

学位論文 博士（工学）

NC工作機械の高精度運動制御
のためのリニアスケールシステム
に関する研究

2014年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

藤森 徹

目次

第1章 緒論	1
1-1 序言	1
1-2 NC 工作機械における位置検出装置の発達とリニアスケール	2
1-2-1 位置検出制御の変遷	2
1-2-2 フルクローズド制御方式とリニアスケール	4
1-3 工作機械に適したリニアスケールの検討	5
1-4 超精密工作機械に必要とされる加工精度の動向	7
1-5 超精密工作機械に必要とされるリアルタイム運動誤差補正を可能にするスケール技術の検討	8
1-6 リアルタイム運動誤差補正の定義	9
1-7 本研究の目的	9
1-8 本論文の構成	10
1-9 結言	10
第2章 磁気式リニアスケールの優位性の検討と考察	11
2-1 序言	11
2-2 マグネスケールの種類と原理	11
2-2-1 磁気式リニアスケールの種類	11
2-2-2 磁束応答型磁気式スケールの原理	12
2-2-3 磁気抵抗変化型磁気式スケールの原理	15
2-2-3-1 磁気抵抗変化型磁気式スケールの検出原理	15
2-2-3-2 磁気抵抗変化型磁気式スケール	18
2-2-3-3 磁気抵抗変化型磁気式スケールのアブソリュート機能	20
2-2-3-4 アブソリュート磁気抵抗変化型磁気式スケールにおける信号処理と内挿の原理	21
2-3 磁気抵抗変化型磁気式スケールの性能の現状	23
2-3-1 磁気抵抗変化型磁気式スケールの実装例	23
2-3-2 リニアスケールを搭載した工作機械の制御精度	25
2-3-3 磁気式スケールと光学式スケールの耐環境特性	29
2-3-3-1 磁気式スケールと光学式スケールの振動特性	29

2-3-3-2	磁気式スケールと光学式スケールの温度特性	33
(1)	実験装置・方法	33
(2)	実験結果	33
(3)	考察	35
2-3-3-3	磁気式スケールの耐クーラント性	36
2-4	結言	37
第3章	磁気式スケールの3次元への拡張	38
	-原理とその実現可能性検証-	
3-1	序言	38
3-2	補正用スケールに要求される測定範囲	39
3-3	補正用磁気式スケールの検出原理と補正方法の提案	43
3-3-1	X, Y軸方向の測定	45
3-3-2	Z方向の測定	46
3-3-3	補正方法の提案	47
3-4	補正用磁気式スケールの試作と性能評価	49
3-4-1	Z軸方向検出に必要な信号波長	49
3-4-2	求められる内挿精度と分解能	50
3-4-3	性能評価実験	51
3-5	結言	55
第4章	超精密工作機械の運動誤差補正用	
	2次元スケールシステムの開発	56
4-1	序言	56
4-2	格子干渉計型スケールシステムの選択	56
4-2-1	格子干渉計の選択理由と現行方式の問題点	56
4-1-2	格子干渉計の原理と特徴	57
4-1-3	格子干渉計とマイケルソンの干渉計の比較	59
4-1-4	2次元計測の計測方法比較	60
4-1-5	レーザスケール	61
4-2	2次元レーザスケールシステムの開発	62
4-2-1	試作2次元レーザスケールシステムの構成	62
4-2-2	試作2次元レーザスケールのスケール部	63
4-2-3	試作2次元レーザスケールの検出ヘッド部	65
4-2-4	試作2次元レーザスケールの内挿回路部	66

4-3	試作レーザスケールシステムの性能評価	67
4-3-1	2次元レーザスケールの出力と分布の評価	67
4-3-2	2次元レーザスケールの精度測定と格子直交度の測定	68
4-3-3	2次元レーザスケールのノイズと安定性の測定	72
4-4	工作機械における2次元スケールの適応方法の検討	75
4-4-1	2次元スケールの搭載方法	75
4-4-2	補正システムの構成	79
4-5	結言	80
第5章	2次元スケールを使った補正とシステムとしての評価	81
5-1	序言	81
5-2	2次元レーザスケール開発の背景	82
5-3	ホログラムスケールを用いた2次元工作機械 精度測定システム	83
5-3-1	2次元スケールと検出ヘッド	83
5-3-2	2次元精度測定用ソフトウェア	85
5-4	工作機械の誤差モデルと誤差補正	87
5-4-1	3軸工作機械の一般的な3次元誤差のモデル化法	87
5-4-2	新工作機械の軌跡誤差補正方法	88
5-4-3	NCコード変更による誤差補正	91
5-5	誤差計測と誤差補正の実験的検証	92
5-5-1	ボールネジ駆動機に関する実験	92
5-5-2	リニアモータ駆動機に関する実験	95
5-6	結言	98
第6章	結論	99
	謝辞	102
	参考文献	103
	関連論文	107

第 1 章 緒論

1-1 序言

ムーアの法則のカーブ (図 1-1) [1] に乗った半導体の急速な進歩に伴い、スマートフォンに代表される情報システム端末商品は高機能化、高密度化が進み、想像を超える普及を果たすとともに半導体産業も著しく発展している。この半導体の進歩の効果は、自動車や各種機械製品においても現れており、製品の電子制御化とともに、構成する部品精度にはますます高精度化が求められている。そして、それらものづくりに欠かせない生産設備のマザーマシンといわれる工作機械も素材を切削する、研削する、研磨する、電触する、成型する、という基本的な機能と機械の基本構造はさほど変わらないものの、その制御技術は高度化され電子制御システムと言える様相を呈してきている。特に、NC 工作機械におけるフィードバック制御は加工精度向上に必要不可欠であり、フルクロード制御化の要請に伴い位置検出装置の役割もさらに重要となりこの分野における技術も大きく進化してきている。

本章では、工作機械の運動精度向上に果たす位置検出装置としてリニアスケールシステムに注目し、そのシステムの構成要素であるスケール技術の役割は何か、その役割を果たすために、従来からどのような技術の進化が起こってきたのか、さらに今後必要とされるスケール技術は何かについて述べた後、本研究の目的について述べる。

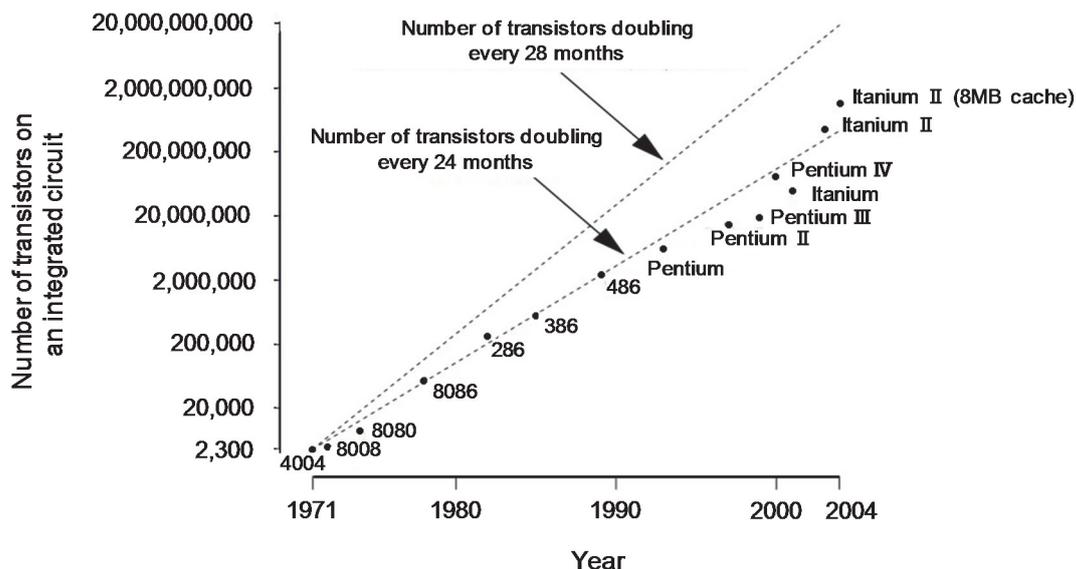


Fig. 1-1 Moore's law [2]

1-2 NC 工作機械における位置検出装置の発達とリニアスケール

1-2-1 位置検出制御の変遷

現在見られるほとんどの工作機械と呼ばれるものの原型は、20世紀初頭までに主として欧米において開発され、その自動化と高精度化が図られてきたが、1952年のパーソンズ（米）による数値制御（NC）の発明は工作機械に一大変革をもたらした^[3]。数値制御方式の実用化に向けた NC 装置としては、アメリカ合衆国マサチューセッツ工科大学のサーボ研究室で開発されたが、この時の NC 制御装置における制御回路は真空管をベースとしたものであった。一方、半導体の技術開発が並行して進んでいたが、1960年初頭には、そこから実用化された始めたサイリスタやパワートランジスタ等のエレクトロニクス技術を取り入れた素子を活用し、電気電子演算回路を主体としたハードワイヤ型 NC 装置へと移行して行った。同時に半導体集積回路の発明は半導体時代の幕開けとなり、1970年代初頭に出現したマイクロプロセッサは NC 制御装置をコンピュータ応用型 NC 装置（CNC：Computer Numerical Control）へと大きく変革させていった。そして、現在の NC 工作機械はムーアの法則に乗った半導体の急速な進化の恩恵を享受し、全ての制御機能がソフトウェアにより実現できる NC 制御装置を搭載したソフトウェア型 NC 工作機械となっている。

この半導体の進化に根ざした NC 制御装置の変遷により NC 工作機械の機能と性能は飛躍的に向上したわけであるが、特に、加工精度の向上は目覚ましいものがある。

加工精度とは工作機械の運動すなわち加工物と工具の相対運動により最終的に加工された結果を言うわけであるが、この相対運動は X 軸、Y 軸、Z 軸の 3 軸方向の直線運動の合成空間運動により構成されることが基本であり、先ずは、その相対運動の精度が求められる。NC 工作機械においては各軸の運動は NC プログラムにより指令されるわけであるが、その指令通りに各軸が運動し、さらには相対運動がなされていなければならない。そして、同時に、高速化も伴わなければならない。

工作機械の運動精度を測定する方法としてはいままでに、レーザ干渉計を用いた測定方法^[4]、ダブルボールバーを用いた測定方法^[5]、R-test と呼ばれる測定方法^[6]、レーザトラッカーを用いた測定方法^[7]などが開発されている。

一方、工作機械の運動の高精度化、運動の高速化を達成するために、機械運動要素、制御方式、それに必要なセンサ・アクチュエータ技術の 3 要素技術を駆使した制御が重要となってくる。この 3 要素は相互に影響を及ぼす関係にあるが、その関係は次の 2 つの制御方式により異なる。

すなわち、

1. セミクローズド制御方式（Semi-closed loop control method）、
2. フルクローズド制御方式（Full-closed loop control method）、

であり、特に精度向上にフルクローズド制御方式がとられることが多くなり、それに伴って 3 要素技術は目覚ましい発展を遂げてきている。

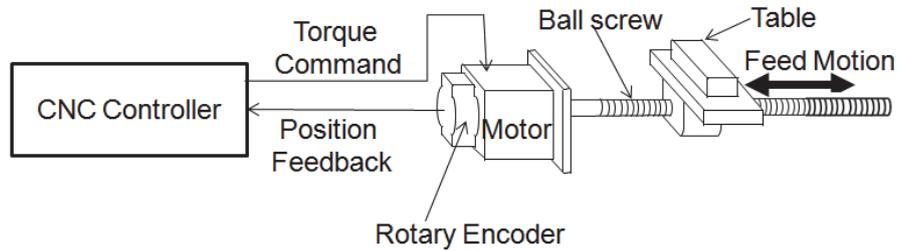


Fig. 1-2 Semi-closed loop control method

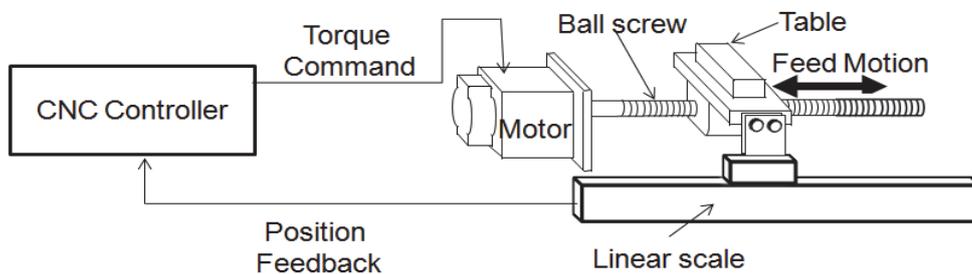


Fig. 1-3 Full-closed loop control method

セミクローズド制御方式は、図 1-2 に示すように、運動の最終位置を検出することなく、直線運動の機構としてボールねじによる送り機構等の様に、回転運動を直線運動に変換する機構において、その回転動力部としての回転型駆動装置（アクチュエータ）に装着された回転角度検出器が検出するアクチュエータの回転角から機構の直線運動変換係数を乗じて算出した値を運動距離としている。回転角度検出器にはレゾルバや回転スケール（ロータリエンコーダ）と呼ばれるものがある。このセミクローズド制御方式は安価な構成が可能のため高精度化に向けた研究も進んでいる^[8]。

この制御方式の場合、モータなどのアクチュエータの回転運動はフィードバック制御の原理を活かして高精度に制御できるが、そのアクチュエータの回転運動から直線運動への変換機構などで発生する誤差、すなわち回転角度検出以降の運動誤差は検出していないため運動の高精度制御は難しい。例えば、一般的なボールねじによる送り機構の場合、ボールねじが一回転するとナットがねじ 1 ピッチ分直進する動作原理であるため、熱膨張・収縮などボールねじピッチが変動すると、アクチュエータの回転角が正確に検出されていても、ナットの移動距離 L は、ねじピッチを X 、回転角を θ で表すと、 $L=X \cdot (\theta / 2\pi)$ というねじピッチの計算に基づいて算出されるため実際の送り距離との差が出てしまう。さらに、その熱膨張や収縮の挙動は周囲の温度や運動速度、加工負荷に依存する熱の発生が不規則であり再現性がなく、規則性を把握してそれをフィードバックするということが不可能に近い。また、ボールねじの場合、バックラッシュを抑えることも難しい。

1-2-2 フルクロード制御方式とリニアスケール

セミクロード制御で検出できない運動誤差を極力押さえるために熱の発生を押さえ、また、熱変形が起こるとしてもその変形が少なくなる様な構造をとり、機構部品精度と組み立て精度を徹底的に上げるという考え方もあるが、そのアプローチでは高精度化に限界がある。このような不完全な位置検出方式に起因する不正確な運動位置検出の問題を解決するには、図 1-3 に示すように運動体を直接検出し、その検出した位置情報に基づいて正確に運動を制御するフルクロード制御方式を採用することが望ましい。

直線運動距離を直接検出するには、安定した波長を持つレーザー光を移動対象物に当てて光干渉の原理を用いて検出するレーザー干渉計などがある。しかし、レーザー干渉計（図 1-4）は空気の揺らぎの影響を受けるため工作機械の実際の使用環境には適しておらず、安定した環境での工作機械の精度評価用に使われている。実際の使用環境における制御用には、動作安定性やコストの点からリニアスケール（リニアエンコーダ）と呼ばれる検出器を搭載することが一般的である。従って、更なる精度向上に向けて近年このリニアスケールを活用した運動制御システムの研究が進んできている^[9]。

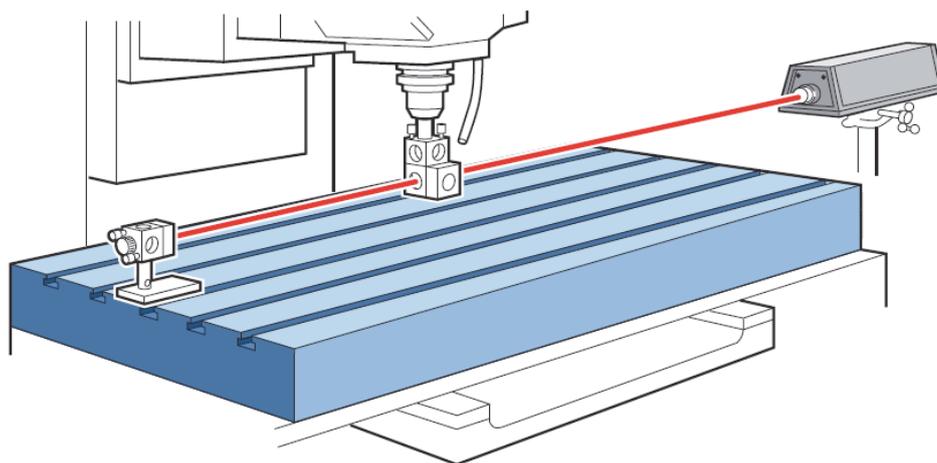


Fig. 1-4 Laser measuring system ^[10]

1-3 工作機械に適したリニアスケールの検討

工作機械向けのリニアスケールはその記録・読み取り方式として光学式のものや磁気式のものがあるが、従来その分解能においては光学式が優位に立っていた。

一方、工作機械の使用環境にはクーラントや切削油といった光学式スケールの読み取りの信頼性を損なう要因が多く、スケール自身のプロテクト構造や、機械装着設計上の配慮がその信頼性を決定付けている。磁気式スケールはその点では原理的に有利であり、例えば、図 1-5 のようにスケールにクーラントをかける環境試験などでは、内部にクーラントが侵入すると光学式はたちまちエラーとなるが磁気式では全く問題がない。従って、光学式ではクーラント侵入対策が大きな課題であり、磁気式スケールでは分解能の向上が望まれていた。

そして、近年、磁気式スケールでは分解能においても光学式スケールとの差は全くないレベルに大きく改善されている。光学式スケールではわずかなミストは難しいものの、クーラント侵入を防ぐ対策が進んでいる。表 1-1 に、精度に関する同じクラスの両方の製品カタログデータと、信号読み取り原理、それに関わるスケールの構造、及び機械への装着方式の違いによる比較を簡単に記載する。

これらの検討により本研究では、第 1 段階として加工精度 $0.1\ \mu\text{m}$ レベルを求める高精度工作機械を対象としたフルクロード制御システムにおいて、特にリアルタイム運動誤差補正の研究にあたり分解能 $10\ \text{nm}$ の磁気式リニアスケールを用いることとした。

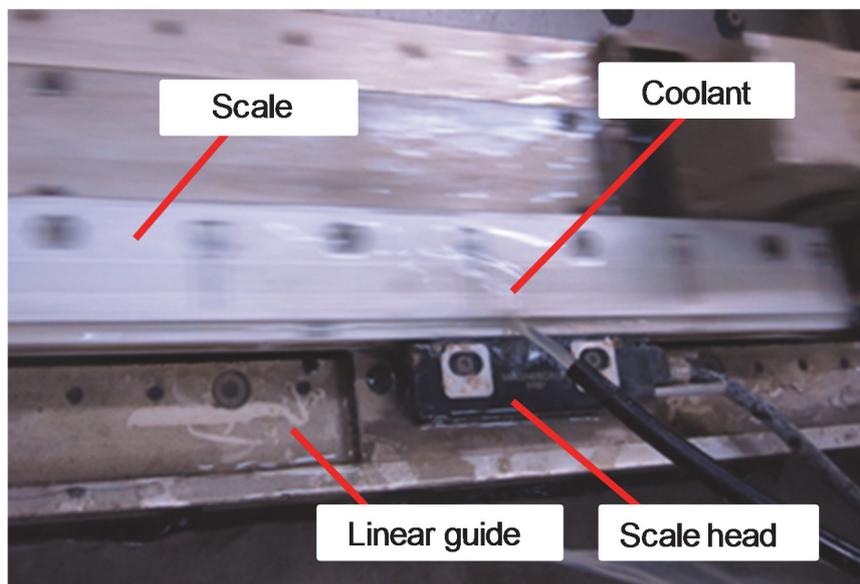


Fig. 1-5 Coolant durability test

Table 1-1 Comparison table between Magnetic Scale and Optical Scale in absolute linear scale

		Magnetic Scale (Magnescale)	Optical Scale
Basic specification	Wave length	80 μm	16 μm
	Resolution	10 nm	10 nm
	Accuracy in 1 wave length	0.3 μm	0.3 μm
	Accumulated accuracy	$\left(3 + \frac{3L}{1000}\right) \mu\text{m p} - \text{p}$	±3 μm
	Fluctuation	±10 nm	—
	Response speed	200 m/min	180 m/min
	Scale base material	Aluminum alloy	Glass
	Linear expansion coefficient	$\alpha=11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (Equivalent to iron's)	$\alpha=8.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (Equivalent to glass's)
	Fixing method of scale	Whole surface fixed to iron member	One point fixed to machine tool. Other areas supported elastically.
Environmental characteristic	Vibration durability	Better durability from whole surface fixing method	Susceptible to outer vibration due to one point scale fixing method
	Scale expansion against temperature change	Equivalent to machine tool material expansion (iron)	Equivalent to glass expansion
	IP rating	IP67	—
	Coolant resistance	Normal performance when liquid or gasification coolant enter into scale body	Failure when liquid or gasification coolant enter into scale body

Magnescale: SR87, Optical Scale: Heidenhain LC181

1-4 超精密工作機械に必要とされる加工精度の動向

工作機械の今後の高精度化の予測は1983年に 図1-6 に示す谷口カーブが発表されているが^[11], そのカーブで予測された1 nmの加工精度は既に非球面レンズ研削機や非球面レンズ金型加工機^[12, 13]などで求められ実用化されるようになってきており (図1-7), 今後, このカーブに則した高精度化への要求はますます高まると考えられる。

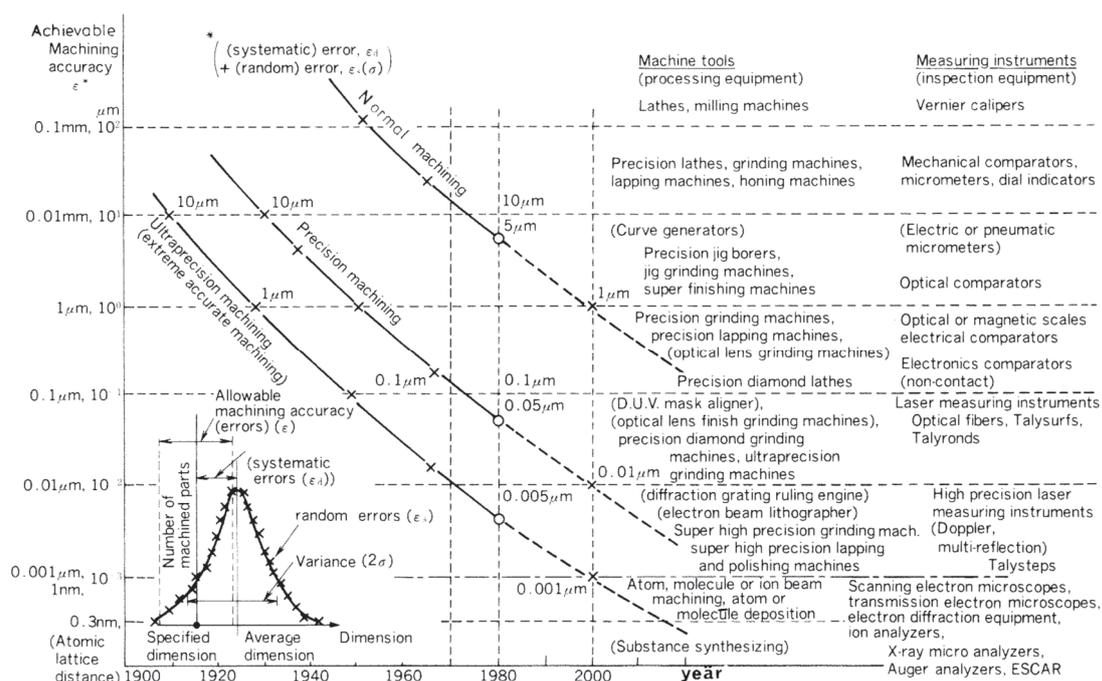


Fig. 1-6 Development of achievable machining accuracy ^[11]

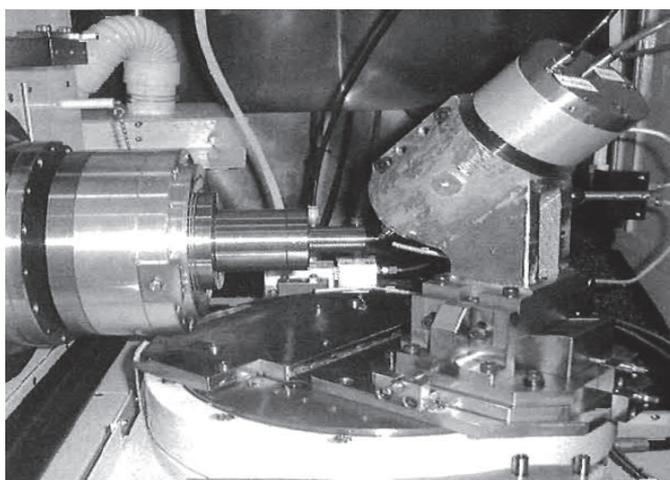


Fig. 1-7 Grinding of an aspherical lens ^[12]

1-5 超精密工作機械に必要とされるリアルタイム運動誤差補正を 可能にするスケール技術の検討

1nm の運動誤差検出を行うためには、1-3 節で比較した 0.1 μm 精度の工作機械用スケールでは光学式、磁気式共に分解能が低くて使用できない。半導体製造装置では 10 nm \sim 34 pm の分解能を持つ 2 次元のレーザスケールが採用され、高速・高精度の位置決め制御による高精細な半導体製造を可能にしている。図 1-8 はムーアの法則に従い、近年ピコメータ (pm) 分解能を達成している株式会社マグネスケールのレーザスケールを図 1-6 に示した谷口カーブにプロットしたものだが、十分に工作機械の高精度化に対応できることが伺える。また、先に述べた非球面加工用工作機械においてはレーザスケールがすでに用いられている。

工作機械の 1 nm 加工においては 3 次元曲面の高精度加工が求められ、3 次元空間運動誤差補正のための軸間補正、そして、0.1 μm 精度加工よりは軽減されるにせよ、加工熱変位、加工負荷、重心移動、振動、による運動誤差補正は不可欠になると考えられる。従って、本研究では、第 2 段階としてこの領域の精度向上にはリアルタイム運動誤差補正技術が必要となってくると考えた。

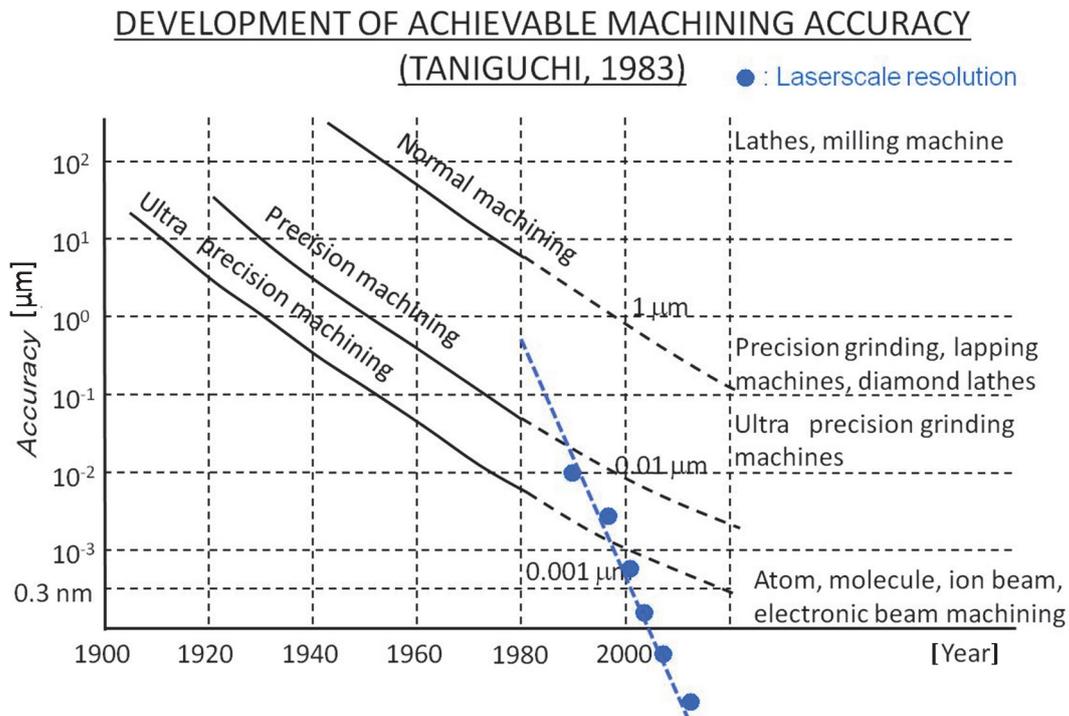


Fig. 1-8 Laserscale resolution ^[1]

1-6 リアルタイム運動誤差補正の定義

現在広く用いられている工作機械の運動誤差の補正方法は、工作機械上に運動精度を正確に測定できる測定装置を取り付けて一定の運動を行わせ、その運動誤差を測定し、その誤差データを NC 制御装置内に保存し、実際の加工中には、その保存誤差データに基づいて指令値の誤差補正を行う方法である。

この方法は、工作機械の運動誤差の挙動が常に、あらかじめ測定保存した誤差の挙動と同一であるという仮定に立つものであり、保存されている誤差データを変えない限り補正のやり方を変えることは出来ない、いわば静的な誤差補正であった。

従来は、加工中に運動誤差を検出することはできず、被加工物を機械から下ろし、オフマシンで計測し、その結果から運動誤差を導き出し再加工の機械指令に補正をかけるか、被加工物は機械にある状態としても、機械は一旦加工を停止させ、外部の測定機などで計測しそのデータから次の加工指令を補正することになる。いずれにしても加工中に計測が出来ないため、データ量は限られ規則性のある運動誤差であることを把握するのは難しく、妥当な補正指令に行き着くまでに時間を要していた。

本研究で提案するスケールシステムは、工作機械に常設されたスケールで加工中に常時運動誤差を検出でき、また、その検出データから求めた補正済みの機械指令を加工中に使用できると言うことから、従来の補正方法に比べて、はるかに早く妥当な補正ができるため、この補正方法をリアルタイム運動誤差補正と呼ぶこととした。

1-7 本研究の目的

NC 工作機械の高精度化にともない、送り機構は 1 軸毎のフルクローズド制御が行われるようになりスケールの高信頼性化、高分解能化も進んでいる。しかし、高精度化の要求がさらに進むと、工作機械各部の運動とともに変化する工作機械の重心位置、切削抵抗、発熱等の変化にともなう 3 次元空間内の運動誤差をリアルタイムに同定し、これを補正するすなわちリアルタイム運動誤差補正が必要となってくる。特に、1 nm の超精密加工領域では、各軸間リアルタイム補正を含めたリアルタイム運動誤差補正が重要となるものと考えられる。

そこで本研究では、その補正レベルにおいて、第 1 段階として、現状の高精度工作機械（加工精度が 0.1 μm レベル）と第 2 段階として、将来の超精密工作機械（加工精度が 1 nm レベル）の 2 段階の補正レベルを想定し、それぞれのケースについて新しい位置検出スケールを駆使した運動誤差検出システムを提案するとともにその実現可能性を検証することを目的とした。

1-8 本論文の構成

本論文は本章を含み6章で構成される。

第1章では、NC工作機械の制御技術の発展の歴史と今後求められる高精度化について述べた。そして、そこに必要な工作機械の位置検出システムの中でのリニアスケールの役割を明らかにし、本研究の目的と目標を述べている。

第2章では、第1段階の加工精度0.1 μm レベルの高精度工作機械での運動誤差補正用スケールシステムとして第3章で述べる、1軸で軸の直進性や運動誤差を検出できる多自由度スケールを研究するにあたり、そのスケール方式として選定した磁気式リニアスケールについて、十分足りうるものであるかどうか、原理にさかのぼり検証し、更に、精度並びに耐環境性能の実機検証データをもとに、1軸の運動誤差補正システム用スケールとして妥当であることを検証した内容を述べる。

第3章では、磁気式リニアスケールにおいてスケールの直線方向だけでなく直角2方向の運動誤差をわずかではあるが効果的な範囲で検出可能な構造を考案し、それら2方向についての補正位置検出能力が得られることを示す。

第4章では、研究第2段階の1 nmレベル超精密加工領域での運動誤差補正のために考案したスケールシステムと、そのシステムに組み込むスケールとして試作した2次元スケールの性能評価結果について述べる。1 nmレベルの超精密工作機械では、各軸間リアルタイム補正を含めた3次元空間のリアルタイム運動誤差補正が必要と考えられる。そのため、3組の2次元スケールと検出センサーをそれぞれが正規直交の関係となるよう配置したスケールシステムを考案した。その2次元スケールとして選定したpmレベルの分解能を持つホログラム方式2次元レーザスケールが、この3次元空間補正のスケールシステムのスケールとして十分足りうるものか、その原理にさかのぼり検証するとともに、性能評価を行った結果について述べ、さらに、このレーザスケールシステムを工作機械に組み込むための基本的搭載構造を提案する。

第5章では、第4章で説明した2次元レーザスケールを実験機に搭載し、軸間リアルタイム運動誤差補正が可能であることを検証した結果について述べる。

第6章では、本研究で得られた知見をまとめ、本論文の結論を述べる。

1-9 結言

本章では、まず工作機械の高精度化の歴史を制御技術の観点で述べ、その中で位置検出器の必要性の高まりとともに進化してきたスケールをいくつかの検出原理及び方式による差異とともに具体的に説明した。さらに工作機械が高精度化されることを予測し、そこに必要なスケールの技術を明らかにした上で、本研究における工作機械の運動誤差補正技術の開発とその目的を述べた。

第 2 章 磁気式リニアスケールの優位性の検討と考察

2-1 序言

第 1 段階の加工精度 $0.1 \mu\text{m}$ レベル高精度工作機械の運動補正においては、多軸間の補正までは実現せずとも、1 軸毎の運動の非直進性や加工応力、熱膨張などによる運動誤差を検出できるスケールが必要となると考えた。そのスケールとして、次章では 1 軸リニアスケールで軸方向に対して、直交する 2 方向の運動誤差の補正に必要な範囲が検出可能な 3 次元スケールを提案する。このスケールは、磁気式という原理が持つ特徴を活かして 3 次元スケール化しているものである。

本章では、その磁気式スケールが持つ基本性能、信頼性が本研究対象のスケールとして妥当であるかを検証する。すなわち、改めて磁気式リニアスケールの原理と特徴を調べ、基本性能を実測検証し、さらに、工作機械搭載時の性能検証と、もう一つの磁気式スケール採用の妥当性とした工作機械搭載時の優位性を検証した結果を述べる。

2-2 マグネスケールの種類と原理

2-2-1 磁気式リニアスケールの種類

磁気式リニアスケールとして本研究で対象としたのは、株式会社マグネスケール製のマグネスケールという商品名のリニアスケールである。

最初の工作機械用磁気式リニアスケールは、1968年、当時のソニー株式会社研究部で植村三良氏が開発・商品化し「マグネスケール」と名付けて発表されたものであった。翌1969年、この磁気式リニアスケールを商品とするソニーマグネスケール株式会社が設立され、現在、株式会社マグネスケールとして事業が継続されている。

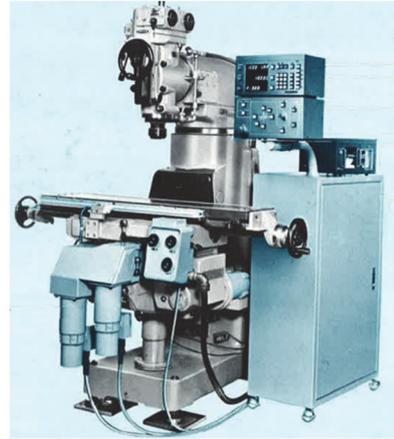
(図2-1)

当初のマグネスケールの検出方式は磁束応答型であったが、その後の開発の進展により現在主流となっているものは、磁気抵抗素子によって磁界の向き又は量の変化を素子抵抗値の変化として検出する磁気抵抗変化型である。

研究で対象とした磁気式スケールはマグネスケールであり、具体的な原理や性能、構造についての記述で磁気式スケールとしているのはマグネスケールについてのものである。



(a) Flux response type magnetic scale



(b) Milling machine with magnetic scale

Fig. 2-1 Historical Magnescale and old NC machine with Magnescale

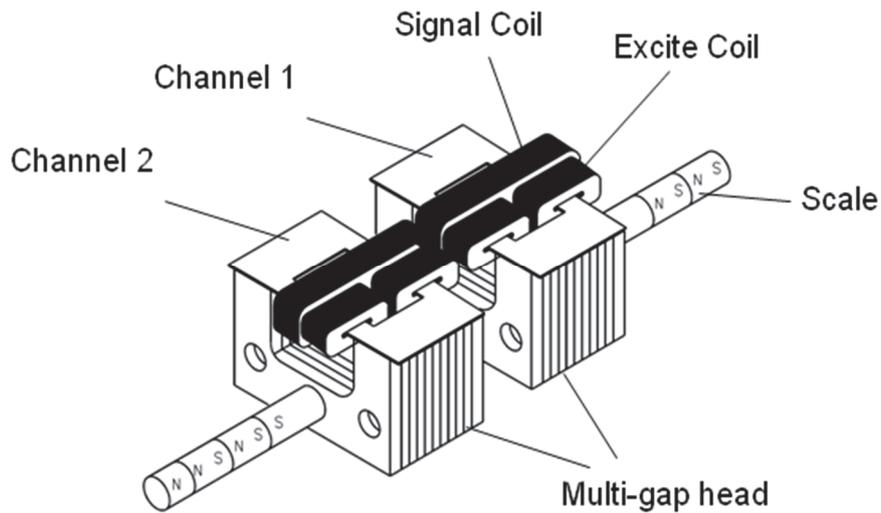


Fig. 2-2 Magnetic flux response type multi gap head

2-2-2 磁束応答型磁気式スケールの原理

図 2-2 に磁束応答型磁気式スケールの構成を示す^[4]。このスケールは磁性金属材料で製作される丸棒状のスケールと、マルチギャップヘッドと呼ばれる、中心にスケールを通す穴の開いた検出ヘッドとで構成される。検出ヘッドは、マルチギャップ構造のヨーク部と、エキサイトコアと呼ばれる磁電変換部から成り、エキサイトコアには励磁コイルと信号コイルが巻かれている。

