

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局(43) 国際公開日  
2008 年 1 月 24 日 (24.01.2008)

PCT

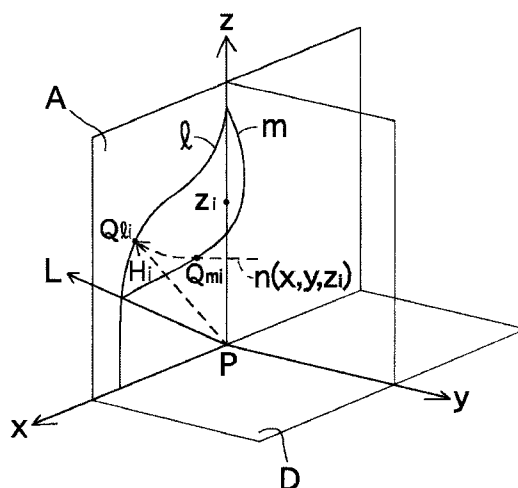
(10) 国際公開番号  
WO 2008/010592 A1

- (51) 国際特許分類:  
G01N 21/27 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2007/064415
- (22) 国際出願日: 2007 年 7 月 23 日 (23.07.2007)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2006-199967 2006 年 7 月 21 日 (21.07.2006) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): トヨタ自動車株式会社 (TOYOTA JIDOSHA KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒4718571 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地 Aichi (JP).
- (72) 発明者; および  
(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 高木 淳 (TAKAGI, Atsushi) [JP/JP]; 〒4718571 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地 トヨタ自動車株式会社内 Aichi (JP).
- (74) 代理人: 大川 宏 (OHKAWA, Hiroshi); 〒4500002 愛知県名古屋市中村区名駅 3 丁目 2 番 5 号 Aichi (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[ 続葉有 ]

(54) Title: METHOD FOR ESTIMATING REFLECTANCE

(54) 発明の名称: 反射率推定方法



(57) Abstract: Reflectance is measured conveniently even for a color shifted painting color. First reflectance  $R(\alpha_a)$  of first reflected light  $V_a$  in an incident plane A is measured, and first locus l of the end point of a first vector  $H_a$  ( $|H_a| = |R(\alpha_a)|$ ) divided equally into two and displacing two-dimensionally in the incident plane A is determined. Second reflectance  $R(\alpha_b)$  of second reflected light  $V_b$  on the outside of the incident plane A is measured, and second locus m of the end point of a second vector  $H_b$  ( $|H_b| = |R(\alpha_b)|$ ) divided equally into two and displacing three-dimensionally on the outside of the incident plane A is determined. Locus  $n(x, y, z_i)$  of the end point of a vector  $H_i$  divided equally into two on a plane  $z=z_i$  parallel with a plane under measurement is approximated from both loci l and m by a mathematical expression representing an ellipse and a modelled approximation model expression is determined. Finally, overall locus  $n'(x, y, z)$  of the entire end points of the vector  $H'$  of reflected light  $V'$  other than the first reflected light  $V_a$  and the second reflected light  $V_b$  divided equally into two is determined approximately.

(57) 要約: カラー・シフト塗装色についても簡便に反射率を測定する。入射面 A 内における第 1 反射光  $V_a$  の第 1 反射率  $R(\alpha_a)$  を測定するとともに、入射面 A 内で二次元的に変位する第 1 二等分ベクトル  $H_a$  ( $|H_a| = |R(\alpha_a)|$ ) の終点の第 1 軌跡 l を求める。入射面 A 外における第 2 反射光  $V_b$  の第 2 反射率  $R(\alpha_b)$  を測定するとともに、

[ 続葉有 ]

WO 2008/010592 A1



(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

添付公開書類:

— 国際調査報告書

入射面A外で三次元的に変位する第2二等分ベクトル $H_b$  ( $|H_b| = |R(\alpha_b)|$ )の終点の第2軌跡 $m$ を求める。両軌跡 $l$ 及び $m$ から被測定面と平行な平面 $z = z_i$ 上における二等分ベクトル $H_i$ の終点の軌跡 $n(x, y, z_i)$ を、楕円を示す数式で近似してモデル化した近似モデル式を求め、第1反射光 $V_a$ 及び第2反射光 $V_b$ 以外の反射光 $V'$ の二等分ベクトル $H'$ の終点全体の全体軌跡 $n'(x, y, z)$ を近似的に求める。

## 明 細 書

### 反射率推定方法

### 技術分野

[0001] 本発明は反射率推定方法に関し、詳しくはカラー・シフト塗装色の反射特性を調べるのに適した反射率推定方法に関する。

### 背景技術

[0002] 自動車の車体に塗られる塗装色は、色と明るさが見る方向によって変化する。こうした塗装の見栄えは塗装面の反射特性、すなわち反射率によって数値化することができる。このため、塗装色の反射率を測定することによって、塗装色の製造工程や検査工程において品質を管理したり、塗る前にコンピュータ・グラフィクス(CG)で塗装色を検討したりすることが可能になる。したがって、塗装色の反射率を測定することは重要である。そして、塗装面の反射率を測定する際の条件をどのように設定するかが重要な課題となる。

[0003] 車体に塗られる一般的な塗装色の反射特性は、一つの入射面内において、入射角度60度で入射した光を略10度(10度±数度)、略18度(18度±数度)、略28度(28度±数度)、略40度(40度±数度)、略90度(90度±数度)の代表5変角で受光したときの反射率を求めることによって、十分に把握できることがわかっている(例えば、特許文献1参照)。

[0004] なお、この特許文献1では、被測定面上の入射点Pに入射角 $\theta$ で入射した光が入射面A内において反射角 $\theta$ で正反射するとき、その正反射方向を変角0度として、正反射方向から入射点Pにおける被測定面の法線側に向かう角度(正反射方向から法線に向かう側が正となり、法線とは反対の被測定面に向かう側が負となる)を変角としている。

[0005] この5角度法では、一つの入射面内における代表5変角で受光した反射率を求めて補間する。これにより、ソリッドの他に、メタリックやパールマイカなどの複雑な塗装色についても、その反射率を簡便に測定することができる。

特許文献1:特開2003-307456号公報

## 発明の開示

### 発明が解決しようとする課題

- [0006] ところで、近年、自動車業界における市場ニーズの多様化・差別化に対応するために、マジョーラ(日本ペイント社)のようなカラー・シフト塗装色(特殊塗装色)が開発されて市場に徐々に浸透しつつある。このため、カラー・シフト塗装色の反射特性を定量化しうる反射率の測定方法が必要となっている。
- [0007] しかし、カラー・シフト塗装色は、光源の位置が変わるに連れて色の見え方が著しく異なるという特性を有する。このため、カラー・シフト塗装色の反射光に関しては、入射面に含まれない方向についても考慮する必要がある。したがって、一つの入射面内における代表5変角で受光する前記従来の5角度法によっては、カラー・シフト塗装色の反射率を正確に測定することができなかった。
- [0008] 以下、前記従来の5角度法によっては、カラー・シフト塗装色の反射率を正確に測定できないことを具体的に示す。
- [0009] 前記従来の5角度法は、一つの入射面内における代表5変角で受光したときの反射率を測定するもので、測定しようとする塗装色が下記(a)及び(b)の2条件を満たすことを前提としている。
- [0010] (a) 入射角が変化しても変角特性が変わらない(入射角依存性がない)。  
(b) 変角の正又は負によって変角特性が変わらない(変角0度での変角特性の対称性がある)。
- [0011] しかしながら、以下に示す本発明者の研究調査により、カラー・シフト塗装色は前記2条件を満たすものではなく、したがって、カラー・シフト塗装色については、前述した従来の5角度法を使うことができないことが明らかとなった。
- [0012] カラー・シフト塗装色の特性について、入射角依存性があるか否かという観点及び変角0度での変角特性の対称性があるか否かという観点から、本発明者が研究調査した結果を以下に示す。
- [0013] なお、以下に示す研究調査の結果においては、一つの入射面において、入射角  $\theta$  で光を入射させ、その入射面内の変角  $\alpha$  における塗装色を  $L^* a^* b^*$  値で表し、 $c(\theta, \alpha) = (L^*_{\theta}(\alpha), a^*_{\theta}(\alpha), b^*_{\theta}(\alpha))$  と表記する。

[0014] (入射角依存性)

ある一つのカラー・シフト塗装色(日本ペイント社製の773(エメラルドSS))を含む194種類のサンプル塗装色について、入射角  $\theta$  が60度、45度及び50度であるときの  $c(60, \alpha)$ 、 $c(45, \alpha)$  及び  $c(50, \alpha)$  をそれぞれ求めた。

[0015] そして、各サンプル塗装色について、入射角  $\theta$  が60度である場合と入射角  $\theta$  が45度である場合との変角毎の色差の平均値(60度及び45度間における平均色差)を、下記(1)のように定義して求めた。

[0016] 同様に、各サンプル塗装色について、入射角  $\theta$  が60度である場合と入射角  $\theta$  が50度である場合との変角毎の色差の平均値(60度及び50度間における平均色差)を、下記(2)のように定義して求めた。

[0017] なお、仮に入射角依存性が全くなければ、下記(1)式で定義される60度及び45度間における平均色差並びに前記(2)式で定義される60度及び50度間における平均色差は、それぞれ0になるはずである。

[0018] また、正反射方向近傍で受光したときの測定データは測定誤差を含んでいるため、 $0 \leq \alpha \leq 9$ の測定データを除いた。

[0019] [数1]

$$\overline{\Delta E}_{60-45} = \frac{1}{81} \sum_{\alpha=10}^{90} \| c(60, \alpha) - c(45, \alpha) \| \quad \dots\dots\dots (1)$$

[0020] [数2]

$$\overline{\Delta E}_{60-50} = \frac{1}{81} \sum_{\alpha=10}^{90} \| c(60, \alpha) - c(50, \alpha) \| \quad \dots\dots\dots (2)$$

[0021] その結果、前記(a)及び(b)の2条件を満たす一般塗装色では、60度及び45度間における平均色差が3.50となり、60度及び50度間における平均色差が2.53となった。これにより、一般塗装色では、入射角が60度から45度に変化したり、あるいは入射角が60度から50度に変化したりしても、変角特性はほとんど変化せず、入射角依存性がほとんどないことがわかった。

[0022] これに対し、カラー・シフト塗装色では、60度及び45度間における平均色差が15.

60となり、60度及び50度間における平均色差が11.55となった。これにより、カラー・シフト塗装色では、入射角が変化すれば変角特性が変化し、入射角依存性があることがわかった。

[0023] (変角0度での変角特性の対称性)

次に、各前記サンプル塗装色について、入射角60度で、光源側の変角 $\alpha$ を10～20度の間で変化させるとともに、被測定面側の変角 $-\alpha$ を $-10 \sim -20$ 度の間で変化させ、下記(3)式により、変角の正一負間における色差の平均値を求めた。

[0024] なお、仮に変角0度での変角特性の対称性があれば、下記(3)式で定義される変角の正一負間における平均色差は、0になるはずである。

[0025] [数3]

$$\overline{\Delta E}_{60} = \frac{1}{11} \sum_{\alpha=10}^{20} \| c(60, \alpha) - c(60, -\alpha) \| \quad \dots\dots\dots (3)$$

[0026] また、各前記サンプル塗装色について、入射角45度、50度においても同様にして、変角の正一負間における平均色差を調べた。

[0027] その結果、前記(a)及び(b)の2条件を満たす一般塗装色では、変角の正一負間における平均色差は、入射角45度のときに7.30、入射角50度のときに7.00、入射角60度のときに6.96となった。これにより、一般塗装色では、どの入射角でも、変角の正又は負によって変角特性があまり変わらず、変角0度での変角特性の対称性がほぼあることがわかった。

[0028] これに対し、カラー・シフト塗装色では、変角の正一負間における平均色差は、入射角45度のときに33.66、入射角50度のときに54.18、入射角60度のときに65.79となった。これにより、カラー・シフト塗装色では、どの入射角でも、変角の正又は負によって変角特性が大きく変わり、変角0度での変角特性の対称性がないことがわかった。

[0029] 以上の研究調査により、カラー・シフト塗装色は前記(a)及び(b)の2条件をいずれも満たさず、したがって前記(a)及び(b)の2条件を前提とし、一つの入射面内のみにおいて代表5変角を変化させて反射率を測定する前述した従来の5角度法は、カ

ラー・シフト塗装色には使えないことがわかった。

[0030] すなわち、カラー・シフト塗装色については、入射面に含まれない方向に反射する反射光を考慮する必要がある、新規な測定方法を用いない限り、原則、全ての入射角及び反射角について反射率を全点測定する必要があることが判明した。

[0031] しかし、全点測定方法は、測定点が膨大となり、多大な測定時間を要するため、非実用的である。仮に、入射角を0～90度の範囲、反射角を－90～90度の範囲及び方位角(入射面と反射面とがなす角)を0～90度の範囲で、例えば入射角を4度毎、反射角を2度毎、方位角を4度毎に変化させて測ったとしても、全部で48139(=23×91×23)点を測る必要がある。一点の測定には通常9～10秒程度を要するため、1日8時間測定するとして、48139点の測定には約16日間という多大な測定時間を要することになる。

[0032] このように、カラー・シフト塗装色については、簡便な反射率の測定方法が未だ確立されていないのが現状である。

[0033] 本発明は上記実情に鑑みてなされたものであり、カラー・シフト塗装色についても簡便に反射率を測定することを解決すべき技術課題とするものである。

#### 課題を解決するための手段

[0034] 本発明者は、カラー・シフト塗装色の反射率を測定する際の測定時間を短縮化させるべく、塗装色の反射率の相互性(reciprocity)と反射光分布のモデル化という2つの手法を用いて測定点数を削減することを創案し、これらの手法が有効であることを研究調査により確認して、本発明を完成した。

[0035] すなわち、本発明の反射率推定方法は、被測定面上の入射点Pに入射光Lを所定の入射角 $\theta$ で入射させたときに該入射光Lが入射面A内で正反射した正反射光Sと、該入射光Lが該入射点Pで反射して受光される反射光Vとがなす角を変角 $\alpha$ として、該入射面A内及び入射面A外にある任意の変角における反射率を推定する反射率推定方法であって、第1反射率測定工程、第1軌跡取得工程、第2反射率測定工程、第2軌跡取得工程、2交点座標取得工程、モデル式取得工程及び全体軌跡取得工程を備えている。

[0036] 第1反射率測定工程では、前記入射面A内において前記入射点Pに入射角 $\theta_d$ で

入射光 $L_d$ を入射させ、該入射面A内における所定の変角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、…で受光したときの、該入射面A内に在る第1反射光 $V_{a1}$ 、 $V_{a2}$ 、…の該入射光 $L_d$ に対する第1反射率 $R(\alpha_{a1})$ 、 $R(\alpha_{a2})$ 、…を測定する。

[0037] 第1軌跡取得工程では、前記入射光 $L_d$ と各前記第1反射光 $V_{a1}$ 、 $V_{a2}$ 、…との二等分ベクトルをそれぞれ第1二等分ベクトル $H_{a1}$ 、 $H_{a2}$ 、…とするとともに、前記第1反射率 $R(\alpha_a)$ の大きさを $|H_a| = |R(\alpha_a)|$ と定義して、前記第1反射率 $R(\alpha_{a1})$ 、 $R(\alpha_{a2})$ 、…の測定結果から、前記入射面A内で二次元的に変位する曲線としての、該第1二等分ベクトル $H_{a1}$ 、 $H_{a2}$ 、…の終点の第1軌跡 $l$ を求める。

[0038] 第2反射率測定工程では、前記入射面A内において前記入射点Pに前記入射角 $\theta_d$ で前記入射光 $L_d$ を入射させ、入射面A外における前記変角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、…で受光したときの、該入射面A外に在る第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の該入射光 $L_d$ に対する第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定する。

[0039] 第2軌跡取得工程では、前記入射光 $L_d$ と各前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…との二等分ベクトルをそれぞれ第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…とするとともに、前記第2反射率 $R(\alpha_b)$ の大きさを $|H_b| = |R(\alpha_b)|$ と定義して、前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…の測定結果から、前記入射面A外で三次元的に変位する曲線としての、該第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…の終点の第2軌跡 $m$ を求める。

[0040] 2交点座標取得工程では、互いに直交し前記入射点Pを原点として共有するx軸、y軸及びz軸を有するとともに、前記被測定面がxy平面となり且つ該入射点Pを含むxz平面が前記入射面Aとなる空間内の直交座標P-xyzを想定したとき、z軸に垂直な平面 $z=z_i$ と前記第1軌跡 $l$ 及び前記第2軌跡 $m$ との交点 $Q_{li}(x_{li}, 0, z_i)$ 及び $Q_{mi}(x_{mi}, y_{mi}, z_i)$ を求める。

