

单目视觉 Tukey 权因子模型室内位置测量

刘飞^{1,2}, 张继贤³, 王坚⁴, 张欣欣⁵, 丁晓波²

1. 中国矿业大学, 徐州 221116;

2. 航空遥感技术国家测绘地理信息局重点实验室, 北京 100039;

3. 国家测绘产品质量检验检测中心, 北京 100830;

4. 北京建筑大学, 北京 102616;

5. 河南理工大学, 焦作 454000

摘要: 面向室内导航和定位的需求, 本文提出了一种基于编码图形和单目视觉传感器相结合的室内移动载体位置测量方法。首先, 优化设计了一系列用于移动载体空间位置计算的编码影像, 利用轮廓匹配、矩计算和映射匹配相结合的方式实现空编图形的识别与定位。其次, 针对编码图形中心像方坐标观测值提取残差, 构建了基于单位权和 Tukey 权因子模型的空间后方交会方法, 基于两种权重因子分别计算了移动载体的观测值残差权重, 分析了不同残差的观测值对结果的影响程度。然后, 构建了 4 组实验环境, 从不同角度获取了观测影像, 并进行了数据处理与分析。最后, 通过实验验证, 表明基于 2 种权因子模型的方法均能够实现载体位置的计算, 但基于 Tukey 权因子方法具有更高的精度, 平面精度提高了 29.76%—49.42%, 高程精度提高了 29.17%—74.07%。本文方法能够为室内空间移动载体提供高精度的导航和定位测量服务。

关键词: 室内定位, 编码图形, 单目视觉, tukey 权重, 抗差模型

引用格式: 刘飞, 张继贤, 王坚, 张欣欣, 丁晓波. 2020. 单目视觉 Tukey 权因子模型室内位置测量. 遥感学报, 24(1): 76–84

Liu F, Zhang J X, Wang J, Zhang X X and Ding X B. 2020. A monocular indoor vision position measurement method based on the Tukey model. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(1): 76–84[DOI: 10.11834/jrs.20208210]

1 引言

近年来, 面向室内导航和定位的需求, 基于智能机器人平台的室内空间信息采集技术取得了快速发展。室内移动平台轨迹推算和室内外空间信息一体化集成对室内空间导航和定位技术提出了较高的要求。另外, 视觉传感器具有信息丰富、成本低廉和使用方便等特点。目前, 基于视觉传感器的室内空间导航和定位方法成为研究热点之一。

视觉定位方法可分为单目、双目和多目视觉定位等多种方式。单目视觉定位仅需一台摄像机, 可以基于单帧图像或者立体图像进行空间定位, 无需解决立体视觉中的两摄像机间的最优距离和特征点匹配问题, 也不需解决全方位视觉传感器的较大畸变问题。目前国内外有较多的学者进行

单目视觉定位的研究, 如周娜等(2007)提出的“一种简化的基于单应矩阵的摄像机定位方法”, 设计了一幅简单可行的平面模板, 通过在任意方位摄取一幅模板图像建立约束得到单应矩阵, 通过单应矩阵即可以定位摄像机。沈慧杰等(2009)提出的“基于图像拼接技术的摄像机定位方法”, 利用了图像拼接过程中的仿射变换, 找到两幅相邻位置图像中的多对匹配点后, 求解仿射变换模型, 从而得到两图像间的转换矩阵和平移矩阵, 并进一步推出摄像机的位置变化情况, 初步实现摄像机定位。以及 Royer 等(2007)提出的“基于单目视觉的移动机器人定位和自动导航”研究, 利用单目相机和自然路标通过人工引导和学习实现移动机器人自主导航。经分析可知, 目前多数基于单目视觉的研究方法不能够实现室内外空间信息一体化集成, 需要用到多幅影像进行解算空间位置,

收稿日期: 2018-05-09; 预印本: 2018-09-10

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2016YFC0803103)

第一作者简介: 刘飞, 1987年生, 工程师, 研究方向为摄影测量与遥感。E-mail: liu_fei_99@sina.com

并且不能对观测值误差进行有效的探测和定位,以至于不能够排除残差影响(张子森等, 2011; 冯春, 2013; 陈易婷, 2016; Aider等, 2005; Ayala等, 2000)。

为了克服上述问题, 本文提出了一种基于编码图形和单目视觉传感器相结合的平台位置测量方法, 利用带世界坐标的编码影像实现室内外空间信息一体化集成; 利用单幅编码影像, 基于 Tukey 权因子模型的空间后方交会方法实现对观测值残差识别、观测值优化估值以及平台位置信息获取, 为室内空间移动载体提供具有较高鲁棒性的导航和定位测量服务。

2 技术路线

本文首先在室内环境布设了编码图形, 且精确采集每幅编码图形中心的坐标, 并构建编码图形物方坐标库; 其次, 利用本文提出的编码识别方法, 获取编码图形中心的像方和物方坐标; 然后利用 Tukey 抗差位置测量算法精确计算移动载体的空间位置; 最后通过实验验证本文方法的可行性和鲁棒性。详细技术路线如图 1 所示。

