リール駆動高速テープ送り系の解析 及びその高精度化*

垣脇成光** 奥田 徹** 岩松 正** 石川俊夫**

Dynamic Characteristic Analysis of the Magnetic Tape Transport Mechanism
and the High Performance Servo System

Shigeaki KAKIYAKI, Tohru OKUDA, Tadashi IWAMATSU and Toshio ISHIKAWA

High-speed tape transport mechanisms directly driven by take-up and supply reels are adopted as the large-scale external storage systems or the high-speed search systems of the video cassette recorders and so on. In this paper, the kinetic model of the mechanism is introduced. The relations between the dynamic characteristics and the mechanical parameters are simulated numerically and proved experimentally. In order to improve the frequency characteristics of the servo system, original servo systems are employed newly and the high performance is obtained.

Key words: tape transport mechanism, reel driving, servo system, numerical simulation

1. 緒 言

テープを用いた磁気記録システムにおいて、記録密度の向上に伴って記憶容量が増大しており、情報の転送速度は、より一層の高速化が要求されるようになってきた。また、必要な情報が大量に記録されたテープから目的とする場所を見つけ出す、いわゆる頭だし機能の高速化も必要になっている。

このため、磁気テープを高速度で送ると共に、テープ上に高密度で記録された情報を読み出し、または記録する必要がある。安定に情報を記録再生するためには磁気テープのテープテンションを一定に保ちながら、磁気テープと磁気ヘッドの間の相対速度を高精度に保つように、高速度なテープ送りを実現しなければならない。

従来、テープを移送する手段としてはキャプスタンとピンチローラを用いたテープ駆動方法がある。しかし、高速にテープを送るためには、キャプスタン、ピンチローラの回転数を上げるか、キャプスタン径を大きくする必要があり、モータの能力、装置の小型化などの観点からこれらの方法は適当ではない。

そこで、高速にテープを送るための方法としてキャプスタン、ピンチローラを用いず、リールを直接駆動

しテープを移送する方法が考えられる。このような方式のテープ送り系については、テープ速度とテープテンションの両者を検出し、これを供給リール、巻取リールへフィードバックすることによって制御を行う場合についての報告がなされている¹⁾²⁾。しかし、これらの場合テープテンションを検出するための機構が必要である。

本研究は、テープテンション検出機構を持たないリール駆動系で高精度なテープ送りを実現することを目的とし、まずリール駆動による高速テープ送り系のモデル化を行い、その挙動の数値的な解析を行った。さらに、本解析に基づき、最適化した高精度サーボ系について述べる。

2. リール駆動テープ送り系とそのモデル化

2.1 リール駆動によるテープ送り系

図1に本報告で解析したテープ送り系の構成を示す。供給リールから巻取リールへと磁気テープが移送され、その途中にテープ走行速度を検出するための速度検出ローラが備えられている。これは、回転速度に比例した周波数の信号を発生するいわゆるFG (frequency generator) を備えており、この信号周波数を測定することによりテープ速度を検出する。両リールはそれぞれ独立に駆動力を与えられるリールモータにより駆動され、テープの移送を行う。テープテンションを直接検出するための機構は備えていない。

* 原稿受付 平成4年9月1日

** 正会員 シャープ(株)技術本部メカトロシステム研究所
(天理市樺本町 2613-1)

Fig. 1 Model of tape transportation driven by reels

Table 1 Parameters and variables for the model

J_t, J_s, J_e	Inertia moment
C_m, C_e	Viscosity coefficient for axis
C_t, C_s	Viscosity coefficient for tape
K_t, K_s	Spring constant for tape
R_t, R_s, R_e	Reel or sensor radius
$\omega_t, \omega_s, \omega_e$	Angular velocity
F_t, F_s	Tape tension

T : take-up side, S : supply side, E : tape speed sensor, M : motor

また、後述するようにテープの巻径変化に伴って系の伝達特性が変化するため、テープ巻径を検知するために両リールにもFGを備えている。

2.2 力学モデル

この系は、テープリール、テープ、速度検出ローラにより構成されており、それぞれについて慣性モーメント、粘性係数、ばね定数を考慮して表1に示すようなパラメータで表現される。

