

## A New Model Applied in Vision Sense Technology with Single Camera \*

WANG Juan<sup>1,2</sup>, QIU Zu-rong<sup>1\*</sup>, LI Peng-yan<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. School of Electric Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China

**Abstract :** A new model applied in vision sense technology is proposed, and this model can take use of some parameters to directly solve the coordinate solutions of the control points in the vision measuring process with a single camera, further to find the three dimensions coordinates of the measuring point. The measuring principle and the structure of the 3D coordinates on the object with a single camera are introduced in brief, then the computing process to conquer the new model is also given in detail, and at last large scale experiments are conducted to verify the correctness and accurateness of the new model.

**Key words :** vision sense technology; new computing model; single camera; experiments

EEACC: 7230; 7320C

## 一种用于单摄像机视觉传感技术的新模型 \*

王娟<sup>1,2</sup>, 裘祖荣<sup>1\*</sup>, 李鹏燕<sup>1</sup>

1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;  
2. 天津理工大学自动化学院, 天津 300191

**摘要 :** 提出了一种用于单摄像机视觉传感测量技术的新模型, 该模型采用参数法可直接求解视觉传感测量过程中控制点的三维坐标, 进而求出被测点的三维坐标。文中简要介绍了利用单摄像机测量目标三维坐标的工作原理与系统结构, 给出了求解新模型的详细计算过程, 并通过大量的实验来验证了新模型的正确性与有效性。

**关键词 :** 视觉传感技术; 新计算模型; 单摄像机; 实验

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2009)05-0651-04

随着电子技术和半导体技术的发展, 视觉传感测量技术在工业测量过程中得到广泛应用, 该方法测量速度快, 精度高, 非常适于对不能直接接触目标的测量。但是, 这种方法在工业应用中的一个最大的问题是特征点的获取, 特别是对于那些不能采用结构光获取被测目标的场合, 比如大型自由锻造过程中, 其尺寸的在线监测非常重要, 如果能够实现精确的在线尺寸测量则能够节约大量的原材料, 能源, 并能大量的提高生产效率<sup>[1]</sup>。但是由于被测目标本身就是红热的, 其特征点很难得到, 因此特征点的获取和匹配就成为很难解决的问题。

因此出现了另外一种测量方法, 该方法采用人为增加额外特征点的方法, 将接触测量和非接触测

量结合, 利用一个摄像机和一个带有一些控制点的测量棒来实现坐标的测量<sup>[2-3]</sup>。本文针对这种测量方法提出一种新的计算模型, 该模型采用参数法, 避免了角度运算中正弦余弦等运算, 计算方法简单, 实用, 而且精度较高。

### 1 系统结构

测量系统如图 1 所示, 该系统由带有一些控制点的测量棒, 摄像机和一台计算机以及相关软件组成。要求测量棒上至少有三个控制点在一条直线上, 测量头的球心也在该直线上。控制点成像于摄像机的焦平面上, 通过对每个图像的处理可以提取控制点的质心在焦平面上的二维坐标, 然后利用本

基金项目: 国家自然科学基金资助(50775160, 60602050, 60805004)

收稿日期: 2008-12-30 修改日期: 2009-03-09

文提出的参数法计算模型计算出这些点在摄像机坐标系下的空间三维坐标,进而根据测量头至各控制点之间的距离和位置关系计算出测量头中心在摄像机坐标系下的三维坐标。有了目标表面的一系列三维坐标就可以获得其他相关尺寸以及表面特征的信息。

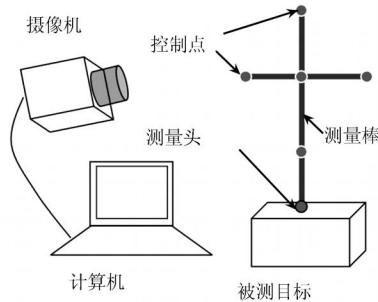


图1 系统结构

## 2 计算模型

以往利用单摄像机的视觉坐标测量的计算模型大多根据焦平面上图像质心坐标之间的角度关系,利用这些角度之间的正弦和余弦来计算控制点的三维坐标<sup>[4-5]</sup>,计算过程复杂,而且角度计算的微小误差会带来较大的测量误差,因此本文引入一些参数来建立计算模型,计算方法简单,但是精度较高。

假设摄像机成像满足小孔成像模型,该模型是基于共线原理的,即目标空间中的每个点都以直线的形式投影到通过光心的图像平面上。假设摄像机坐标系的原点为焦点  $F$ ,  $XY$  平面平行于图像平面,  $Z$  轴与图像平面垂直,如图 2 所示。因此摄像机焦点的坐标为  $(0,0,0)$ 。

