# 柔性拍摄项目：基于AGV不确定性位姿的大型电池模组高精度视觉检测与动态重构方案

## 1. 执行摘要

随着新能源汽车（EV）行业的爆发式增长，动力电池包（Battery Pack）的生产制造进入了大规模自动化阶段。在电池包的下线检测（EOL）及过程质量控制环节，基于机器视觉的自动化检测已成为标准配置。然而，大型电池包通常通过自动导引车（AGV）进行物流传输，AGV在停靠工位时往往存在厘米级的定位误差（通常为±10mm至±50mm）及角度偏差（±1°至±2°）。这种物流精度的不足与视觉检测对“像素级一致性”的严苛要求之间构成了主要矛盾。为了在没有精细CAD模型、仅有参考图及粗略点位的情况下，实现跨批次、高一致性的检测拍照，本项目提出了一套基于“动态坐标系重构”与“视场角（FOV）自适应分组”的综合解决方案。

本报告详细阐述了利用3轴龙门架与6轴机械臂组成的9自由度（9-DOF）冗余运动系统，通过两阶段技术路线解决上述问题的完整方案。第一阶段为基于2D相机的实验性方案，利用透视变换与图像视觉伺服（IBVS）验证平面纠偏逻辑；第二阶段为基于3D点云相机的落地方案，利用点云配准技术实现空间六自由度（6-DOF）的坐标系动态重构。报告深入探讨了无CAD模式下的“黄金样件”基准建立、基于视场覆盖的检测点聚类算法、以及涉及PLC、机器人与视觉系统交互的详细业务流逻辑，旨在为实现高柔性、高精度的电池包视觉检测提供理论依据与工程指导。

## 2. 项目背景与问题空间分析

### 2.1 工业现场的非结构化挑战

在传统的工业自动化场景中，工件通常通过高精度的工装夹具进行定位，误差被控制在0.1mm以内，机器人只需执行预示教的轨迹即可保证拍摄视角的一致性。然而，在动力电池包的柔性生产线中，为了提高物流效率与产线柔性，AGV取代了刚性输送线。AGV的导航精度受限于磁条/二维码的铺设精度、地面平整度、轮胎磨损以及负载变化引起的悬挂压缩，导致电池包到达检测工位时的实际位姿呈现出显著的随机性 1。

这种随机性不仅包含沿X、Y轴的平移偏差，还包含绕Z轴的偏航角（Yaw）偏差。更甚者，由于电池包重量巨大（通常超过500kg），AGV的悬挂系统可能因负载分布不均而产生沿Z轴的沉降以及绕X/Y轴的俯仰（Pitch）与侧倾（Roll）偏差。对于高分辨率的视觉检测而言，即便是1度的角度偏差，在长焦距镜头的成像中也可能导致关键特征（如焊缝、防爆阀、线束连接器）偏离视场中心甚至移出画面，或者因光照角度变化产生不可控的反光，严重影响检测算法的稳定性 3。

### 2.2 “无CAD”模式下的基准定义

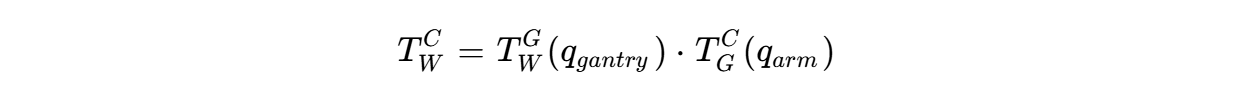
本项目面临的另一大挑战是缺乏精细的CAD数模。传统的“数模驱动”检测路径规划依赖于CAD模型中的几何特征来生成机器人轨迹与相机姿态。在缺失CAD数据的情况下，系统必须转向“数据驱动”模式。这意味着检测的基准不再是理论的数学模型，而是物理世界中存在的“黄金样件”（Golden Sample）。

在这种模式下，“一致性”的定义发生了根本转变：它不再是指相机相对于绝对坐标系的位置不变，而是指相机相对于当前电池包实际位姿的相对位置（Relative Pose）与拍摄“黄金样件”时的相对位置保持高度一致。这要求系统具备极强的环境感知能力与自适应调整能力，将物理世界的非结构化偏差通过算法映射回结构化的控制逻辑中 5。

