

### Model Predictive Measurementを用いたステレオ360度カメラによる3次元人物追跡

Matsui, Yutaro / 松井, 佑太郎

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院情報科学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 情報科学研究科編

(巻 / Volume)

19

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030621>

# Model Predictive Measurement を用いたステレオ 360 度カメラによる 3 次元人物追跡 Person 3D-Tracking with Stereo 360-Degree Camera using Model Predictive Measurement

松井佑太朗 (Yutaro Matsui)\*

法政大学 情報科学研究科 情報科学専攻  
yutaro.matsui.4b@stu.hosei.ac.jp

## Abstract

This paper propose a person 3D tracking method using stereo 360-degree cameras. In previous studies, it was difficult to estimate the 3D position of a person using only the image. This is mainly due to issues such as insufficient resolution and lens distortion in 360-degree images. I use Model Predictive Measurement(MPM), which enables meaningful measurement and recognition even in adverse conditions by utilizing knowledge of the object. The knowledge of the object was applied in the form of positional constraints on the person model. Two constraints were applied to the person model. First, the person must move on the ground. Second, the person must not move closer to the camera over time. The two constraints improved the accuracy of person 3D tracking. Person 3D tracking was possible for persons up to 20 meters away from the camera. This enabled the estimation of 3D coordinates at longer distances compared to previous methods. Calibration was performed to accurately determine the correspondence between the 3D coordinates of the person model and the images.

## 1 はじめに

現在、人物追跡はセキュリティやエンターテインメントの観点から様々な研究が行われている。3 次元的な人物追跡を行うことで空間的に物体を捉えることが可能となり遮蔽された領域でも人物追跡を行うことが可能となる。加えて、ハードウェアのコストを減らすため、少ないカメラの台数で広範囲の人物追跡を行うことは重要な課題である。

360 度方向の人物追跡を行う手法として、パン・チルト・ズーム (PTZ) カメラを用いて行う手法 [1] があるが、カメラ特性から遠方領域を監視できる一方でハードウェアのコストが大

きい。360 度カメラを用いて移動物体追跡を行う研究として、TLD アルゴリズムを用いる手法 [3]、画像特徴を用いる手法 [2]、交差点の移動物体検出を行う手法 [6] があるが、画像上で 2 次元的な追跡を行うため、遮蔽された状況に弱い課題がある。ステレオ 360 度カメラを用いた SfM として、画像変形と局所領域の特徴マッチングを用いた手法 [8]、地下空間の 3 次元モデルを構築する手法 [5] がある。また、手法 [7] は、2 次元姿勢推定から得られた関節点を対応点とすることで 3 次元人物追跡を行った。従来の 3 次元化を行う手法は、遠距離の物体に対して 3 次元推定を行えない課題がある。なぜなら、画像情報のみを利用して対応点のマッチングと三角測量を行うため、画像が不鮮明であるときに対応点を検出することが困難であるからである。文献 [9] で述べられるように、360 度カメラで撮影された画像は解像度不足やレンズの歪みの問題から遠距離に映る対象物が不鮮明となることが原因である。画像情報以外を用いた人物検出の手法として通常のカメラを使用した手法 [10] があるが、人物検出の 3 次元化を達成していない。手法 [4] は、対象物の知識を利用することで悪条件下でも有意義な測定と認識を可能とする Model Predictive Measurement(MPM) を用いて、通常のステレオカメラを用いた 3 次元姿勢推定を行っている。

本研究では、少ないカメラ台数で広範囲の 3 次元追跡を行うためにステレオ 360 度カメラを用いた。特に遠距離の人物を対象とするために人物モデルの知識を利用する MPM を用いた手法を提案する。人物モデルの知識として 2 つの位置制約を加えた。1 つ目は人物が地面上を移動する制約である。2 つ目は時間経過とともに人物モデルがカメラに接近することを抑制する制約である。実験結果より 2 つの位置制約により 3 次元人物追跡の精度が向上し、カメラから最大 20m 程度離れた人物に対して 3 次元的な人物追跡が行えた。この結果は従来手法と比べて遠距離の 3 次元推定である。また、3 次元人物モデルを画像に正確な投影を行うためのキャリブレーションを行った。

