基于定点旋转的遥操作前端视觉自标定

王志峰 王占林 付永领

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为解决遥操作过程中当前端视觉内参数改变时的标定问题, 特别是在一些危险的或是人无法到达的环境下, 在前端放置标定物用传统的方法进行标定是不可能的, 因此采用了一种基于定点旋转的自标定技术来进行标定. 对基于定点旋转的自标定方法进行了理论推导, 得到了标定步骤. 在试验过程中, 摄像机固定在一种旋转装置上进行拍摄, 采用 SIFT (Scale Invariant Feature Transformation)算法对拍摄的图像进行特征点检测和匹配, 采用牛顿算法进行计算. 为和传统的标定方法进行比较, 对自制的平面模板进行拍摄, 利用 Harris算子对平面模板图像进行角点检测, 用传统的标定方法重新对摄像机进行标定. 结果表明两种方法得到的答案相近, 用传统标定方法标定结果是接近摄像机真实参数值的, 说明这种新的标定方法是一种有效的标定方法.

关 键 词: 自标定; 变尺度特征检测 (SIFT)算法; Harris算子

中图分类号: TP 79

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2008) 07-0825-05

Camera self-calibration technique for vision system in front for teleoperation system based on pointing rotation

Wang zhifeng Wang Zhanlin Fu Yongling

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Camera self-calibration technique for vision system in front for teleoperation system based on pointing rotation is an effective method. The problem that the calibration object can not be put in front of the camera, when the teleoperation is going on and the camera parameters need to be modified can be solved by using the self-calibration. The theoretic of self-calibration was analyzed firstly, correlative examination was done secondly. In the testing process, the camera was fixed on the rotation device. The scale invariant feature transformation (SIFT) was used to solve the problem of the feature points detection and matching, and the Newton method was used to calculate. Another camera calibration method was used to calibrate the same camera, and compared with the self-calibration. The corner point of the calibration plane was detected by using the Harris corner detector. The result of the two methods is similar, so the self-calibration is effectual.

Key words: self-calibration; scale invariant feature transformation (SIFT) method; Harris corner detector

目前, 遥操作机器人已成为空间机器人领域一个重要的研究课题, 它可以使人类安全地在太空环境中进行操作. 世界先进国家已经制订计划研究和利用遥操作空间机器人, 1999年召开的中国空间机器人及遥操作科学技术研讨会指出, 目前发展将遥控和一定自主能力结合在一起的半自主机器人是非常合适的.

为使遥操作系统中的机器人具有一定的自主能力, 给机器人加上视觉. 视觉确定空间中一定点的位置, 根据确定出的位置, 编制软件, 机器人自主规划轨迹, 操作者进行总体决策, 机器人得以完成较复杂的任务. 利用视觉确定空间中点的位置,

收稿日期: 2007-05-25

作者简介: 王志峰(1980-), 男, 河南郑州人, 博士生, windy12888@126.com.

必须对摄像机进行标定. 遥操作中, 前端视觉部分可能处在人无法到达的地方, 无法在前端放置标定物, 因此要采用自标定技术.

1 摄像机自标定方法

1.1 自标定方法

摄像机常用的标定方法可以分为两大类: 有标定参照物的传统标定方法; 依靠摄像机本身的约束以及主动控制摄像机做一定的运动来达到标定的自标定方法.

自标定的思想[1]自 20世纪 90年代一经提出, 得到了广大学者的深入研究, 文献[2]对目前的自标定方法进行了综述性研究. 自标定方法需要摄像机去执行某种特殊的运动, 两种最常用的运动是纯平移运动[1, 3-4]和纯旋转运动[5-7]. 摄像机的纯旋转相对于摄像机的平移更容易实现, 文献[5-7]中摄像机的纯旋转运动的实现是绕着过摄像机光心的轴旋转实现的, 所有推导只是在理论上完成, 在实际中不可能找到摄像机光心, 一般的做法是找到大致通过光心的轴作为旋转轴, 这样得到是一种近似解.

本文推导出一种更一般、更通用的绕定点旋转的摄像机自标定方法, 该方法能够较精确的对摄像机进行标定.