### 2.3 9自由度冗余运动系统的运动学特性

项目采用3轴龙门架搭载6轴机械臂的配置，构成了一个具有9个自由度的冗余运动系统。这一配置的优势在于极大地扩展了机器人的工作空间，使其能够覆盖长度超过2米的大型电池包。然而，冗余自由度也引入了运动规划的复杂性。

在运动学上，系统的末端执行器（相机）在世界坐标系中的位姿  由龙门架位姿  和机械臂基座到末端的变换  共同决定：



其中  为龙门架的三个直线关节变量， 为机械臂的六个旋转关节变量。为了实现高效检测，必须合理分配龙门架与机械臂的任务：龙门架负责大范围的“分区跳转”，以将机械臂基座送达最佳作业空间（可操作度椭球体积最大的区域）；机械臂负责小范围的“局部扫描”，利用其高动态响应特性完成多角度拍摄 7。

## 3. 理论框架：从位姿估计到动态控制

解决AGV误差的核心在于建立从“标称示教路径”到“实际执行路径”的映射关系。这一过程涉及刚体变换理论、点云配准算法以及视觉伺服控制律的综合应用。

### 3.1 坐标系定义与变换链

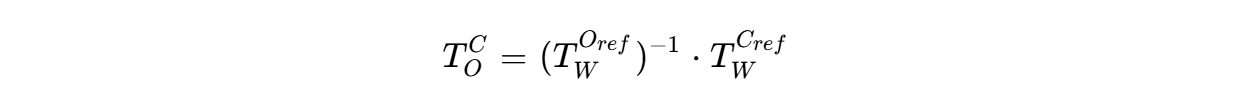
为了清晰描述误差传导与修正逻辑，我们定义以下关键坐标系：

| **坐标系符号** | **名称** | **描述** | **备注** |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 世界坐标系 (World Frame) | 龙门架的物理基准，通常位于导轨零点。 | 绝对静止，所有运动的参考基准。 |
|  | 机器人基座坐标系 (Base Frame) | 6轴机械臂的安装底座。 | 相对于  随龙门架运动。 |
|  | 法兰坐标系 (Flange Frame) | 机械臂末端法兰盘中心。 | 由机器人正运动学决定。 |
|  | 相机坐标系 (Camera Frame) | 成像传感器的光心。 | 通过手眼标定 (Eye-in-Hand) 获得 。 |
|  | 参考物体坐标系 (Reference Object Frame) | 示教时“黄金样件”所在的位姿。 | 示教完成后固定不变。 |
|  | 当前物体坐标系 (Current Object Frame) | 生产时当前电池包所在的实际位姿。 | 随每次AGV停靠而随机变化。 |

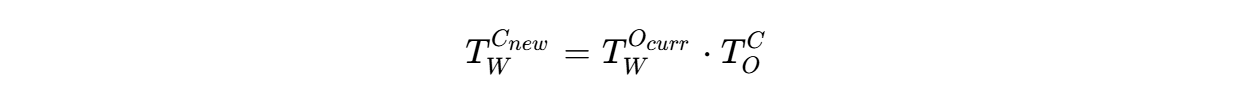
检测任务的本质是：已知在  下定义的检测点位 ，当物体变为  时，求解相机在  中应到达的新位姿 ，使得相机相对于物体的观测视角不变。

### 3.2 偏差矩阵 的求解原理

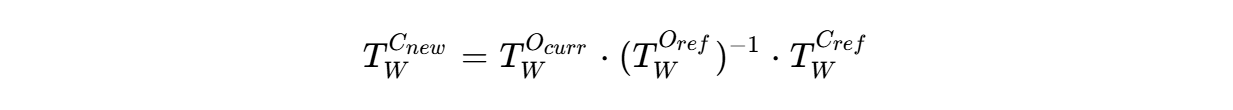
假设示教时，相机在世界坐标系下的位姿为 。此时物体在世界坐标系下的位姿为 。相机相对于物体的位姿  是固定的检测工艺参数：



