

文章编号: 0253-2239(2003)09-1030-7

四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统*

张国雄¹ 林永兵^{1,2} 李杏华¹ 李真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 中国科学院计算技术研究所, 北京 100080)

摘要: 介绍了基于多边法原理的四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统, 包括系统的工作原理、冗余特性、激光跟踪干涉仪、新型目标靶镜、系统的布局及实验结果等, 并进一步指出下一步的工作。实验表明, 在距跟踪干涉仪 800 mm 远处 700 mm × 600 mm 平面范围内, 系统三维坐标测量不确定度为 0.0620 mm。

关键词: 光学测量; 激光跟踪干涉仪; 多边法; 坐标测量; 冗余; 优化; 猫眼逆反射器; 布局

中图分类号: TN249 文献标识码: A

1 引言

基于多边法原理的多路激光跟踪干涉三维坐标测量系统, 具有高精度、大范围、柔性、动态、现场测量等一系列突出优点, 并且通过冗余设计系统还具有自标定、丢失信号自恢复、误差补偿的能力。因此, 多路激光跟踪坐标测量系统在大尺寸精密测量、机器人标定等许多领域有着极为广阔的应用前景。这种测量方法是在成熟的激光干涉技术基础上, 综合近二三十年来飞速发展的计算机技术、电子技术、精密机械技术、伺服控制技术和现代数值计算技术, 实现了对三维空间目标点的动态实时跟踪测量, 是现代计量测试领域研究的前沿课题^[1~4]。英国国家物理实验室(NPL)和日本国家计量研究室(NRLM)都已研制出基于激光跟踪和多边法原理的柔性坐标测量机的样机^[5,6]。国内的研究单位主要有清华大学^[7,8]。我们成功研制了四路激光跟踪干涉柔性坐标测量系统, 并完成了三维坐标测量对比实验。在研制过程中, 我们在跟踪转镜机构、干涉测量光路、猫眼逆反射器、系统布局等方面取得了明显的创新。

2 系统工作原理和冗余特性

采用四路激光跟踪干涉仪组成的三维坐标测量系统如图 1 所示。图中的 $B_j (j=1, \dots, 4)$ 表示每路激光跟踪干涉仪双轴跟踪转镜的中心, 定义为测量系统的基点。系统建立后各基点位置须保证稳定不

变。 T 为目标镜“猫眼”的中心位置, 定义为测量系统的动点。目标镜可以在三维空间内运动, 每一路激光跟踪干涉仪实时跟踪目标镜的运动并测出它到跟踪转镜中心的相对长度变动量。只要三个基点的相对位置和初始动点(将三个激光跟踪干涉仪示值清零时的动点)位置已知, 可用三路激光跟踪干涉仪共同瞄准并跟踪空间某一运动目标, 测得动点到基点的距离, 空间运动目标的位置也就唯一确定了。这就是三边法测量原理。由于测量过程中只涉及到位移量, 无需测量角度量, 而对位移的测量基于激光干涉技术, 因此系统具有非常高的理论精度。

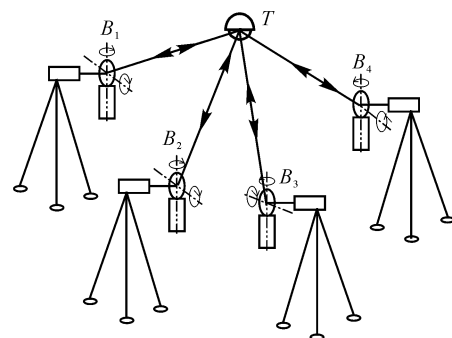


Fig. 1 Four-beam laser tracking interferometer system for three-dimensional coordinate measurement

在三路激光跟踪测量系统基础上, 增加一路跟踪干涉仪, 构成冗余系统, 不仅可以解决三路激光跟踪测量系统存在的标定困难和对丢光敏感的问题, 而且还可以实现系统的自标定、挡光自恢复、误差分离和补偿、跟踪干涉仪的“迁移”和“再标定”等一系列重要功能^[9,10], 从而使系统具有了高可靠性、高精度和实用化的特点。

