

文章编号 1004-924X(2009)04-0909-07

快速全天自主星图识别

张磊^{1,2}, 魏仲慧¹, 何昕¹, 赵宝庆¹

(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 研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了克服三角形识别算法中三角形因特征维数较低带来的冗余匹配问题, 对该算法进行了改进。在利用标记法进行三角形识别的基础上, 引入三角形以外的第四颗星, 并以其为顶点, 与三角形构成假想的四面体, 顶点与底面三角形3个点的角距既可作为识别特征量, 也可用于检验识别的结果是否正确。识别算法以星对角距作为主要识别特征, 增加星等差为辅助识别特征, 减少了对冗余数据的存储, 使导航特征库的容量仅有0.4 Mb。在识别过程中, 利用散列查找法对识别特征构造散列函数, 减少了对导航特征库遍历比较的次数和时间开销, 加快了识别过程, 平均识别时间为0.43 ms。仿真实验结果表明, 该识别算法在较大位置和星等误差时具有较短的识别时间和较高的识别率。

关键词: 星敏感器; 星图识别; 三角形算法; 散列查找

中图分类号: V448.22; TP391.4 **文献标识码:** A

Fast all-sky autonomous star identification

ZHANG Lei^{1,2}, WEI Zhong-hui¹, HE Xin¹, ZHAO Bao-qing¹

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

Abstract: An improved star identification algorithm based on the traditional triangle method is proposed in this paper to overcome the low character dimensions and high percentage of redundant matches in star identification. When a triangle is recognized by a labeling method, the fourth star is introduced as a vertex to make up a tetrahedron with the triangle, and the accessorial angular distances among them can be used not only as the supplementary character to reduce redundancies, but also to verify whether the result is correct. The proposed algorithm takes the angular distance as the main identification character and relative magnitude information as the assistant character, so that the capacity of guide star database decreases to 0.4 Mb. During star-pair matching, the hashing search is used to construct the function for identification characters to reduce travelling times and time consumption for the guide star database and to speed up the identification process, and the average identification time is 0.43 ms. The result of simulation demonstrates that the improved identification algorithm has advantages of high identification efficiency and short identification time in the all-sky autonomous star identification.

Key words: star sensor; star identification; triangle algorithm; hashing search

收稿日期: 2008-07-22; 修订日期: 2008-08-15.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

1 引言

星敏传感器作为一种姿态敏感部件,是以恒星为参照物,以矢量观测为定姿原理的敏感器。有着无姿态积累误差、快速的故障恢复能力和能进行自主导航等优点,采用星敏传感器确定飞行器姿态是现行方法中精度最高的,已成为国内外各种飞行器姿态敏感器的首选^[1-2]。星敏传感器的工作原理是以天空中的恒星作为参照物,利用摄像头探测单元某一时刻对天空直接捕获星图,经过数据处理单元对星图进行恒星质心提取、星图识别、星跟踪、姿态计算等一系列处理,获得星敏传感器瞬时视轴指向信息,然后根据星敏传感器在飞行器上的安装位置,经过一定的坐标转换,最终给出飞行器本体坐标系的方位信息。

星图识别是指将星敏传感器视场中观测星组成的观测星图与星表中导航星组成的星图根据某种特征进行匹配,以确定观测星与导航星的对应关系。识别算法的灵活性大,其算法设计是软件开发中的核心技术之一,因此对星图识别算法的研究也就成为星敏传感器姿态确定领域里的一个重要研究问题。全天自主星图识别是在星敏传感器进入工作状态的初始时刻或者由于故障姿态丢失,完全没有先验的姿态信息的情况下,进行初始姿态的捕获,是第二代星敏传感器自主导航的关键,也是研究的重点和难点。多年来,各国学者研究并发展了很多识别算法,如三角形算法^[4]、匹配组法、栅格法、奇异值分解法、神经网络、遗传算法等等。而在实际工程应用中,关注重点是恒星星等、星对角距和恒星间几何形状这 3 个主要特征,最为常用的还是最基础的星对识别和三角形识别算法^[5-6]。尽管已相继提出了不少改进的算法^[7-8],但受特征维数的限制,较高的冗余匹配一直是三角形算法的一大缺陷。本文基于三角形全天识别算法,先将视场内的三颗观测星组成的三角形与导航数据库在一定容差范围内进行匹配,然后引入第四颗观测星为顶点,与三角形构成四面体,将其与底面三角形顶点的角距作为特征量以减少冗余匹配,匹配过程中增加星等差为辅助特征以提高识别命中率。仿真实验表明,这种方法在具有较高的星点位置噪声下仍具有较高的识别率和较短的识别时间。

