

文章编号 1004-924X(2018)06-1462-08

微小光学器件装配系统与实验研究

马立¹, 赵志杰^{1*}, 周辅君¹, 叶萍², 荣伟彬³

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072;

2. 中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065;

3. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:在激光陀螺谐振腔上精确装配微小光学器件合光棱镜和光电管的过程称为合光,它是激光陀螺制造过程中的关键环节。传统的人工合光装配效率低、质量一致性差,已不能满足激光陀螺的生产需求。因此,本文在分析合光原理的基础上,开发一套由合光机构、信号处理、视觉检测及控制模块等组成的自动合光装配系统。根据合光装配特点,设计了双臂协同运动的合光机构,保证操作精准度的同时提高装配效率。激光陀螺合光信号易受干扰,提出采用 Sallen-Key 低通滤波器对合光信号进行滤波处理,有效地滤除了残余噪声。控制模块通过机器视觉辅助完成合光棱镜的粗调,采用层次分析法综合多个评价参数确定光学器件的最佳位姿,实现合光装配自动化。试验结果表明,开发的激光陀螺合光装配系统能够成功地完成光学器件的精确装配。

关键词:精密装配;微小器件;信号处理;视觉检测

中图分类号:TP242 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182606.1462

Assembly system for miniature optical parts and experimental study

MA Li¹, ZHAO Zhi-jie^{1*}, ZHOU Fu-jun¹, YE Ping², RONG Wei-bin³

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, AVIC, Xi'an 710065, China;

3. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: 710623242@qq.com

Abstract: The process of precisely assembling a prism and a phototube onto the resonator of a ring laser gyroscope is called beam-coupling. This is a key procedure in the production of ring laser gyroscopes. Traditional manual beam-coupling is unable to satisfy the demands of ring laser gyroscope assembly, due to the inefficiency and lack of stability associated with the process. An automatic beam-coupling assembly system is therefore developed based on the analysis of beam-coupling principles. This method involves the application of beam-coupling mechanisms, the processing of the beam-coupling signals, vision detection and the use of a control module. Based on the operation characteristics of beam-coupling, a two-arm coordinated movement mechanism is designed to ensure the accuracy of operation and to simultaneously improve the efficiency of the assembly process. A low pass filter

收稿日期:2017-11-20;修订日期:2018-01-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61573238);上海市自然科学基金资助项目(No. 13ZR1415800)

based on the Sallen-Key is used to remove noise since the beam-coupling signal is easily disturbed. The control module performs coarse adjustments of the optical prism using machine vision and uses the analytic hierarchy process (AHP) to evaluate the best position and orientation of the optical device. This is achieved by combining a plurality of evaluation parameters to realize automation of the optical assembly. The experimental results show that the developed laser-gyro-assembly system can successfully perform accurate assembly of optical devices.

Key words: precision assembly; micro optical parts; signal processing; vision detection

1 引 言

激光陀螺是捷联惯导系统的理想器件,广泛应用于军事和民用领域^[1]。激光陀螺合光装配是指在激光陀螺谐振腔体上精确装配合光棱镜和光电管的过程,简称合光。合光输出特性^[2]直接影响激光陀螺的工作精度,是激光陀螺制造过程中的一个至关重要环节。国内激光陀螺合光装配主要采用人工操作,效率低,稳定性差,易受人为因素影响,已不能满足激光陀螺的生产需求,亟待开发一套自动合光装配系统。

