

平成12年度

新エネルギー・産業技術総合開発機構研究受託成果報告書

知的基盤創成・利用技術研究開発

高効率人体計測器の研究開発

平成13年3月

社団法人 人間生活工学研究センター

平成12年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構研究受託成果報告書
知的基盤創成・利用技術研究開発 「高効率人体計測器の研究開発」

要約：

1. 検出ヘッド部の調整

マルチスリットラインのレーザにおける外周部に僅かな湾曲状の曲がりが存在することにより要求仕様の精度が確保できないことが判明。原因は回折格子にて生成されたスリットをレンズにて拡大する際に光学原理上、湾曲状の曲がりが発生するため。回折格子を変更、レーザの形状を複数のスリットから複数のドットに変え、各ドットの先にライン状に広げる為のレンズをライン本数と同数追加することにより湾曲状の曲がりを回避した。

2. 隠れ部位の計測法の検討と試作器の作製

特殊体型ダミーを用い、頬の下、脇の下、股の下等既存計測器では隠れ部位となる部分に関する計測可能になるよう検出ヘッド部の位置を最適化する検討を行い、この結果を基に試作機図面を作成した。

3. 複数センサより取得されるデータのマージ法検討

座標軸の差分を埋めるように3次元上で回転、移動、スケーリングを行った後、オーバーラップ領域内で点間距離が短い点同士を近似点とし、合成をおこなう[近似点合成法]、座標軸の統一を行った後、その形状データを3次元上に設定した格子との断面を求め、ある一定間隔に並んだ座標に再構成する[3次元格子法]の検討を行った。

4. 計測誤差の分析

既存計測器を用いた特徴点位置座標抽出における寸法算出誤差について検討した結果、計測器の設置調整時における不備が発覚、再調整後に再度検討した結果、精度的に問題ない算出寸法項目を選別した。

Summary:

1. Adjustment of detection head section

We have found that sufficient accuracy to meet the requested specifications could not be maintained, due to the existence of a slight bend on the outer circumference section of the multi-slit line laser beam. From the viewpoint of optical principles this bending is caused when the slits formed by the diffraction grid are magnified by the lens. We have therefore changed the diffraction grid and the laser form, from multiple slits to multiple dots, and have added a number of lenses, the same as the number of lines, ahead of each dot, to expand the dots into linear form, thus avoiding the occurrence of bending.

2. Study of method for measuring hidden parts, and production of trial model

Using a special human-form dummy, we studied the optimal position of the detection head to enable measurement of body parts such as areas beneath the chin and under the arms, and the crotch, etc., which are hidden when existing measuring equipment is used, and, based on the results of this study, prepared drawings of the trial model.

3. Study of method of merging data obtained from multiple sensors

After we carried out rotation, transfer and scaling of three-dimensional coordinates to

compensate for the differences between the axes of the coordinates, we unified these axes by the “approximate point composite method” which combines points within the overlap domain for which inter-point distance is short, to give approximate points. We then studied the “three-dimensional grid method” of reconstituting the coordinates positioned on individual lines at regular intervals, by obtaining the form data for each section of the grid set up using three-dimensional coordinates.

4. Analysis of measurement error

As the result of our study regarding errors in calculation of dimensions in extraction of the coordinates of the positions of characteristic points using the existing measuring instrument, we discovered imperfections occurring at the time of measuring instrument set-up and adjustment, and as a result of further study following re-adjustment of the measuring instrument, we selected those dimensional items that can be calculated without any problems in accuracy.

目次

はじめに	1
第1章 本年度研究概要	2
1. 1 本年度の研究実施内容	2
1. 2 委員会の設置	3
1. 2. 1 検討委員会委員構成	3
1. 2. 2 委員会の活動	5
1. 3 実施計画日程	5
第2章 検出ヘッド部の調整	6
2. 1 レーザ投光方式のマルチスリット化	6
2. 1. 1 人体計測器における短時間計測の必要性	6
2. 1. 2 短時間計測の為の手法	7
2. 2 検出ヘッドの構成と仕様	16
2. 2. 1 構成	16
2. 2. 2 仕様	17
2. 3 レーザ投光方式のマルチスリット化の問題点	20
2. 3. 1 問題点	20
2. 3. 2 原因	20
2. 4 問題点（レーザの湾曲）に対する対応策	22
2. 4. 1 対応策1：ソフトウェアでの補正処理	22
2. 4. 2 対応策2：シリンドリカルレンズによる補正	24
2. 4. 3 対応策3：マルチスリットレーザユニットを 違う光学素子で製作	26
2. 4. 4 マルチスリットの湾曲に対する対応策結論	29
2. 5 検出ヘッドの同時動作	31
2. 5. 1 概要	31
2. 5. 2 検出ヘッドの同時動作の為の手法	32
2. 6 仕様の変更	33
2. 6. 1 仕様	33
2. 6. 2 レーザスキャナユニット	34
第3章 隠れ部位の計測法の検討と試作器の作製	35
3. 1 概要	35

3. 2 レイアウト検討概要	35
3. 3 基本レイアウト検証	36
第4章 複数センサより取得されるデータのマージ法の検討	44
4. 1 概要	44
4. 2 処理項目	44
4. 3 検討を行った処理方法と問題点	47
第5章 計測誤差の分析	49
5. 1 手計測実験 1	49
5. 1. 1 目的	49
5. 1. 2 被験者	50
5. 1. 3 計測項目と特徴点	50
5. 1. 4 手計測	52
5. 1. 5 3次元形状計測	53
5. 1. 6 比較方法と結果	54
5. 2 VOXELAN 検定実験 1	56
5. 2. 1 目的	56
5. 2. 2 高さ座標値の検討	56
5. 2. 3 中心から左右方向の位置による偏差の違い	59
5. 2. 4 中心をはさんだ左右の幅の真値からのずれ	61
5. 2. 5 前後座標値の検討	63
5. 2. 6 特徴点座標値の計算	64
5. 3 VOXELAN 検定実験 2	67
5. 3. 1 目的	67
5. 3. 2 高さ座標値の検討	67
5. 3. 3 水平方向座標値の検討	69
5. 3. 4 前後方向座標値の検討	71
5. 4 手計測実験 2	74
5. 4. 1 目的	74
5. 4. 2 計測法に関する検討	74
5. 4. 3 被験者	75
5. 4. 4 計測項目と特徴点	75
5. 4. 5 結果	78
5. 4. 6 高効率計測器幹発に向けて	79

はじめに

近年、消費者ニーズの多様化や急速な高齢化により、人体に適合した衣類、寝具、住宅設備等の需要が拡大しており、身体計測データを新たな製品開発や既存製品の高付加価値化に反映させることが求められている。社団法人人間生活工学研究センター（以下、「HQL」という。）が自主事業として 1992 年から 1994 年にかけて行った計測により構築された 34,000 人の人体計測データベースは、衣料サイズ JIS 規格の改訂等、人体適合製品開発に大きく貢献してきた。

この計測において三次元人体計測器を用いた三次元画像データは、被計測者の負担軽減を目的とした寸法データ取得のための補助手段という位置付けであった。しかし近年、コンピュータを用いた製品設計の普及に伴い、産業界での設計現場よりコンピュータ上で扱える三次元人体形状データへのニーズが急増している。

また、現在 ISO 及び CEN において、人間の形態特性に関する規格としては、「設計のための基本人体寸法計測法」(ISO-7250)が正式規格として制定され、また「人体寸法データベースの構成要素」(NP-15535) 及び「製品等評価のための人体寸法的視点からの被験者選定法」(NP-15537) が新規規格として提案されているが、これらはいずれも人体の「寸法」に係る規格である。今後は人体の「形状」データについての国際規格化が進むと見られ、米国を中心として計画されている CAESAR 計画 (Civilian American and European Surface Anthropometry Resource Project; 1 万人規模の欧米人の人体形状データの計測とデータベース化プロジェクト) はその先駆けとなるものであり、単なる寸法データだけでなく三次元形状データを取得し、データベース化することを目的としている。

このような流れの中で、HQL では新規産業育成即効型国際標準開発事業において身体形態特性データの計測・データベース化手法に係る標準化の研究開発に着手し、三次元人体形状データの数値化への手法開発や人体形状の類型化の研究開発等、三次元形状データの規格や取り扱いに関しての技術開発に着手してきている。

一方、先に述べた HQL の人体計測データベースは計測開始から既に 7 年が経過しており、データの陳腐化が懸念され、韓国のように 5~10 年の間隔での定期計測を求める声が強い。

このような中、HQL は本事業において、近年技術の進歩が著しい、光学的方法による三次元形状計測技術と高性能なコンピュータによる画像処理技術により、人間の体型とサイズを高速・高精度で計測し、その結果を速やかに製品設計へと適用できるよう、寸法データ、三次元形状データとして出力できる高効率人体計測器の開発研究を経済産業省 産業技術総合技術研究所 生命工学工業技術研究所（以下、「生命研」という。）との共同研究によって行っている。

本報告は、当該事業に係る 2 年目における研究成果をまとめたものである。

第1章 本年度研究概要

1. 1 本年度の研究実施内容

今回の「高効率人体計測器の研究開発」における最終開発目標は「人間が不動に耐え得る1秒程度の迅速な速度で、なおかつ1mm程度の高精度を有する計測によって、寸法データ採取の基礎となる特徴点が正確に特定され、現実の身体形状を忠実に再現する三次元身体形状データを取得できる」ことにある。

このような三次元身体形状データが自由にコンピュータ上にて操作可能となれば、寸法データを始めとしてあらゆる身体形状特性データが随時採取可能となり、人間に適合した製品設計へ迅速に対応できる知的基盤が整備されることとなる。

本年度は昨年度本事業にて作製された検出ヘッド部（センサ部）を調整後、複数設置し、全身形状を隠れなく計測できる試作器の作製を目標とする。

(i) 検出ヘッド部の調整

検出ヘッド部は基本原理として、「イメージエンコーダ法」を用いている。ただし、本システムでは短時間に計測を行うことを目的としているため、従来1本のスリットレーザーにて走査していたものを複数のスリットレーザーにて走査を行う方式へ改良したものである。従来1本のレーザーにより測定範囲全域を走査することにより各画素の角度データを取得していたが、本方式では複数のスリットレーザーをスリット間隔分のみ移動して各画素の角度データを取得する。このとき走査方向に対する角度データは、従来方式は1次的に増加するが本方式では鋸状の角度データとなる。鋸状のデータでは各画素の絶対位置角度の算出できないが、本方式ではマルチスリットの中心スリットの輝度が高いことを利用し、このスリットを中心として絶対的な角度を算出する。この検出ヘッド部を全身計測に適用できるよう個別に細部の調整を行う。

(ii) 隠れ部位の計測法の検討と試作器の作製

頸の下、脇の下、股の間など陰や隠れとなる部位を極力減らすために隠れ部位の計測法の検討を行う。その結果を基に等身大の人間ダミー等を計測対象として用いて、センサに側面方向への回転角をつけるなど、センサの位置をうまく調整することにより側面及び股の間、脇の下など隠れ部位の奥の方までが計測可能となる試作器を作製する。

(iii)複数センサより取得されるデータのマージ法の検討

隠れ部位がないように複数配置されたセンサより取得される形状データを最終的に1つの全身データとして合成（マージ）しなければならない。これはセンサの数が増え、その配置位置が多様であるほど困難となる。この困難を解決するマージ法を検討し、3次元座標合成後で、距離精度目標である1.0 mm を実現させる。

(iv) 計測誤差の分析（生命研との共同研究）

研究開発目標の妥当性を検討し、最終的な製品の有用性を示すため、人間計測システム全体のトレーサビリティを検討する。

(a) 三次元計測器算出寸法と手計測寸法における誤差の検討

三次元形状データより特徴点座標を抽出後、これより人体寸法を算出した際の手計測寸法データとの誤差について検証する。

(b) 手計測寸法データと同等とみなせる三次元データ算出寸法の抽出

(a) の誤差検証の結果より手計測データと同等にみなせ、今後の計測を三次元計測器で代替可能な寸法項目の抽出を行う。

1. 2 委員会の設置

1. 2. 1 検討委員会委員構成

本事業を遂行するにあたり、人体計測に関する企業代表者や学識経験者等による以下の検討委員会を構成した。

(委員長)

河内 まき子 経済産業省 産業技術総合研究所 生命工学工業技術研究所
人間環境システム部 形態機能研究室 室長

(委員) [五十音順]

芦澤 玖美	大妻女子大学 人間生活科学研究所 教授
高増 潔	東京大学 工学系研究科 助教授
岸本 泰蔵	株式会社ワコール 人間科学研究所 形態動態研究グループ
中澤 和夫	慶應大学 理工学部 システムデザイン工学科 専任講師
平尾 章成	日産自動車株式会社 総合研究所 車両交通研究所
美濃 導彦	京都大学 総合情報メディアセンター 教授

持丸 正明 経済産業省 産業技術総合研究所 生命工学工業技術研究所
人間環境システム部 形態機能研究所 主任研究官
森廣 治 株式会社ホリカワ 総合企画部 技術開発課

(オブザーバー)

千野 雅人 通商産業省 生活産業局 人間生活システム企画室 室長
:(平成13年1月5日まで)
中山 泰 経済産業省 製造産業局 機械・生活産業ユニット
人間生活システム企画チーム チーム長
:(平成13年1月6日より)
森田 健太郎 通商産業省 生活産業局 人間生活システム企画室 企画班長
:(平成12年6月末日まで)
大木 雅文 経済産業省 製造産業局 機械・生活産業ユニット
人間生活システム企画チーム:(平成12年6月1日から)
栗原 一徳 経済産業省 製造産業局 機械・生活産業ユニット
人間生活システム企画チーム:(平成12年6月1日から)
岩田 寛治 通商産業省 工業技術院 標準部 知的基盤課 知的基盤係長
:(平成12年9月末日まで)
鴨志田 直史 経済産業省 産業技術環境局 基準認証ユニット 知的基盤課
知的基盤係長:(平成12年10月1日から)
荻山 久雄 新エネルギー・産業技術総合開発機構 基盤技術研究開発室長
:(平成12年9月末日まで)
瀧井 克弥 新エネルギー・産業技術総合開発機構 基盤技術研究開発室
主査:(平成12年12月末日まで)
小川 忠俊 新エネルギー・産業技術総合開発機構 研究開発業務部
研究業務室 主査:(平成12年1月4日より)

(事務局)

吉岡 松太郎 社団法人人間生活工学研究センター 研究開発部 部長
土田 一雄 社団法人人間生活工学研究センター 研究開発部 課長
津熊 貴子 社団法人人間生活工学研究センター 研究開発部

1. 2. 2 委員会の活動

(1) 第1回検討委員会

- 日時：平成13年1月22日（月）13：30～15：30
- 場所：東京丸の内 新丸コンファレンス第3集会室
- 委員欠席者：芦澤 玖美、中澤 和夫、岸本 泰蔵
- 内容
 - ①概要説明
 - ②進捗状況報告（浜野エンジニアリング）
 - ③誤差検証実験結果報告（生命研）
 - ④今後について（HQL）

1. 3 実施計画日程

項目	平成12年									平成13年		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
(i) 検出ヘッド部の調整												
(ii) 隠れ部位の計測法の検討と試作器の作製												
(iii) 複数センサより取得されるデータのマージ法の検討												
(iv) 計測誤差の分析												
検討委員会運営 報告書作成											○	

第2章 検出ヘッド部の調整

2. 1 レーザ投光方式のマルチスリット化

2. 1. 1 人体計測器における短時間計測の必要性

従来の全身型計測器では計測精度を確保する為に、レーザを被験者に向けて投光し、走査する時間に約30秒を必要としていた。これは、本計測器及び従来器に使用している計測原理、「イメージエンコーダ法」に基づくものである。

(1) イメージエンコーダ法における計測時間の必要性

「イメージエンコーダ法」ではCCDカメラにて計測対象範囲を撮影しながら、レーザを走査し、入力した画像上のレーザの当たった画素を抽出する必要がある。計測範囲内の形状を計測する為には計測範囲内の全ての画素に少なくとも1回、レーザの中心が撮影されなくてはならない。その為、レーザを高速化するとレーザの中心の当たらない画素が発生してしまい、形状が正しく計測できない。

(2) 人体計測における短時間計測の必要性

計測時間を長くすると人体計測ゆえの問題が発生する。「イメージエンコーダ法」ではレーザの走査中に計測対象が静止していることが必要となるが、計測対象となる被験者は約30秒間の間、一定の姿勢を保つことが難しく、耐え切れず動作してしまう。すると、その動作が計測結果の形状データにノイズとして発生してしまう。また、一定の姿勢を保つことは被験者に対して身体的・精神的な負担となる。

上記の2点の理由から、今回の計測器では「イメージエンコーダ法」に必要とされる計測精度を保ちながら、被験者の体動揺を抑える為、計測時間を短縮する必要があり、従来器に無い、新たな機構、手法を使用する必要がある。

2. 1. 2 短時間計測の為の手法

本計測器では、まず、レーザの投光方式を1本の線レーザ（シングルスリット）から、複数の線レーザ（マルチスリット）に変更することにより計測時間の短縮を行う手法を検討した。

（1）マルチスリット化による利点

従来器では1回のレーザ走査はシングルスリットにて行ってきた。1本のレーザでは、計測範囲の端から端までを走査する為の移動距離が長く、その分、撮影される画像の全画素にレーザを投光しようとすると、計測時間が長くなってしまう。

これに対し、マルチスリットの投光方式では計測範囲内に等角度に割当てられたレーザを投光する。これによって個々のレーザに割当てられる計測範囲を狭めて、レーザ走査の距離を短くすることができる。走査する距離が短縮される為、計測時間も短くすることが可能である。

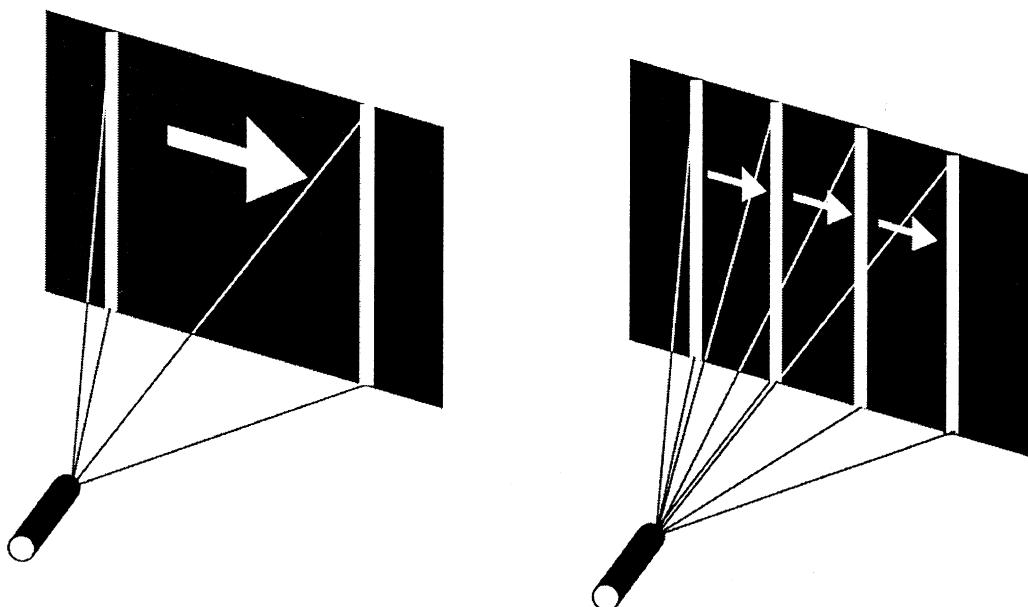


図2-1. マルチスリットによる走査距離の短縮

(2) マルチスリットの欠点

マルチスリットによって走査した計測画像ではレーザが複数本撮影されている為、形状を演算する為には画像に移っているレーザが何番目のレーザなのかを認識し、その投光角度を個別に認識する必要がある。しかし、傾斜の大きい形状を計測する際にはレーザが重なり、番号が認識できない場合があり、レーザが重ならないように投光角度を空ける必要がある。

その為、無制限にレーザの本数を増やすことはできず、適正なレーザ本数と投光角度間隔を選択する必要がある。

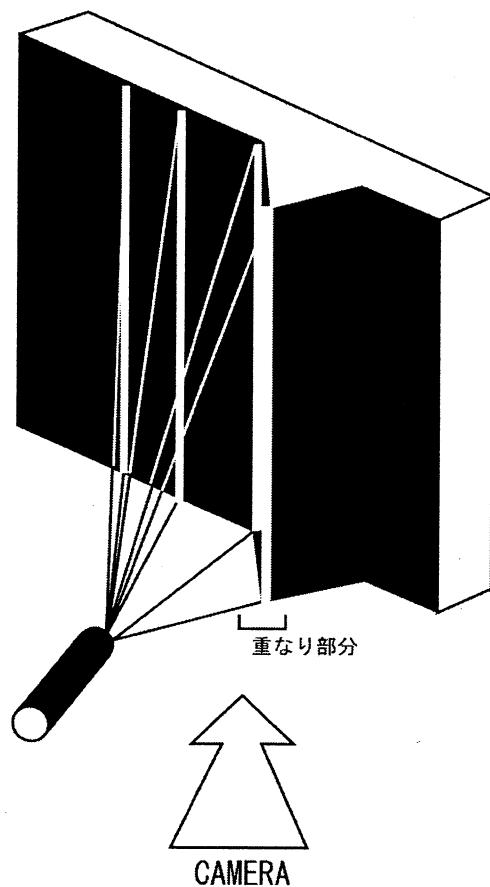


図2-2. マルチスリットレーザの段差による重なり

(3) マルチスリットの演算処理

マルチスリットによって得られた計測結果の画像には、複数のスリットによる走査が同時に計測されることとなる。この為、得られた画像から形状演算処理を行う際に、従来型の单一のスリットによる走査と異なる処理手順が必要となる。本事業にてこの処理手順の設計、開発を行った。

<演算処理変更の必要性>

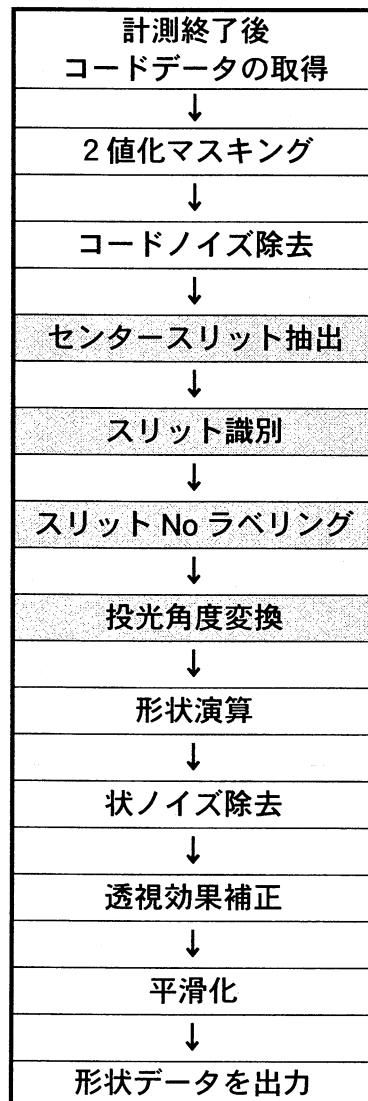
シングルスリットレーザによる走査では、計測した画像シーケンスの1フレーム（30分の1秒の静止画像）内に複数の投光角を持ったレーザが当たる事は、ありえない。

しかし、マルチスリットレーザでは1フレーム内に複数の投光角度を持ったスリットが照射される為、従来の演算方法のように単一のコードを積んでいくと、本来ありえない投光角度を演算してしまう。

よって、マルチスリットレーザを使用する際はスキャナヘッドの基準走査角度を持つセンターレーザを認識する事とセンターレーザからのレーザ本数オフセットを正しく認識させる為の処理が必要となる。

<形状演算の流れ>

形状演算の流れについては下表に従って行う、マルチスリットのデータを処理するために追加した機能は網掛け部分に該当する。この追加した処理について記述する。



<形状演算の流れ>

センタースリット抽出

概要：本計測器に使用するマルチスリットレーザは複数本数のレーザを同時に投光する為に各レーザの投光角度を得る為にはそれが何本目のレーザかを判別する必要がある。

本処理はマルチスリットの本数を選定する上で基準となるセンタースリットを抽出する処理である。

処理説明： 今回、設計した仕様では下図に示すようにセンタースリットが他のスリットに比べ輝度値が高い特性を持たせている。本計測器では、この特性を利用してセンタースリットの抽出を行い、絶対的なスリット位置を確定する。このレーザ位置の確定にあたり、まずはセンタースリットを確実に抽出する必要がある。以下にセンタースリットの抽出する方式について説明する。

