

基于迭代的旋转视觉元件针脚位姿估计精度优化

邝泳聪, 陈泽田

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 高效率型插件机通过同步带拖动旋转轴, 插件模块紧凑重量轻, 但大角度转动时旋转角定位误差偏大, 针对旋转角定位误差影响针脚位姿估计精度的问题, 提出基于位置约束和迭代拟合的位姿估计精度优化方法; 元件针脚的相对位置固定, 因此旋转测量时所有针脚转过相同角度, 且针脚轨迹为圆周, 该方法根据这两种约束构造了圆轨迹拟合方程和旋转角拟合方程, 通过迭代实施这两种拟合得到旋转角的精确估计值, 从而实现了元件针脚位姿精密估计; 为了验证文章方法的有效性, 进行了理论分析和仿真, 仿真结果表明: 文章方法可有效降低因旋转角定位误差增大对针脚位姿估计的影响, 常用针脚元件的最大位姿估算误差在 ± 0.018 mm之内, 耗时低于 65 ms, 算法的精度和实时性均能满足异形插件机的实际需求。

关键词: 旋转视觉; 位姿估计; 拟合迭代; 位置约束; 异形插件

Research on Optimal Algorithm for 3D Pose Estimation of Component Pins

KUANG Yongcong, CHEN Zetian

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The rotating shafts of high efficiency inserting machine are drive with synchronous belt, it makes the new design insertion module compact and light, but the error of shafts rotation increases when rotate large angle, this will degrade the estimation accuracy of pin pose. In order to solve this problem, a improved pose estimation method based on location constraints and iterative fitting is proposed. The pin of the component is fixed, so all pins pass same angle every time they rotate during rotation measurement, and the rotation trajectories of all the pins are on circles. Base on these two constraints, circular trajectory fitting function and rotation angle fitting function was constructed, by iteratively implementing these two fitting operations, accurate estimation of the rotation angle is obtained, as result the precise position estimation of component pin is achieved. To verify the proposed method, theoretical analysis and simulation was conducted, the results show that the method can effectively reduce the influence of pins pose estimation when rotate large angle. The maximum pose estimation error of frequent used pins within ± 0.018 mm and the time costs less than 65 ms. The accuracy and efficiency of the proposed method can meet the requirements of automatic inserting machine.

Keywords: Rotational stereo vision; pose estimation; iterative fitting; Odd-shape components Insertion

0 引言

插件机是将针脚电子元件插装到印刷电路板的精密组装设备, 当前异形插件机采用的底部视觉算法简单直观, 但由于部分元件底部反光较强, 导致针脚图像提取困难, 这影响了插件良率。插件机旋转视觉通过转动元件, 从不同角度位置获取针脚的背光图像, 有助于解决反光影响针脚识别精度的问题。

随着插件机的推广应用, 除了保证精度外, 插件效率上也提出更高的要求, 当前高精度机型的插件模块, 采用伺服电机一对一直驱动, 保证了定位精度, 但其插件模块较重体积也难以缩小, 因此高效率机型的插件模块设计, 改由一个电机通过同步带拖动多个旋转轴, 好处是减轻插件模块重量也便于缩小体积, 不利因素是同步带存在弹性变形和齿隙, 只做微小角度转动时, 同步带传动的旋转轴可以满足插件精度要求, 但做大角度转动时, 角度旋转误差较大。前期旋转视觉研究主要针对高精度机型, 该机型

旋转轴的实际旋转角度与理论值非常接近(误差小于 0.03°), 因此用旋转角的理论值计算针脚姿态, 精度能满足要求。将旋转视觉应用到高效率机型时, 由于实际旋转角与理论值差异大, 用旋转角理论值估算针脚位姿, 精度难以保证。常规的解决方案是每个旋转轴安装高精度旋转编码器, 测量实际的转动角度, 但这不但增加成本也不利于插件模块小型化, 因此有必要从软件算法上寻找解决方法。

旋转测量时元件针脚之间相对位置固定, 因此转动取像时所有针脚转过的角度相同。借鉴现有基于约束的优化方法, 本文提出一种基于位置约束和迭代拟合的针脚位姿估计精度优化方法, 通过上述针脚位置约束拟合出针脚的实际初始角和每次转过的角度。基于约束的优化是工程领域的一个重要课题, 约束条件的存在限定了决策变量的可行范围, 使解更具目的性^[1]。空间位置约束是一种常见的数学约束, 通常表现为目标点相对参考系位置的几何关系。工程上已有诸多利用相对位置不变性进行后续处理的算法流程, 多视图聚

收稿日期: 2022-03-17; 修回日期: 2022-03-24。

基金项目: 广州市科技项目(20190420020)。

作者简介: 邝泳聪(1970-)男, 广东台山人, 博士, 副教授, 主要从事机器视觉、精密制造方向的研究。

引用格式: 邝泳聪, 陈泽田. 基于迭代的旋转视觉元件针脚位姿估计精度优化[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 231-237, 261.

类根据多视角包含共同空间区域信息的一致性原则作为约束条件, 从而对不同视角拍摄的对象进行聚类分析^[2], ICP 点云拼接则是根据刚性不变性估计变换矩阵并利用点云簇内部空间坐标相对不变的关系进行迭代的三维拼接^[3]。此外, 在视觉标定中, Zhang 式标定法利用了标定板角点相对位置不变约束完成空间点至相机坐标系的对应关系^[4], 根据目标结构特点, 采用几何约束的方法是提升位姿估算精度的有效方法。文献 [5] 利用物体表面多种几何特征, 如点与点、线与线的位置约束构造超定方程进而获得高精度的位姿估计。文献 [6] 根据物体几何不变性计算协方差从而提高深度相机的位姿估计精度; 苏杰^[7]等通过夹持器的形状约束来对目标进行位姿估计; Hou 等^[8]利用单目相机拍摄物体旋转不同角度的图片, 并利用几何约束进行三维重建以提高精度, 文献 [9-10] 基于相机成像线性特征实现对位姿估计的优化及高精度的畸变校正。

本文所提出的针脚位姿估计优化方法, 利用元件各针脚相对位置固定的约束关系, 将圆轨迹拟合与旋转角迭代拟合相结合获取实际旋转角的最优估计, 进而得到精密的针脚位姿估计值。论文先建立基于位置约束的旋转角拟合模型, 并从理论上分析了该方法的可行性; 进而通过仿真分析该方法的精度与图像噪声、像素分辨率、针脚数和旋转取像点数等主要因素的关系, 并进行效率分析, 从算法精度和效率上验证了该方法的可行性。

