

半球型柔軟指の指先力減衰特性

Fingertip Force Attenuation Property of a Hemispherical Soft Fingertip

正 井上 貴浩 (岡山県大) 学 濱野 祐哉 (日星電気株式会社) 正 平井 慎一 (立命館大)

Takahiro INOUE, Dept. of Human Information Engineering, Okayama Pref. Univ., inoue@ss.oka-pu.ac.jp

Yuya HAMANO, Okayama Prefectural Univ., NISSEI ELECTRIC CO., LTD.

Shinichi HIRAI, Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

This paper proposes a transfer function model for a hemispherical soft fingertip which is usually used for object grasping and manipulation by means of robotic hands. We estimate two kinds of transfer function relating to the soft fingertip deformation and elastic forces induced by repetitive sinusoidal compression to the normal direction. Finally, this study exhibits reasonable transfer function models of the soft fingertip.

Key Words: Soft fingertip, Frequency response, FFT analysis, Transfer function, Elastic force.

1 緒言

ロボットハンドによる対象物体の把持と操りタスクにおいて、指先に柔らかい素材を用いることが多い [1, 2]。それらの指先は、シリコンやポリウレタン樹脂を用いてモールド加工し円筒型や半球型に成型される。これらを総称してエラストマー材料というが、その柔軟性や容易に大変形することが物体把持や操りに極めて有利であることは広く知られている。それゆえに、柔らかい指先 (以下では柔軟指と呼ぶ) がロボットハンドに取り付けられ、把持操り実験において安定的な物体制御が可能となっている [3, 4]。また、把持物体の姿勢計算を実時間で処理できる視覚フィードバックを施した実験例においても操り動作は安定しており、100 ms の制御周期の遅れに対しても姿勢制御がロバストであることが報告されている [5, 6]。このように、多くの実験において柔軟指による安定把持効果を実証されているが、一方で安定性に関する理論的な根拠は不足している。つまり、数値解析が必要となる柔軟指や柔軟材料の弾性係数や静止摩擦係数の同定は多く行われているが [2, 7, 8]、これらの物理パラメータは材料が有する静特性であり、粘性係数を含めた動特性のモデル化や議論はほとんど見られない。

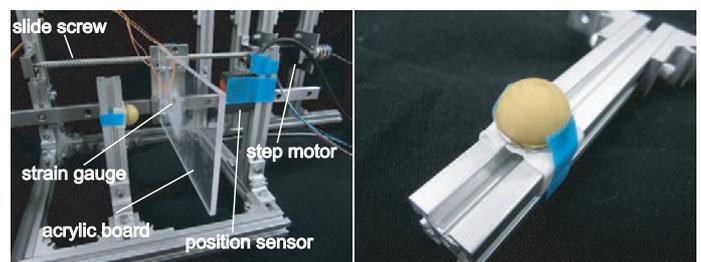
このようなことから本研究では、ポリウレタン樹脂で製作された直径 20 mm の半球型柔軟指への押し込み変位入力に対する指先変位及び指先弾性力の伝達関数モデルを導出する。いずれの伝達関数においても厳密にプロパーであると仮定した上で、結果から指先変位に対する伝達関数の相対次数が 2 次であり、指先弾性力に対する伝達関数の相対次数が 1 次であることを示す。また、得られた伝達関数モデルを解析することで、柔軟指による把持接触が極めて安定な動作であることを明らかにする。

2 半球型柔軟指への動的繰り返し圧縮実験

本章では、半球型柔軟指に対して垂直に正弦波押し込み変位入力に加え指先変位及び指先弾性力を計測することで、それぞれの伝達関数モデルを同定する。

2.1 実験装置と実験方法

図 1 に柔軟指押し付け実験装置と直径 20 mm の半球型柔軟指を示す。また、システム構成の概略は図 2 のようになる。まず、滑りネジ上のステージに取り付けられたアクリル板を並進移動させ柔軟指に垂直に接触させる。ここでは、ステッピングモータにより高精度な移動を実現している。アクリル板のこの移動により柔軟指が押し込まれ、大変形に起因する指先弾性力が生じる。



(a) apparatus

(b) soft fingertip

Fig.1 The left figure shows an overall view of experimental setup for compressing a hemispherical soft fingertip; the right figure shows the fingertip made of polyurethane materials, and its diameter is 20mm.