* 国家自然科学基金(59875064)资助课题。

E-mail: yblin@jdl.ac.cn

收稿日期: 2002-07-29; 收到修改稿日期: 2002-09-19

2.1 系统自标定

图 1 中,对于每一动点,按两点距离公式,与 4 个基点可以建立 4 个方程。而每引进一个动点,只增加 3 个未知坐标,可见存在一个冗余约束方程。增加动点数,使冗余约束方程个数大于或等于系统未知参量个数,对系统进行标定。这就是系统自标定的原理。系统的未知参量应当包括 4 个基点以及 1 个初始动点的位置坐标^[11],未知数共 $3 \times (4+1) = 15$ 个。通过合理建立坐标系,可以使系统未知参量减少到 9 个,因此为完成系统自标定所需的动点数至少为 9 个。为下文叙述方便,将 4 个基点和 1 个初始动点的位置坐标统称为系统参量。为提高标定精度,实际进行系统自标定时采取的动点数远大于 9 个,此时将构成超定方程组。采用高斯-牛顿法可以有效地解决此类非线性最小二乘问题。

2.2 挡光后信息自恢复

激光跟踪干涉仪是增量码仪器,一旦发生挡光,测量就无法继续,整个测量过程就必须重新开始。实际测量时,两路或多路同时被挡光的情形比较少,更多的是某一路光线被遮挡。此时可以利用系统冗余特性,实现挡光后信息自恢复。在系统标定后,只要有 3 台干涉仪正常工作,仍可确定动点的坐标。在被挡光的干涉仪恢复透光后,由于动点与基点坐标均已知,可以按算出的方位驱动转镜使光束瞄准目标点,恢复跟踪;同时按算出的距离将干涉仪置数,使测量继续进行,就像没有发生过挡光一样。

2.3 误差分离和补偿

激光跟踪测量系统要求跟踪过程中基点位置不变,但实际上各干涉仪跟踪转镜上的光点很难通过它的回转中心,且光点偏离回转中心的量 $b_j (j=1, \dots, 4)$ 难以精确确定。在进行系统自标定时,可把 b_j 作为系统待标定的参量之一,将 b_j 带来的影响写入自标定数学模型中。只要相应增加测点数,就可将 b_j 求出,从而实现误差分离。而在实际测量时,考虑 b_j 的影响,实现误差补偿。

2.4 跟踪干涉仪的“迁移”和“再标定”

4 台干涉仪很难同时探测到被测对象的各个侧面。系统完成标定后,只要有 3 台干涉仪正常工作就可以保持原有坐标系。可逐步将干涉仪一一转移到新的位置,再测 3 个点就可确定转移后的一个新基点位置,保持坐标系统一。经过这样 4 次迁移后,整个系统就被“迁移”到被测对象的另一测量面,可以继续对被测对象进行测量,从而实现一次安装中测量多个被测面^[10]。

由此可见,冗余技术的应用使系统发生了质的飞跃。冗余设计应当成为系统设计的一项重要原则。

3 激光跟踪干涉仪

四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统的基本工作单元是激光跟踪干涉仪。激光跟踪干涉仪的工作性能、测量精度决定了整个系统的性能和精度指标。激光跟踪干涉仪是在普通激光干涉仪基础上加入了跟踪转镜机构,可以跟踪空间运动目标并实时测量目标到跟踪转镜中心的距离变化量。由于引进了伺服跟踪转镜机构,使干涉仪测量位移的方向从固定的直线方向转变到可以投向空间任意点的任意方向,大大扩展了激光干涉仪这种高精度测量仪器的应用范围。我们利用常规激光干涉仪 HP5528A,经过改造变成激光跟踪干涉仪,在单一方向干涉测距的基础上,实现了三维动态跟踪测量。

3.1 干涉测长光路

为简化激光干涉系统的光路设计,我们利用 HP5528A 干涉仪测量直线度的功能实现对位移的测量,只需将直线度读数乘上一个系数(1/36 或 1/360)即可得到实际位移量。测量直线度时,干涉仪返回光线和出射光线处于同一直线上。利用这一点可以使跟踪干涉仪的测量光路大大简化。如图 2 所示,激光头 1 射出的光到达偏振分光镜 2 后,参考光被偏振分光镜 2 反射向角锥棱镜 3 的顶点,然后沿原路返回;测量光透过偏振分光镜 2,经跟踪转镜 5 反射后射向猫眼 6,由猫眼反射回来的光沿原路返回,在偏振分光镜 2 处与参考光束汇合,这两路光一起返回到激光头出射孔处,产生干涉,实现对位移的测量。分光镜 4 分出部分返回光线射向四象限光电二

