

NAIST-IS-MT1651021

修士論文

スプリントトレーニング支援のための
多視点全天球カメラ映像からのピッチ・ストライドの推定

大内 勇磨

2018 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

大内 勇磨

審査委員：

加藤 博一 教授	（主指導教員）
小笠原 司 教授	（副指導教員）
Christian Sandor 准教授	（副指導教員）
武富 貴史 助教	（副指導教員）

スプリントトレーニング支援のための 多視点全天球カメラ映像からのピッチ・ストライドの推 定*

大内 勇磨

内容梗概

スプリントトレーニングは、主にスプリント動作の改善を目的として行われている。そのため、ピッチやストライドなどの走速度の決定要因となるデータの分析が重要となるが、日常のスプリントトレーニングにおけるデータの収集は、タイムの計測にとどまっているという現状がある。一方で、ピッチおよびストライドに関してはアスリートまたはコーチの主観によって分析が行われている。より効果的なスプリントトレーニングを実現するためには、日常のスプリントトレーニングにおいてピッチ、ストライド、スプリント動作のデータを収集・分析し、アスリートまたはコーチにフィードバックする必要がある。これまで、スプリントパフォーマンス分析のためのデータ収集を目的として、様々な計測装置を用いた手法が提案されている。しかしながら、これらの手法の多くは、セットアップが煩雑、実際の競技環境の再現性が低い、データのフィードバックに時間がかかるといった問題があり、トレーニング現場での利用は難しい。これに対して、オプトジャンプなどのように設置が容易であり、実際の競技環境と近い状況でのデータ収集を可能とする手法がある。これにより、ピッチ、ストライドの情報を即時にフィードバックすることが可能となるが、スプリント動作を確認するためには各センサに加えてカメラを用いた動作映像の撮影が必要となる。そこで、本研究では、カメラ映像からピッチおよびストライドの計測を行うことで、これらの情報とスプリント動作のデータを同時に収集可能なフレームワークを提案する。具体的には、走路周辺に設置した複数の全天球カメラ映像から三次元足関節位置の軌跡を推定することで、ピッチおよびス

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1651021, 2018 年 3 月 15 日.

トライドの推定を行う。実験では提案手法の有効性を示すために、手動で取得した真値との比較によって三次元足関節位置，ピッチ，ストライドの推定精度の評価を行った。その結果，それぞれの推定手法が目標精度を満たすことが確認された。

キーワード

スプリントトレーニング，全天球カメラ，姿勢推定

Pitch and Stride Estimation from Multi-Omnidirectional Videos for Sprint Training Support*

Yuma Ouchi

Abstract

The purpose of sprint training is to improve sprint form. As running speed affects sprint form during training, it is important to measure two main factors: pitch and stride data. However, in current training scenarios, athletes and coaches subjectively measure pitch and stride, and also use sprint time to evaluate sprint form. In order to achieve more effective sprint training, it is necessary to develop a system that collects and analyzes pitch, stride, and sprint form data in daily sprint training which then generates feedback to the athletes or the coaches. However, most of these systems are difficult to use at training sites because the setup is complicated, the reproducibility of the actual field environment is low, and the generation of feedback data is time-consuming. On the contrary, there are systems that are easy to install such as Optojump, which enables data collection in a scenario close to the actual field environment. This makes it possible to immediately provide information about pitch and stride. But in order to confirm the sprint form, it is necessary to capture videos using a camera in addition to each sensor. Therefore, in this research, we developed a framework that can simultaneously collect sprint form information, as well as pitch and stride data from the camera images. Specifically, we estimate the pitch and stride by estimating the trajectory of three-dimensional ankle joint positions from images of multiple omnidirectional cameras installed around the

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651021, March 15, 2018.

track. Then, we conducted an experiment to show the effectiveness of the proposed method. We looked at the estimation accuracy of three-dimensional ankle joint positions. We also compared pitch and stride data from our framework and from ground truth values acquired manually. Results show that each estimation method satisfies the target accuracy.

Keywords:

sprint training, omnidirectional camera, pose estimation

目次

図目次		vi
第 1 章	はじめに	1
第 2 章	スプリントパフォーマンス分析における従来のデータ収集手法と 本研究の位置づけ	4
第 3 章	多視点全天球カメラ映像からのピッチ・ストライドの推定	11
3.1	多視点全天球カメラ映像からの二次元関節位置推定	12
3.1.1	カメラと人物の幾何学的な関係に基づく二次元関節位置の 補正	12
3.1.2	エピポーラ拘束に基づく投票処理による二次元関節位置の 補正	14
3.2	三次元足関節（足首）位置の軌跡の推定	18
3.3	接地時刻の推定	20
第 4 章	実験	22
4.1	実験環境	22
4.2	三次元足関節位置推定の精度評価	22
4.3	ピッチ・ストライドの推定の精度評価	29
第 5 章	まとめ	31
謝辞		32
参考文献		33

図目次

1.1	走速度の決定要因 [11]	3
2.1	フォースプレートと使用風景 [23]	5
2.2	オプトジャンプの設置風景 [22]	6
2.3	トレッドミル [19]	6
2.4	従来手法と提案手法の比較	8
2.5	ピッチ・ストライドの推定手法の位置づけ	9
2.6	スプリントパフォーマンス分析における様々なデータ（上の赤枠：ピッチの最小値・最大値の平均と標準偏差，下の赤枠：歩幅の最小値・最大値の平均と標準偏差） [15]	10
3.1	処理手順	11
3.2	撮影環境を上から見た際のカメラの配置（カメラ台数が N 台の場合）	12
3.3	カメラと人物間の距離に依存して関節位置推定精度が低下	13
3.4	鼻が正しく検出されていないことによる人物の正面・背面判定の誤り	14
3.5	関節のオクルージョンなどによる左右判定の誤り	17
3.6	各カメラ画像で検出された関節位置と実際の人物の関節位置の関係の例	17
3.7	エピポーラ線を投影した結果の例	18
3.8	データ処理の例	21
4.1	実験環境におけるカメラの配置	23
4.2	カメラ配置の決定要因	23
4.3	三次元右足関節位置の誤差	24
4.4	三次元左足関節位置の誤差	24
4.5	一方の足関節から両足関節を検出してしまった場合の例（上：カメラ 2 のフレーム番号 53，下：カメラ 3 のフレーム番号 111）	25

4.6	足関節の検出位置のずれが比較的大きい場合の例（上：カメラ 2 の フレーム番号 98, 下：カメラ 4 のフレーム番号 121）	26
4.7	投票される側のカメラ画像で検出された両足関節の距離が近い場 合の例（上：カメラ 2 のフレーム番号 47, 下：カメラ 4 のフレ ーム番号 154）	28

第 1 章 はじめに

短距離走競技におけるゴールタイムの向上を目的として、スプリント走時の様々なデータの分析が行われている。陸上競技の花形である 100 メートル走競技においては、走速度の変化から加速局面，最大速度局面，減速局面の 3 つの走局面に分けて研究が行われてきた。なかでも，最大走速度がゴールタイムに大きな影響を及ぼすため，最大速度局面に限定してピッチおよびストライド（これらの定義は 3.3 節参照）のデータの収集・分析を行う研究が数多くある [1–5]。しかし，最大走速度は加速局面を経て到達することから，加速局面でより高い走速度を獲得できることもゴールタイムを短縮するうえで重要な要因となることが知られている [6]。そのため，加速局面におけるピッチおよびストライドのデータについても分析が行われている [7]。これらの研究成果から，ピッチおよびストライドが走速度を決定づけるうえで重要な要因であることが知られている。また，ピッチおよびストライドの決定要因に関しての考察も報告されている。Hunter ら [9] はピッチおよびストライドの間には，ストライドが増加するとピッチが低下し，ピッチが増加するとストライドが低下するというトレードオフの関係があるとし，Hay [10] によるピッチおよびストライドそれぞれの決定要因に関する説明を拡張した。これらの知見については，図 1.1 に示すようにピッチおよびストライドを決定づける要因について詳細にまとめられている [11]。また，図 1.1 では走速度がピッチおよびストライドによって決定され，それらは最終的に身体の運動学的要因，地面反力による力積，空気抵抗など様々な決定要因に影響を受けることが示されている。

このように，スプリントトレーニングにおいてピッチおよびストライドの計測は重要であるが，日常のスプリントトレーニングにおけるデータの収集は，タイムの計測にとどまっているという現状がある。そのため，ピッチ，ストライド，スプリント動作などのデータに関してはアスリートまたはコーチの主観によって分析が行われている。したがって，より効果的なスプリントトレーニングを実現するためには，日常のスプリントトレーニングにおいてピッチ，ストライド，スプリント動作などのデータを収集・分析し，アスリートまたはコーチにフィードバックする必要がある。

スプリントパフォーマンス分析における従来のデータ収集手法としてはビデオ

映像を用いた手法 [1, 2, 7–9, 12–16], モーションキャプチャシステムを用いた手法 [3, 9, 17], フォースプレートを用いた手法 [3, 9, 15, 16], 接地測定装置 (Optojump Next, Microgate 社製, 以下, オプトジャンプ) を用いた手法 [4, 5, 15], トレッドミルを用いた手法 [17–20] など様々な計測装置を用いた手法が提案されている. これらの手法の多くはトレーニング時に利用することを想定していないため, 以下のような問題がある.

- セットアップが煩雑
- 実際の競技環境の再現性が低い
- データのフィードバックに時間がかかる

フォースプレートを用いた手法 [3, 9, 15, 16] およびオプトジャンプを用いた手法 [4, 5, 15] は上記の問題が少ないが, これらの手法では, スプリント動作を確認するために各センサに加えてカメラを用いた動作映像の撮影が必要になる. また, 計測機器が高価なため, 実際のトレーニングの現場に普及していない. そこで, 本研究では, カメラ映像からピッチおよびストライドの計測を行うことで, これらの情報とスプリント動作のデータを同時に収集可能なフレームワークを構築することを目指す. 具体的には, 走路周辺に設置した複数の全天球カメラ映像から三次元足関節位置の軌跡を推定することで, ピッチおよびストライドの推定を行う. スプリント動作は各カメラで撮影した映像から確認することができる. これにより, 従来のデータ収集手法よりも簡易的かつ安価なシステムでピッチ, ストライド, スプリント動作のデータの収集・分析が可能になることが期待される.

以下, 2 章ではスプリントパフォーマンス分析における従来のデータ収集手法と本研究の位置づけについて述べる. 3 章では多視点全天球カメラ映像からの三次元足関節位置の軌跡を推定することでピッチおよびストライドを推定する手法について述べる. 4 章では 3 章で提案した手法を用いた実験における結果およびその精度評価について述べる. 最後に, 5 章で本研究のまとめと今後の課題について述べる.

