

三维视觉系统数学模型优化算法

王 滨 曲志刚 吴 林

(沈阳工业高等专科学校焊接教研室 110044) (哈尔滨工业大学 150006)

摘 要 本文根据系统辨识理论,在比较深入分析三维视觉系统观测特性的基础上,提出了一种优化该系统数学模型的非线性迭代算法.实际测试结果表明,视觉系统的测量精度仅低于视觉传感器分辨率的 0.2%,且在整个测量空间,其精度基本一致.

关键词 视觉,数学模型,结构光,图象,机器人

1 引言

三维视觉是机器人及人工智能领域的重要研究课题,同时也是现代工业生产中颇有应用前景的信息测量手段.目前,在机器人控制和工业控制中应用的三维视觉主要是用于工件位置,形状和尺寸测量检验^[2,3].毫无疑问,三维视觉系统数学模型的精度则是至关重要的.影响三维视觉系统数学模型精度的因素较多,如视觉传感器光学系统的非线性,传感器本身尺寸和安装尺寸偏差及图象处理算法误差等.这些影响因素既难以用数学模型精确地加以描述,同时无法直接测量.因此,研究一种高精度,高可靠性的三维视觉数学模型辨识方法,对于提高三维视觉系统的测量精度,扩大其应用领域具有重要意义.

2 三维视觉系统及数学模型结构

三维视觉系统结构如图 1 所示.该系统由 CCD 面阵摄像机,结构光投影器、图象接口、图象处理与分析软件及 IBM-PC 机组成.视觉传感器由 CCD 摄像机与结构光投影器组成,二者刚性固定.结构光投影器产生的光学模式是 5 个空间方向不同的光面.视觉传感器的结构如图 2 所示.



图 1 三维视觉系统结构

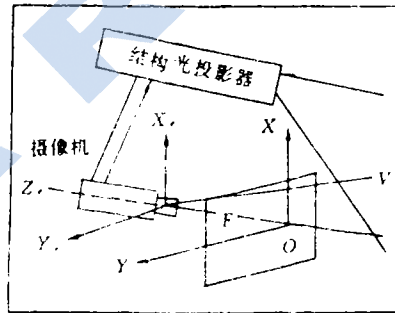


图 2 传感器工作原理图

图中 X, Y, Z, O 与摄像机位置相对不变,坐标原点为摄像机镜头中心, Z 轴与摄像机光

轴重合,方向如图 2 所示. f 是摄像机镜头焦距. 在图 2 中,平面 $X-Y$ 为摄像机成象面, $X Y$ 为成象面坐标系,原点为成象面与摄像机光轴的交点. 设:点 V 为结构光光面上任一点. 它在摄像机坐标系 X, Y, Z, O 中的坐标为 (X, Y, Z) . 根据摄像机小孔法模型,所有到达摄像机成象面的射线均通过一个公共点——聚焦中点. 因此,在摄像机坐标系中,空间点 V 在成象面上的象点就是通过空间点 V 和 O 的直线与成象面的交点. 方程为

$$\frac{x}{X} = \frac{y}{Y} = \frac{z}{Z} \quad (1)$$

如果 V 点在成象面上的坐标为 (x_i, y_i) , 则

$$\frac{X_i}{x_i} = \frac{Y_i}{y_i} = \frac{Z_i}{z_i} \quad (2)$$

式(2)中的 (x_i, y_i) 由图象接口离散化后,可表示为

$$\begin{cases} x_i = K_x(N_x - N_{x_0}) \\ y_i = K_y(N_y - N_{y_0}) \end{cases} \quad (3)$$

上式中 K_x, K_y 表示单位象素的 X 轴和 Y 轴的长度. N_{x_0}, N_{y_0} 分别为 V 点在图象中的行列序号. 结构光光面 i 在摄像机坐标系中的方程为

$$x_i \cos \alpha_i + y_i \cos \beta_i + z_i \cos \gamma_i - P_i = 0 \quad (4)$$

式中 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 分别为光面法线的方向角, P_i 为摄像机坐标系原点 O_i 到光面 i 的距离. 求解联立方程组(2), (3)和(4)有

$$\begin{cases} X_i = \frac{K_x(N_x - N_{x_0})P_i}{K_x(N_x - N_{x_0})\cos \alpha_i + K_y(N_y - N_{y_0})\cos \beta_i + f\cos \gamma_i} \\ Y_i = \frac{K_y(N_y - N_{y_0})P_i}{K_x(N_x - N_{x_0})\cos \alpha_i + K_y(N_y - N_{y_0})\cos \beta_i + f\cos \gamma_i} \\ Z_i = \frac{fP_i}{K_x(N_x - N_{x_0})\cos \alpha_i + K_y(N_y - N_{y_0})\cos \beta_i + f\cos \gamma_i} \end{cases} \quad (5)$$

由于

$$\cos^2 \alpha_i + \cos^2 \beta_i + \cos^2 \gamma_i = 1 \quad (6)$$

所以式(5)和(6)的结构光三维视觉系统的数学模型. 在模型中,参数 $K_x, K_y, N_{x_0}, N_{y_0}, \alpha_i, \beta_i, P_i$ 及 f 在视觉系统建立后,一般仅能近似地确定其值的大小. 因此,需要对这些参数进行优化.