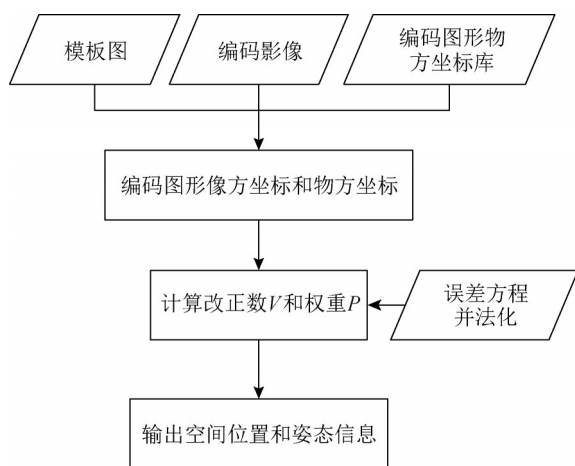


图1 本文方法的整体技术框架图

Fig.1 Technical framework

3 编码设计与识别

3.1 编码设计

为了能够为室内移动载体提供室内外统一的空间信息, 本文提出一种可以表示序列编码、对应物方坐标、且可用于图像自动识别的黑白编码图形。图形编号用黑白图形编码变换组合表示,

编码序列号与物方坐标数据库中编码一一对应(图2)。



图2 编码图形和模板图

Fig.2 Coding graphic and template graphic

编码图形为两部分, 中间部分为半径 R 相同的黑色圆环、白色圆环和 $3/4$ 圆组成的匹配模板, 外围为半径 R 的白色圆环隔离层和半径为 $2R$ 的编码层, 编码方式按圆心角等分原则, 将最外围编码层 24 等分, 黑色表示为 0、白色表示为 1, 按逆时针顺序以 24 位 0, 1 信息组成的二进制数作为该编码图形的唯一识别信息, 编码可以表示的信息数量为 2^{24} (王植等, 2011; 王至博等, 2010)。

3.2 编码识别

本文采用了一种基于单目视觉影像的编码图形像方坐标自动提取以及基于编码序列匹配的编码图形物方坐标获取方法, 计算流程图 3 所示, 结果如图 4、5、6、7 所示。

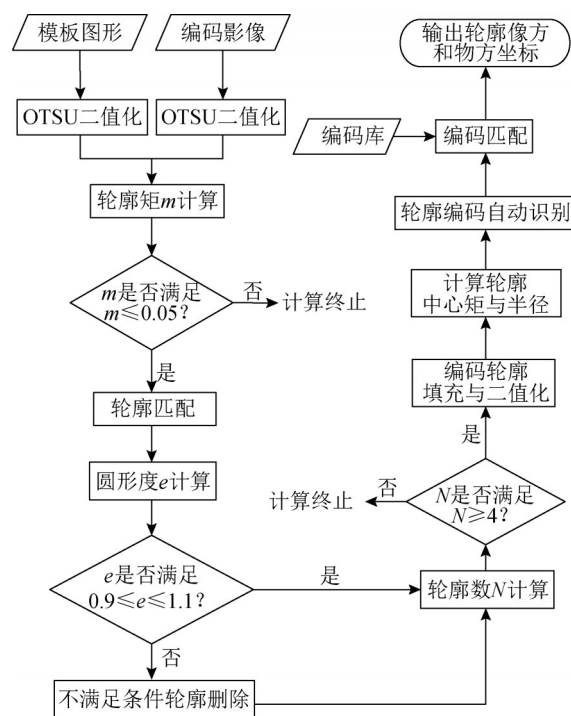


图3 编码图形识别流程图

Fig.3 Coding graphic recognition tree



图4 编码影像
Fig.4 Coding image

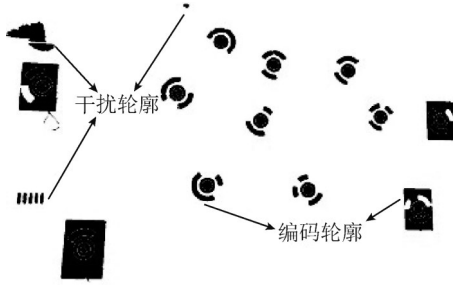


图5 轮廓匹配结果
Fig.5 Contour matching results

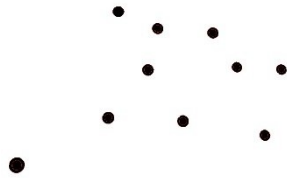


图6 干扰轮廓剔除效果
Fig.6 Interference contour culling results

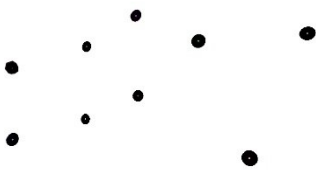


图7 编码图形矩心
Fig.7 Coding graphic centroid

(1) 对模板图形和编码硬性进行二值化处理, 二值化过程中灰度值阈值基于OTSU算法自动设置(Otsu, 1975); (2) 轮廓匹配: 采用轮廓匹配方法从编码影像上遍历编码图形, 如果计算的矩满足阈值设定则执行轮廓匹配, 否则终止计算(张铮等, 2014); (3) 轮廓筛选: 轮廓匹配过程中如果圆弧度

