

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 11 月 26 日 (26.11.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/233290 A1

- (51) 国际专利分类号:
B64F 5/60 (2017.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/084846
- (22) 国际申请日: 2020 年 4 月 15 日 (15.04.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910413535.4 2019年5月17日 (17.05.2019) CN
- (71) 申请人: 东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。
- (72) 发明人: 陈熙源(CHEN, Xiyuan); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。 杨萍(YANG, Ping); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼

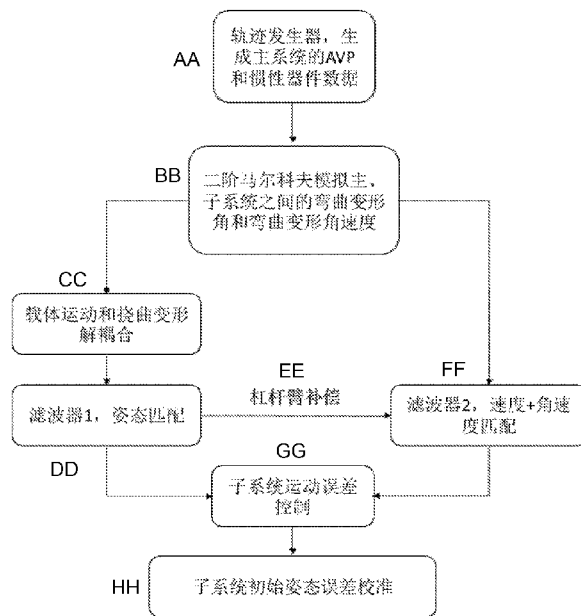
2号, Jiangsu 210096 (CN)。 方琳(FANG, Lin); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。 王俊玮(WANG, Junwei); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼2号, Jiangsu 210096 (CN)。

(74) 代理人: 南京众联专利代理有限公司(NANJING ZHONGLIAN PATENT AGENCY CO., LTD.); 中国江苏省南京市建邺区福园街129号万达广场7层, Jiangsu 210017 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,

(54) Title: DUAL-FILTER-BASED TRANSFER ALIGNMENT METHOD UNDER DYNAMIC DEFORMATION

(54) 发明名称: 一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法



- AA Trajectory generator, generating AVP and inertial device data of a main system
- BB Simulate a bending deformation angle and a bending deformation angular speed between the main system and a sub-system by means of second-order Markov
- CC Decouple carrier motion and flexural deformation
- DD Filter 1, attitude matching
- EE Lever arm compensation
- FF Filter 2, speed plus angular speed matching
- GG Sub-system motion error control
- HH Sub-system initial attitude error correction

图 1

(57) Abstract: A dual-filter-based transfer alignment method under dynamic deformation. A dynamic deformation angle generated under dynamic deformation and a coupling angle between dynamic deformation and body motion will reduce the accuracy of transfer alignment; and a transfer alignment filter is divided into two parts, the first part estimates a bending deformation angle and the coupling angle, and uses an attitude matching method, and the second part estimates a dynamic lever arm, and uses a "speed plus angular speed" matching method.

PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法, 动态变形下产生的动态变形角以及动态变形和机体运动之间的耦合角会降低传递对准的精度; 将传递对准滤波器分为两部分, 第一部分针对弯曲变形角和耦合角进行估计, 采用姿态匹配方法; 第二部分针对动态杠杆臂进行估计, 采用"速度+角速度"匹配方法。

一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法

技术领域

本发明属于惯性导航技术领域，利用惯性导航系统测量飞机的机翼变形，其中涉及高精度主惯导系统对低精度子惯导系统进行校准的过程，具体涉及一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法。

背景技术

飞机的承载能力有限，特别是机翼部分，因此飞机机翼动态变形测量对测量设备的重量和尺寸有非常严格的要求，而 IMU 单元的测量精度与重量和尺寸成正比，每个负载处无法同时安装高精度的 IMU。

目前飞机机翼变形测量采用机身安装高精度的 POS，而机翼部分则采用低精度 IMU 单元，通过主、子系统间传递对准获取各定位点的高精度位置、姿态信息。但是主、子之间挠曲变形产生的附加速度、角速度和角度是影响其精度的主要因素，现有的飞机机翼动态变形测量将机翼视为刚体，不考虑挠曲变形，其传递对准精度难以达到所需要的精度。

发明内容

发明目的：针对现有技术的不足，本发明目的在于提供一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法，对飞机机翼动态变形测量传递对准过程中机体运动和动态变形之间的耦合所引起的误差角度和角速度进行几何建模和数学分析，推导出耦合角度和角速度的表达

式，并将传递对准滤波器分为两部分，第一部分针对弯曲变形角和耦合角进行估计，采用姿态匹配方法；第二部分针对动态杠杆臂进行估计，采用“速度+角速度”匹配方法，此设计在提高传递对准精度的前提下，同时缩短了传递对准过程的时间。

技术方案：为实现上述发明目的，本发明采用的技术方案如下：

一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法，应用于飞机机翼变形测量系统中，其中主惯导系统安装在机舱，子惯导系统安装在机翼，该方法包括以下步骤：

(1) 用轨迹发生器产生主惯导系统的姿态、速度和位置信息以及陀螺仪和加速度计的输出，用二阶马尔科夫模拟主、子惯导之间的弯曲变形角 θ 和弯曲变形角速度 $\dot{\theta}$ ，对弯曲变形进行几何分析，推导出由载体动态变形和载体运动所引起的耦合角度 $\Delta\vec{\phi}$ 表达式；

(2) 将弯曲变形角、弯曲变形角速度和耦合角作为状态量，采用姿态匹配方法，建立滤波器 1 模型；

(3) 利用步骤 (2) 中估计的弯曲变形角和耦合角建立动态杠杆臂模型，推导速度误差表达式和角速度误差表达式；

(4) 利用步骤 (3) 推导的速度误差表达式和角速度误差表达式，采用“速度+角速度”匹配方法，建立滤波器 2 的模型，估计子惯导系统的初始姿态误差，并将此误差用于子惯导系统的初始姿态校准，完成传递对准过程。

进一步地，所述步骤 (1) 中，对弯曲变形进行几何分析，推导出由载体动态变形和载体运动所引起的耦合角度 $\Delta\vec{\phi}$ 表达式为：

$$\Delta\vec{\phi} = M \vec{\omega}_{\theta}$$

其中, $\vec{\omega}_{\theta} = \dot{\vec{\theta}}$, M 表示为:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{\omega_{isy}^s} \\ -\frac{1}{\omega_{isz}^s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\omega_{isx}^s} & 0 \end{bmatrix}$$

其中, ω_{isx}^s 、 ω_{isy}^s 、 ω_{isz}^s 分别表示东、北、天三个方向下子惯导系统角速度理想值。

进一步地, 所述步骤(2)中, 将弯曲变形角、弯曲变形角速度和耦合角作为状态量, 采用姿态匹配方法建立滤波器 1 模型, 具体如下:

选取滤波器 1 的状态量为:

$$x_1 = \left[\delta\vec{\phi} \quad \vec{\varepsilon}^s \quad \vec{\rho}_0 \quad \vec{\theta} \quad \dot{\vec{\theta}} \quad \Delta\vec{\phi} \right]^T$$

其中, $\delta\vec{\phi}$ 表示姿态误差, $\vec{\varepsilon}^s$ 表示子系统陀螺仪测量零漂, $\vec{\rho}_0$ 表示主、子系统之间的初始安装角误差;

