

文章编号 1004-924X(2008)10-1901-06

激光制导测量机器人运动系统设计

刘万里¹,王占奎²,欧阳健飞³,曲兴华¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072;

2. 河南科技学院 机电学院,河南 新乡 453003;3. 河南理工大学 精密工程研究所,河南 焦作 454003)

摘要:提出了一种新型的“光束运动-光靶跟踪”激光跟踪测量方法,并在其理论上,研制开发了一种能够在水平和垂直被测对象表面运动的小型轮臂复合式激光制导测量机器人。该机器人机构融合了轮式机构、爬行臂式结构和真空吸附式机构的优点,并且具有质量轻、体积小、运动灵活和反应快速等特点,可以根据不同的被测对象表面特征变换测量模式,利用轮式结构实现机器人在水平被测表面上高速远距离运动,利用爬行臂式和真空吸附式机构实现机器人在倾斜光滑表面上的灵活爬行和转向。对其运动特性进行了详细的分析,并利用激光跟踪仪和三坐标测量机对研制的激光制导测量机器人进行了性能测试。实验结果表明,机器人跟踪圆弧的测量精度为 0.106 mm,跟踪直线的测量精度为 0.094 mm,可自动高效地完成被测对象实体测量。

关键词:激光制导;测量机器人;设计;运动特性

中图分类号:TP242.6;TN247 **文献标识码:**A

Design of motion system for laser guided measuring robot

LIU Wan-li¹, WANG Zhan-kui², OUYANG Jian-fei³, QU Xing-hua¹

(1. *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

2. *College of Mechatronics, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China;*

3. *Institute of Precision Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China*)

Abstract: In order to perform Laser Tracker System(LTS) more efficiently and automatically, a new laser tracking measurement theory of “laser beam moving and SMR tracking” was proposed. The Laser Guided Measurement Robot (LGMR) technology was studied and a miniature wheel-armed LGMR system that can move on the horizontal and vertical surfaces of measured part was developed based on this theory. In combination of the merits of wheeled mechanism, armed mechanism and vacuum-adsorb mechanism, the LGMR system has many advantages of less weight, small volume, simple structure and quickly response. The LGMR also can change the measuring modes according different characteristics of parts to move on the horizontal surface with high speed and remote distance using wheeled system and to climb flexibly on the smooth inclined surface using crawling armed system. The moving characters of LGMR were analyzed in detail, analyzed results show that the measuring ac-

收稿日期:2007-12-21;修订日期:2008-02-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50475038)

accuracy of LGMR is 0.106 mm in tracking circle and 0.094 mm in tracking straight-line, which concludes that designed LGMR can track automatically laser beam and measure effectively the surfaces of given part.

Key words: laser guiding; measuring robot; design; moving character

1 引言

随着国家经济实力提高,产业结构调整,飞机及汽车等大型制造工业进入大规模发展时期。此类工业的特点是产品尺寸大、价值高、安全性强,对其制造测量技术要求高。大尺寸制造测量技术作为生产过程中保证生产、提高质量、降低成本的主要技术手段,在飞机及汽车等大型制造业中具有巨大的市场需求。

目前,世界上先进的大尺寸测量技术主要有激光跟踪测量、数字扫描摄影、激光经纬仪、多关节测量机器人、三坐标测量机和双频激光干涉仪等。作为大尺寸制造测量主要手段的激光跟踪测量技术,是在“光靶运动-光束跟踪”理论上发展起来的,它利用激光干涉测长、精密测角及光靶跟踪技术,可对任意点的空间坐标进行实时跟踪测量,测量精度高、测量速度快、测量范围大、通用性强,特别适用于大尺寸工件的现场测量,在大型设备的制造安装过程中得到广泛应用。现有的“光靶运动-光束跟踪”式激光跟踪测量技术的工作原理是:测量人员手持测量光靶,与被测对象接触,测量激光束始终跟踪瞄准测量光靶,精确测量出被测点三维空间位置。这种传统式激光跟踪测量技术存在以下几个问题^[1-2]。