---

\* 指導教員：花泉弘 教授

## 2 提案手法

従来研究では、360度画像の情報のみを用いた人物検出と三角測量による3次元人物追跡を行う。そのため、不鮮明な画像に対して人物の対応点を見つけることが困難となり、正確な3次元位置の推定が行えなかった。そこで、人物モデルの知識を利用することで、画像から得られる情報が少なくても有意義な3次元位置を推定を行う手法を提案する。前提として、360度カメラから出力される画像の投影方法は正距円筒図法である。この投影方法の画像座標は、カメラから対象物までの方向を示す。また、360度カメラ自体が正しく全方位の情報を出力することを前提とし、左カメラの位置を座標系の原点として3次元位置推定を行う。

### 2.1 Model Predictive Measurement

本節では、Model Predictive Measurement(MPM)を用いて人物の3次元位置を推定する手法について述べる。MPMとは、対象物の知識を利用することで悪条件下でも有意義な測定と認識を可能とする方法である。本研究では、対象物の知識として人物モデルの位置制約を用いた。図1を用いて概要を説明する。3次元座標の地面上に実際の人物が存在する場合を仮定する。3次元座標系に人物モデルを配置して左右の画像に投影を行うとき、「画像に投影された人物モデル」と「撮影された画像に映る人物領域」が共通しているなら、人物モデルと実際の人物の位置が近い。例えば、図1内の青い人物モデルと実際の人物の画像領域が重ならないため離れた位置に3次元座標が推測され、橙の人物モデルと実際の人物の画像領域と重なるため近い位置に3次元座標が推測される。

人物モデルの知識として地面制約と深度制約の2つを用いた。地面制約は、人物モデルが地面上を移動することを仮定した。この制約により、人物モデルの位置最適化を行う際に探索次元を減らすことができる。深度制約は、時間経過とともに人物モデルがカメラに接近することを抑制する。地面上のカメラの位置と人物モデル間の直線上で人物モデルの位置を最適化する。

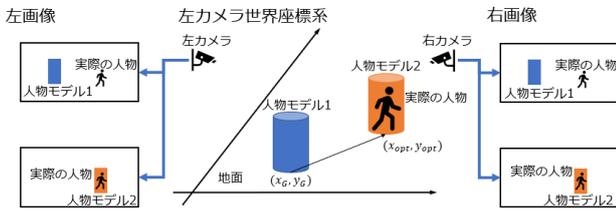


図1: MPMの概要

2次元の地面座標系上の点  $(x_G, y_G)$  に人物モデルを設置する。地面座標系の原点は、左カメラを地面上に投影した点とする。人物モデルの左カメラ世界座標系における3次元点群集合を  $M = \{(x_i, y_i, z_i) | i = 1, \dots, n\}$  とすると、左カメラ方向余弦  $\mathbf{D}_l^1$  と右カメラ方向余弦  $\mathbf{D}_r^1$  は式(1)のように求める。ただ

し、キャラリブレーションパラメータを  $\mathbf{R}$  と  $\mathbf{t}$  とした。

$$\mathbf{D}_l^1 = \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{D}_r^1 = \mathbf{R}^{-1} \left( \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} - \mathbf{t} \right)$$

左カメラ画像座標系  $(u_l, v_l)$  は左カメラ方向余弦  $\mathbf{D}_l^1 = (d_{lx}, d_{ly}, d_{lz})$  を用いて、式(2)のように求まる。右カメラ画像座標系  $(u_r, v_r)$  も同様である。

$$\begin{pmatrix} u_l \\ v_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \arccos \frac{d_{lz}}{\sqrt{d_{lx}^2 + d_{ly}^2}} \\ \arcsin d_{ly} \end{pmatrix} \quad (2)$$

左画像座標系上の人物領域の集合を  $I_l$ 、右画像座標系上の人物領域の集合を  $I_r$  とする。この集合は撮影された画像情報から取得される。最適化関数は、画像情報から得られる人物領域と人物モデルを画像座標系に投影した凸包領域の和集合とする。最適化関数が最大化する人物モデルの位置  $(x_{opt}, y_{opt})$  を式(3)を用いて求める。ただし、3次元点群集合を左右カメラ画像座標系に変換する関数を  $F_l, F_r$ 、集合の凸包を求める関数を  $Convex$ 、集合の要素数を求める関数を  $\mathcal{N}$  とする。

$$x_{opt}, y_{opt} \leftarrow \underset{x_G, y_G}{\operatorname{argmax}} (\mathcal{N}(I_l \cap Convex(F_l(M(x_G, y_G)))) + \mathcal{N}(I_r \cap Convex(F_r(M(x_G, y_G)))))) \quad (3)$$

