

気球赤外線干渉望遠鏡の基礎開発：ミラー角度制御

八木豊兎*・芝井 広・矢島信之・河野嗣男*・奥田治之・中川貴雄

Development of Balloon-Borne Infrared Interferometer: Control of Mirror Alignment

By

T. YAGI, H. SHIBAI, N. YAJIMA, T. KOHNO, H. OKUDA, AND T. NAKAGAWA

Abstract: An accurate attitude-control system of a mirror has been developed for a balloon-borne infrared interferometer. This system controls the mirror in arbitrary attitudes and achieves an accuracy of less than 0.2 arcsec. The drive mechanism and the attitude sensor were newly developed for this system. The components described in this paper, such as the actuator and the sensor as well as the overall control system can be used in balloon environment.

1. 気球赤外線干渉望遠鏡の開発目的¹⁾

遠方の天体からの光や電波をより精密に観測するためには、観測用検出器の高感度化とともに、「望遠鏡がどこまで小さいものを見分けられるか」が問題となる。すなわち、高い空間分解能の望遠鏡が不可欠となる。望遠鏡の空間分解能は、約 λ/D [rad] (λ : 観測波長, D : 望遠鏡口径) で制限され、観測波長が短いほど、口径が大きいほど高い分解能が得られる。

ところが、観測波長が遠赤外波長帯(波長約30~300 μ m)では、地球大気による吸収のため地上からの観測は不可能であり、望遠鏡などの観測装置をジェット機、気球、衛星などに搭載し、上空に上げる必要がある。したがって、波長が長いわりに、望遠鏡の口径を大きくできず、空間分解能を上げることは困難である。

一方、この遠赤外波長帯は天体のエネルギー収支を知る上で、本質的な重要性を持っていることが解明されてきたため、遠赤外を中心として近赤外からサブミリ波に至る波長帯で超

* 都立科学技術大学工学部機械システム工学科

高感度観測できる冷却望遠鏡衛星の打ち上げ計画が各国で進行している。これらの望遠鏡衛星は、観測条件の良い大気圏外、光学系全体の極低温冷却、赤外線検出器の低雑音性という好条件が重なり検出限界はこれまでの装置よりも2～3桁以上向上している。

しかし、現在計画中の搭載用赤外線望遠鏡はいずれも口径1 m以下であり、波長 $100\mu\text{m}$ の場合、25秒以上の角分解能である。近赤外やミリ波のように、地上観測が可能な波長域では、角分解能は1秒以下に迫っている。このままでは、これらの波長帯と遠赤外波長帯の空間分解能の差は3桁以上に広がってしまい、空間分解能が高くできない理由により遠赤外波長帯の重要性が十分に生かし切れない可能性がある。

したがって、遠赤外波長帯での高分解能を目標とした望遠鏡を開発することは、今後の重要な方向の一つであると考えられる。一般に、高い角分解能を得るには望遠鏡の単一集光鏡の口径を大きくするため、超軽量鏡や軌道上での展張などが考えられる。しかし、搭載用を前提とすれば、単一大口径鏡の代わりに、比較的小さな口径の鏡を組み合わせ複数開口にすることにより、空間分解能を向上させる方が現実的である。

このような考え方にに基づき、気球搭載用の赤外線干渉望遠鏡を開発する計画が始められた。この計画では、望遠鏡の構成を簡素化するため2素子(2つの集光鏡)の干渉望遠鏡の開発を目標としている。この場合、2つの集光鏡を離して配置することにより、空間分解能を高くできる。離れた距離を d とすると、約 λ/d の角分解能が得られ、理論上は d を大きく取れば、高分解能が得られることになる。これが実現できれば波長 $100\mu\text{m}$ で約10秒角という遠赤外では超高分解能の角分解能が得られることになり、その時点で天文学的に重要な観測が可能であると思われる。

本研究は、この計画に沿ったものであり、気球赤外線干渉望遠鏡を開発する上で技術的に最も重要であると考えられる2つの集光鏡の位相を合わせるための基本的なシステムを構築することが目的である。また、ここで開発される集光鏡のアライメント技術は、将来スペース開口合成望遠鏡などを計画する上で、重要な技術的ベースラインになると思われる。

2. 干渉望遠鏡²⁾

2.1 開口合成法

一般に、光学系のRayleighによる像の角分解能 θ は約 λ/D である。ここでの D は光学系の開口の大きさ、 λ は観測波長の長さである。したがってある物体の波長 λ に対する像をより高い分解能で観測するためには、望遠鏡の口径を大きくする必要がある。しかし、単に口径を大きくすれば、鏡面の加工など製造技術上の困難さが急増し、観測に際して鏡面の変形などの問題もあり、結局結像性能を劣化させてしまう。

そこで比較的小さな開口を持つ望遠鏡を用いて、大きな開口に相当する高い分解能の像を得ようとする試みが考えられ、開口合成という新しい結像方法が考え出された。開口合成法とは「一つまたは複数個の面積の小さな開口の光学系を用いて単一の大きな全開口の光学系に相当する分解能の像を得る技術」と定義され、天体干渉計、天体強度干渉計、スペckル干渉計、MMT(Multiple Mirror Telescope)などがその定義に沿ったものである。

このような開口合成法の考え方が最初に適用されたのはMichelsonが試みた図1の天体

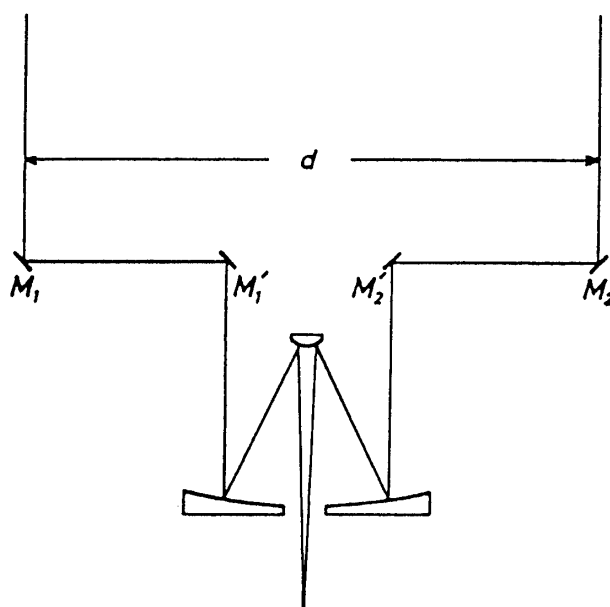


図1 Michelsonの天体干渉計

干渉計(1921年)である。これは、望遠鏡の前に2枚の小さな鏡を置き、星からの光をとり入れ、焦点面に干渉縞を生じさせるものである。これを観測することにより Michelson は2重星の角距離や星の視野直径を高い精度で測定できることを示した。その後この技術はその機械的調整の困難さのため光学望遠鏡の分野では使われなくなったが、1950年頃から電波天体干渉計に応用されるようになった。一方、光の分野では1960年頃から宇宙開発が進展し、観測条件の良い大気圏外で観測が可能になったため、軽量で高分解能の望遠鏡が要求され、周辺技術が向上したことも手伝い開口合成の研究が盛んになった。

2.2 天体干渉計

Michelsonの天体干渉計(図1)は、星からの光を望遠鏡の開口より広げられた小さな可動鏡 M_1 , M_2 にとり入れ固定鏡 M_1' , M_2' に反射させ望遠鏡の結像作用によりそれぞれの光を重ね合わせるものである。

これら可動鏡が u 軸上にあるとすると開口関数は、デルタ関数 δ を用いて、

$$P(u) = \delta(u-d/2) + \delta(u+d/2) \quad (1)$$

となる。したがって、これをフーリエスペクトル領域で考えると、この OTF (Optical Transfer Function) は、 $\omega = 0$, $\omega = \pm d/\lambda f$ (f は望遠鏡の焦点距離) の3つの周波数のみを持つ狭帯域フィルターの特性を持つ。 $\omega = 0$ は等間隔の2つの開口の回折が重なりあってできている。よって、像面には物体のスペクトルの直流成分 $\omega = 0$ と交流成分 $\omega = \pm d/\lambda f$ のみが現れる。すなわち、この干渉計は物体のフーリエアナライザーの役割をしている。

無限遠の点光源をこの干渉計で観測すると、図2のような2次元的な干渉縞強度分布が得られる。これは、物体が点であるため、式(1)をフーリエ変換することによって計算できる³⁾。

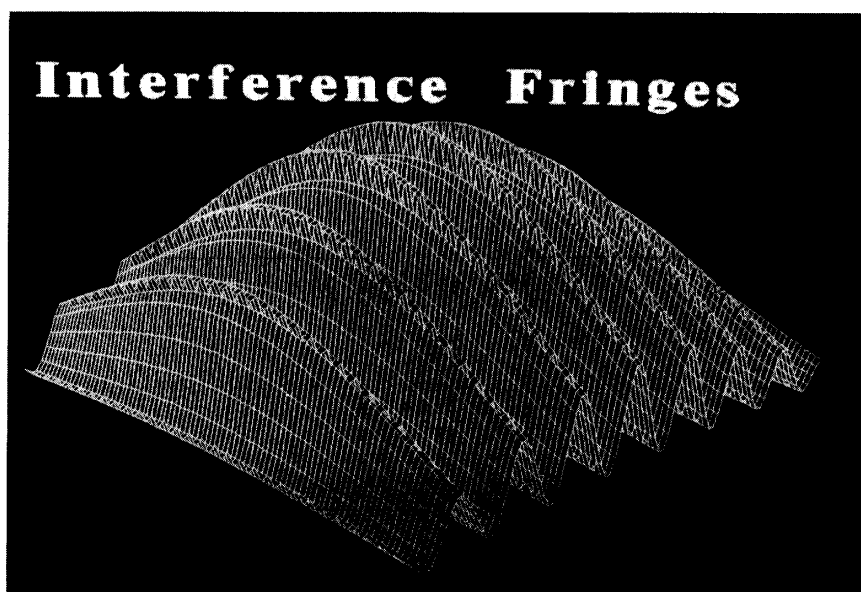


図2 点光源の干渉縞

ここで M_1 , M_2 を円開口とし, その半径 r と間隔 d の比 r/d は $3/40$ とした場合のもので, 全体のゆったりした形状が $\omega=0$ の成分であり, その中の小さい縞が交流成分である.

間隔 d とその方向を順次変え, この2次元的な物体のスペクトル $O(\omega_x, \omega_y)$ を測定すればこれをフーリエ逆変換することにより, 幾何学的な物体像 $O(x, y)$ を合成できる.

以上のようにこの干渉計の分解能は, M_1 , M_2 の間隔 d によって定まり, 望遠鏡は単に2つの光束を焦点面で干渉させる役割を果たしている.

2.3 開口合成法における問題点

一般にこのような干渉望遠鏡における問題点として,

- 1) Seeing : 天体の地上観測の場合, 大気の空間的及び時間的ゆらぎのため星の像が広がりを持つ.
- 2) Sensitivity : 小さな開口鏡を用いるため受光光量が少く, 測定のス/Nが低い.
- 3) Phasing : 望遠鏡を構成する2個以上の鏡からの光は焦点面において観測波長のオーダーで位相を合致させなければ成らない.

が挙げられる.

1) の seeing についてはその PSF が統計的に測定できるので, 観測された像に逆数フィルターを用いる情報処理を施すことにより修正する方法も近年では行なわれている. 2) については像検出の sensitivity を向上させる必要があり, 高感度の検出器が必要となる. これが低いと露出時間を長くとらざるを得ないため, 結局大気のゆらぎの影響も増大する. 最近では固体撮像素子が検出器として用いられ観測のス/Nの低さを補うことができる. 3) は鏡面位置をレーザ干渉計で検出しその誤差を高精度で制御する機構によって可能となってきている.

