

基于线结构光的亚像素精度 焊缝提取方法研究

胡韵松¹, 王军民¹, 付嘉玮¹, 李雄军¹, 刘威²

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100;

2. 贺州学院, 广西 贺州 542899)

摘要: 对于激光视觉焊缝跟踪系统, 基于线性结构光快速、高精度地提取焊缝特征点是系统搭建的关键; 现有算法多是采取像素级别的提取特征, 现提出改进的亚像素精度算法用以提取焊缝特征点; 与以往算法不同的是, 算法不需要进行阈值的选取, 提取条纹中心线和检测特征点的过程, 都采用了先计算出亚像素位置, 再对图像进行处理, 显著地提高了算法的精度; 并且目前图像处理多采用深度学习, 但都为对像素的离散点实现, 难以做到亚像素精度; 实验结果表明, 该算法能够满足生产实际要求, 能够实时、精确地实现焊缝提取。

关键词: 图像处理; 亚像素; 焊缝跟踪; 特征点提取

Sub-pixel Precision Seam Extraction Method Based on Line Structured Light

Hu Yunsong¹, Wang Junmin¹, Fu Jiawei¹, Li Xiongjun¹, Liu Wei²

(1. Ministerial Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources,

Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Hezhou University, Hezhou 542899, China)

Abstract: For the laser vision seam tracking system, it is the key to extract the weld feature points quickly and accurately based on the linear structured light. Most of the existing algorithms are pixel-level feature extraction. Now an improved sub-pixel accuracy algorithm is proposed to extract weld feature points. Different from the previous algorithm, the proposed algorithm does not need to select the threshold value. In the process of extracting the fringe centerline and detecting the feature points, the sub-pixel position was calculated first, and then the image was processed. The accuracy of the algorithm was greatly improved. Moreover, image processing mostly adopts deep learning technology at present. But the deep learning technology is all for the realization of pixel discrete point, it is difficult to achieve sub-pixel precision. The experimental results showed that the algorithm could meet the actual production requirements, and could achieve real-time and accurate weld extraction.

Keywords: image processing; sub-pixel; seam tracking; feature point extraction

0 序言

激光线性结构光传感器具有结构简单, 体积小等特点, 广泛用于焊接的焊缝追踪, 轨迹规划等, 称为焊接过程自动化的关键技术之一。而在结构光条定位中, 为了提高定位精度, 提出了亚像素的概念, 是指在相机得到的像素和像素之间还有几十到十几个微米的距离。而通常我们计算出的坐标都是正整数, 这表示的是我们是在对像素进行操作, 而亚像素计算出来的坐标是实数, 能够极大地提高算法的精度。

多年来, 国内外学者就光条中心问题提出了多种方法, 比较常见的主要有极值法、几何中心法、灰度重心法和

Steger 法等; 特征点检测常见有 Harris 角点检测、FAST 角点检测, 以及一些局部图像特征, 如 SIFT, SURF, ORB 等^[1]。焊缝特征识别的一般步骤是图像滤波、中心线提取、对线性特征进行拟合、特征点的识别。但是这些算法都只是依赖于像素单元进行处理, 算法的识别精度并不高。更有学者使用深度学习、机器学习的方法^[2]对焊缝进行处理, 在涉及到小目标, 神经网络在网络深层差一个像素, 在网络浅层会差 8 或者 16 个像素, 这对小目标的跟踪影响巨大, 也难以做到亚像素定位。文中将利用基于 Hessian 矩阵的 Steger 亚像素光条定位算法, 再通过经过亚像素精度优化后的 Shi-Tomasi 角点检测算法, 在提取光条中心线以及特征点检测两个重要流程中, 都在亚像素精度下进行图像处理, 并且考虑到了算法的实时性, 经过实验表明, 算法的精度和效率能够满足要求。

