

# レンズアクチュエータのロバスト設計 (第2報)

— 複数物理場連成シミュレーション合理化による基本機能評価の実現 —

Robust Design of Lens Actuator (2nd Report)

– Realization of a Basic Function by Streamlining Coupled Simulation for Multiple Physical Field –

中垣保孝*	八木克哉*	波多野洋*
Yasutaka NAKAGAKI	Katsuya YAGI	Hiroshi HATANO
山崎茂*	黒釜龍司*	田村希志臣**
Shigeru YAMASAKI	Tatsuji KUROGAMA	Kishio TAMURA

## 要旨

我々はこれまでレンズアクチュエータのロバスト設計の第1段階として、システムを分けた評価を行ってきた。今回、研究効率を一層高めていくために全体システムでの基本機能評価を目指した。一般にシステムは複数の物理場から構成されており、CAEを活用して全体システムの同時評価を行うには、複数のシミュレーションを連成して使用する事となる。レンズアクチュエータで用いる電磁アクチュエータは構造場と磁場の系であり、構造シミュレーションと磁気シミュレーションの連成が必要となる。しかし、このような連成シミュレーションには膨大な時間を要するという課題があった。本課題に対し、評価モデルの合理化、連成手順の工夫により効率化を図り、全体システムの基本機能評価を実現した。その結果、システム全体での最適化を達成し、機能の安定化と共に品質の向上も果たした。また構造場と電気場の系であるSIDMアクチュエータにも適応し、その有効性を確認した。

## Abstract

In the first stage of the robust design of lens actuators, previous practice has been to evaluate each subsystem independently. For more efficient research, in this study it was decided to evaluate the generic function of the total system. As a system generally involves multiple physical fields, a CAE evaluation of the total system requires coupled simulations. The electromagnetic actuator systems used in lens actuators have a structural field and a magnetic field, requiring a coupling of structural simulation and magnetic simulation. The huge amounts of time taken by such coupled simulations have been a problem. When the generic function of the total system was evaluated in this study, the evaluation model was rationalized and more efficient coupling techniques were devised. As a result, it became possible to optimize the total system, stabilize its function, and improve its quality. The effectiveness of the new techniques was confirmed in a separate application to an SIDM (Smooth Impact Drive Mechanism) actuator, another system having structural and magnetic fields.

\* コニカミノルタオプト(株)  
技術開発本部

\*\* コニカミノルタビジネステクノロジーズ(株)  
開発本部 化製品開発センター

## 1 背景と目的

### 1.1 前報の検討範囲

光ピックアップ用対物レンズアクチュエータは、磁気回路部(電流-力変換)と構造部(力-変位変換)から構成される電磁力アクチュエータである。このアクチュエータが駆動する際、製造誤差やユーザー使用条件により傾き(以降チルトと呼ぶ)が発生し、情報の読み書き性能を悪化させる。前報<sup>1)</sup>では、構造部(Fig. 1中のdisplacement transducer)について、反復最適化により安定性向上を実現し、短時間でロバスト設計可能な評価方法を構築した。これにより、構造部に対する安定性化の指針を得ることができた。研究効率を一層高めるためには、レンズアクチュエータ全体の基本システム設計を行う必要があり、磁気回路部(Fig. 1中のforce transducer)も加えたシステム全体でのロバスト設計が求められる。

### 1.2 本報の検討範囲と目的

前報は全体システムの構造部分に着目した研究開発であり、開発初期の基本システム設計段階、つまりシステム選択の段階で使うには、磁気回路部分を考慮していないため、別途検討という研究効率の観点で課題があった。開発初期の技術開発の段階で全体システムを考慮した評価方法が開発できれば、さまざまなシステムを深掘りした検討をすることができるため研究効率が格段に上がる。そのための方法として、本報ではレンズアクチュエータ全体の設計を行なうために、磁気回路部と構造部を分けて考えるのではなく、全体システムとして捉えた基本機能で、同時設計することに取り組んだ。このためには、磁気回路シミュレーションと構造シミュレーションとの連成が必要である。しかしながら、このような連成シミュレーションは、一般的に膨大な時間がかかる。本課題に対し、評価モデルの合理化、連成手順の工夫により効率化を図り、両シミュレーションを用いた効率的な同時最適を目指す。

本研究の目的を整理すると、磁気回路部と構造部を別々に設計するのではなく、システム全体としての基本機能評価方法を構築することにより、開発上流での効率的なレンズアクチュエータ基本システムの設計を実現し、駆動時のチルト特性をも同時改善することである。

