

服务空间中人的定位与跟踪

段 朋 田国会 张 伟

(山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要 针对人与机器人共存的服务空间中人的定位跟踪问题,提出了一种基于分布式激光雷达协作感知的全局定位跟踪方法。分别对各台激光雷达获取的数据进行统计检验,将其分为静态数据和动态数据,利用静态数据完成各台激光雷达的位置标定,实现背景消除。动态数据通过无线网络传送到服务器,将来自同一时刻不同激光雷达的动态数据组成观测数据的一帧,实现数据的同步与融合。对获取的每帧数据进行基于迭代最近点算法的轮廓模型匹配,区分各个目标。采用基于位置-速度的关联门对相邻两帧的检测目标进行关联,实现对各动态目标的跟踪。实验验证了该方法在解决人的定位与跟踪问题的有效性,与基于视觉的定位跟踪方法相比,本系统在定位精度和跟踪成功率上优势明显。

关键词 传感器; 激光雷达; 定位跟踪; 数据同步与融合; 迭代最近点算法; 关联门

中图分类号 TP242.6; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1108007

Human Localization and Tracking in Service Space

Duan Peng Tian Guohui Zhang Wei

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract To solve the problem of human localization and tracking in the service space of human-robot coexistence, a novel method based on collaborative perception using distributed laser radars for human tracking is proposed. First, laser data obtained from each of radars is evaluated statistically, separately. All data are divided into static data and dynamic data. Static data are employed to calibrate the laser radars for background subtraction. Dynamic data are then sent to server computer by wireless network. Data from different radars at the same moment are formed into one frame to realize data synchronization and integration. Finally, contour model matching based interative closest point algorithm is implemented on each frame of laser data to distinguish the targets. To realize human tracking, targets between two frames are associated using association gate based on their positions and speeds. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method in solving the problem of human localization and tracking. Compared to vision-based tracking methods, the system performs better in terms of localization accuracy and tracking success rate.

Key words sensors; laser radars; localization and tracking; data synchronization and integration; interative closest point method; association gate

OCIS codes 120.6650; 140.3460; 280.3400

1 引 言

在服务型机器人实现自主化和智能化的过程中,人与机器人共存作为一个基本且重要的课题,一直备受国内外诸多研究者关注^[1]。服务空间中运动

的人一方面可能是机器人直接或潜在的服务对象,另一方面也是机器人完成既定导航任务需要避让的目标,因此利用各种传感器对服务空间的人进行检测,并跟踪其位置,获得服务对象实时、全面的状态

收稿日期: 2014-03-26; 收到修改稿日期: 2014-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(61075092)、山东省自然科学基金(ZR2011FM011)

作者简介: 段 朋(1987—),男,博士研究生,主要从事分布式激光定位、服务机器人导航技术等方面的研究。

E-mail: duanpeng162008@126.com

导师简介: 田国会(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事服务机器人、智能空间、多机器人协同协作等方面的研究。

E-mail: g. h. tian@sdu. edu. cn (通信联系人)

信息是服务机器人感知环境、适应环境,继而完成人性化服务的基础^[2]。

近年来,对于服务空间中人的定位与跟踪,尽管国内外诸多学者已经进行了广泛的研究,取得了一些可喜的识别、定位成果,但是在实际应用中还存在着不少问题^[3]。比如基于视觉的人的定位与跟踪^[4-6],受环境背景复杂多变、光照不均匀、遮挡、目标人的非刚性等因素影响,使得人的位置估计变得容易发散,难以获得准确的定位信息。与此同时,人机交互的相对定位成为一种间接解决服务对象全局定位的有效方式^[7-9]。文献[7]介绍了一种使用安装在机器人本体上的激光雷达和视觉摄像机实现运动人检测与跟踪的方法,参照机器人实时位置获取目标人的全局位置。但这些方法存在一个共同的缺点,服务机器人在实现运动目标全局定位的同时,难以抽身完成其他的服务任务。另外,仅仅使用机器人自身携带的传感器同时完成对服务对象及其周围复杂环境的识别和感知,其能力毕竟有限,不足在于:探测速度慢、效率低、感知环境信息欠完整,机器人定位不精确、稳健性差,严重制约着服务机器人导航能力和服务水平的提升。

