

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	索状能動体のためのOLE型トルクセンサの開発
Title	Development of an OLE-type Torque Sensor for Active Code Mechanism
著者(和文)	高岡峻一, 山田浩也, 広瀬茂男
Authors	Shunichi Takaoka, Hiroya Yamada, SHIGEO HIROSE
出典 / Citation	日本ロボット学会学術講演会, , 3N3-2
Citation(English)	, , , 3N3-2
発行日 / Pub. date	2010, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2010 The Robotics Society of Japan.

# 索状能動体のためのOLE型トルクセンサの開発

高岡峻一(東京工業大学) 山田浩也(東京工業大学) 広瀬茂男(東京工業大学)

## Development of an OLE-type Torque Sensor for Active Code Mechanism

\*Shunichi TAKAOKA(Tokyo Tech), Hiroya YAMADA(Tokyo Tech), Shigeo HIROSE(Tokyo Tech)

**Abstract**— This paper proposes a new active code mechanism which has sensors for surrounding environments, flexibility of joints, dust- and water-proof system and overload protection mechanism. In order to achieve this concept we proposed to develop a practical active code mechanism ACM-R4n and an OLE-type torque sensor. ACM-R4n is an ACM which has active joints and active wheels, and it has dust- and water-proof system. An OLE-type torque sensor is a new sensor which has a function of a torque sensor and torque limiter and elasticity. Our concept is achieved by mounting OLE-type torque sensors to ACM-R4n.

In this paper we mainly focus on the sensor. The prototype is developed with a spring, a friction plate, 2 plates with cam groove and balls. Firstly we analyzed theoretical characteristic of it. Then we measured real characteristic of the sensor through experiments and validate its effectiveness.

**Key Words:** Active code mechanism, OLE-type torque sensor

### 1. 序論

災害現場での被災者探索や配管検査などの狭隘環境で行う作業において、不整地での運動性能の高さから索状能動体(Active Code Mechanism, ACM)の実用化が期待されている。広瀬[1]によりACMが提案されて以来、実用化を目指したACMの研究が数多く行われており、これまでに文献[2]~[5]に代表される多くの形態のACMが開発されてきた。しかし、不整地環境に対し十分な適応性を備えたACMは未だ開発されておらず、実用化して使用されている例は未だ見受けられない。

そこで本論文では、ACMの環境への適応性を向上させることを目的とした新しいセンサの提案を行い、それを搭載したACMの開発を行う。

### 2. 実用的索状能動体 ACM-R4n

不整地に対する高い適応性を実現するために、以下の4つの機能が重要であると著者らは考えている。

- 環境センサ
- 関節の柔軟性
- 防塵防水機能
- 耐過負荷機構

上記のいずれかを有するACMはこれまでも開発されており、例えば防塵防水機能と耐過負荷機構を有したACM[3]や、力センサを搭載したACM[6]は既に存在する。しかし、前述した4項すべてを有するACMは未だ開発されていない。

そこで、本論文では上記のすべての機能を有するACMを開発することを提案する。文献[3]のヘビ型ロボットACM-R4には前述した第3, 4項が実現されており、ある程度高い適応性を持つので、これを改良して第1, 2項を付加することで新しい実用的なACMの開発を行う。開発するヘビ型ロボットを以後ACM-R4nと呼称する。

ACM-R4nの外観図をFig.1に示す。ACM-R4nの体



Fig.1 ACM-R4n

幹は円筒状の関節を複数直列に接続した構造をしており、その関節は3次元索状能動体として機能を実現するために回転軸が90度異なるように接続されている。関節の両側には関節と同軸の能動車輪が装備されており、ロボットがどのような姿勢となっても車輪と環境が常に接触し、不整地においてもスタックすることがない構造となっている。関節内部にはバッテリーを搭載しておらず、有線による駆動を考えている。

### 3. OLE型トルクセンサの提案

#### 3-1 OLE型トルクセンサのコンセプト

ACM-R4nに必要な機能として、第1に環境センサがある。その環境センサとして、著者らはACM-R4nの円筒状の関節にトルクセンサを付加することを提案する。全ての関節にトルクセンサを搭載することで体幹上のトルク分布を知ることができるため、地面や障害物の検知を行うことで環境に適応した不整地走行が可能になると考えられる。必要な機能の第2として、関節の柔軟性が挙げられる。これは、関節にばね性を付加することで実現する。また、関節は耐過負荷機構でなければならない。

