

2. 光学的計測手法

2. 1 光学的全視野計測法の概要

初期の光学的全視野計測法は、アナログ写真機を利用した光弾性、ホログラフィ干渉法、モアレ干渉法、スペックル写真法などによる計測が行われていた。その後、光学的全視野計測はコンピュータの発展と CCD 素子に代表されるデジタルエリアセンサの開発により計測はデジタル化され、広く普及している。全視野計測法には大きく、2 種類に分類できる。一つ目はレーザを光源としてレーザ干渉を利用した計測法で、スペックル干渉法、ホログラフィ干渉法、モアレ干渉法などがこれに対応する。これらの方法の特徴としてレーザ光の干渉を利用しているため計測精度はレーザ光の波長に依存しており、非常に高精度な計測手法である。しかしながらレーザ干渉を利用しているため振動などの外乱に弱い計測手法である。もう一つは CCD 素子のようなエリアセンサで取り込んだ情報を基にする方法で、デジタル画像相関法、赤外線サーモグラフィ法などある。デジタル画像相関法の計測精度は取り込んだ画像サイズに依存するため、拡大することで高精度な計測は可能となるが、その場合は測定範囲が狭くなる。赤外線サーモグラフィは輻射赤外光を測定する方法であるため計測精度は取り込む素子の感度に依存し、空間分解能は素子の画素数に依存する方法である。これらの方法は対象物を計測カメラで取り込むだけの比較的簡便な計測手法である。以下に、光学的手法を紹介する。

2. 2 スペックル干渉法

2. 2. 1 はじめに

スペックル干渉法はレーザ光が粗面などによって散乱・反射することで生じるスペックルパターンを利用した計測手法である。測定面があれいていることが条件となるため実構造物のような粗面を持つモノの計測法として非常に適している。測定領域は理論的には数 m^2 程度の広範囲から顕微鏡領域までの変位分布計測が可能である。計測精度はレーザの波長を基準としており、位相解析を行うことで数 nm という非常に高精度な計測法である。実構造物表面の変形・応力解析の手段として用いることが可能である。

2. 2. 2 スペックル干渉法の原理[1]

スペックル干渉法の原理について説明する。スペックル干渉法は、単一のレーザ光を分割し、2 つ以上の光路を通ったレーザ光が粗面で散乱・反射し、干渉した時に生じるスペックパターンを利用して変位分布を求める方法である。図-2.2.1 に面外変位を求める基本的な光学系を示す。この光学系は1つのレーザ光をハーフミラーにより2分割し、試料と参照物に照射する。それぞれの表面で散乱・反射したレーザ光を干渉させ、CCD カメラ上で結像させてスペックパターンを得る。ここで、 λ をレーザ

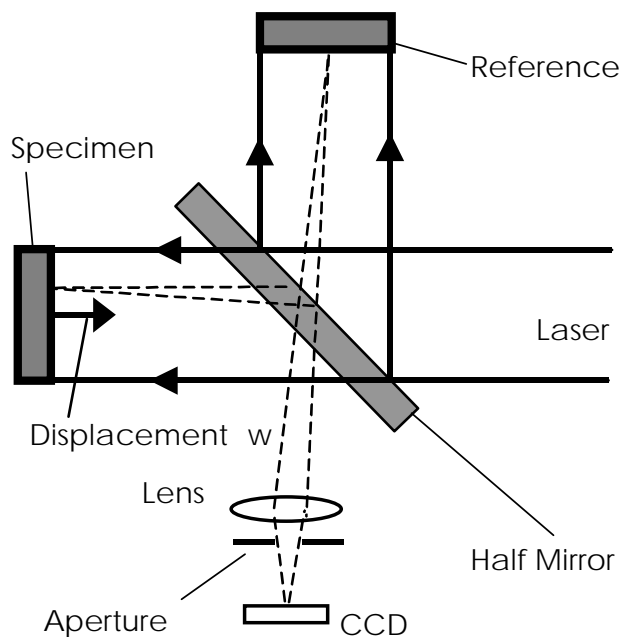


図-2.2.1 スペックル干渉法による面外変位計測用の光学系

の波長とし、測定面が面外方向に w だけ変形したとすると、変形前後で二つの光路を通る光の位相差 $\Delta \phi$ は次式で表される。

$$\Delta \phi = \frac{4\pi w}{\lambda} \quad (1)$$

また、試料と参照物からの反射光が CCD カメラ画素上の 1 点に到達する光の振幅をそれぞれ a_1 、 a_2 とし、両者の位相、並びに位相差をそれぞれ ϕ_1 、 ϕ_2 、 $\phi = \phi_1 - \phi_2$ とするとこの点の変形前の強度は次式で表される。

$$\begin{aligned} I_{before} &= |a_1 \exp(i\phi_1) + a_2 \exp(i\phi_2)|^2 \\ &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \phi \end{aligned} \quad (2)$$

変形後の強度 I_{after} は変形による位相差 $\Delta \phi$ を用いると

$$I_{after} = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\phi + \Delta \phi) \quad (3)$$

となり、変形前 I_{before} と後 I_{after} の差の絶対値を取ると次式となる。

$$\begin{aligned} |I_{before} - I_{after}| &= |2a_1a_2 [\cos(\phi) - \cos(\phi + \Delta \phi)]| \\ &= 4|a_1a_2| \left| \sin\left(\phi + \frac{\Delta \phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta \phi}{2}\right) \right| \end{aligned} \quad (4)$$

この式より $|\sin(\phi + \Delta \phi/2)|$ はカメラ画素上の計測位置によって 0 から 1 までのランダムな値となるが、 $|\sin(\Delta \phi/2)|$ は変形による位相差によって 0 から 1 まで規則的に変化する。そのため変形による位相差 $\Delta \cdot$ が π の奇数倍 $(2n+1)\pi$ の場合は、 $|\sin(\Delta \phi/2)| = 1$ となり強度が最も大きくなり、偶数倍 $2\pi n$ の場合は、 $|\sin(\Delta \phi/2)| = 0$ となり強度がゼロとなる。これにより明暗の干渉縞が形成される。干渉縞 1 本辺りの変形量は式(1)よりレーザの波長の半分となる。図-2.2.2 に面外変位計測装置の写真を示す。この光学系はマイケルソン型の光学系で、He-Ne レーザ、CCD カメラ、レンズ、ハーフミラー、参照物、試料で構成される。その他の面外変位計測用の光学系として、参照光を直接 CCD カメラに取り込む方法もある[1]。計測例として表面に銀色のスプレーを塗布した片持ちはり（長さ 50mm、幅 15mm）の端面を後ろからマイクロメータで押し出し、たわみ量を計測した例を図-2.2.3 に示す。得られたスペックル干渉縞は変形前後のスペックルパターン画像の差の絶対値を演算した。固定端側の干渉縞分布が粗で、自由端側に向かって密になっている様子が見て取れる。

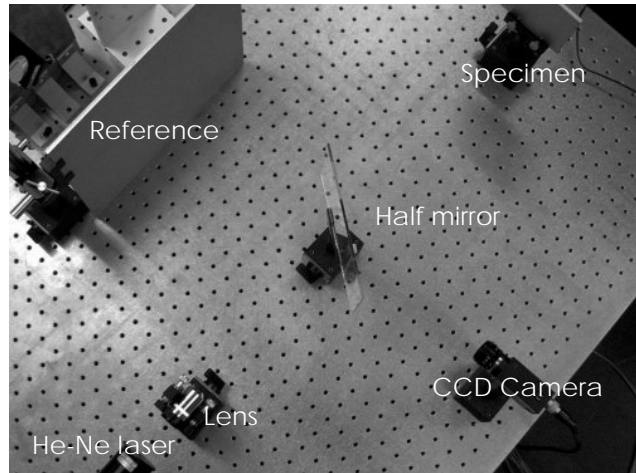


図-2.2.2 スペックル干渉法による面外変位計測用の光学系の写真

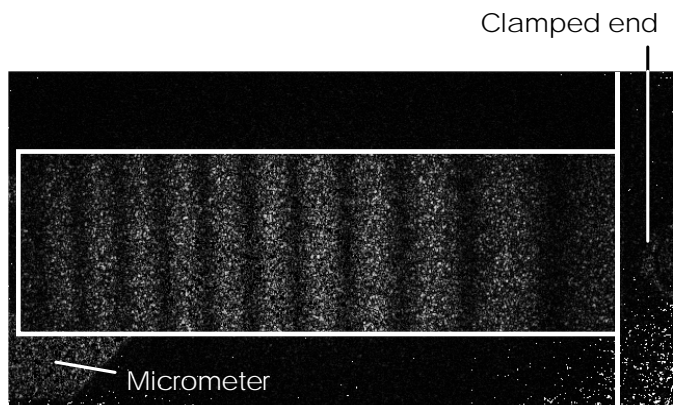


図-2.2.3 はりのたわみ計測結果

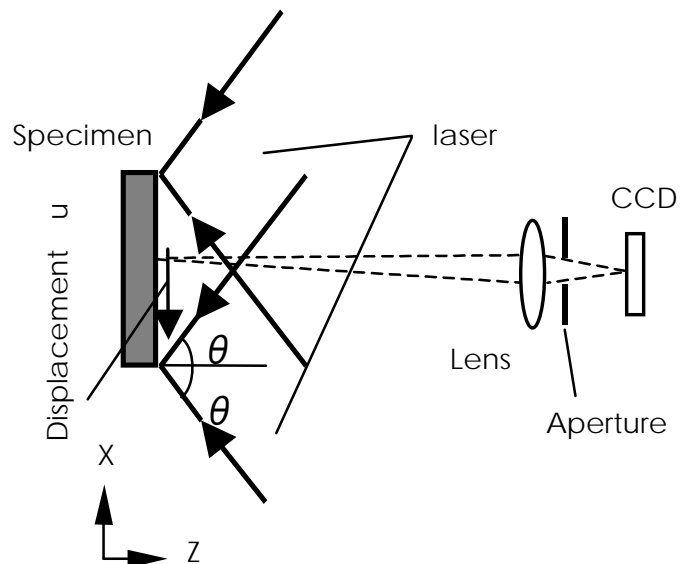
一方、面内変位は図－2.2.4に示す光学系のように測定面の法線に対して対称な2方向からレーザ光を照射し、法線方向から観察するとレーザの照射方向、この場合はx軸方向の面内変位分布を求めることができる[2]。測定面が面内方向にuだけ変形したとすると変形前後で二つの光路を通る光の位相差 $\Delta\phi$ は次式で表される。

$$\Delta\phi = \frac{4\pi u}{\lambda} \sin\theta \quad (5)$$

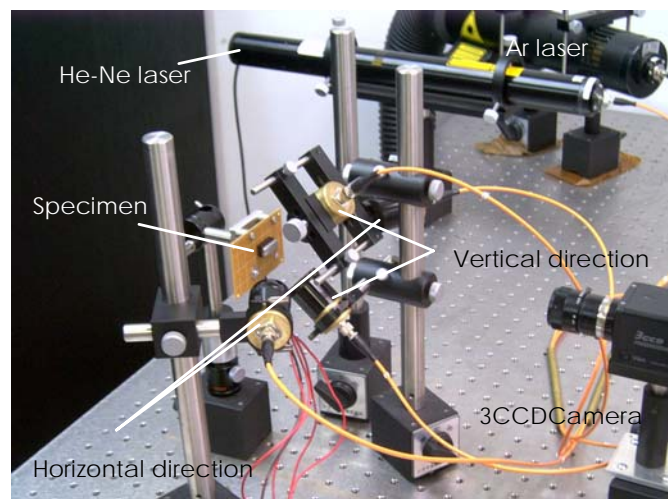
ここで、 θ は照射光が測定面の法線となす角である。面内変位により生じた干涉縞1本辺りの変形量は式(5)より求めることができる。

スペックル干渉法は非常に高精度な計測方法であるが、レーザ照射方向の変位分布しか求めることができないため、面内変位計測では少なくとも2方向からの計測が必要である。2方向面内変位計測法としては照射する方向を光学素子やシャッタ等を用いて切り替える方法[2-4]、2方向同時計測法としてレーザ光の偏向を利用した計測法[5]がある。ここでは2種類の波長の異なるレーザと波長分離装置を利用した計測法を紹介する[6, 7]。図－2.2.5

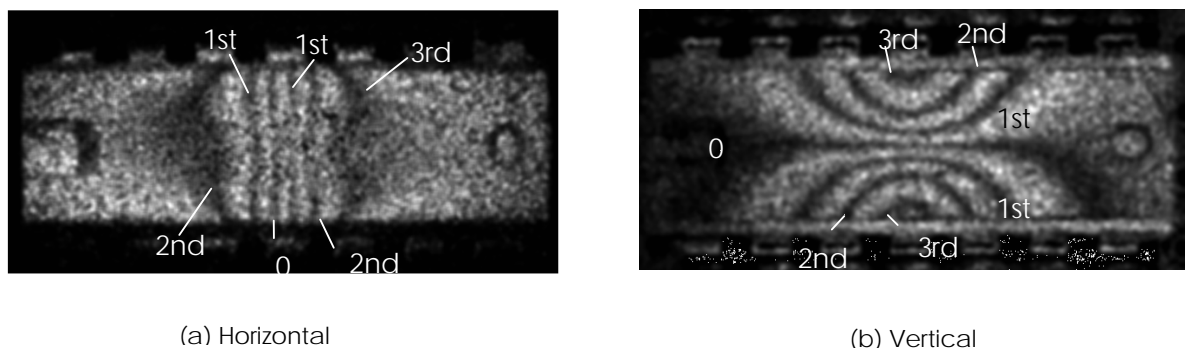
に光学系の写真を示す。本装置はHe-Neレーザとアルゴンイオンレーザ、レーザ照射用光学系、3CCDカメラで構成される。波長の異なるレーザを1:2に分割する光ファイバーを利用し、水平、垂直方向から同時に試料に照射する。試料表面で散乱・反射した波長の混じったレーザ光は3CCDカメラで水平、垂直方向のスペックルパターンに分離され、異なるCCDに取り込まれ、水平、垂直方向の変位分布を同時に計測する。2方向面内変位同時計測例として図－2.2.6にIC(HD74LSOOP: 19×5 mm²)に電流を流し駆動させた時の熱変形計測結果を示す。スペックル干渉縞には画像処理を行い、縞にコントラストをつけている。水平、垂直両方向とも中央部の干涉縞分布が密になっており、中央部が大きく変形していることが確認できる。また、欠陥があるような場合では、正常な場合と異なる変位分布となるため干涉縞分布より欠陥の有無や位置の特定等の判断が可能である。