众所周知,激光雷达是机器人领域常用的一种测距传感器,可以获得较高精度的感知信息,且噪声相对较小,但单个雷达难以实现多目标、有遮挡等复杂环境运动目标的动态定位^[10]。然而利用若干激光雷达协作感知,却可以有效解决上述问题^[11]。文献[12]介绍了一种基于激光雷达分层布置的运动人定位方法,其重点在于获得人体运动的近似三维(3D)模型,不足在于每层只有一个激光测距仪,检测边沿信息量少,难以有效应对遮挡问题。Sasaki

等^[13]使用多激光雷达实现了室内基于形状的目标定位。Cui等^[14]提出了一种采用多激光雷达的检测人腿的目标跟踪方法,由于测量噪声的存在,腿部检测特征的不明显性以及人体腿部动作的不可预测性容易引起目标的误识别。本文基于多传感器协作感知思想,采用分布式激光雷达搭建了服务空间中人的定位跟踪系统,激光扫描的数据点经统计检验后,通过无线(WiFi)网络传到服务器端,实现数据的同步与融合,对获取的每帧数据进行基于迭代最近点(ICP)算法的轮廓模型匹配,采用关联门对相邻两帧的检测目标进行关联,实现对各动态目标的跟踪。

2 系统介绍

由于一台激光雷达只能观测到运动目标的一个或部分侧面,而通过分布式多个激光雷达的数据融合,可以获取运动目标的四周,从而可以有效地实现运动目标的定位与跟踪^[15]。图1为基于分布式激光雷达实现人的定位与跟踪系统的数据流程图。首先,每台激光雷达连接一台客户端PC机,负责数据采集及数据点的统计检验。为了便于目标的提取与跟踪,观测数据被分为静态和动态两类。静态数据主要用于实现各台激光雷达的位置标定和背景消除。其次,客户端与服务器通过WiFi网络实现数据通信,服务器将来自同一时刻不同雷达的动态数据点组成数据的一帧,实现数据的同步与融合。最后,对获取的每帧数据进行基于ICP的轮廓模型匹配,完成各个目标定位。采用基于位置-速度的关联门对相邻两帧的检测目标进行关联,实现对各动态目标的跟踪。

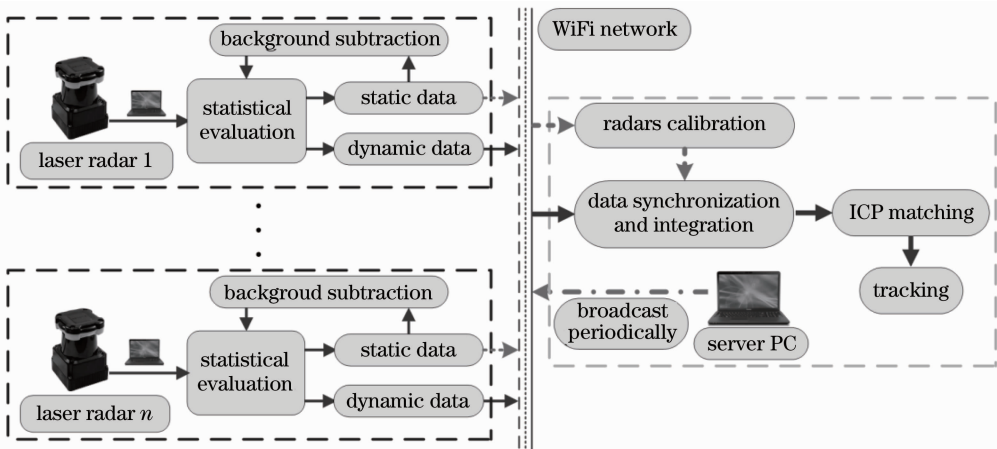


图1 人的定位与跟踪数据流程图

Fig. 1 Data flow diagram of human localization and tracking

2.1 激光雷达观测模型

本系统采用 HOKUYO 公司的 UTM-30LX 型激光雷达搭建人的定位跟踪系统,该型雷达拥有 270° 的视角,分辨率为 0.25° ,扫描时间为 25 ms ,测距范围为 $0.1\sim 30\text{ m}$,其观测模型可用极坐标表示为

