

SfM多視点ステレオフォトグラメトリーによる 恐竜足跡化石の三次元的な記録

柴田健一郎*・松川正樹**・マーチン G. ロックレイ***・
アンドリュー R. C. ミルナー****

Structure-from-Motion Multi-View Stereo Photogrammetry for
3-D documentation of dinosaur tracks

SHIBATA Kenichiro*, MATSUKAWA Masaki**,
Martin G. LOCKLEY*** and Andrew R. C. MILNER****

キーワード：フォトグラメトリー，足跡化石，恐竜足跡，オルソモザイク画像，深度マップ
Keywords：photogrammetry, fossil footprints, dinosaur tracks, orthophoto image,
color depth map

複数視点から撮影された写真を基に撮影物の三次元的な形状を復元する手法，SfM 多視点ステレオフォトグラメトリーは，日本国内の足跡化石研究にこれまで活用されてこなかった。本稿では，横須賀市自然・人文博物館に収蔵されている恐竜の歩行跡を含む足跡化石レプリカ標本4点と，足跡産地の実物の恐竜足跡化石1点について，この手法を用いて3-Dモデルと三次元画像を作成した。その結果，足跡化石と層理面の形状が三次元的に可視化された。フォトグラメトリーは足跡化石や歩行跡の三次元的な形状を客観的に復元して記録するために有効である。また，フォトグラメトリーによって生成された三次元画像には，鳥脚類の足跡化石に残された皮膚の跡を復元するのに十分な解像度を有することが明らかとなった。三次元画像上で足跡化石を計測したところ，足跡化石の長さや幅，歩行跡のステップやストライドが1 cm未満の精度で計測された。従来の輪郭のスケッチとフォトグラメトリーの併用により，高精度な足跡化石の記載ができるようになると思われる。

Structure-from-Motion Multi-View Stereo Photogrammetry, which can reconstruct three-dimensional structures of an object from two-dimensional photos taken from multiple views, had not been applied to studies of fossil footprints in Japan. Here, photogrammetry was applied to four replicas of dinosaur tracks including a trackway housed in the Yokosuka City Museum and a dinosaur footprint at a tracksite, and their 3-D models and 3-D images were generated. As a result, shapes of the tracks and bedding planes could be visualized three-

* 横須賀市自然・人文博物館 〒238-0016 神奈川県横須賀市深田台95

** 東京学芸大学・環境科学分野 〒184-8501 東京都小金井市貫井北町4-1-1

*** Dinosaur Trackers Research Group, University of Colorado Denver, PO Box 173364, Denver, Colorado, 80217-3364 U.S.A.

**** St. George Dinosaur Discovery Site at Johnson Farm, 2180 East Riverside Drive, St. George, Utah, 84790 U.S.A.

dimensionally. Photogrammetry is considered to be useful to reconstruct and document three-dimensional features of fossil footprints and trackways objectively. In addition, a 3-D image generated by this method revealed that photogrammetry has resolution enough to reconstruct skin impression of ornithopod tracks. Furthermore, lengths and widths of tracks, and steps and strides of trackways could be measured on 3-D images with an accuracy of less than 1 cm. A combination of traditional outline sketches and photogrammetry is interpreted to be a useful tool for more detailed descriptions of fossil footprints.

はじめに

足跡化石の研究では、その形状を客観的に記録することが重要である。足跡化石の記録法として、輪郭のスケッチが古くから用いられてきた（例えば、Thulborn, 1990）。スケッチは、主に足跡化石に透明なトレーシングペーパーを重ね、肉眼で輪郭を判断し、その輪郭をトレースすることによって行われる。しかし、足跡と層理面との境界が不鮮明で輪郭の判断が困難な場合は、同じ化石から複数の異なる輪郭が描かれることがある（Thulborn, 1990）。写真は足跡化石の記録に有効であるが、光源の方向や照度によっては足跡の輪郭や形態が不鮮明になること（Ishigaki and Fujisaki, 1989; Thulborn, 1990）、写真の中心から外周に向かって歪が生じることから、足跡の形態を正確に表現できない場合がある。足跡化石を三次元的に表現するために、足跡化石に光をあて干渉模様を発生させるモアレ法を用いたモアレ写真（Ishigaki and Fujisaki, 1989; 岡村・高橋, 2009; 安藤ほか, 2010）や、自作した等高線描画装置による近似等深線図（ゾウの足跡化石調査法編集委員会, 1994）が用いられたこともあった。日本国内における足跡化石研究では、2000年代以降、非接触三次元形状入力機（Arakawa *et al.*, 2002）がしばしば用いられている（Azuma *et al.*, 2002; Imai, 2018; Tsukiji *et al.*, 2018, 2019, 2020）。一方、複数視点から撮影された写真をもとに、撮影物の三次元的な形状をデジタルで復元する SfM 多視点ステレオフォトグラメトリー（以下、フォトグラメトリー）を足跡化石研究に応用する方法が米国やヨーロッパで進展している（例えば、Milner *et al.*, 2009; Remondino *et al.*, 2010; McCrea and Pigeon, 2014; Lockley *et al.*, 2014, 2017a, 2017b, 2018; Falkingham, 2016; Matthews *et al.*, 2016; Wing *et al.*, 2016; Wood *et al.*, 2021）。日本国内では、フォトグラメトリーが体化石の研究（新村ほか, 2016; 新村・小西, 2018; 安藤ほか, 2018; 石黒, 2018; 新村・松井, 2019）やアウトリーチ（唐

沢・松井, 2020）、足跡化石の展示（市川・正岡, 2020）に用いられているが、足跡化石研究にはこれまで活用されていない。本稿では、横須賀市自然・人文博物館に収蔵されている恐竜の足跡化石レプリカ標本4点、足跡産地の実物の恐竜足跡化石1点について、フォトグラメトリーを用いたオルソモザイク画像、深度マップの作成例を示すとともに、足跡化石研究におけるフォトグラメトリーの意義について述べる。

検討資料

横須賀市博物館古生物資料（YCM-GP）の恐竜足跡化石レプリカ標本4点、足跡産地の実物の恐竜足跡化石1点を検討対象とした。

1) アジアノポダス（YCM-GP1845）

肉食恐竜である獣脚類の足跡アジアノポダス・バルビニカルクス（*Asianopodus pulvinicalx*）の正模式標本（Matsukawa *et al.*, 2005, Figs. 8-A2, 9-2, 10-2）のレプリカ。第Ⅱ指～第Ⅳ指からなる3本指の左足の足跡で、鋭い爪の跡を持ち、丸い踵が特徴的である。下に凸のモールド。石川県白山市目附谷、下部白亜系手取層群桑島層より産出。YCM-GP1845は石膏製で、標本の大きさは36×28×4 cm。東京学芸大学所蔵のTGUSE-DT1004（ラバーモールド）から柴田が複製した。

2) ユーブロンテス（T8L3）

獣脚類の足跡ユーブロンテス（*Eubrontes isp.*）の実物化石。第Ⅱ指～第Ⅳ指からなるがっしりした3本指の左足の足跡で、鋭い爪の跡を持つ。足跡産地に残された下に凸のモールド。米国ユタ州サンフアン郡のメールステーション恐竜足跡産地で、下部ジュラ系ナバホ砂岩より産出（Lockley *et al.*, 2021）。足跡化石の長さは39.0 cm。