図－2.2.4 スペックル干渉法による面内変位計測用の光学系



図－2.2.5 面内変位計測用の光学系の写真

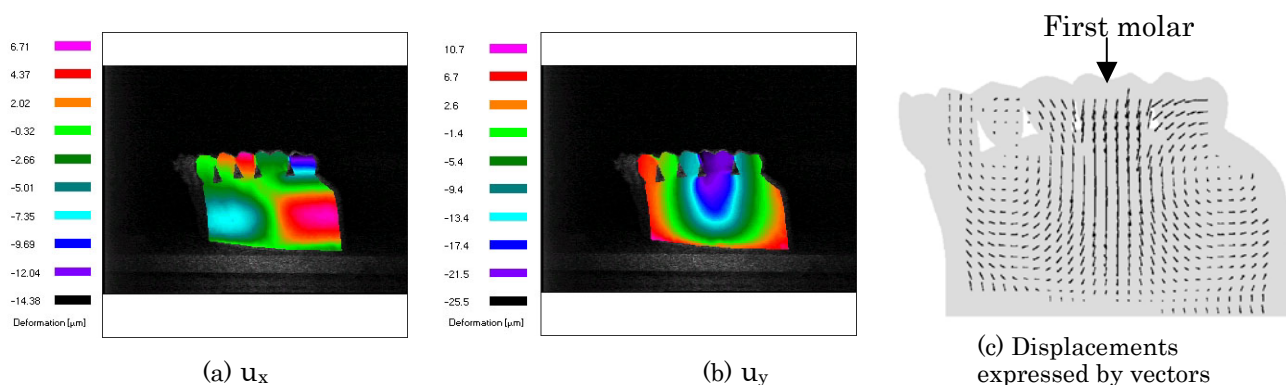


図－2.2.6 ICの熱膨張による面内変形の計測結果

2.2.3 スペック干渉法の数値化

スペックル干渉法で得られる干渉縞一本あたりの変形量は数百 nm 程度であるが、干渉縞を数値化することで更に高精度なナノレベルでの計測が可能となる。数値化の方法として広く使われている方法に位相シフト法がある[1]。この方法は面外変位の場合は参照用のレーザ光、面内変位（2 光束法）の場合は片方のレーザ光の位相を変化させたものを 3 枚以上取り込み、演算し、数学的に位相を求める方法である。この方法では 3 枚以上の画像を取り込むため基本的に静的（もしくは準静的）な条件での計測に限られているが、高精度な位相解析が可能である。梅崎らのグループにより、本手法を用いて歯の矯正治療における歯の支持組織の変形を評価した例を図－2.2.7 に示す[8]。噛み合わせ条件の違いによって歯茎の変形分布が大きく異なる様子などを評価できることを報告している。

次に、熱膨張やクリープ現象、応力緩和などの動的変形挙動計測法を紹介する。この方法はスペックルパターンの中の 1 画素の強度変化に着目し、強度変化を時系列に評価し変形を求める。豊岡らのグループは時系列評価法にヒルベルト変換を利用した位相解析法を報告している[9]。また、時系列評価法で変形方向を同定するための一方向変位キャリアを利用した位相解析法がある。これらの方法は連続に取り込んだスペックルパターン画像のみで解析が終了するため動的な変形計測が可能となる。本手法を用いてヒータブロック（100mm 角）の初期加熱変形を計測した結果を図－2.2.8 に示す。計測は左下 1/4 程度の範囲で行った。スペックル干渉縞分布より中心部からほぼ同心円状



図－2.2.7 歯の変形計測結果（圧縮荷重 2.94N）

に変形分布が生じていることが分かる。加えて変形方向を考慮した解析結果では、加熱直後には中心部は白線で示す初期位置よりもマイナス側に変形し、初期挙動として凹むことが確認できる。

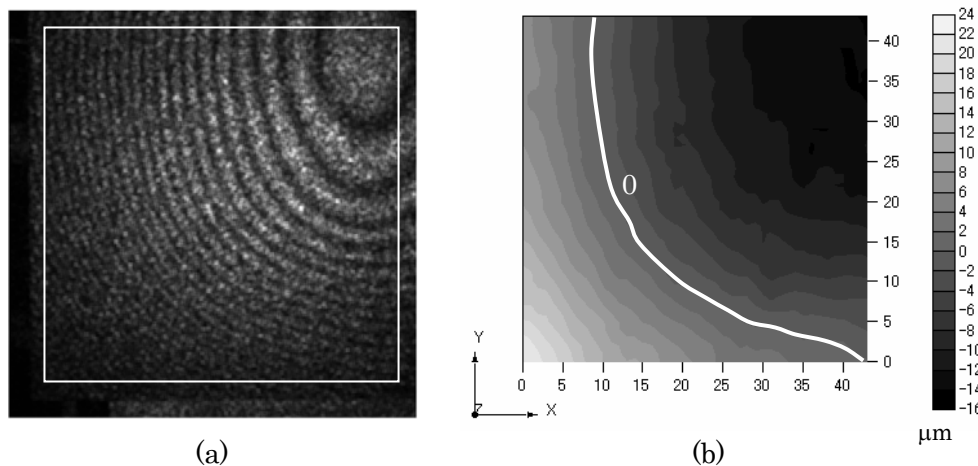


図-2.2.8 ヒータブロックの熱膨張の計測結果

<参考文献>

- [1] Pramod, K. R., Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques, John Wiley & Sons, Ltd Press, Chichester, 2001
- [2] Facchini, M. and Zanetta, P., Maes. Sci. Technol.: An Electronic Speckle Pattern Interferometry In-Plane System Applied to the Evaluation of Mechanical Characteristics of Masonry, Vol. 6, pp.1260 - 1269, 1995
- [3] Gong, X. L. and Toyooka, S.: Investigation on Mechanism of Plastic Deformation by Digital Speckle Pattern Interferometry, Exp. Mech. Vol. 39, No. 1, pp.25 - 29, 1999
- [4] Bowe, B., Martin, S., Toal, V., Langhoff, A. and Whelan, M., M.: Dual In-Plane Electronic Speckle Pattern Interferometry System with Electro-Optical Switching and Phase Shifting, Appl. Opt., Vol. 38, No. 4, pp.666 - 673, 1999
- [5] Moore, A. J. and Tyrer, J. R.: An Electronic Speckle Pattern Interferometer for Complete In-Plane Displacement Measurement, Maes. Sci. Technol., Vol. 1, pp.1024 - 1030, 1990
- [6] Uchino, M.: Two-Directional Simultaneous Measurement System of the Surface Deformation using Speckle Interferometry Method, Proc. of the APCFS & ATEM'01, pp. 863 - 839, 2001
- [7] 内野正和：スペックル干渉法による面外面内同時変形計測について、日本実験力学学会講演論文集 2004 年度年次講演会、No.2、pp.126 - 129、2004
- [8] 梅崎栄作：電子スペックル干渉法による生体材料の変形計測、日本実験力学学会講演論文集 2004 年度年次講演会、No.2、pp. 9 - 14、2004
- [9] V.Madjarova, H. Kadono, and S. Toyooka: Optics Express, 11-6、pp.617 - 623、2003
- [10] 内野正和：ESPI を利用した動的変形計測法の開発、日本機械学会 2006 年次大会講演論文集、Vol.1、No.06-1、pp.845 - 846、2006

(内野 正和)

2. 3 デジタルホログラフィ法

2. 3. 1 はじめに

近年、コンピュータの発達により従来の写真乾板の代わりに CCD 素子に代表されるデジタルエリアセンサを利用したデジタルホログラフィの研究が盛んに行われている。この研究を大きく発展させた基礎となる技術が 1997 年に山口らにより報告された[1]。CCD 画素を利用したデジタルホログラフィでは CCD 素子の解像度が低いために物体光と参照光の角度を数度以下にしなければならず。そのため 0 次の回折像と±1 次の回折像が重なり、それらを分離することが難しかった。そこで縞解析の用いられてきた位相シフト法をホログラム記録に応用し、この問題点を解決したのが位相シフトデジタルホログラフィである。参照光の位相をずらして少なくとも 3 枚以上のホログラムを取り込み。これら位相をずらしたホログラムよりコンピュータ上で CCD 素子上での複素振幅を直接求め、それを回折積分することで像の再生が可能となる。以下に実験力学 Vol.1 No.4 の山口先生による解説[2]を元に位相シフトデジタルホログラフィの基本原理を述べる。

2. 3. 2 デジタルホログラフィ法の原理

図-2.3.1 に位相シフトデジタルホログラフィの光学系を示す。これは同軸配置のデジタルホログラフィで、ハーフミラーでレーザ光を物体光と参照光に分け、参照光をハーフミラーを介して CCD 素子の正面同軸方向から入射させる。この時、ピエゾ素子を利用して参照光の位相をシフトさせて複数枚のホログラムを取り込む。図-2.3.2 に結像系を示す。物体面を (x',y') 、ホログラム面 (CCD 素子面) を (x,y) 、再生面を (X,Y) とする。 z_0,z_R,Z は物体面とホログラム面、参照光の光源とホログラム面、ホログラム面と再生面とのそれぞれ距離を示す。特にホログラム面と再生面との距離を再生距離という。

物体光と参照光の複素振幅をそれぞれ $U_0(x,y)$ 、 $U_R(x,y)$ とすると次式で表される。

$$U_0 = A_0 \exp[i\phi_0(x,y)] \quad (1)$$

$$U_R = A_R \exp[i\phi_R(x,y)] \quad (2)$$

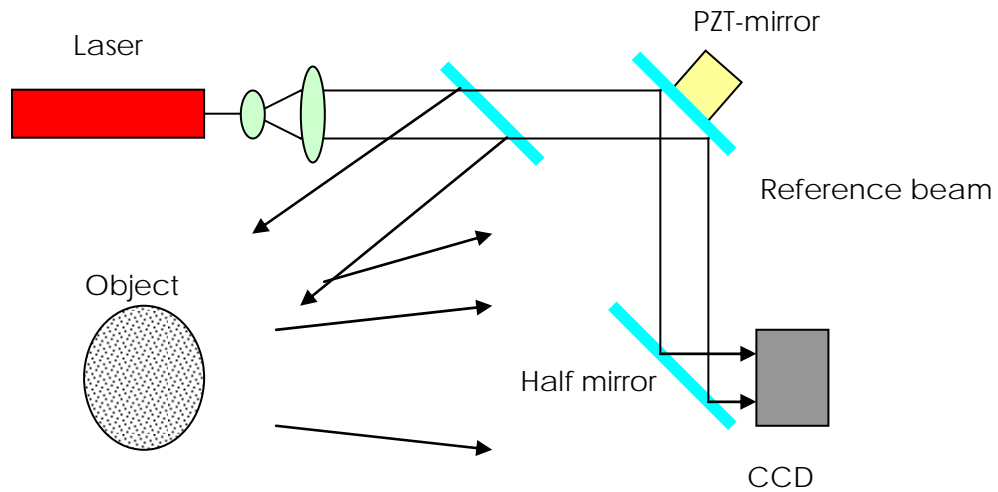


図-2.3.1 位相シフトデジタルホログラフィの概略図

ここで CCD に記録される干渉強度は位相シフト量 δ をとすると次式のようにになる。

$$\begin{aligned} I(x, y, \delta) &= |U_R(x, y)\exp(i\delta) + U_0(x, y)|^2 \\ &= |U_R(x, y)|^2 + |U_0(x, y)|^2 + U_0 U_R^* \exp(-i\delta) + U_0^* U_R \exp(i\delta) \end{aligned} \quad (3)$$

$0, \pi/2, \pi$ だけ位相シフトさせた 3 枚の複素振幅パターンを利用すると、ホログラム面における物体光の複素振幅は次式によって表される。

$$U(x, y) = \frac{1-i}{4U_R^*} \left\{ I(x, y, 0) - I\left(x, y, \frac{\pi}{2}\right) + i \left[I\left(x, y, \frac{\pi}{2}\right) - I(x, y, \pi) \right] \right\} \quad (4)$$

また、 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の 4 枚の位相シフトさせた場合、ホログラム面における物体光の複素振幅は次式によって表される。

$$U(x, y) = \frac{1}{4U_R^*} \left\{ I(x, y, 0) - I(x, y, \pi) + i \left[I\left(x, y, \frac{\pi}{2}\right) - I\left(x, y, \frac{3\pi}{2}\right) \right] \right\} \quad (5)$$

これに次のフレネル変換を施すとホログラム面から Z の距離にある再生面上の複素振幅を求めることができる。

$$U_I(X, Y, Z) = \iint U(x, y) \exp \left[ik \frac{(X-x)^2 + (Y-y)^2}{2Z} \right] dx dy \quad (6)$$

