

レーザー計測と写真計測点群合成のための計測自動化システム

村上 隼人¹⁾(非会員) 游 梦博²⁾(正会員) 古舘 守通³⁾(非会員) 藤原 歩³⁾(非会員)

盧 忻²⁾(正会員) 千葉 史⁴⁾(非会員) 今野 晃市²⁾(正会員)

1) 株式会社シーズ・ラボ 2) 岩手大学大学院総合科学研究科

3) 岩手大学理工学系技術部 4) 株式会社ラング

Study on Automated Measurement System for Compositing Point Clouds of Obtaining Laser Scanner and Photogrammetry

Hayato Murakami¹⁾ Mengbo You²⁾ Morimichi Furudate³⁾

Ayumi Fujiwara³⁾ Xin Lu²⁾ Fumito Chiba⁴⁾ Kouichi Konno²⁾

1) C's Lab Co., Ltd. 2) Graduate School of Arts and Science, Iwate University

3) Technical Office for Science and Engineering, Iwate University 4) LANG Co., Ltd.

概要

対象物の表面点群を取得する方法に、レーザー計測と写真計測がある。レーザー計測は実寸で計測できるが、点群が欠損しやすい。一方、写真計測は実寸では計測できないが、欠損は生じにくい。そして、写真を基にするので色情報を取得できる。したがって、レーザー計測点群と写真計測点群を合成することで、実寸かつ欠損がない、色情報付きの点群を取得することができる。しかし、レーザー計測と写真計測で対象物をそれぞれ計測して合成すると時間と手間がかかる。そこで本稿では、多数の対象物を一括自動計測可能なレーザー計測装置に、写真計測機能を追加した計測自動化システムを提案する。本システムにより、色情報付きの実寸かつ欠損がない点群を、人間の介入をできるだけ減らし、効率的に取得することが可能となる。本手法を用いて、対象物を計測し、有意性のある点群が取得できることを確認した。

Abstract

Laser scanning and photogrammetry are the methods to obtain the surface point cloud of an object. Laser scanning can measure the actual size, but some missing spots might appear if the laser does not reach the object surface. In contrast, photogrammetry cannot measure the actual size of an object, but missing spots are less likely to appear. By using laser-scanned point clouds and photogrammetric ones together, it will be possible that point clouds of the object's actual size will be obtained without any missing surface spots. However, it takes time and effort to perform laser scanning and photogrammetry to the object and synthesize the obtained point clouds. In this paper, an automated measurement system that adds a photogrammetric function to a laser measurement system capable of batch automatic measurement of a large number of objects is proposed. This system makes it possible to efficiently acquire a point cloud of color information included in real size and with no missing points, with as little human intervention as possible. Using this method, we measured the object and confirmed that a significant point cloud could be obtained.

1 はじめに

3次元計測装置で対象物を計測した点群は、対象物の表面形状の記録だけでなく、形状類似度評価 [1] や形状モデリング [2] など様々な用途で使用されている。対象物の表面点群を取得する方法に、レーザー計測と写真計測がある。レーザー計測は実寸で計測できるが、レーザーが物体の表面に到達しない場合、点群が欠損する。また、対象物の黒色の箇所は、レーザーを吸収してしまうため欠損が発生しやすい [3]。加えて、レーザーで対象物を計測しても対象物の色情報が点群に反映されない。一方、写真計測は対象物を実寸では計測できないが、形状表面に欠損は生じにくい。そして、写真に基づいて点群を作成するので、色情報も取得できる。しかし、対象物の白色の箇所は写真の白飛びが起こる可能性があるため、欠損が発生しやすい。

小型対象物の点群と色情報が取得できる市販の計測装置の例として、3D Makerpro Seal [4] がある。しかし、市販の 3D スキャナでは多数の対象物を同時に計測するのは難しく、一つずつ対象物を計測すると、対象物の交換に手間や時間がかかる [5]。多数の対象物を一括計測可能な計測装置として、多方向大量同時計測装置がある [6, 7, 8]。しかし、レーザーセンサによる計測のため、色情報が取得できない。

また、文献 [3] で実寸かつ欠損のない点群を取得できる手法が提案されている。文献 [3] は、欠損したレーザー計測点群と欠損のない写真計測点群を合成するものである。つまり、写真計測点群が色付きであれば、実寸であるレーザー計測点群に合成することで、色情報が付いた実寸かつ欠損がない点群を取得することができる。しかし、レーザー計測と写真計測で対象物をそれぞれ計測して合成すると時間と手間がかかる。

そこで本論文では、対象物を一括計測可能なレーザー計測装置に対して写真計測機能を追加し、計測及び点群の合成を自動化するシステムを開発する。本システムは、レーザー計測と写真計測を自動で行いノイズ除去をしたのち、得られたレーザー計測点群と写真計測点群を文献 [3] で提案された手法を用いて合成する。つまり、色情報付きで実寸かつ欠損のない点群を自動的に取得し、3次元計測を効率化するものである。本研究での自動化の範囲は、レーザー計測と写真計測、作成した点群の大

まかなノイズ除去、点群合成の一部分である。細かなノイズ除去や対象物を複数計測した場合の対象物ごとの切り出しは手動で行っている。表面形状が複雑な牡蠣殻の表面を計測し、本システムの有効性を検証する。

2 先行研究

2.1 3次元計測装置

近年、3D フォトグラメトリおよびレーザー計測装置は急速に発展している。博物館に所蔵の鳥類標本および昆虫標本の三次元デジタル化に向けて、一眼レフカメラを固定し、標本を回転台に載せてリモコンで回転を制御する装置が開発されてきた [9, 10, 11]。これらの装置は、標本の形態、色彩、紫外線反射の計測、およびメッシュ生成を目的としている。一方、本研究では多数の対象物を同時に計測する必要があるため、回転台方式の適用は困難である。Hudson らおよび Mantle らは、自然史標本のデジタル化に特化したソフトウェア「Inselect」および撮影システム「SatScan」を提案し、昆虫標本を同時に大量撮影しつつ、自動認識や付属情報の転記といった処理を支援することを可能とした [12, 13]。本研究において、多数の対象物を同時に画像撮影するのではなく、三次元的に計測することを目的としている。

