

空间点的多视图DLT三维定位

赵祚喜, 冯荣, 朱裕昌, 谈婷

引用本文:

赵祚喜, 冯荣, 朱裕昌, 等. 空间点的多视图DLT三维定位[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(1): 212–222.

ZHAO Zuo-xi, FENG Rong, ZHU Yu-chang, et al. Multi-view DLT three-dimensional positioning method for spatial points[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 212–222.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202801.0212>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大视场双目立体视觉柔性标定

Flexible calibration method for binocular stereo vision in large field of view

光学精密工程. 2017, 25(7): 1882–1889 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172507.1882>

地面三维激光扫描仪与外架数码相机间安置参数的高精度标定

High accuracy calibration of installation parameters between 3D terrestrial laser scanner and external-installed digital camera

光学精密工程. 2016, 24(9): 2158–2166 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162409.2158>

基于立体定向靶标的探针式多视场三维视觉测量系统

Probe-based multi-view field 3D vision measurement system based on three-dimensional orientation target

光学精密工程. 2019, 27(1): 34–44 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192701.0034>

三维姿态角高精度测量装置

High accuracy three-dimensional attitude angle measuring device

光学精密工程. 2016, 24(5): 963–970 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162405.0963>

二维旋转平台下的相机参数标定

Camera parameter calibration based on two-dimensional rotating platform

光学精密工程. 2017, 25(7): 1890–1899 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172507.1890>

文章编号 1004-924X(2020)01-0212-11

空间点的多视图 DLT 三维定位

赵祚喜*, 冯 荣, 朱裕昌, 谈 婷
(华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:物理点的三维定位是计算机视觉实现特征提取、模式识别、测绘、运动分析的基础,为了减少遮挡的影响及增大视场面积,可以通过多视图实现点的三维定位,但目前使用专门仪器设备及专门软件实现,定位的点数、二次开发功能都有一定限制。本论文提出一种基于直接线性变换(Direct Linear Transformation, DLT)的物体上点的世界坐标系下的三维定位方法,适用于单台相机移动获取的多视图实现的静态结构体点的定位,也适合于多台相机同时拍摄获取的机器上点的三维动态定位。采用 DLT 方法进行各相机(或不同位置下的相机)进行标定获取内外参数,即布置 6 个以上不共面且坐标已知的控制点,根据空间三维坐标与图像二维坐标的线性变换关系列出方程组,通过最小二乘法对相机内外参数进行线性估计;再利用这些内外参数实现点的三维定位,即依据空间几何线-线交会原理利用最小二乘法求解实现空间点的世界坐标测量。论文论证了本方法的原理,提出了方法的步骤,并以水田平地机为试验平台,测量平地铲上待测点的世界坐标来验证。试验结果表明:该方法测得的坐标在 X, Y, Z 方向的平均绝对误差为 4.19 mm, 3.97 mm, 3.69 mm, 空间相对距离误差为 0.81%, 满足一般测量精度要求。进一步提高精度可以考虑在标定步骤中校正相机失真。基于一台或多台相机得到的多视图,该方法能够实现任意多个物理点的世界坐标测量,测量结果不受相机位置影响。

关键词: DLT 方法; 多视图; 相机标定; 三维定位; 机器视觉

中图分类号: TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202801.0212

Multi-view DLT three-dimensional positioning method for spatial points

ZHAO Zuo-xi*, FENG Rong, ZHU Yu-chang, TAN Ting

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

* Corresponding author, E-mail: zhao_zuoxi@scau.edu.cn

Abstract: 3D positioning of physical body points plays an important role in machine vision applications involving feature extractions, pattern recognition, geometrical measurement and motion analysis. To cover a wide detection and mitigate the influence of occlusion some multiple view technique for positioning is adopted, a technique that is generally fulfilled using expensive instruments and specialized software and thus its applications are restricted in terms of number of points that can be positioned simultaneously, ability for user programming and affordability. With both complete algorithm and procedure, this paper proposed a DLT(Direct Linear Transformation)-based method for 3D positioning of

收稿日期: 2019-05-21; **修订日期:** 2019-06-14.

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(No. 2016YFD0700101-02, No. 2016KZDXM027); 广东省现代农业产业技术体系创新团队项目资助(No. 2019KJ129)

object point in the world coordinate frame via multiple view geometry, applicable to multiple view provided by either a single camera moving into different positions for still scene positioning, or by multiple cameras for a dynamic positioning application. This method consisted of 2 main steps, i. e. a DLT-based camera calibration and a 3D coordinates reconstruction (positioning) with the camera parameters obtained in calibration. In the calibration step, a minimum of 6 control points, not co-planar but with known world coordinates, were set up and linear equations were formulated modeling relationship between world frame coordinates of these control points and their relevant image points' position in the camera coordinate frame, and equations then were solved via least squares method for best linear estimation of the camera parameters in the form of a series of L intermediary parameters. In the positioning step, the concept of finding intersection point of multiple spatial ray—each ray emanating from the corresponding camera's optical center and the image point corresponding to the same physical point—was used to formulate equations for the 3D positioning, which then were solved also via the linear least square method with the obtained L parameters. Still scene physical point positioning tests of 10 control points and 20 test points were conducted on a field leveler machine platform, where the scene was captured by one camera in 3 different positions and true reference positions of the test points provided by a total station. Results show that the average absolute error of the coordinates measured in the X, Y and Z directions is 4.19 mm, 3.97 mm, 3.69 mm, and the spatial relative distance error is 0.81%, thus satisfying the needs of general geometrical measurement. The method proposed can measure static and dynamic 3D world coordinates for multiple physical points, though higher via a more complicated DLT-based calibration procedure for the additional cameras' distortion parameters.

