

ビデオカメラ用レンズ駆動機構に生じる自励振動の解析

An Analysis of Self-Excited Vibration in a Video Camcorder Lens Drive Mechanism

江村 哲二*

Emura, Tetsuji

This paper describes an analysis of self-excited vibration through the lens drive mechanism which the lens barrel is linear-guided with two parallel guide-shafts. It got the following results by numerical simulations of the model.

As for the reporting self-excited vibration; 1) Because of the existence of the instability of the system with the cross coupling force through the friction which acts between the guide-shaft and guide-bush, the initial unstable vibration is increasing and transforms to the stick-slip phenomenon. 2) It is possible to rise the critical friction coefficient which the self-excited vibration occurs, by changing the stiffness of constituent members which make the lens drive mechanism.

1 緒言

外部からエネルギーを受け取り、そのエネルギーを周期的な振動現象に変換することによって振動が持続する物理現象がある。同じ振動でもエネルギー源が振動的である場合の強制振動とは区別して、これらの振動は一般に「自励振動」と呼ばれている。この現象は我々にはよく音として認識され、もっとも身近なのは引き戸がきしむ音であり、自動車のディスク・ブレーキの鳴き音であり、またヴァイオリンなどの擦弦楽器の音である。これらの自励振動は擦れ合う2つの物体間に働く摩擦力に起因するスティック・スリップ現象によるものである場合が多いが、系の構造自体が主要因である場合¹⁾²⁾も知られている。

2本のガイドシャフトによって直進案内されたレンズ枠を持ち、移動するキャリッジを外部から連結してレンズ枠を駆動するビデオカメラ用レンズ駆動機構においても自励振動が生じることがあり、それはビビリと呼ばれる異音の発生として認識され、この機構を搭載した製品の品質に大きなダメージを与える。本機構はガイドシャフト上を滑る摺動部に対して、レンズの重心が大きく離れているため、レンズ枠とキャリッジ連結部からなる連成剛性力が自励振動の発生に関係しているのではないかと考え、その解析を行い、それを確認するとともに、その対策方法を検討した。

2 解析モデル

Fig. 1 に本報告におけるビデオカメラ用レンズ駆動機構を示す。本機構はビデオカメラに現在もっとも多く使われているレンズ駆動機構である。レンズを収めたレンズ枠はガイドブッシュおよび回転止めを持ち、それらは

*OPTカンパニー オプト開発グループ

光軸と平行に固定された2本のガイドシャフトにそれぞれ嵌合し光軸方向に直進案内されている。また駆動源であるモータの出力軸に形成されたリードスクリューには、回転運動を直進運動に変換するキャリッジが噛み合わされており、そのキャリッジをレンズ枠と連結することによってレンズを光軸方向に駆動する構造となっている。

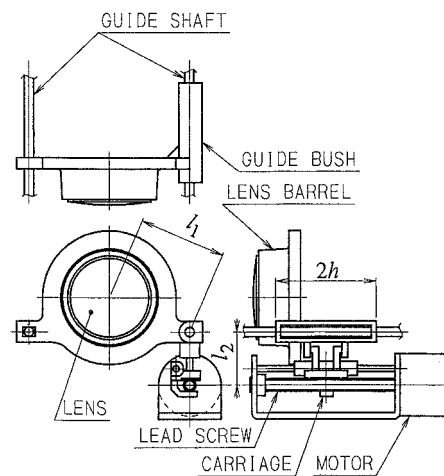


Fig. 1 Schematic View

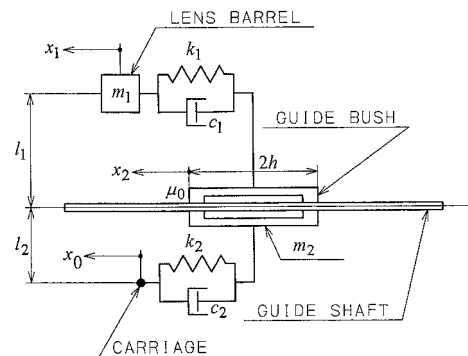


Fig. 2 Analytical Model

Fig. 2 は本機構を解析するためにモデル化したものである。レンズを含むレンズ枠の質量 m_1 とガイドブッシュの質量 m_2 が剛性 k_1 と粘性 c_1 で結合されており、また連結部は剛性 k_2 と粘性 c_2 から成っている。光軸とガイドブッシュ間距離を l_1 、ガイドブッシュとリードスクリーウ間距離を l_2 、ガイドブッシュ長を $2h$ とすると、本モデルは下式(1)の連立方程式で記述できる。尚、ガイドブッシュとガイドシャフト間の摩擦係数を μ_0 とし、回転止めとガイドシャフト間の摩擦は無視する。また本モデルは $l_1 > l_2$ の場合のみを扱う。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad \dots (1)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1(1-\mu_0 l_1/h) & c_1(1-\mu_0 l_1/h) + c_2(1-\mu_0 l_2/h) \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1(1-\mu_0 l_1/h) & k_1(1-\mu_0 l_1/h) + k_2(1-\mu_0 l_2/h) \end{bmatrix}$$

