



DOI: 10.12086/oe.2019.180445

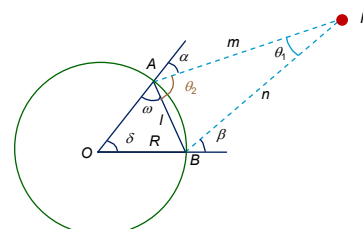
基于光电伺服平台的动态角度测量方法研究

佘明华¹, 王伟明^{1*}, 张勇², 吴浩³

¹ 石家庄铁道大学电气与工程学院, 河北 石家庄 050043;

² 中国人民解放军32181部队, 河北 石家庄 050000;

³ 陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003



摘要: 针对动态角度测量的成本高及精度低的问题, 提出一种基于非合作目标视觉跟踪的光电测量方法。利用安装在被测对象上的光电伺服平台搭载相机和激光测距仪对非合作目标进行实时跟踪和距离测量, 根据伺服平台输出的精密角度、非合作目标距离和被测角度之间的转化关系计算出被测动态角度值。研制了基于光电伺服平台的动态角度测量装置, 并对其进行了精度标定和误差分析。利用高精度旋转台模拟被测动态角度进行实验, 验证了测量方法的可行性。实验结果表明在测量空间 11.082 m 范围内, 测角误差在 $\pm 0.09^\circ$ 以内。

关键词: 光电测量; 大角度; 动态测量; 非合作目标

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

引用格式: 佘明华, 王伟明, 张勇, 等. 基于光电伺服平台的动态角度测量方法研究[J]. 光电工程, 2019, 46(10): 180445

Research on dynamic angle measurement method based on electro-optical servo platform

Si Minghua¹, Wang Weiming^{1*}, Zhang Yong², Wu Hao³

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

²32181 Unit of PLA, Shijiazhuang, Hebei 050000, China;

³Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

Abstract: Aiming at the measurement problem of high cost and low precision in dynamic angle, an electro-optical measurement method based on non-cooperative target vision tracking is presented. By using electro-optical servo platform mounted on the measured object to carry the camera and the laser rangefinder for the real time tracking and distance measurement of the non-cooperative target, the dynamic angle value is calculated according to the conversion relationship between the high precision angle of measurement of the servo system and the distance of the non-cooperative target. A dynamic angle measuring device is developed, and its precision calibration and error analysis are carried out. Using the high precision manual displacement table to simulate the measured dynamic angle to experiment, the feasibility of the measuring method is verified. The experimental results show that the measured angle error is 0.09° within the range of 11.082 m.

收稿日期: 2018-08-25; 收到修改稿日期: 2018-12-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305455); 陆军装备部资助课题(ZS2014070140A12002); 河北省自然科学基金资助项目(E201610104)

作者简介: 佘明华(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事伺服控制技术的研究。E-mail: 976884312@qq.com

通信作者: 王伟明(1979-), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事光电系统伺服控制技术的研究。E-mail: wangwm@stdu.edu.cn

Keywords: electro-optical measurement; large angle; dynamic measurement; non-cooperative target

Citation: Si M H, Wang W M, Zhang Y, *et al.* Research on dynamic angle measurement method based on electro-optical servo platform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(10): 180445

1 引言

动态角度测量技术广泛应用于船舶、航空航天和卫星通信领域，其技术要求测量范围广、精度高、自动化程度高。在上述领域壳体设备组装和通信天线安装过程常常需要测量几米至十几米范围内直线(壳体侧孔中心线、天线轴线等)的动态夹角^[1-9]，组装和安装过程的精度控制直接影响设备的整体性能。此类动态角度不易采用测角设备直接测量，需借助辅助设备间接测量。因此，研究一种高效率、高精度、低成本的动态角度测量方法成为角度测量关键技术之一。目前动态角度测量方法有以下几种：

1) 惯性测量法^[10]，采用三轴倾角传感器模块测量角度，由于受倾角传感器工艺限制和存在积分累积误差，测角精度一般只能达到 0.2°，且测量一致性差。

2) 视觉测量法^[11-15]，采用建立公共基准的方法，虽然在 6.997 m 范围内精度达到 0.02085°，但是测量范围有限，只能测量二维静态角度且仅能测量同一视场内夹角。

