

第 2 章

デジタル画像相関法

2.1 原理

DICMの技術は、1980年代初頭にSouth Carolina大学の研究者によって開発された。DICM^{1)~14)}は、計測対象物表面の模様ランダム性を基にして、変形前後の計測対象物表面をCCDカメラなどで計測したデジタル画像を画像処理することにより、計測範囲全体にわたって変位の大きさと方向を求めることができる手法である。DICMの特長として、計測空間の揺らぎには比較的強いことが挙げられる。また、2台のカメラを使用することで三次元変形やひずみも計測可能である。DICMの適用分野としては、機械^{9)~14)}、医療^{15)~18)}、電気・電子¹⁹⁾²⁰⁾、農学^{21)~23)}、材料分野^{24)~31)}で用いられている。

DICMの計測精度は、1画素（画素：デジタル画像の大きさの単位）に対応する長さの20~50分の1と言われており、例えば、1画素の長さが1mmであるとする計測精度は20~50 μm となる。このようにDICMでは、計測精度は取り込んだ画像サイズに依存するため、計測物のサイズが大きい場合は低分解能で、小さい場合は高分解能で計測が可能となる手法である。

DICMを行う際に重要になるのが、任意の点の移動量の算出である。解析原理は、デジタル画像が256階調で表現される画像であることを利用したものである。まず、変形前の画像において、任意の点（1画素）を中心とした $N \times N$ 画素の任意領域（サブセット）を指定する（図2.1.1(a)）。計測対象物に変位を与えると、変形後の画像でのサブセットの位置は変化する（図2.1.1(b)）。変形後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。このサブセット中心の点の移動より変位方向、変位量を算出する。この処理を全ての小領域で繰り返す事によって、全視野の変位データを得ることができる。ひずみ分布は、以上の方法により得た変形量を利用して算出する。これは、あらかじ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、変形後の二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。この解析手法の特長として、水平、垂直、斜め、最大主ひずみ、最小主ひずみ（図2.1.2）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ができる、すなわちゲージ長の自由な選択が可能となること、などが挙げられる。

変形前後の画像間における相関を求める方法として、1画素単位の計測精度で変位量を求める粗探索と、1画素以下の精度で変位量を求める精密探索が存在する。粗探索の一例として、残差最小法を利用した算出方法を式(2.1.1)に示す。

$$C(X+u, Y+v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M |I_d(X+u+i, Y+v+j) - I_u(X+i, Y+j)| \quad (2.1.1)$$

ここで、同式中の $I_u(X, Y)$ 、 $I_d(X+u, Y+v)$ は、それぞれ変形前、変形後の画像強度（輝度値）を示す。 X 、 Y は、サブセットの中心座標を表す。 u 、 v は、それぞれ x 方向、 y 方向への移動量を示す。 $N=2M+1$ である。式(2.1.1)の値が最小となる位置は、設定したサブセットの移動後における中心位置（最近接画素）と考えられる。

しかしながら、前述のとおり、実際の移動量は最近接画像と一致することは稀であり、ほとんどの場

合は、1画素単位以下の微小な変位をともなうものである。そこで、粗探索後に、1画素以下の精度で移動量を求める精密探索を行う。これらの探索例として、最近接画素周辺の画素点での相関値を利用する方法³²⁾³³⁾や、離散的な画素の強度値の間に対して直接的に数値補間を導入し、相関が最も良い位置を求める方法³⁴⁾³⁵⁾がある。前者は、相関の最も高い画素位置とその周辺部の画素位置での相関値について、1次曲線や2次曲線、ガウス分布の直線、曲線などを利用して補間し、その交点やピークをもとに1画素以下の移動量を求めるものである。一方、後者は、計測した画像の離散的な強度分布を直接、線形や2次曲線、Bi-cubicなどの補関数を用いて補間、相関関数を演算し、相関の最も良い位置を求めるものである。本研究では、精密探索として後者の解析方法を採用した。同解析方法に使用した相互相関の式を、式(2.1.2)に示す。

$$C(X+u, Y+v) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \times \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_u(X+i, Y+j)}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \{I_d(X+u+i, Y+v+j)\}^2 \times \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \{I_u(X+i, Y+j)\}^2}} \quad (2.1.2)$$