次に、深度方向の制約を加えた最適化を行う。地面座標系の原点と人物モデル間の直線上で人物モデルの位置を最適化する。最適化関数は、画像情報から得られる人物領域と人物モデルを画像座標系に投影した凸包領域の和集合である。最適化関数が最大化する係数  $a$  を式(4)を用いて求める。

$$a_{opt} \leftarrow \underset{a}{\operatorname{argmax}} (\mathcal{N}(I_l \cap Convex(F_l(M(ax_G, ay_G)))) + \mathcal{N}(I_r \cap Convex(F_r(M(ax_G, ay_G)))))) \quad (4)$$

### 2.2 キャリブレーション

本節では、左右のカメラの光軸を平行化させるキャリブレーションについて述べる。キャリブレーションを行うことで、世界座標系上に設置された人物モデルを正確に画像座標系上に投影することができる。光軸が平行でないと世界座標系と画像座標系の変換で誤差が生じる。例えば、図2において実際の点  $\mathbf{P}$  は誤って点  $\mathbf{Q}$  として推定される。

図2において世界座標系を左カメラ世界座標系に変換するための回転行列  $\mathbf{R}_l$  と並進行列  $\mathbf{t}_l$  を求める。左カメラ画像座標系上の点を  $(u_l, v_l)$  とすると、左カメラ世界座標系上の方向余弦  $\mathbf{D}_l$  は式(5)のように示される。

$$\mathbf{D}_l = \begin{pmatrix} \cos u_l \sin v_l \\ \sin u_l \\ \cos u_l \cos v_l \end{pmatrix} \quad (5)$$

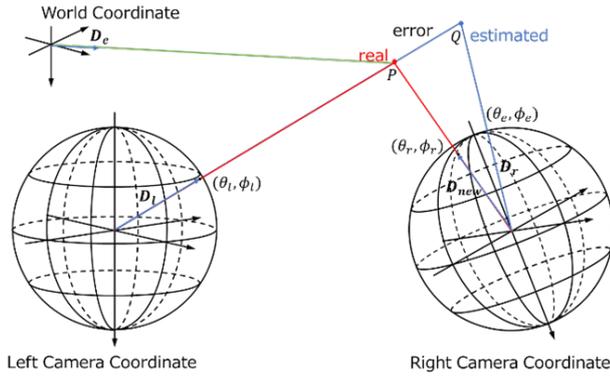


図 2: キャリブレーションの概要

世界座標系上の実測値を  $\mathbf{P}$  とし、回転と平行移動を与えて左カメラ世界座標系上の方向余弦  $\mathbf{D}_e$  を方向余弦  $\mathbf{D}_l$  に一致させる。補正を加えた後の方向余弦  $\mathbf{D}_e$  は式 (6) のように示される。

$$\mathbf{D}_e = \mathbf{R}_l \frac{\mathbf{P} - \mathbf{t}_l}{\|\mathbf{P} - \mathbf{t}_l\|} \quad (6)$$

このとき、方向余弦  $\mathbf{D}_e$  と方向余弦  $\mathbf{D}_l$  の内積が最大となればよい。そこで、式 (7) のように最適化を行う。

$$\mathbf{R}_l, \mathbf{t}_l \leftarrow \underset{\mathbf{R}, \mathbf{t}}{\operatorname{argmin}} (1 - \mathbf{D}_l \cdot \mathbf{D}_e) \quad (7)$$

同様に、右カメラ世界座標系に対する世界座標系の回転行列  $\mathbf{R}_r$  と並進行列  $\mathbf{t}_r$  を求める。つまり、左カメラ世界座標系に対する右カメラ世界座標系の相対的な回転行列  $\mathbf{R}$  と並進行列  $\mathbf{t}$  は式 (8) のように示される。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_l^T \mathbf{R}_r, \quad \mathbf{t} = \mathbf{t}_r - \mathbf{t}_l \quad (8)$$