- (1) 不能直接应用被测对象的数字模型对其进行自动高效测量。
- (2) 对大型被测对象,人工布点及测量过程繁杂,测量效率低。
- (3) 人工操作测量,造成被测对象几何形状变形,严重影响测量精度。
- (4) 对大型薄壁结构,测量过程困难,甚至无法进行测量。

如何解决以上问题,是当前国际上激光跟踪测量技术领域的焦点研究课题之一,但基于“光靶运动-光束跟踪”基本技术路线的研究,尚未取得重大突破。

本文在对“光靶运动-光束跟踪”式激光跟踪测量技术进行全面分析与系统研究的基础上,开

辟了一条全新的技术路线,提出了“光束运动-光靶跟踪”新方法,并在此理论基础上,研究激光制导测量机器人技术,开发研制了一种能够在水平和垂直被测对象表面上运动的小型轮臂复合式激光制导测量机器人系统。该机器人机构融合轮式机构、爬行臂式结构和真空吸附式机构的优点,并且具有质量轻、体积小、运动灵活和反应快速等特点,可以根据不同的被测对象表面特征变换测量模式,利用轮式结构实现机器人在水平被测表面上高速远距离运动,利用爬行臂式和真空吸附式机构实现机器人在垂直光滑表面上灵活地爬行和转向。本研究在国际上率先为研究新型激光跟踪测量技术提供理论与方法,为国家重大工程项目提供测量技术与设备支持,在飞机、汽车、火车、火箭、轮船、轨道和建筑等制造安装中有广泛应用前景^[3-4]。

2 激光制导测量机器人系统原理

2.1 激光跟踪测量系统工作原理

激光跟踪测量系统是一种球坐标测量系统,测量原理如图1所示:测量人员手持测量光靶

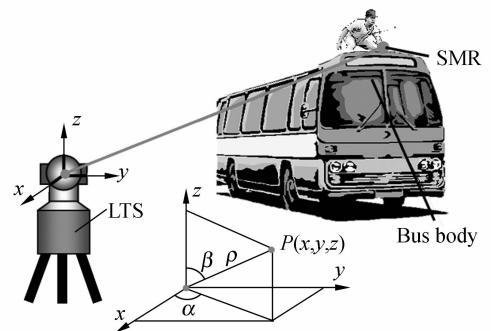


图1 激光跟踪测量系统的工作原理

Fig.1 Working principle of laser tracking system

(SMR)与被测对象接触,测量激光束始终跟踪瞄准测量光靶,精确测量出被测点三维空间位置,即通过测量极径 ρ 和两个方位角 α 和 β ,即可确定被测点 P 的空间坐标,由式(1)给出:

$$\begin{cases} x = \rho \sin \beta \cos \alpha \\ y = \rho \sin \beta \sin \alpha \\ z = \rho \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

本文提出的“光束运动-光靶跟踪”新方法 与现有的“光靶运动-光束跟踪”方法不同之处,主要表 现在激光束与光靶的相互运动控制形式上,比较如表 1 所示。这种光束与光靶相互运动控制形式改变,可 从根本上解决激光跟踪测量技术中的主要问题^[5-6]。

表 1 “光束运动-光靶跟踪”与“光靶运动-光束跟踪”
Tab.1 “Laser beam moving and SMR tracking”
and “SMR moving and laser beam tracking”

	“光束运动-光靶跟踪”	“光靶运动-光束跟踪”
测量光束	按数字模型扫描	跟踪光靶运动
测量光靶	自动跟踪激光束	人工操纵运动

2.2 “光束运动-光靶跟踪”基础理论与实现方法

“光束运动-光靶跟踪”理论是一种新的测量理念,采用这种技术的激光制导跟踪测量系统的原理如图 2 所示。测量光靶作为测量机器人的一部分,安装在测量机器人上,测量激光束射向测量光靶,再从光靶反射回来,用激光干涉仪及水平/垂直测角器测量出光靶的空间位置。通过被测对象数字模型,产生光束位置控制信号,驱动水平/垂直激光束位置控制器,带动激光束位置调节镜,使测量激光束产生空间扫描运动,将被测对象数字模型转换成测量激光束空间位置模型。当测量激光束运动时,利用激光束位置瞄准器,产生测量机器人位置控制信号,控制测量机器人运动,使测量机器人始终跟踪瞄准测量激光束,在测量激光