3) 三坐标测量方法^[16]，对被测对象进行三维坐标测量，需搭建室内多台仪器工作平台，测量过程较复杂且不适合外场大空间测量。

4) 激光跟踪仪法^[17]，在被测对象关键点安装激光反射器，通过激光测距和编码器测角获取关键点的空间坐标值。此方法测距易受环境因素的影响，需要提前在被测对象安装激光反射器，在测量动态大角度时容易丢失目标，且价格昂贵。

5) 双经纬仪测量法^[18-19]，采用两经纬仪交汇原理测得前方点坐标值，测量精度比较低，且不能进行动态测量。

以上测量方法和测量设备在测量动态角度时存在一定的局限性。在分析当前动态角测量方法局限性的基础上，提出一种基于非合作目标跟踪与测距的光电测量方法，研制了动态角度测量装置，并对测量装置进行了系统误差分析^[20-21]，最后通过实验验证了测量方法的可行性。

2 测量原理

如图 1 所示以被测对象方位通道为例建立数学模

型。机械臂发生转动时，机械臂的运动看作沿圆弧 AB 的运动，O 为圆心，R 为半径。机械臂由 B 位置运动到 A 位置产生角度 δ 。P 点为远端的非合作目标特征点。 m 、 n 分别为在 A、B 位置相机焦点与点 P 的距离， α 、 β 分别为在 A、B 位置相机视轴方向和机械臂轴线方向的夹角， θ_1 为在 A、B 两个位置视轴的夹角值， l 为弦 AB， θ_2 为 A 位置时视轴和弦 AB 的夹角， ω 为弦 AB 和半径的夹角。

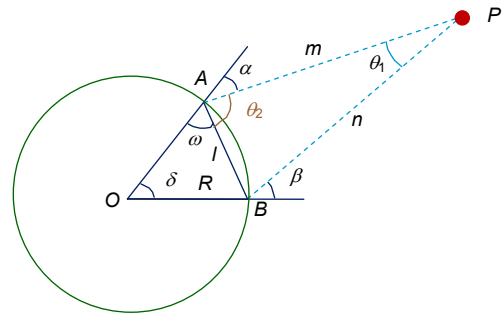


图 1 测量数学模型图

Fig. 1 Mathematical model diagram of measurement

由测得的数据 m 、 n 、 α 、 β 、 R ，求解 δ 。

由三角几何关系得：

$$\alpha + \omega + \theta_2 = \pi \quad (1)$$

$$2\omega + \delta = \pi \quad (2)$$

$$\alpha + \beta = \delta + \theta_1 \quad (3)$$

由三角正弦定理：

$$\frac{n}{\sin \theta_2} = \frac{l}{\sin \theta_1} \quad (4)$$

$$\frac{l}{\sin \delta} = \frac{R}{\sin \omega} \quad (5)$$

将式(1)~式(3)带入式(4)、式(5)联立式(4)、(5)得式(6)，解得结果为式(7)。

$$l = \frac{R \sin \delta}{\sin \left(\frac{\pi - \delta}{2} \right)} = \frac{n \sin(\alpha + \beta - \delta)}{\sin \left(\frac{\pi - \alpha + \delta}{2} \right)} \quad (6)$$

$$\delta = 2 \arctan \left\{ \frac{1}{2 \sin \alpha + [n \sin(\alpha + \beta)] / R} \times \left[\frac{n}{R} \cos(\alpha + \beta) + \cos \alpha - \sqrt{\frac{n^2}{R^2} + \cos^2 \alpha + \frac{2n}{R} \cos \beta} \right] \right\} \quad (7)$$

3 误差分析

误差分析的目的是找到影响测量精度的主要因素和次要因素, 根据分析结果建立误差修正模型。误差分析结果在系统设计阶段和系统实现阶段均能提供参考依据, 从而有针对性地减小误差, 提高测量精度。

本测量过程中包括测距误差、伺服系统几何误差、安装误差和瞄准误差。

1) 测距误差为激光测距仪的测距误差, 测距精度为 $50\text{ m} \pm 2\text{ mm}$, 测距误差导致的测角误差可以忽略。

2) 伺服系统的几何误差为测角传感器即旋转变压器的非线性误差, 本文利用伺服系统的标定实验减小几何误差。

3) 安装误差是被测对象的轴线和测量装置的轴线是否共轴的误差, 利用平行光管检测轴线的一致性, 减小安装误差。

4) 瞄准误差即存在相机视轴和跟踪目标点之间的偏移。测量的角度为动态角度, 即被测对象的角度值是随时间变化的序列, 控制器根据反馈量实时调控伺服电机, 伺服稳定为动态平衡状态而非静止平衡, 即在一定范围内达到动态平衡。在相机视轴和非合作目标特征点之间存在小范围的偏移, 从而导致测角误差的不确定性。

