

本文引用格式: 刘煜辉,高艳强.多传感器融合的工业生产线故障预警技术[J].自动化与信息工程,2024,45(2):41-44.

LIU Yuhui, GAO Yanqiang. Industrial production line fault warning technology based on multi-sensor fusion[J]. Automation & Information Engineering, 2024,45(2):41-44.

多传感器融合的工业生产线故障预警技术

刘煜辉 高艳强

(许昌职业技术学院机电与汽车工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对工业生产线故障预警过程中, 因不同传感器采集的数据维度不同, 导致预警效率低的问题, 提出一种多传感器融合的工业生产线故障预警技术。首先, 通过投影的方式对不同传感器数据进行融合转换, 将传感器坐标系下工业生产线设备的位置信息转换成平面坐标系下的数据形式; 然后, 利用光束平差算法进行坐标系融合, 得到工业生产线设备的位姿; 最后, 利用深度置信网络计算工业生产线设备的位姿与目标状态之间的关系, 确定工业生产线设备是否处于故障状态, 并及时做出相应的预警。经测试, 该技术对不同类型、不同程度的工业生产线故障均实现了高效预警, 时间开销稳定在 1.0 s 以内。

关键词: 多传感器融合; 工业生产线; 故障预警; 投影; 光束平差算法; 坐标系融合转换

中图分类号: TP277

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)02-0007-04

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.02.007

Industrial Production Line Fault Warning Technology Based on Multi-sensor Fusion

LIU Yuhui GAO Yanqiang

(School of Mechanical-electronic and Automotive Engineering, Xuchang Vocational Technical College, Xuchang 461000, China)

Abstract: In order to solve the problem of low early warning efficiency caused by different data dimensions collected by different sensors in the process of industrial production line fault early warning, a multi-sensor fusion technology for industrial production line fault early warning is proposed. Firstly, different sensor data are fused and converted by projection, and the position information of industrial production line equipment in the sensor coordinate system is converted into the data form in the plane coordinate system; Then, using the beam adjustment algorithm for coordinate system fusion, the pose of industrial production line equipment is obtained; Finally, using deep confidence networks to calculate the relationship between the pose of industrial production line equipment and the target state, determine whether the industrial production line equipment is in a faulty state, and make corresponding warnings in a timely manner. After testing, this technology has achieved efficient early warning for industrial production line faults of different types and degrees, with a stable time cost of less than 1.0 second.

Keywords: multi-sensor fusion; industrial production line; fault warning; projection; beam adjustment algorithm; coordinate system fusion conversion

0 引言

利用计算机、传感器、执行器等设备, 实现工业生产流程的自动控制与管理^[1], 通过自动化技术监测工业生产线设备的运行状态^[2], 可提高生产效率、降

低生产成本、改善产品质量、提升生产安全。受复杂生产环境及元器件老化等因素的影响^[3], 工业生产线设备不可避免地会出现故障。当发生故障时, 需快速、准确地判断故障点, 为后续的维修工作提供保障^[4]。文献^[5]利用斯皮尔曼相关性分析对磨煤机的特征参

数进行降维,采用多元状态估计算法和层次分析法对特征参数进行权重赋值,并通过自适应阈值的方法进行故障预警。文献[6]利用改进的动态记忆矩阵 D 构建多元状态估计技术 (multivariate state estimation technique, MSET) 模型,并采用相似度函数和滑动窗口法进行工业生产线设备的故障预警。但上述方法均未对多项异构数据进行融合处理,导致工业生产线设备故障预警的精度不高。

为此,本文提出一种多传感器融合的工业生产线故障预警技术,并通过对比测试及实际应用效果进行分析验证。

1 工业生产线故障预警技术

1.1 工业生产线设备状态数据融合转换

多个传感器采集工业生产线设备的状态数据,是将真实三维世界的信息映射到二维的成像平面^[7]。在映射过程中,因不同传感器采集的数据维度不同,需对其进行融合转换。

通过投影的方式对不同传感器的坐标系进行融合转换^[8]。假设 W 表示 a_1 传感器的坐标系, C 表示 a_2 传感器的坐标系,那么工业生产线设备的位置 P_w 融合转换后的二维坐标为

