高速ビジョンを用いた弾性はりのダイナミック接触力推定

金子 真*・溝井 敏幸**・石井 抱*

Dynamic Contact Force Estimation of Flexible Beam through a High Speed Vision

Makoto KANEKO*, Toshiyuki MIZOI** and Idaku ISHII*

This paper discusses the way for estimating a dynamic contact force between a flexible beam and an environment by utilizing a high speed vision with an official frame rate of 1[kHz]. We utilize the equation of motion of flexible beam while a force is given at the end of the beam. The contact force can be estimated by solving the inverse problem where the contact force is estimated by measuring the shape of the beam by a high speed vision. We show that the contact force can be evaluated by knowing both the fixed point at base and another point on the beam. By utilizing the developed system, we also confirmed the basic idea experimentally.

Key Words: contact force estimation, high speed vision, dynamic force, flexible beam

1. ま え が き

構造が簡単、高応答、取り扱いが容易といった利点で、歪ゲージは最も一般的に普及している力計測素子である。ただし、歪ゲージは構造物に直接貼り付けて利用するため、f-MRI(functional-Magnetic Resonance Imaging)のように強い磁場環境やナノ・マイクロマニピュレータのように設置場所が制限を受ける環境では利用が困難となっている^{1)~4)}。このような問題に対処するため、金子らは、弾性はりの変形をビジョンで計測することによって環境との接触点と接触力を推定するビジョンベースト力センシングについて提案している^{5),6)}。この研究では弾性はりが任意の点で環境と接触することを想定し、接触位置にかかわらず、はり上の任意の二点の位置を計測することによって、原理的に接触点位置と接触力が推定できることを示している。また谷江らは外力によるシリコンシートの変形量をビジョンで処理することによって接触点を推定する方法を提案している⁷⁾。その後この研究は、永田ら、上山らによって引き継がれ^{8),9)}、さらに木下らによって接触力推定にまで展開されている¹⁰⁾。ただし、これらの研究は、いずれも動的効果が無視できる程度のゆっくりした運動(準静的条件下)に限定されていた。そのため、動的環境下での接触力を推定することは困難であった。

Fig. 1 Conceptual image of vision based force sensing

Fig. 2 A view of micro hand⁴⁾

* 広島大学大学院工学研究科 東広島市鏡山 1-4-1

** 三菱重工業(株) 紙・印刷機械事業部 三原市糸崎町 5007

* Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima

** MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD., Paper & Printing Machinery Division, Mihara, Hiroshima

(Received February 18, 2005)

(Revised May 16, 2005)

一方、近年、ビジョンシステムの高速化が進み、1[kHz]レベルの高速処理を実現する高速ビジョンシステムが使えるようになってきた^{11),12)}。これまでのビジョンが30[Hz]の処理速度を基準にしていたことを考慮すると、実に30倍以上もの高速化が図られたことになる。重要な点は、高速ビジョンの処理速度が、歪ゲージの応答領域(10[kHz])に近づ

Fig. 3 Explanation of searching line

いてきた点である。本研究では、このような点を踏まえて、Fig.1のように高速ビジョンを用いて弾性はり先端に接触力が作用した場合の動的接触力を推定する問題を取り扱う。この問題は、Fig.2のようにマイクロハンドが高速アクチュエータで対象物をマニピュレーションする状態を模擬したものと解釈することができる。筆者らが知る範囲において、高速ビジョンを用いて動的接触力を推定した研究例はない。

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では問題設定を行ない、3章では、はりの曲げ振動と接触力との関係を簡単に説明した後、接触力の推定アルゴリズムについて言及する。さらに、はりに加わる接触力に含まれている慣性力と静的な力との比を表わす無次元数 R を導入する。4章では、実機を用いて、本手法、準静的手法および歪ゲージによる直接測定法の3つ方法により力推定実験を行なう。特に慣性力の影響が大きくなるに伴い、準静的手法では力推定が難しくなるが、本手法では適切に推定が出来ることを示す。