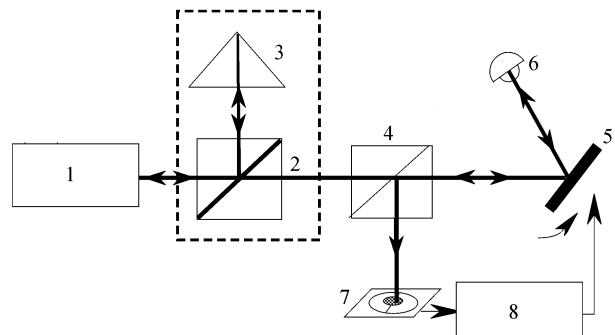


Fig. 2 The optical diagram of laser tracking interferometer. 1: laser head; 2: polarizing beam splitter (PBS); 3: corner cube; 4: beam splitter; 5: tracing mirror; 6: cat's-eye; 7: quadrant photo diode (QPD); 8: control circuit

极管 7。当猫眼在空中运动时,返回光束会发生平移,从而在四象限光二极管上产生偏差信号。该偏差信号输入到跟踪控制电路,驱动跟踪转镜 5 转动,实现对目标靶镜猫眼的跟踪。

这种光路巧妙地利用了干涉仪测量直线度时激光头内部附带的光学元件,使外部光路变得非常简单,只需一个分光镜和一个角锥棱镜即可满足跟踪干涉仪所需的光路要求;尤为重要,图 2 所示的测量光路光能损失相当小,可以保证有足够强的干涉信号。在实验中取得了满意的效果。

3.2 跟踪转镜机构

独立式单转镜跟踪机构是指两个电机转轴垂直相交放置,分别驱动反射镜绕水平轴和垂直轴旋转,反射镜反射基点恰好位于两电机转轴相交点,保证反射基点在反射镜转动过程中稳定不变。由于转动部分只有跟踪转镜,体积小,重量轻,可以使跟踪机构具有良好的动态性能。我们设计的就是这种独立式单转镜跟踪机构,实物照片如图 3(a)所示,结构示意图如图 3(b)所示。两空心杯直流力矩电机垂直相交放置,电机的轴线相交于点 A, A 点就是激光束在反射镜面上的反射点。拨杆 3 固定在电机轴上,每一个拨杆的端头固定一个钢球,均布于件 2 的 V 型槽内。为减小系统的磨擦,件 2 外部由聚四氟乙烯材料制成,内嵌一反射镜,反射镜的反射点与轴线的交点 A 重合。当电机旋转时,件 2 在拨杆的驱动下围绕交点 A 作立体旋转。当件 2 旋转时,钢球 1 在件 2 的 V 型槽内滑动,这样两个电机相互独立运动,互不干扰,不存在交叉耦合。由于交点 A 在电机的旋转过程中保持不动,即反射基点不动,所以此跟踪机构在原理上保证了反射基点不变的情况下能将激光束导向空间任意位置^[13]。

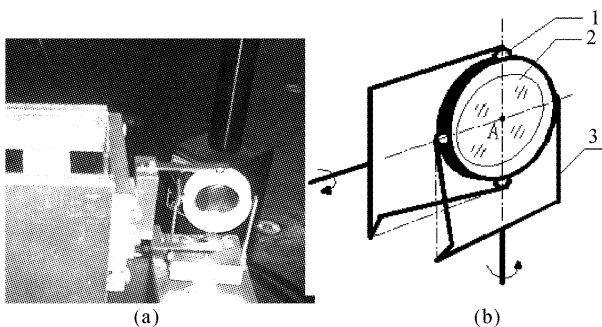


Fig. 3 Single mirror independent tracking mechanism.

(a) Photo; (b) Structure. 1: steel ball; 2: mirror; 3: pole

这种双轴跟踪转镜机构设计巧妙,结构简单,具

有重量轻、体积小、转动灵活、易于控制、动态跟踪性能好等一系列优点。为保证转镜转动过程中基点 A 稳定不变,必须要求所选用的电机转轴有很高的回转精度,并且要求安装精度较高。

