

服务机器人智能空间中顶棚投影器建模与外参数标定

李国栋^{a,b}, 田国会^b, 周凤余^b, 王洪君^a

(山东大学 a. 信息科学与工程学院, b. 控制科学与工程学院, 济南 250100)

摘要: 研究服务机器人智能空间中顶棚投影器的运动学建模和外参数标定问题. 首先, 利用 D-H 方法对投影器进行运动学建模; 然后, 给出一种全新的求解一类关于旋转矩阵方程组的非线性迭代优化算法, 以完成投影器的外参数标定; 最后进行了实验验证. 实验结果表明, 所提出的投影器建模方法和外参数标定算法具有很高的精度, 经过标定后的投影器能够在地面上投射出完全按期望路径引导机器人运动的激光斑点, 从而实现低成本服务机器人高效和精确地导航.

关键词: 服务机器人智能空间; 顶棚激光投影器; 运动学建模; 外参数标定

中图分类号: TP24.2

文献标志码: A

Research on modeling and extrinsic parameter calibration of ceiling projector in service robot intelligent space

LI Guo-dong^{a,b}, TIAN Guo-hui^b, ZHOU Feng-yu^b, WANG Hong-jun^a

(a. School of Information Science and Engineering, b. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100, China. Correspondent: TIAN Guo-hui, E-mail: g.h.tian@sdu.edu.cn)

Abstract: The kinematic modeling and extrinsic parameter calibration problems of the ceiling projector in the service robot intelligent space (SRIS) are investigated. Firstly, the D-H method is used to set up the kinematic model of the projector. Then, according to solving a set of equations of the rotation matrix using a novel nonlinear iterative optimization algorithm, the extrinsic parameter of the projector is calibrated. Finally, some experiments are designed to verify the kinematic model's correctness and the calibration algorithm's accuracy. The experimental results show that, the modeled and calibrated projector can project the laser spot moving along a desired path on the ground, with which the navigation tasks for the low-cost service robot can be accomplished efficiently and accurately.

Key words: service robot intelligent space; ceiling projector; kinematic modeling; extrinsic parameter calibration

0 引言

传统的服务机器人导航方法必须首先按照任务要求规划出符合特定约束的最优路径, 然后采用动态反馈线性化^[1]方法或反步法^[2]来控制机器人实现路径跟踪, 且在路径跟踪过程中还需利用 EKF、Markov 或 Monte Carlo 等方法实时地对本体进行自定位. 较重的处理器计算负担大大影响了导航效率, 成为制约服务机器人推广应用的瓶颈之一.

以基于顶棚投影器的服务机器人快速导航为显著特色的服务机器人智能空间 (SRIS)^[3]技术的引入, 将服务机器人路径跟踪控制问题转换为服务机器人对运动目标 (即运动激光斑点) 的视觉伺服跟踪控制问题, 从而无需再对机器人的确切位置进行实时定位,

大大减轻了服务机器人的计算负担. SRIS 服务器通过 ZigBee 无线网络将规划好的全局路径信息传递给顶棚激光投影器, 投影器在地面上投射出沿规划路径运动的激光斑点, 机器人通过跟踪运动激光点的方式即可完成快速导航, 这其中关键的环节是投影器的运动学建模和投影器基坐标系与地面上的世界坐标系间位姿关系 (即外参数) 的标定.

目前, 机构运动学建模与外参数标定领域的研究多集中在机械臂手眼系统^[4]、自主移动车视觉系统^[5]、线结构光三维扫描系统^[6]、显微测量系统^[7]、自主移动车车载激光扫描系统^[8]等应用领域. 除 Hara^[9]曾对顶棚投影器导航方法做出过初步的有益探索之外, 有关顶棚投影器软硬件设计、运动学建模及外参数标

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2014-01-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61075092); 国家863计划项目(2006AA040206, 2009AA04Z220).

作者简介: 李国栋(1981—), 男, 博士后, 从事视觉伺服、机器视觉的研究; 田国会(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事服务机器人、智能空间、现代物流系统的优化与调度等研究.

