

文章编号 1004-924X(2008)07-1236-05

大尺寸测量中多传感器的融合

张福民, 曲兴华, 叶声华

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了实现大型工件的几何量测量,建立了多测量站的测量网络,研究了相应的多传感器信息融合方法以充分融合多测量站的信息。基于奇异值分解的解析形式将多测量站的测量信息进行空间数据配准,统一到全局坐标系下。再建立各测量站的测量模型,得到各测量站的协方差矩阵和雅可比矩阵,按矩阵加权线性最小方差最优融合准则,求取权重矩阵,对多测量站的测量数据有效融合。仿真实验给出了某一空间的平均测量结果,全站仪、经纬仪测量系统和激光跟踪仪的测量误差分别为 0.745 1 mm、0.044 9 mm 和 0.032 7 mm,融合测量误差降低为 0.012 8 mm。最后,将该方法实际应用于隧道构件的测量网络,理论、仿真和实际实验都验证了本文提出的融合规则可有效提高融合精度,融合精度优于各局部精度,增强了测量网络的冗余性和可靠性。

关键词: 大尺寸测量;多传感器融合;激光跟踪仪;最小方差

中图分类号: TB92;TP391 **文献标识码:** A

Multiple sensor fusion in large scale measurement

ZHANG Fu-min, QU Xing-hua, YE Sheng-hua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to realize the geometric measurement of large scale workpiece, a measuring net for multiple measurement stations was established. With the aim of the information fusion of multiple measurement station, a relevant multi-sensor information fusion method was researched. The spatial data of multiple measurement stations were registrated based on singular value decomposition to unify as global coordinate system. Then, the measuring model of each measurement station was established to get its covariance matrix and Jacobian matrix, so the weight matrix was obtained by the optimum fusion criterion of matrix weighting linearity minimum variance for fusing effectively measured data of multiple measurement station. A simulation experiment was carried out and the average measuring results were given as follow, the measurement errors of total station, theodolite and laser tracker are 0.745 1 mm, 0.044 9 mm and 0.032 7 mm, respectively, and the fusion measurement error is 0.012 8 mm. Finally, the fusion method was applied to measure a net in tunnel component. The validity of fusion criterion for precision is proved by theory, simulation and practical experiments, and the fusion precision is superior to each partial precision.

Key words: large scale measurement; multiple sensor fusion; laser tracker; minimum variance

收稿日期:2007-11-27;修订日期:2008-01-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50575158);全国博士学位论文作者专项资金资助项目(No. 200537)

1 引言

随着国家经济的发展和先进制造水平的提高,航空、航天、造船、涡轮机、发电机等领域需要大量大型几何量测量技术作为技术支撑,目前一般采用经纬仪测量系统、摄影测量系统和激光跟踪仪等适于大尺寸测量的仪器^[1]。当只用一个站点测量时,站点就需要设置的较远,直接导致测量精度下降^[2-3]。另外,当工件尺寸超过仪器测量范围,或由于通视性致使无法测量隐藏点时,一台仪器往往不能测量全部工件特征。

多传感器信息融合技术已应用于多个领域,如 Basir 融合振动、声音、压力和温度等信息,采用 D-S 证据融合规则诊断发动机故障^[4]; Acerbi-Junior 利用小波变换实现多传感器图像融合^[5]; Ruhm Karl H 利用传感器融合组建传感器网络^[6];此外,将多传感器信息融合应用于军事部署、遥感、微传感器和智能传感器等领域^[7-9]也多有实例。在大尺寸测量领域应用多传感器融合有着越来越明显的优势。多台仪器组成测量网融合测量不仅可以扩大测量范围,更重要的是提高了冗余性、可靠性和测量精度。各测量系统在测量范围、精度、速度和成本等属性上有很大不同,冗余测量可以充分选用测量精度高的部件,多种传感器类型信息互补,优化配置,使测量任务达到最优化。例如,激光跟踪仪的测距单元精度较高,经纬仪或全站仪的测角精度高,充分融合两者的信息即可以提高测量精度。张国雄、Hanqi Zhuang 和 Defen Zhang 等利用激光跟踪仪测距单元精度高的优点,研究了多路激光跟踪测量系统^[10]。斯坦福直线加速器中心和上海光源工程则在加速器准直测量工程中组合应用激光跟踪仪、全站仪和水准仪等仪器。目前已经出现了一些基于组合机制的测量产品,如 FARO 公司组合了激光跟踪仪和关节式三坐标测量机,以测量隐藏点和提高测量精度。API 公司也在激光跟踪仪的配套软件中加入了融合算法。但目前的研究多停留在机械组合扩大范围,仍未充分挖掘各自的测量信息加以融合。本文研究了有效的多传感器融合方法,充分融合多站点测量数据,以提高大尺寸测量精度。

