

セル内三次元測距に関する研究

(先行基礎工学研究に関する共同研究報告書)

2003年4月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所
茨 城 大 学

本資料の全部または一部を複写・複製・転写する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122(代表)
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
茨城大学 (Ibaraki University)
2003

セル内三次元測距に関する研究
(先行基礎工学研究に関する共同研究報告書)

白石昌武*, 青島伸一*
青瀬晋一**, 竹内正行**

要　　旨

セル内に設置されている機器、塔槽類、配管等は、使用目的の変更や経年劣化によって更新される。設置場所が大型セルの場合、交換、据付を遠隔操作で行うこととなり、したがって現場での位置合わせが困難である。従来からこれの自動位置決め法が強く要求されている。そのためには、まずこれらの機器や配管の状態(劣化や亀裂など)を診断する必要がある。つまり、亀裂の状態、腐食の状態、劣化の程度等を何らかの方法で検出かつ判断しなければ、機器交換の時期を知ることはできない。そこで本研究では機器や配管等の劣化状態を診断するため、レーザ光とカメラを用いたコントラスト法を提案し、キズの検出および劣化のオンライン診断法を構築した。

次に機器交換を行うための情報取得を行うため、絶対基準位置を設けかつ交換用マニピュレータを含めた全体の位置を把握することを目的とした粗動計測法を提案した。そして粗動で計測できない陰影部分に対しては、移動計測可能な装置をマニピュレータ上に搭載することで局所的な計測が行える微動計測法を提案し、それによる情報取得を行った。これら二つの計測系で相互の情報補完を行い、得られたデータを適宜処理することにより機器交換時の位置決め制御の情報提供を行う新しい手法の提案を行った。

そして最後に今後の展開として、VR(バーチャルリアリティー)によるマニピュレータ操作の可能性について、途中経過を述べる。

* 茨城大学

** 環境保全・研究開発センター 先進リサイクル研究開発部 機器開発 Gr

Research on in-situ measurement technique of three-dimensional distance
(Document on Collaborative Study: the JNC Cooperative Research Scheme on the Nuclear
Fuel Cycle)

Masatake Shiraishi*, Shinichi Aoshima*

Shinichi Aose**, Masayuki Takeuchi**

Abstract

Equipments used in the nuclear facility must be done the adequate maintenance and should be exchanged to new ones by the remote control. For this aim, we need information about the objects such as a distance, a profile, and an inclination with the required accuracy. The aim of this research is, thus, to establish an equipment exchanging method by controlling the position of equipments and parts. In order to catch the whole position condition of objects, a rough measurement system was developed, and information was obtained from the front side of parts. Then, a precise measurement system that performs local measurement was constructed to obtain the information around the shade portion of the objects, which is not obtainable by the rough measurement system. Therefore, the new system performs two measurements: a rough measurement and a precise measurement. Consequently, it was found to be effective for acquiring a lot of information that are not obtained only by the rough measurement system from the front side only.

Before exchanging equipments, we need to know their conditions whether they are still applicable or not. The another point of this research is, therefore, to develop an on-line deterioration diagnosis method of equipments. Specifically, a new approach in which the laser light is projected onto the equipment surface is proposed to check the contrast of the reflection pattern. Because the contrast is corresponding to the condition of the measured surface and therefore we can conjecture the surface states of the object surface by obtaining the contrast. We examined those states empirically by changing the laser angle of incidence and the receiving angle of camera. As a result, the validity of the on-line diagnosis was confirmed through various experiments.

Finally, the possibility of applying VR method was discussed as a control of robot manipulator, although this research is on going.

* Ibaraki university

** Advanced fuel recycle technology division, Waste management and fuel cycle research center

目 次

1 緒 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的と内容	1
1.2.1 機器の劣化診断法の開発	2
1.2.2 粗微動強調計測法による機器交換のための情報取得法の構築	2
1.2.3 VR によるマニピレータの制御法の開発（途中までの経過）	2
 2 物体の劣化診断法の開発	3
2.1 コントラストの計算法	3
2.2 反射光分布の考え方	4
2.3 システム構成	6
2.4 実験方法	7
2.4.1 コントラストの算出領域	7
2.4.2 電線のキズ	7
2.5 実験結果	8
2.5.1 新線の結果	8
2.5.2 劣化電線の結果	9
2.6 キズ検出に関する考察	9
2.7 劣化状態診断に関する考察	10
2.7.1 実験結果	11
2.7.2 劣化率の算出	11
2.7.3 劣化状態診断に関する考察	12
 3 機器交換のための情報取得法の開発	13
3.1 レーザ計測系の原理とその拡張	13
3.1.1 三角測量法	13
3.1.2 画角法	16
3.1.3 スリット光投影法	17
3.1.4 十字スリット光投影法	18

3.2 システム構成	20
3.2.1 粗動計測装置の概観	20
3.2.2 微動計測装置の概観	21
3.3 具体的測定の例	22
3.3.1 物体の三次元稜線抽出	22
3.3.2 十字スリット光による面の傾斜計測実験	23
3.3.3 十字スリット光による円径の計測実験	24
3.4 粗動計測と微動計測による協調操作	26
3.4.1 微動計測装置による多方向からの計測	26
3.4.2 微動協調操作による情報取得法	26
3.4.3 セル内機器への適用例	30
3.5 今後の課題	34
 4 VR (バーチャルリアリティ) による対応の提案	35
4.1 システムの構成	35
4.1.1 リアルタイム制御	35
4.2 仮想世界	35
4.2.1 ユーザーインターフェースとしての VR	35
4.2.2 現実世界とのインターフェースとしての VR	36
4.3 物体把握のための座標	36
4.3.1 三次元表現法	36
4.4 接触判定	37
4.4.1 「点と面」による接触判定	37
 5 結 論	41
 参考文献	42
 本研究関連の発表	42

表 目 次

表 3.1 十字スリット光による面の傾き計測

表 3.2 十字スリット光による円径の計測結果

図 目 次

図 2.1 画像の分割

図 2.2 スポット径 d のレーザ光の反射光分布

図 2.3 キズでの反射

図 2.4 平面での反射

図 2.5 表面性状測定装置

図 2.6 コントラストの算出範囲

図 2.7 移動測定による標準偏差 G の変化

図 2.8 移動測定によるコントラスト G の変化

図 2.9 移動測定による標準偏差 G の変化

図 2.10 移動測定によるコントラスト G の変化

図 2.11 新線の場合の判定基準

図 2.12 劣化電線の場合の判定基準

図 2.13 コントラスト G 変化

図 2.14 コントラストの劣化率

図 3.1 三角測量法

図 3.2 測定の詳細

図 3.3 焦点距離法

図 3.4 撮像素子とセルビッチ

図 3.5 画角法

図 3.6 スリット光画像

図 3.7 スリット光投影法

図 3.8 十字スリット光が照射された対象物

図 3.9 カメラ上部に光源を設置した場合の十字スリット光投影法

- 図 3.10 システム構成
- 図 3.11 粗動計測装置
- 図 3.12 微動計測装置
- 図 3.13 立方体のプレウィット変換
- 図 3.14 三次元稜線を含むスリット光画像
- 図 3.15 十字スリット光による傾斜計測
- 図 3.16 傾斜計測の対象物
- 図 3.17 十字スリット光による円径の計測
- 図 3.18 微動計測装置導入による多方向計測
- 図 3.19 対象物が現れている場合の計測
- 図 3.20 対象物が現れている場合の手順
- 図 3.21 対象物が隠れている場合
- 図 3.22 単純な隠れの場合の粗微動協調計測
- 図 3.23 計測対象物の金属物体
- 図 3.24 金属物体の三次元スリット光画像
- 図 3.25 粗動計測
- 図 3.26 近接による微動計測
- 図 3.27 プレウィット変換と計測領域指定
- 図 3.28 下方からの微動計測
- 図 3.29 配管型交換対象物正面方向からの微動計測
- 図 3.30 領域指定と配管型交換対象物
- 図 4.1 システム構成
- 図 4.2 進行方向に表側を出している面
- 図 4.3 移動後十分な距離のある場合
- 図 4.4 点を通過して移動する場合
- 図 4.5 仮想マニピュレータ

写真目次

写真 2.1 新線

写真 2.2 劣化電線

写真 2.3 1mm 幅キズ

写真 2.4 4 本の 1mm 幅キズ

写真 2.5 2mm 幅キズ

写真 2.6 4 本の 2mm 幅キズ

写真 2.7 横方向のキズ

1 緒 論

1. 1 研究の背景

原子力内関連施設で使用される設備機器は、必要に応じて交換や保守作業をしなければならない。一般的の施設と異なり作業員の被爆回避という重大な問題があり、そのため工程の機器を遠隔操作によって交換・保守をする必要がある。つまり、サイクル機器試験施設やガラス固化技術開発施設で使用される試験装置等の設備機器は、試験セル内で取り扱われている。このセル内は放射線や放射性物質による表面汚染のため、通常の状態では内部での人の作業は当然不可能となる。現在このような環境下での機器の交換や補修は、両腕マスタスレーブ型マニピュレータによって行われている。しかし、このマニピュレータの左右前後に搭載されている四台のカメラは視野や稼動範囲が必ずしも広いわけではなく、遠隔操作室内でそれらの画像を見ながら操作を行うオペレータにとって、現場での位置合わせが困難であるという課題がある。また現実問題として、そのオペレータが熟練するまでには相当の月日が必要とされている。理想的には、対象物までの距離・形状・傾き・位置等の具体的かつ詳細な位置情報を得て、自動によって機器交換や保守点検が可能であることが望ましい。

さて機器の交換や保守点検に当たっては、それらの状態（劣化や亀裂など）をまず診断する必要がある。つまり、亀裂の状態、腐食の状態、劣化の程度等を何らかの方法で検出かつ判断しなければ、機器交換の時期を知ることはできない。一般の生産技術の中でのオンライン劣化診断法は研究レベルとしては開発されてきているが、実用化に際しては検出の信頼性と安定性の点から必ずしも成功していないのが現状である。一例を上げると、高圧送電線は鳥獣や樹木の接触、雷撃、塩害等様々な原因によって傷や錆等が発生して劣化し、やがて断線する。このような断線事故の発生を未然に防ぐためには、オンライン検出法によって傷や錆等を早期発見し、その部分の交換が必要となる。現状では、ヘリコプターに搭載したVTRにより電線を連続的に撮影し、帰還後にビデオテープを再生して点検者が目視で異常箇所を判定する手法をとっている。しかし、本方法には人件費やコストの問題、点検作業に要する時間、さらには目視による人的な評価のため信頼性に欠けるなどの欠点があり、自動診断装置の開発が望まれている。

一方このような人が介入できないような場所での作業については、VR（バーチャルリアリティ）の活用が当然検討されるべきである。前述のように、現行の両腕マスタスレーブ型マニピュレータのエンドイフェクタとしての作業は、約20m離れた場所で行われる。そこで、このマニピュレータの制御にVR技術の導入が可能かどうかを検討する必要がある。

このような背景を踏まえ、本研究では

- (1) 機器等の劣化診断の開発
- (2) 機器の状態及びその交換のための情報取得法の構築
- (3) VRによる適用性の検討

の3つ内容に研究の主眼を置いた。

1. 2 本研究の目的と内容

背景で述べたように、本研究のメインテーマは、

“いかに機器等の劣化状態を診断し”

“その結果に基づいて機器交換のための情報をいかに捉え”

“かつ、いかにVRの手法を駆使するか”

にある。

そこでこのテーマの順に従い、本研究の目的と主な内容を以下のように設定して研究を遂行した。

1. 2. 1 機器の劣化診断法の開発

診断法としてカメラとレーザ光を用いる。レーザ光を物体測定面に照射し、観測面上で得られるスペックルパターンのコントラストおよび標準偏差から、その性状（劣化の有無、傷の有無など）を評価する。本方法では、レーザ光の入射角とカメラの受光角により測定結果が大きく変わると言う問題が発生する。そこで光学系の有効的な配置法についても検討する。

1. 2. 2 粗微動協調計測法による機器交換のための情報取得法の構築

同じくカメラとレーザ光を中心に計測系を構築する。計測のための絶対的な基準位置を設定し、機器交換用マニピュレータを含めた全体の位置を把握することを目的とした粗動計測装置でまず対象物の計測を行う。粗動で計測できない陰影部分等に対しては、移動可能なマニピュレータ上に搭載した微動計測装置でもって物体に関する情報を取得する。これら二つの計測系で情報取得を行うことで相互の情報補完を行い、得られたデータを適宜処理することで機器交換およびロボット等の位置決めのための情報提供を行う。

1. 2. 3 VRによるマニピュレータの制御法の開発（途中までの経過）

システムとしてマニピュレータ、VRを実現するためのPC、および入出力装置を使用する。VR内に現実世界の作業場を再現する。VR内の制御完了後、その入力情報を元に現実世界のマニピュレータの動作コードを作成する。またVR内には、実作業場同様マニピュレータも現実世界と同様の物を作成する。このような環境を設定することにより、現実世界でどのようにマニピュレータを作業させれば安全かをあらかじめ考慮して動作コードが作成する。そしてその後作成された動作コードを使用することで、現実世界のマニピュレータに作業をさせることが可能となる。

なおこのVRについての考察については、途中までの検討結果について述べる。

2 物体の劣化診断法の開発

レーザ光を有する粗さを有する物体に照射するとスペックルパターンが現れる。このスペックルの性質を用いたスペックル法は、物体の表面性状に依存してそのコントラストとの間に比較的よい相関がある。また潜在的な長所として、高い分解能と移動物体の測定が可能である。一方このような光学的表面性状評価においては、レーザ光の入射角とカメラの受光角との相対的な角度が測定結果に直接影響する。

2. 1 コントラストの計算法

本研究ではコントラストを画像の輝度値の平均値と標準偏差の比で定義することとした。1画像は 640×480 の画素に分割してモニタに表示され、1画素に当たる座標(i, j)にはR(Red)、G(Green)、B(Blue)の3つの色成分が含まれる。一方予備実験の結果、表面性状がG(Green)の成分によって比較的良く現れることから、この色成分に注目して研究を進めた。

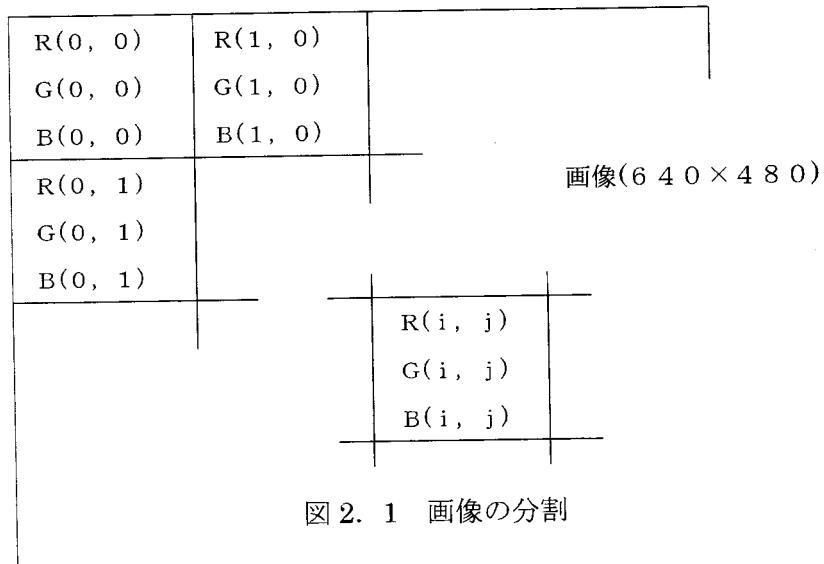


図 2. 1 画像の分割

ここでR成分の輝度値の平均値は式(2.1)により求められる。

$$A_R = \frac{\sum_{i=0}^{640} \sum_{j=0}^{480} G(i, j)}{640 \times 480} \quad (2. 1)$$