これらの要求を満たすため、本論文では前述の3つの機能を併せ持つOLE(Over Load Elude)型トルクセ

ンサを提案する．OLE 型トルクセンサとは著者らが定義した名称であり，

「任意の限界トルクまではセンサとしての機能を果たし，それを超えるトルクが作用した場合は滑りを生じることでトルクリミッタとして作用するセンサ」

のことを指す．Fig.2 にその概念図を示す．上図は 3 D モデルを表し，下図は概略図である．

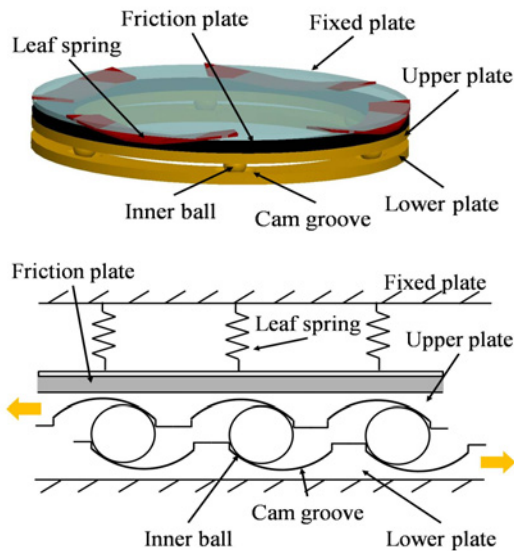


Fig.2 Concept of proposed mechanism(upper:3-D model, lower:schematic)

OLE 型トルクセンサはボールベアリングに似た構造をしており，固定板，板ばね，摩擦板，カム溝のある上プレートと下プレート，その間に挟まれたボールで構成される．プレート間にトルクが作用すると，ボールがカム溝に沿って転がり接触しながら移動し，プレート間の距離を広げて板ばねを圧縮する．作用トルクと板ばねの弾性力による反トルクが釣り合う位置までプレート間に変位が生じるので，センサはばね性を持つ．また，このトルク特性を予め計測しておけば，プレートの回転角度を計測することによりトルクを推定できるためトルクセンサとしても使用可能であり，さらに過負荷が作用した場合には摩擦板により機構に滑りが生じるため，トルクリミッタとしても機能する．本センサのトルク特性を Fig.3 に示す．青線が上プレート

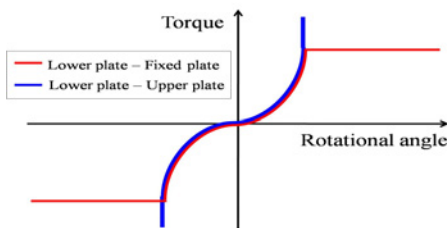


Fig.3 Ideal characteristic of OLE-type torque sensor と下プレートのトルク特性であり，赤線が固定板と下プレートのトルク特性である．摩擦板が滑り出すまでは上プレートと下プレートの特性がセンサの特性とな

り，滑り出した後は滑り出しトルクを保持した状態で滑る．

本機構の特徴として，機構のトルク特性を任意に設計することが挙げられる．トルクが作用した際のプレート間の距離はカム溝の形状に依存するため，カム溝を設計することで任意のトルク特性を得ることができる．

### 3.2 ACM-R4n への応用

OLE 型トルクセンサを搭載した ACM-R4n の関節を Fig.4 に示す．ACM-R4n の関節は内部の内歯車を介し

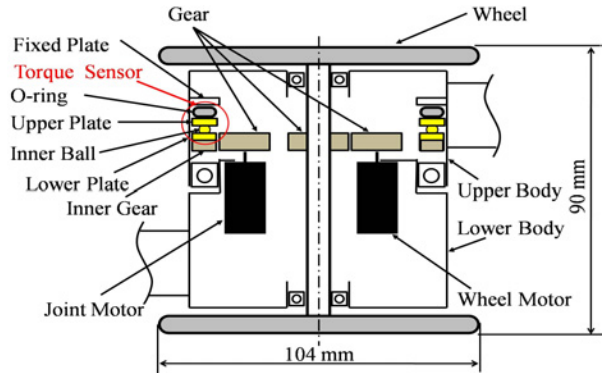


Fig.4 Joint structure of ACM-R4n

て駆動されるため，内歯車にセンサ下プレートを固定し，センサの固定板は関節本体に固定する構造とした．また，ACM-R4n には防水機能も付加させることから，センサの板ばねと摩擦板は防水用のゴム製リング（Oリング）で代用することとし，構造の簡易化を図った．

