



(43) 申请公布日 2021.11.23

G06F 17/16 (2006.01)

1. 分布式测量系统基站姿态补偿装置, 其特征在于, 包括多个基站 (103) 和光电自准直仪 (104);

其中, 所述基站包括嵌在所述基站内部的倾角传感器 (102), 以及设置在所述基站侧壁上的反射镜 (101); 所述基站放置在精密摆动平台 (203) 上;

所述反射镜镜面与倾角传感器坐标系YOZ平面近似重合, 镜面法向量与倾角传感器坐标系X轴正方向近似同向, 光电自准直仪坐标系不随倾角传感器及镜面坐标系姿态的变化而变化;

所述光电自准直仪的光源出射轴线与所述基站的反射镜中心的垂线处于平行状态。

2. 根据权利要求1所述的分布式测量系统基站姿态补偿装置, 其特征在于, 所述补偿装置还包括基准尺 (303), 用于根据基准尺两端点间的基准长度提供基准长度约束。

3. 根据权利要求1所述的分布式测量系统基站姿态补偿装置, 其特征在于, 所述装置设置一个所述光电自准直仪 (104) 和多个基站 (103), 选定其中一个基站为主基站, 所述光电自准直仪的光源出射轴线与所述主基站的反射镜中心的垂线处于平行状态。

4. 根据权利要求1所述的分布式测量系统基站姿态补偿装置, 其特征在于, 所述装置设置多个基站 (103), 每个所述基站配备一个对应的所述光电自准直仪 (104), 所述光电自准直仪的光源出射轴线与其对应的所述基站的反射镜中心的垂线处于平行状态。

5. 利用权利要求1所述分布式测量系统基站姿态补偿装置的姿态补偿方法, 包括以下步骤:

步骤一: 将多个基站 (103) 设置在精密摆动平台 (203) 上, 所述基站内嵌有倾角传感器 (102) 且侧壁上具有反射镜 (101), 选定一个基站作为主基站 (301), 其余基站为从基站, 调整所述光电自准直仪 (104) 的光源出射轴线, 使其与所述主基站 (301) 的反射镜中心的垂线处于平行状态下;

建立主基站 (301) 的倾角传感器坐标系, 由于镜面与倾角传感器坐标系平面近似重合, 镜面法向量与倾角传感器坐标系X轴正方向近似同向, 以此为基本关系建立主基站的镜面坐标系; 其中倾角传感器和基站固连, 因此主基站内倾角传感坐标系与基站坐标系、镜面坐标系的相对位姿关系不变; 光电自准直仪坐标系不随倾角传感器及镜面坐标系姿态的变化而变化;

步骤二: 利用激光跟踪仪 (201) 标定空间中的随机控制点 (202) 的坐标, 所述随机控制点 (202) 构成世界坐标系, 通过后向交会算法获得主基站 (301) 与世界坐标系之间的姿态关系, 利用所述精密摆动平台 (203) 多次调整主基站 (301) 姿态, 标定倾角传感坐标系与镜面坐标系之间的旋转矩阵, 获得新的主基站坐标系及其倾角传感器的姿态变化; 其中所述姿态关系为世界坐标系到主基站坐标系的旋转矩阵和平移矩阵;

步骤三: 利用步骤二获得的新的主基站坐标系及其倾角传感器的姿态变化, 在新的主基站坐标系下表达其余基站的坐标系, 获得主基站与从基站的姿态变化; 通过倾角传感器姿态变化过程的输出值与镜面姿态变化过程中所述光电自准直仪的输出值, 建立倾角传感器与光电自准直仪组合测量约束方程与目标函数; 将姿态变化后的主基站坐标系到从基站坐标系的平移矩阵作为初值进行非线性优化, 从而得到位姿变化后的位置参数, 实现实时更新基站姿态。

6. 利用权利要求5所述的姿态补偿方法, 其特征在于所述步骤三在“将姿态变化后的主

基站坐标系到从基站坐标系的平移矩阵作为初值进行非线性优化”后还包括:进一步利用基准尺的基准长度为约束建立目标函数,非线性优化所述目标函数从而得到位姿变化后的位置参数,实现实时更新基站姿态。

7. 利用权利要求5所述的姿态补偿方法,其特征在于步骤二具体包括如下步骤:

步骤2-1:由空间中的随机控制点构成世界坐标系 $O-X_W Y_W Z_W$,基站坐标系为 $O-X_T Y_T Z_T$,利用激光跟踪仪标定随机控制点的坐标,通过后向交会算法获得主基站与世界坐标系之间的姿态关系为:

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{WT} \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{WT} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{R}_{WT}$ 与 $\mathbf{T}_{WT}$ 分别是世界坐标系到单基站坐标系的旋转矩阵和平移矩阵;

步骤2-2:通过精密摆动平台对基站姿态进行多次精密调整,并保证每次姿态变化时反射镜面处于准直状态,即令光电自准直仪的输出值为 $[0,0]$,每次调整都通过步骤2-1后向交会算法获得基站与世界坐标系的姿态关系,推导不同姿态基站坐标系的姿态关系为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{Tj} \\ y_{Tj} \\ z_{Tj} \end{bmatrix} &= \mathbf{R}_{WTj} \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{WTj} = \mathbf{R}_{WTj} \mathbf{R}_{WTi}^{-1} \left(\begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{bmatrix} - \mathbf{T}_{WTi} \right) + \mathbf{T}_{WTj} \\ &= \mathbf{R}_{WTj} \mathbf{R}_{WTi}^{-1} \begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{bmatrix} - \mathbf{R}_{WTj} \mathbf{R}_{WTi}^{-1} \mathbf{T}_{WTi} + \mathbf{T}_{WTj} \\ &= \mathbf{R}_{Tij} \begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{Tij} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 i, j 表示基站不同姿态, $\mathbf{R}_{Tij}$ 、 $\mathbf{T}_{Tij}$ 表示基站坐标系从姿态 i 到姿态 j 的旋转矩阵和平移矩阵;

步骤2-3:不考虑平移时,不同姿态之间,基站只有绕镜面法向量的旋转,使用罗德里格斯旋转矩阵求解镜面法向量初值;对罗德里格斯公式逆变换,从旋转矩阵获得旋转向量,表达式如下:

$$\begin{aligned} \theta &= \arccos \left(\frac{\text{tr}(\mathbf{R}) - 1}{2} \right) \\ \sin \theta \begin{bmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & n_x \\ -n_y & -n_x & 0 \end{bmatrix} &= \frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}^T}{2} \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{R}$ 代表旋转矩阵; $\mathbf{R}^T$ 代表旋转矩阵的转置, $\mathbf{n}$ 是旋转向量,镜面法向量设为单位向量 $\mathbf{n}_T = [n_{Tx} \ n_{Ty} \ n_{Tz}]^T$;

将基站任意两个姿态之间的旋转矩阵 $\mathbf{R}_{Tij}$ 代入表达式获得镜面法向量在基站坐标系下的初值;