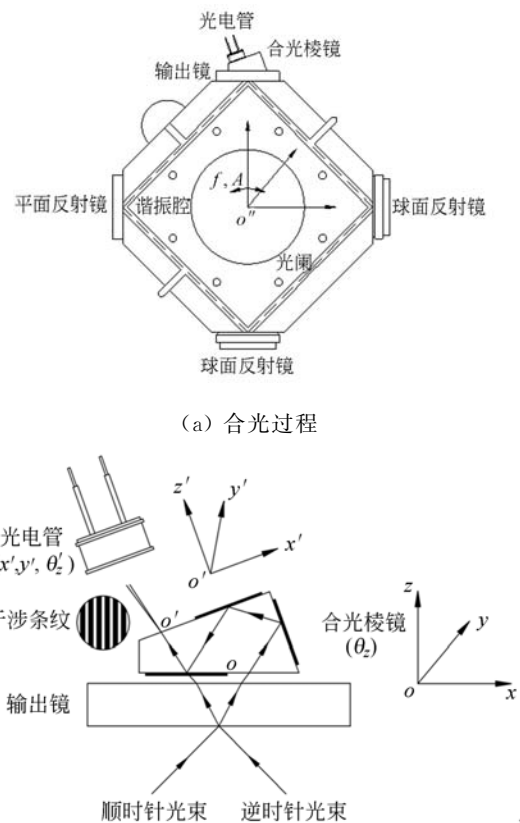
激光陀螺结构复杂,影响输出结果的因素众多。目前,国内针对激光陀螺的研究大多集中在提高输出信号的精度^[3-4]以及相关器件的性能^[5-6]方面。但是针对激光陀螺生产制造中的装配环节研究非常少,国内仅有少数研究单位进行过相关研究。哈尔滨工业大学采用机器视觉检测技术研制了激光陀螺抖动轮自动装配系统^[7];同时针对激光陀螺生产中的调控问题,设计了面向光学精密装配的微操作机器人^[8]。合光棱镜和光电管是尺寸小且精密的光学器件,针对微小零件的自动装配,借助于机器视觉辅助和传感器反馈等技术,国内外很多科研单位都进行了相关方面的研究^[9-11]。

本文针对激光陀螺合光装配特点,将微小型零件装配技术引入到合光装配工艺中,建立由合光机构、信号处理、视觉检测及计算机控制等模块组成的合光装配系统,研究合光装配策略,实现合光装配的自动化。

2 合光原理及系统设计

合光原理如图 1 所示,它是在激光陀螺谐振腔体处于高频抖动下进行的[图 1(a)],通过精确

调整合光棱镜位姿 θ_z 使得从激光陀螺谐振腔的输出镜射出的顺时针、逆时针激光束经过合光棱镜的反射和折射后耦合产生干涉,同时精确调整光电管位姿 (x', y', θ_z') 准确接收投影到光敏面的干涉信号[图 1(b)],光电管的两个光敏面将其转换成两路电流信号,该电流信号进入调理电路,计算机采集合光信号并计算两路信号的光强(光的电场强度)、幅值差和相位差。合光装配要求光电管和合光棱镜调整到一个最佳位姿,该位姿满足顺、逆两路光信号幅值差小于 5%,且两路光强均在接近最大值,相位差处于 $90^\circ \pm 2^\circ$ 的范围内。



(a) 合光过程

(b) 原理示意图

(b) Diagram of principle

图 1 合光原理

Fig. 1 Beam-coupling principle

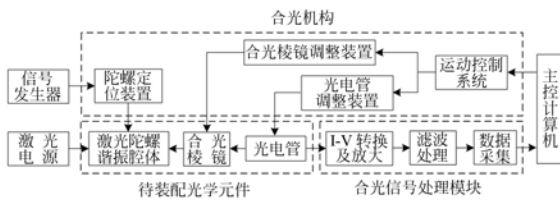


图 2 自动合光装配系统总体结构

Fig. 2 General structure of assembly system of automatic beam-coupling

为完成合光任务,设计如图 2 所示的自动合光装配平台,主要由激光电源、信号发生器、视觉检测模块、合光机构、信号处理模块及主控计算机组成。激光电源使得激光陀螺谐振腔内产生顺、逆时针激光束。信号发生器为谐振腔体提供振荡源。视觉检测模块辅助检测合光棱镜的装配状态。合光机构用于精确调整合光棱镜、光电管的位姿。信号处理完成信号的放大和滤波。主控计算机进行信号的采集和计算并实时显示采集到的信号和相关参数,实现合光系统的自动控制。

针对激光陀螺合光工艺特点,设计了如图 3 所示双臂协同操作的合光机构。左臂为合光棱镜调整装置,由四自由度(x, y, z, θ_z)工作台及合光棱镜夹持器组成,用于实现合光棱镜的夹紧、释放及精密位姿调整;右臂为光电管调整装置,由三自由度(x', y', z')工作台及光电管夹持器组成,用于实现光电管的夹紧、释放及精密位姿调整;机构中间为陀螺定位装置,用于实现陀螺谐振腔体的精确定位及抖动。平移工作台采用精密滚珠丝杠传动,运动分辨率为 $1 \mu\text{m}$;旋转工作台采用蜗轮副传动,运动分辨率为 $3''$,满足合光棱镜及光电管位姿调整需要。

