先进成像

激光写光电子学进展

一种面向齿形结构装配的视觉测量方法

李航宇1,黄翔1*,褚文敏1,周蒯1,赵子越2

¹南京航空航天大学机电学院,江苏南京 210016; ²中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所,北京 100095

摘要 针对同轴内啮合的大尺寸齿形结构手动装配模式中测量困难且精度不易保证的问题,提出一种面向齿形结构装配的视觉测量方法。该方法通过构建单目视觉测量系统,利用其图像特征解算空间位姿实现高精度测量。首先基于自适应核与自适应阈值的最小核值相似区算法提取齿顶角点,并采用大津阈值改进的 Canny 算法检测辅助圆离散弧段;然后结合随机采样一致思想,运用基于几何距离及 Levenberg-Marquardt 优化的椭圆拟合算法获取椭圆参数,并给出了齿形结构测量模型及其位姿解算原理。最后进行实验验证,结果表明该方法的测量精度可达0.050 mm,满足齿形结构装配的高精度测量要求。

关键词 图像处理;齿形结构;机器视觉;角点检测;椭圆拟合;位姿解算 中图分类号 TP391 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP202158.1610003

A Vision Measurement Method for Gear Structure Assembly

Li Hangyu¹, Huang Xiang^{1*}, Chu Wenmin¹, Zhou Kuai¹, Zhao Ziyue²

¹ College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing, Jiangsu 210016, China;

² Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China

Abstract In order to solve the problems of measurement difficulty and precision in manual assembly mode of largesize gear structure with coaxial internal meshing, a visual measurement method for gear profile structure assembly is proposed. In this method, a monocular vision measurement system is constructed, and its spatial pose is calculated by using its image features to realize high-precision measurement. First, based on the minimum kernel value similarity area algorithm of adaptive kernel and adaptive threshold, the tooth tip angle points are extracted, and Canny algorithm improved by OSTU is used to detect discrete arcs of auxiliary circle. Then, combined with the idea of random sampling consensus, the ellipse fitting algorithm based on geometric distance and Levenberg-Marquardt optimization is used to obtain the ellipse parameters, and the measurement model of gear profile structure and the principle of pose calculation are given. Finally, the experiment is verified, and the experimental results show that the measurement accuracy of this method can reach 0.050 mm, which meets the requirements of high-precision measurement of gear structure assembly.

Key words image processing; gear structure; machine vision; corner detection; ellipse fitting; pose calculation OCIS codes 100.2960; 150.0155;150.1135; 150.5670

1 引 言

在航空、船舶等涉及大尺寸部件装配领域,随着

数字化测量技术及自动定位技术的快速发展,数字 化自动装配已被广泛研究与应用。而在数字化自动 装配系统中,测量大尺寸部件的位置与姿态一般利

收稿日期: 2020-10-13; 修回日期: 2020-10-27; 录用日期: 2020-12-02 通信作者: *xhuang@nuaa. edu. cn

研究论文

用数字化测量设备,然后经由坐标系的转换计算出 调姿机构的运动路径,最后驱动部件使其达到目标 位姿。其中对于部件的装配,主要采用激光跟踪仪、 激光雷达等进行装配定位,凭借测量其关键特征点 来检验位姿的准确性[1]。如赵俊峰[2]在船舶大型装 置高精度安装中用激光跟踪仪测量安装大型动力主 机,张白等[3]基于激光跟踪仪对特大型直齿轮齿距 偏差测量,范斌等^[4]提出了基于室内定位测量系统 的大部件对接方法,祖爽等^[5]使用激光雷达对人工 路标进行导航定位。如今计算机科学与信息技术高 速发展,通过摄像机拍摄图像,利用数字信号处理技 术图像传输到计算机中进行分析和处理,得到相应 的视觉信息,形成了具有广泛应用背景的机器视 觉[6]。近年来,机器视觉在大尺寸部件装配方面的 应用价值逐渐体现,其中又因单目视觉较多目视觉 具有低成本、低复杂性的特点,而具有研究意义[7]。 在航天领域,苗锡奎^[8]介绍了具有星箭对接环的飞 行器视觉位姿测量方法,并利用对接环平面外的一 参考点到圆心距离的欧氏不变性作为约束解决二义 性,高珊等^[9]针对两个航天器交会对接的最终段,给 出一种单目视觉下基于矢量描述建立相对位置和姿 杰确定算法;在航空领域,张辉等^[10]面向飞机翼身 叉耳对接提出基于机器视觉的孔位测量技术。在 船舶、直升机传动系统涉及的齿形结构的装配过 程中,因为输出轴与输入轴之间存在遮挡关系,若 使用激光跟踪仪进行装配引导时较难测量位姿, 而采用引出式靶球等方式在现场条件复杂的情

况下属于间接测量,易产生碰撞,难以保证测量精度 要求。

因此本文提出一种面向齿形结构装配的视觉测量方法,给出测量模型,介绍相关关键技术如图像处理、椭圆拟合、位姿解算等,并且通过实验进行了精度验证。该研究将对丰富航空航天等领域的数字化装配内容、保障其装配质量具有重要的意义。