[0041] モデル式取得工程では、前記交点 $Q_{li}$ 及び $Q_{mi}$ から、前記平面 $z=z_i$ における二等分ベクトル $H_i$ の終点の軌跡 $n(x, y, z_i)$ を、該交点 $Q_{li}$ 及び $Q_{mi}$ を通るなめらかな曲線を示す数式で近似してモデル化した、近似モデル式を求める。

[0042] ここに、前記なめらかな曲線とは、微分不可能な点がない曲線のことである。また、前記交点 $Q_{li}$ 及び $Q_{mi}$ を通るなめらかな曲線には、例えば、陰関数曲線、陽関数曲線、フーリエ級数で表現される曲線、直交関数の線形結合で曲線やパラメトリック曲線

が含まれる。なお、これらの曲線の次数は、曲線であれば問わない。また、パラメトリック曲線とは、各座標が1つのパラメータでパラメトリックに表される曲線をいい、ベジエ曲線やスプライン曲線等が含まれる。これらの曲線のうち、例えば陰関数曲線であって、次数が2次の曲線の一つである楕円を採用することが好ましい。

[0043] 全体軌跡取得工程では、 $z = 0 \sim \infty$ として、前記近似モデル式から、前記第1反射光 $V_a$ 及び前記第2反射光 $V_b$ 以外の反射光 $V'$ と前記入射光 $L_d$ との二等分ベクトル $H'$ の終点全体の全体軌跡 $n'(x, y, z)$ を近似的に求める。

[0044] 前記変角 $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ は、 $0 \sim 90$ 度の範囲内で定められた $N$  ( $1 \leq N \leq 89$ )個の代表 $N$ 変角から選ばれる少なくとも一つを含む。

[0045] そして、本発明の反射率推定方法では、前記第1反射率測定工程、前記第1軌跡取得工程、前記第2反射率測定工程、前記第2軌跡取得工程、前記2交点座標取得工程、前記モデル式取得工程及び前記全体軌跡取得工程を、 $0 \sim 90$ 度の範囲内にある複数の入射角 $\theta_d = \theta_1, \theta_2, \dots$ についての入射光 $L = L_1, L_2, \dots$ 毎に繰り返す。

[0046] ここに、本発明の反射率推定方法における前記変角 $\alpha$ とは、前述のとおり被測定面上の入射点 $P$ に入射光 $L$ を所定の入射角 $\theta$ で入射させたときに該入射光 $L$ が入射面 $A$ 内で正反射した正反射光 $S$ と、該入射光 $L$ が該入射点 $P$ で反射して受光される反射光 $V$ とがなす角をいうが、この変角 $\alpha$ には、前記入射面 $A$ 内における変角と、前記入射面 $A$ 外における変角とが含まれる。

[0047] また、変角 $\alpha$ が前記入射面(直交座標 $P-xyz$ における $x$ 軸と $z$ 軸とで張られる $xz$ 平面) $A$ 内における変角である場合、変角 $\alpha$ は、正反射方向から入射点における被測定面(直交座標 $P-xyz$ における $x$ 軸と $y$ 軸とで張られる $xy$ 平面)の法線(直交座標 $P-xyz$ における $z$ 軸)に向かう側が正となり、正反射方向から被測定面に向かう側が負となる。一方、変角 $\alpha$ が前記入射面 $A$ 外における変角である場合、変角 $\alpha$ は、二等分ベクトルの $x$ 座標及び $y$ 座標が共に0より大きくなる場合が正となり、二等分ベクトルの $y$ 座標が0以上でかつ $x$ 座標が0より小さくなる場合が負となる。

[0048] また、前記二等分ベクトルとは、入射光ベクトルと反射光ベクトルとがなす角の半分の角度方向を向くベクトル(ハーフウェイベクトル)をいう。

[0049] 本発明の反射率推定方法では、第1反射率測定工程及び第1軌跡取得工程により、入射面A内における第1反射光 $V_a$ の反射率 $R(\alpha_a)$ の第1軌跡 $l$ を求めるとともに、第2反射率測定工程及び第2軌跡取得工程により、入射面A外における第2反射光 $V_b$ の反射率 $R(\alpha_b)$ の第2軌跡 $m$ を求める。このとき、反射率の相互性を利用して、変角 $\alpha$ が負になる測定点については反射率を測定しない。また、原則的には、変角 $\alpha$ が所定の代表N変角になる測定点についてのみ反射率を測定する。代表N変角以外の変角についての反射率は、主成分分析、重回帰分析や時系列分析で得られた主成分ベクトル(固有ベクトル)の外挿処理や曲線補間法等により補間することができる。そして、2交点座標取得工程、モデル式取得工程及び全体軌跡取得工程により、第1軌跡 $l$ 及び第2軌跡 $m$ から反射光分布をモデル化して、三次元的な反射光分布を求める。

[0050] したがって、本発明の反射率推定方法では、三次元的な反射光分布を求めることができるので、入射面A内にある変角 $\alpha$ のみならず、入射面A外を含む三次元における変角 $\alpha$ についても、その反射率を推定することが可能となる。

[0051] しかも本発明の反射率推定方法では、反射率の相互性と反射光分布のモデル化とを利用することで、全ての入射角及び全ての反射角を変化させて測定する全点測定方法等と比べて、測定点の削減により測定時間を短縮することができ、カラー・シフト塗装色であっても簡便に反射率を測定することが可能となる。

[0052] 本発明の反射率推定方法において、前記第2反射率測定工程では、前記入射点Pを頂点とし、かつ該入射点Pにおける前記被測定面の法線たる回転軸としてのz軸と母線とが前記入射角 $\theta_d$ と同等の角度をなす円錐面上に在る前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定することが好ましい。

[0053] このように、z軸と角度 $\theta_d$ をなす円錐面上に第2反射光 $V_b$ を採れば、測定方法が単純となるので、入射面A外における第2反射光 $V_b$ の反射率 $R(\alpha_b)$ を測定する際に測定漏れ等のミスを減らすことができる。

[0054] 本発明の反射率推定方法において、前記第2反射率測定工程では、前記入射面Aたるxz平面と方位角 $\phi_1 = 90$ 度、 $\phi_2 = (90 - e)$ 度、 $\phi_3 = (90 - 2e)$ 度、…をなし、かつ前記入射点Pにおける前記被測定面の法線たるz軸を含む平面 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、

…を想定したとき(前記 $e$ は任意の正の数)、前記代表 $N$ 変角のうちの角度の小さい方からできるだけ多くを採れる範囲内で、前記平面 $B_1$ 内に前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…が在るような前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定する第1工程を実施し、かつ、直前の第 $(f-1)$ 工程では、平面 $B_{f-1}$ 内に前記第2二等分ベクトルが在るようには前記代表 $N$ 変角の少なくとも一部を採れないために、前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…の少なくとも一部を測定できなかったときは、該第 $(f-1)$ 工程で採れなかった該代表 $N$ 変角の少なくとも一部のうちの角度の小さい方からできるだけ多くを採れる範囲内で、前記平面 $B_{f-1}$ 内ではなく平面 $B_f$ 内に前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…が在るような前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定する第 $f$ 工程を、第2工程、第3工程、…として繰り返し実施することにより、前記代表 $N$ 変角における前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…が前記平面 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、…内のいずれかに在るような前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定することが好ましい。

[0055] このように第2反射率測定工程で入射面 $A$ 外における第2反射光 $V_b$ の反射率 $R(\alpha_b)$ を測定すれば、第2軌跡取得工程で得られる第2軌跡 $m$ を第1軌跡 $l$ から離すのに有利となるため、反射光分布を示す楕円等の数式をより正確に特定することができ、反射率の推定をより高精度に行うことが可能となる。

[0056] ここに、本発明の反射率推定方法において、前記変角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、…は、測定点数の削減による測定時間の短縮化を図る観点より、 $0 \sim 90$ 度の範囲内で定められた $N$  ( $1 \leq N \leq 89$ )個の代表 $N$ 変角から選ばれる少なくとも一つを含む。

[0057] この代表 $N$ 変角の角度及び数は特に限定されないが、本発明方法により推定した反射率の精度を高めて信頼性を向上させる観点より、略10度と略90度とが少なくとも含まれていることが好ましく、例えば代表 $N$ 変角は、略10度(10度±数度)、略18度(18度±数度)、略28度(28度±数度)、略40度(40度±数度)及び略90度(90度±数度)の代表5変角であることが好ましい。

[0058] また、代表 $N$ 変角として負の変角 $\alpha$ を考えないのは、反射率の相互性を利用できるからである。反射率の相互性によれば、例えば、入射角 $\theta_a$ が30度で、入射面 $A$ 内

における変角  $\alpha$  が  $-40$  度 (受光角 (= 入射角 - 変角)  $\theta_b$  が  $70$  度) であるときの反射光の反射率  $R(30, 70)$  と、入射角  $\theta_a$  が  $70$  度で、入射面 A 内における変角  $\alpha$  が  $40$  度 (受光角  $\theta_b$  が  $30$  度) であるときの反射光の反射率  $R(70, 30)$  とは等しくなる ( $R(30, 70) = R(70, 30)$ )。このため、入射角  $\theta_a$  が  $30$  度で、入射面 A 内における変角  $\alpha$  が  $-40$  度 (受光角  $\theta_b$  が  $70$  度) であるときの反射光の反射率  $R(30, 70)$  は、入射角  $\theta_a$  が  $70$  度で、入射面 A 内における変角  $\alpha$  が  $40$  度 (受光角  $\theta_b$  が  $30$  度) であるときの反射光の反射率  $R(70, 30)$  として測定していることになるので、測定する必要がない。

[0059] なお、反射率を測定する際の測定機によっては、機構上の制約により、被測定面となす角度 (被測定面からの仰角) が所定値よりも小さくなる角度範囲 (測定不可能範囲) 内に入射光又は反射光が入るときは、測定が不可能になるものがある。この場合、測定不可能範囲内に入る入射光又は反射光の反射率については、測定可能なものでなるべく近いものの反射率を代用することができる。

[0060] 例えば、被測定面となす角度が  $10$  度未満になる範囲が測定不可能範囲であるような測定機を使用する場合において、入射角が  $80$  度を超えるとその入射光は測定不可能範囲に入るので、反射率の測定が不可能となる。このため、このような場合は、入射角が  $80$  度を超える入射光についての反射率は、測定することなく、例えば入射角が  $80$  度であるときの入射光についての反射率を代わりに採用することができる。

[0061] 同様に、被測定面となす角度が  $10$  度未満になる範囲が測定不可能範囲であるような測定機を使用する場合において、例えば、入射角が  $10$  度未満になると、その入射光の入射面内における変角  $\alpha$  が  $90$  度となる反射光は測定不可能範囲に入るので、反射率の測定が不可能となる。このため、このような場合は、例えば入射角  $\theta$  が  $10$  度未満で入射面内における変角  $\alpha$  が  $90$  度になる反射光についての反射率は、測定することなく、例えば入射角  $\theta$  が  $10$  度未満で入射面内における変角  $\alpha$  が  $(80 + \theta)$  度となる反射光についての反射率を代わりに採用することができる。

[0062] 本発明の反射率推定方法の好適な態様において、前記被測定面にはカラー・シフト塗装色が施されている。すなわち、本発明の反射率推定方法は、カラー・シフト塗装色の反射率を測定するのに好適に利用することができる。

[0063] ここに、前記カラー・シフト塗装色とは、光の入射角によって変角特性が変化し(入射角依存性があり)、かつ、変角の正又は負によって変角特性が変わる(変角0度での変角特性の対称性がない)ものをいう。

[0064] なお、前記変角特性とは、変角(入射面内で正反射方向に反射する正反射光と、受光する反射光とがなす角度)による反射光の強度変化である。

### 発明の効果

[0065] 本発明の反射率推定方法によれば、全ての入射角及び全ての反射角を変化させて測定する全点測定方法等と比べて、測定点の削減により測定時間を短縮することができ、カラー・シフト塗装色であっても簡便に反射率を測定することが可能となる。

### 図面の簡単な説明

[0066] [図1]本実施形態1において、カラー・シフト塗装色が施された被測定面D上の入射点Pに入射光Lを所定の入射角 $\theta$ で入射させるとともにその反射光Vを受光する様子を説明する説明図である。

[図2]本実施形態1において、第1反射率測定工程で、カラー・シフト塗装色が施された被測定面D上の入射点Pに入射角 $\theta_d$ で入射光 $L_d$ を入射させ、入射面A内における所定の変角 $\alpha$ で受光したときの、該入射面A内に在る第1反射光 $V_a$ の第1反射率(分光立体角反射率) $R(\alpha_a)$ を測定する様子を説明する説明図である。

[図3]本実施形態1において、第2反射率測定工程で、入射点Pを頂点とし、かつ入射点Pにおける被測定面Dの法線たるz軸と入射角 $\theta_d$ をなす円錐面上に在る第2反射光 $V_b$ の第2反射率 $R(\alpha_b)$ を測定する様子を説明する説明図である。

[図4]本実施形態1において、2交点座標取得工程で、第1軌跡取得工程で求めた第1軌跡l及び第2軌跡取得工程で求めた第2軌跡mと、平面 $z=z_i$ との交点を求める様子を説明する説明図である。

[図5]本実施形態2において、第2反射率測定工程で、入射面Aたるxz平面と方位角 $\phi_i$ をなし、かつ入射点Pにおける被測定面Dの法線たるz軸を含む平面 $B_i$ 内に在る、入射光Lと第2反射光 $V_{bi}$ との第2二等分ベクトル $H_{bi}$ を説明する説明図である。

[図6]本実施形態2において、第2反射率測定工程で、第2反射光 $V_{bi}$ がxy平面となす角 $\eta$ の最小値を与える $\phi$ の最大値 $\phi_{\max}$ と平面 $B_i$ の方位角 $\phi_i$ との関係を示し、方

位角  $\phi_i$  が90度から小さくなる平面B<sub>i</sub>ほど、その平面B<sub>i</sub>内で第2二等分ベクトルH<sub>bi</sub>が動くことのできる範囲が増大することを説明する説明図である。

[図7]本実施形態2において、第2反射率測定工程で、平面B<sub>i</sub>の方位角  $\phi_i$  と、その方位角  $\phi_i$  の平面B<sub>i</sub>内に第2二等分ベクトルH<sub>bi</sub>が在るような第2反射光V<sub>bi</sub>の変角  $\alpha_i$  の最大変角  $\alpha_{\max}$  との関係を示し、方位角  $\phi_i$  が小さくなるほど、最大変角  $\alpha_{\max}$  が大きくなることを説明する説明図である。

[図8]本実施形態2において、第2軌跡取得工程で求めた、入射面A外で三次元的に変位する曲線としての第2軌跡mの一例を説明する説明図である。

[図9]波長が390nmである入射光における反射分布について、微小面の分布により立体表示したもので、上段の3つが入射角20度のもの、中段3つが入射角40度のもの、下段3つが入射角60度のものであり、また、左の列がyz平面、中央の列がzx平面、右の列がxy平面を示す。

[図10](a)は波長が450nmで、入射角  $\theta$  が60度である場合について、反射率の計算値と実測値との比較結果を示し、(b)は各変角  $\alpha$  における両者の色差を示す。

### 符号の説明

|        |                           |                           |
|--------|---------------------------|---------------------------|
| [0067] | A…入射面                     | D…被測定面                    |
|        | L…入射光                     | V…反射光                     |
|        | S…正反射光                    | $\theta$ …入射角             |
|        | l…第1軌跡                    | m…第2軌跡                    |
|        | V <sub>a</sub> …第1反射光     | V <sub>b</sub> …第2反射光     |
|        | H <sub>a</sub> …第1二等分ベクトル | H <sub>b</sub> …第2二等分ベクトル |
|        | $\alpha$ …変角              |                           |

### 発明を実施するための最良の形態

[0068] まず、カラー・シフト塗装色の反射率の測定において、測定点数を削減するためには、塗装色の反射率の相互性と反射光分布のモデル化(数式モデル化)という2つの手法が有効であることを、本発明者による研究調査の結果とともに以下に示す。

[0069] (塗装色についての反射率の相互性による測定点数の削減)

塗装色についての反射率の相互性とは、入射光と反射光とを逆にしてもその塗装

色の反射率が変わらない性質をいう。すなわち、入射光の入射角を  $\theta a$ 、反射光の受光角(=入射角-変角)を  $\theta b$ としたときの反射率 $R(\theta a, \theta b)$ と、入射光と反射光とを逆にして入射角を  $\theta b$ 、受光角を  $\theta a$ としたときの反射率 $R(\theta b, \theta a)$ とが等しければ( $R(\theta a, \theta b)=R(\theta b, \theta a)$ )、塗装色の反射率の相互性があることになる。

