

运用视频技术的快速三维旋转分析与计算的研究

祝晓东^{1,2} 郁松年¹

(上海大学计算机工程与科学学院 上海 200072)¹ (浙江万里学院智能控制研究所 宁波 315100)²

摘要 着重讨论了基于光流场的旋转运动矢量的估计方法,它是一种非接触式的运动测量技术,对特殊的场合具有很重要的应用价值。研究中运用的是光流场特征法,即首先建立刚体运动方程,然后根据特征点对坐标,采用两步迭代交替法计算出运动方程参数,进而计算出测量对象的旋转矢量。为了提高运算的速度,对投影平面上的位移矢量测量采用了基于灰度编码的位平面的块匹配算法,该算法中以简单的逻辑异或运算来完成两帧中的特征块匹配搜索,以降低运算复杂度。最后通过一组实验验证了测量结果是比较准确的。

关键词 视频,运动模型,光流场,角速度,位平面图像,块匹配算法

中图分类号 TP306+.2 **文献标识码** A

Research on Fast 3-D Rotation Calculation Based on Video Techniques

ZHU Xiao-dong^{1,2} YU Song-nian¹

(Department of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China)¹

(Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China)²

Abstract This paper discussed the calculation method of rotation based on optical flow. Which is a non-touch measuring technique, and has important value in some special occasions. It is to set up rigid motion equations by optical flow character, and then using two-step iterative method to estimate motion equation and calculate rotation speed for each coordinate axis. In order to improve the computing speed, the matching algorithm based on gray-coded bit plane block is adopted in the measurement for displacement vector on the projection plane. The calculation is less complex because two characteristics blocks searching is done with simple logical XOR. The experiment results show the calculation is accurate.

Keywords Video, Motion model, Optical flow, Angular velocity, Bit-plane image, Block matching algorithm

1 引言

从动态图像或时变图像序列确定 3D 物体结构及运动矢量是目前计算机视觉研究的热点问题。视觉分析主要有基于特征(Feature)方法和基于光流场(Optical Flow)方法^[1]。基于特征方法也被作为离散处理方法,该方法的思想就是从相邻的两帧或数帧中提取角点、直线或曲线的特征,建立空间特征对应关系,并根据这些对应关系计算出 3D 物体的结构和运动;基于光流场的方法被称为是连续处理方法。基于视频的运动分析及估计主要是测量三维物体在投影平面上的坐标变化,分析运动物体的结构,估计运动物体的运动参数。刚性物体在三维空间的运动中可以分解为围绕通过原点的一个轴的旋转和平移,在三维空间中,物体的旋转可以用一个 3×3 的矩阵 R 来描述,平移可以用一个 3×1 的列向量 T 来描述。 R 和 T 是描述刚性物体在三维空间运动的重要参数,即需要 12 个参数来描述刚性物体的三维运动。转速测量传统上都是采用在测量对象上安装旋转编码器等测量设备^[2]的测量方

法。基于计算机视觉的图像测量技术成为近年来在测量领域中形成的新的测量技术。例如英国剑桥的 Stephen Warr, George T. H. Jacques 等早在 1994 年就在他们的研究中开始应用高速摄像机对颗粒流系统进行采样,然后应用计算机对图像进行分析,运用 Hough 变换等技术检测对象的位置和角度变化,再结合模式识别技术进一步提高精度。近些年国内对基于视频的测量也逐渐展开,当前利用视频技术进行运动测量分析的应用基本都是针对位移的跟踪和测量,而基于视频技术的旋转的测量应用很少见到报道。近期只有彭可和彭年香^[2,3]等工作涉及到这方面的研究,即测量出物体上辅助标志在转动状态下相邻两帧旋转矢量之间的夹角,然后计算出平均转速。但是他们的研究只是用于对运动对象进行理想假设的特殊情况,即假设旋转方向固定,例如风扇、车辆和电机等,虽然测量精度比较满意,但应用的场合受到限制,因为,现实世界中旋转物体的旋转方向往往都是动态变化的,包括各个轴方向的旋转。本文的研究目标就是要设法解决这种复杂旋转情况下的旋转矢量的估计问题,并且通过基于灰度编

到稿日期:2012-03-11 返修日期:2012-06-19 本文受国家自然科学基金项目(60873129),浙江省教育厅项目(Y201121927),上海市重点学科项目(J50103)资助。

祝晓东(1966-),男,博士,主要研究方向为图像检索、视频图像处理等,E-mail:zxdsanghai@shu.edu.cn;郁松年(1949-),男,教授,主要研究方向为海量信息检索、组合算法等。

