

三维成像激光雷达系统中的微电子机械系统扫描： 扫描视场角与扩束

李小宝^{1,2} 王春晖^{1,2} 曲扬^{1,2} 任逍遥^{1,2}

¹哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

²哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 基于微电子机械系统(MEMS)微镜的二维光学扫描系统是趋于低成本、小型化和高清晰的新一代三维成像激光雷达的核心部件之一。由于现有可实现二维高帧频扫描的MEMS其口径和扫描角度有限,因而需要对经MEMS微镜扫描后的激光束进行相应扩角和扩束。讨论了开普勒式扩束望远镜系统对扫描光束扩束之后光斑大小与扫描视场角之间的制约关系;推演得到了扫描角与扩束倍率之间的关系式;提出了一种三维成像激光雷达系统中的基于MEMS和开普勒式望远镜的扫描与变焦扩束系统结构,并在此基础上利用Zemax软件设计出了11片式的扫描变焦扩束光学系统,其模拟的结果与理论计算值完全相吻合。

关键词 机器视觉; 三维遥感成像; 激光雷达; 系统设计; 望远镜

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.111501

Micro-Electromechanical Systems Scan in Three-Dimensional Imaging Lidar System: Scanning Field Angle and Beam Expender

Li Xiaobao^{1,2} Wang Chunhui^{1,2} Qu Yang^{1,2} Ren Xiaoyao^{1,2}

¹National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

²Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract Micro-electromechanical systems (MEMS) based on two-dimensional optical scan system is one of the core parts in the new generation three-dimensional imaging lidar system, which is developing towards to direction of low-cost, miniaturization and high-definition. Because of the limited aperture and maximum scan angle of the MEMS off-the-shelf, which can scan along two axes in bi-direction with high frame frequency, the laser beam reflected off the MEMS needs scanning angle expender and beam expender. We discuss the restrictive relationship between the spot size of the scan beam which is expended by Keplerian telescope system and the scan angle, derives the relationship between scan angle and the beam expender ratio, proposes the structure of a scan and zoom beam expender system which is based on MEMS and Keplerian telescope for three-dimensional imaging lidar system, and then on this basis gives an eleven piece type scan and zoom beam expender optical system designed by the optical design software Zemax, the result of the Zemax simulation has been shown perfectly conformed to the theoretical calculation.

Key words machine vision; three-dimensional sensing; lidar; system design; telescopes

OCIS codes 150.0155; 150.6910; 280.3640; 220.4830; 110.6770

1 引言

新一代三维(3D)成像激光雷达系统以低成本、小型化、高清晰成像为特征,将广泛应用于机器人视觉、

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-31; 网络出版日期: 2015-09-20

作者简介: 李小宝(1981—),男,博士研究生,主要从事激光雷达系统设计方面的研究。

E-mail: lixiaobao200801@126.com

导师简介: 王春晖(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事激光雷达和空间信息技术方面的研究。

E-mail: wangchunhui02@sohu.com

战场环境监测、武器测试、车辆导航等军用和民用领域中^[1-4]。微电子机械系统(MEMS)微镜是3D成像激光雷达的扫描光学系统中的重要组成部件,它具有扫描速度快、体积小、功耗低和价格相对低廉等其他扫描方式(如旋转棱镜扫描,电流振镜计等)不具备的独特优势。目前现有可实现二维(2D)扫描的单片双轴MEMS口径和扫描视场有限,如美国Mirrorcle Tech公司生产的谐振扫描频率在1 kHz以上的MEMS产品中,激光反射口径有1.6、1.7、2.0 mm。它们的机械扫描角为 $\pm 4^\circ$ 左右,其相应的光学扫描角为 $\pm 8^\circ$ 左右^[4-7]。国内的2D扫描单片双轴MEMS微镜谐振频率约在2.4 kHz,其最大光学扫描角也在 $\pm 12^\circ$ 左右,而且还在实验阶段^[8-10]。3D成像激光雷达系统往往既需要有较大的扫描角度,同时为了保证能量的有效传输,又需要有较大的光斑大小。然而,入射到MEMS微镜上的激光束最大光斑尺寸受MEMS口径所限制。

为增大扫描视场角,一般采用光学扩角方法,即用凸凹透镜分别置于MEMS两边组成光学扩角系统^[2-3]。这样光学扫描的角度得到了有效扩展,但存在严重的问题是出射光斑相对入射光束光斑会变小,并且由于激光高斯光束的特征,激光发散角增大,因而极大地降低了对目标探测有效能量的传输,进而影响激光雷达系统的最大成像距离。