4 跟踪测量系统目标靶镜

目前在干涉系统中广泛应用的光学逆反射器主要有角锥棱镜和猫眼逆反射器两种。与角锥棱镜相比,猫眼逆反射器具有接收角大、测量中心稳定(对入射光线方向不敏感)等优点,这也就决定了猫眼逆反射器将成为多路激光跟踪干涉系统的主流目标镜。猫眼逆反射器一般由两个不同半径的玻璃半球对心胶合在一起(图 4)。为使猫眼具有逆反射的特性,必须要求猫眼前半球的像方焦点落在后半球的球面上,并在后半球表面镀上反射膜。这样,对于任一近轴光线,经前半球聚焦后落在后半球的球面上,在后半球球面上发生反射,此时相当于从前半球的像方焦点处发出一束光,故出射光线平行于入射光线,即具有逆反射性。猫眼前后半球半径 r_1 、 r_2 和采用的玻璃折射率 n 之间符合如下关系式:

$$r_2 = r_1 / (n - 1), \quad (1)$$

由此式可见,当折射率 $n = 2$ 时,有 $r_2 = r_1$,这意味着此时猫眼可以加工成完整的球形。日本国家计量研究院采用折射率 $n = 1.9997$ 的光学玻璃制作了直径为 60 mm 的完整球形猫眼^[4];英国国家物理研究院采用 $n = 2 \pm 0.0001$ 的材料(TaDF44)制作了球形猫眼^[5]。这种球形猫眼应用于激光跟踪干涉系统时,精度指标大大优于双半球结构的普通猫眼。

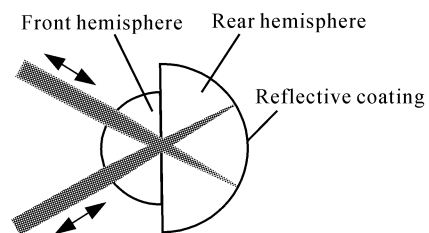


Fig. 4 Cat's eye retroreflector composed of two hemispheres

然而,式(1)只对近轴光线适用,实际上激光束不是一条理想几何直线(激光束直径为 6 mm),且猫眼球体半径不可能做得很大,这样完全按(1)式制作的猫眼将不是最优的。严格地说,除了通过猫眼球心的光线按原路返回外,其他所有偏离光轴的入射光线,经猫眼反射后,都存在一个发散角,影响返回光束的平行性。以返回光束的发散角最小为目

标,对双半球猫眼各项参量进行优化设计^[13]。图 5 给出了不同 r_1 值时,对应的最佳 r_2 数值(玻璃材料采用 ZF₆, $n=1.749708$)。由图可见,对于小于 5 m 的测量范围,制作 $r_1=25$ mm、 $r_2=33.2430$ mm、 $n=1.749708$ (ZF₆) 的双半球猫眼即可满足要求。此时最大发散角约为 $\phi=1 \times 10^{-4}$ rad,约为优化前的 1/4,这相当于在 5 m 远处只产生 0.5 mm 的横向位移,完全能保证激光干涉仪可靠工作。

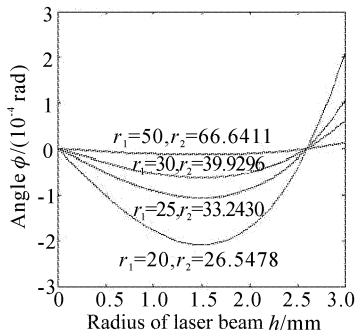


Fig. 5 The relation between the divergence angle and the radius of hemispheres (ZF₆)

猫眼实物如图 6。实验证明,这种猫眼的发散角大大小于普通猫眼,更适合于大范围的测量任务。

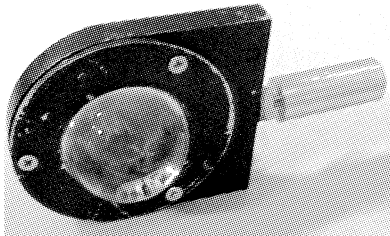


Fig. 6 The photo of cat's eye retroreflector

5 系统的布局和优化

四路激光跟踪三维坐标测量系统的测量精度在很大程度上依赖于系统的布局。系统的布局问题涉及到许多方面,包括测量时四路干涉仪的布局、测量区域的选择、自标定时基点、动点和初始动点的布局及其相互位置关系等。这些众多的因素使得系统布局优化问题变得相当复杂。至今为止,系统布局优化问题在国际上仍未得到解决。我们系统地研究了系统的布局优化问题,并首次提出了系统测量时的最佳布局和自标定时最优方案,较圆满地解决了系统布局优化问题^[14]。