2. 問題設定

Fig.1のような片持ちりを考える。静止状態の形状が直線で、単位長さあたりの質量 μ 、ヤング率 E 、断面二次モーメント I 、はりの全長 L は既知とし、はりの根元から先端まで一様であるとする。本研究で用いた仮定は以下のとおりである。

仮定 1: はりの粘性による振動の減衰は無視する。

仮定 2: はりのたわみ量は線形解析が成り立つ程度の微小量とする。 $y(L, t)/L < 0.1$ 。

仮定 3: 光学系の軸は z 軸に平行として、かつ、はりの運動は $x-y$ 平面内に限定する。

仮定 4: 外力 $F(L, t)$ は、はりの先端に y 方向に加わるものとする。

仮定 5: 外力の振動モード以外の振動モードは無視できるものとする。

上記の仮定のもので、Fig.3 に示す単純モデルを考える。ここで、はりのたわみ量を測定する領域をサーチラインと定義し、下記の問題設定を行なう。

問題設定:

(1) $F(L, t)$ を推定するために必要十分なサーチラインはいくつつか?

(2) 外力の推定アルゴリズムはどうなるか?

3. 推定原理

3.1 はりの曲げ振動方程式

Fig.3 に示すように外力が加わった場合の、曲げ振動方程式を考える。はりの微小部分における方程式は下記のように与えられる¹³⁾。

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = f(x, t) \quad (1)$$

$$f(x, t) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x < L) \\ F(L, t) & (x = L) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、(1) 式の一般解は得難いことから、はりのたわみ量に対し、以下の変数分離形を用いる。

$$y(x, t) = Y(x) \cdot q(t) \quad (3)$$

$$Y(x) = C_1 \cos\left(\frac{\alpha x}{L}\right) + C_2 \sin\left(\frac{\alpha x}{L}\right) + C_3 \cosh\left(\frac{\alpha x}{L}\right) + C_4 \sinh\left(\frac{\alpha x}{L}\right) \quad (4)$$

なお、 $q(t)$ については周期外力の場合(後述)には調和振動解を仮定することができる。

3.2 準静的条件下での力推定

準静的条件下では、慣性力を無視することが出来る。時間微分項を無視して(1)、(2)式を解くことで接触力 $F(L, t)$ は(5)式で与えることができる。

$$F(L, t) = \frac{3EI}{L^3} y(L, t) \quad (5)$$

(5) 式は力とたわみ量の関係に対応しており、材料力学の分野ではよく知られる関係である¹⁴⁾。

3.3 動的条件下での力推定

3.3.1 差分近似式を用いた一般外力の推定方法

強制外力 $F(L, t)$ が、はりの先端に加わるものを考える。

(1)、(3) 式より、時刻 $t = t_p$ における外力は一般的に

$$F(L, t_p) = EI \cdot q(t_p) \cdot Y''''(L) + \mu \cdot Y(L) \cdot q''(t_p) \quad (6)$$

と表わすことが出来る。一方で、固定端 ($x = 0$) における、はりのたわみ量、および曲げ角度は

$$Y(0) = 0 \quad (7)$$

$$Y'(0) = 0 \quad (8)$$

である。また、自由端 ($x = L$) における、はりの曲げモーメントは

$$Y''(L) = 0 \quad (9)$$

である。以上の境界条件を考慮すると、(3) 式は、

$$y(x, t) = Y(x) \cdot q(t) = W(x) \cdot C \cdot q(t) \quad (10)$$

$$W(x) = (\sin \alpha + \sinh \alpha) \left(\cos\left(\frac{\alpha x}{L}\right) - \cosh\left(\frac{\alpha x}{L}\right) \right) - (\cos \alpha + \cosh \alpha) \left(\sin\left(\frac{\alpha x}{L}\right) - \sinh\left(\frac{\alpha x}{L}\right) \right)$$

Fig. 4 Experimental system

と表わすことが出来る¹⁵⁾。(10)式を(6)式に代入すると、

$$F(L, t_p) = EI \cdot C \cdot q(t_p) \cdot W''''(L) + \mu \cdot W(L) \cdot C \cdot q''(t_p) \quad (11)$$

$$W''''(L) = \frac{2\alpha^4}{L^4} (\sinh \alpha \cos \alpha - \sin \alpha \cosh \alpha)$$

