

移动机器人双目立体视觉测量系统研究

叶锦华, 吴海彬, 陈天炎

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350002)

摘要: 研究了一种用于移动机器人进行三维感知的被动双目立体视觉测量系统。首先建立了该系统的数学模型, 然后针对其双通道图像同时采集和大数据量快速处理的需要, 采用了基于多媒体 DSP 芯片 DM642 硬件系统构架, 并应用了一种基于 SUSAN 角点特征的区域匹配算法。实验表明该系统测量速度快、精度高。

关键词: 移动机器人; 双目立体视觉测量; 立体匹配; TMS320DM642

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8829(2008)09-0015-03

Research on Mobile Robot Binocular Stereo Vision Measuring System

YE Jin-hua, WU Hai-bin, CHEN Tian-yan

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: A passive binocular vision measuring system for 3D-perception of mobile robot is studied. At first, the mathematical model is built, then for its simultaneous acquisition of dual-channel image data and rapid processing with large quantity of data, a hardware system based on multimedia DSP chip of DM642 is used, and an algorithm based on regional matching of SUSAN corner features is introduced. Experiments show that the system has rapid measuring speed and high accuracy.

Key words: mobile robot; binocular stereo vision measuring system; stereo matching; TMS320DM642

当前机器人正向新一代智能机器人方向发展, 而机器人智能感知系统是机器人智能化的一个重要方面, 移动机器人应用视觉传感器来进行视觉导航与定位、目标识别和地图构造等将大大提高移动机器人的智能和自主控制能力。移动机器人要实现其全自主规划, 首先要解决的就是其周边运动空间环境地图信息的恢复, 借助于视觉测量可以获取周围环境的三维坐标, 这些坐标包含恢复移动机器人运动空间环境地图的关键信息。

双目立体视觉是模仿具有双眼的生物视觉系统^[1], 生物的双眼在观察物体时, 可感觉到物体的大小及与远近关系。双目立体视觉测量是通过分析由具备一定几何关系的两摄像机同时拍摄两幅图像来获取物体三维几何信息的方法。双目立体视觉测量是一种视觉被动测量方式, 与视觉主动测量方式不同, 它不需要借助外部具备特定纹理特征的结构光投影于待测物体上, 因此, 其系统结构更为简单且测量范围大、效率高, 同时, 随着硬件处理器性能的大幅度提高和视觉处理算法的不断优化, 双目立体视觉测量的硬件瓶颈不复存在, 测量精度也大为提高, 使得双目立体视觉测量成为目前最为常见的视觉测量方法。

本研究围绕移动机器人双目立体视觉测量系统要解决的系统硬件、数学模型、实时立体视觉匹配算法及实现等关键问题展开研究, 并给出实验情况。

1 硬件系统总体设计

双目视觉测量系统硬件上需要完成双通道图像的采集、大

数据量存储和复杂算法的快速处理, 因此采用 TI 公司 2003 年推出的一款针对多媒体领域应用的 64 位定点 DSP 芯片 TMS320DM642^[2] 作为双目视觉测量系统的处理器, 该芯片基于 C64x 核心构架, 最高主频达 720 MHz, 具有丰富的外设及接口, 很好地满足本系统的应用要求。以该芯片为核心的双目视觉测量系统硬件方框图如图 1 所示。

双通道图像采集系统由两彩色 CCD 摄像机、视频解码器和 DM642 视频端口组成。图像采集系统通过 DM642 的 I²C 模块对两视频解码器进行初始化配置后, 便可以进行对 CCD 摄像机采集视频信号的解码, 解码后的标准视频流再通过 DM642 视频端口进行捕捉, 捕捉到的图像数据可以是一场或一帧, 并按 YUV 3 个分量分别存放于 DM642 视频模块的 FIFO 内, FIFO 缓冲区数据达到设定门限后, 将触发一次 DMA 传送事件, 将 FIFO 内图像数据传送到指定存储空间内。可通过对两视频端口设置不同的中断优先级来控制不同通道图像数据的采集与传送, 实现双通道图像的同时采集。

