



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103064076 B

(45) 授权公告日 2014. 06. 25

(21) 申请号 201210574661. 6

(22) 申请日 2012. 12. 26

(73) 专利权人 南京理工大学

地址 210094 江苏省南京市孝陵卫 200 号

(72) 发明人 何伟基 陈钱 顾国华 司马博羽

陈云飞 张闻文 钱惟贤 隋修宝

于雪莲 路东明

(74) 专利代理机构 南京理工大学专利中心

32203

代理人 唐代盛

(51) Int. Cl.

G01S 7/497(2006. 01)

(56) 对比文件

WO 2011/029646 A1, 2011. 03. 17, 全文 .

CN 102062861 A, 2011. 05. 18, 全文 .

CN 102608619 A, 2012. 07. 25, 全文 .

Beibei Zhou 等 . A DUAL-THRESHOLD

METHOD FOR PHOTON COUNTING IMAGING WITH THE EMCCD. 《Proceedings of 2010 IEEE 17th International Conference on Image Processing》. 2010, 第 3333-3336 页 .

彭晨 等 . 利用光电经纬仪修正地基红外搜索跟踪系统静态误差的方法 . 《红外与激光工程》. 2012, 第 41 卷 (第 10 期), 第 2791-2794 页 .

审查员 杨世兴

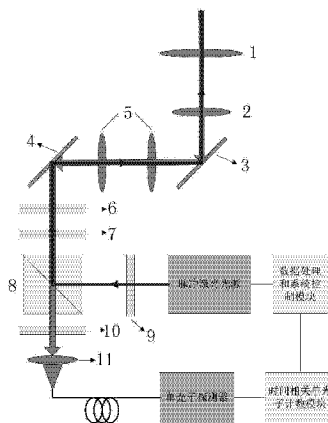
权利要求书3页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统及方法, 首先对光子计数三维成像激光雷达的距离行走误差进行多点标定, 得到不同激光脉冲响应率下的距离行走误差; 然后采用数学拟合的方法, 获取距离行走误差关于激光脉冲响应率的函数, 记为距离行走误差函数; 最后, 在光子计数三维成像激光雷达的工作过程中, 统计原始三维距离图像的激光脉冲响应率分布, 采用距离行走误差函数对距离行走误差进行预测, 对原始三维距离图像应用补偿进行校正, 得到校正后的三维距离图像。本发明能够消除距离行走误差。



1. 一种光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统,其特征包括光学系统、单光子探测器、脉冲激光光源、时间相关单光子计数模块和数据处理系统控制模块,光学系统由望远镜镜头(1)、透镜(2)、Y轴扫描转镜(3)、X轴扫描转镜(4)、准直透镜组(5)、四分之一波片(6)、第二半波片(7)、分光棱镜(8)、第一半波片(9)、滤波片(10)、光纤耦合器(11)组成,脉冲激光光源同时发出同步起始信号和脉冲周期激光,同步起始信号输入数据处理系统控制模块,脉冲周期激光依次经过第一半波片(9)、分光棱镜(8)部分反射后在经过第二半波片(7)、四分之一波片(6)、Y轴扫描转镜(3)、准直透镜组(5)、X轴扫描转镜(4)、透镜(2)和望远镜镜头(1),出射到目标,经过目标漫反射被望远镜镜头(1)接收,依次经过透镜(2)、X轴扫描转镜(4)、准直透镜组(5)、Y轴扫描转镜(3)、四分之一波片(6)、第二半波片(7),在分光棱镜(8)处部分透射,经过滤波片(10),达光纤耦合器(11),形成回波信号,被单光子探测器所探测接收,经过时间相关单光子计数模块产生截止信号输入数据处理系统控制模块;

脉冲激光光源发出周期脉冲激光,同时给予数据处理系统控制模块同步起始信号,经过光学系统后,激光反射信号到达单光子探测器,激励探测器形成响应脉冲,被时间相关单光子计数模块和数据处理系统控制模块接收,结合同步起始信号,即截止信号与同步起始信号的时间差,该时间差乘以光速,形成目标距离信息;通过固定X、Y轴扫描转镜,在数据处理系统控制模块实现单像素的先验标定;通过对X、Y轴扫描转镜的控制,控制出射激光到达目标的不同位置,从而达到对整个视场,即目标的整个平面进行二维扫描,得到每个像素的距离信息及误差信息,合成三维距离图像,对该三维距离图像在数据处理系统控制模块进行实时校正。

2. 根据权利要求1所述的光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统,其特征包括单像素数据处理系统控制模块的先验标定过程为:

(1) 事先准备高反射率平板一块作为目标,放置于光子计数三维成像激光雷达的望远镜镜头(1)正前方固定距离处;

(2) 使得光子计数三维成像激光雷达的X轴扫描转镜(4)、Y轴扫描转镜(3)处于静止状态,设定脉冲激光光源输出脉冲能量为最大,激光脉冲能量记为 E_0 ;

(3) 使得脉冲激光光源处于周期工作状态,连续输出激光脉冲,激光脉冲重复次数均设定为 N_{total} ;同时,采用时间相关单光子计数模块分别记录每个激光脉冲中光子飞行时间,记为 $t_{tof}(0, j)$, $1 \leq j \leq N_{total}$;