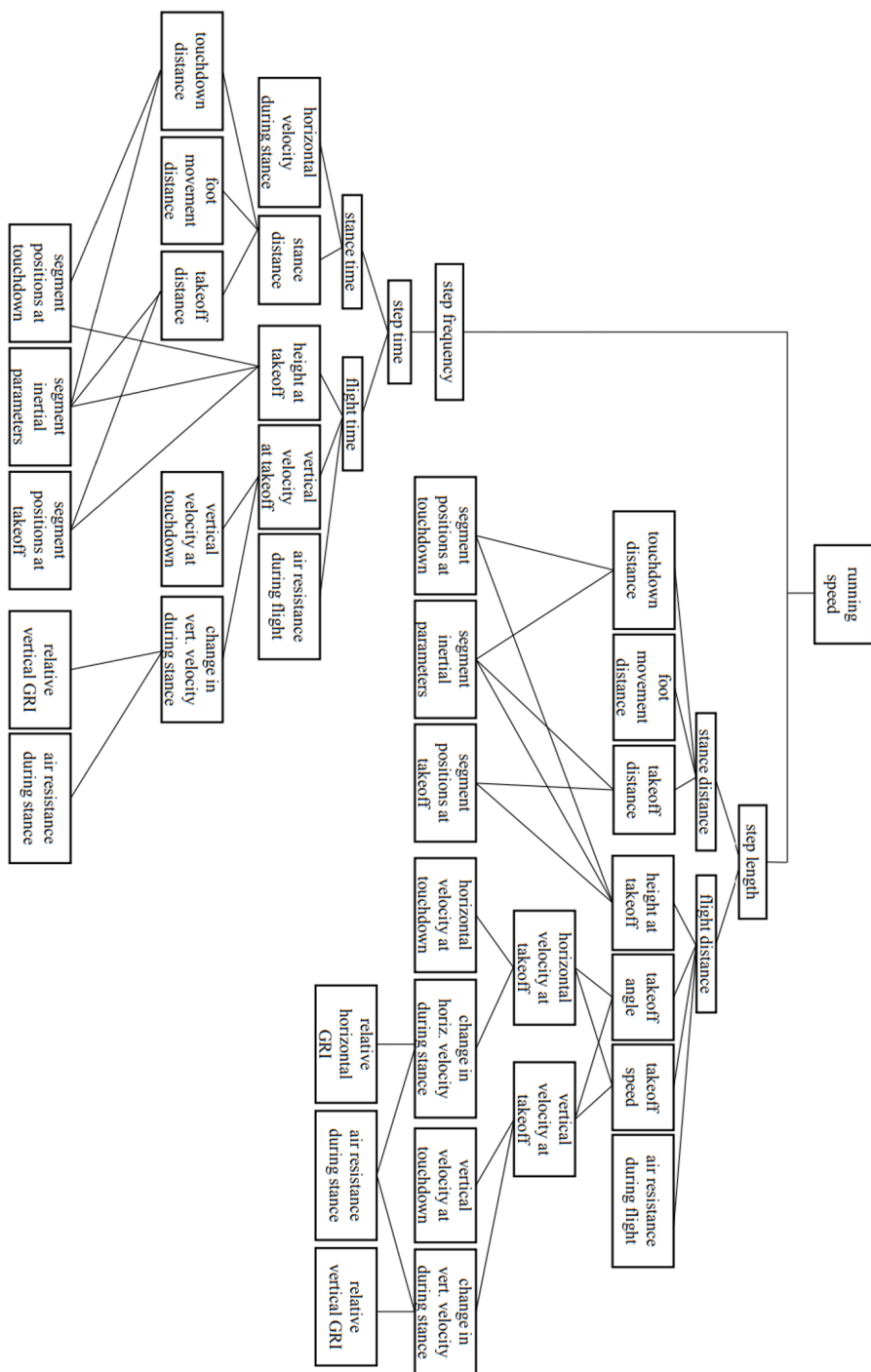


図 1.1 走速度の決定要因 [11]

第 2 章 スプリントパフォーマンス分析における従来のデータ収集手法と本研究の位置づけ

スプリントパフォーマンス分析における従来のデータの収集手法をビデオ映像を用いた手法 [1,2,7-9,12-16], モーションキャプチャシステムを用いた手法 [3,9,17], フォースプレートを用いた手法 [3,9,15,16], オプトジャンプを用いた手法 [4,5,15], トレッドミルを用いた手法 [17-20] に大別し, スプリントトレーニング時に利用するという観点からそれぞれの特徴または問題点について述べる。

ビデオ映像を用いた手法 [1,2,7-9,12-16] は, 人がビデオ映像を確認することで, ある区間内での総歩数, 経過時間, 平均速度, 平均ピッチ, 平均ストライドなどのデータが収集可能である。この手法では, 基本的にビデオ映像のみからデータの収集・分析が可能であるため, テレビやウェブ上で公開されている実際の競技映像からの分析例もある [8,13,14]。セットアップがカメラの設置のみであるため容易であり, また, 実際の競技時と同じ環境におけるデータの収集が可能である。しかし, ビデオ映像から手動で接地位置の抽出などを行う必要があるため, フィードバックまでに時間がかかるという問題がある。

モーションキャプチャシステムを用いた手法 [3,9,17] は, アスリートの身体に複数の反射マーカを取り付け, スプリント動作中のアスリートを複数の赤外線カメラで撮影することで, 反射マーカの三次元位置データが収集可能である。これによって, スプリント動作の詳細な分析が可能である。また, 収集したデータは専用のソフトウェアから実時間で確認することができる。しかし, 反射マーカの取り付けやキャリブレーションが必要であるため, セットアップが煩雑になる。また, 身体に反射マーカを取り付けることで, アスリートに少なからず違和感を与えてしまう可能性があり, 衣服にも制限があるため, 実際の競技環境の再現性は低い。

フォースプレートを用いた手法 [3,9,15,16] は, 図 2.1 のようにフォースプレートが設置されたトラックの上をアスリートが通過し, フォースプレートを踏むことで, ピッチやストライドなどに加えて地面反力のデータが収集可能である。サンプリング周波数は 1000 ヘルツ程度で, フォースプレートを複数台並べることで計測範囲が拡張可能である。現在では, 鹿屋体育大学のスポーツパフォーマンス研究棟に 50 枚のフォースプレート (50 メートル) が設置された陸上トラックがある。

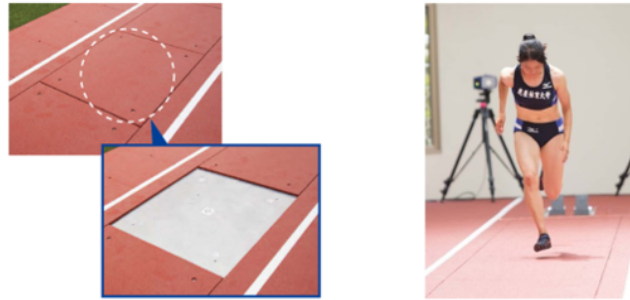


図 2.1 フォースプレートと使用風景 [23]

これによって、詳細なデータを比較的広範囲で収集可能となっている．この手法では、すでにフォースプレートを設置してある場合、セットアップに必要な作業は極めて少ない．また、実際の競技環境の再現性も高い．さらに、収集したデータの即時フィードバックが可能である．しかし、フォースプレートの価格は 1 メートルあたり数百万円以上であるため、100 メートルのフォースプレートが設置された陸上トラックを用意するには数億円以上の費用がかかる．

オプトジャンプを用いた手法 [4,5,15] は、図 2.2 のように送信バーと受信バーを向かい合わせに配置し、その間をアスリートが通過することで足の接地の有無を感知し、ピッチやストライドなどのデータが収集可能である．サンプリング周波数は 1000 ヘルツで、ユニットの延長により最長 100 メートルまで計測可能である．この手法では、オプトジャンプを設置してパソコンと接続するだけで計測可能であるため、セットアップが容易である．また、実際の競技環境の再現性も高い．さらに、収集したデータは専用のソフトウェアから実時間で確認することができる．しかし、オプトジャンプの価格は 1 メートルあたり数十万円以上であるため、100 メートルのオプトジャンプが設置された陸上トラックを用意するには数千万円以上の費用がかかる．

トレッドミルを用いた手法 [17-20] は、図 2.3 のようにトレッドミルベルト上でスプリント走を行うことで様々なデータが収集可能である．トレッドミルで収集可能なデータは基本的に実時間でのフィードバックが可能である．しかし、トレッドミルの種類によって収集可能なデータが異なるため、モーションキャプチャシステムや他のセンサと組み合わせて用いることが多い [17,18,20]．したがって、計測し



図 2.2 オプトジャンプの設置風景 [22]

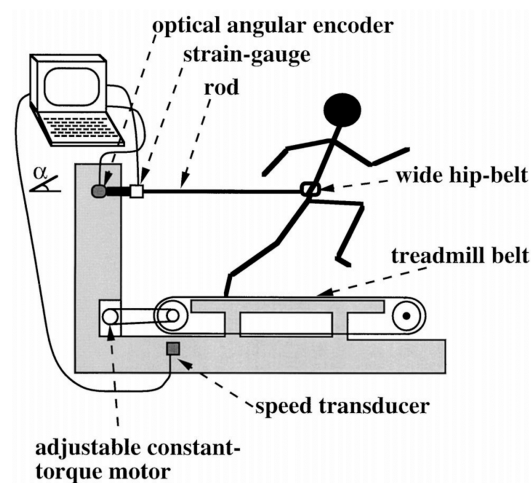


図 2.3 トレッドミル [19]

たデータすべての即時フィードバックが可能とは限らず，場合によってはセットアップが煩雑になる．また，ベルトを取り付けることによるスプリント動作の制限やスターティングブロックの使用が不可能である．さらに，Morin ら [20] は 100 メートル走をトレッドミルで行った場合とフィールドで行った場合を比較し，トレッドミルではスプリントパフォーマンスが下がることを報告している．したがって，実際の競技環境の再現性は低い．

ここからは，スプリントトレーニング時に利用することを前提として，従来手法に対する本研究の位置づけについて述べる．スプリントトレーニング時に用いるためには以下の 3 つの条件を満たす必要がある．

条件 1 セットアップが容易

条件 2 実際の競技環境の再現性が高い

条件 3 データの即時フィードバックが可能

従来手法のなかでも，これら 3 つの条件をすべて満たす手法はフォースプレートを用いた手法 [3, 9, 15, 16] とオプトジャンプを用いた手法 [4, 5, 15] に絞られる（図 2.1）．とはいえ，より効果的なスプリントトレーニングを実現するためには，ピッチおよびストライドに加えてそれらの決定要因となるスプリント動作がフィードバック可能である必要がある．しかし，これらの手法では，スプリント動作のデータを収集するためにカメラの用意が必要である．また，フォースプレートおよびオプトジャンプともに高価なため，実際のトレーニングの現場に普及していない．

一方で，コンピュータビジョンの分野において，カメラ映像から実時間で人物の三次元姿勢の推定を行う手法が提案されている [24–26]．これらの手法は，基本的に人物の動作に関する制約は設けておらず，用途の限定はなされていない．これに対して，本研究では，対象がスプリント動作中の人物に限定される．そのため，以下のような仮定を設けることが可能である．

- 人物は繰り返し動作を行っている
- 人物はある特定の方向にのみ移動する

これらの条件の下で，ピッチおよびストライドの推定を実現する必要がある．そのため，カメラと人物の幾何学的関係やビデオ映像の時系列情報などを利用することで，コンピュータビジョン分野で提案されている人物姿勢推定手法よりも高精度が

表 2.1 スプリントトレーニング時に用いるための条件

手法	セットアップが容易	競技環境の再現性	即時フィードバック	価格帯
ビデオ映像	○	○		数十万円程度～
モーションキャプチャ			○	数千万円程度～
フォースプレート	○	○	○	数億円程度～
オプトジャンプ	○	○	○	数千万円程度～
トレッドミル			○	数百万円程度～