如图 2 所示为视轴和跟踪非合作目标特征点之间存在偏移的示意图, 从 t_B 时刻到 t_A 时刻, 被测对象由 B 位置到 A 位置达到动态平衡, 在 t_A 时刻图像上存在 Δx 的偏移量。

误差 $\Delta\delta$ 可作如下近似, f 为相机的焦距。

$$\tan \Delta\alpha = \frac{\Delta x}{f}, \quad (8)$$

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta x}{f}\right), \quad (9)$$

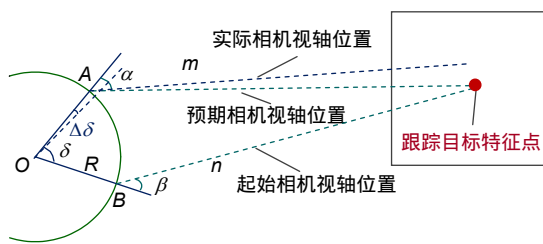


图 2 视轴偏移图

Fig. 2 Visual axis offset graph

$$\Delta\delta \approx \Delta\alpha \quad (10)$$

对 δ 动态误差补偿结果为

$$\delta = 2 \arctan \left\{ \frac{1}{2 \sin \alpha - (n \sin(\alpha + \beta)) / R} \times \left[\frac{n}{R} \cos(\alpha + \beta) + \cos \alpha + \sqrt{\frac{n^2}{R^2} + \cos^2 \alpha + \frac{2n}{R} \cos \beta} \right] \right\} \pm \Delta\delta \quad (11)$$

4 实验平台的搭建

如图 3 所示, 利用精度为 $60''$ 的旋转台转动产生旋转角, 模拟被测对象动态角度, 伺服系统载荷包括激光测距仪和相机, 将测量装置夹持在旋转台平板底座末端, 旋转台安装于光学平台上。手动控制旋转台产生一定旋转角度, 利用伺服控制技术实现测量装置对非合作目标自动实时跟踪与定位, 获取测量装置角度传感器的角度信息和距离信息。图 4 为光学平台、旋转台和测量装置的实物图。

测量装置伺服框架上安装一个低成本三轴速率陀螺, 用来感知相机轴线运动的角速率, 通过速度控制回路提高伺服系统的位置指向控制精度。为保证安装电机后的回转框架力矩平衡, 在器件对称布置基础上做配平设计。为保证安装过程中激光光轴和视轴平行, 利用平行光管对激光测距光轴和相机视轴进行调整。

测量装置在安装前利用高精度单轴转台对测量装置伺服系统指向精度进行标定。将测量装置固定在 TD650 单轴速率转台中心, 手动调节使测量装置框架转动中心与转台中心对准并固定。远端 40 m 处放置十字靶板。图 5 是标定过程示意图。使测量装置框架角度归零, 单轴转台读数置零, 调整单轴转台使电十字