$$\mathbf{u}_i^n = (d_i^n, \phi_i^n)^\top, \quad n = 1, \dots, N, \quad (1)$$

与笛卡尔直角坐标系之间的转换关系为

$$\begin{cases} x_i^n = d_i^n \cos \phi_i^n \\ y_i^n = d_i^n \sin \phi_i^n \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $(x_i^n, y_i^n)^\top$ 为扫描数据的坐标表示形式, N 为扫描数据点的总数,由于测量值 $(d_i^n, \phi_i^n)^\top$ 受噪声干扰,假设它们分别服从高斯分布且相互独立。

2.2 背景消除

每台激光雷达在每个扫描周期都会获得大量的观测数据点,它们反映了环境中各类目标的空间分布,其中,部分数据点表征了空间中的静态物体(比如,墙、桌子),为了便于运动目标提取与跟踪,将数据中反映静态目标的数据点除去,即实现环境的背景消除。

由于测量值不可避免地包含噪声,即使检测目标为静态物体,不同时刻的测量值也不尽相同。一种有效的方法是为观测数据设定有效的波动范围,若某个数据点长时间都在某个狭小的范围内波动,即认为该数据点的检测为环境背景。为判定某个数据点所对应检测目标是否静态目标,定义检测数据归一化的统计距离:

$$D^2 = \mathbf{A}^\top \mathbf{S}^{-1} \mathbf{A}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_t - \frac{1}{m} \sum_{i=t-m}^{t-1} x_i \\ y_t - \frac{1}{m} \sum_{i=t-m}^{t-1} y_i \end{bmatrix}$, 为观测误差矩阵, m 为

时间窗口; $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}$ 为观测误差协方差矩阵。当观测误差服从正态分布时,则检测数据归一化的统计距离 $D^2 = x$ 服从自由度为 2 的 χ^2 分布,其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{2 \cdot \Gamma(1)} \exp\left(-\frac{x}{2}\right), \quad (4)$$

式中 $\Gamma(\alpha) = \int_0^{+\infty} x^{\alpha-1} \exp(-x) dx$, 为第二型欧拉积分。

实际上,这就把判断一个观测数据点是否对应静态目标的问题转变为一个统计检验的问题。因此,根据 χ^2 检验理论,一个观测数据点为静态背景的概率可

表达为

$$P = 1 - \int_0^{D^2} f(x) dx, \quad (5)$$

即该点的统计距离 D^2 越大,其为静态背景的概率越小,理论上,只有统计距离趋于零时,才会认定该观测数据点为静态点。在此,必须指出很重要的一点:为保证目标跟踪实时性,减轻客户端数据点的存储与计算负担,时间窗口 m 的数值不宜设置过大。然而,当跟踪目标的运动速度很慢时,数据点在特定区域内滞留时间延长,一部分本应反映目标轮廓的数据点为静态点的概率增大,容易导致数据点的错归。针对上述问题,对概率值较大的数据点进行区域统计约束,即统计一定区域内,动静态数据点出现的个数为

$$(x - x_i^j)^2 + (y - y_i^j)^2 \leq \delta^2, \quad (6)$$

式中 (x_i^j, y_i^j) 为概率值较大的数据点, δ 为区域统计约束半径。对于某观测点来说,只有其为静态点的概率超过一定阈值(本文取值为 90%),且其周围区域内静态点的个数大于动态点的个数时,认定该观测点对应静态目标,将其当作背景除去。

2.3 数据同步与融合

为确保各台激光雷达所获得的观测数据是对同一批目标的观测,需要将观测数据进行同步,数据的同步主要包括两个方面:空间配准和时间同步。在空间上,观测数据的坐标都是以各台雷达所处的局部坐标系为基准,为了便于数据融合,需要将各台雷达的位置和角度信息统一到全局坐标系中,借助各台激光雷达获取的静态数据,作为其位置标定的依据,对各台激光雷达的相对位置进行离线标定。

