光ディスク装置へのフィードフォワード制御の適用

An Application of Feedforward Control to Optical Disk Systems

正会員 柳澤 齊^{†1}, 正会員 小出 大一^{†2}, 正会員 徳丸 春樹^{†2},
正会員 藤田 欣裕^{†2}, 早川 義法^{†3}, 大石 潔^{†4}

Hitoshi Yanagisawa^{†1}, Daiichi Koide^{†2}, Haruki Tokumaru^{†2},
Yoshihiro Fujita^{†2}, Yoshinori Hayakawa^{†3} and Kiyoshi Ohishi^{†4}

Abstract A high-speed and precise focusing/tracking servo system is indispensable for developing a HDTV optical disk camera-recorder. This system is needed for higher data transfer rate and recording density. In this work, we adopted a feedforward control employing the Zero Phase Error Tracking method for the focusing/tracking servo system, and this method reduced residual focusing/tracking errors compared with a feedback system. In addition, we confirmed that the method makes possible obtaining stable recordings and reproduces signals in optical disk systems with the high data transfer rate needed for broadcast use.

キーワード：光ディスク，フォーカス制御，トラッキング制御，フィードフォワード制御，高速記録再生，レーザ

1. ま え が き

放送用途のハイビジョン光ディスクの開発には、青紫色レーザによる100Mbps以上の高転送レートでの記録再生が必要となる¹⁾。このような高転送レートでの記録再生には、光ディスクを高速で回転させる必要があるため、レーザ光の焦点を光ディスク面上に合わせるフォーカス制御、レーザ光を光ディスク上のトラックに追従させるトラッキング制御の両方について、高速かつ高精度な制御が要求される。しかしながら、ディスク回転数の高速化に伴い、光ディスクの面振れ、および光ディスクの偏芯などによるトラック振れの周波数が高くなるため、従来のフィードバック制御方式では高精度なフォーカス制御、およびトラッキング制御は困難であった。今回、フォーカス制御およびトラッキング制御にフィードフォワード方式を適用することで、フ

ォーカス制御およびトラッキング制御の高速・高精度化を図ったので報告する。

2. フィードフォワード制御方式

2.1 目標とする線速度とディスク回転数

最初に、100Mbpsの転送レートを達成するために必要な線速度およびディスク回転数について検討を行った。図1にビット長を $0.18\mu\text{m}$ とした場合の、線速度とディスク回転数の関係を示す。この場合、100Mbpsの転送レートを得るためには線速度で 18m/s となる。これをディスク回転数に換算した場合、ディスクの最内周側と最外周側では、同じ線速度でも半径が異なるため、必要なディスク回転数は

図1 線速度とディスク回転数
Disk rotation speed for 100Mbps.

2004年1月21日受付, 2005年6月23日最終受付, 2005年7月13日採録

†1 NHK 大阪放送局

(〒540-8501 大阪市中央区大手前4-1-20, TEL 06-6937-3264)

†2 NHK 放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-3257)

†3 株式会社ツガミ

(〒385-8586 長野県佐久市中込3600, TEL 0267-62-1071)

†4 長岡技術科学大学

(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1, TEL 0258-47-9525)

†1 NHK Osaka Broadcasting Station

(4-1-20, Ohtemae, Chuo-ku, Osaka, 540-8501, Japan)

†2 NHK Science & Technical Research Laboratories

(1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo, 157-8510, Japan)

†3 Tsugami Corporation

(3600, Nakagomi, Saku-city, Nagano, 385-8586, Japan)

†4 Nagaoka University of Technology

(1603-1, Kamitomioka-cho, Nagaoka-city, Niigata, 940-2188, Japan)

図2 フィードバック制御系の開ループ特性
Frequency response of a feedback controller.