由于MEMS的口径较小,经MEMS反射后光斑较小的激光光束若投射到10 m量级的近目标上,激光能量的传输没有太大问题;但对于更远的目标,扫描角度扩展后,传输至目标处的激光有效能量便会很小,甚至极小而难于被探测。因此,激光束扫描角度扩展后有需要进行适当的扩束准直,扩束后必然影响扫描视场。本文将主要讨论MEMS扫描角度扩展后的扩束,以及扩束后对扫描视场角的影响。

2 MEMS扫描视场与扩束

为了对较远目标进行有效扫描,并使激光束能量能够有效传输,需要对激光扫描光束进行扩束以增大激光束的光斑大小。一个可行的办法是在尽量保证扫描视场角的条件下,在一个单片双轴MEMS微镜后加一个倒用的望远镜系统来实现对激光的准直扩束。原则上扩束系统可用开普勒式或伽利略式,从系统体积小型化考虑,将采用MEMS后加开普勒式的扩束系统,原因在于伽利略式扩束系统为凹透镜与凸透镜组合,光束过凹透镜后光束发散,使得后面的凸透镜口径较大,进而使得整个扫描光学系统口径很大;而开普勒式的望远镜系统口径可以相对较小,如图1所示。

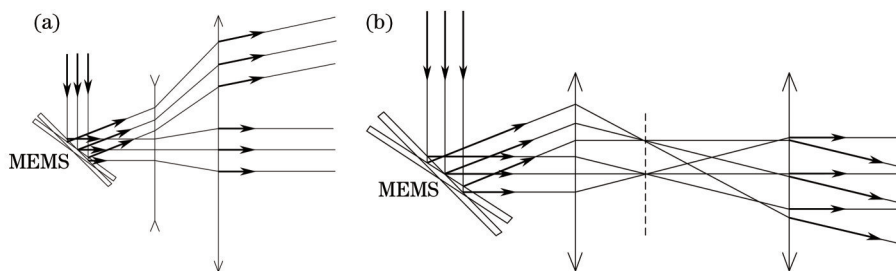


图1 MEMS扫描中望远镜系统示意图。(a)伽利略式扩束;(b)开普勒式扩束

Fig.1 Scheme of telescope system in MEMS scanning. (a) Galileo-type beam expander; (b) Kepler-type beam expander

2.1 MEMS扫描视场与扩束倍率的关系

在图1(b)所示的开普勒式激光扫描准直扩束望远镜系统中,扫描光束的光斑大小得到扩大,但同时其扫描角却相应的有所减小。如图2所示,激光束光斑大小与扫描角之间关系为

$$m = \frac{D_2}{D_1} = \frac{f_2}{f_1}, \quad (1)$$

$$\tan \theta_2 \cdot f_2 = \tan \theta_1 \cdot f_1, \quad (2)$$

式中 m 为扩束倍率, D_1 和 D_2 分别为扩束前后的光斑直径, f_1 和 f_2 分别为望远镜中的两透镜组的焦距, θ_1 和 θ_2 分别为扩束前后的扫描角度。因而有

$$\tan \theta_2 = \tan \theta_1 \cdot \frac{D_1}{D_2} = \frac{\tan \theta_1}{m}. \quad (3)$$

显然, $D_2 > D_1$ 时, $\theta_2 < \theta_1$,即激光光束准直扩束之后,其扫描角度减小。图3给出了MEMS扫描系统中扩束倍率 m 分别取值2、3、4、5和6时,扩束后的扫描角 θ_2 随扩束前扫描角 θ_1 的变化关系。虚线表示的是相

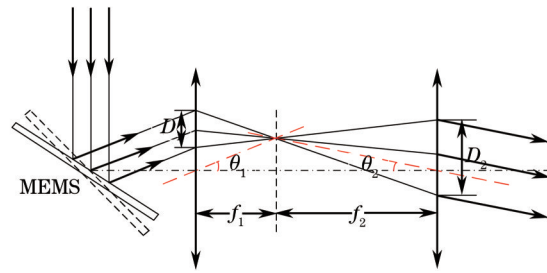
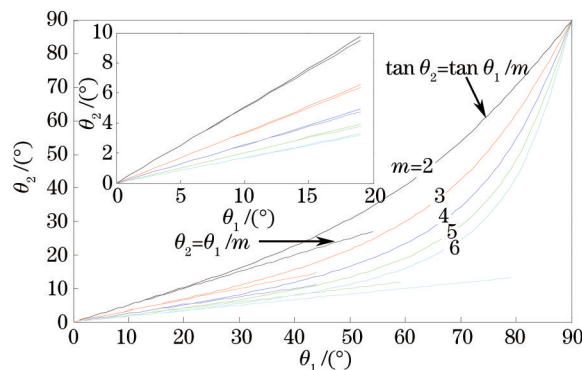