$$P_c = T_w P_w \quad (1)$$

式中: P_c 、 P_w 分别为平面坐标系和传感器坐标系下的工业生产线设备的位置, T_w 为投影转换系数。

通过公式(1)可以将传感器坐标系下的工业生产线设备的位置 P_w 投影为平面坐标系下的工业生产线设备的位置 P_c 。

利用传感器的数据转换函数 s_p ,可对多个传感器的数据进行融合转换, s_p 的计算公式为

$$s_p = \int_{-\infty}^{+\infty} KP_c dt \quad (2)$$

式中: K 为传感器坐标系下的投影系数。

通过公式(2)可以将多个传感器坐标系下的工业生产线设备的位置转换到平面坐标系下,传感器数据

融合转换后可表示为

$$\begin{bmatrix} s_u \\ s_v \\ s_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_p X_c \\ s_p Y_c \\ s_p Z_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: s_u 、 s_v 、 s_w 分别为工业生产线设备在平面坐标系下的状态参数、变化参数、位置参数, f_x 、 f_y 分别为 x 、 y 方向的位置变化函数, c_x 、 c_y 分别为 x 、 y 方向的位置信息, X_c 、 Y_c 、 Z_c 分别为多个传感器采集的工业生产线设备的状态测量值。

通过公式(3)可对多个传感器采集的数据进行融合转换,得到工业生产线设备的二维坐标。

1.2 工业生产线设备位姿融合

为了准确估计工业生产线设备的三维位置和姿态,借助光束平差 (bundle adjustment, BA) 算法计算其位姿。利用 BA 算法对多个传感器采集的数据进行融合,其重投影误差最小化处理方法如图 1 所示。其中, p_1 、 p_2 是同一个空间点 P 在不同传感器坐标系下的投影, q_1 、 q_2 是同一个空间点 Q 在不同传感器坐标系下的投影, o_1 、 o_2 是同一个空间点 O 在不同传感器坐标系下的投影。

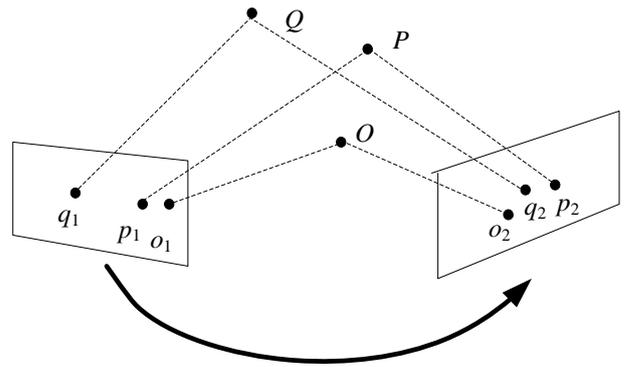


图 1 重投影误差最小化处理方法

BA 算法对多个传感器采集的数据进行融合的重投影误差最小化处理的具体步骤如下:

首先,通过多个传感器采集空间点 P 、 Q 、 O 的状态测量值,估计每个传感器的位置和姿态;

然后,将不同传感器采集的工业生产线设备状态数据进行匹配,得到状态测量值在不同传感器坐标系

中的对应关系，并据此计算状态测量值的三维坐标；

接着，将所有的状态测量值匹配数据和三维点坐标作为初始值，利用 BA 算法使重投影误差最小化，即将每个三维点投影到不同传感器的平面坐标系上，计算其在传感器平面坐标系上的投影误差，并将所有的误差累加作为优化函数，通过迭代更新姿态和三维点坐标，使重投影误差逐渐减小，直到收敛为止；

最后，得到优化后的工业生产线设备的姿态和三维点坐标。需要注意的是，此时投影后状态数据的维度主要取决于工业生产线设备的传感器数量。

工业生产线设备的位姿 g 表示为

$$g = \min \sum \left\| \begin{bmatrix} s_u \\ s_v \\ s_w \end{bmatrix} - KTP_{wi} \right\|_2^2 \quad (4)$$

