

AR の高精度位置決め方法の検討

MHI パワーエンジニアリング株式会社	正会員	○森 直樹
MHI パワーエンジニアリング株式会社		高橋 智子
東杜シーテック株式会社		田高 義
エム・エムブリッジ株式会社	正会員	古田 大介
エム・エムブリッジ株式会社	正会員	荒木 健二

1. 目的

近年 AR（拡張現実）の進歩は目覚ましくホロレンズやタブレットなどで手軽に使用されるようになってきた。しかし、実際に使用してみると位置決め精度が不十分で重畳する CAD モデルと実構造が大きくズレてしまうことがしばしばあった。そこでここでは複数の ArUco マーカーを使用した高精度な位置決め手法を開発し鋼橋に適用したので報告する。

2. 多点マーカーのベストマッチによる方法

AR にて CAD と実構造の位置決めをする場合一般には小さなマーカー 1 枚を実構造に設置し CAD と実構造の位置合わせを行う。しかし端末がマーカーより徐々に離れるに従い AR の測定誤差のために許容できないようなズレを生じさせてしまう。このためマーカーを複数準備し最小二乗法で合わせ、更に端末近傍の重み係数を強調させることでロバスト性の高い手法を開発した。式（1）は最小二乗法の位置合わせ式を示す。

$$v = \begin{Bmatrix} v_{xi}' \\ v_{yi}' \\ v_{zi}' \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_{bi} & -y_{bi} & x_{bi} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{bi} & 0 & x_{bi} & y_{bi} \\ 0 & 0 & 1 & y_{bi} & -x_{bi} & 0 & z_{bi} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \\ s \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} x_{di} - x_{bi} \\ y_{di} - y_{bi} \\ z_{di} - z_{bi} \end{Bmatrix} = Ax - l \quad (1)$$
$$v^t P v \rightarrow \min$$

l : observation vector
 v : resedial vector
 A : Jacobian matrix
 x : camera position
 P : weight factor

3. 既知マーカーより端末位置を逆算する方法

上記の多点参照のベストマッチの手法を用いた場合でも AR の計測は徐々に誤差が累積するため厳密な位置合わせは不可能である。そこで図-1 に示すように複数の既知座標マーカーを参照し端末の位置・姿勢を逆算する手法を開発した。この場合、マーカーの座標が正確であれば厳密な位置合わせが可能となる。なお、式（2）は端末位置・姿勢求解式を示す。

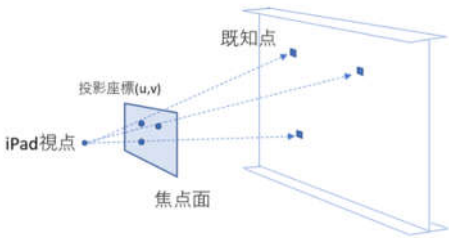


図-1 端末位置求解法

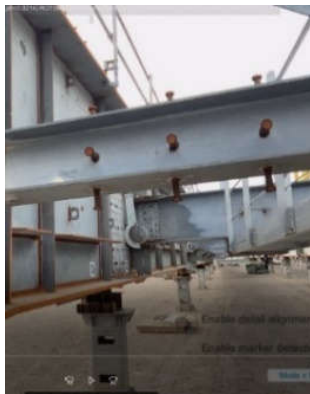
$$x_i' + v_x = x_0 + f \frac{r_{11}(X_i - X_0) + r_{21}(Y_i - Y_0) + r_{31}(Z_i - Z_0)}{r_{13}(X_i - X_0) + r_{23}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0)}$$
$$y_i' + v_y = y_0 + f \frac{r_{12}(X_i - X_0) + r_{22}(Y_i - Y_0) + r_{32}(Z_i - Z_0)}{r_{13}(X_i - X_0) + r_{23}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0)}$$

i : point index x_i, y_i : screen coordinate
 x_0, y_0 : focal point f : focal length
 X_i, Y_i, Z_i : 3d coordinate of ArUco Code
 X_0, Y_0, Z_0 : Camera Position Camera rotation $R = \begin{Bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{Bmatrix}$