定等方面的研究还是空白。

为了克服 Hara 导航方案成本高且通用性和扩展性差的缺点, 设计了一种新型的顶棚激光投影器, 该投影器使用搭载激光器的二自由度云台来替代固定于顶棚的移动机构及导轨, 同时为服务机器人配备廉价 USB 摄像头替代激光检测阵列。为了让顶棚投影器在地面上投射出严格沿规划路径引导机器人运动的激光斑点, 首先利用 D-H 方法对投影器进行运动学建模; 然后利用一种全新的非线性迭代优化算法对投影器基坐标系与世界坐标系之间的位姿关系进行标定。最后的实验表明, 所设计的投影器导航方案在显著降低系统成本的同时, 大大提高了服务机器人室内导航的稳定性和工作效率。

1 问题描述

图 1 所示为顶棚投影器的投影原理, 其中投影器由二自由度变速球形云台及固定于云台上的激光发射器组成。记世界坐标系为 $\{W\}$, 投影器基坐标系为 $\{0\}$, 激光器坐标系为 $\{E\}$, 0T_E 为坐标系 $\{E\}$ 相对坐标系 $\{0\}$ 的位姿, 地面上点 P 为投射到地面的激光点。

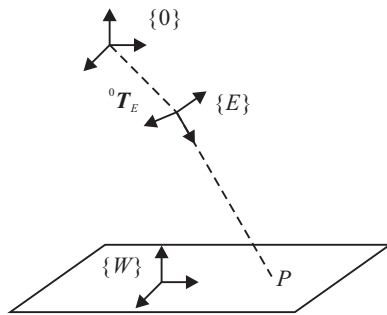


图 1 顶棚投影原理

如何由 P 在 $\{W\}$ 中的线位移 ${}^W P = [{}^W x, {}^W y, 0]^T$ 和线速度 ${}^W \dot{P} = [{}^W \dot{x}, {}^W \dot{y}, 0]^T$ 求得对应的投影器角位移 $\theta = [\theta_1, \theta_2]^T$ 和角速度 $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T$ 是本研究需要解决的主要问题。

记顶棚高度为 H , 世界坐标系 $\{W\}$ 与投影器基坐标系 $\{0\}$ 间的位姿关系为 ${}^0R_W|{}^0t_W$, 则 P 在 $\{W\}$ 和 $\{0\}$ 中分别为 ${}^W P = [{}^W x, {}^W y, 0]^T$ 和 ${}^0 P = [{}^0 x, {}^0 y, -H]^T$ 。可由

$${}^0 P = {}^0 R_W {}^W P + {}^0 t_W \tag{1}$$

和

$$[{}^0 \dot{x} \quad {}^0 \dot{y} \quad 0]^T = {}^0 R_W [{}^W \dot{x} \quad {}^W \dot{y} \quad 0]^T \tag{2}$$

将点 P 的线位移和线速度由 $\{W\}$ 转换到 $\{0\}$ 中。

记 ${}^E P = [0, 0, {}^E z]^T$, 其中 ${}^E z$ 是投影器角位移 θ 的函数 ${}^E z = g(\theta_1, \theta_2)$, $\{E\}$ 与 $\{0\}$ 间的位姿关系 ${}^0 T_E$ 亦为 θ 的函数, 则可由

$${}^0 P = {}^0 T_E \cdot {}^E P = f(\theta_1, \theta_2) \tag{3}$$

和

$${}^0 \dot{P} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} \dot{\theta} = J \dot{\theta} \tag{4}$$

将 P 在 $\{0\}$ 中的线位移和线速度与投影器角位移和角速度联系起来, 其中式 (4) 中的 J 为表征 $\dot{\theta}$ 与 ${}^0 \dot{P}$ 之间映射关系的雅可比矩阵。

这样, 问题最终被归结为式 (1) 和 (2) 中外参数 ${}^0 R_W|{}^0 t_W$ 的确定以及式 (3) 和 (4) 中 f 和 J 的求解。

2 问题的解

2.1 投影器运动学建模

欲求式 (3) 和 (4) 中的 f 和 J , 必须建立投影器的运动学模型。将投影器视为一个二自由度的机械臂, 按照 D-H 建模方法, 建立如图 2 所示的各连杆坐标系和末端执行器坐标系 (即激光器坐标系)。

