

基于遗传算法的直线光流刚体运动重建

杨建伟, 陈震, 危水根, 简宏伟

(南昌航空大学自动化学院计算机视觉研究室, 南昌 330063)

摘要: 建立一种新的基于直线光流场从单目图像序列恢复刚体运动和结构的模型, 推导出直线光流场与刚体的运动参数之间的关系, 用 2 个二阶线性微分方程表达这种关系, 并提出一种求解刚体运动参数的遗传算法, 只需要获得图像平面的 2 条直线光流即可求解刚体的旋转参数, 并用合成图像测试了该算法的有效性。

关键词: 单目图像序列; 直线光流; 遗传算法

Recover 3-D Motion of Rigid Body from Straight-line Optical Flow Based on Genetic Algorithm

YANG Jian-wei, CHEN Zhen, WEI Shui-gen, JIAN Hong-wei

(Laboratory of Computer Vision, College of Automation, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

【Abstract】 This paper presents a new model for recovering the 3-D structure and motion using the image sequences of monocular images. It deducts the relationship between straight line optical flow and the motion of a rigid body, and represents it with second derivative linear equation. A new method is presented to solve the model based on Genetic Algorithm(GA). It needs at least two group of straight-line optical flow in projection plane to recover rotational components of motion. Validity of the algorithm is tested with synthetic sequences.

【Key words】 sequences of monocular images; straight-line optical flow; Genetic Algorithm(GA)

1 概述

视觉运动分析的主要任务是从单目摄像机记录的图像序列中恢复运动物体的运动和结构, 即从运动到结构(Structure from Motion, SfM)。文献[1]提出了多运动目标的 SfM 的光流算法, 文献[2]使用了基于序列重要时刻采样技术的贝叶斯算法同时估计多个运动目标的运动。文献[3]提出了基于特征匹配的多目标因式分解法, 引入了由图像特征的轨迹计算出来的形状互感矩阵, 逐个分离出物体的运动和结构。文献[4]依据颜色和亮度信息使用两步遗传算法恢复运动。文献[5]提出过基于直线条段的 SFM 模型, 从运动的相机拍摄的多幅图像中提取并跟踪其中的直线条段来恢复物体结构。文献[6]提出了直线光流场的概念, 运用解非线性方程组的方法, 利用 3 幅图像中 6 条直线的光流, 实现了三维场景的重建。文献[7]使用 2 条光流直线通过解线性方程组即可解出刚体的旋转参数。本文建立了一种新的直线光流与运动参数之间的非线性模型, 并提出使用遗传算法求解该模型。

2 投影模型和直线表示

确定一条 3D 直线至少需要 4 个参数。本文提出一种新的 3D 直线表示法, 使用 4 个参数, 包括 3 个角度、1 个坐标值。视觉系统被模型化为一个正交坐标系统和通过原点的中心投影, 见图 1。图中, 投影平面为 $Z=f$ (为摄像机焦距), 空间直线 L 和其在投影平面的投影直线 AB 形成的平面称为 π , 平面 π 的法向量为 n 。平面 π 与 Z 正半轴的夹角设为 α , 假设使 π 平面绕过原点 O 且平行于 AB 的直线旋转 α 弧度, 则 Z 轴在 π 平面的投影与 Z 轴重合, 此时 π 平面与 YOZ 平面的夹角为 β , 使 π 继续绕 Z 轴旋转 β 弧度使得与 YOZ 平面重合, 此时直线 L 与 Z 轴相交于 $(0, 0, Z_L)$, 易证明平面 π 可以用 2 个参数 (α, β) 表示, 直线 L 可用 4 个参数 $(\alpha, \beta, \theta, Z_L)$ 表示。

