

基于激光雷达的移动机器人 实时位姿估计方法研究¹⁾

杨明¹ 董斌¹ 王宏¹ 张钹¹ Helder Araújo²

¹(清华大学智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084)

²(葡萄牙 Coimbra 大学系统与机器人研究所 Coimbra 3030-290)

(E-mail: yangming@tsinghua.org.cn)

摘要 位姿估计是移动机器人研究中的一个关键问题,对于运动目标跟踪、机器人导航、地图生成等具有重要意义.提出了一种基于二维激光雷达的实时位姿估计方法,包括基于 Hough 变换的切线角度直方图算法和迭代切线加权最近点算法两部分.两种算法的结合和切线信息的引入,有效地解决了传统方法无法解决的局部最小值、类孔径、大计算量等问题.仿真数据和室外环境实际数据的大量实验结果表明它具有精度高、速度快、适用性广和对噪声、遮挡和类孔径问题鲁棒性高的特点.

关键词 位姿估计,角度直方图,迭代最近点,切线信息,移动机器人,激光雷达

中图分类号 TP242.6

Research on Laser Radar Based Real-Time Pose Estimation for Mobile Robots

YANG Ming¹ DONG Bin¹ WANG Hong¹ ZHANG Bo¹ Helder Araújo²

¹(State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084)

²(Institute of Systems and Robotics, Coimbra University, Coimbra 3030-290, Portugal)

(E-mail: yangming@tsinghua.org.cn)

Abstract Pose estimation is a key issue in mobile robots and important to moving objects tracking, robot navigation, map building, etc. A real-time pose estimation method using 2D range data from a laser radar is presented, which consists of iterative tangent weighted closest point and Hough transform based tangent angle histogram algorithms to overcome problems with past methods, such as local minimum, aperture-like, high computation problem, etc. This method has been tested on both synthetic and real range data collected in outdoor environment. Experimental results demonstrate its high accuracy, low computation, wide applicability and high robustness to aperture-like problem, occlusion and noises.

Key words Pose estimation, angle histogram, iterative closest point(ICP), tangent information, mobile robots, laser radar

1) 国家 863 计划(2002AA420110)和科技部中葡科技合作计划(2001066)资助

Supported by the National 863 Program(2002AA420110) and China-Portugal Science and Technology Cooperation Project(2001066)

收稿日期 2002-08-05 收修改稿日期 2003-03-11

Received August 5, 2002; in revised form March 11, 2003

1 引言

位姿估计是移动机器人研究中的一个关键问题,对于运动目标跟踪、机器人导航、地图生成等具有重要意义.为了解决这个问题,人们提出了各种解决方案.航位推算方法简单易用且造价低廉,但该方法对标定误差、不良路面接触、颠簸等非常敏感,因此精度较低.惯性导航系统的精度虽然较高,但是造价昂贵且对陀螺漂移和标定误差敏感,感知范围也有限.由于存在累积误差,这两种方法都不适用于全局位姿估计.基于信标的方法虽然适用于全局位姿估计,但是由于该方法要求在环境中放置信标,在很多场合下并不适用,尤其是室外环境.

一种可行的解决方案是在机器人上安装二维激光雷达^[1].通过匹配相邻两帧的激光雷达距离数据(称为扫描),可以估计出相对位姿关系,类似地,绝对位姿可以通过将当前距离数据与数字地图匹配获得.本文所提出方法主要是针对相对位姿估计,但是稍加修改后也可用于全局位姿估计.由于激光雷达的精度较高,因此这种方法获得的位姿估计的精度也非常高,而且无需对环境进行任何修改.除此之外,该方法也使得其它基于激光雷达的应用(例如运动目标跟踪和地图生成等)可以直接使用位姿信息而无需多传感器之间的标定,大大降低了设备费用和维护负担.

在二维环境中,相对位姿估计的本质就是搜索能够使相邻两帧距离扫描之间的最佳匹配的变换关系 (t_x, t_y, θ) ,其中 (t_x, t_y) 表示平移分量, θ 表示旋转分量.角度直方图(angle histogram)算法^[2]将三维位姿搜索问题转化成3个一维搜索问题,因而大大降低了计算量.但是,该算法要求环境具有明显的线段特征,而且其精度由于与直方图的分辨率有关而十分有限.迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法^[3]是一种基于对应的方法,包括对应点搜索和误差最小化两部分.由于ICP算法直接使用距离数据点进行对应匹配,因此其精度和鲁棒性均高于基于特征的对应方法.但是由于距离数据点的数目较多,ICP算法的计算量较大,收敛速度较慢.此外,ICP算法和其它基于对应的方法一样具有局部最小值问题.

通过上面的比较,可以发现角度直方图算法和ICP算法之间存在很强的互补性,因此将这两种方法结合起来可以大大提高算法的性能.此外,扫描中每点的切线方向在匹配中是非常重要的参考信息.基于这两点,本文提出了一种基于切线的角度直方图——迭代最近点(tangent based angle histogram & iterative closest point, TAHICP)方法.首先,使用M-估计器鲁棒地计算扫描中每点的切线方向;然后,使用基于Hough变换的切线角度直方图(Hough transform based tangent angle histogram, HTAH)算法计算旋转分量,并以此作为ICP算法的初始旋转估计;最后,使用迭代切线加权最近点(iterative tangent weighted closest point, ITCP)算法计算相对位姿估计.角度直方图算法和ICP算法的结合,一方面,利用角度直方图算法提供的初始旋转估计解决了ICP算法的局部最小值和低收敛速度问题;另一方面,ICP算法的使用避免了角度直方图方法的多边形环境要求并提高了位姿估计的精度.此外,切线方向的引入也大大提高了角度直方图方法的效率和ICP算法对噪声、遮挡和类孔径问题的鲁棒性.

2 基于 Hough 变换的切线角度直方图(HTAH)算法

将扫描中相邻两点连接起来,可以得到一条线段.计算所有相邻两点间线段的方向并离

散化, 经过统计得到的直方图称之为角度直方图. 分析表明, 角度直方图对平移具有不变性, 而旋转只会引起直方图的相位变化^[2]. 利用这一特性, 通过交叉相关的方法可得到两个角度直方图之间的相位差, 从而得到这两个扫描间旋转分量的大小.