変化する．最も高いディスク回転数を必要とするのは最内周部分で，最大7,200rpmの回転数でディスクを回転させなければならない．したがって，フォーカス・トラッキング制御の制御特性は，回転数にして7,200rpmまで検討する必要がある．

2.2 フィードバック制御の限界

光ディスク装置のフォーカス・トラッキング制御には，フィードバック制御器が一般的に用いられている．このフィードバック制御器は，フォーカス・トラッキングアクチュエータの制御特性をもとにして，必要な制御特性が得られるように設計を行う．図2に，フィードバック制御器をアクチュエータに接続した時の一般的な制御特性の例を示す．この制御器では位相進み補償回路2段，位相遅れ補償回路1段の構成としている．図より50Hz，120Hz（回転数にして3,000rpm，7,200rpmに相当）でのゲインはそれぞれ約65dB，45dBであるので，例えば，偏芯が $50\mu\text{m}$ ある場合には，トラッキング誤差はそれぞれ約 $0.03\mu\text{m}$ ， $0.28\mu\text{m}$ に抑圧される．ところで，各種DVDで規定されているディスクの面振れ，偏芯によるフォーカス誤差・トラッキング誤差の許容値は表1に示すようになっている．表1記載の中で，ディスク回転数が最も高いものでは約3,000rpmであるが，この回転数であれば，図2に示したフィードバック制御器によりフォーカス誤差，トラッキング誤差を許容値以下に低減することが可能である．しかし，ディスク回転数7,200rpmのような高速回転時には，図2のフィードバック制御器では許容値以下に低減することはできない．許容値以下にトラッキ

表1 各種DVDの規格
The standards of DVD.

	面振れ	許容誤差 (フォーカス)	偏芯	許容誤差 (トラッキング)	最高ディスク 回転数
DVD-ROM	$\pm 300\mu\text{m}$	$\pm 0.23\mu\text{m}$	$100\mu\text{m}_{\text{p-p}}$	$\pm 0.022\mu\text{m}$	約 1400
DVD-R	$\pm 300\mu\text{m}$	$\pm 0.23\mu\text{m}$	$70\mu\text{m}_{\text{p-p}}$	$\pm 0.022\mu\text{m}$	約 1500
DVD-RAM	$\pm 300\mu\text{m}$	$\pm 0.23\mu\text{m}$	$50\mu\text{m}_{\text{p-p}}$	$\pm 0.022\mu\text{m}$	約 3200

ング誤差を改善するためには，制御ゲインを約20dB改善しなければならないが，この場合DCゲインが85dB以上と非常に高ゲインとなり，十分な位相余裕，ゲイン余裕を確保できず制御系が不安定になる．また，制御系の高ゲイン化を可能とするために，有限要素法などを用いてアクチュエータの高次共振周波数をより高い周波数に改善する研究もなされているが，この高次共振周波数は10～50kHzに存在するため，十分な位相余裕，ゲイン余裕を確保できず，フィードバック制御器の高ゲイン化には限界がある²⁾．そのため制御系の安定性を確保したまま，高周波数領域で制御特性の改善効果のあるフィードフォワード制御方式を導入することとした．

2.3 フィードフォワード制御方式の概要

今回，フォーカス・トラッキング制御の高速・高精度化のために導入したフィードフォワード制御方式について述べる．図3に一般的なフィードフォワード制御系を示した．図中の $x_d(k)$ は位置指令信号， $x(k)$ は位置検出信号，

図3 フィードフォワード制御方式
Feedforward control system.

$G_{\text{closed}}(z^{-1})$ はフィードバック制御システムのパルス伝達関数、 $r(k)$ は $G_{\text{closed}}(z^{-1})$ への入力信号を表す。また、 $x_d(k)$ 、 $x(k)$ 、 $r(k)$ をZ変換したものをそれぞれ $X_d(z^{-1})$ 、 $X(z^{-1})$ 、 $R(z^{-1})$ とする。

ここで、 $G_{\text{closed}}(z^{-1})$ を式 (1) のように表すことができる。

$$G_{\text{closed}}(z^{-1}) = \frac{z^{-d} B_c(z^{-1})}{A_c(z^{-1})} \quad (1)$$

ここで z は複素数であり、 z^{-1} は1ステップ遅れ、 z^{-d} は d ステップ遅れに相当する。 $B_c(z^{-1})$ と $A_c(z^{-1})$ は z^{-1} の多項式で次式とする。