研究系统布局优化问题的做法是,把系统的测量过程和自标定过程分开来考虑。首先研究测量时的最佳布局问题,得到系统的最佳测量布局,然后限

定 4 路激光跟踪干涉仪处于这一最佳测量布局下,反过来研究系统自标定的最优方案。

5.1 最佳测量布局

测量时的最优布局问题是:对三维空间某一被测点,4 路激光跟踪干涉仪如何布置才可以使干涉仪测量误差对该点的位置测量精度影响最小。这里仅讨论测量时的最佳布局问题,认为系统参量已知。

四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统是基于多边法测量原理的,即通过测量被测点到 4 个已知点的距离来确定该点的位置坐标。这与全球定位系统(GPS)定位原理完全一致。为研究测量布局问题,我们利用了导航学中用于评价定位精度的一个概念:位置精度衰减因子(Positional dilution of precision) β ^[15]。经过分析可知^[14],四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统对空间某一特定点的位置测量不确定度可以表示为

$$\sigma = \beta \cdot \sigma_1, \quad (2)$$

式中 σ_1 表示激光跟踪干涉仪的测量不确定度, β 为被测点的位置精度衰减因子。需要指出的是,激光跟踪干涉仪的测量不确定度与激光干涉仪的测量不确定度是两个不同的概念。激光跟踪干涉仪的误差源主要来自于跟踪转镜机构,而不是激光干涉仪本身。因此我们可以认为,四路激光跟踪干涉仪的测量不确定度相互独立并相等,与被测距离关系不大。在一定的被测距离范围内,可认为 σ_1 不变。正是在这个假设下,才有了上述关系。

由(2)式可知,位置精度衰减因子实际上就是误差放大因子。这样,系统测量布局优化问题就转化为求位置精度衰减因子 β 的极小值问题。 β 与被测点和 4 个基点的布局有关,若在某种布局下, β 取得最小值,我们就认为这种布局是最优的。通过建立相应的数学模型,并进行优化问题求解,最终可获得如下三种布局(对应的 $\beta=1.5$)^[14,15]:

第一种布局如图 7(a)所示。图中,4 个矢量 e_1 、 e_2 、 e_3 、 e_4 为被测点到基点方向的单位矢量,单位矢量端点分布在一个以被测点 O 为球心、1 为半径的球面上。任何两个矢量之间的夹角均为 $\theta=109.47^\circ$,矢量端点构成的几何图形为正四面体。显然这种布局要求猫眼接收角范围达到 360° ,但目前可用的双半球猫眼接收角最大只有 180° ,因此这种布局不可能实现。

第二种布局如图 7(b)所示。这种图形相当于图 7(a)中任何两个单位矢量取反的结果。图中,相邻两矢量之间的夹角均为 $\theta=70.53^\circ$,相对两矢量

(e_1 与 e_3 、 e_2 与 e_4) 之间的夹角均为 109.47° 。矢量端点与被测点组成的几何图形为等腰五面体,该五面体每个侧面的顶角均为 70.53° ,底面为正方形。显然 4 个单位矢量端点落在同一平面内。考虑到自标定对布局的限制,即 4 个基点不能落在同一平面内^[11],这种布局也不可行。