不满足阈值设定, 则定义为干扰轮廓, 该轮廓将被删除, 如果满足阈值设定, 则计算满足要求的轮廓数目, 轮廓数不小于4个, 如不满足则终止计算; (4) 像方坐标计算: 计算2倍面积与周长之比获得轮廓半径, 利用轮廓中心矩计算编码图形中心点坐标观测值(Bradski 和 Kaehler, 2008); (5) 物方坐标计算: 识别确定轮廓编码, 与轮廓编码库中的编码匹配映射, 获取编码图形中心点物方坐标, 物方坐标事先采用全站仪等仪器测定。

4 Tukey 抗差位置测量模型

4.1 位置计算方法

由于受拍摄角度影响致使编码图形在影像上发生变形, 使得编码图形的中心点与物方测量时实际位置不一致, 观测值存在残差。为了减少观测值残差对计算结果的影响, 本文提出了一种基于Tukey(周江文等, 1997)权因子模型的空间后方交会载体位置计算方法。

本文根据编码影像4个或以上均匀分布的已知像方坐标和物方空间坐标的点作为控制点, 且控制点不位于一个圆柱面上, 利用空间后方交会的方法计算相机位置(张剑清等 2009; 冯文灏, 2002)。

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x, y) 为像平面坐标, 为观测值, 有残差存在; (x_0, y_0) 为主点像平面坐标, 已知; f 为焦距, 已知 (X, Y, Z) 为物方点坐标, 由实地测量获得; (X_s, Y_s, Z_s) 为投影中心点坐标; 也是外方位线元素;

$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}$ 为与相机的内、外方位元素有关的系数矩阵。

对共线方程进行线性化, 可得到关于外方位元素的线性方程, 如下

$$\begin{cases} v_x = (x) - x + \frac{\partial x}{\partial X_s} \Delta X_s + \frac{\partial x}{\partial Y_s} \Delta Y_s + \frac{\partial x}{\partial Z_s} \Delta Z_s + \frac{\partial x}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial x}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial x}{\partial \kappa} \Delta \kappa \\ v_y = (y) - y + \frac{\partial y}{\partial X_s} \Delta X_s + \frac{\partial y}{\partial Y_s} \Delta Y_s + \frac{\partial y}{\partial Z_s} \Delta Z_s + \frac{\partial y}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial y}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial y}{\partial \kappa} \Delta \kappa \end{cases} \quad (2)$$

在不考虑物方点误差的情况下, 当利用若干点时, 可将式(2)写成矩阵形式

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{L} \quad (3)$$

式中,

$$\mathbf{V} = [v_x \ v_y]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{X} = [DX_s \ DY_s \ DZ_s \ Df \ Dw \ Dk]^T \quad (6)$$

式中, DX_s 、 DY_s 、 DZ_s 、 Df 、 Dw 、 Dk 表示影像外方位元素改正值。

$$\mathbf{L} = [lx \ ly]^T = [x - (x) \ y - (y)]^T \quad (7)$$

表示编码图形中心物方坐标估值。在计算过程中, 首先, 假设已知的外方位元素的初值, 结合编码图形中心的物方坐标, 然后利用贡献方程, 计算出编码图形中心的像方坐标 (x, y) (张剑清 等, 2009)。

根据最小二乘间接平差原理, 可以列出法方程

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{P}$ 为观测值的权矩阵。

法方程解的表达式为

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (9)$$

4.2 权因子计算方法

Tukey 估计是属于有淘汰区域的最大似然估计, 其影响函数有界, 对分布在中间部分的观测值小的变化不敏感, 但对有较大变化的观测值敏感, 能够根据观测值的变化分配不同的权重, 获得较优估值。Tukey 权因子函数为

$$\omega(u) = \begin{cases} (1 - u^2)^2, & |u| \leq 1 \\ 0, & |u| > 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $u = (l - \hat{\mathbf{A}}^T \mathbf{x}) / (c \cdot \text{MAD})$, $\text{MAD} = \text{med}_i |l_i -$

$\hat{\mathbf{A}}_i^T \mathbf{x}_{\text{Tukey}}|$, c 为回归因子, 一般取值为 6—12, 本文取 8。

式(9)中的观测值的权矩阵 $\mathbf{P}$ 由 Tukey 权因子由式(10)确定。

模型计算流程如图 8 所示。

(1)构建误差方程计算编码影像外方位元素未知数初值; (2)通过法方程计算编码图形中心像方坐标估值和改正值; (3)判断改正值是否超过限差, 如果未超出限差则输出正确结果, 反之则计算未知数改正数和权重, 并计算改正后的位置和姿态参数; (4)计算结果再次输入到法方程, 迭代计算, 直到结果满足限差要求或者超出迭代次数阈值为止。

