

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2005-98978

(P2005-98978A)

(43) 公開日 平成17年4月14日(2005.4.14)

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>

G01B 11/24

F I

G01B 11/24

G01B 11/24

G01B 11/24

K

A

G

テーマコード(参考)

2F065

審査請求 有 請求項の数 14 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号 特願2004-158554 (P2004-158554)  
 (22) 出願日 平成16年5月28日(2004.5.28)  
 (31) 優先権主張番号 特願2003-296705 (P2003-296705)  
 (32) 優先日 平成15年8月20日(2003.8.20)  
 (33) 優先権主張国 日本国(JP)

特許法第30条第1項適用申請有り

(71) 出願人 503360115  
 独立行政法人科学技術振興機構  
 埼玉県川口市本町4丁目1番8号

(74) 代理人 100085660  
 弁理士 鈴木 均

(72) 発明者 川末 紀功仁  
 宮崎県宮崎郡清武町正手3丁目30-1

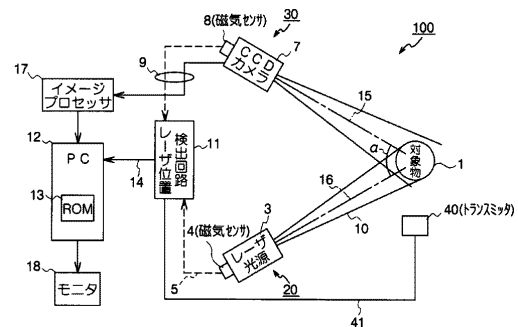
Fターム(参考) 2F065 AA04 AA37 AA53 BB05 BB15  
 DD02 DD06 FF01 FF02 FF04  
 FF09 FF42 FF65 FF67 GG04  
 GG07 HH05 JJ03 JJ26 MM06  
 MM11 PP04 QQ23 QQ25 QQ31  
 SS02 SS13

(54) 【発明の名称】 三次元計測装置、三次元計測方法、三次元計測プログラムおよび記録媒体

(57) 【要約】

【課題】 テレビカメラとレーザ投光器に三次元位置と方向を検出できる三次元磁気センサを取り付け、テレビカメラとレーザ投光器をそれぞれ独立して動作させながら被測定対象物全体を計測することにより、死角を減少させると共に、流体の流動現象を計測することが可能な三次元計測装置を提供する。

【解決手段】 この三次元計測装置100は、CCDカメラ7からの画像信号からレーザ輝線の座標をリアルタイムに演算するレーザ位置検出回路11と、対象物1にレーザスリット光を照射するレーザ投光器20と、このレーザ投光器20により対象物1の表面に照射された光を撮像する撮像装置30と、所定のエリアに磁界ベクトルを形成するトランスミッタ40と、CCDカメラ7により撮像された画像データをPC12が処理し易いように変換するイメージプロセッサ17と、磁気センサ4、磁気センサ8の信号から三次元位置情報及び姿勢情報を検出するまたレーザ位置検出回路11と、データに基づいて、対象物1の三次元画像を再生するパーソナルコンピュータ(PC)12を備えて構成される。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

物体の三次元情報を入力して前記物体の三次元形状を計測する三次元計測装置において

前記物体に光を照射する投光手段と、該投光手段により前記物体表面に照射された光を撮像する撮像手段と、前記投光手段に備えられ該投光手段の三次元位置情報及び姿勢情報を生成する第 1 のセンサと、前記撮像手段に備えられ該撮像手段の三次元位置情報及び姿勢情報を生成する第 2 のセンサと、前記物体に照射された光の平面方程式を算出する方程式算出手段と、を備え、

前記投光手段と撮像手段がそれぞれ独立に動作することにより前記第 1 のセンサ及び第 2 のセンサより得られる三次元位置情報及び姿勢情報に基づいて、前記方程式算出手段が前記物体に照射された光の平面方程式を算出し、該算出結果から前記物体の三次元形状を計測することを特徴とする三次元計測装置。

10

## 【請求項 2】

前記方程式算出手段は、前記第 1 及び第 2 のセンサから得られた位置のデータを  $(x_w, y_w, z_w)$ 、姿勢のデータを  $(\phi, \theta, \psi)$  とした場合、前記各センサのセンサ座標に原点を置いたセンサ座標上の点  $(x_r, y_r, z_r)$  は、出力された前記各センサのデータを基に、

$$\begin{bmatrix} x_{rw} \\ y_{rw} \\ z_{rw} \end{bmatrix} = RPY(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{ow} \\ y_{ow} \\ z_{ow} \end{bmatrix} \quad (1)$$

20

ここで

$$\begin{aligned} RPY(\phi, \theta, \psi) &= R(z, \phi) \cdot R(y, \theta) \cdot R(x, \psi) \\ &= \begin{bmatrix} C_\phi & -S_\phi & 0 \\ S_\phi & C_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & S_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_\theta & 0 & C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\psi & S_\psi \\ 0 & S_\psi & C_\psi \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} C_\phi C_\theta & C_\phi S_\theta S_\psi - S_\phi C_\psi & C_\phi S_\theta C_\psi + S_\phi S_\psi \\ S_\phi C_\theta & S_\phi S_\theta S_\psi + C_\phi C_\psi & S_\phi S_\theta C_\psi - C_\phi S_\psi \\ -S_\theta & C_\theta S_\psi & C_\theta C_\psi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

30

C : C o s、S : S i n

とし、

前記センサ座標上で光平面上の任意の 3 点の座標  $(x_r, y_r, z_r)$  を前記式 (1) 及び (2) により前記トランスミッタを原点としたワールド座標に変換し、前記ワールド座標  $(x_{rw}, y_{rw}, z_{rw})$  に変換することにより、

40

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{rw1} & y_{rw1} & z_{rw1} \\ x_{rw2} & y_{rw2} & z_{rw2} \\ x_{rw3} & y_{rw3} & z_{rw3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[X, Y, Z] \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

前記式(3)及び式(4)として光の平面方程式を取得し、前記撮像手段の焦点から受像面までの距離を  $f$  と置くと、前記受像面上の座標  $(u, v)$  は前記撮像手段の焦点を原点とした座標系において、

$$u = f \cdot \frac{X}{Z}, v = f \cdot \frac{Y}{Z} \quad \dots (5)$$

10

となり、 $Z =$  とおき線形化すると、

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \dots (6)$$

20

と表わされ、該式(6)を前記センサ座標で表すために、回転・平行移動を考慮して、

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (7)$$

式(7)として表し、(ここで  $k_{11} \sim k_{33}$  のパラメータには前記撮像手段の位置や姿勢などをはじめとする計測対象と、前記撮像手段の位置を表すデータが全て含まれているものとする) 該式(7)が前記センサ座標  $(x, y, z)$  と前記受像面上の座標  $(u, v)$  の関係式となり、前記式(7)を展開し、整理すると式(8)を得て、

30

$$\begin{cases} (k_{31}u - k_{11})x + (k_{32}u - k_{12})y + (k_{33}u - k_{13})z = k_{14} - u \\ (k_{31}v - k_{21})x + (k_{32}v - k_{22})y + (k_{33}v - k_{23})z = k_{24} - v \end{cases} \quad \dots (8)$$

前記式(8)の2平面の交線で表される直線は前記撮像手段の焦点から計測点に向かう直線として

40

$$\begin{cases} x = f \cdot t + m \\ y = g \cdot t + n \\ z = h \cdot t + l \end{cases} \quad \dots (9)$$

式(9)のレシーバ座標を求め、前記式(1)と同様にワールド座標に変換して前記撮像手段の焦点から計測点に向かう直線である式(10)を求め、

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = RPY(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} f \cdot t + m \\ g \cdot t + n \\ h \cdot t + l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} wx \\ wy \\ wz \end{bmatrix} \quad \dots \quad (10)$$

(ここで、(wx, wy, wz)はトランスミッタを原点としたレシーバの世界座標である)

前記式(10)とレーザ平面上の方程式である前記式(4)を連立させて前記計測点の世界座標(X, Y, Z)を求めることを特徴とする請求項1に記載の三次元計測装置。

【請求項3】

前記方程式算出手段は、前記平面方程式をリアルタイムに算出することにより前記投光手段の独立走査を可能としたことを特徴とする請求項1又は2に記載の三次元計測装置。

【請求項4】

前記投光手段は、光源からの光束を所定の幅を有するスリット光に変換し、該スリット光を前記物体に照射することにより前記物体を光切断するように走査することを特徴とする請求項1又は3に記載の三次元計測装置。

【請求項5】

前記投光手段の光源はレーザ光若しくはLEDであることを特徴とする請求項4に記載の三次元計測装置。

【請求項6】

所定のエリアに磁界ベクトルを形成するトランスミッタを更に備え、前記第1のセンサ及び第2のセンサは前記磁界ベクトルを受信することにより、当該センサの三次元位置情報及びロール角、ピッチ角、及びヨー角の姿勢情報を取得することを特徴とする請求項1又は2に記載の三次元計測装置。

