

三视场定位定向设备的视场确定

王昊京¹, 王建立¹, 吴 量^{1,2}, 姚凯男^{1,2}

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了提高三视场定位定向设备可靠性, 建立三视场系统功能的基本约束条件测试模型, 以模型为依据对可见光波段的视场进行优化分析。首先, 分析了设备正常完成工作时采用组合星图识别和简单星图识别所需的必要条件, 并建立这两种识别方式关于视场大小的概率分布模型。从原理和实验数据两个方面说明了三视场结构识别三角形概率分布不能通过单视场的概率分布简单推导获取的原因。接着, 给出用蒙特卡洛法求取此概率分布和视场最优值的方法。然后, 通过仿真分析得出了两种识别方法关于视场大小的概率分布, 在分析两种识别方法仿真数据的基础上, 取识别概率为 1 时视场大小为其优化值。实验结果表明: 以组合星图识别为工作基础的三视场定位定向设备有更好的可靠性, 优化的视场大小为 $4.225^\circ \times 3.168\ 75^\circ$ 。它满足三视场定位定向设备识别条件可靠性要求。

关键词: 视场优化; 定位定向; 天文导航; 三视场; 星图识别

中图分类号: V249.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1890-08

FOV determination of the three FOVs position and orientation determination equipment

Wang Haojing¹, Wang Jianli¹, Wu Liang^{1,2}, Yao Kainan^{1,2}

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the three FOVs position and orientation determination equipment reliability, the basic constraints test probability distribution model of the three FOVs system was established. Based on the model, the optimized FOV size of the equipment was analyzed on the visible band. First, the necessary conditions of the composite FOVs star identification and the sample FOV star identification were analyzed, and the probability distribution models of the methods were established. The reason why probability distribution of recognized triangles on three FOVs equipment cannot be simply deduced from the one FOV's was illuminated in theory and simulated experiment. Then, the optimal value of the probability distribution was obtained by the monte Carlo method. Finally, the optimal design of the FOV size was presented by computer simulation. The experimental results show that: the three FOVs celestial navigation equipment using the composite FOVs star identification is more reliable. The optimal FOV size is $4.225^\circ \times 3.168\ 75^\circ$. It can satisfy the reliability requirements of the three FOVs position and orientation determination equipment.

收稿日期: 2014-10-17; 修订日期: 2014-11-19

基金项目: 国防科技创新基金(CXJJ-10-M53)

作者简介: 王昊京(1983-), 男, 博士, 主要从事导航、辐射标定等方面的研究工作。Email: wanghaojing@vip.qq.com

Key words: FOV optimization; position and orientation determination; celestial navigation; three FOVs; star identification

0 引言

天文导航是重要的辅助导航系统,有着特有的优势。它可自主式导航,进行被动式测量,抗干扰能力强;另外它的定向、定位精度高,定位误差与时间无关,不需要定期的标校^[1-3]。天文导航具有这些优势是GPS、无线电导航等导航系统无法比拟的。

近年,美国已开发出三视场定位定向设备原理样机。例如美国Trex公司已经开发出来多视场恒星跟踪器。它可以在白天的海平面探测到6.3等的恒星,并可完成定位定向或高精度姿态测量工作^[4-5]。此设备可以为航海提供精确的方位基准,独立于惯性导航系统。法国SODERN公司的HYDRA星敏感器,应用于航天器的姿态测量^[6]。国内在多视场天文导航方面起步较晚,目前北京航空航天大学对多视场的工作模式进行了研究^[7-9],清华大学和国防科技大学等研究了双视场天文导航系统^[7,9],这些研究的重点是获取高精度系统姿态。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所完成了一种基于“视场拼接”的双星敏感器组合定姿测量算法,对双星敏感器组合定姿算法模型进行了推导并进行了基于双星敏感器的船姿测量系统实验,满足了船姿测量要求,基本达到了预期目标^[10],该所还进行了三视场定位定向方向的研究工作。

三视场结构布局在定位定向方面更为可靠些,定位定向精度高。

对星敏感器的视场确定可由经验公式估计获得,但对三视场结构视场大小的优化确定并未有深入研究。一般地,在对单视场结构的星敏感器的视场确定时认为视场内的恒星数目同视星等和视场大小近似服从泊松分布,通过枚举星等和视场大小的近似关系估算出合适的视场大小,通常是 $8^\circ \times 8^\circ$ 甚至是更大的视场^[11]。此经验估计在大视场的单视场星敏感器中经验证是正确的^[12]。但是不能由单视场内恒星的概率分布经简单推导获取三视场结构中构造观测三角形时的概率分布进而准确确定视场大小。