$$B_c(z^{-1}) = b_{c0} + b_{c1}z^{-1} + \dots + b_{cm}z^{-m}$$

$$A_c(z^{-1}) = 1 + a_{c1}z^{-1} + \dots + a_{cn}z^{-n}$$

ただし、 $b_{c0} \neq 0$

このとき、 $x(k)$ は式 (2) となる。

$$X(z^{-1}) = G_{\text{closed}}(z^{-1}) \cdot R(z^{-1}) \quad (2)$$

フィードフォワードコントローラのパルス伝達関数を $G_{\text{ff}}(z^{-1})$ とすると $R(z^{-1})$ は式 (3) となる。

$$R(z^{-1}) = G_{\text{ff}}(z^{-1}) \cdot X_d(z^{-1}) \quad (3)$$

ここで $X(z^{-1})$ と $X_d(z^{-1})$ を一致させるためには、式 (1) ~ 式 (3) より $G_{\text{ff}}(z^{-1})$ が次式を満たせば良い。

$$G_{\text{ff}}(z^{-1}) = \frac{1}{G_{\text{closed}}(z^{-1})} = \frac{z^d A_c(z^{-1})}{B_c(z^{-1})} \quad (4)$$

式 (4) の分子には z^d が含まれる。これは入力信号の未来値を表しているため、入力信号 $x_d(k)$ があらかじめわかっていることが、フィードフォワード制御方式では不可欠の条件となる。

2.4 コントローラの構成方法

式 (4) は、直接的なフィードフォワードコントローラの形であるが、連続時間系のシステムを零次ホールドにより離散化した場合には不安定零点を持つ。このため、実際にフィードフォワード制御を導入する場合には、フィードバック制御系の不安定零点を考慮して、フィードフォワードコントローラを構成する必要がある。この不安定零点の影響を避けるため、フィードフォワードコントローラの構成

方法に、零位相誤差トラッキング制御 (Zero Phase Error Tracking; ZPET) 方式を用いた^{3) 4)}。

まず、不安定零点の取り扱いを明確にするため $B_c(z^{-1})$ を、安定零点を含む $B^{-}c(z^{-1})$ と不安定零点を含む $B^{+}c(z^{-1})$ に分解する。

$$B_c(z^{-1}) = B^{-}c(z^{-1}) \cdot B^{+}c(z^{-1}) \quad (5)$$

これにより、

$$\begin{aligned} r(k) &= \frac{A_c(z^{-1})}{B_c(z^{-1})} \cdot z^d \cdot x_d(k) \\ &= \frac{A_c(z^{-1})}{B^{+}c(z^{-1}) \cdot B^{-}c(z^{-1})} \cdot x_d(k+d) \end{aligned} \quad (6)$$

このままフィードフォワードコントローラを構成すると、 $G_{\text{closed}}(z^{-1})$ と $B^{-}c(z^{-1})$ との間で不安定零点と極の相殺が行われるため制御系が不安定になる。そこで零位相誤差トラッキング制御方式の手法により、まず次のように式変形を行う。 $B^{-}c(z^{-1})$ の z^{-1} を z で置き換えた $B^{-}c(z)$ は $B^{-}c(z^{-1})$ と複素共役の関係にある。この多項式を式 (6) の分子、分母に乗じて、

$$r(k) = \frac{A_c(z^{-1}) \cdot B^{-}c(z)}{B^{+}c(z^{-1}) \cdot B^{-}c(z^{-1}) \cdot B^{-}c(z)} \cdot x_d(k+d) \quad (7)$$

とする。ここで制御系を不安定にする極と零点の相殺を防ぐために、分母の $B^{-}c(z^{-1})$ と $B^{-}c(z)$ の z^{-1} と z を1とし、式 (8) を得る。

$$r(k) = \frac{A_c(z^{-1}) \cdot B^{-}c(z)}{B^{+}c(z^{-1}) \cdot [B^{-}c(1)]^2} \cdot x_d(k+d) \quad (8)$$

このとき $X_d(z^{-1})$ から $X(z^{-1})$ への伝達関数は式 (9) となる。

$$X(z^{-1}) = \frac{B^{-}c(z^{-1}) \cdot B^{-}c(z)}{[B^{-}c(1)]^2} \cdot X_d(z^{-1}) \quad (9)$$

ここで $B^{-}c(z^{-1})$ と $B^{-}c(z)$ は複素共役の関係にあるため、すべての周波数について位相差が0となり、高周波領域においても位相遅れのない制御系を構成できる⁵⁾。

2.5 光ディスクシステムへの適用

次にフィードフォワード制御方式の光ディスク装置への

図4 光ディスク装置におけるフィードフォワード制御方式
Feedforward control in optical disk system.

