

基于正交柱面成像相机的大尺寸三维坐标测量

刘海庆, 杨凌辉, 任永杰, 郝继贵

(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: 提出了一种基于正交柱面成像相机的大尺寸三维坐标测量方法。正交柱面成像相机由一个正交柱面成像光学系统和两个正交放置的线阵 CCD 组成, 它们分别被用来检测被测点的水平角和垂直角。一个相机决定了两个角度, 两个相机交汇, 即可实现被测点的三维坐标测量。所提出的方法在精密坐标测量特别是动态位置跟踪方面具有突出的优势。一个灵活的内参标定方法被用来标定正交柱面成像相机, 内参标定后相机在水平方向和垂直方向角度测量误差的均值分别为 1.85" 和 2.16"。另外, 双相机的外参标定也被介绍, 外参标定后系统的坐标测量精度优于 0.52 mm。实验结果表明: 所提出的三维坐标测量方法有效, 具有良好的测量精度。

关键词: 正交柱面成像; 线阵相机; 大尺寸三维坐标测量

中图分类号: TU198 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1117002

Large-scale 3D coordinate measurement based on orthogonal cylindrical imaging cameras

Liu Haiqing, Yang Linghui, Ren Yongjie, Zhu Jigui

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

Abstract: A large-scale 3D coordinate measurement method based on orthogonal cylindrical imaging cameras was proposed. The camera was consisted of one orthogonal cylindrical imaging system and two orthogonal linear CCDs, which were used to detect the horizontal angle and vertical angle of a measurement point, respectively. One camera determined two angles, therefore, the 3D coordinate of the measurement point can be measured by the intersection of two cameras. The proposed method has prominent advantages in precise coordinate measurement and especially in dynamic position-tracking. A flexible intrinsic parameters calibration method was used to calibrate the orthogonal cylindrical imaging cameras. After intrinsic parameters calibration, the average of angle measurement error in the horizontal and vertical direction of the camera is 1.85" and 2.16", respectively. In addition, the extrinsic parameters calibration of the two cameras is also introduced. After extrinsic parameters calibration, the coordinate measurement accuracy of the system is better than 0.52 mm. The experimental results show that the proposed 3D coordinate measurement method is valid with good measurement accuracy.

Key words: orthogonal cylindrical imaging; linear camera; large-scale 3D coordinate measurement

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-15

基金项目: 国家 863 计划(2012AA041205); 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室研究基金(JMTZ201604)

作者简介: 刘海庆(1987-), 男, 博士生, 主要从事视觉检测技术方面的研究。Email: liuhaiqing@tju.edu.cn

导师简介: 郝继贵(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光及光电测试和视觉检测技术方面的研究。Email: jiguizhu@tju.edu.cn

0 引言

随着制造水平的提高和现代工业的发展,大尺寸、实时的三维坐标测量的作用日益凸显,特别是在大型工件对接、机器人实时引导、动态位姿测量等方面^[1]。目前,常用的大尺寸坐标测量系统有激光跟踪仪、室内 GPS 和近景摄影测量系统等^[2]。

激光跟踪仪^[3]作为一个成熟的产品,具有测量范围大、精度高、实时性好等优势,已经被广泛应用于大尺寸测量领域。但是,激光跟踪仪不能同时跟踪多个目标。对于某些应用,例如大型工件对接,需要跟踪六个或更多的点(每个工件至少三个点)。如满足这种应用,使用六台激光跟踪仪成本很高。

室内 GPS^[4]作为一个多站式测量设备,在大尺寸测量领域得到越来越广泛的应用,特别是考虑到其多任务并行的能力。但是,室内 GPS 从原理上分析并不适合于实时的坐标测量。一方面,发射站的两个激光平面是先后扫过接收器,而非同时;另一方面,不同发射站的激光平面也是先后扫过接收器^[5-6]。