このときのステージ移動量を d_s 、垂直押し込み量を d 、弾性力を F とする。また、動作中の押し込み量はレーザ変位計 (位置センサ) を利用し、アクリル板を透過し指先に当たることで測定する。加えて、ひずみゲージを温度補償のためにアクリル板両面に貼付し、2 ゲージ法により計測し指先弾性力を求める。ステッピングモータへの正弦波状の指令入力は、押し込み量が最小 1 mm から最大 5 mm までの往復変位信号であり次式となる。

$$f^{\text{ref}}(t) = 2 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + 3 \text{ [mm]}. \quad (1)$$

なお、上式の入力信号はマイコンで整形しシステム全体の制御系も同様にマイコンにより構築している。また、正弦波入力信号の周波数を 1 rad/s から 64 rad/s まで試行ごとに順次増加させ、61 通りの試行を行う。

2.2 実験結果

紙面の関係から、往復運動が最も遅い $\omega = 1 \text{ rad/s}$ の結果と最も速い $\omega = 64 \text{ rad/s}$ の結果を、図 3 と図 4 にそれぞれ示す。両結果とも (a) 図に滑りネジ上のステージの正弦波軌道と実際の指先変位を表し、(b) 図に指先弾性力を示している。

まず、図 3 から考察する。(a) 図よりステージ移動量に対して最大変位比較で約 72%、振幅比で 69% まで減衰していることが分かる。これは、大変形により増大する指先弾性力の影響によりアクリル板がたわんだためである。このたわみ量を利用して貼付したひずみゲージにより求めた指先弾性力が (b) 図となる。両図を観察すると、3.5 mm という比較的小さな指先変位量で 10 N

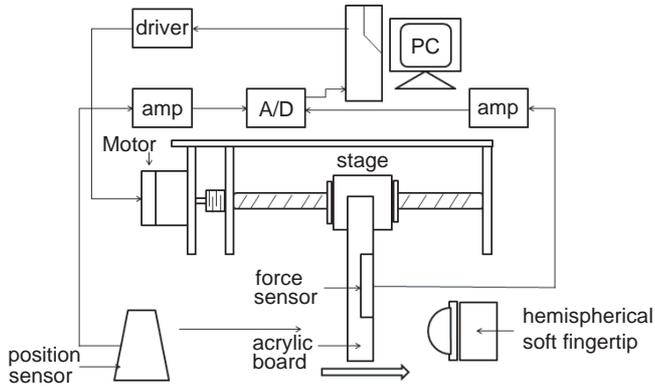
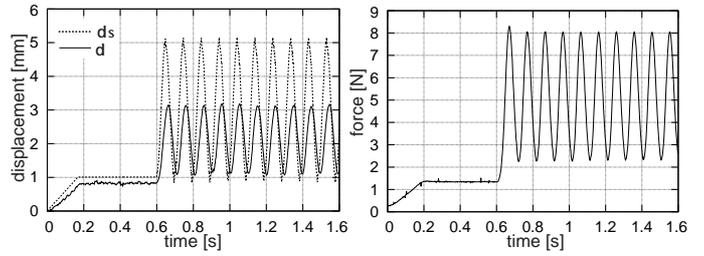
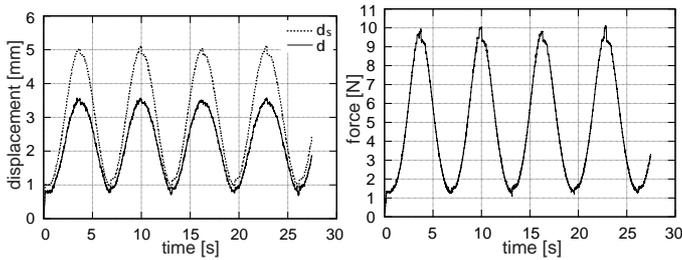


Fig.2 A system configuration of repetitive compression test of soft fingertip.