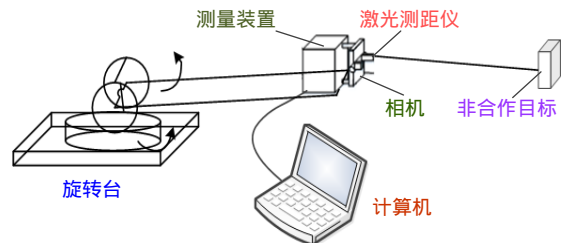


图 3 测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the measurement setup

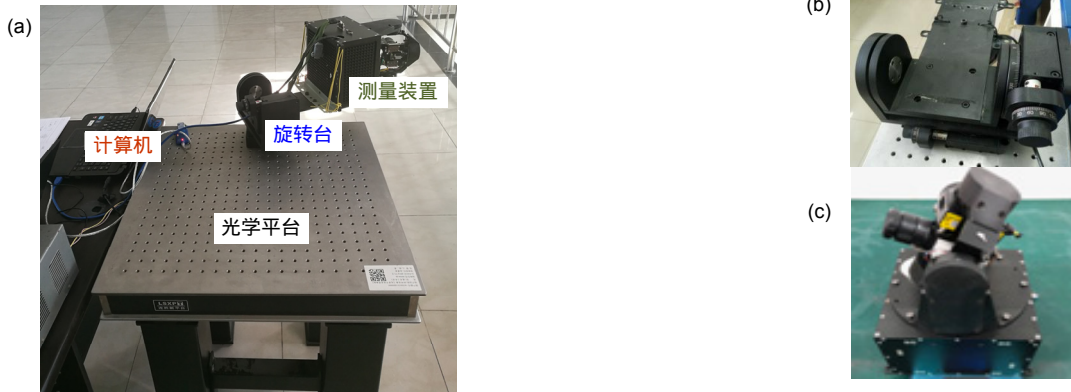


图 4 测量实物图。(a) 整体图; (b) 旋转台; (c) 测量装置

Fig. 4 Physical diagram of measurement setup. (a) Overall diagram; (b) Rotary table; (c) Measuring device

分划与十字分划靶板中心重合。控制测量装置伺服框架转动相应角度, 手动转动单轴转台使电十字分划中心始终压住靶板中心, 记录单轴转台角度值即为测量装置框架转动角度真值, 将值记录在标定表格中。针对测量装置伺服系统的几何误差, 利用该实验装置获得采样数据进行分段直线拟合, 将拟合直线写入控制程序, 测角精度达到 30" 内。激光测距仪精度为 50 m±2 mm。

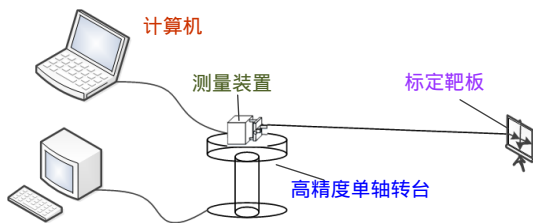


图 5 标定过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the calibration process

由相机的焦距 $f=75\text{ mm}$ 和像元大小 $d=4.8\text{ }\mu\text{m}$, 由式(12)计算相机角度分辨率为 $\lambda=13.2''$ 。

$$\lambda = \arctan\left(\frac{d}{f}\right) \quad (12)$$

为了实现更好的实时性、鲁棒性跟踪和角度测量的精确性, 将非合作目标跟踪分为粗跟踪阶段和细跟踪阶段。

粗跟踪阶段采用核相关滤波(kernelized correlation filters, KCF)跟踪算法^[22], KCF 是一种鉴别式跟踪方法, 在跟踪过程中训练一个目标检测器, 使用目标检测器去检测下一帧预测位置是否是目标, 然后再使

用新检测结果去更新训练集进而更新目标检测器。而在训练目标检测器时一般选取目标区域为正样本, 目标的周围区域为负样本, 当然越靠近目标的区域为正样本的可能性越大。粗跟踪阶段是由 KCF 跟踪器确定包含目标的区域。

细跟踪在粗跟踪的基础上进行的, 通过选择确定粗跟踪区域内的鲁棒特征点作为目标来跟踪。根据伺服系统的位置环、速度环反馈控制使目标点位于视场的水平中心线位置, 最后实现对非合作目标的像素级的精确跟踪。常见的特征描述子有 SIFT、SURF、FAST、ORB、BRIEF、HARRIS, 为了兼顾跟踪的鲁棒性和实时性, 本文采用 SURF 算法检测特征点作为跟踪目标预选选择对象, 通过总相似度计算选取相似度最低的特征点作为鲁棒特征点。SURF 算法是一种具有尺度和旋转不变性特点的特征点提取和描述方法, 相对于 SIFT 算法, 实时性更好。鲁棒特征点选取过程如下, 首先选取 KCF 跟踪器的跟踪区域, 并对该区域进行 SURF 特征点检测; 如式(13)所示, 设检测到的特征点数为 n , 分别计算特征点 i 与其他特征点 $j(0 < j < n$ 且 $j \neq i)$ 之间的欧氏距离和, 对求取的每个特征点的距离和进行排序, 得到距离和最大的点(即与其他特征点相似度最低的点)作为跟踪目标:

$$\arg \max_i \sum_{j \neq i}^n |P_i - P_j| \quad (13)$$

图 6 为跟踪过程中采集的 9 幅序列图像。粗跟踪阶段确定目标区域, 蓝色十字分划为跟踪目标值, 红色标志点为细跟踪阶段的特征点。在跟踪过程中, 特征点始终位于十字分划的竖线上。

