

高精度に速度制御可能な電気接点現象測定システムの開発

Development of an accurately speed-controllable electric contact phenomena measurement system

作田和磨* , 曾根秀昭**

Sakuda Kazuma* , Sone Hideaki**

*東北大学大学院情報科学研究科, **東北大学情報シナジーセンター

*Graduate School of Information Sciences, TOHOKU University,
**Tohoku University Information Synergy Center

キーワード： 電気接点 (electrical contacts) , 開離速度 (opening velocity) , 速度ムラ (velocity ripple) , 臨界距離 (critical gap)

連絡先： 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区青葉6-3 東北大学 情報シナジーセンター 曾根・水木研究室
作田和磨 , Tel.: (022)795-6094 , Fax.: (022)795-6096 , E-mail: k-sakuda@mail.tains.tohoku.ac.jp

1. 序言

1.1 背景

電気接点が開閉する際に、電極間にアーク放電が生じ、伝導性のノイズの発生、接点の性能低下につながるといった現象が起こる。このような現象は短時間に発生すること、使用条件、環境条件、接点の設計など様々な要因によって左右されることから再現性に乏しく、系統的かつ定量的な特性の把握が非常に困難である。⁽¹⁾

このような接点現象の中でも、アーク放電の特性に注目した研究が今までになされており、放電形態の移行もその一つである。⁽²⁾ 接点開離中のアーク放電は、電気接点の使用条件によって開離直後の接点由来の金属蒸気内で維持される金属相アークから、電極間距離の増大によって周囲気体のイオンがアーク維持に大きな役割を果たすガス相アークに移行すると言われている。

アーク放電の形態移行は周囲雰囲気、回路条件によって、移行する電極間の距離(臨界距離)が決まり、接点の開離速度には依存しないと言われてきた。しかし、1997年にMcBrideらによって、開離速度が数百mm/sの領域では臨界距離が接点の開離速度に比例して伸びていく現象が報告された。⁽³⁾ ただこの報告にある臨界距離の実験結果は、測定毎に値のばらつきがある再現性の乏しいものであり、測定値の平均に対する標準偏差の割合は最大で14%程ある実験結果であった。

我々は、臨界距離の再現性の乏しさが電気接点駆動装置の接点开離速度のばらつきに起因するものであり、より正確な臨界距離の測定を行うための新たな装置の製作を行う必要があると考えた。

1.2 目的

臨界距離の開離速度依存性を正確に測定する装置を製作するにあたり、まず必要とされる装置の要求仕様を決定する。次に、どのような駆動方式で要求仕様を満たす装置が製作できるか駆動方式について比較検討を行い、速度の再現性がよく、速度ムラの小さい新たな電気接点駆動装置の提案を行う。

2. 電気接点駆動装置の設計

2.1 電気接点駆動装置

電気接点駆動装置とは、電気接点現象解明のために開発された実験装置であり、電気接点現象の開離速度依存性に関する実験では、以下の条件が装置に対して求められる。

- 接点の開離速度が広範囲に可変である
- 接点开離中の速度が大幅に変わらない
- 開離速度の設定が簡単にできる

以上の条件に加えて、今回、新たに提案する装置では

- 速度ムラが小さく、速度の再現性が良い

という条件も加えて、提案装置の仕様を決定する。

2.2 提案装置の要求仕様設定

前述した条件にある、開離速度の範囲と速度の再現性について、提案装置に求める具体的な仕様の設定を行う。

まず、接点の開離速度の範囲を決定する。過去に臨界距離の速度依存性について行われた研究⁽⁴⁾から、範囲の下限を10 mm/s、上限を1000 mm/sに設定する。これにより、臨界距離は速度に依存しないとされる低開離速度(数十mm/s)、臨界距離は速度に依存するとされる高開離速度(数百

mm/s)の2つの速度領域について実験を行うことができる。

次に、速度の再現性の決定にあたり、パラメータの指標として繰り返し位置決め精度を用いることにする。繰り返し位置決め精度とは、任意の一点に同じ方向から位置決めを7回行い、測定値の最大差の1/2を求め \pm をつけて表すものである。繰り返し位置決め精度が良いとは、位置決めについて再現性が高いということである。よって、時間あたりの変位量である速度にも優位性があると考え、提案装置の要求設定の指標として用いる。具体的なパラメータ決定を決定する。McBrideらの研究結果において、接点の開離速度が100mm/s時、臨界距離の標準誤差が $\pm 25\mu\text{m}$ であった。よって、オーダーを一桁減らすために、要求する精度繰り返し位置決め精度を $\pm 1\mu\text{m}$ 以下に設定する。

