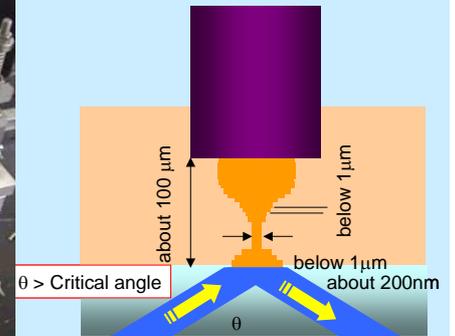
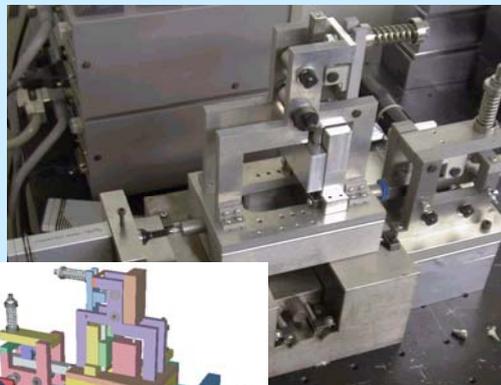
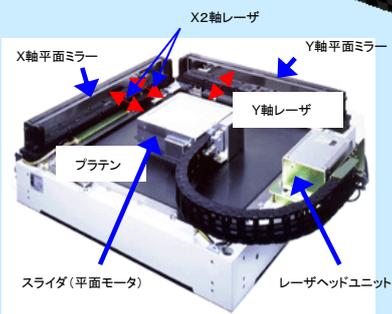
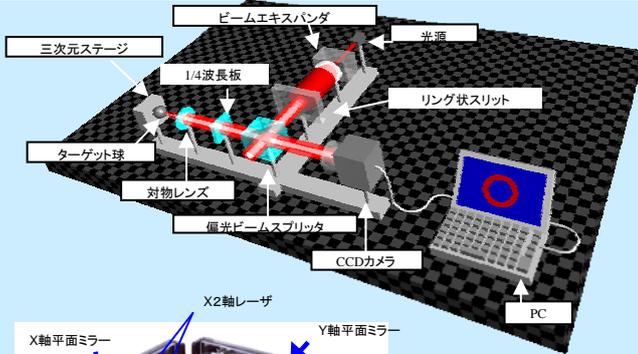
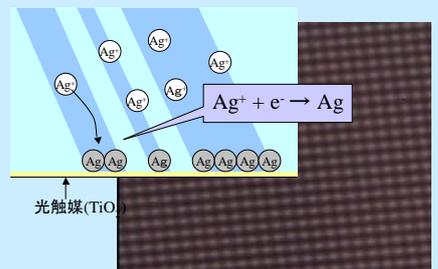
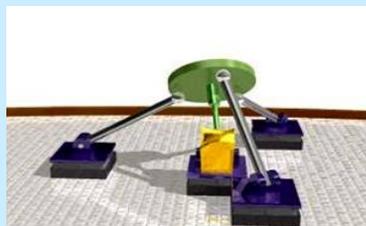
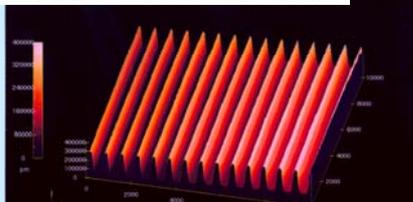
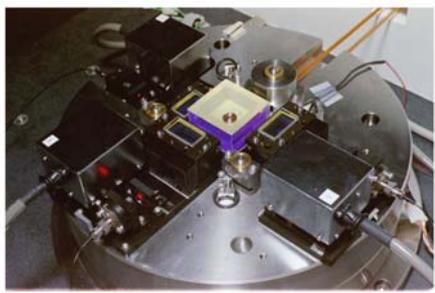
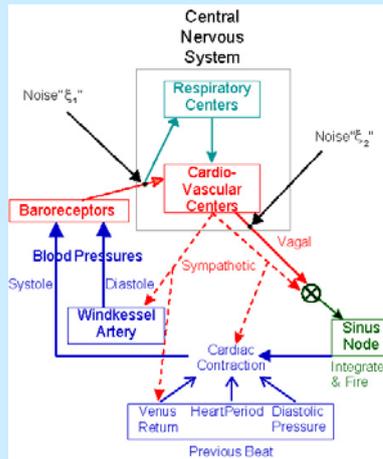
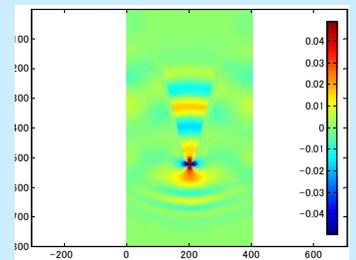
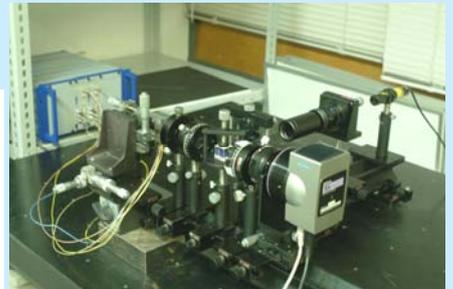
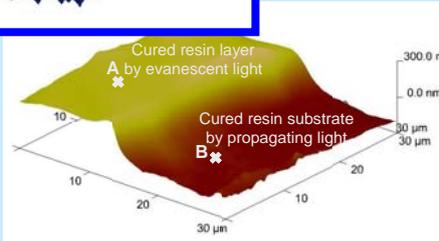


高増・高橋研究室(2005年4月)



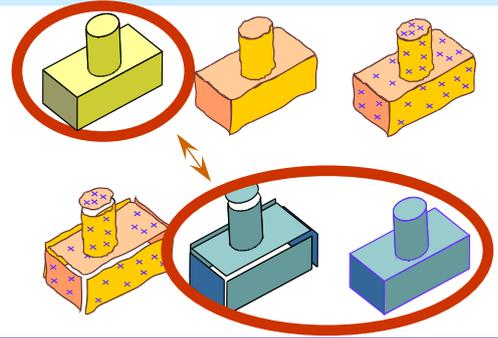
Evanescent light exposure



三次元計測における不確かさ推定の研究

研究の背景と目的

三次元計測では、三次元測定機本体の不確かさ以外にも、測定対象、測定環境、測定戦略などの影響により、不確かさが変わるため、不確かさを正確に推定することが難しい。本研究では、種々の条件における不確かさを理論的に推定する手法を研究する。



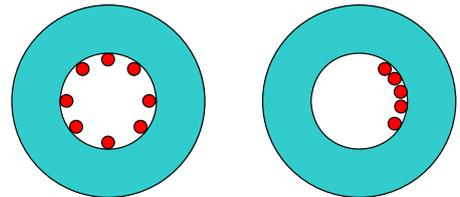
測定戦略、測定物の影響

測定戦略の影響:

同じ測定機、同じ測定物を測定した場合でも、測定戦略(測定点の数、測定点の位置)により、測定の不確かさは変化する。

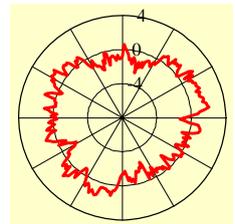
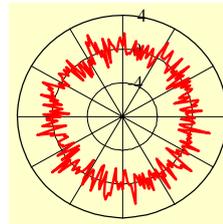
測定形状の影響:

測定物の持つ形状偏差がランダムの場合、比較的簡単にその影響を計算できる。しかし、形状偏差が相関を持つ場合には、相関を考慮しないと測定の不確かさが計算できない。



均等に8点で測定

一部を5点で測定



ランダムな形状偏差と相関のある形状偏差

誤差伝播による不確かさの推定

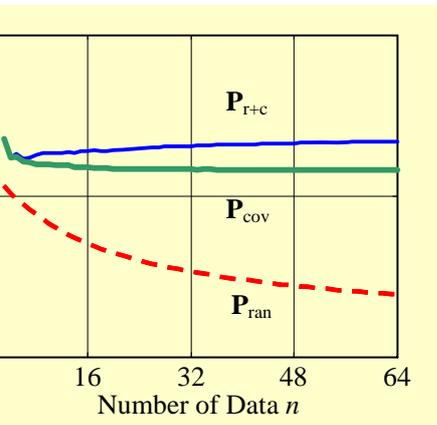
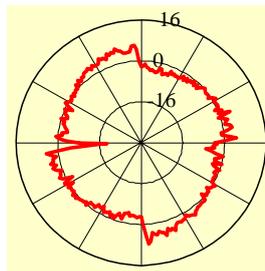
誤差伝播を利用して、測定戦略や測定物の影響を含めた不確かさを推定できる。式で、 \mathbf{A} はヤコビ行列で測定点の数や位置によって計算される。 \mathbf{S} は誤差行列で、CMMの測定の不確かさおよび測定物の形状偏差などで計算できる。