图 7 为跟踪的流程图。



图 6 跟踪序列图像

Fig. 6 Tracking sequence images

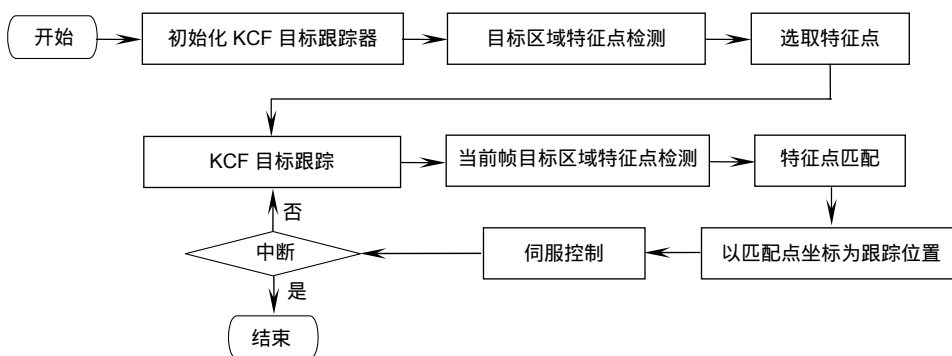


图 7 目标跟踪流程图

Fig. 7 Target tracking flowchart

5 实验结果

本实验被测对象机械臂的半径 $R=0.37\text{ m}$ 。实验首先将测量装置和旋转台调节到零位，选取非合作目标跟踪区域，进行角度测量。连续调节旋转台使旋转台带动测量装置在 $\pm 80^\circ$ 范围内产生动态旋转角度，读取

并记录测量装置的角度信息和距离信息。选取在 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 40^\circ$ 、 $\pm 50^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 70^\circ$ 、 $\pm 80^\circ$ 为测量点进行角度计算，根据 α 、 β 、 m 、 n 值，根据式(7)计算旋转角度，并根据式(11)进行动态误差补偿。

如图 8 为 5 次实验的测角误差分布图，测角误差在 $\pm 0.09^\circ$ 以内。

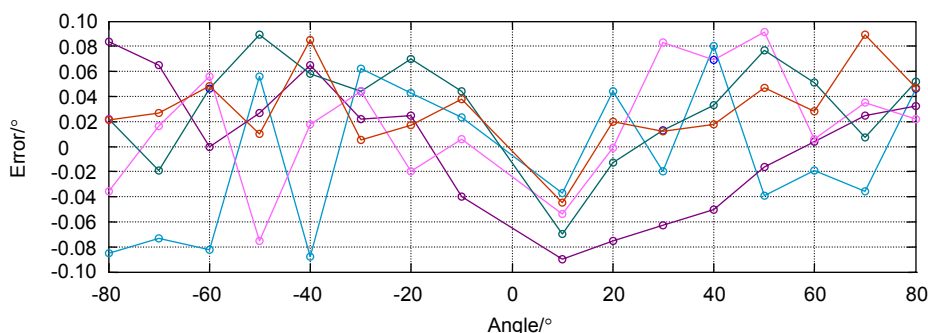


图 8 测角误差分布图

Fig. 8 The distribution chart of angle measurement error

6 结论

本方法将空间动态角度测量问题转化为基于视觉的非合作目标跟踪与测距问题, 根据测量装置和被测对象的空间关系, 构建旋转角度测量的数学模型, 推导出由伺服平台测角传感器的输出角度以及激光测距结果计算动态角度的表达式, 并搭建了实验平台。在非合作目标与被测对象 11.082 m 范围内, 测角范围达到 $\pm 80^\circ$, 测角误差为 $\pm 0.09^\circ$, 实验结果表明了本文动态角度测量方法的可行性。为了进一步提高测角精度, 下一步拟对目标图像进行超分辨率处理再对特征点位置进行亚像素提取, 提高特征点位置的精度。另外, 本方法目前尚不能应用于三维空间角度的测量, 需建立三维空间坐标模型, 这是本文下一步的研究目标。