但是, 由于角度直方图在线段方向的计算中仅使用相邻两点, 因此对噪声非常敏感. 为了提高对噪声的鲁棒性, 可在角度直方图的计算中考虑更多的邻域点. Dubrawski 提出了一种极坐标表示下的基于 Hough 变换的角度直方图 (Hough transform based angle histogram, HAH) 算法^[6]. 该方法采用了 Hough 变换的思想, 使用 $2n+1$ 个相邻点计算角度直方图. 如图 1(a) 所示, 给定方向角 α , 如果 P_i 点附近 $2n+1$ 点共线, 那么 P_i 点对角度 α 投票. 对于角度为 α 且过 P_i 点的线段, 其垂距为

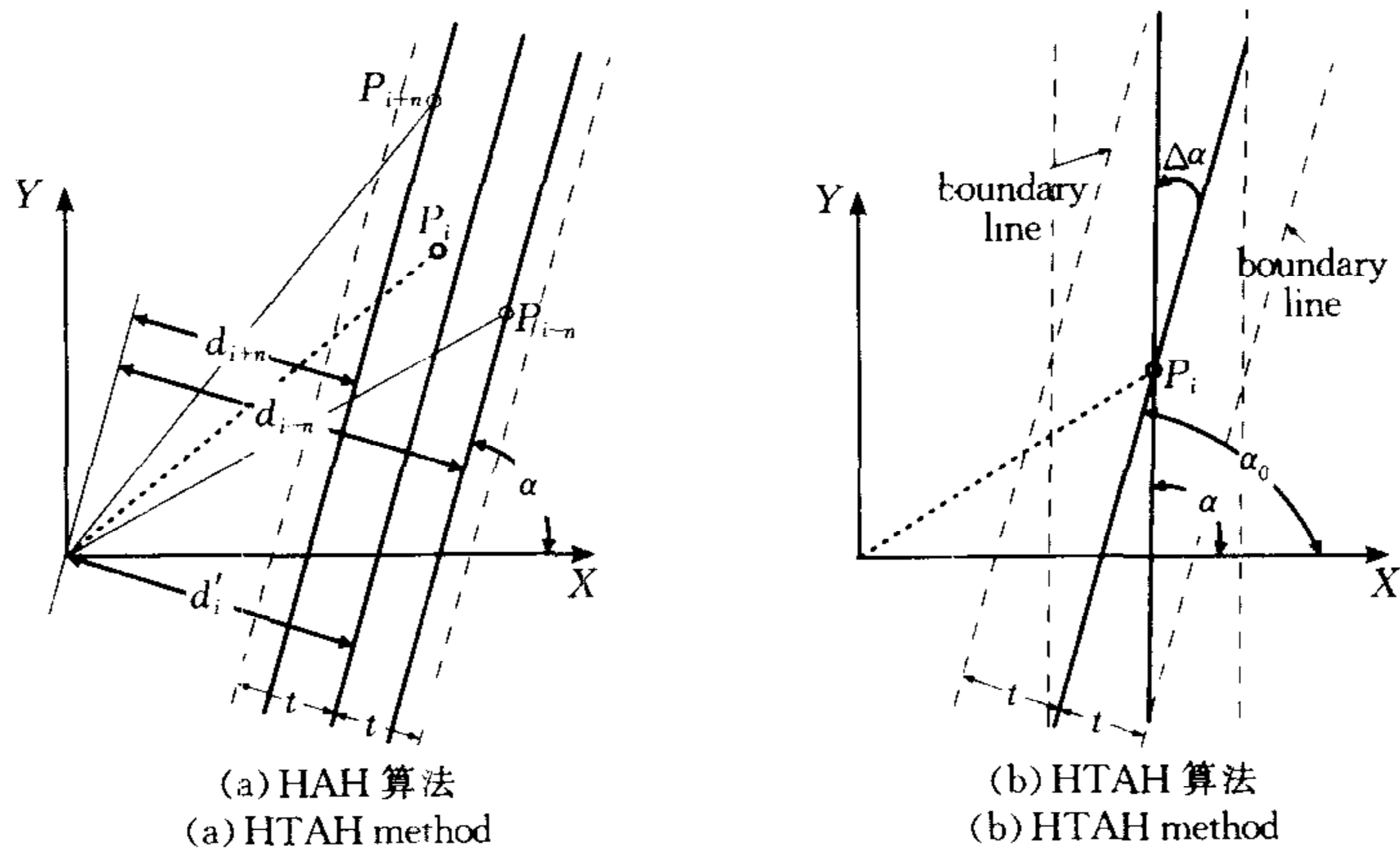


图 1 两种角度直方图算法的示意图
Fig. 1 Two angle histogram methods

$$d_i = R_i \cdot \sin(\varphi_i - \alpha) \quad (1)$$

其中 (R_i, φ_i) 为 P_i 点的极坐标. 如果下式成立, 那么认为这 $2n+1$ 点满足共线性.

$$\forall j \in [i-n, i+n], \quad |d_j - d'_i| \leq t_{\text{line}} \quad (2)$$

其中, $d'_i = (d_{i-n} + d_{i+n})/2$ 为平均垂距; t_{line} 为共线性阈值. 虽然 Hough 变换大大提高了算法对噪声的鲁棒性, 但同时也导致算法的复杂度由 $O(n)$ 增大到 $O(m \cdot n)$, 其中, n 为扫描中点数, m 为直方图的长度.

通常, 场景中角度的分布是有限的, 因此在角度直方图的计算中无需对每个角度 α 进行计算, 只需考虑有限范围内的角度, 我们称之为兴趣角度 (angle-of-interest, AOI). 由于通常相邻 2 帧扫描的直方图变化不大, 因此兴趣角度可通过标准角度直方图获得. 虽然兴趣角度的大小与环境结构有关, 但一般来说, 使用兴趣角度可减少 3~5 倍计算量.