1 实验装置和工作原理

1.1 设备描述

实验装置包括计算模块, 成像系统模块。文中使用开

收稿日期: 2019-11-21; 修回日期: 2019-12-18。

作者简介: 胡韵松(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事机器视觉和计算机视觉方向的工作。

通讯作者: 王军民(1960-), 男, 副教授, 主要从事地球物理仪器的方向研究。

源, 体积小, 相对廉价的树莓派用作计算模块, 使用工业相机进行图像信号的采集, 采用线性的主动激光提取激光照射后的特征。考虑到图像处理中的实时性要求, 要求图像采集速度要高于检测对象的检测速率, 即相机的帧率要高, 同时得保证计算要足够快。因此, 采用了一块基于 1.4 GHz 64 位 4 核 ARM Cortex-A53 CPU 的树莓派 3B+ 作为计算模块。成像系统采用了一块像素为 200 万的工业相机, 同时使用一块 650 nm 的低通滤光片过滤, 限制镜头的进光量。

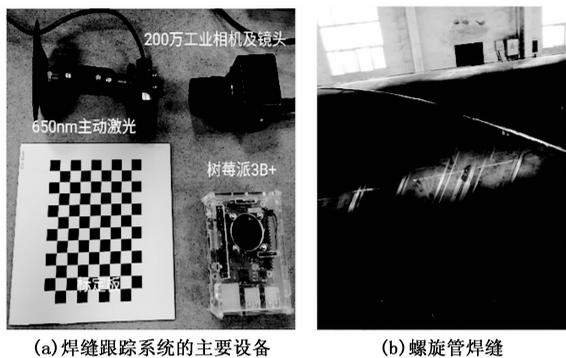


图 1 焊缝提取系统设备和工作环境

1.2 焊缝视觉提取装置设计思路

系统采用主动激光和工业相机来采集图像, 在主动激光接通电源后, 能够发出特定波长的光, 产生一个平面的线激光, 线激光照射在焊件上会产生固定形状的光条^[3]。经过特定波长的滤光片和相机中的透镜成像后, 能够正好拍摄到一条包含焊缝轮廓信息的条纹。通过对主动激光照射在焊件上产生的图像进行处理, 可以提取到焊缝的中心线以及焊缝坡口的位置, 以便于以后通过图像处理得到偏移的距离, 然后采用输出指令的方式来纠正焊枪的位置。

2 焊缝提取平台搭建和算法研究

2.1 软件平台环境

本提取系统后续需要在一秒内向伺服电机输出 5 或 6 条指令。因此进行图像处理的计算要求较高, 故采用 C++ 进行程序设计, 在树莓派的 Raspbian 操作系统, 编译 OpenCV 库, 作为主要的图像处理工具。

2.2 相机镜头的标定

在机器视觉的应用中, 相机得到的图像往往会产生畸变, 这些畸变一般分为径向畸变和切向畸变。径向畸变往往是由于透镜的形状引起的, 见公式。

$$x_{\text{correct}} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (1)$$

$$y_{\text{correct}} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (2)$$

式中, x 和 y 为像素横纵方向的像素距离, r 为该点距离成像中心的距离, 得到的结果为校正后的新位置。对于畸变较小的中心区域, 主要是 k_1 起作用, 对于畸变较大的边缘, 主要是 k_2 起作用。普通的相机一般用这两个参数就可校正, 而工业相机一般会使用到更多参数。

而切向畸变是因为在相机的组装过程中, 由于不能使透镜严格和成像平面平行, 会引入切向畸变, 给出计算公式。

$$x_{\text{correct}} = x + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \quad (3)$$

$$y_{\text{correct}} = y + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \quad (4)$$

联立四式, 得到畸变参数 k_1 、 k_2 、 p_1 、 p_2 、 p_3 。

我们需要利用标定算法同时求出相机的内参和畸变参数, 来校正图像。最常见的算法是张正友标定算法, 在 OpenCV 和 Matlab 中均已经实现该算法。本系统中采用玻璃底板、棋盘格宽度为 1 cm 的棋盘格进行标定。如图 3, 是 15 张 640×480 分辨率的棋盘格图像, 标定生成的成像模式示意图。