步骤2-4:镜面法向量具有如下约束关系:

$$\mathbf{f} = \mathbf{R}_{WTj} \mathbf{R}_{WTi}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{Tx} \\ \mathbf{n}_{Ty} \\ \mathbf{n}_{Tz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{Tx} \\ \mathbf{n}_{Ty} \\ \mathbf{n}_{Tz} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$h = \sqrt{\mathbf{n}_{Tx}^2 + \mathbf{n}_{Ty}^2 + \mathbf{n}_{Tz}^2} = 1 \quad (5)$$

根据镜面法向量的约束关系建立非线性目标函数,采用L-M算法进行非线性优化,获得镜面法向量在基站坐标系下的表示;非线性目标函数如下,式中M为罚因子,h为约束关系;

$$\min_{\mathbf{n}_T} \left\{ \sum_{i \neq j} (\mathbf{f}_1^2 + \mathbf{f}_2^2 + \mathbf{f}_3^2) + M(h-1)^2 \right\} \quad (6)$$

步骤2-5:已知基站坐标系与倾角传感器之间的姿态关系 $\mathbf{R}_{IT}$,镜面法向量在倾角传感器坐标系下的表示为:

$$\mathbf{n}_I = \mathbf{R}_{IT}^{-1} \mathbf{n}_T \quad (7)$$

步骤2-6:设倾角传感器坐标系的基为 $\{\mathbf{i}_I, \mathbf{j}_I, \mathbf{k}_I\}$,其在自身坐标系下的表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_I &= [1 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{j}_I &= [0 \ 1 \ 0]^T \\ \mathbf{k}_I &= [0 \ 0 \ 1]^T \end{aligned} \quad (8)$$

镜面坐标系的基为 $\{\mathbf{i}_M, \mathbf{j}_M, \mathbf{k}_M\}$,令镜面法向量为镜面坐标系Z轴,镜面坐标系Y轴与倾角传感器坐标系Z轴垂直,镜面坐标系X轴通过右手定则获得,如图1所示,则镜面坐标系的基在倾角传感器坐标系下表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_M &= \mathbf{n}_I \\ \mathbf{j}_M &= \mathbf{k}_M \times [0 \ 0 \ 1]^T \\ \mathbf{i}_M &= \mathbf{j}_M \times \mathbf{k}_M \end{aligned} \quad (9)$$

步骤2-7:根据方向余弦矩阵,倾角传感器坐标系到镜面坐标系的旋转矩阵即表示为:

$$\mathbf{R}_{IM} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_I \cdot \mathbf{i}_M & \mathbf{j}_I \cdot \mathbf{i}_M & \mathbf{k}_I \cdot \mathbf{i}_M \\ \mathbf{i}_I \cdot \mathbf{j}_M & \mathbf{j}_I \cdot \mathbf{j}_M & \mathbf{k}_I \cdot \mathbf{j}_M \\ \mathbf{i}_I \cdot \mathbf{k}_M & \mathbf{j}_I \cdot \mathbf{k}_M & \mathbf{k}_I \cdot \mathbf{k}_M \end{bmatrix} \quad (10)$$

8. 利用权利要求5所述的姿态补偿方法,其特征在于,所述步骤三具体包括如下步骤:

步骤3-1:根据上述步骤获得的倾角传感器坐标系 $0-X_I Y_I Z_I$ 、镜面坐标系 $0-X_M Y_M Z_M$ 、光电自准直坐标系 $0-X_A Y_A Z_A$,设镜面坐标系 $0-X_M Y_M Z_M$ 与姿态变化前参与自准直仪测量的镜面坐标系 $0-X_{M1} Y_{M1} Z_{M1}$ 不重合,假定两坐标系关系为:

$$\begin{bmatrix} x_{M1} \\ y_{M1} \\ z_{M1} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Z(\delta) \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 $\mathbf{R}_Z$ 为两坐标系的旋转矩阵, δ 为绕Z轴的旋转角;结合上式与步骤2-7,倾角传感器坐标系到镜面坐标系 $0-X_{M1} Y_{M1} Z_{M1}$ 的旋转矩阵表达式为:

$$R'_{IM} = R_Z(\delta) R_{IM} \quad (12)$$

步骤3-2:根据倾角传感器在姿态变化过程中的输出值,获得欧拉旋转角 α_{I1} 、 β_{I1} 、 α_{I2} 、 β_{I2} ,倾角传感器的姿态变化可表示为:

$$R_I = R_Y(\beta_{I2}) R_X(\alpha_{I2}) R_Z(\theta_I) R_X(-\alpha_{I1}) R_Y(-\beta_{I1}) \quad (13)$$

步骤3-3:根据镜面姿态变化过程中自准直仪的输出值,获得欧拉旋转角 α_{M1} 、 β_{M1} 、 α_{M1} 、 β_{M1} ,建立约束方程:

$$\begin{aligned} F &= R_I R'_{IM} - R'_{IM} R_{M1} \\ &= R_Y(\beta_{I2}) R_X(\alpha_{I2}) R_Z(\theta_I) R_X(-\alpha_{I1}) R_Y(-\beta_{I1}) R_Z(\delta) R_{IM} - R_Z(\delta) R_{IM} R_Z(\theta_M) R_Y(\beta_{M2}) R_X(\alpha_{M2}) R_X(-\alpha_{M1}) \\ &\quad R_Y(-\beta_{M1}) \\ &= [f_{ij}] = [0] \end{aligned} \quad (14)$$

步骤3-4:根据约束方程得到目标函数,并使用L-M算法进行非线性优化:

$$\min_{\theta_1, \delta, \theta_M} \left\{ \sum_{i=1}^3 (f_{i1}^2 + f_{i2}^2 + f_{i3}^2) \right\} \quad (15)。$$

9. 根据权利要求1所述的分布式测量系统基站姿态补偿装置,其特征在于,所述光电自准直仪的测角精度为 $0.4''$,所述倾角传感器为双轴倾角传感器。

分布式测量系统基站姿态补偿装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及大尺度空间三维坐标测量方法,具体涉及一种分布式测量系统基站姿态补偿装置及方法。

背景技术

[0002] 分布式测量系统具有多目标、多任务并行测量,测量空间可任意扩展等特点,近年来在工业测量领域得到广泛的应用。分布式测量系统以基于角度交会测量原理为主,例如多站视觉定位系统、经纬仪交汇测量系统、室内空间测量定位系统等。其中,室内空间测量定位系统是一种基于光电扫描角度交会的坐标测量系统,通过多个旋转激光发射装置(基站)组成测量网络,对接收器位置进行自动三维坐标测量,具有亚毫米级的测量精度,其以iGPS(indoor Global Positioning System)和wMPS(workshop Measurement Positioning System)为典型代表。