式中： T 为位姿参数， P_{wi} 为由多个传感器匹配成功数据构成的数据集。

1.3 工业生产线故障预警

考虑到工业生产线不同程度的故障对设备位姿的影响程度不同，利用深度置信网络中的显元对工业生产线设备姿态的表观状态进行分析，结果可表示为

$$E(x, y|g) = g \sum x_i y_j - \sum a_i x_i - \sum b_j y_j \quad (5)$$

式中： $E(x, y|g)$ 为显元对工业生产线设备姿态的表观状态的分析结果， x_i 、 y_j 分别为工业生产线设备位姿在 x 、 y 方向的参数， a_i 、 b_j 分别为工业生产线设备位姿在 x 、 y 方向的允许变化阈值系数。

当 $E(x, y|g)$ 为正值时，表示工业生产线设备处于故障状态，需预警；当 $E(x, y|g)$ 为负值时，表示工业生产线设备处于正常状态，无需预警。

2 测试与分析

2.1 测试环境设置

利用某连续退火生产线测试本文提出的多传感器融合的工业生产线故障预警技术的应用效果^[9-10]，并在相同的测试环境下，设置文献[5]、[6]提出的故障

预警技术作为对照组。

本文以预警效率为评价指标。预警效率是指故障发生时刻与故障预警时刻的时间差，计算公式为

$$T(i) = t_s(i) - t_e(i) \quad (6)$$

式中： $T(i)$ 为 i 故障的预警效率， $t_s(i)$ 为 i 故障的发生时刻， $t_e(i)$ 为 i 故障的预警时刻。

测试生产线的工艺流程及设备配置如表 1 所示。

表 1 测试生产线的工艺流程及设备配置

| 工艺流程 | 设备配置 |
|------|---|
| 入口段 | 行车、连续退火机组、入口步进梁（6 个鞍座，1#、2#、3#为受料鞍座，4#为活动梁，5#为固定鞍座，6#为传递鞍座），2 台开卷机、矫直机、入口月牙剪、入口活套、自动拆捆机 |
| 中央段 | 锌锅、张力辊、中间活套（立式）、平整机（六辊液压式）、退火炉 |
| 出口段 | 出口活套、月牙剪、涂油机、出口飞剪、钢卷小车、鞍座、打捆位、过渡鞍座、张力控制辊 |

本文设置的故障情况如表 2 所示。

表 2 故障设置情况

| 故障编号 | 故障类型 |
|------|----------------|
| 1 | 入口段受料鞍座断路器断开 |
| 2 | 入口段自动拆捆机接近开关损坏 |
| 3 | 中央段平整机电机过载 |
| 4 | 中央段退火炉接线端子接触不良 |
| 5 | 出口段涂油机无法动作 |
| 6 | 出口段自动卷取程序死循环 |
| 7 | 出口段张力控制辊跳电 |
| 8 | 出口段打捆位带钢外圈松卷 |

2.2 测试结果与分析

按照表 2 所示的故障设置情况，分别利用文献[5]、[6]、本文技术对某连续退火生产线进行预警测试，测试结果如表 3 所示。

由表 3 可知，3 种故障预警技术对不同类型故障的预警效率差异明显。文献[5]对是非类故障（断路器断开、开关损坏、跳电）的预警效率较高，均稳定在

2.0 s 以内，但对状态参数类故障（电机过载、接线端子接触不良、涂油机无法动作、程序死循环）的预警效率偏低，最大时间开销达到 4.12 s；文献[6]对各类故障的预警效率相对稳定，均在 2.0 ~2.7 s 范围内；本文技术对不同类型故障的预警效率具有较高的稳定性，时间开销均稳定在 1.0 s 以内。

表 3 不同技术下故障预警效率对比表 单位：s

| 故障类型 | 文献[5] | 文献[6] | 本文技术 |
|----------------|-------|-------|------|
| 入口段受料鞍座断路器断开 | 1.45 | 2.16 | 0.36 |
| 入口段自动拆捆机接近开关损坏 | 1.36 | 2.35 | 0.27 |
| 中央段平整机电机过载 | 3.26 | 2.64 | 0.42 |
| 中央段退火炉接线端子接触不良 | 2.24 | 2.03 | 0.45 |
| 出口段涂油机无法动作 | 2.15 | 2.19 | 0.30 |
| 出口段自动卷取程序死循环 | 3.86 | 2.30 | 0.83 |
| 出口段张力控制辊跳电 | 0.59 | 2.46 | 0.21 |
| 出口段打捆位带钢外圈松卷 | 4.12 | 2.58 | 0.68 |