この計算結果として、 \mathbf{P} は測定結果の不確かさを表す。 \mathbf{P} を計算する場合に、測定偏差の相関を無視した場合、ランダムとして扱った場合では、推定された不確かさは異なる。図のような相関を持った形状の一部をデータ数 n で測定した場合の不確かさをグラフに示す。

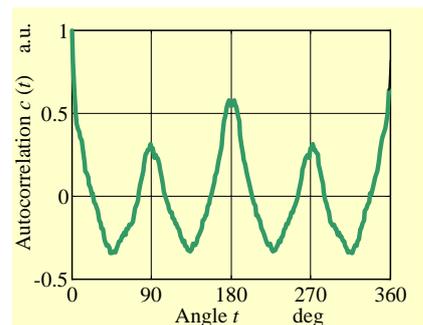
グラフで、 \mathbf{P}_{ran} がランダムの場合、 $\mathbf{P}_{\text{r+c}}$ が相関を無視した場合で、正しい不確かさの \mathbf{P}_{cov} と推定結果が異なっている。

$$\mathbf{C} = (\mathbf{A}'\mathbf{S}^{-1}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}'\mathbf{S}^{-1} = (\mathbf{A}'\mathbf{W}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}'\mathbf{W}$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{C}\mathbf{S}\mathbf{C}' = (\mathbf{A}'\mathbf{S}^{-1}\mathbf{A})^{-1} = (\mathbf{A}'\mathbf{W}\mathbf{A})^{-1}$$



測定点数と直径の不確かさの関係

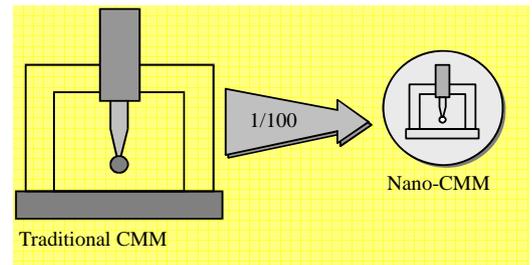


測定形状とその自己相関

Nano-CMMとNano-Probeの開発

研究の背景と目的

ナノメートルの分解能で、表面を測定する方法はAFM, STMなどが実用化されているが、機械部品の寸法や形状測定に利用されているような、ナノメートルで三次元形状測定ができる方法(Nano-CMM: Coordinate Measuring Machine with nanometer scale)の開発は遅れている。



従来のCMMのスペックを1/100にする

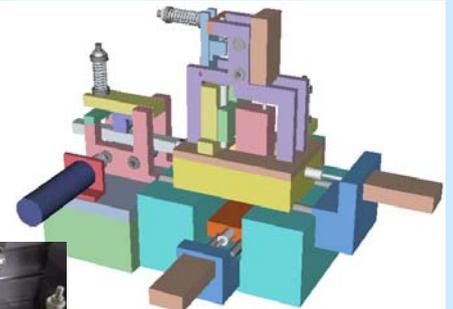
小型で単純なメカニズムを持つNano-CMM

主な仕様

- ・測定範囲: 10mm × 10mm × 10mm
- ・測定分解能: 10nm
- ・測定不確かさ: 50nm(目標)
- ・大きさ: 300mm × 300mm × 300mm

機構の構成

- ・単一材料(定熱膨張鋳鉄)
- ・三角溝によるすべり案内(過剰拘束+テフロンパット)
- ・摩擦駆動
- ・ガラススケール(10nm分解能)



Nano-CMMの構成とプロトタイプ

機械的接触と光検出によるNano-Probe

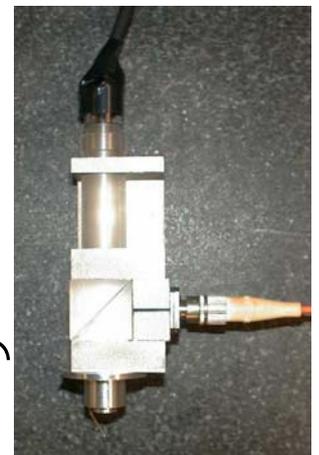
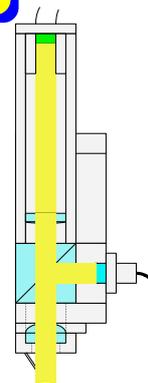
Nano-CMMの開発のキーとなるのは、プロービングシステムである。機械的接触を光で検出することでNano-Probeを実現する。

主な仕様

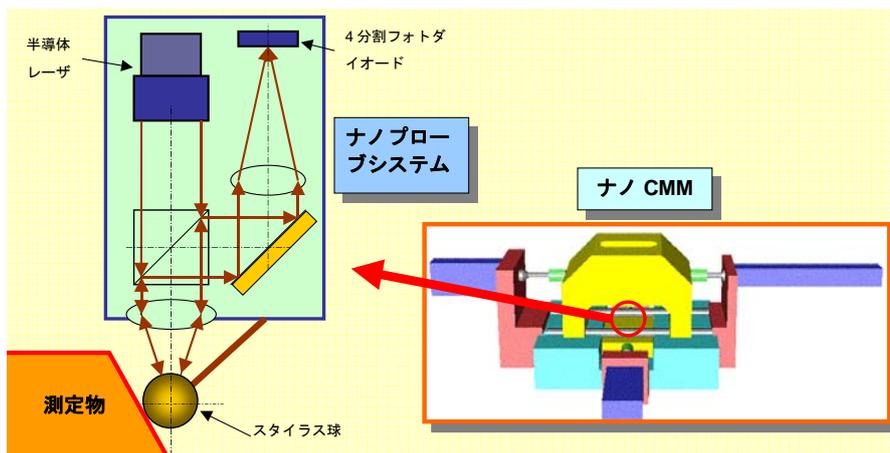
- ・測定不確かさ: 10nm(目標)
- ・大きさ: 30mm × 30mm × 100mm

構成

- ・ボール付きのカンチレバー(ボール径0.1mm)
- ・光検出機構によりボールの移動を2次的に検出



Nano-Probeの構成とプロトタイプ

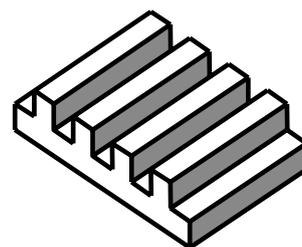


Nano-CMMとNano-Probeの構成

測長AFMを用いたナノメートル標準の確立に関する研究

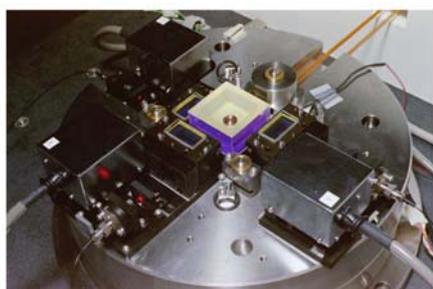
背景 ナノメートル標準の確立が急務

- ・ナノメートル計測における測定結果の高信頼性への要求
- ・ナノメートル計測用標準試料で各種装置を校正
- ・原子間力顕微鏡は面内、深さ方向の双方の測定に適した装置

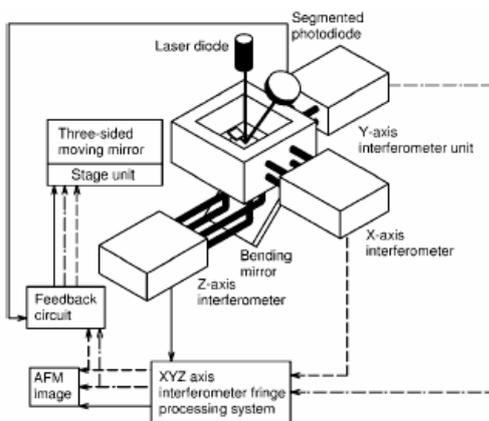


一次元グレーティング(回折格子)
: ナノメートル計測用標準試料の例

原理 高分解能レーザ干渉計を搭載した原子間力顕微鏡(測長AFM)



