

基于未知地标被动观测的弹群 INS 定位误差协同修正方法

寇昆湖, 张友安, 柳爱利

(海军航空工程学院控制工程系, 烟台 264001)

摘要: 针对弹群协同编队飞行中, 编队成员单独使用惯导系统(INS)时存在定位误差发散的问题, 基于相同性能的多套 INS 在相同环境下工作时, 其误差近似呈零均值高斯分布这一特性, 提出了一种利用成像导引头对航路上任一未知地标被动观测的弹群 INS 定位误差协同修正方法。首先, 融合弹群中各枚导弹相对于地标的视线角测量信息及 INS 位置量测信息, 利用最小二乘思想对未知地标进行协同定位; 然后, 基于估计得到的地标位置, 利用各枚导弹相对于地标的视线角和方位角速率量测信息及 INS 速度量测信息, 反过来修正弹群中各枚导弹的 INS 定位误差。最后, 仿真验证了方法的有效性。

关键词: 视觉辅助导航; INS 定位误差; 协同导航; 导弹编队; 未知地标

中图分类号: V249.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2013)04-0511-05

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.04.009

An INS Position Error Cooperative Modification Method Based on Passive Observation to Unknown Feature Target of Missile Formation

KOU Kun-hu, ZHANG You-an, LIU Ai-li

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In absence of other navigation systems, INS errors of missile formation will cumulate continuously with time. According to the assumption that multiple INS errors of missile formation basically obey Gaussian distributions with zero mean, a novel INS position error cooperative modification method is proposed based on passive observation to a unknown feature target of missile formation. Firstly, the position of unknown feature target is cooperatively located by using LOS angle information and INS position. Then INS localization errors of missile formation are modified based on the estimated feature target position, LOS angle information, LOS angle rate information and INS velocity. Finally simulation results validate that this method is effective.

Key words: Vision aided navigation; INS position error; Cooperative navigation; Missile formation; Unknown feature target

0 引言

在飞航导弹导航领域, 惯性导航是拥有绝对统治地位的导航方式, 但单独使用 INS 长时间工作时, 存在定位误差发散的问题^[1]。虽然 GPS 具有全球性、高精度实时定位的能力, 但 GPS 易受干扰, 同时面临战时不可依赖的问题^[2]。成像导引头是实现

精确末制导所必须的, 它也可被用于在中制导阶段捕获跟踪地标, 进行视觉辅助定位^[1,3]。

考虑到相同性能的多套 INS 在相同环境下工作时, 其误差近似呈零均值高斯分布, 因此工作在同一位置的多套 INS 通过对输出取加权平均的办法可明显提高其定位精度^[4]。然而在多数情况下, 一枚导弹仅装配一套 INS, 上述思路很难实施。多导弹协

同作战是未来战争的发展趋势^[5],且同一弹群中的各枚导弹往往装配相同性能的INS。从体系感知的角度考虑,可将上述思路应用到一个弹群,达到与加权平均类似的效果。

国内外采用上述思路进行研究的文献不多见。文献[4]基于编队成员相互进行一维测距的方法来实现机群组网定位,但该方法需要各成员两两之间均有测距和数据通信,机载数据链负荷较大。文献[6]研究了基于不相关误差模型的协同导航,然而该方法需要成员间的三维距离信息分量,对于弹群来说,三维测距实现难度大。文献[7]研究了基于相对导航的多平台INS误差联合修正方法,该方法要求主机始终在僚机视野之内,不适用于弹群INS误差修正。

针对上述问题,本文提出了一种利用成像导引头对航路上任一未知地标进行被动观测的弹群INS定位误差协同修正方法。与文献[4]相比较,该方法既不需要无线电测距,也无须弹群各成员两两之间都有数据通信。与文献[6]相比较,该方法不需要成员间的三维距离信息,工程可实现性强。与文献[7]相比较,该方法仅需弹群中各成员对航路上任一未知地标进行观测,符合弹群特点,易于实现。仿真结果表明,该方法利用成像导引头视觉量测精度优于INS定位精度的特点,将弹群中各枚导弹的视觉量测信息和INS量测信息有效融合,提高了无GPS时弹群协同编队飞行的INS估计精度。