3) 皮膚の跡があるカリリクニウム（YCM-GP1813）

植物食恐竜である鳥脚類の足跡カリリクニウム・レオナルディアイ（*Caririchnium leonardii*）の右後

足のレプリカ。先の丸い第Ⅱ指～第Ⅳ指の3本指からなるモールドで、第Ⅳ指の内側、踵などに凹凸のある皮膚の跡が保存されている (Lockley *et al.*, 1992; Lockley and Hunt, 1995)。米国コロラド州ターキークリークの白亜系ダコタ層群より産出。YCM-GP1813はFPR製で、標本の大きさは50×56.5×4 cm。原標本は西コロラド博物館所蔵のCU-MWC201.1 (Shibata *et al.*, 2016) で、現在はコロラド大学博物館にUCM201.1として移管されている。

4) カリリクニウムの歩行跡 (YCM-GP1833)

鳥脚類の足跡カリリクニウム・レオナルディアイ (*Caririchnium leonardii*) の正模式標本 (Lockley, 1987, Fig. 2 Trackway A, Fig. 5a) のレプリカ。3組の後足と前足からなるモールドの歩行跡で、後足は先の丸い第Ⅱ指～第Ⅳ指の3本指からなり、前足は蹄状である。米国コロラド州ダイナソーリッジの白亜系ダコタ層群より産出。YCM-GP1833はFRP製で、標本の大きさは55.5×214.5×4 cm。原標本は西コロラド博物館所蔵のCU-MWC200.0 (Shibata *et al.*, 2016) で、現在はコロラド大学博物館にUCM200.0として移管されている。

5) 伏したユーブロンテス (YCM-GP3005)

獣脚類が伏したと解釈されている跡のレプリカ。後足と前足、恥骨、尻尾の跡からなるモールドで、後足の足跡はユーブロンテス (*Eubrontes* isp.) として分類・同定される。獣脚類が伏した際に少なくとも2回、体を移動させたことを示す3組の足跡が保存されている (Milner *et al.*, 2006, 2009)。原標本の伏した跡は、26個の足跡や恥骨の跡、尻尾の跡からなる獣脚類の歩行跡の一部を構成している (Milner *et al.*, 2009)。米国ユタ州セントジョージの下部ジュラ系モエナビ層ウィットモアポイント部層より産出。YCM-GP3005はFRP製で、標本の大きさは96×123×4 cm。セントジョージ恐竜発見産地博物館所蔵のSGDS 18.T1のFRP製マスターキャストから柴田とDavid Slauf氏によって複製された。

工夫した。足跡化石は複数視点から撮影するとともに、フレームに収めた範囲が複数の写真でオーバーラップするように撮影した。構築する3-Dモデル1点あたり、48枚以上の写真を撮影した。

2) 基準点の設定と計測

フォトグラメトリーソフトウェア上で3-Dモデルの座標を設定するために、同一の層理面上に3点の基準点を設定し、それらの基準点間の距離と角度を計測した。

3) 3-Dモデルの作成

撮影した写真から、フォトグラメトリーソフトウェア Agisoft Metashape Professional v1.5.4 を使用して3-Dモデルを作成した。まず、写真をソフトウェアに読み込み、各写真のカメラ位置を解析させて荒いポイントクラウドを生成した (第1図A)。続いて復元対象とする範囲を設定し、高密度ポイントクラウドを作成した (第1図B)。次に、高密度ポイントクラウドからポリゴンメッシュモデルを生成した。

4) 座標の設定

レプリカ標本または実物化石で設定しておいた基準点3点を、高密度ポイントクラウド上にマーカーとして配置し (第1図C)、あらかじめ計測した3点間の距離と角度を、X軸とY軸の座標としてメートル単位で入力した。基準点は同一の層理面上に設定したため、Z軸の座標は0 mとした。

5) 三次元画像の作成

層理面を水平面として、高密度ポイントクラウドから深度マップ (数値標高モデル、DEM) と、基となった写真と構築した3-Dモデルからオルソモザイク画像 (歪みの無い正投影写真) の三次元画像を作成した。

6) 三次元画像での計測

オルソモザイク画像または深度マップ上で足跡の長さや幅、歩行跡のステップとストライドを計測した (第1図D)。それらの値は、レプリカ標本での計測値、ならびに文献に示されている足跡産地での計測値と比較した。

方 法

1) 撮影

撮影にはコンパクトデジタルカメラ OLYMPUS Tough TG-5 を使用した。レンズは35 mm フィルム換算で25 mm 相当である。対象とする足跡化石の周辺にスケールやハンマー等を置き、後述するソフトウェアが各写真のカメラ位置を解析しやすいように

結 果

アジアノボダス (YCM-GP1845) で70枚、ユーブロンテス (T9L3) で68枚、皮膚の跡があるカリリクニウム (YCM-GP1813) で71枚、カリリクニウムの歩行跡 (YCM-GP1833) で72枚、伏したユーブロンテス (YCM-GP3005) で111枚の写真を撮影した。

Agisoft Metashape Professional に読み込んだところ、アジアノボダスは 70 枚すべて、ユーブロンテスは 68 枚すべて、皮膚の跡があるカリリクニウムは 71 枚すべて、カリリクニウムの歩行跡は 65 枚、伏したユーブロンテスは 108 枚の写真が配列された。皮膚の跡があるカリリクニウムについては、第 IV 指の皮膚の跡周辺の約 15×15 cm の範囲を別途、48 枚の写真を撮影し、46 枚が配列された。配列されなかった写真は 3-D モデルの復元から除外した。配列された写真からは荒いポイントクラウドと高密度ポイントクラウド、ポリゴンメッシュモデルが順次生成され、座標を設定したのちにオルソモザイク画像と深度マップが作成された (第 2～6 図)。

レプリカ標本で計測した値を理論値とすると、三

次元画像上で計測した足跡の長さの幅の絶対誤差は -0.6 cm \sim 0.8 cm, ステップとストライドの絶対誤差は -0.2 cm \sim 0.8 cm, これらの計測値の相対誤差は -3.3% \sim 3.9% であった (第 1～3 表)。実物化石で計測した値を理論値とすると、三次元画像上で計測した足跡の長さの幅の絶対誤差は -2.9 cm \sim 7.0 cm, ステップとストライドの絶対誤差は -2.8 cm \sim 0.1 cm, すべての計測値の相対誤差は -32.2% \sim 33.5% であった (第 1～3 表)。