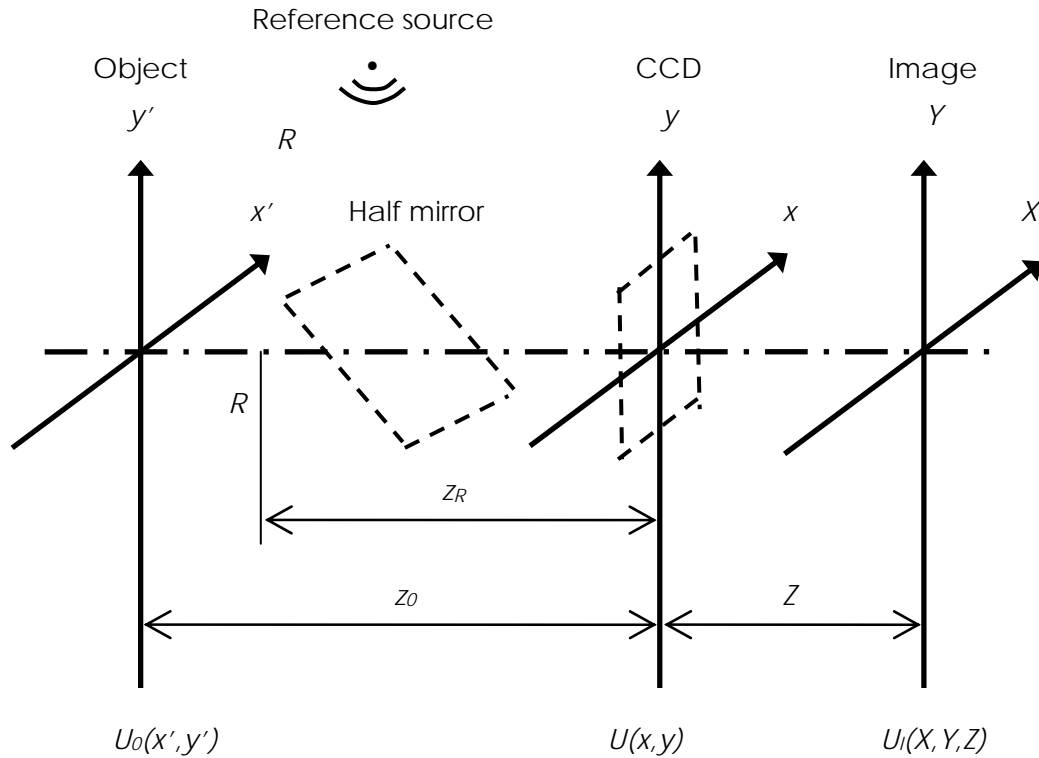


図-2.3.2 ホログラフィの光学系の結像図

また、再生像の位相は次式で求めることができる。

$$\phi(X, Y, Z) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[U_I(X, Y, Z)]}{\text{Re}[U_I(X, Y, Z)]} \quad (7)$$

参照光が平行光で物体が (x_0, y_0, z_0) の位置にある点光源の場合、像の強度は $(X, Y, Z) = (x_0, y_0, -z_0)$ で最大となり、そこが点像の中心となる。

2.3.3 デジタルホログラフィ法の応用

表面形状の計測は、測定物を平行光で照射し、平行光の入射角度を変える前と後の計測結果から入射角の変化による物体上の位相変化から形状計測が可能となる[3]。また、変形計測として、変形前後の再生位相差を求め、物体照射方向と観察方向の2等分線方向成分の変位が求めることができる[3]。更に、大型の測定物に関してはレンズを使用し、CCD素子上に像を結像する方法で計測が可能となる。これはイメージホログラフィと呼ばれる方法で、図-2.3.3に光学系概略図を示す。レンズ系を使用しないデジタルホログラフィでは、数10cmの距離にある測定物の計測できる大きさは数cm程度である。しかしながら、図-2.3.3にあるようにレンズを用いて測定物の像をCCD上に結ぶことで大きな測定物の計測も可能となる[4]。更に応用としてノイズ除去した高精度変位・変位勾配計測[5]や動的変位・歪み計測[6]などの研究が行われている。

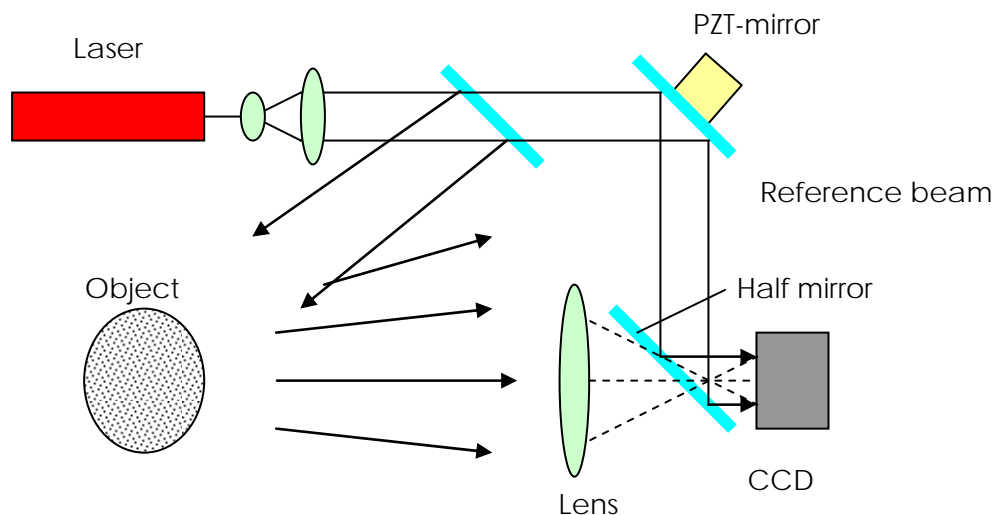


図-2.3.3 イメージホログラフィの光学系

<参考文献>

- [1] Yamaguchi, I. and Zhang, T.: Phase-shifting Digital Holography, Opt. Lett. Vol.22, No.16, pp.1268 - 1270, 1997
- [2] 山口一郎 : 位相シフトデジタルホログラフィによる形状と変形の測定、実験力学、Vol.1、No.4、pp.191 - 196、2001
- [3] Yamaguchi, I. Kato, J., and Ohta, S.: Surface Shape Measurement by Phase-shifting Digital Holography、Opt. Rev.、Vol.8, No.2、pp.85 - 89、2001
- [4] Yamaguchi, I. Kato, J., and Matsuzaki, H.: Measurement of Surface Shape and Deformation by Phase-shifting Image Digital Holography、Opt. Eng.,Vol.42、No.5、pp.1267 - 1271、2003
- [5] 坂上賢一・大瀧博貴・隆雅久 : 位相シフトイメージプレーンデジタルホログラフィによる変位・変位勾配の計測、実験力学、Vol.6、No.2、pp.71 - 76、2006
- [6] 高橋功・森本吉春・野村孝徳・米山聡・藤垣元治 : 位相シフトデジタルホログラフィを用いた面外変位計測、実験力学、Vol.3、No.2、pp.42 - 46、2003

(内野 正和)

2. 4 デジタル画像相関法

2. 4. 1 デジタル画像相関法について

デジタル画像相関法は、輝度分布相関法またはパターン追跡法とも呼ばれている。この手法は、変形前後の測定対象物表面を CCD カメラ・CMOS カメラなどのデジタルカメラで撮影したデジタル画像を画像処理することにより、計測範囲全体に渡って表面変形の大きさと方向の両方の要素を計測することが可能な方法である(写真-2.4.1 参照)。この特長として、測定空間の揺らぎには比較的強いこと、2 台のデジタルカメラと 3 軸自動ステージを用いることにより、面外変形も含めた 3 次元変形計測法も可能となることが挙げられる[1][2]。

既に機械・材料分野では、写真-2.4.2 に示すような集積回路の熱膨張や窒化ケイ素のき裂開口機構の解明をはじめ、多岐にわたる研究に活用されている[3]。また、農学分野では、栄養生長期の小麦における植被率に関する研究に用いられている[4]。

2. 4. 2 デジタル画像相関法の原理

デジタル画像相関法を行う際に重要になるのが、任意点の移動量の算出である。デジタル画像相関法の解析原理は、デジタル画像が一般的に 256 濃度階調で表現される画素から構成された濃淡のある画像であることを利用したものである。まず、測定対象物表面の模様のランダム性を基にして測定対象物の変形前後をデジタルカメラ等で撮影し、得られたデジタル画像の輝度値分布から試料表面の変形量と方向を同時に求める方法である。

写真-2.4.3 に示すように点 A が点 A' に移動した場合、変形前の画像において、まず点 A を中心とした微小領域(以下、サブセット)を考える。変形後の画像中のどこかに移動後の点 A' が存在することから、変形後の画像における任意のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度値分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索する。変形前後におけるサブセットが非常に良く似ていれば、移動後の点として同定できることから、点の移動方向と移動量を算出できる。デジタル画像相関法では、以下に示す 2 つを組み合わせることにより、高い精度でサブセットの移動位

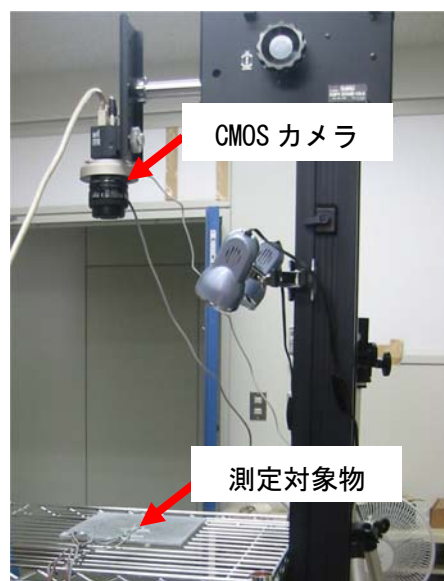


写真-2.4.1 CMOS カメラセット

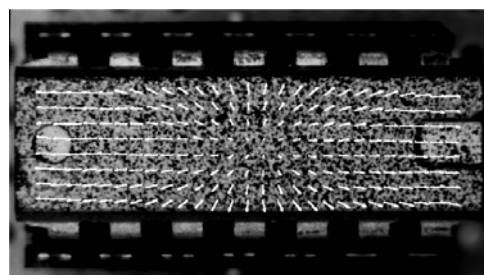


写真-2.4.2 デジタル画像相関法を用いた集積回路の熱膨張

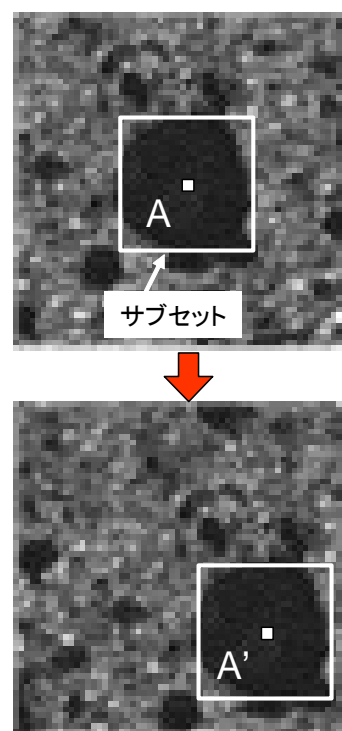


写真-2.4.3 サブセットの移動例

置を特定することができる。

(1) 粗探索

変形前の画素中の基準となるサブセットを変形前の画像より僅かに位置をずらしながら基準となるサブセットとの相関係数を計算し、最も相関の高い画素位置から移動画素を算出する。計測精度は、画素単位である。

(2) 精密探索

最も高い相関が得られた画素の相関値とその周辺に位置する画素の相関値を利用して、これらの点を通過する曲線や曲面で補完を行い、その最大値あるいは最小値から画素間のピーク値を算出する。計測精度は 0.05 画素～0.1 画素である。前述の探索方法以外にも、画素間の強度分布を線形・曲線補完して画素間を数値化し、ニュートンラプソン法を活用して、相関関数の最小となる位置を算出する方法などがある[3]。

以上に示す方法で任意の点の移動位置を同定できることから、対象物における矩形領域の変形は以下に示す計算方法で算出することができる。図-2.4.1 に示すように、変形前の画像から X 軸方向に長さ X_0 、Y 軸方向に長さ Y_0 をとった 4 点から構成される矩形領域を選択する。次にこの矩形領域が変形後に示す位置に移動すると考えると、ひずみ量は式(1)をもとに以下のように計算できる。

写真-2.4.4 は、基準となる変形前の画像から変形後の画像がどのように移動したかについて矢印を用いて表したものである。同図から、左から右に矢印が生じていることから、いずれの点も同方向に移動していることがわかる。なお、同写真の矢印の大きさは、実際の移動画素量を 50 倍したものである。

2.4.3 デジタル画像相関法によるひずみ解析

デジタル画像相関法を利用したひずみ解析は、直接ひずみが得られるものではなく、変位計測結果を利用してひずみ分布を求める方

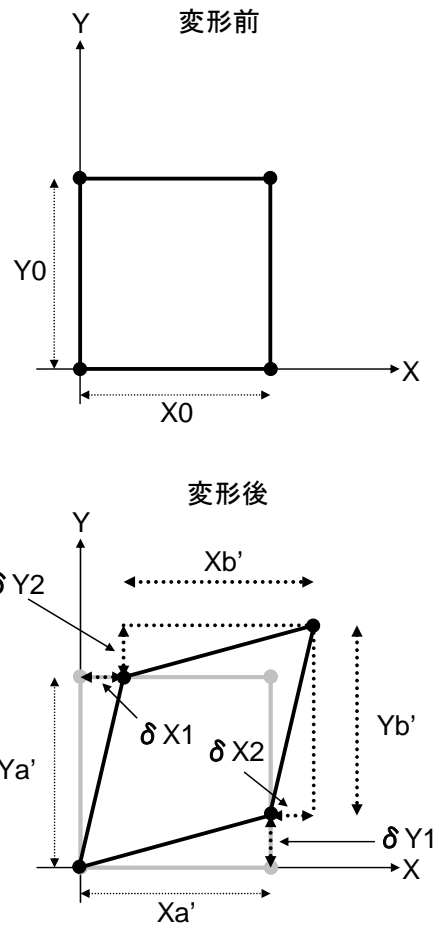


図-2.4.1 矩形領域の移動

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{(Xa' - X_0) / X_0 + (Xb' - X_0) / X_0}{2} \\ \varepsilon_y &= \frac{(Ya' - Y_0) / Y_0 + (Yb' - Y_0) / Y_0}{2} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{(\delta X_1 / Ya' + \delta Y_1 / Xa') + (\delta X_2 / Yb' + \delta Y_2 / Xb')}{2} \\ &\dots (1)\end{aligned}$$