(4) 计算激光脉冲能量 E_0 对应的激光脉冲响应率为 $R(0) = N_{pulse}(0) / N_{total}$,其中, $N_{pulse}(0)$ 表示在测量持续时间内,探测器响应的脉冲总数; N_{total} 表示在在测量持续时间内,激光脉冲重复次数;

(5) 计算激光脉冲能量 E_0 对应的光子飞行时间测量均值: $\overline{t_{me}}(0) = \frac{1}{N_{total}} \sum_{j=1}^{N_{total}} t_{tof}(0, j)$;

(6) 计算距离行走误差 $t_{error}(0) = \overline{t_{me}}(0) - t_{tof}$,其中, t_{tof} 为恒定不变量,是光子在光子计数三维激光成像雷达与目标间光子的飞行时间;

(7) 逐次减小脉冲激光光源的激光脉冲输出能量,重复步骤(2)至(6),得到不同激光脉冲响应率对应的距离行走误差,记为 $t_{error}(R(i)) = f(R(i))$, $0 \leq i < n$;

(8) 采用数值拟合方式,得到距离行走误差函数,记为 $t_{\text{error}}(R)=f(R)$ 。

3. 根据权利要求 1 所述的光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统,其特征在于三维图像数据处理系统控制模块的实时校正过程为:

1) 通过对 X、Y 轴扫描转镜的控制,控制出射激光到达目标的不同位置,达到对目标不同像素点的探测,统计像素位置为 (i, j) 的光子飞行时间测量值,根据脉冲个数,得到该位置对应的光子飞行时间测量均值 $\overline{t_{me}}(i, j)$;

2) 统计像素位置为 (i, j) 的光子脉冲响应率,得到该位置对应的激光脉冲响应率 $R(i, j)$,即:

$$R(i, j) = N_{\text{pulse}}(i, j) / N_{\text{total}}(i, j)$$

其中, $N_{\text{pulse}}(i, j)$ 表示在像素位置 (i, j) 处的探测器输出脉冲总数; $N_{\text{total}}(i, j)$ 表示在像素位置 (i, j) 处的激光脉冲总数;

3) 计算像素位置为 (i, j) 的距离行走误差,得到距离补偿图像 $t_{\text{error}}(i, j)$,即: $t_{\text{error}}(i, j) = f(R(i, j))$;

4) 补偿像素位置为 (i, j) 的光子飞行时间测量均值并得到校正后的光子飞行时间测量值,即:

$$t_{\text{correct}}(i, j) = \overline{t_{me}}(i, j) + t_{\text{error}}(i, j)$$

5) 统计每个像素点校正后的光子飞行时间测量值,合成目标的三维距离信息图及形状特征。

4. 一种利用权利要求 1 所述的光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统实现校正方法,其特征在于包括先验标定和实时校正方法,其中先验标定方法包括以下步骤:

(1) 事先准备高反射率平板一块作为目标,放置于光子计数三维成像激光雷达的望远镜镜头(1)正前方固定距离处;

(2) 使得光子计数三维成像激光雷达的 X 轴扫描转镜(4)、Y 轴扫描转镜(3)处于静止状态,设定脉冲激光光源输出脉冲能量为最大,激光脉冲能量记为 E_0 ;

(3) 使得脉冲激光光源处于周期工作状态,连续输出激光脉冲,激光脉冲重复次数均设定为 N_{total} ;同时,采用时间相关单光子计数模块分别记录每个激光脉冲中光子飞行时间,记为 $t_{\text{tof}}(0, j)$ ($1 \leq j \leq N_{\text{total}}$);

(4) 计算激光脉冲能量 E_0 对应的激光脉冲响应率为: $R(0) = N_{\text{pulse}}(0) / N_{\text{total}}$,其中,表示 $N_{\text{pulse}}(0)$ 在测量持续时间内,探测器响应的脉冲总数; N_{total} 表示在在测量持续时间内,激光脉冲的总数;

(5) 计算激光脉冲能量 E_0 对应的光子飞行时间测量均值: $\overline{t_{me}}(0) = \frac{1}{N_{\text{total}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{total}}} t_{\text{tof}}(0, j)$;

(6) 计算距离行走误差 $t_{\text{error}}(0) = \overline{t_{me}}(0) - t_{\text{tof}}$,其中, t_{tof} 为恒定不变量,是光子在光子计数三维激光成像雷达与目标间光子的飞行时间;

(7) 逐次减小脉冲激光光源的激光脉冲输出能量,重复步骤(2)至(6),得到不同激光脉冲响应率对应的距离行走误差,记为 $t_{\text{error}}(R(i)) = f(R(i))$, $0 \leq i < n$;

(8) 采用数值拟合方式,得到距离行走误差函数,记为 $t_{\text{error}}(R)=f(R)$;

其中实时校正方法包括以下步骤 :

1) 通过对 X、Y 轴扫描转镜的控制,控制出射激光到达目标的不同位置,达到对目标不同像素点的探测,统计像素位置为 (i, j) 的光子飞行时间测量值,得到该位置对应的光子飞行时间测量均值 $\overline{t_{me}}(i, j)$;

2) 统计像素位置为 (i, j) 的光子脉冲响应率,得到该位置对应的激光脉冲响应率 $R(i, j)$,即 :

$$R(i, j)=N_{\text{pulse}}(i, j)/N_{\text{total}}(i, j)$$

其中, $N_{\text{pulse}}(i, j)$ 表示在像素位置 (i, j) 处的探测器输出脉冲总数 ; $N_{\text{total}}(i, j)$ 表示在像素位置 (i, j) 处的激光脉冲总数 ;