滤波器 1 的状态方程为:

$$\dot{x}_1 = F_1 x_1 + G_1 w_1$$

其中, F_1 表示滤波器 1 状态转移矩阵, G_1 表示滤波器 1 系统噪声分配矩阵, w_1 表示滤波器 1 系统噪声, 状态转移矩阵 F_1 表示为:

$$F_1 = \begin{bmatrix} (-\vec{\omega}_{in}^n \times) & -C_{s'}^n & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & B_1 & B_2 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & F_{64} & F_{65} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

其中, $\vec{\omega}_{in}^n$ 表示导航系相对于惯性系的旋转, $\vec{\omega}_{in}^n \times$ 表示反对称矩阵, $C_{s'}^n$ 表示子系统理想坐标系与导航坐标系之间的转换矩阵,

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & -2\beta_y & 0 \\ 0 & 0 & -2\beta_z \\ -2\beta_x & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\beta_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_z^2 \\ -\beta_x^2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \beta_i (i = x, y, z) \text{ 表示东、北、天三}$$

个方向上二阶马尔科夫模型的系数, $F_{64} = MB_2$, $F_{65} = MB_1$;

系统量测方程为:

$$y_1 = H_1 x_1 + \mu_1$$

其中, y_1 表示姿态真实值与滤波器估计值的差值, H_1 表示滤波器 1 量测矩阵, μ_1 表示滤波器 1 量测噪声。

进一步地, 所述步骤 (3) 中, 推导出的速度误差表达式和角速度误差表达式, 具体如下:

角速度误差表达式为:

$$\Delta \vec{\omega} = (\vec{\omega}_{in}^m \times) \vec{\phi} + (\vec{\omega}_{in}^m \times) \Delta \vec{\phi} + A(\vec{\omega}_{\theta}) \vec{u}_{is}^s - A(\vec{\omega}_{\theta}) \left[\left(\frac{\pi}{2} U - \Delta \vec{\phi} \right) \times \right] \vec{u}_{is}^s$$

其中, $\vec{\omega}_{in}^m$ 表示主系统坐标系下主系统的角速度, $\vec{\phi}$ 表示主、子系统之间的理想误差角, $A(\vec{\omega}_{\theta})$ 表示幅值矩阵, $\vec{u}_{is}^s$ 表示 $\vec{\omega}_{is}^s$ 方向上的单位矩阵, $\vec{\omega}_{is}^s$ 表示子系统坐标系下子系统的角速度, $U = [1 \ 1 \ 1]^T$;

速度误差表达式为:

$$\begin{aligned} \delta \dot{\vec{v}} = & -(2\vec{\omega}_{ie}^n + \vec{\omega}_{en}^n) \times \delta \vec{v} + R_0 B_2 \vec{\theta} + (2(\vec{\omega}_{im}^n \times) R_0 + R_0 B_1) \dot{\vec{\theta}} + C_s^n \vec{\nabla}^s + R_0 \Delta \ddot{\phi} \\ & + [(\vec{\omega}_{im}^n \times)(\vec{\omega}_{im}^n \times) + (\dot{\vec{\omega}}_{im}^n \times)] \delta \vec{r} + (f_s^n \times) \Delta \vec{\phi} + [(\vec{\omega}_{im}^n \times)(\vec{\omega}_{im}^n \times) + (\dot{\vec{\omega}}_{im}^n \times)] \vec{r}_0 \end{aligned}$$

其中, $\vec{\omega}_{ie}^n$ 为地球自转引起的导航系旋转, $\vec{\omega}_{en}^n$ 为子系统在地球表面移动因地球表面弯曲引起的导航系的旋转, $\delta \vec{v} = \vec{v}_s^n - \vec{v}_m^n$, $\vec{v}_m^n$ 、 $\vec{v}_s^n$ 分别表示主、子系统在导航坐标系下的速度矢量, $\vec{\theta}$ 为主、子惯导之间的弯曲变形角, $\Delta \vec{\phi}$ 为主、子惯导之间的耦合角, $\vec{\omega}_{im}^n$ 表示导航系下主系统的角速度, C_s^n 表示子系统与导航坐标系之间的转换矩阵, $\vec{\nabla}^s$ 表示子系统加速度计测量零偏, f_s^n 表示子系统在导航坐标系下的比力, $\delta \vec{r}$ 表示动态杠杆臂, $\vec{r}_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ 表示静止状态下杠杆臂, $x_0 \ y_0 \ z_0$ 分别表示东、北、天三个方向的静止状态下杠杆臂, R_0 可表示为:

$$R_0 = \begin{bmatrix} 0 & z_0 & 0 \\ 0 & 0 & x_0 \\ y_0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

进一步地, 所述步骤 (4) 中, 滤波器 2 采用“速度+角速度”匹配, 利用步骤 (3) 推导的速度误差表达式和角速度误差表达式建立量测量方程, 建立卡尔曼滤波器模型, 具体如下:

选取卡尔曼滤波器 2 的状态量为:

$$x_2 = \begin{bmatrix} \delta \vec{v} & \vec{\nabla}^s & \vec{\theta} & \dot{\vec{\theta}} & \delta \vec{r} \end{bmatrix}^T$$

其中, $\delta \vec{v}$ 表示速度误差, $\vec{\nabla}^s$ 表示子系统加速度计测量零偏;

滤波器的状态方程为:

$$\dot{x}_2 = F_2 x_2 + G_2 w_2$$

其中, G_2 表示滤波器 2 系统噪声分配矩阵, w_2 表示滤波器 2 系统噪声, 状态转移矩阵 F_2 表示为:

$$F_2 = \begin{bmatrix} F_{11} & C_s^n & F_{13} & F_{14} & F_{15} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & B_1 & B_2 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & F_{53} & F_{54} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

其中， $F_{11} = -[(2\vec{\omega}_{ie}^n + \vec{\omega}_{en}^n) \times]$ ， $F_{13} = R_0 B_2 + R_0 M (B_1 B_2 + B_2)$ ，

$$F_{14} = (2(\vec{\omega}_{im}^n \times) R_0 + R_0 B_1) + R_0 M B_1^2 \quad F_{15} = [(\vec{\omega}_{im}^n \times)(\vec{\omega}_{im}^n \times) + (\dot{\vec{\omega}}_{im}^n \times)] \quad , \quad F_{53} = R_0 M B_2 \quad ,$$

$F_{54} = R_0 + R_0 M B_1$ ，系统量测方程为：

$$y_2 = H_2 x_2 + \mu_2$$

其中， y_2 表示速度、角速度真实值与滤波器估计值的差值， μ_2 表示滤波器 2 量测噪声， $H_2 = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & (\vec{\omega}_{im}^m \times) & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$ 。

有益效果：与现有技术相比，本发明考虑了载体运动主、子系统之间刚体运动和动态弹性形变耦合误差，对动态弹性变形下主、子系统之间的角度和角速度误差进行空间几何建模和数学分析，得出动态形变下主、子系统之间的耦合角度误差，由此推导出动态形变下主、子系统之间的角速度误差表达式，并采用双重滤波器的方法，两滤波器同步进行，在最后一步进行融合；传统的传递对准过程，不考虑动态形变和机体运动之间的耦合误差，传递对准精度无法达到高精度传递对准的要求，另一方面，采用 24 维的滤波器，计算量大，本发明对主、子系统之间的耦合角度进行几何分析，得出耦合角度的表达式，并将状态量分为两组，分别在两个滤波器中同步进行，此设计在提高传递对准精度的前提下，同时缩短了传递对准过程的时间。

