

三维光学测量系统的内部符合精度评定

鲁萌萌¹, 陈小娟²

(¹ 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221008;

² 西安煤航信息产业有限公司测绘工程分公司, 陕西 西安 710054)

摘要 三维光学面扫描系统和点测量系统满足反求逆向设计需求, 适合产品在线质量检测。系统配合紧密, 造价远远低于国外相应产品, 对制造业和数字近景工业摄影测量发展起着重要作用。本文介绍了三维光学面扫描系统和点测量系统的内部符合精度评定, 评定采用直接量测距离, 即由距离中误差计算点位误差的方法。三维光学面扫描系统和点测量系统的精度评定对整套系统的使用具有一定的指导意义。

关键词 光学三维测量 精度评定 内部符合精度

中图分类号: P207

文献标识码: A

文章编号: 1672- 4097(2011)01- 0006- 05

随着中国制造业的快速发展, 许多行业的产品大量采用了中大型和复杂曲面工件, 特别是在汽车、飞机、船舶、军工、风电等行业应用中比较普遍。目前, 对于小于 1 m 长度工件的三维尺寸质量检测基本不存在问题, 检测多采用三坐标测量机、关节臂、激光扫描等完成。而对于 1 m~ 30 m 长度的工件, 如风力发电叶片、汽车模具、汽车覆盖件、飞机部件、船舶部件、大型机械设备等, 传统方法所采用的龙门式三坐标机、激光跟踪仪、关节臂、经纬仪等, 激光跟踪仪、关节臂、经纬仪等设备存在繁琐的移站问题, 且测量设备昂贵, 一般企业无法承受。而很多中大型工件曲面日益复杂, 不但要测关键点三维尺寸, 还要测量曲面尺寸, 所以目前中大型工件存在大量的三维全尺寸质量检测难题, 迫切需要解决^[1]。

国内外真正能够独立研发在线产品三维质量检测系统的极少, 西安交通大学的工业摄影测量技术和面扫描技术都是自主研发, 不但满足反求逆向设计需求, 更适合产品在线质量检测, 系统配合紧密, 造价远远低于国外相应设备。

1 内部符合精度评定

在相同条件下对同一被测量对象进行连续多次测量, 结果之间的一致性反映仪器的内部符合精度。内部符合精度的评定包括三维光学点测量和三维光学面扫描两个系统的内容。三维光学点测量系统评定内容是单点精度评定; 三维光学面扫描系统评定内容包括点云点位精度、点云间距测定和多幅拼接时的点云精度, 其中三维光学面扫描系统又分为两种测量幅面。

2 单点精度评定

2.1 评定方案设计

三维光学点测量系统是用一个摄影测量相机从不同观测角度拍摄被测物体的多幅图片, 用测量软件计算出所有相关的目标点, 并自动计算这些数码图片中粘贴标志点和物体特征点的三维坐标。试验测定单点点位精度时, 需要多次测量的数据, 而软件每次测定计算的坐标都处于假定坐标系中, 不便比较。所以需利用多次测量固定点之间的距离做比对, 由点位误差和距离误差之间的关系, 计算系统的点位精度。

2.2 试验数据处理

内部符合精度评定, 点位误差和距离误差的关系计算如下。

以中误差作为衡量精度的指标。方差 σ^2 是真误差平方 (Δ^2) 的数学期望。则中误差计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{E(\Delta^2)} \quad (2-1)$$

或者说方差 σ^2 是 $\frac{[\Delta\Delta]}{n}$ 的极限值, 这是理论上的数值, 实际上观测个数 n 总是有限的, 由有限个观测值的真误差只能得到方差和中误差的估值, 方差 σ^2 和中误差 σ 的估值分别用符号 $\hat{\sigma}^2$ 和 $\hat{\sigma}$ 表示, 则:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{[\Delta\Delta]}{n} \quad (2-2)$$