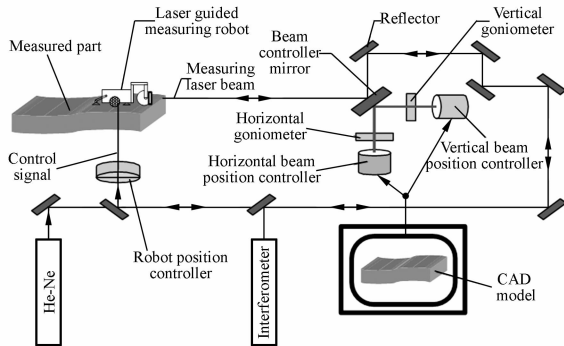


图 2 激光制导测量机器人系统原理

Fig.2 Working principle of laser guided measuring robot

束制导下,形成被测对象的实体点位模型,从而完成被测对象实体测量。

3 激光制导测量机器人系统设计

3.1 运动系统总体结构

运动系统设计是机器人设计的基础,也是机器人各种动作得以完成的保证^[7]。本文所研制的激光制导测量机器人除能够在平面和斜平面进行移动测量以外,还具有以下主要功能:(1) 可独立控制,在测量激光束制导下运动;(2) 能可靠运动到被测对象上的测量点处,跟踪激光束;(3) 能可靠运动到被测对象上的测量点处,跟踪激光束;所携带光靶的位置可调,能够对激光束进行精确瞄准接光。另外,为满足运动学特性的要求,机器人的重心要在中心平面上,为了提高测量机器人的性能,设计还在满足功能要求前提下尽量减轻机器人整体质量^[8-9]。

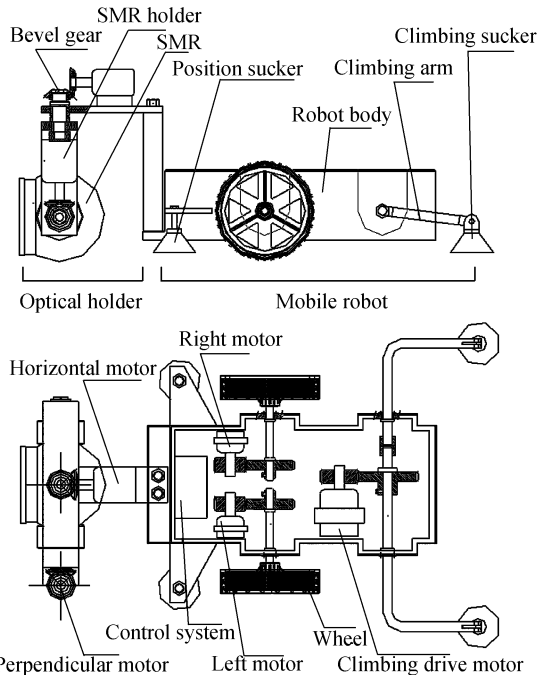


图 3 激光制导测量机器人总体结构

Fig.3 General structure of laser guided measuring robot

针对激光制导测量机器人测量功能要求,考虑到其作业对象的多样性,如图 3 所示,研制开发的激光制导测量机器人是在三轮机构机器人基础上融合了爬行臂式机构和真空吸附装置的复合式机构。该结构中机器人由光靶自动跟踪装置、测

量机器人本体和控制系统 3 部分组成。其中,光靶自动跟踪装置包括光靶、光靶夹紧装置、电动机组以及控制系统等。它的主要功能是实现光靶自动跟踪激光束,完成测量任务。根据测量控制信号,控制水平电动机和垂直电动机转动并带动光靶绕垂直轴和水平轴旋转一定的角度,使激光束能够入射到光靶中心,并按原路返回到激光跟踪测量系统中,从而测量被测特征。而测量机器人本体由车体、真空系统、车轮、电动机组和爬行机构等组成。它的功能是携带光靶自动跟踪装置大范围内移动和跟踪激光束,并能在工件表面实现定位。当待测工件表面为水平面或与地面所成角度较小的平面时,移动机构采用轮子结构;当表面为斜面时,移动机构采用爬行机构^[10-11]。