附图说明

图 1 为本发明基于双重滤波器的传递对准流程图；

图 2 为角速度矢量与附加动态弯曲角速度矢量之间的空间关系示意图；

图 3 为动态变形下主、子惯导之间耦合角度（投影到 yoz 平面）示意图；

图 4 为主、子系统相对位置关系示意图。

具体实施方式

以下结合具体的实施方案和附图对本发明作进一步详细说明：

如图 1 所示，本发明实施提出的一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法，用轨迹模拟器模拟飞机主系统的姿态、速度、位置和惯性器件的输出数据，同时采用二阶马尔科夫模拟输出主、子系统之间的弯曲变形角 $\bar{\theta}$ 和弯曲变形角速度 $\dot{\bar{\theta}}$ ；对载体运动和挠曲变形解耦合，得到耦合角并将其作为滤波器 1 的状态量，采用姿态匹配；滤波器 2 利用滤波器 1 的结果对杠杆臂误差进行补偿，并采用速度+角速度匹配方法。下面进行详细的分析：

步骤 1：轨迹发生器产生主惯导系统的姿态、速度和位置信息以及惯性器件（陀螺仪和加速度计）的输出，用二阶马尔科夫模拟主惯导与子惯导之间的弯曲变形角 $\bar{\theta}$ 和弯曲变形角速度 $\dot{\bar{\theta}}$ ，并对弯曲变形进行几何分析，推导出由主、子系统之间动态变形所引起的主、子系统之间的耦合角度 $\Delta\bar{\phi}$ ，主、子系统之间弯曲变形角 $\bar{\theta}$ 可用二阶马尔

科夫表示为:

$$\ddot{\vec{\theta}} = -2\beta\dot{\vec{\theta}} - \beta^2\vec{\theta} + \vec{\omega}$$

其中, $\beta=2.146/\tau$, τ 表示相关时间, $\vec{\omega}$ 表示高斯白噪声, 主、子系统之间的理想误差角矢量 $\vec{\phi}$ 表示为:

$$\begin{aligned}\vec{\omega}_{is}^{s'} &= C_m^{s'}(\vec{\phi})\vec{\omega}_{im}^m \\ \vec{\phi} &= \vec{\phi}_0 + \vec{\theta}\end{aligned}$$

其中, $\vec{\omega}_{is}^{s'}$ 表示理想状态下子系统陀螺仪的输出, $\vec{\omega}_{im}^m$ 表示主系统陀螺仪的输出, $C_m^{s'}(\vec{\phi})$ 表示主、子系统之间的姿态矩阵, $\vec{\phi}_0$ 表示主系统初始安装误差角矢量, $\vec{\theta}$ 表示弯曲变形角, 由于动态弯曲变形的作用, 产生了附加的角速度 $\vec{\omega}_\theta$, 其可表示为 $\vec{\omega}_\theta = \dot{\vec{\theta}}$, 则如图 2 所示, 实际状态下子系统的角速度输出 $\vec{\omega}_{is}^s$ 可表示为:

$$\vec{\omega}_{is}^s = \vec{\omega}_{is}^{s'} + \vec{\omega}_\theta$$

取弯曲变形耦合角速度所引起的主、子系统之间的耦合误差角矢量为 $\Delta\vec{\phi}$,

$$\Delta\vec{\phi} = [\Delta\phi_x \quad \Delta\phi_y \quad \Delta\phi_z]^T$$

下标 x, y, z 分别表示东、北、天三个方向, $\Delta\vec{\phi}$ 为弯曲变形耦合角速度所引起的主、子系统之间的耦合误差角, 即 $\vec{\omega}_{is}^s$ 与 $\vec{\omega}_{is}^{s'}$ 的夹角, 取

$\vec{\omega}_{is}^{s'} = [\omega_{isx}^{s'} \quad \omega_{isy}^{s'} \quad \omega_{isz}^{s'}]^T$, $\vec{\omega}_\theta = [\omega_{\theta x} \quad \omega_{\theta y} \quad \omega_{\theta z}]^T$, 则有:

$$\vec{\omega}_{is}^s = [\omega_{isx}^{s'} + \omega_{\theta x} \quad \omega_{isy}^{s'} + \omega_{\theta y} \quad \omega_{isz}^{s'} + \omega_{\theta z}]^T$$

如图 3 所示, 由几何关系有:

$$\begin{cases} \Delta\phi_x = \arctan \frac{\omega_{isz}^{s'} + \omega_{\theta z}}{\omega_{isy}^{s'} + \omega_{\theta y}} - \arctan \frac{\omega_{isz}^{s'}}{\omega_{isy}^{s'}} \\ \Delta\phi_y = \arctan \frac{\omega_{isx}^{s'} + \omega_{\theta x}}{\omega_{isz}^{s'} + \omega_{\theta z}} - \arctan \frac{\omega_{isx}^{s'}}{\omega_{isz}^{s'}} \\ \Delta\phi_z = \arctan \frac{\omega_{isy}^{s'} + \omega_{\theta y}}{\omega_{isx}^{s'} + \omega_{\theta x}} - \arctan \frac{\omega_{isy}^{s'}}{\omega_{isx}^{s'}} \end{cases}$$

用泰勒级数将反正切函数 $\arctan$ 展开，并略去高次项，可得：

$$\Delta\phi = M\omega_\theta = M\dot{\theta}$$

其中，M 可表示为：

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{\omega_{isy}^{s'}} \\ -\frac{1}{\omega_{isz}^{s'}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\omega_{isx}^{s'}} & 0 \end{bmatrix};$$

步骤 2：将弯曲变形角、弯曲变形角速度和耦合角作为状态量，采用姿态匹配方法建立滤波器 1 的模型，具体如下：

选取滤波器 1 的状态量为：

$$x_1 = \left[\delta\vec{\phi} \quad \vec{\varepsilon}^s \quad \vec{\rho}_0 \quad \vec{\theta} \quad \dot{\vec{\theta}} \quad \Delta\vec{\phi} \right]^T$$

其中， $\delta\vec{\phi}$ 表示姿态误差， $\vec{\varepsilon}^s$ 表示子系统陀螺仪测量零漂， $\vec{\rho}_0$ 表示主、子系统之间的初始安装角误差；

滤波器 1 的状态方程为：

$$\dot{x}_1 = F_1 x_1 + G_1 w_1$$

其中， F_1 表示状态转移矩阵， G_1 表示系统噪声分配矩阵， w_1 表示系统噪声，根据步骤（1）中得到的耦合角模型，状态转移矩阵 F_1 可表示为：

$$F_1 = \begin{bmatrix} (-\vec{\omega}_{in}^n \times) & -C_{s'}^n & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & B_1 & B_2 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & F_{64} & F_{65} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

其中, $\vec{\omega}_{in}^n$ 表示导航系相对于惯性系的旋转, $\vec{\omega}_{in}^n \times$ 表示反对称矩阵, $C_{s'}^n$ 表示子系统理想坐标系与导航坐标系之间的转换矩阵,

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & -2\beta_y & 0 \\ 0 & 0 & -2\beta_z \\ -2\beta_x & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\beta_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_z^2 \\ -\beta_x^2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \beta_i (i = x, y, z) \text{ 表示 } x, y, z \text{ 三个方}$$

向上二阶马尔科夫模型的系数, $F_{64} = MB_2$, $F_{65} = MB_1$;