知数改正数和权重, 并计算改正后的位置和姿态参数; (4)计算结果再次输入到法方程, 迭代计算, 直到结果满足限差要求或者超出迭代次数阈值为止。

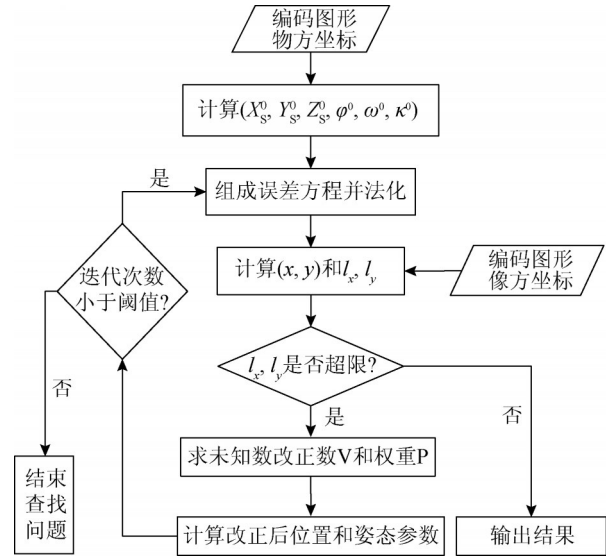


图8 位置测量流程图

Fig.8 Position measurement tree

5 实验验证

5.1 实验数据获取

实验过程中在室内随机布设了 22 个编码图形, 利用全站仪采集了精度优于 1 cm 的编码图形中心坐标, 建立了包括编码图形的编号和物方坐标的编码图形库。传感器选用 Sony ILCE-QX1 相机, 相机参数由张正友检校算法(Zhang, 2000)获得, 如表 1 所示。在 4 个位置获取了 4 组影像作为实验数据, 见图 9。由于受到拍摄角度和图像畸变差影响, 4 组影像中分别有 9 个、12 个、11 个和 17 个有效编码图形。

表1 相机标定参数

Table 1 Camera calibration parameters

定义	参数
分辨率	1618×1080
f_x/u (pixels)	1110.87598
f_y/u (pixels)	1117.20777
pixel size (um)	14.3×14.3
x_0 (pixel)	810.11558
y_0 (pixel)	529.80134

注: f_x, f_y 分别为像平面 x, y 方向的焦距, 单位为 mm; u 为像元大小, 单位为 μm ; (x_0, y_0) 为主点像平面坐标。

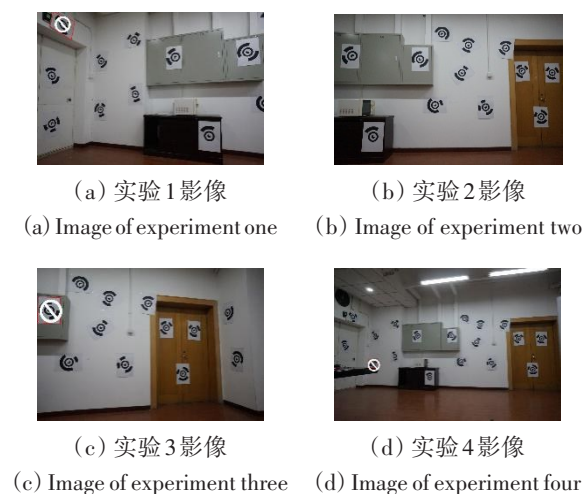


图9 实验影像
Fig.9 Experiment images

5.2 数据分析

拟采用以下思路进行分析, (1)基于等价单位权的方式计算每个观测值的残差, 并计算移动载体的位置信息; 分析统计各观测值残差中误差, 划分残差分布范围; (2)基于本文方法计算观测值残差、观测值权重以及移动载体的位置信息; (3)对比分析两种方法计算的移动载体位置精度, 对本文方法进行定量评价。

5.2.1 基于等价权方法的载体位置计算

采用本文方法获取的每组影像上编码图形中心像方坐标观测值, 在已知物方坐标的情况下, 基于空间后方交会的方式计算了编码图形的观测值残差和每组影像拍摄时的位置。

如图10、11所示, 实验1统计了9个编码图形的18个观测值残差, 最大残差为 -0.25 mm, 最小为 0.03 mm, 残差中误差为 ± 0.16 mm, 残差大小优于1倍中误差的观测值数量约占72.22%, 1倍至2倍中误差范围内的约占27.78%。

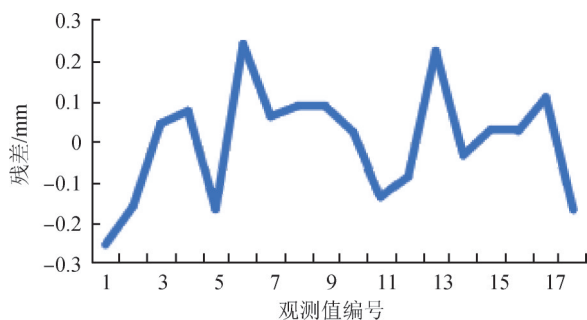


图10 实验1观测值残差统计
Fig.10 Observational residuals of experiment one

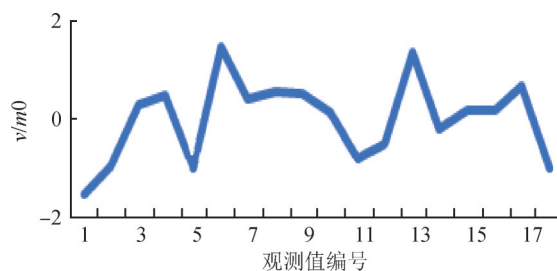


图11 实验1残差 $v/m0$
Fig.11 $v/m0$ of experiment two

如图12、13所示, 实验2统计了12个编码图形的24个观测值残差, 最大残差为 0.46 mm, 最小为 0.03 mm, 残差中误差为 ± 0.16 mm, 残差大小优于1倍中误差的观测值数量约占83.33%, 1倍至2倍中误差范围内的约占12.50%, 2倍至3倍中误差方位内的约占4.17%。

