

二维影像测量软件系统中 坐标系的建立方法

徐小平, 魏国强

(北京航空精密机械研究所, 北京 100076)

摘要: 在产品的误差检验和逆向工程中, 为了实际测量的需要以及保证测量数据的一致性, 用二维影像测量仪进行测量之前需要建立相应的测量坐标系。本文详细讨论了二维影像测量软件系统中涉及到的各种坐标系的建立方法, 深入讨论了各种坐标系间变换关系的建立过程, 并简要介绍了二维标定的原理, 具有较强的实用价值。

关键词: 精密工程测量; 影像测量; 标定; 坐标系建立; 坐标系变换

中图分类号: TH741.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2008)07-0634-6

Creation method of coordinate systems in 2-D image measuring software system

XU Xiaoping, WEI Guoqiang

(Beijing Precision Engineering Institute, Beijing 100076)

Abstract: In order to ensure the coherence of the measuring data, measuring-coordinate system must be created firstly before the part is measured and checked by 2-D image measuring instrument. This paper discusses not only the creation method of coordinate systems in 2-D image measuring software system in detail, but also the theory of transformations among the coordinate systems in-depth, and briefly study the theory of calibration in image measuring. The conclusion have strong practical value.

Key words: precise engineering surveying; image measuring; calibration; creation of coordinate system; transformation of coordinate system

0 引言

影像测量是近几年才发展起来的一门非接触式测量技术。它是现代光学为基础, 融光电子学、计算机图像学、信息处理、计算机视觉等科学技术为一体的现代测量技术^[1]。数字图像处理技术是影像测量技术的核心, 其发展在某种程度上决定着影像测量技术的发展。物体的尺寸、形状及位置关系是通过一系列坐标值来反映的, 要真正实现对目标物体的测量, 就必须建立相应的测量坐标系。因此, 研究探讨测量过程中涉及到的各种坐标系、坐标系的建立过程及其相互变换关系都有较强的实用价值。

1 坐标系的类型

二维影像测量仪是近几年检测行业新生的一款设备。它将投影和图像集合在一起进行数据测量, 要达到测量目的, 需要软件和仪器本身的硬件一起实现。二维影像测量仪的物理结构如图1所示。

二维影像测量中常用的坐标系包括直角坐标系、极坐标系及非正交坐标系等。由于直角坐标系可以通过线性变换矩阵实现坐标变换, 在二维影像测量中大都以直角坐标系作为坐标变换的基础。按照坐标系的作用及其形成的先后顺序, 二维影像测量系统中会涉及到以下几种坐标系:

作者简介: 徐小平 (1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 影像测量

通信联系人: 魏国强, 研究员, 主要研究方向: 坐标测量技术, E-mail: guoqwei@263.net.cn

1) 机床坐标系是以开机时机器测头所在的位置为原点，以 X, Y, Z 三个导轨方向为坐标轴所构成的直角坐标系[2]。

2) 绝对坐标系是以测量仪工作台上一个固定不变的点为基准（原点）， X, Y, Z 三个导轨方向为坐标轴建立的一个参考基准，又被称为 0 号坐标系。在变换了测头，甚至在关机后系统重新启动的情况下，仍能根据它重新恢复各元素之间的相互位置关系[2]。

3) 工件坐标系又被称作零件坐标系。它是在被测零件上以零件设计基准建立的坐标系，是为了修正被测工件摆放位置误差而建立起来的坐标系。工件坐标系的作用等效于使用传统测量仪器在测量之前所做的精确找正[2]。

4) 世界坐标系是用户自定义的三维空间参考坐标系，用于描述相机和物体（工件）的位置。机床坐标系、基准坐标系、工件坐标系等都是世界坐标系。

5) 图像像素坐标系 (u, v) 是以图像左上角为原点，以像素为坐标单位的直角坐标系。 u, v 分别表示像素在数字图像中的列数与行数。

6) CAD 数模系统坐标系是由 CAD 数模绘制者在绘制图纸时自定义的坐标系。

上述几种坐标系之间的相互关系如图 2 所示。图中 H 为实线箭头联系的坐标系之间的变换矩阵，虚线表示省略的工件坐标系。

在二维影像测量中，由于被测物体表面、载物台表面及 CCD 成像面相互平行，且二维测量中不需要深度信息，故可以在一个固定的平面如 $Z=0$ 的平面内讨论上述各坐标系的建立过程及其相互之间的关系。