1.2 摄像机的投影模型

如图 1所示, 摄像机投影模型中有 3个坐标系, 分别是世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$、摄像机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$和图像坐标系 Ouv. $O_w x_w y_w z_w$ 位于空间中某一固定点, $O_c x_c y_c z_c$位于摄像机的光心处, 并且 z_c与摄像机的光轴重合, Ouv位于摄像机的成像平面上.

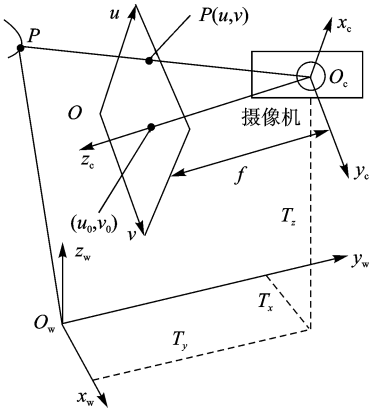


图 1 坐标系

设空间一点 P, 在 $O_w x_w y_w z_w$ 中的坐标为 (x_w, y_w, z_w), 由点 P 在摄像机中的投影关系, 可得到摄像机的数学模型为

$$\lambda\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{W}[\boldsymbol{R} \quad \boldsymbol{T}]\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中, λ为尺度因子; $[x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T$为 $O_w x_w y_w z_w$ 中点 P 的齐次坐标; $[u \ v \ 1]^T$为空间点 P 投影在 Ouv 的齐次坐标; $[\boldsymbol{R} \quad \boldsymbol{T}]$为摄像机的外部参数矩阵, $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{T}$ 分别为 $O_w x_w y_w z_w$ 相对于 $O_c x_c y_c z_c$ 的旋转矩阵和平移矩阵, $\boldsymbol{R}$ 的维数为 3×3, $\boldsymbol{T}$ 的维数为 3×1; $\boldsymbol{W}$为摄像机的内部参数矩阵:

$$\boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, $\alpha_x = f/\mathrm{d}x$为 u轴上的尺度因子, 或称为 u 轴上归一化焦距; $\alpha_y = f/\mathrm{d}y$, 为 v 轴上的尺度因子, 或称 v为轴上归一化焦距; (u_0, v_0)为摄像机镜头的主点像素坐标, 即是光轴与摄像机镜头的交点; γ为 u 轴和 v轴不垂直因子.

1.3 自标定方法的理论推导

方法模型如图 2所示.

两个摄像机安装在量尺上, 两摄像机的光轴与量尺垂直, 量尺与旋转轴垂直, 两摄像机的光轴与旋转轴也垂直, 两个摄像机可绕旋转轴转动, 定旋转轴上的任意一点都可成为旋转点, 不妨设旋转点在如图 2所示位置. 在旋转过程中, 旋转点相对于 $O_c x_c y_c z_c$ 的位置 $\boldsymbol{T}$是始终不变的, 这就是摄像机绕定点旋转.

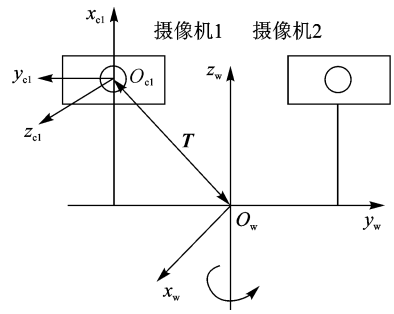


图 2 方法模型

设 $O_w x_w y_w z_w$ 固连在旋转轴的中心线上, 如图 2所示. $O_w x_w y_w z_w$ 的原点在旋转点上, 设开始时旋转点相对于摄像机 1的平移量为 $\boldsymbol{T}$, $O_w x_w y_w z_w$ 相对于摄像机 1的坐标系 $O_{c1} x_{c1} y_{c1} z_{c1}$的旋转为 $\boldsymbol{R}_1$ (位置 1), 当摄像机 1绕定点旋转一定的角度到位置 2时得到摄像机 1′, $O_w x_w y_w z_w$ 相对于摄像机 1′的坐标系 $O_{c1'} x_{c1'} y_{c1'} z_{c1'}$ 的平移仍然是 $\boldsymbol{T}$, $O_w x_w y_w z_w$ 相对摄像机 1′的坐标系 $O_{c1'} x_{c1'} y_{c1'} z_{c1'}$的旋转是 $\boldsymbol{R}_2$, 可得到空间中一定点 P 到摄像机

