

博士論文

ガルバノスキャナ位置決め装置における
高速・高精度
位置決め制御と軌道追従制御

Fast and Precise Point-to-point and
Trajectory Control for Positioning
Systems of Galvanometer Scanner

2015年度

松家 大介

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的と従来研究の動向	3
1.2.1	本研究の目的	3
1.2.2	従来研究の動向	5
1.3	本論文の構成	7
第 2 章	ガルバノスキャナ位置決め装置の概要と本研究の課題	11
2.1	レーザ穴明機向けガルバノスキャナ位置決め装置の概要	11
2.1.1	レーザ穴明機の概要	11
2.1.2	レーザ穴明機における加工方法の概要	14
2.1.3	ガルバノスキャナ位置決め装置の構成	14
2.1.4	ガルバノスキャナの構造	15
2.1.5	ガルバノスキャナ位置決め装置の仕様	16
2.2	周波数応答特性の測定と制御対象の数学モデルの構築	17
2.2.1	周波数応答特性の測定	18
2.2.2	制御対象の数学モデルの構築	18
2.3	トルク指令型 2 自由度制御系の設計	21
2.3.1	位相安定化法による FB 補償器の設計	23
2.3.2	FSC に基づく FF 制御入力設計	25
2.4	既約分解表現に基づく 2 自由度制御系の設計	30
2.4.1	状態量 FB 制御によるサーボ系の概要	31
2.4.2	既約分解表現に基づく 2 自由度制御系の設計	32
2.5	位置決め性能低下問題における技術課題の明確化	36
2.5.1	プラント特性変動による位置決め精度の劣化	36
2.5.2	装置運用面で発生する位置決め精度の劣化	38
2.5.3	機構部品の経時・経年劣化による位置決め精度の劣化	40

2.6	まとめ	42
第3章	位置決め精度劣化の定量的な評価と発生要因の分析	45
3.1	プロニー解析法による位置決め誤差波形の分析	45
3.1.1	プロニー解析法の概要	45
3.1.2	プロニー解析法のガルバノスキャナへの適用	47
3.2	転がり軸受性能低下が位置決め精度に与える影響の定量化	50
3.3	まとめ	53
第4章	動作モード切り替え時の過渡応答を低減する目標軌道設計	55
4.1	トレパニングの概要	55
4.2	NST法の提案	56
4.2.1	NST法の概要	57
4.2.2	2軸協調位置決め制御系の構成	60
4.3	NST法の適用と効果検証	61
4.4	まとめ	63
第5章	小振幅揺動動作による転がり軸受性能低下の定量化とその補償	67
5.1	転がり軸受性能低下の定量化法	67
5.1.1	転がり軸受性能低下の定量化法の概要	68
5.1.2	トルク特性の取得方法	68
5.1.3	トルク変動の算出と転がり軸受性能の定量化	71
5.1.4	転がり軸受性能低下の定量化法の適用と効果検証	71
5.2	転がり軸受性能低下時の補償法	73
5.2.1	FF補償による位置決め精度改善	76
5.2.2	転がり軸受性能低下時の補償法の適用と効果検証	77
5.3	まとめ	79
第6章	結論	81
6.1	本研究で得られた成果	81
6.2	今後の課題と展望	83
	謝辞	85
	参考文献	87
	発表論文リスト	95

目次

1.1	論文の構成	8
2.1	CO ₂ レーザ穴明機の外観	12
2.2	レーザ穴明機におけるレーザ光位置決め装置の基本構成	12
2.3	レーザ穴明機での加工方法	14
2.4	ガルバノスキャナ位置決め装置の制御システム基本構成	15
2.5	可動コイル式ガルバノスキャナの横断図	16
2.6	可動磁石式ガルバノスキャナの横断図	16
2.7	ガルバノスキャナ位置決め装置における位置決め性能指標	18
2.8	制御対象の周波数応答特性 (供試体 1)	19
2.9	制御対象の周波数応答特性 (供試体 2)	19
2.10	制御対象の周波数応答特性 (供試体 3)	19
2.11	制御対象の周波数応答特性 (供試体 4)	20
2.12	制御対象の周波数応答特性 (供試体 5)	20
2.13	制御対象の周波数応答特性 (供試体 6)	20
2.14	拡大系制御対象のブロック線図	21
2.15	トルク指令型 2 自由度制御系のブロック線図	25
2.16	$C(z)$ の周波数応答特性 (供試体 1)	27
2.17	開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 1)	27
2.18	感度関数の周波数応答特性 (供試体 1)	27
2.19	$C(z)$ の周波数応答特性 (供試体 2)	28
2.20	開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 2)	28
2.21	感度関数の周波数応答特性 (供試体 2)	28
2.22	$C(z)$ の周波数応答特性 (供試体 3)	29
2.23	開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 3)	29
2.24	感度関数の周波数応答特性 (供試体 3)	29
2.25	機構特性変動時の開ループ伝達関数のナイキスト線図 (位相安定化法)	30

2.26	機構特性変動時の開ループ伝達関数のナイキスト線図 (スモールゲインによる設計法)	30
2.27	FSC によるトルク指令波形	31
2.28	FSC によるトルク指令の周波数分析結果	31
2.29	既約分解表現に基づく 2 自由度制御系のブロック線図	32
2.30	検出角度 y' -制御操作量 u の周波数応答特性 (供試体 4)	33
2.31	開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 4)	33
2.32	感度関数の周波数応答特性 (供試体 4)	33
2.33	検出角度 y' -制御操作量 u の周波数応答特性 (供試体 5)	34
2.34	開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 5)	34
2.35	感度関数の周波数応答特性 (供試体 5)	34
2.36	検出角度 y' -制御操作量 u の周波数応答特性 (供試体 6)	35
2.37	開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 6)	35
2.38	感度関数の周波数応答特性 (供試体 6)	35
2.39	目標追従特性の周波数応答特性 (供試体 5)	37
2.40	目標追従特性の周波数応答特性 (供試体 6)	37
2.41	トルク定数の変動と位置決め誤差波形の関係 (供試体 2)	39
2.42	発熱条件における位置決め誤差の増大 (供試体 2)	39
2.43	トレパニングにおける各ガルバノスキャナの応答波形	40
2.44	転がり軸受性能が低下したガルバノスキャナでの位置決め誤差波形	41
2.45	フレッチング損傷が生じた転がり軸受の内輪軌道面写真	42
2.46	フレッチング損傷発生メカニズム	42
3.1	位置決め誤差波形 (供試体 3)	48
3.2	プロニー解析法で分離した振動/過減衰モードの波形 (供試体 3)	49
3.3	周波数応答特性から予想される FB 系の極配置	50
3.4	位置決め誤差波形 (供試体 3、再合成)	50
3.5	位置決め誤差波形 (供試体 3B、損傷領域)	53
3.6	位置決め誤差波形 (供試体 3B、正常領域)	53
3.7	位置決め誤差波形のモード分離結果 (供試体 3B、モード No.1、損傷領域)	54
3.8	位置決め誤差波形のモード分離結果 (供試体 3B、モード No.4、正常領域)	54
4.1	トレパニングのフローチャート (従来法)	57
4.2	加工平面での位置決め軌道 (従来法)	57
4.3	トレパニングのフローチャート (NST 法)	59

4.4	加工平面での位置決め軌道 (NST 法)	59
4.5	目標軌道重畳開始点の決定方法	60
4.6	2 軸協調位置決め制御装置の構成	61
4.7	評価に用いた加工パターン	62
4.8	x 軸ガルバノスキャナの角度指令と検出角度波形 (従来法)	64
4.9	y 軸ガルバノスキャナの角度指令と検出角度波形 (従来法)	64
4.10	加工平面における位置決め軌道 (従来法)	64
4.11	x 軸ガルバノスキャナの角度指令と検出角度波形 (NST 法)	65
4.12	y 軸ガルバノスキャナの角度指令と検出角度波形 (NST 法)	65
4.13	加工平面における位置決め軌道 (NST 法)	65
5.1	転がり軸受性能低下の定量化法のフローチャート	69
5.2	トルク特性測定系のブロック線図	70
5.3	トルク特性測定結果 (供試体 4)	71
5.4	トルク変動算出結果 (供試体 4)	72
5.5	位置決め誤差波形 (供試体 4)	72
5.6	トルク変動算出結果 (供試体 4A)	74
5.7	トルク変動算出結果 (供試体 4B)	74
5.8	位置決め誤差波形 (供試体 4A)	75
5.9	位置決め誤差波形 (供試体 4B)	75
5.10	転がり軸受の内輪軌道面写真 (供試体 4A)	76
5.11	転がり軸受の内輪軌道面写真 (供試体 4B)	76
5.12	速度 FF 補償を備えたトルク指令型 2 自由度制御系のブロック線図	77
5.13	速度 FF 補償による位置決め誤差波形の変動	77
5.14	位置決め誤差波形 (供試体 3A、速度 FF 補償なし)	78
5.15	位置決め誤差波形 (供試体 3A、速度 FF 補償あり)	78

表目次

2.1	供試体の仕様	17
2.2	機構振動モード特性 (供試体 1)	22
2.3	機構振動モード特性 (供試体 2)	22
2.4	機構振動モード特性 (供試体 3)	22
2.5	機構振動モード特性 (供試体 4)	22
2.6	機構振動モード特性 (供試体 5)	23
2.7	機構振動モード特性 (供試体 6)	23
2.8	設計した FB 補償器の各係数 (供試体 1)	26
2.9	設計した FB 補償器の各係数 (供試体 2)	26
2.10	設計した FB 補償器の各係数 (供試体 3)	26
2.11	閉ループ系の特性 (供試体 1-3)	26
2.12	閉ループ系の特性 (供試体 4-6)	32
3.1	位置決め誤差波形のモード特性同定結果 (供試体 3)	49
3.2	位置決め誤差波形のモード特性同定結果 (供試体 3B、損傷領域)	52
3.3	位置決め誤差波形のモード特性同定結果 (供試体 3B、正常領域)	52
3.4	位置決め誤差波形のモード特性同定結果 (供試体 3C、過減衰モード)	52
3.5	位置決め誤差波形のモード特性同定結果 (供試体 3D、過減衰モード)	52
4.1	NST 法評価における試験条件	63
4.2	NST 法評価試験の結果	63
5.1	式 5.6 の各係数 (供試体 4)	72
5.2	式 5.6 の各係数 (供試体 4A、4B)	74

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

近年、我が国が抱える様々な課題 (超高齢化社会、社会インフラの老朽化、地域経済の活性化など) に対して、情報通信技術 (ICT; Information and Communication Technology) を活用して解決を試みる事例が増えている [1]。その理由として、パーソナルコンピュータに代表される従来型の据え置き型のデータ端末装置に加え、スマートフォンやタブレット PC のような小型で多機能なモバイル機器が我が国で一定の普及期を迎え [2]、都心の若年者から地方の高齢者に至るまで情報端末を所有・使用するライフスタイルとなり、これまでと異なる ICT を利活用した解決策が実現できるようになったことが挙げられる。そのため、今後もウェアラブル端末やモノのインターネット (IoT; Internet of Things) で使用されるセンサ・制御機器などの需要が急増すると見込まれ、そこで使用される電子機器には、高機能化、小型化、低価格化、省エネルギー化が求められる。

これらの電子機器の高機能化には、半導体技術の進展が不可欠なのに加え、マイクロプロセッサなどの電子部品を搭載して電子回路として機能するプリント配線板の高密度化が非常に重要である。電子機器の競争優位性を示す性能指標 (Figure of merit) によれば、同一の機能を持つ製品であれば、より消費電力が小さく、軽量でサイズが小さく、コストが安価な製品の競争優位性が高くなる。プリント配線板は、配線の微細化とビルドアップ配線板に代表される配線の多層化により、市場の要求を満たしてきた。中でも、ビルドアップ配線板は配線パターンが形成された導体層と絶縁層が交互に積層されており、ビアホール (Via hole) と呼ばれる層間接続穴の側面をめっきして、導体層間の電氣的な接続を行う構造を持つ [3]。微細化の一例として、特に高密度化が要求される半導体パッケージ用モジュール基板では、2014 年時点で最小導体幅/間隙が $10 \mu\text{m} / 12 \mu\text{m}$ 、最小ビアホール径 $50 \mu\text{m}$ の組み合わせで量産化されている [4]。その一方で、電子機器の高機能化に伴い電子部品の搭載数は増加する傾向にあり、一つの電子機器における総ビアホール数

も増え続けている。

配線の高密度化やビア数の増加が進む電子回路基板を製造・検査する装置は、位置決め・駆動機構の集合体といえる。それぞれの位置決め・駆動機構がメカトロニクス技術を用いて高速かつ高精度に動作することで、装置全体で高い加工・検査速度と良好な加工・検査品質の両立が可能となる [5,6]。メカトロニクス技術は四つの基盤技術から成り立ち、機械工学 (Mechanics)、電子工学 (Electronics)、情報工学 (Informatics)、制御工学 (Control Engineering) の融合により、機構部品に複雑な動作をさせることを可能にする技術全般と解釈される。電子回路基板向け製造装置に限らず、多くの FA (Factory Automation) 機器の開発では、コンピュータ支援設計 (CAD; Computer Aided Design)、数値シミュレーション技術やマイクロプロセッサ制御 (デジタル制御) といったメカトロニクス技術を活用することで、装置に要求される高い性能仕様を実現している [7]。

メカトロニクス技術の基盤技術の一つである制御工学を用いたモーションコントロール技術は、アクチュエータ・電気回路・センサといった物理的な構成要素 (Hardware) を用いた位置決め・駆動機構を、目的通りの動作をさせるためのソフトウェア (Software) 技術であり、位置決め・駆動機構とその制御装置から構成されるシステム全体 (以下、位置決め装置) の最終性能を大きく左右する重要な要素である。そのため、所望の位置決め仕様を満足するためのモーションコントロール技術として、従来より研究開発が盛んに行われている [8,9]。文献 [10] によれば、モーションコントロール技術は、

- (1) 軌道計画 (目標軌道設計)
- (2) 軌道追従 (サーボ設計)
- (3) 目標位置近傍に到達した後に発生する問題に対処する制御設計 (セtring制御)
- (4) 位置決め完了後の外乱抑圧制御

の四つを設計指針とするサーボ制御技術と定義される。特に、マイクロ・ナノメートルオーダの位置決め速度・精度が要求されるサーボ制御技術は、精密サーボ技術と称される [11]。(1) の従来研究の例として、磁気ディスク装置のショートスパンのトラックシーク動作を対象として、最大加速した後に最大減速する Bang-bang 制御型のフィードフォワード (FF; Feedforward / 以下、FF) 入力を生成する最短時間制御法 [12]、制御対象の持つ機構振動特性および離散化の影響を考慮し、制御装置のサンプリング周期の整数倍の FF 入力をジャック最小軌道となるよう生成する終端状態制御法 (FSC; Final State Control) [13,14]、FSC と同じ課題設定に対してサンプル値の多項式より FF 入力を生成する方法 [15] などの提案がある。(2) の従来研究の例として、現在の製造・検査装置でも多くの採用実績のある、二つの独立した補償器により目標値追従機能とサーボ系の安定化機能を設計できる 2 自由度制御系設計法 [16]、そして 2 自由度制御系設計法のうち、既約分解表現を用いた 2 自由度制御系設計法 [17-19]、目標軌道の未来値を与えることで

理想的な位相遅れを 0 とする零位相差追従制御法 (ZPETC; Zero Phase Error Tracking Control) [20]、離散化による制御対象の不安定零点の存在をマルチレート化することで完全追従制御 (PTC; Perfect Tracking Control) を実現するマルチレートサンプリングを用いた完全追従制御法 [21] などの提案がある。(3) の従来研究の例として、制御対象が持つ転がり摩擦非線形ばね特性に対して、転がり摩擦の粗・微動特性を考慮する制御法 [22]、非線形ばね特性を特性の異なる複数のばねモデルの組み合わせで再現して補償する MVNLS (Multi Variable Natural Length Spring) モデル補償法 [23]、転がり摩擦モデルに基づく外乱オブザーバを用いた補償法 [24] などの提案がある。(4) の従来研究の例として、振動モード周波数での一巡伝達特性のゲインを 1 未満にするスモールゲインを用いた設計法 [25] や、機構振動特性に対する位相条件による安定化法の提案 [26]、マルチレートフィルタを用いたサンプル値位置決め制御系の外乱圧縮特性に関する考察 [27]、ナノメートルオーダの精密な位置決めが要求される装置に対して十分な外乱抑圧性能を持つ、フィードバック (FB; Feedback / 以下、FB) 系の位相安定化制御系設計法 [28] の提案がある。

このように、ノミナル性能で高い要求仕様を満たす精密サーボ技術に関する研究は古くから数多くなされており、特に磁気ディスク装置や光ディスク装置などのコンシューマ製品を対象とした報告が多い。その一方で、製造工程で使用される装置に搭載され、さまざまな加工・検査パターンで長期間稼働し続ける位置決め装置において、位置決め精度の劣化を定量的に評価する方法や、位置決め精度の劣化要因を分析する方法、また精度改善の方法は、未だ確立されていない部分が多く残されている。

1.2 本研究の目的と従来研究の動向

ここでは、本研究の目的を述べるとともに、製造・検査装置で長期間運用される位置決め装置が持つ課題に対する従来の研究動向を示し、それらに対する本研究の位置付けを明確にする。

1.2.1 本研究の目的

本研究では、製造・検査装置に搭載される位置決め装置の有する問題を解決し、高性能な位置決め制御の実現を目的とする。本研究で制御対象とする後述のガルバノメータスキャナ (以下、ガルバノスキャナ) は、例えば電子回路基板向け製造装置の一種であるプリント配線板向けレーザ穴明け装置 (以下、レーザ穴明け機) [29] に搭載され、偏向ミラーの角度を位置決めすることでレーザ照射位置を決定する位置決め装置である。レーザ穴明け機は、ビルドアップ配線板の一種である高密度基板 (HDI; High Density Interconnect) やパッ

ページプリント配線板に対して、特に非貫通のビアホール(ブラインドビア、ベリードビア)の穴明け加工を得意とする装置である[30]。市場がレーザ穴明機に望む高い加工生産性と高い加工精度を満たすために、装置性能を決定づけるガルバノスキャナ位置決め装置は、高速かつ高精度に位置決めが可能である必要がある。ガルバノスキャナ位置決め装置に要求される性能の一例をあげれば、従来 1,000 Hz 程度であったガルバノ速度が 2,400 Hz 以上になり、ビアホールを加工した際の位置精度は $\pm 10 \mu\text{m}$ [31] である。そして、ガルバノスキャナの位置決め精度の劣化は加工誤差に直結するため、加工するプリント配線板で目標とする加工精度を満足するためには、全てのビアホール加工における位置決め動作で、所望の制御仕様(位置決め速度・位置決め精度)を達成する必要がある。

ガルバノスキャナ位置決め装置に対する、高速・高精度な位置決めを阻害する要因として、

- (1) 高速化に伴い増大する発熱による機構振動特性・トルク特性の変動
- (2) 動作モードの切り替え時に発生する過渡応答
- (3) 駆動系に内在する非線形性や外乱

が挙げられる。以下では、それぞれの要因により生じる位置決め性能の劣化について詳説する。

(1) に関しては、ガルバノスキャナは揺動型の電磁モータであり、コイルに電圧を印加すると、コイルを流れる電流と永久磁石が形成する磁場により電磁力が生じ、回転軸にトルクが発生する。ガルバノスキャナにおいて、移動距離が同じで位置決め速度が2倍になった場合、消費電力は位置決め速度が向上した割合の四乗の16倍(算出式の導出は、第4章参照)となり、増大する消費電力に伴ってガルバノスキャナ内部の温度も上昇する。永久磁石は温度が上がるにつれて減磁し磁力が低下することから、発生するトルクも低下する。このようなトルクの変動は加工動作開始から数秒で発生し、位置決め精度の劣化を引き起こす。

(2) に関しては、レーザ穴明機では位置決め(PTP; Point-to-point /以下、PTP)動作のみで加工する方法と、PTP動作と軌道追従(CP; Continuous path /以下、CP)動作の両方を用いて加工する方法がある。後者の装置の制約上、二つの動作モードを併用することはできず、切り替える際に過渡応答が生じ、これが加工速度の低下を引き起こす。

(3) に関しては、モータの回転力がギアボックスなどの間接的機構を介さずに直接、駆動対象に伝達するダイレクトドライブ方式であるガルバノスキャナは、他のメカトロニクス製品で用いられる位置決め機構、例えばボールねじを用いるステージ位置決め機構などと比較して非線形要素が少ないが、ガルバノスキャナを駆動するアンプ部が持つ非線形性や、回転軸を支える転がり軸受部の非線形性は、近年位置決め装置に要求される仕様を鑑みると、その影響が無視できなくなりつつある。特に、長期間運用されたガルバノスキャ

ナにおいては、転がり軸受の性能が低下し、大幅な位置決め精度の劣化を引き起こすことが経験的に知られている。

以上 (1)~(3) に挙げた三つの問題は、(1) 短時間で発生する制御対象の特性変動への対応、(2) 装置制約により発生する過渡応答への対応、(3) 長期間の稼働で生じる制御対象の特性変動への対応、と簡潔に言い換えることができる。本研究では、特に (2) および (3) の課題に対して制御対象の特性変動を推測・計測して補償し、適切な目標軌道を設計することで、高性能な位置決めを実現する。さらに、以上の課題の解決法を検討するにあたり、位置決め精度の劣化について定量的な評価が可能で、精度劣化の要因毎に影響度合いが分離可能な評価法の提案も併せて行う。

1.2.2 従来の研究動向

本研究で対象とするガルバノスキャナに関する研究・開発は、ノミナル性能を向上することを目的としている報告が多い。例えば、FSC をガルバノスキャナに適用して位置決め性能の向上を実現したもの [32] や、駆動アンプの飽和を考慮するよう FSC を拡張したもの [33]、外乱抑圧特性の向上を目的とした機構設計法 [34]、圧電素子を用いて制御帯域の向上を実現したもの [35]、連続動作を行うガルバノスキャナにおいて、前回の状態量を次の移動に持ち越して位置決め精度劣化することを避ける初期値補償法 [36] がある。さらに、制御対象のモデル化に関しては、ガルバノスキャナを集中定数系で表現するもの [37] がある。

一方、位置決め装置で発生する振動の評価については、定常的な振動や制御周期よりも十分に長い時間で緩やかに周波数が変動する現象の解析には、高速フーリエ変換 (FFT; Fast Fourier Transform) [38] がよく用いられる。それに対して、衝撃や過渡現象の解析には、短時間フーリエ変換 (STFT; Short Time Fourier Transform) [39]、あるいはウェーブレット変換 (WT; Wavelet Transform) [40] なども用いられる。SFFT は時間変化を伴う信号の解析によく用いられる手法であり、短時間ごとに区切ってフーリエ変換し、その周波数成分の時間変化を捉えるのに用いられる。WT は、フーリエ変換では失われる時間領域の情報を残すことが可能であり、時間変動と周波数推移を同時に取得可能である [41]。しかし、これらの手法は減衰特性が直接得られないため、位置決め後の時間波形を評価するには適さない。その一方で、モード特性同定法の一つであるプロニー解析法 [42, 43] は、複数の振動モードを同時に同定することができる。プロニー解析法を時系列データに用いてモード特性同定を行った例として、電力系統の動揺モード検出 [44] や、磁気ディスク装置における位置決め誤差解析 [45] がある。

次に、動作モードの切り替え時に発生する過渡応答に関しては、装置構造の変更で動作モードの切り替え行為を除去する方法 [46] や、加工方法を工夫して解決する方法 [47] が

提案されているが、ともに装置の大幅な変更を要する。切り替え動作を伴う制御では、(1) 動作モード切り替え直後の制御器の状態変数の適切な初期値の設定、(2) 制御対象の切り替え時点の変位、速度、加速度といった状態量を適切な組み合わせとする軌道の設計による過渡応答の改善が主に検討されている。前者は初期値補償制御と呼ばれ、閉ループ系の状態変数の2乗積分値を最小にする実係数行列を設計する方法 [48] などがある。後者は切り替え後の応答の2乗積分や、操作量の2乗積分などを評価関数として、制御対象の状態量の初期値を求める方法である [49]。これらは複数のFB補償器が動作モードによって切り替わる構成となっており、本研究で対象とするレーザ穴明機向けガルバノスキャナ位置決め装置では演算時間の制約から、同一の補償器で実現する必要がある。

駆動系に内在する非線形性や外乱に関しては、本研究では特に長期間稼働したガルバノスキャナで転がり軸受の性能が低下した場合における位置決め性能の劣化について取り組むが、転がり軸受は回転することが前提の構造であるため [50]、ガルバノスキャナのような小振幅の揺動運動を繰り返す研究例は少ない。その理由として、転がり軸受は小振幅の繰り返し揺動運動を行う機構に用いると、転がり軸受の転動体と軌道輪の接触部分においてフレッチング (Fretting) もしくはフォールブリネリング (False brinelling) と呼ばれる損傷の発生が挙げられる [51–53]。レーザ穴明機向けガルバノスキャナにおいて、装置への取り付け寸法や要求される高い位置決め性能を実現するために、転がり軸受を採用せざる負えないのが現状である。フレッチング損傷に対する研究として、微小揺動動作に用いられる転がり軸受の長寿命化について、使用する潤滑剤で検討したもの [54, 55] や、転動体の公転を利用したもの [56] の例がある。損傷の程度を把握する方法として、アンデロンメータを用いた計測 [57] があるが、転がり軸受を装置から取り外す必要がある。転がり軸受の性能が劣化したボールねじ送り駆動機構を対象として、実験的挙動の解析と制御対象の数式モデル化を検討した報告 [58, 59] もあるが、位置決め性能劣化に対する補償法はこれまで提案されていない。

以上の従来研究に対する動向の下、本研究の位置付けを以下に示す。

- **位置決め精度劣化の定量的な評価法と要因分析法の提案 (第3章)**

3章では、まず実験モード解析の一手法であるプロニー解析法を用いて、位置決め誤差信号の振動モードの分離とモード特性の同定を行う。本研究では分離結果と制御対象の周波数応答特性を比較することで、位置決め波形を誤差要因毎に評価する方法 [60] を提案する。さらに、導出したモード特性値を用いた装置の状態監視が可能であることを示す。

- **位置決め精度劣化要因毎の補償法の提案 (第4、5章)**

4章以降では、2章で明確となった位置決め精度を劣化させる要因に対して、その補償法を提案する。

4章では、PTP動作からCP動作への切り替わり時に発生する過渡応答について、二動作の目標軌道を重畳させて生成するノンストップトレパニング (NST; Non Stop Trepanning / 以下、NST) 法 [62] を提案する。NST法は、滑らかな動作切り替えを実現する目標軌道を簡易な構成で実現することが可能なため、既存の装置への搭載が容易であり、産業界のニーズに合致するものである。

5章では、特に長期間稼働したガルバノスキャナに発生するフレッチング損傷による位置決め性能劣化の問題に対して、転がり軸受性能低下の定量化法 [63] とその補償法を提案する。提案手法は装置の分解を伴わない画期的な手法であり、稼働中の装置にも適用可能である。また位置決め精度の改善策として、FB補償器による外乱圧縮特性向上策ではなく速度FF補償器による改善策を採用することで、FB系の安定性に影響を与えない。

1.3 本論文の構成

本論文は、全6章より構成される。図1.1に本論文の構成を示すとともに、以下に各章の概要を示す。

第1章：序論

本章では、ガルバノスキャナ位置決め装置における高速・高精度位置決め制御を取り上げ、その概況と現下の技術課題を挙げ、本研究の意義と目的を明確にした。

第2章：ガルバノスキャナ位置決め装置の概要と本研究の課題

本章では、レーザ穴明機向けガルバノスキャナ位置装置の概要を述べ、制御対象の周波数応答特性をよく表現する数学モデルを同定する。そして、同定した数学モデルに対して、PTP動作向けにはトルク指令型2自由度制御系設計、CP動作向けには既約分解表現に基づく2自由度制御系設計の枠組みで、制御対象の振動モードの励起を避けるFF制御入力設計を適用する。併せて、それぞれの動作に対し、位相安定化法によるFB補償器と状態量FBによるFB補償器を設計する。そして、数値シミュレーションと供試ガルバノスキャナ位置決め装置を用いて、位置決め性能が低下する三つの要因、「高速化に伴い増大する発熱による機構振動特性・トルク特性の変動」「動作モードの切り替え時に発生する過渡応答」「駆動系に内在する非線形性や外乱」による位置決め性能劣化の状況を再