フォトグラメトリの意義

フォトグラメトリによる復元の結果、足跡化石と歩行跡、層理面の凹凸が三次元画像として立体的

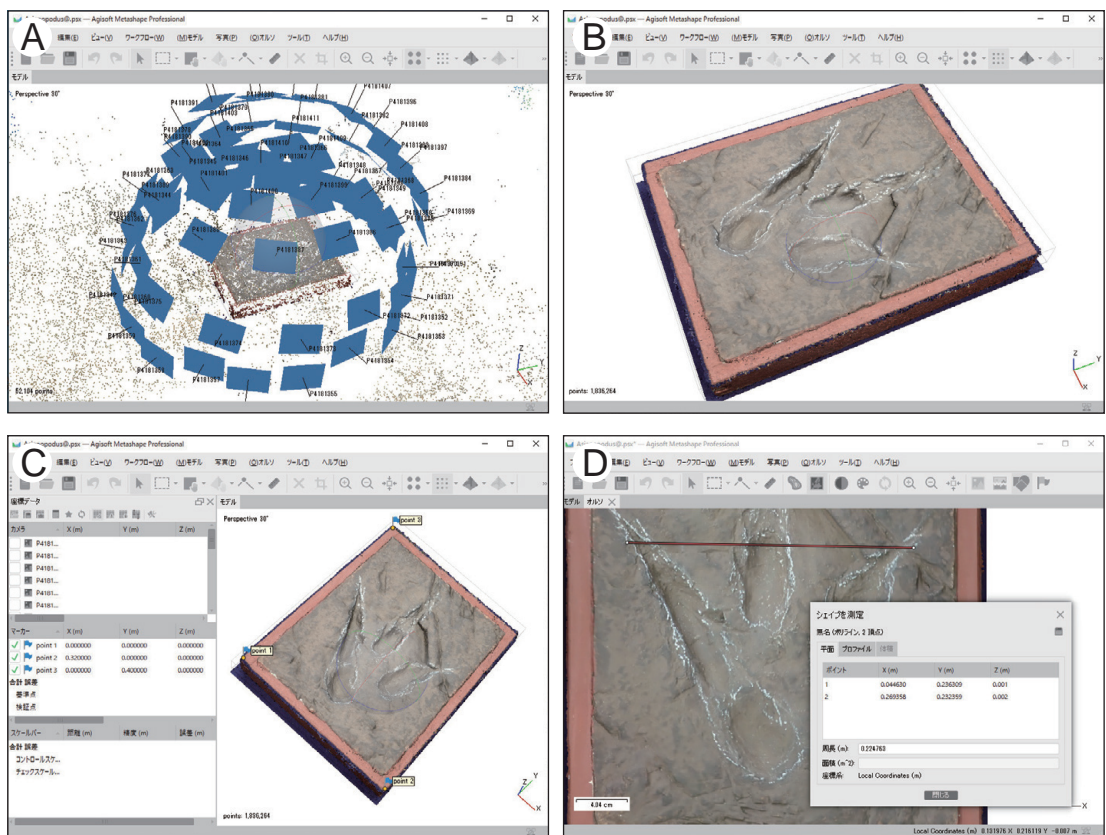


Fig. 1 Processes of reconstruction and measuring of a 3-D model. A: Aligned photos and sparse point cloud. B: Dense point cloud. C: Markers on dense point cloud. The markers were located on a bedding plane. D: Measurements of track width of *Asianopodus* (YCM-GP1845) on orthophoto image. All images were captured from Agisoft Metashape Professional.

第 1 図 3-D モデルの復元と計測の過程。A: 配列された写真と生成された荒いポイントクラウド。B: 高密度ポイントクラウド。C: 高密度ポイントクラウド上に設定した基準点 (マーカー)。基準点は層理面上に設定した。D: オルソモザイク画像上でのアジアノボダス (YCM-GP1845) の幅の計測。いずれの画像も Agisoft Metashape Professional をキャプチャーしたもの。

に可視化された(第2~6図)。これは、フォトグラメトリーが単一の足跡化石(第2~4図)だけでなく歩行跡(第5図)にも適用できること、室内の標本(第2図, 第4~6図)だけでなく野外の足跡産地(第3図)にも適用できることを示している。アジアノボダス(YCM-GP1845)では鋭い爪や丸い踵の跡(第2図B), ユーブロンテス(T8L3)ではがっしりした指の跡(第3図B), カリクニウム(YCM-GP1813, YCM-GP1833)では丸い指先の跡(第4図B, 第5図B)など、足跡化石の輪郭と形態の特徴が深度マップで三次元的に把握できた。一方、伏したユーブロン

テス(YCM-GP3005)の深度マップでは(第6図B), 後足や前足の跡の輪郭を識別することが困難であった。伏したユーブロンテスの原標本では、これまで異なる輪郭のスケッチが示されていること(Milner *et al.*, 2006, 2009)(第5図C, D), 本稿で計測した足跡の計測値と足跡産地の実物化石で計測されたそれらの値(Milner *et al.*, 2009)に差が見られること(第3表)も、この標本の足跡の輪郭を認識することが困難であることを示唆している。輪郭の認識が困難なのは、深さが浅い足跡であること、獣脚類が伏して体を移動させた際に複数の足跡がオーバープリント

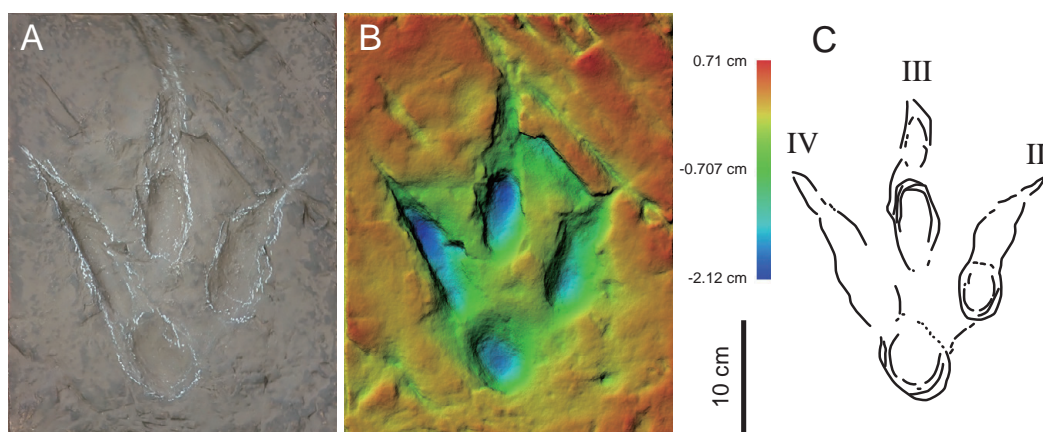


Fig. 2 Photogrammetric orthophoto image (A), color depth map (B), and outline sketch (C) of *Asianopodus pulvinicalx* (YCM-GP1845). II–IV indicate digits II–IV. Original specimen is TGUSE-DT1004 housed in Tokyo Gakugei University (holotype). C was redrawn from Matsukawa *et al.* (2005).