文中以可见光波段三视场天文定位定向设备的

视场大小优化方法为研究对象,以设备完成正常工作时所必须的条件为依据,分析了采用组合星图识别和简单星图识别所需的必要条件,并建立了这两种识别方法关于视场大小的概率分布模型。分析并通过实验数据说明:不能由单视场内的恒星概率分布经简单推导获得三视场定位定向设备中构造观测三角形的概率分布,更不可能精确获得最优的视场大小。但通过蒙特卡洛法可以精确求取三视场结构的视场大小的最优值。最后,使用该数值设计了光学系统,进行了野外实验验证。

1 设备可靠工作的必要条件

1.1 三视场天文导航的功能框图

三视场天文定位定向设备用于在地面附近完成设备的定位和定向,它和用于姿态测量的星敏感器在工作原理上比较类似,它们都是通过星图识别的方法确定视场内的恒星,然后利用时间信息、恒星等信息进行测量。三视场的恒星识别技术是核心关键技术。所不同的是它使用三个视场内的恒星信息完成识别,通过识别的恒星确定天文圆的方法求取平台位置和方位信息^[13]、或者通过求解包含方位信息姿态矩阵的方式获取地理位置和设备方向。它的具体工作原理不是文中的论述重点,不在这里展开叙述。

图1是三视场定位定向设备的结构图。在三视场导航设备的载体坐标系内有三个光轴,每个光轴在载体坐标系内都有一个固定方位角(Azi)和仰角

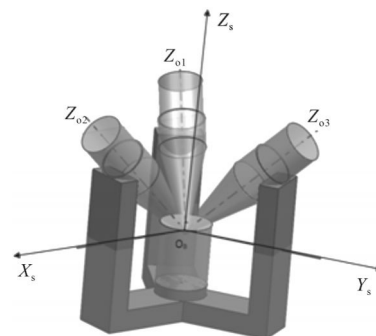


图1 三视场定位定向设备结构图

Fig.1 Structure of three FOVs position and orientation determination equipment

(Ele), 它在载体中坐标系的方位可由单位矢量 $AxiVec_i = [\cos(Azi)\cos(Ele), \sin(Azi)\cos(Ele), \sin(Ele)]^T$ 表示。三视场定位定向设备为了降低恒星识别的复杂度, 一般采用对称式光轴形式, 即光轴的方位角间隔为 120° , 而仰角相等 $Ele=45^\circ$ 。

图 2 是三视场天文定位定向设备的原理框图, 能否实现定位定向的关键之一就是能否实现星图识别。参考文献[16]给出了定位定向原理的更详细解释, 在此仅作简述。恒星光线从光学系统进入并在探测器上形成星像, 通过星图预处理提取图像中的恒星目标。通过质心计算获取恒星质心位置, 质心位置结合光学系统焦距、CCD 的像元大小、分辨率(简记为 Res)、主点位置、畸变参数、光轴在载体中的单位矢量 $AxiVec_i$ 以及 CCD 的安装旋转角等, 可以算出各个星点之间的星角距^[13]。星角距结合星图识别数据库进行星图识别, 获得导航星与观测星的匹配组, 然后结合载体的水平倾斜信息、气象参数、时间信息进行计算分析, 据定位定向算法进行定位定向, 并输出结果。其中定向就去确定设备的指北信息, 它是待求解量。可见恒星识别是三视场的天文导航设备的关键约束条件。

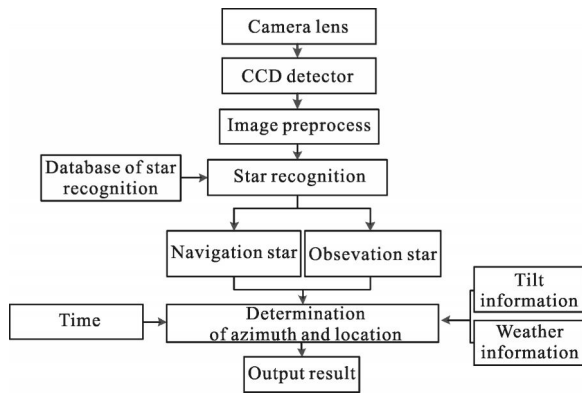


图 2 三视场定位定向设备的原理框图

Fig. 2 Functional block diagram of the three FOVs position and orientation determination equipment

