

汎用デジタルカメラを用いた顔面形状計測

勅使河原 大輔

明海大学大学院歯学研究科

歯学専攻

(指導：藤澤 政紀 教授)

An Application for Three-Dimensional Facial Measurement Using
General-Purpose Digital Camera

Daisuke TESHIGAWARA

Meikai University Graduates School of Dentistry
(Mentor: Prof. Masanori FUJISAWA)

Abstract

Three-dimensional (3D) measuring system, which is comprised of a digital camera having two sets of lenses-sensors and the application for the 3D image analysis, has been recently developed to measure distances in remote locations. Similar to a compact digital camera, this system is portable and can easily photograph objects. To apply this system to facial measurement, the following were investigated.

Reference points were plotted on a stone facial model and measured on the 3D dataset built from various measurement distances. Each value was compared to the actual value surveyed on the model for evaluating an accuracy of the measurement.

A pair of stereo images of a stone facial model and a wax facial prosthesis was photographed using a general-purpose digital camera. Then, a 3D point cloud dataset of the object was constructed using space measurement software. Each dataset built from different conditions was compared for determining the effect of the conditions.

A 3D point cloud dataset of a stone facial model was built by method above mentioned. A noise removing procedure using the down sampling of digital color information allowed for data smoothing. Results were as follows:

- 1) There is no correlation between the measurement distance and relative error. The highest precision of the measurement was achieved at a 60cm measurement distance. The relative error was 1.30%.
- 2) Capacity for building the point cloud dataset was affected by image projections on the objects and lens position. The longer measurement distance tends to relieve distortions on the surface.
- 3) In addition to the effect of normal down sampling, the correction with light intensity detection allowed to detect more microstructures. It is considered that light intensity is related to the actual irregularity of objects. The correction using color information to lessen noise on a point group may be valid for facial measurements.

Key words: facial impression, digital technology, 3D scanner, stereo camera

要 旨

近年、汎用デジタルカメラを用いた空間計測システムが実用化された。このシステムでは通常の写真と同様に撮影された画像をもとに3次元モデルの構築を行うことができる。携帯性や簡便性に優れており主に遠隔対象物の測量に用いられているものの、生体計測への応用例は少ない。そこで本システムを顔面形状計測法として応用するうえで、測定条件が3次元モデルの形状に及ぼす影響および空間計測精度を評価し、さらに測定エラーとしてモデルに反映されるノイズに対して、撮影した画像の色データを用いた処理法について検討した。

顔面石膏模型およびエピテーゼのワックスパターンを被写体とした。異なる条件で撮影したステレオ画像をもとに3次元点群モデルを再構成し、モデル上の基準点間距離を実測値との比較による計測誤差の算出およびモデル同士の比較による形状評価を行った。また、作成したモデルに対して奥行の測定値および画素のRGB値より算出した色データを用いたノイズ処理を行いその効果を検討し以下の結果を得た。

1. 撮影距離と測定精度の関連は一定の傾向を認めなかった。撮影距離 60 cm で最大の計測精度が得られ、実測値に対する計測誤差は 1.30% であった。
2. 被写体に対して垂直方向のレンズ配置および画像投影を行うことで点群形状の欠落が減少し、撮影距離の増加では欠落だけでなくノイズも減少した。
3. 色情報を用いることで、測定形状を反映したノイズ処理が可能であった。画像内の色調の明暗は視覚的だけではなく実際の立体構造に影響し、本法は3次元モデルの細部再現性を向上させることが示唆された。

牽引用語：顔面印象法，デジタル技術，3D スキャナー，ステレオカメラ

緒 言

眼部を含め広範囲な顔面欠損に対して審美的な再建を必要とする場合，エピテーゼによる補綴的再建方法が選択される¹⁾．エピテーゼは形態や色調が生体に調和することが患者の QOL 回復，社会復帰に影響するため，その製作には術者に高い技術が要求される．

近年，コンピュータ技術の発展に伴い，3次元デジタルデータを用いた画像再構成システムあるいは CAD/CAM システムを応用した歯冠補綴装置の製作が行われるようになってきた²⁾．顎顔面補綴領域においても CAD/CAM システムによるエピテーゼの製作法が提唱されている³⁾．患者の健全側や血縁近親者の顔面形状データを利用したエピテーゼの設計は，術者の技術が軽減される^{4,5)}．顔面形状の取得には CT や MRI などの画像データを使用した方法^{5,6)}に加え，非接触 3D スキャナを利用した方法が用いられている^{4,5,8-13)}．これらの方法は，従来の歯科用印象材を用いた顔面印象法¹⁴⁾と比較

し、患者および術者に対する負担の少ない処置が可能である。しかし、計測機器によって、生体計測に対する安全性が不十分であることや¹¹⁾大型で専用の測定空間を必要とすること¹⁵⁾などの問題がある。

近年、汎用デジタルステレオカメラを使用した空間計測システムが開発され、屋外での建造物の測量などに利用されている。使用カメラはいわゆるコンパクトデジタルカメラであり携帯性に優れる。撮影方法は受動型ステレオ画像法を原理とし、通常¹⁶⁾の2次元平面の写真撮影と同様の撮影方法により空間計測を行うことが可能である。従って、本システムは安全性、簡便性にも優れた手法として生体計測への応用が期待できる¹⁶⁾。

そこで、本研究は顔面欠損に対する顔貌回復のためのエピテーゼ製作における顔面形状取得法として、空間計測機器に汎用デジタルステレオカメラを用いた顔面形状計測システムを構築し、その実用性を評価した。

材 料 と 方 法

1 . 3 次 元 空 間 計 測 シ ス テ ム

本 研 究 に は 被 写 体 の 3 次 元 デ ー タ を 取 得 す
る た め の 空 間 計 測 シ ス テ ム と し て , 富 士 フ ィ
ル ム 3D 計 測 シ ス テ ム (富 士 フ ィ ル ム , 東 京)
お よ び 3 次 元 空 間 計 測 ソ フ ト ウ ェ ア (撮 測 3D ,
ア ル モ ニ コ ス , 静 岡) を 用 い た .

本 シ ス テ ム は , ス テ レ オ カ メ ラ に よ っ て 撮
影 し た 画 像 を 基 に , 被 写 体 の 3 次 元 点 群 モ デ
ル を 再 構 成 で き る . 撮 影 時 に 特 別 な 光 源 を 必
要 と せ ず , 撮 影 時 間 は 数 ミ リ 秒 で あ る こ と か
ら , 簡 便 か つ 短 時 間 に 被 写 体 の 立 体 情 報 を 取
得 で き る . 本 シ ス テ ム は 受 動 型 ス テ レ オ 視 法
に 分 類 さ れ る 3 次 元 距 離 計 測 法 で あ る . 本 シ
ス テ ム は 異 な る 2 つ の 位 置 か ら 撮 影 さ れ た 被
写 体 の 画 像 上 の 位 置 の 違 い に 基 づ く 三 角 測 量
法 を 基 本 原 理 と し て い る . 以 下 に そ の 詳 細 を
示 す .

1) 測 定 装 置

測 定 装 置 と し て 汎 用 デ ジ タ ル カ メ ラ (

FinePix REAL3D w3m , 富士フィルム , 東京 , Fig 1)
を用いた . カメラ本体の大きさは横 124.0mm ×
縦 65.9mm × 厚さ 27.8mm である . レンズ構成は , 焦
点距離 $f = 6.3\text{mm}$ の光学式 3 倍ズームレンズ ,
撮像素子として 1/2.3 型 CCD センサから構成さ
れるカメラを 2 つ内蔵しているステレオカメ
ラである . 従って , 1 回の撮影で撮影角度の
異なる 2 つの画像を同時に取得することがで
きる . レンズ中心軸間距離は 75mm で固定され
ており , 撮影した画像の平行化および空間座
標の測定に必要な情報 ① レンズによるディス
トーション ② レンズの焦点距離 ③ 画素ピッチ
④ 画像中心の座標 ⑤ 一方のカメラに対するも
う一方のカメラ位置と回転量に対するキャリ
ブレーションデータが保管されている . 従っ
て , 空間計測においては , 通常測定ごとに必
要となる装置のジオメトリーに対するキャリ
ブレーションが不要となり , 簡便かつ短時間
に空間計測が可能である . 本カメラの記録系
ファイルフォーマットは MPO および JPEG であ

る．記録画素数は $3,648 \times 2,736$ ピクセルである．

2) 画像処理

(1) 平行ステレオ視における距離計測

ステレオ視法は，エピポーラ幾何に基づく三角測量法を原理としている．被写体上の測定点およびそれぞれのカメラのレンズ中心を結んだ平面をエピポーラ平面と呼び，このとき平面を画像内に投影した線をエピポーラ線と呼ぶ．カメラのレンズ中心軸間距離である基線長，焦点距離などカメラ間の幾何的關係が既知の場合，基準画像に投影された対応点が与えられることでエピポーラ平面および，エピポーラ線が決定され，測定点および両画像の空間的な配置を知ることができる．さらにこのとき両画像上に投影された2つの画像内の対応点はエピポーラ線上に必ず存在することとなる（エピポーラ拘束）¹⁷⁾．エピポーラ拘束によって，対応点の探索は，曖昧さが減少するだけでなく，探索範囲をエピポーラ線上に限定できるため2次元平面から1次元

処理が可能となり距離計測に必要な演算処理時間も短縮される。本システムは計測用カメラに固有のキャリブレーションデータを用いて画像処理を行い、カメラの光軸が平行に配置した状態で撮影された画像を再構成する。

対応点の座標は以下の式で算出される¹⁸⁾。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \times B / (u - u') \\ v \times B / (u - u') \\ f / p \times B / (u - u') \end{bmatrix}$$

(X, Y, Z) : 注目点の空間座標
 (u, v) : 基準画像上での注目点の座標
 u' : 対応点の水平座標
 B : レンズ中心軸間距離
 f : レンズ焦点
 p : 画素ピッチ

(2) 対応点の探索

対応点の探索は拘束されたエピポーラ線上でそれぞれの画像に対してブロックマッチング法による類似度評価指標を用いる。対応点は画像上で、加法混色原理に基づき赤、緑および青の基本色それぞれ0～255階調（RGB値）で表現される。対応点の探索は、RGB値より算出される輝度値を用いた相互相関関数処理によって推定する。本システムでは、周囲の画素を含む対応点の輝度値を用いて、輝度値の差の絶対値の合計を用いた一致度評価関数であるSADが採用されている。