Key words: Direct Linear Transformation(DLT); multiple view geometry; camera calibration; 3D positioning ; machine vision

1 引 言

在航空航天、机械制造、汽车装配等领域,各种复杂零件的研制、生产和装配、建模、仿真、分析,需要先进的检测技术和测量方法。对于越来越多需要进行空间三维测量的工件,传统的线、面检测方法已不能满足生产需要,因此坐标测量技术将作为几何量测的研究重点^[1]。传统的坐标测量方法一般采用全站仪、三坐标测量仪、激光跟踪仪等进行三维关键点的测量,这些仪器每次只能测量很少的点,测量速度相当慢^[2-4]。由于基于计算机视觉的三维定位技术具有非接触、无破坏以及高分辨率、测量效率高的优点,已逐渐成为几何量测技术的研究重点^[5]。

3D 视觉测量系统根据相机是否需要固定分为大致分为两种测量模式:一种是摄像机固定式的三维测量,即摄像机固定,操作人员手持光笔,

将光笔低端的测针接触物体表面上的被测点,摄像机系统通过光笔上镶嵌的多个光学特征点,求解出光笔的空间位姿参数,由于测针的几何位置已知,被测点的三维坐标即可被精确测量出来;另一种是摄像机移动式的三维测量,事先在被测物体表面粘贴标记点,利用手持式高分辨率数码相机在多个位置对被测物体进行拍摄,测量软件对图像自动进行处理并计算出标记点的空间坐标,实例是各种手持 3D 扫描仪。

在 3D 视觉定位领域的研究和应用很多。赵永国^[6]等在移动机器人避障过程中为获取障碍物在现实世界坐标系下的三维坐标,利用 MATLAB 与 Triclops SDK 数据库,开发了一套基于双目视觉的移动机器人避障系统,实测数据表明该套系统具有不错的避障表现;解则晓^[7]等为了对车间生产工件实现高精度、大尺寸的三维坐标现场测量,设计了一套光笔测量系统,该系统由两台面阵 CCD 摄像机、光笔、支架及一台笔记本电

脑组成,通过试验测试了该系统在有效视场范围内的测量精度,基本满足要求不太高的大尺寸现场测量;董英华^[8]等为提高其研发的光笔式视觉坐标测量系统的测量精度,采用改进的 Tsai 标定法实现摄像机的高精度标定,通过数学平均思想提高了测头中心的稳定性及算法的收敛速度;孔筱芳^[9]等提出一种双目摄像机标定及空间坐标重建方法,采用了高精度 GPS 代替 2D 或 3D 靶标,与传统的 3D 靶标标定方法相比,其空间重建坐标相对距离误差从 1.56% 减少到 0.52%,具有较高的空间坐标重建精度,但 GPS 不便于安装到被测物体表面点上,不满足实际的应用场景。

国内外一些公司已开发出成熟的 3D 测量产品,国外的有挪威 Metronor 公司的 SOLO 系统、美国 GSI 公司的 V-STARS 系统和 Aicon 公司的 ProCam 系统等^[10],国内的有北京天远三维科技公司的 DigiMetric 三维摄影测量系统和 Robot 动作捕捉系统等。SOLO 系统主要由相机、测量光笔及测针、笔记本电脑及测量软件组成,该系统可实现 30 m 的范围测量,长度测量精度为 25 μm ,还可以测量 600 mm 深度的隐藏点^[11];V-STARS/S 系统由 1 套测量型数码相机、1 台笔记本电脑(含系统软件)、1 根基准尺、1 根定向棒、1 组人工特征标志点组成,10 m 范围的坐标测量精度达到 0.044 mm^[12];DigiMetric 三维摄影测量系统是在被测物体表面粘贴若干标记点,利用手持式高分辨率数码相机在多个位置对被测物体进行拍摄,将拍摄所得图像导入到计算机中,DigiMetric 测量系统软件对图像自动进行处理并计算出标记点的三维坐标,具有测量环境不受限制,测量范围不受限制,操作简单方便等优点,坐标测量精度 $\leq 0.1 \text{ mm}/4 \text{ m}$ 。

以上的方法往往需要昂贵的仪器、专门的设备因而应用受到限制,例如能同时定位的点数、二次开发能力等的限制,难以在一般的实验室推广使用。本文提出一种不需要昂贵仪器的物体点世界坐标系 3D 定位方法。该方法基于直接线性变换(Direct Linear Transformation, DLT)的物体上点的世界坐标系下的三维定位方法,适用于单台相机移动获取的多视图实现的静态结构体点的定位,也适合于多台相机同时拍摄获取的机器上

点的三维动态定位。根据空间几何线-线交会原理,利用最小二乘法实现空间点的世界坐标测量,与传统的测量法相比,该方法能够实现任意个点的 3D 世界坐标测量,而且相机位置可移动,使用方便。

2 基于 DLT 方法的相机标定及物点多视图 3D 定位原理分析

2.1 DLT 相机标定

相机标定的基本方法是通过环境(有专门的几何形状已知的标定对象或无专门的标定对象)来确定相机几何参数的过程,是计算机 3D 视觉应用的首要步骤,按照使用的标定对象的不同可分为 3D, 2D, 1D 及无标定对象^[13]。DLT 标定方法是一种基于 3D 标定对象的相机标定方法,即将标定对象上每一个已知控制点(3D 世界坐标已知)和相机图片上的对应的成像点(图像坐标系下 2D 像素坐标已知)建立线性模型(式(2)),将相机内外参、几何失真参数视为未知数,设置多个控制点使所列的方程数不小于未知数数量,再利用最小二乘法实现这些参数的线性估计(不使用旋转矩阵各个元素之间的非线性约束),原理简单计算工作量小^[13-14]。本章有关 DLT 方法参考了文献如下^[15],DLT 相机标定方法的完整介绍^[16]。图 1 为小孔成像模型示意图,在相机标定过程中涉及 4 个坐标系及 3 次坐标转换,分别为世界坐标系 W 到相机坐标系 C 的转换①,相机坐标系 C 到图像坐标系 I 的转换②,图像坐标系 I 到像素坐标系 S 的转换③,最终得到像素坐标系 S 和世