磁性金属材料で製作された丸棒状スケールにはその外周表面に、記録ヘッドにより 200 μm ピッチの磁気記録がされている。そして、このスケールはスケールに対し支配的な剛性を持つ鉄製の筐体に所定の張力をかけて取り付けられているため、鉄と同じ熱膨張係数を持つこととなる。また、スケールが筐体内でたわむため、スケールが工作機械の走行に対して厳密に平行でなくてもある程度は許容して測定を行う事ができる。

図 2-3 に磁束応答型ヘッドの検出原理を示す^[15, 16]。励磁コイルに流す励磁電流を i_e とすると信号コイルに発生する検出信号 e_{01} は、励磁電流 i_e によりエキサイトコアに励磁される磁界と、マルチギャップ構造のヨークを介してエキサイトコアに廻るスケールからの磁界の合成された磁界を信号コイルで検出して、

$$i_e = I_0 \cos(\omega_e t) \quad (2-1)$$

$$e_{01} = K_1 H_0 \cos(2\omega_e t) \quad (2-2)$$

と表せる。ここで t は時間、 ω_e は励磁周波数、 I_0 は励磁電流振幅、 K_1 は信号変換効率を表す。

磁界 H_0 を 式(2-3) の様に現すと検出ヘッドの出力 e_{01} は 式(2-4) で表される。

$$H_0 = K_2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad (2-3)$$

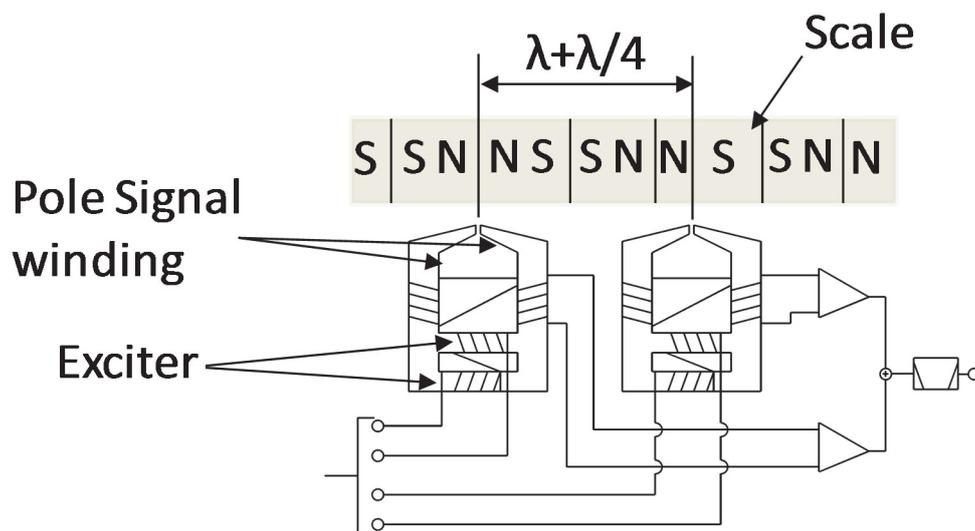


Fig. 2-3 Principle of magnetic flux response type head

式(2-3) の K_2 はスケール磁力で決まる定数である。 λ は信号の波長である。

$$e_{01} = E_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \cos(2\omega_e t) \quad (2-4)$$

E_0 は、 K_1 , K_2 で決まる定数である。

検出位置をこの位置から記録波長の 1/4 波長分の距離をあけて同じヘッドを配置し励磁電流の位相を 90° ずらすと 式(2-5) の様に 90° 位相の異なる信号 e_{02} が得られる。

$$e_{02} = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \sin(2\omega_e t) \quad (2-5)$$

2つの検出ヘッドの出力を加えると 式(2-6) に示すように励磁電流の2倍周期でスケール位相が含まれる位相変調信号が得られる。

$$\begin{aligned} e_0 &= E_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \cos(2\omega_e t) + E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \sin(2\omega_e t) \\ &= E_0 \sin\left(2\omega_e t + \frac{2\pi}{\lambda}x\right) \end{aligned} \quad (2-6)$$

この信号をスケールの記録毎に重ねられたマルチギャップで検出すると出力は積算されるとともに波長の選択性が現れて、信号の正確性が増す。

式(2-7) に合算時の信号出力を示す。

$$E_e = K \frac{\sin\left(\frac{\pi g}{\lambda}\right)}{\frac{\pi g}{\lambda}} e^{-\frac{2\pi d}{\lambda}} \times \frac{(-1)^{\frac{n+2}{2}} \sin\left(\frac{n\pi\lambda m}{2\lambda}\right)}{\cos\left(\frac{\pi\lambda m}{2\lambda}\right)} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (2-7)$$

この磁性金属材料によるスケールとマルチギャップヘッドの構成のため、磁束応答型磁気式スケールは非常に耐環境性に強く、高い信頼性を持つこととなる。その特性は、スケール内に切屑が詰まり、可動距離が短くなってさえも信号を異常なく検出する事ができるほどである。この悪環境における高信頼性から、発売と同時に多くの工作機械メーカーから高い評価を得ることとなった。

しかし後に、工作機械用のフィードバックスケールとしては光学式スケールの装着が主流となっていった。その理由は、磁気式スケールの信号ピッチ $200\ \mu\text{m}$ 比べ、光学式スケールの信号ピッチが $20\ \mu\text{m}$ と約 $1/10$ 程度と小さく、工作機械に求められる加工精度および速度が高まるにつれ、磁気式スケールの内挿誤差の大きさが問題となり始め、また、励磁された信号から励磁周波数をフィルターにかけて位相変化成分を検出する際の時間遅れが加工速度を上げるための制御の応答時間短縮に障害となり始めたためである。

これらの問題は次章で述べる磁気抵抗変化型磁気式スケールにより払拭されている。

2-2-3 磁気抵抗変化型磁気式スケールの原理

2-2-3-1 磁気抵抗変化型磁気式スケールの検出原理

現在主流になっている磁気式スケールは磁気抵抗変化型である。この方式は磁界の向きと大きさに従い抵抗の変化する磁気抵抗素子を検出センサーとして使用する方式で、磁束応答型と異なり直流電流で素子を駆動出来るので、時間遅れ無く、リアルタイムの磁電変換が可能である。磁気抵抗素子自体は $100\ \text{MHz}$ の動作が 1968 年時点で確認されている報告が有る。後に述べるように現在主流の磁気スケールの記録波長は $160\ \mu\text{m}$ 信号波長は $80\ \mu\text{m}$ なので工作機械のテーブルの移動速度として仮に $300\ \text{m/min}$ として試算すると信号波長の周波数は $62.5\ \text{kHz}$ であり、実用レベルにおいて磁気抵抗素子は全く問題の無い応答性を有している [17, 18]。

磁気抵抗素子はスケールからの磁界によって素子の磁化方向を回転させ、その回転角度に応じて抵抗値が変化する事を利用している。

現在用いられている磁気抵抗素子は異方性磁気抵抗効果素子と呼ばれ 図 2-4 に示す磁化 M と電流 I の間の角度を θ として、抵抗 R は

$$R = R_0 + \Delta R \cos^2(\theta) \quad (2-8)$$

と表すことができる。 R_0 は抵抗の固定値、 ΔR は変化最大値である。

素子は、無磁界状態では電流 I と同じ方向に磁化方向が向いている。スケールからの磁界の内、膜面内方向で I と直行方向の H の成分の大きさに応じて磁化方向が回転し、抵抗値が変化する。

図 2-5 にこの動作状態による磁気抵抗素子の特性を示す。

この図で横軸は磁界の大きさであり、縦軸は抵抗値を示す。磁気抵抗素子の抵抗変化は磁場の方向によらず対称に変化する。このため、スケールの記録波長に対し、S 極と N 極を判別しない磁気抵抗素子に定電流電源を組み合わせた検出回路の信号出力は、記録波長の $1/2$ の波長となって現われる。図 2-4 には記録波長と信号出力の波長を図示している。以降、信号出力の波長を信号波長という。

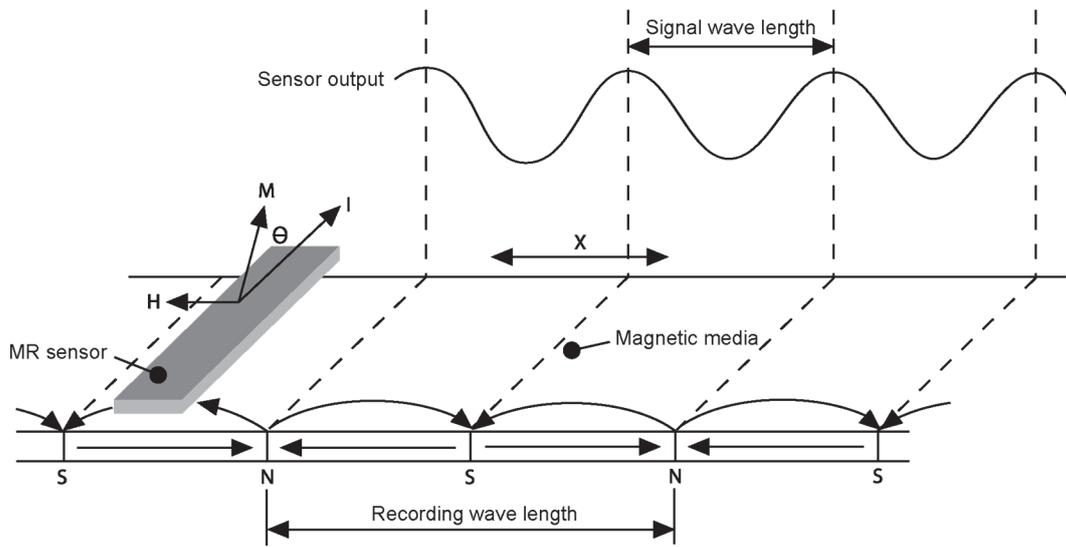


Fig. 2-4 Principle detection of magnetic resistance type scale

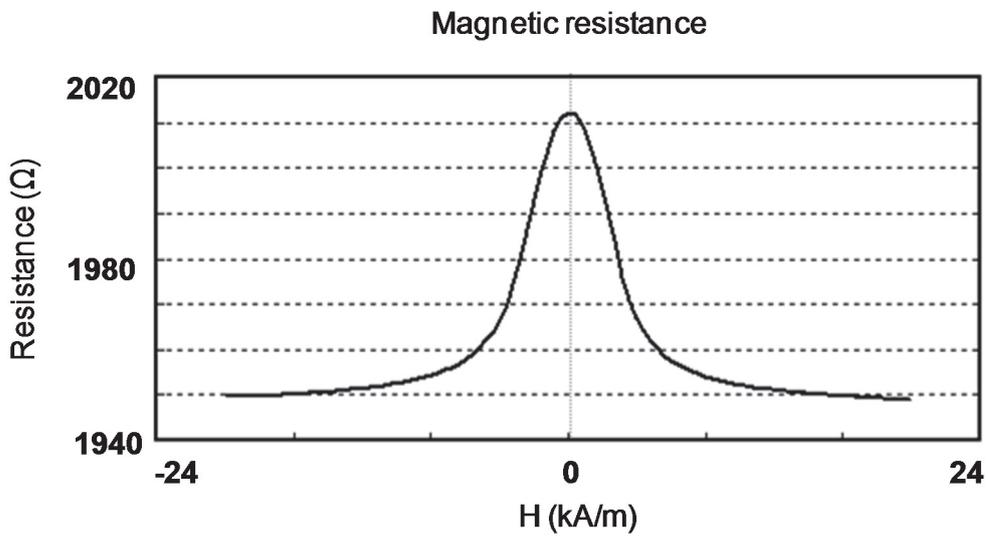


Fig. 2-5 Magnetic resistance change

スケール付近の磁場 H は, I_m を磁化, λ を記録波長, Z をスケールからの距離 (ただし, スケール記録深さの中心をゼロとする), δ を記録の深さとして, 式(2-9) の様に表される.

$$H = \frac{I_m}{2\mu_0} \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cdot e^{(-2\pi Z/\lambda)} \cdot (e^{\pi\delta/\lambda} - e^{-\pi\delta/\lambda})$$

(2-9)

C を定数とすると電圧検出出力 E は 式(2-10) の様に表される.

$$E = C \cdot \sin\left(\frac{4\pi x}{\lambda}\right)$$

(2-10)

磁気抵抗方式でも検出素子の数を増加させる事で, 磁束応答型と同様に信号の冗長性を上げる事ができる. また検出素子の配置を信号の高調波を打ち消す配置をとる事により信号歪の少ない正弦波出力を得る事ができる.

図2-6 に磁気抵抗変化型磁気式スケールの検出センサーにおけるインクリメンタル部の磁気抵抗素子の構成を示す^[9]. P は出力信号の波長に等しく従って磁気記録波長の 1/2 である. 磁気抵抗素子は $P/6$ 長手方向にずれたペアで構成されている. もし個々の素子の抵抗変化に信号波長 P の 3 次高調波成分が含まれていると, $P/6$ ずれた位置は 3 次高調波では 180° 逆相位置になるのでこの 2 つの抵抗変化を加算する事で 3 次高調波成分は消去される. この様な原理で信号の高調波を低減する事が出来る. 2-2-3-4 項で説明する様に細かい分解能を高精度に得るためには信号が正弦波になっている事が必要である.

実際の磁気抵抗変化型の検出素子は複数の高調波消去やその他の変動要因を除くために複雑なパターンになっている. 材料は, 鉄ニッケルでシリコン基板もしくは, ガラス基板上にスパッタリング等により成膜され, リソグラフィープロセスによってパターンが形成される.

素子の抵抗の変化率は通常の異方性磁気抵抗素子 (AMR 素子) の場合で 3% 程度の変化となる. これに対し, ハードディスクドライブの検出用に開発された GMR 素子, TMR 素子においては抵抗変化率が格段に大きくなるが, GMR 素子でスピナルバルブタイプはどちらかと言うとスイッチ的な特性になるためスケール用検出センサーとしては使い勝手が悪い. また人工格子型多層膜の GMR は異方性磁気抵抗効果素子と同じような特性で抵抗変化率が 10~20% と大きい, 現状ではヒステリシスがやや大きくフィードバックスケール用途としては実用化されていない. また TMR 素子は現在ハードディスクで主流となってきたが, 各種のセンサー用途においても開発がなされており今後の実用化展開が期待される.

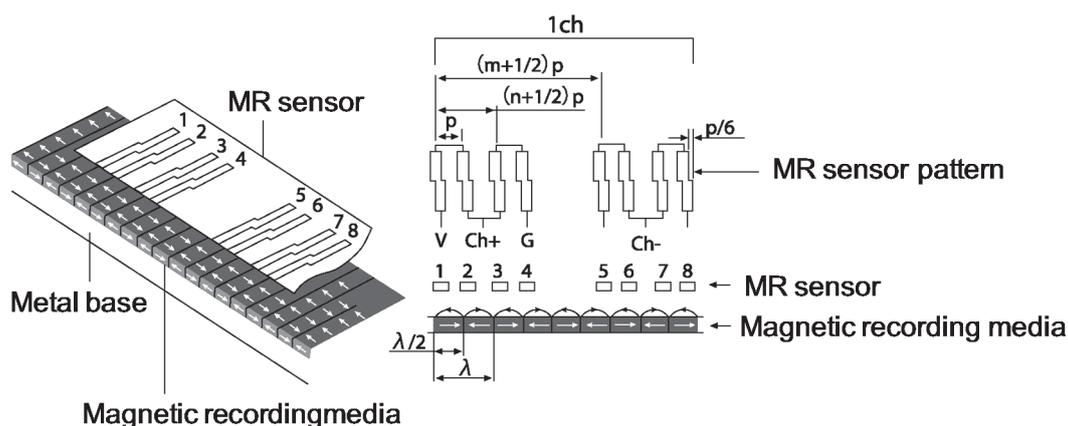


Fig. 2-6 Incremental part of head structure on magnetic resistance type scale

2-2-3-2 磁気抵抗変化型磁気式スケール

マグネスケールにおける磁気抵抗変化型磁気式スケールのスケール部は、非磁性材のベース基板の上に磁性媒体を塗布して形成され、鉄系材料の「スケールベース」と呼ばれる剛性の高いスケール構造体に強固に固定され、レーザ干渉計をリファレンスにして記録ヘッドによりスケールの「目盛」づけとしての磁気記録が行われる。磁性媒体は、塗布膜面内でスケール長手方向に配向されており、磁気記録としては水平磁化を行い 図 2-4 に示した様な着磁を行う。そして、この磁気スケール部のベース基板は構造体である鉄系材料の「スケールベース」に比べて弾性係数の低い、また、厚みにおいても充分薄いアルミニウム製であり、磁気スケール部の剛性や熱膨張特性は「スケールベース」に依存する。もともと、温度変化については、スケール基板のアルミニウムと「スケールベース」の鉄との線膨張係数の違いから、僅かではあるがバイメタル効果による反りが発生するが、これを打ち消すために「スケールベース」の磁気スケール部固定面と対称となる反対側に、磁気スケール部のベース基板と同じアルミニウム製ベース基板を貼り付け固定している。図 2-7 にスケール構造を示す。

図 2-8 に記録媒体の塗布膜面内のスケール長手方向の磁気特性を示す。スケールベースに形成される記録媒体は VTR 用の磁気テープ材料を元にした金属磁性粉を主成分とする磁性塗料である。この磁性塗料は極めて均一性にすぐれ、細かい信号波長の中まで均一な信号が得られる長所がある。工作機械で使用される多くのクーラントに対し耐性を持つ事が確認されている。記録媒体は以下の様な磁気特性を有する。

$$Br : 0.2 \sim 0.25 \text{ T}$$

$$Hc : \text{約 } 120 \text{ kA/m}$$

ただし、 Br は残留磁束密度、 Hc は保持力である。

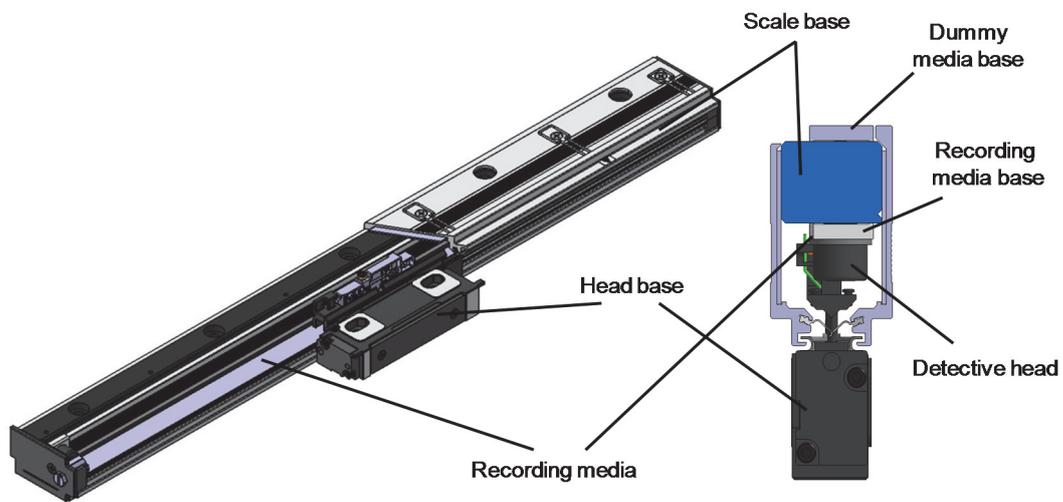


Fig. 2-7 Scale Structure

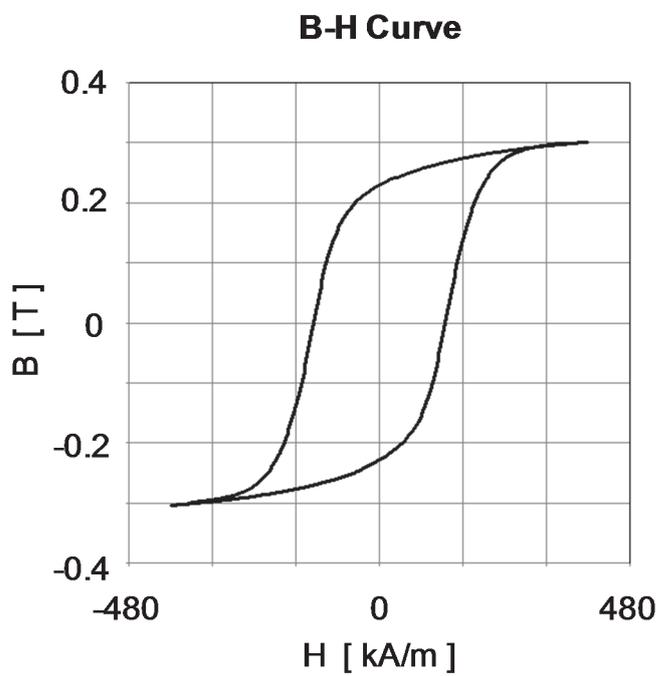


Fig. 2-8 B-H curve of recording media

2-2-3-3 磁気抵抗変化型磁気式スケールのアブソリュート機能

工作機械では絶対位置情報を持つアブソリュートスケールが一般的である。絶対位置情報を持たないインクリメンタルのスケールは電源を切ると原点信号を得るまで現在位置を知る事ができないが、アブソリュートスケールは電源を切っても再び電源を入れた時に現在位置が出力できる。アブソリュートスケールには、電源を切断した時にそれまでの値を覚えているバッテリーバックアップ式のアブソリュートスケールと絶対位置を移動なしで検出できるアブソリュートスケールがある。

マグネスケールのアブソリュートスケールは後者であり電池を持つ必要がない。

一般に後者のアブソリュートスケールでは、現在位置の番地がインクリメンタル信号の検出と同時に検出できるようになっている。番地の書き込み方法には、グレーコード方式やMコード方式で書き込むか、もしくは波長の僅かに異なる複数のインクリメンタル信号を読み込んで2つのインクリメンタル信号の位相の差を検出する事でアブソリュート位置を表す方法、また、これらを組み合わせるなど多くの方式がある。株式会社マグネスケールの磁気抵抗変化型磁気式スケールでは、Mコード方式で絶対位置を記録している。Mコード方式とは以下に説明する様に、与えられる連続するコードを多くの検出ヘッドで検出し絶対位置を得る方式である^[20]。

MコードとはM系列という2値(0と1)で構成される符号列で、周期が $N=2^n-1$ の巡回符号である。ここで n はMコードを生成する原始多項式における次数であり、スケールにおいてはMコードビットの桁数である。次数毎に原始多項式が有り、ゼロを除く任意の初期値から順次符号列を生成する。例えば、ビットの桁数=原始多項式の次数で、次数8の時の例を下に記す。

生成多項式 $F(x)$ を式(2-11)に示す。各項 x^n の n はデータのビット桁数を表す。 x^n にはその桁のビットの値が入る。+は排他的論理和、次数とビットは逆で次数上位が下位ビットに対応する。初期値8ビットの次のデータは0となる。

$$F(x)=x^0+x^2+x^3+x^4 \quad (2-11)$$

8ビット初期値00000001として

$$x^0+x^2+x^3+x^4 = 0+0+0+0 = 0 \quad (2-12)$$

以下、1つずれたデータ00000010に対して同様に論理計算を行い、符号列00000001000111000100…を得る。

上記符号列を磁気スケール上に磁気記録として形成する方法としては、先に述べたように、磁気抵抗素子は印加される磁場の向きによらず量で抵抗値が変化する特性を有しているため、この特性を用いて、例えば符号列で0になる位置には磁気記録をしないで磁化させない状態として、符号列で1になる位置ではどちらかの向きの磁化を記録する、という方法で符号列を磁気パターンとして記録する。この様子を図2-9に示す。

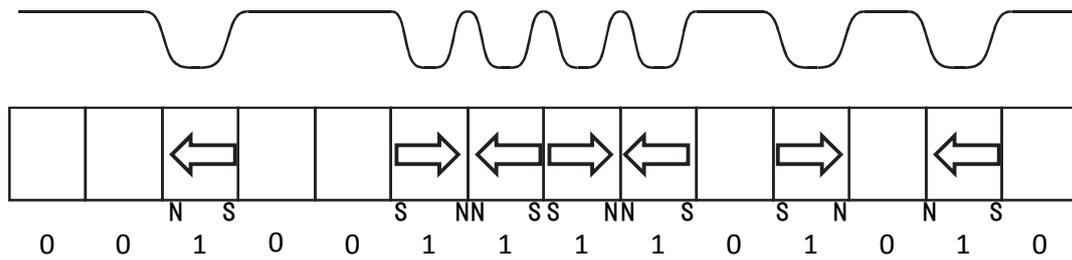


Fig. 2-9 Visualized figure of M-code magnetization

コードの検出はコードの桁数分以上の MR 素子の抵抗値変化で検出し、処理回路により、コードで記録された絶対位置を位置出力に変換後、インクリメンタル信号の位置と合成して位置信号を作成し、出力する。

2-2-3-4 アブソリュート磁気抵抗変化型磁気式スケールにおける信号処理と内挿の原理

磁気式スケールが光学式スケールと同等の精度を達成できるのは、信号処理回路の分解能の高さと補正の精度による。センサーによって検出されるサインとコサインの 2 つの信号は、AD コンバータに入力されてデジタル信号に変換される。2 つの信号が理想的な信号の場合、2 つの信号が作るリサージュ波形は完全な円となり、内挿回路はアークタンジェントを求める作業になる。しかし実際には、サイン信号とコサイン信号には DC 成分が有り、信号振幅も同じ大きさでは無く、2 つの信号の位相差が 90° からずれる事がある。またこれら DC 成分、信号振幅位相差はスケールの場所によって変動する。これらの要因でリサージュ波形は完全な円とはなっていない。

最も大きな誤差を発生させるのは信号の DC 成分で、この他にもサイン信号とコサイン信号のゲインの不一致などがあいまって内挿精度は悪化する。磁気式スケールの信号処理回路では、これらの成分を検出して補正を行い内挿する。図 2-10 に処理回路のブロックダイアグラムを示し、図 2-11 に補正方法を示す。スケールから出力される信号の 1 周期毎に図中の点の値が計測され、DC 成分、振幅差、位相のずれ成分を求める。この値を 1 波長毎に適正な量で補正し完全な円に近づけ内挿位置が出力される。内挿精度は、磁気式の場合で信号波長の $1/3000$ 、信号歪の少ないレーザスケールの場合で $1/5000$ が得られる。

先に述べたアブソリュート信号はインクリメンタル信号に同期して検出される。アブソリュート信号のコードパターンは検出後、先の作成式からデコードして位置信号に変換される。この値はインクリメンタル信号の波数の単位となり、この波数を信号波長倍した後、インクリメンタル信号の内挿から得られる 1 波長内の絶対位置と足し合わせて出力される^{[21], [22]}。

処理回路は電源投入時に取得したアブソリュート位置にその後のインクリメンタル信号の累積で計算された現在位置と、現在のアブソリュート信号とインクリメンタル信号から計算した現在位置を回路内で比較しており、2 つの現在位置の差が

大きくなるとアラームを発生する様にしている。正常動作時は、前者の冗長度の高いインクリメンタル信号を基本とした位置データが出力される。

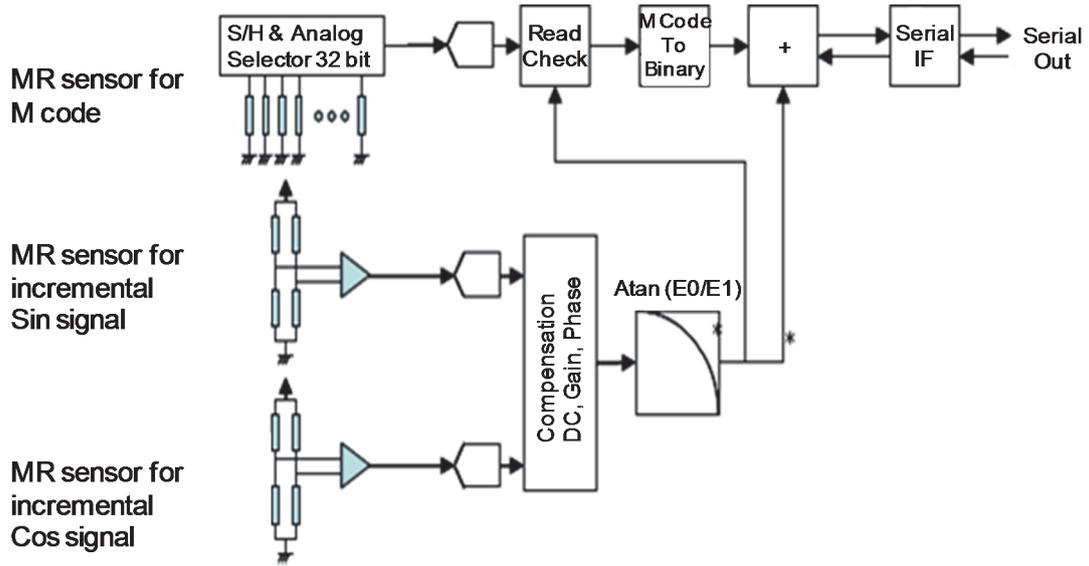


Fig. 2-10 Block diagram of interpolation circuit

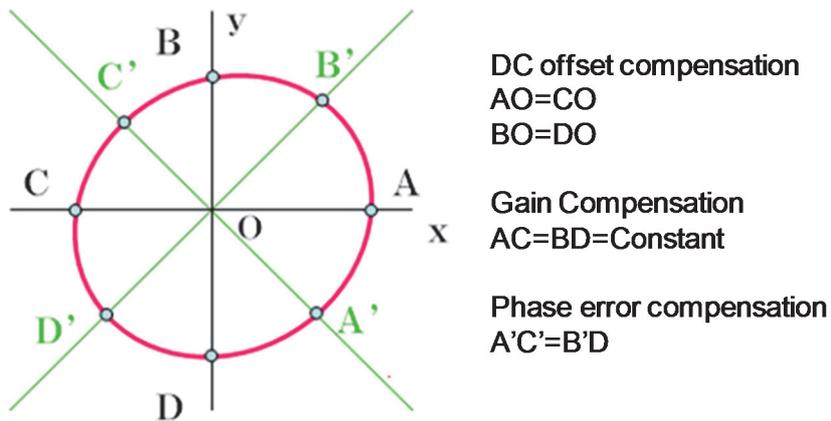


Fig. 2-11 Compensation way for Sin and Cosine incremental signal

2-3 磁気抵抗変化型磁気式スケールの性能の現状

磁気式スケールが世に送り出された当初、磁気式では同じ信号周波数の時のスケールとヘッドの間の距離が光学式に比べると小さくなるため、実用的に必要なヘッドとスケール間の距離をとると、磁気式では信号波長が光学式に比べて大きくなり、結果として分解能が低くなるという問題があった。現在でも、一般的な工作機械用光学式スケールの信号波長は 20 μm であり、株式会社マグネスケールのアブソリュートスケールの信号波長は 80 μm である。しかし、前節で述べたように少なくとも工作機械における制御精度は光学式とくらべて劣ることがないと言うことは明らかである。

この問題を解決したのは、急速に進んだ信号の内挿技術であった。20 年前までは、信号は抵抗分割方式等のアナログ回路により分割されており、内挿速度も精度も悪かった。しかしながら、高分解能の AD コンバータと FPGA 等の高速処理 IC 及び、安価になったメモリによって、非常に高精度で高速の処理ができるようになって新しい内挿方式が開発された。このため、光学式スケールに対して分解能で劣るといふ難点は、一般の工作機械用スケールにおいて完全に払拭されている。むしろ光学式スケールに比べ高い耐振動特性のため、機械精度が上がることが考えられる。

2-3-1 磁気抵抗変化型磁気式スケールの実装例

ここでは、すでに多くの工作機械に搭載されているアブソリュート磁気式スケールについて、具体的な例として高精度高速横型マシニングセンタ DMG 森精機株式会社製 NHX5000 に搭載した例について述べる。この工作機械は自動車、建設機械の切削部品の加工や、油圧バルブ等の加工に用いられるもので、高い機械剛性と熱変位対策を有する省エネルギータイプの高精度機である。そのため、スケールは標準で搭載されており、機械と同じ熱膨張係数を持ち、光学式スケールの半分以下の消費電力である磁気式スケールの搭載により、高精度加工だけでなく暖機運転時間の短縮が図られている。

図 2-12 に搭載機の中のスケール装着部を示す。この機械では株式会社マグネスケール製の 3 台のアブソリュート磁気式リニアスケール SR87 と 1 台のアブソリュート磁気式ロータリエンコーダ RU77 が使用されている。機械の最大加速度は X 軸 1G、Y 軸 1.1G、Z 軸 0.7G で加工物の真円度誤差は 1.97 μm の値がカタログ上に記載されている。

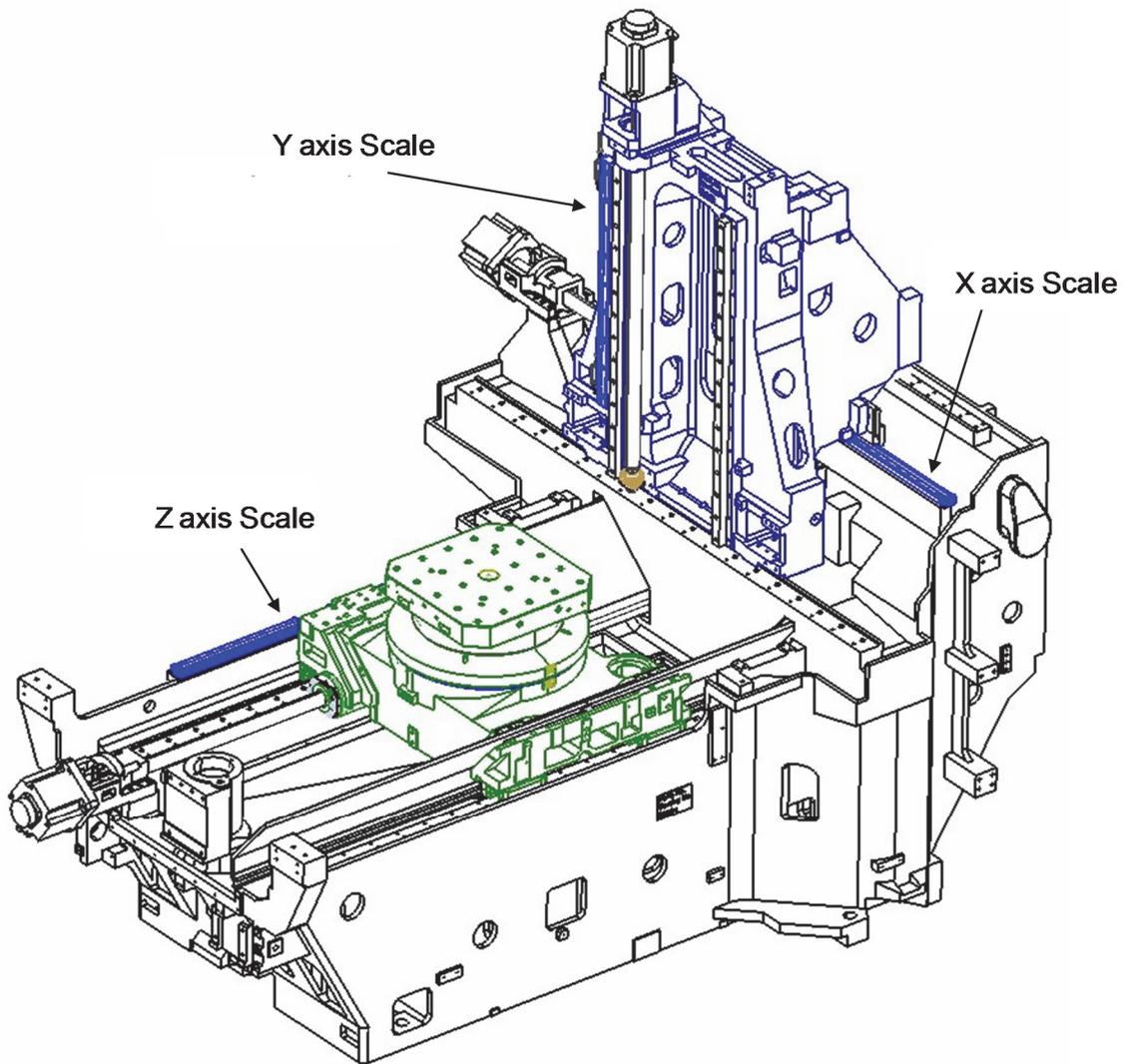


Fig. 2-12 Scale position in NHX5000

2-3-2 リニアスケールを搭載した工作機械の制御精度

次に磁気式マグネスケール単体の精度測定結果と 2-3-1 項で述べたスケール搭載機の精度測定結果を示す。

まず 図 2-13 は、スケール単体の精度表である。横軸は測定長さであり、上段のグラフが累積精度を示し、下段のグラフが内挿精度を示す。

単体の精度測定は室温 $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ の恒温室において、スケールの検出ヘッドの読取ラインとインライン上に設定されたレーザ干渉計をリファレンスとして行われる。計測中のスケールはエアースライド上に固定され、一定速度で移動しながら測定する。計測温度と気圧の補正は計測毎に行っている。

