電動アシスト自転車用超磁歪トルクセンサの開発

正員 角谷 和重 (三洋電機株式会社)

正員 横谷 和展 (三洋電機株式会社)

Development of a Torque Sensor using Giant Magnetostrictive Material for Electric Power-Assisted Bicycles

Kazushige Kakutani, Member (SANYO Electric Co., Ltd)

Kazunobu Yokotani, Member (SANYO Electric Co., Ltd)

We developed a new light-weight power-assisted bicycle using a giant magnetostrictive torque sensor, which is a new mechatronics product for individual use. The key components for power-assisted bicycles are sensors, which are vital for detecting the extremely large forces (maximum crank axle torque : about 160 Nm) of power exerted on the pedals by the riders. In this paper we propose a torque detection method that uses a giant magnetostrictive material with a high force detection sensitivity, where the capacity to resist stress is extremely large.

Improving the hysteresis has become an issue for raising the precision of force sensors that use giant magnetostrictive elements. As a method to improve the hysteresis, we focus on the point of integrating these force sensors into microcomputer-equipped digital control systems, and construct a detection circuit such that the magnetostrictive elements are expanded instantaneously by the application of a pulse magnetic field during the sampling of discrete sensor data. this paper also examines this hysteresis reduction method and reports the contents of an actual construction method for force sensors.

キーワード : 超磁歪材料、磁歪、ビラリ効果、トルクセンサ、ヒステリシス、パワーアシスト自転車

Keywords : giant magnetostrictive material, magnetostriction, Villari Effect, torque sensor, hysteresis, power-assisted bicycle

1. まえがき

高齢化社会、環境問題を背景に近年注目を集めている電動アシスト自転車は、人間がペダルを踏む力（トルク）を検出し、その情報を基に駆動モータをトルク制御する新しいタイプのパーソナルコンピュータである。使用者はモータ駆動部の操作方法を意識せずに通常の自転車と同じ感覚で操縦するだけで、約半分の走行負荷をモータが補助する。この補助割合を全駆動力の50%以下とすれば、“通常の自転車”として認められるため、取り扱いも簡単ということと急速な市場形成も始まっている⁽¹⁾。

電動アシスト自転車のキーコンポーネントとして、人間のペダル踏力という非常に大きな力（最大クランク軸トルク：約160Nm）の検出を、自転車機構というシンプルで限られたスペースにコンパクト且つ低コストで実現できるセンサが要求される。現在、そのセンサとしては、力伝達系に弾性要素を用い、機構を駆使した弾性変位量検出式トルクセンサが主に採用されている⁽²⁾⁽³⁾。しかし、この方式では、回転部で受ける力（弾性体の変位量）を機構的に固定部へ伝達しているため構造が複雑で大きくなる。また、バネ等の弾性変位で検出するため弾性係数が小さいとペダル作

動時に通常の自転車とは異なる違和感が生じる。

これらの課題を解決するためには、バネ等の弾性変位と変位の伝達機構を用いない検出方法が必要である。著者らは、強磁性体材料が圧縮応力により内部磁化が変化する磁歪の逆効果に着目し、磁化の変化をコイル等を用いて電気信号に変換することで、耐圧縮力が大きい金属材料を用いてダイレクトに力を検出する手法を提案する。

磁歪現象は、強磁性体に磁場を加えると、磁化ベクトルが磁場の方向に揃うように回転することで形状に変化を起こす現象である。なかでも飽和磁歪が1000ppmを超えるような材料を超磁歪材料⁽⁴⁾⁽⁵⁾ (Giant Magnetostrictive Material : GMM)と呼ぶ。また、エネルギー密度は $(2.3 \sim 36) \times 10^3 \text{ J/m}^3$ であり、圧電材料に比べて10～50倍と大きいことから、海洋ソーナ等の開発目的で1959年から米国海軍戦略研究所のA.E.Clarkらによって研究が進められてきた⁽⁶⁾。しかし、民生用への応用開発は歴史も浅く、以上の特徴を生かした特定用途のアクチュエータとして開発^{(6)～(8)}があるもののセンサとしての民生応用は報告がない。国内で唯一超磁歪材料の製造を行っているTDK(株)から圧力センサ⁽⁹⁾や振動センサ⁽¹⁰⁾の報告にみられる程度である。その理由の一つとして、超磁歪材料は、強磁性材料がもつ磁気ヒステリ