[0003] 系统中各个测量基站间相对位姿关系(位姿关系参数:3个位置参数和3个角度参数)的精确确定是实现分布式网络高精度测量的首要问题,为保证测量的精确,原则上须保证系统的定向参数在测量过程中严格不变。而在船舶、飞机等大型装备制造过程中,由于现场测量环境复杂,基站在长期运行过程中会不可避免地受外界振动等因素干扰,其位姿发生微小变化所引起的测量误差将会累积放大,影响最终测量结果,此时往往需要对系统进行重新标定。常规标定方法需要在有限的测量空间内构建足够的靶标几何约束数量,构建过程易受标定条件及环境制约,尤其不利于系统在复杂遮挡环境下的使用。为了减少定向过程测量空间端所需的约束条件,可以通过融合其它测量系统提供的几何约束,尤其是位姿关系的角度参数,以减少分布式测量单元相对位姿关系的自由度,达到有效提升测量系统的定向效率和环境适应能力的目的。

[0004] 因此,研究分布式测量系统中基站的姿态补偿方法是提高系统测量精度和满足复杂工业现场适应性的有效手段。专利CN207882432U公开了一种基于倾角传感的新型基站装置,通过刚性连接将倾角传感器安装在基站内部并实时捕捉倾角传感器的位姿信息。专利CN107144273A公开了一种基于倾角传感的室内测量定位系统基站姿态自动补偿方法,通过倾角传感器的输出,结合姿态补偿算法,实时更新基站姿态。但是,这些方法中利用的双轴倾角传感器能够实现2自由度的高精度角度测量,而基站姿态关系包括3个姿态角度参数,仅使用倾角传感器无法完全满足3个姿态角参数的补偿更新需求。

[0005] 为此,需要一种针对分布式测量系统的基站姿态关系补偿需求,能够实现3个姿态角度参数补偿的装置及方法。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种基于光电自准直与倾角传感组合测量的分布式测量系统基站姿态补偿装置及方法,引入光电自准直仪作为额外的角度测量装置,通过建立双轴倾角传感器与光电自准直仪组合测量,解决了仅使用倾角传感器无法完全满足姿态更新

要求的问题,将位姿补偿问题分解为测量单元姿态的更新和系统位置参数的解算,实现对基站姿态变化的实时补偿,对测量系统长期稳定的测量提供保证,可满足复杂工业现场的测量要求。

[0007] 本发明的目的是通过以下技术方案实现的:

[0008] 分布式测量系统基站姿态补偿装置,包括多个基站和光电自准直仪;

[0009] 其中,所述基站包括嵌在所述基站内部的倾角传感器,以及设置在所述基站侧壁上的反射镜;所述基站放置在精密摆动平台上;

[0010] 所述反射镜镜面与倾角传感器坐标系YOZ平面近似重合,镜面法向量与倾角传感器坐标系X轴正方向近似同向,光电自准直仪坐标系不随倾角传感器及镜面坐标系姿态的变化而变化;

[0011] 所述光电自准直仪的光源出射轴线与所述基站的反射镜中心的垂线处于平行状态。

[0012] 进一步的,所述补偿装置还包括基准尺,用于根据基准尺两端点间的基准长度提供基准长度约束。

[0013] 进一步的,所述装置设置一个所述光电自准直仪和多个基站,选定其中一个基站为主基站,所述光电自准直仪的光源出射轴线与所述主基站的反射镜中心的垂线处于平行状态。

[0014] 进一步的,所述装置设置多个基站,每个所述基站配备一个对应的所述光电自准直仪,所述光电自准直仪的光源出射轴线与其对应的所述基站的反射镜中心的垂线处于平行状态。

[0015] 利用所述分布式测量系统基站姿态补偿装置的姿态补偿方法,包括以下步骤:

[0016] 步骤一:将多个基站设置在精密摆动平台上,所述基站内嵌有倾角传感器且侧壁上具有反射镜,选定一个基站作为主基站,其余基站为从基站,调整所述光电自准直仪的光源出射轴线,使其与所述主基站的反射镜中心的垂线处于平行状态下;

[0017] 建立主基站的倾角传感器坐标系,由于镜面与倾角传感器坐标系平面近似重合,镜面法向量与倾角传感器坐标系X轴正方向近似同向,以此为基本关系建立主基站的镜面坐标系;其中倾角传感器和基站固连,因此主基站内倾角传感坐标系与基站坐标系、镜面坐标系的相对位姿关系不变;光电自准直仪坐标系不随倾角传感器及镜面坐标系姿态的变化而变化;

[0018] 步骤二:利用激光跟踪仪标定空间中的随机控制点的坐标,随机控制点构成世界坐标系,通过后向交会算法获得主基站与世界坐标系之间的姿态关系,利用所述精密摆动平台多次调整主基站姿态,标定倾角传感坐标系与镜面坐标系之间的旋转矩阵,获得新的主基站坐标系及其倾角传感器的姿态变化;其中所述姿态关系为世界坐标系到主基站坐标系的旋转矩阵和平移矩阵;

[0019] 步骤三:利用步骤二获得的新的主基站坐标系及其倾角传感器的姿态变化,在新的主基站坐标系下表达其余基站的坐标系,获得主基站与从基站的姿态变化;通过倾角传感器姿态变化过程的输出值与镜面姿态变化过程中所述光电自准直仪的输出值,建立倾角传感器与光电自准直仪组合测量约束方程与目标函数;将姿态变化后的主基站坐标系到从基站坐标系的平移矩阵作为初值进行非线性优化,从而得到位姿变化后的位置参数,实现

实时更新基站姿态。

[0020] 进一步的,所述步骤三在“将姿态变化后的主基站坐标系到从基站坐标系的平移矩阵作为初值进行非线性优化”后还包括:进一步利用基准尺的基准长度为约束建立目标函数,非线性优化所述目标函数从而得到位姿变化后的位置参数,实现实时更新基站姿态。

[0021] 进一步的,步骤二具体包括如下步骤:

[0022] 步骤2-1:由空间中的随机控制点构成世界坐标系 $O-X_WY_WZ_W$,基站坐标系为 $O-X_TY_TZ_T$,利用激光跟踪仪标定随机控制点的坐标,通过后向交会算法获得主基站与世界坐标系之间的姿态关系为:

$$[0023] \quad \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = R_{WT} \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + T_{WT} \quad (1)$$

[0024] 其中, R_{WT} 与 T_{WT} 分别是世界坐标系到单基站坐标系的旋转矩阵和平移矩阵;

[0025] 步骤2-2:通过精密摆动平台对基站姿态进行多次精密调整,并保证每次姿态变化时反射镜面处于准直状态,即令光电自准直仪的输出值为 $[0,0]$,每次调整都通过步骤2-1后向交会算法获得基站与世界坐标系的姿态关系,推导不同姿态基站坐标系的姿态关系为:

$$[0026] \quad \begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{Tj} \\ y_{Tj} \\ z_{Tj} \end{bmatrix} &= R_{WTj} \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + T_{WTj} = R_{WTj} R_{WTi}^{-1} \left(\begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{bmatrix} - T_{WTi} \right) + T_{WTj} \\ &= R_{WTj} R_{WTi}^{-1} \begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{bmatrix} - R_{WTj} R_{WTi}^{-1} T_{WTi} + T_{WTj} \\ &= R_{Tij} \begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{bmatrix} + T_{Tij} \end{aligned} \quad (2)$$

[0027] 其中 i, j 表示基站不同姿态, R_{Tij} 、 T_{Tij} 表示基站坐标系从姿态 i 到姿态 j 的旋转矩阵和平移矩阵;