3) 计算像素位置为 (i, j) 的距离行走误差,得到距离补偿图像 $t_{\text{error}}(i, j)$,即 : $t_{\text{error}}(i, j)=f(R(i, j))$;

4) 补偿像素位置为 (i, j) 的光子飞行时间测量均值并得到校正后的光子飞行时间测量值,即 :

$$t_{\text{correct}}(i, j)=\overline{t_{me}}(i, j)+t_{\text{error}}(i, j)$$

5) 统计每个像素点校正后的光子飞行时间测量值,合成目标的三维距离信息图及形状特征的三维距离图像。

5. 根据权利要求 4 所述的光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统实现校正方法,其特征在于先验标定的步骤 (7) 中,逐次减小脉冲激光光源的激光脉冲输出能量值为 $0.1E_0$ 至 $0.15E_0$ 之间固定值。

光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统及方法

技术领域

[0001] 本发明属于光学、激光雷达和图像处理技术,特别是一种光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统及方法。

背景技术

[0002] 距离图采用三维影像模式描述感兴趣区域,数据立方中包含了目标的几何不变特性,可以避免二维图像中的扭曲和混淆,广泛应用于工业模具设计、军事目标自动识别等领域。目前已知有若干技术途径可以用于获取距离图像。其中,光子计数三维激光成像雷达采用具有单光子灵敏度、工作于盖革模式下的雪崩二极管作为激光回波信号光子探测器,以光子飞行模式实现高时间分辨率测量。对目标进行多脉冲重复测量,再利用统计原理、光子计数技术得到目标单一像素的距离信息,通过扫描整个视场,得到目标的完整三维距离信息。

[0003] 光子计数三维激光成像雷达的测量精度是最为重要的参数。精度定义为测量结果与实际距离间的差异,是探测器响应特性的随工作时间、工作状态和外部输入条件等因素改变而产生测量漂移,也称之为距离行走误差,以光子飞行时间测量误差或测量长度误差单位表示。为了克服距离行走误差,已有两种技术途径。(1) 假定造成距离行走误差的原因是 GmAPD 输出电流脉冲上升速率因激光脉冲回波光子数多寡存在差异,提出一种采用多级阈值比较电路的校正方法 [G. Kirchner, F. Koidl, et al, Proc. SPIE. 3218, 106-112(1997).]。(2) 认为造成距离行走误差是激光脉冲回波光子数差异造成的 GmAPD 探测概率变化,进而提出了基于 GmAPD 探测概率模型的查表式校正方法 [Min Seok Oh, Hong Jin Kong, Tae Hoon Kim, Keun Ho Hong, Byung Wook Kim, Opt. Commun. 283, 304-308(2010).]。

[0004] 以上两种距离行走误差校正方法,能够在一定程度上校正误差,但也存在着很多不足之处。多级阈值比较电路过于复杂,难以集成到单片式读出电路中,因而应用价值有限。回波光子数差异改变探测器探测概率,难以经过实验验证,且查表式校正方法局限于单一实验系统,不具有普遍性。

[0005] 在我们的研究中发现,造成距离行走误差的因素是激光脉冲回波光子数差异导致的原电子产生平均时间和 GmAPD 电流上升速率的变化。有必要采取更完善的校正方法进行测量结果的校正。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统及方法,能够消除距离行走误差,避免了测量误差对距离信息的干扰,提高成像质量。

[0007] 实现本发明目的的技术解决方案为:一种光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统,包括光学系统、单光子探测器、脉冲激光光源、时间相关单光子计数模块和数据处理系统控制模块,光学系统由望远镜镜头、透镜、Y 轴扫描转镜、X 轴扫描转镜、准直

透镜组、四分之一波片、第二半波片、分光棱镜、第一半波片、滤波片、光纤耦合器组成,脉冲激光光源同时发出同步起始信号和脉冲周期激光,同步起始信号输入数据处理系统控制模块,脉冲周期激光依次经过第一半波片、分光棱镜部分反射后在经过第二半波片、四分之一波片、Y轴扫描转镜、准直透镜组、X轴扫描转镜、透镜和望远镜镜头,出射到目标,经过目标漫反射被望远镜镜头接收,依次经过透镜、X轴扫描转镜、准直透镜组、Y轴扫描转镜、四分之一波片、第二半波片,在分光棱镜处部分透射,经过滤波片,达光纤耦合器,形成回波信号,被单光子探测器所探测接收,经过时间相关单光子计数模块产生截止信号输入数据处理系统控制模块;

[0008] 脉冲激光光源发出周期脉冲激光,同时给予数据处理系统控制模块同步起始信号,经过光学系统后,激光反射信号到达单光子探测器,激励探测器形成响应脉冲,被时间相关单光子计数模块和数据处理系统控制模块接收,结合同步起始信号,即截止信号与同步起始信号的时间差,该时间差乘以光速,形成目标距离信息;通过固定X、Y轴扫描转镜,在数据处理系统控制模块实现单像素的先验标定;通过对X、Y轴扫描转镜的控制,控制出射激光到达目标的不同位置,从而达到对整个视场,即目标的整个平面进行二维扫描,得到每个像素的距离信息及误差信息,合成三维距离图像,对该三维距离图像在数据处理系统控制模块进行实时校正。

