

相机目标自标定系统三维重构的研究

陈芬

(徐州工业职业技术学院信息与电气工程学院,江苏 徐州 221000)

摘要:对相机目标自标定系统三维重构方法进行了研究,首先介绍了相机的针孔透视变换的数学模型,并计算了相机成像的畸变系数;介绍了相机传统线性标定的方法,重点分析了引入非线性优化的平面标定的方法,并在此基础上结合LM优化算法对相机的参数进行了求解;最后通过实验仿真证明了该方法能够较好地描述相机的成像情况,从而证明了引入非线性优化的标定方法在相机目标自标定系统三维重构中的可行性。为相机系统识别目标的精确度,实现对目标的全方位精确识别提出了一种新的研究思路。

关键词:自标定系统;非线性优化;三维重构;相机畸变

中图分类号:P391.41; TB852.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2017)04-0031-04

Research on Three-dimensional Reconstruction of Camera Self-calibration System

CHEN Fen

(Institute of Information and Electrical Engineering, Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou, Jiangsu 221000, China)

Abstract: In this paper, the calibration method with nonlinear optimization introduced in camera system is researched. The mathematical model of pinhole perspective transformation of the camera is discussed, and the distortion coefficient of camera imaging is figured out. The traditional linear calibration method of camera is briefly introduced. The planar calibration method with nonlinear optimization introduced is emphatically analyzed, based on which, the camera parameters are combining with LM optimization algorithm. Finally, the experimental simulation proves that this method can describe the imaging situation of the camera better, and thus proves the feasibility of the calibration method with nonlinear optimization introduced in missile guidance system. In order to identify the precision of the camera system, a new approach is proposed to realize the accurate identification of the target.

Keywords: self-calibration system; nonlinear optimization; 3D reconstruction; camera distortion

0 引言

计算机立体视觉系统可以根据相机中图像的基本情况,得出三维条件下物体的方位、大小以及空间几何,同时判断该条件下的物体特征。相机能够根据成像原理把三维图像投射到二维空间来,这一过程是成像变换的一种情况,也是相机成像模型。根据相机中二维图像的基本情况得出三维条件下物体的信息,同时重新构建物体。但是物体的三维定位点和物体图像中的点二者的关系是根据相机成像几何模型来衔接的。几何模型的参数和相机参数大体一致,根据相机标定方法得知,相机

标定有相机内部的几何位置和内部参数,还有在坐标中相机的三维定点和变化趋势。提出了引入非线性优化的相机标定方法,并就其在相机系统中的应用做了探讨。

1 针孔透视变换模型

在计算机视觉系统内,相机模型的主要工作是把三维空间内的点和二维图像中的点进行衔接。使用的相机模型一般有透视投影模型(针孔相机模型),正交投影模型和拟透视投影模型3种,使用频率较多的是针孔相机模型,如图1所示。

收稿日期:2017-09-19

基金项目:2016年江苏省职业技术教育学会立项课题:项目工作室驱动下的动画运动规律课程“四段递进”教学模式应用研究(XHXS2015042); 2017年江苏省高职院校青年教师企业实践培训项目(2017QYSJPY015)。

作者简介:陈芬(1982—),女,江苏江阴市人,硕士,讲师,研究方向:计算机应用技术。

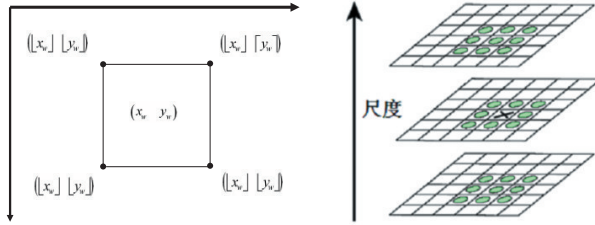


图1 针孔相机模型

图2 投影后的点的坐标的计算

假设没有透镜畸变这一影响因素,空间内的某点 X 在图像上的成像方位能够通过针孔透视变换模型进行显示。如图2所示,通过透镜的成像几何能够得出:

$$x = \frac{fx_c}{z_c}, y = \frac{fy_c}{z_c} \quad (1)$$

在式(1)中, (x, y) 所表示的是空间点 X 在图像平面成像的图像坐标, (x_c, y_c, z_c) 代表的是空间点 X 在相机坐标系下的坐标。可通过齐次坐标与矩阵来描述投影关系:

$$z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过将式(2)与(1)进行结方程组能够得出世界坐标系 $o_w x_w y_w z_w$ 中点 X 坐标与和其投影点在图像坐标系下的坐标关系:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\mu_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/\mu_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & k_2 & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = P X_w \quad (3)$$