[0028] 步骤2-3:不考虑平移时,不同姿态之间,基站只有绕镜面法向量(设为单位向量 $n_T = [n_{Tx} n_{Ty} n_{Tz}]^T$)的旋转,使用罗德里格斯旋转矩阵求解镜面法向量初值;对罗德里格斯公式逆变换,从旋转矩阵获得旋转向量,表达式如下:

$$[0029] \quad \theta = \arccos \left(\frac{\text{tr}(R) - 1}{2} \right)$$

$$[0030] \quad \sin \theta \begin{bmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & n_x \\ -n_y & -n_x & 0 \end{bmatrix} = \frac{R - R^T}{2} \quad (3)$$

[0031] 其中 R 代表旋转矩阵; R^T 代表旋转矩阵的转置, n 是旋转向量;

[0032] 将基站任意两个姿态之间的旋转矩阵 R_{Tij} 代入表达式获得镜面法向量在基站坐标系下的初值。

[0033] 步骤2-4:镜面法向量具有如下约束关系:

$$[0034] \quad \mathbf{f} = \mathbf{R}_{WTj} \mathbf{R}_{WTi}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{Tx} \\ \mathbf{n}_{Ty} \\ \mathbf{n}_{Tz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{Tx} \\ \mathbf{n}_{Ty} \\ \mathbf{n}_{Tz} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$[0035] \quad h = \sqrt{\mathbf{n}_{Tx}^2 + \mathbf{n}_{Ty}^2 + \mathbf{n}_{Tz}^2} = 1 \quad (5)$$

[0036] 根据镜面法向量的约束关系建立非线性目标函数,采用L-M算法进行非线性优化,获得镜面法向量在基站坐标系下的表示。非线性目标函数如下,式中M为罚因子,h为约束关系。

$$[0037] \quad \min_{\mathbf{n}_T} \left\{ \sum_{i \neq j} (\mathbf{f}_1^2 + \mathbf{f}_2^2 + \mathbf{f}_3^2) + M(h-1)^2 \right\} \quad (6)$$

[0038] 步骤2-5:已知基站坐标系与倾角传感器之间的姿态关系 $\mathbf{R}_{IT}$,镜面法向量在倾角传感器坐标系下的表示为:

$$[0039] \quad \mathbf{n}_I = \mathbf{R}_{IT}^{-1} \mathbf{n}_T \quad (7)$$

[0040] 步骤2-6:设倾角传感器坐标系的基为 $\{\mathbf{i}_I, \mathbf{j}_I, \mathbf{k}_I\}$,其在自身坐标系下的表示为:

$$[0041] \quad \mathbf{i}_I = [1 \ 0 \ 0]^T$$

$$[0042] \quad \mathbf{j}_I = [0 \ 1 \ 0]^T$$

$$[0043] \quad \mathbf{k}_I = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (8)$$

[0044] 镜面坐标系的基为 $\{\mathbf{i}_M, \mathbf{j}_M, \mathbf{k}_M\}$,令镜面法向量为镜面坐标系Z轴,镜面坐标系Y轴与倾角传感器坐标系Z轴垂直,镜面坐标系X轴通过右手定则获得,如图1所示,则镜面坐标系的基在倾角传感器坐标系下表示为:

$$[0045] \quad \mathbf{k}_M = \mathbf{n}_I$$

$$[0046] \quad \mathbf{j}_M = \mathbf{k}_M \times [0 \ 0 \ 1]^T$$

$$[0047] \quad \mathbf{i}_M = \mathbf{j}_M \times \mathbf{k}_M \quad (9)$$

[0048] 步骤2-7:根据方向余弦矩阵,倾角传感器坐标系到镜面坐标系的旋转矩阵即表示为:

$$[0049] \quad \mathbf{R}_{IM} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_I \cdot \mathbf{i}_M & \mathbf{j}_I \cdot \mathbf{i}_M & \mathbf{k}_I \cdot \mathbf{i}_M \\ \mathbf{i}_I \cdot \mathbf{j}_M & \mathbf{j}_I \cdot \mathbf{j}_M & \mathbf{k}_I \cdot \mathbf{j}_M \\ \mathbf{i}_I \cdot \mathbf{k}_M & \mathbf{j}_I \cdot \mathbf{k}_M & \mathbf{k}_I \cdot \mathbf{k}_M \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0050] 进一步的,所述步骤三具体包括如下步骤:

[0051] 步骤3-1:根据上述步骤获得的倾角传感器坐标系 $0-X_I Y_I Z_I$ 、镜面坐标系 $0-X_M Y_M Z_M$ 、光电自准直坐标系 $0-X_A Y_A Z_A$,设镜面坐标系 $0-X_M Y_M Z_M$ 与姿态变化前参与自准直仪测量的镜面坐标系 $0-X_{M1} Y_{M1} Z_{M1}$ 不重合,假定两坐标系关系为:

$$[0052] \quad \begin{bmatrix} x_{M1} \\ y_{M1} \\ z_{M1} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Z(\delta) \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix} \quad (11)$$

[0053] 其中 R_z 为两坐标系的旋转矩阵, δ 为绕Z轴的旋转角;结合上式与步骤2-7,倾角传感器坐标系到镜面坐标系 $O-X_{M1}Y_{M1}Z_{M1}$ 的旋转矩阵表达式为:

$$[0054] \quad R'_{IM} = R_z(\delta) R_{IM} \quad (12)$$

[0055] 步骤3-2:根据倾角传感器在姿态变化过程中的输出值,获得欧拉旋转角 α_{I1} 、 β_{I1} 、 α_{I2} 、 β_{I2} ,倾角传感器的姿态变化可表示为:

$$[0056] \quad R_I = R_Y(\beta_{I2}) R_X(\alpha_{I2}) R_Z(\theta_I) R_X(-\alpha_{I1}) R_Y(-\beta_{I1}) \quad (13)$$

[0057] 步骤3-3:根据镜面姿态变化过程中自准直仪的输出值,获得欧拉旋转角 α_{M1} 、 β_{M1} 、 α_{M1} 、 β_{M1} ,建立约束方程:

$$[0058] \quad F = R_I R'_{IM} - R'_{IM} R_{M1}$$

$$[0059] \quad = R_Y(\beta_{I2}) R_X(\alpha_{I2}) R_Z(\theta_I) R_X(-\alpha_{I1}) R_Y(-\beta_{I1}) R_Z(\delta) R_{IM} - R_Z(\delta) R_{IM} R_Z(\theta_M) R_Y(\beta_{M2}) R_X(\alpha_{M2}) R_X(-\alpha_{M1}) R_Y(-\beta_{M1})$$

$$[0060] \quad = [f_{ij}] = [0] \quad (14)$$

[0061] 步骤3-4:根据约束方程得到目标函数,并使用L-M算法进行非线性优化:

$$[0062] \quad \min_{\theta_I, \delta, \theta_M} \left\{ \sum_{i=1}^3 (f_{i1}^2 + f_{i2}^2 + f_{i3}^2) \right\} \quad (15)$$