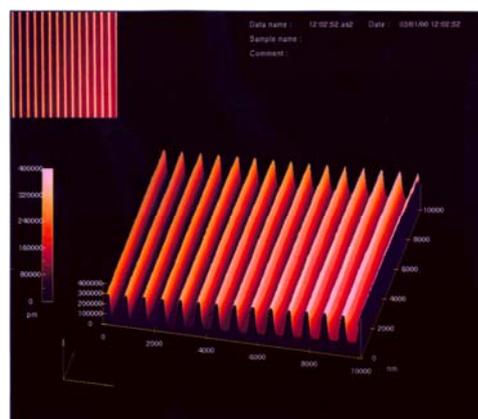
測長AFMのレーザ干渉計部



- ・干渉計信号でサーボ制御
- ・標準試料を
実時間校正
- ・長さ標準に
トレーサブル

測長AFMの原理図

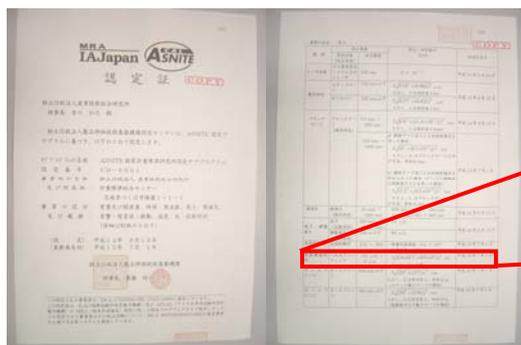
実験 測定・不確かさ評価・品質システムによりナノメートル標準が確立



一次元グレーティングの測長AFM像

一次元グレーティングのピッチ測定における主な不確かさ

不確かさ要因	標準不確かさ
干渉測長の非線形性	0.115 nm
試料の均一性	0.033 nm
干渉計の分解能	0.023 nm
測定の繰返し性	0.021 nm
レーザの周波数安定性	0.020 nm
アッベ誤差	0.011 nm
光路長変化	0.002 nm
アライメント時のコサイン誤差	1.8E-5 nm



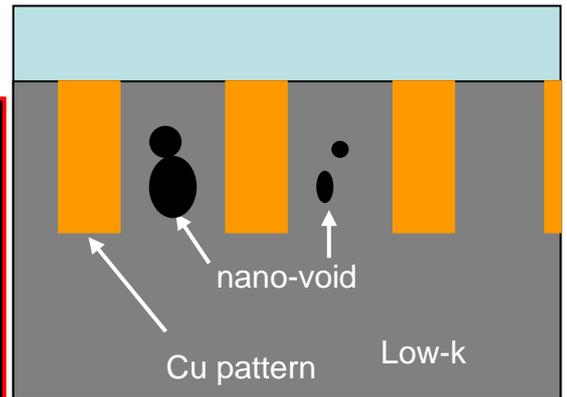
表面微細形状	一次元グレーティング	0.2 μm ~ 8 μm	$2\sqrt{(1.6 \times 10^{-3})^2 + (9.9 \times 10^{-6} L)^2}$ nm (L nm: ピッチ値)	平成15年7月1日
--------	------------	---------------	--	-----------

品質システムの構築: 認定証

近接場光学顕微法によるlow-k内部欠陥検査

背景

次世代の半導体デバイスを開発するためには寸法の微細化だけでなく構造や材料を改善することが必要である。新材料の一つである低誘電率層間絶縁膜 (low-k) を配線構造に導入するには様々な問題がある。更なる低誘電率化を進めるためにlow-kに対してポーラス (空孔) 構造を持たせてやる手法が一般的となっているが、ポーラス化による機械強度の低下やポーラス構造の検査・評価が困難なことが懸念される。low-k中の欠陥 (nano-void) は断面をSEMで観察することによって確認 (右図) されているが、非破壊の光学的な検査手法は未だない。

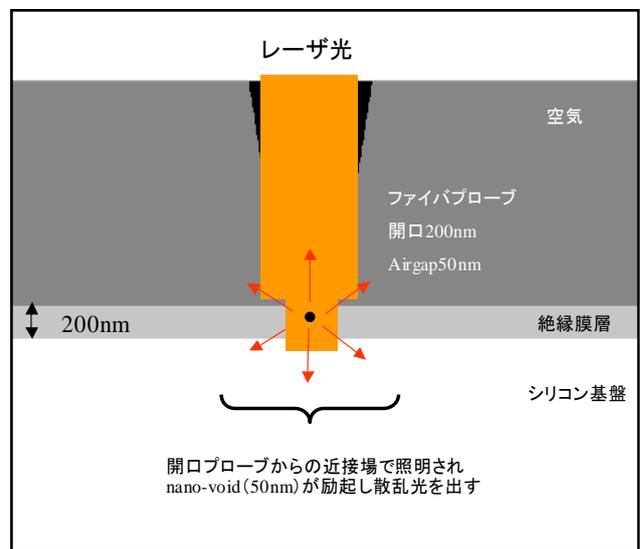


原理

微小開口ファイバプローブを走査し半導体の配線構造中のlow-k内部微小欠陥を検査

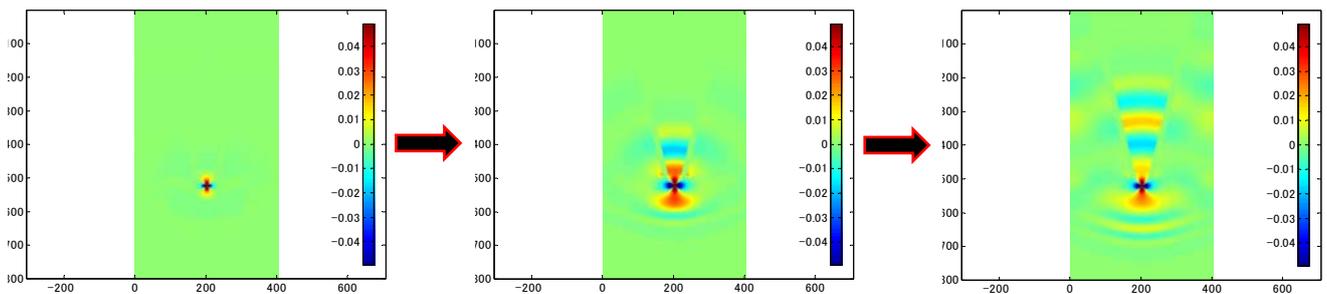
主な特徴

- ◆非破壊検査
- ◆光学応答の取得
- ◆近接場光学顕微法による高分解能観察
- ◆微小開口プローブ先端からの染み出し電場 (開口程度の大きさ) による層内部への限定的照明
- ◆微小開口プローブによる欠陥からの散乱光の限定的集光
- ◆プローブ走査による内部構造の可視化