シス特性が大きい点が挙げられる。アクチュエータとして用いる場合は、歪み量等のフィードバックにより出力変位の制御が可能であるが、センサの場合は、そのヒステリシス特性がセンサ性能に直接影響を与える。

しかし、磁化の変化による寸法変化量が大きいことは、大きな外部応力による内部磁化の変化量も大きく、磁化（または、透磁率）検出用コイルを用いると、検出可能な力の範囲で大きな電氣的インピーダンス変化が得られるため、大応力用の高感度なデバイスの構成が期待できる。

そこで本研究は、超磁歪材料を用いた電動アシスト自転車用トルクセンサを開発し、そのセンシング性能を評価した。また、高精度化の最大の問題点となるヒステリシス現象についても考察を行い、超磁歪センサの民生応用としてマイコン搭載機器への組み込みを考慮したヒステリシス低減手法を提案し、その特性と効果についても検証した。

2. 電動アシスト自転車

<2・1> 全体構成 図1に電動アシスト自転車の概念図を示す。トルクセンサは、人間が自転車に与えるペダル踏力トルクをリアルタイム(数msでサンプリング)に検出するものである。パワーアシストコントローラは、この検出トルクに対してアシスト率(人間の踏力トルクに対する補助動力トルクの比率)100%以内で、モータにより自転車の駆動トルクを補助している。即ち、人間が自転車を漕いでいる状態では、踏力センサによりその踏力トルクを検出し、

図1 電動アシスト自転車の概念
Fig.1. Concept of the electric power-assisted bicycle

図2 電動アシスト自転車の制御ブロック図
Fig.2. Block diagram of a electric power-assisted bicycle

最大で踏力トルクと同等の補助トルクをモータが出力するため、アシストのない場合と同じ条件の負荷に対し、約半分の踏力となる。入力となる人間の踏力トルクがゼロの場合、アシスト率に関係なくモータは補助トルクを一切出力しない。しかし、操作上は、モータの駆動を意識する必要がなく、従来の自転車と全く同じであることが大きな特徴である。

図2に開発した電動アシスト自転車の制御ブロック図を示す。ここで、 $P(s)$ は人間が搭乗した自転車モデルで駆動トルク入力により駆動輪の回転速度を出力する。ブロック図では便宜上モータから駆動輪までの減速比を考慮したモータ軸の回転速度 ω を自転車モデルの出力としている。 τ_h は人間の踏力トルク、 τ_m はモータによる補助トルク、 τ_t は自転車を受ける負荷トルク、 τ_{mn} はモータ仕様にあるトルク定数 K_m と電流センサによる電機子電流値 i_a から求められる計算上のモータ補助トルクである。 τ_{ref} は踏力トルクセンサより得られたトルク値にアシスト率を掛けPI補償器への指令値としたものであり、 K_p は比例ゲイン、 T_i は積分時間を表す。モータへの印加電圧はPWM(Pulse Width Modulation)により与えており、 η_{pwm} はそのデューティ比を表し、バッテリー電圧値 V_{bat} によりモータ電圧 V_m が与えられる。DCモータは電機子抵抗 R_a 、インダクタンス L_a から得られる一般的なモデルである。制御装置は、トルクセンサ情報をパラメータとした適切なアシスト比率でモータ出力をトルク（電流フィードバック）制御している。電動アシスト自転車が通常の自転車の範疇であるためのレギュレーションとして、車速に対するアシスト率の制限がある。車速が15km/hまでは、アシスト率100%まで可能であるが、15km/hから24km/hまでアシスト率は比例漸減し、24km/h以上では0%、即ちモータによる補助を行ってはいけない。図1における速度センサはこの用途で搭載されている。以上のパワーアシスト制御において、より人間に快適なアシスト感を実現するためには、現状のレギュレーションであるアシスト率100%以内でどのようにアシスト力を制御するかが課題となる。その前提として制御系の入力となる踏力トルクの良好なセンシング性能が要求される⁽¹¹⁾。本開発での設計思想としては、従来のシンプルな自転車構造をできる限り変更することなく小型軽量な電動アシスト自転車を実現するために、トルク検出系とアシスト駆動系を独立に設計できるものとする。