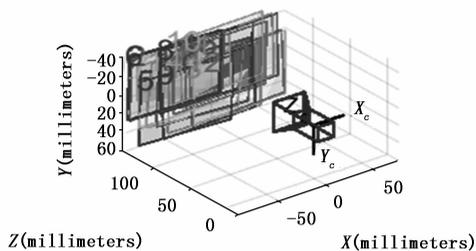
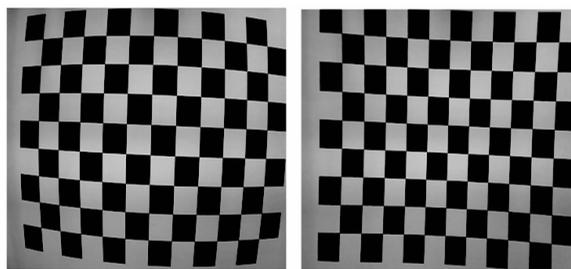


图 2 标定图像成像示意图

对标定后的数据, 使用 5 个畸变参数与相机内参数实现校正, 校正结果如图 3。



(a) Original (原始图像) (b) Calibrated (校正图像)

图 3 原始图像和校正图像对比图

2.3 图像处理算法设计

在没有主动激光的情况下, 提取焊缝多要使用 LED 光源、卤素灯、高频荧光灯等常见机器视觉光源。但在采用主动激光的条件, 周围光照一定不能超过激光的强度, 所以可以不需要再采用其他机器视觉光源进行辅助。埋弧钢管焊接中图像的噪声多为椒盐噪声, 这里采用高斯滤波进行图像处理, 可以一定程度上去除噪声干扰, 并对后一步光条中心线的提取做好了前置工作。

2.3.1 光条中心线的提取方法

光条细化中心的提取, 对后续进行焊缝坡口以及特征点的提取具有重要意义。需要对光条进行处理, 得到一条单像素宽的中心线。并且光条细化中心的提取速度和精度, 会影响整个焊缝处理系统。目前, 光条中心线的提取方法主要包括骨架细化法、几何中心法、灰度重心法、基于 Hessian 矩阵的 Steger 算法等, 国内外学者也对其做了大量的研究^[4]。

骨架细化法是一种形态学算法, 通过不断剥离二值图像的边界像素, 最终得到细化的光条, 但是剥离的过程要

花费大量的时间，不满足实时性。

几何中心法，则是通过 Roberts 算子，Sobel 算子、Canny 算子等先做边缘检测，得到光条的两边边界，再将两边边界的中线，取做中间线。该方法简单，速度快，但是要求图像的光条边界必须十分精确，生产实际中的噪声会对边缘检测造成非常大的影响，算法的鲁棒性不高。

灰度重心法，是对图像中的所有像素进行遍历，在一列线激光中，先采用极值法求取光强最大的一点 max ，然后确定一个阈值 $K = max - \Delta I$ (I 一般取 $10 \sim 20$)，在阈值两边判断大于 K 的元素，对中间的每一行提取灰度重心作为光条纹的中心位置。灰度重心法需要对阈值进行选取，也易受环境噪声影响。

基于 Hessian 矩阵的 Steger 算法，是一种亚像素中心定位算法。图像中的点性结构具有各项同性，而线性结构具有各向异性。因此我们可以利用 Hessian 矩阵对图像中的线性结构进行增强，滤去点状的结构和噪声点。Steger 算法首先通过 Hessian 矩阵最大特征值对应的特征向量，得到光条的法线方向，然后在法线方向上进行泰勒展开，求出的多项式极大值就是光条纹中心的亚像素位置^[5]。Hessian 矩阵是由多元函数的二阶偏导数组成的矩阵，定义如式 (5)。式中 r_{xx} 为图像沿 x 方向的二阶偏导数，其它的值类似。

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

而对于二维图像内某一点的 Hessian 矩阵，它的最大特征值和其对应的特征向量，对应其邻域二维曲线最大曲率的强度和方向。总结来说，图像某点的 Hessian 矩阵特征值大小和符号决定了该点邻域内的几何结构。该算法具有处理精度高，鲁棒性好等优点，本系统采用了这种方法，但是计算量相对较大，为了保证实时性需要进行实验和程序设计时算法的复杂度。处理结果见图 4。