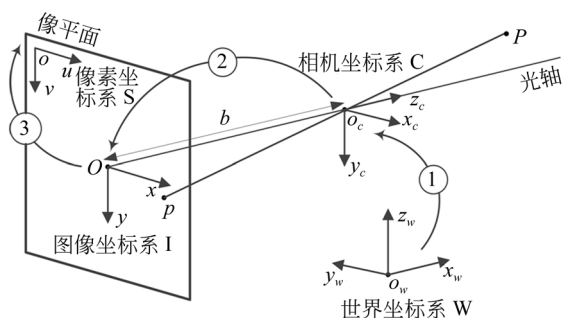


图 1 小孔成像模型示意图

Fig. 1 Sketch map of pinhole camera model

界坐标系 W 间的线性变换关系^[17-18]如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_{ci}} \begin{bmatrix} b/k_u & 0 & u_0 \\ 0 & b/k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{wi} - x_0 \\ y_{wi} - y_0 \\ z_{wi} - z_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, $(u_i, v_i, 1)^T$ 为各成像点的像素齐次坐标, b 为相机焦距, k_u, k_v 分别为单个像素在 u 和 v 方向上的真实尺寸, (u_0, v_0) 为焦点的像素坐标, r_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) 为世界坐标系至相机坐标系之间旋转矩阵 \mathbf{R} 中的元素, (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) ($i=1, 2, \dots, N$) 为各标定点的 3D 世界坐标, (x_0, y_0, z_0) 为平移矩阵 \mathbf{T} , 表示相机坐标系原点 o_c 在世界坐标系下的坐标, z_{ci} ($i=1, 2, \dots, N$) 为各标定点在相机坐标系 Z 方向上的坐标。

将式(1)展开得式(2):

$$\begin{aligned} u_i - u_0 &= \frac{b}{k_u} \frac{r_{11}(x_{wi} - x_0) + r_{12}(y_{wi} - y_0) + r_{13}(z_{wi} - z_0)}{r_{31}(x_{wi} - x_0) + r_{32}(y_{wi} - y_0) + r_{33}(z_{wi} - z_0)} \\ v_i - v_0 &= \frac{b}{k_v} \frac{r_{21}(x_{wi} - x_0) + r_{22}(y_{wi} - y_0) + r_{23}(z_{wi} - z_0)}{r_{31}(x_{wi} - x_0) + r_{32}(y_{wi} - y_0) + r_{33}(z_{wi} - z_0)}, \end{aligned} \quad (2)$$

将式(2)整理为如下式(3),使得式(3)中像素坐标 (u_i, v_i) 值只取决于标定点的世界坐标 (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) ($i=1, 2, \dots, N$) 及 11 个包括相机内外参数的常数参数 L_k ($k=1, 2, \dots, 11$)。

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{L_1 x_{wi} + L_2 y_{wi} + L_3 z_{wi} + L_4}{L_9 x_{wi} + L_{10} y_{wi} + L_{11} z_{wi} + 1} \\ v_i &= \frac{L_5 x_{wi} + L_6 y_{wi} + L_7 z_{wi} + L_8}{L_9 x_{wi} + L_{10} y_{wi} + L_{11} z_{wi} + 1} \end{aligned} \quad (3)$$

参数 $L_1 \sim L_{11}$ 可用内外参数表示为如式(4):

$$\begin{cases} L_1 = \frac{u_0 r_{31} - b_u r_{11}}{D} \\ L_2 = \frac{u_0 r_{32} - b_u r_{12}}{D} \\ L_3 = \frac{u_0 r_{33} - b_u r_{13}}{D} \\ L_4 = \frac{1}{D} [(b_u r_{11} - u_0 r_{31}) x_0 + (b_u r_{12} - u_0 r_{32}) y_0 + (b_u r_{13} - u_0 r_{33}) z_0] \\ L_5 = \frac{v_0 r_{31} - b_v r_{21}}{D} \\ L_6 = \frac{v_0 r_{32} - b_v r_{22}}{D} \\ L_7 = \frac{v_0 r_{33} - b_v r_{23}}{D} \\ L_8 = \frac{1}{D} [(b_v r_{21} - v_0 r_{31}) x_0 + (b_v r_{22} - v_0 r_{32}) y_0 + (b_v r_{23} - v_0 r_{33}) z_0] \\ L_9 = \frac{r_{31}}{D} \\ L_{10} = \frac{r_{32}}{D} \\ L_{11} = \frac{r_{33}}{D} \end{cases}, \quad (4)$$

其中: $b_u = b / k_u, b_v = b / k_v, D = -(x_0 r_{31} + y_0 r_{32} + z_0 r_{33})$ 。

将式(3)写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 x_{w1} & -u_1 y_{w1} & -u_1 z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & -v_1 x_{w1} & -v_1 y_{w1} & -v_1 z_{w1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n x_{wn} & -u_n y_{wn} & -u_n z_{wn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & -v_n x_{wn} & -v_n y_{wn} & -v_n z_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \\ L_6 \\ L_7 \\ L_8 \\ L_9 \\ L_{10} \\ L_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix}. \quad (5)$$