左カメラ世界座標系上に変換された右カメラ世界座標系上の方向余弦  $\mathbf{D}_{\text{new}}$  と式 (9) のようになる。

$$\mathbf{D}_{\text{new}} = \mathbf{R} \mathbf{D}_r + \mathbf{t} \quad (9)$$

3次元座標は、左カメラの座標 (原点)、右カメラの座標  $\mathbf{t}$ 、左右のカメラの方向余弦  $\mathbf{D}_l$ 、 $\mathbf{D}_r$  を用いて3次元空間上の最接近位置を求めた。

### 3 実験

本章では、3.1節に実験条件、3.2節に予備実験による事前情報の導出、3.3節にMPMによる3次元人物追跡の精度、3.4説に人物モデルに対する2つの制約の重要性について述べる。

#### 3.1 実験条件

実験で使用した360度カメラはRICOH THETA SC2である。投影方法は正距円筒図法、解像度は1920 × 3840、FPSは30である。2台の360度カメラを光軸が平行となるように設置した。また、法政大学小金井キャンパス西館2F学生ラウ

ンジから道路を撮影した映像を使用して人物追跡を行う。図3に実際に撮影された映像の1フレームを示す。



図 3: 左 360 度画像

#### 3.2 予備実験

MPMによる3次元人物追跡を行うためには、キャリブレーションパラメータ、地面、画像の人物領域、人物モデルの事前情報が必要である。本節では、予備実験を用いて事前情報を導出する。

##### 3.2.1 キャリブレーション

本項では、2.2節の手法を用いてキャリブレーションを行う。チェッカーボード型のシートをキャリブレーションシートとして使用した。1マスの大きさが0.1m × 0.1m、マスの数は7 × 34である。推定されたキャリブレーションパラメータを用いて左カメラ世界座標系上に3次元復元を行うと図4のようになる。青点がカメラの位置、緑点が理論値、赤点が推測値である。推測値と理論値がそれぞれ構成する平面が類似し、レンズの天頂から離れるほど推測値が理論値よりも大きくなる傾向がある。原因としてレンズの歪みが考えられる。

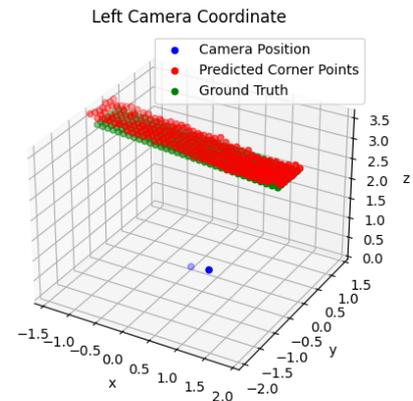


図 4: 3次元復元結果

##### 3.2.2 地面の推定

本項では、地面の推定を行う。左右の画像から対応点を検出、3次元座標の復元、主成分分析を行う。このとき、第3固有ベクトルが法線ベクトルである。図3の中央に映る横断歩道から対応点を23点抽出して地面の推定を行った。地面からカメ

ラまでの高さは 5.44m, 地面の法線方向の標準偏差は 0.164m となった。

### 3.2.3 画像の人物領域

実世界で人物は移動していると仮定する。そこで, 画像上の人物領域は移動領域検出アルゴリズムであるフレーム間差分を用いて特定した。ノイズ除去や移動領域の構造を得るために生画像に対して, ガウシアンフィルタによる平滑化, フレーム間差分, メディアンフィルタ, モルフォロジー変換の順番で前処理を行った。前処理の結果を図 5 に示す。インパルスノイズが削除され, 人物領域が結合した。



(a) フレーム間差分 (b) 前処理後 (c) マスク結果

図 5: 前処理結果

### 3.2.4 人物モデル

本項では, 人物モデルについて述べる。人物モデルの形状は円柱, 高さは 1.8m, 半径は 0.3m とした。

まずは, 人物モデルの初期位置の指定方法について述べる。新規の人物モデルの初期位置は, 世界座標系上における地面に人物モデルを格子状に仮配置し, 最適化関数の値を計算する。そして, 閾値 600 を超えた人物モデルを実在するとした。この閾値は誤検出が少なくなるように実験的に求めた値である。既存の人物モデルの初期位置は, 前フレームの人物モデルの位置を用いた。図 6 に新規人物モデルの仮配置を赤枠で示す。