2 数据空间配准

由于各传感器空间位置的差异,导致信息描述空间各不相同,每个测量站点的测量数据均在各自定义的坐标系下,因此必须在融合前将传感器数据映射到同一参考空间,将测量坐标系统一到全局坐标系。一般可以选择其中一个站点的坐标系为全局坐标系,将不同坐标系下的数据做空间配准^[11]。以图 1 所示的一个典型大尺寸测量网络为例,它包括激光跟踪仪、经纬仪和关节式测量臂等 3 个测量仪器。以激光跟踪仪测量站为全局坐标系,则需将其它两个测量站的测量数据配准到该全局坐标系下。

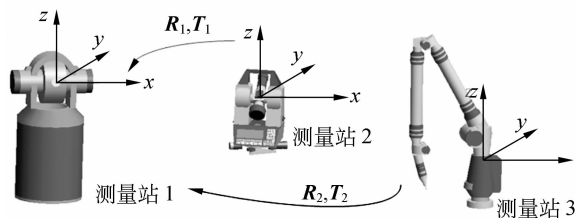


图 1 多测量站的坐标系转换

Fig. 1 Coordinate registration of multi measurement stations

坐标转换方程为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{M}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{F} = (x_w \ y_w \ z_w \ 1)^T$ 为全局坐标系下的数据, $\mathbf{M} = (x \ y \ z \ 1)^T$ 为局部坐标系下的数据, \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{T} 为平移向量。

本文采用基于奇异值分解的配准算法。在最优配准时,两组点应有相同的重心。因此,先将两组坐标数据重心化,这样可以将未知的平移向量 \mathbf{T} 从函数中分离出去,先求旋转矩阵 \mathbf{R} 。

两组坐标的重心分别为:

$$\bar{\mathbf{F}} = \frac{\sum \mathbf{F}}{n}, \bar{\mathbf{M}} = \frac{\sum \mathbf{M}}{n}, \quad (2)$$

重心化后的坐标分别为:

$$\mathbf{F}_C = \mathbf{F} - \bar{\mathbf{F}}, \mathbf{M}_C = \mathbf{M} - \bar{\mathbf{M}}. \quad (3)$$

则目标函数可写为:

$$\sum \| \mathbf{F}_C - \mathbf{R} \mathbf{M}_C \|^2 = \sum (\mathbf{F}_C^T \mathbf{F}_C + \mathbf{M}_C^T \mathbf{M}_C - 2 \mathbf{F}_C^T \mathbf{R} \mathbf{M}_C). \quad (4)$$

目标函数最小化等价于 $F_C^T R M_C$ 最大化。令 $H = \sum M_C F_C^T$ ，则等价于 $\text{Trace}(RH)$ 最大化。其中 Trace 是矩阵对角线元素求和算子。

求 H 的奇异值分解：

$$H = U \Lambda V^T, \tag{5}$$

则最优旋转矩阵

$$R = V U^T, \tag{6}$$

最后求解平移向量：

$$T = F_C - R \cdot M_C. \tag{7}$$

利用式(6)和式(7)求出的最优旋转矩阵和平移向量，就可将每个测量站的数据都配准到全局坐标系下，再按下面的融合规则融合测量信息。

3 数据融合规则

数据融合规则有多种方式，本文采用按矩阵加权线性最小方差最优融合准则。

一般每个测量站都是非线性传感模型。设 $\theta_i \in \mathbf{R}^n$ 作为第 i 个传感器的测量数据， n 为该站的传感器数量。本文考虑 $n \geq 3$ 的情况。即单测量站的传感器单元多于 3，可以恢复三坐标信息，如跟踪仪和全站仪中有 1 个测距单元和 2 个测角单元， $n=3$ ；关节式测量臂内有 6 个测角单元， $n=6$ 。单台仪器不能独自恢复三坐标信息的，可以两台以上共同恢复三坐标。例如经纬仪和摄影测量相机， $n=2$ ，即只能得到二维信息，一般用两台组成测量系统得到三坐标。 $m_i \in \mathbf{R}^3$ 是第 i 个测量站的三坐标数据。 m 通常被表示为 θ 的非线性向量函数：