近景摄影测量系统^[7-8]作为一个灵活的技术被广泛应用于大尺度测量。基于面阵相机的摄影测量系统技术成熟,但是限于面阵相机的帧频、图像传输时间、图像处理时间等因素,该系统一般用于离线测量,测量频率低;基于线阵相机的摄影测量系统(三线阵相机测量)测量频率高,但是该系统仅包含三个角度约束,与双目测量相比少一个约束,同时,三线阵相机的视场是三个相机视场的交汇区域,相机越多交汇区域越小。

文中提出了一种基于正交柱面成像相机的大尺寸三维坐标测量方法。该相机包含一个正交柱面成像光学系统和两个正交放置的线阵 CCD,它们被用来检测目标发光点的水平角和俯仰角。双相机交汇,即可实现目标点的三维坐标测量。与激光跟踪仪相比,此方法能够测量多个目标点;与室内 GPS 相比,此方法可以实现多个目标点的同时测量,并且测量频率更高;与基于面阵相机的摄影测量系统相比,该系统具有更高的测量频率和空间分辨率;与传统的三线阵相机测量方式相比,该系统具有更多的角度约束、更大的视场、更高的精度^[9]。

1 测量原理

正交柱面成像相机由一个成像镜头(球面镜组

合)、分光镜、两个柱面镜和两个正交放置的线阵 CCD 组成。相机视场 $40^\circ \times 40^\circ$, f 数 19, 焦距 38 mm。线阵 CCD 分辨率 4096×1 , 帧频 1 kHz。正交柱面成像相机投影映射过程如图 1 所示。

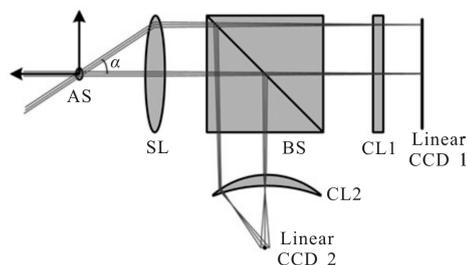


图 1 正交柱面成像相机的投影映射示意图

Fig.1 Projection mapping diagram of the orthogonal cylindrical imaging camera

被测发光点发出的光经过正交分光成像系统投影在两个正交放置的线阵 CCD 上。平行于线阵 CCD 的方向,柱面镜相当于平行平板(如图 1 中的 CL1),光束被汇聚来保证良好的成像质量;垂直于线阵 CCD 的方向,柱面镜(如图 1 中的 CL2)将光束汇聚成一个线状像与 CCD 相交。不同水平角的光束在投影在 CCD1 的不同位置,以此实现水平角 α 的测量,正交放置的 CCD2 用来实现垂直角 β 的测量。

如上所述,单个相机决定目标点的两个空间角度,双相机交汇即可实现三维空间坐标测量,其原理示意图如图 2 所示。

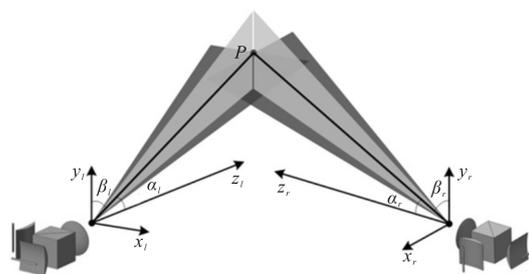


图 2 三维坐标测量原理示意图

Fig.2 Schematic of the 3D coordinate measurement

根据发光点在相机坐标系下的水平角 α 和垂直角 β ,右面相机所确定的两个平面方程为:

$$\tan \alpha_r = x_r / z_r \quad (1)$$

$$\tan \beta_r = y_r / z_r \quad (2)$$

左面相机所确定的两个平面方程为:

$$\tan\alpha_i = x_i/z_i \quad (3)$$

$$\tan\beta_i = y_i/z_i \quad (4)$$

式中： (x_l, y_l, z_l) 、 (x_r, y_r, z_r) 分别为目标点 P 在左、右相机坐标系 $o_l-x_l y_l z_l$ 、 $o_r-x_r y_r z_r$ 下的三维坐标。其中 α 和 β 由内参标定求得，经过外参标定后，4 个平面交汇即可求解目标点三维坐标。