2 . 方 法

本実験は、測定環境を一定とするため、測定の間時間帯や天候などの影響を受けない室内で行った。また、撮影は三脚を用いてカメラを固定し、カメラの内蔵フラッシュを使用せず、蛍光灯による室内照明下にて行った。測定環境の評価として照度計（デジタル照度計 T-1 , ミノルタ , 東京）を用いて測定条件を一定（100 ~ 150lx）とした。また、画素のノイズを最小限に抑えるために、感度を ISO100 に固定し、自動露出補正機能を使用し撮影を行った。

1) 測定精度の評価

顔面石膏模型上に、ノギス（M型標準ノギス N10R , ミットヨ , 神奈川 , 最小読取値 0.05mm）を用いて測定点間距離を 8.00cm とした 2 個の測定点を固定した。その後本システムを用いて被写体の 3 次元点群モデルデータを再構成した。被写体・カメラ間距離を撮影距離として、30cm から 80cm までの間、10cm ごとに距離を設定し撮影を行った。再構成した 3 次元点群モ

デルデータの測定点間距離をソフトウェアの距離計測機能を用いて測定し，実測値に対する撮影距離ごとの測定点間距離を評価した．

2) 測定方法の評価

顔面石膏模型およびエピテーゼのワックスパターンを被写体とした．撮影距離 30cm，水平方向のレンズ配置および画像投影無しを条件とした撮影を基準とした．以下に示す条件を変化させて撮影した画像より3次元点群モデルを再構成し，モデル上に生じた節点の欠落およびノイズを検出し形状を評価した．

(1) 撮影距離 (SD) とレンズ配置 (LP)

異なる撮影距離および被写体に対するレンズの配置の幾何学的配置方向を変化させて撮影を行いステレオ画像間に生じる視差の影響を評価した．

(2) 画像投影の有無および種類 (IP)

ハロゲンランプを光源とした液晶プロジェクター (XJ-S32, Casio, 東京) を用いて，パターン画像を投影した (Fig 2)．また，投影画像

の種類 (**Fig 3**) が空間計測に及ぼす影響を評価した。

3) 解析方法

(1) 3次元モデルの2次元平面投影
撮影した画像の撮影距離 ± 10cm の範囲で3次元点群モデルを再構成した。3次元点群モデルの節点座標 (XYZ直交座標系) および色 (RGB 値) の測定値を CSV 形式で出力した。本形式では測定値を連続的に記述したものであるため、欠落した形状データは反映されない (**Fig 4**)。

一方、本システムによって再構成した3次元点群モデルの各節点はエピポーラ拘束および撮影画像のピクセル幅を基準として一定の間隔 (理論的節点間隔) で配列している。それぞれの同一エピポーラ線上の測定節点は本来、理論節点間隔を比例定数とした直線 (理論的直線) 上に配列している。そこで、CSVデータより、同一エピポーラ線上に存在する、すなわち X 座標値が同一の測定値を有する節

点を抽出し，理論的直線上に再配列することで欠落した節点をデータに反映し，測定形状の復元を行った（**Fig 5**）. さらに抽出した節点をYZ平面上に投影し，Z軸（奥行）成分の変位からノイズを検出し，モデルの形状を評価した．

（ 2 ） 欠落およびノイズの検出

YZ平面上で隣接する節点間のY軸成分の差が理論的節点間隔より大きい場合を形状の欠落とした．また，欠落の長さを理論的節点間隔で除することで欠落節点数を算出した．

隣接する節点間でのZ軸成分値の差に対して閾値（0.4mm）を設定した．閾値以上の変位量を認めた節点をノイズとして検出し，ノイズ節点数を算出した（**Fig 6**）.

4）色データを用いた測定ノイズの処理

測定方法の評価を行った際と同様の被写体および手順にて3次元点群モデルを再構成した．モデルの色データを応用したノイズ処理法（CCI）を用いてその効果を評価した．ノイ

ズ処理法の手順を以下に示す。

(1) 補正誤差の算出

YZ平面上で隣接する節点間のZ軸成分値の変位量を検出した。理論的節点間隔を基準として0.2mmを閾値とし、閾値以上のZ軸成分値の変化を認められた節点を抽出した。抽出した両節点に対してRGB値より算出される輝度値の差、すなわち明るさの変化の有無を検出した。明るさの変化がない場合ノイズであるとして処理し、明るさの変化がある対象節点を抽出し、DSのデータに反映した(Fig 7)。解析はDSあるいはCCIによって抽出した節点間を直線で結んだ面を補正面とし、実測値からなる基準面と重ね合わせにより得られた領域内の面積を補正誤差として算出した(Fig 8)。

(2) データ容量軽減効果の評価

CCIあるいはDSによって抽出した節点数の総節点数に対する割合を算出した。データ容量についてCCIのデータ容量軽減効果を評価した。

結 果

1 . 測 定 精 度 の 評 価

3次元点群モデル上での測定間距離を **Table 1** に示す。実測値で 8.00cm であった測定点間距離は撮影距離が撮影距離 60cm で 8.03cm であり実測値に最も近い値を示した。測定点間距離の平均値は 8.10cm であり，実測値に対する測定誤差は 1.25 % であった。

2 . 測 定 方 法 の 評 価

再構成した点群モデルの総節点数に対する，欠落節点数およびノイズ節点数の割合を **Table 2** に示す。欠落節点は撮影距離 30cm ，水平レンズ配置，画像投影無しの条件を基準とした場合，その他の条件全てで，その発生頻度が減少した。ノイズ節点の発生率については，画像投影を行った場合とレンズ配置を垂直とした場合で増加し，撮影距離を 60cm とした場合で減少した (**Figs 9a-e**) .

3 . 色 データ を 用 い た 測 定 ノ イ ズ の 除 去

CCI 節 点 と DS 節 点 に よ る 補 正 面 と 測 定 値 か ら
な る 基 準 面 と の 比 較 を **Figs 10-12** に 示 す . そ の 結
果 , 1,252 節 点 中 65 節 点 が CCI 節 点 と し て 抽 出 さ
れ た .

測 定 節 点 の サ ン プ リ ン グ レ ー ト に 対 す る 補
正 誤 差 と デ ー タ 容 量 の 変 化 を **Fig 13** に 示 す . DS
節 点 の み か ら な る 補 正 面 は サ ン プ リ ン グ レ ー
ト の 増 加 に 比 例 し て 補 正 誤 差 が 増 加 す る の に
対 し て , CCI 節 点 の 追 加 に よ っ て そ の 増 加 を 抑
制 す る 傾 向 を 認 め , DS 節 点 の サ ン プ リ ン グ レ
ー ト が 増 加 す る ほ ど そ の 抑 制 効 果 は 顕 著 で あ
っ た . ま た , デ ー タ 容 量 の 軽 減 効 果 は CCI 節 点
を 追 加 し た 場 合 で も , DS 節 点 の み を 抽 出 し た
場 合 と 同 様 の 傾 向 を 示 し た .

考 察

1 . 測 定 精 度 に つ い て

本 研 究 で 用 い た 空 間 計 測 シ ス テ ム は , 測 定 用 ス テ レ オ カ メ ラ の 両 レ ン ズ 中 心 軸 間 距 離 , レ ン ズ の 焦 点 距 離 お よ び 画 素 ピ ッ チ よ り 算 出 さ れ る 三 次 元 空 間 内 で の 理 論 距 離 分 解 能 は , 撮 影 距 離 が 1 m の 場 合 で , X 軸 お よ び Y 軸 成 分 で 0.3mm , Z 軸 成 分 で 3.6mm と な り , 撮 影 距 離 に 対 す る Z 軸 成 分 の 距 離 分 解 能 は 0.3 % と な っ て い る ¹⁸⁾ . ま た , 1/2.3 型 CCD セ ン サ に 対 し て 記 録 画 素 は 3,648 × 2,736 ピ ク セ ル で 一 定 で あ る た め , 撮 影 距 離 の 増 加 に 伴 い , セ ン サ 内 で の 被 写 体 の 解 像 度 は 相 対 的 に 低 下 す る . 従 っ て , 理 論 的 空 間 分 解 能 は 撮 影 距 離 に 反 比 例 す る こ と と な る . 測 定 精 度 の 評 価 で は 撮 影 距 離 30cm で の 撮 影 が 理 論 的 最 小 空 間 分 解 能 を 条 件 と し た 距 離 計 測 で あ っ た が , 撮 影 距 離 と 測 定 精 度 に 関 連 を 認 め な っ た .

受 動 型 ス テ レ オ 視 法 で は 対 応 点 検 出 精 度 は 測 定 精 度 の 向 上 に 大 き く 影 響 す る こ と が 知 ら

れている¹⁹⁾。一般に基線長の短いカメラの配置条件で被写体を撮影することにより、視差の少ない画像すなわち類似性の高い画像の取得が可能である。これらの画像を基にした空間計測では、対応点の検出精度が向上し、良好な測定結果を得ることができると考えられる²⁰⁾。本研究で用いたステレオカメラは基線長に相当する両レンズ中心軸間距離が一定となっているため、撮影距離の増加によって取得した画像の類似性が増大する。従って、対応点の検出精度が向上することにより測定精度が向上すると考えられる。さらに撮影距離の増加は、画像に投影される被写体の拡大率が減少し、光学レンズの周辺ひずみの影響が少ない画像を取得できる。撮影距離の増加は画像の解像度を低下させる一方で、対応点の検出精度の向上やひずみの少ない画像の取得が可能であり、測定精度に対して二律相反を生じる。従って、本実験では撮影距離と測定精度の関係に一定の傾向が認められなかったものと考えられる。

この点に対しては，被写体の色調や表面性状など他にも影響を及ぼす要因が関与することから今後さらなる検証が必要と考える．

一方，撮影距離 60cm で最大の測定精度が得られたことから，対象の大きさや撮影距離など，顔面計測を想定した計測では，空間分解能よりも対応点の検出精度の方が測定精度に及ぼす影響が大きいものと考えられる．

撮影距離 80cm の場合で，取得した画像の解像度の低下により基準点の検出が困難であった．撮影距離が 30 ～ 70cm の場合について実測値に対しての平均測定誤差は 1.25 % であった．

小坂らは²¹⁾，2次元顔貌写真を用いて視覚による顔面の対称性の識別を検証した報告において，非対称性の判断の境界点は，顔貌正面観の左右的な非対称率が 6.0 ～ 6.9 % の範囲内にあると報告している．本実験で再構成した3次元モデルを用いてミラー投影による設計法^{4.5)}を用いたエピソードを製作した場合，装置の寸法的な誤差は臨床的に許容できると考

