

# 光学センサの動特性補償による安価な関節トルク計測

## Inexpensive Joint Torque Measurement by Dynamics Compensation of a Photo-interrupter

○学 西尾政紀 (阪大) 杉原知道 (阪大)

Masaki Nishio, Osaka University, masaki.nishio@ams.eng.osaka-u.ac.jp

Tomonmichi Sugihara, Osaka University

An inexpensive joint torque measurement is achieved. A photo-interrupter is used to sense a distortion of the joint axis due to the applied external torque. Despite the hardware system is setup at a low cost, an identification and compensation technique of the hysteresis characteristics in the strain body based on Bouc-Wen model improves the measurement accuracy.

*Key Words:* Torque measurement, Hysteresis compensation, Photo-interrupter, Bouc-Wen model

### 1. はじめに

現在製造業分野で実用されているロボットの多くは、精密・高速な位置決めを行うため、原則的に関節は「硬く」制御され、外界との不慮の干渉を避けるよう隔離された空間で動作する。一方、一般家庭での作業補助など、今後自動化が期待される作業の多くでは、外界と衝突・接触することが前提となる。このようなロボットの関節は、十分な位置決め精度を確保するための剛性と、接触時の柔軟性という相反する性質を兼ね備えていなければならない。制御性の良さから多く採用されてきた電磁モータと減速器の組み合わせでは、減速器内部の摩擦が柔軟性の障害となる。これを補償するために、外界から逆入力されたトルクを計測しフィードバックする技術が幾つか提案されている [1][2][3][4]。

上記の目的におけるトルクセンサは高即応性、高 S/N 比、低ヒステリシス等が求められる。現在広く用いられている歪みゲージ [3][5] は、センサ自体は安価であるが、付設や較正の困難さ、破損しやすさ等から、コスト増加につながっている。また、歪みによる磁歪を検出しトルクに変換するものは、一般に大型、低サンプリング周期、電磁気ノイズに弱いといった欠点がある。ほか、起歪体の変形を高精度に計測する方法 [4] も提案されているが、高価なセンサが必要となる。そのような中、フォトインタラプタを用いる方法 [6] は、起歪体の変形を受光量の変化として非接触に計測可能であり、センサも S/N 比が比較的高く小型かつ安価である。

以上より、本稿ではフォトインタラプタを用いた関節トルク計測方法を提案する。どのようなセンサを使うとしても、起歪体変形のヒステリシスやセンサ自体の動特性に起因する計測精度の低下は免れない。逆にこれらを同定し補償することで、安価なセンサであっても計測精度を向上できる可能性がある。特にヒステリシスが支配的な特性を表現し得るものとして、三要素モデルと Bouc-Wen モデルを採用し、筆者らのセンサシステム構成において後者がより補償性が高いことを確認した。

### 2. フォトインタラプタを用いたトルク計測

フォトインタラプタは、LED とフォトトランジスタ間の遮蔽物の侵入量に応じて受光量および出力電圧が変化する素子である。ロボットの関節において、図 1 に示すように減速器出力軸に近い側にスリットを切った遮光板を、梁（リンク）側にフォトイ

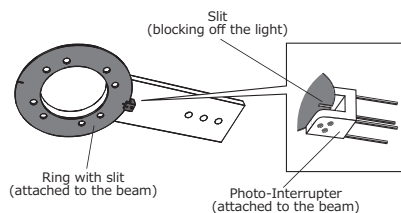


Fig.1 Schematic image of a photo-interrupter on a beam

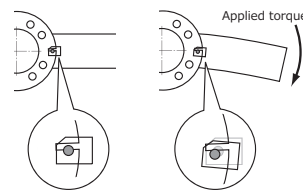


Fig.2 Ray sensed by the photo-interrupter is blocked off by douser when an external torque is applied.