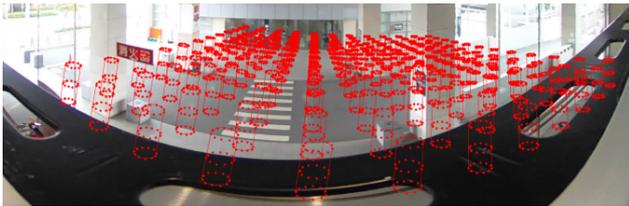


図 6: 新規人物モデルの初期配置

次に 2.1 節の手法を用いて, 人物モデルの位置最適化を行った。位置が最適化された人物モデルを左右の画像座標系上に投影すると図 7 のようになる。左右画像の人物領域上に人物モデルが投影されている。

### 3.3 追跡結果

画像上における人物の軌跡と地面座標系における人物の軌跡を図 8 に示す。地面座標系の原点は, 左カメラを地面に投影した点とした。図 8a は 1 人の人物が画像右から左へ等速かつ直線的に移動する。同一人物の移動が, 柱右では青軌跡, 柱間では緑軌跡, 柱左では青軌跡で示されている。人物が柱に隠れる



(a) 左 360 度画像 (b) 右 360 度画像

図 7: 画像に投影した人物モデル

と新しい人物として検出される。黒線はすべての推測位置の第 1 主成分を可視化したものであり, 人物モデルの移動が直線的である。図 8b は 1 人の人物が画像中央から下へ等速かつ直線的に移動する。人物の移動を赤軌跡で示す。黒線はすべての推測位置の第 1 主成分を可視化したものであり, 人物モデルの移動が直線的である。

地面上における 2 点間の距離の実測値, 推測値を表 1 に示す。図 8a に映る 2 本の柱間の距離, 左カメラと直線の距離, 図 8a に映る横断歩道の長さを使用した。実測値に対して推測値が 30% 程度長くなった。

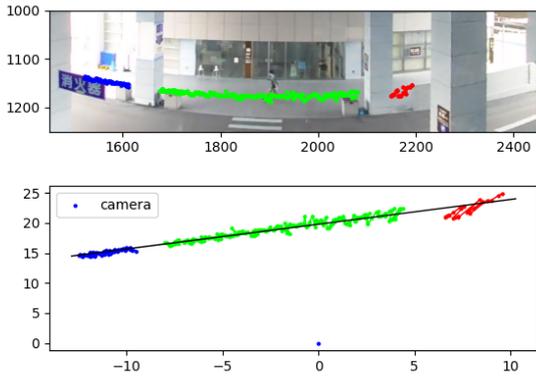
表 1: 2 点間の距離

	実測値 (m)	推測値 (m)
2 柱間の距離	9.3	12.6
カメラと直線の距離	13.6	18.3
横断歩道の長さ	5.6	7.2

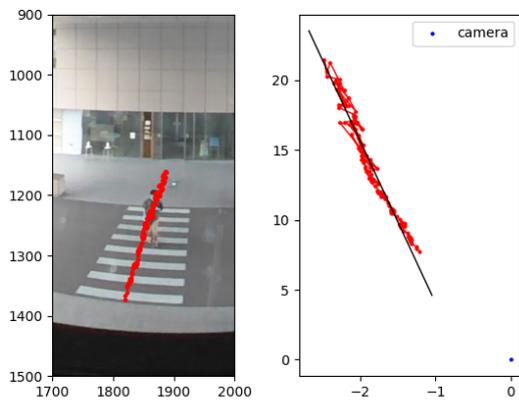
水平方向の移動と垂直方向の移動に対して, 進行方向に対する位置と速度の統計情報を表 2, 3 に示す。推定された位置情報に主成分分析を行い, 進行方向を求める。進行方向を基準として位置の鉛直成分の位置標準偏差, 水平成分の速度平均, 水平成分と鉛直成分の速度標準偏差を求めた。推定された平均速度は実際の速度に比べて速い。表 1 の推測値が実測値より長くなるが, 時間が一定であることが原因であると考えられる。また, 水平移動における水平成分の速度標準偏差, 垂直移動における鉛直成分の位置と速度標準偏差が比較的小さい値となった。つまり, 深度方向より水平方向に対する人物の推定の精度が高い。

