

# 面向全自主智能机器人的无标定图像视觉伺服控制研究

胡茂伟

(广东省深圳市悦动天下科技有限公司, 广东 深圳 518017)

**摘要:** 在利用全自主智能机器人检测、搬运目标物的过程中, 为了提高主机元件对机器人的伺服控制效果, 设计了一种无标定图像视觉伺服控制方法; 首先, 根据机器人轨迹的无标定估计结果, 计量目标物的位姿点, 推导出机器人无标定图像中的目标物检测与追踪条件; 按需连接视觉伺服控制器, 通过求解机器人无标定运动内积的方式, 计算图像视觉特征的伺服选择标准, 实现对机器人无标定图像视觉特征的伺服选择; 然后, 在无标定图像中定义雅克比矩阵, 根据图像视觉分割原则, 完成机器人图像角点的伺服匹配处理, 再通过确定强化控制参数的取值范围, 实现无标定图像的视觉伺服控制; 根据实验可知, 应用该方法可以解决智能机器人难以运动至标定区域的问题, 为提高伺服控制指令的执行有效性提供了保障。

**关键词:** 智能机器人; 无标定图像; 伺服控制; 位姿点; 运动内积; 雅克比矩阵; 视觉分割; 伺服匹配

## Research on Uncalibrated Image Visual Servo Control for Fully Autonomous Intelligent Robots

HU Maowei

(Guangdong Shenzhen Yuedong World Technology Co., Ltd., Shenzhen 518017, China)

**Abstract:** In the process of using fully autonomous intelligent robots to detect and track targets, in order to improve the servo control effect of host components on a robot, an uncalibrated image visual servo control method is designed. Firstly, the uncalibrated estimation results on the robot trajectory is used to measure the pose points of the target object, and derive the detection and tracking conditions of the target object in the uncalibrated image of the robot. As needed, the visual servo controller is connected, and the servo selection criteria for image visual features is calculated to solve the inner product of uncalibrated motion of the robot, and achieve the servo selection for the uncalibrated image visual features of the robot. Then, a Jacobian matrix is defined in the uncalibrated image, and the servo matching of robot image corners is completed according to the principle of image visual segmentation. Then, the visual servo control of the uncalibrated image is achieved by determining the range of reinforcement control parameters. Through the experiment, the designed method can solve intelligent robots have difficulty in moving to the calibration area, providing a guarantee for improving the effectiveness of servo control command execution.

**Keywords:** intelligent robot; no calibration image; servo control; pose point; inner product of motion; Jacobian matrix; visual segmentation; servo matching

### 0 引言

无标定图像视觉伺服控制是机器人感知和导航的关键技术之一。面向全自主智能机器人的无标定图像视觉伺服控制研究, 旨在利用机器学习、深度学习等技术, 使机器人能够从未知环境的图像中自动识别并估计相机内外参数, 实现自主的感知和导航能力。这种研究方法具有重要的理论和应用价值, 可以大大提高机器人的自主性和适应性, 推动机器人技术在智能制造、服务机器人、室内外导航等领域的应用<sup>[1]</sup>。

仲训泉<sup>[2]</sup>等人提出了一种基于自抗扰控制器的机器人

视觉伺服控制方法, 利用无模型理论和非线性自抗扰技术建立机器人“视觉-运动”空间映射, 设计不依赖雅可比建模的视觉反馈控制器。其中, 跟踪微分器用于跟踪视觉空间期望特征, 扩展状态观测器实现未建模雅可比反馈补偿, 非线性状态误差反馈规则得出机器人运动空间控制量。张德伟<sup>[3]</sup>等人提出一种利用图像单应性进行混合视觉伺服的策略, 通过估计机器人相对位姿, 实现准确到达目标位姿。针对机器人足式机构的间歇性运动对视觉反馈和伺服控制的准确性的影响, 通过分析足式机构运动学并建立移动速度与电机转速的映射关系, 使控制器可以更准确地调

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-01-29。

作者简介: 胡茂伟(1977-), 男, 硕士。

引用格式: 胡茂伟. 面向全自主智能机器人的无标定图像视觉伺服控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 169-175.

整机器人运动速度。同时，采用改进型自适应中值滤波算法提高位姿估计精度，并设计滑模控制器进行伺服控制。任百峰<sup>[4]</sup>等人该方法设计了一种基于 YOLO-V4 算法和 CSPDarknet53 网络结构的机器人无标定视觉伺服控制方法。通过使用 YOLO-V4 算法，可以在机器人无标定图像中检测和追踪目标物。CSPDarknet53 网络结构则用于提取图像特征，以便在无标定的情况下实现机器人的视觉伺服控制。

基于上述分析，本研究提出了一种面向全自主智能机器人的新型无标定图像视觉伺服控制方法。所谓无标定，可以理解为目标图像对象的不完全标记，在一幅运动图像中，保留视觉目标的模糊性，有利于主机元件快速构建机器人行为轨迹，从而为伺服控制器部件预留更长的执行时间，以便于控制器单元能够在求解运动内积条件的同时，确定现有伺服控制标准与机器人运动行为之间的适配性关系。本文设计的控制方法具有如下创新性与优势。