ここに A_G : G成分の平均値、 $G(i, j)$: 座標(i, j)におけるRの輝度値

また画像の標準偏差は式(2.2)で求められる。

$$S_G = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{640} \sum_{j=0}^{480} \{G(i, j) - A_G\}^2}{640 \times 480}} \quad (2. 2)$$

ここに S_G : G 成分の輝度値の標準偏差

以上よりコントラスト値は次式となる。

$$C_G = \frac{S_G}{A_G} \quad (2. 3)$$

2. 2 反射光分布の考え方

レーザ光の入射角とカメラの受光角を設定するに当たり、簡単化のため物体表面のキズが半径 r の半円であると仮定して幾何光学的に考える。またレーザ光は正反射方向に全反射すると仮定する。このときレーザ光のスポット径を幅 d とすると、入射角を任意の角度 θ としたレーザ光は、キズである半円上の面から図 2. 2 のような反射光分布となることが考えられる。

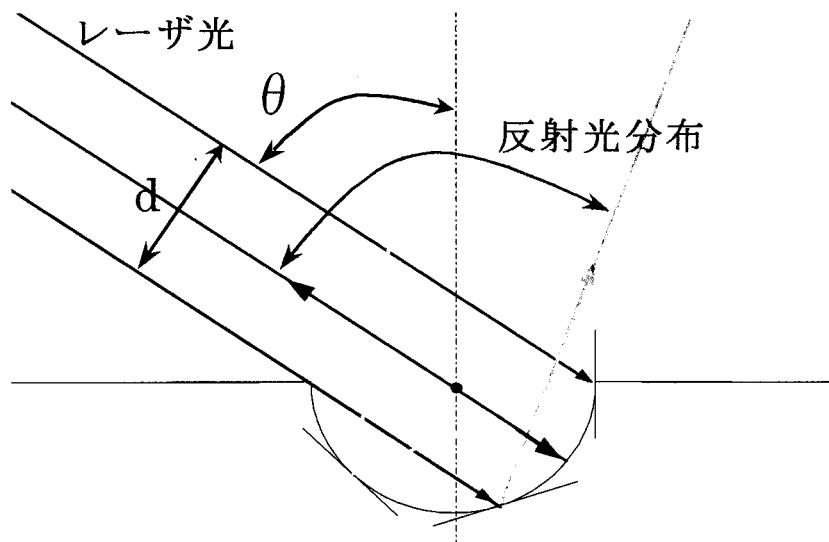


図 2. 2 スポット径 d のレーザ光の反射光分布

さてここで図 2. 3 に示すようにキズの正面にカメラを設置すると、カメラで観測される反射パターンは図 2.3 のキズがある場合と図 2.4 の平面（キズがない）との場合とで異なり、したがってコントラストもそれぞれの場合で異なった値が得られる。

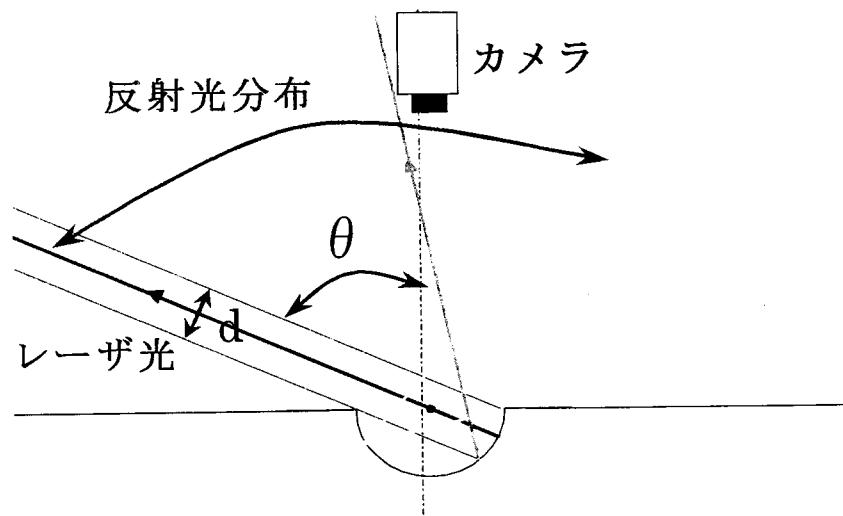


図2.3 キズでの反射

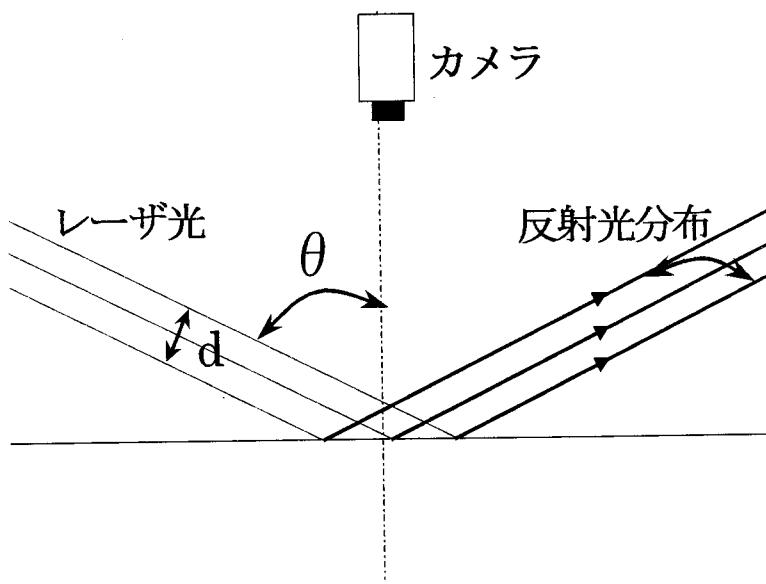


図2.4 平面での反射

これらの図的考察より、レーザ光の入射角 θ が 45 度付近の時コントラストが最も大きくなると推測される。その理由として、入射角が 45 度の時、図 2.3 のキズがある半円の右半分はレーザ光が照射されるが、左半分は影となりレーザ光は照射されないからである。

以上の考察から、カメラを測定物体に対して垂直に設置し、それに対するレーザ光の入射角を 45 度付近に設定して実験を行った。

2. 3 システム構成

測定装置のシステム構成を図 2.5 に示す。また実験用の対象物体として劣化した高圧電線と新線を用いた。

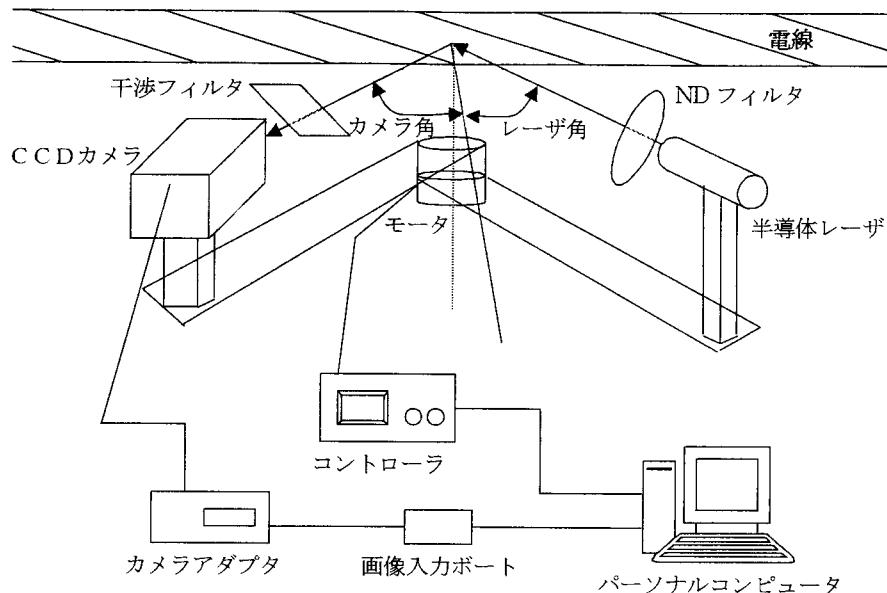


図 2.5 表面性状測定装置

光学系には、コヒーレント光源として波長 635nm の半導体レーザを、観察面には汎用の C C D カメラを採用した。半導体レーザのスポット径を幅 1.0[cm]、高さ 4.0[cm]として電線表面に照射する。ND フィルタを使用してレーザ光の透過率を 5[%]とした。レーザ光によって生じた反射パターンの明暗信号を干渉フィルタを通して C C D カメラで撮影し、その画像を画像入力ボードを介してオンラインでコンピュータに取り込む。コンピュータ上で反射パターンコントラストの算出をオンラインで行い、表面性状に関する情報を得る。レーザとカメラから構成される測定器は通常のボックスでおおい、移動ステージを用いてこれらの測定器を電線に沿って移動させることで連続的にコントラストを測定した。電線には写真 2.1 の直径 25[mm]の新線と、写真 2.2 に示す直径 30[mm]の黒く劣化した電線を用意した。



写真 2.1 新線

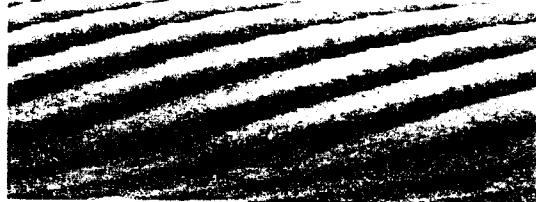


写真 2.2 劣化電線

2. 4 実験方法

2.4.1 コントラストの算出領域

1 画像によるコントラストの算出範囲を図 2.6 のように、素線 1 本に相当する 35×30 (縦×横)画素をコントラストの算出範囲とした。また算出範囲の位置は 1 画像で電線の中央部に設定した。

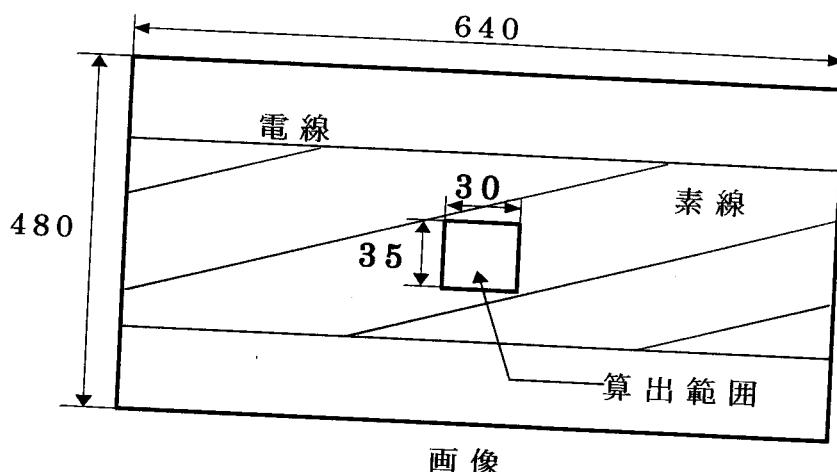


図 2.6 コントラストの算出範囲

2.4.2 電線のキズ

電線のキズは新線と劣化電線共に同様のキズを付けた。キズは幅 1 [mm] と 2 [mm] の 2 種類とし、写真 2.3 から写真 2.7 の 5 通りのキズを付けた。

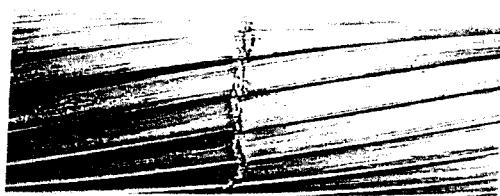


写真 2.3 1mm 幅キズ



写真 2.4 4 本の 1mm 幅キズ

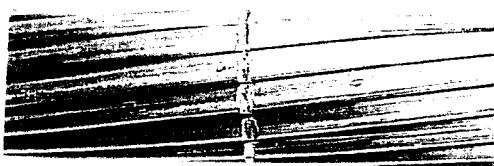


写真 2.5 2mm 幅キズ

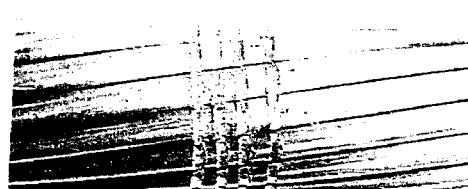


写真 2.6 4 本の 2mm 幅キズ



写真 2.7 横方向のキズ

2. 5 実験結果

2.5.1 新線の結果

レーザの入射角を 45 度、カメラの受光角を 0 度とした場合の輝度値の標準偏差とコントラストの実験結果を図 2.7 および図 2.8 に示す。横軸が測定器の移動距離、縦軸が輝度値の標準偏差及びコントラストである。移動距離が 40[mm]付近に 1[mm]幅のキズ、80[mm]付近に横方向のキズ、130[mm]付近に 2[mm]幅のキズ、210[mm]付近に 4 本の 2[mm]幅のキズ、260[mm]付近に 4 本の 1[mm]幅のキズが検出されているのが確認できる。

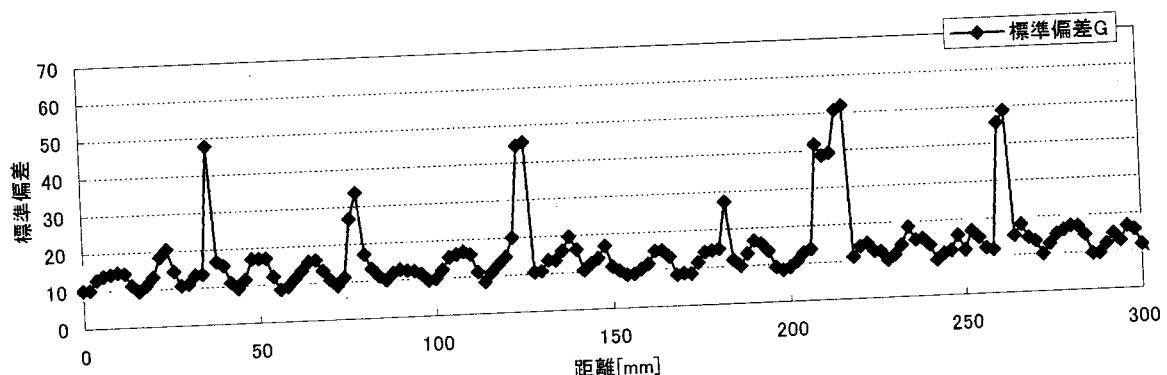


図 2.7 移動測定による標準偏差Gの変化

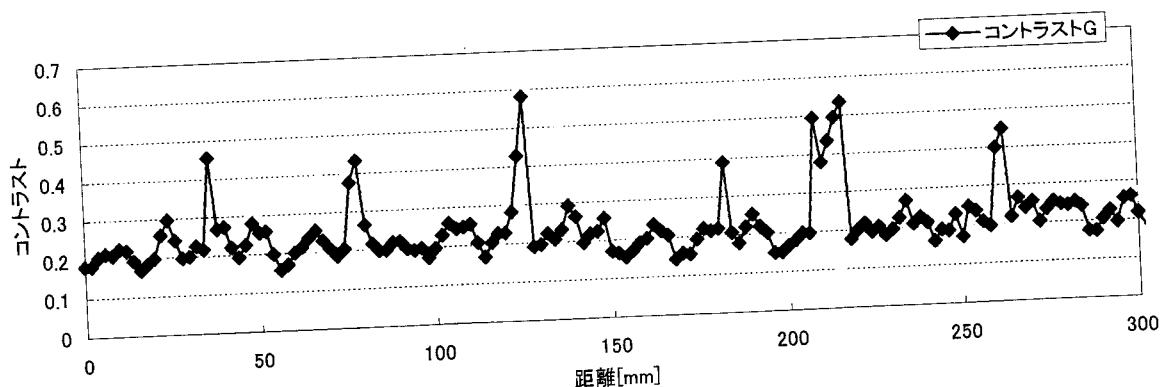


図 2.8 移動測定によるコントラストGの変化

2.5.2 劣化電線の結果

同じく劣化した電線にキズがある場合の結果が図 2.9 と図 2.10 で、この場合もキズの検出は可能である。これらの結果はカメラの受光角度を 0 度としたままで、レーザ光の入射角度を 50 度とした場合である。