3. 気球赤外線干渉望遠鏡の基本構成¹⁾

ここで計画している干渉望遠鏡の構成を図3に示す。口径30cm程度の非軸放物面鏡を約2m離して配置する。天体からの光はそれらによって集められ、そこからの反射光を平面鏡で折り返した後、共通の焦点で干渉縞を生じる。この干渉縞を液体ヘリウムで冷却されたクライオスタット(低温冷却維持装置)内のアレイ検出器で検出する。

2つの非軸放物面鏡は、同一の回転放物面上にはなく、光を折り返させる平面鏡が接触する位置にくるように、お互い近付いた位置にある。このように平面鏡からは、集光鏡からの光以外クライオスタット内の検出器に入らないようにし、赤外線観測において外乱となる背景放射をできるだけ抑えるようにする。つまり、アレイ検出器側から平面鏡を見た場合、視野内のどの位置から見ても平面鏡には、2つの集光鏡で反射された空の方角が映っているようにしてある。各集光鏡を近づけると、干渉縞の本数が減ることが予想されるが、赤外線検出器は16素子程度のリニアレイであり、このことについては問題ないと思われる。また、この検出器の多素子化もこの計画には含まれている。

光学系については、平面鏡と検出器は正確にアライメントされ(中央光学系)、観測中再調整する必要がないように固定されている。2つの集光鏡は地上では中央光学系に対しアライメントされるが、搭載用を目的としているためその位置、角度の精度は期待できない。そこでこの集光鏡をアクチュエータによって微動ができるものにし、目標天体の観測中は独立に設けられたアライメント・センサによって制御し、観測中でもその位置が保たれるだけでなく、上空で自動的に、また地上からのコマンドによる手動操作も加えてアライメントをとるという方式にする。したがって、調整範囲が広く、かつ最終精度が高いものにする必要がある。

この気球赤外線干渉望遠鏡のシステムをできるだけ簡素化するため、また観測波長が比較的長い遠赤外域であることを考慮し、微動鏡の自由度は各鏡当たり3自由度(光軸に沿った

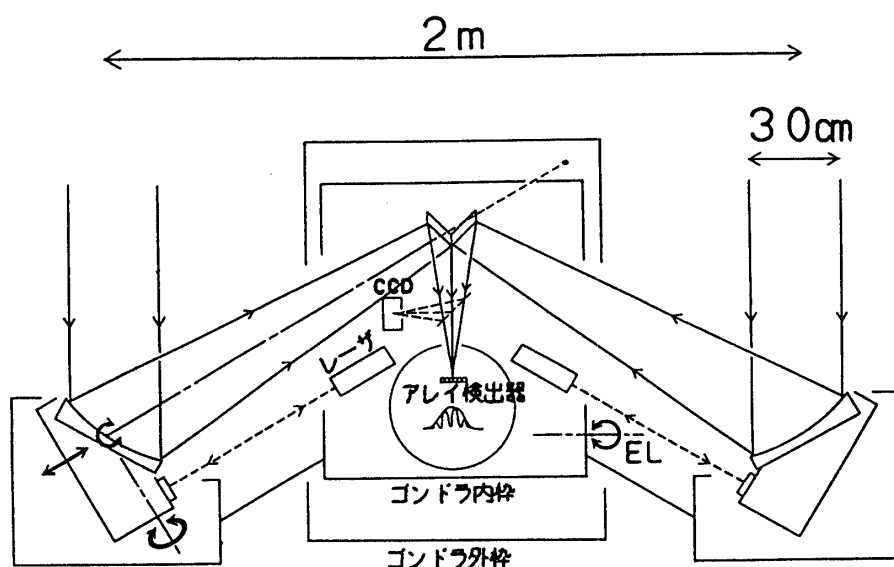


図3 赤外干渉望遠鏡の光学系概念図

路離, 2軸のあおり)まで減らした構成になっている。この微動鏡の制御がこのシステムの中心的開発要素である。

4. 本研究の開発目標

2.3で挙げた一般的な干渉望遠鏡の問題点での1)については前述したように気球搭載が前提なので、大気の非常に薄い上空に上げるため大気のゆらぎは問題にならない。また、最近の気球観測においては、銀河系内の天体についてかなり感度の高い観測ができており、2)も障害とはならないと考えられる。

したがって、先にも述べたが、現時点では3)を解決することが赤外線望遠鏡を開発する上での技術的課題である。すなわち、前述した中央光学系に対し2つの微動鏡のアライメントを広範囲で精度良く制御することである。

この要素技術を確立するため、本研究ではアライメントが補正される先に述べた3自由度の内、2軸のあおり(ヨー, ピッチ)が補正される Tilt 微動鏡の開発を行なうことを目的としている。

広範囲で精度良く調整する必要があるため、粗, 精2段の制御が必要であり、粗, 精2つのセンサを制御用に用いることにした。粗センサは広範囲測定を行ない、精センサが測定できるレンジまで追い込み、その後精センサに切り替え目標精度を実現させることにした。

先に述べた観測波長 $100\mu\text{m}$ で10秒角がシステム全体の目標分解能であるため、2軸のあおり制御の最終精度はその1/10以下、つまり1秒以下を目標(ここでは ± 0.1 秒角)とした。

そして、観測中の温度変化や姿勢変化による比較的ゆっくりした各微動鏡のずれを補正するような制御を対象にした。

表1に Tilt 微動鏡の制御目標をまとめる。

表1 制御目標

制御範囲	$\pm 2\sim 3\text{deg.}$
最終精度	$\pm 0.1\text{arcsec}$
応答速度	数 Hz

5. 気球赤外線干渉望遠鏡用 Tilt 微動鏡

5.1 Tilt 微動鏡の構成

微動鏡の構成を図4, 図5に示す。

鏡治具の大きさは200mmであり、これを支える軸の長さは170mmである。鏡治具の表側(図4の左側)には、 $50\times 50\text{mm}$ の金蒸着平面ミラーと後述の精センサで用いる半導体レーザを反射させるための $\phi 1\text{cm}$ の平面ミラーが装着されている。鏡治具や支持台, 軸などはアルミ製である。

鏡を駆動するアクチュエータはペン書きオシロのガルバノメータ(電磁式ダイレクト駆動

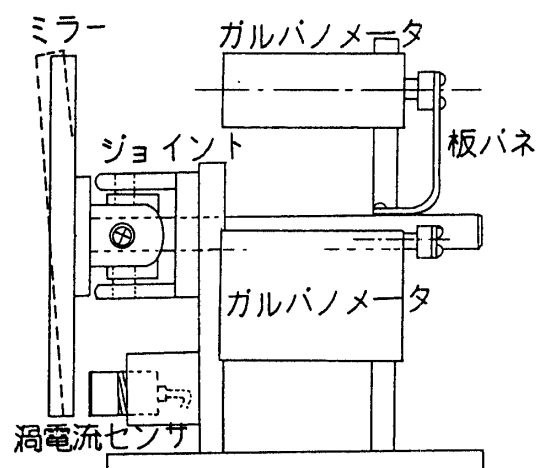
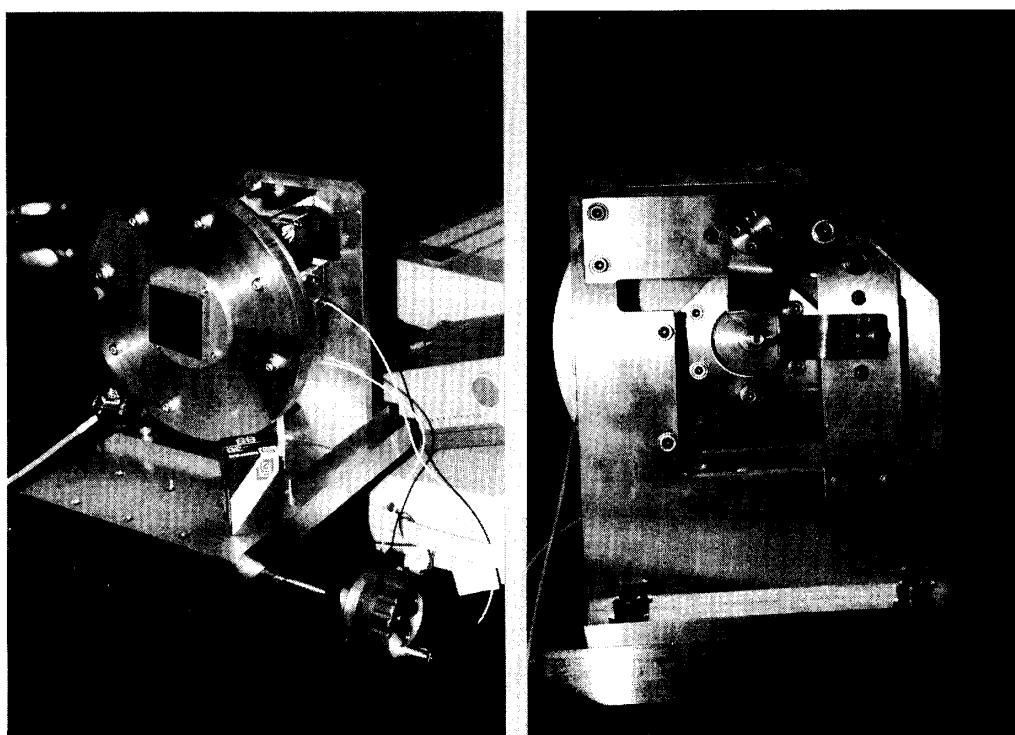


図4 Tilt 微動鏡の構成



(a) Front Of View

(b) Back Of View

図5 Tilt 微動鏡

モータ) をヨー、ピッチまわりの軸に対して使用した。このガルバノメータならば軸受け方法としてバネ軸受けを利用することによりここで目標としている精度が実現されることが考えられた。

したがって、軸受けは十字バネ (Bendix 社) を4つ用いた2重ジンバルになっておりユニバーサルジョイント (図6参照) によって鏡を支えている。また、ガルバノメータからのトルクを銅製板バネ (図5(b)参照) によって伝達している。板バネはトルク伝達の回転方向には剛

表2 駆動方法と精度

駆動方法	動範囲		精度	
電磁式ダイレクト駆動モータ	±数度	○	0.1秒～1秒角	○
DCモータと減速歯車	数十度～	○	0.1分～1分角	×
圧電素子	数分角	×	0.001秒角	○

体として、それに垂直方向にはバネとして働く。

このようにモータとは異なる駆動方式を利用し、ポインティング精度の向上を目指している。他の駆動方式としては、DCモータと減速歯車の組み合わせ、圧電素子などが考えられるが、いずれも制御の広範囲条件と高精度条件の両方を満足するものではない。表2にその特徴をまとめる。そして、図のように渦電流変位計が鏡中心から75mmの位置に固定され、治具裏面とセンサとのギャップが測定される。その出力から鏡治具のヨー、ピッチそれぞれの傾きを知ることができる。この渦電流センサ(新川電機株)を先に述べた粗センサ(広範囲の制御用センサ)として用いる。また、精センサとしては半導体レーザと4分割フォトダイオードを用いてセンサを作製した。以下にガルバノメータと渦電流センサについて述べる。

(1) ガルバノメータの出力トルク

ガルバノメータ(図6参照)を電流制御によって駆動するとき、入力電流 i [A] とすると、ガルバノメータの出すトルク T [Nm] は、

$$T = K_g \cdot i \quad [\text{Nm}] \quad (2)$$

となる。ここで K_g はガルバノメータのトルク定数 [Nm/A] である。今回用いる駆動電流アンプは電流フィードバックされるため、ガルバノメータが動作したときに発生する逆起電力を打ち消すように電流フィードバックされる。よって、ガルバノメータには入力電圧に比例する電流が流れ、式(2)は入力電圧を V_{in} [V] とすると、

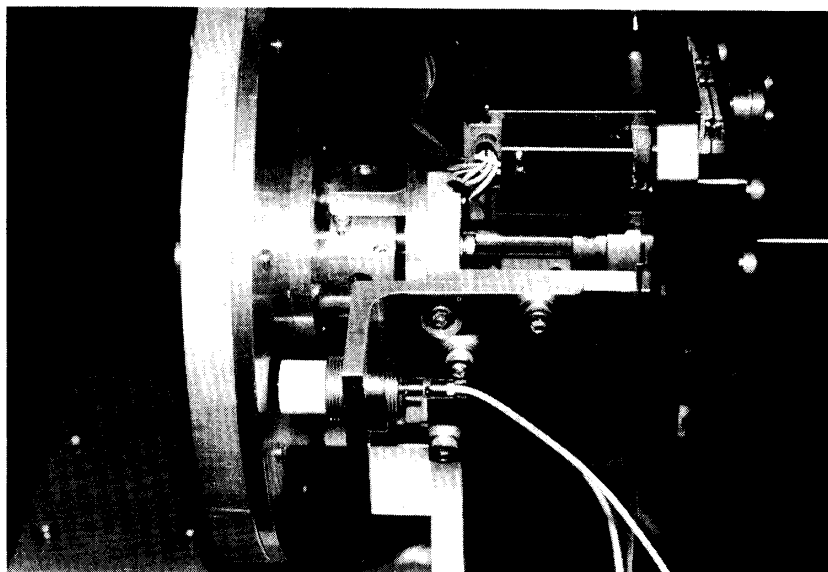


図6 渦電流センサ、ガルバノメータ、ジョイント部

$$T = V_{in} \cdot K_T \cdot K_g \quad [N] \quad (3)$$

となる。 K_T は電流アンプの電流/電圧定数 K_T [A/V] である。実際には、 $K_T = 0.1$ [A/V] であり、 $K_g = 950$ [gcm/A] $= 9.3 \times 10^{-2}$ [Nm/A] である。

(2) 渦電流センサ(粗センサ)