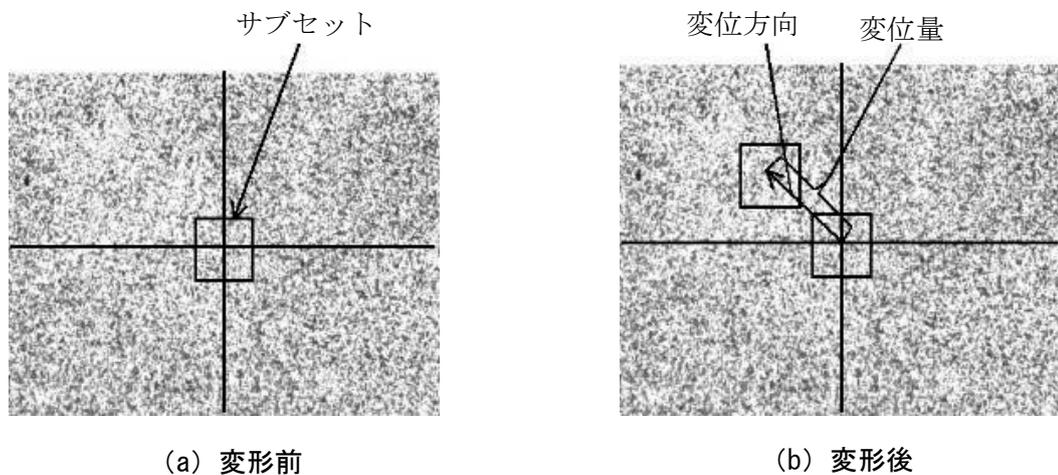


図 2.1.1 変形前と変形後のデジタル画像

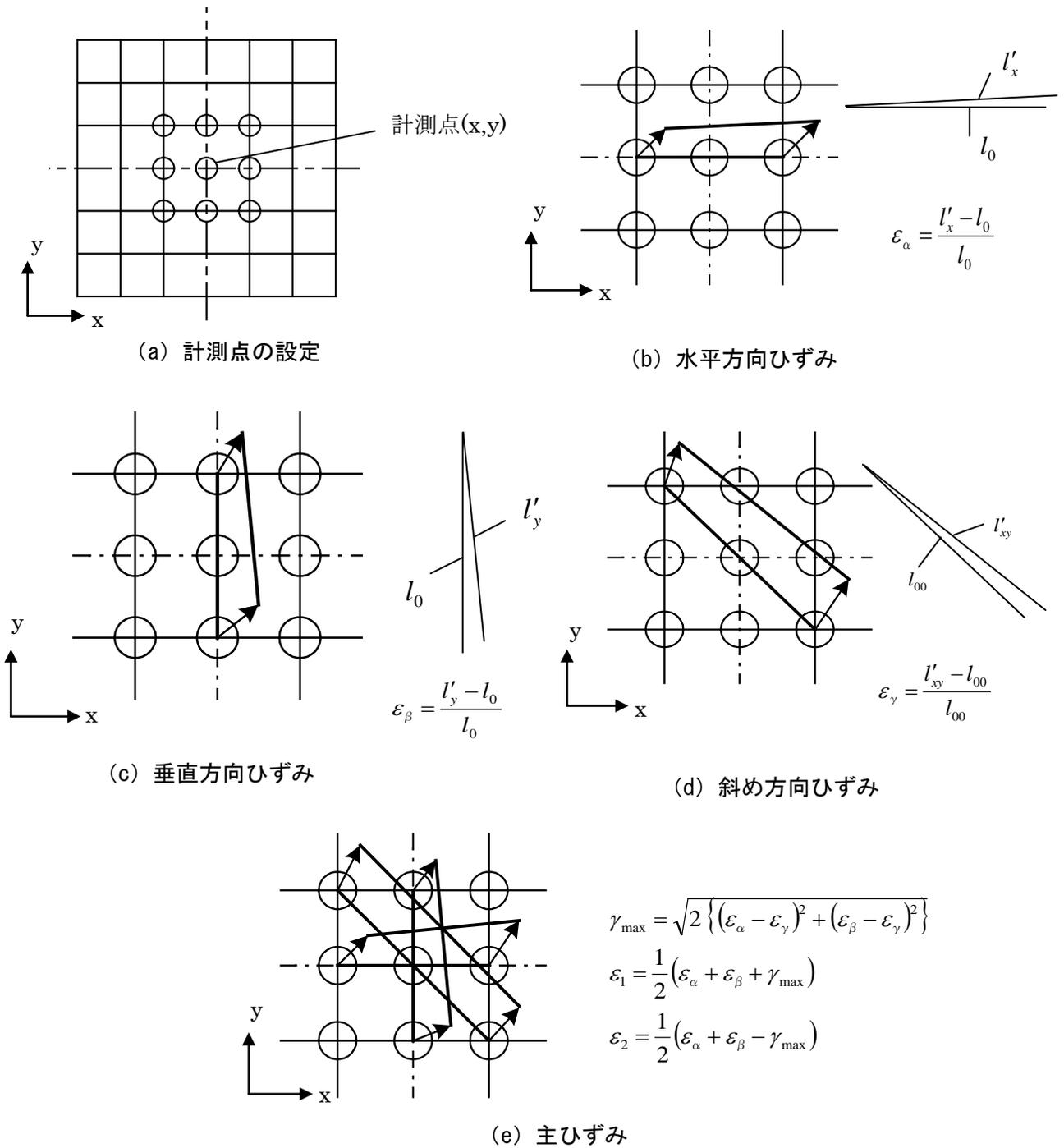


図 2.1.2 ひずみ解析

2.2 光学的全視野計測装置

ここでは、DICMに必要なデジタル画像を取得するための画像取得装置について説明する。本研究で用いた画像計測装置は、カメラタイプ全視野計測装置とスキャナタイプ全視野計測装置である。カメラタイプ全視野計測装置は、DICMの研究で多く利用されている装置である。また、スキャナタイプ全視野計測装置は、屋外で計測を行うために本研究で開発した装置である。

2.2.1 カメラタイプ全視野計測装置

カメラタイプ全視野計測装置（以下カメラ装置と呼ぶ）の写真、概要図および仕様をそれぞれ写真 2.2.1、図 2.2.1 および表 2.2.1 に示す。カメラ装置は、モノクロ CCD カメラ、レンズ、ノートパソコン、接続ケーブルで構成される。これらは、簡易なシステムかつ軽量で持ち運びが容易である。カメラ自体にメモリなどが内蔵されていないため、計測画像はノートパソコンに保存される。画像の計測は、通常のデジタルカメラとほぼ同様のため、計測に際して特別な技量は必要としない。焦点距離の異なるレンズを使用すれば計測距離を自由に設定することができる。本研究では、2台の CCD カメラを用いたステレオ計測による三次元計測を行い、変位・ひずみを算出した。ステレオ計測は、カメラ1台の計測と比較して、カメラと試験体を正対させて計測する必要がないことや、試験中に試験体が面外方向に変形しても高精度な計測できる特徴がある。

一般に、カメラレンズは曲面となっているため、計測された画像は収差がある。また、2台のカメラでステレオ計測を行う場合、カメラの位置合わせを行う必要がある。ここでは、計測前に計測距離に応じて、サイズの異なるキャリブレーションボード（写真 2.2.2）を用いて、ボード中の黒丸を対応点とし、ボードの向きと角度を変えながら複数枚（20枚から30枚程度）計測することで、画像のひずみ補正やカメラの位置合わせを行う。写真 2.2.3 にキャリブレーション状況を示す。

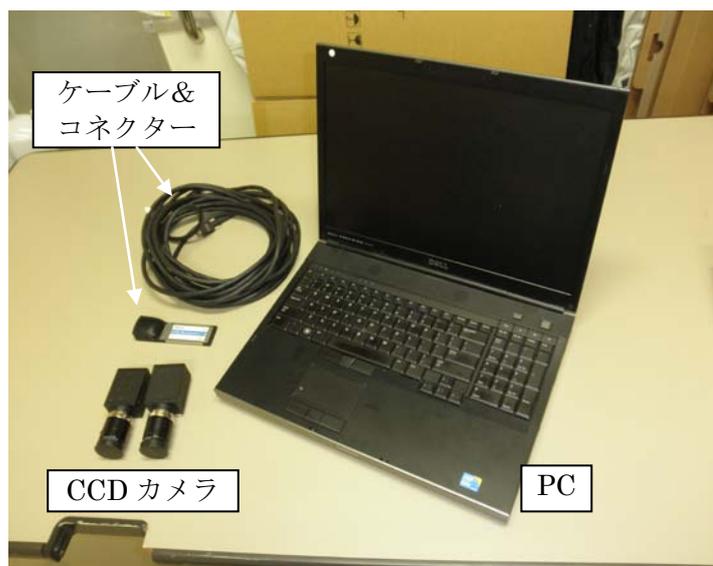


写真 2.2.1 カメラ装置

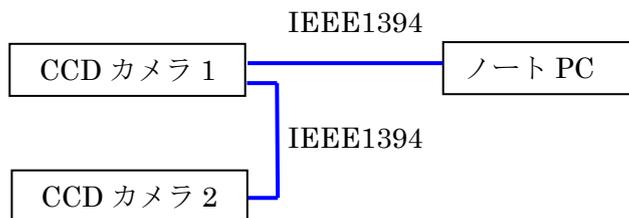


図 2.2.1 システム概要図

表 2.2.1 仕様

CCD カメラ	型番：Point Grey Researc 社 GRASS-50S5M/C 撮像素子：Sony ICX625 CCD 解像度：2448×2048pixel（500 万画素） 画素サイズ：3.45 ×3.45μm デジタル画像：モノクロ 8 ビット シャッター形式：電子シャッター シャッター速度：0.02ms ～10s 最大フレームレート：15fps 質量：100g
レンズ	レンズ 1：Schneider Kreuznach 社 Xenoplan 1.4/ 17mm レンズ 2：KEYENCE 社 CA-LHR35 レンズ 3：Schneider Kreuznach 社 Xenoplan 2.8/ 50mm 質量：約 100g
ノート PC	OS：Windows XP Pro CPU：Intel(R) Core(TM)i7 CPU Q 820 @1.73GHz (8CPUs) HD：300GB メモリ容量：3.5GB RAM 質量：3.7kg
LED ライト	Suntech 社 PL130 光源：高輝度白色 LED130 個 照度：3520 lx（50cm・full） 絞値：f11+2/10（ISO400・1/30 秒・50cm・Full） 色温度：約 5500 K 照射角度：44 度 *フィルターなしの条件