1 基本原理

基于未知地标被动观测的多导弹协同INS误差修正示意图如图1所示。

图中以3枚导弹($k = i, j, p$)编队为例,在以发射点为原点的东北天坐标系中,设第 k 枚导弹的位置为 $\mathbf{p}_k = (x_k, y_k, z_k)^T$,未知地标的真实位置为 $\mathbf{p}_T = (x_T, y_T, z_T)^T$;OXYZ是以地标中心O为原点的东北天坐标系, M_kxyz 是以导弹质心 M_k 为原点的东北天坐标系, r_k 为弹目距离, r_{Tk} 为弹目距离在地标水平面OXY的投影分量, G_k 为导弹质心 M_k 在地标水平面OXY中的投影。 M_iM_j 和 M_jM_p 组成了3枚导弹的弹间单连通数据链,负责弹间通信,此处主要用于传输各枚导弹的INS信息和视觉量测信息。在OXYZ坐标系中,导弹与地标间的观测视线为 $\vec{OM}_k = (x_k - x_T)$

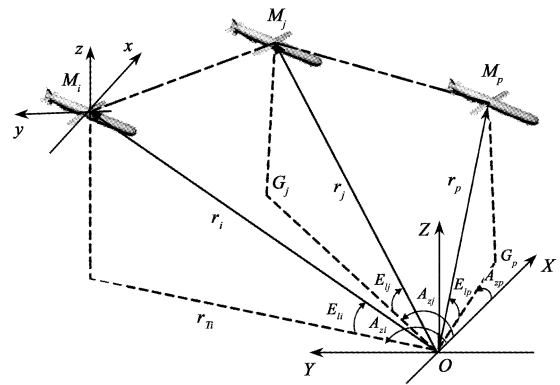


图1 多导弹协同INS误差修正示意图

Fig. 1 Sketch map of multi-missiles INS error cooperative modification

$\vec{i} + (y_k - y_T)\vec{j} + (z_k - z_T)\vec{k}$,定义视线方位角 A_{zk} 为视线 OG_k 与OX轴的夹角,位于OX轴的左侧为正;视线高低角 E_{lk} 为视线 OM_k 与 OG_k 的夹角,位于 OG_k 的上方为正。为了便于研究,考虑 $A_{zk} \in (0, 90^\circ)$, $E_{lk} \in (0, 90^\circ)$ 的简单情形(实际应用时需要具体考虑视线角所在象限),在OXYZ坐标系中,视线方位角 A_{zk} 和视线高低角 E_{lk} 可表示为:

$$A_{zk} = \arctan((y_k - y_T)/(x_k - x_T)) \quad (1)$$

$$E_{lk} = \arctan((z_k - z_T)/r_{Tk}) \quad (2)$$

式中, $r_{Tk} = \sqrt{(x_k - x_T)^2 + (y_k - y_T)^2}$ 。

设 v_{ek} 、 v_{nk} 分别为导弹东向和北向的速度分量,方位角速率 \dot{A}_{zk} 可表示为^[1]:

$$\dot{A}_{zk} = (v_{ek} \sin A_{zk} - v_{nk} \cos A_{zk})/r_{Tk} \quad (3)$$

基于未知地标被动观测的弹群INS误差协同修正方法分为如下两个步骤:

(1) 多导弹协同定位未知地标

弹群中的各枚导弹对进入视场的某未知地标进行被动观测,基于各枚导弹的视线角量测信息和INS位置量测信息对未知地标定位。地标位置的估计值融合了弹群中所有导弹的INS位置量测值,这相当于对弹群中的所有INS定位误差进行了加权平均。

(2) 基于地标位置估计值的INS误差修正

在步骤(1)的基础上,以估计得到的地标位置为参考,利用各枚导弹相对于地标的视线角和方位角速率量测信息及INS速度量测信息,反过来修正弹群各枚导弹的INS定位误差。

2 多导弹协同未知地标定位

弹群中各枚导弹利用其成像导引头对进入视场的某未知地标进行观测,以第 $k(k = 1, 2, \dots, n)$ 枚导弹为例,导弹相对于地标的观测视线方向矢量 \mathbf{l}_k 可以表示为

$$\mathbf{l}_k = \hat{\mathbf{l}}_k + \delta\mathbf{l}_k \quad (4)$$

式中,

$$\hat{\mathbf{l}}_k = [\cos \hat{E}_{lk} \cos \hat{A}_{zk} \quad \cos \hat{E}_{lk} \sin \hat{A}_{zk} \quad \sin \hat{E}_{lk}]^T$$

