

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26650170

研究課題名(和文) 無標点3D運動解析法の開発

研究課題名(英文) Development of a new non-invasive method for kinematic analysis of animal locomotion

研究代表者

平崎 鋭矢 (HIRASAKI, EISHI)

京都大学・霊長類研究所・准教授

研究者番号：70252567

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：屋外で自由に動く動物のロコモーションを運動学的に分析するのは困難であった。分析用マーカーを動物に付けられないことと、計測空間のキャリブレーションがほぼ不可能であることが理由である。これら2点を克服するために、Structure from Motionアルゴリズムに基づく新たな計測手法を開発した。4-8台のビデオカメラを同期させて撮影した映像をフレームに分解し、それぞれのセットに対して、オープンソースのBundlerおよびPMSVでの処理を行ったところ、ロコモーション中の動物の体表面形状をポイントクラウドとして十分な精度で再構成できた。屋外での運動分析のための、強力なツールが得られたと言える。

研究成果の概要(英文)：Kinematic studies of primate locomotion have suffered from two difficulties: 1) it is almost impossible to attach markers to freely moving animals; 2) it is often difficult to calibrate the space used by the animals. We propose a solution based on SfM 3D photogrammetry. This technique is widely used for still images but we expanded its use to video clips. We filmed animals using 4-8 synchronized cameras. The film streams were converted into sequentially numbered JPEG images. For each frame set we applied the open-source tools Bundler and PMSV to generate a 3D point cloud representing the animal's body surface. In test sessions, we analyzed various locomotor behaviors of the Japanese macaques and chimpanzees. The results showed that the method works well and generates 3D reconstructed body surface data during locomotion. The accuracy was much better than that of the manual digitization. Our new technique provides a powerful new tool for kinematic analysis outside the laboratory.

研究分野：自然人類学

キーワード：markerless Structure from Motion positional behaviour

1. 研究開始当初の背景

動物の運動計測で常に問題となるのは、標点の装着の困難さである。実験室内での計測を除くと、実質上不可能と言えるだろう。多様な種の運動計測を、自然な状態で行おうとすると、「無標点計測」を行わざるを得ない。しかし、現在の無標点解析は「心の目」に依存しており、当然精度が低い。特に3次元となると、奥行き情報はほとんど信頼できない(図1)。ポジショナル行動は動物の基本的な動きであり、その種の形態、運動戦略、環境との関わり、進化史等多くの情報を含むにも関わらず、こうした理由から、定量的知見の蓄積は多いとは言えない。

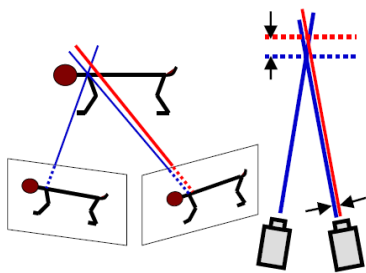


図1. 従来の3次元計測では、まず2次元映像上で関節点をデジタル化するため、デジタル化時のわずかなずれが奥行き情報の大きな誤差に繋がる。

最近になって、Bundler という Structure from Motion 法のオープンソースプログラムが開発された (Snavely et al., 2008)。これは、多視点静止画像からカメラ位置と対象物の表面形状を3D再構成する一種の写真測量法である。その概念を、チンパンジー頭蓋骨の再構成を例に、図2に示す。対象物の表面形状は3D座標値を持つ点の集まり(ポイントクラウド)として再構成され、任意の3D計測も可能である。写真の条件が良ければ再構成画像を用いた計測の精度は、MicroScribe (Revware社)を用いた場合のそれに劣らない (Glenser et al., 2015)。

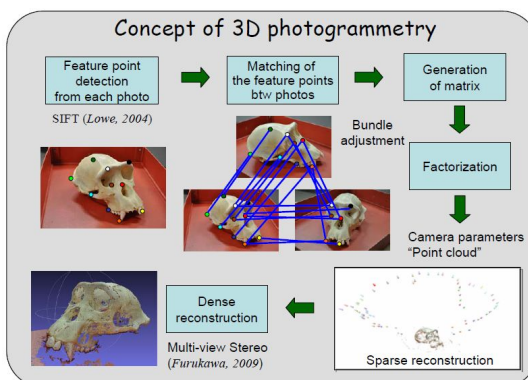


図2 Bundlerによる3D photogrammetryの概念図。

ただ、Bundlerの使用は、これまでは静止画の使用に限られていた。もし、この手法を動画に拡張することができれば、運動解析の強力なツールとなる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、Bundler アルゴリズムを用いて、複数台のビデオカメラの映像から運動中の被験体の体表面形状の3D情報を取得する手法を開発することを目的とした。研究は、手法の開発と、その試用と評価の2段階に分けて行われた。開発では、(1)撮影条件の探索(視点数=カメラ台数の最小化と画質の探索)、(2)映像をフレーム毎の静止画像に展開しカメラ間の同期をとる手法の確立、(3)得られた3D形状から必要な運動学パラメータを抽出する手法の開発を行なった。試用と評価では、ニホンザルとチンパンジーのポジショナル行動の分析を行った。