尽管使用了兴趣角度, HAH 的计算量仍然较大, 无法满足实时性要求. 此外, Dubrawski 使用 $Line(d'_i, \alpha)$ 作为 $2n+1$ 个相邻点直线拟合的结果, 这种假设导致结果对 P_{i-n} 和 P_{i+n} 点上的噪声非常敏感. 为了解决以上两个问题, 本文提出了基于 Hough 变换的切线角度直方图 (HTAH) 算法. 切线角度直方图是角度直方图的一种推广, 它使用扫描中点的切线方向分布取代相邻两点间线段方向的分布, 其中切线方向 α_0 的计算可使用鲁棒估计方法 (例如, M 估计器等). 由于采用鲁棒方法计算得到的切线方向作为 $2n+1$ 点直线拟合的初始方向估计, 角度直方图的鲁棒性得到了进一步的提高. 考虑到 P_i 点在角度直方图上的投票是

连续的,我们将 P_i 点的投票过程可分解为正向投票和反向投票 2 个搜索过程,其中正向投票的步骤如下:

- 1) 令 $\alpha' = \alpha_0$;
- 2) 对于角度 $\alpha = \alpha' + \Delta\alpha$, 其中 $\Delta\alpha$ 为角度直方图的分辨率;
- 3) 根据公式(1),计算过 P_i 点且方向为 α 的直线的垂距;
- 4) 使用图 1(b) 中所示的边界线校验 $2n+1$ 邻域点的共线性;
- 5) 如果共线,令 $\alpha' = \alpha$ 并返回步骤 2.

反向投票过程与上述步骤基本相同,只需用 $\alpha = \alpha' - \Delta\alpha$ 替换步骤 2 中的 $\alpha = \alpha' + \Delta\alpha$. 采用这种搜索策略后,HTAH 算法的速度比 HAH 算法提高了 5~10 倍(参见实验结果比较).

图 2 给出了一个使用角度直方图估计旋转分量的典型例子,两帧扫描之间的实际旋转角度为 25.07° . 图 2(b) 是使用 HTAH 算法计算的角度直方图,其中直方图的分辨率为 0.2° . 对两个角度直方图进行交叉相关,在 25.2° 处取得极大值(图 2(c)),误差为 0.13° . 图 2(d) 显示了补偿旋转分量后两帧扫描,结果显示两帧扫描互相平行,只存在一定的平移关系. 下面,我们使用 ICP 算法来估计平移分量.

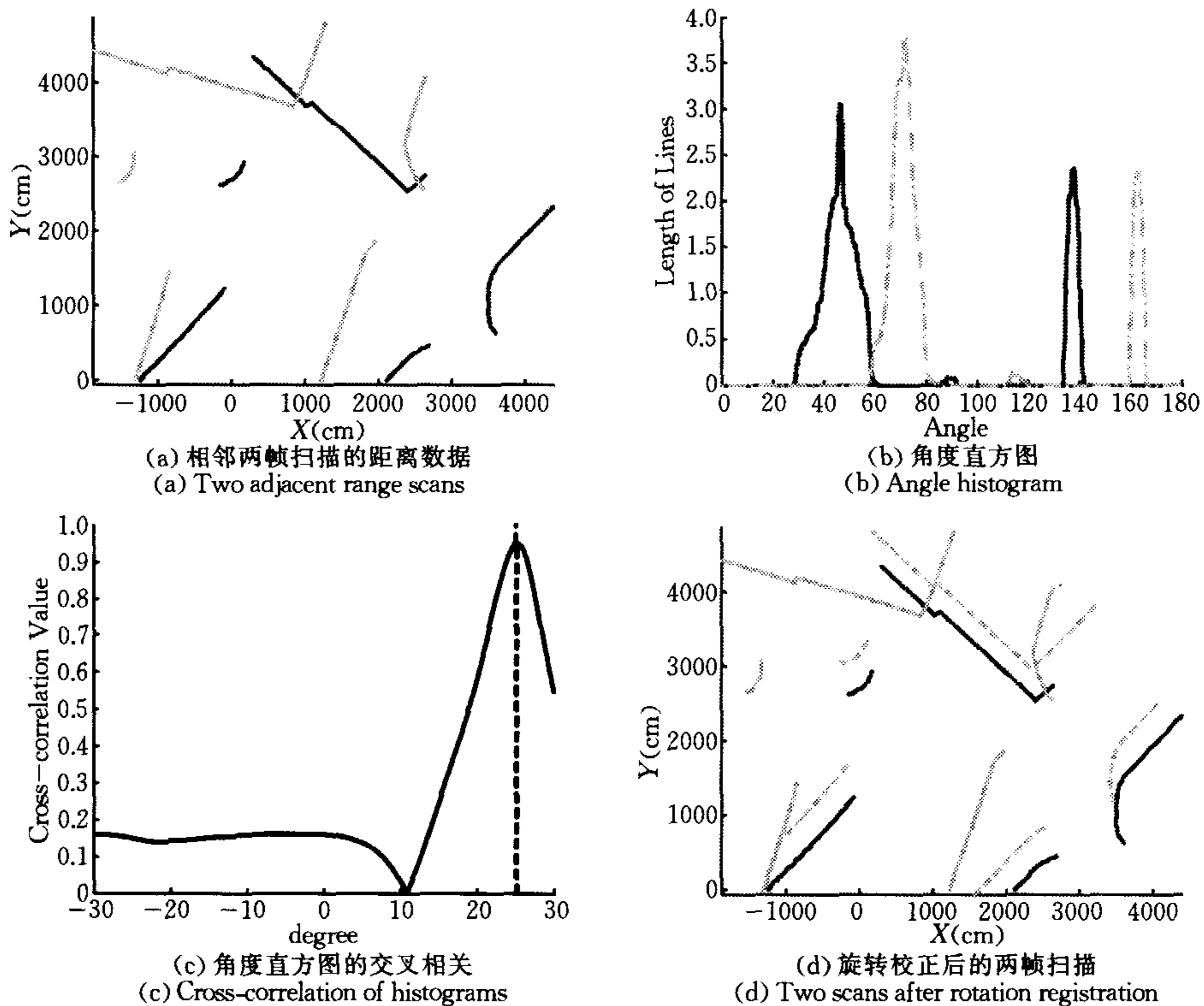


图 2 一个使用角度直方图方法估计旋转分量的典型例子

Fig. 2 A typical example of rotation estimation by the angle histogram method

3 迭代切线加权最近点(ITCP)算法

将扫描中的所有点依次连接起来,可以得到环境的多线段近似模型. 设 p_i 表示当前扫

描中的任意一点, ICP 算法根据最近点规则, 选择上一帧扫描中距离 p_i 最近的点作为其对应点 p'_i , 其中距离函数可采用欧式距离或极距距离^[3]. 根据最近点规则得到 m 对匹配 $\{p_i, p'_i\}$ 后, 通过最小化 2 帧间的误差函数即可获得两帧扫描之间的相对位姿, 即,

$$\min_{(\theta, t_x, t_y)} e_{\text{dist}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|R_\theta p_i + [t_x, t_y]^T - p'_i\|^2 \quad (3)$$