图2 光斑大小与扫描角度关系

Fig.2 Relationship of the spot size and scan angle

应的线性关系 $\theta_2 = \theta_1/m$ 。从内嵌的放大图可以清晰地看到在 $\theta_1 \leq 10^\circ$ 的小角度扫描时,扩束后的扫描角 θ_2 与扩束前扫描角 θ_1 近似呈线性关系,即激光束光斑扩展到 m 倍,则扩束后光束的扫描角减小到扩束前的 $1/m$ 倍。而且扩束倍率不同,线性区间的大小也不同。扩束倍率 m 越大,近似呈线性关系的扫描角范围越大。另外,需要指出的是,伽俐略式的望远镜系统也满足(3)式。

图3 MEMS扫描系统中,扩束倍率 m 取不同值时扩束后的扫描角 θ_2 随扩束前扫描角 θ_1 的变化关系。

内嵌图为 θ_1 从 0° 至 20° 区间的放大

Fig.3 Variation of the expanded scan angle θ_2 versus the scan angle θ_1 in the MEMS scan system with the magnification m . Embedded figure is the enlarged view as the variable θ_1 ranges from 0° to 20°

2.2 一种 MEMS 扫描扩束系统方案

激光束经 MEMS 微镜扫描再扩束后的最大光学扫描角由(3)式所制约,对于给定的扩束倍率, MEMS 微镜的最大光学扫描角 $\theta_{1,max}$ 一旦给定,扫描系统的扫描视场 $2\theta_{2,max}$ 便可以确定。增大扫描光束光斑大小的代价是减小扫描视场。当激光光束扫描近目标时,光斑可以较小,此时扫描角度大,对应于系统的扩束倍率小;当激光光束扫描较远目标时,需适当对光束进行扩束,以增加其能量传输距离,但此时扫描视场变小。因而,基于 MEMS 微镜的激光扫描光学扩角系统应该采用一种变焦距式望远镜扩角扩束系统,对近距离目标可进行大视场角扫描;对远距离目标进行小视场扫描,目标的扫描面积大小近似保持不变,如图 4 所示。

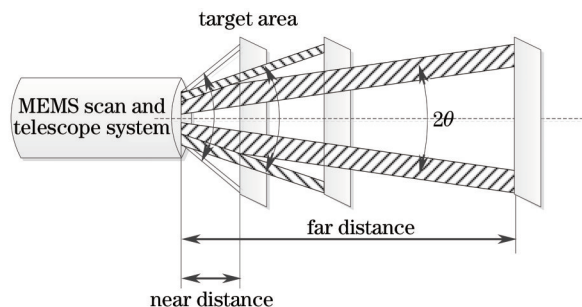


图4 MEMS扫描中视场与扫描距离关系示意图

Fig.4 Scheme of the relationship between field of view (FOV) and scan distance in MEMS scanning system

3 扫描扩束系统方案的光学设计

根据第2节的讨论,采用美国 Mirrorcle Tech 公司的 2.0 mm 的单片双轴 MEMS 微镜,设计一个扫描变

焦扩束光学系统。

为简化计算,系统中经MEMS扫描部分未画出,直接从MEMS后的扩束部分开始。系统的最大光学扫描角度由MEMS本身确定,所用MEMS的机械偏转角为 $\pm 4^\circ$,光学扫描角为其2倍, $\pm 8^\circ$ 。将波长为1550 nm,光斑直径为1.0 mm的准直激光束入射到MEMS微镜上,反射后再经过一个变倍率从2倍至6倍可调的开普勒式的变焦扩束系统。在开普勒式的变焦扩束系统中,它的第一组透镜的有效焦距 f_1 为25 mm,第二组透镜的有效焦距 f_2 从50 mm变到150 mm。

借助常见的光学设计软件Zemax^[11],设计了11片式的开普勒型变焦扩束光学系统,图5为其设计效果,其中前面两片正透镜组成第一组焦距为25 mm的透镜组,后面9片透镜组成变焦距的第二组透镜。第二组透镜采用机械连续可调的正组补偿的变焦结构^[12-18],从左至右分别为补偿组、变倍组和前固定组,整个系统的长度约为264 mm。