相机标定中,需要设置 $N(N \geq 6)$ 个已知三维坐标的控制点,故式(5)中含有 $2N$ 个线性方程,令:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 x_{w1} & -u_1 y_{w1} & -u_1 z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & -v_1 x_{w1} & -v_1 y_{w1} & -v_1 z_{w1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n x_{wn} & -u_n y_{wn} & -u_n z_{wn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & -v_n x_{wn} & -v_n y_{wn} & -v_n z_{wn} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{b} = [u_1, v_1, \dots, u_n, v_n]^T,$$

$$\mathbf{x} = [L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9, L_{10}, L_{11}]^T.$$

则式(6)可表示为求解非齐次线性方程组的矩阵形式 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, 采用最小二乘法可求解出未知量 \mathbf{x} , 即:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (7)$$

包含内外参数的 $L_k (k=1, 2, \dots, 11)$ 求解出后,需要通过式(4)来求解 16 个内外参数,包括 4 个内参数 b_u, b_v, u_0, v_0 和 12 个外参数 $r_{ij} (i, j=1, 2, 3)$, $\mathbf{T} = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$, 其中外参数 $r_{ij} (i, j=1, 2, 3)$ 形成的矩阵 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ 为正交旋转矩阵。这样就完成了相机的内外参数 DLT 法的标定。显然如果是多台相机实现多视图测量,则每台相机要经过上述步骤实现标定;如果是单台相机移动位置实现的多视图测量,则没移动一个位置均要按上述方法标定一次。

2.2 物理点的多视图 3D 定位

如前所述,多视图包括单台相机移动位置拍摄同一个场景得到多视图,也指多台相机同时拍摄获取多视图。前者适合静态测量场合后者适合于动态测量场合。图 2 为物理点的多视图的 3D 定位(坐标重建)系统结构和原理示意图。

对于每个视图下的相机而言,如果光心和像点已知,可唯一确定过测量点的一条直线,依据空间几何线-线交会原理,可以对测量点进行交会定

$$\begin{cases} (L_1 - L_9 u_1) x_w + (L_2 - L_{10} u_1) y_w + (L_3 - L_{11} u_1) z_w = u_1 - L_4 \\ (L_5 - L_9 v_1) x_w + (L_6 - L_{10} v_1) y_w + (L_7 - L_{11} v_1) z_w = v_1 - L_8 \end{cases}. \quad (8)$$

单个视图可列出 2 个线性方程,则 3 个视图可列出关于 (x_w, y_w, z_w) 的 6 个线性方程,转换为矩阵形式,有:

$$\begin{bmatrix} L_1^1 - u_1 L_9^1 & L_2^1 - u_1 L_{10}^1 & L_3^1 - u_1 L_{11}^1 \\ L_5^1 - v_1 L_9^1 & L_6^1 - v_1 L_{10}^1 & L_7^1 - v_1 L_{11}^1 \\ L_1^2 - u_2 L_9^2 & L_2^2 - u_2 L_{10}^2 & L_3^2 - u_2 L_{11}^2 \\ L_5^2 - v_2 L_9^2 & L_6^2 - v_2 L_{10}^2 & L_7^2 - v_2 L_{11}^2 \\ L_1^3 - u_3 L_9^3 & L_2^3 - u_3 L_{10}^3 & L_3^3 - u_3 L_{11}^3 \\ L_5^3 - v_3 L_9^3 & L_6^3 - v_3 L_{10}^3 & L_7^3 - v_3 L_{11}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 - L_4^1 \\ v_1 - L_8^1 \\ u_2 - L_4^2 \\ v_2 - L_8^2 \\ u_3 - L_4^3 \\ v_3 - L_8^3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

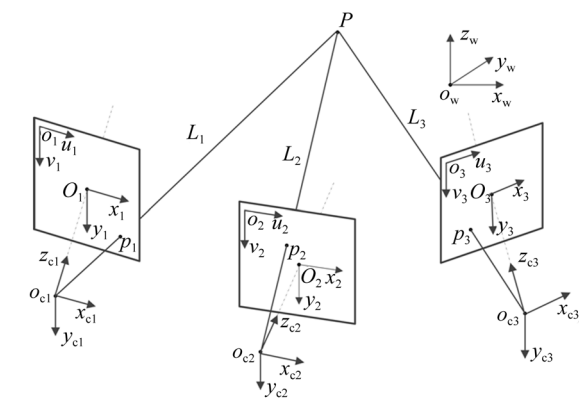


图 2 多视图的坐标重建示意图

Fig. 2 Sketch map of spatial coordinate reconstruction based on multi-view

位,由于镜头畸变、像素坐标提取精度、标定点坐标误差的存在,使得相机多角度确定的各条直线异面,不会相交于同一测量点,因此本文通过最小二乘法来求解被测目标点的空间坐标,假设空间中任意一点 $P(x_w, y_w, z_w)$ 在相机 3 个视图中对应的成像点分别为 $p_1(u_1, v_1)$, $p_2(u_2, v_2)$ 和 $p_3(u_3, v_3)$, 3 个视图对应的相机参数 $L_i (i=1, 2, \dots, 11)$ 可由式(7)求解得出,由式(3),可得到如下方程:

采用最小二乘法 $\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$ 即可求解出被测点 P 的坐标 (x_w, y_w, z_w) 。

为评价定位结果提出以下评价指标。将获得

的空间重建点 $P(x_w, y_w, z_w)$ 与其在世界坐标系下 3D 坐标真值 (x_q, y_q, z_q) 进行比较,得到空间点 P 重建坐标在 X, Y, Z 方向上的误差 dX, dY, dZ , 有:

$$\begin{cases} dX = |x_q - x_w| \\ dY = |y_q - y_w| \\ dZ = |z_q - z_w| \end{cases} \quad (10)$$

