

文章编号: 1000-6893(2007)04-0981-07

# 基于激光扫描的移动机器人实时轨迹测量系统

宗光华, 邓鲁华, 王 巍

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

## Laser Scanner Based Real-time Trajectory Measurement System for Mobile Robot

ZONG Guang-hua, DENGLu-hua, WANG Wei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of  
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘 要:** 设计了一种移动机器人实时轨迹测量系统, 主要包括激光扫描仪、数据采集计算机、无线通讯网络和数据处理显示软件 4 个部分。测量系统采用两台激光扫描仪从不同高度测量机器人身上安装的标志杆的位置, 将测量数据经过位置识别和坐标系对准后, 传输到一台计算机上进行融合, 采用卡尔曼滤波器消除测量随机误差, 绘制出机器人的运动轨迹。实验结果表明, 测量系统可以在较大的测量范围内实现厘米级测量精度和目标分辨率的轨迹测量, 为移动机器人的设计开发和导航控制等研究领域提供了良好的实验测试平台。

**关键词:** 激光扫描; 移动机器人; 运动轨迹; 实时测量; 卡尔曼滤波

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A

**Abstract:** A kind of laser scanners based real-time trajectory measurement system for mobile robot is proposed. The system consists of four main components: laser scanner, data acquisition computer, wireless communication network and data process software. Two laser scanners measure the sign pole of the robot in different levels to localize the robot, and the measurement data are transferred to one computer and fused after position identifying and coordinate matching. The measurement stochastic error is eliminated by Kalman filter, and the trajectory of mobile robot is painted. The results of experiments show that the measurement system can achieve the measurement precision and object resolving power about centimeters in a large measurement range, and that provides a good experiment measurement platform for design of mobile robot and robot navigation control research fields.

**Key words:** laser scanner; mobile robot; movement trajectory; real-time measurement; Kalman filter

移动机器人的运动轨迹可以为移动机器人的研究提供重要信息。在移动机器人的设计开发、定位导航、轨迹跟踪控制、路径规划算法等研究领域, 移动机器人的运动轨迹数据可以在结构优化、误差补偿、数据融合、参数调整和算法设计等方面提供重要的分析依据和评价标准。因此, 移动机器人运动轨迹的测量在移动机器人研究中有着重重要的应用价值。

移动机器人的轨迹测量系统应该比移动机器人自身定位传感器具有更高的、更稳定的测量精度, 以对机器人的定位和控制进行标定与评价。现有的较高精度移动机器人轨迹测量方法主要有标记线法、视觉测量法等<sup>[1]</sup>。其中标记线法是在机器人运动过程中在地面上留下轨迹标记线, 此方法由于不便于对标记线进行测量而应用较少。

视觉测量法在工业机器人和足球机器人等小型移动机器人的研究中被广泛用来进行机器人定位和轨迹测量。由于受摄像机视角和图像畸变等因素的限制, 难以实现大范围、高精度的移动机器人运动轨迹测量, 其测量范围一般在 10 m 以内, 同时对测量环境要求比较高, 并且标定比较复杂<sup>[2]</sup>。高精度的差分 GPS 定位传感器也可以用来进行移动机器人运动轨迹的高精度测量和定位标定, 但是由于其精度受卫星数量和信号质量等诸多因素的影响而不稳定, 精度一般在十几厘米, 难以实现稳定可靠的高精度轨迹测量<sup>[3]</sup>。

激光由于其测量距离远、精度高和不易受干扰等优点, 在机器人定位、障碍物探测等领域得到了广泛的应用<sup>[4]</sup>。本文设计了一种基于激光扫描仪的移动机器人运动轨迹实时测量系统, 可以在较大范围内对机器人运动轨迹实现较高精度的实时测量, 为移动机器人的设计开发和导航控制等研究领域提供了良好的实验测试与标定平台。

收稿日期: 2006-07-11; 修订日期: 2006-11-03

基金项目: “985”计划(204023)