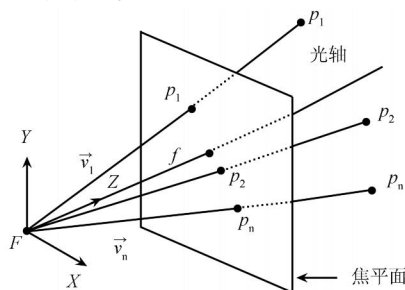


图2 成像模型

假设空间点的坐标为  $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T$ , 而  $p_i = (x_i, y_i)$  为这些点在摄像机坐标系下的图像坐标。由于图像平面位于焦平面上,因此  $z_i$  即为焦距  $f$ 。令  $\vec{p}_i$  为直线  $Fp_i$  的方向矢量。于是可以计算出  $\vec{p}_i$ , 即

$$\vec{p}_i = \frac{Fp_i}{|Fp_i|} = \left( \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}, \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}}, \frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \right)^T \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_{xi} = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \\ e_{yi} = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \\ e_{zi} = \frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \end{cases} \quad (2)$$

于是该方向矢量可以写成

$$\vec{p}_i = (e_{xi} \ e_{yi} \ e_{zi})^T \quad (3)$$

因此这些空间点可以写成

$$P_i = \vec{p}_i \quad i \geq 0 \quad \forall i \quad (4)$$

于是空间两点  $P_i$  和  $P_j$  之间的矢量如下式所示

$$\vec{P_i P_j} = P_j - P_i = \vec{p}_j - \vec{p}_i \quad (5)$$

假设空间三点  $P_1, P_2$  和  $P_3$  在同一直线上,可以

假设

$$\vec{P_1 P_2} = k \vec{P_1 P_3} \quad (6)$$

将公式(4)代入上式得

$$\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = k(\vec{p}_3 - \vec{p}_1) \quad (7)$$

将公式(3)中的  $\vec{p}_i$  代入上式得

$$\begin{bmatrix} (2e_{x2} - 1e_{x1}) - k(3e_{x3} - 1e_{x1}) \\ (2e_{y2} - 1e_{y1}) - k(3e_{y3} - 1e_{y1}) \\ (2e_{z2} - 2e_{z1}) - k(3e_{z3} - 1e_{z1}) \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

上式可以写成

$$\begin{bmatrix} (k-1)e_{x1} & e_{x2} & -ke_{x3} \\ (k-1)e_{y1} & e_{y2} & -ke_{y3} \\ (k-1)e_{z1} & e_{z2} & -ke_{z3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

该线性系统的解为

$$2 = \frac{(1-k)(e_{x1}e_{y3} - e_{x3}e_{y1})}{e_{x2}e_{y3} - e_{y2}e_{x3}} 1 \quad (10)$$

$$3 = \frac{-e_{y2}e_{y1} - ke_{x1}e_{y2} + ke_{x2}e_{y1} + e_{x1}e_{y2}}{k(e_{x2}e_{y3} - e_{y2}e_{x3})} 1 \quad (11)$$

如果知道  $1$ , 就可以求出  $2$  和  $3$ , 由于

$$P_1 P_2 = L_{12} \quad (12)$$

根据公式(4), 将  $P_1$  和  $P_2$  代入公式(12), 可得

$$(2e_{x2} - 1e_{x1})^2 + (2e_{y2} - 1e_{y1})^2 + (2e_{z2} - 1e_{z1})^2 = L_{12}^2 \quad (13)$$

我们令

$$h = \frac{(1-k)(e_{x1}e_{y3} - e_{x3}e_{y1})}{e_{x2}e_{y3} - e_{y2}e_{x3}} \quad (14)$$

$$\text{于是} \quad 2 = h 1 \quad (15)$$

结合公式(13)和(15), 可以得到下式

$$((he_{x2} - e_{x1})^2 + (he_{y2} - e_{y1})^2 + (he_{z2} - e_{z1})^2) 1^2 = L_{12}^2 \quad (16)$$

因此可以解得

$$1 = \frac{L_{12}}{\sqrt{(he_{x2} - e_{x1})^2 + (he_{y2} - e_{y1})^2 + (he_{z2} - e_{z1})^2}} \quad (17)$$

公式(16)有两个平方根, 正根才是我们需要

的, 负根为位于镜头后面的对称位置的解。

将  $P_1$  代入公式 (10) 和 (11) 就可以求出  $Z_2$  和  $Z_3$ , 于是空间三点  $P_1, P_2$  和  $P_3$  在摄像机坐标系下的坐标就能求出, 即

$$P_1 = [X_1 \ Y_1 \ Z_1]^T = [{}^1e_{x_1} \ {}^1e_{y_1} \ {}^1e_{z_1}]^T \quad (18)$$

$$P_M = \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} X_1 + X_2 + X_3 \\ Y_1 + Y_2 + Y_3 \\ Z_1 + Z_2 + Z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_{3M}/d_{12} \\ d_{2M}/d_{13} \\ d_{1M}/d_{23} \end{bmatrix} \quad (21)$$