1) 图像视觉特征的伺服选择：通过求解机器人无标定运动内积的方式，本文方法能够计算图像视觉特征的伺服选择标准，从而实现对机器人无标定图像视觉特征的伺服选择。这种基于内积的伺服选择方法比传统的方法更为精确和稳定。

2) 目标物检测与追踪的条件推导：本文方法通过推导出机器人无标定图像中的目标物检测与追踪条件，可以帮助视觉系统根据目标物的特征进行准确的检测和追踪。这样可以降低由于环境变化或目标物变化导致的检测和追踪失效的问题。

3) 雅克比矩阵和角点的伺服匹配处理：通过无标定图像中定义雅克比矩阵，并基于图像视觉分割原则，完成机器人图像角点的伺服匹配处理。这有效地解决了在无标定条件下，对机器人图像角点进行准确匹配的问题，从而提高了视觉伺服控制的准确性和稳定性。

4) 强化控制参数的取值范围确定：通过确定强化控制参数的取值范围，使得伺服控制指令的执行更加有效。这样可以提高机器人准确运动至标定区域的能力，增强伺服控制指令的稳定性和鲁棒性。

## 1 全自主智能机器人无标定图像中的目标物检测与追踪

对于全自主智能机器人无标定图像中目标物的检测与追踪以机器人轨迹的无标定估计原则为基础，通过计量目标物位姿点的方式，得到具体的执行条件。

### 1.1 智能机器人轨迹的无标定估计

在伺服控制全自主智能机器人的过程中，图像处理、无标定目标物的检测与追踪都会产生一定的时间延迟，不但影响伺服控制指令的执行效率，还会影响主机元件对轨迹节点的控制能力。无标定估计处理则可以有效避免上述问题，在减小或弥补时延误差的同时，将更多的机器人轨迹节点融合在一起，一方面避免主机元件对无标定图像中的目标物做出错误检测，另一方面也能够适度提升伺服控

制指令的实时执行效率<sup>[5-6]</sup>。相较于目标物位姿点的直接统计，无标定思想更注重对视觉对象的捕捉，在运动图像中，要在追踪所有轨迹节点的同时，不产生标定物丢失问题，就必须对目标物所处轨迹位置进行实时预测。

令  $\chi$  表示智能机器人轨迹中的节点融合阈值，其取值属于  $(0, +\infty)$  的数值区间。对于阈值参数  $\chi$  的计算，参考公式 (1)：

$$\chi = \sqrt{(\alpha + 1) \times b_\alpha} \quad (1)$$

其中： $\alpha$  表示一个随机选择的、不为零的轨迹节点编号参数， $b_\alpha$  表示基于参数  $\alpha$  的节点对象融合结果。

在公式 (1) 的基础上，可将智能机器人轨迹的无标定估计结果表示为：

$$M = \delta \times \left(\frac{\hat{m}^2 \beta}{2}\right) \times (\chi^2 - 1) \times |\Delta N| \quad (2)$$

其中： $\delta$  表示机器人轨迹节点的无标定排列系数项， $\hat{m}$  表示无标定机器人运动图像中的像素特征， $\beta$  表示机器人运动图像中的像素点无标定序列估算值， $\Delta N$  表示运动图像中机器人轨迹节点的单位计数总量。主机元件所规定的无标定估计条件是有序性数值集合，每一个数据样点的符号都可以用来描述标定点与核心轨迹点之间的方向性关系。

### 1.2 无标定图像内的机器人目标物位姿点计量

依照无标定估计条件所推导的机器人目标物位姿点计量标准被主机元件认定为符合视觉伺服控制条件的轨迹节点计量标准。在垂直于视觉相机光轴中心的平面内，使用一幅无标定机器人运动图像就可以实现对平面内目标物的实时检测与追踪<sup>[7]</sup>。当已知光轴中心平面运动行为时，利用无标定图像内、视觉相机平面内可匹配的目标物位姿点，就可以计算出空间中任意机器人轨迹节点的三维位置。

无标定机器人图像平面、视觉相机平面分别存在于光轴中心平面两端，经过光轴中心平面的聚合处理后，视觉相机平面内的轨迹路径在无标定图像平面内完整显示出来，以便于主机元件可以获取待测的目标物对象<sup>[8]</sup>。具体的机器人目标物位姿点计量原理如图 1 所示。

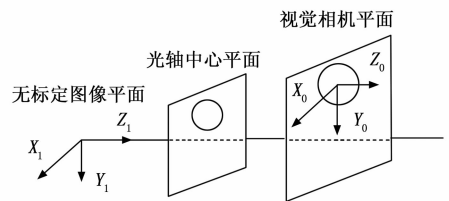


图 1 无标定图像内的机器人目标物位姿点计量原则

设视觉相机平面内的位姿点坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ ，无标定图像平面内的位姿点坐标为  $(X_1, Y_1, Z_1)$ ，且  $X_0 \neq X_1$ 、 $Y_0 \neq Y_1$ 、 $Z_0 \neq Z_1$ 。联立公式 (2)，可将无标定图像内的机器人目标物位姿点计量条件表示为：

$$B = \frac{(\bar{\epsilon}_x | X_1 - X_0 |) \cdot (\bar{\epsilon}_y | Y_1 - Y_0 |)}{M^2 \cdot (\bar{\epsilon}_z | Z_1 - Z_0 |)} \quad (3)$$