### 4. OLE 型トルクセンサの理論特性

本章では，センサ上プレートと下プレート間のトルクの理論特性を 2 次元モデルを用いて導出する．

ボールがカム溝の中心位置から移動した場合の力の釣り合いを考えると，Fig.5 のようになる．ここで，上

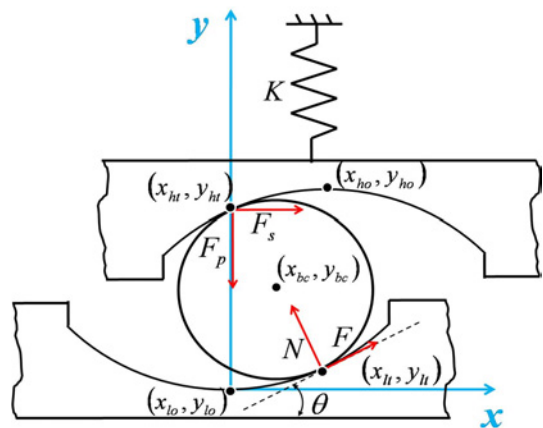


Fig.5 Equilibrium of force between plates and a ball

プレートに作用する外力を  $F_s$ ，板ばねの弾性力を  $F_p$ ，ボールに作用するカム溝に水平な力を  $F$ ，垂直な力を  $N$ ，カム溝の傾斜角を  $\theta$  としている．2つの接触点を通る直線がボールの中心を通ると仮定すると，ボールの力の釣り合いとボール中心回りのモーメントの釣り合

いより,

$$\begin{cases} N - F_s \sin \theta - F_p \cos \theta = 0 \\ -F - F_s \cos \theta + F_p \sin \theta = 0 \\ -Fr_b + F_s r_b \cos \theta - F_p r_b \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

が成り立つ．これを解くと,

$$\begin{cases} F = 0 \\ N = \frac{F_p}{\cos \theta} \\ F_s = F_p \tan \theta \end{cases} \quad (2)$$

となる．ここで，初期姿勢でのボールと下プレート・上プレートのカム溝の接触点座標をそれぞれ  $X_{lo}$ ,  $X_{ho}$ ，任意の姿勢でのボールと下プレート・上プレートのカム溝の接触点座標をそれぞれ  $X_{lt}$ ,  $X_{ht}$ ，ボールの中心座標を  $X_{bc}$  と表わす．座標の原点を  $X_{lo}$  にとり，ボールの半径を  $r_b$  とすると，各座標は以下のように求められる．

$$X_{bc} = X_{lt} + r_b T_m e_y \quad (3)$$

$$X_{ht} = X_{lt} + 2r_b T_m e_y \quad (4)$$

$$X_{ho} = X_{ht} + X_{lt} - X_{lo} \quad (5)$$

ここで， $T_m$  は回転行列， $e_y$  は  $y$  方向単位ベクトルである．

$$T_m = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$e_y = [0 \quad 1]^T \quad (7)$$

板ばねのばね定数を  $K$ ，プリロードを  $F_{p0}$  とすると，上プレートに作用する外力  $F_s$  は次式で表される．

$$F_p = K(y_{ho} - 2r_b) + F_{p0} \quad (8)$$

$$\tan \theta = \frac{dy_{lt}}{dx_{lt}} \quad (9)$$

$$F_s = F_p \tan \theta \quad (10)$$

板ばねの個数を  $N_s$  とすると，機構に作用するトルク  $T$  は

$$T = N_s r_m F_s \quad (11)$$

$$= N_s r_m (K(y_{ho} - 2r_b) + F_{p0}) \frac{dy_{lt}}{dx_{lt}} \quad (12)$$

となる．

ここで，トルク  $T$  と機構の  $x$  軸方向変位  $x_{ho}$  の間にある関数の関係があるとすると

$$T = f(x_{ho}) \quad (13)$$

各座標  $X_{lo}$ ,  $X_{ho}$ ,  $X_{bc}$  には以下の関係があるので，

$$\frac{dy_{lt}}{dx_{lt}} = \frac{dy_{bc}}{dx_{bc}} = \frac{dy_{ho}}{dx_{ho}} \quad (14)$$