这样就能求出空间被测目标点的坐标, 进而求出目标物上的其他几何信息。

### 3 实验和误差分析

我们在试验室利用大量的实验来验证本计算模型的正确性与精确性。实验采用数字摄像机 Lucam135, 其 CCD 的像素数为  $1392 \times 1040$ , 像素的尺寸为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 。由于我们拟利用本方法实现较远距离的测量, 所以我们实验时的物距大概为  $2\ 000\ \text{mm}$ 。摄像机的内部参数事先标定好<sup>[6,8]</sup>, 本次实验时摄像机的焦距标定为  $31.811\ 3\ \text{mm}$ 。

首先将摄像机和测量棒都固定, 拍摄五次, 计算出测量点的坐标, 如表 1 所示。

表 1 测量点坐标

Coordinate/mm	$X_M$	$Y_M$	$Z_M$
No. 1	93.923	69.189	1 792.3
No. 2	93.964	69.098	1 793.2
No. 3	93.851	69.138	1 794.2
No. 4	93.874	69.333	1 794.2
No. 5	93.884	69.365	1 793.5
Steady errors	0.113	0.267	1.9

从表中可以看出, 最大重复性误差来源于 Z 方向, 为  $1.9\ \text{mm}$ , X 方向和 Y 方向的最大重复性误差远小于 Z 方向的误差。因此系统适合于对 X 和 Y 方向测量精度要求较高, 而对深度要求不是很高的场合。

其次, 选择两个测量点: 一个距离第三点距离为  $47.20\ \text{mm}$ , 另一个距离第三点为  $111.80\ \text{mm}$ 。任意移动摄像机, 然后计算出各控制点至测量点的距离, 如表 2 和表 3 所示。

表 2 各控制点到测量点 M1 的距离

Distance/mm	$d_{1M1}$	$d_{2M1}$	$d_{3M1}$
Real value	166.82	113.48	47.20
No. 1	166.89	113.56	47.224
No. 2	166.79	113.45	47.189
No. 3	166.70	113.37	47.162
No. 4	166.77	113.43	47.183
Max errors	-0.12	-0.11	-0.038

$$P_2 = [X_2 \ Y_2 \ Z_2]^T = [{}^2e_{x_2} \ {}^2e_{y_2} \ {}^2e_{z_2}]^T \quad (19)$$

$$P_3 = [X_3 \ Y_3 \ Z_3]^T = [{}^3e_{x_3} \ {}^3e_{y_3} \ {}^3e_{z_3}]^T \quad (20)$$

由于空间点  $P_1, P_2, P_3$  和  $P_M$  在同一条直线上, 而且它们之间的距离  $d_{12}, d_{13}, d_{23}, d_{1M}, d_{2M}$  和  $d_{3M}$  已知, 于是测量点 M 的坐标能够从下式求出

$$\begin{bmatrix} X_3 - X_1 & X_3 - X_2 \\ Y_3 - Y_1 & Y_3 - Y_2 \\ Z_3 - Z_1 & Z_3 - Z_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_{3M}/d_{12} \\ d_{2M}/d_{13} \\ d_{1M}/d_{23} \end{bmatrix} \quad (21)$$

表 3 各控制点到测量点 M2 的距离

Distance/mm	$d_{1M2}$	$d_{2M2}$	$d_{3M2}$
Real value	231.42	178.08	111.80
No. 1	231.51	178.18	111.85
No. 2	231.38	178.04	111.78
No. 3	231.26	177.93	111.72
No. 4	231.35	178.01	111.77
Max errors	-0.16	-0.15	-0.08

从以上两个表可以看出, 测量点距离控制点越远, 误差越大。

为进一步说明问题, 我们增加测量距离, 物距增加到约  $3\ 000\ \text{mm}$ , 对摄像机内部参数重新标定后连续拍摄十次, 对所拍摄的图像分别利用本文提出的模型和传统的正余弦的模型计算测量点的三维坐标, 计算结果分别列于表 4 和表 5 中。

表 4 利用本模型计算的测点坐标

Coordinates/mm	$X_M$	$Y_M$	$Z_M$
No. 1	65.166 0	444.537 3	3 005.486 5
No. 2	65.134 5	444.431 0	3 003.326 2
No. 3	65.134 5	444.431 0	3 003.326 2
No. 4	65.193 5	444.953 4	3 005.301 6
No. 5	65.134 5	444.431 0	3 003.326 2
No. 6	65.134 5	444.431 0	3 003.326 2
No. 7	65.200 3	445.221 2	3 006.112 5
No. 8	65.193 5	444.953 4	3 005.301 6
No. 9	65.193 5	444.953 4	3 005.301 6
No. 10	65.193 5	444.953 4	3 005.301 6
Steady errors	0.065 8	0.790 3	2.786 3