3. 研究の方法

Bundlerによる3D再構成を行う上で問題となるのは、視点の数つまりビデオカメラの台数、画質、アングル、およびカメラ間のフレームの同期である。視点の数が多ければ多いほど、3D再構成の質は向上する。しかし、ビデオカメラを何十台も準備するのは現実的ではない。そのため、最少のカメラ台数、台数の少なさを補うカメラアングルと画質を探る必要があった。また、運動する対象物(動物)の各瞬間を3D再構成するためには、ビデオカメラからの映像が完全に同期していなければならない。本研究では、カメラ間の同期が可能であり、1920 x 1080の高解像度画質での録画が可能な、Canon XF-105を8台準備し、解像度、アングル、台数等についての試行錯誤を行った。

3D再構成には以下のプログラムを用いた。いずれもフリーで入手可能なものである。(1)ffmpeg:ビデオクリップから各フレームをjpg画像として切り出す。(2)vlfeat (<http://www.vlfeat.org>):SIFTアルゴリズム(Lowe, 2004)を用いて、各画像から特徴点を抽出する。(3)KeyMatchFull: (<http://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler>):各映像の特徴点のマッチングリストを作成。(4)Bundler:バンドル調整、行列生成、因子分解を行い、疎なポイントクラウド(体表面データ)とカメラの座標を出力する。得られたカメラ位置をさらに(5)pmvs2 (<http://www.di.ens.fr/pmvs>) (Furukawa and Ponce, 2009)にフィードすることで、体表面の密なポイントクラウドが得られる。これらのプログラムを順次実行するために、Python言語

を用いたプログラムを作成した。

再構成された表面形状(ポイントクラウド)から運動学パラメータを抽出するためのツールとして、英国マンチェスター大学の William Irvin Sellers 准教授と共同で、「Cloud Digitizer」というプログラムを作成した (<http://www.animalsimulation.org>)。このプログラムでポイントクラウドを読み込み、フレームごとに画面上に表示されたポイントクラウドの任意の点をデジタル化することで、その点の 3D 座標、あるいはその周辺のポイントを含めた平均座標値を求めることができる。

なお、実測値換算については、通常はカメラ視野内に長さが既知のもの(キャリブレーション用治具等)を写しこむ手法を取るが、本研究では、そのような手法を取れない場合(遠所、高所にいる動物を撮影する場合等)を想定し、Bundler が出力するビデオカメラの座標値から求めたカメラ間距離を実測値と比較する手法をとった。

4. 研究成果

対象動物の 3D 再構成を達成するための最適条件を探った結果、Canon XF-105 を用いた場合、最少で4台のビデオカメラの映像から対象物の片側の表面形状を 3D 再構成できることが明らかになった。その際、カメラは、光軸が互いに 10 度程度の角度をなすように配置し、解像度は 1280 x 720 ピクセル以上、プログレッシブモードで撮影する必要があった。3D 再構成はフレームごとに行われるため、原理的にはビデオカメラは撮影中に動いてもかまわない。つまり、通常のビデオ計測のように、一旦カメラ位置やアングルを決めてキャリブレーション用治具を撮影したら撮影終了まで動かさない、といったことはない。しかし、今回の試用においては、フレームごとに条件が変わると評価が困難になるため、原則としてビデオカメラは固定して撮影を行った。

図3に、本手法を試用した結果の一部を示す。対象は、屋外放飼場で自由に歩行する二ホンザルであった。京都大学霊長類研究所の二ホンザル屋外放飼場の観察台にビデオカメラ(Canon XF-105)を4台設置し(図3上左)放飼場内を自由に動く二ホンザル3頭(図3上右)の歩行を撮影した。観察台から被験体までの距離は約20mであった。ビデオカメラの光軸が互いになす角度は10度、解

像度は 1920 x 1080、Gain は 0dB であった。フレーム速度は、カメラの仕様の都合から毎秒 30 フレームとした。これまでの経験から、動物の自然な歩行では 10Hz を越える成分はほとんど検出されておらず、今回の計測においても、毎秒 30 フレームは二ホンザルの動きの追隨に十分な速度であった。

