

基于目标跟踪的红外触摸屏优化算法

周爱国, 潘强标*

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

(*通信作者电子邮箱 panqiangbiao@163.com)

摘要:针对现有红外触摸屏多点识别时识别错乱和画图时轨迹毛刺严重等问题,在原有识别算法的基础上,加入了卡尔曼滤波与跟踪门算法结合的目标跟踪算法处理,提出一种新型红外触摸屏优化算法。该算法通过数据关联中的跟踪门逻辑,将量测值与已有的目标轨迹进行逻辑判断,选择正确的触点信息,剔除伪触点的信息,实现轨迹关联和目标跟踪。同时在红外触摸屏上建立触点的运动模型上,通过卡尔曼滤波实现轨迹的平滑和一定程度上的轨迹预测。在红外触摸屏上的测试表明,与原有的识别算法相比,优化算法增加了约 $3\ \mu\text{s}$ 单点识别时间,但是提高了轨迹在拐角处的平滑度,减少了拐角处约 60% 的毛刺。优化算法有效地修正了红外触摸屏原有的不足,能实现多触点时的轨迹关联和提高轨迹的平滑程度,能提高红外触摸屏绘图时的实际使用效果。

关键词:多点触控;目标跟踪;跟踪门;卡尔曼滤波;轨迹平滑

中图分类号: TP334.2 **文献标志码:** A

Optimal algorithm for infrared touch screen based on target tracking

ZHOU Aiguo, PAN Qiangbiao*

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Current infrared touch screen has problems in the multi-touch recognition and causes zigzag trace when drawing. In order to deal with these problems, an optimal algorithm based on target tracking was presented combined with Kalman filter and validation region algorithm. In data association, the validation region algorithm was used to match the right touch point's estimate value with the original target trajectory and delete the wrong touch point's estimate value. With the touch point motion model, Kalman filter was adopted for track smoothing and target movement prediction. Compared to the original recognition algorithm, the time of single touch point recognition was added about $3\ \mu\text{s}$ by the optimal algorithm, but the smoothness in the trajectory angles was improved and about 60% of the burr amount was decreased. The experimental results show that some problems of the infrared touch screen are solved by the optimal algorithm, the effectiveness for multi-touch applications and trajectory smoothness is demonstrated, and the drawing effectiveness on the infrared touch screen is improved.

Key words: multi-touch; target tracking; validation region; Kalman filter; track smoothing

0 引言

触摸屏是目前最方便、最友好的人机交互方式。利用这种技术,使用者可以在不经过任何指导的情况下,通过屏幕上的图片和文字进行点击完成对计算机的各种操作,完全摆脱了鼠标和键盘的束缚^[1-5]。触摸屏的类型有电阻式触摸屏,电容式触摸屏和红外式触摸屏等。电阻式触摸屏和电容式触摸屏在小尺寸触摸屏上占据了几乎所有的市场份额,但由于触摸屏结构和制造工艺的原因,在大尺寸的使用场合,电阻式和电容式触摸屏的成本相当高^[6-7]。由于红外式触摸屏是一种运用红外线检测技术,以光束阻断技术为基本原理的触摸屏^[6-10]。在大尺寸的使用场合上,红外触摸屏只增加了边框的成本,并且红外式触摸屏不需要在屏幕表面覆盖任何材料,且对触摸体无特殊要求,具有成本低、生产难度小、透光率高、可测区域大等优势,相对于其他类型的触摸屏更加适合户外的、大尺寸的使用场合。因此红外式触摸屏是当前大尺寸触