为保证数据的时间同步,服务器端定时向各台雷达所连接的客户端 PC 机播报当前时间,实现时钟同步。由于在实际的数据传输中,仍然存在数据的时间延迟,影响数据的同步。为此,对激光雷达获取每组观测数据都绑定一个时间信标,指示数据获取的当前时刻。其数据格式为 `[int timestamp, * long LaserData]`。

为实现各台激光雷达的数据融合,定义一帧融合数据:将各台雷达在同一时刻测量得到的数据抽取出来,统一到全局坐标系中,类似于视频图像的一帧,生成该时刻的一帧数据。采用 C++ 的标准容器 `map`,实现对接收数据的时间排序,将时间相近,来自不同激光雷达的检测数据融合成数据的一帧。

2.4 基于 ICP 算法的轮廓模型匹配

实现目标跟踪的前提是根据观测数据对目标进

行定位,如何利用获得的观测数据完成目标识别成为了关键。本文首先确定哪些数据点可能表征着同一个目标,然后采用 ICP 算法实现基于轮廓模型数据匹配,逐一配准,实现多目标的定位。

ICP 算法最初是由 Besl 等^[16]提出的一种点云对点云的配准算法,在数据点集匹配和图像配准中得到了广泛应用。该方法通过寻找不同点云中匹配点之间的对应关系,计算变换参数,以满足给定的收敛精度,最终获取点云之间的旋转和平移矩阵,来实现点云配准。传统的 ICP 算法将点云配准太过理想化,在实际的应用过程中,点云之间的完全匹配是难以做到的。ICP 算法成功应用的一个前提条件是拥有一个良好的配准初值,不恰当的选择可能导致算法迭代速度变慢或陷入局部极值。针对这一问题,国内外学者从 ICP 算法应用的实际入手,对其开展了广泛而深入的研究,取得了一些良好成果^[17]。

然而,就服务对象的定位跟踪系统而言,还存在一些实际问题:1) 由于目标的动态性及测量误差造成数据分布的多样性,难以用精确的数学模型描述运动目标;2) 多目标存在时,需要实现一对多的数据匹配,配准初值尤为重要;3) 不同扫描视角下,多目标的存在可能导致测量数据存在一定检测区域重叠或遮挡。针对上述问题,本文对 ICP 点云配准算法进行了一定的改进。考虑到激光雷达的摆放高度(1.2 m),检测到人体的躯干部分,其轮廓近似椭圆形。为此,构建人体轮廓检测模型如图 2 所示,由一定数目的数据点组成,定性描述检测目标的大体形状。

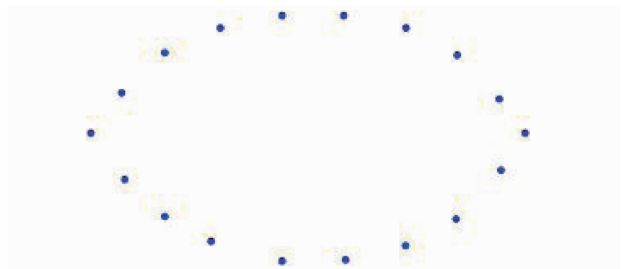


图 2 人体轮廓检测模型

Fig. 2 Detection model of human contour

假设人体轮廓检测模型的基准点集为 $M_p = \{m_i, i = 0, 1, 2, \dots, k\}$, 激光雷达一帧融合数据的观测点集为 $O_p = \{o_i, i = 0, 1, 2, \dots, l\}$, 其中 $k \leq l$ 。对于一帧观测点集,采用 MeanShift 算法^[18]进行聚类。对各类而言,取各聚类中心作为各次匹配的配准初值,对每簇观测数据点分别进行基于 ICP 算法的目标轮廓模型匹配。对于每次配准而言,ICP 算法的目标函数可表示为

$$E_{\text{error}}(\alpha, \mathbf{T}) = \underset{R_\alpha, \mathbf{T}, j \in \{1, 2, \dots, k\}}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^l \|(\mathbf{R}_\alpha o_i^c + \mathbf{T}) - m_j\|_2^2, \quad (7)$$