図3下段は、撮影された二ホンザル3頭の歩く様子を4方向からの画像として再構成したものである。この試用では、4台のビデオカメラを撮影対象の片側(歩行の進行方向の右側)にのみに置いたため、映像に映っているのは二ホンザルの手前側半身のみである。そのため、再構成された画像からは奥側半身が欠けている。しかし、映っていた部分は精度良く 3D 再構成されていることが4方向からの再構成画像から見てとれる。放飼場の斜面の様子も忠実に再現されていた。再構成画像から計測した2点間距離と、実際に放飼場内に立ち入って実測した距離の違いは2~3%であった。本手法の有効性が示されたと言える。ところどころデータの欠損も見られるが、これは視野を広く取り過ぎたためと考えられ、今後の検討課題となった。

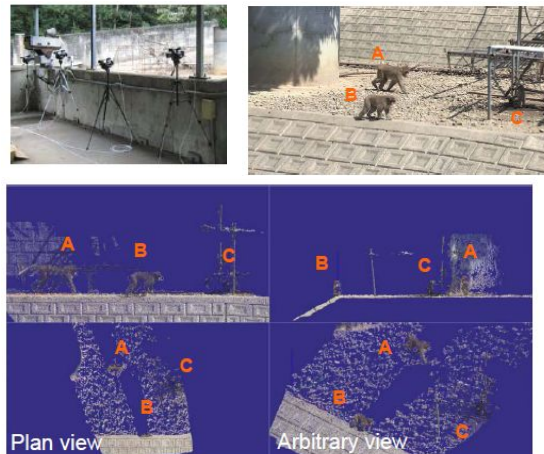


図3. 屋外放飼場内を歩く3頭の二ホンザル(A、B、C)の歩行を4台のビデオカメラ(Canon XF-105、上左)を用いて解像度 1920 x 1080、フレーム速度 30(プログレッシブ)、Gain 0dB で撮影した(上右)。その画像を用い、3D 再構成を行った結果を4方向からの画像として下段に示す。

図4に示すのは、京都大学霊長類研究所においてチンパンジーの運動計測に試用した例である。屋外放飼場に設置されたタワーの間のロープを渡るチンパンジーの二足歩行の運動計測を行った。図3の場合と違って、このケースではビデオに映っていた場所で2点間距離を実測することがほぼ不可能である。つまり、本手法が最も必要となるような状況での試用であった。

4台のビデオカメラは、チンパンジーの屋外運動場に隣接する建物のバルコニーに設置した(図4上左)。先の試用例と同じく、カメラは動かさず、カメラの視野にチンパンジーが入るのを待った(図4上右)。カメラとチンパンジーの間の距離は約20m、カメラ間の角度は約10度であった。解像度は1920 x 1080ピクセル、Gainは0dB、フレーム速度は、毎秒30フレームであった。

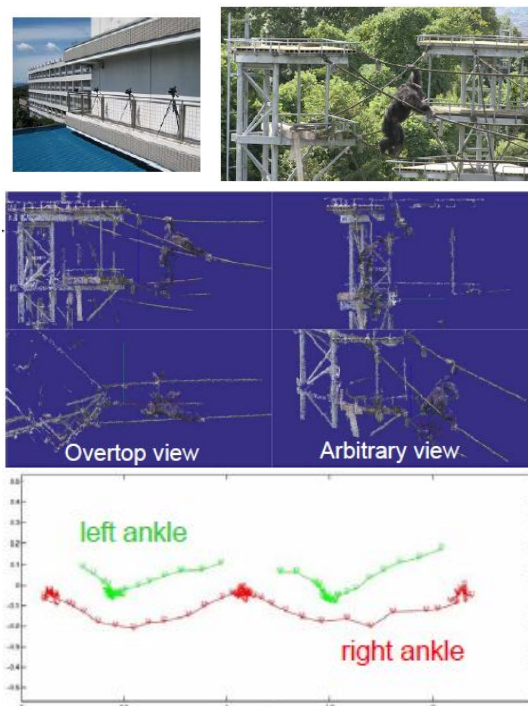


図4．屋外放飼場内のタワー間にはられたロープ上を2足で歩くチンパンジーを4台のビデオカメラ(Canon XF-105、上左)で撮影した。解像度じゃ1920 x 1080、フレーム速度は30(プログレッシブ)、Gainは0dBであった。撮影した映像(上右など)をもとに、3D再構成を行い(中段)、さらに再構成された画像から踵点の動きを見積もった(下段)。

図4中段の再構成画像を見ると、映像に映っていたチンパンジーの右半身については概ねよく再構成されているが、図3のニホンザルに比べ、データの欠損部が目立った。チンパンジーの体毛が黒色で、しかも撮影の方向が逆光となったため、特徴点の抽出が十分に行えなかったのではないかと考えられる。チンパンジーは、この手法で計測する動物種として予定されている重要な種のひとつであるため、今後、さらに検討を重ねて対処法を探る必要がある。