其中： $\bar{\epsilon}_x$  表示水平方向上的位姿坐标计量参数， $\bar{\epsilon}_y$  表示

垂直方向上的位姿坐标计量参数， $\bar{\epsilon}_z$  表示空间方向上的位姿坐标计量参数。机器人轨迹目标物在无标定图像、视觉相机平面内保持完全对应关系，所以主机元件在计量位姿对象时，必须对坐标参数进行分别统计。

### 1.3 目标物检测与追踪条件推导

全自主智能机器人目标物在无标定图像中的检测与追踪可以表示为三维仿射变换模型，主机元件的视觉伺服控制目标则是估算三维变换的准确性。所谓仿射变换是一种存在于三维坐标系之间的线性变换，其目的在于变换行为保持了机器人三维运动轨迹的平行性与平直性特点，经过连续不断的平移、旋转、缩放或翻转处理，实现在另一无标定图像内对机器人目标物的精准检测与追踪<sup>[9-10]</sup>。通常情况下，确定一个三维仿射变换模型，至少需要利用多个不共线的对应点，且在变换过程中，机器人运动轨迹的排列形式不可以发生变化。

在自主智能机器人无标定图像中，选择  $n$  个不重合的待测目标物对象，其定义式如下：

$$\begin{cases} v_1 = \varphi_1 \times \vec{V}_1 \\ v_2 = \varphi_2 \times \vec{V}_2 \\ \vdots \\ v_n = \varphi_n \times \vec{V}_n \end{cases} \quad (4)$$

其中： $\vec{V}_n$  表示与  $n$  个待测目标物对象相关的对应放射变换系数，且其取值同时属于  $(0, 1]$  的数值区间， $\varphi_n$  分别表示待测目标物节点处的坐标变换系数。

联立公式 (3)、公式 (4)，推导全自主智能机器人无标定图像中的目标物检测与追踪条件表达式为：

$$C = \frac{\varphi(v_1)^2 + (v_2)^2 + \dots + (v_n)^2}{B \times \operatorname{argmin} \frac{1}{|c\gamma|}} \quad (5)$$

其中： $\varphi$  表示无标定机器人运动图像中的轨迹节点追踪系数， $c$  表示目标物对象的视觉检测特征， $\gamma$  表示待测目标物节点的数值排序向量。

目标物检测与追踪仿射变换模型的推导存在于整个全自主智能机器人无标定三维图像中，且所选择目标物对象既不能保持完全水平也不能保持完全竖直的分布状态。

## 2 机器人无标定图像视觉特征的伺服选择

主机元件在操纵全自主智能机器人时，必须选择合适的伺服控制条件，本章节研究方向按照视觉伺服控制器连接需求，求解机器人无标定运动内积数值，再以此为基础，推导具体的图像视觉特征伺服选择标准。

### 2.1 视觉伺服控制器连接

视觉伺服控制器是记录全自主智能机器人运动轨迹图像的核心结构装置，由 PC104 控制主板、PC104 总线接口、处理器部件等多个模块单元共同组成。PC104 控制主板负责记录机器人视觉图像中轨迹节点的排列方式，具有较强的视觉感知能力，在机器人运动轨迹较为集中或轨迹节点相似程度相对较高的情况下，主板元件内记录的数据对象也就相对较多，这就表示主机元件在执行伺服控制指令时

所需筛选的无标定像素信息相等较多<sup>[11]</sup>。PC104 总线接口是一类伺服通路，负责将 PC104 控制主板与下级处理器部件串联起来，为无标定视觉像素信息的传输提供了稳定的通路环境。处理器部件包括 MCX314As 处理器与 FPGA 处理器，前者负责规划无标定机器人运动图像中的轨迹节点，具有较强的调节适应性，对于伺服等级不高的节点对象可以进行舍弃处理；后者负责协调机器人无标定图像中像素点之间的视觉对应性关系，以便于主机元件可以对机器人运动行为进行更好的伺服控制。完整的视觉伺服控制器连接模型如图 2 所示。

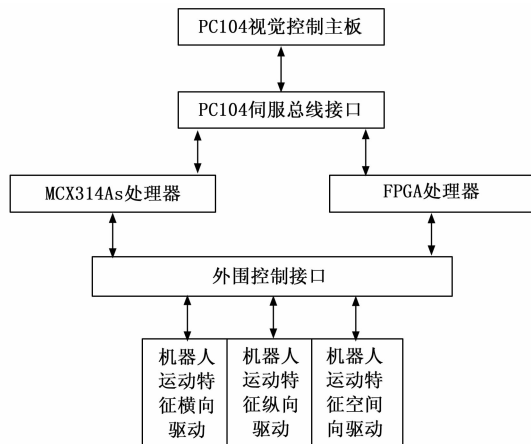


图 2 无标定机器人图像视觉伺服控制器连接模型

外围控制接口接受 MCX314As 处理器、FPGA 处理器的同步调节，对于伺服控制主机而言，这种连接关系能够实现主机元件对机器人横向、纵向与空间向运动特征的同步驱动，特别是在伺服控制指令的执行过程中，保障主机元件对机器人运动特征的同步驱动，才是准确提取无标定图像视觉像素信息的必要条件<sup>[12]</sup>。