【請求項7】

前記物体の形状が滑らかな場合には、前記投光手段により前記物体に照射されたスリット光の光軸と前記撮像手段の光軸との角度を大きくして撮像し、前記物体の形状が複雑な場合には、前記投光手段により前記物体に照射されたスリット光の光軸と前記撮像手段の光軸との角度を小さくして撮像することを特徴とする請求項1乃至6の何れか一項に記載の三次元計測装置。

【請求項8】

前記物体が流体である場合には、当該流体の動きを可視化する可視化手段を更に備え、前記投光手段と撮像手段がそれぞれ独立に動作することにより、前記第1のセンサ及び第2のセンサより得られる三次元位置情報及び姿勢情報に基づいて、前記方程式算出手段が前記可視化手段により可視化された流体に照射された光の平面方程式を算出し、該算出結果から前記流体の流動現象を計測することを特徴とする請求項1に記載の三次元計測装置。

【請求項9】

前記可視化手段は、所定の反射率を有する粒子状の物体であることを特徴とする請求項8に記載の三次元計測装置。

【請求項10】

物体の三次元情報を入力して前記物体の三次元形状を計測する三次元計測方法において

前記物体にスリット光を照射する動作と該照射されたスリット光を撮像する動作を独立に行い、夫々の動作により得られた三次元位置情報及び姿勢情報に基づいて前記物体に照射された光の平面方程式を算出し、該算出結果から前記物体の三次元形状を計測することを特徴とする三次元計測方法。

【請求項11】

前記物体の形状が滑らかな場合には、前記物体に照射されたスリット光の光軸と該スリット光を撮像する光軸との角度を大きくして撮像し、前記物体の形状が複雑な場合には、

10

20

30

40

50

前記物体に照射されたスリット光の光軸と該スリット光を撮像する光軸との角度を小さくして撮像することを特徴とする請求項10に記載の三次元計測方法。

【請求項12】

前記物体が流体である場合には、流体の動きを可視化し、前記流体にスリット光を照射する動作と該照射されたスリット光を撮像する動作を独立に行い、夫々の動作により得られた三次元位置情報及び姿勢情報に基づいて可視化された流体に照射された光の平面方程式を算出し、該算出結果から前記流体の流動現象を計測することを特徴とする請求項10に記載の三次元計測方法。

【請求項13】

請求項10乃至12の何れか一項に記載の三次元計測方法をコンピュータが制御可能にプログラミングしたことを特徴とする三次元計測プログラム。

【請求項14】

請求項13に記載の三次元計測プログラムをコンピュータが読み取り可能な形式で記録したことを特徴とする記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、三次元計測装置に関し、さらに詳しくは、被測定対象物の測定死角を減少すると共に、流体の流動現象を計測する三次元計測装置と三次元計測方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

近年、コンピュータビジョンに関する研究が活発化し、撮像装置を用いた物体の三次元情報入力システムが身近なものになりつつある。この種の技術の中で、撮像装置としてテレビカメラを用い物体の三次元形状を入力する手法として、光切断法が広く知られている。これはスリット光を被測定対象物に照射し、その反射光をテレビカメラで撮像して、三角測量の原理から被測定対象物の三次元位置を求めるものである。

また近年、魚介類の養殖業における養魚介類生産技術を確立させるために高機能飼育水槽システムが開発され、水槽内の飼育環境の最適化を図る事業が実施されている。このような事業で重要なことは、目に見えない水の動きをどのように計測して管理するかである。

即ち、水槽内での水の流れを計測する手法の確立が望まれている。空気や水の流れなど目で見ることのできない現象を観察できるようにする技術は可視化と呼ばれる。可視化技術は、デジタル画像処理の技術を用いて解析を行うことで、流れの定性的な観察のみならず、速度分布などの定量計測にも使うことが可能となっている。また可視化する方法はそれぞれの目的に応じ多くの手法があるが、その中に、PIV（粒子画像流速測定法）と呼ばれるものがある。それは、可視化された画像を解析し、粒子群像の時間的変位から、二次元面内の速度を多点同時計測する技術である。PIVでは高精度な計測ができ、複雑な流れにも対応できる。

【0003】

また、従来 of 三次元画像情報入力装置として特開平9-210646号公報には、被写体に対してスリット光を走査する走査手段と、前記スリット光の位置を測定する位置測定手段と、被写体を光検出手段を用いて撮像する撮像手段と、カラー画像を撮影するカラー画像撮影手段とを備えた三次元画像情報入力装置について開示されている。

また米国ポヒマス社（Polhemus Inc.）は、非接触三次元形状入力装置として、ハンドヘルド・レーザスキャナFastSCAN（商品名）を製品化している。この製品は図24（a）に示すように、レーザダイオード50と、カメラ53と、図示しない磁気センサが一体化された本体52と、被測定対象物56の近傍に置かれ所定のエリアに磁界ベクトルを形成するトランスミッタ54とを備えて構成されている。そして、トランスミッタ54と本体52はケーブル55により接続され、図示しないPC等にケーブル53を介して接続されている。また、図24（b）に示す他の製品は、レーザダイオード61と、カメラ60a

10

20

30

40

50

、60bと、図示しない磁気センサが一体化された本体62と、被測定対象物66の近傍に置かれ所定のエリアに磁界ベクトルを形成するトランスミッタ64と、被測定対象物66の所定の部分に取り付けられた磁気センサ63とを備えて構成されている。以上の製品は、三次元磁気センサを組み合わせることにより、スキャナのカメラと被測定対象物との相対位置を特定できるため、大きな固定台やターンテーブルを必要とせず、三次元形状を素早く簡単に入力することができる、とされている。そして、この製品の原理について、[Hand-held Laser Scanning In Practice]としてBruce McCallum、Mark Nixon、Brent Price and Rick Fright等により詳細が報告されている。

【特許文献1】特開平9-210646号公報

【非特許文献1】[Hand-held Laser Scanning In Practice] Bruce McCallum, Mark Nixon, Brent Price and Rick Fright 10

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、PIV計測では、一般的にスリットレーザを用いて、流れに混入したトレーサ粒子を可視化し、トレーサ粒子の動きを計測することで間接的に流体の速度分布を求め、計測したい位置にレーザ平面を照射させ、レーザ平面上の速度ベクトルを算出する。しかし、計測が三角測量に基づくため、レーザ平面の位置や傾き、もしくはCCDカメラの位置や姿勢が変わるとキャリブレーションのやり直しが必要になり、計測としては操作性が悪いといった問題がある。

20

また特許文献1に開示されている従来技術は、一般的に三角測量の原理上、レーザ投光器やテレビカメラの配置を被測定対象物の大きさに合わせて予め決定し、固定しなければならない。そのため、被測定対象物背面や被測定対象物の形状、凹凸等が複雑な場合においては、死角が生じるといった問題がある。

また、非特許文献1により報告されている製品は、レーザダイオードとカメラが一体化されているため、レーザが照射されている個所がカメラに映らない場合があり、被測定対象物のくぼみ等が死角となる問題がある。これを改善するためにカメラを2台備えて異なる角度から撮像する製品(図24(b))もあるが、カメラが2台必要となるためコストが高くなるという問題がある。

本発明は、かかる課題に鑑み、テレビカメラとレーザ投光器に三次元位置と方向を検出できる三次元磁気センサ(例えば、3SPACE FASTRACK, Polhemus Inc.)を取り付け、テレビカメラとレーザ投光器をそれぞれ独立して動作させながら被測定対象物全体を計測することにより、死角を減少させると共に、流体の流動現象を計測することが可能な三次元計測装置を提供することを目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0005】

本発明はかかる課題を解決するために、請求項1は、物体の三次元情報を入力して前記物体の三次元形状を計測する三次元計測装置において、前記物体に光を照射する投光手段と、該投光手段により前記物体表面に照射された光を撮像する撮像手段と、前記投光手段に備えられ該投光手段の三次元位置情報及び姿勢情報を生成する第1のセンサと、前記撮像手段に備えられ該撮像手段の三次元位置情報及び姿勢情報を生成する第2のセンサと、前記物体に照射された光の平面方程式を算出する方程式算出手段と、を備え、前記投光手段と撮像手段がそれぞれ独立に動作することにより前記第1のセンサ及び第2のセンサより得られる三次元位置情報及び姿勢情報に基づいて、前記方程式算出手段が前記物体に照射された光の平面方程式を算出し、該算出結果から前記物体の三次元形状を計測することを特徴とする。

40

従来は三次元計測装置は、投光手段と撮像手段が所定の角度で一体的に構成されていた。従って、投光手段により物体に光を照射した場合、その狭い範囲を撮像手段が撮像するため、くぼみ等が死角となる場合が多かった。そこで本発明では、投光手段と撮像手段を独立に動作するようにして、それぞれに三次元位置情報及び姿勢情報を生成するセンサを