また、文化遺産の記録に関する研究として、Alshawabkeh らは、レーザースキャナでは遺跡建物の輪郭や平面的特徴を再現しきれないという欠点に対し、画像解析に基づくセグメンテーションを用いることで、平面的特徴を補完し、視覚的かつ幾何学的に高精度な三次元モデルの構築を目指した [14]。実験は、ペトラ遺跡の Al-Khasneh のデータを用いて行われた。Markley らは、大規模な航空宇宙プログラムにおいて、既存施設の設計図の精度が低いという課題に対し、現況に基づいた CAD モデルの作成を目的として、手作業による測定、写真測量、およびレーザースキャンを組み合わせたハイブリッド手法を提案した [15]。本研究では、広範囲の建物の輪郭や線状特徴の再現ではなく、考古学の石器のような小型の対象物を三次元計測し、実寸サイズおよび色情報を有し、かつ欠損のない三次元モデルの取得を目指している。

多数の対象物を自動で一括測定可能なレーザーセンサがついた多方向大量同時計測装置が開発されている [6, 7, 8]。図 1 は多方向大量同時計測装置である。多方向

向大量同時計測装置の可動部分であるアームには、4 台のレーザーセンサが取り付けられており、対象物の周囲 360° をカバーしている。そして、ガラステーブル上に多数の対象物を並べることで、対象物の裏表を一括で測定できる。多方向大量同時計測システムのテーブルサイズは約 100 cm × 50 cm である。一例として、テーブル上には 200 個程度の石器を並べて配置することが可能であり、計測ピッチが 0.2 mm の場合、約 8 時間でテーブル全体を計測することが可能となる。

しかし、多方向大量同時計測システムでは、形状表面を表す点群は取得できるが、対象物の色情報を取得することが難しい。

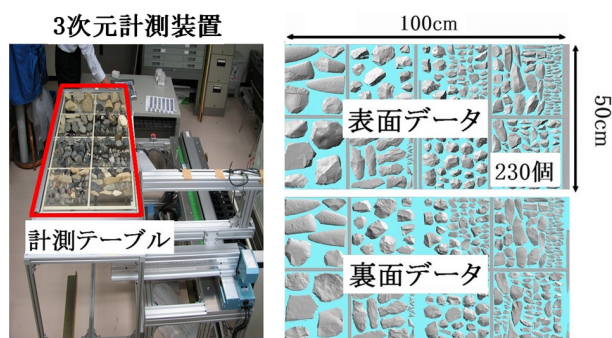


図 1: 多方向大量同時計測装置

2.2 点群合成手法

Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズム [16] は、点集合マッチングの代表的な手法である。しかし、ICP アルゴリズムはスケールを変更しながらの点群のマッチングはできない。そこで、点群のスケールを考慮しながら位置合わせをする Scaling ICP (SICP) アルゴリズム [17] が提案されている。本研究では、レーザー計測と写真計測によって計測した点群は、スケール値を考慮した ICP アルゴリズムを用いて合成する [3]。写真計測点群の初期サイズはレーザー計測点群の半分程度のサイズとすることで精度良く合成できる [3]。

3 提案手法

本研究では、2.1 節で説明した多方向大量同時計測装置の小型版を用いる。レーザーセンサを取り付けるアームに上下 6 台ずつ WEB カメラを取り付け、アームの動きをプログラムで制御することで、レーザーと写真により、対象物を一気通貫的に計測する。レーザーと写真計

測の 2 種類の方法で計測することによって、実寸かつ欠損のない、色情報付きの点群を合成するための計測点群を取得できる。

本研究では、計測する対象物を 850 mm × 350 mm のガラステーブルに載せて計測する。計測装置のアームの位置座標は、レーザーセンサのレーザーがガラステーブルに当たる位置が基準となっている。つまり、アームの位置座標が (0, 0) にあるということは、レーザーがガラステーブルの (0, 0) の位置に当たっているということである。そして、計測装置のアームの可動域も、ガラステーブルの大きさと同じく 850 mm × 350 mm である。

また、対象物の裏側は照明の影響を受けづらく暗くなりやすい。裏側の写真計測において、対象物が暗く写ると、作成した点群も暗くなってしまう。したがって、ガラステーブル下に図 2 のように照明を設置した。



図 2: ガラステーブル下に設置した照明

図 3 および図 4 はレーザー計測装置とそのレーザー計測手法の概念図である。例えば、図 4 のガラステーブル上の赤い範囲は、計測する対象物が置かれている範囲を表している。レーザーセンサが取り付けられたアームは x 軸と平行に動き、実線の赤矢印に示す経路で計測する。そして、点線の赤矢印に示す経路のように y 方向に指定された値だけ移動して、次の計測ラインを計測する。

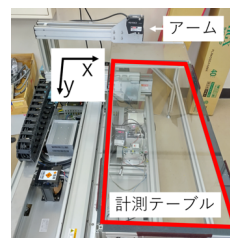


図 3: 本研究で使用する計測装置

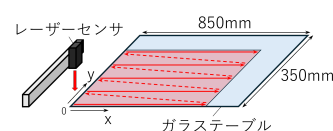
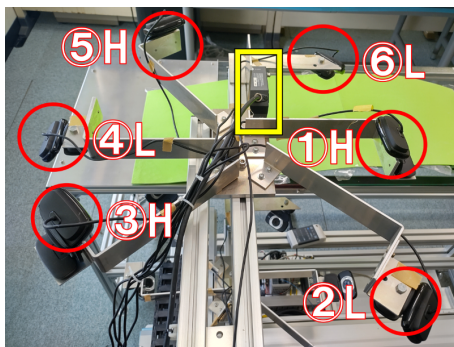


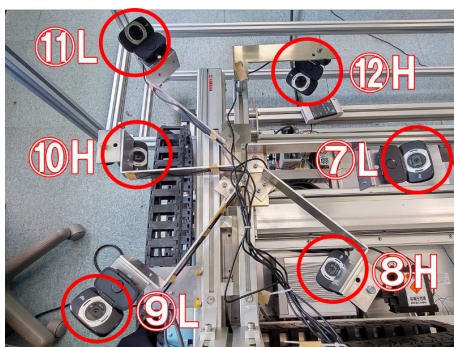
図 4: レーザー計測装置の概念図

3.1 計測装置による計測

図5は、計測装置のアームに取り付けられたレーザーセンサと WEB カメラである。黄色い四角はレーザーセンサであり、アームの上側に配置されている。また、図5の赤い丸は WEB カメラである。WEB カメラは、カメラ①から⑫までナンバリングされている。そして、対象物の表と裏を撮影できるように、上下それぞれ6台の WEB カメラをアームに配置する。WEB カメラである理由は、取り付けるカメラが重すぎるとアームが揺れて正確にレーザー計測ができなくなるからである。軽くて小型であり、十分に写真計測可能な画質を確保できる WEB カメラを採用した。



