

Centerline ↔ G-code (Guided Fit) — STRICT One-to-One Edition 说明文档

概述

功能简介

该算法将相机点云投影为顶视高度图，在G-code引导下沿法线匹配实际中心线，严格一一对应地计算法向偏移并安全导出纠偏G-code。

适用场景

- **目标**: 激光切割、3D打印等精密加工的轨迹纠偏
- **输入**: 相机点云数据 + 理论G-code文件 + 相机标定外参
- **输出**: 偏移表CSV + 纠偏后G-code + 质量报告

非目标场景

- 不适用于多层复杂几何体
- 不处理Z轴高度变化的3D轨迹
- 不支持实时在线纠偏

坐标系约定

- **右手系**: +X向右, +Y向上 (机床坐标系)
- **像素系**: 行向下, 列向右 (OpenCV约定)
- **法向偏移delta_n**: 正值表示实际中心线偏向法向量正方向

与旧版差异速览

- **[CHG] 严格一一对应**: 以G代码等弧长采样点为唯一主序列, 逐点沿法线搜索, 导出不再使用KDTree聚合
- **[CHG] 缺失策略**: 仅对短缺口 ($\leq \text{max_gap_pts}$) 做局部插值, 长段缺失直接判FAIL
- **[NEW] 梯度门限**: $|\Delta\delta/\Delta s| \leq \text{guide_max_grad_mm_per_mm}$, 抑制抖动
- **[NEW] 曲率自适应平滑**: 高曲率区域缩短平滑窗口
- **[NEW] 拐角忽略**: 拐角附近忽略取点, 避免跨段传播
- **[NEW] 遮挡处理**: 固定设备遮挡区域的多边形标定与环带合成

快速开始

依赖环境

```
# 必需
pip install opencv-python numpy
# Percipio SDK (相机驱动)
pip install pcammls # 或按厂商说明安装
```

```
# 可选 (用于高级形态学操作)
pip install scikit-image scipy
```

最小运行步骤

1. 准备文件:

- 相机外参: `T_cam2machine.npy`
- 理论G-code: `args/example.gcode`

2. 运行脚本:

```
python align_centerline_to_gcode_pro_edit_max.py
```

3. 交互操作:

- `q`: 退出程序
- `s`: 保存当前可视化截图
- `c`: 导出纠偏结果 (默认按键, 可配置)
- `+/-`: 调整像素分辨率

4. 查看结果:

- `out/offset_table.csv`: 偏移表
- `out/corrected.gcode`: 纠偏后G-code
- `out/report.json`: 质量报告

参数总览

文件与路径

参数	默认值	类型	作用与调整建议
<code>T_path</code>	<code>'T_cam2machine.npy'</code>	str	相机到机床外参文件, 包含R,t,T矩阵
<code>gcode_path</code>	<code>'args/example.gcode'</code>	str	理论G-code文件路径
<code>out_dir</code>	<code>'out'</code>	str	导出目录
<code>offset_csv</code>	<code>'out/offset_table.csv'</code>	str	偏移表CSV路径
<code>corrected_gcode</code>	<code>'out/corrected.gcode'</code>	str	纠偏后G-code路径
<code>centerline_gcode</code>	<code>'out/centerline.gcode'</code>	str	测得中心线G-code (仅对比用)

顶视投影与ROI

参数	默认值	类型	作用与调整建议
<code>pixel_size_mm</code>	<code>0.8</code>	float	顶视像素分辨率(mm/pixel), 越小越精细但占用内存更多

参数	默认值	类型	作用与调整建议
bounds_qlo	1.0	float	ROI边界百分位下限, 排除极值点
bounds_qhi	99.0	float	ROI边界百分位上限
bounds_margin_mm	20.0	float	ROI边界扩展裕量(mm)
max_grid_pixels	1200000	int	网格最大像素数, 超过则自动调整分辨率