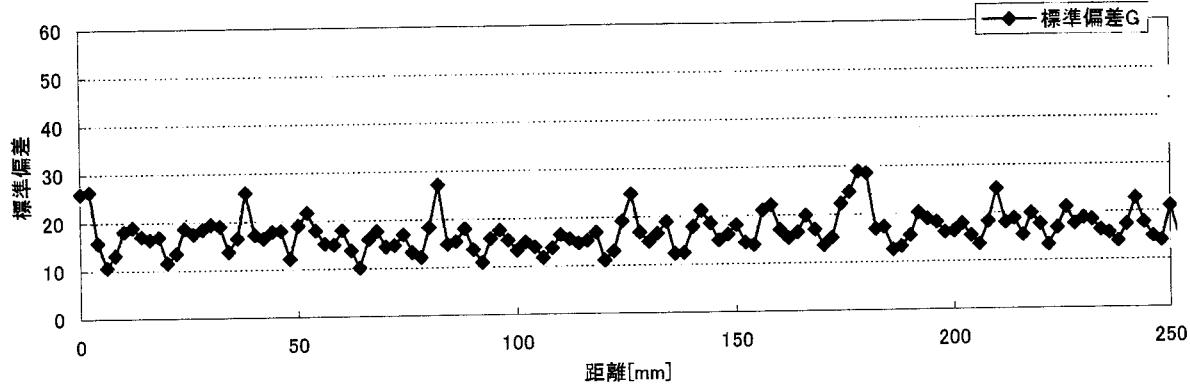


図 2.9 移動測定による標準偏差 G の変化

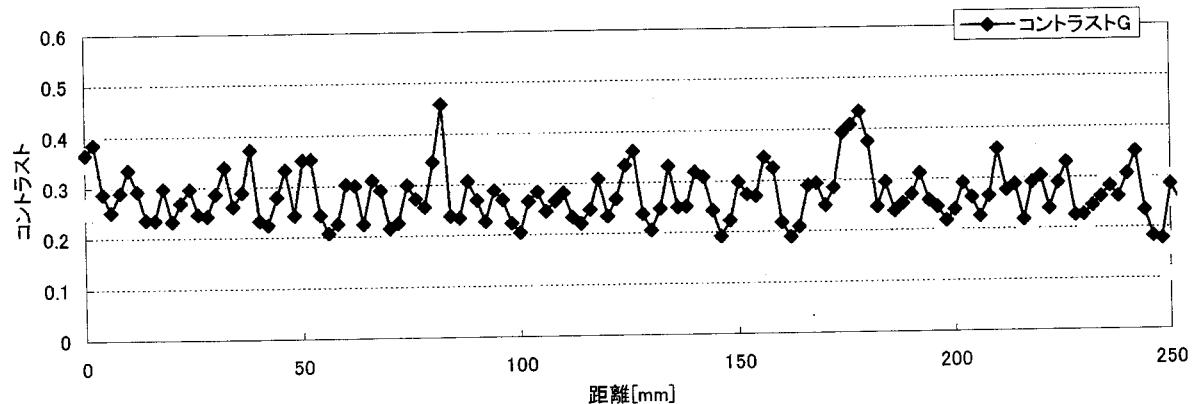


図 2.10 移動測定によるコントラスト G の変化

2. 6 キズ検出に関する考察

新線の場合、輝度値 Green の標準偏差とコントラストが、キズがない部分に比べてキズがある部分の測定値が大きくなっていることが分かる。つまり、実験結果から主観的にキズの有無を判別することは可能である。劣化電線の場合も同様に、輝度値 Green の標準偏差とコントラストについて、横方向と 4 本の 2[mm] 幅のキズ部分では、キズがない部分に比べて測定値が大きくなっている。したがっていずれの場合も、レーザ光の入射角 θ_1 が 45 度から 50 度付近、カメラの受光角 θ_2 が 0 度の時が最もキズの診断に適していると考えられる。

ここで劣化状態の判定法として、キズの判定基準を測定値の平均値から標準偏差の 2 倍である 2σ の値、つまり平均値 $+2\sigma$ としてみる。その理由として、測定値を統計的に考えると平均値 $\pm 2\sigma$ の範囲内には全データの 95.45% が含まれる。よって平均値 $+2\sigma$ 以上の測定値は正常な電線表面

の値であると考えにくいことから、その部分をキズであると判断した。これによる判定結果を、図 2.11 図 2.12 に示す。

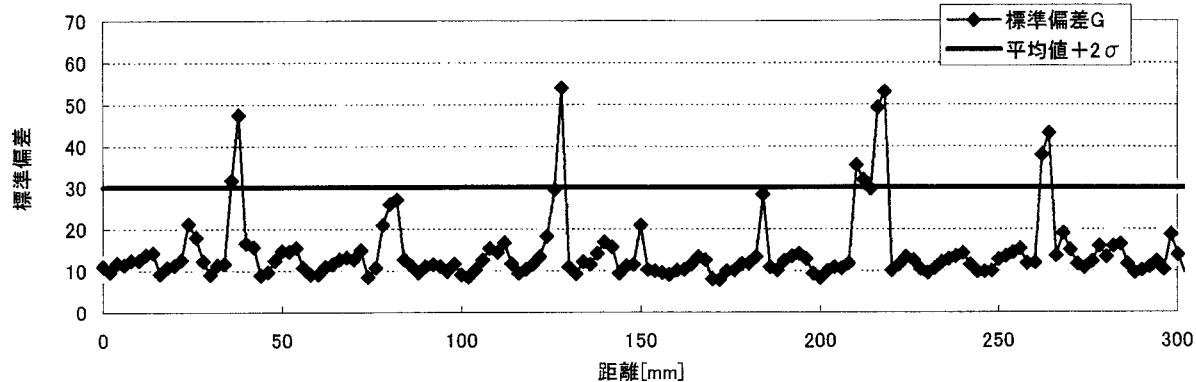


図 2.11 新線の場合の判定基準

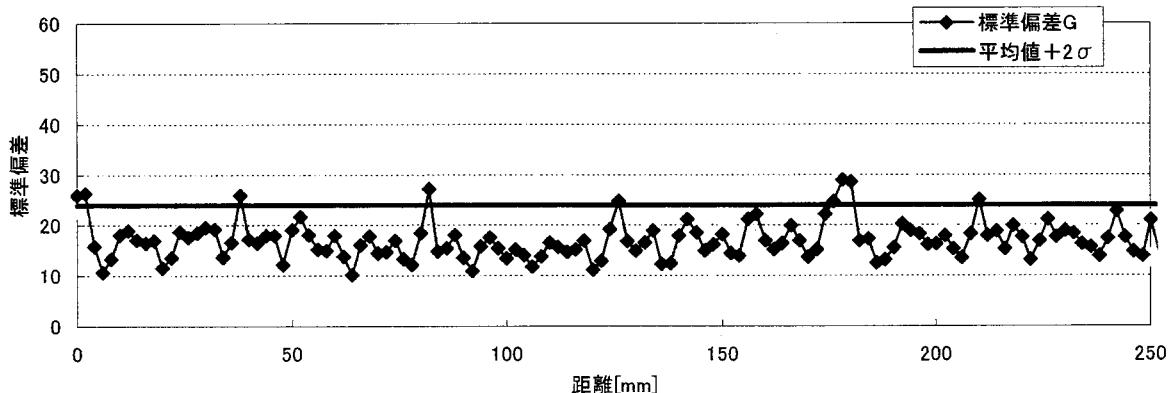


図 2.12 劣化電線の場合の判定基準

新線の場合、横方向のキズの測定値が基準値以下そのためキズ判定が必ずしもされていないが、それ以外のキズについてはは基準値以上でキズの判定が行えている。また劣化電線の場合、キズの測定値はすべて判定基準値以上であり、判定が正しく行えている。

以上のことから、本方法によるキズのオンライン診断の可能性が見出された

2. 7 劣化状態に関する診断

これまでではキズの有無についての診断を行ってきた。ここでは電線の劣化状態（腐食や色あせなど）の検出に関して考察する。システム構成はこれまでと同様である。劣化の状態を判断するため次の劣化率式を提案した。

$$J[\%] = \frac{|C_N - C_o|}{C_N} \times 100 \quad (2.4)$$

ここに

J : 劣化率

C_N : 新線のコントラスト

C_o : 劣化電線のコントラスト

2.7.1 実験結果

予備実験によると、キズの検出の場合と異なりレーザ光の入射角とカメラの受光角が結果にかなり影響することから、それらの角度を変化させて実験をおこなった。

図 2.13 は新線と黒く劣化した電線について、レーザ光の入射角 θ_1 を 40 度とし、カメラの受光角 θ_2 を変えた場合の輝度値 G についての測定結果である。

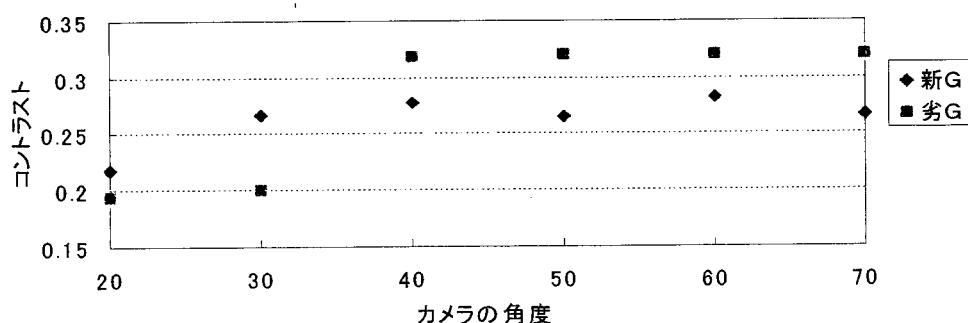


図 2.13 コントラスト G 変化

2.7.2 劣化率の算出

図 2.14 はこの場合の式(2.4)に基づく劣化率を示す。

θ_1 [deg]	20	30	40	50	60	70
θ_2 [deg]	18.35	19.63	8.44	6.92	0.52	3.14
0	20.67	0.25	5.07	5.66	2.67	21.52
10	11.82	10.09	15.22	22.46	28.37	33.04
20	6.14	10.54	2.66	15.97	14.46	11.63
30	33.37	38.72	12.64	21.21	9.83	1.96
40	3.17	3.19	4.76	10.05	0.01	0.99
50	12.76	19.56	6.49	4.87	0.66	15.58

図 2.14 コントラストの劣化率

2.7.3 劣化状態診断に関する考察

図 2.14 の結果から、劣化率が大きく見られたのはレーザ光の入射角 θ_1 が 20~40 度のときである。その中で最も大きかったのは、入射角 θ_1 が 40 度、カメラの受光角 θ_2 が 30 度のときである。この理由として、カメラの受光角度が正反射方向より 10 度外れることで、鏡面反射光の影響をあまり受けずに拡散反射光をカメラで捉えることができたことが考えられる。 θ_1 が 10 度以下の場合、コントラスト G は θ_2 が 30 度以下のとき 15% 以上の劣化率が見られ、それ以上の θ_2 では次第に劣化率が低下している。これは θ_2 を大きくすることで、拡散反射光のカメラへの入射光が弱くなるためである。 θ_1 が 50 度以上のときは全ての θ_2 で大きな劣化率は見られなかった。これはレーザ光の入射角が大きいと、全てのカメラの受光角に対して拡散反射光のカメラへの入射光が弱くなることによると思われる。

また図 2.13 から新線と劣化電線との診断は十分可能であると思われる。

以上の結果から、キズの検出の場合とは異なり劣化状態そのものの検出に対しては、劣化状態によってレーザ光およびカメラの角度をフレキシブルに設定する必要があり、この点は今後の課題である。

3 機器交換のための情報取得法の開発

本章では三角測量法および光切断法の考え方を発展させ、レーザ光とカメラを中心として計測対象物の位置、形状及びその計測箇所近傍からの情報を抽出する。この方法において、一つの計測系では測定不可能な箇所が存在するため、機器交換に必要な情報が不足する。そこで、絶対的な基準位置を設け、機器交換用マニピュレータを想定して全体の位置情報を把握できる粗動計測装置を設定する。そして粗動で計測できない陰影部分等に対しては、移動可能なマニピュレータ上に搭載した微動計測装置を新たに提案して情報取得を行う。これら粗動計測系と微動計測系の二つの計測系で情報取得を行うことで相互の情報補完を行い、得られたデータを適宜処理することにより機器交換時の位置決め制御のための情報提供を行う手法を構築する。

3. 1 レーザ計測系の原理とその拡張

3.1.1 三角測量法

三角測量法に基づくスポット光投影法の原理を図 3.1、図 3.2 に示す。レーザ光の光源と CCD カメラを距離 D (以下、基線長という) の間隔で配置する。光源からレーザ光を対象物に照射し、スポット状の光を CCD カメラで撮像してレンズ中心 O を原点とした対象物までの位置を計測する。カメラは Z 軸を中心に、レーザは Z 軸方向を中心とした X-Y 平面上の左右の回転のみ可能である。レーザ光の照射角を γ 、CCD カメラのレンズ中心 O への入射角を α_x , α_z 、レンズ光軸 1 の傾きを α_0 、撮像素子上における中点から結像位置までの水平方向距離を ω_x 、垂直方向距離を ω_z とすると、対象物表面上の点 $P(x, y, z)$ の座標は式(3.1)、(3.2)、(3.3)から導出される。

$$x = \frac{D \tan(\alpha_0 + \alpha_x)}{\cot \gamma + \tan(\alpha_0 + \alpha_x)} \quad (3.1)$$

$$y = \frac{D}{\cot \gamma + \tan(\alpha_0 + \alpha_x)} \quad (3.2)$$

$$z = \frac{D \tan \alpha_z}{\cot \gamma + \tan(\alpha_0 + \alpha_x)} \quad (3.3)$$

ここで $\alpha_x = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_x}{k}\right)$, $\alpha_z = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_z}{k}\right)$ である。

レンズへの入射角がちょうど中心 O に入った場合は、光軸 1 の傾き角度 α_0 のみで対象物の位置が計測できる。しかし中心からずれた場合は、微小な入射角 α_x , α_z を求めなければならない。