2 标定算法

2.1 内参标定

内参标定的目的是求取相机内部参数，根据该参数结合目标点的像面坐标 (u, v) 可以得到被测点在相机坐标系下的水平角 α 和垂直角 β 。内参标定示意图如图 3 所示。

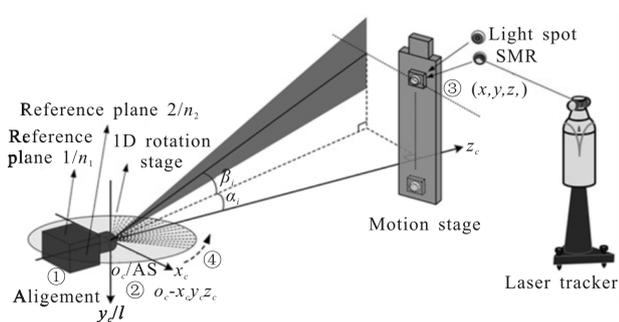


图 3 内参标定示意图

Fig.3 Schematic of intrinsic calibration

(1) 调整相机位置直至参考平面 1 的法线 n_1 平行于转台的转轴 l 。此举是为了保证转台转动过程中，发光点垂直方向入射角度不变；

(2) 建立相机坐标系 $o_c-x_c y_c z_c$ 。以孔径光阑 AS 作为原点， x_c 轴和 y_c 轴分别过原点且平行于 n_2, n_1 ， z_c 轴由右手定则确定；

(3) 记录下发光点的三维坐标 (x, y, z) 。发光点的发光中心已通过工装调至球体的球心，球体直径 38.1 mm，与激光跟踪仪反射球 (SMR) 的直径相同。因此，发光点的三维坐标可通过激光跟踪仪获得；

(4) 在发光点垂直方向的每一个位置，旋转一维转台，记录下每一个位置的像面坐标 (u, v) 。

利用上述步骤即可获得一系列对应点，表示为 $(\alpha_i, \beta_i) \leftrightarrow (u_i, v_i)$ ， i 为第 i 个采样点。获得采样点后，实际测量时，利用径向基函数插值的方法即可求得被测点的水平角 α 和俯仰角 β ：

$$\alpha(u, v) = \sum_{i=1}^{N_{\text{sample}}} \alpha_i \phi_i(u, v) + \sum_{j=1}^3 b_j p_j(u, v) \quad (5)$$

$$\beta(u, v) = \sum_{i=1}^{N_{\text{sample}}} c_i \phi_i(u, v) + \sum_{j=1}^3 d_j p_j(u, v) \quad (6)$$

$$\phi_i(u, v) = [(u-u_i)^2 + (v-v_i)^2 + \chi^2]^{1/2} \quad (7)$$

式中： $\phi_i(u, v)$ 和 $p_j(u, v)$ 分别为径向基函数的径向基和多项式基；多项式基 $p_j(u, v)$ 为 $[1, u, v, u^2, uv, v^2, \dots]$ ； N_{sample} 为采样点的数量； χ 为试探性获取的形状参数； a_i, b_j, c_i, d_j 为对应基函数的权值系数，权值系数的值可通过径向基函数的插值条件和附加条件^[10]求解。