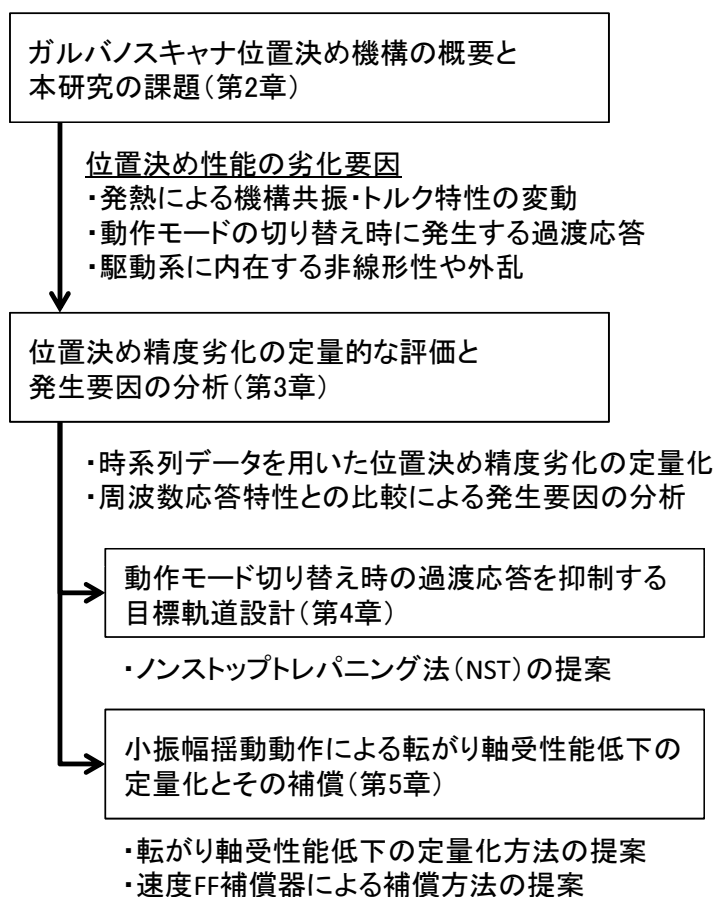


図 1.1: 論文の構成

現し、技術課題を明確にする。なお、数値シミュレーションには数値計算ソフトウェア (The MathWorks 社製、MATLAB/Simulink) を用いる。

第3章：位置決め精度劣化の定量的な評価と発生要因の分析

本章では、位置決め性能の劣化要因分析に取り組む前に、位置決め精度の劣化の程度を定量的に評価する方法を提案する。そこでは、時系列データである位置決め波形を振動モード毎に分離し、周波数応答特性と導出されたモード特性値を比較することで発生要因の分析と位置決め性能劣化の程度を定量化する。本法の有効性は、長期間稼働した供試ガルバノスキャナを用いて実験的に検証する。

第4章：動作モード切り替え時の過渡応答を低減する目標軌道設計

本章では、第2章で問題提起した、「動作モードの切り替え時に発生する過渡応答」による位置決め性能劣化に対して、NST法による解決を試みる。ここでは、PTP動作とCP動作を切り替えながら加工する座繰り加工 (Trepanning / 以下、トレパニング) を対象とし、二つの動作モードを同一のFF、FB補償器で実行するガルバノスキャナ位置決め装置において、様々な動作パターンを含み数万を超えるビアホール加工でも滑らかな目標軌道が設計でき、動作モード切り替え時の過渡応答を抑制する方法を提案する。NST法の有効性は、供試ガルバノスキャナを用いて実験的に検討する。

第5章：小振幅揺動動作による転がり軸受性能低下の定量化とその補償

本章では、第2章で問題提起した、「駆動系に内在する非線形性や外乱」による位置決め性能低下のうち、特に転がり軸受の性能が低下した際の位置決め性能の劣化について取り組む。ここでは、長期間運用されたガルバノスキャナに対して、回転子の可動範囲で一定間隔で制御対象の特性を取得し、その傾向と変動量から転がり軸受性能低下の定量化を試みる。さらに、速度FF補償器により位置決め精度の改善を検討する。本法の有効性は、供試ガルバノスキャナを用いて実験的に検討する。

第6章：結論

本章では、本研究により得られた成果をまとめ、本研究で残された課題を述べるとともに今後の展望について言及する。

第 2 章

ガルバノスキャナ位置決め装置の概要と本研究の課題

本章では、まず制御対象であるガルバノスキャナ位置決め装置の概要を述べるとともに、制御対象の周波数応答特性を取得し、計測結果をよく表現する数学モデルを同定する。次に、外乱圧縮性能の向上と機構振動特性変動に対するロバスト安定性を持つ位相安定化 FB 補償器を設計する。あわせて、トルク指令型 2 自由度制御系設計 [13,14]、および既約分解表現による 2 自由度制御系設計 [18] の枠組みで、目標追従特性の改善を目的とした FF 制御入力設計を適用する。そして、数値シミュレーションと供試ガルバノスキャナ位置決め装置を用いて、位置決め性能が低下する三つの要因、「高速化に伴い増大する発熱による機構振動特性・トルク特性の変動」「動作モードの切り替え時に発生する過渡応答」「駆動系に内在する非線形性や外乱」による位置決め性能劣化の状況を再現し、技術課題を明確にする。

2.1 レーザ穴明機向けガルバノスキャナ位置決め装置の概要

2.1.1 レーザ穴明機の概要

ここでは、研究対象のガルバノスキャナ位置決め装置が搭載される、レーザ穴明機の概要を述べる。図 2.1 は電子回路基板向け製造装置の一種であるレーザ穴明機の外観 [30] を示し、本装置を用いてプリント配線板に電気導通用のビアホールを空ける。レーザ穴明機には、レーザの波長が $10.6 \mu\text{m}$ や $9.4 \mu\text{m}$ の炭酸ガスレーザを搭載する CO₂ レーザ穴明機と、希土類元素 Nd(Neodymium) を少量添加した YAG(Yttrium-Aluminum-Garnet) 結晶の三倍高調波 355 nm を用いた YAG レーザを搭載する UV レーザ穴明機がある。炭酸ガスレーザは金属・非金属の切断、溶接、電子基板の微細穴明加工など多岐にわたり、工業的に最も使われているレーザの一つである。プリント配線板の加工は熱的なものであ

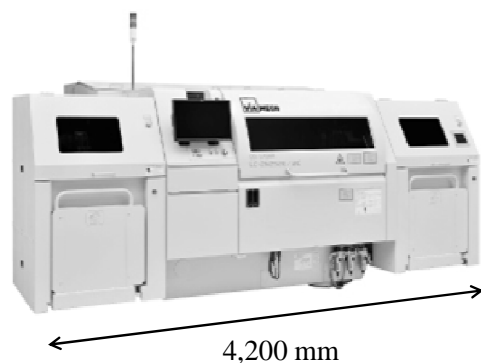


図 2.1: CO2 レーザ穴明機の外観

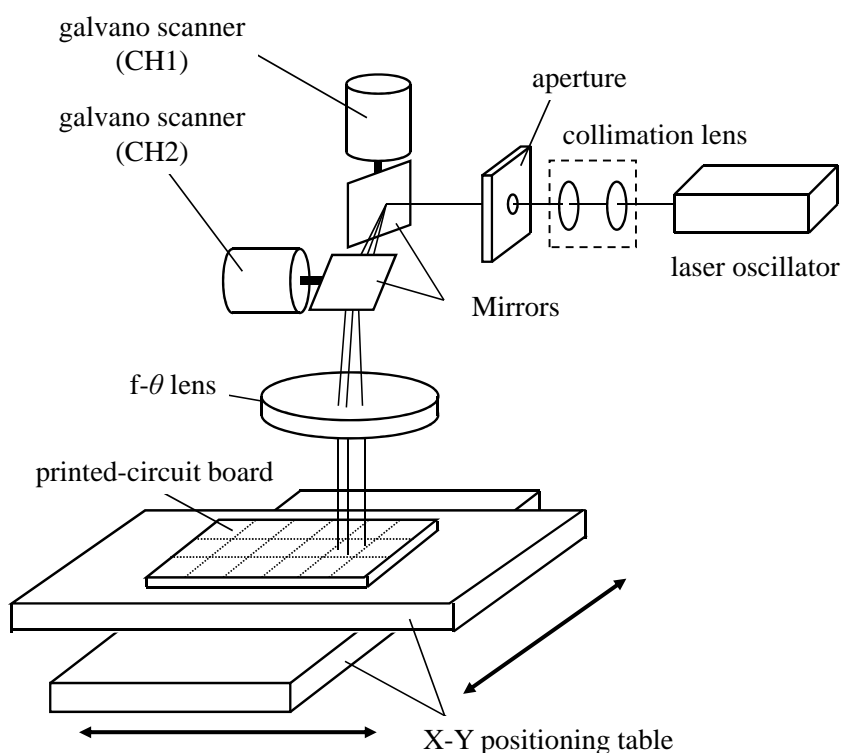


図 2.2: レーザ穴明機におけるレーザ光位置決め装置の基本構成

るのに対して、YAG レーザは金属などの吸収率が高く、加工が実現する閾値が低いために微細加工に向いている。従って、プリント配線板の加工は化学的な加工処理と言えよう [64]。

図 2.2 に、レーザ穴明機におけるレーザ光位置決めシステムの基本構成を示す。レーザ穴明機は、レーザ光を生成するレーザ発振器、レーザ光を所望のエネルギー分布、スポット径に整形するコリメーションレンズやアパーチャなどの光学系、レーザ光を X、Y 方向に偏向する一組のガルバノスキャナと偏向ミラー、そして偏向したレーザ光を加工対象であるプリント配線板加工平面 (以下、加工平面) で結像する $f-\theta$ レンズ、そしてプリント配

線板を X、Y 方向に大きく移動するための X-Y テーブルを持つ。最初にレーザ光を偏向するガルバノスキャナをガルバノスキャナ (CH1) と呼び、2 番目に偏向するガルバノスキャナをガルバノスキャナ (CH2) と呼ぶ。レーザ光直径 D 、レーザ波長 λ 、f- θ レンズの焦点距離 F を用いると、得られるレーザスポット径 d は次式の関係で示される。

$$d \doteq \frac{4\lambda F}{\pi D} \quad (2.1)$$

式 2.1 に従えば、レーザスポット径を小さくするためにはレーザ光直径は大きくなるため、偏向ミラーも大型化する。偏向ミラーの大きさは使用されるレーザ発振器やプリント配線板の用途によって異なり、波長が長い CO2 レーザ穴明機は UV レーザ穴明機よりもレーザ光径を大きくして小径のピアホール加工に対応する必要があり、偏向ミラーも UV レーザ穴明機と比較して大きい。一方、CO2 レーザ穴明機では CH2 の偏向ミラーが CH1 の偏向ミラーに比べて大きいことが多く、UV レーザ穴明機では CH1 と CH2 の偏向ミラーが同一形状であることが多い。

次に、f- θ レンズでの理想像高 y は、焦点距離 F と、レンズへのレーザ光の入射角度 θ を用いると、次式で示される。

$$y = F\theta \quad (2.2)$$

式 2.2 に従えば、入射角度を調整することで、加工平面の任意の位置に結像することができる。レーザ穴明機では、入射角度の調整にガルバノスキャナを用いており、ガルバノスキャナの位置決め速度が装置の加工生産性に直結する。

ガルバノスキャナで走査が可能な範囲 (Scanning Area / 以下、スキャンエリア) は f- θ レンズによって異なるが、一例をあげると 65×65 mm である。プリント配線板の外形は四分割の場合に 610×510 mm、または 510×510 mm であるため、X-Y ステージによるスキャンエリア間の粗動と、ガルバノスキャナによるスキャンエリア内の微動とを組み合わせ一枚のプリント配線板の加工を行う。X-Y ステージとガルバノスキャナの位置決め時間が重複しない動作をステップ・アンド・リピート動作 (Step and Repeat) と呼び、両者が協調する動作を GT 同期動作 (Galvano-table Synchronousness) と呼ぶ。本研究では、ガルバノスキャナ位置決め装置に着目しているため、ステップ・アンド・リピート動作で検討する。プリント配線板の加工に要する時間は、主にガルバノスキャナの位置決め時間、レーザ照射時間、X-Y テーブルの位置決め時間、プリント基板の交換時間に分けられ、ほとんどのケースでガルバノスキャナの位置決め時間が全体の 9 割程度を占める。そのため、レーザ穴明機の装置競争力を高めるためにも、ガルバノスキャナ位置決め装置には高速・高精度な位置決め性能が要求される。

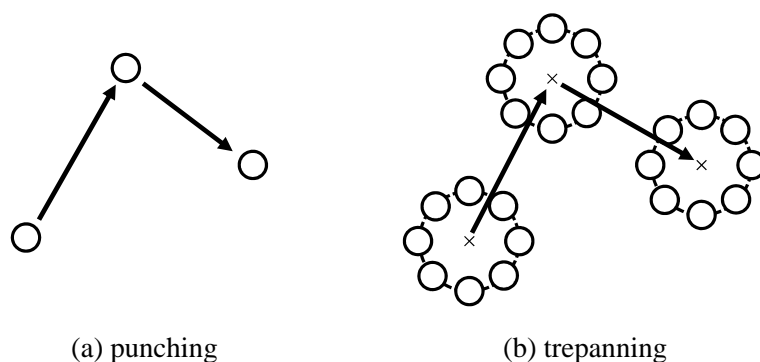


図 2.3: レーザ穴明機での加工方法

2.1.2 レーザ穴明機における加工方法の概要

レーザ穴明機による穴明け加工法は、レーザ光照射中のガルバノスキャナ動作の違いにより二分される。加工法の違いを、図 2.3 を用いて説明する。一つは、PTP 動作で目標とする結像位置へ移動した後に、レーザ光を一回もしくは複数回同一位置にパルス照射して加工する打ち抜き加工 (Punching / 以下、パンチング) であり、レーザスポット径とほぼ同径のビアホールを形成する加工法である。もう一つは、パンチングと同様に PTP 動作で目標とする結像位置の中心に移動した後に、CP 動作にてガルバノスキャナを駆動して同心円状にレーザ光を複数回パルス照射するトレパニングであり、レーザスポット径以上のビアホールを形成する加工法である。トレパニングでは、偏向軸が直角するよう配置された二つのガルバノスキャナに対して、同振幅で 90 度の位相差を持つ正弦波を角度指令として与えることで、レーザ光照射位置を同心円状に旋回することができる。第 1 章で述べた通り、電子機器の高性能化に伴い、プリント配線板で半導体素子等の実装や層間の電氣的結合に使われるビアホールは小径化している。しかし、プリント配線板に実装するすべての電子部品が小型化するわけではなく、依然として大きな径の穴を明ける必要もある。コリメータやアパーチャなどの光学系を切り替えてレーザスポット径を変更することも可能だが、光学系の変更には時間がかかるため、レーザ穴明機ではパンチングとトレパニングを併用して大きさの異なる複数のビアホールを加工する。一般的に、トレパニングはレーザスポット径が小径な UV レーザ穴明機で多用される。

2.1.3 ガルバノスキャナ位置決め装置の構成

図 2.4 は、レーザ穴明機向けガルバノスキャナ位置決め装置の基本構成を示す。レーザ穴明機は階層構造を持つコンピュータ数値制御式 (CNC; Computer Numerical Control) 装置の一種である。上位系は、読み込んだプリント配線板の図面データを元に、後述する

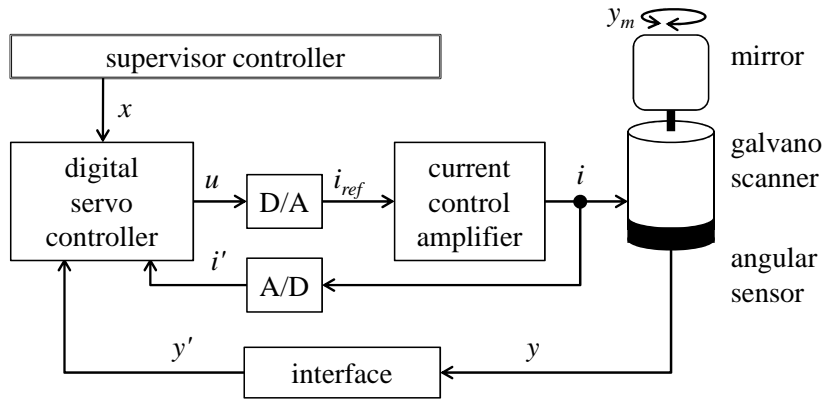


図 2.4: ガルバノスキャナ位置決め装置の制御システム基本構成

位置決め補償を行うガルバノコントローラに目標角度 x を与える。ガルバノコントローラは、受け取った目標角度から制御周期 T_s 毎に角度指令を生成し、位置決め補償によって作成された制御操作量 u を D/A(Digital Analog) 変換器を通して電流指令 i_{ref} として電流制御系に与える。電流制御系は電流指令に基づきガルバノスキャナのコイルに電圧を印加して電流 i を発生させ、ガルバノスキャナを駆動する。このとき、検出電流 i' は電流制御系やガルバノコントローラに A/D(Analog Digital) 変換器を介して送り、FB 信号として用いる。角度検出器で検出される回転角度 y は、インタフェースを介してガルバノコントローラに検出角度 y' として送られ、FB 信号として用いる。以上のように、ガルバノスキャナ位置決め装置は、ガルバノスキャナの検出角度 y' を用いて偏向ミラーの回転角度 y_m を制御するセミクロズドループの制御系である。なお、制御装置でのデジタル演算はマイクロプロセッサ (Microprocessor / 以下、マイコン) で行う。

2.1.4 ガルバノスキャナの構造

本研究で対象とするガルバノスキャナは、揺動型の電磁モータである。磁気回路の構成により、可動コイル式と可動磁石式に二分される。前者の横断図を図 2.5 に、後者の横断図を図 2.6 に示す。レーザ穴明機向け可動コイル式ガルバノスキャナでは、可動子はコイルと回転軸とコイルを回転軸に取り付ける部品、回転軸の片端に偏向ミラー、そしてもう片端に角度検出用スケールを取り付ける。固定子側に永久磁石を持ち、可動子は二つの転がり軸受で支持される。可動磁石式ガルバノスキャナは、永久磁石は可動子に、コイルは固定子に取り付けられる。コイルに電圧を印加すると、流れる電流と永久磁石の形成する磁場によって電磁力が生じ、回転軸にトルクを発生させる。ガルバノスキャナの特徴の一つとして、高剛性な構造により実現できる高い応答性能がある。そのため、ガルバノスキャナは走査型顕微鏡やレーザマーカ装置、ラピッドプロトタイプング装置など、多くの

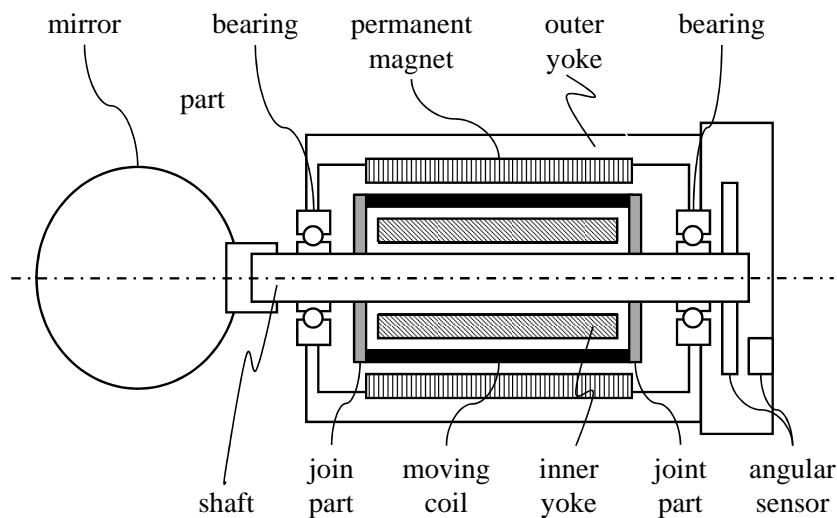


図 2.5: 可動コイル式ガルバノスキャナの横断図

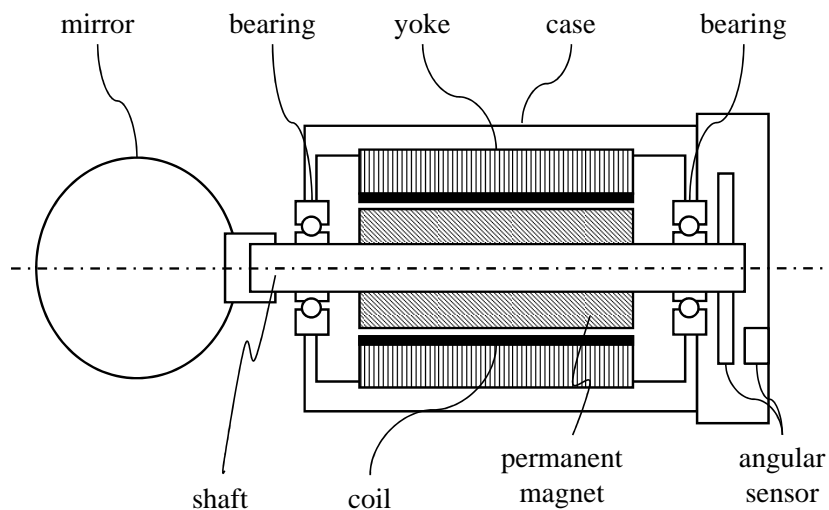


図 2.6: 可動磁石式ガルバノスキャナの横断図

製造・検査装置で用いられる。

2.1.5 ガルバノスキャナ位置決め装置の仕様

本研究では、各検討項目において仕様の異なる供試体を使用した。それぞれの課題に対して対象とする供試体を変えた理由として、位置決め性能の低下に最も影響を与える要因が、加工パターンや偏向ミラーの大きさによって異なるためである。第3章の位置決め精度劣化の定量的な評価法の検討では、CO₂ レーザ穴明機向け可動磁石式ガルバノスキャナを用いた (供試体 3)。第4章の動作モード切り替え時の過渡応答抑制の検討ではUV レーザ穴明機向け可動コイル式ガルバノスキャナ (供試体 5、6) を、第5章の転がり

表 2.1: 供試体の仕様

Name	Scanner type	Mirror type	1 st resonance frequency (fpu)	Using at...
Scanner1	MM	CO2 (CH1)	1.70	Chapter 2
Scanner2	MM	CO2 (CH2)	1.52	Chapter 2
Scanner3	MM	CO2 (CH2)	1.00	Chapter 3, 6
Scanner4	MC	CO2 (CH2)	0.74	Chapter 6
Scanner5	MC	UV (CH1)	1.31	Chapter 5
Scanner6	MC	UV (CH2)	1.32	Chapter 5

軸受性能低下時の位置決め精度改善の検討では、CO2 レーザ穴明機向け可動磁石式ガルバノスキャナ (供試体 3、供試体 4) を用いた。供試体 1 および 2 は、本章で後述するトルク指令型 2 自由度制御系設計法の検討に用いる。表 2.1 に、供試体ごとの仕様をまとめる。表中の「MM」は可動磁石式 (Moving Magnet type) を示し、「MC」は可動コイル式 (Moving Coil type) を示す。なお、本論文における周波数は供試体 3 のねじり 1 次振動モード固有周波数で規格化し、単位は fpu とする。

次に、ガルバノスキャナ位置決め装置の位置決め性能仕様について、図 2.7 を用いて説明する。ガルバノスキャナ位置決め装置に要求する仕様は、位置決め精度と位置決め速度の二項目に関する。位置決め精度の指標は、回転角度を加工平面の位置に換算し、目標位置の ± 2 mppu 以内を位置決め範囲と定義する。ここで、本論文での加工平面での距離は標準的な移動距離で規格化し、単位は ppu (ppu の 1/1000 が mppu) を用いる。位置決め速度の指標は、移動開始から位置決め範囲内に収束するまでにかかる時間を位置決め時間と定義し、移動距離に応じて設定する。標準的な移動距離 1 ppu における目標位置決め時間は $370 \mu\text{s}$ である。そして、目標位置決め時間の逆数を、応答周波数と定義する。

2.2 周波数応答特性の測定と制御対象の数学モデルの構築

制御対象の高精度な数学モデルを構築することは、高速・高精度な位置決め制御を実現する上で非常に重要である。すなわち、制御対象の細部まで再現可能な数学モデルを用いることで、制御系設計や応答性能の評価が数値計算で可能となる。本節では、供試体 1-6 の数式モデルの機構振動特性の同定を行う。

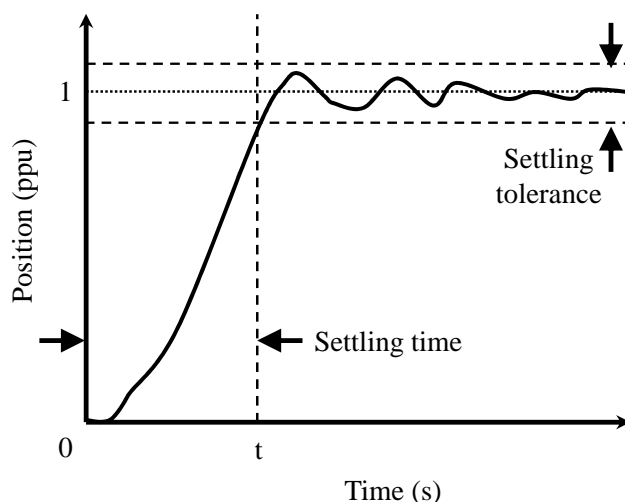


図 2.7: ガルバノスキャナ位置決め装置における位置決め性能指標

2.2.1 周波数応答特性の測定

図 2.4 の制御操作量 u から検出角度 y' を制御対象とした場合の、供試体 1-6 の周波数応答特性の測定結果を、図 2.8-2.13 の細線で示す。その取得には、供試ガルバノスキャナ位置決め装置向けに作られた治具ソフトウェアを用いており、制御対象に対して簡易な安定化補償器を用いて FB 制御系を組み、正弦波掃引法を用いて制御対象の周波数応答特性を測定した結果である。なお、この周波数応答特性には、機構の特性以外に駆動アンプや角度検出器の特性を含んでいる。前述の通り、ガルバノスキャナはダイレクトドライブ方式であり、他の位置決め機構と比較して機構振動モードのピークが顕著である。

2.2.2 制御対象の数学モデルの構築

図 2.14 に、離散時間系の拡大制御対象 $P(z)$ のブロック線図を示す。ここで、 zoh はゼロ次ホールド、 $C_{cur}(s)$ は電流制御系、 $P_{mec}(s)$ はガルバノスキャナ機構部のモデルである。ガルバノスキャナ位置決め装置における電流制御系（駆動アンプ）は高周波数領域まで応答性を持ち、電流制御系の遮断周波数は FB 制御系のサーボ帯域（約 0.3 fpu）に対して十分高い。そのため、 $C_{cur}(s)$ は式 2.3 に示すように、定常ゲイン k_c と等価むだ時間 L_c で表現できる。

$$C_{cur}(s) = \frac{i}{i_{ref}} = k_c e^{-L_c s}(s) i_{ref}(s) \quad (2.3)$$

次に、供試体 3 の周波数応答特性の測定結果（図 2.10）に注目すると、ガルバノスキャナはねじり 1 次振動モード（1.00 fpu）、同 2 次振動モード（2.35 fpu）、同 3 次振動モード

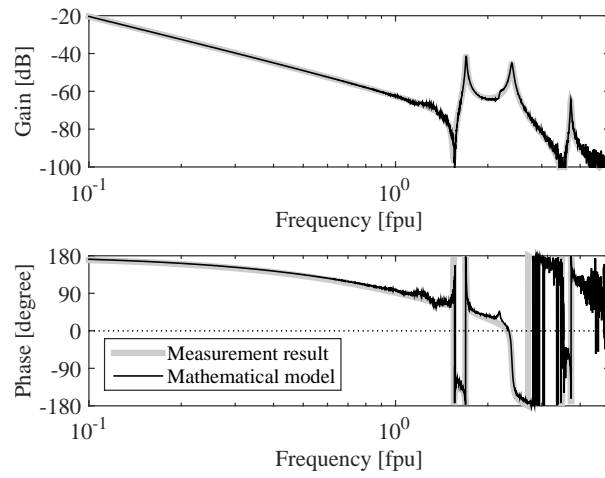


図 2.8: 制御対象の周波数応答特性 (供試体 1)

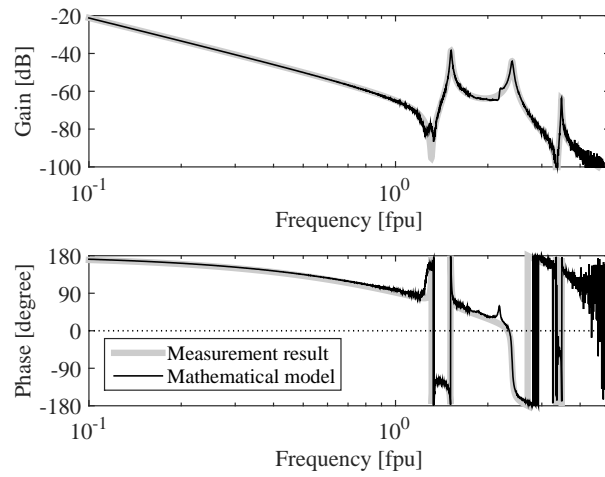


図 2.9: 制御対象の周波数応答特性 (供試体 2)