図5 光ディスク装置におけるフィードフォワード制御のブロック図
Block diagram of feedforward control in optical disk system.

適用を考える。光ディスク装置におけるフォーカス・トラッキング制御において特徴的なこととして、図3のように制御系に位置指令信号を入力し、位置検出信号との差を取り誤差信号を得るという系になっていないことが挙げられる。光ディスク装置では、光ディスク面に照射したレーザ光の反射光により直接フォーカスのずれ、およびトラッキングのずれを表す誤差信号を検出し、これによりアクチュエータの制御信号を生成している⁶⁾⁷⁾。そのため、光ディスク装置の制御系に合う形で図3の制御系を等価変換し、デジタル制御系表現にすると図4のように表すことができる⁸⁾⁹⁾。図中、 T_s はサンプリング時間、 $G_{ff}(z^{-1})$ はフィードフォワードコントローラのパルス伝達関数、 $C(z^{-1})$ はフィードバックコントローラのパルス伝達関数、 $P(s)$ は制御対象の伝達関数、 ZOH は零次ホールド、 $e(k+d)$ は d サンプル先の誤差信号の未来値をそれぞれ表すが、フォーカス誤差、トラッキング誤差信号共に未来の信号を得ることは不可能である。そのためこのままでは、光ディスク装置のフォーカス・トラッキング制御にフィードフォワード制御方式を適用することはできないことになる。

ここでフォーカス誤差、トラッキング誤差が生じる原因について考えてみる。光ディスクはリムーバブル媒体であるため、スピンドルモータに光ディスクをチャッキングした際に偏芯が生じる。また光ディスク自身の反りなど、機械的精度の問題から面振れが生じることも避けることがで

きない。この面振れと偏芯がフォーカス誤差・トラッキング誤差の生じる最も大きな原因となっている。ところで光ディスク上のレーザスポットは、光ディスク1回転ごとに隣接するトラックへと移動するが、偏芯、面振れの状態は隣接するトラックにおいてはほとんど変化しない。したがってフォーカス誤差、トラッキング誤差も1回転ごとにはほとんど変化しないという特徴がある。そこで1回転前の誤差信号を、メモリーに記憶しておいて未来値として代用することが可能であり、これによりフィードフォワード制御系を適用することができる。

以上により構成した、光ディスク装置にフィードフォワード制御を適用した制御系のブロック図を図5に示す。メモリーには一回転前の誤差信号を記憶させ、これをもとにフィードフォワード制御信号を得る形となっている。

2.6 繰り返し制御系との比較

光ディスク装置のフォーカス・トラッキング制御でメモリーに誤差信号を記憶させておき、これをもとにフォーカス・トラッキング誤差の低減を図る方式として繰り返し制御系がある。図6にこの制御系を示す。構成としては、フィードフォワード制御系と類似しているが、メモリーに記憶される信号に大きな違いがある。繰り返し制御では、制御対象に加えられる信号は現在の誤差信号(図6(a))と、メモリーに記憶されている一回転前の信号に制御帯域を制限するフィルタ $F(z^{-1})$ をかけた信号(図6(b))を加算した

図6 繰り返し制御系
Learning control system.

図7 フォーカスアクチュエータの制御特性
Frequency response of a focusing actuator.

