

四路摄像头协同多重触控系统标定方法

谢斐 蔡山 王德鑫 陈超

(国防科学技术大学信息系统与管理学院信息系统工程重点实验室 长沙 410073)

摘要 四路摄像头协同多重触控系统通过拟合四路摄像头得到触点方向线,以解决多触点遮挡问题。针对该原理中触点方向线构建问题,提出查找表法、消失点法和立体标定法3种系统标定方法,以实现多触点精确定位。查找表法在交互区边框上设定标定点,通过插值查找对应标定点,以光心和标定点构建触点方向线;消失点法利用触点方向上的消失点和光心构建触点方向线;立体标定法利用极线几何反投影射线构建触点方向线。误差分析实验结果表明,查找表法适用于较小尺寸平台,消失点法适用于大尺寸平台,立体标定方法精度有待提高。

关键词 人机交互,多重触控,查找表法,消失点法,立体标定法

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Calibration Methods for the Multi-touch System Based on Four Collaborative Cameras

XIE Fei CAI Shan WANG De-xin CHEN Chao

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, College of Information System & Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The multi touch system using four cameras solves the occlusion by fitting the four directing lines of each touch point. This paper presented three methods to build the directing line, including look-up table method, vanishing point method and stereo calibration method. The look-up table method stations a set of reference points along the rectangle frame, finds the closest reference point by interpolation, and builds the line according to the projection center and the reference point; the vanishing point method builds the directing line according to the vanishing point of the touch point and the projection center; stereo calibration method builds the directing line according to epipolar geometry back projection line. Results show that look up table is applicable to small platforms and vanishing point method fits large size platforms while stereo calibration method needs to improve the precision.

Keywords Human-computer interaction, Multi-touch, Look-up table, Vanishing point, Stereo calibration

多重触控(Multi-touch)技术^[1,2]是人机交互领域的研究热点,其借助光学和材料学的成果,使用户能在触控平台上进行多触点操作以实现基于手势的交互,甚至可以让多个用户同时操作以实现基于协同手势的交互,这种以用户为中心的具有高度自由性的交互方式,将是下一代人机交互的发展方向,微软公司 Surface 计算机和苹果公司的 iPhone 就是其中的突出代表。

多重触控技术研究已经有大量的研究成果^[1,2],有电容式、红外式、FTIR(Frustrated Total Internal Reflection)式和多摄像头协同式。我们也提出了一种成本低廉、能有效解决多触点遮挡的四路摄像头协同多重触控系统,其平台只需要简单的红外光源和四路摄像头,不需要投影仪、亚克力玻璃等复杂的材料,能直接安装于显示器或现有交互平台前,装置简单,安装方便,便于扩展和移植^[2]。

四路摄像头协同多重触控系统通过拟合四路摄像头得到

触点方向线以解决多触点遮挡问题。对每个触点目标,如果4条方向直线相交则为真实触点,否则视为伪点予以过滤。本文的研究对象是其中触点方向线的构建问题,目标是实现多触点的精确定位。本文提出了3种构建触点方向线的方法,即查找表法、消失点法和立体标定法。查找表法通过在交互区边框上设定标定点,并通过插值查找触点对应的标定点,以光心和标定点构建触点方向线;消失点法利用触点方向上的消失点和光心构建触点方向线;立体标定法利用极限几何约束和反投影射线构建触点方向线。最后对3种方法进行了精度分析,并给出了实验结果。结果表明:查找表法精度最高,但需要选取较多标定点,过程比较繁杂,适用于较小尺寸平台;消失点法不需要查找表法那么多标定点,精度与查找表法接近,比较适用于大尺寸平台;立体标定方法精度有待提高,其主要原因是系统光源为红外光源,采集模板图像特征点个数有限且较难匹配。

到稿日期:2011-01-04 返修日期:2011-05-09 本文受 863 高技术研究发展计划(2009AA01Z328),国家自然科学基金(60705013,60773023)资助。

谢斐(1983—),男,博士生,主要研究方向为人机交互与多媒体信息系统等,E-mail: xiefei2046@yahoo.com.cn;蔡山(1982—),男,博士生,主要研究方向为图像处理等;王德鑫(1983—),男,博士生,主要研究方向为人机交互等;陈超(1977—),男,博士,讲师,主要研究方向为信息系统工程等。