ピックアップにより高周波磁界を発生させ、その磁界内に電導体や磁性体が近付くと、それらの物体内に渦電流が発生し、ピックアップコイルのインダクタンスが変化する。この基本動作を利用したものが、渦電流変位計である⁴⁾。このセンサを、ミラーの広範囲な傾きを測定するセンサとして用いた。これは分解能が高く、測定スパンが分解能に比べ長いという理由から選んだ。この特性を表3に示す。ここではその信号をミラー傾き角度として利用している(図6参照)。

その関係を調べるため、ミラーをガルバノメータによって実際に傾かせ、その傾き角をオートコリメータ傾斜計で測定し、渦電流センサの出力を調べた。こうして測定したデータを直線に最小自乗近似し、傾き角と渦電流センサ出力の関係 K_s を求めた。その結果ではヨーまわりでは、 $K_{sy} = 5.05 \times 10^{-4}$ [V/arcsec] であり、ピッチまわりには、 $K_{sp} = 4.95 \times 10^{-4}$ [V/arcsec] となった。そのグラフを図7に示す。この結果から、このセンサは角度にするると1.0秒角程度(センサ出力0.01% of F.S. 分の角度)の分解能を持つことになる。

表3 渦電流センサの特性

測定スパン	0~4000 μ m
直線性	$\pm 1.0\%$ of F. S.
分解能	0.01% of F. S. (0.2 μ m)
応答性	DC~20kHz

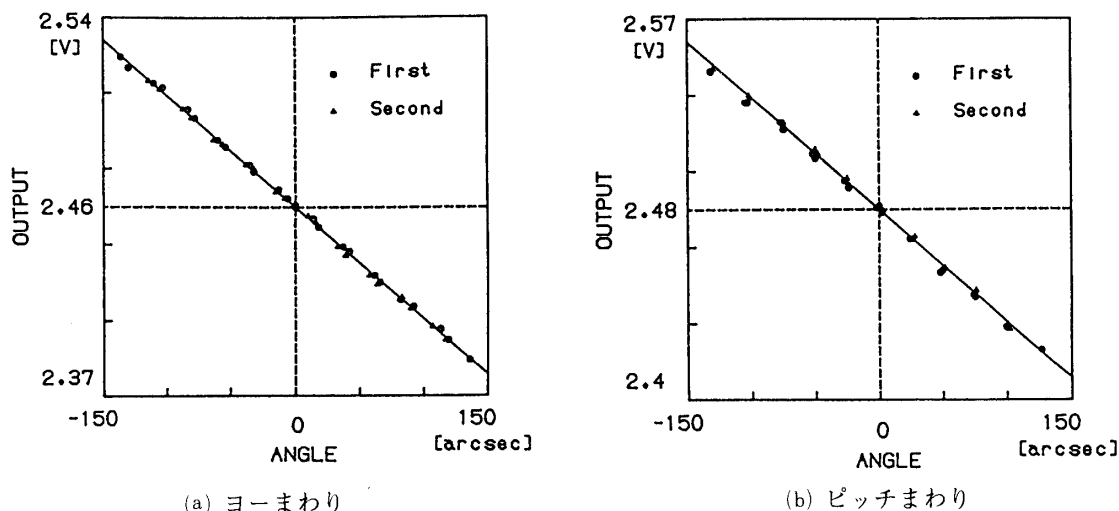


図7 ミラー傾き角—渦電流センサ出力

5.2 微動鏡の機械的特性

ここでは、微動鏡のオープンループ特性を実測し、実際の運動方程式を求めた過程について述べる。

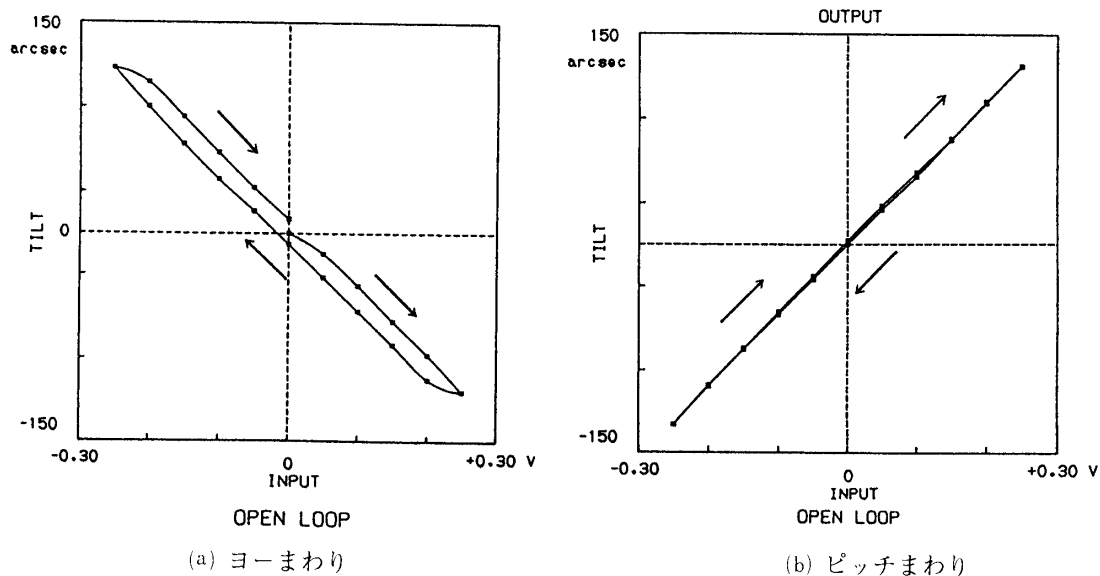


図8 入力電圧—ミラー傾斜角

(1) 静的特性

微動鏡の静的な機械特性を測定したものが図8である。これはオープンループでの入力電圧(電流アンプに入力する電圧)とミラー傾き角を、出力に取ったもので、傾き角は微動鏡と対向した位置に置かれたオートコリメータ傾斜計で測定した。これらには、ヒステリシスが作用していることが分かるが、フィードバック制御の中で使用するため問題ないと思われる。

(2) 動的特性

ステップ入力を電流アンプに入れ、ミラーが振動する様子を渦電流センサでモニタし動的特性を調べた。その結果であるステップ応答を図9に示す。応答は、等差級数的に減衰している。つまり、振幅の極値を結べば直線となる。したがって、この応答は摩擦力がこの系に作用していることを示している。

(3) 摩擦力の作用する運動方程式

この微動鏡のヨーとピッチ運動は連成していないと仮定すると、ここでの運動方程式は、

$$\left. \begin{aligned} I\ddot{\theta} + K\theta + F_f &= 0 & (\dot{\theta} > 0) \\ I\ddot{\theta} + K\theta - F_f &= 0 & (\dot{\theta} < 0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

である。Iは慣性モーメント[kgm^2]であり、ミラー(鏡と鏡治具) I_1 とミラー支持棒 I_2 の合成慣性モーメント($I_1 + I_2$)で表わされる。kは軸受けの十字バネ $k_j (= 6.00 \text{ Nm/rad})$ と板バ

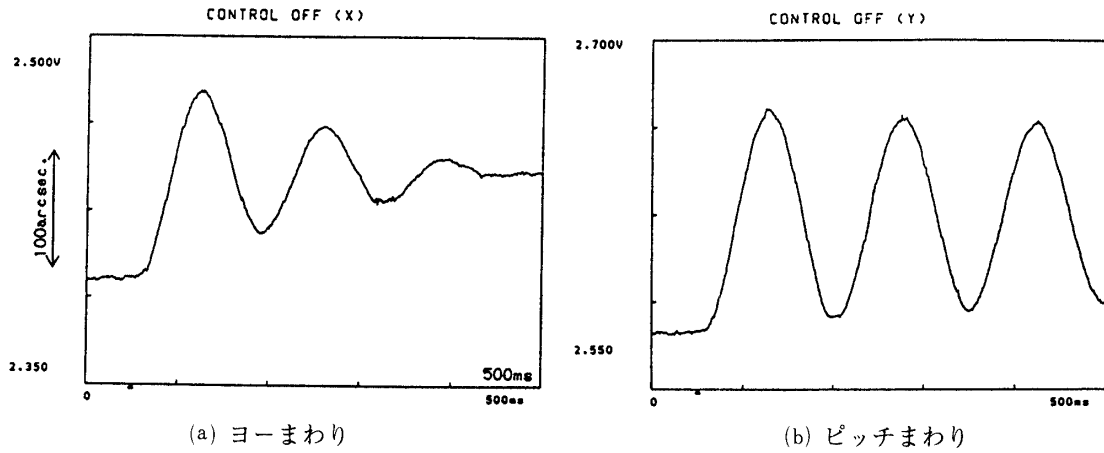


図9 微動鏡の自由振動

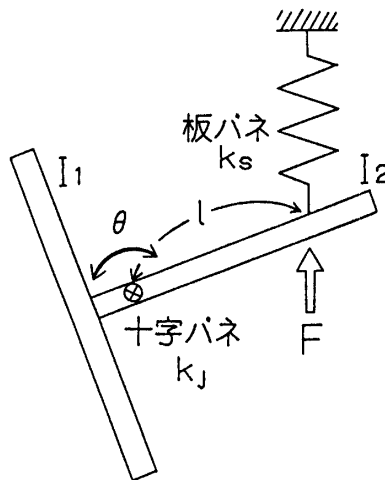


図10 微動鏡のモデル

ネ $k_s (=4.92 \times 10^2 \text{N/m})$ の合成バネ定数であり、板バネは支点(軸受け)から $l (=8.00 \times 10^{-2} \text{m})$ だけ離れているため、支点から見ると $l^2 k_s (=3.15 \text{Nm/rad})$ のバネとして働く。よって、 $k = k + l^2 k_s (=9.15) [\text{Nm/rad}]$ となる。 θ はミラー傾き角度[rad]である(図10参照)。()内は計算値である。

また、 F_f は摩擦力(トルク)であり、大きさは一定である。式(4)は $\dot{\theta}$ の符号によって、一方の方程式から他方へ移らなければ成らない。

ここで、

$$\omega_n^2 = k/I, \quad b = F_f/k [\text{rad}]$$

とおくと、式(4)の第2式は、

$$\ddot{\theta} + \omega_n^2 \theta = b \omega_n^2 \quad (\dot{\theta} < 0) \tag{5}$$

となる。これは1サイクルごとに振幅が $4b$ 減少し、最後にバネの力が摩擦力より小さくなって運動は停止する。したがって、図9の振幅差から b を求めれば運動方程式(5)が決定できる。そして固有角振回数 ω_n は、山と山の時間差 t から、

$$\omega_n = 2\pi/t$$

として実際のものが計算できる。理論的には上の値 I 、 k を用いると固有振動数 f_n は、以下のようなになる。

$$f_n = \omega_n/2\pi = 6.07 \quad [\text{Hz}]$$

(4) 微動鏡運動方程式の決定

(3)の計算方法により b を計算した結果、ヨーまわりでは $b_y = 4.77 \times 10^{-5} [\text{rad}]$ 、ピッチまわりでは $b_p = 3.22 \times 10^{-5} [\text{rad}]$ であった。また、固有振動数 f_n は、ヨーまわりでは $f_{ny} = 7.20 [\text{Hz}]$ 、ピッチまわりでは $f_{np} = 6.74 [\text{Hz}]$ であり、理論値に近い値である。以上の結果から強制振動の場合は、

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta} + \omega_n^2 \theta + b\omega_n^2 &= n \cdot K_T \cdot K_g \cdot v_{in}/I \quad (\dot{\theta} > 0) \\ \ddot{\theta} + \omega_n^2 \theta - b\omega_n^2 &= n \cdot K_T \cdot K_g \cdot v_{in}/I \quad (\dot{\theta} < 0) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となる。ここで K_T (電流/電圧定数)、 K_g (トルク定数)は5.1で述べたもので、 I は慣性モーメント、 v_{in} は入力電圧である。また、90度曲がった板バネでトルクを伝達するため、板バネの腕の長さの比が減速比のような働きをするため、式(6)の減速比 n を考慮した。

以上をまとめ表4とする。

表4 微動鏡の機械的特性

機械的特性	ヨー方向	ピッチ方向
慣性モーメント [Nm]	6.29×10^{-3}	6.29×10^{-3}
合成バネ定数 [Nm/rad]	9.15	9.15
固有振動数 [Hz] *	7.20	6.74
摩擦による減衰 [rad] *	4.77×10^{-5}	3.22×10^{-5}

*：実測値

6. Tilt 微動鏡のPID制御

6.1 渦電流センサ(粗センサ)・フィードバック制御

渦電流センサを用いて、広範囲の制御をPID制御によって実現させた。ここで用いるPID補償回路は精センサに切り替えた場合も同じものを用いる。以下にそれぞれについて述べる。