2 建立坐标系的基本原理及方法

对于每个测量点，影像测量不同于接触式测量，计算机采集的坐标值是图像像素坐标系中的值。测量时如果未建立工件坐标系，则计算机默认工件坐标系与机床坐标系一致，输出相对于机床坐标系的测量结果。如果建立了工件坐标系，则计算机输出的结果是经过转换，并且是相对于工件坐标系的测量结果。正确地建立工件坐标系对于保证迅速而准确地进行测量工作是至关重要的，否则就可能导致错误的测量结果[3]。

2.1 建立坐标系的必备条件

1) 确立第一坐标轴方向的实际基准元素

目标平面上必须有一个确定第一个坐标轴方向的实际基准元素，如在工件坐标系中它一般是工件平面中的某一基准直线。第二坐标轴的方向可以由第一坐标轴的方向逆时针旋转 90° 来确定。

2) 坐标系原点

必须能确定坐标系原点。如工件坐标系原点通常应选在测量中无附加计算便能获得较多的测量结

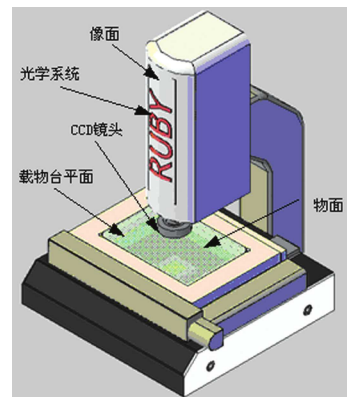


图 1 二维影像测量仪结构图
Fig. 1 Structure of 2-D image measuring instrument

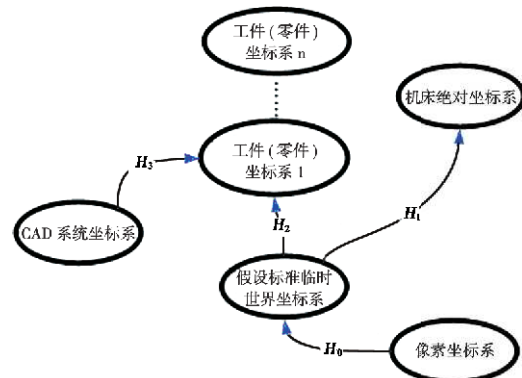


图 2 二维影像测量系统坐标系及其相互关系
Fig. 2 Coordinates of 2-D image measuring system and their relationship

果，且能与图样上标注的尺寸进行比较的位置上。

2.2 建立坐标系

正如上面所讨论的那样，影像测量不同于接触式测量。对于每一个测量点，计算机采集到的坐标值是图像像素坐标系的值。要实现测量，即使不建立工件坐标系，也必须将图像坐标系下的坐标值输出，并转换到机床坐标系中进行计算处理。将在不同状态下测量的数据统一到同一参考系下称为测量数据的定位和重定位^[4]。本文首先讨论像素坐标系与机床坐标系及其之间变换关系的建立过程。

2.2.1 建立像素坐标系到标准临时世界坐标系的变换关系

像素坐标系是通过一个被称作“标准临时世界坐标系”的中间坐标系与机床坐标系发生联系的。发生联系的过程是在 CCD 摄像机的“标定”过程中完成的。CCD 摄像机的标定过程为：拍摄已知世界坐标的空间点阵图像，获取对应点的图像坐标，然后通过特定的成像模型和算法，计算摄像机内外参数，这通常通过观测一个标定参照物来完成。

为了描述方便，本文首先对摄像机标定时使用的成像模型进行简要介绍。摄像机的成像模型有很多，比较常用的是针孔模型。针孔模型假设一幅图像经过透视投影变换将三维空间中的点投影到图像平面。投影公式如下

$$S \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad t] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(X_w, Y_w, Z_w) 是一个点的世界坐标， (u, v) 是点投影在图像平面的坐标，以像素为单位。 A 被称作摄像机内部的参数矩阵， (C_x, C_y) 是基准点，通常在图像的中心， f_x, f_y 是以像素为单位的焦距， R 为转换矩阵， t 为平移向量。