1 系统原理

四路摄像头协同多触点定位原理^[2]如图1所示。首先在矩形交互区4个边框上安装红外光源,并在4个顶点处分别安装广角红外摄像头。利用红外光源作为背景光源能有效地过滤可见光的影响,解决复杂背景下尤其是当交互场景中出现与手指颜色形状接近的物体时手指的精确检测难题。当交互区没有遮挡物(即触点)时,每个摄像头将拍摄到由红外光构成的白色亮带;如果有遮挡物,红外光源发出的光将被遮挡物阻挡,在亮带对应位置上将出现阴影,从而很容易检测出每路摄像头中的阴影目标,根据标定结果可确定触点方向,综合四路摄像头得到的方向数据进行拟合定位,每个真实的触点都可由四路摄像头中的4条方向直线相交得到。

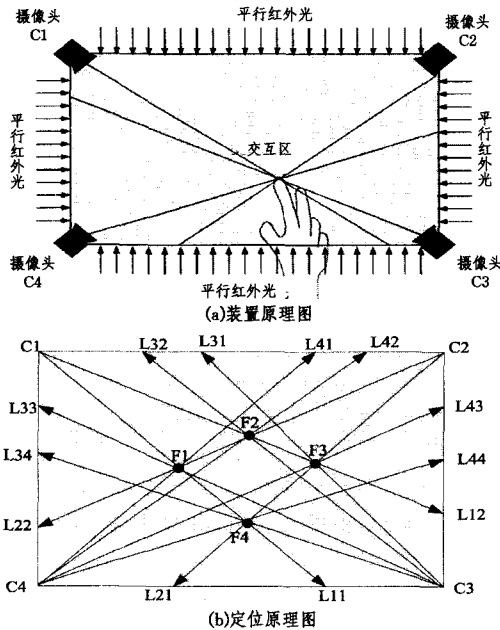


图1 原理图

该方法中每路摄像头的光心都在所在角的角平分线上,且交互区长宽不等,保证了对角两路摄像头的光心与任意触点的连线不会重合,从而任意一个触点即便在某路摄像头中不能成像,也必定能在该摄像头的对角摄像头中成像,确保了每个触点在两个对角线方向的至少两路摄像头中成像,即能构建两条由摄像头光心到遮挡物的像的直线,再融合另两路摄像头中的直线,如果4条直线交于一点,则该点为真实的触点,否则视为伪点予以剔除。如图2(b)中,触点F1和F4,F2和F3在C1中均成同一像,但在C3中成像不同;而且F1和F2,F3和F4在C2中也均成同一像,但在C4中成像不同,所以仍然可以为每个触点构建4条直线,从而确定交互区中有4个触点F1、F2、F3、F4,并且直线的交点即为触点的位置。

本文提出的多触点检测方法,利用红外光源有效过滤了环境光的影响,当交互区没有遮挡物(即触点)时,每个摄像头将拍摄到由红外光构成的白色亮带;如果有遮挡物,红外光源发出的光将被遮挡物阻挡,在亮带对应位置上将出现阴影。所以每路摄像头获取的图像都简单且稳定,可以很容易检测出阴影目标,其位置坐标即为遮挡物在该摄像头图像中的坐标。为了减少触点检测和定位的计算量,可通过掩码图像对亮带区域以外的图像进行过滤,并将亮带区域通过均值化每

列灰度值转化为像素线,从而将区域目标检测转为线上点目标检测,如图2所示。

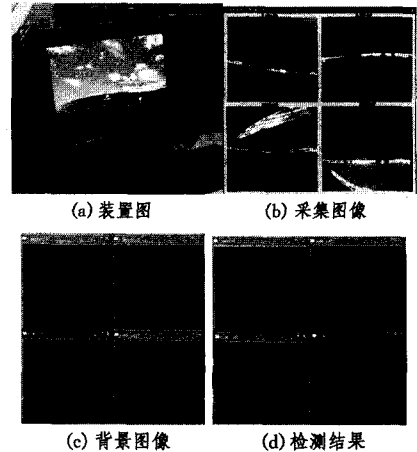


图2 触点检测原理

检测结果为所有触点在每路摄像头中的图像坐标集 $G = \{G_j\}$, G_j 为所有触点在第 j 个摄像头中的图像坐标, $G_j = \{g_{jt_j}\}$, g_{jt_j} 为第 j 个摄像头中第 t_j 个触点图像坐标, $t_j = 1 \dots n_j$, $j = 1, 2, 3, 4$ 。