を得る。ここで、 $x = x_v$ 上にサーチングラインを設置すると、 $y(x_v, t_p)$ はビジョンセンサにより測定出来る。よって、(10)式より

$$C \cdot q(t_p) = \frac{y(x_v, t_p)}{W(x_v)} \quad (12)$$

を得る。また、(11)式の時間微分項は、差分近似式を用いることで、たとえば

$$q''(t_p) = \frac{q(t_p - 1) - 2q(t_p) + q(t_p + 1)}{\Delta t^2} \quad (13)$$

と表わすことができる。(11)式に(12)、(13)式を代入することで、はりの先端に加わる力は下式で表現出来る。

$$F(L, t_p) = EI \cdot \frac{y(x_v, t_p)}{W(x_v)} \cdot W''''(L) + \mu \cdot W(L) \cdot \frac{y(x_v, t_{p-1}) + 2y(x_v, t_p) - y(x_v, t_{p+1}))}{W(x_v) \Delta t^2} \quad (14)$$

(14)式は、はり上の任意の一点を測定することで、はりの先端に加わる外力 $F(L, t_p)$ を推定できることを示している。これより、2章で示した問題設定に対する回答は「(14)式より、一般外力 $F(L, t)$ は1つのサーチングラインで推定できる。」

3.3.2 解析解を用いた周期外力の推定方法¹⁶⁾

ここでは、周期外力 $(F_0 \sin \omega t)$ が、はりの先端に加わるという特別な環境を取り扱う。この場合、はりは調和振動を行なうと仮定できるため、(3)式の時間項を

$$q(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t$$

とおくことができる。境界条件は、(7)~(9)式、およびせん断力ははりの先端に加わる外力と等しいことから、

$$EI \cdot Y'''(L) \cdot (A \cos \omega t + B \sin \omega t) = -F_0 \sin \omega t \quad (15)$$

得る。以上の境界条件と(3)式より、時刻 $t = t_p$ における

Fig. 5 The geometrical relationship among the beam, the motor, and the high speed vision.

接触力は(16)式で与えられる。

$$F(L, t_p) = y(x_v, t_p) \left\{ \frac{2EI\alpha^3(1 + \cos \alpha \cosh \alpha)}{L^3} \right\} / \{ (\sin \alpha + \sinh \alpha) \left(\cos \frac{\alpha x_v}{L} - \cosh \frac{\alpha x_v}{L} \right) - (\cos \alpha + \cosh \alpha) \left(\sin \frac{\alpha x_v}{L} - \sinh \frac{\alpha x_v}{L} \right) \} \quad (16)$$

ただし、

$$\alpha^4 = \mu L^4 \omega^2 / EI \quad (17)$$

(16)式にロピタルの定理を適用すると、下記の関係式を得る。

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} F = \frac{3EI}{L^3} y \quad (18)$$

これより、(16)式を準静的条件下に収束させた(18)式は、(5)式と一致することがわかる。ここで、変位の代表値を y_{max} として(1)式を空間微分項 f_s と、時間微分項 f_d に分解してそれらのオーダーを評価すると以下のようになる。

$$f_s = EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (19)$$

$$\simeq EI \frac{y_{max}}{L^4} \quad (20)$$

$$f_d = \mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (21)$$

$$\simeq \mu y_{max} \omega^2 \quad (22)$$

ここで、無次元数 R をつぎのように定義する。

$$R = \frac{f_d}{f_s} = \frac{\mu L^4 \omega^2}{EI} \quad (23)$$

R は実質的に慣性力と静的な力の比を表わしており、 R が大きくなるほど、はりに加わる接触力に含まれる慣性力の割合が大きくなることを意味する。なお、この R は(17)式の α^4 と厳密に一致している点に注目されたい。