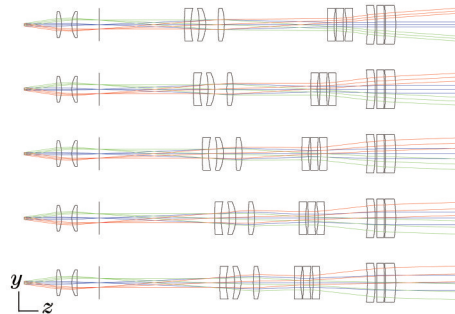


图5 11片镜构成的开普勒式变焦扩束光学系统,自上而下的扩束倍率分别是2、3、4、5和6倍

Fig.5 Keplerian zoom and expander system composed of eleven lenses, with the expander magnification from upper to lower in the picture are 2, 3, 4, 5 and 6, respectively

图6为入射扫描角在 0° 、 $+8^\circ$ 和 -8° 时不同扩束倍率对应的光斑大小,其中图6(a)为入射光束均匀分布的情形;图6(b)为入射光束高斯分布的情形。入射光斑为1 mm,扩束倍率分别为6、5、4、3和2倍时对应的出射光斑分别为6、5、4、3和2 mm,即光斑大小完全符合扩束倍率关系。均匀分布光束与高斯型光束的差别在于高斯型光束的光斑范围内强度分布不均匀。

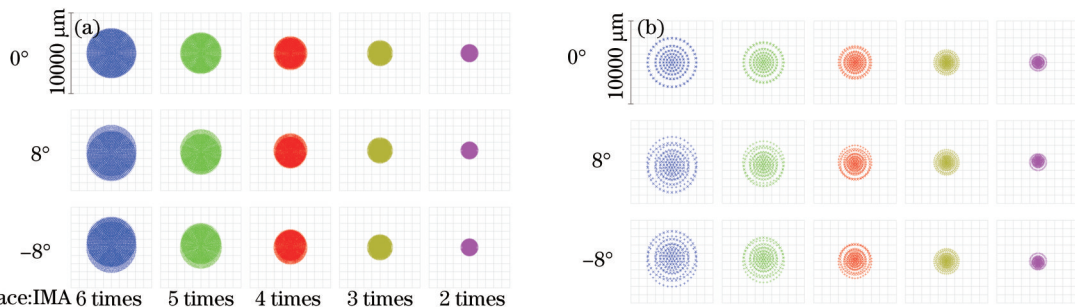


图6 入射扫描角分别为 0° 、 $+8^\circ$ 和 -8° 时扩束倍率分别为6、5、4、3和2倍所对应的光斑大小,其中标度为10000 μm 。

(a) 光束光强为均匀分布;(b) 光束光强为高斯分布情形

Fig.6 Spot size of the scan beam when the incident scan angle are at 0° 、 $+8^\circ$ 和 -8° with the beam expander magnification being 2, 3, 4, 5 and 6, respectively, the scale is 10000 μm . (a) Uniform distribution; (b) Gaussian distribution

表1 Zemax模拟的扩束倍率与最大扫描角度关系

Table 1 Relationship of maximum scan angle and expander magnification simulated by Zemax

Expander magnification	Simulated values $\theta_2 / (^\circ)$	Calculated values $\theta_2 / (^\circ)$
2	3.97	4.02
3	2.66	2.68
4	1.98	2.01
5	1.59	1.60
6	1.36	1.34

的结果。其中扩束前的最大扫描角为 $\pm 8^\circ$;表中第三列根据(3)式计算而来。将从Zemax光线追迹模拟中得到的扫描角度 θ_2 与理论计算值相对比,结果表明:扫描角度模拟的结果与理论计算值很好地符合。

4 结 论

由于现有的可实现2D高帧频扫描的MEMS其口径和扫描角度有限,为满足3D成像激光雷达的应用要求,有必要对MEMS扫描后光学系统进行扩角和扩束。结果表明:光束经扫描角度扩展后再经扩束系统,其光斑大小增大,而扫描角却相应减小。对于小角度情形(θ_1 在 10° 以内),扩束后的扫描角度与扩束前的扫描角度成线性关系;光斑扩大到 m 倍,则扫描角度减小至原来的 $1/m$ 。