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ c_2(1-\mu_0 l_2/h)\dot{x}_0 + k_2(1-\mu_0 l_2/h)x_0 \end{Bmatrix}$$

簡単のために粘性行列[C]を無視すると、式(1)は解析的に解が得られ、少なくとも剛性行列[K]の右上と左下の項が同符号になっていると系としては安定となる。その条件は下式(2)で与えられる。

$$\frac{\mu_0}{h/l_1} < 1 \quad \dots (2)$$

つまりガイドブッシュの半分の長さとお軸・ガイドブッシュ間距離との比よりも摩擦係数が小さければ常に安定である。しかし昨今のコンパクト性を追及したビデオカメラに搭載する本機構は、このような理想的な幾何寸法 l_1 、 h で各部品を配置することが大変困難であり、幾何寸法以外のパラメータ、例えば本機構を構成している部品の物理特性等も考慮に入れた系の安定性条件を知っておく必要がある。そこで本研究では、本機構の実機の諸元値による数値シミュレーションを行い、発生する自励振動の特性を調べることにした。

3 数値解析

本モデルのルンゲ・クッタ法による数値シミュレーションに用いる各諸元値をTable 1 に示す。 c_1 、 c_2 に関しては一般に材料の粘性 c の値を正確に測定することが大変

困難であるため、本研究では本機構に使われ得るエンジニアリング・プラスチックの代表的なオーダー値を使用した。入力としてはキャリッジ x_0 が $t=0$ から0.01 [m/s]の等速度直線運動を始めるものとする。

Table 1 Specifications

m_1	kg	3.0×10^{-3}
m_2	kg	2.0×10^{-4}
c_1	Ns/m	1.0×10^0
c_2	Ns/m	1.0×10^0
l_1	m	1.4×10^{-2}
l_2	m	8.5×10^{-3}
h	m	8.0×10^{-3}
dx_0/dt	m/s	1.0×10^{-2}

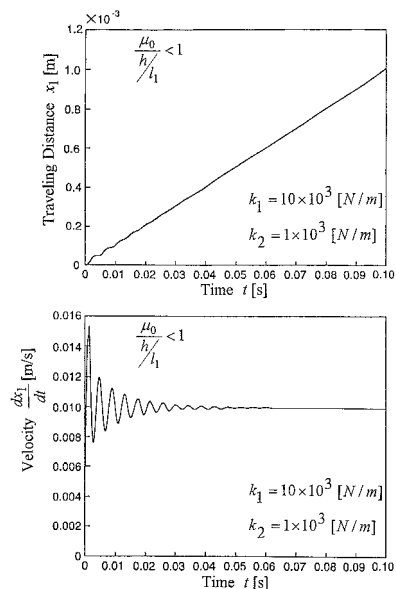


Fig. 3 Calculation Result in Stable Region

Fig. 3 は図中に示す条件下でのレンズ枠 x_1 の動きを示した例である。上図は縦軸にレンズ枠の移動距離、下図は縦軸にレンズ枠の移動速度を示し、横軸はともに時間 $t=0 \sim 0.1$ [sec]である。この例の様に h/l_1 より摩擦係数 μ_0 が小さいときは、動き始めに生じる微振動はすぐに減衰して駆動源であるキャリッジと同じ0.01 [m/s]の等速度直線運動を行うことがわかる。

摩擦係数 μ_0 が h/l_1 より大きくなると、Fig. 4 に示す様に系は不安定となり振動振幅が時間とともに増大していく。しかしあるところで振幅は一定となり、リミットサイクルを描くようになる。そのときのガイドブッシュ x_2 の動きを示したのがFig. 5 である。上図は縦軸にガイドブッシュの移動距離、下図は縦軸にガイドブッシュの移動速度である。これは摩擦に起因する典型的なスティック・スリップ現象であり、摩擦力によりガイドブッシュ

がガイドシャフトにスティックして全く動かない状態とスリップして移動する状態が交互に現れる。このような状態はガイドブッシュがガイドシャフト上をいわばガタガタと動いているわけで、我々にはビビリとして認識される。緒言で述べたように一般に自励振動はこのスティック・スリップ現象が主要因である場合が多いが、本機構で発生している自励振動は、初期微振動が時間とともに成長し、その振幅がある程度大きくなったところでスティック・スリップ現象に移行して振動が持続しているわけであり、スティック・スリップ現象そのものが自励振動を引き起こしているわけではない。よって本自励振動の対策はこの初期微振動の成長に対して行えばよいことがわかった。