## 2 アクチュエータの評価特性と評価方法

### 2.1 アクチュエータの機能と評価特性

レンズアクチュエータは、導通をかねたサスペンション部に電流を流すと磁気回路中のコイル部で発生する電磁力により、サスペンションがたわみ、可動部に生じた変位で、レンズが駆動される。前報の対象範囲は、変位を生じるサスペンションのみであったが、本報では磁気回路部も含めたシステム全体を対象としている。

レンズアクチュエータの駆動は、ディスクの面ぶれ方向に駆動するフォーカス ( $z$ ) 方向と半径方向の偏芯に対して駆動するトラック ( $x$ ) 方向の2方向存在し、それぞれ独立に機能する。つまり、レンズアクチュエータはフォーカス機能とトラック機能の2つの機能をもつ。前報では、フォーカス機能評価のみで総合評価を行なったが、本報では両方の機能を用い総合評価に用いる。

レンズアクチュエータの機能を全体システムの入出力関係で考えると、Fig. 1 に示すように入力はコイルに流す電流、出力は駆動方向へのレンズ駆動量であり、動特性による評価となる。フォーカス機能評価では、フォーカスコイルに入力する電流値を信号水準、そのときのレンズのフォーカス駆動量を出力特性、トラックコイルに

入力する電流値を誤差因子とした動特性で評価を行うことにした。一方、トラック機能評価では、トラックコイルに入力する電流値を信号水準、そのときのレンズのトラック駆動量を出力特性、フォーカスコイルに入力する電流値を誤差因子とした動特性で評価を行う。

### 2.2 アクチュエータの評価方法とデータ形式

今回の検討においては、外側直交表は $L_{32}$ 直交表を使用して、磁気回路部と構造部の両システムから誤差を取り上げた。誤差因子の数が膨大になるため、構造システムの因子からは前報の検討で影響が大きかった誤差を選別して割り当て、評価の効率化をはかる。

制御因子も、磁気回路部、構造部両方の因子を取り上げ $L_{36}$ 直交表へ同時に割り付ける (Fig. 2)。制御因子を割り付けた $L_{36}$ 直交表と誤差因子を割り付けた $L_{32}$ 直交表は直積させて実験を行う。

本実験を、シミュレーションを活用して実施する。磁気回路シミュレーションのCAEモデルをFig. 3に示す。従来は精度重視でモデルを作成していたため、1実験に2.5時間程度計算時間がかかっていたが、本研究においては、精度をある程度確保しつつ有限要素メッシュを極限まで粗くする検討を行い、1実験1分以内を実現した。