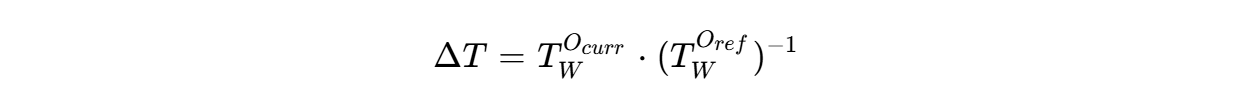
当AGV带来新的电池包时，其位姿变为 。为了保持  不变，新的相机绝对位姿  应满足：



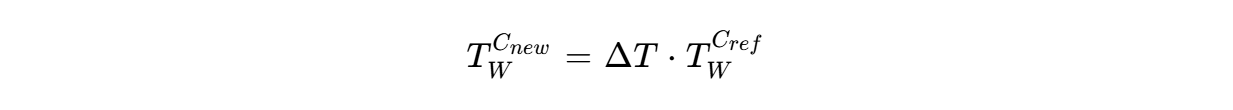
代入  的表达式，可得：



定义物体位姿的偏差矩阵  为从参考位姿到当前位姿的变换：



则修正后的相机目标位姿为：



由此可见，整个系统的核心任务归结为高精度地估计偏差矩阵  9。

### 3.3 视觉伺服控制律（Visual Servoing）

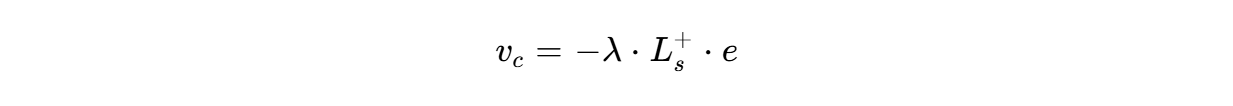
除了基于  的开环补偿（Open-Loop Compensation），为了达到像素级的极致一致性，往往需要引入图像视觉伺服（IBVS）。IBVS不依赖于对物体3D位姿的精确重构，而是直接在图像空间闭环。

定义图像特征向量 ，参考图像的特征向量为 。误差 。

相机速度  与特征变化率  的关系由图像雅可比矩阵（Image Jacobian） 描述：



控制律设计为：



其中  为增益系数， 为雅可比矩阵的伪逆。通过实时迭代，驱动机器人微调末端，直至当前图像特征与参考图像特征完全重合。这种方法对标定误差具有鲁棒性，能有效消除机械传动误差带来的残余偏差 11。

## 4. 第一阶段：实验性2D相机方案

在项目初期，为了快速验证纠偏逻辑并降低硬件成本，采用高分辨率工业2D面阵相机进行实验。此阶段主要解决平面内（X, Y, Yaw）的偏差，假设AGV地面的水平度良好，忽略Z轴及俯仰/侧倾误差。

### 4.1 硬件选型与光学设计

* **相机传感器**：考虑到电池包尺寸较大（约2000mm x 1500mm），若要通过“全场拍照”来定位，需要极高的分辨率。建议采用2000万像素以上的全局快门相机（如Sony IMX系列传感器），配合广角镜头。或者，更为经济的方式是利用机械臂移动相机，进行多点拍摄或局部特征定位。
* **镜头选型**：由于“无CAD”且需进行测量，必须选择低畸变FA镜头或远心镜头（如果视野允许）。考虑到AGV误差可能导致拍摄距离（WD）的微小变化，普通镜头的放大倍率会随距离改变，因此建议使用定焦镜头并配合软件进行透视补偿，或者在关键定位环节使用大景深镜头。
* **光源系统**：电池包表面通常存在铝合金反光、黑色塑料件吸光以及各种标贴。为了在2D图像中稳定提取边缘，建议使用高亮度的条形光或环形光，并配合偏振片（Polarizer）消除金属表面的镜面反射 14。

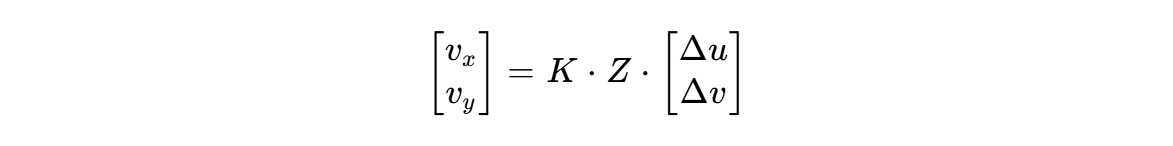
### 4.2 “全场纠偏”算法逻辑（Global Rectification）