在式(3)中, $k_1 = f/\mu_x, k_2 = f/\mu_y$ 。 P 表示 3×4 矩阵, 又称投影矩阵。因为 k_1, k_2, u_0, v_0 和相机的内部结构息息相关, 所以其参数一般是相机的内部参数, 可以通过矩阵求得:

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & k_2 & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, 矩阵 K 所代表的是内方位元素矩阵。

2 相机畸变模型

相机在成像过程中, 实际像点位置往往与理想像点位置存在一定的误差, 而这一误差就是相机畸变。所以, 通过理想针孔模型来使像点与物点进行匹配之前, 需要修改像点的畸变模型。修改模型如式(4)所示:

$$\begin{aligned} x' &= x + \delta_x(x, y) \\ y' &= y + \delta_y(x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

在式(4)中: x', y' 所代表的是实际成像点, x, y 指

的是理想成像点。像点畸变类型可分为径向畸变和切向畸变, 其畸变范围主要是由像点到成像中心的距离确定, 在工业机器视觉领域, 只需要研究径向畸变就可以得出精准成像数据。

径向畸变的表现形式是在实际像点随着径向的方向伸缩, 实际像点回缩表示负径向畸变, 即桶形畸变; 实际像点伸出表示正径向畸变, 即针垫形畸变。畸变是以成像中心作为基点互相对称, 畸变范围只和像点以及成像中心远近息息相关。

$$\begin{aligned} \delta_{xr} &= x(q_1 r^2 + q_2 r^4 + q_3 r^6 + \dots) \\ \delta_{yr} &= y(q_1 r^2 + q_2 r^4 + q_3 r^6 + \dots) \end{aligned} \quad (5)$$

在式(5)中, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, q_1, q_2, q_3 表示各次径向畸变系数。经过多次实验可知, 一次、二次项所发生的畸变要比其他各次畸变总和多得多, 所以在现实操作过程中, 只需要分析一次、二次畸变就可以。这样式(5)可简化为:

$$\begin{aligned} \delta_{xr} &= xq_1(x^2 + y^2) + xq_2(x^2 + y^2)^2 \\ \delta_{yr} &= yq_1(x^2 + y^2) + yq_2(x^2 + y^2)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

3 相机标定方法

传统相机标定法一般是 DLT 直接线性变换相机标定法。该方法是根据摄影测量理论来分析相机和空间点二者的关系, 在此基础上形成了相机成像几何的线性模型。该线性模型能够通过推导线性方程的答案来达到预计效果。因此更加方便, 计算过程简练。

3.1 线性标定

传统线性标定法是将非线性方程进行拆解, 形成一组新的线性方程组, 并通过最小二乘法求出其新变量解, 然后反推求得原变量值。该方法优势在于去除了迭代运算的过程, 自标定效率高。然而却忽略了相机镜头的畸变, 该差值将影响着标定数据的准确, 直接线性转换法是线性标定法的代表。直接线性变换方法使用的模型为:

$$\begin{aligned} u &= \frac{a_{11}x_w + a_{12}y_w + a_{13}z_w + a_{14}}{a_{31}x_w + a_{32}y_w + a_{33}z_w + a_{34}} \\ v &= \frac{a_{21}x_w + a_{22}y_w + a_{23}z_w + a_{24}}{a_{31}x_w + a_{32}y_w + a_{33}z_w + a_{34}} \end{aligned} \quad (7)$$