シミュレーション

i-c modeファイバプローブモデルのFDTD法による2次元電場解析



nano-void (50nm) の近接場照明確認時 (散乱開始時) の散乱電場分布イメージ

1周期後の散乱電場分布イメージ
散乱電場が開口プローブ内に進入

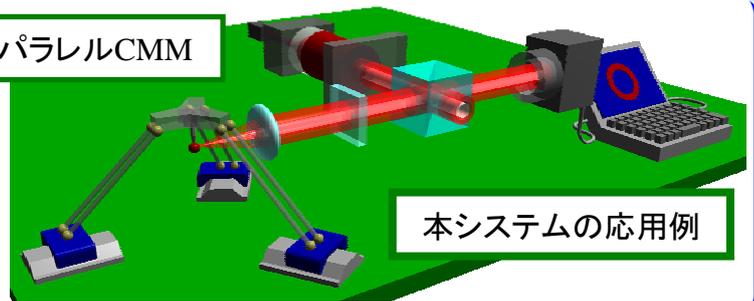
2周期後の散乱電場分布イメージ

リング状スリット光を用いた三次元変位測定

背景

複雑な三次元メカニズムのキャリブレーションを行う為には手先座標の三次元変位(位置)を高精度かつ柔軟に測定することが必要である。

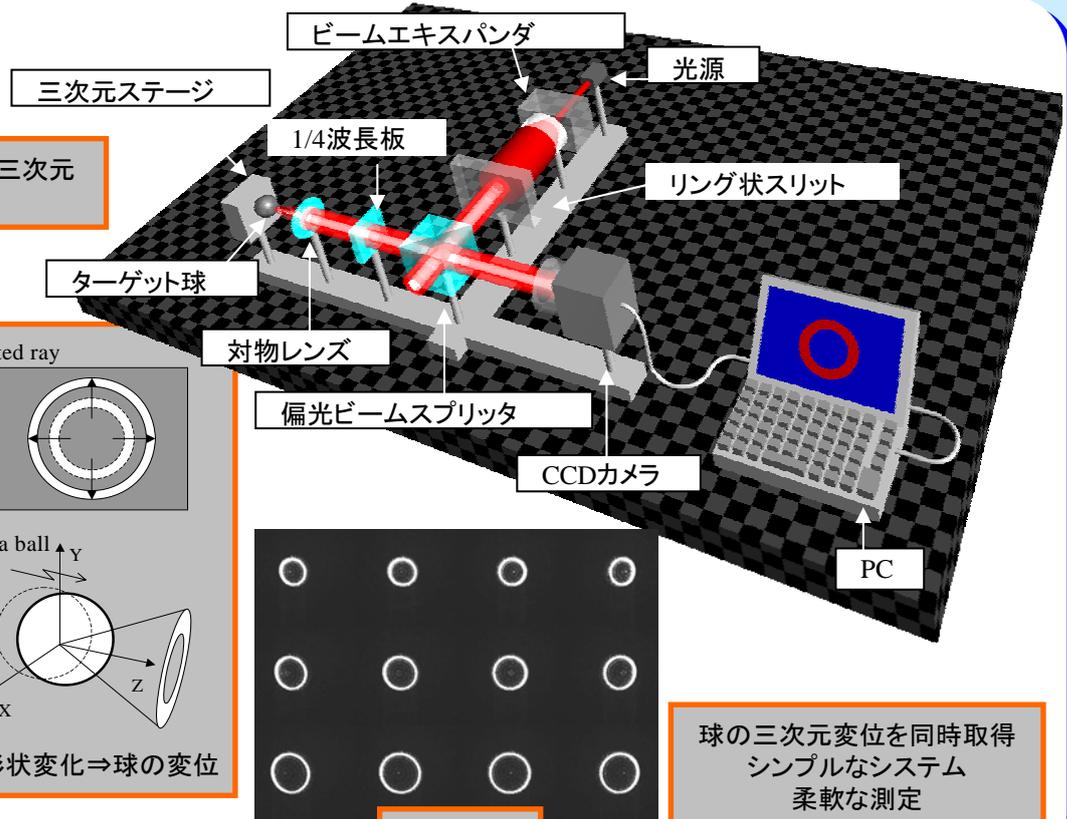
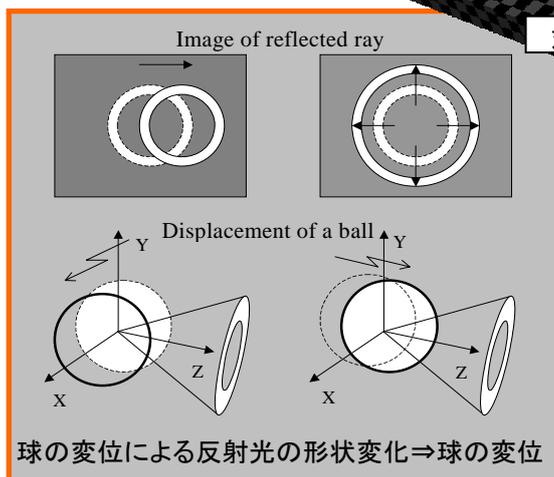
パラレルCMM



本システムの応用例

原理

測定対象に設置した球の三次元変位を測定する



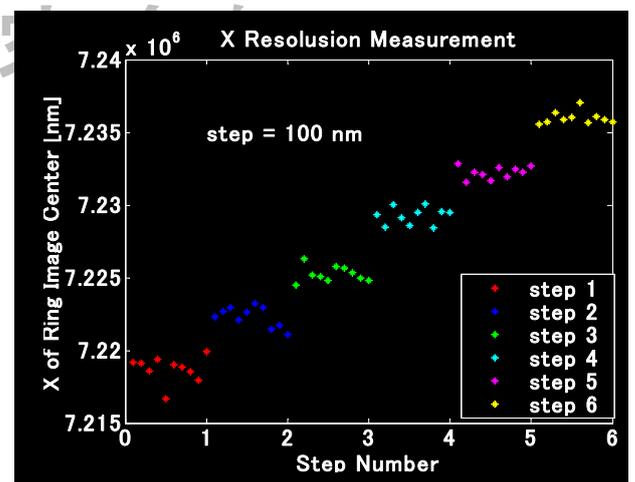
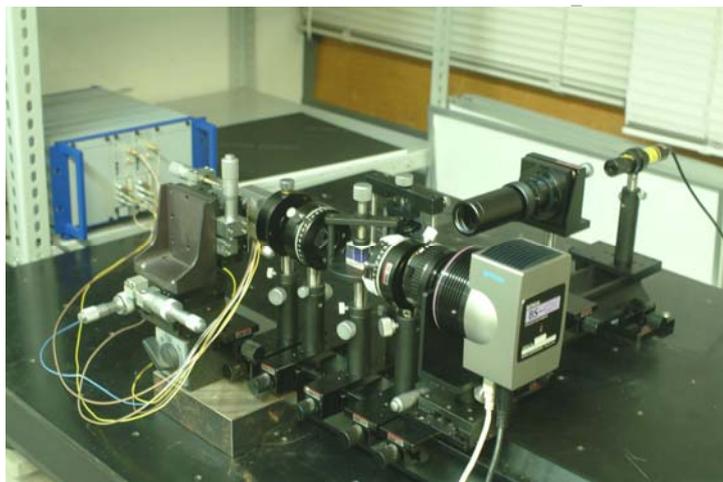
取得画像

球の三次元変位を同時取得
シンプルなシステム
柔軟な測定

実験

実験装置

分解能測定実験(100nm分解能)



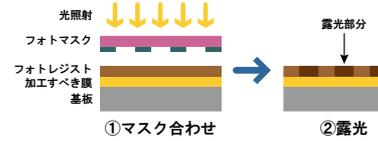
やわらかい薄膜の3次元形状計測

背景

チップの微細化に伴う、露光過程における焦点深度の微小化

レジスト表面に凹凸がパターンニングに影響
現在の最大凹凸差はおよそ50nm

xyz方向で数nmの精度での
レジストの形状測定が必要



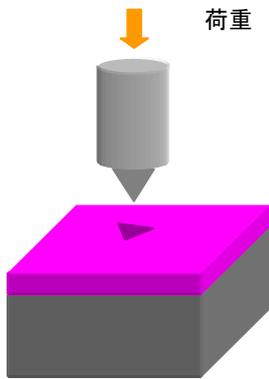
AFMなどの機械接触によるレジスト形状の変形などを評価する



圧子で対象を押し込み、荷重とその変位を
評価するナノインデンテーション法

原理

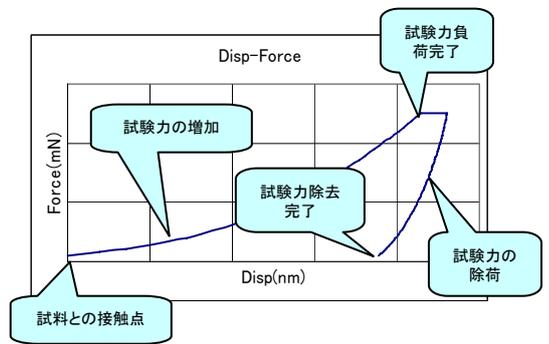
ナノインデンテーション法



ダイヤモンド圧子に微小な荷重を加えて試料に押し込みながら、圧子の侵入量を測定し、得られた荷重-侵入量の関係から試料の弾塑性特性などを評価する材料測定法

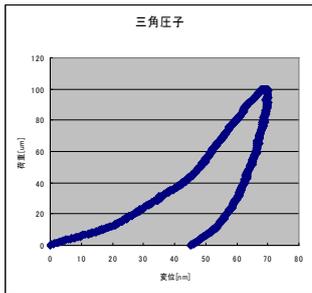
薄膜の硬さなどが測定でき、弾性率や相転移に関する情報も得られる

レジストの物性情報を得られる



実験

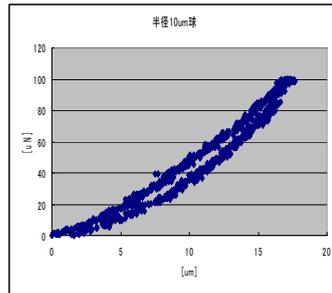
レジスト表面のナノインデンテーション結果



三角錐圧子

最大押込み量: 70nm

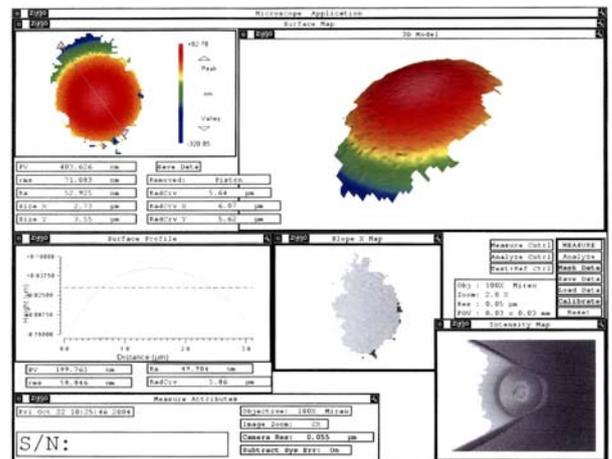
複合ヤング率: 32.6GPa



球状圧子

最大押込み量: 約17nm

複合ヤング率: 6.0GPa



AFMカンチレバーに付けたB₂Si化合物の形状

複合ヤング率E*は以下の式

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1-\nu'^2)}{E'}$$

(E, E'は試料, 圧子のヤング率, ν, ν'は試料, 圧子のポアソン比)