码的位平面的块匹配技术降低运算的复杂度,提高测量的实时性,使这种测量技术能够有更高的应用价值。

2 固定旋转方向的角速度测量

2.1 固定旋转方向的旋转物体视频采样

设世界坐标和摄像机坐标原点重合,世界坐标 $O-XYZ$ 中的 X 轴和 Y 轴方向与摄像机坐标 $O-xy$ 中的 x 轴和 y 轴方向重合。不妨设物体的固定旋转轴为 Z 轴。使用高速摄像机对中低速旋转对象进行视频采样,提取出相邻两帧图像,如图 1 所示。

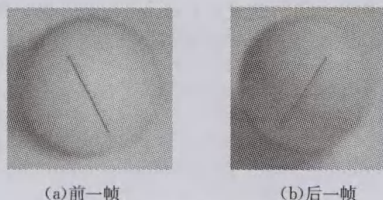


图 1 相邻两帧图像示意

当具有光学特性的物体在三维空间运动时,在图像平面上就形成了相应的图像运动场,也称为图像速度场,即光流场对应运动场^[1]。但也存在特殊的情况,如对于一个非常均匀的球体,在设定的光源照射下,尽管它在旋转,但灰度模式不随表面运动而变化,所以图像也就没有任何变化,此时光流在任何位置都是零,尽管此时运动场并不等于零。这种情况下就不能通过对光流的计算来分析物体的运动,为了解决这问题,研究中常常对球体标志一条黑线或一个点作为特征标志^[2,3]。

2.2 边缘检测跟踪

由于直线的提取和匹配比像素更加准确和容易,且具有更高的抽象层次,因此可以通过对直线跟踪进行重建结构和运动估计。常用的直线检测方法有 Hough 变换和 Radon 变换,下面分别介绍。

2.2.1 Hough 变换

Hough 变换是由 Paul Hough 于 1962 年提出的,并在美国作为专利被发表。它所实现的是一种从图像空间到参数空间的映射关系。其广泛应用于图像处理中各种曲线以及特殊形状的测量,尤其是检测图像中的直线的有效手段。其主要思想是进行坐标系统的变换,将原图中的直线变换成参考坐标中的一个点,将检测转换为简单的计算。原理如图 2 所示。

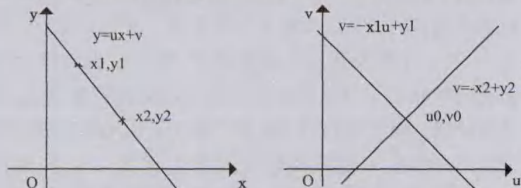


图 2 Hough 变换原理

坐标平面 $O-xy$ 中的任意一条直线都可以表示为:

$$y=ux+v \quad (1)$$

$$v=-xu+y \quad (2)$$

方程中的变量 u, v 是对应直线的斜率和截距。任何一条确定的直线 $y=ux+v$ 有且仅有一对对应的参数 (u, v) 。同理,对应任何一点参数 (u, v) 也只能有唯一确定的一条直线。以这种变换关系,原图 $O-xy$ 中的每一个点的坐标 (x_i, y_i) 都

将影射到变换域 $O-uv$ 中确定的一条直线。可以想象, $O-xy$ 坐标系中一条直线上的所有点将映射成 $O-uv$ 坐标系的多条直线。通过确定这些直线的交点坐标 (u_0, v_0) , 就可以确定 $O-XY$ 坐标系统中对应直线的斜率和截距。但是这种 $y=u * x+v$ 形式的直线方程不能有效地表示与 X 轴垂直的直线(例如 $x=a, a$ 是常数这种情况)。为解决该问题, Duda 和 Hart 两位学者对 Hough 变换进行了适当变形,采用法线式方程表示,也就是直线的极坐标表示形式:

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (3)$$

式中, θ 表示直线法线与 x 轴的夹角, ρ 指代坐标原点到直线的距离^[5,6]。

将图 1 所示的相邻两帧静态图像进行去噪和边缘检测等预处理,得到的检测结果如图 3 所示。



图 1(a)的边缘检测结果 图 1(b)的边缘检测结果

图 3 边缘检测结果

对预处理过的图像再进行细化处理和 Hough 变换,在对应的参数空间把所有的特征点的轨迹描绘出来以后,建立对应的二维数组计数器,当有点落在对应位置,就将相应的计数器加 1,全部变换结束后,即所有计数器完成计数,找出二维数组中的最大元素,即聚类的峰值。对上面两个图的变换可以得到两点坐标分别对应的直线模型的参数为 (θ_1, ρ_1) 和 (θ_2, ρ_2) ^[5]。

