

融合 LIDAR 的激光同步扫描三角测量系统的设计

费凯¹, 张璐², 朱飞虎³, 张旭^{1,4}, 屠大维¹

- (1. 上海大学 机电工程与自动化学院 上海市机械自动化及机器人重点实验室, 上海 200072;
2. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094; 3. 北京控制工程研究所, 北京 100080;
4. 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 为了实现对远近距离的物体进行三维测量, 扩大系统的测量范围, 建立了融合 LIDAR 的激光同步扫描三角测量系统。对该系统的原理、系统设计及器件选型进行研究。首先, 根据同步扫描机制, 在普通三角测量的基础上融合 LIDAR 技术, 并推导出三维点的计算公式。接着, 根据系统设计的要求, 介绍了激光器、接收透镜、反射镜、二向色镜、扫描伺服电机、LIDAR 接收器以及相机的选型等。然后, 根据选型的结果, 设计机械结构。最后, 通过 Zemax 对搭建的光学系统进行光路仿真, 验证原理的可行性; 并在现实环境中, 对 APD 的回光量进行测试以及对实际物体进行扫描并获得三维点云。实验结果表明, 该系统的设计是可行的。

关键词: 光学设计; LIDAR 系统; 三角测量; 同步扫描

中图分类号: TH741; O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2358-06

Design of laser triangulation system based on synchronized scanners with LIDAR

Fei Kai¹, Zhang Lu², Zhu Feihu³, Zhang Xu^{1,4}, Tu Dawei¹

- (1. Shanghai Key Laboratory of Manufacturing Automation and Robotics, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
3. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China;
4. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to realize the three-dimensional measurement of the objects regardless of far or near and expand the measurement range, a laser triangulation system based on synchronized scanners with LIDAR was established. Its principle, design and device selection were investigated. First, according to the synchronous scanning mechanism, the LIDAR technology was fused based on traditional three-dimensional measurement and the computational formula of the 3-D points was deduced. The selections of laser device, lens, and dichroscope, scanning servo motor, LIDAR acceptor and camera were analyzed based on system design requirement. After that the mechanical structure was designed and the light path

收稿日期: 2014-12-10; 修订日期: 2015-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(51205244); 机械系统与振动国家重点实验室课题(MSV2015010); 上海市教育委员会科研创新项目(14YZ006)

作者简介: 费凯(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光学系统设计及视觉检测方面的研究。Email: mybachelor@163.com

通讯作者: 张旭(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构光三维测量、视觉检测方面的研究。Email: xuzhang@shu.edu.cn

of optical system was simulated by Zemax to prove the feasibility of principle. Finally, the back of light of APD was tested and the actual object was scanned to acquire 3-D point clouds. The experimental results show that the system is feasible.

Key words: optical design; LIDAR system; triangulation; synchronized scanners

0 引言

现代光电技术的高速发展,对视觉测量技术的兴起起到极大的推动作用。与传统的测量技术相比,视觉测量技术具有结构简单、检测速度快、实时动态处理、灵活和自动化程度高等优点^[1],在工业、汽车行业、航空、军事等领域中有着广泛的应用,如自主交汇对接^[2]、三维自动目标识别^[3]、避障、探测等。

视觉测量技术的测量原理通常分为两种:基于位置的三角测量^[4-6]和基于时间的 LIDAR 测量^[7-9]。三角测量利用三角几何原理获得成像光斑所对应的空间点的坐标。能在短距离内实现高分辨率和高采样速率,但其分辨率随着距离增长而迅速变差。针对传统激光三角法的局限性, Marc Rioux 等人提出了同步扫描方法^[10],该方法使得发射光与接收光同步旋转,比传统三角法具有更大的系统横向扫描测量范围和纵向测距范围。而国内学者^[4]在 Marc Rioux 等人的基础上,研究了激光同步扫描三角测距成像系统的特点,从理论上推出了一般意义轨迹圆方程,并得出系统所能测量的最大和最小范围、距离分辨率等系统参数的规律。基于时间的 LIDAR 测量利用发出的脉冲信号往返飞行的时间差而测得物体的距离。这种脉冲方法最大的优点在于只要有足够的反射光被收集,它就能测量任何距离,且能提供合理的精度^[7]。但在近距离测量时,如果提高分辨率,采样速率就降低。