通讯作者: 宗光华 E-mail: ghzong@buaa.edu.cn

## 1 系统设计

整个测量系统由激光扫描仪、数据采集计算机、无线通讯网络和软件系统4部分组成,如图1所示。

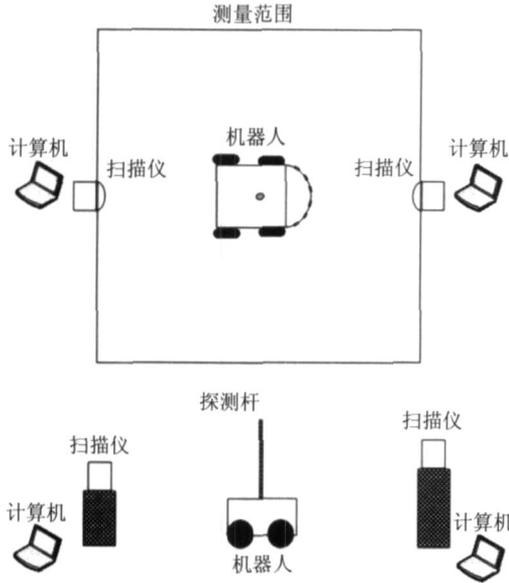


图1 测量系统示意图

Fig. 1 Sketch map of measurement system

在该测量系统中,首先在移动机器人身上垂直安装杆状标志物,然后采用激光扫描仪探测移动机器人身上的杆状标志物,实现对机器人运动轨迹的测量。在测量场地的两端各放置一台激光扫描仪,它们的测量数据首先由各自的控制计算机通过串口进行采集,然后利用无线网络汇集到其中一台计算机上进行融合,确定机器人的位置,对机器人的轨迹进行实时记录和显示。

### 1.1 激光扫描仪

本系统所采用的激光扫描仪为德国SICK公司的LMS200型激光扫描仪,如图2所示。

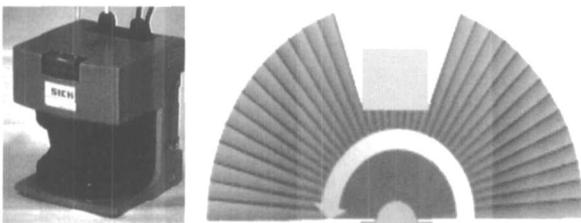


图2 激光扫描仪外观和扫描范围示意图

Fig. 2 Laser scanner and its probing range

该型激光扫描仪的测量原理是:扫描仪中的激光发生器发射出一个激光脉冲,当激光脉冲遇到物体被反射回来时,扫描仪中的接收器接收到

反射脉冲,通过计算激光脉冲从发射到接收到反射信号的度越时间来得到目标物体的距离信息。激光扫描仪通过一个旋转的反射镜改变激光脉冲的发射角度,实现扇形的扫描范围。该型激光扫描仪的主要性能参数如表1所示。

表1 激光扫描仪主要性能参数  
Table 1 Main parameters of laser scanner

最大测量距离/m	30
距离分辨率/mm	10
静态误差/mm	±15(距离1~8 m时) ±40(距离8~20 m时)
扫描范围/(°)	100/180
角度分辨率/(°)	0.25/0.5/1
响应速度/ms	53/26/13
接口	RS-232/RS-422

本系统中采用0.5°角度分辨率和180°扫描范围的工作模式。随着距离的增加,激光扫描仪对目标尺寸的分辨率和测量精度会降低,只能在相对较小的范围内获得理想的测量效果,如距离在8 m以内时的测量精度可以达到±15 mm,在8 m以外时的测量精度则为±40 mm,相差达1倍多。为了在较大的范围内达到比较理想的测量效果,本系统中将两台激光扫描仪组合使用,以获得较大的测量范围,测量时,由于两台激光扫描仪相对放置,为了避免出现扫描仪之间激光脉冲的相互干扰问题,两台激光扫描仪的放置具有高度差,如图1所示,它们是在不同的水平面内对机器人标志杆进行扫描。同理,将更多扫描仪以合适的排列方式组合使用,可以在更大的测量范围内获得理想的测量效果。

### 1.2 数据采集与传输

两台激光扫描仪通过串口分别连接在各自的控制计算机上,扫描仪与计算机之间通过RS-422协议进行通讯,两台计算机通过无线局域网以TCP/IP协议进行通讯,一台作为服务器,一台作为客户端。