在二维影像测量中，可以假设被测对象（靶标平面）位于 $Z=0$ 的平面内，则由式 (1) 可得

$$S \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

该 3×3 的 H 矩阵在相差一个非零常数因子的意义下是确定的，因此在获得一幅靶标平面的图像之后即可计算出相应的 H 矩阵。

要确定空间点阵的世界坐标，需要建立世界坐标系（为了讨论方便，称该坐标系为“标准临时世界坐标系”）。本文以平面靶标为例进行说明。如图 3 所示，以平面靶标上每相邻四个黑白相间的棋盘格子的交叉点（又称做角点）为参考点，其相互位置关系已知。将标准临时世界坐标系建立在靶标上， X_w, Y_w 轴位于靶标平面内， Z_w 轴垂直于靶标平面并指向靶标正面，原点位于左上角的参考点上。这样所有参考点在世界坐标系中的坐标均已知，其 Z_w 坐标值均为 0。

空间点阵数字图像交叉点（角点）坐标可以使用 Harris 角点检测等算法比较容易的获取到。

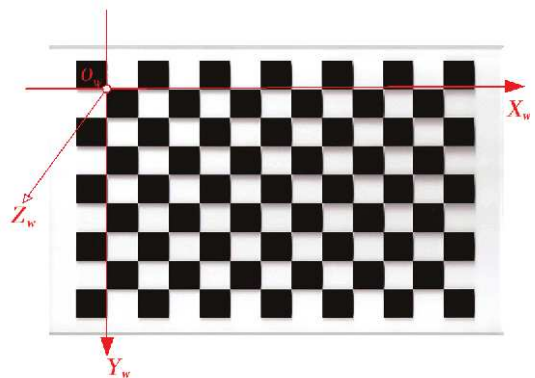


图 3 平面靶标与标准临时世界坐标系
Fig. 3 Flat plate and temporary world coordinate

以平面靶标交叉点的世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 为自变量，对应的数字图像交叉点的像素坐标 (u, v) 为因变量，进行最小二乘拟合，即可计算出式 (2) 中的 H 矩阵与非零常数因子，然后归一化，即确定了标准临时世界坐标系到像素坐标系之间的变换矩阵 H_0 ，像素坐标系到标准临时世界坐标系的变换矩阵为 H_0^{-1} 。

2.2.2 建立标准临时世界坐标系到机床坐标系的变换关系

如图 1 所示，二维影像测量系统 CCD 摄像机物面、像面、载物台平面相互平行，摄像机光轴垂直于载物台平面（物理垂直度由机械硬件结构进行保障）。

因测量过程中机床坐标系的位置相对固定，而其它坐标系都是因被测元素不同而变的，因此需要将测量数据统一到机床坐标系下进行处理。正如上面描述的那样，计算机直接采集到的数据是像素坐标系中的坐标值，要实现测量，还需要建立标准临时世界坐标系与机床坐标系之间的变换关系。 $X_wO_wY_w$ 为标准临时世界坐标系， $X_MO_MY_M$ 为机床坐标系，两者之间的关系如图 4 所示。只要计算出坐标系 $X_wO_wY_w$ 相对于坐标系 $X_MO_MY_M$ 顺时针方向转过的角度 α ，以及原点 O_w 在坐标系 $X_MO_MY_M$ 中的坐标值即可确定两坐标系的变换关系。

2.2.2.1 确定旋转角 α

使载物平台沿机床坐标系的 X_M 轴方向移动一小段距离，如图 4 所示。中心点 O （CCD 摄像机光轴与成像面的交点，该点在像素坐标系中的坐标值可以在 CCD 摄像机标定过程中计算得到）相应移动到 O' 所在位置， OO' 与 X_w 轴的夹角即为待确定的旋转角 α 。因 O' 在 $X_wO_wY_w$ 坐标系中的坐标值较难确定，坐标原点 O_w 为标定板角点，载物平台移动以后该点在坐标系 $X_wO_wY_w$ 中移动的方向和距离与中心点 O 移动的方向和距离相同，而 O_w 点移动后的坐标值很容易获得，可设载物平台移动以后求得 O_w 点在 $X_wO_wY_w$ 坐标系中的坐标值为 (X_1, Y_1) ，则有 $\tan\alpha = X_1/Y_1$ ，即 $\alpha = \tan^{-1}(X_1/Y_1)$ 。

2.2.2.2 确定原点 O_w 在坐标系 $X_MO_MY_M$ 中的平移 (X_{Mh}, Y_{Mh})