[0009] 本发明与现有技术相比,其显著优点:(1)同时考虑GmAPD上升电流和探测率的影响,更符合实际情况,更准确,能够消除距离行走误差;(2)测量的同时进行误差校正,实时性好;(3)实施容易,无需额外增加硬件系统复杂性;(4)避免了测量误差对距离信息的干扰,提高成像质量。

[0010] 下面结合附图对本发明作进一步详细描述。

附图说明

[0011] 图1是本发明光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统的示意图。

[0012] 图2是本发明采用的光子计数三维激光成像雷达的先验标定实验测量结果及数值拟合结果。

[0013] 图3是本发明适用于光子计数三维成像激光雷达的先验标定距离行走误差校正方法的实时校正方法流程示意图。

[0014] 图4是本发明实施效果验证中所采用的目标及实验场景实物图。

[0015] 图5是本发明实施效果验证中光子计数三维成像激光雷达输出的原始距离图像。

[0016] 图6是本发明实施效果验证中光子计数三维成像激光雷达输出的原始距离图像对应的响应率图像。

[0017] 图7是本发明实施效果验证中光子计数三维成像激光雷达输出的原始距离图像对应的距离行走误差补偿图像。

[0018] 图8是本发明实施效果验证中光子计数三维成像激光雷达输出的原始距离图像对应的实时校正图像。

具体实施方式

[0019] 本发明适用于光子计数三维成像激光雷达的先验标定距离行走误差校正方法适

用装置为光子计数三维成像激光雷达。首先通过多组实验,实验中改变出射激光的能量,从而得到不同的回波光光子数,定义回波光光子数与出射脉冲总数的比值为激光脉冲响应率。每次实验可测得相应脉冲响应率下的距离行走误差。然后采用数学拟合的方法,获取距离行走误差关于激光脉冲响应率的函数,记为距离行走误差函数。通过此次标定,就能得到该实验系统的距离行走误差校正函数,即校正方法。实验测量中,得到含有距离行走误差的原始三维距离图像,同时可以得到三维距离图像中每个像素点的激光脉冲响应率,根据此脉冲响应率,结合误差行走函数,能够得到该像素点的距离行走误差,然后对其进行补偿校正,就能够得到更接近真实目标的三维距离图像。

[0020] 结合图 1,光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正(实验)系统,包括光学系统、单光子探测器、脉冲激光光源、时间相关单光子计数模块(市购产品,如 PicoHarp 300) 和数据处理系统控制模块,光学系统由望远镜镜头 1、透镜 2、Y 轴扫描转镜 3、X 轴扫描转镜 4、准直透镜组 5、四分之一波片 6、第二半波片 7、分光棱镜 8、第一半波片 9、滤波片 10、光纤耦合器 11 组成,脉冲激光光源同时发出同步起始信号和脉冲周期激光,同步起始信号输入数据处理系统控制模块,脉冲周期激光依次经过第一半波片 9、分光棱镜 8 部分反射后再经过第二半波片 7、四分之一波片 6、Y 轴扫描转镜 3、准直透镜组 5、X 轴扫描转镜 4、透镜 2 和望远镜镜头 1,出射到目标,经过目标漫反射被望远镜镜头 1 接收,依次经过透镜 2、X 轴扫描转镜 4、准直透镜组 5、Y 轴扫描转镜 3、四分之一波片 6、第二半波片 7,在分光棱镜 8 处部分透射,经过滤波片 10,达光纤耦合器 11,形成回波信号,被单光子探测器所探测接收,经过时间相关单光子计数模块产生截止信号输入数据处理系统控制模块;

[0021] 脉冲激光光源发出周期脉冲激光,同时给予数据处理系统控制模块同步起始信号,经过光学系统后,激光反射信号到达单光子探测器,激励探测器形成响应脉冲,被时间相关单光子计数模块和数据处理系统控制模块接收,结合同步起始信号,即截止信号与同步起始信号的时间差,该时间差乘以光速,形成目标距离信息;通过固定 X、Y 轴扫描转镜,在数据处理系统控制模块实现单像素的先验标定;通过对 X、Y 轴扫描转镜的控制,控制出射激光到达目标的不同位置,从而达到对整个视场,即目标的整个平面进行二维扫描,得到每个像素的距离信息及误差信息,合成三维距离图像,对该三维距离图像在数据处理系统控制模块进行实时校正。

[0022] 上述单像素数据处理系统控制模块的先验标定过程和实时校正过程同方法中步骤。

[0023] 结合图 3,本发明利用上述的光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正系统实现校正方法,包括先验标定和实时校正方法,其中先验标定方法包括以下步骤:

[0024] (1) 事先准备高反射率平板一块作为目标,放置于光子计数三维成像激光雷达的望远镜镜头 1 正前方固定距离处;

[0025] (2) 使得光子计数三维成像激光雷达的 X 轴扫描转镜 4、Y 轴扫描转镜 3 处于静止状态,设定脉冲激光光源输出脉冲能量为最大,激光脉冲能量记为 E_0 ;

[0026] (3) 使得脉冲激光光源处于周期工作状态,连续输出激光脉冲,激光脉冲重复次数均设定为 N_{total} ;同时,采用时间相关单光子计数模块分别记录每个激光脉冲中光子飞行时间,记为 $t_{tof}(0, j)$ ($1 \leq j \leq N_{total}$);