3 迭代优化算法

为计算方便,将式(5)转换成向量函数形式为

$$\vec{V} = \vec{f}(\vec{t}, \vec{Q}) \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} \vec{V} &= (X_i, Y_i, Z_i)^T \\ \vec{Q} &= (\cos \alpha_i, \cos \beta_i, P_i, K_x, K_y, N_{x_0}, N_{y_0})^T \\ \vec{t} &= (N_x, N_y)^T \end{aligned}$$

由式(5)知,模型结构为非线性. 因此,确定数学模型的参数 Q 实际上是非线性系统的参数估计问题,本文采用非线性最小二乘法计算模型参数 \vec{Q} .

为观测方便,选择结构光光面上任意两点间的距离作为观测值.并将 N 个观测值与计算值误差的和作为目标函数 J .即

$$J(\vec{Q}) = \sum_{i=1}^N |D_i^* - D_i| \quad (8)$$

其中 D_i^* 是位于同一结构光光面上两点间距离的观测值. D_i 是 D_i^* 视觉系统的计算值.于是,结构光三维视觉数学模型优化可表示为计算下式

$$J(\vec{Q}^*) = \min \quad (9)$$

计算式(9)的算法很多,其中非线性阻尼最小二乘法是较为实用的迭代方法,根据这种方法,本文建立的结构光三维视觉系统数学模型的优化算法如下式所示

$$\vec{Q}_{i+1} = \vec{Q}_i - \{[(\Delta\vec{Q}_i)^{-1}]^T \cdot \Delta\vec{D}f_i^* \cdot \Delta Df_i(\Delta\vec{Q}_i)^{-1} + \mu I\}^{-1} \cdot [\Delta Df_i^* \cdot \Delta(Df_i)^{-1}]^T \cdot Df_i \quad (10)$$

式中 $\Delta\vec{Q}_i$ 和 $\Delta\vec{D}f_i^*$ 是为避免在迭代运算中,对函数 f 进行求导而设的辅助点,以及根据这些辅助点计算出的辅助点函数.具体方法见文献[1].其中 I 是单位矩阵, μ 是阻尼因子.

4 标定实验与精度测试研究

4.1 观测数据采集

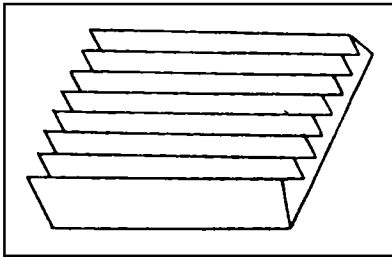


图3 数据模块

对观测数据的基本要求主要包括两方面:

- (1) 观测数据的精度应高于三维视觉系统的测量精度;
- (2) 观测数据应分布于三维视觉系统的整个检测空间.只有根据这样的观测数据对三维视觉系统数学模型进行优化,才能使其数学模型达到较高的精度.为此,本文设计了一个便于观测数据采集的模板,其外形如图3所示.

在观测数据模板上,各相邻顶点间的距离是已知的,如表1所示.

视觉系统的测量精度为0.3mm.由表1可知,观测数据较摄像机测量精度高一个数量级.满足本算法对观测数据的精度要求.

表1 标定数据观测值

| | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 观测值 | 15.02 | 14.02 | 15.08 | 15.20 | 14.92 | 15.06 | 14.62 |
| 序号 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
| 观测值 | 21.20 | 21.38 | 21.30 | 21.38 | 21.42 | 21.00 | |

4.2 迭代运算的初值及阻尼因子选择

迭代计算前,首先要给出初值.本文将三维视觉系统的设计值作为迭代计算的初值.标定实验的另一问题是保证迭代计算收敛到所要求的精度范围.而阻尼因子 μ 对此有相当大影响,它既影响迭代运算的敛散性,也影响运算的速度,作者根据对迭代运算过程的观察,采用了分段自动选择 μ 因子的方法.在迭代运算进入不同精度范围选择不同的阻尼因子,以使迭代运算在保证收敛的前提下,能较快地达到所要求精度.实验证明:该方法简单,效果很好.