2.2 外参标定

外参标定通过控制点的方式实现，控制点的三维坐标由激光跟踪仪获得。外参标定示意图如图 4 所示。

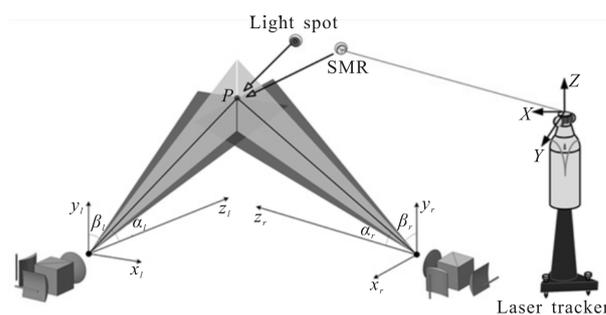


图 4 外参标定示意图

Fig.4 Schematic of extrinsic calibration

选取跟踪仪坐标系 $O-XYZ$ 作为世界坐标系，以右侧相机为例， $o_r-x_r y_r z_r$ 到 $O-XYZ$ 的变换关系可以表示为：

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = [R \quad t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： $(X, Y, Z, 1)^T$ 为控制点在 $O-XYZ$ 下的齐次坐标； $(x_r, y_r, z_r)^T$ 为控制点在 $o_r-x_r y_r z_r$ 下的坐标； $[R \quad t]$ 为 $o_r-x_r y_r z_r \sim O-XYZ$ 的旋转矩阵和平移向量。

将方程(8)代入方程(1)、(2)可得：

$$Xr_1 + Yr_2 + Zr_3 + t_1 - \tan\alpha_r \cdot (Xr_7 + Yr_8 + Zr_9 + t_3) = 0 \quad (9)$$

$$r_4 X + r_5 Y + r_6 Z + t_2 - \tan\beta_r \cdot (r_7 X + r_8 Y + r_9 Z + t_3) = 0 \quad (10)$$

假设有 n 个控制点，其在跟踪仪坐标系下的坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) ($i=1, 2, \dots, n$)，从方程(9)、(10)有：

$$\begin{aligned} F_i = & X_i r_1 + Y_i r_2 + Z_i r_3 + X_i r_4 + Y_i r_5 + Z_i r_6 - (\tan\alpha_n + \tan\beta_n) X_i r_7 - \\ & (\tan\alpha_n + \tan\beta_n) Y_i r_8 - (\tan\alpha_n + \tan\beta_n) Z_i r_9 + t_1 + t_2 - \\ & (\tan\alpha_n - \tan\beta_n) t_3 = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中:未知的 $[R \ t]$ 有 12 个参数 $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9, t_1, t_2, t_3$ 。方程(11)中,每个控制点提供一个约束,12 个控制点所提供的约束线性求解即可求出未知的 $[R \ t]$ 。但是,由于测量难免存在误差,线性求解的旋转矩阵通常不满足正交性。因此,一个非线性的方法被用来求解 $[R \ t]$ 。

旋转矩阵满足如下正交约束关系:

$$\begin{cases} f_1=r_1^2+r_2^2+r_3^2-1=0 \\ f_2=r_4^2+r_5^2+r_6^2-1=0 \\ f_3=r_7^2+r_8^2+r_9^2-1=0 \\ f_4=r_1r_4+r_2r_5+r_3r_6=0 \\ f_5=r_1r_7+r_2r_8+r_3r_9=0 \\ f_6=r_4r_7+r_5r_8+r_6r_9=0 \end{cases} \quad (12)$$

由方程(11)和(12),可以通过最小化如下的目标函数实现:

$$E = \sum_{i=1}^n F_i^2 + M \cdot \sum_{j=1}^6 f_j^2 \quad (13)$$

式中: M 为罚因子。方程(13)最小化是一个非线性最优化问题,可以通过列文伯格-马夸特算法^[11]实现,线性求解的值可以作为最线性最优化的初值。

3 实验

3.1 内参标定实验

内参标定实验平台如图 5 所示。按照 2.1 节所描述的步骤,通过一维转台的水平转动和导轨的垂直运动,在相机视场内采样 N_{sample} 个离散点 $(\alpha_i, \beta_i) \leftrightarrow (u_i, v_i)$ 。

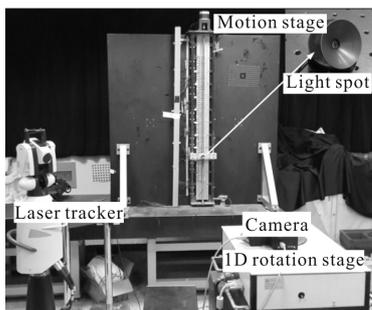


图 5 内参标定实验平台

Fig.5 Experimental platform for intrinsic calibration

通过实验查看 N_{sample} 对角度插值精度的影响。 N_{sample} 个 $(\alpha_i, \beta_i) \leftrightarrow (u_i, v_i)$ 用来计算方程(6)、(7)中的权