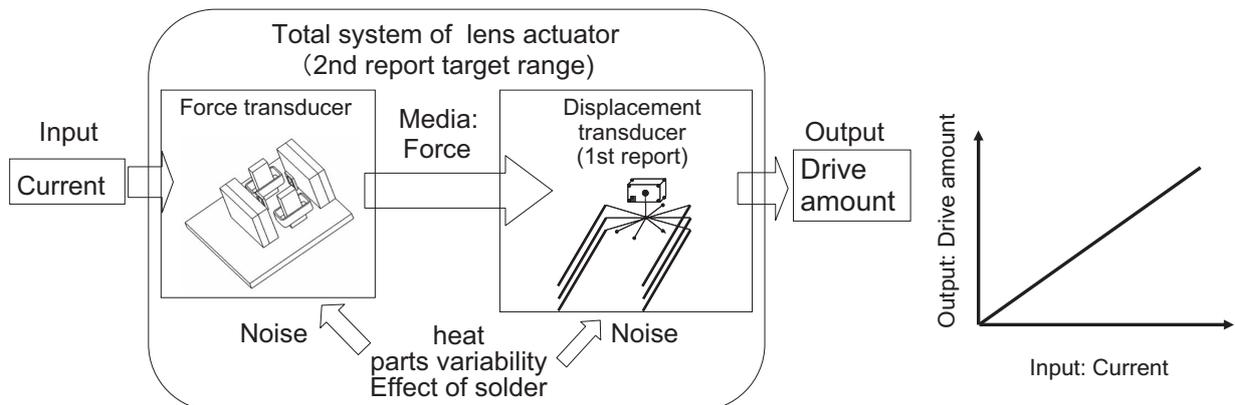


Fig. 1 Total system of lens actuator and input-output relation

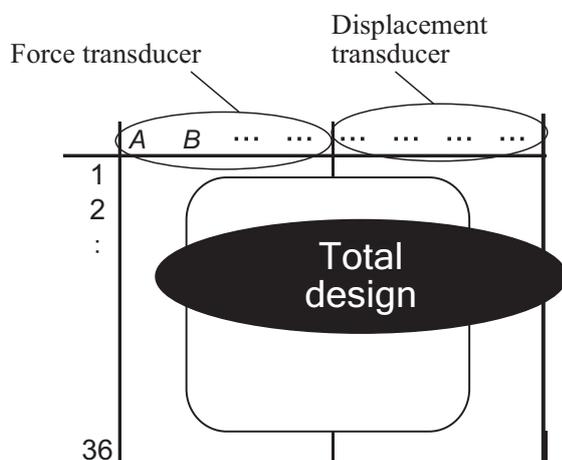


Fig. 2 Total optimization of coupled systems

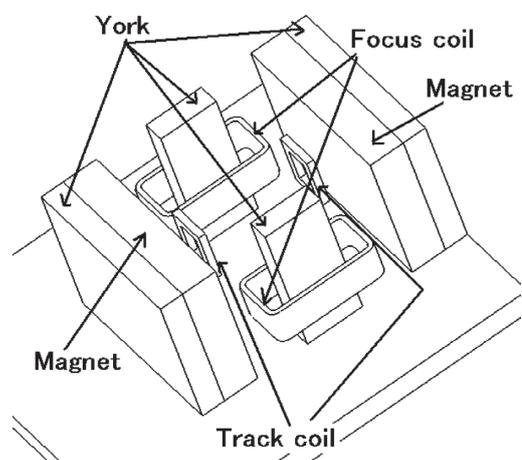


Fig. 3 CAE model of magnetic system

構造部のレンズアクチュエータのCAEモデルは前報と同じように簡略化し、出力値についても駆動量のチルト量を同時に評価するためレンズ中心点周りに8測定点を設け、測定場所の誤差として駆動量を評価する。

フォーカス機能評価におけるトラック駆動3水準や測定点8箇所は、誤差因子として多元配置で解析を行う。信号因子は、フォーカスコイルに入力する電流値3水準とする。出力特性は、フォーカス方向の駆動量である。本評価における、入出力関係の一例をFig. 4に示す。トラック機能評価においては、フォーカス駆動3水準や測定点8箇所は誤差因子として多元配置で解析を行う。信号因子は、トラックコイルに入力する電流値3水準とする。出力特性は、トラック方向の駆動量である。

前述のように、レンズアクチュエータ全体での基本機能評価を実現するためには、磁気回路シミュレーションと構造シミュレーションを連成させる必要がある。このような複数物理場のシミュレータを連成させるには、

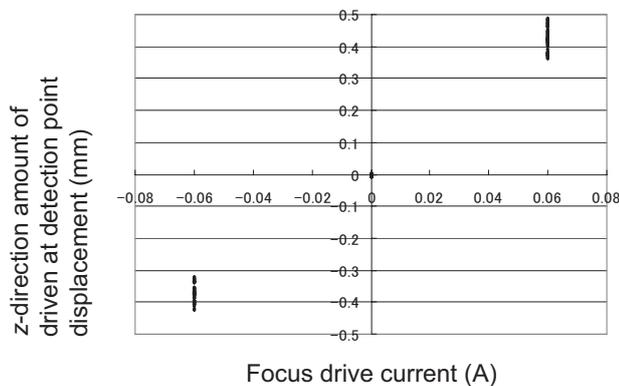


Fig. 4 Focus function input-output relation

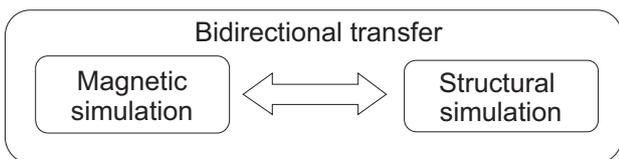


Fig. 5 Bidirectional coupled simulation

Fig. 5 の様に双方向に荷重を転送しながらシミュレートする方法があり、精度が高いという利点があるものの、非常に計算時間がかかるため、パラメータ設計に対して実施すると膨大な時間がかかり、現実的でない。また、荷重を一方向だけ受け渡す単方向連成では、精度が極端に低くなってしまうという欠点や、ユーザー使用条件である駆動位置誤差の考慮が出来ないという課題が発生する。そこで、連成シミュレーションの方法を工夫することで、精度を確保しながら計算コストを抑えつつ、ユーザー誤差を評価可能とした。

工夫した連成シミュレーションについてFig. 6にて説明すると、1) 入力するフォーカスコイルとトラックコイルの電流値を決め、2) 基準位置にて発生する電磁力を磁気シミュレーションする。その後、その荷重を構造シミュレーションに渡し、3) 基準位置にて駆動する量を推定する。その後、4) その推定駆動量位置でフォーカスとトラックコイルの電流値を入力した磁気シミュレーションを行い再び荷重を取得する。5) その最終荷重を構造シミュレーションに転送することで最終駆動量を決める。