2 双目视觉测量系统数学模型

基于针孔成像模型的双目视觉系统的模型图如图 2 所示。图中主要坐标系有左右摄像机坐标系 $o_k x_k y_k z_k$ 和 $o_c x_c y_c z_c$, 像平面 α 的像素坐标系 $u_i o_i v_i$ 和物理坐标系 $X_i O_i Y_i$, 像平面 β 的像素坐标系 $u_o o_o v_o$ 和物理坐标系 $X_o O_o Y_o$ 。 P_i, P_o 分别为空间点 P_o 在像平面 α 和 β 上的像点。

为了提高双目立体视觉测量系统的可移植性, 选择左摄像机坐标系为空间点世界坐标系。根据理想透镜成像原理可知空间点 P_o 的摄像机坐标系下坐标与其成像点的物理坐标满足如下关系式

收稿日期: 2008-01-11

作者简介: 叶锦华(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事机器人技术等方面的研究工作。

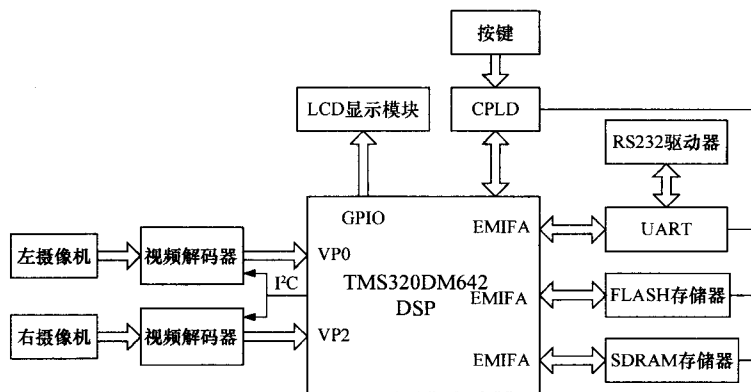


图1 双目视觉测量系统硬件方框图

$$s_l \begin{pmatrix} X_l \\ Y_l \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{lx} & 0 & 0 \\ 0 & f_{ly} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ z_{lc} \end{pmatrix} = P_l \begin{pmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ z_{lc} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$s_r \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & f_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{rc} \\ y_{rc} \\ z_{rc} \end{pmatrix} = P_r \begin{pmatrix} x_{rc} \\ y_{rc} \\ z_{rc} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, f_{lx} 、 f_{ly} 为左摄像机沿 x 和 y 方向的归一化焦距, f_{rx} 、 f_{ry} 为右摄像机沿 x 和 y 方向的归一化焦距。

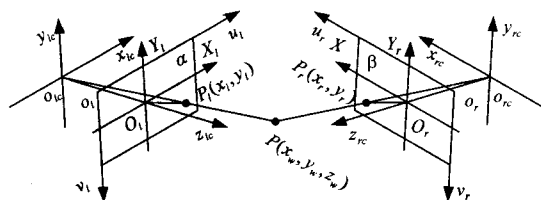


图2 双目视觉系统模型图

在左右摄像机坐标系下的空间点坐标可通过旋转和平移变换确定其相互关系, 设左右摄像机之间的空间旋转为 R , 平移关系矩阵 t , 令 $M_l = (R \ t)$, 则关系式的矩阵表达式为

$$\begin{pmatrix} x_{rc} \\ y_{rc} \\ z_{rc} \\ 1 \end{pmatrix} = M_l \begin{pmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ z_{lc} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ z_{lc} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

结合式(1), 式(2), 式(3)得到空间点 P_w 的三维坐标计算表达式为

$$\begin{cases} X_w = x_{lc} = \frac{z_{lc} X_l}{f_{lx}} \\ Y_w = y_{lc} = \frac{z_{lc} Y_l}{f_{ly}} \\ Z_w = z_{lc} = \frac{f_{lx}(f_{rx} T_x - x_r T_z)}{\{X_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + r_9 f_{lx}) - f_{rx}(r_1 X_l + r_2 Y_l + r_3 f_{lx})\}} \\ = \frac{f_{ly}(f_{rx} T_x - y_r T_z)}{\{Y_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + r_9 f_{lx}) - f_{ry}(r_4 X_l + r_5 Y_l + r_6 f_{ly})\}} \end{cases} \quad (4)$$