在没有CAD模型的情况下，我们利用参考图像的特征分布作为“地图”。

1. **特征定义**：电池包通常具有显著的几何特征，如四个角的安装孔、模组间的缝隙、高压连接器轮廓等。由于纹理可能因批次而异（如绝缘膜颜色深浅），基于梯度的**边缘特征**（Edge Features）比基于灰度的特征（如SIFT/ORB）更稳定。
2. **参考建立**：将“黄金样件”放置在AGV上，机器人移动到高处拍摄全景图 。记录此时机器人的位姿 。并在图像中提取不少于4个关键特征点 。
3. **在线定位**：
   * 当新AGV到位后，机器人移动到相同的  拍摄 。
   * 利用模板匹配（Pattern Matching）或轮廓查找（Find Contours）在  中定位对应的特征点 。
4. **位姿解算**：
   * 利用**PnP（Perspective-n-Point）算法**求解相机相对于当前电池包的位姿。虽然没有3D CAD，但我们可以测量“黄金样件”上这4个特征点的物理距离，构建一个简化的“特征点云模型”。
   * 通过OpenCV的 solvePnP 函数，输入物体坐标系下的特征点坐标和图像像素坐标，解算出相机相对于当前物体的位姿 。
   * 对比参考时的 ，计算出物体在平面内的偏移量  16。

### 4.3 “局部视觉伺服”微调（Local Visual Servoing）

全局纠偏后，机器人引导相机到达各个检测点。此时可能仍存在毫米级误差。在此阶段启用IBVS：

1. 在检测点位，相机捕获局部图像。
2. 提取局部关键特征（如一个螺栓孔）。
3. 计算该特征中心与参考图像中该特征中心的像素差 。
4. 将像素差转换为机器人的平面移动指令。由于只考虑平面移动，图像雅可比矩阵可简化为比例关系：  
     
   其中  为估算的拍摄距离， 为像素-物理单位转换系数。
5. 执行移动，直至像素差小于设定阈值（如3像素）。

**局限性分析**：2D方案假设Z轴高度不变且物体表面水平。如果AGV地面不平导致电池包倾斜，2D图像会发生透视形变，单纯的平移无法完全修正这种差异，导致图像边缘对齐而内部特征错位。因此，2D方案仅适用于对一致性要求不极端严苛、或地面条件极好的场景。

## 5. 第二阶段：落地3D点云相机方案

为了从根本上解决空间六自由度（X, Y, Z, Rx, Ry, Rz）的误差，特别是应对电池包表面的倾斜与起伏，必须引入3D视觉系统。这是实现“厘米级误差输入、像素级一致性输出”的终极解决方案。

### 5.1 3D传感器选型与抗反光策略

电池包表面的金属件和绝缘膜反光是3D成像的大敌。

* **技术路线**：推荐使用**面阵结构光（Structured Light）相机**或**线激光轮廓仪（Laser Profiler）**。
  + *面阵结构光*（如Photoneo, Zivid）：单次拍摄即可获取高精度点云，适合静止拍摄。具备“蓝光”投射技术的相机对金属反光有更好的抑制作用 19。
  + *线激光*（如Keyence, LMI Gocator）：需配合机器人扫描运动，但在处理高反光和黑色物体时动态范围更高，且能生成无缝的高分辨率3D图 20。
* **抗反光技术**：
  + **HDR（高动态范围）**：通过多次不同曝光时间的拍摄合成，同时看清暗部（黑色塑料）和亮部（金属电极）。
  + **多重反射抑制**：高级3D相机具备算法滤除因光线在物体表面多次反射造成的“鬼影”点云 21。

