

人机界面空间几何位置的摄影测量*

王书茂 白雅娟 周一鸣

(中国农业大学)

摘 要 机械系统人机界面的优化匹配, 空间几何位置是其主要因素之一, 它的准确测量对产品设计、制造和改进都十分必要。该文将近影摄影测量、计算机视觉和图像处理技术用于人机界面空间几何位置的测量, 实现了快捷、方便的非接触式测量。测量仪器采用普通民用摄像机和计算机系统。文中介绍了图像数字化过程和摄影测量的数学模型, 给出其求解方法。并对变换误差进行了分析, 通过试验确定线性拟合的误差修正模型, 详细介绍了修正过程。外部三维控制场的设计和布置, 编制了实用的计算机测量和识别软件, 并给出了人机界面实验台的测量结果和识别误差。试验表明其测量误差小于 2%, 可满足一般工程测量的要求。

关键词 机械系统 人机界面 摄影测量 图像处理 计算机

机械系统的人机界面是指人、机械、环境之间能够相互作用的区域^[1]。人通过感觉器官(眼、耳、鼻、舌、身等)接受外界的信息、物质和能量, 又通过执行器官(手、脚、口、身等)向外界发出信息、物质和能量。人机界面的优化匹配, 对机械系统总体效能的发挥, 对操作的舒适性和安全性都具有重要意义, 是机械系统总体设计时必须考虑的因素。对机械系统进行优化匹配就是要尽可能建立最佳的人机关系。一方面, 在机器的功能设计中要考虑人的特点, 使其尽量符合人的生理特征、心理特点、审美观点、社会价值观念等要求。另一方面, 机械设备的结构、功能有其自身规律, 操作环境也会因各种因素在时间、空间上受到某些限制, 有时就要对人的因素加以限制。影响人机界面匹配的因素很多, 其中空间几何位置是主要因素之一, 它的准确测量对产品设计、制造和改进都具有重要意义。目前常用的直接测量方法对空间点测量等方面比较困难, 如人体与系统各部件之间位置关系的测量精度比较低, 运动轨迹难以测量等。本文提出了利用普通摄像机——计算机系统, 用于机械系统人机界面空间几何位置的测量, 无需专门设备, 系统投资少, 测量简便、快捷, 精度可满足工程测量的需求。

摄影测量系统由一台民用摄像机、彩色图像卡和通用计算机组成(图1)。用摄像机在两个不同角度拍摄两幅人机界面图像^[2], 通过图像采集卡存入计算机硬盘, 然后利用测量识别软件可测量任意两点的相对距离和任意点的绝对坐标。如果使用两台摄像机同步测量, 则又可进行动态测量。



图1 测量系统框图

Fig 1 Image measuring system

收稿日期: 1998-08-18

* 国家自然科学基金资助项目(59575039)

王书茂, 副教授, 副院长, 北京市清华东路 中国农业大学(东校区)车辆工程学院, 100083

1 图像数字化处理

计算机视觉是软件通过摄像机对外部世界的识别, 镜头将入射光透射到光电转换器件上形成有序的电信号, 然后通过图像采集卡转变成数字信号, 再由计算机软件进行识别(图 2)。

一幅图像要经过离散化转变成数字图像才能被计算机处理, 这需要具有两种装置:

一是对某个电磁能量谱波段(如紫外线、可见光、红外线等)敏感的物理器件(成像设备, 即传感器), 它能产生与所接受的电磁能量成正比的(模拟)电信号。对于图像源的空间能量分布光函数 $C(x, y, t, \lambda)$

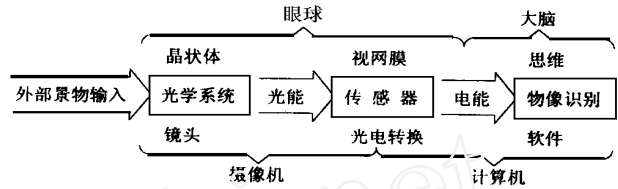


图 2 图像识别模型

Fig. 2 The modal of image identification

$$0 \leq C(x, y, t, \lambda) \leq A$$

可得到第 i 个光谱图像场的图像函数

$$F_i(x, y, t, \lambda) = \int_0 C(x, y, t, \lambda) S_i(\lambda) d\lambda$$

式中 x, y —— 空间坐标; t —— 时间; λ —— 波长; A —— 图像源的空间总能量; $S_i(\lambda)$ —— 传感器在第 i 点的频率响应。