最近表层提取

参数	默认值	类型	作用与调整建议
z_select	'auto'	str	层选择模式: 'auto'自动/'manual'手动
depth_margin_mm	1.2	float	深度选择裕量(mm)
nearest_use_percentile	True	bool	是否使用百分位法选层
nearest_qlo	15.0	float	最近表层百分位下限
nearest_qhi	85.0	float	最近表层百分位上限
morph_open	3	int	形态学开运算核大小, 去噪
morph_close	5	int	形态学闭运算核大小, 填洞
min_component_area_px	500	int	最小连通域面积(像素), 过滤小碎片

平面拟合/展平

参数	默认值	类型	作用与调整建议
plane_sample_cap	120000	int	平面拟合最大采样点数
plane_min_inlier_ratio	0.55	float	平面内点率最低要求, 低于此值Guard失败

引导中轴线 (核心)

参数	默认值	类型	作用与调整建议
guide_enable	True	bool	是否启用G-code引导模式
guide_step_mm	1.0	float	等弧长重采样步长(mm), 影响匹配精度
guide_halfwidth_mm	6.0	float	法向扫描半宽(\pm mm), 应大于预期偏差
guide_use_dt	True	bool	是否使用距离变换优化
guide_min_on_count	3	int	等距带最小有效像素数
guide_smooth_win	7	int	基础平滑窗口大小 (奇数)
guide_max_offset_mm	8.0	float	法向偏移幅值上限(mm)
guide_max_grad_mm_per_mm	0.08	float	[NEW] 梯度限制(mm/mm), 抑制跳变

参数	默认值	类型	作用与调整建议
curvature_adaptive	True	bool	[NEW] 是否启用曲率自适应平滑
curvature_gamma	35.0	float	[NEW] 曲率敏感度参数
min_smooth_win	3	int	[NEW] 自适应平滑最小窗口
guide_min_valid_ratio	0.60	float	最低命中率要求

拐角忽略

参数	默认值	类型	作用与调整建议
corner_ignore_enable	False	bool	[NEW] 是否启用拐角忽略
corner_angle_thr_deg	35.0	float	拐角角度阈值(度), ≥此角度判为拐角
corner_ignore_span_mm	2.0	float	拐角两侧忽略的弧长半径(mm)

遮挡处理

参数	默认值	类型	作用与调整建议
occlusion.enable	True	bool	[NEW] 是否启用遮挡处理
occlusion.polys	[...]	list	遮挡多边形列表 (机床XY坐标, mm)
occlusion.dilate_mm	3.0	float	安全扩张距离(mm)
occlusion.synthesize_band	True	bool	是否在遮挡区合成环带掩码
occlusion.band_halfwidth_mm	None	float/None	环带半宽(mm), None=自动估计

缺失处理与梯度限幅

参数	默认值	类型	作用与调整建议
strict_one_to_one	True	bool	[NEW] 强制一一对应, 仅基于法向单点决策
max_gap_pts	5	int	[NEW] 允许插补的最大缺口点数
long_missing_max_mm	20.0	float	[NEW] 长段缺失长度阈值(mm)
long_missing_max_ratio	0.08	float	[NEW] 长段缺失比例阈值

偏差补偿

参数	默认值	类型	作用与调整建议
bias_comp.enable	True	bool	是否启用偏差补偿
bias_comp.path	'bias_comp.json'	str	补偿标定文件路径
offset_apply_mode	'invert'	str	纠偏模式: 'invert'朝理论轨迹/'follow'跟随实际

参数	默认值	类型	作用与调整建议
auto_flip_offset	True	bool	自动检测偏移符号并翻转

导出控制

参数	默认值	类型	作用与调整建议
export_on_key	'c'	str	导出触发按键
export_centerline	False	bool	是否导出测得中心线G-code
preview_corrected	True	bool	是否预览纠偏轨迹叠加
save_corrected_preview	True	bool	是否保存纠偏预览图