2 标定方法

令交互区二维物理坐标为 $X = [x \ y \ 1]^{-1}$, 触点图像坐标为 $m = [u \ 1]^{-1}$, 根据小孔成像模型可得到 $sm = PX$, 其中 s 为比例系数。令 $P_{2 \times 3} = \begin{bmatrix} P_{1T} \\ P_{2T} \end{bmatrix}$, 则 $\begin{cases} su = P_{1T}X \\ s = P_{2T}X \end{cases}$, $P_{1T}X - uP_{2T}X = 0$, 可写成 $AP = 0$ 的形式, 若有 n 个点, 则 $A = \begin{bmatrix} x_1 - u_1x_1 \\ x_2 - u_2x_2 \\ \dots \\ x_n - u_nx_n \end{bmatrix}$, 由于 P 的自由度为 5, 只要 5 个以上的点即可

通过 SVD 分解求解得到 P 。

假设摄像头光心为 C , 则根据 $PC = 0$, 可求得 C , 其过程为令 H 为 2×2 矩阵, 则 $P = [H \ p_3]$, 再令 $C = [C' \ 1]^T$, 则 $HC' = -p_3$, 从而 $C' = -H^{-1}p_3$, 所以 $C = \begin{bmatrix} -H^{-1}p_3 \\ 1 \end{bmatrix}^{[3]}$ 。

光心位置确定后,需要选取另外一个点以确定代表触点方向的直线,根据选取的参照点的不同可分为查找表法和消失点法。

2.1 查找表法

根据光的直线传播原理,对任一摄像头,从光心出发的同一条直线上的所有点在摄像头的图像中均为同一点,所以根据触点检测过程得到的触点图像坐标,在标定结果中找到与它所成图像坐标一致的标定点,那么触点必在光心与该标定点的连线上^[2]。

首先在边框上取等距分布的 n 个点为标定点,得到标定点的交互区物理坐标集 $W = \{w_i\}$, $w_i = (w_i^x, w_i^y)$, $i = 1, \dots, n$ 。然后对摄像头 C_j , 依次将遮挡物置于从第 1 个标定点到第 n 个标定点处,并用摄像头 C_j 拍摄图像,图像中阴影的中心位置即为该标定点在摄像头 C_j 中的图像坐标,从而得到标定点在摄像头中的图像坐标集, $V = \{V_j\}$, V_j 为标定点在摄像头 C_j 中的图像坐标集, $V_j = \{v_{ji}\}$, $v_{ji} = (v_{ji}^x, v_{ji}^y)$, $j = 1, 2, 3, 4$,

$i=1\cdots n$,如图3所示。

标定点 顺序	1	2	3	$i-1$	i	$i+1$	$i+2$	$\cdots$	n
标定点 物理坐标	w_1	w_2	w_3	w_{i-1}	w_i	w_{i+1}	w_{i+2}	$\cdots$	w_n
摄像头C1 图像坐标	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{1i-1}	v_{1i}	v_{1i+1}	v_{1i+2}	$\cdots$	v_{1n}
摄像头C2 图像坐标	v_{21}	v_{22}	v_{23}	v_{2i-1}	v_{2i}	v_{2i+1}	v_{2i+2}	$\cdots$	v_{2n}
摄像头C3 图像坐标	v_{31}	v_{32}	v_{33}	v_{3i-1}	v_{3i}	v_{3i+1}	v_{3i+2}	$\cdots$	v_{3n}
摄像头C4 图像坐标	v_{41}	v_{42}	v_{43}	v_{4i-1}	v_{4i}	v_{4i+1}	v_{4i+2}	$\cdots$	v_{4n}

图3 查找表法

采用查找表标定法,有可能找不到与触点成同一图像坐标的标定点,此时通过查找图像坐标最接近的标定点,并通过线性插值的方法,构造代表该触点所在方向的直线。

以摄像头 C_1 为例,对 C_1 拍摄到的每个触点的图像坐标 g_{1i_1} ,计算所有标定点在 C_1 中的坐标集 V_1 中与 g_{1i_1} 的距离最近的坐标 v_{1j_1} , $j_1=1,\cdots,n$,若 $g_{1i_1}=v_{1j_1}$,则该触点对应的标定点为 w_{j_1} ,即 $q_{1i_1}=w_{j_1}$, q_{1i_1} 为 g_{1i_1} 在交互区边框上对应点的物理坐标;若 $g_{1i_1}\neq v_{1j_1}$,则采用线性插值的方法对 g_{1i_1} 在交互区边框上的对应点进行插值,插值方法描述如下:

$$\begin{cases} v'_{1j_1}=v_{1j_1+1}, w'_{j_1+1}=w_{j_1+1}, & \text{若 } g_{1i_1} > v_{1j_1} \\ v'_{1j_1}=v_{1j_1-1}, w'_{j_1-1}=w_{j_1-1}, & \text{若 } g_{1i_1} < v_{1j_1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\left| \frac{g_{1i_1}-v_{1j_1}}{v_{1j_1}-v_{1j_1-1}} \right| = \left| \frac{q_{1i_1}-w_{j_1}}{w_{j_1}-w_{j_1-1}} \right| \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, w_{j_1} 为 v_{1j_1} 对应的物理坐标, w_{j_1+1} 为 w_{j_1} 后面一个标定点的物理坐标, w_{j_1-1} 为 w_{j_1} 前面一个标定点的物理坐标, v'_{1j_1} 为所有标定点在 C_1 中的图像坐标集 V_1 中用于插值的图像坐标, w'_{j_1} 为 v'_{1j_1} 对应的物理坐标, q_{1i_1} 为 g_{1i_1} 在交互区边框上的物理坐标,求解 $q_{1i_1}=(q_{1i_1}^x, q_{1i_1}^y)$,从而触点的方向可以通过光心 C_1 和插值结果 q_{1i_1} 确定直线 l_{1i_1} ,且可表示为 $ax+by+c=0$ 的形式^[4], $a=q_{1i_1}^y-C_1^y$, $b=C_1^x-q_{1i_1}^x$, $c=q_{1i_1}^x \cdot C_1^y-C_1^x \cdot q_{1i_1}^y$ 。对摄像头 C_2, C_3, C_4 也采用上述方法,得到所有摄像头中的直线方程集 $L=\{L_1, L_2, L_3, L_4\}$, L_j 表示第 j 个摄像头得到的直线方程集, $L_j=\{l_{j1}, l_{j2}, \cdots, l_{jn_j}\}$, $l_{j\mu_j}$ 表示第 j 个摄像头中根据第 μ_j 个触点得到的直线方程。

2.2 消失点法

触点方向上的消失点坐标为 $q=-H^{-1}m$,所以可用光心和触点方向上的消失点来确定触点方向线。从第一摄像头检测结果中取第 t 个触点目标,图像坐标为 g_{1t} ,消失点坐标为 $q_{1t}=-H_1^{-1}g_{1t}$,通过光心和消失点得到的方向线为 $l_{1t}=[C_1] \times q_{1t}$,然后从第二摄像头检测结果中取第 j 个触点目标,图像坐标为 g_{2j} ,消失点坐标为 $q_{2j}=-H_2^{-1}g_{2j}$,通过光心和消失点得到的方向线为 $l_{2j}=[C_2] \times q_{2j}$,再从第三摄像头检测结果中取第 k 个触点目标,图像坐标为 g_{3k} ,消失点坐标为 $q_{3k}=-H_3^{-1}g_{3k}$,通过光心和消失点得到的方向线为 $l_{3k}=[C_3] \times q_{3k}$,最后从第四摄像头检测结果中取第 s 个触点目标,图像坐标为 g_{4s} ,消失点坐标为 $q_{4s}=-H_4^{-1}g_{4s}$,通过光心和消失点得到的方向线为 $l_{4s}=[C_4] \times q_{4s}$ 。同理也可得到每个摄像头所有触

点的方向直线集合 L 。其中, $[x] \times = \begin{bmatrix} 0 & -t & y \\ t & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}$, $x=(x, y, t)^T$ ^[3,4]。

查找表法和消失点法得到代表触点方向的所有直线集合 L 后,从 L_1 中任选一条 l_{1t} ,从 L_2 中任选一条 l_{2j} ,从 L_3 中任选一条 l_{3k} ,从 L_4 中任选一条 l_{4s} ,从而由这4条直线确定的方程组形式为

$$\begin{cases} [[C_1] \times p_{1t}]^T, & p=0 \\ [[C_2] \times p_{2j}]^T, & p=0 \\ [[C_3] \times p_{3k}]^T, & p=0 \\ [[C_4] \times p_{4s}]^T, & p=0 \end{cases} \text{ 或 } \begin{bmatrix} a_{1t} & b_{1t} & c_{1t} \\ a_{2j} & b_{2j} & c_{2j} \\ a_{3k} & b_{3k} & c_{3k} \\ a_{4s} & b_{4s} & c_{4s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