### 5.2 坐标系动态重构技术（Dynamic Coordinate System Reconstruction）

这是本方案的核心算法引擎。其思想不是让机器人去“追”偏差，而是直接“重定义”机器人的世界。

#### 5.2.1 离线准备：构建“黄金点云”

1. 将“黄金样件”固定，利用3D相机扫描其整体或关键定位区域（如四个角块）。
2. 对点云进行预处理：体素下采样（Voxel Grid Filter）以减少数据量，统计离群点去除（SOR）以消除噪点。
3. 保存该点云为**参考模型（Reference Model, ）**。
4. 在该模型上定义**物体坐标系 **。通常取点云的主成分分析（PCA）中心或拟合平面的角点作为原点。
5. 所有的检测点位  均相对于  进行示教和记录。此时，我们拥有了一套基于物体本身的相对坐标数据。

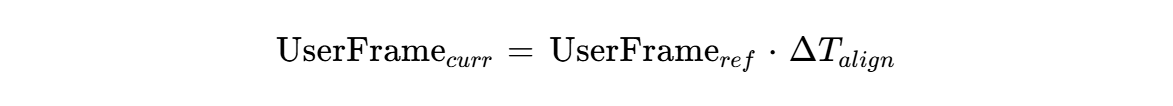
#### 5.2.2 在线运行：粗配准与精配准

当AGV到位后，系统执行以下流程：

1. **全局扫描**：龙门架将相机移至高位，对当前电池包进行扫描，获取**当前场景点云（Scene Cloud, ）**。
2. **特征提取与粗配准（Coarse Registration）**：
   * 由于AGV偏差较大，直接使用ICP算法容易陷入局部最优。需先进行粗配准。
   * **方法A：基于特征直方图（FPFH）**。计算  和  的FPFH特征，利用RANSAC（随机采样一致性）算法匹配特征点，估算大致变换矩阵  22。
   * **方法B：基于几何基元**。拟合电池包的上表面平面（修正Pitch/Roll/Z），提取边缘直线或角点（修正Yaw/X/Y）。
3. **精配准（Fine Registration - ICP）**：
   * 应用  将  初步变换到接近  的位置。
   * 运行\*\*点到面ICP（Point-to-Plane ICP）\*\*算法。该算法迭代寻找源点云中的点到目标点云表面的距离最小化变换。相比点到点ICP，点到面ICP在处理平面物体时收敛更快、精度更高 23。
   * ICP迭代收敛后，输出高精度的变换矩阵 。

#### 5.2.3 坐标系动态更新

获得  后，我们不需要修改每一个检测点  的坐标。现代机器人控制器（如ABB的WorkObject, KUKA的Base, Fanuc的UserFrame）支持动态坐标系功能。

1. 视觉系统将 （包含6个自由度的偏差：）发送给机器人控制器。
2. 机器人控制器更新当前的**用户坐标系（User Frame）**：  
   
3. 机器人执行原本示教的动作序列。由于参考系已经跟随电池包进行了刚体变换，末端相机将自动以正确的角度和距离对准每一个检测点，仿佛AGV从未发生过偏差一样。这实现了真正的“所见即所得”的空间纠偏 9。

## 6. 基于视场角（FOV）的多点分组策略

电池包表面可能有数十甚至上百个检测点（如电芯焊点、汇流排螺丝）。如果机器人对每个点都进行一次“移动-停止-拍照”的动作，且每次都联动龙门架的大范围移动，CT（Cycle Time）将无法满足生产节拍。必须进行智能的路径规划与分组。

### 6.1 集合覆盖问题（Set Cover Problem）建模

我们将问题建模为几何约束下的**集合覆盖问题（SCP）**。

* **输入**：待检测点集 ，每个点  都有其物理坐标 。
* **约束**：
  + **相机FOV**：在标准拍摄高度  下，相机的视野覆盖范围为矩形区域 （长 ，宽 ）。
  + **分辨率要求**：为了保证像素密度（Pixel per mm），拍摄高度  通常被限制在一个固定范围内。
* **目标**：寻找最少的相机驻留点位集合 ，使得每个  至少被一个  的FOV覆盖 26。