つ頑健なピッチおよびストライドの推定を行うことが可能である。

図 2.5 にスプリントトレーニングの現場への導入の難易度，ピッチおよびストライドの推定精度，分析に必要な人的コストの 3 つの評価軸に基づいて，提案手法と従来の各手法の関係を示す．ただし，トレッドミルを用いた手法は，ピッチおよびストライドの推定にはモーションキャプチャシステムやフォースプレートなどを用いるため，除外した．これより，ピッチおよびストライドの推定することが目的の場合，フォースプレートを用いる手法 [3,9,15,16] およびオプトジャンプを用いる手法 [4,5,15] が最も有効である．しかし，これらの手法では，スプリント動作のデータを収集するためにカメラの用意が必要である．また，実際のトレーニングの現場に必要な計測機器が高価であるため，導入することが困難な場合がある．一方で，提案手法では，計測機器がカメラのみであることから，比較的精度は低いものの簡易的かつ安価であることから導入が容易である（図 2.4）．したがって，提案手法によって，より多くのスプリントトレーニングの現場でピッチ，ストライド，スプリント動作のデータの収集・分析が可能になることが期待される．

最後に，ピッチおよびストライドの推定における目標精度について述べる．図 2.6 に示した Step frequency はピッチを表し，Step length は歩幅を表す．特に，赤枠内の値はピッチおよび歩幅それぞれの最小値および最大値の平均を表し，括弧内の値はそれらの標準偏差を表す．本研究では，この標準偏差の値以内の推定誤差，つまりピッチは 0.23 ヘルツ以内，ストライドは 0.11 メートル以内の推定誤差を目標精度とする．

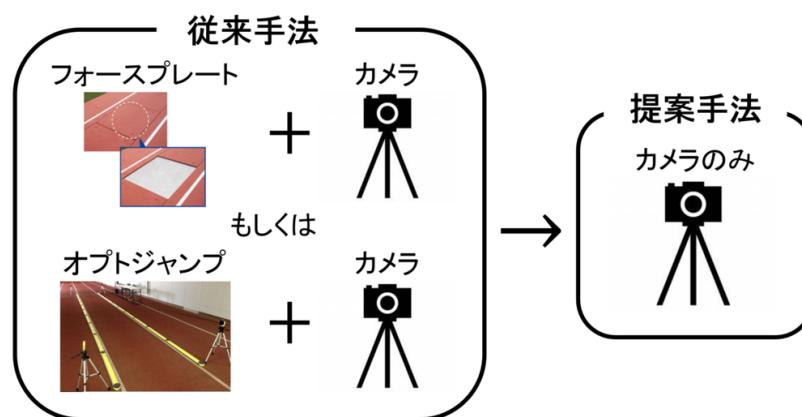


図 2.4 従来手法と提案手法の比較

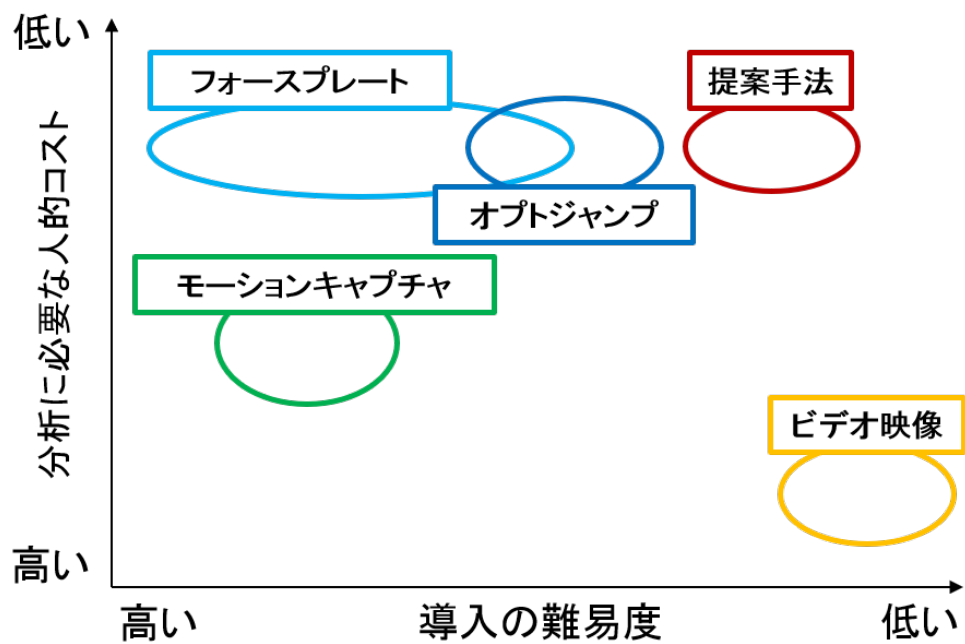
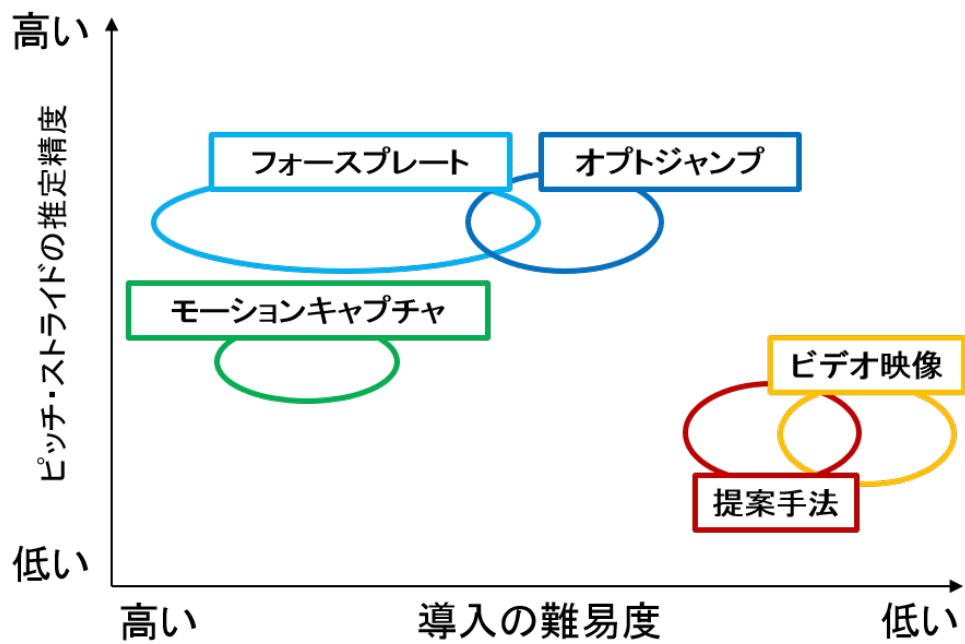


図 2.5 ピッチ・スライドの推定手法の位置づけ

Variable	Mean all (SD) (n = 9)	Mean E (SD) (n = 4)	Mean SE (SD) (n = 5)	Difference (%E)	ES (Cohen's d)
Sprint performance					
10 m time (s)	1.85 (0.10)	1.79 (0.02)	1.90 (0.12)	-6.1	1.10
15 m time (s)	2.50 (0.10)	2.40 (0.02)	2.58 (0.09)	-7.5	1.80
20 m time (s)	3.05 (0.13)	2.94 (0.02)	3.13 (0.13)	-6.5	1.46
30 m time (s)	4.08 (0.18)	3.93 (0.03)	4.20 (0.15)	-6.9	1.50
40 m time (s)	5.10 (0.25)	4.90 (0.07)	5.27 (0.21)	-7.6	1.48
40 m maximal velocity (m/s)	9.78 (0.52)	10.24 (0.19)	9.33 (0.31)	8.9	3.64
Spatiotemporal parameters					
Contact time					
t_{c_blocks} (ms)	396 (33)	376 (13)	412 (36)	-9.6	1.09
Maximal contact time (ms)	193 (28)	191 (18)	193 (30)	-1.0	0.07
Minimal contact time (ms)	94 (4)	94 (5)	94 (4)	0.0	0.0
Aerial time					
t_{a_blocks} (ms)	75 (20)	81 (13)	70 (25)	13.6	0.55
Maximal aerial time (ms)	124 (7)	120 (6)	128 (5)	-6.7	1.14
Minimal aerial time (ms)	50 (13)	42 (13)	56 (10)	-33.3	1.04
Step frequency					
Sf_blocks (Hz)	2.14 (0.17)	2.20 (0.12)	2.09 (0.21)	5.0	0.64
Minimal frequency (Hz)	3.92 (0.34)	3.94 (0.44)	3.90 (0.44)	1.0	0.11
Maximal frequency (Hz)	4.87 (0.23)	4.95 (0.12)	4.80 (0.30)	3.0	0.65
Step length					
Sl_blocks (m)	0.99 (0.11)	0.96 (0.16)	1.01 (0.06)	-5.2	0.45
Minimal step length (m)	1.11 (0.12)	1.18 (0.07)	1.06 (0.14)	10.2	1.00
Maximal step length (m)	2.19 (0.11)	2.22 (0.10)	2.17 (0.12)	2.3	0.45
Force- and power-velocity parameters					
Averaged F_z (N/kg)	17.3 (0.5)	17.2 (0.4)	17.5 (0.5)	-2.0	0.59
Averaged F_y (N/kg)	3.3 (0.3)	3.5 (0.6)	3.1 (0.2)	9.7	1.75
Averaged P_y (W/kg)	20.8 (2.2)	22.5 (1.1)	19.4 (1.9)	13.9	1.99
Averaged RF (% F_{TOT})	19.2 (1.3)	20.3 (0.7)	18.3 (1.0)	9.7	2.31
V_0 (m/s)	11.38 (0.84)	11.90 (0.23)	10.99 (0.97)	7.6	0.12
F_{y0} (N)	776 (93)	855 (60)	744 (90)	13.0	1.19
Relative F_{y0} (N/kg)	9.77 (0.84)	9.95 (0.67)	9.62 (1.06)	3.3	0.39
Theoretical $P_{y_{max}}$ (W)	2328 (295)	2550 (283)	2150 (158)	15.7	1.35
Measured $P_{y_{peak}}$ (W)	2421 (321)	2695 (244)	2201 (158)	18.3	1.53
Relative $P_{y_{max}}$ (W/kg)	29.3 (2.3)	31.1 (0.8)	27.8 (2.2)	10.6	1.43
Relative $P_{y_{peak}}$ (W/kg)	30.5 (2.9)	32.9 (1.2)	28.5 (2.1)	13.4	1.51
RF0 (%)	70.6 (5.4)	71.6 (2.6)	70.1 (7.3)	2.1	0.02
D_{RF}	-0.067 (0.007)	-0.064 (0.003)	-0.069 (0.009)	-7.8	0.71
Mean difference $RF_{xyz} - RF_{xy}$ (% RF_{xyz})	0.25 (0.06)	0.29 (0.03)	0.21 (0.03)	27.6	1.33
Measured block parameters					
Block clearing anteroposterior velocity (m/s)	3.37 (0.27)	3.61 (0.08)	3.17 (0.19)	12.1	1.60
$F_{y_{blocks}}$ (N)	679 (110)	783 (59)	596 (46.9)	23.9	1.70
Relative $F_{y_{blocks}}$ (N/kg)	8.56 (1.18)	9.59 (0.53)	7.74 (0.82)	19.2	1.56
$P_{y_{blocks}}$ (W)	1156 (270)	1415 (118)	949 (124)	32.9	1.72
Relative $P_{y_{blocks}}$ (W/kg)	14.5 (3.0)	17.3 (1.3)	12.3 (1.9)	28.8	1.64
RF_{blocks} (%)	58.9 (5.4)	63.0 (2.6)	54.9 (4.3)	12.8	1.46