3.2 光靶自动跟踪装置设计

如图 4 所示,光靶自动跟踪装置主要由水平轴、竖直轴、磁力卡槽、旋转支架、竖直支撑和滑动轴承组成。

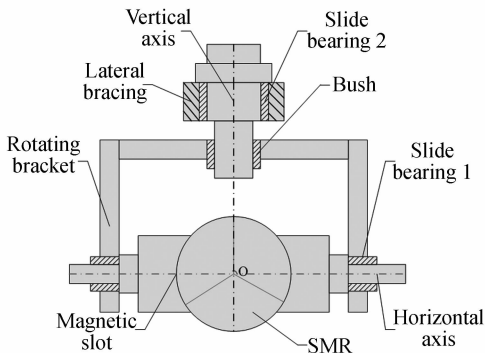


图 4 光靶自动跟踪装置

Fig. 4 Automatic SMR tracking mechanism

光靶在磁力球槽的带动下绕中心线 1 旋转,完成俯仰跟踪,同时旋转支架带动光靶沿中心线 2 旋转,完成水平跟踪。为了保证测量精度,在旋转过程中 SMR 光学中心位置应不变,即光靶在旋转的过程中相对于测量机器人系统的相对位置不变。为了保证旋转精度,必须满足如下条件:

(1) 水平旋转轴、垂直旋转轴中心线 1、2 必须垂直相交,水平转轴、垂直转轴在轴承内旋转精度高。

(2) 光靶的光学中心必须与中心线 1、2 的交点重合,且磁力球槽与光靶的配合精度高,无相对滑动。

为了满足以上条件,采用水平支撑、旋转支架

在数控机床上一体化加工来保证中心线 1、2 的垂直精度,同时采用精密滑动轴承保证旋转精度。

3.3 运动特性分析

机器人采用轮式和爬行臂式的混合移动方式。这种混合移动机构转向灵活、对被测对象适应能力强,而且驱动控制简单。假设研制的激光制导测量机器人在被测面为平面或斜面的工件上移动和测量,下面分别对其进行运动特性分析。

当工件表面为平面或与水平面之间角度较小时,采用轮式结构测量机器人。如图 5 所示,其运动特性为:激光跟踪仪扫描程序启动,并给出驱动控制信号制导测量机器人移动;激光制导测量机器人通过信号接收器、光电编码器和磁航向传感器实时给出机器人的位置和姿态并反馈到控制系统,通过比较计算出偏差信号,偏差信号驱动电动机使测量机器人继续移动,直到偏差信号为零,然后通过激光跟踪测量系统测量出被测特征。通过测量机器人控制系统可实现机器人的前进或后退、转弯等功能;通过两后轮的差速运动实现测量机器人的转弯。在机器人移动过程中,为了保证光靶始终跟踪激光束,光靶自动跟踪装置根据控制信号实时地控制电动机带动光靶绕自身的水平轴、垂直轴转动,完成被测对象实体测量。这种机器人结构简单,控制系统容易实现,而且测量效率高。

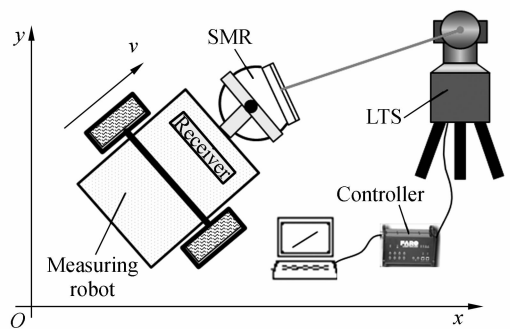


图 5 激光制导测量机器人平面运动特性

Fig. 5 Moving character of LGMR on horizontal surface

当被测表面与水平面角度较大时,轮式结构就不能满足移动和测量要求,此时采用爬行臂式机器人机构,其运动的特性如图 6 所示。首先定位吸盘稳定地吸附于工件表面,爬行机构带动真空吸盘转动,当爬行吸盘与工件表面接触后开始工作,利用压力传感器判断吸盘是否稳定地吸附