在式(7)中, (x_w, y_w, z_w) 表示三维物体空间中控制点的坐标, (u, v) 代表图像上对应于三维控制点的图像点的坐标, a_{ij} 指直接线性变换方法的待定参数。

3.2 引入非线性优化的标定方法

LM 算法广泛应用于计算非线性最小二乘过程中, LM 算法中至关重要的就是通过模型函数把待估参数向量在所涉及的内容中进行线性相似, 不考

虑二阶以上的导数项,最终变成线性最小二乘计算,它最大的优势在于计算快、得出结果正确性高。在相机拍摄某一标定板的各个角度时引入非线性优化实现,或是让相机不发生移动对移动的标定板拍摄,按照二维数据进行标定计算。该标定法的各个环节为:

(1)对相机参数进行初始化标定;

(2)通过初始化标定的数据来修正图像,同时计算出畸变系数;

(3)通过非线性优化对数据进行操作,同时得出优化之后的参数。

在第一次相机标定时,对相机参数进行初始化标定。再标定时,需要将图像坐标和世界坐标初始化,以应对在计算时出现病态性的畸变。图像点坐标表示为 (u_i, v_i) ($i=1, 2, \dots, n$),各空间点的世界坐标为 (X_{wi}, Y_{wi}) ($i=1, 2, \dots, n$),初始化的过程可如下所示:

(1)先得出 u, v 两轴上各坐标的平均值:

$$m_u = \frac{\sum_{i=0}^n u_i}{n}, \quad m_v = \frac{\sum_{i=0}^n v_i}{n} \quad (8)$$

每个图像点对平均值的差距是:

$$\Delta u_i = u_i - m_u, \quad \Delta v_i = v_i - m_v \quad (9)$$

(2)分别求出 u, v 两轴上及 X_w, Y_w 两轴上所有点到平均值点的平均值:

$$d_{uv} = \frac{\sum_{i=0}^n (\Delta u_i^2 + \Delta v_i^2)^{\frac{1}{2}}}{n}, \quad d_{XY} = \frac{\sum_{i=0}^n (\Delta X_{wi}^2 + \Delta Y_{wi}^2)^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (10)$$

(3)分别求 u, v 两轴上及 X_w, Y_w 两轴上的比例缩放因子:

$$s_{uv} = \frac{\sqrt{2}}{d_{uv}}, \quad s_{XY} = \frac{\sqrt{2}}{d_{XY}} \quad (11)$$

(4) u, v 两轴上及 X_w, Y_w 两轴上的变换关系可由矩阵形式表示为:

$$T_{uv} = \begin{bmatrix} s_{uv} & 0 & -s_{uv}m_u \\ 0 & s_{uv} & -s_{uv}m_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_{XY} = \begin{bmatrix} s_{XY} & 0 & -s_{XY}m_X \\ 0 & s_{XY} & -s_{XY}m_Y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

(5)设经过归一化处理的图像坐标和世界坐标分别为 m' 与 M' ,其与原图像坐标和世界坐标 m 与 M 有如下关系:

$$m' = T_{uv}m, \quad M' = T_{XY}M \quad (13)$$

因为单应矩阵 H' 满足 $m' = H'M'$,可由RANSAC等方法求出单应矩阵 H' 的初值。根据式(13)可以转化为 H 。令 $H = [h_1 \ h_2 \ h_3]$,可得:

$$[h_1 \ h_2 \ h_3] = k[R|t] \quad (14)$$

由于矩阵 R 是正交矩阵,根据正交矩阵的性质,可以推得:

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = 0$$

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_1 = h_2^T K^{-T} K^{-1} h_2 \quad (15)$$

令 $B = K^{-T} K^{-1}$,可得:

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_1^2} & 0 & \frac{-u_0}{k_1^2} \\ 0 & \frac{1}{k_2^2} & \frac{-v_0}{k_2^2} \\ \frac{-u_0}{k_1^2} & \frac{-v_0}{k_2^2} & \frac{v_0^2}{k_2^2} - \frac{u_0^2}{k_1^2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

令 $B = [B_{11} \ B_{12} \ B_{22} \ B_{13} \ B_{23} \ B_{33}]^T$,矩阵 H 得第 i 行 $h_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]^T$,可得:

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b \quad (17)$$

其中, $v_{ij} = [h_{i1}h_{j1} \ h_{ij}h_{j2} + h_{i2}h_{j1} \ h_{i2}h_{j2} \ h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3} \ h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3} \ h_{i3}h_{j3}]^T$,根据式(17)的两个约束条件可得:

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (18)$$

如果拍摄得到 n 幅图像,则可以得到 n 个如式(18)的方程组,联立该方程组可得:

$$Vb = 0 \quad (19)$$

得到内方位元素矩阵 K 后,外方为元素也可以由 $H = K[R|t]$ 求得:

$$R = [K^{-1}h_1 \ K^{-1}h_2 \ K^{-1}h_3]$$

$$t = K^{-1}h_4 \quad (20)$$

最后:对可变参数进行优化,在得到初始化标定的前提下,通过非线性优化的过程,约束每个点,并得到优化之后的内外参数。

LM方法的优化的目标函数为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\| m_{ij} - \hat{m}(K, q_1, q_2, R_i, t_i, M_j) \right\|^2 \quad (21)$$

在式(21)中, n 为拍摄所得图像的数量, m 表示控制点的数量, m_{ij} 为实际的图像坐标, $\hat{m}(K, q_1, q_2, R_i, t_i, M_j)$ 是模板上的三维点 M_j 在第 i 幅图像上的投影点。待优化的参数有:内参数矩阵 K ,畸变系数 q_1 和 q_2 ,第 i 幅图像的外参数矩阵 R_i 和 t_i 。

4 实验结果

根据上述研究相机自标定理论,确定具体的实验步骤如下:

(1)打印如图3所示的棋盘方格图,并贴在一个平面上;

(2)固定平面,移动待标定相机并从不同角度拍摄若干张(大于或等于3张)模板图像,如图5所示;

(3)检测每幅图像的角点,并求出每一幅图像

的单应矩阵 H , 并进行初始标定;

(4) 对所求参数进行优化, 如图6所示; 利用反投影法进行误差分析, 如图4所示。

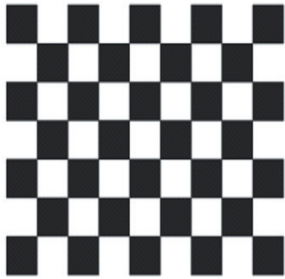


图3 棋盘方格图

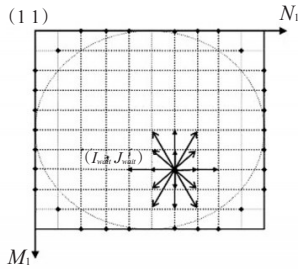


图4 再投影误差(单位: 像素)

用待标定的相机对模板进行不同角度的拍摄, 得到19组大小为 1024×768 的实验图像, 如图5所示。

经过优化后得到的实验结果如下:
 $k_1=1\ 075.443\ 85,$ $k_2=1\ 078.016\ 63;$
 $u_0=497.713\ 14,$ $v_0=396.837\ 14;$
 $q_1=-0.174\ 99,$ $q_2=0.085\ 34$

检测上文标定数据的正确性需要把标定中的

内参数与19个处于不同方位的外参数代入式(30)中, 再通过标定中的世界坐标, 得到图像角点坐标, 同时和现实中拍到的19幅图像的角点结果进行比较, 能够发现投影中存在的一定差别, 图6所标示的是通过反投影对19组数据计算的结论。据此得出, x 方向的误差不超过2个像素, y 方向的误差不超过3个像素, 且大部分点的误差都集中在1个像素之内, 故认为标定结果较好的描述了相机的成像情况。

5 结语

对相机针孔透视变换模型进行了深入研究, 建立了相机成像失真校正的数学模型; 在传统相机标定系统的基础上引入非线性优化方法, 采用 Binocular Vision-Based 算法求解摄像机参数。首先, 基于相机的理想模型的完成相机参数标定, 然后用初始校准参数对图像信息进行修正, 并确定畸变系数; 根据得到的畸变系数和初始校准参数, 数据的非线性优化计算的参数优化。实验结果表明, 利用 LM 优化算法来计算得出相机的参数能够较好的描述相机的成像情况。