### 2.2 机器人无标定运动内积求解

视觉伺服控制器对于机器人无标定运动内积的求解参考近圆性处理原则。所谓近圆性就是指将全自主智能机器人的实时运动轨迹等同于一个近似规范的圆形结构，视觉图像节点按照伺服控制标准依次排列在圆形轨迹之中，且每一个轨迹节点都代表一个不同的运动行为标记位置<sup>[13]</sup>。

在机器人运动图像中圈定一个半径水平大于机器人单位步长的圆形轨迹，规定圆心所在位置为  $O$  (后续计算过程中，用圆  $O$  代替该圆形轨迹)，在圆  $O$  的一侧半圆内选择一个视觉像素节点，定义其物理坐标为  $(X_2, Y_2, Z_2)$ ，在该半圆的另一侧半圆内选择两个步长值相等但位置不重合的轨迹位移向量  $A_1$  与  $A_2$ ，规定向量  $A_1$ 、向量  $A_2$  之间的物理夹角为  $\kappa$ ，其取值属于  $(0, \frac{1}{2\pi})$  的数值区间，具体划分标准如图 3 所示。在上述物理量的支持下，联立公式 (5)，推导机器人无标定运动内积的计算式如下：

$$S = \frac{C}{\sqrt{a^2 + \sin\kappa(A_2 - A_1)^2}} \times \left| \frac{(X_2, Y_2, Z_2)}{xyz} \right| \times \cos\kappa \quad (6)$$

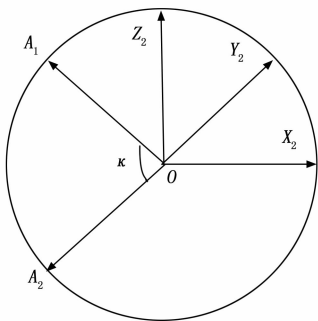


图 3 机器人运动内积的无标定划分

其中:  $a$  表示机器人运动轨迹的近圆性判定参数,  $\vec{x}$  表示机器人无标定图像中水平方向上的运动法向量,  $\vec{y}$  表示竖直方向上的运动法向量,  $\vec{z}$  表示空间方向上的运动法向量。

在伺服控制无标定图像视觉像素的过程中, 主机元件对于运动内积的计算要求轨迹位移向量与视觉像素节点坐标向量的定义方向必须相反, 这种设置规定保障了视觉像素点的分布规律性, 在伺服处理无标定图像的过程中, 能够避免对视觉目标的重复提取<sup>[14]</sup>。

### 2.3 图像视觉特征的伺服选择标准计算

图像视觉特征的伺服选择标准是主机元件伺服控制全自主智能机器人无标定图像视觉像素节点所遵循的唯一条件, 该项原则在规定主机元件对视觉目标取样标准的同时, 定义了完整的伺服控制规则, 因此全自主智能机器人无标定图像中视觉像素点的排列顺序直接影响伺服控制标准的执行效果。对于主机元件而言, 伺服控制全自主智能机器人无标定图像的主要目的是按照控制要求, 对运动轨迹节点进行调节, 从而使得机器人能够运动至标定区域之中<sup>[15-16]</sup>。

令  $\bar{F}$  表示依照无标定运动内积条件所定义的图像视觉特征,  $f$  表示无标定机器人运动图像中的轨迹节点伺服控制参数,  $o$  表示视觉目标取样系数,  $\eta$  表示近圆轨迹中运动节点的无标定划分准确度,  $\iota$  表示无标定图像中视觉像素点的排列顺序定义项,  $\tilde{d}$  表示运动轨迹节点分配特征,  $\lambda$  表示无标定图像视觉像素的伺服选择参数, 在上述物理量的支持下, 联立公式 (6), 推导全自主智能机器人无标定图像视觉特征的伺服选择标准计算式为:

$$D = \frac{\sqrt{|f\bar{F}|^{-o}}}{\sum_{\iota \rightarrow \infty} \eta \times \frac{d^{\tilde{d}}}{\lambda S}} \quad (7)$$

伺服控制是一项计划性执行条件, 主机元件按照伺服控制标准操作全自主智能机器人时, 为满足筛选无标定图像视觉像素节点的需求, 就必须保证机器人标定运动区域与主机元件所选定无标定图像区域的一致性。