以上のような合理化を行うことにより、レンズアクチュエータのシステム全体の基本機能評価を実現したシミュレーションが1実験1分以内で実施可能となった。実験回数は $L_{36} \times L_{32} \times 8$  (トラック誤差3 × 信号水準3-1) より約9000回であることから、全実験は約5日程度で完了する。これは、並列計算やクラスターPCによる実験分担により、さらなる実験時間の短縮が可能である。フォーカス機能評価のデータ形式をTable 1に、分散分析をTable 2に、それぞれ示し、計算例を以下に示す。

$$S_T = (-0.32720)^2 + (-0.00407)^2 + \dots + 0.34177^2$$

$$= 129.658271 \quad (f_T = 2304)$$

$$S_B = \frac{(0.041942 + \dots + 0.038049)^2}{3 \times 8 \times 32r}$$

$$= 128.089991 \quad (f_B = 1)$$

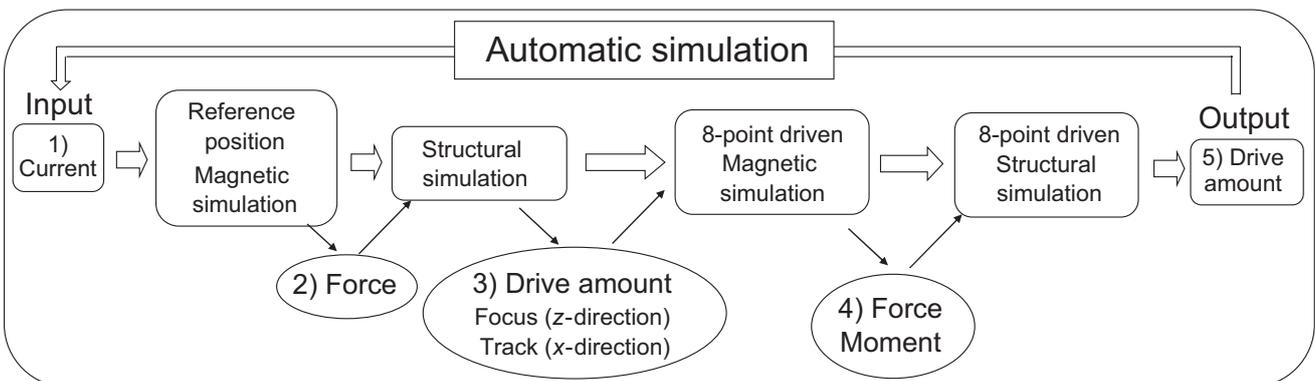


Fig. 6 Devised coupled simulation sequence

$$S_{\text{position} \times \beta} = \frac{(\text{Point 1 線形式和})^2 + \dots + (\text{Point 8 線形式和})^2}{32 \times 3r} - S_{\beta}$$

$$= 0.016120 \quad (f_{\text{position} \times \beta} = 7)$$

$$S_{\text{track} \times \beta} = \frac{(\text{Leftの線形式和})^2 + \dots + (\text{Rightの線形式和})^2}{32 \times 8r} - S_{\beta}$$

$$= 0.000078 \quad (f_{\text{track} \times \beta} = 2)$$

$$S_{N1 \times \beta} = \frac{(\text{因子1の水準1線形式和})^2 + (\text{因子1の水準2線形式和})^2}{8 \times 3 \times 16r} - S_{\beta}$$

$$S_{N'} = S_T - S_{\beta} = 1.568280 \quad (f_{N'} = 2303)$$

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = 0.000298$$

$$V_{N'} = \frac{S_{N'}}{f_{N'}} = 0.000681$$

$$\eta = 10 \cdot \log \frac{1}{8 \times 3 \times 32r} \frac{(S_{\beta} - V_e)}{V_{N'}} = 45.32 \text{ (db)}$$

$$S = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{8 \times 3 \times 32r} (S_{\beta} - V_e) \right) = 13.65 \text{ (db)}$$