2.2.2 Radon 变换

Radon 是另外一种边缘检测方法。在图像处理过程中,二维情况下 Radon 变换的大致过程是:一个平面内沿不同角度的直线(直线与原点的距离为 d , 方向角为 α)对 $f(x, y)$ 做线积分,得到的像 $F(d, \alpha)$ 就是函数 $f(x, y)$ 的 Radon 变换。也就是说,平面 (d, α) 的每个点的像函数值对应了原始函数的某个线积分值。一个最简单而直接的应用就是用其来检测图像中的直线成分,很显然,任何直线都会导致 Radon 像在该直线对应 (d, α) 处的极值。

例如,函数 $f(x, y)$ 在垂直方向线性积分就是 $f(x, y)$ 在 x 轴上的投影,在水平方向的线性积分就是在 y 轴上的投影。变换的原理如图 4 所示。

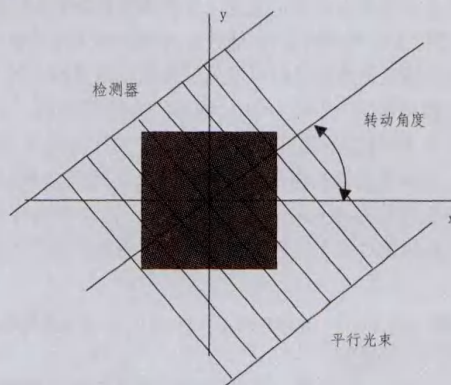


图 4 Radon 变换的基本原理

图像函数 $f(x, y)$ 在任意一个角度 θ 的 Radon 变换公式为:

$$R_{\theta}(x') = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x' \cos\theta - y' \sin\theta, x' \sin\theta + y' \cos\theta) dy' \quad (4)$$

此时相当于摄像机绕 Z 轴旋转角度 θ , (x', y') 是在旋转过角度 θ 的新坐标系中与原坐标系中 (x, y) 对应的点。对应的关系如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

当这个角度 θ 很小时,有以下近似关系:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & -\theta_z \\ \theta_z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (6)$$

二维图形的 Radon 变换,就是沿着各个直线方向对图像 $f(x, y)$ 进行积分,然后将变换值在变换坐标系 $O\theta x'$ 上显示为一个图像。可以理解,当积分直线方向正好与原来图像中的某条直线方向一致时,就会产生一个积分峰值,这个点的坐标 θ 就对应原图像中的直线的法线角度。

利用这种原理,将图 3 中的两幅图像从 $0 \sim 180$ (间隔 1 度) 的变换角度分别进行 Radon 变换,然后把变换结果显示在一个图像上,实验结果如图 5 所示。从实验结果中可以清晰地看到两个亮点,这两个亮点就是对应的峰值,这两个峰值对应的变换角度是 θ_1 和 θ_2 。

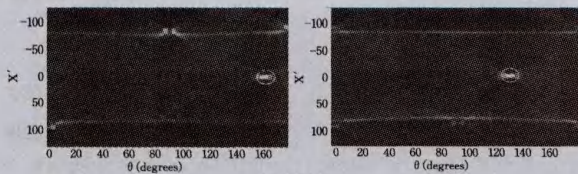


图 5 Radon 变换结果

2.3 旋转速度的计算过程

本研究中对进行过去噪预处理的图像再执行 Hough 变换或 Radon 变换,跟踪角度的变化。整个求 θ 值的过程如图 6 所示。可以分别求得两个图像中直线的 θ_1 和 θ_2 , 被测对象二帧之间旋转角度 $\theta = \theta_2 - \theta_1$ 。值 θ 就是在确定的时间间隔 Δt , 被测对象的旋转角度^[6,7]。根据这个对象在两帧之间的旋转角度,很容易换算出对象的旋转角速度^[7,8]。

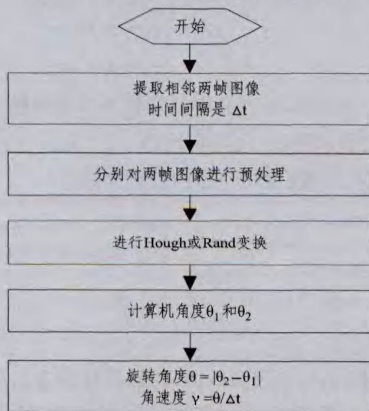


图 6 直线角度变化测量流程

$$\gamma = \theta / \Delta t = \theta / (1/a)$$

(7)

γ : 角速度;

θ : 两帧之间的角度差;