4 自励振動の発生原因

一般に機械の振動対策を行うときは、ゴムなどのダンパーを追加して粘性項を増加させることによって問題となる振動を吸収させてしまう対策を考えることが多い。しかし本機構の場合、特にキャリッジとレンズ枠との連結部の粘性 c_2 を増加させることは、光軸方向の応答にヒステリシスを持たせることになり、キャリッジとレンズ枠の間に過度のバックラッシュが生じる恐れがある。よって粘性項を操作することなくこの自励振動の発生を防ぐ方法を考えることにした。

初期微振動が成長する現象をさらに調べたのがFig. 6である。これはFig. 5の下図、 $t=0 \sim 0.02$ [sec]の部分を拡大したもので、併せて同じ時間におけるレンズ枠の移動速度も記した。この図からわかることは、レンズ枠 x_1 とガイドブッシュ x_2 の位相差がほぼ90度であり、強制振動の共振時における外部加振源と被加振側の位相関係と同じになっていることである。つまり連結された2つの質量 m_1 、 m_2 はあたかもお互いが加振物と被加振物のように振る舞い、非振動的なエネルギーを自ら振動現象に変換し成長させていく、いわば発振回路とも呼べるメカニズムを形成していることがわかった。よって、何らかの諸元値を操作して発振条件であるこの位相関係を回避できれば、初期微振動の振幅が時間とともに増大していくことはなくなり、振動は持続することなくそのまま減衰して消滅することになる。

しかし粘性項を除く諸元値のうち、2つの質量 m_1 、 m_2 は幾何寸法 l_1 、 l_2 、 h と同様、製品が要求する種々の仕様から決まってしまうことが多く、操作可能なパラメータは剛性 k_1 、 k_2 だけということになる。そこで本研究では、構成部材の剛性のみを操作して自励振動が発生しない(つまり初期微振動が時間とともに増大しない)臨界の摩擦係数をできるだけ大きくするような剛性 k_1 と k_2 との関係を調べた。

5 結果

実機の諸元値である前掲のTable 1における解析結果をFig. 7に示す。図の縦軸は摩擦係数 μ_0 と h/l_1 の比、横軸は k_1 と k_2 の比である。

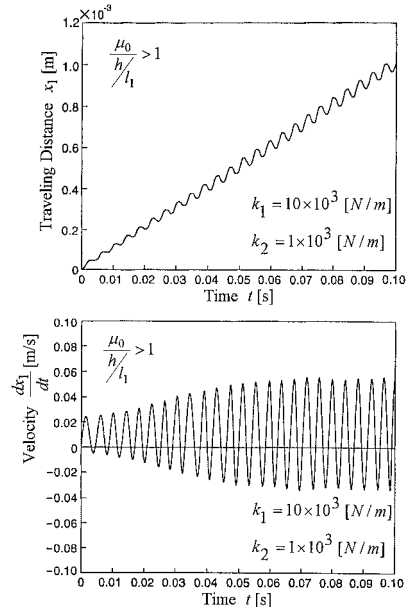


Fig. 4 Calculation Result in Unstable Region

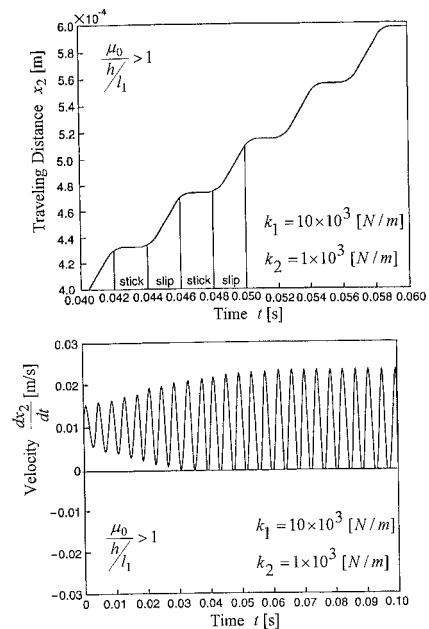


Fig. 5 Stick-Slip Phenomenon in Unstable Region

k_2 によって若干違いはあるが、図のように安定領域と不安定領域とが大きく2分される。曲線の上側が自励振動が発生する不安定領域、下側が自励振動が発生しない安定領域である。式(2)のとおり $\mu_0/(h/l_1)$ が1以下で