累積精度はスケールの波長の $1/800$ の分解能の AB 相出力の立ち上がりパルスでラッチしたレーザ干渉計の値とスケールの位置データを比較し、その差を出力したものであり、内挿精度を含んでいる。

各位置の内挿精度の値は先の $1/800$ 波長毎に取得される累積精度の 1 波長内の差の最大値と最小値の差を計測点毎にプロットしているものであり、p-p の値である。

このスケールは全長 3 m のスケールである。仕様累積精度は $3+3L$ 以下(単位 μm , L はメートル表示の有効長さ)であり、およそ $12 \mu\text{m}$ であるが、 $2.37 \mu\text{m}$ p-p の精度が得られている。工作機械で使用する際に重要な内挿精度は平均で $0.2 \mu\text{m}$ 以内となっている。

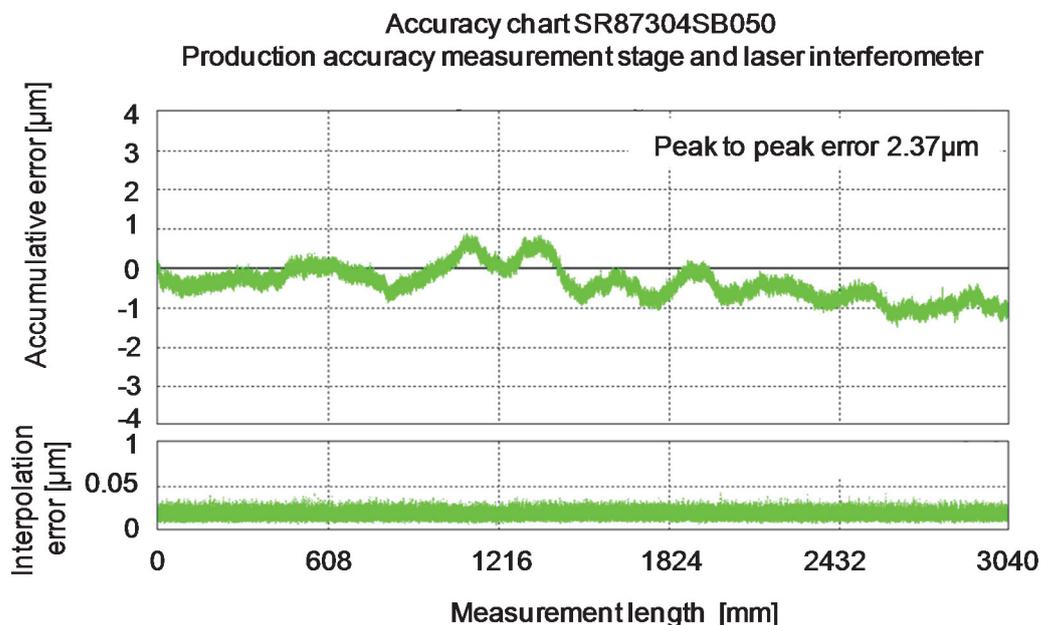


Fig. 2-13 Accuracy chart of scale which measured by measurement stage of production

磁気式スケールの場合、スケール基板をスケール構造体に強固に固定してからスケール格子を記録するため、予め格子を作成したガラス基板をスケール構造体に取り付ける光学式スケールよりも加工組み立て累積精度の点でも条件が良く、取り付け時と精度測定時の変形等による変化も少ない。

次に、機械に搭載時のスケールによる機械制御の精度測定例を 図 2-14(a) に示す。また比較のため、光学式のスケールを、磁気スケールを搭載した NHX5000 と同じ軸配置を持つ DMG 森精機株式会社製 NH5000 に搭載した時の、機械制御の精度測定例を 図 2-13(b) に示す。

計測のリファレンスはレーザ干渉計である。測定された精度は、磁気式スケール、光学式スケールの何れの軸も 4 μm 程度であり、優れた精度が実証されている。しかしながら、機械の制御精度はスケール精度に比べると劣り、再現性も及ばない。その理由は、この機械は優れた機械性能を有しているが、実際に精度の測定を行った加工点付近とスケールが装着されている位置に距離があるためである。制御用スケールの計測軸と加工点の計測軸の間の距離はアッベの誤差を生む。機械の剛性が悪い場合や、さらに精度を上げる場合には、リニアガイドの両サイドにスケールを取り付け、2つのスケールの位置データと加工点の2つのスケールからの距離を計算して制御を行う方法が考えられる。

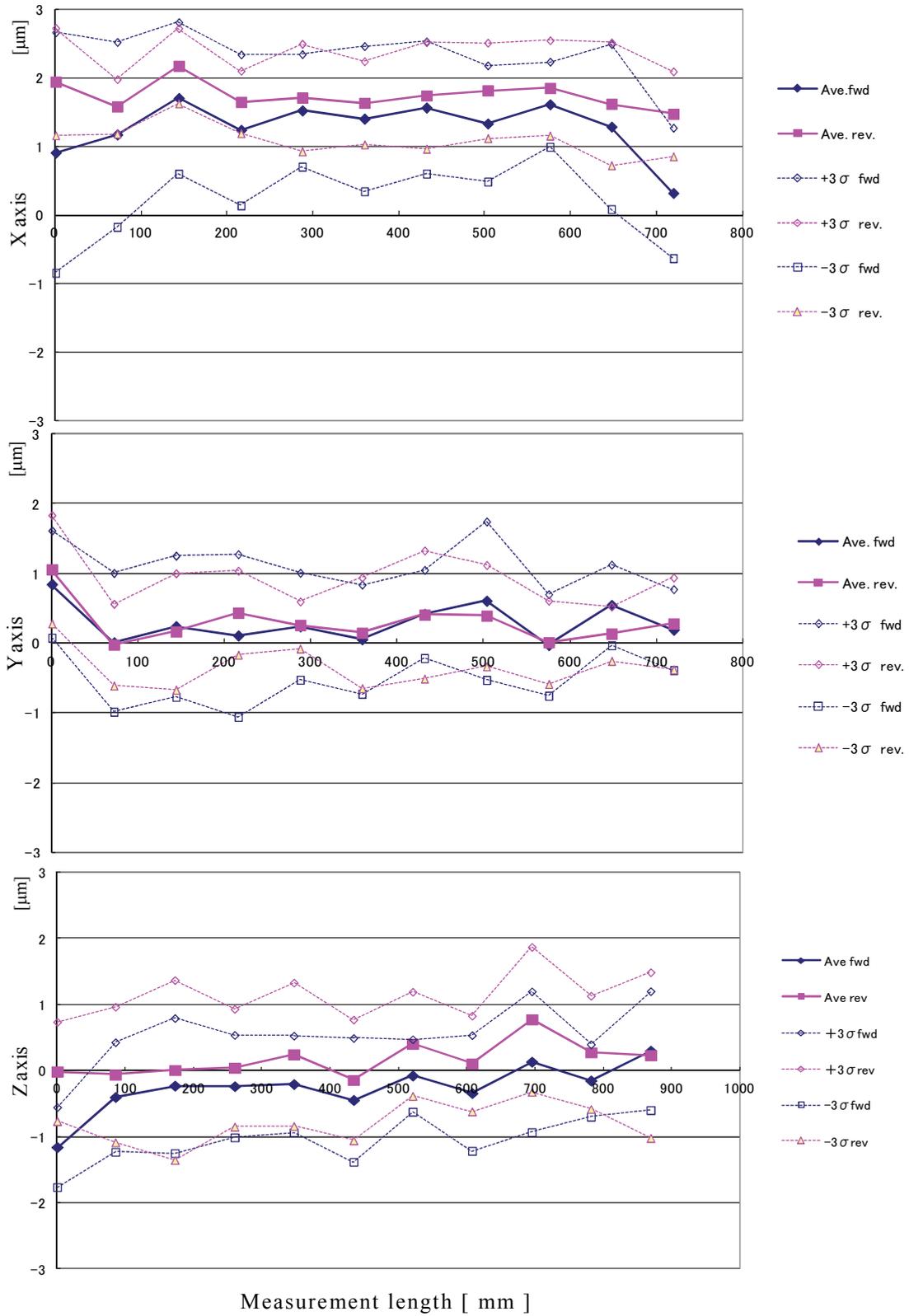


Fig. 2-14(a) Machine accuracy controlled by magnetic scales

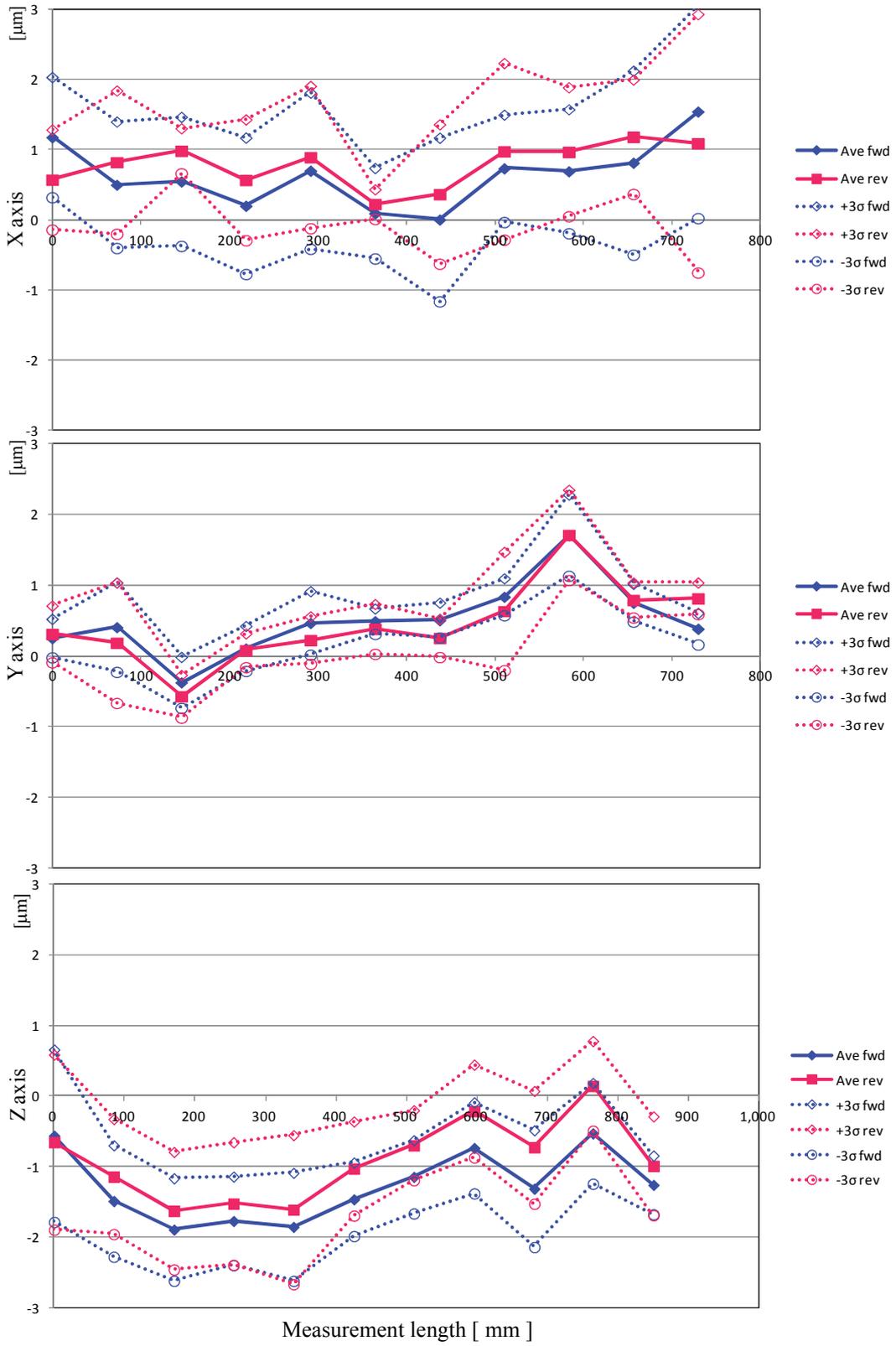


Fig. 2-14(b) Machine accuracy controlled by optical scales

2-3-3 磁気式スケールと光学式スケールの耐環境特性

磁気式スケールにおいては、スケール格子を記録するスケール基板は高い剛性を有する鉄製の機械構造体に、非常に強い接着材で強固に固定されている。そのため、温度変化や振動など外的な環境が変動する際、スケール基板は鉄製の機械構造体と同様な挙動を示す。

一方光学式スケールでは、多くの場合スケール基板に光の透過性が要求されること、さらにスケール格子を形成する際にリソグラフィーの手法を用いるために基板材料に高度の平坦度が要求されることから、鉄などの金属ではなくガラス材料を使用するのが一般的である。ここで注意すべきことは、工作機械の構造体材料はほとんどの場合鉄系であるので、環境温度が変化する際は線膨張係数の差から伸縮量の差が発生することである。この差をどのように吸収するか、具体的には格子を刻んだ脆性材料であるガラスを破壊することなく、どのような方法で工作機械に固定するかが課題になる。

その解決手段として、格子を記録したスケール基板のある一点を工作機械にしっかりと固定して、その他の部分は弾性的な材料で支持する手法がとられる場合が多い^[23]。

以上のように、磁気式スケールと光学式スケールでは、測長のベースとなる格子を記録したスケール基板の支持方法に大きな違いがある。この違いが両スケールの耐環境特性にどのように影響するか、以下のように実験的検討を行った。

- ①外的な振動が加えられた時の出力信号の安定性
- ②環境温度変化に対する位置出力値の変化
- ③クーラントを常時浴びる状況での耐久性

以上の3つを工作機械用スケールの基本的な耐環境特性とし、これらについて実験を行い、その結果を以下に述べる。

2-3-3-1 磁気式スケールと光学式スケールの振動特性

実験に用いたスケールは、磁気式、光学式ともに $0.01\ \mu\text{m}$ の分解能を有する。それぞれのスケールを順番に工作機械の同一軸に取り付け、停止している状態と駆動している状態での出力信号の安定性を比較した。

図 2-15(a) に、工作機械の主電源を入れ、駆動軸が静止している状態（サーボをオフにした）の、磁気式スケールと光学式スケールの出力信号を示す。信号ピークの最大と最小の差は、光学式スケールでは $0.2\ \mu\text{m p-p}$ 、磁気式スケールで $0.14\ \mu\text{m p-p}$ となっている。それぞれの信号の周波数分析を 図 2-15(b) に示す。光学式スケールでは約 $190\ \text{Hz}\sim 300\ \text{Hz}$ 付近にわたり振動レベルが高くなっており、特に $240\ \text{Hz}$ では急峻なレベルの増加が観察される。一方磁気式スケールにおいては $190\ \text{Hz}\sim 300\ \text{Hz}$ 付近での振動レベルの顕著な増加は見られず、 $240\ \text{Hz}$ においてもレベルの増加はあるものの、光学式スケールの 30%程度である。図 2-15(a), (b) では駆動軸のサー

ボはオフであるため、観察された信号の中に制御系の電氣的な振動は入っていない。従って観察されたデータは機械的な振動によるものであり、光学式スケールと磁氣式スケールの差異は外的な振動に対するそれぞれのスケールの特性の差と考えられる。

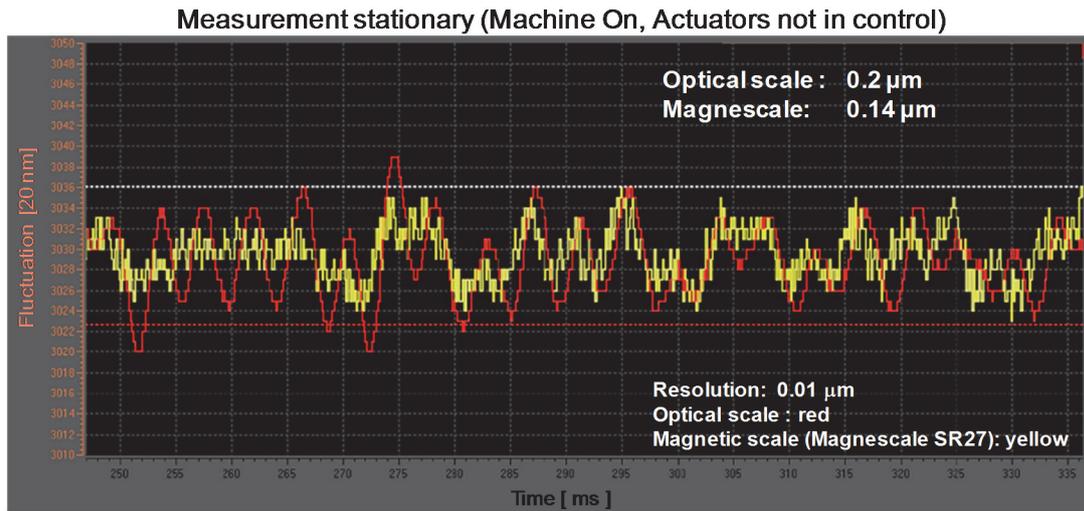


Fig. 2-15(a) Scale signal fluctuation on machine tool (stopped state)

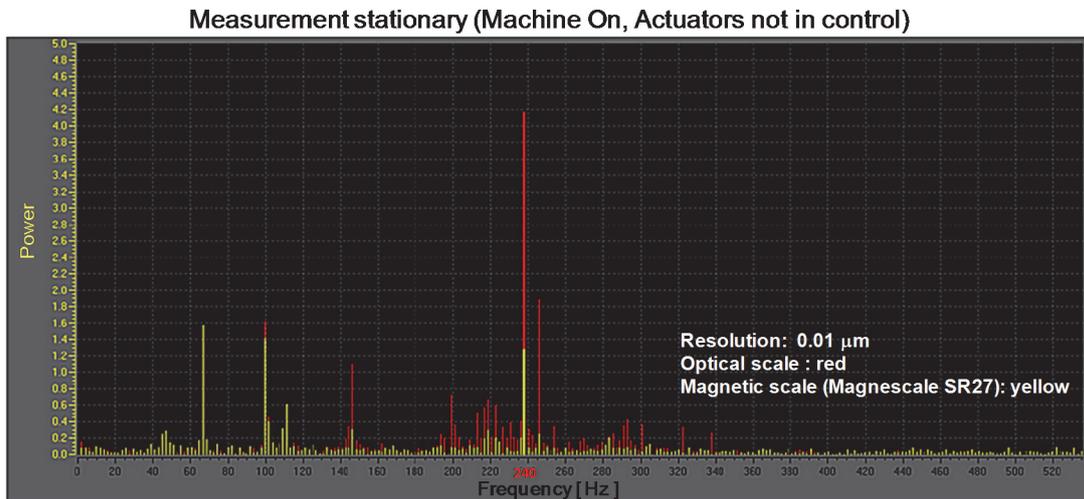


Fig. 2-15(b) Fast Fourier Transform (FFT) of Fig. 2-14(a)

図 2-16(a), (b) に、磁気式スケール及び光学式スケールのそれぞれでフィードバック制御を行い、駆動軸を 0.02 mm/min で運動させた際のテーブル位置信号出力とその周波数分析を示す。位置信号の取得は、第 3 のリニアスケールを用いている。静止時での観察と同様に磁気式スケールと光学式スケールでは位置信号の安定性に差が見られ、ピークの最大と最小の差で比較すると、磁気式スケールで 0.14 $\mu\text{m p-p}$ 、光学式スケールで 0.24 $\mu\text{m p-p}$ となっており、振幅は全体的にやや大きい。両スケールの差異は同じ傾向になっている。周波数分析の結果は、低域において振動レベルの増加が見られるが、この領域では磁気式スケール、光学式スケールの双方ともに同程度のレベル増加であることを考慮すると、位置信号の安定性と同様にその周波数分析の結果も静止時のデータと同じ傾向を示している。この場合も、位置信号の取得は第 3 のリニアスケールで行っているため、観察された位置信号データに制御系の電氣的な振動等は混在せず、純粹に機械的な振動特性を示していると考えられる。

以上のように、磁気式スケールと光学式スケールでは機械的な振動に対する位置信号出力の特性に差があることが明確になった。表 1-1 に示したように、磁気式と光学式ではスケール基板の固定方法に差がある。位置信号出力特性の差がそこに起因すること、すなわち光学式の場合はスケール基板の支持が「1 点で固定、他は弾性支持」方式であるため低い帯域の 240 Hz 付近で共振しやすい、などが示唆されるが、その特定のためにはスケール基板自体の振動特性を測定するなど、さらなる確認が必要である。

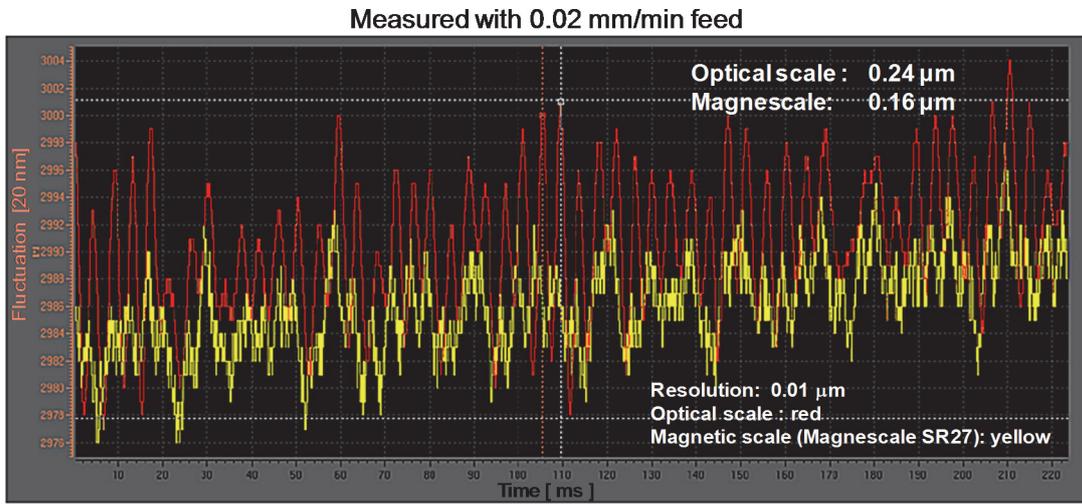


Fig. 2-16(a) Scale signal fluctuation on machine tool (0.02 mm/min feed)

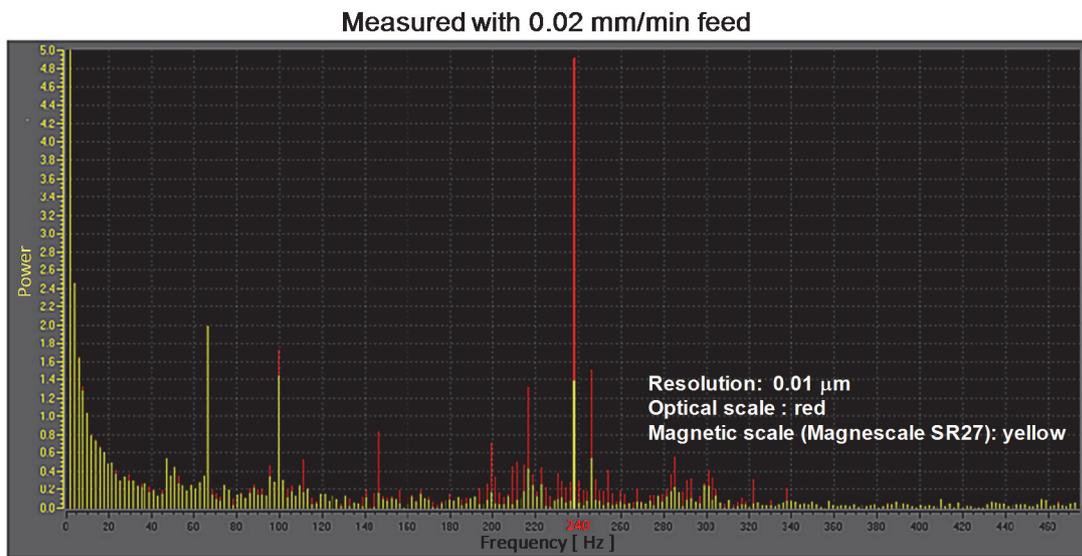


Fig. 2-16(b) Fast Fourier Transform (FFT) of Fig. 2-15(a)

2-3-3-2 磁気式スケールと光学式スケールの温度特性

(1) 実験装置・方法

図 2-17 に実験に使用した装置の構成を示す。工作機械のスケール取り付け部のモデルとして、スケール基板の断面に比較して十分に大きな断面積を持つ鋳鉄製のベースの上に、スケール筐体及び読み取りヘッドを固定し、環境温度が変化した際のスケールの位置出力値を記録した。読み取りヘッドの位置はスケール測定長の中央部と、端部の2か所に設定し、磁気式スケールでは中央部から320 mmの位置、光学式スケールでは中央部から170 mmの位置とした。入手可能であったサンプルの測定長が異なることから、端部のヘッド位置が異なるが、本実験の目的においてはこの差は問題にならないと考える。光学式スケールでは 2-3-3項 で述べたスケール基板の取り付け基準位置はスケール測定長の中央部近傍となっている。

実験装置全体を恒温槽内に入れ、室温から温度差が約10°Cとなるようコントロールした。読み取りヘッド近傍の、スケール筐体上部及び鋳鉄製ベースにおいて熱電対により各点の温度をモニターし、すべての点で温度が均衡状態になった時点で実験を終了した。

(2) 実験結果

図 2-18(a), (b) に、磁気式スケール及び光学式スケールの、温度に対する読み取りヘッドの位置出力値を示す。環境温度の変化に伴い、鋳鉄ベース及びサンプル各点の温度は、ほぼ同じ変化率で推移し、実験開始後、磁気式スケールでは約 160 min, 光学式スケールでは約 120 min 後に均衡温度に達している。この際の磁気式スケールの各読み取りヘッド位置出力値の変化は 1 μm 以内であり、中央部と端部のヘッド位置出力値の相互差は約 0.6 μm である。一方光学式スケールにおいては、温度の変化とともに端部の読み取りヘッド位置出力値は 6 μm の変化が観察された。対して中央部の読み取りヘッド位置出力値は 1 μm 以内であった。

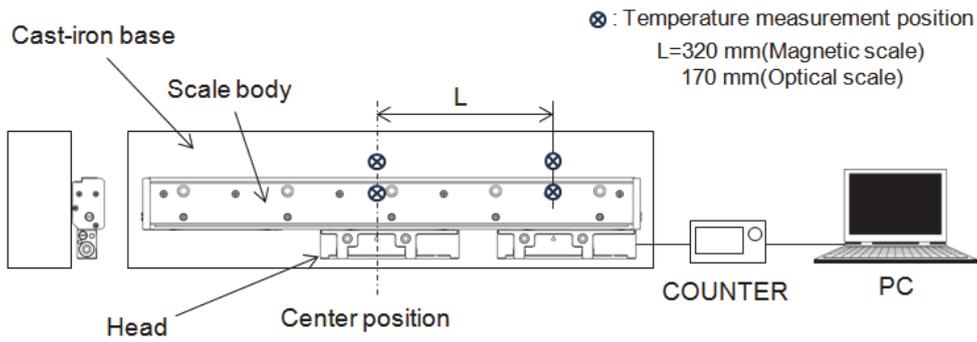
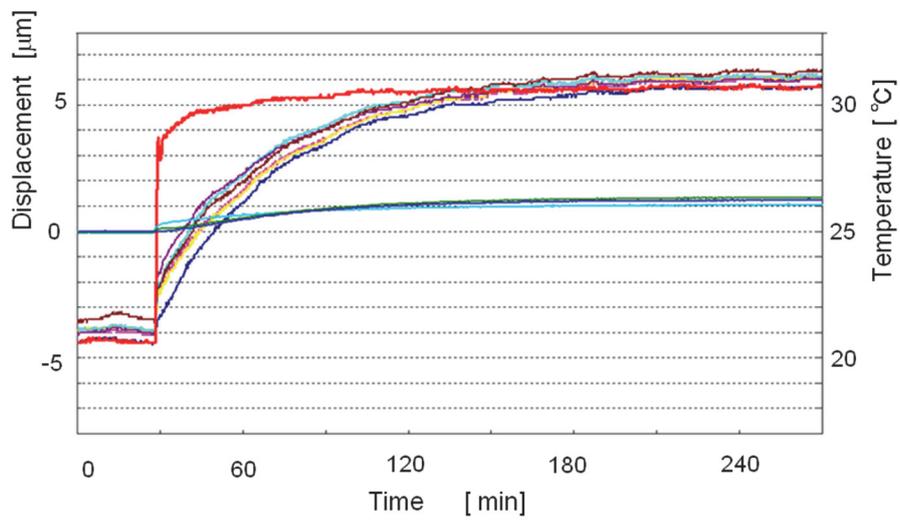
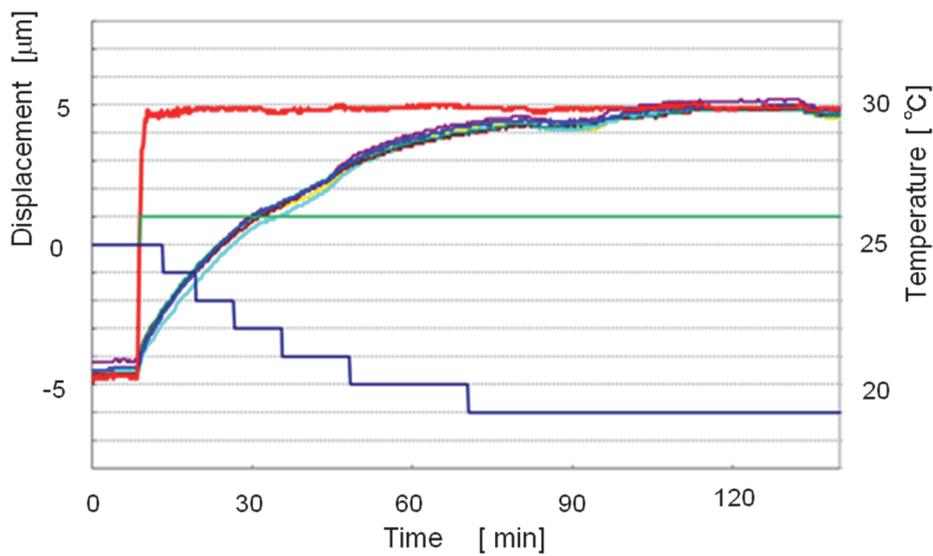


Fig. 2-17 Experiment set up



(a) Magnetic scale



(b) Optical scale

Fig. 2-18 Measured displacement against temperature change

(3) 考察

磁気式スケール、光学式スケールともに、読み取りヘッドは鋳鉄ベースに固定されているので、温度が変化した際もそれらの位置は直下の鋳鉄ベースの位置と同じである。すなわちヘッド位置の変化量は温度変化による鋳鉄の伸縮量と同等である。一方で、「目盛」である格子を記録したスケール基板については、磁気式スケールと光学式スケールでは温度変化時の挙動に差異がある。磁気式スケールのスケール基板は全長が鉄製の構造体に強固に接着され、さらにスケール基板の両端部もネジによって鉄製構造体に締結されているため、温度変化を受ける際の伸縮挙動は鉄製構造体と一体化された構造体としての挙動になる。ここで、スケール基板の断面積とヤング率の積と鉄製構造体の断面積とヤング率の積を比較すると、鉄製構造体のものが約 15 倍であるため、両者を一体化した構造体は鉄とほぼ同等な変形挙動を示す。従って、スケール基板に記録された各格子（目盛）の温度変化による位置変化も鉄の伸縮とほぼ同じとなり、格子を読み取るヘッドとの相対的な位置変化はほとんど生じないため、図 2-18(a) において、中央部ヘッド及び端部ヘッドのカウント値がほとんど変化しない結果となったと考えられる。

光学式スケールでは、スケール基板は中央部の 1 点でスケール筐体に強固に固定され、その他の部分は弾性的に支持される構造である。スケール筐体と鋳鉄ベース間の固定方法もまた、中央部の 1 点においてのみ強固な固定がなされ、周囲の各点では、ネジが締結される部分とスケール筐体本体部の間に図 2-19 に示すようにスリットが設けられる方法である。すなわち、スケール筐体と鋳鉄ベースの位置関係は中央部の固定点のみで決定される。したがって、本実験装置においては、スケール基板と鋳鉄ベース間の位置関係は中央部の 1 点で固定されることとなる。各部の位置は温度変化に対するそれぞれの材料特性に従って変化する。

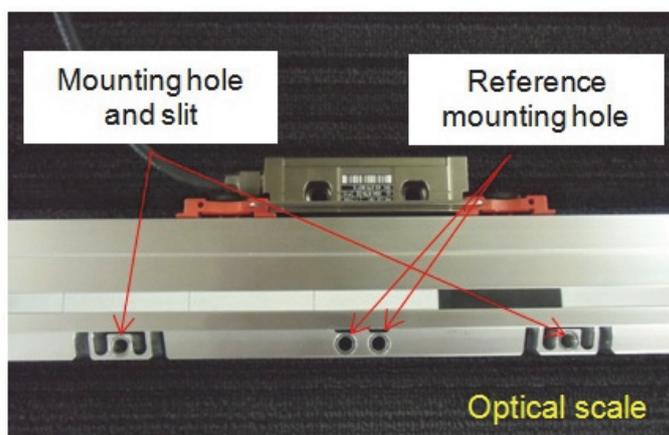


Fig. 2-19 Mounting holes of optical scale

中央部に読み取りヘッドがある場合では、ヘッドが固定されている鋳鉄ベースとスケール基板間は機械的に強固に固定されているため、環境温度が変化して各部に異なる伸縮が生じて、ヘッドとスケール基板間の相対位置の変化はなく位置出力値は一定のままである。ヘッドが端部にある場合は、ヘッド位置が鋳鉄ベースの伸縮によって変化する一方で、スケール基板はその材料であるガラスの熱的挙動に従って位置変化をする。ゆえに鋳鉄とガラスの線膨張係数の差により位置の相対変化が生じ、読み取りヘッドの位置出力値となって観察されたと考えられる。

観察された位置出力値の変化量 $6 \mu\text{m}$ から、スケール基板の線膨張係数を逆算すると約 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ となり、材料であるガラスの線膨張係数より高い値となった。これはスケール筐体の材料がアルミ合金で高い線膨張係数を持つこと、また、中央部を除いてスケール基板のスケール筐体に対する支持方法は「弾性的」であり、固定的に支持はしないものの、ある程度の拘束は不可避であるため、スケール基板が引張りの力を受けたことが要因であると推測される。

2-3-3-3 磁気式スケールの耐クーラント性

磁気式スケールは原理的に光学式スケールに比べクーラント等の汚れに対する適応力がある。光学式スケールでは、光学系の中に水が入ると光路が変化したり、光が通過できないということも起こるため、計測を続ける事ができなくなる。工作機械においては、クーラントを大量に使用するため、常時湿度が高く結露も生じ易い。マグネスケールにおいては、結露は何の妨げにもならないが光学式スケールにとっては、光を散乱する結露状態では信号を得る事ができない。このため、光学式スケールではスケール本体を筐体でカバーし、筐体内にドライエアーを噴出して結露を防いでいる。マグネスケールでは切屑などのゴミの混入を防ぐため、エアーの使用を推奨しているが結露を心配する必要はない。

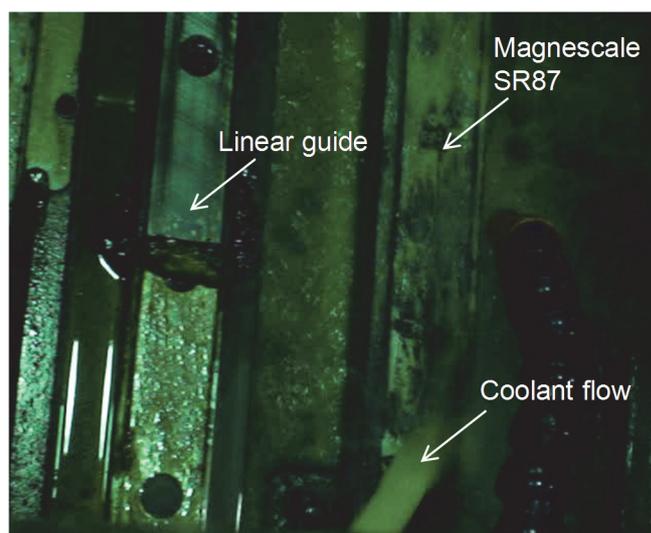


Fig. 2-20 Magnetic scale in coolant

図 2-20 に実際の工作機械におけるスケールの装着状態を示す。この機械は、高精度の研削盤であり極端な例ではあるが、光学式スケールを同様に使用した場合、一晩の連続運転ができなかった。マグネスケールが採用されたが問題を発生していない。