Guard质量门槛

参数	默认值	类型	作用与调整建议
Guard.enable	True	bool	是否启用质量门槛检查
Guard.min_valid_ratio	0.60	float	最低命中率
Guard.max_abs_p95_mm	8.80	float	偏移绝对值P95上限(mm)
Guard.min_plane_inlier_ratio	0.25	float	平面内点率下限
Guard.long_missing_max_mm	20.0	float	[NEW] 长段缺失长度上限(mm)
Guard.grad_max_mm_per_mm	0.08	float	[NEW] 梯度P98上限

可视化与调试

参数	默认值	类型	作用与调整建议
colormap	cv2.COLORMAP_TURBO	int	偏差可视化色彩映射
arrow_stride	12	int	偏差箭头显示间隔
debug_normals_window	True	bool	[NEW] 法线探针调试窗口
debug_normals_stride	25	int	法线显示间隔
debug_normals_max	40	int	最大法线显示数量
debug_normals_text	True	bool	是否标注delta_n数值
dump_quicklook	True	bool	生成快速预览图
dump_report	True	bool	生成详细报告JSON

主流程工作流

整体流程图

- [1] 加载外参 & G-code
↓
- [2] 获取相机点云数据
↓
- [3] 顶视投影 & ROI确定
↓
- [4] 平面展平(可选)
↓
- [5] 最近表层提取
↓
- [6] [OCCLUSION] 遮挡区处理
↓
- [7] G-code等弧长重采样
↓
- [8] 法向扫描匹配(严格一一对应)
↓
- [9] 短缺口插补 & 平滑 & 限幅
↓
- [10] Guard质量检查
↓
- [11] 偏差补偿 & 导出

关键步骤详解

[1] 初始化

- 加载外参矩阵: `T_cam2machine.npy`
- 解析G-code: 提取XY坐标序列, 支持G0/G1/G2/G3
- 建立相机流: 初始化Percipio SDK

[2-3] 顶视投影

- 点云变换: 相机坐标→机床坐标→顶视XY网格
- ROI确定: 基于G-code边界box + 裕量
- 高度图生成: Z向最大值投影

[4] 平面展平 (可选)

- RANSAC平面拟合: 从高度图中提取主平面
- 残差计算: `height_flat = height - plane_fit`
- 内点率检查: 低于阈值触发Guard失败

[5] 最近表层提取

- 层选择: auto模式下使用百分位法
- 形态学处理: 开运算去噪 + 闭运算填洞
- 连通域过滤: 移除小于`min_component_area_px`的碎片

[6] 遮挡区处理 [NEW]

- 多边形光栅化：机床XY → 像素掩码
- 可见区半宽估计：基于距离变换
- 环带合成：在遮挡区按G-code路径合成等宽带掩码

[7] G-code重采样

- 等弧长插值：按`guide_step_mm`重新采样
- 法向量计算：基于切向量的90°旋转
- 拐角检测：相邻段夹角 \geq 阈值判为拐角

[8] 法向扫描匹配 [严格一一对应]

```

for i in range(len(gcode_points)):
    if corner_ignore_mask[i]: # 拐角忽略
        continue

    # 沿法向量扫描 ±halfwidth_mm
    intersections = find_contour_intersections(point_i, normal_i)

    # 在等距带 d_out - d_in ≈ 0 处取最佳交点
    best_point = select_best_intersection(intersections)

    if best_point:
        delta_n[i] = distance_along_normal(point_i, best_point)
        valid_mask[i] = True

```

[9] 后处理流水线

原始`delta_n` → 短缺口插补 → 曲率自适应平滑 → 幅值限幅 → 梯度限幅 → `delta_n_final`

[10-11] Guard检查与导出

- 统计指标：命中率、P95偏差、长段缺失等
- Guard判定：所有指标通过才允许导出
- 偏差补偿：基于`bias_comp.json`修正系统性偏差
- 文件导出：CSV偏移表 + 纠偏G-code + 质量报告