Δt : 两帧之间的间隔时间;

a : 高速摄像机每秒的帧数;

b : 测试对象旋转速度(周/秒)。

旋转速度和测得的两帧之间的角度有明确的线性关系。任意一个检测得到的 θ 都对应该唯一的角速度 γ 。根据这个 γ , 当然也很容易换算得到被测对象相应的旋转速度 b (周/秒)。

3 旋转方向动态变化的角速度测量

现实世界中绝大多数运动物体的旋转方向在运动过程中是变化的,例如拐弯时车轮的转动、乒乓球运动员拉出的“弧圈球”等。如果利用上述 Hough 变换或 Radon 变换对标志直线进行测量,只能求得垂直于投影平面的旋转分量,这显然只能得到绕 Z 轴的旋转分量,不能真正获得运动对象的旋转矢量。为解决这类问题,本研究中采用基于特征法进行运动估计,根据被测量对象的若干对特征点在 OXY 投影的坐标,建立刚体空间三维运动的模型,通过迭代估算法,估计出运动模型的运动参数,求出旋转矢量,也就求出了运动对象相对于各个轴的旋转分量,这样可以有效解决前述测量方法的有限性。

3.1 刚体三维运动旋转矢量估计

运用基于特征 (Feature) 方法,就必须获得若干特征点对的坐标来建立空间对应关系,对运动物体进行运动估算。为了测量方便,对被测量对象做几个明显特征点标识。再通过高速摄像机提取相邻两帧(如果连续两帧中有一帧或两帧图像中都没有标志,就忽略这两帧,直到连续两帧图像中都出现标志)。

本研究中假设景深比较大,摄影系统采用的是正射投影,并行光照射在测量物体上,垂直投影在焦平面上,这样空间坐标和投影坐标有如下对应关系:

$$\begin{cases} X=x \\ Y=y \end{cases} \quad (8)$$

在这样的假设条件下,可以使计算简单化,公式中的 x, y 是投影坐标, X, Y 是原坐标^[3]。

本研究中的对象主要是刚体运动(物体在运动过程中形状不发生改变的称为刚体运动)。与此相对应的是柔性运动,柔体在运动中物体的形状会发生形变,例如人的运动等,所以柔性运动模型也非常复杂,目前还没有很成熟的算法。

三维空间中运动的物体,其运动可以分解成平移和绕原点的旋转。不妨设运动物体上的某个特征点 p 在时刻 t_1 的空间三维坐标是 $p(x, y, z)$, 在时刻 t_2 的空间三维坐标是 $p(x', y', z')$, 两个时刻所对应的坐标关系是:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + T \quad (9)$$

式中, R 是旋转矩阵, T 为移动向量, $T = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$, 其中 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别表示物体在 3 个轴方向的移动距离。假设当物体移动速度较慢,而且景深较大的时候,可以忽略移动向量,此时对转速的测量结果影响不是很大,这样式(9)可以简

化为:

$$[x', y', z']^T = R[x, y, z]^T \quad (10)$$

式中, 旋转矩阵 R 由 3 个轴间旋转矩阵 R_x, R_y, R_z 组成, 运动物体绕原点中心旋转时的旋转矩阵展开为^[5,6]:

$$R = R_x R_y R_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

这个旋转为一个正交矩阵, 在高速摄像机速度足够快、物体的旋转角速度相对比较慢, 而且对测量精度要求不是很高的情况下, 由于对应两帧之间的转动角度 θ_x, θ_y 和 θ_z 都很小, 因此可以采样近似的对应关系:

$$\begin{cases} \sin\theta \approx \theta \\ \cos\theta \approx 1 \end{cases} \quad (12)$$

这样, 旋转矩阵 R 可以被简化为:

$$R = R_x R_y R_z = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & 1 & -\theta_x \\ -\theta_y & \theta_x & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

不妨假设某特征点在图像 t_1 时刻的坐标是 $P_1(x_1, y_1)$, 在 t_2 时刻的坐标是 $P_2(x_2, y_2)$ 。根据式(9), 在正射投影下的对应关系是:

$$\begin{cases} x = X \\ y = Y \end{cases}, \begin{cases} x' = X' \\ y' = Y' \end{cases} \quad (14)$$

现在将式(14)代入式(10)可以得到:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - \theta_z y + \theta_y Z \\ \theta_z x + y - \theta_x Z \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, Z 表示结构参数, θ_x, θ_y 和 θ_z 为相对于 3 个轴的旋转角度。每对特征点都包含这样 4 个运动参数, 可以根据给定的 N 对特征点对坐标, 使用迭代法估计出运动参数和结构参数。计算方法如下:

1) 对于已知的 N 对特征点坐标 $x_i = (x_i, y_i)$ 和 $x_i' = (x_i', y_i')$, 其中 $i = 1, 2, \dots, N$, 对应于这些特征点坐标, 由式(15)可得:

$$\begin{bmatrix} x_i' - x_i \\ y_i' - y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - \theta_z y_i + \theta_y Z_i \\ \theta_z x_i + 0 - \theta_x Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_i & -y_i \\ -Z_i & 0 & x_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

2) 根据 N 对特征点可以列出 $2N$ 个关于运动参数的方程, 然后使用最小二乘法就可以求得运动参数。

再将计算出的运动参数代入式(15), 更新结构参数 Z_i , 重复执行以上两个步骤若干次, 直到迭代收敛结果, 就可以求出物体旋转运动方程, 进而可以求得 θ_x, θ_y 和 θ_z ; 再根据 $\Delta t = t_2 - t_1$, 可以得到物体围绕 X, Y 和 Z 轴的旋转角速度:

$$\left(\frac{d\theta_x}{dt}, \frac{d\theta_y}{dt}, \frac{d\theta_z}{dt} \right) \approx \left(\frac{\Delta\theta_x}{\Delta t}, \frac{\Delta\theta_y}{\Delta t}, \frac{\Delta\theta_z}{\Delta t} \right) \quad (17)$$

旋转角速度为:

$$\frac{d\omega}{dt} = \left\| \left(\frac{xd\theta_x}{dt}, \frac{yd\theta_y}{dt}, \frac{zd\theta_z}{dt} \right) \right\| / \left\| (x, y, z) \right\| \quad (18)$$

式中, $\|(x, y, z)\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。

3.2 对绕刚体原点中心三维旋转的角速度的测量

上述方法是对刚体旋转矢量和结构重建的解法, 但为了估计方程参数, 要多次迭代, 计算量大, 而且需要测量较多的特征点对, 这涉及到相邻帧的块匹配问题, 计算也比较复杂, 耗费时间多。但通常运动对象是绕原点中心旋转的, 也就是满足方程: $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2$, 其中 r 是旋转半径, $O(x_0, y_0, z_0)$ 是原点中心坐标, 可以取原点坐标 $O(0, 0, 0)$ 。这种情况下就可以简化测量的计算。由于假设是围绕原点中心旋转的, 容易知道, 特征标识点同原点中心的距离是固定的, 也就是在一个球面上运动, 再利用 Hough 变换的一种改进方法, 很容易求出同该球面方程对应的参数半径 r 和中心原点坐标 $O(x_0, y_0, z_0)$ 。设一个特征点在时刻 t_1 和 t_2 的空间位置分别是 $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $p_2(x_2, y_2, z_2)$, 在对应的两帧的 $O-XY$ 平面的投影位置是 $p_{xy_1}(x_{xy_1}, y_{xy_1}, 0)$ 和 $p_{xy_2}(x_{xy_2}, y_{xy_2}, 0)$ 。下面讨论根据这个特征点在两个相邻帧的投影坐标计算三维旋转角速度的方法, 设在投影平面上原点到 P_{xy_1} 的直线 OP_{xy_1} 相对于 X 轴的夹角是 θ_{z_1} , 直线 OP_{xy_2} 相对于 X 轴的夹角是 θ_{z_2} , 利用下面公式计算相应的 θ_{z_1} 和 θ_{z_2} 。

$$\begin{cases} \theta_{z_1} = \arctan((y_{xy_1} - y_0)/(x_{xy_1} - x_0)) \\ \theta_{z_2} = \arctan((y_{xy_2} - y_0)/(x_{xy_2} - x_0)) \end{cases} \quad (19)$$

求得:

$$\theta_z = \theta_{z_1} - \theta_{z_2} \quad (20)$$

两条直线之间的差角 $\theta_z = \theta_{z_1} - \theta_{z_2}$ 就是在两采样帧之间的时间间隔, 物体绕 Z 轴转过的角度, 这样关于 Z 轴的角速度分量 $\gamma_z = \theta_z / \Delta t$ 也就很容易计算求出了。

根据 $p_{xy_1}(x_{xy_1}, y_{xy_1}, 0)$ 和 $p_{xy_2}(x_{xy_2}, y_{xy_2}, 0)$ 及正交投影原理可以知道:

$$\begin{cases} x_1 = x_{xy_1} \\ y_1 = y_{xy_1} \\ x_2 = x_{xy_2} \\ y_2 = y_{xy_2} \end{cases} \quad (21)$$

再根据球面方程可以建立方程组:

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 = r^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 = r^2 \end{cases} \quad (22)$$

解这个方程组, 很容易得到变量两个未知量 z_1 和 z_2 , 再根据正交投影原理, 可以得到这两个点 $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 在 $O-XZ$ 和 $O-YZ$ 的投影坐标是:

$$\begin{cases} p_{xz_1}(x_{xz_1}, 0, z_{xz_1}) \\ p_{xz_2}(x_{xz_2}, 0, z_{xz_2}) \end{cases}, \text{其中} \begin{cases} z_{xz_1} = z_1 \\ z_{xz_2} = z_2 \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} p_{yz_1}(0, y_{yz_1}, z_{yz_1}) \\ p_{yz_2}(0, y_{yz_2}, z_{yz_2}) \end{cases}, \text{其中} \begin{cases} z_{yz_1} = z_1 \\ z_{yz_2} = z_2 \end{cases} \quad (24)$$

再运用与式(19)类似的原理, 以同样的方法可以很容易求得 θ_x 和 θ_y 。至此, 就求出了该球体相对于 3 个轴各自的角速度 $(\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z)$, 问题得解。表 1 是一组应用本方法的实验数据。

表1 动态旋转实验数据表

X	Y	Z	X'	X-err	Y'	Y-err	Z'	Z-err
20	10	0	20.6	3.0%	10.2	2.0%	0	0
30	30	0	31.1	3.7%	30.5	1.7%	0	0
20	20	20	20.5	2.5%	20.3	1.5%	20.7	3.5%
0	30	30	0	0	30.9	3.0%	30.2	0.7%

其中, X, Y, Z 代表实际旋转速度, X', Y', Z' 代表应用本算法测量的旋转速度, 单位是周/秒, $X-err, Y-err, Z-err$ 表示相对各个轴方向旋转的测量误差。从实验数据可以看出测量精度符合设计的要求。

4 利用基于灰度位平面匹配方法提高测量速度

设在时刻 t_1 和 t_2 , 空间某一特征点在对应的两帧的 $O-XY$ 平面的投影位置是 $p_{xy_1}(x_{xy_1}, y_{xy_1}, 0)$ 和 $p_{xy_2}(x_{xy_2}, y_{xy_2}, 0)$ 。由于要求 $\Delta t = t_2 - t_1$ 为这段时间转动的角度, 必须先求出在该投影平面上的局部运动矢量 $\tau(x, y)$ 。

$$\begin{cases} x_{xy_2} = x_{xy_1} + \Delta x \\ y_{xy_2} = y_{xy_1} + \Delta y \end{cases} \quad (25)$$

基于块匹配算法在运动估计系统中扮演着非常重要的角色^[11-14], 以平均绝对误差(mean absolute error, MAD)和平均平方误差(mean square error, MSE)为评价标准的全局遍历(full-search, FS)被认为是块运动估计的最佳方案。然而全局遍历计算量很多, 耗费时间多, 常常还需要比较复杂的硬件结构支持。

基于灰度编码的位平面图像的快速匹配方式利于进行局部运动估计^[15], 如图7所示。设定灰度图像点 (x, y) 在 2^k 级图像的第 t 幅的灰度值表示为:

$$f^t(x, y) = a_{k-1}2^{k-1} + a_{k-2}2^{k-2} + \dots + a_12^1 + a_02^0 \quad (26)$$

这里 a_k (其中 $0 \leq k \leq k-1$) 取 0 或 1, 用 $b_k(x, y)$ 表示第 k 个位平面图像。以 8 位图像为例, 一个图像可以被分解为 8 个 1 位的图像 $b_0(x, y) \sim b_7(x, y)$, 分别对应平面 0 到平面 7。 $b_0(x, y)$ 包括组成图像像素点的所有最低有效位, 同理 $b_7(x, y)$ 包括组成图像像素点的所有最高有效位。

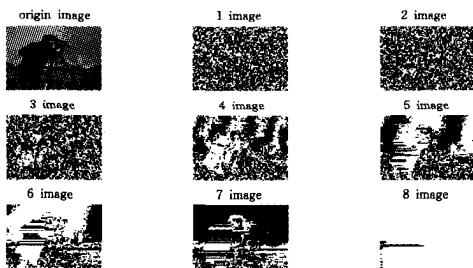


图7 原图和各个位图的分解

第 t 图像帧的 $f^t(x, y)$ 也可以表示为 K 位的灰度编码, 这里的 K 位灰度编码 $g_K \dots g_2 g_1 g_0$ 可以通过以下公式计算:

$$\begin{aligned} g_{K-1} &= a_{K-1} \\ g_k &= a_k \oplus a_{k+1}, \quad 0 \leq k \leq K-2 \end{aligned} \quad (27)$$