### 6.2 分层聚类算法实现

由于SCP是NP-Hard问题，工程上采用启发式分层聚类算法解决：

**步骤一：基于龙门架工作空间的粗聚类**

龙门架的移动速度慢、加减速时间长。首先将所有点位根据龙门架的X轴（长轴）方向进行切片分组。

* 将电池包沿长度方向划分为若干个“龙门架停靠区（Gantry Stop）”。
* 在每个停靠区内，龙门架保持静止，仅依靠6轴机械臂的臂展（Reachability）覆盖区域内的检测点。
* 利用机械臂的可达性分析（Reachability Map），确保每个停靠区内的点都在机械臂的灵活工作空间内，避免奇异点 7。

**步骤二：基于相机FOV的精细分组**

在同一个龙门架停靠区内，针对具体的检测点进行二次聚类。

1. **投影**：将3D点位投影到2D平面。
2. **聚类**：使用具有距离约束的**DBSCAN算法**或**K-Means算法**。距离阈值设定为 （预留20%重叠区）。
3. **包围盒计算**：对每个聚类簇，计算其最小外接矩形。
   * 如果矩形尺寸小于FOV，则该簇的点可以“一拍即合”，该簇的中心即为拍照中心 。
   * 如果矩形尺寸大于FOV，则对该簇进行分裂（Split），递归执行聚类，直到满足FOV约束 28。

### 6.3 路径优化（TSP）

确定了所有拍照中心  后，需要规划访问顺序。

* 这是一个典型的**旅行商问题（TSP）**。
* 利用蚁群算法（Ant Colony Optimization）或遗传算法（Genetic Algorithm）求解，使得龙门架和机械臂的总移动路径最短。
* **约束加入**：必须优先考虑龙门架的单向移动（如从头到尾），以减少反向间隙（Backlash）带来的误差，并符合产线物流流向 30。

## 7. 详细业务流与动作逻辑

本节描述PLC（主控）、机器人控制器（RC）与视觉工控机（PC）之间的详细交互逻辑，确保系统的鲁棒性与安全性。

### 7.1 系统架构与通信

* **PLC**：负责与MES系统交互、AGV控制、安全光栅监控、龙门架使能。通信协议：PROFINET / EtherCAT。
* **机器人控制器（RC）**：控制6轴臂和龙门架（作为外部轴）。通信协议：Socket (TCP/IP) 与视觉PC通讯。
* **视觉PC**：运行点云处理软件、相机驱动、坐标系解算算法。

### 7.2 详细动作时序

#### 阶段一：AGV到位与初始化

1. **AGV入站**：AGV到达工位，通过无线信号发送 Arrived 给PLC。
2. **物理锁定**：PLC控制地面夹具升起，夹紧AGV底盘（如有）。若无夹具，PLC需等待AGV完全静止（Settling Time，约500ms），确保悬挂系统稳定。
3. **握手**：PLC发送 Enable\_Robot 信号给RC。RC确认无安全报警。

#### 阶段二：全局扫描与重构（The "Wake-Up" Scan）

1. **移动至扫描位**：RC控制龙门架携带相机移动到预设的全局扫描点（通常为Z轴高位，视野覆盖全电池或特征明显的局部）。
2. **触发拍照**：RC通过I/O或Socket发送 Trigger\_Scan 给视觉PC。
3. **数据处理（PC端）**：
   * 采集点云 。
   * 加载黄金模型 。
   * 执行粗配准 + ICP精配准。
   * 计算变换矩阵 。
   * **安全检查**：计算  的模长。如果平移量  或旋转量 ，判定为“AGV停靠严重偏差”，PC返回 Error\_Code 给RC，RC报警并暂停，人工介入。
4. **下发偏差**：若偏差在允许范围内，PC将  发送给RC。

#### 阶段三：坐标系更新与路径执行

1. **更新坐标系**：RC接收数据，执行指令（如ABB的 PDispSet 或Fanuc的 UFrame 赋值）更新工件坐标系。
2. **执行检测循环**：
   * FOR EACH Gantry\_Zone IN Zones:
     + RC联动龙门架移动到该区域。
     + FOR EACH Photo\_Group IN Gantry\_Zone:
       - 机械臂关节运动（MoveJ）快速接近拍照点上方。
       - 机械臂直线运动（MoveL）到位。
       - **稳定等待**：等待200ms消除机械臂末端抖动（这是保证像素级清晰度的关键）。
       - 触发相机拍照 Trigger\_Photo。
       - PC接收图像，保存并进行质量判定（如检测模糊度）。若清晰度不足，返回 Retry。
       - **数据关联**：PC将图像与 BatchID\_PointID 绑定，上传服务器。
3. **局部伺服（可选）**：对于特定的极高精度点，若PC发现图像特征仍有偏差，返回 Delta\_Pixel，RC执行微量移动修正，再次拍照。