二是数字化器件(图像卡), 通过采样和量化, 将连续模拟电信号转化为离散的数字信号。经图像卡采集后可得到二维的数字图像函数

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1N_2} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2N_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{N_11} & f_{N_12} & \dots & f_{N_1N_2} \end{bmatrix} = [f_{jk}]$$

式中 F_{jk} 是图像的像元, 对于灰度图像, 一般量化为 256 级; 对彩色图像按 RGB (红、蓝、绿) 三基色各 256 级, 低于 256 级易产生假轮廓, 无法表示较多的细节, 而大于 256 级人眼感觉图像质量并无多大改善, 但图像的存储空间将剧增。

2 标定及测量模型

三维立体空间到显示器的二维平面空间, 需经过四个坐标系^[3]的转换(图 3)。(1) 物空间坐标系 $O-XYZ$: 任意选取的三维坐标系; (2) 图像空间辅助坐标系 $S-X'Y'Z'$: 以摄影站点为原点, 三坐标轴分别与物空间坐标系平行; (3) 像空间坐标系 $s-x'y'z'$: 以摄影站点为原点, 摄像机主光轴为 z' 轴, x', y' 轴分别与像平面坐标系平行; (4) 像平面坐标系 $o-xy$: 坐标系原点为 CCD (电耦合器件) 成像中心。

物空间点 $M(X, Y, Z)$ 经过平移、旋转、比例变换可得到图像平面的成像点 $m(x, y)$, 其变换方程式为

$$[x, y, f]^T = [A] \cdot [X, Y, Z]^T$$

式中 A —— 变换矩阵, 它包含了摄像机的内方位元素、外方位元素及镜头畸变等因素;

f —— 摄像机主距。

由物空间点与图像平面点的坐标变换关系可得物
体成像的共线方程

$$x + \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} = 0$$

$$y + \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} = 0$$

式中 x, y —— 像点的图像坐标; X, Y, Z —— 点的物
方空间坐标。

$L_i (i = 1, 2, \dots, 11)$ 为变换系数, 当物空间坐标由已
知的三维控制场给定时, 便可由测得的图像坐标解得,
即完成了摄像机的标定。

三维物像到二维数字图像, 经过了多次变换, 主要
存在下列三方面的误差: (1) 镜头畸变误差: 本系统采用
普通摄像机, 出现镜头畸变的误差要比专业摄像机大得多, 且电噪声也较大; (2) 离散误差: 模
拟图像数字离散化后受其分辨率的限制而出现误差; (3) 图像变形: 由于 CCD 平面与计算机监
视器的分辨率不同 (尤其是水平分辨率的差异较大) 而引起的图像变形。本文在建立摄像机标
定及误差分析模型时, 根据本系统的具体特点, 参考文献[4, 5], 在试验对比忽略系统误差、镜
头畸变误差和线性拟合误差三个模型的基础上, 选用了线性拟合模型, 具体求解如下:

对将光电转换畸变主项考虑在内的共线方程, 采用直接线性变换算法求解变换系数
 $L_i (i = 1, 2, \dots, 11)$ 。

对其像点误差采用二维多项式进行拟合

$$dx = k_1 + k_2 x + k_3 y + k_4 x^2 + k_5 xy + k_6 y^2 + k_7 x^2 y + k_8 xy^2$$

$$dy = k_1 + k_2 x + k_3 y + k_4 x^2 + k_5 xy + k_6 y^2 + k_7 x^2 y + k_8 xy^2$$

式中 dx, dy —— 像点误差; $k_1, k_2, \dots, k_8; k_1, k_2, \dots, k_8$ —— 待定系数。

由外部三维控制场的标定数据 (至少 8 个点对), 解出上式中的系统误差 dx, dy 。

将待测点的二维坐标点对 $[(x_1, y_1), (x_2, y_2)]$ 除去系统误差

$$\begin{cases} x_1 = x_1 - dx_1 \\ y_1 = y_1 - dy_1 \end{cases} \quad \begin{cases} x_2 = x_2 - dx_2 \\ y_2 = y_2 - dy_2 \end{cases}$$