值系数。然后,在相机视场内均匀选取 51^2 个点作为测试点来验证插值精度。利用方程(6)、(7)计算的角度,与测试点提供的角度相比较,比较结果通过误差棒图展示,如图 6 所示。误差棒的长度表示标准差,中点表示均值。可以看到,随着采样点数量的增多,角度插值误差的均值和标准差都在减小,当 N_{sample} 为 25^2 时,水平角 α 插值误差的均值和标准差分别为 $1.85''$ 和 $1.42''$,垂直角 β 插值误差的均值和标准差分别为 $2.16''$ 和 $1.78''$ 。结果显示,所提出的内参标定方法是有效的,具备良好的精度表现。

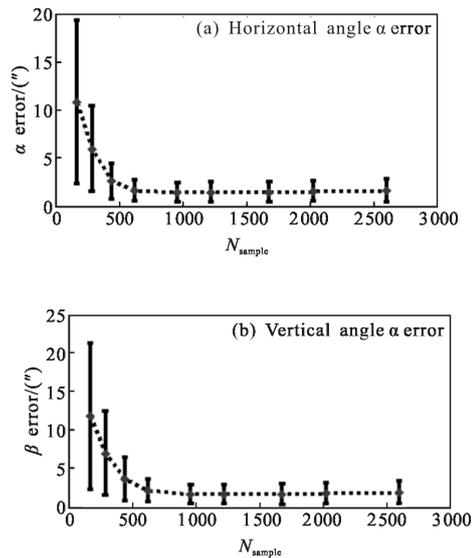


图 6 采样点数目对角度插值误差的影响

Fig.6 Angle interpolation error with respect to N_{sample}

3.2 外参标定实验

外参标定实验平台如图 7 所示,按照 2.2 节的

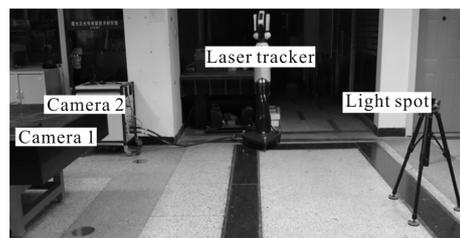


图 7 外参标定实验平台

Fig.7 Experimental platform for extrinsic calibration

描述,在测量空间内将发光点摆放几个位置,相机拍摄并且用跟踪仪记录下此位置的三维坐标,即可完成外参标定过程。

3.3 三维坐标测量实验

内外参标定完成后,此系统即可用于三维坐标测量。坐标测量在一个1 500 mm×1 500 mm×1 500 mm的空间内,此空间距离双相机连线的距离是 3 m。在此空间内,均匀测量 10 个位置,每个位置先固定激光跟踪仪的球座,放置激光跟踪仪的反射球测出此位置的三维坐标,然后,拿走反射球放置球形的发光点(发光点已调至球体中心,球体直径与激光跟踪仪反射球直径相同,为 38.1 mm),利用标定后的系统测量该发光点的三维坐标。所提出方法的测量结果与激光跟踪仪(Leica AT901,精度为 15 μm+6 μm/m)进行比较,比较结果如表1 所示。

