
ロボットの指関節用および精密機器用
マイクロ回転エンコーダの試作

(11355018)

平成 11 年度～平成 13 年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)）

研究成果報告書

平成 14 年 3 月

研究代表者 羽根 一博
(東北大学大学院工学研究科 機械電子工学専攻 教授)

東北大学図書



00031004131

附属図書館

平成 11 年度～平成 13 年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)）

研究成果報告書

はしがき

本報告は平成 11, 12, 13 年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)）の援助により遂行された研究成果を取りまとめたものである。

1. 課題番号 11355018

2. 研究課題 ロボットの指関節用および精密機器用マイクロ回転エンコーダの試作

3. 研究組織

平成 11 年度

研究代表者： 羽根一博（東北大学大学院工学研究科機械電子工専攻教授）
研究分担者： 江刺正喜（東北大学未来科学共同研究センター教授）
研究分担者： 南 和幸（東北大学大学院工学研究科機械電子工専攻助教授）
研究分担者： 佐々木実（東北大学大学院工学研究科機械電子工専攻助手）
研究分担者： 家城 淳（オークマ株式会社開発部主務研究員）

平成 12 年度

研究代表者： 羽根一博（東北大学大学院工学研究科機械電子工専攻教授）
研究分担者： 江刺正喜（東北大学未来科学共同研究センター教授）
研究分担者： 佐々木実（東北大学大学院工学研究科機械電子工専攻助手）
研究分担者： 家城 淳（オークマ株式会社開発部主務研究員）

平成 13 年度

研究代表者： 羽根一博（東北大学大学院工学研究科機械電子工専攻教授）
研究分担者： 江刺正喜（東北大学未来科学共同研究センター教授）
研究分担者： 佐々木実（東北大学大学院工学研究科機械電子工専攻助教授）
研究分担者： 金森義明（東北大学大学院工学研究科機械電子工専攻助手）
研究分担者： 家城 淳（オークマ株式会社開発部主務研究員）

4. 交付決定額（配分額）

（単位千円）

年度	直接経費	間接経費	合計
平成 11 年度	14,100	0	14,100
平成 12 年度	7,400	0	7,400
平成 13 年度	5,900	1,770	7,670
総計	27,400	1,770	29,170

5. 研究発表

（1）学会誌等

1. 羽根一博, 萩原隆志, 吉田充伸, 佐々木実, “計算機合成フレネルホログラムによる三次元露光”, 精密工学会誌, 65 (1999) 141-144.
2. A.Ieki, K.Hane, T.Yoshizawa, K.Matsui, M.Nashiki, “Optical encoder using a slit-width-modulated grating”, J. Mod. Opt., 46 (1999) 1-14.
3. A.Ieki, K.Matsui, M.Nashiki and K.Hane, “Pitch-modulated phase grating and its application to displacement encoder”, J. Mod. Opt. 47(2000) 1213-1225.
4. 家城淳, 松井圭司, 梨木政行, 羽根一博, “変調周期の回折格子を用いた光学式エンコーダ(第 3 報) -高次ひずみ信号成分の除去”, 精密工学会誌 66 (2000) 1087-1091.
5. M.Sasaki, Y.Li, Y.Akatu, T.Fujii, K.Hane, “Anisotropically Etched Si Mold for Solid Polymer Dye Microcavity Laser”, Jpn. J. Appl. Phys. 39 (2000) 6980-6984.
6. Y.Li, M.Sasaki, K.Hane “Fabrication and testing of solid polymer dye microcavity lasers based on PMMA micromolding” J. Micromech. Microeng. 11 (2001) 234-238
7. Y.Li, M.Sasaki, K.Hane, “Fabrication of grating couplers using submicron silicon mold”, 電気学会論文誌 E, 121-E (2001) 320-324
8. 家城淳, 羽根一博, 横山将史, 松井圭司, 梨木政行, 佐々木実, “変調型フォトダイオードアレイを用いた絶対位置検出光エンコーダ”, 日本機械学会論文誌 C, 67 (2001) 364-369.
9. 佐々木実, 能川真一郎, 羽根一博, “立体的マイクロマシニングのためのレジストスプレーコーティング”, 電気学会論文誌 E, 121-E (2002) 印刷中.
10. K. Hane, T. Endo, Y. Ito and M. Sasaki, “A compact optical encoder with micromachined photodetector”, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 3 (2001) 191-195
11. K.Hane, T.Endo, M.Ishimori, Y.Ito, M.Sasaki, “Integration of grating-image-type encoder using Si micromachining”, Sensors and Actuators A (2002) 印刷中.

(2) 口頭発表 (国際会議)

1. A.Ieki, K.Matsui, M.Nashiki, K.Hane, "Compact optical encoder using modulated pitch phase grating: supression of harmonic noise and contrast change", 1999 Int. Conf. Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology (ICOSN'99) (1999) 132-135.
2. M.Sasaki, "Novel optical sensors fabricated by Si micromachining", EUROOPT Conf. on Microsystems Metrology and Inspection (1999) 36-46.
3. K.Hane, M.Sasaki, J.H.Song, "Si-micromachining for optics: optical components and sensors", MICRO/MEMS2001, (2001) 283-291.
4. K.Hane, T.Endo, Y.Ito, M.Sasaki, "Si Micromachined optical encoder based on grating imaging", 11th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (2001) 552-555.
5. K.Hane, M.Sasaki, "Transmission-type optical sensors fabricated by Si micromachining", 11th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (2001) 524-527.

(3) 口頭発表 (国内会議)

1. 羽根、佐々木、能川、"レジスト噴霧法を用いた 3 次元リソグラフィ"機械学会 IIP (1999) 100-104.
2. 家城、横山、松井、梨木、桜井、佐々木、羽根、"変調型フォトダイオードを用いた光学式エンコーダ" 精密工学会秋季大会(1999) 354.
3. 田村、佐々木、羽根、家城、横山、松井、梨木、"一回転整合円筒面回転リソグラフィ装置の開発"、精密工学会秋季大会(1999) 355.
4. 能川、佐々木、羽根、"レジスト噴霧法による 3 次元リソグラフィの開発とファイバ端面加工への応用"、電気学会センサ・マイクロマシン部門研究会 PS-99-13,(1999) 67-72.
5. 田口、佐々木、羽根、"曲面用レーザ描画装置を用いたレンズのリソグラフィ加工" 応用物理学会秋予稿集(2000)864.
6. 李、佐々木、羽根、"モールドプロセスを用いた高分子導波路と微細周期構造の製作"、日本機械学会 IIP2000 講演会論文集(2000)129-131
7. Y.Li, M.Sasaki, K.Hane, "Grating coupler fabricated by silicon mold", 第 17 回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム(2000)102-103
8. K.Hane, T.Endo, M.Sasaki, Y.Ito, "Integration of grating-imaging-type encoder using micromachining technology", Technical Digest of 18th Sensor Symp. (2001) 305-308.
9. 羽根、佐々木、"立体的マイクロマシニングによる光センサ・光部品の製作"、応用物理学会春予稿集(2001)95

(4) 出版物 なし

6. 研究成果による工業所有権の出願・取得状況

なし

7. 研究成果

平成 11 年度

鋼軸円柱表面にエンコーダ用の格子パターンを製作した。円筒面にポリイミド膜を塗り、表面を平坦化した後、レジストを塗布した。レジストの塗布においては、レジスト霧化装置を開発した。霧化において、粒径の最適化、基板温度の最適化を行い、試料を移動、回転させ、レジストの加圧圧力、流量を制御することで、円筒面や凹凸面であっても、均一なレジスト膜を成膜できる条件を得た。エンコーダ用のパターンを転写するために、一回転整合型の露光装置を開発した。半導体用マスクを円筒面に近接させて光を照射しながら、マスクを平行移動させ、円筒を回転させる。マスクの平行移動と円筒の回転は精密に制御できるので、転写のはじめと終わりのパターンを精密に位置合わせできる。このため従来の転写で困難であったパターンのつなぎ合わせの問題を解決した。直径 3 mm のステンレス円柱の表面に周期 $40\ \mu\text{m}$ の格子パターンを転写できた。次にエンコーダの光学設計を行った。回転による変位の検出方法として、コヒーレントなレーザ光を用いる場合には、反射光のフーリエ像を利用する機構を設計した。また LED などのインコヒーレント光源を用いる場合にはグレーティング映像法を利用する機構を設計した。光検出器の製作においては、フォトダイオードアレイを用いるインデックス格子を設計した。さらにシリコンの微細加工によりフォトダイオードの試作を行った。格子周期 $40\ \mu\text{m}$ のフォトダイオードアレイを製作でき、光検出特性を確認した。また、レーザ走査による非平面描画も試みた。

平成 12 年度

マイクロエンコーダの製作においては、昨年度までに、円筒面露光装置、レジスト霧化装置などを開発している。これらの装置を用いて円筒面への微細パターン転写技術を確立した。円筒面のエッチング技術としてウェット法を用いた。ガラス円筒面には、精度のよいパターンを転写でき、アルミのエッチングを行うことで、エンコーダ用の格子を実現した。また、金属円柱面に直接エンコーダパターンを転写し、金属のエッチングを行うことで、金属面へのエンコーダパターンの直接形成を実施した。製作したパターンには、金属の粒界によると思われる凹凸が生じたが、エンコーダとして用いることができることが確認できた。特に転写においては、円筒の円周長さがワークごとに異なることがあるので、転写したパターンの一回転の位置でのパターンの位置ずれが発生する。本研究ではマスクの走査と円筒ワークの回転を独立に制御することで、一回転したときにパターンが合わさる一回転整合型転写法を実現した。これらの方法により直径 3 mm の円柱に対して周期 $40\ \mu\text{m}$ のエンコーダパターンを形成した。

平成 13 年度

エンコーダのセンサ部分においてはリニア型において光検出器と光源を集積することに成功した。軸ずれ、格子周期のひずみなどが平均化された小型であるが精度の高いエンコーダを実現するための技術を確立した。昨年度に引き続きレジストを霧化して塗布するレジスト塗布装置の塗布条件の改良を行った。特に 2 流体混合のノズルにおいて、空気でなく、窒素を用いてレジストの劣化を抑えた。小さいサンプルに対して塗布精度よく行える条件を見出し、エンコーダ用パ

ターンを製作できた。エンコーダの光センサに関しては、インデックス格子と光検出器、光源の一体化を実現した。検出器としてシリコンのフォトダイオードを格子に組み込んだ集積型センサを実現した。光源として、GaAs 半導体基板に電極のパターンを製作し、エンコーダに適した光源を製作した。これらを組み合わせて集積型エンコーダを実現できた。製作した集積型エンコーダの性能を評価するため、計測の実験も行い、精度、信号コントラストなどを評価し、小型でありながら、従来の製品に劣らない性能が得られた。擬似的なロボット指モデルを製作し、軸に一体化したエンコーダにより、関節角の測定が行えることを実験的に確かめた。

製作した円筒格子と光源、光センサを組み合わせ、ロボットの指関節をモデルとした測定系を構成した。円筒は指関節の軸にもちい、ベアリングと組み合わせた。関節は2つ並列に構成し、外部よりモータ駆動した。小型のエンコーダであるが、回転信号が得られ、動作を確認できた。このように、マイクロエンコーダの新しい製作方法を提案し、擬似ロボット指関節においてエンコーダを組み込んだ小型の構造で実証でき、本研究の主要な目的を達成した。

具体的な結果を次頁以降に記す。

第1章 緒言

1.1 光学式ロータリーエンコーダ

ロータリーエンコーダ [1] は、デジタル出力の得られる角度検出器として一般的によく用いられる。エンコーダの主な用途は、測定器の測長、測角のデジタル化や産業機械のデジタルサーボ用位置検出器などが挙げられる。いずれも高精度化、自動化、省力化に結びつくセンシングデバイスとして重要視され、年々需要が増大する傾向にある。

市販されているロータリーエンコーダには、大別すると磁気式、光学式の二つに分類できる。磁気式は、磁界の乱れない環境では外乱に非常に強く、環境の悪い場所でも使い勝手が良い。しかし、物理的要因によって精度の面で限界がある。一方、光学式では、回折光を信号として扱えることから、精度の面では磁気式に比べ非常に高精度なエンコーダが製作可能である。近年、磁気式が利用されることも増えてきているが、精度の面では光学式エンコーダの方がより高精度であり広く普及している。

本研究では、光学式ロータリーエンコーダに注目することにする。光学式エンコーダには、透過型と反射型の二種類がある。最も単純な透過型光学式エンコーダでは、薄板を打ち抜くことでパルス円盤を製作する。一方、反射型光学式エンコーダでは、厚板の光沢表面をエッチングによって、光散乱型格子にすることによって製作する。透過型光学式ロータリーエンコーダの内部構造を図 1.1 に示す。ボールベアリングに支持される入力軸に取り付けられたパルス円盤、固定インデックススケール、およびこれらを挟み配置された光源と受光素子などからなる。

パルス円盤とインデックススケールには、それぞれ扇形の明暗格子縞が刻まれており、パルス円盤の回転に合わせて、透過光量が変化する。この光量変化は、疑似正弦波となる。この波形の周期 p は正確に格子ピッチと一致する。その一定周期のパルス数をカウントすれば、角度変位量を換算することができる。

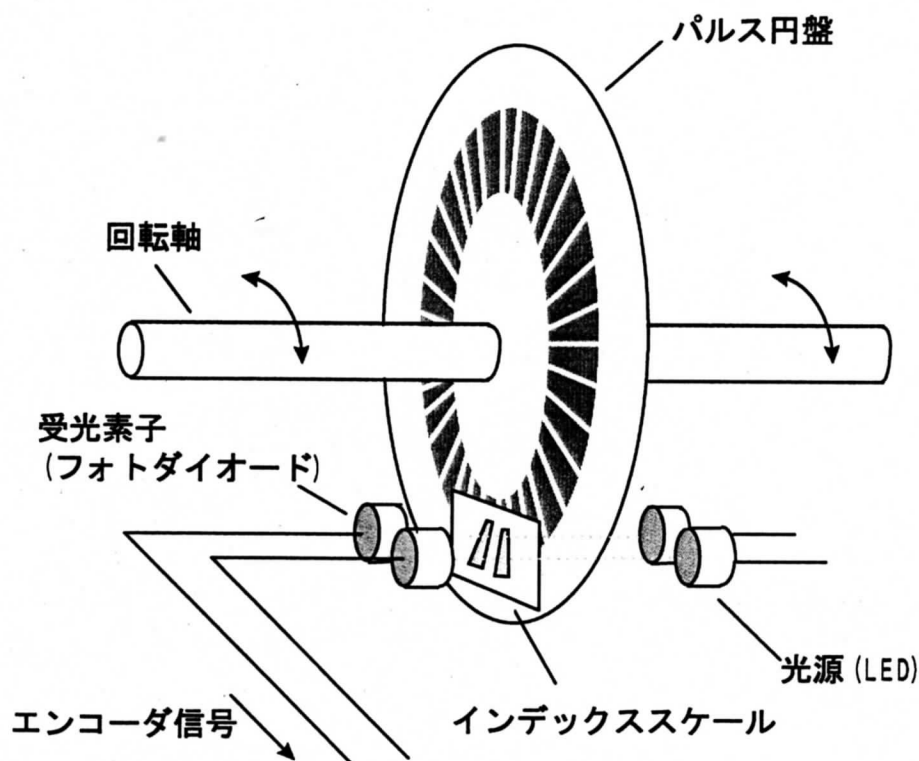


図 1.1: 光学式ロータリーエンコーダの一般的構造

1.2 光学式エンコーダの現状

回折格子を用いた光学式エンコーダは、メカトロニクスにおける制御部品として不可欠な変位センサであり、近年工作機械やロボット等においてより高い精度を保ちつつ小型化が必要とされている。

また、精密機械においては、センサ系のオンマシン化の必要性が高くなってきている。この場合、高精度化とは別に、温度変化・振動・空気ゆらぎ等の環境に強い、信頼性の高いセンサが必要である [2][3]。光学式エンコーダはレーザ干渉計に比較して温度の変動の影響を受けにくい。しかしスケールの材質とステージなどの機械部品との熱膨張係数の違いにより、ステージの変位とスケールから検出される変位に違いが生じてしまい誤差の原因となる [4]。また、ロータリーエンコーダにおいては、軸とスケールの取り付け誤差も問題となる。一般に光学式ロータリーエンコーダのパルス円盤はガラス製である。軸と円盤を別々に加工して、後から取り付けるため、軸の中心とスケール円盤の中心を合わせることが困難であるため、高い精度での測定では誤差の原因となる。

1.3 本研究の目的

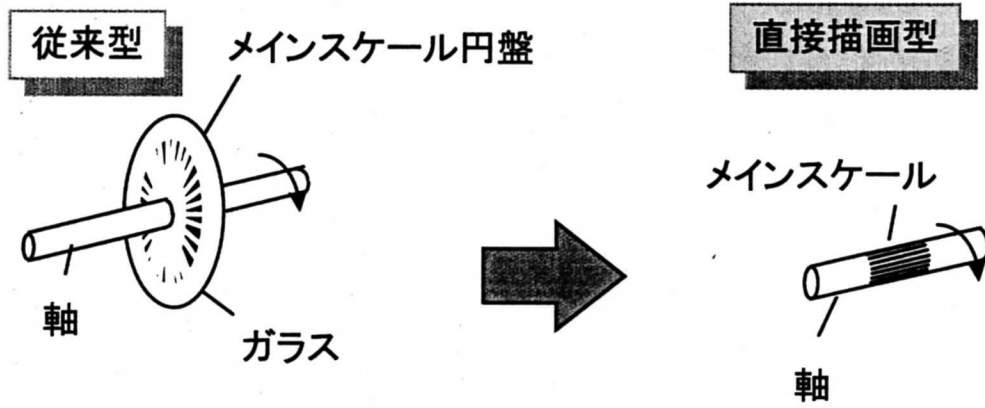
前節の問題点を解決するため軸そのものにスケールを製作することを提案する(図1.2)。回転軸上にスケールがあれば、軸とスケールの間の中心軸ずれは存在しない。また、熱膨張係数の違いによる誤差もなくなり耐環境性も向上すると考えられる。そして、より一層の小型化も可能となる。そのような小型なロータリーエンコーダは、ロボットの指関節やモータの回転軸などに応用できる。

本研究における最終目的は、円筒金属粗面上にスケールとなる格子パターンを直接描画し、エンコーダを構成し、機構の耐振動性向上、小型化、低価格化などを達成することである。

まず、加工表面が円筒面形状であるため、特殊な加工法が必要となる。円筒面への微細パターンの形成においては、レジストを塗布した円筒ワークの表面にレーザ光を集束させて露光する方法、フレキシブルマスクを用いる方法[5] マイクロコンタクトプリンティング[6] などがある。これらは製作の手間や生産性の低さが問題点として挙げられる。

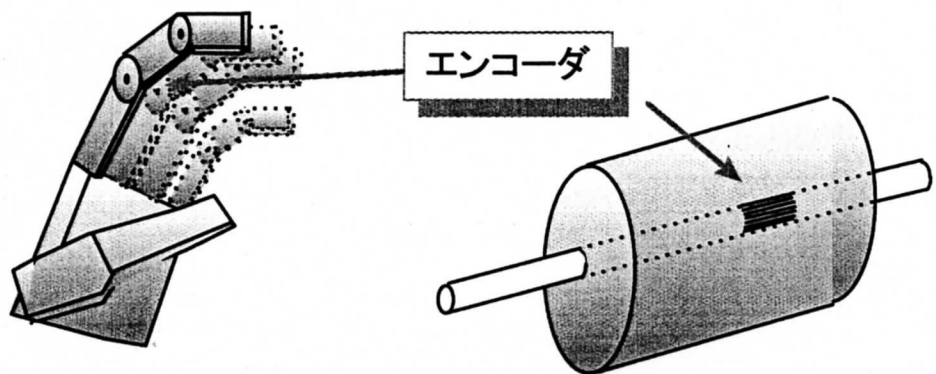
これらの問題点を解決する円筒面への新しい露光方法として転動露光法[7]が提案された。転動露光装置は、平板マスクをレジストを塗布した円筒面ワークに密着させ。その間の摩擦力によって円筒面ワークを回転させる。従来の密着露光に準じているので転写パターンの解像度は高い。しかし、レジストの膜厚、ワークの寸法誤差などの要因で円周が異なると露光開始点と終点でのパターンの繋ぎ目がずれてしまう問題があった。

以上を踏まえた上で、本論文では三部構成で円筒面格子型ロータリーエンコーダの製作にとりかかった。第2章では、円筒面に連続的に格子パターンを転写できる装置の開発をおこなう。繋ぎ目部分の整合性を保つようにワークの回転とマスクの移動量を精密に制御して円筒面を露光できる一回転整合円筒面露光装置を開発する。第3章では、第2章で製作した円筒面露光装置を用いて、メインスケールとなる回転軸を製作し、エンコーダ実験を行う。第4章では、製作した円筒面格子型ロータリーエンコーダを組み込んだロボット用擬似指関節を試作する。第5章では、結言として総括する。



(a)メインスケールと回転軸の一体化

ロボットの指関節やモータなど



(b)使用例

図 1.2: 回転軸とロータリーエンコーダ部品一体化

第2章 一回転整合円筒面露光装置の開発

2.1 はじめに

微細なパターン転写技術として、現在広く用いられる手法としてフォトリソグラフィ技術がある。この技術は、既に確立された手法であり、信頼性も高い。用途として、LSI、LED、フォトダイオードなどの多種多様な半導体デバイスに用いられ、産業上極めて重要な技術である。微小な構造体を作成にも寄与し、センサの小型化などに役立っている。

そのプロセスは、一般的に次のようになる。1. マスクの制作、2. レジスト塗布、3. 露光、4. 現像、5. エッチングの順番で基板表面を加工する。デバイス作成時には、必要な材料を基盤表面に蒸着、スパッタ、CVDなどで薄膜を堆積させ、1~5の操作を繰り返すことでデバイスを制作する。また必要に応じて、イオンを注入しpn接合を形成することでダイオードやトランジスタの機能を持たせることができる。

これまでほとんどの利用法は、二次元的な平面基板に対して、パターン転写をおこなうものである。三次元物体に対してパターン転写をおこなうには、特殊な技術が必要となり、これまで色々な転写法が試されてきた。特に円筒面に限ると過去の例として、フレキシブルマスク法 [5]、 μ CP(マイクロコンタクトプリンティング) 法 [6]、転動露光法 [7] などがある。

本研究で提案している円筒面格子型ロータリーエンコーダでは、上記のような円筒面に対する微細パターン転写技術が必須の技術となる。しかし、これまでに行われた円筒面に対する微細パターン転写技術には共通の問題点がある。その問題点とは一周パターンを転写したとき繋ぎ目がずれてしまうことである。

本章では、問題点を解決するため一回転整合露光法を提案し、それに基づいた円筒面露光装置を開発する。そして、特性実験を行い有効性を示す。

2.2 過去に行われた円筒面へのパターン転写技術

以下に、各露光法を紹介し、その共通の問題点を挙げる。

2.2.1 フレキシブルマスク法

フレキシブルマスク法とは、円筒面に対してフレキシブルマスクを巻き付けるようにして貼り付けることによって露光する密着露光をおこなう露光法である。その概略図を図 2.1 に示す。フレキシブルマスクは、紫外線を通すフレキシブル材料の上に、Cr や Au といった紫外線を通さない金属薄膜をパターンニングして製作する。

フレキシブルマスクは、マスク自体が伸びてしまうこと、金属薄膜との膨張係数の違いによる薄膜構造の亀裂などの問題がある。

2.2.2 マイクロコンタクトプリンティング法

曲面に対してサブミクロンスケールのパターンニングをする手法としてマイクロコンタクトプリンティング法がある。

マイクロコンタクトプリンティング法は、アルカンチオール (例として、ヘキサデカンチオール HDT, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{SH}$) を塗布したエラストマースタンプ (ポリジメチルシロキサン、PDMS) を用いる。ワークには予め、Au をコーティングしておく。Au 薄膜表面とスタンプのアルカンチオールが接触すると SAMs 膜 (Self Assemble Monolayers) を形成する。この SAMs をマスクとして Au をウェットエッチングし Au のパターン転写する方法である。また、この Au のパターンをマスクとして用いても良い。

パターンニングの原理をを図 2.2.3 に示す。Au を蒸着などでコーティングした円筒面をもう一方の PDMS でサポートしながらスタンプ表面で転がす。その後、Au をウェットエッチングすれば Au 構造が円筒面に転写できる。マイクロコンタクトプリンティング法では、 $1[\mu\text{m}]$ ~ 数 $[\text{mm}]$ の線幅で Au 構造を製作でき、 $\sim 5[\text{cm}]$ の曲率半径の基盤に複雑な構造を製作可能である。

この方法の利点は、 $1[\text{min}]$ 以下でかつ 1 ステップで数 $[\text{cm}^2]$ パターンニング可能であるということ、一つのスタンプで様々な半径の基板に対して対応できることである。精度の点でフォトリソグラフィよりも優れた方法ではあるが、スタンプの耐久性や、微小パターンであるときのスタンプ製作の困難さが問題となる。

2.2.3 転動露光法

円筒面に対する露光法で、生産性の向上を目的として提案された転動露光法がある。原理は従来のフォトリソグラフィ技術を応用したものである。転動露光法の原理図を図 2.3 に示す。

平面マスクを円筒面に接触させ、マスクの平行移動とともに円筒を回転させながら露光する。円筒面へ平面マスクで露光すると密着位置から離れるにつれ像の歪みを生じる。そこでスリットにより露光の範囲を限定し、像のコントラストの高い部分だけが露光されるように露光をおこなう。

この露光では、半導体加工用プロセスで用いられるガラス製の平板マスクを利用できる点である。したがって、マスクの製作が容易であるし、安価なシステムを構築することができる。また、ガラス製のマスクであるので、フレキシブルマスクのようなマスクの変形による像の歪みの心配も無い。さらに、一枚のマスクで複数転写可能なので生産性もよい。円柱の径が変わっても、装置が対応していればマスクを作り直す必要はない。