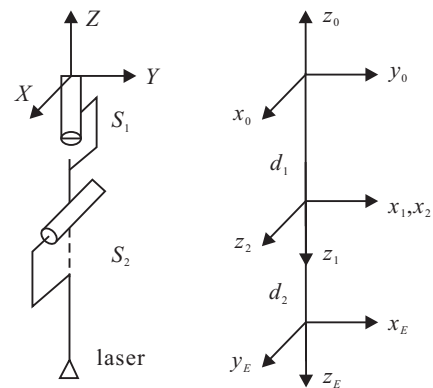


图 2 顶棚投影器各连杆坐标系

图 2 中, Z_1, Z_2 分别为关节 S_1, S_2 的旋转轴, 且它们正交并相交于一点。由图 2 可确定出如表 1 所示的 D-H 运动学参数。

表 1 顶棚投影器运动学参数

连杆	α/rad	a/cm	θ/rad	d/cm	连杆类型
1	π	0	$-\pi/2 + \theta_1$	d_1	R
2	$-\pi/2$	0	$0 + \theta_2$	0	R
E	$\pi/2$	0	0	d_2	

由表 1 可进一步确定出各连杆间的齐次变换矩阵 ${}^{i-1}T_i, i = 1, 2$, 进而求得

$${}^0 T_E = \begin{bmatrix} s_1 c_2 & c_1 & s_1 s_2 & d_2 s_1 s_2 \\ c_1 c_2 & -s_1 & c_1 s_2 & d_2 c_1 s_2 \\ s_2 & 0 & -c_2 & -d_2 c_2 - d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

将式 (5) 代入 (3), 可求得

$$f(\theta_1, \theta_2) = \begin{bmatrix} (H - d_1) s \theta_1 s \theta_2 / c \theta_2 \\ (H - d_1) c \theta_1 s \theta_2 / c \theta_2 \\ -H \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$g(\theta_1, \theta_2) = (H - d_1) / c \theta_2 - d_2. \tag{7}$$

由式(6)可得

$$\begin{cases} \theta_1 = A \tan 2({}^0x, {}^0y), \\ \theta_2 = A \tan(\sqrt{{}^0x^2 + {}^0y^2}/(H - d_1)). \end{cases} \quad (8)$$

建立如式(6)所示的投影器运动方程并获得如式(8)所示的运动方程反解后,以此为基础进行速度分析.对式(6)和(7)求导并整理,得

$$\begin{bmatrix} {}^0\dot{x} \\ {}^0\dot{y} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{H - d_1}{c\theta_2} \begin{bmatrix} c\theta_1 s\theta_2 & s\theta_1/c\theta_2 \\ -s\theta_1 s\theta_2 & c\theta_1/c\theta_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$E\dot{z} = \frac{s\theta_2(H - d_1)}{c\theta_2^2} \dot{\theta}_2. \quad (10)$$

显然, $\theta_2 = 0$ 和 $\theta_2 = \pi/2$ 为投影器的奇异形位,控制投影器运动时,应避免奇异形位的出现.

此外,式(10)给出了激光点沿激光器坐标系 $\{E\}$ 的 Z 轴的运动速度.在多投影器协作对服务机器人进行导航的情况下,它可被用来控制投影器间的切换,从而有效地解决墙壁或机器人本体对投射到地面的激光斑的遮挡问题.