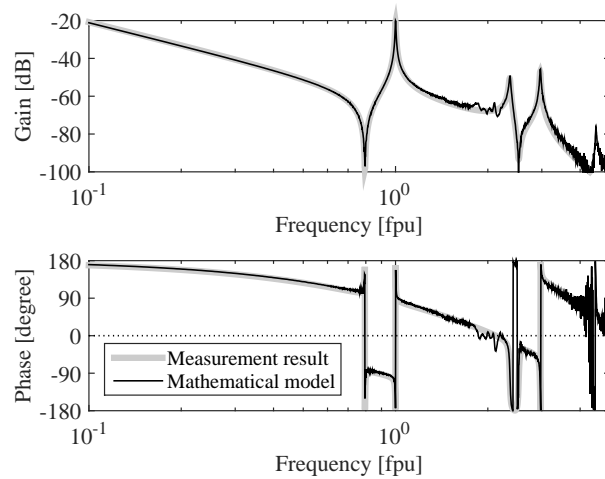


図 2.10: 制御対象の周波数応答特性 (供試体 3)

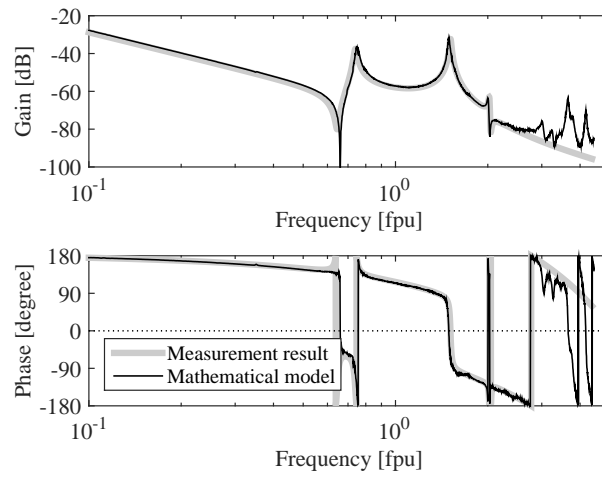


図 2.11: 制御対象の周波数応答特性 (供試体 4)

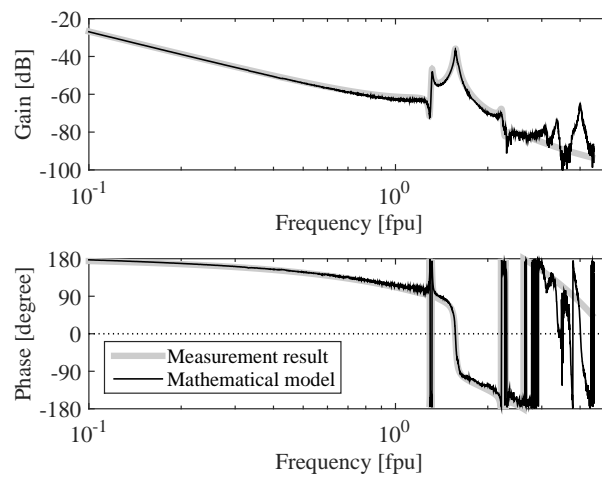


図 2.12: 制御対象の周波数応答特性 (供試体 5)

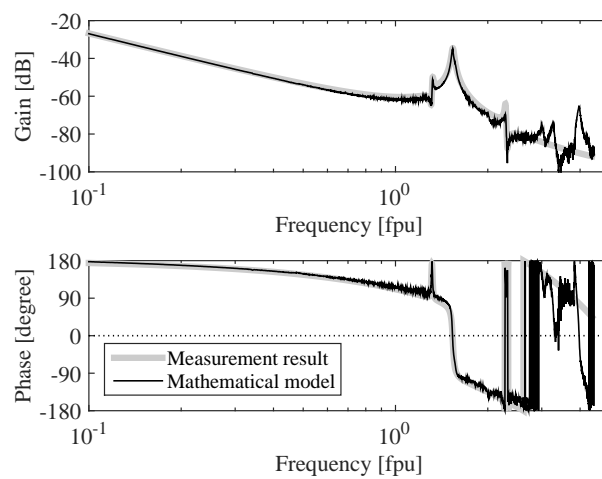


図 2.13: 制御対象の周波数応答特性 (供試体 6)

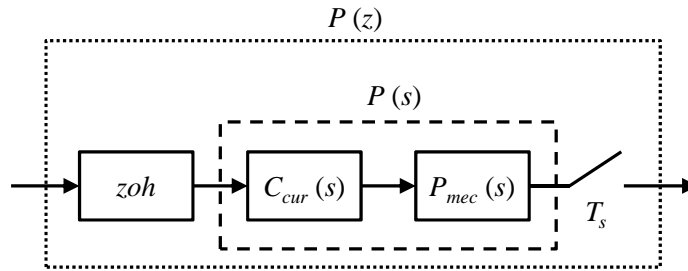


図 2.14: 拡大系制御対象のブロック線図

(2.96 fpu)、および高周波数領域に複数のねじり振動モードを有する機構系である。0.5 fpu 以上の高周波数領域に存在するこれらのねじり振動モードは、制御系の安定性に影響を与えるため、本研究で構築する数学モデルではねじり振動モードを考慮する。その一方で、0.1 fpu 以下の低周波数領域に存在する非線形特性は、ガルバノスキャナの応答周波数 0.1–0.5 fpu と比較して十分に低く、後述する FB 補償器でその影響を抑圧可能であると考え、低域部分は剛体モードでモデル化する。以上より、ガルバノスキャナを剛体特性と 3 つの共振特性を並列結合した式 2.4 に示す連続値系の数学モデル $P_{mec}(s)$ で表現する。

$$P_{mec}(s) = \frac{y(s)}{i(s)} = K_p e^{-Ls} \left(\frac{1}{s^2} + \sum_{l=1}^3 \frac{k_l}{s^2 + 2\zeta_l \omega_l s + \omega_l^2} \right) \quad (2.4)$$

ここで、 K_p : プラントゲイン (トルク定数、角度検出ゲイン、慣性モーメントから求まる制御対象のゲイン成分)、 L : 等価むだ時間 (マイコンの演算時間、角度検出器、D/A 変換器で生じる等価むだ時間の合計)、 ω_l : l 次振動モード固有角周波数、 ζ_l : l 次振動モード減衰係数、 k_l : l 次振動モード影響係数である。文献 [65] に従い、式 2.4 の機構振動モード特性を供試体 1–6 について同定した結果を表 2.2–2.7 に示し、その周波数応答特性を図 2.8–2.13 の太淡線に示す。図より、0.1 fpu から 3.5 fpu までの機構振動モード特性に関して、ゲインと位相が測定結果と数学モデルで一致している。

2.3 トルク指令型 2 自由度制御系の設計

ガルバノスキャナ位置決め制御系には、ゲイン余有と位相余有の確保、前述のねじり振動モードの変動に対するロバスト安定性の確保、摩擦の影響を受ける低周波数領域や、角度検出誤差の影響を受ける高周波数領域での外乱圧縮性能の確保が求められる。さらに、高応答性を実現するためには、前述の三つの特性に加え、ミラーを高速に移動し、位置決めする過渡応答特性も重要である。本節では、追従性能の向上とサーボ系の安定化の両立が可能なトルク指令型 2 自由度制御系を設計する。2 自由度制御系はその名の通り二つの独立した補償器を備える制御系であり、目標値追従機能とサーボ系の安定化機能を独立に

表 2.2: 機構振動モード特性 (供試体 1)

Plant gain	K_p		12.34×10^5
Resonant frequency	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	fpu	1.70, 2.40, 3.73
Damping coefficient	$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$		0.005, 0.009, 0.003
Influence coefficient	k_1, k_2, k_3		0.456, -1.604, -0.193
Delay time	L	1/fpu	0.08

表 2.3: 機構振動モード特性 (供試体 2)

Plant gain	K_p		11.27×10^5
Resonant frequency	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	fpu	1.52, 2.40, 3.48
Damping coefficient	$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$		0.005, 0.009, 0.002
Influence coefficient	k_1, k_2, k_3		0.630, -1.927, -0.155
Delay time	L	1/fpu	0.07

表 2.4: 機構振動モード特性 (供試体 3)

Plant gain	K_p		11.83×10^5
Resonant frequency	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	fpu	1.00, 2.36, 2.96
Damping coefficient	$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$		0.002, 0.006, 0.004
Influence coefficient	k_1, k_2, k_3		0.675, -0.581, -1.084
Delay time	L	1/fpu	0.10

表 2.5: 機構振動モード特性 (供試体 4)

Plant gain	K_p		5.50×10^5
Resonant frequency	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	fpu	0.74, 1.51, 2.02
Damping coefficient	$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$		0.011, 0.007, 0.004
Influence coefficient	k_1, k_2, k_3		0.440, -1.832, 0.049
Delay time	L	1/fpu	0.17

表 2.6: 機構振動モード特性 (供試体 5)

Plant gain	K_p		6.79×10^5
Resonant frequency	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	fpu	1.31, 1.57, 2.23
Damping coefficient	$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$		0.005, 0.010, 0.010
Influence coefficient	k_1, k_2, k_3		0.152, -1.560, 0.061
Delay time	L	1/fpu	0.19

表 2.7: 機構振動モード特性 (供試体 6)

Plant gain	K_p		6.79×10^5
Resonant frequency	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$	fpu	1.32, 1.54, 2.29
Damping coefficient	$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$		0.005, 0.009, 0.004
Influence coefficient	k_1, k_2, k_3		0.084, -1.587, 0.047
Delay time	L	1/fpu	0.19

設計することが可能である。ここでは、位相安定化法により FB 補償器を設計したのちに、FSC に基づき FF 制御入力を設計する。トルク指令型 2 自由度制御系は、後述する既約分解表現に基づく 2 自由度制御系と比較して FF 補償器の次数を低く抑えることができるため、加速・減速性能が重要視される PTP 動作に向いている。そのため、本節では PTP 動作が主の CO2 レーザ穴明機向けガルバノスキャナである供試体 1-3 を用いて設計する。なお供試体 4 も CO2 レーザ穴明機向けであるが、CP 動作を多用する加工に用いられるため、2.4.1 節で述べる既約分解表現による 2 自由度制御系を用いる。

2.3.1 位相安定化法による FB 補償器の設計

前述の通り、ガルバノスキャナはセミクローズドループの制御系であり、本来制御したい偏向ミラーと出力を FB 信号として用いる角度検出器は、それぞれ回転軸の両端に取り付けられている。そのため、制御対象は制御操作量 u から角度検出器用スケールの回転角度 y までの伝達関数 ($= P(s)$) と、制御操作量 u から偏向ミラーの回転角度 y_m までの伝達関数 ($= P_m(s)$) の二つとなる。トルク指令型 2 自由度制御系のブロック線図を図 2.15 に示す。図中、 u_f : FF 制御入力、 $FF(z)$: FF 補償器、 r : 角度指令、 err : 追従誤差、 $C(z)$: FB 補償器、 u_h : 補償器出力、 H : ホールダ、 S : サンプラである。ここでの

FF 補償器 $FF(z)$ は、式 2.3 で示す電流制御系の数式モデルと、式 2.4 で示す機構系の特性を剛体と三次までのねじり振動モードを表す数学モデルを零次ホールドにより離散化した伝達関数モデル $P_n(z)$ である。

本節で設計する FB 補償器は、他の位置決め装置でも使われるノッチフィルタ (NF; Notch Filter / 以下、NF) を用いるが、設計法に特徴がある。一般的な FB 補償器の設計法であるスモールゲインによる設計 [25] では、NF の遮断帯域で減衰が多い特性を利用し、機構振動モード周波数における開ループ伝達関数のゲインを 1 未満にする。しかし、機構振動モード特性が変動した場合に FB 系が不安定化しやすく、さらに外乱圧縮特性が悪化する欠点がある。本研究では位相安定化設計法 [26] に従い、機構振動モードを位相条件により安定化する。つまり、NF の位相特性において、遮断周波数より低い周波数では 90 度位相が遅れ、高い周波数では 90 度位相が進む点を利用する。すなわち、スモールゲインによる設計法では NF の遮断周波数と機構振動モード周波数を一致させるが、本法では機構振動モード周波数に対して NF の遮断周波数を低く、もしくは高く設定する。位相安定化設計法では、機構振動モード特性の変動にロバスト安定性を持ち、また外乱圧縮特性を良好にできる。

本研究における FB 補償器は、式 2.5 に示す位相進み遅れ補償と 3 つの双二次フィルタ (Biquad Notch Filter) を直列に接続する構成とした。

$$C(s) = K_c \frac{s + \omega_{c1}}{s} \frac{s + \omega_{c2}}{s + \omega_{c3}} \prod_{k=1}^3 \frac{s^2 + 2\zeta_{nk}\omega_{nk} + \omega_{nk}^2}{s^2 + 2\zeta_{dk}\omega_{dk} + \omega_{dk}^2} \quad (2.5)$$

二次フィルタは、供試体 3 では NF として用い、供試体 1 および 2 では文献 [66] に基づく全域通過フィルタ (APF; All Pass Filter / 以下、APF) として用いた。供試体 1-3 における $C(s)$ の各係数を、表 2.8-2.10 に示す。 $C(s)$ をプリウープ付双一次変換で離散化した $C(z)$ とし、無限インパルス応答フィルタ (IIR; Infinite Impulse Response Filter) で実装した。供試体 1-3 における $C(z)$ の周波数応答特性、開ループ伝達関数のナイキスト線図、および感度関数の周波数応答特性を、図 2.16-2.24 に示し、表 2.11 に各供試体のゲイン余有、位相余有、および開ループ伝達関数におけるゼロクロス周波数、標準的な移動距離での応答周波数 0.42 fpu における感度関数のゲイン特性を示す。すべての供試体で、ナイキスト軌跡が大きく右半面を描いており、感度関数からも機構振動モード周波数近傍で外乱圧縮特性が高いことが確認できる。また、ゲイン余有・位相余有は 4.5 dB 以上、25 度以上確保できている。ゼロクロス周波数は PTP 動作での最高応答周波数 0.79 fpu よりも低いため、応答性は FF 制御入力でも確保する必要がある。

本 FB 補償器の機構振動モード特性変動に対するロバスト安定性について、数値シミュレータを用いて検討した。図 2.25 は供試体 3 において、ねじり 1 次振動モード周波数が $\pm 3\%$ 変動した際の開ループ特性のナイキスト線図を示す。比較として、FB 補償器をス

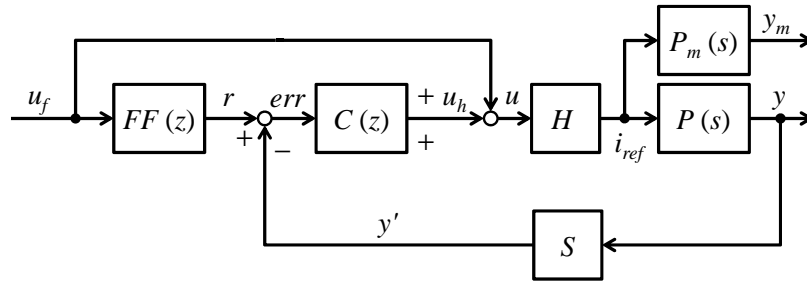


図 2.15: トルク指令型 2 自由度制御系のブロック線図

モールドゲインによる設計法に基づき、NF の遮断周波数を機構振動モード周波数と一致させた場合に同様の変動が生じた際のナイキスト線図を、図 2.26 に示す。両図より、スモールゲインによる設計法では機構特性が変動した場合に FB 系が不安定になるのに対して、位相安定化設計法で FB 系が不安定化することはない。以上より、機構振動モード特性の変動にロバストな FB 補償器が設計できた。

2.3.2 FSC に基づく FF 制御入力的设计

前述の FSC [13] は、制御対象の持つ機構振動特性および離散化の影響を考慮した FF 制御入力の設計法である。なお、周波数成型法を取り入れた FSC (FFSC; Frequency-shaped Final State Control) による FF 制御系入力設計法の詳細は、巻末付録 B に記す。FFSC を用いることで、制御対象の機構振動特性の変動にロバストに設計できる。図 2.15 において、制御対象 $P(s)$ と離散化した制御対象モデル $FF(z)(= P_n(z))$ が理想的に一致すれば、回転角度 y は角度指令 r に追従して追従誤差 err が 0 となり、所望の位置決め性能が得られる。しかし、永久磁石の発熱や経時・経年変化によるねじり振動モード周波数の変動などにより位置決め性能が劣化するため、例えば前節で設計したような、周波数変動に対する低感度化を実現した外乱圧縮特性の高い FB 補償器などと併用することが肝要である。

図 2.27 は、供試体 3 の数式モデル $P_n(z)$ を対象として、巻末付録 B に従って作成した FF 制御入力ベクトル \vec{U} を示す。 \vec{U} を図 2.15 の FF 制御入力 u_f として用いると、供試体 3 は初期状態 $u_f[0] = 0$ から終端状態 $u_f[N] = 1$ まで $N = 41$ ステップで到達する。図 2.28 は \vec{U} の周波数応答特性を示し、供試体 3 のねじり振動モード周波数である 1.00 fpu、2.36 fpu および 2.96 fpu でゲイン成分が極小になっている。従って、FSC に基づく FF 制御入力を設計することで、PTP ガルバノスキャナのねじり振動モードの励起を避ける PTP 動作が実現可能となる。

表 2.8: 設計した FB 補償器の各係数 (供試体 1)

Compensator gain	K_c		3.69×10^4
Cut off frequency	$\omega_{c1}, \omega_{c2}, \omega_{c3}$	fpu	0.05, 0.05, 3.68
Numerator damping coefficient	$\zeta_{n1}, \zeta_{n2}, \zeta_{n3}$		-0.12, 0.10, 0.02
Denominator damping coefficient	$\zeta_{d1}, \zeta_{d2}, \zeta_{d3}$		0.12, 0.40, 0.10
Frequency of notch filter	$\omega_{n1}, \omega_{n2}, \omega_{n3}$	fpu	1.77, 2.29, 3.68

表 2.9: 設計した FB 補償器の各係数 (供試体 2)

Compensator gain	K_c		3.69×10^4
Cut off frequency	$\omega_{c1}, \omega_{c2}, \omega_{c3}$	fpu	0.05, 0.05, 3.68
Numerator damping coefficient	$\zeta_{n1}, \zeta_{n2}, \zeta_{n3}$		-0.16, 0.10, 0.02
Denominator damping coefficient	$\zeta_{d1}, \zeta_{d2}, \zeta_{d3}$		0.16, 0.45, 0.10
Frequency of notch filter	$\omega_{n1}, \omega_{n2}, \omega_{n3}$	fpu	1.53, 2.21, 3.42

表 2.10: 設計した FB 補償器の各係数 (供試体 3)

Compensator gain	K_c		3.55×10^4
Cut off frequency	$\omega_{c1}, \omega_{c2}, \omega_{c3}$	fpu	0.04, 0.04, 3.68
Numerator damping coefficient	$\zeta_{n1}, \zeta_{n2}, \zeta_{n3}$		0.01, 0.05, 0.10
Denominator damping coefficient	$\zeta_{d1}, \zeta_{d2}, \zeta_{d3}$		0.32, 0.25, 0.20
Frequency of notch filter	$\omega_{n1}, \omega_{n2}, \omega_{n3}$	fpu	0.91, 1.40, 2.36

表 2.11: 閉ループ系の特性 (供試体 1-3)

Scanner Number		1	2	3
Gain margin	dB	5.18	4.96	6.25
Phase margin	degrees	29.6	28.0	28.0
Zero cross frequency	fpu	0.37	0.33	0.33
Sensitivity (0.42 fpu)	dB	6.93	8.07	8.84

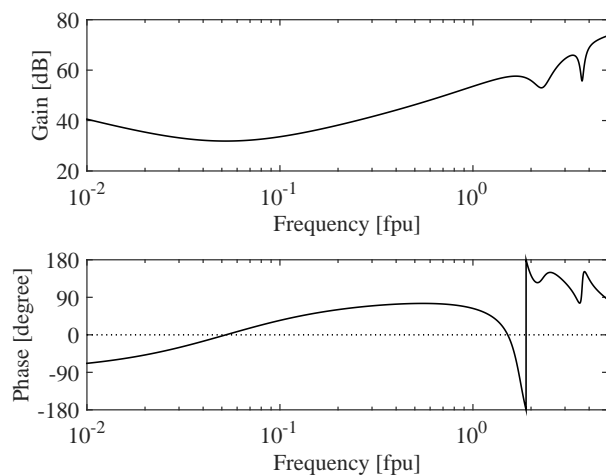
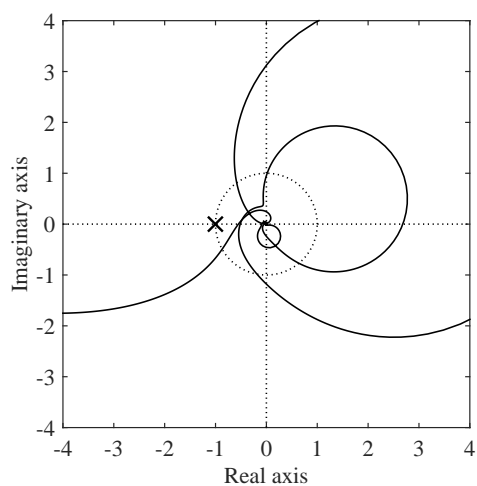
図 2.16: $C(z)$ の周波数応答特性 (供試体 1)

図 2.17: 開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 1)

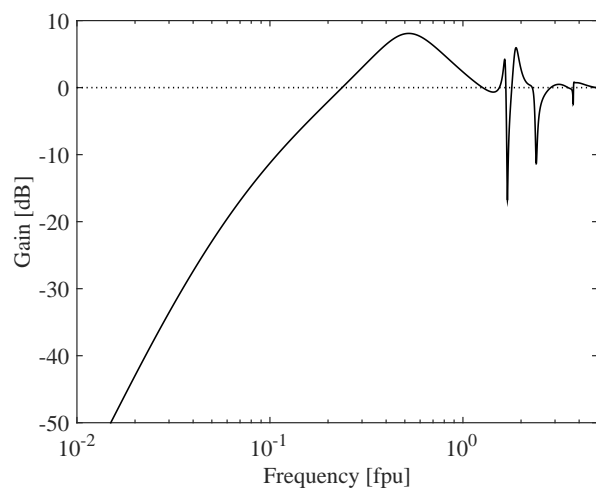


図 2.18: 感度関数の周波数応答特性 (供試体 1)

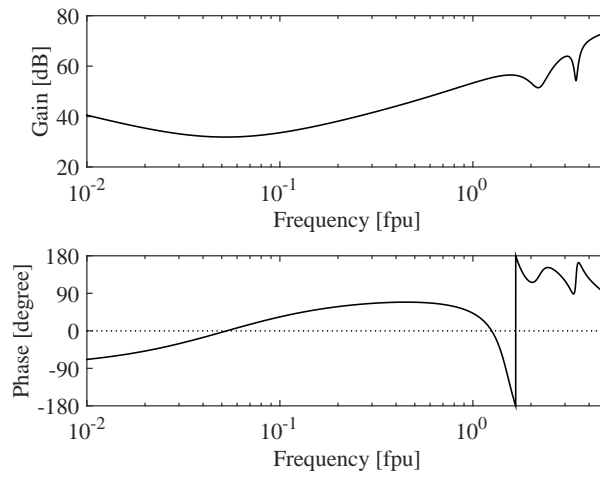
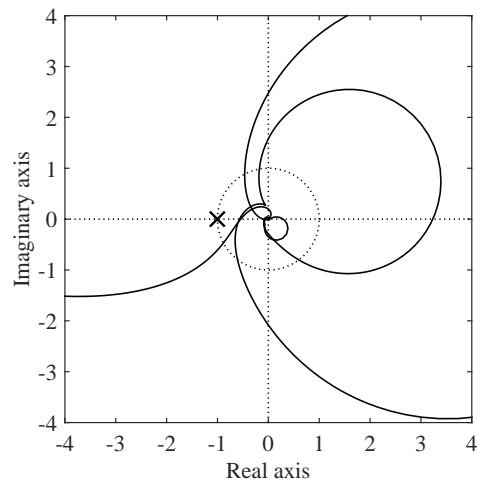
図 2.19: $C(z)$ の周波数応答特性 (供試体 2)

図 2.20: 開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 2)

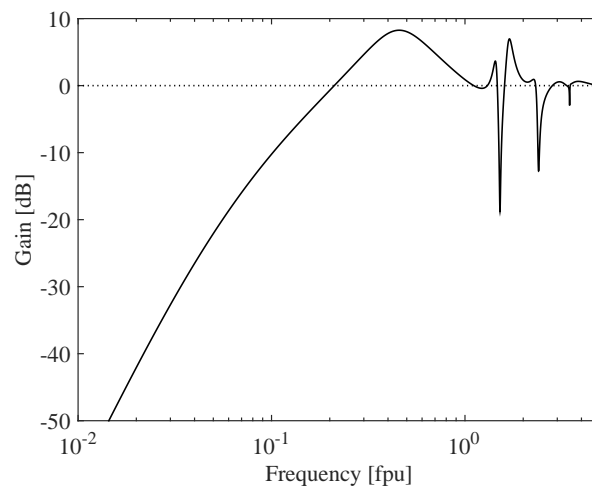


図 2.21: 感度関数の周波数応答特性 (供試体 2)

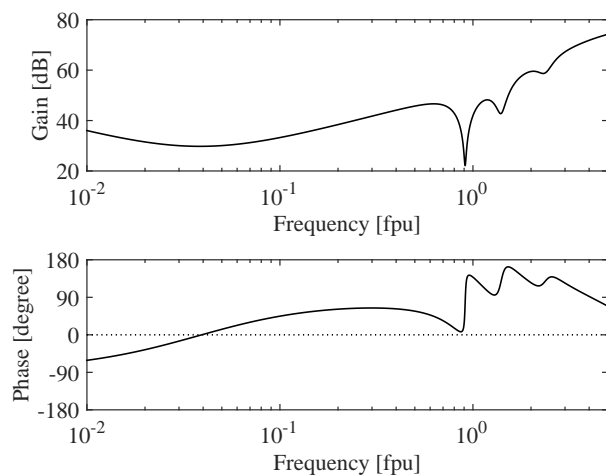


図 2.22: $C(z)$ の周波数応答特性 (供試体 3)

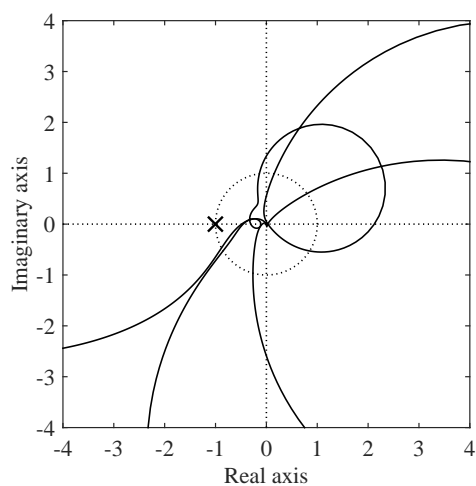


図 2.23: 開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 3)

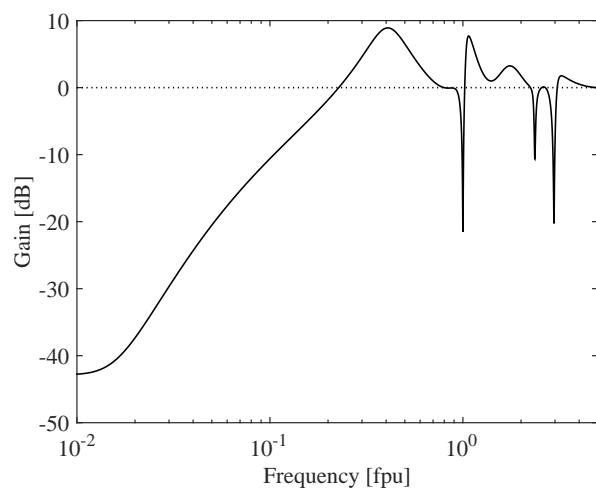


図 2.24: 感度関数の周波数応答特性 (供試体 3)

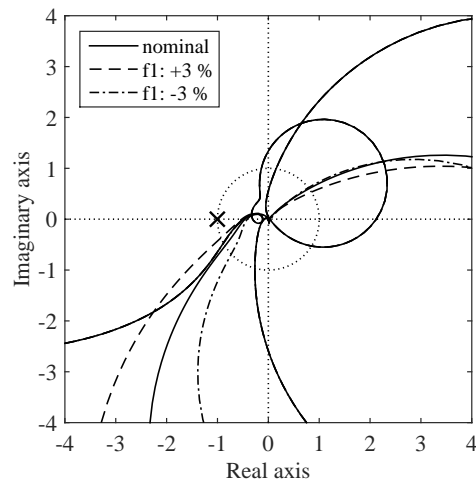


図 2.25: 機構特性変動時の開ループ伝達関数のナイキスト線図 (位相安定化法)

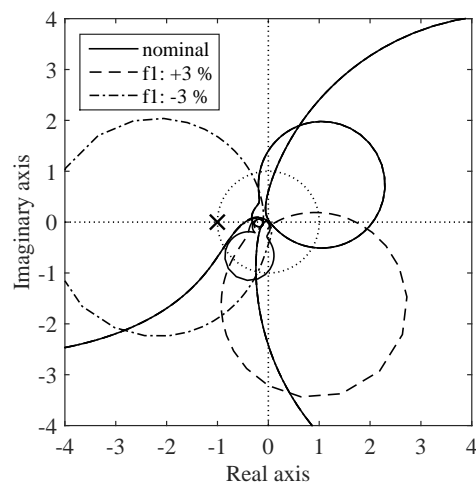


図 2.26: 機構特性変動時の開ループ伝達関数のナイキスト線図 (スモールゲインによる設計法)