信号になる。そしてメモリーに新たに記憶される信号は、この時の制御対象への入力信号 (a+b) になる。このように繰り返し制御器の出力信号が、メモリーに記憶される信号に大きな影響を与えるため、制御系の安定性を確保するうえで $F(z^{-1})$ のチューニングが非常に重要となる¹⁰⁾。

一方、フィードフォワード制御系では、メモリーに記憶されるのは図5からもわかるように、常に一回転前の誤差信号である。そのため、フィードバック制御で除去することができなかった誤差信号から、この誤差をなくすために必要な信号をフィードフォワード制御器に発生させ、これを現在の誤差信号と加算する形の制御系となっている。この違いのため制御系に定常偏差が存在する場合などは、繰

り返し制御系ではメモリーに記憶される信号が増大し発散する可能性があるのに対して、フィードフォワード制御系では、常に一回転前の誤差信号が記憶されるだけのため、安定性の面で繰り返し制御系より優れている。

3. シミュレーション

実験に用いる光ディスク評価装置のフォーカス・トラッキングアクチュエータについて制御特性の測定を行い、それをもとにモデリングを行った^{11) 12)}。図7および図8に示すように、フォーカス・トラッキングアクチュエータ共に2次共振周波数を持った5次系である (1次共振周波数：フォーカスアクチュエータ 38.6Hz, トラッキングアクチュエー

タ38.5Hz, 2次共振周波数: フォーカスアクチュエータ31.2kHz, トラッキングアクチュエータ32.3kHz)。しかし, 今回の実験では, A/D変換器のサンプリング周波数が50kHzのデジタル制御装置を用いて, フォーカス・トラッキング制御を行っている。そのため, ナイキスト周波数25kHz近辺に存在する2次共振点は無視し, 制御対象は式(10)に示すように, 2次系の制御対象と見なしてモデリングを行った¹³⁾。ここで K_a はアクチュエータの推力係数, M は可動部の質量, D は粘性係数, K_s は弾性係数である。

$$P(s) = \frac{K_a}{Ms^2 + Ds + K_s} = \frac{K_a / M}{s^2 + D / M s + K_s / M} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{フォーカスコントローラ} \quad & K_a / M = 3.25 \times 10^2 \\ & D / M = 4.98 \times 10^1 \\ & K_s / M = 6.03 \times 10^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{トラッキングコントローラ} \quad & K_a / M = 2.25 \times 10^2 \\ & D / M = 3.86 \times 10^1 \\ & K_s / M = 5.91 \times 10^4 \end{aligned}$$

また図9, 図10には, フォーカス・トラッキングアクチュエータにフィードバックコントローラを接続したときの開ループ特性を示した。コントローラはフォーカス制御, トラッキング制御共に位相進み補償2段の構成である。DCゲインは, フォーカス制御が65dB, トラッキング制御が75dBとした。また位相余裕はフォーカス制御では12.4deg, トラ

ッキング制御では18.7deg, 交差周波数はフォーカス制御では1.75kHz, トラッキング制御では3.58kHzである。以下にフォーカス, トラッキングコントローラの伝達関数を示す。

$$C(s) = \frac{s^2 + N_1 s + N_0}{s^2 + D_1 s + D_0}$$

$$\begin{aligned} \text{フォーカスコントローラ} \quad & N_1 = 1.6613255698 \times 10^5 \\ & N_0 = 1.7665289003 \times 10^7 \\ & D_1 = 1.5832991560 \times 10^5 \\ & D_0 = 1.5313082734 \times 10^9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{トラッキングコントローラ} \quad & N_1 = 5.6010065264 \times 10^4 \\ & N_0 = 4.6031929134 \times 10^8 \\ & D_1 = 1.7208963634 \times 10^5 \\ & D_0 = 2.3564087284 \times 10^9 \end{aligned}$$

このフィードバックコントローラのみによるフィードバック制御の場合と, フィードバック制御+フィードフォワード制御を適用した場合との比較をシミュレーションにより行った。シミュレーションのモデルを図11に示す。光ディスクの面振れ, 偏芯による誤差 $x_{\text{dis}}(t)$ を誤差信号に直接加える形にしている。シミュレーションの条件としては各種DVDの規格を参考にして, 光ディスクの面振れ(フォーカス方向の振れ)が $\pm 300 \mu\text{m}$, 偏芯(トラッキング方向の振れ)が $\pm 100 \mu\text{m}$, ディスクの1回転周期で正弦波状に変化するものとし, ディスクの回転数は7,200rpmとした。こ

図9 フォーカス制御系の開ループ特性
Open-loop characteristics of a focusing controller.

図10 トラッキング制御系の開ループ特性
Open-loop characteristics of a tracking controller.