(a) 上側のアームに取り付けられたレーザーセンサと WEB カメラ①から⑥

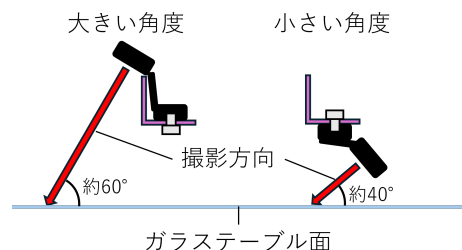


(b) 下側のアームに取り付けられた WEB カメラ⑦から⑫

図5: 計測装置のアームに取り付けられたレーザーセンサと WEB カメラ

また、図6(a)に示すように12台の WEB カメラはテーブルに対してすべて同じ角度で配置するのではなく、対象物の上面(下面)を主に撮影するように、カメラの向きがテーブル面に対して約 60° となるように配置

された WEB カメラと、対象物の側面を主に撮影するように、約 40° となるように配置された WEB カメラを交互に配置する。図6(b)は、計測装置のアームをサイドから撮影したものである。図7は、WEB カメラの角度の違いによる、対象物を撮影したときの画像のオーバーラップの差を示している。図7(a)のように、大きい角度から撮影すると、対象物の上側を複数のカメラで撮影可能となるため、写真がオーバーラップしやすくなる。しかし、対象物の側面の点群密度は低くなる。それに対して、図7(b)のように、小さい角度から撮影すると、対象物の側面を主に撮影するため、対象物の側面の点群密度は高くなるが、対象物の上側の部分がオーバーラップしにくくなり、対象物の形状によっては計測結果が不安定になる。この問題を解決するため、大きい角度と小さい角度の WEB カメラを交互に取り付け、各 WEB カメラから得られた画像のオーバーラップを確保し、欠損のない点群を生成する。図5に示すように、WEB カメラの識別番号の横に記した H(High) または L(Low) は、カメラの角度を表す。本研究では、カメラ①、③、⑤、⑧、⑩、⑫は大きい角度、カメラ②、④、⑥、⑦、⑨、⑪は小さい角度で配置されていることがわかる。



(a) 簡略図



(b) 計測装置サイド部分

図6: 2種類の角度をもつ WEB カメラ

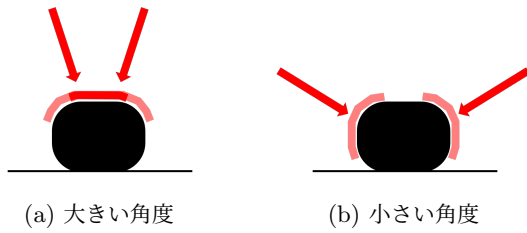
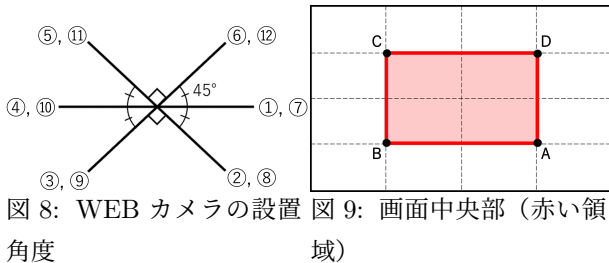


図 7: カメラの角度の違いによるオーバーラップの差

3.2 写真計測範囲

WEB カメラはアームの取り付け位置を中心として、放射状に取り付けている。アーム上側に取り付けられた①と④は、x 軸と平行な方向である。その他上側に配置されたカメラは、①と④を通る直線に対して、45 度傾いた角度で配置する。アーム下側のカメラ⑦–⑫も同様に、配置する。図 8 に WEB カメラの設置角度の簡略図を示す。WEB カメラ①から⑫は、計測範囲がそれぞれ異なるため、計測した画像のオーバーラップを確保するために、WEB カメラごとの計測範囲を考慮した計測が必要である。そこで、本節では WEB カメラごとの計測範囲について述べる。



写真計測には対象物が写った写真が多く必要である。しかし、対象物が写っていない写真や、対象物が画面端に写りピントが合っていない写真は、作成する点群の品質低下につながる。したがって、図 9 のように、1 つのカメラから得られる画像を縦横それぞれに 4 等分したときの画面中央部に対象物が入ったときに撮影するようにする。

図 10 は、ガラステーブル上の座標 (0, 0) にマーカーを置いた写真である。計測範囲の決定方法を説明するため、カメラ①を例とする。まず、カメラ①で座標 (0, 0) にあるマーカーを撮影する。計測装置のアームを手動で動かし、図 9 の黒点で示された画面中央部の角とマーカーを重ねる。図 11 は、カメラ①の黒点 D とマーカー