2 齿形结构视觉测量方法

齿形结构是传动系统中常见的结构形式,如船 舶的发动机主轴与传动轴,直升机升力系统的主轴 与主桨毂等,一般传动系统的输出轴为外齿圈结构, 而输入轴为内齿圈结构。为便于装配,输出轴上常 带有花键,输入轴则留有缺齿,装配时先将缺齿和花 键对合,再通过调节运动机构使齿圈啮合。二者简 化模型如图 1 所示,齿形结构装配流程如图 2 所示。



图 1 齿形结构模型。(a)装配关系;(b)输入轴模型; (c)输出轴模型

Fig. 1 Model of gear structure. (a) Assembly relationship; (b) input shaft model; (c) output shaft model





Fig. 2 Assembly process of gear structure

齿形结构的关键特征分别为输入轴和输出轴的 齿顶角点、上端面辅助圆的离散弧段、缺齿与花键角 点。首先通过图像处理获取输出轴、输入轴的齿顶 角点、辅助圆离散弧段,利用以上信息分别拟合出属 于输出轴与输入轴在图像上的两组椭圆,最后通过 二义性去除虚假解以及花键、缺齿中点的图像坐标 反算输出轴、输入轴空间六维(6D)位姿,获取位姿 后即可驱动定位器完成装配。视觉测量工作流程图 如图 3 所示。

2.1 齿顶角点与辅助圆离散弧段提取

解算输出轴与输入轴空间位姿需要一对平行的 空间圆,每组圆的其一便来自输出轴与输入轴的齿 顶圆,该圆在图像坐标系下即为齿顶角点所拟合的 椭圆。因此要反映该圆的位置,则需要对齿顶角点



图 3 本文方法流程 Fig. 3 Flow of proposed method

精确检测并提取。

角点作为二维特征在图像处理中具有重要特点,即有着足够高的曲率且位于不同明亮区的交界点^[11]。最具代表性的是 Smith 等提出的 SUSAN 方法,选取一个圆形模板,该模板的圆心被称为 "核",其中位于模板内的像素灰度值若与核相近或 相同,则这些像素所构成的集合为核值相似区 (USAN)。本文提出一种基于 SUSAN 的拥有自适 应核与自适应阈值的齿顶角点提取方法,可适应不 同灰度、对比度及不同工作距离的情况,快速提取属 于输出轴或输入轴的齿顶角点。

设圆形模板半径为 $R(R \in N_+)$,包含 $2R^2 + 6R + 1(R \ge 3, R \in N_+)$ 个像素。模板大小是影响角 点提取效果的关键,分别对输出轴与输出轴齿圈进 行环形(近似齿根到齿顶部分)感兴趣区域(ROI)划 分,获取各自灰度直方图,利用近似一维均值方法寻 找二值化阈值,划分前景与背景。得到R值为

$$R_{1,2} = \left[\frac{n(I_{A1,A2}) \times K_{1,2}}{10 \times n(I_{B1,B2}) \times Q_{i}}\right], \qquad (1)$$

式中: R_1 为输出轴模板半径; R_2 为输入轴模板半径; R_1 为输出轴模板半径; R_2 为输入轴模板半径; R_1 , (I_{A1}) , $n(I_{A2})$ 为各自环形 ROI 前景所占像素数; $n(I_{B1})$, $n(I_{B2})$ 为各自环形 ROI 内背景所占像 素数; $K_{1,2}$ 为各自环形 ROI 所占的像素数; Q_i 为图 像总分辨率。当 R 值为 4 时,其模板如图 4 所示。





为了提取角点,需要将模板邻域内的像素灰度 与中心灰度做比较,其相似比较函数为

$$c(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}_{0}) = \exp\left\{-\left[\frac{I(\boldsymbol{r})-I(\boldsymbol{r}_{0})}{t}\right]^{6}\right\}, \quad (2)$$

式中:r 与r。代表模板中心与模板邻域像素的坐标;I(r)、 $I(r_0)$ 为对应坐标下该像素的灰度值;t 为灰度差阈值,常规取 20。结合理论与实践,当指数取 6 时误检率最低。

接着,统计相似程度,表示为

$$n(\boldsymbol{r}_0) = \sum c(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{r}_0)_{\circ}$$
(3)

然后通过下式计算角点响应函数,若某像素点的 USAN 值小于几何阈值 g,则被认为是初始角点,即 USAN 值越小,角点响应越大。

$$R(\mathbf{r}_{0}) = \begin{cases} g - n(\mathbf{r}_{0}) , & n(\mathbf{r}_{0}) < g \\ 0 , & n(\mathbf{r}_{0}) \ge g \end{cases}$$
(4)