半径10umの球を20nm近く押し込んで、
ほとんど塑性変形していないこと分かる

Investigation on Multifractal Dynamics of Human Heartbeat by Physiological Cardiovascular Model

1. Introduction

Multifractality of healthy human heartbeat has attracted interest, because autonomic pathologies with certain diseases are known to be associated with altered heart rate multifractality. The results of recent studies on the heart rate multifractality include : Heart rate of healthy subjects who is administered beta-blocker has multifractality with the Hurst exponent of 0.1, while that of subjects who suffer from congestive heart failure (CHF) or is administered vagal blocker has monofractality with the Hurst exponent of 0.2. Further, heart rate of patients who suffer from primary autonomic failure (PAF) has multifractality associate with the Hurst exponent of 0.23.

To investigate intrinsic as well as complex cardiovascular mechanisms responsible for the multifractality and its loss in, e.g. diseased conditions, further experimental investigations in humans might shed light. But human physiological experiments are associated with problems such as the limited length of data and intrinsic nonstationarity. Instead, here we develop a physiologically plausible structural model. We then conduct, by using this model, some "virtual" physiology experiments searching for the origin(s) of multifractal heart rate dynamics, and also show that the virtual disease would lead to changes in heart rate multifractality observed in the actual patients.

2. Model and analysis

The model (Fig.1) is a system of delay-differential equations and a modification of one initially proposed by Seidel and Herzog to study deterministic nonlinear cardiovascular dynamics. It consists of i) neural afferents from baroreceptors to the central nervous system, ii) autonomic (sympathetic and vagal) neural efferents from the brain stem cardiovascular centers, iii) mechanical signal transductions within the cardiovascular system finally setting the arterial blood pressures, and iv) the effect of the baroreceptor afferents on the instantaneous phase of respiratory oscillator. We set the balance between sympathetic and parasympathetic activities influencing the phase velocity of cardiac pacemaker so that responses in mean heart rate of the model during selective or simultaneous blockades of the two branches of the autonomic nervous system follow what are observed in actual physiological settings. Then, the model was driven by two fractional Brownian motion added, at each heartbeat, to the baroreceptor afferent activity (ξ_1 ; global Hurst exponent is 0.5) and the autonomic neural efferents (ξ_2 ; global Hurst exponent is 0.1).

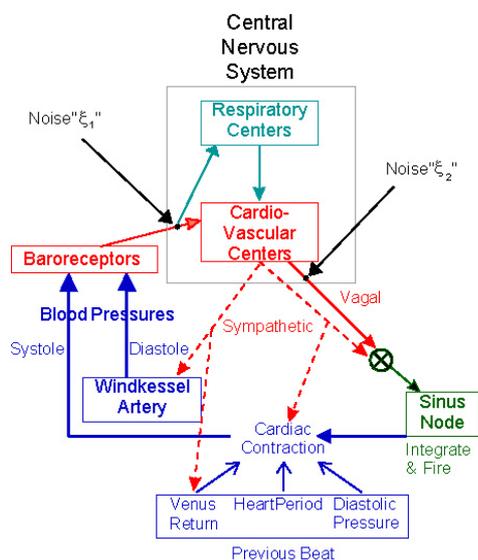


Fig.1 Schematic diagram of cardio-vascular model

In this study, the gains of i) vagal influence on the heart, ii) sympathetic influence on the heart, and iii) sympathetic influence on the vascular smooth muscle were tuned to simulate data with pharmacological blockades and/or autonomic pathologies.

A set of delay-differential equations was numerically integrated by a Runge-Kutta method of fourth order with a constant step size (5ms). In all simulations, we analyzed 20 sets of 50,000 heartbeat intervals as follows.

In this paper, the multifractal index and global Hurst exponent were calculated. For the multifractal index, $\tau(q)$ was calculated by wavelet transform modulus maxima method and its averaged curvature was used. The global Hurst exponent was calculated by detrended fluctuation analysis.

3. Results and Discussion

The results for the multifractal indices and global Hurst exponent are shown in Fig.2. Negative values in averaged curvature indicate multifractality. It has been shown that the actual data with atropine and for CHF show smaller multifractality while those for PAF show almost comparable or even greater multifractality than the heart rate for healthy individuals. The results of statistical analysis for the simulated data generally have such tendencies. The model has almost the same level of multifractal index and global Hurst exponent as the actual healthy, pathological, and pharmacologically nerve-blocked data.

However, there are still some differences from the reality. For example, simulated data mimicking PAF show greater multifractality and smaller global Hurst exponent compared with the results for the actual data. The actual PAF data are characterized by the presence of abrupt changes (burst and/or step-like changes) that might lead to greater multifractality and larger global Hurst exponent. This seems to be caused by the loss of sympathetic influence on the vascular smooth muscles, resulting in instability of blood pressure and venous return responses. Although our model also has a mechanism with which the sympathetic influence on the vascular smooth muscles changes blood pressure and venous return, the effect is considered to be smaller compared to that in the actual PAF. This should be solved in the future research.

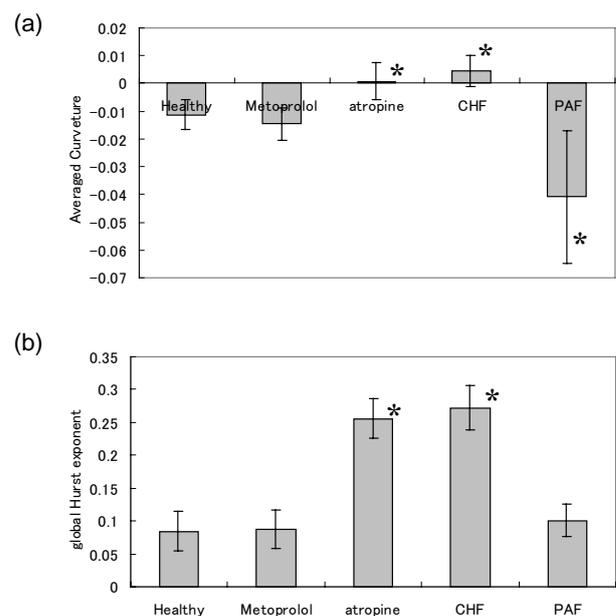


Fig2 (a): Averaged curvatures and (b): global Hurst exponent of the simulation. *indicates there is a statistical difference between the result of healthy condition ($P < 0.05$).

呼吸性洞性不整脈の抽出法を用いた生体負荷の評価

目的

- 従来より高精度に自律神経活動を評価する手法を提案する
- 提案手法を用いて作業負荷下における作業者の精神的負荷(MWL)を評価する

主観評価: アンケート(NASA-TLXなど)

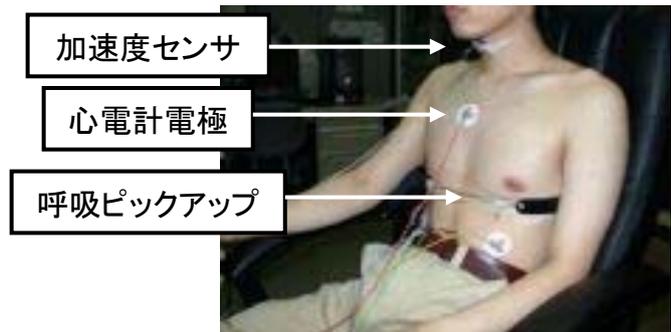
客観評価: 作業のパフォーマンス(正答率や応答時間)