式中 \mathbf{R}_α 为旋转变换矩阵, α 是旋转角, \mathbf{T} 为平移向量, o_i^c 为聚类后类 c 中第 i 个数据点,通过最小化误差和 E_{error} ,判定观测点集与参观点集的匹配程度。在多视角观测下,数据可能存在检测区域重叠或遮挡问题,激光雷达扫描数据具有一定的杂散性。针对这一问题,在数据点对应点匹配时,采用最近点法作为对应点的搜索匹配策略。相关研究表明,尽管最近点法不是搜索速度最快的,但其稳定性最好,无论哪种形式的数据点云配准,最近点法几乎都可以收敛到一个好的结果^[17]。算法的具体步骤如下:

- 1) 采用 MeanShift 算法对融合后一帧数据进行聚类,取聚类中心作为各次匹配的配准初值。
- 2) 对于每簇观测数据点而言,循环执行①~④,直到满足设定条件:

① 计算最近点,即对轮廓模型基准点集 M_p 中的每一个点,在该簇观测点集 o^c 中找到距离该点最近的对应点,并设这些对应点组成的新点集为 $N_p = \{n_i, i = 0, 1, 2, \dots, k\}$,若观测点集数目小于轮廓模型基准点集,退出循环。

② 采用最优化解析方法,计算旋转变换矩阵 \mathbf{R}_α 和平移向量 \mathbf{T} ,使得 $\sum_{i=1}^l \|(\mathbf{R}_\alpha o_i^c + \mathbf{T}) - m_j\|_2^2 \rightarrow \min$ 。

③ 利用 $\mathbf{R}_\alpha, \mathbf{T}$ 对轮廓模型基准点集进行变换,得到新点集 $M'_p = \{m'_i | m'_i = \mathbf{R}_\alpha m_i + \mathbf{T}, i = 0, 1, 2, \dots, k\}$ 。

④ 计算 M'_p 和 N_p 两点集之间的均方根误差,如果误差小于预设的阈值 e 或达到一定的循环次数,则停止,否则,用 M'_p 代替 M_p ,继续循环。

2.5 目标跟踪算法

借助模型匹配实现数据与目标的关联后,另外一个急需解决的问题是相邻两帧检测目标的关联,实现目标跟踪,其主要包括三个方面:已存在的目标进行关联,新目标的产生,原目标的消失。对于前一帧中已经存在的目标,本文采用基于位置-速度的关联门与当前帧的检测目标实现关联,若检测目标的当前状态参数满足(8)式的约束条件,即认为相邻两帧检测目标为同一目标:

$$\frac{(X_t^i - X_{t-1}^i)^2}{k^2 \sigma_X^2} + \frac{(Y_t^i - Y_{t-1}^i)^2}{k^2 \sigma_Y^2} + \frac{(\dot{X}_t^i - \dot{X}_{t-1}^i)^2}{k^2 \sigma_{\dot{X}}^2} + \frac{(\dot{Y}_t^i - \dot{Y}_{t-1}^i)^2}{k^2 \sigma_{\dot{Y}}^2} \leq 1, \quad (8)$$

式中 (X_t^i, Y_t^i) 为 t 时刻第 i 个目标的位置坐标, \dot{X}_t^i, \dot{Y}_t^i 分别为 t 时刻第 i 个目标在 x 轴与 y 轴方向上的运动速度, $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_x^2, \sigma_y^2$ 分别为目标在 x 轴与 y 轴方向上的位置和速度协方差, k 为常数。表1给出了目标跟踪算法的伪代码。其中, min_num_point 为表征人体形状所需检测数据点最小个数, d_m_matching 为数据点与轮廓模型的匹配阈值。