第三种布局如图 7(c) 所示。这种图形相当于

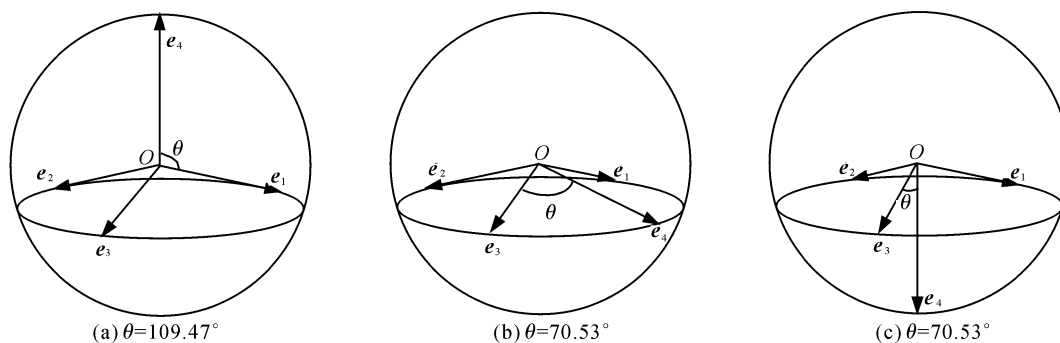


Fig. 7 Three types of geometry

5.2 最佳测量布局下的系统自标定

影响系统自标定精度的因素有:1) 基点的布局;2) 动点的布局和数目;3) 初始动点的位置;4) 自标定算法。限定 4 个基点处于最佳布局的条件下,以所有待标定的系统参量的标准差的平方和作为评价一种布局优劣的标准,通过大量的计算机仿真,深入研究了各个因素对系统自标定的影响规律,最后综合得到了系统自标定时应遵循的一些指导性原则^[14]。按照这些原则,我们直接给出系统自标定的最优方案,基点、动点以及初始动点之间的相互位置关系如图 8 所示。图中 4 个基点的布局符合最佳测量布局,其中 B_1 、 B_2 、 B_3 构成一等边三角形, B_4 位于该等边三角形的正下方。为完成系统自标定而采用的 25 个动点位于等边三角形的正上方某一正方形区域内,该正方形与等边三角形平行。25 个动点按 5×5 的网格均布。初始动点 P_0 远离动点所在平面,并位于正方形区域正上方。当基点 B_1 、 B_2 、 B_3 构成的等边三角形边长为 3000 mm 时,相应的有关参量如下:基点 B_4 到等边三角形的距离约为 800 mm ;初始动点 P_0 到等边三角形的距离约为 1500 mm ;25 个动点所在的正方形到等边三角形的距离约为 500 mm ;动点所在的正方形区域大小约为 $3500 \text{ mm} \times 3500 \text{ mm}$ 。当等边三角形的边长发生变化时,相应的这些参量可按比例缩小或放大。

计算机仿真表明,在上述给定的自标定最优方案下,四路激光跟踪三维坐标测量系统自标定的精度与激光跟踪干涉仪的测量精度相当,系统参量的

图 7(a) 中任何一个单位矢量取反的结果。图中矢量 e_1 、 e_2 、 e_3 之间的夹角均为 109.47° ,而它们与矢量 e_4 之间的夹角均为 $\theta = 70.53^\circ$ 。矢量端点组成的几何图形为一等腰四面体,其底面为等边三角形。这种布局既不受猫眼接收角范围的限制,又满足自标定对布局的要求,因此,这种布局就是系统最佳测量布局,而最佳测量点就在球心处。

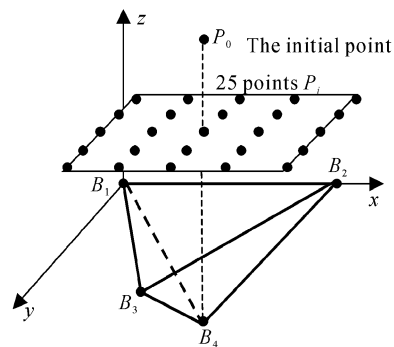


Fig. 8 The optimal arrangement for system self-calibration 自标定误差最大不超过激光跟踪干涉仪误差的 3 倍(在采用 25 个动点数的情况下)。这在许多场合能满足高精度测量的要求。

6 实验和结论

实验在天津市三峰客车有限公司进行,采用的三坐标测量机为意大利的 COORD3. 60. 25. 20 型数控 CMM,测量范围为 $6000 \text{ mm} \times 2500 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$ ($X \times Y \times Z$),空间测量不确定度为 $(8 + 12L/1000) \mu\text{m}$,其中 L 为被测值(mm)。三坐标测量机的精度不是很高,但目前我们研制的实验装置并不完善,测量精度较低,通过与 CMM 的对比实验,在一定程度上还是能够说明问题的。

6.1 单路激光跟踪干涉仪测长实验

实验方案如图 9 所示,常规激光干涉仪 HP5528A 被改造成激光跟踪干涉仪,跟踪安装在三

坐标测量机上的目标镜猫眼的运动,并测出猫眼运动过程中相对于跟踪转镜中心 O 的长度变动量 d_i 。猫眼安装在三坐标机上,限定其在 $500\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的平面范围内运动,测量点大致按网格点分布,共给出 30 个测量点。

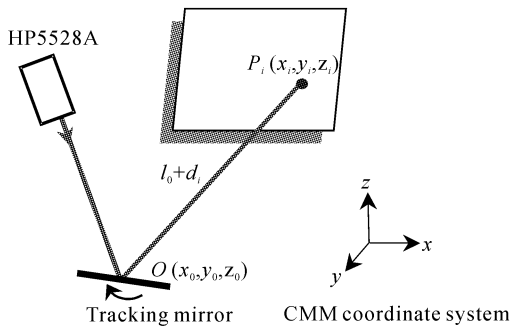


Fig. 9 Experimental setup for testing performance of laser tracking interferometer