[0063] 进一步的,光电自准直仪的测角精度为 $0.4''$,所述倾角传感器为双轴倾角传感器。

[0064] 与现有技术相比,本发明的技术方案所带来的有益效果是:

[0065] 本发明研究了分布式测量系统的基站姿态参数补偿问题,引入光电自准直仪和双轴倾角传感器为测量基站提供外部角度约束,对倾角传感器与自准直镜面法向量进行标定,利用光电自准直仪与双轴倾角传感器实现组合测量,为位姿参数的补偿提供高精度的角度信息,结合已有的定向先验信息进一步减少了待标定的定向参数个数,实现了有效重定向。此方法解决了基站姿态变化后须重复性大范围重新定向的问题,能有效补偿发生变化的系统外部参数,包括更新测量基站坐标系之间的旋转矩阵和解算测量基站坐标系之间的位置参数,增强了系统的鲁棒性,实现了测量基站的姿态更新。

附图说明

[0066] 图1是本发明所述的分布式测量系统基站姿态补偿装置中基站与光电自准直仪的结构示意图;

[0067] 图2是实施例1所述的分布式测量系统基站姿态补偿装置结构示意图;

[0068] 图3是实施例2所述的姿态补偿方法的工作原理图。

[0069] 其中,

[0070] 101:反射镜 102:倾角传感器 103:基站

[0071] 1002:高精度可调节基座 1003:线结构激光器

[0072] 1004:匀速旋转平台 104:光电自准直仪 202:随机控制点

[0073] 203:精密摆动平台 301:主基站 302:从基站

[0074] 303:基准尺

具体实施方式

[0075] 为使本发明实施例的目的、技术方案、有益效果及显著进步更加清楚,下面,将以

室内空间测量定位系统(wMPS) 基站的姿态变化补偿为例,结合本发明实施例中所提供的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所有描述的这些实施例仅是本发明的部分实施例,而不是全部的实施例;基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0076] 实施例1

[0077] 如图1-2所示,分布式测量系统基站姿态补偿装置,包括1个基站103,和光电自准直仪104。其中,如图1所示,所述基站103包括由下至上依次固装高精度可调节基座1002和激光发射装置;所述高精度可调节基座2的中心具有一竖直向上的螺纹柱用于与所述激光发射装置配合连接;所述激光发射装置包括匀速旋转平台1004,所述匀速旋转平台1004的侧壁上周向的安装有两个线结构激光器1003,所述线结构激光器1003能够随所述匀速旋转平台1004一同旋转;还包括嵌在所述基站内部的倾角传感器102,以及设置在所述基站侧壁上的反射镜101;所述基站103放置在精密摆动平台203上(如图2所示)。所述光电自准直仪104的光源出射轴线与所述基站103的反射镜101中心的垂线处于平行状态。

[0078] 根据实际使用情况,所述装置可以设置多个基站103,每个所述基站配备一个对应的所述光电自准直仪104,所述光电自准直仪的光源出射轴线与其对应的所述基站的反射镜中心的垂线处于平行状态。

[0079] 所述反射镜101的镜面与倾角传感器坐标系YOZ平面近似重合,镜面法向量与倾角传感器坐标系X轴正方向近似同向,光电自准直仪坐标系不随倾角传感器及镜面坐标系姿态的变化而变化。

[0080] 如图2所示,利用所述分布式测量系统基站姿态补偿装置的姿态补偿方法,包括以下步骤:

[0081] 步骤一:将1个基站设置在精密摆动平台203上,所述基站内嵌有倾角传感器102且侧壁上具有反射镜101,选定距离所述光电自准直仪最近的一个基站作为主基站301,调整所述光电自准直仪104的光源出射轴线,使其与所述主基站301的反射镜中心的垂线处于平行状态下;

[0082] 建立主基站301的倾角传感器坐标系YOZ,由于镜面与倾角传感器坐标系平面近似重合,镜面法向量与倾角传感器坐标系X轴正方向近似同向,以此为基本关系建立主基站的镜面坐标系;其中倾角传感器和基站固连,因此主基站内倾角传感坐标系与基站坐标系、镜面坐标系的相对位姿关系不变;光电自准直仪坐标系不随倾角传感器及镜面坐标系姿态的变化而变化;当主基站301移动时,倾角传感器和反射镜面也会随之移动,但光电自准直仪是始终不动的。本实施例中光电自准直仪104选择德国TRIOPTICS生产的TriAngle-TA500-57,焦距500mm,测角精度达0.4"。

[0083] 步骤二具体包括如下步骤:

[0084] 步骤2-1:利用激光跟踪仪201标定空间中的随机控制点202的坐标,随机控制点构成世界坐标系 $O-X_WY_WZ_W$,主基站坐标系为 $O-X_TY_TZ_T$,利用激光跟踪仪201标定随机控制点的坐标,通过后向交会算法获得主基站301与世界坐标系之间的姿态关系为:

$$[0085] \quad \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = R_{WT} \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + T_{WT} \quad (1)$$

[0086] 其中, R_{WT} 与 T_{WT} 分别是世界坐标系到单基站坐标系的旋转矩阵和平移矩阵;

[0087] 步骤2-2:通过精密摆动平台203对主基站301姿态进行3次精密调整,图2示出基站的三个姿态,从左到右用弯曲箭头表示顺序,保证每次姿态变化时位于主基站301上的反射镜面处于准直状态,即令光电自准直仪104的输出值为 $[0,0]$,每次调整都通过步骤2-1后向交会算法获得主基站与世界坐标系的姿态关系,推导不同姿态主基站坐标系的姿态关系为:

$$[0088] \quad \begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{Tj} \\ y_{Tj} \\ z_{Tj} \end{bmatrix} &= R_{WTj} \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + T_{WTj} = R_{WTj} R_{WTi}^{-1} \left(\begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{bmatrix} - T_{WTi} \right) + T_{WTj} \\ &= R_{WTj} R_{WTi}^{-1} \begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{bmatrix} - R_{WTj} R_{WTi}^{-1} T_{WTi} + T_{WTj} \\ &= R_{Tij} \begin{bmatrix} x_{Ti} \\ y_{Ti} \\ z_{Ti} \end{bmatrix} + T_{Tij} \end{aligned} \quad (2)$$

[0089] 其中*i, j*表示主基站不同姿态, R_{Tij} 、 T_{Tij} 表示主基站坐标系从姿态*i*到姿态*j*的旋转矩阵和平移矩阵;

[0090] 步骤2-3:不考虑平移时,不同姿态之间,主基站301只有绕镜面法向量(设为单位向量 $n_T = [n_{Tx} \ n_{Ty} \ n_{Tz}]^T$)的旋转,使用罗德里格斯旋转矩阵求解镜面法向量初值;对罗德里格斯公式逆变换,可以从旋转矩阵获得旋转向量,表达式如下:

$$[0091] \quad \theta = \arccos\left(\frac{\text{tr}(R) - 1}{2}\right)$$

$$[0092] \quad \sin \theta \begin{bmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & n_x \\ -n_y & -n_x & 0 \end{bmatrix} = \frac{R - R^T}{2} \quad (3)$$