如图 4 所示的几何关系不难得出如下关系式

$$\begin{cases} X_{Mh} = X_{M1} + Y_{w1} \sin\alpha - X_{w1} \cos\alpha \\ Y_{Mh} = Y_{M1} + X_{w1} \sin\alpha - Y_{w1} \cos\alpha \end{cases} \quad (3)$$

根据以上两关系式即可求出 $X_wO_wY_w$ 坐标系原点在 $X_MO_MY_M$ 坐标系中的坐标值 (X_{Mh}, Y_{Mh}) 。其中 (X_{M1}, Y_{M1}) 为测头在机床坐标系中的位置值，可以通过读取光栅位置计数系统得到； (X_{w1}, Y_{w1}) 为中心点 O 在标准临时世界坐标系中的坐标值。因此可以求得标准临时世界坐标系到机床坐标系的变换矩阵为

$$H_1 = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & X_{Mh} \\ \sin\alpha & \cos\alpha & Y_{Mh} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2.2.3 载物平台或测头移动对变换关系的影响

二维影像测量使用的 CCD 摄像机的物方视场一般都非常小（0.5~10 mm），不能一次完成对整个工件的测量，因此需要移动载物平台或测头

分别测量工件各个部分。一旦载物平台或测头状态发生变化，像素坐标系到标准临时世界坐标系的变换矩阵将不再是 H_0 ，原因是两个坐标系之间的相对位置发生了变化。由于被测物面与摄像系统光轴垂

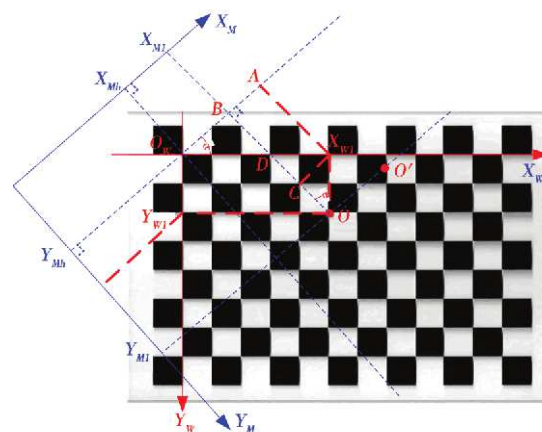


图 4 标准临时世界坐标系与机床坐标系关系图
Fig. 4 Relationship between temporary world coordinate and machine coordinate

直，所以相对位置的变化只有平移的变化。

可假设有一个随着测头移动的移动世界坐标系，它与像素坐标系之间始终满足通过单应性矩阵 H_0 建立起来的变换关系。显然，该坐标系可以通过对标准临时世界坐标系施以平移变换而得到。根据 CCD 成像模型的几何关系，可以求得载物平台或测头在机床坐标系中 X、Y 方向上分别发生 g 、 h （该值可以通过光栅位置计数系统读取）的位移以后，移动世界坐标系相对于标准临时世界坐标系在其 X_w 、 Y_w 方向上发生的位移为

$$\begin{aligned} G &= \frac{g}{\cos\alpha} + (h - g \cdot \tan\alpha)\sin\alpha \\ H &= h \cdot \cos\alpha - g \cdot \sin\alpha \end{aligned} \quad (4)$$

其中， α 为机床坐标系 X 轴正向与标准临时世界坐标系 X 轴正向之间的夹角。则重新建立像素坐标系

到标准临时世界坐标系的变换矩阵为 $H'_0 = H_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & -G \\ 0 & 1 & -H \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

2.2.3 建立标准临时世界坐标到工件坐标系的变换关系

完成上述几个坐标系及其相互变换关系的建立后，即能实现测量。但是有时为了测量方便，需要将坐标系建立在被测工件上，这就需要建立工件坐标系及确定其于标准临时世界坐标系之间的变换关系。在平面中，一条有向直线与一个坐标点即可确定一个平面直角坐标系。可以将有向直线所在的方向作为坐标系 X 轴的方向，将有向直线逆时针旋转 90° 后所在的方向作为坐标系的 Y 轴方向，然后将指定的点作为坐标系原点即可建立起一个笛卡尔平面直角坐标系，如图 5 所示。