[0027] (4) 计算激光脉冲能量 E_0 对应的激光脉冲响应率为: $R(0) = N_{pulse}(0) / N_{total}$, 其中,

表示 $N_{\text{pulse}}(0)$ 在测量持续时间内,探测器响应的脉冲总数; N_{total} 表示在在测量持续时间内,激光脉冲的总数;

[0028] (5) 计算激光脉冲能量 E_0 对应的光子飞行时间测量均值:

$$[0029] \quad \overline{t_{me}}(0) = \frac{1}{N_{\text{total}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{total}}} t_{\text{tof}}(0, j);$$

[0030] (6) 计算距离行走误差 $t_{\text{error}}(0) = \overline{t_{me}}(0) - t_{\text{tof}}$, 其中, t_{tof} 为恒定不变量, 是光子在光子计数三维激光成像雷达与目标间光子的飞行时间;

[0031] (7) 逐次减小脉冲激光光源的激光脉冲输出能量, 重复步骤 (2) 至 (6), 得到不同激光脉冲响应率对应的距离行走误差, 记为 $t_{\text{error}}(R(i)) = f(R(i)), 0 \leq i < n$; 逐次减小脉冲激光光源的激光脉冲输出能量值为 $0.1E_0$ 至 $0.15E_0$ 之间固定值。

[0032] (8) 采用数值拟合(计算机处理, 为常规技术)方式, 得到距离行走误差函数, 记为 $t_{\text{error}}(R) = f(R)$;

[0033] 其中实时校正方法包括以下步骤:

[0034] 1) 通过对 X、Y 轴扫描转镜的控制, 控制出射激光到达目标的不同位置, 达到对目标不同像素点的探测, 统计像素位置为 (i, j) 的光子飞行时间测量值, 得到该位置对应的光子飞行时间测量均值 $\overline{t_{me}}(i, j)$;

[0035] 2) 统计像素位置为 (i, j) 的光子脉冲响应率, 得到该位置对应的激光脉冲响应率 $R(i, j)$, 即:

$$[0036] \quad R(i, j) = N_{\text{pulse}}(i, j) / N_{\text{total}}(i, j)$$

[0037] 其中, $N_{\text{pulse}}(i, j)$ 表示在像素位置 (i, j) 处的探测器输出脉冲总数; $N_{\text{total}}(i, j)$ 表示在像素位置 (i, j) 处的激光脉冲总数;

[0038] 3) 计算像素位置为 (i, j) 的距离行走误差, 得到距离补偿图像 $t_{\text{error}}(i, j)$, 即: $t_{\text{error}}(i, j) = f(R(i, j))$;

[0039] 4) 补偿像素位置为 (i, j) 的光子飞行时间测量均值并得到校正后的光子飞行时间测量值, 即:

$$[0040] \quad t_{\text{correct}}(i, j) = \overline{t_{me}}(i, j) + t_{\text{error}}(i, j)$$

[0041] 5) 统计每个像素点校正后的光子飞行时间测量值, 合成目标的三维距离信息图及形状特征的三维距离图像。

[0042] 实施例

[0043] 本发明光子计数三维成像激光雷达距离行走误差校正方法中, 先验标定方法包括以下步骤:

[0044] (1) 事先准备高反射率(反射率大于 90%)平板一块, 放置于光子计数三维成像激光雷达的正前方的 10 米至 20 米之间固定距离处;

[0045] (2) 使得光子计数三维成像激光雷达的扫描机构处于静止状态, 设定激光器输出脉冲能量为最大, 激光脉冲能量记为 E_0 ;

[0046] (3) 使得激光器处于周期工作状态, 连续输出多个激光脉冲, 激光脉冲重复次数均设定为 N_{total} ; 同时, 采用时间相关单光子计数模块分别记录每个激光脉冲中光子飞行时间, 记为 $t_{\text{top}}(0, j) (1 \leq j \leq N_{\text{total}})$;

[0047] (4) 计算激光脉冲能量 E_0 对应的激光脉冲响应率为: $R(0) = N_{\text{pulse}}(0) / N_{\text{total}}$ 。其

中,表示 $N_{\text{pulse}}(0)$ 在测量持续时间内,探测器响应的脉冲总数; N_{total} 表示在在测量持续时间内,激光脉冲的总数;

[0048] (5) 计算激光脉冲能量 E_0 对应的光子飞行时间测量均值:

$$[0049] \quad \overline{t_{me}}(0) = \frac{1}{N_{\text{total}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{total}}} t_{tof}(0, j);$$

[0050] (6) 计算距离行走误差 $t_{\text{error}}(0) = \overline{t_{me}}(0) - t_{tof}$, 其中, t_{tof} 为恒定不变量,是光子在光子计数三维激光成像雷达与目标间光子的飞行时间;

[0051] (7) 逐次减小激光器的激光脉冲输出能量,每次减小的能量值为 $0.1E_0$ 至 $0.15E_0$ 之间固定值,重复步骤 (2) 至 (6),得到不同激光脉冲响应率对应的距离行走误差,记为 $t_{\text{error}}(R(i)) = f(R(i)), 0 \leq i < n$;

