第 32 卷　第 21 期　　　计　算　机　工　程　　　2006 年 11 月
Vol.32　No.21　　　Computer Engineering　　　November 2006

·工程应用技术与实现·　文章编号：1000—3428(2006)21—0215—02　文献标识码：A　中图分类号：TB472.39

定点法扫描仪外部标定算法

崔培枝，朱　胜，沈灿铎，郭迎春

(装备再制造技术国防科技重点实验室，北京 100072)

摘　要：研究了缺损零件的机器人快速再制造系统中，当机械手夹持扫描仪扫描固定的零件时，通过采用测量空间虚拟固定点的方法进行扫描仪外部标定算法的实现，即标定扫描仪的坐标系与机器人末端坐标系(即$Tool_0$)间的旋转(即R_x, R_y, R_z)和平移(即X，Y，Z)关系，并给出了基本算法原理和求解方法、数据采集过程以及实验结果分析等内容。

关键词：扫描仪；标定；算法；再制造

Scanner External Calibration Algorithm Based on Fixed Point

CUI Peizhi, ZHU Sheng, SHEN Canduo, GUO Yingchun

(National Key Laboratory of Defense Technology for Equipment Remanufacture, Beijing 100072)

【Abstract】This paper deals with the scanner exterior calibration algorithm when the scanner is arranged by the robot and the object scanned is fixed on a rotate device in the robot remanufacture system. The method of calibrating the relationship between the scanner coordinate and the robot $Tool_0$, such as the rotation R_x, R_y, R_z and the transformation X, Y, Z is studied. The data of $Tool_0$ can be directly obtained from its relationship with the robot base-coordinate. So, the coordinate relationship between the scanner coordinate and the robot base coordinate can be easily gotten. The paper explains the basic algorithm theory, computing method, data collecting process, the result data analysis, and etc.. The calibration algorithm is deduced under the orthogonal coordinate.

【Key words】Scanner; Calibration; Algorithm; Remanufacture

在缺损零件的机器人快速再制造系统中，获取缺损零件的几何模型时，首先要进行扫描仪的外部标定，即标定扫描仪的坐标系与机器人末端坐标系(即$Tool_0$)间的旋转(即R_x, R_y, R_z)和平移(即X，Y，Z)关系。国内外许多专家学者已经在实现摄像机参数标定任务方面开展了大量的研究工作，提出了多种方法[3,5]。本文采用两个直径已知的球体作为参考零件，将其固定于可旋转的机械装置中，通过不断变换球的角度，利用扫描仪的运动来实现对球体表面的全部扫描，从而实现了线激光扫描仪的TCP与机器人基坐标系之间相互位置变换关系的标定任务。

1 参数说明

为了便于算法理解及实验数据分析与计算，定义并描述了以下变量参数。见表 1。

表 1 扫描仪外部标定算法中的参数描述

参数名	参数说明
R_x, R_y, R_z,	扫描仪坐标系相对于$Tool_0$坐标 X轴、Y轴和Z轴方向的旋转角度，单位是弧度。
X，Y，Z	分别是扫描仪坐标系TCP(Tool Center Point)相对于$Tool_0$中心点坐标X、Y和Z方向上的平移分量，单位是mm
R_t	旋转变换矩阵，R_t由R_x、R_y和R_z组成。通常采用先绕X轴方向旋转R_x角度，再绕Y轴方向旋转R_y角度，最后绕Z轴方向旋转R_z角度组成如式(1)的变换关系[1]。为了便于阅读，用α、β、γ等价替换R_x、R_y和R_z表示公式
T_t	扫描仪坐标系TCP相对于$Tool_0$平移向量，T_t =(X Y Z)^T
X_t	空间点相对于$Tool_0$坐标系位置坐标。
X_l	空间点在扫描仪坐标系的位置坐标$(x_l\ y_l\ z_l)^T$
R_0	$Tool_0$坐标系相对于机器人Base坐标系的旋转变换矩阵
T_0	$Tool_0$坐标系相对于机器人Base坐标系的平移变换矩阵
X_w	空间点在机器人Base坐标系下的位置坐标$(x_w\ y_w\ z_w)^T$
Fval	非线性拟合标准差，一般要控制在 10^{-3}数量级以内
ConNum	校准指数或称条件数，一般要控制在 10 以内