2.2 投影器外参数标定

欲求式(1)和(2)中的 $[{}^0R_W | {}^0t_W]$, 首先手动控制云台使投影器在地面上投射出不在一条直线上的3个激光点 $P_i (i = 1, 2, 3)$, 然后测量出它们在 $\{W\}$ 中的坐标 ${}^W P_i (i = 1, 2, 3)$; 此外,根据式(6),由云台关节角计算出它们在 $\{0\}$ 中的坐标 ${}^0 P_i (i = 1, 2, 3)$, 由式(1),有

$$\begin{cases} {}^0 P_1 = {}^0 R_W {}^W P_1 + {}^0 t_W, \\ {}^0 P_2 = {}^0 R_W {}^W P_2 + {}^0 t_W, \\ {}^0 P_3 = {}^0 R_W {}^W P_3 + {}^0 t_W. \end{cases} \quad (11)$$

将等式两两相减以消去 ${}^0 t_W$, 并考虑到旋转矩阵保范性,对数据作归一化处理.记

$$\begin{cases} \mathbf{a} = \frac{{}^W P_1 - {}^W P_3}{\|{}^W P_1 - {}^W P_3\|_2}, \\ \mathbf{b} = \frac{{}^0 P_1 - {}^0 P_3}{\|{}^0 P_1 - {}^0 P_3\|_2}, \\ \mathbf{c} = \frac{{}^W P_2 - {}^W P_3}{\|{}^W P_2 - {}^W P_3\|_2}, \\ \mathbf{d} = \frac{{}^0 P_2 - {}^0 P_3}{\|{}^0 P_2 - {}^0 P_3\|_2}, \end{cases} \quad (12)$$

可得一组关于旋转矩阵 \mathbf{R} 的方程组

$$\begin{cases} \mathbf{R}\mathbf{a} = \mathbf{b}, \\ \mathbf{R}\mathbf{c} = \mathbf{d}. \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\mathbf{a} \times \mathbf{b} \neq 0, \mathbf{c} \times \mathbf{d} \neq 0, \mathbf{R}$ 为式(11)中的 ${}^0 R_W$ 的简写.下面给出一种求解方程组(13)的非线性迭代优化算法,该算法使如下代价函数得到最优解:

$$\min d(\mathbf{b}, \hat{\mathbf{b}})^2 + d(\mathbf{d}, \hat{\mathbf{d}})^2;$$

$$\text{s.t. } \hat{\mathbf{b}} = \mathbf{R}\mathbf{a},$$

$$\hat{\mathbf{d}} = \mathbf{R}\mathbf{c}. \quad (14)$$

其中 $d(\mathbf{m}, \mathbf{n})$ 为单位矢量 \mathbf{m}, \mathbf{n} 对应空间 3D 点的欧氏距离.代价函数(14)的最小化意味着单位向量 $\mathbf{b}, \hat{\mathbf{b}}$ 间夹角与 $\mathbf{d}, \hat{\mathbf{d}}$ 间夹角之和为最小.

2.2.1 \mathbf{R} 初值的计算

根据文献[10],以单位矢量 \mathbf{k} 为转轴, $\theta \in (-\pi, \pi]$ 为转角的旋转矩阵 Rodrigues 公式为

$$\mathbf{R}_{\mathbf{k}, \theta} = \cos \theta \mathbf{I}_{3 \times 3} + \sin \theta [\mathbf{k}]_{\times} + (1 - \cos \theta) \mathbf{k}\mathbf{k}^T. \quad (15)$$

则方程 $\mathbf{R}\mathbf{a} = \mathbf{b}$ 和 $\mathbf{R}\mathbf{c} = \mathbf{d}$ 的解可被表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{\mathbf{b}, \theta_1} \mathbf{R}_{\mathbf{a} \times \mathbf{b} / \|\mathbf{a} \times \mathbf{b}\|_2, \arccos \mathbf{a}^T \mathbf{b}}, \quad (16)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{\mathbf{d}, \theta_2} \mathbf{R}_{\mathbf{c} \times \mathbf{d} / \|\mathbf{c} \times \mathbf{d}\|_2, \arccos \mathbf{c}^T \mathbf{d}}. \quad (17)$$

令式(16)和(17)相等,并将等式两端同时右乘 $\mathbf{R}_{\mathbf{a} \times \mathbf{b} / \|\mathbf{a} \times \mathbf{b}\|_2, \arccos \mathbf{a}^T \mathbf{b}}^T$, 得