式(3)可写成 $Ap=0$ 的形式,通过 SVD 得到 $p=(x, y, 1)$ 。但实际中,由于各种噪声的影响,4条直线一般不会交于一点,可通过设定点到直线的距离阈值 TH_1 ,求其中两条直线的交点 $p'=[l_{1t}] \times l_{2j}$,如果 p' 与另两条直线的距离都小于 TH_1 ,则预接受 p' 为真实触点,再判断是否与已定位点重合,如果不重合则接受为真实的触点。

通过对这4条直线方程进行拟合求解交点,如果有解即可得到触点的物理坐标 $f_e=(x, y)$ 。这样的方程组在 L 中共有 $C_{n_1}^1 \cdot C_{n_2}^1 \cdot C_{n_3}^1 \cdot C_{n_4}^1$ 个,求解这些方程组,去掉重复解即可得到所有触点的集合 $F=\{f_e\}$, e 为触点个数。

2.3 立体标定法

在立体视觉中,并不需要标定每个摄像头的光心位置就可以利用两个摄像头重建三维物体的位置,其基本原理就是极线几何关系,如图4所示。其中 I_L 与 I_R 分别为 C_L 和 C_R 得到的影像, X 为空间任一点,在 I_L 与 I_R 平面上的投影分别为 m_L 与 m_R 。 C_L 与 C_R 分别是两摄像机光心,其连线与平面 I_L 与 I_R 交于 e_L 与 e_R , $X C_L C_R$ 平面与两图像平面的交线 l_m 与 l_m' 分别是点 X 在平面 I_L 与 I_R 上的极线。 X 是射线 $C_L X$ 和射线 $C_R X$ 的交点,即空间一点的三维坐标可由两幅图像唯一确定^[3,5]。

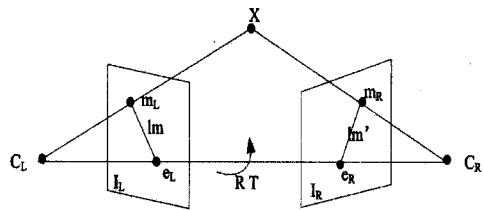


图4 极线几何

从每个摄像头出发指向触点方向的光线可通过立体视觉中的外极面确定。分别利用摄像头对的外极面构建4条代表触点方向的光线,同样如果4条光线交于一点,则认为该点为真实的触点,否则视为伪点予以剔除。

我们以 C_1 为参考摄像头,将 C_2, C_3, C_4 分别与 C_1 配对,且由于交互区对角的两个摄像头 $C_1 C_3$ 组成的摄像头对难以同时拍全标定模板,从而取不到足够多的特征点,因此将 C_3 与 C_2 或 C_4 配对,最后变换到 C_1 坐标系。为此定义了如下5种坐标系,如图5所示,坐标系 $C_1 X_1 Y_1 Z_1$ 、 $C_2 X_2 Y_2 Z_2$ 、 $C_3 X_3 Y_3 Z_3$ 、 $C_4 X_4 Y_4 Z_4$ 分别为摄像头 C_1, C_2, C_3 和 C_4 的摄像头坐标系,另外以交互区的左上角为原点定义了交互区坐标系 $IXYZ$ 。

该方法要标定每个摄像头的投影矩阵 P ,每个摄像头相对参考摄像头的旋转变换矩阵 R_{LR} 和平移变换矩阵 T_{LR} ,以及参考摄像头坐标系 $C_1 X_1 Y_1 Z_1$ 到交互区坐标系 $IXYZ$ 的旋转变换矩阵 R_{CI} 和平移变换矩阵 T_{CI} 。标定过程^[5,6]为分别用每对摄像头同时拍摄若干幅二维棋盘格标定模板,对拍摄图