<2・2> 踏力トルクセンサ 現在、既に商品化されている各社電動アシスト自転車の機構式踏力トルクセンサの一般的な構成を図3に示す。現行の電動アシスト自転車は、モータ出力軸からの合力機構も考慮して、その殆どが専用フレームを採用し、ペダルが取り付けられているクランク部にトルクセンサ機構を組み込んでいる。基本的構成は、無限回転するクランク軸とチェーンホイールの間に伝達トルクに応じて変位する弾性体を介在し、このトルクに応じて回転部での変位量をカムや遊星ギア等の機構を駆使して

図3 機構式踏力トルクセンサの一般的構成
Fig.3. Block diagram of a electric power-assisted bicycle

固定部での変位量に変換する。この変位量をポテンシオメータや可変インダクタンス、可変容量を用いて電気信号に変換し、人間の踏力トルクとの相関を求めることでセンサとして機能する。主な例としては、ペダル踏力トルクの入力からチェーンホイールまでのトルク伝達機構に遊星歯車機構を採用し、入力軸を遊星歯車のプレート回転軸、出力軸を外歯車とし、その間の伝達トルクの反力を受ける内歯車の回転をバネにより抑制する構成をとるものがある⁽²⁾。これにより、遊星歯車から外歯車までトルクが伝達されるときに反力をこの回転抑制バネが受けることになり、伝達トルクに比例してバネが押し縮められる。このバネの変位量をポテンシオメータで抵抗値の変化として検知する。また、別な方法として、クランク軸にトーションバーを採用し、トルクに応じた捻れ量をカム機構を用いてクランク軸と平行方向の変位に変換し、この変位量を直動式ポテンシオメータで抵抗値の変化として検知している例もある⁽³⁾。このときのクランク軸の捻れ量は、100Nmで5°といった設計になっている。以上の例に示す機構は、自転車の簡単な機構に対して極めて複雑な構成である。

本研究では、これら弾性変位量検出式トルクセンサとは違う方式として、超磁歪素子により力をダイレクトに検出する超磁歪トルクセンサを開発した。

3. 超磁歪素子を用いたトルクセンシング

<3-1> 超磁歪材料と応力検出原理 超磁歪材料は、磁気モーメント、磁気弾性エネルギーの大きいランタノイド系元素(Tb,Sm), およびこれと遷移金属元素(Fe,Co,Ni,etc.), との2元系立方晶RT₂(R:ランタノイド, T:遷移金属元素), との2元系立方晶RR'T₂(R':Dy<ジスプロシウム>, Ho<ホルミウム>など)を示し、現在、擬2元系のTb_{0.3}Dy_{0.7}T₂が商品化されている⁽⁴⁾。磁場による磁化の過程に伴う飽和磁歪は、鉄やニッケルがせいぜい数十ppmであるのに対し、超磁歪材料は1000~2000ppmの飽和磁歪をもつ材料である。表1に現在入手可能な超磁歪材料の諸物性⁽⁴⁾⁽⁵⁾を示す。磁界の印加により磁歪が起こる現象を磁歪効果といい、逆に機械的歪みにより内部磁化が変化する現象を磁歪の逆効果という。磁歪における電気(磁気)エネルギーと機械エネルギーの変

表1 超磁歪材料の諸物性
Table 1. Nominal properties of GMMs

材料名	PMS-1	PMT-1	Terfenol-D
製造元	TDK		ETREMA
製造方法	粉末冶金法		ブリッジマン法
磁歪量(ppm)	1450(H=3kOe)	1450(H=3kOe)	1500~2000
弾性率(kJ/m ³)	10	10	14~25
発生応力(N/cm ²)	3900(H=3kOe)	3900(H=3kOe)	—
密度(kg/m ³)	7,950	7,950	9,250
ヤング率(N/m ²)	2.0 x 10+E10	2.0 x 10+E10	2.5~3.5x10+E10
圧縮強度(N/m ²)	600 x 10+E6	600 x 10+E6	700 x 10+E6
引張り強度(N/m ²)	20 x 10+E6	20 x 10+E6	28 x 10+E6
電気抵抗(Ω・m)	60 x 10-E8	60 x 10-E8	60 x 10-E8
比透磁率	8	6	9.2