1.2 三视场定位定向设备中恒星识别所必须的条件

文中以最为常见的三角形匹配识别算法为基础建立优化分析模型。三角形匹配算法的核心思想是从某个采集的星图中选择三颗恒星构成一个恒星三角形, 要求这三颗星不能在同一条直线上。将恒星识别星表中所有可能存在的三角形记录下来形成一个

星识别数据库。据三角形匹配识别的算法在星识别数据库中寻找与此提取的恒星三角形唯一相匹配的三角形来确定这三颗恒星^[14-18]。

三视场定位定向设备欲完成测量, 必须实现恒星识别。想要完成恒星识别, 至少需要捕获三颗恒星, 称此条件为约束条件 I。它也是三视场定位定向设备中恒星识别必须满足的条件。但约束条件 I 是必要条件, 非充分条件。

三视场定位定向设备中恒星识别采用两种识别方法: 简单星图识别和组合星图识别。下面给出这两种识别方法的约束条件测试。

2 采用不同识别方法的概率分布模型

2.1 简单星图识别和组合星图识别的约束条件

(1) 组合星图识别约束条件的概率分布

以星敏感器为典型代表光电测量设备, 它仅仅有一个光学视场。以 SYS^1 表示, 其中 1 表示仅有一个视场。在光学系统光轴指向未知时, 它欲完成测姿输出, 它必须满足约束条件 I。对于任意一个光轴指向, 光学视场内捕获的恒星数记作 $StarCouts$, 将满足恒星识别约束条件 I 的事件记作 E_1 , 那么满足:

$$E_1 = \{StarCouts \geq 3\} \quad (1)$$

将单视场光学测量系统满足恒星识别约束条件的概率记作 $P_{SYS^1}(E_1)$ 。

三视场天文导航系统, 它有对称安装三个光学视场, 如图 1 所示, 此系统记作 SYS^3 , 三个光学系统的视场大小相同, 均为 FOV 。以 $StarCout_0, StarCout_1, StarCout_2$ 来表示每个视场内捕获的恒星数, 将满足约束条件 I 的事件记作 E_2 , 则有如下关系:

$$E_2 = \left\{ \sum_{i=0}^2 StarCouts_i \geq 3 \right\} \quad (2)$$

即欲完成恒星识别, 三个视场内捕获的恒星数之和不少于三, 将此概率记作 $P_{SYS^3}(E_2)$ 。

若将三个视场看作三个“星敏感器”的简单组合, 每个视场单独完成恒星识别; 则将满足此恒星识别约束条件的事件记作 E_3 , 它满足下式:

$$E_3 = \{StarCouts_i \geq 3, i=0, 1, 2\} \quad (3)$$

将 SYS^3 满足此种简单组合的恒星识别约束条件概率记作 $P_{SYS^3}(E_2)$ 。

(2) $P_{SYS^3}(E_3)$ 、 $P_{SYS^3}(E_2)$ 与 $P_{SYS^3}(E_1)$ 之间的关系

$P_{SYS^3}(E_3)$ 并不能由 $P_{SYS^3}(E_1)$ 简单推导得出。显然事件 E_3 与事件 E_1 之间满足 $E_3=E_1^1 E_1^2 E_1^3$, 其中事件的上标表示实验中抽样顺序, 则 $P_{SYS^3}(E_3)=P_{SYS^3}(E_1^1)P_{SYS^3}(E_1^2|E_1^1)P_{SYS^3}(E_1^3|E_1^1 E_1^2)$ 。假设天球上恒星是均匀分布的, 并忽略三个光学视场间的结构关系对概率分布的影响, 且认为它是“放回抽样实验”, 则 $P_{SYS^3}(E_3)=(P_{SYS^3}(E_1))^3$ 。此时简单星图识别约束条件的概率分布可由单视场的概率分布推导出来。

但光学系统的结构对概率分布有影响。即 $P_{SYS^3}(E_1^2|E_1^1) \neq P_{SYS^3}(E_1^1)$, 原因为: 对三视场结构系统的任意一次随机实验而言, 任意一个光学视场均不会和其他两个光轴相重合; 并且其他两个光轴在天球中所处的位置必定落在由第一个光轴位置确定的一个球面环带之内。同理 $P_{SYS^3}(E_2)$ 也不能由 $P_{SYS^3}(E_1)$ 推导得出。这是由其结构特点决定的。