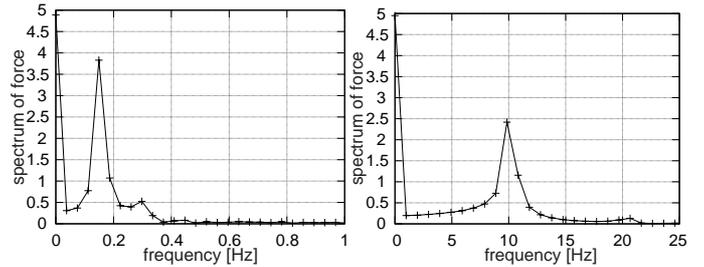
(a) displacement, d (b) fingertip force, F

Fig.4 Experimental results of fingertip displacement and elastic force when compressing a soft fingertip in the case of $\omega = 64$ rad/s: $T = \pi/32$ sec.



(a) displacement, d (b) fingertip force, F

Fig.3 Experimental results of fingertip displacement and elastic force when compressing a soft fingertip in the case of $\omega = 1$ rad/s: $T = 2\pi$ sec.



(a) $\omega = 1$ rad/s (b) $\omega = 64$ rad/s

Fig.5 Results of frequency analysis by means of FFT.

程度の大きな力を生成していることが分かる。これは、半球形状による変形時の接触面積の急激な増大に起因する。また、(b)図においては応答波形が横軸に対して非対称になっている。つまり、弾性力の増大時に上向きに尖形になる傾向がある。なお、(a)図のステージ移動量（点線）の5 mmの折り返し点において波形が乱れている。これは、ステージ移動量を求めるために滑りネジに取り付けたロータリーエンコーダの分解能の低さに起因する。

次に、図4に関して考察を加える。この実験結果は、指令入力周波数を64倍にしたものである。(a)図から分かるように、ステージ移動量に対して最大変位比較で約63%、振幅比で51%まで大きく減衰している。このように、柔軟指への変位入力が高周波になることによって、指先変位量の最大値よりその振幅の減衰率が高いことが明らかになった。他言すると、指先大変形時の大きな弾性力による形状復元は速いが、一方で速い接触においては小変形時の指先復元速度が相対的に遅れることを意味している。他方で、(b)図からは最大で約8 N、振幅で5.8 Nの応答となっていることが分かる。したがって、図3-(b)の振幅が8.7 Nであることと比較すると、指先変位量に加えて指先弾性力も高周波変位入力に対して大きく減衰することが明らかになった。さらに、図4-(b)では、応答波形が横軸に対してほぼ対称になっており低周波入力の結果で見られた尖形は見られない。この差異を検証するために、両指先力をフーリエ変換し周波数特性を観察する。得られた結果が図5となる。

まず、本章の二つの実験において指令正弦波入力の周波数は0.16 Hz (1 rad/s) と10 Hz (64 rad/s) である。よって、(a)、(b)図から指先力には、入力周波数に等しい信号成分を多く含んでいることが理解できる。加えて両図を比較すると、高周波領域

ではスペクトルの山が一つであるのに対して、低周波領域では山が二つ存在していることが明確になる。このように、0.3 Hzにおける二つ目の山が図3-(b)に見られる上向きへの尖形を表していると考えられる。

3 半球型柔軟指の伝達関数モデルの推定

本章では、前章で得られた61通りの指先変位と指先弾性力のデータからそれぞれのゲインと位相を次式を用いて求める。

$$g_d = 20 \log \left| \frac{d}{d_s} \right|, \quad \phi_d = \frac{\delta T_d}{T_d}, \quad (2)$$

$$g_F = 20 \log \left| \frac{F}{d_s} \right|, \quad \phi_F = \frac{\delta T_F}{T_F}. \quad (3)$$

上式において、 T_d 、 T_F は指先変位波形と指先弾性力波形それぞれの周期であり、 δT_d 、 δT_F は波形の時間遅れを表している。なお、これらの値は生データから読み取ることによって得られ、波形4つ分の平均値としている。したがって、入力をステージ移動量 d_s とした上で、指先変位の伝達関数 $G_d(s)$ と指先弾性力の伝達関数 $G_F(s)$ を推定する。なお、具体的な推定作業においては数値解析ソフトウェア(MATLAB)を用いて行う。