图 9 中, P_i 代表猫眼处于各个不同位置。记 P_0 点表示猫眼的初始位置,当猫眼位于 P_0 位置时,将干涉仪读数清零。定义 P_0 点到跟踪转镜中心 O 点的距离为初始长度 l_0 。猫眼移动到 P_i 位置时,激光跟踪干涉仪的读数为 d_i 。记 O 点在 CMM 坐标系下的三维坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,而 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 的三维坐标可直接由 CMM 给出。根据两点距离公式,有

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = l_0 + d_i$$

$$i = 1, 2, \dots, 30$$

式中未知数只有基点 O 的三维坐标 (x_0, y_0, z_0) 和初始长度 l_0 ,可按最小二乘原理进行求解。求得这 4 个参量后,可按下式估算跟踪干涉仪的误差大小:

$$\delta_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - (l_0 + d_i).$$

实验结果表明^[14],在距跟踪干涉仪约 700 mm 远处 $500\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的平面范围内,激光跟踪干涉仪最大测长误差为 0.0186 mm,标准差为 0.0103 mm。这里包括了三坐标测量机的测量误差。实验验证了激光跟踪干涉仪的三维跟踪能力,能够对速度 500 mm/s 的目标镜平稳跟踪无丢光现象发生,并对跟踪干涉仪测长不确定度做出了评价。跟踪干涉仪测量误差主要来源于跟踪转镜基点变动造成的误差。

6.2 四路激光跟踪干涉仪三维坐标测量实验

利用四套 HP5528A 干涉仪构成四路激光跟踪干涉仪,这四路激光跟踪干涉仪同时跟踪安装在三坐标测量机上的目标靶镜猫眼的运动。当猫眼移动多个位置后,由于干涉仪的读数便可以标定出系统参量。在确定系统参量后,就可以对猫眼的三维位置

坐标进行测量,该测量值与三坐标测量机的读数进行对比,以评价系统的三维坐标测量精度。

由于受猫眼实际接收角范围(约为 $\pm 60^\circ$)和跟踪机构的跟踪角范围的限制(约为 50°),系统布局并没有完全按照自标定最优方案(图 8)给定的参量进行布局,而是适当地加大了动点所在平面到基点所在区域的距离。

实验过程如下:首先按最佳测量布局放置好四路跟踪干涉仪的位置(实际上是跟踪转镜的位置),调节干涉仪光路,使四路干涉仪同时跟踪上目标靶镜猫眼,并能够产生干涉。然后控制三坐标测量机移动猫眼到初始动点 P_0 位置,此时将 4 路干涉仪的读数清零。接着,移动猫眼到动点所在的平面,锁定坐标机的 X 轴,让动点在一固定平面内运动。移动猫眼到各个网格点位置,分别记录下 4 路干涉仪的读数。当动点数等于或大于 9 个时,便可由干涉仪读数完成系统自标定。实验中采用了 33 个动点数。系统标定后便可进行实际测量,三维坐标测量值经过坐标变换后与三坐标测量机的读数进行对比,以评价系统的测量精度。图 10 给出了四路激光跟踪干涉测量系统实验照片。

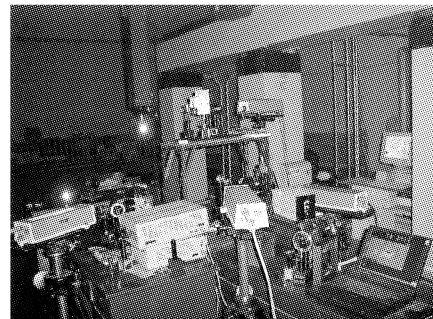


Fig. 10 Experimental setup of four-beam laser tracking interferometer system for three-dimensional coordinate measurement

实验结果表明^[14],在距跟踪干涉仪 800 mm 远处 $700\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ 平面范围内,系统三维坐标测量不确定度为 0.0620 mm,测量点位置误差平均值为 0.0299 mm。说明所提出的系统测量原理与自标定方法可行,但测量精度还有待于提高。实验验证了系统的自标定能力和对三维目标点的跟踪测量能力。

为进一步完善系统,我们目前正在着手以下几方面的工作:

1) 改进激光跟踪干涉仪的控制方式和跟踪转镜机构的装配方式,保证系统在大范围内的快速跟

踪能力和跟踪转镜基点的稳定性。2) 增大目标靶镜的实用接收角范围以及激光跟踪干涉仪的跟踪角范围, 以实现系统合理布局。3) 对光学系统进行集成化、小型化, 使用光纤作为光路传输的媒介, 减少光能损失, 提高系统工作可靠性。4) 进一步探讨测量系统的误差源和误差传递规律, 进行误差分离和补偿, 实现对系统误差的实时修正, 提高测量精度。

感谢天津三峰客车有限公司提供了三坐标测量机; 感谢天津大学机械学院和天津职业技术师范学院提供了激光干涉仪。

参 考 文 献

- 1 Lau K, Hocken R, Haight W. Automatic laser tracking interferometer system for robot metrology. *Precision Engng.*, 1986, **8**(1):3~8
- 2 Mayer J R R, Parker G A. A portable instrument for 3D dynamic robot measurement using triangulation and laser tracking. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 1994, **10**(4):504~516
- 3 Zhuang H, Li B, Roth Z S *et al.*. Self-calibration and mirror center offset elimination of a multi-beam laser tracking system. *Robotics and Autonomous Systems*, 1992, **9**:255~269
- 4 Hughes E B, Wilson A, Peggs G N. Design of a high-accuracy CMM based on multi-lateration techniques. *CIRP Annals*, 2000, **49**(1):391~394
- 5 Nakamura O, Goto M. Four-beam laser interferometry for three-dimensional microscopic coordinate measurement. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(1):31~36
- 6 Takatsuji T, Goto M, Kurosawa T *et al.*. The first measurement of a three-dimensional coordinate by use of a laser tracking interferometer system based on trilateration. *Measurement Science and Technology*, 1998, **9**(1):38~41
- 7 Liu Yongdong, Wang Jia, Hu Zhaohui *et al.*. Laser tracking system for coordinate measurement of moving target by length-measured method. *Optical Instruments* (光学仪器), 2001, **23**(3):12~16 (in Chinese)
- 8 Wang Jia, Hu Zhaohui, Liu Yongdong *et al.*. Experimental research on laser tracking virtual coordinate measurement system and self calibration method. *Optical Technique* (光学技术), 2001, **27**(5):447~450 (in Chinese)
- 9 Zhang Guoxiong. *Coordinate Measuring Machines* (三坐标测量机). Tianjin: Tianjin University Press, 1999 (in Chinese)
- 10 Zhang Guoxiong. Measurement and Information Technology. *Engineering Science* (中国工程科学), 2000, (3):64~66 (in Chinese)
- 11 Takatsuji T, Koseki Y, Goto M *et al.*. Restriction on the arrangement of laser trackers in laser trilateration. *Measurement Sci. Technol.*, 1998, **9**(8):1357~1359
- 12 Li XingHua, Zhang Guoxiong. Design of a 3D tracking mechanism used in laser tracking system. *Metrologic Technique* (计量技术), 2001, (9):5~7 (in Chinese)
- 13 Lin Yongbing, Zhang Guoxiong, Li Zhen. Design and optimization of a cat's-eye retroreflector. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(10):1245~1250 (in Chinese)
- 14 Lin Yongbing. *Optimal Design of Four-Beam Laser Tracking Interferometric Flexible Coordinate Measurement System*. [Dr Thesis], Tianjin University, Tianjin, 2002 (in Chinese)
- 15 Kihara M, Okada T. A satellite selection method and accuracy for the global position system. *Navigation*, 1984, **31**(1):8~20

Four-Beam Laser Tracking Interferometer System for Three-Dimensional Coordinate Measurement

Zhang Guoxiong¹ Lin Yongbing^{1,2} Li Xinghua¹ Li Zhen¹

1 State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072
2 Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

(Received 29 July 2002; revised 19 September 2002)

Abstract: The four-beam laser tracking interferometer system for three-dimensional coordinate measurement is introduced including the principle of measuring system, the redundancy technique, laser tracking interferometer, a new type of target retroreflector, the optimal arrangement of system and the experimental results. The future work is also pointed out. The experimental results show that four-beam laser tracking interferometer system has achieved an accuracy of 0.0620 mm on a 700 mm×600 mm plane located 800 mm away from the trackers.

Key words: laser tracking interferometer; multi-lateration; coordinate measurement; redundancy; optimization; cat's eye retroreflector; arrangement