

文章编号 1004-924X(2009)09-2230-06

流水线并行处理提高星敏感器数据更新率

钟红军¹, 杨孟飞², 卢欣¹

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100190; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 数据更新率是星敏感器的一项重要指标, 也是未来星敏感器研究的一个重要方向。本文提出了一种提高星敏感器数据更新率的方法。介绍了星敏感器数据更新时间的组成; 着重分析了流水线并行处理机制提高星敏感器数据更新率的方法; 描述了串行工作机制、二级流水线机制、三级流水线机制和更高深度流水线机制在星敏感器中的实现, 并给出了其工作流程和数据更新率的计算公式以及软硬件的具体实现方法。将本文的方法在星敏感器工程样机上进行了试验和验证, 结果显示, 采用流水线机制可将数据更新率提高 2~3 倍, 表明采用本方法可将国产星敏感器数据更新率提高至 8~10 Hz。

关键词: 星敏感器; 数据更新率; 流水线; 并行处理

中图分类号: V448.222 **文献标识码:** A

Increasing update rate for star sensor by pipelining parallel processing method

ZHONG Hong-jun¹, YANG Meng-fei², LU Xin¹

(1. *Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;*
2. *China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*)

Abstract: The update rate is a key characteristic of star sensors, and it has been considered as an important research direction in future. In this paper, a method for increasing the update rate of a star sensor is presented and the composition of update time is introduced. The parallel processing mechanisms by using a pipelining method are analyzed emphatically, then a sequential working mode, a two cycle pipelining mode, a three-cycle pipelining mode and a more cycle pipelining mode are successfully realized on the engineering prototype. Moreover, the sequence diagrams and formulas of update rate for different modes are given, and the specific software and hardware implementation methods are described. Finally, a software interpolation method for increasing update rate of the star sensor is introduced. The experimental results indicate that the update rate by parallel processing mechanisms using the pipelining method can reach 8-10 Hz, which has increased by 2-3 times as compared with that of the traditional method.

Key words: star sensor; update rate; pipelining; parallel processing

1 引言

近年来,随着卫星技术的迅速发展,对其定位精度的要求也越来越高,因此对保证卫星高姿态精度和稳定度的姿态测量传感器的研究也越来越迫切。星敏传感器是卫星姿态控制系统中的重要测量部件,也是当前广泛应用的光学姿态传感器;它以太空中的恒星作为姿态测量的参考源,输出传感器光轴在惯性参考系中的指向。星敏传感器的姿态确定精度高,能够提供角秒级甚至更高精度的惯性姿态信息,被认为是目前精度最高的姿态传感器,可适用于各种轨道卫星。

相对于地球传感器和太阳传感器等其它姿态传感器而言,星敏传感器主要有以下优点:可提供更高的指向精度、三轴姿态以及任何指向的全方位姿态信息。并可满足太阳系外的深空探测要求,输出姿态为相对于惯性坐标系的实时直接测量,无慢速漂移问题。星敏传感器技术要求趋于向高精度、高数据更新率、微型化、低功耗和高可靠性等方向发展。

数据更新率是星敏传感器的一项重要指标,也是未来星敏传感器技术发展的一个重要方向,它表征星敏传感器有效姿态数据的最高输出频率。目前国外主流星敏传感器数据更新率可达 $8\sim 10$ Hz,部分产品数据更新率更可高达 $30\sim 50$ Hz,而国内星敏传感器数据更新率大多介于 $1\sim 5$ Hz之间。星敏传感器数据更新率和图像传感器积分时间、星图存储时间、观测星提取和匹配时间、姿态数据通信输出时间等因素密切相关。这些处理部分是采用串行工作还是并行工作就会导致星敏传感器有不同的工作模式。在并行工作模式下,充分考虑上述各种处理时间的并行关系,合理安排流水线操作方式和深度,可显著提高星敏传感器的数据更新率。

本文详细分析了星敏传感器的工作原理和一幅图像各部分的处理时间;对星敏传感器在串行机制、二级流水机制、三级流水机制和更高深度流水机制等条件下的工作流程和数据更新率进行了分析,给出了各种机制下的数据更新率的计算公式;并在星敏传感器工程样机上进行了实现,给出了软件和硬件的实现方法和实现结果。