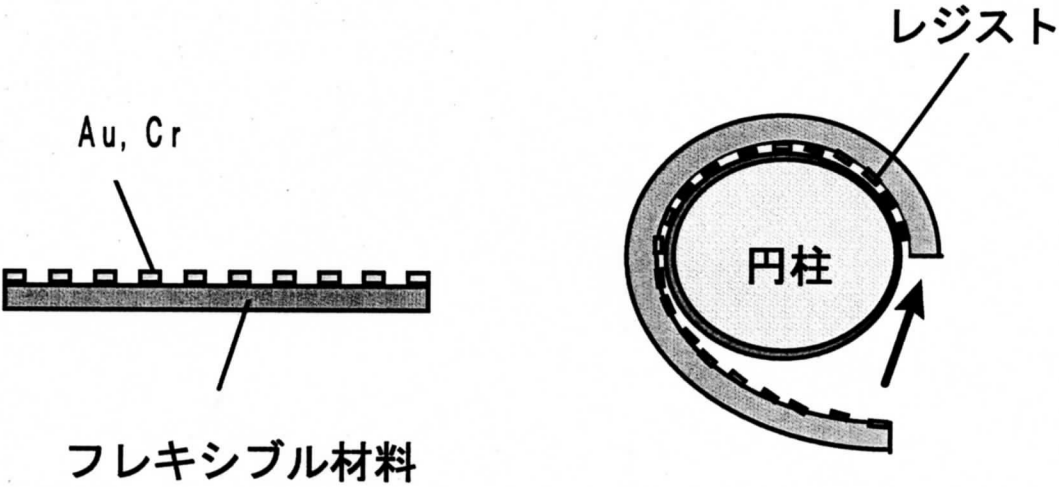


図 2.1: フレキシブルマスク法

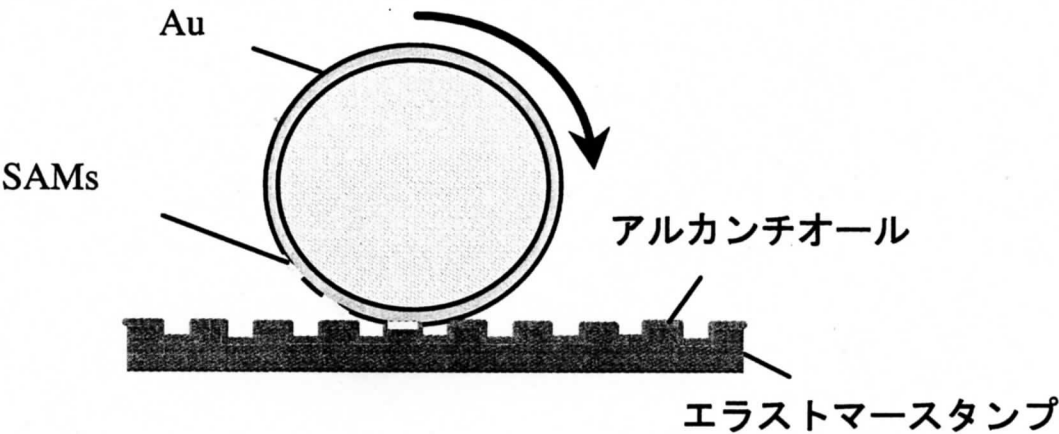


図 2.2: マイクロコンタクトプリンティング法

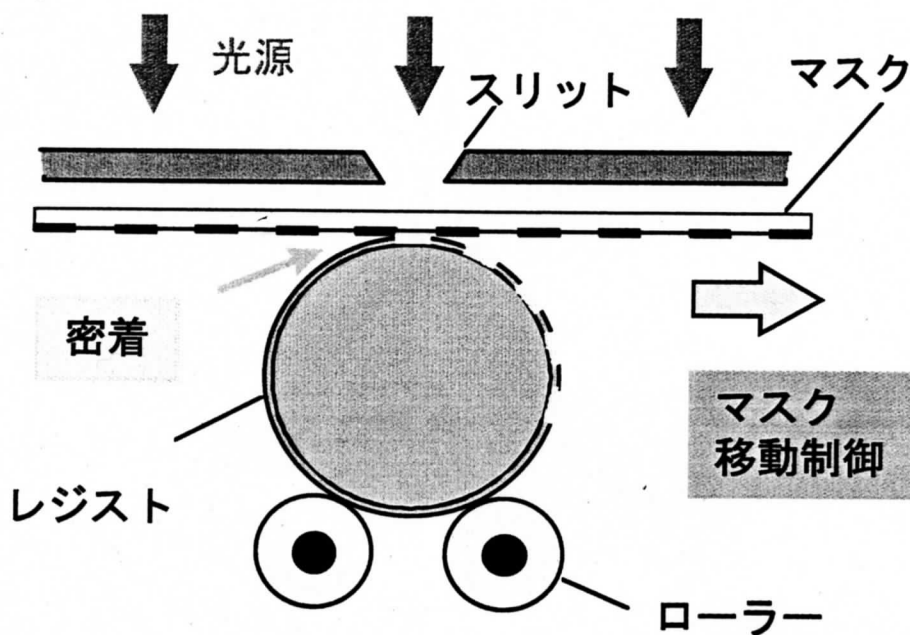


図 2.3: 転動露光法

2.2.4 従来の露光技術における共通の問題点

以上のフレキシブルマスク法、マイクロコンタクトプリンティング法、転動露光法による露光法には、共通の問題点がある。円筒面に対してパターンニングするという点ではどの手法も効果的である。しかし、一周に渡って転写すると、転写パターンとワーク円周との間にずれを生じる。これは、ワークの円周がレジストの膜厚などで変わることで、転写する領域が変わってしまうからである。これまでの手法では、円筒ワークの大部分にパターンニングできるが、一周したときの最終的な繋ぎ合わせ部分がずれてしまう。言い換えると、繋ぎ合わせ部分がずれたときの補正できる手段が無いということである。そこで、それを補正できるように改良を施す必要がある。

本研究では、転動露光法を改良し、円筒ワークとマスクの移動を独立制御することで、ずれを補正または補正の必要がないような装置を考案する。この装置を一回転整合円筒面露光装置と呼ぶことにする。本論文では、円筒一周にわたり連続的な格子パターンが転写できることを以下一回転整合と呼ぶ。

2.3 一回転整合円筒面露光法

2.3.1 原理

提案する露光法の原理を図 2.4 に示す。マスクの平行移動と共に円筒を回転させながら露光する。マスクの平行移動とワークの回転移動は、サーボモータにより精密に制御できる。マスクにはフォトリソグラフィに用いられる汎用のエマルジョンマスク及びクロムマスクを用いることができる。このためマスクパターンはCADでデザインして通常方法で用意できる。

例として半径 r の円筒面に分解能が n [分割/回転] のスケール格子をパターンニングする場合を考える。マスクパターンのピッチは、円筒の半径 $2\pi r/n$ の値に近く CAD で製作可能な $p[\mu\text{m}]$ とする。ワークが一回転する間に $np[\mu\text{m}]$ マスクを移動させながら露光する。そうすると露光の始点と終点でパターンが繋がり、必要なピッチ数だけ円筒面にパターンニングできる。

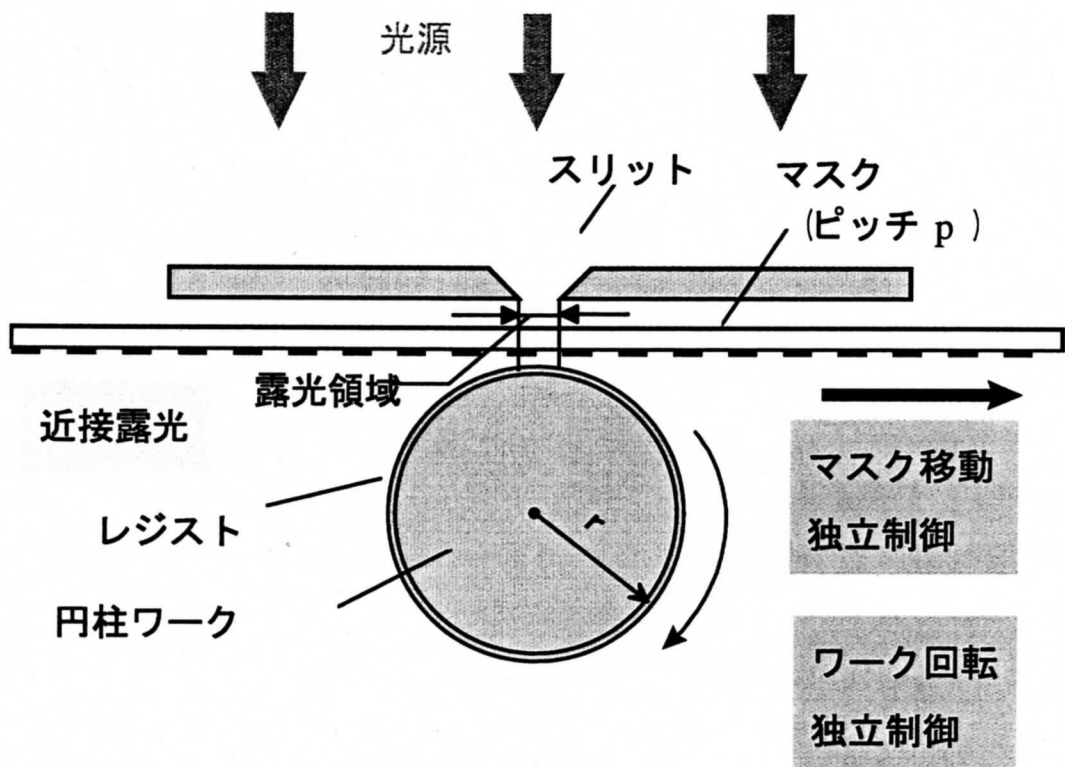


図 2.4: 一回転整合円筒面露光法の原理

2.3.2 同期制御と非同期制御

ワークの回転とマスクの移動をそれぞれ独立に制御できることから制御法を二つに分類する。

一つは、ワーク円周と同じ長さ分マスクを移動させる制御法でこれを同期露光と呼ぶことにする。この時、次の式を満たす。

$$2\pi r = n_0 p \quad (2.1)$$

ここで、 r は円筒ワークの半径、 p はマスク上の格子ピッチ、 n_0 は上式を満たすような整数である。この制御法では、円筒ワーク表面とマスクの間の相対速度が0となり、マスク上のパターンがそのまま円筒面に転写されることになる。円筒ワーク円周とマスクの移動量が厳密に等しくなるということはないが、1ピッチ分程度のずれであればマスク上の格子パターンがそのまま転写されたと考えても良いと考えられる。それは、1ピッチ分のずれが円筒1周にわたって分散されるため、転写されたパターンは p/n_0 のずれしか持たないからである。

もう一つは、ワーク円周とマスクの移動量に差を持たせて移動させる制御法で、これを非同期露光と呼ぶことにする。この時、次の式を満たす。

$$2\pi r = np \neq n_0 p \quad (2.2)$$

ここで、 n は n_0 以外の整数で円筒面一周に転写する格子数を表す。この制御法では、円筒ワーク表面とマスクの間の相対速度があり、転写パターンが引き伸ばされる。マスク上の格子パターンと転写パターンの間にデューティ比の違いを生じることになる。しかし、円筒面一周あたりの格子数は制御できる。光の回折の影響は、格子ピッチによる影響が大きいため、格子数が制御できる利点は大きいと考えられる。また、同一マスクを用いて転写する格子数を制御できる利点がある。

2.4 露光装置の製作

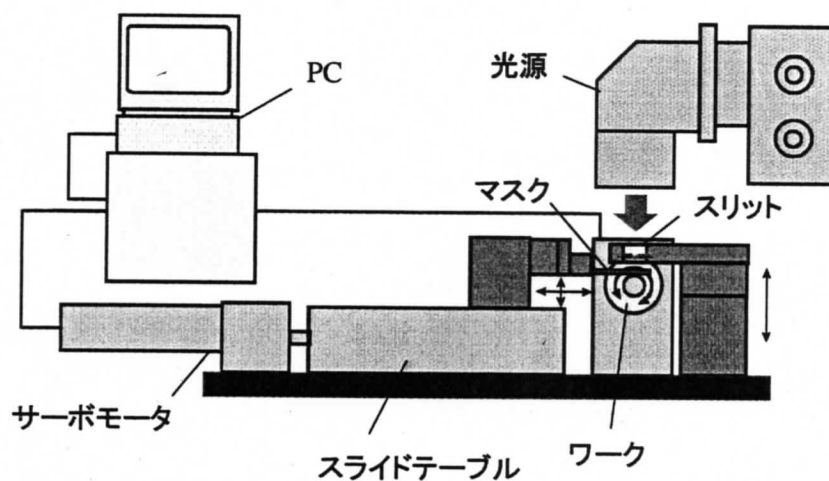
制作した露光装置は、オークマ株式会社製 CNC 装置をベースに新開発したものである。装置の構成を図 2.5 に示す。装置の構成は、ワーク用回転駆動部、マスク用直動駆動部、制御用 PC、スリット、露光用光源に分けられるワークの回転位置は高精度ロータリーエンコーダとサーボモータで精密に制御できる (精度: $2.8 \times 10^{-3} [\text{deg}]$)。また、マスクの位置も同様のロータリーエンコーダとサーボモータに繋がれた高精度な直動ステージで精密に制御できる (精度: $0.04 [\mu\text{m}]$)。WindowsNT 上の専用ソフトウェアからデジタル入出力ボードを介しサーボモータを制御する。操作にはマニュアル操作と簡易プログラムによるオート操作の 2 系統がある。ワークとマスクの移動量の直線補完をプログラム上で容易に実現できるので、1 回転あたりのマスクの移動量を容易に調節できる。光源は超高圧水銀ランプ (USH-250D) を用いている ($365\text{nm}, 170\text{mW}/\text{cm}^2$)。スリットはマスクの像がワーク表面でぼけない程度の領域だけを露光するために挿入している。スリット幅は $0\text{mm} \sim 6\text{mm}$ まで調節できる。ワークの径に合わせてスリットとマスクの高さを調節できる。また、シャッターの ON-OFF はワークの移動開始と終了に合わせておこなうように別に製作したプログラムで制御している。

主な操作手順を図 2.6(a) に示す。制御プログラムを図 2.6(b) に示す。X 軸、Y 軸はそれぞれ、ワークの回転位置 $[\text{deg}]$ 、マスクの移動位置 $[\text{mm}]$ を表す。

プログラム上の移動速度 F は、X 軸 (ワーク回転) 速度と Y 軸 (マスク移動) 速度の合成速度である。合成速度 F と各軸の速度 v_x 、 v_y の関係は次式で表される。

$$F = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (2.3)$$

ここで、 v_x と v_y は異なる単位系であるが、形式上 $[\text{deg}/\text{min}] = [\text{mm}/\text{min}]$ を等価として計算する。



a) 露光装置の構成

制御

マニュアル及びオート操作
回転と移動の直線補完
最小 $1\mu\text{m}$ 単位で移動量を調整

その他

超高圧水銀ランプ(USH-250D)
 $170 [\text{mW}/\text{cm}^2] (365\text{nm})$
 ワーク径 $\sim \phi 10\text{mm}$
 スリット幅 $0 \sim 6\text{mm}$
 マスクサイズ 2inch
 ワーク - マスク間の距離
 $40\mu\text{m}$

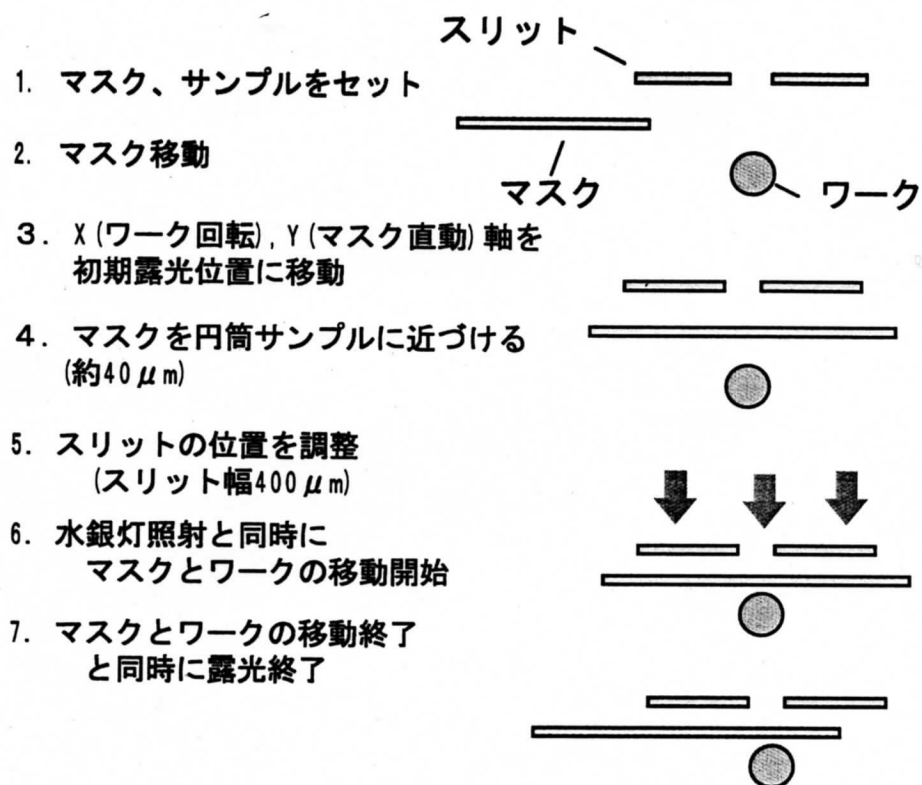
精度

$2.8 \times 10^{-3} [\text{deg.}]$ ワーク回転
 $0.04 [\mu\text{m}]$ マスク直動

露光部

b) 仕様

図 2.5: 製作した露光装置の概略図



(a) 操作手順

M130	// 開始命令
G00 X360 Y124	// 露光開始位置に移動
G91 G01 X-360 Y-22.080 F60	// G91 インクリメンタル移動 // G01 直線補完 // F 移動速度
M02	// 終了命令

(b) プログラム例

図 2.6: 露光装置の使用法

2.5 露光実験

2.5.1 円筒面への格子パターン転写

レジスト膜とマスクを離して露光を行うため、密着露光に準じる転動露光と比較し、コントラストは転写できる最小線幅は大きくなると考えられる(転動露光の最小線幅 $4\mu\text{m}$)。円筒面への格子パターンを転写する実験をおこない、どの程度微細な格子パターン転写ができるか調べた。

実験

ガラス管上に格子パターンを転写する実験をおこなった。

使用したマスクは、2inchのエマルジョンマスクである。マスク上のパターンは、80,40,20 μm ピッチの格子パターンとした。円筒面一周に渡りパターンが転写できるように、マスクの大きさに合わせ5cm分の格子パターンを作成した。その幅は1cmとし、3種類の格子を同時に転写できるように並べて配置した。

使用したサンプルは、市販のパイレックスガラス管(ϕ 7mm)である。長さは、露光装置にセッティングしたとき、露光位置まで届くように12cmとした。ガラス管は、円筒面表面が滑らかであり、簡単に手に入れられるためテスト用としては、最適な素材であると考えられる。

レジストの塗布は、簡単のためディッピングでおこなった。使用したレジストは、OFPR800 30cpを専用シンナーで2倍希釈したものである。今回の実験では次の手順でレジストを塗布した。塗布する際無駄をなくすため、ガラス管を立てるように手で支えながら、スポイトでレジストを上方から垂らして塗った。そのとき、塗りムラが出ないようにガラス管を手で回転させながら塗った。次に円筒サンプル用治具に横置きし、90℃で30分プリベイクする。但し、レジストをスポイトで塗った直後に、横置きすると下側にレジストが回りこみ、膜厚の不均一さがより大きくなる。そのため、乾燥台にサンプルを立てたまま固定しておき、自然乾燥である程度レジストが固まるまで10分程度放置してからプリベイクした。膜厚は $1.5\mu\text{m}$ ~ $2.5\mu\text{m}$ 程度であった(段差計 Tencor P-10)。

プリベイク終了後、サンプルを開発した露光装置にセッティングし、同期露光をおこなった。装置側の設定は、スリット幅300 μm とした。移動速度はF60とし、露光に要する時間は約6分とした。マスクの移動量は、22.080[mm]($276 \times 80[\mu\text{m}]$)とした。ガラス管は透明であるので光が裏側の面にまで到達してしまうので、光を遮断するため、アルミ棒を挿入してから露光した。

次に現像をおこなった。現像液はNMD-3、リンス液は純水である。現像は1分30秒、リンスは30秒を2回とした。

最後に、135℃でポストベイクを30分おこなった。

結果

以上のプロセスを経て得られた円筒面上の格子パターンを図2.7に示す。80、40、20 μm ピッチの格子パターンをコントラスト良く転写できた。つまり、最小線幅10 μm パターンニングできたことになる。

考察

40[μm]程度離れた状態で20 μm ピッチの格子がパターンニングできた。これ以上の小さいパターンを転写するのであれば、次の方法で改善できると考えられる。回折による非露光部へのパターンニングを無くすようにマスクを近づける。円筒面形状が平面に近似できるようにスリット幅を狭くする。また、スリット透過後の回折による光の広がりを抑えるため、スリットとマスクの距離を近づける。以上の三点が有効であると考えられる。最後のスリットを近づける改善法は、現在使用しているスリットでは、構造上1cm以下にすることができないため、改善する必要がある。

使用したレジストはポジレジストであるので、光の照射量に比例してレジストが現像される。つまり、照射量が小さい場合、膜厚は減少するがレジストは残るため実使用上問題ない。しかし、ネガレジストを使用する場合、ポジレジストとは逆の効果を利用するので、できるだけ非露光部には光が当たらないような条件で露光する必要がある。

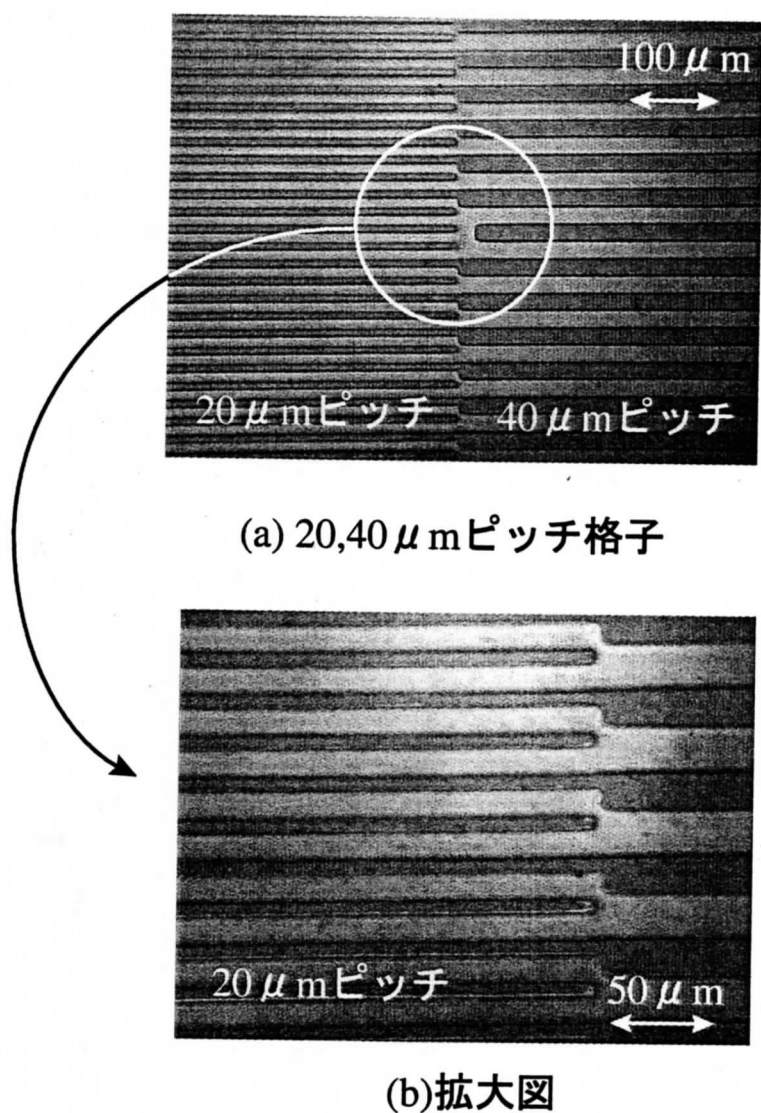


図 2.7: 円筒面への格子パターン転写

2.5.2 一回転整合実験

円筒面に1周に渡り連続的に格子パターンを転写できることを確かめる実験をおこなった。

実験

使用したマスクには、80 μm ピッチの格子パターンがあり、円筒面に格子を転写した際、転写した格子数が分かるように10ピッチごとに四角のパターンを作っておいた。使用した

サンプルは、 ϕ 7mm のガラス管である。レジストの塗布は、本研究室で開発中であるレジスト噴霧装置 [8] を使用して塗布した。今回の実験では、ポジレジスト OFPR-800 30cp を専用シンナーで 10 倍希釈した溶液を用い塗布した。膜厚は、 $4\mu\text{m}$ であった。露光の条件は、スリット幅を $400\mu\text{m}$ 、露光時間約 7 分 (F50) であった。また、同期露光とした。ワークが一回転する間のマスクの移動量は $22.080[\text{mm}](276\times 80[\mu\text{m}])$ とした。

結果

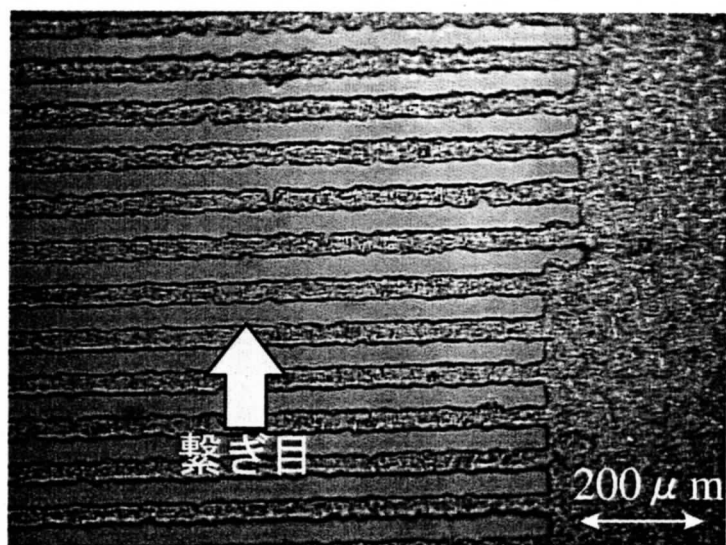
円筒面サンプルの繋ぎ合わせ部分を図 2.8 に示す。連続的に格子パターンが繋がることが確認できた。格子数の確認は次のようにした。転写パターンに格子本数カウント用のマークを 10 本おきにつけておいたので、顕微鏡でマークを確認しながら繋ぎ合わせ部までの格子数をカウントした。その結果、転写した格子数は 276 本であった。すなわち、制御プログラムによって動かしたマスク上の格子数に等しい。

考察

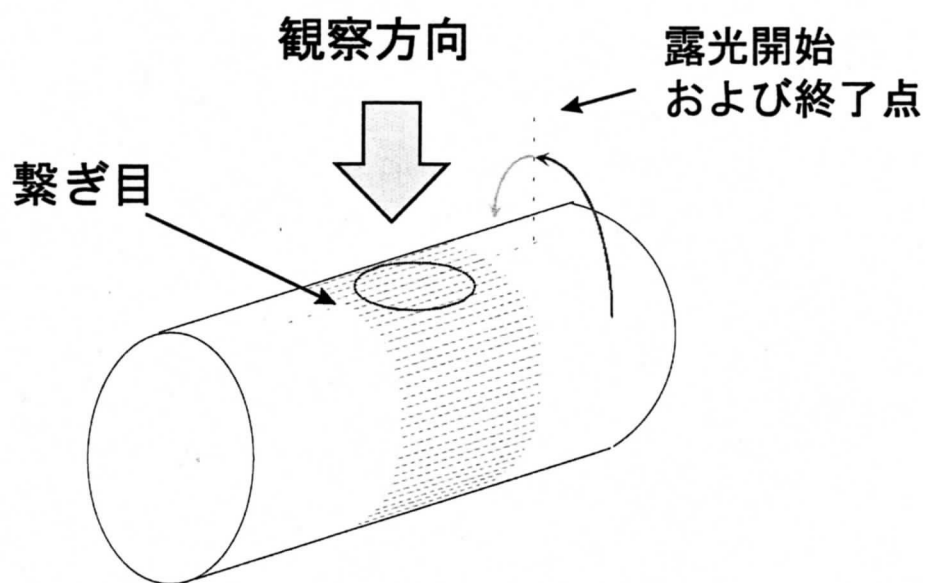
円筒面に連続的な格子パターンができたので、ロータリーエンコーダ用の回転軸製作に本装置が有効であることがわかった。