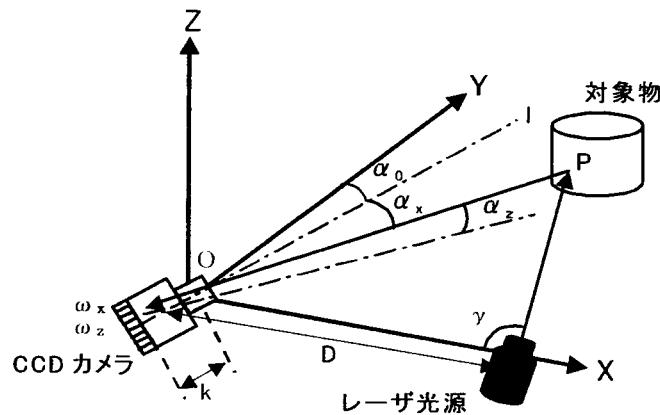


図 3.1 三角測量法

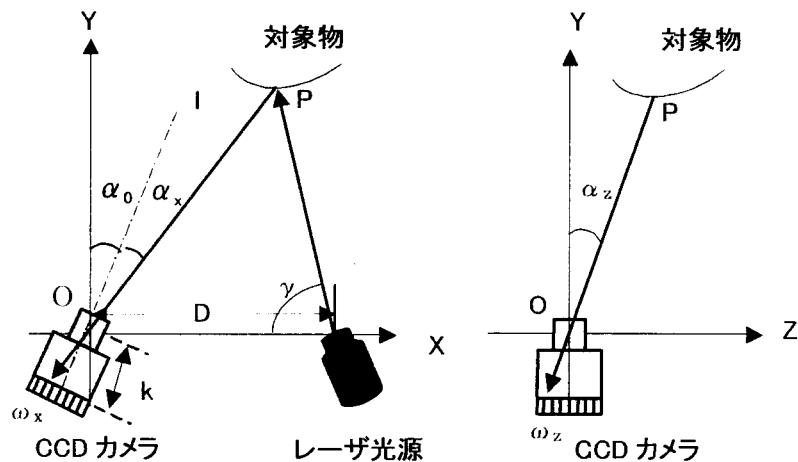


図 3.2 測定の詳細

ここに、 D : レーザ光源と CCD カメラ間の距離（基線長）

γ : レーザ光の照射角

α_0 : CCD カメラのレンズ光軸 l の傾き

α_x : X-Y 平面における CCD カメラのレンズ中心 O への入射角

α_z : X-Z 平面における CCD カメラのレンズ中心 O への入射角

ω_x : 撮像素子上での中点から結像位置までの水平方向距離

ω_z : 撮像素子上での中点から結像位置までの垂直方向距離

k : レンズ中心 O と撮像素子までの距離

レンズへの入射角 α_x , α_z を求めるには図 3.3 を参照して以下のように求まる。

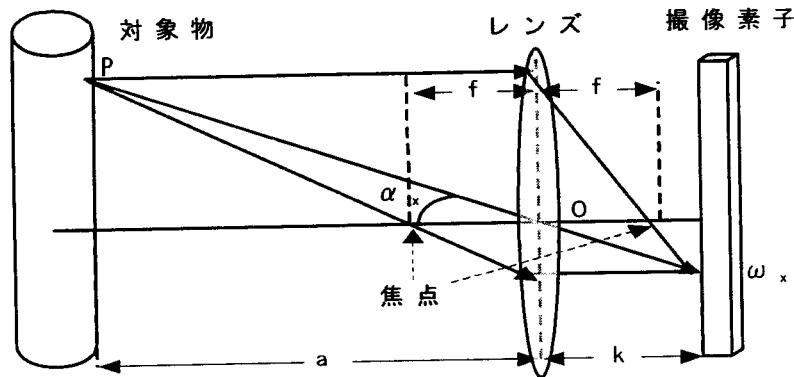


図 3.3 焦点距離法

レンズ中心 O から対象物までの距離を a , レンズから撮像素子までの距離を k , 焦点距離を f , 撮像素子上での中点からスポット状レーザ光の結像位置対応点までの水平方向距離 ω_x , 垂直方向距離 ω_z とする。レンズへの入射角 α_x は

$$\alpha_x = \tan^{-1} \left(\frac{p}{a} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_x}{k} \right) \quad (3.4)$$

である。またレンズの公式より

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f} \quad (3.5)$$

であるが。レンズから対象物までの距離 a に比べ焦点距離 f は微小であるから、上式の a は無視できる。よって

$$k \approx f \quad (3.6)$$

となり、レンズから撮像素子までの長さを焦点距離で近似することができる。したがって、水平方向入射角 α_x は式(3.7)となる。垂直方向入射角 α_z も同様にして求めると式(3.8)となる。

$$\alpha_x = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_x}{k} \right) \approx \tan^{-1} \left(\frac{\omega_x}{f} \right) \quad (3.7)$$

$$\alpha_z = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_z}{k} \right) \approx \tan^{-1} \left(\frac{\omega_z}{f} \right) \quad (3.8)$$

次に、撮像素子上における中点からスポット状レーザ光の結像位置までの距離 ω_x と ω_z は、撮像素子の大きさと画素数との関係から求まる。図3.4に撮像素子とセルピッチの関係を示す。

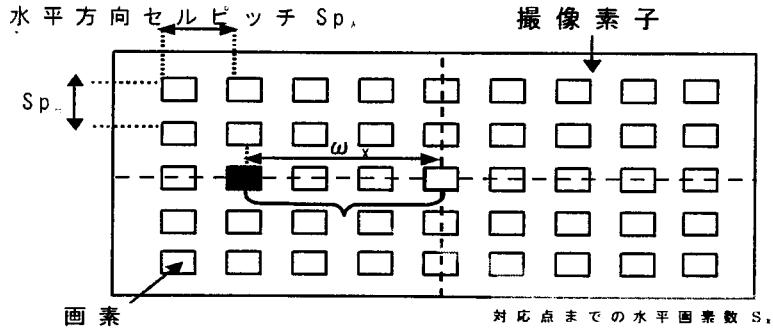


図 3.4 撮像素子とセルピッチ

まず撮像素子での中心からレーザ光結像位置までの水平方向画素数 S_x を求める。これに撮像素子中の画素の間隔を示す水平方向セルピッチ Sp_w を掛けることにより、撮像素子の中点からレーザ光の対応点までの実際の距離 ω_x が式(2.9)で求まる。

$$\omega_x = Sp_w \times S_x \quad (3.9)$$

ω_z も同様にして求めることができる。

この方法は、焦点距離 f と撮像素子上の対応点までの距離 ω_x , ω_z の値により、単純な計測機構であっても入射角が計算できるという特徴を持つ。

3.1.2 画角法

図 3.5 にレンズの画角の性質を利用した画角法による入射角計算の原理を示す。画角とは、撮像素子に被写体が写る角度の範囲、つまりカメラに捉えることができる角度のことである。画角法はこの画角 G と画素数 S との関係から入射角を求める方法である。レンズ中心 O への水平方向の入射角 α_x を考える。レンズの水平画角 G_x と撮像素子が持つ水平方向の画素数 $S_{x-\max}$ との関係から、1 画素当たりの水平方向角度の割合である定数 K_x は式(3.10)で表せる。

$$K_x = \frac{G_w}{S_{x-\max}} \quad (3.10)$$

水平方向での撮像素子の中点からスポット光結像位置までの画素数の差を E_x とする。 E_x と定数 K_x によりレンズ中心 O への水平入射角は式(3.11)となる。

$$\alpha_x = K_x \times E_x \quad (3.11)$$

同様にしてレンズ中心 O への垂直方向の入射角 α_z も求めることができる。

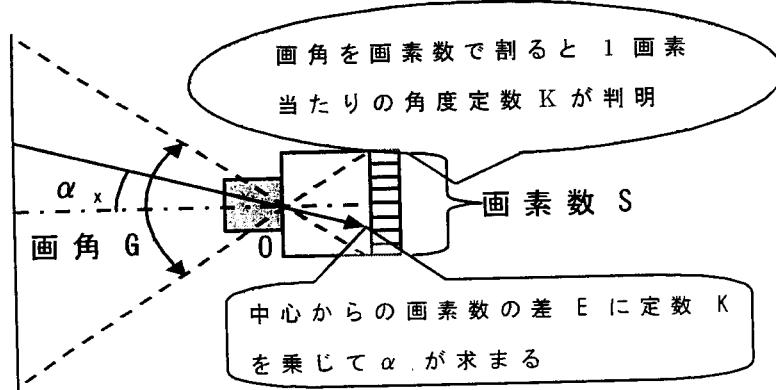


図 3.5 画角法

3.1.3 スリット光投影法

スポット光投影法では1枚の画像から1点しか三次元位置が求まらないため、多くの点の検出には時間がかかる。それに対してこのスリット光投影法では、1回の撮像で1本のスリット光を対象の物に投影し1枚の画像で複数の点を計測する。すなわち、1枚の光シートが物体を切断するときの切断線像が得られる。さらにスリット光の投影方向を図3.6の①、②、③のように少しづつ変化させつつ対象物を走査することにより、複雑な部分の三次元形状データを得ることが可能である。1回の投影で複数の点を計測できるため、スポット光投影法と比べて計測時間の短縮が望める。図3.7にスリット光投影法を示す。

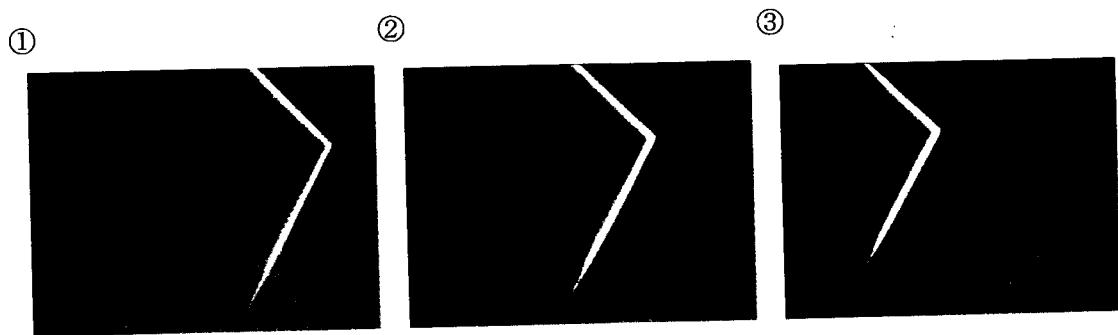


図 3.6 スリット光画像

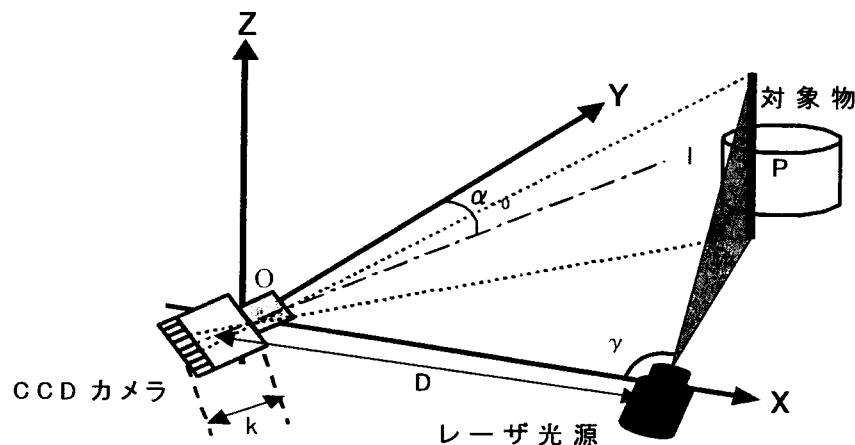


図 3.7 スリット光投影法

3.1.4 十字スリット光投影法

測定物体の面の位置や傾斜を求める場合はスリット光を順次回転させなければならない。そこで既存のシステムに垂直Z軸方向のカメラ上方にレーザ光源を追加し、二本のスリット光を直交させて十字スリット光を作る。三角測量法で三次元的な位置を検出し、その位置情報をを利用して傾きを計算することで、レーザを回転させることなく一回の照射で高速に円の端点や面の傾きを検出するようにした。対象物に十字スリット光を照射した場合を図3.8に示す。

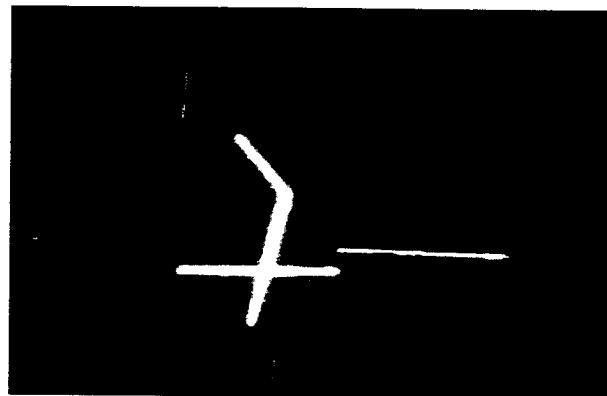


図 3.8 十字スリット光が照射された対象物

図3.9はカメラ上方にレーザ光源を設置した場合の十字スリット光投影法のシステムで、レーザ光源2は上下方向の回転が可能である。対象物表面上の点P(x, y, z)の座標は式(3.12), (3.13), (3.14)で表すことができる。

$$x = \frac{D_2 \tan(\alpha_0 + \alpha_x)}{\cot \gamma_2 + \tan \alpha_{z2}} \quad (3.12)$$

$$y = \frac{D_2}{\cot \gamma_2 + \tan \alpha_{z2}} \quad (3.13)$$

$$z = \frac{D_2 \tan \alpha_{z2}}{\cot \gamma_2 + \tan \alpha_{z2}} \quad (3.14)$$

ここで $\alpha_x = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_x}{k}\right)$, $\alpha_z = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_z}{k}\right)$ である。

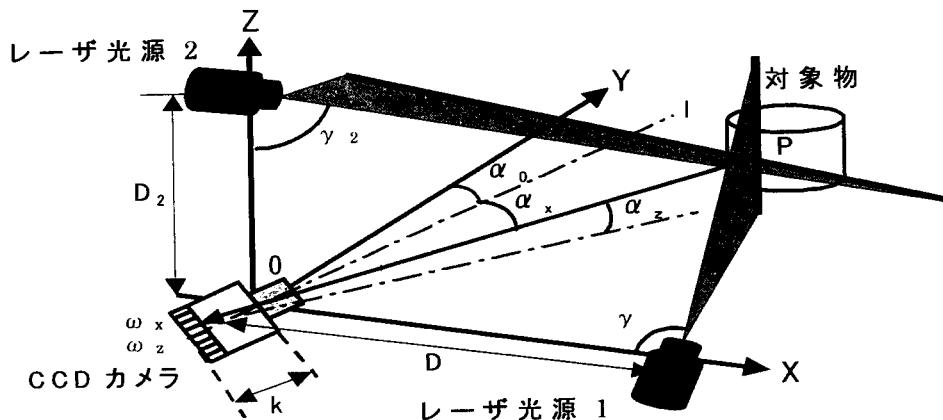


図 3.9 カメラ上部に光源を設置した場合の十字スリット光投影法

- ここに、
- D : レーザ光源 1 と CCD カメラ間の距離（基線長）
 - γ : レーザ光源 1 のレーザ光照射角
 - D_2 : 上方に設置したレーザ光源 2 と CCD カメラ間の距離（基線長）
 - γ_2 : レーザ光源 2 のレーザ光の照射角
 - α_0 : CCD カメラのレンズ光軸 l の傾き
 - α_x : X-Y 平面における CCD カメラのレンズ中心 O への入射角
 - α_z : X-Z 平面における CCD カメラのレンズ中心 O への入射角
 - ω_x : 撮像素子上での中点から結像位置までの水平方向距離
 - ω_z : 撮像素子上での中点から結像位置までの垂直方向距離
 - k : レンズ中心 O と撮像素子までの距離

3. 2 システム構成

実験で使用したシステム全体の構成を図3.10に示す。計測法としては粗動計測法と微動計測法を提案した。いずれの計測装置も機構的には同様な構成であり、移動可能なスライダの上にCCDカメラと半導体レーザを搭載している。粗動計測装置は全体の情報を把握するため、回転機構部であるモータと左右に移動するためのスライダは計測範囲を拡大するための装置である。粗動計測装置自体のみでは、セル内の物体に近接して計測することができない。つまり、測定対象物が遠くに存在するためレーザ光が減衰する場合や、障害物が存在する場合に対処することができない。そのための装置が微動計測装置である。これによって計測不可能な領域をカバーし、機器を交換するために必要な情報の取得を行う。微動計測装置を実際にセル内で使用する場合は、移動可能なマニピュレータ上に搭載させて局所的な計測を行うことになる。

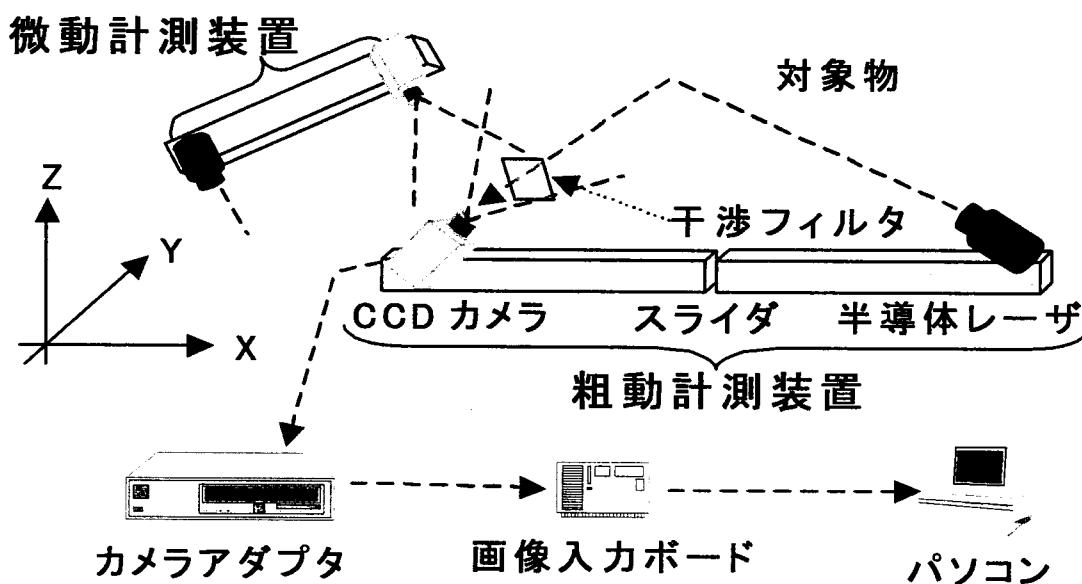


図 3.10 システム構成

3.2.1 粗動計測装置の概観

図3.3.11に示す粗動計測装置は、CCDカメラ、レーザ、ステッピングモータ、二つのスライダ等により構成されている。基本的な動作としては、レーザ光を照射してその画像をCCDカメラによって撮像し、パソコン上に取り込んだ後にプログラムで原点からの位置を求める。スリット光とステッピングモータ駆動により回転角度とレーザ照射回数を指定すると、対象物の形状データを求めることができる。スライダ上の接続板を介して取り付けられたステッピングモータは、カメラとレーザ共に左右の回転が可能である。また、スライダは基線長上においてカメラとレーザの位置を移動させることができ、移動可能範囲は240[mm]から1540[mm]となっている。.