像提取角点,匹配特征点,估计基础矩阵和本质矩阵,最后进行 SVD 分解得到每个摄像头的投影矩阵和相对参考摄像头的旋转和平移变换矩阵。

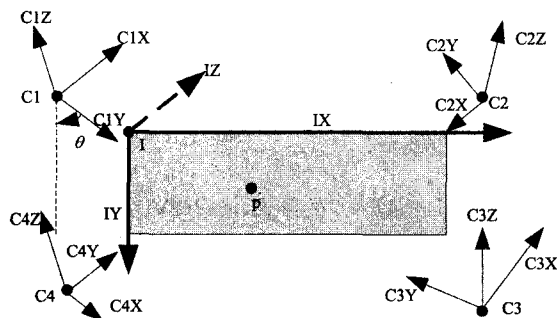


图5 坐标系定义

标定结束后,从每路摄像头检测结果中取一个目标,根据摄像头配对规则分别进行三维重建,且将重建结果的 Z 分量去除。如第一组摄像头对 g_{1i_1} 与 g_{2i_2} 重建结果为 r_1 ,第二组摄像头对 g_{2i_2} 与 g_{3i_3} 重建结果为 r_2 ,第三组摄像头对 g_{1i_1} 与 g_{4i_4} 重建结果为 r_3 ,将其转化到交互区坐标系得到 p_1 、 p_2 和 p_3 ,由于噪声的影响,一般 p_1 、 p_2 和 p_3 不会重合,可通过阈值方法对 p_1 、 p_2 和 p_3 进行融合。如果 3 点之间的距离均小于阈值,则预接纳为真实的触点,否则视为伪点予以剔除,条件为 $\arg \min_{i=1,2,3} (D(p_i, p_j)) \leq Th_1$,其中 $D(p, p')$ 表示两点之间的距离, Th_1 取触点在摄像头中成像的平均宽度。符合 3 点重合条件后,得到预接纳点 $\hat{f} = (p_1 + p_2 + p_3)/3$,然后还需对 $C_{n_1}^1 * C_{n_2}^1 * C_{n_3}^1 * C_{n_4}^1$ 组重建结果去除重复点,条件是 $\min_{i=1 \dots e} (D(\hat{f}, F)) \leq Th_2$,其中 $F = \{f_e\}$ 为已定位的触点集合, e 为已定位的触点个数, Th_2 为判断点是否重合的阈值,一般取 1 即可,如果符合,则接受为真实的触点,即 $f_{e+1} = \hat{f}$ 。

3 实验结果与分析

摄像头分辨率是影响定位精度的主要因素。它决定了采集图像的分辨率,假设摄像头采集图像序列大小为 $iw * ih$, iw 为图像宽度, ih 为图像高度;交互场景宽为 pw ,高为 ph ,由于每个摄像头采集到的图像为一条直线,对应于对角的两条边长度为 $pl = pw + ph$,因此像素分辨率为 $pd = iw/pl$ 。

影响查找表法定位精度的主要因素有标定间距。假设标定点间距为 T ,相邻两标定点的像素坐标最大距离为 MD ,则查找表方法的物理分辨率为 $pd * T/MD$ 。

消失点法的影响因素主要还有特征点个数以及求解 P 的优化算法,但难以量化衡量它们对最后精度的影响,理论上其与查找表法接近。

立体标定法的影响因素主要有投影矩阵、旋转矩阵和平移矩阵的估计。假设每个摄像头标定结果的重投影误差分别为 $[T_x^1 \ T_y^1], [T_x^2 \ T_y^2], [T_x^3 \ T_y^3], [T_x^4 \ T_y^4]$, T_x 表示水平投影误差, T_y 表示竖直投影误差。那么立体标定法中四路摄像头分组重构的结果将在一个以真实点为中心、宽 $2 * TH_x$ 、高 $2 * TH_y$ 的矩形内,其中 $TH_x = \max(T_x^1, T_x^2, T_x^3, T_x^4)$, $TH_y = \max(T_y^1, T_y^2, T_y^3, T_y^4)$ 。从而立体标定法的物理分辨率在水平方向为 $pd * TH_x$,在竖直方向为 $pd * TH_y$ 。

我们设计并实现了一个原型系统,交互区的尺寸与 17 寸显示器的显示区域相同,该装置能移植于任意同规格的显示

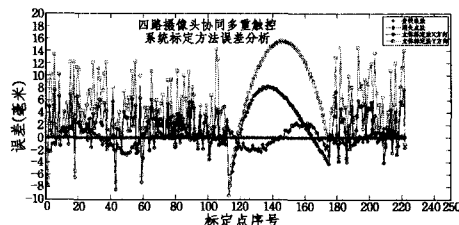
器前。应用程序建立在 VC6.0 平台上,首先基于 Directshow 技术实现四路摄像头图像的同步采集,然后基于 OPENCV 技术实现触点的检测和定位,运行效果如图 6 所示。