応用上、再現性が問題になると考えられる。再現性についての実験をおこなったところ、円筒ワーク、マスクの移動量、移動速度の三つのパラメータを変更しない状態で露光を行った場合、ほとんど誤差なく ($10\mu\text{m}$ 以下) 露光できることを確認できた。移動速度などを変更すると、狙った格子数とは少しずれてパターニングされることもあった。量産するような場合、最初に狙った格子数を露光できるように条件を出したあとで、使用する必要があることがわかった。

ディッピングによるレジスト塗布も試みた。しかし、膜厚を一周に渡り安定させることが難しいため、膜厚のムラが原因で、露光の過不足が生じてしまうことがわかった。だが、経験上 8~9 割程度までパターニングすることができたので、円筒面の一部にパターニングするような場合はディッピングでも良いと考えられる。本研究の目的である回転軸用のメインスケールのように一周に渡り連続的な格子パターンが必要である場合、膜厚を一定に塗布できるようにする必要がある。今回は、レジスト噴霧装置で膜厚を一定化した。



(a) 顕微鏡写真



(b) サンプル概略図

図 2.8: 一回転整合実験

2.5.3 レジスト噴霧装置

レジスト噴霧装置 [8] の概略図を図 2.9 に示す。希釈したレジストをスプレー方式で霧状に噴霧してレジスト塗布をおこなう装置である。この装置の特徴は、立体構造を持つサンプルに対しても均一な成膜ができることである。サンプルを固定する治具は、X、Y、Z、 θ の4軸移動ステージに連動している。今回の場合、治具に円筒面サンプルを固定し θ 軸の回転させることで、円筒面上に均一なレジスト膜を成膜した。

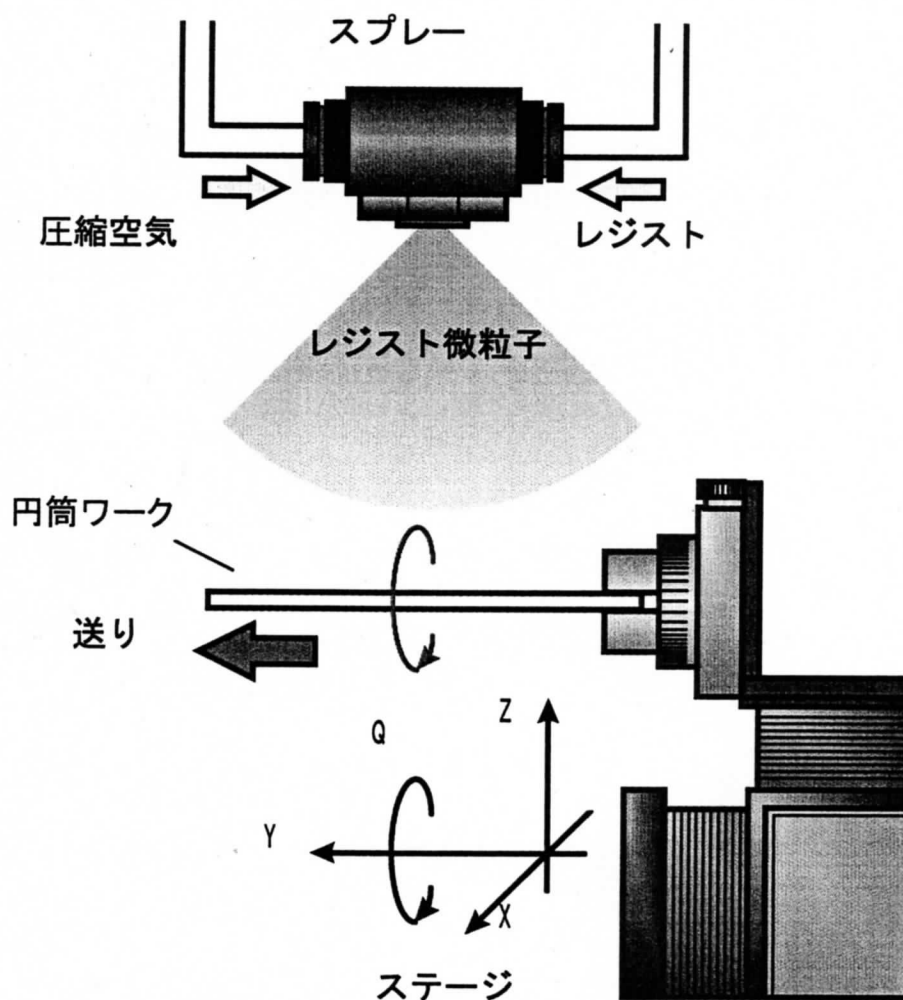


図 2.9: レジスト噴霧装置

2.5.4 非同期露光実験

先にも述べた通りワークとマスクを独立に制御することから、厳密には常に非同期露光となると考えられる。また、非同期露光では、非露光部にも光が照射されてしまい、レジストパターンの劣化が生じると考えられる。しかし、使用に耐えうる範囲内の劣化であるならば、一周あたりに転写する格子本数を調整できる融通性が生じる。

そこで、非同期の度合いを表す指数としてずれ率を定義し、ずれ率に対する非同期露光のレジストパターンの劣化の度合いを調べた。

実験

レジストの塗布は、ディッピングによっておこなった。使用したレジストは、ポジレジスト OFPR800 30cp の2倍希釈したものをを用いた。使用したサンプルはφ 6mmのガラス管である。マスク上の格子ピッチは、80μmである。同期露光時の一周あたりの格子数は236[本/周](マスクの移動量は、 $236 \times 80 = 18.880$ [mm])として露光した。

次にワーク一回転あたりのマスク移動量をずらし、非同期露光をおこなった。同期露光時のマスク移動量に対するずれ率を次式で定義する。

$$\text{ずれ率} = (1 - n/n_0) \times 100[\%] \quad (2.4)$$

ここで、 n は非同期露光時の格子数、 n_0 は同期露光時の格子数である。ずれ率を、5、20、50[%]とし露光した。

結果

同期露光時の80μmピッチ格子のレジストパターンを図2.10(a)に示す。また、図2.10(b)～(c)に示す。左側が顕微鏡写真で、右側が段差計によって測定した表面形状である。表面形状の測定には、段差計 Tencor 10を使用した。X軸は測定距離、Y軸は表面の高さを表す。

顕微鏡写真よりずれ率が大きくなるにつれて非露光部におけるレジストの膜厚が減少し、パターンが劣化しているのが確認できる。段差計で測定した表面形状から、ずれ率が増加すると非露光部の端面側でレジストの膜厚の減少が大きくなっている。5[%]程度のずれ率では、非露光部の中央部分の大半がパターンの劣化が無い状態で残っている。ずれ率が20[%]と大きくなると、非露光部中央部分にもパターンの劣化が現われる。その後は、パターンは劣化する一方で50[%]のときにはレジストがほとんど残らなくなっている。

考察

コントラスト低下の原因は、露光領域がワーク上の非露光部と重なり合ってしまうためである。ただし一回転整合円筒面露光法では、スリットによって露光領域を限定している。そのため、スリットを横切る間におけるずれだけを考えれば良い。スリットが狭ければずれが小さくなると考えられる。また、転写パターンが小さければ露光領域がずれやすくなり、逆にパターンが大きければ問題にならなくなると考えられる。よって、転写パターンのコントラストは、スリット幅と転写する格子ピッチに影響を受けると考えられる。

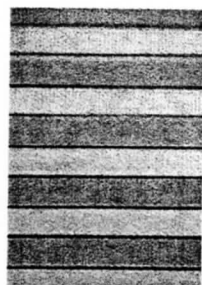
ずれ率に対するコントラストをそれぞれのパラメータについて調べた結果を図 2.11 に示す。コントラストは、次式で定義した。

$$\text{コントラスト} = t/h \quad (2.5)$$

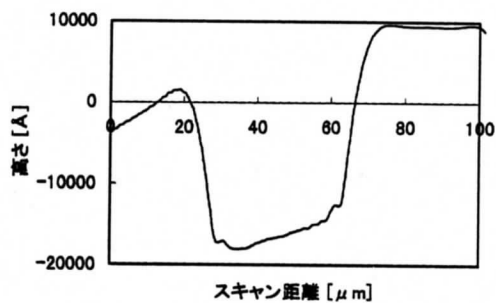
ここで、 t は露光領域における膜厚の平均、 h は非露光領域における膜厚の平均である。円筒面形状であるが直線に近似して値を算出した。露光時間は、スリット幅に 400、200、100[μm] に対し、それぞれ、3,6,10[min] とした。

コントラストは、ずれ率が大きくなるにつれて急激に小さくなる傾向が得られた。コントラストが 0.7[%] 以上を有効なコントラストとする場合、スリット幅 200[μm] 以下、転写する格子ピッチ 40[μm] 以上に対しては、ずれ率が 5[%] 以内に対しては、コントラストが 0.7 以上であることがわかった。

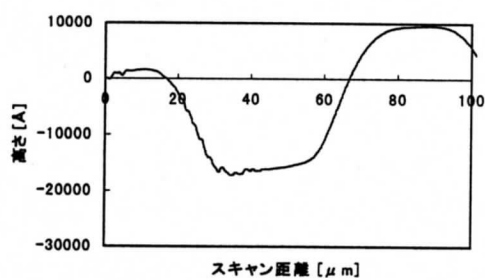
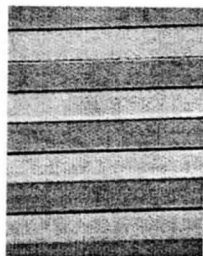
(a) 236
[本/回転]
(同期露光)



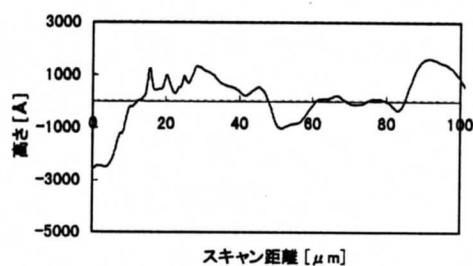
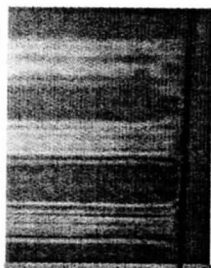
←→ 200 μ m



(b) 224
[本/回転]



(c) 196
[本/回転]



(d) 158
[本/回転]

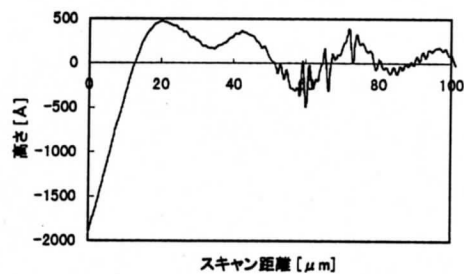
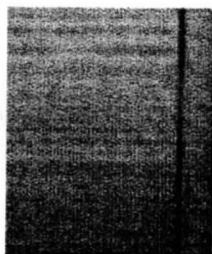
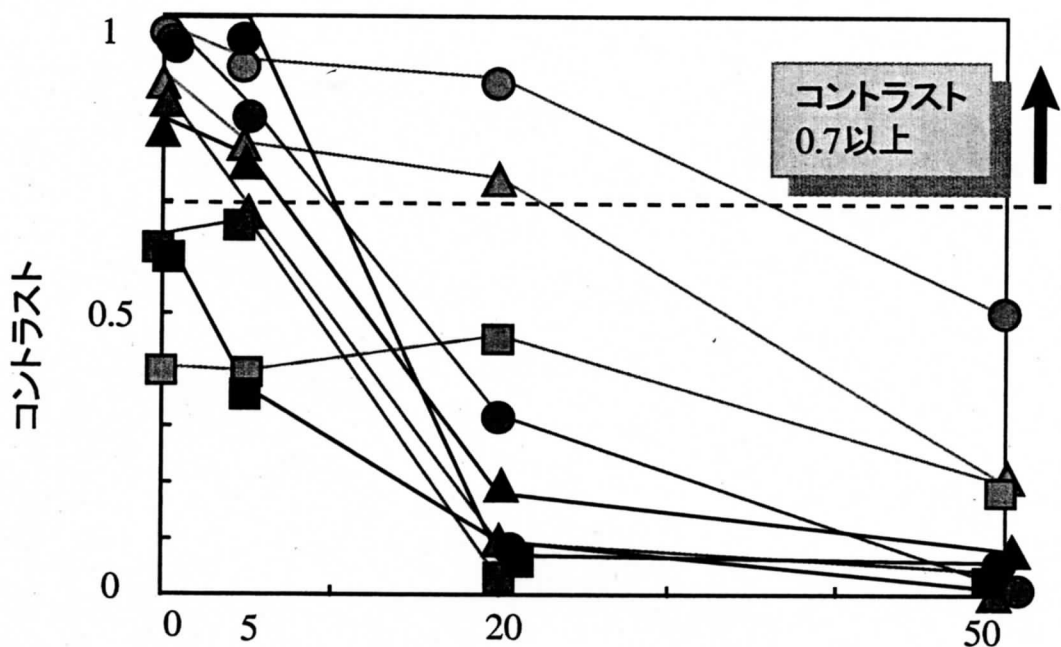


図 2.10: 非同期露光実験



$$\text{ずれ率} = \left(1 - \frac{\text{非同期露光時の格子数}}{\text{同期露光時の格子数}} \right) \times 100 [\%]$$

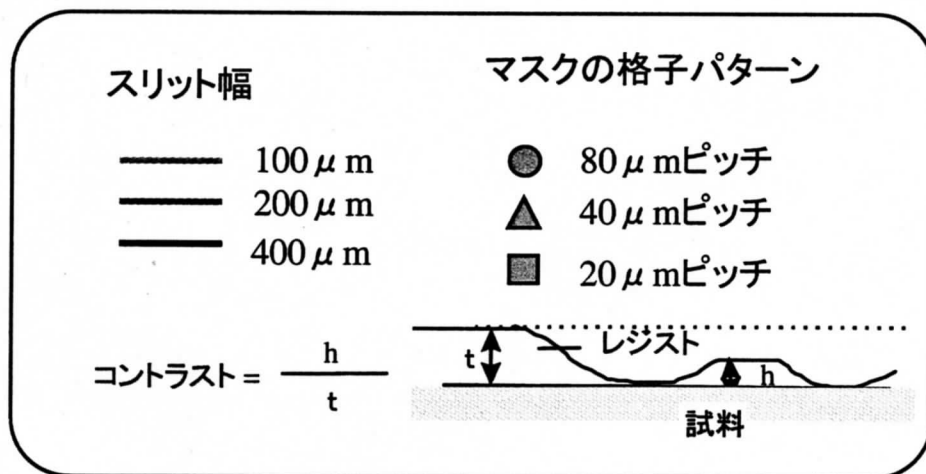


図 2.11: 非同期転写特性

2.6 まとめ

本章では、一周に渡り整合性のとれた格子パターンが転写できる一回転整合円筒面露光装置の開発をおこなった。

装置の特徴としては、

- 従来の半導体加工用のマスクを使用できる
- マスクの移動量とワークの回転量を精密に移動させながら露光できる
- マスクの移動とワークの回転を簡単に直線補完できる

などである。これらの特徴を用いると、円筒面に一周に対し連続的な格子パターンが転写可能である。また、マスクの移動速度とワークの表面速度に相対的なずれを起こすことによって、同じ格子を用いて、異なるピッチの格子を製作することも可能である。

実験的に以下のことを確認した。

- 円筒面に対し、20[μm] ピッチの格子パターンが転写できた。
- 80[μm] ピッチの格子転写において一回転整合のとれた格子パターンを転写することができた。
- 非同期露光を行い、同じマスクを用い異なるピッチの格子を転写することができた。転写する格子パターン、スリット幅などを変更し、ずれ率に対するコントラスト特性を調べたところ、40[μm] ピッチ以上、スリット幅 200[μm] 以下のときには、ずれ率が 5[%] 以内であればコントラストは 0.7 以上であった。

今後の課題

マスクの位置調整は目視で確認しながら行うため、パターンを繋ぎ合わせたときわずかながらずれを生じる。そのため、マスク位置とワークの平行性を校正するような機構を取り入れる必要があると考えられる。

また、半導体加工用のマスクを用いることができるため、円筒面上に機能性デバイスを製作可能である。そのためのアライメント機能の付加することも必要となると考えられる。

また本実験では、ポジレジストを用いて実験をおこなった。ネガレジストでもほぼ同様なパターンニングができると考えられるが、レジストの物理的特性、露光時間などが異なるので、改めて条件出しをする必要がある。

第3章 円筒面格子型ロータリーエンコーダの開発

回転軸とロータリーエンコーダ用メインスケールを一体化した円筒面格子型ロータリーエンコーダを提案する。ガラス管インデックススケールを用いたタイプと、透過形フォトダイオードを用いたタイプの2通りの円筒面格子型ロータリーエンコーダを試作し、評価する。

開発の流れは以下のようにした。はじめに、円筒面形状を利用する前提で、ガラス管インデックススケールを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダを試作する。フーリエイメージを設計概念とし、メインスケール軸、インデックススケールを設計、製作する。製作した部品自作のエンコーダ治具に取り付けエンコーダ実験をおこなう。次に、製作したメインスケール軸をそのまま用いて透過形フォトダイオードを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダを構成し、エンコーダ実験をおこなう。原理はコヒーレント光に対してはフーリエイメージ、インコヒーレント光に対してはグレーティングイメージに基づく。

メインスケール軸の製作には、第2章で開発した一回転整合露光装置を用いた。

3.1 ガラス管インデックススケールを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダ

3.1.1 原理

ガラス管をインデックススケールにした円筒面格子型ロータリーエンコーダを図3.1に示す。

検出方式は、フーリエイメージ(フレネルイメージ)[8]式とした。フーリエイメージとは、回折格子を照明するとその背後に、ほぼ等しい間隔を置いて格子の透過率分布と相似の強度分布が繰り返し現れる現象である。本研究では、円筒面回折格子であるが近似的に直線格子型のフーリエイメージと同様な現象が起きるものと仮定した。

図のようにメインスケール軸は両端をベアリングで固定し、メインスケールの外側にガラス管を配置する。ガラス管には、インデックススケール格子をパターンニングしておく。

エンコーダ信号の検出系には、平行度の高い光源とフォトダイオードを用いる。平行光を斜め上方から入射し、ガラス管の透明な部分を通過し、メインスケール軸上のスケール格子部分に到達後反射される。メインスケール格子から反射された光は、フーリエ距離でメインスケールの格子パターンと同形状の光の強弱パターンが得られると考えられる。光の強弱パターンをガラス管上のインデックス格子によって遮る。回転軸が回転すると光の強弱パターンもまた動き、インデックススケール背面に配置したフォトダイオードで光信号を検出し、これをエンコーダ信号とする。

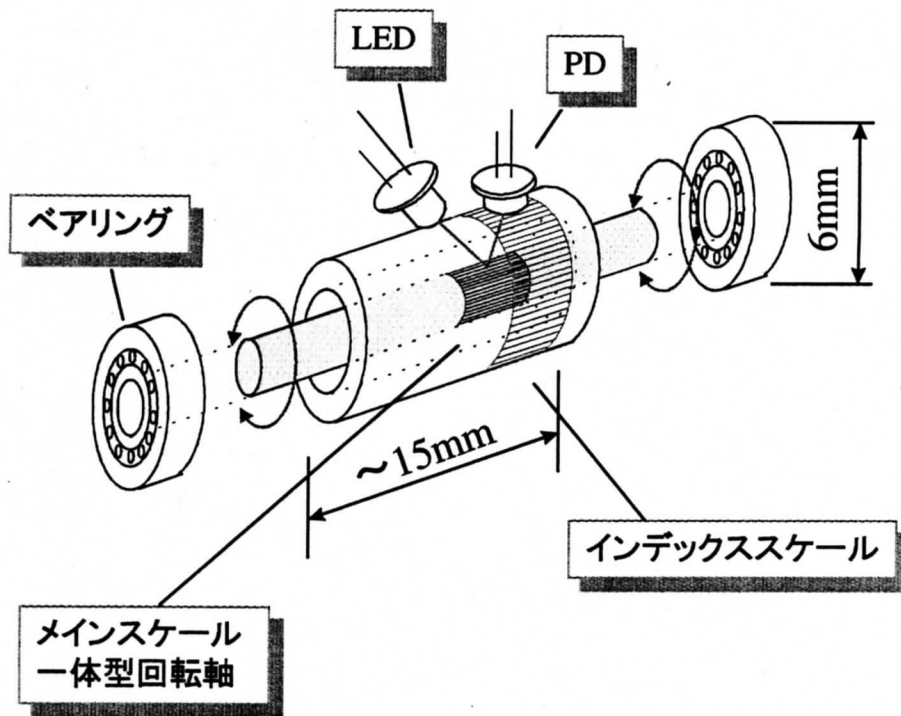


図 3.1: 円筒面格子型ロータリーエンコーダ (ガラス管インデックススケールタイプ)

3.1.2 フーリエイメージの理論 (直線格子型)

格子の透過光が次式で与えられる複素振幅分布 $q(X)$ をもつような周期関数 (格子定数 d) を考える (図 3.2)。

$$q(x) = \sum_{h=0}^{\infty} F_h \cos(2\pi hX/d) \quad (3.1)$$

簡単のため、 $X=0$ に対して対称とする。このような周期格子に平行光線束を入射すると、フレネル回折の積分式を計算する。格子から R だけ離れた格子に平行な平面状の

複素振幅分布 $\psi(x)$ は次式で与えられる。

$$\psi(x) = \left(\frac{i}{R\lambda}\right)^{1/2} \exp\{-ikR\} \int_{-\infty}^{\infty} q(X) \exp\left\{\frac{-ik(x-X)^2}{2R}\right\} dX \quad (3.2)$$

ここで、 $k = 2\pi/\lambda_0$ である。 $q(X) = \cos(2\pi X/d)$ に対してこの積分を実行すると

$$\psi(x) = \exp\{-ikR\} \exp\{i\pi R\lambda/d^2\} \cos(2\pi x/d) \quad (3.3)$$

が得られ、この関係を用いて、(3.2) 式を書き直すと次式となる。

$$\psi(x) = \exp\{-ikR\} \sum_{h=0}^{\infty} F_h \exp\{i\pi R\lambda h^2/d^2\} \cos(2\pi hx/d) \quad (3.4)$$

この式は、(3.1) 式と同じ周期をもつ周期関数だが、各フーリエ成分間の位相が異なり、その大きさは距離 R によって変化する。ここで、 $R = 2nd^2/\lambda$ ($n=1,2,3,\dots$) に対して (3.4) 式の指数部が $2N\pi$ となる。 $N = nh^2$ は整数である。このとき、

$$\psi(x) = \exp\{-ikR\} \sum_{h=0}^{\infty} F_h \cos(2\pi hx/d) \quad (3.5)$$

となり強度分布 $|\psi(x)|^2$ は格子を通過した直後の $|q(X)|^2$ と一致する。また、 $R = nd^2/\lambda$ で n が奇数の場合、指数部が $(2N+1)\pi$ となり、

$$\psi(x) = \exp\{-ikR\} \sum_{h=0}^{\infty} F_h \cos\frac{2\pi h}{d}\left(x \pm \frac{1}{2}d\right) \quad (3.6)$$

が得られる。これは、 $R=0$ の強度分布と等しいが、その明暗が逆転していることを表す。

濃淡を全く持たない位相格子では、 nd^2/λ の距離で一様な照度を示代わりに $(n-1/2)d^2/\lambda$ の位置で、原板の格子定数と同じピッチの強度分布が形成される。

本研究では、メインスケール-インデックス間距離が固定なので、格子ピッチ数で、フーリエイメージの条件を満たすように設計する。

3.1.3 円筒面格子型ロータリーエンコーダの設計

設計仕様を図 3.5 にまとめた。メインスケール軸は、実際使用する上での耐久性を考え、直径 3mm のステンレス研磨丸棒とした。ベアリングは、メインスケール軸に合わせて内径 3mm のものを用いた。ベアリングは、アルミ材質の治具によるしまりばめで固定するため、外径はそれに合うものを使用する。今回は、 $\phi 9\text{mm}$ のベアリングを使用した。インデックススケールパターンニング用のガラス管は、パイレックスガラス製のガラス管を用

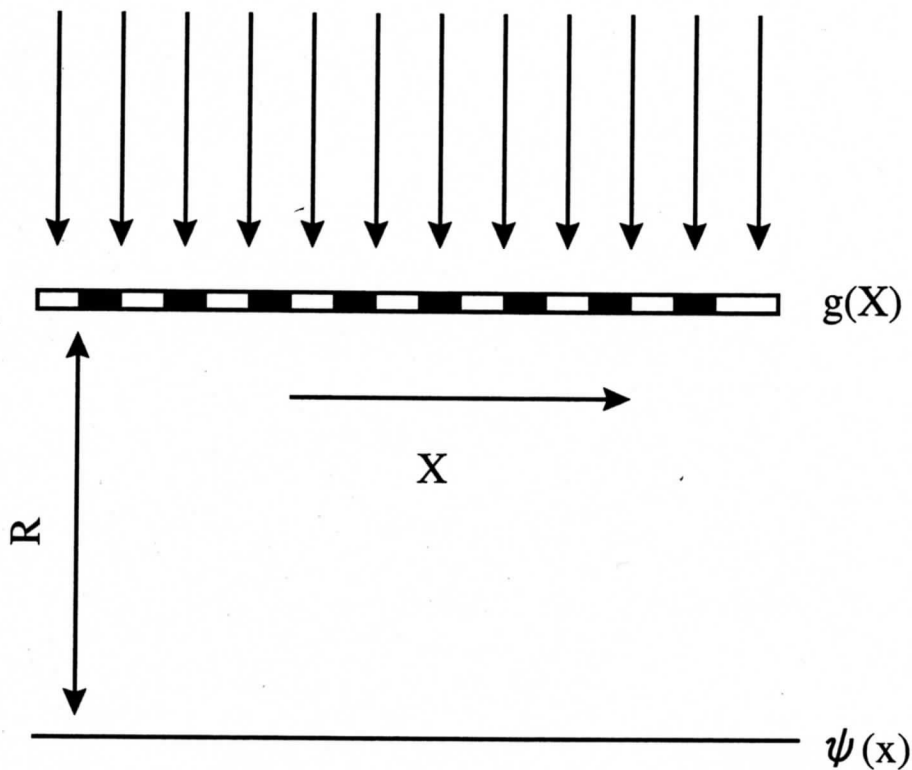


図 3.2: フーリエイメージのモデル

いた。メインスケールとインデックススケールの距離が一番小さくなるようにガラス管を選択すると、外径φ 6mm(肉厚 1mm)のガラス管となった。よってメインスケールとインデックススケールの直線距離は、1.5mm となり、ガラス管内面とメインスケールまでの距離は、0.5mm である。

メインスケール格子の設計

本研究で製作するロータリーエンコーダの概観は、図 3.1 で既に決定している。既定のメインスケール材およびインデックススケール材の寸法から、それぞれのスケール格子ピッチを設計する。ロータリーエンコーダのモデルを図 3.3 とする。