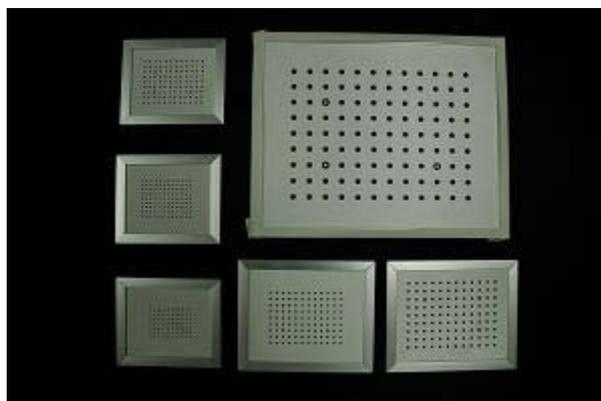


写真 2.2.2 キャリブレーションボード

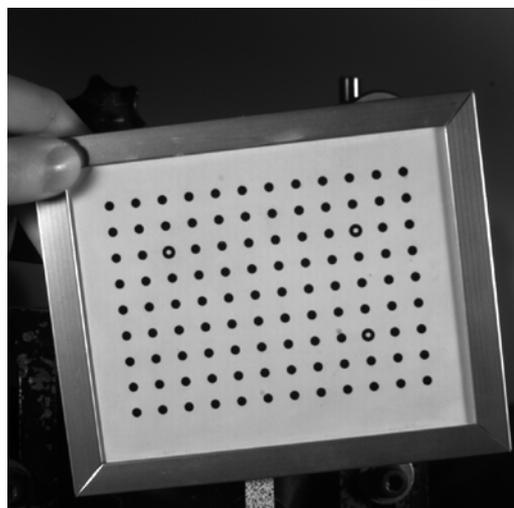
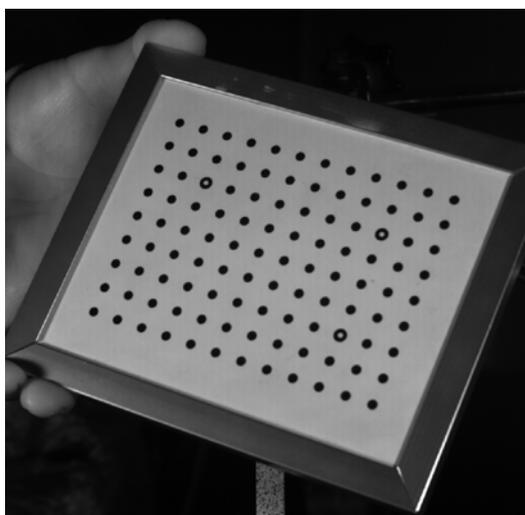


写真 2.2.3 キャリブレーション状況

2.2.2 スキャナタイプ全視野計測装置

現状の DICM の計測システムは、CCD (COMS) カメラ、カメラの制御や画像を保存するためのパソコン (不要な場合もある) および計測対象物を照らす光源で構成される。これらのシステムは、屋外において高精度なひずみ計測ができない理由が4つある。第一に、カメラレンズには収差があり、これを完全に補正することができないためである。第二に、計測時の照度が変わると計測画像の階調が変化するためである。第三に、カメラは三脚や専用の架台に固定し計測を行うが、三脚や架台自体が振動・移動すると画像にブレが生じることや計測距離が変化するためである。最後に、CCD (CMOS) 素子の画素数の不足により大きなサイズの対象物を計測すると計測精度が低下するためである。

本研究では、上記の問題を解決した DICM を用いたスキャナタイプ全視野計測装置 (以下スキャナ装置と呼ぶ) を2台 (装置 A, 装置 B) 開発した。

(1) スキャナ装置 A

スキャナ装置 A の外観を写真 2.2.4～写真 2.2.6 に示す。また、その仕様を表 2.2.2 に示す。スキャナ装置 A により画像を読み取る方法は、USB を介してノートパソコンに接続したスキャナ装置 A を計測対象物の表面に密着させ、ラインセンサを平行に走査し、二次元画像を取得するのみという簡易な方法である。

本装置の特長としては、ラインセンサを平行に走査し、二次元画像を計測するため収差のない画像を取得できる。ラインセンサの横には、光源を配置することによって、構造物に装置を密着させてスキャンすることができ、屋外においても外乱光の影響を受けることなく計測できる。

また、計測対象物に固定具(写真 2.2.7)を取り付けて、スナップジョイントを介してスキャナ装置 A を固定するため、ブレのない画像を得ることができる。スキャナ装置 A の 4 隅には、焦点調整ネジや焦点距離を確認するためのマイクロメータを取り付けてある。このことにより、焦点距離 (計測距離) を常に一定に保つことができ、再現性の高い画像が得られる。最大読取範囲(200mm×200mm)を 1200dpi で計測すると、約 9000 万画素で構成される高解像度の画像を取得できる。スキャナ装置 A のもう一つの特徴としては、ラインセンサおよび駆動装置を回転盤の上に設置し、これを 360°回転できる機構としており、このことにより任意の計測方向に主走査方向を合わせて計測することができる。