由式(11)可得空间重建坐标相对距离误差为:

$$err = \frac{\sqrt{dX^2 + dY^2 + dZ^2}}{\sqrt{x_q^2 + y_q^2 + z_q^2}} = \frac{\sqrt{(x_q - x_w)^2 + (y_q - y_w)^2 + (z_q - z_w)^2}}{\sqrt{x_q^2 + y_q^2 + z_q^2}} \quad (11)$$

2.3 DLT 多视图物理点 3D 定位基本步骤

本文提出的 DLT 多视图物理点世界坐标系 3D 定位的基本步骤总结如下:

(1)建立世界坐标系下的 3D 标定对象:即确定不少于 6 个不在同一个平面的控制点并确定世界坐标系下的 3D 坐标。控制点包络体积尽量覆盖待测点的运动范围,控制点数尽量多且尽量在

包络体积中均布;

(2)DLT 方法完成相机标定得到 L 参数(式(7))及相机内外参数(式(4))。多台相机则每台相机要标定,如果是单台相机则没移动一个位置均要标定。见 2.1 节;

(3)测量待定位物理点对应的图像点的像素坐标,利用上面 2)标定求得的各相机(或同一相机不同位置)的 L 参数,由式(9)求得这些点的世界坐标系的 3D 坐标。见 2.2 节;

(4)如果是多相机实现的多视图物理点位置的连续动态测量,假定相机位置不动则返回(3)继续执行直至任务完成;否则返回(2)(即重新标定)继续执行至任务完成。

3 试验设计与数据分析

3.1 试验设备

进行了单相机移动位置实现的多视图多个物理点静态定位试验并与真实结果(全站仪测量得到)进行了比较验证。实验采用美国 Vision Research 公司产的 Phantom M310 高速相机进行图

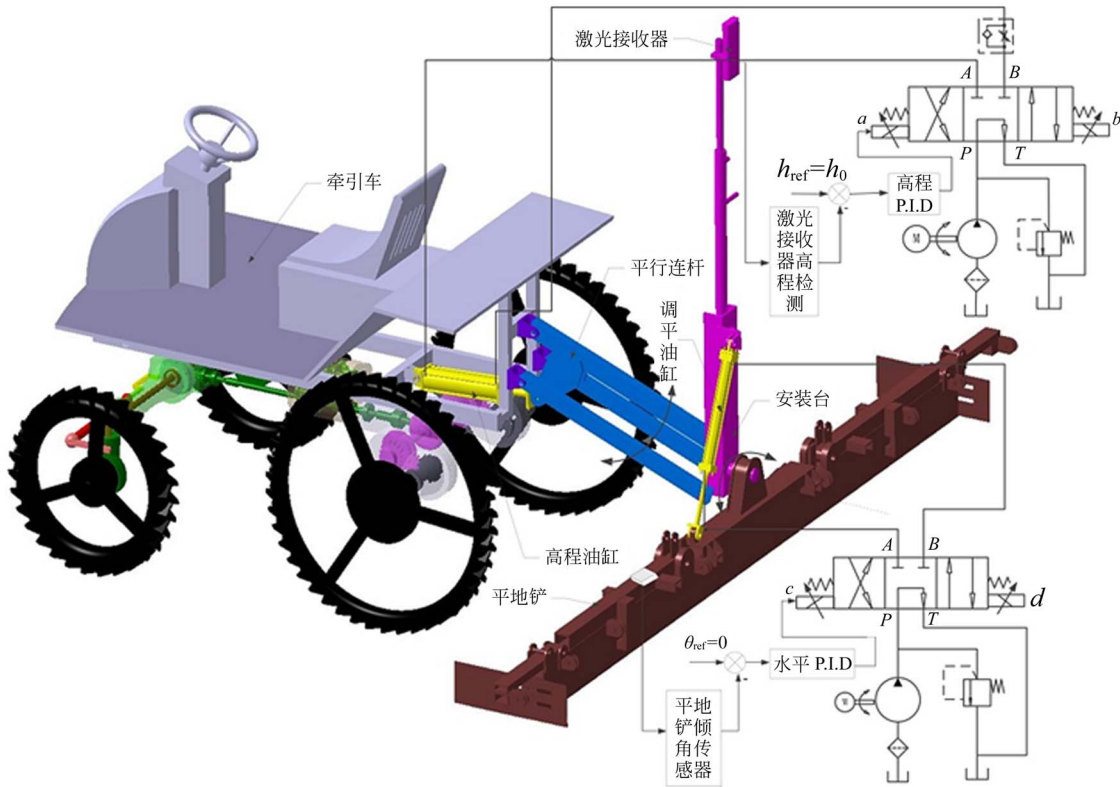


图 3 水田平地机结构示意图

Fig. 3 Sketch map of structure of paddy field leveler

像采集,传感器尺寸为 25.6×16.0 mm,分辨率为 $1\ 280 \times 800$,对应像素大小 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$,镜头焦距 $24 \sim 85$ mm 可调,拍摄速率采用 $1\ 000$ frame/s,光圈值为 $f/2.8$;采用瑞典 Image Systems 公司的 TEMA 运动分析软件测量图像中标定点及被测点的像素坐标,在这里拍摄的是静态场景,故只需截取视频中的 1 帧图像导入 TEMA 软件中进行处理;采用科利达公司产的 KTS-462LL 全站仪对目标点的三维坐标进行测量,该仪器的测距精度为 $2 + 2\text{ppm} \times 5\ \text{km}$,即测量距离为 $5\ \text{km}$ 的误差为 $12\ \text{mm}$,试验在 1PJ-3.0 型水田平地机上进行,图 3 为水田平地机的结构示意图。

水田平地机包括机械系统、液压系统、高程控制系统和水平控制系统四大部分,采用乘坐式并关 PG6 插秧机的为动力^[19-20],以三点悬挂方式与平地机相连,三条平行连杆一端与插秧机底盘旋