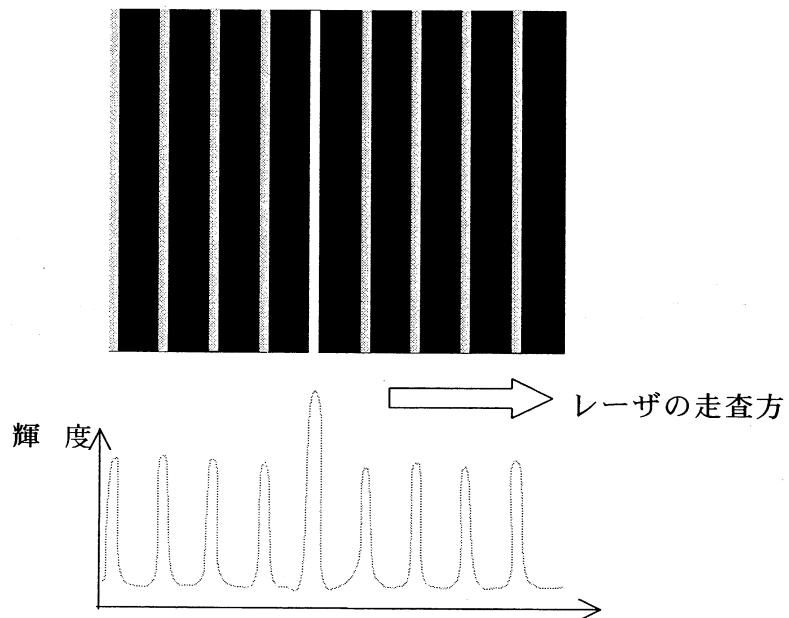


図 2-3 マルチスリットレーザの輝度分布特性

抽出方式は、マルチスリットレーザを走査することにより、最大輝度画像は下図のようにセンタースリット部分のみ輝度値が高い画像が生成され、この画像の輝度値をもとにスリット走査方向に対して各スリットの軌跡から輝度平均を求め、その輝度平均を閾値として2値化処理を行う。

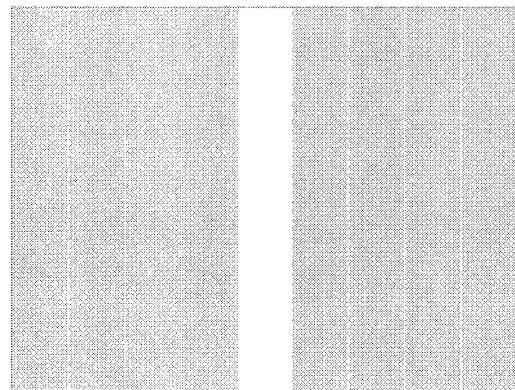


図2-4 マルチスリットレーザ

スリット識別

コードノイズ除去処理を行った後、有効領域と判定されたコードデータは、マルチスリットレーザにより計測されたため、図2-6（計測画面を横向に表示）に示したようにコードデータが鋸状になっている。スリット識別処理ではこのコードデータの段差をもとに各スリットに番号を付けることによりスリットを識別する。

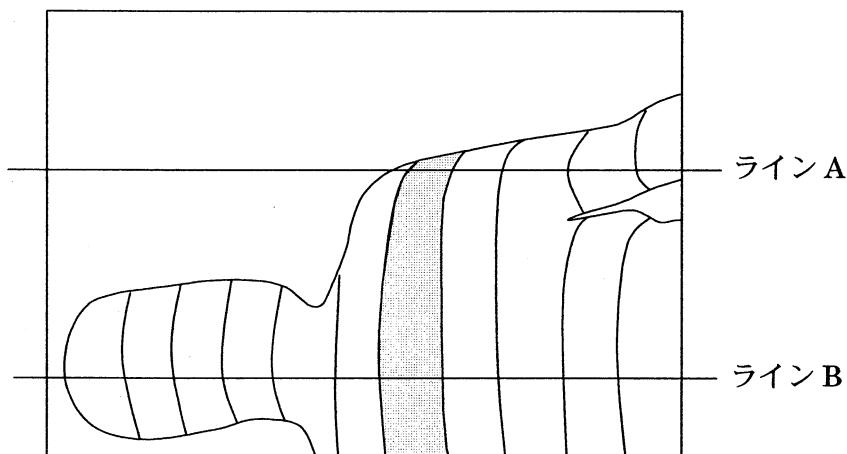


図2-5 コードノイズ除去処理後のコードデータ

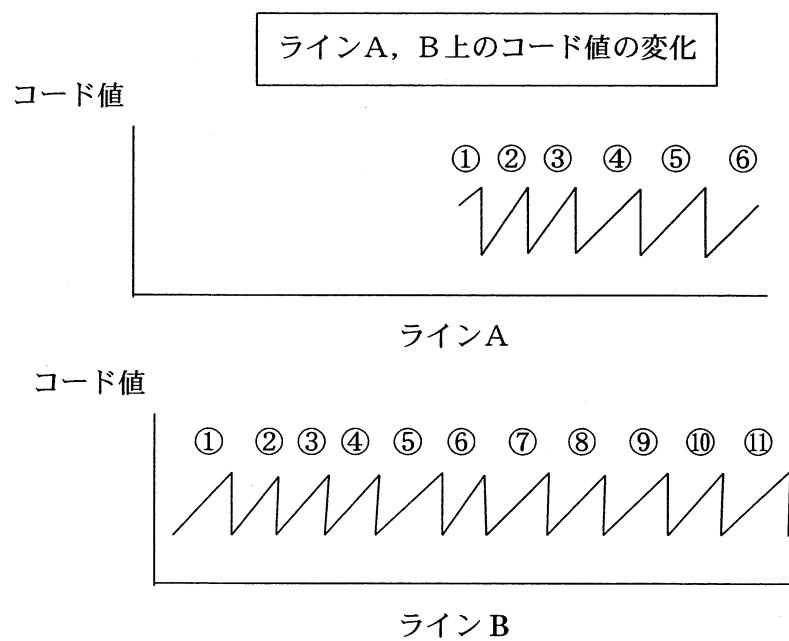


図2-6 各ラインのコードデータ

この時点では、上図に示したように同じ照射位置のスリットにも関わらず、ラインAとラインBでは異なった番号を割り当てる。これを共通化するのが次節のスリット番号割り当て処理である。

スリットNoラベリング

スリット識別処理により各スリットに割り当てられた番号とセンタースリット抽出処理により抽出されたセンタースリットの走査範囲をもとに、下図に示すようにセンタースリットを基準とした絶対値的なスリット番号に変換を行う。

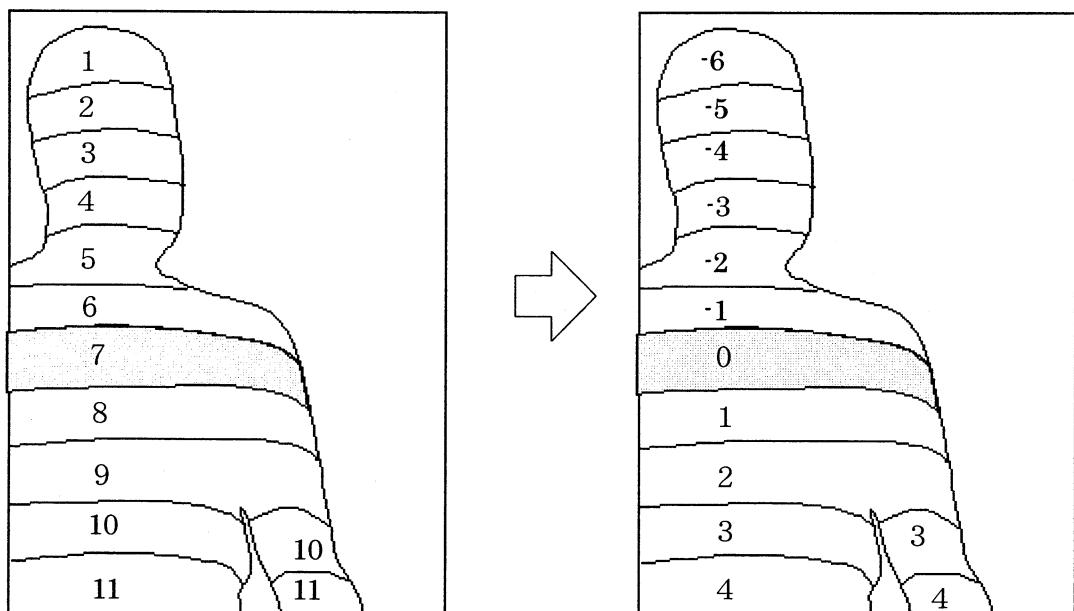


図2-7 スリット番号割り当て

投光角度変換

投光角度変換処理は、スリット番号割り当て処理により、スリット番号が割り当てられたコードデータに対して各スリットのスリット番号と各スリットの間隔角度をもとにコードデータを下図に示すように鋸状のコードデータから従来のような連続的なコードデータに変換する。これにより、演算工程の形状演算以降の処理を従来の計測器と共通化することが可能となる。

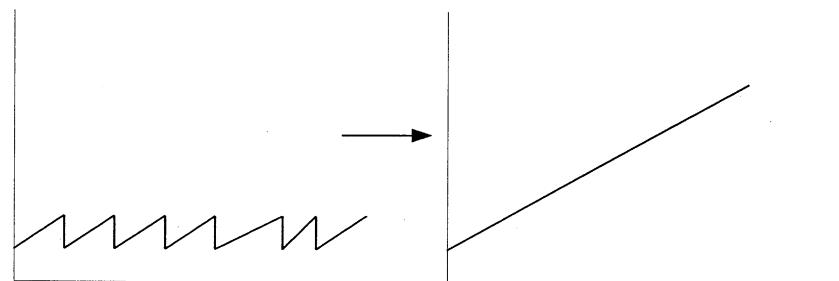


図 2-8 投光角度変換

2. 2 検出ヘッドの構成と仕様

2. 2. 1 構成

検出ヘッドとは、図のように撮像部分のカメラユニットとレーザを走査させるレーザスキャナユニットを1台づつ搭載している。検出ヘッドは単体で計測を行う機能を持っており、計測器の基本となる構成である。本計測器はこの検出ヘッド12台を使用する。

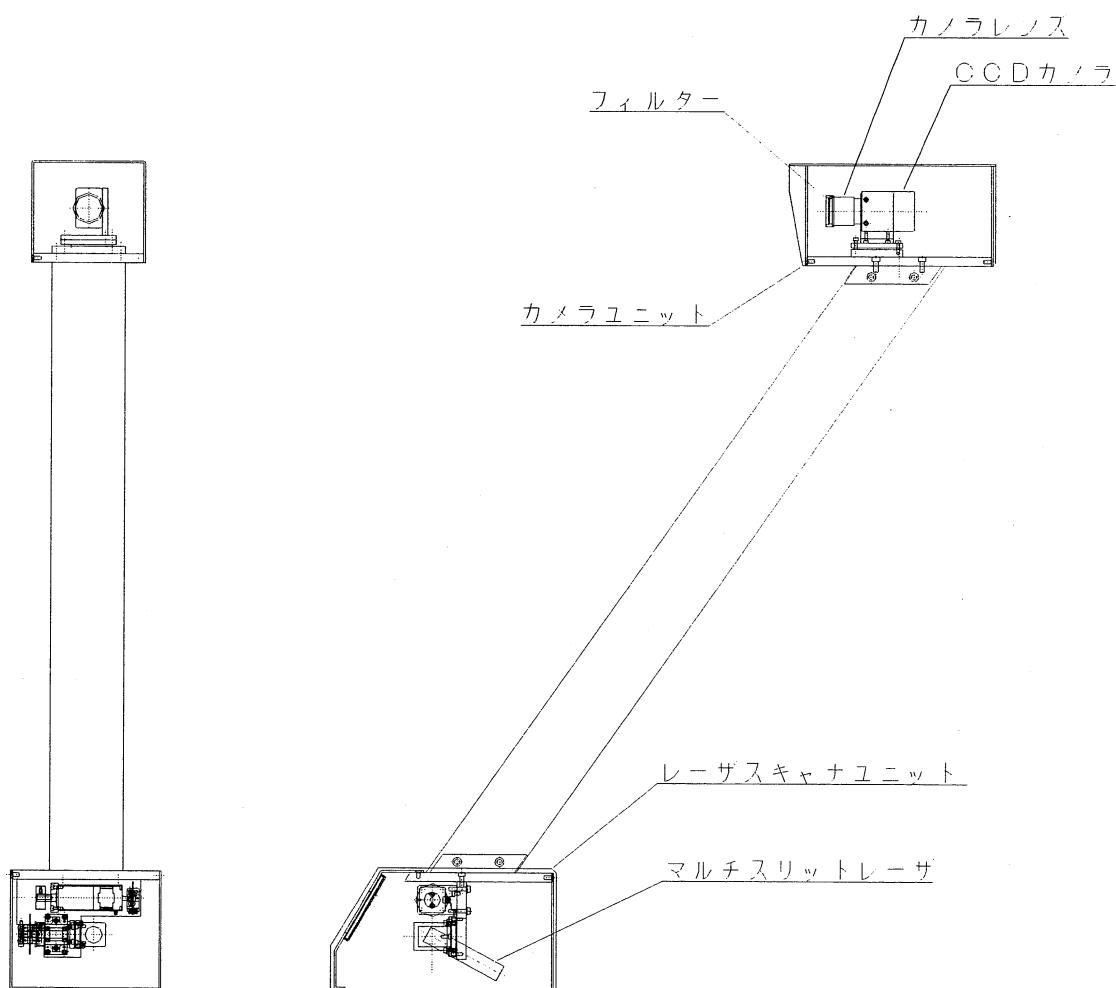


図2-9 検出ヘッド構成図

2. 2. 2 仕様

検出ヘッドの仕様は、表のとおりである。

表 2-1 検出ヘッド仕様書

項目	仕様
計測範囲	1300 (mm) × 975 (mm) × ± 300 (mm)
データピッチ	約 2 mm
計測限界段差	100 (mm)
計測時間	0.4 (sec)
カメラ距離	2000 (mm)
レーザ中心投光角	約 30°
レーザ本数	15 本
レーザ間隔	2.3°
レーザ回転角	2.3°

(1) レーザスキャナユニット

複数のスリットレーザを生成するマルチスリットレーザユニットとこのスリットを走査するためのモータによるスキャニング機構から構成される。2台のスキャナを同時に動かした際の干渉を防ぐため、マルチスリットレーザは2種類の波長を各6台づつ作製する。

・ マルチスリットレーザ

型名 SNF-513L(2.3°) -690-30-30

SNF-513L(2.3°) 635-15-30

※波長が異なるのでいずれか一方のレーザを使用

メーカ MORITEX

仕様 <SNF-513L(2.3°) -690-30-30>

周波数 : 690nm

出力 : 30mW

スリット本数 : 15本

スリット間隔 : 2.3°

広がり角 : 30°

<SNF-513L(2.3°) -635-15-30>

周波数 : 690nm

出力 : 30mW

スリット本数 : 15本

スリット間隔 : 2.3°

広がり角 : 30°

数量 1台

・ ステッピングモータ

型名 PMC33B-MG50

メーカ オリエンタルモータ

仕様 ハーモニックドライブ

角度分解能 : 0.0072°

(2) カメラユニット

カメラユニットは撮像用の CCD カメラを搭載したユニットでスキャナユニットに使用したマルチスリットレーザの波長を識別するための干渉フィルタを搭載している。このフィルタはレーザと同じ帯域の波長を選択して搭載する。

具体的には、波長 635nm のレーザを捕らえるためには、645nm の帯域を持つ干渉フィルタをカメラレンズの前方に取り付けて使用する。

・ CCD カメラ

型式	XC-ST70
メーカー	SONY
仕様	CCD 素子サイズ : 2/3 inch
数量	1 台

・ カメラレンズ

型式	25HB
メーカー	TAMRON
仕様	焦点距離 : f=12
数量	1 台

・ フィルタ

型式	干渉フィルタ
メーカー	酒井ガラス
仕様	帯域周波数 : 700nm
	帯域周波数 : 645nm
	※波長が異なるのでいずれか一方のフィルタを使用
数量	1 台

2. 3 レーザ投光方式のマルチスリット化の問題点

前記検出ヘッドにおけるマルチスリットレーザにはレーザを発生させる投光部と、レーザを分ける分光部が、ユニット化された既製品を用いている。

検出ヘッド単体の調整時にこの既製品のマルチスリットレーザのユニットにおいて後述するような問題が生じた。

2. 3. 1 問題点

検出ヘッドの調整時にマルチスリットラインの周辺部において歪みを生じていることが判明した。この歪みは中心ラインから離れるほどラインの形状が直線から糸巻き状に湾曲していることが確認された。

2. 3. 2 原因

既成品では投光したレーザに糸巻き状の湾曲が発生することが確認された。この現象は調査の結果、投光部から発生したレーザが回折格子とプリズムを合わせた分光部を通過する際、光の通る道、「光路」の距離に差が生じその差がレーザの投光角度に影響与える為と判明した。

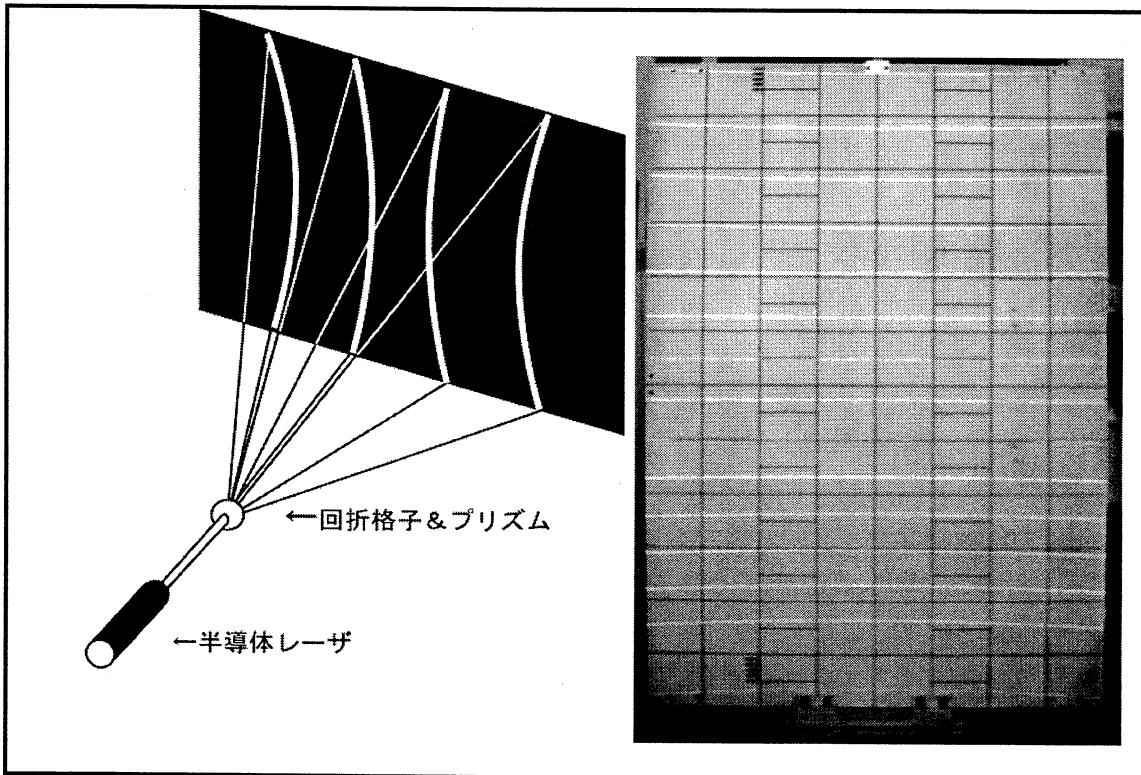


図2-10 マルチスリットにおけるレーザの湾曲

本計測器では投光されるレーザが直線であることを基準として形状演算を行う。その為、湾曲のあるレーザで計測を行うと、演算される形状も湾曲を起こしてしまい、目標とする精度を達成できない。

よって、このマルチスリットの歪を解消することが検出ヘッド部調整の重要な要素となった。

2. 4 問題点（レーザの湾曲）に対する対応策

前述の問題点を解消する方法として対策方法が3つ考えられ、それぞれの対策方法に対して検討を行った。

2. 4. 1 対応策1：ソフトウェアでの補正処理

(1) 補正原理

この方法ではマルチスリットレーザを湾曲したままで使用し、計測した画像より、レーザの湾曲量を算出し、歪を補正した形状演算を行う方法である。下は、その原理図となる。

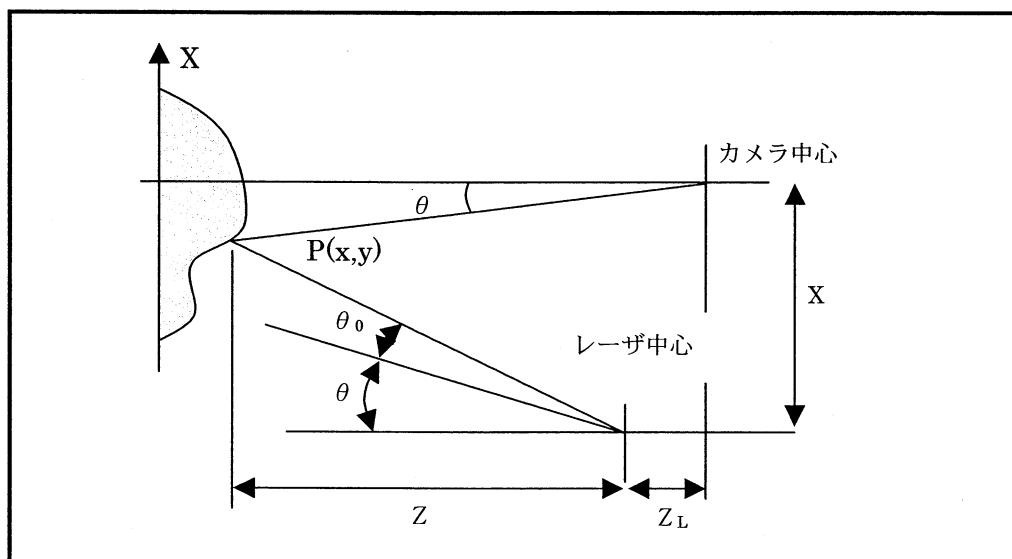


図2-11 側面図

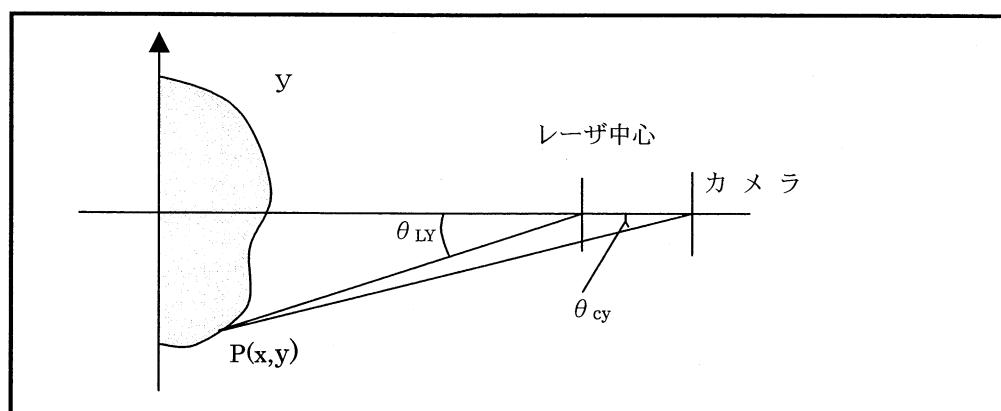


図2-12 平面図

- θ : センターレーザの投光角度
 θ_{cx} : カメラと点Pとの垂直方向角度
 θ_{cy} : " 水平方向角度
 θ_{Lx} : センターレーザと点Pの垂直方向角度
 θ_{Lxc} : センターレーザと点Pに当たったレーザのセンター位置における垂直方向角度
 θ_{Ly} : レーザと点Pにおける水平方向角度

側面図、平面図において干渉格子を使用していることから θ_{Lx} と θ_{Ly} の間には以下の関係式がある。

$$\sin(\theta_{Lx}) = m [\lambda / p \cos(\theta_{Ly})] \quad \text{-----①}$$

m : 中央からのライン数
 λ : レーザの波長
 p : 干渉格子の間隔

ここで平面図より

$$Z \tan \theta_{Ly} = (Z + Z_L) \tan \theta_{cy} \quad \text{-----②}$$

側面図より

$$Z \tan(\theta + \theta_{Lx}) + (Z + Z_L) \tan \theta_{cx} = X_L \quad \text{-----③}$$

②、③よりZを消去すると

$$\frac{Z_L \tan \theta_{cy}}{\tan \theta_{Ly} - \tan \theta_{cy}} = \frac{X_L - Z_L \tan \theta_{cx}}{\tan(\theta + \theta_{Lx}) + \tan \theta_{cx}} \quad \text{-----④}$$

①、④の式においてm、 λ 、p、 θ 、 θ_{cx} 、 θ_{cy} は既知の値として入力できる。

従って、①、④式の連立によって θ_{Ly} を求めることにより θ_{Lx} も求まる。

この計算結果によりレーザの投光角度に補正を行い形状演算に用いる

(2) 検討結果

関係式を導き出す連立方程式は算出可能だが、この連立方程式は展開して関係式を導き出すことが不可能であった。その為、この方程式をソフトウェア上にプログラミングするには、

値を、細かく変化させながら近似値を導きだす方式しかなく、膨大な演算時間が必要となり

現実的に本計測器に適応しなかった。

2. 4. 2 対応策2：シリンドリカルレンズによる補正

(1) 補正原理

マルチスリットレーザユニットから投光されたレーザの歪は糸巻き状に発生する。

その反対にシリンドリカルレンズを通過したレーザの歪みは樽状に発生する。よって、マルチスリットレーザユニットから投光されたレーザをシリンドリカルレンズに通することで逆の方向に湾曲させ、互い湾曲を相殺し、直線のみのマルチスリットとする方法である。