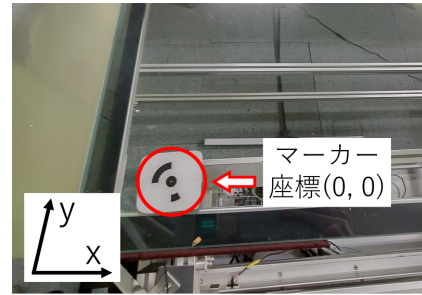


図 10: ガラステーブル上の座標 (0, 0) に置いたマーカー

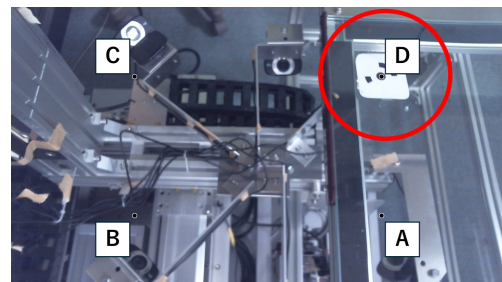


図 11: カメラ①で黒点とマーカーを重ね合わせる

が重なったときの画像である。

また、黒点 D とマーカーが重なったときのアームの位置座標は、図 12 の点 D で示されている。マーカーと黒点を重ねたときのアームの位置座標を、ABCD のそれぞれ 4 点を記録したものが図 12 である。ここで、図 12 の 4 点を結んだ四角形の中にアームの座標があれば、カメラ①の画面中央部に座標 (0, 0) に設置したマーカーは、必ず撮影されているはずである。以上のような方法で、カメラ①から⑫に対して、座標 (0, 0) に対する計測範囲を求める。図 13 に、WEB カメラ②と③の計測範囲を例示する。アームが移動して座標値 (0, 0) 以外の座標を撮影する場合には、図 12 に示す座標 (0, 0) を撮影したときの計測範囲を平行移動することで、任意の位置の計測範囲を推定することが可能である。例えば、対象物が図 14(a) の矩形で示す範囲にあるとき、カメラ①の計測範囲は対象物が置かれている範囲内を平行移動するので、図 14(b) の赤線で示す範囲になる。ここで、アームの可動範囲も考慮すると赤く塗りつぶされている部分がカメラ①の計測範囲となる。図 14(c) は決められた計測範囲でのアーム動作と撮影ポイントを示している。例えば、撮影する間隔を 50 mm としたとき、撮影ポイントは黒点の箇所となる。そして、青い矢印で示されるように、撮影ポイントを折り返すようにしてアームが動き、

撮影ポイントで一時静止しながら撮影を行う。また、図 14(c) のカメラ①の図は、緑丸で示された撮影ポイントでの位置と撮影方向を示している。

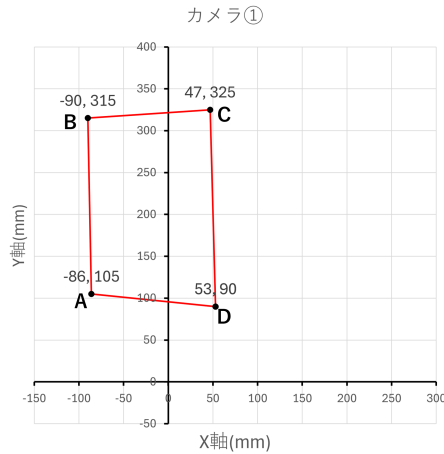


図 12: カメラ①が座標 (0, 0) を対象としたときの計測範囲

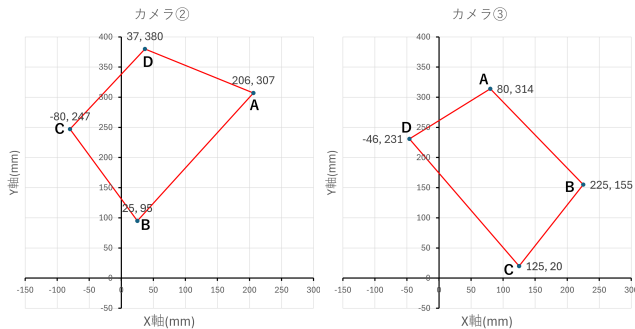
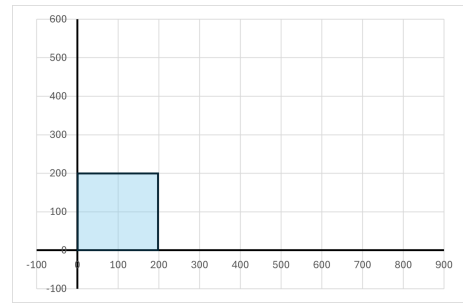


図 13: カメラ②と③の計測範囲

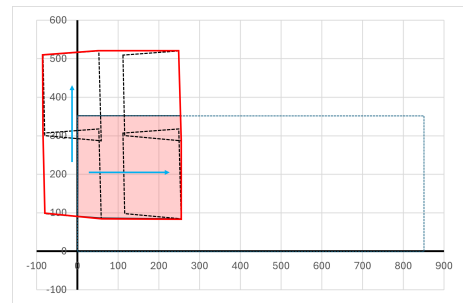
3.3 計測の自動化

計測装置及び PC は図 15 のように接続されている。計測装置はノート PC で制御されており、対象物の計測範囲や計測ピッチなどの計測装置制御パラメータを入力する。デスクトップ PC には商用の写真計測点群作成ソフトが入っており、写真計測点群の作成は、デスクトップ PC で行う。

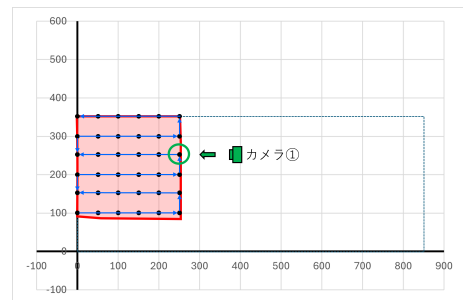
NAS には計測したデータを集約し、図 16 のようにフォルダ分けされる。fig フォルダは、3.2 節の図 14(c) のような、撮影ポイントを黒点で描画した図が WEB カメラ台数分保存される。photo フォルダには WEB カメラで撮影された写真が保存される。laser_scanned_pointcloud フォルダには、レーザー計測



(a) 対象物がある範囲



(b) カメラ①が対象物を計測するときの範囲



(c) アームの動作と撮影ポイント

図 14: 対象物に対する実際の計測範囲

で取得した点群と、計測範囲や計測ピッチ、計測時間などのレーザー計測結果が記録された.txt ファイルが保存される。そして photogrammetry_pointcloud フォルダには、写真計測で取得した点群と、計測範囲や撮影枚数、計測時間などの写真計測結果が記録された.txt ファイル、点群作成ソフトでのパラメータや作成時間が記録されたレポート PDF、点群作成ソフトの実行ファイルが保存される。

図 17 は、計測の流れを示したものである。計測は、監視スクリプト、写真計測点群作成スクリプト、計測装置の 3 つで制御されている。

監視スクリプトは事前に指定したフォルダ (photogrammetry_pointcloud フォルダ) を監視し、新たに.txt ファイルが作成されると写真計測点群作成スクリプトを実行するというスクリプトである。新しい.txt ファイル、すなわち写真計測結果.txt が新たに作成されるということは、計測装置での写真計測が終了し、点群作成に必要な写真がすべて保存されたことを意味する。したがって、写真計測結果.txt の作成を確認すると、監視スクリプトは写真計測点群作成スクリプトを実行し、監視を終了する。

写真計測点群作成スクリプトは、点群作成ソフトでの点群作成処理を自動化するスクリプトである。点群作成処理は大きく分けて、指定したフォルダ内の写真を取り込む、写真のアライメント、高密度点群作成の3工程である。それぞれの工程のパラメータをスクリプト内で指定することで、点群作成を自動化している。