表 1 坐标测量精度评估

Tab.1 Accuracy evaluation of coordinate measurement

No.	X_i	Y_i	Z_i	ΔXYZ
	X_p	Y_p	Z_p	
1	764.39	2 012.76	654.86	0.25
	764.16	2 012.71	654.78	
2	128.97	2 176.36	1 278.54	0.20
	128.85	2 176.25	1 278.42	
3	-789.35	2 138.62	1 165.77	0.33
	-789.07	2 138.51	1 165.64	
4	689.52	2 896.31	965.37	0.28
	689.28	2 896.22	965.25	
5	135.06	2 769.37	845.72	0.17
	135.22	2 769.34	845.67	
6	-815.72	2 908.56	687.53	0.27
	-815.95	2 908.47	687.42	
7	721.96	3 509.86	579.35	0.43
	721.58	3 509.69	579.46	
8	-159.63	3 588.29	327.83	0.29
	-159.84	3 588.15	327.97	
9	-795.23	3 608.63	109.64	0.52
	-795.69	3 608.48	109.82	
10	265.64	3 482.58	-243.86	0.32
	265.36	3 482.65	-243.72	

注: $\Delta XYZ = \sqrt{(X_i - X_p)^2 + (Y_i - Y_p)^2 + (Z_i - Z_p)^2}$

表中, (X_i, Y_i, Z_i) 为被测点由激光跟踪仪测出的三维坐标, (X_p, Y_p, Z_p) 为被测点由所提出的方法测出的三维坐标。如表所示,所提出方法的坐标测量误差小于 0.52 mm。实际上,测量结果受多个因素的影响,例如发光点不在球体(与激光跟踪仪的反射球直径相同)的球心,内参标定、外参标定存在误差。但是,实验结果依然清楚的表明所提出的三维坐标测量方法是有效的,具有良好的精度表现,满足大部分需要亚毫米精度的大尺度测量需求。

4 结 论

在分析了现有大尺寸三维坐标测量系统的基础上提出了一种基于正交柱面成像相机的三维坐标测量方法。分析了其测量原理及坐标求解方法并给出相应的数学模型。针对正交柱面成像相机,一种灵活的方法被用来实现该相机的内参标定,此方法可适用于其他的中心投影相机。相应的外参标定方法被介绍以实现三维坐标测量,测量结果与激光跟踪仪进行比较。实验表明:基于正交柱面成像相机的三维坐标测量方法的测量精度优于 0.52 mm,应用前景广泛。

参 考 文 献:

[1] Liu Zhexu, Zhu Jigui, Yang Linghui, et al. Real-time position and orientation measurement with occlusion handling for distributed optical large-scale metrology systems [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(11): 114101.

[2] Cuypers W, Van Gestel N, Voet A, et al. Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(3): 292-300.

[3] Gan Lin, Li Xiaoxing. Site measuring accuracy testing of laser tracker [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(5): 612-614.

甘霖, 李晓星. 激光跟踪仪现场测量精度检测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(5): 612-614.

[4] Maisano D A, Jamshidi J, Franceschini F, et al. Indoor GPS: system functionality and initial performance evaluation [J]. *International Journal of Manufacturing Research*, 2008, 3(3): 335-342.

[5] Huang Guiping. Study on the key technologies of digital close range industrial photogrammetry and applications [D].

- Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- 黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用. 天津: 天津大学, 2006.
- [6] Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [7] Duanmu Qiong, Yang Xueyou, Zhu Jigui, et al. 3D coordinate measurement system based on optoelectronic scanning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2014–2019. (in Chinese)
- 端木琼, 杨学友, 郝继贵, 等. 基于光电扫描的三维坐标测量系统 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 2014–2019.
- [8] Yang Linghui, Yang Xueyou, Lao Dabao, et al. Large-scale coordinates measurement method based on intersection of optical planes[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1105–1109. (in Chinese)
- 杨凌辉, 杨学友, 劳达宝, 等. 采用光平面交汇的大尺寸坐标测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1105–1109.
- [9] Liu Haiqing, Yang Linghui, Guo Yin, et al. Precise calibration of linear camera equipped with cylindrical lenses using a radial basis function-based mapping technique [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 323–344.
- [10] Golberg M A, Chen C S, Bowman H. Some recent results and proposals for the use of radial basis functions in the BEM [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 1999, 23(4): 285–296.
- [11] More J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory [C]//IEEE Conference on Numerical Analysis, 1978, 630: 105–116.