同步扫描三角技术适用于类似于靠近对接或交汇前的近距离跟踪,而 LIDAR 技术适用于远距离搜索。虽然,两种技术分别在不同行业得到广泛应用,但一个系统,既能实现近距离测量,又能实现远距离测量,且达到同步高采样速率,理想的横向分辨率和纵向分辨率等,仍存在一定的挑战性。文中研究和设计一种以同步扫描的方式将三角测量技术与 LIDAR 技术进行融合的测量系统。该系统使得三角测量技术与 LIDAR 技术优势互补,既能近距离测量,又可

以远距离测量,协同作用,具有更大的测量范围,对实现空间非合作目标的三维探测具有重要价值。

1 融合 LIDAR 的同步扫描三角测量法

整个系统由三角测量系统和 LIDAR 系统两部分组成。其中, LIDAR 系统通过二向色镜和分光镜与三角测量系统共用一条光路。系统工作原理如图1所示。

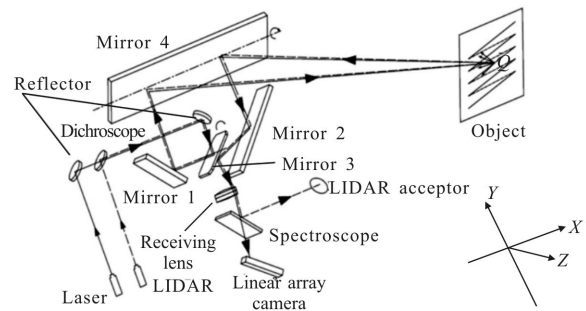


图1 融合 LIDAR 的同步扫描原理图

Fig.1 Principle of synchronized scanners with LIDAR

图1中,一束准直激光通过反射镜,到达 M3 镜的上反射面,再经 M1 镜、M4 镜的反射,到达被测物体表面上某点 \tilde{Q} , 并发生漫反射;部分返回的漫反射光被 M4 镜接收,并经 M2 镜、M3 镜下反射面,由接受透镜汇聚成像在线阵相机上或被 LIDAR 接收器接收。当 M3 镜旋转一个角度时,光斑在 X 轴方向移动一定距离;当 M4 镜摆动一个角度时,光斑在 Y 轴方向移动一定距离;当 M3 镜与 M4 镜同时摆动时,就构成了光斑在被测物体表面作光栅轨迹扫描。其中, M3 镜是双面反射镜,它使得发射光与接收光同步旋转,构成同步扫描。同步扫描的测量范围近似为扇形区域,相对于传统激光三角测量的三角交叉区域,大大扩大了横向测量范围和纵向测距范围^[4,10]。又在 LIDAR 系统的协同作用下,使得系统的测量范围覆盖很大的空间。

同步扫描使得三角测量与 LIDAR 测量的角度信息得以共用,为三维点的计算提供了依据。根据三

角测距原理,由成像光点落在线阵相机上的像素值,可得三维点的坐标 $\tilde{Q}(x,y,z)$,其计算公式(1)为:

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} \tilde{Q}_x \\ \tilde{Q}_y \\ \tilde{Q}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Q_x - E_y') \cot\left(2\theta_1 - 2\theta_3 - \frac{\pi}{2}\right) + E_x' \\ (Q_y - h) \cos(2\theta_1) + h \\ (Q_y - h) \sin(2\theta_1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$Q_y = \frac{c_y' \cot\left(2\theta_2 - 2\theta_3 - \frac{\pi}{2} + \alpha\right) - E_y' \cot\left(2\theta_1 - 2\theta_3 - \frac{\pi}{2}\right) + E_x' - c_x'}{\cot\left(2\theta_2 - 2\theta_3 - \frac{\pi}{2} + \alpha\right) - \cot\left(2\theta_1 - 2\theta_3 - \frac{\pi}{2}\right)}$$