えられる。従って、本システムは顔面計測に応用可能な精度を満たしていると考えられる。

2. 測定条件について

本システムでは、1回1方向からの写真撮影によって取得した画像から点群を構築している。そのため、アンダーカットなど死角を生じた領域の点群は構築されない。また、撮影距離に応じて点群構築範囲を限定しいたことから、範囲外のZ軸成分の座標値を有する節点はデータ上で形状の欠落として反映される。さらに、ステレオ視法では、対応点の識別精度が空間計測精度に大きく影響することが知られている²⁰⁾。一般に視差の少ない画像を基にすること、被写体の色調や表面性状が不均一であるほど、対応点の識別精度が向上するとされている²²⁾。測定対象の形状や大きさによってカメラ間の基線長および角度の調整が行われる。

一方、本実験ではこれらの幾何学的条件は測定装置に固有の値を使用した。そこでそれ

それぞれの測定条件が3次元点群モデルのノイズおよび欠落に及ぼす影響を明らかにし、顔面計測に適した撮影条件を評価した。

3. 撮影距離について

測定方法の評価において、異なる撮影距離によって得た画像より再構成した3次元点群モデルの形状評価の結果、撮影距離60cmは、30cmと比較して、点群の欠落率、およびノイズ発生率が低かった。撮影距離60cmの理論的最小空間分解能はX軸およびY軸成分で0.2mmとなる。このとき撮影画像の解像度は、皺や毛穴などの顔面上の微細な構造を識別可能である。さらに、画像の投影面の大きさはおよそ横73cm×縦55cmとなることから、対象となる顔貌全体を投影することができ十分な距離であると考えられる。測定精度の結果からも、本システムでの撮影距離は60cmを基準とすることが適切と考えられる。

4. レンズの幾何学的配置について

被写体に対するレンズの幾何学的配置は、

レンズを上下に配置して撮影した場合は、レンズを左右に配置した場合よりも点群の欠落の発生が少なかった。解剖学的特徴点に基づく顔面形状相同モデルでの前頭顔面の輪郭は、水平断で正中を頂点とした曲面で近似される²³⁾。つまり、顔面計測においては、レンズを左右に配置して撮影を行った場合は、画像間での視差が大きくなり、対応点の探索精度の低下によって死角による測定エラーが生じやすくなる。レンズを上下に配置した場合は全体的に画像間で視差が少なくなり、測定エラーの少ない計測を行うことができると考えられる。

5. 画像投影について

三角測量法を原理としたステレオ視法は、計測基準点に対する対応点の関連付けが計測精度に大きく影響する²⁰⁾。さらに受動型原理では対応点探索の安定度が低くなる。そこで計測精度の向上を目的とした対応点探索について、2つの画像からブロックマッチングを

行う際，ブロックサイズを適応的に選択する手法²⁴⁾やマッチング関数を用いたサブピクセルレベルでの推定を行う手法²⁵⁾などが提唱されている．一方，アクティブステレオ法は，測定時に被写体に対して光波などのエネルギー波動を投影することで容易かつ確実に対応点の関連付けを行うことができる．アクティブステレオ法は計測用のハードウェアの構成が複雑になるものの高精度な空間計測が可能であり，今日，歯科用口腔内スキャナなど多くの計測機器に応用されている．

本研究では，画像投影によるアクティブ化によって点群モデルの欠落に対して形状の改善を認めた．一方，ノイズについては，通常の撮影によって再構成したモデルよりも発生頻度が増加した．この理由としては，使用した液晶プロジェクターが単一焦点型であったことから，投影された画像が被写体上で歪みを生じ十分な輝度コントラストを得られなかったことが考えられる．さらに1方向からの

画像投影であったことから，被写体上で十分に画像が投影されない部位が生じていたことが考えられる．全焦点型であるレーザープロジェクターを複数台使用することでこれらの原因の解決が可能であると考えられる．しかし，計測用ハードウェアの複雑化は測定が煩雑になるだけでなく，開眼状態での撮影を想定する生体計測では安全性にも問題がある．加えてパターン画像を投影して再構成した点群モデルでは本来の被写体の色調を再現できない．従って本システムを顔面計測に応用する場合，パターン画像投影の併用は避けるべきであると考えられる．

6. 3次元モデルについて

本研究で作成した3次元点群モデルは，RAWデータを使用していることから，空間計測の精度検証^{18,26)}や，異なる計測システムの比較^{9,27)}，被写体の形状評価を行う場合に適した形式である²⁸⁾．

一方，データの記述形式が節点の座標値を

最小構成としており，データ容量が節点数に比例して増加するため，膨大なメモリーが必要となる²⁹⁾．また，空間座標系での表示を行った場合，計測した節点がそれぞれに独立していることから RAW データの取り扱いにはコンピュータに負荷がかかる．従って一般的に，修正距離関数を用いた曲面計算³⁰⁾やドロネ三角形分割によるポリゴン化^{31,32)}，陰関数を利用したメッシュ生成^{33,34)}など点群モデルをその他のモデル形式に変換する手法が提唱されている．

物体の表面形状を微小な多角形の集合として表現したポリゴンモデル，特に，最小構成を三角パッチとした STL は，構成が比較的単純であり，自動要素分割のためのアルゴリズムが公開されていること³²⁾から今日，各種ソフトウェアが準備されている．歯科領域での CAD/CAM システムに利用されるだけでなく，その他の RP システムや，CAM システムの標準ファイルフォーマットとして利用されている³⁵⁻³⁸⁾．

STL の デ ー タ 記 述 形 式 は 面 を 構 成 す る 多 角 形 の 頂 点 座 標 お よ び 法 線 ベ ク ト ル を 最 小 単 位 と し て い る こ と か ら ²⁹⁾ , 点 群 モ デ ル を ポ リ ゴ ン モ デ ル へ 変 換 す る 際 は , 節 点 に 対 す る 法 線 の 設 定 が 必 要 と な る . 点 群 モ デ ル の 節 点 に 対 す る 法 線 の 設 定 は , 対 象 と す る 節 点 の 周 圍 節 点 の 座 標 値 を 参 考 に し て 法 線 ベ ク ト ル の 推 定 を 行 う ³⁹⁾ . 点 群 モ デ ル は RAW デ ー タ と し て 測 定 値 を 直 接 形 状 に 反 映 し た も の で あ る . 従 っ て , 形 状 に 測 定 の エ ラ ー で あ る ノ イ ズ や 欠 落 を 生 じ や す い . そ こ で あ ら か じ め 再 構 成 し た 点 群 モ デ ル の ノ イ ズ 処 理 を 行 う こ と で ポ リ ゴ ン モ デ ル へ の 変 換 の 過 程 で 生 じ る 被 写 体 の 形 状 の 変 形 を 抑 制 で き る と 考 え た .

7 . ノ イ ズ 処 理 に つ い て

点 群 の ノ イ ズ 処 理 に 関 し て , Taubin ら ⁴⁰⁾ は 点 群 を 信 号 レ ベ ル の 異 な る 周 波 数 と し て 取 り 扱 い , 高 周 波 信 号 の み を ノ イ ズ と し て 取 り 除 く 手 法 を 提 唱 し て い る . ま た , Beeler ら ⁴¹⁾ は 顔 面 点 群 モ デ ル に 対 し て , 立 体 モ デ ル デ ー タ の 陰

影表現に用いられる環境遮蔽効果 (AOC)⁴²⁾ を考慮した形状の最適化について報告している。しかし、ソーベルフィルタなどの高周波除去フィルタ⁴⁰⁾では、ノイズの振幅幅が節点の間隔に比べて大きい場合、ノイズを除去することができず、AOCによる形状の最適化⁴¹⁾は、節点の法線データを対象とした処理法である。本実験で再構成した3次元点群モデルの節点は法線データを含まず、形状として皺や毛穴などの微小な凹凸を取り扱う必要があったことから、これらのノイズ処理法の適用が困難であった。そこで、測定によって得られた節点の座標データおよび色データを利用したノイズ処理法についての検討を行った。

本実験で用いたCCIは、その処理過程で隣接する節点間での奥行成分の変位量に閾値を設けた。奥行成分の変位の少ない形状からは対象とする節点が抽出されず、CCI節点は色調の変化を伴う部位に限局していたことから、演算コストの低いDSによる平滑化と併用するこ

とで形状全体のノイズ処理を行い測定形状との比較を行った。

測定環境が室内であり，天井に設置された照明光が測定時の主たる光源であった。また，被写体が一様な色調の石膏模型であり，光に対する挙動が一定であった。従って，撮影した画像は形状の凹凸を色調の陰影として反映が容易であったと考えられる。

CCI節点数の総節点数に対する割合は5.2%であり，CCI節点の抽出によるデータ容量の増加は軽微であるといえる。

以上，本手法は点群モデルのノイズ処理法として有効であると考えられる。人体を対象とした場合は，各種条件が異なることからさらに検証が必要と思われる。顔面を対象とした計測においては，形状の凹凸が主に皮膚上に存在しており，その色調は比較的近似しているため，顔面計測によって再構成した点群モデルに対してもCCIが有効である可能性が高いと考えられる。

結 論

汎用デジタルカメラを用い、顔面計測への応用を目的とした空間計測を行い以下の結論を得た。

1. 被写体・カメラ間距離を撮影距離とした場合、撮影距離と測定精度に関連を認めず、撮影距離 60cm で測定精度が最大となり、撮影距離 30 ～ 70cm の範囲での平均測定誤差は 1.5 % であった。
2. 撮影距離を 60cm とすることで、測定エラーの少ない形状計測が可能であった。
3. 点群モデルの色データを用いたノイズ処理法により被写体の微細な凹凸を選択的に抽出できることがわかった。

以上のことから、本システムを用いた顔面形状計測法は、エピテーゼ製作等臨床応用への展開が可能と思われる。

謝 辞

稿を終えるにあたり，終始御指導を賜りました理工系歯材応用研究群 歯科補綴学Ⅱ 藤澤政紀教授に厚く御礼申し上げます．

また，論文の審査にあたり，御指導，御校閲を賜りました理工系歯材応用研究群 歯科放射線学 奥村泰彦教授，理工系歯材応用研究群 歯科矯正学 須田直人教授，形態系正常形態研究群 口腔解剖学Ⅱ 天野修教授に深く感謝申し上げます．