1 针脚图像坐标与旋转角的函数关系

1.1 旋转视觉针脚位姿重构模型

针脚测量时旋转轴带动元件旋转, 在不同的角度位置获取针脚的侧面图像^[21]。如图 1~2 所示, 针脚末端在图中用点表示, 理想情况下, 旋转轴坐标系与世界坐标系重合且在摄像机坐标系的轴上, 但由于加工和装配都会存在误差, 旋转轴与世界坐标轴之间有一定夹角。

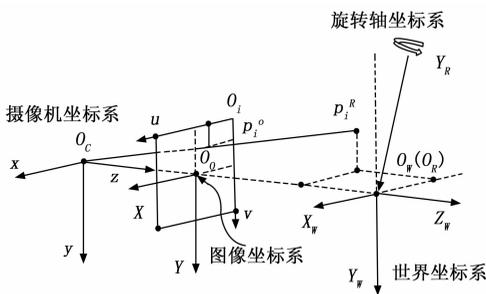


图 1 旋转立体视觉成像模型

目标点 P_i 的旋转轴坐标系坐标与图像投影坐标间的转换关系为^[11]:

$$p_i^l = \frac{1}{z_i^c} * {}^lM_C * {}^cM_R * P_i^R \quad (1)$$

其中: P_i^R 表示点 P_i 的旋转轴坐标系坐标, $P_i^R = [x_i^R, y_i^R, z_i^R, 1]^T$, p_i^l 是对应投影点的图像坐标系坐标, $p_i^l = [u_i, v_i, 1]^T$, z_i^c 是目标点到摄像机光心 O_C 的距离, cM_R 表示从旋转轴坐标系到摄像机坐标系的转换矩阵, lM_C 表示从

摄像机坐标系到图像坐标系的转换矩阵。如图 2 所示, 点 P_i 绕旋转轴 Y_R 转过 θ_k 角度后到达新位置 (记为点 P_{i+1}^R), θ_0 是第一次取像时针脚 P_i 所在的角度位置, θ_k 是从第一次取像位置转到第 k 次取像位置时旋转轴转过的角度, r 是旋转半径, 即针脚末端到旋转轴中心线的距离, p_i, p_{i+1} 是针

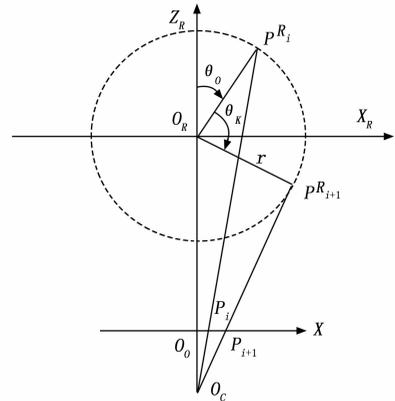


图 2 旋转角与针脚图像投影的关系

脚的图像投影坐标, 有:

$$P_{i+1}^R = M_{\theta}^R * P_i^R \quad (2)$$

其中: $M_{\theta}^R = \begin{bmatrix} \cos\theta_k & 0 & \sin\theta_k & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_k & 0 & \cos\theta_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。由式 (1) 和

(2) 可得到点 P_{i+1}^R 的图像投影坐标:

$$p_{i+1}^l = \frac{1}{z_{i+1}^c} * {}^lM_C * {}^cM_R * M_{\theta}^R * P_i^R \quad (3)$$

根据式 (1) ~ (3) 可得到 $2 * k$ 个方程, 经初等变换消去 z_i^c, z_{i+1}^c , 得到针脚 P_i 的三维重构模型^[11]:

$$L = H * P_i^R \quad (4)$$

其中: $L = L_z \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ X_2 \\ Y_2 \\ \vdots \\ X_k \\ Y_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -fL_x \\ 0 \\ -fL_x \\ 0 \\ \vdots \\ -fL_x \\ 0 \end{bmatrix}$,

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{2k-1,1} & h_{2k-1,2} & h_{2k-1,3} \\ h_{2k,1} & h_{2k,2} & h_{2k,3} \end{bmatrix}$$
。H 中的各个元素包含系统结

构参数 ($f, L_x, L_z, \alpha, \beta$) 和旋转角参数 (θ_0, θ_k), X_k, Y_k 是针脚的图像投影坐标, $X_k = u_k - u_0, Y_k = v_k - v_0$ 。经过标定的系统, 矩阵 L 和 H 的值已知, 因此通过求解超定方程组 (4), 可以得到针脚 P_i^R 的坐标估算值^[11]。前期研究中

旋转角参数 (θ_0, θ_K) 采用理论值, 也就是发给旋转轴电机的控制指令值; 式 (4) 虽然将元件所有针脚的放在同一个方程求解, 但各个针脚的位姿估算是相互独立的。

1.2 针脚图像坐标与旋转角的函数关系

如图 2 所示, 在角度位置 θ_i 时 P_i^R 坐标为:

$$\begin{cases} x_i^R = r \sin \theta_i \\ z_i^R = r \cos \theta_i \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\theta_i = \theta_0 + \theta_K$, 将式 (5) 代入式 (4) 整理可得到针脚 P_i^R 图像坐标与旋转角的函数关系:

$$\begin{cases} X_k = \frac{f r \sin(\theta_0 + \theta_K)}{r \cos(\theta_0 + \theta_K) + L_z} \\ Y_k = \frac{f y_i^R}{r \cos(\theta_0 + \theta_K) + L_z} \end{cases} \quad (6)$$

其中: $k=1$ 时 $\theta_K=0$ 。

2 针脚位姿估计的迭代拟合

2.1 基于位置约束的旋转角求解模型

1) 针脚位置约束:

元件针脚旋转测量时, 针脚间存在位置约束关系: 元件多个针脚之间相对位置固定, 因此每次转动取像时所有针脚转过的角度相同, 从式 (6) 可知, 在每个取像角度位置, 每个针脚都会增加两个图像坐标方程, 针脚越多增加的方程数越多, 而待求变量只增加一个 θ_K , 本文所提出的旋转角拟合方法, 就是通过上述的针脚位置关系拟合出各个针脚的实际初始角度位置 θ_0 和每次转过的 θ_K 。

2) 旋转角求解模型:

旋转取像过程中, 各个针脚的转动轨迹基本在同一个高度, 也就是每个针脚对应的 y_i^R 变化很小; 另外由式 (6) 可知当 L_z 够大时, Y_k 与角度 θ_0 和 θ_K 关系比较微弱; 由于噪声、畸变等因素对针脚图像坐标的影响, 如果 Y_k 参与运算反而带来更大误差, 因此本文中 Y_k 不参与 θ_0 和 θ_K 求解。对式 (6) 整理得到针脚 i 在取像位置 k 的针脚图像坐标与初始角、旋转角及半径的关系模型:

$$X_{i,k}(\theta_{0,i}, \theta_{K,k}) = \frac{f r_i \sin(\theta_{0,i} + \theta_{K,k})}{r_i \cos(\theta_{0,i} + \theta_{K,k}) + L_z} \quad (7)$$