该算法中几何阈值 g 和灰度差阈值 t 起关键性 作用。阈值 g 反映角点的尖锐程度,即和角点的锐 度呈正相关,由于输出轴与输入轴的齿顶角在像平 面呈现出约 120°角,则取 $g=0.67n_{max}$ 。阈值 t 则决 定该算法在角点不同对比度下的检测与抗噪能力, t 越小检测到的角点数量就越少,则会造成遗漏;而 t 越大则更易误判。但因图像中各个齿顶点的对 比度并不一致,即各自的齿顶邻域之间灰度直方 图差异较大,使用同一阈值 t 将无法提取所有齿顶 点,因此需要一种灰度差阈值 t 能够自适应的改进 算法。这里通过计算模板邻域内的各个像素与中 心像素的灰度差获取灰度差关系,再据其经过多 次迭代自动计算出适应各个齿顶不同灰度情况的 阈值 t。

计算模板邻域内的各个像素与中心像素的灰度 差,记初始迭代值为L₁,

$$L_{1} = \frac{\sum I(\mathbf{r}) - I(\mathbf{r}_{0})}{2R^{2} + 6R + 1},$$
 (5)

将上述灰度差小于且等于 L₀ 的灰度值归为集 合 A,其余归入集合 B,进入下一轮迭代,记为 L₂,

$$L_{2} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{q=0}^{L_{1}} q \times A(q)}{\sum_{q=0}^{L_{1}} A(q)} + \frac{\sum_{q=L_{1}+1}^{L_{1}} q \times B(q)}{\sum_{q=L_{1}+1}^{L_{1}} B(q)} \right], (6)$$

式中:q 为模板邻域内某一像素与中心像素的灰度 差值;A(q)、B(q)分别为集合A、B中具有等同于q 值的像素点数。以此类推不断迭代,直至前后迭代 值差值的绝对值为零时退出迭代,并将最后一次的 迭代值赋值给灰度差阈值t。

通过计算该阈值 *t*,经过角点响应函数所获取 的角点会存在齿根部角点,若要完成齿顶角点的筛 选需涉及备选角点邻域灰度差集合 *A* 与 *B*,若集合 *A* 内元素数量大于集合 *B*,则可认为该点是齿顶角 点,否则剔除。

至此灰度差阈值完成自适应计算,可以利用 USAN 区域准确快速地识别不同灰度对比度以及 齿顶显示大小不一致的输出轴与输入轴齿顶角点, 提取结果如图 5 所示。



图 5 输出轴、输入轴齿顶角点提取结果。(a)输入轴齿 顶角点;(b)输出轴齿顶角点

Fig. 5 Extraction results of tooth apex angle of output shaft and input shaft. (a) Tooth apex angle of input shaft; (b) tooth apex angle of output shaft

解算输出轴与输入轴位姿的一组空间圆中其一 为由上述齿顶点所组成的齿顶圆,而另一圆则为输 出轴与输入轴各自的端面圆。为获取端面圆弧段信 息需要对图像进行边缘检测,其中 Canny 边缘检测 算法被认为是适应性最广且最成功的算法。结合本 文所采集的图像,对端面辅助圆边缘采用了优化的 Canny 算法。传统的 Canny 算法中双阈值需要人 为提前设定一个固定值,阈值过大会导致边缘不连 续,而过小则会提取到伪边缘。因此采用大津 (OSTU)阈值作替代,避免每次获取图像因曝光影 响而产生对比度不同造成的边缘提取不准确问题。

对采集的图像进行前景和背景分割,图像总像 素记为N,阈值记为T,属于前景的像素点数占总 像素的比例记 α ,平均灰度记 g_1 ;属于背景的像素 点数占总像素的比例记 β ,平均灰度记 g_2 。图像总 灰度平均值记为g,类间方差记 σ^2 。则有:

$$\alpha = \frac{N_1}{N}, \beta = \frac{N_2}{N}, \qquad (7)$$

$$N_1 + N_2 = N, \alpha + \beta = 1,$$
 (8)

$$g = \alpha \times g_1 + \beta \times g_2, \qquad (9)$$

$$\sigma^2 = \alpha \times (g - g_1)^2 + \beta \times (g - g_2)^2 \, . \tag{10}$$

最佳的分割门限值即类间方差取最大时的灰度 值。对 g 逐个寻优求取最大阈值 T,该 T 即为 Canny 中的高阈值,低阈值则取 0.5T。检测得到单 像素边缘后,需要进一步获得离散的弧段作为椭圆 拟合的输入集,即采用龙洋等^[12]提出的边缘骨架剪 枝算法去除三联通区域与 Shi-Thomas 角点检测^[13] 对曲率突变处进行截断。最后建立相应 ROI 区域 划分属于输出轴、输入轴辅助圆离散弧段部分,检测 结果如图 6 所示。





为了确定输出轴与输入轴绕其 Z 方向的旋转 量,需要对输出轴花键和输入轴缺齿进行定位。由 于花键和缺齿的图像呈现不同,本文采取了不同的 方法获取二者在图像坐标系下的中点坐标。