[0052] (8) 采用最符合的数值拟合方式,得到距离行走误差函数,记为 $t_{\text{error}}(R) = f(R)$ 。

[0053] 结合图 2,图中离散点为实验测得的不同激光脉冲响应率下的距离行走误差,曲线为采用 $y = ax^b$ (a, b 为参数) 对实验数据进行的拟合。采用 $t_{\text{error}}(R) = aR^b$ 对步骤 (1) 至 (8) 得到的测试结果进行拟合。采用的时间单位为 ns; R 为无量纲值,数值变化范围为 0 至 1,得到 $a = -0.5659, b = 3.06$,即距离行走误差与脉冲响应率的函数关系表示为:

$$[0054] \quad t_{\text{error}}(R) = -0.5659R^{(3.06)}$$

[0055] 图 3 为方法流程图,图 4 为实验图,本发明实时校正方法包括以下步骤:

[0056] (1) 通过实验测得单个脉冲,统计像素位置为 (i, j) 的光子飞行时间测量值,再经过大量脉冲(激光脉冲频率为 2.5MHz,积分时间为 100ms),取所有脉冲测得该像素位置的光子飞行时间测量值的平均值为该位置对应的光子飞行时间测量均值 $\overline{t_{me}}(i, j)$ 。对视场进行三维扫描,可以测得所有像素点的光子飞行时间测量均值,从而得到光子计数三维成像激光雷达的原始距离图像如图 5 所示;

[0057] (2) 同时,在步骤 (1) 中,统计像素位置为 (i, j) 的测量均值时,可以同时测得该位置的光子脉冲响应率,得到该位置对应的激光脉冲响应率(探测器输出脉冲总数/激光脉冲总数),即:

$$[0058] \quad R(i, j) = N_{\text{pulse}}(i, j) / N_{\text{total}}(i, j)$$

[0059] 其中, $N_{\text{pulse}}(i, j)$ 表示在像素位置处 (i, j) 的探测器输出脉冲总数; $N_{\text{total}}(i, j)$ 表示在像素位置处 (i, j) 的激光脉冲总数。

[0060] 得到光子计数三维成像激光雷达输出的原始距离图像对应的激光响应率图像如图 6 所示;

[0061] (3) 根据像素点 (i, j) 的激光响应率,通过之前标定得到的距离行走误差函数,可以计算得到像素位置为 (i, j) 的距离行走误差,即距离补偿值。得到距离补偿图像,即:

$$[0062] \quad t_{\text{error}}(i, j) = f(R(i, j))$$

[0063] 其中 $t_{\text{error}}(i, j)$ 为距离补偿值, f 为距离行走误差函数, $f(x) = -0.5659x^{(3.06)}$, $R(i, j)$ 为激光响应率。

[0064] 得到光子计数三维成像激光雷达输出的原始距离图像对应的距离行走误差补偿图像如图 7 所示;

[0065] (4) 通过原始距离测量均值,再减去距离补偿值,可以得到补偿后的校正值。像素位置为 (i, j) 的光子飞行时间测量均值经过补偿后得到校正后的光子飞行时间测量值,

即：

$$[0066] \quad t_{correct}(i, j) = \overline{t_{me}}(i, j) + t_{error}(i, j)$$

[0067] 其中， $t_{correct}(i, j)$ 为校正后光子飞行时间值， $\overline{t_{me}}(i, j)$ 为原始光子飞行时间测量均值， $t_{error}(i, j)$ 为距离行走误差补偿值。

[0068] (5) 根据每个像素校正后的光子飞行时间测量值，可以得到目标到光子计数三维成像激光雷达输出的原始距离图像对应的实时校正图像，即目标的三维形状特征，如图 8 所示。

[0069] 比较三维成像激光雷达输出的原始距离图像（图 5）和校正后的三维距离图像（图 8）。图 5 中红色标出部分，由于背景纸箱贴有胶带，使得这部分的反射率明显高于其他部分，使得三维成像距离图像中此部分存在距离行走误差，与目标三维特征不符合。利用本发明一种适用于光子计数三维成像激光雷达的先验标定距离行走误差校正算法我们得到了校正后的三维成像距离图像（图 8），可以从中看出，红色标出部分的距离行走误差被校正去除，得到的三维距离图像与实际目标三维特征更加吻合。

[0070] 通过上述具体实施例的验证，本发明适用于光子计数三维成像激光雷达的先验标定距离行走误差校正算法可以消除目标（背景）应反射能量差异造成的距离行走误差，避免了距离行走误差的干扰。结果表明，在不增加系统复杂度的前提下，因目标（背景）应反射能量差异造成的距离行走误差是可以有效避免的。