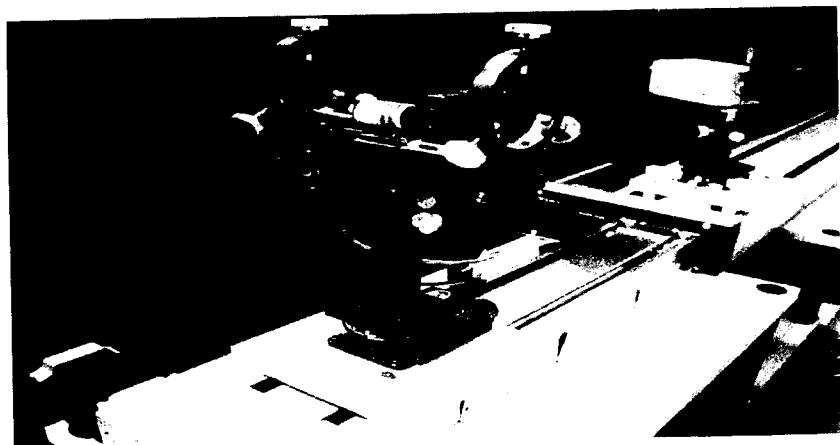


図 3.11 粗動計測装置

3.2.2 微動計測装置の概観

同じく図3.12に微動計測装置を示す。基本的な構成はレーザとカメラを搭載し、回転とスライドが可能である。動作原理としては粗動計測装置と同様であるが、粗動計測装置よりシンプルな構成となっている。スライダ長は300[mm]で、可動範囲は0[mm]～180[mm]となっている。

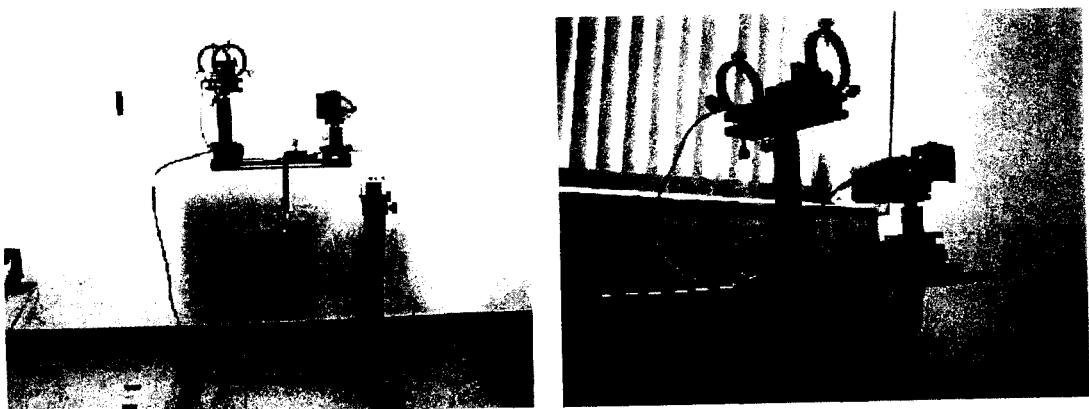


図 3.12 微動計測装置

3. 3 具体的測定の例

3.3.1 物体の三次元稜線抽出

機器や部品を交換する場合には、その幅・直径等の情報が必要となる。スリット光を用いた場合、距離画像にエッジの情報を含ませることになり。エッジを得るための方法として主に二つの方法が挙げられる。一つはカメラ画像における輝度値の変化からエッジの対応点をあらかじめ求め、その後レーザを用いた計測で距離を求める方法である。もう一つは、レーザ計測によって得られた距離画像におけるデータの変化からエッジを抽出する。

まずは前者による手法で全エッジを求める前に、物体の周囲のエッジである三次元稜線の検出を行った。カメラ画像から、図 3.13 のようなプレウィット画像に変換した後に黒い線に囲まれた部分を計測領域として選択し、その後レーザの基本回転角 0.25 度で対象物の三次元計測を行った。このとき一本のレーザの上端点と下端点をそれぞれ結ぶと図 3.14 のような結果が得られる。

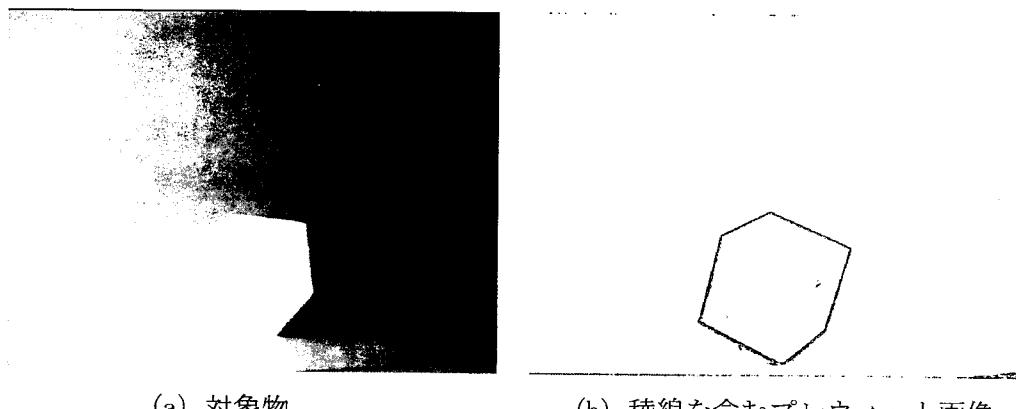


図 3.13 立方体のプレウィット変換

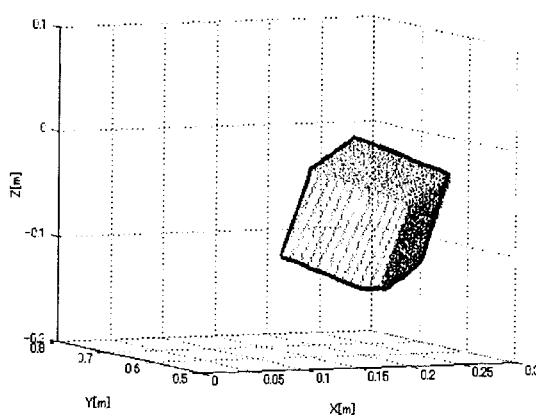


図 3.14 三次元稜線を含むスリット光画像

3.3.2 十字スリット光による面の傾斜計測実験

十字スリット光を用いて面の傾斜計測を行った。レーザを回転させることなく一回の照射で高速に円の端点や面の傾きを検出できる。三角測量法で三次元平面における4点の位置を計測し、得られた値から傾斜を計算する。その計測した4点の座標を $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, $P_3(x_3, y_3, z_3)$, $P_4(x_4, y_4, z_4)$ とすると、面のX軸、Z軸に対する傾斜 θ_x , θ_z を求める式は式(3.15), (3.16)となる。

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{y_4 - y_2}{x_4 - x_2} \right) \quad (3.15)$$

$$\theta_z = \tan^{-1} \left(\frac{y_1 - y_3}{z_1 - z_3} \right) \quad (3.16)$$

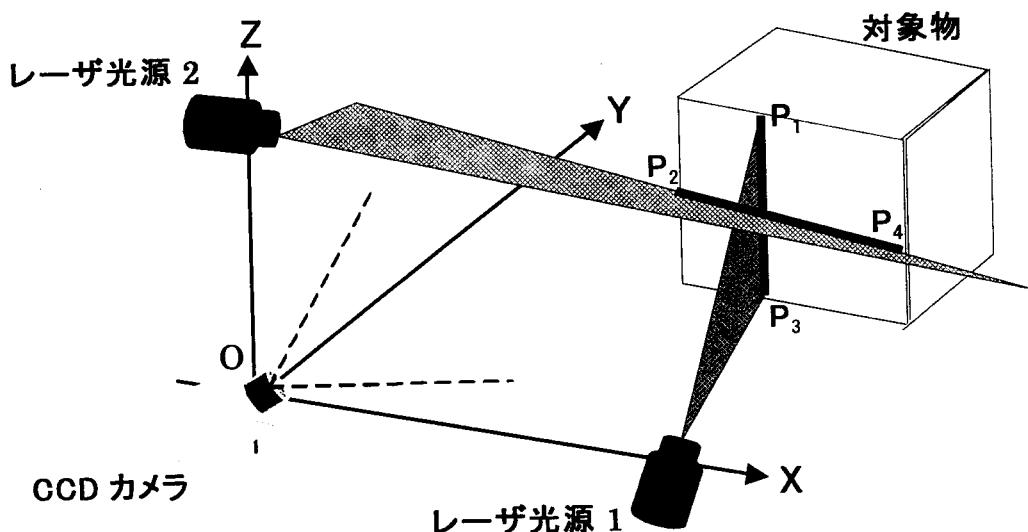


図 3.15 十字スリット光による傾斜計測

3.3.2.1 傾斜計測条件

機器交換の際には交換部品が常に垂直の状態になっているとは限らない。そこで図3.16の対象物である立方体の位置を計測して面の傾斜を求める。X-Z平面を正面として傾斜をランダムに設定し、X軸、Z軸に対する二方向の傾斜計測を行う。

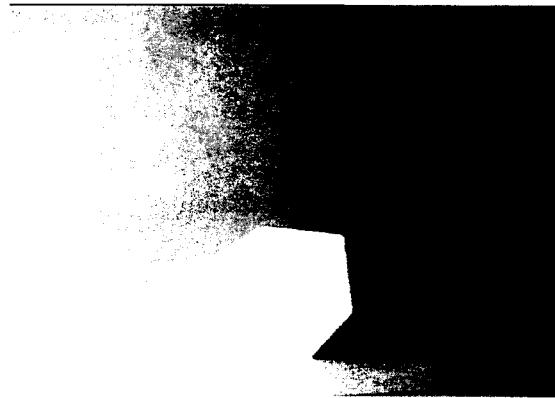


図 3.16 傾斜計測の対象物

3.3.3.2 傾斜計測結果

面の傾き計測の結果を表 3.1 に示す。

表 3.1 十字スリット光による面の傾き計測（単位：度）

面の X 軸に対する傾き真値	20.0	22.0	50.0	55.0	63.0
傾き計測値	21.3	22.3	49.0	56.7	64.8
誤差	1.3	0.3	-1.0	1.7	1.8
面の Z 軸に対する傾き真値	28.0	35.0	19.0	17.0	28.0
傾き計測値	28.4	36.9	19.9	16.4	29.5
誤差	0.4	1.9	0.9	-0.6	1.5

この結果から誤差は小さく抑えられており、十字スリット光による計測法は有効であるといえる。実際の現場では面が平面状となっている対象物も多い。どのような角度であってもカメラにレーザ光が反射されれば、高速で計測できることがこの方法の利点である。

3.3.3 十字スリット光による円径の計測実験

十字スリット光を用いて穴の径と傾斜を計測する。

3.3.3.1 径の計測条件

図3.17 のように円筒の円形面を計測し、得られる端点 P_1 から P_4 の三次元位置より円形面の半径と傾斜を求める。円は半径 $r=92.0[\text{mm}]$ で、正面のみならず面を傾けた場合も半径が計測可能かどうか確かめる。

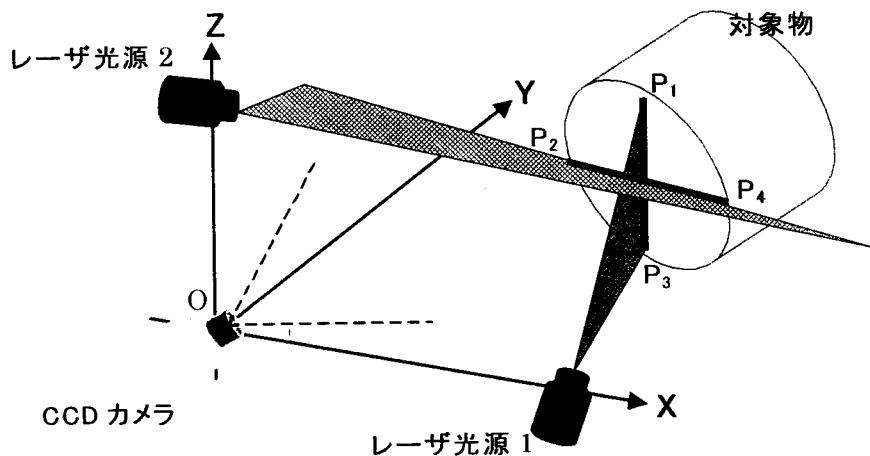


図 3.17 十字スリット光による円径の計測

3.3.3.2 径の計測結果

計測結果を表3.2 に示す。

表 3.2 十字スリット光による円径の計測結果

面の X 軸に対する傾き真値 [deg]	0	20	40	60
傾き計測値 [deg]	0.4	19.7	42.4	60.8
傾き誤差 [deg]	0.4	-0.3	2.4	0.8
半径計測値 [mm]	94.5	89.3	96.2	95.6
半径誤差率 [%]	2.7	2.9	4.5	3.9

傾斜計測の場合、対象物表面のスリット光の 2 点はどの場所を選んでも計測面が平面であれば傾きの測定には影響しない。つまり端点を選んでも途中の点を選んでも傾きは変わらない。しかし円の径を求める場合、端点を正確に選ばなければ真の値に近い値は計測できない。三角測量法によるレーザ光を用いた方法では、レーザ光の幅を理想的に 0 とした場合に正確な値が検出されることになる。したがって、レーザ光の幅が大きくかつ計測対象物が小さければ誤差は大きくなる。つまり、スリット幅をさらに狭くして理想に近づけ、かつ狭くした場合にもカメラで検出できるようにレーザ光の出力を上げることが必要となる。表 3.2 の結果から測定精度は一応満足し得る範囲に入っていると言える。