对于输入轴缺齿,由于已经获取其所有齿顶点 坐标,且已在 3.2 节进行拟合椭圆,则可沿椭圆路径 计算邻近齿顶的距离,当距离取得最大值时,所对应 的两点即为缺齿两角点。设 p_i 、 p_j 为齿顶点集 *C* 中沿椭圆路径的邻近两点,最终获得的两点坐标记 为 p_1 、 p_2 ,表示为

 $\max(p_{i}, p_{j}) = \|p_{i} - p_{j}\|_{2}, (i \neq j, i, j \in C).$ (11)

对于输出轴花键,其相对齿较为突出,通过齿顶 点拟合的椭圆向外做环形 ROI 区域,则该区域内包 含花键特征,用上述的 SUSAN 法检测其角点位置 即可获得花键两端点,记为 q₁、q₂。花键中点坐标 P_z与缺齿中点坐标 Q_z表示为

$$P_{z} = \frac{1}{2}(p_{1} + p_{2}), Q_{z} = \frac{1}{2}(q_{1} + q_{2}).$$
 (12)

输出轴花键、输入轴缺齿中点提取结果如图 7 所示。



- and input shaft missing tooth. (a) midpoint of spline; (b) midpoint of missing tooth
- 2.2 齿顶角点与离散弧段椭圆拟合 获取齿顶点与边缘离散弧段后,进行椭圆拟合,

分别拟合出图像坐标系下的输出轴、输入轴齿顶椭 圆与各自的端面辅助圆。椭圆方程展开式为

$$Ax^{2} + By^{2} + Cxy + Dx + Ey + F = 0, (13)$$

$$\boldsymbol{Q} = \begin{pmatrix} A & D/2 & E/2 \\ D/2 & B & F/2 \\ E/2 & F/2 & C \end{pmatrix} .$$
(14)

建立各自 ROI 区域后,为避免干扰提高鲁棒 性,通过随机采样一致(RANSAC)聚类,再采用基 于几何距离的椭圆拟合方法提高拟合精度。 RANSAC是基于重复最小样本集合,将离群数据剔 除后得到有效集合的方法。假定 S_i 为采集的齿顶 点集或弧段点集,S为存放聚类后的点集,初始为 空。对 S_i 中的值作标记,记为 $p_i(i=1,2,...,N)$, 其横坐标为 p_{ix} ,纵坐标为 p_{iy} ,记 $a_i = (p_{ix}, p_{iy}, 1)^T$ 取出前 5个值,代入下式,其中[•]代表行列式, λ 为 给定阈值。

$$|[a_{1},a_{2},a_{5}][a_{3},a_{4},a_{5}][a_{1},a_{3},a_{i}][a_{2},a_{4},a_{i}] - [a_{1},a_{3},a_{5}][a_{2},a_{4},a_{5}][a_{1},a_{2},a_{i}][a_{3},a_{4},a_{i}]| < \lambda_{\circ}$$
(15)

不等式左端为椭圆的 6 点表达。对满足(15)式 的 *a_i*,其对应的 *p_i*即为取该 5 个值情况下的内点, 通过对 *S_i*取不同的 5 个值重复该过程,比较内点最 多的集合作为聚类后的集合 *S*。根据此算法可分别 找寻为椭圆拟合做准备的输出轴齿顶点集、输出轴 辅助圆弧段点集、输入轴齿顶点集、输入轴辅助圆弧 段点集。

外点剔除后即可直接进行椭圆拟合,将每个点 代入椭圆方程并得到其系数矩阵,经过奇异值分解 (SVD)分解后可得初始拟合结果。相比于一阶泰 勒级数展开逼近的近似距离以及代数距离等方法, 几何距离具有更高的精度。几何距离表示为^[14]

$$d^{2}(a_{i},\boldsymbol{Q}) = \frac{(a_{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}a_{i})^{2}}{\left[1 + \sqrt{\frac{(a_{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}a_{i})^{2} - (a_{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}a_{i})(a_{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}a_{i})}{(a_{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}a_{i})^{2}}}\right]^{2}(a_{i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}a_{i})},$$
(16)

式中:Q 为二次型矩阵; \overline{Q} 为Q 的共轭矩阵; $Q\overline{Q} = \overline{Q}^{\mathsf{T}}Q = \overline{Q}^{\mathsf{T}}Q^{\mathsf{T}} = G, W = \overline{Q}^{\mathsf{T}}Q\overline{Q}$ 。建立非线性优化目标函数,表示为

$$\min_{\boldsymbol{\varrho}} \left[\sum_{a_i \in S} d^2(a_i, \boldsymbol{\varrho}) \right] . \tag{17}$$

求出对应 Q 后通过 Levenberg-Marquardt 算法 进行优化^[15]。此算法能借由执行时修改参数达到 结合高斯-牛顿算法以及梯度下降法的优点,并对 两者之不足进行改善(如高斯-牛顿算法之反矩阵 不存在或是初始值离局部极小值太远)。以此法 完成输出轴、输入轴相应椭圆拟合,拟合结果如 图 8 所示,获取的四组椭圆参数即为位姿解算提 供必要前提。