2.4 既約分解表現に基づく2自由度制御系の設計

前節で設計したトルク指令型2自由度制御系は、PTP動作では非常に有能な手法であるが、指令がトルク次元であるため、例えばトレパニングのように制御周期毎に目標角度を指令として与えるCP動作では扱いにくい。そのため、本節ではPTP動作とCP動作の両方を必要とするUVレーザ穴明機向けガルバノスキャナのために、既約分解表現に基づく2自由度制御系を、供試体4-6を対象として設計する。なお、FB系はCP動作中の追従特性向上のため状態量FB制御を用いた設計としているが、本論文ではFB系の構造および各種特性を記載する。

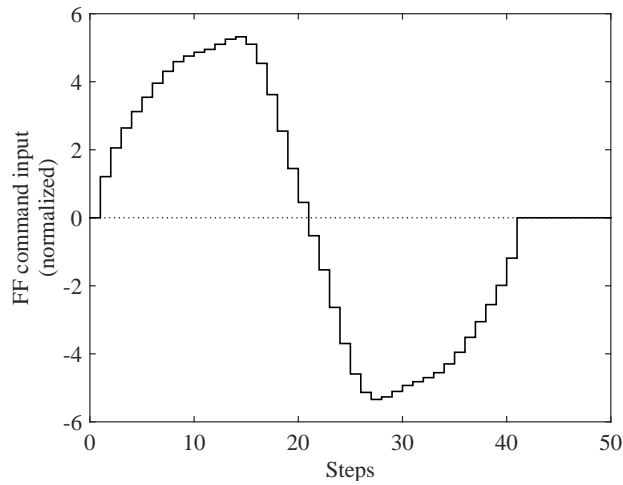


図 2.27: FSC によるトルク指令波形

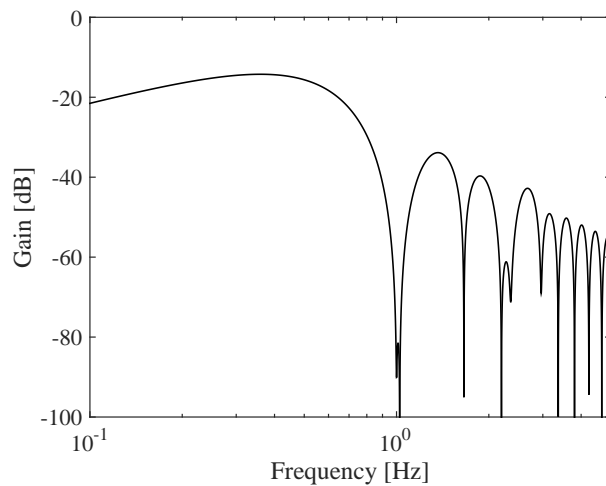


図 2.28: FSC によるトルク指令の周波数分析結果

2.4.1 状態量 FB 制御によるサーボ系の概要

本法のブロック線図を図 2.29 に示す。ここで、 $FF_1(z)$: 後述する FF 補償器 1、 $FF_2(z)$: 後述する FF 補償器 2、 \hat{y} : 理想的な制御対象の回転角度、 $C_{PI}(z)$: 比例積分補償、 $ob(z)$: 状態量オブザーバである。状態量 FB 制御では、状態方程式 $\dot{x} = Ax + Bu$ に対して制御則を $u = -Kx$ (K は状態 FB ゲインと呼ばれる) と与えたときの閉ループ系が $\dot{x} = (A - BK)x$ であり、制御対象が可制御であれば、状態 FB ゲインを適切に設計することで閉ループ系の極を任意に指定できる。すなわち、可制御であれば元のシステムが不安定であっても安定化することができ、さらに収束性も任意に決定できる。図 2.29 に示

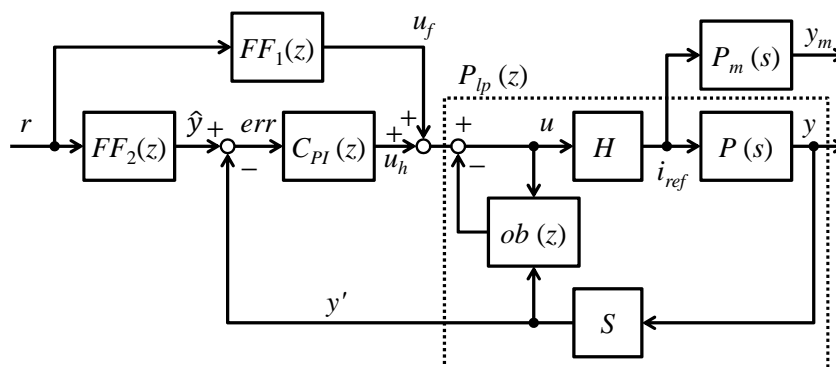


図 2.29: 既約分解表現に基づく 2 自由度制御系のブロック線図

表 2.12: 閉ループ系の特性 (供試体 4-6)

Scanner Number		4	5	6
Gain margin	dB	5.17	5.20	4.89
Phase margin	degrees	31.1	35.9	35.8
Zero cross frequency	fpu	0.22	0.27	0.27
Sensitivity (0.35 fpu)	dB	8.63	5.15	5.17

すガルバノスキャナ位置決め制御では、追従誤差に積分補償を持つ状態 FB 系に拡張しており、一般的に LQI 制御系と呼ばれるものである。状態量の推定にはオブザーバを用い、ねじり 2 次振動モードまで状態を推定している。

供試体 4-6 において、状態量 FB 制御により設計したサーボ系の検出角度 y' -制御操作量 u の周波数応答特性、開ループ伝達関数のナイキスト線図、および感度関数の周波数応答特性を、図 2.30-2.38 に示し、表 2.12 に各供試体のゲイン余有、位相余有、および開ループ伝達関数におけるゼロクロス周波数、本供試体の標準的な移動距離での応答周波数 0.35 fpu における感度関数のゲイン特性を示す。図 2.32-2.38 より、ねじり振動モード周波数近傍で感度特性が良好になっていることが確認できる。

2.4.2 既約分解表現に基づく 2 自由度制御系の設計

既約分解表現に基づく 2 自由度制御系は、制御対象の伝達関数のうち分母多項式のみを補償し、極配置を行う制御法である。分子多項式に対して補償を行わないため、ガルバノスキャナのようなセミクロズドループの制御系に対して有効である。図 2.29 に示すサーボ系では FB 系にマイナーループを持つため、 $P_{lp}(z)$ を拡大制御対象として扱う。ここ

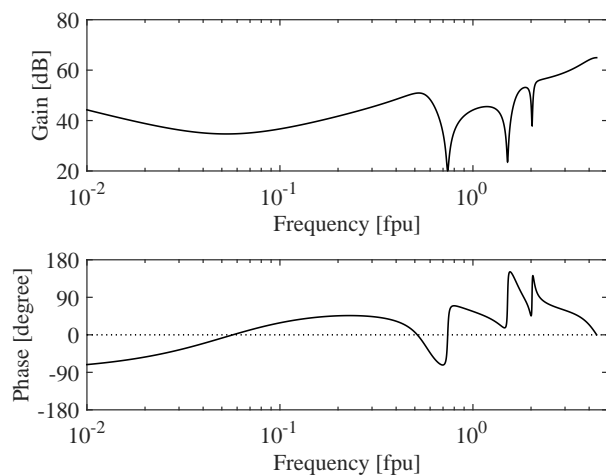


図 2.30: 検出角度 y' -制御操作量 u の周波数応答特性 (供試体 4)

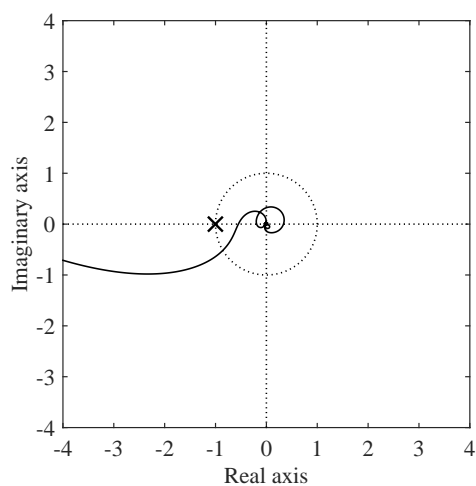


図 2.31: 開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 4)

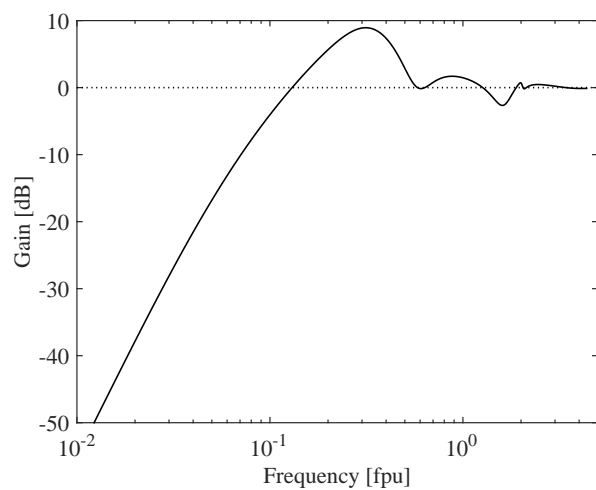


図 2.32: 感度関数の周波数応答特性 (供試体 4)

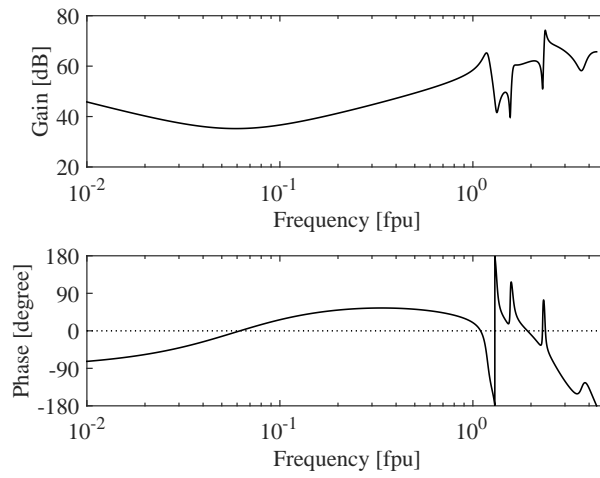


図 2.33: 検出角度 y' -制御操作量 u の周波数応答特性 (供試体 5)

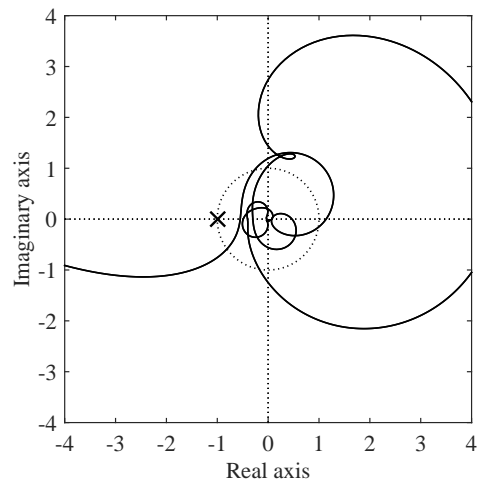


図 2.34: 開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 5)

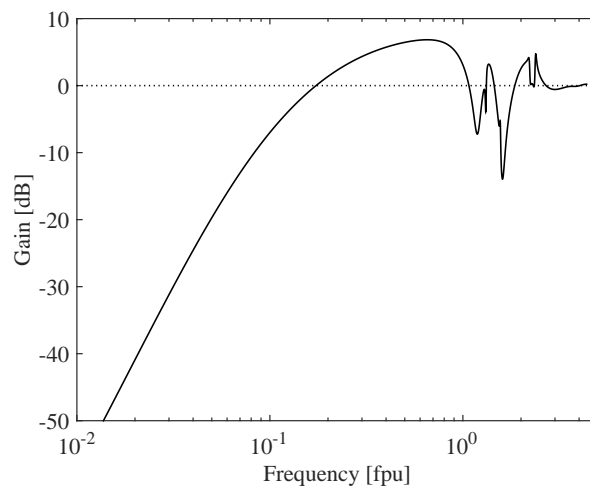


図 2.35: 感度関数の周波数応答特性 (供試体 5)

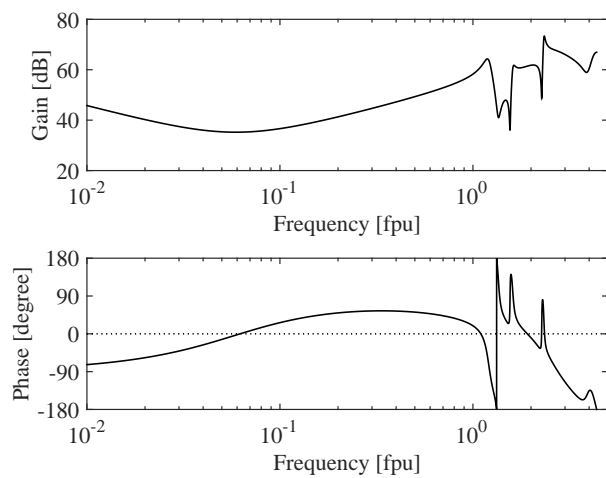


図 2.36: 検出角度 y' -制御操作量 u の周波数応答特性 (供試体 6)

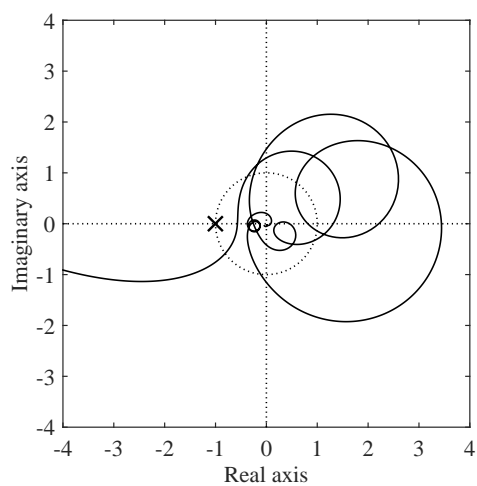


図 2.37: 開ループ伝達関数のナイキスト線図 (供試体 6)

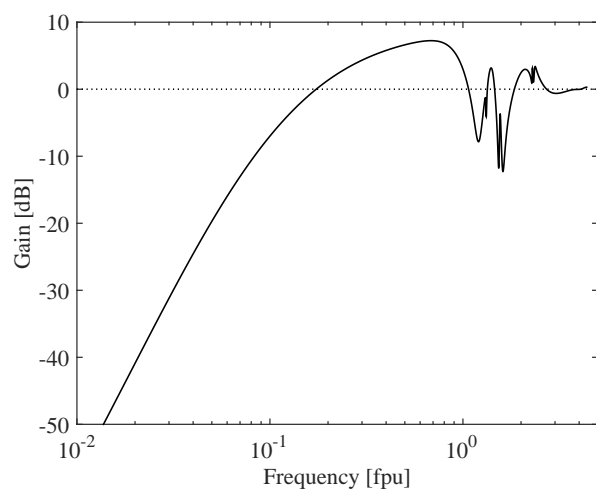


図 2.38: 感度関数の周波数応答特性 (供試体 6)

で、 $P_{lp}(z)$ 、 $FF_1(z)$ および $FF_2(z)$ は、式 2.6 で表される。

$$P_{lp}(z) = \frac{num(z)}{den(z)} \quad (2.6)$$

$$FF_1(z) = \frac{den(z)}{F(z)} \quad (2.7)$$

$$FF_2(z) = \frac{num(z)}{F(z)} \quad (2.8)$$

ここで、 $F(z)$: 任意に設定した極を持つフィルタである。文献 [18] による既約分解表現に基づく 2 自由度制御系では、制御対象の伝達関数を分子多項式 $num(z)$ と分母多項式 $den(z)$ に分けて表現し、二つの FF 補償器の伝達関数の分子に各成分を指定し、分母を共通のフィルタとする。追従誤差 err に対する補償器出力 u_h を無視し、 $r \rightarrow u_f \rightarrow u \rightarrow y$ までの伝達関数を考えると、式 2.9 になる。

$$\frac{y}{r} = \frac{den(z)}{F(z)} \times \frac{num(z)}{den(z)} = \frac{num(z)}{F(z)}$$

上式より、本法では制御対象の極のみを補償している。

図 2.39 および 2.40 は、本法により供試体 5 および 6 で設計した 2 自由度制御系において、目標追従特性 (角度指令 r –検出角度 y') の周波数応答特性である。このとき、二つの供試体の制御帯域は共に 0.27 fpu となり、後述するトレパニング周波数 0.10 fpu よりも高い。なお、0.10 fpu における供試体間のゲイン差および位相差は、それぞれ 0.59 dB、3.77 度であった。

2.5 位置決め性能低下問題における技術課題の明確化

本節では、本研究で対象とする位置決め性能が低下する問題について、ここまで設計した供試ガルバノスキャナ位置決め装置を用いた実験と数値シミュレーションにより性能低下の要因を考察し、技術課題を明確化する。

2.5.1 プラント特性変動による位置決め精度の劣化

前述の通り、プリント配線板の高密度化・多層化に伴いレーザ穴明機向けガルバノスキャナに求められる位置決め性能は高速化・高精度化しているが、高速化に伴いガルバノスキャナで使用される消費電力は増大している。その一方で、 f - θ レンズの焦点距離により適切な偏向位置 (=ガルバノスキャナが配置可能な位置) は決まるため、発熱密度を低く抑えるためにガルバノスキャナを大型にすることは困難で、抜熱性能の大幅な向上も難しい。そのため、従来と比較してガルバノスキャナの内部温度は高くなる傾向にある。

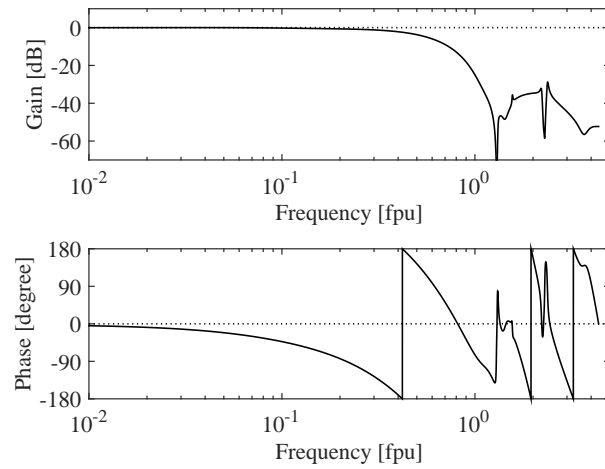


図 2.39: 目標追従特性の周波数応答特性 (供試体 5)

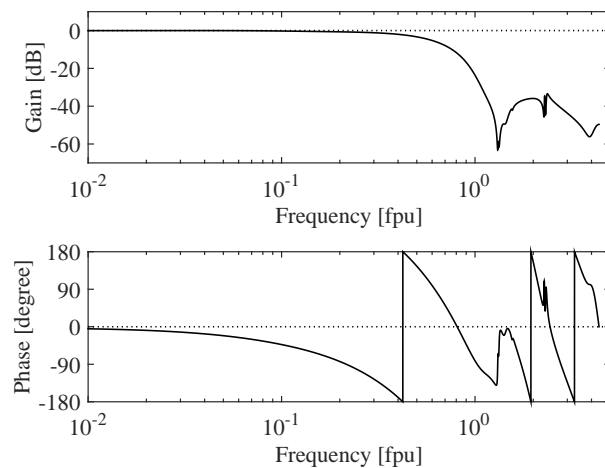


図 2.40: 目標追従特性の周波数応答特性 (供試体 6)

ガルバノスキャナにおいて、内部温度が上昇した際に発生するプラント特性変動として、次の二つがある。

- (1) 構成部品の剛性低下による、ねじり振動モード周波数の低下
- (2) 永久磁石の磁力低下による、トルク定数の低下

(1) に関して、特に樹脂や接着剤などを使用している部位は、一般的には温度上昇と共に剛性が低下する。そのため、FF 制御入力や FB 補償器を設計した時点よりねじり振動モード周波数が低下し、サーボ系の不安定化や位置決め精度の悪化を引き起こす。この問題に対して、ねじり振動モードの周波数変動にロバストな FF 制御入力および FB 補償器を設計 (2.3 節参照) することにより、改善を図っている。さらに、可動コイル式と比較し

て発熱による剛性低下の程度が軽い可動磁石式ガルバノスキャナを用いるケースも増えている。

その一方で、可動磁石式ガルバノスキャナを用いる場合には、永久磁石が可動子側となるため冷却が難しい。そのため、(2)に示す永久磁石の磁力低下に対する補償法の重要性が高まってきた。

熱による永久磁石の磁力低下は熱減磁と呼ばれ、可逆／不可逆現象がある。ここでは、可逆熱減磁について取り上げる。図 2.41 は、可動磁石式ガルバノスキャナである供試体 2 において、トルク定数が変動した場合の位置決め波形の変化を確認したものである。トルク定数の変動は、操作量 u を増減することで模擬した。2.3 節のトルク指令型 2 自由度制御系によりサーボ系を設計し、1 ppu の点から原点 (0 ppu) に向けて目標位置決め時間 $370 \mu\text{s}$ で位置決めする際に、ガルバノスキャナのトルク定数を $\pm 1.5\%$ 変動した場合の結果である。ガルバノスキャナで用いる希土類磁石は、温度が 1°C 上昇した場合に磁気特性が 0.12% 低下するため、トルク定数の $\pm 1.5\%$ の変動は、温度が $\pm 12.5^\circ\text{C}$ 変動することと等価である。図より、トルク定数が 1.2% 低下した場合、位置決め範囲に突入後に 6 mppu の大きなオーバシュートが発生している。また、トルク定数の変化量と最大オーバシュート量は比例関係にある。

次に、熱減磁による位置決め精度の悪化を実際に位置決めを用いて確認した。図 2.42 は、図 2.41 と同様の条件で供試体 2 を連続して往復動作させた場合の、動作開始直後から 800 秒後の位置決め波形誤差波形を 50 秒ごとに重ね書きした結果である。ここで、位置決め誤差 e は目標角度 x と検出角度 y' を用いて、 $e = x - y'$ と定義する。図より、時刻が経過するにつれてオーバシュート量は増加していき、800 秒後の位置決め誤差は 12 mppu となった。図 2.41 の結果から、トルク定数の低下とオーバシュート量は比例関係にあると考えられるため、12 mppu のオーバシュートはトルク定数が 3% 低下したことに相当し、800 秒後の永久磁石の温度上昇量が 25°C 程度であったと推定できる。

2.5.2 装置運用面で発生する位置決め精度の劣化

ビームスポット径より大径のピアホールを加工するトレパニングは、理想的にはオンラインもしくはオフラインですべての穴を滑らかに加工可能な制御周期毎の目標軌道を生成して用いればよい。しかし、オンラインで実現するためには非常に高い演算能力を持つコントローラが必要であり、オフラインでの実現は膨大な座標情報を蓄積するメモリが必要となり、現実的ではない。一方、複数の FF 補償器および FB 補償器を持ち、それぞれの動作に適した補償器を切り替える方法も提案されているが、切り替えるタイミングで制御器の初期値を求める必要があり、一般的な製造装置で見られる階層構造を持つ制御系では導入が難しい。そのため、現状のレーザ穴明機ではピアホールの中心位置に位置決めする

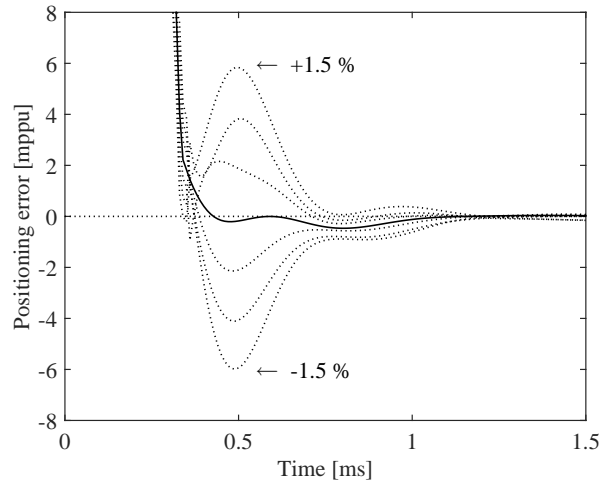


図 2.41: トルク定数の変動と位置決め誤差波形の関係 (供試体 2)

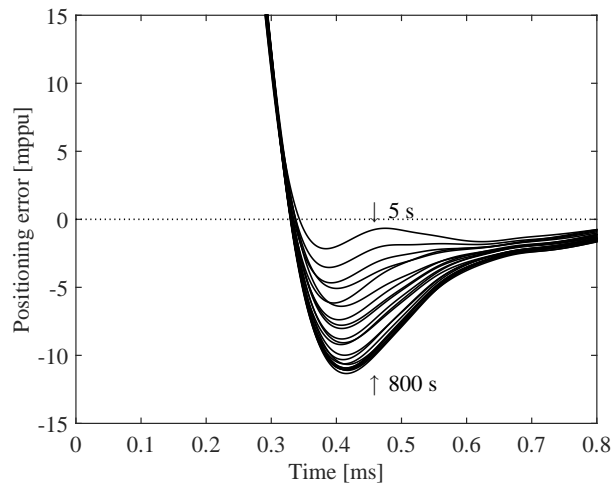


図 2.42: 発熱条件における位置決め誤差の増大 (供試体 2)

穴間移動動作 (PTP 動作) と、ビアホールの外周を旋回する周回動作 (CP 動作) を、動作モードを切り替えることで実現している。

ここでは、動作モードの切り替えにより生じる過渡応答の影響について、供試体 5 および 6 より獲得した数学モデルを用いて説明する。図 2.43 は、2.4 節の既約分解表現に基づく 2 自由度制御系によりサーボ系を構築した数値シミュレータを用い、開始点から x 軸、 y 軸方向に 1 ppu 離れた点で、軌道径 40 mppu のビアホールをトレパニングで加工する場合の、各ガルバノスキャナの応答波形を示す。図中の 0.5 ms までは PTP 動作モードで穴間移動しており、その後は CP 動作モードで外周を旋回している。前述の通り、トレパニングでは角度指令が 90 度位相がずれた正弦波を用いるため、CP 動作に遷移する

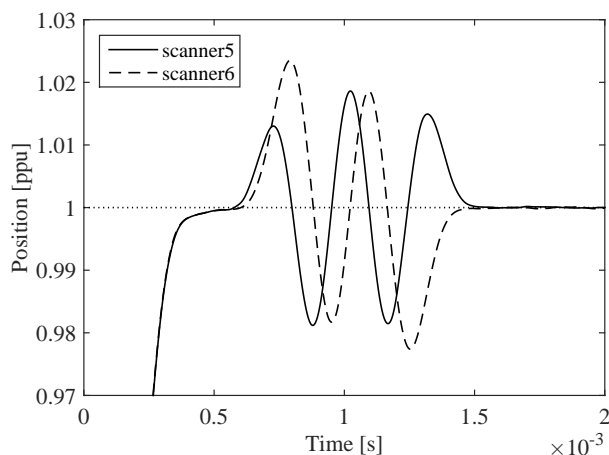


図 2.43: トレパニングにおける各ガルバノスキャナの応答波形

際にどちらからのガルバノスキャナにはステップ上の角度指令が入ることになる (本例では、供試体 6 側が該当する)。そのため、切り替え時に過渡応答が発生するために、周回軌道を旋回するまでの待ち時間を必要とする。実際の装置では動作モードの切り替え後にレーザ光をパルス照査するまで待ち時間を設けており、これは加工生産性低下の一因になっている。

本節で明確となった、動作モードの切り替え時に発生する過渡応答を低減し、高速なトレパニングを実現する方法は、第 4 章で提案する。

2.5.3 機構部品の経時・経年劣化による位置決め精度の劣化

揺動型の電磁モータであるガルバノスキャナにおいて、特に経時・経年劣化の度合いが激しい機構部品は、可動子を支持する転がり軸受である。ダイレクトドライブ機構であるガルバノスキャナは、非線形要素や外乱が少ない位置決め装置であるが、小振幅の揺動動作を繰り返した場合には転がり軸受にフレッチング損傷が生じ、回転軸を手で回した際に分かるほど、損傷部の転がり抵抗が増大する。そのため、損傷部を通過する場合と通過しない場合で位置決め波形の傾向が変わり、特に損傷部付近に位置決めした場合に位置決め精度が大きく劣化する。

転がり軸受性能低下時の位置決め精度が劣化する状況の確認には、長期間プリント配線板製造工程のレーザ穴明機で使用され、転がり軸受に損傷が生じたガルバノスキャナ (供試体 4 と同じ構成) を用いた。本供試体の回転軸を手で回すと、可動範囲の中央部と両端部で引っ掛かりを感じた。図 2.44 は、本供試体で可動範囲の複数の場所で位置決め動作した際の位置決め誤差波形を 100 回重ね書きした図である。図より、位置決めする場所に