通常, 诸如式(3)所描述的最小化问题可采用最小二乘法来求解. 但由于匹配中的部分噪声无法使用高斯白噪声来描述, 因此人们考虑使用鲁棒估计的方法来求解这个问题. 然而, 这将可能导致算法在类孔径(aperture-like)问题下产生错误的估计.

由于传感器的感知范围有限, 在孔径情况下局部运动将会产生二义性. 例如, 当机器人在图 3(a)所示的孔径环境中运动, 其中 A_i 和 A_c 表示上一帧和当前帧扫描中的同一条线段, 由于根据最近点规则获得的所有匹配都来自于主方向(即直线 A 的方向), 因此将无法获得传感器沿着直线 A 的运动分量. 在没有其它传感器的帮助下, 孔径问题是无解的. 类孔径问题不同于孔径问题在于: 存在少量来自于非主方向上的匹配, 而且类孔径问题在理论上是可解的. 以图 3(b)所示情况为例, 机器人沿着主方向运动. 根据最近点规则, 来自主方向上(线段 A)的点被错误地匹配, 而来自非主方向上(线段 B)的点被正确的匹配. A'_i 和 B'_i 显示了使用最小二乘法后得到的结果. 对于基于最小二乘估计的 ICP 算法, 由于非主方向上匹配的数目远小于主方向上匹配的数目, 因此主方向上平移的收敛速度非常慢, 通常很难获得精确的结果. 对于基于鲁棒估计的 ICP 算法, 由于来自线段 B 的正确匹配具有较大的残差, 因此被当作外点错误地抛弃, 而来自线段 A 的错误匹配却因残差较小而被错误地保留, 结果将导致类孔径问题变成了纯孔径问题. 鲁棒估计方法在类孔径问题下失效的根本原因在于残差的大小不能简单地单独用来判断外点.

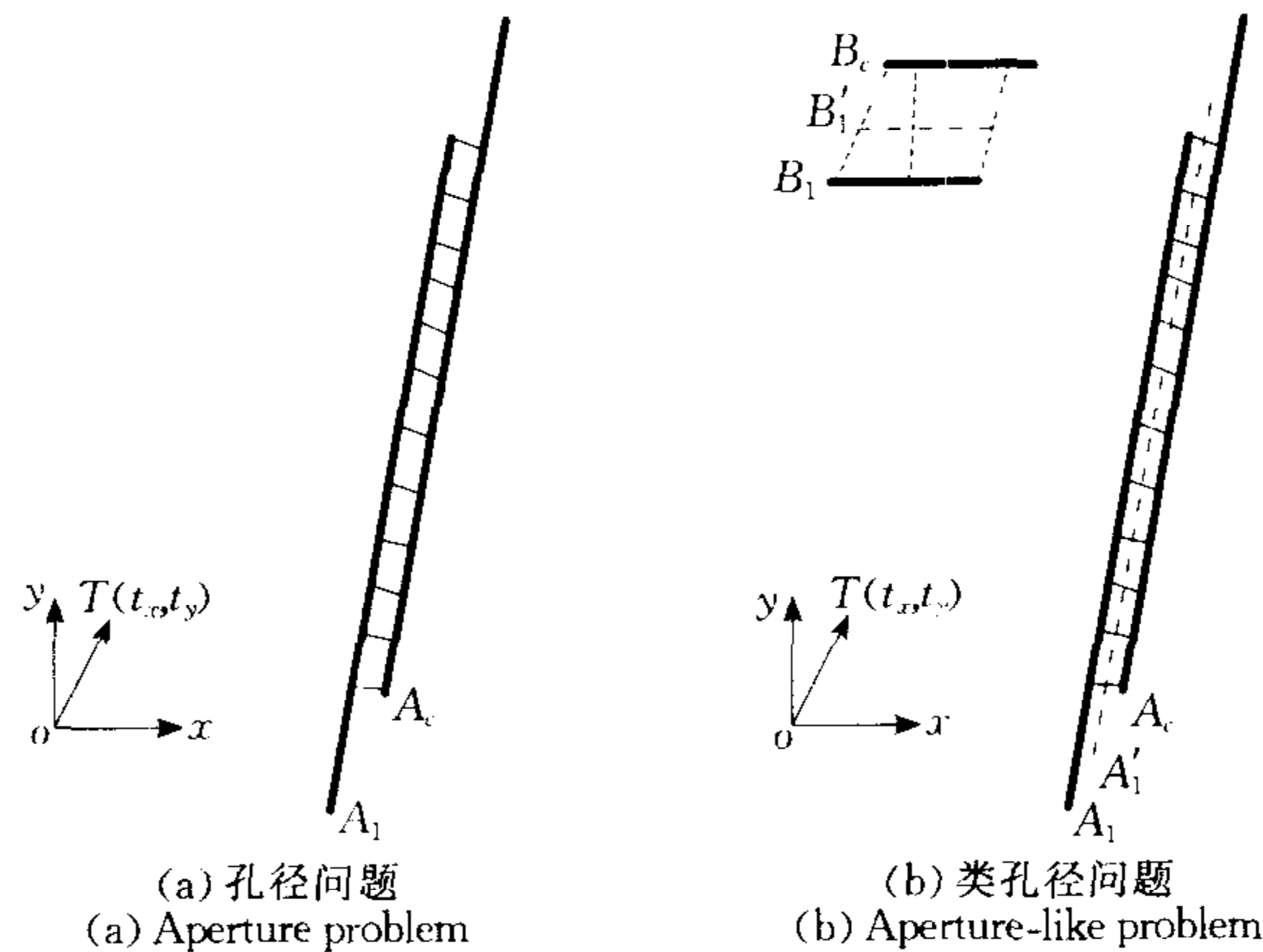


图 3 类孔径问题

Fig. 3 The aperture-like problem

为了解决这个问题, 本文提出了迭代切线加权最近点(ITCP)算法. 其基本思想就是为了使沿主方向的平移分量收敛得更快, 令非主方向上的匹配获得与主方向上匹配相同的总权重. 归一化权重的定义如下:

$$\lambda_i = \begin{cases} m / (2 \times n_{\text{main}}), & p_i \in \text{主方向} \\ m / (2 \times n_{\text{non-main}}), & p_i \in \text{非主方向} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $n_{\text{non-main}}$ 和 n_{main} 分别表示非主方向和主方向上匹配的数目, m 表示匹配的总数. 这样, 问题(3)就变成了加权最小二乘的形式:

$$\min_{(\theta, t_x, t_y)} e_{\text{dist}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \lambda_i \|R_{\theta} p_i + [t_x, t_y]^T - p'_i\|^2 \quad (5)$$

仍使用图 2(a) 所示两个扫描为例, 两帧扫描之间的旋转分量为 25.07° , 平移分量为 $(-243.9, 356.8)$ cm. 使用 HTAH 算法获得的旋转估计 (25.2°) 作为初始旋转估计, ITCP 算法成功地在 14 步内收敛, 如图 4(a) 和 (b) 所示. ITCP 算法估计的平移分量为 $(-243.3, 354.4)$ cm, 误差为 $(-0.6, 2.4)$ cm. 图 4(c) 显示了补偿相对位姿变换后的两帧扫描, 可以看到, 相邻两帧很好地重叠在一起.

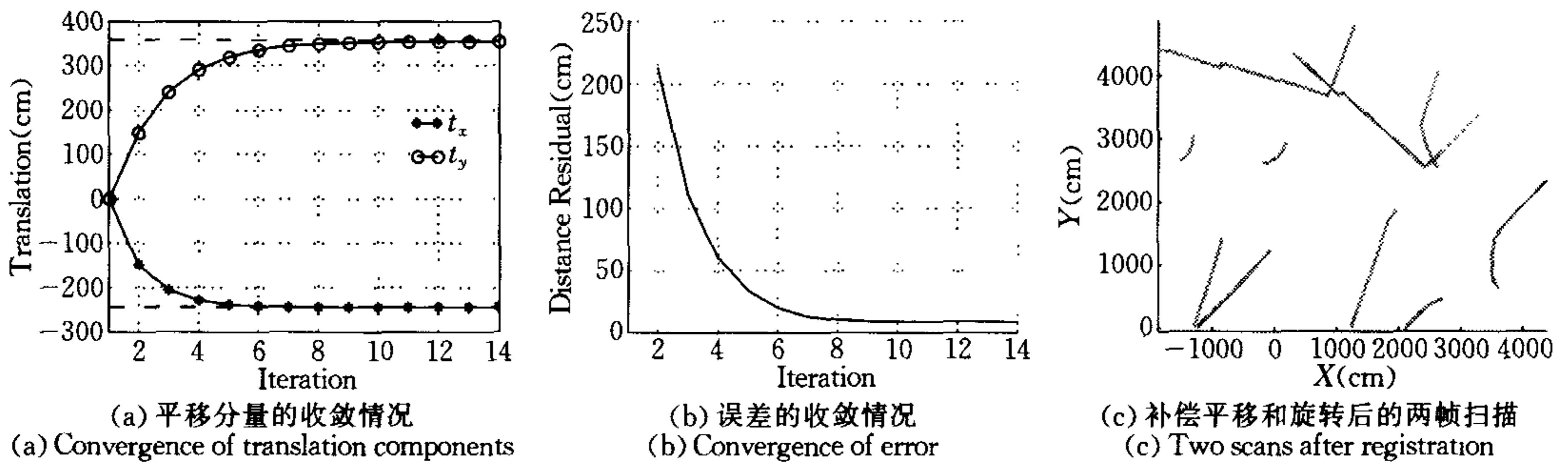


图 4 一个使用 ICP 算法估计相对位姿的典型例子
Fig. 4 A typical example of relative pose estimation by the ICP algorithm

4 实验结果

本文提出的算法分别使用 Matlab 和 C++ 在 1.3GHz 的 PC 上进行了实现. 为了测试算法的性能, 我们分别使用仿真数据和实际数据. 仿真数据是根据已有的清华大学数字地图生成, 其最大距离为 50m, 距离分辨率为 1cm, 角度范围为 $[0, 180^\circ]$, 角度分辨率 0.5° . 为了评估和比较算法的性能, 在生成激光雷达距离数据的同时记录了机器人的实际绝对位姿.

图 5(a) 显示了一个 929 帧扫描序列的实际位置轨迹. 首先, 使用该序列测试和比较本文提到的几种不同的角度直方图法. 如表 1 所示, HAH 和 HTAH 算法由于采用了 Hough 变换, 其精度远高于标准角度直方图法. 而 HTAH 算法与 HAH 算法相比速度快 8 倍, 而