3 合光信号处理与分析

激光陀螺利用光电管作为探测器件对陀螺信号进行光电转换,合光信号处理包括对光电传感器的输出电信号进行 I-V 转换、放大、滤波。激光陀螺的合光信号经过转换、传输、接收,会受到各种随机噪声的干扰,包括测量环境的振动、空气扰动、光源功率不稳定、暗电流和电机噪声等。从信号表现上来说就是信号突变、曲线不平滑等异常情况。良好的滤波电路能够减小信号测量误差,有助于后续的分析 and 计算工作,对自动装配系统

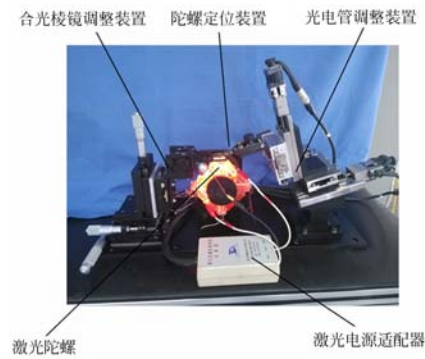


图 3 合光操作机构

Fig. 3 Beam-coupling manipulator

的装配精度至关重要。

3.1 合光信号滤波处理

传统高斯滤波由于比较简单而常被用于信号处理中,采用传统高斯滤波对激光陀螺的合光信号进行滤波处理,能够剔除和滤掉异常点。但是,当所处理的信号具有很高波峰或很低波谷的轮廓时,传统高斯滤波会在这里拉高或降低波形,使得滤波得到的波形畸变,偏离真实的波形。

Sallen-Key(S-K)滤波器^[12]是一种常用的信号处理有源滤波器。综合 S-K 滤波器的特性和实验测试效果,本文采用四阶 S-K 低通滤波器。其原理如图 4 所示,它由 2 个二阶低通滤波器串联而成,二阶 S-K 低通滤波器主要由 4 个部分组成,包括两个相互串联的电阻 R_5 和 R_6 ,1 个输出放大器和 2 个电容(C_4, C_5),1 个减少直流失调的电阻 R_9 ,以及一个处理热噪声的电容 C_8 。电阻 R_5 和 R_6 串联接到运放的输入端。其中电容 C_4 是反馈电容;电容 C_5 连接在放大器输入端和地之间,给电路提供高输入阻抗,同时将滤波器阻抗和前面电路的输出阻抗分离开来。

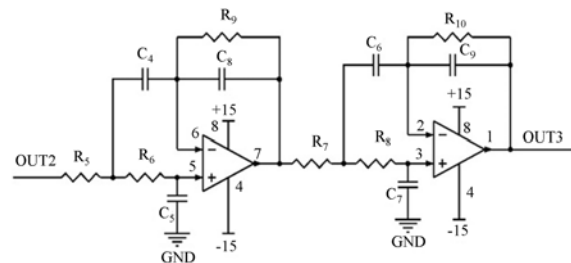
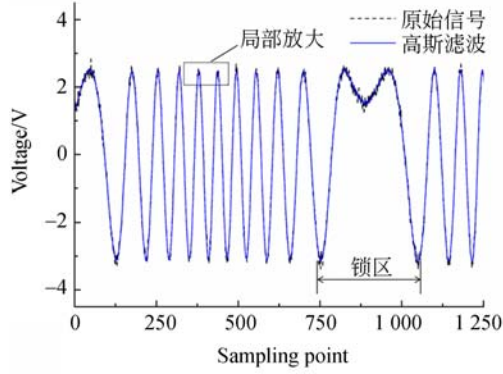


图 4 S-K 低通滤波器原理图

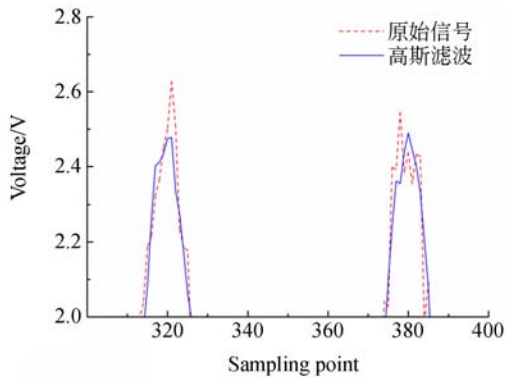
Fig. 4 Schematic of S-K low-pass filter

图 5、图 6 比较了同一合光信号的高斯滤波

及 S-K 滤波效果,显然,S-K 滤波器能更有效滤除合光信号波峰及波谷处噪声,稳定性更高;高斯滤波信号会有轻微畸变,激光陀螺输出信号很容易受到外界因素影响而造成信噪比降低。因此,合光系统选择 S-K 滤波器进行信号滤波。