在不需要强调“估值”的情况下, 即将“中误差的估值”称为“中误差”。

实际试验中应用的公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2-3)$$

其中: x_i 为每次的观测值,
 \bar{x} 为观测值的数学期望,
 n 为观测次数。

两点 $M(x_m, y_m, z_m)$ 和 $N(x_n, y_n, z_n)$, MN 之间的距离为 S , 点 M 、 N 的点位中误差都为 σ , 距离中误差为 σ_s 。

由距离中误差 σ_s 求得点位中误差 σ 的过程如下:

$$s^2 = (x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2 + (z_m - z_n)^2 \quad (2-4)$$

对上式全微分:

$$2s ds = 2(x_m - x_n) dx_m - 2(x_m - x_n) dx_n + 2(y_m - y_n) dy_m - 2(y_m - y_n) dy_n + 2(z_m - z_n) dz_m - 2(z_m - z_n) dz_n \quad (2-5)$$

用协方差传播定律得:

$$s^2 \sigma_s^2 = (x_m - x_n)^2 (\sigma_x^2 + \sigma_n^2) + (y_m - y_n)^2 (\sigma_y^2 + \sigma_n^2)$$

$$+ (z_m - z_n)^2 (\sigma_z^2 + \sigma_n^2) \quad (2-6)$$

假设坐标点在各个坐标方向的中误差均相等, 设为 σ , 再将式(2-4)代入式(2-6), 则:

$$\sigma_s^2 = 2\sigma^2 \quad (2-7)$$

又由于:

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 = 3\sigma^2 \quad (2-8)$$

因此得:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma \quad (2-9)$$

即距离中误差为 $\sqrt{\frac{2}{3}}$ 倍的点位误差。

在地面上布设标志点, 并利用一些辅助性工具避免全部平面铺设。测量以下点之间的距离: 8—9、40—54、30—34、38—37、28—50 和 66—54, 观测共 14 组观测值。

2.3 评定结果

表1 点测量系统点位间距离及中误差(mm)

组次	8—9	40—54	30—34	38—37	28—50	66—54
1	925.427	801.979	824.491	1333.582	897.663	1049.09
2	925.585	802.078	824.594	1333.661	897.732	1049.172
3	925.603	802.063	824.505	1333.631	897.864	1049.19
4	925.584	802.053	824.527	1333.58	897.826	1049.249
5	925.584	802.069	824.509	1333.533	897.801	1049.136
6	925.615	802.075	824.558	1333.674	897.81	1049.176
7	925.628	802.088	824.618	1333.699	897.808	1049.222
8	925.613	802.077	824.523	1333.557	897.769	1049.049
9	925.627	802.097	824.498	1333.494	897.793	1049.031
10	925.587	802.057	824.495	1333.578	897.827	1049.117
11	925.625	802.034	824.523	1333.621	897.856	1049.165
12	925.613	802.004	824.489	1333.535	897.782	1049.044
13	925.621	802.048	824.489	1333.472	897.808	1049.059
14	925.636	802.103	824.615	1333.672	897.785	1049.172
中误差	0.051953	0.034517	0.046525	0.070217	0.050692	0.069893

从数据结果所得, 两点间的距离中误差最大为 0.07 mm, 最小为 0.05 mm。距离中误差为倍的点位误差, 可得点位中误差为 0.086 mm~ 0.061 mm。仪器标称单点点位精度为 0.03 mm~ 0.1 mm, 而仪器基本满足标称精度要求。

3 点云点位精度评定

三维光学面扫描系统的点位精度包括点云点位精度、点云间距测定和多幅拼接时的点云精度。而三维光学面扫描系统又分为两种测量幅面, 分别对这两种幅面进行试验。

3.1 400 mm* 900 mm 扫描幅面(小幅面)