这一结论也可由实验数据反证得出。若简单星图识别或者组合星图识别的约束条件概率分布可由单视场星图识别的概率分布推导出来, 那么意味着: 三视场的结构布局对概率分布的结果没有影响; 在光学视场一致时, 三个光轴仰角 Ele 改变对 $P_{SYS^3}(E_3)$ 的分布没有影响。条件同后面的仿真实验, 图 3 是在改变光轴 Ele 时通过蒙特卡罗法获得的 $P_{SYS^3}(E_3)$ 的概率分布, 显然当三个光轴的仰角由 $30^\circ \sim 75^\circ$ 变化时, 简单星图识别的约束条件概率分布有着明显的变化, 由 0.007 上升至 0.017 左右, 并且总体趋势是变大。图 4 是组合星图识别时概率分布关于仰角的变化状况, 它的概率由 0.85 下降至 0.76 左右, 且明显呈下降趋势。图 3 和图 4 说明在三视场结构中获取观测三角形的概率并不能由单视场的推导精确获得, 三视场布局结构的不同会影响到其概率分布。

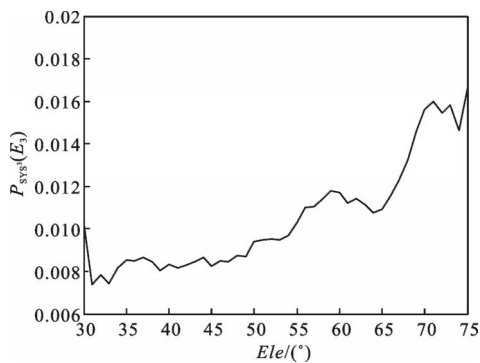


图 3 Ele 变化时 $P_{SYS^3}(E_3)$ 的概率分布

Fig.3 Probability distribution of $P_{SYS^3}(E_3)$ on Ele

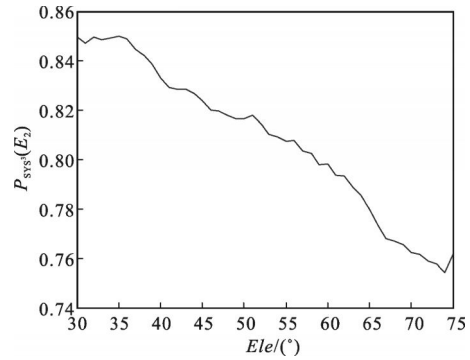


图 4 Ele 变化时 $P_{SYS^3}(E_2)$ 的概率分布

Fig.4 Probability distribution of $P_{SYS^3}(E_2)$ on Ele

(3) 组合星图识别的方式优于简单星图识别

对于三视场定位定向设备 SYS^3 , 将满足式(2)的星图识别方式称之为组合星图识别; 满足式(3)的星图识别方式称之为简单星图识别。即三个星敏传感器简单累加时的识别能力同采用组合视场的方式的识别能力不同, 且在视场 FOV 一致的情况下满足:

$$P_{SYS^3}(E_2) * P_{SYS^3}(E_3) \tag{4}$$

即采用组合星图识别时构造出识别三角形的概率远远高于简单星图识别。

为了让系统更加的健壮, 对组合星图识别的条件进行加强约束。加强约束的内容是: 除了满足事件 E_2 , 并且至少有两个视场内有一颗星。它保证了在使用三角形识别过程中, 除了使用了视场内恒星夹角, 还使用了视场间的恒星。这个加强条件使得在进行恒星识别匹配时, 有更好的识别效果。满足此条件的事件为 E_4 , 将 SYS^3 满足此种加强版组合恒星识别约束条件的概率记作 $P_{SYS^3}(E_4)$, 也是组合星图识别的一种, 且在视场相同时满足:

$$P_{SYS^3}(E_2) > P_{SYS^3}(E_4) * P_{SYS^3}(E_3) \tag{5}$$

下面就这三个概率分布进行深入分析。对于概率分布 $P_{SYS^3}(E_4)$ 的求解, 若尝试使用 $P_{SYS^3}(E_1)$ 推导得出, 需要的计算分析量并不会减少。

2.2 约束条件概率分布模型

2.2.1 约束条件概率分布模型的已知条件

三视场定位定向设备在一定的条件下, 存在最

优的视场设计。视场如果太大,总体上捕获的恒星数量会增加,大量的恒星目标影响识别速率和正确率;也不能太小,如果太小,总体上观测恒星的数目会降低,会降低系统识别的概率。所以存在最优的视场设计。