換基本式は、ある操作点近傍の線形領域においては次式で与えられる。

$$S = s^H T + dH \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$B = dT + \mu^T H \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 S :歪み、 H :磁界強度、 s^H :弾性コンプライアンス(ヤング率の逆数)、 d :磁歪定数、 B :磁束密度、 T :機械的応力、 μ^T :応力 T 時の透磁率である⁽¹²⁾。

(1),(2)式より、印加磁界に対する磁歪量が大きい材料では、機械的応力に対する磁化の変化も大きく超磁歪素子を用いると感度の高い力センサを構成することができる。また、金属材料であるため、表1に示すように素子の圧縮強度は非常に高く小型軽量な力センサが構成可能である。

図4(a)に本トルクセンサに用いた超磁歪素子(TDK製:PMT-1, $\phi 8 \times 7.5$ mm)の外観を示す。製造方法から、粉末冶金法による焼結材料(TDK製)とブリッジマン法による単結晶材料(米国エトリーマ社製)の大きく2つの材料が入手可能である。単結晶材料Terfenol-Dは、焼結材料より更に圧縮強度が高く、主にアクチュエータとして様々な応用がなされているが、円柱形等の組込みに適した形状を要求するとコスト高になる。これに対しTDKによる粉末冶金法では、独自の金型設計により、低コストな素子の製造が可能となってきた。本センサは、焼結材料を用いた。

超磁歪素子による応力検出は、前述のピラリ効果を検出原理としている。磁化の検出は、①素子に巻いたコイルの自己インダクタンスの変化、②差動変圧器の2つの腕の磁心での磁化のそれぞれの増減、③磁気ブリッジ回路の4つの腕の不均衡などで行える⁽¹³⁾。本センサでは、機構的に最も簡単な①の手法を用いる。図4(b)に検出原理図、図4(c)に今回設計した応力ピックアップ部の外観を示す。

<3-2> 圧縮力によるインダクタンス特性 図4(c)の検出コイルは、図4(a)に示す素子に線径: $\phi 0.15$ mmのUEW線を内径:10.0mm, 外形:14.5mm, 長さ7.5mmで巻数400ターン巻いたものである。一般的に、このようなコイルの

図4 超磁歪素子とこれを用いた力ピックアップ部の外観および検出原理
Fig.4. Principle of force detection and outside view of a force pick-up using GMM

インダクタンス L は、次式で表される。

$$L = k \cdot \mu^{(T=0)} \cdot N^2 \cdot A / l \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 k :長岡係数、 $\mu^{(T=0)}$:応力 T がゼロの時の超磁歪素子の透磁率、 N :コイルの巻数、 A :素子の断面積、 l :素子長である。

(3)式より、透磁率の変化は、コイルの自己インダクタンス変化として検出される。透磁率 μ は、素子に加わる応力 T の関数であり、正と負のビラリ効果をもつ。ここでは、正のビラリ効果を物質が圧縮されたときに透磁率が減少することと定義する。また、外部からの磁気ノイズの抑制や、漏れ磁束を少なくする目的で図4(c)に示すように素子とコイルの周辺には鉄(S45C)製のヨークで磁束経路を形成している。このとき力ピックアップの自己インダクタンス変化は、検出のための励振周波数に依存する。図5に力ピックアップの無負荷と4000N負荷(圧縮力)におけるインダクタンス変化量と励振周波数との関係を示す。周波数が1kHzをこえるとインダクタンスが急激に小さくなり、20kHz以上では負荷に対する変化が殆どなくなる。これは、コアとなる超磁歪材料が鉄を主とする組成の合金であるため抵抗率が小さく、高い周波数帯域ではそれによる渦電流の影響が大き