さらに本研究にあたり，ご協力いただきました猪野照夫准教授をはじめ機能保存回復学講座歯科補綴学分野の諸先生に厚く感謝いたします．

なお，本研究の一部は平成26年度宮田研究奨励金Eならびに日本学術振興会科学研究費（挑戦的萌芽研究 26670843）の助成を受けて行った．

引用文献

1. Beumer JIII, Marunick MT and Esposito S: Rehabilitation of Facial Defects. In: Maxillofacial rehabilitation, Esposito S, Reiger J and Beumer J III, eds, 3rd edition, Quintessence publishing Co, Inc, Chicago, pp260-271, 2011
2. 末瀬一彦：保険診療に導入された「CAD/CAM 冠」の初期経過に関する調査研究. 日本デジタル歯科学会誌 5, 85-94, 2015
3. Wolfaardt J, King B, Bibb R, Verdonck H, Cubber JD, Sensen CW and Soh J: Digital technology in maxillofacial rehabilitation. In: Maxillofacial rehabilitation, Esposito S, Reiger J and Beumer J III, eds, 3rd edition, Quintessence publishing Co, Inc, Chicago, pp355-373, 2011
4. Feng ZH, Dong Y, Bai SZ, Wu GF, Bi YP, Wang B and Zhao YM: Virtual transplantation in designing a facial prosthesis for extensive maxillofacial defects that cross the facial midline using computer-assisted technology. Int J Prosthodont. **23**, 513-20, 2010
5. 吉岡 文, 木村尚美, 浅見和哉, 宮前 真, 平井秀明, 坂根 瑞, 尾澤昌悟, 服部正巳, 田中貴信: エピテーゼ製作におけるデジタルテクノロジーの活用. 顎顔面補綴 **36**, 13-18, 2013
6. 大木 明子, 山越 典雅, 門田 千晶, 高戸 毅: 広範囲にわたる顔面欠損に対して CT データを利用して製作したエピテーゼの 1 例. 顎顔面補綴 **35**, 20-27, 2012
7. Ciocca L and Scotti R: Oculo-facial rehabilitation after facial cancer removal: updated CAD/CAM procedures: a pilot study. Prosthet Orthot Int. **38**, 505-509, 2014
8. Tsuji M, Noguchi N, Ihara K, Yamashita Y, Shikimori M and Goto M: Fabrication of a maxillofacial prosthesis using a computer-aided design and manufacturing system. J Prosthodont. **13**, 179-83, 2004
9. Boehnen C and Flynn PJ: Accuracy of 3D scanning technologies in a face scanning context. 3-D Digital Imaging and Modeling DOI: 10.1109/3DIM.2005.13, 2005

10. Coward TJ, Watson RM, Richards R and Scott BJ: A comparison of three methods to evaluate the position of an artificial ear on the deficient side of the face from a three-dimensional surface scan of patients with hemifacial microsomia. *Int J Prosthodont.* **25**, 160-165, 2012
11. Ciocca L, Fantini M, De Crescenzo F, Persiani F and Scotti R: New protocol for construction of eyeglasses-supported provisional nasal prosthesis using CAD/CAM techniques. *J Rehabil Res Dev* **47**, 595-604, 2010
12. Bai SZ, Feng ZH, Gao R, Dong Y, Bi YP, Wu GF and Chen X: Development and application of a rapid rehabilitation system for reconstruction of maxillofacial soft-tissue defects related to war and traumatic injuries. *Mil Med Res* **1**, 11, 2014
13. Grant GT, Aita-Holmes C, Liacouras P, Garnes J and Wilson WO Jr: Digital capture, design, and manufacturing of a facial prosthesis: Clinical report on a pediatric patient. *J Prosthet Dent* **114**, 138-41, 2015
14. 石上友彦：欠損補綴 In：顎顔面補綴の臨床 咀嚼・嚥下・発音の機能回復のために。大山喬史，谷口 尚編，第1版，医学情報社，東京，pp11-25, 2006
15. Lübbers HT, Medinger L, Kruse A, Grätz KW and Matthews F: Precision and accuracy of the 3dMD photogrammetric system in craniomaxillofacial application. *J Craniofac Surg* **21**, 763-767, 2010
16. 勅使河原大輔，猪野照夫，藤澤政紀：3D フェイシャルスキャンの今，そしてこれから。 *QDT art&practice* **40**, 46-58, 2015
17. Zhang Z, Deriche R, Faugeras O and Luong QT: A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry. *Artificial Intelligence* **78**, 87-119, 1995
18. 増田智紀，石山英二，玉山宏：3D デジタルカメラ「FinePix REAL 3D W3」の撮影画像を用いた「3D 計測システム」の開発。 *Fuji Film research & development* **57**, 38-41, 2012

19. 津留宏介, 村井俊治: 市販デジタルカメラを使った地形・地物の写真測量に関する仕様書. In: デジタル写真測量の基礎～デジカメで三次元測定するには～. 日本写真測量学会編, 初版, 社団法人 日本測量協会, 東京, pp105-109, 2010
20. Myron ZB, Darius B and Gregory DH: Advances in computational stereo. *Pattern Analysis and Machine Intelligence* **25**, 993-1008, 2003
21. 小坂正明, 本田康生, 丹羽幸司, 上石 弘: 視覚による顔面非対称性の識別精度. *日形会誌* **19**, 316-322, 1999
22. 津留宏介, 村井俊治: 写真撮影と画質. In: デジタル写真測量の基礎～デジカメで三次元測定するには～. 津留宏介, 村井俊治編, 初版, 社団法人 日本測量協会, 東京, pp59-72, 2010
23. 持丸正明: 光三次元計測の実際例. In: 最新光三次元計測. 吉沢 徹編, 初版, 朝倉書店, 東京, pp120-125, 2006
24. 奥富正敏, 金出武雄: 統計的モデルに基づく適応型ウィンドウによるステレオマッチング 1次元信号を用いた解析と実験. *電子情報通信学会論文誌* **74**, 669-677, 1991
25. Shimizu M and Okutomi M: Sub-pixel estimation error cancellation on area-based matching. *International Journal of Computer Vision* **63**, 207-224, 2005
26. 清水雅夫, 奥富正敏: 画像のマッチングにおける高精度なサブピクセル推定手法. *電子情報通信学会論文誌* **84**, 1409-1418, 2001
27. 木原琢哉, 田地 豪, 二川浩樹: 歯科用 CAD/CAM システムの光学スキャナおよび cone-beamCT による三次元歯列形状計測の精度評価. *日本デジタル歯科学会誌* **5**, 95-104, 2015
28. 橋本 真: 買った後に後悔しないためのかしこい CAD/CAM の選び方 スキャナー& CAD ソフト編. *QDT art&practice* **40**, 88-108, 2015
29. 持丸正明, 河内まき子: 形状データ処理. In: 人体を測る 寸法・形状・運動. 持丸正明, 河内まき子編, 第1版, バイオメカニズム学会, 東京, pp62-65, 2006

30. Lukács G, Marshall AD and Martin RR: Geometric least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori RECCAD, 1997
31. Shewchuk JR: Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation. *Computational Geometry* **22**, 21-74, 2002
32. Isenburg M, Liu Y, Shewchuk J and Snoeyink J: Streaming Computation of Delaunay Triangulations SIGGRAPH, 2006
33. Kazhdan M, Bolitho M and Hoppe H: Poisson Surface Reconstruction. *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, 2006
34. Kanai T, Ohtake Y and Kase K: Hierarchical Error-Driven Approximation of Implicit Surfaces from Polygonal Meshes. *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, 21-30, 2006
35. 土井章夫 : 3次元画像処理と Rapid Prototyping (RP) 技術の医療応用 : Volume Extractor による医療用造形モデルの構築. *塑性と加工* **51**, 201-2085, 2010
36. 小林 毅 : 3D プリンティングの生産性と可能性を最大化するソフトウェアプラットフォーム (特集 デジタルモノづくりを実現する STL データの活用法). *型技術* **30**, 32-36, 2015
37. Wakita A, Yajima M, Harada T, Toriya H, Chiyokura H: XVL: a compact and qualified 3D representation with lattice mesh and surface for the Internet. *ACM Web3D-VRML 2000*, 45-51, 2000
38. 板宮朋基 : 超軽量医用 3D モデル作成技術の臨床と教育への応用. *顎顔面補綴* **36**, 1-3, 2013
39. Lorensen WE and Cline HE: Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *ACM Transactions on Graphics* **21**, 163-169, 1987
40. Taubin G, Zhang T and Golub G: Optimal surface smoothing as filter design. *European Conference on Computer Vision '96*, 283-292, 1996

41. Beeler T, Bradley D, Zimmer H and Gross M: Improved reconstruction of deforming surfaces by cancelling ambient occlusion. European Conference on Computer Vision 2012, 2012
42. Landis H: Production-ready Global Illumination. SIGGRAPH, 2006

Footnote

AOC: Ambient Occlusion Cancelling

CAD/CAM: Computer Assisted Designing and Manufacturing

CCD: Charge-Coupled Device

CCI: Correction using Color Information

CSV: Comma Separated Value

CT: Computed Tomography

DS: Down Sampling

IP: Image Projection

ISO: International Organization for Standardization

JPEG: Joint Photographic Experts Group

LP: Lens Position

MPO: Multi Picture Format

MRI: Magnetic Resonance Imaging

QOL: Quality of Life

RAW: raw

RGB: Red-Green-Blue

RP: Rapid Prototyping

SAD: Sum of Absolute Difference

SD: Shooting Distance

STL: Standard Triangulated Language (Stereo Lithography)

3D: Three Dimensional

Figure legends

- Fig 1 Front view of the commercially available digital stereo camera. The double-head arrow shows a distance of central axis of two lenses.
- Fig 2 Measurement setting of image projection. The projector was set at 45 degrees to the camera-object line.
- Fig 3 Images projected onto the object. Left: Color. Right: Monochrome.
- Fig 4 Correction of CSV dataset considering defects of measured value
- Fig 5 Surface comparison between CSV dataset and corrected shape
- Fig 6 Detection procedure of defects and noises on the 3D point cloud model
- Fig 7 Procedure of CCI sampling
- Fig 8 Analysis method of the correction error
- Fig 9 Overview (left) and expanded section indicated in square (right) of 3D point cloud model. a : SD: 30cm, LP: horizontal, IP: none. b : SD: 30cm, LP: vertical, IP: none. c : SD: 60cm, LP: horizontal, IP: none. d : SD: 30cm, LP: horizontal, IP: color. e : SD: 30cm, LP: horizontal, IP: monochrome.
- Fig 10 Example of CCI sampled points on the measured surface
- Fig 11 Examples of gaps between corrected surfaces and the measured surface
- Fig 12 Expanded view of gaps between corrected surfaces and the measured surface. Left: CCI nodes and measured surface. Center: The area shows the correction gap of DS, Right: The area shows the correction gap of DS and CCI.
- Fig 13 Effects of CCI compared with DS. Solid line: Rate of correction errors to DS rate. Dotted line: Rate of data values to DS rate.