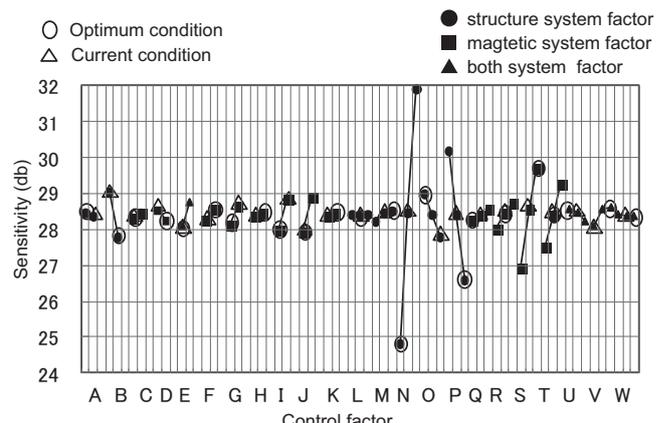
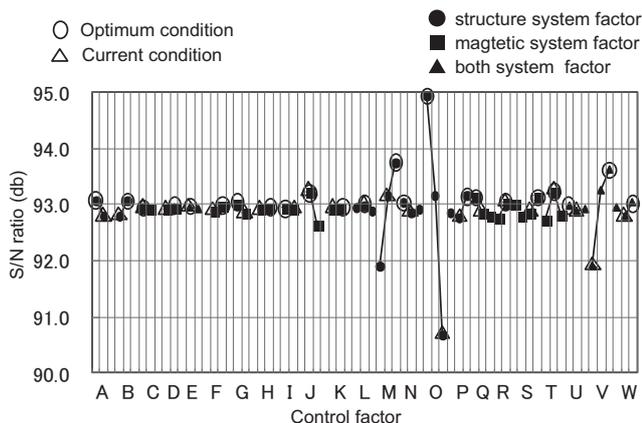
トラック機能評価についてもフォーカス機能評価と同様に計算可能である。このように、レンズアクチュエータはフォーカスとトラックの2つの機能があり、どちらかの機能のみ最適にするのではなく、両方の機能を同時に最適化する必要がある。そのため今回は、各機能のSN比と感度をそれぞれ加算して要因効果図を作成し、総合最適条件を決める。その後、総合最適条件において、フォーカス機能評価とトラック機能評価の再現性を確認して評価方法の妥当性を検証する。

Table 1 Dynamic response data format

No.	Noise			Signal M (Impressed current)			L	
	L <sub>32</sub>	Track	Point	-0.06	0	0.06		
1	Left	1	1	-0.32720	-0.00407	0.37184	0.041942	
		2	2	⋮	⋮	⋮	⋮	
		3	3	⋮	⋮	⋮	⋮	
		4	4	⋮	⋮	⋮	⋮	
		5	5	⋮	⋮	⋮	⋮	
		6	6	⋮	⋮	⋮	⋮	
		7	7	⋮	⋮	⋮	⋮	
		8	8	⋮	⋮	⋮	⋮	
	Middle	1	1	⋮	⋮	⋮	⋮	
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
		8	8	⋮	⋮	⋮	⋮	
		Right	1	1	⋮	⋮	⋮	⋮
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
			8	8	⋮	⋮	⋮	⋮
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	32	⋮	⋮	-0.29238	-0.00134	0.34177	0.038049	
	2	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	36	⋮	⋮	⋮	-0.52540	-0.00618	0.56943	0.06569

Tabel 2 ANOVA

Source		f	S	V
Sensitivity	$\beta$	1	128.089991	
Noise of position	position $\times$ $\beta$	7	⋮	
Noise of track	track $\times$ $\beta$	2	⋮	
Noise of factor 1	N1 $\times$ $\beta$	1	⋮	
⋮	⋮	⋮	⋮	
Noise of factor 31	N <sub>31</sub> $\times$ $\beta$	1	⋮	
Residuals	e	2263	0.673832	2.978E-04
Total noise	N'	2303	1.568280	6.810E-04
Total variation	T	2304	129.658271	



	SN ratio		Sensitivity	
	Prediction	Confirmation	Prediction	Confirmation
Current	89.67	89.62	28.13	28.10
Optimum	98.60	96.08	23.13	22.81
Gain	8.93	6.46	-5.00	-5.29

Fig. 7 Total assessment

### 2.3 アクチュエータの評価結果と考察

フォーカス機能とトラック機能のSN比と感度をそれぞれ加算した要因効果図と総合最適条件の確認実験結果をFig. 7に示す。また、フォーカス機能評価及びトラック機能評価のSN比と感度の要因効果図と確認実験結果を、それぞれFig. 8及びFig. 9に示す。フォーカス機能評価におけるSN比利得の推定値が3.33db, 確認実験値2.32db, トラック機能評価におけるSN比利得の推定値が5.60db, 確認実験値4.13dbと再現性が高いとはいえないものの、各機能評価において、評価方法の妥当性が

期待できるレベルである。つまり、基本システム設計の評価方法としてある程度期待できるといえる。

本評価において、再現性が完全に一致していない原因を考察すると、各因子のインタラクション存在、設計水準の不十分さ、連成解析シーケンス合理化の影響、などが考えられる。

今回の評価方法により見いだした総合最適条件では、フォーカス機能とトラック機能のSN比を同時に改善可能な結果が得られたが、感度は両機能とも低下する結果となった (Fig. 8およびFig. 9の感度参照)。