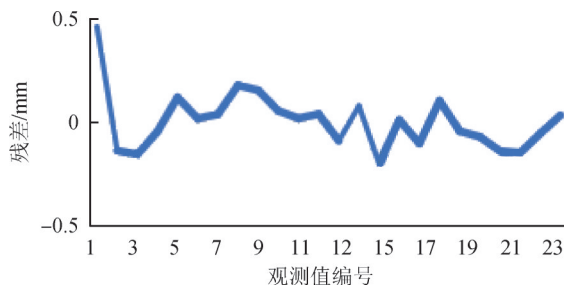


图12 实验2观测值残差统计
Fig.12 Observational residuals of experiment two

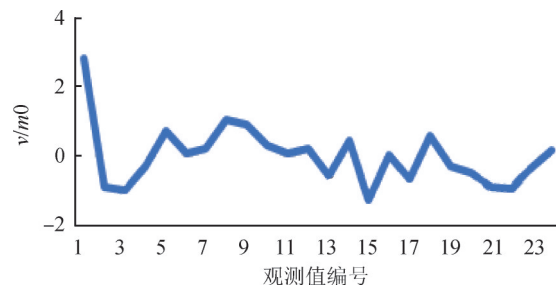


图13 实验2残差 $v/m0$
Fig.13 $v/m0$ of experiment two

如图14、15所示, 实验3统计了11个编码图形的22个观测值残差, 最大残差为 0.38 mm, 最小为 0.02 mm, 残差中误差为 ± 0.14 mm, 残差大小优于1倍中误差的观测值数量约占86.36%, 1倍至2倍中误差范围内的约占9.09%, 2倍至3倍中误差方位内的约占4.55%。

如图16、17所示, 实验4统计了17个编码图形的34个观测值残差, 最大残差为 -0.22 mm, 最小为 0.00 mm, 残差中误差为 ± 0.07 mm, 残差大小优于1倍中误差的观测值数量约占79.41%, 1倍至2倍中误差范围内的约占11.76%, 2倍至3倍中误差

范围内的约占 5.88%，超出 3 倍中误差范围以外的约占 2.94%。

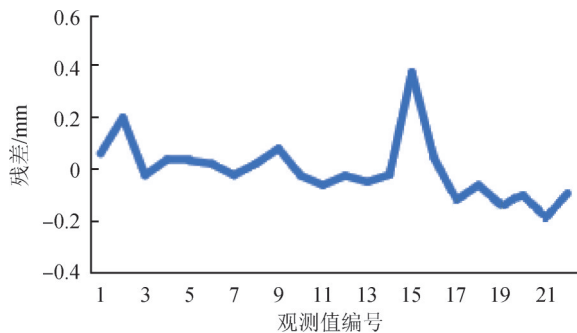


图 14 实验 3 观测值残差统计

Fig.14 Observational residuals of experiment three

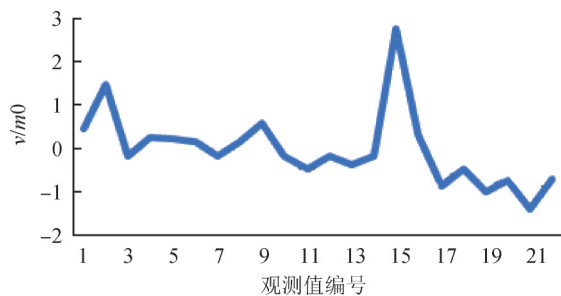


图 15 实验 3 残差 $v/m0$

Fig.15 $v/m0$ of experiment three

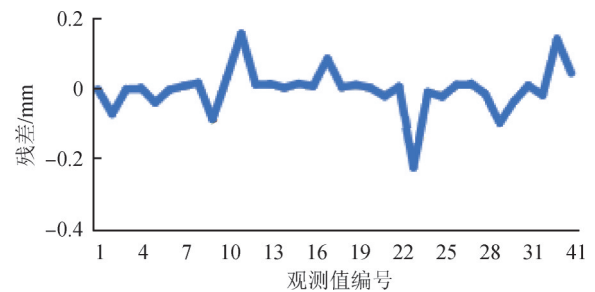


图 16 实验 4 观测值残差统计

Fig.16 Observational residuals of experiment four

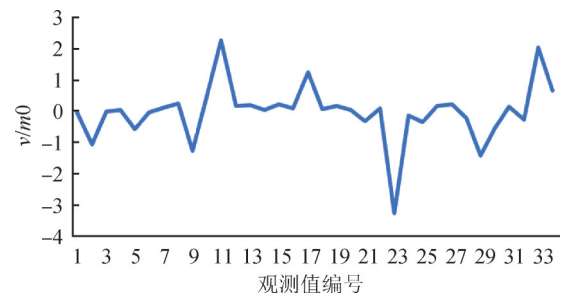


图 17 实验 4 残差 $v/m0$

Fig.17 $v/m0$ of experiment four

从图 9 可以看出, 受拍摄角度影像, 编码图形发生了形变, 导致编码中心像方坐标观测值存在残差, 但基于该方法计算时, 每个观测值的权重均为单位 1, 不能根据残差大小区别对待每个观测值。基于本方法的计算结果如表 2 所示。