くなるためである。しかし、超磁歪素子単体では、10kHz付近まで影響は少なく、ここでの低下はヨーク部が鉄であることの影響が大きいと考えられる。また、インダクタンス L は磁束 ϕ とコイルの電流 i を用いて次式でも表される。

$$L = d\phi / di \quad \dots\dots\dots (4)$$

4000N負荷は、磁歪の逆効果において、ほぼ飽和の圧縮応力であり、インダクタンス測定のための微小電流 i の変化に対する磁束 ϕ の変化が無負荷時よりも小さくなり、渦電流の影響が抑えられることで、高い周波数領域までフラットな特性を示している。

以上より、静的な荷重計測でセンサの感度のみを考えると励振周波数は低く設定するとよいことになるが、ここでは、センサとしての応答性や無負荷時のコイルインダクタンスと巻数の関係を考慮して、本センサの励振周波数を4kHzと設定した。

<3・3> 超磁歪トルクセンサの構成

人間が加える踏力トルクを知るためには、ペダルから後輪までの力伝達過程のどこかでその伝達力(トルク)を検出すれば良い。提案するトルクセンサは、センサのユニット性を考慮し、超磁歪素子を用いた力ピックアップ部が小型化可能なことから、クランク部のチェーンホイールに内蔵した。ホイールがクランク軸とチェーン間で受ける力を検出することでトルク値を計算により求める。図6(a)にトルクセンサ概略構成のブロック図を示す。構成は、内ホイールと外ホイールが独立して自由回転するように構成し、内ホイールがペダルクランク及びクランク軸に固定される。回転中心から一定の腕の長さをもった位置で、図4(c)に示す力ピックアップが各ホイール間で挟まれるように配置し、ペダル踏力とチェーン負荷により超磁歪素子が圧縮力を受けるような構造となっている。検出回路は、スリッリングを通してコイルに一定周期の電圧を印加し、コイルのインダクタンス変化による電流値変化を検出する。電流値は、電流検出用に挿入したシャント抵抗器の電圧降下により検出し、その

図5 インダクタンスの周波数特性
Fig.5. Frequency characteristics of inductance

(a) 超磁歪トルクセンサのブロック図

(b) 検出回路の概略

図6 超磁歪トルクセンサの概略構成図
Fig.6. Schematic of GMM torque sensor

電圧値を反転増幅器により増幅した後にA/Dコンバータを通してマイコンに取り込む。増幅器は、回路の都合上反転増幅器を採用しており、結果的に以下の実験でのセンサ出力はインダクタンスの変化と同じ極性となっている。図6(b)に検出回路の概略を示す。

＜3・4＞ 超磁歪トルクセンサの基本特性 図7に超磁歪トルクセンサの静的な負荷トルクに対するセンサ検出特性を示す。センサ出力にヒステリシス(表2参照)が見られるが、アシスト自転車用踏力トルクセンサとしてはアシスト比率に関する制約を考慮すると十分な特性である。長所と

図7 超磁歪トルクセンサの静特性
Fig.7. Characteristic of GMM torque sensor表2 超磁歪トルクセンサの性能
Table 2. Torque sensor performance

Quantity	Value
1. Measurement range	0 ~ 160 Nm
2. Non-linearity	± 5.0 %/F.S.
3. Hysteresis	8.0 %/F.S.

図8 電動アシスト自転車用
超磁歪トルクセンサ(試作品)
Fig.8. GMM torque sensor for power-assisted bicycle

しては、小型軽量性をみると100N/m以上のトルクセンサでは工業用トルク検出器と比較して約1/10程度のサイズとなっており、量産時のコストにおいても1/100程度での実現が見込める。図8に今回試作したチェーンホイール内蔵の電動アシスト自転車用トルクセンサの外観を示す。

4. ヒステリシス低減手法の提案と検証

＜4・1＞ ヒステリシスの検証と考察 超磁歪トルクセンサの特性は、主にカピックアップ部のセンサ特性であり、以下では、このカピックアップ部特性を評価する。図6(b)の検出回路を用いた超磁歪力センサ出力特性の測定装置構成図を図9に示す。加圧装置には、60WDCモータとハーモニックギア等による1/330減速機を用い、直接センサに圧縮応力を