表1 跟踪算法伪代码

Table 1 Pseudo code of tracking algorithm

Tracking Algorithm
for each existing target
calculate the most likely related cluster points;
update_track (cluster points, state parameters of the target);
remove all laser points near the cluster;
if (the number of removed points is less than min_num_point or model matching error is greater than d_m_matching)
delete this track;
end if
end for
while (there are remaining cluster points)
calculate model matching error based ICP algorithm;
remove all laser points near the cluster;
if (the number of removed points is greater than min_num_point and model matching error is less than d_m_matching)
create new track;
end if
update_track(cluster points, state parameters of the target)
calculate model matching error based ICP algorithm;
update the current location of the target;
calculate the current speed of the target;
if (the parameters of the target is constrained by association gate)
return(the current parameters of the target);
else
delete this track and create new track at this location;
return(the current parameters of the target);
end if

3 实验结果与分析

采用3台2维激光雷达搭建人的全局定位跟踪系统,验证算法的有效性,如图3所示,雷达摆放高度为1.2 m。客户端与服务端的数据传输及服务器端的数据处理程序均采用VC++语言实现,服务器端相邻两帧融合数据的时间间隔为50 ms。图4为各台激光雷达分别检测得到的环境背景。从图中可以看出,单台激光雷达的扫描观测具有一定局限性,存在部分检测死区。

为了直观表达本系统的跟踪效果,在服务器端完成定位跟踪的同时,视觉摄像机同步记录了人的运动状态。图5显示了基于分布式激光雷达实现人的定位跟踪部分实验结果。其中左侧图像为摄像机捕获的视频图像,右侧为本系统在第 n 帧的跟踪结果。受光照条件、遮挡、人的非刚性等因素影响,基于运动历史图像的运动检测方法^[19]很难区分距离较近、颜色相近目标(如第2462帧),而本系统在应对目标遮挡方面上表现出了很大优势。

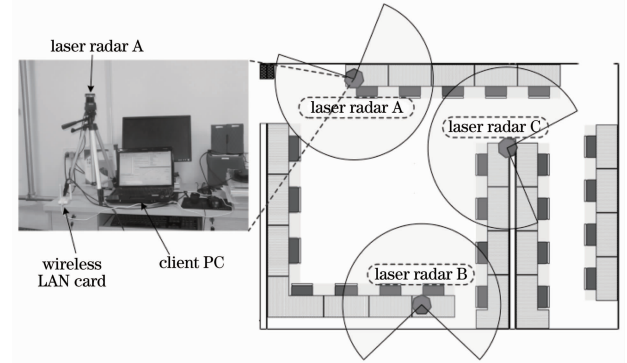


图3 基于分布式激光雷达的全局定位跟踪系统

Fig. 3 Global localization and tracking system based on distributed laser radars

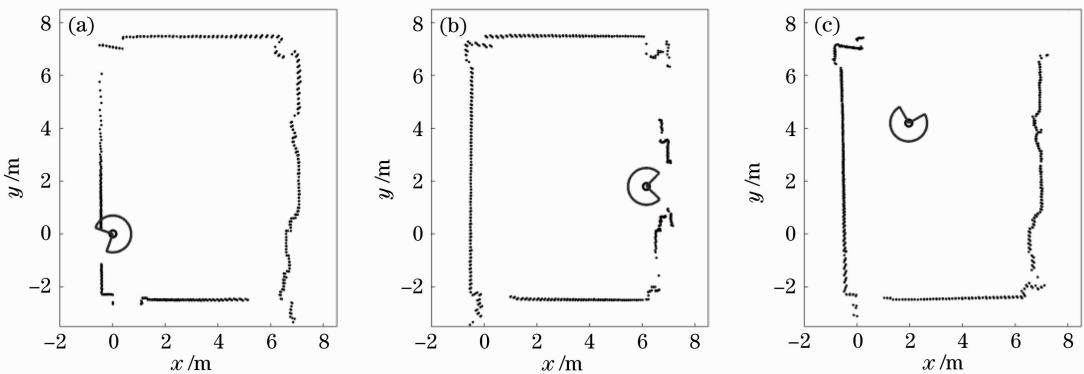


图4 各台雷达检测的环境背景。(a) 激光雷达 A;(b) 激光雷达 B;(c) 激光雷达 C

Fig. 4 Environment background detected using laser radars. (a) Laser radar A; (b) laser radar B; (c) laser radar C