2 导航星数据库的制订

导航星数据库是装载于星敏传感器上存储器中的用于与观测星比照的数据,它是星敏传感器研制过程中的一项基础工作,也是星敏传感器进行星图识别和姿态计算的唯一依据。导航星数据库是同星图识别方法相对应的,不同的识别方法要求构造不同的导航星数据库,它的存储内容,存储方式和读取方式都将影响星图识别的时间和精度。导航星数据库包括导航星库和导航特征库两部分。

2.1 导航星库

导航星库来源于基本星表,是基本星表中星信息的重组,更利于星图识别算法的实现。由于恒星的年中平位置是向视位置转换的必要步骤^[9],因此导航星库中直接存储年中平位置,可以缩短由标准历元平位置向视位置转换的时间,但具有较高精度的转换的有效期只有一年,超过一年需阶段性修正^[8]。除此之外,导航星库中存储内容还包含星号、视星等,为节约存储空间,将浮点型的视星等放大 100 倍保存为短整型数据。

2.2 导航特征库

三角形识别算法一般配有导航三角形特征库,其存储内容包括三角形三个顶点的星号、视星等及三边边长(边长即为星对角距)。星对角距是地球上任意两颗星相对于地球的球心角,是构成三角形的元素,具有较高的精度和旋转不变性,当三角形之间存在共同边时,会存储很多相同的信息。为了避免这种冗余,导航特征库存储星对角距为主要识别特征。

由于人眼和光学探测器所接收的恒星光谱谱段不同,单颗星的星等相对视星等而言存在较大误差,但是经过星等标定后,观测星图中恒星间星等差应相对稳定,在识别过程中,增加星等差作为辅助识别特征。因星等为浮点型,为节约存储空间,将星等差放大 100 倍存为短整型,导航特征库的数据结构为:

```
struct IdentityProperties{
    short   iStar1; //星号 1
    short   iStar2; //星号 2
    short   iDifMag; //星等差
    float   fDistance; //星对角距
};
```

星图识别的过程实际上就是将观测星图中的

特征量与导航特征库中的特征数据进行一系列比较。识别速度既取决于硬件,也取决于软件。表现在软件算法上,起决定性作用的就是在对导航特征库遍历的过程中,搜索满足判决门限数据所需比较的次数。特征库中数据很多,最简单的是线性查找法、二分查找法,其时间复杂度分别为 $O(N)$ 和 $O(\log_2 N)$ 。理想的查找方法是可以不经过任何比较,一次直接从数据库中得到要查找的数据,在数据的存储位置和它的关键字之间建立一个确定的对应关系 H ,使得每个关键字与数据的存储位置相对应,即 $\text{Loc}(\text{key}) = H(\text{key})$,其中, $\text{Loc}(\text{key})$ 表示关键字为 key 的元素的存储位置。如果集合中存在关键字为 key 的元素,则必然在 $H(\text{key})$ 的位置上。这样可以不需要进行比较便可以直接取得该数据,这就是数据结构中散列查找的思想, H 被称为散列函数。散列查找法在实践中被证实是最快的一种查找方法,其时间复杂度为 $O(1)$ ^[10]。

由于识别过程是以星对角距为主要识别特征,基于散列查找的思想,将特征库中的数据按星对角距排序方式排列,以星对角距为关键字 key ,位置索引为 $H(\text{key})$ 进行曲线拟合,即构造散列函数。因散列函数 H 自变量和因变量都是严格递增的,构造的散列函数不存在地址冲突的问题。然后遍历特征库中的所有星对角距 key ,根据散列函数求取星对角距的理论位置 $H(\text{key})$ 并向下取整,计算理论位置 $H(\text{key})$ 与真实位置 $\text{Loc}(\text{key})$ 之间的最大偏差 d_{\max} ,其用途见星图识别过程。

3 星图识别过程

设星传感器视场为以靶面坐标系原点为圆心,以光学系统的半视场角为半径的圆形视场,若方形视场则将其内切圆部分设定为有效视场,由于圆的对称性可以不用考虑视场旋转问题。为防止观测星图中的双星干扰,将观测星以内环限定^[11];并基于恒星越亮(星等越低)越容易被星传感器捕捉和提取,其位置精度越高这一事实^[9],将观测星按星等由亮到暗排序。