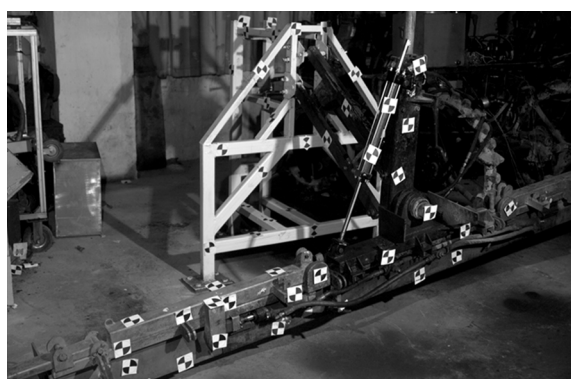
转铰链连接(铰接),另一端与安装台铰接,安装台下端有另一个铰链与平地铲中间连接。安装台与平地铲之间安装有双作用油缸驱使二者之间相对转动实现平地作业中平地铲处于调平状态。

3.2 试验步骤及方法

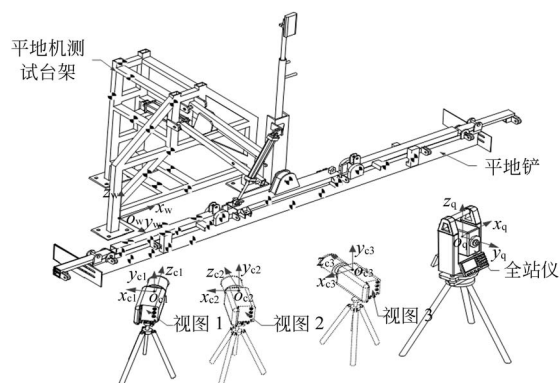
按照 2.3 节所述的基本步骤,进行如下操作。由于试验涉及到验证,故具体步骤稍有区别。

(1) 设定世界坐标系,设定控制点及待测点

图 4 为试验平台及试验布置示意图,先将图 4(b)中的平地铲置于水平地面,在测台架 1 上建立世界坐标系 $o_w-x_w y_w z_w$,在平地铲上粘贴如图所示的不共面的 10 个十字架形状(对角象限分别为白色和黑色)的控制点(像宝马汽车标志,标志点指该十字的交点),记录下各标定点在坐标系 $o_w-x_w y_w z_w$ 下的三维坐标,在平地铲上另外粘贴 20 个标记点作为待测点。一般世界坐标系是静



(a) 测试平台
(a) Test platform



(b) 试验现场布置示意图
(b) Sketch map of test sit

图 4 试验平台及现场布置示意图(平地机测试台上的宝马点为标定点;平地铲上的宝马点为待测点)

Fig. 4 Test platform and sketch map of the test site(BMW points on test setup for leveler are calibration points; BMW points on land-leveling plow are measured points)

止的,控制点宜设置在静止的物体上,而这里是静态试验,控制点和待测点均位于同一刚体(平地铲,水平静置)不会造成问题。

(2) DLT 方法完成相机标定得到 L 参数

调整相机的位置及焦距,使得标定点及待测点在视场中清晰可见,采集此视图 1 下的图像,记为 I_1 ,按相同方法采集视图 2 和视图 3 下的图像,记为 I_2 和 I_3 ;TEMA 软件完成图像标记点的跟踪识别和像素坐标的读取,并按 2.1 节方法完成各位置下的相机标定。

(3) 测量各待定位物理点对应的图像点的像

素坐标;

(4) 结果验证。采用全站仪测量待测点的世界坐标作为世界坐标系真实 3D 位置:

① 建立全站仪坐标系 $o_q-x_q y_q z_q$

将全站仪架设到适宜位置,手动调平,建立以全站仪激光发射中心 o_q 为坐标原点,坐标轴方向与世界坐标系坐标轴方向一致的全站仪坐标系 $o_q-x_q y_q z_q$;

② 全站仪测量待测点坐标

测量得到这些点在全站仪坐标系 $o_q-x_q y_q z_q$ 下的三维坐标,然后将所有的被测点坐标与测得

的世界坐标系原点坐标相减,即可将所有被测点在全站仪坐标系下的坐标转换到世界坐标系下。

3.3 试验数据分析

本实验利用测试台架(平地铲)上粘贴的 10 个标定点的空间坐标及各标定点在图像 $I_j(j=1, 2, 3)$ 的像素坐标,通过最小二乘法及高斯-牛顿迭代法完成各视图下的相机标定,然后根据空间几何线-线交会原理,利用最小二乘法实现被测点的世界坐标测量,表 1 为部分标定点的 $P_i(i=1, 2, \dots,$

10) 的世界坐标及在图像 $I_j(j=1, 2, 3)$ 中的像素坐标信息,表 2 为部分被测点 $Q_n(n=1, 2, \dots, 20)$ 在图像 $I_j(j=1, 2, 3)$ 中的像素坐标信息。表 3 为求得的各视图参数 $L_k(k=1, 2, \dots, 11)$,表 4 为利用高斯-牛顿迭代法求得的各视图相机内外参数,试验采用的各视图相机分辨率均为 $1\ 280 \times 800$,则像平面中焦点 O 的理想像素坐标为 $(640, 400)$,从表 4 可以看出,3 个视图的相机标定结果中,焦点横坐标最大偏差为 65.28 pixel,焦点纵

表 1 部分标定点的坐标

Tab. 1 Partial calibration point coordinates

标定点的	$(x_w, y_w, z_w)/m$	$(u_1, v_1)/pixel$	$(u_2, v_2)/pixel$	$(u_3, v_3)/pixel$
1	(0.59, -0.002, -0.005)	(717.25, 324.75)	(689.88, 327.63)	(694.50, 330.50)
2	(0.613, -0.295, 0.019)	(663.25, 370.38)	(657.38, 382)	(639.63, 379.13)
3	(0.419, -0.181, 0.336)	(618.25, 347.75)	(598.25, 361.63)	(599.38, 355.75)