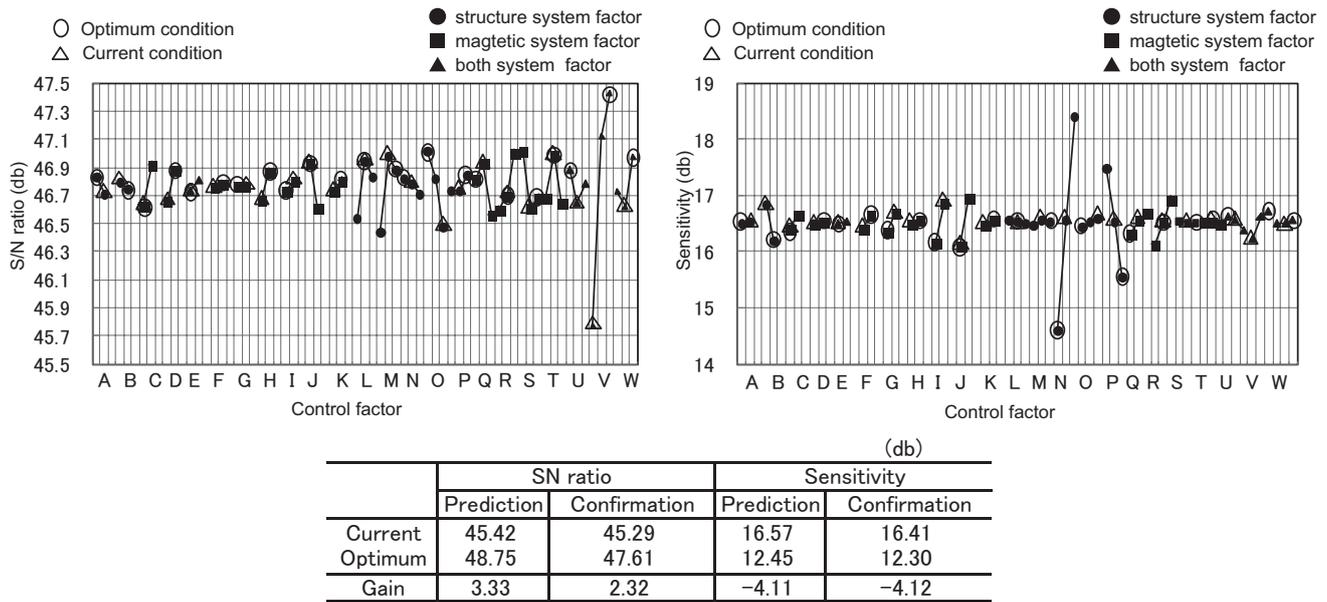


Fig. 8 Focus function assessment

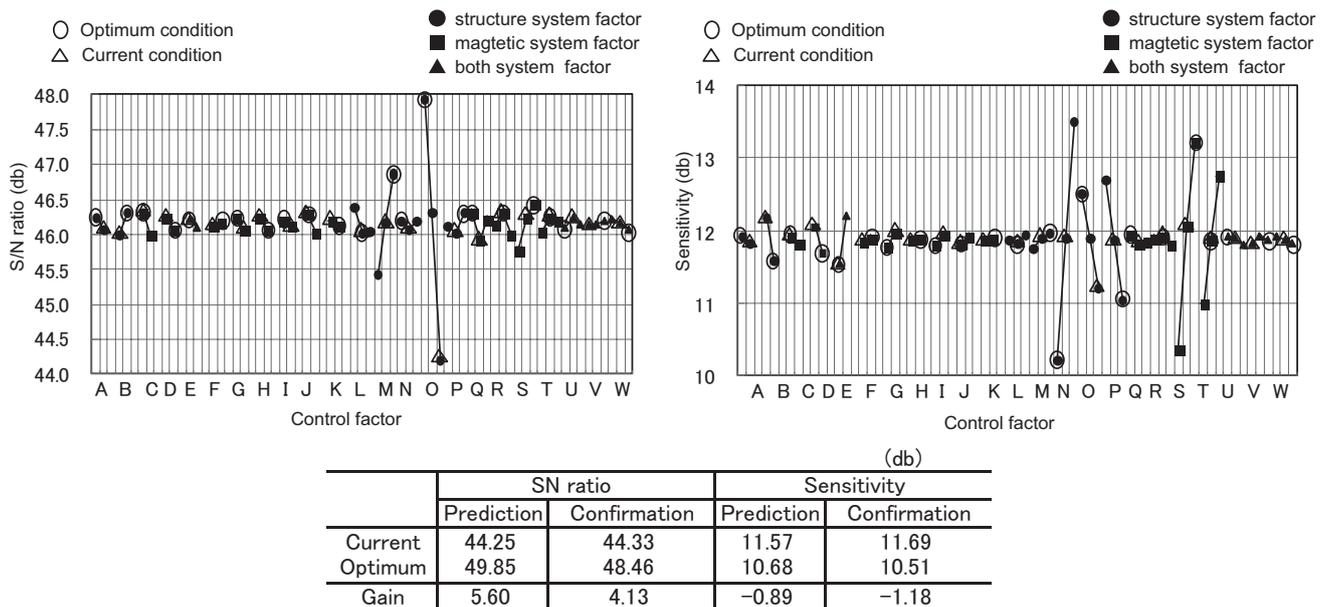


Fig. 9 Track function assessment

Table 3 Result of function assessment

(db)