要应用式(4)首先要通过对摄像机进行标定来获取 P_l, P_r 矩阵中的左右摄像机内部参数和 M_l 矩阵中的左右摄像机外部参数, 本研究应用了张正友的标定方法^[3]。

3 实时双目立体视觉匹配方案

由式(4)可知对于标定后的双目立体视觉测量系统, 要实现对空间点三维坐标的测量, 关键就是找出空间点在左右图像匹配点的图像坐标, 立体匹配就是对空间点在左(右)图像上的像点寻找在右(左)图像的匹配点的过程, 立体匹配是立体视觉算法中最重要也是最困难的一步。

考虑到移动机器人双目视觉测量系统对实时性的要求以及系统硬件资源的限制, 本研究的双目立体视觉测量系统采用一种基于 SUSAN 角点特征的区域匹配方法, 该方法包

含图像预处理、SUSAN 角点检测、NCC 区域相关匹配、匹配点极线几何约束、左右一致性检验 5 个步骤, 整个匹配过程由粗到精。

3.1 图像预处理

由于 DM642 视频口捕捉到的彩色图片为 YUV422 格式, 因此需要对待匹配图像进行预处理以获得后续匹配工作所需的基于 RGB 格式的灰度图像。首先将 YUV422 格式转换为 YUV444 格式, 该转换可通过 Y 不变而 UV 进行隔行复制前行像素点来实现。然后再将 YUV444 格式转换为 RGB 格式, 转换公式为

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1.402 \\ 1 & -0.34414 & -0.71414 \\ 1 & 1.772 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y - 128 \\ U - 128 \\ V - 128 \end{pmatrix} \quad (5)$$

然后应用线性灰度变换来对图像进行灰度化, 线性灰度变换可使图像更为清晰且灰度层次分明, 线性灰度变换的方程为

$$g(x, y) = af(x, y) + b \quad (6)$$

其中, $f(x, y)$ 为输入图像灰度; $g(x, y)$ 为输出图像灰度, 调整系数 a 可改变图像的对比度, 调整系数 b 可以改变图像的亮度。

应用式(6)对彩色图片 RGB 各分量分别进行线性灰度变换, 最后灰度图像的灰度值取 3 个分量的均值。

3.2 SUSAN 角点检测

SUSAN 是 Smith 和 Brady 提出的一种图像处理方法。该算法是基于像素领域包含若干元素的近似圆形模板, 对每个像素基于该模板领域的图像灰度计算角点响应函数(CRF)的数值, 如果大于某一阈值且为局部极大值, 则认为该点为角点。SUSAN 算法具有算法简单、位置准确、抗噪声能力强等特点。

SUSAN 圆形模板内与模板中心点像素灰度值相近的区域称为 USAN 区域, 该区域包含了图像结构的重要信息, SUSAN 根据圆形模板处于物体不同位置时 USAN 区域面积的不同来考察当前像素点为区域内部点、边缘点或角点。USAN 区域面积的计算表达式为

$$c(\vec{r}, \vec{r}_0) = \exp\left(-\frac{I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)}{k}\right)^6 \quad (7)$$

$$n(\vec{r}_0) = \sum_{\vec{r}} c(\vec{r}, \vec{r}_0) \quad (8)$$

其中, \vec{r}_0, \vec{r} 分别表示圆形模板的中心像素和其他位置像素, $I(\vec{r})$ 为 \vec{r} 位置像素点灰度值, k 为预设门限阈值, 表示所能检测角点的最小对比度以及能忽略的噪声的最大容限, 为了能适应不同的对比度和噪声情况的图像, 对 k 采用自适应取值的方

法^[4],即

$$k = \frac{\omega}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{i\max} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{i\min}\right)} \quad (9)$$

其中, $I_{i\max}$ 、 $I_{i\min}$ ($i=1,2,3,\dots,n$) 分别表示图像中第 i 个灰度最大值和第 i 个灰度最小值, n 通常取 3~5, 比例系统 ω 通常取 0.15~0.30。