モデルにおける仮定は次のとおりである。

- ① リールは軸粘性を考慮し、テープ巻径に応じた慣性モーメント（駆動用モータのロータ慣性モーメントを含む）をもつ。
- ② テープは粘性をもった2本のばねと考え、両リールと速度検出ローラの間に独立につながれている。
- ③ 速度検出ローラは軸粘性と一定慣性モーメントをもつ。

なお、両リールの駆動トルク M_t , M_s は図1に示した方向を正とする。すなわち、 M_t はテープ巻取方向、 M_s はテープテンション増大方向を正としている。

モデルを構成する要素はリール2個、速度検出ローラ、テープ2要素の計5個であり、これらについて運動方程式をたて、ラプラス変換し周波数領域で解析する。これらを連立させて解き、出力となる変数を各パラメータおよび入力関数として表現することにより

Fig. 2 Block diagram of simple speed servo

それぞれの出力変数への伝達関数を求めた。

出力となる変数をベクトルで表現すると、

$$x = [\omega_t, \omega_s, \omega_e, F_t, F_s]^t \quad (1)$$

入力は両リールモータの駆動トルクであって、

$$u = [M_t, -M_s, 0, 0, 0]^t \quad (2)$$

となる。このとき、 H を係数行列として、ラプラス変換された運動方程式は次式のようにになる。

$$H \cdot x = u \quad (3)$$

ただし、 s をラプラス演算子として、

$$H = \begin{bmatrix} J_t \cdot s + C_m & 0 & 0 & R_t & 0 \\ 0 & J_s \cdot s + C_m & 0 & 0 & -R_s \\ 0 & 0 & J_e \cdot s + C_e & -R_e & R_e \\ R_t & 0 & -R_e & -s/(K_t + C_t \cdot s) & 0 \\ 0 & -R_s & R_e & 0 & -s/(K_s + C_s \cdot s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

これを解いて、

$$x = H^{-1} \cdot u = G \cdot u \quad (5)$$

逆行列 $H^{-1} = G$ は次のような形で表される。

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{15} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{25} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ G_{51} & G_{52} & \cdots & G_{55} \end{bmatrix} \quad (6)$$

G の第1列は、巻取側モータのトルク M_t に対する出力 x の各要素への伝達関数を表し、第2列は供給側モータのトルク M_s に対する応答の伝達関数を表す。なお、各要素 G_{ij} は s の関数であるが、例えば G_{31} は s について分子3次、分母5次の伝達関数となる。

2.3 サーボ系の構成

まず、系の応答を調べるために、最も簡単な速度サーボ系を構成した。ここでは、供給、巻取の各リールはそれぞれの制御入力を分離しており、巻取リールがテープ速度誤差に基づいてフィードバック制御を行い、供給リールは静的なテープテンションが一定となるように開ループ制御を行う構成としている。

テープ速度は図2のブロック図に示すように制御される。速度検出ローラの回転角速度 ω_e からテープ速度を検出し、巻取側リールモータへトルク M_t のフィードバックを行う。

一方、供給側モータはテープテンションを一定にするために必要となる静的な逆トルク M_s (供給リール

Table 2 Parameters for simulation

	BOT	EOT
R_T m	R_0	$2.36R_0$
R_S m	$2.36R_0$	R_0
R_E m	$0.57R_0$	$0.57R_0$
J_T kg·m ²	J_0	$3.28J_0$
J_S kg·m ²	$3.28J_0$	J_0
J_E kg·m ²	$0.026J_0$	$0.026J_0$
K_T N/m	K_0	K_0
K_S N/m	$1.58K_0$	$1.58K_0$
C_T N·s/m	$9.28 \times 10^{-5}K_0$	$9.28 \times 10^{-5}K_0$
C_S N·s/m	$1.47 \times 10^{-4}K_0$	$1.47 \times 10^{-4}K_0$
C_M N·s·m	$1.80J_0$	$1.80J_0$
C_E N·s·m	$1.80J_0$	$1.80J_0$