以上から、本装置は CCD カメラで計測する諸問題が無く、建設現場や屋外などの環境下にも適用できる。

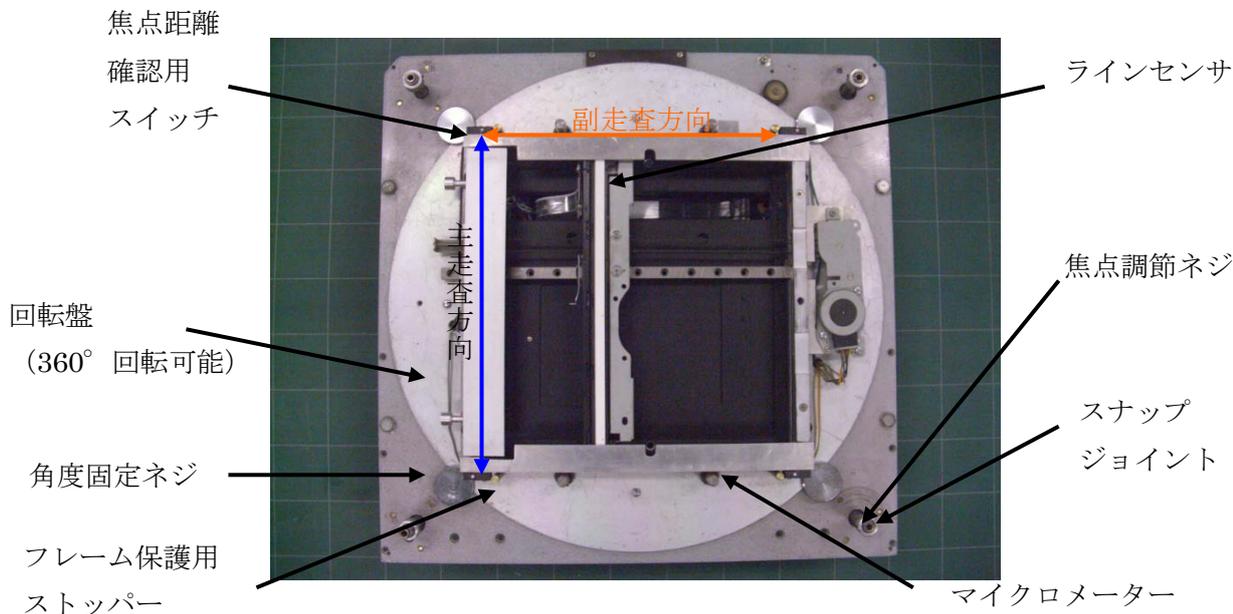


写真 2.2.4 スキャナ装置 A 前面

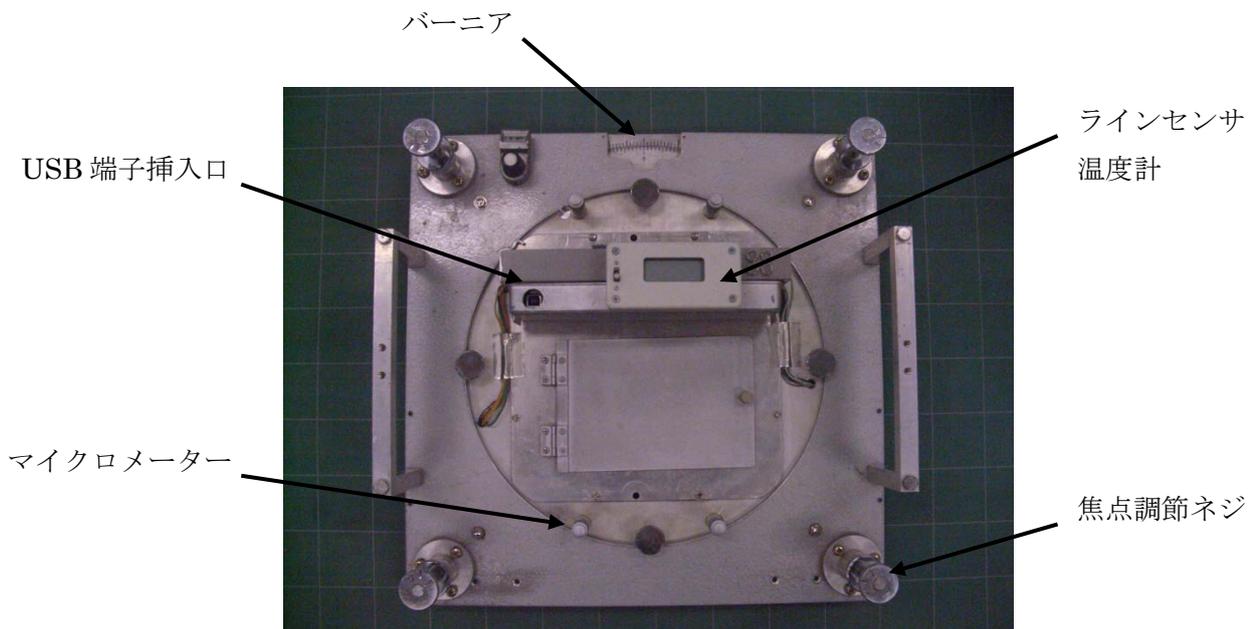


写真 2.2.5 スキャナ装置 A 後面

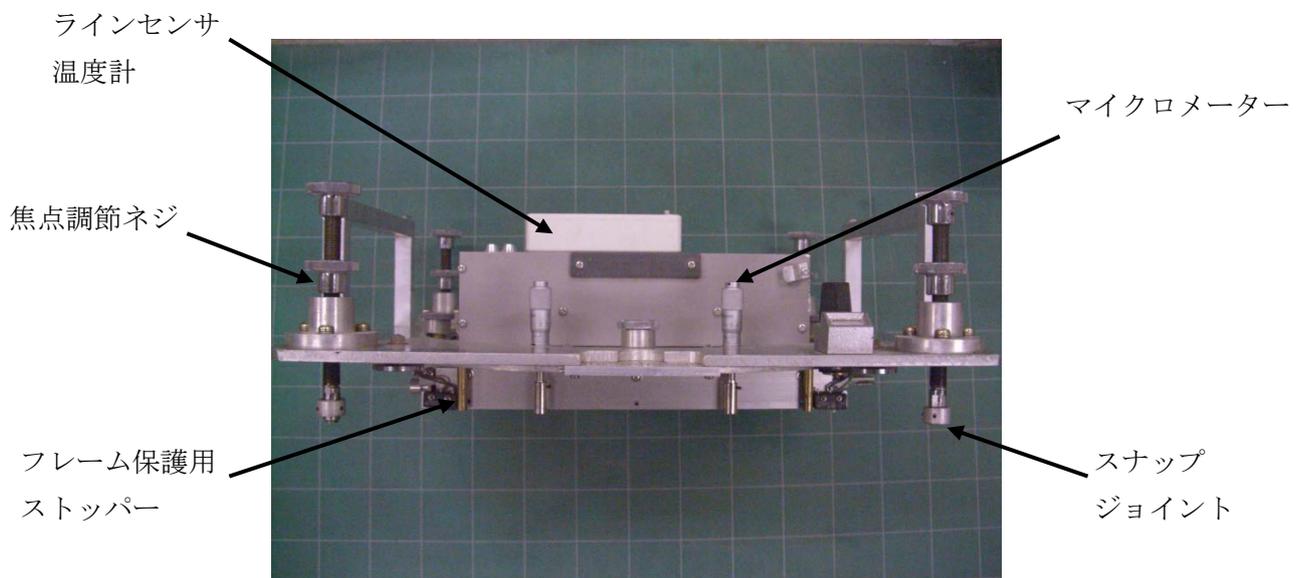


写真 2.2.6 スキャナ装置 A 側面

表 2.2.2 スキャナ装置 A の仕様

走査方向	読み取りヘッド移動による原稿固定読み取り
センサタイプ	CIS(Contact Image Sensor)
最大原稿サイズ	200mm×200mm
光学解像度	1200dpi(20 μ m/pixel)
光源	LED
電源供給	USB バスからの供給 (外部電源必要なし)
消費電力	動作時 : 2.5W/待機時 1.4W
寸法 (幅×奥行×高さ)	397×280×35mm
計測時間	3分30秒
焦点距離	約 3mm
質量	6.0kg



写真 2.2.7 固定具

・ラインセンサ温度計

本装置の内側にダミーセンサを取り付けて、熱電対と接続した。これにより、ラインセンサの温度を計測することが可能となり、ラインセンサの温度変化による見掛けひずみの影響を把握することができる。

・フレーム保護用ストッパー

本装置は四隅に配置されている焦点調節ネジを回すことで、装置と対象物の距離を調節する。その際、焦点調節ネジを締めすぎると、フレームやラインセンサに傷が入るおそれがある。それを防ぐために本装置の四隅にストッパーを配置することで、ネジの締め過ぎによる装置の損傷を防ぐことができる。

(2) スキャナ装置 B

スキャナ装置 B の外観を写真 2.2.8～写真 2.2.11 に示す。また、その仕様を表 2.2.3 に示す。装置の計測範囲は 210mm×210mm であり、最高解像度は 1200dpi で 9921pixel×9921pixel の画像が取得できる。装置本体は 387mm×262mm×90mm、装置固定部の外形寸法は 374mm×374mm である。装置の総質量は約 8.0kg である。

市販のフラットベッドスキャナの駆動系を利用したスキャナ装置 A では、副走査方向の送り精度が低いため、副走査方向のひずみ計測精度が悪い。そこで、副走査方向の送り精度向上のために駆動装置を剛性の高いフレームに固定し、ラインセンサを 2 本のリニアガイドレールを用いて可動できるようにし、これを精密ボールネジとステッピングモータによって精度良く送る機構とした。なお、副走査方向の移動距離の制御には、0.1 μ m の分解能のリニアエンコーダを用いた。