$$m_i = f(\theta_i), \tag{8}$$

对式(8)泰勒展开，略去二次项，得：

$$m = f(\theta) + J(\theta) \delta\theta, \tag{9}$$

式中 J 为雅可比矩阵，有 $J(\theta) = \frac{\partial m}{\partial \theta}$ 。

协方差矩阵：

$$V_i = J_i Q_i J_i^T. \tag{10}$$

$W_i \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是权重矩阵，可按式(11)确定：

$$W_i = \left[\sum (J_i Q_i J_i^T)^{-1} \right]^{-1} (J_i Q_i J_i^T)^{-1}. \tag{11}$$

即可确定按矩阵加权无偏融合估计 \hat{m} ：

$$\hat{m} = \sum W_i m_i, \tag{12}$$

融合后的 \hat{m} 的协方差为：

$$V = \left[\sum (J_i Q_i J_i^T)^{-1} \right]^{-1}. \tag{13}$$

由式(13)易得出 $V^{-1} > V_i^{-1}$ ，进一步得出 $V < V_i$ ，其中 $i=1, \dots, L$ 。由此证明，融合估计精度高于每个局部估计精度。

4 仿真实验分析

仿真实验布设 4 个测量仪器组成的测量网络，分别为一台激光跟踪仪、一台全站仪、两台经纬仪。激光跟踪仪和全站仪的坐标测量原理相同，都是具有一个测距单元，两个测角单元。即测量值为极坐标 $\theta = (l, \alpha, \beta)^T$ ，极坐标可转换为笛卡尔直角坐标：

$$m = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cos \alpha \sin \beta \\ l \sin \alpha \sin \beta \\ l \cos \beta \end{bmatrix}. \tag{14}$$

可得雅可比矩阵：

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial l} & \frac{\partial x}{\partial \alpha} & \frac{\partial x}{\partial \beta} \\ \frac{\partial y}{\partial l} & \frac{\partial y}{\partial \alpha} & \frac{\partial y}{\partial \beta} \\ \frac{\partial z}{\partial l} & \frac{\partial z}{\partial \alpha} & \frac{\partial z}{\partial \beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \sin \beta & -l \sin \alpha \sin \beta & l \cos \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \sin \beta & l \cos \alpha \sin \beta & l \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \beta & 0 & -l \sin \beta \end{bmatrix}. \tag{15}$$

其中全站仪内部为绝对测距方式，一般采用相位式激光测距，测长精度较差，典型值为 $\sigma_l = 1 \text{ mm}$ ，测角精度较高，典型值为 $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 0.5''$ 。激光跟踪仪则利用激光干涉测长，精度高，典型值为 $\sigma_l = 10 \mu\text{m} + 0.8 \mu\text{m}/L$ 。但测角精度稍低，典型值为 $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 1''$ 。设各传感器单元的方差互不相关，则测量协方差矩阵为：

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_l^2 & & \\ & \sigma_\alpha^2 & \\ & & \sigma_\beta^2 \end{bmatrix}. \tag{16}$$

由于一台经纬仪只能得到 2 个角度，不能独自恢复 3 坐标信息，需要 2 台以上组成测量系统才能解算 3 坐标：

$$\begin{aligned} x &= b \frac{\sin HB \cos HA}{\sin(HA + HB)}, \\ y &= b \frac{\sin HB \sin HA}{\sin(HA + HB)}, \\ z &= \frac{1}{2} \left[b \frac{\sin H B \arctan VA + \sin HA \cot VB}{\sin(HA + HB)} + h_{AB} \right], \end{aligned}$$