激光扫描仪有两种扫描工作方式:连续方式和查询方式,其中查询方式需要通过串口对扫描仪下发一条指令,扫描仪接收到指令后通过串口将其对扫描范围的测量结果传送给控制计算机,本测量系统中采用查询工作方式。测量时,首先由服务器通过串口和网络分别向与其连接的扫描仪和客户端计算机以一定频率循环发送测量指令,其连接的扫描仪接收到指令后将扫描结果通过串口发送给服务器,服务器对数据进行处理以

和客户端计算机传来的数据进行融合。客户端计算机接收到测量指令后,通过串口对与其连接的扫描仪下发一条指令,扫描仪接收到指令后将测量结果通过串口发送给客户端计算机,客户端计算机经过数据处理后,将处理结果通过网络传送给服务器计算机,由服务器计算机进行数据融合。系统的数据采集与传输过程如图 3 所示。

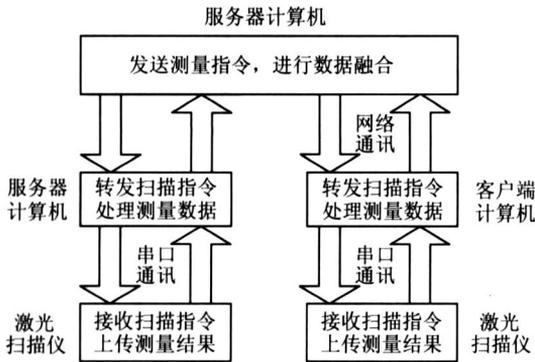


图 3 数据采集与传输过程示意图  
Fig. 3 Data acquisition and transfer

### 1.3 软件系统

测量系统的软件包括服务器端和客户端两个部分。其中服务器端软件主要有设置系统测量参数,产生和下发测量同步信号,采集扫描仪数据,对测量数据进行融合、存储和显示等功能。客户端软件主要有转发测量同步信号、采集激光扫描仪数据并对其进行处理和转发等功能。测量系统的主要功能由服务器端软件来实现,其运行界面如图 4 所示。

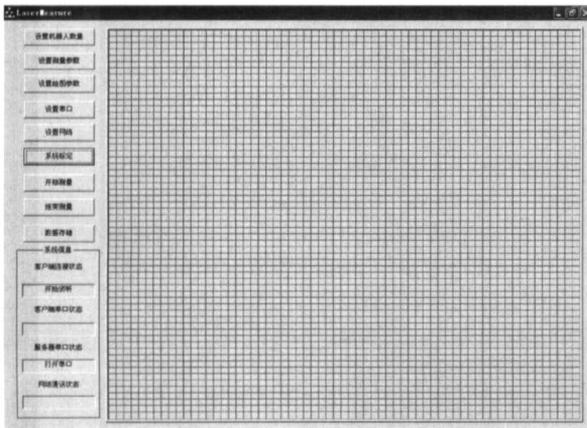


图 4 测量软件界面

Fig. 4 Interface of measurement software

## 2 数据处理

激光扫描仪产生的测量数据需要经过两个阶段的数据处理过程,最终获得机器人的运动轨迹。

两台激光扫描仪的测量数据分别由其控制计算机采集后,首先进行位置识别、坐标系对准等处理运算,然后通过无线网络汇集到服务器计算机上进行融合,以确定机器人的当前位置。

### 2.1 位置识别

激光扫描仪对整个测量范围进行一次扫描,获得以极坐标表示的测量范围内所有反射点的位置信息。由于在测量时,通过测量软件预先设定的测量范围内只有机器人身上安装的标志杆一个物体,其他的反射点都处于设定的测量范围之外,所以根据反射点的分布情况可以首先将背景反射点剔除。由于标志杆可能对激光扫描仪产生多个反射点,所以扫描仪测量到的可能是一个“点簇”,它们分布在以标志杆的中心为中心的圆周范围内。本测量系统采用平均值法对“点簇”进行处理,机器人位置的坐标信息由下式获得

$$k = \frac{i=0}{n} \quad (1)$$

$$D_k = \frac{i=0}{n} D_i \quad (2)$$

式中: $k$ 为测量序号; $n$ 为此次扫描中处于测量范围内的反射点数量; $i$ 为此次扫描中处于测量范围内的反射点的序号; $(k, D_k)$ 为机器人的极坐标。