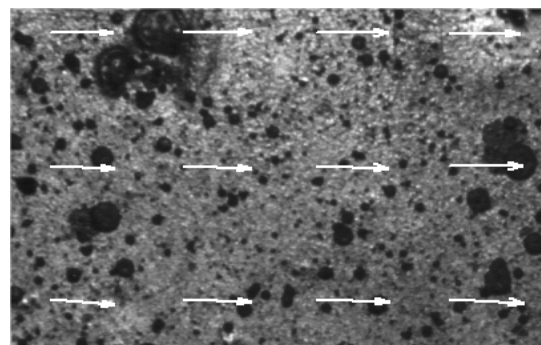


写真-2.4.4 変形前後における点の移動
(測定対象：レジンコンクリート)

法である。これは予め求めたい点を中心としてある画素数だけ離れた点の変位を基に、変形後の2点間の長さの変化を求め、計測点のひずみとする解析手法である。この解析方法の特長として、水平、垂直、斜めといわゆる3軸のひずみゲージと同じ解析を行い、最大主ひずみ、最小主ひずみの値と方向を求めることが可能であること、任意に解析点の距離を変えること、すなわちゲージ長の自由な選択が可能となることなどがあげられる。

コンクリート分野における本解析事例としては、コンクリートの圧縮強度試験(3.1節で詳述)における挙動解析がある。この研究では、本解析手法を基に写真-2.4.5に示すような主ひずみ分布を作成した。他の研究成果として、写真-2.4.6に示すようなコンクリートはりに曲げが作用する場合におけるせん断スパンのひずみ分布(3.2節で詳述)、写真-2.4.7に示すレジコンクリートの硬化収縮(3.4節で詳述)などがある。

2.4.4 解析時の留意点

デジタル画像相関法は、測定対象物表面の模様を利用した解析手法であることから、単色の対象物を撮影する場合には、濃淡の異なる塗料や吸着性の高い紛体などを用いて表面にランダム模様をつけ、画像に濃淡を施す必要がある。

<参考文献>

- [1]内野正和：デジタル画像相関法によるひずみ解析法の検討、日本実験力学会講演論文集 合同ワークショップ 2006、No.6-1、pp.36 - 39、2006
- [2]内野正和・小金丸正明・山口哲也・米山聡：デジタル画像相関法によるひずみ分布計測(1)、日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集、pp.293 - 294、2004
- [3]西川出・小倉敬二・M.A.Sutton：デジタル画像相関法による微小変位計測システム、応用力学研究所研究集会報告 14ME-S4 実験力学における計測・データ処理の問題点・ノウハウ・工夫、pp.43 - 47、2002
- [4]福嶋陽：デジタル画像を利用した栄養生長期の小麦における植被率の簡易推定法、日本作物学会紀事 vol.70(別 1)、pp.236 - 237、2001

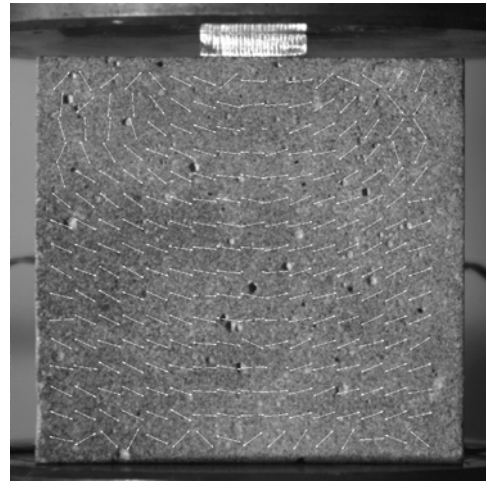


写真-2.4.5 コンクリートの圧縮試験

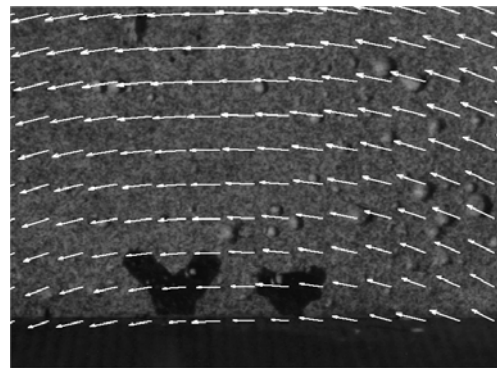


写真-2.4.6 コンクリートはりのひずみ分布

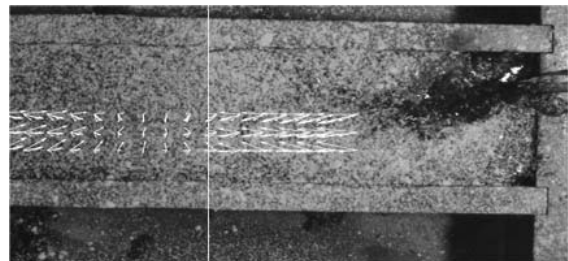


写真-2.4.7 レジコンクリートの硬化収縮挙動

2. 5 赤外線サーモグラフィー

2. 5. 1 赤外線の原理

物質は、異なる原子あるいはその集合である分子で構成されている。これらの原子あるいは分子は、光や熱を受けると、原子の内部の原子核や電子の状態が変化し、加えて分子を構成する原子が振動などの運動を始める。この運動は、絶対零度（ -273.16°C ）で停止し、温度が上昇するに従って激しくなる。これは、物質の熱的状态に応じて運動する意味で、「熱運動」と呼ばれる。

このような物質の内部状態の変化は、それぞれの運動に応じた電磁エネルギーをもつ電磁波を生じさせる。すなわち、物質の内部状態に固有の電磁エネルギーが生じ、固有の波長をもつ電磁波が生まれる。このような電磁エネルギーは、 eV （エレクトロンボルト）の単位で表わされる。 1eV は、1個の電子を 1V の電位で加速したときの、電子の得るエネルギーである。電磁波の振動数(波長)とエネルギーの関係を図-2.5.1に示す。

原子は、原子核とそのまわりを回転している電子からなる。電子の数は、元素によって異なる。内側の電子は殻内電子と呼ばれ、外側の電子は外殻電子と呼ばれる。これらの電子が、殻外の真空準位にとび出すことをイオン化といい、外殻電子がさらに外側の電子軌道に移るのを励起という。紫外線は、外殻電子のイオン化によって生じた電磁波をいい、可視光線は外殻電子の励起によって生じた電磁波である。近赤外線は、分子を構成している原子が振動を起こすいわゆる分子振動によって生じる。遠赤外線は、分子構造の格子が振動を起こす格子振動による電磁放射である。ミリ波およびセンチ波のマイクロ波は、分子回転および反転によって生じる[4]。

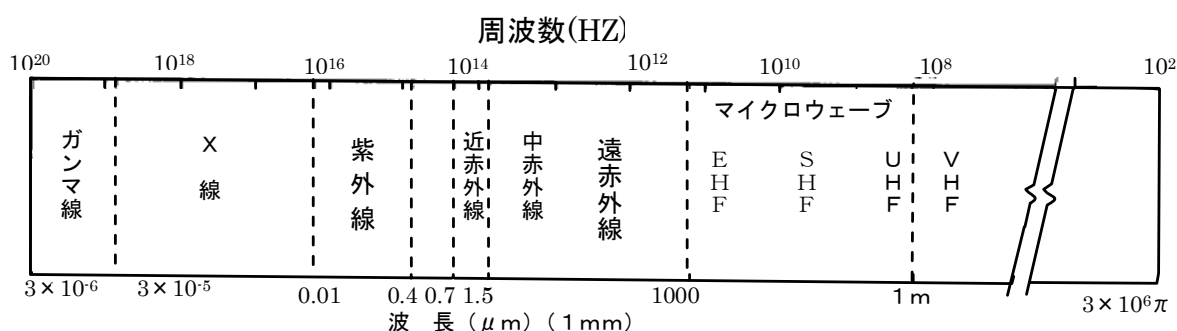


図-2.5.1 電磁波の振動数(波長)とエネルギーの関係[1]

2. 5. 2 中赤外分光法

赤外線法などのリモートセンシングでは、電磁波を複数個のスペクトル帯域に分けて、その電磁エネルギーを収集する方式がとられる。このように電磁エネルギーを波長域ごとに分けることを分光と呼び、複数の分光された電磁エネルギーを解析することをマルチスペクトル解析という。

分光とは、狭義において、物質と電磁波の相互作用が起こる確率が電磁波のエネルギーにどのように依存するかを測定する方法である。その関係を用いて物質の同定を行うだけでなく、温度・圧力・化学組成を変えながら測定することで物質の持つ性質の解明を行う。赤外分光の原理について最も基本的な中赤外域における吸収について、中赤外光をある物質に照射すると、中赤外光のいくらかはその物質によって吸収される。吸収される中赤外光の波長と吸収される程度（吸光度または透過率）は物質によって決まる。したがって中赤外吸収スペクトルを測定すると物質に固有のスペクトルが得られる。

振動数 ν の光が分子に吸収されると分子のエネルギーは $E=h\nu$ (h はプランクの定数) だけ高くなる。中赤外光の場合、そのエネルギーは丁度分子の振動エネルギーレベルに相当する。すなわち、振動の基底状態にあった分子は、中赤外光を吸収して振動の第一励起状態に遷移することができる。ただし、ここで $E=h\nu$ を満足する光を照射すると常に中赤外吸収が起こるというわけではなく、選択律によって許される遷移（許容遷移）と許されない遷移（禁制遷移）とがあることに注意が必要となる。

中赤外域には重要な二つの選択律がある。その一つは振動量子数 ν が ± 1 だけ変化する遷移のみ許容されるというものである。この遷移は振動の基本音に相当する。倍音に相当する ± 2 、 $\pm 3 \cdots$ の遷移は、禁制遷移とよばれ本来は許容されない。

中赤外域におけるもう一つの重要な選択律は「ある分子振動によって、分子全体の電気双極子モーメントが変化する場合に限り、中赤外光が吸収される」というものであり、この制約から物質に固有の中赤外スペクトルが決定される。

2.5.3 近赤外分光法

近赤外分光法は本来、禁制遷移である倍音、結合音に基づく分光法である。本来、禁制である倍音、結合音がスペクトル上に観測される理由は、それは分子の振動が完全な調和振動（フックの法則に従う振動）ではなく、少なからず非調和性があるからと判断され、倍音、結合音の発生確率は低く、吸収は中赤外に比べ非常に弱いものを指す。従って、近赤外分光法は非常に弱いバンドを扱う分光法ということになる。この一見短所に見えることがらが、後に述べるように近赤外分光法の非常な利点につながるのである。

赤外分光法の利点

- ・エネルギーの低い電磁波を用いる為、試料を損傷することがほとんどない。
- ・固体、粉体、繊維、ペースト、液体、気体など様々な状態にある試料に適用することができる
- ・吸収だけでなく、拡散反射、光音響分光法などにも利用できる。

中赤外分光法の特色は、それは中赤外分光分析＝官能基分析ということである。中赤外分光法は $C=O$ や $C=N$ といった官能基の種類を見分けるだけでなく、それらが置かれている環境についても情報を与えることができる。中赤外分光法はいわば分子の指紋のような領域とすることができる。さらに中赤外分光法は近赤外にくらべて各段に大きな吸収特性を有するので微量、微小試料の分析に有効で、近赤外では到底及ばない ng （ナノグラム： $1g$ の十億分の一）オーダーの微量物質、 μm （ミクロン： $1mm$ の千分の一）オーダーの微小試料を容易に分析することが可能となる。

一方、近赤外分光法に限られた特徴をひとつ挙げると、それが禁制遷移を扱う分光法であるということである。

2.5.4 赤外線放射エネルギーの温度変換

観測した赤外線放射エネルギーを温度に変換するためには、対象物の放射率が必要である。放射率は、対象物の物質、表面状態、波長などに依存しており、正確に求めるのは困難である。表－2.5.1 に種々の物質の常温付近における赤外線放射率を示す。この表から、水の場合では放射率が 0.98 でほとんど 1 に近い値となっていることがわかる。また、陸上の対象物でも、木、レンガ、コンクリートなどは 1 に近い値となっている。

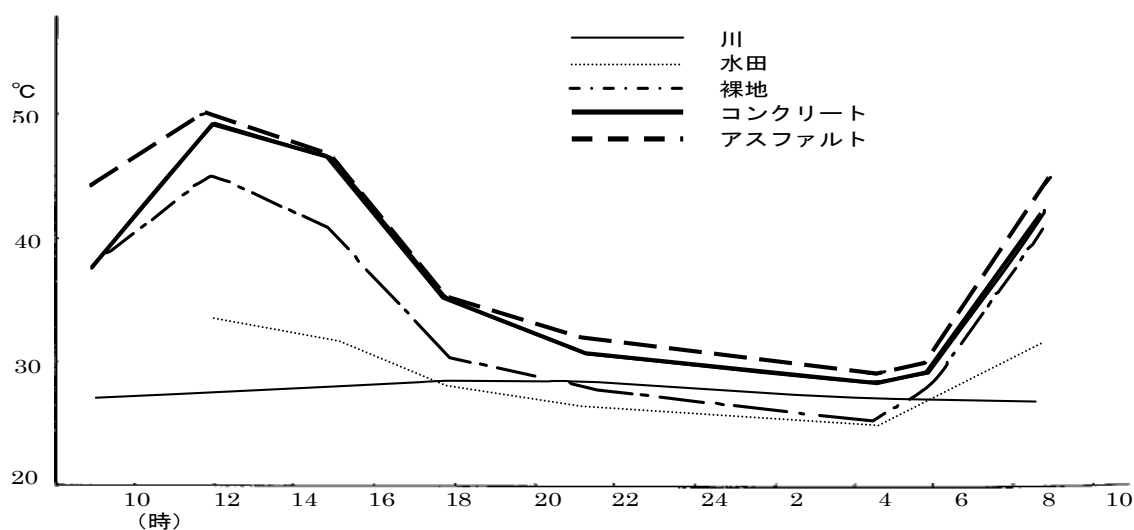
表－2.5.1 いろいろな物質の常温における赤外線放射率[1]

物質	放射率	物質	放射率
石	0.92	枝	0.98
花こう岩	0.28～0.44	やぶ	0.98
砂利	0.28～0.44	耕作地	0.28～0.38
大理石	0.92	水	0.98
コンクリート	0.94	氷	0.98
石板	0.92	霜（柱）	0.98
赤レンガ	0.94	鏡	0.02～0.03
木材	0.78	紙	0.92
葉	0.98	繊維（各色）	0.95