式中, i 指元件第 i 个针脚, 如 $x_{i,k}$ 指针脚 i 在第 k 个取像位置的 X 方向图像投影坐标, r_i 是针脚 i 的旋转半径, $\theta_{0,i}$ 指针脚 i 的初始取像角度, 每个针脚位置不一样, 因此每个针脚的初始角度不同; $\theta_{K,k}$ ($k=1, 2, \dots$) 指从初始取像位置转到第 k 个取像位置时转过的角度增量值, $k=1$ 时 $\theta_{K,k}=0$ 。当 $\theta_{0,i}$ 和 $\theta_{K,k}$ 已知时, 根据式 (7) 可以得到针脚图像坐标的估计值。

3) 旋转角拟合的可行性:

旋转半径 r_i 与针脚坐标 P_i^R (x_i^R, z_i^R) 有关, 由式 (4) 可知针脚坐标 (x_i^R, z_i^R) 是 $X_k, \theta_{0,i}, \theta_{K,k}$ 的函数^[11], 可见式 (7) 中只有 $\theta_{0,i}$ 和 $\theta_{K,k}$ 才是待求变量。记针脚数量为 N_p , 旋转取像位置数为 K , 则根据式 (7) 构造的方程数为 $N_p * K$, 而待求变量数为 $N_p + K - 1$, 方程数量与待求变量数量之差为 $(N_p - 1) * (K - 1)$ 。旋转视觉要求 $K \geq 2$, 可见当 $N_p > 1$ 时根据式 (7) 构造的方程组均为超定, N_p 或 K 越大超定

方程数量越多, 对噪声、图像畸变、图像离散误差等因素的抑制能力越强, $\theta_{0,i}$ 和 $\theta_{K,k}$ 的求解结果精度越高。当 $N_p=1$ 时, 根据式 (7) 构造的方程组为正定, 也能求解 $\theta_{0,i}$ 和 $\theta_{K,k}$, 但对噪声等误差因素没有抑制能力。可见本文提出的基于位置约束的旋转角拟合方法理论上是可行的。

2.2 基于旋转角迭代拟合的针脚位姿估计

1) 针脚位姿估计迭代拟合流程:

旋转角 $\theta_{0,i}$ 和 $\theta_{K,k}$ 拟合是高精度针脚位姿估计的关键, 而进行旋转角迭代前, 需要提供 $r_i, \theta_{0,i}$ 和 $\theta_{K,k}$ 的初始值; 旋转半径 r_i 与针脚坐标 P_i^R 有关, 迭代拟合优化后的旋转角可提升针脚位姿估计精度, 进而可得到更准确的旋转半径 r_i 估计值, 因此旋转角迭代和针脚位姿估计迭代交替进行。如图 3 所示, M 表示迭代拟合最大次数, 针脚位姿迭代拟合主要分三步: 第一步用式 (4) 估算各针脚坐标; 第二步利用各个针脚的坐标估算值进行圆拟合, 算出各个针脚的旋转半径 r_i ; 第三步根据式 (7) 进行旋转角迭代拟合, 如果拟合后的针脚图像坐标残差平方和大于设定值, 则返回进行新一轮的迭代; 如果针脚图像坐标残差平方和小于设定值, 或者达到给定迭代次数, 则根据旋转角拟合的最新章节用式 (4) 算出各个针脚坐标估计值, 完成针脚位姿估计。首次针脚位姿估算和旋转角拟合, 用 $\theta_{0,i}$ 和 $\theta_{K,k}$ 的理论值作为旋转角的初始值。每次旋转角迭代拟合的结果作为下一轮针脚位姿迭代估算的初始值;

(2) 旋转轨迹拟合:

除了因为定位偏差外, 转动取像时针脚的轨迹都在圆周上。每个针脚与旋转中心距离不一样, 因此各针脚的圆轨迹半径不同。针脚 i 的 k 个取像点所在的圆周轨迹方程为:

$$(x_{i,k}^R - a_1)^2 + (z_{i,k}^R - a_2)^2 = r_i^2 \quad (8)$$

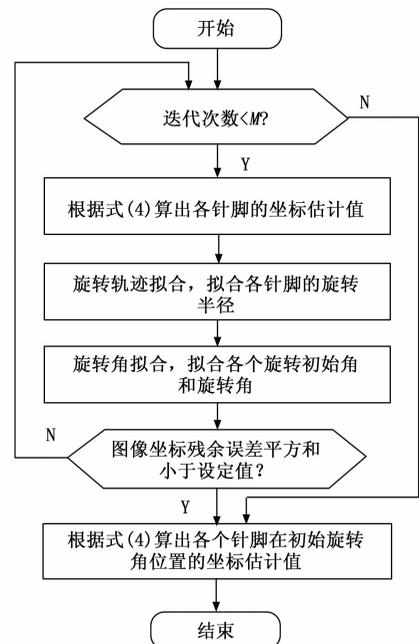


图 3 针脚位姿估计的迭代拟合流程

其中： r_i 为旋转半径，为圆心坐标， $x_{i,k}^R$ 、 $z_{i,k}^R$ 为针脚 i 在第 k 个旋转取像位置的坐标估计值（简单起见，下文对旋转轴坐标变量不再标示上标 R ）。将式 (8) 展开化为：

$$b_1 x_{i,k} + b_2 z_{i,k} - b_{ri} = x_{i,k}^2 + z_{i,k}^2 \quad (9)$$

其中： $b_1 = 2a_1$ ， $b_2 = 2a_2$ ， $b_{ri} = a_1^2 + a_2^2 - r_i^2$ 。根据式 (9) 构造得到针脚 i 的圆周轨迹参数拟合方程组：

$$\begin{bmatrix} x_{i,1} & z_{i,1} & 1 \\ x_{i,2} & z_{i,2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i,k} & z_{i,k} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ -b_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i,1}^2 + z_{i,1}^2 \\ x_{i,2}^2 + z_{i,2}^2 \\ \vdots \\ x_{i,k}^2 + z_{i,k}^2 \end{bmatrix}$$

简记为：

$$[c_i \quad I] \begin{bmatrix} b \\ -b_{ri} \end{bmatrix} = d_i \quad (10)$$

因为元件的所有针脚都同时绕旋转轴转动，因此所有针脚要对同一个旋转中心进行拟合，由式 (10) 得到 i 个针脚的圆轨迹拟合方程：

$$\begin{bmatrix} c_1 & I & 0 & \cdots & 0 \\ c_2 & 0 & I & 0 & 0 \\ \vdots & \cdots & \cdots & \ddots & 0 \\ c_i & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ -b_{r1} \\ -b_{r2} \\ \vdots \\ -b_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