図9 測定装置の構成図
Fig.9. Schematic diagram of a measuring setup

加える。実荷重は、被測定センサの下部に高精度計測用ロードセル(検出範囲:200kgf, 非直線性:0.05 %RO, ヒステリシス:0.04%RO)を配置し、校正されたシグナルコンディショナで計測した値をRS232Cシリアル通信によりパソコン上で管理している。インダクタンスの測定では、検出用コイルの両端にLCRメータ(HP社製:HP4284A)を接続し、GPIBインタフェースを用いてデータ計測を行った。

実験に用いた超磁歪材料は、粉末冶金法によるTDK製PMS-1で形状は、 ϕ 3.5mm $\times$ 6.0mmを用いた。検出コイルの仕様は、内径:5.5mm, 外形:9.6mm, 長さ6.0mm, 線径: ϕ 0.23mmのUEW線, 巻数:200ターンとした。磁性体ヨークは、S45Cで磁気経路を形成した。検出回路のアンプ増幅率は150倍とし、センサ荷重と検出回路出力電圧との相関を実験装置で測定する。測定条件は、素子の初期状態(荷重, 磁化を一度も行っていない消磁状態)から200Nまで加圧し、その後ゼロ荷重まで減圧する。次に続けて同じサイクルをもう2サイクル繰り返す。図10に測定結果を示す。初期時状態からの1サイクル目は、減圧後初期の電圧値に戻らず、2サイクル目以降は、その電圧値から1サイクル目の200N加圧時の電圧値との間でヒステリシスループを繰り返す。

磁化による磁気ヒステリシス曲線は、強磁性結晶内でマグネトンが形成する磁壁と磁区が、印加磁場により磁区の向きが磁界の方向に揃うように、磁壁の移動と磁区の回転におけるピン止め現象に起因する。特に磁区の回転では形状の変化も伴い磁歪効果となる。結晶内で拘束されていた磁区が、強磁場により一度回転が起きると、印加磁場を徐々に弱めても磁壁のピン止め現象により元の状態には戻りにくくヒステリシスが生じる。磁区の持つ自発磁化の方

図10 センサ出力のヒステリシス特性
Fig.10. Hysteresis characteristics of detection circuit

向は、一般にいくつかの磁化容易軸に向いており、結晶中の磁区全体として各磁区の磁化は打ち消し合うように揃っている(図11(a))。この状態から、ある方向より圧縮力を加えていくと結晶内の格子間隔のわずかな歪みにより、磁壁や磁区を構成するマグネトンが回転し磁壁や磁区に変化が生じ、結晶中の磁化に変化を与える(図11(b), (c))。一度変化した磁区や磁壁は、磁気ヒステリシス曲線と同様に加える力を徐々に減らしていても磁壁のピン止め、および、回転した磁化ベクトルのピン止めにより同じ経路で元の状態には戻らず、図10に示すようなヒステリシスが生じると考えられる(図11(d))。

<4・2> ヒステリシス低減手法の提案

前述の考察に述べた印加磁化や応力により生じた磁区の回転による残留磁化を初期状態に戻す(消磁する)ためには、逆方向の適切な強さの磁界または、交流磁界を印加し、強制的に残留磁化

図11 ヒステリシス低減手法の概念図

Fig.11. Conceptual schematic for the proposed method of hysteresis reduction

分を元に戻す必要がある。しかし、力センサとしての実用を考えると小型大容量を長所とする超磁歪センサにおいて、消磁に十分な交流磁界を常時印加するには、大きな消磁用コイルを必要とし、小型化が困難になる。また、任意に変化する応力に対して適切な逆磁界を求め印加することも容易ではない。

そこで本提案では、力センサをマイコンによるデジタル制御機器へ組みこむことを考慮し、超磁歪材料が磁化により寸法が伸びるアクチュエータとしての要素を、時分割によりセンサと同じ系で利用する。近年の組み込みシステムを用いたスマートデバイスの検出回路では、A/Dコンバータ等でセンサデータのサンプリングによる量子化を行うため、データを離散値として扱うことが殆どである。そこで、各サンプルの間に一時的にセンサ用の微弱な励振磁界より十分に大きなパルス磁界を印加し、素子が伸びる方向に結晶内の磁区の回転を生じさせる(図11(e))。これにより、データサンプル時は、検出する力の増減にかかわらず、伸びた状態から圧縮方向のみで力を検出していることになり(図11(f))、センサヒステリシス曲線の初期状態からの曲線のみを用いることになる。図11ではヒステリシス低減手法の一連の概念図を示している。このサイクルを時間的に十分短くとると、マイコン検出回路も含むセンサシステムとしてヒステリシスが低減される⁽¹⁴⁾。