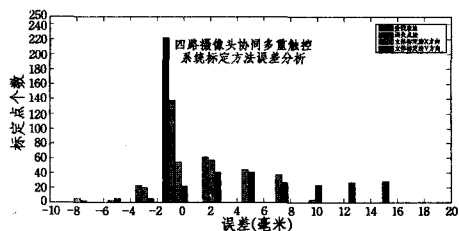
(a) 2 指定位效果 (b) 4 指定位效果

图6 多触点定位效果

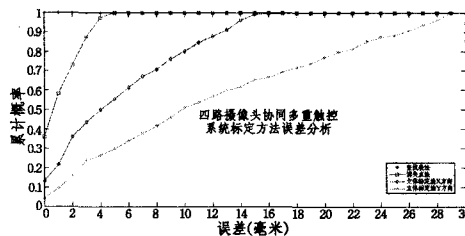
我们以查找表法为基准,对查找表法中采集的标定点(绕矩形交互区一圈以 5mm 的间隔取了 225 个标定点),分别用消失点法和立体标定法进行定位,由于标定点都在矩形交互区边上,各自的一维坐标都是固定的(为 0,交互区长度或宽度),因此消失点法在定位计算中可将该维的误差控制为 0,我们统计每个标定点变化维的误差,实验结果如图 7 所示。



(a) 误差分布图



(b) 误差直方图



(c) 误差累计分布图

图7 标定方法误差分析

从图 7 中可看出,消失点法与查找表法(对标定点来说,查找表法的误差为 0)的误差很小,基本都在 2mm 以内,而立体标定法误差较大,且不集中,在 3~25mm 内大致呈均匀分布的。

实验结果表明,查找表法原理最简单,最容易实现,而且精度高,但是需要选取较多的标定点,标定过程较繁杂;消失点法不需要查找表法那么多的标定点,且取点更灵活,在同样的标定点数目时其精度与查找表法相当;立体标定法是最快速、最方便的方法,但是由于在红外光下拍摄标定模板,所得图像中角点较难精确提取和匹配,而且需要在装配前进行标定,无法避免安装过程带来的误差,因此精度较低。所以查找表法适用于较小尺寸平台,消失点法适用于大尺寸平台,立体

(下转第 263 页)

杂度均不变,表明加密算法和水印算法没有改变工程图的实体个数以及实体类型;加密和嵌入水印后约束复杂度的增加,则表明经过加密或嵌入水印后实体间的约束减少;加密后的二维 CAD 工程图与原始二维 CAD 工程图的特征复杂度一致表明加密算法没有改变二维 CAD 工程图的分层特征,这与文献[4]中算法的原理是一致的,而嵌入水印后二维 CAD 工程图的特征复杂度大大增加,这是因为文献[5]中的水印嵌入方法是通过修改实体线型来嵌入水印,从而导致特征复杂度的大大增加。因此,可以通过分析加密后或嵌入水印后二维 CAD 工程图复杂度的变化程度来衡量加密算法或水印算法的性能。

表 3 复杂度计算结果列表

二维 CAD 工程图类型	实体数	实体复杂度	约束复杂度	特征复杂度
原始二维 CAD 工程图	528	825.5	0.2064	2.6515E-2
加密后的二维 CAD 工程图	528	825.5	0.2468	2.6515E-2
加水印后的二维 CAD 工程图	528	825.5	0.2374	19.6970E-2

由以上分析可知,实体复杂度 C_E 实际上是从图形的组成要素出发对二维 CAD 工程图的复杂度进行度量,图形的组成实体越多,其实体复杂度越高,同时,图形中包含高复杂指数的实体越多,其实体复杂度也越高。另外,约束复杂度 C_F 描述了组成图形的各实体的几何约束关系,这种约束关系对实体参数的取值有直接的影响。因此这与文献[2]中“描述给定图案形状所需的、独立的不相关参数越多,每个参数可能采取的状态越多,该图形就越复杂;反之,就越简单。”的论断是一致的。而特征复杂度 C_C 的引入则进一步描述了二维 CAD