用奇异值分解等方法解式 (11)，可得出各针脚旋转半径值及旋转中心。

3) 旋转角迭代拟合：

根据式 (7) 构造的旋转角方程属于非线性方程，一般通过最小二乘法迭代拟合求解^[12]。基于迭代的最小二乘拟合是提升位姿估算精度的有效方法，文献 [13] 提出一种基于最小二乘的正交迭代算法，并通过实验证实该算法在提升相机位姿估计精度的有效性；文献 [14] 提出一种基于归一化图像平面中单应性误差的最小二乘解法以及一种迭代估计方法，实现了高精度的视觉测距；文献 [15] 运用随机霍夫变换与最小二乘结合，并根据聚类方法获得提取出 PCB 板真实的缺陷圆孔边缘；文献 [16] 根据最小二乘原理将工作台误差方程转化为正规方程，进行位姿的自校准；文献 [17] 基于自适应迭代加权最小二乘进行姿态追踪与几何重构等。

将式 (7) 通过泰勒级数展开为一阶导数形式，有：

$$X_{i,k}(\theta_{0,i}, \theta_{K,k}) \approx \hat{X}_{i,k}(\hat{\theta}_{0,i}, \hat{\theta}_{K,k}) + \frac{\partial X_{i,k}}{\partial \theta_0} \Delta \theta_{0,i} + \frac{\partial X_{i,k}}{\partial \theta_K} \Delta \theta_{K,k} \quad (12)$$

其中： $\hat{\theta}_{0,i}$ 和 $\hat{\theta}_{K,k}$ 为初始角和旋转角的估计值， $\Delta \hat{\theta}_{0,i}$ 和 $\Delta \hat{\theta}_{K,k}$ 为初始角和旋转角的估计误差， $\theta_{0,i} = \hat{\theta}_{0,i} + \Delta \hat{\theta}_{0,i}$ 和 $\theta_{K,k} = \hat{\theta}_{K,k} + \Delta \hat{\theta}_{K,k}$ 表示初始角和旋转角真实值， $X_{i,k}(\theta_{0,i}, \theta_{K,k})$ 为针脚图像坐标真实值， $\hat{X}_{i,k}(\hat{\theta}_{0,i}, \hat{\theta}_{K,k})$ 表示用式 (7) 得到的针脚图像坐标估算值， $\frac{\partial X_{i,k}}{\partial \theta_0}$ 和 $\frac{\partial X_{i,k}}{\partial \theta_K}$ 是式 (7) 函数 $X_{i,k}(\theta_{0,i}, \theta_{K,k})$ 对 θ_0 和 θ_K 的偏导数。式 (12) 右边是针脚图像真实坐标的近似表示，元件的 i 个针脚在 k 个取像位置的真实图像坐标与投影坐标估算值的残余误差

平方和为：

$$\delta X^2(\theta_{0,i}, \theta_{K,k}) = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{k=2}^K (X_{i,k}(\theta_{0,i}, \theta_{K,k}) - \hat{X}_{i,k}(\hat{\theta}_{0,i}, \hat{\theta}_{K,k}))^2 \quad (13)$$

利用最小二乘方法迭代运算，令针脚图像的真实坐标和估算坐标的残余误差平方和 $\delta X^2(\theta_{0,i}, \theta_{K,k})$ 逼近或达到全局最小，可得到 $\theta_{0,i}$ 和 $\theta_{K,k}$ 的最优估计值。考虑到旋转角寻优范围比较小（初始值在 $\pm 0.5^\circ$ 以内）和针脚测量的实时性要求，本文主要采用高斯-牛顿方法迭代求解式 (13)。非线性方程的求解，主要是求解待求参数的调整量。对于针脚 i ，式 (13) 最小二乘解的雅可比矩阵 J_i 、图像坐标残余误差 V_i 和旋转角参数调整向量 $\Delta \theta_i$ 分别为：

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{i,1}}{\partial \theta_0} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial X_{i,2}}{\partial \theta_0} & \frac{\partial X_{i,2}}{\partial \theta_K} & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial X_{i,k}}{\partial \theta_0} & 0 & \cdots & \frac{\partial X_{i,k}}{\partial \theta_K} \end{bmatrix} = [J_{0,i} \mid J_{K,i}],$$

$$V_i = \begin{bmatrix} X_{i,1}(\theta_{0,i}, \theta_{K,k}) - \hat{X}_{i,1}(\hat{\theta}_{0,i}, \hat{\theta}_{K,k}) \\ X_{i,2}(\theta_{0,i}, \theta_{K,k}) - \hat{X}_{i,2}(\hat{\theta}_{0,i}, \hat{\theta}_{K,k}) \\ \vdots \\ \hat{X}_{i,k}(\theta_{0,i}, \theta_{K,k}) - \hat{X}_{i,k}(\hat{\theta}_{0,i}, \hat{\theta}_{K,k}) \end{bmatrix} \text{ 和 } \Delta \theta_i = \begin{bmatrix} \Delta \theta_{0,00} \\ \Delta \theta_{K2} \\ \vdots \\ \Delta \theta_{Kk} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中： $J_{0,i}$ 对应矩阵 J_i 的第一列， $J_{K,i}$ 对应矩阵 J_i 的其余部分。元件所有针脚一起转动，因此在同一取像位置 k 各个针脚的旋转角偏差修正值赋予相同值 $\Delta \theta_{K,k}$ ；因为存在制造误差，相同型号的不同元件针脚间距也有微小差异，所以各针脚的初始角赋予独立的偏差修正值 $\Delta \theta_{0,i}$ 。根据式 (14) 得到所有针脚联合求解的相应矩阵：

$$J = \begin{bmatrix} J_{0,1} & 0 & \cdots & 0 & J_{K,1} \\ 0 & J_{0,2} & \cdots & 0 & J_{K,2} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & J_{0,i} & J_{K,i} \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_i \end{bmatrix},$$

$$\Delta \theta = [\Delta \theta_{0,1} \quad \cdots \quad \Delta \theta_{0,i} \quad \Delta \theta_{K,2} \quad \Delta \theta_{K,3} \quad \cdots \quad \Delta \theta_{K,k}]^T,$$

$$W = \text{diag}[\omega_0 \quad \cdots \quad \omega_0 \quad \omega_K \quad \omega_K \quad \cdots \quad \omega_K]$$

W 是加权对角矩阵，针脚位姿估计主要根据 θ_K 的估计值^[11]，因此 θ_0 和 θ_K 赋予不同权重 ω_0 和 ω_K 。根据高斯-牛顿法可得到旋转角参数调整向量：

$$\Delta \theta = (J^T W J)^{-1} * J^T * W * V \quad (15)$$

第 j 次迭代后旋转角估计值修正为：

$$\hat{\theta}_j = \hat{\theta}_{j-1} + \Delta \theta_j \quad (16)$$

其中： $\Delta \theta_j$ 是旋转角调整向量第 j 次迭代的结果， $\hat{\theta}_{j-1}$ 是第 j 次迭代前的旋转角初始值。旋转角迭代求解通过式 (15) (16) 交替进行，当 $\Delta \theta$ 低于设定值或达到预定的迭代次数时结束迭代。