试验步骤: 在扫描幅面的范围内布设不规则的标志点, 仪器对标志点进行多次扫描, 再对每次扫描的标志点, 固定距离进行量测。

点云点位测量布设如图 1, 观测情况如图 2 和图 3。对图中 1—2、3—4、5—6、2—7、8—9、10—11 和 12—13 七条线的长度进行多次的扫描的距离和距离中误差求取, 测量及计算结果如表 2。

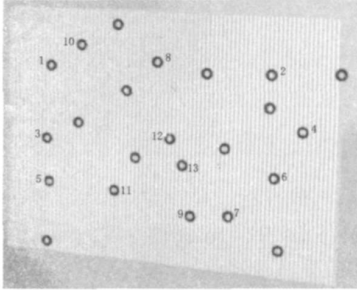


图 1 小幅面点位精度测量布设图

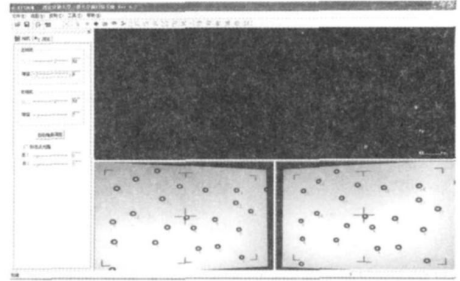


图 2 光学面扫描系统小幅面观测图

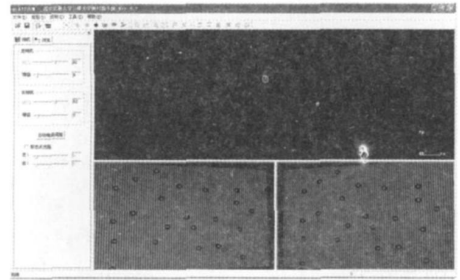


图 3 面扫描系统小幅面点位测量观测图(扫描中)

表 2 面扫描系统点位间距及中误差(m m)

组次	1—2	3—4	5—6	2—7	8—9	10—11	12—13
1	314.836	368.102	328.816	199.539	213.547	207.661	
2	314.83	368.095	328.808	199.536	213.539	207.656	39.703
3	314.825	368.093	328.809	199.532	213.538	207.656	39.698
4	314.827	368.091	328.808	199.531	213.539	207.654	39.699
5	314.824	368.085	328.803	199.532	213.535	207.653	39.698
6	314.823	368.086	328.805	199.532	213.537	207.655	39.699
7	314.828	368.087	328.808	199.533	213.538	207.653	39.7
8	314.826	368.088	328.807	199.531	213.538	207.656	39.701
9	314.826	368.087	328.807	199.531	213.539	207.656	39.698
10	314.826	368.086	328.805	199.532	213.54	207.655	39.699
11	314.82	368.087	328.81	199.529	213.542	207.657	39.696
12	314.826	368.087	328.809	199.53	213.539	207.654	39.698
13	314.826	368.085	328.808	199.53	213.541	207.654	39.698
14	314.829	368.089	328.811	199.531	213.543	207.652	39.696
15	314.83	368.09	328.811	199.532	213.543	207.655	39.699
中误差	0.00271	0.003	0.00229	0.00165	0.00227	0.00144	0.001816

从计算结果可知, 两点间的距离中误差最大为 0.003 mm, 最小为 0.0014 mm。距离中误差为倍的点位误差, 可得点云点位中误差为 0.0037 mm ~ 0.0017 mm。仪器标称点云点位精度不大于 0.05 mm, 仪器可以满足标称精度要求。

3.2 1200 mm* 900 mm 扫描幅面(大幅面)

大幅面的试验操作步骤和小幅面相似。点云点位测量布设情况如图 4, 模型观测情况如图 5。对图中 1—2、3—4、5—6、1—3、2—4 和 6—7 六条线的长度进行 8 次扫描的距离和距离中误差求取, 求取结果如表 3 所示。

表 3 幅面模式点位精度评定表(m m)