(1) PID 制御

制御には動作の信頼性が高いアナログ PID 制御を用いた。PID 制御は指令値とセンサからの信号との偏差 $e(t)$ を、比例(Proportional)、積分(Integral)、微分(Derivative)動作しその和を制御対象の操作量 $u(t)$ とするものである⁵⁾。すなわち、 $u(t)$ は

$$u(t) = K_p \{ e(t) + 1/T_I \int e(t) dt + T_D (de(t)/dt) \} \quad (7)$$

(K_p : 比例ゲイン, T_I : 積分時間, T_D : 微分時間)

$$e(t) = \theta_d - \theta \quad (\theta_d: \text{指令値}, \theta: \text{フィードバック信号})$$

となる。これらの K_p , T_I , T_D を変えることにより、制御対象の応答をある程度任意にできる。

(2) 計算機シミュレーション

(1)で述べた操作量 $u(t)$ を式(6)の v_{in} に代入すると、2階の常微分方程式となる。これを Runge-Kutta-Gill 法によって計算機でシミュレーションした。シミュレーションは評価しやすいようステップ応答を計算させた。

制御の目的としては、粗センサによる制御によって精センサの測定範囲まで追い込むことである。したがって、評価の基準としてはできるだけ速く指令値に達する K_p , T_I , T_D を求めることである。その結果では両軸ともに $K_p=30.0$, $T_I=5.00 \times 10^{-2}$, $T_D=6.67 \times 10^{-3}$ となった。シミュレーションの結果は図12に示す。

(3) 渦電流センサ PID 制御特性

上で求めた各ゲインをもとに、各軸用に2つの PID 補償回路を作製した(図11)。PID 制御回路を評価するため、シミュレーションと同様にステップ応答を測定した。指令値として鏡の傾斜角度にして約100秒にあたる電圧をステップ入力として与え、渦電流センサの出力を表わしたものが図12である。これらの横軸はフルスケールで500msで、実線が測定結果、点線がシミュレーション結果である。制御を行わない場合(図9)は、固有振動数が約7 Hzであったが、図12ではこれが約20Hzとなり、応答がより安定になり、指令値にはやく到達していることが分かる。これは、精センサの測定レンジまでミラーの各傾斜角を追い込むのに十分な応答である。また、渦電流センサの分解能から判断するとこれは1秒程度の精度で制御できていると思われ、この段階での精度についても問題はない。

6.2 4分割フォトダイオード(精センサ)・フィードバック制御

精センサは4分割フォトダイオード(以下4PDと略す)(浜松ホトニクス株)と可視光半導体レーザ(波長780nm, 出射出力0.4mW)を用いて作製した。粗センサによって追い込まれた後、この精センサの信号によりフィードバック制御を行ない、高精度の制御を実現させるためのものである。以下にそれぞれについて述べる。

(1) 精センサ

図13, 14のように可視光半導体レーザからのビームを約65cm離れたミラー(鏡治具)の端

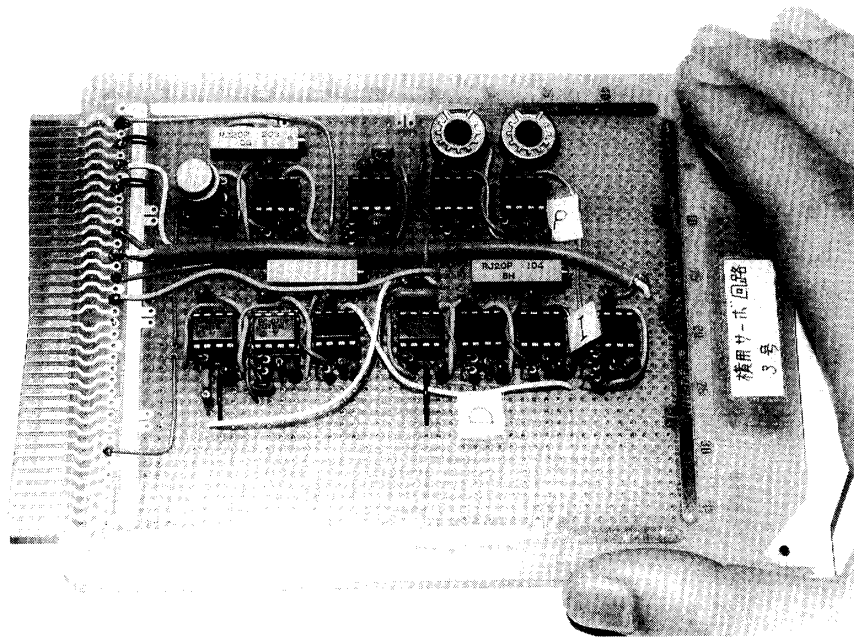


図11 PID 補償回路

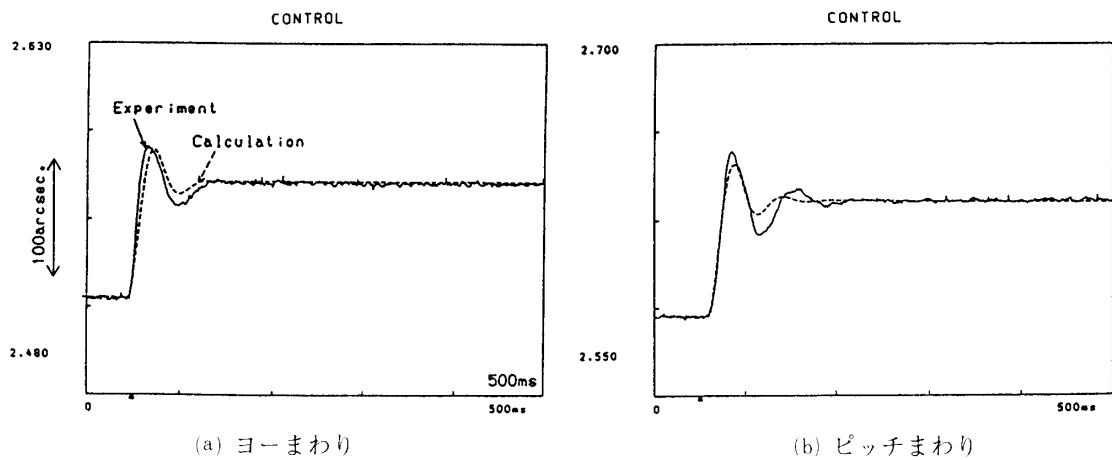


図12 渦電流センサ PID 制御によるステップ応答

に取りつけた $\phi 10\text{mm}$ の平面ミラーに入射させる。そこからの反射光がキューブビームスプリッタ (以下 CBS と略す) に入射し、その半分の光量が 4 PD に入る。したがって、Tilt 微動鏡がヨーまわりに傾くと、4 PD の上のスポットは左右 (CD) 方向) に動き、ピッチまわりでは上下 (AB 方向) に動く。4 PD の各素子は入射光量に比例した電流を流すため、C-D の信号からヨーまわりの、A-B からはピッチまわりの傾きを知ることができる。これは半導体レーザーのスポットが中央付近になければ測定できないため、測定範囲は狭いが分解能や S/N は非常に高い。

半導体レーザーの出力の不安定成分を取り除くためには、割り算を用いて

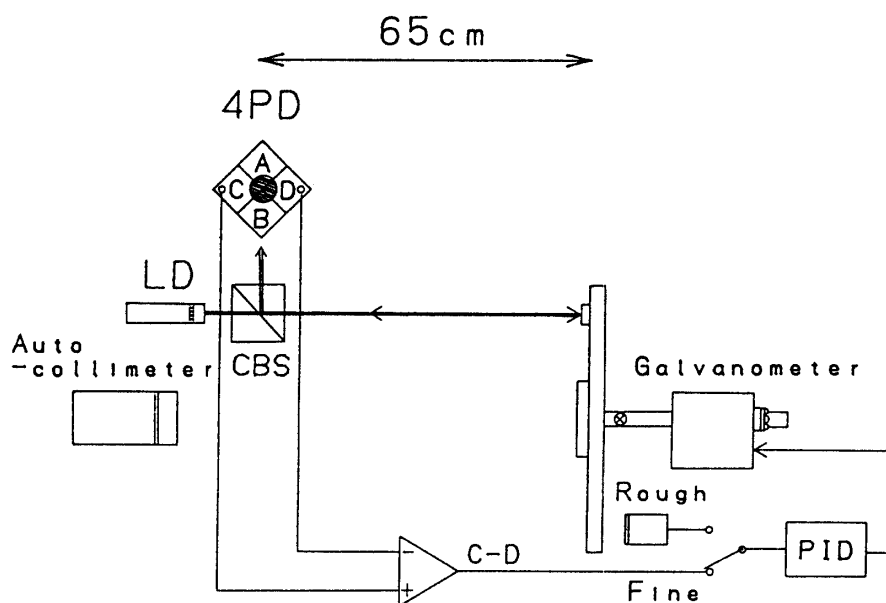


図13 精センサ実験光学系配置

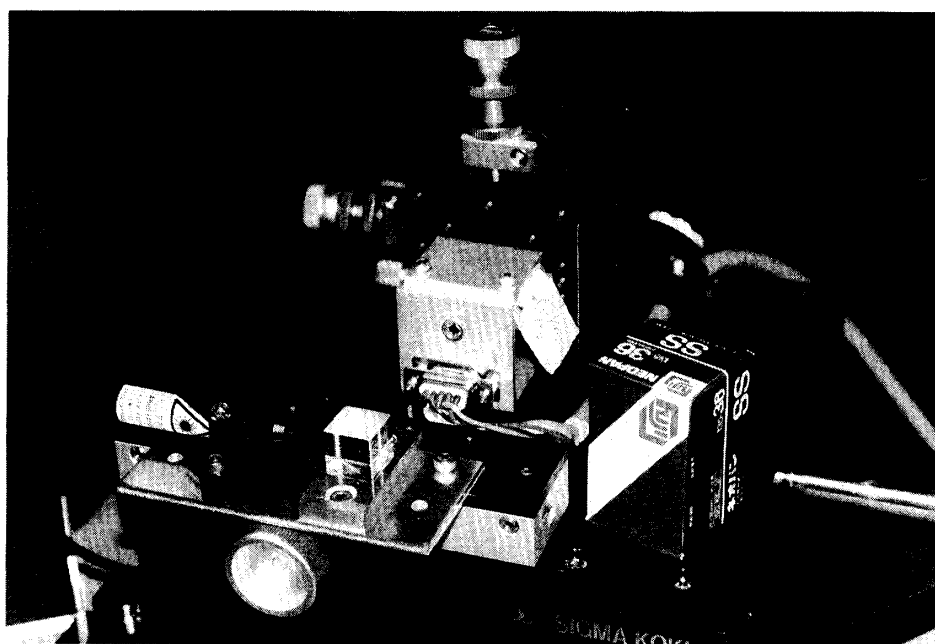


図14 精センサの構成

$$(A-B)/(A+B+C+D)$$

という出力を取り出す。しかし、上の式では分母が0、つまりビームが4PDからはずれた場合、割り算器の出力は振動してしまう。そこで一般には分母に一定電圧 w を加え、分母が0にならないようにする。しかしこれではセンサ出力が非線形になってしまう。そこで今回は割り算器を使用せず $A-B$ 、 $C-D$ を出力する差動増幅回路を作製した。この4PDの

差動増幅回路は図15のようになっている。初段では信号増幅，次の段は各素子のバランス用，その次が差動回路，最後にゲイン調整が行なわれる。またモニタ用として各素子の和 $((A+B+C+D)/4)$ を設けてある。

まず半導体レーザの出力の長時間安定性を調べるため，レーザを4PDに約1時間当て差動増幅回路の $(A+B+C+D)/4$ を測定した(図16)。この結果ではP-Vの差は0.3mV程度の変化しか見られず半導体レーザの安定性に関してはここでは問題とされない範囲である。