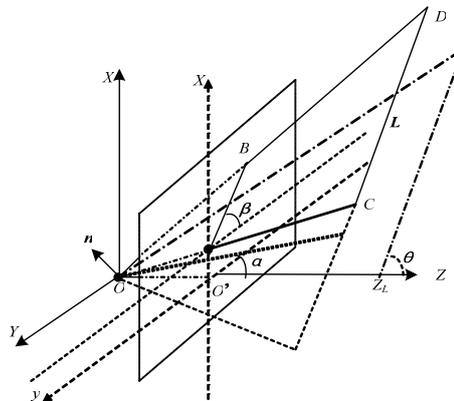


图 1 用 3 个角度和 1 个坐标表示的 3D 直线 L

在图 1 中, α, β, θ 的取值范围为 $[-\pi/2, +\pi/2]$ 。设 n 表示为如下复数形式: $n=ai+ bj+ ck$, 不妨设 n 为单位向量, 并且指向 X 轴正方向, 则 n 中 a, b, c 满足如下关系:

$$\begin{cases} \sin(\alpha) = -\frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \\ \sin(\beta) = -\frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ a^2 + b^2 + c^2 = 1 \\ a > 0 \end{cases} \quad (1)$$

基金项目: 教育部科学技术研究基金资助重点项目(206080); 江西省自然科学基金资助项目(2007GZS1900, CA200411049); 江西省教育厅科技基金资助项目(GJJ08214); 江西省教育厅科学技术研究基金资助项目(赣教[2005]168)

作者简介: 杨建伟(1980-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 模式识别; 陈震, 教授、博士; 危水根, 副教授; 简宏伟, 硕士研究生

收稿日期: 2008-09-16 **E-mail:** wxb-77@163.com

由式(1)解得

$$\begin{cases} a = \cos \alpha \cos \beta \\ b = -\cos \alpha \sin \beta \\ c = -\sin \alpha \end{cases} \quad (2)$$

由上式可知:

$$\mathbf{n} = (\cos \alpha \cos \beta, -\cos \alpha \sin \beta, -\sin \alpha)^T \quad (3)$$

因此,三维直线可以用4个参数表示,即3个角度和一个坐标值。例如,图1中的直线L可用 $(\alpha, \beta, \theta, Z_L)$ 表示,其中,3个角度 α, β, θ 的范围均在 $[-\pi/2, +\pi/2]$ (α 不含边界),坐标值的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$ 。

由图1可以看出,有相同 α, β 值的三维直线有相同的投影直线,即用 α, β 就可以表示二维直线,图2是图1中三维直线L的投影直线AB在二维平面的正视图。

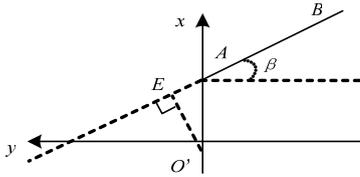


图2 L的投影直线AB在二维平面的正视图

图2中直线AB与Y轴的夹角就是 β ,不难推出:

$$OE = f \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (4)$$

根据图2能分别计算出 α, β ,可以看出,它们与摄像机焦距无关。

3 三维旋转参数的求取

像素点的光流定义为灰度不变的图像点的位置对时间 t 的导数,与像素点的光流相类似,直线的一次和二次光流分别定义为图像中直线的参数对时间 t 的一阶和二阶导数:

$$\begin{cases} \alpha' = \frac{d\alpha}{dt}, \alpha'' = \frac{d^2\alpha}{dt^2} \\ \beta' = \frac{d\beta}{dt}, \beta'' = \frac{d^2\beta}{dt^2} \end{cases}$$