表 2 定位跟踪成功次数统计

Table 2 Summary of results in tracking experiment

Tracking methods	Moving speed / (m/s)	Success/total /frame	Success rate /%
Vision-based Tracker ^[19]	0.10~0.25	3067/4800	63.90
Our System	0.10~0.25	4153/4800	86.52
Vision-based Tracker ^[19]	0.75~1.00	2815/4800	58.65
Our System	0.75~1.00	4362/4800	90.88
Vision-based Tracker ^[19]	1.30~1.50	2191/4800	45.65
Our System	1.30~1.50	3986/4800	83.04

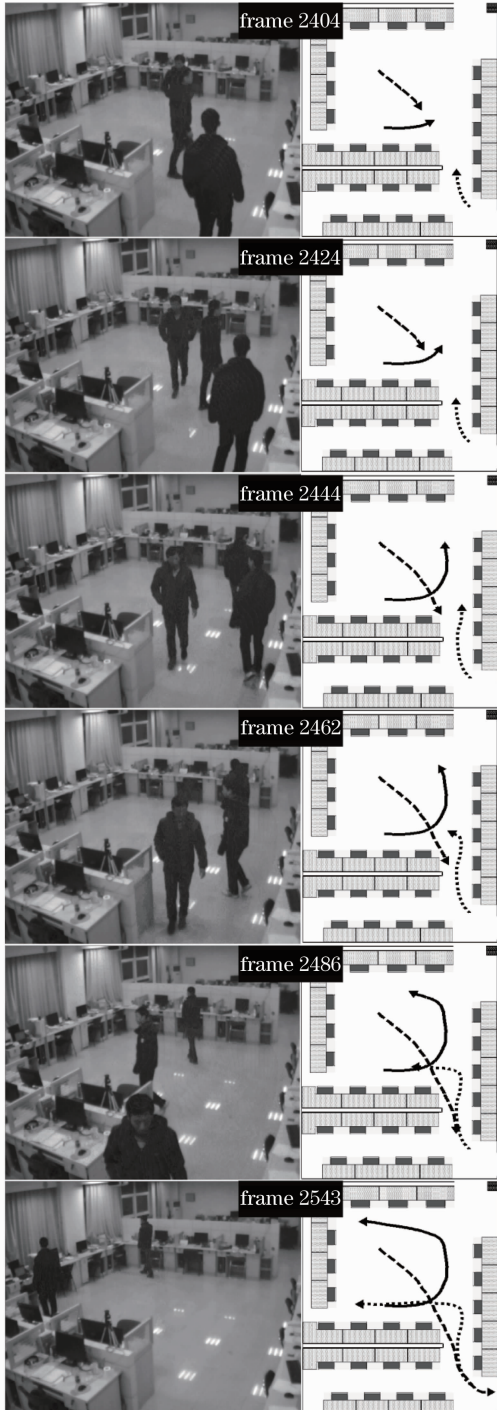


图 5 人的跟踪结果

Fig. 5 Human tracking results

分别统计了视觉跟踪与分布式激光雷达实现定位跟踪在连续 4800 帧的检测结果,视觉跟踪采用基于运动历史图像的检测方法^[19]。定义跟踪成功:一帧数据检测的目标个数与空间中存在的目标个数一致且相邻两帧的检测目标受关联门的约束。表 2 给出了目标在不同的运动速度下,两种方法跟踪成功次数的统计。其中人在室内的正常运动速度为 0.8 m/s 左右,本文提出的定位跟踪系统能够取得较好的跟踪成功率。与之相比,当运动目标的速度较慢或较快时,系统仍能获得令人满意的跟踪效果。其中受遮挡等因素的影响,基于视觉的跟踪成功率低于本系统,基于视觉的定位精度仅可以控制为 50 cm 之内,而本系统定位精度约为 18 cm。然而,本系统也不可避免地出现跟踪失败的情形,其主要原因在于目标相互遮挡不能完全避免,当出现某个目标被大面积遮挡时,如何增强轮廓模型配准的普遍适用性是有待继续探索的难题。