第2図 アジアノボダス(YCM-GP1845)のオルソモザイク画像(A), 深度マップ(B), スケッチ(C)。II–IVは第II指~第IV指を表す。原標本はTGUSE-DT1004(東京学芸大学所蔵)。スケッチはMatsukawa *et al.* (2005)に基づく。

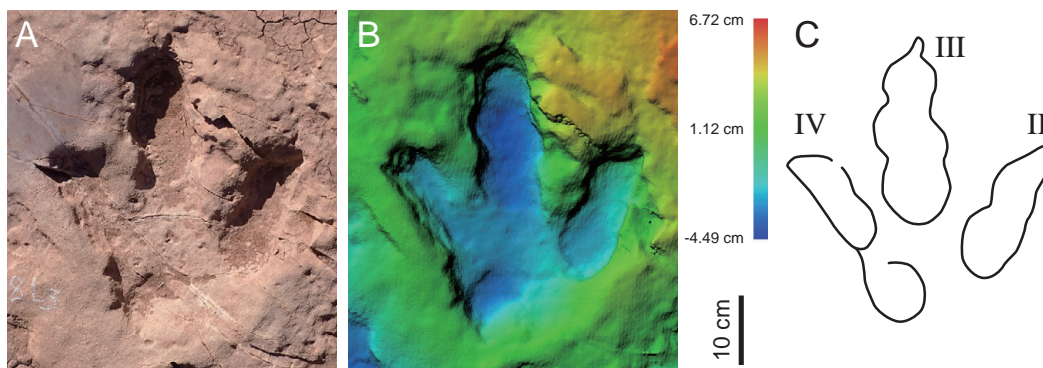


Fig. 3 Photogrammetric orthophoto image (A), color depth map (B), and outline sketch (C) of *Eubrontes* isp. at the Mail Station Dinosaur Tracksite (T8L3), San Juan County, Utah. C was redrawn from Lockley *et al.* (2021).

第3図 米国ユタ州メールステーション恐竜足跡産地のユーブロンテス(T8L3)のオルソモザイク画像(A), 深度マップ(B), スケッチ(C)。スケッチはLockley *et al.* (2021)に基づく。

したことに起因すると考えられる。以上のように、フォトグラメトリーは輪郭の明瞭不明瞭を問わず、足跡化石の三次元的な形状を客観的に復元して記録できる。一方、輪郭のスケッチは、三次元的な足跡化石に対する研究者の解釈が含まれている (Thulborn, 1990)。したがって、従来の輪郭のスケッチと三次元画像を併用することにより、足跡化石の客観的な形状と研究者の解釈を含む輪郭を第三者に明示することが可能となり、より高精度で科学的な足跡化石の記載ができるようになると考えられる。

皮膚の跡があるカリリクニウム (YCM-GP1813)

では、標本全体を撮影した 71 枚の写真からは、皮膚の跡を復元した深度マップが生成されなかった (第 4 図 B)。しかし、第 IV 指の皮膚の跡周辺の約 15 × 15 cm の範囲を撮影した 48 枚の写真から生成された深度マップ (第 4 図 E) では、皮膚の凹凸が復元された。これらは、詳細に復元したい部位を複数視点から集中的に撮影すれば、その部位について 3-D モデルや三次元画像の解像度を高めることができること、フォトグラメトリーが鳥脚類足跡の皮膚の跡を復元するのに十分な解像度を有することを示している。

科学的なフォトグラメトリーには、広角レンズ (20

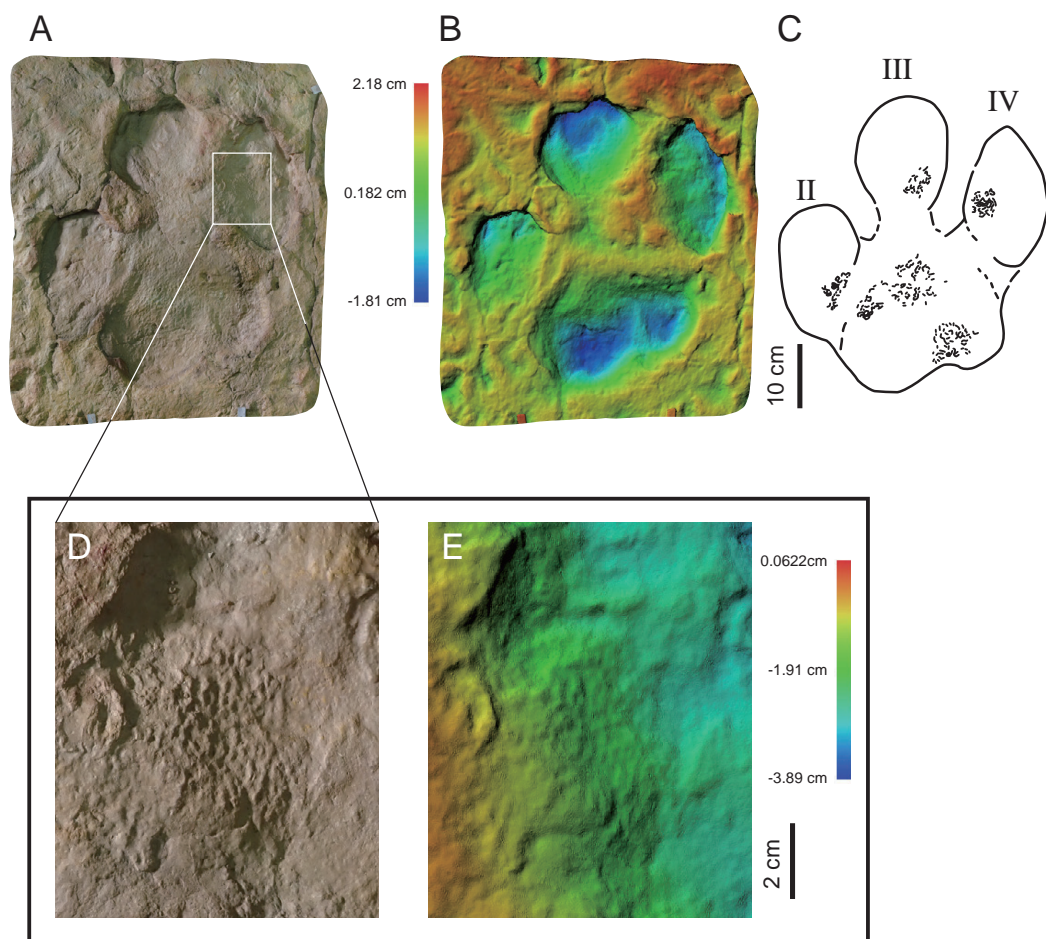


Fig. 4 Photogrammetric orthophoto image (A), color depth map (B), and outline sketch (C) of *Caririchnium leonardii* with skin impressions (YCM-GP1813). Skin impressions are magnified in orthophoto image (D) and color depth map (E). II–IV indicate digits II–IV. Original specimen is UCM201.1 housed in the University of Colorado Museum, which was originally published as CU-MWC201.1. C was redrawn from Lockley and Hunt (1995).