[0070] 塗装色についての反射率の相互性が成立するか否かを確認するために、カラー・シフト塗装色を含む194種類の前記サンプル塗装色において、入射面内で入射角と受光角とを入れ換えた場合の色差を計算した。具体的には、 $R(45, 60)$ と $R(60, 45)$ 及び $R(50, 60)$ と $R(60, 50)$ の2組の色差を塗装色毎に計算した。その結果、 $R(45, 60)$ と $R(60, 45)$ との平均色差は2.10と小さく、 $R(50, 60)$ と $R(60, 50)$ との平均色差も1.86と小さかった。

[0071] さらに、前記サンプル塗装色において、入射光の入射面内に反射光がない場合について15～141度の範囲内で入射角と受光角とを入れ換えて反射率を調べることで、反射光が入射面内にない場合についても、塗装色の反射率の相互性が成立することを確認した。

[0072] これらの結果より、カラー・シフト塗装色及び一般塗装色のいずれにおいても、反射率の相互性が成立することがわかった。これにより、相互性を利用すれば、測定点数を50%削減できることがわかった。

[0073] (反射光分布のモデル化による測定点数の削減)

また、本発明者は、反射光の分布を数式でモデル化することにより測定点数を削減できないかを研究調査した。

[0074] 反射光の分布を考える際、各入射角についての反射光自体の分布を図示しようとすると、入射角によって反射光の分布の方向が変化するため、各入射角で反射光の分布を比較することが困難となる。

[0075] そこで、本発明者は、二等分ベクトルを用いる微小面(方向の異なる微小な面により構成されていると仮想された面で、複数の小素面により構成された面)モデルにより、反射率を考えることとした。この微小面モデルでは、反射光の強度は、入射光と反射光との二等分ベクトルの方向(入射光と反射光とがなす角の半分の角度方向)を向く微小面の数に比例すると便宜的に考えることができる。そうすると、各入射角につい

て微小面の分布を図示したとき、微小面の分布の方向は、入射角にかかわらず常に上方を向くので、それらを比較することが容易となる。

[0076] このため、本発明者は、カラー・シフト塗装色について、反射分布を調べるべく、光源の入射角を変化させたときの微小面の分布を図示してみた。図9は、波長が390nmである入射光における反射分布について、微小面の分布により立体表示したもので、上段の3つが入射角20度のもの、中段3つが入射角40度のもの、下段3つが入射角60度のものである。また、図9において、左の列がyz平面、中央の列がzx平面、右の列がxy平面を示す。なお、図9は、受光変角が正であるときの反射光の反射分布を示す。受光変角が負であるときの反射光の反射分布は、相互性の性質により、受光変角が負であるときの反射光と入射光を入れ換えた場合における受光変角が正であるときの反射分布となる。

[0077] 図9より、カラー・シフト塗装色においては、光源の入射角を変化させたときの微小面の分布が楕円体の一部で近似できることがわかった。この点について詳述すると、互いに直交し前記入射点Pを原点として共有するx軸、y軸及びz軸を有するとともに、前記被測定面がxy平面となり且つ該入射点Pを含むxz平面が前記入射面Aとなる空間内の直交座標P-xyzを想定した場合、受光変角が正であるときについて言えば、光源の入射角を変化させたときの微小面の分布を近似的に示す楕円体の一部は、平面 $z=z_i$ において、入射点Pを中心とし、長軸と短軸を、x軸とy軸(又はy軸とx軸)にもつ楕円の一部となる。

[0078] なお、受光変角が負である場合は、光源の入射角を変化させたときの微小面の分布は、受光変角が正である場合と同様、平面 $z=z_i$ において、入射点Pを中心とし、長軸と短軸をx軸とy軸(又はy軸とx軸)にもつ楕円の一部となるような楕円体の一部により近似できるが、反射率の相互性より考えなくてもよい。

[0079] また、カラー・シフト塗装色において、微小面の分布が前述のような楕円体になるのは、ランバートの法則による円が、特殊な光輝材と特殊な層構造とによって変形したためと考えられる。一方、カラー・シフト塗装色以外の一般塗装色においては、反射光分布が正反射光に対し回転対称であるため、微小面の分布が表面の法線に対して回転対称の図形になると考えられる。

- [0080] これにより、カラー・シフト塗装色が施された被測定面に入射光が入射したときの、該入射光とその反射光との二等分ベクトルにより微小面の分布を考えれば、この被測定面で反射する反射光の反射分布を数式でモデル化できることがわかった。すなわち、カラー・シフト塗装色における微小面の分布を近似的に示す入射点を中心とする前記楕円体の一部について、例えば被測定面と平行な平面で切った楕円（被測定面の入射点における法線を中心とする楕円）の一部に着目すれば、その楕円を示す数式により、カラー・シフト塗装色についての反射分布を近似的にモデル化できることがわかった。
- [0081] ここに、中心がわかっている楕円は、その楕円上の2点の座標がわかれば、数式で特定することができる。例えば、xy座標において、(a, 0)及び(0, b)の2点を通り、且つ原点を中心とする楕円は、数式 $(x/a)^2 + (y/b)^2 = 1$ で特定することができる。
- [0082] そこで、本発明者は、カラー・シフト塗装色における微小面の分布を近似的に示す入射点を中心とする前記楕円体の一部について、被測定面と平行な平面で切った楕円（被測定面の入射点における法線上に中心がくる楕円）の一部を数式で特定すべく、反射率の大きさをその反射光の二等分ベクトルの長さと定義して、入射面内における反射光の二等分ベクトルの終点の軌跡と、入射面外における反射光の二等分ベクトルの終点の軌跡とを求め、各軌跡と前記平面との交点をそれぞれ求めることを考えた。
- [0083] 入射面内における二等分ベクトルの軌跡は、その入射面内で変角 $\alpha$ を変化させたときの反射光の反射率を測定することで求めることができる。このため、前述した従来の5角度法を利用して、入射面内にある代表変角の反射光について反射率を測定して補間しても、ある程度信頼性の高い軌跡を求めることができる。
- [0084] ところが、入射面外における二等分ベクトルの軌跡を求めることについては、種々の問題があった。
- [0085] まず、前述した従来の5角度法は、入射面内における代表変角の反射光について反射率を測定するものであるため、入射面外にある代表変角の反射光について反射率を測定して補間した場合に、それがどの程度信頼できるのかが不明であった。
- [0086] そこで、本発明者は、入射面A内において被測定面上の入射点Pに入射角 $\theta$ で入

射光が入射する場合において、被測定面上の入射点Pを頂点とし、かつ入射点Pにおける被測定面の法線たる回転軸としてのz軸と母線とが入射角 $\theta$ と同等の角度をなす円錐面上に在る反射光 $V_b$ を考えた。なお、入射面Aと反射面とがなす方位角 $\phi$ を用いれば、z軸と角度 $\theta$ をなす円錐面上に在る反射光 $V_b$ は、 $V_b = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$ となる。そして、入射面A内における正反射光Sと反射光 $V_b$ とがなす変角 $\alpha$ を、10度、18度、28度、40度及び90度の代表5変角として、各代表5変角における反射光 $V_b$ の反射率 $R(\alpha_b)$ をそれぞれ測定し、その測定結果から補間した反射率の計算値と、各変角 $\alpha$ について実際に測定した反射率の実測値とを比較した。

[0087] 波長が450nmで、入射角 $\theta$ が60度である場合、反射率の計算値と実測値との比較結果を図10(a)に示し、各変角 $\alpha$ における両者の色差を図10(b)に示す。図10より、10度以上の変角 $\alpha$ において色差が2以下となり、反射率の計算値と実測値とがほぼ等しいことがわかった。他の入射角、波長においても同様に、計算値と実測値とがほとんど一致した。

[0088] これにより、前述した従来の5角度法は、入射面外にある代表変角における反射率を測定する場合においても成立することがわかった。

[0089] また、楕円を示す数式の信頼性を向上させる観点からは、前記入射面内における反射光の二等分ベクトルの終点の軌跡と、前記入射面外における反射光の二等分ベクトルの終点の軌跡とができるだけ離れていることが望ましい。かかる観点からは、入射面外における反射光の二等分ベクトルは、例えば入射面と垂直な平面、すなわち入射面となす方位角 $\phi$ が90度の平面上に在ることが望ましい。

[0090] しかし、後述するように、入射角 $\theta$ を一定とした場合、方位角 $\phi$ が90度のときに、その方位角 $\phi$ が90度の平面上に二等分ベクトルが在るように採ることのできる代表変角の範囲が最も狭くなり、方位角 $\phi$ が90度から減少するに連れて、その方位角 $\phi$ の平面上に二等分ベクトルが在るように採ることのできる代表変角の範囲が広がる。別の言い方をすれば、方位角 $\phi$ が90度の平面では、全ての代表変角における二等分ベクトルがその平面上に在ることになるような入射角 $\theta$ の範囲が狭くなり、方位角 $\phi$ が90度から減少するに連れて、全ての代表変角における二等分ベクトルがその平面上に在ることになるような入射角 $\theta$ の範囲が広くなる。このため、入射面外における反

射光の二等分ベクトルの終点の軌跡として、方位角  $\phi$  が90度の平面上に在る二等分ベクトルの終点の軌跡を求めることは、必ずしも有効ではない。

[0091] そこで、本発明者は、前記入射面外における反射光の二等分ベクトルの終点の軌跡を求めるために、方位角  $\phi$  が90度の平面上以外で三次元的に変位する曲線としての二等分ベクトルの終点の軌跡を求める2つの手法を創案し、これらが有効であることを確認した。

[0092] 以上の研究調査の結果を基になされた本発明の反射率推定方法についての実施形態を、以下図面を参照しつつ説明する。

[0093] (実施形態1)

本実施形態の反射率推定方法では、図1に示されるように、カラー・シフト塗装色が施された被測定面D上の入射点Pに入射光Lを所定の入射角  $\theta$  で入射させるとともにその反射光Vを受光する場合において、該入射光Lが入射面A内で正反射した正反射光Sと、該反射光Vとがなす角を変角  $\alpha$  として、該入射面A内及び入射面A外における任意の変角の反射率を推定する。なお、反射光Vには、入射面A内で反射する反射光及び入射面A外で反射する反射光の双方が含まれる。

[0094] なお、入射角  $\theta_d$  が  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\dots=0$ 度、1度、2度 $\dots$ となるように、入射角  $\theta_d$  を0～90度の範囲内で1度毎に変化させる場合について以下説明するが、この入射角  $\theta_d$  を変化させる角度は特に限定されない。

[0095] また、測定不可能となる角度範囲が10度未満である測定機を用いる場合について以下説明するが、この角度範囲は特に限定されない。ここに、測定不可能となる角度範囲が10度未満であるとは、被測定面Dとなす角度(被測定面Dからの仰角)が10度未満になる角度範囲(測定不可能範囲)内に入射光L又は反射光Vが入るときは、測定機の機構上の制約により、測定が不可能になることを意味する。

[0096] 以下、各工程について具体的に説明する。

[0097] <第1反射率測定工程>

第1反射率測定工程では、図2に示されるように、カラー・シフト塗装色が施された被測定面D上の入射点Pに入射角  $\theta_d$  で入射光Lを入射させ、入射面A内における所定の變角  $\alpha$  で受光したときの、該入射面A内に在る第1反射光V<sub>a</sub>の第1反射率(

分光立体角反射率) $R(\alpha_a)$ を測定する。

- [0098] すなわち、この第1反射率測定工程では、カラー・シフト塗装色が施された被測定面D上の入射点Pに、入射面A内において入射角 $\theta_d$ で入射光 $L_d$ を入射させる。そして、該入射面A内における所定の変角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、…で受光したときの、該入射面A内に在る第1反射光 $V_{a1}$ 、 $V_{a2}$ 、…の該入射光 $L_d$ に対する第1反射率 $R(\alpha_{a1})$ 、 $R(\alpha_{a2})$ 、…を測定する。
- [0099] この第1反射率測定工程で第1反射率 $R(\alpha_{a1})$ 、 $R(\alpha_{a2})$ 、…を測定するときの測定変角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、…として、本実施形態では、表1に示されるように、10度、18度、28度、40度及び90度の代表5変角の他に、 $(80 + \theta_d)$ 度を採用する。そして、入射角 $\theta_d$ の大きさに応じて測定可能な測定変角がこれらの中から採択される。
- [0100] すなわち、入射角 $\theta_d$ が10～80度( $\theta_d = 10$ 度、11度、…、80度)であるときは、測定変角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、…として、10度、18度、28度、40度及び90度の全ての代表5変角が採択される。
- [0101] また、入射角 $\theta_d$ が0～9度( $\theta_d = 0$ 度、1度、…、9度)であるときは、測定変角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、…として、10度、18度、28度及び40度の代表5変角のうちの4点と、 $(80 + \theta_d)$ 度とが採択される。すなわち、入射角 $\theta_d$ が0～9度であるときは、代表5変角としての90度であるときの反射率を測定する代わりに、変角 $\alpha$ が $(80 + \theta_d)$ 度であるときの反射率を測定する。
- [0102] ここに、入射角 $\theta_d$ が0～9度であるときに、測定変角 $\alpha$ として、代表5変角たる90度の代わりに $(80 + \theta_d)$ 度を採用するのは、入射角 $\theta_d$ が0～9度であるときに変角 $\alpha = 90$ 度となるように入射面A内で反射する第1反射光 $V_a$ は、上記測定不可能範囲内に入ることから、反射率を測定できないからである。
- [0103] さらに、入射角 $\theta_d$ が81～90度( $\theta_d = 81$ 度、82度、…、90度)であるときは、入射光 $L_d$ が上記測定不可能範囲内に入ることから、その第1反射光 $V_a$ の反射率を測定できない。このため、本実施形態では、入射角 $\theta_d$ が81～90度の入射光 $L_d$ については、その第1反射光 $V_a$ を測定することなく、入射角 $\theta_d$ が80度であるときの入射光 $L_d$ に対する第1反射光 $V_a$ の反射率をそのまま用いて計算する。
- [0104] なお、反射率の相互性により、変角 $\alpha$ が負になるような測定点については反射率を

測定しない。

[0105] したがって、本実施形態における第1反射率測定工程で第1反射率 $R(\alpha_a)$ を測定する測定点の合計は、 $5 \times 81 = 405$ (点)となる。

[0106] [表1]

| 第1反射率測定工程（入射面A内）   |        |                                 |
|--------------------|--------|---------------------------------|
| 入射角 $\theta_d$ （度） | 測定変角の数 | 測定変角の角度（度）                      |
| 81～90              | —      | —                               |
| 10～80              | 5      | 10, 18, 28, 40, 90              |
| 0～9                | 5      | 10, 18, 28, 40, $80 + \theta_d$ |

[0107] <第1軌跡取得工程>

第1軌跡取得工程では、前記第1反射率測定工程で求めた前記第1反射率 $R(\alpha_{a1})$ 、 $R(\alpha_{a2})$ 、…の測定結果から、前記入射面A内で二次元的に変位する曲線としての、第1二等分ベクトル $H_{a1}$ 、 $H_{a2}$ 、…の終点の第1軌跡 $l$ を求める。

[0108] この第1二等分ベクトル $H_{a1}$ 、 $H_{a2}$ 、…は、入射面A内に在る各第1反射光 $V_{a1}$ 、 $V_{a2}$ 、…と前記入射光 $L_d$ との二等分ベクトルである。また、この第1二等分ベクトル $H_{a1}$ 、 $H_{a2}$ 、…は、各第1反射率 $R(\alpha_{a1})$ 、 $R(\alpha_{a2})$ 、…の大きさを各第1二等分ベクトル $H_{a1}$ 、 $H_{a2}$ 、…の長さ、すなわち $|H_{a1}| = |R(\alpha_{a1})|$ 、 $|H_{a2}| = |R(\alpha_{a2})|$ 、…と定義したものである。

[0109] このため、第1二等分ベクトル $H_{a1}$ 、 $H_{a2}$ 、…の終点の第1軌跡 $l$ は、入射面A内で二次元的に変位する曲線となる。また、この第1軌跡 $l$ は、各入射角 $\theta_d$ 毎に、第1反射光 $V_{a1}$ 、 $V_{a2}$ 、…の反射分布を近似的に示すものとなる。

[0110] ここに、図2に示されるように、被測定面Dをxy平面とし、この被測定面Dの入射点Pにおける法線をz軸とする空間内の直交座標P-xyzを想定すれば、入射面Aはxz平面となる。また、第1軌跡 $l$ の一端はz軸上の点(変角 $\alpha = 0$ 度のときの第1二等分ベクトル $H_a$ の終点)となる。さらに、第1軌跡 $l$ の他端が入射光ベクトル $L$ 上の点(変角 $\alpha = 2\theta_d$ 度のときの第1二等分ベクトル $H_a$ の終点)となったり、あるいは第1軌跡 $l$ の他