50

備え、それぞれが独立に動作することにより得られた三次元位置情報及び姿勢情報を基に平面方程式を算出するものである。これにより、くぼみ等の死角部分に対して撮像手段を自由に移動できるので、測定個所の死角を減少することができ、複雑な物体の三次元計測を迅速に且つ正確に行うことができる。

【 0 0 0 6 】

請求項 2 は、前記方程式算出手段は、前記第 1 及び第 2 のセンサから得られた位置を ( $x_{ow}$ ,  $y_{ow}$ ,  $z_{ow}$ )、姿勢を ( $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ) とした場合、前記各センサのセンサ座標に原点を置いたセンサ座標上の点 ( $x_r$ ,  $y_r$ ,  $z_r$ ) は、出力された前記各センサのデータを基に、

10

$$\begin{bmatrix} x_{rw} \\ y_{rw} \\ z_{rw} \end{bmatrix} = RPY(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{ow} \\ y_{ow} \\ z_{ow} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで

$$RPY(\phi, \theta, \psi) = R(z, \phi) \cdot R(y, \theta) \cdot R(x, \psi)$$

$$= \begin{bmatrix} C_\phi & -S_\phi & 0 \\ S_\phi & C_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & S_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_\theta & 0 & C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\psi & S_\psi \\ 0 & S_\psi & C_\psi \end{bmatrix} \quad (2)$$

20

$$= \begin{bmatrix} C_\phi C_\theta & C_\phi S_\theta S_\psi - S_\phi C_\psi & C_\phi S_\theta C_\psi + S_\phi S_\psi \\ S_\phi C_\theta & S_\phi S_\theta S_\psi + C_\phi C_\psi & S_\phi S_\theta C_\psi - C_\phi S_\psi \\ -S_\theta & C_\theta S_\psi & C_\theta C_\psi \end{bmatrix}$$

C : C o s、S : S i n

とし、前記センサ座標上で光平面上の任意の 3 点の座標 ( $x_r$ ,  $y_r$ ,  $z_r$ ) を前記式 (1) 及び (2) により前記トランスミッタを原点としたワールド座標に変換し、前記ワールド座標 ( $x_{rw}$ ,  $y_{rw}$ ,  $z_{rw}$ ) に変換することにより、

30

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{rw1} & y_{rw1} & z_{rw1} \\ x_{rw2} & y_{rw2} & z_{rw2} \\ x_{rw3} & y_{rw3} & z_{rw3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[X, Y, Z] \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

40

前記式 (3) 及び式 (4) として光の平面方程式を取得し、前記撮像手段の焦点から受像面までの距離を  $f$  と置くと、前記受像面上の座標 ( $u$ ,  $v$ ) は前記撮像手段の焦点を原点とした座標系において、

$$u = f \cdot \frac{X}{Z}, v = f \cdot \frac{Y}{Z} \quad \dots (5)$$

となり、 $Z =$  とおき線形化すると、

50

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \dots (6)$$

と表わされ、該式(6)を前記センサ座標で表すために、回転・平行移動を考慮して、

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (7)$$

10

式(7)として表し、(ここで $k_{11} \sim k_{33}$ のパラメータには前記撮像手段の位置や姿勢などをはじめとする計測対象と、前記撮像手段の位置を表すデータが全て含まれているものとする)該式(7)が前記センサ座標( $x, y, z$ )と前記受像面上の座標( $u, v$ )の関係式となり、前記式(7)を展開し、整理すると式(8)を得て、

$$\begin{cases} (k_{31}u - k_{11})x + (k_{32}u - k_{12})y + (k_{33}u - k_{13})z = k_{14} - u \\ (k_{31}v - k_{21})x + (k_{32}v - k_{22})y + (k_{33}v - k_{23})z = k_{24} - v \end{cases} \quad \dots (8)$$

20

前記式(8)の2平面の交線で表される直線は前記撮像手段の焦点から計測点に向かう直線として

$$\begin{cases} x = f \cdot t + m \\ y = g \cdot t + n \\ z = h \cdot t + l \end{cases} \quad \dots (9)$$

30

式(9)のレシーバ座標を求め、前記式(1)と同様にワールド座標に変換して前記撮像手段の焦点から計測点に向かう直線である式(10)を求め、

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = RPY(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} f \cdot t + m \\ g \cdot t + n \\ h \cdot t + l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} wx \\ wy \\ wz \end{bmatrix} \quad \dots (10)$$

(ここで、( $w_x, w_y, w_z$ )はトランスミッタを原点としたレシーバのワールド座標である)

前記式(10)とレーザ平面上の方程式である前記式(4)を連立させて前記計測点のワールド座標( $X, Y, Z$ )を求めることを特徴とする。

40

【0007】

請求項3は、前記方程式算出手段は、前記平面方程式をリアルタイムに算出することにより前記投光手段の独立走査を可能としたことを特徴とする。

物体に照射された光の平面方程式は方程式算出手段により計算される。このとき計算の処理速度が遅い場合、一旦投光手段により照射された平面情報を記憶してその後バッチ処理により方程式の計算処理を行う。このように計算処理がリアルタイムに行われないと、投光手段を物体の任意の場所に操作することが不可能となり、撮像手段と独立にした意味がなくなってしまう。そこで本発明では、平面方程式をリアルタイムに計算できるようにするために、第1及び第2のセンサから得られた位置情報と姿勢情報を独立に取得するこ

50



とを可能とした。

請求項 4 は、前記投光手段は、光源からの光束を所定の幅を有するスリット光に変換し、該スリット光を前記物体に照射することにより前記物体を光切断するように走査することを特徴とする。

物体の表面の三次元情報を得るには、スポット光を物体表面に照射して、そのスポット光をカメラで読み取ることにも可能であるが、スポット光の場合、二次元的に走査する必要があるためデータ収集に時間を要してしまう。そこで本発明では、光束をスリット状の光に変換し、そのスリット光を物体表面に照射して物体を光により切断するように上下或いは左右に移動することにより、物体の表面の三次元情報を即座に取得することができる。

請求項 5 は、前記投光手段の光源はレーザー光若しくは LED であることを特徴とする。スリット状の光は光源から照射されてから物体に到達するまでできるだけ拡散しないことが好ましい。その点でレーザー光は優れている。しかし、光源と物体との距離が至近の場合は、光の拡散は少ないので LED の光でも可能である。

請求項 6 は、所定のエリアに磁界ベクトルを形成するトランスミッタを更に備え、前記第 1 のセンサ及び第 2 のセンサは前記磁界ベクトルを受信することにより、当該センサの三次元位置情報及びロール角、ピッチ角、及びヨー角の姿勢情報を取得することを特徴とする。

投光手段と撮像手段の位置情報と姿勢情報を得るには、各種の方法が考えられるが、光の光路を邪魔せず、且つ視界を妨げない方法が必要条件である。その点では磁界による方法が最適である。本発明では半球状の磁界を発生するトランスミッタを備え、その磁界の磁力線に対するベクトルを計算することにより三次元位置情報及び姿勢情報を取得するものである。従って、物体と投光手段及び撮像手段の距離はこの磁界のエリア内に限定される。

#### 【 0 0 0 8 】

請求項 7 は、前記物体の形状が滑らかな場合には、前記投光手段により前記物体に照射されたスリット光の光軸と前記撮像手段の光軸との角度を大きくして撮像し、前記物体の形状が複雑な場合には、前記投光手段により前記物体に照射されたスリット光の光軸と前記撮像手段の光軸との角度を小さくして撮像することを特徴とする。

被測定物体の形状はさまざまである。例えば、物体の表面が比較的滑らかで変化がない物体もあれば、物体の形状が複雑で凹凸が多い物体もある。本発明ではこれらの物体の形状に応じてスリット光の光軸と撮像手段の光軸との成す角度を変化させることにより、より迅速に且つ確実に死角を減少させるものである。即ち、物体の表面が滑らかな場合は、角度を大きくして一度に広い範囲の情報を取得して処理時間を短縮し、物体の形状が複雑な場合は、角度を狭くして狭い範囲を確実に走査して死角を減少させるようにする。

請求項 8 は、前記物体が流体である場合には、当該流体の動きを可視化する可視化手段を更に備え、前記投光手段と撮像手段がそれぞれ独立に動作することにより前記第 1 のセンサ及び第 2 のセンサより得られる三次元位置情報及び姿勢情報に基づいて、前記方程式算出手段が前記可視化手段により可視化された流体に照射された光の平面方程式を算出し、該算出結果から前記流体の流動現象を計測することを特徴とする。