Table 1 Line measurement results and relative error of the measurement compared to actual value

Lens-Object(cm)	Straight-line distance(cm)	Relative error(%)
30	8.10	3.95
40	8.21	8.76
50	8.14	5.95
60	8.03	1.30
70	8.13	5.55

Table 2 Frequency of defects and noises of 3D point cloud model

Measurement condition	SD (cm) LP IP	30 horizontal none	60 horizontal none	30 vertical none	30 horizontal color	30 horizontal monochrome
Frequency of defect nodes (%)		13.67	1.82	6.07	1.79	3.54
Frequency of noisy nodes (%)		8.63	3.64	15.42	19.44	22.07

Fig 1 勅使河原↑



Fig 2 勅使河原↑

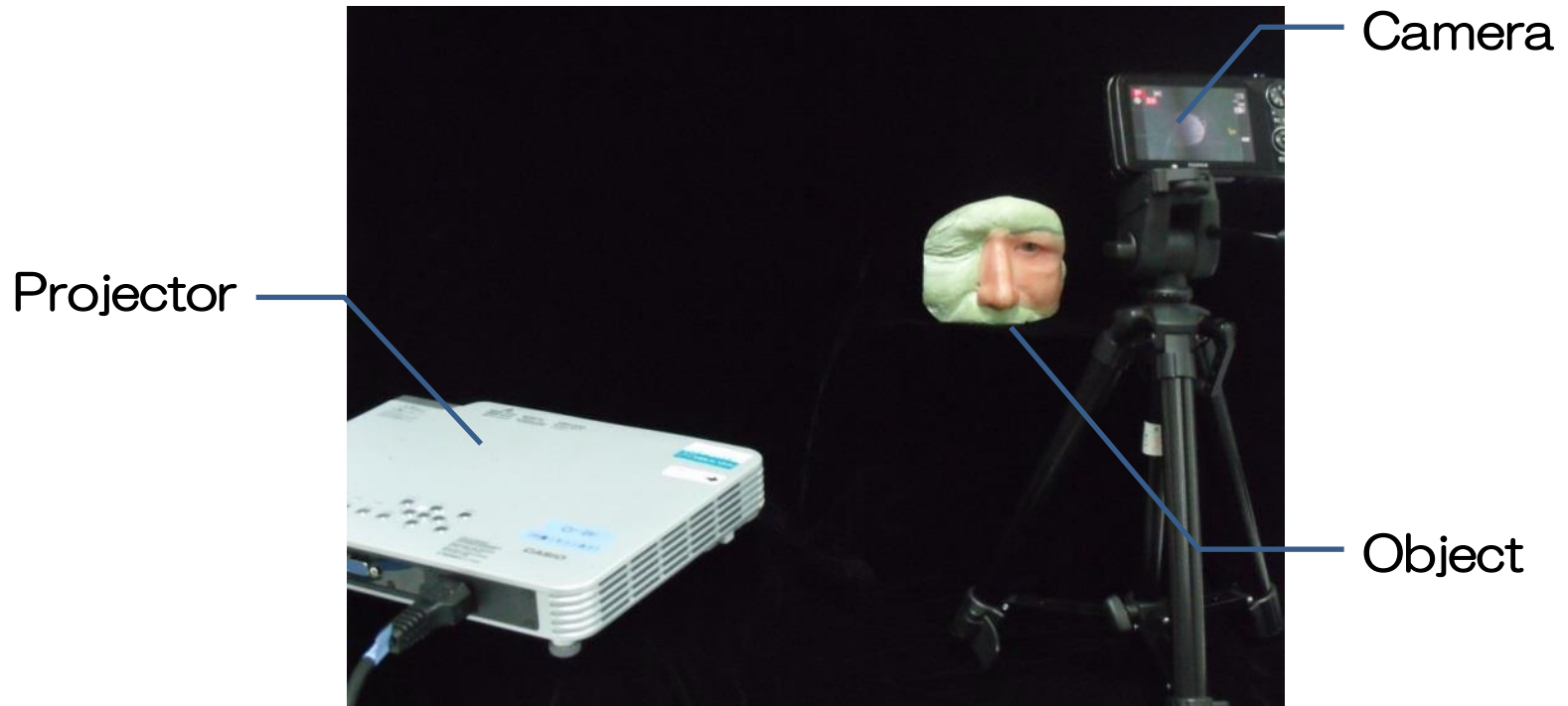
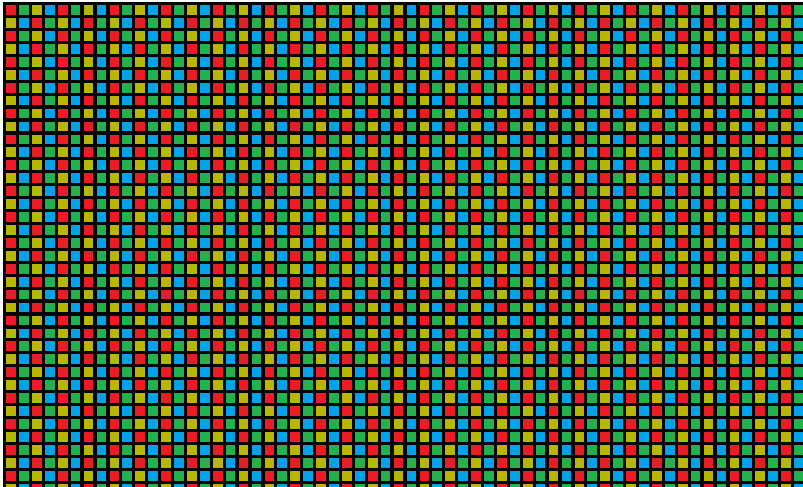
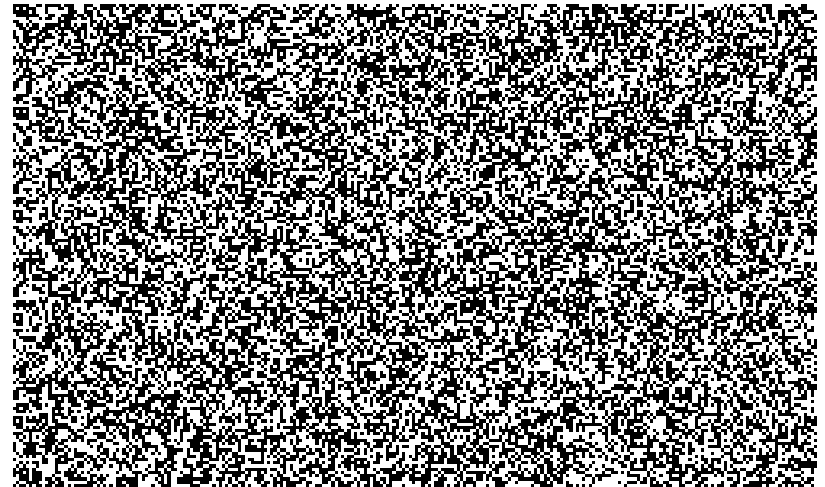


Fig 3 勅使河原↑

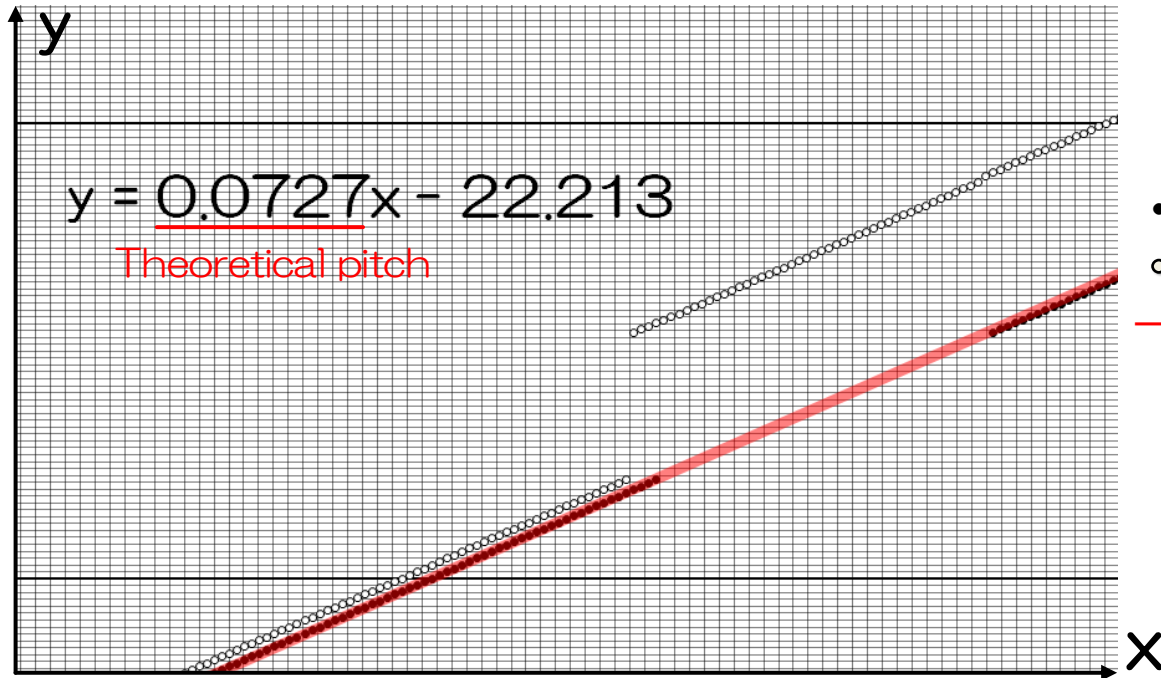


Color



Monochrome

Fig 4 勅使河原↑



- : Corrected value
- : SCV output value
- : Theoretical line (Measured value)

