

# 基于立体视觉的移动机器人自主导航定位系统<sup>1</sup>

刘伟军<sup>o</sup> 董再励 郝颖明 朱 枫

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学开放研究实验室 沈阳 110015)

**摘 要** 描述了一种基于立体视觉的移动机器人自主导航定位系统。该系统采用双目立体视觉完成环境特征的 3D 信息提取, 实时计算出机器人相对作业目标的位姿(6D)关系, 导引移动机器人控制系统按目标导向进行运动。系统在相对位姿计算中采用旋动(Screw)理论, 将带约束的多变量函数的非线性优化问题转化为线性方程组的最小二乘问题, 简化了计算复杂性。实验表明, 这个导航定位系统在定位精度和数据处理速度上均可满足机器人导航的要求。

**关键词** 移动机器人, 自主导航定位, 立体视觉, 旋动理论

## 0 引言

移动机器人自主导航主要由环境感知与建模, 相对位姿确定、运动规划控制和目标确定等几个功能模块组成。其中自定位技术是实现移动机器人自主运动的基本功能模块之一。自定位是指机器人在运动过程中利用自身的传感器, 实时确定其在工作环境中参考坐标系  $W$  下的位置  $(x, y, z)$  和姿态  $(\alpha, \beta, \gamma)$ 。这样, 当目的确定时, 移动机器人就可以自主规划运动, 完成预定的作业。这种定位导航方式属于绝对定位, 大致可分为两大类: 基于计算机视觉的定位技术和基于非视觉传感器(如超声、激光等)的移动机器人定位技术。近年来, 随着计算机视觉技术的发展, 基于视觉的机器人定位方法由于信息量大、适应范围广而受到人们的普遍重视<sup>[1]</sup>, 已经成为机器人导航技术的研究“热点”。

基于视觉的机器人定位导航技术主要由视觉传感器的标定及机器人绝对位姿计算两部分组成。其典型方法是利用像机成像模型理论建立视觉传感器  $S$  与世界坐标系  $W$  的关系; 然后利用这个关系, 通过视觉系统对环境特征的识别与匹配, 计算出环境特征在视觉系统坐标系中的位置, 进而通过预标定的视觉系统与移动机器人的位姿关系, 确定机器人  $R$  在世界坐标系  $W$  中位置和姿态。在运用立体视觉确定载体在  $W$  中的绝对位姿关系以控制载体运动时, 其主要问题是定位的精度和计算效率。即通过连续的位姿变换达到实时可以准确确定运动载体

与目标之间的位姿关系, 完成载体在作业空间的定位导航任务。这个连续的位姿变换关系可以由图 1 来说明。

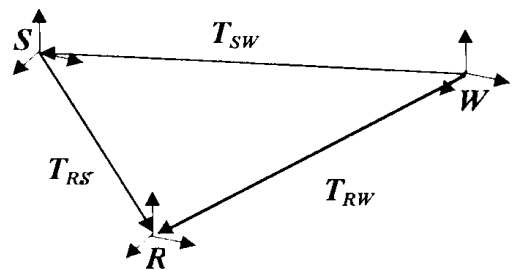


图 1 各坐标系关系图

图 1 中  $T_{sw}$ 、 $T_{rs}$  和  $T_{rw}$  分别是坐标系  $S$ 、 $R$ 、 $W$  间的位姿变换关系矩阵, 由正交的  $3 \times 3$  旋转矩阵  $T_R$  和一个三维位移向量  $T_T$  构成。如果知道  $T_{sw}$  和  $T_{rs}$ , 则有  $T_{rw} = T_{sw} + T_{rs}$ 。如果  $T_{rw}$  确定了, 就确定了机器人在  $W$  下的位姿。这样, 当目的在  $W$  下给定时, 就可以依靠时时给定的  $T_{rw}$  完成对机器人的定位和导航。通常  $T_{rs}$  是依靠安装结构定义的。定义的误差可以根据实验数据进行调整和补偿。 $T_{sw}$  是传感器系统对环境  $W$  下特征识别后, 利用数学模型计算得到的。在建立  $T_{sw}$  时, 需要确定视觉系统与观测环境之间位姿关系参数, 一般理解为观测参数  $C$  矩阵的标定。确定  $C$  后, 就可以计算出环境特征点在  $S$  下的 3D 坐标, 以此来确定  $T_{sw}$ 。当机器人运动时,  $T_{sw}$  是随载体运动变化的, 而  $T_{rs}$  是一常数阵。因而, 视觉系统的主要工作是迅速准确提供  $T_{sw}$  以实现实时对  $T_{rw}$  的计算, 完成对移动