4.3 标定结果

如前所述,本文所设计的三维视觉系统的视觉传感器具有五个方向各异的光面,每一光面与 CCD 摄像机组成一个检测子系统,因而构成五组数学模型参数. 根据 需要,本文仅对中间三条光面与 CCD 摄像机构成的数学模型参数进行了优化. 优化算法的程序框图如图 4 所示. 迭代优化运算结果如表 2 所示.

表 2 给出了结构光三维视觉系统的测量精度,视觉传感器的象素分辨率为 0.31mm. 而视觉系统数字模型的精度略高于视觉传感器象素分辨率. 这是由于本算法对各观测点进行统计和全局优化所至.

4.4 精度测试

为了精确地检验结构光三维视觉系统数学模型的标定结果. 作者在六自由度机器人工作台上进行了精度测试实验. 机器人位移精度为 0.1mm. 转动精度为 0.03mm. 满足精度测试要求,结构光三维视觉传感器固定于机器人腕部.

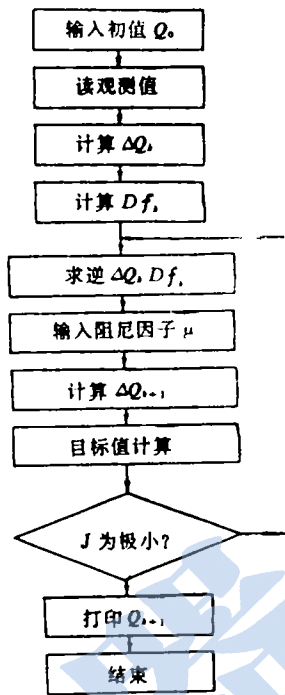


图 4 优化算法程序框图

表 2 迭代优化运算结果

| 标定参数 | 01 | 02 | 03 | 04 |
|--------|----------|------------|----------|------------|
| 参数值 | 1.542651 | -0.6378969 | 116.7761 | 3.98548-02 |
| 标定参数 | 05 | 06 | 07 | |
| 参数值 | 135.4927 | 3.8662E-02 | 126.9882 | |
| (第一光面) | | | | |
| 标定参数 | 01 | 02 | 03 | 04 |
| 参数值 | 1.533331 | -0.7136365 | 116.9849 | 3.9854E-02 |
| 标定参数 | 05 | 06 | 07 | |
| 参数值 | 135.4927 | 3.8662E-02 | 126.9882 | |
| (第二光面) | | | | |
| 标定参数 | 01 | 02 | 03 | 04 |
| 参数值 | 1.53331 | -0.6378969 | 116.7761 | 3.9854E-02 |
| 标定参数 | 05 | 06 | 07 | |
| 参数值 | 135.4927 | 3.8662E-02 | 126.9882 | |
| (第三光面) | | | | |

4.4.1 空间位移精度测试实验

这个实验是在摄像机坐标系 X 、 Z 轴两个方向上分别进行的。首先在视觉传感器首先在视觉传感器的测量范围内放置一立方体，取其边缘线为位移参考线，机器人每次步长 2mm 分别沿 X 、 Z 轴移动。视觉系统则同步对位移参考线进行取象，图象处理和计算。图 5 和图 6 分别给出了视觉系统沿 X 、 Z 轴的位移测量偏差和均方差曲线。由图 5 可以看出沿 X 轴方向视觉系统的测量偏差低于 0.2mm，与视觉系统中间光纹数字模型精度基本符合。沿 Z 轴视觉系统的测量误差低于 0.37mm。 X 轴方向的精度高于 Z 轴的原因是图象接口在 X 方向的量化精度高。但二者均接近于各自的量化精度。