Fig 5 勅使河原↑

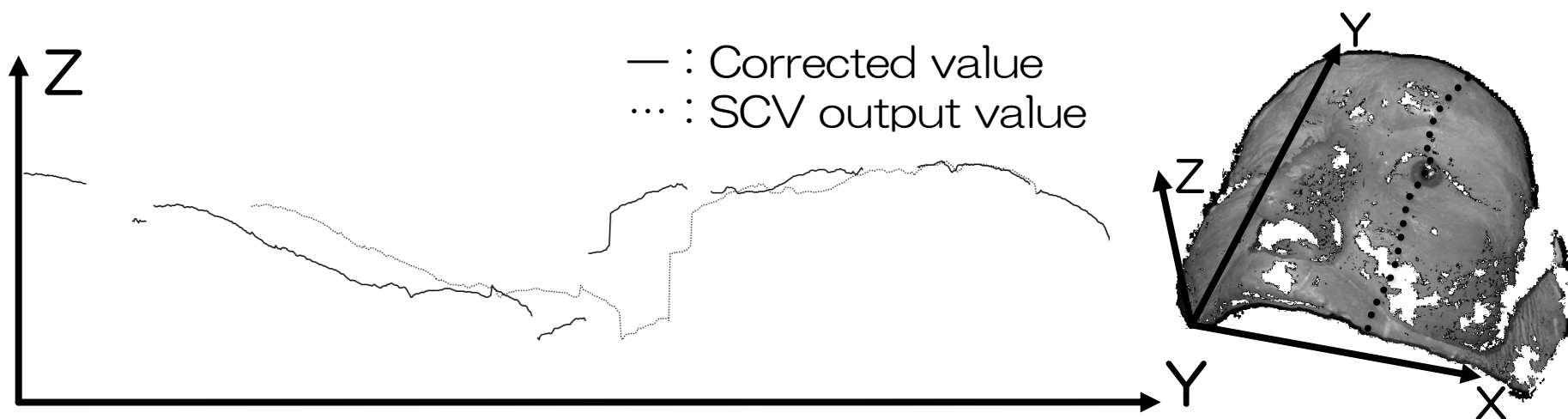
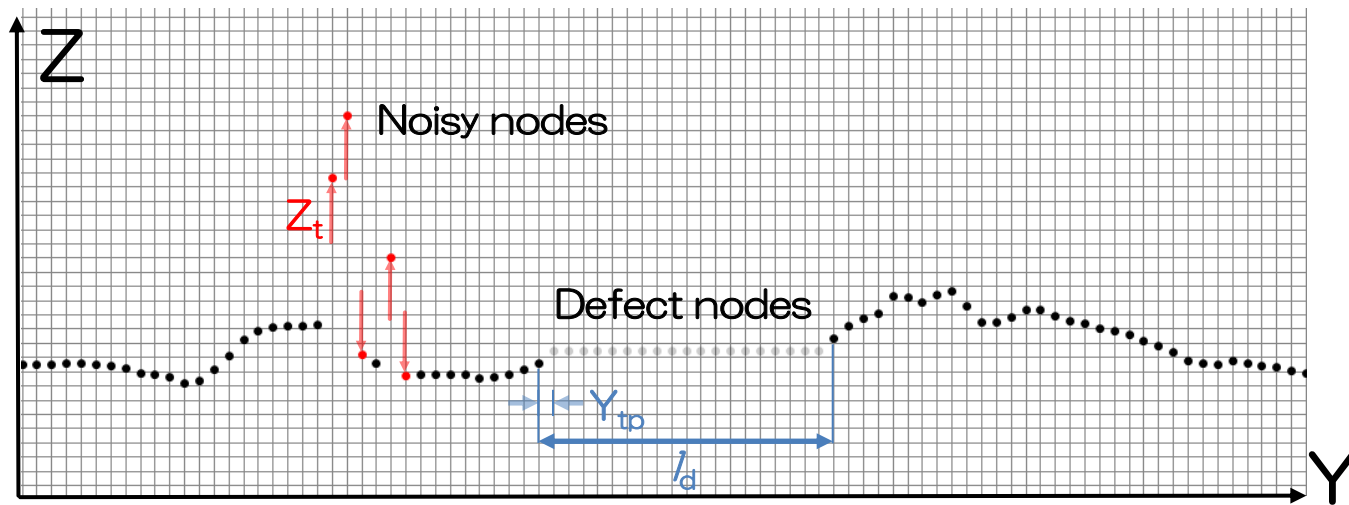


Fig 6 勅使河原↑

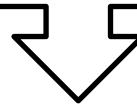


- : Measured value
- Z_t : Threshold of detecting noise = 0.4mm
- Y_{tp} : Theoretical pitch between adjacent nodes
- l_d : Length of defect (Number of defect nodes = l_d/Y_{tp})

A. Detection of a convex (concave) between adjacent points
(threshold: 0.2mm)



B. Confirmation of change in brightness between adjacent points
(Brightness : $Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$)



A and B: Pick up the points as CCI sample
A not B: Dealing the convex (concave) as noise

Fig 8 勅使河原↑

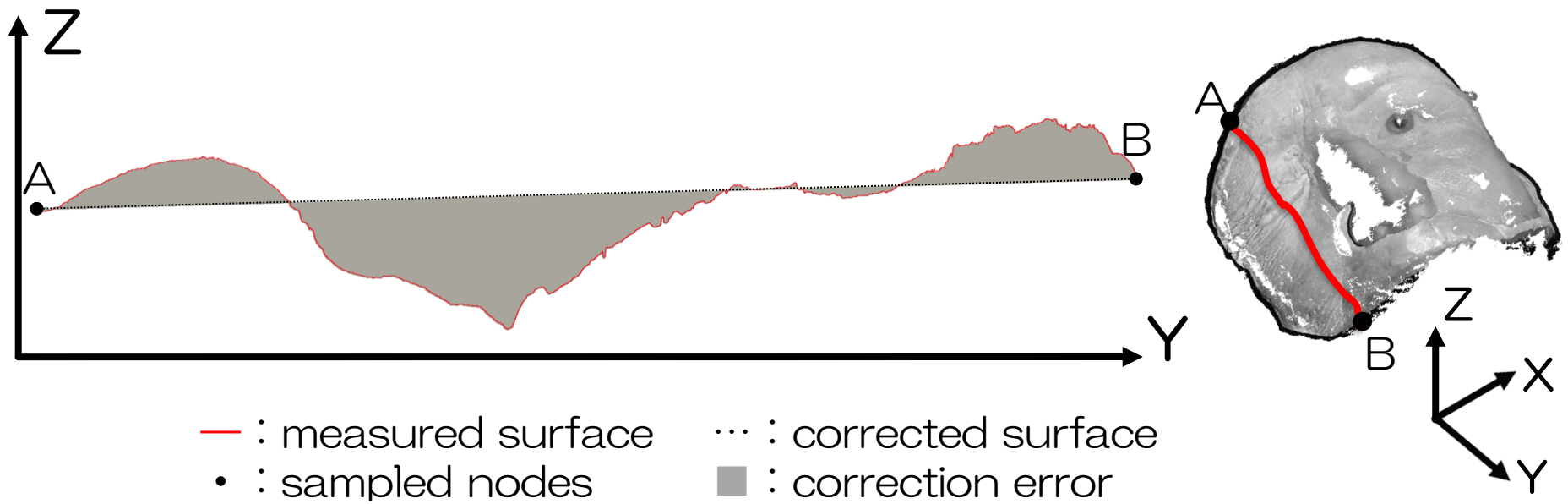
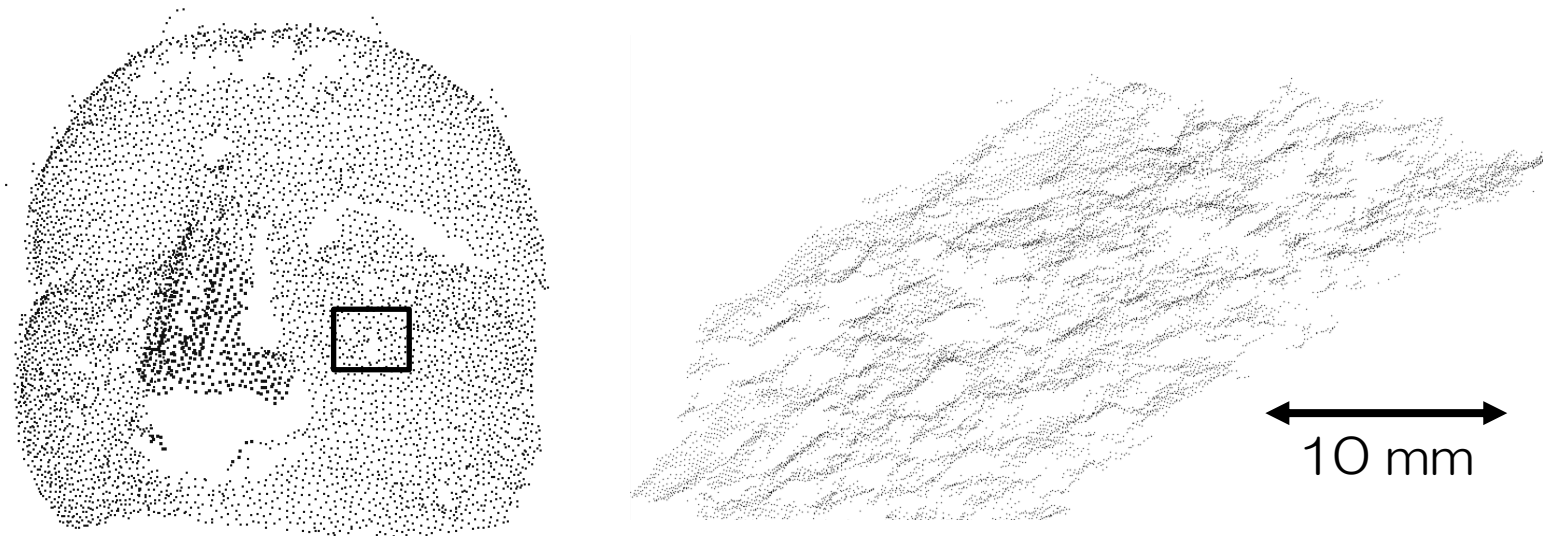
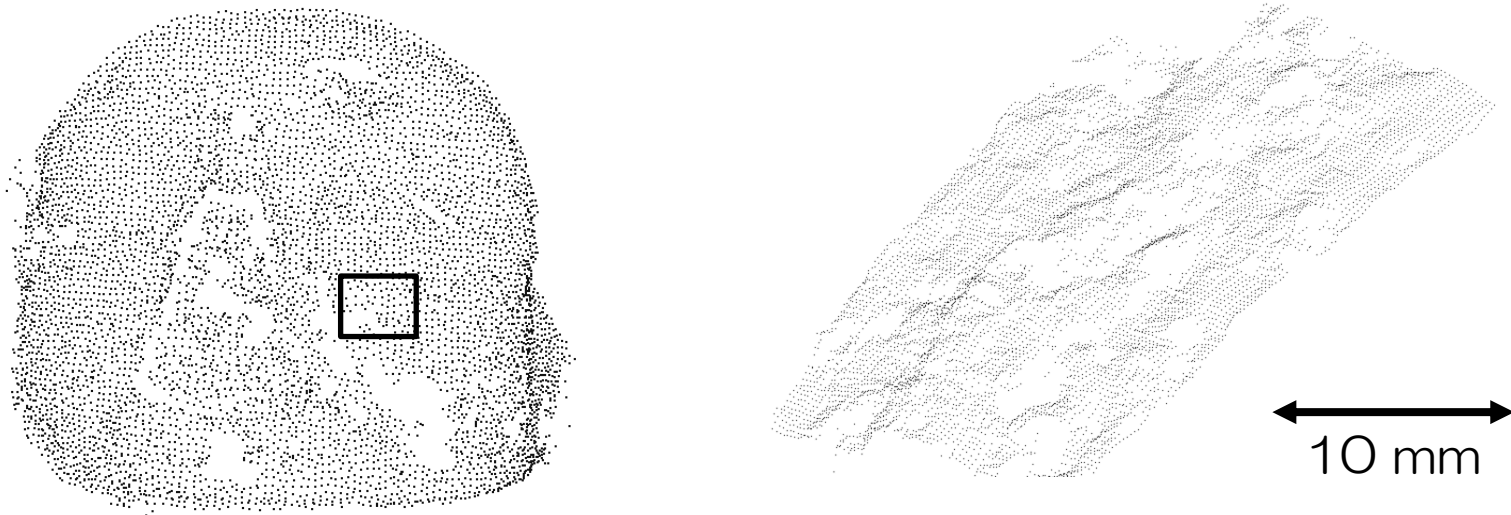