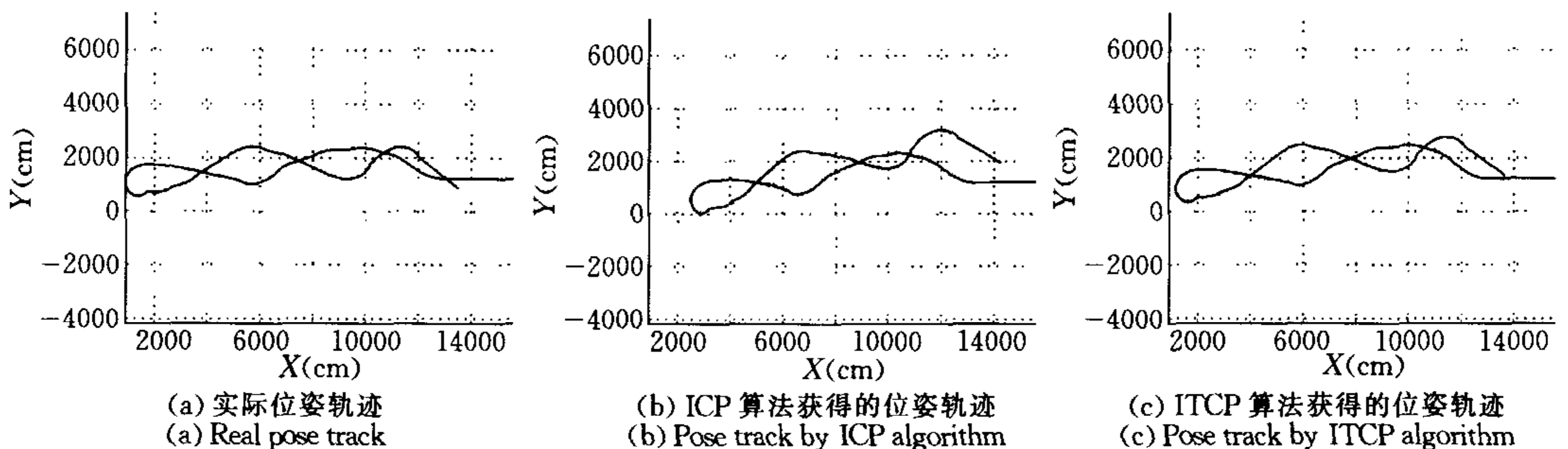


图 5 ICP 和 ITCP 算法的结果比较
Fig. 5 Comparison between the ICP algorithm and the ITCP algorithm

且精度略高,这是因为 HTAH 算法采用了鲁棒切线方向计算和正反向搜索策略。

然后,以 HTAH 算法的结果作为初始旋转估计,我们使用该扫描序列对 ICP 和 ITCP 算法进行了测试和比较.由于具有精度较高的初始旋转估计,ICP 和 ITCP 算法的收敛速度都较快.ITCP 算法的平均计算时间为 14ms,略高于 ICP 算法的 16ms,这主要是由于 ICP 算法在类孔径情况下的收敛速度较慢.出于同样的原因,ITCP 算法平移分量的精度远高于 ICP 算法,如表 2 所示.为了进一步比较 ICP 和 ITCP 算法,我们使用航位推算的方法根据相对位姿估计结果计算出绝对位姿轨迹,如图 5 所示.尽管使用航位推算方法获得位置轨迹不可避免地存在累计误差,而且该误差随着时间和距离增大而不断增大,我们看到 ICP 和 ITCP 算法都获得较好的位姿轨迹(图 5(b)~(c)).但是,ITCP 算法获得的轨迹明显要优于 ICP 算法。

表 1 不同角度直方图方法的误差和比较
Table 1 Error comparisons among different angle histogram methods

	平均值	最大值 (°)	标准偏差 (°)	时间/帧 (ms)
Standard AH	0.338	2.545	0.523	2
HAH	0.048	0.352	0.080	74
HAH with AOI	0.050	0.346	0.083	24
HTAH	0.042	0.275	0.070	9

表 2 ICP 和 ITCP 方法的误差比较
Table 2 Error comparisons between the ICP algorithm and the ITCP algorithm

	θ (°)	t_x (%)	t_y (%)	
ICP	均值	0.026	0.021	0.059
	标准偏差	0.039	0.023	0.084
ITCP	均值	0.022	0.013	0.017
	标准偏差	0.037	0.021	0.027

为了测试算法对噪声的鲁棒性,我们在仿真数据中添加了一系列大小不同的高斯白噪声.结果显示,ITCP 算法无论在旋转还是平移分量上,鲁棒性都要高于 ICP 算法(图 6);由于采用了 Hough 变换,HAH 算法和 HTAH 算法对噪声的鲁棒性都远高于标准角度直方图方法(图 7)。