(a) 高斯滤波处理效果图
(a) Gauss Filter result



(b) 高斯滤波处理局部放大图
(b) Partial amplification results

图 5 合光信号高斯滤波处理效果

Fig. 5 Gauss Filter results of beam-coupling signals

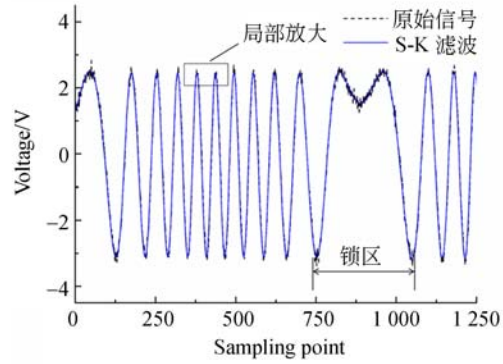
3.2 合光信号分析计算

合光信号经过上述滤波处理之后,由数据采集卡采集到主控计算机,主控计算机分别提取这两路信号中每个周期的峰值,形成两列幅值数据,即 $b_{1(i)}, b_{2(i)}, i=1, 2, \dots, N$ 。

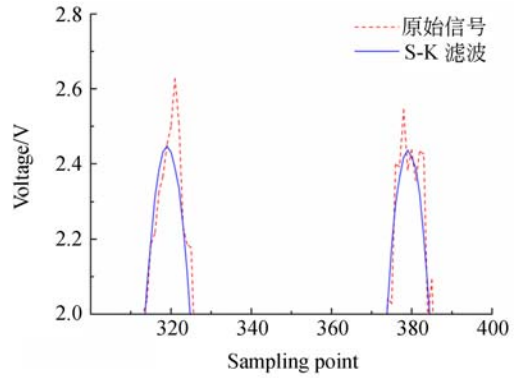
由此可得两路信号幅值差百分比为:

$$Q_{1j} = \left| \frac{\sum_{i=1}^N b_{2(i)} - \sum_{i=1}^N b_{1(i)}}{(\sum_{i=1}^N b_{1(i)} + \sum_{i=1}^N b_{2(i)})/2} \right| \times 100\%, \quad (1)$$

其中: j 为搜索类型, $j=1$ 时表示粗搜索, $j=2$ 时表示精搜索, $j=3$ 时表示相位搜索。



(a) S-K 滤波处理效果图
(a) S-K Filter results



(b) S-K 滤波处理局部放大
(b) Partial amplification results

图 6 合光信号 S-K 滤波处理效果

Fig. 6 S-K Filter results of beam-coupling signals

合光信号光强为:

$$Q_2 = \frac{V_{P-P}(A) + V_{P-P}(B)}{2}, \quad (2)$$

其中: $V_{P-P}(A)$ 指其中一路信号峰峰值, $V_{P-P}(B)$ 指另一路信号峰峰值。

计算合光信号相位差时,为了得到较为真实的数值,应该选择远离锁区的波形进行计算,两路信号的相位差为:

$$\Delta\psi_j = 360^\circ \times \left| \frac{a_{2(i)} - a_{1(i)}}{\min(a_{1(i+1)} - a_{1(i)})} \right|. \quad (3)$$

相对相位差为:

$$Q_{3j} = |\Delta\psi_j - 90^\circ|. \quad (4)$$

为便于后续处理,对参数进行归一化处理:

$$P_{kj} = \frac{Q_{kj} - \min(Q_{kj})}{\max(Q_{kj}) - \min(Q_{kj})}, \quad (5)$$

其中 $k=1, 2, 3$, P_{1j}, P_{2j}, P_{3j} 分别代表归一化后的幅值差、光强及相对相位差。

4 合光控制策略

自动合光装配控制系统是基于 LabVIEW 平台开发的,同时配合数据采集卡和运动控制卡完成信号的实时采集反馈和末端夹持器的精密运动。自动合光装配分为两个步骤进行,首先是粗调合光棱镜,使得出射光线在平行于操作平面上投影的两个光斑重合,然后再通过信号参数精确调整光电管和合光棱镜的位姿。