物体が固形物で固定されているとは限らない。例えば、水や空気のような流体もある。しかし、これらの流体は目に見えないので何らかの方法で可視化する必要がある。そこで本発明では、流体を可視化する手段をさらに備え、その可視化手段にレーザー光を照射することにより、平面方程式を算出して流体の流動現象を計測するものである。

請求項 9 は、前記可視化手段は、所定の反射率を有する粒子状の物体であることを特徴とする。

可視化手段としては、例えば流体が水の場合は、その水の中に光を反射するトレーサ粒子等を混入するのが最も簡単で確実である。

#### 【 0 0 0 9 】

請求項 10 は、物体の三次元情報を入力して前記物体の三次元形状を計測する三次元計測方法において、前記物体にスリット光を照射する動作と該照射されたスリット光を撮像

10

20

30

40

50

する動作を独立に行い、夫々の動作により得られた三次元位置情報及び姿勢情報に基づいて前記物体に照射された光の平面方程式を算出し、該算出結果から前記物体の三次元形状を計測することを特徴とする。

本発明は請求項 1 と同様の作用を奏する。

請求項 1 1 は、前記物体の形状が滑らかな場合には、前記物体に照射されたスリット光の光軸と該スリット光を撮像する光軸との角度を大きくして撮像し、前記物体の形状が複雑な場合には、前記物体に照射されたスリット光の光軸と該スリット光を撮像する光軸との角度を小さくして撮像することを特徴とする。

本発明は請求項 7 と同様の作用を奏する。

請求項 1 2 は、前記物体が流体である場合には、当該流体の動きを可視化し、前記流体にスリット光を照射する動作と該照射されたスリット光を撮像する動作を独立に行い、夫々の動作により得られた三次元位置情報及び姿勢情報に基づいて可視化された流体に照射された光の平面方程式を算出し、該算出結果から前記流体の流動現象を計測することを特徴とする。 10

本発明は請求項 8 と同様の作用を奏する。

請求項 1 3 は、請求項 1 0 乃至 1 2 の何れか一項に記載の三次元計測方法をコンピュータが制御可能にプログラミングしたことを特徴とする。

請求項 1 4 は、請求項 1 3 に記載の三次元計測プログラムをコンピュータが読み取り可能な形式で記録したことを特徴とする。

#### 【発明の効果】 20

##### 【0010】

請求項 1、10 の発明によれば、投光手段と撮像手段を独立に動作するようにして夫々に三次元位置情報及び姿勢情報を生成するセンサを備えたので、物体の測定個所の死角を減少することができ、複雑な物体の三次元計測を迅速に且つ正確に行うことができる。

また請求項 2 では、撮像手段の焦点から計測点に向かう直線である式 (10) とレーザ平面上の方程式である式 (4) を連立させて式 (11) の行列式を求め、この行列式 (11) より計測点のワールド座標 (X, Y, Z) を求めるので、座標変換の考え方を取り入れて平面方程式をリアルタイムに計算できるようにし、処理速度の高速化を図り投光手段の独立走査を行うことができる。

また請求項 3 では、第 1 及び第 2 のセンサから得られた位置情報と姿勢情報を基に、光の平面方程式をリアルタイムに算出することが可能となり、投光手段の独立走査を行うことができる。 30

また請求項 4 では、光束をスリット状の光に変換して物体表面に照射するので、物体の表面の三次元情報を精査に且つ正確に取得することができる。

また請求項 5 では、投光手段の光源はレーザ光若しくは LED を使用するので、光源と物体との距離及び装置のコストとのバランスにより何れかの光源を任意に選択することができる。

また請求項 6 では、所定のエリアに磁界ベクトルを形成するトランスミッタを備えたので、各センサが磁界ベクトルを計算することにより、位置情報及び姿勢情報を正確に取得することができる。 40

##### 【0011】

また請求項 7、11 では、物体の形状に応じてスリット光の光軸と撮像手段の光軸との成す角度を変化させるので、物体の形状に応じて処理時間の短縮と死角の減少を両立させることができる。

また請求項 8、12 では、流体の動きを可視化する可視化手段を更に備えたので、目に見えない流体でも流体の流動現象を測定することができる。

また請求項 9 では、可視化手段が所定の反射率を有する粒子状の物体であるので、流体に簡単に混入することができる。

また請求項 13 では、本発明の三次元計測方法をコンピュータが制御可能な OS に従ってプログラミングすることにより、その OS を備えたコンピュータであれば同じ処理方法 50

により制御することができる。

また請求項 14 では、三次元計測プログラムをコンピュータが読み取り可能な形式で記録媒体に記録することにより、この記録媒体を持ち運ぶことにより何処でもプログラムを稼動することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0012】

以下、本発明を図に示した実施形態を用いて詳細に説明する。但し、この実施形態に記載される構成要素、種類、組み合わせ、形状、その相対配置などは特定の記載がない限り、この発明の範囲をそれのみに限定する主旨ではなく単なる説明例に過ぎない。

図 1 は本発明の第 1 の実施形態に係る三次元計測装置を使用して対象物を計測している斜視図である。この三次元計測装置 100 は、対象物 1 にレーザスリット光を照射するレーザ投光器 20 と、このレーザ投光器 20 により対象物 1 の表面に照射された光を撮像する撮像装置 30 と、所定のエリアに磁界ベクトルを形成するトランスミッタ 40 と、図示しないパーソナルコンピュータ (PC) を備えて構成される。そして、レーザ投光器 20 は T 字型の架台 2 と、スリット状のレーザ光を出射するレーザ光源 3 と、レーザ投光器 20 の位置情報と姿勢情報を生成する磁気センサ 4 とを備えて構成され、レーザ光源 3 への電源とレシーバ A 4 の情報はケーブル 5 により PC に伝えられる。また、撮像装置 30 は T 字型の架台 6 と、対象物 1 に照射されたレーザスリット光を撮像する CCD カメラ 7 と、撮像装置 30 の位置情報と姿勢情報を生成する磁気センサ 8 とを備えて構成され、CCD カメラ 7 の信号とレシーバ B 8 の情報はケーブル 9 により PC に伝えられる。尚、架台 2、6 は磁界の影響をレシーバに与えないために、木製、プラスチック、ゴム等の材質により形成される (詳細は後述する)。また、光源としてレーザ光を使用したか、LED 或いは他の可視光を使用しても構わない。また、本実施形態ではレーザ投光器 20 と撮像装置 30 の位置情報と姿勢情報を生成する手段として、トランスミッタ 40 からの磁界ベクトルを受信するために磁気センサを使用したか、他の手段により生成しても構わない。ここで、投光手段は主としてレーザ投光器 20 により構成され、撮像手段は主として撮像装置 30 により構成され、第 1 のセンサは主として磁気センサ 4 により構成され、第 2 のセンサは主として磁気センサ 8 により構成され、方程式算出手段は主として PC により構成される。

【0013】

次に本実施形態の三次元計測装置 100 の概略動作について説明する。まず、トランスミッタ 40 を対象物 1 の近傍に配置し、電源を投入してトランスミッタ 40 の磁界をレーザ投光器 20 及び撮像装置 30 が検出できるように対象物 1 との位置関係を設定する。これは図示しない PC の画面を見ながら調整を行う。例えば、市販のトランスミッタの場合は半径 90 cm の半円球の範囲に磁界が形成される。そしてレーザ投光器 20 と撮像装置 30 を手に持ち、PC の画面を見ながら CCD カメラ 7 が対象物 1 の全体画像を捉えられるように配置する。そしてレーザ光源 3 の電源を投入して、スリット光が対象物 1 の走査開始位置に来るようにして PC に格納されたプログラムを開始する。そして、レーザ投光器 20 を対象物 1 の走査開始位置から順次上から下 (或いは下から上) に移動し、対象物 1 の全体 (背面を含む) の走査が完了するまで行う。これらの走査の過程で CCD カメラ 7 から読み込まれたスリット光の平面方程式がリアルタイムに計算される。また、走査の過程でレーザ投光器 20 及び撮像装置 30 を移動しても、磁気センサ 4、磁気センサ 8 から位置情報とロール角、ピッチ角、ヨー角の姿勢情報が PC に取り込まれリアルタイムに処理されて対象物 1 の平面方程式に反映される。即ち、例えば対象物 1 に照射したスリット光がくぼみ等で死角となった場合、投光器 20 を移動して死角とならないようにスリット光を照射するか、或いは撮像装置 30 を移動して死角を防ぐようにすることが可能となる。

そして対象物 1 の走査が完了すると PC に取り込まれたデータに基づいて、対象物 1 の三次元画像を再生する。この三次元画像はあらゆる角度からのデータにより構成されているので、対象物を回転して任意の角度から観察することも可能となる。