2 星敏传感器工作原理

星敏传感器是以恒星为测量基准的高精度光学姿态传感器,由于其姿态测量精度高,无可动部件,可靠性高,被广泛应用于各种轨道卫星和航天器的姿态测量和控制系统。

目前星敏传感器成像器件主要以 CCD 为主,但由于 APS 的明显优点,用其作为探测器的星敏传感器发展迅速,使星敏传感器的高精度、微型化、低功耗、高可靠性成为可能。

星敏传感器工作原理为:光学系统将恒星成像于 CCD(或 APS)光敏面上,由 CCD(或 APS)实现光电转换,输出信号经过 A/D 转换后送数据处理单元,经星点提取,确定视场中的恒星在传感器本体坐标系下的坐标,经过与导航星表的比对,完成星图识别,最终确定星敏传感器光轴在惯性坐标系下的指向,通过星敏传感器在卫星或航天器上的安装矩阵,确定卫星或航天器在惯性坐标系下的三轴姿态。

图 1 为北京控制工程研究所研制的 APS 星敏传感器工程样机。表 1 为其实现的技术指标。

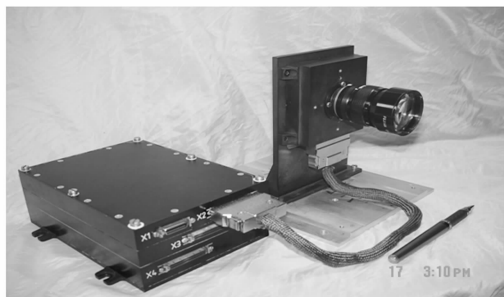


图 1 BICE 研制 APS 星敏传感器工程样机整机外形图
Fig. 1 Outline of APS star sensor EM developed by BICE

表 1 APS 星敏传感器实现技术指标
Tab. 1 Qualifications of APS star sensor

视场	$20^{\circ}\times 20^{\circ}$
重量	1.43 kg
功耗(不含二次电源)	3.6 W
光轴指向精度	$3''(3\sigma)$
数据更新速率	8.6 Hz
初始捕获时间	<3.8 s
设计寿命	5 a

3 星图数据处理时间组成

数据更新率是星传感器的重要指标。星传感器一帧图像的处理时间包括积分时间 t_i 、图像存储时间 t_r 、观测星提取和匹配时间 t_p 和姿态数据通信输出时间 t_c 等几个部分。这些处理部分是采用串行工作还是并行工作就决定了不同的系统工作模式。并行工作又可根据并行的深度来分为二级流水模式和三级流水模式。

流水结构的定义如下:如果某个设计的处理流程分为若干步骤,并且整个数据处理是“单流向”的,即没有反馈或者迭代运算,前一个步骤的输出是下一个步骤的输入,则可以采用流水线设计方法提高系统的工作频率。星传感器的工作情况正好符合流水工作的条件,其中二级流水模式是将光积分部分与星图存储、星图处理、数据通讯部分并行处理的工作逻辑,三级流水模式是将光积分、图像存储、星图处理与数据通讯 3 部分并行处理的工作逻辑。星传感器整机的数据更新时间为流水结构中最慢的一级所占用的时间。

积分时间 t_i 由 CCD 或 APS 图像传感器所要求的灵敏度决定;图像存储时间 t_r 由像元读出频率和像元总个数决定;星传感器数据处理软件的工作模式一般分为全球捕获模式、局部天区识别模式、星点窗口跟踪模式 3 种,其中星点窗口跟踪模式下星敏数据更新率最高。在此模式下,观测星提取和匹配时间 t_p 主要取决于星传感器视场内跟踪恒星个数以及所采用的星图匹配算法;姿态数据通信输出时间 t_c 主要取决于数据通讯传输速率以及具体通讯协议规定的通讯数据量。

提高星传感器数据更新率需要考虑在整机采取流水处理机制的前提下,找出消耗时间最长的一级,进行重点分析,减小最长一级所占用的时间,同时考虑通过增加并行处理的深度来降低每一级的处理时间,提高数据更新率。