3. 電気接点駆動装置の比較検討

本章では、まず既存の研究で用いられた数多くの電気接点駆動装置の中から、電極の開離速度を変えることのできる装置を取り上げる。それらの装置に用いられている駆動方式について接点开離速度の範囲、速度ムラについて要求仕様が満たされるかどうか検討する。

3.1 既存の電気接点駆動装置例

過去の研究で使用された開離速度可変な電気接点駆動装置の例を4つ挙げ、それぞれどのような駆動方式が用いられたか簡単に紹介する。

Fig.1は回転モータとカムを用いた電気接点駆動装置の原理図で、Fig.2はその原理を応用した、現在我々が実験に使用している駆動装置である⁽⁵⁾。Fig.3は自由落下ハンマによって電気接点を駆動する装置⁽⁶⁾、Fig.4はソレノイドによって電気接点を駆動する装置⁽⁷⁾、Fig.5はACサーボモータとボールねじを用いて電気接点を駆動する装置である⁽⁸⁾。

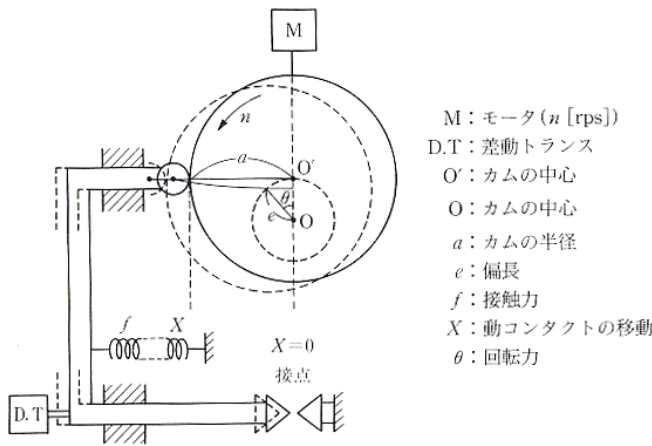


Fig. 1 偏心カムを用いた電気接点駆動装置の原理図

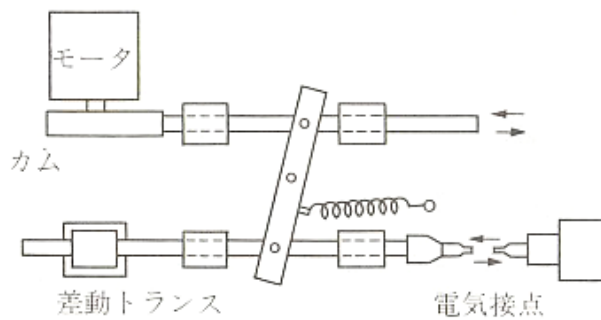


Fig. 2 現有の電気接点駆動装置

その駆動方式は以下の4つが挙げられる。

- 自由落下ハンマ
- ソレノイド
- 回転モータとカム
- 回転モータとボールねじ

3.2 駆動方式の比較

本節では、前節で挙げた4つの駆動方式に関して、速度の範囲、速度ムラの大小に注目し、要求する仕様を満たすことができるか評価、比較を行う。

まず、自由落下ハンマを用いた装置を評価する。Fig.3より、レバーからハンマ部分までの高さが高いため、レバーに衝突する時点でのハンマの速さ

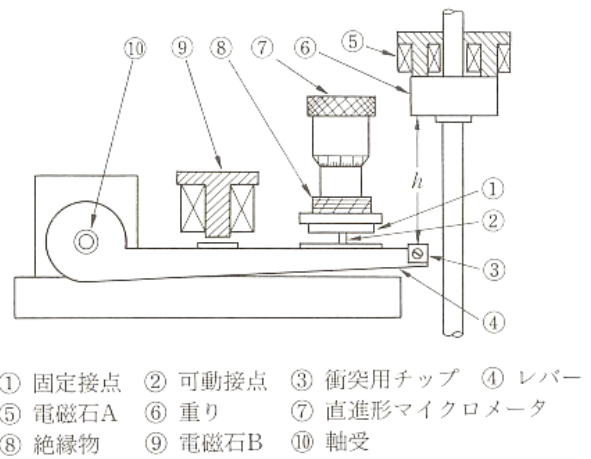


Fig. 3 自由落下ハンマを用いた電気接点駆動装置

