

[研究助成 (A)]

人間 - 機械系の振動伝搬を時空間稠密に捉える 実時間高速ボリュメトリックビジョン

2251005



研究代表者
(助成金受領者)

広島大学 大学院先進理工系科学
研究科

助教

WANG FEIYUE

共同研究者

広島大学 先進理工系科学研究科

教授

石 井 抱

[研究の目的]

人間と機械が相互作用するシステムでは、機械振動が人体へ伝搬することで、作業快適性、疲労、安全性、操作性などへ大きな影響を及ぼすため、人間—機械系における振動伝搬特性の解析は重要である。しかし、従来広く用いられている加速度センサを用いた接触式計測では、測定点数や設置位置に制約があり、全身にわたる時空間稠密な三次元振動分布を取得することは困難である。近年では、高速ビジョンや三次元点群計測を用いた非接触振動計測法が注目されているが、人体のような非剛体対象では、大きな姿勢変化と微小振動が同時に存在するため、高精度な三次元振動解析は容易ではない。特に、高速カメラによる画像解析では、人体運動に伴う見え方の変化や点群形状変化により、時系列データ間で安定した対応関係を維持することが難しい。さらに、異なる実験条件間では、三次元点群の位置や形状が一致しないため、従来手法では実験間におけるポイントワイズな定量比較が困難であるという課題が存在する。

そこで本研究では、高速ステレオカメラとToFカメラを統合した高速ボリュメトリックビジョンを構築し、人間—機械系における振動伝搬の三次元可視化および定量解析を行うことを目的とした。具体的には、人体の非剛体運動に対応するため、三次元モデルを基準として追跡更新しながら微小振動を推定するモデルベー

ス3D-DIC法を提案し、人体表面における高密度な三次元振動分布を高精度に計測した。さらに、異なる実験条件間における比較を可能とするため、標準化3Dモデルに基づくポイントワイズ比較法を導入し、異なる計測データを共通三次元座標系上へ対応付けることで、振動エネルギー分布の定量比較を実現した。本研究を通じ、人間—機械系における複雑な振動伝搬を非接触・全視野で可視化し、人間中心の機械システム設計や快適性評価に資する基盤技術の構築を目指した。

[研究の内容、成果]

1. 人体姿勢変化に対応した三次元振動計測

(1) 技術課題

従来の人体振動計測では、加速度計を人体へ取り付け接触式計測が広く用いられている。しかし、測定点数や設置位置に制約があるため、人体全体における三次元振動分布を取得することは困難である。また、センサ装着や配線が必要であり、人体や座席系へ影響を与える可能性もある。これに対し、ステレオ高速ビジョンを用いた非接触・全視野の振動計測法が注目されている。しかし、図1に示すように、人体は非剛体対象であるため、呼吸や姿勢変化などの大きな運動成分が、機械振動に由来する微小振動成分を埋没させてしまうという課題が存在する。さらに、人体表面形状の変化により画像間

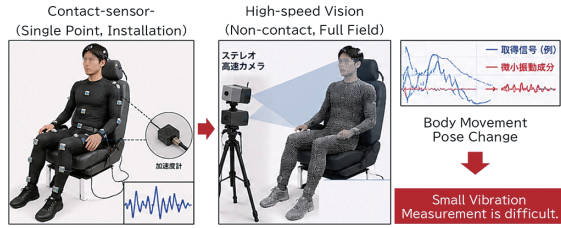


図1 Challenges in Human Vibration Measurement

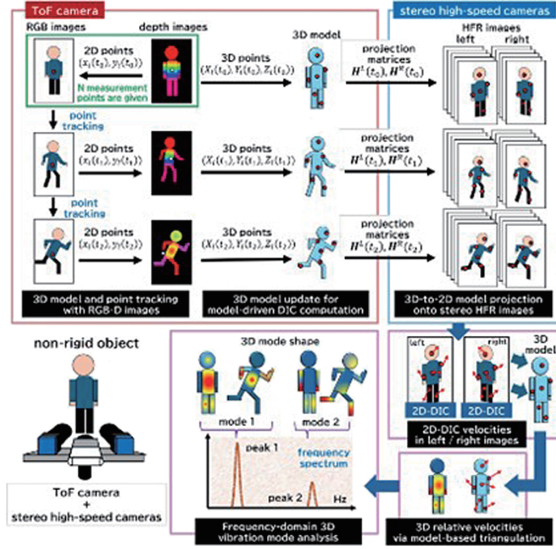


図2 Model-Based-Tracking 3D-DIC

の対応点追跡が不安定となり、高精度な三次元振動解析が困難となる。

(2) 提案手法

本研究では、人体姿勢変化に伴う大きな運動成分の影響を抑制しながら、人体表面における微小振動を高精度に計測するため、高速ステレオカメラと ToF カメラを統合したモデル追跡型 3D-DIC 法を提案した。図2に提案手法の概略を示す。まず、ToF カメラにより取得される RGB-D 画像を用いて人体表面の三次元点群モデルを生成し、各フレームにおいて人体姿勢変化に応じた三次元モデル更新を行う。次に、更新された三次元モデル上の計測点を左右高速カメラ画像へ投影し、対応する ROI 画像に対して二次元 DIC 解析を適用することで、サブピクセル精度の二次元変位分布を算出した。さらに、左右画像から得られた二次元変位情報を三角測量により統合することで、各計測点にお