4 流水线机制提高数据更新率

4.1 串行机制星传感器数据更新率

对于串行工作模式而言,星传感器一帧图像的数据处理时间 t 为所有处理时间的总和:

$$t = t_i + t_r + t_p + t_c. \quad (1)$$

由上式可知,在串行工作模式下,必须缩减上式中所有部分的时间才能缩短星传感器总的数据处理时间,提高数据更新率,工作流程如图 2 所示。

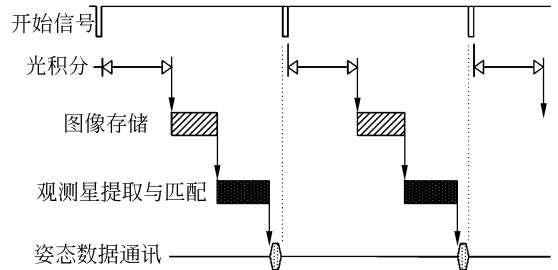


图 2 星传感器串行工作模式时序图

Fig. 2 Sequence diagram of sequential mode

4.2 二级流水机制提高数据更新率

二级流水机制是将光积分部分与星图存储、星图处理、数据通讯部分并行处理的工作逻辑,工作流程如图 3 所示。

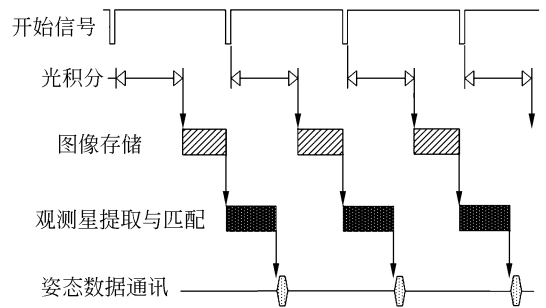


图 3 星传感器二级流水工作模式时序图

Fig. 3 Sequence diagram of two-cycle pipelining mode

二级流水机制下,星传感器一帧图像的数据处理时间 t 计算公式如下:

$$t = \max\{t_i, (t_r + t_p + t_c - t_i)\}. \quad (2)$$

二级流水工作机制具体实现方法为:在本帧图像的数据处理结束之前启动下帧图像的光积分,本帧图像的处理和下帧图像的光积分同步进行。由于图像存储和图像数据处理两个过程共用同一个图像存储器,因此必须在下帧图像光积分结束之前完成本帧图像数据的处理。由于星图恒星个数变化和杂光等影响可能会导致各帧图像数据处理时间的不确定,因此在实际实现时需要留出一定的时间余量。

如果星传感器图像传感器所需要的积分时间

较长,则采用二级流水机制可显著提高数据更新率,其控制方式简单,且不增加额外硬件消耗。

4.3 三级流水机制提高数据更新率

三级流水模式是将光积分、图像存储、星图处理与数据通讯3部分并行处理的工作逻辑。星敏感器三级流水工作流程如图4所示。

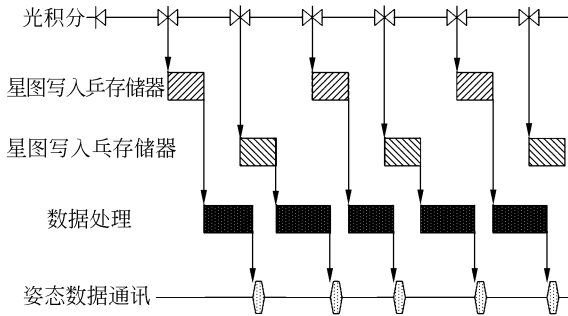


图4 星敏感器三级流水工作模式时序图

Fig. 4 Sequence diagram of three-cycle pipelining mode

为了实现三级流水机制,对图像存储部分采用乒乓图像存储结构。在一个工作流程中(一个积分周期)中对乒乓存储器存入图像,同时对乒乓存储器星图进行计算处理;在下一个工作流程中,对乒乓存储器存入下一帧新积分的图像,同时对乒乓存储器星图进行计算处理,如果此时乒乓存储器的星图计算处理时间超过一个工作流程(非正常情况),下一个工作流程的图像数据将继续存储到乒乓存储器。以此类推实现三级流水处理。