式中: E' 是 M3 镜上反射面与光线交点在展开光路中的对应点, c' 是接收透镜的光心在展开光路中的对应点。

2 系统设计

系统的设计必须同时考虑测量范围,测量精度以及系统的体积这三方面要求,因此需要合理选择系统参数。系统光学结构参数如图 2 所示。

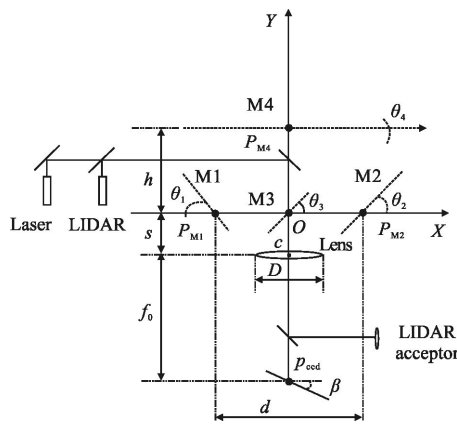


图 2 系统光学结构图

Fig.2 System of optical structure

已知系统的三角测量范围为 0.5~10 m,扫描视场为 30°,光圈大小大于 30 mm,线阵相机的像素点大小为 7 μm。图 2 中,M1 镜与 M2 镜与 X 轴的交点关于 Y 轴对称,基线距离为 d,与 X 轴成的角度 $\theta_1 = \theta_2$;M3 镜放在坐标原点,与 X 轴所成角为 θ_3 ;接收透镜光心与 X 轴距离为 s;M4 镜与 X 轴距离为 h,与 Y 轴成的角度为 θ_4 ;线阵相机主点位置所在的像素为 p_{cod} ,与 Y 轴交点为 β 。根据设计要求,以优化最小系统尺寸和最优系统测量精度为目标,初步设计了系统参数,如表 1 所示。

表 1 系统参数列表

Tab.1 System parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
d	100 mm	θ_1	45°
s	50 mm	M1	65 mm×40 mm×6 mm
h	105 mm	θ_2	45°
f_0	100 mm	M2	114 mm×40 mm×6 mm
β	45°	θ_3	45°
p_{cod}	-80	M3	58 mm×40 mm×3 mm
D	30 mm	θ_4	45°
		M4	250 mm×60 mm×8 mm

2.1 器件选型

图 2 中,三角测量激光束与 LIDAR 系统激光束要经过 9 次反射或透射,且受大气及物体表面的影响,最后到达线阵相机或 LIDAR 接收器的光功率会降低。因此,选用合适的激光器是系统最关键的一步^[5-6]。根据激光工作谱段选择因素:太阳辐射强度低,以减弱背景杂光干扰;脉冲激光器具有较高性能,且稳定可靠;对探测器具有较高的灵敏度,以实现远距离目标的测量需求,系统选择的三角测量激光器是带尾纤的半导体激光器,其型号为 LU0845M150,波长为 845 nm,功率为 150 mW。经过准直后,其发射的发散角为 0.06 mrad,输出光束直径为 1.88 mm,可以抵抗一定干扰。LIDAR 激光器的型号为 MPL-H-532,波长为 532 nm 的短波脉冲激光器,其峰值功率为 1000 W,光束直径大约 3 mm,发散角小于 2 mrad,脉冲宽度为 10 ns。

接收透镜是将部分返回的漫反射光接收并成像在线阵相机上,因此接收透镜对线阵相机的成像准确性和稳定性具有直接的影响。选择透镜主要考虑视场角、焦距和物距等参数。在其他参数不变的情况下,焦距越短测量范围越大,被测物体放大率就越大,精度就降低;反之亦然^[1,6]。双胶合透镜在较高的系统精度下成像质量比普通透镜高。因此,该系统选择非球面双胶合透镜,光圈 $D=30$ mm,焦距 $f=100$ mm。

M1 镜、M2 镜、M3 镜、M4 镜是整个光学系统最主要的四面反射镜,影响整个系统光路的传播。对反射镜的选择要求为反射率 99.5%,表面精度达 1/4 波

长。其中, M3 镜是双面反射镜, 考虑到玻璃材质的反射镜会使得一部分光束透射, 从而得系统产生一定的杂散光, 造成对 LIDAR 接收器的干扰, 影响 LIDAR 系统的测量。因此, M3 镜采用金属铝为材料, 双面镀银膜。其他三面主要反射镜采用玻璃材质, 单面镀介质高反膜。

二向色镜是反射短波光线, 透过长波光线, 相比普通分光镜具有损耗低和能优化光斑尺寸的优点。系统中, 短波光线是 532 nm 的 LIDAR 激光, 长波光线是 845 nm 的三角测量激光, 因此根据波长选择在波段为 800~1 200 nm, 透射率大于 85%; 在波段 425~625 nm, 反射率为大于 90% 的二向色镜。