これらの条件の下で行ったフォーカス誤差，トラッキング誤差のシミュレーション結果を図12，図13に示す．最初の1回転がフィードバック制御のみ，2回転目以降でフィードフォワード制御を併用している．フィードバック制御のみ

の場合は，フォーカス誤差 $\pm 1.4 \mu\text{m}$ ，トラッキング誤差 $\pm 0.18 \mu\text{m}$ となっているものが，フィードフォワード制御を併用することにより，それぞれ $\pm 0.014 \mu\text{m}$ ， $\pm 1 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ に改善され，シミュレーション上はフィードフォワード制

図11 シミュレーションモデル
Simulation model of a focusing/tracking control.

図12 シミュレーション結果 (残留フォーカス誤差)
Simulation results (residual focusing error) .

図13 シミュレーション結果 (残留トラッキング誤差)
Simulation results (residual tracking error) .

御が十分な改善効果があることを確認した。

4. 高速制御実験

次に、光ディスク評価装置を用いて高速制御実験を行った。光ディスク評価装置と制御実験装置の主な諸元を表2に、高速制御実験のブロック図を図14に示す。制御実験装置は、フォーカス・トラッキング誤差信号をサンプリング周波数50kHzでA/D変換してDSP (TMS320C6701) に取り込み、制御演算を行ってフォーカス・トラッキング制御信

表2 実験装置の諸元
Specification of experimental setup.

レーザー光源波長	405nm
NA	0.65
ワーキングディスタンス	1.0mm
フォーカス誤差検出方式	ナイフエッジ
トラッキング誤差検出方式	プッシュプル
DSP	32bit 浮動小数点演算 167MHz
A/D,D/A変換器周波数	50kHz

号を生成する。これをD/A変換して光ディスク評価装置のフォーカス・トラッキングアクチュエータを制御している。図15および図16に高速制御実験を行った際の、制御方式によるフォーカス・トラッキング誤差の比較を示した。この時のディスク回転数は7,200rpm、光ディスクのトラックピッチは0.74 μmである。フィードバック制御だけの場合、フォーカス誤差3.4 μm_{p-p}、トラッキング誤差0.09 μm_{p-p}となっているが、フィードバック制御+フィードフォワード制御の場合にはそれぞれ0.35 μm_{p-p}、0.04 μm_{p-p}、以下に改善され、実験上もフィードフォワード制御による十分な改善効果があることを確認した。

最後に、制御方式の違いによる再生信号の比較を図17に示した。フィードバック制御だけの場合、フォーカス・トラッキング誤差の増加による再生信号の低下が見られる部分があるが、フィードバック制御+フィードフォワード制御の場合は安定な再生信号が得られている。

5. む す び

光ディスク装置におけるフォーカス・トラッキング制御に対して、フィードフォワード制御の適用について検討を行った。フィードフォワード制御の適用には、フォーカス・トラッキング誤差信号の未来の値が必要となるが、1回転前の誤差信号をメモリーに記憶しておき、これを未来値として代用することで、光ディスク装置のフォーカス・トラッキング制御にフィードフォワード制御を適用することを可能とした。このメモリーを利用したフィードフォワード制御方式について、ディスク高速回転時におけるシミ

図14 制御実験のブロック図

Block diagram of focusing/tracking control experiment.

図15 実験結果 (残留フォーカス誤差)

Experimental results (residual focusing error) .

図16 実験結果 (残留トラッキング誤差)

Experimental results (residual tracking error) .

(a)フィードバック制御

(b)フィードバック制御+フィードフォワード制御

図17 制御方式による再生信号の比較
Reproduced signals.