### 2.2 坐标系对准

系统进行测量时,两台激光扫描仪分别放置在测量场地的两端,处于测量场地的中心线位置,与测量场地的边界线平行。由于放置时它们的位置和角度都会存在误差,所以每次测量开始时,都需要进行标定,如图 5 所示。

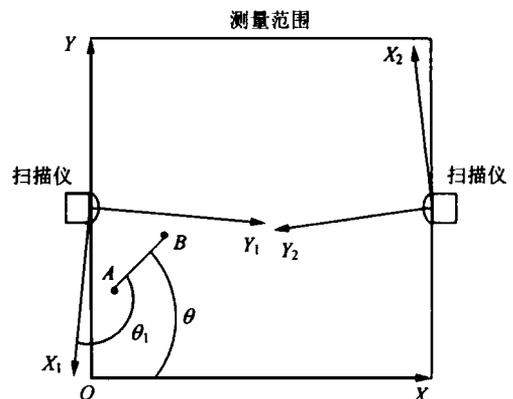


图 5 坐标系对准

Fig. 5 Coordinate matching

激光扫描仪获得的机器人位置信息是以极坐标形式表示的,坐标的原点在激光扫描仪的中心,坐标的正方向是扫描仪右侧的零角度位置。首先将每台激光扫描仪获得的机器人极坐标转换为自身直角坐标系  $X_1 O_1 Y_1$  和  $X_2 O_2 Y_2$ , 它们的坐标原点与激光扫描仪的极坐标原点重合,  $X$  轴正方向与极坐标的零角度线重合,然后对测量系统进行坐标系对准,将两台激光扫描仪的自身坐标系变换到基准坐标系  $XOY$ , 本测量系统中以正方形的测量方位为直角坐标系的基准,称为基准坐标系,坐标系的原点处于测量范围的左下角,向右  $X$  坐标增加,向上  $Y$  坐标增加。对准时,首先设定系统处于标定状态,然后使机器人分别处于两个不同的位置,分别输入机器人所处这两点在基准坐标系中的坐标。设图 5 中  $A$  点和  $B$  点在基准坐标系中的坐标分别为  $(x_A, y_A)$  和  $(x_B, y_B)$ , 由激光扫描仪测量到的  $A$  点和  $B$  点在其自身坐标系中的坐标为  $(x_{A1}, y_{A1})$  和  $(x_{B1}, y_{B1})$ , 则

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a \\ 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos & -\sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{A1} \\ y_{A1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a \\ 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos & -\sin & 0 \\ \sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{B1} \\ y_{B1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $(a, b)$  为从扫描仪的自身坐标系到基准坐标系的平移和旋转量<sup>[5]</sup>。通过上述两式可以计算出从扫描仪的自身坐标系到基准坐标系的平移矩阵和旋转矩阵,实现测量系统的坐标系对准。为了降低坐标系对准时的测量误差,对于每台激光扫描仪,使用直径比较小的标志杆分别在其附近选择两个测量点进行上述计算。

### 2.3 数据融合与滤波

两台激光扫描仪经过位置识别和坐标系对准后的目标位置测量数据通过无线网络传输到服务器计算机上进行数据融合,确定唯一的目标坐标。由于测量范围是一个正方形,在数据融合中,当测量到的目标坐标处于如图 6 所示的  $AB$  连线的左侧时,测量坐标以左侧激光扫描仪的数据为准,当测量到的目标坐标处于如图 6 所示的  $AB$  连线的右侧时,测量坐标以右侧激光