让大多数恒星离焦成像在 3×3 的像素范围内,设计光学系统的最高星等探测能力极限为 Mag_{max} ;通过设计口径、选择 CCD 完成最优视场的设计。进行恒星识别时选择极限星等为 Mag_H ,且满足:

$$Mag_H \leq Mag_{max} \quad (6)$$

通过建立识别星表时星等筛选,排除了星等对 $P_{SYS^a}(E_2)$ 、 $P_{SYS^a}(E_3)$ 、 $P_{SYS^a}(E_4)$ 的影响。

模型的建立需要基于识别星表。分析是基于可见光波段的,选择 Tycho2 星表为基本星表,简称为 StarCat。Star 表示一颗任意恒星,则 $StarCat = \{Star\}$ 。Tycho2 星表中亮于 11 等的恒星个数达到 90 万。这里采用的星图识别星表是基本星表 StarCat 的子集,简称为 $StarCat_{id}$,显然满足下式:

$$StarCat_{id} \subseteq StarCat \quad (7)$$

式(7)中的 $StarCat_{id}$ 满足式(8):

$$\begin{aligned} StarCat_{id} = \{Star | Star < Mag_H, \\ StarAng_{pq} > BinThr, p, q \in N\} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: p, q 代表任意两个不同恒星的星标号; $StarAng_{pq}$ 代表星标号为 p, q 的两颗星之间的星角距。 $BinThr$ 代表星间角距限制,它可以由下式求取:

$$BinThr \approx (6 \sim 8) \left| \frac{FOV}{Res} \right| \quad (9)$$

式中: Res 为 CCD 的分辨率。

由式(7)~(9)可知星图识别星表 $StarCat_{id}$ 的选择与视场大小 FOV 、CCD 分辨率 Res 、星等选择阈值 Mag_H 有关,即满足:

$$StarCat_{id}^*G(FOV, Res, Mag_H) \quad (10)$$

由式(10)确定星图识别星表为下面的约束条件概率分布模型所使用的星表。

在仿真实验之前中,设计使用 75 mm 口径、视场大小约为 $[8^\circ, 6^\circ]^T$ 的光学系统、配合购买的一款分辨率为 $[1\ 024, 768]^T$ 的 CCD 相机,进行了初期的星等极限探测实验,确定此 CCD 相机、光学系统初样的设计可以满足 8.5 等星的探测极限。所以选取 7 等星为识别星表 $StarCat_{id}$ 的星等阈值限制,即

$Mag_H = 7$ 。此时 CCD 的分辨率 Res 和星等阈值 Mag_H 已经确定。

$$StarCat_{id}^*(FOV, [1\ 024, 768]^T, 7) \quad (11)$$

由式(11)可知,识别星表的选择此时仅仅关于 FOV 。

2.2.2 约束条件概率分布模型的建模方法

以蒙特卡罗法进行系统功能的基本约束条件测试,通过仿真的方法给出 $P_{SYS^a}(E_2)$ 、 $P_{SYS^a}(E_3)$ 、 $P_{SYS^a}(E_4)$ 确定方法。

仿真中所取视场的最小数值为 FOV_{min} ,最大视场取 FOV_{max} ,且任意一次仿真过程中所取的视场 FOV_j 满足下式:

$$FOV_{min} \leq FOV_j \leq FOV_{max} \quad (12)$$

此时据式(11)获取识别星表 $StarCat_{id}^j$ 。

首先,在第 j 次仿真实验时通过式子、提取识别星表 $StarCat_{id}^j$,接着进行概率测试。即选择不同的视场时,重新提取星图识别星表。

$P_{SYS^a}(E_2)$ 概率测试的算法流程如表 1 所示。其中 $Couts$ 、 $SucCouts$ 分别为设置测试的总次数和单次测试的成功次数。测试次数要求足够大,可以设置 $Couts = 100\ 00$;初始时设置 $SucCouts$ 为 0。初始时设置载体在国际天文参考系 (ICRS) 的初始姿态为 $(0, 0, 0)$,则其旋转矩阵为单位矩阵;让载体坐标系绕着 $Z \rightarrow Y \rightarrow X$ 的随机旋转,旋转角分别设置为 φ_{Ra} 、 φ_{Dec} 、0,其中 φ_{Ra} 在区间 $[0^\circ, 360^\circ]$ 上服从均匀分布, φ_{Dec} 在区间 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 之间服从均匀分布,那么可以确定一个旋转矩阵 $R_{zyx}(\varphi_{Ra}, \varphi_{Dec}, 0)$,依次求解各个视轴的新指向,如下:

$$AxiVec_i' = R_{zyx}(\varphi_{Ra}, \varphi_{Dec}, 0) AxiVec_i, i = 0, 1, 2 \quad (13)$$