建立工件坐标系时，以标准临时世界坐标系 $X_wO_wY_w$ 作为源坐标系，对其作旋转平移变换，以变换后的坐标系作为工件坐标系。整个建立过程可以分为两个步骤，首先确定旋转角，然后确定坐标原点的平移。

确定旋转角。如图 5 所示，若指定有向直线 P_1P_2 作为工件坐标系的 X 轴方向，则该条直线与 X_w 轴正向的夹角即为需要确定的旋转角。可以规定逆时针旋转时夹角为正，顺时针旋转为负。

确定坐标原点的平移。如图 5 所示，若指定点 P_0 作为工件坐标系的坐标原点，则 P_0 点在 $X_wO_wY_w$ 坐标系中的坐标值即为需要确定的原点平移。

因此，可以得出标准临时世界坐标系到工件坐标系的变换关系为

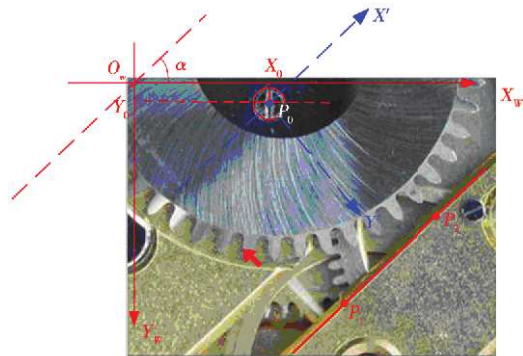


图 5 工件坐标系与标准临时世界坐标系关系图
Fig.5 Relationship between workpiece coordinate and machine coordinate

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ 1 \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & X_0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2.4 建立 CAD 系统坐标系到工件坐标系的变换关系

在实现对工件的自动测量时，为了完成测量任务，需要建立 CAD 数模系统坐标系与工件坐标系之间的变换关系，进而建立与机床坐标系之间的变换关系。这个建立变换关系的过程一般是在建立工件

坐标系的过程中完成的，简要描述如下。

在建立工件坐标系指定有向直线与坐标原点的同时，指出 CAD 数模中与之相对应的直线与坐标点。因 CAD 数模中所有元素的坐标值均是已知的，根据前述坐标系旋转平移的坐标系变换理论，很容易确定两坐标系之间的变换关系为

$$\begin{bmatrix} X_{CAD} \\ Y_{CAD} \\ 1 \end{bmatrix} = H_3 \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & X_{CAD0} \\ \sin\alpha & \cos\alpha & Y_{CAD0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中， (X_{CAD}, Y_{CAD}) 为数模中任意点的坐标值， (X', Y') 为该点在工件坐标系中的坐值， (X_{CAD0}, Y_{CAD0}) 为工件坐标系原点在 CAD 数模系统坐标系中的坐标值， α 为工件坐标系 X 轴正方向与 CAD 数模系统坐标系 X 轴正方向所成的夹角。

3 结论

随着 CAD 技术的发展，非接触式影像测量技术越来越多地应用于实际工程中，与之相应的测量软件也逐渐成熟。本文着重讨论了在实际测量前期建立坐标系统及其相互间变换关系有关的技术问题。这对后续的测量工作以及数据处理过程有至关重要的作用。本文讨论的坐标系及其间相互变换关系的建立方法已在本所测量机事业部研发的二维影像测量仪软件系统中得到实现，取得了较好的应用效果。

[参考文献] (References)

- [1] 吴晓波, 杨永琴, 张建明. 图像测量技术的新应用[J]. 光学精密工程, 1998 (3): 5~8.
WU X B, YANG Y Q, ZHANG J M. Image measuring technique and it's development[J]. Optics and Precision Engineering, 1998(3): 5~8. (in Chinese)
- [2] 于起峰. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
YU Q F. Image-based precision measurement and motion measurement[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [3] 王亚平, 郑彦龙. 三维测量软件系统中坐标系的建立方法[J]. 计量测试与检定, 2004, 14 (16): 27~30.
WANG Y P, ZHENG Y L. Creation method of coordinate system in 3-D measuring software system[J]. Metrology Test Technology & Verification, 2004, 14(6): 27~30. (in Chinese)
- [4] 金淘, 单岩, 童水光. 实物测量造型中的测量数据重定位方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 4 (4): 315~318.
JIN T, SHAN Y, TONG S G. 3D measuring points registration based on datum points in reverse engineering[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2001, 4(4): 315~318. (in Chinese)