关键中间变量

变量	含义	形状
<code>height</code>	顶视高度图	(H, W)
<code>height_flat</code>	平面展平后残差	(H, W)
<code>nearest_mask</code>	最近表层掩码	(H, W) bool

变量	含义	形状
g_xy	G-code重采样坐标	(N, 2)
N_ref	法向量序列	(N, 2)
delta_n	法向偏移(原始)	(N,)
valid_mask	有效匹配标记	(N,) bool
centerline_xy	实际中心线坐标	(N, 2)

关键算法细节

法向扫描与等距带

核心思想：在G-code理论点沿法向量方向扫描，寻找实际轮廓与“等距带”($d_{out} - d_{in} \approx 0$)的交点。

```
# 等距带条件
phi = d_out - d_in # 外距离变换 - 内距离变换
target_phi = 0.0 # 理想中轴线位置

# 沿法向量扫描
for offset in range(-halfwidth_px, +halfwidth_px):
    sample_point = base_point + offset * normal_px
    phi_value = bilinear_sample(phi, sample_point)

    # 寻找φ=0的交点
    if abs(phi_value) < threshold:
        intersections.append((sample_point, phi_value))
```

退化处理：当等距带信号微弱时，回退到距离变换最大值位置。

短缺口插补与长段缺失 [NEW]

短缺口插补 ($\leq \text{max_gap_pts}$) :

```
def local_interpolate_short_gaps(data, valid_mask, max_gap_pts):
    gaps = find_continuous_nan_segments(data)
    for gap_start, gap_end in gaps:
        gap_length = gap_end - gap_start + 1
        if gap_length <= max_gap_pts:
            # 线性插值
            data[gap_start:gap_end+1] = interpolate(
                data[gap_start-1], data[gap_end+1], gap_length
            )
```

长段缺失判定：

- 绝对长度：连续缺失弧长 $> \text{long_missing_max_mm}$

- 相对比例：缺失点数/总点数 > `long_missing_max_ratio`
- 触发Guard失败，拒绝导出

曲率自适应平滑 [NEW]

动机：直线段可用长窗口平滑去噪，弯道处应缩短窗口避免拖尾。

```
def adaptive_smooth_window(base_win, kappa, gamma, win_min):
    # 曲率越大，窗口越小
    adaptive_factor = np.exp(-gamma * kappa)
    actual_win = base_win * adaptive_factor
    return np.clip(actual_win, win_min, base_win)
```

梯度限幅 [NEW]

目的：抑制相邻点间的跳变，确保物理合理性。

```
def gradient_clamp(delta, arc_s, gmax):
    """限制 |Δδ/Δs| ≤ gmax"""
    for i in range(1, len(delta)):
        ds = max(1e-9, arc_s[i] - arc_s[i-1])
        max_change = gmax * ds

        actual_change = delta[i] - delta[i-1]
        if abs(actual_change) > max_change:
            delta[i] = delta[i-1] + np.sign(actual_change) * max_change
```

拐角忽略策略 [NEW]

检测拐角：相邻切向量夹角 $\geq \text{corner_angle_thr_deg}$ **忽略范围：**拐角顶点 $\pm \text{corner_ignore_span_mm}$ 弧长
导出策略：忽略区域强制 `delta_n = 0`，保持理论G-code坐标不变

遮挡处理详解 [NEW]

多边形标定

```
# 示例：左下角62x52mm矩形遮挡（相对机床原点）
occlusion_polys = [
    [(-50, -50), (30, -30), (30, 70), (-50, 70)] # 顺/逆时针均可
]
```

可见区半宽估计

1. 在非遮挡区域计算距离变换
2. 沿G-code路径采样距离值

3. 取中位数作为可见半宽估计

环带掩码合成

在遮挡区域内，基于G-code路径生成等宽“虚拟环带”：

```
# 遮挡区内的G-code段
occluded_segments = intersect(gcode_path, occlusion_polygons)

# 为每段生成±halfwidth的带状掩码
for segment in occluded_segments:
    band_mask = dilate_polyline(segment, halfwidth=estimated_width)
    synthesized_mask |= band_mask
```