## 【 0 0 1 4 】

図 2 は図 1 の斜視図に基づいて本実施形態の三次元計測装置 1 0 0 の全体構成を表す模式図である。同じ構成要素には同じ参照番号が付されているので、重複する説明は省略する。ここで、CCDカメラ 7 の信号はケーブル 9 によりイメージプロセッサ 1 7 に接続され、磁気センサ 8 の信号はケーブル 9 によりレーザ位置検出回路 1 1 に接続され、磁気センサ 4 はケーブル 5 によりレーザ位置検出回路 1 1 に接続され、トランスミッタ 4 0 はケーブル 4 1 によりレーザ位置検出回路 1 1 に接続されている。またレーザ位置検出回路 1 1 の出力及びイメージプロセッサ 1 7 の出力信号は P C 1 2 に入力され、P C 1 2 を制御するプログラムは R O M (Read Only Memory) 1 3 に格納されている。また P C 1 2 からは処理された三次元画像を表示するモニタ 1 8 が接続されている。尚、イメージプロセッサ 1 7 は CCDカメラ 7 により撮像された画像データを P C 1 2 が処理し易いように変換する機能があり、CCDカメラ 7 からの画像信号からレーザ輝線の座標をリアルタイムに演算するために回路を F P G A (Field Programmable Gate Array) により構成している。またレーザ位置検出回路 1 1 は磁気センサ 4、磁気センサ 8 の信号から三次元位置情報及び姿勢情報を検出回路である。

10

また説明の都合上 CCDカメラ 7 の光軸 1 5 とレーザ光源 3 の光軸 1 6 のなす角度をとす。また対象物 1 の表面形状はさまざまなものが存在する。例えば、ヤカンのように表面が比較的滑らかで変化がない物もあれば、人物のブロンズ像のように表面の形状が複雑で凹凸が多い物もある。本実施形態ではこれらの対象物 1 の形状に応じてスリット光 1 0 の光軸 1 6 と CCDカメラ 7 の光軸 1 5 との成す角度を変化させることにより、より迅速に且つ確実に死角を減少させることができる。即ち、対象物 1 の表面が滑らかな場合は、角度を大きくして一度に広い範囲の情報を取得して処理し、対象物 1 の形状が複雑な場合は、角度を狭くして狭い範囲を確実に走査して死角を減少させるようにするものである。これにより、対象物 1 の形状に応じて処理時間の短縮を図ると共に、対象物 1 の死角を減少させることもできる。

20

## 【 0 0 1 5 】

図 3 は投光器 2 0 と撮像装置 3 0 の一例を示す図である(単位は mm とする)。同じ構成要素には同じ参照番号を付して説明する。図 3 ( a ) は撮像装置 3 0 の斜視図であり、この撮像装置 3 0 は、CCDカメラ 7 と、CCDカメラを支持する架台 6 と、架台 6 から起立した部位 6 a に取り付けられた磁気センサ 8 により構成されている。図 3 ( b ) は投光器 2 0 の斜視図であり、投光器 2 0 は、レーザ光源 3 と、レーザ光源 3 を支持する架台 2 と、架台 2 から起立した部位 2 a に取り付けられた磁気センサ 4 により構成されている。また架台 6、2 は金属による磁気センサへの影響を無くすために木製とするのが好ましい。なお、磁気センサ 8 は検知部の中心が CCDカメラ 7 の光軸上になるように取り付けられており、磁気センサ 4 は検知部の中心をレーザの光軸上に設置する。

30

図 4 はトランスミッタ 4 0 の一例を示す外形図である(単位は mm とする)。図 4 ( a ) は上面図であり、図 4 ( b ) は側面図である。そして P 点は電氣的な中心を表している。

図 5 は磁気センサ 8、4 の一例を示す外形図である(単位は mm とする)。図 5 ( a ) は上面図であり、図 5 ( b ) は側面図である。そして Q 点は電氣的な中心を表している。

40

図 6 は本発明のレシーバ A 4、B 8 が位置情報と姿勢情報を生成する原理を説明する図である。図 6 ( a ) は磁界ベクトルと各レシーバの位置関係を表す図であり、トランスミッタ 4 0 から放射された磁界ベクトル 4 2 が半球状に形成され、その磁界ベクトル 4 2 上に例えばレシーバ A 4、B 8 が存在し、対象物 1 が磁界ベクトル 4 2 の内側に含まれるものとする。図 6 ( b ) は磁界ベクトルを説明する模式図である。例えばレシーバ A 4 ではトランスミッタ 4 0 の位置における磁界の強さおよび方向を A とし、磁界の強さおよび方向 A の X 軸方向磁界の強さ、Y 軸方向磁界の強さ、Z 軸方向磁界の強さをそれぞれ  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  とし、 $\cos$ 、 $\cos$ 、 $\cos$  を磁界の強さおよび方向 A の方向余波とすれば、 $A_x = A \cos$ 、 $A_y = A \cos$ 、 $A_z = A \cos$  であり、レシーバ A 4 の X 軸方向の磁界検出コイルからは  $A_x$  の出力が、Y 軸方向の磁界検出コイルからは  $A_y$

50

の出力が、Z軸方向の磁界検出コイルからは  $A_z$  の出力が送出される。そして磁界の強さおよび方向  $A$  は、 $A = (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2)^{1/2}$  で与えられる。同じくレシーバ B の磁界の強さおよび方向  $B$  は、 $B = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$  で与えられる。

#### 【0016】

次にレーザ平面方程式の算出方法について説明する。

図7は各座標系の位置関係を表す図である。カメラ座標（画像モニタ上の座標  $u, v$ ）50、CCDカメラ7に取り付けられた磁気センサ8のレシーバ座標51、レーザ光源3に取り付けられた磁気センサ4のレシーバ座標54、トランスミッタ40の中心を基準とした実座標であるワールド座標53をそれぞれ設定する。レーザ平面52の位置や傾きを自由に設定することを可能にするために、レーザ光源3に取り付けられた磁気センサ4が検出した情報（投光器20の位置と姿勢）を用いて、随時、レーザ平面52の方程式を算出することを行う。また、図7のように受像面55上にある計測点の位置Pとカメラの焦点Fを結ぶ直線1が磁気センサ8が検出した情報、（撮像装置30の位置と姿勢）を基に決定される。また、直線1とレーザ平面52の方程式の交点を求めることで、計測点のワールド座標53（ $X, Y, Z$ ）を算出する。

#### 【0017】

図8はレシーバ座標54とレーザ平面52の関係を表す図である。

即ち、レーザ投光器20と撮像装置30に取り付けられた磁気センサ4、8を用いてレーザ平面方程式をリアルタイムに算出することでレーザスリット平面の独立走査が可能となる。三次元磁気センサからはセンサ自体の位置（ $x_w, y_w, z_w$ ）と姿勢（ $\phi, \theta, \psi$ ）のデータが得られる。三次元磁気センサのレシーバ座標に原点を置いたレシーバ座標上の点（ $x_r, y_r, z_r$ ）は、出力された三次元磁気センサのデータを基に（1）式によって、トランスミッタ40を原点としたワールド座標に変換される。

$$\begin{bmatrix} x_{rw} \\ y_{rw} \\ z_{rw} \end{bmatrix} = RPY(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{ow} \\ y_{ow} \\ z_{ow} \end{bmatrix} \quad \dots (1)$$

ここで

$$\begin{aligned} RPY(\phi, \theta, \psi) &= R(z, \phi) \cdot R(y, \theta) \cdot R(x, \psi) \\ &= \begin{bmatrix} C_\phi & -S_\phi & 0 \\ S_\phi & C_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & S_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_\theta & 0 & C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\psi & S_\psi \\ 0 & S_\psi & C_\psi \end{bmatrix} \quad \dots (2) \\ &= \begin{bmatrix} C_\phi C_\theta & C_\phi S_\theta S_\psi - S_\phi C_\psi & C_\phi S_\theta C_\psi + S_\phi S_\psi \\ S_\phi C_\theta & S_\phi S_\theta S_\psi + C_\phi C_\psi & S_\phi S_\theta C_\psi - C_\phi S_\psi \\ -S_\phi & C_\theta S_\psi & C_\theta C_\psi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

C : Cos、S : Sinとする。

レシーバ座標上でレーザ平面上の任意の3点の座標（ $x_{rw}, y_{rw}, z_{rw}$ ）を式（1）に代入し、ワールド座標に変換することでレーザ平面の方程式を得ることができる。つまり、

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{rw1} & y_{rw1} & z_{rw1} \\ x_{rw2} & y_{rw2} & z_{rw2} \\ x_{rw3} & y_{rw3} & z_{rw3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (3)$$

30

40

50

$$[X, Y, Z] \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

が得られるレーザ平面の方程式である。

【 0 0 1 8 】

図 9 はカメラ座標とレーザ座標の関係を示す図である。また、図 10 に二次元化したカメラ焦点と受像面及び計測点の関係を示す。カメラの焦点 2 0 から受像面までの距離を  $f$  と置くと、受像面上の座標（カメラ座標 5 0）はカメラの焦点 2 0 を原点とした座標系において、