図 2.6 スプリントパフォーマンス分析における様々なデータ（上の赤枠：ピッチの最小値・最大値の平均と標準偏差，下の赤枠：歩幅の最小値・最大値の平均と標準偏差）[15]

第3章 多視点全天球カメラ映像からのピッチ・ストライドの推定

本章では，多視点全天球カメラ映像からピッチおよびストライドを推定する手法について述べる．本研究では，図 3.1 に示したように，まず撮影した映像から人物の二次元関節位置を推定（処理 1）する．次に，二次元関節位置推定の際に発生する問題に対処することで，推定位置の補正（処理 2）を行う．そして，足の接地の有無を判定するために，三次元足関節（足首）位置を推定（処理 3）し，その軌跡を求める（処理 4）．最後に，三次元足関節位置の軌跡から，ピッチおよびストライドを計算するために，接地時刻の推定（処理 5）を行う．以下では，（処理 2）～（処理 5）について詳しく述べる．ただし，各カメラはキャリブレーション済みとし，カメラ映像は同期されているものとする．

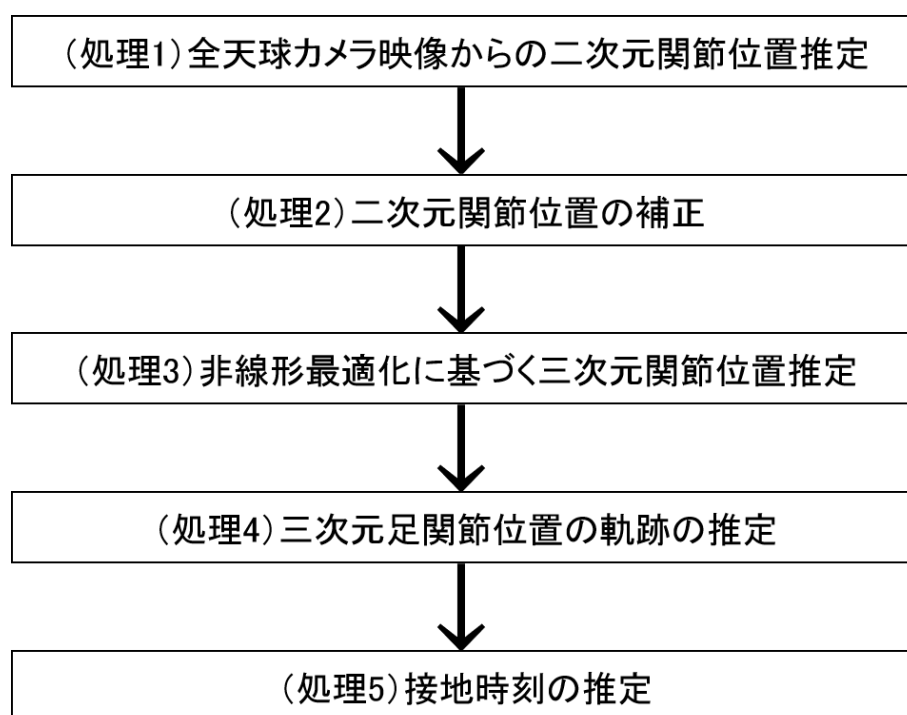


図 3.1 処理手順

3.1 多視点全天球カメラ映像からの二次元関節位置推定

本研究では、人物の進行方向に対し、カメラを図 3.2 のように配置し撮影を行う。そして、Cao ら [27] の二次元関節位置検出アルゴリズムを用いて、撮影した各カメラ映像から人物の二次元関節位置推定を行う。このとき、ピッチおよびストライドを推定するうえで、以下の問題が発生する。

問題 1 カメラと人物間の距離に依存して関節位置推定精度が低下 (図 3.3)

問題 2 鼻が正しく検出されていないことによる人物の正面・背面判定の誤り (図 3.4)

問題 3 上の場合を除いて、関節のオクルージョンなどによる左右判定の誤り (図 3.5)

問題 1 に関しては、経験的に安定して関節位置推定を行うことができる範囲を設定する。そして、事前に推定した首の三次元位置を基準に設定範囲内でのみ二次元関節位置推定を行うようにする。

以下では、残り 2 つの問題の対処手法について述べる。

3.1.1 カメラと人物の幾何学的な関係に基づく二次元関節位置の補正

二次元関節位置推定を行った際に、鼻が正しく検出されていないことによって人物の正面・背面判定に誤り (図 3.4) が生じる。ここでは、その判定の誤りを補正する手法について述べる。

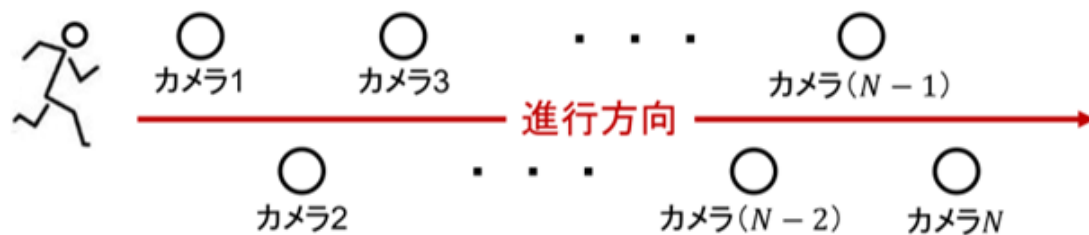


図 3.2 撮影環境を上から見た際のカメラの配置 (カメラ台数が N 台の場合)

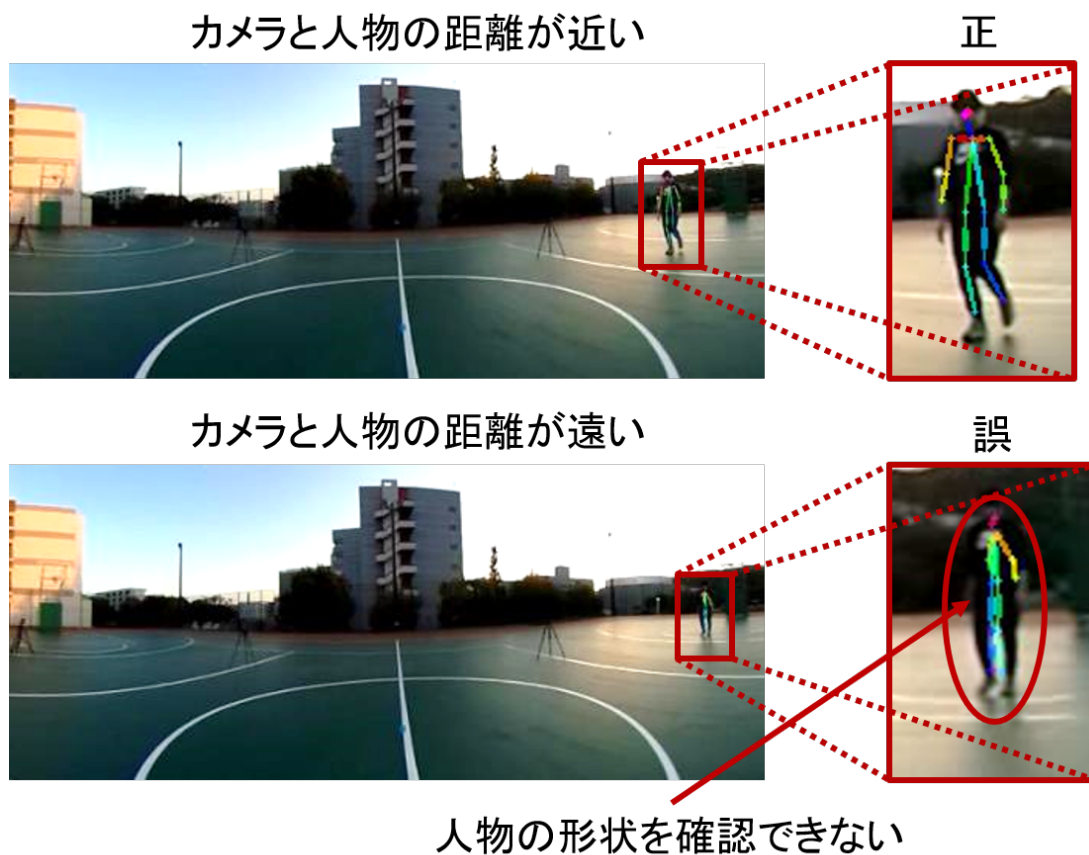


図 3.3 カメラと人物間の距離に依存して関節位置推定精度が低下

Cao ら [27] の手法では、基本的にカメラ画像上で人物の鼻が検出されるかどうかで、正面または背面を撮影しているのかを判定している。実際に、図 3.4 によると、鼻の検出の有無によって推定された関節位置が左右逆になっている。一方で、本研究におけるカメラ配置を考慮すると、進行方向成分を基準にスタート位置からカメラ位置の間に人物がいる場合、カメラでは人物の正面を撮影していることになる。したがって、問題 1 を解決する際に定義した二次元関節位置推定を行う範囲内であり、かつ進行方向成分を基準にスタート位置からカメラ位置の間に人物がいる場合は、鼻が検出されていなければならない。そこで、問題 1 を解決する際に推定した首の三次元位置に基づいて、人物がその範囲内にいるのかどうかを判定する。そし

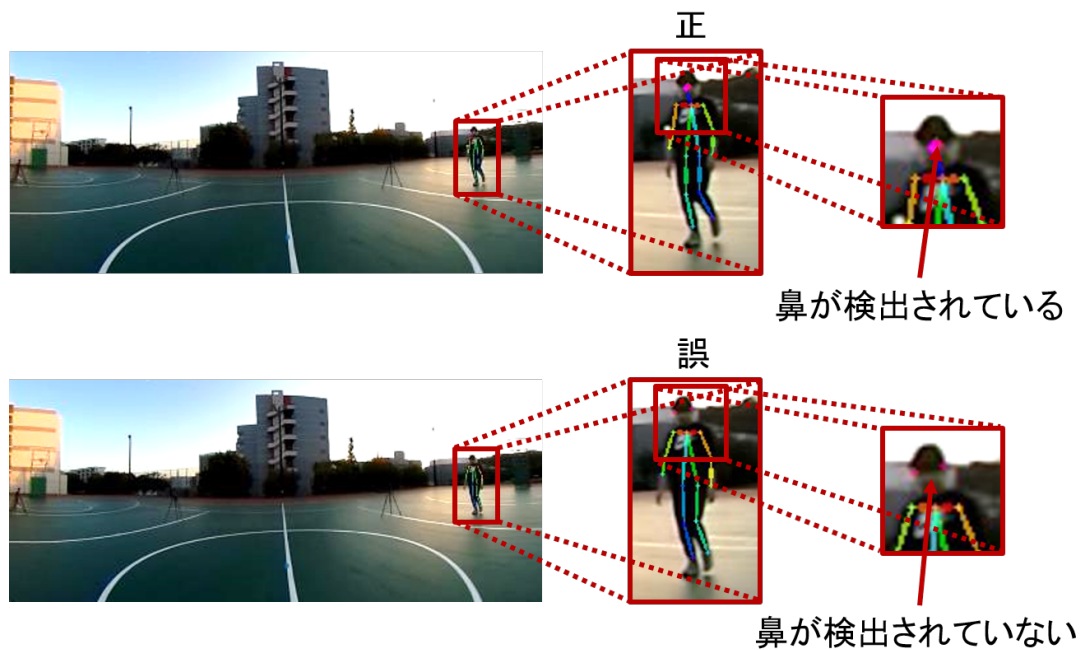


図 3.4 鼻が正しく検出されていないことによる人物の正面・背面判定の誤り

て、人物がその範囲内にいるにもかかわらず、鼻が検出されていない場合には人物の正面・背面の判定を誤っているとみなし、推定した二次元関節位置の左右を反転する。一方で、進行方向成分を基準にカメラ位置を人物が通り過ぎてからしばらくした場合、カメラでは人物の背面を撮影していることになるが、このとき鼻が検出されることはないはずである。したがって、進行方向成分を基準に人物がカメラの前を通過し、鼻が検出されなくなってからしばらくした場合、カメラでは人物の背面を撮影しているとみなす。そして、それ以降で鼻が検出された場合には人物の正面・背面の判定を誤っているとみなし、推定した二次元関節位置の左右を反転する。

