

三角測量の原理をそのまま用いた 3 次元移動軌跡の計測 — フレーム位置補間方法の比較検討 —

A Measuring Method for 3D Trajectory using Straightforward Triangulation — Comparing Investigation on Interpolation Methods —

○石黒 嶺¹, 清水 雅夫²*Rei Ishiguro¹, Masao Shimizu²

Abstract: The report proposes a new measuring method to estimate a 3D trajectory using asynchronous cameras such as wearable camera. Experimental results illustrate effectivity of the proposed method. The report describes two interpolation methods to estimate object position at the sub-frame time.

1. はじめに

屋外などの大空間で、ウェアラブルカメラを使って 3 次元移動軌跡を計測するときには、2つの問題点がある。まず、3次元計測を行うときには、テキスト[1]などに紹介されているカメラの透視投影行列を用いる方法では、計測対象を撮影する前にキャリブレーションオブジェクトを配置する必要がある。しかし、屋外などの大空間でこのようなキャリブレーションを行うことは現実的ではない。次に、ウェアラブルカメラは、他のカメラとの同期を考慮していないので、移動対象を同じタイミングで撮影している保証がない。異なるタイミングで撮影したステレオ画像を使った 3 次元計測結果は、本来の結果とは異なったものになる。

2. 提案手法

2-1. キャリブレーションオブジェクトを使わない位置計測

Figure 1 に示すように、カメラ 1 の光学中心位置を \mathbf{c}_1 、対象の方向ベクトルを \mathbf{u}_1 とすると、対象は s_1 を媒介変数とする直線 $l_1: \mathbf{r}_1(s_1) = \mathbf{c}_1 + s_1 \mathbf{u}_1$ 上にある。

カメラ 2 も同様に、直線 $l_2: \mathbf{r}_2(s_2) = \mathbf{c}_2 + s_2 \mathbf{u}_2$ 上にある。

直線 l_1 上の点 $\mathbf{r}_1(s_1)$ と、直線 l_2 上の点 $\mathbf{r}_2(s_2)$ との距離の 2 乗 $d(s_1, s_2)$ は、次のように求めることができる。

$$d(s_1, s_2) = \|\mathbf{r}_2(s_2) - \mathbf{r}_1(s_1)\|^2 \quad (1)$$

この $d(s_1, s_2)$ が最小のとき、次が成り立つ。

$$\frac{\partial}{\partial s_1} d(s_1, s_2) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial s_2} d(s_1, s_2) = 0 \quad (2)$$

式(2)を満たす s_1 と s_2 をそれぞれ \hat{s}_1 と \hat{s}_2 とすると、2 直線間の最小距離の 2 乗は、 $d(\hat{s}_1, \hat{s}_2)$ で求まる。

対象の 3 次元位置 \mathbf{p} は、次のように計算できる。

$$\mathbf{p} = \frac{1}{2} (\mathbf{r}_1(\hat{s}_1) + \mathbf{r}_2(\hat{s}_2)) \quad (3)$$

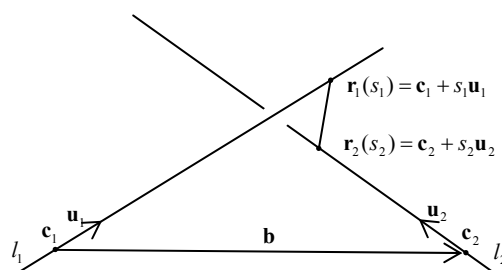


Figure 1. The two lines of sight from camera to object.

2-2. カメラ間のフレーム単位時刻合わせ

カメラ 1 で撮影した時系列画像の i 番目のフレームと、カメラ 2 で撮影した時系列画像の $i+j$ 番目のフレームを使って、対象の 3 次元位置を求める。このとき、視線間距離の最小値の 2 乗を、フレーム番号だけを使って、 $\tilde{d}(i, i+j)$ と表すことにする。このとき、次の j_0 を、フレーム単位時刻合わせとする。

$$j_0 = \arg \min_j E(j) = \arg \min_j \sum_{\min}^{\max} \tilde{d}(i, i+j) \quad (4)$$

ただし、 \min と \max は、移動する対象が時系列画像に撮影されている最小フレーム番号と最大フレーム番号を表す。

2-3. サブフレーム時刻推定

対象位置の計算誤差の 2 乗和 $E(j)$ は、最小位置付近ではフレームずれ量 j の 2 次関数で近似できると考えられる[2]。Figure 2 に示すように、近似した 2 次関数の軸の位置が、計算誤差の 2 乗和を最小にする非同期カメラ間のサブフレーム時刻 $j_0 + \Delta$ である。

$$j_0 + \Delta = j_0 - \frac{1}{2} \frac{E(j_0 + 1) - E(j_0 - 1)}{E(j_0 + 1) + E(j_0 - 1) - 2E(j_0)} \quad (5)$$

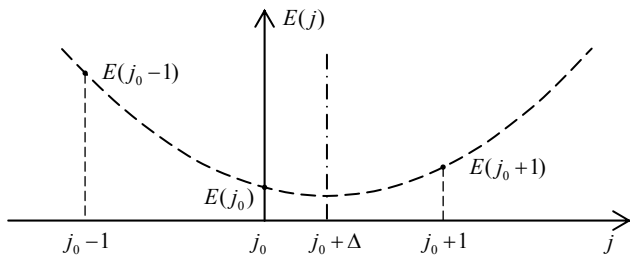


Figure 2. Sum of squared errors for frame displacement.