为视线方向矢量的解算值;

$$\delta\mathbf{l}_k \approx \begin{bmatrix} \cos \hat{E}_{lk} \sin \hat{A}_{zk} \delta A_{zk} + \sin \hat{E}_{lk} \cos \hat{A}_{zk} \delta E_{lk} \\ \cos \hat{E}_{lk} \cos \hat{A}_{zk} \delta A_{zk} + \sin \hat{E}_{lk} \sin \hat{A}_{zk} \delta E_{lk} \\ \cos \hat{E}_{lk} \delta E_{lk} \end{bmatrix}$$

为由方位角量测误差 δA_{zk} 和高低角量测误差 δE_{lk} 所引起的观测视线方向矢量 \mathbf{l}_k 的解算误差。

由于导弹的真实位置 \mathbf{p}_k 不可得,只能用 INS 估计位置 \mathbf{p}_{lk} 代替,它们之间存在如下关系

$$\mathbf{p}_k = \mathbf{p}_{lk} + \delta\mathbf{p}_k \quad \mathbf{p}_{lk} \in \mathbf{R}^3, \delta\mathbf{p}_k \in \mathbf{R}^3 \quad (5)$$

则从 INS 估计位置 \mathbf{p}_{lk} 处沿着解算视线方向矢量 $\hat{\mathbf{l}}_k$ 观测该地标的视线可以表示为

$$\mathbf{L}_k(\lambda_k) = \mathbf{p}_{lk} + \lambda_k \hat{\mathbf{l}}_k, \quad \lambda_k > 0 \quad (6)$$

由于 INS 定位误差和观测视线方向矢量解算误差的存在,使得未知地标 \mathbf{p}_T 不位于观测视线 $\mathbf{L}_k(\lambda_k)$ 上, \mathbf{p}_T 到 $\mathbf{L}_k(\lambda_k)$ 的距离的平方可以表示为

$$F_k(\mathbf{p}_T) = \min_{\lambda_k} \|\mathbf{p}_T - \mathbf{L}_k(\lambda_k)\|_2^2 = \min_{\lambda_k} f(\lambda_k) \quad (7)$$

式中,

$$f(\lambda_k) = \mathbf{p}_T^T \mathbf{p}_T - 2\mathbf{p}_T^T \mathbf{p}_{lk} + \mathbf{p}_{lk}^T \mathbf{p}_{lk} +$$

$$\lambda_k^2 \hat{\mathbf{l}}_k^T \hat{\mathbf{l}}_k + 2\lambda_k \hat{\mathbf{l}}_k^T \mathbf{p}_{lk} - 2\lambda_k \hat{\mathbf{l}}_k^T \mathbf{p}_T$$

又 $\hat{\mathbf{l}}_k^T \hat{\mathbf{l}}_k \approx 1$, 可得当 $\lambda_k = \hat{\mathbf{l}}_k^T \mathbf{p}_T - \hat{\mathbf{l}}_k^T \mathbf{p}_{lk}$ 时, $f(\lambda_k)$ 取得极小值, 为

$$F_k(\mathbf{p}_T) \approx (\mathbf{p}_T - \mathbf{p}_{lk})^T (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{l}}_k \hat{\mathbf{l}}_k^T) (\mathbf{p}_T - \mathbf{p}_{lk}) \quad (8)$$

则地标位置 \mathbf{p}_T 到弹群中所有导弹观测视线 $\mathbf{L}_k(\lambda_k) (k = 1, 2, \dots, n)$ 的距离平方和可以表示为

$$\begin{aligned} E(\mathbf{p}_T) &= \sum_{k=1}^n F_k(\mathbf{p}_T) \\ &\approx \sum_{k=1}^n (\mathbf{p}_T - \mathbf{p}_{lk})^T (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{l}}_k \hat{\mathbf{l}}_k^T) (\mathbf{p}_T - \mathbf{p}_{lk}) \quad (9) \end{aligned}$$

根据最小二乘原理,未知地标位置 \mathbf{p}_T 的最优估计 $\hat{\mathbf{p}}_T$ 应该满足到 n 条观测视线的距离平方和最小,取得极小值时有

$$\left. \frac{\partial E(\mathbf{p}_T)}{\partial \mathbf{p}_T} \right|_{\mathbf{p}_T = \hat{\mathbf{p}}_T} = \mathbf{0}$$

即^[8]

$$\sum_{k=1}^n (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{l}}_k \hat{\mathbf{l}}_k^T) (\hat{\mathbf{p}}_T - \mathbf{p}_{lk}) = \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (10)$$

式(10)可以写成如下形式

$$\hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{p}}_T = \hat{\mathbf{b}} \quad (11)$$