端側が入射光ベクトル $L$ 上の点(変角 $\alpha = 2\theta_d$ 度のときの第1二等分ベクトル $H_a$ の終点)を通ったりする。

[0111] 第1軌跡 $l$ を求める際、第1反射率測定工程で反射率を測定した測定点(測定変角)以外の変角についての反射率は、主に主成分分析により補間することができる。

[0112] 被測定面の反射率は測定変角に応じて変動するが、複数の所定の変角における反射率について主成分分析すれば、反射率についての特徴を求めることができ、その特徴量から所定の変角以外の変角における反射率を推定することができる。すなわち、測定変角における反射率を主成分分析し、その分析結果として得られる主成分を固有値として求め、かつ主成分ベクトルを固有ベクトルとして求め、これら固有値及び固有ベクトル並びに固有ベクトルに乗算するための係数で表した基本式を定めることで、この基本式から測定点以外の変角における反射率を推定することができる。

[0113] 以下、主成分分析による反射率の推定の原理について、簡単に説明する。

[0114] 波長 $\lambda_i$ において、変角 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ における反射率を、下記(4)に示す $p$ 個の要素をもつベクトル量 $X^i$ で表す。

$$X^i = (\rho_1^i, \rho_2^i, \dots, \rho_p^i)^T \quad \dots(4)$$

[0115] また、 $X^i$ のサンプルが $N$ 個あるとして $j$ 番目のサンプル $X_j^i$ を下記(5)とおく。

$$X_j^i = (\rho_{1j}^i, \rho_{2j}^i, \dots, \rho_{pj}^i)^T \quad \dots(5)$$

[0116] そして、 $N$ 個のサンプル $X_j^i (j=1, 2, \dots, N)$ を主成分分析して得られた固有値を $1_1, 1_2, \dots, 1_p (1_1 > 1_2 > \dots > 1_p)$ とし、これに対応する固有ベクトルを $b_1^i, b_2^i, \dots, b_p^i$ とする。ここで、 $b_j^i$ を下記(6)とおく。

$$b_j^i = (b_{1j}^i, b_{2j}^i, \dots, b_{pj}^i)^T \quad \dots(6)$$

[0117] そうすると、 $X_j^i$ は、主成分分析の原理により、下記(7)に示されるように、主成分分析で得られるベクトル $u^i$ 、固有ベクトル $b^i$ 及び係数 $k^i$ によって再構成される。

$$X_j^i = u^i + k_{1j}^i b_1^i + k_{2j}^i b_2^i + \dots + k_{pj}^i b_p^i \quad \dots(7)$$

[0118] ここに、ベクトル $u^i$ は、下記(8)式で示される平均値ベクトルである。

$$u^i = (u_1^i, u_2^i, \dots, u_p^i)^T \quad \dots(8)$$

ただし、

[0119] [数4]

$$u^i_k = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \rho^i_{km} \quad \dots\dots\dots (9)$$

である。

[0120] また、固有ベクトル $b^i_j$ は、下記(10)式で示される固有方程式を満たす $p$ 次元の直交基底である。

$$R^i b^i_j = \lambda^i_j b^i_j, \quad j=1, 2, \dots, p \quad \dots (10)$$

[0121] なお、 $R^i$ は下記(11)式で示される共分散行列である。

[0122] [数5]

$$R^i = \begin{bmatrix} c^i_{11} & c^i_{12} & \dots\dots\dots & c^i_{1p} \\ c^i_{21} & c^i_{22} & \dots\dots\dots & c^i_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c^i_{p1} & c^i_{p2} & \dots\dots\dots & c^i_{pp} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (11)$$

[0123] ここに、(11)式中の $c^i$ は下記(12)式で示される。

[0124] [数6]

$$c^i_{kj} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [\rho^i_{nk} - u^i_k] [\rho^i_{nj} - u^i_j] \quad \dots\dots\dots (12)$$

[0125] さらに、係数 $k^i_j$ は下記(13)式で表される。

$$k^i_{ij} = b^{iT}_{ij} X^i_j \quad \dots (13)$$

[0126] 前記(7)式は第1主成分から第 $p$ 主成分までを用いているが、主成分分析では $p$ より小さな $m$ を用いて第1主成分から第 $m$ 主成分までで表すことができる。これを要素で表記すると、下記(14)となる。

[0127] [数7]

$$\begin{bmatrix} \rho_{1j}^i \\ \rho_{2j}^i \\ \vdots \\ \rho_{pj}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1^i \\ u_2^i \\ \vdots \\ u_p^i \end{bmatrix} + k_{1j}^i \begin{bmatrix} b_{11}^i \\ b_{21}^i \\ \vdots \\ b_{p1}^i \end{bmatrix} + \dots + k_{mj}^i \begin{bmatrix} b_{1m}^i \\ b_{2m}^i \\ \vdots \\ b_{pm}^i \end{bmatrix} \dots (14)$$

[0128] 前記(14)式から理解されるように、任意の変角 $\alpha$ の反射率 $\rho$ は、平均ベクトル $u$ 、固有ベクトル $b$ 及び係数 $k$ により表現することができる。したがって、被測定面について測定した代表5変角等の反射率を用いて、係数 $k$ を求めれば、測定点以外の変角における反射率を前記(14)から導出することができる。この(14)式を係数 $k$ について解けば、下記(15)式が得られる。

[0129] [数8]

$$\begin{bmatrix} k_{1j}^i \\ k_{2j}^i \\ \vdots \\ k_{pj}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11}^i & b_{12}^i & \dots & b_{1m}^i \\ b_{21}^i & b_{22}^i & \dots & b_{2m}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{p1}^i & b_{p2}^i & \dots & b_{pm}^i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_{1j}^i - u_1^i \\ \rho_{2j}^i - u_2^i \\ \vdots \\ \rho_{pj}^i - u_p^i \end{bmatrix} \dots (15)$$

[0130] ここに、例えば代表5変角に対する反射率を $\rho_{1j}^i, \rho_{2j}^i, \dots, \rho_{5j}^i$ と表記し、前記(7)式において第5主成分までを考えれば、これら5つの変角に対して、下記(16)式が成り立つ。

[0131] [数9]

$$\begin{bmatrix} \rho_{1j}^i \\ \rho_{2j}^i \\ \vdots \\ \rho_{5j}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1^i \\ u_2^i \\ \vdots \\ u_5^i \end{bmatrix} + k_{1j}^i \begin{bmatrix} b_{11}^i \\ b_{21}^i \\ \vdots \\ b_{51}^i \end{bmatrix} + \dots + k_{5j}^i \begin{bmatrix} b_{15}^i \\ b_{25}^i \\ \vdots \\ b_{55}^i \end{bmatrix} \dots (16)$$

[0132] この(16)式を係数 $k_1^i, k_2^i, \dots, k_5^i$ について解けば、下記(17)式が得られる。

[0133] [数10]

$$\begin{bmatrix} k_{1j}^i \\ k_{2j}^i \\ \vdots \\ k_{5j}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11}^i & b_{12}^i & \dots & b_{15}^i \\ b_{21}^i & b_{22}^i & \dots & b_{25}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{51}^i & b_{52}^i & \dots & b_{55}^i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_{1j}^i - u_1^i \\ \rho_{2j}^i - u_2^i \\ \vdots \\ \rho_{5j}^i - u_5^i \end{bmatrix}$$

..... (17)

[0134] これにより、 $k_1^i, k_2^i, \dots, k_5^i$ を求め、前記(16)式に代入することによって、代表5変角等の測定点以外の変角における反射率を推定することができる。

[0135] また、変角 $\alpha$ が0～9度( $\alpha=0$ 度、1度、…、9度)の10個の反射率については誤差が大きいため、測定値に忠実に再現しても、その再現結果は信頼性が低くなる。しかし、CG(コンピュータグラフィクス)等の画像表示をする場合には、全変角における反射率のデータが必要であり、10度未満の変角における反射率のデータも必要となる。このとき、CG等における画像表示の滑らか性を向上させる観点より、変角 $\alpha$ が10度未満における反射率のデータについては、変角 $\alpha$ が10～90度における反射率特性の傾向を維持しつつこれに滑らかに連続するような反射率特性となるように推定することが望ましい。

[0136] そこで、本実施形態では、変角 $\alpha$ が10～90度における反射率のデータに基づいて、時系列分析することにより、変角 $\alpha$ が0～9度の反射率を推定する。この時系列分析による外挿は、反射率に対して直接行うのではなく、0～9度の変角における5つの主成分ベクトルに対して行うことが好ましい。0～9度の変角における5つの主成分ベクトルができれば、前記(16)式から0～9度の変角における反射率を推定して外挿することができる。

[0137] 時系列分析においては、 $t=1, 2, \dots, n$ に対する時系列データ $x_t$ が与えられたとき、これらの時系列データを分析して定式化することで、 $t=n+1, n+2, \dots$ に対する $x_t$ を予測することができる。このときの分析には、例えば、定式化を着実に実施できるBox-Jenkins法を利用することができる。

[0138] なお、変角  $\alpha$  が10度未満における反射率の推定には、前記時系列分析の他に、重回帰分析や曲線補間法等を利用することができる。

[0139] また、変角  $\alpha$  が90度を超える範囲については、反射率がほとんど変化しないため、反射率を測定せずに、変角  $\alpha$  が90度であるときの反射率で近似することができる。

[0140] ここに、変角  $\alpha$  が0度であるときの第1反射光  $V_a$  は、入射光  $L_d$  が入射面A内で正反射方向に反射した正反射光  $S_d$  である。そして、この正反射光  $S_d$  たる第1反射光  $V_a$  の第1二等分ベクトル  $H_a$  の終点は、第1軌跡取得工程で求める第1軌跡  $l$  の一端となる。また、変角  $\alpha$  が  $2\theta_d$  度であるときの第1反射光  $V_a$  は、入射光  $L_d$  の入射方向(光の射出側、すなわち再帰反射方向)に反射する反射光となるが、この変角  $\alpha$  が  $2\theta_d$  度であるときの第1反射光  $V_a$  の第1二等分ベクトル  $H_a$  の終点は入射光ベクトル  $L$  上の点となる。なお、第1軌跡  $l$  の一端(変角  $\alpha$  が0度であるときの第1反射光  $V_a$  の第1二等分ベクトル  $H_a$  の終点)は、第2軌跡取得工程で求める第2軌跡  $m$  の一端(変角  $\alpha$  が0度であるときの第2反射光  $V_b$  の第2二等分ベクトル  $H_b$  の終点)と一致する。また、入射光ベクトル  $L$  上に在る第1軌跡  $l$  の一点(変角  $\alpha$  が  $2\theta_d$  度であるときの第1反射光  $V_a$  の第1二等分ベクトル  $H_a$  の終点)は、第2軌跡取得工程で求める第2軌跡  $m$  の他端(変角  $\alpha$  が  $2\theta_d$  度であるときの第2反射光  $V_b$  の第2二等分ベクトル  $H_b$  の終点)と一致する。

[0141] <第2反射率測定工程>

第2反射率測定工程では、前記被測定面D上の入射点Pに入射角  $\theta_d$  で入射光  $L_d$  を入射させ、入射面A外における所定の変角  $\alpha$  で受光したときの、該入射面A外に在る第2反射光  $V_b$  の第2反射率  $R(\alpha_b)$  を測定する。

[0142] すなわち、この第2反射率測定工程では、前記被特定面D上の入射点Pに入射面A内において入射角  $\theta_d$  で入射光  $L_d$  を入射させる。そして、入射面A外における所定の変角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、…で受光したときの、入射面A外に在る第2反射光  $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の該入射光  $L_d$  に対する第2反射率  $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定する。

[0143] 本実施形態における第2反射率測定工程では、図3に示されるように、前記入射点Pを頂点とし、かつ該入射点Pにおける前記被測定面(xy平面)Dの法線たる回転軸としてのz軸と母線とが前記入射角  $\theta_d$  と同等の角度をなす円錐面上に在る第2反射光  $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の第2反射率  $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定する。すなわち、第2反射

率測定工程では、 $z$ 軸と角度  $\theta_d$  をなす円錐面上に在る第2反射光  $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の第2反射率  $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定する。

[0144] なお、図3に示されるように、 $z$ 軸と角度  $\theta_d$  をなす円錐面上に在る第2反射光  $V_b$  の方位角を  $\phi$  とすれば、第2反射光  $V_b$  は、 $V_b = (\sin \theta_d \cos \phi, \sin \theta_d \sin \phi, \cos \theta_d)$  と表される。

[0145] この第2反射率測定工程で第2反射率  $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定するときの測定変角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、…として、本実施形態では、表2に示されるように、10度、18度、28度、40度及び90度の代表5変角の他に、 $(2\theta_d - 1)$ 度を採用する。そして、入射角  $\theta_d$  の大きさに応じて測定可能な測定変角がこれらの中から採択される。

[0146] すなわち、入射角  $\theta_d$  が46～80度 ( $\theta_d = 46$ 度、47度、…、80度)であるときは、測定変角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、…として、10度、18度、28度、40度及び90度の全ての代表5変角が採択される。

[0147] また、入射角  $\theta_d$  が30～45度 ( $\theta_d = 30$ 度、31度、…、45度)であるときは、測定変角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、…として、10度、18度、28度及び40度の代表5変角のうちの4点が採択される。

[0148] ここに、入射角  $\theta_d$  が30～45度であるとき、変角  $\alpha$  が代表5変角としての90度となるような反射光は、 $z$ 軸と角度  $\theta_d$  をなす円錐面上にくることがない。このため、入射角  $\theta_d$  が30～44度であるとき、変角  $\alpha$  が代表5変角としての90度となるような反射光の反射率は、第2反射率測定工程では測定しない。ただし、第2軌跡取得工程で第2軌跡  $m$  を求める際に、変角  $\alpha$  が代表5変角としての90度となる反射光の反射率の代わりに、第1軌跡取得工程で求めた、変角  $\alpha$  が  $2\theta_d$  度となる反射光の反射率を計算に用いる。

[0149] また、入射角  $\theta_d$  が45度であるとき、変角  $\alpha$  が代表5変角としての90度 ( $= 2\theta_d$  度)となる反射光の反射率も、第2反射率測定工程で実際に測定することはしない。そして、第2軌跡取得工程で第2軌跡  $m$  を求める際には、変角  $\alpha$  が代表5変角としての90度となる反射光の反射率の代わりに、第1軌跡取得工程で求めた、変角  $\alpha$  が  $2\theta_d$  度となる反射光の反射率を計算に用いる。

[0150] さらに、入射角  $\theta_d$  が1～29度 ( $\theta_d = 1$ 度、2度、…、29度)であるときは、測定変角

$\alpha_1, \alpha_2, \dots$ として、1度、2度、 $\dots$ 、 $(2\theta_d - 1)$ 度が採択される。すなわち、入射角  $\theta_d$  が1～29度であるときは、1～ $(2\theta_d - 1)$ 度の各角度で全て反射率を測定する。

[0151] 例えば、入射角  $\theta_d$  が1度であるときは、測定変角  $\alpha_1$  として1度が採択され、また、入射角  $\theta_d$  が2度であるときは、測定変角  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ として1度、2度及び3度が採択され、入射角  $\theta_d$  が3度であるときは、測定変角  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ として1度、2度、 $\dots$ 及び8度が採択され、 $\dots$ 、入射角  $\theta_d$  が29度であるときは、測定変角  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ として1度、2度 $\dots$ 及び57度が採択される。

[0152] なお、入射角  $\theta_d$  が1～29度であるとき、変角が  $2\theta_d$  となる反射光の反射率は、前記第1反射率測定工程で測定しているか、あるいは前記第1軌跡取得工程で計算により求めているため、第2反射率測定工程では測定しない。

[0153] また、入射角  $\theta_d$  が81～90度 ( $\theta_d = 81$ 度、82度、 $\dots$ 、90度)であるときは、入射光  $L_d$  が上記測定不可能範囲内に入ることから、その第2反射光  $V_a$  の反射率を測定できない。このため、本実施形態では、入射角  $\theta_d$  が81～90度の入射光  $L_d$  については、その第2反射光  $V_b$  を測定することなく、入射角  $\theta_d$  が80度であるときの入射光  $L_d$  に対する第2反射光  $V_b$  の反射率をそのまま用いて計算する。

[0154] さらに、反射率の相互性により、変角  $\alpha$  が負になるような測定点については反射率を測定しない。

[0155] したがって、本実施形態における第2反射率測定工程で第2反射率  $R(\alpha_b)$  を測定する測定点の合計は、下記(18)式より1080(点)となる。