表 2 空间位置计算结果及误差

Table 2 Results and errors of spatial position

		/mm					
	结果	X_s	Y_s	Z_s	e_x	e_y	e_z
实验 1	等价权方法	6932.40	9410.20	12062.00	-78.60	-23.80	48.00
	真值	7011.00	9434.00	12014.00			
实验 2	等价权方法	6991.10	9246.10	12189.00	79.10	-28.90	-12.00
	真值	6912.00	9275.00	12201.00			
实验 3	等价权方法	7436.20	9432.00	12041.00	-9.80	-37.00	-27.00
	真值	7446.00	9469.00	12068.00			
实验 4	等价权方法	8506.30	9533.40	15264.00	90.30	-52.60	16.00
	真值	8416.00	9586.00	15248.00			

5.2.2 基于本文方法的载体位置计算

为了减弱甚至抑制残差较大的观测值, 基于本文方法计算了引入权因子后的观测值残差大小、观测值权重和载体位置。

图 18、19、20、21 表示了 4 组实验观测值残差和对应的权重关系, 其中蓝色表示观测值残差, 红线表示观测值对应的权重。

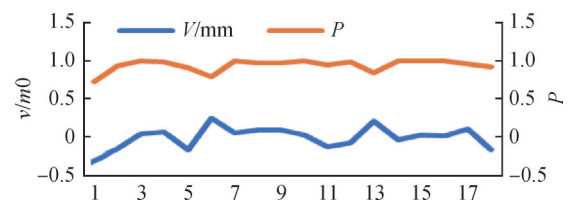


图 18 实验 1 残差 V 与权重 P 关系

Fig.18 Relationship between V and P of experiment one

(1)在实验 1 中, 观测值的最大权重为 1.00, 最

小权重为 0.73, 残差大小优于 1 倍中误差的观测值平均权重为 0.97; 1 倍至 2 倍中误差范围内的观测值平均权重为 0.85。(2)实验 2 中观测值的最大权重为 1.00, 最小权重为 0.50, 残差大小优于 1 倍中误差的观测值平均权重为 0.95; 残差位于 1 倍至 2 倍中误差范围内的观测值平均权重为 0.50, 图 13 中残差位于 2 倍至 3 倍中误差的观测值, 在本文方法中, 因迭代过程中引入了权因子, 使得观测值残差和残差中误差均发生改变, 导致该观测值残差变为 1 倍至 2 倍中误差之间, 权重变为 0.50—1.00, 该部分观测值的贡献度有所减弱。(3)实验 3 中观测值的最大权重为 1.00, 最小权重为 0.00, 残差大小优于 1 倍中误差的观测值平均权重为 0.95; 1 倍至 2 倍中误差范围内的观测值平均权重为 0.36, 2 倍中误差范围外的观测值平均权重为 0.00。(4)实验 4 中观测值的最大权重为 1.00, 最小权重为 0.00。本组实验中, 有 31 个观测值的残差分布在 1 倍中误差范围内, 残差最小为 0.0002 mm, 最大为 0.0749 mm; 1 个观测值残差位于 1 倍至 2 倍中误差范围、2 个观测值残差位于 2 倍以外中误差范围。残差绝对值小于 0.0037 观测值权重最大, 为 1.00。残差位于 1 倍中误差范围内的观测值平均权重为 0.85; 1 倍中误差范围外的观测值平均权重为 0.00。

通过实验可以看出本文方法可以依据残差大小调整观测值在结果计算过程中的参与程度, 使

得残差优于 1 倍中误差的观测值成为有效信息, 并充分利用; 1 倍至 2 倍中误差范围的观测值成为可用信息, 并降权利用; 2 倍中误差范围外的观测值当做有害信息, 并抑制处理。基于本文方法的载体位置计算结果如表 3 所示。