线阵相机的选择要求满足: 测量范围内的物体表面信息, 都必须成像在相机上, 且成像质量高、可靠性好、测量重复性高。通过光路分析, 线阵相机的最小工作长度为 26.67 mm, 已知像素精度为 7 μm , 可得线阵相机的像素点为 3 810 个。因此, 选择 Baslar ral4096-80 km 相机, 相机主要性能参数为分辨率 1×4 096, 行频 80 kHz, 响应率 77 N/nJ/@12 bit, 辐照度为 0.02 nJ/cm²。

在 LIDAR 系统中, 需要一个光电传感器对接收的脉冲信号进行转换, 作为脉冲信号返回的时间节点。APD(Avalanche Photo Diode, 雪崩光电二极管)是一种敏感的光电探测器, 具有可靠性高、动态范围大、响应时间短等优点, 且对微弱信号也有相当高的灵敏度, 所以既能保证测量精度, 又能扩大测量范围。型号为 C5658 的 APD 具有较高的响应率、较高的灵敏度以及平坦的频率特性, 响应波长范围为 400~1 000 nm, 满足系统要求。

扫描伺服电机分别驱动 M3 镜绕 X 轴旋转, 其转动频率为 32 Hz; 驱动 M4 镜绕 Y 轴旋转, 其转动频率为 1 Hz。两者的转动范围都在 $\pm 7.5^\circ$ 之间。为了保证电机能摆到正确位置, 电机需要满足容易实现速度控制和正反转控制, 且具有较高的运行精度和良好的动态性能。根据已知条件, 可得 M3 镜驱动电机在先加速后减速的过程中, 最大角速度为 $\omega = 67.020 6 \text{ rad/s}$, 角加速度为 $\alpha = 17 177 \text{ rad/s}^2$, 负载的转动惯量为 $7.6 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。因此, 保证电机的最小角加速度为 $\alpha = 17 177 \text{ rad/s}^2$ 就能满足系统要求。该系统选择型号为 MSMD042G1 的松下伺服电机, 其额定转矩 1.3 N·m, 转子转动惯量 $0.26 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 计算

可得 M3 镜在该型号电机的驱动下, 其角加速度为 $38 690 \text{ rad/s}^2$, 符合系统设计的要求。同样, 该型号的电机满足 M4 镜驱动。

2.2 机械设计

由于 M3 镜尺寸小, 摆动频率高, 一方面为了防止镜子被甩出, 另一方面防止固定时破坏镜子表面, 因此采用尼龙钉压紧方式将 M3 镜固定在特定支架上, 特定支架通过键配合与电机相连。M4 镜尺寸较大, 但其摆动缓慢, 在安装时需要保证 M4 镜转动的同轴度。M4 镜通过两个橡胶小压块压紧其边缘, 固定在支架板上, 该支架板两端通过两个滚动轴承安装在底座上, 其中一端的轴通过弹性联轴器与电机相连。反射镜、接收透镜、二向色镜和激光器在本系统中是静止的, 通过压圈固定在 L 型固件上。

光学系统对机械结构的精度要求很高, 稍微有点误差, 都会导致实际光路偏离理想光路, 从而影响系统的测量精度及测量范围。但机械加工精度有限, 即使保证高精度加工, 高精度装配, 也避免不了对光路的影响。因此, 系统为了弥补机械结构的不足, 分别采用 4 轴精密移动平台调整线阵相机与 LIDAR 接收器(APD)的位置。

图 3 表示系统的实物图, 总体尺寸 566 mm×416 mm×300 mm。



图 3 实物图

Fig.3 Actual object

3 仿真与实验

3.1 Zemax 光路仿真

为了验证搭建的光学系统是否满足理想设计要求, 文中采用 Zemax 软件中的非序列模式, 对系统进行光路仿真, 从而进行原理性验证。将上述系统设计的参数导入 Zemax 中, 添加遮挡物遮挡杂散光, 物体表面设置为反射率为 40% 的理想朗伯体表面, 探测器的像素为 1×4 096, 激光功率为 150 mW。图 4 是