第 4 図 皮膚の跡があるカリリクニウム (YCM-GP1813) のオルソモザイク画像 (A)、深度マップ (B)、スケッチ (C)、ならびに拡大した皮膚の跡のオルソモザイク画像 (D) と深度マップ (E)。II–IV は第 II 指～第 IV 指を表す。原標本は UCM201.1 (コロラド大学博物館所蔵)。スケッチは Lockley and Hunt (1995) に基づく。

～30 mm) を装着したデジタル一眼レフカメラが最も適すると考えられている (Matthews *et al.*, 2016)。今回, 35 mm フィルム換算で 25 mm 相当のレンズを用いたコンパクトデジタルカメラでも, 3-D モデルや三次元画像を復元し, 撮影物に対して 1 cm 未満の精度で足跡化石の長さや幅, 歩行跡のステップやス

トライドを計測できた (第 1～3 表)。恐竜の足跡化石研究では, センチメートル単位で足跡の長さや幅, 歩行跡のステップやストライドが計測されることが多い (例えば Lockley, 1987; Matsukawa *et al.*, 2005; Milner *et al.*, 2009; Lockley *et al.*, 2017a)。そのため, 本研究で得られた 3-D モデルや三次元画像は, 足跡

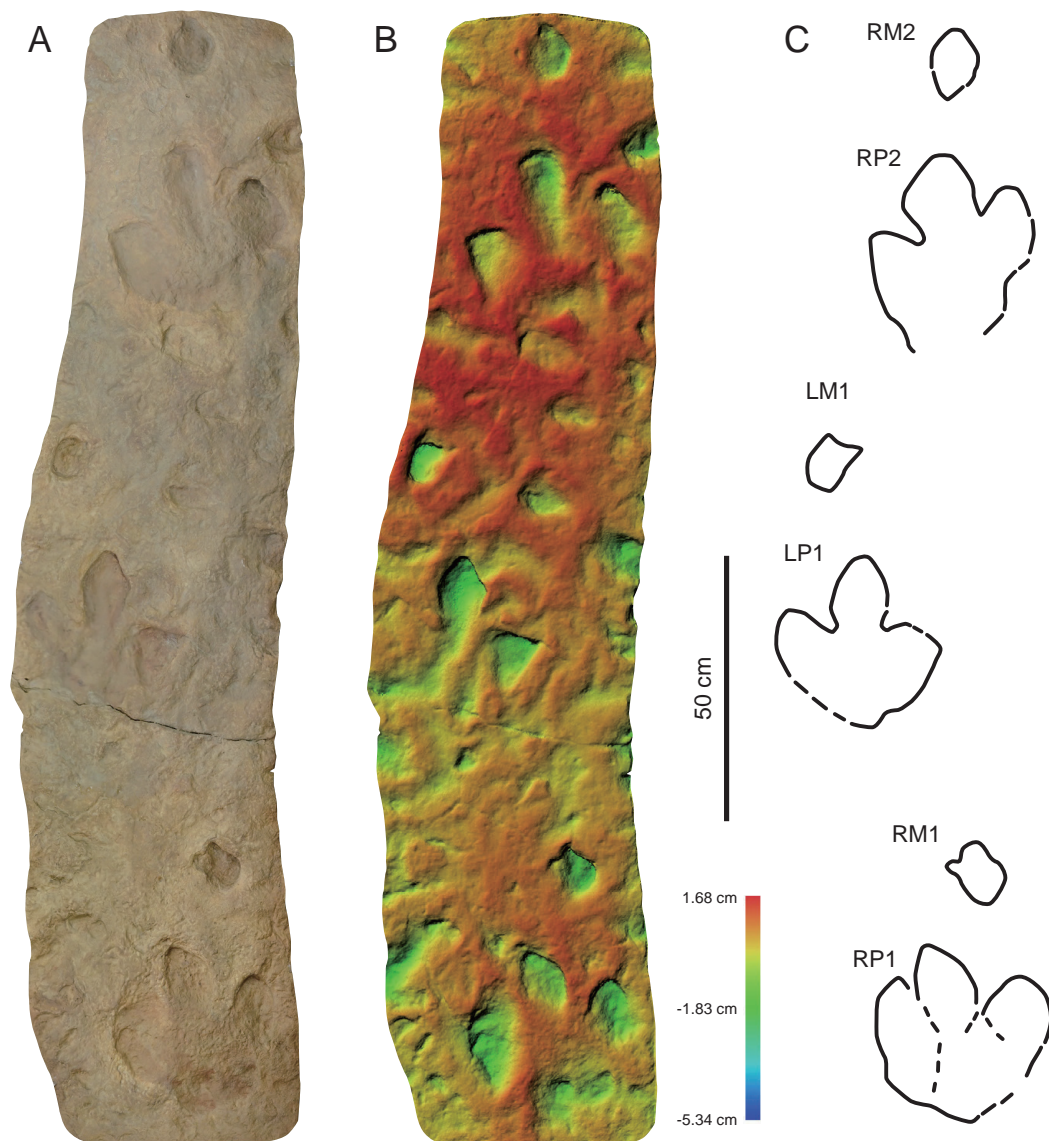


Fig. 5 Photogrammetric orthophoto image (A), color depth map (B), and outline sketch (C) of trackway of *Caririchnium leonardii* (YCM-GP1833). RP: right pes, LP: left pes, RM: right manus, LM: left manus. Original specimen is UCM200.0 (holotype) housed in the University of Colorado Museum, which was originally published as CU-MWC200.0. C is redrawn from Lockley (1987).

第 5 図 カリリクニウムの歩行跡 (YCM-GP1833) のオルソモザイク画像 (A), 深度マップ (B), スケッチ (C)。RP: 右後足, LP: 左後足, RM: 右前足, LM: 左前足。原標本は UCM200.0 (コロラド大学博物館所蔵)。スケッチは Lockley (1987) に基づく。