3.1 用散列查找法匹配星对角距

观测星图中观测星的提取是星图识别的前提,是星传感器最基本的测量数据,其位置测量模型如式(1)所示^[12]。

$$\mathbf{p}_m = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} = \mathbf{p} + \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}_1 \cdots, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{p}_m = [x_m, y_m]^T$ 为恒星像点在观测星图中的测量值, $\mathbf{p} = [x, y]^T$ 为星点在观测星图中的真实位置, $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ 是测量误差,服从均值为 0、方差为 σ^2 的正态分布。若恒星经像点提取误差最大为 $\boldsymbol{\varepsilon}_1$,那么两星之间角距的误差最大为 $2\boldsymbol{\varepsilon}_1$ 。而且,恒星间有相对运动,其运动速度很快,虽然恒星距离太阳系或相对于地球半径可以认为无穷远,相对于地球的自行也很小,但两颗恒星间的星对角距并不是常量,与导航星特征库中的数据存在一定程度的偏差。另一方面,由于人眼与 CCD 探测器所能接收的光谱谱段不同,视星等与仪器星等有较大差别,经星等标定后的观测星之间相对星等应比较稳定,可作为辅助识别特征。在进行星图识别时,应为系统和仪器的误差留有一定的余地,只要将待匹配的星对角距做适当处理并引入相应的判决门限来实现一定程度上的近似,以上几方面对星图识别结果的影响就不会太大。判决门限的设置受限于恒星位置测量精度和星等测量精度^[5]。本算法取角距判断门限为 $\varepsilon_d = 3\sigma_d$,星等判决门限为 $\varepsilon_b = 3\sigma_b$, σ_d 和 σ_b 分别为位置和星等测量误差的均方差。

用散列查找法匹配角距过程如下:假设观测星 S_1 、 S_2 在 CCD 靶面坐标系中的位置为 $[x_1, y_1]$ 、 $[x_2, y_2]$,根据式(2)计算观测星间角距,式中 f 为光学系统焦距,考虑由于像点提取误差和恒星间相对运动带来的位置不确定性,将 $f\text{Dis} \pm \varepsilon_d$ 代入散列函数 H ,得到一个索引闭区间 $[a, b]$,考虑到经散列函数求得的理论位置 $H(\text{key})$ 与真实位置 $\text{Loc}(\text{key})$ 偏差最大的星对角距可能出现在区间 $[f\text{Dis} - \varepsilon_d, f\text{Dis} + \varepsilon_d]$,为了保证识别命中率,将索引区间扩大至 $[a - d_{\max}, b + d_{\max}]$,假设在该区间搜索满足式(3)的星对并存储。

$$f\text{Dis} = \arccos\left(\frac{x_1 \times x_2 + y_1 \times y_2 + f^2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + f^2} \times \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + f^2}}\right) \cdots, \quad (2)$$

$$\begin{cases} |fDis - IdentityProperties[i]. fDistance| \leq \epsilon_d \\ |\Delta Mag \times 100 - IdentityProperties[i]. iDifMag| \leq \epsilon_b \times 100 \dots \end{cases} \quad (3)$$

3.2 三角形的识别

改进的三角形全天识别算法示意图如图 1 所示,选择观测星队列中较亮的 4 颗星组成三角形,先选择由最亮的 3 颗星组成的三角形进行识别,假设 Δabc 中三边分别为 ab 、 bc 和 ac 。利用散列查找法对三角形的每条边(星对角距)在特征库中分别找出满足角距判门限、同时满足星等差判门限的导航星对,利用三角形几何约束关系减小冗余。

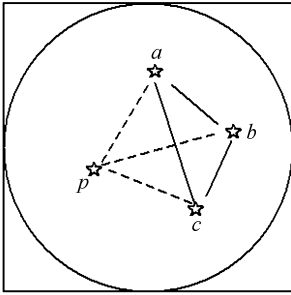


图 1 改进的三角形全天识别算法示意图

Fig. 1 Diagram of improved all-sky triangle identification algorithm

构造一个匹配结构体和长度为导航星数量的匹配结构体数组,结构体数据结构为:

```
struct TempMatch{
    short iStar2; //第二颗星的星号
    short iStar3; //第三颗星的星号
    short iCounter; //状态标记
    short iCount_star2; //第二颗星的个数
    short iCount_star3; //第三颗星的个数
};
```