2-4 結言

本章では、研究の第 1 段階としての $0.1 \mu\text{m}$ レベルの加工精度における工作機械のリアルタイム運動誤差補正技術の研究に必要な位置検出装置として、最適なりニアスケールを採択すべくその必要条件を述べるとともに、研究に使用するリニアスケールの選定のための評価実験結果を明らかにした。磁気式と光学式ではその原理的な点から工作機械の使用環境には磁気式が有利であることは明らかであるが、これまで両者の信号波長の差から単純に光学式の方が、精度が高いという見解があった。しかし、最近の磁気式スケールにおいては検出回路、内挿精度などの精度追及の技術開発により、光学式に比べて分解能に全く差が見られないだけでなく、工作機械の実稼働状態における振動あるいはクーラントの影響など環境条件によっては、むしろ磁気式が勝る結果が確認できた。温度変化による影響は、第 1 章の表 1-1 の線膨張係数の違いによる差の影響が実験により確認されたが、これは機械構造設計、制御設計の考え方によりどちらの特性を選択するかという問題と考えられる。いずれにしても、スケールの取り付けは、スケール原点が機械として熱変形を受けにくい点に来るように取り付けることが望ましく、これは、スケールを工作機械の機構設計の中でどう扱うかという機械設計上の課題と考える。

以上の実験結果より、本研究における第 1 段階の補正システム検討には磁気式スケールであるマグネスケールを採用することとした。

第 3 章 磁気式スケールの 3 次元への拡張

-原理とその実現可能性検証-

3-1 序言

本章は、第2章の序言で述べた、1軸の磁気式リニアスケールに、運動誤差の補正に必要な軸方向に直交する2方向の検出範囲を持たせた3次元スケールを提案、その実現の可能性を検証するものである。

運動誤差、環境温度変化による誤差、切削反力等の動的に変動する力及び制御ソフトウェアが、工作機械の加工精度に大きく影響することが指摘され、また同時に、精度悪化を抑制する多くの方法が提唱されている^[24]。例えば、より高精度の機械加工を行うため、あらかじめ機械の運動誤差を測定しておき、誤差補正分を含んだ指令値を生成して繰返し再現性のある機械の運動精度を向上させる方法はよく知られている^[25]。第5章では本研究では、高精度の2次元ホログラフィックスケールを用い、実際の工作機械の補正値をサブナノメートルの分解能で取得して指令値を補正し、運動精度が補正を行わない場合に比べ格段に改善される事を提案すると共に実際の機械で検証実験も行っている。また、大面積の2次元もしくは3次元のスケールを用いて補正を行う制御方式は良く知られており^[26]、高精度ステージに関する発明も報告されている^[27]。

このように原理的に有効であることは確認できているが、工作機械において実際にこの方式で補正機能を実現しようとした時に、以下に述べる克服すべき課題が浮かび上がる。

- (1) 2次元のスケールは、検出原理上検出面積と同等な大きさのスケール面積を必要とする。そのため、工作機械に常時搭載すると機械自体の大きさが大きくなるだけでなく、2次元スケールの搭載による機械設計上の制約が大きい。
- (2) 2次元スケールは1次元のスケールに対し製造コストが高いことから、一般的な高精度工作機械の精度において、経済的な制御を実現しようとする時には過剰コストとなることが予測される。
- (3) 本研究で検証実験に用いた2次元ホログラフィックスケール等のレーザスケールはゴミ・汚れなどを嫌うため、クーラントや切屑、さらにはオイルミストなどをともなう工作機械の使用環境条件では厳重な保護対策が不可欠となるが、検出面積全体を切屑、クーラントやオイルミストから完全に保護する事は構造的にかなりハードルが高い。

以上の理由で、現状では、工作機械において制御用もしくは補正用に、2次元スケールを常時使用する事は、非常に高精度な機械に限らざるを得ない。常時使用しない方法としては、機械の組み立て調整時のみに2次元スケールを使用して運動精度を測定し、補正値を取得後に2次元スケールを取り外して常時補正をかけながら

運転するという方法もある。しかしこの場合は、加工時の切削反力による運動誤差の動的な変化、また、周囲環境や経時的な変化で補正值が変わる可能性が大きい。

そこで、本章では、軸間の補正はできないが、精度を落とす主運動方向に付随した横ずれを、制御用の1次元スケールに、主計測方向に直交する2方向の小区間計測機能を追加して補正する方法を検討した。ベッドとコラム間の相対運動を、主運動方向に加え、それに付随する直交方向の動きも含め常時モニターして、初期の補正值からのずれが大きくなった場合に再度補正值の取得を促す事で、経時的な変動に対する再補正が可能になる。また切削反力等による動的な運動誤差変動の補正も追加することができるため、補正精度を上げられる可能性があると考えた。

この方法では、通常の制御用1次元スケールに追加するのは小区間に限定した検出機能なので、スケールの大きさとしては2次元スケールに比較して大幅に小型化が可能である。従って上述した課題(1)、(2)に対する解決策になり得る。また課題(3)に対しては、第2章で述べたように磁気式が有利である。

提案した新方式のスケールを検討するにあたり、まず加工物の重量や切削反力によるベッドの変位がどの程度であるか、代表的な工作機械モデルを用いて検討し、スケールでこれを計測する場合に必要な計測範囲を求めた。その結果をもとに、補正用スケールが、耐環境性に優れた磁気式スケールで設計が可能であることを示し、その基本的な性能を、スケールを実際に試作して評価した。

3-2 補正用スケールに要求される測定範囲

図3-1に加工時の切削反力、テーブル移動の加減速時の慣性力による運動誤差の計算を行った小型の工作機械のモデルを示す。各変数を以下のように定義した。

F_x : Cutting counterforce in X direction	A_x : Inertial force due to X axis acceleration
F_y : Cutting counterforce in Y direction	A_y : Inertial force due to X axis acceleration
F_z : Cutting counterforce in Z direction	$R1\sim R4$: Counterforce acting on linear motion bearing blocks (in Y direction)
W_x : Gravity force of X table	
W_y : Gravity force of Y table	

通常スケールはリニアガイド近傍に設置されるため、スケールの主測定方向と直交する方向に必要な測定範囲は、負荷変動によるリニアガイドブロックのたわみ変位量と同等とした。

まず自重と切削反力の釣り合いと、ガイドの周りのモーメントの釣り合いの条件式を求める。

Y方向の力の釣り合いより

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 - W_x - W_y - F_y = 0 \quad (3-1)$$

A点まわりのモーメントの釣り合いから

$$F_z Y_1 - F_y Z_1 + W_x Z_2 - (R_3 + R_4) Z_3 = 0 \quad (3-2)$$

B 点周りのモーメントのつり合いから

$$(W_x + W_y + F_y) X_1/2 + F_x Y_1 - (R_2 + R_4) X_1 = 0 \quad (3-3)$$

次に、リニアガイドブロックからの反力 $R_1 \sim R_4$ の作用点が長方形の頂点に配置されるという幾何学的条件を考慮するため、 $R_1 \sim R_4$ を各点の変位に応じたバネ力により表す。各点の変移量をそれぞれ、 $y_1 \sim y_4$ 、バネ定数は各点で共通とし k とすると、

$$R_1 = ky_1, \quad R_2 = ky_2, \quad R_3 = ky_3, \quad R_4 = ky_4, \quad (3-4)$$

ここで、 $y_1 \sim y_4$ は（同一平面上の）長方形の頂点に位置することより、4 点の中心位置での変位量は整合するので、

$$y_1 + y_4 = y_2 + y_3 \quad (3-5)$$

式(3-4) および 式(3-5) より幾何学的条件を示す以下の式を得る。

$$R_1 + R_4 = R_2 + R_3 \quad (3-6)$$

以上で 4 つの未知数 $R_1 \sim R_4$ に対して 4 つの条件式が得られた。

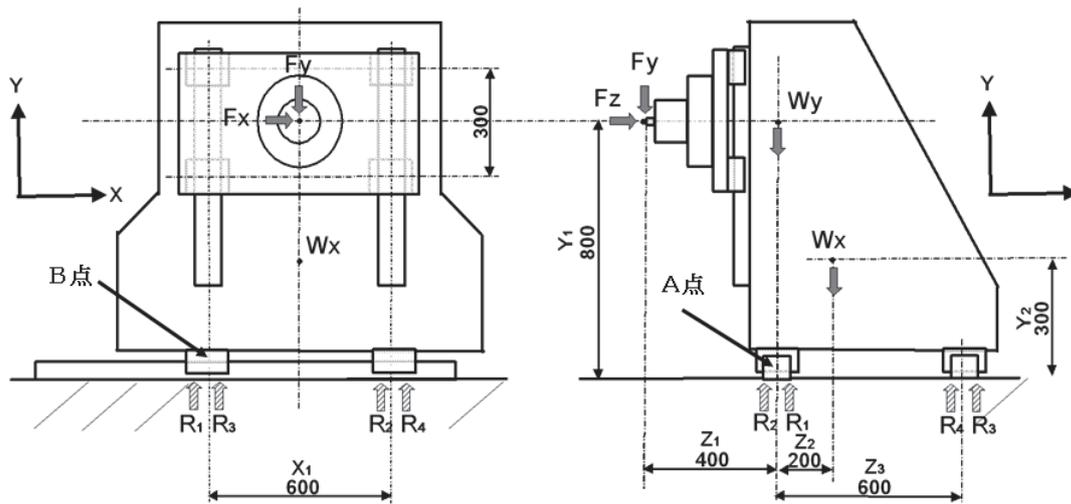


Fig. 3-1 Model for motion errors calculation

Table 3-1 Values for error calculation

W_x	6 kN	F_x	± 5 kN
W_y	2 kN	F_y	± 5 kN
A_x	9.8 m/s ²	F_z	5 kN
A_y	9.8 m/s ²		

表 3-1 に、モデルとした工作機械で想定する各部の重量、運動の加速度および切削反力を示す。

表 3-1 の値を用い、式(3-1), (3-2), (3-3), (3-6) を解き、リニアガイドブロックの反力 R の最大値と最小値を求めると、

$$R_{max} = 9.3 \text{ kN}, \quad R_{min} = -7.8 \text{ kN} \quad (3-7)$$

モデルで想定しているリニアガイドは THK 社製 LM ガイド HSR45LC0 である。公開されているガイドの剛性線図 (荷重-変位線図) ^[28] から 式(3-7) に示す力の変化によるリニアガイドブロックの変位量の幅を求めると、約 25 μm となる。

25 μm は現在の機械の精度から考えて無視できる値ではなく補正が必要であると考える。

同様に、自重と、ベッド移動に伴う慣性力によるリニアガイドブロックの変位変動を求める。ベッドの移動加速度は、モデルとした工作機械が想定している実際の加速度と、さらに市場における高加速度工作機械の加速度を考慮して、9.8 m/s² (1G) とした。

Y 軸が移動する場合の慣性モーメントのつり合いから

$$W_x Z_2 = (R_3 + R_4) Z_3 \quad (3-8)$$

$$(R_1 + R_2) Z_3 - (W_y \pm A_y) Z_3 - W_x (Z_3 - Z_2) = 0 \quad (3-9)$$

移動加速度は 1G であるので、 $A_y = W_y$

$$\therefore (R_1 + R_2) Z_3 - (W_y \pm W_y) Z_3 - W_x (Z_3 - Z_2) = 0 \quad (3-9')$$

同様に X 軸が移動する場合の慣性モーメントのつり合いから

$$A_y Y_1 + A_x Y_2 + \frac{(W_x + W_y) X_1}{2} = (R_2 + R_4) X_1 \quad (3-10)$$

$$-A_y Y_1 - A_x Y_2 + \frac{(W_x + W_y)X_1}{2} = (R_1 + R_3)X_1 \quad (3-11)$$

移動加速度は1Gであるので、 $A_y=W_y$ 、 $A_x=W_x$

$$\therefore W_y Y_1 + W_x Y_2 + \frac{(W_x + W_y)X_1}{2} = (R_2 + R_4)X_1 \quad (3-10')$$

$$\therefore -W_y Y_1 - W_x Y_2 + \frac{(W_x + W_y)X_1}{2} = (R_2 + R_4)X_1 \quad (3-11')$$

また、式(3-6)はこの場合も成立するので、式(3-8)~(3-11')のつり合い式に加えて加速度によるRの最大値と最小値を求めると、

$$R_{\max} = 9.3 \text{ kN}, \quad R_{\min} = -7.8 \text{ kN} \quad (3-12)$$

これによるリニアガイドブロックの変位量の幅は約10 μm となつて、やはり配慮すべき値となっている。

以上で求めたこの動的な変位変動量に加え、LMガイドの走行精度、さらに経時的な変動要素を考慮し、スケールに求められる計測範囲を以下の考え方で設定した。

計算に使用したモデルにおけるLMガイドブロックの動的な変位変動量は35 μm であるので、工作機械一般におけるLMガイドブロックの動的変位変動を、マージンを含めて70 μm と設定した。

また、LMガイドの走行精度はTHK社カタログ^[29]より20 μm とし、さらに経時的な変動要素として10 μm を見込んだ。合計すると、予想されるガイドブロックの変動量はおおよそ100 μm となる。

したがって、100 μm の範囲で主計測方向に直交する方向の計測を可能にすれば、目的とする計測と、それを用いた工作機械の運動誤差の補正が可能になると考えた。

3-3 補正用磁気式スケールの検出原理と補正方法の提案

図 3-2 に提案する補正用磁気式スケールの原理図を示す。

補正用磁気式スケールは、スケール側に X 軸方向のアブソリュートコードが記録されたスケール部と、その両側に 1 本ずつ、合計 2 本のインクリメンタルスケール部を有し、検出側は、アブソリュートスケール検出部と各インクリメンタルスケールに対応する合計 4 つのインクリメンタル検出部から構成されている。図中、X 軸方向が主移動方向、Y 軸方向はスケール面内で主移動に直行する方向である。スケール中央のアブソリュートスケール部には M コードパターンが記録されており、その両サイドにはインクリメンタルスケール検出用パターンが、Y 軸方向から θ の角度で X 軸対称に記録されている。図 3-3 は、アブソリュートスケールと 2 つのインクリメンタルスケールの磁気記録状態を模式的に示したもので、Y 軸方向から θ の角度に、互いに逆向きに記録位相が傾いて記録されている様子を示している。

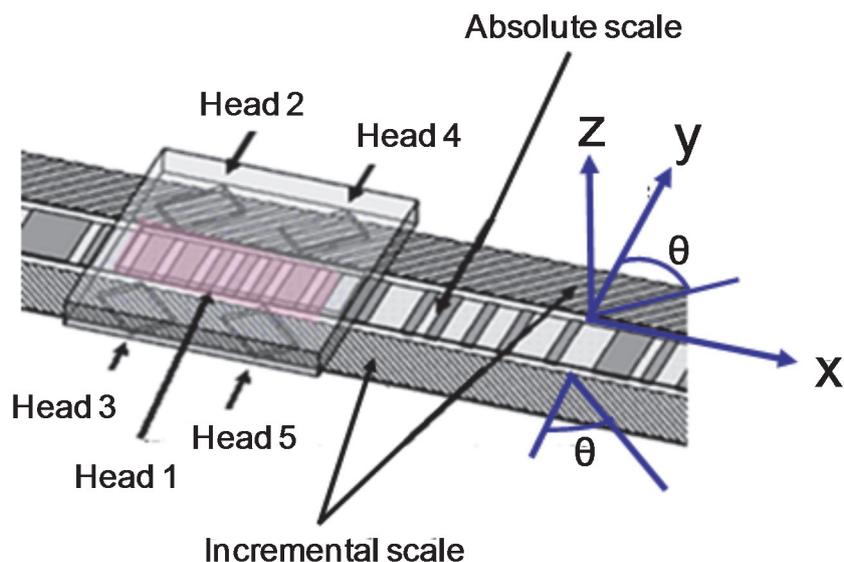


Fig. 3-2 Example of magnetic scale for motion control compensation

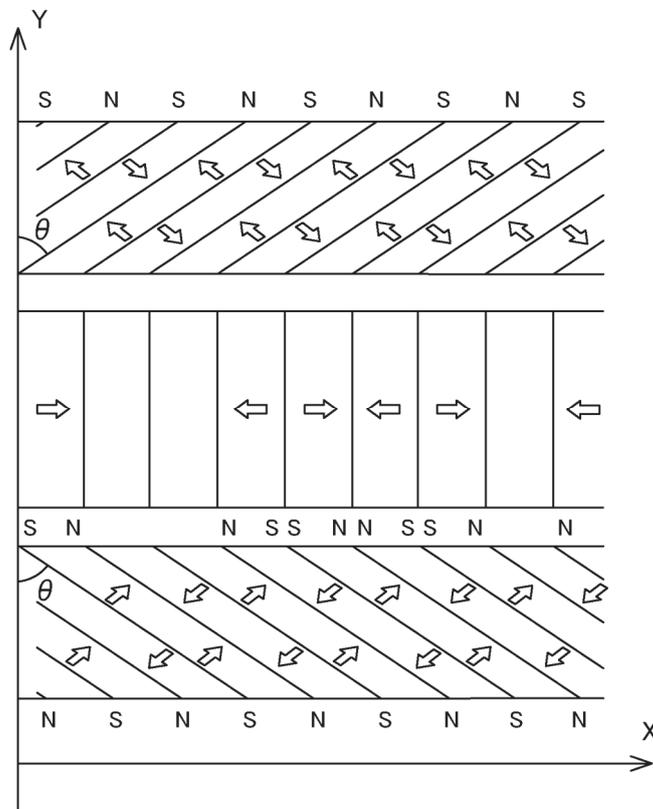


Fig. 3-3 Visualised figure of Fig. 3-2's magnetic scale

ヘッド1はMコードパターンからアブソリュート信号を検出するヘッドである。ヘッド2~5によりインクリメンタル信号を検出し、その検出値からX, Y軸方向それぞれのインクリメンタル移動量が算出され、同時に信号の強度を測定することでZ方向の移動量が計測される。それぞれの方法を以下に説明する。

3-3-1 X, Y 軸方向の測定

X, Y 軸方向の測定原理を, ヘッド 2, 3 を例にして説明する. 図 3-4 に, インクリメンタルヘッドの検出値と XY 移動量の関係を示す. ヘッドで検出される値は, X 軸方向・Y 軸方向それぞれの移動量のうち, 記録された信号パターンと直交する成分である. ヘッド 2 およびヘッド 3 の XY 軸方向の移動量を, Xh_2 , Yh_2 および Xh_3 , Yh_3 , 検出値を Sh_2 , Sh_3 とすると

$$Sh_2 = Xh_2 \cos(\theta) + Yh_2 \sin(\theta) \quad (3-13)$$

$$Sh_3 = Xh_3 \cos(\theta) + Yh_3 \sin(\theta) \quad (3-14)$$

ヘッド 4, 5 についても同様に計算し,

$$Sh_4 = Xh_4 \cos(\theta) + Yh_4 \sin(\theta) \quad (3-15)$$

$$Sh_5 = Xh_5 \cos(\theta) + Yh_5 \sin(\theta) \quad (3-16)$$

ヘッド 2 と 3, ヘッド 4 と 5 の距離がそれぞれ小さく, ヨーイングによる XY 軸方向移動量の差が十分小さいとすると,

$$Xh_2 \cong Xh_3, \quad Yh_2 \cong Yh_3 \quad (3-17)$$

$$Xh_4 \cong Xh_5, \quad Yh_4 \cong Yh_5 \quad (3-18)$$

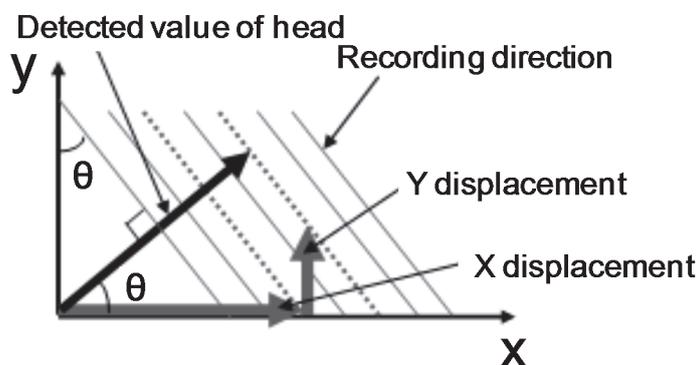


Fig. 3-4 Relationship between detected value of head and real X Y displacement

式(3-17) を 式(3-13), (3-14) に代入した結果の和と差から、ヘッド 2, 3 の X 軸, Y 軸方向移動量として以下を得る.

$$Xh_2 \cong Xh_3 = \frac{Sh_2 + Sh_3}{2 \cos(\theta)}, \quad (3-19)$$

$$Yh_2 \cong Yh_3 = \frac{Sh_2 - Sh_3}{2 \sin(\theta)} \quad (3-20)$$

ヘッド 4, 5 についても同様にして

$$Xh_4 \cong Xh_5 = \frac{Sh_4 + Sh_5}{2 \cos(\theta)}, \quad (3-21)$$

$$Yh_4 \cong Yh_5 = \frac{Sh_4 - Sh_5}{2 \sin(\theta)} \quad (3-22)$$

以上で、ヘッド 2~5 の XY 移動量が求められた.

さらに、式(3-20) と 式(3-22) の差をとることにより、XY 軸平面内の傾き、すなわちヨーイングが算出される.

3-3-2 Z 方向の測定

以上で述べてきた X 軸, Y 軸方向それぞれのインクリメンタル信号を検出するヘッドは、原理的にスケールとヘッドの間の距離により信号強度が変化する特性を持つ。信号強度の変化の様子は記録波長とヘッドの設定位置によって変わるが、スケールとヘッド間距離と信号出力の関係が明確に記述できる条件を設定することにより、4 つのインクリメンタル信号の強度からそれぞれのヘッドとスケール間のギャップを Z 軸方向位置として検出が可能である。

実際の、Z 軸方向位置と信号強度の関係、また Z 軸方向位置の具体的な計測方法については、使用する記録波長やセンサー位置の設定に大きく依存し、それらは結果的にスケールとしての基本性能である主方向の測定精度に密接に関係するため、それらを 3-4 節 で包括的に述べる。

3-3-3 補正方法の提案

図 3-2 におけるヘッド 2, 4 のギャップの平均とヘッド 3, 5 のギャップの平均の差を計算することでローリングが算出できる。また、ヘッド 2, 3 のギャップの平均とヘッド 4, 5 のギャップの平均の差からピッチングが検出でき、3-3-1 項, 3-3-2 項の結果と合わせて、X, Y, Z 軸およびそれぞれの軸まわりの回転軸の、全方向のモニターが可能となる。

磁気式スケールは耐環境性能が高いため、本スケールを工作機械に取り付け、各軸の動きを合成して補正して制御を行う事ができれば、加工中の機械の運動誤差の補正を行う事ができ、誤差を低減できる可能性があると考えられる。またこのスケールを使用すると、機械の誤差の経時的な変化が計測できる。よって予め大型の光学式 2 次元スケールで校正した機械の誤差が経時変化により規定値よりも大きくなった場合に、警告を出して機械を止め、再度 2 次元スケールによって校正する事を促す事で精度を上げる事が可能となる。

図 3-5 に本方法で補正する簡単な機械モデルを示す。

このモデルにおけるそれぞれの方向の計測値を

X軸スケールの計測値	X_x	Z軸スケールの計測値	Z_z
X軸並行動	X_y	Z軸並行動	Z_x
X軸上下動	X_z	Z軸上下動	Z_y
X軸ピッチング	XR_y	Z軸ピッチング	ZR_x
X軸ヨーイング	XR_z	Z軸ヨーイング	ZR_y
X軸ローリング	XR_x	Z軸ローリング	ZR_z
Y軸スケールの計測値	Y_x		
Y軸並行動	Y_y		
Y軸上下動	Y_z		
Y軸ピッチング	YR_y		
Y軸ヨーイング	YR_z		
Y軸ローリング	YR_x		

とする。

L_x, L_y はステージ中心から Y 軸スケール, X 軸スケールまでのそれぞれの距離, Z はインライン取り付けがされている事を仮定すると $L_z = 0$ となり, X 軸方向の移動量 X , Y 軸方向の移動量 Y , Z 軸方向の移動量 Z はそれぞれ, 以下の様に表される。

$$X = X_x + Y_x + Z_x + L_x XR_z + Y_x YR_z + Z_z ZR_y \quad (3-23)$$

$$Y = Y_y + X_y + Z_y + L_y YR_z + X_x XR_z + Z_z ZR_x \quad (3-24)$$

$$Z = Z_z + X_z + Y_z + L_x XR_x + L_y YR_y + X_x XR_y + Y_y YR_x \quad (3-25)$$

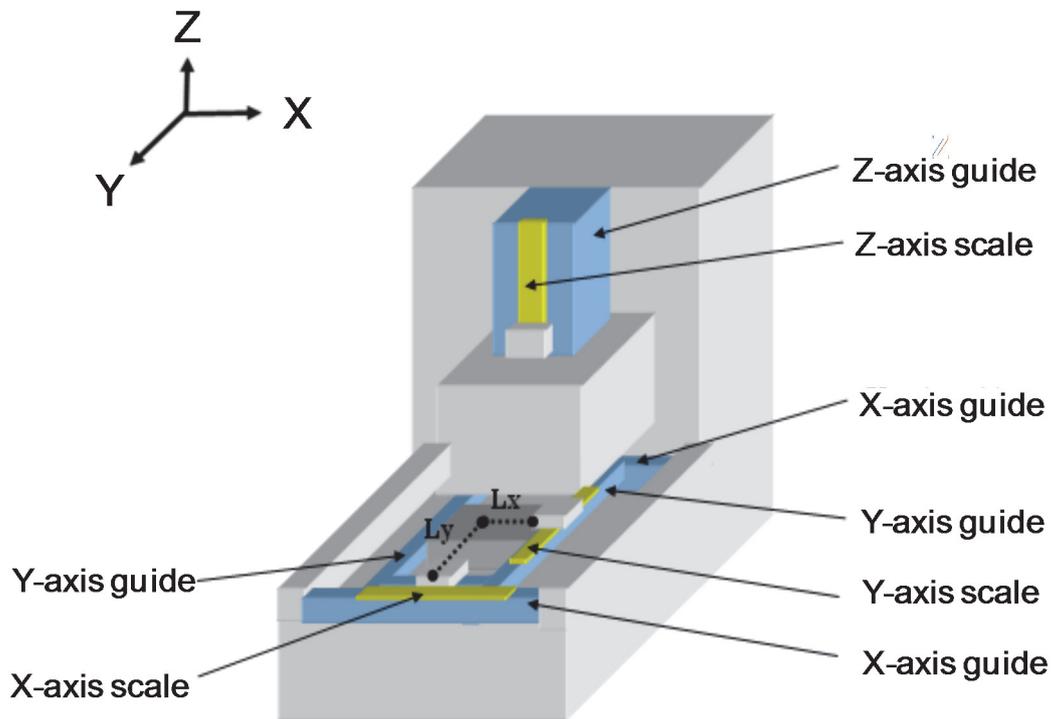


Fig. 3-5 Machine tool model for motion control compensation

3-4 補正用磁気式スケールの試作と性能評価

3-4-1 Z 軸方向検出に必要な信号波長

Z 軸方向の計測は、インクリメンタル信号の強さが、スケールとヘッド間距離によって変化することを利用して行われる。

スケールから出る磁場は、スケールからの距離と記録波長の逆数で指数関数的に減衰し、式(3-26)^[30]で表される。

$$H = \frac{I_m}{2\mu_0} \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cdot e^{(-2\pi Z/\lambda)} \cdot (e^{\pi\delta/\lambda} - e^{-\pi\delta/\lambda}) \quad (3-26)$$

ここで H は磁場、 I_m は磁化、 λ は記録波長であり、 Z はスケールからの距離を、 x はスケールの主移動方向の位置を、 δ は記録の深さを表す。

図 3-6 に、信号波長で規格化したスケールとヘッド間距離とインクリメンタル信号出力、および内挿精度の測定例を示す。

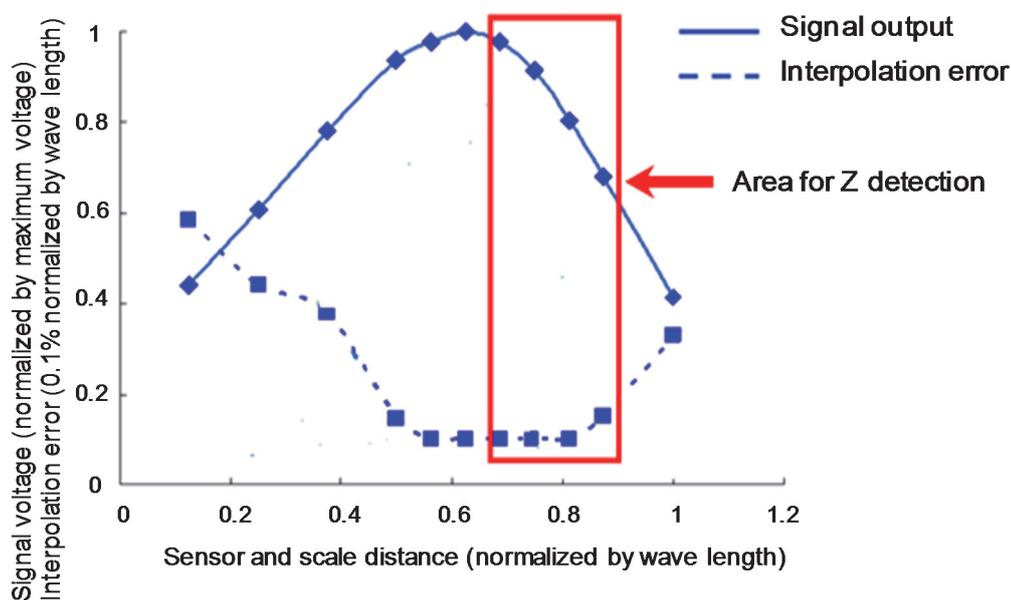


Fig. 3-6 Signal and interpolation error change caused by sensor and scale distance

信号波長の約 67 % から信号波長までの区間 (図中, 赤枠で囲ったエリア) では, インクリメンタル信号の大きさは, ヘッドとスケール間の距離に対して概ね線形に変化し, 式(3-27) の様に表される.

$$z \approx \log_e(C_1 \cos^{-1}(C_2 + C_3 V)) \quad (3-27)$$

ここで $C_1 \sim C_3$ は定数, z はスケールからヘッドまでの距離を, V は信号振幅を表す. この領域に検出範囲が設定されるよう, ヘッドを配置することで Z 軸方向の計測が可能となる.

さらに, 信号強度を Z 軸方向の変位に変換する信号処理回路に, 例えば予め計測した非直線性を補正する補正值テーブルによる補正機能を入れる事で, 1 μm 程度の精度が得られる可能性を確認している.

一方, 内挿精度は信号波長の 92 % 付近から信号波長にかけて急激に悪化しており, この領域においては Z 軸方向の計測は問題ないが主方向の測定精度が保てない.

以上の結果より, Z 軸方向および主方向の両方の検出に使用できるヘッドとスケール間距離を, 信号波長の 67 % ~ 91 % の領域, すなわち信号波長の 25 % とした. 言い換えると, 検出すべき長さに対して 4 倍の長さの波長を選択すれば, 求められる範囲の計測が可能になる.

3-4-2 求められる内挿精度と分解能

3-2 節で導出したように計測範囲は 100 μm である. リニアスケールの走行ガイドで発生するメカ起因の測定精度に対する変動要素を 100 μm と考え合計 200 μm をスケールの計測可能領域と設定する. 3-4-1 項 で検討したように, 選択すべき信号波長は検出すべき長さの 4 倍であるので, 波長を 800 μm にすれば, 必要な計測範囲が得られる事となる.

しかしながら, この波長は工作機械用スケールで一般的に用いられている波長に比較して長い. また, 一般にスケールの誤差は波長が長くなると増加するので, 長い波長を用いる場合は, 測定精度への影響が懸念される.

現在市販されているアブソリュート型光学式スケールの信号波長は 20 μm 程度であり, 磁気式のスケールでは 80 μm 程度の信号波長が用いられている. また, これらのスケールが要求される分解能は 5 nm ~ 100 nm で, 内挿精度・累積精度は, それぞれ, 約 0.5 μm p-p \cdot \pm 0.5 μm である.

よって本スケールを工作機械の制御用スケールとして使用するためには, 800 μm の信号波長においても, 5 nm ~ 100 nm の分解能が得られること, 内挿誤差が 0.5 μm p-p 以内であること, さらに全測定範囲にわたっての累積精度が \pm 0.5 μm 以上であることを確かめなければならない. これを確認するため, 実際に信号波長が 800 μm の信号波長をもつスケールの試作を行い, 分解能と内挿精度および累積精度を実測することで検証を行った.