表 2: 水平移動の位置と速度に関する統計情報

	進行方向	鉛直方向
位置の標準偏差 (m)	-	0.48
速度の平均 (m/s)	2.2	0.29
速度の標準偏差 (m/s)	9.42	15.6
実際の速度 (m/s)	1.6	-



(a) 水平方向の移動



(b) 垂直方向の移動

図 8: 人物の追跡結果

表 3: 垂直移動の位置と速度に関する統計情報

	進行方向	鉛直方向
位置の標準偏差 (m)	-	0.059
速度の平均 (m/s)	2.50	0.0011
速度の標準偏差 (m/s)	108.7	1.79
実際の速度 (m/s)	1.6	-

### 3.4 制約の重要性

本節では、2.1 節で述べた地面制約と深度制約が人物追跡の精度に及ぼす影響を調べる。図 8a と同一の映像を用いて、それぞれの制約を外した実験を行った。

地面制約を適用せずに式 (3)、式 (4) による最適化を行った結果を図 9 に示す。左カメラの位置を原点、緑平面が地面を表す 3 次元空間上で人物の軌跡を示す。地面上に検出された人物モデルは、数フレームでカメラ周辺に移動するため人物追跡が行えない。

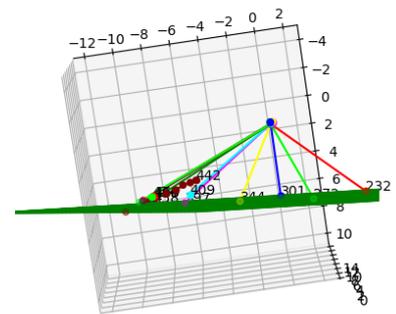


図 9: 地面制約を適用しない人物追跡結果

深度制約を適用しない式 (3) のみの最適化を行った結果を図 10 に示す。ただし、地面制約は適用する。柱右の移動は赤軌跡、柱間の移動は緑と青と黄軌跡、柱左の移動は赤紫軌跡で示される。時間経過とともに人物モデルがカメラに滑らかに近づき、大きく遠ざかることを繰り返す傾向がある。

また、進行方向に対する位置と速度の統計情報を表 4 に示す。同様の条件下である表 2 と比較し、位置に対して標準偏差が大きい。つまり、深度制約により位置推定の精度が上がった。

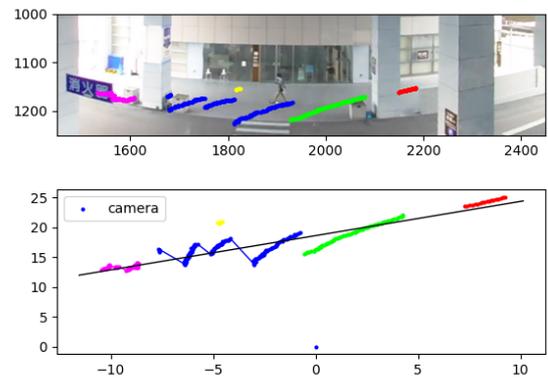


図 10: 深度制約を適用しない人物追跡結果

表 4: 深度制約を適用しない位置と速度の統計情報

	水平成分	鉛直成分
位置の標準偏差 (m)	-	1.01
速度の平均 (m/s)	2.4	0.38
速度の標準偏差 (m/s)	2.98	10.9
実際の速度 (m/s)	1.6	-

2つの制約を適用しない場合、人物モデルはカメラに接近するため正確な位置推定が行えない。なぜなら、人物モデルがカメラに接近するほど画像に投影した人物モデルの領域が大きくなり、多くのノイズを吸収し、最適化関数の値が大きくなるからである。