摸屏市场的重要方向。

然而,目前红外式触摸屏在多个触点的识别和轨迹平滑上仍存在不足。在轨迹平滑的研究上,郑磊等^[11]使用前点取平均的方法减少轨迹的毛刺,但该算法只适用于轨迹是直线的情况,并且平滑算法没有基于轨迹运动趋势来进行运动预测;Lin等^[12]使用了卡尔曼滤波器在电容触摸屏上实现轨迹平滑,但在多点触摸的轨迹关联上,只使用最短间距的方法来区分不同轨迹,不能剔除错误的点,具有一定的局限性。本文提出了一种基于目标跟踪的红外触摸屏数据处理算法。该算法结合跟踪门和卡尔曼滤波算法,实现了多触点的识别和轨迹的平滑的功能。

1 算法逻辑

红外触摸屏上有红外发射管和红外接收管。当出现触摸时红外发射管发射的红外管受到阻挡,接收管采集到的 AD 值会产生变化,通过检测算法可以得到触点位置的原始信息,

收稿日期: 2015-04-22;修回日期: 2015-07-21。

作者简介: 周爱国(1973-),男,湖南攸县人,副教授,博士,主要研究方向:机械电子驱动与控制、机器人动力学建模、汽车传感器、生物仪器; 潘强标(1989-),男,广东中山人,硕士研究生,主要研究方向:红外触摸屏优化。

即目标跟踪中的量测值^[13],如图1所示。当触点移动时,通过基于卡尔曼滤波的目标跟踪算法得出运动信息^[14],并通过运动状态对量测值进行处理,实现运动轨迹的平滑。

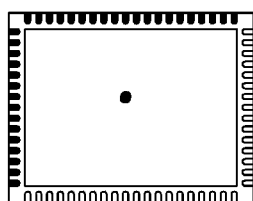


图1 红外触摸屏原理

红外触摸屏的目标跟踪算法是将多个触点视作多个独立的目标来进行跟踪。红外触摸屏的跟踪过程是一个递推过程,如图2所示。红外触摸屏的量测值经过数据关联逻辑,对量测值与现有轨迹进行判断。如果来自红外触摸屏的量测值数据落入目标的跟踪门中,则称此量测值为候选量测值。跟踪门用来粗略确定量测值、轨迹关联是否合理。然后根据候选量测值的数量分别进行不同数据关联逻辑处理。在跟踪维持过程,对触点轨迹进行卡尔曼滤波和预测。若出现新的轨迹,则在下一轮目标跟踪中加入该目标的数据关联过程。若判断触摸已经结束,则不对该轨迹数据进行关联处理。最后,在新的量测值到达之前,由目标预测状态和接收正确预测值的概率确定下一时刻跟踪门的中心和大小,重新开始下一时刻的递推循环^[15]。

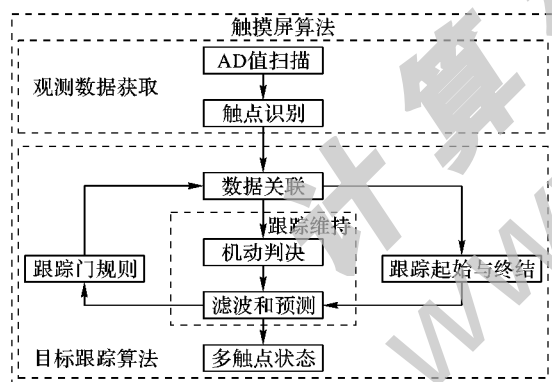


图2 多目标跟踪示意图

2 噪声的分布规律

红外触摸屏在触摸过程中受到众多的外界干扰,在设计滤波算法前,先通过获取红外触摸屏上的数据,测定红外触摸屏的量测噪声的分布规律^[16]。为了简便有效地进行噪声的测量,采用的方法是在触摸屏上画直线,然后测量轨迹的离散程度。借助于尺子在触摸屏上画出由上往下的笔直轨迹,该轨迹与y轴平行。由触点数据作出散点图,并进行线性回归分析,拟合得到方程:

$$\hat{x} = ay + b$$

然后通过拟合值 \hat{x} 与 x 相减可以得到红外触摸屏的轨迹偏差值。根据偏差的情况划分区间,然后分别求出误差在这些区间上的概率。最后得到误差的概率分布图,如图3所示。通过概率密度分布可以发现红外触摸屏在使用时的量测噪声大致符合高斯分布。由此假设红外触摸屏的量测噪声为高斯白噪声,所以在红外触摸屏上的滤波算法选择了基于高斯白噪