3-4-3 性能評価実験

提案したスケールはリニアスケールであるが、基本性能評価用スケールの試作にあたっては、評価の一般性を損なわない範囲で、これまで例として説明に採り上げてきたリニアスケールではなく、ロータリスケールを採用した。

これは、リニアスケールの走行ガイドで発生するメカ起因の測定精度に対する変動要素を極力排除したいこと、対してロータリスケールはシンプルな回転軸受構造のためメカ的な変動要素が少ないこと、加えて計測が容易である、という理由からである。

図3-7 に実験で使用した磁気式ロータリスケールの外観写真を示す。スケールは、図中中央の回転軸により回転可能に支持されており、その上部の固定部分に磁気抵抗素子（ヘッド）および内挿処理回路を含む制御回路が配置されている。図3-8 には磁気記録面を露出させた模式図を示す。長さ約 800 mm のリニアスケールに相当するロータリスケールとして、半径 255 mm の円周上に、信号波長 800 μm に対応する記録波長 1600 μm で磁気記録を行った。

図3-9 に試作スケールのインクリメンタル信号とアブソリュート信号の実測値を示す。図中上段の正弦波状の波形（緑色）はインクリメンタル信号、中段の線（赤色）はアナログのアブソリュート信号、下段の階段状の線（青色）はデジタル化されたアブソリュート信号である。この測定例では、アブソリュート信号として 0, 1, 1, 0, 0, 0, のパターンが記録されているが、インクリメンタル信号の頂点付近の位相に同期して、アナログアブソリュート信号を検出する事により、下段のデジタルアブソリュート信号が正しく検出されている事が解る。

試作した自動補正機能を備えた新内挿処理回路により、この磁気式ロータリスケールのインクリメンタル信号を 1/8000 に分割し、長さ換算で 10 nm の分解能が得られる事を確認した。

次に、レーザ式ロータリスケールをリファレンスとして内挿精度と累積精度を計測した。リファレンスに用いたスケールの、波長は 250 nm、分割数は 2^7 であるので、全測定可能長にして約 2 nm の分解能での測定が可能である。

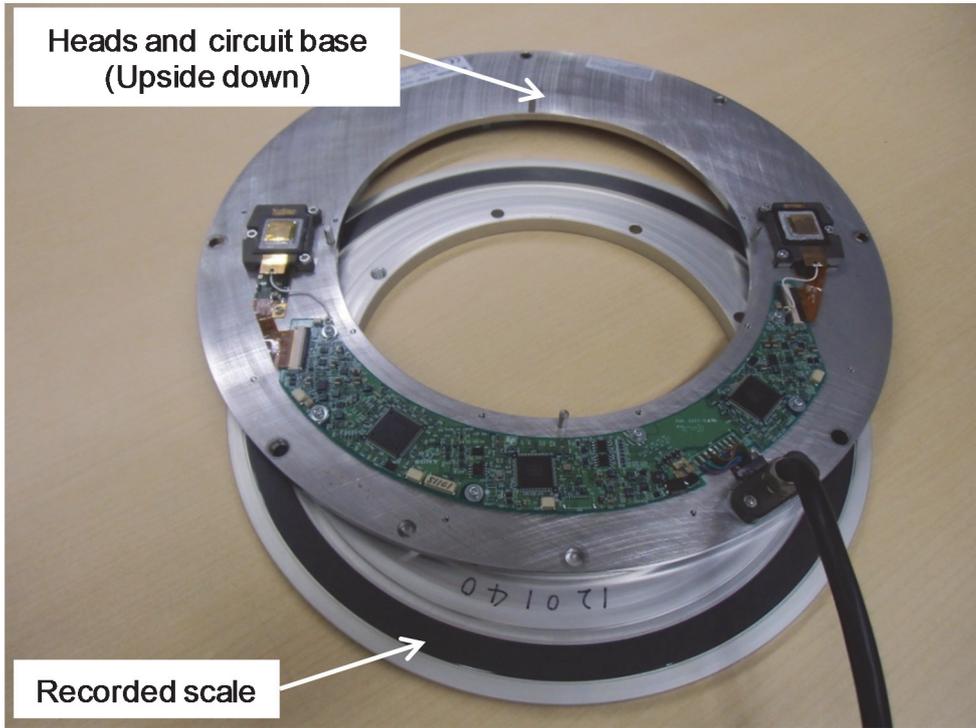


Fig. 3-7 Tested prototype of rotary magnetic scale

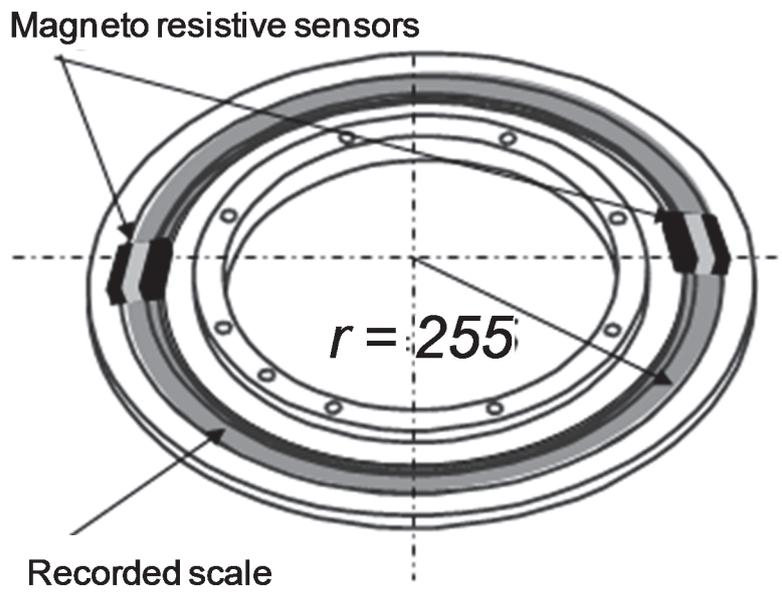


Fig. 3-8 Schematic view of recorded scale and magneto resistive sensors

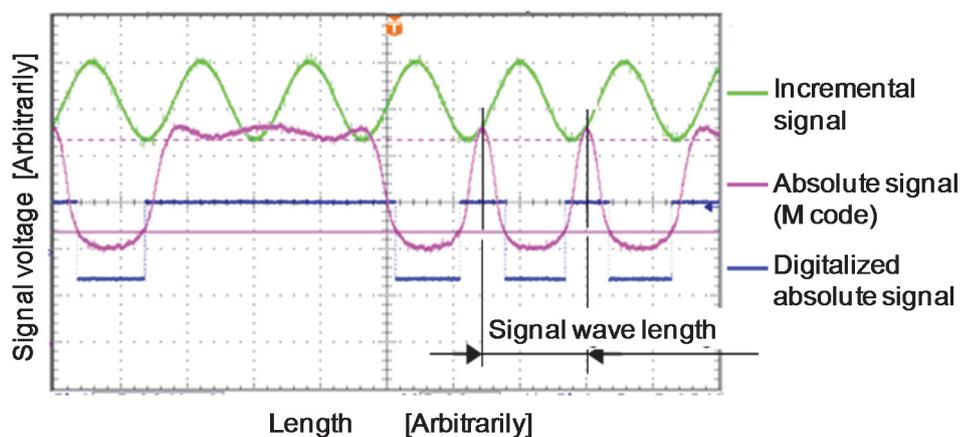


Fig. 3-9 Incremental signal and absolute signal of prototype magnetic scale

図 3-10 に実際に試作を行った磁気式ロータリスケールの、長さに換算した内挿精度データを示す。横軸は測定長さで、図の約 5 mm には 6 波長が含まれる。内挿精度は波長内の非直線精度であるので、波長毎に周期的に繰り返される。図に示す、5 波長分の内挿精度は約 $0.4 \mu\text{m p-p}$ であることから、スケールに対する要求性能である、内挿精度 $0.5 \mu\text{m p-p}$ 以上が確認された。

図 3-11 には累積精度データを示す。横軸の測定長さ 800 mm は、試作したロータリスケールの全周に相当し、全測定範囲をカバーしている。計測された累積精度データは $\pm 0.5 \mu\text{m}$ の範囲に入っており、こちらも要求性能を満足していることが確認された。

以上により、本スケールで採用した $800 \mu\text{m}$ の信号波長においても、工作機械の制御用スケールとして要求される、分解能、内挿精度および累積精度を満足することができることが実証された。

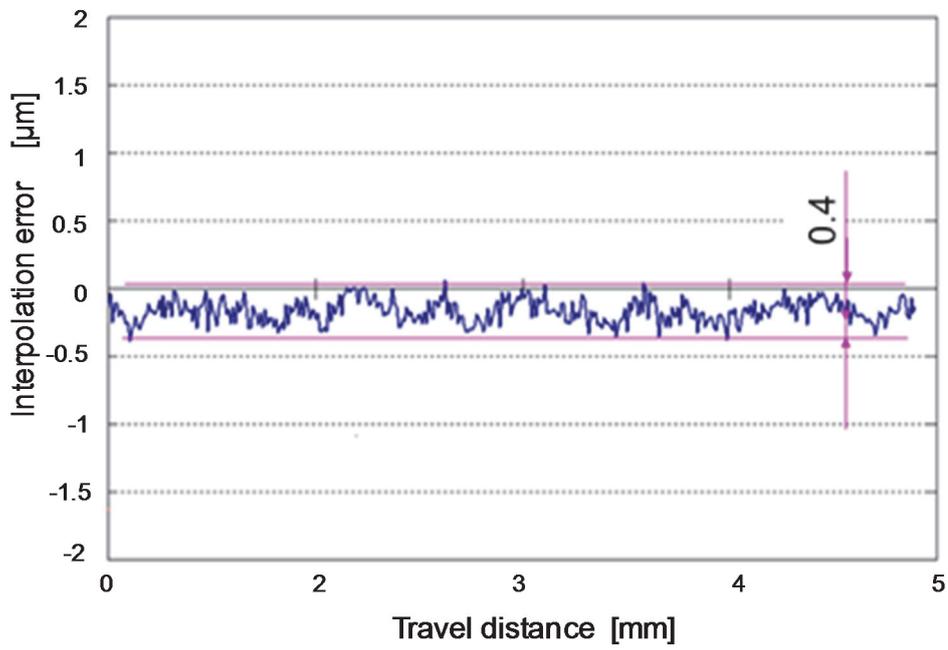


Fig. 3-10 Interpolation error of prototype rotary magnetic scale

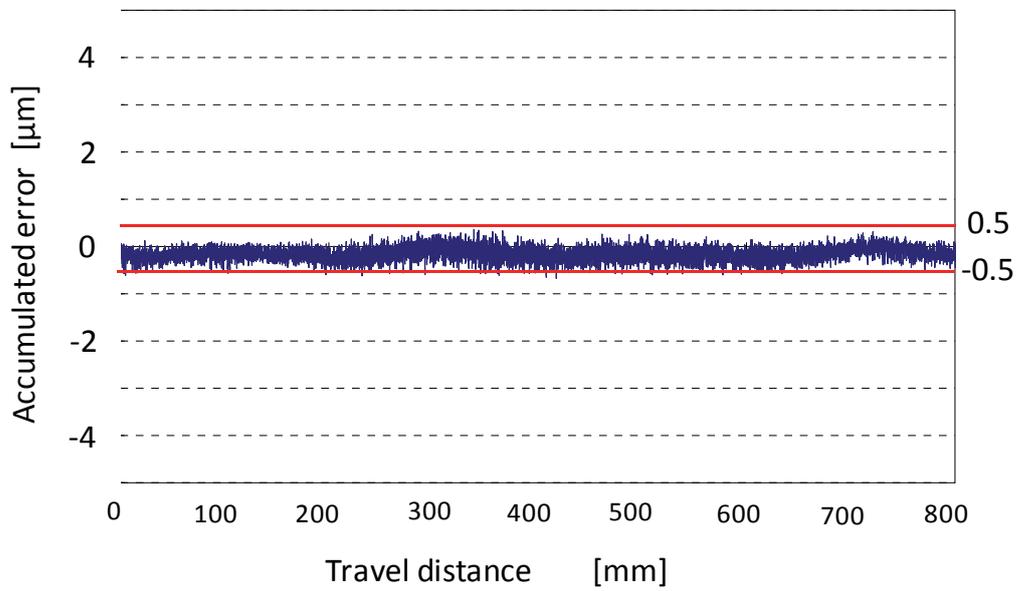


Fig. 3-11 Accumulated error of prototype rotary magnetic scale

3-5 結言

工作機械における運動誤差の補正をより正確に行うリアルタイム補正方式を実現するために、スケールに要求される主運動方向と直交方向の計測範囲を検討し、およそ200 μm が適当であることを導いた。また、その計測範囲をカバーするスケールを、耐環境性に優れた磁気式スケールで設計する際の検出原理を示し、運動補正方法を提案した。

次に磁気式スケールの、スケールと検出ヘッド間距離の変化による、インクリメンタル信号出力変化の直線性及び主測定方向の測定精度が、記録波長の約25%の範囲で保たれる事確かめ、補正範囲の検討結果と合わせ、必要なZ方向の補正計測範囲を得るためには、800 μm の信号波長が必要である事を導出した。

さらに、800 μm の磁気式ロータリスケールを実際に試作し、同時に開発した内挿回路を用いる事で、工作機械用スケールとして最も重要な性能であるアブソリュート信号の検出が可能である事と、十分な分解能及び測定精度が得られる事を検証した。しかしながら現状では、要素技術の確認に留まり、実際に5ヘッドを組み合わせて全ての方向の計測を同時に行ってはいない。

計測軸以外の直交する2方向の必要な計測範囲の計測が行え、かつ10 nmの分解能と内挿精度 0.4 μm p-pを有するスケールが出来れば、工作機械のみならず多くの分野で高精度なステージの制御に使える可能性も高い。今後は実用化を目指し、5つのヘッドを組み合わせた新ヘッドと信号処理回路を試作し、使い易さと応用方法を考慮しながら検討を進めることが必要と考える。

第4章 超精密工作機械の運動誤差補正用 2次元スケールシステムの開発

4-1 序言

本研究の第2段階は、加工精度1 nm レベルの超精密工作機械におけるリアルタイム運動誤差補正のためのスケールシステムの検討である。この時、スケールの分解能は少なくとも0.1 nm 以上であることが望ましい。また、この加工精度領域では、多軸間の運動誤差補正が必須となるとしたので、軸間運動誤差の検出が可能なスケールシステムでなければならない。すなわち2次元ないし3次元スケールが必要となる。本研究では、現存する分解能が pm レベルの2次元スケールと検出ヘッドを3組で構成する、3次元加工空間での位置検出が可能なスケールシステムを開発することとした。

3組で構成する2次元スケールとしては、ホログラム方式の2次元レーザスケールを選定したが、これは、第2章で工作機械に磁気式スケールが優位であるとしたことと矛盾することになる。しかし、第1章で述べた既にレーザスケールが活用されている非球面レンズ金型加工機が、切削機械とはいえ、環境管理されたところで稼働されており、目指す1 nm レベルの加工精度の超精密工作機械は、そういった環境で使われる場合が多いであろうと言う想定から、レーザ式で対応できると考えられる。しかしながら超精密加工に於いて、環境条件の悪いケースでの対策を検討することは課題として残される。

本章では、ホログラム方式2次元レーザスケールについて、その原理と特徴を調べ、評価用試作スケールでの性能評価を行った結果を述べる。さらに、3組構成の2次元スケールを工作機械に具体的に配置する構造および制御システムを考案した。

4-2 格子干渉計型スケールシステムの選択

4-2-1 格子干渉計の選択理由と現行方式の問題点

本研究で対象とする超精密工作機械は、第1章で触れた谷口カーブが予測する次世代に向けてのものであるが、同じく第1章で触れた非球面レンズ金型加工機などではすでにその領域に入っており、この金型で生産される高精度小型レンズはスマートフォンなどに搭載され、我々は当たり前のようにその恩恵に浴している^{[31], [32]}。このようなナノ加工機と呼ばれる加工装置に搭載されているフィードバックスケールの分解能は0.1 nm程度である。第3章で述べた現状の高精度工作機械で活用されているスケールの分解能は10 nmであり、本研究の目的である1 nmレベルの加工精度を得るには位置検出器の分解能は少なくとも0.1 nm以上であることが望ましい。格子干渉計は一般の光学式スケールの約100倍の分解能を持つ。分解能は内挿を行う処理回路の分解能を上げる事で見かけ上細かくする事が可能であるが、ノイズが

分解能を超えている、あるいは内挿精度が悪くては分解能を上げる意味がない。計測分解能に見合う安定性も必要であり、測定中にドリフトがあれば精密な測定ができない。格子干渉計方式のスケールは他のスケールに比べて圧倒的な分解能を有するために、ノイズが低く安定性も優れるという特徴がある。

次に格子干渉計方式のスケールの場合、スケールと検出ヘッド間の距離、以降ワーキングディスタンスと称すが、格子のピッチによらずに大きくとれる点を使い易い。工作機械の制御性能の確認では、計測用のスケールをテーブルに設置し、工作機械の加工軸に検出ヘッドをとりつけてテーブルに円運動をさせた場合の運動遅延による象限切り替え誤差をしばしば確認する作業を行う場合があるが、この時、スケールの検出ヘッドとスケール間の距離が充分にないと、計測中のスケールとヘッドが衝突し、スケールを破壊する可能性が高い。この目的のために、すでに光学式の2次元計測用スケールが商品化されており、機械の補正の目的で使用されている^[33]。

しかしながら、ワーキングディスタンスが小さいために調整に非常に手間取り、検出ヘッドとスケール間の距離を一定に保つ必要があるため、測定範囲が限られる場合があった。

一般の光学スケールであるモアレ縞検出方式で、分解能が上げられない原因は、スケールを通過した光が、スケールによって回折されて広がるためである。回折角度はスケールが細くなればなる程大きくなるため、分解能の高いスケール程、スケールと検出ヘッド内に設けられる副尺の間の距離を小さくしなければならない。

工作機械における2次元計測においては、検出ヘッドとスケールの間の距離が変化することもあるが、ワーキングディスタンスの変化に対し、モアレ縞検出方式の光学スケールの信号は敏感に変化するため、ワーキングディスタンスの変化がXY計測精度を落とす要因となる可能性がある。

4-1-2 格子干渉計の原理と特徴

これに対し格子干渉計方式の場合は、この様な問題がない。格子干渉計方式の原理を図4-1に示す^[34]。光源から出射された可干渉光は、スケールによって回折され、格子の位相成分を光の位相に重畳させる。左右逆方向に回折された光を重ね合わせると干渉が始まる。スケールが1波長移動すると、信号となる干渉強度は2周期分変化し、これによって格子の分解能の2倍の信号分解能を持つ。スケールに入射する光の時間振動成分を除いた振幅 E を式(4-1)で表し、スケールの透過率を式(4-2)で表すと、2つの回折光の振幅は式(4-3)と式(4-4)で表され、スケールの位相成分の重畳方向が反対になる。2つの光を重ね合わせて干渉させると干渉光の強度 I は式(4-5)の様に表され、ここで、 k は光の波数ベクトルであり、その大きさは $2\pi/\lambda$ である。

K は格子ベクトルで同様に $2\pi/A$ であるが前者の λ は光の波長を、後者の A は格子波長を示す。

$$E = 2e^{i(kr)} \quad (4-1)$$

$$T = \cos(K_x) \quad (4-2)$$

左側に回折された光の振幅 E_{-1}

$$E_{-1} = e^{i(kr - K_x + \phi_1)} \quad (4-3)$$

右側に回折された光の振幅 E_1

$$E_1 = e^{i(kr + K_x + \phi_2)} \quad (4-4)$$

干渉光の強度 I

$$\begin{aligned} I &= (E_1 + E_{-1})(E_1 + E_{-1})^* \\ &= 2 + 2\cos(2K_x + \phi) \end{aligned} \quad (4-5)$$

ここで ϕ は $\phi_1 - \phi_2$ であり，スケールの位相に無関係な光路長の差を表す。

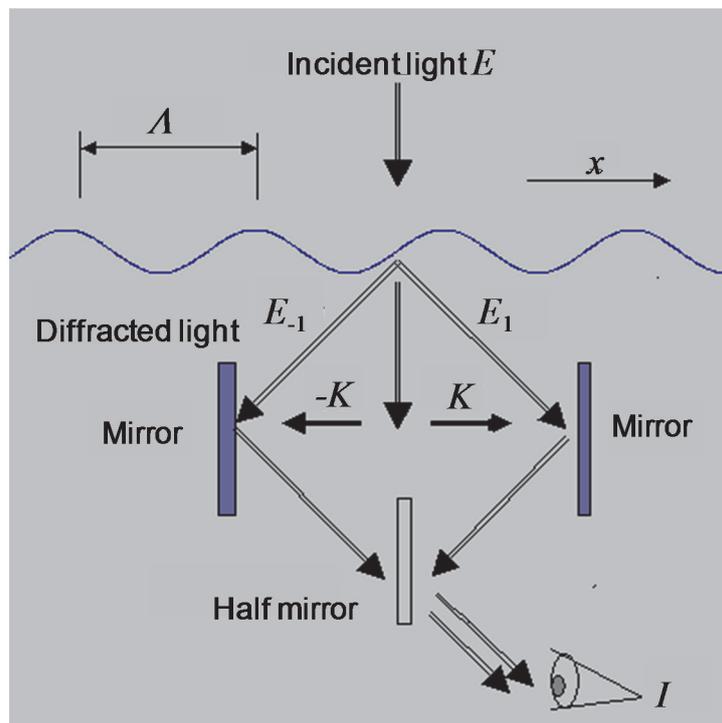


Fig. 4-1 Principle of grating interferometer

格子干渉計方式では逆方向に回折される光を干渉させる事により、分解能を上げる事ができ、回折回数を増やす事でも分解能を上げる事ができる。回折格子のピッチが小さくなると回折角度が大きくなるため、検出ヘッドは大きくなるが、検出ヘッドとスケールとの距離には制限が無く、設計によって大きくとれる。また、スケールとヘッドとの距離が変化しても信号品質には変化が無く、計測方向以外の移動も原理的には誤差を発生しない。

格子干渉計の場合、信号は干渉信号であるため、原理的には高調波を含まない理想的な正弦波となる。そのため内挿精度を上げる事ができる。

4-1-3 格子干渉計とマイケルソンの干渉計の比較

機械の校正用途で用いられる一般の干渉計と格子干渉計のメリットとデメリットを比較する^[35, 36, 37, 38]。

一般の干渉計方式は非常に安定性の高い光源が必要になる。通常の干渉計を使う際は、安定化したヘリウムネオンレーザを光源として使用する。安定化した気体レーザはスケールに比べると高価で大きく発熱量も大きい。よって発熱による計測誤差を避けようとする、光源と計測物とを離さなければならないため、大掛かりな装置が必要となるという問題がある。しかも計測の基準となる光の波長は光源の不安定性だけでなく、伝播する空気の屈折率の変化によっても変る。このため、計測雰囲気や湿度、炭酸ガス濃度等は計算して補正されねばならない。レーザ干渉計を用いて計測を行っている部屋のドアの開け閉めで、サブミクロンの計測値のふらつきを観測する事は良く経験される事である^[39, 40]。

格子干渉計における計測の基準はあくまでもスケールであるので上記のような問題は発生しない。先の図 4-1 で、スケールから出た後の左右の光路を同じ長さになる様に調整すると光の波長が変化しても同様に位相が変化するため、計測誤差を発生しない様にできる。このため、格子干渉計方式では高価で大型の安定化レーザを使用する必要が無く、波長の変動しやすい半導体レーザを光源として使用する事ができ、コンパクトな計測を行う事ができる。

分岐以降の2つの光路を近づけておけば、気温や気圧による空気の屈折率の変化が、左右の光路で同様に発生するために誤差とならない。これらの事から、格子干渉計では、一般のレーザ干渉計以上の分解能と安定性が得られる。

工作機械の運動誤差を計測する際にはある程度の時間が必要となり、この間の検出方式の安定性は必要不可欠である。

一方、これに対し、一般の光波干渉計のメリットは、長区間のリニアリティが良い事である。格子干渉計の場合は、スケールの製造工程における記録の誤差や、取り付け後の曲がり等のため、リニアリティには限度がある。これに対し、一般の干渉計の場合、環境さえ良ければ、リニアリティは原理的に保証される。また、スケールの場合、記録のプロセスの制限から数 m を越す長さになると非常に高価になるが、一般の干渉計では、長さの制限は光源の可干渉距離で決まり、数十 m の計測も不可能ではない。

本研究で提案する2次元スケールは、格子干渉計方式のスケールであり、スケールの精度は一般の干渉計で環境の整った場所で計測される。スケールの長区間の非直線性と累積精度は干渉計で計測された値で補正される。実際の計測は補正済みの

スケールの値を使って行えば，両計測方法のデメリットを補完する高精度の測定が可能となる。

4-1-4 2次元計測の計測方法比較

格子干渉計方式では，高い分解能と広いワーキングディスタンス，及び，安定性が得られる事を述べたが，表 4-1 に工作機械で2次元計測を行う際の各種の計測手段のメリット・デメリットを比較してまとめた。

Table 4-1 Comparison chart of the measuring methods.

Measuring method	Merit	Demerit
Moiré type Optical scale	<ul style="list-style-type: none"> ● 2 Dimensional scale already available 	<ul style="list-style-type: none"> ● Poor resolution ● Narrow working distance ● Big Z cross talk ● Setting difficulty
Michelson Interferometer	<ul style="list-style-type: none"> ● Excellent accumulative error ● 2 Dimensional appreciations using long mirror bar are well known ● Good resolution 	<ul style="list-style-type: none"> ● Poor stability especially in the atmosphere. ● Aliment difficulty ● Big size
Grating Interferometer	<ul style="list-style-type: none"> ● 2 Dimensional scale will be available ● Ultra high resolution ● Big working distance ● Big mounting tolerance ● Very good stability and repeatability 	<ul style="list-style-type: none"> ● Low long range accuracy ● And required compensation for high accuracy system

4-1-5 レーザスケール

本研究で計測に用いたのは、株式会社マグネスケール製のホログラム方式のレーザスケールである^[41]。このレーザスケールは純粋な格子干渉計方式のスケールで工作機械においては、特に光学部品やその金型の切削をおこなう機械に搭載されている。

図 4-2 に 2 次元のレーザスケールの検出ヘッドの中の光学系の原理図を示す。

半導体レーザから出射されたレーザビームは偏光ビームスプリッタにより 2 分される。ビームスプリッタにより反射された光は右側のミラーを介して破線で記したスケール格子に入射し、回折されて右側のミラーへ向かう。一方、ビームスプリッタを透過した光は、左側のミラーを介してスケールに入射し、同様に回折されて左側のミラーへ進むが、回折は反対方向になるため、スケールの逆方向の位相がそれぞれ重畳される。ミラーに向かった光はともに反射されて再びスケールに戻るが、この時、ミラー上に設置された $\lambda/4$ 位相板を 2 回通過して偏光方向が帰路で往路と直交している。スケールによって再び同方向に回折されると各々の光の位相には、2 倍のスケール位相が加わり、偏光ビームスプリッタに戻ると、往時と偏光方向が直交しているため、両ビーム共にフォトディテクタ側に向かう。フォトディテクタユニットに戻った光はさらに 2 つに分けられ、その後設けられた偏光ビームスプリッタを通過後干渉を始める。

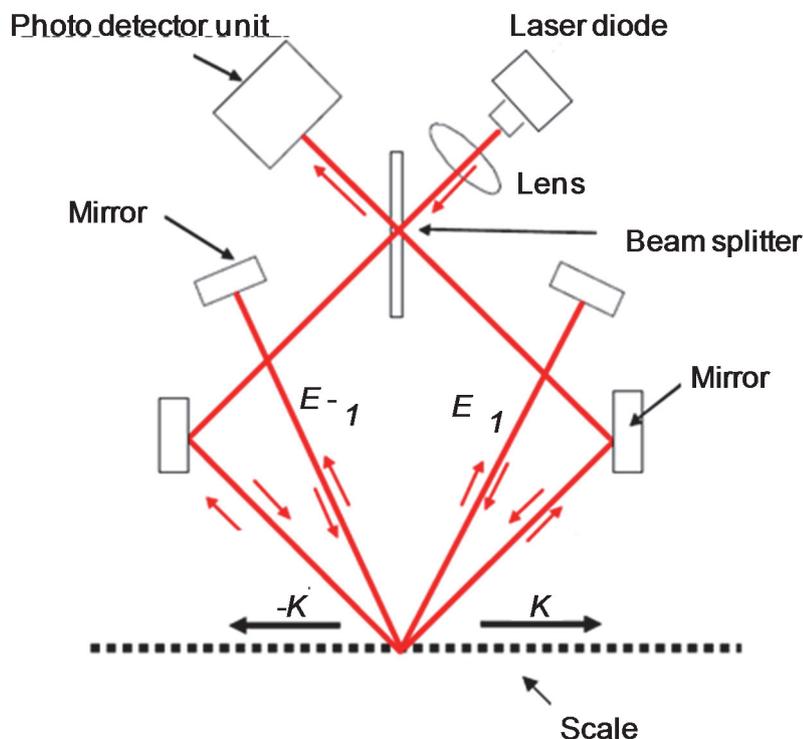


Fig. 4-2 Laserscale detective optics and principle

分割された他方のビームは、偏光ビームスプリッタの前に設置された $\lambda/4$ 位相板により、円偏光となって偏光ビームスプリッタに入り干渉を始めるが元の偏光が直交しているために先の干渉に対し、 90° 位相が変化する。この光学系で使用されるスケールの格子ピッチは $1 \mu\text{m}$ 、干渉信号の信号波長は 2 つのビームが逆方向に 2 回ずつ回折されてから干渉する事により 4 分の 1 となり、 250 nm となる。

右側の光の振幅を E_1 、左側の光の振幅 E_{-1} とし、干渉後の強度を I とすると以下に表される。

$$E_{-1} = e^{i(kr-2K_x+\phi_1)} \quad (4-6)$$

$$E_1 = e^{i(kr+2K_x+\phi_2)} \quad (4-7)$$

$$\begin{aligned} I &= (E_1 + E_{-1})(E_1 + E_{-1})^* \\ &= 2 + 2\cos(4K_x + \phi) \end{aligned} \quad (4-8)$$

先の格子干渉計の理論式と比べるとレーザスケールの実際の検出光学系では、回折回数が 2 倍になっているため、スケールから重畳するスケール位相が 2 倍となり、干渉強度における信号波長はスケールの $1/4$ となっている。

レーザスケールの光信号の波長は一般のスケールに比べて非常に短く、最も高い分解能を有するのは透過型のレーザスケールであり $0.138 \mu\text{m}$ の信号波長を持ち、2 次元スケールで使用する反射型でも $0.25 \mu\text{m}$ となる。この信号は、後述する信号処理回路を用いて内挿する事で、 15 pm までの分解能が得られる。この分解能は本研究の目的とする工作機械の運動誤差の測定において充分であると言える。

4-2 2次元レーザスケールシステムの開発

4-2-1 試作 2次元レーザスケールシステムの構成

本研究で用いた 2次元レーザスケールのシステム構成を 図 4-3 に示す。

このシステムは 2次元のホログラムスケールと、2 個の検出ヘッドとこれを内挿する 2 台のインターポレータ、及びインターポレータから出力されるバイナリデータをパーソナルコンピュータに取り込む 2 枚の IO ボードと計測のタイミング決めるデータリクエスト信号を作成する発振器とコンピュータで構成される。

2つのインターポレータは個別のタイミングで 1.7 MHz のサンプリング周波数で内挿を行って位置出力を更新しているが、発振器の信号で同時にラッチされるように設定されている。インターポレータの非同期分の誤差は、 100 mm/s で移動しているとして、最大 50 nm であるので、現在は無視できる。

さらに早い動きを計測する際は、インターポレータの同期が必要である。

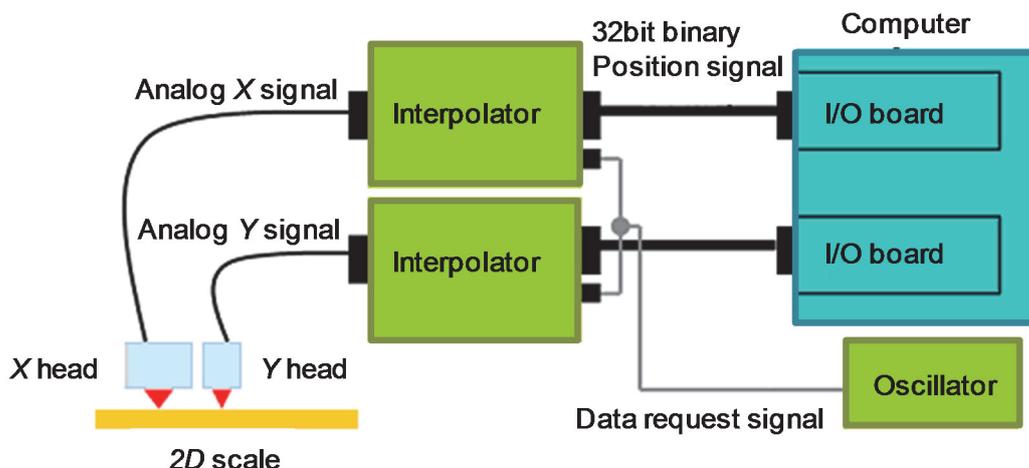


Fig. 4-3 Configuration of the 2D scale system.

4-2-2 試作 2次元レーザスケールのスケール部

試作レーザスケールのスケール格子の作成はホログラム方式で行われる。その理由は、スケールに必要な格子ピッチが細かく、かつ大きなスケールが作れる大型の高分解能のリソグラフィ装置がない事と、不必要な高調波成分を除いた記録を行って回折効率を上げるためである。

スケールを記録するためには大型の高強度レーザービームを2分割し、その後拡大して正確な平行ビームを作成して干渉させる。格子ピッチは干渉させる2つの光の間の角度を調整して行い、1 μm の格子を記録した。図 4-4 にホログラム方式のスケール記録方法を示す。ここで、λは記録に使用するレーザーの波長、Λは記録される干渉縞の波長であり、それぞれの関係は 式(4-9) で示される。

$$\Lambda = \lambda / 2 \sin(\theta) \quad (4-9)$$

株式会社マグネスケール製のレーザスケールには、0.55 μm の透過型ホログラム方式スケールと 1 μm の反射型ホログラム方式スケールと 1.6 μm の透過型ホログラムスケールの3種類がある。

図 4-5 に試作スケールの写真を示す。スケール本体の厚さは 5 mm、スケール面の外形寸法は 120 mm × 120 mm である。後述の検出ヘッドの検出点が 12 mm 離れているため、最大計測範囲は XY 方向 100 mm × 100 mm である。

スケールはガラスカバーで保護し、計測中に工作機械の油滴等が落下しても直接スケールには影響が及ばず、カバー面に付着したオイル、クーラント、ゴミなどは簡単にふき取る事ができる。取り付けの利便性を考え、取り付け台座を備えており、取り付け台座の外形を基準に機械に簡単にネジで締結することが可能になっている。基板材料は石英で熱膨張係数は $0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ であるからスケール自体の熱安定性は良い。台座はステンレス製である。

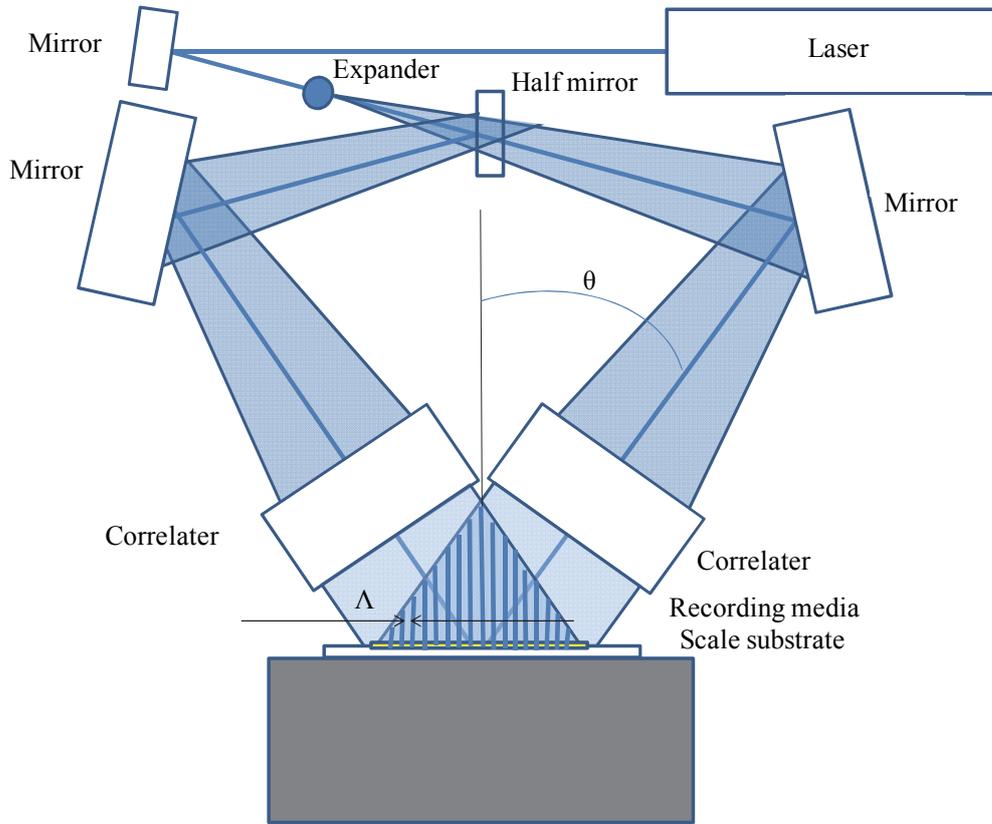


Fig. 4-4 Holographic recording of scale

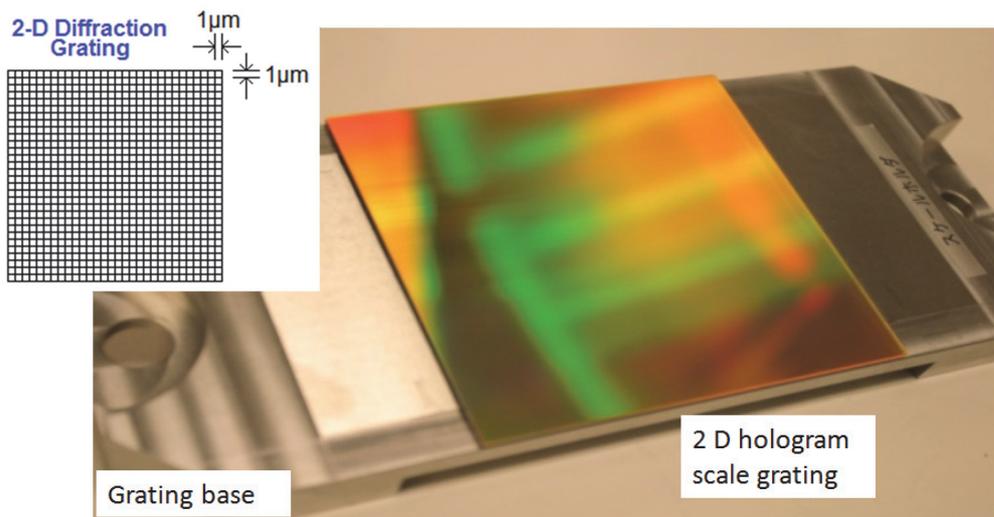


Fig. 4-5 Laserscale

4-2-3 試作 2 次元レーザスケールの検出ヘッド部

図 4-6 に実際に使用したヘッドの写真を示す。

XY 方向の検出には 2 つの 1 次元ヘッドを組み合わせて使用した。右側のヘッドが X 軸方向の検出を行い、左側のヘッドが Y 軸方向の検出を行っている。左右のケースには初段のアンプが入っており、このアンプの出力が処理回路に入力されて内挿されデジタルの位置計測データとなる。X 方向と Y 方向の検出点は離れており、今後の改良が必要である。この検出ヘッドのワーキングディスタンスは、2.5 mm で $\pm 100 \mu\text{m}$ の間で十分な信号が得られる。光源には 790 nm のレーザダイオードが使用されており、ヘッド 1 台当りの消費電力はアンプを含んで 250 mW である。信号波長は XY 方向ともに 250 nm である。

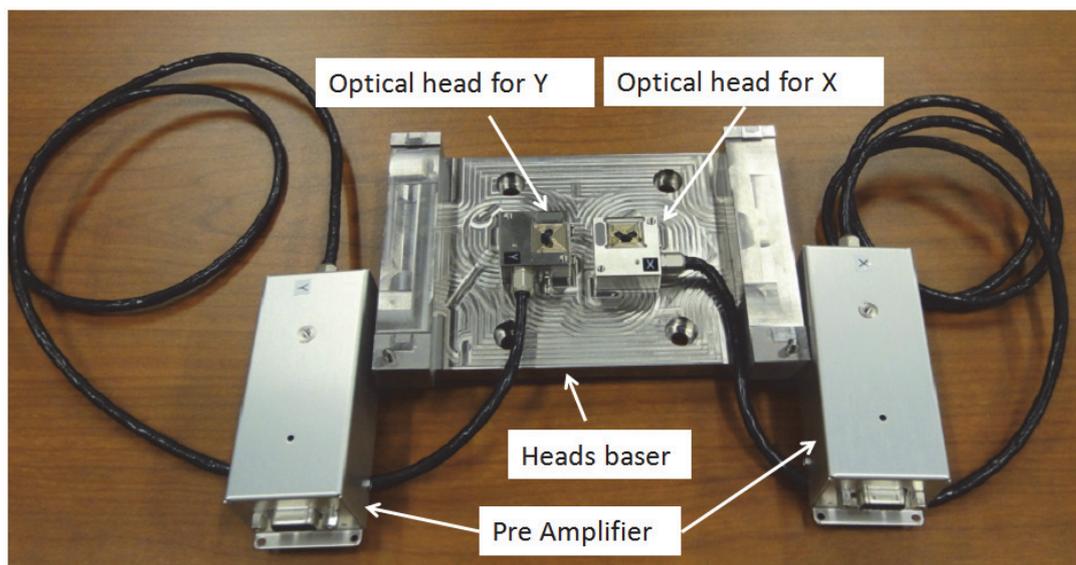


Fig. 4-6 Photograph of the Laserscale detective head units

4-2-4 試作 2 次元レーザスケールの内挿回路部

計測時の内挿数は 4000 分割で、内挿後の分解能は 65 pm である。

この内挿回路の原理は 2-2-3-4 項 で述べたアブソリュート磁気抵抗変化型磁気式スケールで使用した内挿回路と同様である。レーザスケールの場合は信号周期が短く、同じスピードで移動した場合も信号周波数が早いため、磁気式スケールに比べ回路の処理速度を速める必要がある。