参考文献

- [1] Peng G L, Sun Y, Han R, et al. A measuring method for large antenna assembly using laser and vision guiding technology[J]. *Measurement*, 2016, **92**: 400–412.
- [2] Estler W T, Edmundson K L, Peggs G N, et al. Large-scale metrology – an update[J]. *CIRP Annals*, 2002, **51**(2): 587–609.
- [3] Chen Z B, Xiao W J, Ma D X, et al. Technical progress and analysis on large-scale spatial angle measurement[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, **37**(3): 407–414.
陈志斌, 肖文健, 马东奎, 等. 大尺寸空间角测量技术进展及其分析[J]. *应用光学*, 2016, **37**(3): 407–414.
- [4] Yu J P, Guo J P. Research development of dynamic angle measurement methods[J]. *China Measurement & Test*, 2012, **38**(3): 27–30.
于冀平, 郭继平. 动态角测量方法研究进展[J]. *中国测试*, 2012, **38**(3): 27–30.
- [5] Xiao W J, Chen Z B, Ma D X, et al. Large-scale spatial angle measurement and the pointing error analysis[J]. *Optoelectronics Letters*, 2016, **12**(3): 229–232.
- [6] Zhang G X, Yao J W, Qiu Z R, et al. Large-scale space angle measurement[J]. *CIRP Annals*, 2008, **57**(1): 525–528.
- [7] Yang L H, Yang X Y, Zhu J G, et al. Novel method for spatial angle measurement based on rotating planar laser beams[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **23**(6): 758–764.
- [8] Wang Z Y, Wang Y Y, Cheng W, et al. A monocular vision system based on cooperative targets detection for aircraft pose measurement[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, **887**(1): 012029.
- [9] Du J F, Zhang M W, Zhang X M. Angle measurement accuracy of photoelectric theodolite[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(3): 466–473.
杜俊峰, 张孟伟, 张晓明. 光电经纬仪测角精度分析[J]. *应用光学*, 2012, **33**(3): 466–473.
- [10] Cao J A, Zhang L P, Wu H, et al. Analytical approach for measurement of spatial angle with inclination sensor[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, **47**(10): 109–114.
曹建安, 张乐平, 吴昊, 等. 采用倾角传感器实现空间旋转角度测量的解析方法研究[J]. *西安交通大学学报*, 2013, **47**(10): 109–114.
- [11] Hu W C, Qiu Z R, Zhang G X. Measurement of large-scale space angle formed by non-uniplanar lines[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(7): 1427–1433.
胡文川, 袁祖荣, 张国雄. 大尺寸空间异面直线夹角的检测[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(7): 1427–1433.
- [12] Jiang J, Miao Z, Zhang G J. Dynamic altitude angle measurement system based on dot-structure light[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(3): 532–536.
江洁, 苗准, 张广军. 点结构光动态姿态角测量系统[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(3): 532–536.
- [13] Guo J P, Li A M, Yu J P, et al. Dynamic angle measurement method based on stereo vision[J]. *China Measurement & Test*, 2015, **41**(7): 21–23, 36.
郭继平, 李阿蒙, 于冀平, 等. 双目立体视觉动态角度测量方法[J]. *中国测试*, 2015, **41**(7): 21–23, 36.
- [14] Sun Y, Zhang Z Y, Huang S J, et al. Vision measurement technology research for model angle of attack in wind tunnel tests[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, **34**(1): 1–7.
孙岩, 张征宇, 黄诗捷, 等. 风洞试验中模型迎角视觉测量技术研究[J]. *航空学报*, 2013, **34**(1): 1–7.
- [15] Guan Y, Wang X J, Yin L, et al. Monocular position and pose measurement method based on surface topography of object[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(1): 170522.
关印, 王向军, 阴雷, 等. 基于物体表面形貌的单相机视觉位姿测量方法[J]. *光电工程*, 2018, **45**(1): 170522.
- [16] Ding L P, Chen W L, Lu G. Combined large-scale measurement system for large aircraft assembly[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013(13): 76–80.
丁力平, 陈文亮, 卢鹤. 面向大型飞机装配的组合式大尺寸测量系统[J]. *航空制造技术*, 2013(13): 76–80.
- [17] Wei Z Z, Sun W, Zhang G J, et al. Method for finding the 3D center positions of the target reflectors in laser tracking measurement system based on vision guiding[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 929–935.
魏振忠, 孙文, 张广军, 等. 激光跟踪视觉导引测量中靶标球心定位方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(4): 929–935.
- [18] Zhou F Q, Zhang G J, Jiang J, et al. Three-dimensional coordinate measuring system with bino-theodolites on site[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, **40**(1): 165–169.
周富强, 张广军, 江洁, 等. 现场双经纬仪三维坐标测量系统[J]. *机械工程学报*, 2004, **40**(1): 165–169.
- [19] Ren S Q, Chen H B, Zhao H B. Perpendicularity measurement method of 3-D large guideway with theodolite[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, **33**(1): 188–193.
任顺清, 陈海兵, 赵洪波. 用经纬仪测量大尺寸三维导轨垂直度的方法[J]. *仪器仪表学报*, 2012, **33**(1): 188–193.
- [20] Lin J R, Zhu J G, Zhang H L, et al. Field evaluation of laser tracker angle measurement error[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, **33**(2): 463–468.
林嘉睿, 郝继贵, 张皓琳, 等. 激光跟踪仪测角误差的现场评价[J]. *仪器仪表学报*, 2012, **33**(2): 463–468.
- [21] Zhang Z L, Zhu J G, Zhou W H. Error calibration and correction of mirror tilt in laser trackers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1205–1212.
张滋黎, 朱涵, 周维虎. 激光跟踪仪转镜倾斜误差的标定及修正[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(5): 1205–1212.
- [22] Henriques J F, Caseiro R, Martins P, et al. High-speed tracking with kernelized correlation filters[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, **37**(3): 583–596.

