

## 論文の内容の要旨

論文題目 「DVD原盤露光装置用ステージ位置制御に関する研究—粗微動による超精密軌跡制御と次世代姿勢センシング要素技術—」

氏名 佐久田 茂

### 1. はじめに

高精度なピット群をガラス原盤上に高精度に露光する装置が光ディスク原盤露光装置である。原盤露光装置へ摩擦駆動、粗微動制御を適用して高精度露光を達成するとともに精密制御の今後の多自由度化を見据えたSTMを用いた超精密姿勢センサを考案し、基礎性能を実証した。以下の三点に重点をおいて議論を進めた。

- (1) 光ディスク原盤露光装置ステージ送り系に対して摩擦駆動機構を初めて展開した。
- (2) 粗動・微動制御の干渉現出の理論的・実験的検証を踏まえて、粗動・微動連動制御をDVD原盤露光装置へ展開した。
- (3) STMを用いた超精密角度センサを考案し、基本性能を実証した。

### 2. 摩擦駆動

光ディスク原盤露光装置ステージ送り系に対して摩擦駆動機構を初めて展開した。図1

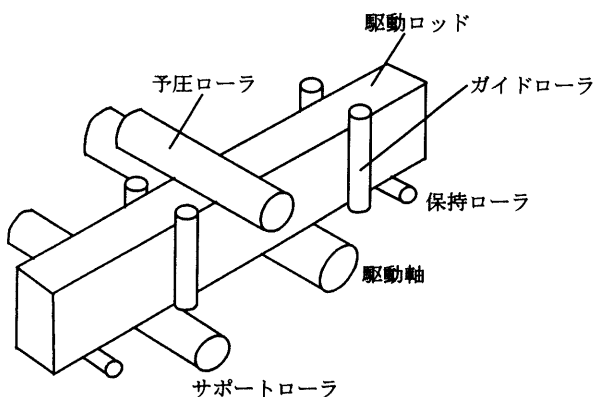


図1 摩擦駆動機構の概観

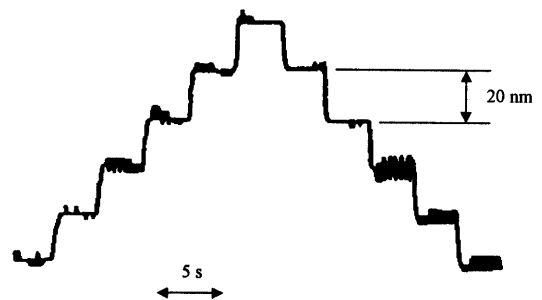


図2 ステージ微小変位応答

は、摩擦駆動の概観である。駆動軸と駆動ロッドの接触状態を大ストロークにわたって一定状態に確保できるように駆動ロッドを左右対称に配置された駆動軸、サポートローラ、予圧ローラによって三点支持する基本構成である。図2は、ステージ微小変位応答である。位置決め分解能は5 nmであった。光ディスク原盤露光装置に対して高精度位置センサとの組み合わせで適用が可能である。

### 3. 粗動・微動連動制御

図3は、筆者等が提案した尺取虫方式粗微動連動の制御原理図である。微動が粗動と同期をとりながら伸縮を繰り返しつつ連続的に位置決めさせる。連動時の粗動・微動間の干渉は、対象周波数が高い場合位置決め誤差として顕在化する。干渉の軽減には、(1)粗動対象周波数を下げることが可能な場合は、粗動対象周波数を下げる(2)同じステップ指令の繰返し時のPTP制御のような場合は、微動指令プロファイルを予見的に変形させる、ことが有効であることを尺取虫方式粗動・微動連動を用いた装置設計・試作・実験を通して実証した。また根本的な干渉軽減には(3)微動共振周波数を上げる、ことが必要であることをモデル解析より明確にした。

### 4. DVD原盤露光装置の開発

摩擦駆動要素試験、および粗動・微動制御の干渉現出の理論的・実験的検証を踏まえて、粗動(摩擦駆動)・微動連動制御をDVD原盤露光装置へ展開した。DVD原盤露光装置ではステージ指令軌跡が時間軸に対して非常に滑らかなプロファイルとなるため、粗動・微動間の干渉は無視できる。図4は、DVD原盤露光装置のモデルである。粗動・微動連動制御は、図4に示す内含する励振源などに対するロバスト性向上(外乱抑圧)に対して有効である。図5は、原盤露光装置ステージ送り系ブロック線図である。図6は開発したDVD原盤露光装置ステージ系の外観である。表1は、粗動・微動連動制御によるステージ位置制御のロバスト性向上効果をまとめたものである。図7は開発した装置による原盤のAFM像である。DVD原盤仕様トラックピッチ $0.74\mu\text{m} \pm 0.03\mu\text{m}$ を満たす原盤を製作できた。