メインスケール格子の設計を以下のようにおこなった。メインスケール表面で反射された LED 光は、あるフーリエ距離でメインスケール格子パターンと同等な光強度パターンが得られると過程している。平面の場合におけるフーリエ距離は、

$$l = P^2 / 2 \lambda \quad (3.7)$$

で与えられる。今回の場合は、円筒面に考慮して適用する必要があるが、計算が繁雑になってしまうため、メインスケール表面とその法線軸と直交するインデックススケール表

面の間の距離を近似的なフーリエ距離として適用する。 a をメインスケール-ガラス管内壁の距離、 b をガラス管の肉厚とすると近似的なフーリエ距離は、 $a+b$ で表せる。ガラス管の屈折率 n による影響も考えると光学的距離は、 $a+nb$ で与えられる。ここで、次の式を満たすようにメインスケール格子ピッチ P を決定すればよい。

$$a + nb = P^2 / 2 \lambda \quad (3.8)$$

ここで、 $a=0.5[\text{mm}]$ 、 $b=1.0[\text{mm}]$ 、 $n=1.5$ とすると格子ピッチは、 $P=59.9[\mu\text{m}]$ となる。CADによる製作上 $1\mu\text{m}$ の分解能以下に設計できないため、 $P=60[\mu\text{m}]$ とした。メインスケール軸1周あたり160ピッチ相当となる。格子ピッチの整数倍とメインスケール外周に微小なずれがあるが、1回転整合露光法によって、1周に渡りスケール格子が繋がるようにパターンを転写する。

インデックススケール格子の設計

続いて、インデックススケール格子の設計をおこなった。LED光をコリメートしてメインスケールに照射する。平行光を入射したと考えると、メインスケールは円筒面であるため、光が当たる場所によって異なる角度で反射される。そのため、インデックススケールはそれに合わせたものでなければならない。よって次の計算を行った。円筒の軸方向に対する変化は一様であると考えられる。そこで、入射角と出射角の関係を図3.3の正面図のような二次元モデルとして計算した。円筒面の法線方向から平行光線を入射し、一定のビーム幅で照射されているとする。ビームは平行光線を無限分割した光束とする。各光線ごとの光の軌跡を幾何学的計算により求める。考慮したのは、空気-ガラス管の屈折とメインスケールでの反射である。ここで、屈折率は、空気、ガラスそれぞれに対して、1.0、1.5とした。入射角と出射角はそれぞれ、光線とメインスケールの交点と法線軸がなす角および光線とインデックススケール表面の交点と法線軸がなす角とした。計算結果を図3.4に示す。結果より入射角と出射角の間にほぼ比例関係が得られた。よって、或角度のメインスケールの像がインデックススケール表面において、一定倍拡大して結像されることが予想できる。今回の計算の場合、拡大率は1.44倍であった。その結果、転写するインデックススケールピッチは $168[\mu\text{m}]$ となる。実際には、118、140、 $174[\mu\text{m}]$ の3種類の格子を試作した。

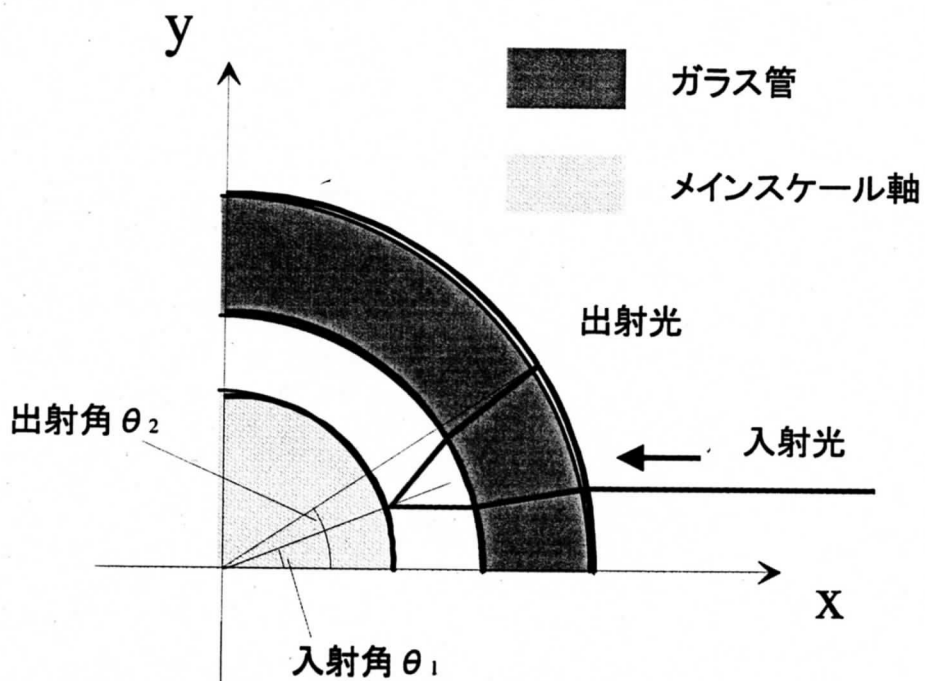


図 3.3: ロータリーエンコーダのモデル

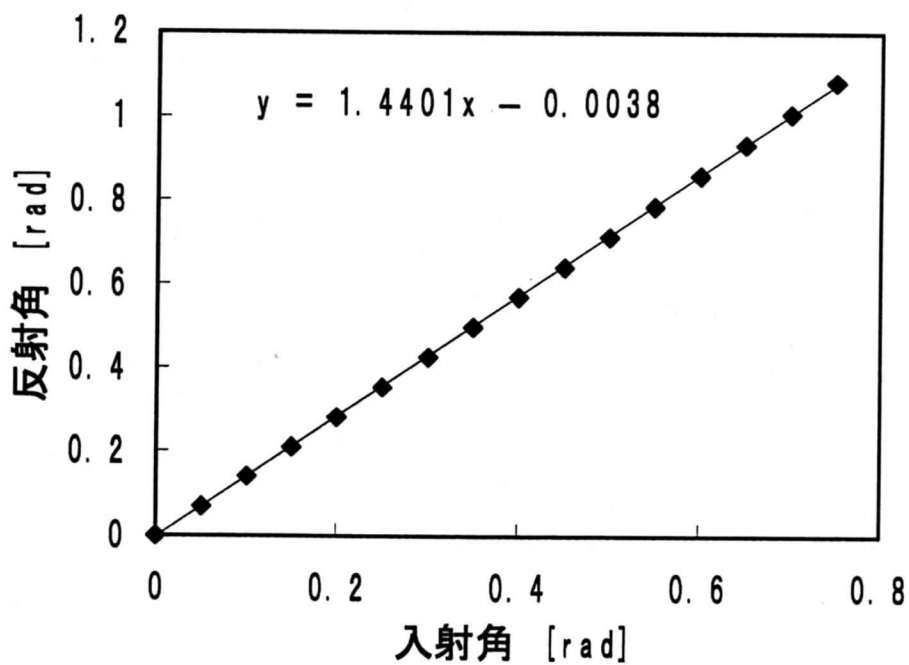


図 3.4: 幾何学的計算による光の広がり

表. 1 ロータリーエンコーダの仕様

検出方式	フーリエイメージ式	インデックス スケール	パイレックス ガラス管 外径φ6 mm (肉厚 1mm)
LED波長	880 nm		
メイン スケール軸	ステンレス研磨丸棒 φ3 mm	ベアリング	内径φ3 mm

表.2 スケール格子の設計

<u>メインスケール</u>			
$a+nb = \frac{p^2}{2\lambda} \quad (\text{平面のときの フーリエ距離}) \text{ より}$			
P_m (格子ピッチ)	60 μm	格子数	160 本/周
<u>インデックススケール</u>			
ガラス管外周 / 160 × α (α: 拡大率)			
P_i (格子ピッチ) = 168 μm (ガラス管の屈折率 n = 1.5)			

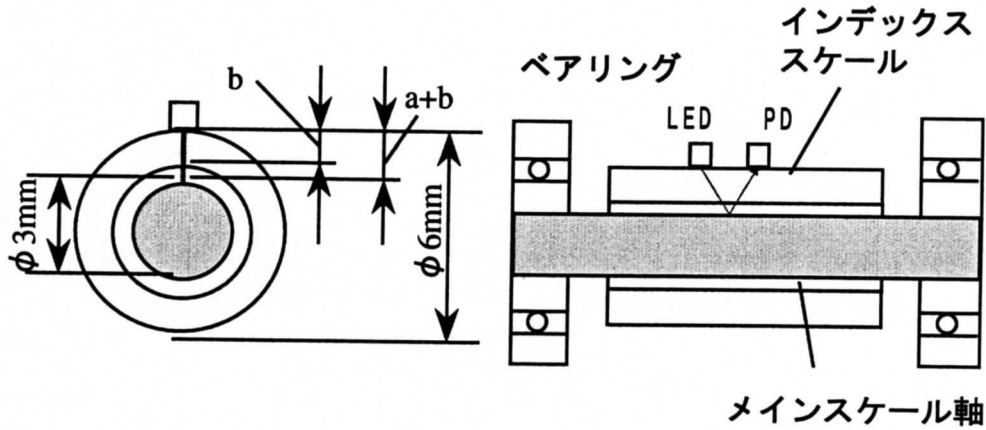


図 3.5: 製作するロータリーエンコーダの仕様

3.1.4 金属粗面平滑化の検討

本論文で提案する円筒面格子型ロータリーエンコーダでは、回転軸に直接メインスケール格子をパターンニングするものである。回転軸には、高剛性、耐久性が要求される一方、安定した信号を得るため、表面は鏡面のように平滑化されたものが理想的な素材であると考えられる。高剛性、耐久性という観点からステンレス材料を回転軸とするのが適当であると考えられる。一般に市販されている研磨丸棒は鏡面という程平滑化されてはいない。そこで、コーティング剤によって表面を平滑化することを考えた。

実験

ステンレス研磨丸棒、アルミ丸棒にコーティングし、平滑化する実験をおこなった。コーティング剤としては、ポジレジスト (OFPR800 200cp, 60cp) とポリイミド系コーティング剤 (セミコファイン SP-341 1.5 倍希釈, TORAY) を試用した。コーティングはディッピングでおこなった。ベイクを 90[°C] で 30[min]、135[°C] で 30[min] したあと、Al 蒸着した。

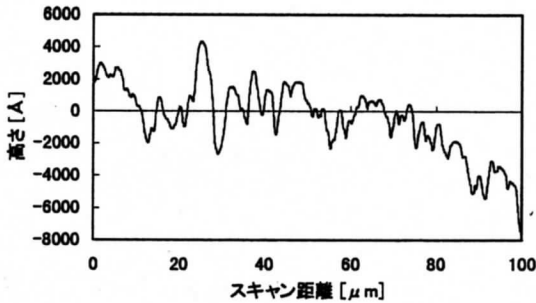
結果

コーティング後に段差計 (Tencor P-10) で測定した表面形状をを図 3.6 に示す。各グラフの横軸はスキャン距離、縦軸は表面の高さである。(a) はコーティング前の市販ステンレス研磨丸棒の表面形状である。最大高さ R_y は約 500[nm] であった。(b) は市販の ϕ 7mm Al 丸棒 (冷間引拔) にポジレジスト (OFPR 30cp) をコーティングした表面形状である。 R_y は約 150[nm] であった。(c) は ϕ 3mm ステンレス研磨丸棒にポリイミド系コーティング剤をコーティングした表面形状である。 R_y は約 30[nm] であった。

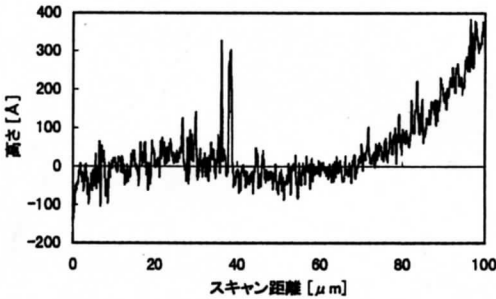
考察

コーティング剤を粗面にコーティングすることによって、数 10 μ m 単位で局所的に観た場合、表面粗さは、1/10 以下に抑えることができることがわかった。しかし、観測範囲を広げると、数百 μ m オーダーの周期でうねりを生じてしまうこともわかった。ただし、コーティング剤の性質とコーティング剤の粘度によって表面の状態が大きく変化する。薄すぎると元の金属粗面の形状が出て、平滑化の効果が小さくなり、濃すぎるとうねりの影響が大きくなる傾向が得られた。ポリイミド系コーティング剤は自然乾燥しにくく、希釈しすぎると大半が流れ落ちてしまい、元の金属粗面と同様な表面形状となってしまう。一方ポジレジストは、ポリイミドに比べ乾燥しやすく、適度な膜厚に調整しやすい。しか

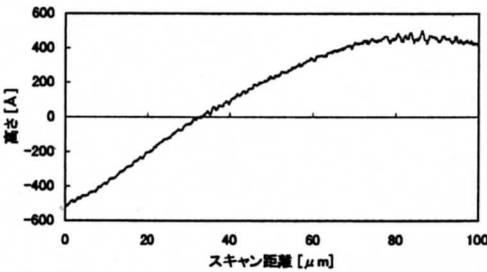
し、円筒面格子型ロータリーエンコーダのメインスケール軸は、耐久性も必要になると考えられるため、本研究ではポリイミドによる平滑化をおこなう。



(a)市販のステンレス研磨丸棒



(b)ポジレジストコーティング(サンプル: Al丸棒)



(c)ポリイミドコーティング
(サンプル: ステンレス研磨丸棒)

図 3.6: 金属粗面の平滑化

3.1.5 インデックススケールの製作

製作工程

インデックススケールの製作工程を図 3.7 に示す。ガラス管を適当な長さに切断したあと、有機物を落とすためにトリクレンで洗浄する。洗浄後、サンプル回転機構をもつスパッタ装置(図 3.9)にて Al を堆積させる。Al の膜厚は、エンコーダ信号を得るとき問題にならないため、適度な厚さ(100nm 程度)堆積させれば十分である。スパッタの条件は、Ar ガス流入時の圧力が 5.0×10^{-3} [Torr] で、RF 電力は、120[W] とした。スパッタ時間は、5 [min] とした。回転速度は、6[sec/回転] である。次にレジストを塗布する。全面に渡ってパターンニングする必要があるため、ディッピングによってレジストを塗布した(OFPR800 30cp2 倍希釈)。膜厚は、約 3[μ m] である。レジスト塗布後、プリベイクをおこなう(90℃,30min)。次に露光をおこなう。露光には、第 2 章で開発した一回転整合露光装置を用いガラス管の円周方向に格子パターンを同期露光する。

現像したあと、ポストベイクをおこなう(135[℃],30[min])。最後に Al エッチをおこない、インデックススケールとなる格子を作製する。Al エッチャントは、リン酸 6 : 硝酸 1 : 酢酸 1 : 水 1 の比で混合した溶液である。エッチャントの温度を 40[℃] としパターンを確認しながら、約 1 分エッチングした。以上で、インデックススケールとなる格子は完成となる。Al の格子上にはレジストが残っているが、インデックススケールの効果とは無関係であるためそのままにしてある。問題があるならばレジスト剥離液を用いて剥離すれば良い。

製作結果

製作したガラス管インデックススケールを図 3.8 に示す。(a) は光学顕微鏡写真である。(b) は段差計による表面形状をであり、横軸がスキャン距離、縦軸が表面の高さである。測定の際は、レジストをレジスト剥離液 502A で剥離したあとに測定をおこなった。

コントラスト良くレジストをパターンニングすることができた。

考察

エンコーダ信号を取得するとき問題になるのは、パターンニングされた格子形状であると考えられる。そのほか、ガラス管内側からの光を外側の Al 製インデックススケールで遮るという原理のため、表面粗さ、膜厚は信号検出の上で問題にならないと考えられる。

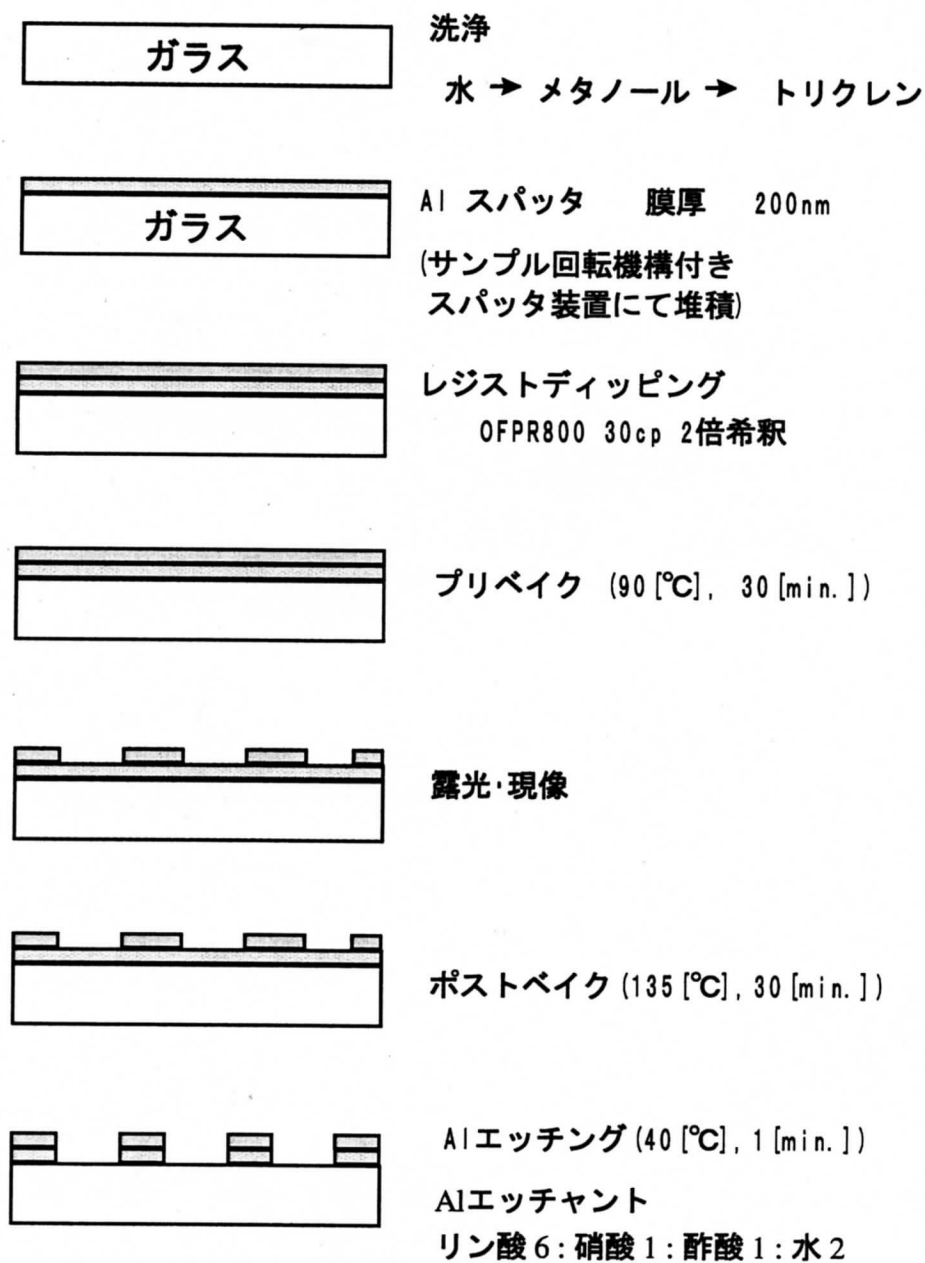
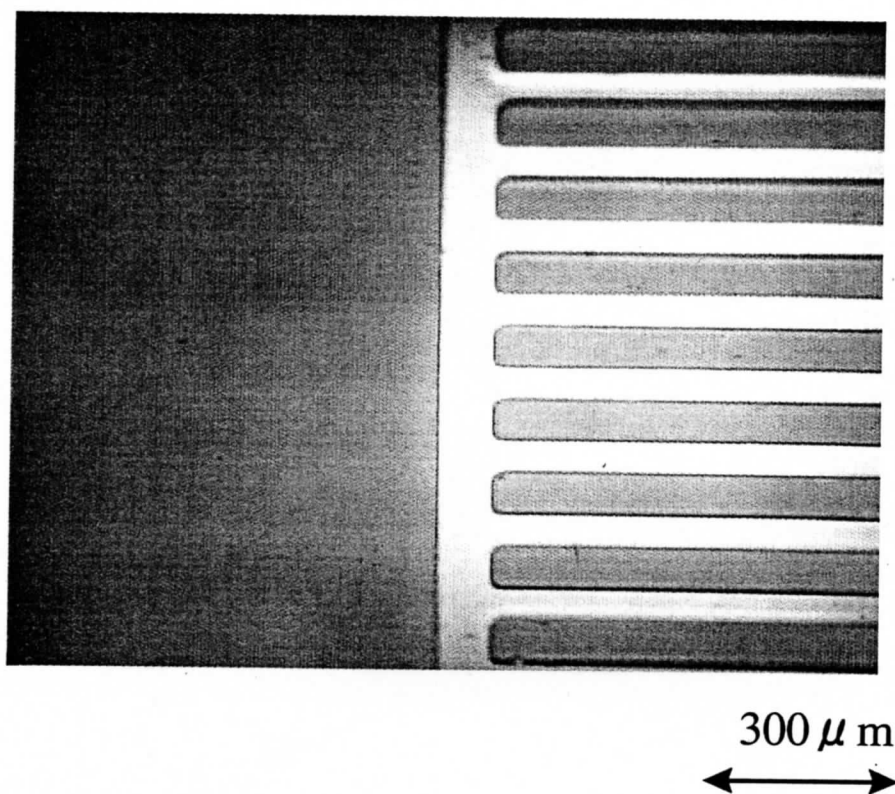
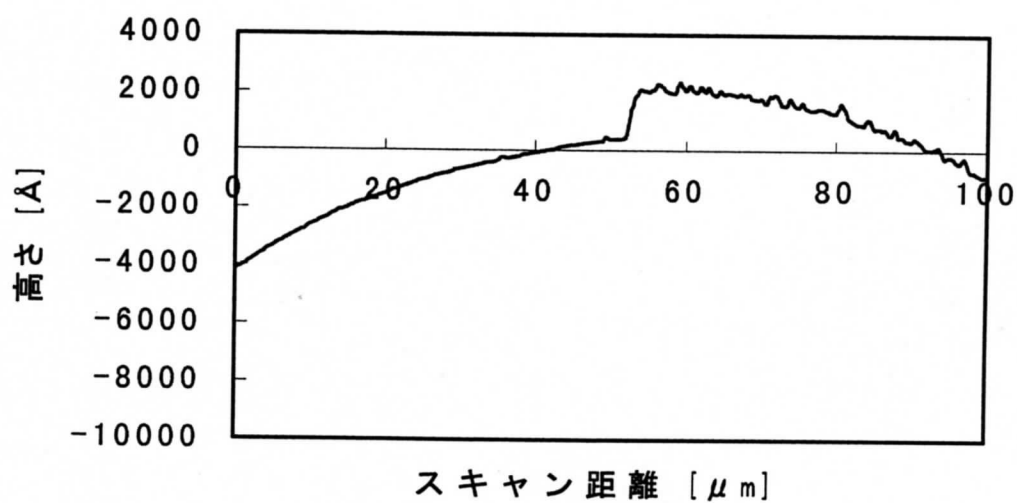


図 3.7: インデックススケールの製作工程

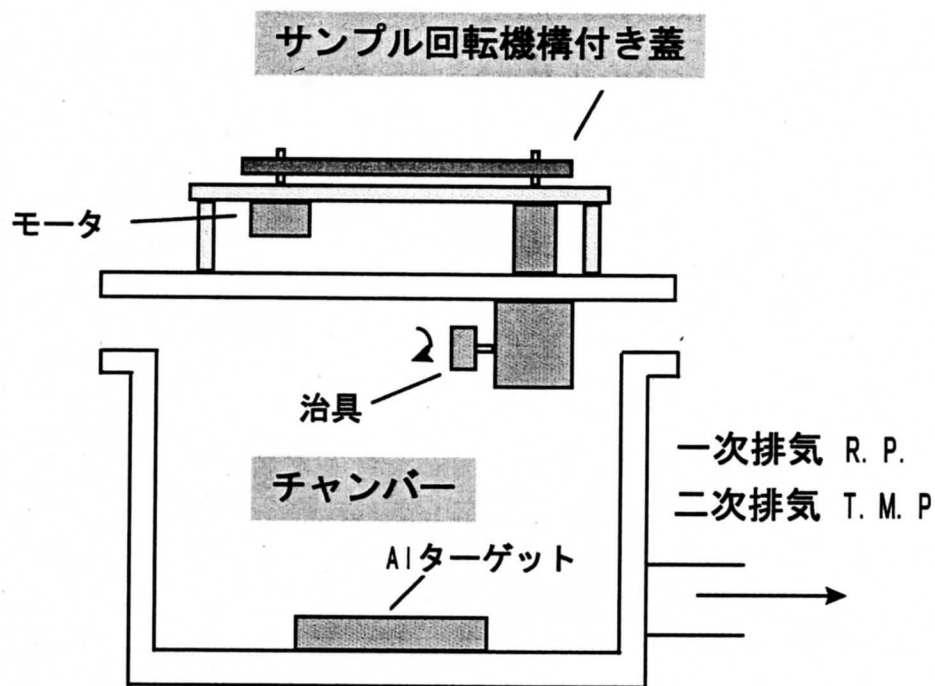


(a)光学顕微鏡写真($118\ \mu\text{m}$ ピッチ格子)

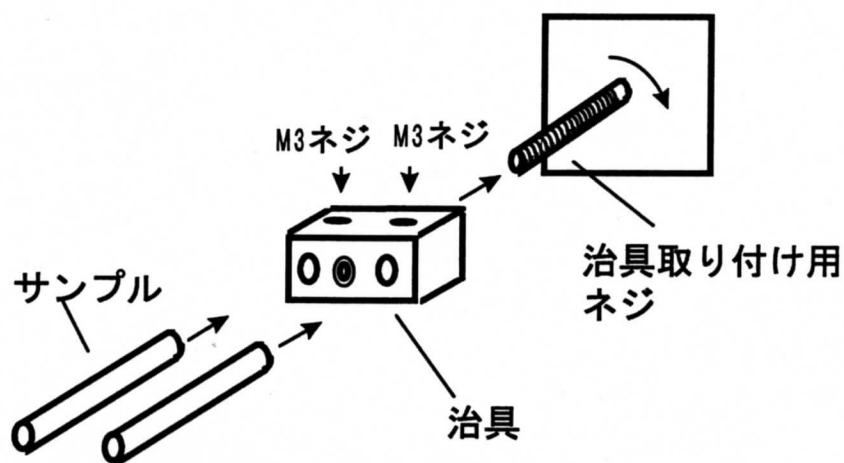


(b)表面形状(レジスト剥離後)

図 3.8: 製作したインデックススケール



(a) 装置概略図



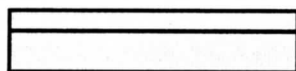
(b) サンプル固定法

図 3.9: 回転機構付きスパッタ装置

3.1.6 メインスケールの製作

製作工程

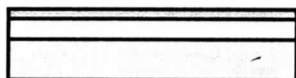
メインスケールの製作工程を図 3.10 に示す。切断したステンレス棒をトリクレンで洗浄する。洗浄後、ステンレス棒の表面を滑らかにするために、ポリイミド系コーティング剤 セミコファイン P-341(TORAY) を N-メチル 2 ピロリジノンで適度に希釈し、ステンレス棒にスポイトで塗る。その後、自作の乾燥台に直立の状態で 15 分程度放置して、表面張力によって表面のコーティング剤が一様になるようにする。その後、2 段階に分けてベイクする。最初に 90[°C] で 30[min] したあと、135[°C] で 30[min] ベイクする。この 2 段階処理によって、急激な加熱による気泡の発生などが抑制できる。次に、Al をサンプル回転機構付きスパッタ装置で堆積させる。この時の膜厚は、位相格子の条件を満たすため、440[nm] とする。スパッタの条件は、インデックススケール作製時と同様で Ar 流入時圧力 5×10^{-3} [Torr]、RF 電源電力 120[W] とした。スパッタ時間は、24[min] とした。但し、基盤の温度上昇を防ぐため、スパッタ 10 [min] ごとに 5 分の休憩をはさみ、基盤が冷えてから再度スパッタする必要があった。よって、スパッタ 10[min]+10[min]+4[min]=計 24[min] で、途中 5 分休憩を 2 回挟む次にレジストを塗布する。ネガレジスト OMR80 60cp の 20 倍希釈液を改良を加えられたレジスト噴霧装置で塗布した。MFC を利用することで、流量の安定化し、塗布条件のばらつきが少なくなっている。今回ネガレジストとしたのは、レジスト噴霧装置の流量調整が MFC で行われるとともにネガレジスト専用となったためである。膜厚は、3[μm] である。次にプリベイクをおこなう (90[°C],30[min])。ベイク後、一回転整合露光装置によってメインスケール格子パターンを転写する。サンプルを 360[deg.] 回転させる間に、マスクを 9.600[mm](60[μm] × 160[pitch]) 移動させる。移動速度は F1800 で、露光時間は約 12[sec.] である。露光後、現像をおこなう。次にポストベイクをおこなう (135[°C],30[min])。次に Al エッチングをおこなう。レジスト剥離液 502A でレジストを剥離する。最後に、全面を Al で覆うため、再度 Al をサンプル回転機構付きスパッタ装置で堆積させる。堆積させる膜厚は、先につけた Al の形状を損ねることないように薄くつけければ良い。今回は、50[nm] 程度とした。スパッタ条件は、上記と同じである。スパッタ時間を 3[min] とした。以上でメインスケール軸の完成となる。



洗浄、ポリイミドコーティング

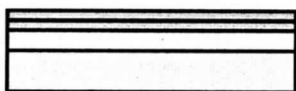
ベイク 90 [°C] 30 [min]

→ 135 [°C] 30 [min]



Alスパッタ (膜厚, 440 nm)

サンプル回転機構付きスパッタ装置でAlを堆積

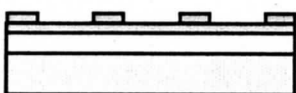


レジスト塗布

レジスト噴霧器によるレジストコーティング

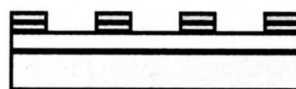
ネガレジスト OMR80 60cp 20倍希釈を使用

プリベイク (90 [°C], 30 [min])

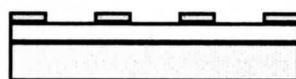


露光・現像

ポストベイク (135 [°C], 30 [min.])