系统量测方程为:

$$y_1 = H_1 x_1 + \mu_1$$

其中, y_1 表示姿态真实值与滤波器估计值的差值, H_1 表示量测矩阵, H 矩阵的具体表达式见文献 “Multi-node Transfer Alignment based on Mechanics Modeling for Airborne DPOS”, μ_1 表示滤波器 1 量测噪声;

步骤 3: 推导速度误差表达式和角速度误差表达式, 具体如下:

主、子系统之间的角速度之差 $\Delta \vec{\omega}$ 可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{\omega} &= \vec{\omega}_{is}^s - \vec{\omega}_{im}^m \\ \Delta \vec{\omega} &= \vec{\omega}_{is}^{s'} + \vec{\omega}_{\theta} - \vec{\omega}_{im}^m \end{aligned}$$

其中, 主、子系统之间的耦合误差角矢量为 $\Delta \vec{\phi}$, 则主、子系统之间的转换矩阵可以表示为 $C_m^{s'}(\vec{\phi} + \Delta \vec{\phi})$, 主、子系统之间的误差角速度可以表示为:

$$\Delta \vec{\omega} = C_m^{s'}(\vec{\phi} + \Delta \vec{\phi}) \vec{\omega}_{im}^m + \vec{\omega}_{\theta} - \vec{\omega}_{im}^m$$

其中, $\vec{\omega}_\theta'$ 为 $\vec{\omega}_{is}^{s'}$ 在 $\vec{\omega}_{is}^s$ 上的投影, 由于主系统到子系统之间的旋转矢量 $(\vec{\phi} + \Delta\vec{\phi})$ 为小量, 则有

$$[(\vec{\phi} + \Delta\vec{\phi}) \times] = I - C_m^{s'}(\vec{\phi} + \Delta\vec{\phi})$$

故有:

$$\Delta\vec{\omega} = \vec{\omega}_\theta' - [(\vec{\phi} + \Delta\vec{\phi}) \times] \vec{\omega}_{im}^m$$

其中, $[(\vec{\phi} + \Delta\vec{\phi}) \times]$ 表示反对称矩阵, 取 $\vec{\omega}_\theta'$ 为:

$$\vec{\omega}_\theta' = A(\vec{\omega}_\theta) T(\vec{\alpha}) \vec{u}_{is}^s$$

其中, $A(\vec{\omega}_\theta)$ 表示幅值矩阵, $\vec{u}_{is}^s$ 表示 $\vec{\omega}_{is}^s$ 方向上的单位矩阵, $\vec{\alpha}$ 表示 $\vec{\omega}_\theta$ 与 $\vec{\omega}_{is}^s$ 之间的夹角矢量, $T(\vec{\alpha})$ 表示由 $\vec{\omega}_\theta$ 到 $\vec{\omega}_{is}^s$ 之间的转换矩阵, $\vec{\alpha} = \frac{\pi}{2} U - \Delta\vec{\phi}$, 其中, $U = [1 \ 1 \ 1]^T$, 且有:

$$A(\vec{\omega}_\theta) = \begin{bmatrix} |\omega_{\theta_x}| & 0 & 0 \\ 0 & |\omega_{\theta_y}| & 0 \\ 0 & 0 & |\omega_{\theta_z}| \end{bmatrix} \quad \vec{u}_{is}^s = \frac{\vec{\omega}_{is}^s}{|\vec{\omega}_{is}^s|} \quad T(\vec{\alpha}) = I - \left[\left(\frac{\pi}{2} U - \Delta\vec{\phi} \right) \times \right]$$

符号 $||$ 表示求模, 将 $\vec{\omega}_\theta'$ 代入 $\Delta\vec{\omega}$ 的表达式, 则有:

$$\Delta\vec{\omega} = A(\vec{\omega}_\theta) T(\vec{\alpha}) \vec{u}_{is}^s - [(\vec{\phi} + \Delta\vec{\phi}) \times] \vec{\omega}_{im}^m$$

将 $T(\vec{\alpha})$ 代入 $\Delta\vec{\omega}$ 的表达式, 则有:

$$\Delta\vec{\omega} = (\vec{\omega}_{im}^m \times) \vec{\phi} + (\vec{\omega}_{im}^m \times) \Delta\vec{\phi} + A(\vec{\omega}_\theta) \vec{u}_{is}^s - A(\vec{\omega}_\theta) \left[\left(\frac{\pi}{2} U - \Delta\vec{\phi} \right) \times \right] \vec{u}_{is}^s$$

主、子系统之间的位置关系如图 4 所示, 表达式为:

$$\vec{R}_s = \vec{R}_m + \vec{r}$$

其中, $\vec{R}_m$ 、 $\vec{R}_s$ 分别表示主、子节点到地心的矢量, $\vec{r}$ 表示主、子节点之间的动态杠杆臂矢量, 则在惯性系下可表示为:

$$\ddot{\vec{R}}_s^i = \ddot{\vec{R}}_m^i + C_m^i (\vec{\omega}_{im}^m \times) (\vec{\omega}_{im}^m \times) \vec{r}^m + C_m^i (\dot{\vec{\omega}}_{im}^m \times) \vec{r}^m + C_m^i (\vec{\omega}_{im}^m \times) \dot{\vec{r}}^m + C_m^i (\dot{\vec{\omega}}_{im}^m \times) \dot{\vec{r}}^m + C_m^i \ddot{\vec{r}}^m$$

其中, C_m^i 表示主系统到惯性系的转换矩阵, $\vec{r}^m$ 表示主系统坐标系下动态杠杆臂矢量, 根据牛顿第二定律, 有:

$$\begin{aligned}\ddot{\vec{R}}_s^i &= \vec{f}_s^i + \vec{g}_s^i + \vec{\omega}_{ie}^i \times (\vec{\omega}_{ie}^i \times \vec{R}_s^i) \\ \ddot{\vec{R}}_m^i &= \vec{f}_m^i + \vec{g}_m^i + \vec{\omega}_{ie}^i \times (\vec{\omega}_{ie}^i \times \vec{R}_m^i)\end{aligned}$$

其中, f_s^i 表示子系统在惯性系下的比力, f_m^i 表示主系统在惯性系下的比力, g 表示重力加速度, $\vec{\omega}_{ie}^i$ 表示地球自转角速度, 联立上式有:

$$\vec{f}_s^i = \vec{f}_m^i + C_m^i (\vec{\omega}_{im}^m \times) (\vec{\omega}_{im}^m \times) \vec{r}^m + C_m^i (\dot{\vec{\omega}}_{im}^m \times) \vec{r}^m + C_m^i (\vec{\omega}_{im}^m \times) \dot{\vec{r}}^m + C_m^i (\vec{\omega}_{im}^m \times) \dot{\vec{r}}^m + C_m^i \ddot{\vec{r}}^m$$

由于, 主、子系统速度矢量微分方程可表示为:

$$\begin{aligned}\dot{\vec{v}}_m^n &= C_m^n \vec{f}_m^m - (2\vec{\omega}_{ie}^n + \vec{\omega}_{en}^n) \times \vec{v}_m^n + \vec{g}^n \\ \dot{\vec{v}}_s^n &= C_m^n C_s^m (\vec{f}_s^s + \vec{\nabla}^s) - (2\vec{\omega}_{ie}^n + \vec{\omega}_{en}^n) \times \vec{v}_s^n + \vec{g}^s\end{aligned}$$