Fig 9a 勅使河原↑



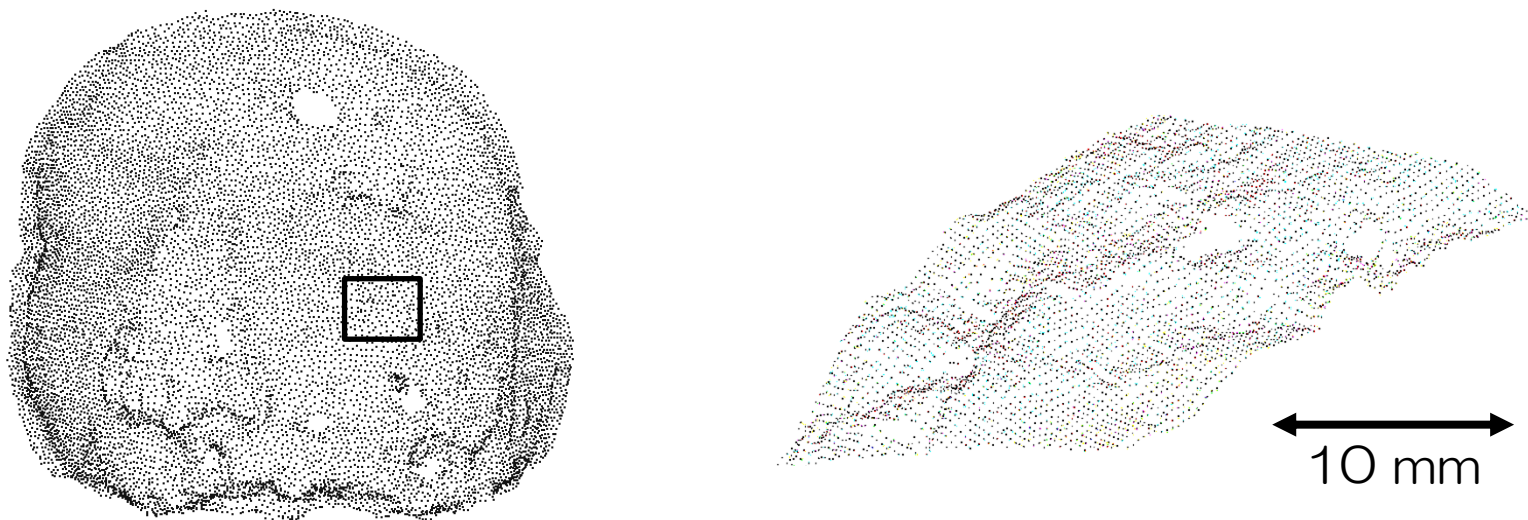
SD : 30 cm, LP : Horizontal, IP : none

Fig 9b 勅使河原↑



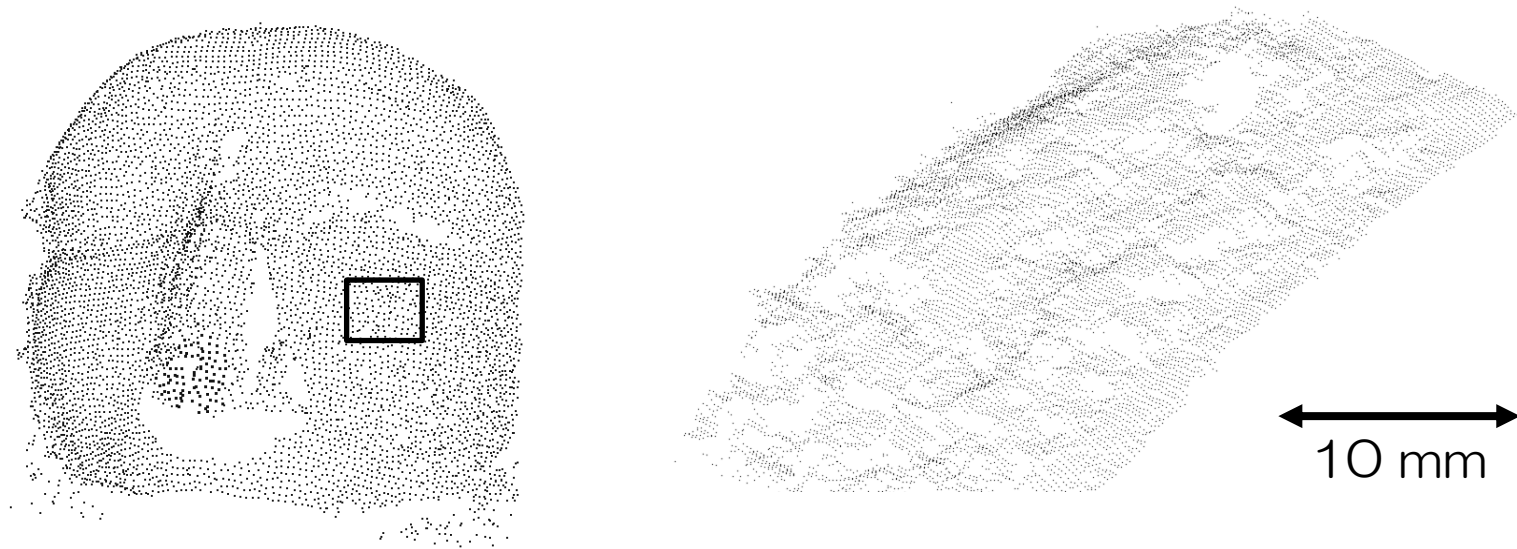
SD : 30 cm , LP : vertical , IP : none

Fig 9c 勅使河原↑



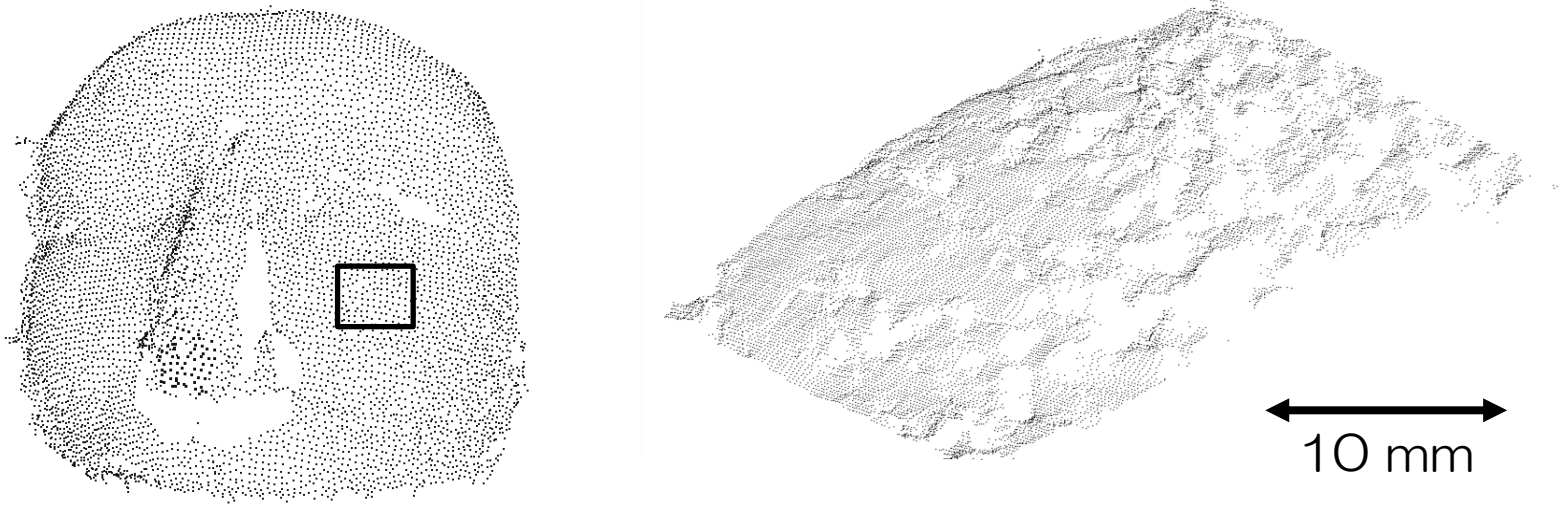
SD : 60 cm , LP : horizontal , IP : none