[0156] [数11]

$$5 \times 35 + 4 \times 16 + \sum_{\theta_d=1}^{29} (2\theta_d - 1) = 1080 \quad \dots\dots\dots (18)$$

[0157] [表2]

| 第2反射率測定工程（入射面A外）   |                 |                            |
|--------------------|-----------------|----------------------------|
| 入射角 $\theta_d$ （度） | 測定変角の数          | 測定変角の角度（度）                 |
| 81～90              | —               | —                          |
| 46～80              | 5               | 10, 18, 28, 40, 90         |
| 30～45              | 4               | 10, 18, 28, 40             |
| 1～29               | $2\theta_d - 1$ | 1, 2, ..., $2\theta_d - 1$ |

[0158] <第2軌跡取得工程>

第2軌跡取得工程では、前記第2反射率測定工程で求めた前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…の測定結果から、前記入射面A外で三次元的に変位する曲線としての、第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…の終点の第2軌跡mを求める。

[0159] この第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…は、入射面A外にあり、z軸と角度 $\theta_d$ をなす円錐面上に在る第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…と前記入射光 $L_d$ との二等分ベクトルである。また、この第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…は、各第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…の大きさを各第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…の長さ、すなわち $|H_{b1}| = |R(\alpha_{b1})|$ 、 $|H_{b2}| = |R(\alpha_{b2})|$ 、…と定義したものである。

[0160] このため、第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…の終点の第2軌跡mは、入射面A外で三次元的に変位する曲線となる。また、この第2軌跡mは、各入射角 $\theta_d$ 毎に、第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の反射分布を近似的に示すものとなる。

[0161] ここに、第2軌跡mの一端はz軸上の点(変角 $\alpha = 0$ 度の際の第2二等分ベクトル $H_b$ の終点)となる。また、第2軌跡mの他端は入射光ベクトル $L$ 上の点(変角 $\alpha = 2\theta_d$ 度の際の第2二等分ベクトル $H_a$ の終点)となる。

[0162] 第2軌跡mを求める際、第2反射率測定工程で反射率を測定した測定点(測定変角)以外の変角についての反射率は、前記第1軌跡取得工程と同様に補間することができる。

[0163] <2交点座標取得工程>

前述したように、カラー・シフト塗装色が施された被測定面に入射光が入射したとき

の、該入射光とその反射光との二等分ベクトルにより微小面の分布を考えれば、カラー・シフト塗装色における微小面の分布は入射点Pを中心とする楕円体の一部で近似できる。このため、この入射点Pを中心とする楕円体の一部について、被測定面と平行な平面(z軸に垂直な一つの平面 $z=z_i$ )で切った楕円(被測定面の入射点Pにおける法線たるz軸を中心とする楕円)の一部に着目すれば、その楕円を示す数式により、カラー・シフト塗装色についての反射分布を近似的にモデル化できる。

[0164] そこで、2交点座標取得工程では、図4に示されるように、前記直交座標P-xyzにおけるz軸に垂直な平面 $z=z_i$ を想定する。そして、この平面 $z=z_i$ と、前記第1軌跡取得工程で求めた前記第1軌跡lとの交点 $Q_{li}(x_{li}, 0, z_i)$ を求める。また、平面 $z=z_i$ と、前記第2軌跡取得工程で求めた前記第2軌跡mとの交点 $Q_{mi}(x_{mi}, y_{mi}, z_i)$ を求める。

[0165] こうして求めた交点 $Q_{li}(x_{li}, 0, z_i)$ は、平面 $z=z_i$ における第1二等分ベクトル $H_a$ の終点である。また、交点 $Q_{mi}(x_{mi}, y_{mi}, z_i)$ は、平面 $z=z_i$ 上における第2二等分ベクトル $H_b$ の終点である。

[0166] <モデル式取得工程>

そして、モデル式取得工程では、図4に示されるように、前記2交点座標取得工程で求めた前記交点 $Q_{li}$ 及び $Q_{mi}$ から、前記平面 $z=z_i$ 上における二等分ベクトル $H_i$ の終点の軌跡 $n(x, y, z_i)$ を、楕円を示す数式で近似してモデル化した、近似モデル式(19)を求める。

$$(x/a)^2 + (y/b)^2 = 1, z = z_i \quad \dots (19)$$

[0167] この近似モデル式(19)は、例えば既知の2点を代入して得られる2元連立方程式の解を利用することで、 $Q_{li}(x_{li}, 0, z_i)$ 及び $Q_{mi}(x_{mi}, y_{mi}, z_i)$ から求めることができる。なお、近似モデル式(19)において、aは、入射面A内における軌跡nのx座標であり、 $a = x_{li}$ である。また、近似モデル式(19)において、bは、入射面Aと垂直な平面内における軌跡nのy座標である。

[0168] <全体軌跡取得工程>

さらに、全体軌跡取得工程では、 $z_i = 0 \sim \infty$ として、前記近似モデル式(19)から、前記第1反射光 $V_a$ 及び前記第2反射光 $V_b$ 以外の反射光 $V'$ と前記入射光 $L_d$ との二等分ベクトル $H'$ の終点全体の全体軌跡 $n'(x, y, z)$ を近似的に求める。

[0169] そして、本実施形態の反射率推定方法では、前記第1反射率測定工程、前記第1軌跡取得工程、前記第2反射率測定工程、前記第2軌跡取得工程、前記2交点座標取得工程、前記モデル式取得工程及び前記全体軌跡取得工程を、0～90度の範囲内にある複数の入射角  $\theta_d = \theta_1, \theta_2, \dots = 0$  度、1度、 $\dots$ 、90度についての入射光  $L_d = L_1, L_2, \dots, L_{91}$  毎に繰り返す。ただし、入射角  $\theta_d$  が81～90度の入射光  $L_d$  については、前述の通り、入射光  $L_d$  が測定不可能範囲に入るため、反射率の測定はしない。

[0170] これにより、本実施形態の反射率推定方法では、三次元的な反射光分布を求めることができるので、入射面A内にある変角  $\alpha$  のみならず、入射面A外を含む三次元における変角  $\alpha$  についても、その反射率を推定することが可能となる。

[0171] また、本実施形態の反射率推定方法では、反射率の測定点の合計が  $405 + 1080 = 1485$  (点) となる。この測定点の合計 (1485点) は、前述した全点測定方法における全測定点数  $48139 (= 23 \times 91 \times 23)$  点の約3%に相当する。よって、本実施形態の反射率推定方法によれば、前述した全点測定方法に対して、約97%分の測定点の削減が可能になった。

[0172] さらに、本実施形態では、前記第2反射率測定工程で、 $z$  軸と入射角  $\theta_d$  をなす円錐面上に第2反射光  $V_b$  を採っているので、測定方法が単純となり、入射面A外における第2反射光  $V_b$  の反射率  $R(\alpha_b)$  を測定する際に測定漏れ等のミスを減らすことができる。

[0173] (実施形態2)

本実施形態の反射率推定方法は、前記実施形態1の反射率推定方法において、第2反射率測定工程を変更したものである。

[0174] 前記実施形態1における前記第2反射率測定工程のように、 $z$  軸と入射角  $\theta_d$  をなす円錐面上に第2反射光  $V_b$  を採った場合、変角  $\alpha$  が0度であるときに、前記第2軌跡  $m$  の一端が、 $z$  軸上の一点で、前記第1軌跡  $l$  の一端と一致する。また、変角  $\alpha$  が  $2\theta_d$  度であるときに、前記第2軌跡  $m$  の他端が、入射光ベクトル  $L$  上の一点で、前記第1軌跡  $l$  の一点と一致する。このことは、変角  $\alpha$  が0度及び変角  $\alpha$  が  $2\theta_d$  度では、楕円が作れないことを意味する。また、変角  $\alpha$  が0度又は  $2\theta_d$  度の近傍にあるときは、楕円を

形成するための前記2交点 $Q_{li}$ 及び $Q_{mi}$ が互いに接近することになるため、これら2交点 $Q_{li}$ 及び $Q_{mi}$ から求める楕円の精度が低下する。

[0175] ここに、図5に示されるように、前記入射面Aたるxz平面と方位角 $\phi_i$  ( $\phi_1=90$ 度、 $\phi_2=89$ 度、 $\phi_3=88$ 度、…)をなし、かつ前記入射点Pにおける前記被測定面(xy面)Dの法線たるz軸を含む平面 $B_i$  (方位角 $\phi_1$ が90度の平面 $B_1$ 、方位角 $\phi_2$ が89度の平面 $B_2$ 、方位角 $\phi_3$ が88度の平面 $B_3$ 、…)を想定する。

[0176] 前記第1軌跡lと前記第2軌跡mとを極力引き離して、前記楕円を示す数式の信頼性を向上させるという観点からは、第2軌跡mは、方位角 $\phi_1$ が90度の平面 $B_1$ 内で二次元的に変位するものであることが最良であり、該平面 $B_1$ 内で二次元的に変位するものになるべく近いものであることが望ましい。

[0177] そして、図5に示されるように、入射光Lと第2反射光 $V_{bi}$ との第2二等分ベクトル $H_{bi}$ が方位角 $\phi_i$ の平面 $B_i$ 内に在るような第2反射光 $V_{bi}$ を考え、この第2二等分ベクトル $H_{bi}$ がz軸となす角を $\phi$ とし、前記正反射光Sと第2反射光 $V_{bi}$ とがなす角を変角 $\alpha_i$ としたとき、第2軌跡mが平面 $B_1$ 内に在るためには、全ての變角 $\alpha_i$ における第2二等分ベクトル $H_{bi}$ が平面 $B_1$ 内になければならない。

[0178] しかし、以下に説明するように、入射角 $\theta$ を一定とした場合に、方位角 $\phi_i$ が90度から小さくなる平面 $B_i$ ほど、その平面 $B_i$ 内で第2二等分ベクトル $H_{bi}$ が動くことのできる範囲が増大する。すなわち、方位角 $\phi_1$ が90度の平面 $B_1$ 内では、第2二等分ベクトル $H_{bi}$ が動くことのできる範囲が他の平面 $B_2$ 、 $B_3$ 、…と比べて最小となる。

[0179] まず、平面 $B_1$ 内に在る第2二等分ベクトル $H_{bi}$ を、下記(20)式で表せば、入射光Lは下記(21)式であるから、第2反射光 $V_{bi}$ は下記(22)式で表される。

$$H_{bi} = (\sin \phi \cos \phi_i, \sin \phi \sin \phi_i, \cos \phi) \quad \cdots (20)$$

$$L = (\sin \theta, 0, \cos \theta) \quad \cdots (21)$$

$$\begin{aligned} V_{bi} &= 2(L \cdot H_{bi})H_{bi} - L \\ &= 2(\sin \theta \sin \phi \cos \phi_i + \cos \theta \cos \phi) \cdot (\sin \phi \cos \phi_i, \sin \phi \sin \phi_i, \cos \phi) \\ &\quad - (\sin \theta, 0, \cos \theta) \quad \cdots (22) \end{aligned}$$

[0180] すなわち、第2反射光 $V_{bi}$ のx座標、y座標、z座標をそれぞれ $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$ とすると、 $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$ はそれぞれ下記(23)式、(24)式、(25)式で表される。

$$V_x = 2(\sin \theta \sin \phi \cos \phi_i + \cos \theta \cos \phi) \cdot (\sin \phi \cos \phi_i) - \sin \theta \quad \cdots (23)$$

$$V_y = 2(\sin \theta \sin \phi \cos \phi_i + \cos \theta \cos \phi) \cdot (\sin \phi \sin \phi_i) \quad \cdots (24)$$

$$V_z = 2(\sin \theta \sin \phi \cos \phi_i + \cos \theta \cos \phi) \cdot (\cos \phi) - \cos \theta \quad \cdots (25)$$

[0181] よって、第2反射光 $V_{bi}$ の $z$ 座標 $V_z$ は、下記(26)で表される。

[0182] [数12]

$$\begin{aligned} V_z &= \sin \theta \cos \phi_i \sin 2\psi + \cos \theta \cos 2\psi \\ &= \sqrt{\sin^2 \theta \cos^2 \phi_i + \cos^2 \theta} \cdot \sin(2\psi + \xi) \quad \cdots \cdots \cdots (26) \end{aligned}$$

[0183] ただし、 $\xi$ は下記(27)式を満たす。

$$\tan \xi = \cos \theta / (\sin \theta \cos \phi_i) \quad \cdots (27)$$

[0184] また、第2反射光 $V_{bi}$ が $xy$ 平面となす角 $\eta$ は、下記(28)式で表される。

[0185] [数13]

$$\eta = \tan^{-1} \left( \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \right) \quad \cdots \cdots \cdots (28)$$

[0186] ここに、第2反射光 $V_{bi}$ は、測定機の機構上の制約から、前記測定不可能範囲内に入ることができないので、第2反射光 $V_{bi}$ が $xy$ 平面となす角 $\eta$ は $\eta \geq 10$ となる。そして、 $\eta \geq 10$ を満たす最小の $\eta$ を与える $\phi$ の最大値を $\phi_{\max}$ とする。そうすると、入射角 $\theta$ が一定の場合、 $\phi_{\max}$ は方位角 $\phi_i$ の関数となるが、 $\phi_{\max}$ は方位角 $\phi_i$ が減少するに連れて大きくなる。

[0187] この入射角 $\theta$ が一定の場合における、 $\phi_{\max}$ と方位角 $\phi_i$ との関係は、前記(28)式を用いると、図6のようになる。この図6より、入射角 $\theta$ を一定とした場合に、方位角 $\phi_i$ が90度から小さくなる平面 $B_i$ ほど、その平面 $B_i$ 内で第2二等分ベクトル $H_{bi}$ が動くことのできる範囲が増大することがわかる。

[0188] また、図7に示されるように、入射角 $\theta$ が一定である場合、平面 $B_i$ の方位角 $\phi_i$ と、その方位角 $\phi_i$ の平面 $B_i$ 内に第2二等分ベクトル $H_{bi}$ が在るような第2反射光 $V_{bi}$ の変角 $\alpha_i$ の最大変角 $\alpha_{\max}$ との間には、方位角 $\phi_i$ が小さくなるほど、最大変角 $\alpha_{\max}$ が大きくなる。

なるという関係がある。ここに、最大変角  $\alpha_{\max}$  とは、入射光L及び第2反射光 $V_{bi}$ が前記測定不可能範囲内に入らない場合において、平面 $B_i$ 内に第2二等分ベクトル $H_{bi}$ が在るような第2反射光 $V_{bi}$ と前記正反射光Sとがなす変角  $\alpha_i$  のうち、最大となる変角をいう。

[0189] このため、図7からわかるように、例えば入射角  $\theta$  が60度である場合、方位角  $\phi_1$  が90度の平面 $B_1$ では、最大変角  $\alpha_{\max}$  が約32～33度であるため、前記代表5変角のうち10度、18度及び28度のみを採ることができ、これら3つの変角における第2反射光 $V_{bi}$ の第2二等分ベクトル $H_{bi}$ が前記平面 $B_1$ 内に在ることになる。そして、前記代表5変角の40度を採るためには、最大変角  $\alpha_{\max}$  が約40度以上となるように方位角  $\phi_i$  を約80度以上としなければならず、また、前記代表5変角の90度を採るためには、最大変角  $\alpha_{\max}$  が約90度以上となるように方位角  $\phi_i$  を約45度以上としなければならない。

[0190] したがって、方位角  $\phi_1$  が90度の平面 $B_1$ 内でのみ二次元的に変位するような第2軌跡 $m$ を求めることはできない。

[0191] そこで、本実施形態における第2反射率測定工程では、第2軌跡 $m$ を、方位角  $\phi_1$  が90度の平面 $B_1$ 内で二次元的に変位するものになるべく近いものとするために、以下の工程を実施する。

[0192] まず、第1工程では、前記代表5変角のうちの角度の小さい方からできるだけ多くを採れる範囲内で、前記平面 $B_1$ 内に前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…が在るような前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定する。

[0193] そして、直前の第 $(f-1)$ 工程では、平面 $B_{f-1}$ 内に前記第2二等分ベクトルが在るようには前記代表5変角の少なくとも一部を採れないために、前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…の少なくとも一部を測定できなかったときは、該第 $(f-1)$ 工程で採れなかった該代表5変角の少なくとも一部のうちの角度の小さい方からできるだけ多くを採れる範囲内で、前記平面 $B_{f-1}$ ではなく平面 $B_f$ 内に前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…が在るような前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定する第 $f$ 工程を、第2工程、第3工程、…として繰り返し実施する。

[0194] すなわち、第1工程では、平面 $B_1$ 内に前記第2二等分ベクトルが在るようには前記

代表5変角の少なくとも一部を採れないために、前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、 $\dots$ の少なくとも一部を測定できなかったときは、該第1工程で採れなかった該代表5変角の少なくとも一部のうちの角度の小さい方からできるだけ多くを採れる範囲内で、前記平面 $B_1$ 内ではなく平面 $B_2$ 内に前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、 $\dots$ が在るような前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、 $\dots$ の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、 $\dots$ を測定する第2工程を実施する。