表 2 部分被测点的像素坐标

Tab. 2 Pixel coordinates of partial the measured points

(pixel)

被测点	(u_1, v_1)	(u_2, v_2)	(u_3, v_3)
1	(303.38, 72.13)	(111.07, 88.15)	(318.50, 51)
2	(319.13, 32.38)	(135.50, 50.50)	(330.88, 15.88)
3	(323.25, 131.50)	(137.88, 144.13)	(337.75, 109.75)

表 3 各视图相机参数 L_k 求解结果

Tab. 3 Solution results of parameters L_k for each view

视图	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}	L_{11}
1	490.19	68.282	-33.203	490.17	112.42	-220.64	410.12	288.25	0.145	-0.251	-0.075
2	501.01	-39.477	-31.853	440.41	68.285	-274.98	386.1	310.62	0.112	-0.296	-0.101
3	472.84	71.291	-26.642	480.63	112.92	-242.75	379.57	296	0.157	-0.260	-0.092

表 4 各视图相机内外参数求解结果

Tab. 4 Internal and external parameter solution results for each view camera

参数	视图 1	视图 2	视图 3
(u_0, v_0)	(633.83, 463.36)	(646.48, 457.31)	(574.72, 451.87)
(b_u, b_v)	(1 533.2, 1 533.9)	(1 371.9, 1 367.8)	(1 397.2, 1 393.8)
\mathbf{R}	$\begin{bmatrix} -0.868 & -0.495 & -0.029 \\ -0.098 & 0.228 & -0.969 \\ 0.487 & -0.838 & -0.246 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.940 & -0.333 & -0.072 \\ -0.037 & 0.307 & -0.951 \\ 0.339 & -0.891 & -0.301 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.865 & -0.498 & -0.060 \\ -0.096 & 0.284 & -0.954 \\ 0.492 & -0.820 & -0.293 \end{bmatrix}$
\mathbf{T}	$[1.318 \ 2.871 \ 1.203]^T$	$[-0.584 \ 2.735 \ 1.247]^T$	$[-1.335 \ 2.591 \ 1.275]^T$

最大偏差为 63.36 pixel,这与标定过程中各标定空间坐标测量误差及对应的像素坐标提取误差有关。

分别利用全站仪与本文方法对平地铲上 20 个被测点进行测量,并计算各被测点在 X, Y, Z 方向上的误差 dX, dY, dZ ,结果如图 5 所示,其中蓝色折线为被测点在世界坐标系 $o_w-x_w y_w z_w$ 下的三维坐标(由全站仪获得),绿色折线为相机测得的各被测点在 X, Y, Z 方向上的坐标,红色折线为相机测得的被测点坐标相对于全站仪测得坐标的误差,表 5 为被测点在 X, Y, Z 方向上的平均误差,从图 5 可以看出(彩图见期刊电子版),相机测

得被测点坐标与全站仪测得的坐标位置基本吻合,被测点坐标在 X, Y, Z 方向上的绝对误差均值为 4.19 mm, 3.97 mm, 3.69 mm, 空间相对距离误差为 0.81%。

表 5 被测点在 X, Y, Z 方向上的平均误差

Tab. 5 Average error of measured points in X, Y, and Z directions

	X 方向	Y 方向	Z 方向	Error
相机测量	0.004 2	0.004 0	0.003 7	0.008 1

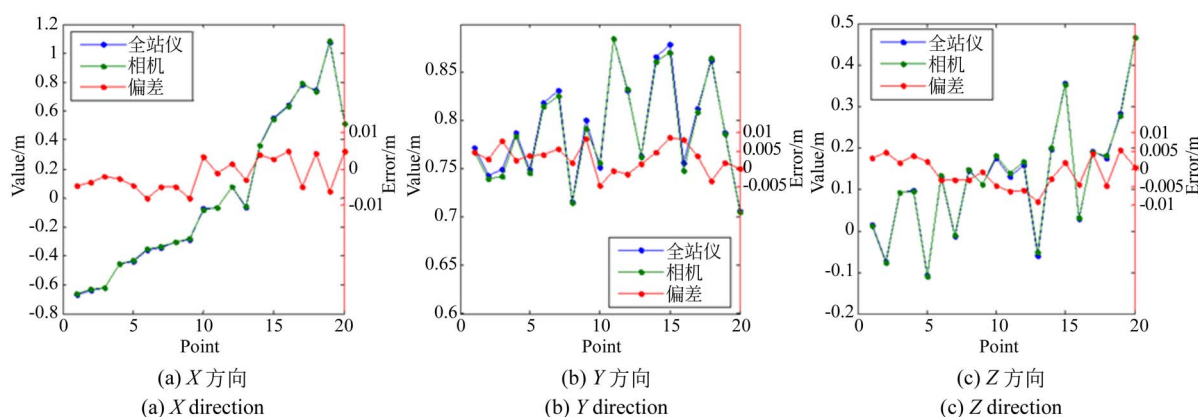


图 5 被测点的世界坐标在 X, Y, Z 方向的误差

Fig. 5 Error of world coordinates of measured point in X, Y, and Z directions

4 结 论

(1) 本文提出的基于 DLT 的世界坐标系多视图 3D 定位方法,既适用于单台相机移动获取的多视图实现的静态结构体点的定位,也适合于多台相机同时拍摄获取的机器上点的三维动态定位,能够实现任意多个物理点的世界坐标测量,原理上测量结果不受相机位置影响。该方法不需要专门的仪器设备,对一般的结构和机器系统的测绘、运动分析适用。