3.1.2 エピポーラ拘束に基づく投票処理による二次元関節位置の補正

二次元関節位置推定を行った際に、問題 1 と問題 2 の場合を除いて、関節のオクルージョンなどが原因となり左右判定に誤りが生じる（図 3.5）。ここでは、その判

定の誤りを補正する手法として、あるカメラ画像で検出した関節が左右正しく検出されているかどうかを判断するために、エピポーラ拘束式と推定した関節の信頼度を利用した投票処理を行う。

ここでは、各カメラ間の位置・姿勢情報から求めた基本行列を $\mathbf{E}$ とする。また、カメラ i 画像とカメラ j 画像で共通して見られる対応点を各カメラ座標系に変換した座標値をそれぞれ $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ とする。このとき、カメラの位置・姿勢情報や対応点の検出誤差などが無いと仮定すると、以下のエピポーラ拘束式が成り立つ。

$$\mathbf{x}_i^T \mathbf{E} \mathbf{x}_j = 0 \quad (3.1.1)$$

ここからは、エピポーラ拘束に基づく投票処理について述べる。投票処理は問題 3 が発生しているカメラ以外では比較的正しく関節が検出されている場合に有効である。したがって、頻繁に問題 3 が発生する腕関節ではなく、足関節のみを対象として、投票処理による補正を行う。

投票処理を行う前に、まず、エピポーラ拘束を用いて二次元足関節位置の検出結果の確認を行う。具体的には、同時刻に関節位置が検出されているフレームの集合のなかで、確認を行う対象となる特定のフレームに対して、それ以外のフレームで検出された足関節位置に対応するエピポーラ線を投影する。そして、各エピポーラ線に近い関節が左右どちらの足関節であるかを判定する。実際に、ある時刻に 3 つのカメラで関節が検出され、それらのカメラで検出された関節位置と実際の人物の関節位置の関係が図 3.6 のような場合に、カメラ 2 画像に対してエピポーラ線を投影した結果が図 3.7 である。各エピポーラ線に近い関節の判定はエピポーラ拘束を利用して行う。ここでは、確認を行う対象となるカメラ番号を i 、カメラ i を除いて同時刻に足関節位置が検出されたカメラ番号を j とし、カメラ i 画像で検出された右足関節のカメラ i 座標系における座標値を $\mathbf{x}_i$ 、左足関節の場合の座標値を $\mathbf{y}_i$ とする。このとき、 $\mathbf{x}_i^T \mathbf{E} \mathbf{x}_j$ と $\mathbf{y}_i^T \mathbf{E} \mathbf{x}_j$ 、 $\mathbf{x}_i^T \mathbf{E} \mathbf{y}_j$ と $\mathbf{y}_i^T \mathbf{E} \mathbf{y}_j$ の大小関係によって、エピポーラ線に近い関節を判定する。たとえば、

$$\mathbf{x}_i^T \mathbf{E} \mathbf{x}_j < \mathbf{y}_i^T \mathbf{E} \mathbf{x}_j \quad (3.1.2)$$

である場合、カメラ j 画像で検出された右足関節に対応するエピポーラ線はカメラ i 画像で検出された右足関節に近いことがわかる。実際に、図 3.7 の場合には、以

下の 4 つの不等式を得る.

$$\mathbf{x}_2^T \mathbf{E} \mathbf{x}_1 > \mathbf{y}_2^T \mathbf{E} \mathbf{x}_1 \quad (3.1.3)$$

$$\mathbf{x}_2^T \mathbf{E} \mathbf{y}_1 < \mathbf{y}_2^T \mathbf{E} \mathbf{y}_1 \quad (3.1.4)$$

$$\mathbf{x}_2^T \mathbf{E} \mathbf{x}_3 > \mathbf{y}_2^T \mathbf{E} \mathbf{x}_3 \quad (3.1.5)$$

$$\mathbf{x}_2^T \mathbf{E} \mathbf{y}_3 < \mathbf{y}_2^T \mathbf{E} \mathbf{y}_3 \quad (3.1.6)$$

これらは, カメラ 1 画像およびカメラ 3 画像で検出された右足関節に対応するエピポーラ線はともにカメラ 2 画像で検出された左足関節に近く, 左足関節に対応するエピポーラ線はともに右足関節に近いことを示している.

次に, 事前に得た不等式をもとに, Cao ら [27] の手法で取得可能な信頼度を用いて投票処理を行う. ここで, カメラ j 画像で検出された右足関節がカメラ i 画像で検出された右足関節と一致する可能性を C_{right} , 一致しない可能性を E_{right} とし, 左足関節の場合も同様にそれぞれ C_{left} , E_{left} とする. そして, 以下のように, 事前に得た不等式をもとに投票処理を行う.

$$\mathbf{x}_i^T \mathbf{E} \mathbf{x}_j \leq \mathbf{y}_i^T \mathbf{E} \mathbf{x}_j \Rightarrow C_{right} \text{に } \mathbf{x}_j \text{に対応する信頼度を足す}$$

$$\mathbf{x}_i^T \mathbf{E} \mathbf{x}_j > \mathbf{y}_i^T \mathbf{E} \mathbf{x}_j \Rightarrow E_{right} \text{に } \mathbf{x}_j \text{に対応する信頼度を足す}$$

$$\mathbf{x}_i^T \mathbf{E} \mathbf{y}_j < \mathbf{y}_i^T \mathbf{E} \mathbf{y}_j \Rightarrow E_{left} \text{に } \mathbf{y}_j \text{に対応する信頼度を足す}$$

$$\mathbf{x}_i^T \mathbf{E} \mathbf{y}_j \geq \mathbf{y}_i^T \mathbf{E} \mathbf{y}_j \Rightarrow C_{left} \text{に } \mathbf{y}_j \text{に対応する信頼度を足す}$$

この投票処理はカメラ j に該当するカメラ, つまりカメラ i を除いて同時刻に足関節位置が検出されているフレームの集合の要素の数分行う. たとえば, 図 3.7 の場合には, 以下のように投票処理を行う.

$$\mathbf{x}_2^T \mathbf{E} \mathbf{x}_1 > \mathbf{y}_2^T \mathbf{E} \mathbf{x}_1 \Rightarrow E_{right} \text{に } \mathbf{x}_1 \text{に対応する信頼度を足す}$$

$$\mathbf{x}_2^T \mathbf{E} \mathbf{y}_1 < \mathbf{y}_2^T \mathbf{E} \mathbf{y}_1 \Rightarrow E_{left} \text{に } \mathbf{y}_1 \text{に対応する信頼度を足す}$$

$$\mathbf{x}_2^T \mathbf{E} \mathbf{x}_3 > \mathbf{y}_2^T \mathbf{E} \mathbf{x}_3 \Rightarrow E_{right} \text{に } \mathbf{x}_3 \text{に対応する信頼度を足す}$$

$$\mathbf{x}_2^T \mathbf{E} \mathbf{y}_3 < \mathbf{y}_2^T \mathbf{E} \mathbf{y}_3 \Rightarrow E_{left} \text{に } \mathbf{y}_3 \text{に対応する信頼度を足す}$$

最終的に, 以下の不等式が成り立つ場合のみ, カメラ i 画像では足関節の左右判定を誤っているとし, 検出した下半身の関節の左右を反転する.