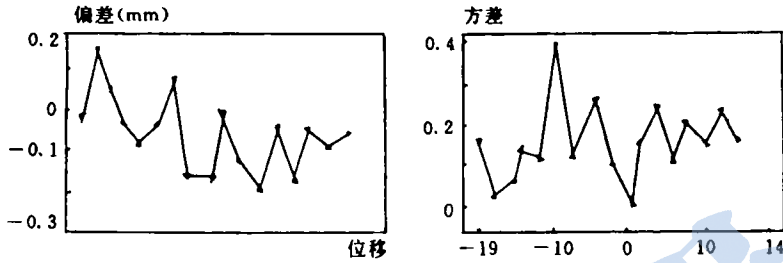


图 5 X 轴位移测量偏差和均方差

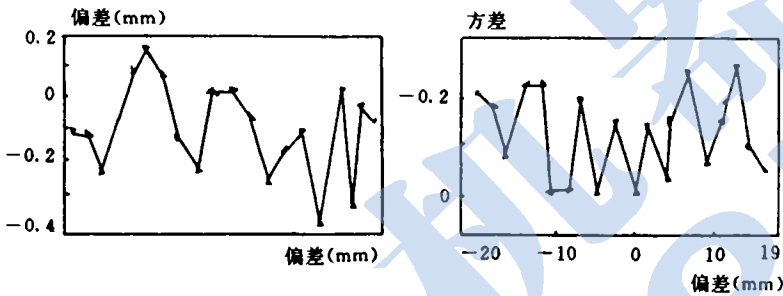


图 6 Z 轴位移偏差和均方差

4.4.2 平面法向精度测试

图 7 和图 8 分别给出了平面法线与 X 、 X_c 的夹角的测量偏差和均方差。由图可以看出，

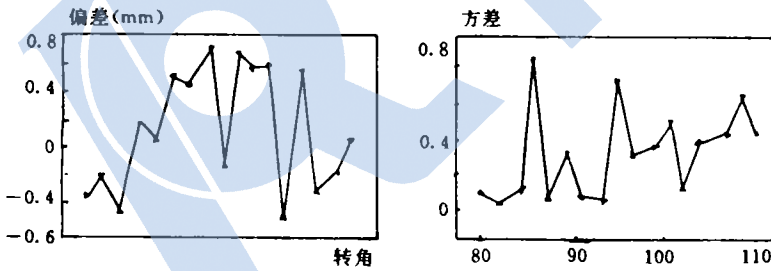


图 7 平面法线与 X 轴夹角方差和均方差

与 X 轴夹角的测量偏差在 0.70° 之内，均方差小于 0.8° 。与轴夹角的测量偏差在 0.7° 之内，均方差小于 0.8° 。与轴夹角的测量偏差在 0.7° 之内，均方差小于 0.3° 。经过分析表明，以上误差相当于一个象素波动引起的计算角度波动的幅度。平面法向的测量值是由平面上两个矢量叉乘后归一化得到的。精度测试结果表明，用这种方法标定的数学模型不仅具有满意的位移测量精度，而且平面法向的测量精度也是令人满意的。

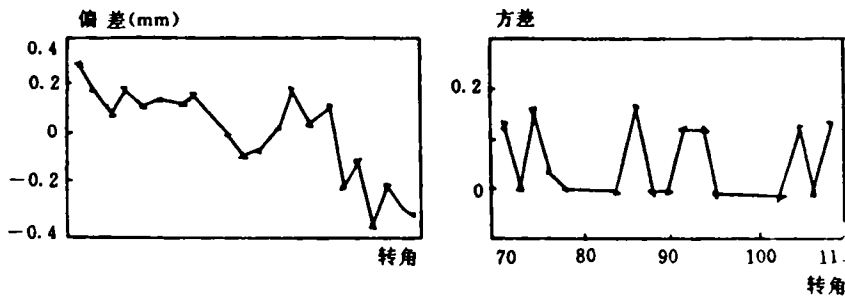


图 8 平面法线与 Y 轴夹角方差和均方差

5 结 论

1) 本文所研究的结构光三维视觉系统优化算法可获得高精度的数学模型, 中间三个光面的数学模型的测量精度接近像素分辨率。

2) 结构光三维视觉传感器精度测试结果表明视觉传感器具有很高的空间位置和方向的测量能力。

参 考 文 献

- 1 王德人. 非线性方程组解法与最优化方法. 人民教育出版社, 1979.
- 2 B ed. On Robot Vision and Sensory Controls. Massachusetts, IFS Ltd and SPIE, Proc of 3rd Inter Conf, 1983;113-120.
- 3 Laurent P Foulloy, Robert B. Compute. IEEE, 1984;62-70.

AN OPTIMUM ALGORITHM OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR THE 3D-VISION SYSTEM

WANG Bin

(Welding division, Shenyang Collegy of Technology 110044)

QU Zhigang WU Lin

(Welding Division, Harbin Institute of Technology 150006)

Abstract An optimum algorithm of the mathematical model for 3D-vision system is presented according to the theory of the systematic identification and on the basis of the analysis for the measuring characteristics of the 3D-vision system. The practical measuring result shows the precision of the visual system is only lower 0.2% than the sensor resolution. And in the whole measuring space the precision is nearly the same.

Key words Vision, mathematical model, structured light, image robot

作者简介:

王 滨: 男, 34 岁, 博士. 研究领域: 机器人视觉, 焊接过程计算机控制及智能控制等.

曲志刚: 男, 40 岁, 博士. 研究领域: 机器人视觉, 焊接过程计算机控制及智能控制等.

吴 林: 男, 57 岁, 教授. 研究领域: 机器人视觉, 焊接过程计算机控制及智能控制等.