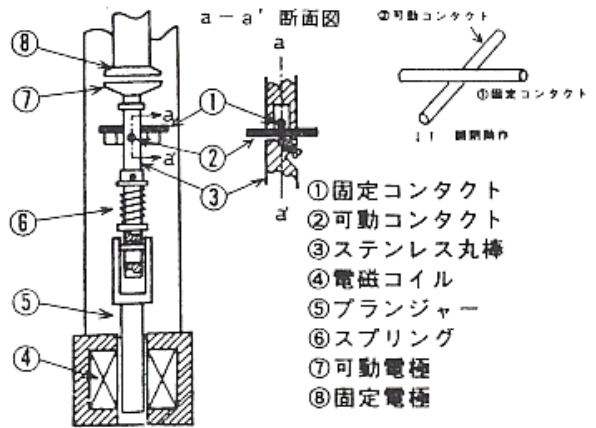


Fig. 4 ソレノイドを用いた電気接点駆動装置

v は位置エネルギーと運動エネルギーの保存則より式(1)となる。

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

となり、式(1)中の v が電極の開離速度となる。この駆動方式では、速度 h によって制御するが外乱に対する補償が無く、正確に開離速度を制御するのは困難である。このため、今回要求する装置の仕様を満たすことができないので不適當である。

次に、ソレノイドを用いた装置について考える。Fig.6にソレノイドの基本構造を示す。

ソレノイドは磁気回路に蓄えられるエネルギーがギャップの変動によって変化し、そのエネルギーが機械的な力になることを利用してプランジャを

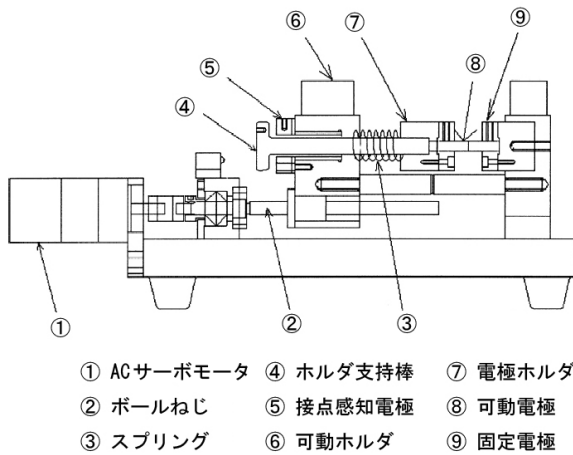


Fig. 5 ボールねじとACサーボモータを用いた電気接点開離装置

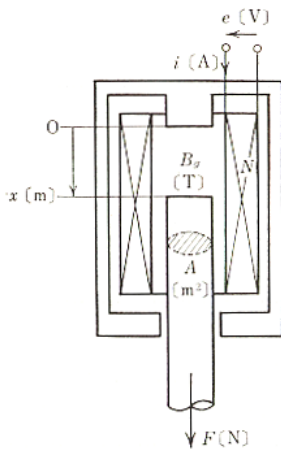


Fig. 6 リニア電磁ソレノイド

変位させる。その機械的な力 $F(x)$ は式(2)となる。

$$F(x) = \frac{dW_m}{dx} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (2)$$

W_m : ギャップに蓄えられるエネルギー

$L(x)$: コイルのコンダクタンス

式(2)をより、プランジャに働く力は、コンダクタンスの非線形性から変位 x に対して非線形になってしまう。このため、プランジャの位置、速度を制御するのは困難である。よって、提案装置の仕様を満たすことができないので不適當である。