[0195] また、第2工程では、平面 $B_2$ 内に前記第2二等分ベクトルが在るようには前記代表5変角の少なくとも一部を採れないために、前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、 $\dots$ の少なくとも一部を測定できなかったときは、該第2工程で採れなかった該代表5変角の少なくとも一部のうちの角度の小さい方からできるだけ多くを採れる範囲内で、前記平面 $B_2$ 内ではなく平面 $B_3$ 内に前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、 $\dots$ が在るような前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、 $\dots$ の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、 $\dots$ を測定する第3工程を実施する。

[0196] さらに、第3工程では、平面 $B_3$ 内に前記第2二等分ベクトルが在るようには前記代表5変角の少なくとも一部を採れないために、前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、 $\dots$ の少なくとも一部を測定できなかったときは、前記第3工程と同様にして、第4工程を実施する。

[0197] こうして第1工程、第2工程、第3工程、 $\dots$ と順に実施することにより、前記代表5変角における前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、 $\dots$ が前記平面 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $\dots$ 内のいずれかに在るような前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、 $\dots$ の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、 $\dots$ を測定する。

[0198] ここに、前記第1工程、第2工程、第3工程、 $\dots$ における測定点(測定変角)は、以下のようにして決定することができる。

[0199] 光源 $L$ の被測定面 $D$ に対する正反射光 $S$ は、下記(29)式で表されるから、正反射光 $S$ と第2反射光 $V_{bi}$ とがなす変角を $\alpha_i$ とすれば、下記(30)式より、 $\phi$ は下記(31)式で与えられる。

$$S = (\sin \theta, 0, \cos \theta) \quad \dots(29)$$

$$S \cdot V_{bi} = 1 \cdot 1 \cdot \cos \alpha_i$$

$$= 2(\cos^2 \theta \cos^2 \phi - \sin^2 \theta \sin^2 \phi \cos^2 \phi_i) - \cos 2\theta \quad \cdots (30)$$

[0200] [数14]

$$\sin \psi = \sqrt{\frac{\cos \phi_i - 1}{2 \{ \sin^2 \theta (1 - \cos^2 \phi_i) - 1 \}}} \quad \cdots (31)$$

[0201] 上記(31)式より、正反射光Sと第2反射光V<sub>bi</sub>とがなす変角 $\alpha_i$ と、方位角 $\phi_i$ とが決められ、 $\phi$ が決まる。

[0202] <第1工程>

最初は、方位角 $\phi_i$ を $\phi_1 = 90$ 度として、変角 $\alpha_i$ が0度、1度、2度、…とどこまで採れるかを調べる。与えられた入射角 $\theta$ に対して、図6に示されるように、 $\phi$ が動くことのできる範囲に注意しながら、前記(31)式を用いて、 $\alpha_i = 0$ 度、1度、2度、…に対する $\phi$ を求める。そして、方位角 $\phi_1 = 90$ 度での前記最大変角 $\alpha_{\max}$  (図7参照)を $\alpha_{90}$ とおく。すなわち、方位角 $\phi_1 = 90$ 度では、変角 $\alpha_i$ を $\alpha_i = 0$ 度、1度、2度、…、 $\alpha_{90}$ とする。

[0203] そして、求めた変角 $\alpha_i$ が前記代表5変角たる10度、18度、28度、40度、90度の小さい方からいずれかに一致するかどうかを調べる。もし、方位角 $\phi_1 = 90$ 度のとき、変角 $\alpha_i$ が代表5変角のいずれかに一致する(又は近似できる)場合は、そのときの方位角 $\phi_1 = 90$ 度、 $\phi$ 及び $\alpha_{90}$ 、並びにそのとき一致する(又は近似できる)代表5変角10度、18度、…の組( $\phi_1 = 90$ 度、 $\phi$ 、 $\alpha_{90}$ 、10度、18度、…)を記憶する。この記憶した代表5変角10度、18度、…の組が、前記第1工程で測定する測定点(測定変角)となる。

[0204] <第2工程>

次に、方位角 $\phi_i$ を1度減らし、 $\phi_2 = 89$ 度として、上記と同様に、変角 $\alpha_i$ が $\alpha_i = \alpha_{90} + 1$ 、 $\alpha_{90} + 2$ 、 $\alpha_{90} + 3$ 、…がどこまで採れるかを調べ、それぞれの $\alpha_i$ に対応する $\phi$ を前記(31)式より求める。

[0205] そして、 $\phi_2 = 89$ 度での前記最大変角 $\alpha_{\max}$ を $\alpha_{89}$ とおく。すなわち、 $\phi_2 = 89$ 度では、変角 $\alpha_i$ を $\alpha_i = \alpha_{90} + 1$ 、 $\alpha_{90} + 2$ 、 $\alpha_{90} + 3$ 、… $\alpha_{89}$ とする。そして、 $\phi_1 = 90$ 度で

の測定変角とは異なる( $\phi_1 = 90$ 度での測定変角よりも大きな)代表5変角があるかどうかを調べる。もし、そのような代表5変角があれば、そのときの方位角 $\phi_2 = 89$ 度、 $\phi$ 及び $\alpha_{89}$ 、並びにそのとき一致する(又は近似できる)代表5変角…、40度、90度の組( $\phi_2 = 89$ 度、 $\phi$ 、 $\alpha_{89}$ 、…、40度、90度)を同様に記憶する。なお、そのような代表5変角がなければ何もしない。この記憶した代表5変角…、40度、90度の組が、前記第2工程で測定する測定点(測定変角)となる。

[0206] <第3工程、第4工程、…>

さらに、方位角 $\phi_i$ を1度減らし、 $\phi_3 = 88$ 度として、上記と同様に前記第3工程で測定する測定点を求め、以降、方位角 $\phi_i$ を $\phi_i = 87$ 度、86度、…、0度と1度ずつ減らして同様の手続を進める。

[0207] こうしてすべての方位角 $\phi_i$ ( $\phi_i = 0 \sim 90$ 度)に対して、変角 $\alpha_i$ が代表5変角10度、18度、28度、40度、90度に一致する(又は近似できる)まで続ける。

[0208] なお、いかなる方位角 $\phi_i$ 及び $\phi$ に対しても、測定変角として代表5変角の90度が採れない場合は、方位角 $\phi_i$ を変化させ、例えば、 $\alpha_i = 70$ 度となった時点で、 $\alpha_i = 70$ 度を $\alpha_i = 90$ 度の代わりの測定変角とすることができる。

[0209] 以上の操作は、幾何学的な条件にのみ関係するため、測定機が決まって前記測定不可能範囲が決まれば、測定を実施する前に測定すべき点を全部求めることができる。したがって、すべての入射角 $\theta$ ( $\theta = 0 \sim 90$ 度について、方位角 $\phi_i$ を変化させながら、前記代表5変角を求めることができる。

[0210] こうして方位角 $\phi_i$ 及び $\phi$ を変化させて求めた $\alpha_i = 0$ 度、1度、2度、…、90度のそれぞれに対する方位角 $\phi_i$ 及び $\phi$ が決まる。このため、前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…の方向が決まる。したがって、この第2反射率測定工程で求めた、代表5変角10度、18度、28度、40度、90度における第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、 $R(\alpha_{b3})$ 、 $R(\alpha_{b4})$ 、 $R(\alpha_{b5})$ から、前記実施形態1と同様にして、すべての変角 $\alpha_i$ ( $\alpha_i = 0$ 度、1度、2度、…、90度)における第2反射率 $R(\alpha_b)$ を求めることができる。よって、前記実施形態1と同様、前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…上に、 $|H_b| = |R(\alpha_b)|$ となる点をとれば、例えば図8に示されるような、前記入射面A外で三次元的に変位する曲線としての第2軌跡 $m$ を求めることができる。

- [0211] こうして本実施形態で得られた第2軌跡 $m$ は、入射面 $A$ 内の前記第1軌跡 $l$ と極力離れることになるため、反射光分布を示す楕円の数式をより正確に特定することができ、反射率の推定をより高精度に行うことが可能となる。
- [0212] また、計算の効率化と、測定時間の短縮のために、入射角  $\theta$  が前記測定不可能範囲に入るとき、すなわち  $\theta = 81$ 度、 $82$ 度、 $\cdots$ 、 $90$ 度のときは、 $\theta = 80$ 度のときの反射率を使うことにすると、本実施形態における第2反射率測定工程で第2反射率 $R(\alpha_b)$ を測定する測定点の数は、 $81 \times 5 = 405$ (点)となる。
- [0213] したがって、本実施形態の反射率推定方法では、前記第1反射率測定工程及び第2反射率測定工程における反射率の測定点の合計は、 $405 + 405 = 810$ (点)となる。この測定点の合計(810点)は、前述した全点測定方法における全測定点数48139( $= 23 \times 91 \times 23$ )点の約2%に相当する。よって、本実施形態の反射率推定方法によれば、前述した全点測定方法に対して、約98%分の測定点の削減が可能になった。

## 実施例

- [0214] (実施例1)
- 前記実施形態1で説明した反射率推定方法に準ずる方法により、カラー・シフト塗装色を車体に塗った自動車の塗装面について、測定機として三次元分光光度計(「GCMS-4」、村上色彩製)を用いて、測定した。
- [0215] その結果、この測定に要した時間は約4時間であった。
- [0216] また、測定した反射率をLUT(Look Up Table)に記憶し、6CPU(Intel Xeon 3.06GHz)、解像度SXGAのサイズで計算したところ、画像の計算時間は12分24秒であった。
- [0217] さらに、画像の正確さの評価を行った。これは、前述した全点測定方法による画像を正として、本実施例の方法と、前述した従来の5角度法との差を、画像と数値で比較した。
- [0218] その結果、全点測定方法と本実施例の方法とでは、差異がほとんどなく、ハイライト近傍(変角10度以内)を除く部位における平均色差が2.76であった。
- [0219] これに対し、全点測定方法と前述した従来の5角度法とでは、大きな差があり、ハイ

ライト近傍(変角10度以内)を除く部位における平均色差が20.50であった。

[0220] また、本実施例の方法で色再現した画像は、色合いや明暗の変化が全点測定方法のものと類似しており、前述した従来 of 5 角度法と比べても格段と改善されていた。

[0221] よって、本実施例の方法によれば、前述した従来 of 5 角度法では表現できなかったカラー・シフト塗装色についても、良好に色再現することが可能になった。

## 請求の範囲

- [1] 被測定面上の入射点Pに入射光Lを所定の入射角  $\theta$  で入射させたときに該入射光Lが入射面A内で正反射した正反射光Sと、該入射光Lが該入射点Pで反射して受光される反射光Vとがなす角を変角  $\alpha$  として、該入射面A内及び入射面A外にある任意の変角における反射率を推定する反射率推定方法であつて、

前記入射面A内において前記入射点Pに入射角  $\theta_d$  で入射光  $L_d$  を入射させ、該入射面A内における所定の变角  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$  で受光したときの、該入射面A内に在る第1反射光  $V_{a1}, V_{a2}, \dots$  の該入射光  $L_d$  に対する第1反射率  $R(\alpha_{a1}), R(\alpha_{a2}), \dots$  を測定する第1反射率測定工程と、

前記入射光  $L_d$  と各前記第1反射光  $V_{a1}, V_{a2}, \dots$  との二等分ベクトルをそれぞれ第1二等分ベクトル  $H_{a1}, H_{a2}, \dots$  とするとともに、前記第1反射率  $R(\alpha_a)$  の大きさを  $|H_a| = |R(\alpha_a)|$  と定義して、前記第1反射率  $R(\alpha_{a1}), R(\alpha_{a2}), \dots$  の測定結果から、前記入射面A内で二次元的に変位する曲線としての、該第1二等分ベクトル  $H_{a1}, H_{a2}, \dots$  の終点の第1軌跡lを求める第1軌跡取得工程と、

前記入射面A内において前記入射点Pに前記入射角  $\theta_d$  で前記入射光  $L_d$  を入射させ、入射面A外における前記変角  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$  で受光したときの、該入射面A外に在る第2反射光  $V_{b1}, V_{b2}, \dots$  の該入射光  $L_d$  に対する第2反射率  $R(\alpha_{b1}), R(\alpha_{b2}), \dots$  を測定する第2反射率測定工程と、

前記入射光  $L_d$  と各前記第2反射光  $V_{b1}, V_{b2}, \dots$  との二等分ベクトルをそれぞれ第2二等分ベクトル  $H_{b1}, H_{b2}, \dots$  とするとともに、前記第2反射率  $R(\alpha_b)$  の大きさを  $|H_b| = |R(\alpha_b)|$  と定義して、前記第2反射率  $R(\alpha_{b1}), R(\alpha_{b2}), \dots$  の測定結果から、前記入射面A外で三次元的に変位する曲線としての、該第2二等分ベクトル  $H_{b1}, H_{b2}, \dots$  の終点の第2軌跡mを求める第2軌跡取得工程と、

互いに直交し前記入射点Pを原点として共有するx軸、y軸及びz軸を有するとともに、前記被測定面がxy平面となり且つ該入射点Pを含むxz平面が前記入射面Aとなる空間内の直交座標P-xyzを想定したとき、z軸に垂直な平面  $z = z_i$  と前記第1軌跡l及び前記第2軌跡mとの交点  $Q_{li}(x_{li}, 0, z_i)$  及び  $Q_{mi}(x_{mi}, y_{mi}, z_i)$  を求める2交点座標取得工程と、

前記交点 $Q_{li}$ 及び $Q_{mi}$ から、前記平面 $z=z_i$ における二等分ベクトル $H_i$ の終点の軌跡 $n(x, y, z_i)$ を、該交点 $Q_{li}$ 及び $Q_{mi}$ を通るなめらかな曲線を示す数式で近似してモデル化した、近似モデル式を求めるモデル式取得工程と、

$z_i=0\sim\infty$ として、前記近似モデル式から、前記第1反射光 $V_a$ 及び前記第2反射光 $V_b$ 以外の反射光 $V'$ と前記入射光 $L_d$ との二等分ベクトル $H'$ の終点全体の全体軌跡 $n'(x, y, z)$ を近似的に求める全体軌跡取得工程と、を備え、

前記変角 $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ は、 $0\sim 90$ 度の範囲内で定められた $N$  ( $1\leq N\leq 89$ )個の代表 $N$ 変角から選ばれる少なくとも一つを含み、

前記第1反射率測定工程、前記第1軌跡取得工程、前記第2反射率測定工程、前記第2軌跡取得工程、前記2交点座標取得工程、前記モデル式取得工程及び前記全体軌跡取得工程を、 $0\sim 90$ 度の範囲内にある複数の入射角 $\theta_d = \theta_1, \theta_2, \dots$ についての入射光 $L_d = L_1, L_2, \dots$ 毎に繰り返すことを特徴とする反射率推定方法。

[2] 前記交点 $Q_{li}$ 及び $Q_{mi}$ を通るなめらかな曲線は楕円であることを特徴とする請求項1に記載の反射率推定方法。

[3] 前記第2反射率測定工程では、前記入射点 $P$ を頂点とし、かつ該入射点 $P$ における前記被測定面の法線たる回転軸としての $z$ 軸と母線とが前記入射角 $\theta_d$ と同等の角度をなす円錐面上に在る前記第2反射光 $V_{b1}, V_{b2}, \dots$ の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1}), R(\alpha_{b2}), \dots$ を測定する請求項1又は2に記載の反射率推定方法。

[4] 前記第2反射率測定工程では、

前記入射面 $A$ たる $xz$ 平面と方位角 $\phi_1=90$ 度、 $\phi_2=(90-e)$ 度、 $\phi_3=(90-2e)$ 度、 $\dots$ をなし、かつ前記入射点 $P$ における前記被測定面の法線たる $z$ 軸を含む平面 $B_1, B_2, B_3, \dots$ を想定したとき、

前記代表 $N$ 変角のうちの角度の小さい方からできるだけ多くを採れる範囲内で、前記平面 $B_1$ 内に前記第2二等分ベクトル $H_{b1}, H_{b2}, \dots$ が在るような前記第2反射光 $V_{b1}, V_{b2}, \dots$ の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1}), R(\alpha_{b2}), \dots$ を測定する第1工程を実施し、かつ、