この4PDセンサは，ミラーとの距離，半導体レーザからの出力，スポット形状(図17)，4PD取り付け状態などによって特性が変わるため，この特性を調べる必要がある。

したがって，4PDセンサの出力特性を図12の配置で測定した。2回測定した結果を図18

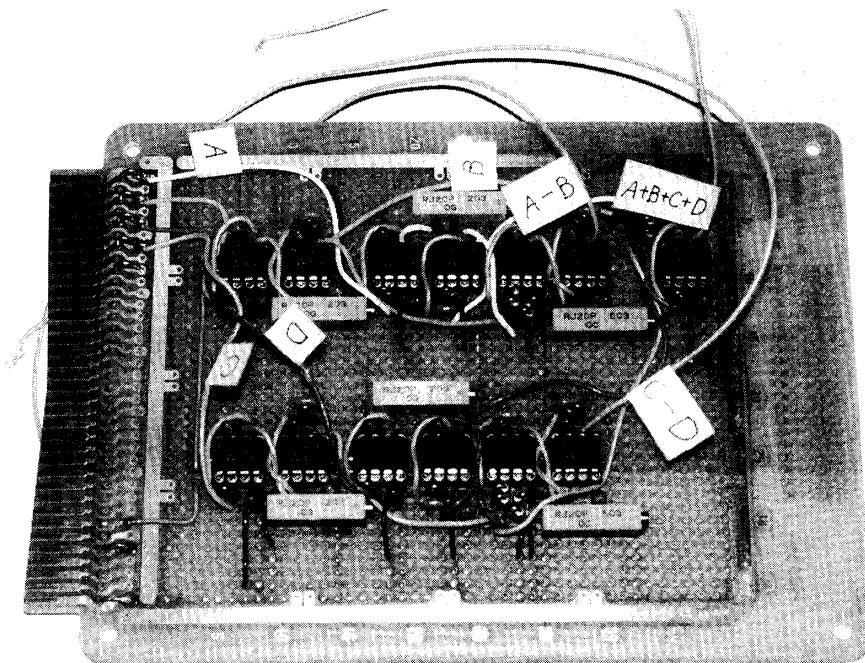
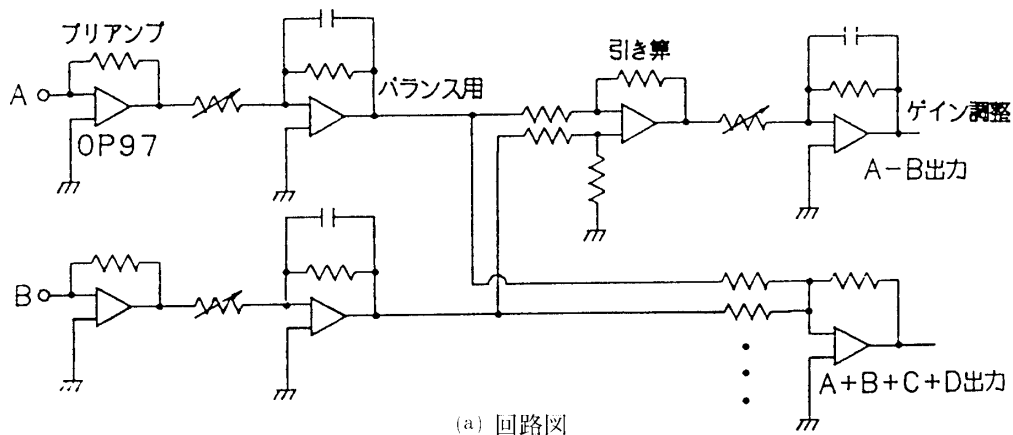


図15 4PD差動増幅回路

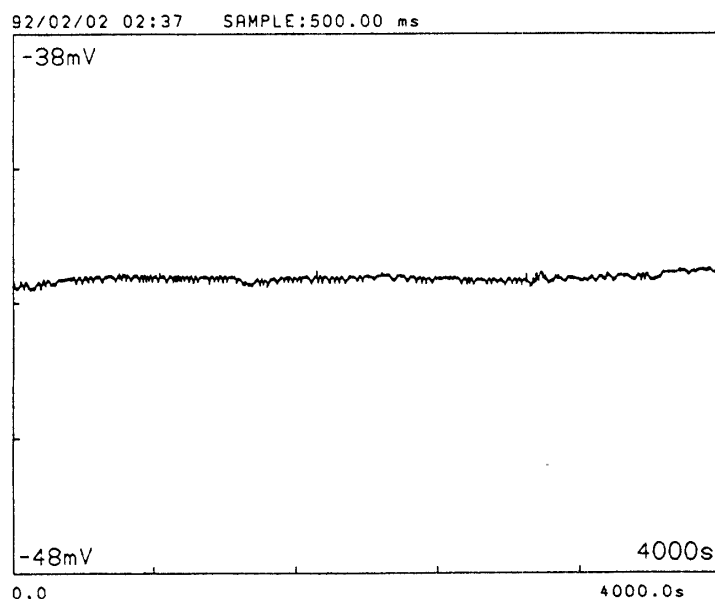


図16 半導体レーザーの安定性

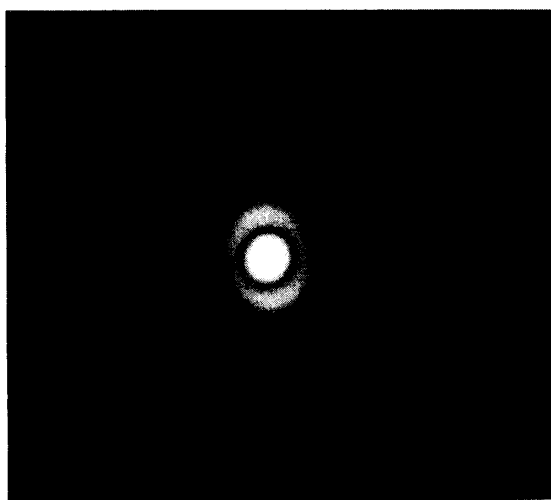


図17 4 PD 上のスポット形状

に示す。横軸はオートコリメータ傾斜計の読み、縦軸は4 PD センサの出力としてある。これは渦電流センサで制御し、徐々に指令入力を増やしてミラーを傾かせて測定している。

ここでの測定では精度的に高い測定を行っているためオートコリメータ傾斜計は実験室内の空気のゆらぎなどの環境による外乱に影響され、 ± 0.1 秒程度不安定になっていた。したがって、この結果は ± 0.1 秒角程度(図18ではマークの大きさの約1/20)の誤差を含んでいるといえる。中央に直線域が存在し、その前後で出力が飽和している様子が分かる。

このセンサの直線域は約 ± 20 秒角であり、この直線域だけを再び測定し、直線に最小自乗近似し、その感度[V/arcsec]を求めた(図19、表5)。ここではオートコリメータ傾斜計の測定レンジを上げているが、やはり環境の乱れ(大気のゆらぎ)によって ± 0.1 秒程度(図19で

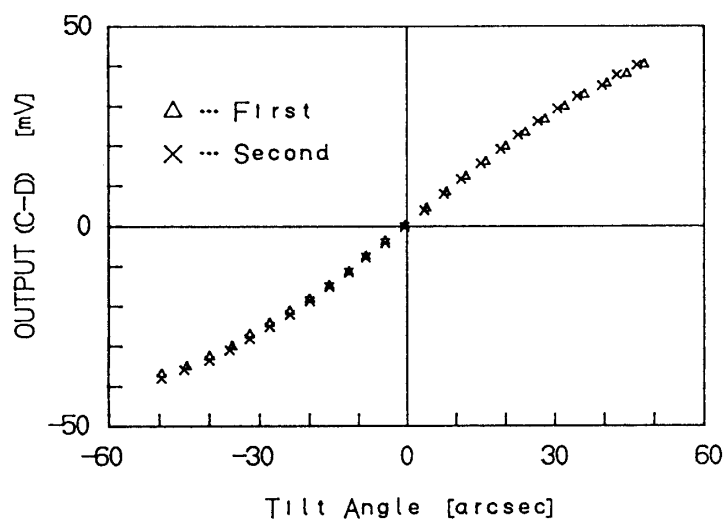
はマークの大きさの約1/2)ゆらいでいた。しかし、直線によくのっており、分解能の良さを示している。

(2) 4 PD センサ PID 制御

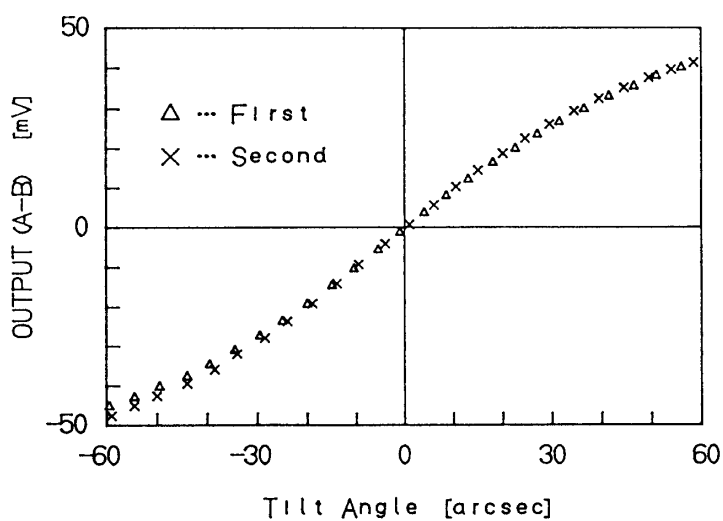
4 PD の測定範囲内(± 20 秒角), すなわち半導体レーザからのビームが4 PD の中央付近

表5 4 PD センサ感度

方向	感度 [V/arcsec]
ヨーまわり	9.44×10^{-4}
ピッチまわり	9.42×10^{-4}



(a) ヨーまわり (C-D)



(b) ピッチまわり (A-B)

図18 4 PD センサの出力特性

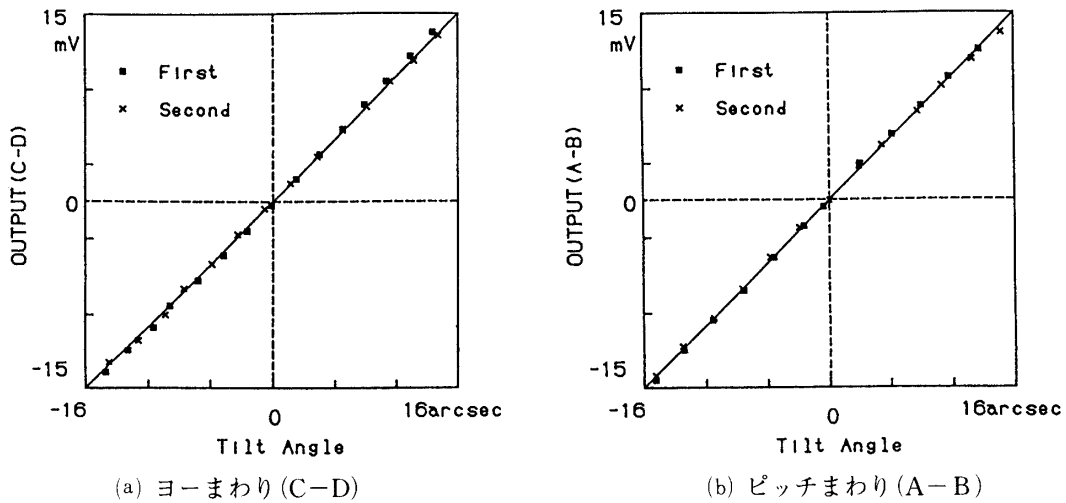


図19 4 PD センサの直線性

(測定範囲)にあるとき、切り替えスイッチによって、渦電流センサから4 PD センサにフィードバック信号を切り替え、同じPID補償回路で制御を行なえるようにした。制御は4 PDからの出力が0になるように、つまりレーザービームが4 PDの中心にくるようにミラーの傾きを補正する。このときの応答を図20に示す。これは4 PDの出力を記録したもので、横軸は500msである。渦電流センサから4 PD センサに切り替えたときの応答で、約20秒角のずれを補正した場合である。

4 PD センサの感度[V/arcsec]は渦電流センサのものに比べ高いため、さらに応答性の高い制御が実現され、制御残差もほとんどなく、その分解能の高さから制御精度も高くなっている。

実際にはこの測定を4 PD センサの感度を変えながら(差動増幅回路の最終段階のゲインを変えながら)行ない、応答ができるだけ速く0になるような感度に設定してから(1)の出力特性を測定した。

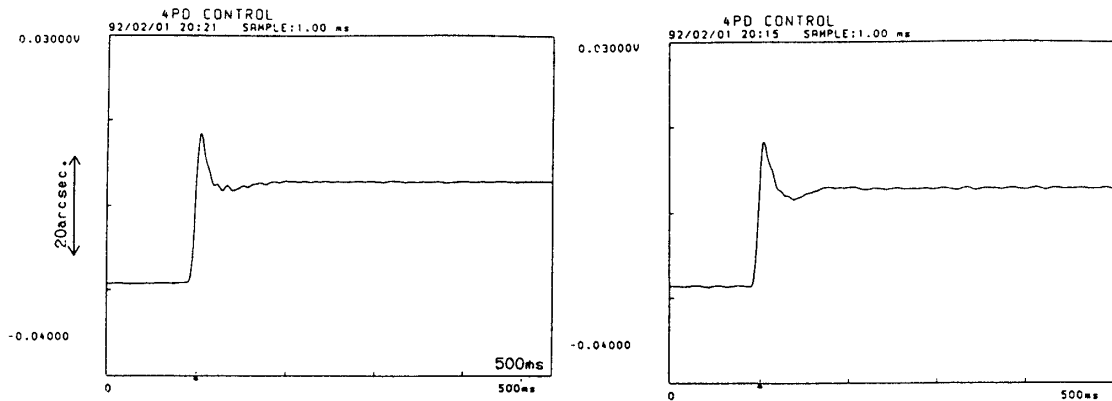
アナログPID回路を用いているため、積分動作をリセットすることが難しいため、この方法で精センサの感度設定を行なった。