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\mathbf{b}, \theta_1} &= \\ \mathbf{R}_{\mathbf{d}, \theta_2} \mathbf{R}_{\mathbf{c} \times \mathbf{d} / \|\mathbf{c} \times \mathbf{d}\|_2, \arccos \mathbf{c}^T \mathbf{d}} \mathbf{R}_{\mathbf{a} \times \mathbf{b} / \|\mathbf{a} \times \mathbf{b}\|_2, \arccos \mathbf{a}^T \mathbf{b}} &. \end{aligned} \quad (18)$$

由文献[10]和文献[11]可证明,由 $\mathbf{R}_{\mathbf{k}, \theta}$ 构造一对一矢量 $\mathbf{r}_{\mathbf{k}, \theta} = \tan(\theta/2)\mathbf{k}$, 并在其上定义运算

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\mathbf{k}_3, \theta_3} &= \\ \mathbf{r}_{\mathbf{k}_1, \theta_1} \otimes \mathbf{r}_{\mathbf{k}_2, \theta_2} &= \\ \frac{\mathbf{r}_{\mathbf{k}_1, \theta_1} + \mathbf{r}_{\mathbf{k}_2, \theta_2} + \mathbf{r}_{\mathbf{k}_1, \theta_1} \times \mathbf{r}_{\mathbf{k}_2, \theta_2}}{1 - \mathbf{r}_{\mathbf{k}_1, \theta_1}^T \mathbf{r}_{\mathbf{k}_2, \theta_2}}, \end{aligned} \quad (19)$$

则所求得 $\mathbf{r}_{\mathbf{k}_3, \theta_3}$ 对应的 $\mathbf{R}_{\mathbf{k}_3, \theta_3}$ 一定满足 $\mathbf{R}_{\mathbf{k}_3, \theta_3} = \mathbf{R}_{\mathbf{k}_1, \theta_1} \mathbf{R}_{\mathbf{k}_2, \theta_2}$.

将式(18)中的旋转矩阵乘法运算转换为式(19)所示的运算形式,并记

$$\mathbf{m} = \mathbf{r}_{\frac{\mathbf{c} \times \mathbf{d}}{\|\mathbf{c} \times \mathbf{d}\|_2}, \arccos \mathbf{c}^T \mathbf{d}} \otimes \mathbf{r}_{\frac{-\mathbf{a} \times \mathbf{b}}{\|\mathbf{a} \times \mathbf{b}\|_2}, \arccos \mathbf{a}^T \mathbf{b}}, \quad (20)$$

则式(18)可被整理为

$$\begin{aligned} \left(1 - \tan \frac{\theta_2}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{m}\right) \tan \frac{\theta_1}{2} \mathbf{b} &= \\ \tan \frac{\theta_2}{2} \mathbf{d} + \mathbf{m} + \tan \frac{\theta_2}{2} (\mathbf{d} \times \mathbf{m}), \end{aligned} \quad (21)$$

为了将 θ_1 消去,等式两端同时叉乘 \mathbf{b} , 得

$$(\mathbf{d} \times \mathbf{b} + \mathbf{d} \times \mathbf{m} \times \mathbf{b}) \tan \frac{\theta_2}{2} = \mathbf{b} \times \mathbf{m}. \quad (22)$$

显然,当且仅当矢量 $\mathbf{d} \times \mathbf{b} + \mathbf{d} \times \mathbf{m} \times \mathbf{b}$ 与 $\mathbf{b} \times \mathbf{m}$ 线性相关时,方程组(13)有解,其解为

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \\ \mathbf{R}_{\mathbf{d}, 2 \arctan((\mathbf{d} \times \mathbf{b} + \mathbf{d} \times \mathbf{m} \times \mathbf{b})^+ (\mathbf{b} \times \mathbf{m}))} \mathbf{R}_{\frac{\mathbf{c} \times \mathbf{d}}{\|\mathbf{c} \times \mathbf{d}\|_2}, \arccos \mathbf{c}^T \mathbf{d}} &. \end{aligned} \quad (23)$$

当方程组(13)无解时,由式(23)可求得其近似解,进而以其为初值来设计优化算法对其进行精化.

