

## スポーツ現場での怪我を予防するための筋骨格解析システムの開発 — 映像・センサ統合による導入容易な動作解析 —

### 1. 背景

スポーツ現場においてフィジカルデータの活用が進んでいるが、関節や筋肉の深刻な怪我に対しては、従来 GPS や心拍数データでは十分な対応ができない。これらの怪我に対処するには、「特定の関節や筋肉にどの程度の負荷がかかっているか」という身体内部の力学的状態を得る必要がある。

姿勢および力学的な情報の計測を行う技術である筋骨格解析 (OpenCap や AnyBody 等) には、高価なモーションキャプチャ設備やフォースプレート、あるいはバイオメカニクスの高度な専門知識が必要であり、屋外のピッチや日常的なトレーニング環境で手軽に利用することは困難であった。このように「映像からの姿勢推定」と「研究室レベルの筋骨格解析」の間には大きな隔たりがあり、現場で直接役立つ解決策が求められていた。

### 2. 目的

本プロジェクトは、カメラ映像とセンサデータを統合し、身体内部の力学負荷を可視化・定量化するアプリケーション「PhysIn」の開発を目的としており、その目指すところは次の通りである。

- 単眼カメラとインソールセンサを組み合わせ、現場での使いやすさと姿勢および力学解析の精度を両立させる。
- フィジカルコーチや理学療法士が、フォーム改善や復帰時期の判断を、経験や感覚ではなく定量的なデータに基づいて行えるようにする。

### 3. 開発の内容

本システムは、映像およびセンサデータから筋骨格負荷を推定・可視化する統合プラットフォームである。解析プロセスのアルゴリズムは図 1 に示すような以下の 3 段階で構成される。

1. 三次元姿勢の推定と補正: 単眼カメラ映像から GVHMR と呼ばれる三次元姿勢推定技術を用いて姿勢を推定し、足部に装着した IMU (ORPHE CORE を使用) の加速度データを用いて、地面への「めり込み」や「浮き」を数理最適化により補正する。図 2 では、IMU により地面へのめり込みを修正する前後の例を示している。
2. 人体モデルの変換: 姿勢推定用の SMPL モデルから、力学計算に適した OpenSim の骨格モデルへ変換する。
3. 力学解析 (関節トルク・筋力の算出): OpenSim を活用し、逆動力学計算によって関節にかかる回転力や筋肉の発揮力を推定する。

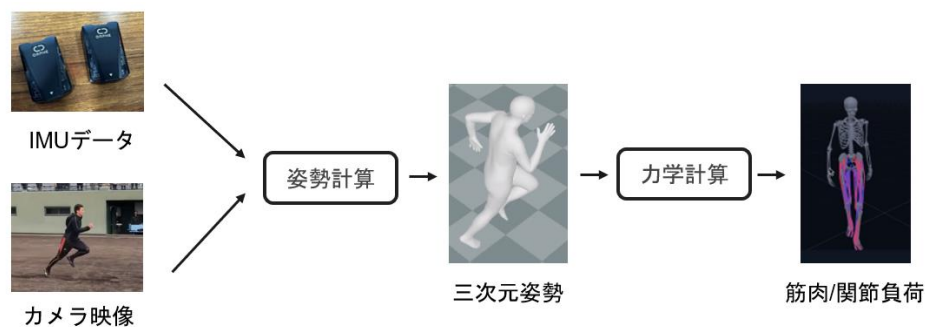


図 1:PhysIn における解析パイプラインの概要

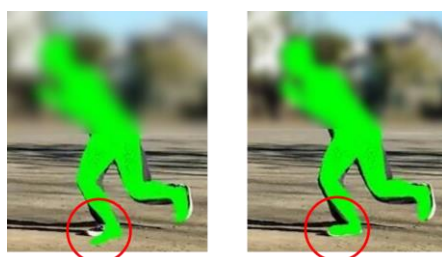


図 2:IMU を用いた足部の姿勢修正

アルゴリズム開発において、計算速度の高速化は本プロダクトの大きな特徴である。解析パイプラインの近似アルゴリズムを独自に実装したことで、単純なアルゴリズムでは数時間を要していた力学計算を、5 秒程度の動作に対して約 15 分(システム合計で約 27 分程度)まで短縮した。

また、図 3 に示すように、足部に装着する ORPHE CORE から Bluetooth で送られるデータを受信し、MicroSD に記録する小型デバイスを ESP32(マイコン)を用いて開発した。



図 3:選手のベスト等に装着可能な小型データ受信デバイス

カメラおよび IMU センサのデータを送信することで、三次元的な姿勢および各関節・筋肉への負荷を可視化できる Web アプリケーションを開発した。解析処理は一定の時間を要するため、バックグラウンドで非同期に実行される。図 4 はアプリケーションの画面の一例であり、Web アプリケーション上で利用できる主な機能は次の通りである。