4. 試験結果

4.1 多点マーカーのベストマッチによる手法

図-2 は多点マーカーのベストマッチ手法を鋼桁橋の製作工場にて適用した例である。(a),(b)は鋼横桁箇所にて CAD モデルを表示した場合と表示しない場合の比較であるが CAD モデルと実橋の横桁・主桁がよく一致している。また図-3 は完成時に設置予定の排水管設備を重畳した例である。仮組時に無い排水装置が実橋の開口部と一致する様子や配管サポートと実橋の取付ピースが良く一致している様子も確認できた。



(a) CAD 無し



(b) CAD 重畳

図-2 多点マーカーのベストマッチ手法の適用例

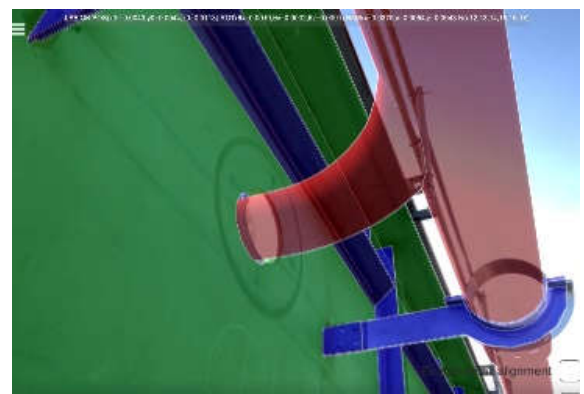


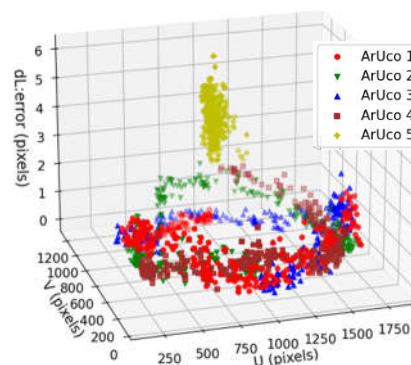
図-3 設置予定の排水装置を実橋に重畳した例

4.2 既知マーカーより端末位置を逆算する手法

図-4(a)は高精度位置合わせの精度検証モデルある。格子状 CAD モデルと実格子と重畳し視覚的に確認する一方、マーカーの3次元座標をスクリーン座標系（水平成分 U と垂直成分 V ）に逆投影し実際の撮像マーカー位置との差（逆投影誤差 dL ）により一致の度合いを定量的に確認した。図-4(b)はその結果を示す。格子モデルの位置合わせは視認では CAD と実格子はぴったり一致し 1mm の誤差もない状態であり、更に逆射影誤差では位置決めに使った ArUco1~4 で 2 ピクセル以下、位置決めに使わない ArUco5 においても 4 ピクセル程度と極めて高い精度が得られることがわかった。図-5 は本法を実橋の端横桁位置に適用した例である。端横桁やスタッド位置まで厳密に一致し従来にない高精度な位置決めが可能となった。



(a) 格子供試体の重畳状況



(b) 逆投影誤差

図-4 格子供試体の精度試験



図-5 端横桁への適用事例

5. まとめ

AR の位置合わせに関して今回二つの手法を開発し鋼橋製品に適用した。多点マーカーのベストマッチ法では AR そのものの 3 次元計測精度を改善できないものの誤差の影響を抑えることができ、大型構造物であっても端末より見た場合のズレを付属物などの有無や誤取付を判断できるに十分な精度で活用することができた。一方、既知マーカー座標から端末位置を逆算する方法では極めて高精度な位置決めを実現することができ付属物の取付精度確認や野書線の代用などに活用できると期待している。

参考文献

- [1] Close Range Photogrammetry principle, Methods and Applications T Luhmann, S Robson, S Kyle and I Harley 2006 Whittles Publishing,
- [2] <https://docs.opencv.org/4.x/index.html> OpenCV documentation
- [3] <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation@5.0/manual/index.html> unity ARfoundation manual
- [4] 新版・測量データの3次元計測 東洋書店 中根勝見（著）2001