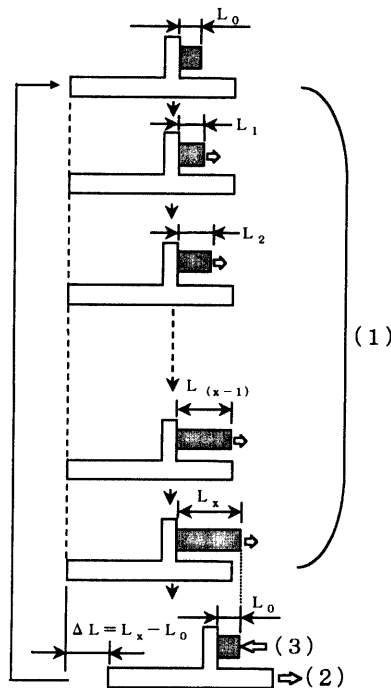


図3 尺取虫方式粗微動連動原理

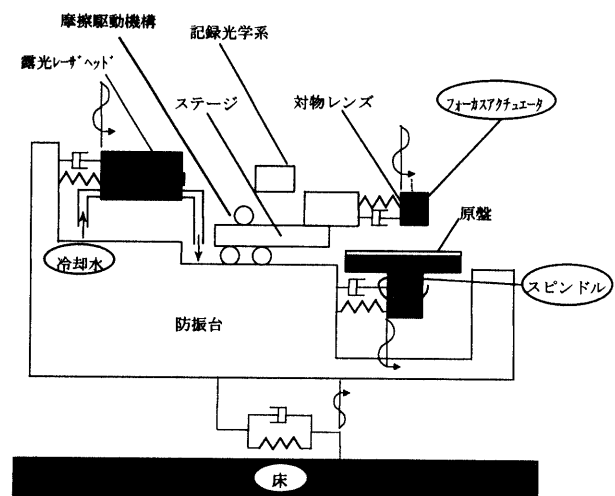


図4 DVD原盤露光装置モデル

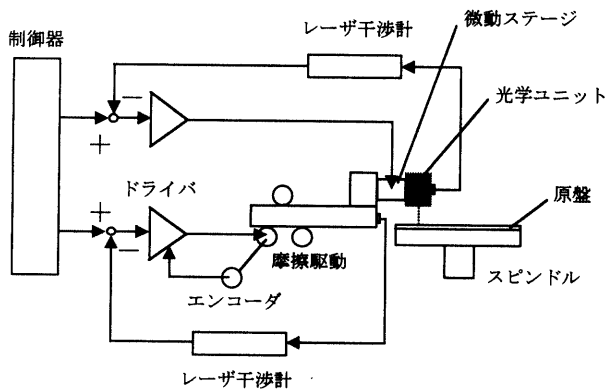


図5 DVD原盤露光装置送り系ブロック線図

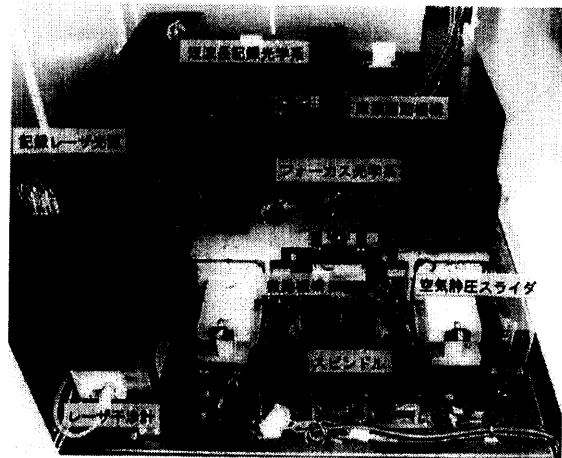


図6 DVD原盤露光装置外観

表1 粗微動連動制御によるステージ位置制御ロバスト効果

	摩擦駆動単独時位置偏差		粗動・微動連動制御時位置偏差		外乱抑圧率 (-dB)
	時間波形	位置決め 誤差(P-P nm)	時間波形	位置決め 誤差(P-P nm)	
外乱振動 無し		1.5		1.0	—
スピンドル 回転 (30 Hz)		1.5		1.0	3.5
レーザーヘッド 冷却水 (65 Hz)		2.2.5		1.0	7.0
フォーカサー ノイズ (400 Hz)		3.0		1.2.5	7.6

今後の位置制御では、『誤差の補正』が性能、コストの両面からみて実用的である。粗動・微動連動制御は、装置の長時間安定性、内含する励振源対策、周囲環境に左右されない位置制御などに関連して、光ディスク原盤露光装置のみならず他の超精密装置に対しても今後一層適用範囲が広がると考えられる。

### 5. STMを用いた角度センサ

高精度化の一方、多自由度化の傾向にある超精密位置制御は、次世代以降の光ディスク原盤露光装置においても同様のことが言える。多自由度化のキーテクノロジーである姿勢センサとして、筆者等は複数のSTM探針を用いた角度センサを考案した。図8は、角度センサの概観である。3本のSTM探針が対象物上の参照原子を追跡することによって対象物の3つ角度変化を同時に測定できる。図9は、2本のSTM探針を用いた要素試験装置の制御ブロック線図である。図10は、ピッチング測定結果である。STMを用いた角度センサがnradの分解能を有すことを設計、試作、実験を通して実証した。