のテープ巻径に比例する)を発生させる開ループ制御を行う。

なお、この時の速度制御ループの一巡伝達関数は、 K をゲインとすると、巻取リール駆動トルク M_T に対する速度検出ローラの回転角速度 ω_E の伝達特性により表されるから、図中に示すように $K \cdot G_{31}$ で表される。

2.4 系の応答特性

モデル化した系の伝達関数の周波数応答特性を計算機シミュレーションした。この系では、テープの移送に伴って供給リール巻径 R_S 、巻取リール巻径 R_T が変化し、同様に供給リール慣性モーメント J_S 、巻取リール慣性モーメント J_T が変化する。

ここでは、表2に示すような定数を基に計算を行った。ただし、 R_0, J_0 はそれぞれリールの最小巻径、最小慣性モーメントを表し、 K_0 は巻取側のばね定数を表している。また、 C_T, C_S における係数は s の次元、 C_M, C_E における係数は 1/s の次元をもつ。

上で述べた巻取リール駆動トルク M_T に対する速度検出ローラの回転角速度 ω_E の応答特性 G_{31} を図3に示す。図3(a)は、テープ巻き始め位置 (BOT: Beginning of tape) における特性であり、図3(b)はテープ巻き終わり位置 (EOT: End of tape) における特性である。

周波数軸は次式に示す ω_0 を基準として表現している。

$$\omega_0 = \left(\frac{K_T \cdot K_S}{K_T + K_S} \cdot \frac{(J_T/R_T^2) \cdot (J_S/R_S^2)}{(J_T/R_T^2) + (J_S/R_S^2)} \right)^{1/2} \quad (7)$$

ω_0 は巻取、供給の両リール慣性モーメントとテープのばねで構成される振動系の固有角振動数である。この共振角周波数 ω_0 は BOT~EOT において図4のように変化する。これは慣性モーメントが次式のように半径 R_T, R_S の変化に伴って変化することによる。

Fig. 3 Speed servo characteristics

 Fig. 4 ω_0 value vs. take-up reel radius R_T

$$\left. \begin{aligned} J_T &= J_0 + \frac{\pi \rho h (R_T^4 - R_0^4)}{2} \\ J_S &= J_0 + \frac{\pi \rho h (R_S^4 - R_0^4)}{2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで、 ρ はテープの密度、 h はテープ幅である。上式の変化の様子は J_T, J_S を構成する定数項と半径 R_T, R_S の 4 乗に比例する項の 2 者の大小関係により異なり、例えば表2の条件を基準として J_0 が変化し、定数項の寄与が変わった場合を図4に示している。

供給リールから巻取リールへとテープが移送されることによって両リールのテープ巻径が変化し、リールの慣性モーメントが変化する。このため、テープ巻き位置によって図3(a), (b) に示したように特性が異なっている。図3からわかるように ω_0 において生ずる共振ピークの付近に反共振が表れる。

BOT~EOT において、特徴的なことは、この反共振点の移動である。EOT においては、低域ゲインが

Fig. 5 Speed servo characteristics (BOT, experimental)

低くなるが、共振点よりも低周波側に反共振点があるため、位相交点は高周波域まで伸びている。一方、BOTにおいては、低域ゲインは高いものの、共振点よりも高周波側に反共振点があるため、位相交点は共振点 ω_0 の位置となる。

先にも述べたように、図3に示した伝達特性は速度制御系の一巡伝達関数を表しているから、BOT～EOTの全域にわたって系を安定化するためにはBOTにおいて系を安定にすれば良いが(図3(a)では安定である)、そのためにはゲインを低くする必要があり、サーボ特性が悪化せざるを得ないことになる。

リール駆動による走行系実験機を作成して、伝達特性の測定を行った。図5にこれを示す。これは図3(a)に相当する測定結果であって、共振点、反共振点が存在しており、シミュレーションと一致していることがわかる。これより本モデルは妥当であると言える。