機構のトルク特性は以下の微分方程式で表わされる．

$$N_s r_m (K(y_{ho} - 2r_b) + F_{p0}) \frac{dy_{ho}}{dx_{ho}} = f(x_{ho}) \quad (15)$$

## 5. OLE 型トルクセンサの評価実験

### 5.1 プロトタイプ製作

試作した OLE 型トルクセンサを Fig.6 に示す．左図はセンサを構成する部品 (上下プレート，ボール，リング) の写真であり，右図は組立後のセンサの写真である．今回製作したセンサは小型であるため，加工精度



Fig.6 A prototype of proposed torque sensor

の関係上，カム溝形状は加工の容易な円形状としボールエンドミルで加工した．

$$y_{lt} = -\sqrt{r_c^2 - x_{lt}^2} + r_c \quad (16)$$

試作したセンサの緒言は Table1 に示す．

Table 1 Specification of OLE-type torque sensor

Radius of cam groove	3.5 mm
Pitch circle diameter of cam groove	56.0 mm
Outer diameter	64.0 mm
Thickness	10.0 mm
Diameter of inner ball	3.0 mm

### 5.2 理論特性との検証

理論特性との比較検証を行うため，Fig.7 に示す実験装置を製作し，センサのトルク特性を計測した．

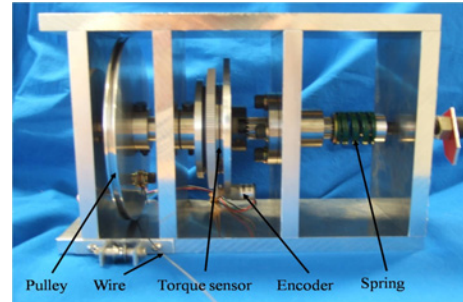


Fig.7 An experimental equipment

このときの実験装置の概念図を Fig.8 に示す．実験装置の中央にトルクセンサがあり，プレートの左片方はシャフトを介してプーリーに固定され，右片方はばねで押し付けられている．ばねの変位はねじで調整できるようになっている．プーリーに接続されたワイヤに重りを付けることでセンサにトルクを作用させ，センサのプレート間の相対変位はロータリーエンコーダにより計測を行う．実験で使用したばねは  $K = 306 \text{ N/mm}$  のものであり，実験時のプリロードは  $F_{p0} = 153 \text{ N}$  とした．計測したセンサのトルク特性を Fig.9 に示す．赤線が理論値，三角のプロットが実験値である．グラフより，理論値と実験値は一致せず，センサがヒステリシス

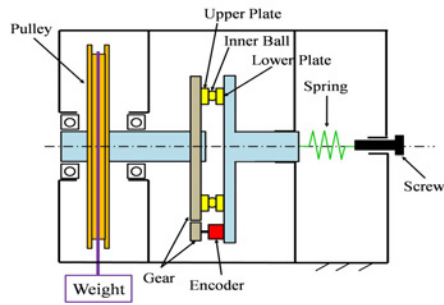


Fig.8 Schematic of an experimental equipment

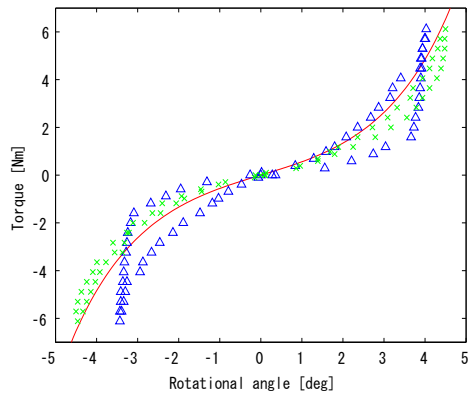


Fig.9 Torque characteristic of proposed sensor

を有することが確認できる．この原因として、カム溝とボール側面の摩擦力のより、ボールの変位が小さい段階で力が平衡状態となったことが考えられる．この仮定を検証するため、実験時に装置に衝撃を加えることで摩擦力による平衡状態が生じないようにした．衝撃を加えた場合のセンサのトルク特性は、Fig9の緑色のプロットで表わされている．理論値とよく一致しており、ヒステリシスも小さくなっていることから、摩擦力がセンサ特性に影響していると判断した．