スキャナ装置 A では装置内部に配置してあったマイクロメーターを本装置では本体の外側に焦点調節ネジとデジタルノギスを配置することで、より正確かつ安易に合わせることが可能とした。センサ温度の他に計測対象の表面温度も容易に計測できるようにした。さらに、装置を対象物へ固定する方法も、より扱いやすく、より頑丈に固定できる方法にした。

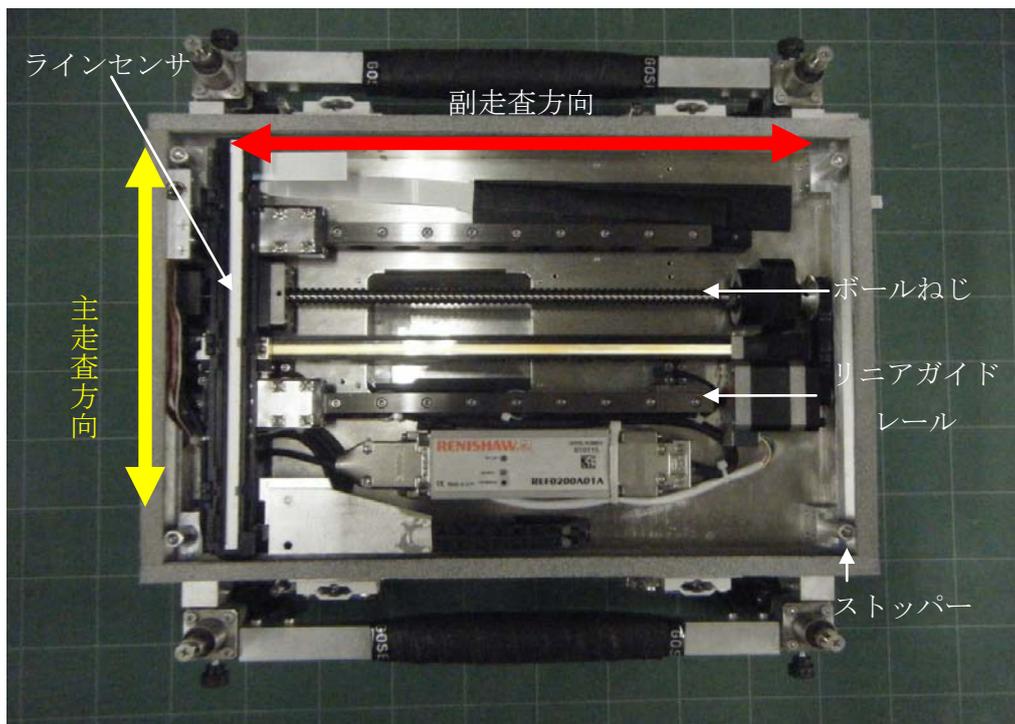


写真 2.2.8 スキャナ装置 B 前面

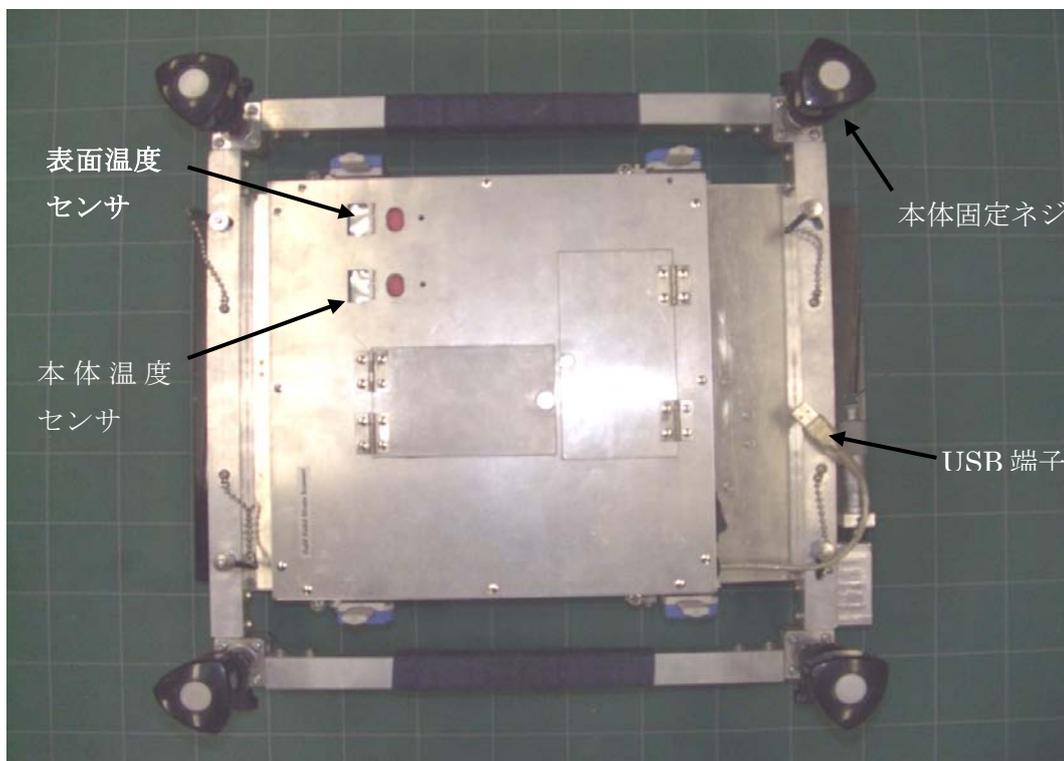


写真 2.2.9 スキャナ装置 B 後面

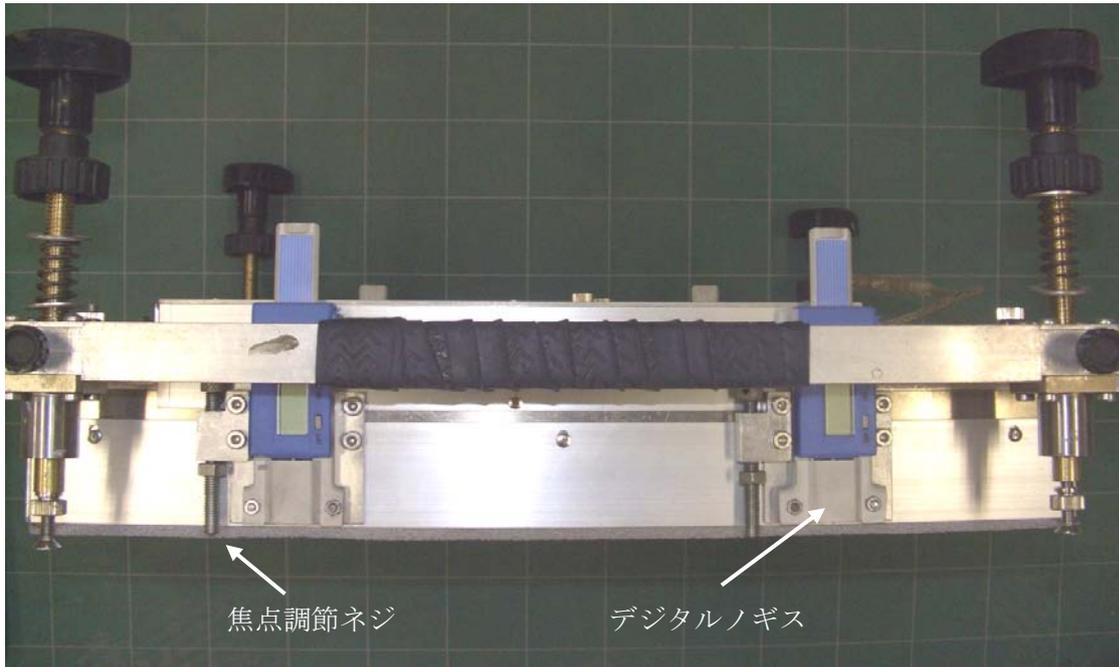


写真 2.2.10 スキャナ装置 B 側面

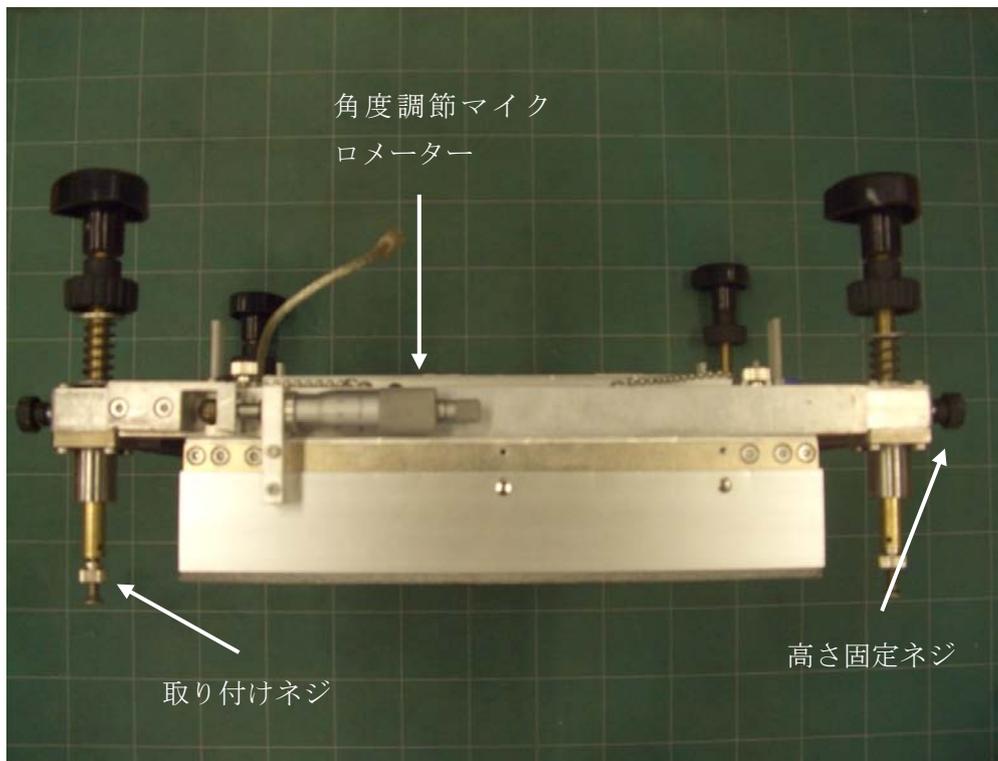


写真 2.2.11 スキャナ装置 B 側面下

表 2.2.3 スキャナ装置 B の仕様

センサタイプ	CIS (Contact Image Sensor)
最大原稿サイズ	210×210mm
光学解像度(主走査×副走査)	1200dpi(20μm/pixel)
光源	LED
電源供給	DC15V
消費電力	15W
計測時間	5分
焦点距離	約4mm
質量	8.0kg

・非接触赤外線放射温度計