- 图 8 椭圆拟合结果图。(a)输入轴齿顶圆、辅助圆拟合 椭圆;(b)输出轴齿顶圆、辅助圆拟合椭圆
- Fig. 8 Ellipse fitting results. (a) Fitting ellipse with tooth top circle and auxiliary circle of input shaft;
 - (b) fitting ellipse with tooth top circle and auxiliary circle of output shaft

研究论文

2.3 齿形结构测量模型及位姿解算

齿形结构为输出轴与输入轴,其均可提供空间 圆特征,分别为二者的齿顶圆与上端面辅助圆,通过 求解出两对圆组的空间圆心坐标和法向量即可获取 输出轴与输入轴的空间除去偏航量的五维(5D)位 姿。最后由输出轴花键和输入轴缺齿在各自齿圈的 投影坐标确定最后的维度信息,从而实现齿形结构 (输出轴、输入轴)的空间位姿测量。

输入轴及输出轴的齿顶圆与上端面圆均为平行 空间圆。为实现通过视觉测量估算输入轴与输出轴 空间位姿的目的,需要建立单目视觉下的空间圆特 征位姿求解模型,再通过空间圆信息确定二者位姿。 空间圆所在平面确定后,其绕圆心处的法向量旋转 时对其本身在图像上成像无任何影响,所以通过确 定俯仰角和偏航角以及圆心坐标和半径即可定义空 间圆姿态。空间圆位姿的定义如图 9 所示,n 为欧 氏空间里圆平面法向量; θ_1 为法向量 n 与 XOY 平 面所形成的夹角,即俯仰角; θ_2 为法向量 n 在 XOY 平面的投影向量 n_2 与 X 轴形成的夹角,即偏航角。



图 9 空间圆位姿定义 Fig. 9 Definition of spatial circular pose

若 $n = (n_1, n_2, n_3), 则有:$

$$\tan \theta_1 = \frac{n_3}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2}}, \tan \theta_2 = \frac{n_2}{n_1}.$$
 (18)

空间圆在经过透视变换后在像平面上成像为椭圆,该椭圆可理解为像平面与空间圆和光心构成的 椭圆视锥所截取而得,如图 10 所示,O_w-X_wY_wZ_w 为世界坐标系,O_e-X_eY_eZ_e为相机坐标系,O₁-X₁Y₁为像平面坐标系。通过在相机坐标系下求解 空间圆位姿后,再经由相机标定得到外参矩阵即可 解算出该圆在世界坐标系的位姿。



图 10 空间圆单目视觉位姿测量原理 Fig. 10 Position and pose measurement principle of spatial circular monocular vision

相机坐标系下空间圆坐标 $P_i^{(C)} = (x_i^{(C)}, y_i^{(C)}, z_i^{(C)})^T$ 与该点在图像坐标系下齐次坐标 $P_i^{(D)} = (x_i^{(D)}, y_i^{(D)}, 1)^T$ 以及像素坐标系下齐次坐标 $P_i^{(D'')} = (u_i^{(D)}, v_i^{(D)}, 1)^T$ 的转换关系为

$$\boldsymbol{z}_{i}^{(C)} \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_{i}^{(D)} \\ \boldsymbol{v}_{i}^{(D)} \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{z}_{i}^{C} \begin{bmatrix} \frac{1}{d\boldsymbol{u}_{i}^{T}} & 0 & \boldsymbol{u}_{0}^{(D)} \\ 0 & \frac{1}{d\boldsymbol{v}_{i}^{(D)}} & \boldsymbol{v}_{0}^{(D)} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}^{(D)} & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{f}^{(D)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{i}^{(D)} \\ \boldsymbol{y}_{i}^{(D)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{u}^{(D)} & 0 & \boldsymbol{u}_{0}^{(D)} \\ 0 & \boldsymbol{f}_{v}^{(D)} & \boldsymbol{v}_{0}^{(D)} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{i}^{(C)} \\ \boldsymbol{y}_{i}^{(C)} \\ \boldsymbol{z}_{i}^{(C)} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

式中: $(u_0^{(D)}, v_0^{(D)})$ 为相机主点,单位为 pixel; $f_u^{(D)} = f^{(D)}/du_i^{(D)}, f_v^{(D)} = f^{(D)}/dv_i^{(D)}$ 为焦比, $f^{(D)}$ 为焦距; $du_i^{(D)}, dv_i^{(D)}$ 为像素在其坐标系下 U、V 方向上的宽度,单位均为 mm。

根据成像模型可得视锥方程矩阵形式表示为^[16]

$$\begin{bmatrix} x \ y \ z \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} A & D/2 & E/2 \\ D/2 & B & F/2 \\ E/2 & F/2 & C \end{bmatrix}}_{z} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = 0. \quad (20)$$

将(20)式中实对称矩阵 Q 对角化,使得:

 $P^{-1}QP = P^{T}QP = \text{diag}(\lambda_{1}, \lambda_{2}, \lambda_{3})$ 。 (21) 对已知半径空间圆的位姿求解即圆锥平面相交