其中, $\vec{v}_m^n$ 、 $\vec{v}_s^n$ 分别表示主、子系统在导航坐标系下的速度矢量, $\vec{\omega}_{ie}^n$ 为地球自转引起的导航系旋转, $\vec{\omega}_{en}^n$ 为子系统在地球表面移动因地球表面弯曲引起的导航系的旋转, $\vec{\omega}_{im}^n$ 表示导航系下主系统的角速度, f_s^n 表示子系统在导航坐标系下的比力, $\dot{\vec{v}}^s$ 表示子系统加速度计测量零偏, 速度误差矢量方程表示为:

$$\delta \vec{v} = \vec{v}_s^n - \vec{v}_m^n$$

将上式两边微分有:

$$\delta \dot{\vec{v}} = -(2\vec{\omega}_{ie}^n + \vec{\omega}_{en}^n) \times \delta \vec{v} + [(\vec{\omega}_{im}^n \times) (\vec{\omega}_{im}^n \times) + (\dot{\vec{\omega}}_{im}^n \times)] \vec{r}^n + 2(\vec{\omega}_{im}^n \times) \dot{\vec{r}}^n + \ddot{\vec{r}}^n + C_s^n \vec{\nabla}^s + (f_s^n \times) \Delta \vec{\phi}$$

动态杠杆臂矢量可表示为:

$$\begin{aligned}\vec{r} &= \vec{r}_0 + \delta \vec{r} \\ \delta \vec{r} &= R_0 (\vec{\phi} + \Delta \vec{\phi})\end{aligned}$$

其中, $\vec{r}_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ 表示静止状态下杠杆臂, $x_0 \ y_0 \ z_0$ 分别表示东、

北、天三个方向的静止状态下杠杆臂, $R_0 = \begin{bmatrix} 0 & z_0 & 0 \\ 0 & 0 & x_0 \\ y_0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, 将上式两边微分

有：

$$\begin{aligned}\dot{\vec{r}} &= \delta \dot{\vec{r}} = R_0(\dot{\vec{\theta}} + \Delta \dot{\vec{\phi}}) \\ \ddot{\vec{r}} &= R_0(\ddot{\vec{\theta}} + \Delta \ddot{\vec{\phi}}) = R_0 B_1 \ddot{\vec{\theta}} + R_0 B_2 \ddot{\vec{\theta}} + R_0 \Delta \ddot{\vec{\phi}}\end{aligned}$$

将动态杠杆臂表达式代入速度误差矢量表达式中，有：

$$\begin{aligned}\delta \dot{\vec{v}} &= -(2\vec{\omega}_{ie}^n + \vec{\omega}_{en}^n) \times \delta \vec{v} + R_0 B_2 \ddot{\vec{\theta}} + (2(\vec{\omega}_{im}^n \times) R_0 + R_0 B_1) \dot{\vec{\theta}} + C_s^n \vec{\nabla}^s + R_0 \Delta \ddot{\vec{\phi}}; \\ &+ [(\vec{\omega}_{im}^n \times)(\vec{\omega}_{im}^n \times) + (\dot{\vec{\omega}}_{im}^n \times)] \delta \vec{r} + (f_s^n \times) \Delta \vec{\phi} + [(\vec{\omega}_{im}^n \times)(\vec{\omega}_{im}^n \times) + (\dot{\vec{\omega}}_{im}^n \times)] \vec{r}_0\end{aligned}$$

步骤 4：传递对准滤波器 2 采用“速度+角速度”匹配，利用步骤 3 推导的速度误差表达式和角速度误差表达式建立量测量方程，建立卡尔曼滤波器模型，估计子节点的初始姿态误差，并将此误差用于子节点的初始姿态校准，完成传递对准过程。

本步骤中选取滤波器 2 的状态量为：

$$x_2 = \begin{bmatrix} \delta \vec{v} & \vec{\nabla}^s & \vec{\theta} & \dot{\vec{\theta}} & \delta \vec{r} \end{bmatrix}^T$$

其中， $\delta \vec{v}$ 表示速度误差， $\vec{\nabla}^s$ 表示子系统加速度计测量零偏；

滤波器的状态方程为：

$$\dot{x}_2 = F_2 x_2 + G_2 w_2$$

其中， G_2 表示滤波器 2 的系统噪声分配矩阵， w_2 表示滤波器 2 的系统噪声， F_2 表示为：

$$F_2 = \begin{bmatrix} F_{11} & C_s^n & F_{13} & F_{14} & F_{15} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & B_1 & B_2 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & F_{53} & F_{54} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

其中， $F_{11} = -[(2\vec{\omega}_{ie}^n + \vec{\omega}_{en}^n) \times]$ ， $F_{13} = R_0 B_2 + R_0 M (B_1 B_2 + B_2)$ ， $F_{14} = (2(\vec{\omega}_{im}^n \times) R_0 + R_0 B_1) + R_0 M B_1^2$

$F_{15} = [(\vec{\omega}_{im}^n \times)(\vec{\omega}_{im}^n \times) + (\dot{\vec{\omega}}_{im}^n \times)]$ ， $F_{53} = R_0 M B_2$ ， $F_{54} = R_0 + R_0 M B_1$ ，系统量测方程为：

$$y_2 = H_2 x_2 + \mu_2$$

其中， y_2 表示速度、角速度真实值与滤波器估计值的差值， μ_2 表

示滤波器 2 量测噪声， $H_2 = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & (\bar{\omega}_{im}^m \times) & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}^{\circ}$

权 利 要 求

1、一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法，应用于飞机机翼变形测量系统中，其中主惯导系统安装在机舱，子惯导系统安装在机翼，其特征在于，包括以下步骤：

(1) 用轨迹发生器产生主惯导系统的姿态、速度和位置信息以及陀螺仪和加速度计的输出，用二阶马尔科夫模拟主、子惯导之间的弯曲变形角 $\bar{\theta}$ 和弯曲变形角速度 $\dot{\bar{\theta}}$ ，对弯曲变形进行几何分析，推导出由载体动态变形和载体运动所引起的耦合角度 $\Delta\vec{\phi}$ 表达式；

(2) 将弯曲变形角、弯曲变形角速度和耦合角作为状态量，采用姿态匹配方法，建立滤波器 1 模型；

(3) 利用步骤 (2) 中估计的弯曲变形角和耦合角建立动态杠杆臂模型，推导速度误差表达式和角速度误差表达式；

(4) 利用步骤 (3) 推导的速度误差表达式和角速度误差表达式，采用“速度+角速度”匹配方法，建立滤波器 2 的模型，估计子惯导系统的初始姿态误差，并将此误差用于子惯导系统的初始姿态校准，完成传递对准过程。

2、根据权利要求 1 所述的一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法，其特征在于，所述步骤 (1) 中，对弯曲变形进行几何分析，推导出由载体动态变形和载体运动所引起的耦合角度 $\Delta\vec{\phi}$ 表达式为：

$$\Delta\vec{\phi} = M\bar{\omega}_{\theta}$$

其中， $\bar{\omega}_{\theta} = \dot{\bar{\theta}}$ ，M 表示为：

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{\omega_{isy}^s} \\ -\frac{1}{\omega_{isz}^s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\omega_{isx}^s} & 0 \end{bmatrix}$$