3. 4 粗動計測と微動計測による協調操作

全体を把握するために計測範囲を拡大した粗動計測装置自体は計測対象に近接して計測することができない。また、対象物が遠くなるにしたがってレーザ光が弱まり、カメラに映し出されず検出できなくなる。さらに障害物が存在する場合情報が得られないという課題が生じる。

3. 4. 1 微動計測装置による多方向からの計測

微動計測装置を用いてロボットを多方向から計測すると図3.18 のようになる。

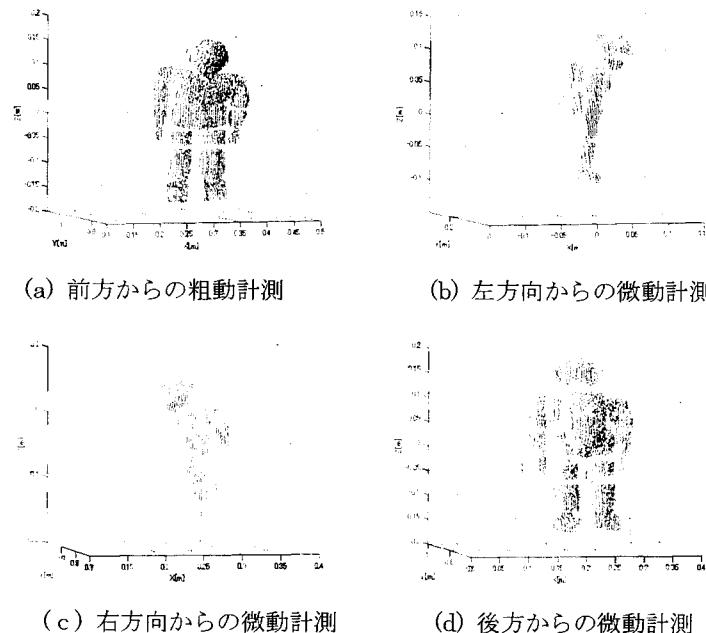


図 3.18 微動計測装置導入による多方向計測

このように微動計測装置を用いることで前面方向からの粗動計測装置のみでは得られない多くの情報を得ることが可能となる。

3. 4. 2 微動協調操作による情報取得法

3. 4. 2. 1 計測対象物が現れている場合

交換対象物が障害物等の影響を受けずにそのまま現れている場合、前面方向から粗動計測を行った後に、図3.19のように粗動カメラのレンズ中心Oを原点とした交換対象機器の任意の点P(x, y, z)を求める。次に、マニピュレータ上の微動計測装置を対象物に近接させ、搭載したレーザとカメラで背面等の粗動では検出できない部分の微動計測を行って機器の交換に必要な情報を得る。なお微動計測装置自体の位置は粗動による計測で求める。

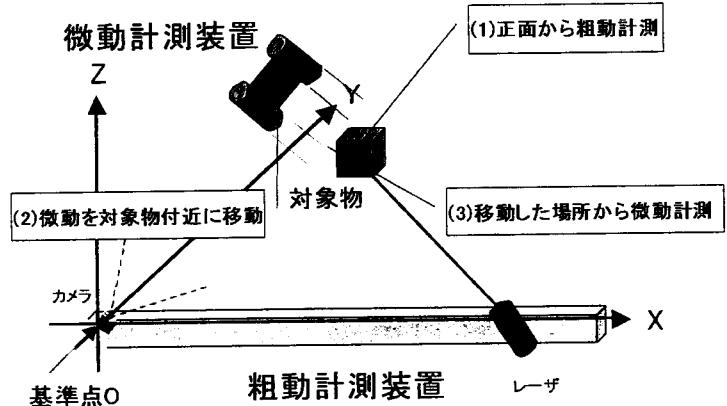


図 3.19 対象物が現れている場合の計測

上述の対象物が他の機器に隠れていない場合の粗微動協調操作は、具体的には以下の手順で行なわれる。

- ① 粗動計測装置のカメラで立方体の対象物を把握する
- ② 対象物の情報を取得する
- ③ 微動計測装置（将来的にはロボットアームに搭載）を対象物付近に移動する
- ④ 移動した微動装置（ロボットアーム）のカメラから対象物を把握する
- ⑤ ロボットアームのアームを動作させてカメラにて対象物を正確に把握する。その後は微動計測装置で情報の取得を行う

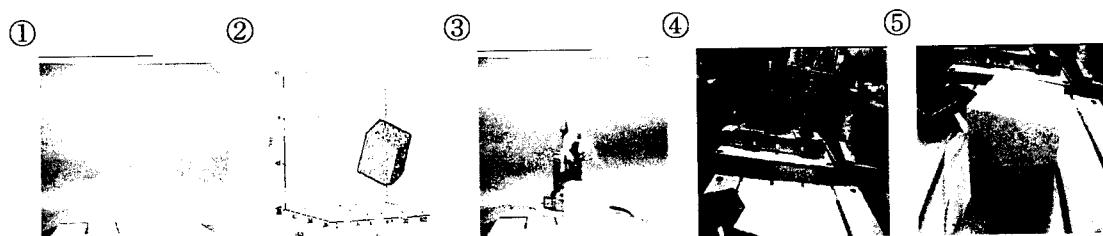


図 3.20 対象物が現れている場合の手順

3.4.2.2 計測対象物が他の機器に隠れている場合

対象物が他の機器に隠れている場合は、図 3.21 のようにさらに二つの場合分けを行う必要がある。

- (a) 対象物が比較的少ない障害物に囲まれている場合は、粗動装置のスライダ機構を利用して計測可能な所まで移動し、交換対象物の任意の座標を求める。その後は求めた座標の付近に微動装置を移動させた後に、微動計測を行うことで粗動では得られない箇所を計測する。

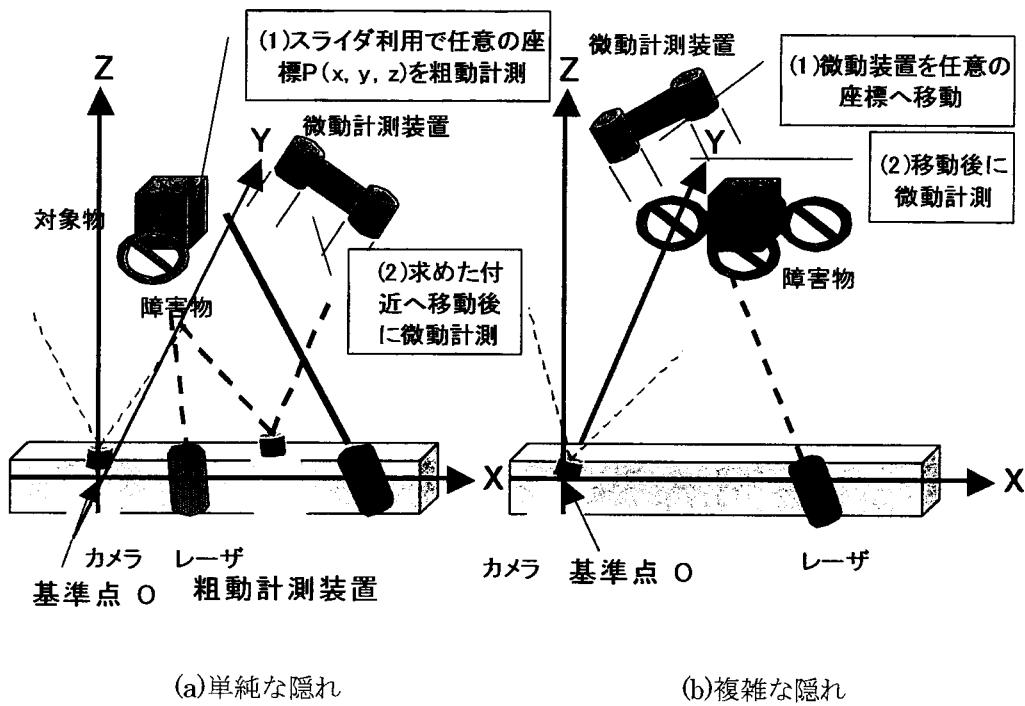


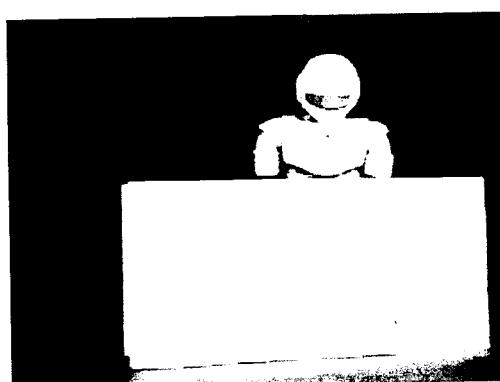
図 3.21 対象物が隠れている場合

(b) 計測対象物が他の障害物に閉ざされて複雑に隠れている場合には、微動計測装置に搭載されたカメラ画像を見ながら微動装置を対象物付近の任意の場所に移動させる。移動先の位置は粗動装置によって求められる。その位置で微動装置のレーザとカメラで対象物の情報を得、さらに微動装置によって移動と計測を繰り返しながら対象物全体の情報を取得する。

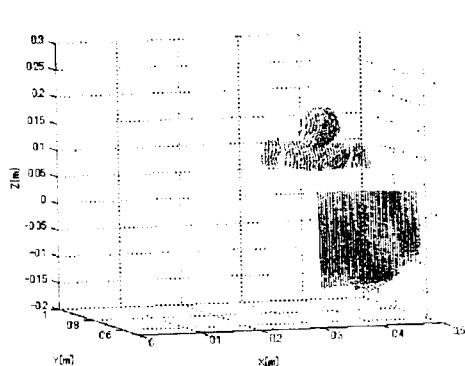
この方法に従い、(a)の単純な隠れの場合の測定を図 3.22 のように行う。対象物はロボットとし、白いブロック型の障害物に隠れているという条件である。

まず、①のように正面の粗動計測装置のカメラ画像を見ると障害物に隠れているのがわかる。その場で粗動計測を行うと②のようになる。

①



②

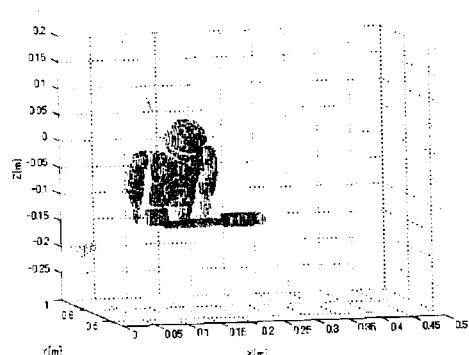


③粗動計測によって大体の位置を把握した後、その情報を利用して対象物に微動計測装置を障害物の影響が少ない上方まで近接させてカメラ画像で捉える。④微動計測を行う。

③



④



⑤次に障害物影響のない裏側の位置まで回りこむ。⑥微動計測を行い、障害物に隠れていた対象物の情報を得る。

⑤



⑥

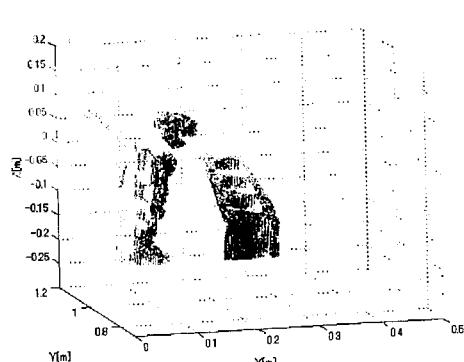


図 3.22 単純な隠れの場合の粗微動協調計測

3.4.3 セル内機器への適用例

3.4.3.1 金属製対象物の情報抽出

図3.23に示す、実際にセル内に使用されている金属製の対象物の場合に本手法を適用するため、形状情報を得る測定を回転角度0.1度刻みで行った。

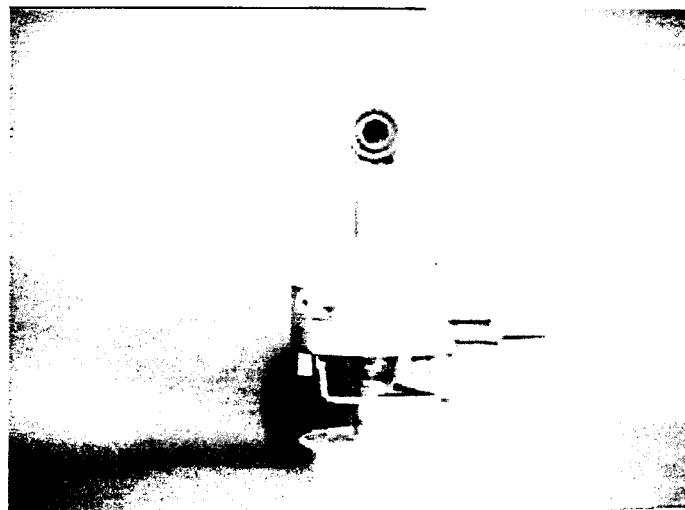


図3.23 計測対象物の金属物体

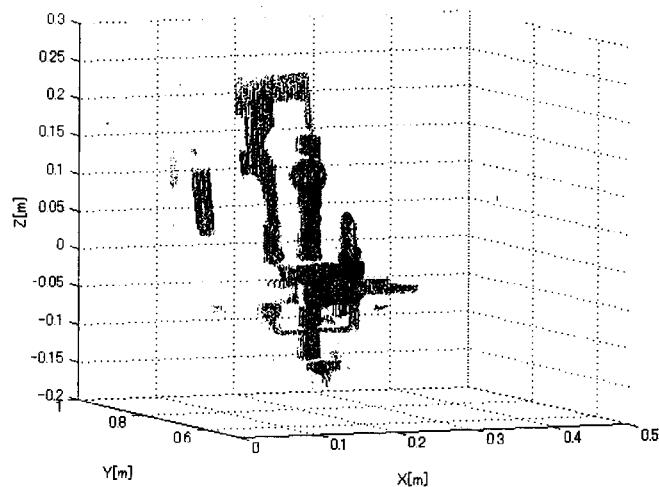


図3.24 金属物体の三次元スリット光画像（回転角0.1度）

図3.24の結果からスリット光画像には情報の欠如が見られる。これはレーザ光が光沢のある金属物体から拡散反射し易いためである。そのため、レーザ光と雑音との閾値設定が困難であった。今後この点は改良する余地がある。

3.4.3.2 機器交換のための情報取得

次に、セル内施設で実際に使用されている金属製物体に、白色配管型の交換用対象物を取り付けた状態で、機器交換を想定した情報取得の実験を行った。まず、粗動計測装置によって前面方向から全体の情報を得た。その結果を図 3.25 に示す。

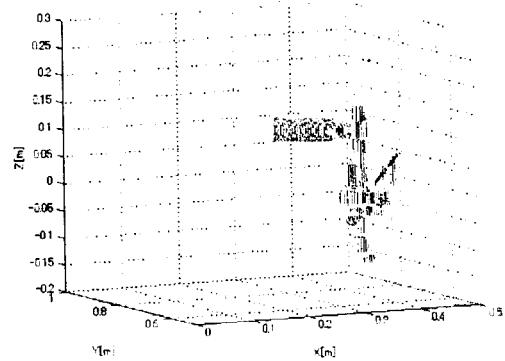
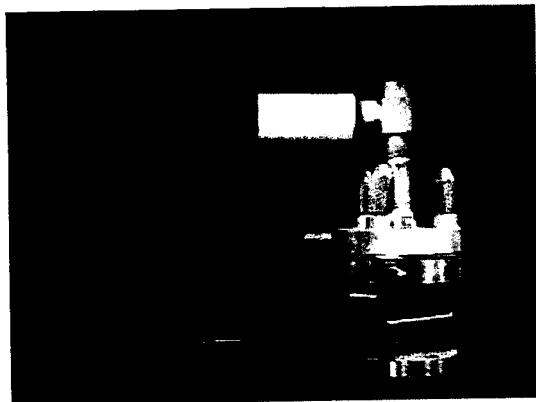