组次	1—2	3—4	5—6	1—3	2—4	6—7
1	619.225	619.944	296.229	622.162	618.721	296.722
2	619.226	619.955	296.237	622.188	618.679	296.733
3	619.218	619.943	296.245	622.192	618.682	296.739
4	619.231	619.964	296.238	622.192	618.695	296.728
5	619.23	619.95	296.235	622.184	618.711	296.731
6	619.229	619.941	296.246	622.178	618.69	296.728
7	619.224	619.953	296.235	622.186	618.712	296.729
8	619.239	619.958	296.238	622.199	618.697	296.725
中误差	0.006135	0.008036	0.005515	0.011231	0.015042	0.005153

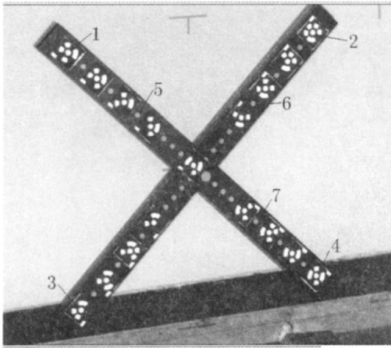


图 4 大幅面模式仪器点位精度评定

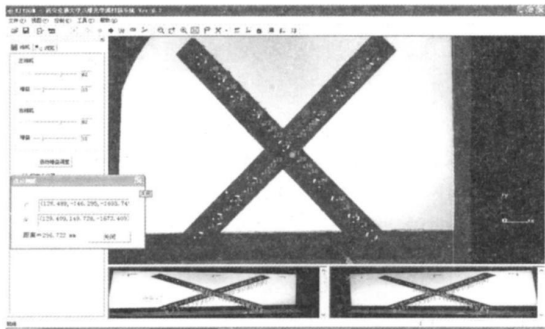


图 5 大幅面模式仪器点位距离测量图

从计算结果可知, 两点间的距离中误差最大为 0.015 mm, 最小为 0.005 mm。距离中误差为倍的点位误差, 可得点云点位中误差为 0.018 mm—0.006 mm, 仪器标称点云点位精度不大于 0.05 mm, 仪器可以满足标称精度要求。

4 点云间距测量精度

4.1 400 mm* 900 mm 扫描幅面(小幅面)

对标准幅面的点云间距进行了测量, 经多次测量, 在点云的各个区域取多个点云间距进行测量,

得到其间距为: 0.355 mm、0.342 mm、0.425 mm、0.436 mm、0.375 mm、0.393 mm、0.369 mm; 对点云间距的要求应不大于 1.0 mm, 在标准幅面下, 仪器精度能满足设计要求。

4.2 1 200 mm* 900 mm 扫描幅面(大幅面)

对大幅面的点云间距进行了测量, 在各个区域取多个点云间距进行测量, 得到其间距为: 1.031 mm、1.002 mm、1.005 mm、1.044 mm、0.989 mm、0.998 mm、0.993 mm、1.047 mm、和 1.046 mm。对点云间距的要求应不大于 1.0 mm, 在大幅面下, 仪器精度基本能满足设计要求。

5 多幅拼接点云精度

5.1 400 mm* 900 mm 扫描幅面(小幅面)

点云拼接的精度测定采用横向拼接和竖向拼接两种方式, 多位于不同测量幅面的点, 测定其距离, 评定出精度。共对拼接后位于不同幅面上的 6 组点间距离进行了八次实验, 得到的点间距离和距离中误差如表 4。

从表 4 可以看出, 拼接后两点间的距离中误差最大为 0.0093 mm, 最小为 0.0011 mm。距

离中误差为 $\sqrt{3}$ 倍的点位误差, 可得点云点位中误差为 0.0139 mm~ 0.0013 mm, 仪器标称点云拼接点位精度不大于 0.05 mm, 仪器可以满足标称精度。

5.2 1 200 mm* 900 mm 扫描幅面(大幅面)