計測装置では、計測を始める前にデータ入力を行う。データは対象物の範囲、レーザー計測ピッチ、写真計測の撮影間隔を入力する。入力後、写真計測を開始し、取得したデータを保存する。ここで、先ほどの説明のように photogrammetry_pointcloud フォルダへの写真計測結果.txt 作成によって、写真計測点群の作成が開始される。そして、写真計測点群が作成されている間、計測装置ではレーザー計測が行われる。

以上のようにして、計測が自動で行われる。

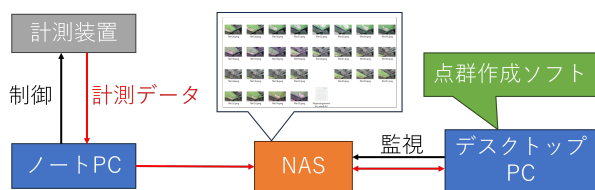


図 15: 計測装置と PC の関係図



図 16: データのフォルダ分け

3.4 マーカーを利用した作成点群の精度向上

写真計測で作成する点群の精度向上のため、写真計測

を行う際に対象物の周りに写真計測用のマーカーを並べる。マーカーの並べ方を図 18 に示す。図 18 のように、マーカー①から④の4つはガラステーブル上の原点を含む計測範囲の4隅に、マーカー⑤はガラステーブルのy軸上かつ原点から10 cm離れた位置に置く。また、裏側からの写真計測のため、マーカーの裏は、それぞれ異なるマーカー⑥から⑩が順番に印刷されているものとする。

マーカーが果たす役割は3つある。第一に、写真計測の精度向上のためである。撮影した写真は商用の写真計測点群作成ソフトで処理される。処理の段階で写真をアライメントする必要があるが、マーカーによって取得した画像の特徴点が増え、写真間のマッチングをソフトがしやすくなり、アライメントの精度が向上するためである。

次に、対象物近傍以外のノイズ除去を自動化できるようになることである。ノイズ除去については、3.6 節で説明する。

最後に、マーカーを座標管理に利用し、チャンク合成や点群合成を行うときの初期位置決めを自動的に決定することができる。チャンク合成については3.5 節、点群合成については3.7 節で説明する。写真計測点群作成ソフトで作成される点群の座標は対象物の実寸とは異なる。そこで、マーカーがすべてガラステーブル平面上に位置することと、原点のマーカーとy軸上かつ原点から10 cm離れた位置に置かれたマーカーの座標を利用することによって、作成する点群の座標軸をマーカーの位置と揃えることができる。これによって、ガラステーブルの表側の写真計測点群、裏側の写真計測点群、およびレーザー計測点群の座標軸が揃う。

3.5 写真計測点群の表裏を合成

本研究は商用の写真計測点群作成ソフトを用いて写真計測点群を取得する。写真計測点群作成ソフトにはチャンク結合という機能があり、チャンク同士の位置とスケールが合う場合に点群の結合ができる。本手法では、マーカーを使用することで、チャンク同士の位置とスケールを合わせ、結合を自動化する。チャンクはカメラの位置情報や深度マップ、点群の情報を持つ。3.1 節で述べたように、写真計測は対象物の表裏を計測する。本手法で利用する写真計測点群作成ソフトでは、表と裏それぞれのチャンクを作成し、対象物の表と裏の点群をチャ