4.1 合光棱镜的粗调

进行合光棱镜粗调之前,合光棱镜已经光胶在激光陀螺腔体上,这是一种依靠分子力结合的连接方式^[13],此时合光棱镜可以转动,难以移动。合光棱镜粗调过程将合光棱镜位姿转动合适的角度,使得经过合光棱镜射出的光束在接收板上形成的光斑重合。使用机器视觉检测辅助合光棱镜的粗调过程,CCD 相机实时检测光斑的相对位置,系统从而判断当前的装配状态,实现合光棱镜的粗调。调整策略如图 7 所示。

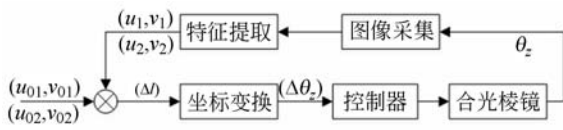
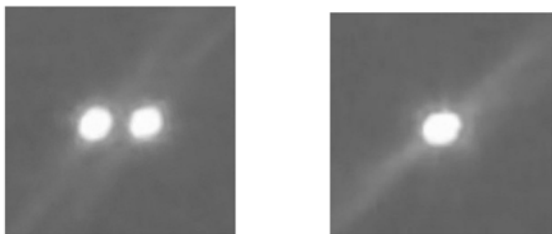


图 7 合光棱镜位姿粗调策略

Fig. 7 Strategy of coarse-adjustment for prism

激光陀螺腔体内的光线射出合光棱镜后在接收板形成的光斑如图 8。图 8(a)为初始任意状态时光斑的相对位置,图 8(b)为光斑重合时的状态。



(a) 光斑移动开始位置 (b) 光斑重合

(a) Start position before spot movement (b) Spot overlap

图 8 光斑的相对位置变化

Fig. 8 Relative position change of light spot

图 8 中光斑图像近似圆形,对采集到的图像进行灰度变换,如图 9 所示,可以看出光斑区域亮

度均匀,对称性较好,特征明显,有利于对图像进一步的处理。

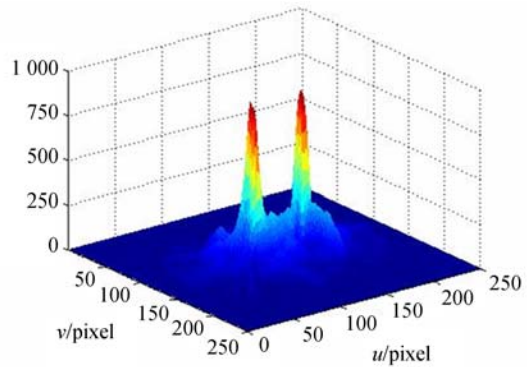


图 9 光斑图像的灰度图

Fig. 9 Grayscale image of spot image

对采集到的光斑图像采用霍夫变换进行边缘检测,识别圆的边缘并计算圆心坐标,最终计算出两个圆心之间的距离,以此判断合光棱镜的初步装配状态。光斑的中心点坐标记为 (u, v) ,边缘检测如式(6)所示:

$$(u, v, rad) = f_{\text{hough}}(img, \text{radrange}), \quad (6)$$

式中: rad 为圆半径, img 为输入图片, radrange 为半径范围。边缘检测结果如图 10 所示。当两个光斑的中心 $M(u_1, v_1)$ 、 $N(u_2, v_2)$ 重合,合光棱镜的粗调过程即可完成。

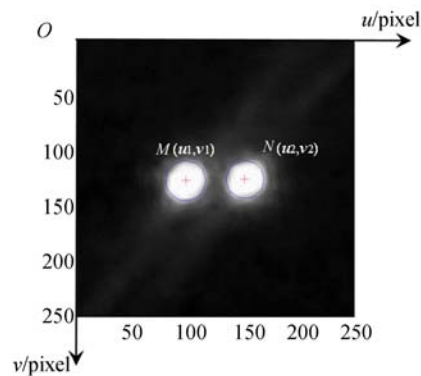


图 10 光斑特征识别

Fig. 10 Spot feature recognition

4.2 精确装配合光棱镜和光电管

完成调光斑后,开始精确调整合光棱镜和光电管的位姿,根据合光装配特点,首先粗搜索调整光电管位姿,然后通过相位搜索调整合光棱镜姿态,最后再对光电管位姿进行精确调整。

4.2.1 粗搜索

光电管在合光棱镜的上表面进行粗搜索,光

电管的移动步距为 $50\ \mu\text{m}$,每走一步记录一次数据,其中包括幅值差 (P_{11})和光强 (P_{21}),根据计算得出最佳点,把光电管运动到该点。由于合光装配评价参数较多,在确定最佳点时,由于各参数不可能同时达到最佳,本文采用层次分析法^[14-15]进行权值的确定,融合多个装配评价参数,确定最佳位姿。由合光经验可知幅值差比光强略重要,得到判断矩阵 I :