		Basic function (Dynamic response)					
		Total		Focus drive		Track drive	
		SN ratio	Sensitivity	SN ratio	Sensitivity	SN ratio	Sensitivity
Current		89.62	28.10	45.29	16.41	44.33	11.69
Optimum	Synthesis Tuning	96.08	22.81	47.61	12.30	48.46	10.51
		95.29	34.27	46.41	17.97	48.88	16.30
Gain	Synthesis Tuning	6.46	-5.29	2.32	-4.12	4.13	-1.18
		5.67	6.17	1.12	1.56	4.55	4.61

## 2.4 チューニング

機能の安定性を重視した総合最適条件は、安定性が高いものの、感度が5db程度マイナスとなる。そこで、総合評価における要因効果図以外にも、フォーカス機能評価、トラック機能評価の要因効果図を同時に確認して、SN比だけでなく感度の影響が大きい水準も選び感度チューニングを行う。

基本は総合最適条件の水準を選ぶ。次に各要因効果図の影響が大きい因子の水準を選んでいく。そのチューニング条件の機能評価結果をTable 3に示す。Table 3の利得を比較すると、SN比利得は、総合最適条件には及ばないものの、感度を確保しながらフォーカス機能とトラック機能の両方の基本機能を同時改善できていることがわかる。

## 3 考察

### 3.1 CAEによる品質特性の確認

チューニング条件において、基本機能SN比改善に対する、品質特性(チルト量)の改善効果を確認するため、現行条件とチューニング条件のチルト量の分布をFig. 10

に示す。これらは、フォーカス駆動量が±0.4mm、トラック駆動量が±0.2mmの8つのポジション駆動位置における、レンズ中心検出点 $L_{32}$ 誤差のチルト量3成分の頻度分布図である。チルト量の目標範囲は±10分である。

現行条件とチューニング条件の品質特性であるチルト量のゼロ望目特性のSN比をTable 4に示す。フォーカス機能とトラック機能の両方の基本機能を同時に改善することにより、品質特性(チルト量)も自然と改善していることがSN比の利得を確認することでわかる。特に、ぼらつきが大きいy軸回りのチルト改善により、目標範囲外のチルトが発生する頻度が減少している。また、z軸回りのチルトについても約40dbもの大きな改善となった。

### 3.2 損失関数による経済効果の算出

駆動時のチルト量がFig. 10のように定義されその特性値がずれることにより発生する損失は損失関数により以下のように定義される。

$$L = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \times \sigma^2$$

L : 損失

$A_0$  : 故障時の消費者の損失

$\Delta_0$  : 機能限界

故障時の消費者の損失 $A_0$ は、修理費用とその他費用から11000円と定義した。今回対象とする光ディスクシステムはレンズのチルト量が15分より大きいと情報を読み取ることが出来ないため、機能限界 $\Delta_0$ は15分と設定した。

Table 4 Tuning result of quality response

(db)

	Quality response		
	Zero-is-best response SN ratio		
	Rot x	Rot y	Rot z
Current	-4.68	-16.40	-19.31
Tuning optimum	-2.91	-10.19	17.85
Gain	1.76	6.21	37.15