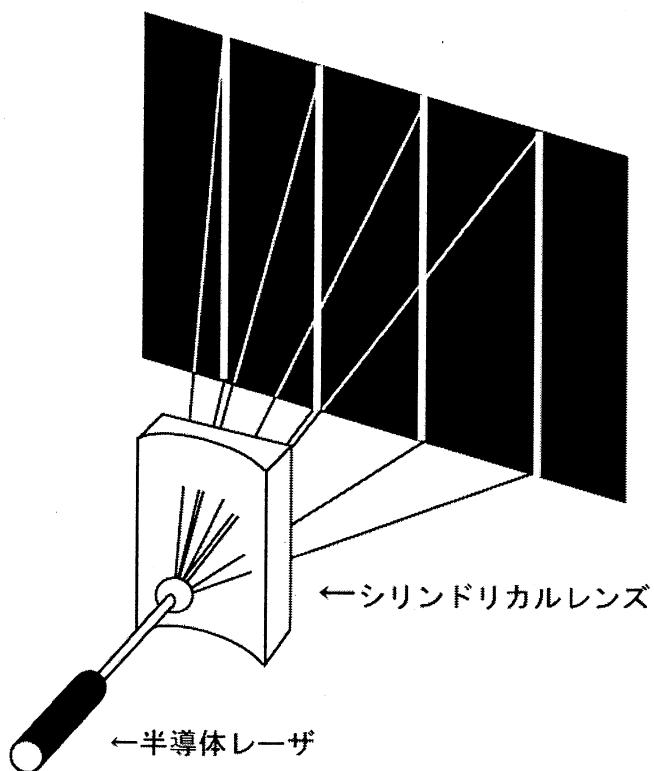


図2-13 シリンドリカルレンズによる補正イメージ

(2) 確認方法

焦点距離 12.7mm と、60mm の 2 種類のシリンドリカルレンズを使用し、マルチスリットレーザの前面にシリンドリカルレンズをレーザが通過するよう に設置し、1. 7 m 先の平板に投光してその湾曲量の変化を確認した。

(3) 検討結果

マルチスリットレーザユニットは 15 本のスリットレーザを投光する。シリンドリカルレンズを通過することで、逆向きの湾曲が生じ、湾曲が相殺するレーザもあるが、湾曲率の合わないレーザでは、湾曲が残ってしまい、逆に湾曲していないレーザが湾曲してしまう場合もあった。

これは、全てのスリットに対して湾曲を補正しようとすると、各々のスリットで補正する為に必要なシリンドリカルレンズへの入射角が異なる事が原因である。

すべてのスリットに対して湾曲を補正する為には、非常に特殊なシリンドリカルレンズを使用する必要があり、既成品にそうしたレンズがない事と、シリンドリカルレンズの形状を必要な形状に変形させ製造が可能なメーカーがないため、この方式を断念した。

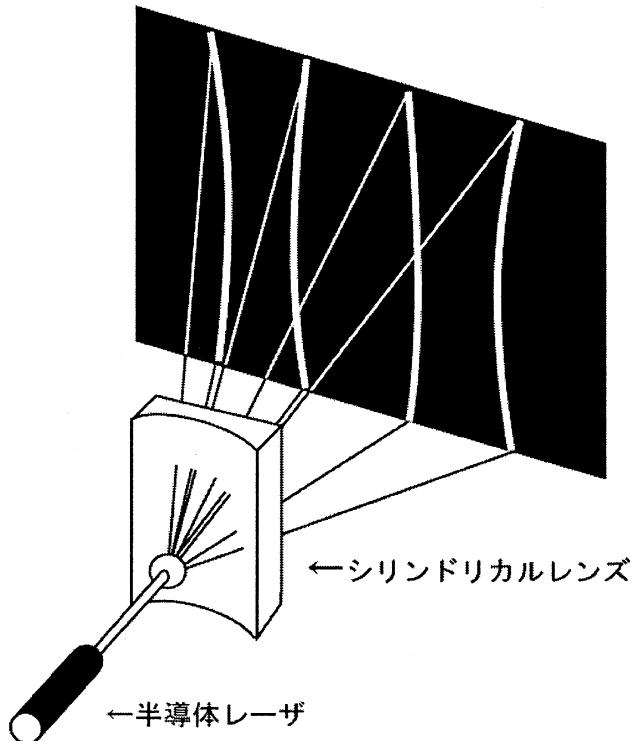


図 2-14 歪みの残り、逆向きの歪みの発生

2. 4. 3 対応策3：マルチスリットレーザユニットを違う光学素子で製作

(1) 原理

この方法では、マルチスリットレーザの湾曲がユニット内部の光学設計に原因がある点に着目し、代替となる光学系を新たに作り直すという方法である。新たに使用するレーザユニットとしてドットラインレーザを選択した。このユニットは複数のドット（点）レーザを既定の直線状に等角度間隔に投光するもので、レーザがドットである以上、湾曲が存在しない。

ドットレーザをスリットレーザにする為にロッドレンズを使用する。ロッドレンズは入射した光を一定方向へ広げるレンズであり、入射したドットレーザが中心を通ることによって湾曲のないスリットレーザを生成することができる。これによって湾曲のないマルチスリットレーザを投光することが可能となる。

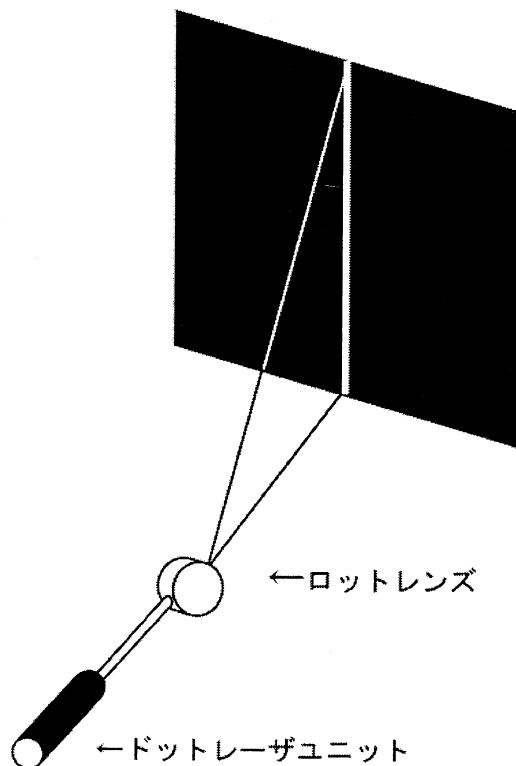
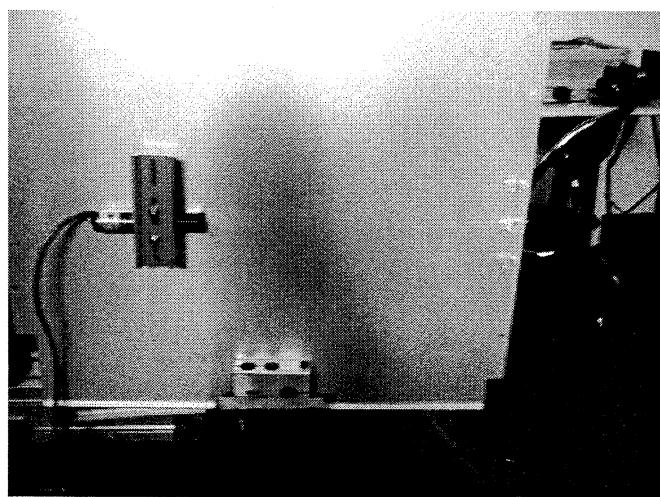


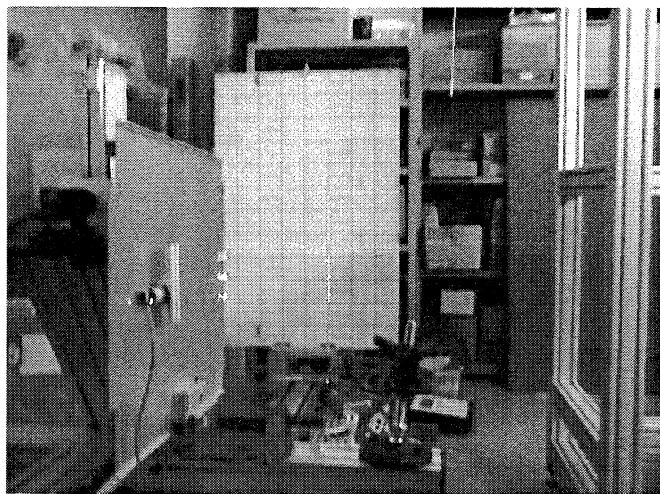
図2-15 ロッドレンズによるスリットレーザの生成

(2) 検討方法

まず、ドットレーザをロッドレンズに入射した際の影響や、ロッドレンズをドットレーザに合わせる角度調整の確認の為、透明なアクリル棒を切断し、ドットラインレーザと組み合わせて検証を行った。



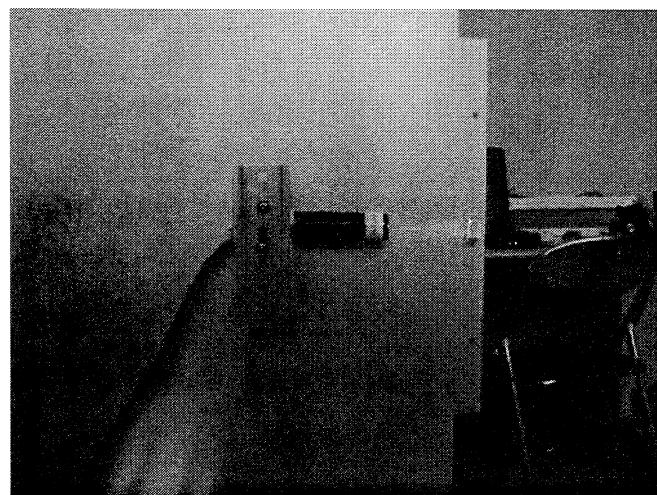
このようにドットラインレーザユニットを固定し、その先に透明なアクリル棒を配置した。それぞれのアクリル棒はドットラインの入射する角度に対して垂直になるように設置しスリットを湾曲のない直線とした。



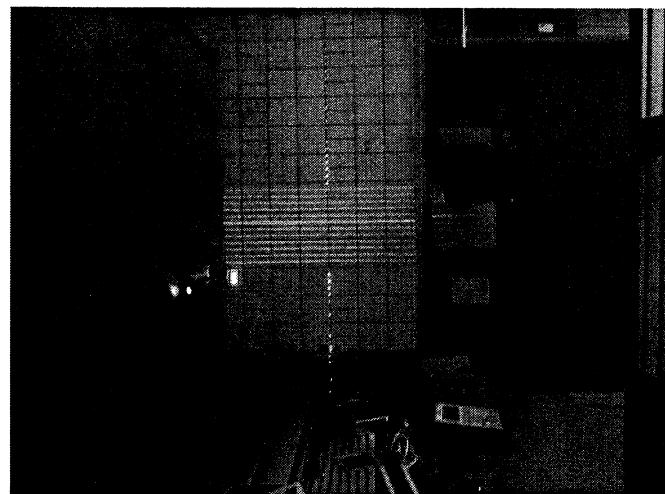
投光された光は、実際に使用されるロッドレンズにくらべて、アクリル棒の透明度が少ない事もあり光量が弱いく、斑が生じていたが、湾曲のない直線のスリットを投光できる事は検証できた。

(3) ロッドレンズによる品質検査

アクリル棒による検証では、投光したレーザに斑が生じていた為、ロッドレンズを用いた検証を再度行い、その品質が計測に使用できるものかを確認した。



検証に使用したドットラインレーザユニットは投光点数が多く十分な間隔が取れない為、1つのロッドレンズに複数のレーザが入射している。



ロッドレンズによって広げた結果、品質、投光角度に問題の無いことが確認できた。

(4) 検討結果

この方式によって、湾曲のないマルチスリットレーザユニットを作成できる事が確認できた。ただし、複数のロッドレンズに対してその中心をドットレーザが通るように配置する必要がある。

等角度間隔を持って投光されるドットレーザに対し、ユニットを囲むように、ロッドレーザを扇上に配置する為の治具、また、ロッドレンズ中心をレーザが通るように位置を調節する機構の再設計が必要となった。

2. 4. 4 マルチスリットの湾曲に対する対応策結論

(1) 結論

最終的に実現可能かつ効果的な方法は、対応策3：マルチスリットレーザユニットを違う光学素子で製作する方法である。

但し、従来の設計ではマルチスリットレーザを1つの投光ユニットのみで行うように想定していた為、レーザ走査を行うユニットの再設計を行い、かつ、従来15本と想定していたスリットレーザ本数を、ロッドレンズを限られた面積にレイアウトする必要と、光量のロスを想定して9本に減らす事が必要となつた。

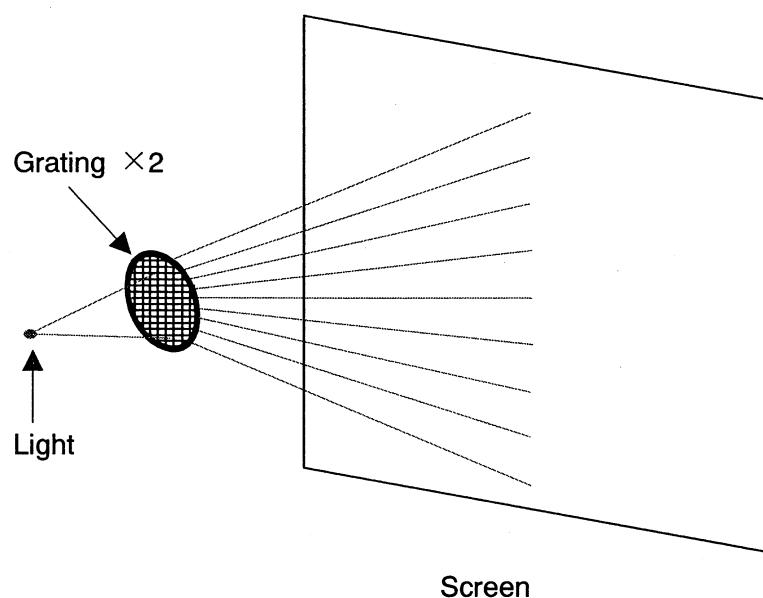


図2-16 点(ドット)レーザの構成

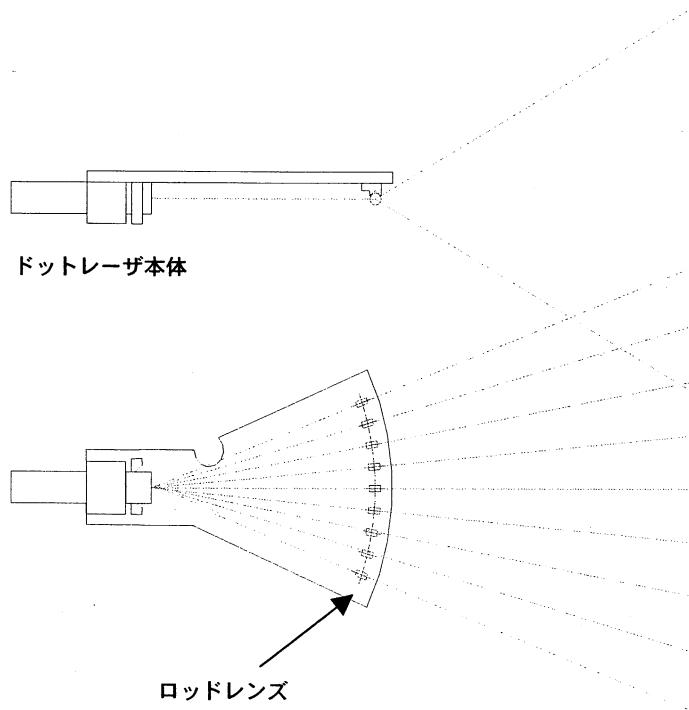


図2-17 ロッドレンズを利用したレーザユニット

2. 5 検出ヘッドの同時動作

2. 5. 1 概要

通常、検出ヘッドは同時に作動させると互いのレーザの判別ができず、形状が演算できない。そこで、検出ヘッドごと使用するレーザユニットの波長を変え、対となるCCDカメラにその波長のみに対応する干渉フィルタを装着する。これによってその検出ヘッドは自らの投光するレーザしか撮影しないので、同時にレーザ波長の違う2台の検出ヘッドを使用することが可能となる。

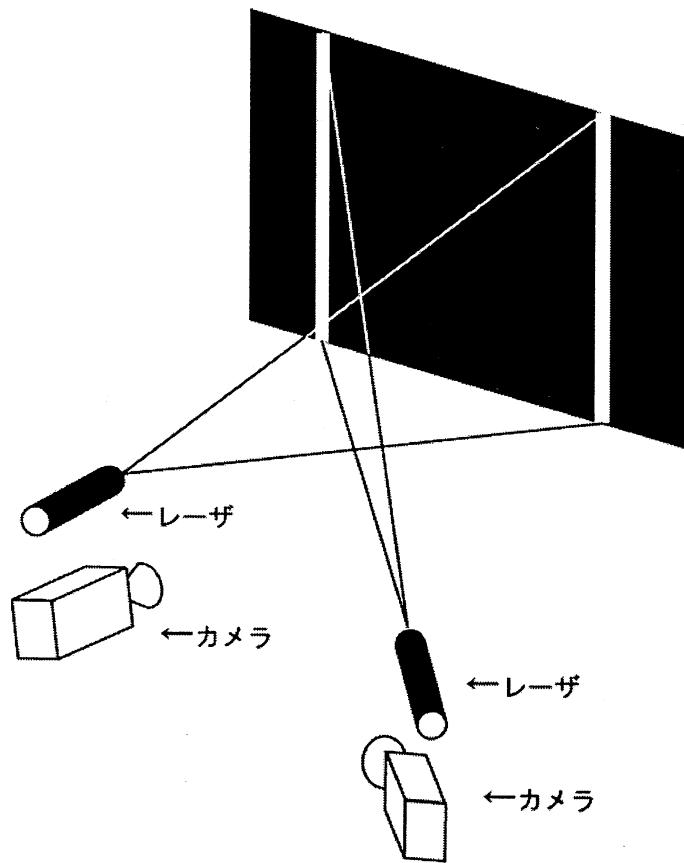


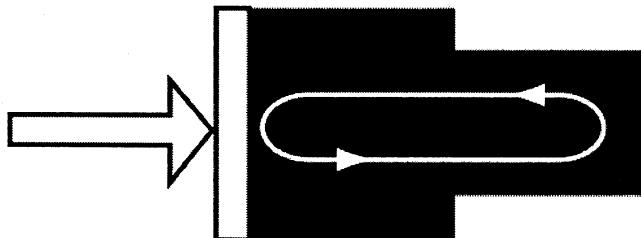
図2-18 干渉フィルタを用いた同時計測

2. 5. 2 検出ヘッドの同時動作の為の手法

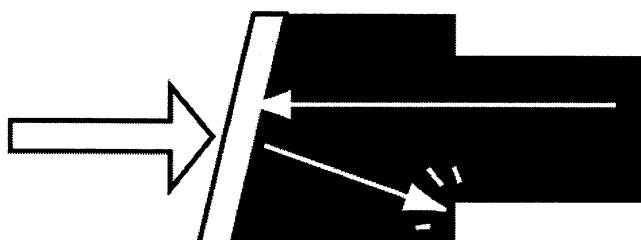
使用するレーザの波長は635nmと690nmの2種類とし、635nmのレーザを走査する側には645nmの干渉フィルタ、690nmのレーザを走査する側には700nmの干渉フィルタをCCDカメラに装着する。これによつて波長の違う検出ヘッドを同時に動かすことが可能とした。

しかし、形状と共に計測を行う輝度画像に波紋状の干渉縞が発生することが判明した。これは、干渉フィルタを通過したレーザがCCDに当り、反射し干渉フィルタとの間で反射を繰り返す為である。この現象を防ぐ為、干渉フィルタはCCDカメラに対して平行にせず、約20度の角度を持って装着されている。

干渉フィルタを傾けて装着する事でCCDとの反射角度がずれ、反射率の低い壁面に吸収される為、干渉縞を防止することができた。



干渉フィルタとCCDとの間で反射が反復する



壁面に吸収されるため反射は反復しない

図2-19 干渉フィルタによる反射の防止

2. 6 仕様の変更

前述したような問題点に対する対策を行った結果、検出ヘッドの仕様を一部変更することとなった。以下に検出ヘッドの仕様と変更を行ったレーザスキャナユニットの仕様を記載する。

2. 6. 1 仕様

検出ヘッドの仕様は、表のとおりである。

表2-2 検出ヘッド仕様書

項目	仕様
計測範囲	1300 (mm) × 975 (mm) × ± 300 (mm)
データピッチ	約 2 mm
計測限界段差	100 (mm)
計測時間	0.4 (sec)
カメラ距離	2000 (mm)
レーザ中心投光角	約 30°
レーザ本数	9 本
レーザ間隔	5 °
レーザ回転角	5 °

2. 6. 2 レーザスキャナユニット

2台のスキャナを同時に動かした際の干渉を防ぐため、ドットラインレーザは2種類の波長を各6台づつ作製する。

・ ドットラインレーザ

型名 SLH-509D(5°)-690-30-30
SLH-509D(5°)-635-15-30

※波長が異なるのでいずれか一方のレーザを使用

メーカー MORITEX

仕様 <SLH-509D(5°)-690-30-30>

周波数 : 690nm

出力 : 30mW

ドット点数 : 9点

ドット間隔 : 5°

広がり角 : 40°

<SLH-509D(5°)-635-15-30>

周波数 : 690nm

出力 : 30mW

ドット点数 : 9点

ドット間隔 : 5°

広がり角 : 40°

数量 1台

・ ステッピングモータ

型名 PMC33B-MG50

メーカー オリエンタルモータ

仕様 ハーモニックドライブ

角度分解能 : 0.0072°

第3章 隠れ部位の計測法の検討と試作器の作製

3. 1 概要

本計測器の用いる「イメージエンコーダ法」は、前提として「検出ヘッドから投光されたレーザに対象が照らされ、その光を CCD カメラにて撮影する」事が必要となる。

よって従来の水平方向からの計測のみでは、肩部、脇の下、股下などの隠れ部位に対するしては、レーザ光が届かないか、もしくは CCD によって撮影できない為、計測が困難であった。

そこで、本計測器では検出ヘッドを前後合わせて 12 台配置し、隠れ部位を撮影するための投光・撮影アングルを設定し対応した。

以下に詳細を記す。

3. 2 レイアウト検討概要

人体を計測するにあたり、計測画像を撮影する CCD カメラを、どの位置からどのような角度に配置するべきか。またレーザをどの方向から照射すれば、最も高率良く、隠れ部位を低減することができるかを検討する。

具体的には通常正面からだけでは計測できない、体側面、肩上部、脇の下、股下、の 4 個所に対して、効果的に計測できるように図面設計し基本レイアウトとした。その基本レイアウトに対して実際に CCD カメラとレーザ投光機を配置し、隠れ部位に関して検討を行った。

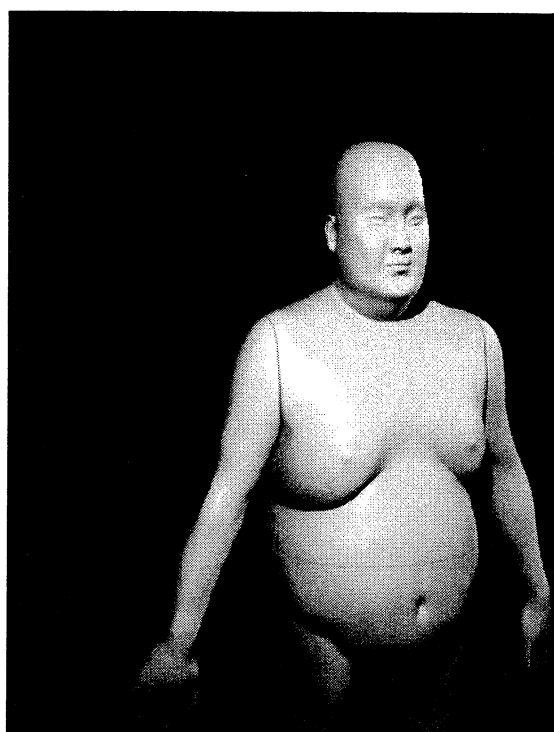
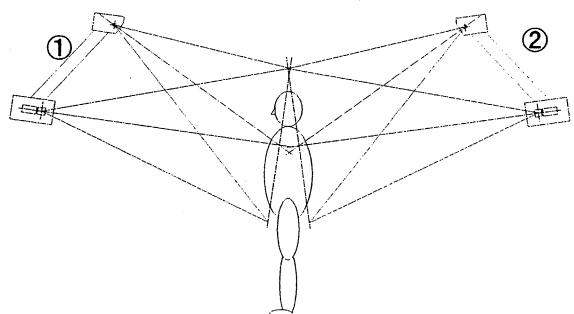
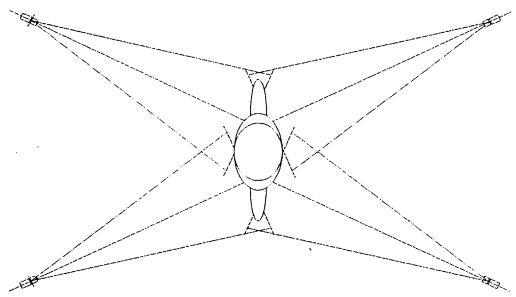
3. 3 基本レイアウト検証

初期案として人体全身を体側面まで回り込んで肩上部、脇の下、股下、などを測定するという考え方から8台の検出ヘッドにより人体を取り囲むように配置することを考えたものである。