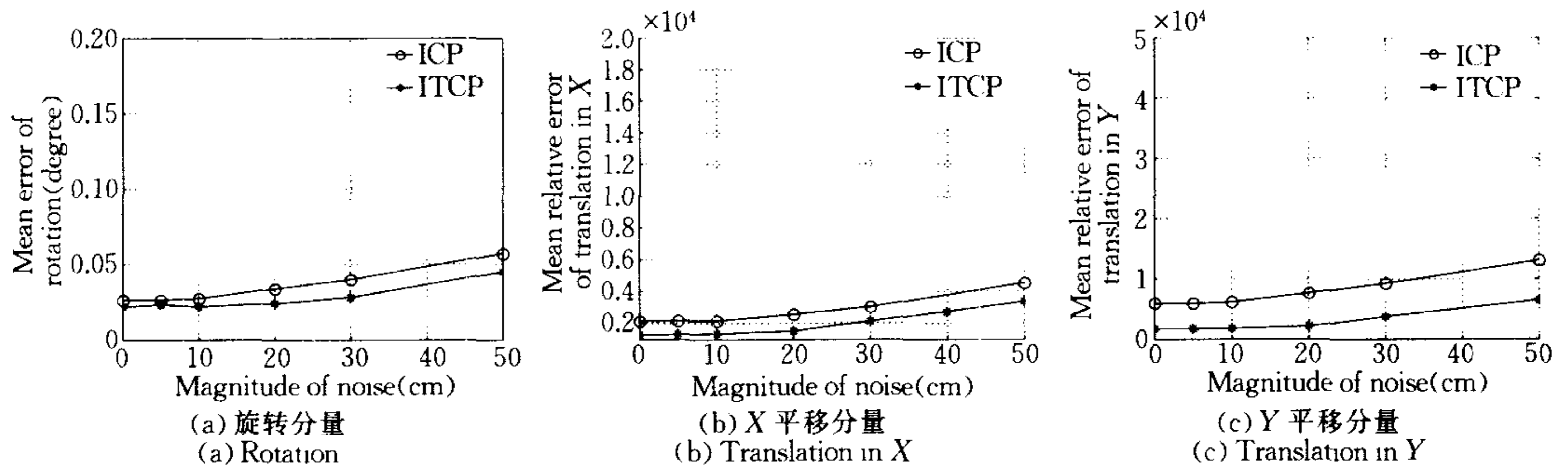


图 6 ICP 与 ITCP 算法的鲁棒性比较

Fig. 6 Comparison in robustness between the ICP algorithm and the ITCP algorithm

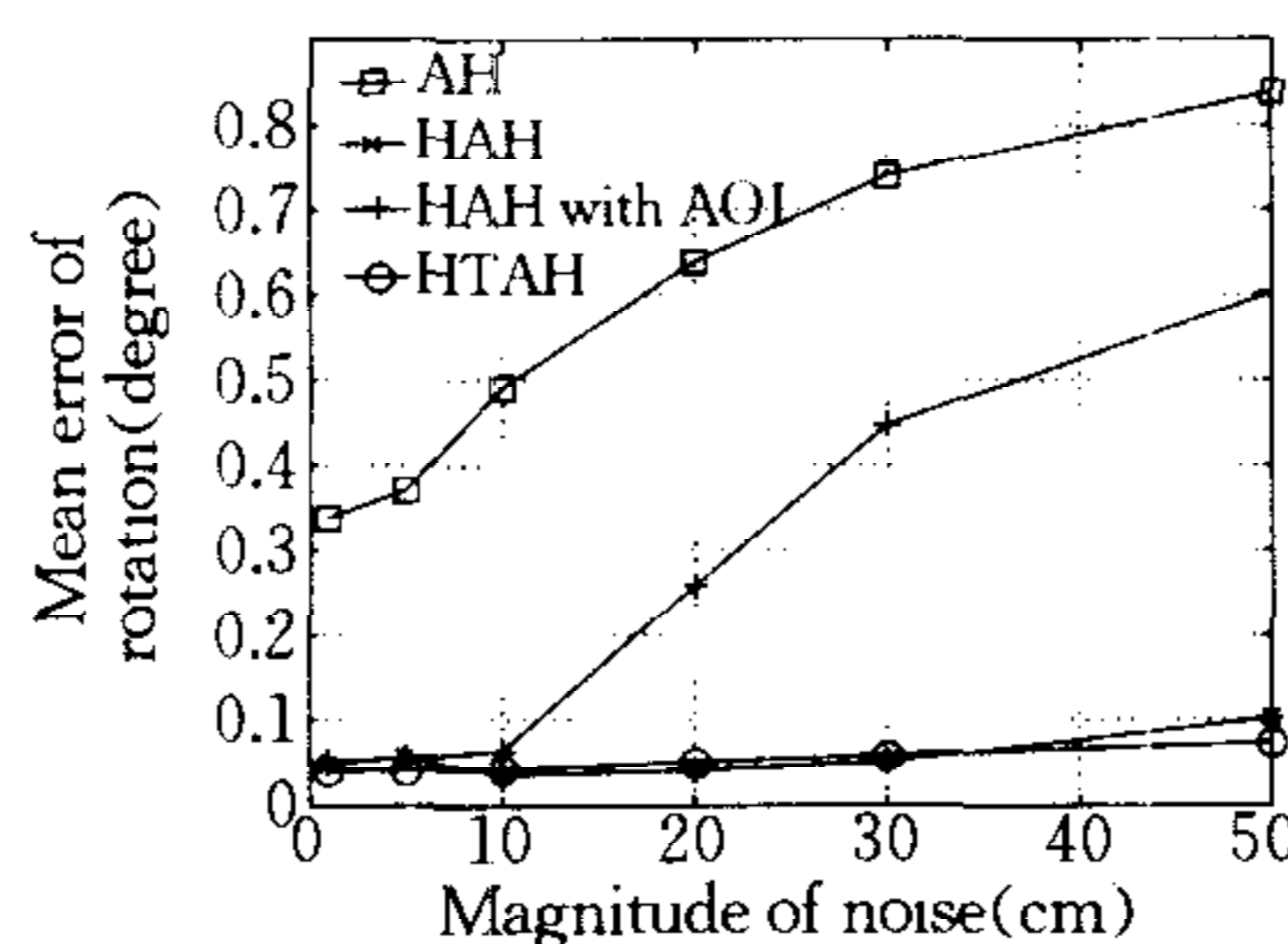


图 7 不同角度直方图算法的鲁棒性比较

Fig. 7 Comparison in robustness among different angle histogram methods

为了进一步验证算法的可行性,我们也使用实际激光雷达数据进行了测试.实验数据来自于清华大学智能车 THMR-V(TsingHua Mobile Robot),上面装备有德国 SICK 公司生产的 LMS220 激光雷达. LMS220 为脉冲式激光雷达,其最大检测距离为 50m,距离精度 5cm,角度范围 $[0, 180^\circ]$,角度分辨率 0.5° ,扫描周期 40ms.实验中的室外环境包含有建筑物、墙、树、灌木、栅栏、汽车,甚至少量运动目标.在第一组实验中,机器人保持直线运动(700 帧),位姿估计的结果(图 8(a))正确地显示出期望的直线轨迹.在第二组实验中,机器人沿着直径约 27m 的圆运动近 2 周(1200 帧).尽管有累计误差的存在,但是图 8(b)的结果仍然正确地显示出圆形轨迹,而且 2 周轨迹很好地重合在一起,再次证明本文算法具有较高的精度和鲁棒性.