3 仿真实验与讨论

为验证本文所提出的针脚位姿估计优化算法的有效性，在 Matlab2020a 开发环境下对所提出方法进行仿真实验。除

非特别说明, 默认仿真参数如表 1 所示。其中图像噪声指图像离散误差之外的其它图像误差 (包括图像畸变、热噪声等); 针脚真实坐标是在理论值基础上将元件整体在旋转轴坐标系 x 轴和 z 轴方向上做 ± 1 mm 以内的随机平移和 $\pm 1^\circ$ 以内的随机旋转偏移得到; 针脚的初始角 $\theta_{0,i}$ 根据各针脚的真实坐标与 z 轴的夹角, 加上元件的初始测试角得到; 根据各针脚的 $\theta_{0,i}$ 和 $\theta_{k,k}$ 用式 (7) 算出无图像噪声的针脚图像坐标 (计算时添加旋转轴径向跳动误差); 再添加图像离散随机误差和图像随机噪声则得到针脚真实图像坐标; 图像离散误差、图像噪声和针脚真实坐标的随机偏移都是通过各自的幅值乘上表中的正态随机数得到; 径向跳动误差按均匀分布产生。

表 1 仿真参数

模型参数	参数值
摄像机像素尺寸 / μm	4.8
像素分辨率	1/5 * 像素尺寸
焦距 f/mm	16
旋转中心至光心距离 L_z/mm	121
元件针脚坐标理论值 (8 针脚)	(6,8) (-4.5,8) (9,4) (-10,5) (6, -8), (-7.6,8) (14.5,12) (-13, -18)
针脚数目	4
取像角度位置数	8
旋转角	$k * 45^\circ (k=1,2,\dots,7)$
旋转角迭代拟合次数	10
针脚位姿迭代估计次数 M	10
图像离散误差(幅值) / μm	1 * 像素分辨率
图像噪声(幅值) / μm	1.2
旋转轴径向跳动误差(幅值) / μm	5
正态随机数	normrnd(0,1/3)
重复实验次数	2 000

重复实验为独立实验, 每次实验的输入数据添加的相关误差或噪声都是重新产生。单次实验完成后, 将针脚三维坐标的估算结果与针脚坐标的真实值比较, 得到针脚位姿估算误差。重复实验完成后, 对每次实验的数据统计, 得到各个针脚位姿估计误差的均值 m 和方差 σ 。单次实验的结果有偶然性, 为了保证仿真结果的可信度, 用 $m \pm 3\sigma$ 作为针脚的位姿估计误差, 将所有针脚位姿估计误差的最大值, 作为重复实验的最终结果。

3.1 多针脚基于迭代法仿真

下文将分析本文所提出方法的针脚位姿估计精度与图像噪声、像素分辨率、针脚数和旋转取像点数等主要因素的关系。同步带传动的旋转轴大角度转动时, 定位误差在 $\pm 0.5^\circ$ 以内, 因此设定旋转角误差的仿真取值范围为 $0.05^\circ \sim 0.50^\circ$ 。

1) 迭代与非迭代:

按图 3 所示的流程, 根据表 1 参数设置不同的迭代次数进行仿真, 分析迭代次数对算法精度的影响。这里迭代次数指的是图 3 所示的 M , $M=1$ 对应非迭代, 即用旋转

角理论值通过式 (4) 计算针脚位姿, 不进行实际旋转角的迭代拟合; 实验结果如图 4 所示。

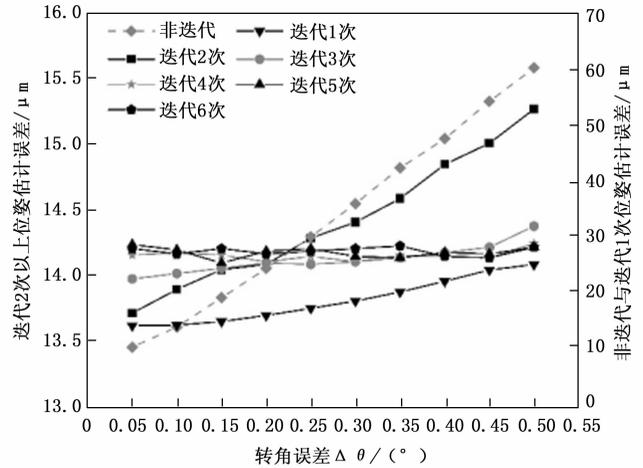


图 4 迭代次数与位姿估算精度关系

由图 4 可见, 非迭代算法的位姿估计误差与转角误差成正比; 迭代算法明显提升了针脚估算精度, 尤其是对于大的转角误差; 增加迭代次数能进一步改善角度拟合精度, 从而提升针脚位姿估计精度, 迭代 3 次针脚估算精度已基本稳定; 当旋转角误差较小 (图中 $< 0.1^\circ$) 时, 非迭代的针脚位姿估计精度比迭代略高, 其原因是受图像随机噪声和像素分辨率的限制, 下文将对该现象进一步说明。

2) 图像噪声:

本小节分析针脚位姿估算精度与图像随机噪声的关系。图像随机噪声 (幅值) 分别取 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$ 、 $1.2 \mu\text{m}$ 和 $2.4 \mu\text{m}$, 其它参数按照表 1 设置。

由图 5 (a) 可见, 图像噪声越大位姿估算误差越大; 随机噪声最大幅值不变时, 迭代拟合的针脚位姿估计精度几乎不受旋转角误差的影响; 由图 5 (b) 可见迭代估算误差与图像噪声成正比, 图像噪声越小估算精度越高, 0.5° 以内的旋转角误差基本不影响位姿估计精度;

本文算法利用旋转测量时所有针脚具有相同旋转角 $\theta_{k,k}$ 的特点, 将所有针脚旋转方程构造成超定方程组解算 $\theta_{0,i}$ 和 $\theta_{k,k}$, 但每个针脚的图像坐标因噪声产生的误差都是独立且随机的, 理论上本文算法对图像噪声引起的误差是无法抑制的。

3) 像素分辨率:

一般情况下, 摄像机的像素分辨率对图像测量的精度有直接影响^[18], 现有视觉检测技术都能达到亚像素分辨率, 如 MVTec 公司软件产品的边缘提取能力达到 1/50 像素^[19], Keyence 公司的 IM-8000 测量仪亚像素边缘提取能力达到 1/100 像素^[20]。本小节分析不同像素分辨率对针脚位姿估算精度的影响, 像素分辨率分别取 1/10、1/5、1/2 和 1 倍摄像机像素尺寸, 其它参数按照表 1 设置。