式中

$$\hat{\mathbf{A}} = \sum_{k=1}^n (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{l}}_k \hat{\mathbf{l}}_k^T), \quad \hat{\mathbf{b}} = \sum_{k=1}^n (\mathbf{p}_{lk} - \hat{\mathbf{l}}_k \hat{\mathbf{l}}_k^T \mathbf{p}_{lk})$$

可以由弹群中各枚导弹的视线角量测信息和 INS 位置量测信息解算得到。

由式(11)可以解算得到弹群对未知地标位置的估计值

$$\hat{\mathbf{p}}_T = \hat{\mathbf{A}}^{-1} \hat{\mathbf{b}} \quad (12)$$

将式(4)、(5)代入式(11)可得

$$\mathbf{A} = \hat{\mathbf{A}} + \delta\mathbf{A} \quad (13a)$$

$$\mathbf{b} = \hat{\mathbf{b}} + \delta\mathbf{b} \quad (13b)$$

式中, $\mathbf{A} = \sum_{k=1}^n (\mathbf{I} - \mathbf{l}_k \mathbf{l}_k^T)$;

$$\delta\mathbf{A} \approx - \sum_{k=1}^n (\delta\mathbf{l}_k \hat{\mathbf{l}}_k^T + \hat{\mathbf{l}}_k (\delta\mathbf{l}_k)^T);$$

$$\mathbf{b} = \sum_{k=1}^n (\mathbf{p}_k - \mathbf{l}_k \mathbf{l}_k^T \mathbf{p}_k);$$

$$\delta\mathbf{b} \approx \sum_{k=1}^n [(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{l}}_k \hat{\mathbf{l}}_k^T) \delta\mathbf{p}_k - (\delta\mathbf{l}_k \hat{\mathbf{l}}_k^T + \hat{\mathbf{l}}_k (\delta\mathbf{l}_k)^T) \mathbf{p}_{lk}]$$

其中, \mathbf{A} 和 \mathbf{b} 分别表示理想状态下(视线角量测误差和 INS 定位误差都为零)的真实值; $\delta\mathbf{A}$ 和 $\delta\mathbf{b}$ 表示对应误差,表达式中忽略了高阶误差项。

又由于理想状态下,所有观测视线必定交于地标位置 \mathbf{p}_T 这一点,可得

$$\mathbf{p}_T = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)可得

$$\mathbf{p}_T = (\hat{\mathbf{A}} + \delta\mathbf{A})^{-1} (\hat{\mathbf{b}} + \delta\mathbf{b}) \quad (15)$$

由于 $\delta\mathbf{A}$ 比 \mathbf{A} 中的元素小得多,可得

$$(\hat{\mathbf{A}} + \delta\mathbf{A})^{-1} \approx \hat{\mathbf{A}}^{-1} - \hat{\mathbf{A}}^{-1} \delta\mathbf{A} \hat{\mathbf{A}}^{-1} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)可得

$$\begin{aligned} p_T &\approx \hat{A}^{-1} \hat{b} + \hat{A}^{-1} \delta b - \hat{A}^{-1} \delta A \hat{A}^{-1} \hat{b} - \\ &\quad \hat{A}^{-1} \delta A \hat{A}^{-1} \delta b \\ &= \hat{p}_T + \delta p_T \end{aligned} \quad (17)$$

式中, $\hat{p}_T = \hat{A}^{-1} \hat{b}$; $\delta p_T \approx \hat{A}^{-1} \delta b - \hat{A}^{-1} \delta A \hat{A}^{-1} \hat{b}$ 。

考虑到成像导引头视觉量测精度远远优于 INS 定位精度, 当导弹成像导引头视线角测量精度很高时, 由式(4)可得 $\delta l_k \rightarrow 0$, 进而可得 $\delta A \rightarrow 0_{3 \times 3}$, 于是有

$$\delta p_T \approx \hat{A}^{-1} \sum_{k=1}^n (I - \hat{l}_k \hat{l}_k^T) \delta p_k \quad (18)$$