<sup>1</sup> 国家 863 计划(863-512 9804-16)。  
<sup>o</sup> 男, 1969 年生, 博士, 助理研究员; 研究方向: 计算机视觉, 虚拟现实, 反求工程等; 联系人。  
 (收稿日期: 2000-07-18)

机器人的定位导航。

本文给出了一种用于移动机器人的视觉定位导航系统。该系统利用了旋动(Screw)理论,将约束条件下的多变量函数的非线性优化问题巧妙地转化为线性方程组的最小二乘问题,简化了位姿关系的求解,提高了位姿解的鲁棒性,稳定性和计算速度,而且在精度和速度上均可满足机器人导航的要求。

## 1 系统构成

本视觉系统采用双目式立体视觉功能模式。由两个 CCD 黑白摄像机,一块可双路并行输入的图象采集板,一台图象数据处理工业计算机组成。该模块安装在移动机器人上,通过通讯接口与机器人控制器相连接,构成视觉定位信息闭环控制自主移动系统。监控系统通过无线网络与自主移动系统交换数据,建立初始状态和初始位置估计,并通过不断得到机器人运动的当前位置和方向监控机器人在行进中的状态。预设计的目标点放置在作业对象上,其坐标建立在  $W$  下,由人工标志构成。采用本系统的位姿计算方法,理论上目标标志只要形成三个空间不共线的特征点或两条空间不共线的特征直线,并能可靠检出即可。

## 2 系统功能实现及方法

移动载体的视觉导航系统功能由几个功能模块实现。一是视觉系统标定模块,完成建立视觉系统与测量对象之间的关系。二是图象采集与预处理模块,完成对环境图象的特征提取与目标检出。三是 3D 位置计算模块,完成对目标特征点的空间位置计算。四是计算各坐标系间的位姿关系模块。

### 2.1 视觉系统标定

视觉系统的标定是建立某一参考坐标系下的可观测对象与视觉系统之间的相互关系。以典型摄像机针孔模型为例,参考系  $F$  中点  $P(x, y, z)$  与对应图象点  $P'(u, v)$  间坐标关系为  $P' = CP$ , 其展开式为

$$\begin{bmatrix} ut \\ vt \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据式(1),给定足够的点  $P$  和对应的图象点  $P'$ ,就可以唯一确定其姿关系矩阵  $C$ 。当两个摄像机与同一指定坐标系  $F$  之间建立了这种关系,则任何一可观测点  $P$  在  $F$  下的三维坐标可根据其在两个图

象上的投影坐标  $(u, v)$ ,通过对  $C$  矩阵的数学处理计算出。

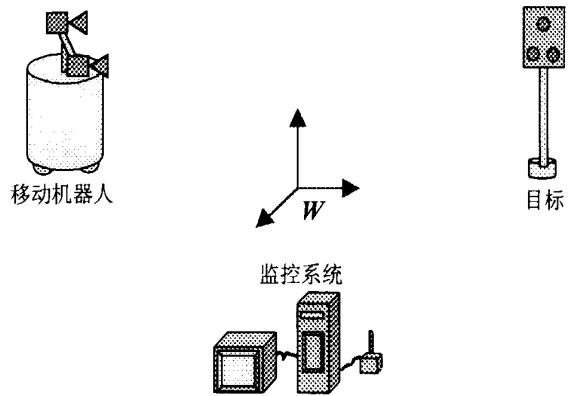


图 2 视觉导引移动机器人系统

### 2.2 基于旋动(Screw)理论的位姿计算方法

本文提到的位姿计算是指已知两个坐标系下的共同特征点,运用旋动理论关于坐标系间位姿关系的数学描述,计算并给出移动机器人在环境坐标系间的位姿。

采用旋动理论求解坐标系位姿关系的基本方法是利用空间向量的位移不变性,建立基于空间旋转轴的姿态变换间的数学描述,给出满足求解条件,解出坐标系间的旋转变换关系,进而解出位置关系。其数学描述如下,已知点  $X$  在两个坐标系  $\omega_0$  与  $\omega_1$  的关系为

$$x_0 = Rx_1 + T \quad (2)$$

其中  $x_0$  和  $x_1$  分别是在  $\omega_0$  和  $\omega_1$  下的位置描述。式(2)中  $R$  为旋转矩阵,满足正交条件,  $T$  则唯一地确定了  $\omega_0$  和  $\omega_1$  的空间位移。