2.5 パラメータの効果

伝達特性は、先に示したテープ巻き位置の変化をはじめとし、各パラメータの値によって変化する。ここでは各パラメータの値の変化に伴う系の特性変化をシミュレーションした。シミュレーションは、図3(a)を基本状態として、それぞれのパラメータのみを変化させたときの伝達特性 G_{31} (一巡伝達関数) を求めた。それぞれのグラフは図3(a)を基本状態とし、各パラメータを10倍、3倍、1/3倍、1/10倍に変化させている。これを次に示す。なお、各パラメータは独立に変化させている。(例えば、慣性モーメント変化と半径変化は必ずしも独立ではないが、ここでは一方のみを変化させていることに注意されたい。)

- ① テープ粘性 C_T, C_S : 大とすることにより、共振をはじめとするすべてのピークの Q 値が小さ

くなる。(図6(a))

- ② モータ粘性 C_M : 小とすることにより、低域のゲインが向上する。(図6(b))

- ③ 速度検出ローラ粘性 C_E : 小とすることにより、低域ゲインが向上するが、共振点2の Q 値が上がる。(図6(c))

- ④ リール慣性モーメント J_T, J_S : 小とすることにより、折点1の周波数が上がる。(図6(d))

- ⑤ 速度検出ローラ慣性モーメント J_E : 小とすることにより、共振点2が高周波域へ移動し、 Q 値が下がる。(図6(e))

- ⑥ テープのばね定数 K_T, K_S : 大とすることにより共振点1, 2の周波数が上がり相対的に共振点の Q 値が上がる。(図6(f))

また、制御後の外乱伝達は、一巡伝達関数を G_0 とすると $G_0 = K \cdot G_{31}$ であって、各伝達関数を $1/(1+G_0)$ 倍することにより求まる。例えば、モータトルク M_T における外乱が及ぼす巻取りリール回転角周波数 ω_T への影響は、 $G_{11}/(1+G_0)$ で表される。したがって、磁気ヘッド部におけるテープ速度の制御後の外乱伝達を G_H とすると、ヘッドが巻取りリールと速度検出ローラの間であり、ヘッド-速度検出ローラ間距離とリール-速度検出ローラ間の距離の比が $\alpha:1$ であるとするとき、

$$G_H = \alpha \cdot R_T \cdot \frac{G_{11}}{1+G_0} + (1-\alpha) \cdot R_E \cdot \frac{G_{31}}{1+G_0} \quad (9)$$

で表される。これを図7に示す。この図において、縦軸は単位をもっており、SI単位系では $[m/(s \cdot N \cdot m)]$ となる。

3. 高精度サーボ系

3.1 高精度サーボ系の構成

前述したように、図3は、巻取りリール駆動モータの発生トルク M_T から速度検出ローラの回転速度 ω_E への伝達であるから、速度検出ローラより得られた速度信号をフィードバックして巻取りリールを駆動するようにサーボを構成すると開ループ伝達関数は共振ピークの周波数で位相交点を生ずるためサーボループを構成するうえで不利である。そこで、速度信号を巻取りリールにだけでなく、供給リールに対してもフィードバックするように構成し、系の応答特性の改善を図った。

これをブロック図で示すと図8のようになる。各リールの動作は次のようになる。

巻取りリールには、所定の一定テンション負荷 F_{T0} の下で速度を一定にするために必要となるトルク M_{T1} (巻取りリール径 R_T , 回転角速度 ω_T に基づく) を与え

Fig. 6 Simulated speed servo characteristics at various parameter conditions

Fig. 7 Transfer function of take-up motor torque to tape speed at magnetic head position

ておいたうえで、さらに速度フィードバックを行う。すなわち、

$$M_T = M_{T0} - k_1 \cdot (\omega_E - \omega_{E0}) \quad (10)$$

$$M_{T0} = R_T \cdot F_{T0} + C_M \cdot \omega_T \quad (11)$$

供給リールには、所望のテープテンション F_{S0} を発生するために必要なトルク M_{S0} (供給リール径 R_S , 回転角速度 ω_S に基づく) を与えておいたうえで、さらに