$$C_{right} < E_{right} \text{ かつ } C_{left} < E_{left} \quad (3.1.7)$$

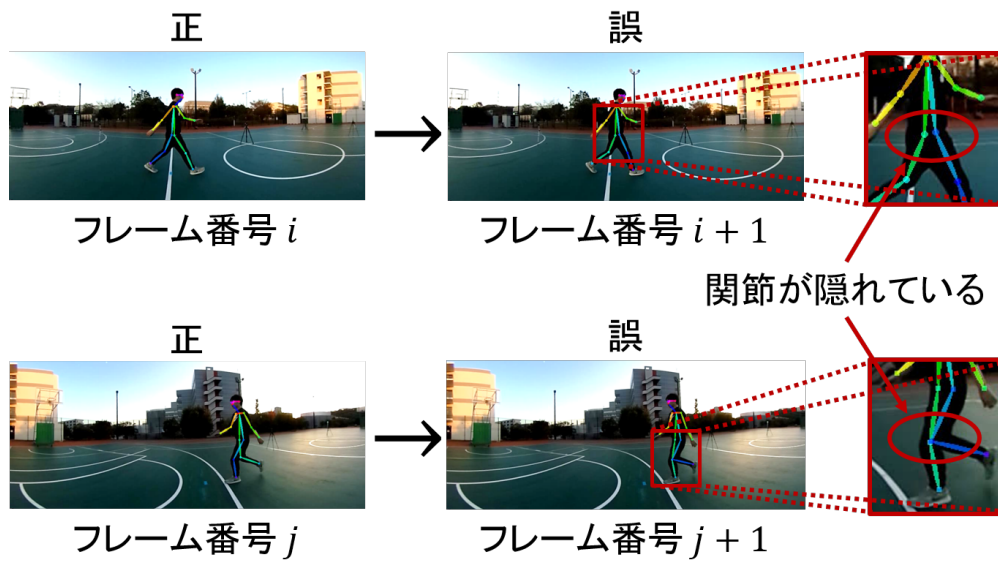


図 3.5 関節のオクルージョンなどによる左右判定の誤り

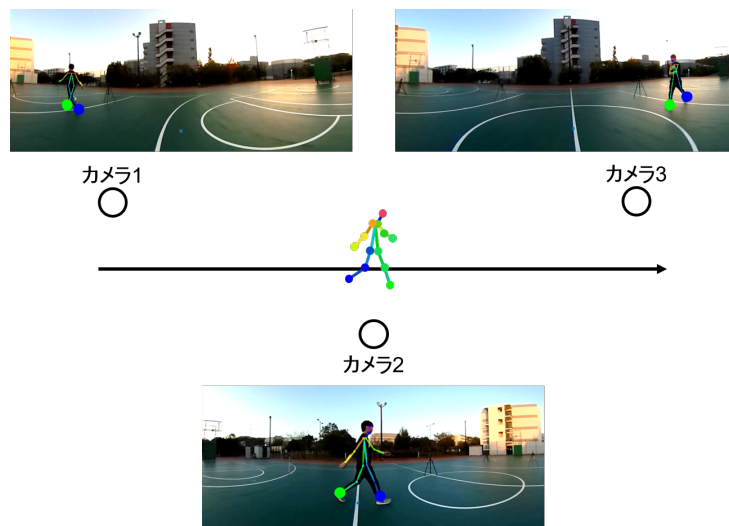
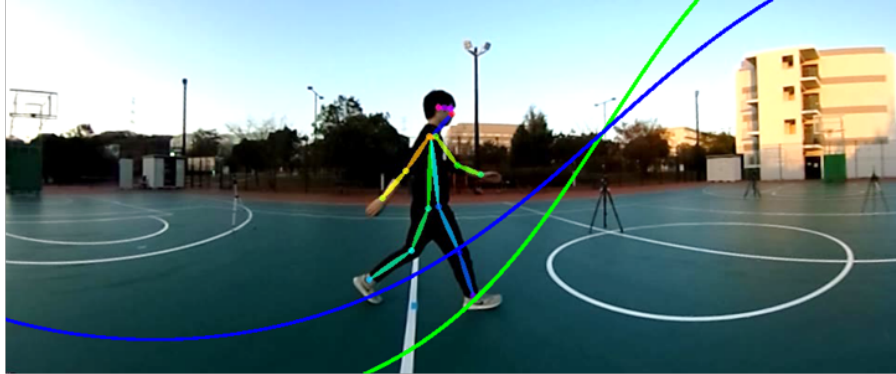
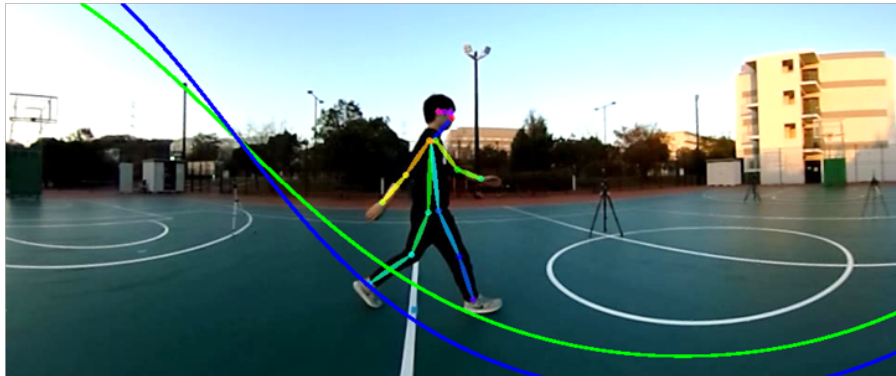


図 3.6 各カメラ画像で検出された関節位置と実際の人物の関節位置の関係の例

カメラ1画像上の足関節位置に対応するエピポーラ線



カメラ3画像上の足関節位置に対応するエピポーラ線



(緑のエピポーラ線は右足関節, 青のエピポーラ線左足関節に対応)

図 3.7 エピポーラ線を投影した結果の例

3.2 三次元足関節（足首）位置の軌跡の推定

ここでは、足の接地の有無を判定するために行う三次元足関節位置の軌跡の推定について述べる。まず、各カメラの位置・姿勢情報および推定した二次元関節位置から、各フレームにおいて検出された各関節の三次元位置を線形演算によって求める。この結果を初期値として、より正確な三次元関節位置を得るために、再投影誤差を定義し、非線形最小化を行う。

推定した二次元関節位置と線形演算によって求めた三次元関節位置を各カメラ座標系における原点中心の単位球面上に投影する．そして，以下のように，それぞれの点の投影先における座標間の距離を再投影誤差 E_p と定義する．

$$E_p = \sum_{i \in J} \frac{1}{|C_i|} \sum_{j \in C_i} |\mathbf{x}_{i,j} - \text{proj}(\mathbf{P}_i)|^2 \quad (3.2.1)$$

ただし， J は検出された関節番号の集合， C_i は関節 i の三次元位置推定に用いたカメラ番号の集合， $\mathbf{x}_{i,j}$ はカメラ j で検出された関節 i の二次元位置をカメラ j 座標系に投影し規格化した座標値， $\mathbf{P}_i$ は関節 i の三次元位置， $\text{proj}()$ は三次元関節位置を各カメラ座標系に投影し規格化する関数を表す．

次に，足の接地の有無をより正確に推定するために，三次元足関節位置の軌跡を B スプライン曲線で近似する．B スプライン曲線は制御点から決定される．そこで，外れ値の影響を減らすために，フレーム間における三次元足関節位置間の距離が極端に大きいものは制御点として採用しない（図 3.8 上）．各フレームにおける三次元足関節位置から外れ値を除いたものを制御点として，B スプライン曲線を以下のように定義する．

$$\begin{aligned} X(t) &= \sum_{i=-2}^{n+2} N^3(t-i)P_X(i) \\ Y(t) &= \sum_{i=-2}^{n+2} N^3(t-i)P_Y(i) \quad (-1 \leq t \leq n+1) \\ Z(t) &= \sum_{i=-2}^{n+2} N^3(t-i)P_Z(i) \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

$$N^3(t) = \begin{cases} \frac{1}{6}(3|t|^3 - 6|t|^2 + 4) & (-1 \leq t \leq 1) \\ -\frac{1}{6}(|t| - 2)^3 & (-2 \leq t \leq -1, 1 \leq t \leq 2) \\ 0 & (t \leq -2, 2 \leq t) \end{cases} \quad (3.2.3)$$

ただし， X, Y, Z は B スプライン曲線， $n+1$ はフレーム数， $N^3()$ は基底関数， P_X, P_Y, P_Z は三次元足関節位置の各軸の座標値を表す．また，B スプライン曲線が $X(0)$ と $X(n)$ を必ず通るように， $X(-2) = X(0), X(-1) = X(0), X(n+1) = X(n), X(n+2) = X(n)$ と定義する．これは， Y, Z についても同様である．

3.3 接地時刻の推定

本節では，推定した三次元足関節位置の軌跡を用いて，接地時刻を推定する手法について述べる．ピッチは足が接地してから次にもう一方の足が接地するまでの経過時間の逆数と定義し，ストライドは足が接地した位置から次に同じ足が接地した位置までの距離と定義する [9]．したがって，接地時刻と接地位置が推定できればピッチおよびストライドを計算することができる．接地位置は各接地時刻に対応する三次元足関節位置から得られる．

足が接地している場合，フレーム間の三次元足関節位置の変位は小さくなるはずである．そこで，前節で推定した三次元足関節位置の軌跡から，各フレーム間における三次元足関節位置間の距離を計算する．次に，ピッチは周期運動かつ低周波であるため，高速フーリエ変換を行うことで，ノイズとなる高周波成分のみを除去する（図 3.8 下）．最後に，各フレーム間における三次元足関節位置間の距離に対して，接地の有無を判定するための閾値を適当に設定する．したがって，その閾値を下回っている範囲では接地していると判定する．

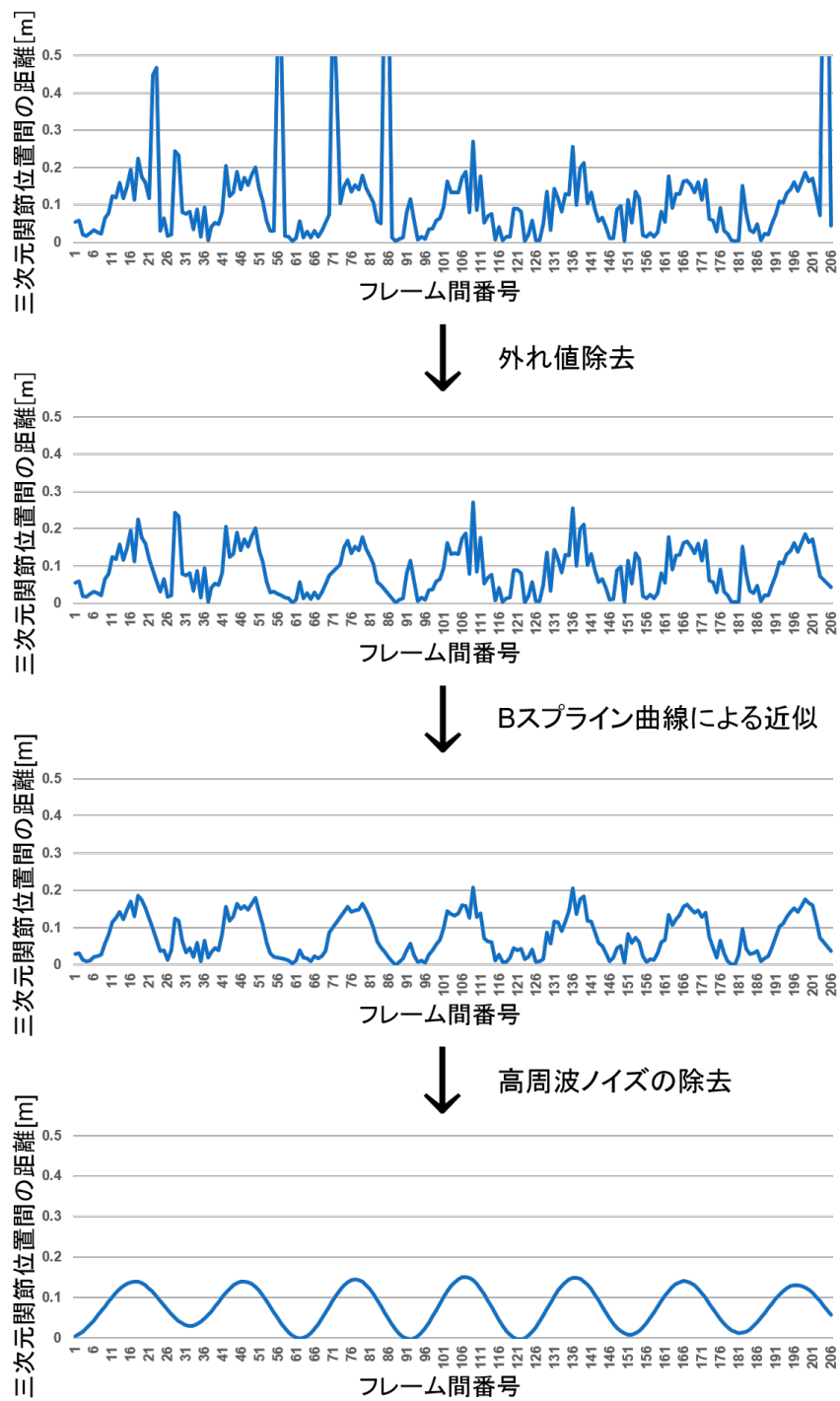


図 3.8 データ処理の例

第 4 章 実験

提案手法の有効性を示すために、三次元足関節位置、ピッチ、ストライドの推定結果の精度評価を行った。以下では、まず実験環境について述べる。次に、三次元足関節位置推定の精度評価について述べ、最後に、ピッチ・ストライドの推定結果の精度評価について述べる。本実験では、各カメラの位置・姿勢情報は各カメラ画像上の特徴点を手動で設定し、その対応関係から求めた。また、各カメラ映像も手動で同期させた。