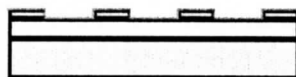
Alエッチング (40 [°C], 1 [min.])



Alエッチャント

リン酸6: 硝酸1: 酢酸1: 水2

レジスト剥離 502A



サンプル回転機構付きスパッタ装置でAlを堆積

Al スパッタ (膜厚, 50 nm)

図 3.10: メインスケールの製作工程

製作結果

製作したメインスケール軸を図 3.11 に示す。(a) は光学顕微鏡写真である。(b) は段差計 (Tencor P-10) により測定した表面形状である。60 μm ピッチのスケール格子を、円筒面上にパターンニングすることができた。膜厚は約 500[nm] であった。

肉眼で確認すると格子部分は白濁化している。(a) において格子の暗い部分が凸部分に相当し、金属光沢を持っている明るい部分が凹部分である。また、格子形状の輪郭がシャープではなく、バリのようになっている。レジスト現像後に確認したところ、隣の格子同士が細かいレジスト膜で繋がるようなパターンが多数確認できている。(b) において凸部分が凹部分に比べ表面が荒れている。

考察

結果より、凸部分と凹部分では同じ Al 膜であるが、凸部分の表面の荒れによって反射率が減少していると考えられるため、位相格子としての機能は低下していると思われる。しかし、格子ピッチは等ピッチに転写できているため、メインスケール格子としては機能すると考えられる。

表面の荒れの原因としては、スパッタ装置の到達真空率が性能上 8×10^{-5} [Torr] までしか下げられなかったため膜質が低下したのではないかと考えられる。

また、格子形状の輪郭の荒れであるが、レジストのパターンニングの不良が原因である。

1. レジストの塗布条件 (MFC 流量、重ね練り回数、移動速度、回転数)、2. プリベイク時間、3. 露光時間の設定、などをそれぞれ変えて条件出しを行ったが、格子パターンの乱れを無くすことはできなかった。非露光部の格子の中央部分に対してもレジストが残る場合もあり、従来の条件以外による影響 (レジストの劣化、水分の混入など) も考慮する必要がある。

3.1.8 エンコーダ実験：同ピッチ格子を近接した場合

実験

製作したメインスケール軸 ($60\mu\text{m}$ ピッチ) に、メインスケール製作時に用いた同ピッチのマスクをインデックススケールとしてエンコーダ信号を測定した。実験系を図 3.14 に示す。

メインスケール格子とインデックススケール用マスクを接触しない程度 ($40\mu\text{m}$) まで近接させる。マスクの格子とメインスケール軸の格子が平行になるようにアライメントする。光源は、LED(AL-402, 波長 910nm) と LD(波長 780nm) の 2 種類に対して実験をおこなった。受光素子は、市販の Si フォトダイオー (受光径 $\phi 1\text{mm}$) を使用した。光はマスクの格子とメインスケール軸の格子が重なりあう地点に対して、斜め上方から入射した。反射光が最も効率的に受光するようにフォトダイオードを配置した。

結果

LD に対するエンコーダ信号を図 3.15 に示す。単位ステップ角 $0.018[\text{deg/step}]$ で $1000[\text{pt.}]$ 測定した。4 周期分の信号が得られた。コントラストは、 $25[\%]$ であった。

LED に対しても同様に 4 周期分の信号が得られ、コントラストは、 $9[\%]$ であった。

エンコーダ信号のコントラストは次式で定義した。

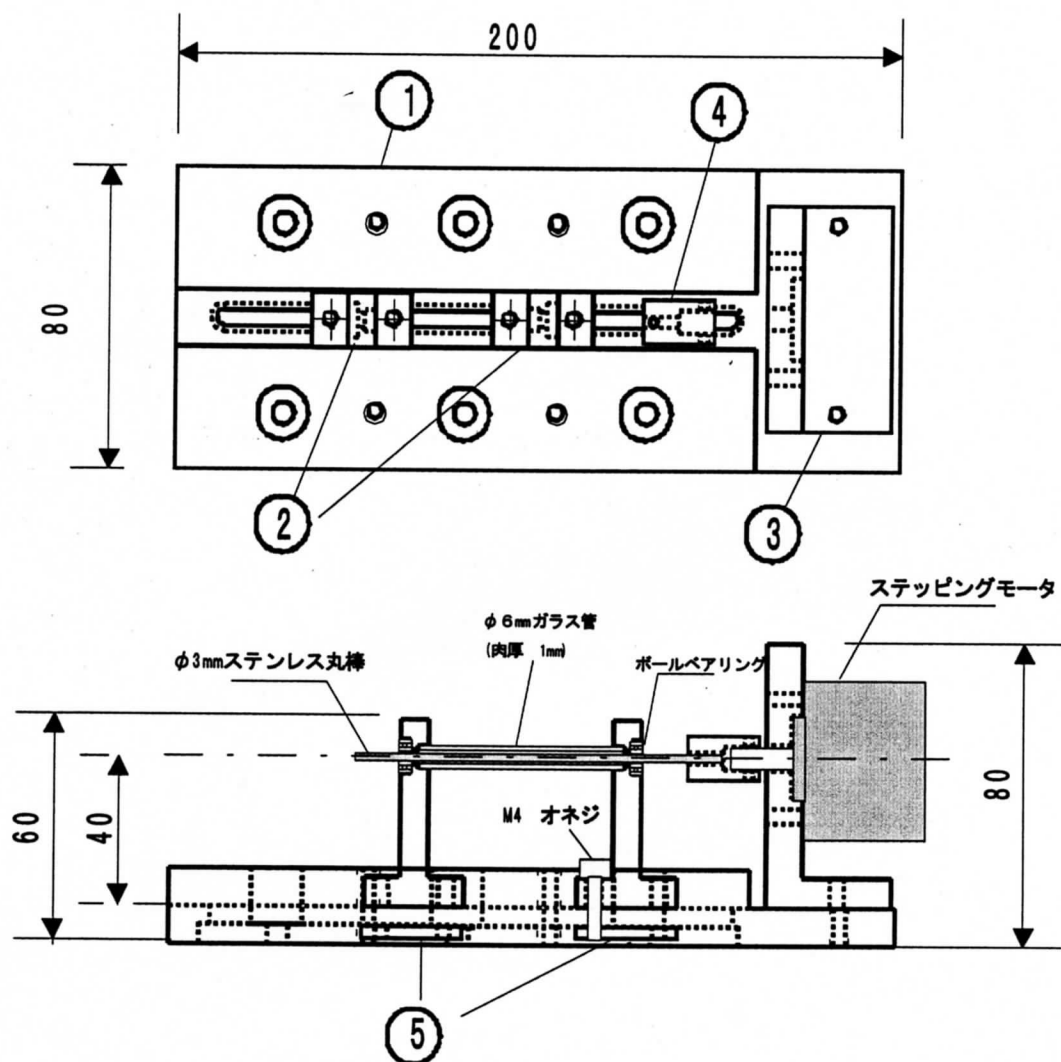
$$\text{コントラスト} = V_{p-p}/V_{max} \quad (3.9)$$

ここで、 V_{p-p} はエンコーダ信号の Peak to Peak 値、 V_{ave} は信号の最大値である。

考察

コントラストが低い原因は、スケールを反射型位相格子としたためである。光を格子と格子を近接して一方の格子を動かした場合、その反射光は格子の明暗によって光の強度が変わる。光の透過率が 1、0 の格子で構成される振幅格子の場合、周期がスケール格子の移動周期と同じとなり、光強度のコントラストは 1 となる。だが、理想的な位相格子であれば、反射光量の変化はほとんどないと考えられる。実際には、製作したスケールは凸部分で表面が荒れているため、反射率が凸部と凹部で異なる。その反射率の違いがコントラストとなって現れていると考えられる。

また、双方の光源において、回転角 $9[\text{deg}]$ に対し 4 周期の信号が得られた。スケール格子の設計において、 $160[\text{本/周}]$ の格子をパターンニングした。これを $9[\text{deg}]$ に換算すると、格子 $4[\text{本}]$ となる。つまり、設計と同等な信号が得られたと考えられる。



1	ベース	アルミ
2	エンコーダ固定具	アルミ
3	モータ固定具	アルミ
4	カップリング	アルミ
5	止め具	アルミ

図 3.13: エンコーダ実験用治具

3.1.7 エンコーダ実験装置

エンコーダ信号を測定するために、エンコーダ実験装置を構築した。実験装置概略図を図 3.12 に示す。また、AI 製のエンコーダ実験用治具の概略図を図 3.13 に示す。メインスケール軸と 5 相ステッピングモータ (オリエンタルモータ製 PK543-B) を治具に固定し両者をカップリングによって直結する。ステッピングモータの回転を直接メインスケール軸に伝達する。ステッピングモータの制御には、ステージコントローラ (MINI12-P, シグマ光機) を用いている。ステージコントローラは、RS-232C ケーブルによってパソコンに接続でき、プログラムによって制御可能である。測定用のプログラムは、Microsoft 製 MS-C によって開発した。プログラムの流れは、次のようにした。ステッピングモータの回転命令を送信後、指定した角度になるまで待機し、指定した角度になったらエンコーダ信号を検出する。ステッピングモータの基本ステップ角は $0.72[\text{deg.}]$ であるが、電氣的分割によって 80 分割まで可能である。よって、1 回転あたり $500 \sim 40,000[\text{分割}]$ で調整が可能であり、 $40,000[\text{パルス/回転}]$ の高精度ロータリーエンコーダの測定も可能である。

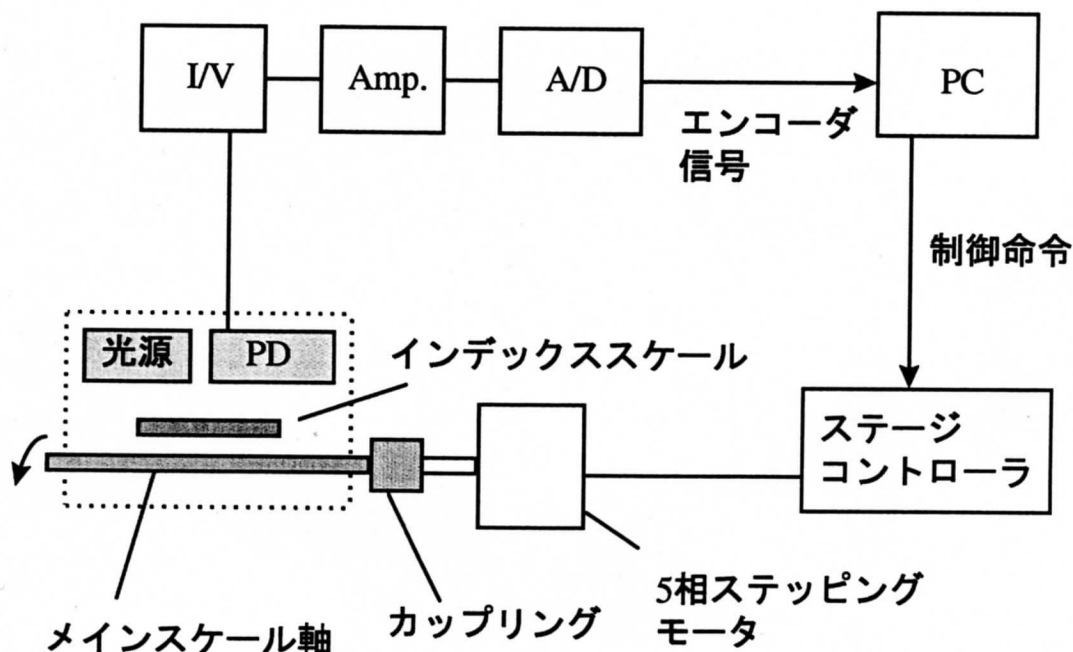
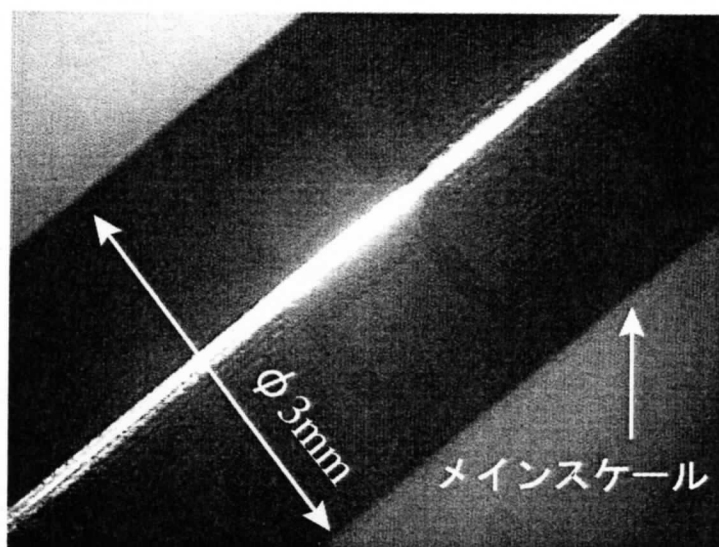
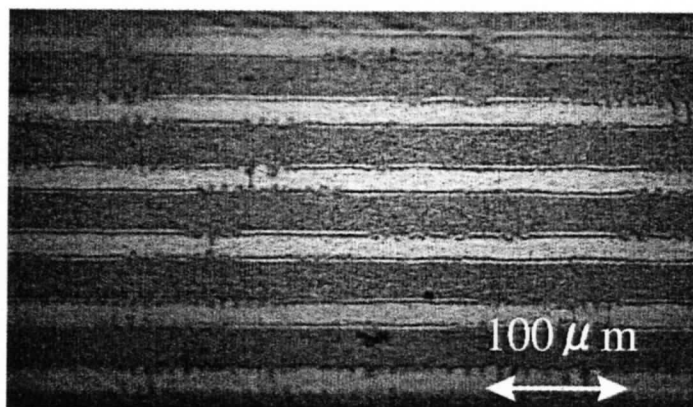


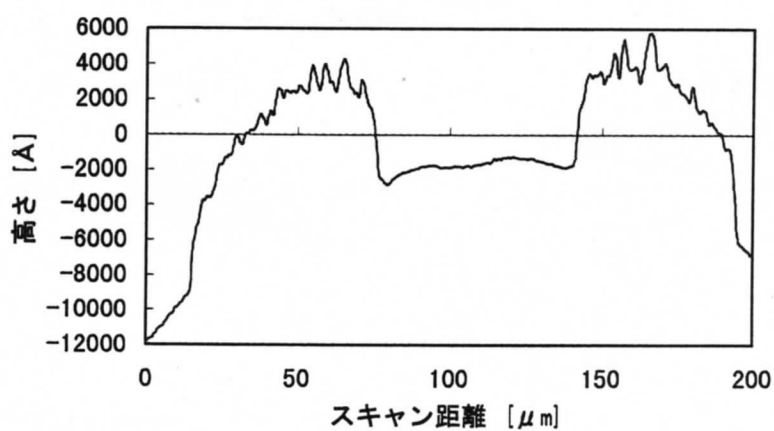
図 3.12: 実験装置



(a)顕微鏡写真(全体像)



(b)顕微鏡写真(拡大像)



(c)表面形状(段差計 Tencor P-10)

図 3.11: 製作したメインスケール一体型回転軸

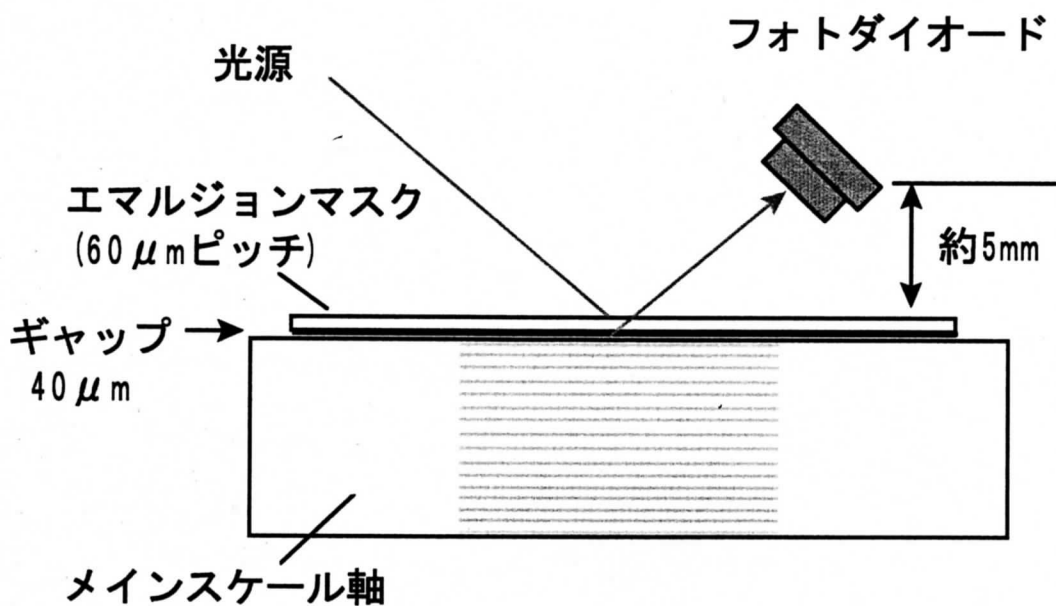


図 3.14: 実験系 : 同ピッチ格子を近接

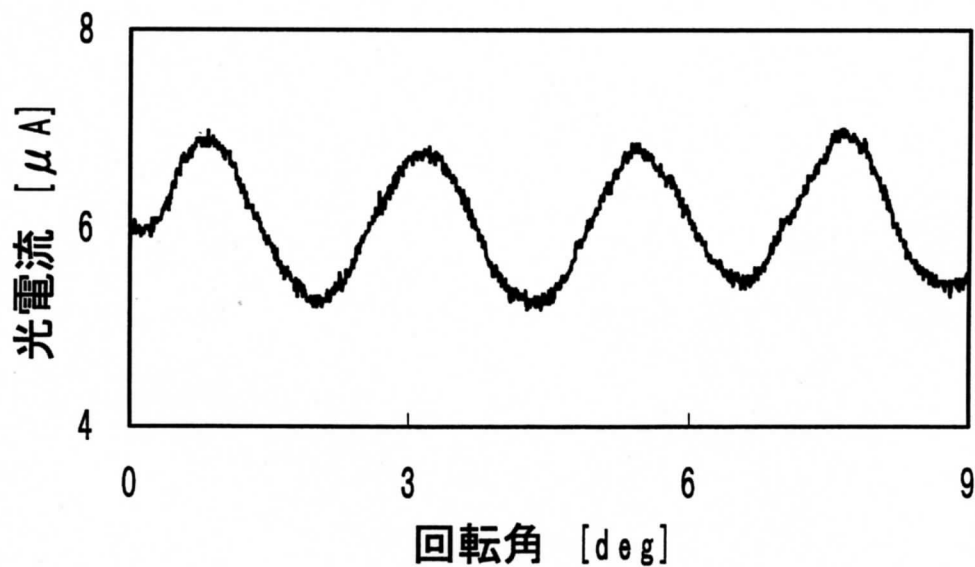


図 3.15: エンコーダ信号 (LD) : 同ピッチ格子を近接

3.1.9 回転軸一周分のエンコーダ実験：同ピッチ格子を近接した場合

前述の実験において、格子の移動周期と等価な信号が得られることがわかったので、一周に渡り信号を測定し、設計通りの格子数による信号が得られるか確認する。

実験

図 3.14 と同様な実験系を用い、一周に渡るエンコーダ信号を測定した。光源は He-Ne レーザ (出力 5[mW]) とした。単位ステップ角は 0.072[deg] に設定し、1000[pt.] 計測した。一周分の信号を得るため測定終了位置から動かさずに、同様な実験を 6 回繰り返した。0 ~ 432[deg] の回転角の測定を行うこととなる。

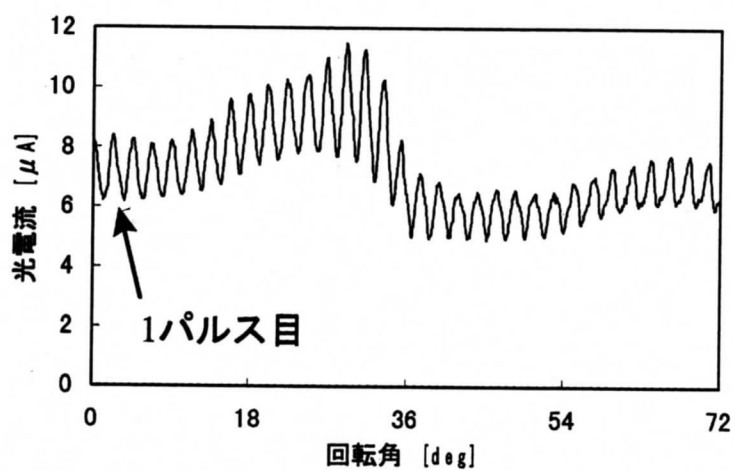
結果

結果を図 3.16、図 3.17 に示す。横軸は、測定開始角を 0[deg] とする回転角の絶対量、縦軸はフォトダイオードの光電流である。一周あたり設計通り 160 パルスの信号が得られ、再現性のある信号を繰り返すことが確認できた。ただし、信号のコントラスト、および強度は回転角によって変動した。今回製作したメインスケール軸では、信号のコントラストは 10~30[%]、信号の強度の変動はピーク値を基準として約 30[%] であった。

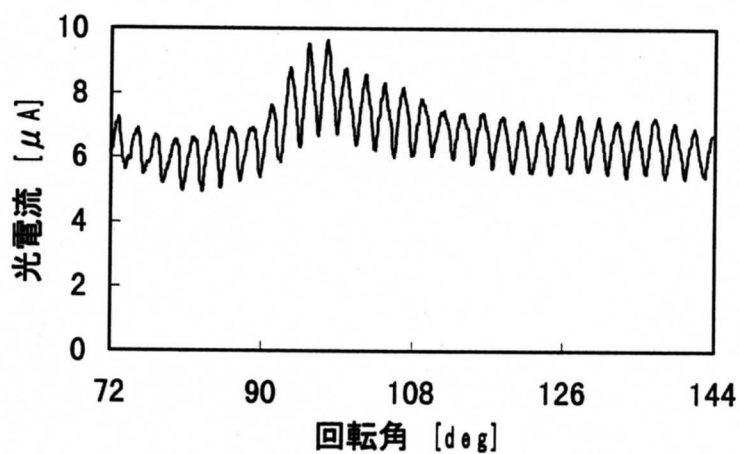
考察

0~72[deg] と 360~432[deg] の範囲の信号の相似性によって信号の再現性が確認できたため、パルス数をカウントして 160[パルス/回転] であると判断した。

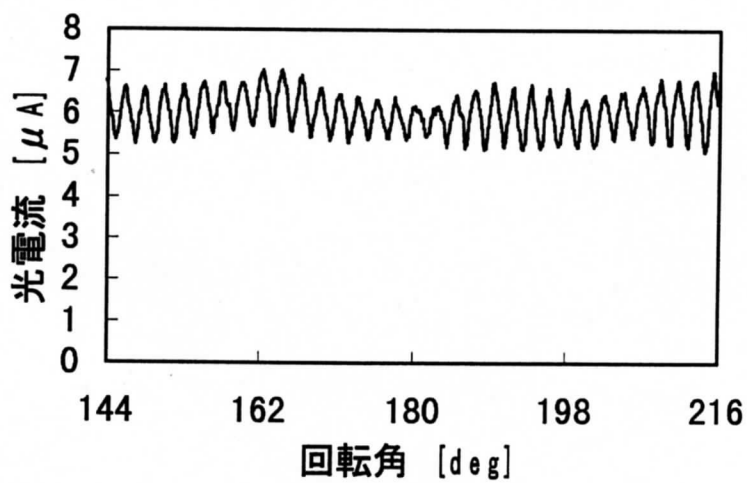
再現性の確認する要因となった信号強度の変動であるが、実際にエンコーダとして使用することを考えた場合不利となる。信号の不安定性の原因は、反射膜の反射率の不均一さ、ポリイミドをコーティングしたときの凹凸などが原因であると考えられる。反射膜の不均一さは、440[nm] の膜厚を目標に堆積させる Al スパッタのとき生じたと考えられる。サンプルを動力軸まわりに固定するため、Al ターゲットからの距離がサンプルの内側は遠くなり外側は近くなる。そのため膜厚に変化が生じると考えられる。また、2 本同時にスパッタするときも互いのサンプルが影になるので膜が薄くなる。あとのプロセスにおいて、再度 Al をスパッタするが、凸部分の薄くなった部分は表面の荒れが少ないため反射面が滑らかになり、他の部分に比べ高い反射率を持つようになる。これらが信号の強度変動の主要因と考えられる。