接着将求得的 USAN 区域面积与几何阈值 (通常取模板元素个数的一半) 进行比较得到角点响应函数值为

$$C_{NCC}(x,y,d) = \frac{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m \{ [I_i(x+i,y+j) - I_i(x,y)] \times [I_r(x+i,y+j+d) - I_r(x,y+d)] \}}{\sqrt{\sigma^2(I_i) \times \sigma^2(I_r)}} \quad (11)$$

其中,

$$\overline{I_i(x,y)} = \frac{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m I_i(x+i,y+j)}{(2n+1)(2m+1)} \quad (12)$$

$$\sigma(I_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m I_i^2(x,y)}{(2n+1)(2m+1)} - \overline{I_i(x,y)}} \quad (13)$$

NCC 则属于相似性度量^[5], 它能对立体图像的亮度差异进行补偿。NCC 算法本身的计算量较大, 是最为耗时的一步, 而本研究首先应用 SUSAN 分别对左右图像进行角点检测后, 再对数量并不大角点进行 NCC 匹配, 使得该算法实现上仍能保持较好的实时性。

应用 NCC 算法是为了获得较为粗略的匹配集, 因此, 对匹配阈值应选择较小的数值。

3.4 极线几何约束

应用 NCC 算法对左右两图像 SUSAN 角点匹配后, 将得到部分为一对一和部分为一对多的匹配点, 构成粗匹配集, 为了进一步进行精确匹配以获得精确匹配集, 引入了双目立体视觉极线几何约束。

极线几何描述了两个任意摄像机之间的相对位置和方向, 因此, 极线几何约束着左右图像匹配点的所在的位置范围, 令左右图像成像点坐标为 m_l 和 m_r , 则对应匹配点应满足如下关系式

$$m_r^T F m_l = 0 \quad (14)$$

其中, F 为外极线约束基本矩阵, 应用 RANSAC (random sample consensus) 法^[6]来求解该矩阵。

实际应用中, 待约束的匹配点往往不只约束在极线上, 而是约束在距极线一定距离的极线带上。

3.5 左右一致性检验

经过极线几何约束后, 可去除粗匹配集内部分一对一的伪匹配点, 同时大部分一对多的匹配点取得一对一的匹配, 对少数仍为一对多的匹配点按照不符合惟一性约束准则进行舍去处理。为了进一步清除由于噪声、弱纹理、遮挡等因素引起的误匹配点, 对精匹配集进行左右一致性校验。

左右一致性校验简单地说就是以左图的基准图, 在右图上搜索得到匹配点, 其在右图上得到的匹配点的在左图的匹配点应该与左图的参考点保持一致。具体实施时, 为了避免增加 1 倍的计算量, 对匹配代价 (NCC 值) 只计算一次, 在左右一致性

$$R(\vec{r}_0) = \begin{cases} g - n(\vec{r}_0) & n(\vec{r}_0) < g \\ 0 & n(\vec{r}_0) \geq g \end{cases} \quad (10)$$

最后搜索初始角点相应中的局部最大值, 将其对应的像素点标记为角点。此外, 为了进一步去除虚假角点, 采用了重心判别法, 即首先计算出检测角点对应的 USAN 区域重心, 然后计算重心和模板中心的距离, 如果距离较小则为虚假角点。

3.3 NCC 区域相关匹配

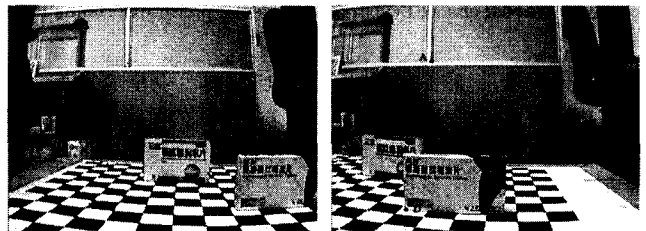
本研究应用归一化交叉相关 NCC 来计算匹配代价, 计算表达式为

检验时, 不需要再重新计算原始匹配代价, 这样可消除大量的重复计算, 加快程序运行速度, 提高系统实时性。

4 实验

本研究在离线条件下完成对双目视觉系统左右摄像机内外参数的标定以及极线约束基本矩阵 F 的求解, 并在专用于 TI 公司系列 DSP 的集成开发环境 CCS (code composer studio) 中, 应用 C 语言完成双目视觉系统程序的开发, 相关实验数据通过硬件仿真 (ICE) 来获取。