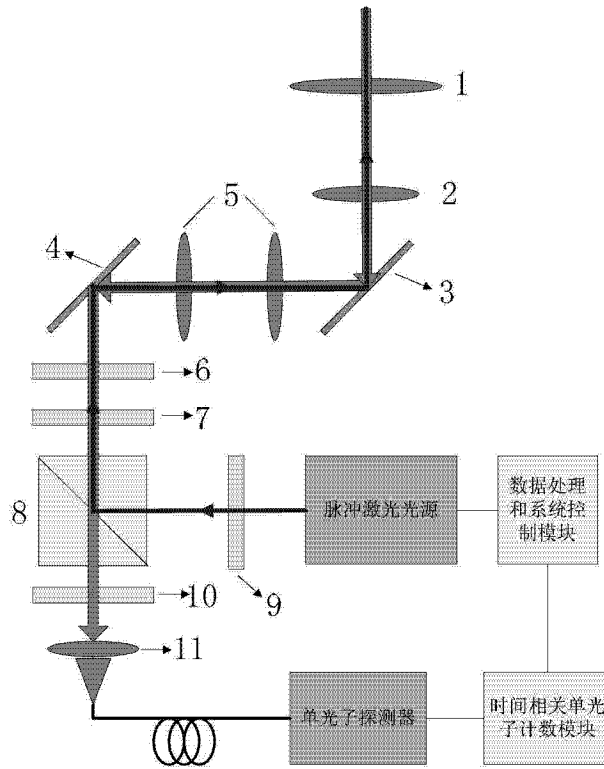


图 1

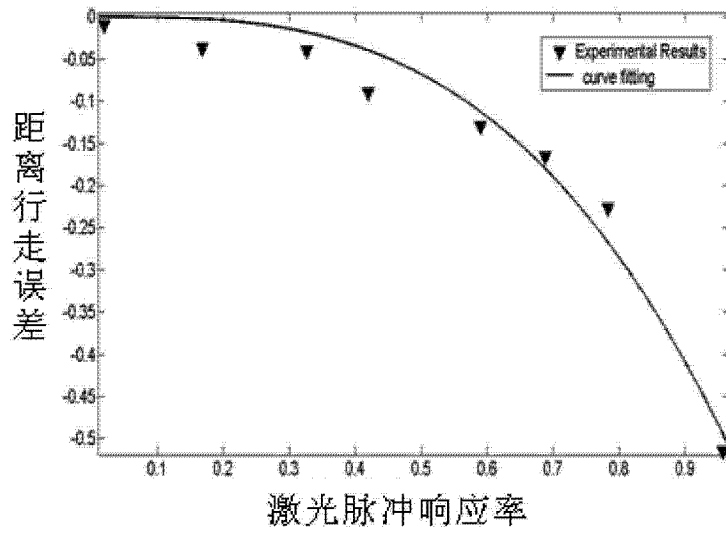


图 2

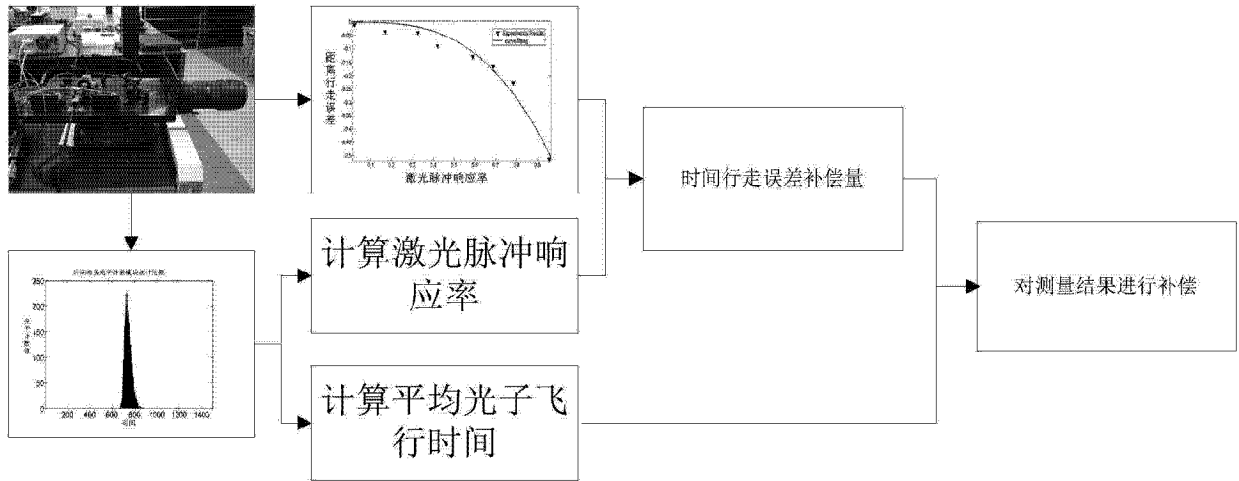


图 3

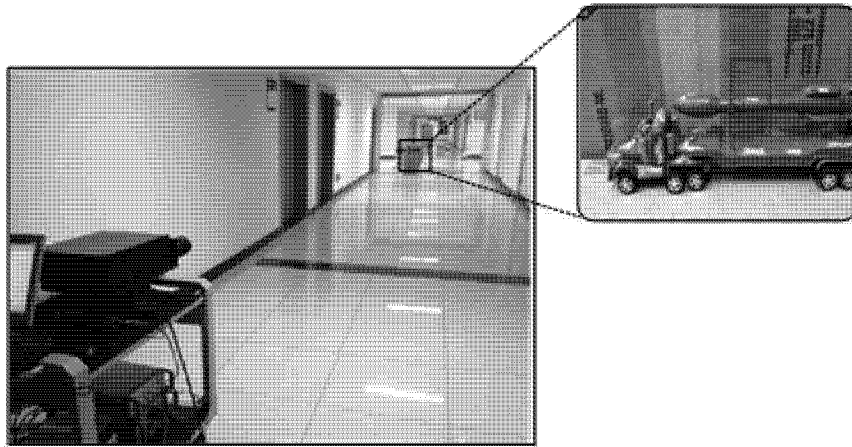


图 4