因为获得的图像是在时间上离散的数字图像,所以利用相邻两帧图像中直线参数的差分来近似直线的一次光流,用得到的差分的相邻差分近似二次光流。

设 $T=(t_1, t_2, t_3)^T$ 和 $\omega=(\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ 分别是刚体运动的平移和旋转量。刚体上某点P在 t 时刻的坐标为 $(X, Y, Z)^T$,P的速度为

$$\dot{P} = T + \omega \times OP \quad (5)$$

设 P_1, P_2 为刚体上的某直线上任意两点,则该直线的方向向量为

$$\mathbf{v} = OP_1 - OP_2$$

上式对时间 t 求导得

$$\dot{\mathbf{v}} = OP_1' - OP_2' \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)得

$$\dot{\mathbf{v}} = \Omega \times \mathbf{v} \quad (7)$$

根据图1,显然 $\mathbf{n}(n_1, n_2, n_3)^T$ 和直线L的方向向量 $\mathbf{V}(v_1, v_2, v_3)^T$ 垂直,则:

$$\mathbf{n}^T \mathbf{v} = 0 \quad (8)$$

上式对时间求导得

$$\dot{\mathbf{n}}^T \mathbf{v} + \mathbf{n}^T \dot{\mathbf{v}} = 0 \quad (9)$$

将式(7)代入式(9)得

$$\dot{\mathbf{n}}^T \mathbf{v} + \mathbf{n}^T (\Omega \times \mathbf{v}) = 0 \quad (10)$$

把 \mathbf{v} 当作未知量,式(8)和式(10)组成了一个关于 \mathbf{v} 的齐

次线性方程组:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{n}}^T \mathbf{v} + \mathbf{n}^T (\Omega \times \mathbf{v}) = 0 \\ \mathbf{n}^T \mathbf{v} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其系数矩阵A为

$$A = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 \\ \omega_2 n_2 - \omega_2 n_3 + n_1' & \omega_3 n_1 + n_2' & \omega_2 n_1 - \omega_1 n_2 + n_3' \end{bmatrix}$$

若行列式A的秩为2,设 (v_1, v_2, v_3) 为方程组的通解,那么方程组的全部解为 $k(v_1, v_2, v_3)$ (k 为任意实数),全部解对应的直线互相平行。由图1可知,只要在平面 π 内直线的方向向量都是方程组的解,满足方程组解的直线不一定平行。因此,行列式A的秩不为2,则A的秩只能为1,因此有

$$\frac{n_1}{\omega_2 n_2 - \omega_2 n_3 + n_1'} = \frac{n_2}{\omega_3 n_1 - \omega_3 n_1 + n_2'} = \frac{n_3}{\omega_2 n_1 - \omega_1 n_2 + n_3'} \quad (12)$$

对式(3)求导得

$$\dot{\mathbf{n}} = (n_1', n_2', n_3')^T \quad (13)$$

其中,

$$n_1' = -\alpha' \sin \alpha \cos \beta - \beta' \sin \alpha \sin \beta$$

$$n_2' = \alpha' \sin \alpha \sin \beta - \beta' \cos \alpha \cos \beta$$

$$n_3' = -\alpha' \cos \alpha$$

将式(3)和式(13)带入式(12)并整理得

$$\begin{cases} a_{11} \omega_1 + a_{12} \omega_2 + a_{13} \omega_3 = t_{11} \\ a_{21} \omega_1 + a_{22} \omega_2 + a_{23} \omega_3 = t_{21} \end{cases} \quad (14)$$

其中,

$$a_{11} = \sin \alpha \cos \beta$$

$$a_{12} = -\sin \alpha \sin \beta$$

$$a_{13} = \cos \alpha$$

$$a_{21} = -(\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \sin^2 \beta)$$

$$a_{22} = -\frac{1}{2} \cos^2 \alpha \sin 2\beta$$

$$a_{23} = -\frac{1}{2} \sin 2\alpha \cos \beta$$

$$t_{11} = -\beta' \cos \alpha$$

$$t_{21} = \frac{1}{2} \beta' \sin 2\alpha \cos \beta - \alpha' \sin \beta$$

对式(14)求导后,记为

$$\begin{cases} a_{31} \omega_1 + a_{32} \omega_2 + a_{33} \omega_3 + a_{34} \varepsilon_1 + a_{35} \varepsilon_2 + a_{36} \varepsilon_3 = t_{31} \\ a_{41} \omega_1 + a_{42} \omega_2 + a_{43} \omega_3 + a_{44} \varepsilon_1 + a_{45} \varepsilon_2 + a_{46} \varepsilon_3 = t_{41} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为旋转速度在3个方向的分量; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 为对应的旋转加速度分量, $a_{ij}(i=3,4; j=1,2, \dots, 6)$ 是含有 $\alpha, \beta, \alpha', \beta', \alpha'', \beta''$ 的表达式。