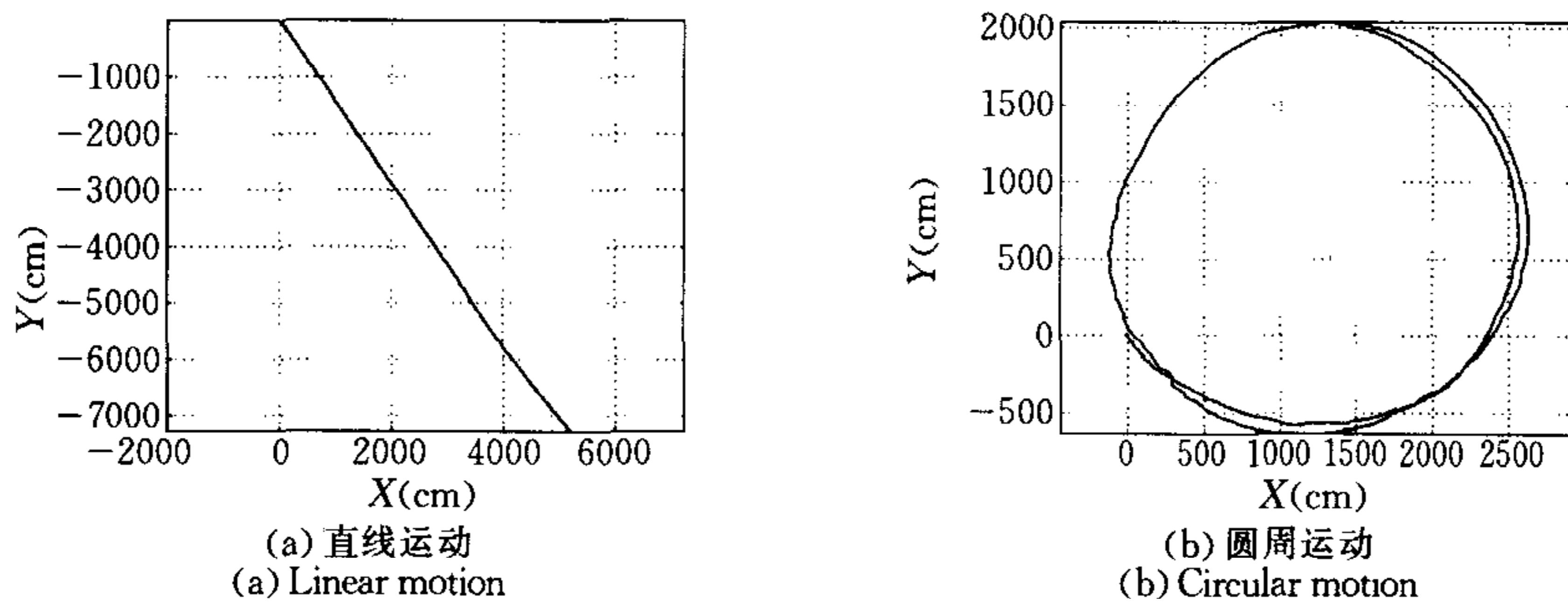


图 8 两个基于实际数据的例子
Fig. 8 Two examples with real data

通过仿真数据和实际数据的实验,结果表明角度直方图算法的引入,有效地减少了 ICP 算法的收敛次数和计算时间.整个算法(包括 HTAH 算法和 ITCP 算法)的平均时间均小于 25ms,可以满足移动机器人实时性要求.

5 结论

本文提出了一种基于激光雷达的移动机器人实时位姿估计方法,它包括 HTAH 算法和 ITCP 算法两个部分.二者的结合不仅成功地解决了 ICP 算法的局部最小值和低收敛速度问题,而且也避免了角度直方图方法的低精度和多边形环境要求.仿真数据和实际数据的实验结果都证明了其具有精度高、速度快、对噪声、遮挡和类孔径问题鲁棒性强的特点.通过引入使用鲁棒估计方法计算的切线方向信息,明显地提高了系统对噪声的鲁棒性.作为标准角度直方图算法的推广,本文提出了基于 Hough 变换的切线角度直方图 HTAH 算法,实验结果表明其在精度和鲁棒性不变的同时,速度比现有 Hough 变换方法快 5~10 倍.此外,本文提出了一种 ICP 算法的改进算法——迭代切线加权最近点 ITCP 算法,解决了现有鲁棒方法无法解决的类孔径问题.实验结果表明 ITCP 算法不仅提高了鲁棒性,而且加快了收敛速度.

下一步的研究重点将是使用我们所提出的 SLOM(simultaneously localization, object detection and tracking, and map building)框架来解决环境中的运动目标对目前算法的干扰问题.此外,我们计划采用本文的方法,实现基于视觉的实时位姿估计,并将两种传感器的信息进行融合,以解决孔径问题.

References

- 1 Yang Ming, Wang Hong, Zhang Bo. Overview of laser radar based pose estimation for mobile robots. *Journal of Robot*, 2002, **24**(2):177~183(in Chinese)
- 2 Weiss G, Wetzler C, Puttkamer E V. Keeping track of position and orientation of moving indoor systems by correlation of range-finder scans. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, California, USA: IEEE Computer Society Press, 1994. 595~601
- 3 Lu F, Milios E. Robot pose estimation in unknown environments by matching 2D range scans. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1997, **18**(3): 249~275
- 4 Yang Ming, Dong Bin, Wang Hong, Zhang Bo. Real-time pose estimation for outdoor mobile robots using range data. In: Proceedings of IEEE International Conference on Pattern Recognition, Québec City: IEEE Computer Society Press, 2002. 593~593
- 5 Yang Ming, Dong Bin, Wang Hong, Zhang Bo. Laser radar based real time ego-motion estimation for intelligent vehicles. In: Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Versailles: IEEE Press, 2002. 44~51
- 6 Dubrawski A, Siemiatkowska B. A method for tracking the pose of a mobile robot equipped with a scanning laser range finder. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium: IEEE Robotics and Automation Society, 1998. 2518~2523

杨 明 博士. 主要从事移动机器人、计算机视觉、激光雷达等方面的研究工作.

(**YANG Ming** Ph. D. . His research interests include mobile robots, computer vision, and laser radar.)

董 斌 硕士研究生. 主要从事移动机器人、雷达、地图生成等方面的研究工作.

(**DONG Bin** Master. His research interests include mobile robots, radar, and map building.)

王 宏 博士, 副教授. 主要从事移动机器人、人工智能等方面的研究工作.

(**WANG Hong** Ph. D. , associate professor. His research interests include mobile robots, and AI.)

张 钺 教授, 博士生导师, 中国科学院院士. 主要从事人工智能、机器学习、机器人等方面的研究工作.

(**ZHANG Bo** Professor, academician. His research interests include AI, machine learning, and robotics.)

Helder Araújo 博士, 副教授. 主要从事机器人视觉、移动机器人感知和导航等方面的工作.

(**Helder Araújo** Ph. D. , associate professor. His research interests include robot vision, perception, and navigation.)