本装置の内側に赤外線放射温度計が取り付けられている。これにより非接触で温度が測れるようになったためラインセンサと計測対象物の表面の温度を把握することが可能となった。ラインセンサの温度を測ることによって、ラインセンサの伸び縮みによる見かけのひずみを補正することができる。また、計測対象物の表面の温度を測り、温度変化による温度ひずみを補正する。なお、温度計はデジタル表示である。外観を写真 2.2.12 に示す。

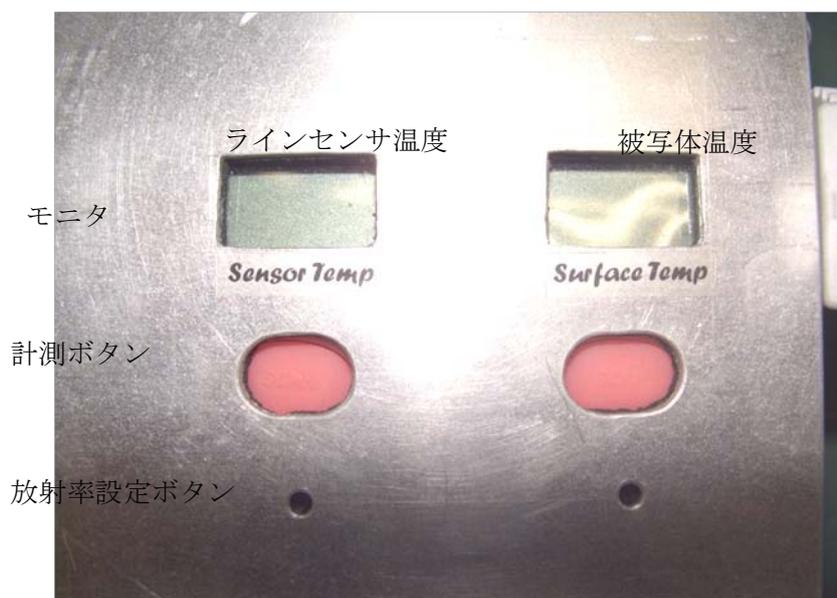


写真 2.2.12 赤外線放射温度計

・デジタルノギスおよび焦点調節ネジ

現場での使用を考慮すると、構造物の計測対象物表面へ本装置を正確かつ簡易に取り付けることが重要である。しかし、スキャン装置 A ではマイクロメーターを装置の内側に設置していたため、装置の位置の確認が困難であった。そこで、本体装置の外側にデジタルノギスと焦点調節ネジを設置することにより、焦点を保ったまま、装置の取り外しが可能となった。外観を写真 2.2.13 に示す。

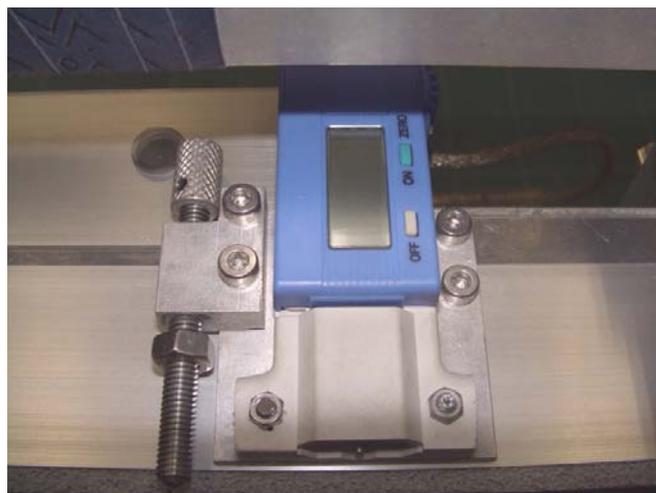


写真 2.2.13 デジタルノギスおよび焦点調節ネジ

・角度調節マイクロメーター

本装置は金具と取り付けネジによって容易に取り外しが可能である。しかし、それによって角度のズレが生じた際、誤差となるおそれがある。それを防ぐために本装置に角度調節マイクロメーターを設置することで、角度のズレを防ぐことができる。なお、マイクロメーターを一周回すと約 0.1 度傾く。外観を写真 2.2.14 に示す。

