

基于间接D-H参数辨识与空间插值的六轴机械臂精度复合补偿技术研究

陈鹏飞¹, 陈东生^{1*}

(1.中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川省绵阳市, 621999;

* 通讯作者, 13518311304@163.com)

摘要: 六轴机械臂出厂时的运动学参数存在误差且用户难以修改, 本文提出了一种基于实验数据的间接参数辨识和修正精度补偿方法, 通过对实验数据的可视化与分析, 观察到末端定位误差呈现显著的空间分布规律, 其大小与方向均表现出对末端笛卡尔坐标的强依赖性。基于上述位姿-误差映射关系, 可以对机械臂的运动学参数进行间接修正, 结合空间插值补偿技术, 建立了一种复合精度补偿方法。设计了机械臂末端误差测量系统, 测量结果表明, 单独进行参数修正时, 定位误差由原来的13mm降低到0.5mm左右; 单独进行空间插值补偿时, 误差降低到0.2mm左右, 且空间网格划分越小, 误差越小; 使用结合两者的复合补偿方法, 能够进一步将误差降低到0.01mm左右。

关键词: 六轴机械臂; 精度补偿; 参数修正; 空间插值

引言

随着工业4.0和智能制造的推进, 自动化生产线的的需求大幅增加, 机械臂被广泛应用于各种行业生产中。精度补偿技术的出现主要源于工业机器人在复杂制造环境中对高精度操作的迫切需求 [1-3]。在某国防高精密设备的装配过程中, 要求使用的六轴机械臂末端定位误差控制在0.1mm之内, 但是市面上可以购得的机械臂末端绝对定位误差大部分在3mm左右, 无法满足需求, 必须使用精度补偿技术对末端误差进行补偿修正, 提高机械臂的定位精度。

目前主流的精度补偿技术主要分为离线标定方法和在线补偿方法两种 [4]。离线标定的主旨是提前建立机械臂的误差模型进行补偿, 主要可以分为运动学标定和非运动学标定。运动学标定基于机器人的D-H (Denavit-Hartenberg) 参数 [5]来描述各杆件的四个基本运动学参数, 王蕾等 [6-7] 使用传统运动学标定方法, 建立机械臂的D-H模型, 根据规划好的采样点来取得定位误差数据进行参数辨识, 也就是建立运动学模型中的各种参数与定位误差之间的映射, 最后根据映射关系进行误差补偿。然而, 机器人定位误差的成因复杂, 影响因素众多且相互耦合, 使得建立一个涵盖所有误差源的精确模型十分困难。因此许多学者致力于构建通用的模型预测误差, 通过建立末端定位误差与转角或位姿的映射关系来实现。周炜等 [8] 通过神经网络、空间插值等非运动学标定方法对位姿误差进行估计与补偿。非运动学标定因其不需要建立准确的误差模型, 因此不受各种误差来源的影响和约束, 更具普遍性。

本文提出了一种结合间接D-H参数辨识与空间插值的复合补偿方法。在测量空间网格点误差的过程中, 根据测得的实验数据对机械臂的D-H参数进行间接补偿, 减小了网格点的误差值, 使得之后的空间插值精度进一步提高, 满足了精密装配的设计要求。D-H参数修正从几何因素上面来减少误差的影响, 复合插值补偿则从综合方面进行补偿。

1. 参数修正与空间插值复合补偿方法

1.1. 定位精度影响因素分析

机器人的末端绝对定位精度受多种因素的影响, 包括D-H参数偏差等几何因素, 工作温度、系统误差等非几何因素。目前主流的运动学标定方法通过建立复杂的运动学模型 [9-10], 对D-H参数进行修正, 但是未考

虑非几何因素的影响，而且补偿效果严重依赖于参数测量点的位置与分布，导致补偿效果难以保证。

1.2. D-H参数辨识与修正方法

传统的参数辨识方法通过建立复杂的运动学模型，采集误差数据，最终通过数值优化等方法辨识参数，这种方法只考虑了几何因素的影响。同时很多厂家在生产机械臂时将运动学参数内置于控制系统之中，用户难以修改，进一步限制了传统参数辨识方法的应用。

本文提出了一种基于位姿-误差映射关系来间接辨识与修正运动学参数的方法。在使用激光跟踪仪对机械臂的实际误差进行测量时发现，末端点位误差呈现出显著的空间分布规律，其大小与方向和机械臂末端的空间位置坐标有强相关性。由于机械臂的末端坐标是由机械臂的D-H参数所决定，所以本质上这种误差的出现是因为D-H参数存在误差。依据对实验数据的分析，我们无需建立复杂的运动学参数模型，直接找出了机械臂定位误差与运动学参数之间的映射关系，并依照这种映射关系得出对应位置时的误差，依靠这个误差对运动学参数进行修正。

1.3. 空间插值补偿法与最优网格划分

为补偿非几何因素导致的定位误差，采用基于误差相似度的空间插值补偿法。该方法将机器人工作空间以固定步长划分为立方体网格。对于任意目标点，基于其所属最小网格单元八个顶点的已知定位误差，插值得到该点的误差估计值。最后，将此误差估计值反向应用于目标点的理论末端坐标，以提升其定位精度。