研究论文

问题,需将相机坐标系下的视锥转换到标准坐标系后,再通过计算并转换回相机坐标系下即可得空间

圆圆心坐标与法向量分别为[17]

$$O = \mathbf{P}^{(R)} \left[\pm R \sqrt{\frac{|\lambda_3| (|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{|\lambda_1| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}, 0, R \sqrt{\frac{|\lambda_1| (|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{|\lambda_3| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \right]^{\mathrm{T}},$$
(22)
$$\mathbf{n} = \mathbf{P}^{(R)} \left[\pm \sqrt{\frac{|\lambda_1| - |\lambda_2|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}}, 0, -\sqrt{\frac{|\lambda_2| + |\lambda_3|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}} \right]^{\mathrm{T}},$$
(23)

式中:**P**^(R) 为视锥从相机坐标系到标准坐标系的转 换矩阵。

由(22)、(23)式可知,空间圆在像平面上投影若 非正圆时其圆心坐标和法向量均有两组解,即存在 二义性问题。本文通过输出轴与输入轴的辅助圆, 即寻找一组同轴平行圆,添加齿圈与端面深度信息、 理论上二圆法向量相同这两个约束条件去除虚 假解。

假设已通过计算获得输出轴齿顶圆圆心 O_{A1}、 O_{A2} 法向量 n_{A1}、n_{A2} 与辅助圆的圆心 O_{B1}、O_{B2} 法向 量 n_{B1}、n_{B2}。由于圆法向量方向近似相等,分别计算 n_{A1} • n_{B1}、n_{A1} • n_{B2}、n_{A2} • n_{B1}、n_{A2} • n_{B2},获取其中 数值较大的两组,再通过比较齿顶圆、辅助圆圆心实 际深度距离与对应的圆心坐标所计算的距离,差值 较小即所求解。

目前为止可获取输出轴与输入轴除偏航角以外 的所有信息,最后一个维度分别由输出轴花键和输 入轴缺齿确定。在单目视觉的相机内参已知时,一 个空间三维点由于缺乏深度信息,则不能仅仅通过 内参矩阵反求三维空间点,但由于已经确定了齿顶 圆平面,且缺齿、花键中点在空间中与各自齿顶圆共 面,只需联立圆平面法向方程与空间点透视投影方 程即可,

$$\begin{cases} z_{c} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{u}^{(1)} & 0 & u_{0}^{(1)} \\ 0 & f_{v}^{(1)} & v_{0}^{(1)} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{c} \\ y_{c} \\ z_{c} \end{bmatrix}, \\ n_{1}(x_{c} - x_{1}) + n_{2}(y_{c} - y_{2}) + n_{3}(z_{c} - z_{3}) = 0 \end{cases}$$
(24)

式中:(u,v)为缺齿或花键中点在像素坐标系下坐标,单位为 pixel; $P_c = (x_c, y_c, z_c)^T$ 为对应中点相机坐标系下坐标; $Q_c = (x_1, y_2, z_3)^T$ 、 $n = (n_1, n_2, n_3)^T$ 分别为齿顶圆在相机坐标系下的圆心坐标和法向量。

至此对于输出轴与输入轴位姿求解的所需参数 均计算完毕,即可得到其在相机坐标系下的相应六 自由度位姿。

3 实验系统搭建与精度验证

依据齿形结构的实际构型及装配形式,构建如 图 11 所示的模拟装配系统,输入轴和输出轴通过齿 圈同轴配合以及缺齿与花键配准实现对接装配。输 出轴固定于精密平台,输入轴与托架、调姿定位机构 相连接。数控定位器球头部件与输入轴托架固联, 球窝与数控定位器连接。工业相机通过可拆卸适配 结构安装于输入轴,打光方式采用背光,可清晰观察 输入轴与输出轴的轮廓边缘。





工业相机采集图像后,利用算法进行处理获取 输出轴与输入轴空间位姿。最后开发相关软件,计 算出各定位器驱动量并进行调姿,迭代此调姿测量 过程直至满足调姿量小于设定阈值,即输出轴与输 入轴对准后,沿输入轴轴线方向驱动部件,完成 装配。

基于机器视觉的齿形结构测量系统主要用于实 现图像采集与处理和位姿解算。

通过计算椭圆的空间姿态,获取椭圆法向和圆 心之后,即可计算孔位配合的对中同轴度。此处在 获得输出轴、输入轴位姿后,主要计算部件两轴线之

研究论文

间的夹角 α 和距离 d 即可。花键、缺齿误差由其中 点和对应齿顶圆圆心连线并投影至同一平面后的夹 角 θ 反映,如图 12 所示。



- 图 12 装配关系图。(a)部件轴线对中关系;(b)花键、 缺齿夹角关系
- Fig. 12 Assembly diagram. (a) Alignment of component axes; (b) angle between spline and groove