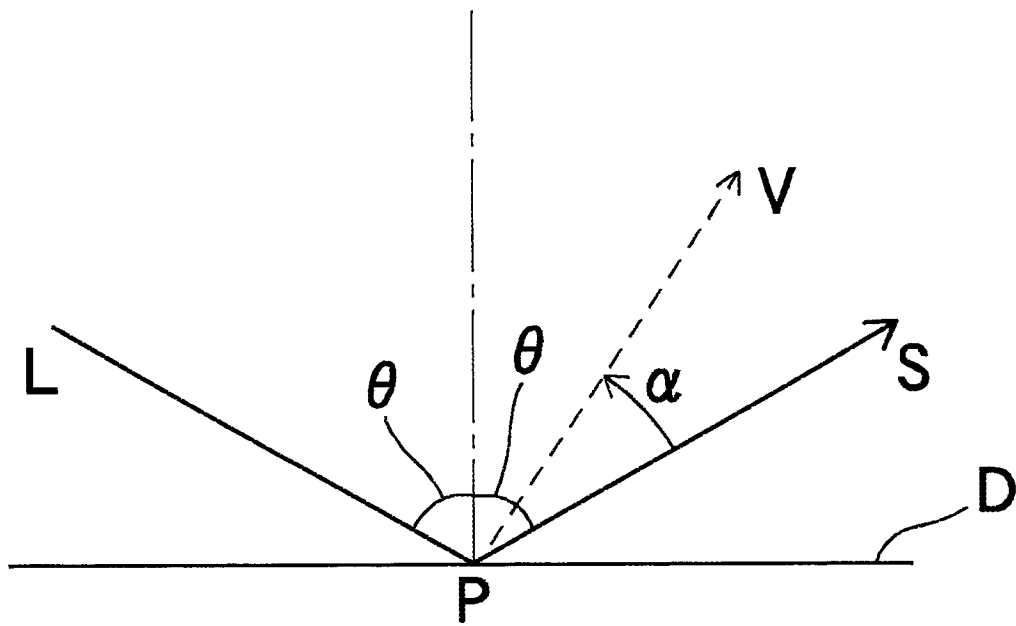
直前の第 $(f-1)$ 工程では、平面 $B_{f-1}$ 内に前記第2二等分ベクトルが在るようには前記代表 $N$ 変角の少なくとも一部を採れないために、前記第2反射率 $R(\alpha_{b1}), R(\alpha_{b2}), \dots$ を測定する第2工程を実施し、かつ、

)、…の少なくとも一部を測定できなかったときは、該第(f-1)工程で採れなかった該代表N変角の少なくとも一部のうちの角度の小さい方からできるだけ多くを採れる範囲内で、前記平面 $B_{f-1}$ 内ではなく平面 $B_f$ 内に前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…が在るような前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定する第f工程を、第2工程、第3工程、…として繰り返し実施することにより、

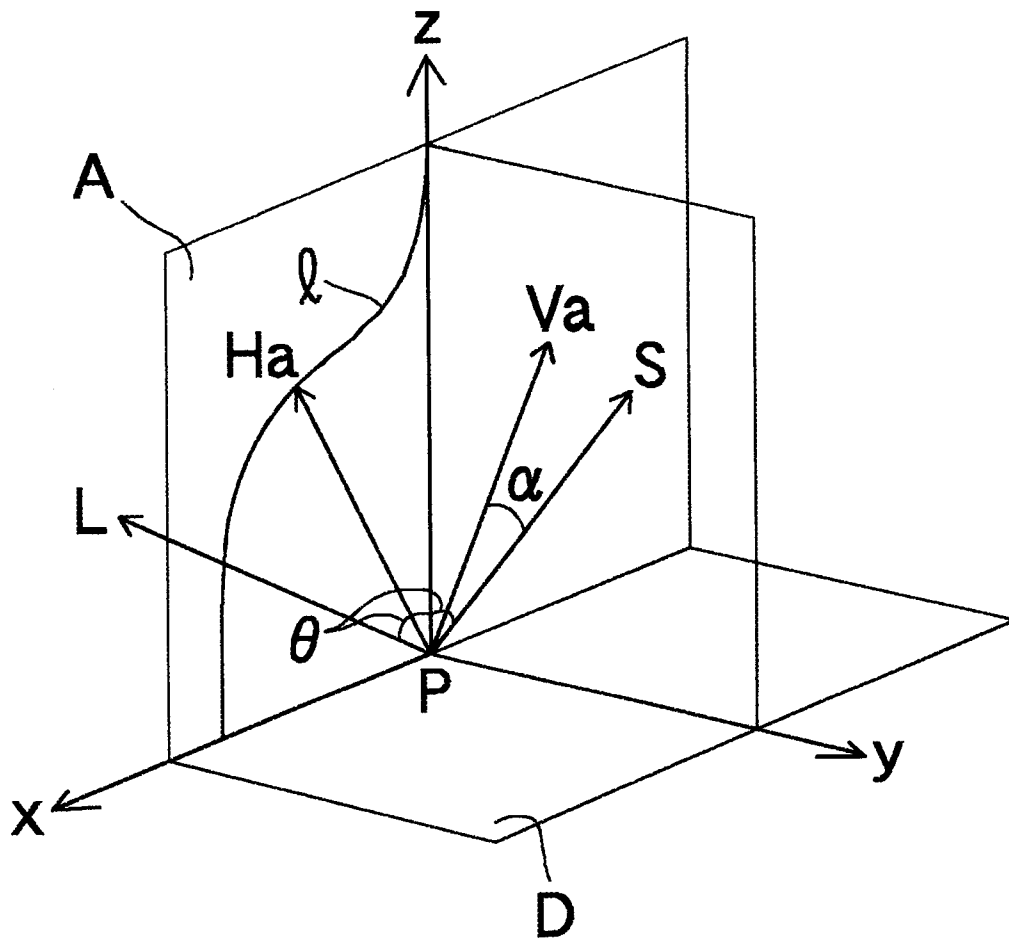
前記代表N変角における前記第2二等分ベクトル $H_{b1}$ 、 $H_{b2}$ 、…が前記平面 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、…内のいずれかに在るような前記第2反射光 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$ 、…の前記第2反射率 $R(\alpha_{b1})$ 、 $R(\alpha_{b2})$ 、…を測定する請求項1又は2に記載の反射率推定方法。

- [5] 前記代表N変角は、略10度、略18度、略28度、略40度及び略90度の代表5変角である請求項1乃至4のいずれか一つに記載の反射率推定方法。
- [6] 前記被測定面にはカラー・シフト塗装色が施されている請求項1乃至5のいずれか一つに記載の反射率推定方法。

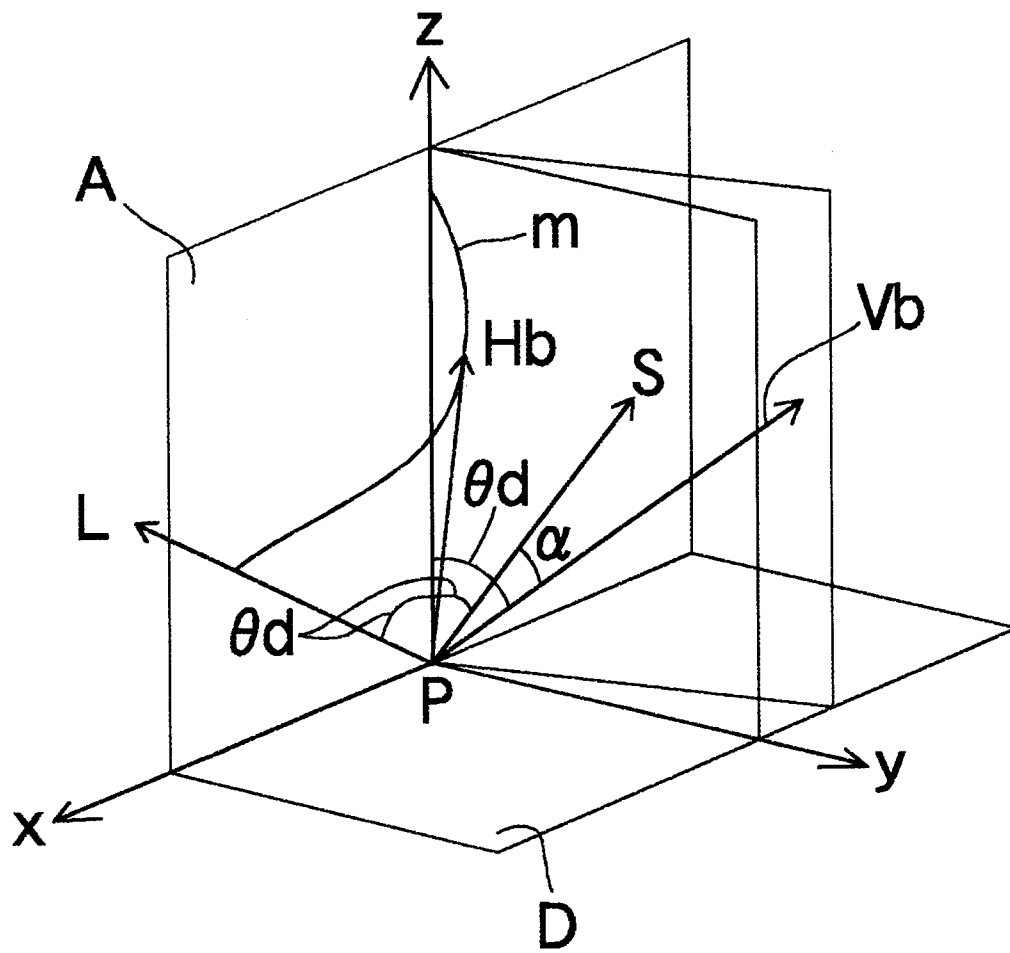
[図1]



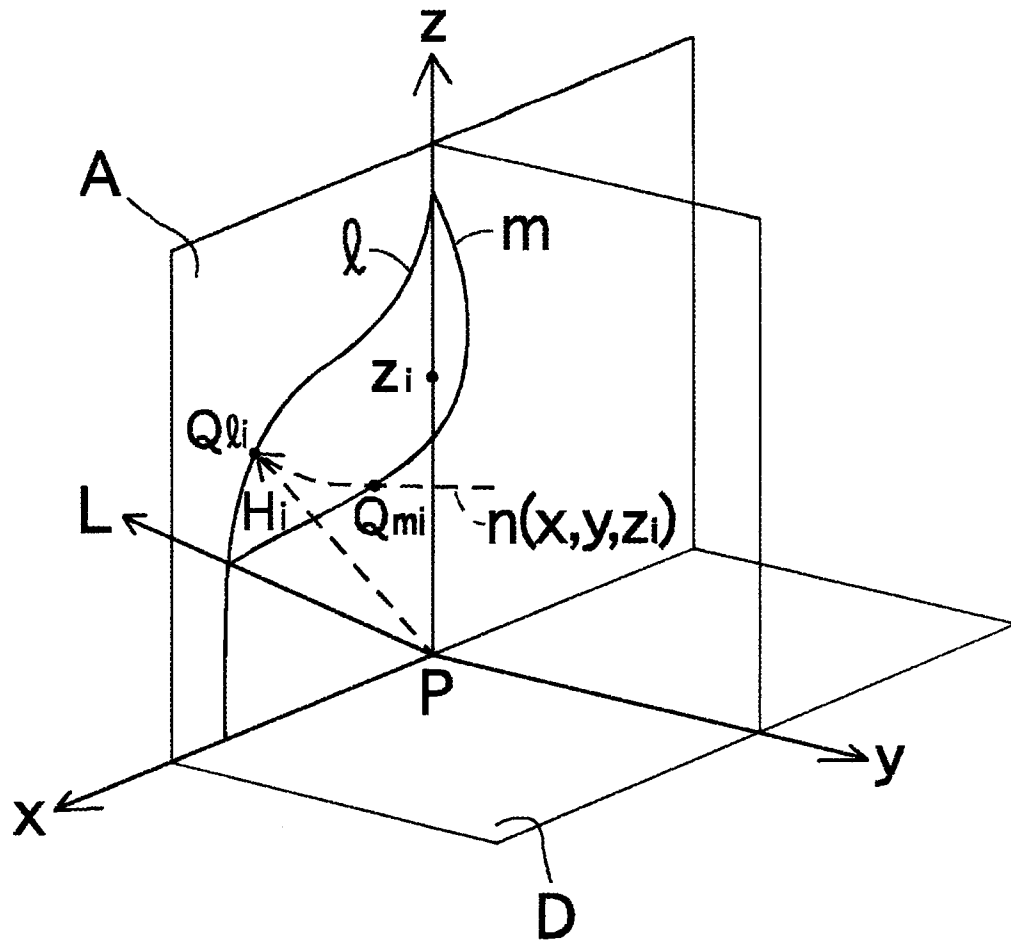
[図2]



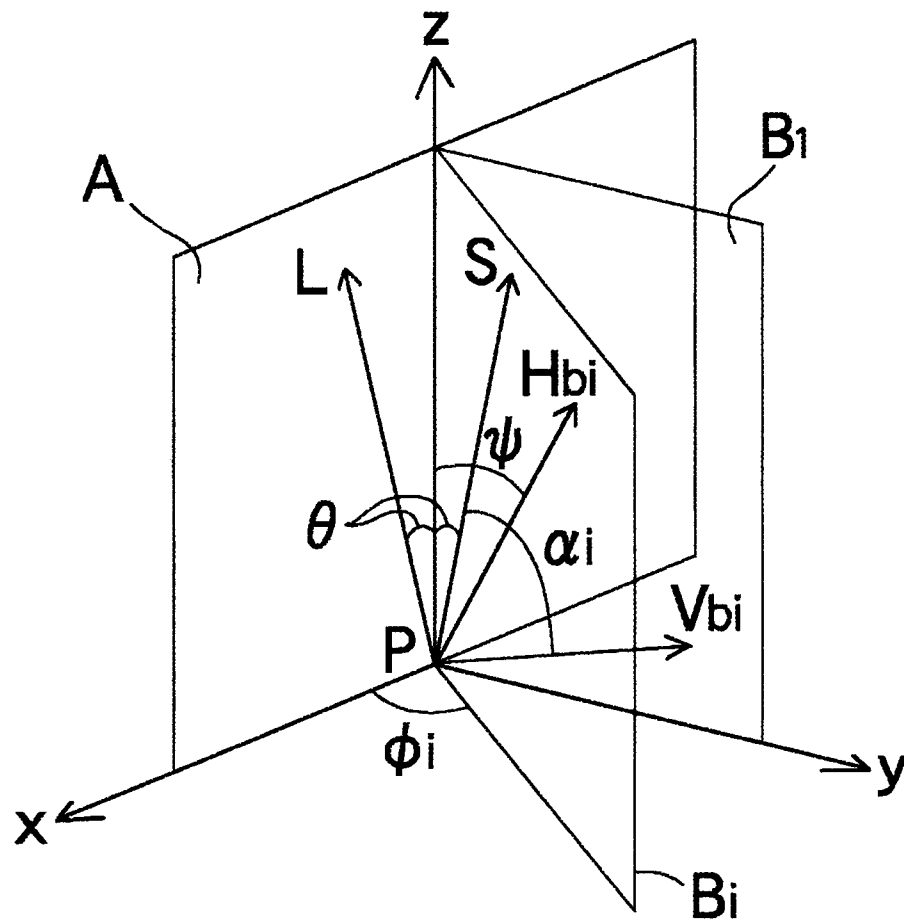
[図3]



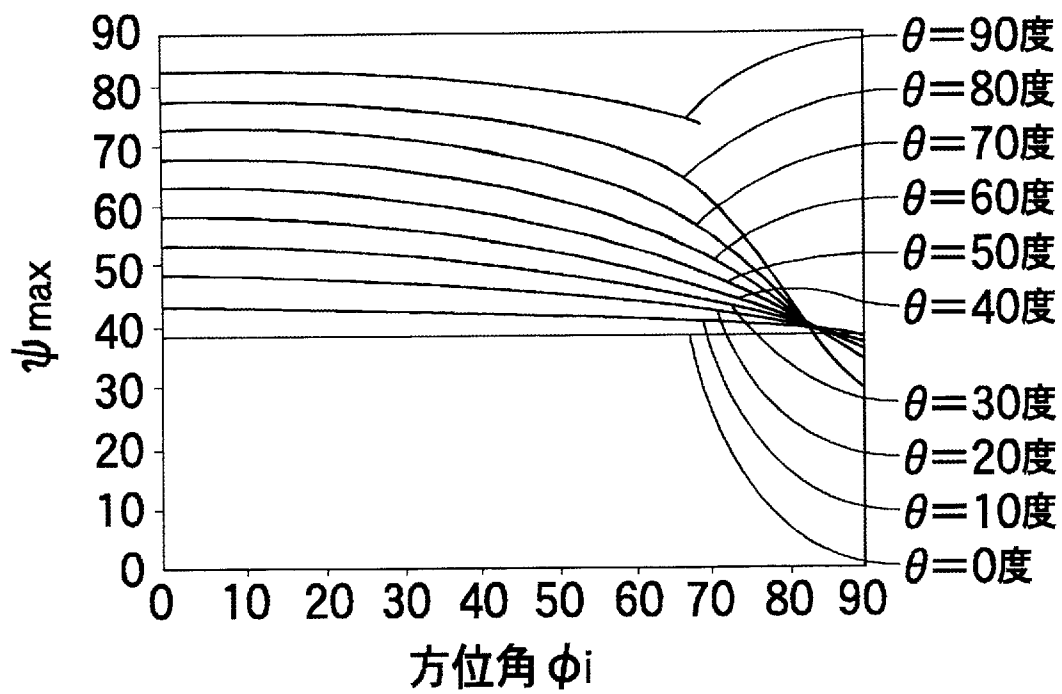
[図4]