## 3 无标定图像视觉伺服控制算法设计

无标定图像视觉伺服控制算法的设计以图像雅克比矩阵为基础, 在实施图像视觉分割处理的同时, 对机器人图像角点进行伺服匹配处理, 再联合相关指标系数, 求解强

化控制参数的具体数值水平, 本章节针对上述内容展开深入研究。

### 3.1 机器人无标定图像的雅克比矩阵定义

在全自主智能机器人无标定图像中, 雅克比矩阵是主机元件按照一阶偏导数标准所定义的数据矩阵集合, 其行列定义形式被称为雅克比行列式。对于主机元件而言, 其在定义视觉像素的伺服控制条件时, 雅克比矩阵充分体现了无标定轨迹样点与像素点对象之间的最优线性逼近关系<sup>[17]</sup>。因此, 从全局性角度来看, 机器人无标定图像的雅克比矩阵类似于多元函数的导数条件。无标定图像内, 机器人轨迹样点的雅克比行列式求解结果与雅克比簇的数值水平相等, 且随着轨迹曲线曲率逐渐趋于平稳, 每一个轨迹对象都可以嵌入矩阵内的一个数值样点之中。

令  $g$  表示全自主智能机器人无标定图像中依照视觉标准所定义的雅克比矩阵中的元素, 其定义式参考公式 (8):

$$g = \sqrt{\left(\frac{D}{2} \times \hat{G}\right)^2 + \left(\frac{\bar{h}}{\mu}\right)^2} \quad (8)$$

其中:  $\hat{G}$  表示无标定图像视觉像素点的雅克比行列式特征,  $\bar{h}$  表示视觉像素点的多元导向量均值,  $\mu$  表示视觉像素点的无标定判定系数。

在公式 (8) 的基础上, 可将机器人无标定图像的雅克比矩阵定义式表示为:

$$[\mathcal{S}] = \frac{1}{g^2} \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1\nu} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2\nu} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{\eta 1} & k_{\eta 2} & \cdots & k_{\eta \nu} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中:  $k$  表示机器人轨迹样点的雅克比行列项,  $\eta$  表示行系数最大值,  $\nu$  表示列系数最大值。

在雅克比矩阵中, 不存在完全相同的数据对象, 因此对于主机元件而言, 其在伺服控制全自主智能机器人无标定图像的视觉像素样点时, 如果在雅克比矩阵内选取符合运算需求的轨迹节点, 也就不会出现重复取样或是重复定义的情况。

### 3.2 图像视觉分割

全自主智能机器人无标定图像的视觉分割, 就是按照视觉特征将连续的运动图像分割成多个不连续部分, 以便于主机元件在定义伺服控制指令时, 能够更好掌握智能机器人在每一行为阶段的运动学特征。

在图像视觉分割的过程中, 上一小节中定义的雅克比矩阵起到了关键作用。在已知雅克比矩阵定义条件的情况下, 按照如下方式完成对图像的视觉分割:

1) 在雅克比矩阵内选取符合运算需求的样点, 每个像素区域内的视觉样点应具有相似或完全相同的像素特性, 为了简化图像处理和分析过程, 对无标定运动图像进行像素区域划分。依照机器人无标定运动图像的灰度等级条件, 将图像分成若干个像素区域。这一过程中应注意, 每一区域内的视觉样点必须具有相似或完全相同的像素特性<sup>[18]</sup>。

2) 在划分像素区域后, 考虑到关键视觉像素存在于无

标定图像中部, 可以提供关于机器人运动状态和目标物位置的重要信息。因此, 利用主机元件定义伺服控制指令, 优先对中部区域的样点组织进行集中提取和处理。

3) 针对包含非必要视觉像素的图像边缘区域, 由于其中的像素样点对于机器人的运动控制可能不是必需的<sup>[19]</sup>, 因此, 可以由主机元件选择是否提取这些像素样点组织。

4) 整合上述 3 个步骤中的提取结果, 完成图像视觉分割。

图 4 为主机元件针对机器人无标定图像所定义的三联视觉分割原则。

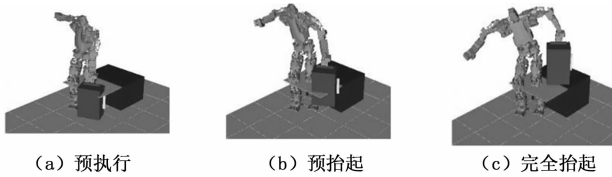


图 4 全自主智能机器人无标定图像的视觉分割

图 4 (a) 表示全自主智能机器人正处于预执行行为状态, 在该图像中, 主机元件能够获得与伺服控制指令相关的视觉像素预处理信息; 图 4 (b) 表示全自主智能机器人正处于预抬起行为状态, 在该图像中, 主机元件能够获得与伺服控制指令相关的视觉像素执行过程信息; 图 4 (c) 表示全自主智能机器人正处于完全抬起行为状态, 在该图像中, 主机元件能够获得与伺服控制指令相关的执行结果信息。

### 3.3 机器人图像角点的伺服匹配

角点是指极值点, 在全自主智能机器人无标定图像中, 可以将角点理解为视觉像素属性特别突出的节点对象。在制定伺服控制指令的过程中, 主机元件可以根据机器人运动行为自定义图像角点的属性, 因此, 无标定图像的视觉角点并不局限于某种特定的存在形式。