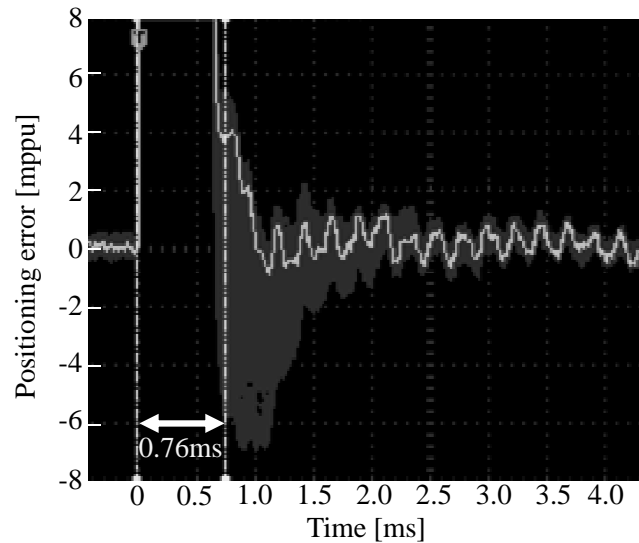


図 2.44: 転がり軸受性能が低下したガルバノスキャナでの位置決め誤差波形

よって位置決め範囲へ突入した直後に、位置決め誤差波形が大きくばらつきを持つことが読み取れる。本供試体で使用した転がり軸受を取り出し、内輪の転動体軌道面（以下、軌道面）を光学顕微鏡で拡大観察した写真を、図 2.45 に示す。図の中央部で軌道面が黒色に変色しており、フレッチング損傷が生じている。ここで、フレッチング摩耗が発生する原因について、図 2.46 を用いて説明する。転がり軸受は、転動体と外輪・内輪、転動体の位置を保持する保持器から構成され、一般的には転動体と内輪・外輪は潤滑油を介して接触している。しかし、微小な揺動動作を繰り返し行くと潤滑油が接触部分からかき出され、転動体と内輪・外輪が直接接触したまま揺動動作を続けることで、接触部分が摩耗する。つまり、フレッチングによる損傷は転がり軸受の転動体と軌道輪の接触部分で発生し、それ以外の個所では大きな性能低下はないことが特徴である。

このように、転がり軸受の性能がフレッチング損傷の発生で低下した場合、位置決めを行う箇所により位置決め誤差波形が変わるため、その対策が非常に難しい。さらに、転がり軸受の性能低下を定量的に評価する方法がなく、転がり軸受の交換時期を見極めることが困難である。

本節で明確となった、長期間使用したガルバノスキャナに多くみられる、小振幅揺動動作による転がり軸受性能低下の定量化と、転がり軸受性能低下が引き起こす位置決め精度の劣化に対する改善方法は、第 5 章で提案する。

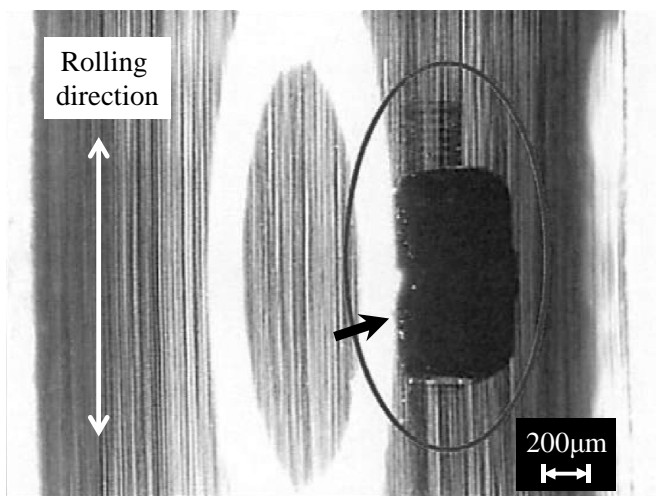


図 2.45: フレッチング損傷が生じた転がり軸受の内輪軌道面写真

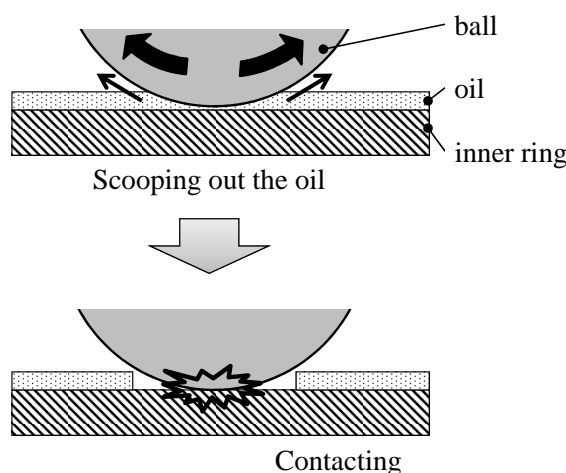


図 2.46: フレッチング損傷発生メカニズム

2.6 まとめ

本章では、まず制御対象の周波数応答特性を取得し、計測結果をよく表現する数学モデルを獲得した。次に、PTP動作が主であるガルバノスキャナに対して、応答性のよいトルク指令型2自由度制御系を構築し、PTP動作とCP動作を切り替えて用いるガルバノスキャナに対して、追従性のよい既約分解表現に基づく2自由度制御系を構築した。そして、それぞれの制御系において、ロバスト安定性に優れたFB補償器の設計と、外乱圧縮特性が良好な状態量FB制御系を設計した。次に、第1章で問題提起した位置決め性能の低下に関して、供試ガルバノスキャナ位置決め装置を用いた実験と数値シミュレーションにより性能低下の要因を考察し、技術課題を明確化した。第3章では、位置決め精度低下

の定量的な評価法と要因分析法を提案し、明確となった技術課題の解決は第 4 章以降で取り組む。

第 3 章

位置決め精度劣化の定量的な評価と発生要因の分析

本章では、実験モード解析によるモード特性同定法を用いて、位置決め精度の劣化の程度を定量的に評価する方法を提案する。そこでは、時系列データである位置決め波形を振動モード毎に分離し、周波数応答関数と同定したモード特性値を比較することで、発生要因の分析と位置決め性能劣化の程度を定量化する。提案法の有効性は、供試体 3 および同様の構成で長期間使用された供試ガルバノスキャナを用いて実験的に検証する。

3.1 プロニー解析法による位置決め誤差波形の分析

3.1.1 プロニー解析法の概要

機構系の振動現象に対して対策を実施する必要がある場合、機構系の振動特性をなんらかの方法で把握し、現象を理解することは非常に重要である。振動特性を把握する方法として、機構系のモード特性を数学モデルの形で表し、振動実験のデータなどから数学モデルの各定数を同定することを、モード特性同定と称す [43]。モード特性同定は実験モード解析 (Experimental Modal Analysis) の一種であり、使用するデータにより二分される。一つは周波数応答関数を入力データとして用いる周波数領域の方法であり、もう一つは単位衝撃応答関数を用いる時間領域の方法である。また、対象とする振動モードを一つとする一自由度法 (SDOF; Single Degree of Freedom Method) と、複数とする多自由度法 (MDOF; Multiple Degree of Freedom Method) に分けられる。なお、第 2 章でガルバノスキャナの周波数応答特性の同定で使用した偏分反復法は、多自由度法のうち周波数領域の方法である。

プロニー解析法は実験モード解析法の一つであり、時系列データを初期振幅、初期位相、減衰率、固有振動数からなる指数関数に近似し、モード特性を同定する方法である。

プロニー解析法による位置決め波形の分析の概要を、以下に述べる。推定する位置決め波形は複数モードの線形和であると仮定し、一回の位置決め動作中に所定のサンプリング間隔で複数回取得した位置決め誤差の実測値 $e(k)$ 、($k = 0, 1, \dots, N - 1$) を用いて、式 3.1 で各モード特性を同定する。

$$\hat{e} = \sum_{i=1}^n B_i Z_i^k \quad (3.1)$$

ここで、 $Z_i = \exp(s_t t)$ 、 $s_t = -\sigma_i + j\omega_{di}$ 、 n : 算出するモード数、 t : サンプリング間隔、 s_i : 固有値、 B_i : 初期値、 σ_i : モード減衰率、 ω_{di} : 減衰角振動数である。 Z_i は、式 3.2 の n 次多項式の解として与えられる。

$$Z_i^n - (a_1 Z_i^{n-1} + a_2 Z_i^{n-2} + \dots + a_n Z_i^0) = 0 \quad (3.2)$$

一方、式 3.1 と式 3.2 より、多項式の係数 $a_1 \sim a_n$ は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} e(n-1) & e(n-2) & \dots & e(0) \\ e(n) & e(n-1) & \dots & e(1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e(N-2) & e(N-3) & \dots & e(N-n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e(n) \\ e(n+1) \\ \vdots \\ e(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

したがって、式 3.3 に取得した位置決め誤差の実測値を代入して、多項式の係数 $a_1 \sim a_n$ を最小二乗法で求め、その結果から式 3.2 の Z_i が得られ、固有値 s_i が算出できる。

次に式 3.1 から、 B_i について次式の関係が導出される。

$$\begin{bmatrix} Z_1^0 & Z_2^0 & \dots & Z_n^0 \\ Z_1^1 & Z_2^1 & \dots & Z_n^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_1^{N-1} & Z_2^{N-1} & \dots & Z_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

式 3.4 について最小二乗法を用いて解き、 B_i を得る。以上より、初期振幅 A_i 、初期位相 ϕ_i 、モード減衰比 ζ 、不減衰振動周波数 f_{di} は、式 3.5–3.8 に帰着する。

$$A_i = |B_i| \quad (3.5)$$

$$\phi_i = \arg B_i \quad (3.6)$$

$$\zeta_i = \frac{\sigma_i / \omega_{di}}{\sqrt{1 + (\sigma_i / \omega_{di})^2}} \quad (3.7)$$

$$f_{di} = \frac{\omega_{di}}{2\pi\sqrt{1-\zeta_i^2}} \quad (3.8)$$

なお、 Z_i が単一の実数根となる場合に過減衰モードとなり、複素根となる場合に振動モードとなる。

3.1.2 プロニー解析法のガルバノスキャナへの適用

次に、ガルバノスキャナの位置決め誤差波形をプロニー解析法で分析した結果を述べる。図 3.1 は、第 2 章でトルク指令型 2 自由度制御系で位置決め制御系を設計した供試体 3 において、開始点から 1 ppu 離れた点に向けて目標位置決め時間 370 μ s で位置決めした際の位置決め誤差波形を示す。試行は 500 回実施し、図はその平均した結果を示す。時系列データの取得は 10 μ s 周期で行った。そして、位置決め目標時間後 (= FSC による FF 制御入力を出し終えた時刻) から 2 ms 経過するまでの、図中の○印で示す 200 点の位置決め誤差の実測値を用いて、プロニー解析法による分析を実施した。なお、式 3.1 のモード次数 n は 80 とした。

プロニー解析法による同定結果の上位 5 モードまでを表 3.1 に示し、図 3.2 に分離した各モードの波形を同じスケールで示す。なお、モードの順位は各モードの解析区間における面積の大小で決定した。特徴的な 1 fpu 近傍の振動は、モード No.2 および No.5 として同定されており、また収束性の悪い応答 (以降、遅い応答) はモード No.1 および No.3 として同定されている。

プロニー解析法による同定結果の妥当性を評価するため、ここでは同定された各モード特性と FB 系の極配置を比較する。図 3.3 は、制御対象が図 2.10 の周波数応答特性を示す場合の、FB 系の目標値応答特性 y'/r に対する極配置を示す。振動モード周波数 0.5 fpu、1.0 fpu および 1.2 fpu 近傍に、 ζ が 0.1 以下である非常に減衰が小さい極が存在する。これらの極は、プロニー解析法を用いて位置決め誤差波形をモード分離した結果 (表 3.1) において、モード No.4 (0.45 fpu)、No.2 (1.03 fpu)、No.5 (1.20 fpu) と対応する。供試体 3 の周波数応答特性から、モード No.4 は FB 制御系が形成する極で、モード No.2 および No.5 は機構系のねじり 1 次振動モードと FB 補償器の NF および APF により形成される極であると言える。これらの振動モードは、制御入力により減衰の悪い極が励起されて位置決め誤差波形に各モードが重畳している。PTP 動作で用いるトルク指令型 2 自由度制御系では、制御入力は FSC によって作成しており、ノミナル状態では制御入力にねじり振動モード周波数成分は含まれない。しかし、経時・経年変化により機構特性が変化し、制御入力で考慮したねじり振動モード周波数と実際の制御対象のねじり振動モード周波数が不一致となった場合、制御入力によりねじり振動モードが励起されて位置決め誤差波形にねじり振動モード成分が重畳する。そのため、プロニー解析法でのモード分離

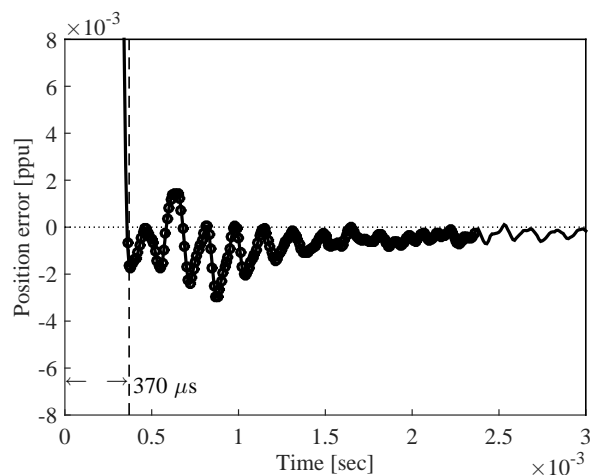


図 3.1: 位置決め誤差波形 (供試体 3)

結果でねじり振動モードの周波数成分が上位モードとして導出された場合、前述のような機構特性の変動が原因と考えられる。位置決め精度低下の程度は、導出された初期振幅の大きさで定量化が可能である。

表 3.1 におけるモード No.1 のような過減衰モードや、モード No.3 のように減衰が大きい減衰振動モードは、制御対象の周波数応答特性を測定しても観測できない。急加速・急減速する PTP 動作において、位置決め誤差波形で顕著な過減衰モードや減衰が大きい振動モードなどの遅いモードは過渡現象であるため、周波数応答関数を入力データとして用いる周波数領域の方法ではモード特性が同定できない。一方、時系列データを入力として用いるプロニー解析法では、遅い応答のモード特性も導出できるため、ガルバノスキャナの位置決め誤差波形の分析に適している。

プロニー解析法によるモード分離結果の妥当性を評価するため、同定された上位五モードを再度時系列データに戻した結果 (細線) と、元の位置決め誤差波形 (太淡線) を図 3.4 に示す。残留振動や収束性の悪い遅い応答も含めて波形の特徴が一致しており、プロニー解析法による精度のよいモード分離が可能である。

以上より、ガルバノスキャナの位置決め誤差波形にプロニー解析法を用いてモード特性を同定することで、位置決め誤差波形に含まれる振動モードや過減衰モードを初期振幅やモード減衰率を用いて定量的に評価できる。特にプロニー解析法は、位置決め誤差波形に遅い応答として現れる過減衰モードのモード特性が同定可能である。次節ではこの特徴を生かし、転がり軸受の性能低下による影響を過減衰モードに着目して定量化する方法を検討する。

表 3.1: 位置決め誤差波形のモード特性同定結果 (供試体 3)

Mode number	Normalized frequency f_{di} (fpu)	Initial amplitude A_i (10^{-3} ppu)	Decay rate σ_i (rad/s)	Initial phase ϕ_i (rad)
1	–	1.27	511	–
2	1.03	3.01	1939	2.69
3	0.16	2.46	3170	–0.14
4	0.45	2.96	3989	2.08
5	1.20	1.28	2846	–1.13

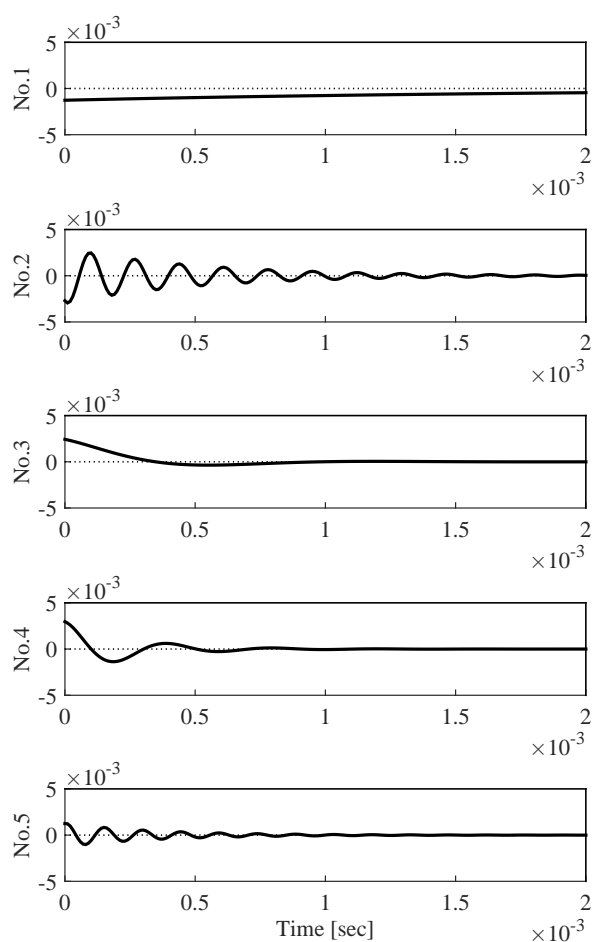


図 3.2: プロニー解析法で分離した振動/過減衰モードの波形 (供試体 3)

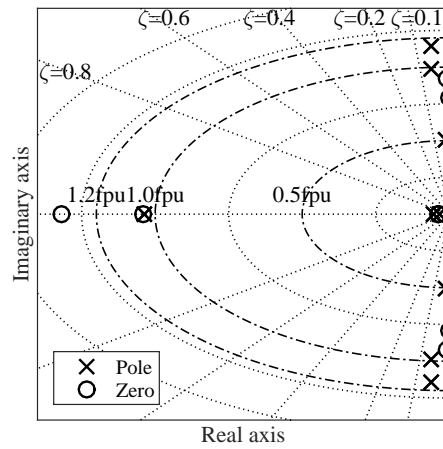


図 3.3: 周波数応答特性から予想される FB 系の極配置

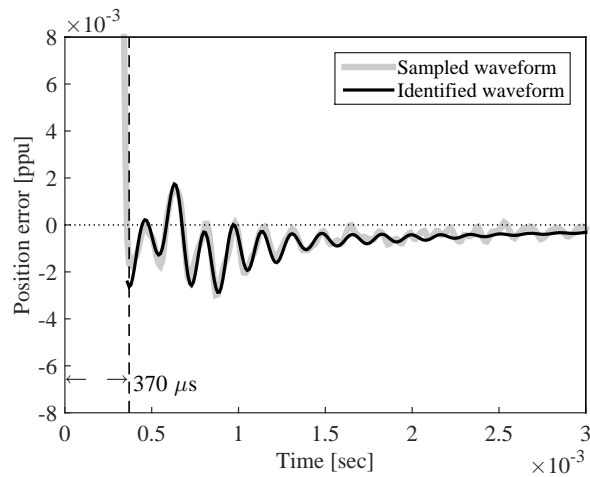


図 3.4: 位置決め誤差波形 (供試体 3、再合成)

3.2 転がり軸受性能低下が位置決め精度に与える影響の定量化

第 2 章で述べた通り、長期間プリント配線板製造工程のレーザ穴明機で使用されたガルバノスキャナは、転がり軸受にフレッチング損傷が生じ、性能が低下する。フレッチング損傷による位置決め精度への影響は、可動範囲で一様ではなく位置に依存して度合いが変わり、位置決めする場所によって位置決め誤差波形の傾向が異なる。

本節では、供試体 3 と同じ構成で転がり軸受に損傷が生じた供試体 3B を用い、転がり

軸受に損傷が発生した箇所 (以下、損傷領域) と正常な箇所 (以下、正常領域) の二か所で位置決め動作した際の位置決め誤差波形に対して、プロニー解析法により評価した。供試体 3B の回転軸を手で回すと、特に可動範囲中央部で引っ掛かりを感じた。そこで、触診結果より損傷領域と予想される $x = 0$ ppu から $x = 1$ ppu で繰り返し位置決めした場合と、正常領域と予想される $x = -10$ ppu から $x = -9$ ppu で繰り返し位置決めした際の、位置決め誤差波形を用いた。損傷領域の位置決め誤差波形を図 3.5 に、正常領域の位置決め誤差波形を図 3.6 に示す。それぞれ 500 回の試行を平均した結果であり、図中の○は後述するモード特性を同定する際に使用した解析点を示す。図より、損傷領域では正常領域に対して、位置決め誤差波形に重畳する収束性の悪い遅い応答が大きい。すなわち、フレッチング損傷が生じたガルバノスキャナで位置決め動作を行うと、形成された痕跡の位置によって位置決め誤差波形に生じる遅い応答の程度が異なると言え、遅い応答に対応する成分を分離できれば、位置決め誤差波形に占める軸受性能低下の影響を数値化できる。そこで、これら二つの位置決め誤差波形に対して、前節と同じ条件でプロニー解析法でモード特性を同定した。同定結果の上位モード五つまでを、表 3.2 および表 3.3 に示す。同定されたモード特性を比較すると、振動モードに関する同定結果は両波形で大きな違いは見られないが、減衰の大きい過減衰モード (表 3.2 のモード No.1、表 3.3 のモード No.4) の初期振幅が、損傷領域における位置決め誤差波形では正常領域の約 10 倍大きくなっている。図 3.7 および図 3.8 は、減衰の大きい過減衰モード成分のみを時間領域に戻した波形を示しており、プロニー解析法により位置決め誤差波形に重畳している遅い応答の主成分を抽出できている。

提案手法の有効性を、供試体 3B と同じ構成で転がり軸受性能が低下した二つのガルバノスキャナ (以下、供試体 3C および 3D) で確認した。表 3.4 および表 3.5 は、供試体 3C および 3D で正常領域と損傷領域それぞれの位置決め誤差波形にプロニー解析法を適用した際の、過減衰モードのモード特性を示す。表より、二つの供試体ともに過減衰モードの初期振幅が正常領域の同定結果に対して損傷領域の同定結果が約三倍大きくなっている。以上の結果より、転がり軸受性能の低下が位置決め精度低下に与える影響は、位置決め誤差波形をプロニー解析法でモード特性を同定した際に得られる初期振幅を用いて定量的に評価できる。

一般的な精密位置決めにおいて、遅い応答の発生原因は転がり摩擦の影響であるとの報告がある [67]。ダイレクトドライブモータの一種であるガルバノスキャナはギアボックスなどの間接的な機構部を持たないため、摩擦の影響は非常に小さく無視できると考えられてきた。しかし、フレッチング損傷が発生するなど転がり軸受内部の潤滑状態が変わり、転がり軸受の性能低下が進むと、転がり軸受部での摩擦が大きくなり、位置決め誤差波形に遅い応答が増大すると考えられる。

表 3.2: 位置決め誤差波形のモード特性同定結果 (供試体 3B、損傷領域)

Mode number	Normalized frequency f_{di} (fpu)	Initial amplitude A_i (10^{-3} ppu)	Decay rate σ_i (rad/s)	Initial phase ϕ_i (rad)
1	–	4.20	745	–
2	0.42	4.74	4023	1.85
3	1.03	1.69	1440	2.65
4	0.16	2.20	4121	–0.18
5	–	10.66	27078	–

表 3.3: 位置決め誤差波形のモード特性同定結果 (供試体 3B、正常領域)

Mode number	Normalized frequency f_{di} (fpu)	Initial amplitude A_i (10^{-3} ppu)	Decay rate σ_i (rad/s)	Initial phase ϕ_i (rad)
1	0.42	4.90	4059	1.55
2	0.13	3.98	3448	1.26
3	1.03	1.66	1357	2.58
4	–	0.43	389	–
5	2.37	0.81	2371	0.65

表 3.4: 位置決め誤差波形のモード特性同定結果 (供試体 3C、過減衰モード)

	Initial amplitude A_i (10^{-3} ppu)	Decay rate σ_i (rad/s)
Normal area	1.72	1671
Damaged area	5.03	885

表 3.5: 位置決め誤差波形のモード特性同定結果 (供試体 3D、過減衰モード)

	Initial amplitude A_i (10^{-3} ppu)	Decay rate σ_i (rad/s)
Normal area	2.79	2436
Damaged area	7.73	964

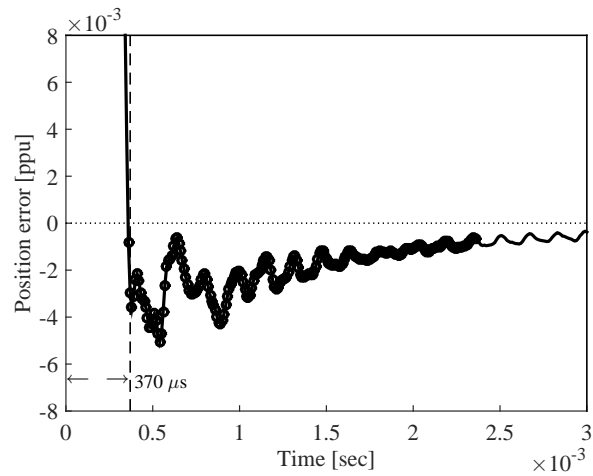


図 3.5: 位置決め誤差波形 (供試体 3B、損傷領域)

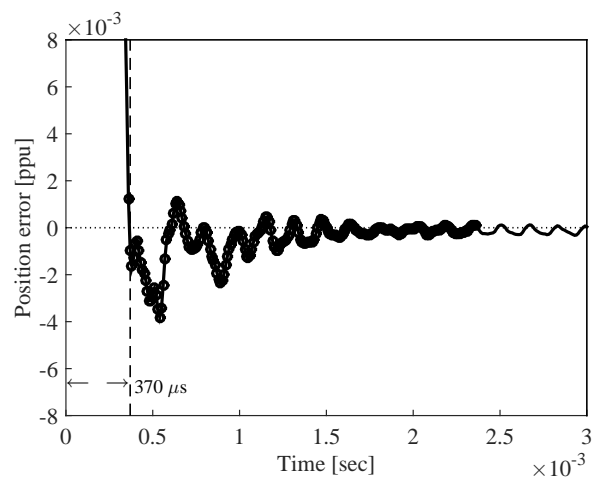


図 3.6: 位置決め誤差波形 (供試体 3B、正常領域)

3.3 まとめ

本章では、実験モード解析によるモード特性同定法を用いて位置決め誤差波形の振動モード分離を行い、分離結果と制御対象の周波数特性を比較することで、位置決め誤差波形を要因毎に評価する方法を提案した。特に転がり軸受の性能低下による位置決め誤差への影響度は、過減衰モードの初期振幅を用いて定量的に評価できる。提案法の有効性は、長期間稼動して転がり軸受性能が低下した供試ガルバノスキャナ位置決め装置を用いて実験的に検証された。

なお、転がり軸受そのものの性能評価法や位置決め精度改善法は、第5章で検討する。

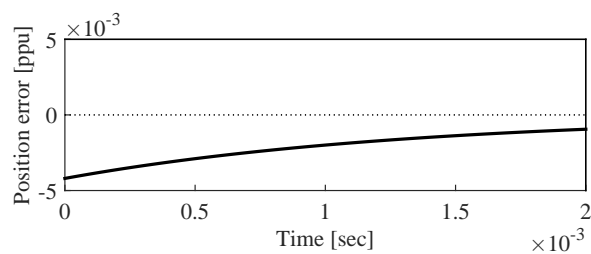


図 3.7: 位置決め誤差波形のモード分離結果 (供試体 3B、モード No.1、損傷領域)

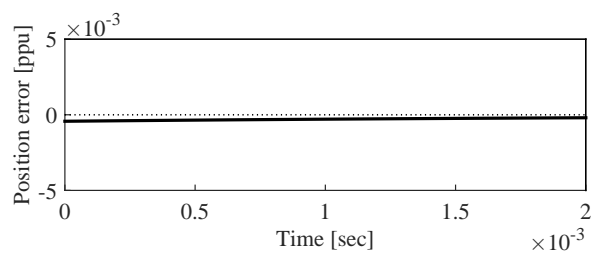


図 3.8: 位置決め誤差波形のモード分離結果 (供試体 3B、モード No.4、正常領域)

第 4 章

動作モード切り替え時の過渡応答を低減する目標軌道設計

本章では、第 2 章で問題提起した「動作モードの切り替え時に発生する過渡応答」に対して、ノンストップトレパニング (NST) 法による解決を試みる。ここでは、PTP 動作と CP 動作を切り替えながら加工するトレパニングにおいて、二つの動作モードを同一の FF、FB 補償器で実行するガルバノスキャナ位置決め装置を対象とする。NST 法は、様々な動作パターンを含み、数万を超えるビアホール加工でも滑らかな目標軌道が設計でき、動作モード切り替え時の過渡応答が抑制可能である。NST 法の有効性は、供試体 5 および 6 を用いて実験的に検証する。