表 1 约束条件概率测试的算法

Tab.1 Algorithm of constraints prerequisite probability test

No.	Procedure
1	Initializes $Couts$, $SucCouts$
2	Randomly set φ_{Ra} , φ_{Dec}
3	Calculate rotate matrix $R_{zyx}(\varphi_{Ra}, \varphi_{Dec}, 0)$
4	Calculate vector $AxiVec_i'$ according to Equation (13)
5	Extraction stellar in the field of view, $StarFOV_i$
6	Calculate the number of stars $StarCout_i$ about $StarFOV_i$
7	If $StarCout_i$ satisfies the condition E_2 , then $SucCouts += 1$, and executes step 8); or not, executes step 8)
8	Do $Couts -= 1$; if $Couts == 0$, then break loop and exit; or not, jump to step 2)

依据新的视轴指向 $AxiVec_i'$ 和视场大小 FOV , 使用星表查询算法^[17], 提取每个视场内的恒星集合 $StarFOV_i$, 并统计每个视场的恒星集合 $StarFOV_i$ 内的恒星个数 $StarCout_i$ 。

如果满足式(2), 那么就将成功次数 $SucCouts$ 加1, 并将测试次数 $Couts$ 减1。循环执行测试, 直至 $Couts=0$ 时停止测试, 最后输出测试概率:

$$P_{SYS^3}(E_2) = \frac{SucCouts}{Couts} \times 100\% \quad (14)$$

如果将流程图中满足事件 E_2 改写成满足事件 E_3, E_4 就可以获得 $P_{SYS^3}(E_3), P_{SYS^3}(E_4)$ 数值。

此时获取的概率是 FOV 的函数, 即满足下面的公式:

$$P_{SYS^3}(E_2) = G_1(FOV) \Big|_{StarCat_L} \quad (15)$$

$$P_{SYS^3}(E_3) = G_2(FOV) \Big|_{StarCat_L} \quad (16)$$

$$P_{SYS^3}(E_4) = G_3(FOV) \Big|_{StarCat_L} \quad (17)$$

对于式(15)而言, 若点集 FOV_2 满足下式:

$$FOV_2 = \{FOV \mid G_1(FOV) = 1\} \quad (18)$$

则式(15)的最优的视场为:

$$FOV_2^{Best} = \min |FOV_2| \quad (19)$$

相似地, 式(16)、(17)的最优视场分布也可以用同样方法求取, 分别记作 $FOV_3^{Best}, FOV_4^{Best}$ 。下面通过实验进行求解最优视场。

3 实验与结果

3.1 仿真实验与结果

文中采用 VS2010 使用 C++ 语言设计程序在电脑上仿真分析。CCD 分辨率为 1024×768 , 像素尺寸为 $4.65 \mu m \times 4.65 \mu m$, 视场的最小数值为 $FOV_{min} = [0.25^\circ, 0.1875^\circ]^T$, 最大视场取 $FOV_{max} = [8^\circ, 6^\circ]^T$, 且仿真过程中第 j 次的仿真所取的视场 FOV_j 满足下式:

$$FOV_{j+1} = FOV_j + [0.025^\circ, 0.0188^\circ]^T \quad (20)$$

除星双星可以更加准确地获取识别星表计算概率。双星的标准定为六个像素的恒星张角, 实验中星表使用星等探测极限 Mag_H 为 7。

图5是不同视场时 $P_{SYS^3}(E_2), P_{SYS^3}(E_3), P_{SYS^3}(E_4)$ 的概率分布。从图中可以看出从 FOV_{min} 到 FOV_{max} 变化时概率从 0 到 1 变化。

视场的最优值分别为 $FOV_3^{Best} = [6.525^\circ, 4.89375^\circ]^T$, $FOV_2^{Best} = [3.775^\circ, 2.83125^\circ]^T$, $FOV_4^{Best} = [4.225^\circ, 3.1688^\circ]^T$ 。 $P_{SYS^3}(E_3), P_{SYS^3}(E_4)$ 都是组合星图识别, 但是 $P_{SYS^3}(E_4)$ 的条件更加严格。所以采用加强约束条件 1 时的优化视场 $FOV_4^{Best} = [4.225^\circ, 3.16875^\circ]^T$ 是优先采用的视场设计。