図4下段は、ロープ上2足歩行を行うチンパンジーの踵の動き表したもので、図の右側がチンパンジーの進行方向、図の上方向がチンパンジーにとっての左、

下方向が右である。再構成された被験体の体表面データ(ポイントクラウド)から、自作のプログラム「Cloud Digitizer」を用いて抽出した。点が密集している部分は立脚相、即ち足がロープに接して動いていなかった時間帯で、弧の部分は足を前に運ぶ遊脚相である。図から、チンパンジーは遊脚相で足を前に運ぶ際に、まっすぐ移動させるのではなく、やや外側に膨らんだ弧を描いて運ぶことが明らかになった。これまでの手法では、チンパンジーが運動する空間のキャリブレーションができず、得ることができなかった種類のデータである。

無標点での三次元計測は、動物の運動分析を行なう研究コミュニティにとって悲願とも言えるものであった。本研究はその可能性を世界で初めて具体的に示した。BundlerによるStructure from Motion法は、コンピュータビジョンの領域において画期的な手法として迎えられたが、これまで、その広がりには「静止画像からの3D再構成」に限られていた(ウェブ上の無数の写真からの名所・名跡・有名建築等の再構成、航空写真からの町の建造物の再構成など)。動画への応用は行われておらず、本課題が世界で最初の試みであった。再構成画像には、データ欠損部もあり、まだ改良の余地を多く残すが、ビデオカメラの台数、解像度などについて、具体的な目安を提示できた意義は大きいと考える。野生動物のポジショナル行動の定量解析が可能になり、新たな研究領域が拓かれたと言えるだろう。

本手法は動物、特に霊長類種の運動分析を念頭において開発されたものだが、対象は動物に限らない。昆虫でも飛行機でも、表面にある程度のテクスチャを持ち、10度程度の間隔で設置した複数台のビデオカメラで撮影できるものであれば、その運動・動作を分析できる。一定の形状を保たず絶えず変化するアメーバのような対象の動きでも、そのままコンピュータに取り込むことが可能となり、絶滅危惧種の動きを3次的に保存することもできる。本研究で課題として残った難点のいくつか(画質や計算負荷)は、ビデオ関連機器やコンピュータの進歩とともに解決すると期待できる。

今後、この手法の発展としては是非行いたいのは、筋骨格モデルのマッチングである。動物の運動分析で本当に知りたいもののひとつは骨格の動きである。しかし、エックス線テレビは被爆が大き過ぎるため、使用は現実的ではない。そこで次善の策として、CT画像からボリュームレンダリングで作成したモデルの「サーフェイス」を、本手法で得る体表面の正確な3D情報にマッチングさせる手法を考案中である。マッチング後のモデルの骨格データを見ることで、運動中の骨格の動きを近似的に知ることができるのではな

いかと考えている。これまで運動計測ができなかった動物種(つまりほとんどの種)について、精度の高い計測が可能になると期待できる。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Sellers WI, Hirasaki E, Markerless 3D motion capture for animal locomotion studies, *Biology Open*, 査読有, 3 巻, 2014, 656-668.

<http://bio.biologists.org/content/3/7/656> / DOI:10.1242/bio.20148086

[学会発表](計 4 件)

Hirasaki E, Sellers WI (2014). A new non-invasive method for kinematic analysis of animal locomotion based on the Structure from Motion algorithm. The 83rd Annual Meeting of the American Association of Physical Anthropologists (2014/04/08-12, Calgary, Canada).

平崎鋭矢 (2014). 霊長類口コモーション研究 - 四肢体幹から脳へ、実験室から野外へ. 第 68 回日本人類学会大会 (2014/10/31-11/03, 浜松).

Hirasaki E, Sellers WI (2014). Development of a new non-invasive method for kinematic analysis of animal locomotion based on the Structure from Motion algorithm. Diversity and Conservation of Asian Primates. The 4th International Congress on Asian Primates (2014/08/18-21, Bogor).

Sellers WI, Brassey CA, O'Mahoney T, Yoxhall A, Hirasaki E (2015). Measuring 3D primate finger movements: the application of video photogrammetry. The Anthropology of Hand Conference (2015/6/24-26, Kent, UK).

[その他]

ホームページ等

http://www.pri.kyoto-u.ac.jp/shinka/keitai/members/hirasaki/research_hirasaki.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平崎鋭矢 (HIRASAKI, Eishi)

京都大学・霊長類研究所・准教授
研究者番号: 70252567

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し