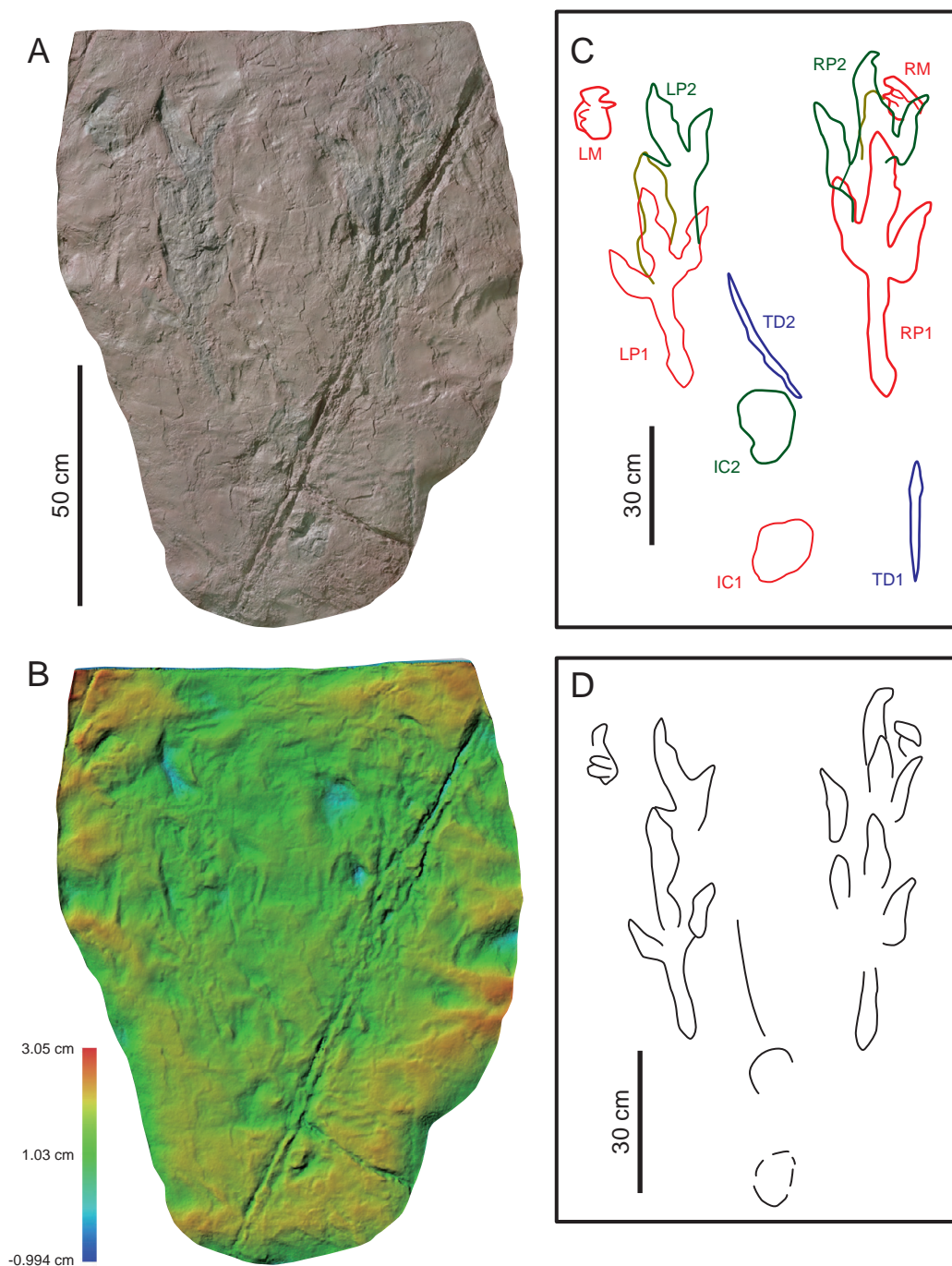


Fig. 6 Photogrammetric orthophoto image (A), color depth map (B), and outline sketches (C and D) of resting trace of *Eubrontes* isp. (YCM-GP3005). RM: right manus, LM: left manus, RP: right pes, LP: left pes, IC: ischial callosity, TD: tail drag marks. Original specimen is SGDS 18.T1 housed in St. George Dinosaur Discovery Site at Johnson Farm. C and D are redrawn from Milner et al. (2009) and Milner et al. (2006), respectively.

第6図 伏したユーブロンテス (YCM-GP3005) のオルソモザイク画像 (A), 深度マップ (B), スケッチ (C, D). RM: 右前足, LM: 左前足, RP: 右後足, LP: 左後足, IC: 坐骨の跡, TD: 尻尾の跡. 原標本は SGDS 18.T1 (セントジョージ恐竜発見産地博物館所蔵). Cは Milner *et al.* (2009), Dは Milner *et al.* (2006) に基づく.

Table 1 Measurements of *Asianopodus pulvinicalx* (YCM-GP1845), *Eubrontes* isp. at the Mail Station Dinosaur Tracksite (T8L3), and *Caririchnium leonardii* with skin impression (YCM-GP1813) on the basis of 3-D images, replicas, and fossils at the tracksites with absolute and relative errors between them. L: track length, W: track width. Measurements of *Asianopodus pulvinicalx* and *Eubrontes* isp. at tracksites are based on Matsukawa *et al.* (2005) and Lockley *et al.* (2021), respectively.

第1表 アジアノボダス (YCM-GP1845) とメールステーション恐竜足跡産地のユーブロンテス (T8L3)、皮膚の跡のあるカリリクニウム (YCM-GP1813) の三次元画像、レプリカ、足跡産地での計測値、ならびにそれらの計測値の絶対誤差と相対誤差。L: 足跡の長さ、W: 足跡の幅。アジアノボダスとユーブロンテスの足跡産地での計測値は Matsukawa *et al.* (2005) と Lockley *et al.* (2021) にそれぞれ基づく。

<i>Asianopodus pulvinicalx</i> (YCM-GP1845)		
	L	W
3-D image (cm)	28.8	22.5
Replica (cm)	28.8	23.0
Absolute error (cm)	0.0	-0.5
Relative error (%)	0.0	-2.2
Tracksite (cm)	29	21
Absolute error (cm)	-0.2	1.5
Relative error (%)	-0.7	7.1
<i>Eubrontes</i> isp. at the Mail Station tracksite (T8L3)		
	L	W
3-D image (cm)	39.3	35.3
Tracksite (cm)	39.0	35.0
Absolute error (cm)	0.3	0.3
Relative error (%)	0.8	0.9
<i>Caririchnium</i> with skin impression (YCM-GP1813)		
	L	W
3-D image (cm)	44.7	43.6
Replica (cm)	44.5	43.5
Absolute error (cm)	0.2	0.1
Relative error (%)	0.4	0.2

化石研究の計測において十分な精度を有していると考えられる。レプリカ標本から生成された三次元画像 (第2図, 第4～6図) での計測値と、足跡産地での実物化石の計測値ではやや誤差が大きいが (第1～3表)、これはレプリカを作成した際の歪による誤差と、計測者の輪郭の解釈の差による誤差を含むと考えられる。

フォトグラメトリーは、あらゆる大きさと形状を持つすべての足跡化石と歩行跡、様々な広さと地層の走向・傾斜を持つすべての足跡産地に適用できる (Matthews *et al.*, 2016)。撮影さえできれば、化石や標本を損傷することもない。また、特別な機器を必

要とせず、コンピュータとデジタルカメラに加え、ソフトウェアさえ導入できれば足跡化石の3-Dモデルと三次元画像の復元が可能である。客観的に足跡化石を三次元的に記録でき、皮膚の跡を復元できる解像度を持ち、デジタルデータ上での計測を可能とするフォトグラメトリーと、研究者の解釈を含む輪郭のスケッチ・足跡産地マップの併用は、今後の足跡化石研究において有効なツールになると考えられる。

結 論

- ・恐竜の足跡化石5点について、SfM多視点ステレオフォトグラメトリーを用いて三次元的な形状を復元した。
- ・フォトグラメトリーを用いると、足跡化石標本や足跡産地の足跡化石の形状を、三次元画像として客観的に記録できる。
- ・フォトグラメトリーは鳥脚類の皮膚の跡を復元するのに十分な解像度を持つ。
- ・復元された三次元画像から、1 cm未満の精度で足跡化石を計測できる。
- ・輪郭のスケッチと三次元画像の併用により、高精度な足跡化石の記載ができるようになると考えられる。

謝 辞

セントジョージ恐竜発見産地博物館ボランティアのDavid Slauf氏にはレプリカ作成にご協力いただいた。米国ユタ州メールステーション恐竜足跡産地での調査は、米国内務省土地管理局の許可の下行われた (BLM Permit UT09-006S)。本研究はJSPS科研費JP17K12968の助成を受けた。

引用文献

- 安藤寿男・小池 渉・国府田良樹・岡村喜明 2010. 茨城県大子町滝倉の中新統浅川層から発見された大型哺乳類足跡化石群とその産状. 茨城県自然博物館研究報告, (13): 1-21, pls. 1-4.
- 安藤佑介・藤原慎一・安藤瑚奈美 2018. フォトグラメトリーを活用した瑞浪層群明世層産 *Crenomytilus grayanus* (二枚貝綱: イガイ科) 群体 (MFM16000) の三次元的な産状再現. 瑞浪市化

Table 2 Measurements of *Caririchnium leonardii* trackway (YCM-GP1833) using 3-D image, replica, and fossil at a tracksite with absolute and relative errors between them. L: track length, W: track width, RP: right pes, LP: left pes, RM: right manus, LM: left manus. Measurements at the tracksite are based on Lockley (1987).