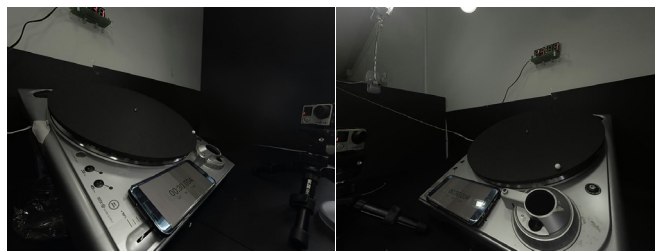


Figure 3. Stereo images of a tracking target.

2-4. サブフレーム時刻における対象位置推定

カメラ 1 で撮影した時系列画像の i 番目のフレームと、カメラ 2 で撮影した時系列画像の $i+j_0+\Delta$ 番目のフレームを使って、対象の 3 次元位置を求める。カメラ 2 で撮影した画像から得る対象の方向ベクトルを、前後のフレーム中の対象の方向ベクトルを使って補間する。補間方法として、直線補間とキュービック補間を比較した。

3. 実験結果

ウェアラブルカメラとして、GoPro HERO4 を使用した。実験室環境で OpenCV のキャリブレーション関数を用いて、あらかじめレンズ歪みとレンズ焦点距離を求めた。全ての撮影は動画撮影モード (1920×1440 画素, 24FPS) で行った。

計測対象は、Figure 3 に示す、回転数を任意に変更できるように改造したレコードプレイヤーのターンテーブルに固定した白玉である。回転数が遅いときには、対象のフレーム周期における移動量が小さいので、同期したステレオカメラでの計測 (正解) と見なすことができる。

Figure 4 に、提案手法での計測結果を示す。低速回転 (赤) と高速回転 (青) の移動軌跡は区別できない。これは、高速回転 (青) の 3 次元軌跡を求めるときにサブフレーム位置補間を行い、完全に同期したカメラでステレオ計測をしていることに相当するためである。

Figure 5 に、視線間の最小距離の 2 乗和を示す。時系列画像間は目視により時刻合わせをしているため、 $j_0=0$ で最小になっている。このときのサブフレーム時刻は、 $\Delta=-0.48$ フレームである。

直線補間のときの 2 直線間の最小距離の平均は 2.83mm、キュービック補間では 3.04mm だった。補間方法による差が小さい理由は、計測対象の移動軌跡が円なので、直線で補間しても十分な精度になったためと考えられる。

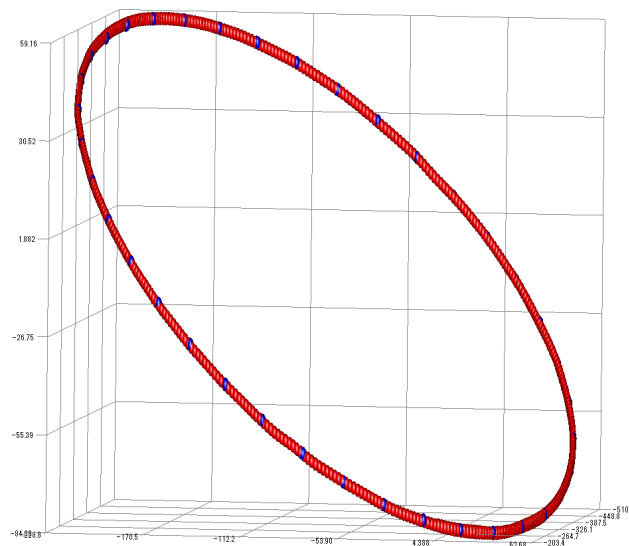


Figure 4. Trajectory using the proposed method.

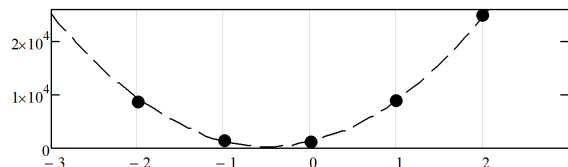


Figure 5. Sum of squared errors for frame displacement in real image sequences.

参考文献

- [1] 奥富ほか編:「デジタル画像処理」, 公益財団法人画像情報教育振興協会, pp. 315--319, 2015.
- [2] 清水・奥富:「画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質」, 電子情報通信学会論文誌, vol. J85-D-II, no. 12, pp. 1791—1800, 2002.