先にも述べたが、内挿回路は最大 1.7 MHz のサンプリングで内挿後の位置出力をバイナリー形式で出力する。2 つの内挿回路には、1 つのデータリクエスト信号が入り、同時にデータがホールドされて出力される。この回路のデータディレイは 3 μ s 程度と考えられる。図 4-7 にインターポレータの写真を示す。

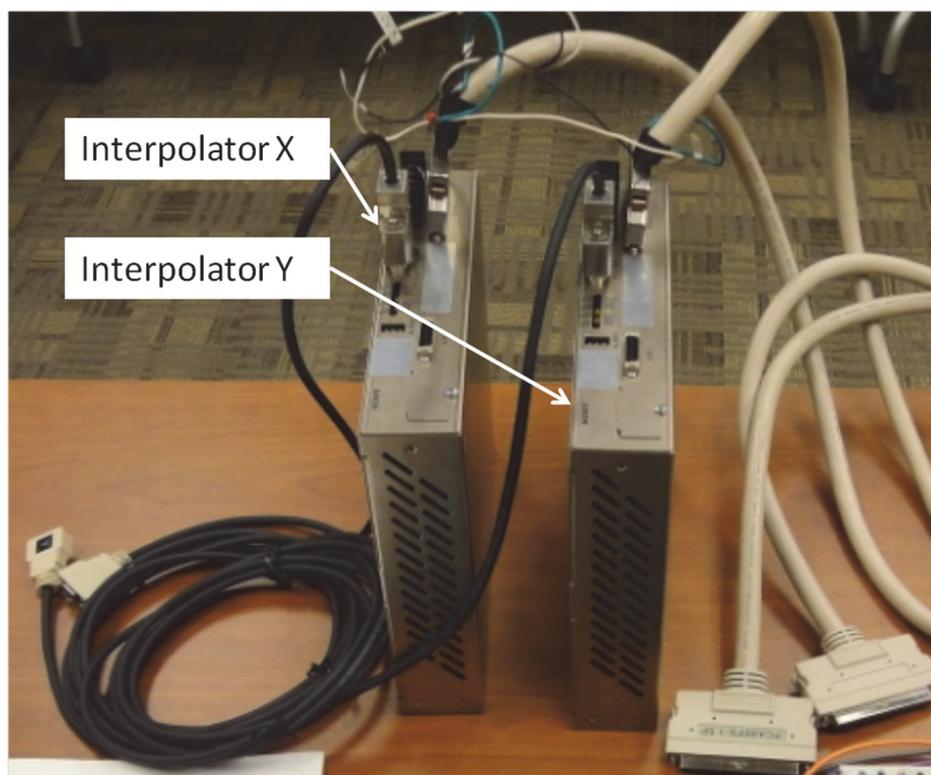


Fig. 4-7 Interpolators

4-3 試作レーザスケールシステムの性能評価

4-3-1 2次元レーザスケールの出力と分布の評価

最初に2次元スケールの出力を測定した結果を述べる。

スケールの出力の大きさは、スケールの停止時ノイズを決めるため、必要な停止時ノイズを確保できる信号出力が得られるかどうかを確認する必要がある。計測分解能は内挿回路の電氣的な分解能と検出ヘッドから出力される原信号の大きさとノイズ及び計測の最高速度で決まる。内挿回路の電氣的な分解能を上げて、原信号のノイズが大きい場合や、信号出力が小さく内挿後のノイズが大きくなる場合には、実質的な計測分解能を得る事が出来ない。ノイズはまた測定時の最高速度で決定される周波数フィルターの影響を受ける。速度が遅い場合は、高域のノイズを低減するローパスフィルターを使用できるため、ノイズは低くできる。その反対に高速動作を測定する場合には、出力信号の帯域を確保するため、高域のノイズを低減できず測定ノイズは増加する。本研究では工作機械の速度を 400 mm/s とし、この速度で目標の 0.1 nm の分解能を得られる原信号出力が得られているかどうかを検証している。

一方スケール内における出力分布は計測冗長性を判断する上で必要である。試作したスケールにおいては、50%までの緩やかな出力の変動があっても内挿回路が精度を保つ様に設計してある為、回路の追従が可能な範囲の出力変動は計測誤差を発生しない。追従が可能な範囲はおおよそ信号周期の 50 倍で、13 μm 程度である。

また出力変動はスケールプロセスの不均一性を計測できる為、スケールの不均一性の原因を特定し、全体の精度を向上していく手掛かりを得る為に有用である。

評価のために使用する XY ステージは、両軸ともにエアースライドを案内とし、真直度は XY 方向では 1 m の移動につき 1" (角度秒)、自重でたわむ Z 方向は 5" である。X 軸と Y 軸の間の直交度は、リファレンスの直交計測器で計測され 1" である。

スケールとステージの計測軸との平行度は、計測方向に移動した際の直交方向のカウント値を計測する事で求められる。この直交方向の移動中のカウント値が最小になる様にスケールは回転台によりスケールの方向を調整し、各々の計測を行った。

図 4-8 に今回試作した 2次元レーザスケールの X 出力分布を示す。

スケールは X 方向に連続して 200 μm の間隔で出力を検出した後、Y 方向に 200 μm 移動し、また X 方向に移動する事を繰り返す方法でまず X 方向の出力分布を検出する。その後スケールの配置を 90° 回転させて同様の検出を行う事で Y 出力分布を計測する。

図中 XY の値はスケール内の座標を示し、色の分布が出力の大きさを示すが、平均出力が図中黄色の 720 mV を超えていることから、計測分解能 0.1 nm が可能である事が解る。分布については、スケール内の色分布が無くなり赤に近づく事が理想の状態ではあるが、内挿処理回路は出力の 50% の変化までは許容して内挿を行う事ができるため、現在の色分布においても出力変動による精度悪化はないとみなす事が可能である。

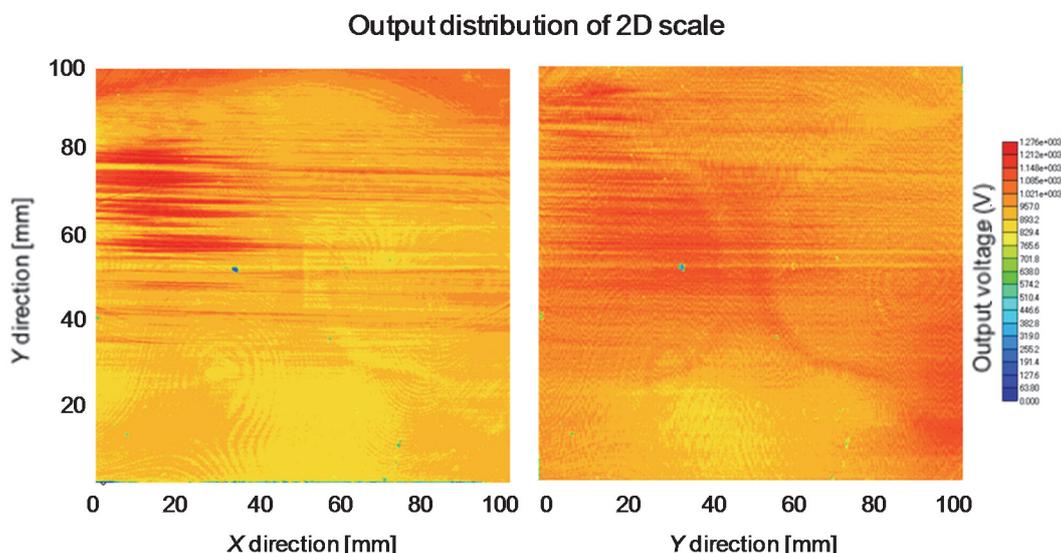


Fig. 4-8 Output distribution of 2D Laserscale

4-3-2 2次元レーザスケールの精度測定と格子直交度の測定

図 4-9, 4-10, 4-11 に 2 次元レーザスケールの精度と直線性の測定結果を示す。リファレンスとしてアジレント社のレーザ干渉計を使用した。スケールの中央の線上の精度と上 40 mm 離れた線上及び下 40 mm 離れた線上の精度を測定して比較している。計測中の雰囲気温度は $23^{\circ}\text{C} \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ に管理し、レーザ干渉計の波長の気圧と温度に対する補正は測定の直前に行っている。

計測方向の測定ピッチは $200\ \mu\text{m}$ であり、3 本の計測時間はおおよそ 10 min である。2 次元スケールの実用化時は、細かいマップ状に精度測定を X 軸と Y 軸に対して行う必要があるが、この計測にはある程度の時間が必要で、この間の干渉計の安定性を保つためには工夫が必要である。計測は 3 回繰り返して測定し、3 色で重ね書きしているが、再現性は良い。

X 方向の累積誤差は 100 mm の計測区間で $\pm 1.5\ \mu\text{m}$ であり、リニアリティは 200 nm 程度である。Y 方向の累積誤差は $\pm 3\ \mu\text{m}$ であり、リニアリティは 100 nm 程度である。この誤差の原因は記録時の波面の誤差と記録媒体の形状誤差により発生しているものと考えられ、波面精度を上げて記録媒体の形状精度を上げる事で精度は改善可能である。

2次元スケールを使用する場合、リニアリティが悪いと補正点数が多くなるために改善の必要がある。スケールを用いて計測を行う際、累積と区間補正を行う事は一般的であるから、リニアリティの誤差を緩やかにして補正区間をできるだけ大きくできる様にしなければならない。

一方、中心に対して±40 mm ずらして測定を行ったデータを見ると、累積は殆ど差がないものの、X方向のリニアリティのデータは異なる。Y方向のリニアリティは、中心に対して対称になっている様に見える。

格子直交度の計測用の評価用XYステージは、両軸ともにエアースライドを案内とし、真直度はXY方向では1 mの移動につき1"、自重でたわむZ方向は5"である。X軸とY軸の間の直交度は、リファレンスの直交計測器(0.5"精度)で計測され1"である。直交度はこのステージの直交度をリファレンスにして計測した。直交度は、両軸の非計測方向に移動した際のカウント値がゼロになる様に一方の軸を回転台で合わせ、この状態で他方の非計測方向のカウント値を測定する事で測定できる。直交度は計測誤差の範囲であるが、今後は回転台を高性能のロータリエンコーダで計測する事により計測精度を向上する事が必要である^[42]。

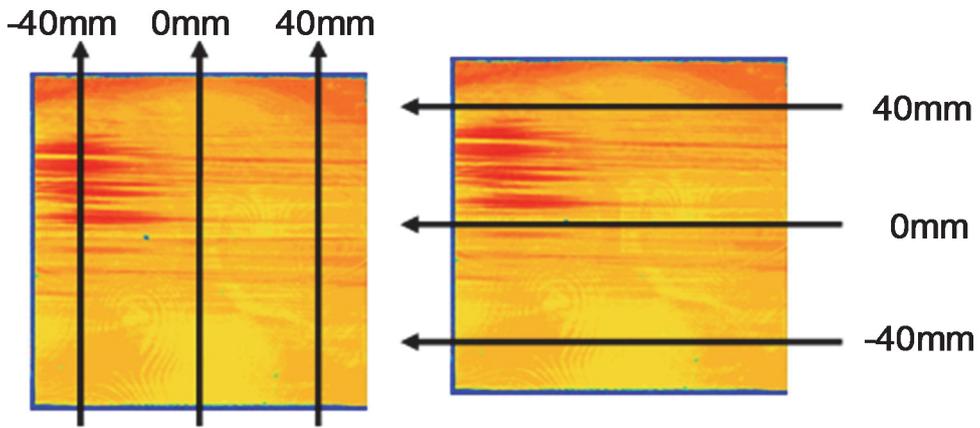


Fig. 4-9 Accuracy measurement line for 2D Laserscale

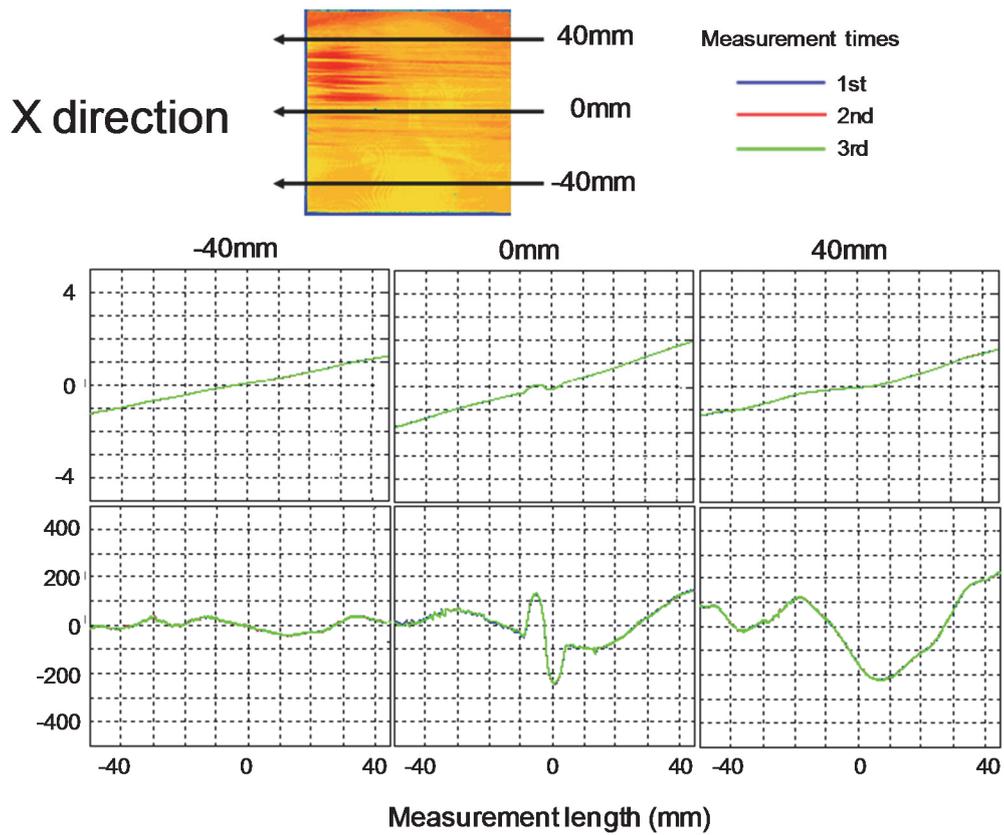


Fig. 4-10 Accuracy measurement data of X directions

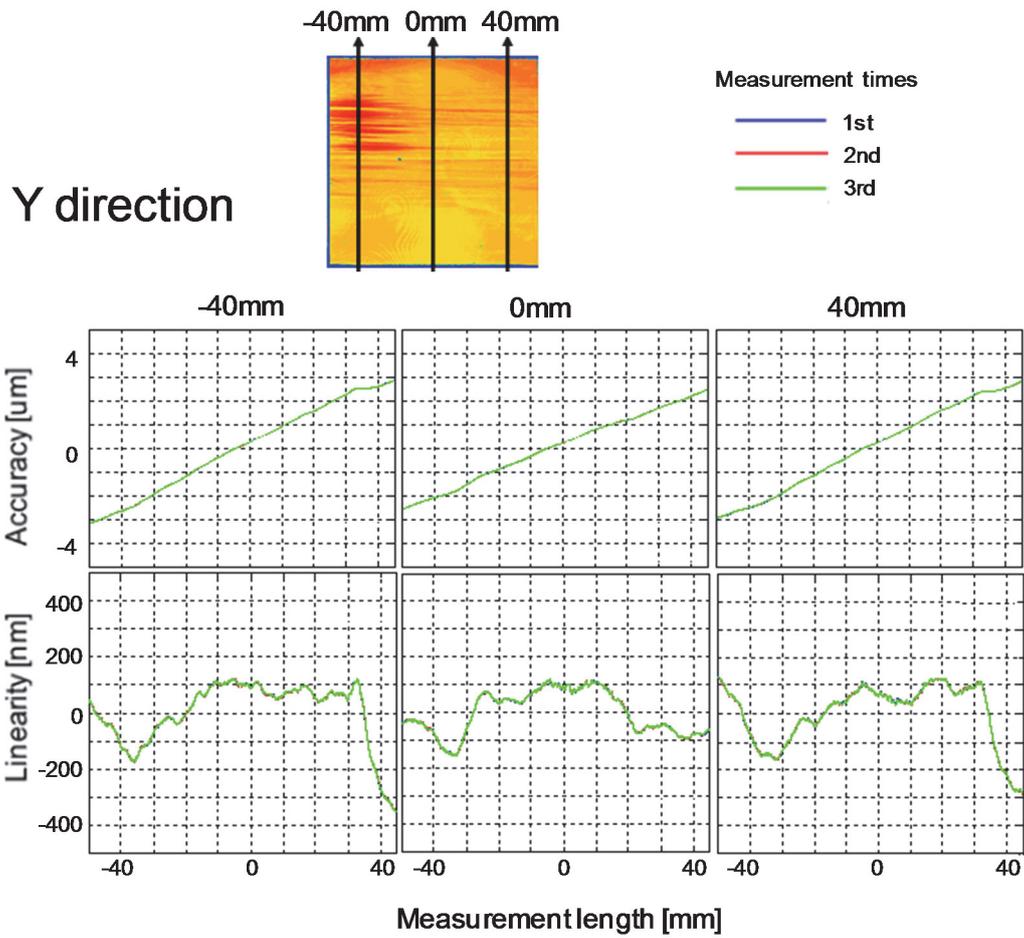


Fig. 4-11 Accuracy measurement data of Y directions

4-3-3 2次元レーザスケールのノイズと安定性の測定

1次元のレーザスケールは nm レベルの位置制御に十分な性能がある事が知られている。図 4-12^[43]は、工作機械において1次元のレーザスケールを用いて1 nm のステップ送り制御の例であるが、2次元スケールの場合はスケールが X と Y の2方向の回折光を出力する必要があるため、軸毎における信号低下によるノイズの増加と軸間のクロストークが無く十分な安定性がある事を確認する必要がある。

図 4-13 にノイズ測定の結果を示す。2次元スケールにおいても十分なノイズ特性が得られている事が解る。

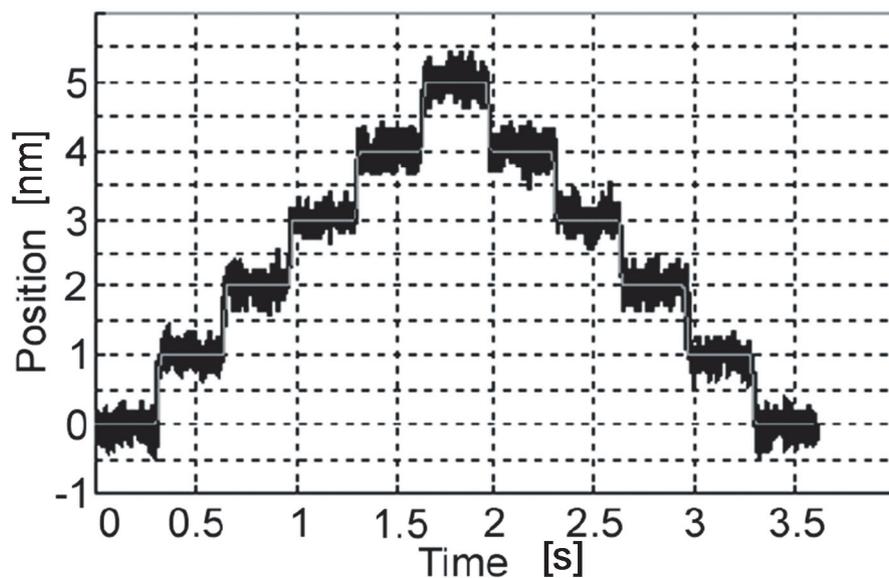


Fig. 4-12 1 nm step motion by ultra accurate machinetool using 1D Laserscale ^[43]

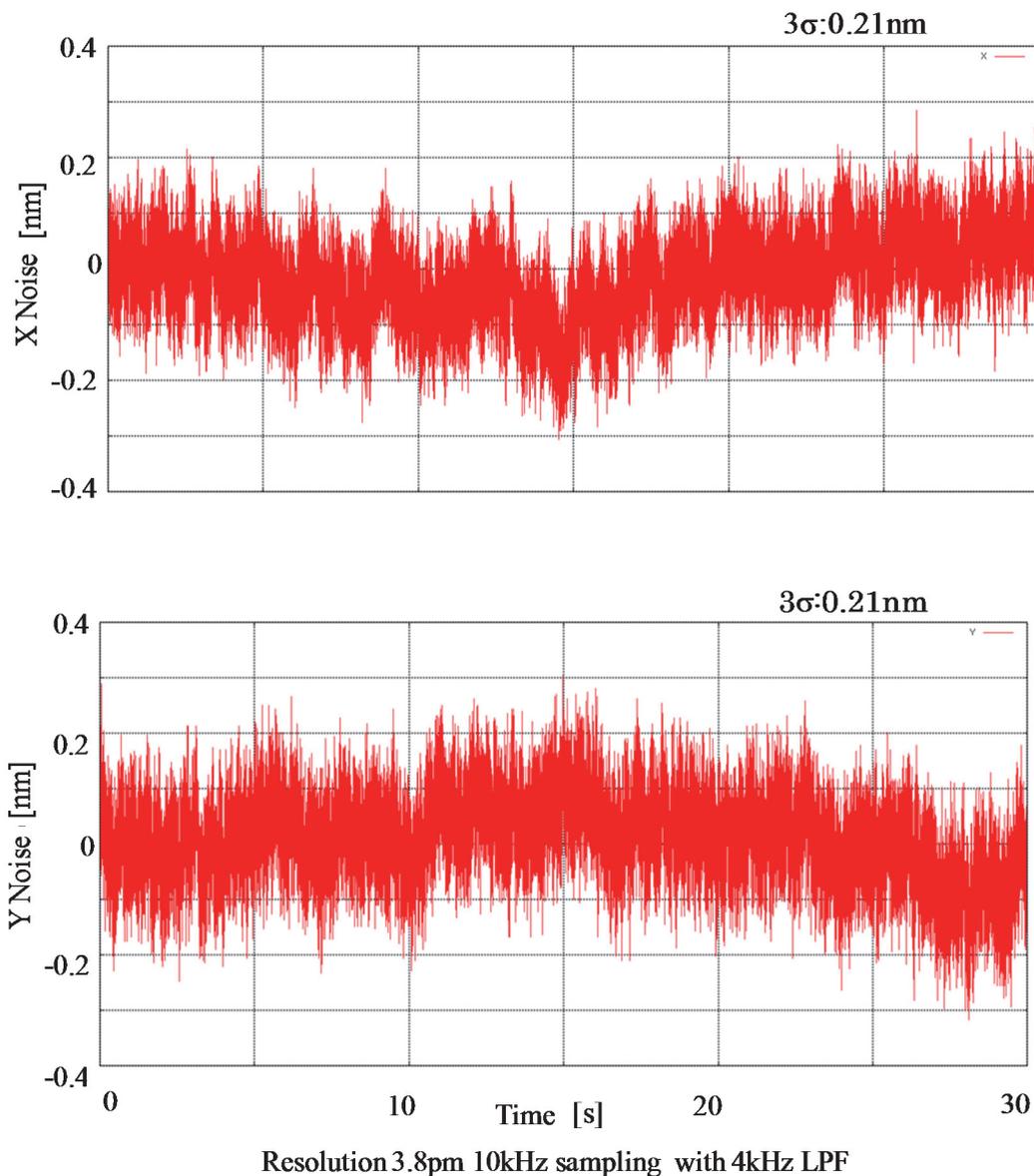


Fig. 4-13 Noise data for 30s

図 4-14 に安定性の計測結果を示す。工作機械における精度の測定に必要な計測時間中のドリフトが大きいと象限突起の測定やバックラッシュの測定等に支障が出るだけでなく、計測の再現性が悪くなるため重要である。

スケールとヘッドを機械的に固定した状態で、安定性の計測を行った。10 kHz のサンプリング周波数で 60 秒間の安定性を X 軸と Y 軸について行った。

X と Y は同時に計測しては行かないが、一方の計測中には他方の計測も行える状況で計測を行った。計測中の温度は $23^{\circ}\text{C} \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ に制御され、スケール温度が計測温度に達し、取り付けによるドリフトの影響が収まるまで約 1 日の放置の後、測定が行われた。その結果、いずれの計測軸においても 0.14 nm/min の安定性が得られた。

この結果は1次元レーザスケールの3倍程度であるが、それでも優れた安定性を持っていると言える。

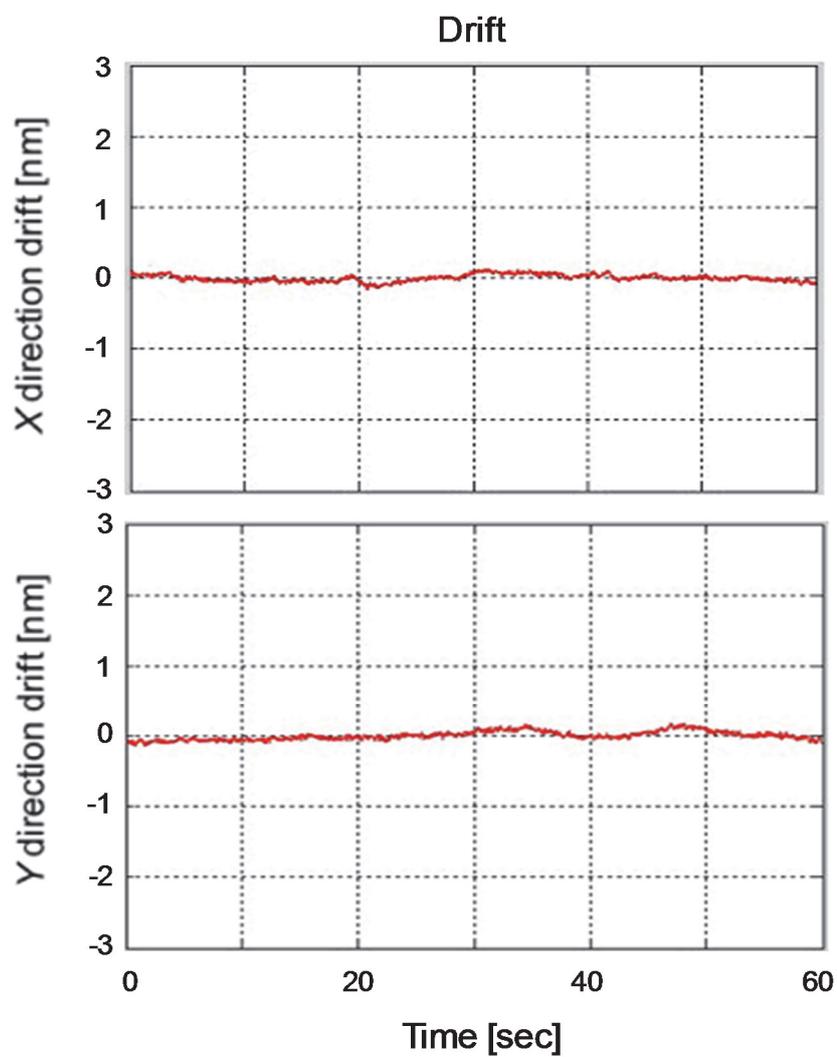


Fig. 4-14 1 minute Stability of 2D scale

4-4 工作機械における2次元スケールの適応方法の検討

4-4-1 2次元スケールの搭載方法

2次元スケールと検出ヘッドを3組組み込んだ工作機械の概念は以下のような構成となる。2次元スケールの検出ヘッドは工作機械の工具と工作機械の相対運動が2次元運動のレベルで可能な限り精度高く検出できるように配置する^[44]。

- ・ 3軸の運動軸を持つ工作機械の場合、これらの2次元スケールと検出ヘッドを3組、それぞれが正規直交の関係となるよう配置する。すなわち、3軸をX、Y、Z軸とすると、2次元スケールはXY面、XZ面、YZ面の運動が検出できるように取り付けられる。
- ・ 2次元スケールは工作機械の運動機構の中に組み込まれるが、検出ヘッドは工作機械構造には結合されない測定フレームに、前述2次元スケールに対応した正規直交の関係となるように固定配置される。
- ・ 各軸の運動制御は、通常のNC工作機械用制御装置と同じ原理で、入力された3次元運動指令情報から制御装置内で各軸の時間対運動位置情報を補間の原理を用いて生成し、それらとフィードバックスケールにより検出された各軸の実際の位置に基づき、軸毎に独立に行われる。

図4-15、4-16に、これらの要素を考慮した工作機械の構成案を示す。

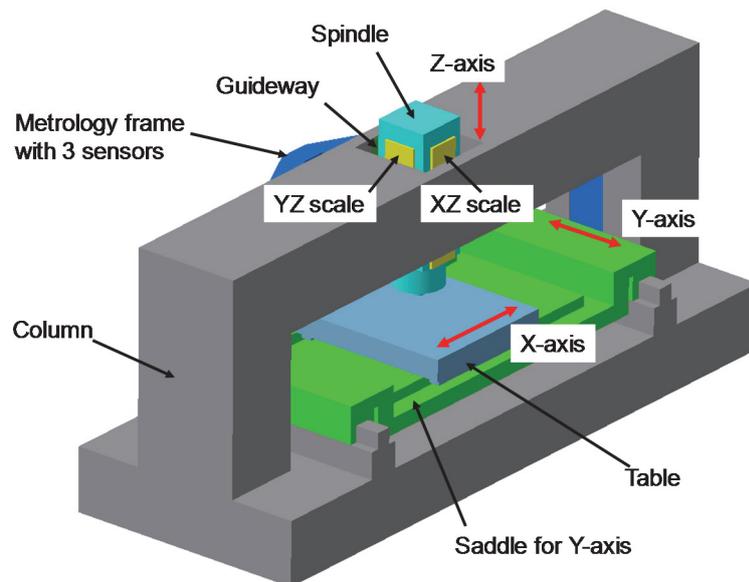


Fig. 4-15 Example configuration of a machine tool equipped with 2 dimensional sensors.

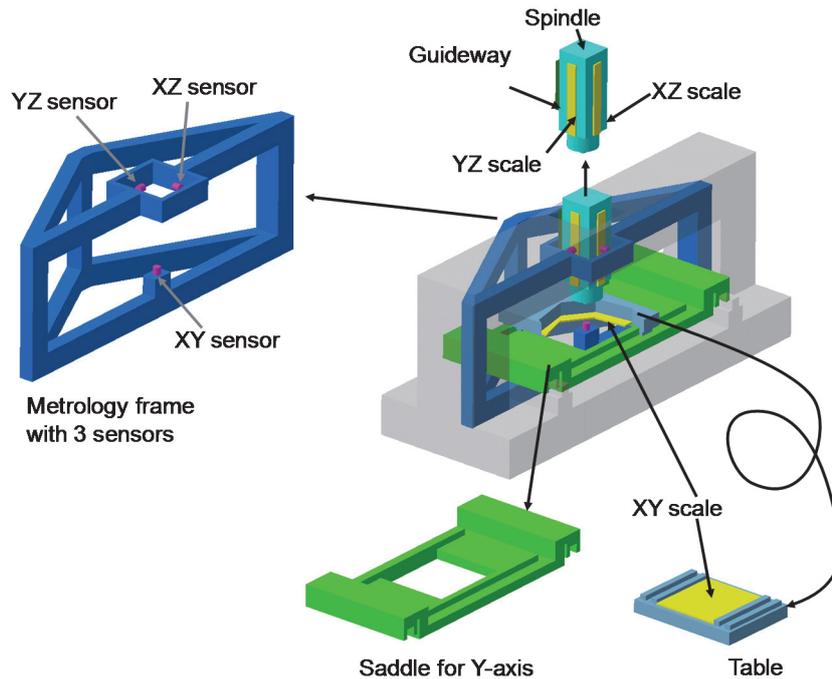


Fig. 4-16 The component details of Fig. 4-15

図 4-15 の構成機構で説明する。テーブルの XY 水平面の動きにおいては、テーブルの下面に配置された XY スケールが位置情報を提供し、スピンドルの垂直方向の XZ 面 XY 面の動きは、XZ スケール YZ スケールがそれぞれの面での位置情報を提供する。ここで XZ スケール、YZ スケールの計測範囲は、Z 方向はスピンドルの稼動範囲であるが、X、Y 方向はコラムのたわみなどによる機械の変形範囲だけでよいため、一見、1 次元スケールの様な細長い形状のものとなる。これら 3 枚の 2 次元スケールの各 2 軸の検出ヘッドを組み合わせたものを、図中では sensor と表示し、機械のコラム内に、コラムとは遊離した形でインバーなどの線膨張係数の低い材料でできたメトロジーフレームにそれぞれ検出すべき 3 枚の 2 次元スケールに対向して設置され、コラムやテーブルの変形に追従するスケールの位置情報を読み取ることによって機械の運動誤差を検出する。

この機械システムでは、機械の 3 次元運動挙動を、3 組の 2 次元センサー XY、YZ、XZ で、3 組の 2 次元平面内の運動の組み合わせで検出し、制御装置内に記憶保持する。

一方、制御装置は、3 次元の運動軌跡指令情報を記憶保持している。この軌跡指令情報に基づき、3 次元補間指令を生成し、各軸の運動制御をおこなった結果の各軸運動挙動もまた制御装置内に記憶できる。以上述べた、3 種類の記憶保持される情報、すなわち、2 次元レベルでの運動の様子、2 次元の軌跡指令情報、実際の各軸運動挙動を同一時間軸上で評価することにより、機械が 3 次元運動指令に対してどの程度正確に運動したかの認識ができ、その認識結果に基づき、3 次元レベルで各軸の補正データをリアルタイムで算出し、補正実行が可能になる。図 4-17 に計測制御のブロックダイアグラムを示す。

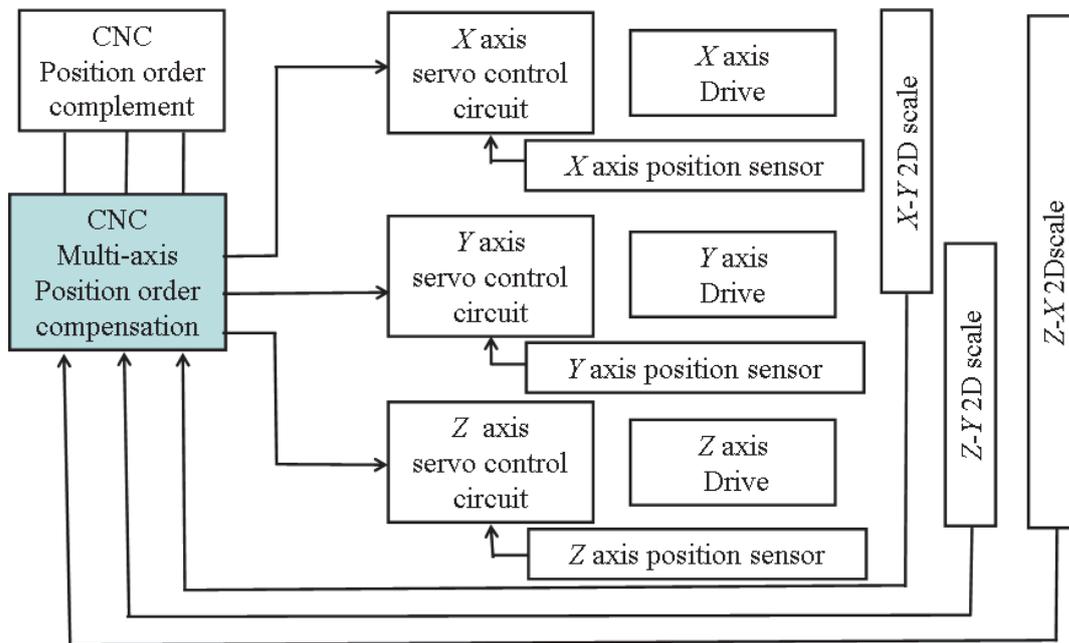


Fig. 4-17 System block diagram of control and measurement.