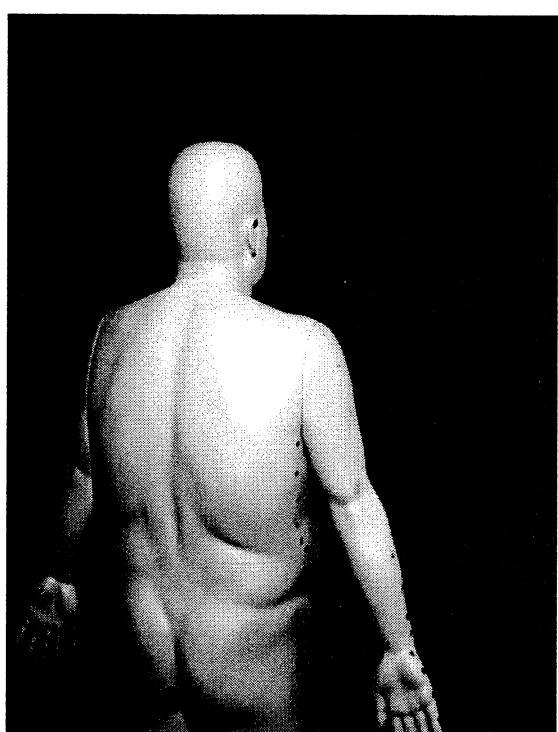
①、②のスキャナユニットを上方に配置し、下方に8°傾け、内側に25°回り込んでレイアウトすることにより人体上半身の体側面と肩上部を計測するようにレイアウトした。

このレイアウトを右図に示す。

また、このレイアウトで計測実験を行った画像を下図に示す。



①スキャナユニット確認画像



②スキャナユニット確認画像

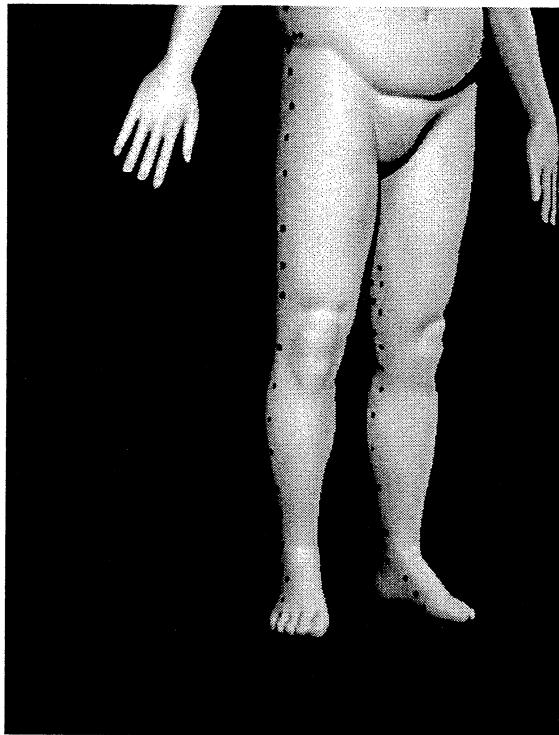
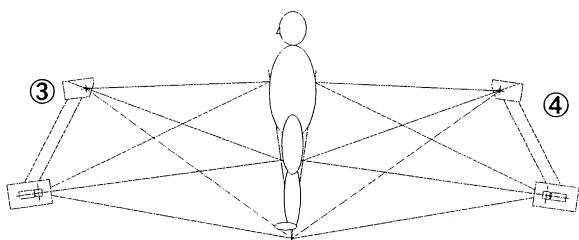
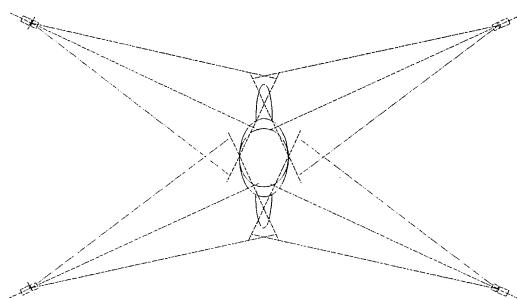
図3-1 計測実験確認画像

つぎに下半身と股下、脇の下を計測するレイアウトを考察した。

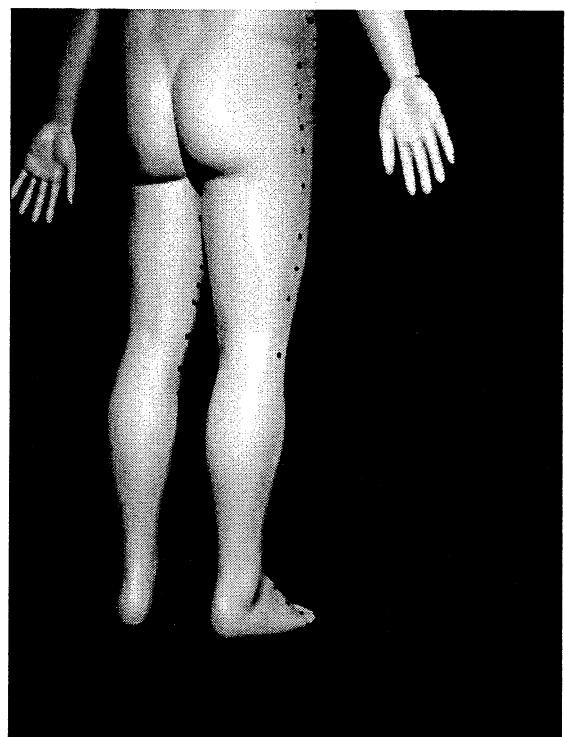
③、④のスキャナユニットを下方に配置し、上方に8°傾け、内側に25°回り込んでレイアウトすることにより人体下半身の体側面と股の下、を計測するようにレイアウトした。

このレイアウトを右図に示す。

また、このレイアウトで計測実験を行った画像を下図に示す。



③スキャナユニット確認画像



④スキャナユニット確認画像

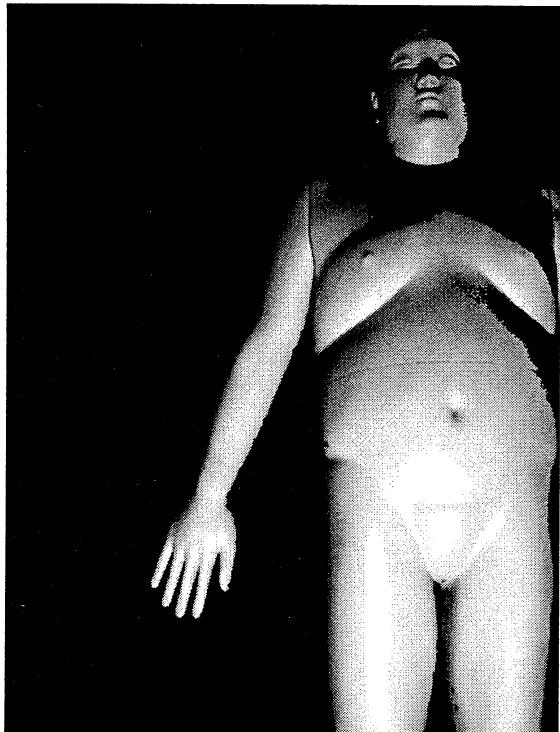
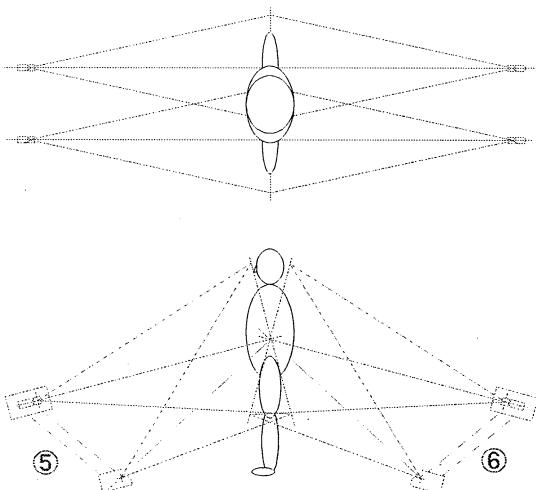
図3-2 計測実験確認画像

上記の検討結果として画像を確認すると体側面の計測と肩上部の計測は完全に行えるが、股下、脇の下にはまだ隠れ部位が残る。特に脇の下部分には腕が影を作ってしまい大きな隠れ部位が残ってしまう。

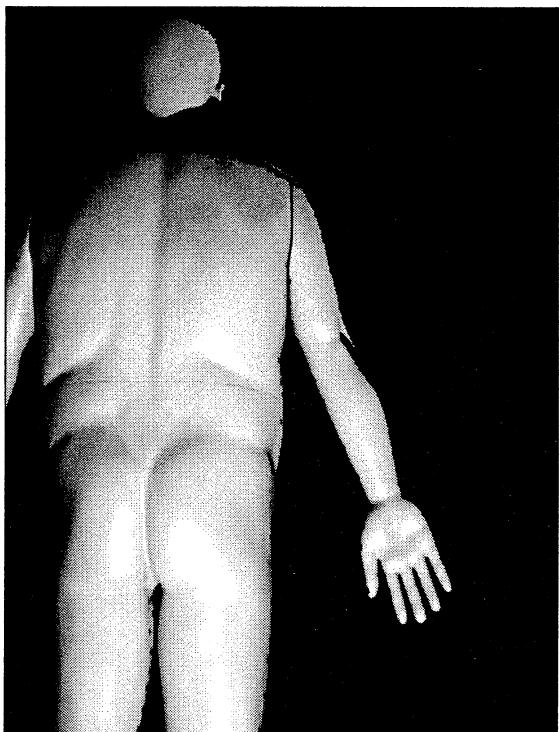
このことに対して股下と脇の下専用のスキャナユニットを前後各2台づつ合計4台追加することを考えた。

これには⑤、⑥4台のスキャナユニットを人体の脇の幅とほぼ同じ幅であり、かつ下から覗き込むように下部に設置し、上方に15°傾けて横方向へは敢えて角度を付けずにレイアウトした。このレイアウトを右図に示す。

また、このレイアウトで計測実験を行った画像を下図に示す。



⑤スキャナユニット確認画像



⑥スキャナユニット確認画像

図3-3 計測実験確認画像

この追加した4台のスキャナユニットにより股下、脇の下を直接画像の中心で計測できるので大幅に隠れ部位の減少性が向上出来ることが確認された。

実際に各検出ヘッドにより計測される領域をダミー人形にマーキングすることにより隠れ部位の詳細な検討を行った。

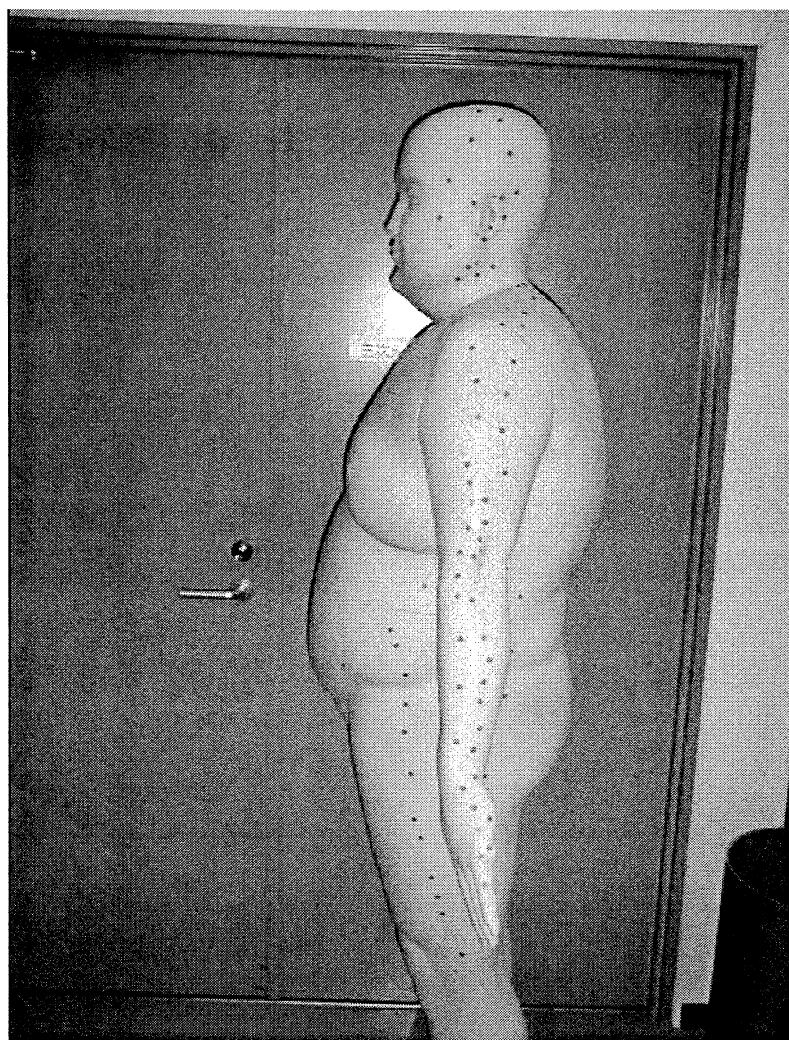


図3-4 計測範囲マーキング結果（側面）

赤い点が背面側に設置される6台の検出ヘッドにより計測される範囲限界であり、青い点が正面側に設置される6台の検出ヘッドにより計測される範囲限界である。

以下に、頭部、脇の下、股下の詳細画像を示す。

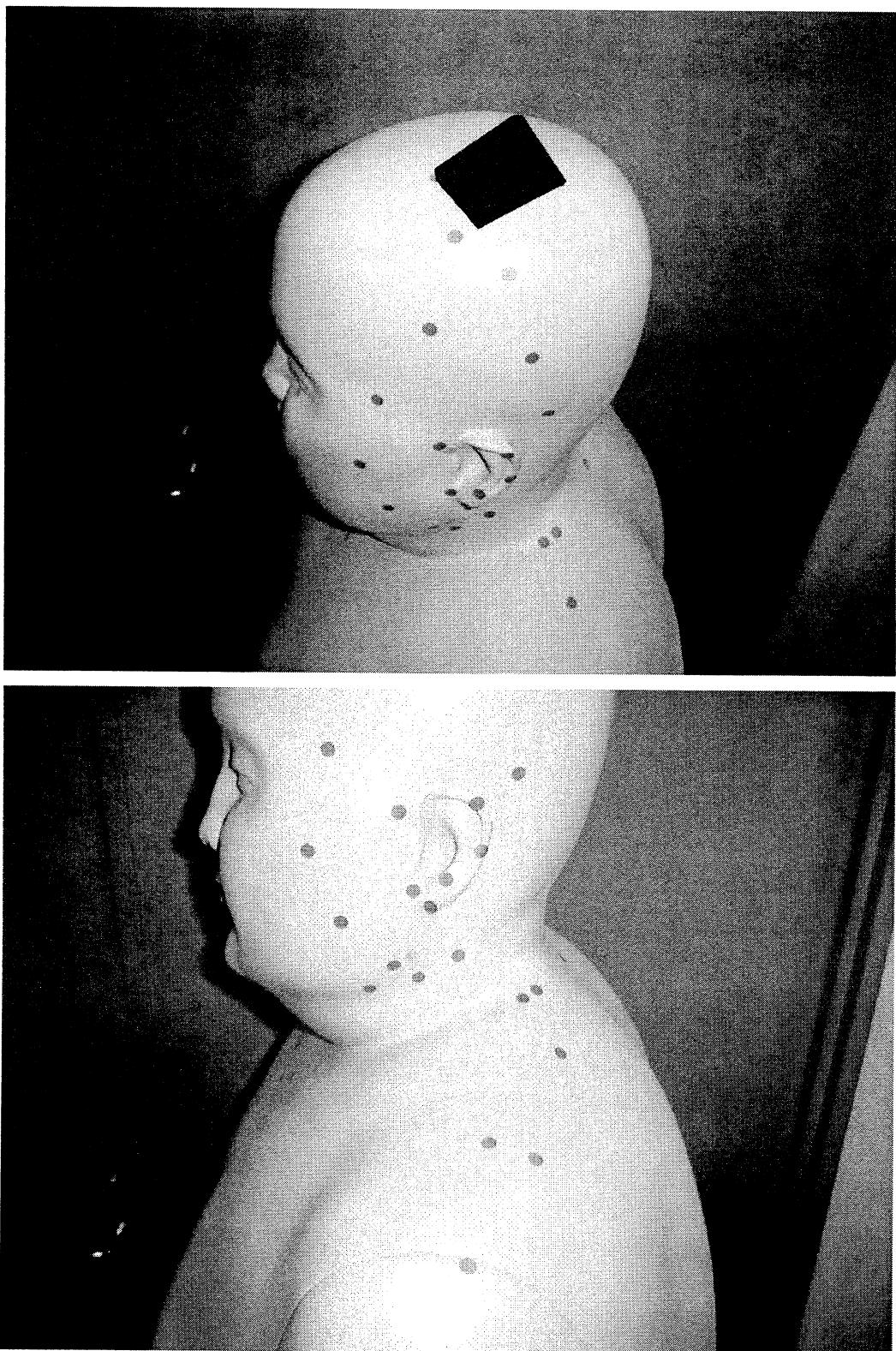


図3-5 計測範囲マーキング結果（頭部）

頭頂の黒色部分がいずれの検出ヘッドからも計測されない隠れ部位となる部分である。

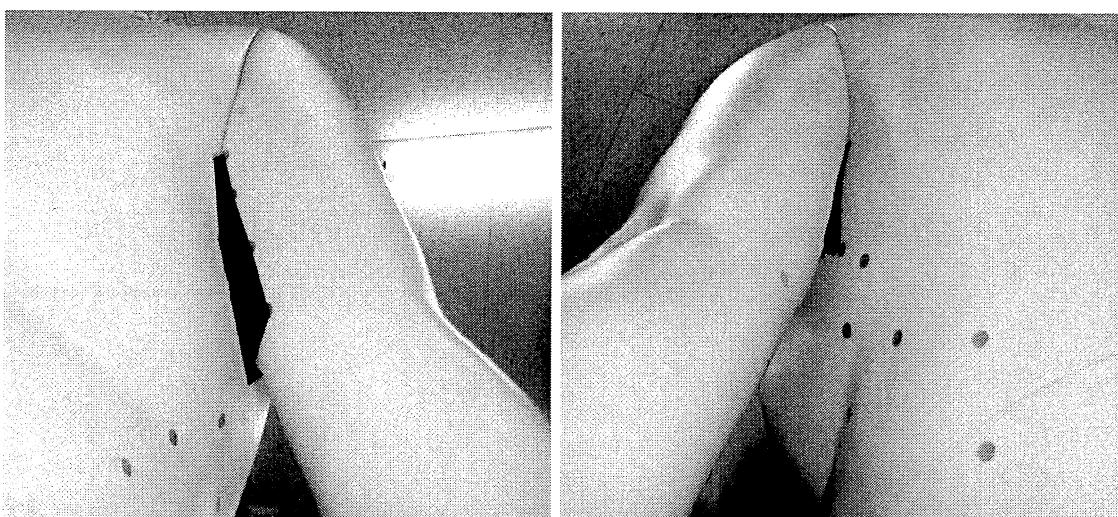
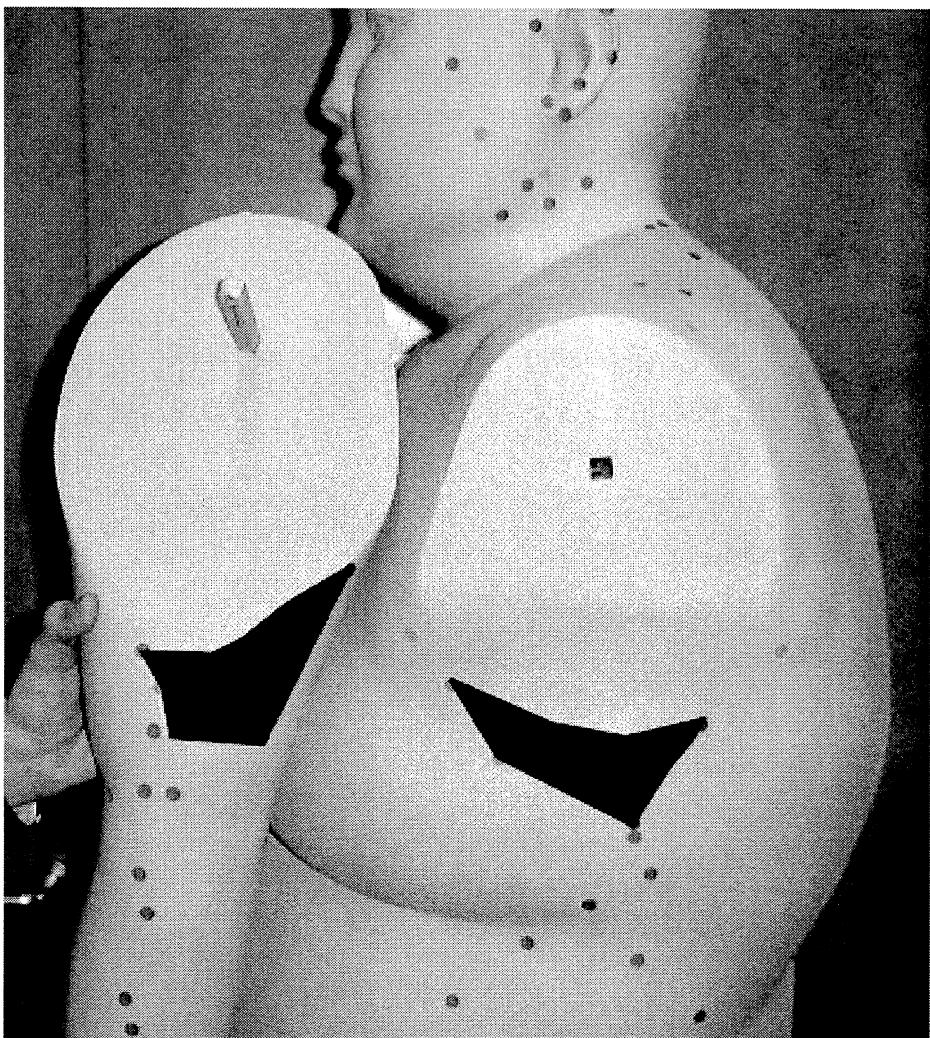


図3-6 計測範囲マーキング結果（脇の下）

脇の下の黒色部分が体と腕が極端に近い為（ほぼ密着状態）カメラが見えない
もしくはレーザが届かないで隠れ部位となる部分である。



図3-7 計測範囲マーキング結果（股下）

股下の黒色部分が極端に奥に入り込みカメラが見えないもしくはレーザが届かないで隠れ部位となる部分である。

これらの検討結果より以下に示すようなレイアウトを最終的に決定した。

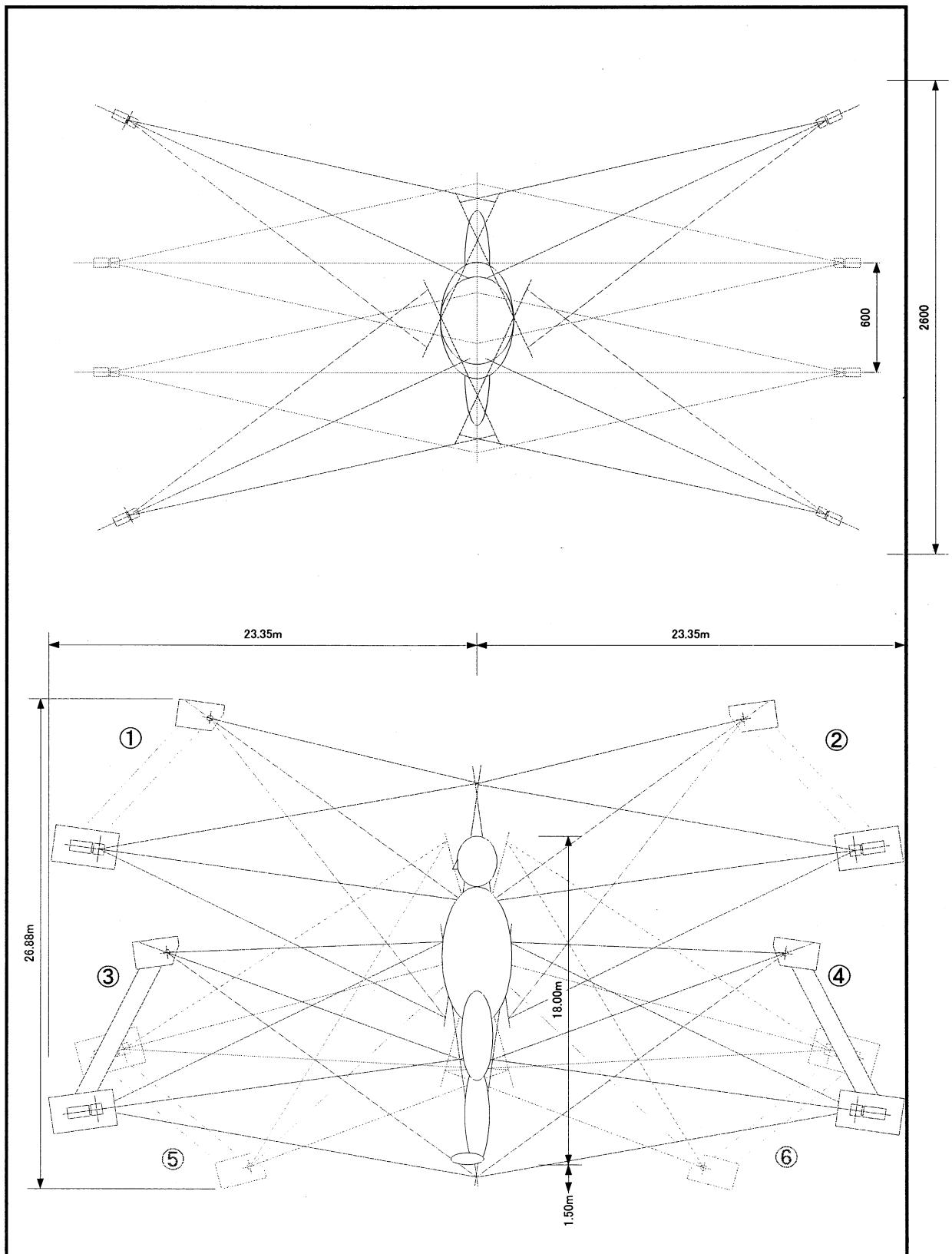


図3-8 決定レイアウト

第4章 複数センサより取得されるデータのマージ法の検討

4. 1 概要

本計測器によって用いる12台の検出ヘッドはそれぞれが個別の角度を持っている為、その検出ヘッドによって計測されるデータも個別の3次元座標軸を持つてしまう。

その為、マーカ位置を検出する際や、測定形状を一体化した形状とするには、個別の3次元座標軸を持つ計測データを統一した座標軸へと置き換える必要がある。平成12年度の開発では、この問題に対して有効な合成（マージ）方法を検討した。