匹配过程是通过记录所有满足观测星对判门限的导航星对到匹配数组实现的。具体过程如下:

(1)搜索导航特征库,记录所有满足观测三角形 ab 边判门限的导航星对,如满足判门限的星对为 (i_1, j_1) 、 (i_2, j_2) ,分别以 $i_1 - 1$ 和 $i_2 - 1$ 为数组位置索引值,将 j_1 、 j_2 存入匹配结构体数组中的 $iStar2$ 元素,并置状态标记 $iCounter$ 为 1;

(2)同步骤 1,搜索满足 ac 边判门限的导航星对,如 (i_1, k_1) 、 (i_3, k_2) ,分别以 $i_1 - 1$ 、 $i_3 - 1$

为数组索引值,查看相应的 $iCounter$ 元素的状态, $i_1 - 1$ 位置已标记为 1,则将 k_1 存入 $iStar3$ 元素,并将 $iCounter$ 标记为 2,而 $i_3 - 1$ 位置未被标记过,则舍弃该 (i_3, k_2) 星对;

(3)若在步骤 2 后,状态标记 $iCounter$ 为 2,则将星号为 $iStar2$ 和 $iStar3$ 的星信息取出,计算星对角距和星等差,将之与 bc 边特征值比较,若在判门限内,则认为找到一个匹配三角形,记下 3 颗星的星号。若三角形匹配失败,则选择由 4 颗亮星构成的三角形中的另外一个三角形重新进行识别。

在三角形匹配过程中,会存在以下情形,如 ab 边特征判门限内可能有导航星对 (i_1, j_1) 、 (i_2, j_2) 、 (i_1, j_3) ,这时以 $i_1 - 1$ 为位置索引,其 $iStar2$ 中已存入星号 j_1 ,那么 j_1 与 j_3 就产生一个冲突,这类似于散列查找法中的地址冲突问题。

本算法选择散列中的开放定址法解决这个问题,当发生冲突时,尝试选择另外一个位置单元,直到找到空的位置单元存储该星号,并将 $i_1 - 1$ 位置的 $iCount_star2$ 加 1,以标明满足条件的第二颗星的个数。整个匹配数组就像一个散列表,因满足判门限的导航星对不会超过 500,相对于整个匹配数组来说,其装填因子低于 $\lambda = 0.5$,总会找到一个空的单元存储冲突的星号。另一方面,即使匹配数组相对较空,存储匹配信息的单元也会形成一些区块,其结果称为聚集,如果此时发生地址冲突,也许要多尝试很多次才能够解决冲突,这就涉及到为减少这种冲突如何选择空单元,也就是如何确定冲突解决函数 f 的问题,事实证明,用平方探测法,即 $f(i) = \pm i^2$ 可较好地解决这一问题。

3.3 顶点星的识别

如图 1 所示, p 为在圆形视场内观测三角形外第四颗观测星。

(1)在三角形之外引入第四颗观测星 p ,以观测星 p 与三角形 3 个顶点 a 、 b 、 c 构造辐射星图,如图 1 中虚线所示,形成假想的四面体,增加 3 个角距作为识别特征;

(2)将导航特征库中满足角距和星等差判门限的星对星号记录下来,并对出现的次数计数,

统计出现 3 次或以上的星号 S_1, S_2, \dots, S_n , 组成集合 C_m , 若 $i \in [1, n]$, 将与 S_i 组成星对的另一颗星星号记录组成集合 C_{pi} ;

(3) 查看 C_{pi} 中是否完全包含某个三角形的 3 个顶点星号, 若完全包含, 则认为是识别结果;

(4) 或者在步骤(2)结束后计算 C_m 中的星号与三角形 3 顶点构成的角距是否都在判决门限内, 若满足要求, 则认为是识别结果;