Fig. 6 The geometrical relationship between the beam and force sensor stick

4. 実験

4.1 実験方法

実験システムの外観を Fig.4 に示す。実験では、直径 1[mm] で長さ 110[mm] のはりをを用いた。Fig.5, Fig.6 はそれぞれ、はりとモータと高速ビジョン、はりとフォースセンサスティックとの幾何学的関係を示す。一端をモータに、他端にはフォースセンサスティックを垂直に取り付けたアームを

$$y = y_0 + y_1 \sin \omega t \quad (y_0 \geq y_1)$$

で振動させて、はりに力を加えた。フォースセンサスティックには、はりに加わる力を直接測定するために、歪ゲージを取り付けている。ただし、歪ゲージにより測定される値は、歪ゲージを取り付けているフォースセンサスティック先端部分の慣性力も同時に計測してしまう点に留意されたい。そこで、予備実験として、フォースセンサスティックのみを振動させ、フォースセンサスティックをはりに接触させない状態で歪ゲージから出力される値を計測した。Fig.7 はそのときの歪ゲージ出力を力に換算した値である。フォースセンサスティックを振動させる速度を早くするにつれて、慣性力の影響は徐々に大きくなることがわかる。ここでは、歪ゲージによる力推定値として、実際の歪ゲージの出力値から、予備実験で得たフォースセンサスティックの慣性力を引いたものを用いる。Fig.8 に、 $R = 0.19, 0.34, 0.49, 0.64$ の場合の、歪ゲージから実際に出力された値とフォースセンサスティック部の慣性力を差し引いた真の接触力推定値を示す。R を大きくするに従い、力の振幅は小さくなるが、逆に、フォースセンサスティックの先端部分の慣性力は R を大きくするにつれて大きくなる。以上より、R を大きくする場合、正確に接触力を評価するためには歪ゲージにより得られた値から、フォースセンサスティック先端部分の慣性力を推定しなければならないことがわかる。

本実験では簡単化のために、周期外力を想定し、差分近似式を用いた手法((14)式)と解析解を用いた手法((16)式)の、2通りの力推定実験を行なった。これらの実験で用いたビジョンセンサは Photron 社の MmVision camera head で、このカメラは 1024×1280[pixel] の解像度を有し、64×64[pixel]

Fig. 7 Dynamics of force sensor stick

Fig. 8 Contact force estimation by strain gauge

のウィンドウを 1[kHz] の周波数でサンプリングできる。はりの変位測定のためには、背景を黒く統一し、はりは白いものを用いた。Fig.9 に、1本のサーチングラインによる変位測定の概念図を示す。ビジョンセンサは 1024×1280 のピクセル数を有するが、今回の実験で変位測定に用いたサーチングラインのサイズは 1×512[pixel] とした。この場合、1ピクセルが 30[μm] に対応し、力に換算すると分解能は 0.001[N] となる。はりの画素重心位置を測定するために、8ビットのグレイスケールに対し閾値を設け 2 値化する。今回の実験では、サーチングラインの固定座標 x_v をはりの根元から 90[mm] の距離に設けた。このサーチングライン上で $t = t_p$ におけるはりの画素重心位置 $y(x_v, t_p)$ を測定する。この変位量を (14) 式、あるいは (16) 式に用いることで、接触力 $F(L, t_p)$ が推定される。

差分近似式による外力の推定について、ノイズの影響を予備実験により確認した。入力 S とノイズ N の比とサーチングラインの本数との関係を Fig.11 に示す。サーチングラインが 1 本の場合は、真値以上にノイズが介在するが、

Fig. 9 Explanation of searching line

Fig. 10 Conceptual image of 16 searching lines

Fig. 11 Relationship between the accuracy and searching line

サーチングラインを増やすことでノイズの影響が小さくなることがわかる。そこで、差分近似式による力推定の場合、Fig.10に示すように、16本のサーチングラインにより変位 $(y(x_{v1}, t_p) \dots y(x_{v16}, t_p))$ を測定した。ここで、

$$Y = [y(x_{v1}, t_p), \dots, y(x_{v16}, t_p)]^t$$

$$W = [W(x_{v1}), \dots, W(x_{v16})]^t$$

とすると、(10)式は、

$$Y = C \cdot q(t_p) \cdot W \quad (24)$$

と表わすことができる。擬似逆行列 $W^\#$ を用いて、次式のように $C \cdot q(t_p)$ を決定することができる。

$$C \cdot q(t_p) = W^\# \cdot Y \quad (25)$$

ただし、

$$W^\# = (W^t \cdot W)^{-1} \cdot W^t \quad (26)$$

したがって、(25)式を(14)式の $y(x_v, t_p)/W(x_v)$ に代入することにより、 $F(L, t_p)$ を推定することができる。このとき、サーチングラインを増やしたことで、サンプリングレートは300[Hz]まで低下した。一方、サーチングライン1本のみで変位を推定する(16)式を用いる手法では、サンプリングレート2[kHz]を実現することができた。