[0093] 其中*R*代表旋转矩阵; R^T 代表旋转矩阵的转置, *n*是旋转向量;

[0094] 将主基站任意两个姿态之间的旋转矩阵 R_{Tij} 代入表达式获得镜面法向量在基站坐标系下的初值。

[0095] 步骤2-4:镜面法向量具有如下约束关系:

$$[0096] \quad f = R_{WTj} R_{WTi}^{-1} \begin{bmatrix} n_{Tx} \\ n_{Ty} \\ n_{Tz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} n_{Tx} \\ n_{Ty} \\ n_{Tz} \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

$$[0097] \quad h = \sqrt{n_{Tx}^2 + n_{Ty}^2 + n_{Tz}^2} = 1 \quad (5)$$

[0098] 根据镜面法向量的约束关系建立非线性目标函数,采用L-M算法进行非线性优化,获得镜面法向量在基站坐标系下的表示;非线性目标函数如下:

$$[0099] \quad \min_{n_T} \left\{ \sum_{i \neq j} (f_1^2 + f_2^2 + f_3^2) + M(h-1)^2 \right\} \quad (6)$$

[0100] 其中M为罚因子,h为约束关系。;

[0101] 步骤2-5:已知主基站坐标系与倾角传感器之间的姿态关系 R_{IT} ,镜面法向量在倾角传感器坐标系下的表示为:

$$[0102] \quad n_I = R_{IT}^{-1} n_T \quad (7)$$

[0103] 其中 R_{IT} 代表基站坐标系与倾角传感器之间的姿态关系, n_T 代表镜面法向量在主基站坐标系下的表示, n_I 代表镜面法向量在倾角传感器坐标系下的表示;

[0104] 步骤2-6:设倾角传感器坐标系的基为 $\{i_I, j_I, k_I\}$,其在自身坐标系下的表示为:

$$[0105] \quad i_I = [1 \ 0 \ 0]^T$$

$$[0106] \quad j_I = [0 \ 1 \ 0]^T$$

$$[0107] \quad k_I = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (8)$$

[0108] 镜面坐标系的基为 $\{i_M, j_M, k_M\}$,令镜面法向量为镜面坐标系Z轴,镜面坐标系Y轴与倾角传感器坐标系Z轴垂直,镜面坐标系X轴通过右手定则获得,如图1所示,则镜面坐标系的基在倾角传感器坐标系下表示为:

$$[0109] \quad k_M = n_I$$

$$[0110] \quad j_M = k_M \times [0 \ 0 \ 1]^T$$

$$[0111] \quad i_M = j_M \times k_M \quad (9)$$

[0112] 步骤2-7:根据方向余弦矩阵,倾角传感器坐标系到镜面坐标系的旋转矩阵即表示为:

$$[0113] \quad R_{IM} = \begin{bmatrix} i_I \cdot i_M & j_I \cdot i_M & k_I \cdot i_M \\ i_I \cdot j_M & j_I \cdot j_M & k_I \cdot j_M \\ i_I \cdot k_M & j_I \cdot k_M & k_I \cdot k_M \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0114] 步骤三具体包括如下步骤:

[0115] 步骤3-1:根据上述步骤获得的倾角传感器坐标系 $0-X_I Y_I Z_I$ 、镜面坐标系 $0-X_M Y_M Z_M$ 、光电自准直坐标系 $0-X_A Y_A Z_A$,设镜面坐标系 $0-X_M Y_M Z_M$ 与姿态变化前参与自准直仪测量的镜面坐标系 $0-X_{M1} Y_{M1} Z_{M1}$ 不重合,假定两坐标系关系为:

$$[0116] \quad \begin{bmatrix} x_{M1} \\ y_{M1} \\ z_{M1} \end{bmatrix} = R_Z(\delta) \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix} \quad (11)$$

[0117] 其中 R_Z 为两坐标系的旋转矩阵, δ 为绕Z轴的旋转角;结合上式与步骤2-7,倾角传感器坐标系到镜面坐标系 $0-X_{M1} Y_{M1} Z_{M1}$ 的旋转矩阵表达式为:

$$[0118] \quad R'_{IM} = R_Z(\delta) R_{IM} \quad (12)$$

[0119] 步骤3-2:根据倾角传感器在姿态变化过程中的输出值,获得欧拉旋转角 α_{I1} 、 β_{I1} 、 α_{I2} 、 β_{I2} ,倾角传感器的姿态变化可表示为:

$$[0120] \quad R_I = R_Y(\beta_{I2}) R_X(\alpha_{I2}) R_Z(\theta_I) R_X(-\alpha_{I1}) R_Y(-\beta_{I1}) \quad (13)$$

[0121] 步骤3-3:根据镜面姿态变化过程中自准直仪104的输出值,获得欧拉旋转角 α_{M1} 、 β_{M1} 、 α_{M2} 、 β_{M2} ,建立约束方程:

$$[0122] \quad F = R_I R'_{IM} - R'_{IM} R_{M1}$$

$$[0123] \quad = R_Y(\beta_{I2}) R_X(\alpha_{I2}) R_Z(\theta_I) R_X(-\alpha_{I1}) R_Y(-\beta_{I1}) R_Z(\delta) R_{IM} R_Z(\delta) R_{IM} R_Z(\theta_M) R_Y(\beta_{M2}) R_X(\alpha_{M2}) R_X(-\alpha_{M1}) R_Y(-\beta_{M1})$$

$$[0124] \quad = [f_{ij}] = [0] \quad (14)$$

[0125] 步骤3-4:根据约束方程得到目标函数,并使用L-M算法进行非线性优化:

$$[0126] \quad \min_{\theta_I, \delta, \theta_M} \{ \sum_{i=1}^3 (f_{i1}^2 + f_{i2}^2 + f_{i3}^2) \} \quad (15)$$

[0127] 其中 θ_I 为倾角传感器绕Z轴的旋转角度, θ_M 为镜面处于准直状态时绕Z轴的旋转角度,由于倾角传感器与光电自准直仪的测量范围较小,因此将 θ_I 、 δ 、 θ_M 的初值设置为0。根据式(13)以及优化后的 θ_I 即可得到倾角传感器坐标系的姿态变化矩阵 R_I ,由于基站与倾角传感器刚性连接,即可通过倾角传感器的姿态变化得到基站的姿态变化。

[0128] 实施例2

[0129] 实施例2的结构与实施例1近似,在此不再赘述,以下只描述其区别特征。如图3所示,以分布式测量系统的代表室内空间测量定位系统(wMPS)为例,双站系统是wMPS中的基本系统,假定在测量过程中系统内的每一个基站的位姿都会发生变化。系统内设置两个基站,基站编号设为1和2,以基站1为主基站301,基站2为从基站302,其坐标系为世界坐标系。

[0130] 所述实施例2的分布式测量系统基站姿态补偿装置还包括基准尺303,用于根据基准尺两端点间的基准长度提供基准长度约束。

[0131] 利用所述分布式测量系统基站姿态补偿装置的姿态补偿方法,包括以下步骤:

[0132] 步骤一:将2个基站设置在精密摆动平台203上,所述基站301,302内嵌有倾角传感器102且侧壁上具有反射镜101,选定一个基站作为主基站301,调整所述光电自准直仪104的光源出射轴线,使其与所述主基站301的反射镜中心的垂线处于平行状态下;

[0133] 建立主基站301的倾角传感器坐标系Y0Z,由于镜面与倾角传感器坐标系平面近似重合,镜面法向量与倾角传感器坐标系X轴正方向近似同向,以此为基本关系建立主基站的镜面坐标系;其中倾角传感器和基站固连,因此主基站内倾角传感坐标系与基站坐标系、镜面坐标系的相对位姿关系不变;光电自准直仪坐标系不随倾角传感器及镜面坐标系姿态的变化而变化;本实施例中光电自准直仪104选择德国TRIOPTICS生产的TriAngle-TA500-57,焦距500mm,测角精度达0.4"。

[0134] 步骤二:

[0135] 利用激光跟踪仪201标定空间中的随机控制点202的坐标,随机控制点构成世界坐标系 $O-X_W Y_W Z_W$,主基站坐标系为 $O-X_T Y_T Z_T$,利用激光跟踪仪标定随机控制点的坐标,通过后向交会算法获得单基站与世界坐标系之间的姿态关系为:

$$[0136] \quad \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = R_{WT} \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + T_{WT} \quad (16)$$

[0137] $R_{WT1} = I, T_{WT1} = 0$

[0138] $R_{WT2} = R_{T12}, T_{WT2} = T_{T12}$

[0139] (17)

[0140] 其中,以基站301作为主基站,其坐标系作为世界坐标系,则 R_{WT1} 是世界坐标系到主基站301的旋转矩阵,为单位阵, R_{WT2} 是世界坐标系到从基站302坐标系的旋转矩阵, T_{WT1} 是世界坐标系到主基站301的平移矩阵,为零向量, T_{WT2} 是世界坐标系到从基站302坐标系的平移矩阵;

[0141] R_{T12} 是主基站301坐标系到从基站302坐标系的旋转矩阵;

[0142] T_{T12} 是主基站301坐标系到从基站302坐标系的平移矩阵;

[0143] 步骤三:

[0144] 由于基站与倾角传感器刚性连接,基站与倾角传感器之间的姿态关系始终保持不变,则单基站的姿态变化 R_d 满足如下方程:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} x'_T \\ y'_T \\ z'_T \end{bmatrix} &= R_d \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} \\
 &= R_{IT} R_I R_{IT}^{-1} \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} \\
 &= R_{IT} R_Y(\beta_2) R_X(\alpha_2) R_Z(\theta_1) R_X(-\alpha_{11}) R_Y(-\beta_{11}) R_{IT}^{-1} \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} \quad (18)
 \end{aligned}$$

[0146] 其中 R_{IT} 为倾角传感器坐标系到基站坐标系的旋转矩阵, R_I 为倾角传感器坐标系的姿态变化矩阵,参见式(13), R_X 、 R_Y 、 R_Z 分别为 R_I 三个轴的分量, α 和 β 为倾角传感器输出值(下标1代表变化前,下标2代表变化后);

[0147] 双站系统中基站301和基站302的姿态变化 R_{d1} 和 R_{d2} 满足:

[0148] $R_{WT2} = R'_{T12} = R_{d2} R_{T12} R_{d1}^{-1} \quad (19)$

[0149] 其中 R_{T12} 和 R'_{T12} 为姿态变化前和变化后基站301到基站302的旋转矩阵,此时的 R_{WT2} 即为双站系统中新的姿态参数。

[0150] 根据基站301坐标系的姿态变化 R_{d1} 可以得到点 O_2 在新的基站1坐标系下的坐标为

[0151] $O'_2 = R_{d1}^{-1} O_2 = -R_{d1}^{-1} R_{12}^{-1} T_{12}, \quad (20)$

[0152] 进而可得位姿变化后的基站301到基站302的平移矩阵

[0153] $T'_{12} = R'_{12} R_{d1}^{-1} R_{12}^{-1} T_{12}, \quad (21)$

[0154] T'_{12} 可作为初值进行非线性优化。

[0155] 利用基准尺303的基准长度为系统提供额外约束,根据基准尺两端点以及基站交会条件,可以得到如下约束:

$$[0156] \quad f_{mnl}(\theta_{mn}, c_l; R_{WTm}, T_{WTm}) = [a_{mn} \quad b_{mn} \quad c_{mn} \quad d_{mn}] \begin{bmatrix} R_z(\theta_{mn}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{WTm} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \\ 1 \end{bmatrix} + T_{WTm} \quad (22)$$

$$= 0$$

[0157] 其中 $l=1,2$ 为基准尺两端点序号, R_{WT2} 可根据位姿变化前的参数与上式补偿得到。

[0158] 根据基准尺的基准长度约束 $r(C)$, 可以建立目标函数为:

$$[0159] \quad \min_{T_{WT2}, C} \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^2 \sum_{l=1}^2 [f_{mnl}(\theta_{mn}, C; R_{WT2}, T_{WT2})]^2 + \lambda [r(C)]^2 \right\} \quad (23)$$

[0160] 其中 $r(C) = [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2]^{\frac{1}{2}} - L = 0$, 式中 L 为基准尺的尺长真值。将 T_{12}' 作为初值对目标函数进行非线性优化, 即可得到位姿变化后的位置参数 T_{WT2} 。

[0161] 综上所述, 本发明公开了分布式测量系统基站姿态补偿装置及方法, 解决了仅使用倾角传感器无法完全满足姿态更新要求的问题, 实现对基站姿态变化的自动补偿, 增强测量系统的稳定性, 大大提高了分布式测量系统的在复杂工业现场的适用性。

[0162] 其中, 本发明技术方案中涉及的倾角传感器测量模型可参考文献: “张维胜. 倾角传感器原理和发展[J]. 传感器世界, 2002, {4} (08): 18-21.”;

[0163] 光电自准直仪测量模型可参考文献: “欧同庚, 陈志高, 杨博雄, 付辉清. CCD光电自准直仪工作原理及误差源分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, {4} (S1): 98-100.”;

[0164] 基站测量模型可参考文献: “杨凌辉. 基于光电扫描的大尺度空间坐标测量定位技术研究[D]. 天津大学, 2010”;

[0165] 空间后向交会测量方法可参考文献: “刘哲旭. 面向大型复杂现场的测量定位方法研究[D]. 天津大学, 2014”。

[0166] 以上实施例仅用以说明本发明的技术方案, 而非是对其的限制, 尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明, 本领域的普通技术人员应当理解, 其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改, 或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换, 而这些修改或者替换, 并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围, 本领域技术人员根据本说明书内容所做出的非本质改进和调整或者替换, 均属本发明所要求保护的范围。