4. 2 処理項目

形状合成においての処理項目は以下の2点となる。

（1）検出ヘッドごとの形状データ間の座標中心・XYZ座標軸の方向の統一：

それぞれの検出ヘッドが別々の座標中心を持ち、XYZ座標軸の向きもずれた状態だと、単純な平行移動だけではデータの合成を行うことはできず、回転を組み合わせて複雑な移動を行わなければならない。原点となる座標を統一しXYZ軸方向を合わせることで相対的な位置を計りやすくし、簡単な座標変換で合成ができるように処理する必要がある。

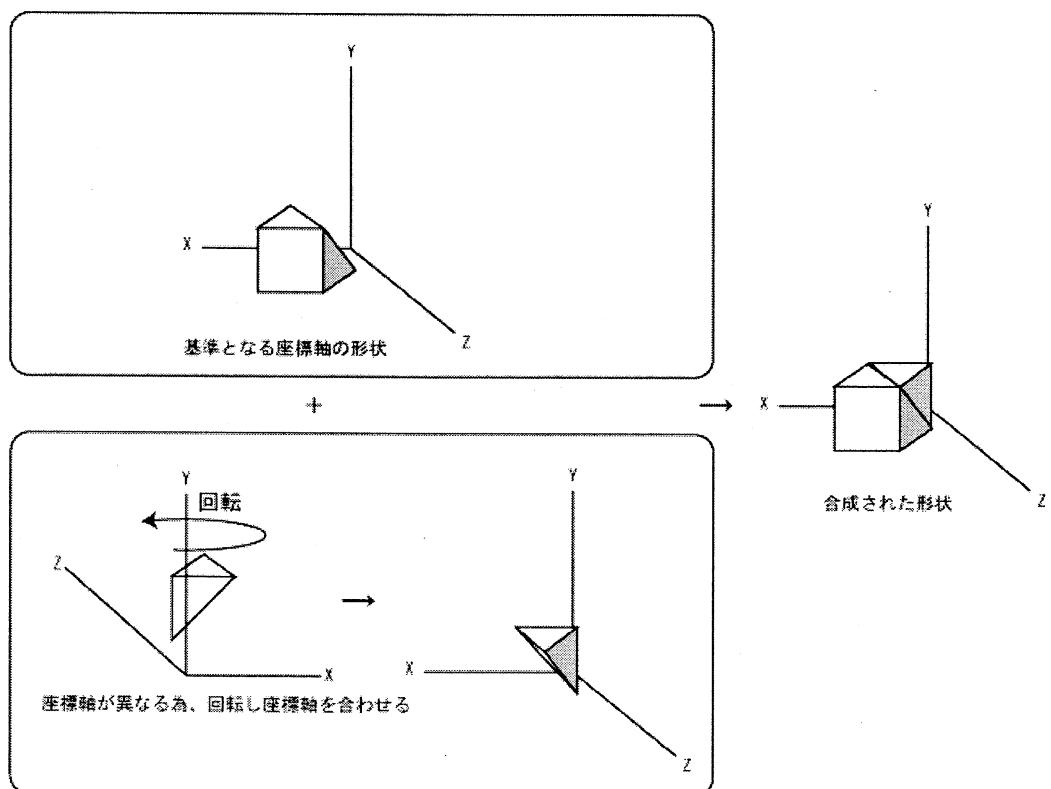


図4－1 座標軸の統一

(2) 形状を構成する面データがオーバーラップした場合に
複数面データを單一面に合成：

本計測器に 1 2 台使用する検出ヘッドは、計測範囲が完全にセパレートされておらず、重複（オーバーラップ）した計測領域をもって計測を行っている。その為、計測されたデータの座標を統一しても、形状を構成する面データがオーバーラップしている為、有効な形状データとはならない。オーバーラップする面データを合成し、單一な面に置き換えることで、有効な合成形状を得る必要がある。

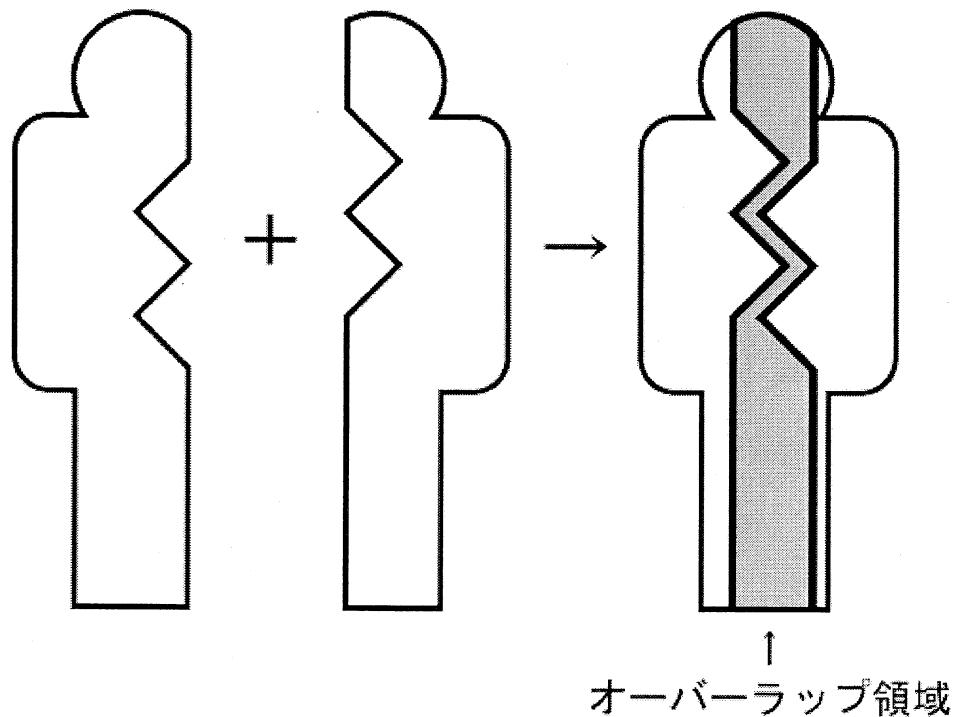


図 4-2 オーバーラップ領域

4. 3 検討を行った処理方法と問題点

(1) 近似点合成法

ユニットごとの形状データを XYZ 軸回転、XYZ 平行移動、XYZ スケーリングなどの座標変換を用い統一された座標軸上に再配置する。全てのユニットの形状データを再配置した後に、面の重なりが発生した場合、重なった点データ間の距離を求め、指定した距離内にある複数の点データを、近似点として1つの点データに合成を行う。以上の処理によって全身形状データを生成する。

この方法の問題点は、近似点合成をおこなうことで点データの分布に疎な部分と密な部分ができ、形状のつなぎ目が不明瞭となる為、面データを構成する際の面の向き（法線）を求め難い点である。

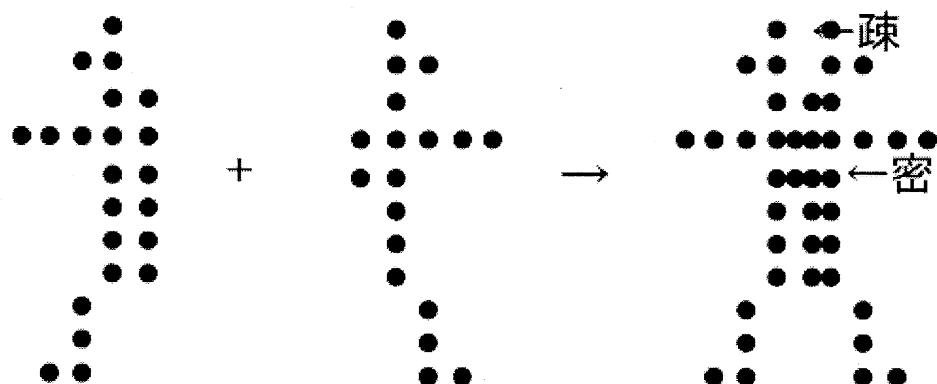


図4-3 近似点合成による密と疎の分布

(2) 3次元格子法

ユニットごとの形状データに XYZ 軸回転、XYZ 平行移動、XYZ スケーリングを行い、統一された座標軸上に再配置を行う。再配置された形状データを三次元上に配置した格子に当てはめ、形状データと格子との接点を新たな形状データとして配置する。これによって全ての形状データを統一された座標軸を基準とした等間隔のデータとして再配置する事ができる。本計測器にて使用するイメージエンコーダ法では、取得される点群データに面の情報が付随される為、そのデータを保持した形で、形状を合成することができる。

この方法では、格子に当て込む再に近似点の合成をおこなう為、閾値の指定方法、近似点の抽出方法に調整が必要となる。

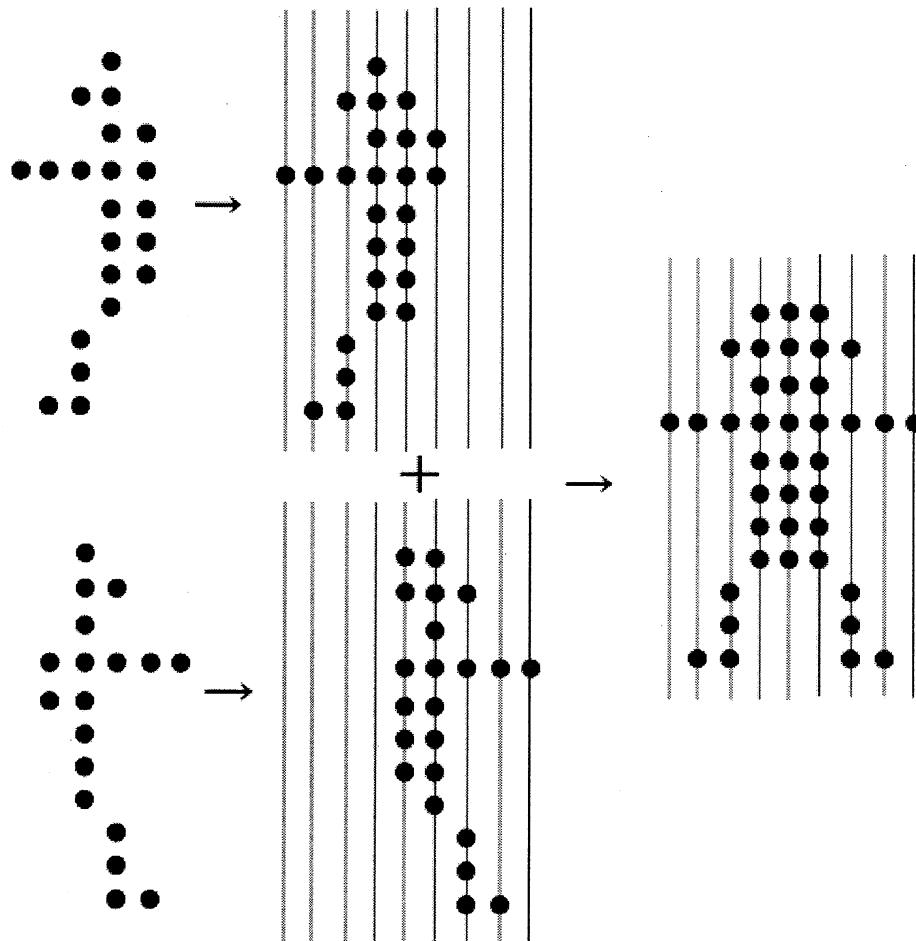


図4-4 三次元格子による合成イメージ

第5章 計測誤差の分析

3次元形状計測装置の主目的は形状データを取得することであるが、第2の目的として形状データから的人体寸法算出が考えられる。人体寸法は、いわゆるマルチン式測定器を用いた手計測で測定が行われており、人体寸法そのものだけでなく、その再現性についてのデータも蓄積されている。熟練した計測者が人体寸法測定を行う場合には、2回の測定値の差として表現された再現性は数mmの範囲におさまること、再現性を左右する最大の要因は特徴点決定時の計測者内および計測者間のばらつきであることが知られている（文献1）。3次元形状データから算出した人体寸法を、これまでに蓄積されてきた手計測による人体寸法と比較する場合には、3次元形状データ得られた寸法が手計測と同等とみなせることを確認するなければならない。このためには、人体寸法項目を、(1) 3次元形状データから算出可能なものの、(2) 3次元形状データから推定可能なものの、(3) 3次元形状データからは算出も推定もできないため、手で測らなければならぬものの、に分類する必要がある。(1)と(2)については再現性についても手計測と同等、あるいはそれ以上であることを確認しなければならない。最終的には、手計測、3次元形状計測をふくめた、人体寸法・形状データ取得のためのプロトコルを決定する必要がある。今年度は、項目群(1)について、3次元形状データから算出した寸法と手計測による寸法を同等とみなすことができるかどうかを検討した。

今回開発する計測器とほぼ同じ計測原理であるVOXELANを用いて、青年男子43名を対象に、3次元形状データから算出した寸法が手計測と同等とみなすことができるかどうかを調べた（手計測実験1）。この結果、両者を同等とみなすことができないことが分かった。この原因を明らかにする一助として、座標値が既知の物体を測り、真値とのずれに一定の傾向があるかどうかを調べた（VOXELAN検定実験1）。この結果、カメラ毎に、真値とのずれに一定の傾向が認められた。この原因は、VOXELAN??設置時の調整が不十分であったことと考えられた。

そこで、浜野エンジニアリングに再度調整を依頼した。調整後、再度座標値が既知の物体を測り、真値とのずれに一定の傾向があるかどうかを調べた（VOXELAN検定実験2）。再調整の結果、真値とのずれに、傾向はほぼ認められなくなった。調整後のソフトを用いて、青年男子43名の寸法が、手計測と3次元形状データから算出したものを同等とみなすことができるかどうかを再度検定した結果、かなり多くの項目が、同等とみなせるようになった。

調整後のVOXELANを用いて、成人20名（うち1名は女性）を対象に、手計測による人体寸法と3次元形状データから算出したものとが同等とみなせるかどうかを、新たに検討した（手計測実験2）。この結果、高さと幅に関する20項目については、両者を同等とみなすことができることがわかった。

以下、手計測実験1、VOXELAN検定実験1、VOXELAN検定実験2、手計測実験2の順に、詳細を述べる。

5. 1. 手計測実験1

5. 1. 1 目的

目的は、項目群(1)（3次元形状データから算出可能なものの）と(2)（3次元形状データから推定可能なものの）に属すると思われる項目について、手計測による寸法を取得すること、項目群(1)に属すると思われ

る項目について、手計測による寸法と3次元形状データから算出した寸法が同等とみなせるかどうかを検定すること、の2点である。項目群(1)に属すると思われる項目とは、正立位、ないし座位姿勢で計測した3次元形状データから得られる特徴点の座標値そのものが人体寸法になるもの（高さ項目）と、2つの特徴点間の直線距離として算出できる項目である。項目群(2)に属する項目としては、周長項目、体表長項目、最大幅などが考えられる。項目群(3)に属する項目としては、特徴点が身体の一部に隠れて見えない項目や、皮下脂肪厚などである。

5. 1. 2 被験者

被験者はすべて男性とした。被験者を集めやすいことが主な理由である。年齢は18-30歳（平均23.1歳）であった。被験者の基礎データを表1に示す。被験者数は、推定式を算出する必要が生じた場合、算出可能な人数を想定した。最終的には43名となった。

表5-1 被験者

項目	N	平均	標準偏差	最大値	最小値
生年	43	1977.0	2.9	1982.0	1970.0
年齢(年)	43	23.1	2.9	30.3	18.2
体重(kg)	43	64.3	10.0	109.5	48.7
身長(mm)	43	1706.0	63.1	1828.0	1600

5. 1. 3 計測項目と特徴点

正立位、ないし座位で計測可能な項目を中心に選定し、以下の101項目とした。これらの寸法を測るために必要な特徴点を中心として、図5-1に示す62特徴点、108ヶ所を選定した。

立位高さ項目

- | | | |
|-----------|-----------|------------|
| 1 外眼角高 | 2 オトガイ高 | 3 頸側点高 |
| 4 頸窩高 | 5 乳頭高 | 6 前腋窩高 |
| 7 耳珠高 | 8 頸椎高 | 9 肩甲骨下角高 |
| 10 後腋窩高 | 11 肩峰高 | 12 桡骨点高 |
| 13 桡骨茎突高 | 14 指節点高 | 15 指尖高 |
| 16 腸骨稜上縁高 | 17 殿突高 | 18 脣高 |
| 19 ウエスト高 | 20 最小胴囲高 | 21 腸骨棘高 |
| 22 転子外突高 | 23 転子高 | 24 殿溝高 |
| 25 股下高 | 26 膝蓋骨中央高 | 27 膝蓋骨下縁高 |
| 28 脛骨上縁高 | 29 下腿最大囲高 | 30 頭囲 |
| 31 頸囲 | 32 頸付け根囲 | 33 上部胸囲 |
| 34 乳頭位胸囲 | 35 最小胴囲 | 36 ウエスト囲 |
| 37 腹囲 | 38 殿囲 | 39 股上前後の長さ |
| 40 大腿囲 | 41 立位膝囲 | 42 下腿最大囲 |
| 43 下腿最小囲 | 44 足囲 | 45 腕付け根囲り |

46	上腕囲	47	前腕最大囲	48	手首囲り
49	手のひら回り	50	そで丈	51	半そで丈
52	胸幅	53	背肩幅	54	背幅
55	背丈A	56	前丈	57	後ろ丈
58	肩傾斜角右	59	肩傾斜角左	60	肩峰幅
61	肩幅	62	肩甲骨下角間幅	63	後腋窩幅
64	胸部横径	65	前腋窩幅	66	乳頭間幅
67	ウエスト幅	68	最大腰幅	69	転子幅
70	上前腸骨棘幅	71	胸部矢状径	72	乳頭位胸部厚径
73	胴部厚径	74	腹部厚径	75	殿部厚径
76	腕付け根の厚さ	77	膝厚径	78	上肢長
79	上腕長	80	前腕長	81	背肩峰距離
82	下腿最小囲高	83	内果端高	84	外果端高
85	足幅（斜め）	86	全頭高	87	頭長
88	頭幅	89	頬弓幅	90	手長
91	手幅	92	座高	93	座位頸椎高
94	座位肩峰高	95	座位眼高	96	座位上後腸骨棘高
97	座位転子高	98	座位大腿厚	99	座位殿・転子距離
100	座位殿・腹厚径	101	座位腹部厚径		

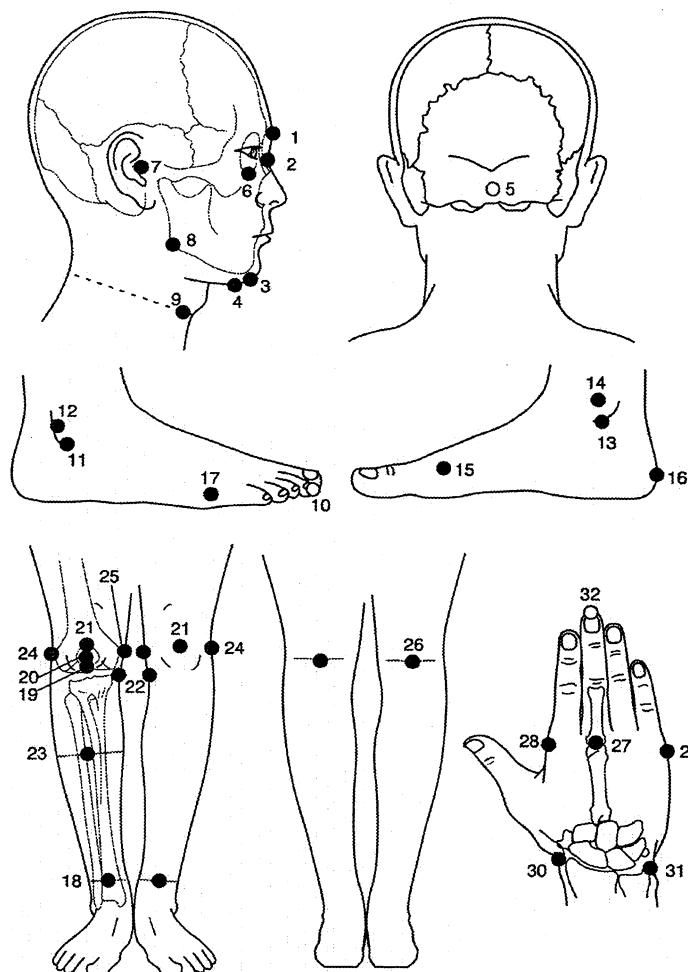


図5-1-1 予備実験1で使った特徴点-1。頭部・上肢・下肢。

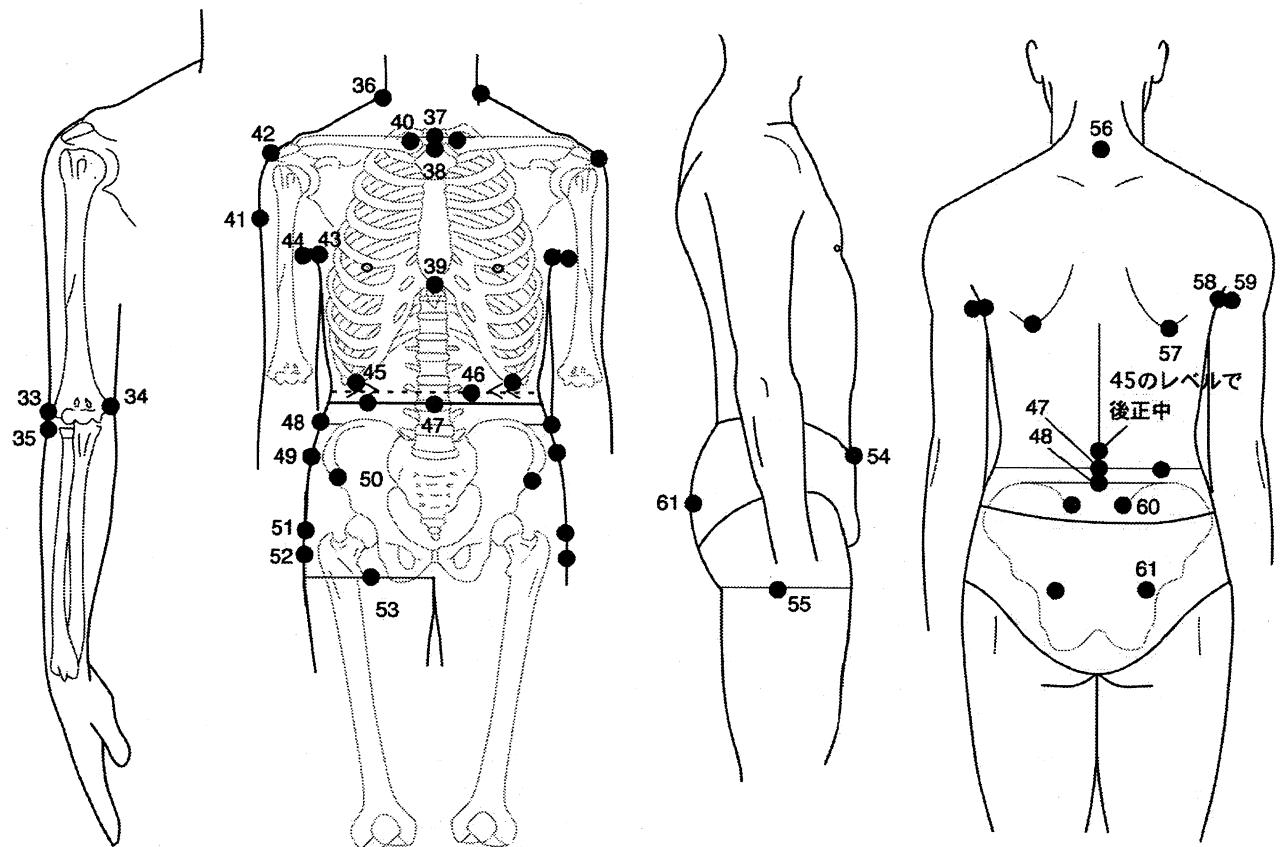


図5-1-2 予備実験1で使った特徴点-2。体幹部。

5. 1. 4 手計測

計測項目数、特徴点数が多いので、特徴点のマーク付けを2名の熟練者が、寸法の手計測を4名の熟練者が分担して担当した。手計測にはGPM社製のアントロポメータメータ、滑動計、触角計を用いた。その他の計測器、計測補助具として、体重計、巻尺、ハイトゲージ、ウエストベルトを用いた。

以下4つ（8ヶ所）の特徴点は、立位姿勢でマークをつけた皮膚上の位置が、座位姿勢をとると骨格上の特徴点位置とずれるので、座位姿勢寸法計測担当者が、色の異なるマーカでマークを付け直した：上前腸骨棘点（50）、上後腸骨棘点（60）、転子点（51）、大腿骨外側上顆（24）。