本文通过搭建实验系统进行验证,实验现场如 图 13 所示。主要包括模拟组件、光学精密平台、三 向运动定位器、相机固持装置、环形光源、工业相机 和控制软件。每组定位器均有三个方向的驱动轴。 通过定位器移动输入轴及其固联部件,多次改变输 出轴与输入轴相对位姿,每组位姿下用激光跟踪仪 的测量值和本文解算值相比较,评估测量装配的精 度。实验中相机工作距离 400~500 mm,输入轴齿 圈直径为 180.000 mm,其辅助圆直径 165.000 mm, 两圆 纵 深 80.000 mm; 输 出 轴 齿 圈 直 径 为 180.000 mm,其辅助圆直径 160.000 mm,两圆纵 深 180.000 mm。相机参数为:u、v 轴像元尺寸均 为 2.400 μ m, 焦距 f = 12.535 mm, 主点 $u_0 = 2798.170$ 、 $v_0 = 1834.290$ 。



图 13 实验现场图 Fig. 13 Experimental site

基于机器视觉的装配精度测试具体步骤如下。

1)完成相机与三向定位器的手眼标定,放置输 出轴并安装环形光源;

2)分别在输出轴与输入轴上放置靶球,通过 Leica 激光跟踪仪,在测量对象无遮挡且方圆 2.5 m 内较为空旷的环境条件下放置激光跟踪仪,测量出 输出轴与输入轴的位姿参数;

3)获取输出轴、输入轴的图像,处理并解算后 得到各自位姿信息,作为本文方法测量值;

 4) 变换输出轴位姿,重复步骤 2~3,获取 10 组 数据;

5)分析数据,比较激光跟踪仪测量值与视觉方 法测量值。

同一齿形结构在10组不同位姿下,通过激光跟 踪仪和视觉系统分别测量出齿形结构位姿参数。 10组不同姿态下的实验测量数据如表1所示,其中

表 1 激光跟踪仪测量数据和视觉系统测量数据

Table 1 I	Laser	tracker	measurement	data	and	vision	system	measurement	data
-----------	-------	---------	-------------	------	-----	--------	--------	-------------	------

Group —	Laser t	Laser tracker measurements			system measu	rements	Difference		
	$\alpha_{\rm T}/(^{\circ})$	$d_{\mathrm{T}}/\mathrm{mm}$	$\theta_{\rm T}/(^{\circ})$	$\alpha_{\rm A}/(^{\circ})$	$d_{\rm A}/{ m mm}$	$\theta_{\rm A}/(^{\circ})$	$\alpha_{\rm D}/(^{\circ})$	$d_{\rm D}/{ m mm}$	$ heta_{ m D}/(^{\circ})$
1	1.343	1.538	3.159	1.327	1.519	3.171	0.016	0.019	0.012
2	1.545	1.354	3.018	1.563	1.334	3.032	0.018	0.020	0.014
3	1.932	1.093	2.876	1.959	1.111	2.891	0.027	0.018	0.015
4	1.964	1.021	2.814	1.989	1.047	2.800	0.025	0.026	0.014
5	2.434	0.982	2.772	2.460	0.998	2.753	0.026	0.016	0.019
6	2.745	0.869	2.421	2.710	0.853	2.402	0.035	0.016	0.019
7	2.990	0.701	2.109	2.973	0.727	2.118	0.017	0.026	0.009
8	3.364	0.532	1.987	3.383	0.547	1.976	0.019	0.015	0.011
9	3.426	0.501	1.820	3.454	0.524	1.843	0.028	0.023	0.023
10	3.543	0.482	1.515	3.564	0.455	1.503	0.021	0.027	0.012

研究论文

 $\alpha_{\mathrm{T}}, d_{\mathrm{T}}, \theta_{\mathrm{T}}$ 为激光跟踪仪测量值, $\alpha_{\mathrm{A}}, d_{\mathrm{A}}, \theta_{\mathrm{A}}$ 为本文 方法测量值, $\alpha_{\mathrm{D}}, d_{\mathrm{D}}, \theta_{\mathrm{D}}$ 为二者差值。

从表中实验数据可以看出,通过视觉测量系统 测出的平均角度 α_D 偏差为 0.023°,平均距离 d_D 偏 差为 0.020 mm,平均角度 θ_D 偏差为 0.015°,系统 要求的实测角度 α_D 偏差应小于 0.030°,距离 d_D 偏 差应小于 0.030 mm,角度 θ_D 偏差应小于 0.030°, 与激光跟踪仪在 2.5 m 的工作距离内的测量精度 0.047 mm 相比,误差小于 0.001 mm,则本文方法 测量精度可达 0.050 mm。

4 结 论

本文针对传统齿形结构的装配困难问题提出了 基于视觉的测量方法。利用改进的 SUSAN 算法与 Canny 算法有效提取齿形结构关键特征,降低了亮 度、曝光、工作距离等因素干扰。并引入 RANSAC 思想,运用基于几何距离及 Levenberg-Marquardt 优化的椭圆拟合算法,准确且快速获取椭圆参数,最 后给出齿形结构测量模型解算其空间位姿。通过搭 建齿形结构模拟装配实验平台,并结合实验结果分 析该方法可达到预期的测量精度,满足装配要求。