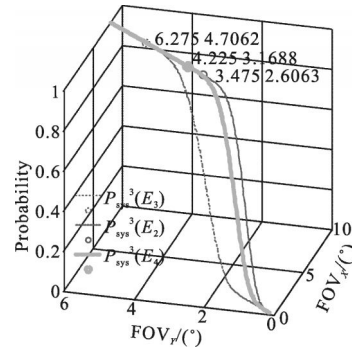


图5 $P_{SYS^3}(E_2), P_{SYS^3}(E_3), P_{SYS^3}(E_4)$ 的概率分布

Fig.5 $P_{SYS^3}(E_2), P_{SYS^3}(E_3), P_{SYS^3}(E_4)$ probability distribution

3.2 野外实验内容

在野外实验过程中, 据上述仿真结果 $FOV_4^{Best} = [4.225, 3.1688]^T$ 进行光学系统设计。选择 Imaging Source 公司的单色工业 CCD 相机, 分辨率为 1024×768 , 像素尺寸为 $4.65 \mu m \times 4.65 \mu m$ 。光学系统的口径 73 mm, 选择焦距 $f = [0.06060 m, 0.06060 m]^T$, 实际的视场设计约为 $[4.5^\circ, 3.3750^\circ]^T$ 。图6是三视场定位定向设备的实验平台, 将其摆放到野外进行实验验证。平台下部是一个小转台, 三个光轴固定在平台上, 可通过计算机控制设备在水平方向 $[0^\circ, 360^\circ)$ 之间、仰角在 $[10^\circ, 90^\circ)$ 之间任意旋转。随机旋转位置的方位和俯仰符合均匀分布, 间隔随机, 由计算机生成的随机数控制, 实现平台的姿态随意变换。

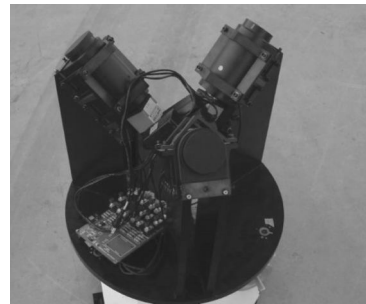


图6 三视场定位定向设备简易实验平台

Fig.6 Experiment platform of the three FOVs position and orientation determination equipment

计算机通过控制程序,控制平台随机进行转动同时采集三个 CCD 相机的星图,然后提取星点进行分析,其他条件同上述仿真时采用的条件。通过进行 100 00 次左右的随机旋转实验,分析 $P_{SYS^s}(E_4)$ 、 $P_{SYS^s}(E_3)$ 、 $P_{SYS^s}(E_2)$ 的概率,概率分布的数值同实验次数之间的关系如图 7 所示。

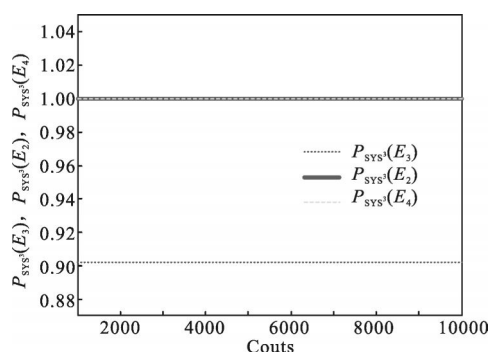


图 7 野外实验的 $P_{SYS^s}(E_2)$ 、 $P_{SYS^s}(E_3)$ 、 $P_{SYS^s}(E_4)$ 的概率分布

Fig. 7 $P_{SYS^s}(E_2)$ 、 $P_{SYS^s}(E_3)$ 、 $P_{SYS^s}(E_4)$ probability distribution of field experiment

由图 7 可以看出在视场大小为 $[4.5^\circ, 3.3750^\circ]^T$ 时,采用组合星图识别无论是加强版约束条件的概率分布 $P_{SYS^s}(E_4)$,还是非加强的约束条件概率分布 $P_{SYS^s}(E_2)$ 都是 100%。但这样的视场只有约 90% 概率满足简单星图识别时的约束条件。这就证实了采用组合星图识别时此视场大小的设计满足要求。