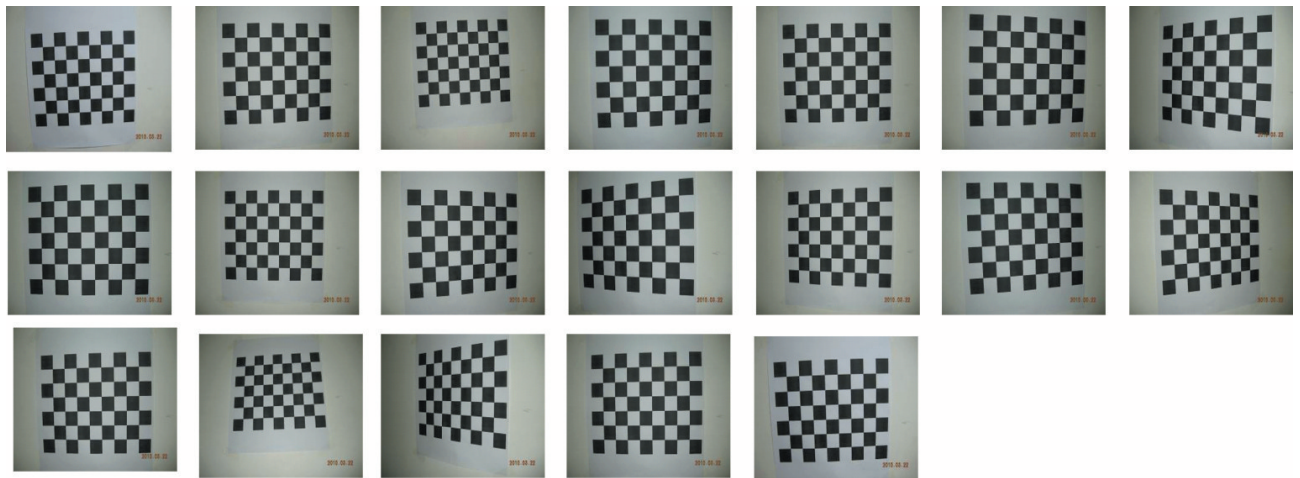


图5 相机标定模板原图

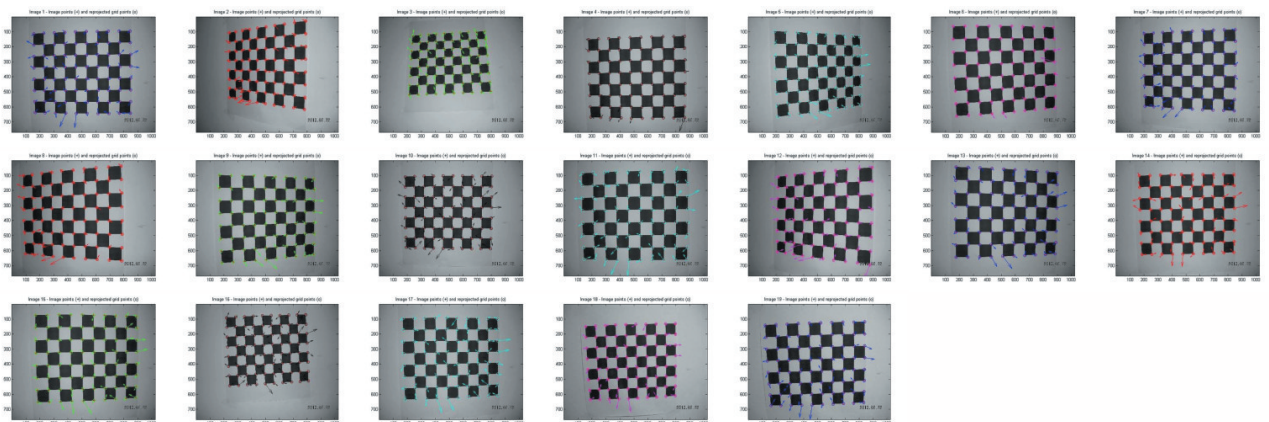


图6 对标定误差进行优化

表14 水体富营养化评价结果

编号	营养指数	评价结果	平均值	评价结果
A-1-上	38.1	中营养		
A-1-中	38.6	中营养	38	中营养
A-1-下	37.2	中营养		
B-2-上	50.3	轻度富营养		
B-2-中	47	中营养	47	中营养
B-2-下	43.8	中营养		
C-3-上	47.5	中营养		
C-3-中	44	中营养	45.9	中营养
C-3-下	46.2	中营养		
D-4-上	45.4	中营养		
D-4-中	48.7	中营养	48.3	中营养
D-4-下	50.8	轻度富营养		

洗涤剂中的P含量,推广使用无磷洗衣粉等,控制上游洗衣、种菜等生产生活活动,采取相应的约束措施等。(3)实施截污工程或者引排污染源。截断向水体排放营养物质的排放源,是控制某些湖泊水体富营养化的关键性措施,可以从根本上消除水体富营养化的主要人为外源性污染源,提供改善水质的基本条件。(4)合理使用土地。合理规划利用土地,保

参考文献:

[1] 吕智强.景观设计概论[M].北京:中国轻工业出版社,2006.
 [2] 徐晶,朱民.城市景观水体富营养化及其控制[J].环境科学与管理,2010,35(7):150-152.
 [3] 樊树红.水体富营养化的探究[J].黑龙江科技信息,2010(28):8-8.
 [4] 归显扬.水体富营养化及其防治对策研究[J].广州化工,2012,40(13):12-13.
 [5] GB3838-2002.地表水环境质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
 [6] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社,1990.

(上接第34页)

参考文献:

[1] FAUGERAS O, LUONG Q T, MAYBANK S. Camera Self-calibration: Theory and Experiments[C]//Proc. of the 2nd European Conference on Computer Vision. London, UK: Springer-Verlag, 1992: 321-334.
