

博士論文 2017 年度（平成 29 年度）

# 床面との接触によるヒト足部の 3 次元変形動態

慶應義塾大学大学院理工学研究科

伊藤 幸太

# 主 論 文 要 旨

報告番号	㊦ 乙 第	号	氏 名	伊藤 幸太
主 論 文 題 目： 床面との接触によるヒト足部の3次元変形動態				
<p>(内容の要旨)</p> <p>ヒトの足部は、多数の骨、筋、靱帯から構成される複雑な筋骨格構造体であり、床面との力学的相互作用により機能的に変形し、安定かつ効率的な二足歩行の生成に寄与していると考えられている。しかし、ヒトの足部を構成する骨と軟組織が、床面との力学的相互作用によってどのように運動・変形するのかについては、計測の困難さゆえ現在のところ十分明らかになっていない。そこで本研究では、2方向X線透視システムを用いた3次元骨格動態計測と、ハイスピードカメラと画像相関法を用いた3次元体表面動態計測を通して、ヒト足部の3次元変形動態を明らかにすることを目的とした。</p> <p>第1章では、本研究の背景と目的を述べた。</p> <p>第2章では、2方向X線透視システムとモデルマッチング手法を用いた足部3次元骨格運動の計測手法を構築した。具体的に、CT断層画像に基づいて構築した3次元形状モデルを、輪郭の一致度が最大となるようにX線透視画像にマッチングし、歩行中の足部骨の3次元運動を計測する手法を提案した。歩行中の足部骨運動を計測する上で十分な精度を有していることを確認し、屍体足部の運動計測に本手法を適用してその有効性を示した。</p> <p>第3章では、提案手法を用いて屍体足部に鉛直圧縮荷重を負荷したときの骨運動を計測し、床面との力学的相互作用による足部の生得的な変形特性を計測した。その結果、荷重下の足部において踵骨の外反とともに距骨は内転し、中足骨は外転することを明らかにした。このような骨格運動は、歩行時の身体鉛直軸まわりに作用するモーメントを打ち消す役割があると考えられ、ヒト足部構造の二足歩行適応の一端を明らかにした。</p> <p>第4章では、歩行中の足部表面の詳細な変形動態を明らかにするために、ハイスピードカメラとデジタル画像相関法を用いた足部3次元主ひずみ分布の計測手法を構築した。デジタル画像相関法を運動中の足部に適用することで、力学的相互作用時の足部体表面変形および皮膚伸縮量を、非接触かつ高分解能で定量化できることを示した。</p> <p>第5章では、提案手法を用いてヒト歩行時の足部体表面の3次元変形動態を計測し、世界に先駆けてその詳細を明らかにした。また、本手法が足部疾患の発症メカニズムの解明や早期診断に有効である可能性を示した。</p> <p>第6章では、本研究で提案した2つの足部計測手法を用いて、屍体足荷重時の骨格運動と体表面動態の同時計測を試みた。その結果、足部の変形や表面伸縮は、基本的にはその内部に存在する骨の運動を反映することを明らかにした。</p> <p>第7章では、各章で得られた足部変形動態に関する知見を整理し、その機能的意味を考察した。また今後の課題と展望を述べた。</p> <p>第8章では、本論文の結論をまとめた。</p>				

## SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Science for Open and Environmental Systems	Student Identification Number	SURNAME, First name ITO, Kohta
Title Three-dimensional deformation characteristics of the human foot due to foot-floor contact		
Abstract <p>The human foot is a complex musculoskeletal structure that mechanically interacts with the ground during locomotion. Therefore, deformation characteristics of the human foot are anticipated to be functionally adapted to generation of bipedal locomotion. However, how the bones constituting the foot translate and rotate and the soft tissue surrounding the bones deforms when the foot is in contact with the ground still remains unclear due to difficulties associated with the measurements. The aim of the present study is to clarify three-dimensional (3D) deformation characteristics of the human foot by means of a bi-plane X-ray fluoroscopy and a digital image correlation (DIC) method using high-speed cameras.</p> <p>Chapter 1 introduces the background and the aim of this study.</p> <p>Chapter 2 describes the bi-planar X-ray fluoroscopic system and an automatic model-based registration method for direct measurement of the foot skeletal movement. 3D surface models of foot bones were registered to fluoroscopic images such as to maximize similarity measures to quantify 3D movements of the foot bones in motion.</p> <p>Chapter 3 presents the 3D kinematics of the cadaver foot bones under the axial loading quantified using the X-ray system. We found that the talus was medioinferiorly translated and adducted as the calcaneus was everted due to axial loading. Furthermore, as the talus is adducted, the talar head moves medially with respect to the navicular, inducing abduction of the metatarsals. This characteristic coupling movement of the foot bones possibly contributes to balance the moment actions to the body around the vertical axis during walking.</p> <p>Chapters 4 and 5 describe measurements of temporal changes in 3D shape and surface strain distribution of the foot during walking using 3D DIC. We described some characteristic deformations occurring the human foot during walking. Information on how foot skin is stretched during walking can be used for early diagnosis and treatment of foot disorders.</p> <p>Chapter 6 presents the results of simultaneous measurements of the foot deformation under axial loading using the two systems. Foot surface strain distribution was observed to be generally correlated to movements of the foot bones under the skin, indicating that the surface deformation measurement based on DIC might possibly be used to infer foot bone movements under the skin non-invasively for clinical applications.</p> <p>Chapter 7 summarizes the 3D deformation characteristics of the human foot elucidated by the present study and discusses some limitations and future directions.</p> <p>Chapter 8 is the conclusion of the present study.</p>		