4.1 実験環境

本実験では、5 台の全天球カメラ（RICOH THETA S, RICOH 社製、解像度 1920×1080 、フレームレート 30fps）を用いた。また、撮影対象は歩行動作とし、歩数は 13 歩であった。そして、各カメラで撮影された 207 フレームを処理対象とした。さらに、図 4.1 で示すように、カメラの位置関係は進行方向の間隔を約 6 メートル、進行方向に対して垂直方向の間隔を約 4 メートルになるように設置した。これは、2 章で示したストライドの推定における目標精度を満たすため、0.11 メートルの動きを過半数のカメラで検出できるように設定した。図 4.2 においてカメラ 1 およびカメラ 3 の中間地点を走者が通過する場合を考える。この地点において、走者が約 0.02 メートル移動した場合、カメラ 1 の画像上で約 1 画素程度の動きが観測される。結果的に、走者が 0.11 メートル移動した場合、カメラ 1 の画像上では約 5 画素程度の動きが観測される。したがって、目標精度以上の分解能で走者の動きを観測することが可能である。

4.2 三次元足関節位置推定の精度評価

提案手法を用いて推定した三次元右足関節位置の誤差を図 4.3 に、三次元左足関節位置の誤差を図 4.4 に示す。ここでは、実際に三次元足関節位置を推定する際に用いたカメラ画像から、二次元関節位置の検出手動で行い、推定した三次元足関節位置を真値とした。

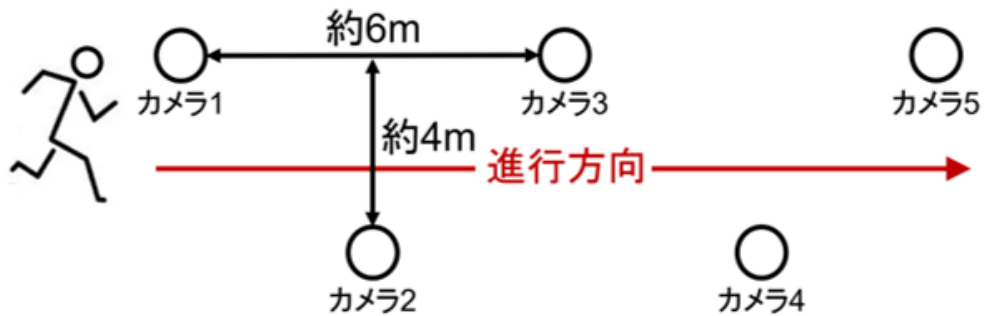


図 4.1 実験環境におけるカメラの配置

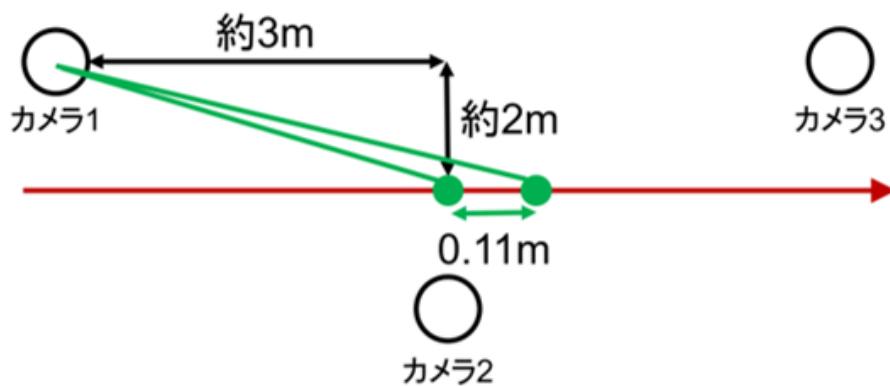


図 4.2 カメラ配置の決定要因

その結果，三次元足関節位置の平均誤差は約 0.05 メートルであった．これより，目標精度である 0.11 メートルを満たしていることが確認された．

図 4.3 および図 4.4 における誤差の主な原因としては以下の二つが考えられる．

- 真値として二次元関節位置を手動で検出したこと
- Cao ら [27] の手法で検出した二次元関節位置の誤差

以下では，後者について詳しく述べる．

まず，Cao ら [27] の手法で検出した二次元関節位置では，稀に一方の足関節から両足関節を検出してしまう場合がある（図 4.5）．実際に，本実験においては合計 10 フレームでそういった場合が確認された．また，足関節の検出位置のずれが比較的大きい場合がある（図 4.6）．検出位置のずれはそれそのものが誤差の原因となるだ

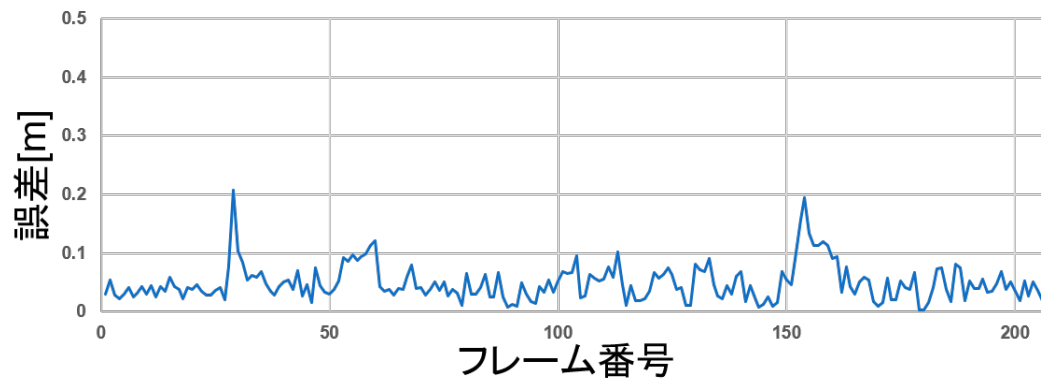


図 4.3 三次元右足関節位置の誤差



図 4.4 三次元左足関節位置の誤差

けではなく，3.1.2 項の補正処理を正常に行うことができない原因となることが考えられる．そこで，表 4.1 に，3.1.2 項の補正処理を正常に行うことができなかったフレームと，そのフレームにおける三次元足関節位置の誤差の値を示す．それらのフレームを調査した結果，足関節の検出位置のずれが主な原因であることが判明した．特に，投票される側のカメラ画像で検出された両足関節の距離が近い場合が多くみられた（図 4.7）．これは，補正処理を行ううえで投票する側のカメラ画像での検出位置のずれの影響を受けやすいためであると考えられる．

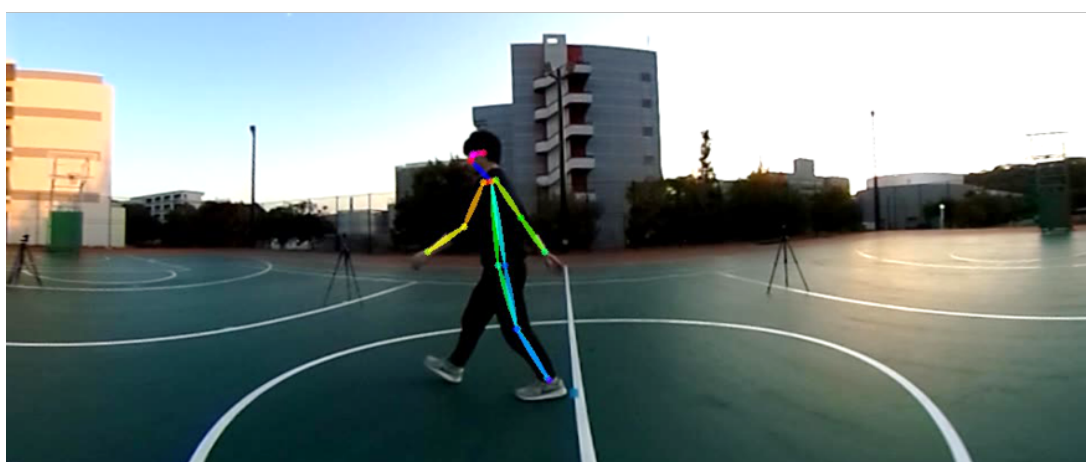


図 4.5 一方の足関節から両足関節を検出してしまった場合の例（上：カメラ 2 のフレーム番号 53，下：カメラ 3 のフレーム番号 111）

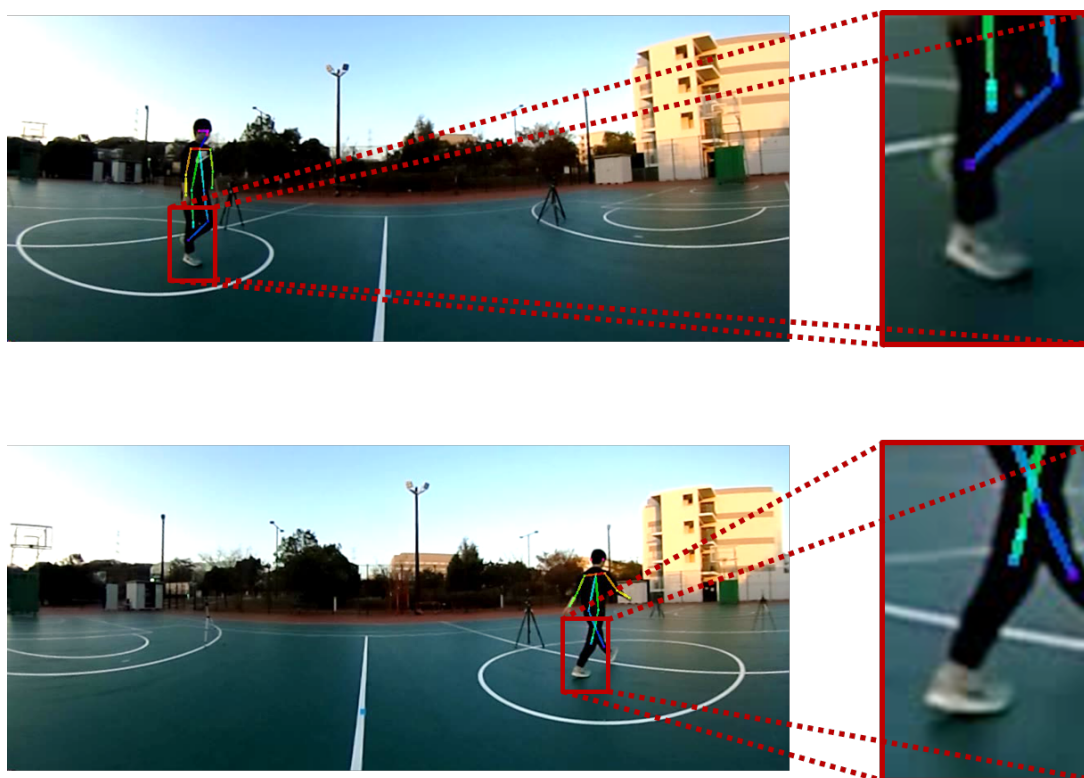


図 4.6 足関節の検出位置のずれが比較的大きい場合の例（上：カメラ 2 のフレーム番号 98，下：カメラ 4 のフレーム番号 121）

表 4.1 二次元関節位置の補正ができていないフレームにおける誤差

カメラ番号	フレーム番号	右足関節位置の誤差 [m]	左足関節位置の誤差 [m]
No.1	No.29	0.21	0.04
No.2	No.47	0.08	0.15
No.2	No.48	0.04	0.07
No.2	No.72	0.04	0.03
No.2	No.86	0.02	0.06
No.3	No.23	0.03	0.03
No.3	No.57	0.09	0.07
No.3	No.64	0.03	0.05
No.3	No.92	0.05	0.06
No.3	No.93	0.03	0.04
No.3	No.153	0.16	0.08
No.4	No.84	0.06	0.05
No.4	No.86	0.02	0.06
No.4	No.105	0.02	0.05
No.4	No.137	0.04	0.08
No.4	No.153	0.16	0.08
No.4	No.154	0.20	0.02
No.4	No.172	0.06	0.08
No.5	No.126	0.04	0.07