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由于该矩阵为二阶矩阵,所以不必进行一致性检验。通过判断矩阵 I 得出 P_{11} 、 P_{21} 所对应权值为: $\lambda_{11} = 2/3, \lambda_{21} = 1/3$ 。

定义粗搜索综合值为 P_1 :

$$P_1 = \lambda_{11} P_{11} + \lambda_{21} (-P_{21}), \quad (8)$$

则粗搜索寻优判断问题转换为求 P_1 的最小值。图 11 给出了一次合光实验中光电管位姿粗搜索过程中综合值得分布情况。存在 C 点为综合值 (P_1) 最佳点,它对应的幅值差 (Q_{11}) 和光强 (Q_{21}) 分别为 1.29% 和 16.67 V (最大光强为 16.68 V)。

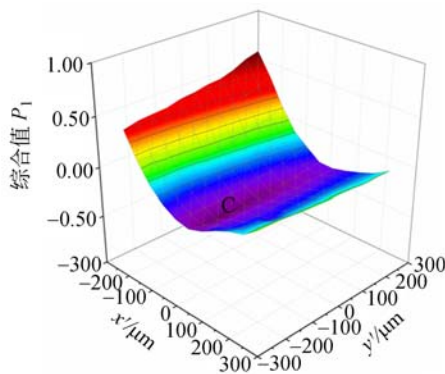


图 11 粗搜索综合值分布

Fig. 11 Comprehensive value distribution of the rough search

4.2.2 相位搜索

当合光棱镜通过光胶与激光陀螺腔体平面镜连接后,由于合光棱镜的光胶特性,因此在相位搜索过程中采用单向步进搜索法,由旋转工作台带动合光棱镜转动,即只要出现符合条件的相位差 (Q_{33}) 时,即停止搜索。

4.2.3 精搜索

精搜索的目的是提高搜索精度,当姿态调整接近完成时,减小光电管移动步距,同时加入相位差判断机制,在保证找到幅值差最小的同时,还要

保证步骤(2)已调整到位的相位差符合要求。每步记录数据包括幅值差 (P_{12})、光强 (P_{22}) 和相对相位差 (P_{32}),在确定最佳点时,方法和粗搜索相同,这里不再赘述。相同陀螺自动合光实验中精搜索的综合值分布如图 12。

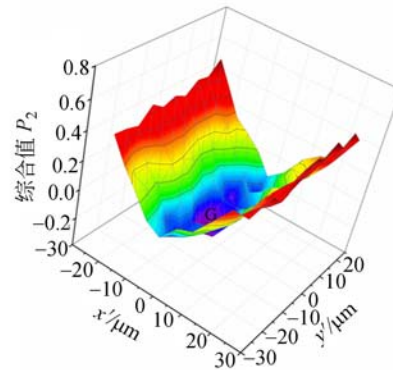


图 12 精搜索综合值分布

Fig. 12 Comprehensive value distribution of fine search

从图 12 中可以得到 G 点是精搜索综合值 (P_2) 最佳点,它所对应的幅值差 (Q_{12})、光强 (Q_{22}) 和相位差 ($\Delta\phi_2$) 分别为 0.67%、16.31 V (最大光强值为 16.33 V) 及 90.06° ,满足合光要求。