图像大小为 640×480 , 最后匹配结果如图 3 所示。



(a) 左摄像机图像

(b) 右摄像机匹配图

图 3 匹配算法匹配结果图

左图取得 SUSAN 角点 356 个, 右图取得 SUSAN 角点 286 个, 整个匹配过程累计处理时间为 0.583 s, 正确匹配率为: 85.2%, 不可靠匹配率为: 10.6%, 错误匹配率为: 4.2%。

表 1 所示为图中标识的 4 对匹配对的图像坐标及应用式 (4) 计算得到的空间 3 维坐标。

表 1 匹配坐标数据

匹配点	匹配对物理坐标		对应空间点三维坐标
	左图	右图	
A	(-81.00, -93.96)	(-118.44, -85.34)	(-291.49, -390.90, 2554.76)
B	(-234.00, 48.04)	(-276.44, 59.66)	(-894.40, 194.37, 2484.67)
C	(-12.00, -60.04)	(-230.44, -71.66)	(-1.48, 44.98, 460.06)
D	(-142.00, 210.04)	(-171.44, 227.66)	(77.54, 108.58, 317.44)

应用空间点距离计算公式计算空间点 AB、CD 之间的距离分别为 843.34 mm 和 174.28 mm, 实际测量空间线段 AB、CD 的距离分别为 855 mm 和 172 mm。通过多组实验数据统计发现本研究的双目视觉测量系统随着测量点距离摄像机越远误差越大, 且在 3 m 范围内的测量误差不超过 24 mm, 较好满足移动机器人双目立体视觉测量的精度要求。

(下转第 21 页)

(3) 当被测源混沌信号幅度大于参考源时,这种情况一般在实际测量中可能性较大。

图 5 中(b)图为仿真所产生的被测源混沌信号,此时得到

的 Lyapunov 指数值中有 $\lambda_1 = 0.010877 > 0$ 。图 5 中(c)图为仿真所产生的参考源混沌信号,此时得到的 Lyapunov 指数值中有 $\lambda_1 = 0.007914 > 0$ 。相应的功率谱估计如图 5 所示。