 [2] STEVE V, MASAYUKI K, NAOKAZU Y. Binocular Vision-based Augmented Reality System With an Increased Registration Depth using Dynamic Correction of Feature Positions[C].Proceedings of the 2003 IEEE, Virtual reality. March 2003(22-26):271-272.
 [3] HARTLEY R.Kruppa's Equations Derived from the Fundamental Matrix[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1997,19(2):133-135.
 [4] POLLEFEYS M,VAN GOOL L J,VERGAUWEN M, et al. Visual modeling with a hand-held Camera[J]. International Journal of Computer Vision, 2004,59(3) : 207-232.
 [5] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A Performance Evaluation of Local Descriptors[C]//Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Madison, Wisconsin, USA: [s. n.], 2005:257-264.
 [6] CHEN G Q,MEDIONI G G. Practical Algorithms for Stratified Structure from Motion[J].Image and Vision Computing,2002,20(2):103-123.

护绿化带、最大限度地减少土壤侵蚀、水土流失与肥料流失。

4.3.2减少内源性营养物质负荷

减少内源性营养物质负荷,可以有效地控制湖泊内部P富集。可以从以下几个方面考虑:(1)生物性措施。利用水生生物吸收利用N、P元素进行代谢活动去除水体中N、P营养物质,通常种植高等植物,如莲藕、蒲草等。随着这些水生植物收获,N、P营养物也就随着水生植物体一道离开了水体,这种方法适用于底泥中营养物质积累丰富的水体。(2)工程性措施。主要包括挖掘底泥沉积物、进行水体深层曝气、注水冲稀等。(3)化学方法。这类方法包括凝聚沉降和用化学药剂杀藻等。

5 结论

通过对龙眠河市区段的水体研究,可以得出以下结论:(1)下游水体的EC、TP、叶绿素a值比上游高,说明河水受到一定污染。(2)水体为Ⅲ类水,水体富营养化综合指数为37.2~50.8,没有达到富营养水平,部分区域达到了轻度富营养化的水平,主要污染因子为TN和叶绿素a和SD。