レギュレーションを行い、フォーカス・トラッキング誤差を改善できることを確認した。また、デジタル制御装置により、フィードフォワード制御系を実際に構成してフォーカス・トラッキング制御実験、および記録再生実験を行い、その有効性を確認した。今後は、放送用光ディスクとして求められる、突発的外乱等に対するフィードフォワード制御系の安定性などについて検討を行う。

〔文 献〕

- 1) H.Tokumaru: "Application of the Optical Disk to TV Broadcasting", Proc. PCOS2000, pp.61-64 (2000)
- 2) 片山, 長沢: "適応型繰り返し制御を用いた光ディスクのトラッキング制御", テレビ誌, 48, 8, pp.1018-1026 (1994)
- 3) M.Tomizuka: "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 109, pp.65-68 (1987)
- 4) B.Haack, M.Tomizuka: "The Effect of Adding Zeros to Feedforward Controllers", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 113, pp.6-10 (1991)
- 5) 富塚: "デジタルレギュレーションとトラッキング制御", 日本機械学会部門関西支部第12回講習会, ロボメカアドバンスシリーズモーションコントロールの基礎と事例, pp.7-20 (1992)
- 6) K.Ohishi, K.Kudo, K.Arai and H.Tokumaru: "Robust High Speed Tracking Servo System for Optical Disk System", Proc.of IEEE, Sixth International Workshop on Advanced Motion Control, pp.92-97 (2000)
- 7) K.Arai, H.Okumura, H.Tokumaru and K.Ohishi: "Improvement of Performance of a Tracking Servo System for an Optical Disk Drive", Jpn.J.Appl.Phys., 39 pp.855-861 (2000)
- 8) 早川, 大石, 工藤, 柳澤, 徳丸, 小出: "光ディスク記録システムの高速ロバストトラッキングサーボ系のシンプル化", 電学全大, 4-221, pp.1555-1556 (2001)
- 9) 早川, 大石, 柳澤, 徳丸, 小出: "光ディスクのエラー予測型高速トラッキング制御系の構成", 電気学産業計測制御研資, IIC-01-43, pp.13-18 (2001)
- 10) 稲田, 下生, 野村: "小型光ディスク装置におけるトラッキングサーボシステム", 信学技報, MR85-32, pp.17-24 (1985)
- 11) 小出, 柳澤, 徳丸, 早川, 大石ほか: "光ディスクにおけるフィードフォワード制御を用いた高速トラッキング実験", 映情学年次大, pp.30-31 (Aug. 2001)
- 12) 大石, 工藤, 柳澤, 徳丸: "光ディスク記録装置の高速ロバストラ

ッキングサーボ系の一構成法", 電学論, 122-D, 5, pp.421-429 (May 2002)

- 13) K.Ohishi, Y.Hayakawa, H.Yanagisawa, D.Koide and H.Tokumaru: "Robust Feedforward Track Following Control System for an Optical Disk", Proc.of IEEE IES AMC2002, 1, pp.57-62 (2002)

柳澤 ひとし 1985年, 早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。1987年, 同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。同年, NHK入局。放送技術研究所にて, ヘッド・メディアインタフェース, 光ディスクのフォーカス・トラッキング制御等の研究に従事。2003年より, 大阪放送局勤務。正会員。

小出 だいいち 1994年, 富山県立大学工学部電子情報工学科卒業。1996年, 同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年, NHK入局。放送技術局制作技術センターを経て, 1999年より, 放送技術研究所勤務。放送用光ディスク, 光ヘッド制御の研究に従事。正会員。

徳丸 春樹 1975年, 熊本大学工学部電気工学科卒業。1977年, 九州大学大学院工学研究科情報工学専攻修了。同年, NHK入局。大阪放送局を経て, 1980年から, 放送技術研究所勤務。光記録デバイスおよびシステムの研究に従事。博士(工学)。正会員。

藤田 欣裕 1976年, 東京大学工学部電気工学科卒業。同年, NHK入局。1981年より, 放送技術研究所にて, 固体撮像技術, 高精細撮像システムの研究に従事。技術局開発センターを経て, 現在, 放送技術研究所(ネットワークシステム)部長。工学博士。正会員。

早川 義法 2000年, 長岡技術科学大学工学部電気電子システム課程卒業。2002年, 同大学大学院工学研究科修士課程修了。現在, (株)ツガミにて, 切削加工の高精度化に従事。

大石 潔 1981年, 慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1986年, 同大学大学院工学研究科博士課程修了。大阪工業大学講師, 助教授を経て, 1993年, 長岡技術科学大学電気系助教授。2003年, 教授, 現在に至る。主として, 制御工学, モーションコントロールに関する研究に従事。工学博士。