将修正后的点对坐标代入物体成像的共线方程

$$(x L_9 + L_1)X + (x L_{10} + L_2)Y + (x L_{11} + L_3)Z + (x + L_4) = 0$$

$$(y L_9 + L_5)X + (y L_{10} + L_6)Y + (y L_{11} + L_7)Z + (y + L_8) = 0$$

最后用最小二乘法可得到测量点的三维坐标 (X, Y, Z) 。

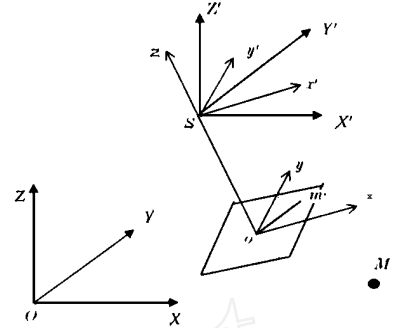


图 3 摄影测量坐标系

Fig. 3 The coordinate of
photogrammetry measurement

3 三维控制场和图像识别

用二维图像识别三维物像, 其精度主要取决于对三维控制场的标定。根据摄影测量控制场
设计原则^[6, 7], 本系统采用 4 根标志杆作为三维控制场的标定物 (图 4)。基于不同测试角度和
被测物多变的特点, 标志杆选用圆管, 便于各个角度均能准确测量, 且可根据被测物体的大小
灵活排列。标志杆为 19 mm 不锈钢管, 刚度大质量小, 不易弯曲。另外将标志杆做成具有明显
刻度的黑白相间标志, 又易与周围环境形成对比。标志杆的布置视被测物体的情况而定, 并保
证四根标志杆垂直于地面, 以获得较高的标定精度。

三维控制场的标定用三幅不同角度拍摄的图像做为标定图像。首先用鼠标在一幅图像上选中某些特征点, 然后在另两幅图像上也选中其对应点。利用标定矩阵和误差模型, 解得标定系数矩阵和系统误差。

图像的识别是利用其特征点(如边、角、元件、颜色标记点等)的像素识别法。选用上述其中两幅不同拍摄角度的图像用于图像识别。首先在一幅图像上选取待识别的某些特征点, 然后在另一幅图像上也选中相应的这些特征点。这时, 软件便可利用标定系数矩阵和系统误差, 计算出识别点物空间的绝对坐标和相对尺寸。

表 1 是对人机界面匹配试验台(图 4)的摄影测量结果, 和与直接测量的对比误差。表 2 是图像上各元件点(元件任意布置)的绝对坐标, 其坐标系为 z 轴经过座椅定位点垂直于地面, x 轴和 y 轴为地水平面上的右手坐标系。由于这些点的绝对坐标难以进行准确的直接测量, 故未给出对比误差。测量完毕, 利用这些特征点数据, 使用 AutoCAD 绘制其轮廓图, 并可利用其旋转、放缩等功能以观察各个侧面。

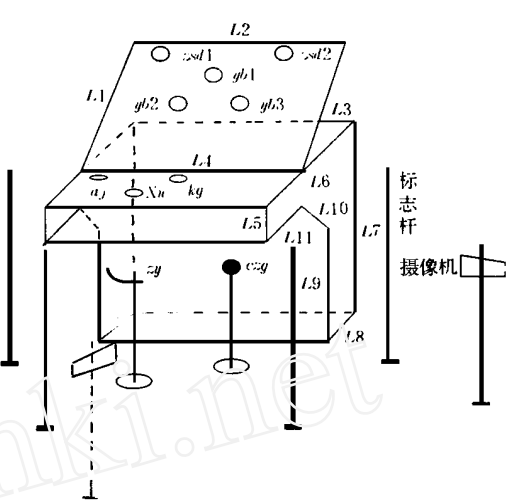


图 4 人机界面匹配试验台和三维控制场

Fig 4 The test board of man-machine interface and three dimensional field

表 1 实验台棱角长度表

Tab 1 The edge length of the test board of man-machine interface

轮廓线段	实测值 /mm	图像测量 /mm	相对误差 /%
L 1	650	639. 6	1. 600
L 2	1221	1238. 1	1. 392
L 3	655	667. 0	1. 832
L 4	1221	1241. 4	1. 671
L 5	200	200. 6	0. 300
L 6	700	702. 6	0. 371
L 7	845	833. 9	1. 314
L 8	167	163. 7	1. 976
L 9	530	526. 2	0. 717
L 10	200	203. 6	1. 800
L 11	315	320. 6	1. 778