図 3.25 粗動計測

粗動計測装置による計測後、今度は局所的な情報取得を行うため微動計測装置を対象物に近接させて微動計測を行った。その結果図 3.26 に示すように、粗動計測に比べて詳細な情報が得られているのがわかる。

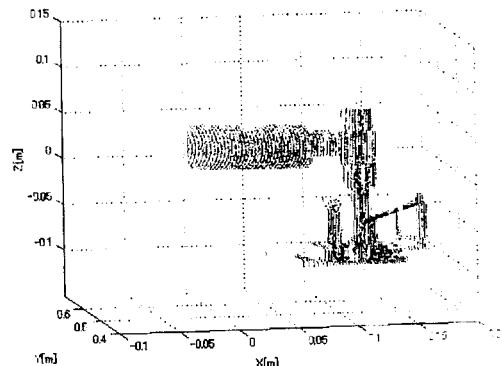
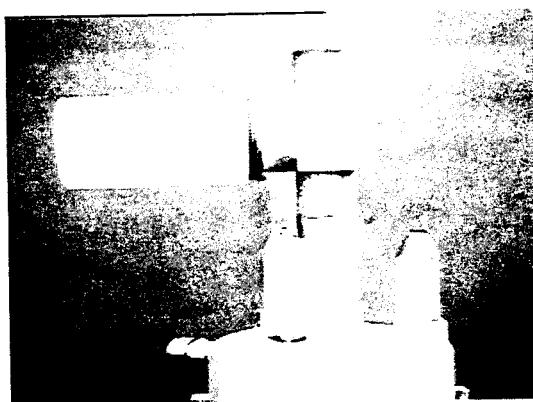


図 3.26 近接による微動計測

また図 3.27 に示すようにプレウィット変換により、カメラ画像に画像処理を施し、エッジを求めて計測する領域を指定することで、配管型の交換対象物のみの情報が得られる。

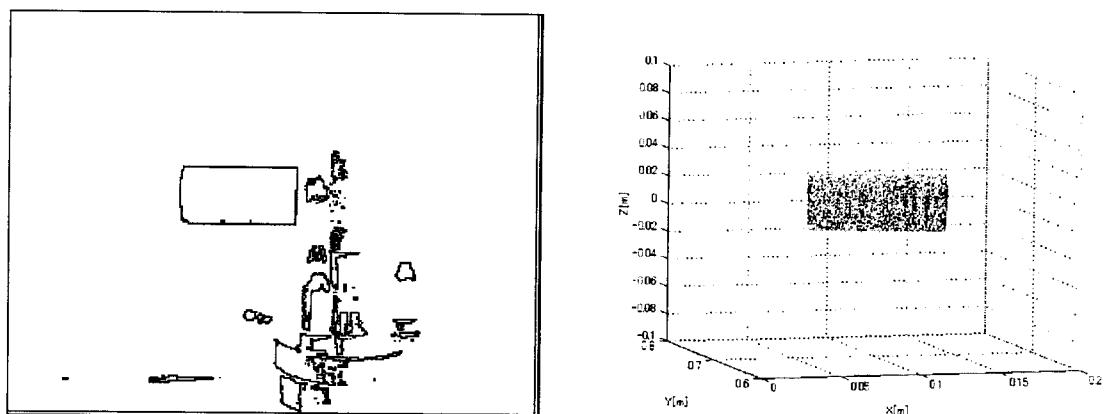


図 3.27 プレウィット変換と計測領域指定

微動計測装置を交換対象物の下方に移動し、カメラ画像から二値化処理を行った上で計測を行うと図3.28 のようになる。

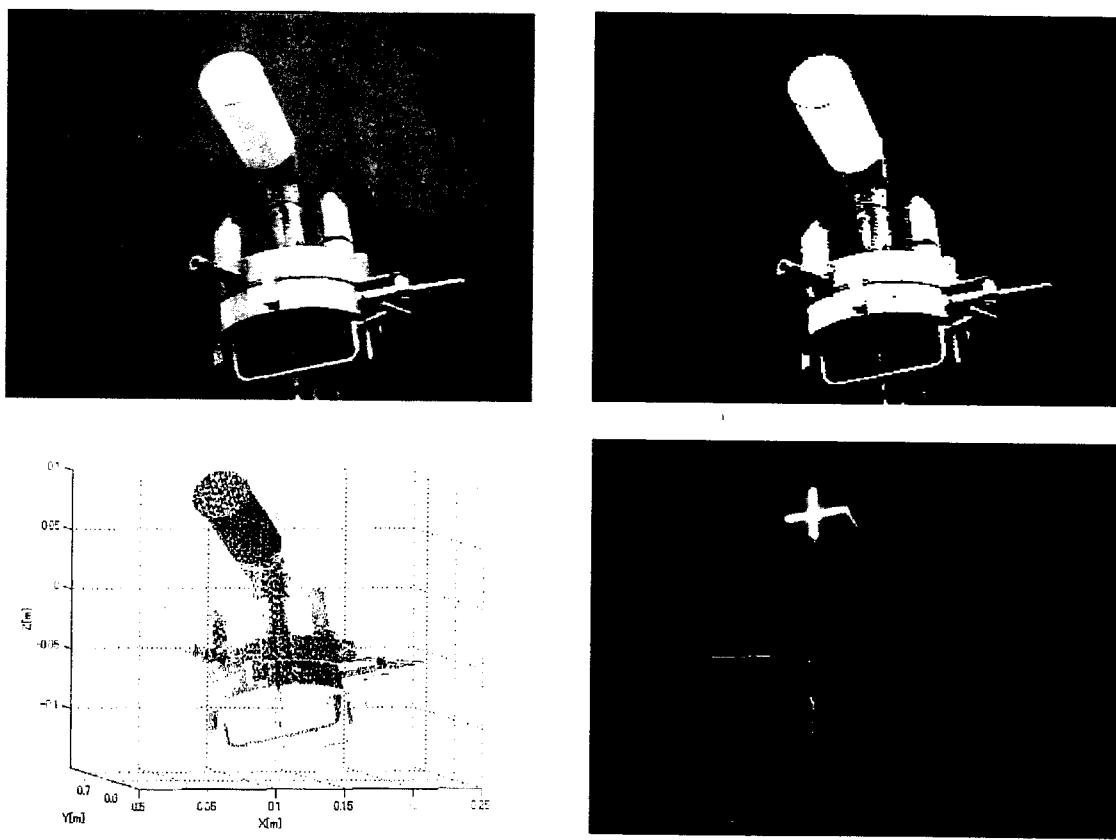


図 3.28 下方からの微動計測

さらに十字スリット光により面の傾きが計測可能である。現在このシステムは完成していないが、将来的にはこの傾斜情報を利用し、配管型交換対象物の前面方向へ微動計測装置を移動させることで測定が可能となる。

配管型交換対象物の前面方向へ移動して微動計測を行うと図 3.29 となる。

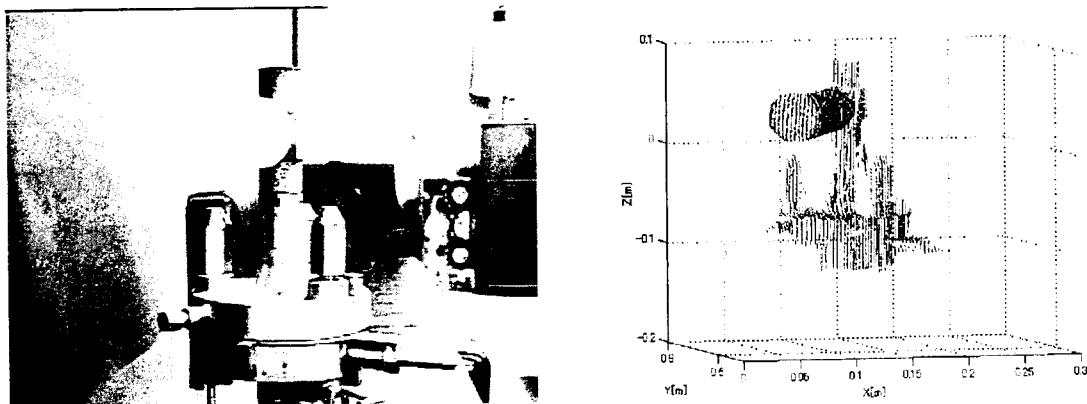


図 3.29 配管型交換対象物正面方向からの微動計測

また図 3.30 のように、配管型交換対象物の前面方向からの領域指定によって、交換対象物のみの情報も得ることが可能である。

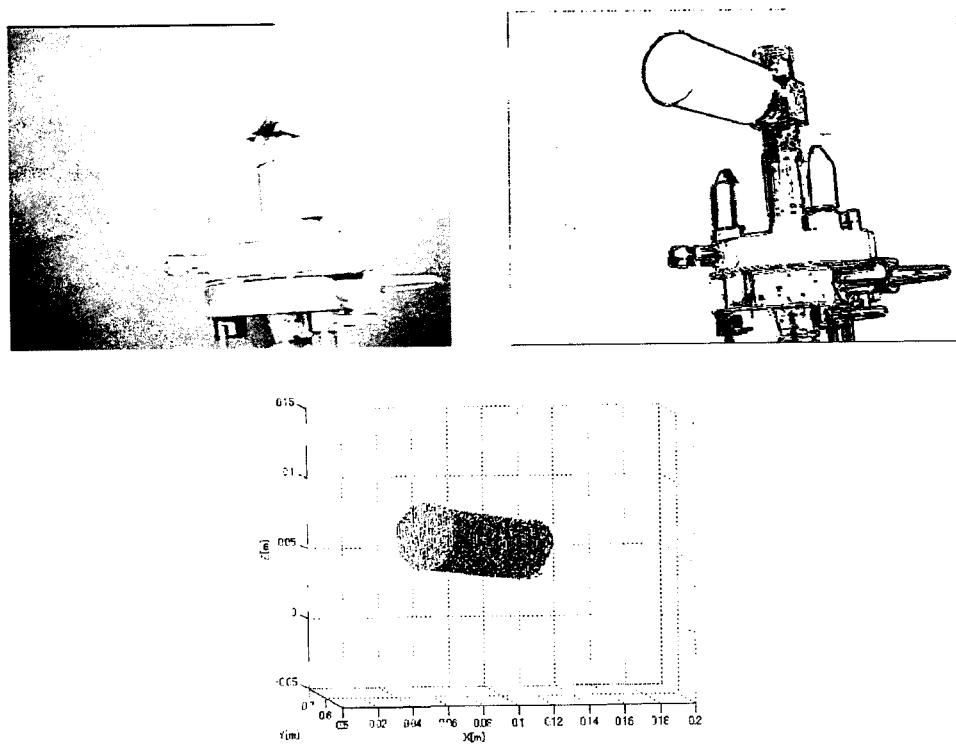


図 3.30 領域指定と配管型交換対象物

以上のような粗動微動協調操作による情報取得を行うことで、遠隔操作によりセル内の機器や部品を交換する際の距離・形状・傾き等の位置情報を非接触かつ必要とされる精度で計測情報を抽出することが可能となった。

3. 5 今後の課題

- (1) まず計測時間を短縮する必要がある。スリット光を用いて形状計測を行う際、現状では撮像素子中全ての画素の輝度値を求め、その中で最大輝度値を探査している。しかし、スリット光照射後、次に照射する場所はその近傍であると予想できるので、全ての画素を探査する必要はない。つまり、計測アルゴリズムの改良の余地がある。
- (2) 現在使用しているパソコンのCPUのクロック周波数は1GHzであり、現在主流の3GHz超の高性能パソコンを導入することによりより高速な計測が行える。これは研究費の問題である。
- (3) 計測精度の向上および計測可能な領域を増やすためには計測装置の改良が必要である。研究費の関係上手作りによらざるを得ない部分がかなりあった。例えば、回転や平行移動の自動による駆動装置を用いることで自由度が増え、それによって計測可能な領域が増大するので精度向上が期待できる。
- (4) 三次元稜線のみではなく、さらに対象物全体のエッジを高精度に抽出する。エッジ抽出のアプローチ法として、画像処理を行ってエッジを抽出してから三次元距離画像を得る手法のみならず、距離画像のデータの変化率からエッジを抽出する手法も併用する。

4 VR (バーチャルリアリティ) による対応の提案

本研究で提案するVRシステムを使用することで、マニピュレータに実作業行わせることの可能性について追及かつ構築して行く。一般に仮想空間内にすべての物理法則を適応させることは難しい。そこで本研究における問題点を以下のように整理し、想定して考察していく。

VR 内での機器の変形および摩擦等の影響は無視する

接触判定に要する時間及び精度は直接操作感を優先させる

視覚的要素により VR を構成する

4. 1 システム構成

システム構成としてマニピュレータ、VR を実現するためのPC 1、それに入出力装置を使用する。

入力情報はPC にのみ送り、マニピュレータはPC で加工された情報で動くシステムを想定する。

制御方法として、作業者は実際のマニピュレータの状態に捕らわれることなく、VR 内にあるマニピュレータで制御を行う。VR に対する制御完了後、その入力情報を元に現実世界でのマニピュレータの動作コードを作成し、正確な制御が行なえるようなシステムとする。これによってリアルタイム制御の必要性をなくすことが可能となる。一方で万が一の事態に対処するため、同時にリアルタイム制御への切り替えを可能にすることでより安全性を高められるシステムを目指す。

4.1.1 リアルタイム制御

ここでいうリアルタイム制御とは、PC に入力を与えた場合その情報が即座に実機に伝達され、実時間的に制御を行う方法をいう。

4. 2 仮想世界

VR で使用する「仮想世界」を表現するためにPC を使用する。またVR内には、一般的に使用されるVR の意味に付け加えて、現実世界とは異なる形状や動作のため、マニピュレータを用いて現実世界の制御を行うインターフェース変換の意味が含まれている。ここでのVR は大きく分けて2つの役割を持っている。

- ① 一つはユーザーインターフェースとしての役割
 - ② もう一つは現実世界とのインターフェースとしての役割
- である。

4.2.1 ユーザーインターフェースとしてのVR

制御を行う作業員とのインターフェースとしての役割を負っているVR はPC 上に表現されている。作業者は仮想空間の中に表現・存在しているマニピュレータを制御することで、結果として現実世界を制御することになる。ここで作業者は、現実世界でのマニピュレータがどの位置に存在し、どのような状態であるかを気にする必要はない。また、現実世界のマニピュレータを実際に制御するのは作業者ではなくPC となる。なお、仮想空間内に表現・存在しているマニピュレータは現実世

界に存在しているものと同系の両腕型ではなく、片腕でかつ手首のみである。そのため操作は非常に容易となる。このように作業者は現実世界を一切気にする必要がなく、また現実世界とは異型の簡易マニピュレータを制御するだけで済む点が、本提案法の最大の特徴である。

これは、現実世界では行わなければならない面倒な作業の大部分をPCが行うことで容易に対応し得るという点で大きく貢献している。また、VRであるため現実世界でのカメラと異なり、視野や位置は任意に決定でき、仮に作業に失敗したとしてもリセットを行うだけで処理できる。制御と操作に熟練は一切必要としない等多くの問題を解決することが可能となる。

4.2.2 現実世界とのインターフェースとしてのVR

本システムでは作業者とマニピュレータが同期する制御、つまりリアルタイム制御である必要がない。まず、作業者がVRに対し制御を行うが、VRはここからどのようなことを行うかと言った事実だけを取り出す。つまり、VR内のマニピュレータの移動経路等は一切関係なく、何を行ったかだけが取り出される。そのため作業者はどのような経路を選んで作業を行っても一向に差し支えない。作業者のVRに対する制御が終了後、取り出した事実から現実に制御を行うためにどのような経路を通り、どのようなことを行えば良いかを計算してファイルに書き出す。これはNC工作機械で使用されているNCコードと似ている。