4.1 トレパニングの概要

トレパニングではビアホールの中心に移動した後に、偏向軸が直交するよう配置された二つのガルバノスキャナに対して、同振幅で 90 度の位相差を持つ正弦波を角度指令として与える。この指令により、レーザ照射位置が同心円状に旋回するため、レーザ光の発振周波数に合わせてパルス照射を行うことにより、レーザスポット径以上のビアホール加工が可能となる。なおトレパニングでは、三角関数を用いて周回軌道の座標を算出する必要がある。エンドミルやメカドリルを加工手段として用いる一般的な CNC 装置と比べ、レーザ穴明機はレーザ光のパルス照射周期が短く素早い加工が可能であり、PTP 動作および CP 動作速度をより速く設定できる。その一方で、ガルバノコントローラの制御周期を非常に短くする必要があり、上位系やガルバノコントローラで逐次周回軌道を計算することは、演算能力の制約により実現が困難である。そのため、レーザ穴明機では加工動作中の演算時間の軽減を目的として、設定された加工条件より周回軌道の座標を加工開始前にあらかじめ計算して、ガルバノコントローラの記憶領域に記憶している。

以下、従来法にて一周でビアホールを加工する場合の流れを、図 4.1 および図 4.2 を用いて詳説する。図 4.1 は従来法におけるトレパニングのフローチャートを示し、図 4.2 は従来法で点 A から点 B を中心とする円 O_n でトレパニングを行う際の加工平面での位置決め軌道を模式的に示す。図 4.2 の黒丸は、制御周期毎の目標座標を表す。図 4.1 に示したように、トレパニングでは時系列的に三つのステージに分けることができる。

- ① 加工するビアホールの中心まで、パンチングと同様に PTP 動作モードで移動する (穴間移動動作)。
- ② 事前に作成した周回軌道の座標列を、制御周期毎に出力する CP 動作 (周回動作) を開始する。
- ③ 事前に設定した遷移時間 (レーザ光照射位置が目標周回軌道上を旋回するまでの待ち時間) 後に、レーザ光発振周波数に応じて間欠的にパルス照射する。

周回軌道の座標列をすべて出し終わると、周回軌道の最終点で位置決めされて次の動作に備える。以上のように、従来のトレパニングでは必ずビアホールの中心に位置決めしてから周回軌道へと遷移しており、周回軌道のみを加工する場合は ② ⇒ ③ の動作に要する時間 (遷移時間 T_{trs}) が無駄である。遷移時間はビアホールの中心から周回軌道へ移るまでの時間であると共に、静止状態から周回動作開始に伴い生じる振動が収束するまでの待ち時間も兼ねている。そのため、穴間移動動作での到達位置を周回軌道上の点とした場合でも、穴間移動動作から周回動作に遷移する場合に静止する限り、遷移時間は必要である。解決方法として、直接周回軌道へ突入して静止せずに円軌道を周回する軌道を与える方法が考えられるが、単純に各動作モードの目標軌道をつなぎ合わせただけでは、動作モード切り替え後の過渡応答に振動が発生するため、動作モードの速やかな遷移が行えない。

4.2 NST 法の提案

本節では、現行の装置構成でも高速なトレパニングが可能であるノンストップトレパニング (NST) 法を提案する。NST 法は、穴間移動動作から周回動作へ静止することなく連続的に遷移する目標軌道生成法である。NST 法は、動作モード切り替え後の過渡応答に発生する過渡応答の低減を目的として、穴間移動動作を開始した時点から周回動作の指令成分を重畳することを特徴とする。

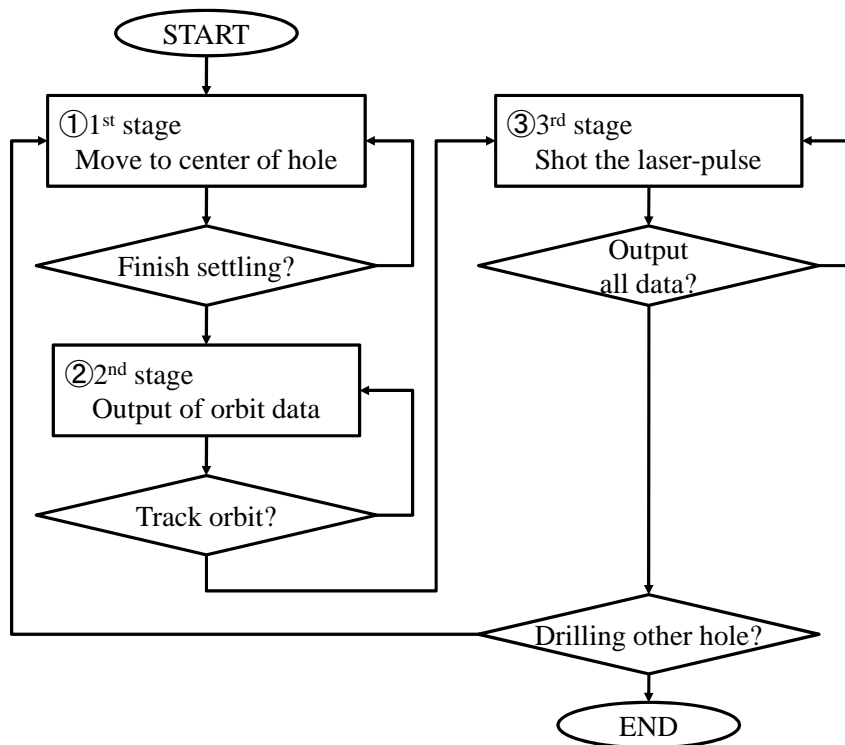


図 4.1: トレパニングのフローチャート (従来法)

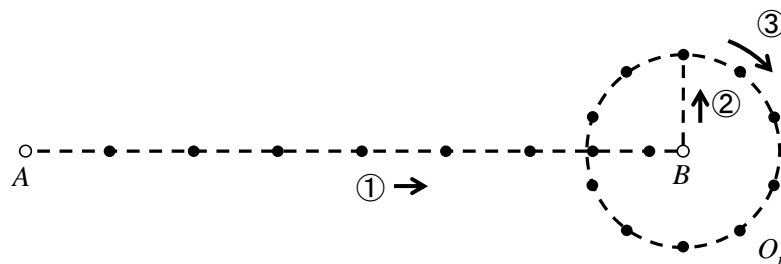


図 4.2: 加工平面での位置決め軌道 (従来法)

4.2.1 NST 法の概要

NST 法におけるトレパニングのフローチャートを、図 4.3 に示す。従来法と比べ、② ⇒ ③ の動作がない点異なる。また図 4.4 は、NST 法において点 A から点 B を中心とする円 O_n でトレパニングを行う際の、制御周期毎の目標位置を模式的に示しており、図より目標位置が穴間移動動作から周回動作へ連続的に遷移していることが分かる。このような動作を実現するためには、角度指令 \vec{a} として、点 A から円 O_n の中心である点 B への移動に対応する指令成分、

$$\vec{r}_{ptp}(t) = [x_{ptp}(t), y_{ptp}(t)] \quad (4.1)$$

と、円 O_{n+1} の最初に加工する円周上での、円の中心から見た周回動作に対応する指令成分、

$$\vec{r}_{trp}(t) = [x_{trp}(t), y_{trp}(t)] \quad (4.2)$$

を合成した、

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_{ptp}(t) + \vec{r}_{trp}(t) = [x(t), y(t)] \quad (4.3)$$

を用いる。このとき、円 O_n に向けた穴間移動を開始する時点から周回動作に対応する指令成分を重畳する。上記の通り目標軌道を作成することで、穴間移動を完了した時点で周回軌道に乗るため、直ちにレーザー光をパルス照射することができる。

次に、周回軌道に接線方向より突入する目標軌道の作成方法を説明する。前述の通り、周回動作に対応する指令成分 \vec{r}_R は、あらかじめ与えられる加工条件 (軌道径 D 、円周上でのレーザースポット間距離 L_P 、レーザー光発振周波数 f_P) より加工開始前に作成して、記憶領域に記憶する。このとき、1 周回に要する時間 T_{trp} は、

$$T_{trp} = \frac{\pi D}{f_P L_P} \quad (4.4)$$

である。このとき、 \vec{r}_R は正弦波または余弦波であり、その周波数は T_{trp} の逆数となる (以下、トレパニング周波数 f_{trp})。特に小径を加工する場合、 f_{trp} は制御帯域よりも高くなる傾向にあり、二つのガルバノスキャナ間の特性差により加工円が楕円となる恐れがある。ガルバノスキャナ間の特性差の影響を低減するためには、トレパニング周波数 f_{trp} における各サーボ系の目標値追従特性のゲイン差、位相差を考慮して周回軌道の座標列 r_R を生成する方法が提案されている [70]。

加工の一例として、図 4.5 に $L_D = \frac{\pi D}{12}$ の場合を取り上げる。図中の P_i ($i = 1, 2, 3, \dots, 12$) は、記憶領域に保存された円の中心から見た周回動作に対応する座標を示す。点 A より距離 L だけ離れた点 B を中心とする円 O_n の周回軌道まで移動して、時計回りにトレパニングを行う場合、理想的な突入位置は周回軌道の接点 P_t である。しかしながら、接点 P_t に到達してから周回動作に対応する座標の加算を開始した場合、ガルバノスキャナは静止状態から加速するため過渡応答に振動が生じ、振動が収束するまでの待ち時間が必要であった。そこで NST 法では、周回動作で発生する振動の早期低減を目標として、穴間移動動作を開始した時点から周回動作の指令成分を重畳する。NST 法を実現する際の、周回動作に対応する指令成分の開始点 P_s は、接点 P_t から角度 β だけ戻った点といえる。トレパニング周波数 f_{trp} におけるガルバノスキャナの応答遅れ (角度指令-角度セ

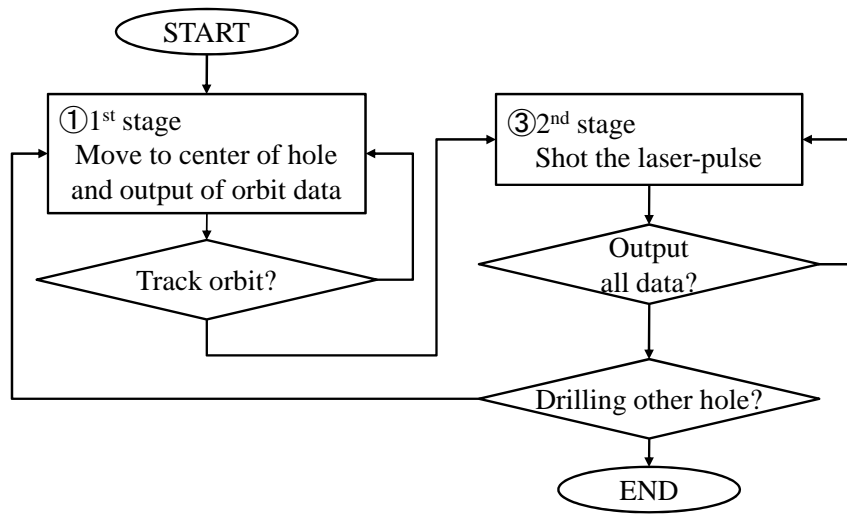


図 4.3: トレパニングのフローチャート (NST 法)

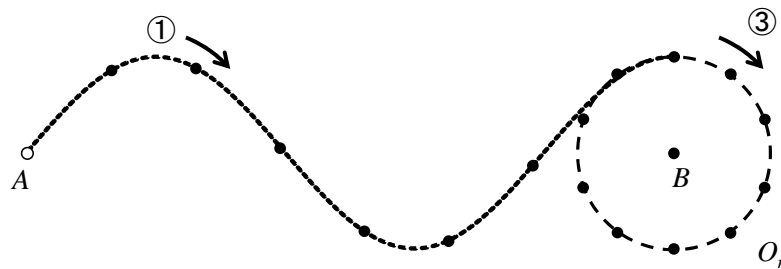


図 4.4: 加工平面での位置決め軌道 (NST 法)

ンサ出力までの時間遅れ) を T_{dly} とすると、 β は穴間移動に要する時間 T_{ptp} と T_{dly} を用いて、式 4.5 で表せる。

$$\beta = \frac{T_{ptp} - T_{dly}}{T_{trp}} \times 360 \quad (4.5)$$

周回動作に対応する指令成分の開始点を、動作毎に式 4.5 を満たすように生成する方法も考えられるが、計算コストを考慮すると、記憶した P_i の中で最も近い点を選ぶこと (本例では P_{11}) が現実的である。なお、NST 法でも重畳開始直後は目標軌道が不連続となるために過渡応答に振動が生じる可能性があるが、従来設けていた遷移時間 T_{trs} よりも移動に要する時間 T_{ptp} が十分長いことなどから、穴間移動動作が完了する頃には周回軌道成分による過渡応答の振動が減衰するため、問題とならない。

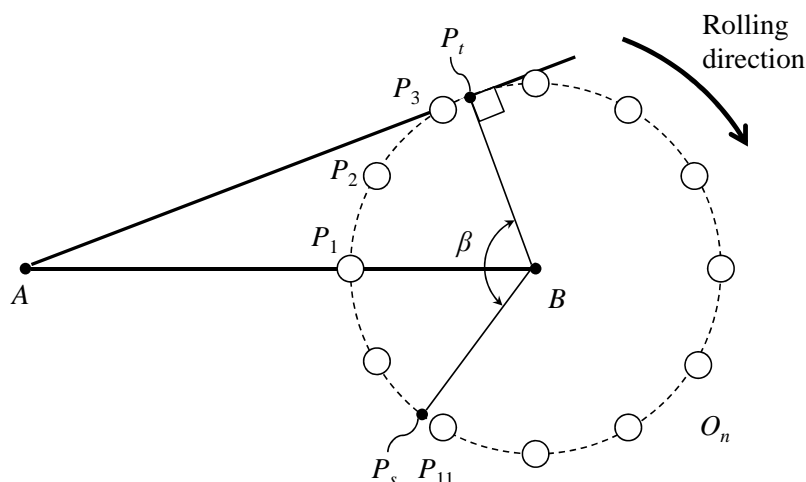


図 4.5: 目標軌道重畳開始点の決定方法

4.2.2 2軸協調位置決め制御系の構成

次に、トレパニングを実現する2軸協調位置決め制御装置の構成について、図4.6を用いて詳説する。2軸協調位置決め制御装置でトレパニングを行うには、まず上位制御系から加工開始前に加工条件が、またピアホール毎に中心座標 (x_o, y_o) がガルバノコントローラへ送付される。ガルバノコントローラ内の軌道生成部では、事前に作成した周回軌道の座標 $(x_{trp}[k], y_{trp}[k])$ とピアホールの中心座標を元に補間を行った穴間移動成分の座標 $(x_{ptp}[k], y_{ptp}[k])$ を加算した値を、二つのガルバノスキャナが個別に持つサーボ系へ受け渡す。ここで各変数の添え字の k は、制御周期 T_S である時刻における値であることを意味する。このように作成した目標軌道を角度指令 r としてサーボ系に連続的に出力することで、二つのガルバノスキャナが同期することになる。穴間移動での補間処理は、減速時の加速度に制限を設けて振動の励起を抑制することを目的としており、例えば x 軸の出力は式4.6で求める。 y 軸でも、同様に算出する。

$$\begin{cases} x_{ptp}[k] = x_{ptp}[k-1] + \alpha \Delta x_{ptp} & (|\Delta x_{ptp}| < x_{lim}) \\ x_{ptp}[k] = x_{ptp}[k-1] + x_{lim} & (|\Delta x_{ptp}| \geq x_{lim}) \end{cases} \quad (4.6)$$

ただし、 $\Delta x_{ptp} = x_{ptp}[k] - x_{ptp}[k-1]$ である。加速度に関する定数 α ($0 < \alpha < 1$)、および速度に関する定数 x_{lim} は、振動の発生が最小となるよう試行錯誤して求める。サーボ系の構成は、第2章の既約分解表現による2自由度制御系(図2.29)を採用した。

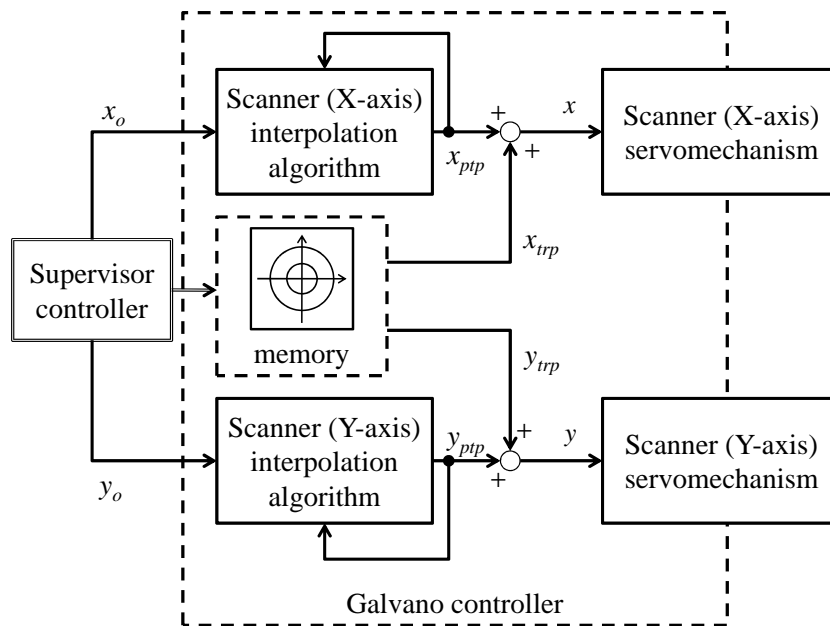


図 4.6: 2 軸協調位置決め制御装置の構成

4.3 NST 法の適用と効果検証

本節では、 x 軸の偏向に供試体 5、 y 軸の変更に供試体 6 を持つガルバノスキャナ位置決め装置に NST 法を適用し、その効果を検証した結果について述べる。なおレーザ穴明機では実際の加工形状が重要であるが、加工形状はレーザ発振器の安定性など他の要因も影響するため、ここではレーザ光をパルス照射した時点での検出角度 y' を評価に用いた。

評価には、図 4.7 に示す二つのテストパターンを用いた。パターン A は各ガルバノスキャナともに原点と 0.15 ppu 間を往復してトレパニングを行う動作を、パターン B は格子状の 25 点を移動しながら順次トレパニングを行う動作を、それぞれ連続して 100 回行った。評価は総加工時間と楕円率で行った。ここで、楕円率はビアホールの加工精度を表す指標の一つであり、一般的な加工では 0.9 以上であることが要求される。真円ではない円の長径を D_{max} 、短径を D_{min} とすると、楕円率 J は

$$J = \frac{D_{min}}{D_{max}} \quad (4.7)$$

と表され、 $J = 1$ は真円である。動作条件に関するパラメータを、表 4.1 に示す。軌道径 D は 0.04 ppu であり、またトレパニング周波数 f_{trp} は、レーザ光発振周波数 f_P と円周上でのレーザスポット間距離 L_P から、式 4.4 を用いて 0.10 fpu と算出される。

パターン A における従来法の評価結果について、供試体 5、6 の角度指令 r と検出角度

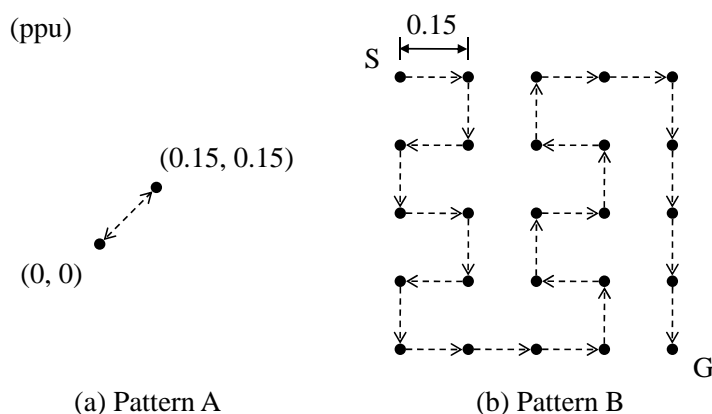


図 4.7: 評価に用いた加工パターン

y' 、および加工平面における位置決め軌道を図 4.8–4.10 に示す。また NST 法の評価結果も、同様に図 4.11–4.13 に示す。各図中の「Shot signal」はレーザー光がパルス照射されていることを示し、従来法と NST 法でのパルス照射時間は共に $1/f_{trp}$ である。

従来法でのガルバノスキャナの動きを、図 4.8 を用いて説明する。 x 軸の角度指令 r_x に注目すると、ガルバノコントローラの軌道生成部は、まず穴間移動動作の角度指令 x_{ptp} を出力し、ビアホールの中で静止した後に周回動作の角度指令 x_{trp} を出力する。遷移時間 T_{trs} 経過後にパルス照射を開始し、加工を始める。検出角度に注目するとビアホールの中心に滞留する時間が存在することが確認でき、これは加工生産性を低下させる無駄な時間である。また、トレパニングでは角度指令の位相が二つのガルバノスキャナで 90 度ずれるため、周回動作を開始する際の角度指令は、片方のガルバノスキャナでステップ状となり、過渡応答に振動が発生しやすい。従来法では、振動が収束するまでの待ち時間(遷移時間)を必要とし、本例では一穴につき 0.5 ms 要する。

次に、NST 法でのガルバノスキャナの動きを、図 4.11 を用いて説明する。従来法と同様に x 軸の角度指令に注目すると、ガルバノコントローラの軌道生成部は穴間移動動作の角度指令 x_{ptp} と周回動作の角度指令 x_{trp} が重畳した角度指令を、穴間移動動作を開始した直後から出力している。また、角度指令や検出角度が穴間移動動作から周回動作へ連続的に遷移しており、動作モードの切り替えが滑らかに行われている。図 4.13 の加工平面における位置決め軌道は、周回軌道へ接線方向から振動を生じることなく突入しており、周回軌道へ到達直後よりレーザー光のパルス照射が可能である。

総加工時間と楕円率の結果について、表 4.2 に示す。二つのテストパターンともに、NST 法は従来法に対して総加工時間が 13 % 以上短縮できた。NST 法の楕円率は従来法と比較してわずかに低下しているが、目標楕円率の 0.9 以上を満たすため、実際の加工で問題は生じない。

表 4.1: NST 法評価における試験条件

			Conventioanl method	Proposed method
Hole diameter	D	mppu	40	←
Pitch of laser pulse	L_P	mppu	7	←
Laser pulse frequency	f_P	fpu	1.75	←
Trepaning frequency	f_{trp}	fpu	0.10	←
Transition time	T_{trs}	ms	0.5	0

表 4.2: NST 法評価試験の結果

	Pattern A		Pattern B	
	Working time (ms)	Ellipticity (average)	Working time (ms)	Ellipticity (average)
Conventional method	98.8	0.944	792.8	0.941
Proposed method	83.8 (-15.2%)	0.939	683.7 (-13.8%)	0.939

4.4 まとめ

本章では、トレパニング高速化を目標として、PTP 動作から CP 動作へ連続して遷移するガルバノスキャナ位置決め制御系の目標軌道設計法を提案した。穴間移動を開始した直後から周回軌道成分の指令を適切な位相で重畳させる方法とすることで、コントローラでの演算量増加がなく、周回軌道の接線方向より PTP 動作から CP 動作へのスムーズな遷移が可能な 2 軸協調位置決め制御装置を得た。検証試験の結果、提案法は従来法と同等の位置決め精度を有しつつ、10 % 以上の高速化を実現した。以上より、提案法は有効である。

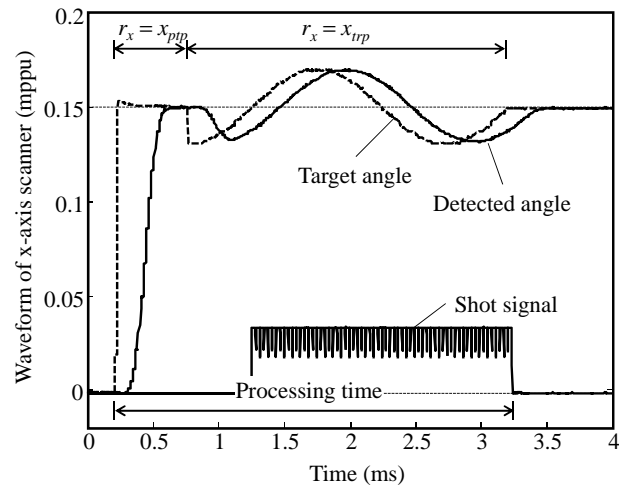
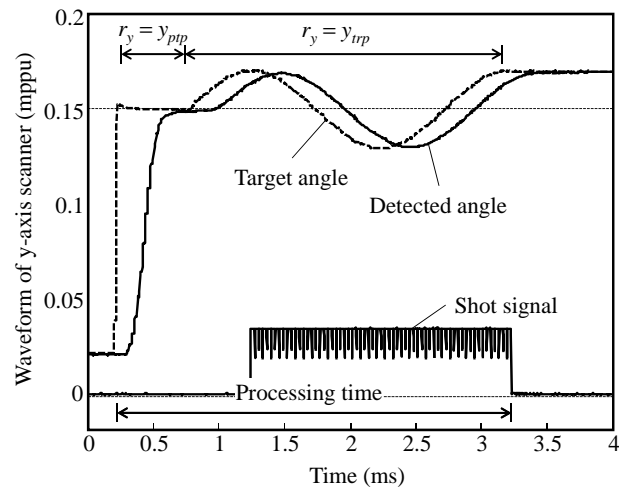
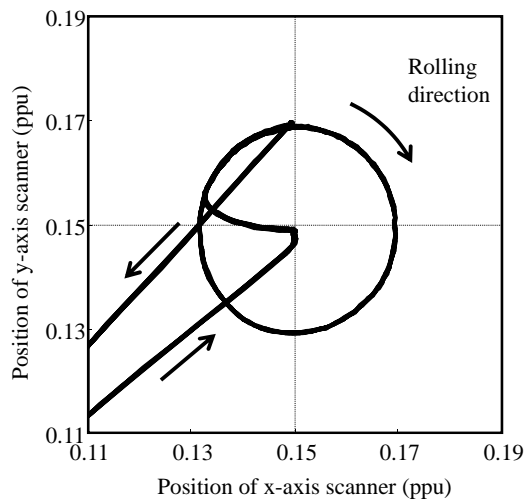
図 4.8: x 軸ガルバノスキャナの角度指令と検出角度波形 (従来法)図 4.9: y 軸ガルバノスキャナの角度指令と検出角度波形 (従来法)

図 4.10: 加工平面における位置決め軌道 (従来法)

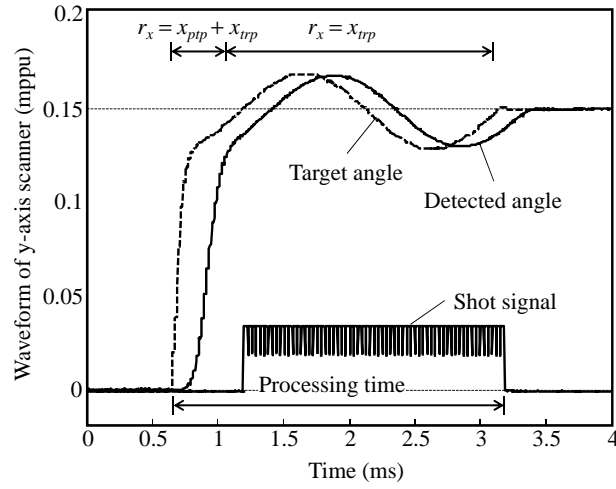


図 4.11: x 軸ガルバノスキャナの角度指令と検出角度波形 (NST 法)

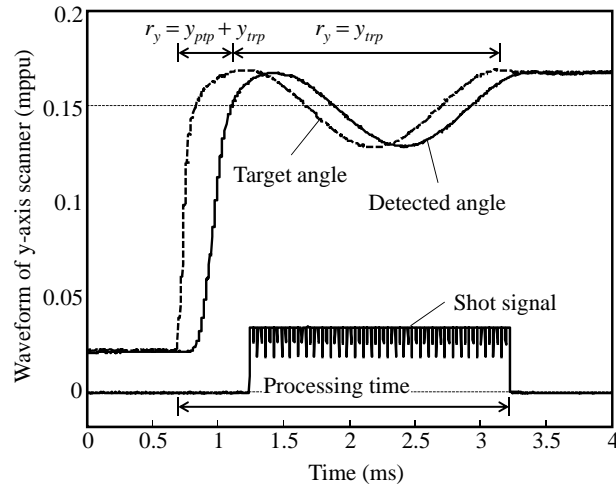


図 4.12: y 軸ガルバノスキャナの角度指令と検出角度波形 (NST 法)