2.5.5 測定対象の時間的溫度特性

測定対象の温度は、季節（月変化）、日（時間的変化）、天候等によって変化する。いわゆる時間的溫度特性を有している。対象の温度に対する時間特性を十分に調査し、背景と対象との間の温度差が最大となる時期を把握する必要がある。

図－2.5.2 に物質別表面温度日変化に関する対象の時間的溫度特性の一例を示す。



図－2.5.2 物質別表面温度日変化[1]

2.5.6 色の表現

光は可視域の電磁波と考えることができるのに対して、色は光の属性と考えることができる。色は物理学的な尺度で表現することもできるが、実用的には、感覚的あるいは心理学的な尺度で表現するのが便利なきときもある。

物理学の立場では、色は、電磁放射エネルギーの大きさを示す放射輝度、分光放射特性、およびその分布の偏りを表す純度で表される。最も純度の高い色は単波長の色で、スペクトルの色または

単色光と呼ばれる。スペクトルの色はプリズムで容易につくることができる。純度の低い色とは、どの波長の放射輝度も一定であるような色をいい、白、灰色、黒などが最も純度が低い。

ある温度の黒体の発色する色は、絶対温度何度の色温度と呼ばれる。

心理学の立場では、色を感覚的にとらえ、標準の色票を定めてその色の呼び名がつけられる。このような表色系のひとつに、マンセルの表色系がある。マンセルの表色系では、色は、明度、色相、彩度の3属性で表現される。色相は、赤 (R)、黄 (Y)、緑 (G)、青 (B)、紫 (P) の5つの色を基本とし、さらにその中間色 YR、GY、BG、PB、RP を加えて10色とする。10色の色相をさらに4分割して合計40色として環状にならべてマンセルの色相環がつくられる。これらの色相は、0から10までの10段階の明度に分けられる。値の小さいほうが暗い色で大きいほうが明るい色を表す。彩度は、色相および明度に対応して0から16までの値をもつ。小さい値ほど濁った色で大きい値ほどあざやかな色となる。色は、呼び名のほかに、たとえば5Y9/14のように記号で表される。これは、黄色で明度9、彩度14の意味であり、あざやかな明るい黄色を表している。

色は、単光色である赤、緑、青の3原刺激からつくられると考え、この3刺激値をX、Y、Zとする。各刺激値の、総和に対する比を刺激係数 x 、 y 、 z と呼び、このうち(x 、 y)を色度座標と呼ぶ。色度図による表色系では、(X、Y、Z)の代わりに、慣用的にY(x 、 y)で表わし、Yが明度に対応し、(x 、 y)が色相と彩度をあわせた色度に対応するようになっている[4]。

<参考文献>

- [1] 日本写真測量学会：熱赤外線リモートセンシングの技術と実際 pp. 36、52、82
- [2] 魚本健人・加藤佳孝：コンクリート構造物の検査・診断－非破壊検査ガイドブック－pp. 155 - 170、理工図書、2003
- [3] 赤外線サーモグラフィ－：日本アビオニクス株式会社ホームページ
- [4] 日本リモートセンシング研究会：リモートセンシング・ノート－原理と応用－ pp. 8 - 9、26

(添田 政司)

2. 6 レーザを用いた3D計測

2.6.1 レーザを用いた3次元画像計測の概要

画像計測におけるステレオ画像法は、左右二つのカメラから得られる画像の間で対応点を見つけて、三角測量法を適用するものであり、カメラを用いた基本的な画像計測手法である。しかしこの方法では、二つの画像間で空間上の同一点をどう対応付けするかに問題が出てくる。このため、一方のカメラを光に置き換えた能動的ステレオ法の研究が活発に行われ、現在種々のタイプのレンジファインダ(カメラなどに用いられる光学式距離計を表す言葉)が用いられている。能動的ステレオ法は、投影される光のパターンの形で分類されるが、ここではスポット光投影法とスリット光投影法について紹介する。

(1) スポットレーザ投光法

レーザビームを対象に投影してできる輝いたスポットを異なった角度からカメラでとらえ、スポットの3次元位置を求めるもので、レーザ光源とカメラとスポット位置を直線で結んで三角形をつくるという、三角測量の原理に最も忠実なアクティブファインダである(図-2.6.1 参照)。受動的な計測法であるステレオ画像法では、特別なスポット像は得られない。しかし、能動的型のスポットレーザ投光法ではレーザ光源のためスポット像の輝度が十分に高く、簡単なピーク検出で得られるので曖昧さは伴わない。したがって、計測法としては、信頼性の高いものということができるが、実用上の問題は処理時間である。しかし、スポットレーザ投光法では、計測時間を短縮するために、PSD(Position Sensitive Detector)、イメージディセクタ、CCD リニアセンサなどの利用の工夫がなされている。

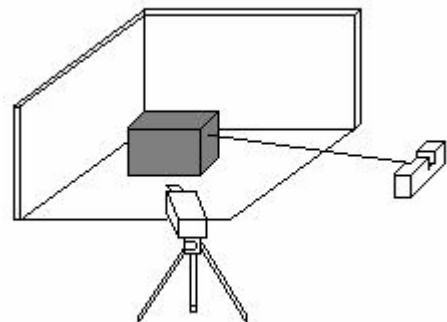


図-2.6.1 スポットレーザ投光法

(2) スリットレーザ投影法

別名光切断法とも呼ばれる。最も知られた3次元画像撮影法である。スポット画像法では、1枚の画像からただ1点しか3次元位置が求まらないため、データ取得に長時間を要する。それに対してこのスリットレーザ投影法(図-2.6.2 参照)では、1回の撮像で、1本のスリット光、言い換えれば1枚の光シートが物体を切断する時の切断線像が得られる。そこでスリットプロジェクタの投影方法を少しずつ変化させつつ、観測対象を走査すれば3次元形状データが得られる。

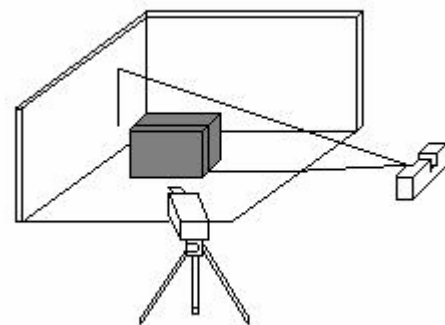


図-2.6.2 スリットレーザ投影法

2.6.2 計測理論

レーザを用いた能動的ステレオ画像法も、基本的には三角測量で用いられる理論に基づいている。本項では、光投影法の3次元位置の計測原理について、カメラやプロジェクタ（レーザ投光器）などの光学系の数式モデル化や、3次元位置の計算方法について詳述する。このモデル化の考え方は、スポット光、スリット光投影法などアクティブステレオ計測から、パッシブステレオ画像法まで、広くステレオ型の3次元画像計測法に共通するものである。

(1) 透視変換モデル

三次元画像計測の計測理論では、図-2.6.3のような透視変換モデルが用いられる。図中のFはレンズ主点、fはレンズの焦点距離、Iは実結像面である。レンズ主点を原点としたときの対象物の点Pの物体座標（絶対座標）を $P(X,Y,Z)$ とする。また、実際のカメラは、対象物→レンズ→実結像面となっているが、これでは像が反転して分かりにくいいため、仮想的に結像面I'をレンズの前におき、対象物→仮想結像面→レンズと配置し、仮想結像面に透視された点P'の基準座標を $P'(X_c, Y_c, Z_c)$ とする。

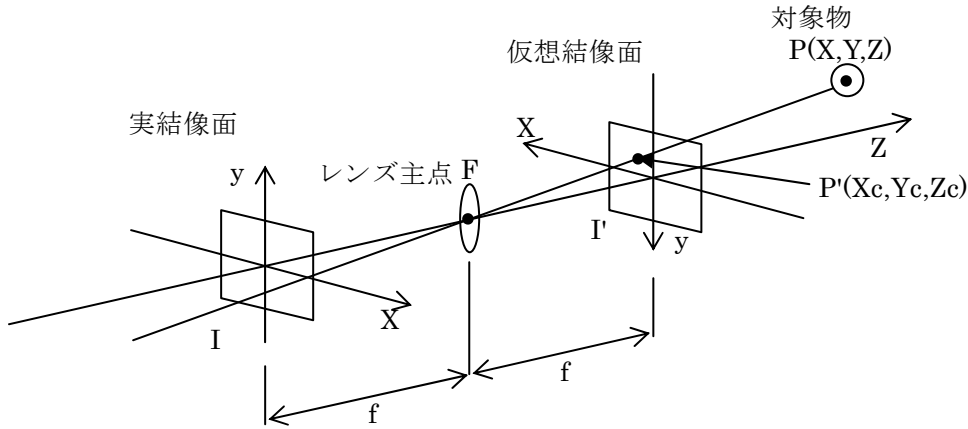


図-2.6.3 透視変換図

3次元の座標を媒介する変数 W_h を付け加えて、次元を一つ上げて4次元座標 $P(X_h, Y_h, Z_h, W_h)$ で考えると、3次元座標系の $P(X,Y,Z)$ と4次元座標系の $P'(X_{hc}, Y_{hc}, Z_{hc}, W_{hc})$ との関係は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} X_{hc} \\ Y_{hc} \\ Z_{hc} \\ W_{hc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.6.1)$$

これが、仮想結像面中心を原点として、ある媒介変数 W_{hc} を含んだ実際の対象空間座標を、結像面上の対象物座標に変換した透視変換行列である。

図-2.6.3の透視変換は、点Pと点P'の3次元座標系がともに固定した座標系で表現される場合にのみ適用できるので、点Pと点P'を独立した別の座標系で表現するため、回転移動と平行移動を含めた変換マトリクスTを式(2.6.1)に関係付ける。さらに $Z_{hc}=0$ とし、 (X_{hc}, Y_{hc}) を結像面上での二次元座標 (u,v) と置き、 W_{hc} を定数 λ とすれば、次式のように簡略化した形で記述することができる。

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.6.2)$$

上式の 3×4 のマトリクス C_{ij} は、カメラ（レーザ）の特性を表すパラメータであり、カメラ（レーザ）の物体座標系に対する位置と方向、レンズの焦点距離など、カメラ（レーザ）に関するデータがすべて含まれている。三次元計測を行なう前に、まずカメラとレーザの位置関係を表すこれらパラメータを求める必要がある。この作業をカメラ（レーザ）のキャリブレーション（幾何校正）と言う。

(2) キャリブレーション

いま、基準座標系において 3 次元座標 $P(X_a, Y_a, Z_a)$ と、それに対応する仮想結像面でのラスタ座標 $P'(u_a, v_a)$ が既知とするならば、 C_{ij} を未知数とする関係式が式 (2.6.2) より次のように得られる。（ $C_{34}=1$ とする）

$$\begin{bmatrix} X_a & Y_a & Z_a & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_a u_a & -Y_a u_a & -Z_a u_a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_a & Y_a & Z_a & 1 & -X_a v_a & -Y_a v_a & -Z_a v_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \vdots \\ C_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a \\ v_a \end{bmatrix} \quad (2.6.3)$$

キャリブレーションは、表面にグリッドを引いた平面板を 3 枚組み合わせた CB（キャリブレーションボード）を使って行なう。パラメータ C_{ij} の 11 個の未知数を求めるためには、この CB 上の同一平面上にない点を任意に 9 点抽出し、式 (2.6.3) を連立させパラメータを算出する。

(3) レーザのキャリブレーション

レーザには、カメラのようにラスタ座標が存在しないが、図-2.6.4 に示すようにレーザを照射する際の方角 θ と仰角 ϕ から、カメラと同じようにラスタ座標を設定することができる。

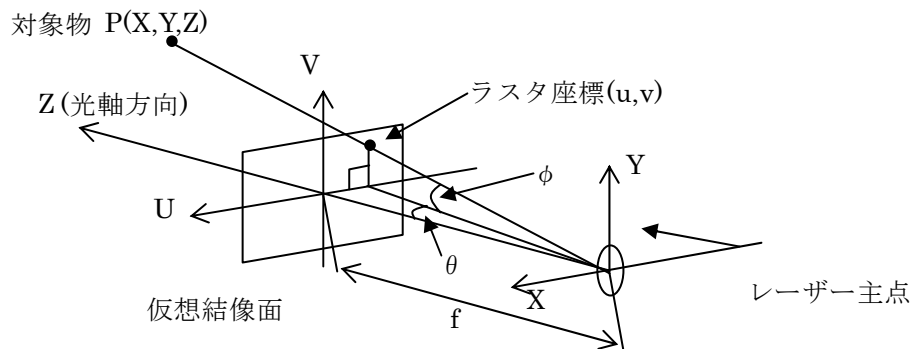


図-2.6.4 スポット及びスリットレーザの透視変換図

ここで、方位角方向の変位を X_p 、仰角方向の変位を Y_p とすると、レーザの焦点距離 f を用

いて、次式で表せる。

$$X_p = f \tan \theta, \quad Y_p = f \frac{\tan \phi}{\cos \theta} \quad (2.6.4)$$

いま、レーザの仮想結像面を $f=1$ とすると、 X_p, Y_p はレーザのラスタ座標となり、 u, v に置き換えて、

$$u = \tan \theta, \quad v = \frac{\tan \phi}{\cos \theta} \quad (2.6.5)$$

となる。式 (2.6.5) によって、レーザのラスタ座標はカメラのラスタ座標と同じように式 (2.6.3) を用いることができ、パラメータを算出できる。

(3) スポット光投影法

式 (2.6.2) を変換すると、次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} C_{11}-C_{31}u & C_{12}-C_{32}u & C_{13}-C_{33}u \\ C_{21}-C_{31}v & C_{22}-C_{32}v & C_{23}-C_{33}v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{34}u-C_{14} \\ C_{34}v-C_{24} \end{bmatrix} \quad (2.6.6)$$