4 结 论

针对人与机器人共存的服务空间中人的全局定位与跟踪问题,提出了一种基于分布式激光雷达协作感知的定位跟踪方法。与现有的基于视觉的定位方法相比,在定位精度和跟踪成功率上展现出了一定优势。通过对目标人定位跟踪,提取其运动轨迹,为服务机器人路径规划与避障控制提供可靠支持,是未来发展的一个重要方向。

参 考 文 献

- 1 Lee S I, Jang C S, Kim S H, *et al.*. Issues and implementation of a URC home service robot [C]. The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2007. 570—575.
- 2 Qian Kun. Service Robot Localization and Navigation in Human-Robot Coexisting Environments and Its Application [D]. Nanjing: Southeast University, 2010. 14—25.
钱 堃. 与人共存环境下服务机器人定位导航技术研究及应用 [D]. 南京:东南大学, 2010. 14—25.
- 3 Kim M, Kim S, Park S, *et al.*. Service robot for the elderly[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2009, 16(1): 34—45.
- 4 Ahn J H, Lee J E, Kim J H, *et al.*. Human position estimation

- in intelligent space for an active information display[C]. 11th International Conference on Control, Automation and Systems, 2011. 1497–1500.
- 5 Bellotto N, Hu H. Multisensor-based human detection and tracking for mobile service robots[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2009, 39(1): 167–181.
- 6 Tan J T C, Arai T. Triple stereo vision system for safety monitoring of human-robot collaboration in cellular manufacturing [C]. IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM), 2011. 1–6.
- 7 Luo R C, Chang N W, Lin S C, *et al.*. Human tracking and following using sensor fusion approach for mobile assistive companion robot [C]. Industrial Electronics (IECON), 35th Annual Conference of IEEE, 2009. 2235–2240.
- 8 Chen C L, Chou C C, Lian F L. Active pedestrian following using laser range finder[C]. IEEE International Conference on Information and Automation, 2011. 690–695.
- 9 Kim H, Chung W, Yoo Y. Detection and tracking of human legs for a mobile service robot [C]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2010. 812–817.
- 10 Hu Shaoxing, Chen Chunpeng, Zhang Aiwu. Application of SLAM in vehicle-borne mobile mapping system[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1108012.
胡少兴, 陈春朋, 张爱武. 同步定位及地图创建算法在车载移动测绘系统中的应用[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108012.
- 11 Yang Fan, Zhang Aiwu, Dai Yucheng, *et al.*. Application of three-dimensional laser scanning technology in granary reserve detection[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(s1): 317–323.
杨帆, 张爱武, 戴玉成, 等. 三维激光扫描技术在粮仓储量检测中的应用[J]. 中国激光, 2010, 37(s1): 317–323.
- 12 Wang Wei, Brscic Drazen. Real-time human body motion estimation based on multi-layer laser scans [C]. The 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2011. 297–302.
- 13 Sasaki T, Tamura H, Hashimoto H, *et al.*. Position estimation based on the target shape information using laser range finders for intelligent space[C]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2010. 605–610.
- 14 Cui Jinshi, Zha Hongbin, Zhao Huijing, *et al.*. Laser-based detection and tracking of multiple people in crowds[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2007, 106(2): 300–312.
- 15 Guo Yulan, Lu Min, Tan Zhiguo, *et al.*. Fast target recognition in lidar using projection contour features[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0209003.
郭裕兰, 鲁敏, 谭志国, 等. 采用投影轮廓特征的激光雷达快速目标识别[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0209003.
- 16 Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239–256.
- 17 Zhao Mingbo, He Jun, Luo Xiaobo, *et al.*. Two-viewing angle lidar data registration based on improved iterative closest-point algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1128007.
赵明波, 何峻, 罗小波, 等. 基于改进迭代最近点算法的两视角激光雷达数据配准[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1128007.
- 18 Yizong Cheng. Mean shift, mode seeking, and clustering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(8): 790–799.
- 19 Jiang Haitao. Vision Service Support System of Intelligent Space in the Hospital[D]. Jinan: Shandong University, 2011. 11–36.
姜海涛. 医院环境下智能空间视觉服务支持系统[D]. 济南: 山东大学, 2011. 11–36.

栏目编辑：何卓铭