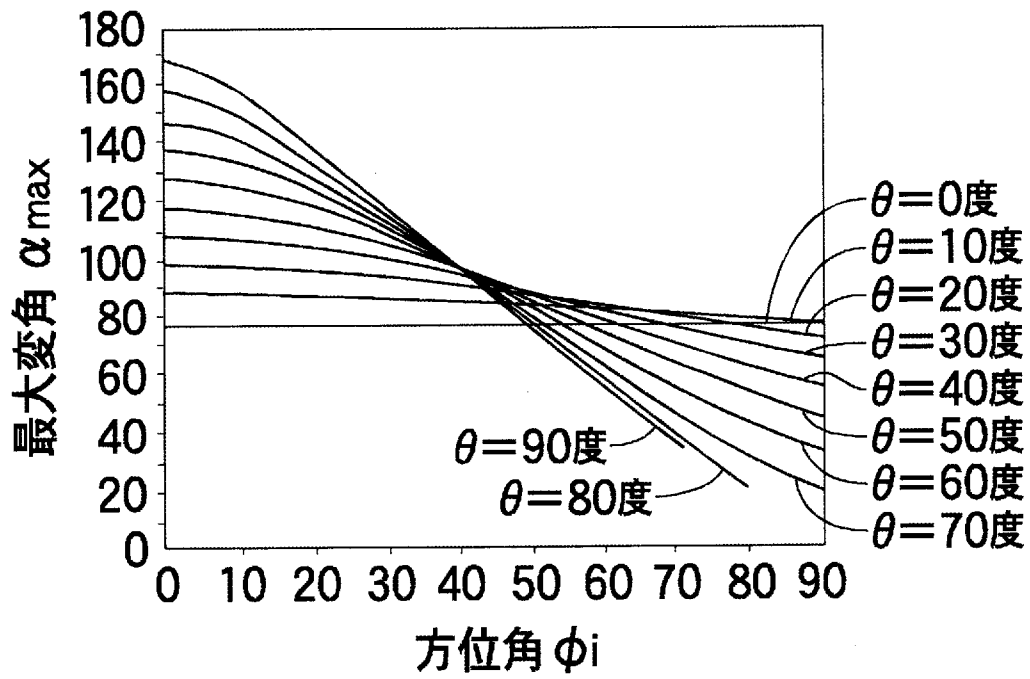
[図5]



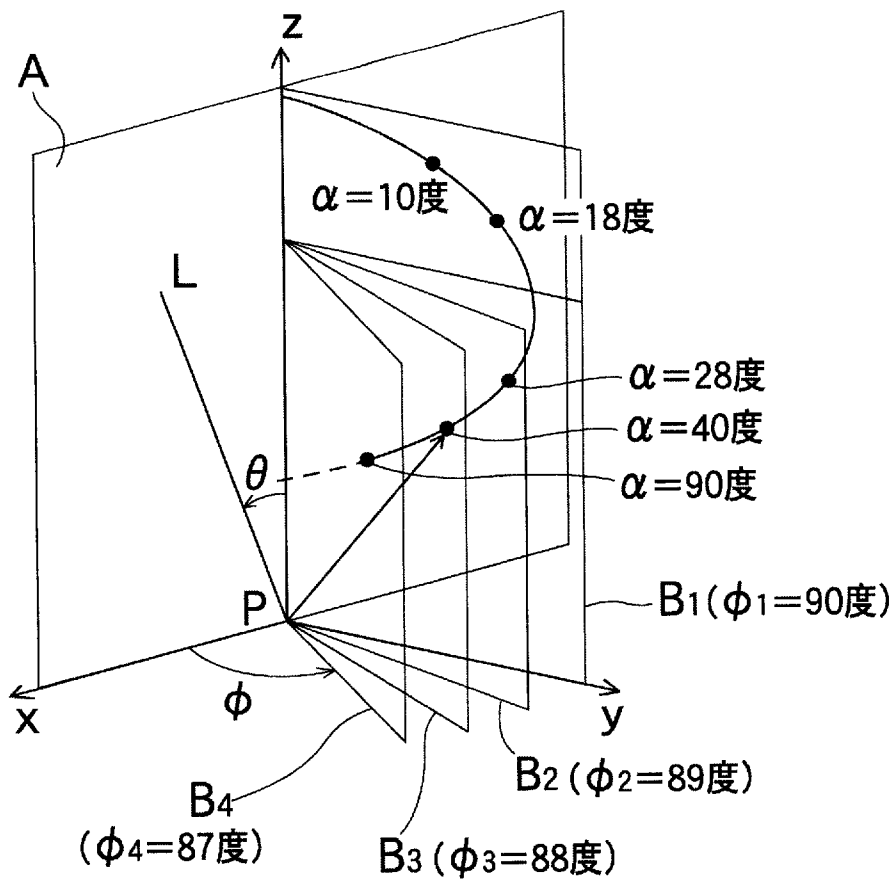
[図6]



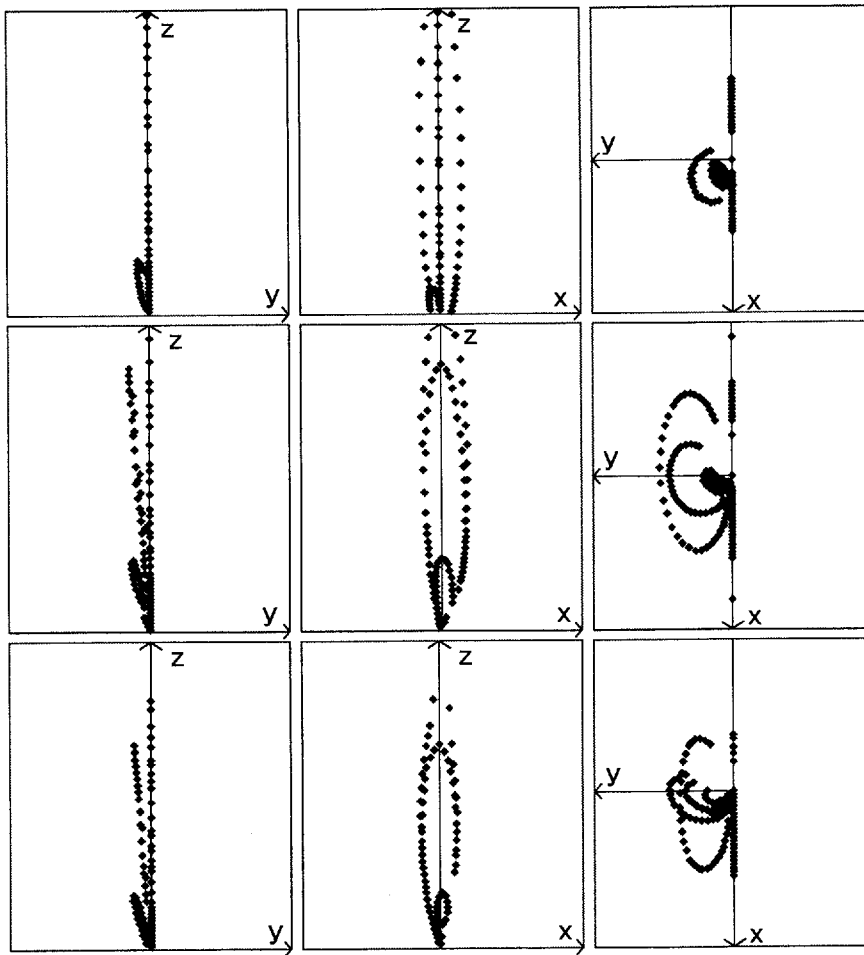
[図7]



[図8]

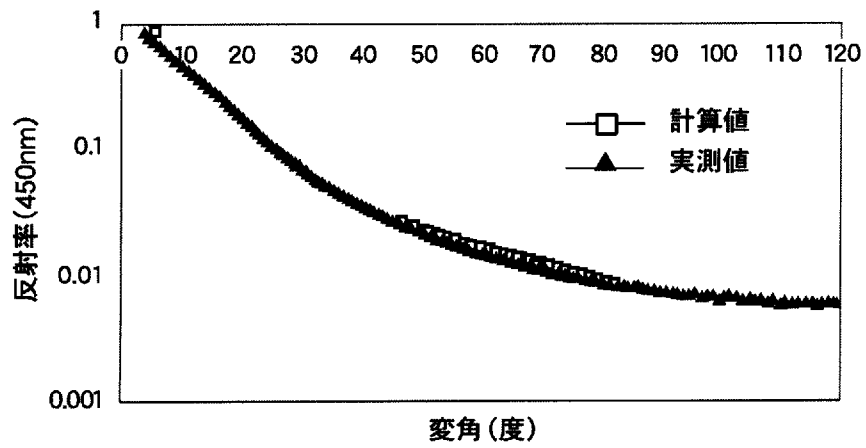


[図9]

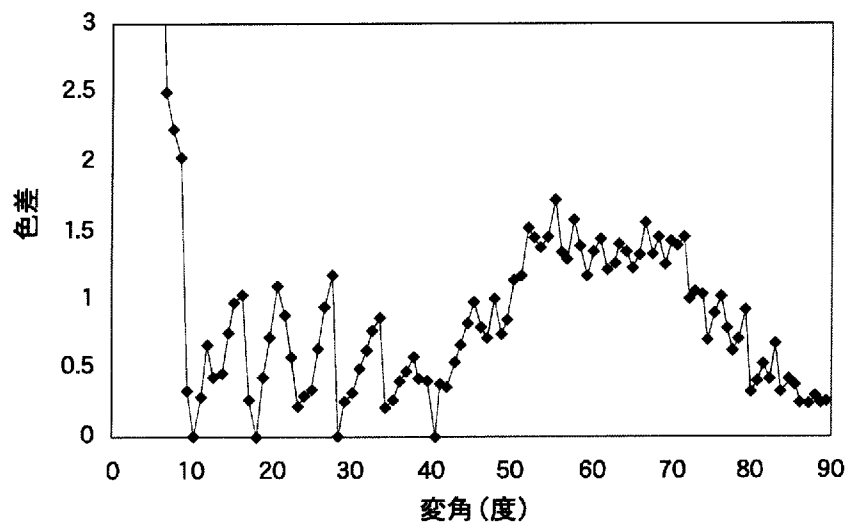


[図10]

(a)



(b)



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2007/064415

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N21/27(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N21/00-G01N21/61, G01J3/00-G01J3/52

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

|                           |           |                            |           |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Jitsuyo Shinan Koho       | 1922-1996 | Jitsuyo Shinan Toroku Koho | 1996-2007 |
| Kokai Jitsuyo Shinan Koho | 1971-2007 | Toroku Jitsuyo Shinan Koho | 1994-2007 |

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

IEEE, Science Direct, JST7580(JDream2), JSTPlus(JDream2),  
Science Citation Index Expanded (Web of Science)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                            | Relevant to claim No. |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | JP 2006-153846 A (Sharp Corp.),<br>15 June, 2006 (15.06.06),<br>Par. Nos. [0052] to [0063]                                                    | 1                     |
| A         | JP 2003-307456 A (Toyota Motor Corp.),<br>31 October, 2003 (31.10.03),<br>Par. Nos. [0121] to [0188]                                          | 1                     |
| A         | JP 5-322655 A (Toyota Central Research and<br>Development Laboratories, Inc.),<br>07 December, 1993 (07.12.93),<br>Par. Nos. [0035] to [0048] | 1                     |

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date  
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)  
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
07 August, 2007 (07.08.07)

Date of mailing of the international search report  
14 August, 2007 (14.08.07)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2007/064415

|                  |            |                   |            |
|------------------|------------|-------------------|------------|
| JP 2006-153846 A | 2006.06.15 | CN 1766577 A      | 2006.05.03 |
|                  |            | US 2006/092412 A1 | 2006.05.04 |
| JP 2003-307456 A | 2003.10.31 | EP 1353156 A2     | 2003.10.15 |
|                  |            | EP 1353156 A3     | 2004.05.12 |
|                  |            | US 2003/193669 A1 | 2003.10.16 |
| JP 5-322655 A    | 1993.12.07 | DE 69329131 T2    | 2001.06.07 |
|                  |            | DE 69333663 T2    | 2006.02.23 |
|                  |            | EP 570003 A2      | 1993.11.18 |
|                  |            | EP 570003 A3      | 1994.05.25 |
|                  |            | EP 570003 B1      | 2000.08.02 |
|                  |            | EP 961475 A2      | 1999.12.01 |
|                  |            | EP 961475 A3      | 1999.12.29 |
|                  |            | EP 961475 B1      | 2004.10.13 |
|                  |            | JP 2790750 B2     | 1998.08.27 |
|                  |            | JP 5-324850 A     | 1993.12.10 |
|                  |            | JP 3095525 B2     | 2000.10.03 |
|                  |            | JP 3119528 B2     | 2000.12.25 |
|                  |            | JP 5-322657 A     | 1993.12.07 |
|                  |            | US 5502799 A      | 1996.03.26 |

## A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01N21/27(2006.01)i

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01N21/00 - G01N21/61, G01J3/00 - G01J3/52

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

|             |                     |
|-------------|---------------------|
| 日本国実用新案公報   | 1 9 2 2 - 1 9 9 6 年 |
| 日本国公開実用新案公報 | 1 9 7 1 - 2 0 0 7 年 |
| 日本国実用新案登録公報 | 1 9 9 6 - 2 0 0 7 年 |
| 日本国登録実用新案公報 | 1 9 9 4 - 2 0 0 7 年 |

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

IEEE, Science Direct, JST7580(JDream2), JSTPlus(JDream2), Science Citation Index Expanded (Web of Science)

## C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の<br>カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示                     | 関連する<br>請求の範囲の番号 |
|-----------------|-------------------------------------------------------|------------------|
| A               | JP 2006-153846 A（シャープ株式会社）2006.06.15, [0052]-[0063]   | 1                |
| A               | JP 2003-307456 A（トヨタ自動車株式会社）2003.10.31, [0121]-[0188] | 1                |
| A               | JP 5-322655 A（株式会社トヨタ中央研究所）1993.12.07, [0035]-[0048]  | 1                |

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）  
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献  
「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

0 7 . 0 8 . 2 0 0 7

国際調査報告の発送日

1 4 . 0 8 . 2 0 0 7

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）  
郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5  
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

高場 正光

2W

2 9 1 0

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 9 2

|                  |              |                   |              |
|------------------|--------------|-------------------|--------------|
| JP 2006-153846 A | 2006. 06. 15 | CN 1766577 A      | 2006. 05. 03 |
|                  |              | US 2006/092412 A1 | 2006. 05. 04 |
| -----            | -----        | -----             | -----        |
| JP 2003-307456 A | 2003. 10. 31 | EP 1353156 A2     | 2003. 10. 15 |
|                  |              | EP 1353156 A3     | 2004. 05. 12 |
|                  |              | US 2003/193669 A1 | 2003. 10. 16 |
| -----            | -----        | -----             | -----        |
| JP 5-322655 A    | 1993. 12. 07 | DE 69329131 T2    | 2001. 06. 07 |
|                  |              | DE 69333663 T2    | 2006. 02. 23 |
|                  |              | EP 570003 A2      | 1993. 11. 18 |
|                  |              | EP 570003 A3      | 1994. 05. 25 |
|                  |              | EP 570003 B1      | 2000. 08. 02 |
|                  |              | EP 961475 A2      | 1999. 12. 01 |
|                  |              | EP 961475 A3      | 1999. 12. 29 |
|                  |              | EP 961475 B1      | 2004. 10. 13 |
|                  |              | JP 2790750 B2     | 1998. 08. 27 |
|                  |              | JP 5-324850 A     | 1993. 12. 10 |
|                  |              | JP 3095525 B2     | 2000. 10. 03 |
|                  |              | JP 3119528 B2     | 2000. 12. 25 |
|                  |              | JP 5-322657 A     | 1993. 12. 07 |
|                  |              | US 5502799 A      | 1996. 03. 26 |
| -----            | -----        | -----             | -----        |