ここで、各軸の誤差を表 4-2 の様に表し、工作機械の測定軸間の距離を図 4-18 の様に表すと、補正は式(4-9)で表わされる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\varepsilon_y(x, y) - \varepsilon_y(z) & \delta_x(z) - \delta_x(x, y) - (P_z - L_z)\varepsilon_y(x, y) + L_z\varepsilon_y(z) \\ 0 & 1 & \varepsilon_x(x, y) - \varepsilon_x(z) & \delta_y(z) - \delta_y(x, y) + (P_z - L_z)\varepsilon_x(x, y) - L_x\varepsilon_z(x, y) - L_x\varepsilon_z(z) + L_z\varepsilon_x(z) \\ 0 & 0 & 1 & \delta_z(z) - \delta_z(x, y) + L_x\varepsilon_y(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

Table4-2 Errors

$\delta_x(x, y)$	Translation error of machine table in X-direction
$\delta_y(x, y)$	Translation error of machine table in Y-direction
$\delta_z(x, y)$	Translation error of machine table in Z-direction
$\varepsilon_x(x, y)$	Rotation error of machine table around X-axis
$\varepsilon_y(x, y)$	Rotation error of machine table around Y-axis
$\delta_x(z)$	Straightness error of Z-axis (spindle) in X-direction
$\delta_y(z)$	Straightness error of Z-axis (spindle) in Y-direction
$\delta_z(z)$	Positioning error of Z-axis (spindle)
$\varepsilon_x(z)$	Pitch error of Z-axis (spindle)
$\varepsilon_y(z)$	Yaw error of Z-axis (spindle)
$E_z(z)$	Roll error of Z-axis (spindle)

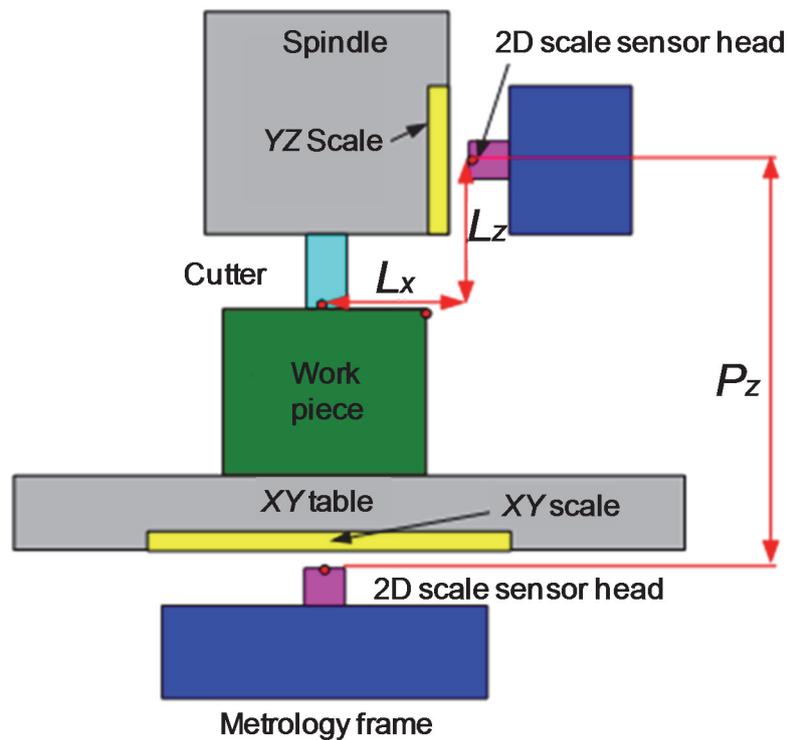


Fig. 4-18 Design parameter of the sample machine

4-4-2 補正システムの構成

図 4-19 に従来の制御システムと提案する補正システムを示す。通常の NC 制御装置に 2 次元スケール信号を直接入力して軸間補正を行う場合、コントローラのクロックと各軸のインターポレータのクロックは同期しないため、時間差が発生して補正誤差が発生する事が予想される。また、この場合、通常の NC が信号を受け取るサイクルは数 ms 程度の時間間隔でおこなわれるため、補正に時間がかかって制御の遅延が大きくなり運動精度が上がらない可能性もある。しかしながら、図中の統合インターポレータを使用し、軸間の補正をインターポレータ側で行うと、各軸のデータ取得を同時に行え、インターポレーションの後に補正を高速で行う事ができるため、精度向上が期待できる。

32 ビットの位置データの 6 軸間補正を行う場合、100 MHz のクロックを使用した場合、およそ 1 μ s 程度のデータ遅延で補正計算を終了する事は可能であると考えられる。

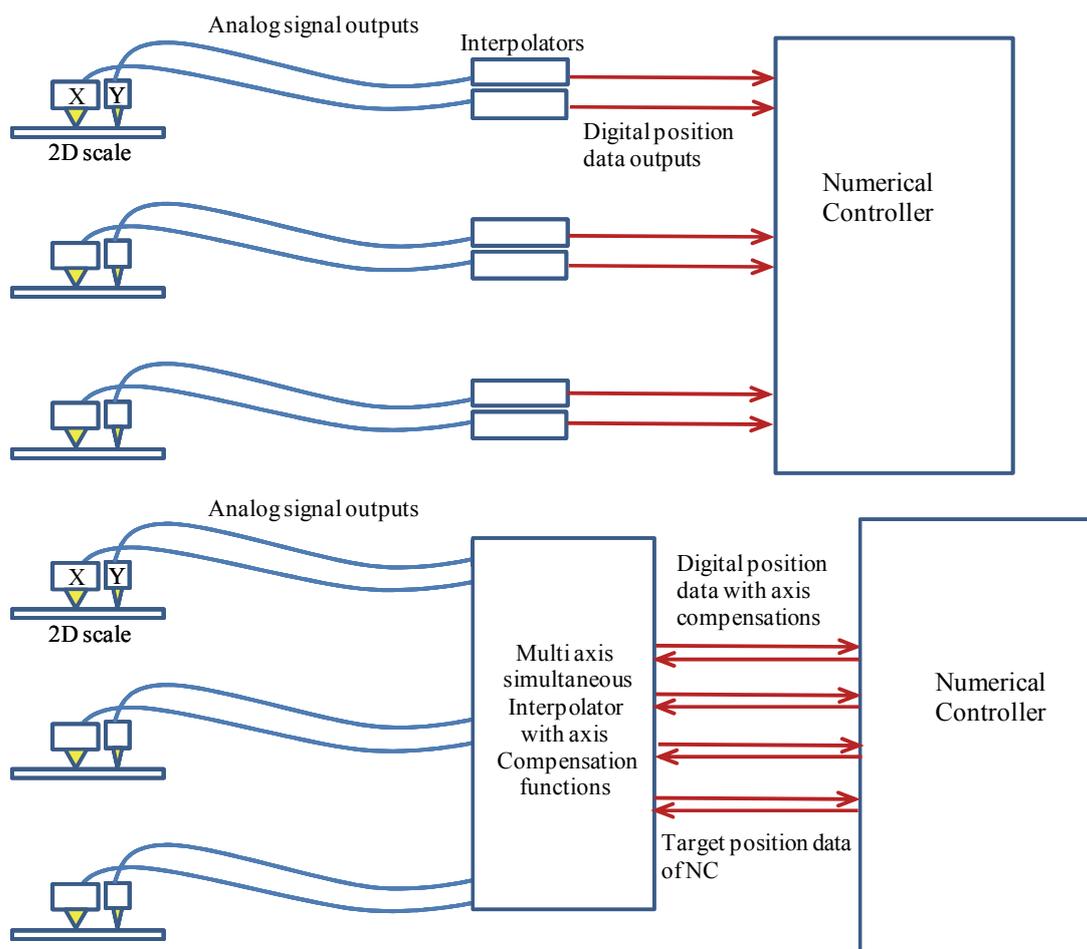


Fig. 4-19 Comparison of normal NC and multi-axis simultaneous interpolator with axis compensation

4-5 結言

1 nm 精度の超精密工作機械のリアルタイム運動誤差補正に株式会社マグネスケールの2次元「レーザスケール」が妥当であることを確認し、研究のためのスケールを試作しその評価を行った。その結果、本研究に必要な性能を持つことを確認した。

合わせて1 nm の運動誤差を補正する時に避けて通れない、工作機械の軸間補正のための機械への装着の構造についても検討し、その具体的な案が示した。

第5章 2次元スケールを使った補正とシステムとしての評価

5-1 序言

1 nmレベルの超精密加工精度が既に非球面レンズ金型加工機械の領域において実現されていることは第1章で触れたが、今後も、このような精度向上の傾向は続いていくと考えられる。レンズ金型加工機の場合は旋削作業をベースとした微小の送りで2軸に軸方向制御をするだけのものではあったが、加工製品の複雑な3次元自由曲面生成に精密加工が必要となった場合は、加えて考慮すべき誤差補正がある。それは3次元曲面生成に必要な工作機械の送り3軸（X, Y, Z軸）のリアルタイム軸間補正である。すなわち、3次元面生成で1 nmレベルの加工精度を向上させるには、工作機械の設置場所の温度管理やクリーン度の管理などに注意を払ったとして、わずかであっても切削抵抗により変形誤差、発熱による熱膨張誤差、加工物の重心移動によるたわみ誤差などの運動誤差補正を考慮すると同時に、加えて軸間リアルタイム補正を考慮する必要があると考える。

MEMSシステムや光学部品の金型など高い精度が要求される部品の製造においては、基本的に、超精密加工機などによる極めて高い運動精度を保証する加工装置が必要となる^[45]。工作機械の加工精度はその機械の持つ運動誤差により決まる^[46]。その誤差原因は時間軸で3つに分類される。

第1の誤差原因は、工作機械の製品仕様に謳われる初期精度に関わるものであり、これは設計仕様に基づく部品精度や組立て調整精度、制御系の追従精度、などの製作工程で累積された誤差であり、工作機械メーカーの出荷時、あるいは加工現場への設置時の機械初期精度を決めるものである。

第2は、その初期精度が経時的に悪化する要因で、設置環境、使用条件、などに影響を受ける機械の劣化を引き起こすものであるが、これは、機械の信頼性設計レベル、製作品質レベル、メンテナンス状態によりその大きさは異なる。

いずれにしても加工精度を低下させることになる。

第3は、実際の加工時に発生する運動誤差である。切削により発生する熱による変形、切削抵抗による機械のたわみ、加工物の重量移動によるたわみ、などの原因で起こる運動誤差でこれらの負荷が除去されると解消される誤差である。

従って、第4章で述べた様に、多軸間の運動誤差補正を含めた、分解能が pm レベルの2次元スケールを3組で構成した、3次元加工空間の位置検出を可能とするスケールシステムを提案し、その実現可能性を検証することにしたわけであるが、検証を簡素化するため、本研究では、2軸間における2次元の運動誤差補正を試み検証することとした。

本章では、2次元の運動誤差を直接リアルタイムで同定すると同時に、その同定結果に基づいてリアルタイムで2次元の運動誤差の補正を実行するシステムを研究した結果についてのべる。この研究では、まず2次元運動の挙動を直接同定するセンサーとして、高精度2次元ホログラムスケールシステムを開発した結果について述べる。それに続いて、このセンサーシステムによって得られた結果を解析して、再現性のある運動誤差のみを抽出する方法とそれを利用して3次元的な運動誤差補正を行う方法について研究した結果を述べる。また、この補正効果の有効性を実験により確認した結果について述べる。

5-2 2次元レーザスケール開発の背景

これまで工作機械の精度を計測し高精度加工を行うため、多くの計測システムが開発されてきた。ダブルボールバーシステムは、これを用いて、工作機械の2次元から3次元の精度を短時間で計測することができる^[47]。しかしその計測範囲は、伸縮バーのストロークの可動距離の制限で限界がある。一方、レーザビームの干渉を使ったレーザ干渉計で直線変位の計測を行う高精度精度測定装置がある。このレーザ干渉計ではナノメートルの分解能が得られるが、空気の温度、圧力と湿度などの変化の影響を受けやすく、計測環境は制限されている^[48]。しかし、第1の誤差を含む工作機械の初期精度計測には問題なく、これらの計測方法がとられている。また、第2の誤差原因である経時的劣化をメンテナンスや、校正といった機械精度復帰作業時の計測方法としても適応されている。

しかし、第3の運動誤差を計測するには、ダブルボールバー方式は計測範囲の問題、レーザ干渉計は悪環境と言える実切削加工状態での空気の揺らぎの影響を受けると言う問題から、それぞれ使用は困難である。これに対し、ホログラム方式リニアレーザスケールは、レーザ干渉計に比較して環境の影響を受けにくく、また、リニアスケールであるため直線方向の計測範囲も大きく取れる。

さらに、格子干渉計方式のリニアスケールでは、サブナノメートルの分解能も得られるなど工作機械の実稼動状態での微小な運動誤差補正用の位置検出方式として有利である。例えば、ホログラムをスケールとして使うレーザスケールでは、既に0.0625 nmの分解能が達成されている^[49]。そして、ホログラム方式レーザスケールには2次元計測機能を持つ2次元スケールもある。1 nmレベルの超精密加工を実現する工作機械の運動誤差の計測には、単に送り方向の位置情報だけでなく、走行の直線性情報、さらには送り軸間の誤差情報が必要となってくるが、それには、スケールとしてこの2次元計測機能が不可欠となってくる。ハイデンハイン株式会社が開発したクロスグリッドシステム (KGM) は非接触の2次元計測が可能で、工作機械の前述の第3の運動誤差解析に適している^[50, 51]。

工作機械精度の評価測定は、多くの計測装置にとって基本的なアプリケーションのひとつであるが、これら計測装置を単に状態計測として使うのではなく、工作機械の稼動状態において発生する再現性のある運動誤差を補正することに活用することが重要となってくる。

数値誤差補正の研究者であるHockenは、数値補正を三次元座標測定機に適用する研究を行っている^[52]。またDomenzは、準静的な誤差補正のための一般法について述べ、そこには幾何学的な誤差と温度変化による誤差が含まれている事を示した^[53]。SatoriとZhangは、1995年以前に開発された幾何的な計測誤差とその補正方法についてレビューしているが、そこでは、数値補正の基本が示され、種々の誤差計測法と補正法がまとめられている^[54]。

近年、Schwenkeは、幾何的な誤差計測と実応用の視点から見た誤差補正について再検討をしており、新しい校正方法の出現と、国際基準の新概念及び、進展する工作機械コントローラの誤差補正能力について述べている^[46]。

5-3 ホログラムスケールを用いた2次元工作機械精度測定システム

5-3-1 2次元スケールと検出ヘッド

ホログラフィックに作製された格子は、ルーリングエンジンをを用いて作製された格子やフォトリソグラフィックに作製された回折格子に比べて不要な回折光が少ない^[55]。その結果、ホログラムスケールは、一般的な回折格子を用いたスケールよりも精度が高いことから、これまでに、高精度のホログラムスケールを用いた2次元の工作機械の精度測定装置、すなわち2次元スケールが開発されている^[56]。

最新の2次元スケールは、2つの直交する回折格子から成り、一方はX軸方向の変位の計測に用いられ、他方はY軸方向に用いられる。

スケールのサイズは120 mm×120 mmで、回折格子のピッチは1 μmである。

検出ヘッドは、スケールの変位を格子干渉計方式で検出し、検出信号の波長は250 nmとなる。この信号は、内挿処理回路により1/4000分割され、最終的には0.0625 nmの分解能のデジタル位置信号として出力される。図5-1に実装された2次元スケールの写真を示す。また、図5-2に2次元の検出ヘッドの写真を示す。

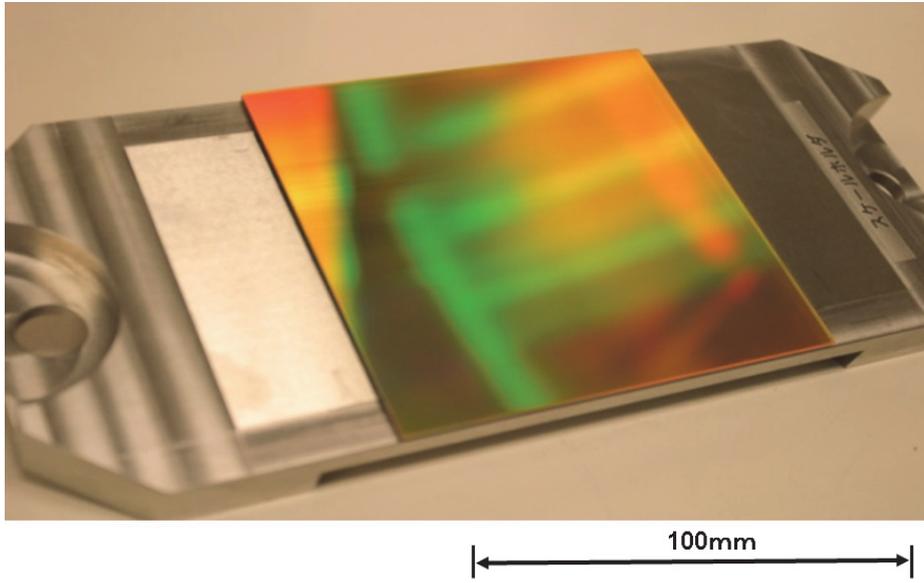


Fig. 5-1 2D holographic scale

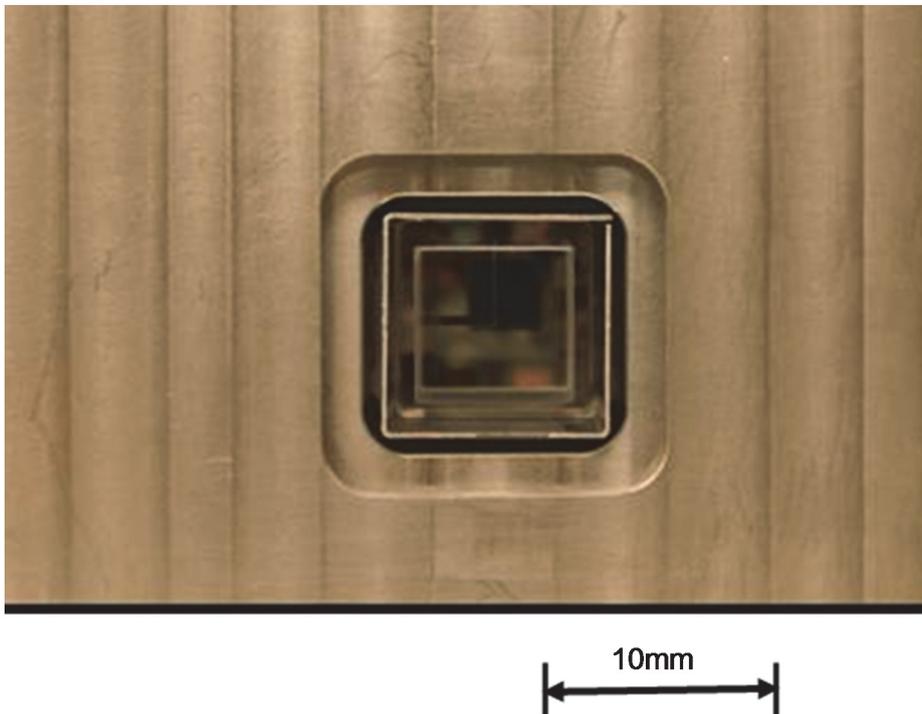


Fig. 5-2 Sensor head for the 2D accuracy measurement system

5-3-2 2次元精度測定用ソフトウェア

測定ソフトウェアはC++言語を用いてプログラムされ、OPEN GLグラフィックディスプレイライブラリーを利用して開発した。図5-3 に、工作機械テーブルの円運動誤差計測を試験した際の計測画面例を示す。

本ソフトウェアの主たる機能は以下の通りである。

(1) ユーザーインターフェース

- ・ハードウェアのキャリブレーション実施操作
- ・計測パラメータの設定
- ・各種計測結果表示パラメータの設定
- ・目標軌跡の作成機能を含むグラフの作成と文書操作

(2) NC コードの生成

- ・数値制御機械の運動挙動を計測する際に使われる運動を定義した NC プログラムを生成する。以下の運動試験を行う NC プログラムが生成される。

円運動試験

自由曲線運動試験

送り速度試験

補間試験 (ISO230-4, ISO10791-6)

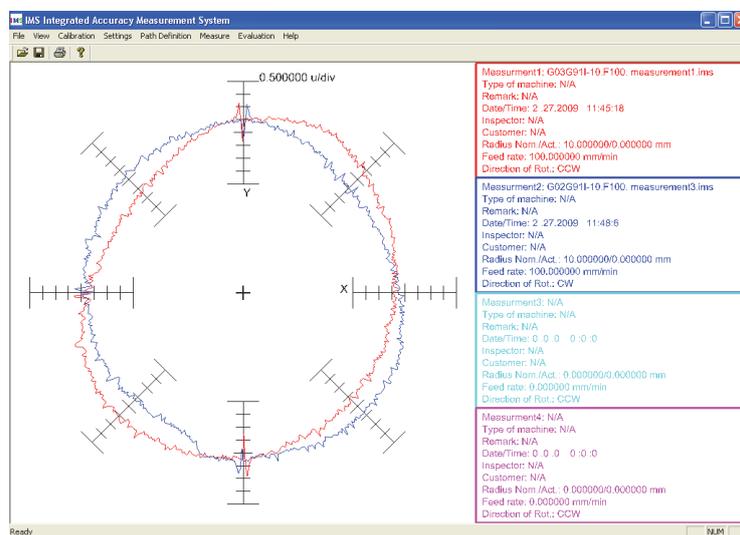


Fig. 5-3 The dedicated software of 2D accuracy measurement system

(3) 2種類の測定データ取得

- ・特定軌跡モード
あらかじめ定義してある運動軌跡に従って運動している最中のみ測定データが取得されるモードで、それ以外の運動を行っている部分のデータは捨てられる。このモードは運動精度試験を行う際に使用される。
- ・直接データ取得
機械の運動中すべてのデータポイントでデータを取得する。このモードは、ハードウェアをキャリブレーションする際に使用される。

(4) 工作機械運動試験データの解析

- ・このモジュールは測定データの可視化、工作機械誤差特性パラメータの評価、定義された運動軌跡と実際の運動軌跡との間の誤差の評価を行う。測定データの可視化には、円運動試験結果の極座標形式による表示、円運動試験結果の直交座標形式による表示、自由曲線運動試験結果の直交座標形式による表示を行う。工作機械誤差特性パラメータの評価は、ISO230-4に従った円運動試験で得られる特性パラメータの評価を行う。定義された運動軌跡と実際の運動軌跡との間の差の評価は、円運動や自由曲線運動の運動誤差評価を行う。

(5) ドキュメンテーション

- ・ハードディスク上のデータの保管
- ・データのハードディスクからの読出し
- ・高分解能グラフィクスやプリンターへのデータ転送

5-4 工作機械の誤差モデルと誤差補正

5-4-1 3軸工作機械の一般的な3次元誤差のモデル化法

3軸の工作機械の位置精度を表現する一般的なモデル方法は、 x - y - z 座標系内の剛体の6自由度の運動を基本としており、図5-4に示すように、空間内での運動には、1つの位置誤差、2つの直線性誤差、3つの角度誤差（ロール、ピッチ、ヨー）が存在する。これらの中に、3つの直行する誤差が、それぞれの軸の組み合わせに対して存在する。したがって、3軸のNC工作機械には、計21の誤差成分が存在することになる。これらの誤差成分は同次の変換行列で表すことができる^[57, 58]。立体空間での誤差は同次の変換行列をお互いに掛け合せて得られ、基本的には、スピンドルとテーブル間の一つの変換行列が作られ、位置の誤差だけで取り扱われる。

先に述べた様に、本研究は2次元運動に焦点を絞っているので、前述の式は簡単化することができる。その結果、式(5-1)では、 X 軸と Y 軸方向の位置と非直線性の誤差だけが含まれ、 X 軸と Y 軸の間の非直交性の誤差と X 軸のヨー誤差が含まれている。

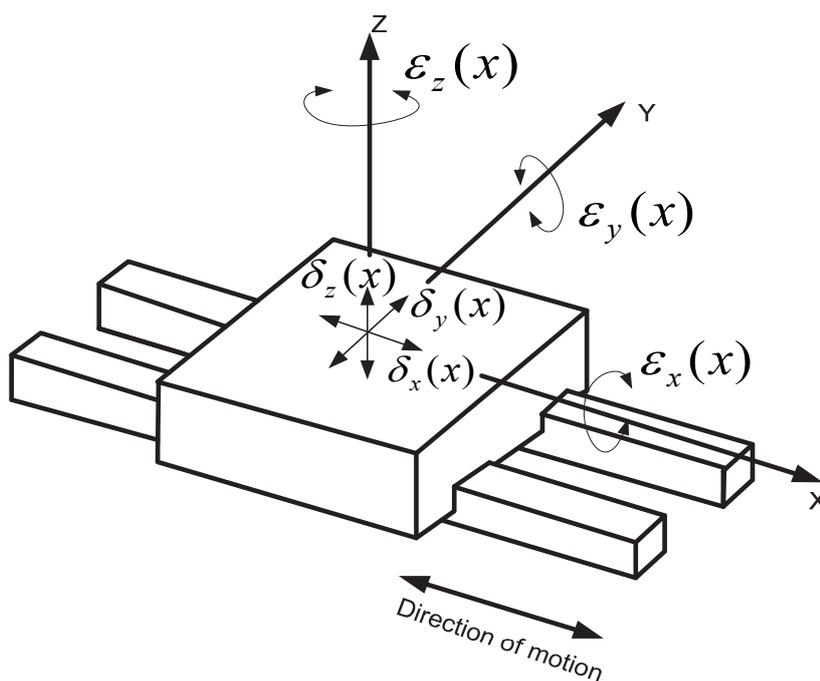


Fig. 5-4 Six component errors of a linear motion axis

$$F_{2D} = \begin{bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_x(x) + \delta_x(y) + y \cdot \alpha_{xy} - y \cdot \varepsilon_z(x) \\ \delta_y(x) + \delta_y(y) \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

$\delta_x(x), \delta_y(y)$: 位置誤差

$\delta_y(x), \delta_x(y)$: 直線性誤差

$\delta_z(x)$: 角度誤差 (ヨ一)

α_{xy} : 非直交誤差

簡単化された2次元モデルにおいては、それでも未だ6成分の誤差関数が総誤差解析の中に含まれている。実際、各々の誤差を測定する事は、大変難しく、時とともに誤差形態が変化するため、常にこの情報を更新するのは極めて困難と考えられる。この問題を解決するためには、より簡潔で、この誤差モデルに匹敵する関数の導出が望まれている。

5-4-2 新工作機械の軌跡誤差補正方法

2次元スケールを使用した場合の最大の利点の一つは、2次元スケールを機械の2次元移動ステージの裏側に取り付けることにより、加工中でも機械の2次元の運動を直接測定できる事である。NC工作機械においては、2次元スケールを介して直接測定された運動軌跡とNCプログラムによって規定される理想的な運動軌跡を比較する事によって、運動誤差を定める事ができる。

前述した考え方に基づけば、物体がある軌跡に従って運動した場合でもその運動誤差を関数表現することが出来る。誤差は設定した指令位置と計測された実際の位置との間の距離である。ここで誤差の符号のマイナスは、計画上の軌跡よりも左にいる事を示し、プラス符号は右を示しており、機械の目指す理想位置へのパスの方向である。例えば、軌跡が厳密に円であれば、誤差関数の独立変数は、円の中心からの位置の角度と半径の誤差となる。ここで、符号は、計測された半径が計算上の半径よりも小さい場合にマイナスとなり、プラス符号は大きい場合となる。

運動誤差は時計回りの場合プラスになり、反時計回りの場合マイナスとなる。

本研究ではBスプラインファンクションが誤差関数を表現する方法として採用されている。一般的なBスプラインファンクションは次式の様に表される。

$$f(x) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}((x - x_s)/(x_e - x_s)) V_i \quad (5-2)$$

ここで、

$[x_s, x_e]$: 設定した機械の運動範囲、

- V_i : 縦座標,
 $N_{i, p}(u)$: ノットベクトル $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{n+p+1}\}$ に関して定義された基底関数,
 p : 基底関数の次数

である.

設定した運動軌跡距離に比べると V_i の大きさは非常に小さいので, 均一な B スプライン基底関数が適し, ノットベクトルは次のように示される.

$$u_i = \begin{cases} 0 & 0 \leq i \leq p \\ (i-p)/(n+1-p) & p+1 \leq i \leq n \\ 1 & n+1 \leq i \leq n+p+1 \end{cases} \quad (5-3)$$

基底関数は帰納的に定義され, 次のように表される.

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5-4)$$

$$N_{i, p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i, p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1, p-1}(u) \quad (5-5)$$

誤差関数の成分は, 誤差残差の統計的な分布を考慮する事により, 繰り返し再現性データから求める事ができる^[59]. 図 5-5 は高精度工作機械テーブルの真直度の繰り返し再現性のデータから再現誤差関数を抽出した例を示している. 図 5-6 は, 残差誤差の統計的分布を示している.

誤差の厳密な定義により, B スプライン誤差マップはどの軌跡上においても, 簡単に X, Y 成分に分解できる. すべての計測において再現誤差は計画位置からのずれの大きさと方向を表しており, 分解が容易にできる. すべての誤算が分解されれば, これは X, Y 軸に入力する 2 つの関数に等しく, 出力誤差の X, Y 成分となる. 本質的にこれは 式(5-5) から得られるものと同じであるが, 2 成分の誤差関数であって (各々の誤差関数軸に 1 つの成分で) 6 成分の誤差関数ではない. それゆえ, 簡単に計算でき, シンプルに使えるにも関わらず結果は精度が高い.

同定された誤差関数によって, 運動誤差の振る舞いが再現性を有するかどうかの確認を行う事ができる. また確立された誤差関数は, 誤差補正に使う事ができる. もし確認結果が, 誤差補正関数がもはや適正でない事を示した時は, 新しい誤差関数を最新の運動軌跡データから導くことができる.

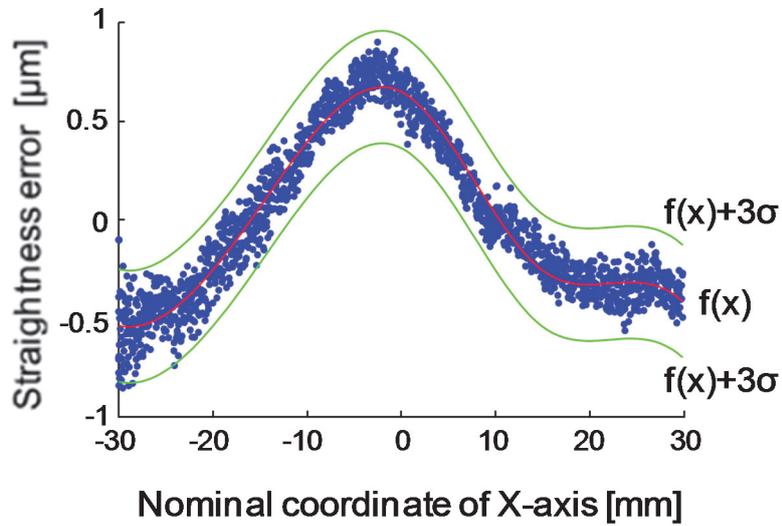


Fig. 5-5 Extraction of component error function by least squares fitting

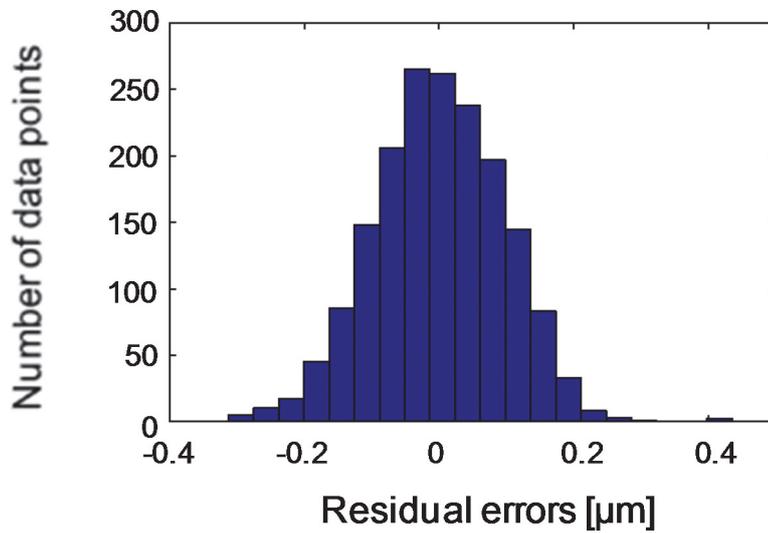


Fig. 5-6 Distribution of residual errors for the extraction of component error function

5-4-3 NC コード変更による誤差補正

工作機械のための数値誤差補正を行うために、ツールパスの計算された軌跡データを繰り返し測定データから作られた数値誤差マップにより補正する事が可能である。NC コードによる誤差補正のプロセスの概要を図 5-7 に示す。

最初に位置精度が測定され、計算上の軌跡と比べられた後、5-4-2 で述べた誤差マップが生成される。その後、符号を反対にした誤差マップが計算上の軌跡に誤差を補正するために加えられる。逆誤差マップはスケールそのものの計測に与える誤差は無視できるものと仮定している。(計算上の軌跡のある点における誤差が多少大きい場合であっても、せいぜい数 μm 程度しか離れていない点にあるから無視できる)。このため、誤差は単純に計算上の軌跡から引かれて補正軌跡が作られる。例えば目的とする円軌跡の半径が 5 mm の時、実際に計測された運動軌跡の半径がある角度で 5.001 mm であった場合、調整された軌跡は同じ角度の場所において 4.999 mm の半径になる。

一度補正軌跡が生成されると、それは工作機械に NC コードとして直線と回転の成分に合成される。ただし、軌跡の上の離散的な点の間を補完するデータを作る作業は、1 行の NC コードに 1000 行あまりを要するため、あまりにも多い点を持つ場合は誤差補正に完全には使えないことも考えられる。

この様に、軌跡の分割補正は徐々に細かくされていき、さらなる分割が精度の改善を生じなくなるまで繰り返される。

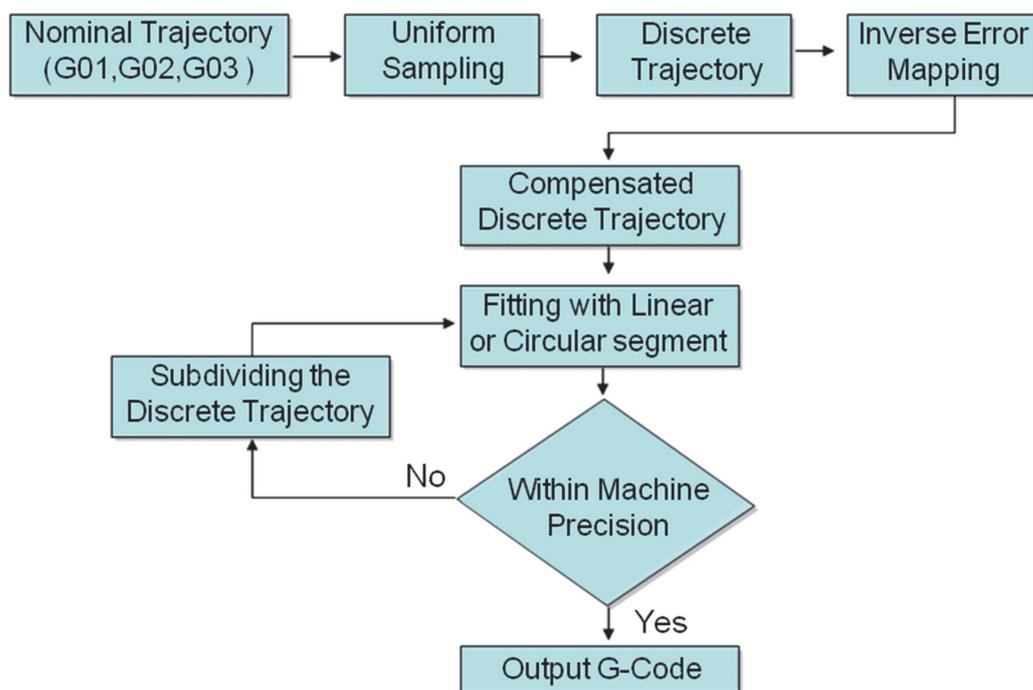


Fig. 5-7 Flowchart of compensation G-code generation

5-5 誤差計測と誤差補正の実験的検証

現在、高精度工作機械と呼ばれるものには、駆動方式においてボールネジ駆動方式とリニアモータ駆動方式の2種類がある。一般的にリニアモータ駆動方式の機械は、ボールネジ駆動方式の機械に比べ幾つかの高精度化に有利な点がある。すなわち、ダイレクト駆動であるため構成部品が少ないということから、駆動体の慣性質量が小さいこと、部品の組み合わせによって起こる動力伝達系の弾性が低いこと、バックラッシュとヒステリシスが皆無であること、そして摩擦が非常に小さい事などである^[60]。これらの特徴の多くがコントロールシステムの性能に影響を与えるため、誤差補正の効果を異なる駆動系を用いたシステムで比較実験を行った。実験においては、ボールネジ駆動の工作機械と、リニアモータ駆動の工作機械を準備し、どちらの機械も0.1 μm の精度が得られるようにプログラムを組んだ。誤差計測と誤差補正は、実験を簡素化し、結果分析を容易にする意味で工作機械テーブルのXY軸平面上で行った^[57]。図5-8に計測実験時の代表的なセットアップ状態の写真を示す。

5-5-1 ボールネジ駆動機に関する実験

図5-9に、ボールネジ駆動方式の実験に使用された機械の運動原理の構造を示す。5-4-2項で述べた様に、XY平面上の体積誤差マップは、機械構造に従って誤差成分を合成する事によって得られる。誤差補正の有効性を確認するため、機械のXY平面上の円軌道運動テストを補正前後で行った。図5-10に実験装置のセットアップの写真を示す。