あればいかなる場合でも常に安定であるが、 k_1 と k_2 の関係を選ぶことによって $\mu_0/(h/l_1)$ が1以上であっても系が安定となる領域が存在する。本機構のような構造を設計した場合、一般には k_2/k_1 が小さくなりがちであるが、機構の安定性面からは実は逆であり、 k_2/k_1 が大きいほど安定領域は広がるのがわかった。そして $k_2/k_1 > 5$ においてほぼその限界に達し、それは式(2)で表される値の $2l_1/(l_1+l_2)$ 倍の大きさになる。それ以上の領域ではいかなる場合でも常に不安定である。直感的にも理解できるが、この効果は特に $l_1 \gg l_2$ の機構ほど有利である。

また剛性 k は材料固有の物理特性であるヤング率と、その部品の形状から決まる断面二次モーメントとの積に比例する量であるから、これは設計段階において設計者にある程度の自由度が与えられているパラメータである。 $l_1 \gg l_2$ の機構ほど有利であることから、スペースがあって形状には自由度があるが、レンズを収納する関係上材料が限定されてしまう k_1 は主に形状の操作によって、またスペースがなく形状には自由度が少ないが、光学性能には直接関係がない k_2 は主に材料を選ぶことによってそれぞれ k_1 、 k_2 を決定することがもっとも合理的な設計方針であると言える。

6 結 論

- (1) 本例の自励振動の発生主要因は、摩擦を介した連成剛性力に起因する系の不安定性によって、初期微振動の振幅が時間とともに増大していくことにある。
- (2) 剛性の操作のみによって自励振動が生じる臨界の摩擦係数を上昇させることが可能である。

7 考 察

一般に多自由度系の機構設計は剛性行列が非対称にならないように設計することが基本セオリーとされている。しかしビデオカメラに現在もっとも多く使われている本機構は式(1)で示したように非対称な剛性行列(主対角線に対して右上の項 左下の項)を持っている。その項は

摩擦係数 μ_0 を含んでおり、 $\mu_0 = 0$ とならない限り非対称性は消えない。よって絶えず式(2)の条件ないしFig. 7で示される条件を満たしていなければならない。もし摩擦 μ_0 が存在していても剛性行列が非対称にならないレンズ駆動機構を考案できれば、本例の自励振動はほぼ完全に解決することになる。これが本機構設計者に与えられた今後の課題といえよう。

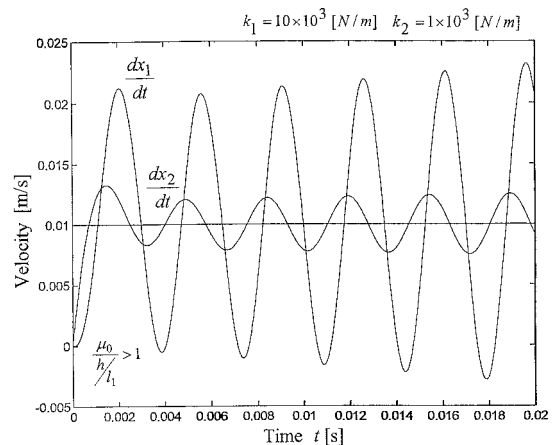


Fig. 6 Phase Shift between x_1 and x_2 in Unstable Region

参考文献

- 1) 桜井明、井上善雄、筒井秀美、伊藤廣、日本機械学会論文集(C編) 60、380 (1994)
- 2) 小野京右、岡田徹、山崎聡、日本機械学会論文集(C編) 60、2894(1994)
- 3) 江村哲二、日本機械学会1999年度年次大会講演論文集()、395 (1999-7.27 ~ 29, 東京)

注：本報は筆者によって日本機械学会1999年度年次大会講演会にて口頭発表した内容³⁾に加筆したものである。

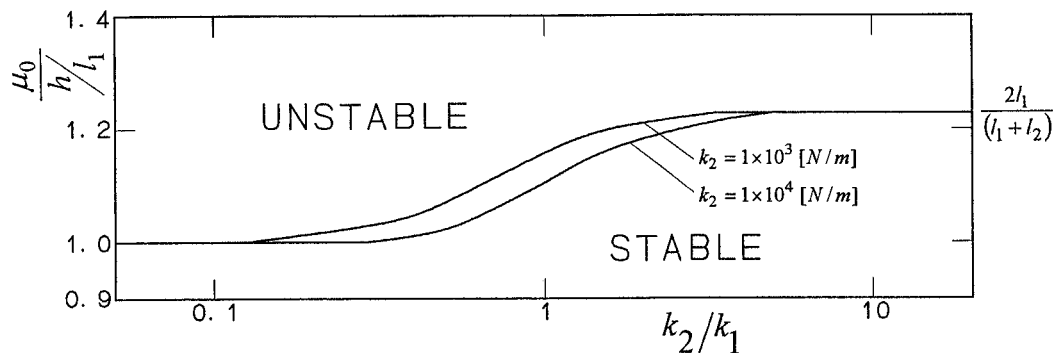


Fig. 7 Stable and Unstable Region