工程图规范程度。

结束语 本文从实体复杂度、约束复杂度以及分层特征复杂度 3 个方面定量分析和描述了二维 CAD 工程图的复杂性度量方法,并给出了上述 3 种复杂度的计算方法。分析与讨论表明上述 3 种复杂度能对二维 CAD 工程图的复杂度进行有效的度量,同时可通过分析加密后的二维 CAD 工程图的复杂度的变化程度,来评测加密算法以及水印算法的性能。但这 3 种复杂度之间的关系、3 种复杂度与二维 CAD 工程图总体复杂度之间的关系及其在二维 CAD 工程图内容安全中的进一步应用还有待深入研究。

参考文献

- [1] 郭云彪,尤新刚,张春田,等. 面向信息隐藏的图像复杂度研究[J]. 电子学报,2006,34(6):1048-1052
- [2] 段先云,邓学雄,左启阳. 级进模刃孔图形复杂度的研究[J]. 工程图学学报,2006,5:94-97
- [3] 余英林. 数字图像处理与模式识别[M]. 广州:华南理工大学出版社,1990:186-207
- [4] Li Shuai-jun, Peng Fei. An Encryption Algorithm for 2D Engineering Graphics' Content Based on Chaos Systems[C]//Proc of 9th International Conference for Young Computer Scientists (ICYCS2008). Zhangjiajie, 2008:1435-1439
- [5] Fei Peng, Guo Re-si, Li C T, et al. A Semi-fragile Watermarking Algorithm for Authenticating 2D CAD Engineering Graphics Based on Log-Polar Transformation[J]. Computer-Aided Design, 2010,42(12):1207-1216
- (上接第 256 页)
- 标定法精度有待提高,但是如果有一种标定模板能在红外场景下精确提取和匹配角点,立体标定法也不失为一种好方法。
- 结束语** 本文研究了四路摄像头协同多重触控系统标定问题,提出了 3 种构建触点方向直线的方法,即查找表法、消失点法和立体标定法,以解决多触点精确定位问题。查找表法通过在交互区边框上设定标定点,并通过插值查找触点对应的标定点,以光心和标定点构建触点方向直线;消失点法利用触点方向上的消失点和光心构建触点方向直线;立体标定法利用极限几何约束和反投影射线构建触点方向直线。然后对每个触点目标从每路摄像头中选择方向直线,如果 4 条方向直线相交则为真实触点,否则视为伪点予以过滤,从而解决了多触点遮挡问题。并且对 3 种方法进行了误差分析,结果表明在较小尺寸平台用查找表法标定最合适,而在大尺寸平台用消失点法最合适,而立体标定法精度有待提高。
- 下一步我们还将对四路摄像头协同多重触控系统各个环节进行改进,如多触点跟踪^[7],通过对视频序列上的多触点目标建立关联,确定触点的运动轨迹,以及定义与识别基于触点运动轨迹的多重触控手势^[8]等等,以提高系统的鲁棒性。另外还将进一步探索多重触控系统的应用模式,如大尺寸平台多用户基于协同手势的交互^[9]、3D 物体的操作^[10]、与其它交互设备的融合等等。
- 参考文献**
- [1] Bill B. Multi-touch systems that I have known and loved [OL]. <http://www.billbuxton.com/multitouchOverview.html>, 2008-12-20
- [2] 王德鑫,张茂军,熊志辉,等. 四路摄像头协同的多重触控系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(10):1507-1512
- [3] 吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京:科学出版社,2008
- [4] 何援军. 图形变换的几何化表示[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(4):723-728
- [5] Torr P H S. A structure and motion toolkit in matlab[R]. Cambridge:Microsoft Research,2002
- [6] Camera Calibration Toolbox for Matlab [OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html, 2008-12-20
- [7] Khurram S, Mubarak S. A Non-iterative Greedy Algorithm for Multi-frame Point Correspondence [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005,27(1):51-65
- [8] Wu M, Shen C, Ryall K, et al. Gesture registration, relaxation, and reuse for multi-point direct-touch surfaces[C]//Proceedings of The First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-computer Systems. Adelaide, 2006:183-190
- [9] Morris M R, Huang A, Paepcke A, et al. Cooperative Gestures: Multi-user Gestural Interactions for Collocated Groupware[C]//Proceedings of CHI 2006. ACM Press, 2002:1201-1210
- [10] Frank S, Klaus H, Johannes S, et al. Multi-touching 3 D Data: Towards Direct Interaction in Stereoscopic Display Environments Coupled with Mobile Devices[C]//Proceedings of PPD 2008: Workshop on Designing Multi-touch Interaction Techniques for Coupled Public and Private Displays, as part of AVI 2008. Naples, Italy, May 2008:46-49