可见, 多弹协同定位未知地标的误差可以表示为弹群中各枚导弹 INS 定位误差的加权平均。

3 基于地标位置估计值的 INS 定位误差修正

以式(12)估计得到的地标位置 \hat{p}_T 为参考, 利用各枚导弹相对于地标的视线角和方位角速率量测信息及 INS 速度估计信息, 反过来修正弹群中各枚导弹的 INS 定位误差。以第 k ($k = 1, 2, \dots, n$) 枚导弹为例, 考虑到成像导引头视觉量测精度远远优于 INS 定位精度, 视觉量测误差可忽略不计, 设 v_{ek} 和 v_{nk} 分别为第 k 枚导弹东向、北向速度真实值, \hat{v}_{ek} 和 \hat{v}_{nk} 分别为其 INS 东向、北向速度输出值, 有

$$v_{ek} = \hat{v}_{ek} + \delta v_{ek} \quad (19a)$$

$$v_{nk} = \hat{v}_{nk} + \delta v_{nk} \quad (19b)$$

式中, δv_{ek} 和 δv_{nk} 分别是 INS 东、北向速度估计误差。

将式(19)代入式(3)可得

$$r_{Tk} = \hat{r}_{Tk} + \delta r_{Tk} \quad (20)$$

式中

$$\hat{r}_{Tk} \approx (\hat{v}_{ek} \sin A_{zk} - \hat{v}_{nk} \cos A_{zk}) / \dot{A}_{zk}$$

$$\delta r_{Tk} \approx (\sin A_{zk} \cdot \delta v_{ek} - \cos A_{zk} \cdot \delta v_{nk}) / \dot{A}_{zk}$$

由式(1)、(2)、(12)和(20)可得

$$\hat{x}_k = \hat{x}_T + \hat{r}_{Tk} \cos A_{zk} \quad (21a)$$

$$\hat{y}_k = \hat{y}_T + \hat{r}_{Tk} \sin A_{zk} \quad (21b)$$

$$\hat{z}_k = \hat{z}_T + \hat{r}_{Tk} \tan E_{lk} \quad (21c)$$

这样, 就估计出了导弹编队中任意成员的三维位置, 实现了导弹编队的 INS 定位误差修正。

误差修正后, 编队中第 k 枚导弹的误差修正精度为

$$\delta x'_k \approx \delta x_T + \delta r_{Tk} \cos A_{zk} \quad (22a)$$

$$\delta y'_k \approx \delta y_T + \delta r_{Tk} \sin A_{zk} \quad (22b)$$

$$\delta z'_k \approx \delta z_T + \delta r_{Tk} \tan E_{lk} \quad (22c)$$

在忽略 INS 速度估计误差的基础上, 由式(20)和(22)进一步可得

$$\delta p'_k \approx \delta p_T, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

于是, 由式(18)和式(23)可以得到如下结论:

(1) 协同 INS 误差修正后, 弹群中各枚导弹的 INS 定位误差基本相同, 均接近地标的定位误差, 即实现了弹群中各枚导弹 INS 定位误差的加权平均。

(2) 协同 INS 误差修正的本质是使得朝着任意方向发散的各枚导弹的 INS 定位误差相互牵制, 减缓了整个弹群的 INS 定位误差漂移速度, 使得各枚导弹的 INS 定位误差朝着平均大小漂移。

(3) 理论上参与协同 INS 误差修正的导弹数目越多, INS 定位误差修正精度越高; 即使参与协同 INS 误差修正的导弹数目较少, 从弹群的角度来看, INS 定位误差应该仍可得到一定程度的修正, 最起码不会变差。

4 仿真分析

以 10 枚导弹编队为例, 仿真验证本文方法的有效性及其结论的正确性。设弹群中各枚导弹的 INS 位置及速度量测误差初值如表 1 所示; 地标位于弹群的正前方, 第 1~5 枚导弹从左侧观测地标, 第 6~10 枚导弹从右侧观测地标, 各枚导弹的成像导引头视线角和方位角速率量测误差均为高斯白噪声, 量测噪声的标准差分别为 0.03° 和 $0.01(^\circ)/s$ 。

表 1 INS 位置及速度量测误差初值

Table 1 INS position and velocity error before modification

	δx_k /m	δy_k /m	δz_k /m	δv_{ek} /(ms^{-1})	δv_{nk} /(ms^{-1})
1	296	196	-120	2.2	1.8
2	198	-280	166	2	-2.4
3	-137	-272	-198	-1.4	-2.1
4	177	261	-111	1.5	2.5
5	-164	295	222	-1.4	2.3
6	-270	-200	-159	-2	-1.6
7	175	102	200	1.5	1
8	-220	230	285	-1.3	1.4
9	-242	-175	-102	-1.9	-1.5
10	187	-157	-183	1.6	-1.2

10 枚导弹基于各自的视线角量测信息和 INS

位置量测信息(如表1)对未知地标进行协同定位,仿真得到地标的估计精度为(32.4094, -30.9026, 18.4954)。由于地标位置的估计过程中融合了弹群中各枚导弹的 INS 信息,相当于对弹群中各枚导弹的 INS 定位误差进行了加权平均,如式(18)所示,因此,地标的估计精度远高于表1中各枚导弹的 INS 定位精度。