三级流水机制下,星敏感器一帧图像的数据处理时间 t 计算公式如下:

$$t = \max\{t_i, t_r, (t_p + t_c)\} \quad (3)$$

在实际应用中,可采用一片FPGA来实现乒乓星图的图像存储、星图处理之间的复杂逻辑控制和切换。并在FPGA内部设置可供星敏应用软件访问的标志寄存器,用以标志乒乓图像SRAM的访问占用状态,FPGA根据其内部标志寄存器完成下一帧图像的存储,处理器则根据标志寄存器完成本帧星图的计算处理,并且用乒乓图像存储器的自动互斥机制实现星图存储和星图计算处理。

三级流水模式下,每一帧星图从曝光至完成姿态数据输出,总时间消耗和串行模式以及二级流水模式相同,但星敏感器整机输出的数据更新率却有了显著的提高。从整机实现上看,相比串

行工作模式和二级流水模式,三级流水模式只需要在硬件上新增加一片图像存储器SRAM,在FPGA软件上增加流水控制逻辑。

4.4 更高深度流水机制提高数据更新率

对大多数星敏感器来说,图像存储时间 t_r 一般比积分时间 t_i 小,积分时间 t_i 一般比观测星提取和匹配时间 t_p 小。因此 t_p 成为制约提高数据更新率的瓶颈。

在此情况下可将星图预处理时间从观测星提取和匹配时间 t_p 中分离,通过增加一级流水线深度的方法来缩短流水线最长一级消耗的时间。星图预处理时间 t_y 内完成内容包括:图像滤波、图像背景均值和阈值计算、星点提取等。星图预处理阶段的输出结果为像面上所有星像点能量重心坐标。

在此流水机制下,星敏感器一帧图像的数据处理时间 t 计算公式如下:

$$t = \max\{t_i, t_r, (t_p + t_c - t_y), t_y\}.$$

对于姿态数据通信输出时间 t_c 而言,可通过提高数据通讯传输速率来减小通讯时间。同时可在硬件上设置带数据缓存的专用ASIC通讯芯片进行通讯数据的接收和发送,以减小星敏感器数据处理(DSP或者RISC)在数据通讯上的时间消耗。

4.5 不同流水线机制数据更新率实现结果

北京控制工程研究所将不同流水线机制在APS星敏感器工程样机上进行了物理实现。

星敏感器时间参数如下:APS积分时间 t_i 为116 ms;图像存储时间 t_r 和积分时间相同也为116 ms;图像观测星提取和匹配时间 $t_p < 100$ ms;数据通讯波特率为115.2 kbps,通讯时间 $t_c < 10$ ms时,不同工作模式下星敏感器实现数据更新率如表2所示。

表2 不同工作模式下星敏感器数据更新率

Tab. 2 Update rates in different pipelining modes

	串行工作	二级流水	三级流水
星敏感器 数据更新率	3.1 Hz	4.2 Hz	8.6 Hz

由上表可以看出,采用三级流水工作模式,星敏感器的数据更新率大大提高。

5 结 论

高数据更新率是星敏感器未来发展的趋势。流水线机制是提高数据更新率的一种较好方法,硬件代价小,系统可实现性好。在实际应用中,合理安排流水线操作方式和深度,尽可能将流水线中的各部分时间分配均衡,必要时可增加流水线深度来缩减最长一级流水线的等待时间。实验结果证明,采用流水线机制可将数据更新率提高 2~3 倍。

参考文献:

- [1] 屠善澄. 卫星姿态动力学与控制(3) [M]. 北京: 宇航出版社, 2003:122-183.
TU SH CH. *Attitude Dynamics and Control of Satellite*(3) [M]. Beijing: Astronautic Publishing house, 2003:122-183. (in Chinese)
- [2] LIEBE C C, ALKALAI L, DOMINGO G, *et al.*. Micro. APS based star tracker[C]. *IEEE*, 2002; 2285-2299.
- [3] LIEBE C C. Accuracy performance of star tracker—a tutorial [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2002,38(2):587-599.
- [4] 李葆华,王常虹,张迎春. 适用于星敏感器的局部星像提取方法[J]. *光学精密工程*, 2007,15(9):1427-1431.
LI B H, WANG CH H, ZHANG Y CH. Obtaining method for star locations in local region of star image for star sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1427-1431. (in Chinese)
- [5] JU G, KIM H, POLLOCK T, *et al.*. Digistar: a low cost micro star tracker[C]. *AIAA'99 Space Technology Conference and Exposition, Albuquerque*,1999:28-30.
- [6] LIEBE C C, DENNISON E, HANCOCK B, *et al.*. Active pixel sensor(APS) based star tracker [C]. *IEEE*, 1998:119-127.
- [7] SCHMIDT U, WUNDER D. Hard-wired digital data preprocessing; applied within a modular star and target tracker[J]. *SPIE*,3163:214-223.
- [8] KRUIJFF M, HEIDE E J, BOOM C W, *et al.*. Star sensor algorithm application and spin-off[J].