10

$$u = f \cdot \frac{X}{Z}, v = f \cdot \frac{Y}{Z} \quad \dots (5)$$

となる。

$z =$  とおき、線形化すると、

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \dots (6)$$

20

と表される。

ここで、式（6）を三次元磁気センサのレーザを原点とした座標系（レーザ座標 5 4）で表すために、回転・平行移動を考慮して、以下のような行列で表すことができる。

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (7)$$

30

ここで  $k_{11} \sim k_{33}$  のパラメータには CCD カメラ 7 の位置や姿勢などをはじめとする計測対象と、CCD カメラ 7 の位置を表すデータが全て含まれている。従って、式（7）がレーザ座標（ $x, y, z$ ）5 4 とカメラ位置（ $u, v$ ）の関係式になる。

式（7）を展開し、整理すると次式のように表せる。

$$\begin{cases} (k_{31}u - k_{11})x + (k_{32}u - k_{12})y + (k_{33}u - k_{13})z = k_{14} - u \\ (k_{31}v - k_{21})x + (k_{32}v - k_{22})y + (k_{33}v - k_{23})z = k_{24} - v \end{cases} \quad \dots (8)$$

40

尚、11 個の未知数  $k_{11} \sim k_{33}$  は、既知の世界座標の基準点（ $x, y, z$ ）と、それに対応するカメラ座標 2 1 の点（ $u, v$ ）の組み合わせを式（8）に代入し、連立方程式を解くことで求めることができる。

また式（8）の 2 平面の交線で表される直線はカメラの焦点から計測点に向かう直線で以下のような媒介変数で表せる。

$$\begin{cases} x = f \cdot t + m \\ y = g \cdot t + n \\ z = h \cdot t + l \end{cases} \dots (9)$$

式(9)はレシーバ座標54であるので、式(1)と同様にワールド座標53に変換する。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = RPY(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} f \cdot t + m \\ g \cdot t + n \\ h \cdot t + l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} wx \\ wy \\ wz \end{bmatrix} \dots (10)$$

10

ここで、(wx, wy, wz)はトランスミッタ40を原点とした磁気センサ8のワールド座標である。

カメラの焦点から計測点に向かう直線である式(10)とレーザ平面上の方程式である式(4)を連立させ計測点21のワールド座標(X, Y, Z)を求めることができる。

【0019】

図11はキャリブレーションの構成を示す図である。50mmおきに目盛りが書かれたキャリブレーションボード70、71をレシーバ72のXY平面と平行になるように設置し撮影する。そして、画面上での座標(u, v)をクリックし読み取る。また、対応するキャリブレーションボード上の座標(x, y, z)も読み取る。同じz軸方向距離で4点の座標を読み取り、それをz軸方向に50mm移動しながら複数回(6回以上)繰り返す。

20

式(8)に画面上での座標(u, v)と対応するキャリブレーションボード上の座標(x, y, z)の組み合わせを代入し、以下の連立方程式を組み立てる。

$$Tk = c \dots (12)$$

ここで

$$T = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1u_1 & -y_1u_1 & -z_1u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -x_1v_1 & -y_1v_1 & -z_1v_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_2u_2 & -y_2u_2 & -z_2u_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 & -x_2v_2 & -y_2v_2 & -z_2v_2 \\ \vdots & & & & & & & & & & \\ \vdots & & & & & & & & & & \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_nu_n & -y_nu_n & -z_nu_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & -x_nv_n & -y_nv_n & -z_nv_n \end{bmatrix} \dots (13)$$

30

40

$$k = \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{12} \\ k_{13} \\ k_{14} \\ k_{21} \\ \vdots \\ k_{33} \end{bmatrix} \dots (14)$$

50

$$c = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ u_6 \\ v_6 \end{bmatrix} \cdot \cdot \cdot \cdot (15)$$

そこで11個の係数

$$k_{11} \sim k_{33}$$

は擬似逆行列 $T^+$ を用いて算出する。

$$k = T^+c = (T^tT)^{-1}T^tc \cdot \cdot \cdot \cdot (16)$$

この行列式を解き係数

$$k_{11} \sim k_{33}$$

が求まると、カメラ座標とレシーバ座標の関係式(7)が決定される。

【0020】

(実施例)

また、本発明の三次元計測装置の計測性能を検証するために、形状が既知である物体を計測した。計測は数回行い、任意の10回分の結果を選択し誤差を算出した。その結果、本発明の三次元計測装置におけるRMS誤差は約1mmであった。

また、本実施例による手法では三角測量の原理を用いているため、レシーバA4とレシーバB8の角度差と奥行き方向についての精度を算出した。図12は計測対象1をCCDカメラ7から奥行き方向276mmのところ設置して距離を計測したときのRMS誤差を示した図である。横軸にCCDカメラ7の光軸15とレーザ光源3の光軸16のなす角度を表し、縦軸に誤差の値を表している。この図から明らかなように、角度が30度以上あれば誤差が1mm以下となり、角度が30度より小さくなると急激に誤差が大きくなることが解る。この結果から、CCDカメラ7の光軸15とレーザ光源3の光軸16のなす角度は少なくとも30度以上確保することが必要である。

以上の通り、CCDカメラ7とスリット光の分離走査を行うことで、計測対象1に凸凹が部分的にあるなど、計測対象が複雑な部分と滑らかな部分が含まれる対象全域についても効率良く計測することが可能となった。本発明の三次元計測装置における誤差は約1mmであり、計測対象1の全域を一度で計測できる精度としては十分であるといえる。また、本発明の三次元計測装置は人体、骨、歯型などの医療分野や骨董品、化石、出土品などの美術・考古学分野などの計測として様々な分野への応用が考えられる。

図13は本発明の第2の実施形態に係る三次元計測装置を使用して対象物を計測している斜視図である。同じ構成要素には同じ参照番号を付して説明する。この三次元計測装置200は、トレーサ粒子86を混入した水81を貯水する水槽80と、水81に気泡を注入するエアストーン85と、水槽80を保持する水槽台82と、エアストーン85にホース83を介して空気を送り込むポンプ84とを備えて構成される。

そしてアングルで作成した水槽台82に対し鉛直方向に水槽80を立て、ポンプ84により空気を送り込み、水槽80の下部のエアストーン85から気泡を作り出す。そこにトレーサ粒子86を入れ周囲を暗くした状態で水槽80の側面からスリットレーザ光87を当てるとトレーサ粒子86は光り、水槽80内の流れを可視化することができる。それを水槽80の正面からCCDカメラ7により撮影し、イメージプロセッサ17とPC12に

10

20

30

40

50



より画像処理を行い、レーザ平面上での流動現象を計測する。レーザ光源 3 に取り付けられた三次元磁気センサ 4 からのデータを監視することで、レーザの位置と傾きを任意に変更しながら計測を行うことができる。また、CCDカメラ 7 にも同様に磁気センサ 8 を取り付けることで、CCDカメラ 7 の移動を監視する。

#### 【0021】

以上の手続きにより、異なる時刻に撮影された画像間で、流体と共に運動するトレーサ粒子 86 の位置を算出することで、速度ベクトルを算出することができる。即ち、CCDの画素に対し比較的粒子の径が大きい場合は、それぞれの粒子が簡単に認識され、受像面上に撮影された粒子の座標 ( $u, v$ )、レーザ平面の方程式などにより前述した方法により、トレーサ粒子のワールド座標が算出され、それぞれの粒子を追跡することで流体の状態を定量的に把握することができる。

しかしながら粒子がCCDの画素に対し過小であるために、一つ一つの粒子が認識されない場合がある。その場合は、一個一個の粒子の位置に着目するのではなく、複数の粒子で構成されるパターンを追跡することにより、流れの状態を把握することを行うこの手法は、画像相関を用いることで実現できる。

相互相関法とは、2枚の画像を比べて、粒子群（輝度値）が最も近似している場所を探し、その位置関係から速度ベクトルを求める方法である。粒子一個一個に着目するのではなく、画像を碁盤の目のように細かく分割し、それぞれの微小領域を計測点とする。即ち、ある時刻に撮影された画像のある微小領域 A の位置を計測点 ( $u_1, v_1$ ) とし、異なる時刻に撮影された画像内から、微小領域 A に最も近いパターンをもつ位置 ( $u_2, v_2$ ) を探し出す処理を行う。( $u_1, v_1$ ) および ( $u_2, v_2$ ) が決定されたら前述した処理により、これらの座標をワールド座標に変換し、速度ベクトルを三次元的に求めることができる。そして分割した全ての領域に対して行えば、多点同時計測を行うことができる。図 14、図 15 に異なる時刻に撮影された二枚の画像例を示す。

#### 【0022】

次にこれらの画像に相互相関を適用する例を説明する。フレーム画像全体を小さな領域に分割し、その領域の中心を計測点とする。例えば、図 16 のようなフレーム画像全体 90 を図示しない小さな領域に分割し、例えば拡大図 91 の中心 92 を計測点とする。