(2) 在水田平地机上进行了单相机移动位置得到的多视图多物理点静态定位试验。验证采用

本方多个目标点进行了世界坐标测量,与全站仪的测量结果相比,该方法测得的坐标在 X, Y, Z 方向的平均绝对误差为 4.19 mm, 3.97 mm, 3.69 mm, 空间相对距离误差为 0.81%, 满足一般测量精度要求。

(3) 为进一步 DLT 相机标定与物理点的 3D 定位的精度除了使用更多的控制点、更多的视图等措施^[15]外,还需要对相机的径向和切向失真进行校正,这可以在 DLT 标定步骤中对失真参数进行标定,此时需要使用 16 个 L 参数,需要的不共面的控制点为 8 个^[15]。此外 Matlab 有相机标定工具箱,借助该工具箱可以验证本方法第 2 步得到的相机标定结果。

参考文献:

[1] 周虎. 基于视觉的目标跟踪与空间坐标定位系统研

究[D]. 天津:天津大学,2011.

ZHOU H. Study on the Vision-based Target Tracking and Spatial Coordinates Positioning Sys-

- tem [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [2] 全燕鸣,黎淑梅,麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 1054-1061.
- QUAN Y M, LI SH M, MAI Q Q. On-machine 3D measurement of workpiece dimensions based on binocular vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 1054-1061. (in Chinese)
- [3] 胡宝洁,曾峦,熊伟,等. 基于立体视觉的目标姿态测量技术[J]. 计算机测量与控制, 2007(1): 27-28+61.
- HU B J, ZENG L, XIONG W, et al.. Object pose measurement technique based on stereovision [J]. *Computer Measurement & Control*, 2007(1): 27-28+61. (in Chinese)
- [4] 解邦福. 基于单目视觉的刚体位姿测量系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- XIE B F. *Study on Rigid Body's Attitude Measurement System Based on Mono-Vision* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [5] ALEX M. A. Multiple view geometry in computer vision second edition[J]. *Kybernetes*, 2003, 30(9-10): 1333-1341.
- [6] ZHAO Y G, HOU X L, LEI J, et al.. The Obstacle Avoidance System for Mobile Robot Based on Binocular Stereo Vision[C]. 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 7-9 July, 2010: 1151-11708.
- [7] 解则晓,孙洪磊,王晓敏. 光笔式双摄像机三维坐标视觉测量系统[J]. 光学技术, 2012, 38(4): 459-464.
- XIE Z X, SUN H L, WANG X M. Study of the two-light pen-camera type 3D-coordinate measuring system[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(4): 459-464. (in Chinese)
- [8] 董英华. 光笔式单目视觉坐标测量系统精度改进技术的研究[D]. 天津:天津大学, 2013.
- DONG Y H. *Research on Technologies for Accuracy Improvement of Light Pen Coordinate Measuring System with Single Camera*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)
- [9] 孔筱芳,陈钱,顾国华,等. GPS 双目摄像机标定及空间坐标重建[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 485-492.
- KONG X F, CHEN Q, GU G H, et al.. GPS-based binocular camera calibration and space coordinate reconstruction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 485-492. (in Chinese)
- [10] 徐巧玉. 大型装备在线三维视觉测量系统关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.
- XU Q Y. *Study of the Key Technologies of On-line 3D Vision Measurement System for Large-scale Equipment*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] 张伊慧. 单目多角度空间点三维坐标测量方法研究[D]. 天津:天津大学, 2016.
- ZHANG Y H. *Research on the Multi-angle Monocular Coordinates Measuring Method for Spatial Points*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [12] 王春圆. 基于广角成像的天线结构整体测量[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.
- WANG CH Y. *Whole Measurement of Antenna Structure based on Wide-angle Imaging*[D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [13] ZHENGYOU ZHANG. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [14] CHRISTIAN WOHLER. *3D Computer Vision - Efficient Methods and Applications, 2nd*[M]. New York: Springer-Verlag London, 2013.
- [15] MICHAEL A S, JEAN-JOSE ORTEU, HUBERT W S. *Image Correlation for Shape Motion and Deformation Measurements*[M]. New York: Springer Science Business Media, LLC 2009.
- [16] YOUNG HOO KWON. Direct linear transformation method [P/OL]. [1998]. <http://www.kwon3d.com/theory/dlt/dlt.html>.
- [17] RICHARD HARTLEY A Z. *Multiple View Geometry in Computer Vision 2nd Edition* [M]. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [18] T LUHMANN, S ROBSON, S K HARLEY. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging* [M]. Scotland: Whittles Publishing, 2011.
- [19] 赵祚喜,涂海,冯荣,等. 水田平地机刚柔耦合多体动力学建模及验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 27-33.
- ZHAO Z X, TU H, FENG R, et al.. Dynamic modelling of paddy leveler based on flexible multi-body systems and its verification [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(19): 27-33. (in Chinese)

- [20] 可欣荣. 水田激光平地机激光接收器和高程控制器研究[D]. 广州:华南农业大学,2014.
KE X R. *Design of a Laser Receiver and Height*

Controller of Laser Levelers for Paddy Fields [D]. Guangzhou: South Agricultural University, 2014. (in Chinese)

作者简介:



赵祚喜(1968—),男,湖南慈利人,教授,博士生导师,分别于1990年、1993年、2003年获得华南农业大学学士、硕士、博士学位,主要从事精准农业作业的车辆自动导航技术、智能农机控制技术、机器视觉等方面的研究。E-mail: Zhao_zuoxi@scau.edu.cn



冯 荣(1988—),男,山西朔州人,硕士研究生,2014年于海南大学获得学士学位,主要从事视觉测量方面的研究。E-mail: 942099486@qq.com