Zemax 仿真示意图, 图 5 为被测物体在不同位置处的线阵相机上成像点的位置及光照度。

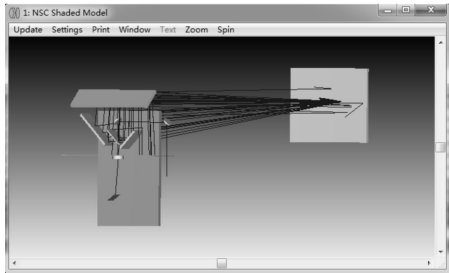


图 4 Zemax 仿真示意图
Fig.4 Simulation by Zemax

从仿真结果可知, 系统的设计基本上符合设计要求。图 5(a)中, 被测物体放在 0.5 m, 在探测器的 2.867 mm 处有明显的峰值, 该峰值表示返回的漫反射光聚焦在这个位置。图 5(b)中, 被测物体放在 4 m 处时, 探测器在 -14.34 mm 处能接收到 4m 处返回的漫反射光。

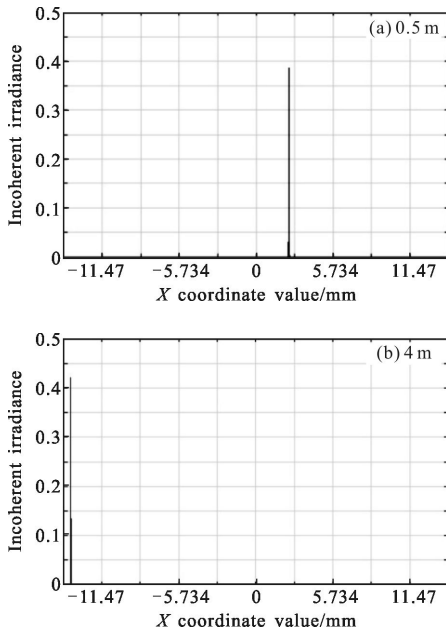


图 5 线阵相机成像点的位置及光照度图
Fig.5 Position and grayscale in line camera

3.2 实验及结果

将系统放在光学防震平台上, 对系统分别进行 APD 回光量与同步扫描三角测量实验。在实验过程中, 由于三角测量激光是不可见光, 为了便于观察, 文中使用 650 nm 的红光作为指示激光, 与三角测量用激光共光路。通过仿真可以发现, 在实验中, 需要使用 4 轴

精密移动平台, 分别调整线阵相机与 APD 的位置, 使得线阵相机与 APD 能充分接收到返回的漫反射光。

3.2.1 APD 回光量实验

对 APD 在测量不同距离处的回光量进行实验。用示波器观察 APD 的电压, 测量距离为 5~100 m, 每隔 10 m 记录一次峰值电压。图 6 是 APD 接收漫反射光后, 示波器显示的曲线, 其中峰值说明 APD 探测到 LIDAR 激光照射在距离 20 m 处的墙面反射回来的脉冲信号。图 7 表示 LIDAR 系统测量 5~100 m 之间, 实验测得 APD 回光量的变化, 其中 data1 是第一次测量的数据, 噪声信号 100 mV; data2 是第二次测量的数据, 噪声信号 80 mV。图 7 中, 在 20 m 之前, 回光能量逐渐上升, 20 m 达到最强。说明 LIDAR 激光漫反射返回后, 在 20 m 处聚焦最好。在 20 m 之后回光能量缓慢减弱, 最后趋于平缓。在距离为 100 m 时, 信噪比近似为 20 dB, 表明 LIDAR 系统还能测量更远的距离。根据 100 m 处信噪比数据, 可分析出的 200 m 处的信噪比数据, 如图中虚线表示。表明 APD 在 200 m 处能接收到 LIDAR 回光。

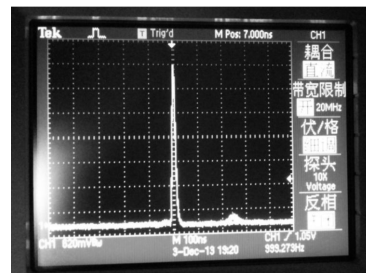


图 6 APD 探测到脉冲信号的峰值图

Fig.6 Peak picture of pulse signal detected by APD

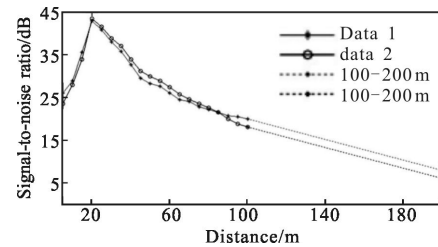


图 7 APD 信噪比曲线

Fig.7 APD signal-to-noise ratio curves

3.2.2 同步扫描三角测量实验

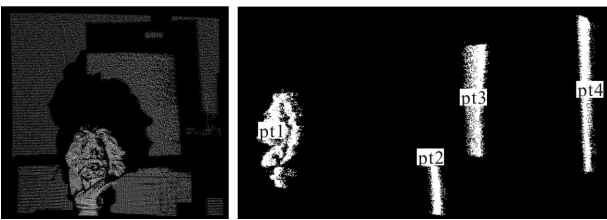
对系统进行三维扫描实验, 验证系统的可行性。实验的对象包括人像、桌子、白板及墙面, 如图 8(a)、(b)所示。系统扫描后, 获得三维点云, 如图 9(a)、(b)所示。



