示す。そして算出した粘性減衰係数 c を測定時の長さ l で割り粘性率 D とし、曲げ剛性と同等に考えるため断面 2 次モーメント I を掛け曲げ粘性 DI

とする．そして各質点間の長さ n で割ることによって質点間の曲げ粘性減衰係数 b_{bend} を求める．

$$D = \frac{c}{l} \quad (7)$$

$$b_{bend} = \frac{DI}{n} \quad (8)$$

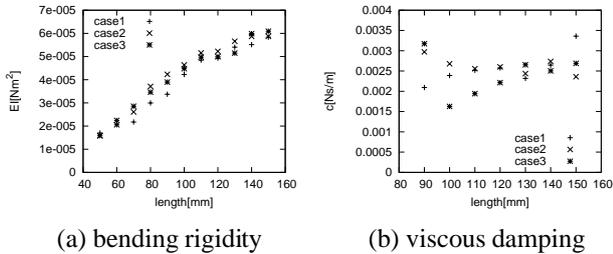


Fig.3 Viscoelasticity of spring steel

4. シミュレーションと同定結果の比較

3節より求めた測定長さ毎の曲げ弾性係数 k_{bend} と曲げ粘性減衰係数 b_{bend} を用い，バネ鋼の固定部から自由端までの長さを 10.0[mm] 刻みで 50.0[mm] ~ 150.0[mm] と変化させシミュレーションを行う．100.0[mm] 時のシミュレーション結果を Fig.4 に先端位置の y 座標変化を Fig.5 示す．そしてバネ鋼の先端変位とシミュレーションの先端変位を比較した結果を Fig.6(a) に示す．そしてバネ鋼の先端の振動とシミュレーションの先端の振動を比較するために式 (5) を用い，対数減衰率 δ をそれぞれ算出した結果を Fig.6(b) に示す．

シミュレーションと測定の変位結果の比較から分かるように，先端位置の変位はバネ鋼長さが長くなるに従って，変位差が大きくなっている．これは，曲げ剛性同定方法がバネ鋼が微小変形をすると仮定しているからであり，バネ鋼の長さが長くなるに従って変形量も大きくなるので誤差が大きくなる事が分かる．次に対数減衰率について比較した結果だが 110.0[mm] 付近ではシミュレーションと測定値と近い値を示しているが，離れるに従って誤差が大きくなっている．そしてシミュレーションは測定結果と異なり長くなるに従って対数減衰率が減少している．

5. 結言

本稿では，柔軟線状物体のモデリング方法にパーティクルベースモデリングを用いモデル化を行い，モデルに即した粘弾性同定を行った．そしてシミュレーションと実際の変形を比較することによって，この粘弾性同定方法がパーティクルベースモデリングに適した手法であることを検証し，弾性項は，粘性項は一部のみ測定値と近い結果を得た．今後は柔軟線状物体の操作を含めた動的シミュレーションを実現する．

参考文献

- 1) 山崎, 若松, 妻屋, 荒井, 平井: "接触を考慮した線状物体の動的変形シミュレーション", 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 2C22(CD-ROM), 2006.9
- 2) 松山, 平井: "柔軟円形ロボットの外殻変形形状と跳躍量の関係の実験的解析", 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 3F22(CD-ROM), 2006.9

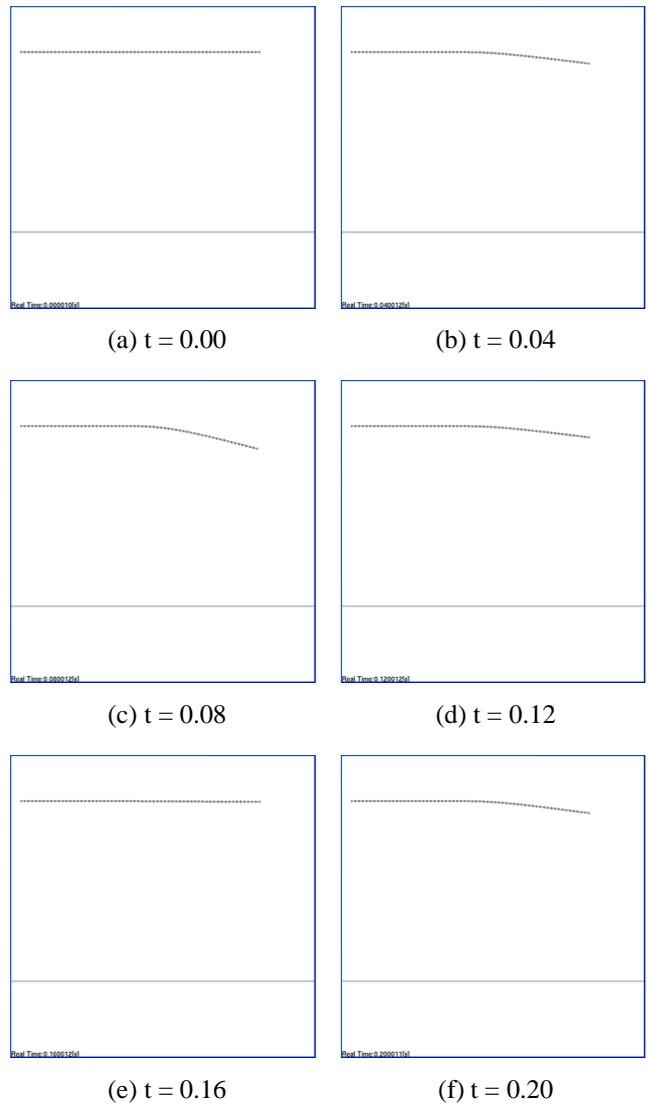


Fig.4 Simulation in length of 100[mm]

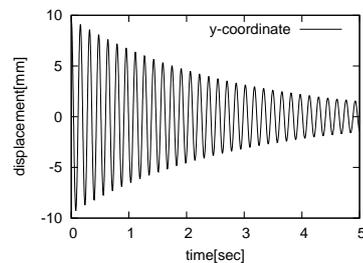


Fig.5 Free oscillation in simulation

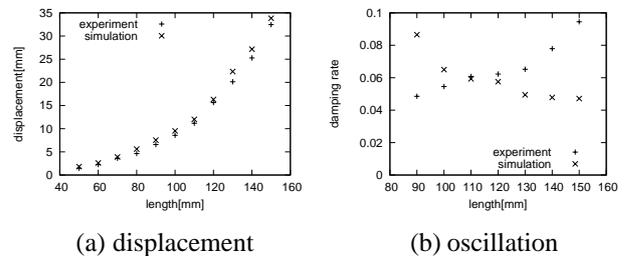


Fig.6 Comparison between experiment and simulation