(a) 0~72 $[\text{deg}]$

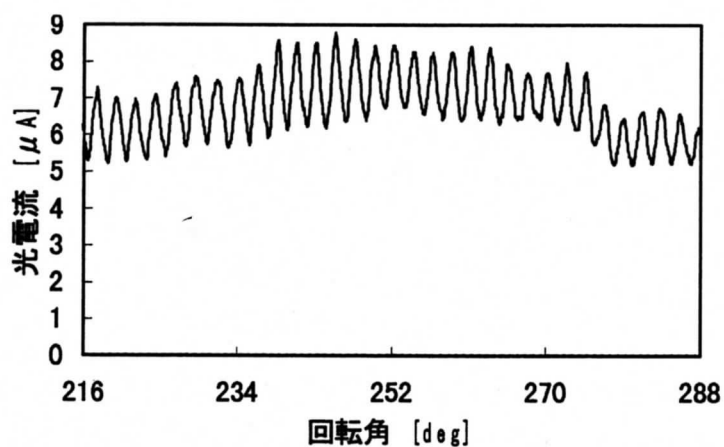


(b) 72~144 $[\text{deg}]$

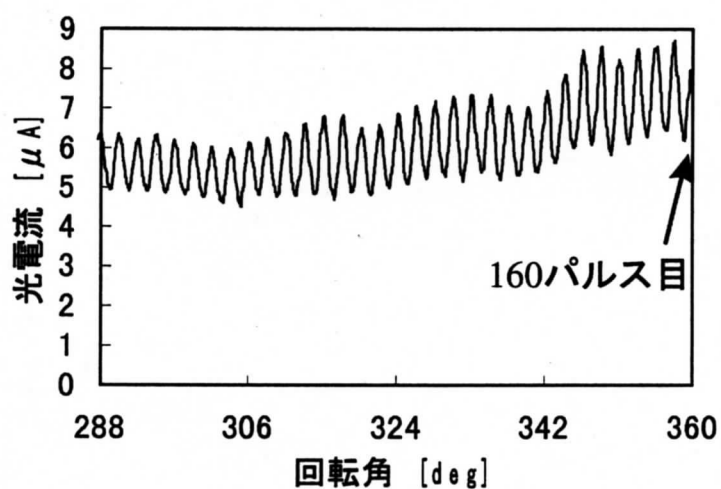


(b) 144~216 $[\text{deg}]$

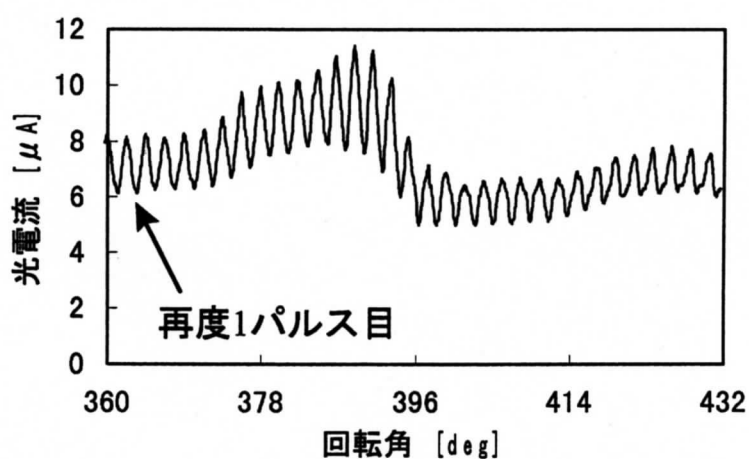
図 3.16: メインスケール軸一周に渡るエンコーダ信号 (0~216 $[\text{deg}]$)



(d) 216~288 [deg]



(e) 288~360 [deg]



(f) 360~432 [deg] (0~72[deg])

図 3.17: メインスケール軸一周に渡るエンコーダ信号 (216~432[deg])

3.1.10 空間的光強度分布

実験

メインスケールによる反射光の空間的光強度分布を測定した。実験系を図 3.18 に示す。光源には LD(波長 780nm) を使い、 $100\mu\text{m}$ 幅のスリットの後部にフォトダイオードを取り付け、スリットごと X ステージで動かした。

結果

図 3.18 中で $x=2.6[\text{cm}]$, $y=1.9[\text{cm}]$ のときの光強度分布の測定結果を図 3.19 に示す。横軸はフォトダイオード付きスリットの移動距離、縦軸は光強度を表す。光強度分布において、幅の広いピークと狭いピークが交互に現れた。幅の広いピークと狭いピーク間の距離は、約 $1[\text{mm}]$ であった。また、幅広なピークでは、2 つピークに別れているものが確認できた。

回折光を黒色の散乱板にあててメインスケール軸の回転にともなう回折光の移動の様子を観察したところ、メインスケールの回転に合わせ連続的に回折パターンが移動することを確認した。メインスケール格子約 1 ピッチ分回転させたところ、回折光のパターンが 2 周期分 (幅広+幅狭のピーク) ずれていることを確認した。

考察

図 3.18 より、幅広の信号は二つのピークが少しずれて重なることで生じていると考えられる。

格子ピッチ約 1 ピッチ分を回転させると、2 周期分 (幅広+幅狭のピーク) 回折光のパターンがずれたことから、格子ピッチの投影像は、幅狭のパターンであり幅広のパターンは、高次の回折光の重ね合わせであると推測する。

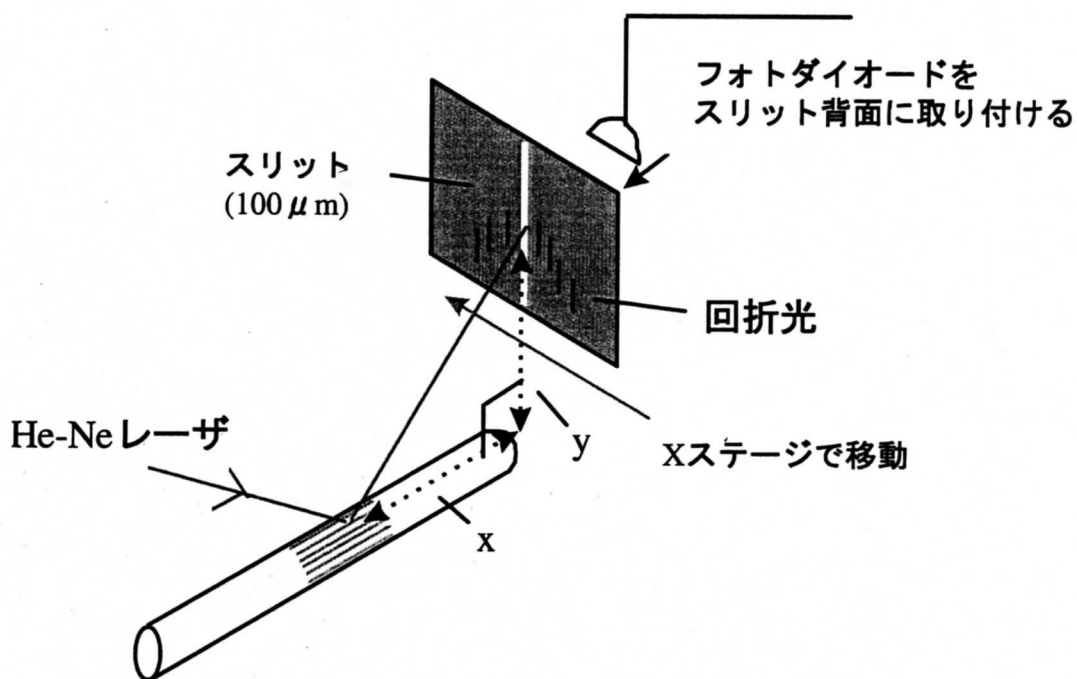


図 3.18: 実験系：空間的光強度分布測定

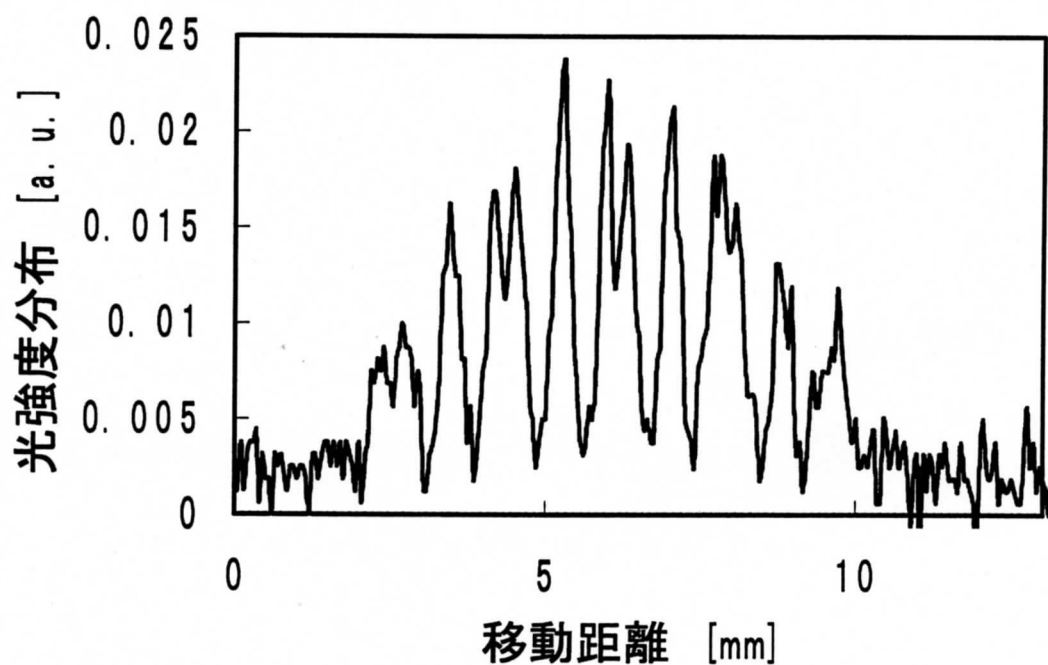


図 3.19: 空間的光強度分布

3.1.11 エンコーダ実験：ガラス管インデックススケールタイプ

実験

製作したメインスケール軸とインデックススケールをロータリーエンコーダとして機能するように、自作の Al 製治具に固定した (図 3.20)。また、光源として平行レンズ付き LED (Al-402, 波長 910[nm]) とフォトダイオードを、メインスケールからの反射光がインデックススケールを通過するように配置した。インデックススケールは、118、140、174[μm] ピッチの三種類とした。メインスケール軸の回転角を 1 パルスあたり 0.009[deg] とし 1000 パルス動かしたときのエンコーダ信号を測定した。レーザを光源としたときのエンコーダ信号も測定した。

結果

LED (出力 50[mW]) を光源としたときのエンコーダ信号を図 3.1.11 に示す。横軸はメインスケール軸の回転角、縦軸はフォトダイオードの光電流を表す。(a)、(b)、(c) の数値は、それぞれ 118、140、174[μm] ピッチの各インデックススケールに対応する。コントラストは、(a)1.8[%]、(b)1.3[%]、(c)1.8[%] であった。信号の周期は、(a)8 周期、(b)6 周期、(c)4 周期の信号が得られた。

次に、He-Ne レーザ光 (出力 5[mW]) を入射角約 30[deg] で入射したときのエンコーダ信号を図 3.1.11 に示す。ただし、(a) のみ市販のレーザーダイオード (出力 42[mW]) とした。条件は、LED のときと同様である。コントラストは最大で (a)18[%]、(b)43[%]、(c)10[%] であった。信号の周期は、(a) では、エンコーダ信号の大きいピーク間に小さいピークが入るように 8 周期のエンコーダ信号が得られた。(b) および (c) では、4 周期の信号が得られた。

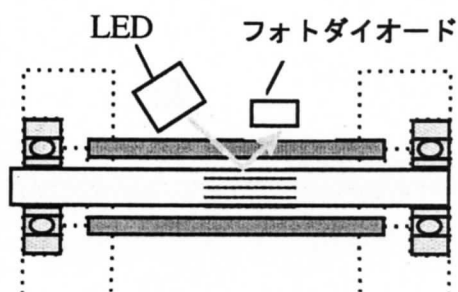
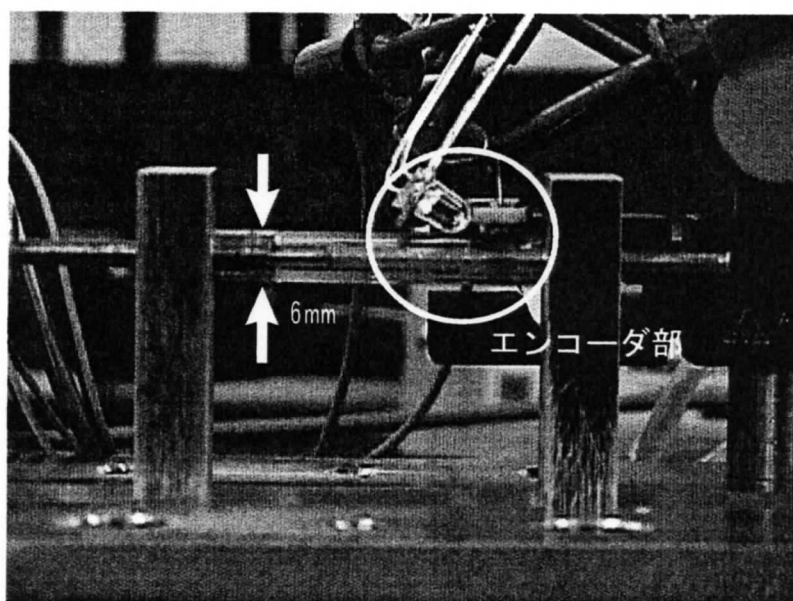
考察

LED でコントラストが低い原因は、ガラス管をインデックススケールとした場合、市販の LED とフォトダイオードでは、構造の都合上近づけることが困難であり、光路が長くなってしまうためであると考えられる。平行レンズ付きであっても光路が長くなればビーム形は広がってしまう。よって平行成分以外は、バックグラウンドとして信号のコントラストを小さくしてしまうと考えられる。

信号の周期が変化するのは、もともとの空間的光強度分布に高次の回折成分が含まれているためではないかと推測できる。

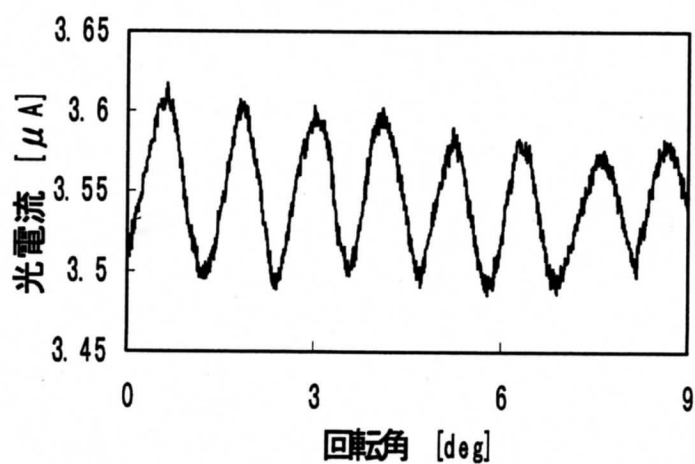
レーザを用いた場合、光量も大きく指向性も高いのでコントラストの高いエンコーダ信号が得られた。

フーリエイメージの原理では、回折格子の周期と等周期の光強度分布が得られる。よって、9[deg.]の回転角に対して4周期分のエンコーダ信号が得られるはずである。しかし、(a)では小さいピークを含めると8周期分の信号が得られた。LEDの場合と同様に、高次の回折成分の影響であると推測する。(b)、(c)では、予想通りの周期信号が得られた。幾何学的に計算したインデックススケールの格子ピッチよりも小さい140[μm]ピッチ(拡大率1.19に相当)のとき最大のコントラストが得られた。幾何学的効果だけでなく、回折の影響もあったと推測される。

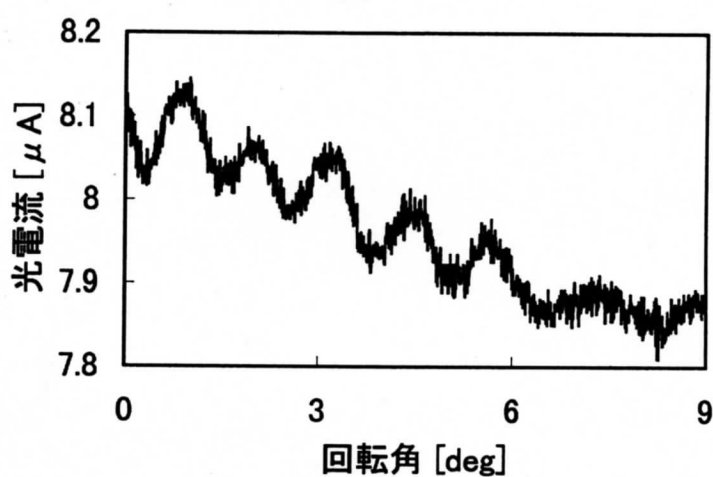


模式図

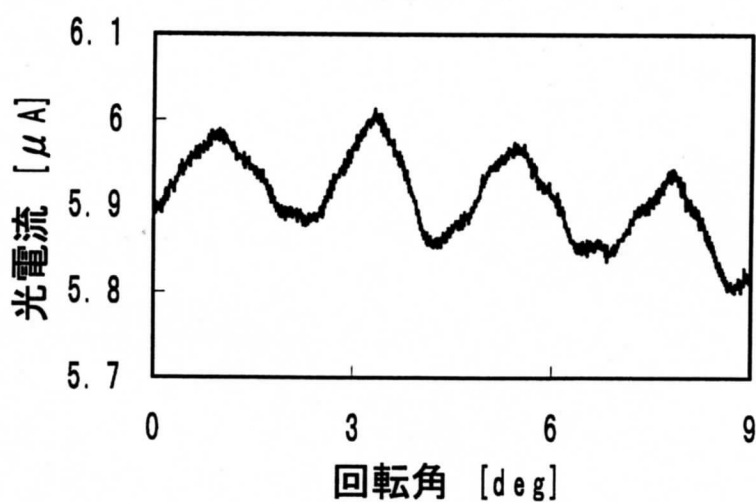
図 3.20: 製作した円筒面格子型ロータリーエンコーダ



(a) $118\ \mu\text{m}$



(b) $140\ \mu\text{m}$



(c) $174\ \mu\text{m}$

図 3.21: エンコーダ信号 (LED) : ガラス管インデックススケール
(各数値は、インデックススケールの格子ピッチ)

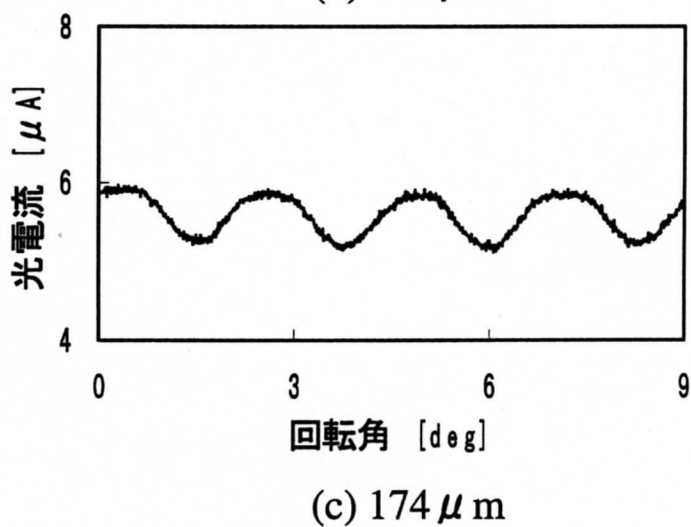
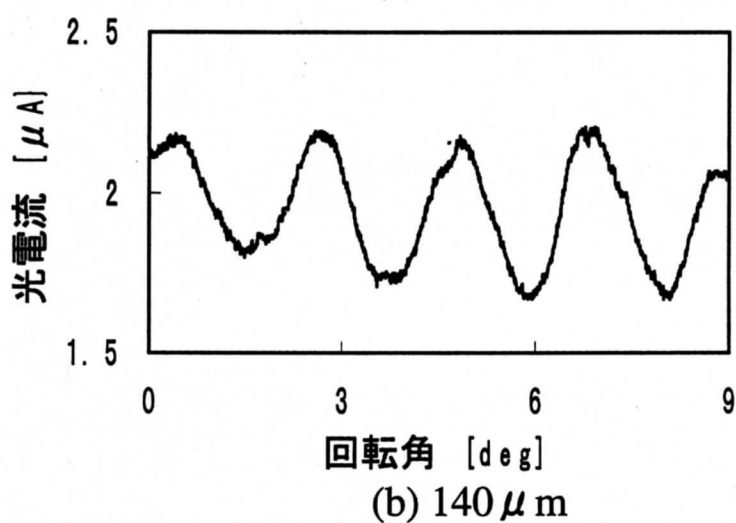
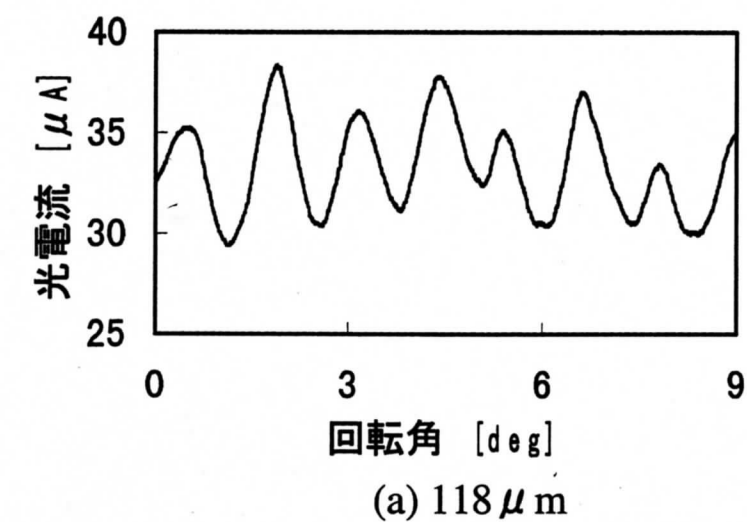


図 3.22: エンコーダ信号(レーザ): ガラス管インデックススケール
(各数値は、インデックススケールの格子ピッチ、(a)LD、(b)(c)He-Ne レーザ)

3.1.12 評価

LEDを用いた場合のコントラスト0.1~0.2[%]程度であり、実用に耐えうるコントラストが得られなかった。実用上、少なくとも10[%]程度のコントラストが必要である。レーザーではインデックススケールのピッチに関わらずコントラストは10~40[%]程度の信号が得られた。よって、コントラストの面から考えてレーザーを使用したガラス管インデックススケールタイプの円筒面格子型ロータリーエンコーダは、実用的なロータリーエンコーダとなりうる。

しかし、いくつか解決する必要のある問題点がある。

一つは、コントラスト、エンコーダ信号強度のばらつきである。信号強度が変動するとエンコーダ信号を取り扱いは不便である。そのため、強度変化の小さくなるように改良する必要がある。メインスケール軸のムラによる信号のばらつきが一番大きいと考えられる。ムラの大きな原因は、コーティング剤の塗りムラ、Alスパッタ成膜時の荒れが考えられる。前者の解決法は、表面を特殊研磨したスケール軸を用いることである。ただし、製作する装置に適した形での入手は困難である。そのためコストが高くなり、専用治具の製作が必要となる。しかし、コーティング剤による平滑化でも塗布法を改善できれば、そちらを用いた方が入手のしやすさ、コストの面で有益である。後者では、成膜時の条件を変えることで膜質の向上が見込まれる。

第二に、インデックススケールの設計次第で、高次のノイズ成分と考えられる信号も光強度のピークとして取得してしまうことがわかった。そのため、インデックススケールの設計は重要となる。幾何学的計算によるインデックススケールの設計をおこなったが、それだけでは不十分であるため、他の設計方法が必要となる。

第三に、光学系の配置の問題点が挙げられる。現状では、ガラス間の外側に光源、フォトダイオードを配置する必要がある。そのため、光の受光効率が低下している。また、小型化の妨げとなっている。よって、小型化のためには、できるだけLD、LEDの形状を小さくする必要がある。一回転整合露光装置では、半導体加工の応用で、ガラス管円筒面上に半導体材料を堆積させることで、光源、受光素子をガラス管上に集積化することができれば、サイズはより小さくなると考えられる。

3.2 透過形フォトダイオードを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダ

ガラス管インデックススケールを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダでは、構造上次のような問題点が挙げられる。メインスケール格子からの反射光の受光効率が小さい。構造上メインスケール-インデックススケール間の距離を変更できない。光源とフォトダイオードの配置のバランスが悪い。

そこで、透過形フォトダイオードを用いて問題点を解決することを考えた。円筒面の形状効果を考慮すると設計が複雑化してしまうので、測定対象を一部の領域に限定して近似的に直線形のメインスケールとしてエンコーダ信号を得ることを考える。信号検出の原理は、インコヒーレント光源を用いた場合はグレーティングイメージング、コヒーレント光源を用いた場合はフーリエイメージの原理である。受光効率、光源とフォトダイオードの配置のバランスを考慮すると透過形フォトダイオードを用いた光学系が適していると考えられる。

3.2.1 原理

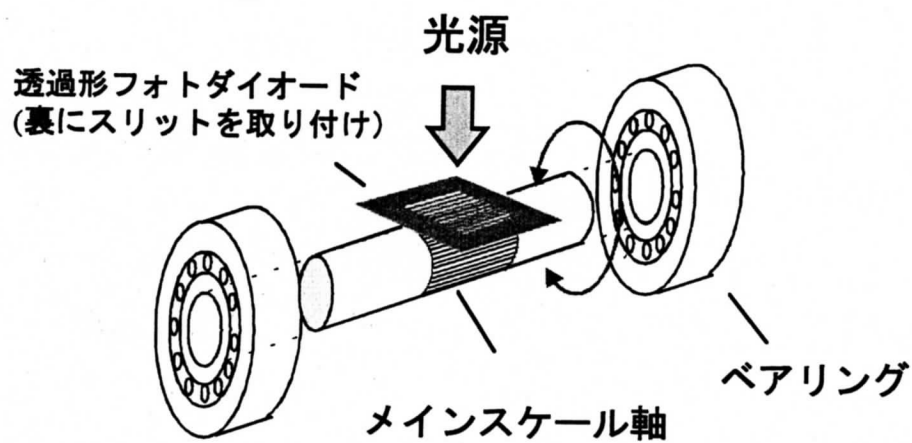
透過形フォトダイオードを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダを図 3.23 に示す。フォトダイオードを回折格子に加工した透過形フォトダイオードをメインスケール軸上に配置し、裏面から光を照射する。透過形フォトダイオードを通過した光は、メインスケール軸上の格子によって反射され、透過形フォトダイオード前面の格子状フォトダイオードで光を検出する。その際、光源を LED のようなインコヒーレント光源を用いた場合グレーティングイメージ [10] の原理によって最初に透過形フォトダイオードを通過するときの像がフォトダイオード前面に結像される。