扫描仪的数据为准,当由于分辨率等问题,某一台激光扫描仪没有测量到目标时,以另外一台的数据为准。

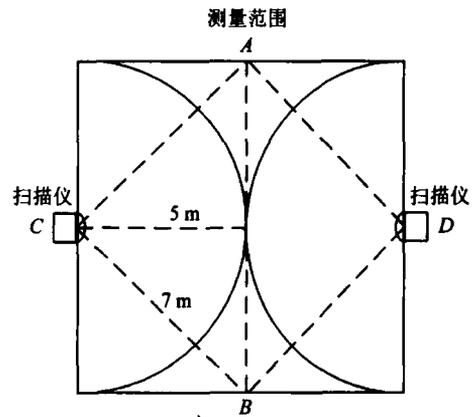


图 6 数据融合方法

Fig. 6 Data fusion

测量中,由于激光扫描仪测量误差的存在,测量到的目标位置会出现比较大的波动,为了消除误差对测量值的影响,使用卡尔曼滤波器对融合后的测量值进行处理<sup>[6]</sup>。由于机器人  $X$  轴和  $Y$  轴方向上运动的耦合性不强,在滤波时采取分散滤波的形式,以  $X$  轴为例,系统的状态变量选取为

$$X = [x \quad v_x \quad a_x]^T \quad (5)$$

式中:  $x$  为机器人的坐标;  $v_x$  为机器人在  $X$  轴方向上的速度分量;  $a_x$  为机器人在  $X$  轴方向上的加速度分量。则系统的状态方程为

$$X_{k+1} = {}_{k+1/k}X_k + {}_k W_k \quad (6)$$

式中:  $W_k$  为协方差矩阵为  $Q$  的系统噪声矩阵;  ${}_k$  为系统噪声矩阵的驱动矩阵,本系统中为  $I$ 。状态转移矩阵

$${}_{k+1/k} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $T$  为系统状态的时间间隔。系统的量测方程为

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (8)$$

式中:  $V_k$  为协方差矩阵为  $R$  的量测噪声矩阵; 系统量测矩阵

$$H_k = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (9)$$

则通过式(10)~式(14)就可以计算出系统变量的估计值。

状态传递方程:

$$\mathbf{X}_{k+1/k} = {}_{k+1/k}\mathbf{X}_{k/k} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{k+1/k} = {}_{k+1/k}\mathbf{P}_{k/k} + \mathbf{Q} \quad (11)$$

状态更新方程:

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}_{k+1/k} (\mathbf{P}_{k+1/k} + \mathbf{R})^{-1} \quad (12)$$

$$\mathbf{X}_{k+1/k+1} = \mathbf{X}_{k+1/k} + \mathbf{K}(\mathbf{Z}_k - \mathbf{X}_{k+1/k}) \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_{k+1/k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}) \mathbf{P}_{k+1/k} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{P}$  为误差协方差矩阵;  $\mathbf{K}$  为卡尔曼增益矩阵。  $Y$  轴方向上的滤波方法与  $X$  轴方向上相同。

### 3 目标分辨率与测量频率

本测量系统的目标尺寸的分辨率主要取决于激光扫描仪的角度分辨率和目标到激光扫描仪的距离,如图 7 所示。

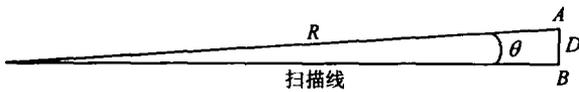


图 7 目标尺寸分辨率

Fig. 7 Resolving power of object dimension

目标尺寸分辨率由下式获得

$$D = R \times \theta \quad (15)$$

式中:  $D$  为目标尺寸分辨率;  $R$  为目标到激光扫描仪的距离;  $\theta$  为激光扫描仪的角度分辨率。本系统中,  $\theta = 0.5^\circ$ ; 在  $R = 5 \text{ m}$  时, 目标尺寸分辨率  $D = 43 \text{ mm}$ 。

系统的测量频率主要取决于激光扫描仪的响应速度和系统数据传输速度, 即

$$S = \frac{1}{t} \quad (16)$$

式中:  $S$  为系统测量频率;  $t$  为系统响应时间, 主要包括激光扫描仪的响应时间(本系统中为  $26 \text{ ms}$ ) 和数据的串口传输时间及网络传输时间, 当采用 RS-422 协议, 波特率为  $500 \text{ K}$  时, 采集一次测量数据大约需要  $12 \text{ ms}$ , 由于网络传输数据量较少, 网络传输时间大约为几毫秒, 考虑到数据处理需要的时间, 本系统中  $T$  取  $100 \text{ ms}$ , 即系统的测量频率为  $10 \text{ Hz}$ 。