Fig. 12 Experimental results by using infinite differential approximation(2[sec])

Fig. 13 Experimental results by using infinite differential approximation(0.4[sec])

4.2 実験結果

4.2.1 差分近似式((14)式)を用いる場合

Fig.12に $R = 0.005, 0.08, 0.19, 0.34, 0.49, 0.64$ の場合の実験結果を示す。Fig.13は $R = 0.49, 0.64$ の場合の実験結果を時間軸で拡大したものである。それぞれの結果は、歪ゲージにより推定した接触力、準静的手法により推定した接触力および本提案手法((14)式)により推定した接触力を示す。 R が小さい場合、これら3つの方法により得られた力の値はよく一致している。 R を大きくするに従い、本提案手法から得られる力の値と、歪ゲージによる推定値は良く一致するが、準静的手法により得られた力の値は、ほかの2つからは離れてしまうことがわかる。このことから、 R が大きくなるに従い、準静的な手法では正確に力を推定できなくなることがわかる。

4.2.2 解析解((16)式)を用いる場合

Fig.14に $R = 0.005, 0.08, 0.19, 0.34, 0.49, 0.64$ の場合の実験結果を示す。Fig.15は $R = 0.49, 0.64$ の場合の実験結果を時間軸で拡大したものである。(16)式を用いる手法の、(14)式を用いる手法に対する決定的な有意性は、数値微分を行っていないために、ノイズが介在しない点である。

4.3 考察

Fig.16に、(16)式を用いた実験値、および本手法と準静的手法より得られる理論値の振幅が R を大きくすることで、

Fig. 14 Experimental results by using an analytical solution(2[sec])

Fig. 15 Experimental results by using an analytical solution(0.4[sec])

どのように変化するかを示す。これらの値は、準静的手法から推定できる力の振幅を A_s とし、それぞれの力の振幅を A_s で割ったものである。 R を大きくするにつれて、準静的手法から得られる値は変化しない。しかし、本手法から得られる値は徐々に減少し、 $R=1$ で 0 となる。 $R=1$ というのははりの固有振動数と同じ周期外力が加わった場合に対応する。この場合、外力が 0 であっても、振動が維持できることを意味している。Fig.16 より、実験結果は理論値とよく一致しているようすが伺える。なお、本研究で考察した力推定法は高速ビジョンだけでなく 30[fps] のビジョンに対しても適用可能である。ただし、その場合には固有振動数が 2[Hz] 程度の極端に低い対象物に限定されることに注意されたい。

5. ま と め

本稿では、高速ビジョンを用いて、片持ちはり対象との接触力をリアルタイムに推定する方法について提案した。

- 提案手法では原理的に 1 つのサーチングラインで力推定が可能であることを示した。
- (14) 式に示す差分近似解を用いることで一般外力の推定をサンプリングレート 300[Hz] で行なえることを確認した。
- 周期外力を想定した場合、(16) 式に示す解析解を用い

Fig. 16 Comparison of the experimental and the theoretical value

ることで、ノイズの介在しない力推定を行なった。そのときのサンプリングレートは 2[kHz] を実現した。今後は微分フィルタを組み込み、一般的な外力に対して考察を進めていきたい。