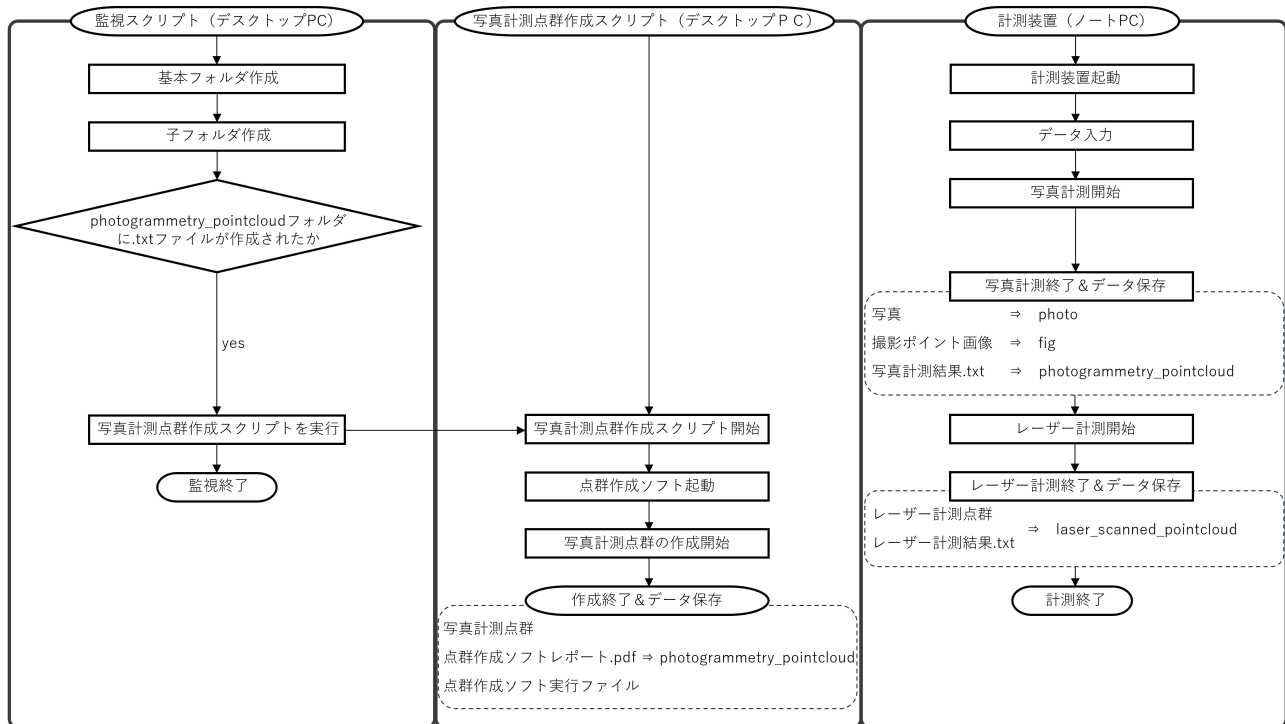


図 17: 計測自動化の流れ

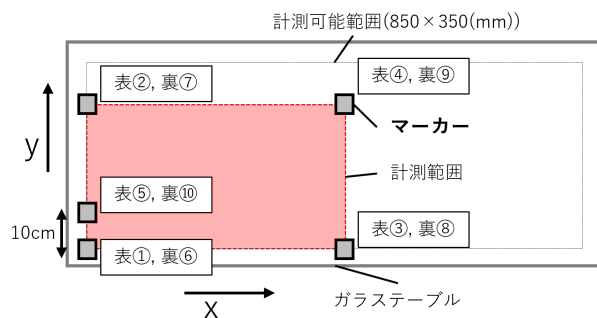


図 18: マーカーの配置図

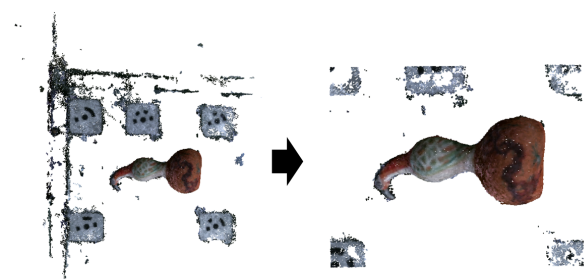


図 19: マーカーによるノイズ除去例

リンク結合機能を用いて 1 つの写真計測点群に結合する。

3.6 点群のノイズ除去

本節では、計測点群のノイズ除去の自動化について説明する。

写真計測では、写真に対象物以外の物体が写りこむ場合、対象物以外の余分な点群も取得してしまう場合がある。そこで、マーカーの範囲内にある点群のみを作成することで、マーカーの範囲外、すなわち対象物近傍以外のノイズを自動的に除去できる。マーカーによってノイズが除去されている例を図 19 に示す。

また、写真計測点群作成ソフトは点の信頼度計算をす

ることができる。取得した写真計測点群にはガラステーブルや影でできたノイズがあるが、ノイズは信頼度が非常に低い。したがって、信頼度が低い点をフィルタをかけて取り除くことで、写真計測点群の対象物付近のノイズを一部除去することができる。

レーザー計測点群の場合、ガラステーブル面の点群も取得してしまう。そこで、ガラステーブル面に相当する座標の点を除去することで、ノイズの大半は自動的に除去できる。レーザー計測点群、写真計測点群ともに自動で除去しきれない細かなノイズは手動で除去する。

3.7 点群の合成

3.6 節で述べたように、レーザー計測点群、写真計測

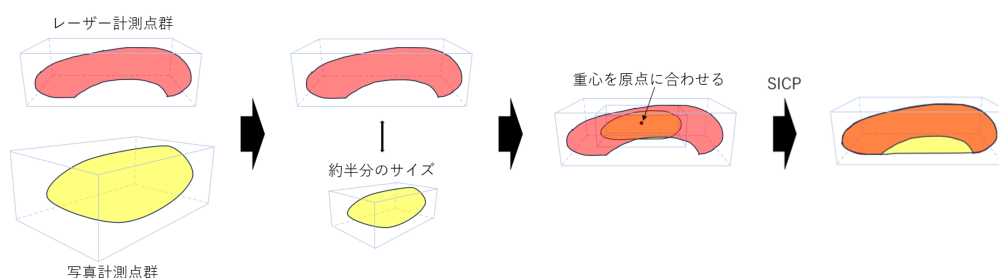


図 20: 点群合成手順の概要図

点群ともに、ノイズとなる点群は自動で除去する。そして、自動的に除去しきれなかったノイズは、点群合成前に手動で除去する。

対象物を複数個並べて計測を行った場合、点群合成時の点数が非常に多くなってしまふ。したがって、取得した点群を対象物ごとに手動で切り出し、点群合成をする必要がある。

図 20 は点群合成手順の概要図である。写真計測点群の場合、マーカーを利用して点群の座標管理を行う。文献 [3] の手法に従って、SICP アルゴリズムを適用する前の点群の初期サイズは、写真計測点群がレーザー計測点群の半分程度となるように作成する。また、点群の方向も取得した点群の座標に基づいて自動で決定し、点群の重心が一致するように位置を調整する。最後に、SICP アルゴリズムによって 2 つの点群を位置合わせする。

4 実験結果

本手法の検証のため、対象物として複数の牡蠣殻を一括計測した。実験環境は、OS が Windows 10 Pro, CPU は Intel®Core™i7-5820k, RAM は 64.0GB である。使用した WEB カメラは、Logicool® の C615n であり、解像度は 1080p でフル HD である。

計測した牡蠣殻は図 21 であり、左から牡蠣殻 (a), (b), (c), (d) とする。牡蠣殻が置かれた範囲は 516 mm × 303.12 mm である。

写真計測での撮影間隔は 75 mm とし、撮影した写真の枚数は、表側のカメラ①から⑥の順に、23, 26, 36, 35, 46, 38 枚の計 204 枚、裏側のカメラ⑦から⑫の順に、23, 16, 16, 34, 42, 35 枚の計 166 枚である。撮影時間は、34 分 3 秒であった。また、写真計測点群作成ソフトでは、表側 204 枚、裏側 166 枚、計 370 枚の写真のうち 370 枚すべてがアライメントされた。点群作成ソフト

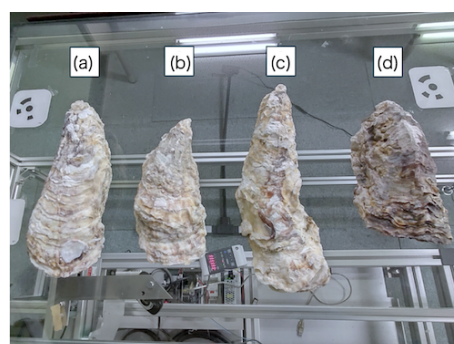


図 21: 計測に使用した牡蠣殻

トでかかった時間は、23 分 5 秒であり、得られた写真計測点群を図 22 に示す。裏側の写真計測は、対象物がガラス越しとなる撮影になるが、対象物に対して焦点を合わせて撮影することで、問題なく点群を作成できた。細かなノイズを取り除いた後の写真計測点群を図 23 に示す。点数は 806,676 点である。



図 22: 自動計測によって得られた写真計測点群

レーザー計測の計測ピッチは 0.24 mm とし、レーザー計測時間は 3 時間 1 分 20 秒であった。図 24 はノイズを取り除いたレーザー計測点群であり、点数は 616,021 点である。