以估计得到的地标位置为参考,利用各枚导弹相对于地标的视线角和方位角速率量测信息及 INS 速度量测信息(如表1),反过来修正弹群各枚导弹的 INS 定位误差。协同误差修正后弹群中各枚导弹的 INS 定位精度如表2所示。

表2 协同误差修正后弹群 INS 定位精度
Table 2 INS position accuracy after modification

	$\delta x'_k / m$	$\delta y'_k / m$	$\delta z'_k / m$
1	31.4398	-27.2422	21.7986
2	40.0021	-17.1419	22.4880
3	30.5869	-28.0548	21.7635
4	21.3106	-30.9882	19.4862
5	19.9067	-30.9092	19.0968
6	43.3881	-38.1746	22.3699
7	28.9922	-22.0492	21.1800
8	35.3447	-29.4462	21.7429
9	41.7017	-30.6453	21.2374
10	37.4232	-29.8307	20.7391

由表2可以看出,由于弹群中各枚导弹 INS 速度量测误差、成像导引头视线角量测误差和方位角速率量测误差的影响,使得地标的估计精度不能准确地传递到各枚导弹,但协同 INS 误差修正后,弹群中各枚导弹的 INS 定位误差均接近地标的定位误差。与表1中的初始定位误差相比较,弹群 INS 定位精度得到显著提高,证明了方法的有效性。

5 结论

该方法只需要成像导引头提供的视觉测量信息和 INS 导航信息,就能有效减缓弹群的 INS 定位误差发散速度。并且,即使弹群飞行航路上可供参考的地标稀少,也不影响弹群 INS 误差协同修正的效果。该方法可以推广应用到无人机、水下航行器等其它领域,用于在 GPS 不可用时提高编队的 INS 定位精度。

参 考 文 献

- [1] 邵巍,常晓华,崔平远,等. 惯导融合特征匹配的小天体着陆导航算法[J]. 宇航学报, 2010, 31(7): 1748 - 1755. [Shao Wei, Chang Xiao-hua, Cui Ping-yuan, et al. Coupled feature matching and INS for small body landing navigation[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(7): 1748 - 1755.]
- [2] 曹娟娟,房建成,盛蔚,等. GPS 失锁时基于神经网络预测的 MEMS-SINS 误差反馈校正方法研究[J]. 飞行力学, 2009, 30(6): 2231 - 2236. [Cao Juan-juan, Fang Jian-cheng, Sheng Wei, et al. Adaptive neural network prediction feedback for MEMS-SINS during GPS outage[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(6): 2231 - 2236.]
- [3] 张友安,寇昆湖,柳爱利. 参考地物的飞航导弹视觉辅助导航[J], 海军航空工程学院学报, 2012, 27(4): 361 - 365. [Zhang You-an, Kou Kun-hu, Liu Ai-li. Vision navigation system based on reference features for cruise missile[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012, 27(4): 361 - 365.]
- [4] 冯培德,谢淑香,张京娟. 机群组网定位的一种新途径[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11): 1263 - 1267. [Feng Pei-de, Xie Shu-xiang, Zhang Jing-juan. New approach for swarming aircraft positioning via network information[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1263 - 1267.]
- [5] 王小刚,郭继峰,崔乃刚. 基于数据链的智能导弹协同定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(3): 319 - 323. [Wang Xiao-gang, Guo Ji-feng, Cui Nai-gang. Cooperative localization approach to intelligent missile based on data link[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(3): 319 - 323.]
- [6] Yotam E, Alfred M B. A thermodynamic approach to the analysis of multi-robot cooperative localization under independent errors [R]. Israel Computer Science Department, January 2010.
- [7] 张共愿,程咏梅,程承,等. 基于相对导航的多平台 INS 误差联合修正方法[J]. 航空学报, 2011, 32(2): 271 - 280. [Zhang Gong-yuan, Cheng Yong-mei, Cheng Cheng, et al. A joint correcting method of multi-platform INS error based on relative navigation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 271 - 280.]
- [8] 程云鹏. 矩阵论[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2003, 9: 166 - 167.

作者简介:

寇昆湖(1982 -),男,博士,讲师,研究方向为导航、制导与控制。
通信地址:烟台市二马路 188 号控制工程系(264001)
电话:(0535)6635657
E-mail:koukunhu@yahoo.com.cn

(编辑:曹亚君)