3.1 推定アルゴリズム

まず、両伝達関数に関して最適な分母多項式の次数を決定する。これには状態空間モデル推定器(n4sid関数)を用い、システムの入力から出力への遅延サンプル数(次数)を求める。遅延次数は当該伝達関数の分母の次数と同義であるため結果的に、 $G_d(s)$ の次数が3、 $G_F(s)$ の次数が2と決定する。次に、本稿で一連の柔軟指への動的圧縮実験から得られる入出力関係が厳密にプロパーなシステムに従うものと仮定する。この仮定より、 $G_d(s)$ に関しては分子多項式の次数を0、1、2のように変更した場合の最適次数を決定する。さらに、 $G_F(s)$ に関しては分子多項式の次数を0または1とし、最適次数を決定する。ここでの推

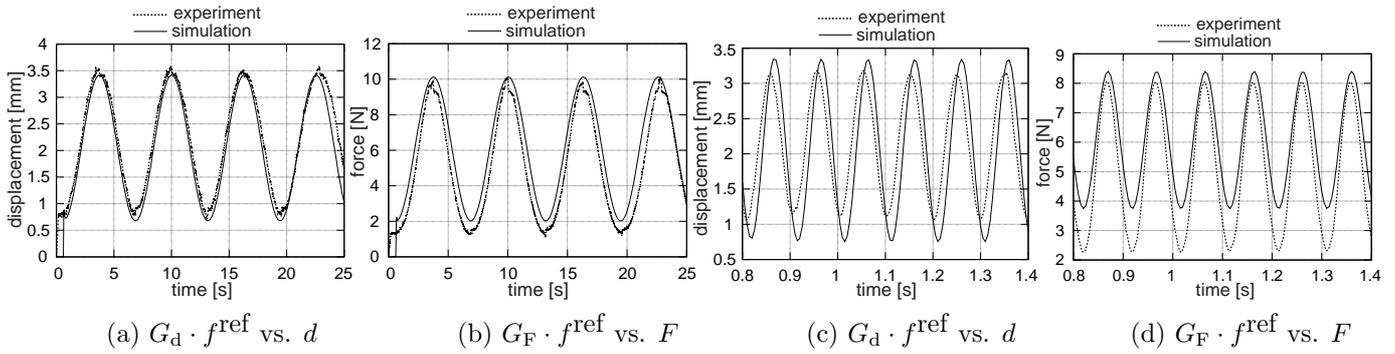


Fig.8 Comparison between experimental results and simulation results when applying input signals, Eq. (1), into the estimated transfer functions.

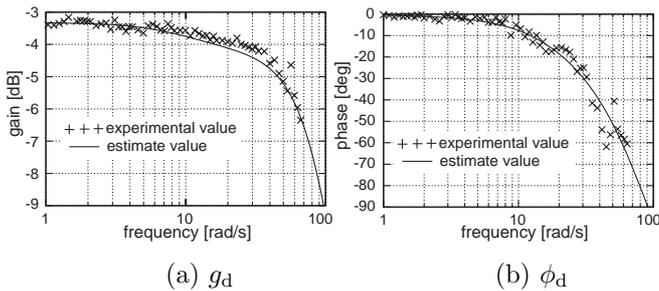


Fig.6 Bode diagram relating to fingertip displacement.

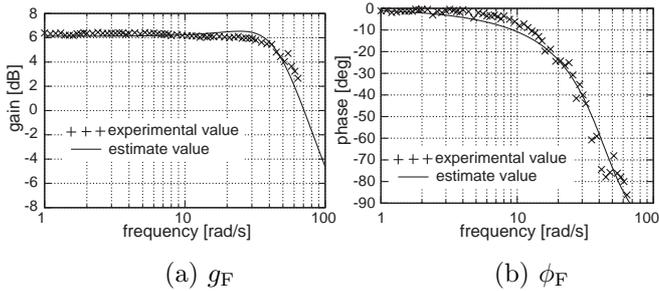


Fig.7 Bode diagram relating to fingertip elastic force.