さらに詳細に説明するために、図 17 を参照して説明する。一枚目の画像のある微小領域を A1 とする（図 17 (a)）。画像にそれぞれの画素において輝度データが存在する（数字が大きい方が輝度が明るい）。この輝度データをもとに相関処理を行う。例えば、A1 領域が微小時間後にどこに移動したかを知るために、図 17 (b) の画像において、計測点近傍の領域 A2 から同じ輝度データを探す。しかし、完全に一致することはないので、最も近似している領域を探す。つまり図 18 (a) のような A1 領域に最も近似している領域を探すと、図 18 (b) のように A2 領域が図のようであると仮定すると、検索した結果、右下方向（符号 93）で類似度が最大になることがわかる。その結果、図 18 (c) のように計測点 94 に対するベクトル方向は矢印 95 の方向であることが解る。

図 19 は水槽内流れを定量計測する実験装置の構成図である。この実験装置は、図 13 と同様の装置を使用して、レーザ位置 87 を撮像装置 30 に近い壁面から水槽中心まで 20 mm 間隔で奥行き方向にレーザ投光器 20 をシフトしていき、各奥行き距離での水槽内流れを定量計測する実験を行った。

図 20 は実際に 2 枚の画像から相互相関法によりベクトル表示した画像である。そして CCDカメラ 7 の焦点と図 20 のベクトルの始点座標、終点座標のそれぞれを通る二本の直線とレーザ平面の方程式を算出することで、速度ベクトルを三次元的に求めることができる。

次に計測性能評価について説明する。図 21 は水槽の奥行き方向の RMS 誤差と距離の関係を表し、図 22 は水槽の水平方向の RMS 誤差と距離の関係を表し、図 23 は水槽の高さ方向の RMS 誤差と距離の関係を表している。これらの図から明らかのように、トランスミッタ 40 からの距離が離れるにつれて各方向とも RMS 誤差が大きくなっているのが解る。従って、トランスミッタ 40 は可能な限り水槽に近づけて使用する方が誤差が少

10

20

30

40

50

ないことがわかる。

【図面の簡単な説明】

【0023】

【図1】本発明の一実施形態に係る三次元計測装置を使用して対象物を計測している斜視図。

【図2】本発明の図1の斜視図に基づいて本実施形態の三次元計測装置100の全体構成を表す模式図。

【図3】投光器20と撮像装置30の一例を示す図。

【図4】トランスミッタ40の一例を示す外形図。

【図5】磁気センサ8、4の一例を示す外形図。

10

【図6】本発明のレシーバA4、B8が位置情報と姿勢情報を生成する原理を説明する図。

【図7】各座標系の位置関係を表す図。

【図8】レシーバ座標54とレーザ平面52の関係を表す図。

【図9】カメラ座標とレシーバ座標の関係を示す図。

【図10】二次元化したカメラ焦点と受像面及び計測点の関係を示す図。

【図11】キャリブレーションの構成を示す図。

【図12】計測対象1をCCDカメラ7から奥行き方向276mmのところに設置して距離を計測したときのRMS誤差を示した図。

【図13】本発明の第2の実施形態に係る三次元計測装置を使用して対象物を計測している斜視図。

20

【図14】異なる時刻に撮影された二枚の画像例を示す図（フレーム1画像）。

【図15】異なる時刻に撮影された二枚の画像例を示す図（フレーム2画像）。

【図16】計測点を説明する図。

【図17】輝度データの検索を説明する図。

【図18】ベクトル表示を説明する図。

【図19】水槽内流れを定量計測する実験装置の構成図。

【図20】実際に2枚の画像から相互相関法によりベクトル表示した画像を示す図。

【図21】水槽の奥行き方向のRMS誤差と距離の関係を表す図。

【図22】水槽の水平方向のRMS誤差と距離の関係を表す図。

30

【図23】水槽の高さ方向のRMS誤差と距離の関係を表す図。

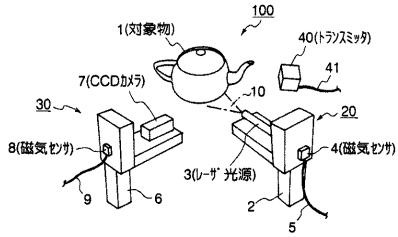
【図24】従来三次元形状装置により物体を計測している図。

【符号の説明】

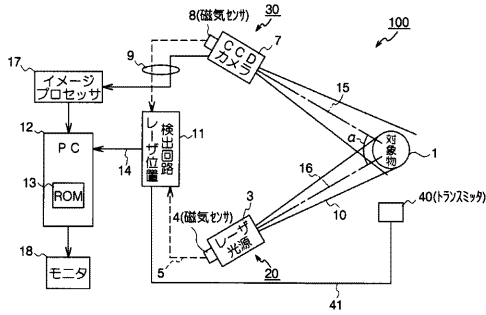
【0024】

1 対象物、2、6 架台、3 レーザ光源、4、8 磁気センサ、7 CCDカメラ、11 レーザ位置検出回路、12 PC、13 ROM、17 イメージプロセッサ、18 モニタ、20 レーザ投光器、30 撮像装置、40 トランスミッタ