偏差补偿机制

两种模式

1. **per-index表模式**: 逐点补偿表，精确但需预标定
2. **向量模式**: $\text{bias} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{N} + b$, 参数化模型

步长对齐

```
# 检查补偿表与当前G-code的步长一致性
step_tolerance = 1e-9
step_ok = abs(bias_file['guide_step_mm'] - current_step_mm) < step_tolerance

if not step_ok:
    # 基于拐角锁定的分段重采样
    resampled_bias = resample_bias_piecewise(
        bias_table, current_length, corner_knots
    )
```

应用策略

```
# 仅对有效测量点应用补偿, NaN点保持不变
valid_indices = np.isfinite(delta_n_measured)
delta_n_measured[valid_indices] -= bias[valid_indices]
```

Guard质量门槛与导出策略

Guard检查项目

指标	阈值参数	失败原因	排查建议
----	------	------	------

指标	阈值参数	失败原因	排查建议
命中率	min_valid_ratio=0.60	法向扫描失败过多	增大guide_halfwidth_mm, 检查最近表层质量
P95偏差	max_abs_p95_mm=8.80	存在异常大偏差	检查ROI边界, 排除干扰轮廓
平面内点率	min_plane_inlier_ratio=0.25	表面非平面或噪声过大	调整相机曝光, 改善点云质量
长段缺失 (长度)	long_missing_max_mm=20.0	连续缺失段过长	检查遮挡标定, 调整扫描参数
长段缺失 (比例)	long_missing_max_ratio=0.08	总缺失比例过高	同上
梯度P98	grad_max_mm_per_mm=0.08	存在剧烈跳变	增大平滑窗口, 检查数据质量

导出决策流程

```
Guard检查 → PASS → 偏差补偿 → 符号判定 → 生成导出文件
↓
FAIL → 拒绝导出, 显示失败原因
```

导出文件清单

1. 偏移表CSV (`offset_table.csv`)

```
arc_length_mm,x_theory_mm,y_theory_mm,delta_n_mm,x_actual_mm,y_actual_mm
0.000,10.000,20.000,0.123,10.045,20.089
1.000,11.000,20.000,-0.067,10.982,19.933
...
...
```

2. 纠偏G-code (`corrected.gcode`)

```
; Original: G1 X10.000 Y20.000
G1 X10.045 Y20.089
; Original: G1 X11.000 Y20.000
G1 X10.982 Y19.933
...
...
```

3. 质量报告JSON (`report.json`)

```
{
  "timestamp": "2024-01-01 12:00:00",
```

```

"guard_status": "PASS",
"statistics": {
    "valid_ratio": 0.87,
    "delta_n_p95_mm": 2.45,
    "plane_inlier_ratio": 0.78,
    "longest_missing_mm": 8.5
},
"bias_compensation": {
    "enabled": true,
    "mode": "per_index",
    "mean_correction_mm": -0.034
}
}
}

```

4. 可视化图片

- `out/quicklook.png`: 偏差热力图概览
- `out/corrected_preview.png`: 纠偏前后轨迹对比
- `out/bias_histogram.png`: 偏差分布直方图

可视化与排障手册

关键可视化窗口

1. 主窗口：偏差热力图叠加

观察要点：

- 蓝色=负偏差（向左），红色=正偏差（向右）
- 绿色箭头=偏差方向和大小
- 白色骨架线=骨架提取结果（仅参考）

2. 法线探针窗口 [NEW] (`debug_normals_window=True`)

观察要点：

- 白色圆点=理论G-code采样点
- 浅蓝线段=法向量方向
- 品红圆点=实际匹配交点
- 数字标注=该点的`delta_n`值(mm)