式中, 运算符 \oplus 是异或操作, a_k 是指式(26)中给出的基为 2 的第 k 位。

这种灰度编码具有独特的性质, 即相邻的编码仅仅就一位二进制是不同的。因此微小的灰度变化对所有的 K 位图

影响比较小, 例如灰度值 127 和 128 是相邻的, 只有第 7 位从 0 变换到 1。因为根据式(29)可以得到对应的编码分别是 11000000 和 01000000, 所以可以知道只有高序位的位图包含图像主要的可视信息, 而低序位的位图只是包含图像的细节信息。从图7可以看出位图4~图7基本能反映原图的主要面貌。

图8所示是基于位平面图匹配的运动估计方法, 根据4个子图区域估计局部运动矢量。根据上一帧子图区域同当前帧的子图区域的最接近匹配估计出每个子图区域的运动矢量。该方法要满足同一子区域的运动矢量是一致的, 并且运动范围在定义搜索窗口之内。设每个子块的大小为 $M \times N$, 搜索窗口是 $(M+2p) \times (N+2p)$, 对于基于位平面匹配的测试, 相应的计算公式如下:

$$C_j(m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} g_k^t(x, y) \oplus g_k^{t-1}(x+m, y+n), \quad -p \leq m, n \leq p \quad (28)$$

式中, $g_k^t(x, y), g_k^{t-1}(x, y)$ 分别代表当前帧和前一帧的第 k 位的位图平面, p 是指在搜索窗口的最大位移量。

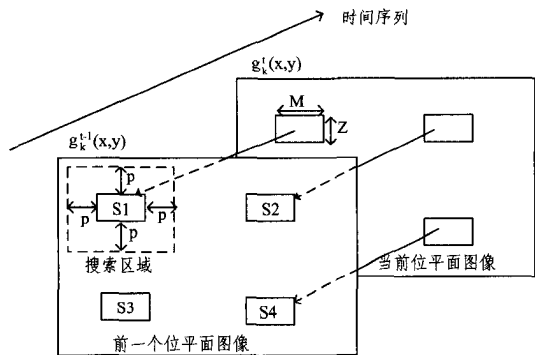


图8 根据位平面进行块匹配

对于搜索窗口中的每对 (m, n) 都需要计算出对应的参数 $C_j(m, n)$, 这个参数表示当前帧和前一帧中对应位图子区域中值不同的点的总数。 $C_j(m, n)$ 最小时表示当前子区域块是最佳匹配, m, n 值就是局部运动矢量。这样第 j 个子图对应的运动矢量 V_j 表示如下:

$$V_j = \arg \min \{ C_j(m, n), -p \leq m, n \leq p \} \quad (29)$$

这种方法可以代替传统的 MAD(平均绝对误差)和 MSE(平均平方误差), 由于其主要运算是异或布尔逻辑运算, 比算术运算简单, 因此极大地减少了运算的复杂性, 缩短了计算时间。为了进一步降低计算复杂度, 可以在搜索过程中采用三步搜索法和更加快速的新三步搜索法

结束语 本研究使用光流场特征方法, 对视频图像进行分析, 从而实现非接触式的角速度的测量。对测量环境做了若干个假设, 例如假设在正射投影成像的前提下进行旋转估计, 而且假设在移动不是很快, 并且在景深较大的情况下进行测量, 所以刚体运动方程中忽略了平移分量。但是实际测量情况下不可能保证都满足这样的理想条件, 甚至会出现摄像机抖动引起的全局不均匀运动, 因此当实际情况不满足这些约束条件的环境时, 就必然会对测量和计算精度带来影响。因此, 以后的研究需要进一步考虑在普通平行投影成像情况

(下转第 307 页)

统计如表 2 所列。



图 5 本文算法下建立的三维人脸图片

表 2 三维人脸模型几何特征测量

微笑	沮丧	撅嘴	鼓腮
0.8cm	1.6cm	0.3cm	0.1cm
0.6cm	1.7cm	0.1cm	0.2cm
3.7cm	2.9cm	0.5cm	0.2cm
0.2cm	0.1cm	0cm	0cm
7度	7度	0度	0度
3度	9度	3度	3度
23度	7度	4度	4度
43度	27度	27度	27度
3 cm ³	2.4 cm ³	0 cm ³	0 cm ³
0.57	0.44	0.62	0.54
0.62	0.73	0.61	0.58