2.2.2 R 的非线性迭代优化

令旋转矩阵 R 作角度为 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 的微分转动, 得到新的旋转矩阵

$$R' = R_{x,\delta_x} R_{y,\delta_y} R_{z,\delta_z} R. \quad (24)$$

将 $R_{x,\delta_x}, R_{y,\delta_y}, R_{z,\delta_z}$ 按照 Rodrigues 公式展开并忽略高阶项, 可求得旋转矩阵的导数

$$\dot{R} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R' - R}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \begin{bmatrix} 0 & -\delta_z/\Delta t & \delta_y/\Delta t \\ \delta_z/\Delta t & 0 & -\delta_x/\Delta t \\ -\delta_y/\Delta t & \delta_x/\Delta t & 0 \end{bmatrix} R = [\omega]_{\times} R. \quad (25)$$

其中 $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 为角速度矢量.

记式 (14) 中的 \hat{b}, \hat{d} 为 $\hat{Y} = [\hat{b}^T, \hat{d}^T]^T$, 则其导数

$$\dot{\hat{Y}} = \begin{bmatrix} \dot{Ra} \\ \dot{Rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\omega]_{\times} Ra \\ [\omega]_{\times} Rc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\omega]_{\times} \hat{b} \\ [\omega]_{\times} \hat{d} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{d} \end{bmatrix}_{\times} \omega = J_{\omega} \omega. \quad (26)$$

记 $Y = [b^T, d^T]^T$, 定义误差矢量 $\epsilon = Y - \hat{Y}$, 则需最小化的代价函数 (14) 可以写为 Lyapunov 函数的形式 $L = \epsilon^T \epsilon$. 对其求导, 得

$$\dot{L} = 2\epsilon^T \dot{\epsilon} = -2\epsilon^T \dot{\hat{Y}} = -2\epsilon^T J_{\omega} \omega. \quad (27)$$

为保证 $\dot{L} < 0$, ω 可取为

$$\omega = \lambda J_{\omega}^T (J_{\omega} J_{\omega}^T)^{-1} \epsilon. \quad (28)$$

将式 (28) 离散化, 有

$$\begin{bmatrix} \delta_x^{(k+1)} \\ \delta_y^{(k+1)} \\ \delta_z^{(k+1)} \end{bmatrix} = \alpha J_{\omega}^{(k)T} (J_{\omega}^{(k)} J_{\omega}^{(k)T})^{-1} \epsilon^{(k)}. \quad (29)$$

至此, 非线性迭代优化方法可概述如下.

Step 1: 令 $k = 0$, 将由式 (23) 求得的 R 的初值代入式 (14) 和 (26), 求出 $\epsilon^{(k)}, J_{\omega}^{(k)}$.

Step 2: 由式 (29) 计算出微分转动并代入式 (24), 确定出 $R^{(k+1)}$.

Step 3: 将 $R^{(k+1)}$ 分别代入式 (14) 和 (26), 计算出 $\epsilon^{(k+1)}$ 和 $J_{\omega}^{(k+1)}$. 若 $\|\epsilon^{(k+1)} - \epsilon^{(k)}\| < \epsilon_0$, 则停止迭代, 以 $R^{(k+1)}$ 为近似最优解; 否则, 令 $k = k + 1$, 转 Step 2.

3 实验与分析

图 3 所示为吊装投影器的实验室场景及其对应的二维地图. $\{W\}$ 为固联到地面的世界坐标系, 实验室被两个隔断分隔为 3 个子区域. 为了使投影器的投影区域完全覆盖整个实验室, 在 A、B 两点对应的顶棚上吊装了两个由型号为 YL5307-A07 的亚安变速球形云台和安装到云台上的红光激光器组成的投影器.