(a) 扫描对象的正面视图 (b) 扫描对象的侧面视图
(a) Front view of the subjects (b) Side view of the subjects

图 8 扫描对象图

Fig.8 Scanning subjects



(a) 点云正面视图 (b) 深度方向的点云
(a) Front view of point clouds (b) Point clouds depth

图 9 实验图

Fig.9 Experimental picture

其中图 9(a)是点云的正面视图,从实验结果可以看出,人像、桌子、白板以及墙面的形状非常明显尤其是人像的表面特征。图 9(b)是人像、桌子、白板以及墙面之间的位置关系。

系统与实际物体之间的位置关系,实验测得的物体之间的位置关系对照如下表 2 所示。从表 2 可知,系统测得物体与系统的位置与实际位置存在一定的误差,但是误差并不大。由于没有对系统进行标定,因此测得的距离只做参考。

表 2 实验测得与实际物体的位置关系比较

Tab.2 Comparing location between experiment measured and actually measured distance

Object	Measured distance	Actual distance
Portrait(pt1)	1 983.27 mm	1 985 mm
Table(pt2)	2 895.76 mm	2 900 mm
White board(pt3)	3 175.70 mm	3 180 mm
Wall (pt4)	3 834.05 mm	3 840 mm

4 结 论

三角测量技术由于在中远距离测量精度不高,广泛应用于近距离测量的场合;而 LIDAR 系统虽然能测量长远距离且能给出合理的测量精度,但不适

合测量近距离。文中设计并加工了通过同步扫描的方式融合 LIDAR 系统的同步扫描三角测量系统,使得两系统取长补短,并且协同作用,实现长短距离的测量,扩大系统的测量范围。文章重点介绍了光学系统的组成以及机械结构设计;利用 Zemax 软件对光路进行仿真,验证设计方案的可行性。最后在实际环境中测试系统 APD 回光量性能以及三维扫描效果,对系统可行性作进一步测试。从实验的结果看,系统能清楚的显示被测物体的表面点云,且能获得被测物体的距离,系统的设计是可行的。

未来将对系统光路位置及镜面位置、角度进行优化,并对系统的测量精度、分辨率进行标定和校正。

参考文献:

- [1] Xu Junfeng. The system of laser triangulation measuring [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 1-40. (in Chinese)
- [2] Ruel S, Tim Luu Andrew Berube. Space shuttle testing of the TriDAR 3D rendezvous and docking sensor [J]. *Journal of Field Robotics*, 2012, 29(4): 535-553.
- [3] Ruel S, Chad English, Melo L, et al. Field testing of a 3D Automatic Target Recognition and Pose Estimation Algorithm [C]//SPIE, 2004, 5426: 102-111.
- [4] Tang Shengbiao. The research of 3-D profile sensing based on synchronized scanning in the integrated vision sensor [D]. Shanghai: Shanghai University, 2002: 1-28. (in Chinese)
- [5] Wang Xiaojia, Gao Jun, Wang Lei. Survey on the laser triangulation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 601-608. (in Chinese)
- [6] Lin Xiaoqian. Distance measuring using single-point laser triangulation system design based on CMOS [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 1-27. (in Chinese)
- [7] Chad English, Sean Zhu, Christine Smith, et al. TriDAR: a hybrid sensor for exploiting the complementary nature of triangulation and LIDAR technologies [C]//Proceedings of the ISAIRAS 2005 Conference (ESA SP-603), 2005, 603: 1-9.
- [8] Wu Jianwei, Ma Hongchao. Error analysis on laser beam misalignment with scanner mirror of airborne LIDAR [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 243-246. (in Chinese)
- [9] Li Li, Ren Ximing. Analysis of RVD LIDAR key technologies [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37: 108-111. (in Chinese)
- [10] Marc Rioux. Laser range finder based on synchronized scanners [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(21): 3837-3844.