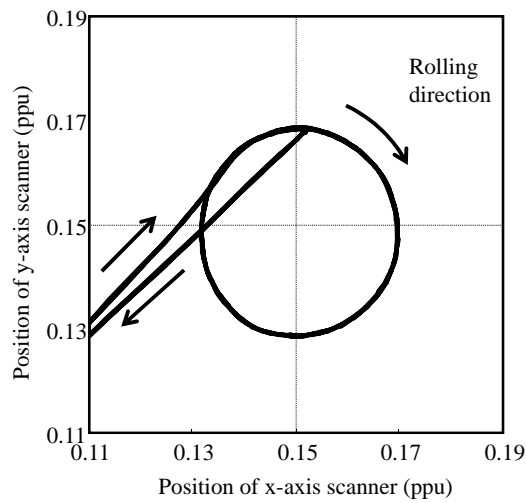


図 4.13: 加工平面における位置決め軌道 (NST 法)

第 5 章

小振幅揺動動作による転がり軸受性能低下の定量化とその補償

本章では、第 2 章で問題提起した、「駆動系に内在する非線形性や外乱」のうち、特に転がり軸受の性能が低下した際の位置決め性能の劣化について取り組む。まず、長期間運用されたガルバノスキャナに対して、回転子の可動範囲における制御対象のトルク特性を取得し、その傾向と変動量から転がり軸受性能低下の定量化を試みる。さらに、速度 FF 補償による位置決め精度の改善法を検討する。本法の有効性は、供試体 3、4、および長期間使用された供試ガルバノスキャナを用いて実験的に検討する。

5.1 転がり軸受性能低下の定量化法

装置の長期間使用に伴う非線形な特性変化として、転がり軸受の性能低下に起因するものがある。近年の高機能なプリント配線板では、狭い加工領域に多数の加工穴が存在するため、ガルバノスキャナは小さな回転角で揺動動作を長期間継続する。第 2 章でも述べたが、転がり軸受において転動体がほとんど回転しない微小な揺動を継続すると、フレッチング損傷が生じることがよく知られている。フレッチング損傷とは、内外輪で転動体の軌道面に縦縞状の痕跡が形成される現象である。そして、転動体が痕跡を乗り越える際には他の領域よりも大きな力を必要とするため、フレッチング損傷が生じた転がり軸受では位置に依存して転がり抵抗が変化する。ここでは、転がり抵抗の変化を転がり軸受性能の低下と定義する。ガルバノスキャナの出力を考えた場合、転がり抵抗の変動は発生トルクの変動と見なせ、位置決め精度に悪影響を及ぼす恐れがある。転がり軸受性能低下の程度を把握する方法として、従来は回転軸を手で回した感触により評価していたが、検査者の経験に依存するため定量性に欠け、またガルバノスキャナを装置より取り外す必要があった。本節では、装置に搭載した状態でガルバノスキャナの転がり軸受性能を定量的に評価

する方法を提案する。

5.1.1 転がり軸受性能低下の定量化法の概要

提案法は、ガルバノスキャナの可動範囲全域におけるトルク変動と転がり軸受の関係を用いて、転がり軸受性能を定量的に評価する [63, 71]。ガルバノスキャナでトルク変動が起こる理由は数多くあり、例えば第4章に示した永久磁石の発熱に伴う減磁によるトルクの低下や、可動範囲における磁束密度分布の不均一性によるものがある。これらは、可動範囲全域に渡って特徴的な傾向を持つ。一方、転がり軸受にフレッチング損傷が生じたガルバノスキャナでは、特定の場所で転がり抵抗が増大するため、可動範囲の一部でのみトルク変動が生じる。提案法では、可動範囲全域におけるトルク変動の形状からトルク変動発生要因の切り分けを行い、特に転がり軸受性能低下時に発生するトルク変動の大きさに着目して転がり軸受性能の定量化する。

図 5.1 は、提案法による転がり軸受性能評価のフローチャートを示す。提案法は、

- ① トルク特性の取得 (図 5.1、step10–50)
- ② トルク変動の導出、評価 (図 5.1、step60–70)

の大きく二つのプロセスに分かれている。各ステップの詳細は、5.1.2 項および 5.1.3 項で詳説する。

5.1.2 トルク特性の取得方法

図 5.2 は、トルク特性測定系のブロック線図である。図中の $C(z)$ 、 $P(s)$ 、 H 、 S 、 r 、 err 、 u_h 、 u および i_{ref} は図 2.15 と同一であり、 d : 外乱入力、 $H(z)$: 帯域通過フィルタ (BPF; Band-pass filter / 以下、BPF)、 $u_f(z)$: BPF 通過後の操作量、 $y_f(z)$: BPF 通過後の角度検出値である。次式に示すように、 $BPFH(z)$ は 2 次バターワースフィルタ (Butterworth filter) を四つ直列接続した構成になっており、そのうち二つが高域通過フィルタ (HPF; High-pass filter) として、残り二つを低域通過フィルタ (LPF; Low-pass filter) として用いている。

$$H(z) = H_{lpf}(z) \cdot H_{lpf}(z) \cdot H_{hpf}(z) \cdot H_{hpf}(z) \quad (5.1)$$

H_{lpf} および H_{hpf} のカットオフ周波数は 0.18 fpu とした。これらのフィルタは双一次 z 変換 (Bilinear Z-transform) により離散化した。

提案法によるトルク特性の取得方法について、説明する。最初に、測定位置 θ_m ($\theta = 1, 2, \dots, i, \dots, 1000$) に位置決めする (図 5.1、step10)。測定は可動範囲全域 ± 8 ppu を等間隔に 1000 分割したそれぞれの位置で行い、まず -8 ppu から開始する。測定位置に

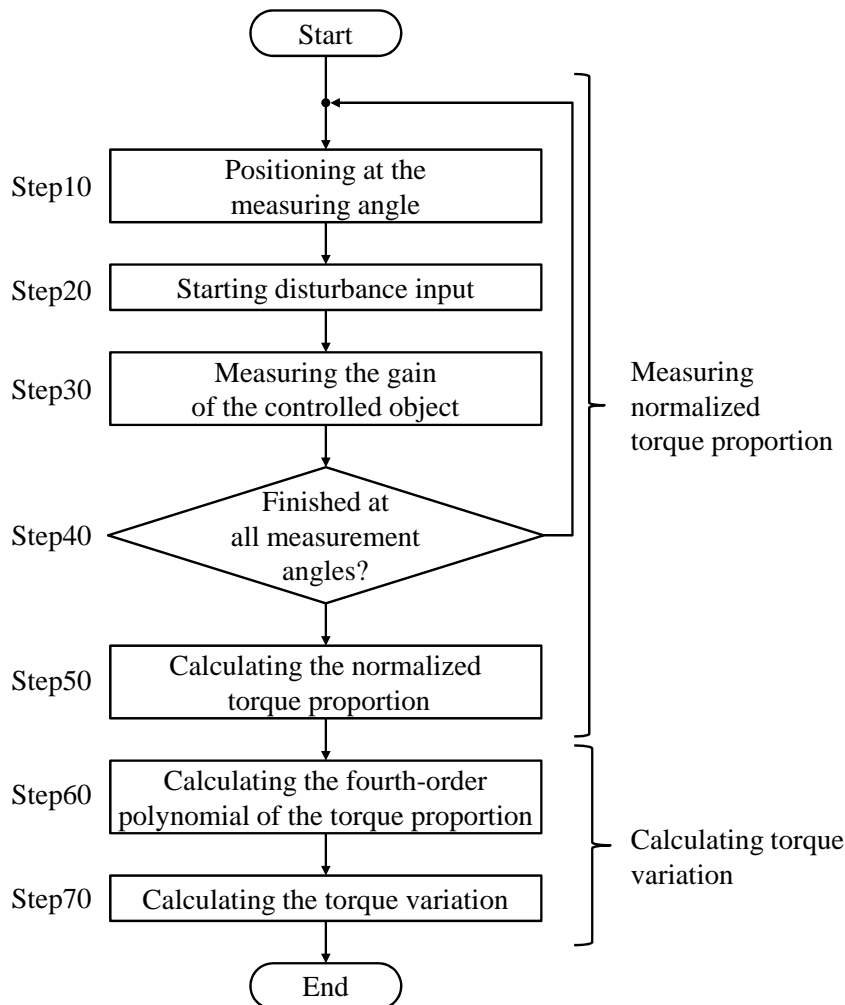


図 5.1: 転がり軸受性能低下の定量化法のフローチャート

位置決めを完了した後に、外乱入力を開始する (同、step20)。このとき入力する外乱は単一正弦波であり、図 2.11 に示す供試体 4 の周波数応答特性で、制御対象が剛体とみなせる周波数 (本例では 0.1 – 0.4 fpu) を選択することが望ましい。また、外乱の振幅は小さいほどトルク変動の分解能が向上するが、光学式の角度検出器は電気分割に伴う内挿誤差が生じるため、入力外乱の振幅を角度検出器の角度検出用グリッド以上とすべきである。本節では、0.18 fpu で片振幅が 0.33 ppu の単一正弦波を用いた。外乱入力を一定値としてトルク特性を取得する方法も考えられるが、提案法では角度検出器の検出誤差を低減するために単一正弦波を用いる。外乱入力によるガルバノスキャナの応答が定常状態となった後に、下式により $u_f(z)$ および $y_f(z)$ を求める。

$$u_f(z) = H(z) \cdot u(z) \quad (5.2)$$

$$y_f(z) = H(z) \cdot y(z) \quad (5.3)$$

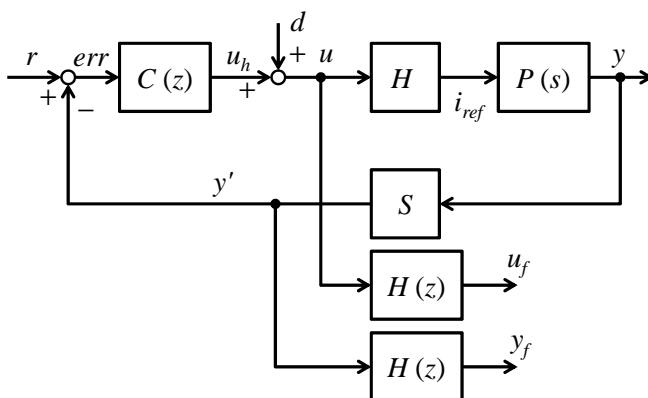


図 5.2: トルク特性測定系のブロック線図

そして、 θ_i において、入力を BPF 通過後の操作量、出力を BPF 通過後の角度検出値とした伝達関数 ($\cong 0.18$ fpu の制御対象の周波数応答特性) のゲイン g_i は、次式で求められる (同、step30)。

$$\begin{cases} g_i = \frac{u_{peak}}{y_{peak}} \Big|_{\theta_i} \\ u_{peak} = \sup |u_f(z)| \\ y_{peak} = \sup |y_f(z)| \end{cases} \quad (5.4)$$

全ての測定位置で g_i を取得した後に、下式で規格化したトルク特性 L_i を得る (同、step50)。

$$L_i = \frac{g_i}{g_c} \quad (5.5)$$

式中の g_c は可動範囲の中心におけるゲインである。制御対象の特性にはガルバノアンプや角度検出器の特性などが含まれるが、位置に依存した特性の変動は生じないと考えられるため、 L_i は各測定位置におけるトルク特性とみなせる。以上の step10-50 の手順を踏むことで、可動範囲における規格化されたトルク特性を得る。なお、トルク特性取得時の動作は通常的位置決め動作よりも振幅が小さく、応答周波数も遅いため、装置性能に悪影響を及ぼすことはない。図 5.3 は提案法を供試体 4 に適用して得られたトルク特性である。ガルバノスキャナは可動範囲の中心で磁束密度が最大となるよう設計されているため、トルク特性は平坦ではない。

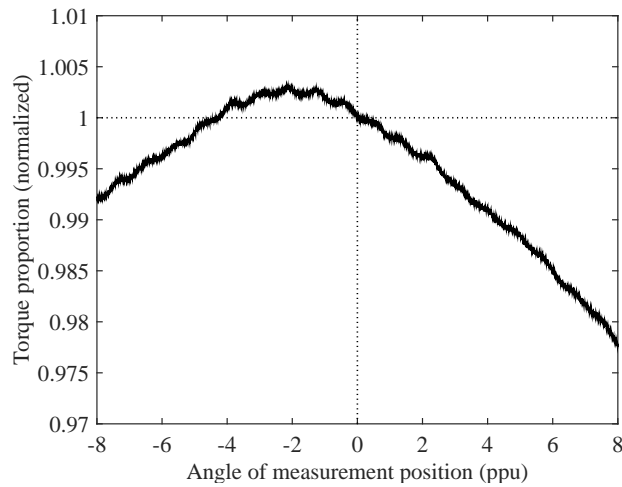


図 5.3: トルク特性測定結果 (供試体 4)

5.1.3 トルク変動の算出と転がり軸受性能の定量化

ガルバノスキャナの転がり軸受にフレッチングなどの損傷が生じた際には、トルク特性に変動が生じると考えられる。しかし 5.1.2 項の通り、ガルバノスキャナのトルク特性は磁束密度分布により可動範囲の中心近傍で発生トルク最大となる。そのため、転がり軸受性能をトルク変動から評価するには、磁束密度分布によるトルク特性への影響を減算する必要がある。提案法では、角度 θ に対する磁束密度分布によるトルク変動を、次式に示す 4 次多項式で近似する。

$$K_c \doteq a_1\theta^4 + a_2\theta^3 + a_3\theta^2 + a_4\theta + a_5 \quad (5.6)$$

図 5.4 は、供試体 4 を用いて得られたトルク特性からトルク変動を導出した結果を示す。このとき、近似の際に使用した a_1 – a_5 を表 5.1 に示す。供試体 4 は稼働時間が短いため、特に大きなトルク変動は見られない。図 5.5 は、供試体 4 で可動範囲の複数の場所で 1 ppu 移動して位置決め動作した際の位置決め誤差波形を 100 回重ね書きした結果を示し、このときの目標位置決め時間は $760 \mu\text{s}$ である。図中の明線は 100 回目の試行を示し、それ以外は淡灰線で示す。目標位置決め時間後の許容位置決め誤差は $\pm 4 \text{ mppu}$ 以内であり、供試体 4 は仕様を満たしている。

5.1.4 転がり軸受性能低下の定量化法の適用と効果検証

提案法の効果検証のため、本項では供試体 4 と同じ構成で長期間運用した二つのガルバノスキャナ (以下、供試体 4A、供試体 4B) を用いた。回転軸の手回し感では、供試体 4A

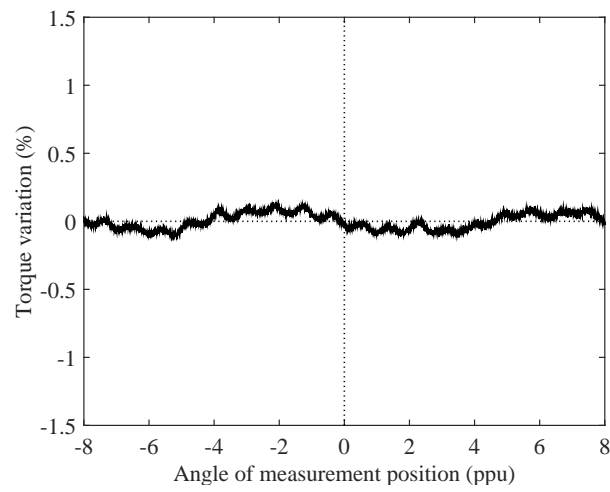


図 5.4: トルク変動算出結果 (供試体 4)

表 5.1: 式 5.6 の各係数 (供試体 4)

a_1	1.49×10^{-5}
a_2	4.91×10^{-5}
a_3	-1.21×10^{-3}
a_4	-2.54×10^{-3}
a_5	1.00

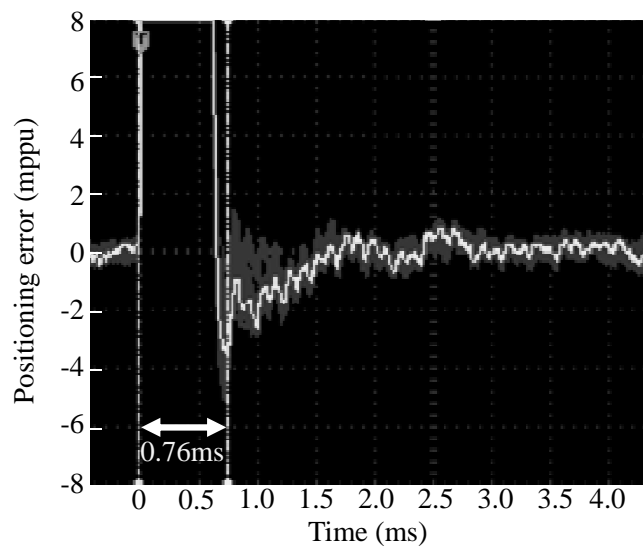


図 5.5: 位置決め誤差波形 (供試体 4)

は中央部で転がり抵抗を感じ、供試体 4B は可動範囲の中央部と両端部で大きな転がり抵抗を感じた。なお、供試体 4B は 2.5.3 項で使用したガルバノスキャナと同一である。

図 5.6 および図 5.7 は、提案法による供試体 4A、4B のトルク変動算出結果を示し、表 5.2 は各供試体の磁束密度によるトルク特性への影響を式 5.6 で近似した際の各係数を示す。供試体 4A は可動範囲の中央部に小さなトルク変動があり、供試体 4B は可動範囲の中央部および両端にトルク変動が存在する。特に供試体 4B では、トルク変動率が 1 % を超える大きな変動であることから、フレッチング損傷の程度が大きいと推察される。

次に、供試体 4A および供試体 4B において、図 5.5 と同様の位置決め動作を実施した際の位置決め誤差波形を、図 5.8 および図 5.9 に示す。なお、図 5.9 は図 2.44 と同一である。図より、供試体 4A で位置決め誤差の変動幅が 7 mppu 程度、供試体 4B では 12 mppu 以上であり、両供試体で位置決めに 1 ms 以上要する収束性の悪い遅い応答が発生している。供試体 4B の状態は許容位置決め誤差 ± 4 mppu を大幅に超過しており、供試体 4B を搭載するレーザ穴明機で加工した際には、加工不良が発生する恐れがある。

最後に、トルク変動の発生原因を調査するため、レーザ穴明機からガルバノスキャナを外して転がり軸受の分解調査を行った。図 5.10 および 5.11 は、供試体 4A および 4B の偏向ミラー側の転がり軸受内輪の顕微鏡写真である。なお、図 5.11 は図 2.45 と同一である。図より、供試体 4A では写真中央部に紙面左右方向に細い傷が 2 本生じているのが分かり、供試体 4B では $800 \times 250 \mu\text{m}$ の範囲が黒色化していることが判る。これらは、典型的なフレッチング損傷の痕跡と言え、損傷は図 5.10 よりも図 5.11 の方が程度が重い。

以上より、提案法で得られたトルク変動算出結果は、触診結果および分解写真の傾向とよく合致していることから、触診で感じた転がり抵抗をトルク変動率へ置き換えることで、転がり軸受性能の定量的な評価が可能である。またトルク変動率が大きくなると位置決め精度が低下し、特にトルク変動率が 1 % 以上となると位置決め誤差の変動幅が 12 mppu 以上となる。一般的に、転がり軸受でフレッチング損傷が発生する場合には、図 5.10 の状態がしばらく続いた後に、図 5.11 の状態に一気に遷移することが知られている [72]。そのため、提案法により供試体 4A の状態を検知することで、装置の使用者にガルバノスキャナの交換を促すことができ、加工不良の発生やダウンタイムの短縮を図れる。このように、提案法は装置の保守や状態監視へ応用が可能である。

5.2 転がり軸受性能低下時の補償法

5.1 節で示した転がり軸受性能の定量化法により著しい性能の低下が判明した場合には、本来は転がり軸受を交換するべきである。その理由として、フレッチング損傷の進行は供試体 4A の状態から供試体 4B の状態へ突然変化することがあり、位置決め性能の急激な低下が発生するためである。しかし、プリント配線板の製造工程に組み込まれるレーザ穴

表 5.2: 式 5.6 の各係数 (供試体 4A、4B)

	scanner 4A	scanner 4B
a_1	2.84×10^{-5}	6.57×10^{-7}
a_2	5.16×10^{-6}	-1.43×10^{-5}
a_3	-1.51×10^{-3}	-1.06×10^{-3}
a_4	-7.88×10^{-4}	2.71×10^{-4}
a_5	1.04	1.00

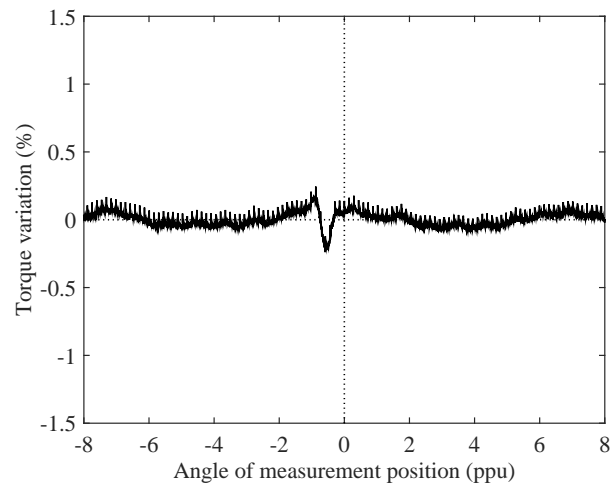


図 5.6: トルク変動算出結果 (供試体 4A)

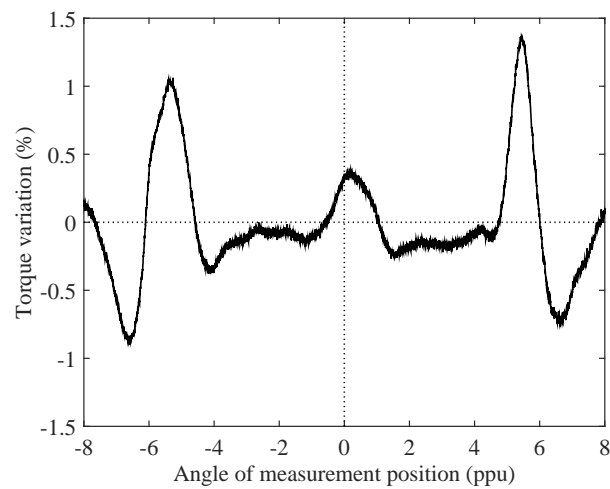


図 5.7: トルク変動算出結果 (供試体 4B)

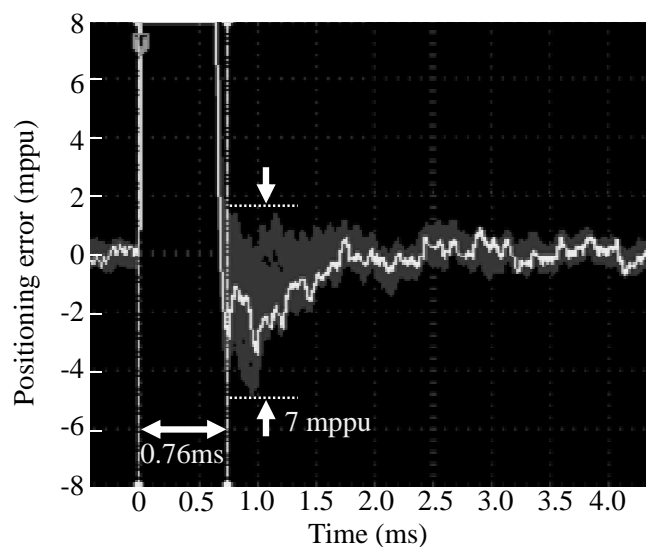


図 5.8: 位置決め誤差波形 (供試体 4A)

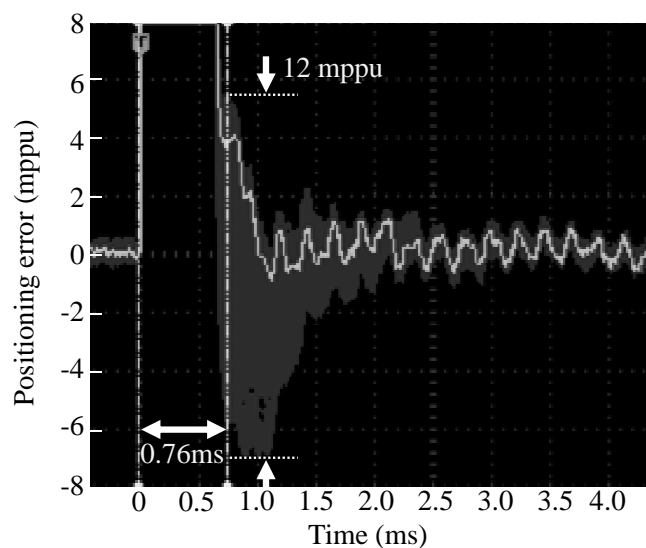


図 5.9: 位置決め誤差波形 (供試体 4B)

明機では、ガルバノスキャナ交換作業に伴う装置の停止は製造ライン全体に影響する。そのため、転がり軸受性能の低下が検出された後でも、一定期間運用可能であることへの顧客ニーズがある。本節では、フレッチング損傷が生じた供試体 4A の状態における、位置決め精度の改善法を提案する。

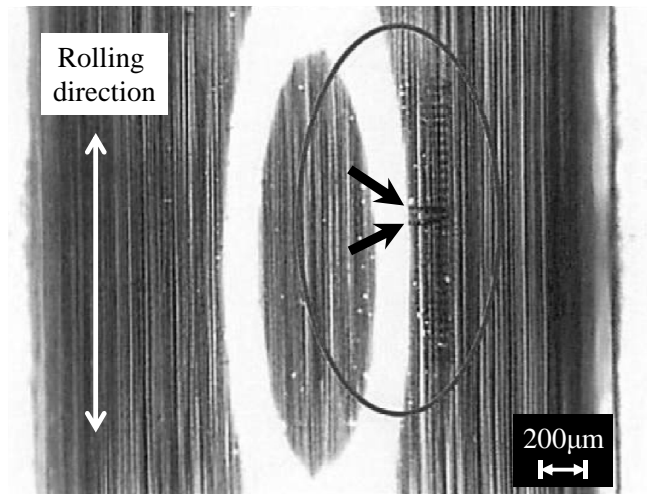


図 5.10: 転がり軸受の内輪軌道面写真 (供試体 4A)

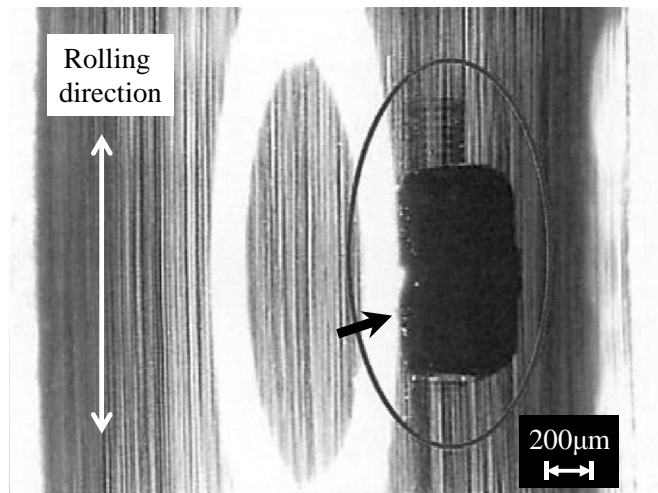


図 5.11: 転がり軸受の内輪軌道面写真 (供試体 4B)

5.2.1 FF 補償による位置決め精度改善

転がり軸受性能低下時に位置決め誤差波形に発生する遅い応答を抑制する方法として、FB 系の外乱圧縮特性を向上する方法も考えられるが、ねじり振動モードの変動に対するロバスト性やサーボ安定性とトレードオフの関係にあるため、ここでは速度 FF 補償による改善方法を検討した。提案する位置決め精度改善法のブロック線図を、図 5.12 に示す。元のトルク指令型 2 自由度制御系 (図 2.15) と比較して、 D_v : 速度補償ゲインが追加されている点が異なる。ここで、 v_m : 速度指令である。図 5.13 は、提案法をフレッチング損傷が発生していない供試体 4 に適用し、開始点から $x = 0.6$ ppu 離れた点に向けて目標