在表面上,稳定后,定位吸盘停止工作,同时爬行臂在电动机带动下继续转动,从而实现爬行机构拖动机器人本体及光靶向前移动。当机器人从点 B 移动到点 B' 时,爬行真空子系统停止工作,同时定位真空子系统开始工作,根据压力传感器判定定位吸盘稳定性吸附于工件表面,这样,爬行臂式测量机器人完成了一个运动周期;测量机器人通过光电编码器和磁航向传感器实时给出机器人的位置和姿态并反馈到控制系统,通过比较计算出偏差信号,偏差信号驱动电动机使测量机器人继续移动,直到偏差信号为零。定位吸盘和爬行吸盘交替工作就实现了测量机器人的移动并完成对被测工件的测量。

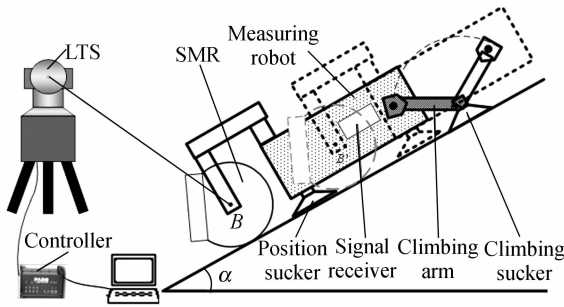


图 6 激光制导测量机器人斜面爬行特性

Fig. 6 Moving character of LGMR on inclined surface

4 试验结果与分析

如图 7 所示,本文利用 FARO SI 型激光跟踪仪和海克斯康 G9128 三坐标测量机对研制的激光制导测量机器人进行了性能测试。激光制导测量机器人的运动形态有轮式和爬臂式的移动。轮式结构机器人的移动方式有两种,直线运动和转向;爬臂式结构有爬行和转向两种功能,对这 4 种方式进行了实验和分析。

实验中首先让激光跟踪仪扫描程序启动,并给出驱动控制信号使制导测量机器人在水平的工件表面上做圆周式的跟踪测量运动,在倾斜的被测工件表面上做直线式的爬行运动;然后用三坐标测量机实时地测量出光靶的空间位置坐标。其测量结果如图 8 所示,实线代表理论轨迹曲线,虚线是测量机器人的跟踪测量轨迹曲线。总共进行了 30 次相同的试验,跟踪圆弧的测量精度为 0.106 mm,跟踪直线的测量精度为 0.094 mm。

实验结果表明所研制的激光制导测量机器人

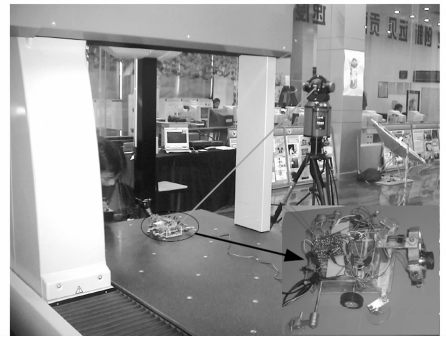


图 7 性能测试实验

Fig. 7 Performance test experiment

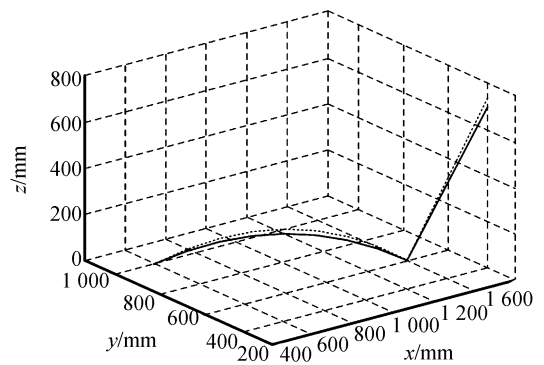


图 8 激光制导测量机器人测量轨迹

Fig. 8 Measured results of LGMR

能够跟踪测量激光束在水平和倾斜的被测工件表面上进行自动高效跟踪测量运动。此外,由于机器人加工和装配精度不高,齿轮装配精度低,以及真空吸附系统的不完善都给测量机器人带来了一定跟踪测量误差,这些有待于在以后研究中进一步改善和提高。