第2表 カリリクニウムの歩行跡 (YCM-GP1833) の三次元画像, レプリカ, 足跡産地での計測値, ならびにそれらの絶対誤差と相対誤差. L: 足跡の長さ, W: 足跡の幅, RP: 右後足, LP: 左後足, RM: 右前足, LM: 左前足. 足跡産地での計測値は Lockley (1987) に基づく.

Track length and width of pes								
	RP1		LP1		RP2		Mean	
	L	W	L	W	L	W	L	W
3-D image (cm)	32.8	31.9	31.0	30.8	32.9	33.3	32.2	32.0
Replica (cm)	32.0	31.2	32.0	30.8	33.5	32.6	32.5	31.5
Absolute error (cm)	0.8	0.7	-1.0	0.0	-0.6	0.7	-0.3	0.5
Relative error (%)	2.5	2.2	-3.1	0.0	-1.8	2.1	-0.8	1.5
Tracksite (cm)							34	32
Absolute error (cm)							-1.8	0.0
Relative error (%)							-5.2	0.0

Track length and width of manus								
	RM1		LM1		RM2		Mean	
	L	W	L	W	L	W	L	W
3-D image (cm)	9.3	9.1	8.4	8.2	11.1	8.5	9.6	8.6
Replica (cm)	9.5	9.2	8.5	8.0	11.1	8.4	9.7	8.5
Absolute error (cm)	-0.2	-0.1	-0.1	0.2	0.0	0.1	-0.1	0.1
Relative error (%)	-2.1	-1.1	-1.2	2.5	0.0	1.2	-1.0	0.8

Step and stride of pes				
	Step			Stride
	RP1-LP1	LP1-RP2	Mean	RP1-RP2
3-D image (cm)	77.0	79.2	78.1	153.2
Replica (cm)	76.4	78.5	77.5	152.4
Absolute error (cm)	0.6	0.7	0.6	0.8
Relative error (%)	0.8	0.9	0.8	0.5
Tracksite (cm)			78	156
Absolute error (cm)			0.1	-2.8
Relative error (%)			0.1	-1.8

Step and stride of manus				
	Step			Stride
	RM1-LM1	LM1-RM2	Mean	RM1-RM2
3-D image (cm)	82.7	82.8	82.8	156.4
Replica (cm)	82.9	82.4	82.7	156.6
Absolute error (cm)	-0.2	0.4	0.1	-0.2
Relative error (%)	-0.2	0.5	0.1	-0.1

石博物館研究報告, (44) 特別号: 63-70.

Arakawa Y., Azuma Y., Kano A., Tanijiri T. and Miyamoto T. 2002. A new technique to illustrate and analyze dinosaur and bird footprints using 3-D digitizer. *Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum*, (1): 7-18.

Azuma Y., Arakawa, Y., Tomida Y. and Currie P. J. 2002. Early Cretaceous bird tracks from the Tetori Group, Fukui Prefecture, Japan. *Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum*, (1): 1-6.

Falkingham P. L. 2016. Applying objective methods to subjective track outlines. In Falkingham P. L., Marty D. and Richter A. eds. *Dinosaur tracks the next step*: 72-80. Indiana University Press, Bloomington & Indianapolis.

Imai T., Tsukiji Y. and Azuma Y. 2018. Description of bird tracks from the Kitadani Formation (Aptian), Katsuyama, Fukui, Japan with three-dimensional imaging techniques. *Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum*, (17): 1-8.

Table 3 Measurements of resting trace of *Eubrontes* isp. (YCM-GP3005) using 3-D image, replica, and fossil at a tracksite with absolute and relative errors between them. L: track length, W: track width, RP: right pes, LP: left pes, RM: right manus, LM: left manus. Measurements at the tracksite are based on Milner *et al.* (2009).

第3表 伏したユーブロンテス (YCM-GP3005) の三次元画像, レプリカ, 足跡産地での計測値, ならびにそれらの絶対誤差と相対誤差. L: 足跡の長さ, W: 足跡の幅, RP: 右後足, LP: 左後足, RM: 右前足, LM: 左前足. 足跡産地での計測値は Milner *et al.* (2009) に基づく.

Pes										
	RP1		LP1		RP2		LP2		Mean	
	L	W	L	W	L	W	L	W	L	W
3-D image (cm)	31.7	20.0	33.6	22.7	32.0	26.7	32.1	18.7	32.4	22.0
Replica (cm)	31.5	20.1	33.8	23.0	31.0	26.5	32.0	18.0	32.1	21.9
Absolute error (cm)	0.2	-0.1	-0.2	-0.3	1.0	0.2	0.1	0.7	0.3	0.1
Relative error (%)	0.6	-0.5	-0.6	-1.3	3.2	0.8	0.3	3.9	0.9	0.7
Tracksite (cm)	34.0	20.0	33.5	24.0	31.0	20.0	35.0	24.0	33.8	22.0
Absolute error (cm)	-2.3	0.0	1.4	-1.3	1.0	6.7	-2.9	-5.3	-1.4	0.0
Relative error (%)	-6.8	0.0	-4.0	-5.4	3.2	33.5	-8.3	-22.1	-4.1	0.1

Manus						
	RM		LM		Mean	
	L	W	L	W	L	W
3-D image (cm)	12.2	5.8	15.0	8.5	13.6	7.2
Replica (cm)	12.1	6.0	15.0	8.5	13.6	7.3
Absolute error (cm)	0.1	-0.2	0.0	0.0	0.0	-0.1
Relative error (%)	0.8	-3.3	0.0	0.0	0.4	-1.7
Tracksite (cm)	18.0	8.5	22.0	12.0	20.0	10.3
Absolute error (cm)	5.8	2.7	7.0	3.5	6.4	3.1
Relative error (%)	-32.2	-31.8	-31.8	-29.2	-32.0	-30.2

市川清士・正岡祐人 2020. 恐竜足跡化石産地の VR 展示. 高津翔平 (編) 岐阜県立博物館特別企画展 みんなの恐竜学: 84-85. 岐阜県立博物館.

Ishigaki S. and Fujisaki T. 1989. Three dimensional representation of *Eubrontes* by the method of moiré topography. In Gillette D. D. and Lockley M. G. eds. *Dinosaur Tracks and Traces*: 421-425. Cambridge University Press, Cambridge.