4 结论

文中首先根据三视场定位定向设备导航可靠性的要求,分析完成其功能所必需的条件,并建立组合星图识别和简单星图识别关于视场大小的概率分布函数。分析了不能由单视场内的恒星概率分布经简单推导准确获得三视场定位定向设备中构造观测三角形概率分布的原因,并通过反证实验验证。然后,给出通过蒙特卡洛法求取此概率分布函数方法步骤,以及获取视场最优值的方法。在计算机上进行了仿真实验,给出采用组合星图识别和星敏感识别时的最优视场大小。最后结合仿真实验结果,设计光学视场为 $[4.5^\circ, 3.3750^\circ]^T$ 三视场定位定向实验平台,通过实际的实验验证检验了系统的可靠性。

参考文献:

[1] Wang Anguo. Celestial navigation technique in the background

of navigation war—the history, present situation and developing tendency of celestial navigation technique [J].

Process In Astronomy, 2001, 19(2): 325–330. (in Chinese)

王安国. 导航战背景下的天文导航技术——天文导航技术的历史、现状及其发展趋势[J]. 天文学进展, 2001, 19(2): 325–330.

[2] Chen Jinzhi. Celestial navigation and starlight guidance[J]. *Ship Science and Technology*, 2001(1): 1354–1360. (in Chinese)

陈金枝. 天文导航与星光制导 [J]. 舰船科学技术, 2001 (1): 1354–1360.

[3] Wang Anguo. Modern celestial navigation and the key techniques[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2007, 35(12): 2347–2353. (in Chinese)

王安国. 现代天文导航及其关键技术[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2348–2353.

[4] Sodern. Star Trackers: Hydra Family [EB/OL]. http://www.sodern.com/sites/en/ref/Star-Trackers-HYDRA_51.html.

[5] Trex Enterprises Corp. Daytime stellar imager for attitude determination: US, 7, 349, 803 B2[P]. 2008–03–25.

[6] Blarre L, Perrimon N, Airey S. New Multiple Head Star Sensor(HYDRA)description and development status: a highly autonomous, accurate and very robust system to pave the way for gyroless very accurate AOCS systems[R]. Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2005: AIAA–2005–5932.

[7] Ye Shenglong, Wei Xinguo, Fan Qiaoyun, et al. Operation mode design of multi-FOV star sensor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(10): 1244–1247. (in Chinese)

叶生龙, 魏新国, 樊巧云, 等. 多视场星敏感器工作模式设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(10): 1244–1247.

[8] Wang Zhen, Wei Xinguo, Zhang Guangjun, et al. Structure optimization for multi-FOV star sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2469–2473. (in Chinese)

王真, 魏新国, 张广军, 等. 多视场星敏感器结构布局优化[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2469–2473.

[9] Zhang Lijun. Spacecraft attitude determination for multiple fields of view star sensors [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

张力军. 基于多视场星敏感器的航天器姿态确定方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.

[10] Guo Jingming. Study on ship attitude measurement based on star sensor [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

- 郭敬明. 基于星敏感器的船姿测量方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [11] He Jiawei. Study on the key technologies for high-accuracy and all-time star sensor [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
何家维. 高精度全天时星敏感器关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [12] Lin Tao, Qian Guohui. The prediction of guide stars in the field of view [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1999, 19(3): 253-259. (in Chinese)
林涛, 钱国蕙. 视场内导航星分布的预测 [J]. 空间科学学报, 1999, 19(3): 253-259.
- [13] Wang Haojing. Study on celestial navigation by three fields of view star recognition [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
王昊京. 三视场恒星识别天文导航方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- [14] Zhang Lei, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Modification of triangle identification algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2): 458-463. (in Chinese)
张磊, 何昕, 魏仲慧, 等. 三角形星图识别算法的改进[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(2): 458-463.
- [15] Samaan M K. Toward faster and more accurate star sensors using recursive centroiding and star identification[D]. Texas: University of Texas, 2003.
- [16] Carl Christian Liebe. Pattern recognition of star constellations for spacecraft applications[J]. *IEEE AES Systems Magazine*, 1992, 7(6): 34-41.
- [17] Rao Caijie, Fang Jiancheng. A way of extracting observed stars for star image simulation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(2): 130-135. (in Chinese)
饶才杰, 房建成. 一种星图模拟中观测星提取的方法[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(2): 130-135
- [18] G Lamy au Rousseau, J Bostel. Star pattern recognition algorithm for APS star tracker application: oriented triangles [J]. *IEEE Aerospace Electron Syst Mag*, 2005, 20(2): 27-31.