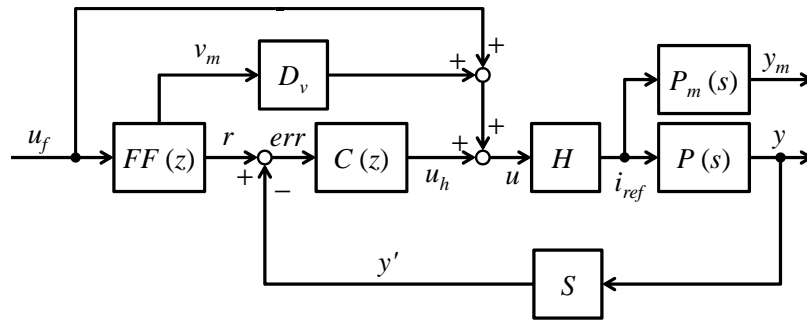


図 5.12: 速度 FF 補償を備えたトルク指令型 2 自由度制御系のブロック線図

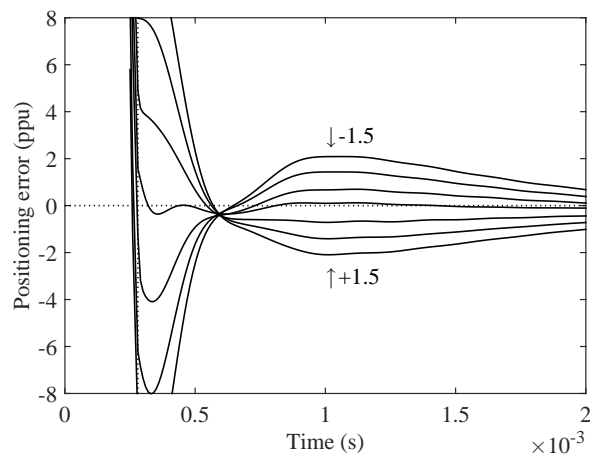


図 5.13: 速度 FF 補償による位置決め誤差波形の変動

位置決め時間 0.28 ms で位置決めする際の、 D_v を ± 1.5 間を 0.5 刻みで変更した場合の位置決め誤差波形を示す。 D_v による変化を分かりやすくするため、図の位置決め誤差波形は第 3 章で詳説したプロニー解析法によりモード分離し、0.7 fpu 以下の振動モードと過減衰モードで再構成した波形とした。図より、 D_v により転がり軸受性能低下時に遅い応答が生じる 0.6 – 2.0 ms の範囲において、位置決め誤差波形が調整可能である。また、 D_v の導入により時刻 0.28 – 0.6 ms の位置決め誤差波形が増大するが、 D_v の出力と加算する u_{ff} の大きさを調整することで、これらの位置決め誤差を抑制可能である。

5.2.2 転がり軸受性能低下時の補償法の適用と効果検証

供試体 3 と同じ構成で長期間運用したガルバノスキャナ (以下、供試体 3A) を用いて、速度 FF 補償の効果検証を実施した。図 5.14 と図 5.15 は、開始点から $x = 1.0$ ppu 離れた点に向けて目標位置決め時間 0.4 ms で位置決めした際の位置決め誤差波形を示し、前者は速度 FF 補償なしで後者は速度 FF 補償ありである。このとき、速度 FF 補償ゲイン

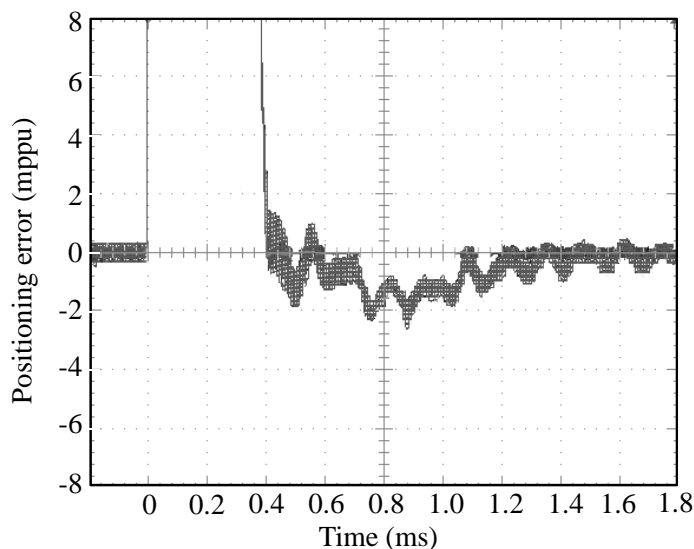


図 5.14: 位置決め誤差波形 (供試体 3A、速度 FF 補償なし)

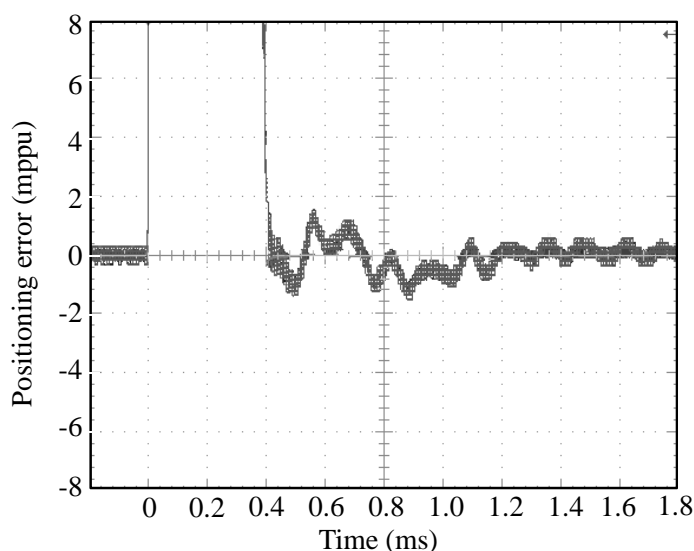


図 5.15: 位置決め誤差波形 (供試体 3A、速度 FF 補償あり)

D_v は 0.32 と設定した。速度 FF 補償なしの場合は、時刻 0.6 – 1.2 ms で微小な遅い応答が見受けられるが、速度 FF 補償を導入することで遅い応答が抑制できる。

前節の通り、フレッチング損傷による転がり軸受性能の低下は、位置に依存して起きる現象である。そのため、位置決め場所によってガルバノスキャナの応答が異なり、最適な速度補償ゲインも異なる。今回の効果検証では遅い応答の抑制を確認したが、前節で提案した転がり軸受性能の定量化法によって得られたトルク変動結果を元に、位置決め動作を開始する前に速度 FF 補償ゲインを設定することで、可動範囲の全領域で転がり軸受性能低下による位置決め精度の低下を抑制できる。

5.3 まとめ

本章では、特に長期間稼働したガルバノスキャナに発生するフレッチング損傷による位置決め精度低下の問題に対して、損傷程度の定量化法とその補償法を提案した。損傷程度の定量化法は装置の分解を伴わない画期的な方法であり、稼働中の装置にも適用可能である。また位置決め精度の改善方法として、FB 補償器による外乱圧縮特性向上策ではなく速度 FF 補償器による改善策とすることで、FB 系の安定性に影響を与えずに位置決め精度の向上が図れた。各提案法の有効性は、供試ガルバノスキャナ位置決め装置を用いて実験的に検証された。

第6章

結論

6.1 本研究で得られた成果

本研究では、ガルバノスキャナ位置決め装置を対象に、市場より要求される高性能な位置決めを実現するために、(1) 装置制約により発生する過渡応答への対応、(2) 長期間の稼働で生じる制御対象の特性変動への対応、を課題として設定し、制御対象の特性変動を推測・計測して補償し、適切な目標軌道を設計することで、高速・高精度な位置決め動作と軌跡追従動作を実現した。さらに、上記の課題について解決法を検討するにあたり、位置決め精度の劣化について定量的な評価が可能で、精度劣化の要因毎に影響度合いが分離可能な評価法を提案した。提案法の有効性は、供試ガルバノスキャナの特性に対する数値シミュレーション並びに実験により検証した。以下に、本研究で得られた成果を各章ごとに記す。

第2章：ガルバノスキャナ位置決め装置の概要と本研究の課題

レーザ穴明機向けガルバノスキャナ位置決め装置の概要を述べ、制御対象の周波数応答関数をよく表現する数学モデルを構築した。さらに、同定した数学モデルに対して、PTP動作向けにはトルク指令型2自由度制御系設計、CP動作向けには既約分解表現に基づく2自由度制御系設計の枠組みで、制御対象の振動モードの励起を避けるFF制御入力設計を適用した。併せて、それぞれの動作に対し、位相安定化法によるFB補償器と状態量FBによるFB補償器を設計した。そして、数値シミュレーションと供試ガルバノスキャナ位置決め装置を用いて、位置決め性能が低下する三つの要因、

- 高速化に伴い増大する発熱による機構振動特性・トルク特性の変動
- 動作モードの切り替え時に発生する過渡応答
- 駆動系に内在する非線形性や外乱

による位置決め性能劣化の状況を再現し、技術課題を明確にした。

第3章：位置決め精度劣化の定量的な評価と発生要因の分析

第2章で提起した位置決め性能の劣化要因分析に取り組む前に、位置決め精度の劣化の程度を定量的に評価する方法を提案した。提案法では、実験モード解析法の一つであるプロニー解析法を活用し、時系列データである位置決め波形を振動モード毎に分離し、周波数応答特性と導出されたモード特性値を比較することで発生要因の分析と位置決め性能劣化の程度を定量化した。特に転がり軸受の性能低下による位置決め誤差への影響度は、過減衰モードの初期振幅を評価に用いることで定量化できることを示した。本法の有効性は、長期間稼働した供試ガルバノスキャナを用いて実験的に検証された。本章では、転がり軸受性能低下の定量化法や遅い応答の補償法の確立が課題として残された。

第4章：動作モード切り替え時の過渡応答を低減する目標軌道設計

第2章で問題提起した、「動作モードの切り替え時に発生する過渡応答」による位置決め性能劣化に対して、PTP動作からCP動作へ連続して遷移するガルバノスキャナ位置決め制御系の目標軌道設計法であるNST法を提案した。提案法は、PTP動作とCP動作を切り替えて加工するトレパニングにおいて、同一のFF、FB補償器で実行しなければならないガルバノスキャナ位置決め装置で滑らかな目標軌道が設計でき、動作モード切り替え時の過渡応答を抑制する方法である。移動開始直後から、穴間移動の目標指令に対して周回軌道成分の目標指令を適切な位相から重畳させることで、計算コストを抑制しつつスムーズな動作モードの切り替えを実現した。本法の有効性は、供試ガルバノスキャナを用いて実験的に検証された。

第5章：小振幅揺動動作による転がり軸受性能低下の定量化とその補償

第2章で問題提起した、「駆動系に内在する非線形性や外乱」による位置決め性能低下のうち、特にフレッチング損傷により転がり軸受の性能が低下した際の位置決め性能の劣化について取り組んだ。提案法は、長期間運用されたガルバノスキャナにおいて、回転子の可動範囲で制御対象の特性を取得し、その傾向と変動量から転がり軸受性能低下の定量化が可能である。また、本法は装置の分解を伴わない画期的な方法であり、稼働中の装置にも適用可能であり、装置の保守や状態監視に応用可能であることが示された。そして、FB系の安定性や機構変動に対するロバスト性を損なうことなく位置決め精度の改善が可能な速度FFによる補償法を提案した。提案法の有効性は、供試ガルバノスキャナを用い

て実験的に検討された。

6.2 今後の課題と展望

以下に、本研究に対する今後の課題と展望を示す。

- 高速化に伴い増大する発熱による機構振動特性・トルク特性の変動に対する補償について、本論文では問題提起にとどまった。今後、永久磁石自己発熱を考慮した高精度な永久磁石温度予測に基づく電流値補償により、その解決を図る。
- 本研究では、主に制御による位置決め性能の向上を検討したが、ハードウェアの変更を許せば性能が劇的に改善する可能性がある。そのためには、ハードウェアとソフトウェアの両面から各種の制約事項が適切に設定されているかを把握する必要がある、両者を連携して検討可能なスキームの確立が望まれる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、幾多の御指導、御鞭撻を賜ると共に、投稿・発表論文の執筆においても多大な御力添えを頂きました、名古屋工業大学 情報工学専攻 岩崎 誠 教授に深く感謝申し上げます。

本研究に対し、学位審査に携わって頂き、多くの御助言を頂きました、名古屋工業大学 情報工学専攻 森田 良文 教授、小坂 卓 准教授に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行に際し、名古屋工業大学 情報工学専攻 関 健太 准教授、前田 佳弘 准教授、ビアメカニクス・モーションシステム研究所 平井 洋武 プロジェクト教授、元特任助教 廣瀬 徳晃 氏より、幾多の御指導、御助言を下さいました。ここに謝意を表します。

本研究の実証にあたり、株式会社 日立製作所 大槻 治明 氏、土居 昭 氏、山本 晃弘 氏、ビアメカニクス株式会社 大久保 弥市 氏、北村 幸之助 氏、福島 智 氏、佐野 哲也 氏、田中 秀典 氏、田中 翼 氏、元ビアメカニクス株式会社 遠山 聡一 氏、菅原 弘之 氏、北村 大介 氏には沢山の御協力をいただき、侃々諤々の議論をさせていただきました。心より御礼申し上げます。

また社会人ドクターコースへの進学について、理解と支援をしていただいた、株式会社 日立製作所に感謝申し上げます。

最後に、三年間会社員と学生の二足のわらじを履くことを認め、温かく支えてくれた妻と、いつも私に元気を与えてくれた子供たちに、感謝します。

2015年12月10日

松家 大介

参考文献

- [1] 総務省 ICT 成長戦略会議：
「ICT 成長戦略 ～ICT による経済成長と国際社会への貢献～」
http://www.soumu.go.jp/main_content/000236560.pdf, (参照 2015-09-27)
- [2] 情報通信白書：
「平成 26 年版:ICT がもたらす世界規模でのパラダイムシフト」
総務省, pp.172–173, 2014
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/>, (参照 2015-09-27)
- [3] 高木 清：
「よくわかる ビルドアップ多層プリント配線板のできるまで」
日刊工業新聞社, 2006
- [4] 2014 年度版 プリント配線板技術ロードマップ」
一般社団法人 日本電子回路工業会, 2014
- [5] 大前 力, 平井 洋武, 涌井 伸二：
「情報システムにおける制御」
コロナ社, 1999
- [6] 中尾 修：
「電子部品実装機の高速度・高精度位置決め」
精密工学会誌, Vol.62, No.9, pp.1259–1262, 1996
- [7] 山口 高司：
「メカトロニクス of 勘所」
計測と制御, Vol.46, No.5, pp.362–369, 2007
- [8] 山口 高司, 平田 光男, 藤本 博志：
「ナノスケールサーボ制御 –高速・高精度に位置を決める技術–」
東京電機大学出版局, 2007
- [9] M. Iwasaki, K. Seki, Y. Maeda：
「High Precision Motion Control Techniques -A Promising Approach to Improving

- Motion Performance」
IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol.6, No.1, pp.32–40, 2012
- [10] 電子メール座談会：
「実用からみたモーションコントロールの本音と期待」
計測と制御, Vol.139, No.10, pp.667–676, 2000
- [11] 電気学会 産業応用部門 メカトロニクス制御技術委員会：
「精密サーボシステムの多様性探求調査専門委員会」
<http://www2.iee.or.jp/~dmec/committee/DMEC1001.html>, (参照 2015-09-27)
- [12] K. S. Ananthanarayanan：
「Third-Order Theory and Bang-Bang Control of Voice Coil Actuators」
IEEE Transactions on Magnetics, Vol.Mag-18, No.3, pp.888–892, 1982
- [13] 平田 光男, 長谷川 辰紀, 野波 健蔵：
「終端状態制御によるハードディスクのショートシーク制御」
電気学会論文誌 D, Vol.125, No.5, pp.524–529, 2005
- [14] 川瀬 大介, 岩崎 誠, 川福 基裕, 平井 洋武：
「LMI を用いた位置指令生成による機台振動抑制を考慮した高速高精度位置決め制御」
電気学会論文誌 D, Vol.128, No.6, pp.750–757, 2008
- [15] T. Atsumi：
「Feedforward Control Using Sampled-Data Polynomial for Track Seeking in Hard Disk Drives」
IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.56, No.5, pp.1338–1346, 1982
- [16] 荒木 光彦：
「デジタル制御理論入門」
朝倉書店, pp.114–123, 1991
- [17] 宮崎 敏昌, 大石 潔：
「外乱オブザーバと既約分解表現を用いたロバスト安定な 2 自由度制御系の一設計法」
電気学会論文誌 D, Vol.117, No.5, pp.572–578, 1997
- [18] 伊藤 和晃, 岩崎 誠, 松井 信行：
「既約分解表現に基づく 2 自由度位置決め制御系の GA による自律設計」
電気学会論文誌 D, Vol.124, No.1, pp.69–76, 2004
- [19] 吉田 収志, 金子 貴之, 平井 洋武：
「高速・高精度を実現する制御系設計技術」
富士時報, Vol.77, No.6, pp.444–447, 2004

- [20] M. Tomizuka :
「Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control」
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.109, No.1, pp.65–68, 1987
- [21] 藤本 博志, 堀 洋一, 山口 高司, 中川 真介 :
「マルチレートサンプリングを用いた完全追従制御法による磁気ディスク装置のシーク制御」
電気学会論文誌 D, Vol.120, No.10, pp.1157–1164, 2000
- [22] 二見 茂, 古谷 彰浩 :
「AC リニアモータと転がり案内を用いたナノメータ位置決め (第 1 報)–システムの構成と粗・微動制御–」
精密工学会誌, Vol.57, No.3, pp.158–163, 1991
- [23] 浅海 博圭, 藤本 博志 :
「可変自然長ばねモデルに基づく非線形摩擦補償の提案」
平成 23 年電気学会産業計測制御研究会, IIC-08-48, pp.75–80, 2006
- [24] 前田 佳弘, 樋口 雄介, 伊藤 和晃, 川福 基裕, 岩崎 誠, 平井 洋武 :
「転がり摩擦モデルに基づく外乱オブザーバの初期値補償」
平成 23 年電気学会産業計測制御研究会, IIC-06-88, pp.145–151, 2006
- [25] 森 貴彦, 不破 勝彦, 神藤 久 :
「前置フィルタを用いた周波数依存型最適サーボ系の構成」
電気学会論文誌 C, Vol.127, No.12, pp.2057–2063, 2007
- [26] T. Atsumi, T. Arisaka, T. Shimizu, T. Yamaguchi :
「Vibration Servo Control Design for Mechanical Resonant Modes of a Hard-Disk-Drive Actuator」
JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, Vol.46, No.3, pp.819–827, 2003
- [27] 熱海 武憲 :
「サンプル値位置決め制御系における外乱圧縮特性」
電気学会論文誌 D, Vol.129, No.12, pp.1178–1186, 2009
- [28] 小川 博紀, 小山 昌宏, 水落 真樹, 郡司 芳郎 :
「精密位置決め装置における位相安定化制御系の性能評価」
第 54 回自動制御連合講演会講演論文集, 2B403, pp.954–957, 2006
- [29] 大槻 治明, 伊藤 靖, 青山 博志, 遠山 聡一, 平井 洋武 :
「プリント基板穴あけ用レーザ加工機の開発」
日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 (7), pp.331–332, 2006

- [30] 「HDI・パッケージプリント配線板向け 高速高精度 CO2 レーザ加工機」
ビアメカニクス株式会社
<http://www.viamechanics.com/products/laser/207/>, (参照 2015-09-27)
- [31] 道上 典男, 山家 正俊, 川村 正弘, 久世 修, 中村 滋男 :
「超高密度多層配線を実現する高性能プリント配線板製造装置」
日立評論, Vol.93, No.02, pp.43-47, 2011
- [32] 平田 光男, 城所 隆弘, 上田 伸治 :
「終端状態制御によるガルバノスキャナのナノスケールサーボ制御」
電気学会論文誌 D, Vol.129, No.9, pp.938-944, 2009
- [33] 上田 伸治, 黒木 幸恵, 平田 光男 :
「制御入力および状態の飽和を考慮したガルバノスキャナ位置決め制御」
平成 22 年電気学会産業計測制御研究会, IIC-10-164, pp.25-30, 2010
- [34] 関 優志, 藤本 博志, 有松 孟 :
「ガルバノスキャナにおける機構と制御の同時最適化に関する基礎検討」
平成 23 年電気学会産業計測制御研究会, IIC-11-052, pp.17-22, 2011
- [35] 関 健太, 神波 弘樹, 岩崎 誠, 平井 洋武 :
「圧電素子を用いたセルフセンシングアクチュエーションによるガルバノミラーの制振制御」
電気学会論文誌 D, Vol.131, No.3, pp.229-236, 2011
- [36] 廣瀬 徳晃, 川福 基裕, 岩崎 誠, 平井 洋武 :
「繰り返し位置決め制御時の初期値補償による残留振動抑制」
電気学会論文誌 D, Vol.125, No.1, pp.76-83, 2005
- [37] 中出 圭輔, 涌井 伸二, 中村 幸紀 :
「ガルバノミラーの集中定数モデル作成の提案」
平成 27 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2-25, II, pp.201-204, 2015
- [38] 三上 直樹 :
「はじめて学ぶデジタル・フィルタと高速フーリエ変換」
CQ 出版社, pp.133-146, 2005
- [39] Leon Cohen :
「Time Frequency Analysis: Theory and Applications」
Prentice Hall, 1994
- [40] G. Strang, T. Nguyen :
「Wavelets and Filter Banks」
Wellesley Cambridge Press, pp.221-262, 1996
- [41] 伊東圭昌, 山口尚人, 山崎徹 :

- 「デジタルフィルタによる時間-周波数分析を用いた振動解析に関する基礎的検討」
日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.801, pp.1633-1646, 2013
- [42] 長松 昭男：
「モード解析入門」
コロナ社, pp.367-371, 1993
- [43] モード解析ハンドブック編集委員会：
「モード解析ハンドブック」
コロナ社, pp.68-95, 2000
- [44] 天野 雅彦, 世古口雅宏, 禰里 勝義, 河田 謙一：
「プロシー解析法による電力系統実測データの動揺モード検出」
電気学会論文誌 B, Vol.120, No.2, pp.141-147, 2000
- [45] 沼里 英彦, 伊藤 清忠, 三枝 省三：
「磁気ディスク装置におけるヘッド位置決め誤差の解析手法 (セtring応答解析)」
日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, No.638, pp.4093-4099, 1999
- [46] 早川 順, 国府田 京司：
「レーザ加工装置及びレーザ加工方法」
公開特許公報 特開 2003-220484, 2002-1-23
- [47] 小山 孝, 笹川 泰, 加藤 浩和：
「プリント配線基板の穴あけ加工方法」
公開特許公報 特開 2004-87879, 2002-8-28
- [48] 山口 高司, 宍田 和久, 平井 洋武：
「磁気ディスク装置ヘッド位置決めサーボ系におけるサーボモード切り換え時の初期値補償問題の基礎検討」
計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.7, pp.792-799, 1993
- [49] 山口 高司, 沼里 英彦, 平井 洋武：
「初期値補償を伴うモード切り換え型制御系の切り換え条件の設計と磁気ディスク装置ヘッド位置決め制御系への適用」
計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.8, pp.718-725, 2008
- [50] 日本トライボロジー学会 転がり軸受寿命研究会：
「転がり軸受寿命計算式の変遷 (3)」
トライボロジスト, Vol.58, No.3, pp.162-165, 2013
- [51] 綿林 英一：
「転がり軸受マニュアル」
日本規格協会, 1976
- [52] J. Brndlein, P. Eschmann, L. Hasbargen, K. Weigand :

- 「Ball and Roller Bearings: Theory, Design and Application」
Wiley, 1999
- [53] 日本工業標準調査会：
「JIS B 1562：2009 転がり軸受－損傷及び故障－」
日本規格協会，2009
- [54] 喜多 武勝，山本 雄二：「揺動スラスト玉軸受におけるリチウム石けんグリースの耐
フレッチング摩耗特性」トライボロジスト，Vol.42，No.6，pp.492–499，1997
- [55] 丸山 泰右，齋藤 剛：「油およびグリース潤滑下におけるフレッチング摩耗防止メカ
ニズムの違い」トライボロジスト，Vol.56，No.12，pp.788–796，2011
- [56] 野口 明治，松尾 和昭，芳川 悟史，野木 高：「転動体の公転を利用した玉軸受のフレッ
チング防止に関する研究」日本機械学会論文集 C 編，Vol.77，No.779，pp.2894–2904，
2011
- [57] 坂上 賢太郎，横内 敦，中 道治：
「転がり軸受のフレッチング摩耗の損傷度の評価方法とアンデロン値の推測方法と転
がり軸受及びグリースの耐フレッチング性の推測方法」
公開特許公報 特開 2006-292029，2005-4-8
- [58] 佐藤 隆太：
「直動転がり案内における摩擦特性の実験的挙動解析」
日本機械学会論文集 C 編，Vol.73，No.734，pp.2811–2819，2007
- [59] 佐藤 隆太，堤 正臣：
「AC サーボモータと直動転がり案内を用いた送り駆動系の数学モデル」
精密工学会誌論文集，Vo.71，No.5，pp.633–638，2005
- [60] 松家 大介，遠山 聡一，平井 洋武，岩崎 誠：
「レーザ加工装置」
公開特許公報 特許第 5711032 号，2015-4-30
- [61] 松家 大介，徳山 幹夫，森 崇則，山本 晃弘：
「ガルバノスキャナ制御装置およびレーザ加工装置」
公開特許公報 特開 2014-149406，2014-8-21
- [62] 松家 大介，遠山 聡一，平井 洋武，岩崎 誠：
「レーザ加工装置」
公開特許公報 特開 2011-110589，2011-6-9
- [63] 徳山 幹夫，松家 大介，大槻 治明，遠山 聡一，福島 智：
「レーザ加工装置」
公開特許公報 特開 2013-167777，2013-8-29
- [64] 次世代レーザプロセッシングとその産業応用 調査委員会：

- 「最新レーザプロセッシングの基礎と産業応用」
電気学会, 2007
- [65] 川福 基裕, 大津 一宏, 岩崎 誠, 平井 洋武, 小林 正人, 奥山 淳: 「ハードディスク装置の高精度位置決め制御 第一報: 偏分反復法を用いた高精度シミュレータの構築」
電気学会論文誌 D, Vol.125, No.12, pp.1069–1075, 2005
- [66] 廣瀬 徳晃, 岩崎 誠, 川福 基裕, 平井 洋武: 「全域通過フィルタを用いたフィードバック補償による共振モードのロバスト制振制御」
電気学会論文誌 D, Vol.129, No.10, pp.981–988, 2009
- [67] 前田 佳弘, 岩崎 誠:
「転がり摩擦モデルに基づく位置決め整定時における遅い応答の発生要因の考察と補償」
電気学会論文誌 D, Vol.129, No.12, pp.1218–1225, 2009
- [68] T. Ono, S. Toyama, Y. Okubo, and H. Hirai:
「Positioning control system for moving element and laser drilling machine」
米国特許出願公開 第 11/707,153 号 明細書, 2014-10-28
- [69] T. Miura:
「Motor control device, control method, and control program」
米国特許出願公開 第 12/309,526 号 明細書, 2011-9-6
- [70] 遠山 聡一, 坂本 淳, 大槻 治明, 大久保 弥市: 「スキャナ装置およびレーザ加工機」
公開特許公報 特許第 4391093 号, 2003-1-20
- [71] H. Otsuki, S. Toyama, K. Seki, Y. Okubo, D. Kitamura:
「Optical scanner control method, optical scanner and laser machining apparatus」
米国特許 第 7,270,270 号 明細書, 2007-9-18
- [72] 志摩 政幸, 地引 達彦:
「フレッチング摩耗」
トライボロジスト, Vol.53, No.7, pp.462–468, 2008

発表論文リスト

学術雑誌論文

- [1] D. Matsuka, M. Tokuyama :
「Deterioration Diagnosis Method for Ball Bearings that Continue Minute Swaying Motion」
Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.7, No.1, pp.30–38, 2013
- [2] 松家 大介, 大槻 治明, 佐野 哲也 :
「ガルバノミラー式位置決めサーボ機構における動作モードを重畳させる目標軌道設計手法」
電気学会論文誌 D, Vol.133, No.4, pp.421–427, 2013
- [3] 松家 大介, 岩崎 誠 :
「ガルバノスキャナにおける軸受性能低下による位置決め性能への影響分析手法」
電気学会論文誌 D, Vol.134, No.8, pp.776–783, 2014

国際会議

- [4] D. Matsuka, M. Tokuyama :
「Deterioration Diagnosis Method for Bearings of Galvanometer Scanners that Continue Reciprocating Motion」
Proc. of 2012 ASME-ISPS / JSME-IIP Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, pp.355–357, 2012
- [5] D. Matsuka, S. Fukushima, M. Iwasaki :
「Compensation for Reversible Flux Loss Caused by Temperature Change in Fast and Precise Positioning of Galvanometer Scanners」
Proc. of 2015 IEEE International Conference on Mechatronics, pp.642–647, 2015
- [6] D. Matsuka, K. Seki, M. Iwasaki :

「Method for Quantifying Degradation of Bearing Performance and Analyzing Its Effect on Settling Performance of Galvano Scanners」
Proc. of the 1st IEEJ international Workshop on Sensing, Actuation and Motion Control, pp.IS7-5-1-4, 2015

国内会議

- [7] 松家 大介, 大槻 治明, 佐野 哲也 :
「穴間移動動作から軌跡追従動作へ連続的に遷移するガルバノミラー式位置決めサーボ機構の目標軌道設計手法」
平成 23 年電気学会産業計測制御研究会, IIC-11-165, 2011
- [8] 松家 大介, 岩崎 誠 :
「ガルバノスキャナにおける位置決め誤差解析の一手法」
平成 25 年電気学会産業応用部門大会, 2-11, II, pp.87-90, 2013
- [9] 松家 大介, 関 健太, 岩崎 誠 :
「ガルバノスキャナにおける高速高精度位置決め制御系の開発」
平成 26 年電気学会産業応用部門大会シンポジウム, 2-S8-3, II, pp.13-18, 2014