なお、本研究は 21 世紀 COE プログラム:「超速ハイパーヒューマン技術が開く新世界」の一環として行なわれたものである。

参 考 文 献

- 1) J.Z. Liu, et al.: Simultaneous measurement of human joint force, surface electromyograms, and functional MRI-measured brain activation, *Neuroscience Methods*, **101**, 49/57 (2000)
- 2) J.P. Kuhtz-Buschbeck, et al.: Human brain activity in the control of fine static precision grip forces: an fMRI study, *European Journal of Neuroscience*, **14**, 382/390 (2001)
- 3) N. Takahashi, M. Tada, J. Ueda, Y. Matsumoto and T. Ogasawara: An optical 6-axis force sensor for brain function analysis using fMRI, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Sensors* (2003)
- 4) T. Arai, T. Tanigawa and R. Larssonneur: Mechanism design and motion control of finger module for micro hand, *Journal of the Robotics Society of Japan*, **15**-3, 402/407 (1997)
- 5) M. Kaneko, N. Kanayama and T. Tsuji: Vision based active antenna, *Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2555/2560 (1996).
- 6) M. Kaneko, N. Kanayama and T. Tsuji: Vision based active antenna — basic considerations on two-points detecting method, *Proc. of the 1996 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems* (1996)
- 7) K. Tanie, et al.: A high-resolution tactile sensor, in *Robot Sensors*, **2**, Tactile and Non-Vision, A. Pugh, ed., IFS(Publications)Ltd, 189/198 (1986)
- 8) K. Nagata, T. Omata, W. Suzuki and M. Kakikura: Image based compliant tactile sensor, *Proc. of JSME Annual Conf. on Robotics and Mechatronics*, 687/688 (1994)
- 9) K. Kamiyama, H. Kajimoto, M. Inami, N. Kawakami and S. Tachi: "A vision-based tactile sensor", *Proc. of the 2001 ICAT Int. Conf. on Artificial Reality and Telexistence*, 127/134 (2001)
- 10) G. Kinoshita, Y. Kurimoto, H. Osumi and K. Umeda: Dynamic contact sensing of soft planar fingers with tactile sensors, *Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics*

and Automation, 565/570 (2001)

- 11) I. Ishii, et al.: High speed mega-pixel vision with intelligent scanning, *Proc. of the 20th Annual Conf. of the Robotics Society of Japan*, 3A15 (2002)
- 12) I. Ishii, et al.: Development of MmVision(Mega-pixel and milli-second vision) camera head, *Proc. of the 10th Symposium on Sensing via Image Information*, 185/188 (2004)
- 13) K. Yasuda: Modal analysis and dynamic design, CORONA PUBLISHING CO., LTD. (1993)
- 14) J. Oda, A. Tsurusaki, S. Kida and K. Yamazaki: Material science, MORIKITA PUBLISHING CO., LTD. (1988)
- 15) K. Hongo and Y. Tsuyuki: Vibration, MORIKITA PUBLISHING CO., LTD. (1974)
- 16) M. Kaneko, T. Mizoi and I. Ishii: Real time contact force estimation using a high speed vision, *Proc. of the Annual Conf. on SICE System Integration Division*, 3A1-3 (2004)

=====

[著 者 紹 介]

金子 真 (正会員)

1981年, 東京大学工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年, 通産省工業技術院機械技術研究所入所。90年九州工業大学情報工学部機械システム工学科助教授。93年広島大学工学研究科複雑システム工学専攻教授。アクティブセンシングや把握戦略の研究に従事。日本ロボット学会, 日本機械学会, IEEE等の会員。21世紀COEプログラム:「超速ハイパーヒューマン技術が開く新世界」プロジェクトリーダー

溝井 敏 幸

2003年, 広島大学工学部第二類(電気系)卒業。2005年, 広島大学大学院工学研究科複雑システム工学専攻博士課程前期修了。同年, 三菱重工業(株)に入社, 現在に至る。高速ビジョンを用いたアクティブセンシングの研究に従事。

石井 抱 (正会員)

1994年, 東京大学大学院修士課程修了。1996年, 東京大学大学院博士課程中退。同年, 同大学大学院工学系研究科計数工学専攻助手。2000年, 東京農工大学工学部電気電子工学科講師, 2002年, 同助教授。2003年, 広島大学工学研究科複雑システム工学専攻助教授, 現在に至る。高速ビジョン, センサ情報処理の研究に従事。博士(工学)。

=====