(3) 天体観測時での制御方法

実際の観測では粗センサから精センサを遠隔操作することになる。そのときの精センサによる制御までの手順を図21のように行なってみた。

まず、Tilt微動鏡が精センサの測定レンジからはずれているところから始める。

- (a) 4 PDのA+B+C+D 応答をモニタし、それに出力が現れるように粗センサの指令入力を徐々に加える。
- (b) これによって半導体レーザーが4 PDの中央付近にくるため、A+B+C+D 出力は一定になるが、A-B 出力は急激に変化する。
- (c) 精センサの測定範囲にまで微動鏡が傾く(A-B 出力が±20秒角以内)ことを確認した後、スイッチを4 PD側に倒し、精センサによる制御を行なう。



(a) ヨーまわり (C-D)

(b) ピッチまわり (A-B)

図20 4 PD 閉ループ制御応答(粗センサから精センサへの切り替え)

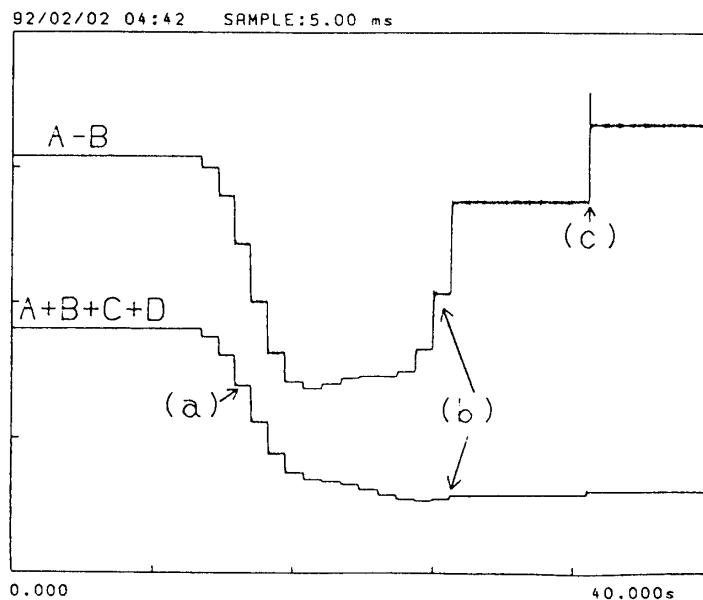


図21 観測時の制御手順

図21には(a)から(c)での各出力を示す。

(4) 高精度ポインティング制御

図14では、4 PD は上下、左右に手動で微小移動できる Z-X ステージに保持されている。4 PD フィードバック制御を行ない、そのステージを $40\mu\text{m}$ ずつ移動させ、4 PD の位置をずらし、これにミラーが精度よく追いついてくるかを測定した。その結果が図22であり、横軸にその移動量($\pm 450\mu\text{m}$)、縦軸にはオートコリメータ傾斜計の読み(± 30 秒角)をプロットした。

図にあるようにこれらの点はほとんど直線に乗っており、精度良くポインティングができていることを表わしている。一部直線からはずれるところがあるが、これはステージを動か

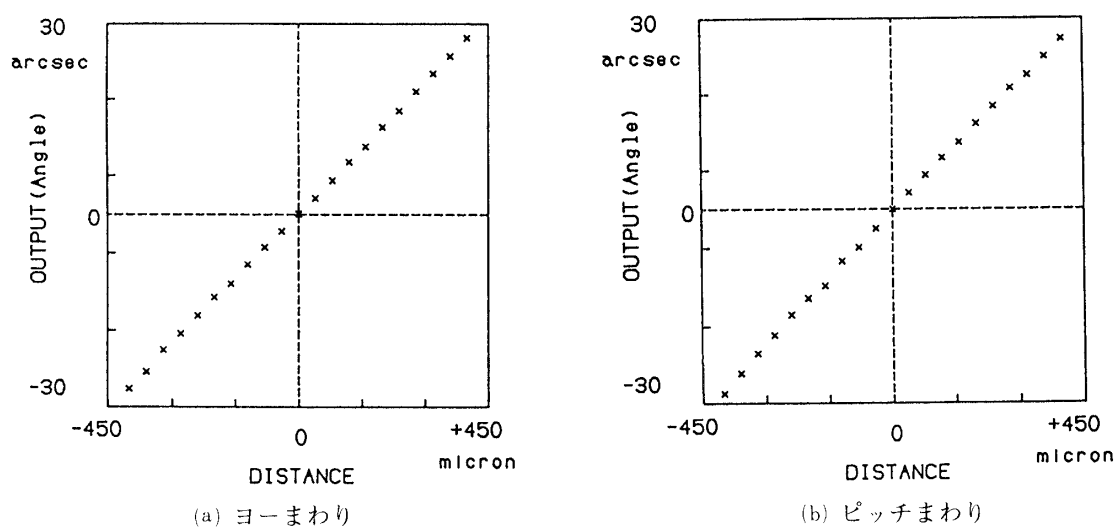


図22 ポインティング制御

す送りネジのバックラッシュや、実際には正確に40 μ m送れていなかったなどの移動側の影響であると思われる。

(5) 精センサ制御の分解能(最終精度)

図23に4 PD制御を行なった場合のその出力C-D及びA-Bを示す。縦軸はフルスケールで約5秒角である。これは微小範囲 ± 0.2 秒程度で振動しており、お互い同期している。したがって、ヨーまわりとピッチまわりの運動がこの微小範囲では連成していると思われる。また、半導体レーザーの光路中の環境の乱れ(ほこりなどの介在)も影響すると考えられる。

以上の結果を表6にまとめる。また表7に粗センサを含めた結果を表にする。ここでの制御範囲は渦電流センサの測定範囲であり、応答速度は精センサの固有振動数の1/10とした。

表6 精センサ制御結果

制御範囲	± 20 arcsec
位置決め精度	± 0.2 arcsec
固有振動数	約100 Hz

表7 全体の制御結果

制御範囲	± 1.6 deg.
最終精度	± 0.2 arcsec
応答速度	約10 Hz

7. Tilt 微動鏡を用いたマイケルソン干渉計

Tilt 微動鏡の動作を実時間でしかも高精度で確認するため、1つのミラーをこの微動鏡にし、参照平面ミラーを固定鏡にしてマイケルソン干渉計を除振台の光学定盤の上に組み上げた(図24参照)。

He-Ne レーザ(波長 $\lambda=0.633\mu\text{m}$)を光源とし ϕ 約15mm 平行光束を取り出し、2つのミラーから反射された光をハーフミラーによって干渉させ、スクリーンに投影する。これをマクロレンズを付けた CCD ビデオカメラで撮影した。スクリーンの前には ϕ 15mm のマスク

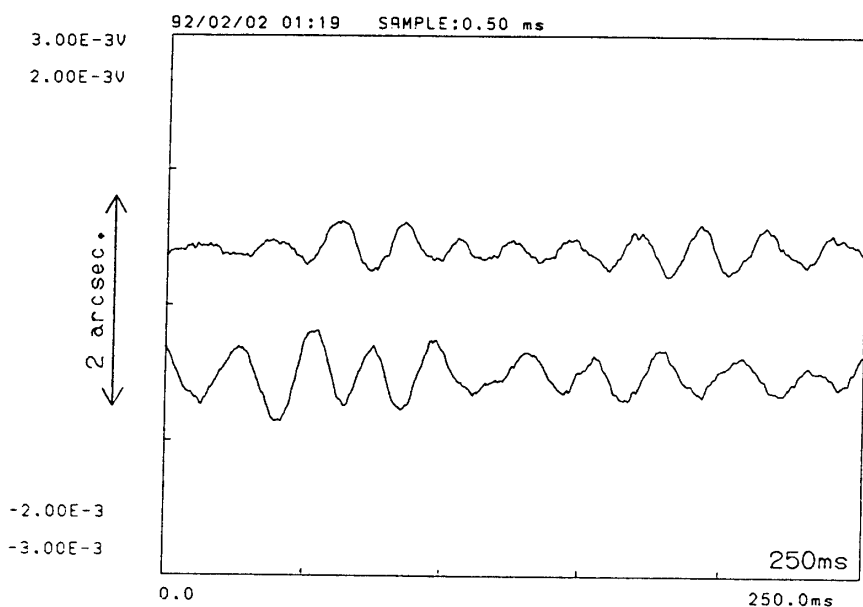


図23 精センサ制御の精度

をいって余分な光を遮った。そして、得られた干渉縞をビデオに撮り、その後計算機で解析しそれぞれの状態での Tilt 微動鏡の相対的な参照面に対する傾きを調べた。

測定としては図左上の定盤に荷重をかけ(いくつかのおもりを徐々にその定盤にのせ定盤自体を、ある方向に傾かせる)粗センサ制御と精センサ制御での干渉縞の様子を見た。微動鏡を傾かせるのと、精センサ参照ミラー系を傾かせるというのは相対的なものであるため、再現性の良いこの方法をとった。荷重をかける2つのミラーの相対傾き角を変えた場合、精センサ制御ではマスク内に現れる干渉縞の本数とその傾きは変化しないはずである。以下にその測定について述べる。

7.1 干渉縞の画像解析³⁾

この場合、干渉縞は2つの平面ミラーの相対的な傾きを表わす $\lambda/2$ の直線等高線となる(図25参照)。したがって、得られた干渉縞画像から相対的な傾きを知ることができ、この処理を計算機によって行なった。

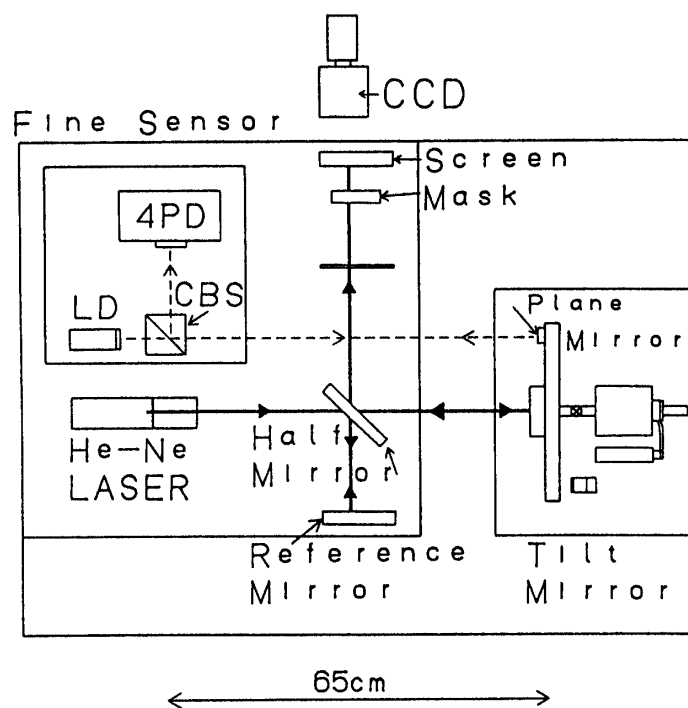
得られた画像は画像ボード(株)フォトンによってA/D変換され、計算機メモリに蓄えられる。

以下に画像処理ソフトウェアの手順を述べる。

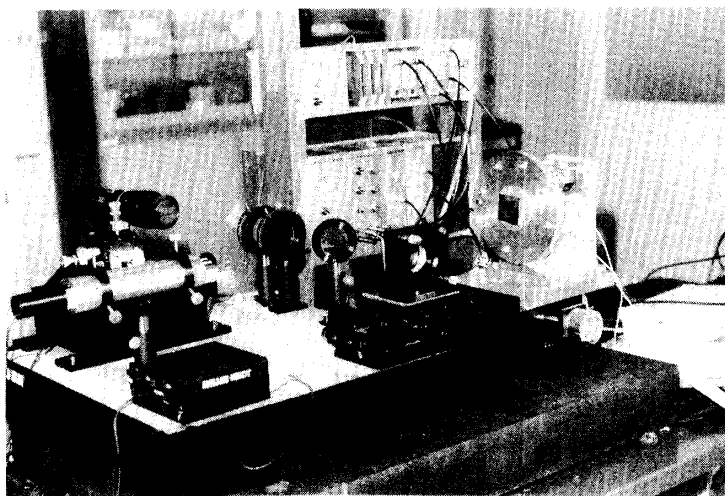
(1) 前処理(平均化フィルタ)