通过表 2 的统计以及图 5 的结果可以看出,本文的方法较为准确地刻画了人脸在表情发生变化下的三维人脸情况,刻画较为精准,取得了令人满意的效果。

结束语 本文提出一种基于小区域点曲线逼近的三维人脸建模算法。对人脸的三维区域表情变化较为丰富的区域进行小区域划分,运用特征点曲线松弛约束逼近技术,模拟较为复杂的人脸曲线轮廓,避免了传统算法中用直线进行轮廓刻

画中带来的刻画不准、特征模拟失真的弊端。该方法能很好地恢复三维人脸表情变化较为丰富区域的特征信息,三维人脸匹配更加逼真,特征刻画准确度更高。

参 考 文 献

(上接第 293 页)

下的运动,同时必须要解决满足旋转对象旋转的同时还在进行移动的情况,只有把解决问题方法的限定条件充分弱化,将特殊情况进行泛化,这种方法才会更有价值,应用更加广泛。本研究中的算法绝大多数都是依靠软件实现的,为了更好地实现算法的实时性,提高计算速度,对基于位平面的快速块匹配算法可以设法通过硬件来直接实现,这样速度必将大幅度提高,这些都是今后继续研究的方向。

参 考 文 献

[1] Auzuki H, Ebine T, Hamada N. Moving objects detection using motion field constraint with Observer motion parameter[C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering 3808, 1999:398-405

[2] 彭可,彭年香,陈燕红.一种基于视频处理技术的转速测量方法[J].计算技术与自动化,2010,29(1):76-81

[3] 彭年香.基于视频处理技术的转速测量与监控系统研究[D].长沙:湖南师范大学,2010

[4] Schnörr C. Segmentation of visual motion by minimizing convex non-quadratic functionals[C]//Proc. Twelfth International Conference on Pattern Recognition, volum A. IEEE Computer Society Press. Jerusalem, Israel. Oct. 1994:661-663

[5] 李玉山.数字视觉和视频技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2006:94-99

[6] 孙即祥.图像分析[M].北京:科学出版,2005:100-102

[7] Bai Shun-ke, Wang Feng-quan. Measurement of Vibration Am-

[1] Ueshiba T, Tomita F. A factorization method for projective and euclidean reconstruction from multiple perspective views via iterative depth estimation[C]// Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV), 2008:296-310

[2] Xiao J, Chai J, Kanade T. A closed-form solution to non-rigid shape and motion recovery[J]. International Journal of Computer Vision (IJCV). 2009, 67: 233-246

[3] Lee L. Gait Analysis for Classification[R]. AI Technical Report 2003-014. Massachusetts Institute of Technology-Artificial Intelligence Laboratory, June 2003

[4] Lu Y, Pyandeh S. Cooperative Hybrid Multi-camera Tracking for People Surveillance[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2008, 33(3):145-152

[5] Yoon H-S, Park T-H. A fast focusing method for CCM auto-focusing handlers [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2009, 43: 287-293

[6] 秦晓周,杨天梁,刘增良.图文互生转换的实现方法[J].计算机仿真,2003,10(11):17-20

[7] 杨荣根,任明武,杨静宇.基于稀疏表示的人脸识别方法[J].计算机科学,2019,9(9):267-269

[8] 李茜,龚勋,王国胤.基于曲率和纹理信息的三维人脸特征提取[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2008,20(6):729-732

plitude by Time-Average Imaging[J]. Journal of southeast university(Natural science Edition), 1999, 4(11):3-4

[8] Maitre, Henri. Contribution to the Prediction of Performances of the Hough Transform[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(5):669-674

[9] Hart P E. How the Hough transform was invented [J]. Signal Processing Magazine, IEEE Issue Date, 2009, 26(6):18-22

[10] Davison A J. Dept. of Eng. Sci. Oxford Univ. Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera[C]//Computer Vision, 2003. Proceedings. Ninth IEEE International Conference. 2003, 2:1403-1410

[11] Uornori K. Automatic image stabilizing system by full-digital signal processing[J]. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 1990, 36(3):510-519

[12] Paik J-K, Park Y-C, Kim D-W. An adaptive motion decisionsystem for digital image stabilizer based on edge pattern matching [J]. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 1992, 38(3):607-615

[13] Kinugasa T, Yamamoto N, Komatsu H. Electronic image stabilizer for video camera use[J]. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 1990, 36(3):520-525

[14] Ko S-J, Lee S-H, Lee K-H. Digital image stabilizing algorithms based on bit-plane matching[J]. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 1998, 44(3):617-622

[15] Ko S, Lee S, Jeon S, et al. Fast digital image stabilizer based on gray-coded bit-plane matching[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45(3):598-603