- 動画トリミング・アップロード: ブラウザ上で解析範囲を調整してアップロードできる。

- 3次元ビジュアライザ: 推定された骨格と筋経路をブラウザ上で再生できる。
- 動作評価指標の表示: 左右の筋出力バランス、ハムストリングスと大腿四頭筋の筋発揮力比率など、スポーツ指導の現場で動作やコンディションの評価に用いられる指標を出力し、フィードバックの解釈を高める。

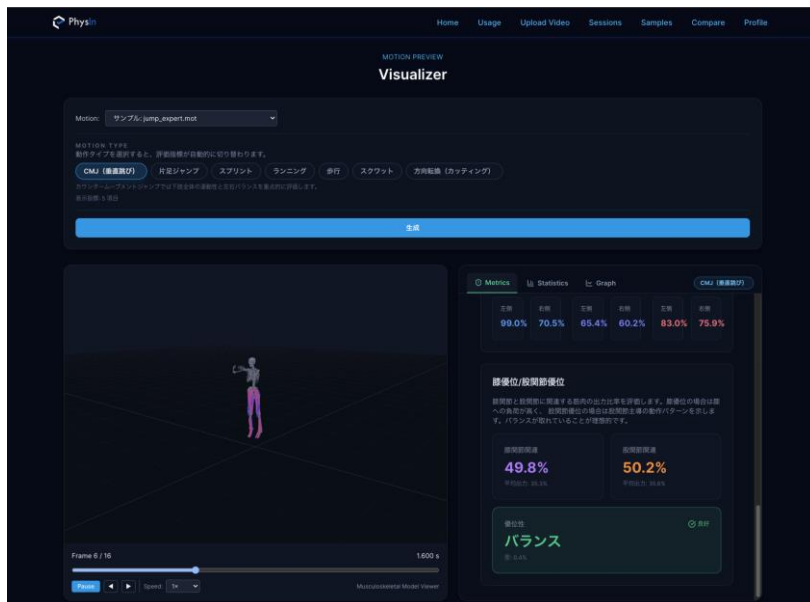


図 4: PhysIn の 3D ビジュアライザ  
左右の出力差や動作特性を直感的に理解できる。

#### 4. 従来の技術(または機能)との相違

既存の技術である OpenCap と比較した本システムの優位性は表 1 の通りである。

表 1: 既存アプリケーションとの比較

比較項目	OpenCap	PhysIn
機材・準備	2 台以上のカメラ、大型チェッカーボード(格子板)が必要	単眼カメラ + 小型 IMU のみ。持ち運びが容易
設置の制約	カメラ同士の厳密な位置合わせが必要	屋外ピッチ等でもスマートフォン1台で撮影可能
足部の精度	映像のみでは接地タイミングの精度に限界がある	IMU との統合により、接地の有無を物理的に整合した形で補正
解析結果の解釈	物理量の出力に留まり、現場での解釈に専門知識が必要	指導者が着目する「左右差」「動作特性」を指標化して提示

#### 5. 期待される効果

本システムの普及により、スポーツ現場における怪我予防とコンディショニングの在り方が根本から変革されることが期待される。まず、従来は主観的な感覚や経験則に頼らざるを得なかった筋肉の過負荷や無意識の底い動作を、関節トルクや筋発揮力といった具体

的な数値として可視化することで、疲労の蓄積を早期に捉え、過度な負荷に起因する怪我を未然に防ぐことが可能となる。また、リハビリテーションの過程においても、左右の筋出力バランスや特定の負傷部位への負荷といった客観的な指標を基準に据えることで、安全かつ効率的な競技復帰を支援できる。さらに、高価な設備を必要としない本システムは、プロチームのみならず、これまで高度な解析環境を持てなかった育成年代の部活動や地域スポーツにも動作解析を普及させる一助となる。将来的には、これらの技術を高齢者の歩行分析や転倒防止といったヘルスケア分野へ転用することで、健康寿命の延伸に向けた「予防医療」としての波及効果も見込まれる。

#### 6. 普及(または活用)の見通し

本システムは、まずプロおよびアマチュアのスポーツチームにおいて、日々のコンディション管理や動作改善を目的とした活用を見込んでいる。具体的には、コンディションの評価に用いられる特定動作、例えば片脚スクワットや方向転換動作などを短時間で簡易的に診断するツールとして導入を進め、1チームあたり数十名規模の選手を定期的にモニタリングする体制の構築を目指す。

将来的な展望としては、数千セッション規模の解析データを蓄積・分析することで、単なる現状の可視化に留まらず、負荷量と怪我発生の相関関係から将来の怪我リスクを統計的に提示する予測機能の実装を計画している。

#### 7. クリエータ名(所属)

福島 隆人(東京大学 大学院情報理工学系研究科)

梶尾 直哉(東京大学 大学院情報理工学系研究科)