ける三次元相対速度分布を推定した。

また、得られた三次元速度時系列に対して短時間フーリエ変換 (STFT) を適用することで、周波数領域における三次元振動モード解析を行った。これにより、人体姿勢変化による大きな運動成分と、機械振動に起因する微小振動成分を分離しながら、人体全体における振動伝搬の三次元可視化を可能とした。提案手法では、ToF カメラによる三次元モデル追跡を基準として高速画像解析を行うことで、人体の非剛体変形や姿勢変化に対して安定した対応点追跡を実現した。これにより、従来法では困難であった人体全体における時空間稠密な三次元振動計測を非接触で実現した。

(3) 実験結果

IMV 社の 4 自由度振動試験機上に座席シートを設置し、実車市街地走行 (60 km/h) で取得した振動を 30% 強度で再現した着座振動試験を実施した。図3左に撮影システムを示す。高速ステレオカメラには EoSens 2.1CXP12 (3840 × 2144@200 fps)、ToF カメラには Azure Kinect DK を用い、被験者および座席シートを対象として 13 秒間の三次元振動計測を行った。図3右に ToF カメラにより取得した着座者と座席シートの三次元点群を示す。取得した点群から一様サンプリングにより計測点を抽出し、全視野三次元速度解析に用いた。

図4には、抽出した 9,540 点の 2D 速度場の可視化と、10.3 秒間における 2 秒間隔での 3D 速度可視化を示す。2D 速度は ROI サイズ 128 × 128 で IC-GN アルゴリズムにより算出され、全測定点が精度良く 2D 空間にマッピングされ