$O_{c1}x_{c1}y_{c1}z_{c1}$和 $O_{c1'}x_{c1'}y_{c1'}z_{c1'}$的成像关系为

$$\lambda_1\begin{bmatrix}u_1\\v_1\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{W}[\boldsymbol{R}_1\quad\boldsymbol{T}]\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\\1\end{bmatrix}\tag{2}$$

$$\lambda_2\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{W}[\boldsymbol{R}_2\quad\boldsymbol{T}]\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\\1\end{bmatrix}\tag{3}$$

如果摄像机的光心和旋转点重合, 式 (2)和式 (3)中 $\boldsymbol{T}$应为 $\boldsymbol{0}$, 这样得到基于旋转的自标定方法和文献[5- 7]中的方法是一样的. 但是一般情况不可能重合, 所以 $\boldsymbol{T}$一般不为 $\boldsymbol{0}$, 这使得摄像机的标定计算相当复杂. 令摄像机 1再绕定点旋转一定的角度到位置 3得到摄像机 1″, $O_wx_wy_wz_w$ 相对摄像机 1″的坐标系 $O_{c1''}x_{c1''}y_{c1''}z_{c1''}$的旋转是 $\boldsymbol{R}_3$, 可得成像关系为

$$\lambda_3\begin{bmatrix}u_3\\v_3\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{W}[\boldsymbol{R}_3\quad\boldsymbol{T}]\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\\1\end{bmatrix}\tag{4}$$

式 (2)减式 (3), 式 (4)减式 (3)得:

$$\lambda_1\begin{bmatrix}u_1\\v_1\\1\end{bmatrix}-\lambda_2\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{W}(\boldsymbol{R}_1-\boldsymbol{R}_2)\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\end{bmatrix}\tag{5}$$

$$\lambda_3\begin{bmatrix}u_3\\v_3\\1\end{bmatrix}-\lambda_2\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{W}(\boldsymbol{R}_3-\boldsymbol{R}_2)\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\end{bmatrix}\tag{6}$$

式 (5)和式 (6)中消去 $[x_w\quad y_w\quad z_w]$得

$$(\boldsymbol{R}_1-\boldsymbol{R}_2)^{-1}\boldsymbol{W}^{-1}\left(\lambda_1\begin{bmatrix}u_1\\v_1\\1\end{bmatrix}-\lambda_2\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}\right)=(\boldsymbol{R}_3-\boldsymbol{R}_2)^{-1}-\boldsymbol{W}^{-1}\left(\lambda_3\begin{bmatrix}u_3\\v_3\\1\end{bmatrix}-\lambda_2\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}\right)\tag{7}$$

如果 $O_{c1}x_{c1}y_{c1}z_{c1}$相对于 $O_{c1'}x_{c1'}y_{c1'}z_{c1'}$的旋转角度等于 $O_{c1''}x_{c1''}y_{c1''}z_{c1''}$相对于 $O_{c1'}x_{c1'}y_{c1'}z_{c1'}$的旋转角度但方向相反, 可以通过在初始位置分别往两个相反的方向旋转到 $O_{c1'}x_{c1'}y_{c1'}z_{c1'}$和 $O_{c1''}x_{c1''}y_{c1''}z_{c1''}$, 旋转量相同为 $\boldsymbol{R}$, 可将式 (7)简化为

$$\lambda_1\begin{bmatrix}u_1\\v_1\\1\end{bmatrix}-\lambda_2\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{WRW}^{-1}\left(\lambda_3\begin{bmatrix}u_3\\v_3\\1\end{bmatrix}-\lambda_2\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}\right)\tag{8}$$