对大幅面扫描点云同样进行了拼接精度评定, 共对拼接后位于不同幅面上的 3 组点间距离进行了 8 次测量, 得到的点间距离和距离中误差如表 5 所示。

表 4 面扫描系统拼接点间距及中误差(mm)

	1—2	3—4	5—6	7—8	9—10	11—12
1	493.742	485.066	510.325	341.006	341.445	346.748
2	493.756	485.081	510.301	341.005	341.444	346.759
3	493.759	485.072	510.332	340.996	341.424	346.73
4	493.749	485.085	510.308	340.997	341.445	346.757
5	493.767	485.072	510.329	341	341.431	346.73
6	493.762	485.094	510.303	340.997	341.443	346.742
7	493.766	485.069	510.329	341.006	341.431	346.732
8	493.749	485.08	510.293	341.006	341.441	346.751
中误差	0.00894	0.009349	0.015372	0.004565	0.008124	0.01194

表 5 大幅面拼接点云间距离及中误差(mm)

点号	1—2	3—4	5—6
1	1121.052	1071.607	833.529
2	1120.956	1071.524	833.453
3	1120.957	1071.517	833.522
4	1120.931	1071.516	833.498
5	1120.921	1071.588	833.492
6	1121.027	1071.526	833.495
7	1121.014	1071.516	833.498
8	1120.962	1071.538	833.465
中误差	0.047524	0.035681	0.025545

从表 5-2 可以看出, 拼接后两点间的距离中误差最大为 0.048 mm, 最小为 0.026 mm。距离中误差为 $\sqrt{\frac{2}{3}}$ 倍的点位误差, 可得点云点位中误差为 0.059 mm ~ 0.032 mm, 仪器标称点云拼接点位精度不大于 0.05 mm, 仪器可以满足标称精度要求。

参考文献

- 1 邵双运. 光学三维测量技术与应用[J]. 现代仪器, 2008(3): 10-13
- 2 梁晋, 肖振中, 刘建伟等. 大型飞机三维光学快速测量建模关键技术研究[J]. 中国机械工程, 2009(3): 648-656
- 3 姚吉利, 韩保民, 杨元喜. 罗德里格矩阵在三维坐标转换严密解算中的应用[J]. 武汉大学学报, 2006(12): 1094-1096
- 4 葛永慧. 测量平差[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005
- 5 张华海, 徐邵铨, 杨志强等. GPS 测量原理及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004
- 6 于成浩, 柯明, 赵振堂. 激光跟踪仪测量精度的评定[J]. 测绘工程, 2006(6): 39-42
- 7 刘科利. 北京 54 和西安 80 坐标系下的坐标转换及精度分析在 Excel 中的实现[J]. 勘察科学技术, 2008(5): 24-27
- 8 马兴安. 光电测距仪测距误差分析及精度评定. 湖南水利水电, 2004(3): 14-15
- 9 王佩军, 徐亚明. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007
- 10 高井祥, 肖本林, 付培义等. 数字测图原理与方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005

Internal Accord Accuracy Assessment of 3D Optical Measuring System

LU Meng-meng¹, CHEN Xiao-juan²

(¹ Chinese University of Mining and Technology School of Environment Science and Spatial Informatics, Xuzhou Jiangsu 221008, China; ² Xi'an ARSC Information Industry Limited Surveying & Mapping Engineering Branch, Xi'an Shanxi 710054, China)

Abstract XJTUOM and XJTUDP could meet the demand for reverse design and could suitable for testing the quality of online products. They are cooperating with each other closely and are costing less than foreign systems, which are playing an important role in manufacturing development and the digital close range photogrammetric industry development. This paper introduces the internal accord accuracy. In the part of internal accord accuracy, it uses the method of measuring the distance directly, and calculates the positional accuracy by the mean square error of distance. Accuracy assessment of the XJTUOM and XJTUDP could as directive significance for the using of entire system.

Key words optical 3D measurement; accuracy assessment; internal accord accuracy