单纯从视觉像素匹配的角度来看, 机器人无标定图像角点既可以是两条运动轨迹线的交叉点, 也可以是相邻方向上不同视觉像素区域的融合样点<sup>[20]</sup>。本研究中, 首先在图像中选取一个像素点, 然后在该像素点周围的邻域内进行灰度值的变化检测。如果该像素点周围的灰度值变化明显, 则认为该像素点是一个角点。

所谓伺服匹配, 特指为满足伺服控制需求所制定的视觉像素点处理标准, 关于匹配是由查找、配准两部分共同组成的执行流程, 一般来说, 待伺服控制的轨迹节点越多, 主机元件所需匹配处理的视觉样点对象就越多。

随机选择  $n$  个不存在相互覆盖关系的图像角点对象, 其取值满足如下表达式:

$$K_1, K_2, \dots, K_n \in \mathcal{S} \quad (10)$$

利用公式 (10), 推导机器人图像角点的伺服匹配表达式如下:

$$H = \left(\frac{1}{\theta_j}\right) \times \prod_{k=1}^{+\infty} \frac{G_{\max} - G_{\min}}{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n} (\omega^2 - 1) \quad (11)$$

其中:  $j$  表示无标定图像内的视觉像素点配准系数,  $\theta$  表

示已定义视觉像素点的查找参数,  $G_{\max}$  表示伺服匹配向量的最大取值,  $G_{\min}$  表示伺服匹配向量的最小取值,  $\omega$  表示视觉样点融合度的伺服判定阈值。伺服控制指令的执行范围相对有限, 因此在实施机器人图像角点的伺服匹配处理时, 应划定单位无标定图像区域作为实际运算范围。

### 3.4 强化控制参数计算

强化控制参数是依照伺服控制标准所求解的参数指标, 面向全自主智能机器人的无标定图像的视觉像素进行处理时, 该项物理量的取值影响主机元件对视觉像素点的伺服处理能力。在无标定图像中, 伺服匹配区域包含了大量的视觉像素点, 但由于这些节点对象的排列方式并不固定, 所以在求解强化控制参数之前, 必须确定所涉及视觉像素点之间的水平、竖直与空间向间隔距离关系。设  $u_x$  表示伺服匹配区域内视觉像素点的水平向间隔距离参数,  $u_y$  表示视觉像素点的竖直向间隔距离参数,  $u_z$  表示视觉像素点的空间向间隔距离间隔距离参数, 且  $u_x \neq 0$ 、 $u_y \neq 0$ 、 $u_z \neq 0$  的不等式取值条件同时成立。在上述物理量的支持下, 联立公式 (11), 可将强化控制参数计算式表示为:

$$L = (\vec{p})^{-1} \div \left| \sqrt{\frac{\sum_{e=1}^l i \times (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)}{\vartheta \cdot H}} \right| \quad (12)$$

其中:  $\vec{p}$  表示基于机器人图像角点伺服匹配条件所定义的实际像素点排列向量,  $\omega$  表示伺服控制指令的执行等级判定参数,  $e$  表示等效控制距离定义值,  $l$  表示无标定机器人运动图像的视觉控制特征,  $\vartheta$  表示视觉像素样点的空间性标定阈值。主机元件对于全自主智能机器人无标定图像视觉像素点的伺服控制并不局限于一种或几种执行形式, 因此即便是在机器人运动行为无法保持固定状态的情况下, 控制指令也能够得到较为可靠的执行结果。

## 4 实验分析与研究

选择面向全自主智能机器人的无标定图像视觉伺服控制方法、未知雅可比建模的机器人视觉伺服自抗扰控制方法、基于 YOLO-V4 的机器人无标定视觉伺服控制方法展开实验, 根据不同方法作用下机器人实时节点与标定区域边界的间隔距离, 来判断各方法的具体控制能力。

### 4.1 原理与准备

实验基于 Gazebo 平台完成, 其为开源机器人仿真平台, 可以用于模拟机器人在各种环境下的视觉伺服控制。使用 Gazebo 内置的建模工具及导入自定义模型, 创建一个包含标定区域的仿真场景。在场景中添加一个尺寸为长 2.5 m、宽 2.5 m 的正方形区域作为实验标定区域。标定场景如图 5 所示。实验设置机器人初始速度为 0.1 m/s, 最大速度为 0.5 m/s; 视觉传感器分辨率设为 1 280×720 像素; 图像传输延迟设定为 100 ms。

实验过程中, 如果机器人视觉图像内机器人实时所处节点存在于标定区域内, 则表示在该方法作用下, 主机元件对机器人视觉图像的伺服控制能力较强, 机器人设备的智能化受控水平相对较高; 如果机器人视觉图像内机器人



图 5 标定场景图

实时所处节点存在于标定区域外部，则表示在该方法作用下，主机元件对机器人视觉图像的伺服控制能力相对较弱，机器人设备的智能化受控水平也就相对较低。

出于公平性考虑，改变实验方法时，机器人设备运动状态及相关设备元件的连接形式始终保持一致。

### 4.2 实验步骤

本次实验的具体实施流程如下：

1) 在主机元件中输入面向全自主智能机器人的无标定图像视觉伺服控制算法（实验组）的执行程序，并设置初始参数如下：视觉伺服控制器控制周期为 200 ms；速度反馈增益为 0.1；位置反馈增益为 0.5；雅克比矩阵定义图像角点数量为 8 个。运行后，记录在该方法作用下，机器人实时所处节点在视觉图像中的位置。