声的卡尔曼滤波。

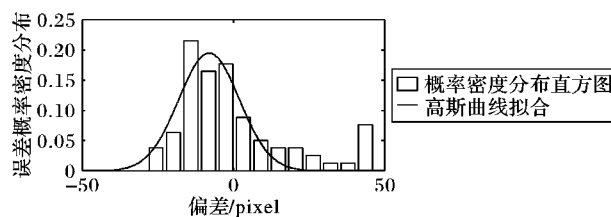


图3 误差概率密度分布

3 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是基于线性代数理论及隐马尔可夫模型的一种方法,它是一种最优估计算法。卡尔曼滤波利用目标运动信息并结合目标当前的量测值,修改对目标未来位置的观察估计值,预测目标的运动信息,如运动速度和运动方向,提高对目标运动信息预测的准确性。对于出现遮挡物将被跟踪目标完全遮挡的情况,由于卡尔曼滤波具有预测能力,则可以保证不间断的跟踪^{[17]21-25}。

3.1 状态方程

在满足模型的精度、跟踪性能和运算速度的条件下,假设红外触摸屏上的触点基本上为匀速运动,建立了匀速运动模型。这样建立模型一方面是因为红外触摸屏的红外对管的扫描周期为10 ms,在每个扫描周期内触点的运动距离短,可以认为是匀速运动。另一方面是卡尔曼滤波的匀速运动模型只需运算4阶矩阵,而建立匀加速模型,需要运算6阶矩阵。多触点时就需要分别进行带有6阶矩阵运算的卡尔曼滤波,运算的时间复杂度会相当大。

由于触摸操作时触摸动作的变化和触摸屏受到的干扰会带来不可预测的变化,不可能完全获得目标精确的模型,所以这里要引入过程噪声。则目标状态方程用矩阵可表示为:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k) \quad (1)$$

其中: $\mathbf{V}(k)$ 为假定为零均值的附加高斯白噪声序列的过程噪声,协方差为 $\mathbf{Q}(k)$ 。状态向量 $\mathbf{X}(k)$ 和系统状态转移矩阵 $\mathbf{F}(k)$ 分别为:

$$\mathbf{X}(k) = [x_k \quad \dot{x}_k \quad y_k \quad \dot{y}_k]$$

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2 量测方程

量测方程是红外触摸屏检测过程的假设,线性系统的量测方程表示为:

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{W}(k) \quad (2)$$

其中: $\mathbf{Z}(k)$ 为量测向量, $\mathbf{H}(k)$ 为量测矩阵, $\mathbf{X}(k)$ 状态向量, $\mathbf{W}(k)$ 为量测噪声序列。同时假定为零均值的附加高斯白噪声序列,协方差为 $\mathbf{R}(k)$,且假定过程噪声和量测噪声序列及目标初始状态时相互独立的^[18]。

根据触点的二维平面匀速运动对目标进行建模时,对应的量测向量 $\mathbf{Z}(k)$ 为:

$$\mathbf{Z}(k) = [x_k \quad y_k]'$$

而量测矩阵 $\mathbf{H}(k)$ 为:

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

3.3 卡尔曼滤波器

卡尔曼滤波器通过系统状态模型和前一时刻的预测值得到下一时刻的状态估计值,然后结合当前的量测值和卡尔曼

增益得到卡尔曼的滤波值。卡尔曼增益是通过预测协方差求得,而预测的协方差是通过过程噪声和量测噪声的协方差递推求得。卡尔曼滤波器的运算如下:

新息协方差用来衡量新息的不确定性,新息协方差越小,则说明量测值越精确^[18]:

$$S(k|k-1) = H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k) \quad (3)$$