ンタラプタを設置する。梁に外トルクが印加されると、図 2 に示すように梁の曲げ変形によってスリットとフォトインタラプタの間に相対変位が生じ、出力電圧が変化する。これにより印加されたトルクの大きさを推定することができる [6]。

上記の原理に基づくトルクセンサの特性を調べるために、印加トルクとセンサ出力電圧の計測実験を行う。フォトインタラプタを固定した梁 (A5052) とスリットを切った遮光板リング (A5052 黒アルマイト処理) を、ハーモニックドライブ SHG-14-80-2UH の出力軸にボルトで締結した。これは関節サーボ実験にも使用するためであり、本実験ではハーモニックドライブの入力軸を固定し印加トルクによる回転を防止した。ハーモニックドライブ出力軸中心から 100mm 離れた点に開いた孔にワイヤーを通し、これを介してフォースゲージで荷重を加え、フォースゲージの値をトルク換算し記録した。ただし、鉛直下向きに荷重を加えてトルクが生じる方向を正方向とした。また同時にフォトインタラプタの出力電圧をボルテージフォロア/増幅回路を通しデータロガーで記録した。

実験結果を図 3(a)(b) に示す。センサ出力電圧に、トルク換算で 2 [N・m] 程度ヒステリシスが生じていることが分かる。これは

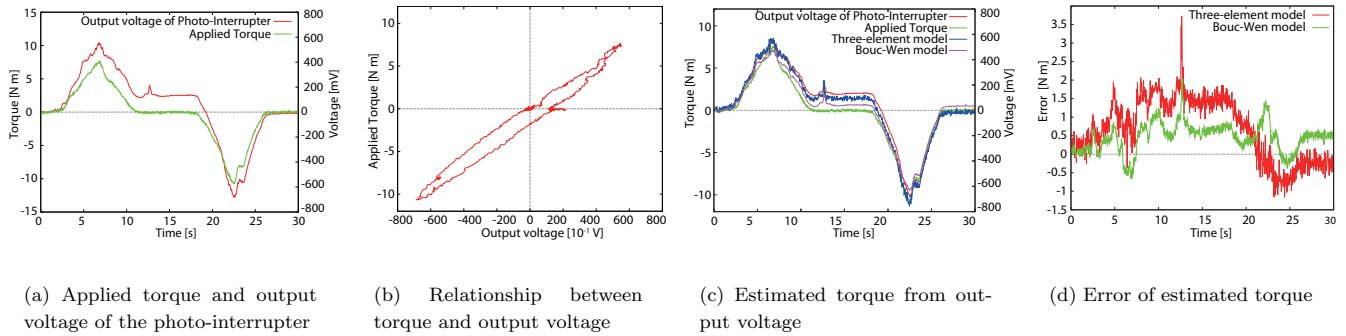


Fig.3 Measurement of applied torque and output voltage of the photo-interrupter and Estimated torque from output voltage

次の二つの原因が考えられる。

**ボルト締結部の滑り・がたの影響** ボルト締結している遮光板と梁との間に滑りが生じ、フォトインタラプタとスリットの相対位置が元の位置関係からずれて復元しなかった可能性がある。

**梁部材の塑性変形** 梁内部に微小な塑性変形が残存し、元の状態に復元しなかった可能性がある。

### 3. ヒステリシスを含むセンサの動特性補償

#### 3.1 動特性モデル

前節の問題に対し、本研究ではこれをソフトウェア的に補償することを考える。ヒステリシスを主とする動特性モデルとして、次の三要素モデルと Bouc-Wen モデル [7] が知られている。いずれのモデルにおいても、印加トルクを  $\tau$ 、フォトインタラプタの出力電圧を  $V$  とする。

##### I) 三要素モデル

バネとダンパを並列に接続した Kelvin-Voight モデルにさらに直列にダンパを接続したモデルであり、直列に接続されたダンパにより材料のヒステリシスを表現することができる。三要素モデルにおいて、応力  $\sigma$  を印加トルク  $\tau$  に、ひずみ  $\varepsilon$  をフォトインタラプタの出力電圧  $V$  にそれぞれ対応付けると、次式を得る。

$$(\eta_1 + \eta_2)\dot{\tau} + E\tau = \eta_1\eta_2\dot{V} + \eta_2E\dot{V} \quad (1)$$