记式(14)和式(15)组成的方程组左边的系数矩阵为 Pn (式(14)中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 的系数为0),方程组右边的数值组成列向量 Tn ,未知量 $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)^T$ 记为 X ,则:

$$Pn \cdot X = Tn \quad (16)$$

式(16)中有4个方程,但含有6个未知参数,如果提供2组直线光流量将可以得到8个方程。因此,求解6个未知参数至少需要2组直线光流量,而2组直线光流量可以从连续的3帧图像中获得。

4 基于遗传算法的直线光流场算法模型

遗传算法有其他方法不具备的优点:对可行解表示的广泛性和群体搜索特性有多种改进方法避免陷于局部收敛,具有较好的全局搜索能力。根据式(16)建立遗传算法模型。

将 Pn 和 Tn 中的一行分别记为 P_i, T_i ,则所求的 X 必须满足下式:

$$X = \arg \min_x \frac{1}{M} \times \sum_{i=1}^M (P_i \square X - T_i)^2$$

显然所求模型为最小值问题，因此，相应的目标函数为

$$f(X) = \sum_i^M (P_i \square X - T_i)^2$$

直接取适应度函数为目标函数，将目标问题转化为求最小值问题：

$$Fit(f(X)) = f(X) \quad (17)$$

式(16)中的 P_n 和 T_n 是含有 $\alpha, \beta, \alpha', \beta', \alpha'', \beta''$ 的矩阵，而这 6 个量可以用如下方法求得：

(1)取连续 3 帧图像，提取每一帧图像中的直线，并跟踪得到 n 条 ($n > 2$) 匹配直线 (每一帧中都含有的直线)。

(2)分别计算出每一帧中 n 条直线的 α, β 参数，得到 3 组 n 对 α, β 。

(3)用直线在相邻两帧中的 α, β 值的差分近似 α', β' ，用得到的 2 组差分的差分近似 α'', β'' ，得到了 2 组 n 个 α', β' 、一组 n 个 α'', β'' 。

(4)取第 1 帧中的 n 个 α, β 、第 1 组的 n 个 α', β' 、 n 个 α'', β'' 组成 n 组光流数据 $(\alpha, \beta, \alpha', \beta', \alpha'', \beta'')$ ，将这 n 组数据代入式(17)中。

(5)使用遗传算法计算式(17)的最大值。

(6)满足上式目标函数取极小值时的 X 即为所求。

5 实验结果

计算机合成一个立方体 (可见 12 条直线)，使其按指定的参数运动，将运动前和 2 次运动后的空间直线在 $Z=f$ 平面的投影作为 3 帧图像。按照上述算法模型求出 12 组光流数据 $(\alpha, \beta, \alpha', \beta', \alpha'', \beta'')$ ，将其代入式(17)并使用遗传算法进行进化。指定的旋转参数分别为： $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 0.005$ 弧度/帧， $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.001$ 弧度/帧²，取焦距 $f=1$ 像素 (跟焦距无关)。使用上面建立的遗传算法模型，设计算法步骤如下：

(1)对算法进行初始化设置，对 X 的每个量进行浮点数编码，初始化为 $[-1, 1]$ 中的随机值，种群大小为 30 个，设置适应度最小容忍改进值 1×10^{-7} ，进化代数数为 500 代。