Fig. 8 Block diagram of improved speed servo

速度フィードバックを行う。すなわち、

$$M_S = M_{S0} + k_2 \cdot (\omega_E - \omega_{E0}) \quad (12)$$

$$M_{S0} = R_S \cdot F_{S0} - C_M \cdot \omega_S \quad (13)$$

上式において、それぞれのリールにフィードバックするゲイン (k_1, k_2) は供給リールのテープ送り出し加速度と、巻取リールのテープ巻取加速度とが等しくなるように選べばよい。すなわち、

$$R_T \cdot \frac{d\omega_T}{dt} = R_S \cdot \frac{d\omega_S}{dt} \quad (14)$$

速度検出ローラの慣性 J_E が両リールの慣性 J_T, J_S に

Fig. 9 Improved speed servo characteristics (BOT, simulated)

比べて無視でき、両リールが独立に動作するなら、両リールの平衡点からのトルク変化を δM_T , δM_S で表すと

$$\left. \begin{aligned} \delta M_T &= J_T \cdot \frac{d\omega_T}{dt} \\ \delta M_S &= -J_S \cdot \frac{d\omega_S}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

であるから、速度制御の際のトルク変化分は式 (14), (15) より、

$$R_T \cdot \frac{\delta M_T}{J_T} = R_S \cdot \frac{-\delta M_S}{J_S} \quad (16)$$

が成り立てば良い。式 (10), (12) のそれぞれの第 2 項が δM_T , δM_S に比例するから

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{-\delta M_S}{\delta M_T} = \frac{R_T \cdot J_S}{R_S \cdot J_T} \quad (17)$$

上式を満足するように供給側と巻取側それぞれのテープ巻径、慣性モーメントに従ってゲイン k_1 , k_2 を選び、制御を最適化すればよい。

なお、負号は、フィードバックする際の両リールモータトルクの極性が互いに逆であることを示している。

3.2 サーボ系の伝達特性

3.1 節で述べたように構成したサーボ系の開ループ伝達関数は図 9 に示すようになる。

図 9 からわかるようにリールとテープによる共振点が相殺されている。これは、速度誤差量 ($\omega_E - \omega_{E0}$) に基づいて制御されるモータトルクの出力変化が、供給、巻取の両リールで同期し、テープの送り出し、巻取の加速度が等しくなるように構成されているためである。

共振点の相殺により、位相交点は高周波数の位置となるためゲインを上げることができ、高域まで応答特性を延ばすことが可能となる。この例では低周波数域において 20 dB 以上ゲインを上げることができ、応答周波数を 10 倍以上高周波域まで高められることがわかる。

Fig. 10 Improved speed servo characteristics (BOT, experimental)

上述のようにサーボループを構成した実験機により走行実験を行った。その結果を図 10 に示す。図からわかるように、共振点が相殺されており、供給リールにも速度フィードバックを与えたことによってサーボゲインを 20 dB 上げることができ、系の応答特性が 10 倍向上した。

4. 結 言

磁気テープの弾性率と粘性率、供給側および巻取側の慣性モーメントを考慮することで、リール駆動によるテープ送り系の挙動を説明できることがわかった。

本解析モデルにより、リール駆動によるテープ送り系の挙動を特徴づけるパラメータのそれぞれの寄与の仕方を明らかにすることができ、サーボ系の設計において有効な指針を得ることができた。

本解析モデルを用いることでサーボ系を最適化することができ、この制御法を用いることによって共振点が除去され、低域ゲインを高め、より高域まで応答する高精度なサーボ系を実現することができた。

謝 辞

本研究にあたり、多くの助言をいただきました大阪大学精密工学科の森勇蔵教授に深く感謝いたします。また、実験等にご協力いただきましたシャープ(株)技術本部メカトロシステム研究所第 3 研究部の研究員各位に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) X. Rui and S. Yunxiang: A New Micro-Computer-Based Reel Servo System in the Instrumentation Magnetic Recorder, Proc. Int. Telemetry Conf., 24, (1988) 333.
- 2) 永山 昭, 田丸直幸: リール間直接テープ送り制御, 磁気記録研究会資料, MR77-45 (1977) 11.