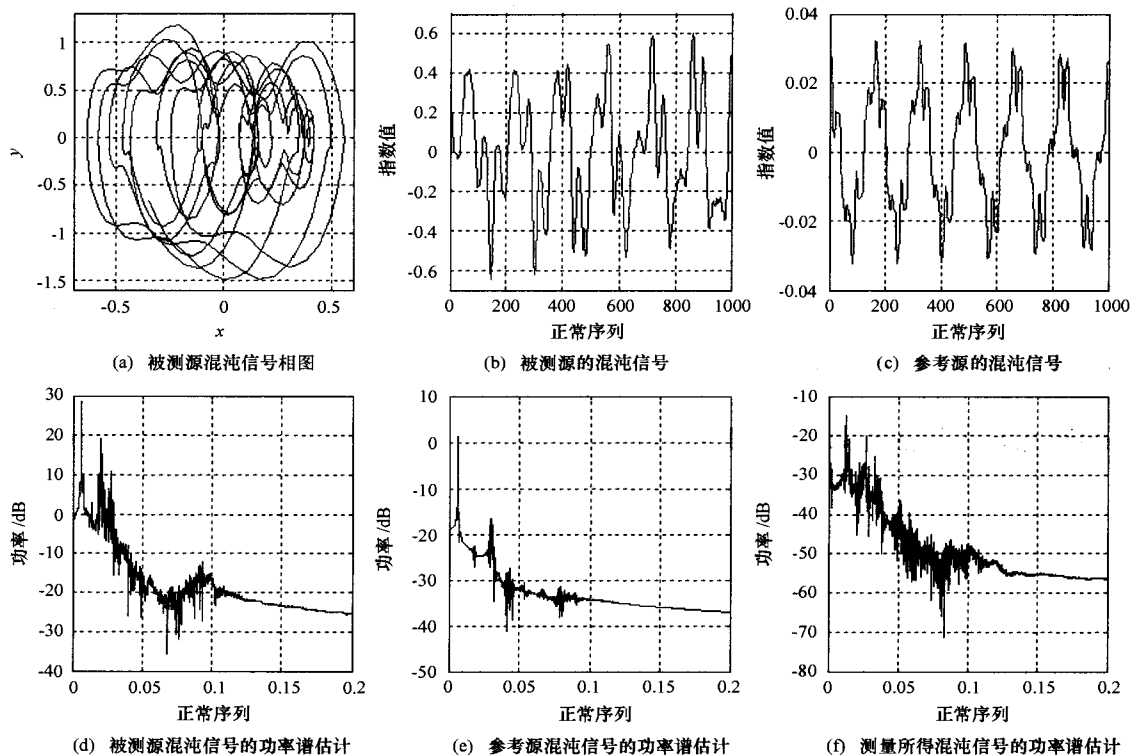


图 5 情况(3)时,被测源和参考源产生的混沌信号及其功率谱估计

3 结束语

通过分别对比图 3,图 4,图 5 中的(d)图和(f)图,可以发现,采用鉴相法测量的结果由于源的弱混沌信号的影响,当被测源混沌信号幅度小于参考源混沌信号幅度时,测得的功率谱与被测信号实际混沌信号的功率谱大小相当,当被测源混沌信号幅度大于或与参考源混沌信号幅度相当时,测得的功率谱比被测信号实际混沌信号的功率谱要小。也就是说,采用鉴相法测量相位噪声时,确实存在测得的相位噪声比实际使用时振荡器的相位噪声要好一些的问题。

因此可以考虑改进相位噪声的测量方法,使得参考源产生的混沌信号不影响被测源相位噪声的测量。方法之一就是不使用参考源,直接对被测源的输出采用相关运算来得到其相位噪声,理论上,这种方法可以很准确地测量出被测源的相位噪声。当然研究振荡器产生混沌的机理及模型,由此设计出稳定度更高的振荡器,使产生的混沌信号尽可能小。或将混沌的控制引入振荡器的设计,使振荡器的输出中,尽可能减小其中的混沌分量,从而进一步提高振荡器的稳定度也都是非常有实际意义的研究方向。

参考文献:

- [1] 白居宪. 低噪声频率合成[M]. 西安:西安交通大学出版社,1995.
- [2] 刘曾荣. 混沌的微扰判据[M]. 上海:上海科技教育出版社,1994.
- [3] Wolf A, Swift J B, et al. Determining lyapunov exponents from a time series[J]. Physica D,1985, (16):285-317.

(上接第 17 页)

5 结束语

本研究首先建立移动机器人双目立体视觉测量系统的数学模型,并根据系统功能需要构架了基于多媒体 DSP 处理器 DM642 的硬件系统,同时针对系统处理能力和硬件资源的有限性,其实时立体匹配算法采用了一种基于 SUSAN 角点特征的区域匹配算法,实验表明该系统测量速度快、精度高,较好地满足移动机器人进行三维感知的需要,具备较高的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 刘传才. 图像理解与机器视觉[M]. 厦门:厦门大学出版社,2002.
- [2] TMS320DM642 Video/Imaging Fixed-Point Digital Signal Processor Data Manual[Z]. Texas Instruments Inc.,2003.
- [3] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(11):1330-1334.
- [4] 席志红,刘利彬,许新利. SUSAN 角点检测算法改进[J]. 应用科技,2006,33(9):29-31,36.
- [5] Faugeras O, Hotz B, Mathieu H, et al. Real-time correlation-based stereo: algorithm implementations and applications[R]. INRIA Technical Report #2013,1993-08.
- [6] Fischler M A and Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM,1981,24(6):381-395.

□

□