增益:

$$K(k) = P(k|k-1)H'(k)S^{-1}(k|k-1) \quad (4)$$

状态更新方程:

$$\hat{X}(k+1|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)v(k) \quad (5)$$

$v(k)$ 为新息或量测残差:

$$v(k) = Z(k) - H(k)\hat{X}(k|k-1) \quad (6)$$

预测协方差:

$$\begin{cases} P(k+1|k) = F(k)(P(k|k-1) - P(k|k-1)) \\ H'(k)S^{-1}H(k)P(k|k-1))F'(k) + Q(k) \end{cases} \quad (7)$$

4 跟踪门

多点触摸时需要通过数据关联来将候选量测值与已知目标轨迹相比较,并最后确定正确的量测与轨迹配对。本文中通过跟踪门规则实现数据的关联。跟踪门规则是将量测值分配给已建立的目标轨迹或新目标轨迹的检验方法^{[17]83-86,[18]}。跟踪门检测可以有效地将一些不太可能的量测值删除。跟踪门的大小需要和跟踪目标的特性相匹配,如果跟踪门选择得过大,那么跟踪门内将会存在大量无效的量测值,影响目标跟踪的精度和加大运算量;如果跟踪门的范围选择得过小,将会失去过多有用的信息,有可能丢失目标。常用的跟踪门有矩形跟踪门和椭圆跟踪门。由于在红外触摸屏的应用中,触点的机动性比较大,椭圆跟踪门的跟踪区域比矩形跟踪门大,因此这里结合卡尔曼滤波器的新息进行椭圆跟踪门逻辑的跟踪。

4.1 椭圆跟踪门

由于红外触摸屏的测量噪声服从高斯分布,因此利用 χ^2 分布建立椭圆门限来进行轨迹的关联,通过跟踪门来对多点触摸时触摸轨迹的关联,再通过卡尔曼滤波进行轨迹的平滑。椭圆跟踪门是在匀速运动卡尔曼滤波器基础上,通过滤波残差 $v(k)$ 与残差协方差 $S(k|k-1)$ 作为跟踪门规则。

设 r 为椭圆跟踪门的门限大小,当预测值 $Z(k)$ 满足关系式(8)时,称 $Z(k)$ 为候选量测值,式(8)称为椭圆跟踪门规则:

$$g(k) = v^T(k)S^{-1}(k|k-1)v(k) \leq g \quad (8)$$

随机变量 $g(k)$ 服从自由度为 M 的 χ_M^2 分布。因此,有 χ_M^2 分布可计算出落入椭圆跟踪门内的概率 P_G ,即

$$P_G(M) = \int_{v_G} \cdots \int f(d) dd_1 dd_2 \cdots dd_M \quad (9)$$

量测值为两维时:

$$P_G(M) = 1 - \exp(-r/2) \quad (10)$$

可以从表1中看出,只要通过改变跟踪门的规律就可以改变落入跟踪门的概率,从而实现带有噪声的量测值的挑选。当红外触摸屏的测量噪声不变时,跟踪门的规律就不变。因此在红外触摸屏首次使用时利用红外触摸屏的校正软件,检测红外触摸屏的测量噪声,选择合适的跟踪门规律^{[17]85}。 r 的选择是在红外触摸屏的校正软件中画三角形、圆形等轨迹,然后通过软件比较真实轨迹和触摸轨迹,计算测量噪声的大小来选择合适的跟踪门的参数 r ,再通过软件将参数传输给红外触摸屏。

表1 落入跟踪门内的概率 P_G

维度 M	$r=1$	$r=4$	$r=9$	$r=16$
1	0.683	0.954	0.997	0.9994
2	0.393	0.865	0.989	0.9997
3	0.199	0.739	0.971	0.9989