5 自动合光装配实验

基于上述研究,本文搭建了合光试验系统,如图 13 所示。

在图 13 所示的激光陀螺自动合光装配平台上进行合光试验,图 14 中为合光装配完成后的合光信号,结果显示,两路信号的幅值差为 0.15%,

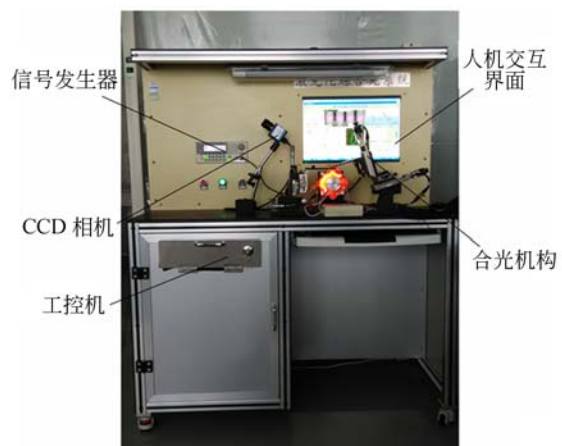


图 13 合光实验系统

Fig. 13 Photosynthetic experiment system

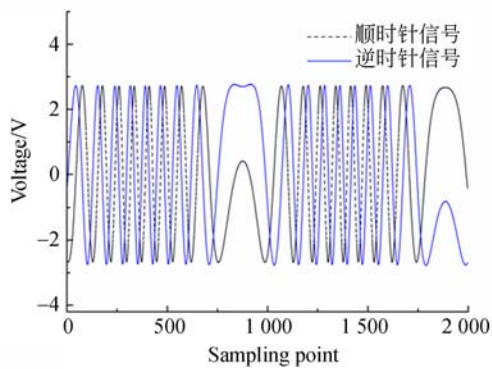


图 14 激光陀螺合光后信号图

Fig. 14 Signals after beam-coupling of laser gyro

相位差为 90.19° ，光强为 2.69 V ，满足合光装配的工艺要求。

为了验证合光装配系统的实用性，采用该系统进行合光装配实验，装配成功后的产品在 24 小时后进行复测，随机选取 10 次装配结果，统计该合光装配系统装配评价参数。结果如表 1 所示。

由表 1 可知，所选取的陀螺合光装配后复测结果全部合格。根据实际装配结果统计，使用自动合光系统进行激光陀螺合光装配，复测合格率达到 98%。统计结果表明，该系统能够代替人工完成合光装配操作。

表 1 激光陀螺合光实验结果

Tab. 1 Experimental results of laser gyro assembly

序号	幅值 A /V	幅值 B /V	相位差 /($^\circ$)	幅值差 /%	复测幅值 A /V	复测幅值 B /V	复测相位差 /($^\circ$)	复测幅值差 /%	是否合格
1	15.1	15.03	91.51	2.73	15.11	15.28	91.77	3.27	是
2	14.2	14.24	88.7	0.93	14.06	14.06	88.87	0.25	是
3	14.25	14.38	88.38	3.1	14.59	14.5	88.14	2.09	是
4	13.95	13.91	88.98	1.17	13.77	13.82	88.03	1.15	是
5	15.31	15.45	88.22	2.61	15.35	15.23	88.67	2.16	是
6	15.34	15.41	90	1.31	15.52	15.67	90.47	2.6	是
7	15.42	15.44	90.07	0.38	15.23	15.39	90.72	3.01	是
8	15.24	15.24	88.95	0.01	15.72	15.37	89.21	0.02	是
9	15.49	15.49	88.77	0.01	15.29	15.28	88.17	0.18	是
10	14.97	14.99	88.75	0.4	15.14	15.19	88.59	0.97	是

6 结 论

为了实现激光陀螺自动合光装配任务，本文开发了一套用于激光陀螺生产过程中装配合光棱镜和光电管的自动合光系统。在分析合光原理基础上，设计了激光陀螺自动合光装配平台，针对装配对象的特点，设计了双臂协同操作式合光机构。激光陀螺合光输出信号微弱且容易受到干扰，信

噪比较低，在信号处理电路中提出采用 Sallen-Key 低通滤波器对合光信号进行滤波处理，信号处理结果表明，该滤波器能够有效地滤除残杂噪声。控制模块以合光原理为基础，利用视觉检测合光棱镜位姿并完成合光棱镜的粗调，结合层次分析法综合多个评价参数确定光学器件的最佳位姿。在以上研究的基础上，使用该合光装配系统进行激光陀螺合光实验。实验结果表明，该装配系统能够成功地完成激光陀螺的合光装配任务。