スクリーンには拡散板を用いており、スペckルパターンが現れてしまう。このままでは雑音が多く、縞画像の明るさにむらがある。そこで、前処理として得られた画像に近傍処理の1つである平均化フィルタをかける。

これはある注目画素濃度をその画素まわりの 3×3 画素領域(図26)の単純平均に変換する



(a) 配置図



(b) 干渉光学系

図24 干渉実験光学系配置図

処理である。この処理を数回(ここでは3回程度)繰り返し雑音の抑制, 明るさのむら補正, コントラストの補正ができる(図28の右上)。

(2) 尾根線検出

その後, 縞のピーク位置(縞の尾根線)を検出するため 5×5 近傍を用いた平均化微分オペレータを利用する。図27のように注目画素を中心とした近傍を考え, x , y , xy , $-xy$ 方向

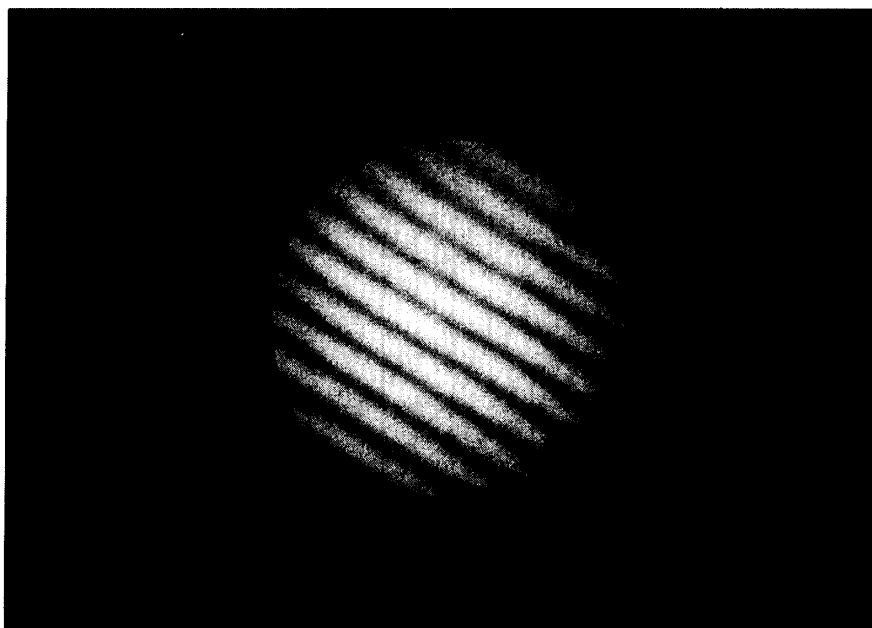


図25 得られた干渉縞

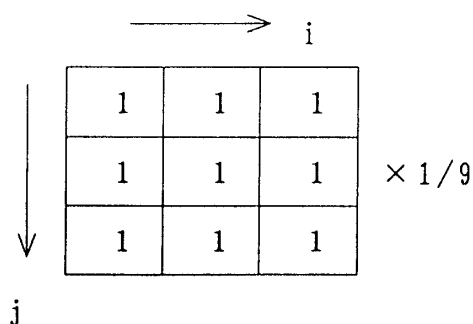


図26 3 × 3 領域

に対するピーク検出を行なう。

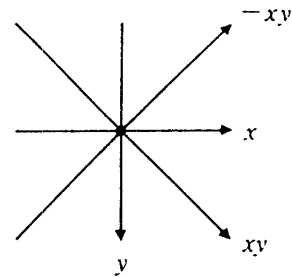
この4方向の内いずれか2方向のみピークが存在していれば、その画素はピークとした。そのピーク画素を1(白)、その他を0(黒)として2値画像に変換(図28の左下)する。以下からは2値画像に対する処理である。

(3) 細線化

検出された尾根線は1画素よりも太かったり、余分な成分を含んでいる。これを除去して幅1の中心線を得る方法として細線化がある。これは元の図形を幅方向の境界から一層ずつ削り取る画素削除と、またこれが線幅1になったときの処理停止条件の2つの条件を設定している。

この結果が図28の右下である。(1)から(3)までの処理の過程を図28に示す。

$P_{-2\ 2}$	$P_{-1\ 2}$	$P_{0\ 2}$	$P_{1\ 2}$	$P_{2\ 2}$
$P_{-2\ 1}$	$P_{-1\ 1}$	$P_{0\ 1}$	$P_{1\ 1}$	$P_{2\ 1}$
$P_{-2\ 0}$	$P_{-1\ 0}$	$P_{0\ 0}$	$P_{1\ 0}$	$P_{2\ 0}$
$P_{-2\ 1}$	$P_{-1\ 1}$	$P_{0\ 1}$	$P_{1\ 1}$	$P_{2\ 1}$
$P_{-2\ 2}$	$P_{-1\ 2}$	$P_{0\ 2}$	$P_{1\ 2}$	$P_{2\ 2}$



(a) 5 × 5 画素領域

(b) ピーク検出方向

図27 5 × 5 平均化微分オペレータ

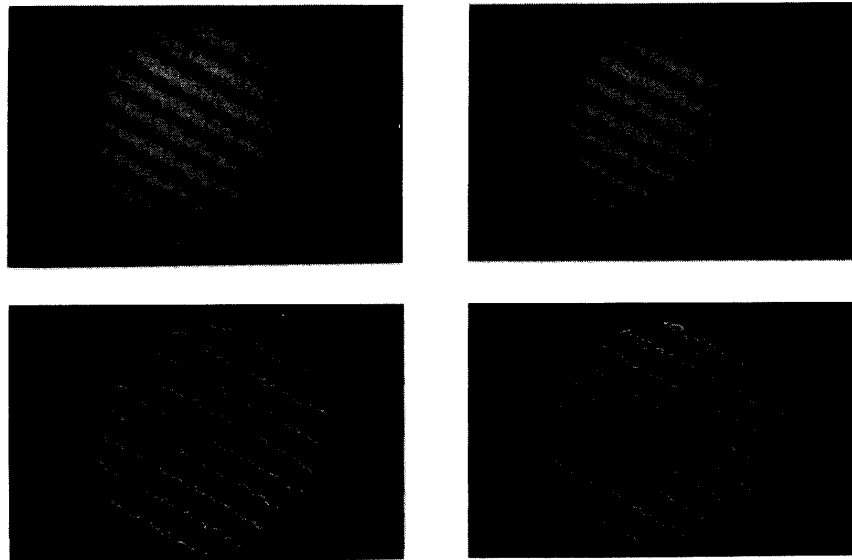


図28 画像変換(原画像, 平均化, 尾根検出, 細線化)

(4) 直線抽出(Hough 変換)⁷⁾

以上の処理によって干渉縞が線として表わされるが、実際のものには途中で線が切れている場合が多い。このような画像でも、線を抽出することができる手法がHough 変換である。Hough 変換は画像を別の平面に変換して処理するもので、線の傾きを高精度で検出できるため、ここでの使用に適していると考えた。

まず、xy 平面の2 値画像と、別の uv 座標系であらわされる uv 平面を考える。画像を走査し、白画素 (x_i, y_i) が存在すれば、次式で表わされる曲線を uv 平面に描く。

$$v = x_i \cos(u) + y_i \sin(u) \tag{8}$$

例えば、図29の a, b, c のように、原画像中で直線L上に点がある場合、それらに対応する uv 平面上の曲線は同図(b)のように1点 (u_c, v_c) で交わる。直線Lは、以下の式で表わされる。

$$v_c = x \cos(u_c) + y \sin(u_c) \quad (9)$$

したがって、 uv 平面上の交点を逆に xy 平面の直線に変換することにより、画像中の直線の傾きを求めることができる。

これらの直線からその間隔と方向によって、参照ミラーと Tilt 微動鏡の相対的な傾きが計算できる。

以上の処理は2つの鏡の高低差である $\lambda/2$ の $1/10$ 程度見分けられると思われるため、マスクの大きさ $\phi 15\text{mm}$ を考慮すると、 ± 0.2 秒の測定分解能がある。これは精センサ制御による分解能と同程度である。

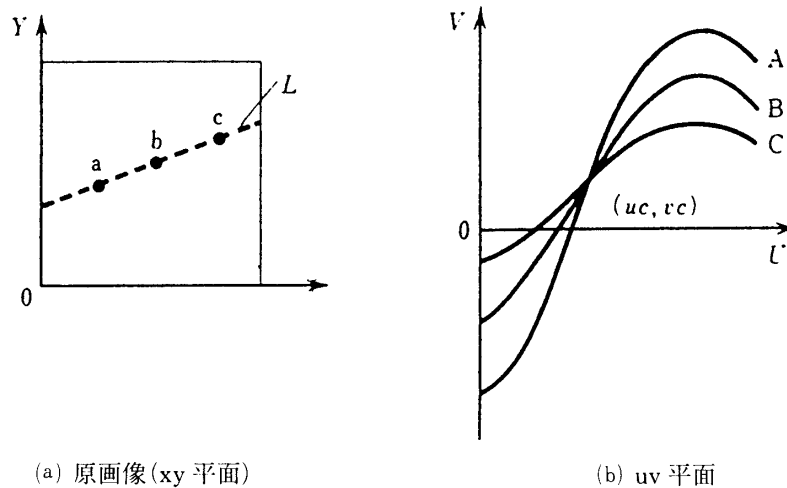


図29 Hough 変換⁷⁾

7.2 粗センサ制御での干渉

粗センサ制御では、ミラー裏面との距離を一定に保つ制御である。そのため、定盤に荷重が加った場合では、その上に乗っている精センサ参照ミラー系の傾きはフィードバック信号にはあらわれない。したがって、荷重に応じ干渉縞の本数や傾きが変化する。

その結果である相対的な傾きを以下に示す。ここでは後述の測定点の7から8へのときの干渉縞から解析した。7は最大荷重を加えた場合で、8はそれを取り除いた場合である。

左の図は干渉縞を直線抽出した結果であり、 $\lambda/2$ の等高線を表している。矢印は傾斜の方向とその大きさを示している。この矢印が長いほど、急な勾配であることを表す。右の図はその3次元表示であり、縦軸に He-Ne レーザの波長 ($0.633\mu\text{m}$) をとっており、円の径はマスクの大きさである 15mm である。また干渉縞の動き方を見ると不安定で、環境による乱れによる影響よりも速い振動であった。

7.3 精センサ制御での干渉

精センサでは荷重によって傾いた量をフィードバックし、その分が補正される。高精度で制御されている場合は、干渉縞の本数、その傾き、干渉縞間隔は不変になるはずである。

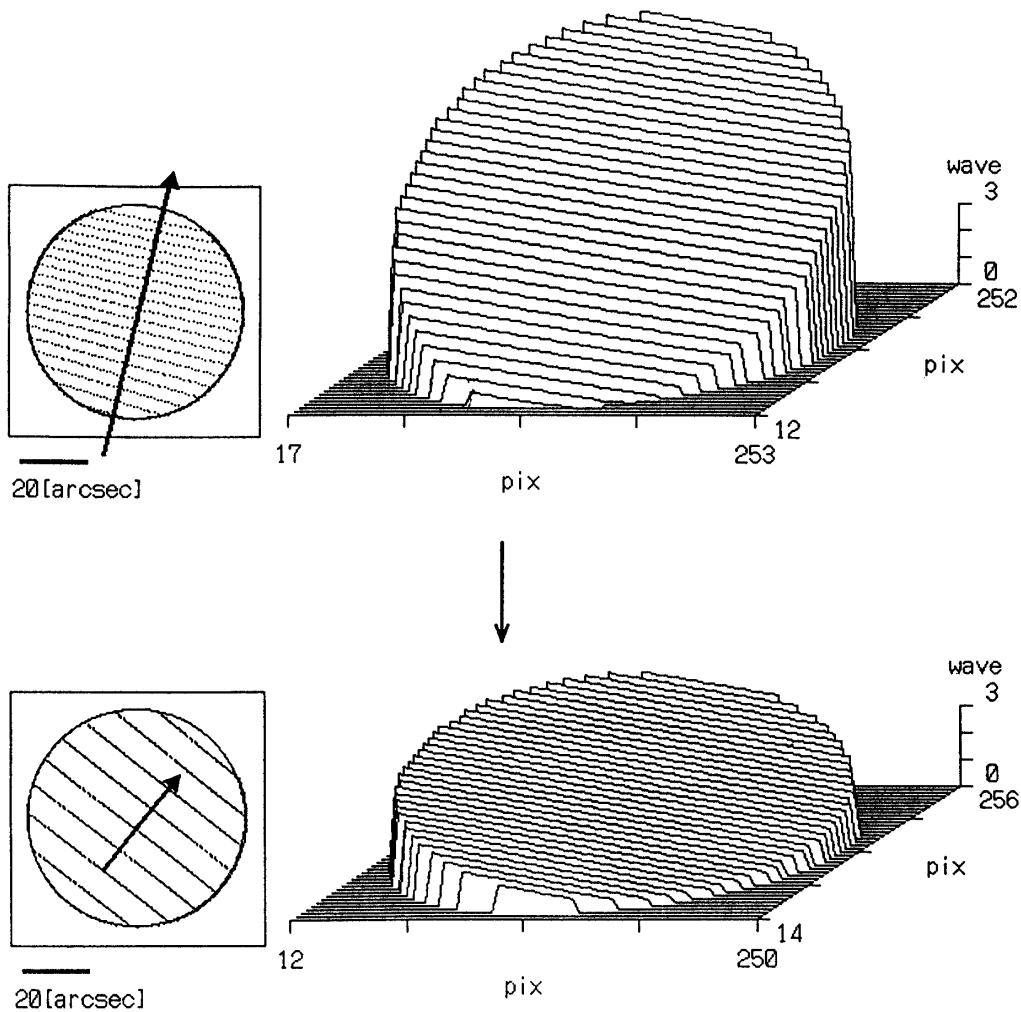


図30 粗センサ制御での干渉縞解析結果

7.2と同様に最大荷重をかけた場合とそれを取り除いた場合の相対的な傾きを以下に示す。表示は図30の場合と同じである。

この結果は粗センサ制御のときの図30に対応しており、図30にあるような傾きを精センサで補正するため、傾き角は一定のままであることが分かる。また干渉縞の動きに関しては非常に安定しており、粗センサで見られた振動は見られなかった。