## 4 考察

3章の人物の位置推定において、推測値が実測値より距離が長く検出される傾向がある。原因は3つ考えられる。1つ目は、レンズの歪みの問題である。3.2.1からレンズの天頂から離れるほど3次元座標は離れて観測される傾向にあることが分かった。図3では、人物追跡を行う領域は天頂である画像の中央から離れた位置にある。そのため、実測値より距離が長くなったと考えられる。2つ目は人物領域の検出にフレーム間差分を用いたことである。人物が移動する際に踏み込む足の移動が小さく足元領域が検出されにくい。そのため、最適化関数に足元領域が反映されにくい。3つ目は、モデルの大きさである。映像に映る実際の人物の身長が1.67mに対して人物モデルの高さは1.8mとした。そのため、人物モデルが実際の位置より遠方に配置されたと考えられる。

人物モデルがカメラから離れるほど位置推定の精度が下がることが、図8bにおける人物の軌跡より推察できる。なぜなら、図6の画像に投影した人物モデルのように、遠方の人物領域の変化量、深度方向に並ぶ人物領域の変化量が小さい。そのため、遠方と深度方向のフレーム間差分の検出精度が下がり、人物領域が小さくなるからである。表3の進行方向に対する速度の標準偏差が極端に大きな値をとることも同様の理由が考えられる。つまり、水平方向の移動を含まない人物追跡は不得手である。

現状における人物検出の限界はカメラから20m程度の距離である。この値は、図8bにおいて人物が検出される最長距離である。閾値より画素数が300以上あれば人物追跡が可能であるといえるため、解像度が低くても追跡が行えているといえる。また、360度画像の全領域を使用すれば、カメラを中心として距離が20m以内の人物を画角を考慮せず行えるため広範囲であるといえる。より遠方の人物を検出するためには、人物の实在判定を行う最適化関数の閾値を小さくする必要がある。そのためには、人物領域の検出時に発生するノイズを低減する必要がある。

## 5 おわりに

本研究では、ステレオ360度カメラを用いて3次元的人物追跡を行った。人物モデルの位置制約を用いてMPMを行うことで、従来研究で困難であった遠距離の3次元推定を行うことができた。位置制約として、地面制約と深度制約を用いることで追跡精度が向上し、カメラから最大20m程度の距離の3次元人物追跡を行うことができた。この結果は従来手法と比較し遠距離である。今後の課題は、左右360度画像に人物が映

らない状況下の人物追跡である。この状況は、撮影場所に障害物がある場合や複数人の人物追跡を行う際に発生する。解決策として、同一座標上に障害物と人物がいないことを制約を加えて、人物の3次元位置時系列的に推測することが検討される。

## 参考文献

- [1] H. K. Chavda and M. Dhamecha. Moving object tracking using ptz camera in video surveillance system. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, pages 263–266, 2017.
- [2] A. Delforouzi and M. Grzegorzec. Robust and fast object tracking for challenging 360-degree videos. In *2017 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)*, pages 274–277, 2017.
- [3] A. Delforouzi, S. A. H. Tabatabaei, K. Shirahama, and M. Grzegorzec. Unknown object tracking in 360-degree camera images. In *2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pages 1798–1803, 2016.
- [4] H. Hanaizumi. Stereo-measurement of 3d poses of a walking person with a puppet model and low-rank filter. In C. Volosencu, editor, *Model Predictive Control*, chapter 3. IntechOpen, Rijeka, 2023.
- [5] M. Janiszewski, M. Torkan, L. Uotinen, and M. Rinne. Rapid photogrammetry with a 360-degree camera for tunnel mapping. *Remote Sensing*, 14(21), 2022.
- [6] C. Premachandra, S. Ueda, and Y. Suzuki. Detection and tracking of moving objects at road intersections using a 360-degree camera for driver assistance and automated driving. *IEEE Access*, 8:135652–135660, 2020.
- [7] M. Shere, H. Kim, and A. Hilton. 3d multi person tracking with dual 360° cameras. In *2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 2765–2769, 2020.
- [8] H. Taira, Y. Inoue, A. Torii, and M. Okutomi. Robust feature matching for distorted projection by spherical cameras. *Information and Media Technologies*, 10(3):478–482, 2015.
- [9] M. Tamaki and C. Premachandra. An automatic compensation system for unclear area in 360-degree images using pan-tilt camera. In *2019 International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, pages 1–4, 2019.
- [10] L. Wang and N. H. C. Yung. Three-dimensional model-based human detection in crowded scenes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(2):691–703, 2012.