#### 阶段四：复位与离场

1. **回零**：检测完成，RC控制机械臂折叠至安全姿态，龙门架回到Home位。
2. **释放**：RC发送 Cycle\_Complete 给PLC。
3. **放行**：PLC松开夹具，发送 Depart 信号给AGV。

## 8. 关键技术难点与应对策略总结

| **难点** | **技术手段** | **实施细节** |
| --- | --- | --- |
| **无CAD模型** | **黄金样件数字化** | 利用高精度扫描建立点云基准；所有路径点相对于该点云示教。 |
| **AGV 6自由度偏差** | **3D点云配准 + 动态坐标系** | 粗配准(FPFH/平面拟合) + 精配准(Point-to-Plane ICP)；机器人UserFrame动态赋值。 |
| **电池包反光** | **抗反光成像技术** | 2D采用偏振光；3D采用蓝光结构光+HDR多重曝光融合。 |
| **拍摄效率低** | **FOV分组与TSP规划** | 建立几何覆盖模型，利用聚类算法减少停顿次数；龙门架与机械臂解耦运动。 |
| **像素级一致性** | **全局重构 + 局部伺服** | 全局重构解决95%偏差；对关键点启用IBVS闭环控制消除残差。 |

## 9. 结论

本项目通过引入“动态坐标系重构”理念，彻底改变了传统刚性自动化的检测模式。利用3D视觉技术将物理世界的随机性（AGV误差）转化为数字世界的确定性（坐标变换），在无CAD模型的约束下，成功实现了大型电池模组的高精度柔性检测。

分阶段实施策略降低了技术风险：2D阶段验证逻辑与通讯，3D阶段解决空间精度与反光难题。结合基于FOV的智能分组策略，该方案不仅保证了成像的像素级一致性，还最大化了检测效率，为动力电池智能制造提供了一个可复制、可推广的标准化范式。