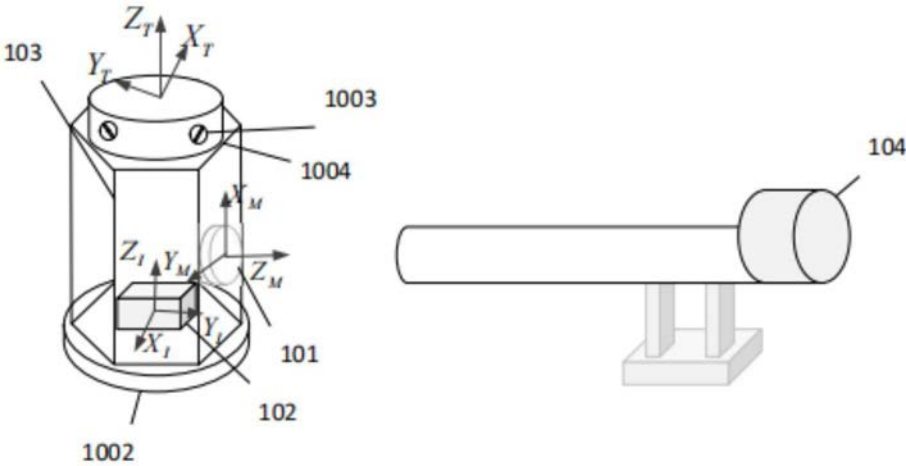


图1

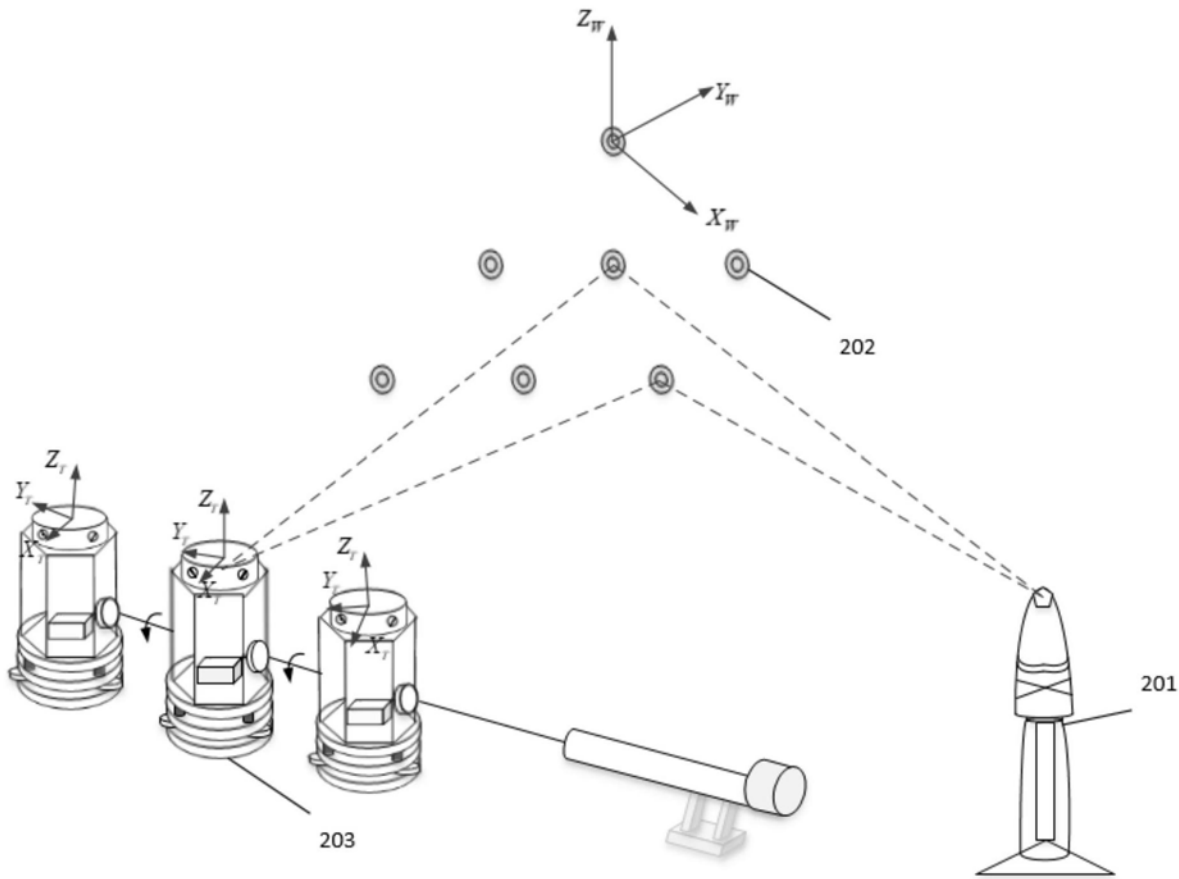


图2

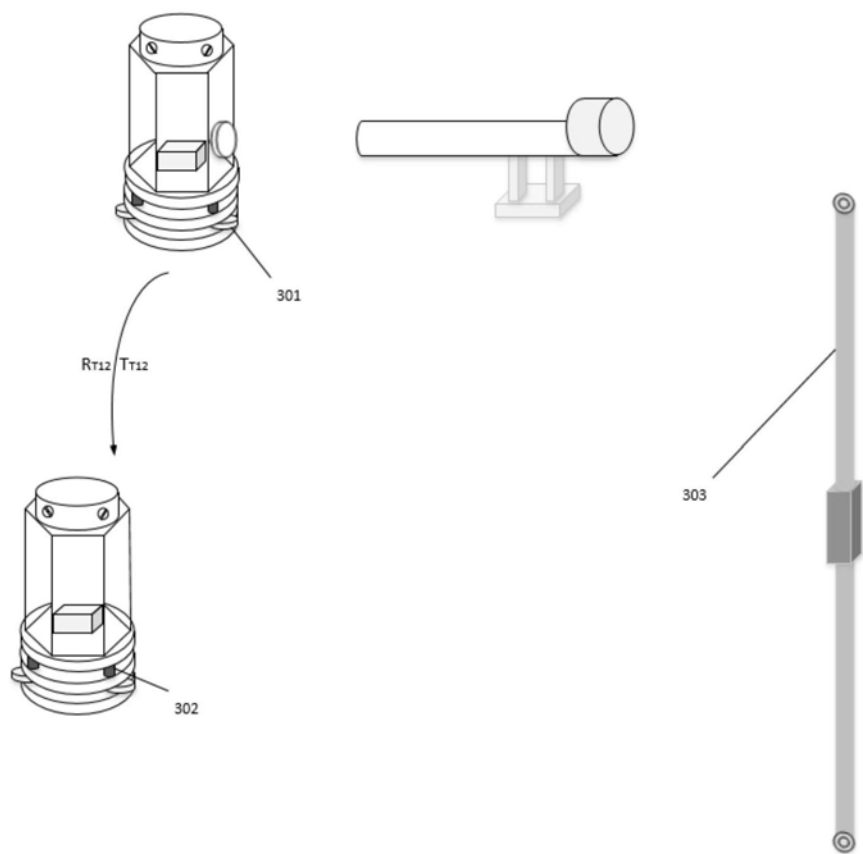


图3