从图 6 可见, 像素分辨率越高, 迭代和非迭代算法的针脚位姿估计精度都越高; 总的来看, 像素分辨率对迭代法估计精度的影响更明显。旋转视觉的针脚图像通过背光

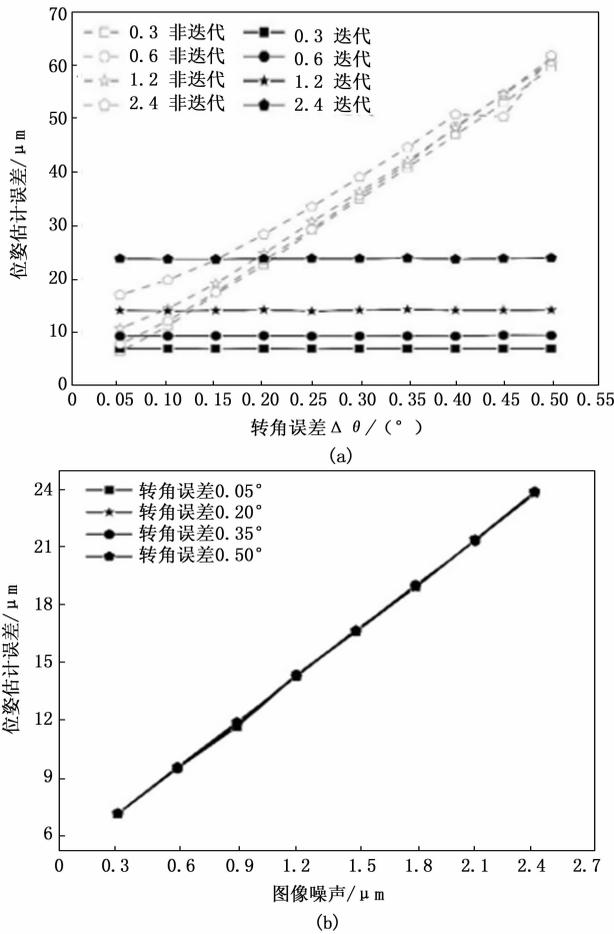


图 5 位姿估计误差与图像噪声关系

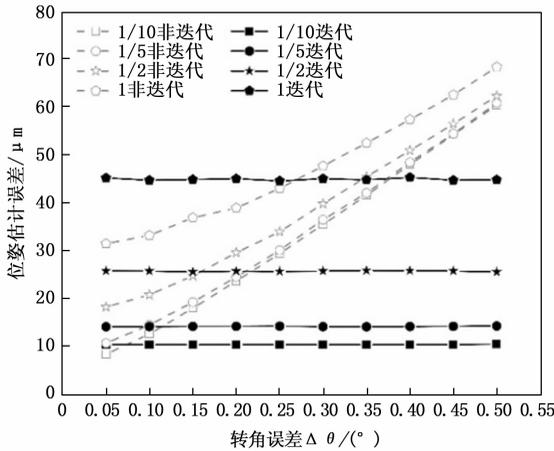


图 6 像素分辨率对位姿估算精度的影响

拍摄, 图像对比度较高, 因此针脚图像坐标的提取可获得较高的分辨率。

4) 针脚个数:

如 3.1 节所分析, 增加针脚元件针脚数量可增加式 (7) 方程的数量, 这有助于提高旋转角的拟合精度, 进而提升针脚位姿的估算精度。常见异形元件针脚数在 2~8 个左右, 针脚数量更多的元件如 PCI 插槽等, 元件本体较长, 并且旋转拍摄时容易出现针脚遮挡的情况, 因此不适合用

旋转视觉检测定位。本小节针对 2~8 个针脚的元件, 分析针脚位姿估计精度与针脚数量的关系, 其它参数按照表 1 设置。

从图 7 可见, 针脚个数越多, 基于迭代的针脚位姿估计误差越小; 图中非迭代算法的结果曲线, 增加针脚数会导致定位误差变大, 分析其原因为: 新增针脚的旋转半径大, 非迭代算法对旋转角误差没有修正作用, 因此相同转角误差时大的半径所带来的针脚位姿估计误差也越大。

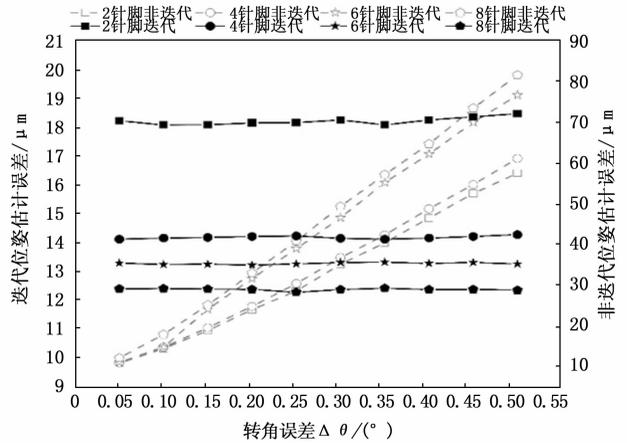


图 7 针脚个数与针脚位姿估算精度关系

表 1 仿真参数和旋转角误差皆根据插件机实际工作参数而定, 常见异形元件针脚数为 2~8 个, 异形元件的插件误差通常要求不超过 ±0.05 mm, 由图 7 可知, 其中 2 针脚元件的迭代位姿估计误差同比最大, 但最大误差基本在 ±0.018 mm 以内, 可见本文所提出的迭代方法的针脚位姿估算精度完全能满足插件机的精度要求。

5) 旋转取像点数:

本小节研究取像点数对位姿估算精度的影响, 取像点数分别为 4、6、8、12, 旋转角均匀分布在圆周上, 其它参数按照表 1 设置。

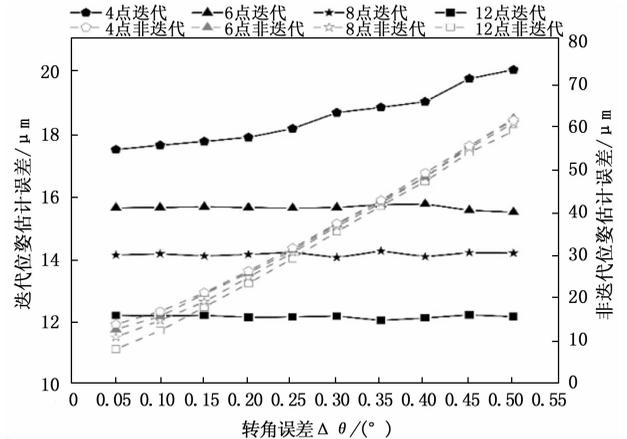


图 8 取像点数与针脚位姿估计精度关系

由图 8 可见, 取像点数越多, 基于迭代的针脚位姿估计精度越高, 这是因为增加旋转取像次数同样可增加式 (7) 方程的数量, 因而有助于提高旋转角的拟合精度, 进