式 (8)两边同时用 λ_2除得

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\begin{bmatrix}u_1\\v_1\\1\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{WRW}^{-1}\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2}\begin{bmatrix}u_3\\v_3\\1\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}\right)\tag{9}$$

式 (9)展开有 3个方程, 两个尺度因子, 消去尺度因子$\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$, $\frac{\lambda_3}{\lambda_2}$得

$$\frac{u_2-u_1+(\boldsymbol{P}_1-u_1\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}}{(\boldsymbol{P}_1-u_1\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_3\\v_3\\1\end{bmatrix}}=\frac{v_2-v_1+(\boldsymbol{P}_2-v_1\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}}{(\boldsymbol{P}_2-v_1\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_3\\v_3\\1\end{bmatrix}}\tag{10}$$

式 (10)中

$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{WRW}^{-1}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{P}_1\\\boldsymbol{P}_2\\\boldsymbol{P}_3\end{bmatrix}$$

式 (10)包含了 $\boldsymbol{P}$中的 9个未知元素. 给定 8个对应的图像点有 8个方程, 加上 $\boldsymbol{P}$的行列式等于 1, 一共 9个约束方程, 就可求得 $\boldsymbol{P}$中的各个元素.

求出 $\boldsymbol{P}$ 之后, 可得: $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{W}^{-1}\boldsymbol{PW}$, 又因为 $\boldsymbol{RR}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{I}$, 可以得到:

$$\boldsymbol{P}(\boldsymbol{WW})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{WW}^{\mathrm{T}}\tag{11}$$

式 (11)可以看成是指含有 $\boldsymbol{W}$的非线性方程, 求此非线性方程就可以求出 $\boldsymbol{W}$.

2　解算方法推导

对于 $\boldsymbol{W}$ 的求解, 可以通过两步来计算. 首先通过求解式 (10)来求解 $\boldsymbol{P}$, 然后通过式 (11)来求解 $\boldsymbol{W}$.

2 1　$\boldsymbol{P}$ 的解算

$\boldsymbol{P}$ 的求解精度将会对 $\boldsymbol{W}$ 带来很大的影响, $\boldsymbol{P}$ 很小的误差就会造成 $\boldsymbol{W}$ 很大的误差. 采用一种精确的求解方法来精确求解 $\boldsymbol{P}$, 对 $\boldsymbol{W}$ 的求解是很重要的.

通过比较分析, 采用牛顿法来求解, 方法即简单又可以保证求解的精度.

假设有 n个匹配点, 可以得到式 (12):

$$\boldsymbol{F}=\begin{cases}\dfrac{u_{21}-u_{11}+(\boldsymbol{P}_1-u_{11}\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_{21}\\v_{21}\\1\end{bmatrix}}{(\boldsymbol{P}_1-u_{11}\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_{31}\\v_{31}\\1\end{bmatrix}}-\dfrac{v_{21}-v_{11}+(\boldsymbol{P}_2-v_{11}\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_{21}\\v_{21}\\1\end{bmatrix}}{(\boldsymbol{P}_2-v_{11}\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_{31}\\v_{31}\\1\end{bmatrix}}\\ \vdots\\ \dfrac{u_{2n}-u_{1n}+(\boldsymbol{P}_1-u_{1n}\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_{2n}\\v_{2n}\\1\end{bmatrix}}{(\boldsymbol{P}_1-u_{1n}\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_{3n}\\v_{3n}\\1\end{bmatrix}}-\dfrac{v_{2n}-v_{1n}+(\boldsymbol{P}_2-v_{1n}\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_{2n}\\v_{2n}\\1\end{bmatrix}}{(\boldsymbol{P}_2-v_{1n}\boldsymbol{P}_3)\begin{bmatrix}u_{3n}\\v_{3n}\\1\end{bmatrix}}\\ \det\boldsymbol{P}-1\end{cases} \tag{12}$$

式中, $(u_{ji}, v_{ji})(j=1, 2, 3\ i=1, 2, 3, \cdots, n)$为第 j 幅图像上的第 i个匹配点的坐标; $\det\boldsymbol{P}$ 为 $\boldsymbol{P}$的行列式. 从而得到牛顿法的解算步骤如下:

1) 初始化: $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}^{(0)}$, $\boldsymbol{x}$ 为由 $\boldsymbol{P}$ 的元素构成的向量;

2) 计算 $\boldsymbol{F}^{(k)}$, 如果 $\|\boldsymbol{F}^{(k)}\|$已经小到了要求的范围, 则停止计算, 此时 $\boldsymbol{x}^{(k)}$即为所求, 否则转到 3);

3) 计算雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}^{(k)}$, 求解 $\boldsymbol{J}^{(k)}\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}=-\boldsymbol{F}^{(k)}$得到 $\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}$, 令 $\boldsymbol{x}^{(k+1)}=\boldsymbol{x}^{(k)}+\Delta\boldsymbol{x}^{(k)}$, $k=k+1$, 重新回到 2).

2.2 $\boldsymbol{W}$的解算

当解出了 $\boldsymbol{P}$ 之后, 得到式 (11), 既可以采用线性方法也可以采用非线性的方法求解 $\boldsymbol{W}$. 考虑到如果用线性的方法求解 $\boldsymbol{W}$ 对 $\boldsymbol{P}$ 的误差相当敏感, 应采用非线性的方法来求解. 下山单纯形法 (downhill simplex method)在迭代中不需要求解微分或偏微分, 只用代价函数的估计值, 所以具有极强的鲁棒性, 而且实现简单. 令

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{P}(\boldsymbol{W}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{W}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}=(\boldsymbol{W}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}})\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{P}^{-1}(\boldsymbol{W}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}) \tag{13}$$

令
$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{A}_{00}^2+\boldsymbol{A}_{01}^2+\boldsymbol{A}_{02}^2+\boldsymbol{A}_{10}^2+\boldsymbol{A}_{11}^2+\boldsymbol{A}_{12}^2+\boldsymbol{A}_{20}^2+\boldsymbol{A}_{21}^2+\boldsymbol{A}_{22}^2 \tag{14}$$

式中, $\boldsymbol{A}_{ij}$为 $\boldsymbol{A}$ 的第 (i, j)个元素. 式 (14)中的未知数只有 $\boldsymbol{W}$ 中的元素, 即 α_x, α_y, u_0, v_0, γ, 可以采用单纯形来求解.

3 实 验

在实验中可以用编制的软件在有效焦距范围内任意的调节摄像机的焦距等参数. 采用的旋转装置如图 3所示.



图 3 旋转装置

3.1 特征点检测与匹配

上述的标定算法是采用基于特征点的标定, 所以首先必须检测图像的特征点, 对特征点进行匹配, 找到有效的匹配点对, 然后利用得到的匹配点对对摄像机进行标定. 文献[8]中描述的 SIFT (Scale Invariant Feature Transformation)算法非常适合多幅图像之间的特征点检测与匹配. 采用上述的算法, 让摄像机分别在两个相反的方向上绕定点旋转 +12.9°和 −12.9°, 分别拍摄图像, 加上原位置拍摄的图像, 一共 3幅图像, 图像的分辨率是 320像素 ×240像素, 匹配结果如图 4所示.



图 4 SIFT 算法特征点检测与匹配结果

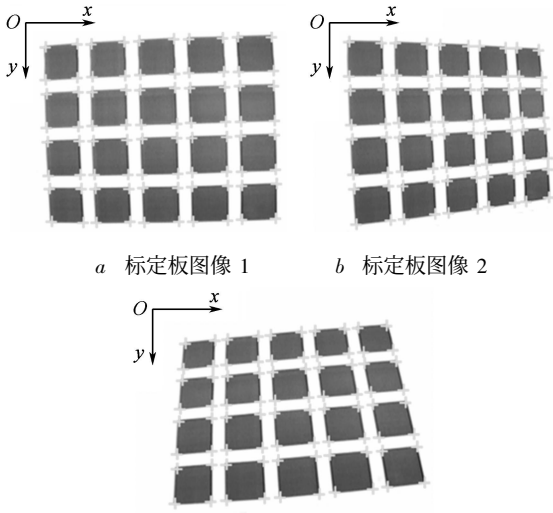
3 2　计算结果

3幅图像一共得到 16个匹配的特征点, 根据这些特征点对摄像机进行匹配的结果如表 1

表 1　标定结果

方　法	α_x /mm	α_y /mm	γ	u_0 /mm	v_0 /mm
本文	297. 56	297. 56	0	136. 21	124. 89
文献[9]	288. 07	286. 54	0	124. 64	132. 76