スポット光を照射した点 (X, Y, Z) を、2 台の CCD カメラにより撮影する。その際、点 (X, Y, Z) は左側のカメラ（カメラパラメータ L ）の画像では画像座標値 (u_L, v_L) に射影され、また右側のカメラ（カメラパラメータ R ）の画像では画像座標値 (u_R, v_R) に射影される。

カメラにより撮影された画像座標値を式 (2.6.6) に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} L_{11}-L_{31}u_L & L_{12}-L_{32}u_L & L_{13}-L_{33}u_L \\ L_{21}-L_{31}v_L & L_{22}-L_{32}v_L & L_{23}-L_{33}v_L \\ R_{11}-R_{31}u_R & R_{12}-R_{32}u_R & R_{13}-R_{33}u_R \\ R_{21}-R_{31}v_R & R_{22}-R_{32}v_R & R_{23}-R_{33}v_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{34}u_L-L_{14} \\ L_{34}v_L-L_{24} \\ R_{34}u_R-R_{14} \\ R_{34}v_R-R_{24} \end{bmatrix} \quad (2.6.7)$$

式 (2.6.7) を $PX=U$ と表せば、求めるべき三次元座標での解 X は、

$$X = (P^t P)^{-1} P^t U \quad (2.6.8)$$

で求められる。

スリット光投影法：

レーザパラメータ L_{ij} 、カメラパラメータ C_{ij} 、及び測定したい点のラスタ座標（縦スリットの場合 u_L ）があれば、求めたい三次元座標 (X, Y, Z) に対して次式が成立する。

$$\begin{bmatrix} L_{11}-L_{21}u_L & L_{12}-L_{22}u_L & L_{13}-L_{23}u_L \\ C_{11}-C_{31}u_C & C_{12}-C_{32}u_C & C_{13}-C_{33}u_C \\ C_{21}-C_{31}v_C & C_{22}-C_{32}v_C & C_{23}-C_{33}v_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{24}u_L-L_{14} \\ C_{34}u_C-C_{14} \\ C_{34}v_C-C_{24} \end{bmatrix} \quad (2.6.9)$$

上式を $PX=U$ と表せば、解 X はスポット光投影法と同様、式 (2.6.8) で求められる。

2.6.3 計測装置と計測結果

(1) 計測装置概要

図-2.6.5 は、CCD カメラとレーザ投光器が一体化されたレーザ計測器である。カメラは 1/3 インチ CCD アナログカメラを使用しており、PC(制御用コンピュータ) に内蔵された画像処理ボードによって、32 万画素のデジタルデータとして画像を取り込んでいる。

レーザ投光器は、2 軸に 12 ビット分解能のガルバノメータスキャナ(先端にレーザ光反射用ミラーを取付)を搭載している。各軸のスキャナが u 軸、v 軸に対応しており、各スキャナを制御することにより、発射させた直径 5mm の半導体レーザ光(波長 633 nm, 強さ 0.9 mW)を前方任意方向へ自由に照射できる機構になっている。また、1 つの軸を高速に振ることにより、スリットレーザの照射も可能なマルチレーザ投光システムである。

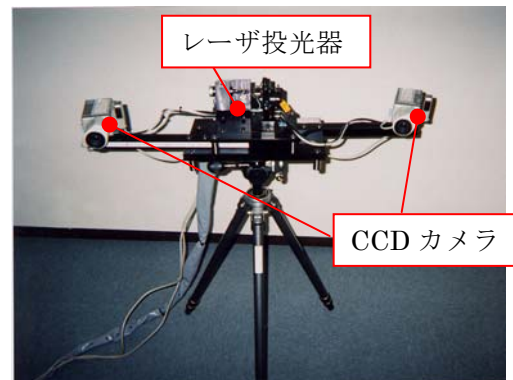


図-2.6.5 計測装置

(2) コンクリート表面計測の結果

図-2.6.6、図-2.6.7 は本計測装置でコンクリートの表面粗度を計測した結果である。コンクリート表面の座標を 10 万点以上取得しており、表面積や山数、平均深さなど、表面形状の凹凸具合を取得データから分析可能である。



図-2.6.6 コンクリート表面計測状況

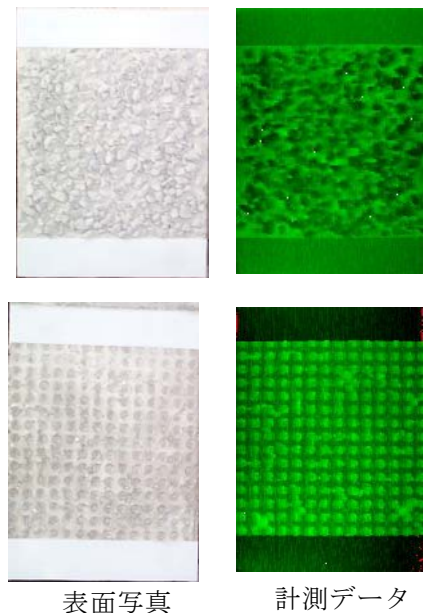


図-2.6.7 コンクリート表面計測結果

<参考文献>

- [1]井口征士・佐藤宏介：3次元画像計測、昭晃堂、1990
- [2]杉原太郎・森山雅雄・松田浩：小規模3次元計測システムの開発、日本写真測量学会秋季学術講演会論文集、pp.59 - 62、1998
- [3]杉原太郎・森山雅雄・松田浩・山本晃・和田眞禎：長さ基準における校正手法を導入した3次元画像計測システムの開発、日本写真測量学会平成11年度年次講演会発表論文集、pp.299 - 302
- [4]和田眞禎・森山雅雄・松田浩・杉原太郎：レーザ光を用いた3次元画像計測システムの開発、日本写真測量学会平成11年度年次講演会発表論文集、pp.297 - 298
- [5]和田眞禎・松田浩・森山雅雄・樋野勝巳・山本晃：レーザとCCDカメラを用いた3次元計測装置の開発とその適用例、土木学会第54回年次学術講演会、pp.560 - 561

(山本 晃)

2. 7 3Dレーザスキャナ

2. 7. 1 3Dレーザスキャナの概要[1] [3]

3D レーザスキャナは、レーザによる計測対象物とセンサの間をレーザパルスが往復する時間を計測することで距離を計測し、同時にレーザビームを発射した方向を計測することで、計測対象点の3次元座標を取得するものである。測定原理は、レーザが測定対象物で反射して帰ってくるまでの時間から距離を算出し、またレーザの移動方向角度から角度を算出し、この距離・角度情報から3次元位置情報を求める「Time of flight 方式」と、数種類のレーザ波長の「位相差（干渉波）」で計測距離を算出する「フェーズシフト方式」のものがある。

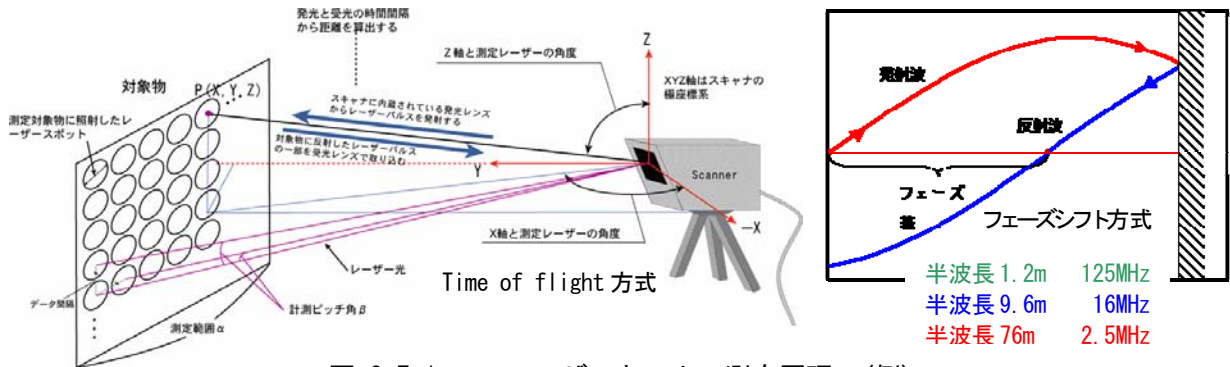


図-2.7.1 3Dレーザスキャナの測定原理（例）

2. 7. 2 3Dレーザスキャナの特徴

3次元レーザスキャナは、様々な地形や建物の測量に利用できるリアルタイム3D形状計測装置である。特徴として、非常に短時間で広範囲を測定できることが挙げられる。現在の測量の主流である光波測距儀やGPSによる測量と大きく異なる点は、測定精度は同等程度か若干劣るものの、一度のスキャンで大量のデータを取り込むことができ、そこから必要な3次元座標データを抽出し、形状計測、変位計測が短時間でできることである。

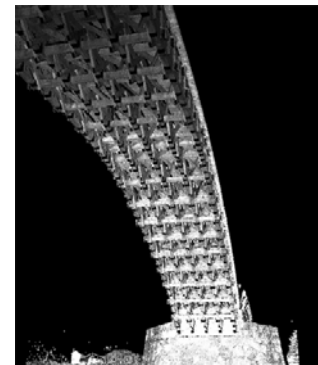
また、測定データを既知点の座標に関連付けて座標変換することによって、簡単に現地座標にあわせた図面データを作成できる。

市販されているものでは、ILRIS-3D、LMS-Z210、Cyrax 2500、MENSIGS100 等である。各機種で使用しているレーザ光の帯域（紫外線から近赤外）によりその精度（分解能）と到達距離が関係する。計測のステップ角の設定や対象物までの計測距離の設定により、レーザ光の入射角や計測密度が変化する。取得データとしては、座標情報以外に、各点の反射強度・RGB情報も同時に得ることができるものもあり、これらの情報から、必要な点データをDXF、ASCITEXT、VRMLなどのファイル形式で抜き出すことが可能である。また、スキャンを行う際、画像解像度を変更することが可能であり、測定点の角度間隔を自由に設定できる。

土木分野における応用としては、橋梁をはじめとする構造物や切土斜面などの形状計測と土量計算などに用いられている。一般的には数cm間隔でデータを取得して、3次元鳥瞰図、合成図（メッシュ図）、VRML、断面図、DWF、等高線図(Conta)を出力する。



実写（写真）



3Dレーザスキャナ測定結果

図-2.7.2 計測例

2.7.3 計測距離とスポットサイズ[1]

レーザの性質上、計測距離が長くなればなるほどレーザのビーム幅であるスポットの直径（スポットサイズ）が大きくなる。これは距離に応じて計測対象物の分解能が変化することによるものである。例えば Optech 社 ILRIS-3 D では 100m の距離でおよそ 30mm の幅となる。

ビーム幅 D と分解能 S の関係式

$$D=0.17R+12 \quad S=0.026R$$

$\left[\begin{array}{l} D: \text{ビーム幅 (スポットサイズ) (mm)} \\ S: \text{データ間隔 (分解能) (mm)} \\ R: \text{計測対象物までの距離 (m)} \end{array} \right]$

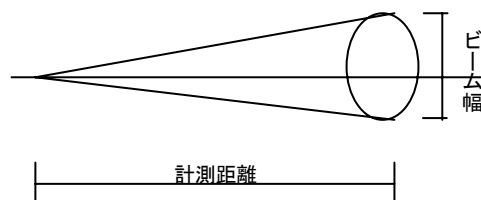


表-2.7.1 計測距離とビーム幅他

計測距離 (R)	ビーム幅(D) (スポットサイズ)	データ間隔(S) (分解能)	精 度
10m	13.7mm	>0.3mm	—
20m	15.4mm	>0.5mm	—
50m	20.5mm	>1.3mm	—
100m	29.0mm	>2.6mm	3mm
500m	97.0mm	>13.0mm	—

また、計測距離が長くなればなるほどデータ間隔は広くなる。データ間隔の違いにかかわる要素には距離による要素とスキャンするステップ角度による要素がある。データ間隔を変更することによりデータの密度を調整することができる（図-2.7.3）。

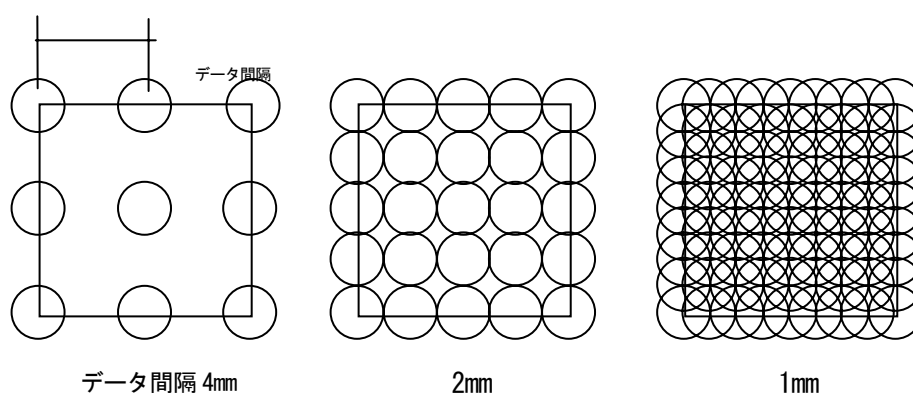


図-2.7.3 一定距離でデータ間隔を変更した場合のデータ密度

その他、使用しているレーザの帯域について、例えば、Cyrax 2500 のように青色レーザを用いた機器の場合、赤煉瓦での反射強度が低く計測精度が悪くなるなど、対象物の色彩とレーザの帯域にも配慮が必要である。また、霧などの天候の影響も受けやすく、測定時刻などへの注意が必要である。