生理評価: 脳波, 汗, 心拍変動などを計測

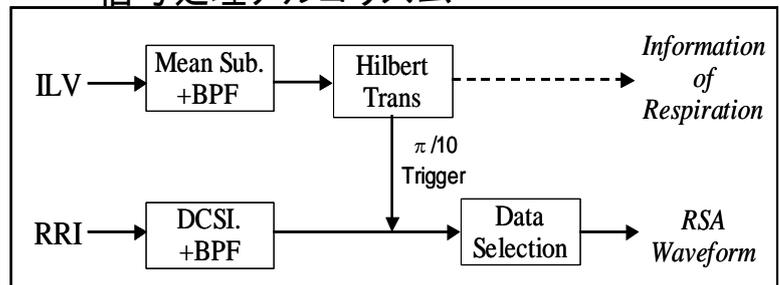
☆本研究では, 心電計からの心拍変動と呼吸信号からRSA (Respiratory Sinus Arrhythmia) という生理現象を抽出し, 自律神経活動の評価を行う

実験

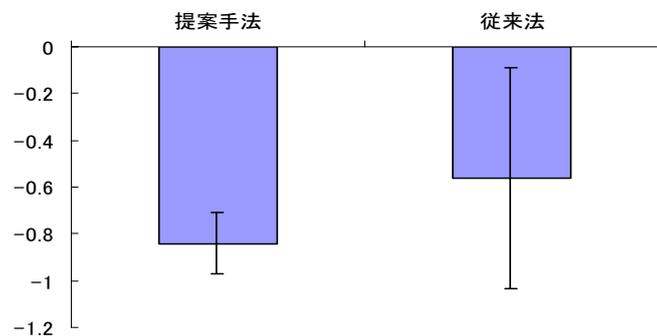
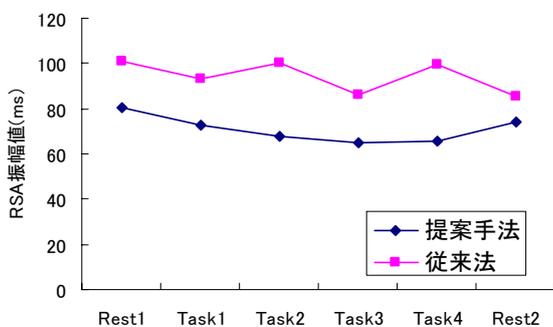
- 成人男子7名を被験者に, 暗算負荷を課し, 心拍・呼吸データを測定
- 暗算負荷の1セッションは5分
- 段階的に負荷を増大
- 心電計のデータを1kHzで, 呼吸ピックアップ・加速度センサのデータを100Hzでサンプリング
- 主観的評価指標としてNASA-TLXを2回行う
- 客観評価として正答率を算出
- 嚙下時の呼吸を除去



信号処理アルゴリズム



結論



相関係数の比較

負荷レベルとRSAの振幅値の相関係数(平均)

提案手法: -0.84(標準偏差0.14)

従来法: -0.56(標準偏差0.48)

従来法よりも提案手法の方が負荷レベルに追従する

平面リニアモータを用いたXYテーブルの高精度化

背景

従来から使われているXYテーブルにおいて、姿勢精度を含めた多自由度の測定と補正が行われるが、統一的に評価する方法はまだ確立していない

平面リニアモータを用いたXYテーブルの精密位置決め精度に関する要求

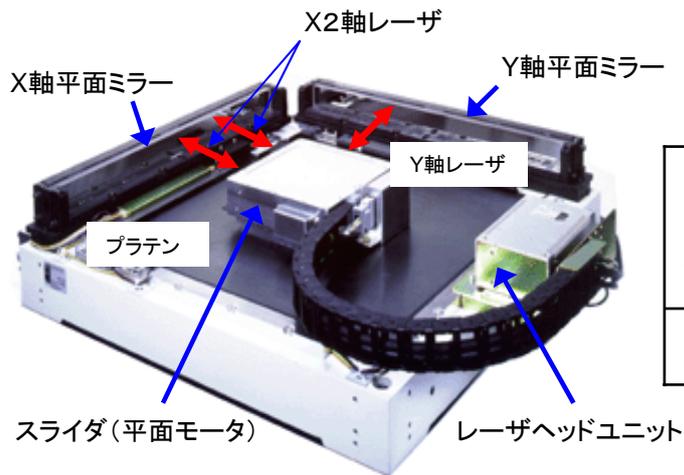
- ◆ 並進(X軸)、並進(Y軸)、ヨーイング
- ◆ ピッチング(X軸)、ピッチング(Y軸)
- ◆ 干渉用反射ミラーの形状精度(うねり)

本研究では、平面リニアモータを用いたXYテーブルの精度を評価し、校正する

原理

可動部スライダは2組(4個)のリニアモータをX方向とY方向に点対称となるように設置し、プラテン上自由移動できるXYテーブルを構成する

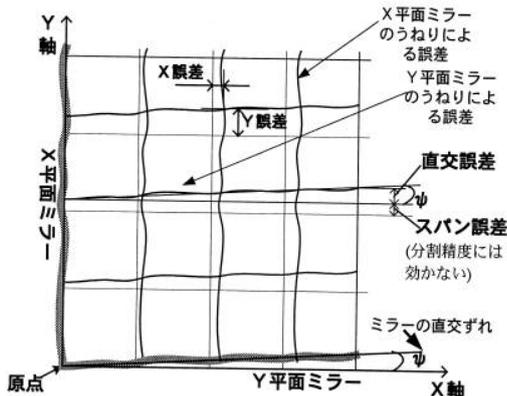
スライダの上部に3軸半導体レーザーを搭載し、XY軸のミラーに反射することで、XYθ非干渉制御する



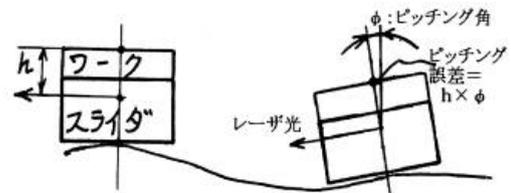
指令分解能	分割精度
0.1 μm	±1 μm

3相ソーヤ型平面リニアモータによるXYテーブルの構成

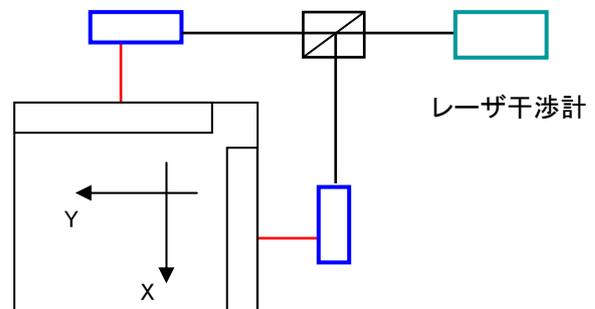
実験



ミラーの平面度による誤差(うねり)



プラテンの平面度による誤差(ピッチング)



従来では、うねりは平面度干渉計、ピッチングはオートコリメータやレーザー干渉計などで測定できるが、本研究では、運動精度と形状偏差の分離手法を検討し、同時に自動補正できる方法を提案する

今後の目標

- 上述平面モータの基本的な評価
- アーティファクトを利用した精度評価手法の開発
- 平面リニアモータを用いたXYテーブルの評価手法の確立

小型平面リニアモータを用いた移動トレイシステムの開発

背景

セル生産を想定した作業を支援するために、作業者に手を差し伸べるシステム(AWB: Attentive Workbench)を提案する

AWBの構成

- ◆ 動作認識ビジョンシステム
- ◆ 情報提示プロジェクタ
- ◆ 作業者認識センサ
- ◆ 移動トレイシステム

運搬作業
組立作業
知的な作業

平面リニアモータによる方法を提案し、開発する

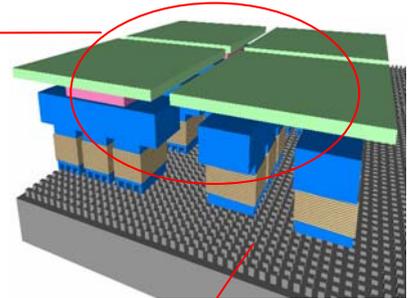
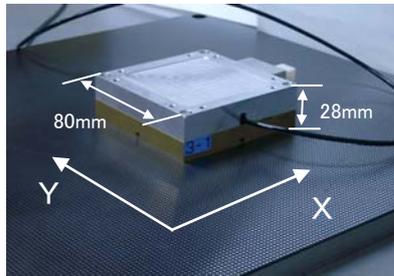
原理

平面モータとは:

複数の1次元モータを同一平面上に配置することにより、可動部が平面上を2次元的な動作できるステージ

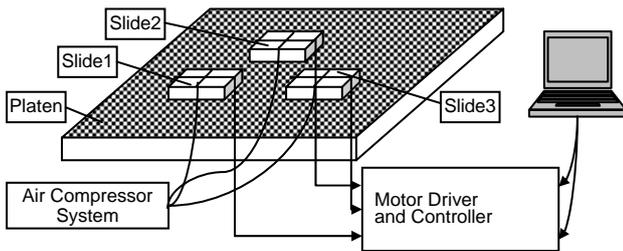
3相ソーマ型平面リニアモータ

可動部スライダは3相ステッピングモータを4個用いて、X軸Y軸用に直交させて、点対称となるように設置している。外観寸法はL80×W80×H28mmである。



固定部プラテンは平板状純鉄材料で先端に小歯突起が格子状分布している。歯ピッチ2×2mm。

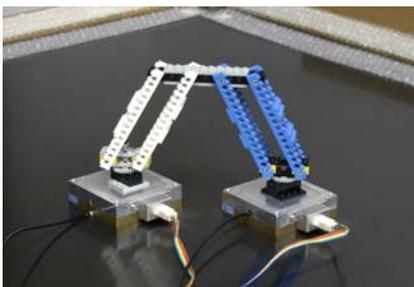
実験



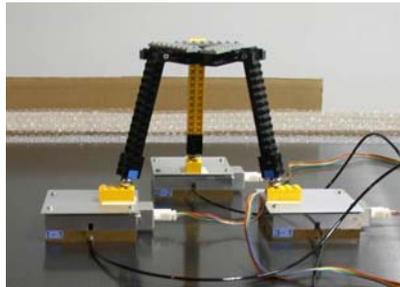
モータシステムの構成

モータ特性の評価

項目	仕様
スライダ	2軸(XY)3相ハイブリッドパルスリニアモータ
ベース	格子状プラテン一体構造(2mmピッチ)
給気圧	0.2Mpa(浮上量 19μm)
スライダ部重量	750g
スライダ部寸法	L80×W80×H28 (mm)
励磁電流	2A
最大推力	12N 以上
最大速度	0.8m/s
最大自起動周波数	2800pps
負荷荷重	3kg
指令分解能	41.7μm(相電流1周期48パルス)
位置決め精度	50μm
繰り返し精度	10μm



2つのトレイによるXYZ方向およびZ軸周りの回転の4つの自由度を持つ機構



3つのトレイによるXYZ方向の移動およびXYZ軸周りの回転の6自由度を持つ機構

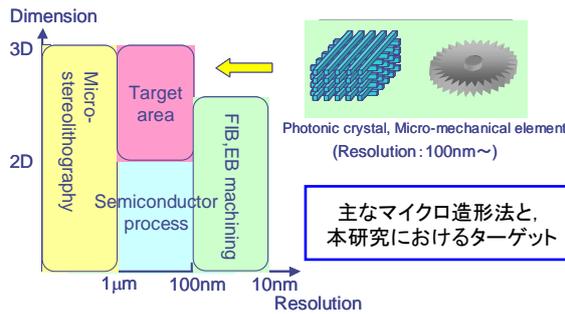
今後の展望

- 可動部の電線と空気管を除去する方法の検討
- 協調動作できる次世代作業テーブルの実現を図る



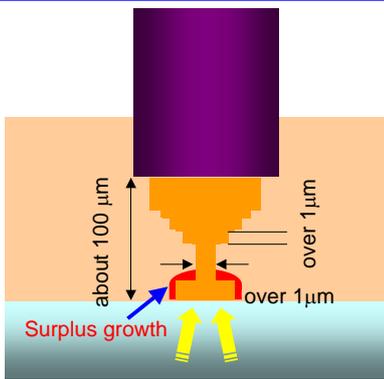
エバネッセント光を利用したナノ光造形

背景及び目的



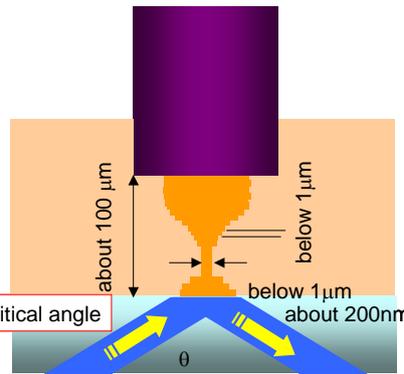
微小光学素子などサブマイクロオーダーの分解能を持つ三次元造形法確立への需要が高まっているなか、柔軟性及びスループットの高いマイクロ光造形法にエバネッセント光を応用させることにより、要求分解能を持つナノ光造形法の確立を目指す。

エバネッセント露光のメリット



Propagating light exposure

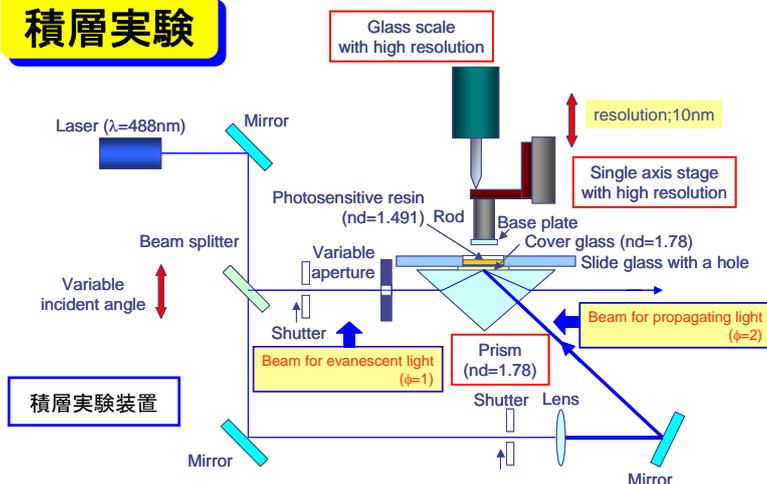
従来の伝搬光露光においては、効果樹脂中を透過してきた光エネルギーにより余剰な液体樹脂まで硬化してしまう余剰硬化 (surplus growth) が発生する。



Evanescent light exposure

エバネッセント光は界面近傍に局在するエネルギーであるため透過エネルギーが発生せず、余剰硬化が起こらない。そのため、従来法よりも高分解能の造形が期待される。

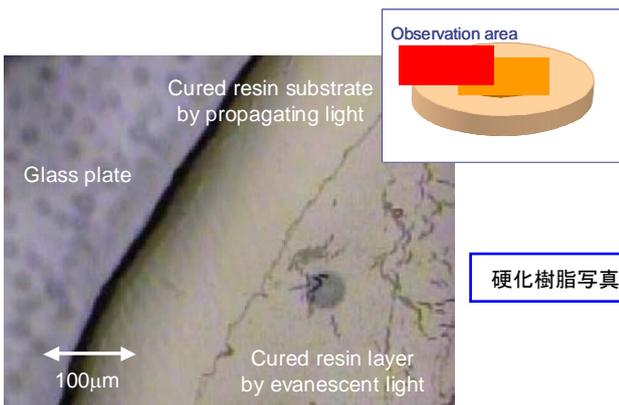
積層実験



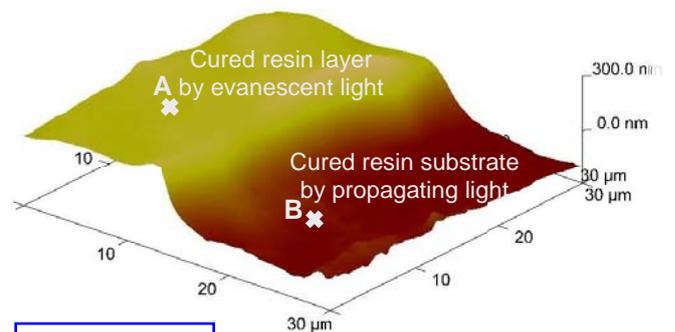
積層実験装置

左図のような、伝搬光およびエバネッセント光による造形が可能な実験装置を作成し、3次元造形への第一歩としてエバネッセント露光による単純な積層実験を行った。

下の結果の通り、サブマイクロメートルオーダーのエバネッセント露光による硬化樹脂積層が現在確認されており、積層を繰り返すことにより具体的な造形を現在行っている。



硬化樹脂写真



硬化樹脂AFM像

エバネッセント露光による面内構造造形

背景

微小光学素子、微小MEMSなどに要求される、サブマイクロメートルオーダーの三次元造形法への需要

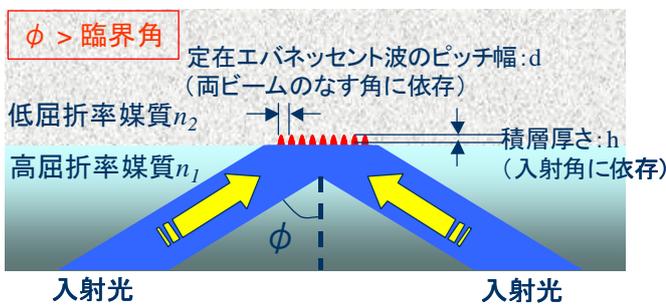
柔軟な三次元造形が可能であるマイクロ光造形法の露光エネルギーとして、エバネッセント光を利用することにより、サブマイクロメートルオーダーの三次元光造形法確立を目指す。