$$Rs(\alpha,\beta,\gamma)=Rz(\gamma)Ry(\beta)Rx(\alpha)=$$
$$\begin{pmatrix}\cos\gamma & \sin\gamma & 0\\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}.\begin{pmatrix}\cos\beta & 0 & -\sin\beta\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\beta & 0 & \cos\beta\end{pmatrix}.\begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha\\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha\end{pmatrix}=$$
$$\begin{pmatrix}\cos\beta\cos\gamma & \cos\alpha\sin\gamma+\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\gamma-\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma\\ -\cos\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma-\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\alpha\cos\gamma+\cos\alpha\sin\beta\sin\gamma\\ \sin\beta & -\sin\varepsilon\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta\end{pmatrix} \tag{1}$$

2 算法原理

2.1 恢复空间定点的方法

对于线激光扫描仪，很难找到某一空间点在扫描仪下的坐标，但可通过控制扫描仪恢复虚拟空间点(如球心)坐标的方法得以解决。在扫描仪扫到球体时，可利用激光线上点的拟合得到一个空间圆[2,4]，当球体半径已知时，就可通过几何关系求得球心坐标。此时球心坐标将有两个解，可以通过实验过程中人为参与排除伪解。例如，实验者可以由扫描线在球体中的位置判断球心方向，再通过以约定次序选定扫描线中的上、中、下 3 点，将此情况通知计算机，而计算机则根据这 3 点得到两个向量，再由这两个向量叉乘的结果得到球心所在的大致方向，从而排除伪解。

2.2 标定旋转关系 *Rx, Ry, Rz*

对一个与机器人基坐标系位置固定的点，在基坐标系下的坐标X_w与其相对于扫描仪坐标系的坐标X_l间的关系满足

$$\begin{pmatrix}X_w\\ 1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}R_0 & T_0\\ 0 & 1\end{pmatrix}.\begin{pmatrix}R_t & T_t\\ 0 & 1\end{pmatrix}.\begin{pmatrix}X_l\\ 1\end{pmatrix} \tag{2}$$

将式(2)展开后，可以得到

作者简介：崔培枝(1975－)，女，博士生，主研方向：计算机应用及工程；朱　胜，教授、博士、博导；沈灿铎、郭迎春，硕士生

收稿日期：2005-12-29　**E-mail**：cui_peizhi@yahoo.com.cn

$$X_w = R_0 \cdot R_t \cdot X_l + R_0 \cdot T_t + T_0 \tag{3}$$

控制机器人，使得扫描仪两次恢复同一固定点，可得到

$$X_{w1} = R_{01} \cdot R_t \cdot X_{l1} + R_{01} \cdot T_t + T_{01} \tag{4}$$

$$X_{w2} = R_{02} \cdot R_t \cdot X_{l2} + R_{02} \cdot T_t + T_{02} \tag{5}$$

如果使控制过程中机器人的姿态保持不变，即$R_{01}=R_{02}$，则式(4)、式(5)可以得到

$$R_0 \cdot R_t \cdot (X_{l1} - X_{l2}) = T_{02} - T_{01} \tag{6}$$

采集多组实验数据后，通过对式(6)的求解，可求得R_t，即得到R_x、R_y、R_z。

2.3 标定平移关系 X，Y，Z

由式(3)可得，对于与基坐标系位置固定的空间点有

$$X_w = R_0 \cdot R_t \cdot X_l + R_0 \cdot T_t + T_0 \tag{7}$$

当机器人以平动来扫描一个球面时，无论T_t取何值，其恢复结果都是一个球面(该结论的证明见定理证明)。取T_t=0，将其扫描恢复结果(即X_w)做球形拟合，得球心位置X_B与球心的真实位置X_b间将满足式(7)，即

$$X_b = X_B + R_0 \cdot T_t \tag{8}$$

通过改变机器人位姿，扫描球面，可以得到多组X_B和R_0，求解式(8)，从而得到T_t。

2.4 附加说明

在上述零件模型三维重构系统中，扫描仪的恢复结果(空间点相对于Base坐标系的位置)X_w与其在扫描仪坐标系下的坐标X_l 的关系如式(7)。对于不同空间点X_{w1}与X_{w2}，可以得到其相对位置关系：

$$X_{w2} - X_{w1} = R_{02} \cdot R_t \cdot X_{l2} + R_{02} \cdot T_t + T_{02} - (R_{01} \cdot R_t \cdot X_{l1} + R_{01} \cdot T_t + T_{01}) \tag{9}$$