### 4 误差分析

测量系统的误差主要有以下几个方面的来源: 测量中标志杆的倾斜造成的误差、激光扫描仪放置不垂直造成的误差、坐标系对准时的标

定误差、位置识别时的数据处理造成的误差和由于两台激光扫描仪时间同步所造成的误差等。

测量系统中两台激光扫描仪在不同的水平面内对标志杆进行扫描, 标志杆安装的误差和机器人运动时地面的不平坦都会造成标志杆倾斜, 如图 8 所示。

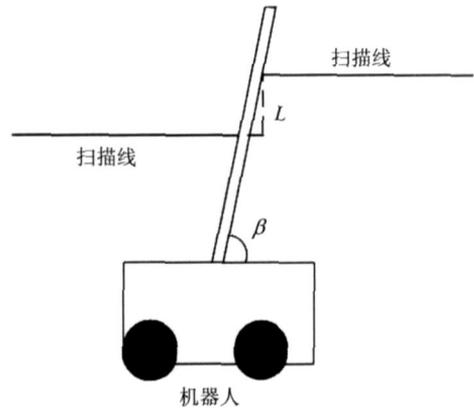


图 8 倾斜误差示意图

Fig. 8 Lean error

从图 8 中可以看到, 当不考虑标志杆直径的影响时, 标志杆的倾斜造成的两个扫描仪测量数据的误差为

$$d = L \tan \beta \quad (17)$$

式中:  $d$  为两个扫描仪测量数据的差;  $L$  为两台扫描仪的水平高度差;  $\beta$  为标志杆的倾斜角度。因此, 提高标志杆安装时的垂直度和在保证两台激光扫描仪不相互干扰的情况下尽量减少它们的水平高度差以及选择比较平坦的实验场地, 可以有效降低此种误差。同理, 测量时尽量提高激光扫描仪的放置垂直度, 使扫描线水平, 也可以减少测量误差。

进行坐标系对准时的标定测量时, 尽量在靠近激光扫描仪的地方使用直径较小的标志杆进行测量, 可以减少测量系统的误差, 同时由前文所述的位置识别方法可以知道, 经过平均法处理后的位置点处于以标志杆的中心为中心的圆周内, 其半径等于标志杆的半径加上激光扫描仪的测量误差。因此, 在满足测量系统目标分辨率的情况下尽量减小标志杆的半径和在激光扫描仪精度较高的范围内进行测量, 可以有效降低此种误差。由于两台激光扫描仪进行的测量是由同一台计算机产生的测量信号所触发的, 所以时间差在毫秒级, 对系统测量精度影响不大。

## 5 实验

为了验证所设计的移动机器人轨迹测量系统的效果,以 Pioneer3-A T 型移动机器人为测量对象进行了实验。实验中,在机器人身上安装了直径 50 mm 的标志杆,所以本文将最大测量范围设定为边长 10 m 的正方形,以满足测量系统的目标尺寸分辨率,同时使测量范围处于激光扫描仪精度比较高的范围内。测量时机器人最大运动速度为 500 mm/s,如图 9 所示。

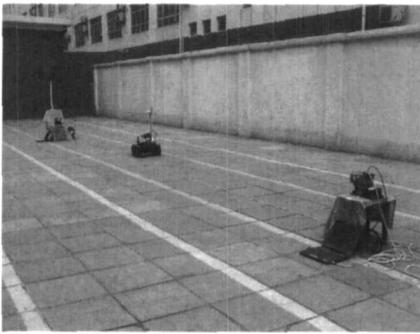


图 9 轨迹测量实验

Fig 9 Experiment of trajectory measurement

为了确定测量系统的精度,对系统的静态测量精度进行了实验。实验中,分别在图 6 所示的 A, B 两点 and C, D 两点的连线上每隔 0.5 m 测一个点,计算其平均误差。两条线上的平均误差如表 2 所示。