(a) 通过滤光片的焊缝图像 (b) Steger 图法得到的焊缝图像

图 4 增加滤光片焊缝图像与 Steger 算法处理效果图

2.3.2 特征点提取

一般图像的特征类型可以被分为边缘、角点、感兴趣区域。焊缝特征点的提取可以依赖于角点特征的提取。角点的具体描述一般可以分为灰度的梯度局部最大所对应的像素点；两条或两条以上边缘的交点；图像中梯度值和梯度变化率高的点。角点提取算法有很多，例如 Harris 角点，FAST 角点，以及学者们又设计了很多局部图像特征，如 SIFT，SURF，ORB 等，但是在生产实际中，SIFT 以及

SURF 都有专利保护。故此采用一种对 Harris 角点的进行改进的算法，Shi-Tomasi 角点检测算法，在很多情况下可以得到比 Harris 算法更好的结果。

用 (w, x) 表示窗口函数， (u, v) 为窗口平移量，可以求得像素在窗口内的变化量，再对灰度变化进行泰勒展开，可以得到式 (6)。

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} \sum_w I_x^2 & \sum_w I_x I_y \\ \sum_w I_x I_y & \sum_w I_y^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$H = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \text{ 则上式可以写作:}$$

$$Au^2 + 2Buv + Cv^2 = E \quad (7)$$

即为椭圆方程，椭圆的长短轴表示了矩阵的特征值，反应了两个垂直方向的变化情况，两个特征值都大的情况。Harris 角点检测是用 C 来评价角点的强度，见式 (7)。检测的结果与 k 值有关， k 是一个经验值，需要多次试验才能找到最佳值。

$$C = \det(H) - k \text{trace}(H) \quad (8)$$

$$C = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2 \quad (9)$$

式中， $\det(H)$ 为窗口矩阵的行列式， $\text{trace}(H)$ 为窗口矩阵的迹， λ_1, λ_2 为特征值。而在 Shi-Tomasi 算法中间，直接用较小的那个特征值作为 C 来判断角点的强度，这样就不需要调整 K 值了^[5]。见公式 (9)。和 Harris 角点检测算法一样， C 大于设定的阈值，我们就认为它是一个角点。

$$C = \min(\lambda_1, \lambda_2) \quad (10)$$

基于 Shi-Tomasi 算法与 Harris 角点检测算法一样，只能达到像素级别，可以使用 cornerSubPix 亚像素角点检测作进一步的优化操作，可以使角点的精度达到亚像素的级别。算法的主要思想，是要对正交向量的点乘进行迭代。

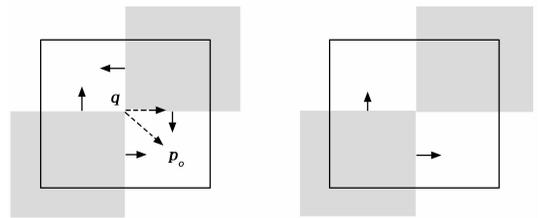


图 5 cornerSubPix 算法示意图

如图 5， q 为待求取的亚像素点， p_i 是 q 周围的点，坐标已知，可以自行选取，图像中实线的箭头表示梯度方向。求取亚像素点需要两个正交向量才可求解，设 $(p_i - q)$ 为第一个向量， p_i 位置的灰度设为 G_i ，为第二个向量。考虑两种情况，如图 5 中 p_o 表示，位于白色区域，此时的梯度为 0；如图 5 中的 p_i 表示，位于边缘区域，向量 $(p_i - q)$ 与 G_i 垂直，即点乘为 0。都可以得到式 (11)。