当机器人在扫描中只平移，$R_{01}=R_{02}$时，上式简化为

$$X_{w2} - X_{w1} = R_0 \cdot R_t \cdot (X_{l2} - X_{l1}) + T_{02} - T_{01} \tag{10}$$

从式(10)可得，在由机器人夹持扫描仪进行模型重构中，如机器人在扫描过程中只平移，则扫描仪重构的零件模型只与扫描仪TCP标定中的旋转矩阵R_t有关，而与平移关系T_t无关。所以在标定旋转关系R_x, R_y, R_z时控制过程中机器人的姿态不变，从而保证$R_{01}=R_{02}$成立。

3 算法求解

通过Matlab程序分别求式(6)的解R_x, R_y, R_z和式(8)的解$T_t=(X\ \ Y\ \ Z)^T$。式(6)通过数据采集过程，可以采集到多组$\triangle T_0=T_{02}-T_{01}$，$\triangle X_l=X_{l2}-X_{l1}$和相应的$R_0$，给定默认初始值(0.0，0.0，0.0)，利用函数fminsearch()来求得与初始点相近的最小解，即转化为求解式(11)中$valE$最小时的R_x,R_y,R_z。

$$valE = R_0 \cdot R_t \cdot (X_{l2} - X_{l1}) + (T_{02} - T_{01}) \tag{11}$$

式(8)为线性方程，可直接求解。实际上由式(8)可得

$$-(X_{B2} - X_{B1}) = (R_{02} - R_{01}) \cdot T_t \tag{12}$$

$$T_t = inv\left(\begin{pmatrix} R_{02}-R_{01} \\ \vdots \\ R_{0i}-R_{0j} \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} R_{02}-R_{01} \\ \vdots \\ R_{0i}-R_{0j} \end{pmatrix}\right) \cdot \begin{pmatrix} R_{02}-R_{01} \\ \vdots \\ R_{0i}-R_{0j} \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} -(X_{B2}-X_{B1}) \\ \vdots \\ -(X_{Bi}-X_{Bj}) \end{pmatrix} \tag{13}$$

其中，i, j分别是实验数据中的两组数据编号，且$i \neq j$。通过数据采集过程采集多组X_B和相应的R_0，即可求解得到$T_t=(X\ Y\ Z)^T$，并给出相应的标准差，以估计多组数据求解误差。

4 实验数据及分析

利用ABB IRB2400/16 标准版本的机器人夹持单目 3D 激光扫描仪分别对直径为 15mm和 30mm的实验球进行重复扫描，各采集了 10 组数据，用来验证R_x, R_y, R_z和X，Y，Z的标定算法。

4.1 标定R_x, R_y, R_z的实验数据分析

从表 2 第 9 组数据可看出 Matlab 函数 fminsearch 求解非线性方程式(6)时，计算上有一些波动，当输入参数变化不大时，输出结果有比较大的波动。去掉波动较大的第 9 组数据，根据标准差计算公式

$$\mathrm{std}(x)=\sqrt{\frac{\sum\left(xi-\bar{x}\right)^2}{n-1}}$$

分别计算各自校准差为std(R_x)=0.037 4, std(R_y)=0.003 0, std(R_z)= 0.034 6。估算R_x, R_y, R_z标定的重复精度为