計測時の基本姿勢は、以下の通りとした：

立位：せすじをのばし、かかとをそろえて立つ。肩の力をぬき、上肢を自然に下垂する。手は手掌を体側につけ、指を伸ばす。頭部は耳眼面を水平に保持する。

座位：せすじを伸ばし、固い座面のいすにすわる。膝と足首がほぼ直角になるよう、足台の高さを調節する。直角は、転子点、大腿骨外側上顆、外果最突点で決める。肩の力をぬき、上肢を自然に下垂する。

着衣は、HOM社製、白色のボクサーショーツとした（図5-2参照）。

5. 1. 5 3次元形状計測

3次元形状計測にはVOXELANを用いた。これはレーザー光で体表を前後別々にスキャンし、前後左右に設置された8台のカメラで撮影する。計測時間が約30秒かかる。そこで、身体動揺を低減するため、身体固定具を試作し、使用した（図5-2）。また、座位姿勢のための専用のいすと足台を試作し、使用した（図5-3）。

計測時姿勢は、立位は人体寸法計測と同じとした。座位は、人体寸法計測時とほぼ同じだが、上肢を少し外転させた姿勢とした。

特徴点位置につけるマーカシールは、直径9mmの水色の円形シールとした（図5-2参照）。特徴点位置へのシールはり、姿勢固定等を、3名が担当して行った。



図5-2 身体固定装置

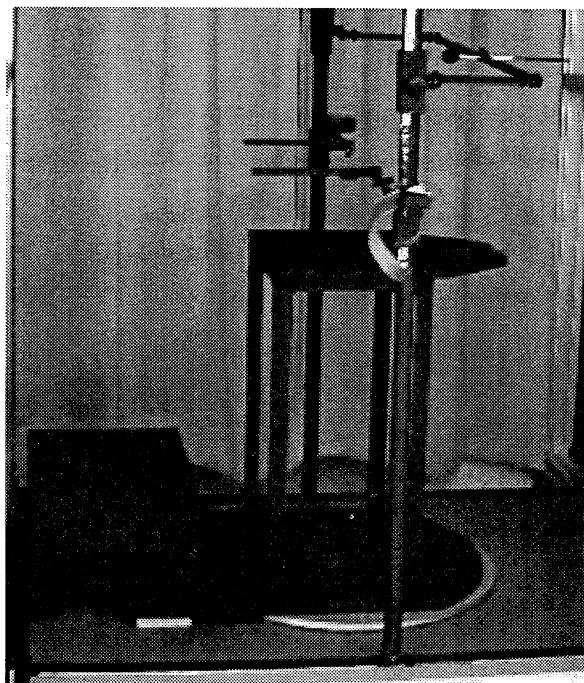


図5-3 3次元計測用のいすと足台

5. 1. 6 比較方法と結果

特徴点の3次元座標値から直接寸法を算出することができる、高さと幅項目について、手計測で得られた値と3次元形状データから算出した値を同等とみなすことができるか否かを、対応ありのt-検定により検定した。結果を表5-2に示す。

手計測により得られた寸法と3次元形状データから算出した寸法を同等とみなすことができるならば、両者の差は平均値がほぼ0の正規分布をし、両者の相関係数は1.0に非常に近くなるはずである。実際には大部分の項目で両者に有意な差が認められ、後腋窩高、指節点高、転子外突高、転子高、股下高、脛骨上縁高以外のすべての寸法で、両者を同等とみなすことはできなかった。

表5-2手計測による寸法と3次元形状データから算出した寸法の比較結果。対応ありのt-検定による。

高さ項目	DF	手計測平均値	3D平均値	差平均値	t	p	相関係数
1 外眼角高	42	1584.8	1568.7	16.0	12.926	<.0001	.991
2 オトガイ高	42	1469.9	1454.1	15.8	10.499	<.0001	.988
3 頸側点高	30	1440.1	1409.2	14.0	18.931	<.0001	.997
4 頸窩高	42	1389.8	1376.4	13.4	18.796	<.0001	.996
5 乳頭高	42	1227.8	1216.3	11.5	10.452	<.0001	.991
6 前腋窩高	42	1267.8	1256.5	11.3	11.538	<.0001	.993
7 耳珠高	42	1570.7	1558.8	11.9	14.830	<.0001	.996
8 頸椎高	42	1446.6	1437.0	9.5	12.587	<.0001	.996
9 肩甲骨下角高	42	1242.1	1234.5	7.6	6.617	<.0001	.990
10 後腋窩高	42	1250.2	1248.2	2.0	1.679	.1005	ns .989
11 肩峰高	41	1369.1	1364.4	5.5	5.157	<.0001	.994
12 橋骨点高	37	1058.0	1055.8	3.7	2.648	.0118	* .982
13 橋骨茎突高	42	818.1	821.0	-2.9	2.413	.0202	* .979
14 指節点高	42	727.6	729.9	-2.2	-1.825	.0751	ns .976
15 指尖高	42	639.8	648.6	-8.8	-6.767	<.0001	.970
16 腸骨稜上縁高	42	1010.7	1007.1	3.6	4.177	<.0001	.993
17 殿突高	41	858.5	853.5	6.1	7.227	<.0001	.992
18 脇高	41	997.0	988.7	9.5	9.089	<.0001	.988
19 ウエスト高	42	1032.0	1023.3	8.8	11.424	<.0001	.994
20 最小胴囲高	42	1052.5	1058.3	-5.8	-2.307	.0261	* .928
21 腸骨棘高	42	915.2	904.6	10.6	9.164	<.0001	.986
22 転子外突高	42	837.0	836.5	0.4	0.221	.8263	ns .954
23 転子高	22	866.0	858.7	3.2	1.806	.0847	ns .988
24 殿溝高	11	732.9	724.6	4.3	5.287	.0003	.998
25 股下高	41	773.7	773.8	1.4	1.531	.1335	ns .988
26 膝蓋骨中央高	42	451.8	454.7	-2.8	-2.958	.0051	.965
27 膝蓋骨下縁高	42	431.1	433.6	-2.5	-2.570	.0138	* .962
28 脣骨上縁高	42	437.6	439.2	-1.7	-1.761	.0856	ns .964
29 下腿最大囲高	42	303.8	309.3	-5.5	-9.534	<.0001	.980
30 下腿最小囲高	42	122.9	125.9	-3.0	-9.745	<.0001	.957
31 外果端高	42	56.4	53.3	3.1	9.971	<.0001	.913

幅項目	DF	手計測平均値	3D平均値	差平均値	t	p	相関係数
1 前腋窩幅	42	308.5	316.1	-7.7	-9.220	<.0001	.961
2 乳頭間幅	42	193.6	200.4	-6.8	-9.392	<.0001	.965
3 上前腸骨棘幅	42	232.5	239.3	-6.8	-6.096	<.0001	.932
4 肩峰幅	42	399.9	401.7	-1.9	-3.167	.0029	.966
5 肩甲骨下角間幅	42	182.8	180.2	2.6	3.784	.0005	.980
6 後腋窩幅	42	335.4	330.3	5.1	4.109	.0002	.917
7 転子幅	32	318.8	324.4	-4.8	-7.211	<.0001	.973

図5-4は、手計測による高さ項目の平均値と、手計測による値から3次元形状データから算出した値を引いて計算した、差の平均値の関係を示している。手計測による寸法平均値が700mm付近までは、大きな寸法ほど手計測による値の方が3次元形状データから算出した値よりも小さく、手計測による寸法平均値が700mm以上では逆に、大きな寸法ほど手計測による値の方が3次元形状データから算出した値よりも大きい傾向が認められる。

そこで、座標値が既知の物体を用いて、このような傾向が実際にあるかどうかを調べることにした。

手計測－3次元計測の平均値 (mm)

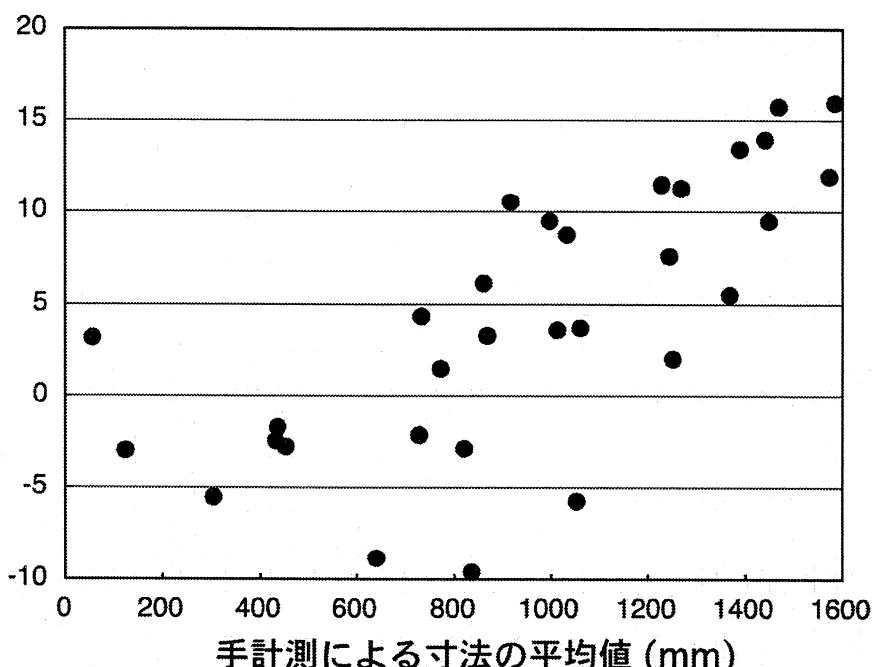


図5-4 手計測寸法と3次元形状データから算出した寸法の差の平均値と寸法の絶対的サイズとの関係

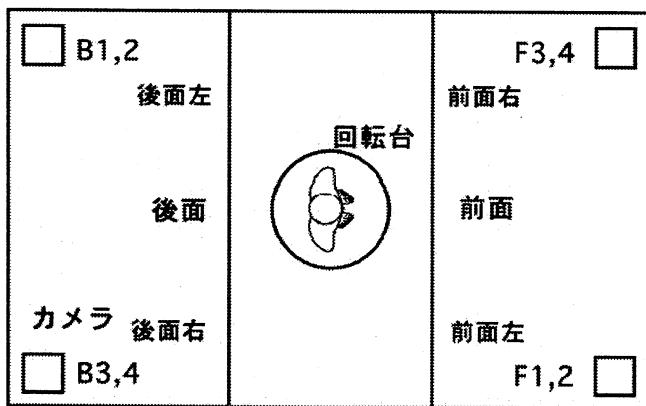
5. 2 VOXELAN検定実験- 1

5. 2. 1 目的

本実験の第1の目的は、座標が既知の点をVOXELANで測った時、正しい座標値が得られるかどうかを明らかにすることである。第2は、特徴点の座標値を求めるために、円形マーカシールの重心を計算するソフトを用いているが、これにより算出されるマーカ重心座標値の再現性を確認し、これにより正しくマーカシールの中心が算出されているかを検討することである。

VOXELANでは、図5-5のようにカメラが配置されている。被験者は、回転台の上に前面の方に顔を向けて立つ。被験者から見て前面右にカメラF1、F2が、前面左にカメラF3、F4がある。被験者の後面左をカメラB1、B2が、後面右をカメラB3、B4が撮影する。カメラ1、2とカメラ3、4は上下に配置されており、カメラ1、3が上方を、カメラ2、4が下方を撮影する。以後、カメラの前後左右は、被験者の前後左右のいずれを測るかを基準に表現することにする。

手計測実験で図5-4のような結果が得られたのは、上方を担当するカメラと下方を担当するカメラで、高さの真値からの偏差が異なっていることを示唆している。



カメラ番号1, 2 : 上が1、下が2

カメラ番号3, 4 : 上が3、下が4

図5-5 VOXELANのカメラ配置

5. 2. 2 高さ座標値の検討

図5-6に高さ座標値計測精度検証用の実験道具の模式図を示す。長さ約1900mmの板の前面と後面に、床面から約60mmから約1760mmの高さまで、50mmおきに、直径9mmの水色のマーカシールをはったものである。このうち、床面からの高さが約1510mmの点をP1、約1010mmの点をP2、約510mmの点をP3とする。この棒を、図5-5の回転台の中心付近につり下げて、前面と後面から3次元形状計測装置を用いて計測した。

ここでは、高さ座標値の検討の他に、マーカ抽出の再現性についても検討した。これは、手計測による寸法との違いの一因として、マーカ中心の検出失敗が考えられるためである。

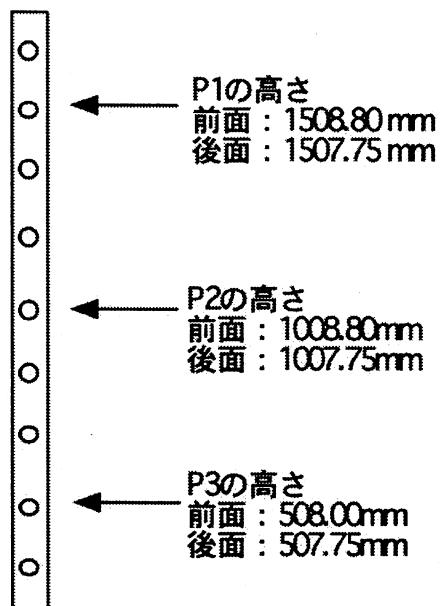


図6. 高さ計測精度用実験道具の模式図

図5-6に示した道具を使い、34のデータ点の高さ座標値をVOXELANで計測した。結果を図7～10に示す。カメラによって程度は少し異なるが、どのカメラにおいても、高い位置のデータ点ほど実測値が真値より小さい（低く測られる）傾向がある。

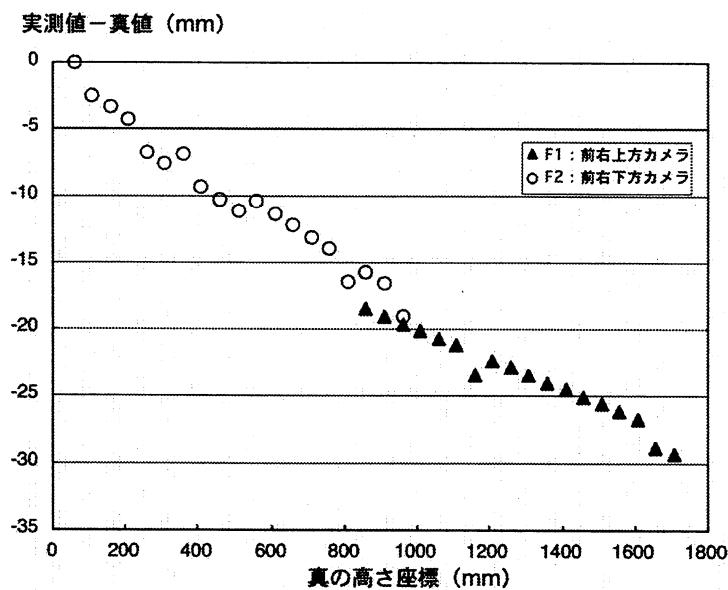


図5-7 高さ座標値の検証-1。前面右側カメラ1, 2。

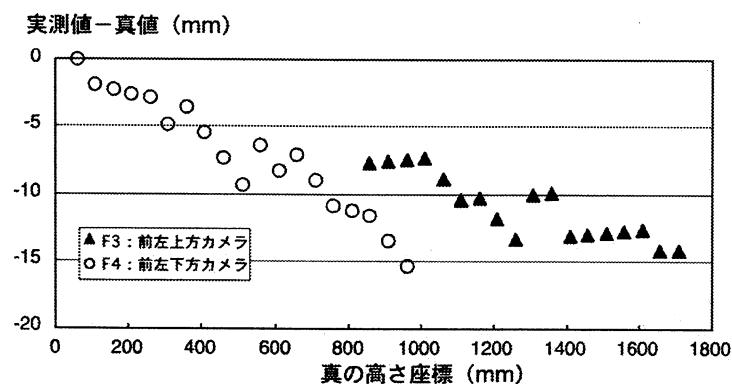


図5-8 高さ座標値の検証-2。前面左側カメラ3, 4。

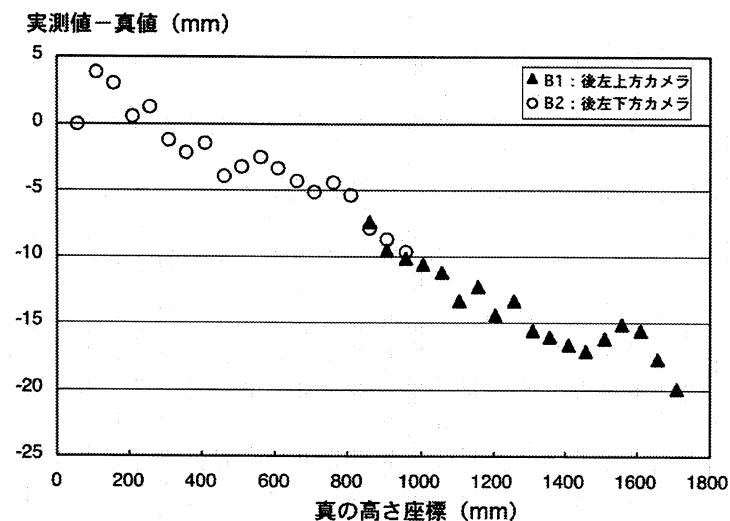


図5-9 高さ座標値の検証-3。後面左側カメラ1, 2。

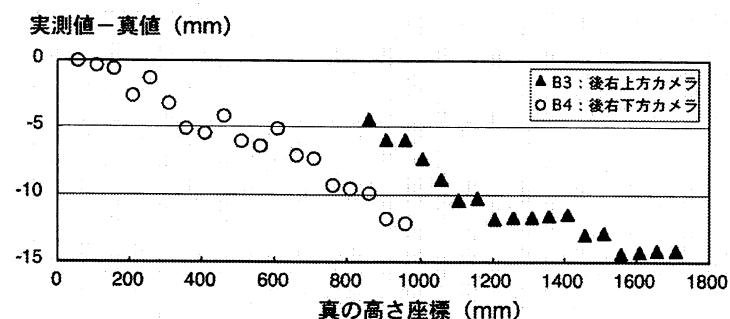


図5-10 高さ座標値の検証-4。後面左側カメラ。

高さの偏差が明瞭であったため、座標値計算ソフトのバージョンアップによる修正を試みたが、これだけでは高さの偏差をなくしきれなかった。

5. 2. 3 中心から左右方向の位置による偏差の違い

左右方向の計測精度を調べるため、図5-11に示す実験道具の0点が回転台の中心にくるように、図5-12のように設置した。実験道具を床面から500mm、1000mm、1500mmの3つの高さにおいて、3次元形状計測装置でデータ点の座標値を計測した。以下、左右方向、前後方向の偏差の検討では、座標値計算ソフトversion 3を使用した。

結果を図5-13～5-16に示す。多くのカメラが真値から系統的なずれを示した。また、カメラによっては中心から左右に離れるほど偏差が大きくなる傾向を示すものもあった。

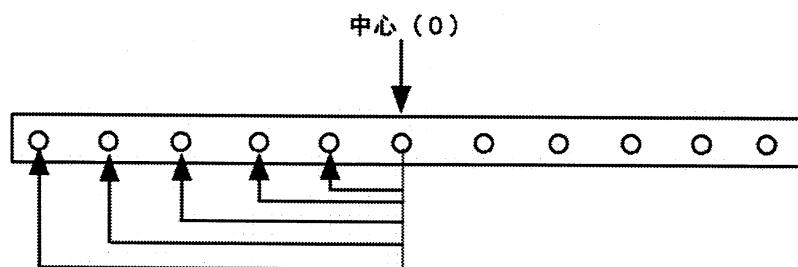


図5-11 左右方向計測精度用実験道具

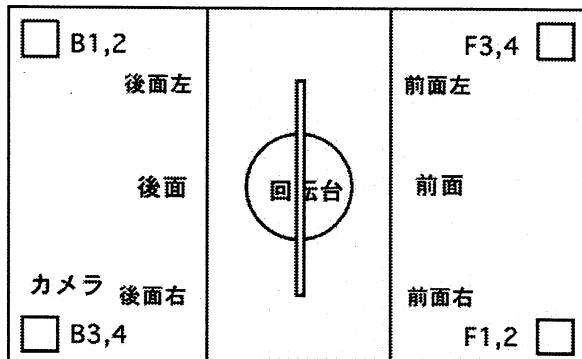


図5-12 左右方向計測精度実験道具の配置

実測値－真値 (mm)

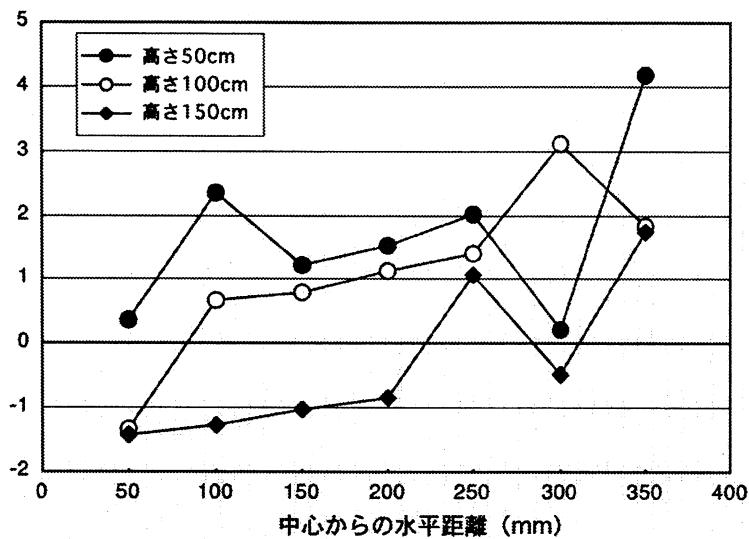


図5-13 前面右（カメラFC1,2）における左右方向の真値からの偏差

実測値－真値 (mm)

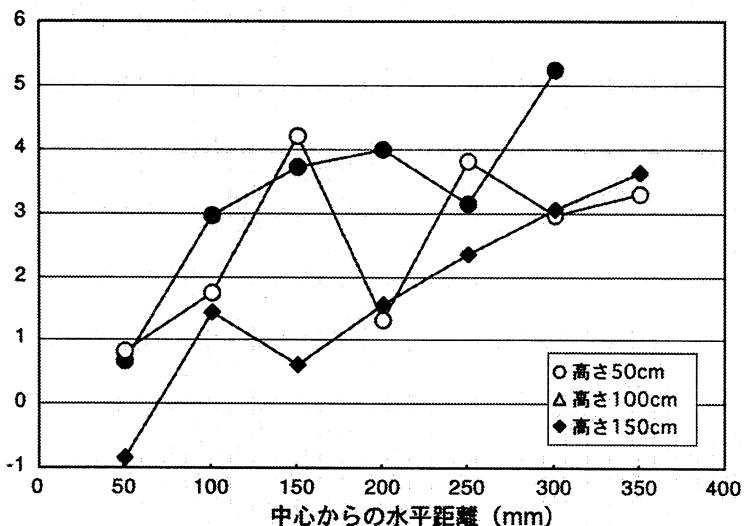


図5-14 前面左（カメラFC3,4）における左右方向の真値からの偏差

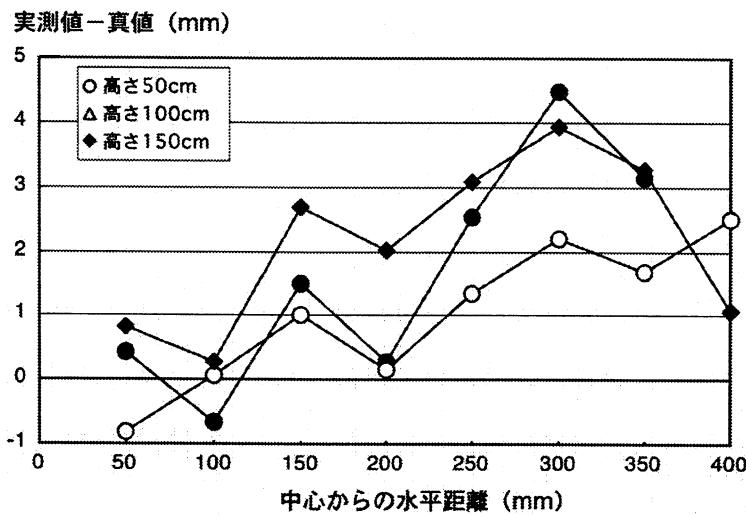


図5-15 後面右（カメラBC3,4）における左右方向の真値からの偏差

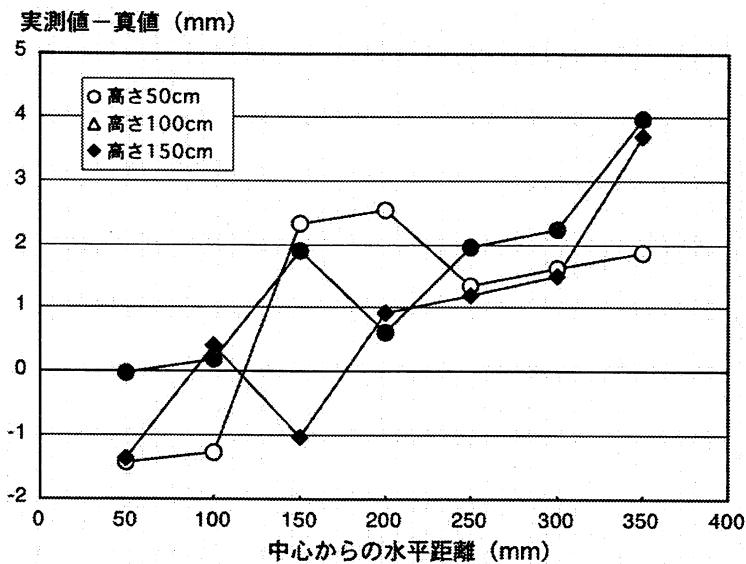


図5-16 後面左（カメラBC1,2）における左右方向の真値からの偏差

5. 2. 4 中心をはさんだ左右の幅の真値からのずれ

図5-17に示すように、中心をはさんで左右の点間の幅を測ったときの真値からのずれを、図5-18、5-19に示す。片側ずつではそれほど明瞭でなかったが、左右の幅にすると、水平距離が大きくなるほど、偏差が大きくなる傾向が認められた。