### 5.3 ACM 搭載用センサの特性

ACM-R4n に搭載する OLE 型トルクセンサは Oリングを使用するため、実験装置を Fig10 のように変更し、Oリングを用いた場合のセンサのトルク特性を計測した．Oリングは株式会社 NOK 製のニトリルゴム Oリング P50A を使用した．その結果を Fig.11 に示す．

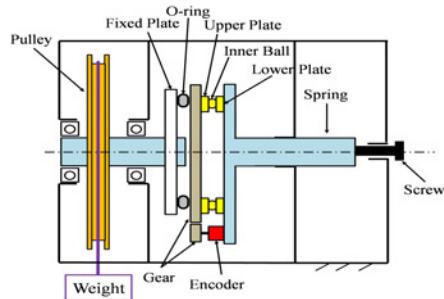


Fig.10 Schematic of an experimental equipment for a sensor with an o-ring

Fig11 の上図より、Oリングを使用した場合も、ばねの場合と同様の特性が得られることがわかった．ただし、ヒステリシスも同様に存在し、その誤差は 10 % 程

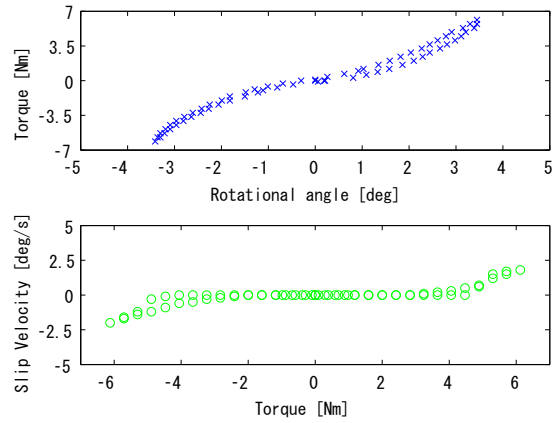


Fig.11 Torque characteristic of a sensor with an o-ring

度であった．また Fig11 の下図より、トルクが高くなるに伴い滑り速度も大きくなっており、OLE 型トルクセンサがトルクリミッタとして作用していることが確認できる．しかし、Oリングは荷重を負荷した状態で長時間放置しておく金属に粘着するため、滑り速度が一致に定まらないという問題点があることも確認した．

## 6. 結論

本論文では、より環境に対する適応性の高い ACM として、環境センサ、関節の柔軟性、防塵防水機能と対過負荷機構の 4 つの機能を有するヘビ型ロボット ACM-R4n を提案し、これを実現するために OLE 型トルクセンサの開発を行った．理論解析と検証実験を行った結果、摩擦の影響を除けばセンサは理論通りのトルク特性を持つことを確認した．また、Oリングを使用したセンサもばねの場合と同様の特性を持ち、トルクリミッタとしても機能することも確認した．ただし、センサはヒステリシスを持つことや、ゴム製 Oリングは滑り出し速度が安定しないという問題点もあり、解決すべき課題は数多く残されている．

## 参考文献

- [1] S.Hirose, "Biologically Inspired Robots", Oxford University Press, 1993.
- [2] M.Mori and S.Hirose, "Three dimensional serpentine motion and lateral rolling by Active Code Mechanism "ACM-R3", Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.829-834, 2002.
- [3] Hiroya Yamada and Shigeo Hirose, "Development of Practical 3-Dimensional Active Code Mechanism ACM-R4", Journal of Robotics and Mechatronics Vol.18 No.3, 2006.
- [4] H. Kimura, S. Hirose, "Development of Genbu : Active wheel passive joint articulated mobile robot", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System, pp823-829, 2002.
- [5] 大橋太郎, 山田浩也, 広瀬茂男, "ヘビ型ロボットの Loop-Gait 推進とその操舵制御の研究", 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1M2-01, 9/2009.
- [6] Sigurd Fjerdingen, Pal Liljeback and Aksel A. Transeth, "A snake-like robot for internal inspection of complex pipe structures (PIKo)", Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.5665-5671, 2009.