(0.037 4+0.003 0+0.034 6)/3=0.025 0 rad

取各自的平均值作为最终的标定结果如下：

(R_x, R_y, R_z)= (0.521 2, 1.608 5, 0.525 5) rad

表 2 R_x, R_y, R_z 标定数据

组号	DeltaT0 (mm)	DeltaXv (mm)	R_x (rad)	R_y (rad)	R_z(rad)	Fval
1	2.00,2.72,18.19 3.76,-0.61,20.00	-18.38,-0.40,2.23 -19.95,3.97,1.76	0.590 969	1.616 215	0.594 542	0.009 740
2	2.00,2.72,18.19 3.76,-0.61,20.01	-18.36,-0.46,2.27 -19.93,3.96,1.74	0.524 172	1.608 486	0.522 144	0.000 535
3	2.00,2.72,18.19 3.76,-0.61,20.01	-18.40,-0.47,2.27 -19.93,3.97,1.77	0.513 394	1.608 300	0.520 041	0.001 403
4	2.00,2.72,18.19 3.76,-0.62,20.00	-18.37,-0.46,2.26 -19.95,3.99,1.77	0.477 312	1.607 816	0.484 067	0.001 533
5	2.00,2.72,18.19 3.76,-0.62,20.00	-18.41,-0.47,2.29 -19.90,3.98,1.76	0.548 601	1.607 853	0.549 132	0.001 860
6	2.00,2.72,18.19 3.77,-0.62,20.01	-18.34,-0.44,2.25 -19.96,3.98,1.80	0.469 683	1.607 851	0.482 589	0.001 874
7	2.00,2.72,18.20 3.76,-0.61,20.01	-18.44,-0.46,2.31 -19.96,3.99,1.79	0.546 468	1.606 629	0.546 692	0.004 082
8	2.00,2.72,18.20 3.76,-0.61,20.01	-18.46,-0.45,2.30 -19.98,4.00,1.79	0.512 890	1.606 620	0.517 084	0.006 464
9	2.00,2.72,18.20 3.76,-0.61,20.01	-18.37,-0.45,2.24 -19.97,3.98,1.77	-2.687 715	1.533 329	-2.675 884	0.002 166
10	2.00,2.72,18.20 3.76,-0.61,20.01	-18.44,-0.44,2.30 -19.97,3.98,1.80	0.506 904	1.606 393	0.513 510	0.003 919

4.2 标定 X，Y，Z 的实验数据分析

从表 3 中可以看出 Matlab 直接求解线性方程(8)，计算结果比较稳定，去掉第 1 组偏差比较大的数据，计算相应标准差为 std(X)= 0.027 8，std(Y)=0.033 4，std(Z)= 0.034 2，估计 X，Y，Z 标定的重复精度为(0.027 8+0.033 4+0.034 2)/3=0.031 8 mm。取 X，Y，Z 的平均值作为最后的标定结果：

(X，Y，Z) =(-428.034 1，26.062 5，258.954 9) mm

表 3 X，Y，Z 标定数据

（下转第 237 页）

组号	Sphere Center	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	ConNum
1	732.15,352.50, 1 174.99 571.98, -84.28, 1 156.53 790.77,-186.13, 389.95	-428.405 529	-26.132 647	259.431 955	3.282 373
2	732.31,352.12, 1 174.96 572.37, -84.21, 1 156.55 790.89,-186.20,1 389.82	-428.091 936	-26.031 918	258.988 209	3.282 250
3	732.30,352.10, 1 174.99 572.38, -84.20, 1 156.57 790.89,-186.16, 389.81	-428.046 432	-26.027 746	258.999 707	3.282 400
4	732.32,352.11, 1 174.98 572.37, -84.19, 1 156.57 790.88,-186.15, 389.79	-428.037 779	-26.043 297	258.977858	3.282 301
5	732.33,352.12, 1 175.00 572.38, -84.20, 1 156.58 790.86,-186.15,1 389.82	-428.045 041	-26.044 172	258.944 011	3.282 426
6	732.32,352.10, 1 175.00 572.39, -84.19, 1 156.59 790.88,-186.11 1 389.80	-428.007 630	-26.050 522	258.934 529	3.282 204
7	732.34,352.10, 1 175.02 572.39, -84.18, 1 156.61 790.85,-186.09,1 389.85	-428.005 105	-26.052 398	258.906 309	3.282 240
8	732.35,352.10, 1 175.00 572.39, -84.16, 1 156.63 790.86,-186.09, 389.87	-428.021 048	-26.088 611	258.953 470	3.282 359
9	732.38,352.12, 1 175.05 572.40, -84.15, 1 156.65 790.84,-186.06, 389.89	-428.006 969	-26.099 394	258.908 671	3.282 267
10	732.39,352.14, 1 175.05 572.38, -84.11, 1 156.66 790.85,-186.05, 389.96	-428.045 299	-26.124 002	258.981 303	3.282 411