表 2 测量平均误差

Table 2 Average error of measurement

AB 连线平均误差/mm	24.2
CD 连线平均误差/mm	20.6

从测量数据可以看到,测量系统达到了厘米级的测量精度。为了验证测量系统对动态轨迹的测量能力,进行了机器人在测量范围内做随机避障运动时的轨迹测量,测量曲线和滤波后的曲线如图 10 所示。

图 10 中星号标记点所示为运动轨迹的测量数据,实线所示为滤波后的运动轨迹。从图 10 中可以看到,测量系统可以较好地实现对机器人轨迹的测量。并且可以观察到,当机器人运动速度比较慢时,系统所测量到的点就较密,轨迹测量精度也较高。

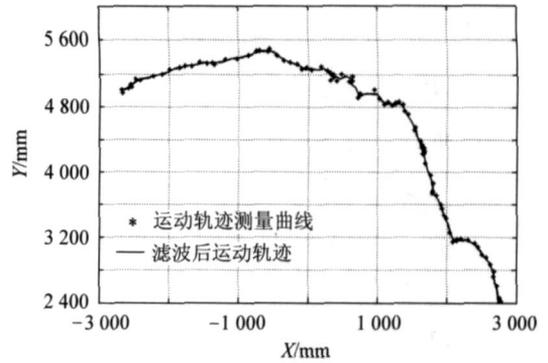


图 10 机器人运动轨迹测量曲线

Fig. 10 Movement trajectory of robot

## 6 结论

设计了一种基于双激光扫描仪的移动机器人实时轨迹测量系统,通过融合两台激光扫描仪对机器人身上标志杆的测量数据,利用卡尔曼滤波消除随机测量误差的影响,绘制出机器人的运动轨迹。分析了多台激光扫描仪组合使用时的坐标系对准,数据处理和误差来源等问题。经实验,该测量系统能够在边长 10 m 的矩形范围内实现厘米级精度的移动机器人轨迹测量,可以满足大部分移动机器人测量精度的需要,同时对环境要求比较低,标定简单,为移动机器人的设计开发和导航控制等研究领域提供了良好的实验测试平台。使用双台激光扫描仪克服了单台激光扫描仪测量范围小、测量精度随着距离增加而降低的缺点,使得测量系统在整个实验场地范围内都能够实现较高精度的轨迹测量。如果采用测量精度更高的激光扫描仪,提高其角度分辨率,减小标志杆的直径,增加参与组合的扫描仪数量,则测量系统的测量范围和精度还可以得到进一步提高。

## 参 考 文 献

- [1] Emura T, Arakawa A, Kaneko T. Wide-range trajectory measurement using CCD camera for small mobile robots [C]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1995: 655-660.
- [2] 岁波, 都东, 陈强. 基于双目视觉的工业机器人运动轨迹准确度检测[J]. 机械工程学报, 2003, 39(5): 88-91.  
Sui B, Du D, Chen Q. Path accuracy measurement of industrial robot based on binocular vision[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5): 88-91. (in Chinese)
- [3] Ohno K, Tsubouchi T, Yuta S. Outdoor map building based on odometry and RTK-GPS positioning fusion[C].

IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004: 684-690.

- [4] Tsai C C, Lin H H, Lin C C. Trajectory tracking control of a laser-guided wheeled mobile robot [C]. IEEE International Conference on Control Applications, 2004: 1055-1060.

- [5] 吴瑞祥. 机器人技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994.

Wu R X. Robot technology and application [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1994. (in Chinese)

- [6] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.

Qin Y Y, Zhang H Y, Wang S H. Kalman filter and integrated navigation theory [M]. Xi an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998. (in Chinese)

#### 作者简介:



宗光华(1943 - ) 男,教授,博士生导师。  
主要研究方向:自主机器人与机电系统。

Tel:010-82317749

E-mail:ghzong@buaa.edu.cn



邓鲁华(1978 - ) 男,博士研究生。主要研究方向:移动机器人导航与多机器人协作系统。

E-mail:www\_dlh@sina.com



王巍(1973 - ) 男,博士,副教授。主要研究方向:自主机器人与机电系统。

E-mail:wangweilab@buaa.edu.cn

(责任编辑:蔡斐)