### 6. まとめ

本論文の結論は以下である。

- (1) DVD原盤露光装置に対して摩擦駆動機構は有効である。次世代以降の光ディスク原盤露光装置に対しても高精度位置センサとの組み合わせで展開が可能である。

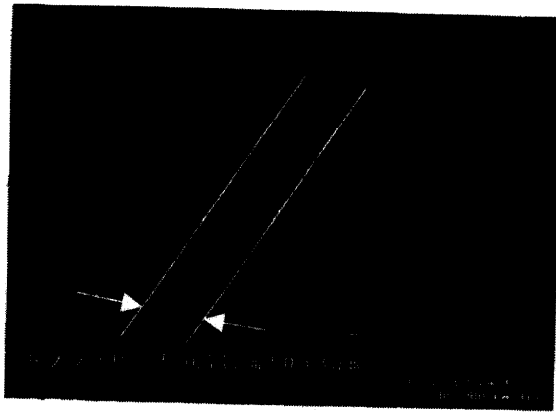


図7 DVDピットAFM像

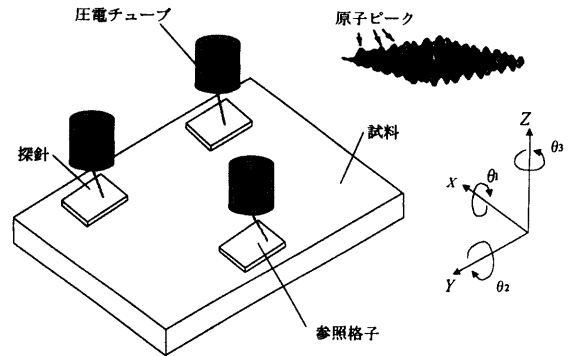


図8 STMを用いた角度センサ概観

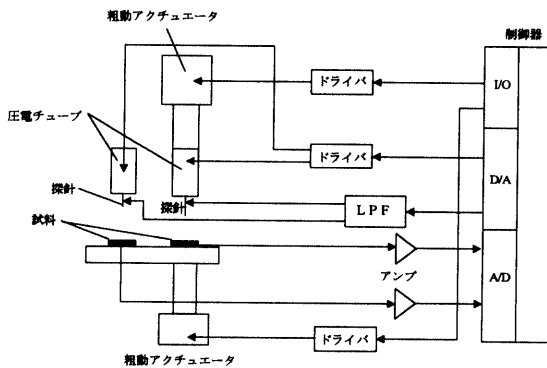


図9 要素試験装置ブロック線図

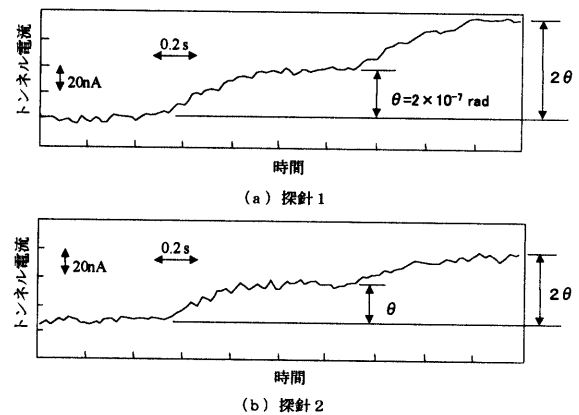


図10 2本のSTM探針を用いたピッチング測定

- (2) DVD原盤露光装置において粗動・微動連動制御は、ロバスト性向上（外乱抑圧）に対して有効である。今後の位置制御では、『誤差の補正』が性能、コストの両面からみて実用的である。光ディスク原盤露光装置のみならず他の超精密装置に対しても粗動・微動連動制御は今後一層適用範囲が広がると考えられる。
- (3) DVD原盤露光装置ではステージ指令軌跡が時間に対して非常に滑らかなプロファイルとなるため、粗動・微動間の干渉は問題とならない。粗動が高い周波数領域で運動する際は問題が顕在化する。干渉の軽減には、(1) 微動共振周波数を上げる (2) 粗動対象周波数を下げる (3) 微動指令プロファイルを予見的に変形させる（同じステップ指令の繰返しのPTP制御の場合）、ことが有効であることをモデル解析・試作・実験を通して実証した。
- (4) 多自由度化の傾向にある超精密位置制御は、次世代以降の光ディスク原盤露光装置についても同様のことが言える。多自由度化のキーテクノロジーである姿勢センサとして、STMを用いた角度センサを考案した。STMを用いた角度センサが  $\text{nrad}$  の分解能を有することを設計、試作、実験を通して実証した。

本研究成果の工業界への貢献として、摩擦駆動、および粗動・微動連動制御を光ディスク原盤露光装置へ適用し、1996年のDVDの発売に先立って、東芝からのDVD提案および規格統一化用のサンプルディスクの原盤製造に本装置は大きく寄与した。さらに、DVD発売以降はDVDビデオの原盤製造に本装置が用いられ、DVDの普及に威力を発揮した。