由于星图识别计算时间可以分为星图预处理、观测星提取、星图匹配识别、姿态确定等串行环节,因此当星图识别计算时间成为制约数据更新率提高的主要因素时,可以采取增加流水线深度的方法来加以解决。对大多数图像传感器来说,星图存储时间一般都比其积分时间要小,因此积分时间未来将成为进一步提高星敏感器数据更新率(10 Hz 以上)的瓶颈。如何在保证灵敏度的前提下降低探测器的积分时间是未来研究中最核心、最困难的问题。

IAC-03-A. 5. 03:1-11.

- [9] 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)
- [10] 刘金国,李杰,郝志航. APS 星敏感器探测灵敏度研究[J]. *光学精密工程*, 2006,14(4):553-557.
LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on detection sensitivity of APS star tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):553-557. (in Chinese)
- [11] 王忠立,刘佳音,贾云得. 基于 CCD 与 CMOS 的图像传感技术[J]. *光学技术*,2003,29(3):361-364.
WANG ZH L, LIU J Y, JIA D Y. Technique of image sensor based on CCD and CMOS [J]. *Optical Technique*, 2003,29(3):361-364. (in Chinese)
- [12] 刘智. CMOS 图像传感器在星敏感器中应用研究[D]. 长春:中科院长春光学精密机械与物理研究所,2004.
LIU ZH. *Study on application technique of CMOS imager in star tracker* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Pyhsics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [13] MORTARI D, JUNKINS J L, SAMAAN M A. Lost-in-space pyramid algorithm for robust star pattern recognition[C]. *Paper AAS 01-004 Guidance and Control Conference, Breckenridge*,2001, 26(7):971-974.

作者简介:



钟红军(1978—),男,湖北孝感人,工程师,分别在2000年和2002年于哈尔滨工业大学获得学士和硕士学位,主要从事星敏感器等方面的研究工作。E-mail: mailzonecn@yahoo.com.cn



卢欣(1961—),男,吉林长春人,研究员,1983年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事星敏感器等方面的研究工作。E-mail: lx502502@yahoo.com.cn



杨孟飞(1962—),男,湖南湘阴人,研究员,博士生导师,1982年于西北电讯工程学院获得学士学位,1985年于北京控制工程研究所获得硕士学位,2005年于清华大学获得博士学位,主要从事卫星控制系统和控制计算机等方面的研究工作。E-mail: yangmf@bice.org.cn

● 下期预告

基于光栅的贴片机对准系统的精度标定

刘文超^{1,2},钟毓宁²,王选择²,谢铁邦¹

(1. 华中科技大学 机械科学与工程学院,湖北 武汉 430074;

2. 湖北工业大学 湖北省现代制造质量工程重点实验室,湖北 武汉 430068)

贴片机对准系统的精度标定是视觉定位的关键环节,直接影响贴片精度与贴片质量。传统的标定方法往往需要进行大量的矩阵计算和分析,来确定相机的坐标系与世界坐标系和图像坐标系之间的关系,因此要掌握大量的三维几何知识与投影理论,并且计算繁杂。本文提出的基于光栅的精度标定方法,将光栅图像灰度值之和形成一组周期固定的准正弦信号,通过像元平移把图像条纹灰度值变为李萨如图。再对李萨如图及其数据进行分析与处理,直接计算出光学系统的分辨率,实现光学系统的精度标定。实验结果表明这种标定方法的精度高,偏差小于 $0.2\ \mu\text{m}$,满足贴片机的对准精度要求。