参考文献：

- [1] 查峰, 高敬东, 许江宁, 等. 光学陀螺捷联惯性系统的发展与展望[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7):33-40.
CHA F, GAO J D, XU J N, *et al.*. Overview on Strapdown Inertial System Consisted by Optical Gyros[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(7):33-40.
- [2] 刘健宁, 蒋军彪, 石顺祥, 等. 全反射棱镜式环形激光器合光输出及陀螺精度特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1):1-6.
LIU J N, JIANG J B, SHI SH X, *et al.*. Analysis of total reflection prism ring laser's output characteristic and gyroscope's accuracy[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2013, 40(1):1-6. (in Chinese)
- [3] 史震, 陈帅, 张健, 等. 基于改进径向基函数神经网络的激光陀螺温度补偿[J]. 光学精密工程, 2014,

- 22(11):2975-2982.
- SHI Z, CHEN S, ZHANG J, *et al.*. Temperature compensation of laser gyro based on improved RBF neural network[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11):2975-2982. (in Chinese)
- [4] 杨云涛,王省书,黄宗升,等. 船体变形测量中激光陀螺零偏误差的补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2014(12):2755-2761.
- YANG Y T, WANG SH SH, HUANG Z SH, *et al.*. Bias error compensation of laser gyroscope for autonomous measurement of ship hull angular deformation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014(12):2755-2761. (in Chinese)
- [5] 梁可,李龙,陈林峰,等. 激光陀螺反射镜最佳透射率实验研究[J]. *中国激光*, 2017(4):12-16.
- LIANG K, LI L, CHEN L F, *et al.*. Experimental Study on Optimal Transmittance of Mirror in Laser Gyro[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017(4):12-16. (in Chinese)
- [6] 马仰华,于文东,权冰心,等. 腔长控制镜对激光陀螺动态特性的影响[J]. *中国激光*, 2017(6):15-22.
- MA Y H, YU W D, QUAN B X, *et al.*. Influence of Path Length Control Mirror on Dynamical Stability of Ring Laser Gyro[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017(6):15-22. (in Chinese)
- [7] RONG W, LI Z, ZHANG W, *et al.*. An improved Canny edge detection algorithm[C]. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. IEEE, 2014:577-582.
- [8] 马立,荣伟彬,孙立宁,等. 面向光学精密装配的微操作机器人[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2):280-287.
- MA L, RONG W B, SUN L N, *et al.*. Micro Operation Robot for Optical Precise Assembly [J]. *Journal of Mechanical and Engineering*, 2009, 45(2):280-287. (in Chinese)
- [9] 阮元,任同群,王晓东,等. 跨尺度微小零件自动精密装配系统[J]. *光学精密工程*. 2015, 23(10):260-265.
- RUAN Y, REN T Q, WANG X D, *et al.*. Automatic precision assembly system for trans-scale miniature parts[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):260-265. (in Chinese)
- [10] JAIN R K, MAJUMDER S, GHOSH B, *et al.*. Design and manufacturing of mobile micro manipulation system with a compliant piezoelectric actuator based micro gripper[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, 35:76-91.
- [11] NERAKAE P, UANGPAIROJ P, CHAMNIPRASART K. Using Machine Vision for Flexible Automatic Assembly System[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 96:428-435.
- [12] 周伟,周建斌,雷家荣,等. 基于 Sallen-Key 滤波器的数字高斯成形方法的仿真[J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(1):195-196.
- ZHOU W, ZHOU J B, LEI J R, *et al.*. Simulation of Digital Gaussian Filtering Based on Sallen-Key Filter[J]. *Journal of System Simulation*, 2013,25(1):195-196. (in Chinese)
- [13] 苏瑛,支西玲,丛丽艳,等. 晶体光学零件的光胶工艺研究[J]. *应用光学*, 2008, 29(2):289-292.
- SU Y, ZHI X L, CONG L Y, *et al.*. Optical cement technique for optical crystal elements [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008,29(2),289-292.
- [14] 李永锋,朱丽萍. 基于模糊层次分析法的产品可用性评价方法[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(14):183-191.
- LI Y F, ZHU L P. Product usability evaluation method based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(14):183-191. (in Chinese)
- [15] LI L, LIU F, LI C. Customer satisfaction evaluation method for customized product development using entropy weight and analytic hierarchy process [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 77(11):80-87.

作者简介:



马立(1979—),女,黑龙江人,研究员,博士生导师,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要研究方向为微操作机器人技术。E-mail: malian@shu.edu.cn



赵志杰(1992—),男,陕西渭南人,硕士研究生,2015年于西安建筑科技大学获得学士学位,主要研究方向为机器人精密装配。E-mail: 710623242@qq.com