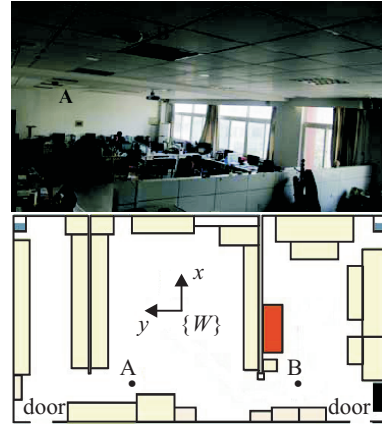


图 3 实验室场景及其二维地图

以厘米为计量单位, 手动控制投影器 A, 将激光点投射到地面上, 测量出它们在 $\{W\}$ 和 $\{0\}$ 中的对应坐标 ${}^W P_i \leftrightarrow {}^0 P_i, i = 1, 2, 3$:

$$[0 \ 0 \ 0]^T \leftrightarrow [240 \ -90 \ -290]^T,$$

$$[60 \ 60 \ 0]^T \leftrightarrow [297.09 \ -28.15 \ -290]^T,$$

$$[0 \ 90 \ 0]^T \leftrightarrow [236.50 \ -10.40 \ -290]^T.$$

将它们代入式 (12), 利用式 (23) 求得投影器 A 外参数的初值

$$[{}^0 A R_W | {}^0 A t_W] = \begin{bmatrix} 0.9992 & -0.0399 & 0 & 240 \\ 0.0399 & 0.9992 & 0 & -90 \\ 0 & 0 & 1 & -290 \end{bmatrix}.$$

根据式 (29), 对其进行非线性迭代优化, 优化后的解为

$$[{}^0 A R_W | {}^0 A t_W] = \begin{bmatrix} 0.9991 & -0.0419 & 0 & 240 \\ 0.0419 & 0.9991 & 0 & -90 \\ 0 & 0 & 1 & -290 \end{bmatrix}.$$

迭代过程中, 代价函数 $\epsilon^T \epsilon$ 的变化曲线如图 4 所示.

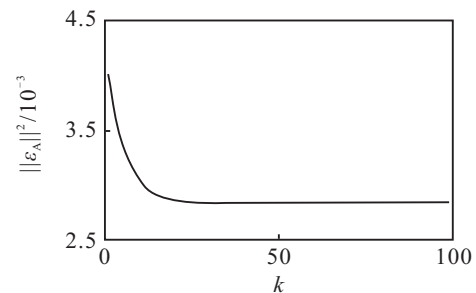


图 4 迭代过程中的代价函数变化曲线

利用同样的方法, 确定出投影器 B 的外参数

$$[{}^0 B R_W | {}^0 B t_W] = \begin{bmatrix} 0.9996 & 0.0284 & 0 & 273 \\ -0.0284 & 0.9996 & 0 & 455 \\ 0 & 0 & 1 & -290 \end{bmatrix}.$$

表 2 所示为世界坐标系 $\{W\}$ 中的期望点 ${}^W P_i (i = 1, 2, \dots, 9)$, 以及投影器 A、B 根据期望点利用式

(1)和(8)计算出关节角,进而投射到地面的激光点在 $\{W\}$ 中的测量值间的对照表.由表2可以看出,该标定方法标定出的投影器有着很高的投影精度.

表 2 投影器投影真值与测量值对照表

	真值	A 测量值	B 测量值
第 1 组	(-200, -200)	(-199.7, -201.6)	(-200.7, -199.7)
	(-200, 0)	(-199.4, -0.2)	(-198.4, -4.9)
	(-200, 200)	(-200.2, 200.5)	(-198.7, 203.6)
第 2 组	(0, -200)	(-0.5, -198.5)	(2.3, -198.3)
	(0, 0)	(2.2, -1.9)	(-1.6, -0.1)
	(0, 200)	(2.5, 200.1)	(-2.8, 197.2)
第 3 组	(200, -200)	(201.4, -200.5)	(200.6, -198.3)
	(200, 0)	(204.3, 0.9)	(198.5, -0.5)
	(200, 200)	(203.5, 202.3)	(199.3, 194.9)

图5为利用A、B两投影器接力实现的服务机器人导航图.图中实线为SRIS服务器根据服务机器人当前位置start和目标位置end规划出的期望路径,虚线为机器人利用投影器进行导航过程中其机载StarGazer红外定位系统记录的实际运动轨迹.可以看出,机器人很好地实现了对期望路径的路径跟踪.