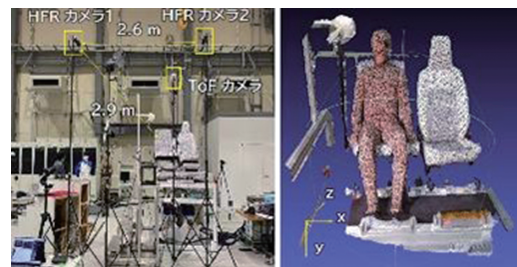


図3 Experiment scene and ToF-scanned 3D model

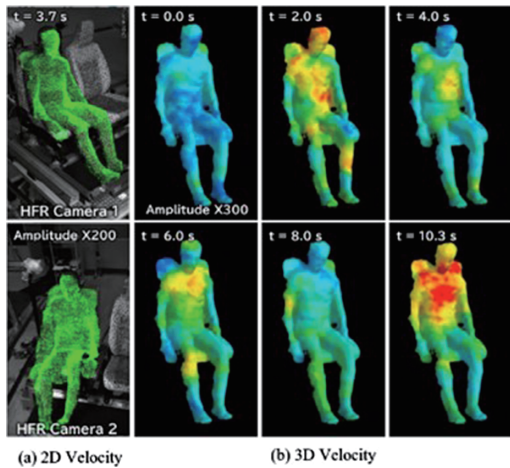


図4 Estimated 2D and 3D velocity distribution

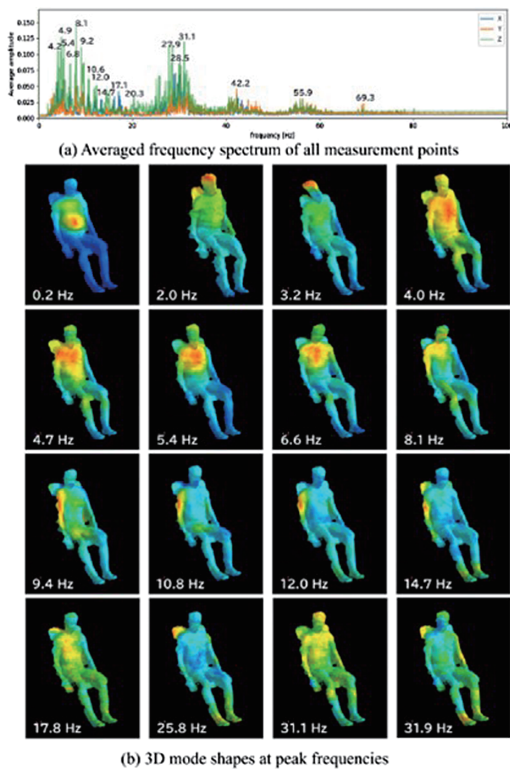


図5 Frequency Spectrum and 3D Mode Shapes

ていることが確認できた。

さらに3D速度の可視化から、振動が主に着座者の腹部から上の上半身に集中していることが示され、これはシートベルト非着用時に体感される振動分布と一致していた。

図5に全計測点の平均周波数スペクトルおよび主要ピーク周波数に対応する三次元振動モードを示す。0.2 Hzでは腹部を中心とした振動が

観測され、呼吸動作の影響を反映していると考えられる。2.0 Hzおよび3.2 Hzでは頭部の揺動が支配的であり、4.0 Hzでは全身にわたる振動分布が確認された。また、4.7～8.1 Hzでは胸部周辺、9.4～14.7 Hzでは左肩部周辺に局所的な振動が現れ、人体振動に非対称な周波数特性が存在することを確認した。さらに、高周波帯域では人体と座席の同時振動や座席固有振動に対応するモードが観測された。これらの結果より、提案手法により人体各部位における周波数依存的な振動伝搬特性を三次元的に可視化可能であることを確認した。

2. 標準化3Dモデルに基づく実験間振動比較

(1) 技術課題

従来の三次元振動解析では、各実験において取得される三次元点群の位置や形状が異なるため、異なる実験条件間における振動分布を定量的に比較することが困難であった。特に、図6に示すように、人体を対象とした場合、着座姿勢や体形のわずかな変化によって三次元点群形状が変化するため、同一部位における振動特性をポイントワイズに比較することができないという課題が存在する。そのため、従来手法では座席条件や振動条件の違いが人体振動へ与える影響を定量的に評価することが難しかった。

(2) 提案手法

本研究では、異なる実験条件間における人体振動分布の定量比較を実現するため、図7に示すように、標準化3Dモデルに基づく振動比較手法を提案した。図8に提案手法の概略を示す。

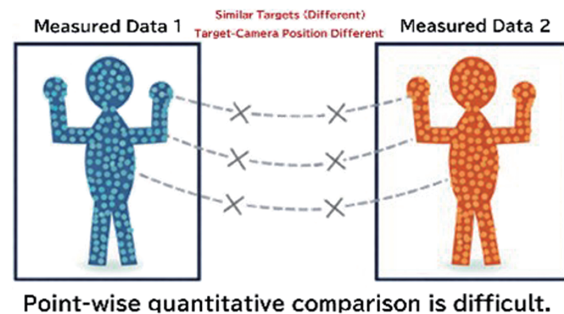


図6 Challenges in Data Comparison

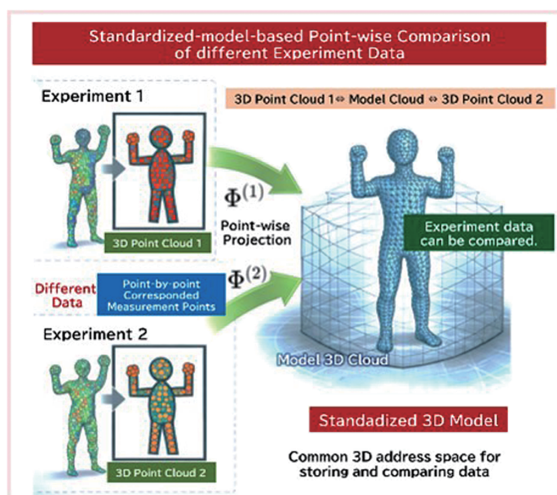


図7 Standardized-model-based Comparison

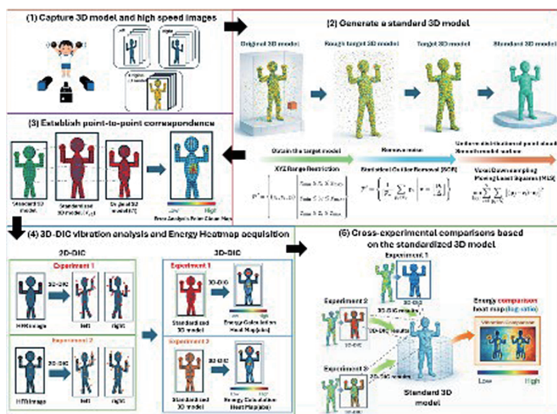


図8 Flowchart of Proposed Concept

まず、高速ステレオカメラおよびToFカメラを用いて、高速画像列と人体表面の三次元点群を同時計測した。次に、各実験で取得された三次元点群に対して、点群範囲制限、外れ値除去、ダウンサンプリングおよび平滑化処理を適用し、標準化三次元モデルを生成した。その後、各実験で取得された三次元点群と標準化3Dモデルとの間でポイント間対応付けを行い、共通三次元座標系上におけるポイントワイズ対応関係を構築した。さらに、各実験に対して3D-DIC解析を適用し、標準化3Dモデル上へ三次元振動速度および振動エネルギー分布を投影した。最後に、異なる実験条件間における振動エネルギー分布を同一標準3Dモデル上で比較することで、人体各部位における振動伝搬特