在实际的工业生产线运行过程中，状态参数类故障的表现程度存在明显差异。为此，本文以中央段的平整机电机过载故障为例，分别设置过载程度为 15.0%、10.0%、5.0%、3.0%、2.0% 和 1.0%，进一步测试 3 种预警技术的预警效率，测试结果如表 4 所示。

表 4 不同故障程度下预警效率对比表 单位：s

| 过载程度/ % | 文献[5] | 文献[6] | 本文技术 |
|---------|-------|-------|------|
| 15.0 | 1.36 | 1.85 | 0.09 |
| 10.0 | 1.90 | 1.94 | 0.16 |
| 5.0 | 2.06 | 2.16 | 0.28 |
| 3.0 | 3.02 | 2.53 | 0.48 |
| 2.0 | 3.50 | 2.84 | 0.61 |
| 1.0 | 3.99 | 3.12 | 0.86 |

由表 4 可知，随着中央段的平整机电机过载故障程度的降低，3 种故障预警技术的预警效率均呈现逐

作者简介：

刘煜辉，男，1981 年生，本科，助教，主要研究方向：工业自动化。E-mail: fireboo@126.com

高艳强，男，1977 年生，硕士研究生，讲师，主要研究方向：工业自动化。E-mail: mailsnake@126.com

渐上升的趋势。文献[5]在过载程度大于 5.0% 时，预警效率较高，但过载程度小于 5.0% 时，预警效率明显降低，最大时间开销达 3.99 s（电机过载程度为 1.0% 时）；文献[6]预警效率与电机过载故障程度之间的关系表现较为平稳；本文技术的预警效率始终稳定在 1.0 s 以内，表现了良好的预警性能。

3 结论

本文提出的多传感器融合的工业生产线故障预警技术，实现了对不同类型、不同程度故障的精准预警，相比于文献[5]、[6]的故障预警技术，有效减小了故障处理的时间开销，在不同故障类型和故障严重程度下的预警效率保持在 1.0 s 内。在未来研究中，结合故障定位技术，进一步完善对工业生产线的监测。

参考文献

- [1] 刘晋成,唐伦,陈前斌.基于数据特征的多传感器融合实时目标检测[J].计算机应用研究,2023,40(11):3456-3461.
- [2] 文礼杰,谢荣,许军立,等.基于相容系数的多传感器融合目标识别方法[J].电子测量与仪器学报,2023,37(4):142-153.
- [3] 马永光,冯勇升.基于 IICEEMDAN-PCA-GRU 的风电机组齿轮箱故障预警方法研究[J].太阳能学报,2023,44(4):67-73.
- [4] 谢天,覃子珍,杨如意,等.基于常模式提取的火电机组通流故障早期预警方法研究[J].汽轮机技术,2023,65(2):122-126.
- [5] 吴涛,王毅,刘震,等.基于多元状态估计-层次分析法的磨煤机故障预警[J].热力发电,2023,52(5):14-21.
- [6] 余兴刚,宾谊沅,陈文,等.基于改进 MSET 的一次风机故障预警及诊断方法[J].机电工程,2023,40(4):535-541.
- [7] 李广,孔飞,王逍遥,等.基于多视觉传感器融合的装配过程质量移动智能检测技术研究[J].现代制造工程,2023(4):116-123.
- [8] 陈学标,肖远辉,肖富锋,等.基于 EEMD-SD 振动信号分析的水电机组故障预警方法[J].水电与新能源,2023,37(2):1-5.
- [9] 宋爱娟,张国荣,袁重焕,等.基于数字孪生的 LabVIEW 与传感器融合实验平台的研究与创新[J].现代电子技术,2023,46(7):149-154.
- [10] 程秀钱,孙书利.多传感器非线性系统的序贯观测融合扩展卡尔曼滤波器[J].黑龙江大学学报,2023,14(1):38-43.