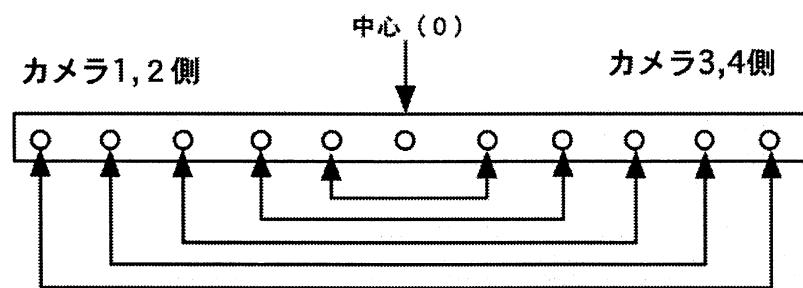


図5-17 中心をはさんだ左右の幅の計測

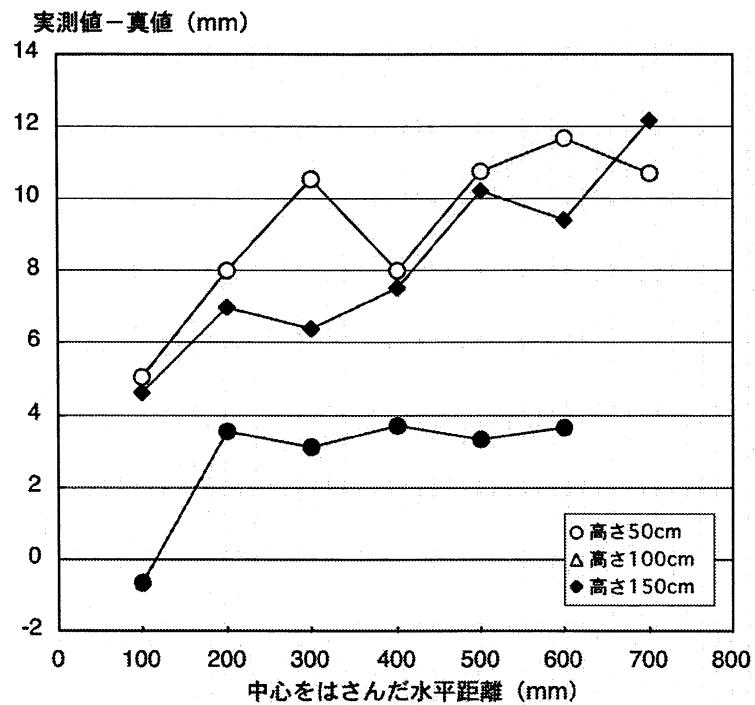


図5-18 前面カメラによる左右の幅の計測

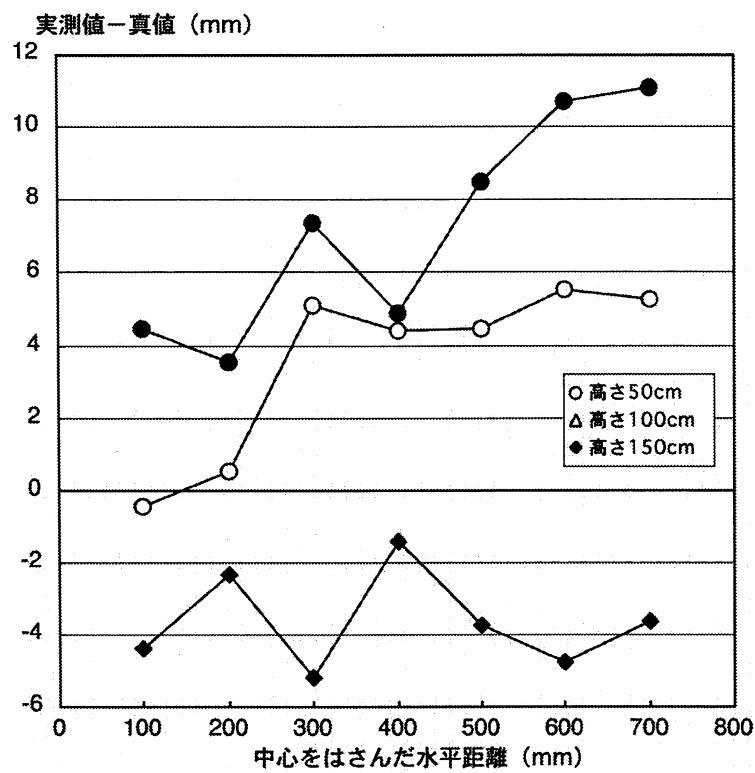


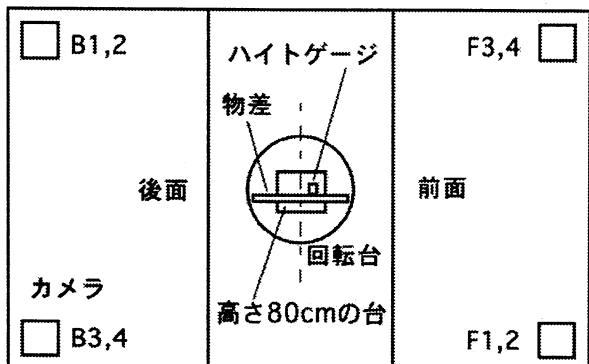
図5-19 後面カメラによる左右の幅の計測

5. 2. 5 前後座標値の検討

図5-20に示すように、回転台上に表面が水平な高さ800mmの台をおき、その上に前後方向に600mmの物差をはりつけた。この台のマーカシールをはったハイトゲージを置いて、物差を基準に50mmずつ移動させて、その都度計測した。

結果を図5-21に示す。回転台の中心から前後に離れるほど、系統的に偏差が大きくなっている。

以上のように、上下、左右、前後、すべての方向で、系統的な偏差の増大傾向が認められた。これをソフトで修正するのは難しいことがわかったため、3次元形状計測装置の再調整を行うことにした。



カメラ番号1, 2 : 上が1、下が2

カメラ番号3, 4 : 上が3、下が4

図5-20 前後方向座標値検証方法

実測値－真値 (mm)

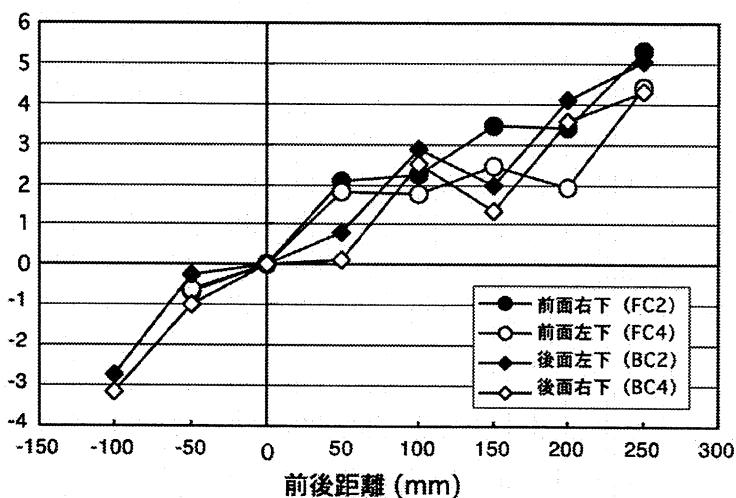


図5-21 前後方向座標値の真値からの偏差

5. 2. 6 特徴点座標値の計算

1) マーカ中心算出ソフト

マーカの座標値は、マーカ全体をふくむ範囲をマウスで選択し、専用のソフトでその重心の座標値を計算する。図5-6のP1～P3の3点につき、このソフトで20回座標値を算出したときの、高さ座標値のばらつき（標準偏差、単位：mm）は以下のとおりであった。標準偏差は1mm未満であり、安定した結果を与えるといえる。

カメラ	P1	P2	P3	
前右上下	FC1,2	0.49	0.00	0.00
前左上下	FC3,4	0.00	0.59	0.00
後右上下	BC3,4	0.00	0.00	0.00
後左上下	BC1,2	0.00	0.00	0.36

2) マウスによるマーカクリックの誤差

マーカ座標値の計算を、専用のソフトを使わず、眼で見てマウスでマーカ中心をクリックした場合の再現性を調べるため、1)と同じデータを用いて、20回クリックをしたときの、高さ座標値のばらつき（標準偏差、単位：mm）を調べた。結果は以下のとおりであった。ばらつきは1.0～1.5mm程度で、ピクセルサイズにはほぼ等しい。

カメラ		P1	P2	P3
前右上	FC1	1.49	1.38	1.16
前右下	FC2	1.49	1.23	1.03
後左上	BC1	1.19	1.07	1.08
後左下	BC3	0.98	1.40	0.96

3) 身体の曲率の影響

マーカシールが円形に見える場合は、マーカ重心算出ソフトで得られたマーカの中心と、目で見てマウスでクリックしたマーカの中心はほぼ一致する。しかしながら、曲率の高い身体部位によっては画面に移ったマーカは円にはならない。このような場合、計算されたマーカの重心と目で見たマーカ中心がずれる可能性がある。この影響が寸法算出にどの程度の影響を与えるかを調べた。

図5-22に示すように、現代人青年女性平均形態をもとに作成された人台（新文化ヌードボディ）のウエストライン上に50mmおきに緑色のマーカシールを貼り、3次元形状計測装置で計測した。マーカの座標値を、重心算出ソフトとマウスクリックの両方で求めた。

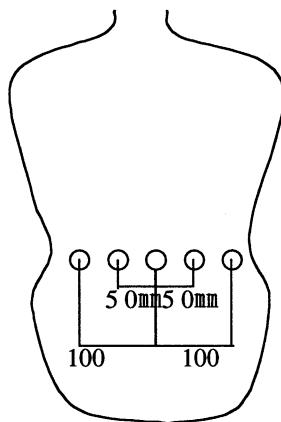


図5-22. 人台にはったマーカの位置

以下に、2つの方法で算出したマーカ中心の座標値から計算した、中央の点から他のマーカ中心までの距離を示す。最終調整前の計測装置を使ったため、いずれの方法で算出した寸法も実寸から異なっているが、目で見て重心位置がずれている点では、場合によっては両者で5mmもの差がある。

身体の中心から横に100mm程度離れると、マーカシールの形状が鞍型になって、現在のソフトでは中心の位置を正確に算出しにくくなるようである。

重心自動抽出による座標値からの算出結果 (単位 : mm)

マーク位置 FrontC1 FrontC2 FrontC3 FrontC4 BackC1 BackC2 BackC3 BackC4								
100	102.097	103.707	欠落	<u>100.261</u>	<u>106.918</u>	106.366	<u>106.402</u>	<u>109.044</u>
50	51.956	52.32	50.649	53.367	53.852	53.691	<u>51.664</u>	見えない
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	<u>53.594</u>	52.547	欠落	52.705	51.447	見えない	53.37	52.699
100	欠落	<u>104.161</u>	102.934	<u>104.306</u>	<u>107.465</u>	<u>108.704</u>	<u>104.899</u>	<u>105.64</u>

太字下線：見た目で、重心抽出がずれている

マウスによるクリックによる座標値からの算出結果 (単位 : mm)

マーク位置 FrontC1 FrontC2 FrontC3 FrontC4 BackC1 BackC2 BackC3 BackC4								
100	103.796	102.208	-	105.636	105.449	106.43	107.372	109.609
50	53.655	52.106	50.496	51.718	52.093	53.715	51.79	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	51.563	53.917	-	52.762	51.557		51.822	51.242
100	-	103.562	102.933	104.277	105.723	103.312	104.839	104.093

差 ソフトマウス (単位 : mm)

マーク位置 FrontC1 FrontC2 FrontC3 FrontC4 BackC1 BackC2 BackC3 BackC4								
100-1.699	1.499		-5.375	1.469	-0.064	-0.97	-0.565	
50	-1.699	0.214	0.153	1.649	1.759	-0.024	-0.126	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	2.031	-1.37		-0.057	-0.11		1.548	1.457
100		0.599	0.001	0.029	1.742	5.392	0.06	1.547

5. 3 VOXELAN検定実験-2

5. 3. 1 目的

本実験の目的は、座標が既知の点を設置時調整をやり直した後のVOXELANで測った時、正しい座標値が得られるかどうかを明らかにすることである。

調整後のVOXELANの、カメラ配置等を図5-23に示す。基準位置は、回転台の中心を通る。

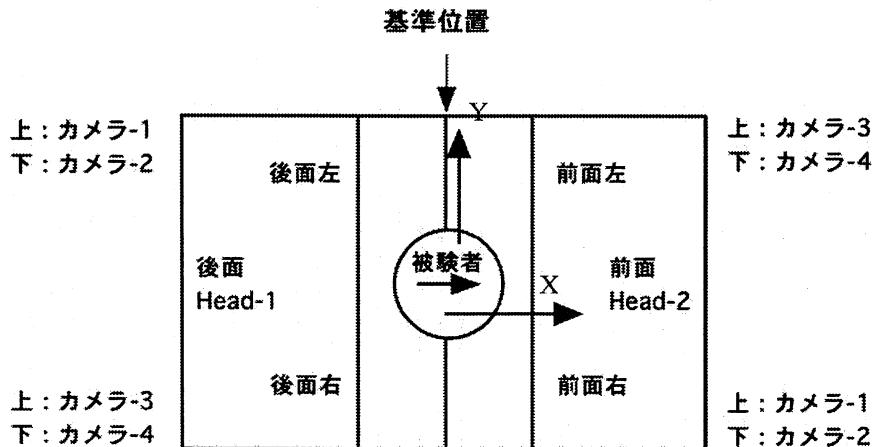


図5-23 調整後VOXELANのカメラ配置

5. 3. 2 高さ座標値の検討

以下3点を評価ポイントとした：

- 1) 各カメラで測った各点のZ座標値（高さ方向）の真値からのずれが十分に小さいか。
- 2) 床面から高くなるほど真値からのずれが大きくなる傾向がないか。
- 3) 中心から左右にずれると真値からのずれが大きくならないか。

これらを調べるために、図5-24に示すような装置を作った。床面に対して垂直な平板上に互いに平行な3本の線をひき、各線上に、床面から高さ50mmの位置から高さ1700mmの位置まで、50mm間隔で円形マーカシールをはったものである。平板の前面下端を図5-23の基準線に合わせ、中央の線（L2）を回転台の中心合わせて設置し、前面（Head-2）、後面（Head-1）別々に、3次元形状計測装置で計測した。

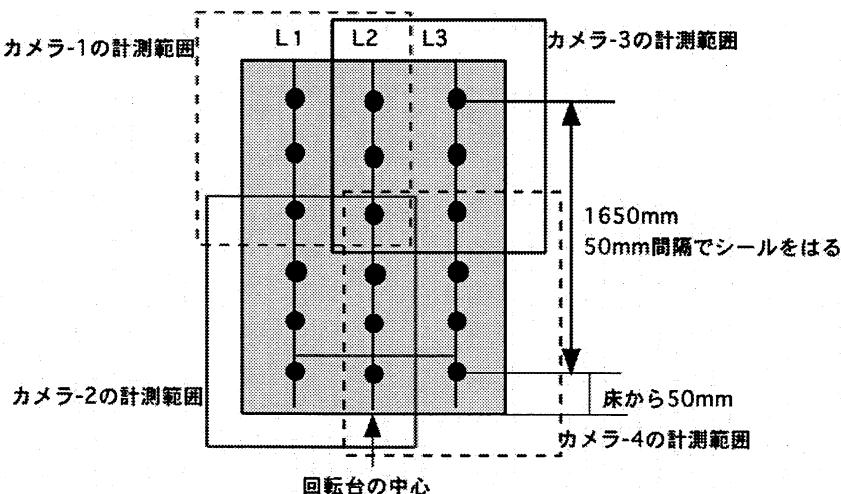


図5-24 高さ座標検証のための装置

前面カメラ1、2と後面カメラ1、2はL1とL2上の点を、前面カメラ3、4と後面カメラ3、4はL2とL3上の点を計測することになる。

結果を図5-25～5-28に示す。各カメラではっきりと見えた最下のマークの座標値を0として図示してある。したがって、図5-25～5-28の横軸の数値は床面からの絶対高さを示すわけではないことに注意されたい。

8つのカメラによって結果は少しずつ異なる。部位によっては偏差が3mmよりも大きい点があるが、多くの点で座標値は真値から±2mmの範囲におさまっている。高さに伴う系統的な偏差の増加傾向は、ほとんど認められない。また、L2上の点に比べてL1やL3上の点の方が偏差が大きいとはいえない。したがって、上記3つの観点からみて、かなりよい結果といえよう。

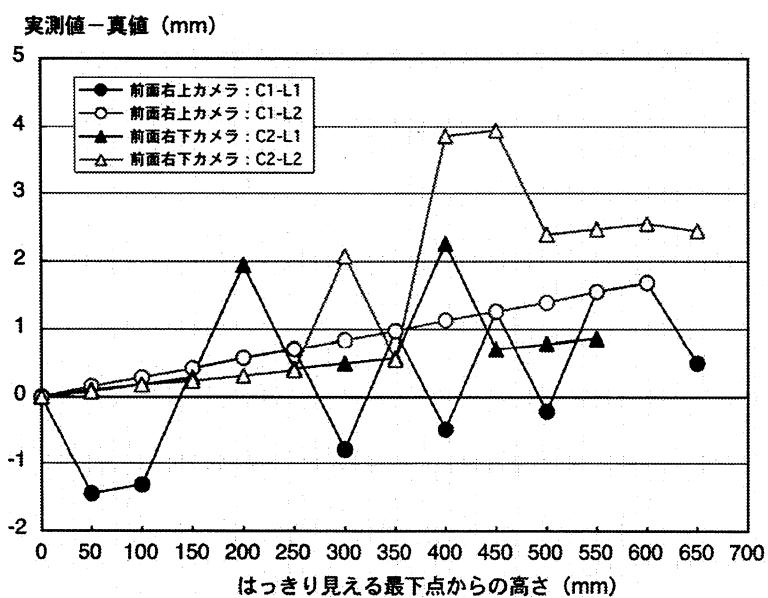


図5-25 前面 (Head-2) 右側カメラ (上C1, 下C2) による高さの真値からのずれ

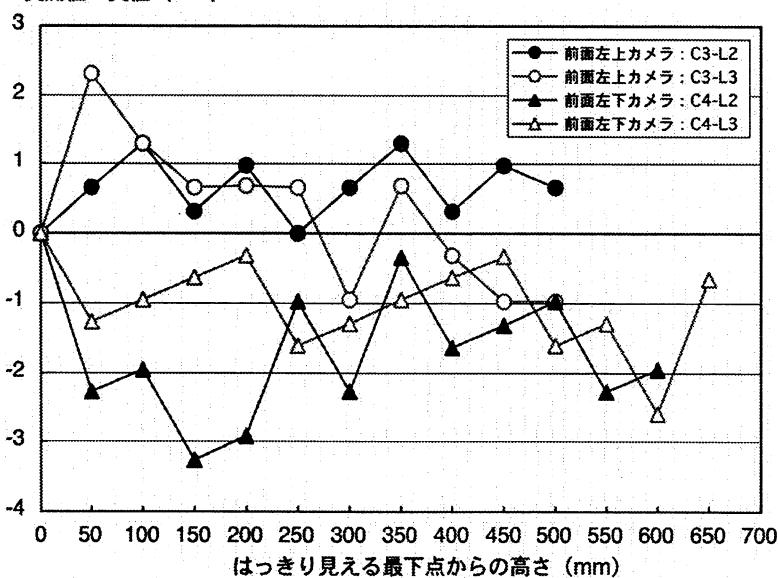


図5-26 前面 (Head-2) 左側カメラ (上C3, 下C4) による高さの真値からのずれ

実測値-真値 (mm)

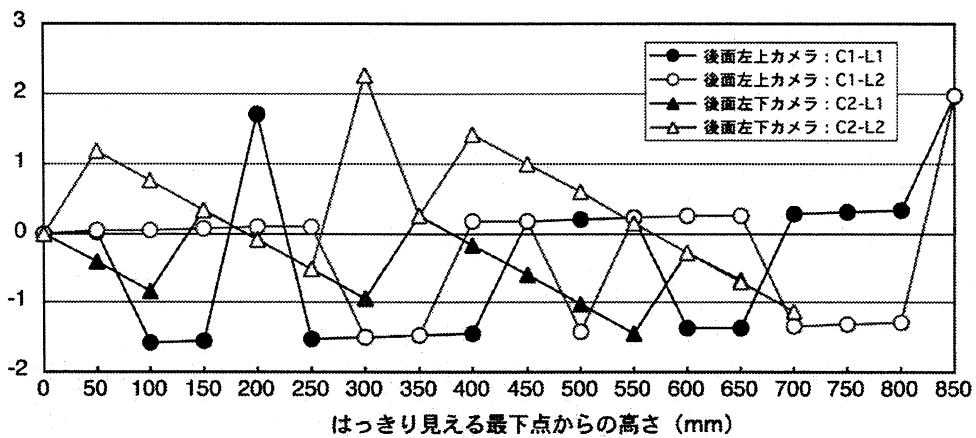


図5-27 後面 (Head-1) 左側カメラ (上C1,下C2) による高さの真値からのずれ

実測値-真値 (mm)

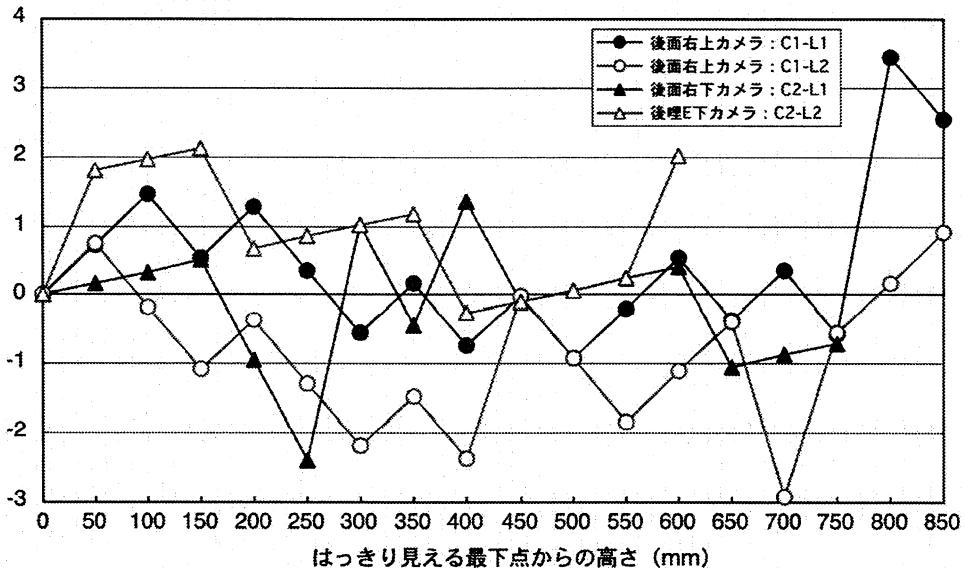


図5-28 後面 (Head-1) 右側カメラ (上C3,下C4) による高さの真値からのずれ

5. 3. 3 水平方向座標値の検討

以下2点を評価ポイントとした。

- 1) 各カメラで測った各点の座標値が十分真値に近いか。
- 2) 中心から左右にずれると真値からのずれが大きくならないか。

これらを調べるため、図5-29に示すような装置を作った。床面に対して垂直な平板上に、床面から500mmの高さと床面から1500mmの高さに、互いに平行な2本の水平な線をひき、各線上に50mm間隔で円形マーカシールをはったものである。平板の前面下端を図5-23の基準線に合わせ、中央の点を回転台の中心合わせて設置し、前面 (Head-2) 、後面 (Head-1) 別々に、3次元形状計測装置で計測した。

結果を図5-30、5-31に示す。これらの図では、各々のカメラで見える最もそのカメラと反対側の点を0点としてあるので、0点が必ずしも回転台の中心位置に一致していないことに注意されたい。