另外为了和目前较常用的文献[9]所示的传统的标定方法进行比较, 把采用文献[9]方法的标定结果也列在了表中. 在用文献[9]的标定方法时, 角点的检测采用 Harris角点检测方法[10], 采用的模板图像以及检测的角点如图 5所示.



a　标定板图像 1　　b　标定板图像 2

c　标定板图像 3

图 5　3幅标定板图像

图 6为用文献[9]的方法得到的内外参数对平面模板进行重构的结果. 从结果看, 平面模板相对于摄像机的位置在 20 cm 左右, 和实际当中所放置的平面模板的位置是一致的, 各次放置的平面模板相对于摄像机的位置也是一致的, 得到的摄像机的内参数是正确的.

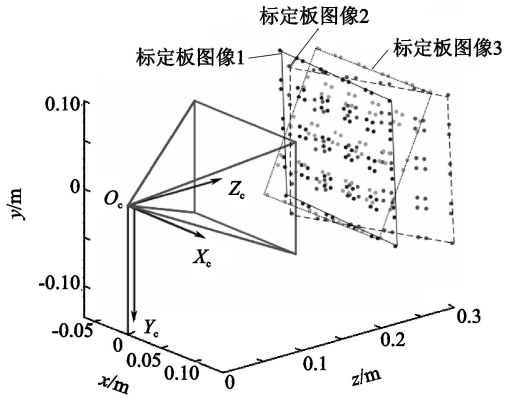


图 6　重构结果

4　结　论

通过实验比较得到以下结论: 采用基于定点旋转的自标定方法得到的摄像机的内参数能达到较高的精度; 当摄像机的内参数求出来后, 文献[11]已经证明如果能再已知 3个空间点在世界坐标中的坐标就可以求出摄像机的全部外参数; 自标方法如果能很好的标定摄像机的参数, 遥操作前端视觉就可以在运行中任意的改变摄像机的参数, 而无需放置标定物就可以对摄像机参数进行标定.

参考文献 (References)

[1] Maybank S J, Faugeras O D. A theory of self-calibration of a moving camera[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151

[2] 孟晓桥, 胡占义. 摄像机自标定方法的研究与进展[J]. 自动化学报, 2003, 29(1): 110-124
Meng Xiaoqiao, Hu Zhanyi. Recent progress in camera self-calibration[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(1): 110-124 (in Chinese)

[3] Jang Jeonghun, Hong Kisang. Self calibration of a stereo-camera by pure translational motion[J]. IEEE International Conference on Image Processing, 1996, 2(2): 297-300

[4] Ma Songde. A self-calibration technique for active vision system[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 114-120

[5] Birchfield S. Elliptical head tracking using intensity gradients and color histograms[C]//Santa Barbara: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE Computer Society, 1998: 232-237

[6] Du F, Brady M. Self-calibration of the intrinsic parameters of cameras for active vision systems[C]// Santa Barbara: Proc IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE Computer Society, 1993: 477-482

[7] Hartley R. Self-calibration of stationary cameras[J]. International Journal of Computer Vision, 1996, 22(1): 5-23

[8] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110

[9] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions Patttern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334

[10] Harris C. 3D positional Integration from image sequences[J]. Image and Vision Computing, 1998, 6(2): 87-90

[11] 马颂德, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004
Ma Songde, Zhang Zhengyou. Computer vision: calculation theory and algorithm basis[M]. Beijing: Science Press, 2004 (in chinese)

(责任编辑: 刘登敏)