而降低位姿估算误差; 但多的取像点数也是增大测量耗时的主要因素, 因此需平衡取像点数与检测效率之间的关系, 目前常用的取像点数为 8 点; 此外, 增加取像次数也有助于非迭代算法降低位姿估计误差, 但因为该算法没有修正旋转角误差, 因而其估算误差随转角误差增加而增加。

3.2 效率分析

为了验证本文针脚位姿估计优化方法的实时性, 在配置为 CPU i7-8550U、4.00 GHz、8 GB 内存的计算机上用 Matlab2020a 的时间探查器分析计算效率。除了迭代次数和阈值外, 影响迭代耗时的主要因素是针脚数和旋转取像点数, 本小节针对常用针脚个数和取像点数分析本文优化方法的实时性。针脚个数分别取 2、4、6、8, 旋转取样点数分别取 3、4、6、8、12, 其它参数按照表 1 设置, 算法平均耗时如表 2 所示。

表 2 不同条件下优化方法耗时表

针脚个数	取像点数				
	3	4	6	8	12
2	5.19	7.25	11.86	17.89	37.16
4	9.71	12.93	22.47	34.34	53.16
6	12.92	18.72	31.82	52.17	104.62
8	17.22	23.81	41.59	64.63	135.80

从表 2 中可见, 算法的耗时与针脚数量、取像点数基本正相关。目前异形元件插件机每轮插 4~6 个元件, 平均每个元件耗时 500~800 ms^[20]。插件头从取件位移动至插件位一般需要 350~400 ms, 移动过程中同步进行旋转图像采集、针脚图像提取和位姿计算。从开始采集到完成针脚图像提取一般需要 200 ms 左右; 插件一般都是逐个进行, 因此第一个元件的针脚位姿估算至少有 100 ms 左右的处理时间。从表 2 可见, 除了最高耗时 135.80 ms 的组合外, 其它组合都能满足首个元件的插件实时性要求, 在常见 2~8 针脚元件以及取像点中, 最高耗时也少于 65 ms; 插装一个元件需要 200 ms 左右, 因此随后插装的几个元件, 表中的所有组合都能满足效率要求。

根据以上的仿真结果可得到如下结论: (1) 迭代法确实可降低因同步带传动带来的旋转角定位误差对位姿估计精度的影响; (2) 图像噪声越小迭代法的位姿估算精度越高; (3) 针脚个数或取像点数越多, 迭代算法的估算精度越高; (4) 像素分辨率越高, 迭代法的针脚位姿估计精度越好; 提高像素分辨率, 可以改善图像噪声大而转角误差较小时迭代法的位姿估算精度。

由于篇幅限制, 上述数据主要根据表 1 参数配置得到的。将表 1 的元件针脚坐标理论值和旋转角, 换为其它元件针脚坐标或旋转角度组合 (旋转半径在 25 mm 以内, 组合的角度差异一般要求 20° 以上), 得到的数据与以上仿真结果类似。

4 结束语

本文在前期研究基础上, 针对因旋转角误差影响针脚

位姿估计精度的问题, 提出一种基于位置约束和迭代拟合的元件针脚位姿估计精度优化方法。该方法利用元件针脚位置固定的约束关系, 将圆拟合与旋转角拟合相结合, 通过迭代实现了针脚位姿精密估计; 理论分析和仿真结果都表明, 该方法的精度和实时性均能满足异形插件的要求, 本文研究为新款异形插件机因同步带传动引起的针脚位姿测量精度问题, 提供了可行的解决方案。

参考文献:

- [1] 李智勇, 黄滔, 陈少森, 等. 约束优化进化算法综述 [J]. 软件学报, 2017, 28 (6): 1529-1546.
- [2] ZHANG X, SUN H, LIU Z, et al. Robust low-rank kernel multi-view subspace clustering based on the Schatten p-norm and correntropy [J]. Information Sciences, 2018, 477: 430-447.
- [3] BESL P J, MCKAY H D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14 (2): 239-256.
- [4] ZHANG Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330-1334.
- [5] JI Q, COSTA MS, HARALICK RM, et al. An integrated linear technique for Pose estimation from different geometric features [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1999, 13 (5): 705-733.
- [6] 李兴东, 郭伟, 李满天, 等. 一种估计深度相机位姿精度的闭式算法 [J]. 机器人, 2014, 36 (2): 194-202, 209.
- [7] 苏杰, 张云洲, 等. 基于多重几何约束的未知物体抓取位姿估计 [J]. 机器人, 2020, 42 (2): 129-138.
- [8] HOU G, ZHANG W, WU B, et al. 3D reconstruction and positioning of surface features based on a monocular camera and geometric constraints [J]. Appl. Opt, 2022, 61 (6): C27-C36.
- [9] 张敏, 金龙旭, 李国宁, 等. 基于直线特征的摄像机镜头畸变标定方法 [J]. 光学学报, 2015, 35 (6): 0615001.
- [10] GUO K, YE H, CHEN H, GAO X. A New Method for Absolute Pose Estimation with Unknown Focal Length and Radial Distortion. Sensors. 2022; 22 (5): 1841-1857.
- [11] 邝泳聪, 董亦飞. 基于旋转视觉的三维姿态重构方法及精度分析 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (7): 235-242, 263.
- [12] STRUTZ T. 数据拟合与不确定度 [M] (第 2 版). 北京: 国防工业出版社, 2019.
- [13] 李鑫, 龙古灿, 等. 相机位姿估计的加速正交迭代算法 [J]. 光学学报, 2015, 35 (1): 015004.
- [14] ZHAO C, FAN B, HU J, et al. Homography-based camera pose estimation with known gravity direction for UAV navigation [J]. 中国科学: 信息科学 (英文版), 2021, 64 (1): 13.
- [15] 乔闹生, 叶玉堂, 黄永林, 等. PCB 显微图像缺陷圆孔检测方法研究 [J]. 光电子·激光, 2009, 20 (7): 964-966, 982.
- [16] 乔潇悦, 陈欣, 丁国清, 等. 基于最小二乘法的自校准位姿方案 [J]. 光学学报, 2018, 38 (12): 164-170.