参考文献

- [1] Mei Z Y, Fan Y Q. Flexible assembly technique for aircraft parts joining based on laser tracking and positioning [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(1): 65-69.
 梅中义,范玉青.基于激光跟踪定位的部件对接柔性 装配技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35 (1): 65-69.
- [2] Zhao J F. Research on high precision installation technology of large ship installation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
 赵俊峰. 船舶大型装置高精度安装技术研究[D]. 大 连:大连理工大学, 2018.
- [3] Zhang B, Lin J C. New method of tooth pitch deviation measurement based on laser tracker for mega spur gear[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(10): 146-150.
 张白,林家春.基于激光跟踪仪的特大型直齿轮齿距 偏差测量新方法[J]. 机械传动, 2019, 43(10): 146-150.
- [4] Fan B, Ji Q S, Li M F, et al. iGPS and laser tracker applications comparison in digital assembly of large aircraft parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(5): 57-62.
 范斌,季青松,李明飞,等. iGPS 测量系统与激光跟

踪仪在某飞机大部件数字化装配中的对比应用[J]. 航空制造技术,2019,62(5):57-62.

- [5] Zu S, Hu P P, Pan Q. Extraction method of artificial landmark center based on lidar echo intensity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0810001.
 祖爽,胡攀攀,潘奇.基于激光雷达回波强度的人工路标中心提取方法 [J]. 中国激光, 2020, 47 (8): 0810001.
- [6] Lu R S, Shi Y Q, Hu H B. Review of three-dimensional imaging techniques for robotic vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57 (4): 040001.
 卢荣胜,史艳琼,胡海兵.机器人视觉三维成像技术 综述[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57 (4): 040001.
 [7] Zhao S F, Huang T, Xu Q, et al. Unsupervised
- [7] Zhao S F, Huang I, Xu Q, et al. Unsupervised monocular depth estimation for autonomous flight of drones[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 021012.
 赵栓峰,黄涛,许倩,等.面向无人机自主飞行的无监督单目视觉深度估计[J].激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 021012.
- [8] Miao X K. Research on key technologies of visual pose measurement for non-cooperative objects in space[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
 苗锡奎.空间非合作目标视觉位姿测量关键技术研究[D].北京:中国科学院大学, 2013.
- [9] Gao S, Han Y H. A vision-based relative position and attitude determination algorithm for RVD between spacecraft [J]. Aerospace Control, 2011, 29(1): 31-36.
 高珊, 韩艳铧. 一种基于机器视觉的航天器交会对接 相对位置和姿态确定算法研究[J]. 航天控制, 2011, 29(1): 31-36.
- [10] Zhang H, Li S G, Xu Y, et al. A vision measuring method for fork type wing-fuselage docking [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(21): 56-61.
 张辉,李泷杲,徐岩,等.一种面向叉耳式翼身对接 的视觉测量方法[J]. 航空制造技术, 2017, 60(21): 56-61.
- Liu Q S, Xie X F, Zhang X Z, et al. Checkerboard corner detection algorithm for calibration of focused plenoptic camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (14): 1415002.
 刘青松,谢晓方,张烜喆,等.用于聚焦型光场相机 标定的棋盘角点检测算法[J].光学学报, 2020, 40 (14): 1415002.
- [12] Long Y, Hu G L, Meng Y Q, et al. A fast pruning algorithm for the skeleton of linear structured light

研究论文

stripes [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(2): 60-64, 78. 龙洋, 胡改玲, 蒙雁琦, 等. 快速的线结构光条纹骨 架剪枝算法[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(2): 60-64, 78.

- [13] Wu K, Wang X H, Yao J L. An image copy detection algorithm based on Shi-Tomasi corner area
 [J]. Journal of China University of Metrology, 2014, 25(3): 263-267.
 吴坤, 王小华, 姚金良. Shi-Tomasi 角点区域的拷贝 图像检测[J]. 中国计量学院学报, 2014, 25(3): 263-267.
- [14] Wu Y H, Wang H R, Tang F L. Conic fitting: new easy geometric method and revisiting sampson distance [C] // 2017 4th IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR), November 26-29, 2017, Nanjing, China. New York: IEEE Press,

2017: 37-42.

- [15] Bellavia S, Gratton S, Riccietti E. A Levenberg-Marquardt method for large nonlinear least-squares problems with dynamic accuracy in functions and gradients [J]. Numerische Mathematik, 2018, 140 (3): 791-825.
- [16] Ren L C, Lü S Z, Wang Q S, et al. A kind of space oblique conic map projection model and its calculation
 [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(3): 461-466, 473.
 任留成,吕泗洲,王青山,等.一种空间斜圆锥投影
 模型及解算[J].测绘学报, 2013, 42(3): 461-466, 473.
- [17] Safaee-Rad R, Tchoukanov I, Smith K C, et al. Three-dimensional location estimation of circular features for machine vision[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(5): 624-640.