テストパラメータ
ノミナル半径： 20 mm
駆動速度： 200 mm/min
テスト方向： 時計回り

実験結果を図5-11に示す。誤差補正の後では輪郭精度の明らかな改善が見られたが、それに対して象限突起誤差の改善は見られなかった。

実験結果の平均値と標準偏差及び2乗平均平方誤差を表5-1に示す。

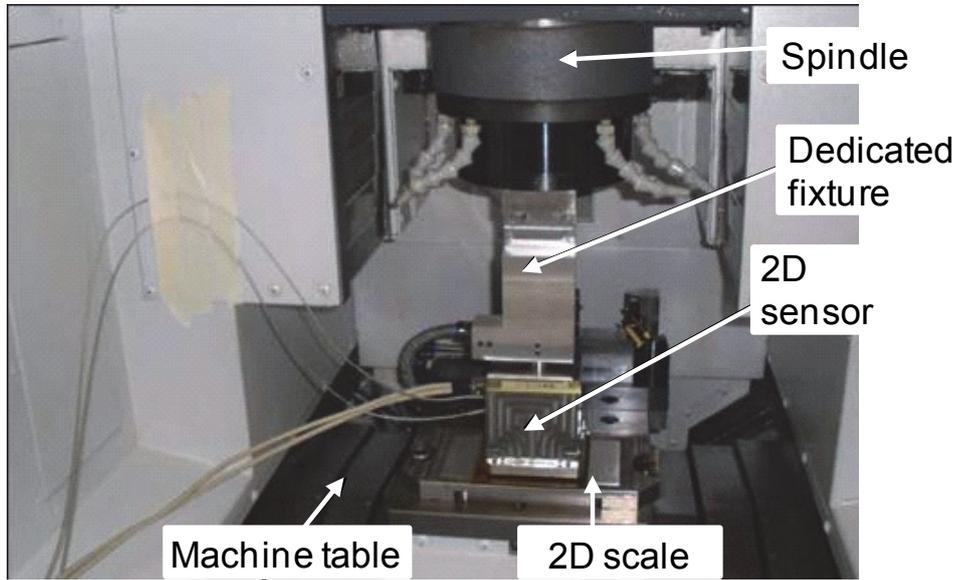


Fig. 5-8 Complete measurement system installed on a machining center

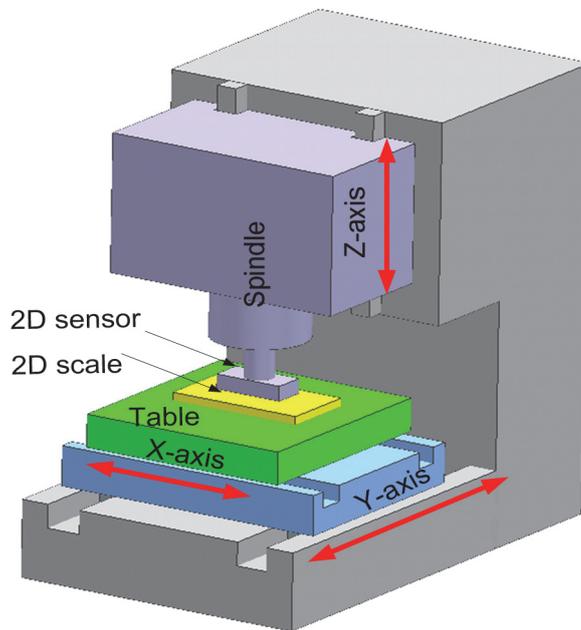


Fig. 5-9 Kinematic structure of the ballscrew driven machine

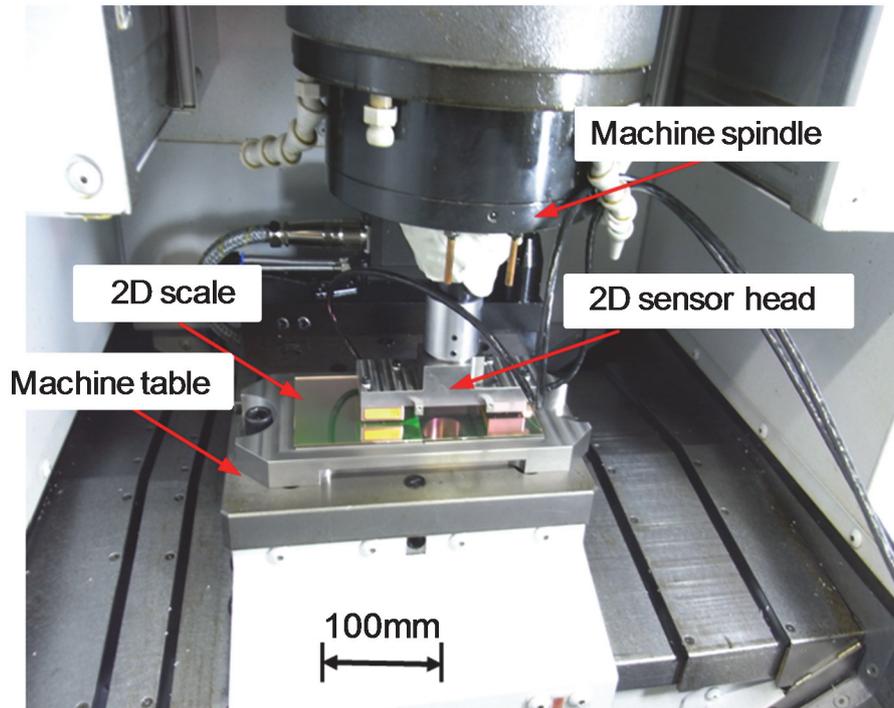


Fig. 5-10 Setup of the experimental system on the ball screw driven machine tool

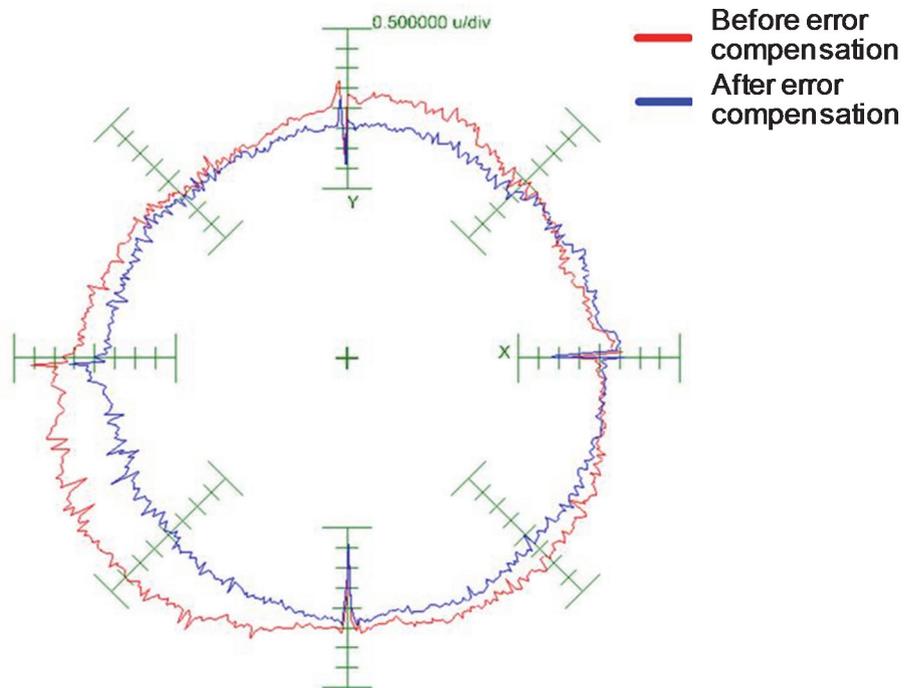


Fig. 5-11 Circular test before and after error compensation the ballscrew driven machine

Table5-1 Error characteristics before and after error compensation

	[unit: μm]		
	Mean	Std Dev	RMS
Before error compensation	0.3940	0.5811	0.7016
After error compensation	-0.0609	0.3379	0.3431

5-5-2 リニアモータ駆動機に関する実験

本研究で新たに提案した2次元の精度測定装置，すなわち2次元スケールを使った誤差補正方法を確実に評価するため，誤差補正実験は外乱の少ないリニアモータ駆動の高精度工作機械に対して行った．図 5-12 にリニアモータ駆動機の運動原理の構造を示す．同様に 5-2 節 で示した方法に従って，3次元の体積誤差マップが作成された．

図 5-13 にリニアモータ駆動機における実験のセットアップの様子を示す．実験条件については，ボールスクリュウ駆動機の場合と同様に設定した．実験結果を図 5-14 に示す．

リニア駆動機における円軌道描画試験の誤差統計データを表 5-2 に示す．

誤差補正の後，輪郭精度は改善され，ボールネジ駆動機よりも改善効果は高い．ボールネジ駆動機の円軌道描画試験では，高い周波数の運動誤差と，象限突起が見られた．リニア駆動機ではそのような誤差は見られず，問題となっていない．この事からみても，より高分解能の位置決めを行うと，リニアモータ機の軌道補正においては，さらなる改善が期待できる．これに比較して，ボールネジ駆動機の場合は，高周波の運動誤差と象限突起誤差のために，改善効果が制限される．

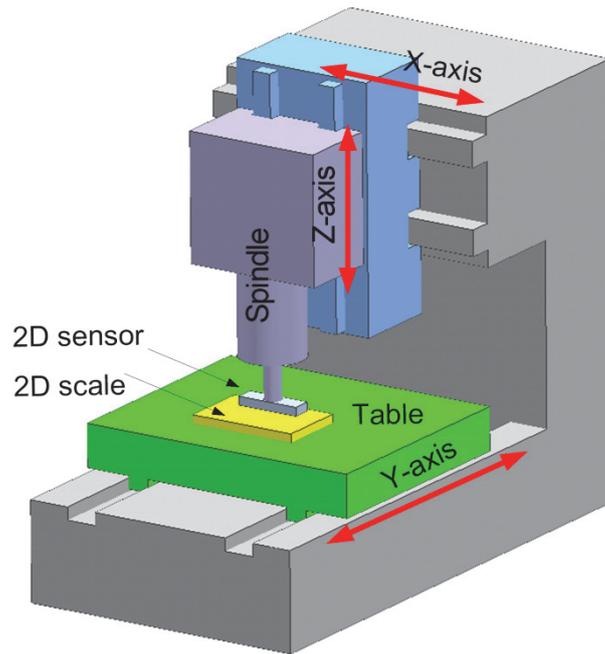


Fig. 5-12 Kinematic structure the linear driven machine

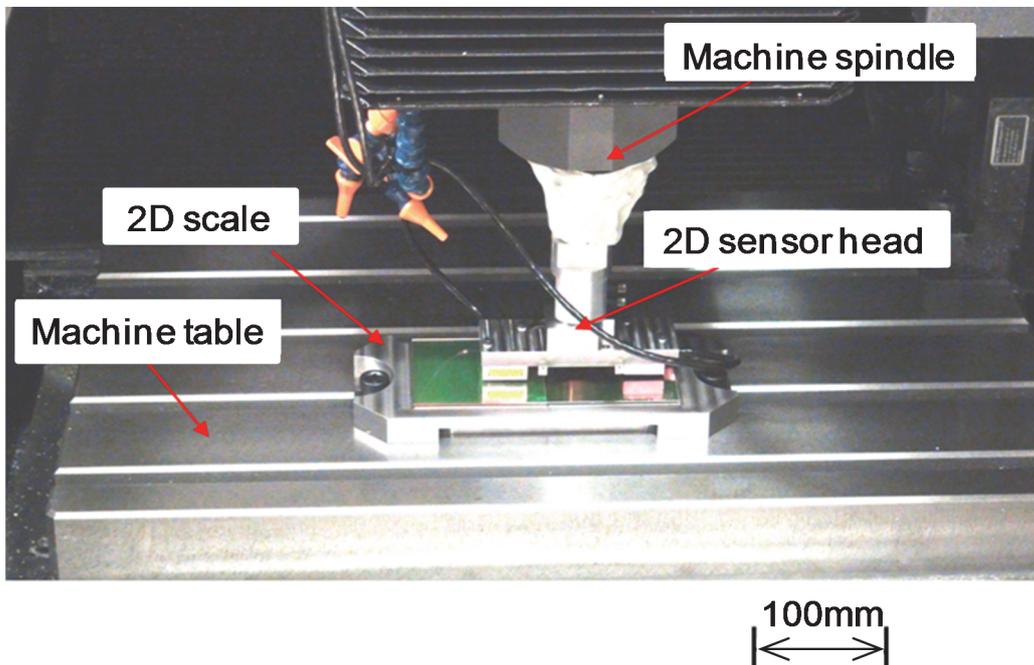


Fig. 5-13 Setup of the experimental system on the linear driven machine tool

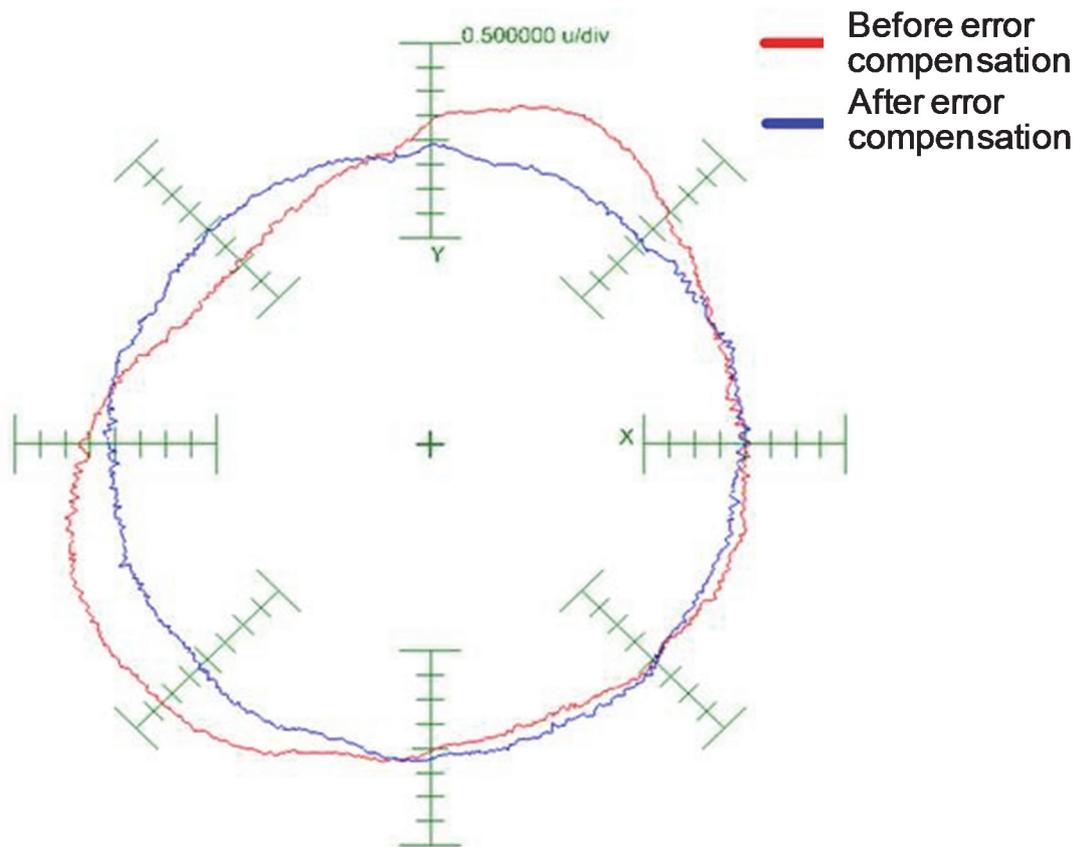


Fig. 5-14 Circular tests before and after error compensation on the linear driven machine

Table 5-2 Error characteristics before and after error compensation

	Mean	Std Dev	RMS
Before error compensation	0.2245	0.6351	0.6732
After error compensation	-0.0100	0.1804	0.1806

[Unit: μm]

5-6 結言

本章では、序言で述べた超高精度工作機械のリアルタイム運動誤差補正を研究するために、その検証実験のための新しい精度測定装置を提案し、その効果を実験機に搭載して確認することができた。

実験ではまず、提案した精度測定装置としての、2次元のホログラムスケールと2次元検出ヘッドを適用した計測システム及びその制御ソフトウェアについて、制御が有効に行われることを確認した。

誤差補正プログラムは、いくつかの誤差関数を合成した3次元の体積誤差マップを用いてGコードにより作成したが、この補正プログラムの有効性も確認することができた。

補正確認実験は、工作機械テーブルのXY軸平面上で行ったが、機械としてはボールねじ駆動機とリニアモータ駆動機の2種類について行った。

結果は、いずれも数値補正の効果を得られることが確認できたが、特にリニアモータ駆動においては、その補正効果が高く制御精度が向上し優れた運動性能を達成できることが明らかとなった。

第 6 章 結論

工作機械の加工精度向上に対する期待はますます高まっているが、将来への高精度化には、工作機械の初期精度の向上だけではなく、加工中の種々の応力により発生する運動誤差、並びに機械の経時的変化による誤差を補正することが必要となってくる。この運動誤差補正に関する研究は数多く進められているが、本研究では、運動誤差補正に必要な技術の中で、特に加工中に機械を止めることなくリアルタイムに運動誤差補正することを可能にする位置検出装置として、リニアスケールシステム技術に注目し、そこに求められるリニアスケールとスケールシステムの機能がどうあるべきかを検討し、その具体的なスケール及びスケールシステムについて新しい方式を提案した。そして、その提案するスケール及びスケールシステムの実現の可能性を実験検証したので、以下に、本研究で得られた結果をまとめる。

第 1 章では、NC 工作機械の高精度化の歴史を制御技術の観点で述べ、その中で位置検出器の必要性の高まりとともに進化してきたスケールをいくつかの検出原理及び方式による差異とともに具体的に説明した。さらに工作機械が高精度化されることを予測し、そこに必要なスケールの技術を明らかにした上で、本研究における工作機械の運動誤差補正技術の開発とその目的を述べた。

高精度化の目標は谷口カーブ^[1]を参考にし、第 1 段階を 0.1 μm レベルの加工精度、第 2 段階は 1 nm レベルの加工精度とした。

第 2 章では、本研究の第 1 段階の加工精度を実現するためのリニアスケールシステムのスケールとして選定した磁気式リニアスケールについて、単体精度を実測するとともに機械搭載時の機械精度および耐環境性を光学式スケールとの比較評価実験で確認し、その優位性を明らかにした。その結果を以下に示す。

精度評価：

- (1) 磁気式スケール単体精度は累積精度 2.37 μm p-p (全長 3 m にて)、内挿精度、平均 0.2 μm で、光学式に対して全く精度が劣らないことを明らかにした。
- (2) 工作機械搭載時の機械精度についても光学式と比較して差が見られないことを明らかにした。

耐環境性評価：

- (1) クーラント環境試験での耐久性

原理的に光学式はスケール表面に霧状であっても液体が付着すると信号を読み取れなくなるが、磁気式は液体に浸しても問題がない。クーラント環境試験でそれを確認した。

光学式スケールではシール構造の強化、エアーパージ強化などによりクーラント侵入を防ぐことが行なわれているので一般的には問題なく工作機械で使用されている。ただし、機械稼働停止時にエアーパージが解除され、空気中の水蒸気がスケール表面に結露する際には、機械再稼働時にそれを除去するための始動運転時間を長く必要とする。磁気式ではその必要がない。

- (2) 外的振動に対する出力信号の安定性

工作機械搭載時の機械振動の影響を実機を使用して調べたが、サーボオフの状態と比較すると、特徴的な周波数において出力信号は光学式が、磁気式の約

- 3 倍共振することが明らかとなった。この共振はサーボオン時に影響が残ることが確認され、3 次元曲面加工の加工表面品質に影響が出るものと考えられる。
- (3) 環境温度変化に対する位置出力値の変化
- スケール基板の材質の持つ線膨張係数の違いが、そのまま現れる結果であった。すなわち、工作機械の熱膨張によって移動するスケール検出ヘッドに対して、磁気式は工作機械と同じ膨張をしているため検出位置信号は変化せず、一方、光学式はスケール基板が硝子のため、機械の熱膨張には追従せず検出位置信号が変化することを確認した。この結果についてはどちらが優位であるというものではなく、工作機械の制御設計の中でスケールをどう位置づけるかという設計思想により選択する問題と考えられる。いずれにしても、スケールの原点は工作機械の複雑な熱膨張変化に対して、工作機械の原点としてふさわしい位置に来るよう固定されなければならない。もし、工作機械全体が均等に熱膨張するならば、機械の材料である鉄の線膨張係数を持つ磁気式のマグネスケールは、機械と一体となって膨張するため、機械の温度変化に対する NC プログラムの補正は必要ないということになるが、これは今後の高精度工作機械設計において、スケールシステムの特性を十分加味した総合設計が重要であるという課題と捉える。

第 3 章では、第 1 段階の運動誤差補正として、新しい磁気式リニアスケールを提案し、その実現可能性の評価実験結果を示した。

この新スケールは、工作機械の各軸の位置検出用リニアスケールにおいて、その軸方向の位置検出だけでなく、軸方向に直交する 2 方向の運動誤差をわずかではあるが実用的な範囲で検出可能で、さらにロール、ピッチ、ヨーまで検出できるものである。必要な検出範囲を機械モデルから算出し以下に決定した。

- ・ X 軸方向（リニアスケールの主計測方向）：リニアスケールとしての計測範囲
- ・ Y 軸方向（主計測方向に対してスケール面上で直交する方向）：200 μm
- ・ Z 軸方向（主計測方向に対してスケール面に対して垂直方向）：200 μm
- ・ ロール、ピッチ、ヨーの範囲：Y 軸方向、Z 軸方向の合成範囲

この場合、新たな検出方向の検出範囲の中でクリティカルなのは Z 方向であり、補正に必要な範囲の計算から、本研究で開発したスケールの信号波長は既存スケールの 10 倍の 800 μm となった。この信号波長での精度検証実験結果を以下に示す。

- ・ 分解能 : 10 nm
- ・ 内挿精度 : 0.4 μm p-p

これにより、この多自由度スケールは、工作機械の各軸での非直進性や運動誤差の補正に実現可能性の高いスケールとして期待できることが明らかとなった。

本研究の第 2 段階である 1 nm レベルの加工精度を実現する運動誤差補正スケールシステムの補正対象は、多軸間の運動誤差である。

第 4 章ではこの運動誤差補正のスケールシステムとして、2 次元スケール 3 組で構成する 3 次元空間運動誤差補正用のスケールシステムを提案した。2 次元スケールとして選定した pm レベル分解能のホログラム方式 2 次元レーザスケールを試作し、その性能を評価した。試作した 2 次元スケールの仕様と評価結果を以下に示す。

(1) 試作 2 次元スケール仕様

- ・ スケール計測範囲：100 mm × 100 mm
- ・ 2 次元格子ピッチ：X 方向 Y 方向とも 1 μm
- ・ 2 次元信号波長：X 方向 Y 方向とも 250 nm
- ・ 最高検出速度：400 mm/s
- ・ 分解能：0.1 nm

(2) 評価結果

1. 分解能：65 μm
2. 累積精度： X 方向 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ (計測区間 100 mm),
Y 方向 $\pm 3 \mu\text{m}$ (計測区間 100 mm)
3. リニアリティ： X 方向 200 nm, Y 方向 100 nm
4. XY 軸直交度：1" 以内
5. 信号ノイズ： X 方向 $\pm 0.2 \text{ nm}$, Y 方向 $\pm 0.2 \text{ nm}$
(10 kHz サンプリング周波数で 4 kHz LPF)
6. 安定性：0.14 nm/min (10 kHz サンプリング周波数で 1 分間)

この結果から、本研究の第 2 段階の運動誤差補正に十分な性能を備えるスケールを試作することができた。

また、3 次元空間運動誤差補正用のスケールシステムについては、3 組の 2 次元スケールを機械に具体的に配置する構造を考案した。

第 5 章では、多軸間運動誤差補正に向けて、2 次元レーザスケール 1 組を実験機に搭載し、軸間リアルタイム運動補正制御が可能であることを検証した実験結果を示した。実験は、2 次元レーザスケールを実験機の XY 駆動テーブルに装着し、テーブルの円運動軌跡を検出して得た運動誤差データをもとに補正した。結果は、試作 2 次元スケールと補正プログラムにより、2 軸間リアルタイム補正が可能であることを確認した。

また、実験機としては、ボールねじ駆動機とリニアモータ駆動機の 2 種類の機械について同様の実験を行い、その比較を行った結果、いずれも所定の補正効果が得られることが確認できたが、特にリニアモータ駆動においてその効果が顕著であることが明らかになった。

以上のスケールシステムに関する研究成果は、工作機械の高精度化に必要となると考えられるリアルタイム運動誤差補正技術に貢献できるものであると確信する。

課題としては、特にホログラム方式レーザスケールでの耐環境性をどう向上させるかということと、3 次元空間補正のために、分解能 1 nm の 2 次元スケール 3 組をリアルタイムに制御する制御システムの高速化が挙げられる。超精密工作機械のリアルタイム運動誤差補正を効果的に行うためには、機械の使用環境を含めたフィードバック制御を機械メカニズム、NC 制御システム、アクチュエータそしてスケールシステムのそれぞれの固有技術研究は当然として、全体システムとして研究していくことが重要であり、4-4-2 項に述べたスケールシステムと制御システムは一体開発が望まれる。

謝辞

本研究は、著者が慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻に在学中、同研究科 青山藤詞郎教授の御指導のもとで行われたものであり、同教授より賜った御指導と御鞭撻に厚く御礼申し上げます。また、カリフォルニア大学バークレイ校の山崎和雄教授には、国際共同指導として本研究遂行の詳細にわたり貴重なご助言を賜りました。ここに心から厚く御礼申し上げます。

ご多忙中の貴重な時間を割かれて本論文をご査読いただき、有益なご助言とご指導を数多く賜りました、慶應義塾大学大学院理工学研究科 青山英樹教授、鈴木哲也教授、閻紀旺教授に厚くお礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、多大なご支援とご助言をいただきました、DMG 森精機株式会社 森雅彦社長に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、材料の提供、実験など、細部に渡り支援いただきました、株式会社マグネスケールの谷口常務取締役、丸山課長以下、多くの社員の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] R. R. Schaller : “Moore's Law: past, present, and future”, IEEE Spectrum, pp. 53-59, (1997).
- [2] Wikipedia: “ムーアの法則”, <http://ja.wikipedia.org/wiki/ムーアの法則>, (参照日 2013 年 12 月 25 日).
- [3] W. Pease : “An Automatic Machine Tool”, Scientific American, pp. 101-115, (1952).
- [4] W. T. Estler : “High-accuracy displacement interferometry refin air”, Applied Optics, Vol. 24, Issue 6, pp. 808-815, (1985).
- [5] Y. Kakino, Y. Ihara, Y. Nakatsu : “The measurement of motion errors of NC machine tools and diagnosis of their origins by using telescoping magnetic ball bar method”, pp. 377, (1987).
- [6] S. Weikert : “R-Test, a new device for accuracy measurements on five axis machine tools”, pp. 429, (2004).
- [7] J. D. Wang, J. J. Guo : “Research on volumetric error compensation for NC machine tool based on laser tracker measurement”, Science China Technological Sciences, 55(11), pp. 3000-3009, (2012).
- [8] 樋口卓郎, 国定宏通, 国井嘉仁, 佐藤隆太, 堤正臣 : “マシニングセンターの円弧補間運動における二山象限突起の補正”, 日本機械学会論文集 (C 編), 78 巻, 788 号, pp. 186-195, (2012).
- [9] 芝原豪紀, 熊谷幹人, 幸田盛, 奥田孝一 : “工作機械案内面のロスとモーション特性補償による真円輪郭精度の向上”, 日本機械学会論文集(C 編), 75 巻, 751 号, pp. 223-228, (2009).
- [10] Agilent Technologies : “Agilent 5530 ダイナミック・キャリブレーション”, 5989・9354JAJP, pp. 6, (2008).
- [11] N. Taniguchi : “Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing”, Annals of the CIRP, Vol. 32/2/1983, pp. 572-583, (1983).
- [12] 清水龍人 : “小型レンズ金型加工用小型非球面加工機 ASP01”, 不二越技報, Vol. 57, No. 2 通巻 123 号, pp. 41-46, (2002).
- [13] 厨川常元 : “非球面研削加工の基礎”, 精密工学会誌, Vol. 77, No. 10, 2011, pp. 927-931, (2011).
- [14] 大久保浩之, 佐野潤一, 長淵真介 : “メカトロニクスを支える要素技術各論 II 磁気スケール”, 機械設計, 1984, 2 巻, 8 号, pp. 110-113, (1984).
- [15] 管野充 : “磁気変調器による測定電磁気計測”, 電子情報通信学会編, コロナ社, 9.1.4, pp. 179, (1991).
- [16] 氷室陽, 壬生捷利, 吉岡崇元, 成松明壽 : “検出ヘッド”, 特許 平 4-29967
- [17] J. C. Mallinson/林和彦訳 : “4 異方性磁気抵抗効果”, 磁気抵抗ヘッド, 丸善 p25, (1996).
- [18] 大久保浩之 : “5 強磁性金属膜素子による変位検出”, センサデバイスハンドブック, 情報調査会, p54, (1983).
- [19] 多田純一, 吉岡崇元 : 位置検出装置, 特許 2787783, p54, (1990).

- [20] 横山光雄：“6. 3PN 系列 M 系列の発生”，スペクトラム拡散通信システム，科学技術出版社，p395，(1988).
- [21] 久須美雅昭，岡野道男，石本茂，大野満，根門康夫：位置検出装置，特許 4166488，p54，(2002).
- [22] 久須美雅昭，田中孝：変位量検出装置，特許第 3367226 号，(1994).
- [23] J. Lopez, M. Artes, I. Alejandro：“Analysis of optical linear encoders errors under vibration at different mounting conditions”，Measurement, 44, pp. 1367-1380, (2011).
- [24] H. Shwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckmann, R. Schmitt, F. Delbressine：“Geometric Error Measurement and Compensation of Machines - An Update”，Annals of the CIRP, Vol. 57, No. 2, pp. 660-675, (2008).
- [25] W. Zhu, Z. Wang, K. Yamazaki：“Machine tool component error extraction and error compensation by incorporating statistical analysis”，International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 50, No. 9, pp. 798-806, (2010).
- [26] A. Matsumura, K. Nagaoka, K. Yamazaki：“Analysis method for investigating the influence of mechanical components on dynamic mechanical error of machine tools”，Precision Engineering, Vol.36, pp. 477-484, (2012).
- [27] 金谷有歩：“校正方法，移動体駆動方法及び，露光方法及び，パターン形成方法及び装置，並びにデバイス製造方法”，特開 2009-252993，(2009).
- [28] THK 社：“LM ガイド HSR45L”，技術資料，(2013).
- [29] THK 社：“LM ガイド新精度規格のご案内”，カタログ，p5，(2006).
- [30] 松本光功：磁気記録，共立出版，p103，(1977).
- [31] 谷口紀男：“超精密加工とその応用-微細加工との関連において”，日本時計学会誌，Vol. 106, pp. 37-61, (1983).
- [32] 三澤三郎：“超精密加工技術の変遷”，工作機械 84・1ST Issue, pp. 14-16, (1984).
- [33] W. Zhu, Z. Wang, K. Yamazaki：“Machine tool component error extraction and error compensation by incorporating statistical analysis”，International Journal of Machine Tools & Manufacture. 50, pp. 798-806, (2010).
- [34] H. Tamiya：“Displacement detection apparatus, polarization beam splitter, and diffraction grating”，United States Patent 7738112, (2007).
- [35] R. Hocken, J. A. Simpson, B. Borchardt, J. Lazar, C. Reeve, P. Stein：“Three Dimensional Metrology”，Annals of the CIRP, Vol. 26, No. 2, pp. 403-408, (1977).
- [36] S. Ibaraki, T. Hata：“A new formulation of laser step diagonal measurement - Three-dimensional case”，Precision Engineering 34, pp. 516-525, (2010).
- [37] H. F. F. Castro：“Uncertainty analysis of a Laser calibration system for evaluating the positioning accuracy of a numerically controlled axis of coordinate measuring machine and machine tool”，Precision Engineering, 32, pp. 106-113, (2008)
- [38] H. Shinno, H. Yoshioka, S. Sawano：“A newly developed long range positioning table system with a sub-nanometer resolution”，CIRP Annals - Manufacturing Technology 60, pp. 403-406, (2011).
- [39] B. Edlen：“The Refractive Index of Air”，Metrologia, 2. 2, p 71, (1966).
- [40] 清水嘉彦，秋元義明，谷村吉久，松本弘一，岡本病人：“20°C～60°C におけるエドレンの式の実験的検討”，レーザ研究，20 巻，3 号，pp. 18-23, (1991).

- [41] K. Taniguchi : “Hologram scale apparatus for making hologram scale, moving member having hologram”, United States Patent 5225918, (1991).
- [42] A. W. Khan, W. Chen : “Squareness perpendicularity measuring techniques in multiaxis machine tools”, Proceedings of SPIE, Vol. 7283, 72830K, pp. 1-12, (2009).
- [43] P. Sriyotha, K. Nakamoto, M. Sugai, K. Yamazaki : “Development of 5-Axis Linear Motor Driven Super-Precision Machine”, Annals of CIRP 2009, 55(1), pp. 381-384, (2006).
- [44] 山崎和雄, 藤森徹 : 工作機械 特開 2012-45703, (2012).
- [45] P. McKeown : “The Role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future”, Annals of the CIRP 36(2), pp. 495-501, (1987).
- [46] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, et al. : “Geometric Error Measurement and Compensation of Machines - An Update”, Annals of the CIRP 2008, 57(2), pp. 660-675, (2008).
- [47] J. Bryan : “A simple method for testing measuring machines and machine tools Part 1, Principles and applications”, Precision Engineering, 4(2), pp. 61-69, (1982).
- [48] P. Schelleke, N. Rosielle, H. Vermeulen, et al. : “Design for Precision: Current Status and Trends”, Annals of the CIRP 1998, 47(2), pp.557-586, (1998).
- [49] Magnescale: “Lasyscale”, [http://www. magnescale. com/Laserscale.html](http://www.magnescale.com/Laserscale.html), (参照日 2013 年 12 月 25 日).
- [50] Heidenhain: “製品情報 : 精度評価用測定装置”, カタログ, (2014).
- [51] S. Ibaraki, T. Hata, A. Matsubara : “A new formulation of laser step-diagonal measurement - two-dimensional case”, Precision Engineering, 33 (1), pp. 56-64, (2009).
- [52] R. Hocken, J. Simpson, B. Borchardt, et al. : “Three dimensional metrology”, Annals of the CIRP 1977, 26 (2), pp. 403-408, (1977).
- [53] A. Donmez, D. S. Blomquist, R. Hocken, et al. : “A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation”, Precision Engineering, 8 (4), pp. 187-196, (1986).
- [54] S. Sartori G. X. Zhang : “Geometric Error Measurement and Compensation of Machines”, Annals of the CIRP 1995, 44 (2), pp. 599-609, (1995).
- [55] Eugene Hecht : Optics, Fourth Edition, Addison Wesley, (2002).
- [56] W. Zhu, Z. Wang, K. Yamazaki : “Development of a Nanometer Resolution Measurement System by Using 2D Holographic Grid Scales”, MTTRF 2009 Annual Meeting Shanghai, China, July, (2009).
- [57] G. X. Zhang, R. Veale, T. Chartton, B. Borchardt, R. Hocken : “Error compensation of co-ordinate measuring machines”, Annals of the CIRP 1985, 341, pp. 445-44, (1985).
- [58] W. Zhu, Z. Wang, K. Yamazaki : “Machine tool component error extraction and error compensation by incorporating statistical analysis”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 50(9), pp. 798-806, (2010).
- [59] P. S. Huang, J. Ni : “On-line error compensation of coordinate measuring machines”, Int J Mach Tools Manufact, 35, pp. 725-38, (1995).

- [60] G. Pritschow : “A Comparison of Linear and Conventional Electromechanical Drives”, Annals of the CIRP 1998, 47(2), pp. 541-548, (1998).

関連論文

1. 定期刊行誌掲載論文（主論文に関連する原著論文）
 - (1) 藤森徹, 丸山重明, 山崎和雄, 青山藤詞郎 : “高精度工作機械の運動誤差を補正する多自由度スケールの研究”, 日本機械学会論文集, C 編, 79 巻, 806 号, pp. 3993-4001, (2013).
 - (2) T. Fujimori, K. Taniguchi, C. Ellis, K. Yamazaki, T. Aoyama : “A Study of Error Compensation on High Precision Machine Tool System using a 2D Laser Holographic Scale System”, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2012 Vol. 6, No. 6, pp. 999-1014, (2012).

2. 国際会議論文（査読付きの full-length papers）
 - (1) T. Fujimori, K. Taniguchi, C. Ellis, K. Yamazaki, T. Aoyama : “A Developmental Study on Two Dimensional Laser Scale System for High Precision Machine Tool System”, Proceedings of the 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), November 8-10, CD, (2011).

5. 国内学会発表
 - (1) 藤森 徹*, 糸山芳美, 山崎和雄, 青山藤詞郎 : “工作機械用部品加工用工程設計支援システムに関する研究（第 1 報 システムの概念設計）”, 日本機械学会第 8 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 岡山, pp.111-112, (2010).
 - (2) 藤森 徹*, W. Zhu, 谷口佳代子, 山崎和雄, 青山藤詞郎 : “二次元精密スケールを内蔵した工作機械システムに関する研究（第 1 報 運動精度安定化のための概念設計）”, 日本機械学会第 8 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 岡山, pp. 291-292, (2010).
 - (3) 藤森 徹*, 丸山重明, 山崎和雄, 青山藤詞郎 : “磁気スケールを使用した工作機械の精度向上”, 日本機械学会第 9 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 秋田, pp. 59-60, (2012).