其中， ω_{isx}^s 、 ω_{isy}^s 、 ω_{isz}^s 分别表示东、北、天三个方向下子惯导系统角速度理想值。

3、根据权利要求 2 所述的一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法，其特征在于，所述步骤（2）中，将弯曲变形角、弯曲变形角速度和耦合角作为状态量，采用姿态匹配方法建立滤波器 1 模型，具体如下：

选取滤波器 1 的状态量为：

$$x_1 = \begin{bmatrix} \delta\vec{\phi} & \vec{\varepsilon}^s & \vec{\rho}_0 & \vec{\theta} & \dot{\vec{\theta}} & \Delta\vec{\phi} \end{bmatrix}^T$$

其中， $\delta\vec{\phi}$ 表示姿态误差， $\vec{\varepsilon}^s$ 表示子系统陀螺仪测量零漂， $\vec{\rho}_0$ 表示主、子系统之间的初始安装角误差；

滤波器 1 的状态方程为：

$$\dot{x}_1 = F_1 x_1 + G_1 w_1$$

其中， F_1 表示滤波器 1 状态转移矩阵， G_1 表示滤波器 1 系统噪声分配矩阵， w_1 表示滤波器 1 系统噪声，状态转移矩阵 F_1 表示为：

$$F_1 = \begin{bmatrix} (-\vec{\omega}_{in}^n \times) & -C_{s'}^n & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & B_1 & B_2 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & F_{64} & F_{65} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

其中, $\vec{\omega}_{in}^n$ 表示导航系相对于惯性系的旋转, $\vec{\omega}_{in}^n \times$ 表示反对称矩阵, C_s^n 表示子系统理想坐标系与导航坐标系之间的转换矩阵,

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & -2\beta_y & 0 \\ 0 & 0 & -2\beta_z \\ -2\beta_x & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\beta_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_z^2 \\ -\beta_x^2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \beta_i (i = x, y, z) \text{ 表示东、北、天三}$$

个方向上二阶马尔科夫模型的系数, $F_{64} = MB_2$, $F_{65} = MB_1$;

系统量测方程为:

$$y_1 = H_1 x_1 + \mu_1$$

其中, y_1 表示姿态真实值与滤波器估计值的差值, H_1 表示滤波器 1 量测矩阵, μ_1 表示滤波器 1 量测噪声。

4、根据权利要求 2 所述的一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法, 其特征在于, 所述步骤 (3) 中, 推导出的速度误差表达式和角速度误差表达式, 具体如下:

角速度误差表达式为:

$$\Delta \vec{\omega} = (\vec{\omega}_{in}^m \times) \vec{\phi} + (\vec{\omega}_{in}^m \times) \Delta \vec{\phi} + A(\vec{\omega}_\theta) \vec{u}_{is}^s - A(\vec{\omega}_\theta) \left[\left(\frac{\pi}{2} U - \Delta \vec{\phi} \right) \times \right] \vec{u}_{is}^s$$

其中, $\vec{\omega}_{in}^m$ 表示主系统坐标系下主系统的角速度, $\vec{\phi}$ 表示主、子系统之间的理想误差角, $A(\vec{\omega}_\theta)$ 表示幅值矩阵, $\vec{u}_{is}^s$ 表示 $\vec{\omega}_{is}^s$ 方向上的单位矩阵, $\vec{\omega}_{is}^s$ 表示子系统坐标系下子系统的角速度, $U = [1 \ 1 \ 1]^T$;

速度误差表达式为:

$$\begin{aligned} \delta \dot{\vec{v}} = & -(2\vec{\omega}_{ie}^n + \vec{\omega}_{en}^n) \times \delta \vec{v} + R_0 B_2 \vec{\theta} + (2(\vec{\omega}_{in}^n \times) R_0 + R_0 B_1) \dot{\vec{\theta}} + C_s^n \ddot{\vec{v}}_s + R_0 \Delta \ddot{\phi} \\ & + [(\vec{\omega}_{in}^n \times)(\vec{\omega}_{in}^n \times) + (\dot{\vec{\omega}}_{in}^n \times)] \delta \vec{r} + (f_s^n \times) \Delta \vec{\phi} + [(\vec{\omega}_{in}^n \times)(\vec{\omega}_{in}^n \times) + (\dot{\vec{\omega}}_{in}^n \times)] \vec{r}_0 \end{aligned}$$

其中, $\vec{\omega}_{ie}^n$ 为地球自转引起的导航系旋转, $\vec{\omega}_{en}^n$ 为子系统在地球表面移动因地球表面弯曲引起的导航系的旋转, $\delta \vec{v} = \vec{v}_s^n - \vec{v}_m^n$, $\vec{v}_m^n$ 、 $\vec{v}_s^n$ 分别表

示主、子系统在导航坐标系下的速度矢量, $\bar{\theta}$ 为主、子惯导之间的弯曲变形角, $\Delta\bar{\phi}$ 为主、子惯导之间的耦合角, $\bar{\omega}_{im}^n$ 表示导航系下主系统的角速度, C_s^n 表示子系统与导航坐标系之间的转换矩阵, $\bar{\nabla}^s$ 表示子系统加速度计测量零偏, f_s^n 表示子系统在导航坐标系下的比力, $\delta\bar{r}$ 表示动态杠杆臂, $\bar{r}_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ 表示静止状态下杠杆臂, $x_0 \ y_0 \ z_0$ 分别表示东、北、天三个方向的静止状态下杠杆臂, R_0 可表示为:

$$R_0 = \begin{bmatrix} 0 & z_0 & 0 \\ 0 & 0 & x_0 \\ y_0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

5、权利要求4所述的一种动态变形下基于双重滤波器的传递对准方法, 其特征在于, 所述步骤(4)中, 滤波器2采用“速度+角速度”匹配, 利用步骤(3)推导的速度误差表达式和角速度误差表达式建立量测量方程, 建立卡尔曼滤波器模型, 具体如下:

选取卡尔曼滤波器2的状态量为:

$$x_2 = \begin{bmatrix} \delta\bar{v} & \bar{\nabla}^s & \bar{\theta} & \dot{\bar{\theta}} & \delta\bar{r} \end{bmatrix}^T$$

其中, $\delta\bar{v}$ 表示速度误差, $\bar{\nabla}^s$ 表示子系统加速度计测量零偏;

滤波器的状态方程为:

$$\dot{x}_2 = F_2 x_2 + G_2 w_2$$

其中, G_2 表示滤波器2系统噪声分配矩阵, w_2 表示滤波器2系统噪声, 状态转移矩阵 F_2 表示为:

$$F_2 = \begin{bmatrix} F_{11} & C_s^n & F_{13} & F_{14} & F_{15} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & B_1 & B_2 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & F_{53} & F_{54} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

其中, $F_{11} = -[(2\vec{\omega}_{ie}^n + \vec{\omega}_{en}^n) \times]$, $F_{13} = R_0 B_2 + R_0 M (B_1 B_2 + B_2)$, $F_{14} = (2(\vec{\omega}_{im}^n \times) R_0 + R_0 B_1) + R_0 M B_1^2$

$F_{15} = [(\vec{\omega}_{im}^n \times)(\vec{\omega}_{im}^n \times) + (\dot{\vec{\omega}}_{im}^n \times)]$, $F_{53} = R_0 M B_2$, $F_{54} = R_0 + R_0 M B_1$, 系统量测方程为:

$$y_2 = H_2 x_2 + \mu_2$$

其中, y_2 表示速度、角速度真实值与滤波器估计值的差值, μ_2 表示滤

波器 2 量测噪声, $H_2 = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & (\vec{\omega}_{im}^m \times) & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$ 。