石黒宏治 2018. 化石と文化財の 3D 計測. 山形県立博物館研究報告, (36): 1-6.

唐沢與希・松井久美子 2020. 国天然記念物 “触れる”: 地方博物館における貴重標本のマルチメディア活用. 化石, (108): 3-10.

Lockley M. G. 1987. Dinosaur footprints from the Dakota Group of eastern Colorado. *Mountain Geologists*, 24: 107-122.

Lockley M. G., Gierlinski G. D., Dubicka Z., Breithaupt B. H. and Matthews N. A. 2014. A preliminary report on a new dinosaur tracksite in the Cedar Mountain Formation (Cretaceous) of eastern Utah. *New Mexico Museum of Natural History & Science Bulletin*, (62): 279-285.

Lockley M. G., Gierlinski G., Matthews, N., Xing L., Foster J. and Cart K. 2017a. New dinosaur track occurrences from the Upper Jurassic Salt Wash Member (Morrison Formation) of southeastern Utah: Implications for thyreophoran trackmaker distribution and diversity. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 470: 116-121.

Lockley M. G., Holbrook J., Hunt A. P., Matsukawa M. and Meyer C. 1992. The Dinosaur Freeway: A preliminary report on the Cretaceous megatracksite, Dakota Group, Rocky Mountain front range and high plains, Colorado, Oklahoma, and New Mexico. In R. Flores, ed. *Mesozoic of the Western Interior Field Trip Guidebook*: 39-54.

Lockley M. G. and Hunt A. P. 1995. Dinosaur tracks and other fossil footprints of the western United States. 338pp. Columbia University Press, New York.

Lockley M. G., Breithaupt B., Matthews N., Shibata K. and Hunt-Foster R. 2021. A preliminary report on an Early Jurassic *Eubrontes*-dominated tracksite in the Navajo formation at the Mail

- Station Dinosaur Tracksite, eastern Utah. *New Mexico Museum of Natural History & Science Bulletin*, (82): 195–208.
- Lockley M. G., Matthews N. A., Breithaupt B. 2017b. A new mammal track from the Laramie Formation (Maastrichtian) at the Fossil Trace locality, Golden, Colorado. *Cretaceous Research*, **78**: 221–227.
- Lockley M. G., Matthews N. R., Breithaupt B. H., Gierlinski G., Cart K. and Hunt-Foster R. 2018. Large dinosaur tracksites in the Lower Jurassic Kayenta Formation near Moab, Utah: Implications for paleoecology. *New Mexico Museum of Natural History & Science Bulletin*, (79): 5–13.
- Matsukawa M., Shibata K., Kukihiro R., Koarai K. and Lockley M. G. 2005. Review of Japanese dinosaur track localities: implications for ichnotaxonomy, paleogeography and stratigraphic correlation. *Ichnos*, **12**: 201–222.
- Matthews N., Noble T. and Breithaupt B. 2016. Close-range photogrammetry for 3-D ichnology: the basics of photogrammetric ichnology. In Falkingham P. L., Marty D. and Richter A. eds. *Dinosaur tracks the next step*: 28–55. Indiana University Press, Bloomington & Indianapolis.
- McCrea R. T. and Pigeon T. S. 2014. Replication and description of a large theropod and large ornithomimid trackway from the Upper Minnes Group (Lower Cretaceous: Valanginian) of the Peace region of northeastern British Columbia, Canada. *New Mexico Museum of Natural History & Science Bulletin*, (62): 269–277.
- Milner A. R. C., Harris J. D., Lockley M. G., Kirkland J. I. and Matthews N. A. 2009. Bird-like anatomy, posture, and behavior revealed by an Early Jurassic theropod dinosaur resting trace. *Plos ONE*, **4**: e4591.
- Milner A. R. C., Lockley M. G. and Johnson S. B. 2006. The story of the St. George dinosaur discovery site at Johnson Farm: an important new Lower Jurassic dinosaur tracksite from the Moenave Formation of southwestern Utah. *New Mexico Museum of Natural History & Science Bulletin*, (37): 329–345.
- 岡村喜明・高橋啓一 2009. 新生代からの足跡化石研究の現状. 化石研究会会誌, **41**: 82–88.
- Remondino F., Rizzi A., Girardi S., Petti F. M. and Avanzini M. 2010. 3D ichnology—Recovering digital 3D models of dinosaur footprints. *The Photogrammetric Record*, **25**(131): 266–282.
- Shibata K., Matsukawa M. and Lockley M. G. 2016. Catalogue of fossil footprint replicas in Yokosuka City Museum: Dinosaur track study of the joint Colorado–Japan project. *Miscellaneous Report of the Yokosuka City Museum*, (40): 1–14.
- 新村龍也・小西卓哉 2018. *Phosphorosaurus* の 3D CG による生体復元と骨格復元の制作—3D CG ソフトによる古脊椎動物復元の有効性と将来性—, むかわ町穂別博物館研究報告, (33): 37–44.
- 新村龍也・松井久美子 2019. 3D CG による東柱累の生体復元. 化石, (106): 1–2.
- 新村龍也・田中嘉寛・甲能直樹・山田一孝・佐々木基樹 2016. 北海道産鰐脚類化石のデジタル生体復元—フォトリソメトリックおよび 3D CG ソフトによる制作—. 化石, (99): 85–92.
- Thulborn T. 1990. Dinosaur tracks. 410pp. Chapman and Hall.
- Tsukiji Y., Azuma Y., Shiraishi F., Shibata M. and Noda Y. 2018. New ornithomimid footprints from the Lower Cretaceous Kitadani Formation, Fukui, Japan: Ichnotaxonomical implications. *Cretaceous Research*, **84**: 501–514.
- Tsukiji Y., Azuma Y., Shiraishi F. and Shibata M. 2019. A diverse theropod footprint assemblage from the Lower Cretaceous Kitadani Formation, Tetori Group, central Japan. *Cretaceous Research*, **97**: 16–33.
- Tsukiji Y., Kawabe S. and Azuma Y. 2020. A reexamination of dinosaur trackmakers based on three dimensional quantitative data from the Lower Cretaceous Tetori Group of the Oshirakawa Area, Gifu Prefecture (Japan). *Paleontological Research*, **24**: 203–215.
- Wing O., Lallensack J. N. and Mallison H. 2016. The Early Cretaceous dinosaur trackways in Münchehagen (Lower Saxony, Germany): 3-D photogrammetry as basis for geometric morphometric analysis of shape variation and evaluation of material loss during excavation. In

- Falkingham P. L., Marty D. and Richter A. eds. *Dinosaur tracks the next step*: 56–70. Indiana University Press, Bloomington & Indianapolis.
- Wood J. R., Bozek M. A., Milner A. R. C., Mims A. L., Frost F. and Santucci V. L. 2021. Structure from motion photogrammetry enhances paleontological resource documentation, research, preservation and education efforts for national park service areas. *New Mexico Museum of Natural History & Science Bulletin*, (82): 513–523.
- ゾウの足跡化石調査法編集委員会 1994. ゾウの足跡化石調査法. 128 ページ. 地学団体研究会.