性の差異を可視化した。これにより、従来困難であった異なる実験条件間における人体振動分布のポイントワイズ比較および定量評価を実現した。

(3) 実験結果

図9に振動比較実験時の撮影環境を示す。IMV社の4自由度振動試験機上に座席シートを設置し、BYD車両の60 km/h都市走行時振動データ(20%, 25%, 30%加振)を入力した状態で、着座者を対象とした20秒間の振動試験を実施した。図9左にシートベルト非装着時、図9右にシートベルト装着時の撮影場面を示す。

図10に三次元点群と高速画像間における対応付け処理を示す。まず、解析用三次元点群を左右高速カメラ画像へ投影し、2D-DIC解析により三次元振動分布を推定した。次に、基準となる標準化3Dモデル上の各計測点に対して三次元点群内で対応点探索を行い、ポイントワイズな振動比較を実現した。図11にシートベルト有無条件における振動エネルギー比較結果を示す。赤色はシートベルト装着時に振動エネルギーが増大した領域、青色は非装着時に振動エネルギーが増大した領域を表す。比較結果より、0-3 Hz帯域ではシートベルト装着時に上半身周辺の振動エネルギーが増大する傾向が確認さ

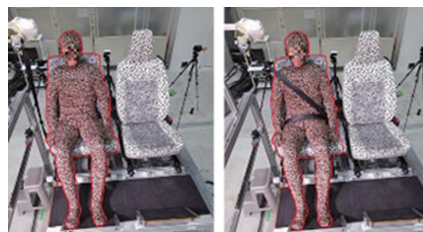


図9 Comparison of with and without seatbelt

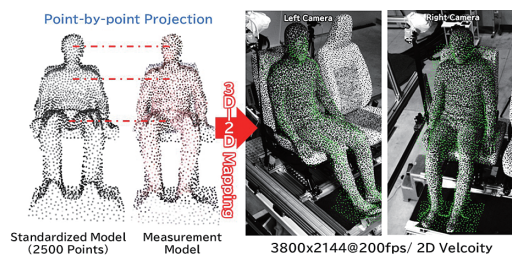


図10 3D Model and 2D Velocity

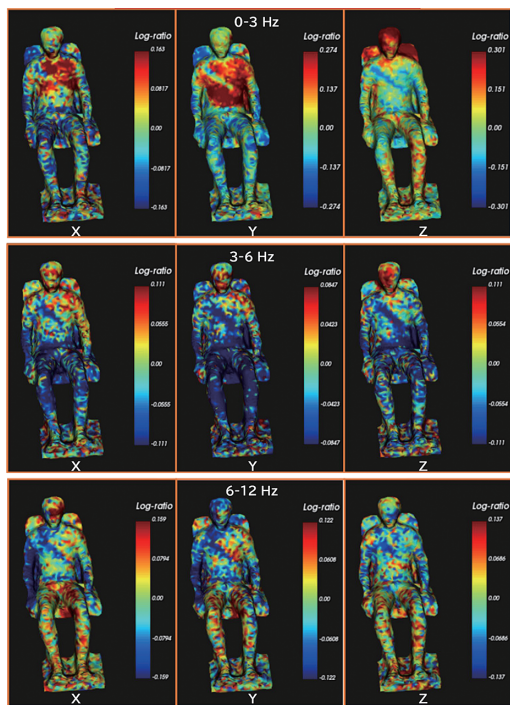


図 11 3D Energy Comparison

れた。3-6 Hz 帯域では頭部周辺のエネルギー増大と、下半身周辺のエネルギー低下が観測された。また、6-12 Hz 帯域では脚部周辺において振動エネルギーの増大が確認された。これらの結果より、シートベルト装着は全周波数帯域において一様な振動抑制を実現するものではなく、周波数帯域や人体部位によっては局所的な振動増幅が発生する可能性が示された。提案手法により、人体各部位における周波数依存的な振動伝搬特性を定量的に比較可能であることを確認した。

[成果の発表, 論文など]

1. Mori T, Wang F*, Shimasaki K, Ishii I: High-Speed Volumetric Capture for Vibration Propagation in the Human Body, IEEE Sensors Letters, Vol. 9, No. 5, 2025.
2. 王 飛躍, 島崎 航平, 石井 抱, 北川 哲也, 古舞 隆司: 座席シート振動試験における着座者のボリュメトリック振動可視化, 第 26 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2025), 2025.