表 5 利用传统模型计算的测点坐标

Coordinates/mm	$X_M$	$Y_M$	$Z_M$
No. 1	64.303 6	438.803 4	2 965.511 9
No. 2	64.372 3	439.532 8	2 967.775 0
No. 3	64.372 3	439.532 8	2 967.775 0
No. 4	64.413 6	439.861 5	2 969.040 9
No. 5	64.372 3	439.532 8	2 967.775 0
No. 6	64.372 3	439.532 8	2 967.775 0
No. 7	64.408 3	439.997 9	2 969.345 6
No. 8	64.413 6	439.861 5	2 969.040 9
No. 9	64.413 6	439.861 5	2 969.040 9
No. 10	64.413 6	439.861 5	2 969.040 9
Steady errors	0.110 0	1.194 4	3.833 7

从表4和表5可以看出利用本文提出的参数法计算模型比利用传统角度计算模型的计算稳定性明显提高。对相同的图像分析结果可以看出,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  坐标的测量重复性分别提高了 0.044 2 mm, 0.404 1 mm, 和 1.047 4 mm。

从整个模型的计算原理和计算过程可以看出, 控制点图像的质心提取是整个模型的计算基础, 会对整个模型测量产生重要影响; 另外摄像机的参数标定会影响控制点的图像在焦平面上的坐标的确定; 其次控制点的特征<sup>[9]</sup>, 测量棒上各控制点之间的位置关系, 以及它们与测量点的共线性等都会对测量结果产生影响; 再有, 从两次不同的测量距离的实验可以看出, 测量距离越远, 误差越大。在以后的研究过程中, 我们会从以上几个方面努力, 从而尽量减小测量误差。另外, 由于利用单摄像机进行测量, 无法避免  $Z$  方向误差较大的缺陷, 考虑采用双目或激光跟踪仪与摄像机结合的方法来实现更精确的测量。

## 4 结论

提出了一种新的用单摄像机测量三维坐标以及尺寸的计算方法, 建立了测量系统模型, 给出了解析解, 并用大量实验证明了该方法正确, 测量速度快, 并且具有一定的测量精度。实验结果表明, 该方法适合于工业上对测量速度要求比测量精度更高的场合。



王娟(1975-), 女, 天津大学测试计量技术及仪器专业在读博士, 天津理工大学自动化学院教师。主要研究方向为精密测试技术, 机器视觉技术等, juanwang75@163.com

## 参考文献:

- [1] Juan Wang, Zurong Qiu, Jin Li. Experimental Research on Dimensional Measurement of Hot Parts Based on CCD[C]// SPIE. 2007, 6829: 68291D-1-6.
- [2] 黄凤山, 岳彦芳. 光笔式视觉传感技术中控制点坐标测量值的修正[J]. 传感技术学报, 2007, 20(11): 1523-1526.
- [3] 彭凯, 张雪飞, 刘书桂等. 点阵测头成像视觉坐标测量系统的研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(7): 1635-1638.
- [4] Huang Gui-ping, Ye Sheng-hua. Principle of Coordinates Acquisition Based on Single Camera[J]. Transactions of Tianjin University, 2005, 11(1): 049-052.
- [5] Ma Shur-ying, Yu zhi-jing, Ma Ji-wei, et al. Single Camera 3-D Coordinate Measuring System Based on Optical Probe Imaging[J]. Semiconductor Photonics and Technology, 2001, 7(4): 235-240.
- [6] Fabio Remondino, Clive Fraser, Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Comparisons[C]// ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', IAPRS, 2006, 36, (5): 266-272.
- [7] ROGER Y. TSAI. A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses[J], IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, RA-3(4): 323-344.
- [8] 段发阶, 胡亮. 基于参考像面法的 CCD 摄像机标定新技术[J]. 传感技术学报, 2006, 19(1): 166-169.
- [9] Kruth J P, Zhou L, Vanherck P. Thermal Error Analysis and Compensation of an LED-CMOS Camera 3D Measuring System[J]. Measurement Science Review, 2003, 3(3): 5-8.



裴祖荣(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 中国机械工程学会生产工程分会常务委员, 测试专业委员会主任; 全国高校互换性与测量技术研究会副理事长。研究领域为精密测试理论与技术, 智能测量仪器, 精密机械设计, 新型传感器研制, 三坐标测量等, qzr@tju.edu.cn