如果在三角形匹配环节存在如镜像等冗余三角形, 这一步骤可用于排除冗余三角形; 如果不存在冗余三角形, 也可用于验证三角形识别是否正确。

用改进的三角形全天识别方法进行全天识别软件流程图如图 2 所示。

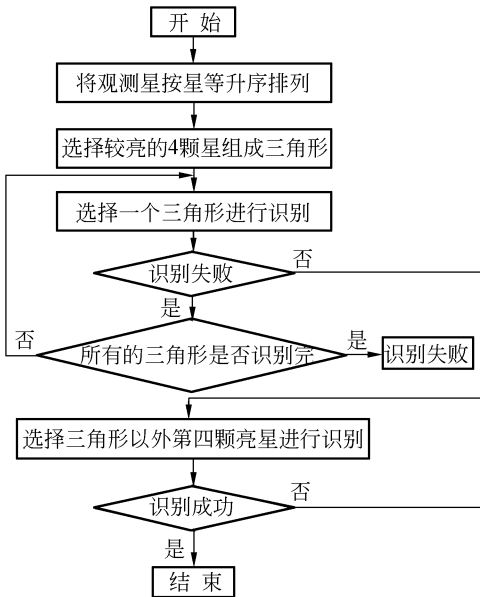


图 2 三角形全天自主星识别算法软件流程图

Fig.2 Flow chart of all-sky autonomous triangle identification algorithm

4 仿真结果与分析

仿真实验中选择耶鲁亮星星表(Bright Star Catalog)为基本星表, 依据导航星选星原则, 在 CCD 探测器所能探测到的极限星等 5.0 星等以下, 剔除星对角距小于像元分辨率的双星和位置、星等不固定的变星, 导航星库由 1 608 颗导航星构成, 导航星数据库总大小为 0.4 MB。

仿真实验环境为: P4 1.8 GHz CPU, 256 M

内存, Windows XP 操作系统。用 MonteCarlo 法进行算法测试的流程如图 3 所示^[3,13], 仿真实验中所采用的星敏传感器理想模型参数和误差模型参数见表 1。

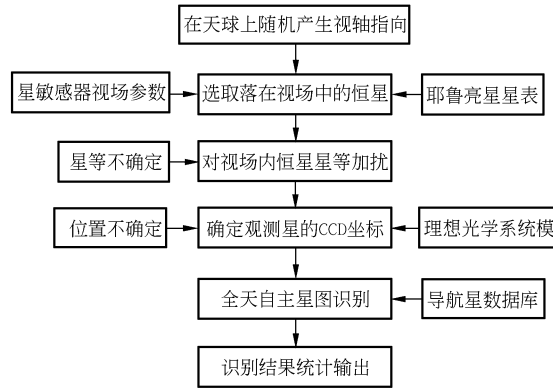


图 3 MonteCarlo 仿真流程图

Fig.3 Flow chart of MonteCarlo simulation

表 1 星敏传感器模型参数

Tab.1 Parameters of star sensor model

参数	参数值
视场	15° × 15°
像元数	1 000 × 1 000
位置不确定度	1'
角距误差门限	3'
星等误差门限	0.75

当单星星等误差为 0.25 星等, 位置误差为 60''(1σ) 时, 星等及位置误差均假设为服从正态分布的随机变量, 随机实验次数为 10 000 次, 仿真实验得到统计识别成功率为 99.5%, 单次识别时间约为 0.43 ms。

与文献[8-9]相对比, 该算法具有较小容量的导航星数据库, 且可容许较大的位置误差, 但因导航星库中极限星等为 5.0 等星, 仿真试验中存在较多的少于 3 颗星的视场, 导致算法识别失败。

5 结 论

星敏传感器是一种高精度的姿态敏感器, 对星敏传感器的研究与应用在我国的航天领域里越来越受重视, 全天自主星图识别因其天文自主导航功能而成为软件中研究的重点。本文立足于工程应

用中的实际问题,对传统三角形识别算法进行了分析、改进,在利用标记法进行三角形识别的基础上,以三角形以外的第四颗星为顶点,与三角形构成假想的四面体,顶点与底面三角形形成的三条侧边增加了特征维数,提高了识别率;与传统三角形识别算法比较,设计了仅由星等差和星对角距

构成的特征库,大大减小了导航星数据库的容量;同时,改进遍历的方式为利用散列查找的思想访问导航星数据库,缩短了星图识别的时间。实验结果表明改进后的全天自主识别算法在存在较大位置误差和星等误差的情况下,仍具有较高的识别率。

参考文献:

- [1] 方蓉初. 恒星敏感器(航天丛书)[M]. 北京:宇航出版社,2001.
FANG R CH. *Star Sensor (SpaceFlight series)* [M]. Beijing: Astronautic Publishing House, 2001. (in Chinese)
- [2] 郝志航,王家琪. CCD星跟踪器[J]. 光学精密工程, 1991(6):73-78.
HAO ZH H, WANG J Q. CCD star tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1991(6):73-78. (in Chinese)
- [3] 郝胜国,郝志航. 星敏感器星象模拟软件的研究[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3):208-212.
HAO SH G, HAO ZH H. Star image simulation software of star-tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3):208-212. (in Chinese)
- [4] LIEBE C C. Pattern recognition of star constellations for spacecraft applications [J]. *IEEE AES Magazine*, 1992, 28(6):34-41.
- [5] 田宏,李展. 提高星图识别正确率的方法研究[J]. 光电工程, 2003, 30(6):1-3.
TIAN H, LI ZH. A study on method for improving star map identifiability [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(6):1-3. (in Chinese)
- [6] 张晨,陈朝阳,沈绪榜. 基于角距分布的星表快速查找算法[J]. 计算机工程与应用, 2004(9):16-17.
ZHANG CH, CHEN CH Y, SHEN X B. Angular distance distribution-based search-less algorithm for star list [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004(9):16-17. (in Chinese)
- [7] 李立宏,林涛,宁永臣,等. 一种改进的全天自主三角形星图识别算法[J]. 光学技术, 2000, 26(4):372-374.
LI L H, LIN T, NING Y CH, et al.. Improved all-sky autonomous triangle star-field identification algorithm [J]. *Optical Technique*, 2000, 26(4):372-374. (in Chinese)
- [8] 郑万波. 基于星敏感器的全天自主分层星识别算法研究[D]. 长春:中国科学院研究生院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
ZHENG W B. *Fully autonomous layered star identification algorithm research based-on star sensor* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [9] 王桂如,刘利强. 一种求恒星视位置的新算法[J]. 应用科技, 2006, 33(2):36-39.
WANG G R, LIU L Q. A new algorithm of calculating the apparent place of fixed star [J]. *Applied Science and Technology*, 2006, 33(2):36-39. (in Chinese)
- [10] 严蔚敏,吴伟民. 数据结构(C语言版)[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
YAN W M, WU W M. *Data Structure (C Language Version)* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [11] SCHOOL M S. Star-field identification algorithm performance verification using simulated star fields [J]. *SPIE, Infrared Spaceborne Remote Sensing*, 1993, 2019:275-290.
- [12] 张辉,钟建勇,袁家虎,等. 电路噪声对星敏感器星点定位精度的影响[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6):1052-1056.
ZHANG H, ZHONG J Y, YUAN J H, et al.. Circuit noise effects on star sensor position accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):1052-1056. (in Chinese)
- [13] 朱本仁. 蒙特卡洛方法引论[M]. 济南:山东大学出版社, 1987.
ZHU B R. *Introduce of Mont Carlo Method* [M]. Ji'nan: Shandong University Press, 1987. (in Chinese)

作者简介:



张磊(1982—),男,吉林松原人,现在中科院长春光学精密机械与物理研究所攻读博士学位,主要从事图像处理和网络控制等方面的研究。E-mail: zlxrl@tom.com



何昕(1966—),男,吉林长春人,研究员,博士研究生导师,主要从事图像处理和光电测量等方面的研究。E-mail: hexin6627@sohu.com

通讯作者:



魏仲慧(1961—),女,吉林长春人,研究员,硕士研究生导师,主要从事图像存储等方面的研究。E-mail: weizh2@tom.com

赵宝庆(1942—),男,吉林长春人,研究员,主要从事数字图像处理等方面的研究。

●下期预告

双腔体压电泵设计方法

彭太江¹,杨志刚²,程光明³,阚君武²,曾平³

(1. 深圳大学 机电与控制工程学院,广州 深圳 518060;

2. 吉林大学 链传动研究所,吉林 长春 130025;

3. 吉林大学 机械科学与工程学院,吉林 长春 130025)

由于自吸性差、对气泡敏感等原因,单腔体压电泵在应用中受到限制,采用多腔体结构是提高压电泵性能的有效途径。通过分析腔体容积与压力变化过程得出:双腔体串联压电泵只能采用串联驱动方式而不能采用并联驱动方式,双腔体并联压电泵只能采用并联驱动方式而不能采用串联驱动方式。制作双腔并联、串联压电泵样机进行测试:串联压电泵在驱动电压 200 VAC,频率 152 Hz 时,输出流量达到最大为 1150 ml/min,并联泵在驱动电压 140 VAC,频率 220 Hz 时,输出流量达到最大为 640 ml/min;因此多腔泵采用腔体串联结构能提高压电泵的工作效率,提高泵的工作性能。