2.7.4 地上型3Dレーザスキャナー製品の仕様比較表

表-2.7.2 3Dレーザスキャナー製品の仕様比較表ー長距離型（例）

機種名	ILRIS-3D	LMS-Z420 i	ScanStation	GX200
メーカー	オプテック社(カナダ) http://www.optech.on.ca	リーグル社(オーストリア) http://www.riegl.co.at	ライカ社(スイス) http://www.CYRA.com	トリンブル社 http://www.mensi.com
代理店	株式会社 日本シベルヘグナー	リーグルジャパン株式会社	ジャパンテック株式会社	市川物産株式会社
機器イメージ				
測定範囲	3～350m(350mの反射率4%) ～800m(800mの反射率20%)	2～1000m(反射率80%)	最大300m(反射率90%) (最適距離1.5m～50m)	2～200m
スキャンニング角	垂直±20° × 水平±20°	垂直80° × 水平360°	垂直40° × 水平40°	水平 ～60° (水平広角) 垂直 ～360° (垂直仰角)
スキャンニング速度	2000ポイント/秒	20000ポイント/秒	最大1000ポイント/秒	3500ポイント/秒
レーザー波長	1540nm(近赤外)	905nm(近赤外)	532 nm(青色)	640nm(青色)
レーザー強度 ※注1)	クラス1	クラス1	クラス2	クラス2
測定精度	標準±3mm(100mの時)	標準±10mm	標準6mm(50mの時)	標準6mm
レーザーのビーム幅(スポットサイズ)	30mm(100mの時)	25mm(100mの時)	6mm(50mの時)	3mm(50mの時)
測定温度条件	0～40℃	-10℃～+50℃	0℃～40℃	0℃～40℃
本体重量 サイズ	12kg L312×W312×H205mm	13kg φ210×H435mm	20.5kg L400×W340×H430mm	14kg L380×W420×H280mm
備考	・モニターで確認しながら対象物を高精度にスキャンし、対象物の距離や角度位置(鉛直・水平の両軸)を計測。 ・3D距離画像の他に受光強度画像を得ることが可能。	・計測データはPC直結のECPパラレルインターフェースで出力。 ・3D距離画像の他に受光強度画像、RGBも得ることが可能。 ・受光強度画像から地形の起伏や対象物の材質差などを読み取ることが可能。	・PC上にビデオイメージ表示ができるため、枠決め方式で目標区域の区分表示が容易。 ・スキャン密度を垂直水平方向それぞれに独自に設定可能。	・点群データの他に受光強度画像、RGBが得ることが可能。 ・専用モデリングソフト"リアルワークサーベ"からAutoCAD、マイクロステーションへの変換可能。 DGN、DXF、IGES、STL、
主な用途	文化財/土木一般/橋梁などの維持管理	土木一般(法面他)	プラント、文化財他	プラント、文化財他
ソフトウェア	「Optech Parser」 ILRISによるスキャンデータはATAフラッシュカードに蓄積し、PCへ移行する。Optech Parserでは測量状況をデジタルイメージにより再現する。 「I-SITE Studio」 ・入力：オーストラリア製 Optech (3dv)、Riegl (3dd)	「3D-RiSCAN Ver.2.24」 ・表示機能：カラーコード化した距離画像、グレーコード化した受光強度画像、RGB画像 ・スキャン合成機能：高い反射率のターゲットによってマークされている、定義された絶対座標系の利用による合成、共通3点による合成 ・出力：一般多形式	「Cyclone 4.0」 現場で作成したスキャンにネットワーク経由でアクセス可能。Cyraxポイントクラウドの豊富なデータと迅速な処理能力	「3D IPSOS」 ・機能：自動写真貼付け、メッシュ作成、横断図作成、土量計算 「Real Works Survey」 3D-IPSOSからの機能抽出バージョン

※注1)レーザー強度：レーザー機器から発生するレーザー光線の波長、放出持続時間により人体に与える影響の程度を表す等級。

クラス1・・・人体に影響を与えない低出力のもので、目に安全なレベル。どのような条件下でも最大許容露光量(MPE)を超えない。

クラス2・・・可視光(波長 380～780nm)で、眼のまばたきにより眼が保護される程度の出力以下(おおむね 1mW 以下)のもの。

本表は 2006 年 11 月時点で、国内販売実績のあるメーカーの主要機種を抽出し、HP など公表されている仕様(PDF 版)と調査結果を基に作成しています。

2.7.5 地上型3Dレーザスキャナー応用分野と課題[2] [3]

(1) 3D レーザの応用分野

3D レーザスキャナは、多くの利点を持った最新の計測機器であると同時に、開発途中の計測機器である。各メーカーサイドでは、高精度化に対して技術革新が目覚ましい。筆者がこれまでに関わった応用分野について整理すると、土木分野では、法面、橋梁、河川・港湾（防波堤）、トンネル、フィルダム堤体、石垣・石橋などがある。建築分野では、文化財建造物（木造・RC）、埋蔵文化財・彫刻などがあるが、今後精度の向上如何によっては、より高精細を要求する対象物への展開が考えられる。

(2) 3D レーザ（点群）データの利活用

3D レーザ計測によって取得した面（点群）データ処理の観点から、今後の展開・利用を概念図に整理した。まず 3D レーザは、短時間、かつ直接的に 3 次元データを得られるが、データ容量が膨大でかつ点群データには少なからずノイズが含まれる。しかしそれらの膨大なデータを一括処理による間引等の低減を行うと、情報記録の観点からは不十分となる。

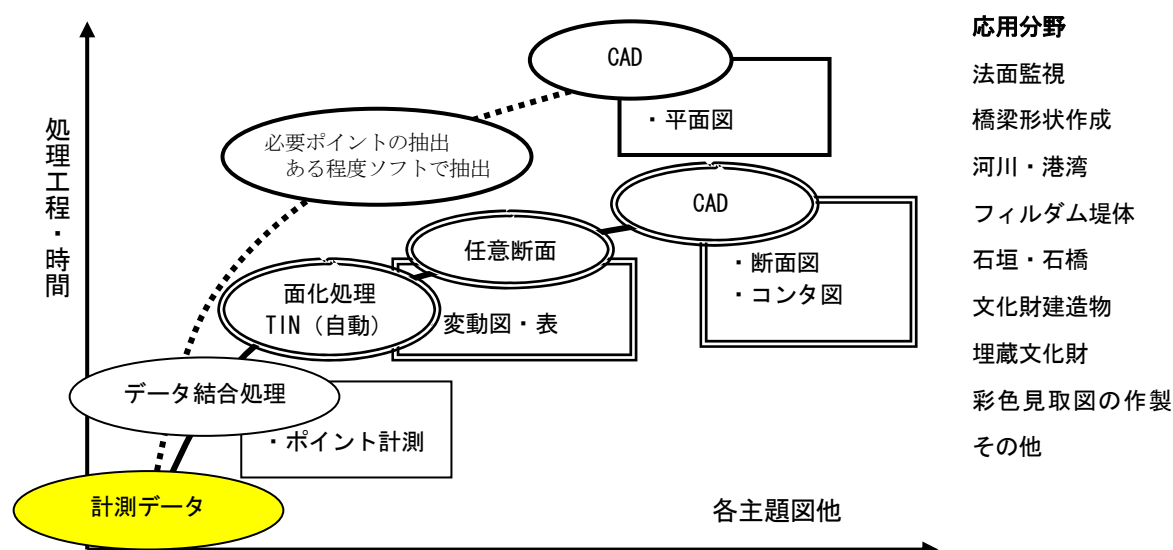


図-2.7.4 3次元面（点群）データの利活用の概念図

図-2.7.4に示すように 3D レーザデータから各種の主題図を作成する過程で、データ変換・取り込み・編集の処理により処理時間は増加する。取得した画像や点群データを現地で即時確認するシステムは、各 3D レーザ専用の解析ソフトの機能で対応できる。計測された点群データから、コンタ図や断面図（点）は、面化处理することで作成可能である。また 2 時期の差分解析や、取得した他の面情報からの差分解析を行う変動図の作成も可能である。これらの処理解析は、そのデータ容量と正の関係があるために必要十分な計測データとなるよう事前の計測計画が重要である。しかし図面化処理作業は、現段階では人手による作業が主体となるため今後の課題である。

2.7.6 まとめ

3D レーザスキャナは、多くの利点を持った最新の計測機器であると同時に、開発途中の計測機器でもある。従って、現在のところ、確実な計測方法が確立しておらず、そのため、想定した通りに計測結果が得られない場合がある。これらを解決するため、計測を行うにあたっては、以下の点に留意し、計測方法を立てる必要がある。[1] [2]

- ・ 用途に応じた 3D レーザスキャナの選択：高精度用、長距離用などそれぞれの 3D レーザスキャナの特長を把握し、用途に応じた機器の選択が必要である。
- ・ 適切なデータ密度（スポット間隔）の選択：用途に応じて選択する。（図-2.7.5）
- ・ 計測場所・計測回数の選定：データに隠蔽部・欠測部が生じないよう適切な選定が必要。
- ・ 計測にあたっての前準備：例えば表面の草木による不要なデータの除去作業が必要。
- ・ 部材など計測する場合、適切な道具等を準備して所期の目的が計測できるよう調整が必要。
- ・ データの平均化処理：高精度にデータを取得する場合は、複数回計測を行い、データの平均化処理を行うなどの必要がある。

また取得データの解析処理としては、

- ・ 対象を表現する上での特徴抽出処理
- ・ レーザ計測データと写真解析を併用し情報を抽出するためのシステムの開発
- ・ 任意の位置からの写真画像を、3D レーザデータで構築したポリゴンに正確にマッピングが可能なシステム開発

これら解析処理の完成が望まれる。

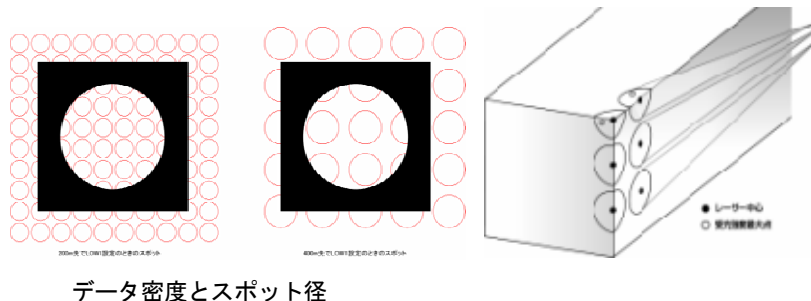


図-2.7.5 対象物の原形状の復元が可能な最適なデータ密度

<参考文献>

- [1]文化庁 文化財部 建造物課：マルチメディアによる文化財保存活用方策の調査研究、2002
- [2]和田雅昭・鈴木恵二・長野章・西村正三・増田稔：3D レーザスキャナによる函館漁港船入潤防波堤の三次元計測、平成 18 年度日本水産工学会学術講演会講演論文集、pp.207 - 210、2006
- [3]西村正三：「デジタル写真測量の理論と実践」文化財の保存管理におけるデジタル情報の活用（社）日本測量協会、2004

（西村 正三）

2. 8 3D写真図化システム

2. 8. 1 デジタル写真測量の概要

(1) 概要

写真測量は、主として航空機から地上を撮影した空中写真を用い、広範囲の正確な地図を作成する技術として発展してきた。最近ではデジタルカメラの高性能化により、フィルムの現像処理から解放され、現地で撮影後、直ちに3次元計測が可能となり、土木、建築、文化財、工業計測といった分野において、デジタル写真測量（画像計測）に対する期待、ニーズが高まっている [1] [2]。

計測には左右方向から撮影した最低2枚のステレオ画像を用い、解析後の3Dデータと画像データを用いて、テクスチャ付きの3Dモデルを作成し、パソコンの上で計測した結果を任意の視点から3Dとして観測し、視覚的に評価できる。最近ではTopcon (PI-3000V2)、Kurabo (Kuraves-K)、Victorysoft (PhotoModeler) に代表される写真解析ソフトも市販され、簡易に学部学生が使いこなせるレベルにある。

デジタル写真測量の特徴を3Dレーザと比較すると下記があげられる。

- ①作業が簡単で経済的である。(デジタルカメラ+パソコン、非常に安価なシステム)
- ②画像からターゲットの位置情報のみを簡単かつ高精度で取得できる。(後処理なし)
- ③自動計測した3Dデータと画像からオルソ画像、3Dモデリングが簡単に作成でき、ターゲットの変位計測を組み合わせた表示と評価が可能。
- ④システム陳腐化のリスクが低い。デジタルカメラ、パソコンは短期間に高精度化、高性能化、低価格化しており、常に最新のハードウェアを利用でき陳腐化のリスクが低い。
- ⑤データの記録と保存、管理が容易である。3Dレーザスキャナーのように膨大な3Dデータを持つ必要がなく、何点かのターゲット（基準点）と画像データのみで再現が可能。

本文では、デジタルカメラを用いた3D画像計測方法、その計測例について紹介する。

2. 8. 2 3D画像計測

(1) 基本原理と処理の流れ

写真測量の原理は、図-2.8.1 に示すように、デジタルカメラなどで撮影した左右2枚の画像を用いて3次元計測を行う。左右の異なる位置 O_1 、 O_2 から対象を撮影し、画像上の対応点 p_1 、 p_2 を計測して、三角測量の原理により、対象の3次元座標 P が求められる。この例は、カメラの傾きのない平行撮影という理想的な場合を想定したものであり、実際には基準点を何点か一緒に写し込んで、撮影した時のカメラの位置や傾きを求める標定作業を行う。3次元座標の計測は左右のステレオ画像毎に行う。左右の画像をパソコンのモニターに表示し、左画像上の p_1 に対応する右画像上の点 p_2 をマウス等のポインティングデバイスを用いて指示して、3次元座標を求める。この対応付けを画像処理で自動的に行う方法はステレオマッチングと呼ばれる。図-2.8.2 に一般的な画像計測の流れを示す。

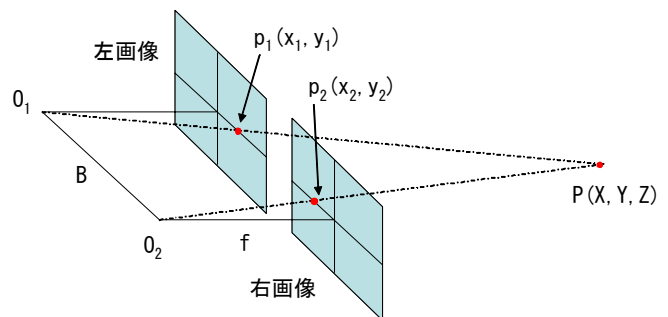


図-2.8.1 写真測量の基本原則

(2) 精度

写真測量においては、通常撮影距離の 1/1000 程度が精度といわれてきた。しかし最近のソフトでは対象物にセットしたターゲットの中心（重心）を半自動で算定することで、個人差なく簡単かつ高精度で標定できる。撮影距離に対して、およそ 1/5,000～1/20,000、すなわち撮影距離 5m で 1mm 以下の精度で計測が可能となる [1] [3]。