#### 2.2.1 旋转矩阵 $R$ 的求解

设  $P_1$  和  $P_2$  为给定的两个空间特征点,其连线构成一空间向量  $P_1P_2$ 。根据空间向量的表达与其位置无关的性质,该向量  $P_1P_2$ (如图 3 所示)在坐标系  $\omega$  和  $\omega'$  下可分别表示为  $X$  和  $X'$ 。且有

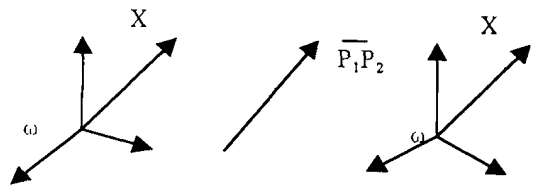


图 3 空间向量  $P_1P_2$  及其在两个坐标系下的表示

$$X = RX' \quad (3)$$

根据旋动理论的旋转变换关系,存在一个由旋转轴

$u = (u_x, u_y, u_z)$  构成的关系矩阵  $U$ , 使得式(3) 满足

$$X - X' = U(X + X') \quad (4)$$

且  $U = \text{Screw}(u)$ 。根据 Cayley 定理,  $U$  与  $R$  的关系可写为

$$R = [1 + U \quad U^2]^{-1} [1 - U] \quad (5)$$

由于  $U = \text{Screw}(u)$  为一斜反对称奇异矩阵, 因此不能用式(4)直接解出  $u$  的三个分量, 即无法直接获得  $U$ 。

由数学分析可知, 如果已知空间另一向量  $P_3P_4$ , 在坐标系  $\omega$  和  $\omega'$  下的表达分别为  $Y$  和  $Y'$ ; 则式(4)可改写为

$$\begin{bmatrix} X - X' \\ Y - Y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(X + X') \\ U(Y + Y') \end{bmatrix} \quad (6)$$

可以证明, 只要向量  $(X + X')$  与  $(Y + Y')$  不共线, 则利用式(6)可以解出  $u$ , 然后通过  $u$  构造出  $U$ , 再可由式(5)得出  $R$ 。

### 2.2.2 位移 $T$ 的求解

在  $R$  得出后, 式(2)中的  $T$  可直接由下式计算

$$T = x_0 - Rx_1 \quad (7)$$

这样, 两个坐标系  $\omega_0$  和  $\omega_1$  之间的变换关系就由  $R$  和  $T$  唯一确定了。如果  $\omega_0$  和  $\omega_1$  分别是  $R$  和  $W$ ,

则通过上述计算方法,  $T_{rw}$  就可以得到。

## 3 实验结果

本文利用中国科学院机器人学开放研究实验室自行研制的全方位移动机器人完成了上述导航定位实验。实验时, 空间标定点  $n (n \geq 11)$  的坐标定义在移动机器人坐标系上, 分别对安装在机器人顶部的两个 CCD 黑白摄像机 (12mm 镜头) 进行标定。这样, 视觉系统观测计算出的环境特征的 3D 信息就直接定义在机器人坐标系下, 省去了对  $T_{rs}$  的标定和计算。目标支架上安装有标志点, 如图 4 所示, 世界坐标系选在支架上。当机器人向支架行进时, 可实时计算出机器人相对于世界坐标系的位置和姿态。实验步骤如下:

(1) 利用 2.1 中介绍的方法对视觉系统进行标定, 确定视觉坐标系  $S$  (也是机器人坐标系  $R$ ) 与世界坐标系  $W$  之间的关系。

(2) 全方位移动机器人原地绕转动, 视觉系统扫描寻找目标(支架)位置。

(3) 根据标定好的  $S(R)$  与  $W$  之间的关系, 并利用图像处理技术实时确定支架上的特征点在坐标系  $S(R)$  中的 3D 坐标。

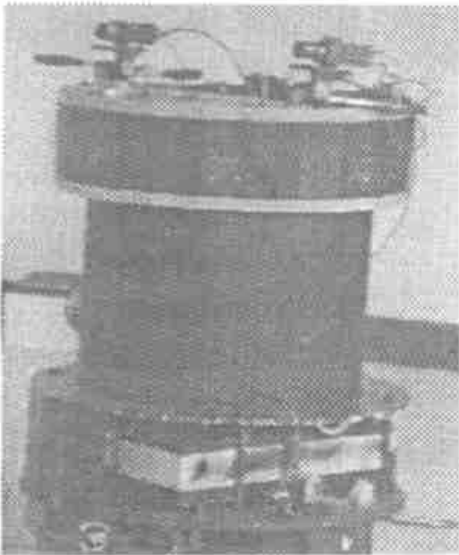
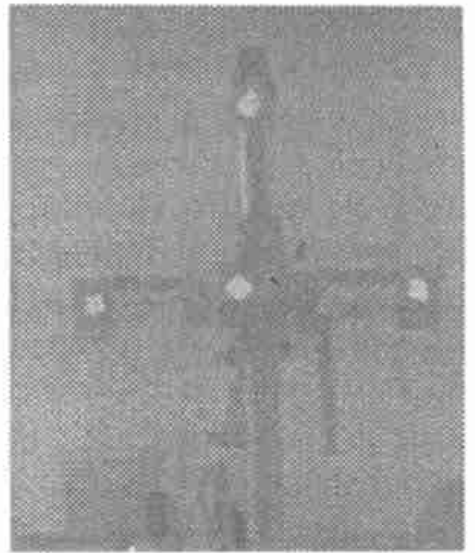