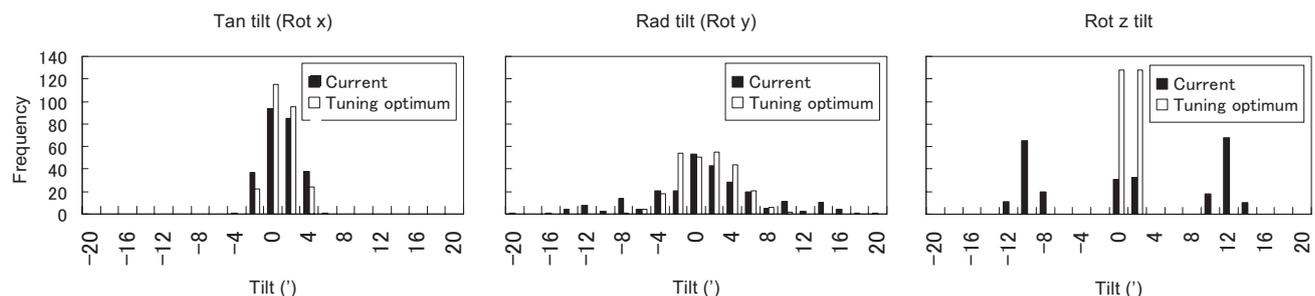


Fig. 10 Frequency histogram of tilt angle

これより、損失関数は以下のように設定できる。

$$L = \frac{11000}{15^2} \times \sigma^2$$
$$= 48.9 \times \sigma^2$$

ここで、Fig. 10における現行条件の $\sigma$ は6.6分、チューニング条件の $\sigma$ は2.0分である。いずれも平均値は0である。商品の総ロットを百万個(1000K)とすると、各条件の損失は以下の値になる。

$$L_{\text{現行条件}} = \frac{11000}{15^2} \times 6.6^2 \times 1000K$$
$$= 2,129,600,000 \text{円}$$

$$L_{\text{チューニング条件}} = \frac{11000}{15^2} \times 2.0^2 \times 1000K$$
$$= 195,555,555 \text{円}$$

つまり、現行条件では約21億円、チューニング条件では約2億円である。よって約19億円の経済効果があったといえる。

今回の結果は、改善するために品質特性のチルト評価をするのではなく、基本機能を安定化させていけば品質も改善できることを示唆している。

本評価において、再現性が十分であったとはいえないが、レンズアクチュエータのロバスト設計が可能となった。

#### 4 結論と今後の検討課題

本研究の目的は、システム全体としての基本機能評価方法を構築することにより、開発上流での効率的なレンズアクチュエータ基本システムの設計を実現し、駆動時のチルト特性を改善することであった。

本研究の結果を、以下にまとめる。

- (1)CAEを用いて、開発上流におけるレンズアクチュエータ全体システム基本機能評価を1実験1分以内で達成する工夫を行い、実現化した。
- (2)レンズアクチュエータ全体システムの基本機能評価を構築し、構造部と磁気回路部の同時最適を実現しつつ、フォーカス、トラック両機能の同時安定化も実現することで、品質特性のチルト量をも改善できることを示した。
- (3)本評価の再現性をさらに向上させることが課題であるが、研究目的であるレンズアクチュエータ基本システムのロバスト設計が実現可能となった。今後、新たなシステムを創造し、システム選定を行っていく必要がある。
- (4)これまでの検討はアクチュエータのDC特性についての技術構築であるが、周波数特性を見据えた評価方法の構築が今後の課題である。

#### 5 他事例による評価方法の汎用性確認

本稿では詳しく述べていないが、全体システムの基本機能評価は、弊社のSIDM (Smooth Impact Drive Mechanism) アクチュエータにも適応でき、ロバスト設計を実現した。これより、基本機能評価の汎用性を示すことが出来た。SIDMアクチュエータは、小型・低電圧駆動でありながら高推力が得られ、nmオーダの駆動制御が可能なアクチュエータであり市場で高い評価を得ている<sup>2)</sup>。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた応用計測研究所の矢野宏先生、コニカミノルタビジネステクノロジーの豊田美帆氏、加川哲哉氏に深く感謝を致します。

#### ●参考文献

- 1) 中垣保孝, 他: レンズアクチュエータのロバスト設計, 品質工学, 18, 6 (2010), pp.75-85.
- 2) Y. Ozeki et al.: Miniature multiple-axes adaptiveoptics unit employing SIDMs and its application to anefficient green laser module, Konica Minolta Tech.Rep., 6,(2009), pp.82-87
- 3) 田口玄一, 矢野宏: コンピュータによる情報設計の技術開発-シミュレーションとMTシステム-, 日本規格協会, (2004), pp.145-168.
- 4) 山田幸光, 宇井友成, 他: 品質工学を活用したシステム設計手法-磁気センシングシステムの最適化-, 品質工学, 15, 3(2007), pp.50-56
- 5) 豊田美帆, 他: IH定着装置の試作レス開発, 品質工学, 16, 4(2008), pp.31-37.
- 6) 田口玄一: 開発・設計段階の品質工学, 日本規格協会, (1996)
- 7) Shinji Tanaka et al.: Super Thin Actuator for7mm-Height Optical Disc Drives, Int. Symp. Optical Memory 2007, Abthree Publishing Co., Ltd.,(2007),pp.254-255
- 8) Hideo Yamaguchi et al.: Two-Axis Actuator with High Sensitivity and Low Tilt, Int. Symp. Optical Memory2000, Business Center for Academic Societies Japan.,(2000), pp.138-139

#### ●出典

本稿は学会誌「品質工学」Vol.19, No.6 (2011年12月1日発行)からの転載である。本稿の著作権は品質工学会が有する。