4.2 跟踪门数据关联逻辑

通过跟踪门规则,由量测值是否落入跟踪门内可以将量测点分成两类。若当量测值满足目标的跟踪门规则时,称此量测值为候选量测值,并考虑用来更新目标触点轨迹。若多个量测值同时落入目标触点的跟踪门,则通过式(8)椭圆跟踪门规则最小来选取量测值。若量测值不落入任何已建立目标触点的跟踪门,此时量测值可能为新增加的触点的量测值或者为错误值。此时将量测值作为新增加的触点的假定轨迹,通过未来的几个周期的数据来判断假定轨迹的真实性。若目标的跟踪门内的量测值少于一个,同时该触点触摸还没结束,将用卡尔曼滤波器的预测值来作为该轨迹的更新状态。

5 仿真结果

仿真两个目标的匀速运动轨迹,首先生成带有过程噪声的原始轨迹,然后再生成带有量测噪声的量测轨迹,过程噪声与量测噪声都为高斯白噪声。通过数据关联算法跟踪两个目标,然后通过卡尔曼滤波进行滤波处理。从图4可以发现算法量测轨迹带有比较大的噪声,而滤波后的轨迹有效降低了噪声带来的干扰,而且在两个目标相交时也没有发生目标识别错误,与原始轨迹比较接近。

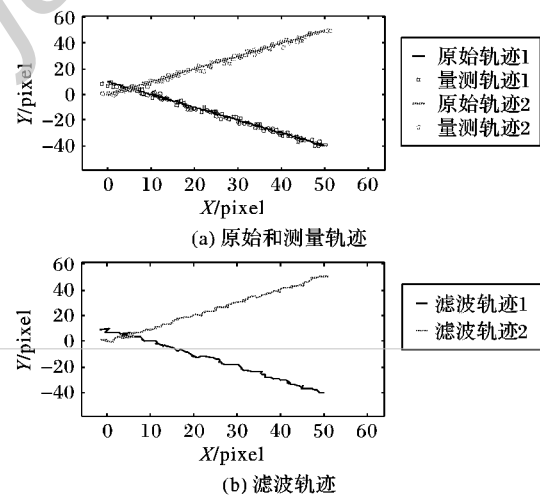


图4 两点触摸仿真结果

图5将目标1的量测轨迹与滤波轨迹放大进行对比,由于噪声的影响,匀速运动的轨迹出现了拐角和毛刺,滤波后的轨迹变得更加平滑。

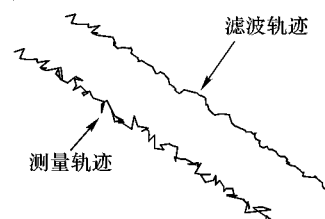


图5 目标1量测轨迹与滤波轨迹

为了比较滤波算法的性能,利用位置均方根误差(Root

Mean Square Error, RMSE) 分别求出量测轨迹与滤波轨迹和原始轨迹的均方根误差。计算公式如式(11) 所示:

RMSE =
$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \hat{X}_i)^2 + (Y_i - \hat{Y}_i)^2 + (Z_i - \hat{Z}_i)^2}{3}} \quad (11)$$