5 结论

(1) 提出了一种新型的“光束运动-光靶跟踪”激光跟踪测量方法。研制并开发了一种能够在水平和垂直被测对象表面上运动的小型轮臂复合式激光制导测量机器人系统。

(2) 实验证明了所研制的激光制导测量机器人能够跟踪测量激光束在水平和倾斜的被测工件表面上自动高效地完成被测对象实体测量。本研究为国家重大项目提供了测量技术与设备支持,在飞机、汽车、火车、火箭、轮船、轨道和建筑等制造安装中有广泛应用前景。

参考文献:

- [1] LIU W L, OUYANG J F, QU X H, *et al.*. Misalignment error calibration of faro retro probe for laser tracker system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(5):281-283.
- [2] 刘万里, 曲兴华, 闫勇刚. 激光跟踪测量系统的建模与仿真[J]. 石油化工高等学校学报, 2007, 20(3):50-53.
LIU W L, QU X H, YAN Y G. Modeling and simulation of laser tracking system [J]. *Shiyou Huagong Gaodeng Xuexiao Xuebao*, 2007, 20(3):50-53. (in Chinese)
- [3] OUYANG J F, LIU W L, YAN Y G, *et al.*. Angular error calibration of laser tracker system [J]. *SPIE*, 2006, 6344:6344-6348.
- [4] HWANG S H, LEE H G, CHOI G R, *et al.*. Development of laser tracking system for measuring position accuracy of robots [C]. *Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Control and Measurement*, 2000: 215-220.
- [5] LARSSON U, FORSBERG J, WERNERSSON A. Mobile robot localization; integrating measurements from a time-of-flight laser [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996, 43(3): 422-431.
- [6] WHITE T S, ALEXANDER R, CALLOW R, *et al.*. A mobile climbing robot for high precision manufacture and inspection of aerostructures [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2005, 24(7): 589-598.
- [7] 叶声华, 王一, 任永杰, 等. 基于激光跟踪仪的机器人运动学参数标定方法[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2):202-205.
YE SH H, WANG Y, REN Y J, *et al.*. Calibration of robot kinematic parameters based on laser tracker [J]. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(2):202-205. (in Chinese)
- [8] 岳明, 邓宗全. 基于状态观测器的球形机器人状态反馈控制系统设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6):878-883.
YUE M, DENG Z Q. Design of state feedback control system for spherical robot based on state observer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):878-883. (in Chinese)
- [9] 李研彪, 金振林. 球面三自由度机器人的力矩输入均衡性能分析与设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5):730-734.
LI Y B, JIN ZH L. Analysis and design of input torque of spherical 3-DOF manipulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5):730-734. (in Chinese)
- [10] 段星光, 黄强, 李科杰. 小型轮履腿复合式机器人设计及运动特性分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8):108-114.
DUAN X G, HUANG Q, LI K J. Design and motion analysis of miniature wheel-track-legged mobile robot [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(8):108-114. (in Chinese)
- [11] 郝波, 颜国正. 基于冗余关节机器人的插接管道焊缝扫查系统设计 [J]. 光学精密工程, 2004, 12(4):420-425.
YAN B, YAN G ZH. Design of weld inspection system for intersected pipe based on redundant manipulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4):420-425. (in Chinese)

作者简介:刘万里(1980—),男,博士研究生,主要从事精密测试技术与仪器方面的研究;E-mail: liuwanli218@126.com
曲兴华(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事精密测试技术与仪器方面的研究;E-mail: quxinghua@tju.edu.cn
欧阳健飞(1962—),男,河南省特聘教授,工学博士,博士生导师,主要从事精密测试技术与仪器方面的研究。
E-mail: ouyang@hpu.edu.cn