そして、荷重を加えるときにどうしても衝撃が加わってしまう。しかし、この衝撃によって精センサの制御範囲がはずれ、精センサで制御不可能となることはなく、衝撃が加わった場合でも精センサのフィードバック制御がかかっている。

これを見る限り、かなり速い変動にも応答し、補正が加わることが分かる。このような測定を何回も行ないそのときのヨー及びピッチをグラフにしたものが図32である。横軸の測定点は表8に示す。粗センサ制御を見ると荷重の方向によってピッチ角の変動がかなり変化している。一方、精センサの制御ではこれが補正され、ほぼ一定の角度で保たれているようすが分かる。

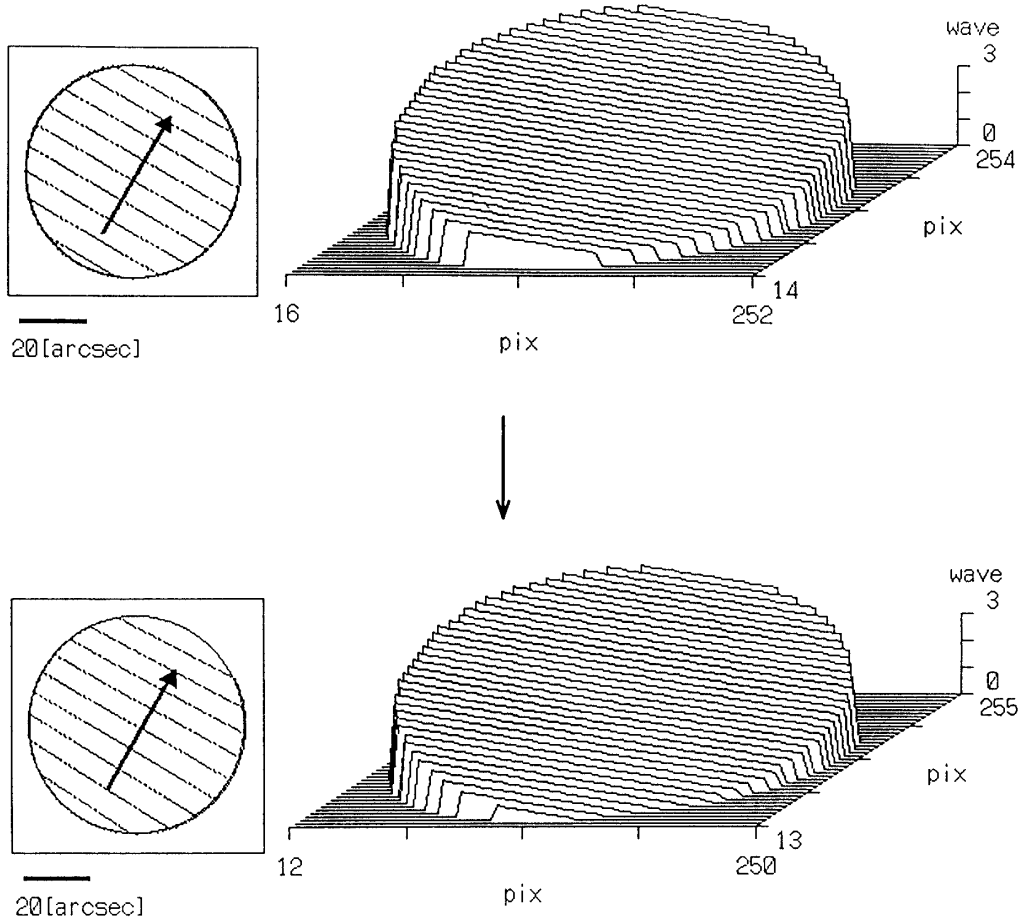


図31 精センサ制御での干渉縞解析結果

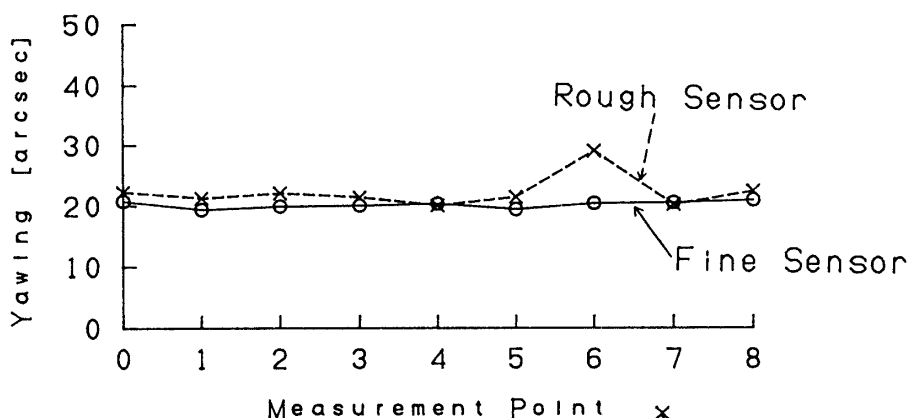
表8 測定点

No.	条件
0	荷重なし
1~3	徐々に荷重
4~6	徐々に取り除く
7	最大荷重
8	それを取り除く

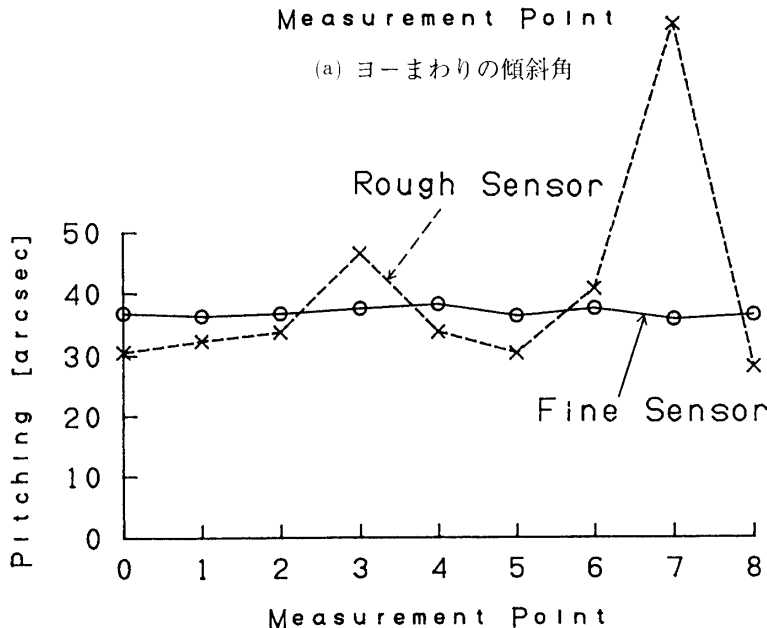
8. 考 察

この章では Tilt 微動鏡を制御し、最終的に干渉計を組んでその応答を精度良く調べた。制御は広範囲制御と高精度制御を実現するため、粗、精2つのセンサを用い、同じ補償回路で微動鏡を駆動した。その切り替え操作も良好であり、かなり速い応答であった。

粗センサの制御では渦電流センサの特性が良かったこともあり、十分な精度、応答速度で



(a) ヨーまわりの傾斜角



(b) ピッチまわりの傾斜角

図32 干渉縞から求めた傾斜角

あった。これは精センサの測定範囲まで微動鏡を傾かせることを目的としている。

ここでの最終精度の目標には、わずかに及ばなかったが、目標としている精度はかなり厳しく実験室内の環境の乱れと同等あるいはそれ以下のものであった。これ以上の測定を行なうには、空気の乱れやほこりなどがほとんどない環境で行なう必要がある。しかし、逆に考えれば、そこまでの精度は実現できたといえる。この精度を制限しているものが板バネの連成によるものであると考えられるため、ここを工夫する(例えば板バネを長くし、たわませる)ことによってさらに精度の高い制御ができるものと予想できたが、現状の精度でも十分であると考え、実現までには至らなかった。

また、応答周波数も高くすることができ、目的としては温度変化などによるゆっくりしたずれを補正することを考えていたため、この点では問題ないと言える。今回の結果からこの精度(± 0.2 秒)が実現できていれば遠赤外ではもちろん中間赤外の干渉望遠鏡としても使用可能であることが予想される。

これは上空で作動させることを想定しており、低温、真空などの環境で正常に働くことが第一条件であるため、アナログ回路を用いた。このようなアナログ回路はこれまでの気球観測にも用いており、信頼性が高い。一方、デジタル制御では、CPUなどが厳しい環境の中で動作するかどうか、確かめる必要があり、これらの実験をするだけでも、かなり困難が生ずると思われた。以上の理由からも実際にも使用されるであろうアナログ回路を用いた。

そして干渉縞を解析する画像処理はここで2つの傾きを計測するために、C言語を用いて作製した。干渉縞をビデオに録画し、その後画像処理を行なっているためここでの処理速度は重視しなかった。その処理時間は約2分である。これは、測定精度が良く、ヨー、ピッチの傾きが同時に計測できる。また、平均化フィルタから細線化までの処理は形状測定干渉計で得られるような干渉縞にも対応できるものであり、Hough変換は画像の特徴抽出に用いることができる。

今後の問題としては、残された光軸方向の変位制御である。これを考えるにはまず、その変位を測定する測定方法が問題となる。これは1m先の物体の相対変位を分解能 $1\mu\text{m}$ 以下で計測することが要求された。以上のことを考えると、干渉変位計が適している。しかし、これはHe-Neレーザなどを光源としたものが多く高電圧が必要であり、気球搭載では上空で放電するためここでは適していない。

一方、半導体レーザを光源として用いることにより、先のことは解決できるが、動作が不安定になり、精度的に信頼性が低くなる。測定環境としては大気の薄いところで測定するため、大気ゆらぎなどがなく非常に良い。したがって、半導体レーザの安定性の向上がこの測定法を左右する。

その他にも4PDを用いて非点収差を利用した方法も考えられるが、将来のスペース開口合成まで考えるとやはり半導体レーザを用いた干渉変位計が適していると考えられる。

気球高度(3~4万m)では大気が薄くゆらぎが問題とならないため、このような測定環境としては地上での実験などよりを良い。しかし、対流がないため熱輻射によって気球全体の温度分布が不均一になる。それによって温度歪みが生じるため、それを補正できるようなアライメント技術が必要であり、ここではそれを開発する上での基礎技術が確立され、遠赤外線が対象波長ならば十分な精度が実現できたといえる。

参考文献

- 1) 芝井広, 他: 気球赤外線干渉望遠鏡の基礎計画, 1992.
- 2) 馬場直志, 他: 開口合成法—インコヒーレントな場合—, 光学, 4, 5, 1975, p213-219.
- 3) 谷田貝豊彦: 応用光学光計測入門, 丸善, 1988, p50-53.
- 4) 吉川孝雄, 他: 機械の力学, コロナ社, 1987, pp65-66.
- 5) 藤堂勇雄: 制御工学基礎理論, 森北出版, 1987, p91.
- 6) 船久保登: 視覚パターン処理と認識, 啓学出版, 1990, p141.
- 7) 安居院猛, 他: C言語による画像処理, 昭晃堂, 1990, p139.