He-Ne レーザなどのコヒーレント光源を用いた場合、フーリエイメージの原理でフォトダイオードの前面に結像される。

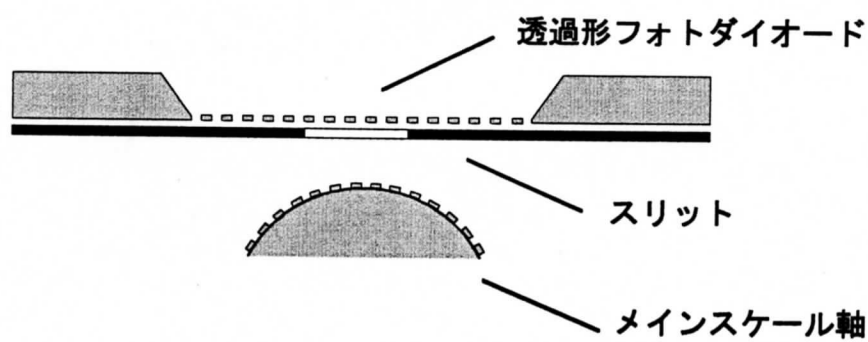
直線格子の場合を考えると、信号の周期はグレーティングイメージングの場合は格子の移動周期の 2 倍の信号が得られ、フーリエイメージの場合等倍の周期信号が得られる。円筒面形状による悪影響を低減するため、スリットで検出範囲を限定すれば、同様な信号が得られると考えられる。

ガラス管インデックススケールと比べて、光源、検出素子 (透過形フォトダイオード)、グレーティングイメージング用格子 (透過形フォトダイオード、メインスケール軸) を直線的に配置できるため、光の利用効率も高い。各部品を集積化することで、より一層の小

型化も期待できる。



(a)全体図



(b)概略図

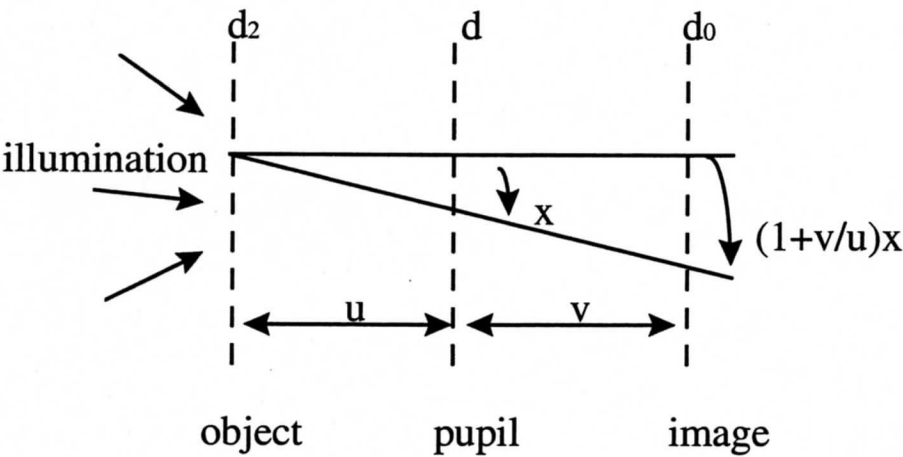
図 3.23: 透過形フォトダイオードを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダ

3.2.2 グレーティングイメージング

周期的格子を通過してできた object の影像は、インコヒーレント像再生や表面トポグラフィや応力解析などに応用されてきた。このように周期的な格子を用いた像の結像をグレーティングイメージングという。

影像には幾何光学的な結像と回折の効果による結像がある。回折の効果による結像は、周期的 object の影像である周期的系の応答を記述するために、瞳関数の自己相関によって得た伝達関数 [11] によって記述することができる。

インコヒーレント光源を用いた場合の、格子像のグレーティングイメージングの光学系を図 3.24 に示す。幾何像と回折像それぞれに対する格子像の結像条件も合わせて示す。幾何像には波長条件があるのに対し、回折像にはないのが特徴である。



	幾何像	回折像
a)結像条件	$d_2=d(1+u/v)$	$d=1/2d_2(1+u/v)$
b)像倍率	$d_0=(v/u)d_2$	$d_i=(v/u)d_2$
c)波長条件	$u=n \frac{d \cdot d_2}{\lambda}$	なし 但し $v > \frac{d^2}{2\lambda}$

図 3.24: グレーティングイメージング

3.2.3 透過形PD

透過形フォトダイオードは、グレーティングイメージ検出用フォトダイオードである。フォトダイオードが透過形回折格子の形状をしている。主な使用目的は、反射型スケール格子に対するエンコーダ信号計測である。

透過形フォトダイオードを用いたエンコーダ信号検出系を図 3.25 に示す。透過形フォトダイオードの背面から光を入射し、格子状のフォトダイオードの隙間から前面に通り、反射形格子で反射した光を前面の格子状のフォトダイオードで検出する。

ここで、透過形フォトダイオードの格子は、図 3.24 中の object と image の双方に等価である。反射型スケール格子を用いるため object-pupil と pupil-image の距離が必ず等しくなる ($u=v$)。そのため格子間隔をアライメントする必要がない。

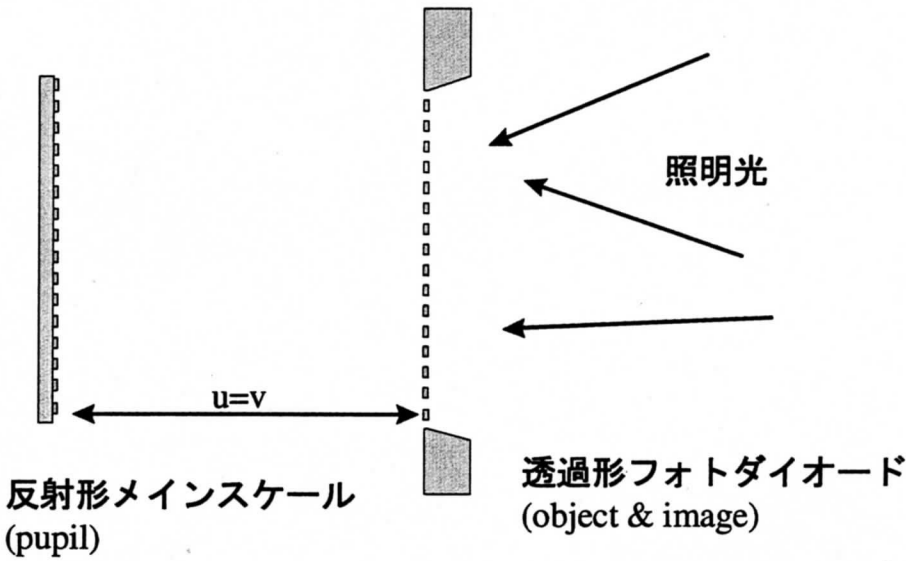


図 3.25: 透過形フォトダイオードを用いたエンコーダ信号検出系

3.2.4 エンコーダ実験：透過形フォトダイオード

実験

実験系は、図 3.12 の装置および図 3.13 の治具を用いた。透過形フォトダイオードをメインスケール軸上に配置して上部から光を入射した。光源は、LED(波長 880nm) と He-Ne レーザ(波長 632.8nm) の 2 種類とした。受光領域を制限するスリットの幅は格子 20 本分の 0.8mm とした。ステッピングモータの単位ステップ角を 0.009[deg] に設定し、1000[pt] 測定した。

結果

光源を LED としたエンコーダ信号を図 3.26、He-Ne レーザとしたものを図 3.27 に示す。横軸はメインスケール軸の回転角、縦軸はフォトダイオードに流れた光電流である。

LED によるエンコーダ信号は、透過形フォトダイオードとメインスケールの距離、光量を変化させてもエンコーダ信号は得られなかった。また、白色光源を用いて同様な実験を行ったが、信号は得られなかった。

He-Ne レーザによるエンコーダ信号は、透過形フォトダイオードとメインスケールの距離が約 1mm のとき振幅が最大となった。測定範囲 9[deg] の回転角で移動した格子数は、 $236 \times 9/360 = 5.9$ [本] である。図中の波形では、移動した格子周期の二倍の周期の信号が得られた。

考察

二倍の周期の信号が得られたが、コヒーレント光源であれば像は射影であるため、本来であれば移動した格子の周期と等周期の信号が得られるはずである。しかし、それとは異なる信号が得られた。考えられる原因としては、高次の回折光によるノイズ成分の影響が考えられる。直線型の格子であれば次数の等しい回折光は等方向に向かうが、格子が円筒面形状をしているため本来得られるべき信号の間に集光している可能性がある。しかし、各ピーク間の大きさにばらつきがあまりないため、他の原因の可能性もある。今後、検討が必要である。

グレーティングイメージングは、インコヒーレント光源であることを想定しているが、そのときには、二倍の周期の信号が得られる。グレーティングイメージングの object と image が同時に動くことに相当するからである。

また、円筒面による形状効果が大きく働いているため、インデックススケールとなる

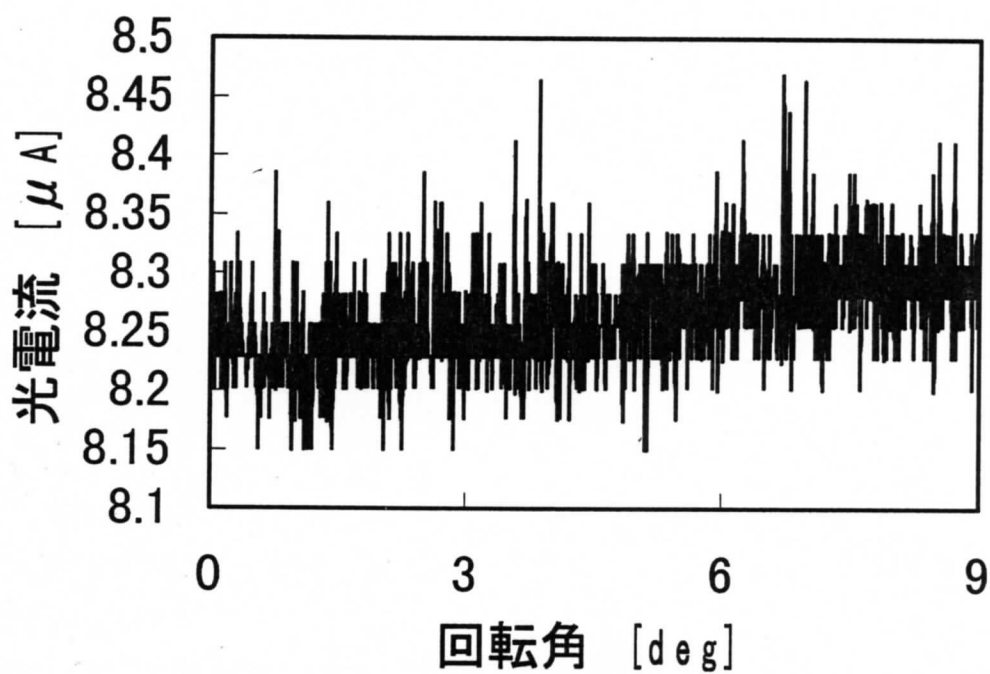


図 3.26: エンコーダ信号 (LED) : 透過形フォトダイオード

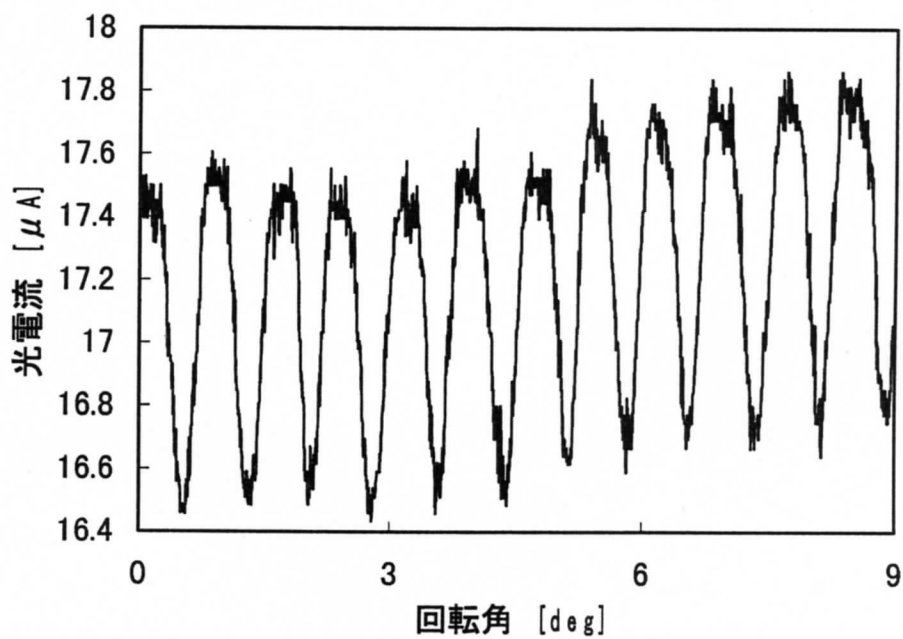


図 3.27: エンコーダ信号 (He-Ne レーザ) : 透過形フォトダイオード

3.2.5 間隙に対するコントラスト変化

レーザを用いたエンコーダ実験において、エンコーダ信号が得られた。そのとき、メインスケール-透過形フォトダイオード間距離を変化させると、信号のコントラストが変化した。そこで、メインスケールと透過形フォトダイオード間の距離に対するコントラストを測定した。

実験

Zステージでメインスケールと透過形フォトダイオードの距離を変化させ、平均信号強度とコントラストを測定した。ただし、今回使用した透過形フォトダイオードでは、光源からの光が格子部分を抜けてくる際に格子の側面で光を受光するため、前面に何も無い状態でも光電流が流れてしまう。その信号がバックグラウンドとなってしまうため、見かけのコントラストは低下する。そこで、エンコーダ信号のコントラストを算出するとき、側面で受光したことによる光電流を引いた上で、正味のコントラストを算出した。

バックグラウンド光は、次のようにして測定した。エンコーダ実験用のセッティングのままメインスケール軸を取り出し、透過光が透過形フォトダイオード前面のフォトダイオードで受光しないように、ミラーで透過光をそらす。その状態の信号をバックグラウンド光とした。

結果

バックグラウンド光を測定した結果、 $15.2[\mu\text{A}]$ であった。透過形フォトダイオードを $10[\text{cm}]$ 程度上下させて信号を測定しても $0.2[\mu\text{A}]$ 程度の変動しかなかったため、 $15.2[\mu\text{A}]$ をバックグラウンドの光電流とした。

透過形フォトダイオード-メインスケール間距離に対するコントラスト特性を図3.28に示す。そのときの光量特性も合わせて示す。

$0.65[\text{mm}]$ で最初のコントラストのピークを迎え、 $0.6\sim 0.7[\text{mm}]$ 周期でコントラストは強弱を繰り返した。スリットを透過形フォトダイオード前面に置いているため、透過形フォトダイオードからの距離の測定開始位置は、 $0.35[\text{mm}]$ であった。

考察

本来グレーティングイメージは、インコヒーレント光を光源として結像するためのものであるためLEDによる信号検出を基本にして光学系を形成したが、LED、白色光源を

用いた実験では、信号が得られなかった。レーザのようなコヒーレント光源に比べ、円筒面形状によってグレーティングイメージングの条件が成立しにくいためであると考えられる。

コヒーレント光源の場合、信号のコントラストは強弱を繰り返す。文献[10]によると、コントラスト極大となる最初の距離は、 d^2/λ となる。今回の場合2.53[mm]となる。今回の実験の場合、コントラストが極大となる最初の距離は、0.65[mm]程度であり、直線格子に比べ約1/4短い。原因は、円筒面形状によるものであると考えられる。実用を考えた場合、エンコーダの小型化には距離が近いほど小型化が可能となる。そのため、この点に関しては有利である。

理論的な検討が今後の課題である。

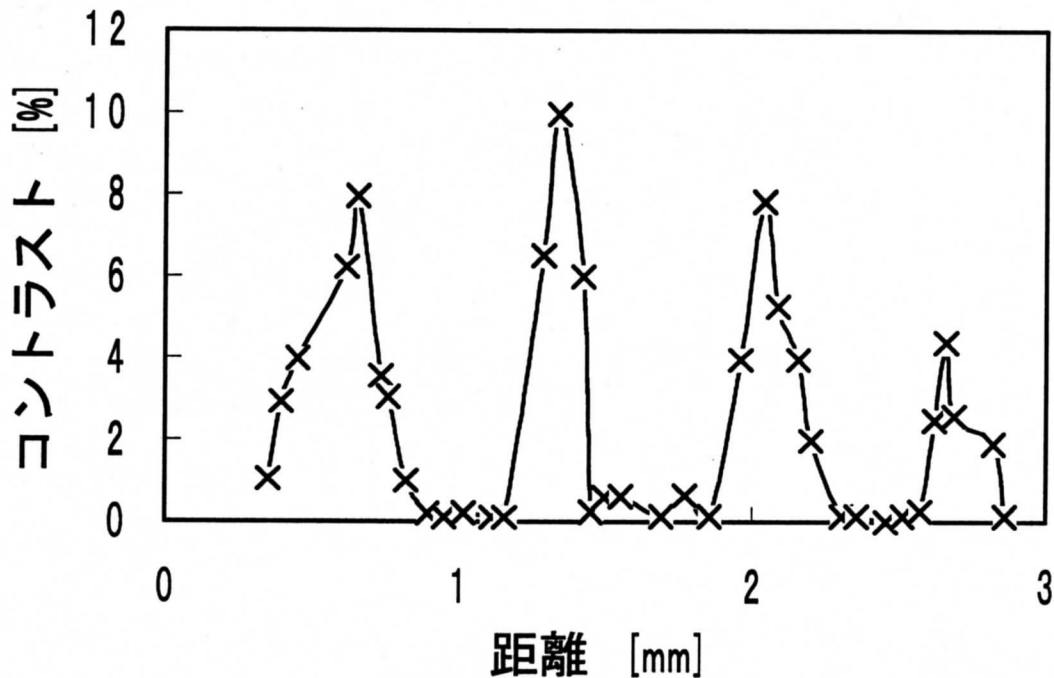


図 3.28: フォトダイオード-メインスケール間距離に対するコントラスト

3.2.6 評価

コントラストは、レーザを用いて測定した結果、実際の信号強度では約 5[%]、現状の透過型フォトダイオードの特性によるバックグラウンド光を引いた正味の信号強度では、約 10[%] が得られた。よって、ガラス管インデックススケールを用いた場合と比較し、コントラストの低い。しかし、フォトダイオード、レーザを集積化することにより、ガラス間インデックススケールタイプよりサイズを小さくできる利点があるため、コントラストを向上させることができれば、より有効であると考えられる。

問題点をいくつか以下に挙げる。

一つめは、上記のようにコントラストが低いということである。スリットで直線に近似しようとしても円筒面形状の効果が残るため、インコヒーレント光源では信号が出ない。さらに受光量も減ってしまうため、信号の劣化の原因となる。レーザ光による信号では、受光面における像が円筒面の形状による反射で拡大しており、インデックススケールとして小さい。受光面における像の周期とインデックススケールとなるフォトダイオードの格子の周期にずれが生じているため、コントラストが小さくなっていると考えられる。そこで、透過型フォトダイオードを使用することを前提で、これを解決する方法として、次の手法が考えられる。回折格子上のフォトダイオードを格子を一つずつおいて機能させるようにすれば、回折格子の半分の周期で格子状のフォトダイオードを配置でき、像の拡大にも対応できると考えられる。また、二つおきずつにすれば、回折格子に対して、 $1/3$ 周期の格子状フォトダイオードとなる。

二つめは、レーザ光を用いたエンコーダ信号が、本来得られるべき周期の倍の周期で信号が出ることである。この原因も円筒面形状による像の拡大によるものと考えられるため、上述のように、インデックススケールの格子ピッチを適したものにすれば、その効果も消える可能性がある。

三つめは、理論解析である。円筒面形状による回折の効果を効果的に利用するため必要になる。

3.3 まとめ

本章では、一回転整合円筒面露光装置を用い、円筒面格子型ロータリーエンコーダを製作した。ガラス管インデックススケールタイプと透過形フォトダイオードタイプの二種類を試作した。

ガラス管インデックススケールタイプ

- $60\mu\text{m}$ ピッチメインスケール軸を製作した。
- 118 、 140 、 $174\mu\text{m}$ ピッチガラス管インデックススケールを製作した。
- 等ピッチインデックススケールを近接してエンコーダ信号を測定し、一周分のエンコーダ信号を測定した。その結果、設計通り 160 周期のエンコーダ信号がえられた
- 空間的光強度分布を測定した。
- ガラス管インデックススケールを用い、円筒面格子型ロータリーエンコーダを構成した。
- ガラス管インデックススケールを用い、エンコーダ信号を測定した。He-Ne レーザおよび $140\mu\text{m}$ ピッチインデックススケール格子を用いたとき、最大のコントラスト $43[\%]$ が得られた。

透過形フォトダイオード

- $40\mu\text{m}$ ピッチメインスケール格子を製作した。
- 透過型フォトダイオードを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダを構成した。
- 透過型フォトダイオードを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダを用いてエンコーダ信号を測定した。He-Ne レーザを用いたとき、正味の最大コントラスト $10[\%]$ が得られた。
- 透過形フォトダイオード-メインスケール間距離に対するコントラスト特性を調べた。 $0.65[\text{mm}]$ で最初のピークを迎え、その後 $0.65[\text{mm}]$ 周期でコントラストが変化した。

その他

- ロータリーエンコーダ実験用装置を構築した。

第4章 円筒面格子型ロータリーエンコーダを組み込んだロボット用疑似指関節の試作

3章で製作した透過形フォトダイオードを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダを集積化し、ロボット用疑似指関節を試作する。ガラス製インデックススケールタイプと透過形フォトダイオードタイプの二種類を同時に組み込む。

4.1 ロボット用疑似指関節の設計

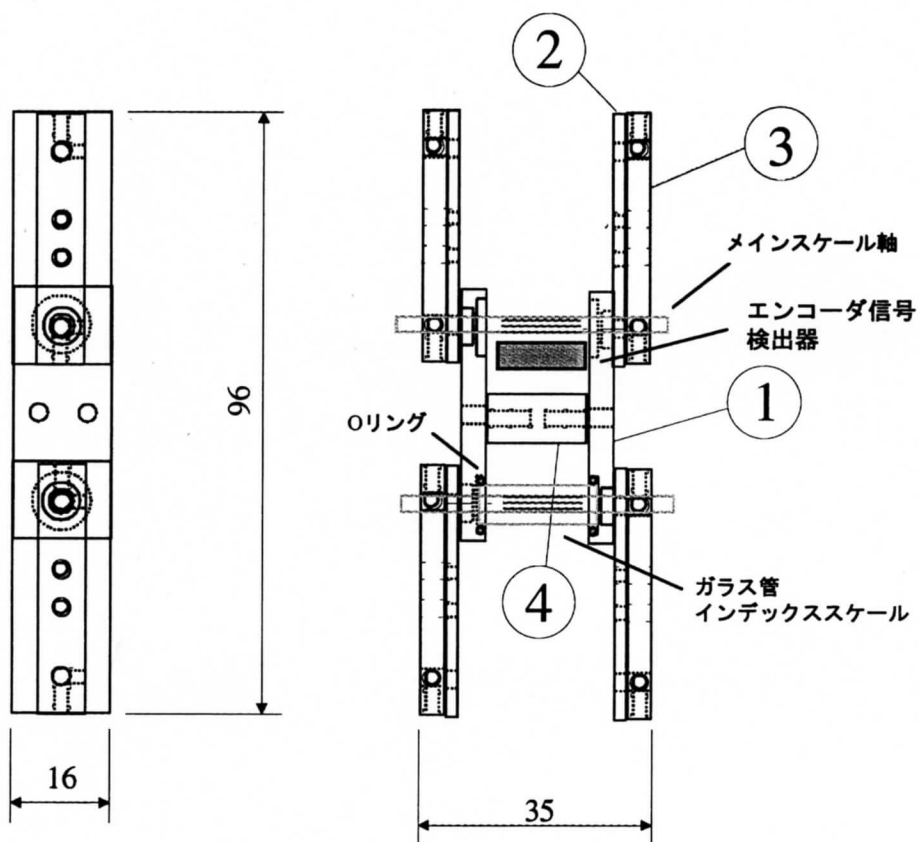
4.1.1 フレームの設計

ロボット用疑似指関節の設計をおこなった。2枚のフレームを一組として継ぎ足していくフレーム構造とした。組立図を図4.1に示す。ガラス管インデックススケールの固定には、ガラス管の寸法誤差に対応できるようにOリングを用いることにした。

4.1.2 エンコーダ信号検出器の集積化

透過形フォトダイオードを用いたロータリーエンコーダ用に、エンコーダ信号検出器としてスリット、透過形フォトダイオード、レーザーダイオード(波長785nm、HL7859MG、HITACHI)を集積化し、パッケージ化した。

製作したエンコーダ信号検出器を図4.2に示す。スリットは、透過形フォトダイオード前面と背面に配置し、スリット幅は0.8[mm]とした。また、コントラストの向上を考え、 $\phi 2$ [mm]のボールレンズをレーザーダイオード前面に取り付けた(図4.3)。取り付けには、紫外線硬化接着剤を使用した。



1	エンコーダ冶具	アルミ	2
2	フレーム	鉄鋼	4
3	止め具	アルミ	4
4	スペーサ	アルミ	1

図 4.1: ロボット用指関節フレーム構造

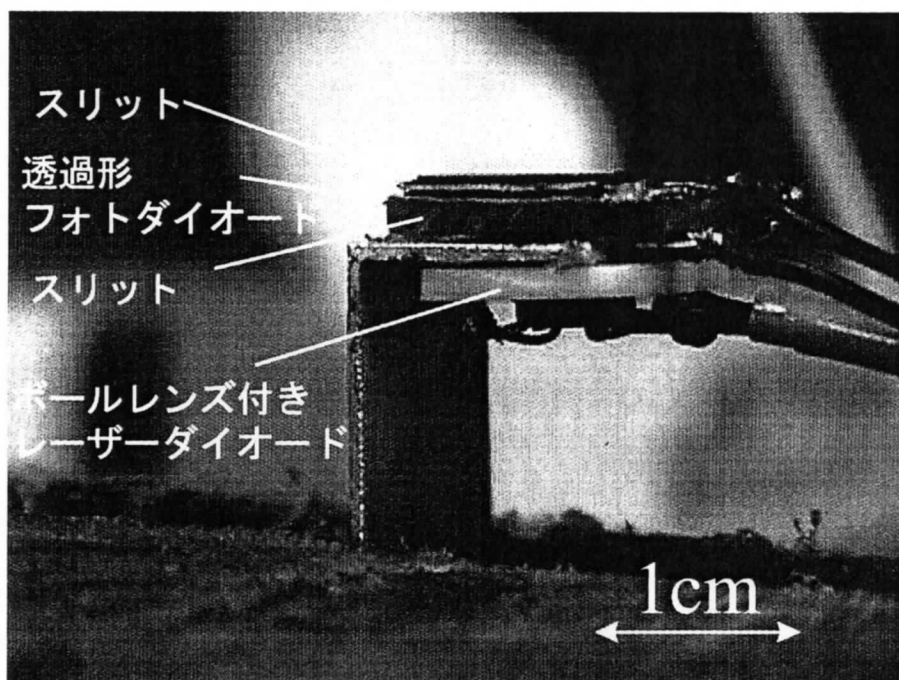


図 4.2: 集積化したエンコーダ信号検出器

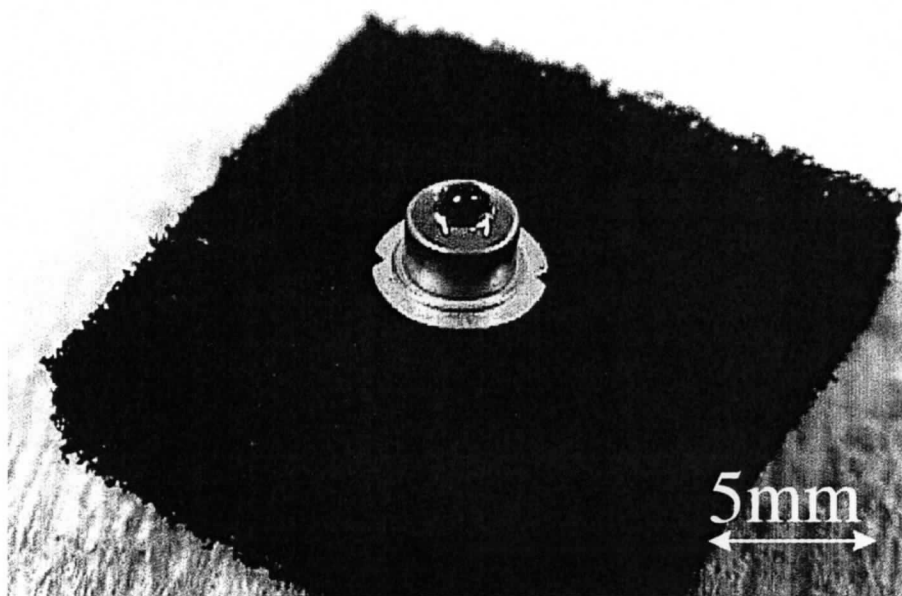


図 4.3: ボールレンズ付レーザーダイオード
(写真は $\phi 1.5\text{mm}$ のボールレンズ)