図 4.7 投票される側のカメラ画像で検出された両足関節の距離が近い場合の例
(上：カメラ 2 のフレーム番号 47，下：カメラ 4 のフレーム番号 154)

4.3 ピッチ・ストライドの推定の精度評価

ピッチおよびストライドの定義（3.3 節参照）より，左右の足が接地した直後の時刻が抽出できればそれぞれの値は計算できる．実際に，推定した結果を表 4.2 に示す．ここでは，全天球カメラ映像をフレームごとに確認し，接地した直後のフレームを抽出した結果を真値とした．

接地した直後のフレーム番号は平均誤差が 0.5 フレームで推定できている．このデータと前節の三次元足関節位置からピッチ，ストライドを計算した結果がそれぞれ表 4.3 および表 4.4 である．これらから，ピッチおよびストライドの精度を表 4.5 に示した．これより，ピッチの目標精度である 0.23 ヘルツ，ストライドの目標精度である 0.11 メートルを満たしていることが確認された．

表 4.2 接地した直後のフレーム番号

右足			左足		
真値	推定結果	誤差	真値	推定結果	誤差
No.24	No.25	+1	No.8	No.7	-1
No.54	No.54	0	No.39	No.40	+1
No.84	No.84	0	No.69	No.69	0
No.113	No.114	+1	No.99	No.99	0
No.143	No.144	+1	No.129	No.128	-1
No.174	No.173	-1	No.159	No.159	0
No.204	No.204	0	No.189	No.189	0

表 4.3 ピッチの推定結果

真値 [Hz]	推定結果 [Hz]	誤差 [Hz]
1.88	1.67	-0.21
2	2	0
2	2.14	+0.14
2	2	0
2	2	0
2	2	0
2.14	2	-0.14
1.88	2.14	+0.27
2.14	1.88	-0.27
1.88	2	+0.13
2	2.14	+0.14
2	1.88	-0.13
2	2	0

表 4.4 スライドの推定結果

真値 [m]	推定結果 [m]	誤差 [m]
1.91	2.01	+0.11
1.77	1.74	-0.04
1.90	1.93	+0.03
1.90	1.77	-0.13
1.84	1.89	+0.05
1.78	1.89	+0.11

表 4.5 ピッチ・スライドの平均誤差

	ピッチ [Hz]	スライド [m]
平均誤差	0.11	0.08

第5章 まとめ

本論文では，カメラ映像からピッチおよびストライドの計測を行うことで，これらの情報とスプリント動作のデータを同時に収集可能なフレームワークを提案した．具体的には多視点全天球カメラ映像から三次元足関節位置を復元し，その軌跡を推定することで接地時刻の計測を可能にした．これにより，歩行動作におけるピッチおよびストライドの計測が可能となっている．また，ビデオ映像からは歩行動作を確認することが可能となっている．したがって，従来のスプリントパフォーマンス分析手法に比べて，簡易的かつ安価なシステムでピッチ，ストライド，歩行動作のデータの収集が可能であることを示した．

実験では，提案手法で推定された三次元足関節位置，ピッチ，ストライドを手動で取得した真値と比較することで，それぞれが目標精度を満たすことが確認された．しかしながら，歩行動作での検証のみとなっているため，今後，スプリント動作の場合についても検証が必要である．また，現状，足関節位置のみの推定にとどまっているが，動作解析を行うためには三次元モーションの推定を行う必要がある．そして，計測データと動作映像を効果的にフィードバックする手法についても検討が必要である．さらに，今回手動で行っていたカメラ映像の同期処理，カメラキャリブレーションなどの作業は自動化する必要がある．このような課題を解決することによって，より多くのスプリントトレーニングの現場でピッチ，ストライド，スプリント動作のデータの収集・分析が可能になることが期待される．

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始暖かく御助言，御鞭撻を頂いたインタラクティブメディア設計学研究室 加藤博一教授に心より感謝致します．また，ロボティクス研究室 小笠原司教授には学内発表の場におきまして的確なご指摘を頂きましたこと，厚く御礼申し上げます．そして，日頃の研究生生活において様々なご意見やご指導をいただきましたインタラクティブメディア設計学研究室 Christian Sandor 准教授に深く感謝致します．本研究を進めるにあたり，多岐にわたるご助言を賜るとともに，日々の激励のお言葉をいただきましたインタラクティブメディア設計学研究室 武富貴史助教に心より感謝致します．また，研究室内のミーティングにおいて的確なご指摘を頂き，発表に関するご助言をいただきましたインタラクティブメディア設計学研究室 Alexander Plopski 助教に深く感謝致します．さらに，本研究を進めるにあたり，貴重なご意見やご指摘をいただきました鹿屋体育大学スポーツ生命科学系の吉武康栄准教授ならびに東洋大学法学部の土江寛裕教授に厚く御礼申し上げます．また，研究室生活を送るうえで様々なサポートをして頂いた上野真紀子女史ならびに小川暁子女史に心より感謝致します．2年間の学生生活で研究や語学等の様々な面でサポートして頂いたインタラクティブメディア設計学の先輩，同輩，後輩の皆様へ心より御礼申し上げます．そして最後に，このような研究を行う機会を与えていただいた両親へ心より感謝致します．

参考文献

- [1] R. Mann, J. Herman: “Kinematic analysis of Olympic sprint performance: Men’s 200 meters,” *International Journal of Sport Biomechanics*, Vol.1, pp. 151-162, 1985.
- [2] 土江 寛裕: “日本人トップスプリンターのバイオメカニクス的特長とその変化～桐生祥秀選手の事例的研究～”, *東洋法学*, Vol. 60, No. 3, pp. 23-40, 2017.
- [3] 豊嶋 陵司, 田内 健二, 遠藤 俊典, 磯 繁雄, 桜井 伸二: “スプリント走におけるピッチおよびストライドの個人内変動に影響を与えるバイオメカニクスの要因”, *体育学研究*, Vol. 60, No. 1, pp. 197-208, 2015.
- [4] 土江 寛裕, 櫛部 静二, 平塚 潤: “最大スプリント走時の走速度, ピッチ・ストライド, 接地・滞空時間の相互関係と, 競技力向上への一考察”, *城西大学研究年報*, Vol. 33, pp. 31-36, 2010.
- [5] A. Monte, V. Muollo, F. Nardello, P. Zamparo: “Sprint running: how changes in step frequency affect running mechanics and leg spring behaviour at maximal speed,” *Journal of Sports Sciences*, Vol. 35, No. 4, pp. 339-345, 2017.
- [6] J. Schiffer: “The sprints” , *New Studies in Athletics*, Vol. 24, No. 1, pp. 4-17, 2009.
- [7] H. Naito, Y. Kariyama, K. Miyashiro, K. Yamamoto, S. Tanigawa: “Type-specific step characteristics of sprinters during acceleration phase of 100-m race,” *International Conference on Biomechanics in Sports*, 2013.
- [8] A. I. T. Salo, I. N. Bezodis, A. M. Batterham, D. G. Kerwin: “Elite sprinting: are athletes individually step-frequency or step-length reliant?,” *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Vol. 43, No. 6, pp. 1055-1062, 2011.
- [9] J. P. Hunter, R. N. Marshall, P. J. McNair: “Interaction of step length and step rate during sprint running,” *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Vol. 36, No. 2, pp. 261-271, 2004.
- [10] J. G. Hay: “The biomechanics of sports techniques(4th Edition),” Prentice

Hall, pp. 396-411.

- [11] 豊嶋 陵司: “短距離走の最大速度局面におけるピッチとストライドとのトレードオフの克服に関するバイオメカニクスの要因 The biomechanical factors to overcome trade-off relationship between step frequency and step length during top speed phase in sprint running” , 中京大学博士審査学位論文, pp. 0-91, 2017.
- [12] K. Mackala: “Optimisation of performance through kinematic analysis of the different phases of the 100 metres,” *New Studies in Athletics*, Vol. 22, No. 2, pp. 7-16, 2007.
- [13] M. krzysztof, A. Mero: “A kinematics analysis of three best 100 m performances ever,” *Journal of Human Kinetics*, Vol. 36, No. 1, pp. 149-160, 2013.
- [14] J. Slawinski, N. Termoz, G. Rabita, G. Guilhem, S. Dorel, J. B. Morin, P. Samozino: “How 100-m event analyses improve our understanding of world-class men’s and women’s sprint performace,” *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, Vol. 27, No. 1, pp. 45-54, 2017.
- [15] G. Rabita, S. Dorel, J. Slawinski, E. Saez-de-Villarreal, A. Couturier, P. Samozino, J. B. Morin: “Sprint mechanics in world-class athletes: a new insight into the limits of human locomotion,” *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, Vol. 25, No. 5, pp. 583-594, 2015.
- [16] P. Samozino, G. Rabita, S. Dorel, J. Slawinski, N. Peyrot, E. Saez de Villareal, J. B. Morin: “A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running,” *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, Vol. 26, No. 6, pp. 648-658, 2016.
- [17] D. G. Thelen, E. S. Chumanov, D. M. Hoerth, T. M. Best, S. C. Swanson, L. Li, M. Young, B. C. Heidrscheit: “Hamstring muscle kinematics during treadmill sprinting,” *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Vol.37, No. 1, pp. 108-114, 2005.
- [18] J. B. Morin, M. Bourdin, P. Edouard, N. Peyrot, P. Samozino, J. R. Lacour: “Mechanical determinants of 100-m sprint running performance,” *European*

- Journal of Applied Physiology, Vol. 112, No. 11, pp. 3921-3930, 2012.
- [19] S. M. Chelly, C. Denis: “Leg power and hopping stiffness: relationship with sprint running performance,” *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Vol. 33, No. 2, pp. 326-333, 2001.
 - [20] J. B. Morin, P. Seve: “Sprint running performance: comparison between treadmill and field conditions,” *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 111, No. 8, pp. 1695-1703, 2011.
 - [21] P. R. Cavanagh, R. Kram: “Stride length in distance running: velocity, body dimensions, and added mass effects,” *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Vo. 21, No. 4, pp. 467-79, 2016.
 - [22] S & C スポーツ科学計測テクノロジー. <http://www.sandcplanning.com/category/1778299.html>
 - [23] 鹿屋体育大学 スポーツパフォーマンス研究棟. <http://splab.nifs-k.ac.jp/ja/kinou/force-plate/>
 - [24] C. Stoll, N. Hasler, J. Gall, H. P. Seidel, C. Theobalt: “Fast articulated motion tracking using a sums of gaussians body model,” *International Conference on Computer Vision (ICCV2011)*, pp. 951-958, 2011.
 - [25] A. Shafaei, J. J. Little: “Real-time human motion capture with multiple depth cameras,” *Conference on Computer and Robot Vision*, pp. 24-31, 2016.
 - [26] D. Mehta, S. Sridhar, O. Sotnychenko, H. Rhodin, M. Shafiei, H. P. Seidel, W. Xu, D. Casas, C. Theobalt: “VNect: Real-time 3D Human Pose Estimation with a Single RGB Camera,” *arXiv preprint arXiv:1705.01583*, 2017.
 - [27] Z. Cao, T. Simon, S. E. Wei, Y. Sheikh: “Realttime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields,” *arXiv preprint arXiv:1611.08050*, 2016.