図 25 は、レーザー計測点群と写真計測点群を SICP アルゴリズムによって位置合わせした結果である。赤い



図 23: ノイズを除去した写真計測点群

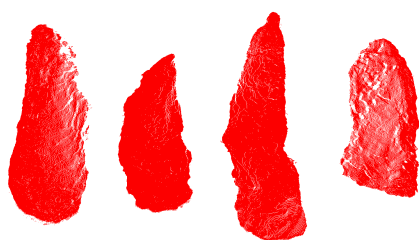


図 24: ノイズを取り除いたレーザー計測点群

点群がレーザー計測点群であり、色付きの点群が写真計測点群である。SICP アルゴリズムの閾値は 0.001 とし、初期位置決めの処理時間は合計 3.45 秒、点群合成の処理時間は合計 25 分 51 秒であった。表 1 は、牡蠣殻 (a) から (d) に対して SICP アルゴリズムを用いて位置合わせを行った結果を示している。なかでも「距離の 2 乗和の平均」は、写真計測点群とレーザー計測点群との間の誤差を示す指標である。各写真計測点群の精度は、対応するレーザー計測点群に対して「距離の 2 乗和の平均」がいずれも 0.04 以下であり、これは距離誤差に換算して 0.2 mm 以下であることを意味する。この値は、レーザー計測の計測ピッチに比して十分に小さいものであり、本手法による合成点群の精度が高いことを確認できた。

表 1: SICP アルゴリズム実行結果

	反復回数 (回)	距離の 2 乗和 の平均	処理時間 (s)
牡蠣殻 (a)	41	0.0313	459.8
牡蠣殻 (b)	37	0.0259	261.7
牡蠣殻 (c)	40	0.0354	543.9
牡蠣殻 (d)	43	0.0365	286.1

図 25 はレーザー計測点群と写真計測点群を合成し

た牡蠣殻 (a) である。図 25 に示すように、実寸かつ色情報をもつ点群を取得することができた。

図 26 は、総計測時間を図に示したものである。赤枠は自動処理、黒枠は手動処理を表し、矢印の横に処理時間を記載した。また、この図から分かるように、レーザー計測をしている間に、並行して写真計測点群作成を行うことができた。その後、ノイズ除去および対象物切り出しの手動処理を行う。

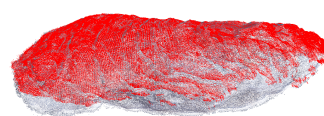


図 25: 点群を合成した牡蠣殻 (a)

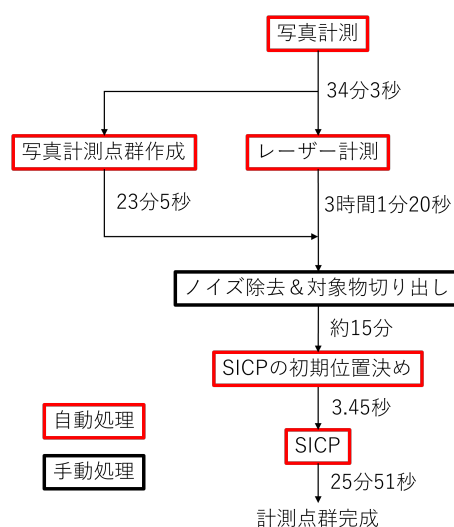


図 26: 総計測時間

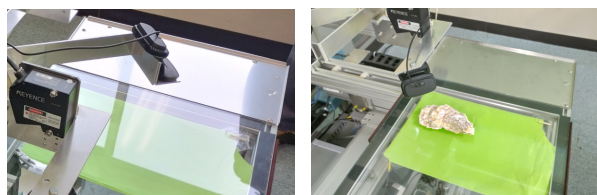
5 考察

本研究の利点について考察すると、一般的にレーザー計測のみを用いる場合、実寸の点群データを取得することは可能であるが、計測ピッチにより点密度には限界があり、また、凹な形状などのレーザーが届かない場所では欠損が発生する可能性がある。一方、写真計測のみを用いた場合、色情報を含む稠密な点群を作成できるという利点があるが、実寸の点群取得が困難であり、また多角度

からの撮影を手動で行う必要があるなど、作業負荷が大きい。本研究では、12 台の WEB カメラをアームに取り付けたシステムを用い、レーザ計測と写真計測による点群を統合することにより、両手法の利点を併せ持つ実寸かつ色情報を含む高精度な点群を効率的に取得することが可能となった。



図 27: 暗幕で窓からの太陽光を遮断



(a) 窓からの太陽光あり (b) 窓からの太陽光を遮断

図 28: 窓からの太陽光により、鏡のように反射するガラステーブル

本手法はガラステーブル上に対象物を載せて計測をする。写真計測のとき、強い照明や太陽光などによりガラステーブルが鏡のように反射する場合がある。反射した光は写真の白飛びの原因になるため、写真計測点群作成ソフトが認識できなくなったりノイズが発生したりする。加えて、対象物の裏面を写真計測する場合は、対象物の手前に反射が存在することになり、強いノイズが発生する。したがって、写真計測時は窓からの太陽光を遮断し、計測装置の真上の照明は消すことを推奨する。本実験では、図 27 のように暗幕を設置して、太陽光を遮断した。図 28(a) は窓からの太陽光による例であり、暗幕により太陽光を遮断し、ガラステーブルの反射を抑えたのが図 28(b) である。本実験環境において、暗幕を設置することで、太陽光を遮断し、ガラステーブルの反射を抑えることができ、写真計測モデルの作成がうまくできた。

本研究においては、マーカー①および⑤を用いるこ

とで、レーザスキャンを用いずともおよそのスケール合わせが可能である。しかし、マーカーによるスケール調整では新たな手作業が必要となる上、マーカー位置の推定に誤差が生じた場合、データ全体のスケールに影響を及ぼす可能性が高い。ゆえに、本研究では、レーザスキャンにより取得された点群と写真計測により取得された点群とを自動的に位置合わせすることで、点群の合成を行っている。現時点では、レーザ計測によって得られた点群は、最終的に出力される合成点群には含まれていない。これは、レーザ計測点群には色情報が付与されていないことが主な理由である。

6 まとめ

本研究では、レーザ計測と写真計測の計測自動化を検討した。今後は、手動で行った細かなノイズ除去や対象物の切り出しを自動化する。なお、本論文は NICOGRAPH2024 で発表した論文 [18] に加筆したものである。投稿論文 [18] のご確認とご助言をいただいた NICOGRAPH2024 プログラム委員の皆様に深謝する。