(2)设置交叉概率为 0.8，变异概率为 0.05，将式(17)作为适应度函数进行评价。

(3)根据适应度改进值和进化代数判断是否终止遗传算法，符合则转第(2)步继续，否则转第(4)步。

(4)将适应度最好的个体作为最终解 X 。

取不同数量的光流数据重复以上步骤，得到如下误差与所取直线条数的关系，见图 3、图 4。图中， $w_1, w_2, w_3, e_1, e_2, e_3$ 分别对应参数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 。

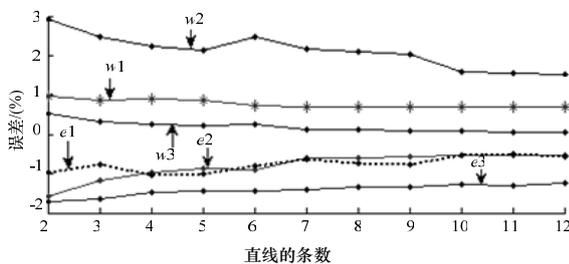


图 3 计算误差与所取直线的条数之间的关系

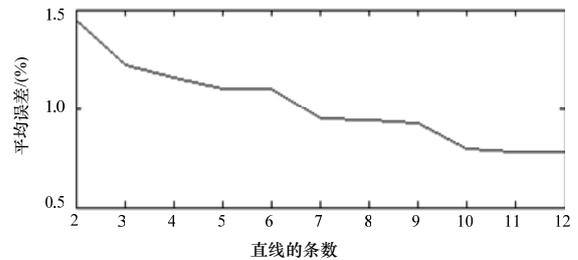


图 4 平均计算误差与所取直线的条数之间的关系

由图 3、图 4 可以看出，所取的直线数量越多，各参数的误差越小。当取 2 条直线时，误差不超过 1.5%；当取 12 条直线时，误差最小。与其他求解直线光流场的算法相比，本算法整体误差明显较小，具体结果如表 1 所示。

表 1 计算误差 (%)

参数	ω_1	ω_2	ω_3	ε_1	ε_2	ε_3	平均
最小二乘法	0.56	0.68	0.25	2.54	2.77	0.93	1.29
L-M 算法	0.49	0.16	0.71	3.4	3.2	1.5	1.58
BP 神经网络	0.14	0.36	0.62	0.46	1.18	2.87	0.93
遗传算法	0.69	0.23	0.31	1.61	0.49	0.13	0.58

6 结束语

本文提出了一种新的直线光流场模型，在该模型下，推导出图像序列中直线参数与运动参数之间的关系。运用该模型，从连续的 3 帧图像序列中求解出了图像中物体的旋转参数。本文使用遗传算法求解该模型，经过与其他算法比较得出，该算法比其他算法有更高的精度，对此模型有良好的适用性。

参考文献

- [1] Adiv G. Determining 3-D Motion and Structure from Optical Flow Generated by Several Moving Objects[J]. IEEE Trans. on Pattern Anal. Machine Intelligence, 1985, PAMI-7(4): 384-401.
- [2] Gang Qian, Chellappa R, Zheng Qinfen. Bayesian Algorithms for Simultaneous Structure from Motion Estimation of Multiple Independently Moving Objects[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(1): 94-109.
- [3] Costeira J P, Kanade T. A Multibody Factorization Method for Independently Moving-objects[J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 29(3): 159-179.
- [4] Tagliasacchi M. A Genetic Algorithm for Optical Flow Estimation[J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(5): 141-147.
- [5] Taylor C J, Kriegman D J. Structure and Motion from Line Segments in Multiple Images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(11): 1021-1032.
- [6] 陈震, 高满屯, 沈允文. 图像光流场计算技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7A(5): 434-439.
- [7] 江少锋, 陈震, 黎明, 等. 从二维图像直线光流场求解三维刚体旋转运动参数[J]. 南昌航空工业学院学报: 自然科学版, 2005, 20(4): 5-8.

编辑 张正兴