$$G_i * (p_i - q) = 0 \quad (11)$$

再将式 (10) 转换为最小二乘法的矩阵形式。

$$G_i^T G_i q = G_i^T G_i p_i \quad (12)$$

$$q = (G_i^T G_i)^{-1} * (G_i^T G_i p_i) \quad (13)$$

所以当点 q 固定时, 若有足够多的向量 $(p_i - q)$ 满足式 (11), 将每个向量看成一个方程, 对方程组求解, 可求得亚像素点的位置。但是点 q 只有一个, p_i 点有多个, 需要对式 (13) 加上求和符号。但是在采用多点计算后, 各点离中心距离不一致, 需要引入权重, 这里引入高斯权重, 假设 p_i 处权重系数为 w_i , 式子最终可以修正为式 (14)。

$$q = \sum_{i=0}^N (G_i^T G_i)^{-1} * (G_i^T G_i w_i p_i) \quad (14)$$

即 cornerSubPix 亚像素角点检测优化, 是以一个初始的角点 q_0 为中心, 选取一个窗口, 对窗口中各点的梯度进行求和, 因为各点离中心距离不一, 引入了高斯权重, 用最小二乘法求解, 即可得到一个亚像素点 (q_x, q_y) , 再以 q 为中心, 不断迭代, 通过设置结果精度确定迭代次数。于是, 对得到的特征点进行筛选, 考虑到坡口处的横坐标远大于非坡口处的横坐标, 就能过滤掉非坡口处的坐标, 选取坡口部分的特征点坐标。对坡口处的特征点坐标进行均值处理, 最后能够得到我们需要的特征点坐标。

3 实验分析

3.1 图像处理算法耗时测试

为了验证算法的有效性和准确性, 实验基于标定后的线结构光测量系统, 选取了两块不锈钢板作为测量对象, 尺寸大小为 $300 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 分别对其表面进行焊缝提取。试验中, 传感器距离焊件表面约 100 mm , 所检测的焊缝宽度约为 2 mm 。考虑算法执行时间和 CPU 的频率有关, 在分辨率为 320×240 、 640×480 、 $1\,024 \times 768$ 、 $1\,280 \times 960$ 图像分辨率下对算法所用的执行时间进行测算, 执行的平台为树莓派。但是算法执行的时间和操作系统调度有关, 如果在轻负载情况下, 可以通过多次运行消除操作系统调度的影响。且近 10 年来的处理器都支持动态频率调整, 会根据负载的情况会调整频率。故采用多次测量时间求均值消除影响。测量时间如图 6, 横坐标的单位为图像像素, 纵坐标单位为毫秒。

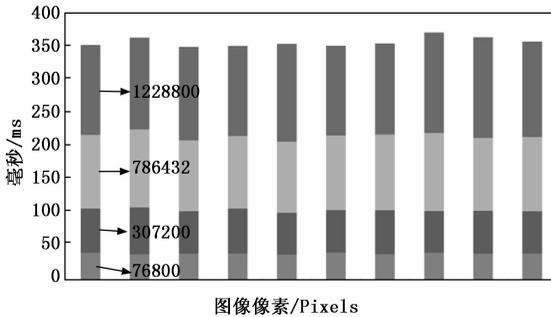


图 6 不同分辨率下求取 10 次算法时间统计图

对所做实验的结果求取均值, 可以得到算法在不同分辨率时间的预测。

3.2 焊缝跟踪提取实验

要求在 1 秒内输出至少五帧, 则每一帧的总时间不超过 200 ms 。在不开启图像显示时 (人机交互), 可以使用

640×480 分辨率的图像; 在开启图像显示后, 会拖慢图像处理的速度, 这时在树莓派的算力下需要采用 320×240 分辨率的图像。

表 1 不同分辨率下图像处理时间

图像分辨率/pixels×pixels	时间/ms
320×340	39.35
640×480	64.50
1 024×768	110.67
1 280×960	140.21

3.3 焊缝精度提取实验

利用 Harris 角点检测对以及细化处理的图像进行检测, 观察放大后的图像, 提取的角点位置多为离散像素点的角点, 而不是焊缝坡口处的角点, 检测出的精度不高。