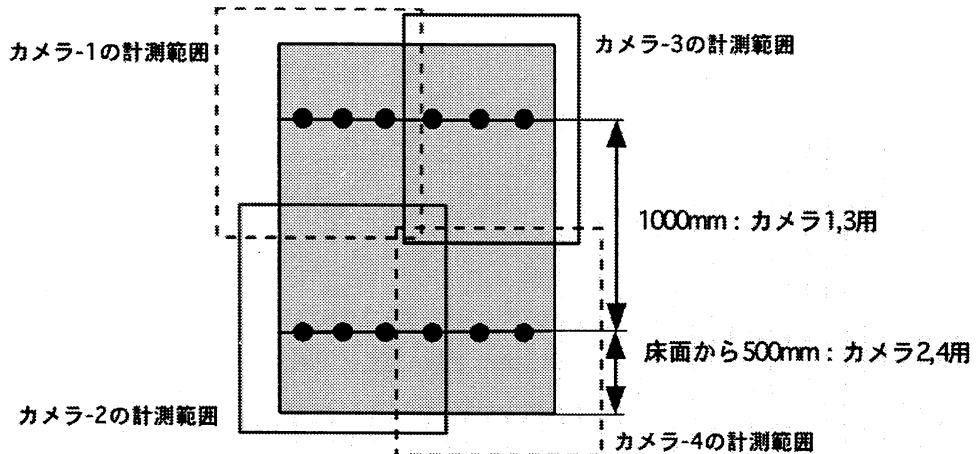


図5-29 水平方向座標検証のための装置

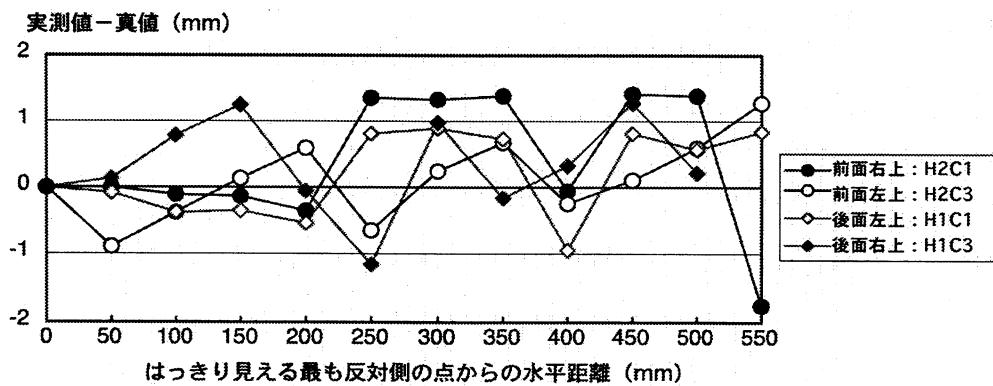


図5-30 床面から1500mmの高さにおける水平方向座標値の真値からのずれ

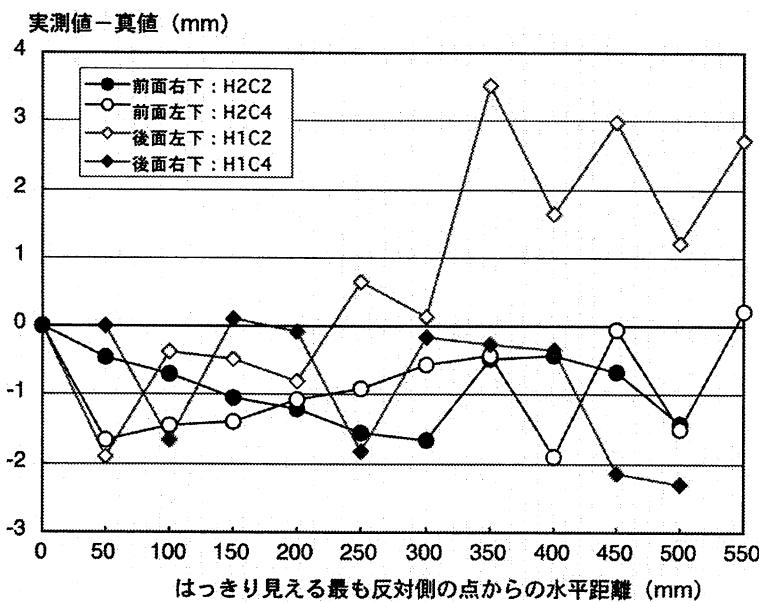


図5-31 床面から500mmの高さにおける水平方向座標値の真値からのずれ

一部、かなり偏差の大きい点があるが、大部分の点で、真値とのずれは±2mm以内におさまっている。また、中心から離れるほど偏差が大きくなる傾向は認められない。

中心をはさんだ左右の幅に関する結果を図5-31に示す。中心から片側を測った場合に比べて偏差は大きい。しかし、中心から離れるほど偏差が大きくなる傾向は、人体後面を測るカメラ (Head-1)では認められないが、人体前面を測るカメラ (Head-2) ではないとはいえない。図5-31の横軸数値と縦軸数値との相関係数は、前面1500mmで0.87、前面500mmで0.72であった。

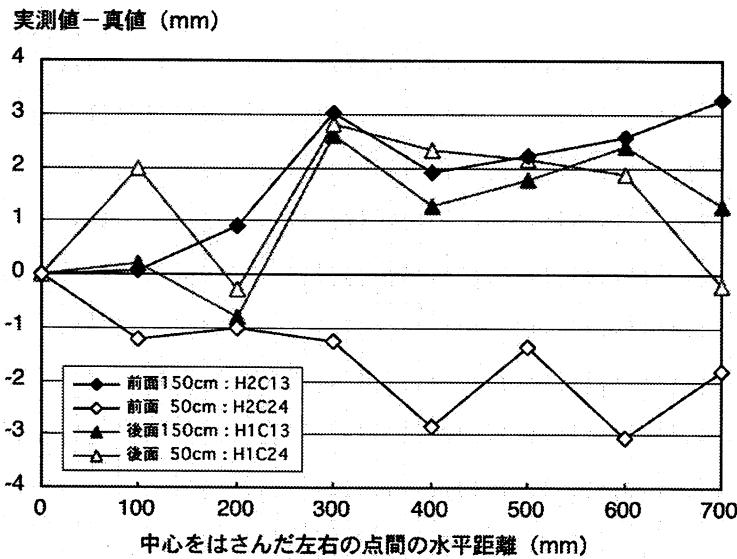


図5-32 中心をはさんだ左右の点間の水平距離の真値からのずれ

5. 3. 4 前後方向座標値の検討

以下2点を評価のポイントとした。

- 1) 各カメラでみえる点の奥行き座標の真値とのずれが十分に小さいか。
- 2) 奥行きが原点から離れるにしたがい、誤差が大きくならないか。

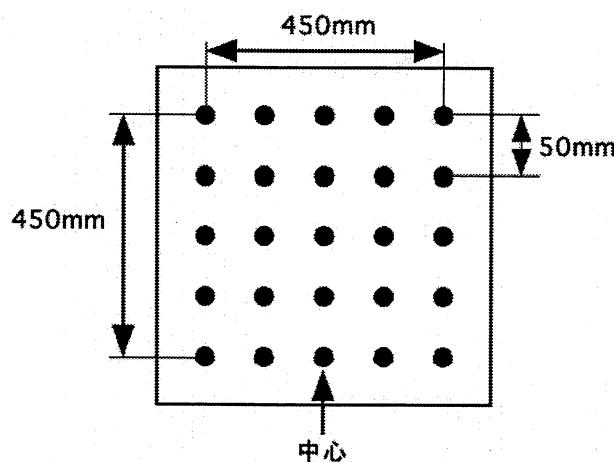


図5-33 前後方向座標検証のための装置。

これを調べるため、図5-33のような装置を作った。これは、垂直な基準盤の面上に、幅450mm、高さ450mmの範囲に各方向に50mm間隔でマーカシールをはつたものである。この中心を回転台の中心に、面を図5-23の基準位置に設置する。このとき、最も下にある点の中心の床面からの高さ1140mm（カメラ1,3用）、および240mm（カメラ2,4用）になるようにする。これを基準位置として、この他に、面の位置が基準より手前100mm（+100mm）、手前200mm（+200mm）、および基準より向こう側50mm（-50mm）の位置の、合計4ヶ所において、3次元形状計測装置で計測した。

図5-34に示すように各カメラで見える四隅の点を、P1, P2, P3, P4として集計した。

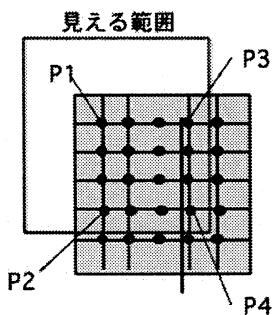


図5-34 各カメラで見える範囲の端の点をP1～P4とする。

結果の実測値は、表5-2、表5-3のとおりであった。ほとんどの点で、真値との差は2mm未満である。各カメラによりP1～P4は異なる点であり、前後位置に伴なう偏差の系統的違いは、明瞭でない。

表5-2 前後座標の実測値（単位：mm）。

ヘッド2=前面

前面右上 (H2-C1)

真値	P1	P2	P3	P4
-50	-51.2	-50.7	-48.2	-50.6
100	99.5	99.7	-	100.1
200	200.0	198.8	-	199.5

前面右下 (H2-C2)

真値	P1	P2	P3	P4
-50	-51.3	-51.7	-50.9	-48.6
100	99.4	99.0	99.2	-
200	201.1	200.1	200.3	-

前面左上 (H2-C3)

真値	P1	P2	P3	P4
-50	-50.7	-48.9	-48.4	-48.1
100	-	100.7	100.9	100.8
200	-	200.6	201.5	201.4

前面左下 (H2-C4)

真値	P1	P2	P3	P4
-50	-49.7	-48.8	-48.5	-48.1
100	-	98.6	99.0	99.7
200	-	199.0	199.3	200.2

ヘッド1=後面

後面左上 (H1-C1)

真値	P1	P2	P3	P4
-50	-50.7	-51.3	-50.2	-50.0
100	100.1	98.1	101.0	100.3
200	199.1	198.1	199.9	199.6

後面左下 (H1-C2)

真値	P1	P2	P3	P4
-50	-49.6	-49.5	-48.6	-50.6
100	100.9	100.9	101.0	99.5
200	200.1	199.6	200.3	200.2

(続く)

後面右上 (H1-C3)				
真値	P1	P2	P3	P4
-50	-50.9	-52.4	-51.5	-51.5
100	101.4	100.9	101.7	100.6
200	-	200.2	200.7	199.9

後面右下 (H1-C4)				
真値	P1	P2	P3	P4
-50	-49.6	-50.3	-50.5	-50.3
100	100.6	100.7	100.4	100.5
200	-	199.7	198.9	198.9

表5-3 前後座標の実測値と真値の差 (実測値 - 真値) (単位 : mm)。

ヘッド2=前面

前面右上 (H2-C1)				
位置	P1	P2	P3	P4
-50	-1.2	-0.7	1.8	-0.6
100	-0.5	-0.3	-	0.1
200	0.0	-1.2	-	-0.5

前面右下 (H2-C2)				
位置	P1	P2	P3	P4
-50	-1.3	-1.7	-1.0	1.4
100	-0.6	-1.0	-0.8	-
200	1.1	0.1	0.3	-

前面左上 (H2-C3)				
位置	P1	P2	P3	P4
-50	-0.8	1.1	1.6	1.9
100	-	0.7	0.9	0.9
200	-	0.6	1.5	1.4

前面左下 (H2-C4)				
位置	P1	P2	P3	P4
-50	0.4	1.2	1.5	1.9
100	-	-1.4	-1.0	-0.3
200	-	-1.0	-0.7	0.2

ヘッド1=後面

後面左上 (H1-C1)				
真値	P1	P2	P3	P4
-50	-0.7	-1.3	-0.2	0.0
100	0.1	-1.9	1.0	0.3
200	-0.9	-1.9	-0.1	-0.4

後面左下 (H1-C2)				
真値	P1	P2	P3	P4
-50	0.4	0.5	1.4	-0.6
100	0.9	1.0	1.0	-0.5
200	0.1	-0.4	0.3	0.2

後面右上 (H1-C3)				
真値	P1	P2	P3	P4
-50	-0.9	-2.4	-1.5	-1.5
100	1.4	0.9	1.7	0.6
200	.	0.2	0.7	-0.1

後面右下 (H1-C4)				
真値	P1	P2	P3	P4
-50	0.4	-0.3	-0.5	-0.3
100	0.6	0.7	0.4	0.5
200	.	-0.3	-1.1	-1.1

5. 4 手計測実験 2

5. 4. 1 目的

本実験の目的は、調整後VOXELANにより得られた特徴点の3次元座標値から算出することができる人体寸法が、手計測で得られた値と同等とみなすことができるかどうかを明らかにすることである。

5. 4. 2 計測法に関する検討

本実験に先立ち、調整後VOXELANに組み込まれたソフトを用いて、手計測実験1で取得した3次元形状データから寸法を算出しなおしたものと、手計測による値とを同等とみなすことができるかどうかを対応ありのt-検定で調べた。この結果を表5-4に示す。

表5-4 手計測実験1のデータを調整後VOXELANソフトで処理して得られた寸法と手計測による寸法の比較結果（対応ありのt-検定による）

項目	自由度	手計測平均値	3D平均値	差平均値	t	p	相関係数
1 外眼角高	42	1584.8	1585.8	-1.0	-.815	.4199	ns .991
2 頸側点高	28	1440.1	1428.5	-2.0	-2.951	.0063	** .998
3 頸窩高	42	1389.8	1391.8	-2.0	-3.113	.0033	** .997
4 乳頭高	42	1227.8	1229.2	-1.4	-1.709	.0949	ns .995
5 前腋窩高	42	1267.8	1270.0	-2.3	-2.571	.0138	* .995
6 頸椎高	42	1446.6	1447.0	-.4	-.653	.5176	ns .997
7 肩甲骨下角高	42	1242.1	1242.4	-.3	-.344	.7322	ns .992
8 後腋窩高	40	1250.2	1251.8	-4.4	-3.520	.0011	** .989
9 肩峰高	40	1369.1	1370.5	-2.9	-3.138	.0032	** .995
10 橫骨点高	30	1058.0	1060.4	-.9	-.589	.5602	ns .984
11 橫骨茎突高	42	818.1	828.9	-10.8	-8.091	<.0001	** .975
12 腸骨稜上縁高	42	1010.7	1012.0	-1.4	-1.826	.0749	ns .995
13 殿突高	41	858.5	856.7	2.9	4.096	.0002	** .994
14 脇高	39	997.0	993.0	4.7	1.173	.2840	ns .871
15 ウエスト高	42	1032.0	1034.3	-2.3	-3.394	.0015	** .995
16 腸骨棘高	42	915.2	914.6	.6	.543	.5900	ns .987
17 股下高	42	773.7	785.3	-11.6	-2.756	.0086	** .768
18 膝蓋骨中央高	42	451.8	457.2	-5.4	-5.473	<.0001	** .967
19 脛骨上縁高	41	437.6	442.5	-5.2	-5.743	<.0001	** .968
20 下腿最大囲高	42	303.8	309.3	-5.5	-9.859	<.0001	** .980
21 座位眼高	42	800.3	793.9	6.4	4.464	<.0001	** .950
22 座位頸椎高	42	667.6	661.9	5.7	5.670	<.0001	** .969
23 座位肩峰高	39	592.1	588.2	3.5	2.455	.0186	* .953
24 座位上後腸骨棘高	42	145.9	151.2	-5.3	-2.517	.0162	* .699

(続く)

25 前腋窩幅	37	308.5	314.5	-6.8	-7.519	<.0001	**	.961
26 乳頭間幅	41	192.2	196.8	-4.6	-7.116	<.0001	**	.953
27 上前腸骨棘幅	41	232.5	236.6	-4.3	-3.885	.0004	**	.940
28 肩峰幅	40	399.9	404.7	-5.7	-8.657	<.0001	**	.957
29 肩甲骨下角間幅	39	182.8	181.3	.5	.641	.5256	ns	.973
30 後腋窩幅	38	335.4	332.8	.1	.094	.9253	ns	.852
31 上腕長	30	317.9	317.4	1.7	3.533	.0014	**	.984

自由度が42以外の場合は、手計測平均値と3D平均値でサンプル数が異なることに注意

この結果、31項目中10項目で手計測による値と3次元形状データから算出された値との差が有意でなくなった。また、有意差がある場合も、表2に示した結果よりも多くの項目で差の平均値が0に近くなつた。しかしながら、依然として21項目では両者の差が有意であることから、両者の違いをもたらす要因について検討した。この結果、以下の問題点が明らかになった。

- 1) 耳珠点、乳頭点、臍点は、生体では明瞭だが3次元形状計測装置でとった画像では明瞭でない場合がある。これは、特徴点位置に大型のマーカシールをはることで解決できる。
 - 2) 頸側点、肩峰点のように身体の側面にある特徴点は3次元形状計測装置で見えない。これは、カメラ配置を工夫しないと見えるようにならない。新規開発のスキャナでは、カメラ配置に特に注意をはらう必要がある。
 - 3) 指節点、指尖点は、指がしっかり伸びていないために3次元形状計測装置では測れないことがある。これは、計測直前に姿勢確認を確実にすることで解決できるかもしれない。確認しながら測れる手計測の方が確実であろう。
 - 4) 膝よりも低い位置にある特徴点、特に足首付近の特徴点の高さは、3次元形状計測装置の計測精度から判断して、手計測した方がよいと考えられる。
- 以上の点を考慮した上で、どの寸法項目が3次元形状計測装置で算出可能かを調べるために、新たな被験者を使って2回目の実験を行うことにした。

5. 4. 3 被験者

目的を、同等とみなすことができるか否かの確認に限ったので、男女をとわず、成人を対象とした。最終的に男性19名、女性1名を計測した。年齢は22~78歳であった。うち60歳以上が8名、30歳未満が11名であった。

5. 4. 4 計測項目と特徴点

計測項目は、特徴点の3次元座標値から算出可能な2点間距離と高さ項目に限った。これは、周長等を推定するための推定式の計算が簡単にはできそうもないことによる。最終的に、表5-5に示す35項目について検討した。ただし、膝蓋骨下縁高は手計測をしなかった。

これらの算出に必要な特徴点は表5-4に示す59点（女性は60点）、107ヶ所（女性は108ヶ所）とした。

表5-5 本実験で用いた特徴点。左右ある場合は右を使用。

特徴点	数	マーカ種類	対応する人体寸法
1 外眼角点	2		外眼角高 座位眼高
33 頸側点	2	緑 9 mm	頸側点高
34 頸窩点	1	緑 9 mm	頸窩高
42 乳頭点	2	水色 15mm	乳頭高 乳頭間幅
40 前腋窩点	2	水色 9 mm	前腋窩高 前腋窩幅
7 耳珠点	2	水色 15mm	耳珠高
53 頸椎点	1	緑 9 mm	頸椎高 座位頸椎高
54 肩甲骨下角	2	水色 9 mm	肩甲骨下角高
55 後腋窩点	2	水色 9 mm	後腋窩高 後腋窩幅
37 肩峰点	2	緑 9 mm	肩峰高 肩峰幅 座位肩峰高
31 桡骨点	2	水色 15mm	桡骨点高
26 桡骨茎突点	2	水色 9 mm	桡骨茎突高
23 指節点	2	水色 15mm	指節点高
28 指尖点	2	水色 15mm、 3次元計測時のみ	指尖高
47 腸骨稜上縁後正中	3	水色 9 mm	腸骨稜上縁高／後正中
58 殿部最後方突出点	2	水色 9 mm	殿突高
44 脇	1	水色 15mm	脇高
45 最小胴囲レベル	1	水色 9 mm、 肋骨下縁と腸骨稜上 縁の中間のレベル	最小胴囲高*
前ウエストレベル			前ウエスト高
後ウエストレベル			後ウエスト高 座位後ウエスト高
48 上前腸骨棘点	2	水色 9 mm	腸骨棘高
49 転子点	2	水色 9 mm	転子高
50 大転子最外側	2	水色 9 mm	転子外突高
52 殿溝レベル	1	水色 9 mm	殿溝高
18 膝蓋骨中央	2	緑 9 mm	膝蓋骨中央高
19 脛骨点	2	緑 9 mm	脛骨上縁高
1 眉間点	1	緑 9 mm	
2 鼻鞍点	1	緑 9 mm	
3 スプラグナチオン	1	緑 9 mm	
4 グナチオン	1	緑 9 mm	
5 ヌカーレ	1	緑 9 mm、 3次元計測時のみ	
6 眼窩点	2	緑 9 mm	
8 ゴニオン	2	緑 9 mm	

9	足第2指先端	2	水色 9 mm、3次元計測時のみ
10	外果端点	2	水色 9 mm
11	外果最突	2	水色 9 mm
12	内果端点	2	水色 9 mm
13	内果最突	2	水色 9 mm
14	脛側中足点	2	水色 9 mm
15	踵点	2	水色 9 mm
16	腓側中足点	2	水色 9 mm
17	膝蓋骨下縁	2	緑 9 mm
20	大腿骨外側上顆	2	緑 9 mm
21	大腿骨内側上顆	2	緑 9 mm
22	膝窩のしわの中央	2	緑 9 mm
23	指節点	2	水色 15mm
24	橈側中手点	2	水色 9 mm
25	尺側中手点	2	水色 9 mm
27	尺骨茎突点	2	水色 9 mm
29	上腕骨外側上顆	2	水色 9 mm
30	上腕骨内側上顆	2	水色 9 mm
32	肘頭最後方点	2	水色 9 mm
35	胸骨上点	1	緑 9 mm
36	鎖骨点	2	緑 9 mm
38	胸骨下点	1	水色 9 mm
39	三角筋最外側突出レベル	1	水色 9 mm
41	前腋窩レベル上腕	2	水色 9 mm
43	第10肋骨下縁	2	水色 9 mm
46	ウエスト	4	水色 9 mm、自分でウエストベルトをしめる
51	腹部最前方レベル	1	水色 9 mm
56	後腋窩上腕レベル	2	水色 9 mm
57	上後腸骨棘	2	水色 9 mm
59	右第10肋骨下縁の高さで後正中の点	1	水色 9 mm
60	アンダーバスト	1	水色 9 mm、女性のみ
61	股下	1	算出点なのでマーカをつけない (CAESARプロジェクト準拠)
合計		男性 107	うち1つはマーカをつけない
		女性 108	うち1つはマーカをつけない

5. 4. 5 結果

上記20名の被験者について、手計測で得られた寸法と3次元形状計測装置で算出した寸法を同じとみなせるかどうかを、対応ありのt-検定で検定した結果を表5-6に示す。

35項目中、21項目で、2つの方法で得られた寸法に差があるとはいえたかった。しかし、これらのうち頸側点高、前腋窩高、肩峰高、橈骨点高、指節点高、転子高、転子外突高、肩峰幅の8項目は、特徴点が3次元形状計測装置では見えないことがあるため、この計測装置を使う限り、手計測をする他ない。

指尖高は、計測時間を通じて指先の伸ばし方を確認するのが難しいのが問題であるが、計測時間が大幅に短縮されれば、解決できる可能性がある。

殿突高、最小胴囲高、殿溝高、膝蓋骨中央高、脛骨上縁高については、両者が一致しない原因の特定は難しい。

表5-6 手計測実験2における対応ありのt-検定結果。

項目名	N	被験者が少ない理由	差の平均値 (mm)	対応あり t-検定結果	本実験
1 外眼角高	20		-0.47	ns	3Dに移行
2 頸側点高	3	点が見えない	-3.48	ns	手計測
3 頸窩高	20		0.85	ns	3Dに移行
4 乳頭高	20		-2.02	ns	3Dに移行
5 前腋窩高	18	点が見えない	-3.18	**	手計測
6 耳珠高	20		-1.56	ns	3Dに移行
7 頸椎高	19	シール貼り忘れ	-0.24	ns	3Dに移行
8 肩甲骨下角高	20		-2.88	ns	3Dに移行
9 後腋窩高	20		-1.45	ns	3Dに移行
10 肩峰高	19	点が見えない	-1.34	ns	手計測
11 橈骨点高	15	見えないことがある。	3.84	*	手計測
12 橈骨茎突高	20		6.38	**	手計測
13 指節点高	15	見えないことがある。	3.88	ns	手計測
14 指尖高	20		4.64	*	手計測
15 腸骨稜上縁高／後正中	20		1.14	ns	3Dに移行
16 殿突高	20		2.68	*	3Dに移行
17 脣高	20		1.61	ns	3Dに移行
18 最小胴囲高	20		2.15	*	3Dに移行
19 腸骨棘高	19	シール貼り忘れ	0.94	ns	3Dに移行
20 転子外突高	13	点が見えない	2.18	ns	手計測
21 転子高	13	点が見えない	1.48	ns	手計測
22 殿溝高	18	シール貼り忘れ	3.39	**	3Dに移行
23 膝蓋骨中央高	20		3.36	**	手計測
24 膝蓋骨下縁高	-		-	-	3Dのみ
25 脣骨上縁高	20		2.64	**	手計測
26 肩峰幅	19	点が見えない	1.06	ns	手計測
27 後腋窩幅	20		0.04	ns	3Dに移行
28 前腋窩幅	19		2.88	*	手計測
29 乳頭間幅	20		2.89	*	手計測
30 座位頸椎高	19	筆記ミス	-2.8	*	3Dに移行

31	座位肩峰高	20		-1.92	ns	(3Dに移行)
32	座位眼高	20		-0.54	ns	3Dに移行
33	前ウエスト高*	16	シール貼り忘れ	2.3	*	3Dに移行
34	後ウエスト高*	20		-0.03	ns	3Dに移行
35	座位後ウエスト高*	19	シール貼り忘れ	2.59	ns	3Dに移行

* : 手計測実験1では測らなかった項目。

5. 4. 6 高効率計測器開発に向けて

以上の結果から、設置時の調整を精密に行えば、高さ項目の多くと幅項目の一部については、3次元形状計測装置から手計測と同等の寸法を算出できることがわかった。しかしながら、一方で、現在の計測器では特徴点位置が見えないために寸法が測れない項目も少なからずある。特徴点がみえないことは、形状の一部が欠け、しかもその部分に重要な特徴点があることを意味しており、形状データ自体の価値も大きく下がってしまう。新規開発の計測器ではカメラ配置に細かく配慮して、隠れ部位をできる限り低減する必要がある。

計測時姿勢を保つ必要性の観点からは、計測所要時間が1秒以内ならば、この問題による再現性低減は防ぐことができると考えられる。

全体的精度の問題としては、絶対寸法の小さい項目の算出精度をあげるためにには、現状よりも高い計測精度が必要であろう。

本報告書の内容を公表する際は、あらかじめ
新エネルギー・産業技術総合開発機構
基盤技術研究開発室 にご連絡下さい。