2) 在主机元件中输入未知雅可比建模的机器人视觉伺服自抗扰控制方法（对照 A 组）的执行程序，并设置初始参数如下：自抗扰控制器参数线性状态反馈增益为 0.1，扩张状态观测器增益为 0.05；环境摩擦系数为 0.5；环境初始扰动为 0.1。运行后，记录在该方法作用下，机器人实时所处节点在视觉图像中的位置。

3) 在主机元件中输入基于 YOLO-V4 的机器人无标定视觉伺服控制方法（对照 B 组）的执行程序，并设置初始参数如下：使用 CSPDarknet53 作为骨干网络，添加 YOLO-V4 算法以实现目标检测和定位，学习率为 0.001，训练批次大小为 32，训练迭代次数为 20 000 次，验证频率为每 1 000 次迭代验证一次。运行后，记录在该方法作用下，机器人实时所处节点在视觉图像中的位置。

4) 分别将实验组、对照 A 组、对照 B 组节点位置与标定区域进行对比，并根据具体情况总结实验规律。

### 4.3 数据处理

图 6 记录了实验组、对照 A 组、对照 B 组机器人实时所处节点在视觉图像中的具体位置。对应图 6 中的实验结果，统计各个视觉图像点与标定区域边界的距离（如

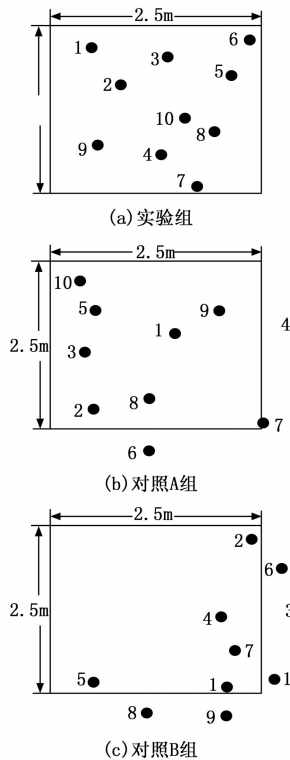


图 6 机器人实时所处节点在视觉图像中的位置

果视觉图像点存在于标定区域内，则将节点与区域边界的距离记为 0 cm)。

分析表 1 可知，与实验组统计结果相比，对照 A 组第 4 号、第 6 号、第 7 号图像点存在于标定区域外部，表示 A 对照组方法的应用，并不能保证机器人完全运动至标定区域内部；对照 B 组第 3 号、第 6 号、第 8 号、第 9 号、第 10 号图像点存在于标定区域外部，表示 B 对照组方法的应用，也不能保证机器人完全运动至标定区域内部。

表 1 间隔距离统计 cm

视觉图像点编号	实验组	对照 A 组	对照 B 组
1 号	0	0	0
2 号	0	0	0
3 号	0	0	14.2
4 号	0	1.3	0
5 号	0	0	0
6 号	0	6.1	6.8
7 号	0	0.8	0
8 号	0	0	3.5
9 号	0	0	4.4
10 号	0	0	2.7

实验结论：应用面向全自主智能机器人的无标定图像视觉伺服控制方法，可以有效解决智能机器人无法运动至标定区域的问题，能够提升主机元件对图像点的伺服控制能力，与局部最优重构、改进卷积神经网络型图像目标控制方法相比，更有助于提升机器人的智能化水平。

## 5 结束语

面向全自主智能机器人的无标定图像视觉伺服控制方法的设计以检测与追踪目标对象为基础, 在计量机器人目标位姿点的同时, 选择较为适宜的视觉伺服控制器部件, 且由于图像角点的伺服匹配条件始终保持不变, 所以强化控制参数的计算结果并不会出现较大偏差。实用性方面, 应用面向全自主智能机器人的无标定图像视觉伺服控制方法, 不会造成机器人设备未能运动至标定区域的问题, 符合提升机器人智能化水平的实际应用需求, 在增强主机元件对图像点的伺服控制能力方面, 具有突出作用价值。