次に、回転モータとカムを用いた装置を評価する。Fig.1より、カムによって駆動される従動子の

速度は式(5)のようになる。

$$X = e \sin \theta \quad (3)$$

$$v = \frac{dX}{dt} \quad (4)$$

$$= 2n\pi \cdot e \cos \theta \quad (5)$$

$\theta = 0$ の時、 v はほぼ一定速になるので式(6)となる。

$$v|_{\theta=0} = v_0 = 2n\pi e \quad (6)$$

ここで、Fig.2に示すようなリンクを用い、モータの回転数などのパラメータを適宜設定すると、電気接点の最高開離速度1000mm/sを満たす偏心カムの半径は $r = 100\text{mm}$ 程度となり、実現可能なサイズであることがわかった。モータの回転数を下げることによって、5mm/s程度の低い開離速度も実現可能である。繰り返し位置決め精度は、カムの加工精度、回転モータの誤差から $\pm 25\mu\text{m}$ 程度となる。

カムを用いた駆動装置についてまとめると、速度の範囲は5~1000mm/sと十分であり、回転数を変えることで速度を変化させることができるので速度の設定も容易である。繰り返し位置決め精度は $\pm 25\mu\text{m}$ 程度であり、要求仕様を満たすことができないので提案する装置には不適當である。

次に、回転モータとボールねじを用いた装置について評価する。Fig.7に基本構造を示す。

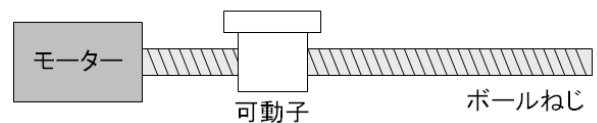


Fig. 7 回転モーターとボールねじの基本構造

駆動される可動子の速度は式(7)のようになる。

$$v = NL \quad (7)$$

N : 回転モータの回転数

L : ボールねじのリード長

評価のために、一例としてACサーボモータとボールねじを組み合わせた直動機構の製品を提示する。製品の仕様は、開離速度は1~2000mm/s、繰り返し位置決め精度は $\pm 5\mu\text{m}$ になる。繰り返し位置決め精度の悪化原因は、モータのトルクリップル、ボールねじの弾性変形、発熱による膨張等の機械的な誤差がである。

ボールねじを用いた駆動装置についてまとめると、速度の範囲は1~2000mm/sと十分であり、カムと同様に、回転数を変えることで速度を変化させることができるので、速度の設定も容易である。繰り返し位置決め精度は $\pm 5\mu\text{m}$ であるので、要求仕様を満たすことができない。よって提案する装置には不適當である。

以上の駆動方式毎の特徴をTable 1に示す。

Table 1 駆動方式毎の特徴比較

方式	速度範囲	速度一定	設定の容易さ	速度ムラ
自由落下ハンマ				×
ソレノイド		×	×	×
モータ+カム				
モータ+ボールねじ				

Table 1より、開離速度の範囲、設定の容易さ、速度の大幅な変化の項目では回転モータとカム、回転モータとボールねじが有用である。しかし、これらの駆動方式では、繰り返し位置決め精度がモータのトルクリップル、機構の機械的な誤差によって悪くなり、装置の要求仕様を満たすことができない。

そこで、機械的誤差の少ない駆動方式を用いることで、繰り返し位置決め精度を改善できると考え、次章でその考えに基づいて、新たな駆動方式を用いた装置の提案を行う。

4. 新たな装置の提案

本章では、新たな電気接点駆動装置の駆動方式として、リニアモータの一種であるシャフトモータを挙げ、その原理と特性について述べる。

4.1 シャフトモータ概要

Fig.8、Fig.9に示すのはシャフトモータの基本構造と動作原理である。

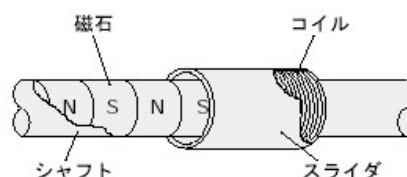


Fig. 8 シャフトモータの基本構造

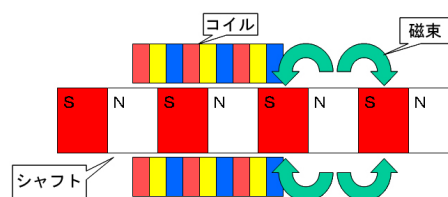


Fig. 9 シャフトモータの動作原理

シャフトモータは、永久磁石のシャフトとその周りに配置されるムービングコイルからなるリニアモータの一種である。Fig.9にあるように、シャフトの磁石から出ている磁束がコイルを貫き、コイルに電流を流すことによって、ローレンツ力を発生させて可動子を動かす。