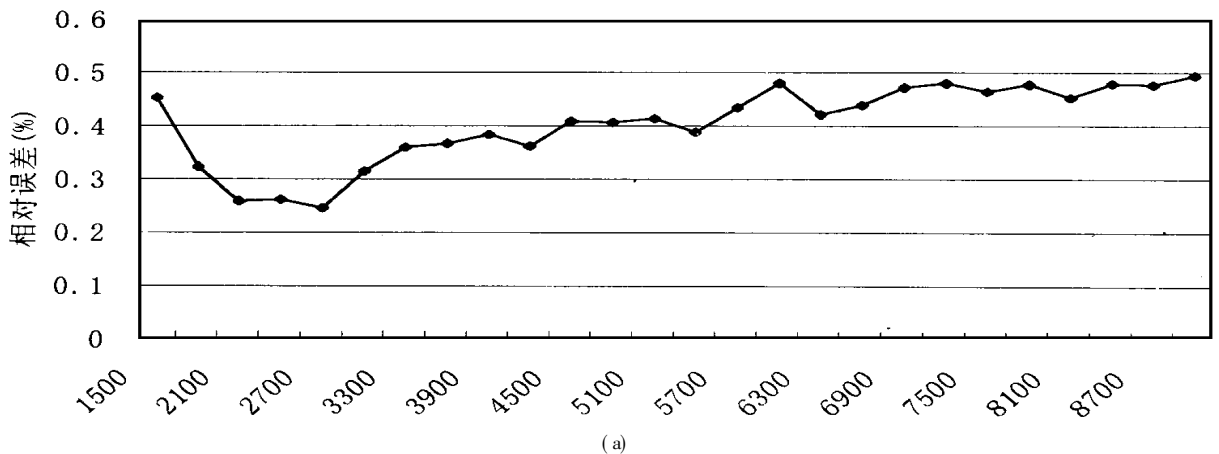
图 4 实验所用视觉导引机器人和带有标志点的支架



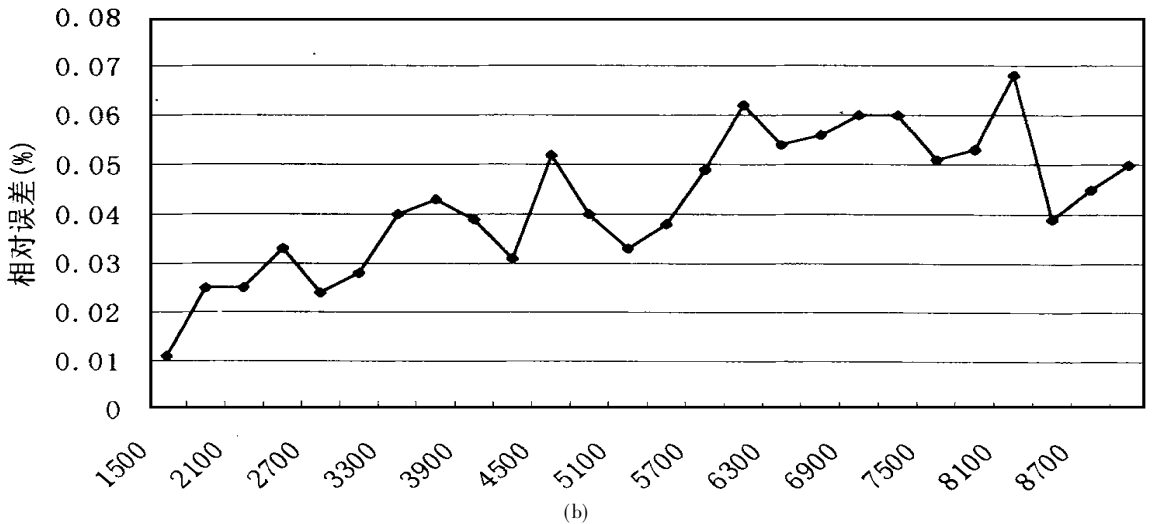
(4) 根据支架上的特征点在  $W$  和  $S(R)$  中的位置, 利用旋动理论实时确定这两个坐标系之间的相互关系, 得到机器人相对于作业目标的位置和姿态。

(5) 将机器人相对于作业目标的位置和姿态信息通过通讯接口传给控制器, 控制机器人向目标方向行进。

所得到的实验结果如图 5 所示。其中图 5(a) 为移动机器人行进过程中在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上所产生的位置相对误差的匀方根值, 图 5(b) 为机器人行进过程中在  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  方面所产生的姿态相对误差的匀方根值。实验中图像采集和处理速度为 4~5 次/秒。



(a)



(b)

图5 移动机器人姿态相对误差曲线(mm)

## 5 结论

本文描述了一种基于立体视觉的移动机器人自主导航定位系统。该系统采用双目立体视觉作为环境感知传感器,可快速、准确地导引移动机器人按目标导向进行运动。系统在相对位姿计算中采用旋动(Screw)理论,将带约束的多变量函数的非线性优化问题转化为线性方程组的最小二乘问题,可大大简化计算复杂性。实验表明,这个导航定位系统在定

位精度和数据处理速度上均可满足一般机器人导航的要求。

### 参考文献:

- [1] 杨毅, 杨长江, 胡占义. 基于垂线和水平线的机器人自定位方法. 计算机学报, 1999, 22(7)
- [2] 马颂德, 张正友. 计算机视觉. 科学出版社, 1998
- [3] Polanski A, Wojciechowski K, Borek A. Stereo Calibration by Planar Grid Lines, CAIP' Proceedings, Springer Verlag, 1995
- [4] Wei G Q, Ma S D. Implicit and Explicit Camera Calibration: Theory and experiments, IEEE Trans. PAMI, 1994, 16: 469
- [5] 董再励等. 一种基于立体视觉的多视点建模方法. 中国图形图象学报, 1997, 2(7)

## A Robot Self location Method Based on Stereovision System

Liu Weijun, Dong Zaili, Hao Yingming, Zhu Feng

(Robotics Lab., Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015)

### Abstract

A new method for Robot Self location Based on Stereovision System has been developed within two stages. In the first stage, stereo cameras calibration is performed. And in the second stage, the determination of robot's location and pose is carried out by the method that is based on screw theory. The efficiency of the proposed robot Self location method is proved by experiments.

**Key words:** Robot Self location, Camera calibration, Determination of robot's location and pose, Screw theory