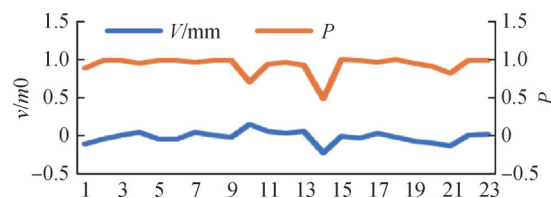


图 19 实验 2 残差 V 与权重 P 关系

Fig.19 Relationship between V and P of experiment two

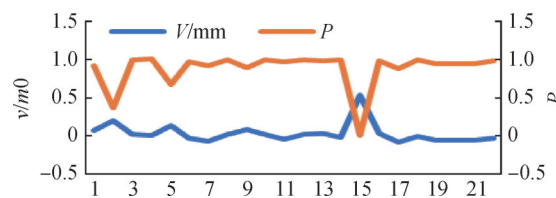


图 20 实验 3 残差 V 与权重 P 关系

Fig.20 Relationship between V and P of experiment three

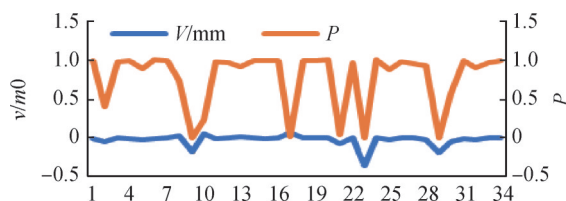


图 21 实验 4 残差 V 与权重 P 关系

Fig.21 Relationship between V and P of experiment four

表 3 空间位置计算结果及误差

Table 3 Results and errors of spatial position

		/mm					
	结果	X_s	Y_s	Z_s	e_x	e_y	e_z
实验 1	本文方法	6957.00	9416.00	12048.00	-54.00	-18.00	34.00
	真值	7011.00	9434.00	12014.00			
实验 2	本文方法	6876.00	9235.90	12206.00	-36.00	-39.10	5.00
	真值	6912.00	9275.00	12201.00			
实验 3	本文方法	7435.10	9485.00	12075.00	-10.90	16.00	7.00
	真值	7446.00	9469.00	12068.00			
实验 4	本文方法	8342.60	9612.50	15242.00	-73.40	26.50	-6.00
	真值	8416.00	9586.00	15248.00			

5.2.3 基于等价权与本文方法的载体位置计算精度对比分析

基于以上两种方法计算的载体位置和真实载体位置进行了对比分析, 结果如表 4 所示, 可以计

算出, 在单目视觉的实验条件下本文方法对比等价权最小二乘法在计算精度上有所改善, 平面精度最小提升 29.76%, 最大提升 49.42%; 高程精度最小提升 29.17%, 最大提升 74.07%。

表4 载体位置计算精度对比
Table 4 Comparison of positioning accuracy

		/mm		
结果		e_x	e_y	e_z
实验1	等价权方法	-78.60	-23.80	48.00
	本文方法	-54.00	-18.00	34.00
	真值	提升 30.69%		提升 29.17%
实验2	等价权方法	79.10	-28.90	-12.00
	本文方法	-36.00	-39.10	5.00
	真值	提升 36.89%		提升 58.33%
实验3	等价权方法	-9.80	-37.00	-27.00
	本文方法	-10.90	16.00	7.00
	真值	提升 49.42%		提升 74.07%
实验4	等价权方法	90.30	-52.60	16.00
	本文方法	-73.40	26.50	-6.00
	真值	提升 29.76%		提升 62.50%

综合实验结果可知, 本文采用的方法在现有的实验条件下能够根据残差大小获得观测值权重, 在计算过程中使得具有不同程度残差的观测值获得较优估值, 提升了测量结果的准确度。但是受拍摄角度影响, 导致观测值残差分布不均匀, 造成多组试验结果精度波动比较大, 因此不同拍摄角度的观测值残差分布仍需要在下一步的工作中进行量化分析。

6 结 论

本文面向室内移动载体定位的需求, 研究了基于编码图形辅助的单目视觉的载体位置测量方法, 并通过引入权因子调整观测值对测量结果的影响, 提高了载体位置计算精度, 主要结论如下:

(1) 本文设计的编码图形可被精确识别与定位, 能够作为移动载体位置测量的物方控制点; 但受拍摄角度影响, 导致编码图形产生形变, 致使编码图形中心点物方坐标提取存在残差, 影响载体位置计算精度。

(2) Tukey 权因子模型能够对编码图形中心物标的观测值残差进行有效的识别, 并可根据残差情况计算观测值权重, 调整观测值在载体位置计算过程中参与度。

(3) 基于 Tukey 权因子模型的空间后方交会方法, 能够用于计算载体的位置信息, 并获得较优估值, 对比等价权方法, 在平面和高程精度方面均有所改善。

基于本文的方法和结论, 后续的研究工作会

在以下两个方面继续开展研究: (1) 引入 INS(惯性导航系统) 传感器, 作为载体位置变化的连续测量设备, 减少编码图形空间布设数量, 提高载体位置测量的频率; (2) 针对室内弱纹理环境, 研究编码图形与 INS 组合使用方法, 提高环境适应能力。通过进一步的研究, 构建一种室内移动载体高鲁棒性, 稳定性位置测量方法, 服务于室内导航定位和测图需求。

参考文献(References)

- Aider O A, Hoppenot P and Colle E. 2005. A model-based method for indoor mobile robot localization using monocular vision and straight-line correspondences. *Robotics and Autonomous Systems*, 52(2/3): 229-246 [DOI: 10.1016/j.robot.2005.03.002]
- Ayala V, Hayet J B, Lerasle F and Devy M. 2000. Visual localization of a mobile robot in indoor environments using planar landmarks// *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Takamatsu, Japan: IEEE: 275-280 [DOI: 10.1109/IROS.2000.894617]
- Bradski G and Kaehler A. 2008. *Learning OpenCV*. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc
- Chen Y T. 2016. *Research and Application on Monocular Vision for Mobile Robot Navigation and Localization Technology*. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China (陈易婷. 2016. 基于单目视觉的移动智能机器人的导航定位技术的研究和应用. 成都: 电子科技大学)
- Feng C. 2013. *Research on Identification and Location of Object Based on Monocular Vision*. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (冯春. 2013. 基于单目视觉的目标识别与定位研究. 南京: 南京航空航天大学)
- Feng W H. 2002. *Close Range Photogrammetry*. Wuhan: Wuhan University Press (冯文灏. 2002. 近景摄影测量——物体外形与运动状态的摄影法测定. 武汉: 武汉大学出版社)
- Otsu N. 1975. A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 11(285/296): 23-27
- Royer E, Lhuillier M, Dhome M and Lavest J M. 2007. Monocular vision for mobile robot localization and autonomous navigation. *International Journal of Computer Vision*, 74(3): 237-260 [DOI: 10.1007/s11263-006-0023-y]
- Shen H J. 2009. *Research on Camera Location based on Monocular Vision*. Changchun: Jilin University (沈慧杰. 2009. 基于单目视觉的摄像机定位方法的研究. 长春: 吉林大学)
- Wang Z, Wu L X and Kong X Q. 2011. Mobile positioning in blind environments (I): pattern recognition algorithms for coded sequence pattern signposts. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 32(5): 732-735 (王植, 吴立新, 孔祥勤. 2011. 盲环境移动定位(I): 序列编码图形路标识别算法. 东北大学学报(自然科学版), 32(5): 732-735) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-3026.2011.05.031]
- Wang Z B, Yao X and Luan X K. 2010. Automated circle target detec-