异常信号：

- 大量缺失交点 → `guide_halfwidth_mm`太小或表层质量差
- 交点位置异常 → 轮廓提取或等距带计算有误

3. 偏差补偿对比窗口 (`bias_comp.enable=True`)

观察要点：

- 蓝色直方图=原始偏差分布
- 红色直方图=补偿后偏差分布
- 理想情况：补偿后分布更集中于0附近

4. 骨架提取窗口

观察要点：

- 彩色=最近表层掩码
- 白色线条=提取的骨架
- **注意：**骨架仅用于可视化，不参与最终导出

常见问题排障

问题1：Guard失败 - 命中率过低

现象：`valid_ratio < min_valid_ratio` 可能原因：

- `guide_halfwidth_mm`设置过小
- 最近表层掩码质量差
- ROI边界截断了有效区域

排查步骤：

1. 观察法线探针窗口，查看缺失交点的分布
2. 检查最近表层掩码是否连续
3. 逐步增大`guide_halfwidth_mm`从6.0到12.0mm
4. 调整`bounds_margin_mm`确保ROI完整覆盖

问题2：Guard失败 - P95偏差过大

现象：`delta_n_p95_mm > max_abs_p95_mm` 可能原因：

- 存在干扰轮廓或错误匹配
- ROI包含了非目标物体
- 相机标定不准确

排查步骤：

1. 检查主窗口偏差热力图，定位异常大偏差区域
2. 确认ROI边界是否包含干扰物
3. 验证相机外参`T_cam2machine.npy`的准确性
4. 考虑启用`corner_ignore_enable=True`排除拐角干扰

问题3：Guard失败 - 长段缺失

现象：`longest_missing_mm > long_missing_max_mm` 可能原因：

- 遮挡区域未正确标定
- 表层质量在某段轨迹上极差
- `guide_halfwidth_mm`局部不足

排查步骤：

1. 检查`occlusion.polys`是否正确标定固定遮挡
2. 观察缺失段在哪些区域集中出现
3. 增大`guide_halfwidth_mm`或启用`occlusion.synthesize_band=True`
4. 调整最近表层提取参数改善掩码质量

问题4：偏差补偿不生效

现象：启用`bias_comp.enable=True`但补偿前后无差异 **可能原因：**

- `bias_comp.json`文件不存在或格式错误
- 步长不匹配：`guide_step_mm`与补偿表不一致
- 拐角忽略导致补偿点被跳过

排查步骤：

1. 检查终端日志是否有`[BIAS] failed:`错误信息
2. 验证`bias_comp.json`的`guide_step_mm`字段
3. 查看偏差补偿对比窗口确认直方图变化
4. 检查`corner_ignore_enable`设置与补偿表的兼容性

调试检查清单

启动前检查：

- `T_cam2machine.npy`文件存在且外参矩阵合理
- G-code文件路径正确，包含有效的G0/G1/G2/G3指令
- 相机连接正常，pcammls SDK可用
- 输出目录`out_dir`可写

运行中观察：

- ROI覆盖完整，无关键区域被截断
- 最近表层掩码连续，无大片空洞
- 法线探针窗口显示合理的交点分布
- 主窗口偏差分布符合预期（无异常大值）

导出前验证：

- Guard所有指标通过
- 偏差补偿效果（如启用）符合预期
- 预览图显示纠偏轨迹合理
- 安全阈值检查：最大偏移<20mm（依据记忆中的安全控制要求）

示例与最佳实践

最小配置示例

```

# 基础配置 (安全保守设置)
PARAMS_MINIMAL = dict(
    # 文件
    T_path='T_cam2machine.npy',
    gcode_path='args/example.gcode',

    # 核心参数
    pixel_size_mm=1.0,                      # 较粗分辨率, 节省内存
    guide_step_mm=1.0,                        # 标准采样精度
    guide_halfwidth_mm=8.0,                   # 较宽扫描, 提高命中率
    guide_smooth_win=5,                       # 保守平滑

    # 安全门槛
    guide_max_offset_mm=6.0,                  # 较严格的偏移限制
    Guard=dict(
        enable=True,
        min_valid_ratio=0.50,                 # 降低命中率要求
        max_abs_p95_mm=6.0,                  # 更严格的P95限制
    ),
    # 禁用复杂功能
    corner_ignore_enable=False,
    occlusion=dict(enable=False),
    bias_comp=dict(enable=False),
)