4.2 シャフトモータを用いた駆動装置

ボールねじ同様、評価のために、一例としてシャフトモータを用いた直動機構の製品を提示する。製品の使用は、速度範囲10mm/s程度~2000mm/s、繰り返し位置決め精度 $\pm 0.71\mu\text{m}$ になる。繰り返し位置決め精度が良い理由は、機械的な接触部がガ

イドのボールベアリングのみなので機械的な誤差がほとんど無く、モータがコアレスなのでトルクリップルも小さい。また、可動子の位置でのクローズドループ制御を行っているため、制御精度も高いものになる。

シャフトモーターを用いた駆動装置についてまとめると、速度範囲、繰り返し位置決め精度の要求仕様は満たしている。また、可動子の位置で制御を行っているので設定も容易である。よって提案する装置に用いることが可能である。

前章で行った既存の駆動方式の比較表に、シャフトモータを加えた表をTable 2に示す。

Table 2 シャフトモータを加えた駆動方式毎の特徴比較

方式	速度範囲	速度一定	設定の容易さ	速度ムラ
自由落下ハンマ				×
ソレノイド		×	×	×
モータ+カム				
モータ+ボールねじ				
シャフトモータ				

Table 2より、速度範囲、速度の一定さ、設定の容易さの点においては回転モータ+カム、回転モータ+ボールねじ、シャフトモータのいずれも要求仕様を満たしているが、繰り返し位置決め精度の点においては前述の要因からシャフトモータが他の2つに比べて優れている。よって、今回新たに作成する装置の駆動方式とし、シャフトモータが適切である。

5. 結言

5.1 まとめ

今回、電気接点現象の一つであるアーク放電の臨界距離を正確に求めるために必要とされる装置の要求仕様を定めた。次に、これまで開発されてきた電気接点駆動装置について、機構毎に仕様、特徴を整理し、電気接点駆動装置に要求される条件と新たに製作する装置の要求仕様に関して比較を行った。その結果、機械的な誤差から、既存の駆動方式では繰り返し位置決め精度の仕様を満たすことが難しいことが判明した。そのため、新たな駆動装置として、機械的な誤差の少ないシャフトモータを用いた電気接点駆動装置を提案した。

5.2 今後の予定

シャフトモータを用いた電気接点駆動装置を実際に構築して開離速度の再現性の評価、電気接点現象の観測を行い、臨界距離の開離速度依存性について調査する。

参考文献

- 1) 嶺岸, 大森, 越後, 佐藤: コンタクト開離アーク電流のスペクトルに関する実験的検討, 信学技法, EMCJ84-1(1984)
- 2) 高橋篤夫, 吉田清: 銀コンタクト開離時アークのガス相移行境界, 信学論, vol.J71-C, no.10, pp.1373-1379 (1988.10)
- 3) Suleiman M Abu Sharkh, John W McBride : VOLTAGE STEPS IN ATMOSPHERIC LOW CURRENT ARCS BETWEEN OPENING SILVER METAL OXIDE CONTACTS , Proceeding of the Forty-Third IEEE Holm Conference on Electrical Contacts , pp.233-237 (1997)
- 4) P.J. Boddy, T. Utsumi : Fluctuation of Arc Potential Caused by Metal-Vapor Diffusion in Arcs in Air , J. Appl. Phys , vol.42, no.9, pp.3369-3373 (1971)
- 5) 井上浩, 小原仁, 高木相: コンタクトアーク継続時間の開離速度依存性の実験, 信学技法, EMCJ79-65, pp.39-46 (1979)
- 6) 沢孝一郎, 上木忠勇, 宮地邦夫: 間欠アークの発生条件について, 電学論, 94-A-8, pp.325-332 (1974.8)

- 7) 高橋篤夫, 吉田清, 宮地邦夫: コンタクト開離時アークのメタリック相からガス相への移行境界, 信学論, vol.J66-C, no.11, pp.813-819 (1983)
- 8) Takayoshi ENDO, Junya SEKIKAWA, Takayoshi KUBONO : Cathode and Anode Bright-Spot Behaviors of Breaking Arc between Electrical Contacts with Low Separating Speed , IEICE Trans. Electron. , vol.E88-C, no.8, pp.1596-1602 (2005)