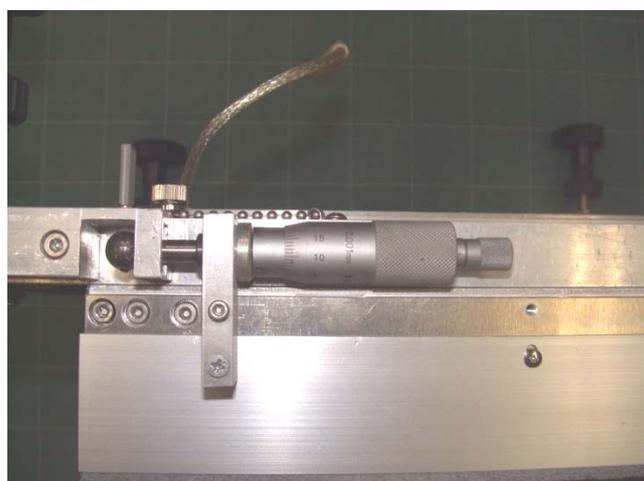


写真 2.2.14 角度調整マイクロメーター

・フレーム保護用ストッパー

本体の外側に配置されている焦点調節ネジを締めることで、装置と対象物の距離を調節する。焦点調節ネジを締めすぎると、フレームやラインセンサに傷が入るおそれがある。それを防ぐために本装置の四隅にストッパーを配置することで、ネジの締め過ぎによる装置の損傷を防ぐことができる。

・固定部

装置を設置する際、計測範囲が毎回同じ計測範囲であること、現場での操作性を考慮し装置を容易にセットし固定ができることが必要である。本装置の設置の方法は受け具を貼り付け、そこに装置の四隅の取り付け部を入れ込み、押しバネの反力により装置を押しつけ固定するといった容易な操作で設置できる。横向き、上向き、下向きとどの向きであっても確実に固定ができる。固定部を写真 2.2.15 に示す。

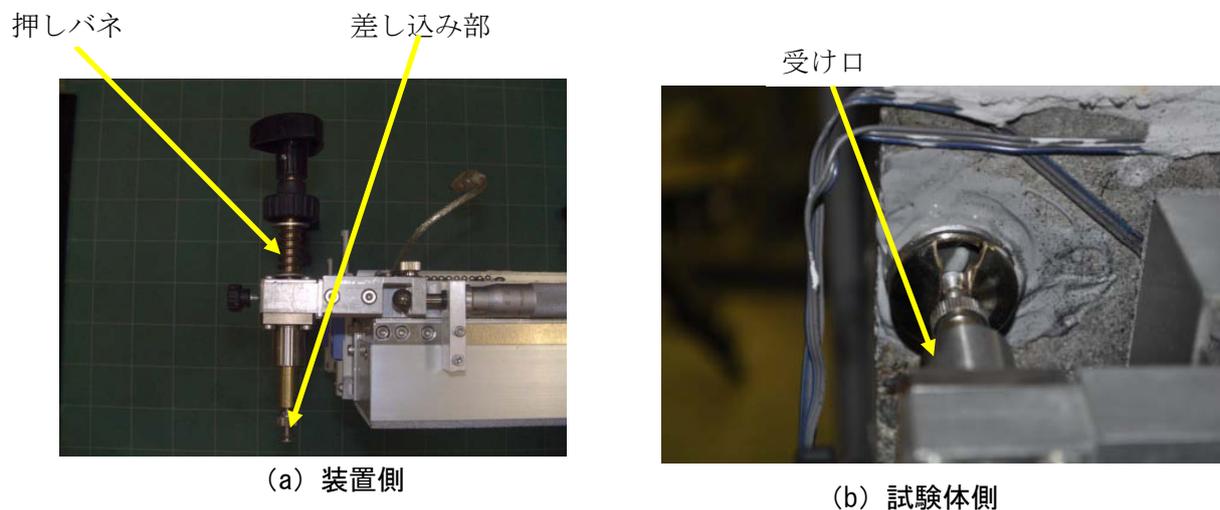


写真 2.2.15 固定部

2.3 カメラ装置とスキャナ装置の比較

カメラ装置とスキャナ装置の比較表を表 2.3.1 に示す。

表 2.3.1 比較表

	カメラ装置	スキャナ装置	
		装置 A	装置 B
システム	CCD カメラ, レンズ, ノート PC, 接続ケーブル, 三脚など	スキャナ装置, ノート PC, USB ケーブル	
出力	三次元形状 (ステレオ計測の場合) 変位, ひずみ	二次元変位, ひずみ	
操作性	通常のデジタルカメラとほぼ同様に 操作に技術は必要ない	技術が必要	
画素数 解像度	500 万画素	1200dpi (20 μ m/pixel) 例: 210mm \times 210 mm を計測すると約 9800 万画素	
計測範囲	計測距離やレンズの焦点距離を変化 させることにより自由に設定可能	200mm \times 200mm	210mm \times 210mm
計測距離	レンズの焦点距離を変化させること により自由に設定可能	約 3mm	約 4mm
計測時間	明るさとカメラの性能によるが自由 に設定可能	3 分 30 秒	5 分
振動・外乱 光の影響	有 ⇒計測誤差につながる	無	
質量	約 5kg 以内 (ノート PC 含む, 三脚 除く)	約 6.0kg	約 8.0kg
特徴	三次元計測が可能	回転盤により主走査方 向を 360° 回転できる	副走査の精度を向上させ たため, 回転盤なし
計測表面	計測面に輝度値の変化がなければ, スプレーでランダムパターンを塗布する必要がある		
備考	ステレオ計測により, 凹凸形状や曲 面形状の対象物を計測できる	計測対象物が凹凸形状や曲面形状の場合, 計測表面 を研磨して平滑にする必要がある	

2.4 ひずみの算出方法

ひずみの算出方法は、例えばひずみゲージのひずみ値を比較する場合、ゲージ直上に標点を定め、DICM により各標点の移動画素を計測し、各々の隣り合う標点間距離の変化からひずみを算出し、その平均から解析範囲内のひずみを求める。図 2.4.1 にひずみ算出のイメージ図を示す。