Fig 9d 勅使河原↑



SD : 30 cm , LP : horizontal , IP : color

Fig 9e 勅使河原↑



SD : 30 cm , LP : horizontal , IP : monochrome

Fig 10 勅使河原↑

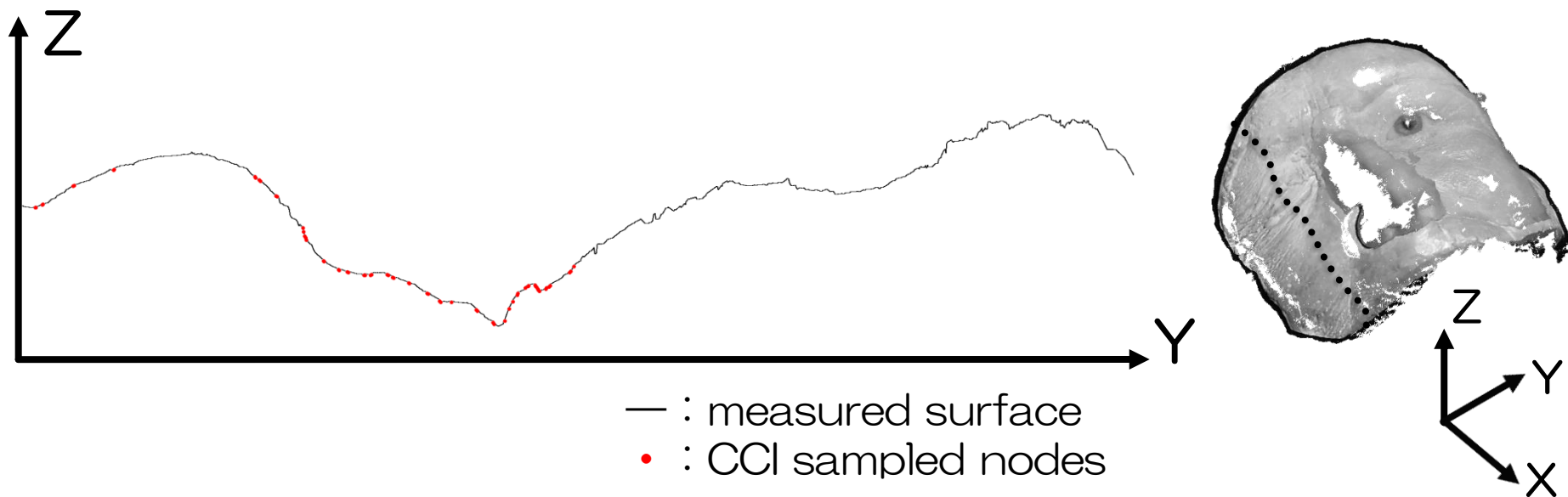


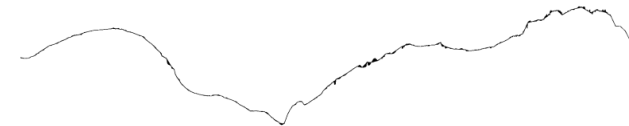
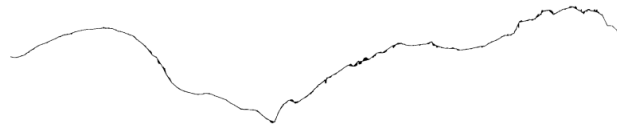
Fig 11 勅使河原↑

Down sampling rate

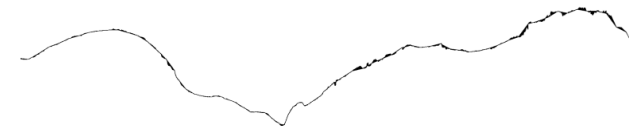
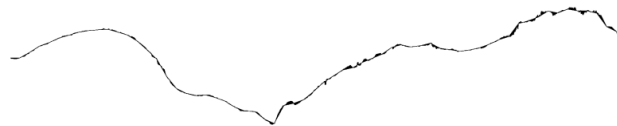
DS

DS + CCI

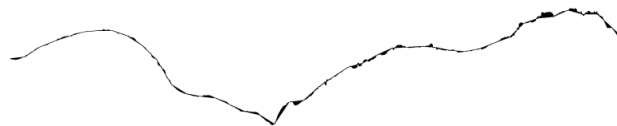
2 (mm)



4 (mm)



6 (mm)



8 (mm)



10 (mm)

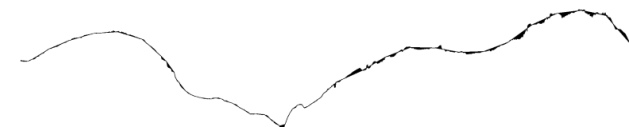
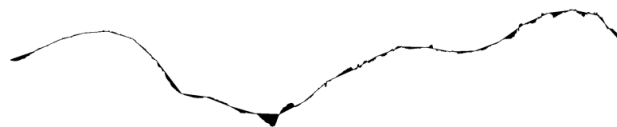


Fig 12 勅使河原↑

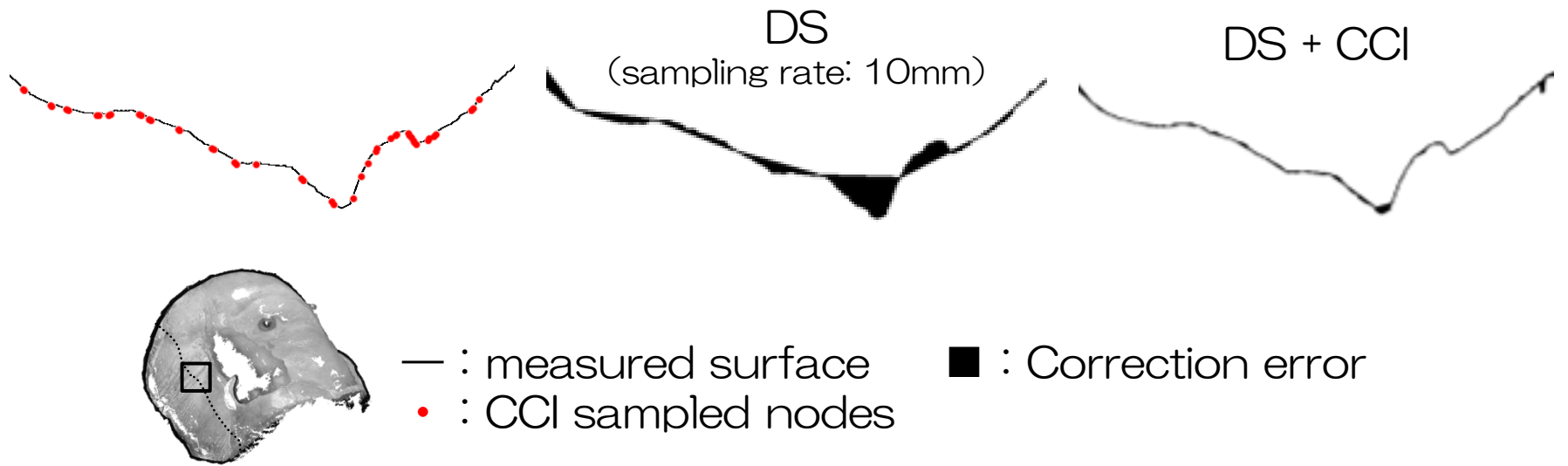
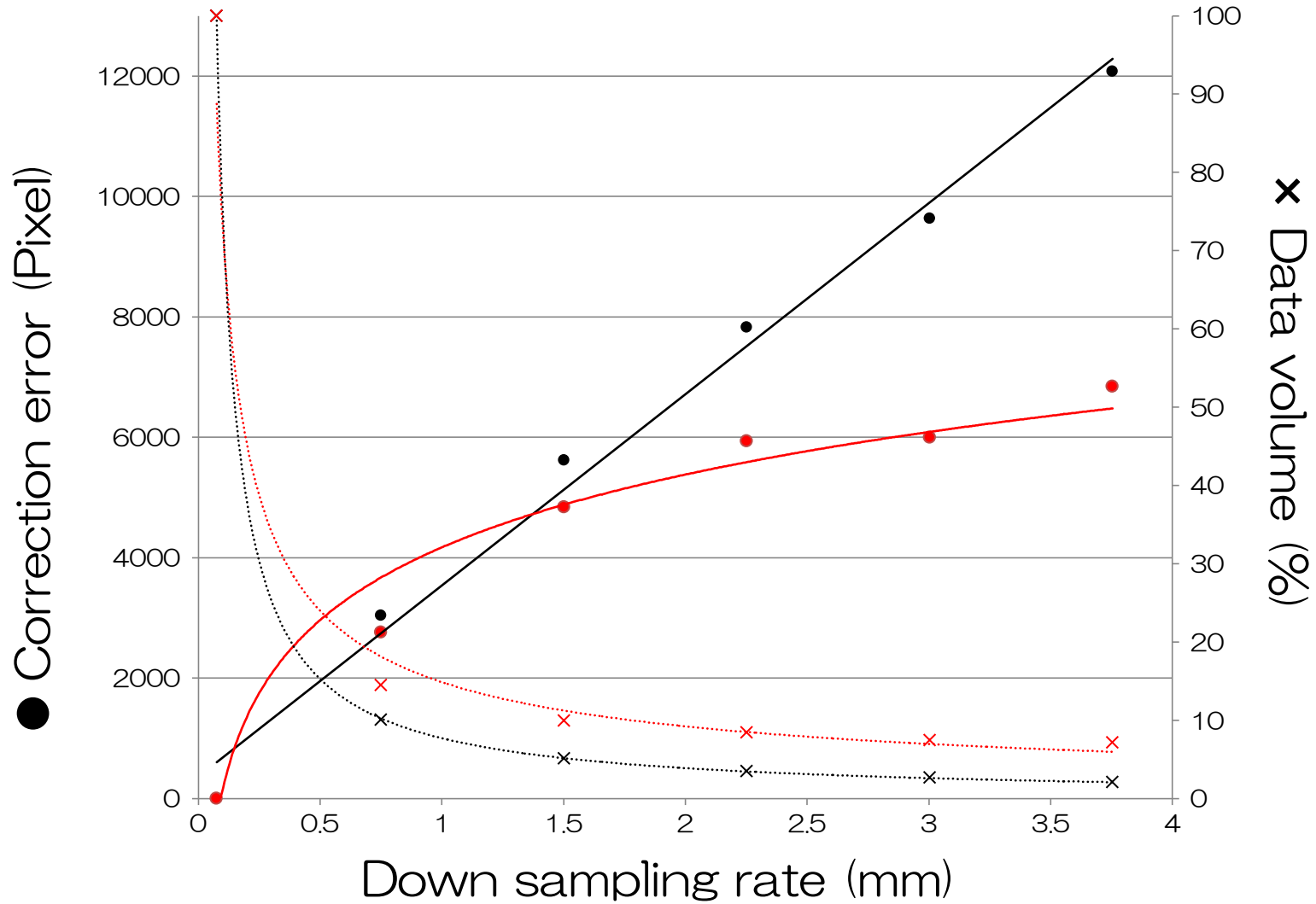


Fig 13 勅使河原↑



● x : Number of nodes by DS

● x : Number of nodes by DS + CCI