表 2 元件位置坐标表

Tab 2 Element position coordinate

元件名称	代码	X /mm	Y /mm	Z /mm
指示灯 1	zsd1	- 357. 7	863. 2	1346. 3
指示灯 2	zsd2	343. 8	860. 5	1344. 7
仪表 1	yb1	- 10. 4	796. 3	1221. 2
仪表 2	yb2	- 145. 8	719. 4	1094. 1
仪表 3	yb3	132. 9	721. 4	1098. 3
按 键	aj	- 542. 0	350. 6	875. 2
开 关	kg	16. 7	350. 4	877. 6
旋 钮	xn	- 246. 9	249. 0	876. 4
手 柄	sb	437. 4	125. 5	486. 7
坐 椅	zy	0	0	436. 7

另外, 为了提高规则形状物体(如长方体、圆柱体、长方形、圆、弧线等)以及常用元件(如座椅、仪表、脚踏板等)的测量效率, 减小测量误差, 软件可仅测量其特征点, 然后画出其规则形状, 或将已经建立的常用元件库中的元件“装”上。如长方体可测出其相邻的三个棱角, 圆平面可测出圆心和圆周上任一点, 等等。对于标准元件(如座椅、指示灯、仪表等), 可事先制作标准元件库, 在测量出元件的特征点后可将这些标准元件“装”上。

4 结 语

摄影测量用于机械系统人机界面空间几何位置的测量, 是一种方便高效的测量手段, 尤其

实现了对空间点的绝对坐标测量。试验表明测量误差小于 2 % , 可满足一般工程测量的需要。如果控制好外部三维控制点场的标定精度, 采用大屏幕高分辨率显示器, 测量误差可进一步减小。同时, 若采用两台摄像机进行同步拍摄, 还可对动态图像进行静态处理, 实现动态图像的测量。

参 考 文 献

- 1 曹 琦 人机工程学 重庆: 四川科学出版社, 1991 3~ 10
- 2 白雅娟 机械系统人机界面空间集合位置的摄影测量技术: [硕士学位论文] 北京: 中国农业大学, 1998
- 3 王之卓 摄影测量原理 北京: 测绘出版社, 1979 1~ 4, 319~ 325
- 4 Jin Z C Lai On the Sensitivity of Camera Calibration. Image and Vision Computing 1993, 11(10) 123 ~ 127
- 5 Abdel-Aziz, Y I, H M Karara Photogrammetric Potentials of Non-Metric Cameras. Photogrammetry Series No. 36, 1974 46~ 51
- 6 国家标准局 GB/5067- 92 工程摄影测量规范 北京: 中国计划出版社, 1993
- 7 李锦成, 袁保宗 一种用于三维立体视觉的精密摄像机定标算法 计算机学报, 1990 3 194~ 199

Photogrammetry Technology on Space Position of Man-Machine Interface

Wang Shumao Bai Yajuan Zhou Yiming

(China Agricultural University, Beijing)

Abstract The optimization of man-machine interface is very important for improving the efficiency of the machine system and increasing the comfortable and safety of operation. The space position is one of the main factor. Its accurate measurement must be much helpful to the design, manufacture and improvement of the system. In this paper, photogrammetry, computer vision and image processing techniques were used to measure the space position. The instruments were composed with a popular video camera, an image converter and a computer. The paper discussed the following items: the processing of image digitalizing; a mathematic model of photogrammetry and the solution method; the line-fit error model based on experiment data; a method of reducing the error; the design and arrangement of a three dimensional field used for calibration. Finally, a computer software was developed and its application instance to measuring a man-machine interface experimental set-up was given. The results indicated that the measured error is less than 2 % , which can satisfy the engineering requirement. The experimental result indicated that this non-contact measurement system can fast and conveniently be used in the measurement of space position of man-machine system with lower cost. Furthermore, it can be used in movement measurement for man-machine system if with two camera.

Key words mechanical system, man-machine interface, photogrammetry, image processing, computer