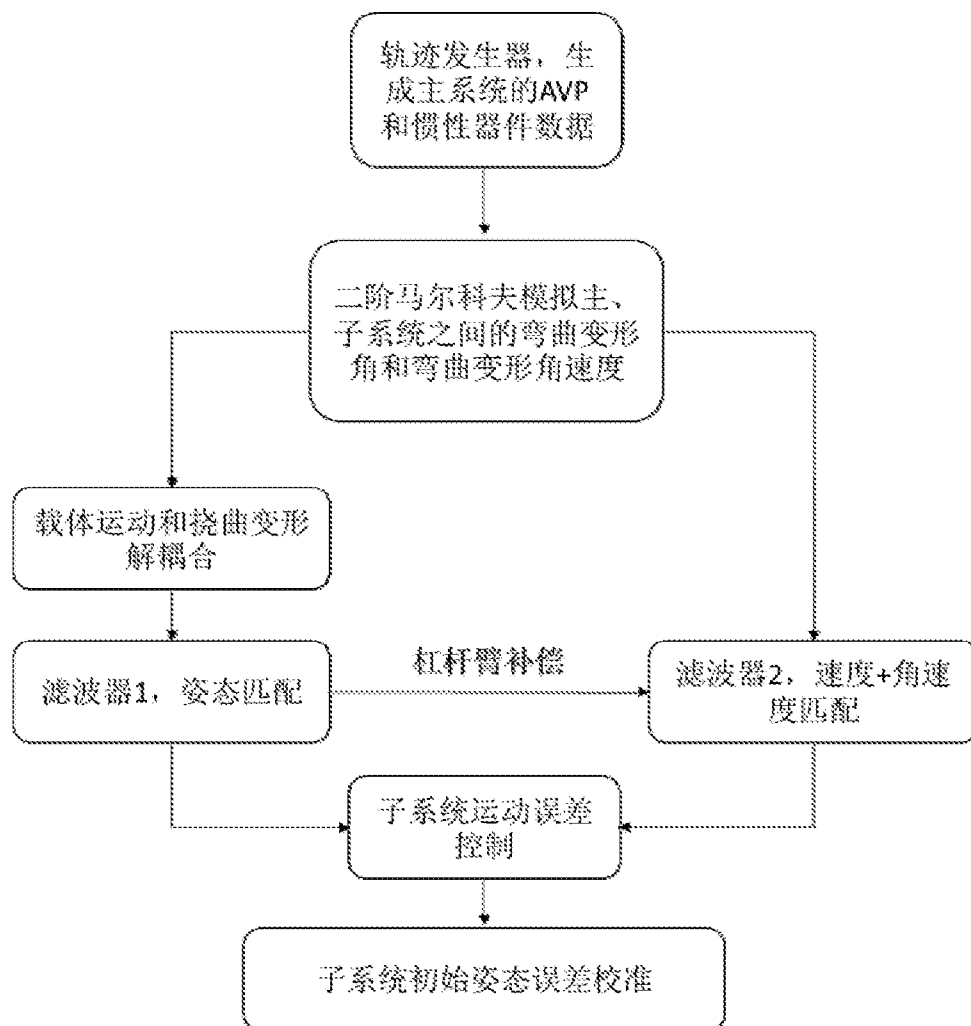


图 1

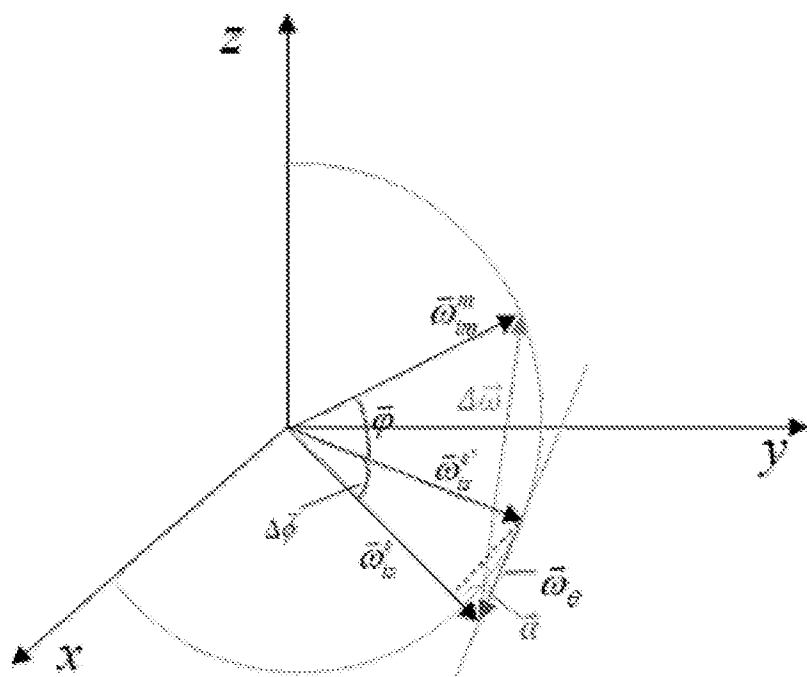


图 2

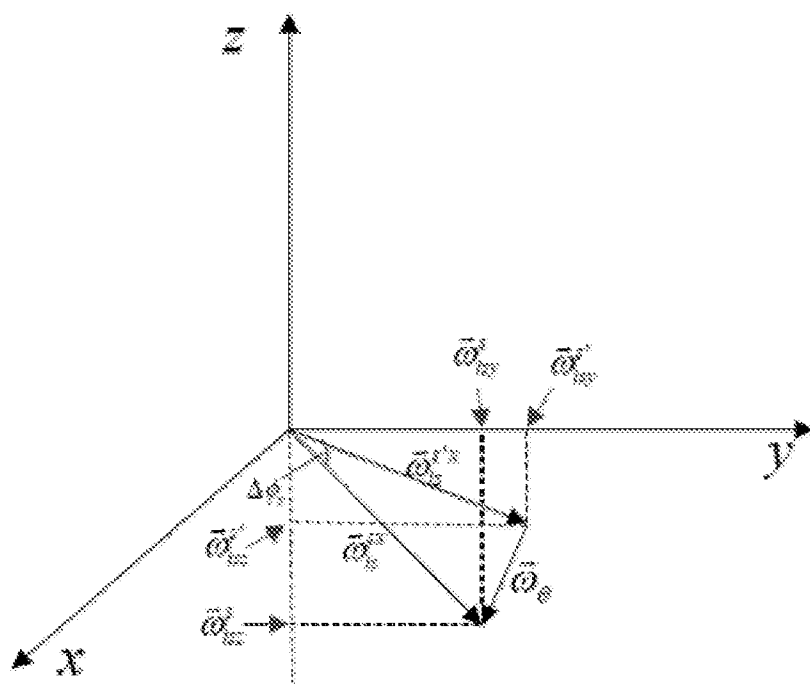


图 3

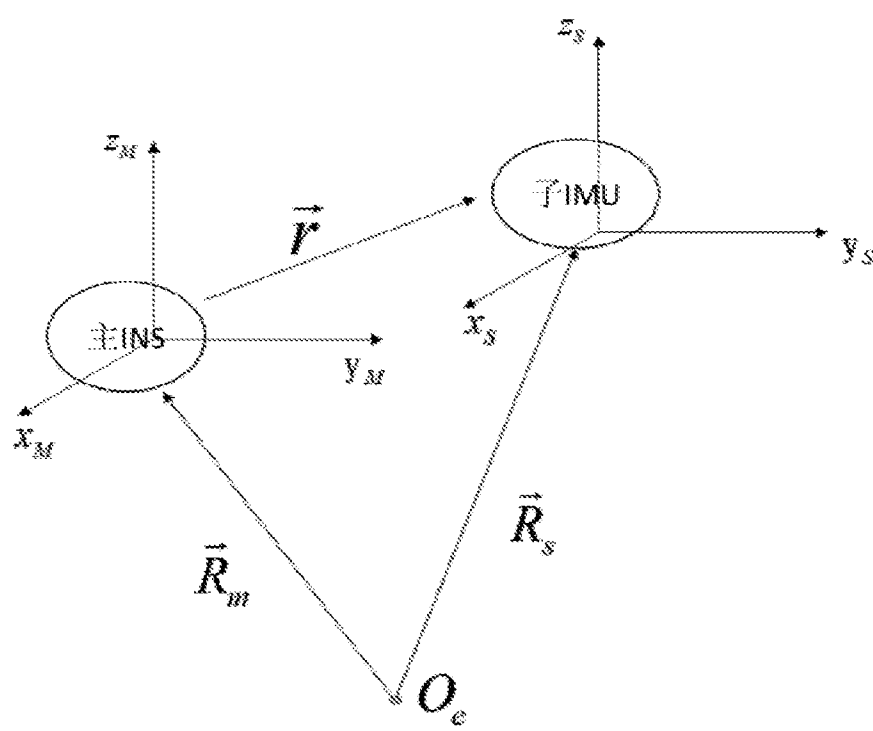


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/084846

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B64F 5/60(2017.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B64F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNKI; CNTXT; VEN; USTXT; EPTXT; WOTXT: 东南大学, 机翼, 动态, 变形, 滤波器, 双重, 测量, 校准, 错误, 速度, 角速度, 姿态, 惯导, 耦合, wing, dynamic, deformat+, align+, filter, dual, error, measur+, calibrat+, attitude, velocity, angle, accelerometer, navigat+, coupl+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 110371318 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 25 October 2019 (2019-10-25) claims 1-5	1-5
A	CN 104567930 A (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 29 April 2015 (2015-04-29) description, paragraphs [0018]-[0090], and figures 1-5	1-5
A	CN 109724624 A (THE GENERAL DESIGNING INSTITUTE OF HUBEI SPACE TECHNOLOGY ACADEMY) 07 May 2019 (2019-05-07) entire document	1-5
A	CN 102621565 A (BEIHANG UNIVERSITY) 01 August 2012 (2012-08-01) entire document	1-5
A	CN 108413887 A (BEIHANG UNIVERSITY) 17 August 2018 (2018-08-17) entire document	1-5
A	EP 2634534 A2 (HONEYWELL INTERNATIONAL INC.) 04 September 2013 (2013-09-04) entire document	1-5



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date
 “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 “&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

02 June 2020

Date of mailing of the international search report

08 July 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/084846

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	110371318	A	25 October 2019	None			
CN	104567930	A	29 April 2015	None			
CN	109724624	A	07 May 2019	None			
CN	102621565	A	01 August 2012	CN	102621565	B	04 December 2013
CN	108413887	A	17 August 2018	CN	108413887	B	26 May 2020
EP	2634534	A2	04 September 2013	EP	2634534	B1	20 January 2016
				US	8515672	B1	20 August 2013
				EP	2634534	A3	26 March 2014
				US	2013231860	A1	05 September 2013
				JP	2013181985	A	12 September 2013

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/084846

A. 主题的分类 B64F 5/60 (2017.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																							
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) B64F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNABS; CNKI; CNTXT; VEN; USTXT; EPTXT; WOTXT; 东南大学, 机翼, 动态, 变形, 滤波器, 双重, 测量, 校准, 错误, 速度, 角速度, 姿态, 惯导, 耦合, wing, dynamic, deformat+, align+, filter, dual, error, measur+, calibrat+, attitude, velocity, angle, accelerometer, navigat+, coupl+																							