式中 HA 、 HB 分别为两台经纬仪的水平角, VA 、 VB 分别为两台经纬仪的垂直角, b 为基线长度, h_{AB} 为两台经纬仪的高度差。可求得雅可比矩阵为:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial HA} & \frac{\partial x}{\partial HB} & \frac{\partial x}{\partial VA} & \frac{\partial x}{\partial VB} \\ \frac{\partial y}{\partial HA} & \frac{\partial y}{\partial HB} & \frac{\partial y}{\partial VA} & \frac{\partial y}{\partial VB} \\ \frac{\partial z}{\partial HA} & \frac{\partial z}{\partial HB} & \frac{\partial z}{\partial VA} & \frac{\partial z}{\partial VB} \end{pmatrix} \quad (17)$$

两个经纬仪测量站的水平角和垂直角的精度分别为:

$$\sigma_{HA} = \sigma_{HB} = \sigma_{VA} = \sigma_{VB} = 0.5''$$

协方差矩阵为:

$$Q = \begin{pmatrix} \sigma_{HA}^2 & & & \\ & \sigma_{HB}^2 & & \\ & & \sigma_{VA}^2 & \\ & & & \sigma_{VB}^2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

由各测量站的协方差矩阵结合式(12)和式(13)便可确定融合坐标值和融合后的协方差。

仿真过程如下:在 $5\,000\text{ mm} \times 5\,000\text{ mm} \times 5\,000\text{ mm}$ 的空间内均匀随机生成 100 个点,模拟被测坐标的真值 x 。每个模拟测量点坐标值加入服从正态分布的高斯噪声 $\sigma \in N(0, u)$, 模拟测量误差。噪声幅度 u 按照上述各典型值确定。分别求出各个测量站的局部测量值 $x_i, i=1, 2$ 。然后利用最优估计融合规则求出融合测量值 \hat{m} , 各个测量值分别与真值比较, 则可求得各自的测量误差 $e = \hat{m} - m$ 。分别求出各测量站 100 个点的总误差 $\|e\|$, 结果如图 2 所示。

表 1 中分别列出各测量系统的 100 个点的测量误差平均值和标准差。

表 1 仿真结果比较

Tab. 1 Comparison of simulation results

	误差平均值(mm)	标准差(mm)
全站仪	0.745 1	0.568 2
经纬仪	0.044 9	0.031 3
跟踪仪	0.032 7	0.027 7
融合测量	0.012 8	0.007 8

可见融合测量误差最小, 标准差也最小, 精度提高显著。

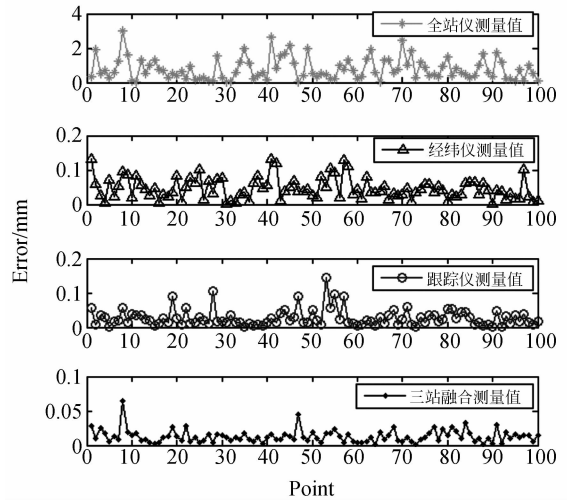


图 2 融合测量仿真

Fig. 2 Simulation of fusion measurement

5 实际测量实验

以盾构隧道构件为实验对象进行实际测量实验。大型隧道构件的几何尺寸和形状误差有着严格要求。随着山洞、地铁、越海等隧道的大力发展, 隧道的长度越来越长, 经常达到十几公里, 相应要求隧道直径和构件外形尺寸越来越大, 制造和配合精度越来越高, 因此对测量的准确度要求更高。