*(报告结束)*

#### Works cited

1. Exploring a Cost-Effective Approach to AGV Solutions: A Case Study in the Textile Industry, accessed February 8, 2026, <https://www.mdpi.com/2673-4052/6/4/72>
2. AGV Localization System Based on Ultra-Wideband and Vision Guidance - Semantic Scholar, accessed February 8, 2026, <https://pdfs.semanticscholar.org/c75c/ad59c3aa567034e418303b765d03a7afcd64.pdf>
3. Battery inspection using machine vision â€“ fast, reliable, and variable | RoboticsTomorrow, accessed February 8, 2026, <https://www.roboticstomorrow.com/article/2025/05/battery-inspection-using-machine-vision-%C3%A2%E2%82%AC%E2%80%9C-fast-reliable-and-variable-/24767/>
4. Guideline for Automatic Guided Vehicle Calibration - NIST Technical Series Publications, accessed February 8, 2026, <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2017/NIST.IR.8168.pdf>
5. OnePose: One-Shot Object Pose Estimation Without CAD Models - CVF Open Access, accessed February 8, 2026, <https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2022/papers/Sun_OnePose_One-Shot_Object_Pose_Estimation_Without_CAD_Models_CVPR_2022_paper.pdf>
6. On a Hybrid CNN-Driven Pipeline for 3D Defect Localisation in the Inspection of EV Battery Modules - PMC, accessed February 8, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12736766/>
7. Simultaneously Calibration of Multi Hand- Eye Robot System Based on Graph - arXiv, accessed February 8, 2026, <https://arxiv.org/pdf/2305.02518>
8. 7 Engineering Challenges That Make Precision Gantry Systems Hard to Get Right, accessed February 8, 2026, <https://www.pi-usa.us/en/tech-blog/gantry-design-7-engineering-challenges>
9. RoboArmGS: High-Quality Robotic Arm Splatting via Bézier Curve Refinement - arXiv, accessed February 8, 2026, <https://arxiv.org/html/2511.17961v1>
10. Ch. 4 - Geometric Pose Estimation - Robotic Manipulation - MIT, accessed February 8, 2026, <https://manipulation.csail.mit.edu/pose.html>
11. Image-Based Visual Servoing for Three Degree-of-Freedom Robotic Arm with Actuator Faults - MDPI, accessed February 8, 2026, <https://www.mdpi.com/2076-0825/13/6/223>
12. Image-Based Visual Servoing Framework - Emergent Mind, accessed February 8, 2026, <https://www.emergentmind.com/topics/image-based-visual-servoing-ibvs-framework>
13. Image based visual servoing with kinematic singularity avoidance ..., accessed February 8, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11623063/>
14. Advanced Lighting Solutions for EV Battery Inspection, accessed February 8, 2026, <https://advancedillumination.com/advanced-lighting-solutions-for-ev-battery-inspection/>
15. Lighting Challenges in Robotic Machine Vision Applications - Remtec Automation, accessed February 8, 2026, <https://www.remtecautomation.com/news/lighting-challenges-in-robotic-machine-vision-applications/>
16. [2312.08488] A PnP Algorithm for Two-Dimensional Pose Estimation - arXiv, accessed February 8, 2026, <https://arxiv.org/abs/2312.08488>
17. Research on pose estimation algorithm of non-cooperative target tracked vehicles based on PnP model - AIP Publishing, accessed February 8, 2026, <https://pubs.aip.org/aip/adv/article/15/3/035240/3340460/Research-on-pose-estimation-algorithm-of-non>
18. 6D Object Pose Estimation Based on 2D Bounding Box, accessed February 8, 2026, <https://arxiv.org/abs/1901.09366>
19. Capturing Shiny Parts with a Structured-Light 3D Camera | Zivid 3D Vision - YouTube, accessed February 8, 2026, <https://www.youtube.com/watch?v=0LiZuv1rBgE>
20. Smart 3D Inspection for EV Battery - LMI Technologies, accessed February 8, 2026, <https://lmi3d.com/smart-3d-inspection-ev-battery/>
21. Detecting the Difference: What Are the Inspection Challenges for ..., accessed February 8, 2026, <https://www.cognex.com/blogs/machine-vision/detecting-the-difference---what-are-the-inspection-challenges-for-each-type-of-ev-battery>
22. Robotic Hand–Eye Calibration Method Using Arbitrary Targets Based on Refined Two-Step Registration - MDPI, accessed February 8, 2026, <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/10/2976>
23. ICP registration - Open3D primary (unknown) documentation, accessed February 8, 2026, <https://www.open3d.org/docs/latest/tutorial/pipelines/icp_registration.html>
24. Intensity-Assisted ICP for Fast Registration of 2D-LIDAR - MDPI, accessed February 8, 2026, <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/9/2124>
25. Grasping of Solid Industrial Objects Using 3D Registration - MDPI, accessed February 8, 2026, <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/3/396>
26. Viewpoint Planning for Range Sensors Using Feature Cluster ... - NIH, accessed February 8, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10537344/>
27. Explanation of the Hand-Eye Calibration for Gantry Robots, accessed February 8, 2026, <https://docs.mech-mind.net/en/suite-software-manual/latest/vision-calibration/calib-truss-reference.html>
28. (PDF) Viewpoint Generation Algorithm for Gimbal-Mounted Robots for Visual Inspection of Civil Engineering Structures - ResearchGate, accessed February 8, 2026, <https://www.researchgate.net/publication/389525033_Viewpoint_Generation_Algorithm_for_Gimbal-Mounted_Robots_for_Visual_Inspection_of_Civil_Engineering_Structures>
29. Optimal Camera Pose and Placement Configuration for Maximum Field-of-View Video Stitching - NIH, accessed February 8, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6068806/>
30. Surface reconstruction and path planning for industrial inspection with a climbing robot | Request PDF - ResearchGate, accessed February 8, 2026, <https://www.researchgate.net/publication/261489715_Surface_reconstruction_and_path_planning_for_industrial_inspection_with_a_climbing_robot>