### 参考文献:

- [1] 黄正军, 王桂锋, 施卢丹. 运用图像轨迹规划的无标定机器人视觉伺服控制 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41 (3): 402-408.
- [2] 仲训泉, 仲训昱, 彭侠夫, 等. 未知雅可比建模的机器人视觉伺服自抗扰控制方法 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2022, 61 (2): 231-238.
- [3] 张德伟, 刘海涛, 王仙业, 等. 一种足式移动机器人的混合视觉伺服控制方法 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41 (12): 1805-1814.
- [4] 任百峰. 基于 YOLO-V4 的矿用巡检机器人无标定视觉伺服控制系统 [J]. 煤炭技术, 2022, 41 (10): 216-218.
- [5] 谢 啸, 张 涵, 汤自林, 等. 基于动态系统稳定估计器的机器人变刚度轨迹规划 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (4): 1250-1258.
- [6] 王新杰, 张 莹, 张东波, 等. 自主移动机器人路径规划中的点云噪声处理 [J]. 智能系统学报, 2021, 16 (4): 699-706.
- [7] 张 磊, 徐孝彬, 曹晨飞, 等. 基于动态特征剔除的图像与点云融合的机器人位姿估计方法 [J]. 中国激光, 2022, 49 (6): 58-69.
- [8] 李荣华, 董根基, 薛豪鹏, 等. 改进 PointNetLK 的点云智能配准与位姿图优化方法 [J]. 宇航学报, 2022, 43 (11): 1557-1565.
- [9] 洪 锋, 鲁昌华, 蒋薇薇, 等. 基于时空一致性约束视频目标

(上接第 168 页)

- [6] 马跃坤, 李再韩, 赵彦旭, 等. 无砟轨道板表面裂缝的红外热成像检测方法 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (3): 579-587.
- [7] 骆燕燕, 潘晓松, 马 旋, 等. 红外热成像技术在电连接器插拔磨损检测中的应用研究 [J]. 工程设计学报, 2021, 28 (5): 615-624.
- [8] 周克虎, 雷 涛, 罗 刚. 一种基于时域滤波的红外序列图像去噪算法 [J]. 应用光学, 2021, 42 (3): 474-480.
- [9] 靳亚晴, 董瑞芳, 权润爱, 等. 门控下 InGaAs/InP 单光子探测器用于符合测量的时域滤波特性研究 [J]. 物理学报, 2021, 70 (7): 126-134.
- [10] 冯 旭, 崔小乐, 魏 琛, 等. 低系统开销的多 TSV 子阵列联合数据传输方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33 (4): 649-654.

- 车辆的检测与跟踪算法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36 (3): 105-112.
- [10] 马 东, 刘超杰, 王立玲, 等. 基于精确背景运动补偿的机器人运动目标检测与跟踪 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (3): 20-27.
- [11] 许文波, 魏泽宇, 孔 伟, 等. PMSM 伺服系统线性自抗扰控制器的参数整定 [J]. 控制理论与应用, 2022, 39 (1): 165-178.
- [12] 乔丽霞, 王丽娟, 刘清涛, 等. 基于 CMAC 控制器的可变幅液电伺服系统优化及验证 [J]. 中国工程机械学报, 2022, 20 (2): 156-160.
- [13] 段大卫, 马宏忠, 杨启帆, 等. 粘滞阻力下交流 GIL 中线形颗粒运动行为研究 [J]. 电机与控制学报, 2021, 25 (11): 83-92.
- [14] 陈彦羽, 关立文, 常佳豪, 等. 基于 RTCP 功能的五轴联动伺服匹配优化 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2021, 61 (10): 1115-1123.
- [15] 朱宏辉, 王嘉豪, 朱 轶. 基于特征点密度峰值的视觉伺服目标选择方法 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (8): 2350-2357.
- [16] 王俊奇, 郑 刚, 付永忠, 等. 基于 AMESim 的比例方向阀与直驱式伺服阀故障特性分析 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (15): 198-202.
- [17] 王 腾, 张承瑞, 陈齐志, 等. 利用增广雅可比矩阵的冗余机械臂逆运动学求解算法 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (16): 6752-6757.
- [18] 张 震, 张照崎, 朱留存, 等. 一种基于 Shi-Tomasi 和改进 LBP 的特征匹配及目标定位快速算法 [J]. 吉林大学学报 (理学版), 2021, 59 (5): 1171-1178.
- [19] 白雪飞, 韩晓静, 王文剑. 一种视觉显著性引导的模糊聚类图像分割方法 [J]. 郑州大学学报 (理学版), 2022, 54 (2): 1-7.
- [20] 杨 勇, 郭 玲, 叶阳东. 全变分流边与 M~2GGD 相结合的自然图像分割方法 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57 (11): 202-210.
- [11] 张维星, 党超群, 张锁平, 等. 基于多传感器融合的波浪谱数据获取与传输方法研究 [J]. 海洋与湖沼, 2023, 54 (3): 645-652.
- [12] 董顶峰, 黄文新, 卜飞飞, 等. 圆筒型反向式横向磁通直线电机定位力补偿二阶自抗扰控制器位置控制 [J]. 电工技术学报, 2021, 36 (11): 2365-2373.
- [13] 郭 伟, 石 波, 张益林. 加速器驱动次临界系统堆芯功率的自抗扰控制 [J]. 动力工程学报, 2022, 42 (3): 242-248.
- [14] 李 枫, 蓝益鹏. 电励磁直线同步电机磁悬浮系统自抗扰控制 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48 (9): 8-13.
- [15] 胡近朱, 高 强, 侯润民, 等. 侦察车云台伺服系统的改进自抗扰控制 [J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41 (1): 65-69.
- [16] 田黄田, 谢 源, 施铃丽. 基于改进差分算法的变桨 ADRC 参数优化 [J]. 计算机仿真, 2020, 37 (3): 78-82.