本研究では特に一層の造形に着目し、面内において変調を与えたエバネッセント光強分布による面内の樹脂硬化形状の制御を行う。

原理

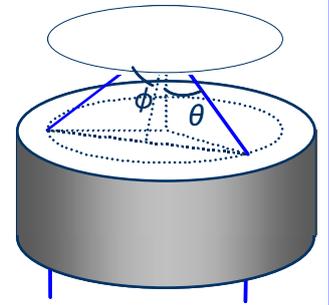
エバネッセント光を利用した微細周期構造の造形に向けて

対向ビームを入射し干渉させることで、横方向に微細な周期構造をもつエバネッセント場を**定在エバネッセント波**と呼ぶ。

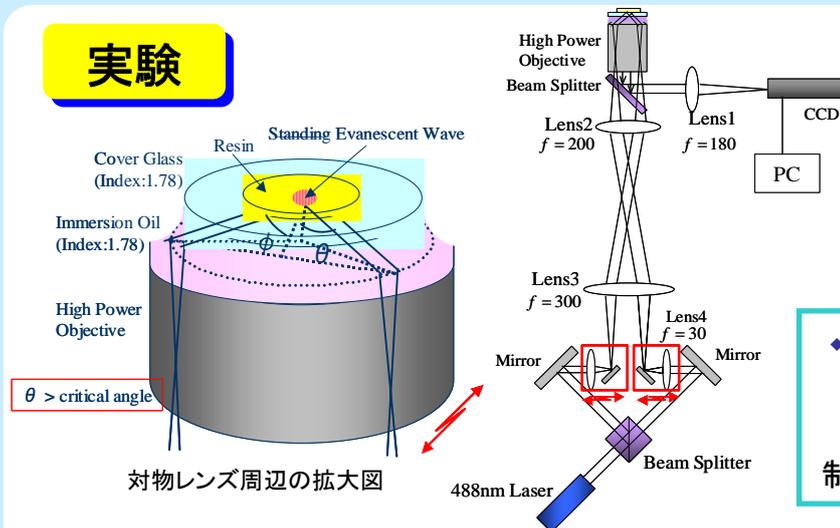


θ と ϕ をそれぞれ変化させることで、**積層厚さとピッチ幅の独立制御が可能**

$$d = \lambda / 2n_1 \sin \phi$$

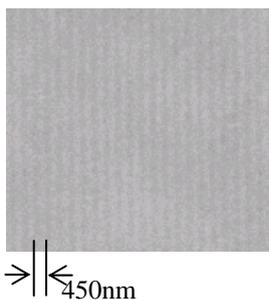


実験

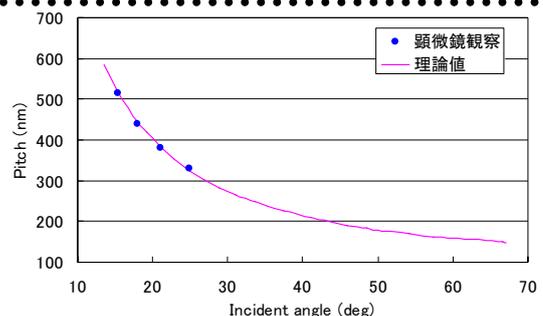


高開口数対物レンズ : NA1.78
入射角 θ は θ_c (臨界角) $\sim 68^\circ$ で変化可能
定在波ピッチ幅 150nm \sim
両ビームと対物レンズの位置関係を変化させることで、樹脂下面の照射領域を
ことなく θ , ϕ を変えることが可能

- ◆定在エバネッセント波による造形実験
 - ・硬化中樹脂の顕微鏡観察
 - ・顕微鏡観察に基づいたピッチ幅の制御性の確認



実験条件
 $\theta = 67^\circ$
 $\phi = 18^\circ$
樹脂屈折率 1.5
出力 $85\text{mW}/\text{cm}^2$
照射時間 15分



サブミクロンオーダーの周期構造の樹脂の硬化が確認できた。

硬化中の樹脂を顕微鏡により確認。
ピッチ幅に関する制御性を実験的に確認した。

光触媒を利用した微小構造創製

背景

◆マイクロ構造体(微小光学素子, MEMS...)の創製にはサブマイクロメートルオーダーの加工分解能が必要

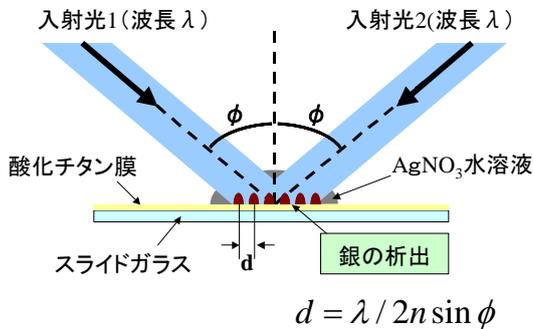
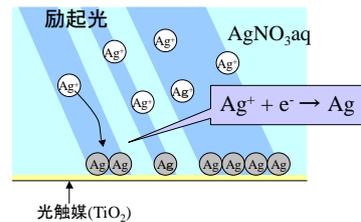
光触媒を利用した新しい微細加工技術

- ◆ サブマイクロメートルオーダーの加工分解能
- ◆ 金属による微小構造が創製可能
- ◆ 加工形状の柔軟な制御

原理

酸化チタン光触媒による銀析出反応

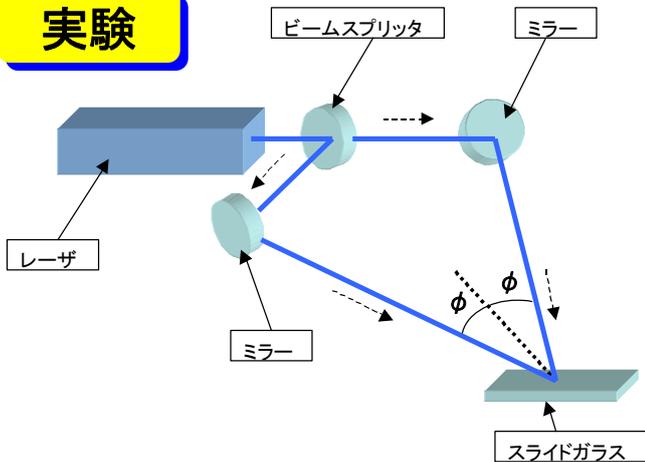
TiO₂の持つ還元力によって硝酸銀水溶液から金属銀が析出する



- ◆ 周期的定在波の強度分布(数100nmピッチ)を用いて, 周期的銀構造を創製可能
- ◆ ピッチ幅は入射角等制御により100nm以下まで微細化可能
- ◆ 定在波は伝搬光とエバネッセント光の2通りにより生成

実験

伝搬光を用いた微細構造創製実験



基板の上に酸化チタンコーティング剤を塗布

↓
硝酸銀水溶液を滴下

↓
露光



φ = 9.5°
露光時間5秒

光源: He-Cdレーザ (波長325nm, 10mW, 径1.0mm)
硝酸銀水溶液: 0.1mol/l, 屈折率1.335
酸化チタン: Folium (コーティング剤, 川崎重工製)

伝搬光定在波による微細周期構造



エバネッセント定在波による微細周期構造
(φ = 3° 露光時間10秒)

今後の展望

- ◆ SEM・AFMによる構造の定量的解析
- ◆ より微細な(100nm以下)の周期構造の創製
- ◆ 任意の微小形状の創製法の検討
- ◆ 積層等による三次元化の検討

Takamasu-Takahashi Lab.



Intelligent Measurement Lab.
Department of Precision Engineering
The University of Tokyo

www: <http://www.nano.pe.u-tokyo.ac.jp/>

Takamasu-Takahashi Laboratory
Department of Precision Engineering
The University of Tokyo

Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN
Phone: +81-3-5841-6450
Fax: +81-3-5841-8554
E-mail: takamasu@pe.u-tokyo.ac.jp
takahashi@nano.pe.u-tokyo.ac.jp