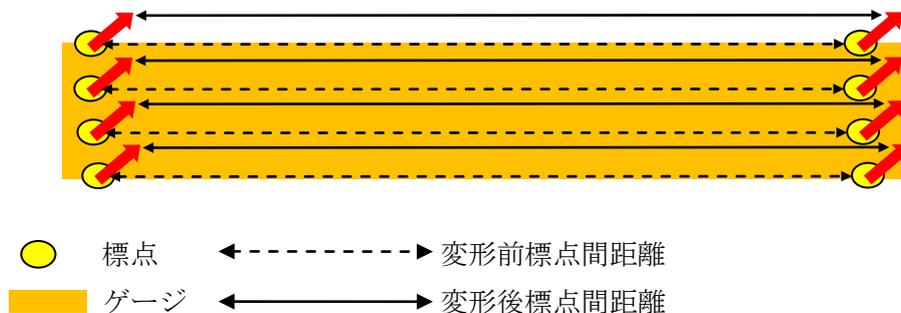


図 2.4.1 ひずみ算出イメージ図

【参考文献】

- 1) Sutton, M.A., J.-J., Orteu, and J.-J., Scriver : Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, 2009.
- 2) Hild, F., and F., Roux : Digital Image Correlation : from Displacement measurement to Identification of Elastic Properties-a Review, Strain, Vol.42, No.2, pp.69-80, 2006.
- 3) Pan, B., K., Qian, H., Xie, and A., Asundi, : Two-dimensional Digital Image Correlation for In-plane Displacement and Strain Measurement : a Review, Measurement Science and Technology, Vol.20, No.6, Art.No.062001, 2009.
- 4) Morita, Y., M., Uchino, M., Todo, Y., Matsushita, K., Akarawa, and K., Koyano : Visualizing Displacement and Deformation Behavior of the Periodontium Under Dental Occlusion Using a Digital Image Correlation Method, Journal of biomechanical science and engineering, Vol.2, No.3, pp.105-114, 2007.
- 5) 西川出 : デジタル画像相関法による全視野微小変位分布計測, 非破壊検査, Vol.54, No.3, pp.132-138, 2005.
- 6) 米山聡 : デジタル画像相関法を用いた変位・ひずみ分布測定, 非破壊検査, Vol.59, No.7, pp.306-310, 2010.
- 7) 梅崎栄作 : デジタル画像相関法, 実験力学, Vol.3, No.2, pp.115-118, 2003.
- 8) 米山聡, 森本吉春 : デジタル画像相関法による変位測定とその標準化について, 材料力学部門春のシンポジウム講演論文集, pp.98-103, 2003.
- 9) 岡直樹, 松崎亮介, 轟章 : デジタル画像相関法を用いたタイヤの面内ひずみ・面外変位同時計測, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.746, pp.53-59, 2008.
- 10) 藤松信義, 三栖功 : 軟質ゲルコーティングを用いた表面摩擦力の画像計測システムの構築, 可視化情報学会誌, Vol. 27, pp.265-268, 2007.
- 11) 植村知正, 井口学, 臼井尚, 坂根守 : 二値画像相関法による水槽中の三次元流れの計測, 可視化情報学会誌, Vol. 13, pp.67-70, 1993.
- 12) Yoneyama, S. and M., Takashi : Automatic Determination of Stress Intensity Factor Utilizing Digital Image Correlation, J. Jpn. Soc. Exp. Mech., Vol. 1, No. 4, pp.202-206, 2001.
- 13) 畝田道雄, 岩田節雄, 松石正克, 芦田吏史, 岡田潤, 石川憲一 : 計測画像を用いたひずみ分布計測法に関する研究 : 高ひずみ条件下における計測精度および疲労き裂発生位置の推定に関する実験検証, 精密工学会誌, Vol.75, No.3, pp.437-442, 2009.
- 14) 葛上昌司, 桑水流理, 吉川暢宏 : 並列三次元一括画像相関法による軟組織内部の変位場同定, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.73, No.732, pp. 844-851, 2007.
- 15) 桑水流理, 中本与一, 吉川暢宏 : X線 CTによる生体内非侵襲力学場評価, 日本機械学会第15回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, pp.423-424, 2003.
- 16) 森田康之 : デジタル画像相関法による骨セメント型人工股関節を模擬したステム/骨セメント

- ／皮質骨界面周辺の微視的変形挙動計測, 実験力学, Vol.11, No.2, pp.107-111, 2011.
- 17) 南谷晴之, 臓器微小循環系の血流・リンパ流の可視化と動態解析, 生物物理, Vol.36, No.1, pp.35-39, 1996.
 - 18) 森田康之, 銭立和, 東藤貢, 松下恭之, 内野正和, 新川和夫, 古谷野潔: デジタル画像相関法による歯科インプラントを植立した擬似骨の変形計測(実験力学における計測, 解析法の新展開(2)), 年次大会講演論文集, pp.143-144, 2009.
 - 19) 穴戸信之, 池田徹, 宮崎則幸, 中村健太郎, 宮崎政志: デジタル画像相関法を用いた電子実装部の熱ひずみ分布計測 材料, Vol.57, No.1, pp.83-89, 2008.
 - 20) 鈴木康平, 荒木俊二, 池田健一, 三宅修吾: デジタル画像相関法による電子デバイスとはんだ接合部の熱変形評価(特集2 マイクロ接続技術の進化), エレクトロニクス実装学会誌, Vol.12, No.7, pp.616-622, 2009.
 - 21) 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, Vol.70, pp.236-237, 2001.
 - 22) 豊岡了: ビデオカメラおよびデジタル画像相関法によるシロイヌナズナの回旋運動の計測, 非破壊検査, Vol.54, No.6, pp. 298-301, 2005.
 - 23) 豊岡了, 門野博史, 三輪誠, ラルハヤケ P.アムラ: 植物の成長の光学的非接触計測とその環境センシングへの応用, 実験力学, Vol. 8, No. 4, pp23-24, 2008.
 - 24) 松原晃義, 町田賢司, 荻原慎二: デジタル画像相関法とインテリジェントハイブリッド法によるCFRP複合材料の応力解析(セッション2 画像計測・評価), 評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, Vol.4, pp.37-40, 2005.
 - 25) 中山智仁, 江前敏晴, 尾鍋史彦: 透過光画像に画像相関法を応用した紙の物性解析技術, 紙パ技協誌, Vol. 56, No. 11, pp.90-96, 2002.
 - 26) Choi, D.,J.L., Thorpe, and R.B.,Hanna : Image-analysis to measure strain in wood and paper, Wood Science and Technology, Vol.25, No.4, pp. 251-262, 1991.
 - 27) 村澤剛, 米山聡, 東郷敬一郎, 隆雅久: 形状記憶合金複合材料に生じる変形と内部応力分布 , 日本機械学会論文集 A 編, Vol.71, No.705, pp.780-788, 2005.
 - 28) 村田功二, 増田稔, 宇京斉一郎: デジタル画像相関法による木材のひずみ分布解析, 可視化情報学会論文集, Vol.25, No.7, pp.57-63, 2005.
 - 29) 村田功二, 増田稔: 画像相関法による針葉樹の横圧縮ひずみ分布解析(<特集>木質材料), 材料, Vol.52, No.4, pp.347-352, 2003.
 - 30) 松田浩, 森下喬, 安東祐樹, 古屋瞬, 山下務, 内野正和, 伊藤幸広, 崎山毅: デジタル画像相関法を用いた矩形張力膜のリンクル計測, 応用力学論文集, Vol.9, pp.581-590, 2006.
 - 31) 大貫博崇, 町田賢司: デジタル画像相関法による構造物の振動解析, 実験力学, Vol.10, No.1, pp.57-62, 2010.
 - 32) He, Z. H., M. A., Sutton, W. F., Ranson, and W. H., Peters: Two-dimensional fluid-velocity measurements by use of digital- speckle correlation techniques, Exp.Mech., Vol.24,

- pp.117-121, 1984.
- 33) Sutton, M. A., S. R., McNeill, J. D., Helm, and Y.J., Chao: *Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision*, Springer-Verlag, pp.323-372, 2000.
 - 34) 廬石鎬, 山口一郎: 二次元スペックル相関法によるひずみ分布の自動解析, 非破壊検査, Vol.47, No.8, pp.473-478, 1992.
 - 35) Kato, A., and H., Wate : *Deformation Measurement using Digital Image Correlation*, Proc.APCFS & ATEM'01, pp.840-845, 2001.