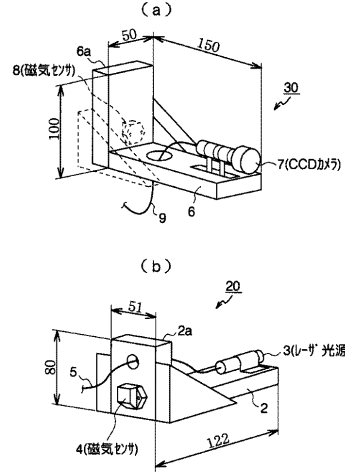
【 図 1 】



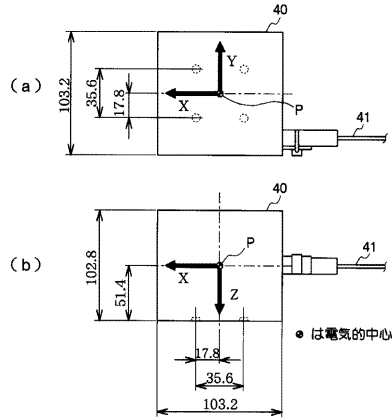
【 図 2 】



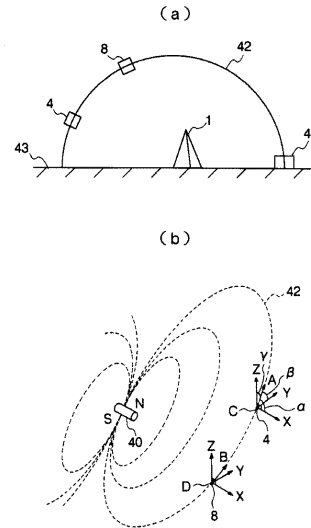
【 図 3 】



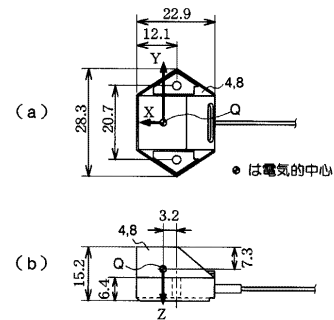
【 図 4 】



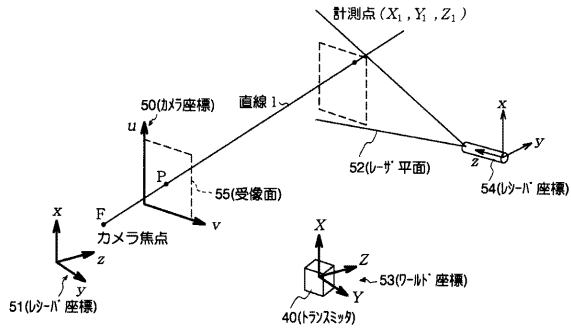
【 図 6 】



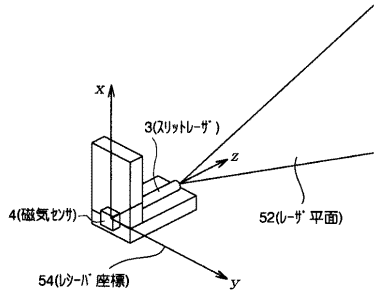
【 図 5 】



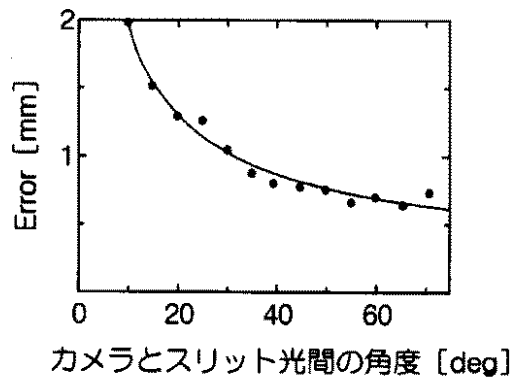
【 図 7 】



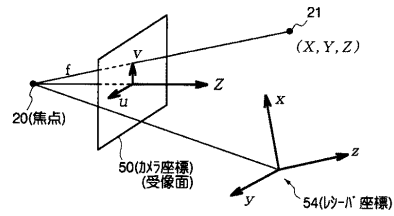
【 図 8 】



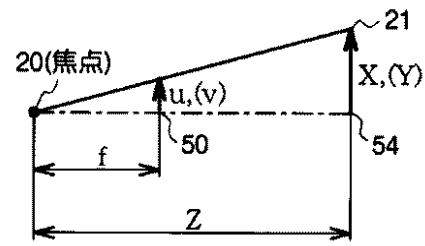
【 図 1 2 】



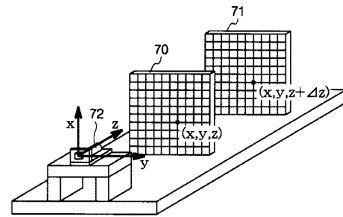
【 図 9 】



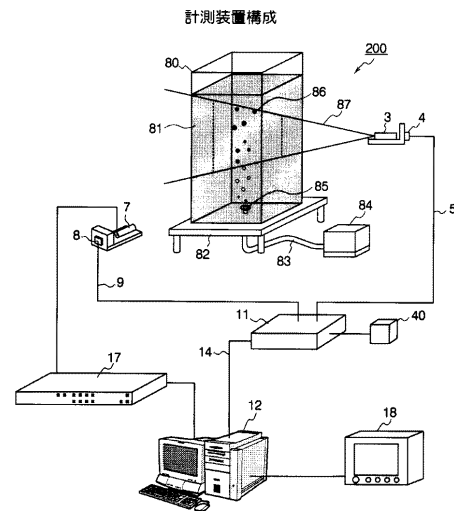
【 図 1 0 】



【 図 1 1 】

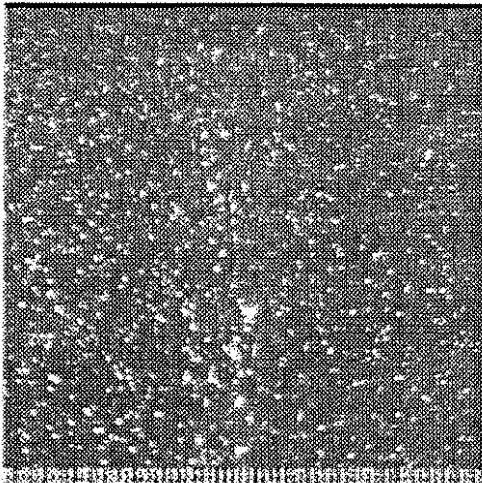


【 図 1 3 】



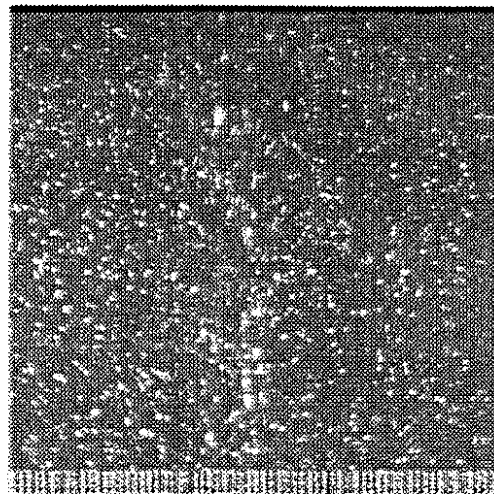
【図14】

フレーム1画像

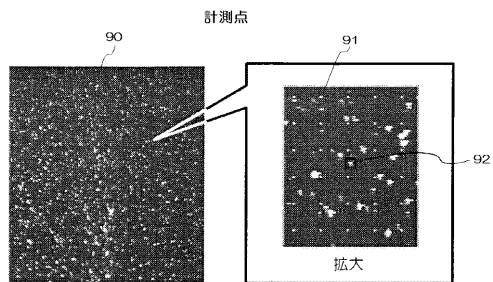


【図15】

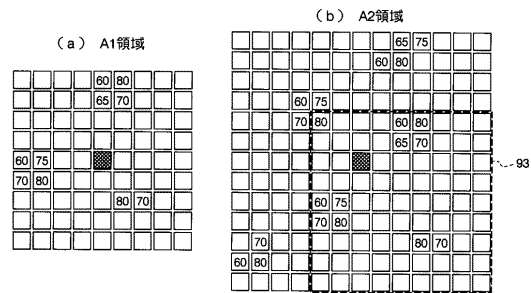
フレーム2画像



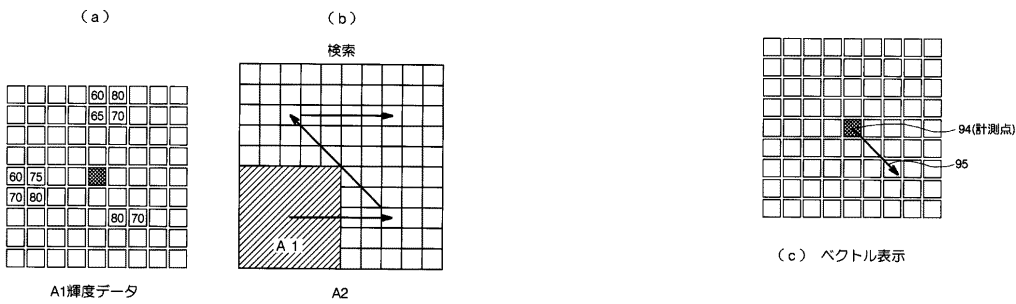
【図16】



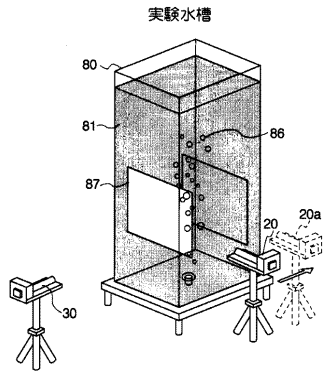
【図18】



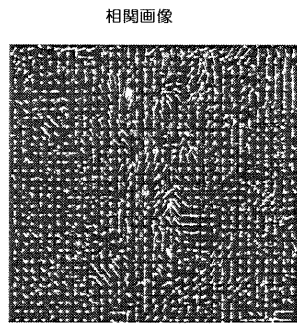
【図17】



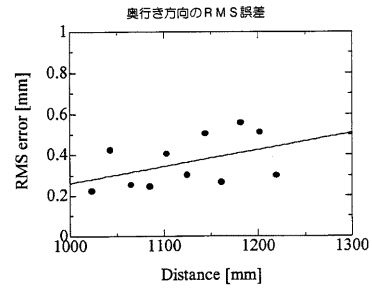
【 図 1 9 】



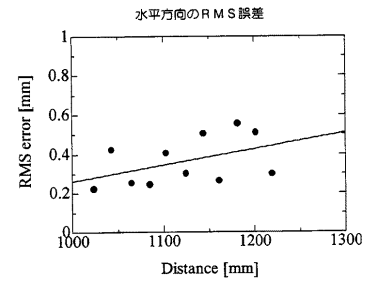
【 図 2 0 】



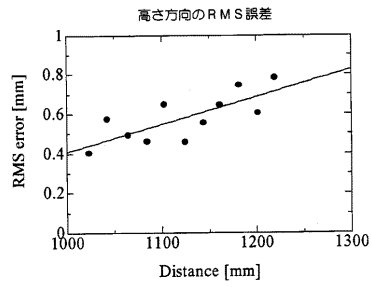
【 図 2 1 】



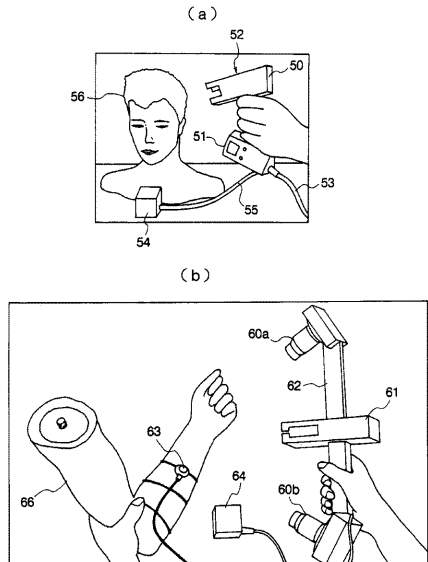
【 図 2 2 】



【 図 2 3 】



【 図 2 4 】



フロントページの続き

【要約の続き】

【選択図】 図2