最終的に現実世界のマニピュレータを既に求めてあるファイル通りに動かす。そのため作業者がVRに対し制御を行っている時点で失敗が生じても、ファイルの書き出しを行わないだけで済むことになり、何ら問題は生じない。また、一旦ファイルを書き出せば次回から同じ作業を行わせる場合に、再びVRに対する制御を行わないで良いことになる。

以上がVRを適用する際の基本となる。安全性を考え、いつでもリアルタイム制御へ移行できるようにする必要があることも忘れてはならない。

4.3 物体把握のための座標

物体の把握は、セル内においてマニピュレータによって交換用機器等を操作する場合の基本である。重要な課題となる。

4.3.1 三 次元表現法

(1) 座標とベクトル

使用するグラフィックスライブラリでは、座標値を三 次元のベクトルで表現する。座標値もベクトルも同じ表現の仕方をするが、これは処理によって座標値であるかベクトルであるかが変わる。例えば、ある点に回転行列を掛ける時、この点は座標値までのベクトルと見なし、原点を中心にベクトルを回転させる処理となる。

(2) 座標系

3次元空間の表現にはx, y, zのそれぞれの座標軸をどのように配置するかで、右手座標系と左手座標系がある。ここでは左手座標系を採用した。但し、回転の向きは右手座標系のそれとする。

(3) 座標変換

三次元直交座標系中の座標 (px ; py ; pz) の点を考える。座標系の x ; y ; z 軸方向の単位

ベクトルを i ; j ; k とすると、この点の位置は以下の様なベクトル p となる。

$$p = px i + py j + pz k \quad (4.1)$$

この点を x 軸方向に dx , y 軸方向に dy , z 軸方向に dz 平行移動すると、移動後の点の座標は $(px + dx; py + dy; pz + dz)$ となる。

次に、方程式 $f(x; y; z) = 0$ で表現される図形を同様に $(dx; dy; dz)$ 平行移動することを考える。移動後の図形の方程式を $q(x; y; z) = 0$ とする。 $q(x; y; z) = 0$ を満たす点の座標 $(x; y; z)$ を $(i dx; i dy; i dz)$ 平行移動した点の座標 $(px + dx; py + dy; pz + dz)$ は、移動前の図形の方程式を満たすはずであるから、

$$q(x; y; z) = f(x + dx; y + dy; z + dz) = 0 \quad (4.2)$$

となる。例えば $f(x; y; z) = ax + by + cz + d = 0$ という方程式で表現される平面を平行移動すると、移動後の形状は

$$a(x + dx) + b(y + dy) + c(z + dz) + d = 0 \quad (4.3)$$

となる。これももちろん平面である。

以下この定義に従って回転移動等を行う。

4. 4 接触判定

VR によりマニピュレータの操作および制御を行う以上、その物体同士の状況、例えば接触状況などが分かるということは当然必要不可欠な情報である。しかしグラフィックスライブラリには三次元表現をする機能がついているのみである。そこで必要となる物理法則を独自に作成した。例えば、複数存在する物理法則のうち接触現象に着目して、VR 内でも物体に触ることができるようにしてある。その他の物理法則、例えば回転モーメント、運動量保存の法則、運動量保存の法則等に関しては今後作成していくかなければならない。接触判定の中でも、平行移動時の接触判定と回転移動時の接触判定とは方法が異なる。そこで、この2種類の移動方法で接触判定が行えるようプログラムを実行した。なお、現実的に考えてこの2種類の移動方法で移動が可能であれば、任意の移動を表現することが可能となる。平行移動を行う場合、ローカル座標、ワールド座標に関係なく物体を構成できる。各点は同時に同一方向、同一距離だけ移動する。そのため平行移動を基準として接触判定を行うことにしている。

一方回転移動を行う場合、回転中心の位置により物体を構成している各点の移動方向や移動量は異なる。そのため回転移動の際の接触判定は、物体を構成する各三角形がその場で回転を行い、その後平行移動をするという考え方で実現している。ここで物体そのものがその場で回転をしているわけでは無いことを強調しておく。これは接触判定の正確性を向上させるためである。このため、回転移動による接触判定は平行移動による接触判定の基に成り立っている。

4.4.1 「点と面」による接触判定

仮想空間内の物体は全て三角形の集まりで表現されていることを利用し、移動時の物体同士の

接触という現象を仮想空間内で実現する際、接触判定の有無について照合する。その手順を示す。以下に示す手順(1)から(9)では、移動物体とそれ以外の単体の内の1つに対し接触の有無について照合を行う。そのためこの照合を複数回繰り返すことによって全体の接触判定が行える。また移動物体以外の物体は静止状態であると仮定している。またこの方法でそのまま処理を行うと非常に処理量が多くなるため、

移動しても接触をする可能性がないことが分かった段階で、その後の処理をせずに判定を行っている。これにより処理時間を短くすることが可能となる。

- (1) 照合の対象となる単物体を決定する。以下これを照合対象物体と呼ぶ。すべての単体に対し照合を行い、照合対象物体の無い場合は移動しても何にも接触することが無いため非接触を検出し、照合を終了する。
- (2) 現在選択されている照合対象物体が例外処理をする物体として登録されている場合は、全体の非接触検出をおこなう。全体非接触とは移動物体と照合対象物体との非接触である。
- (3) 移動物体と照合対象物体とが互いにテリトリーに侵入していない場合は、接触することのない十分な距離を保っているので全体の非接触状態を検出する。
- (4) 移動物体を構成する三角形の1つを決定する。以下これを照合平面と呼ぶ。既にすべての三角形に対し照合が行われている場合は全体非接触状態を検出する。
- (5) 照合平面が図4.1示す様に進行方向に表側を見せていている場合、接触の可能性はないので部分非接触状態を検出する。以下部分非接触とは照合平面と照合対象物体との非接触状態である。



図4.1 進行方向に表側を出している面

(6) 照合対象物体を構成する三角形の頂点を選択する。以下これを照合対象点と呼ぶ。既にすべての照合対象点に対し照合が行われている場合は部分非接触状態を検出する。

(7) 照合平面の裏側に照合対象点がある場合は、接触の可能性がないので部分非接触状態を検出する。

(8) 図4.2のように、移動後も照合平面と照合対象点が十分な距離にある場合は接触することができないので部分非接触状態を検出する。この判定は移動後も面の表に点があるかどうかで確認ができる。

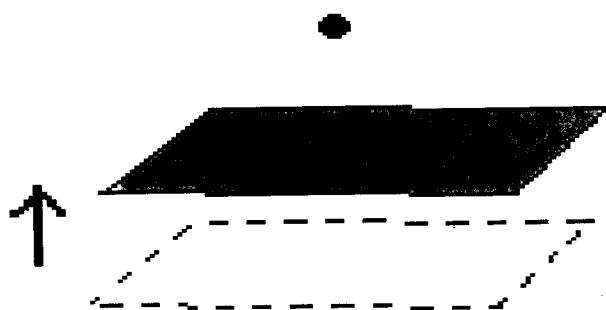


図4.2 移動後十分な距離のある場合

(9) 図4.3に示すように、物体が移動する際に照合平面が照合対象点を通過して移動する場合は照合対象物と接触したと判断し、検出後に照合を終了する。接触が検出されない場合は部分非接触状態を検出する。点を通過して移動する面については後述する。



図4.3 点を通過して移動する場合

仮想空間内のマニピュレータや物体は複雑な構造をしていて、図4.4のようなマニピュレー

タで他の物体を掴んだりする。そのため簡単に移動物体と言っても複数の単体が存在する環境下にある。自分自身を構成している複数の単物体を始め、掴む掴まれるという関係にある他の物体はあらかじめリストに登録されている。そこで移動する物体に掴まれている他の物体や、移動物体を掴んでいる物体は一時的に移動物体の一部になっていると見なし、照合対象物体が自分自身を構成する単物体のみの場合は接触することが無いため全体が非接触状態となる。この処理は無駄な処理を抑えることにつながり、データの処理量を大幅に軽減することに貢献している。

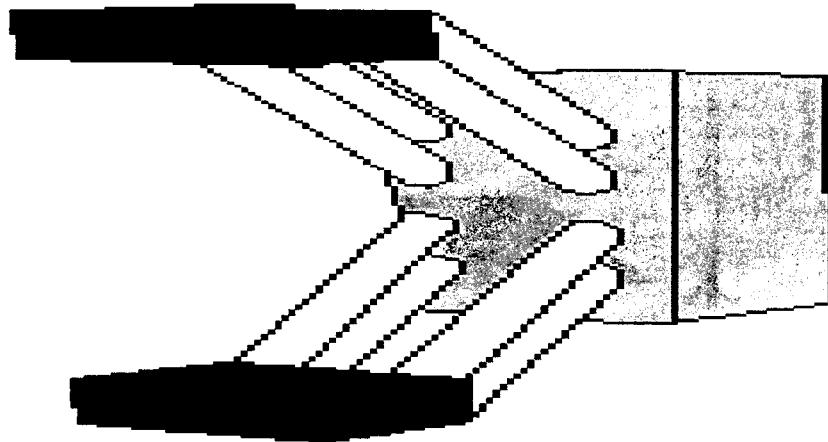


図4.4 仮想マニピュレータ

各物体はローカル座標系同様独自のテリトリーを持っている。これは各物体の中心部分から物体を完全に飲み込むことができる最小の球内を意味する。移動物体の移動後の中心位置と照合対象物体の中心位置との差と、移動物体の持つテリトリーの半径と照合対象物体のテリトリーの半径の和を比べることで、十分な距離を持つかどうかが分かる。当然十分な距離を保っている場合は処理を行わない。この処理により移動物体の近くにある物体のみが照合対象物体となりうるため、処理量を軽減することに大きく貢献する。

進行方向に表を見せている面については、照合平面は三角形であるため当然3つの点を持つ。この3点から面の向きを知ることができる。三角形を構成する点の順番により始点と2つのベクトルを取り出すことができるので、この2つのベクトルの外積から面の法線ベクトルを得て、それと進行方向ベクトルとの内積により進行方向に表を見せていく面かどうかが判断できる。進行方向に表を見せていない場合は、他の物体と接触することはありえないでの、それから先の処理は行わない。この判定も処理量を軽減することに貢献する。

以上VRについての途中経過について述べた。

5 結 論

以上の研究を通し、以下の結論を得た。

機器や配管等の劣化状態を検出する手法として、電線を測定物体に選んでコントラスト法を提案した。この場合、測定結果がレーザ光の入射角とカメラの受光角度に大きく影響されるという問題が生じた。そこでレーザとカメラの有効的な配置法を理論的かつ実験的に検討した。得られた結果を要約すれば次のようになる。

- (1) レーザとカメラの最も有効的な配置法は、レーザ光の入射角 50 度、カメラの受光角 0 度のときである。
- (2) 輝度度値 Green の標準偏差を用いてキズの診断を行うことが可能である。この場合の判定基準を平均値 $+2\sigma$ とすることの有効性が得られた。
- (3) コントラスト法による劣化状態の判別が可能であることが確認された。

次に、セル内における機器・配管等を交換するための情報取得を目的として、位置や形状計測法を提案した。得られた結論を以下に示す。

- (1) スポット光による三次元位置計測では、レーザ光源からスポット光を照射して三角測量法に基づく対象物の三次元位置計測を行った。その結果、計測された値は実際の位置と近い値が得られた。また、スポット光による三次元位置計測法を応用したスリット光による三次元形状計測では、レーザ光を平面状に広げたスリット光を照射してレーザを順次回転させることで対象物全体の形状計測を行った。その結果、対象物の概形を示すことが確認できた。
- (2) 十字スリット光投影法により面の傾き、円の径、さらには形状計測を行い、実際の傾きや円の径の値と近い計測値が得られ、かつ対象物の概形も得られた。また二値化処理等の画像処理を用いて計測対象領域指定により対象物のみに注目し、それによる三次元稜線抽出を行った。その結果、交換に必要な三次元稜線の抽出が可能であることが示された。
- (3) 粗動計測装置と微動計測装置の協調操作による相互の情報補完法を導入することで、今までには得ることができなかった隠れ領域の詳細な情報を得ることが可能であることを示した。

なおVRの適用性については基本的には十分その可能性が見出されたが、現状は未だ研究の途中段階であるので、今後引き続き検討して行く必要がある。

参考文献

1. 社)精密機械学会 光を用いた工学表面の性状評価分科会： 非接触方式による精密加工表面の性状評価、 理工企画株式会社 (1985) .
2. 井口征士、佐藤宏介： 三次元画像計測、 pp. 36、昭晃堂 (1990).
3. 小関修, 他：“光切断法を用いた実時間距離検出装置”、電気通信学会論文誌、第 68 卷、5 (1985)

本研究関連の発表

- (1) G. Yang and M. Shiraishi: On Machine Measurement of a Curved Profile by Sensor Positioning Control, Proc. of In. Conf. on Advanced Manufacturing Systems and Manufacturing Automation, China, June, pp. 542-545, 2000.
- (2) M. Shiraishi, K. Tsuchiya and G. Yang: Sensing and Control of Friction for Fine Positioning, Proc. of Nanotechnology Symposium, University of Warwick, Sept.18-21, 2000 (Key Note Paper).
- (3) 青島伸一, 近森丈士, 白石昌武: 車両上部搭載型複合センサを用いたトンネル内壁の動劣化監視, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集(CD-ROM), (2001)
- (4) S. AOSHIMA, H. KAMINAGA, M. SHIRAISHI: One-Hand Drive Type Power Assisted Wheelchair with Direction Control Device Using Pneumatic Pressure, Proc. of the ICSC Symposia on INTELLIGENT SYSTEMS & APPLICATION (ISA' 2000), CD-ROM paper No. 1543-146, (2000)
- (5).S. Aoshima, A. Murao, and M. Shiraishi: Mechanism and Control of Master-Slave Walking Robot, Proc. of Third European Workshop on Advanced Mobile Robots (Eurobot'99), pp.9-16, 1999
- (6) A. Ito and M. Shiraishi: New Design Method of Observer-Frequency Domain Approach,
Japan Society for Precision Eng., Vol. 67, No. 5, pp. 781-785, 2001 (in Japanese).
- (7) 伊藤敬輔：レーザ光による物体の状態検出, 平成 12 年度茨城大学卒業研究論文.
- (8) M. Shiraishi and T. Koizumi: Friction Control of Positioning System By AE Detection, Proc. EWGAE 2002, Prague, Sept.11-13, pp. II/157-162, 2002.
- (9) M. Shiraishi, T. Yamagiwa and A. Ito: Practical Dimensional Error Control and Surface Roughness Inspection in Turning, Proc. IMECE, ASME, Nov.17-22, CD-ROM, 2002
- (10) M. Shiraishi and T. Yamagiwa: Is it possible to detect and control friction in positioning?, Proc. Korea-Japan Conference on Positioning Technology, Teijon, Oct.15-17, pp. 64-68,2002.

- (11) A. Ito and M. Shiraishi: Observer Design for Mechatronics System based on Frequency Domain, Proc. of Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Hiroshima, July, pp. 1035-1042, 2002.
- (12) 白石昌武：ロバストなセンシング and/or 制御への挑戦，キーノートスピーチ，精密工学会春季学術講演会，東京農工大，3月，CD-ROM，2003。
- (13) 大山正勝，小泉務，小山智造，白石昌武：光圧力による粒子の挙動に関する研究、精密工学会春季学術講演会，東京農工大，3月，CD-ROM，2003。
- (14) 森本國文，小泉務，小山智造，白石昌武：VR を用いたマニピュレータの操作、精密工学会春季学術講演会，東京農工大，3月，CD-ROM，2003。
- (15) 沖智之，小泉務，小山智造，白石昌武：高圧電線の表面性状オンライン診断、精密工学会春季学術講演会，東京農工大，3月，CD-ROM，2003。
- (16) 伊藤敬輔，小泉務，小山智造，白石昌武：粗微動協調操作による原子炉内機器交換のための情報取得、精密工学会春季学術講演会，東京農工大，3月，CD-ROM，2003。