如图 6,通过比较可以发现滤波后的位置均方根误差明显小于滤波前的值,说明滤波后的轨迹更加接近真实的轨迹。

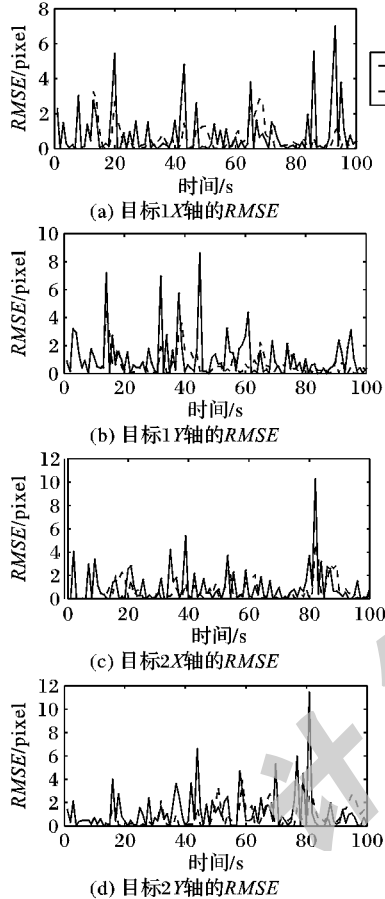


图6 目标1和目标2的X、Y轴均方根位置误差

6 红外触摸屏实验平台

红外触摸屏实验平台是安装了红外触摸屏的 32 英寸的显示屏。该红外触摸屏的分辨率为 32 767 × 32 767,而电脑分辨率为 1 280 × 768。红外触摸屏通过 USB 通信进行对电脑的触摸控制,通过 Windows 自带的画图软件进行轨迹的显示。

从算法运算量上分析,单个触点的目标跟踪算法约 400 个乘法和 400 个加法。在算法实现时为了提高运算的速度,利用整型运算代替浮点型的运算,而主控芯片整型乘法的运算时间大概为 30 ns,因此单个触点的运算时间约为 2.4 μs。而红外触摸屏的扫描周期为 10 ms,因此即使在多个触点的情况下也不会对红外触摸屏的响应速度造成很大的影响。在红外触摸屏上实现了目标跟踪算法后,对红外触摸屏的运算时间进行了记录,单个触点的识别时间增加了 2.6 μs,多个触点时运算时间如表 2。可以看出随着触点数的增加,运算时间的增加越来越快,主要原因是跟踪门算法的运算量与触点数的平方成正比。但总的来说,算法的运算时间比 10 ms 的扫描周期小很多,该目标跟踪算法在运算复杂度上有可行性。

表2 触点个数与运算时间的关系

触点个数	增加时间/μs	触点个数	增加时间/μs
1	2.6	3	12.8
2	5.6	4	17.0

6.1 触摸事件一

基于目标跟踪的优化算法对轨迹进行滤波是通过加入了基于运动模型的预测,当量测值受到干扰时,预测值反映了原来的运动趋势,通过量测值与预测值的加权结合,可以减少毛刺。由于红外触摸屏的触点在慢速移动时容易产生漂移的情况,因此触摸原始轨迹在拐角时会出现错误如图 7(a)。将轨迹数据经过目标跟踪算法处理后再输出。对轨迹进行放大后观察,经过算法处理后地解决了图 7(a)拐角时的缺陷,如图 7(b)所示。

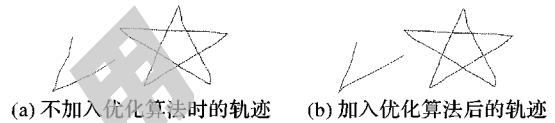


图7 加入优化算法前后的轨迹对比

为了摆脱评价的主观性,更好地描述轨迹的平滑程度,这里通过余弦定理,求出相邻点倾角(见图 8)。从图 8 可看出:优化后的轨迹相邻点倾角基本稳定地保持为 180°,倾角出现 4 次比较大的变化与轨迹出现 4 个拐角一致,而优化前的倾角存在较多毛刺,而且拐角时的波动范围比较大。从优化前后对应拐角处的倾角变化比例中得出,优化算法降低了倾角突变的 60% ~ 66%。综合分析得出优化算法减少了轨迹毛刺,提高了轨迹的平滑程度。