(下转第 261 页)

6) 按照表3的统计结果, 基于模糊关系矩阵计算一级因素能力评分: $C = \{0.822, 0.497, 0.753, 0.913, 0.913, 0.913, 0.913, 0.913, 0.913\}$;

7) 计算二级因素“X下变频器类”状态评分: $D=0.9$;

8) 该卫星对于此资源因素的需求数量为 $m=4$, 系统资源总数量 $z=10$, 计算二级因素“X下变频器类”评判等级集: $Y = \{\text{好, 较好, 一般, 差}\} = \{0.9, 0.8, 0.5, 0\}$, 其中, “好” $\in (0.9, 1.0]$, “较好” $\in [0.5, 0.9]$, “一般” $\in [0.4, 0.5)$, “差” $\in [0, 0.4)$;

9) 确定二级因素“X下变频器类”的评判等级为“较好”, 评判值 $y=0.8$, 评判指标系数为2; 其他二级因素评判等级均为“好”, 评判值为0.9, 评判指标系数为1;

10) 确定三级因素 G_1 的评判等级值为 $\theta_1=0.875$, 三级因素 G_2 的评判等级值为 $\theta_2=0.9$;

11) 计算针对该卫星的系统业务能力值:

$$F = \alpha \cdot \theta_1 + \beta \cdot \theta_2 = 0.8993$$

4.3 业务能力评估结果分析

基于定义的评判标准, 可以看出, 该地面接收系统当前对于该卫星的跟踪接收业务能力为“中”的水平, 表明系统中存在该卫星跟踪接收需求的资源出现了部分故障, 即故障资源为“X下变频器2”, 但其余的资源能够支持地面接收系统完成该卫星的接收业务。在系统实际运行中, 此结果与系统业务能力一致, 该方法及模型能够有效的评估当前系统对于一颗卫星的跟踪接收业务能力状态。

5 结束语

本文首先借鉴 AHP 的描述方法对遥感卫星地面接收系统进行系统研究及分析, 提炼出影响系统业务能力状态的关键因素, 建立了遥感卫星地面接收系统数据接收业务能力评估指标体系, 然后, 结合遥感卫星地面接收系统的特点, 以接收卫星数据的地面系统为评估对象, 设计了一套遥感卫星地面接收系统业务能力评估模型, 并通过遥感卫星地面接收系统的实例应用验证了模型的可行性, 结果表明, 本文论述的评估方法能够快速评估系统当前状态对新接入卫星的业务能力, 定位系统故障对新接入卫星业务能力的影 响, 为系统接入卫星的能力优化提供改进方向。同时, 使用该方法也能够评估系统当前状态对系统内已接入的卫星的业务能力, 对遥感卫星地面接收系统数据接收业务能力的评估及系统后续优化具有一定的参考价值。举一反三, 该方法同样能够扩展应用于测控数传一体化地面系统中进行系统业务能力的评估。

(上接第 237 页)

- [17] HONGKAI D, JIANJUN Y, ZHUORAN W, et al. Robust feature-free pose tracking and uncertainty-aware geometry reconstruction for spinning non-cooperative [J]. Robust feature-free pose tracking and uncertainty-aware geometry reconstruction for spinning non-cooperative, 2022, 102: 30-44.
- [18] CARLOS, A, BERENSTEIN, et al. A geometric approach to subpixel registration accuracy [J]. Computer Vision Graphics

参考文献:

- [1] FATOS X, XAVIER H, ADMIR B, et al. A simulated annealing algorithm for ground station scheduling problem [C] // Proc. of the 16th International Conference on Network-Based Information Systems, 2013. 24-30.
- [2] 刘莹, 章文毅, 马广彬, 等. 支持向量回归在地面站资源评价模型中的应用 [J]. 遥感信息, 2016, 31 (4): 22-27.
- [3] 王无敌, 周志鑫, 李湘, 等. 一种解决多星遥感地面接收资源冲突及优化的方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33 (6): 1299-1304.
- [4] GOOLEY T D, BORSI J J, MOORE J T. Automating air force satellite control network (AFSCN) scheduling [J]. Mathematical & Computer Modelling, 1996, 24 (2): 91-101.
- [5] 王小妹, 王万玉, 毛伟, 等. S/X/Ka 三频低轨遥感卫星数据接收系统的设计及实现 [J]. 空间电子技术, 2018, 15 (1): 105-110.
- [6] 王嘉, 王万玉. 无人值守遥感卫星接收站的设计及实现 [J]. 空间电子技术, 2019 (1): 28-33.
- [7] 林茂伟, 陈浩一, 年昭华, 等. 卫星地面站故障通用报警系统设计及应用 [J]. 气象科技, 2018, 46 (4): 829-834.
- [8] 申鸿辉. 基于监测点与自动化测试的接收系统故障诊断 [J]. 控制工程, 2016, 23 (3): 417-422.
- [9] 王英强, 刘焱. 基于状态机的遥感卫星地面站自动测试设计 [C] // 第 19 届中国遥感大会论文集, 2014, 349-354.
- [10] 朱维祥, 王万玉, 冯旭祥. 遥感卫星地面接收系统一体化设计 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (9): 73-76.
- [11] 许树柏. 实用决策方法: 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 1-6.
- [12] 李奇. 基于集对分析的大坝风险后果评价模型研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [13] 梁桂林, 周晓纪, 王亚琼. 基于 ADC 模型的遥感卫星地面系统效能评估 [J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40 (5): 62-68.
- [14] 姚华飞, 赵光磊. 基于灰色 AHP 的防空预警探测系统效能评估 [J]. 国外电子测量技术, 2013, 32 (5): 44-48.
- [15] 姚智海, 刘建平, 王建平, 等. 地面测控资源调度效能评估指标体系 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42 (8): 1751-1758.
- [16] 张鑫, 韩建立, 刘坚, 等. 基于集对分析和 AHP 的某型导弹保障性评估 [J]. 舰船电子工程, 2021, 41 (2): 123-127.
- [17] 王怀, 王强. 多模双频段车载遥感地面站的设计及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (6): 180-186.
- [18] 李云峰, 武小悦. 地面站系统服务能力评估指标及其计算方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, (2): 158-164.
- [19] 王万玉, 陶孙杰, 冯旭祥, 等. 遥感卫星接收系统故障诊断专家系统设计 [J]. 电讯技术, 2015, 55 (5): 491-496.
- [20] 余涛. 航天地面测控系统的健康管理应用 [J]. 电讯技术, 2021, 61 (1): 30-35.
- [21] 李德军, 李德军, 李德军, 等. 遥感卫星地面接收系统 & Image Processing, 1987. 40 (3): 334-360.
- [19] MVTec. Subpixel 词条 [EB/OL]. [2022-03-15]. <https://www.mvtec.com/technologies/subpixel>.
- [20] Keyence. IM-8000 系列图像尺寸测量仪产品目录 [EB/OL]. [2022-03-15]. <https://www.keyence.com.cn/products/measure-sys/image-measure/im-8000/models/im-8000/>.
- [21] 邝泳聪, 李家裕, 梁经伦, 等. 基于旋转立体视觉的元件引脚精密定位方法 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2018, 46 (2): 45-53.