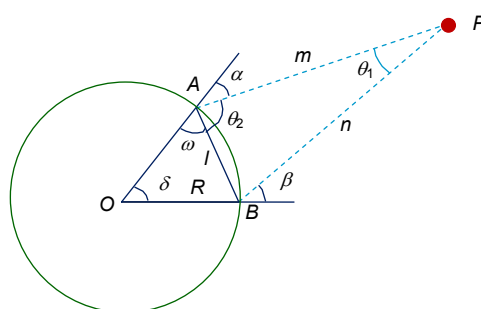
Research on dynamic angle measurement method based on electro-optical servo platform

Si Minghua¹, Wang Weiming^{1*}, Zhang Yong², Wu Hao³

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

²32181 Unit of PLA, Shijiazhuang, Hebei 050000, China;

³Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang, Hebei 050003, China



Mathematical model diagram of measurement

Overview: In the field of military and industrial production, it is often necessary to measure the dynamic corners of large rotating equipment. This type of rotating angle, which cannot be measured directly by angle measuring equipment, requires indirect measurement with the help of a sensor, and the measured angle is calculated according to the sensor data. Aiming at the problems of high measurement cost and low precision of dynamic angle measurement methods such as inertial measurement method, double theodolite measurement method, and three coordinate measurement method, an electro-optical measurement method based on non-cooperative target vision tracking is presented. Mathematical calculation model and dynamic compensation model for dynamic angle measurement are established. Using electro-optical servo platform mounted on the measured object to carry the camera and the laser rangefinder for the real time tracking and distance measurement of the non-cooperative target, the dynamic angle value is calculated according to the conversion relationship between the high precision angle of measurement of the servo system and the distance of the non-cooperative target and compensating the angle value according to the dynamic compensation model.

A dynamic angle measuring device is developed. The servo system structure adopts the azimuth and pitch double frame structure, the inner frame is the pitch channel, the outer frame is the azimuth channel, and the camera and the laser rangefinder are installed in the inner frame. The frame is driven directly by the permanent magnet synchronous motor, and the 16-bit rotary transformer is used as the angle measuring unit. Furthermore, its precision calibration and error analysis are carried out and accuracy of servo system up to 30" after calibration.

The servo control adopts the speed position double closed loop, using the instantaneous angular rate of the rate Gyro induction camera installed in the inner frame. This angular rate is regarded as the speed loop feedback, which make up of the closed loop with servo motor composition speed to isolate the disturbance of the carrier. Achieving stable tracking of non-cooperative goals, the non-cooperative target miss is used as the position ring input, and the spin angle is used as the feedback quantity to form the position closed loop. Using the high precision manual displacement table to simulate the measured dynamic angle, the feasibility of the measuring method is verified. The experimental results show that the measured angle error is 0.09° within the range of 11.082 m and angle measuring range reaches ±80°.

Citation: Si M H, Wang W M, Zhang Y, *et al.* Research on dynamic angle measurement method based on electro-optical servo platform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(10): 180445

Supported by National Natural Science Foundation of China (51305455), Army Equipment Department (ZS2014070140A12002), and Natural Science Foundation of Hebei Province (E201610104)

* E-mail: wangwm@stdu.edu.cn