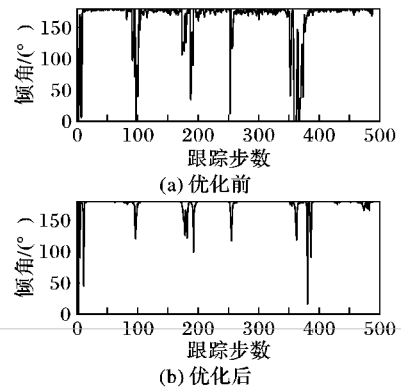


图8 优化前和优化后相邻点夹角

6.2 触摸事件二

由于红外触摸屏采用正交扫描和斜向扫描结合的方式来增加触点识别的精度,但红外触摸屏的角落的位置靠近触摸屏边框,因此无法采用斜向扫描^[19]。在红外触摸屏的角落进行多点触摸时容易出现识别错误,导致轨迹进行交叉。优化算法是在目标跟踪算法的基础上加入了红外触摸屏的边沿判断条件。算法中识别触点靠近红外触摸屏边沿时,将对轨迹中的落在跟踪门外的数据进行剔除。采用优化算法可以有效地实现轨迹的纠正。优化前后的轨迹比较如图 9 所示。

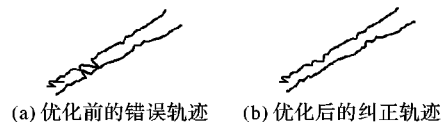


图9 优化前后的轨迹比较

6.3 触摸事件三

由于红外触摸屏是利用红外对管被阻断时电压值的变化来检测触点的位置,因此当5个手指与红外触摸屏扫描方向重叠时,由于手指的之间相互被遮挡,导致此时红外触摸屏没法检测5个触点,轨迹如图10(a)。由于红外触摸屏使用时只有特定位置才会出现触点的缺失,因此可以通过目标跟踪算法优化补偿来改善这种情况,通过优化可以将轨迹的预测值来代替轨迹缺失时的数值,实现了轨迹连续。图10(b)是使用优化算法后的多点触摸时的情况,可以观察到优化算法较好解决了相互遮挡的问题。

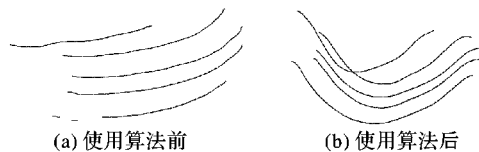


图10 使用算法前后5点触摸效果比较

6.4 测试结果分析

从优化算法的实际使用中,可以看出基于目标跟踪的优化算法可以解决红外触摸屏中触点移动慢速时漂移、特殊位置时识别精度低和轨迹丢失等问题,使得触摸轨迹更加平滑。从红外触摸屏的使用来看,加入的目标跟踪算法后的红外触摸屏在响应速度上没有明显的变化,在多点触摸时依然可以保持着比较高的响应速度。由此可见优化算法中的匀速运动模型和高斯噪声的假设具有的合理性,能满足红外触摸屏的使用要求。

7 结语

本文通过对卡尔曼滤波与跟踪门算法的结合,在原有红外触摸屏触点识别的基础上,加入了目标跟踪算法处理。通过跟踪门算法来进行轨迹的关联,通过基于卡尔曼滤波的目标跟踪算法得出运动状态,并通过运动状态对量测值进行处理,实现运动轨迹的平滑。在匀速运动的仿真实验结果表明,在运算量不大的情况下,经过目标跟踪优化算法后的轨迹能正确地实现轨迹的关联和平滑,并且位置均方根误差得到降低。在红外触摸屏实验平台上实现了基于目标跟踪的优化算法后,触摸轨迹在拐角时出现的漂移情况得到了改善,解决了多触点时轨迹错误和断开的情况。

参考文献:

- [1] KLAGZKY R L, GIUDICE N A, BENNETT C R, *et al.* Touch-screen technology for the dynamic display of 2D spatial information without vision: Promise and progress[J]. *Multisensory Research*, 2014, 27(5/6): 359-378.
- [2] IRWIN C B, SESTO M E. Performance and touch characteristics of disabled and non-disabled participants during a reciprocal tapping task using touch screen technology[J]. *Applied Ergonomics*, 2012, 43(6): 1038-1043.
- [3] ALTINSOY M E, MERCHEL S. Electrotactile feedback for hand-held devices with touch screen and simulation of roughness[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2012, 5(1): 6-13.
- [4] ZHANG L, FU J, WANG Z, *et al.* The design of touch-screen with high resolution infrared based on plastic optical fiber and image processing[C]// *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Granular Computing*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 433-436.
- [5] KIM H K, LEE S, YUN K S. Capacitive tactile sensor array for touch screen application[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 165(1): 2-7.
- [6] MAZZEO A D, KALB W B, CHAN L, *et al.* Paper-based, capacitive touch pads[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(21): 2850-2856.
- [7] AHN M H, CHO E S, KWON S J. Characteristics of ITO-resistive touch film deposited on a PET substrate by in-line DC magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2014, 101: 221-227.
- [8] KANE S K, MORRIS M R, WOBROCK J O. Touchplates: low-cost tactile overlays for visually impaired touch screen users[C]// *Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. New York: ACM Press, 2013: 22.
- [9] YANG Y, LI Y. The technology and market analysis of touch screen[J]. *Information Recording Materials*, 2012, 13(1): 35-46. (杨玉琴, 李亚宁. 触摸屏技术研究及市场进展[J]. 信息记录材料, 2012, 13(1): 35-46.)
- [10] WESTERMAN W, ELIAS J G, HEDGE A. Multi-touch: a new tactile 2-D gesture interface for human-computer interaction[C]// *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. [S. l.]: SAGE Publications, 2001: 632-636.
- [11] ZHENG L, YANG F. Design of IR - touch screen based on AT - mega88[J]. *Development and Innovation of Machinery and Electrical Products*, 2010(1): 27-29. (郑磊, 杨福兴. 基于 AT-mega88 的红外触摸屏设计[J]. 机电产品开发与创新, 2010(1): 27-29.)
- [12] LIN C, CHANG Y, LIN U, *et al.* Kalman filter smooth tracking based on multi-touch for capacitive panel[C]// *Proceedings of the 2011 SID Symposium Digest of Technical Papers*. [S. l.]: Blackwell Publishing Ltd, 2011: 1845-1847.
- [13] WANG L, NIU W, FANG L, *et al.* A new multi recognition algorithm for infrared touch screen based on computational geometry[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2013(7): 300-303. (王璐, 牛薇, 方乐, 等. 基于计算几何的新型红外式触摸屏多点触摸识别算法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013(7): 300-303.)
- [14] TIAN H, JING Z. A multi-space data association algorithm for target tracking systems[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2007, 12(4): 608-617.
- [15] FENG Y. The research on data association in multi-target tracking[D]. Xi'an: Xidian University, 2008: 9-10. (冯洋. 多目标跟踪的数据关联算法研究[D]. 西安电子科技大学, 2008: 9-10.)
- [16] KOSANAM S, SIMON D J. Kalman filtering with uncertain noise covariances[EB/OL]. [2014-10-10]. http://engagedscholarship.csuohio.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1182&context=enece_facpub.
- [17] HE Y, XIU J, GUAN X, *et al.* Radar data processing with application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 20-24. (何友, 修建娟, 关欣, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 20-24.)
- [18] SIMON D. Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and non-linear approaches[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.
- [19] LI J. A new infrared multi-touch recognition algorithm[J]. *Computer and Modernization*, 2012(9): 178-180. (李钧. 一种新型红外多点触摸识别算法[J]. 计算机与现代化, 2012(9): 178-180.)
- [20] CHEN J. Filtering methods in target tracking system[M]. Xi'an: Publishing House of Xidian University, 2013: 9-10. (陈金广. 目标跟踪系统中的滤波方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013: 9-10.)
- [21] HABTEMARIAM B, THARMARASA R, THAYAPARAN T, *et al.* A multiple-detection joint probabilistic data association filter[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2013, 7(3): 461-471.