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 110371318 A (东南大学) 2019年 10月 25日 (2019 - 10 - 25) 权利要求1-5</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104567930 A (南京理工大学) 2015年 4月 29日 (2015 - 04 - 29) 说明书第[0018]-[0090]段、附图1-5</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 109724624 A (湖北航天技术研究院总体设计所) 2019年 5月 7日 (2019 - 05 - 07) 全文</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102621565 A (北京航空航天大学) 2012年 8月 1日 (2012 - 08 - 01) 全文</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 108413887 A (北京航空航天大学) 2018年 8月 17日 (2018 - 08 - 17) 全文</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>EP 2634534 A2 (HONEYWELL INT INC) 2013年 9月 4日 (2013 - 09 - 04) 全文</td> <td>1-5</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 110371318 A (东南大学) 2019年 10月 25日 (2019 - 10 - 25) 权利要求1-5	1-5	A	CN 104567930 A (南京理工大学) 2015年 4月 29日 (2015 - 04 - 29) 说明书第[0018]-[0090]段、附图1-5	1-5	A	CN 109724624 A (湖北航天技术研究院总体设计所) 2019年 5月 7日 (2019 - 05 - 07) 全文	1-5	A	CN 102621565 A (北京航空航天大学) 2012年 8月 1日 (2012 - 08 - 01) 全文	1-5	A	CN 108413887 A (北京航空航天大学) 2018年 8月 17日 (2018 - 08 - 17) 全文	1-5	A	EP 2634534 A2 (HONEYWELL INT INC) 2013年 9月 4日 (2013 - 09 - 04) 全文	1-5
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
PX	CN 110371318 A (东南大学) 2019年 10月 25日 (2019 - 10 - 25) 权利要求1-5	1-5																					
A	CN 104567930 A (南京理工大学) 2015年 4月 29日 (2015 - 04 - 29) 说明书第[0018]-[0090]段、附图1-5	1-5																					
A	CN 109724624 A (湖北航天技术研究院总体设计所) 2019年 5月 7日 (2019 - 05 - 07) 全文	1-5																					
A	CN 102621565 A (北京航空航天大学) 2012年 8月 1日 (2012 - 08 - 01) 全文	1-5																					
A	CN 108413887 A (北京航空航天大学) 2018年 8月 17日 (2018 - 08 - 17) 全文	1-5																					
A	EP 2634534 A2 (HONEYWELL INT INC) 2013年 9月 4日 (2013 - 09 - 04) 全文	1-5																					
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																							
<table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> * 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td style="vertical-align: top;"> “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																			
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																						
国际检索实际完成的日期 2020年 6月 2日		国际检索报告邮寄日期 2020年 7月 8日																					
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 颜胜 电话号码 (86-512) 88996668																					

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/084846

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	110371318	A	2019年 10月 25日	无	
CN	104567930	A	2015年 4月 29日	无	
CN	109724624	A	2019年 5月 7日	无	
CN	102621565	A	2012年 8月 1日	CN	102621565 B 2013年 12月 4日
CN	108413887	A	2018年 8月 17日	CN	108413887 B 2020年 5月 26日
EP	2634534	A2	2013年 9月 4日	EP	2634534 B1 2016年 1月 20日
				US	8515672 B1 2013年 8月 20日
				EP	2634534 A3 2014年 3月 26日
				US	2013231860 A1 2013年 9月 5日
				JP	2013181985 A 2013年 9月 12日