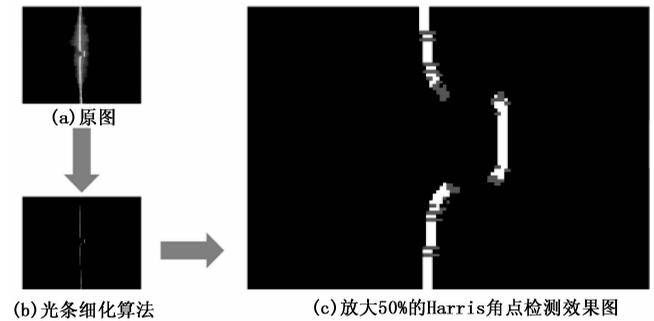


图 7 增加滤光片焊缝图像与 Harris 算法处理效果图

如图 8, 显示了直接使用 Shi-Tomasi 算法和经过亚像素精度优化后的结果、根据图像显示, 找到的角点位置更加清晰, 通过对角点的显示, 角点和角点的位置之间没有更多粘粘, 可以得出经过亚像素优化后的角点的位置更加准确。

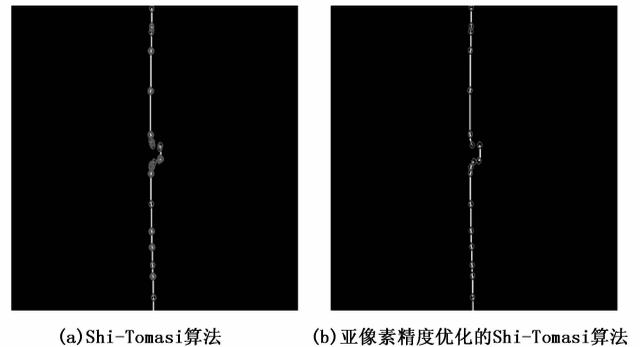


图 8 Shi-Tomasi 算法与优化后的算法处理效果图

4 结束语

1) 针对常见焊缝提取算法精度不高的问题, 文章利用树莓派和工业相机搭建主动激光焊缝提取系统, 通过 Steger 算法以及对 Shi-Tomasi 角点检测算法进行精度优化, 做到了亚像素精度级别的焊缝识别, 能够得到了坡口处的位置信息, 为下一步进行伺服电机控制焊枪提供了帮助。

(2) 经过试验表明, 该算法实时性能够达到要求, 算法精度高, 实际可行^[6-13]。

参考文献:

[1] 刘航, 李志勇, 任杰亮, 等. 焊缝轮廓线激光检测系统开发及算法实现 [J]. 焊接, 2017 (1): 27-31.

[2] 罗超群, 胡志辉, 邓渝波. 焊缝检测区域的分段线性阈值增强算法 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (5): 45-47.

[3] 杨镇豪, 杨柳, 李辉, 等. 复杂环境下结构光中心线提取算法 [J]. 计算机技术与发展, 2018, 28 (9): 7-10.

[4] 王秀平, 白瑞林. 基于线结构光视觉的焊缝类型识别与特征提取 [J]. 电焊机, 2014, 44 (11): 94-98.

[5] Zou Y, Chen T. Laser vision seam tracking system based on image processing and continuous convolution operator tracker [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 105: 141-149.

[6] 张殷, 姚宾, 梁锦堂, 等. 基于线阵相机图像识别技术的带钢焊缝检测系统 [J]. 电气传动, 2019, 49 (2): 79-81.

[7] 林少铎, 高向东, 黎扬进, 等. 角点检测与光流跟踪的焊缝特征提取与定位研究 [J]. 机电工程, 2019, 36 (4): 440-444.

[8] Jeong J, Yoon T S, Park J B. Mean shift tracker combined with online learning-based detector and Kalman filtering for real-time tracking [J]. Expert Systems with Applications, 2017, 79: 194-206.

[9] 汤溢, 陈曦, 刘祥磊. OpenCV 的相机标定在高速相机中的应用 [J]. 北京测绘, 2018, 32 (5): 578-582.

[10] Zhang H W, Sun J H, Chen J. Status and development trend of the welding consumables industry in China [J]. China Welding, 2017, 26 (2): 23-31.