```

典型运行日志

```

[INIT] 加载外参: T_cam2machine.npy
[GCODE] 解析G-code: 1247 points, 1246.8mm total length
[CAM] 初始化相机: Percipio SDK v2.1
[ROI] 确定区域: X[10.2, 89.7]mm, Y[15.1, 76.3]mm
[PROJ] 顶视投影: 1024x768 grid, 0.8mm/pixel
[PLANE] 平面拟合: inlier_ratio=0.82 > 0.25 [PASS]
[LAYER] 最近表层: 87.3% area coverage
[GUIDE] G-code重采样: 1247→1248 points (1.0mm step)
[MATCH] 法向扫描: valid_ratio=0.74 > 0.60 [PASS]
[GUARD] 质量检查:
    ✓ valid_ratio: 0.74 ≥ 0.60
    ✓ delta_n_p95: 2.31mm ≤ 8.80mm
    ✓ plane_inlier: 0.82 ≥ 0.25
    ✓ longest_missing: 8.5mm ≤ 20.0mm
    → Guard: PASS
[BIAS] 偏差补偿: 应用per_index表, 平均纠偏-0.034mm
[EXPORT] 导出完成:
    - out/offset_table.csv: 1248 rows
    - out/corrected.gcode: 1247 lines
    - out/report.json: Guard通过

```

维护与扩展

版本变更记录位点

源码顶部注释明确标注了主要变更：

- [CHG] 严格一一对应：不再使用KDTree聚合，纯粹基于法向匹配
- [NEW] 梯度门限：`guide_max_grad_mm_per_mm`参数抑制跳变
- [NEW] 曲率自适应：`curvature_adaptive`高曲率区域缩短平滑窗口
- [NEW] 拐角忽略：`corner_ignore_enable`避免拐角附近的跨段传播
- [NEW] 遮挡处理：`occlusion.polys`多边形标定与环带合成

常见扩展需求

新增设备遮挡

1. 在机床坐标系下测量遮挡物边界
2. 更新`PARAMS['occlusion']['polys']`添加新多边形
3. 调整`dilate_mm`确保安全裕量
4. 验证`synthesize_band`效果

迁移旧版偏差表

1. 检查旧表的步长与当前`guide_step_mm`兼容性
2. 如不兼容，使用`_resample_per_index_bias_piecewise`重采样
3. 转换为新的JSON格式，包含`mode`、`guide_step_mm`等元数据
4. 验证拐角锁定的一致性

新增Guard指标

1. 在`run()`主循环中计算新统计量
2. 添加对应的`Guard.*`参数到`PARAMS`
3. 在`Guard`检查逻辑中增加新判定条件
4. 更新失败原因的文本描述

术语与符号约定

- **坐标系**：右手系，+X右，+Y上（机床）；像素系Y向下
- **量纲**：所有空间距离以mm为单位，角度以度为单位
- **统计量**：P95=95%分位数，median=中位数，mean=平均值
- **delta_n**：法向偏移，正值=实际中心线偏向法向量正方向
- **有效测量**：`valid_mask[i]=True`且`isfinite(delta_n[i])`
- **长段缺失**：连续缺失弧长>`long_missing_max_mm`的区间

完整文档总结：本文档涵盖了从参数配置到故障排除的完整流程，新接手的同事可按照“快速开始”部分立即运行，根据“参数总览”调整配置，利用“排障手册”解决问题，并通过“Guard门槛”确保导出安全性。所有核心算法改动已标注[NEW]/[CHG]，便于理解新版本的技术优势与向后兼容性考量。