定アルゴリズムは出力誤差（時系列誤差）モデル（oe 関数）を用い [9]，同時にモデル適応度を示す．

3.2 伝達関数の推定結果

図 6 に指先変位にかかわる伝達関数 $G_d(s)$ のゲイン・位相線図を，図 7 に指先弾性力にかかわる伝達関数 $G_F(s)$ のゲイン・位相線図をそれぞれ示している．ゲインと位相のすべての実験値を用いて前節の推定アルゴリズムを適用することで，次式のような伝達関数モデルを同定することができる．

$$G_d(s) = \frac{5080s + 55184}{s^3 + 137s^2 + 6730s + 80878}, \quad (4)$$

$$G_F(s) = \frac{40s + 4091}{s^2 + 56s + 2021}. \quad (5)$$

なお，この同定プロセスにおいて前述したように， $G_d(s)$ および $G_F(s)$ の分子の最適次数はいずれも 1 次であり，適応度はそれぞれ 79.25%，81.30% となっている．

3.3 伝達関数モデルと実験値との比較

最後に，前節で得られた伝達関数に式 (1) で示す指令入力を印加したときの時間応答を確認し，モデル化誤差が時間領域での程度存在するのかを検証する．比較結果を図 8 に示す．ま

ず，(a)，(b) 図は $\omega = 1 \text{ rad/s}$ での解析結果 $G_d(s) \cdot f^{\text{ref}}(s)$ 及び $G_F(s) \cdot f^{\text{ref}}(s)$ と図 3 の実験結果を比較したものであり，同様に，(c)，(d) 図では $\omega = 64 \text{ rad/s}$ での解析結果と図 4 の実験結果を示し比較している．結果から，高周波領域での応答にモデル化誤差が顕著に現れている一方で，低周波領域でのモデル化精度が良好となっている．これらは今後の課題としたい．

4 結言

本研究では，ロボットハンドによる物体把持や操り動作に利用されている半球型の柔軟指を対象として，その動特性を検証するために伝達関数モデルを導出した．本稿では，アクリル板を用いた指先への変位入力に対する指先の変位量および指先弾性力の二つの伝達関数を同定した．同定結果から，指先変位量が分母 3 次・分子 1 次の伝達関数を持ち，指先弾性力が分母 2 次・分子 1 次の伝達関数を持つことが明らかになった．

謝 辞

本研究の一部は，科研費基盤研究 A(15H02230)，公財 JKA 補助事業 (26-144, 27-146) の支援を受けて行われたものである．

参考文献

- [1] 井上，平井，"柔軟指による物体把持と操作における力学の実験的解明"，日本ロボット学会誌，Vol.25, No.6, pp.951-959, 2007.
- [2] 原田，辻，藤平，渡辺，宇都，山野辺，永田，北垣，"接触面を考慮したソフトフィンガ型把持の安定性解析"，計測自動制御学会論文集，Vol.51, No.2, pp.83-91, 2015.
- [3] 井上，平井，"柔軟指による把持物体の姿勢制御"，日本機械学会論文集 C 編，Vol.75, No.757, pp.2537-2546, 2009.
- [4] T. Inoue, D. Takizawa, and S. Hirai, "Modelless and Grasping-forceless Control by Robotic Fingers Capable of Mechanically Coupled Movement", IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.5875-5879, 2010.
- [5] T. Inoue and S. Hirai, "Robotic Manipulation with Large Time Delay on Visual Feedback Systems", IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, pp.1111-1115, 2010.
- [6] 井上，松井，平井，"視覚情報遅れを考慮した 2 指 1 自由度対ロボットハンドによる対向操り動作"，計測自動制御学会論文集，Vol.45, No.12, pp.678-687, 2009.
- [7] 山田，三田，藤田，土田，今井，"把握力制御のための静摩擦係数のアクティブ・センシング"，計測自動制御学会論文集，Vol.30, No.10, pp.1188-1194, 1994.
- [8] 永瀬，佐藤，脇元，嵯峨，鈴森，"柔軟ゴムデバイスをを用いた空気圧剛性可変フィンガの予測機能制御"，計測自動制御学会論文集，Vol.48, No.8, pp.470-478, 2012.
- [9] 富田，A.A.H. Damen, P. Van den Hof, "システム同定における式誤差規範 (EEM) と出力誤差規範 (OEM) の相違"，計測自動制御学会論文集，Vol.21, No.1, pp.50-55, 1986.