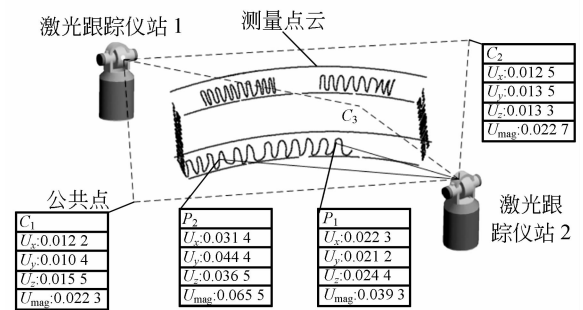


图 3 实际隧道构件测量实验

Fig. 3 Measurement experiment of tunnel structure

实验用到的隧道构件弧长约 5 m, 宽约 2 m。以 FARO 激光跟踪仪作为实验设备进行坐标测量。尽管激光跟踪仪的测量范围可达到 35 m, 但由于通视障碍, 一台跟踪仪不能测到所有型面。因此需要一次移站或两台配合测量, 如图 3 所示。两个站点的坐标系不一致, 需要将两次测量的数据统一到全局坐标系中。以其中一个测量站的坐

标系为全局坐标系,用基于奇异值分解的最佳适配算法进行空间数据配准。这需要另外布置至少 3 个稳定的公共点,如图 3 中的 C_1 到 C_2 。通过测量被测型面上的一些点,如图 3 中的 P_1 和 P_2 ,拟合分析构件的尺寸信息。

给出两个测量点 P_1 和 P_2 的不确定度,由于只有 1 个测量站测量,不确定度较好反映了跟踪仪的特性,且被测点距离测量站越远,不确定度越大。由于 P_2 离的较远,所以不确定度较 P_1 大。而公共点 C_1 和 C_2 由于两个测量站同时测量,融合后的不确定度明显较 P_1 和 P_2 等测量点小。

6 结 论

采用大尺寸测量网络扩大了测量范围,提高了冗余性和测量精度,奇异值分解的空间配准将多测量站的数据对齐到同一坐标系下。按矩阵加权线性最小方差最优融合准则充分融合各测量站的信息,融合精度优于各局部精度,对飞机、轮船装配等工业各领域的大型几何量测量提供了有效手段。

参考文献:

- [1] CALKINS J M. *Quantifying coordinate uncertainty fields in coupled spatial measurement systems*[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute, 2002.
- [2] 李晓光,王兆楠,王智,等. 一种目标位置解算方法[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 1076-1081.
LI X G, WANG ZH N, WANG ZH, *et al.*. Research on location compute method of object[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1076-1081. (in Chinese)
- [3] 尤红建,张世强. 组合 CCD 图像和稀疏激光测距数据的建筑物三维信息提取[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 297-302.
YOU H J, ZHANG SH Q. Reconstructing 3D buildings based on airborne CCD image and laser scanning rangefinder data[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 297-302. (in Chinese)
- [4] BASIR O, YUAN X H. Engine fault diagnosis based on multi-sensor information fusion using dempster-shafer evidence theory[J]. *Information Fusion*, 2007, 8(4): 379-386.
- [5] ACERBI-JUNIOR F W, CLEVERS J G P W, SCHAEPMAN M E. The assessment of multi-sensor image fusion using wavelet transforms for mapping the Brazilian Savanna[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006, 8(4): 278-288.
- [6] RUHM K H. Sensor fusion and data fusion-mapping and reconstruction[J]. *Measurement*, 2007, 40(2): 145-157.
- [7] LUO R C, YIH C C. Multisensor fusion and integration; approaches, applications, and future research directions [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2002, 2(2): 107-119.
- [8] 高印寒,周晓华,梁杰,等. 数据融合技术在声全息测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1104-1111.
GAO Y H, ZHOU X H, LIANG J, *et al.*. Application of data fusion to acoustic holography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1104-1111. (in Chinese)
- [9] 张强,郭宝龙. 应用第二代 Curvelet 变换的遥感图像融合[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1130-1136.
ZHANG Q, GUO B L. Fusion of remote sensing images based on the second generation Curvelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1130-1136. (in Chinese)
- [10] 张国雄,李杏华,林永兵. 多路法激光跟踪干涉测量系统的研究[J]. *天津大学学报*, 2003, 36(1): 23-27.
ZHANG G X, LI X H, LIN Y B. Study on the multi-path laser tracking measuring system[J]. *Journal of Tianjin University*, 2003, 36(1): 23-27. (in Chinese)
- [11] EGGERT D W, LORUSSO A, FISHER R B. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms[J]. *Machine Vision and Applications*, 1997, (9): 272-290.