ただし、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $E$  はパラメータである。

##### II) Bouc-Wen モデル

ランダムな入力に対して生じるヒステリシスのよいモデルとなる。次式で表される。

$$\dot{\tau} = A\dot{V} - (\gamma|\dot{V}|\tau|^{n-1} + \beta\dot{V}|\tau|^n) \quad (2)$$

ただし、 $A$ 、 $\gamma$ 、 $\beta$  は定数、 $n$  は整数である。

#### 3.2 モデルパラメータ同定と特性補償によるトルク推定

式 (1) における  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $E$  および式 (2) における  $A$ 、 $\gamma$ 、 $\beta$  を同定するため、 $-100 \sim 100$  [N] の荷重を無作為に与える実験を合計 10 回行った。同時に計測したフォトインタラプタの出力電圧とあわせ、それぞれの式において誤差の二乗和が最小になるようにパラメータを決定した。ただし Bouc-Wen モデルにおいては簡単のため  $n = 1$  とした。

それぞれのモデルと同定されたパラメータに基づいて印加トルクを推定した結果を図 3(c) に、その推定誤差を図 3(d) にそ

れぞれ示す。除荷後のヒステリシスは、三要素モデルによって約 35%、Bouc-Wen モデルによって約 75% それぞれ低減された。またトルク推定誤差は、三要素モデルでは  $-1 \sim 2$  [N·m]、Bouc-Wen モデルでは  $-0.5 \sim 1.5$  [N·m] であった。いずれのモデルにおいても、動特性補償しない場合と比べてより精度良くトルク推定できることが確認できた。特に Bouc-Wen モデルは三要素モデルに比べ、ヒステリシスの補償性能、推定精度両方の観点から良好な結果となった。

### 4. おわりに

モータ制御における減速器の摩擦補償を目的とした、フォトインタラプタによる関節トルクセンサにおいて、三要素モデルおよび Bouc-Wen モデルにより起歪体の動特性、特にヒステリシスを補償することで、トルク推定精度を向上できることを示した。センサが安価であり、また付設や較正に大きなコストが発生しないことが特長である。今後、モータ制御実験を通して要求推定精度を見極めながら、必要に応じてセンサ付設部の機械特性を考慮し部材や形状を工夫することで、さらに精度向上を目指す。

**謝辞** 本研究は、公益財団法人立石科学技術振興財団平成 24 年度研究助成金の支援を受けた。

### 文献

- [1] L.L. Tien, A.Albu-Schaffer. Friction observer and compensation for control of robots with joint torque measurement. In Proc. of *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 22–26, 2008.
- [2] 長阪ら. 理想関節ユニットを有したロボットへの一般化逆動力学の適用. 第 14 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 152–158, 2009.
- [3] L.E. Pfeffer et al. Joint torque sensory feedback in the control of a PUMA manipulator. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, Vol. 5, No. 4, pp. 418–425, 1989.
- [4] Kawakami et al. High-fidelity joint drive system by torque feedback control using high precision linear encoder. In Proc. of *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 3904–3909, 2010.
- [5] D. Vischer and O. Khatib. Design and development of high-performance torque-controlled joints. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, Vol. 11, No. 4, pp. 537–544, 1995.
- [6] Tsetserukou et al. Optical torque sensors for implementation of local impedance control of the arm of humanoid robot. In Proc. of *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, No. May, pp. 1674–1679, 2006.
- [7] Yi-Kwei Wen and M.ASCE. Method for Random Vibration of Hysteretic Systems. *J. Eng. Mech. Div.*, Vol. 102, No. 2, pp. 249–263, 1976.