<4・3> 検証実験 図6(b)の検出回路にヒステリシス低減のためのパルス電流印加回路を付加した回路図を図12に示す。ピーク電流値は、素子の消磁状態から力センサの最大定格値(この場合200N)まで荷重を印加した後に、荷重をゼロとした時に残る残留磁化を消磁状態まで戻せる磁界相当の電流値を設定する。ここでは、試験的にピーク電流値を800mAに設定している。測定装置及び被測定デバイスとは、<4・1>と同じものを用いている。

<4・4> 実験結果と考察 本実験では、センサデータのサンプリング周期を500msとし、その間に約1msのパルス幅でパルス電流を流す。提案するヒステリシス低減手法を用い、<4・1>と同一条件で測定を行った。センサ出力特性の測

図12 パルス電流回路付き検出回路の概要
Fig.12. Schematic of detection circuit with pulse current

定結果は、図13に示すようにヒステリシスの改善が見られた。荷重ゼロの状態では、パルス磁界により出力の初期値が消磁状態とほぼ同等の値を示す。荷重を増加するに従い、検出回路の電圧は小さくなる方向に変化していくが、この時、特性曲線は、パルス磁界を印加しない場合の消磁状態からの初期曲線よりも大きな変化を示している。この現象は、パルス磁界がゼロに戻る時の荷重による慣性力でヒステリシス低減手法を用いない状態より圧縮歪が大きくなり、感度が向上していると考えられる。しかし、実際に物理的な素子の伸縮があるため、磁界の立ち上り、立下り時にインパルス音が発生する。特に立下り時のインパルス音は大きい。この現象を起こさないようにするためには、パルス磁界の立ち上り、立下り時間を十分に長く取り、慣性力による衝撃を抑制する必要がある。図13で得られたセンサ出力曲線の近似曲線式を求め、実荷重に対し、検出された力センサ特性を図14に示す。測定結果より、提案する手法が超磁歪センサのヒステリシス低減に有効であることが分かった。本実験においては、サンプリング周期を500msとしたが、現状でも数十ms程度の周期までは対応可能である。

図13 ヒステリシス低減手法によるセンサ出力
Fig.13. Characteristics of GMM sensor output utilizing the hysteresis reduction method

図14 提案手法による力センサヒステリシスの改善
Fig.14. Improvement of GMM force sensor hysteresis

しかし、インダクタンス変化の検出回路とパルス電流の印加回路を共用しているため、パルス電流によるセンサ値の変動が治まるまでの時間は必要であり、更に高速なサンプリング周期に対応するためには、検出用コイルのインダクタンス、励振周波数、フィルタの時定数、及び、アクチュエーション用パルス電流のパルス幅といった各パラメータを調整する必要がある。これらの調整により大規模な構造の変更やコストアップをすることなく更に高精度な電動アシスト自転車用踏力トルクセンサに改良することが可能である。

5. まとめ

本論文では、超磁歪素子を用いた電動アシスト自転車用トルク(力)センサの開発内容について示した。更に、超磁歪素子を用いたセンサ精度の最大の要因となるヒステリシスを低減する手法の提案を行った。本研究で得られた諸点は以下の通りである。

- (1) 超磁歪素子の特性を活かした電動アシスト自転車に最適な弾性変位の無いチェーンホイール一体の超磁歪トルクセンサを開発した。
- (2) 素子の特徴である高いセンシティブティと耐圧縮応力により小型軽量で大容量(0~160Nm)の超磁歪トルクセンサを実現した。
- (3) センサのマイコン機器組み込みを考慮し、センサ値のサンプル直前にパルス磁界を印可することにより、ヒステリシスの低減が可能であることを検証した。
- (4) パルス磁界で素子の内部磁化を一度磁場方向に揃えることによる消磁効果と、荷重の慣性力により圧縮歪が大きくなることで、センサ感度と非直線性も向上することが分かった。
- (5) 一方、パルス励磁によるインパルス音の発生やパルス励磁電力による電源電力消費の問題もあり、これらの点に関しては、パルス電流値、パルス幅、およびパルス波形とセンサのサンプリング周波数を考慮し、更に改良していく必要がある。