(3) 標定

標定とは、計測対象を撮影した時のカメラの位置と傾きを求める作業であり、通常、座標のわかっている基準点を 3 点以上写しこんで、基準点と画像との対応点を計測して算出する。全周計測の場合には適当な位置で撮影した画像から、隣り合う画像を順次接続して標定を行い、統一座標系にてそれぞれのカメラの位置と傾きを同時に求める。また、基準点がなくても画像の特徴部分に対応付けることにより、画像座標のみで仮のカメラの位置と傾きを計算して、後で既知点の座標値や 2 点間の長さを入力すれば、3 次元座標に変換できる。

(4) 3D 計測・図化

図化とは、対象物の輪郭などの形状を 3D でトレースする機能であり、計測した点と点をポリラインで連続的に結線する。左側の画像の図化したい部分をマウスにて指示すると、ステレオマッチングにより、右側の画像の対応点が自動的に位置決めされ、3 次元座標が計算される。

(5) データ処理

ステレオマッチングで計測される DSM データは、対象物の表面形状をリアルな高密度データ（点群）として得ることができる。これらの点群データから 3D モデルを形成するには、TIN モデルなどの面的なデータに変換することが必要である。マニュアルで計測された輪郭などのポリラインデータも TIN モデルとして利用できる。TIN モデルが形成できると、正射画像（オルソ）への変換、等高線、断面図として簡単に処理できる。テクスチャ付きの 3D モデルの作成は、デジタル写真測量の場合、標定によってそれぞれの画像から計測されるデータと元の画像との関係が確立しているため、計測データの合成やテクスチャの位置合わせといった特別な作業は必要としない。また、最近のパソコンには、3D アクセラレーション機能を持つビデオカードが搭載されており、非常に高速な描画が可能である。画像計測で生成されたテクスチャ付き 3D モデルは、数十万ポリゴンに及ぶ膨大なデータであっても、ストレスなく、画面上で高速に拡大、縮小、回転して表示する事ができ、建築や構造物などの複雑な計測や編集作業を進める事ができる [3]。

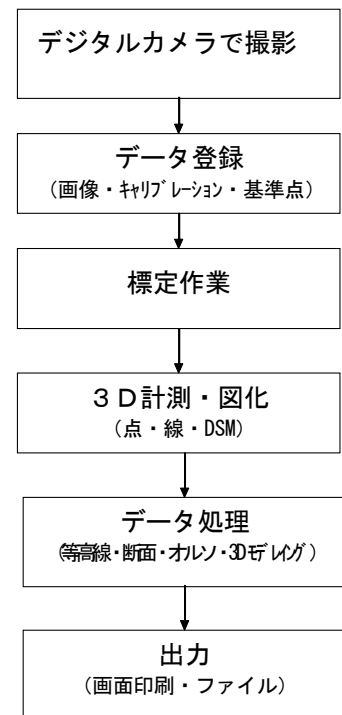
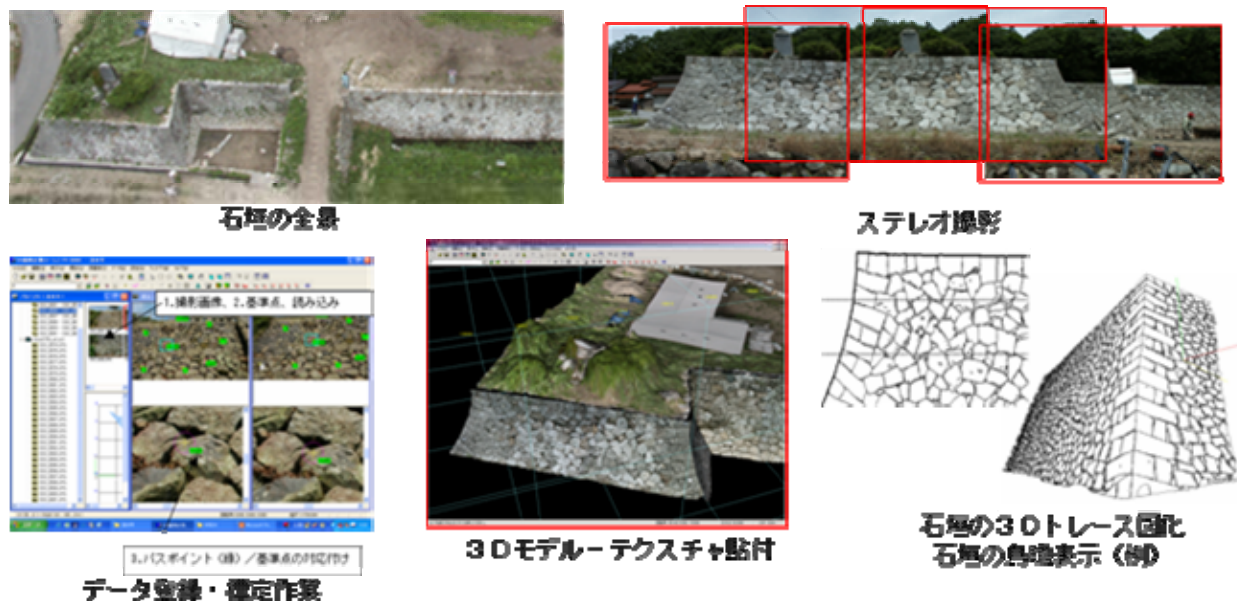


図-2.8.2 画像計測の流れ

2.8.3 計測例

(1) 構造物（石垣）の形状計測

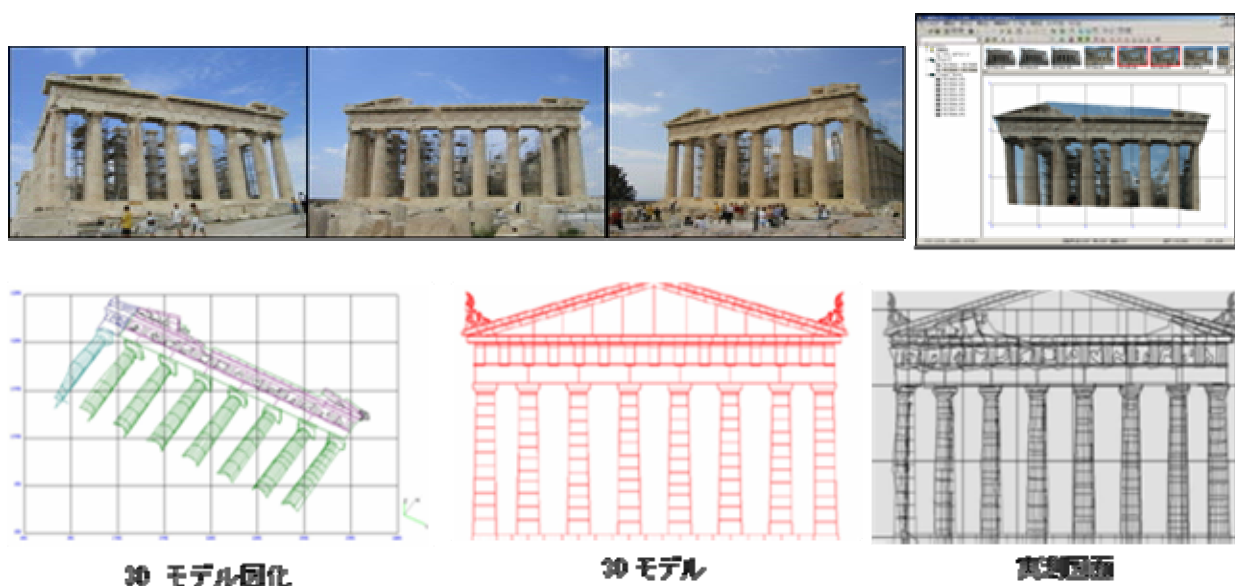
デジタルカメラで石垣を撮影し、写真解析ソフト（PI-3000V2）を用いて解析した例を示す。図-2.8.3 は撮影画像から解析処理・3D 計測・図化処理の流れである。3D モデル上の石垣のトレースは、マニュアル・半自動で図化した。石垣の目地や損傷等を視覚的に確認できる。これらの 3D モデルから石垣の孕み箇所を抽出し、修理範囲を特定することができる。



図ー2.8.3 石垣の形状計測から 3D モデル作成・図化出力

(2) 構造物（パルテノン神殿）の形状計測

ギリシアパルテノン神殿を、民生用デジタルカメラで撮影し、3D 計測・図化した。撮影条件は距離約 25m、基線長 7m 前後である。この条件では 1 画素の分解能は、平面方向で約 1cm である。この画像を用いて、3D 図化と DSM 自動計測を行った。検証のために、過去に作成したパルテノン神殿の実測図面を 2 次元 CAD 化し重畳して比較した。3D 図化したものは、撮影時には実測していないので、その実測図面から絶対座標として基準点約 20 点を加えオルソ画像にして、重ね合わせ全体の検証を行った。検証結果より、精度は±1 画素、すなわち、±1cm であった。文化財の海外調査では、機材も制約を受けることが多い。デジタルカメラ 1 台で、3D モデルが作成できる事は非常に有効であるが、文化財の専門家にとって、例えば残存状況や組積み手法の図を描くこと自体が対象の解釈を深める上で重要であるとされる。対象物と格闘しながら対象物を解釈しながらの実測調査との連携が重要であることに変わりはない[1] [2]。



図ー2.8.4 パルテノン神殿の形状計測から 3D モデル作成・図化出力

(3) ひび割れの観測・図化

これまで河川内に位置する橋脚・桁裏に発生しているクラックの発生位置、幅及び長さを調査するためには大掛かりな足場の設置が必要であったが、写真測量システムを組み込んだ画像トータルステーション（以下画像 TS）を使用することで、簡易に詳細なオルソ写真を取得することができる。通常写真測量を行う場合、対象物に基準点を設置し計測する必要があるが、この画像 TS では計測した位置の座標と画像（広角、望遠）が同時に記録できるので、基準点を設置する事なく、先に示した写真解析ソフト（PI-3000V2）で解析が可能である。そこで標定点設置作業を省略することができ、作業の安全性、効率性の向上が図れる。

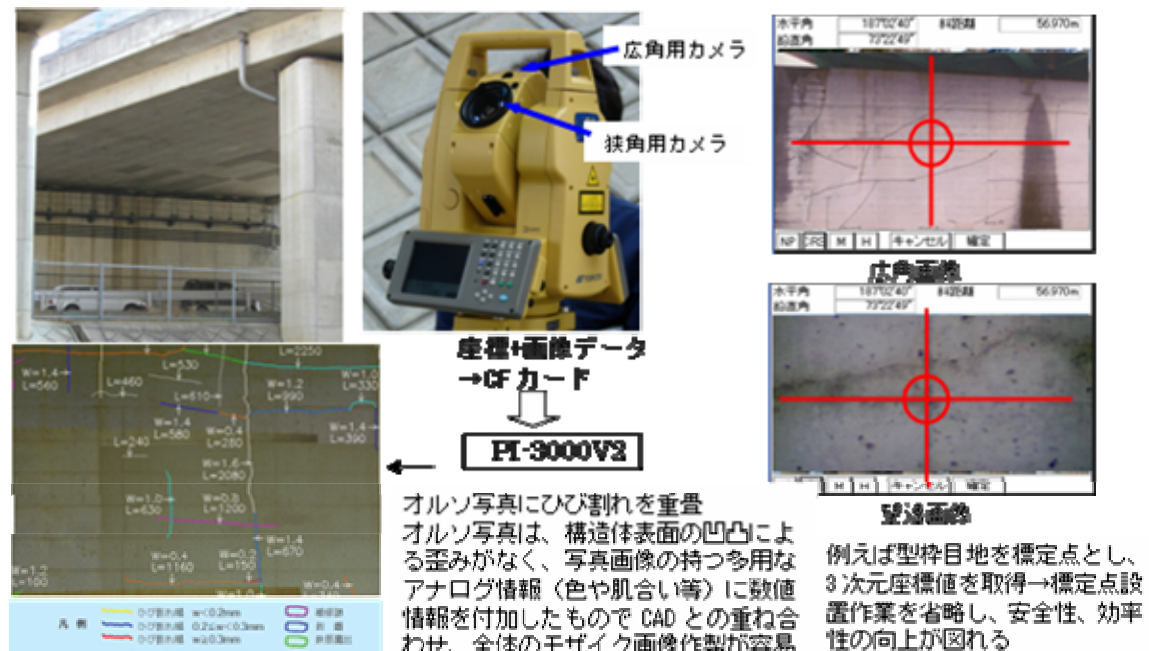


図-2.8.5 画像 TS を用いたひび割れの観測・図化

2.8.4 まとめ

本文では、デジタルカメラの 3D 画像計測について概説した。これまでの写真測量は、特殊かつ高価な計測用カメラを用いて 3 次元計測を行う方法であった。しかし、安価で高分解能なデジタルカメラの発展により、パソコンにて簡単かつ高精度な 3 次元計測ができる状況になった。さらに、計測に使用した画像を利用して 3D モデルが簡単に作成できるので、バーチャルリアリティやアニメーションなどと組み合わせて、計測の視覚化のためのモデリングツールとしても有効であり、今後、デジタルの技術革新を背景に、その応用分野が益々広がっていくものと期待される。

<参考文献>

- [1] Kochi, N., Ito, T., Noma, T., Otani, H., Nishimura, S., Ito, J. : PC-Based 3D Image Measuring Station with Digital Camera an Example of its Actual Application on a Historical Ruin. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV-5/W12, pp.117 - 120, Ancona, 2003
- [2] 西村正三 : 「西田橋の移設復元におけるデジタル情報の活用」 土木学会土木史研究 21、pp.257-264、2001
- [3] 村井俊治・近津博文 : 「デジタル写真測量の理論と実践」 文化財の保存管理におけるデジタル情報の活用（社）日本測量協会、2004（西村 正三）