- tion in close-range photogrammetry based on Hu moments. Urban Geotechnical Investigation and Surveying, (5): 93-97(王至博, 姚喜, 栾学科. 2010. 基于 Hu 矩的近景摄影测量圆形标志的自动检测. 城市勘测, (5): 93-97) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8262.2010.05.023]
- Zhang J Q, Pan L and Wang S G. 2009. Photogrammetry. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press (张剑清, 潘励, 王树根. 2009. 摄影测量学. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社)
- Zhang Z, Xu C, Ren S X and Han H L. 2014. Digital Image Process and Robot Vision. 2nd ed. Beijing: PostsandTelecom Press (张铮, 徐超, 任淑霞, 韩海玲. 2014. 数字图像处理与机器视觉——Visual C++与 Matlab 实现. 2 版. 北京: 人民邮电出版社)
- Zhang Z M, Wang P and Sun C K. 2011. Position and orientation measurement method with monocular vision and digital simulation. Journal of Tianjin University, 44(5): 440-444(张子森, 王鹏, 孙长库. 2011. 单目视觉位姿测量方法及数字仿真. 天津大学学报, 44(5): 440-444) [DOI: 10.3969/j.issn.0493-2137.2011.05.012]
- Zhang Z Y. 2000. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11): 1330-1334 [DOI: 10.1109/34.888718]
- Zhou J W, Huang Y C and Yang Y X. 1997. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press: 74-82(周江文, 黄幼才, 杨元喜. 1997. 抗差最小二乘法. 武汉: 华中理工大学出版社: 74-82)
- Zhou N. 2007. Research on Camera Location based on Monocular Vision. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (周娜. 2007. 基于单目视觉的摄像机定位技术研究. 南京: 南京航空航天大学)

A monocular indoor vision position measurement method based on the Tukey model

LIU Fei^{1,2}, ZHANG Jixian³, WANG Jian⁴, ZHANG Xinxin⁵, Ding Xiaobo²

1.China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2.Key Laboratory for Aerial Remote Sensing Technology of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Beijing 100039, China;

3.National Quality Inspection and Testing Center for Surveying and Mapping Products, Beijing 100830, China;

4.Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China;

5.Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

Abstract: Localization is one of the core technologies of indoor surveying and mapping services. To achieve an accurate indoor navigation and positioning, many indoor navigation and positioning technologies have been introduced. Given that visual sensors can generate an abundant amount of information at low cost and can be easily implemented, the space navigation and positioning method based on vision sensors has become a research hotspot. This paper proposes a robust method for measuring the mobile platform position measurement based on the coding graphic images that are captured by a monocular vision sensor.

First, a series of coding graphics for the positioning of the carrier are designed. Coding graphics can be accurately identified through contour matching, and the coordinates of the center of graphics can be obtained by means of moment calculation and coding matching. However, due to the shooting angle, the coding image is deformed, thereby resulting in the residual errors of the image coordinates. Second, the Tukey weight factor model is used to calculate the weight according to the residual of the observed value. The value with a residual error of less than $1s_0$ will be fully utilized, the value with a residual error ranging from $1s_0$ to $2s_0$ will be used with reduced weight, and the values with a residual error outside the range of $2s_0$ will be suppressed. Third, the space resection methods based on Tukey and unit weights are adopted and used to calculate the position information of the mobile vehicle. Finally, experimental environments are then built, where 22 coding graphics are randomly pasted on the wall, and the coordinates of the coding graphics with accuracies of greater than 1 cm are measured by the total station. Four groups of images are captured, with each group having 9, 12, 11, and 17 available coding graphics of each group.

The experiment results indicate that the proposed methods (based on unit weight and Tukey weights can be used to calculate the position of mobile carriers in a room. The method based on Tukey weight obtained better results and improved the plane and elevation accuracies by 29.76% – 49.42% and 29.17% – 74.07%, respectively.

In general, the coding graphics designed in this paper can be accurately identified and positioned, the Tukey weight factor model can effectively identify the observed value residuals, and the space resection method based on the Tukey weight factor model can be used to calculate the position information of the vehicle and obtain better estimates. Therefore, the proposed method can provide high-precision navigation and positioning measurement services for indoor space mobile carriers.

Key words: indoor positioning, coding graphics, monocular vision, tukey weight, robust model

Supported by National Key Research and Development Project of China (No. 2016YFC0803103)