为了有效地利用激光能量和增加扫描成像距离,基于MEMS的3D成像激光雷达扫描系统的扩束系统设计为变焦扩束的开普勒式扩束系统。据此用Zemax软件设计出了一个11片式的扫描变倍扩束光学系统,通过对其模拟结果的分析,发现其结果与预想的理论值很好地吻合,因此可以为3D成像激光雷达基于MEMS的扫描光学系统的研制提供有用的理论指导。

参 考 文 献

- 1 W C Stone, M Juberts, N Dagalakis, *et al.*. Performance Analysis of Next- Generation LADAR for Manufacturing, Construction, and Mobility[OL]. <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build04/PDF/b04032.pdf>. [2015-8-27].
- 2 J Siepman, A Rybaltowski. Optically extended MEMS scanning transforms imaging lidar[J]. Laser Focus World, 2005, 41(7): 89-91.
- 3 J P Siepman, A Rybaltowski. Integrable ultra-compact, high-resolution, real-time MEMS LADAR for the individual soldier[C]. Military Communications Conference, IEEE, 2005, 5: 3073-3079.
- 4 Li Danni, Hu Dan, Wang Jinsong, *et al.*. Application of three-dimensional Laser radar to the measurement of deviation angle of guns[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1014004.
李丹妮, 呼丹, 王劲松, 等. 三维激光雷达在火炮偏离角测量中的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1014004.
- 5 V Milanovi, D T McCormick, G Matus. Gimballess monolithic silicon actuators for tip-tilt piston micromirror applications [J]. IEEE Journal of Select Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(3): 462-471.
- 6 V Milanovi, W K Lo. Fast and high precision 3D tracking and position measurement with MEMS micromirrors[C]. 2008 IEEE/LEOS Optical MEMS and Their Applications Conference, IEEE, 2008: 72-73.
- 7 Mirrorcle Technologies. Datasheets of Typical Dual-Axis Devices[OL]. www.mirrorcletech.com/support.html. [2015-8-20].
- 8 Li Zhao, Yuan Weizheng, Wu Meng, *et al.*. Micro scanning mirrors with laser diode for pattern generation[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(11): 1625-1629.
李昭, 苑伟政, 吴蒙, 等. 基于微扫描镜的激光投影[J]. 光子学报, 2011, 40(11): 1625-1629.
- 9 Yan Bin, Yuan Weizheng, Qiao Dayong, *et al.*. Novel resonant micro-opto-electro-mechanical scanning mirror and Lissajous pattern display[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0523003.
燕斌, 苑伟政, 乔大勇, 等. 一种新型谐振式微机电系统扫描镜及其利萨如图形显示[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0523003.
- 10 Yan Bin, Yuan Weizheng, Qiao Dayong, *et al.*. Study on resonant frequency for a novel MEMS micro scanning mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0623004.
燕斌, 苑伟政, 乔大勇, 等. 一种新型微机电系统扫描镜的谐振频率研究[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0623004.
- 11 J M Geary. Introduction to Lens Design with Practical ZEMAX Examples[M]. Richmond: Willman-Bell, 2002.
- 12 Zhang Tingcheng, Liao Zhibo. Design of 6X cooled thermal imaging middle infrared continuous zoom optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122004.
张庭成, 廖志波. 6倍制冷型中红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122004.
- 13 Zhou Hao, Liu Ying, Sun Qiang. Mid infrared zoom optical system with ratio of 25[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0422001.
周昊, 刘英, 孙强. 25倍中红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0422001.
- 14 Yao Duoxun. The design method of three component continuous zoom optical system with mechanical compensation (I)[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 160-165.
姚多舜. 机械补偿式三组元连续变焦光学系统设计方法(I)[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 160-165.

- 15 Yao Duoxun. The design method of three component continuous zoom optical system with mechanical compensation (II)[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2): 1-6.
姚多舜. 机械补偿式三组元连续变焦光学系统设计方法(2)[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 1-6.
- 16 Yao Duoxun. The design method of three component continuous zoom optical system with mechanical compensation (III)[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(3): 13-18.
姚多舜. 机械补偿式三组元连续变焦光学系统设计方法(3)[J]. 应用光学, 2008, 29(3): 13-18.
- 17 Tao Chunkan. Zoom Optical System Design[M]. Beijing: National Defense Industry House, 1998: 121-153.
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 121-153.
- 18 Cai Wei. Design of Large Zoom Ratio System[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 11-42.
蔡 伟. 大变倍比变焦距系统设计[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012: 11-42.

栏目编辑: 何卓铭