[11] He Y, Xu Y, Chen Y, et al. Weld seam profile detection and feature point extraction for multi-pass route planning based on visual attention model [J]. Robotics and computer-integrated manufacturing, 2016, 37: 251-261.

[12] Lü X, Gu D, Wang Y, et al. Feature extraction of welding seam image based on laser vision [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18 (11): 4715-4724.

[13] Li X H, Li X D, Khyam M O, et al. Robust welding seam tracking and recognition [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17 (17): 5609-5617.

(上接第 137 页)

4 结束语

本文在探讨快响空间地面控制系统时基于虚拟任务操作中心思想, 研究快响空间地面控制系统的工作与信息流程及应用端使用模式, 充分利用现有卫星、地面测控、运控、应用系统资源能力, 突出多部门、多手段联合观测和快速反应, 提高天基对地观测作业精度, 探索天基信息支援控制体制机制创新。

基于云服务框架构建快速响应空间任务应用的地面控制系统体系架构。按照以“云”聚合各类航天装备资源, 以“云”协同各级任务筹划, 以“云”贯通各类保障渠道的体系思想, 构建一体化、分布式的快速响应空间地面控制“云”系统体系架构, 基于网络化和云平台的构建, 实现应用软件的按需、灵活部署, 支持应用端功能的快速迁移和灵活重构。结合天地安全互联技术, 用户终端通过云端应用以服务的方式获取使用资源, 从而实现“一线操作人员所想即所得、直接操控卫星”。

在构建快响空间地面控制流程时, 打破原有各部门各系统各自为政, 独立运转的现状, 在实现各部门、各系统的互联互通的基础上, 从顶层进行协调调度, 实现航天对地观测、快响发射、机动测控等统一调度, 充分利用现有卫星资源和地面测运控、应用系统能力, 进行实现多部门、多手段联合协同和快速反应, 提高天基空间快速响应能力。

在实现快响空间地面控制系统任务规划、调度和控制功能实现途径时, 可采用微服务+容器架构对现有体制业务信息系统进行相关改造, 以分布式服务为基础, 通过服务框架、中间件、消息通信实现服务的规范化。对微服务进行重新排列、组合成新应用, 以容器的方式将应用快速

发布上线。通过各类任务系统纵向的结构分层、横向的功能拆分, 实现同层的功能聚合, 积累并形成标准规范, 集中统一开发通用的和专用服务组件, 通过按需定制、动态重组、灵活扩展、快速构建各类任务系统。

参考文献:

[1] 潘清, 廖育荣, 等. 快速响应空间概念与研究进展 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.

[2] 高永明, 吴钰飞. 快速响应空间体系与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

[3] 董正宏, 廖育荣. 我国空间快速响应体系结构发展模式 [J]. 国防科技, 2009 (4): 47-50.

[4] 黄文博, 张强, 肖飞, 等. 空间快速响应航天器轨道/弹道一体化规划 [J]. 固体火箭技术, 2012, 35 (1): 11-16.

[5] 付晓锋, 吴美平, 张敬. 快速响应侦察的测控通信与地面站布设研究 [J]. 飞行器测控学报, 2011, 30 (4): 6-13.

[6] 付晓锋, 吴美平, 唐毅. 快速侦察任务响应时间分析与轨道设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34 (3): 555-561.

[7] 陈兵. 美军快速响应空间计划的发展 [J]. 太空探索, 2015 (6): 28-31.

[8] 荣鹏. 美国快速响应卫星遥感相机电子学的技术特点 [J]. 航天返回与遥感, 2016, 37 (2): 9-16.

[9] 陈金勇. 航天对地观测运行机制与快速响应系统研究 [J]. 无线电工程, 2017, 47 (2): 1-6.

[10] 洪海丽, 邱红哲, 等. 美军虚拟任务作战中心走向实战 [J]. 装备学院学报, 2015, 26 (2): 62-67.

[11] 陈盈果. 面向任务的快速响应空间卫星部署优化设计方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.

[12] 付晓锋, 吴美平, 张敬, 等. 快速响应侦察的测控通信与地面站布设研究 [J]. 飞行器测控学报, 2011, 30 (4): 6-12.