今後、本トルクセンサの実用化に向けては、信号伝達部を含む信頼性の向上と、個体差によるセンサ特性のばらつき抑制が当面の課題であり、これらについて研究を進めていく予定である。

謝 辞

本研究開発進めるにあたり、超磁歪素子の提供やご指導ご助言を頂いたTDK株式会社基礎材料研究所の森輝夫氏をはじめご協力頂いた皆様に感謝致します。

(平成13年3月23日受付、平成13年7月16日再受付)

文 献

- (1) 長谷川武彦, 中道忍, 勝岡達三, 生熊克己, 柴田広高, 小山裕之:「電動ハイブリッド自転車の開発」, 機械振興, vol.27, No.12, pp.86-89 (1994)

- (2) 芦原安史:「電動ハイブリッド自転車の設計開発における発想の展開」, 日本機械学会通常総会講演会講演論文集, Vol.72, No.5, PP.383-384 (1995)
- (3) 木村達郎, 手塚義博:「電動補助力付き自転車の駆動系の開発と設計 自転車のペダルトルク検出手法とリダクションギアの消音手法」, 油空圧技術, Vol.36, No.9, PP.10-14 (1997)
- (4) 森輝夫, 石川博康, 中村知子, アメール・ラトール:超磁歪材料, 工業材料, Vol.44, No.11, PP.48-53 (1996)
- (5) J. L. Butler: "Application Manual for the Design of ETREMA TERFENOL-D™ Magnetostrictive Transducers," pp.7-12, 19-26 Edge Technologies, Inc., (1988)
- (6) A. E. クラーク, 江田弘: 超磁歪材料マイクロシステム・アクチュエータへの応用, 日刊工業新聞社, pp.1, 85-94, 169-189 (1995)
- (7) H. Wakiwaka, K. Aoki, T. Yoshikawa, H. Kamata, M. Igarashi, H. Yamada: "Maximum output of a low frequency sound source using giant magnetostrictive material, Journal of Alloys and Compounds, Vol.258, pp.87-92 (1997)
- (8) 村田幸雄, 川瀬和夫, 小川豊, 脇若弘之, 山田一:「超磁歪材料の大出力アクチュエータへの適応検討」, 第9回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム講演会論文集, pp.3-6 (1997)
- (9) 森輝夫, 江田弘, 野老誠吾, 清水淳:「超磁歪を用いた圧力センサの開発」, 日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, Vol.1, pp.209-210 (1999)
- (10) 森輝夫, Amer Rathore, 江田弘:「超磁歪材料を用いた磁歪振動センサ」, 第7回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム講演論文集, No.125, pp.129-130 (1995)
- (11) 角谷和重, 河上日出生, 青木英明:「超磁歪トルクセンサを用いた電動アシスト自転車の開発」, 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1193-1194 (1998)
- (12) G. Nick Weisensel: "ETREMA TERFENOL-D Sensor Technology Study," pp.10;16;21-32 (1996)
- (13) Harry E. Burke: 磁気現象ハンドブック, 共立出版株式会社, pp.195-196 (1995)
- (14) Kazushige Kakutani, Keiji Kishimoto, et al.: "Study on a Method of Hysteresis Reduction for the Force Sensor using Giant Magnetostrictive Material", Proceedings of the Japan -USA Flexible Automation Conference, 2000JUSFA-13026 (2000)

角谷 和重 (正員) 1964年10月13日生まれ。1987年3月九州工業大学電気工学科卒業。同年4月三洋電機(株)入社。主としてパワーアシスト制御を用いた介護ロボット、電動アシスト自転車の開発、超磁歪材料を用いた力センサの研究に従事。日本ロボット学会、システム制御情報学会会員。

横谷 和展 (正員) 1964年10月18日生まれ。1989年3月大阪市立大学機械工学科卒業。同年4月三洋電機(株)入社。主としてパワーアシスト制御を用いた電動アシスト自転車、超磁歪材料を用いた力センサの研究に従事。システム制御情報学会会員。