4.1.3 エンコーダ実験：集積型エンコーダ信号検出器

第3章で製作したエンコーダ実験装置にエンコーダ信号検出器を取り付け、エンコーダ信号を測定した。

実験

第3章の透過形フォトダイオードを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダのエンコーダ実験と同様な実験をおこなった。単位ステップ角は、 $0.009[\text{deg}]$ とし $1000[\text{pt}]$ 測定した。レーザーダイオードの出力は $13[\text{mW}]$ とした。メインスケール-フォトダイオード間距離は、約 $1[\text{mm}]$ とした。

結果

得られたエンコーダ信号を図4.4に示す。横軸は回転角、縦軸は光電流である。約6周期の信号が得られた。よって、移動した格子ピッチと等倍の周期信号が得られた。コントラストは、正味で $10[\%]$ であった。

考察

第3章において透過形フォトダイオードとレーザーを組み合わせ信号を測定した場合、格子の移動周期の倍の周期が得られていた。しかし、今回はレーザーを使用したにも関わらず等倍の周期信号が得られた。違いは、ボールレンズによって平行光を得た点である。レーザーダイオード単体では、特性上 $10\sim 30[\text{deg}]$ 程度の放射角で出光するため、一般にレンズによって補正が行われる。今回は小型化が目標であるため、ボールレンズを使用した。十分な平行光ではなかったため、第3章の実験とは異なる結果となったと考えられる。

今回の実験では、コントラストは正味で $10[\%]$ が得られた。ボールレンズを用いずにレーザーダイオード単体を光源として透過形フォトダイオードの前面と背面にスリットをおいた状態でも正味で最大 $10[\%]$ のコントラストが得られた。しかし、信号を得るためには、 $3[\text{mm}]$ 程度離す必要があったため、ボールレンズを用いた方が小型化には有効であると考えられる。

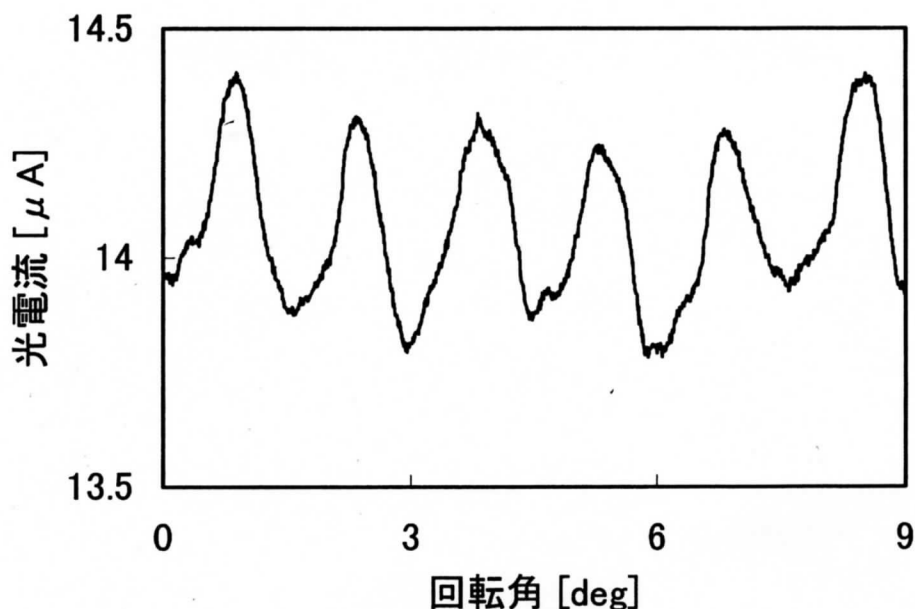


図 4.4: エンコーダ信号：集積型エンコーダ信号検出器

4.1.4 指関節の組み立て

エンコーダ実験装置、フレーム、エンコーダ信号検出器を組み立てた。全体図を図 4.5 に示す。また、エンコーダを含むフレームの正面図を図 4.6 に示す。上部関節は透過形フォトダイオードを集積した検出器による円筒面格子型ロータリーエンコーダであり、下部関節はガラス管インデックススケールを用いた円筒面格子型ロータリーエンコーダである。

上部関節の拡大写真を図 4.7 に示す。スリット位置が円筒面の頂点付近に合うように、エンコーダ信号検出器のくの字型治具を調整している。

下部関節の拡大写真を図 4.8 に示す。今回はガラス管インデックススケールタイプの光源は LED(AL-402) とした。インデックススケールの格子ピッチは $174[\mu m]$ のものを使用した。

メインスケール軸、インデックススケール (透過形フォトダイオード、ガラス管インデックススケール) は、いずれも第 3 章で製作したものを使用した。

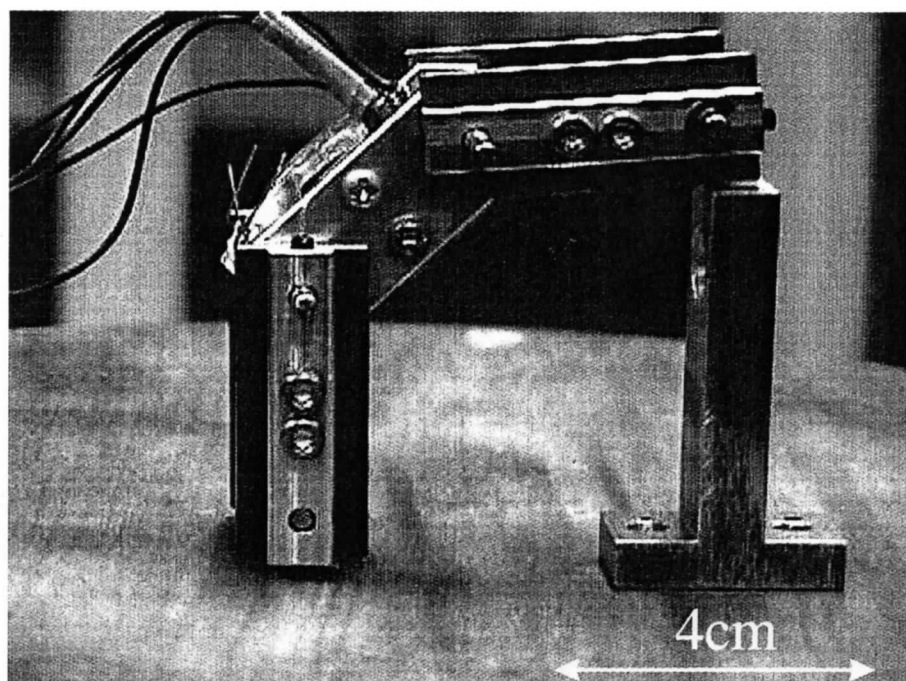


図 4.5: ロボット用疑似指関節 (側面図)

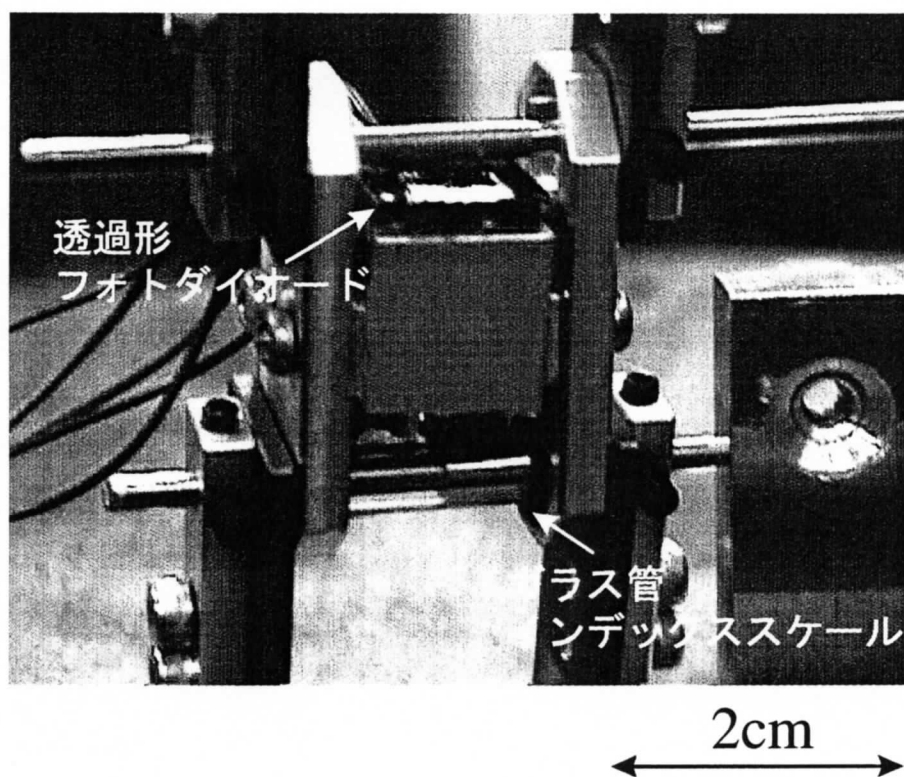


図 4.6: ロボット用疑似指関節 (正面拡大図)

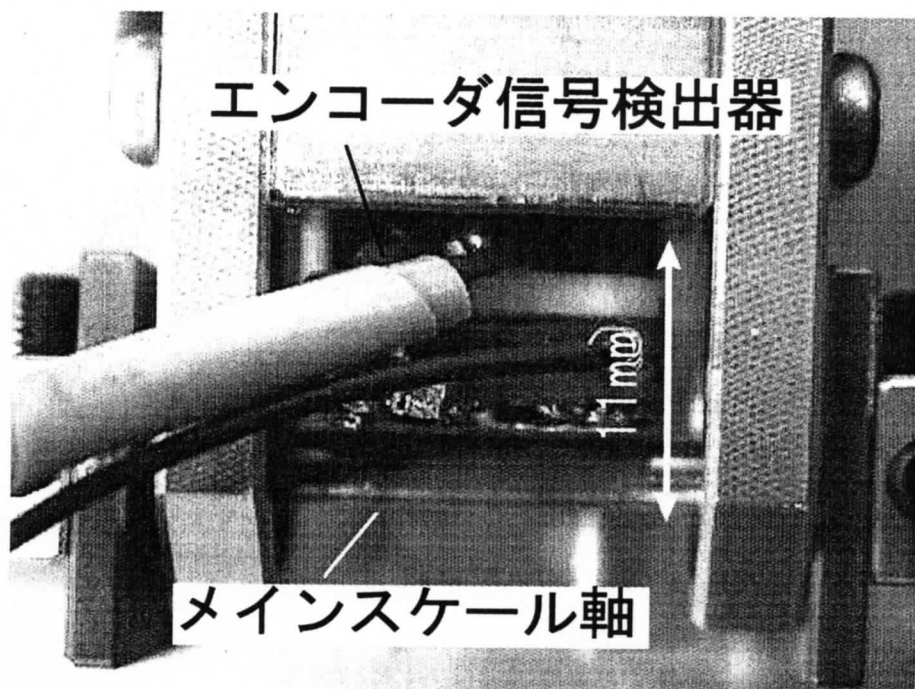


図 4.7: ロボット用疑似指関節：透過形フォトダイオードタイプ

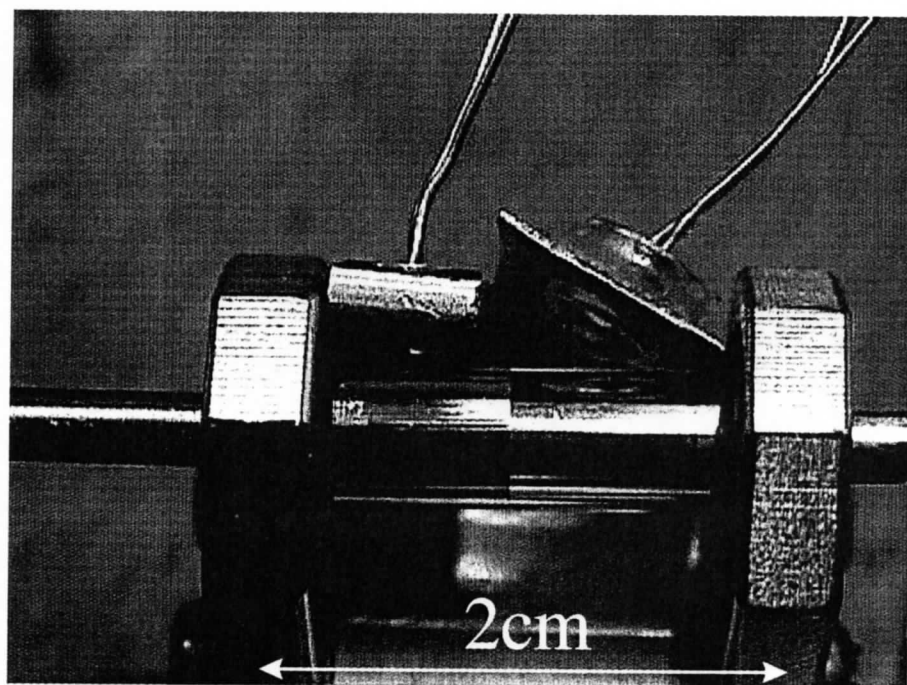


図 4.8: ロボット用疑似指関節：ガラス管インデックススケール

4.2 エンコーダ実験：ロボット用擬似指関節

製作したロボット用擬似指関節を第3章で製作したエンコーダ実験装置に組み込み、エンコーダ実験を行う。取り付けた円筒面格子型ロータリーエンコーダの動作確認をする。

実験

実験装置を図4.9に示す。ロボット用指関節を第3章のエンコーダ実験で用いた固定台に取り付ける。図中のフレーム1-エンコーダ治具およびエンコーダ治具-フレーム2の間の関節は自由に回転する。フレーム2と固定台は、動かないように接着した。フレーム1の先にステンレス製のクランクを取り付け、クランク根元をステッピングモータにカップリングで直結する。ステッピングモータの回転軸周りにクランクを回転させ、回転可能な二つの関節が同時に移動するようにした。動作確認が目的であるので、ステッピングモータの定速移動と停止を繰り返し、エンコーダ信号の時間応答を測定した。ステッピングモータの単位ステップ角は、 $0.009[\text{deg}]$ である。

結果

エンコーダ信号を図4.10に示す。(a)、(b)はそれぞれ、ガラス管インデックスタイプ、透過形フォトダイオードタイプ(集積化した検出器)で得られたエンコーダ信号である。横軸は時間、縦軸は光電流を表す。(a)、(b)どちらの場合も、ステッピングモータの移動と停止に対応したエンコーダ信号が得られた。透過形フォトダイオードタイプの方が高いコントラストが得られた。

考察

ガラス管インデックススケールタイプでは、コントラストが低く、信号強度のばらつきが大きかった。コントラストが低い原因は、インコヒーレントなLEDを用いたためである。第3章でも同様な結果が得られている。レーザーダイオードを用いるなどして、コントラストの向上が図れると考えられる。信号のばらつきの原因は、関節の移動の際に、LEDがずれてしまったためであるLEDは、フォトダイオードに効率良く入光するように斜めに素子を配置する必要がある、自作した治具による固定が不完全だったためと考えられる。光源、受光素子を頑丈に配置する必要がある。

透過形フォトダイオードタイプでは、前者に比べ比較的高いコントラストと信号の安定性が得られた。固定方法が簡単である、ずれにくい、無理なくスペースの納まるなどの特

徴により、コンパクトにまとめることができた (大きさ 11[mm]、236[パルス/回転相当])。

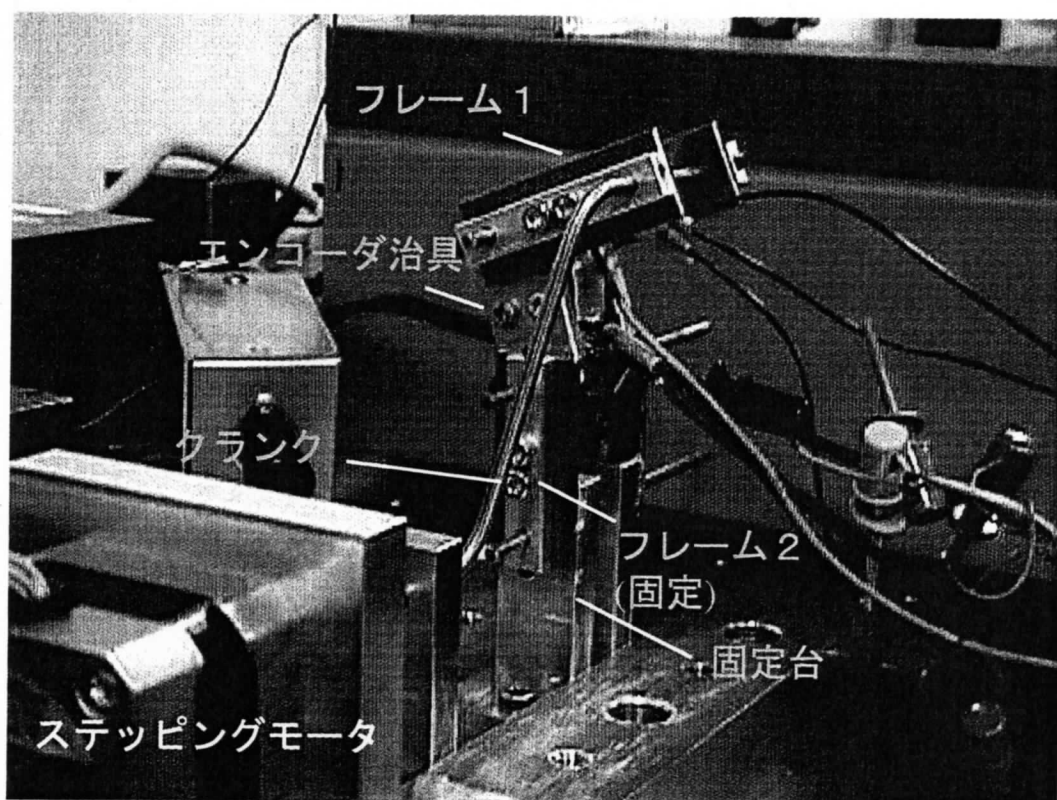
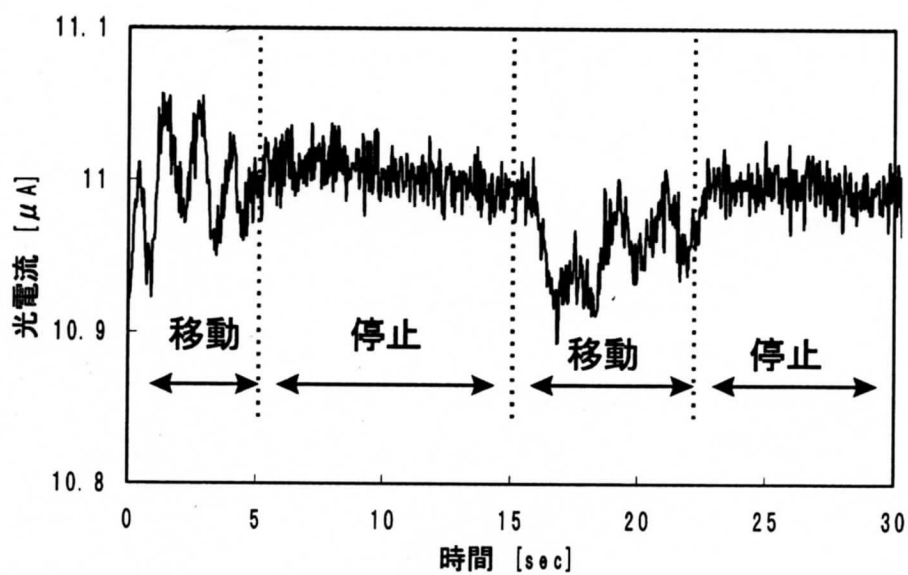
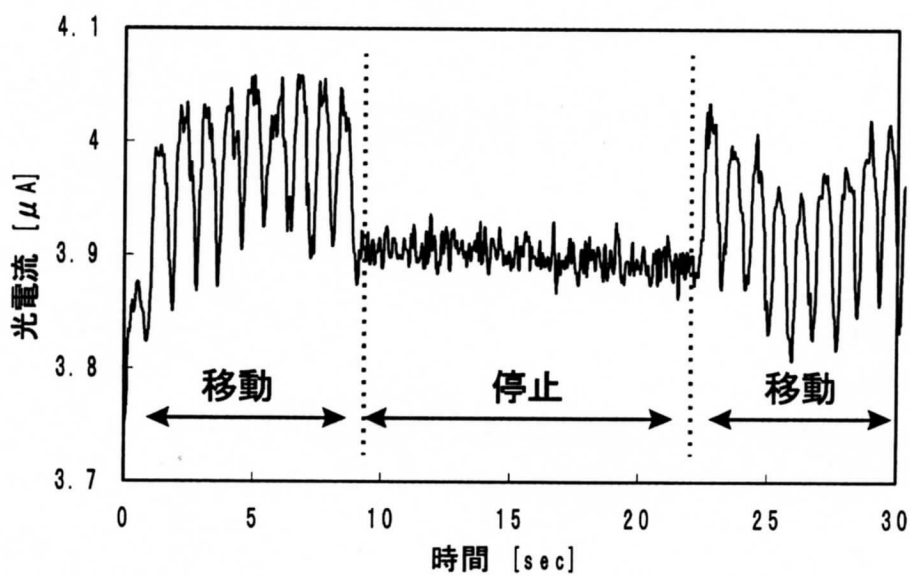


図 4.9: エンコーダ実験装置に組み込んだロボット用擬似指関節



(a) ガラス管インデックススケール



(a) 透過形フォトダイオード

図 4.10: エンコーダ信号：ロボット用擬似指関節

第5章 結言

本論文では、円筒面格子型ロータリーエンコーダの開発をおこなった。

開発にあたり、次のような流れで開発をおこなった。円筒面一周に渡り格子パターンを連続的に転写できる一回転整合円筒面露光装置を開発した(第2章)。次に開発した露光装置を用い、円筒面格子型ロータリーエンコーダの開発をおこなった(第3章)。製作した円筒面格子型ロータリーエンコーダを用いた擬似ロボット指関節を試作した(第4章)。

第2章では、一回転整合円筒面露光装置を開発し以下の知見を得た。

- $20\mu\text{m}$ ピッチの格子パターンを転写できた。
- 一回転整合のとれた格子パターンを円筒面に転写できた。
- 非同期露光法によって、同一マスクを用い異なるピッチの格子パターンを転写できた。スリット幅 $200[\mu\text{m}]$ 以下、転写する格子ピッチ $40[\mu\text{m}]$ 以上の場合、ずれ率 $5[\%]$ 以内であれば、転写パターンのコントラストは 0.7 以上得られることがわかった。

第3章では、二種類の円筒面格子型ロータリーエンコーダの開発し以下の知見を得た。
ガラス管インデックススケールタイプ

- $60[\mu\text{m}]$ ピッチのメインスケール軸 ($\phi 3[\text{mm}]$) に対し、 $140[\mu\text{m}]$ ピッチのガラス管インデックススケール (外径 $\phi 6[\text{mm}]$ 、内径 $\phi 4[\text{mm}]$) のとき、最も高いコントラスト ($43[\%]$) が得られた。(He-Ne レーザ使用)
- インデックススケールの格子ピッチが狭いと、メインスケール軸の移動した格子周期とは、異なる周期の信号が得られた。

透過型フォトダイオードタイプ

- $40[\mu\text{m}]$ ピッチのメインスケール軸 ($\phi 3[\text{mm}]$) に対し、 $40[\mu\text{m}]$ ピッチの透過形フォトダイオードを用いた場合、正味で $10[\%]$ のコントラストが得られた (He-Ne レーザ使用)。

- また、透過形フォトダイオード-メインスケール間の距離に対して周期的にコントラストの変化が生じることを確認した。。距離が0.65[mm] のとき最初のピークが現れ、その後 0.65[mm] 周期でコントラストが変化した

円筒面による形状効果によって、インデックススケール付近に生じる像は、メインスケール格子に対して拡大していると考えられる。そのため、形状を考慮にいたした設計方法を再検討する必要があることがわかった。

第4章では、ロボット用擬似指関節を試作した。

- ロボット用擬似指関節のフレームを設計した。
- 透過形フォトダイオードを光源と一体化した集積型エンコーダ信号検出器を製作し、エンコーダ信号を得た (正味のコントラスト 10[%])。
- ロボット用擬似指関節に二種類の円筒面格子型ロータリーエンコーダを組み込んだ。
- 製作したロボット用擬似指関節を動かし、それに対応するエンコーダ信号が得られた。

本研究では、大きさ 11[mm]、236[パルス/回転] 相当の円筒面格子型ロータリーエンコーダを製作できた (透過形フォトダイオードタイプ)。

参考文献

- [1] 片岡昭栄 他編：センサハンドブック, 培風館 (1986) 第5章
- [2] 羽根一博：ナノメートルからピコメートルへ-変位センサの高精度高性能化, 精密工学会誌, 61, 12(1995)1666
- [3] A. Teimei : Technology and Applications of Grating Inter-ferometers in High-precision Measurement, Prec. Eng., 14(1992)147
- [4] 伊澤 他：精密位置決め技術, 工業調査会, (1989) 第1章
- [5] Wen J.Li and CHih-Ming Ho : MEMS on Bulk Mechanical Contour Substrates, TRANSDUCERS97(1997)1431
- [6] Rebecca J. Jackman, James L. Wilbur and George M. Whitesides : Fabrication of Submicrometer Features on Curved Substrates by Microcontact Printing, SCIENCE, 269, 4(1995)664
- [7] 萩原隆志：平成10年度東北大学工学研究科機械電子工学専攻修士論文
- [8] 能川真一郎：平成11年度東北大学工学研究科機械電子工学専攻修士論文
- [9] LESZEK WRONKOWSKI : Fresnel images of a binary diffraction grating with open ratio less than 0.5, JOURNAL OF MODERN OPTICS, 1987, Vol.34, No.8, 1057-1065
- [10] R. M. Pettigrew : ANALYSIS OF GRATING IMAGING AND ITS APPLICATION TO DISPLACEMENT METROLOGY, SPIE, 136(1977)325
- [11] K.Hane and C.P.Grover : Imaging with rectangular transmission gratings, Journal of the Optical Society of America A, 1987, Vol.4, 706

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録しておりません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。