7 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP25K00537 の助成を受けた。

参考文献

- [1] X. Lu, C. Li, T. Kinoshita, A. Kimura, and K. Konno: “A Study on 3D Face Similarity by Point Cloud Based Metric for Japanese Terracotta Figurines (Haniwa),” The Journal of the Society for Art and Science, Vol.19, No.3, pp.25-39, 2020.
- [2] E. Altantsetseg, K. Matsuyama, and K. Konno: “Minimum Surface Area Based Complex Hole Filling Algorithm of 3D Mesh,” The Journal of the Society for Art and Science, Vol.14, No.2, pp.26-35, 2015.
- [3] 古川勝, E. Altantsetseg, 今野晃市: “拡大・縮小可能な ICP アルゴリズムに基づく写真計測点群とレーザ計測点群の合成による点群欠損補完手法,” 情報考古学, Vol.26, No.1・2, pp.1-8, 2021.
- [4] 3DMakerpro Seal (シール) 3D スキャナー, <https://flashforge.shop-pro.jp/?pid=179182640>.

参照：2024-8-16.

- [5] 横山真, 千葉史, 今野晃市, 村木祐太: “考古遺物のための三次元計測器開発”, 季刊考古学, 140 号, pp.30-33, 2017.
- [6] E. Altantsetseg, Y. Muraki, F. Chiba, and K. Konno: “3D Surface Reconstruction of Stone Tools by Using Four-Directional Measurement Machine,” The International Journal of Virtual Reality (IJVR), Vol.10, No.1, pp.37-43, 2011.
- [7] 村木祐太, アルタンツェツェグ エンフバヤル, 千葉史, 松山克胤, 今野晃市: “多数の遺物を一括測定可能なレーザー型自動計測システム”, 情報考古学, Vol.20, No.1・2, pp.8-15, 2014.
- [8] 今野晃市, 千葉史, 横山真: “石器接合に特化した3次元計測装置開発と石器接合処理自動化”, システム／制御／情報, 第66巻, 第7号, pp.244-249, 2022.
- [9] C. V. Nguyen, D. R. Lovell, M. Adcock, L. J. Salle: “Capturing natural-colour 3D models of insects for species discovery and diagnostics,” PLoS One, Vol.9, No.4, e94346, 2014.
- [10] J. J. Medina, J. M. Maley, S. Sannapareddy, N. N. Medina, C. M. Gilman, J. E. McCormack: “A rapid and cost-effective pipeline for digitization of museum specimens with 3D photogrammetry,” PLoS One, Vol.15, No.8, e0236417, 2020.
- [11] T. N. Doan, C. V. Nguyen: “A low-cost digital 3D insect scanner,” Information Processing in Agriculture, Vol.11, No.3, pp.337-355, 2024.
- [12] L. N. Hudson, V. Blagoderov, A. Heaton, P. Holtzhausen, L. Livermore, B. W. Price: “In-select: Automating the Digitization of Natural History Collections,” PLoS One, Vol.10, No.11, e0143402, 2015.
- [13] B. L. Mantle, L. J. Salle, and N. Fisher: “Whole-drawer imaging for digital management and curation of a large entomological collection,” Zookeys, Vol.209, pp.147-163, 2012.
- [14] Y. Alshawabkeh, H. Norbert: “Integration of digital photogrammetry and laser scanning for heritage documentation,” ISPRS XX. Symposium, Com. V., WG, pp.12-23, 2004.
- [15] J. D. Markley, R. S. Jeffrey, and E. N. Harris: “Hybridization of photogrammetry and laser scanning technology for as-built 3D CAD models,” 2008 IEEE Aerospace Conference, 2008.
- [16] P. J. Besl, N. D. McKay: “A method for registration of 3d shapes,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992.
- [17] S. Du, N. Zheng, L. Xiong, S. Ying, and J. Xue: “Scaling iterative closest point algorithm for registration of m-D point sets,” Journal of Visual Communication and Image Representation, Vol.21, No.5, pp.442-452, 2010.
- [18] 村上隼人, 游梦博, 古舘守通, 藤原歩, 盧忻, 千葉史, 今野晃市: “レーザー計測と写真計測点群合成のための計測自動化システムの検討”, NICOGRAPH2024, pp.F-3:1-F-3:8, 2024.

村上 隼人



2023 年岩手大学理工学部卒業。2025 年岩手大学大学院総合科学研究科理工学専攻修士課程修了。同年、シーズ・ラボ（株）に入社。

游 梦博



2012 年中国西北農林科技大学卒業。2015 年に岩手大学工学研究科デザイン・メディア工学専攻博士前期課程修

了, 2018 年同大学博士後期課程修了. 博士 (工学). 同年より西北農林科技大学講師. 現在, 岩手大学准教授. コンピュータビジョンやコンピュータグラフィックスに関する研究に従事. 芸術科学会, 画像電子学会会員.

古館 守通



岩手大学大学院工学研究科電子情報システム工学専攻にて博士 (工学) の学位を取得. 2015 年株式会社ラングにて 3 次元計測装置等の開発に従事. 2016 年より岩手大学理工学系技術部技術職員として現在に至る.

藤原 歩



2009 年岩手大学農学部卒業. 2011 年岩手大学大学院農学研究科農学生命専攻修了. 現在, 岩手大学理工学系技術部技術専門職員として, プログラム開発や解析などの研究支援に従事.

盧 忻



2006 年に徳島大学大学院工学研究科機能システム工学専攻博士後期課程を修了. 現在, 岩手大学理工学部助教.

信号処理や計測に関する研究に従事. 博士 (工学). 芸術科学会, 日本情報考古学会などの会員.

千葉 史



2001 年, 岩手大学大学院工学研究科博士後期課程電子情報工学専攻修了. 岩手大学工学部情報システム工学科助手を経て, 現在, (株) ラング常務取締役. 考古遺物の三次元形状計測・処理などの研究開発に従事. 日本情報考古学会会員.

今野 晃市



1985 年, 筑波大学第三学群情報学類卒業. (株) リコーソフトウェア研究所, ラティス・テクノロジー (株) を経て, 現在, 岩手大学理工学部教授. CG, CAD, VR, 遺物計測などの研究に従事. 著書に「3 次元形状処理入門」がある. 博士 (工学). 芸術科学会, 映像情報メディア学会, 日本情報考古学会, 情報処理学会, EuroGraphics 会員.