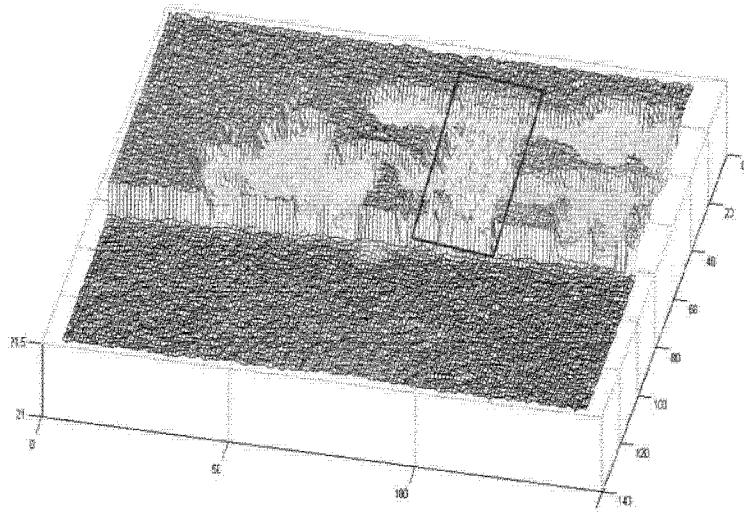


图 5

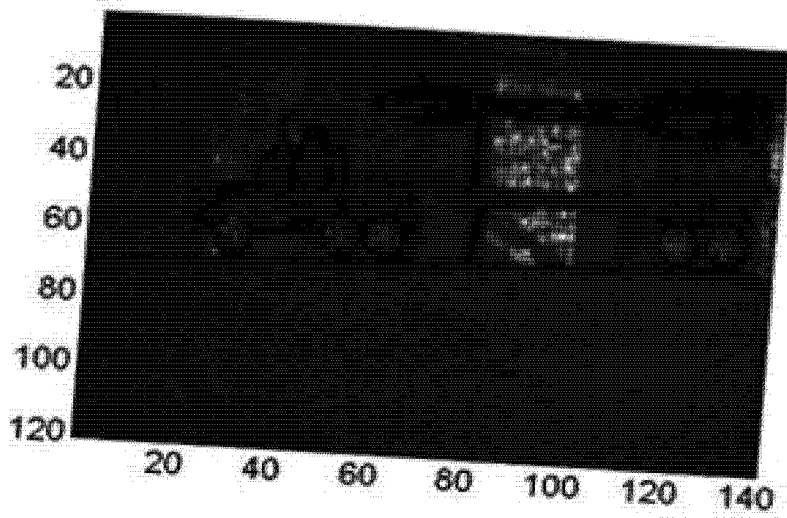


图 6

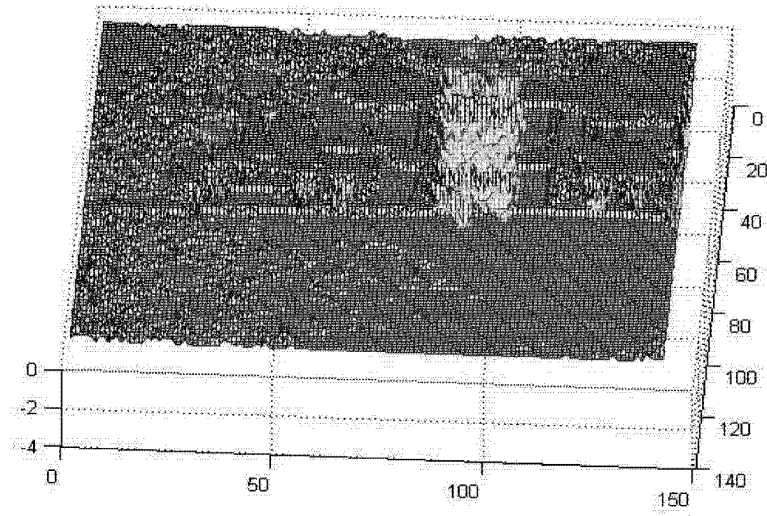


图 7

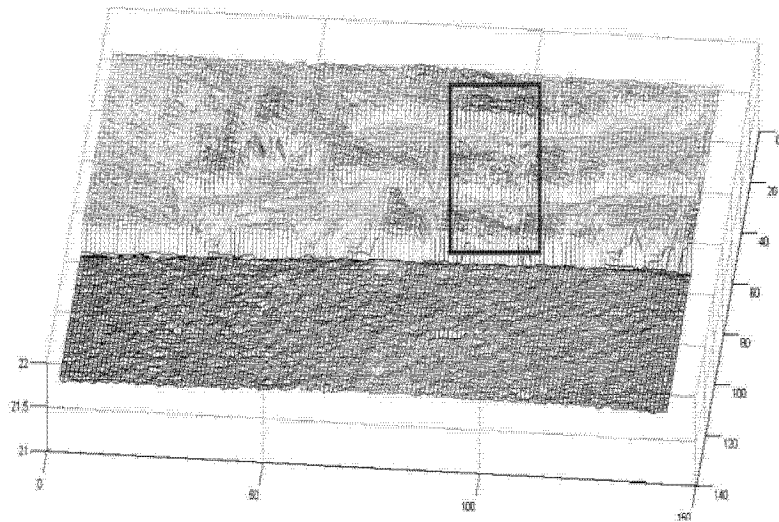


图 8