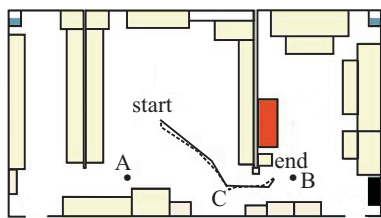


图 5 服务机器人顶棚投影循迹导航

4 结 论

本文针对目前家庭服务机器人导航定位精度低及效率不高等缺点,在SRIS中设计了一种基于顶棚激光投影器的机器人高效导航系统,对系统中顶棚激光投影器的运动学建模和外参数标定方法进行了重点研究.实验结果及实际应用表明,按该方法标定后的投影器具有很高的精度,能够在地面上投射出完全按期望路径运动的激光斑点,服务机器人仅利用一个廉价的USB摄像头就可以完成导航任务.该导航方案显著降低了系统成本,提高了服务机器人室内导航的稳定性和工作效率,具有较大的推广应用价值.

参考文献(References)

- [1] 马保离,宗光华,霍伟.非完整链式系统的输出跟踪控制——动态扩展线性化方法[J].自动化学报,1999,25(3): 316-322.
(Ma B L, Zong G H, Huo W. Tracking control of nonholonomic chained systems by dynamic extended linearization[J]. Acta Automatica Sinica, 1999, 25(3): 316-322.)
- [2] 董文杰,霍伟.链式系统的轨迹跟踪控制[J].自动化学报,2000,26(3): 310-316.

- (Dong W J, Huo W. Trajectory tracking control of chained systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(3): 310-316.)
- [3] Lee J, Hashimoto H. Intelligent space-concept and contents[J]. Advanced Robotics, 2002, 16(3): 265-280.
- [4] 杨广林,孔令富,王洁.一种新的机器人手眼关系标定方法[J].机器人,2006,28(4): 400-405.
(Yang G L, Kong L F, Wang J. A new calibration approach to hand-eye relationship of manipulator[J]. Robot, 2006, 28(4): 400-405.)
- [5] 李国栋,田国会,王洪君,等.服务机器人智能空间中QR Code人工地标的设计、定位与识读[J].高技术通讯,2013,23(12): 27-35.
(Li G D, Tian G H, Wang H J, et al. Design, location and recognition of the QR code-based artificial landmark in service robot intelligent space[J]. High Technology Letters, 2013, 23(12): 27-35.)
- [6] 谢则晓,张成国.线结构光测头外参数的精确标定方法[J].机械工程学报,2005,41(8): 218-223.
(Xie Z X, Zhang C G. Accurate calibration of structured-light sensors for solving the extrinsic parameters[J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 218-223.)
- [7] 尚进,刘文耀,王兵振.显微测量系统外参数标定的研究[J].计量学报,2007,28(1): 23-28.
(Shang J, Liu W Y, Wang B Z. A camera calibration method for micro-imaging measurement[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(1): 23-28.)
- [8] 李磊,严洁,阮友田.车载激光测绘系统的标定[J].中国光学,2013,6(3): 353-358.
(Li L, Yan J, Ruan Y T. Calibration of vehicle-borne laser mapping system[J]. Chinese Optics, 2013, 6(3): 353-358.)
- [9] Hara K, Inoue M, Maeyama S, et al. Navigation using one laser source for mobile robot with optical sensor array installed in pan and tilt mechanism[C]. Proc of the 2008 IEEE ASME Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics. Xi'an: IEEE, 2008: 257-263.
- [10] 熊有伦,丁汉,刘恩沧.机器人学[M].北京:机械工业出版社,1993: 52-53.
(Xiong Y L, Ding H, Liu E C. Robotics[M]. Beijing: China Machine Press, 1993: 52-53.)
- [11] 邢燕.四元数及其在图形图像处理中的应用研究[D].合肥:合肥工业大学计算机与信息学院,2009: 21-22.
(Xing Y. Research on quaternion and its applications in graphics and image processing[D]. Hefei: School of computer and information, Hefei University of Technology, 2009: 21-22.)