根据机械臂的运动学模型建立的机械臂位置误差模型如公式(1)所示，其中向量 n, o, a 为机械臂末端位置向量，向量 δ, p, d 为关于机械臂运动学参数的向量表达式，任一点的位置误差 Δp 可表示为机器人各杆件运动学几何参数的三角函数组合。对于六轴转动机械臂，只有关节转角为变量，其他几何参数都为常量。因其误差模型由三角函数构成，在工作空间内连续且平滑，故当两点之间对应的关节转角相差足够小时，其位置误差之间必然也存在相似性，并且转角相差越小，相似性越高。误差相似性原理是之后进行精度补偿的理论基础。

$$\mathbf{d}^n = \begin{bmatrix} dx^n \\ dy^n \\ dz^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \left[\delta_i^{AT} (\mathbf{p}_{i+1}^u \times \mathbf{n}_{i+1}^u) + \mathbf{d}_i^{AT} \mathbf{n}_{i+1}^u \right] \\ \sum_{i=1}^n \left[\delta_i^{AT} (\mathbf{p}_{i+1}^u \times \mathbf{o}_{i+1}^u) + \mathbf{d}_i^{AT} \mathbf{o}_{i+1}^u \right] \\ \sum_{i=1}^n \left[\delta_i^{AT} (\mathbf{p}_{i+1}^u \times \mathbf{a}_{i+1}^u) + \mathbf{d}_i^{AT} \mathbf{a}_{i+1}^u \right] \end{bmatrix} \quad (1)$$

空间插值旨在通过已知空间数据点构建函数关系，并通过拟合已知点来预测区域内任意位置的值。反距离加权法 (IDW) 是常用方法，其核心是：待插值点的权重与已知点距离成反比 (距离越近，权重越大)。IDW 计算高效、精度良好，若已知目标点邻近相似误差向量，即可用 IDW 插值估算其定位误差。为优化插值效果并便于空间划分，将工作空间按固定步长离散为立方体网格，以顶点为采样点。工作空间内任意点的定位误差，可由其所在网格的八个顶点误差插值获得。

如图1所示，定义网格的八个顶点为 $K_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ ，其对应的理论坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) ，通过激光跟踪仪测得的实际坐标为 (X_i', Y_i', Z_i') ，将实际坐标与理论坐标相减，得到网格点的绝对定位误差为 $(\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i)$ 。

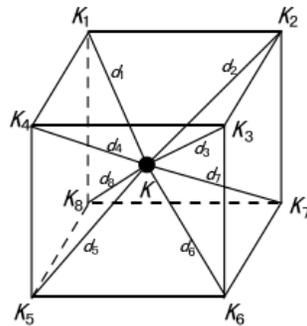


图1 空间立方体网格插补示意图

对于网格中任意一点 $K(X, Y, Z)$ ，它的绝对定位误差预测方法如下：

1) 计算8个网格点对于 K 点的影响权值，采用反距离加权法，根据网格点与 K 点的距离 d_i 的大小反向求取权值 q_i ，如下式：

$$q_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{j=1}^8 \frac{1}{d_j}} \quad (2)$$

其中：

$$d_i = \sqrt{(X - X_i')^2 + (Y - Y_i')^2 + (Z - Z_i')^2} \quad (3)$$

2) 预测 K 点的定位误差。对8个点的误差进行加权平均，计算出 K 点在各个方向上的定位误差。

$$\begin{cases} \Delta X = \sum_{i=1}^8 \Delta X_i q_i \\ \Delta Y = \sum_{i=1}^8 \Delta Y_i q_i \\ \Delta Z = \sum_{i=1}^8 \Delta Z_i q_i \end{cases} \quad (4)$$

利用预测的 K 点误差修正理论坐标，并驱动机械臂运动，以提高定位精度。

根据误差相似性原理，网格点划分的越小，两个点之间的位置越接近，机械臂的关节转角也越接近，那么这些点之间的误差越接近。因此在进行网格划分时，网格划分的越小，那么插值补偿得到的预测误差越接近实际误差。但是在实际应用中，网格划分的越小，所需要测量的网格点误差数据越多，需要的计算量越大，因此需要在计算量与预测效果之间找到一个平衡点，在网格划分尽量小的前提下关注计算量的大小。

1.4. 精度复合补偿方法

将前文提出的参数修正方法与空间插值补偿法相结合，提出了一种复合补偿方法。在传统空间插补法中，将空间划分为若干网格，并测量各个网格点的误差进行插值补偿，现在提前对网格点误差进行参数修正，减小网格点的误差，再使用修正后的网格点进行插值补偿，可以进一步提高空间插值补偿的效果，使预测的误差更加接近实际误差，提高绝对定位精度。

2. 基于位姿-误差映射关系的参数辨识

为了辨识机械臂的运动学参数，首先需要验证末端定位误差与末端位置之间映射关系的正确性，建立一个实验平台来对误差数据进行测量与处理。设置不同的网格大小，分别验证映射关系的准确性与通用性。

2.1. 参数辨识平台搭建

实验平台由机械臂，激光跟踪仪，机械臂上位控制机，激光跟踪仪上位控制机和算法控制上位机组成，如图2所示。



图2 参数辨识平台意图

机械臂选用6轴转动机械臂，工作空间半径为1300mm，它的上位机自带操作系统，可以进行可视化编程，同时支持外部数据通信，便于控制算法的开发。机械臂目前的绝对定位误差为1~3mm，无法满足工作要求，目标为使用精度补偿算法使误差降低为0.1mm左右。

测量仪器选用激光跟踪仪，测量精度可以达到0.001mm，满足设计的测量要求。测量的空间范围大，涵盖机械臂的工作空间，反射镜能够方便安装在机械臂的末端与各类平面上，方便测量。

2.2. 参数辨识方法

为了验证映射关系的准确性与通用性，在机械臂的工作空间内部划分了两个空间立方体，分别测量以不同步长划分网格时的映射关系是否成立。以机械臂的基座原点为零坐标，大立方体的顶点坐标为(300, -100, 300)，边长500mm，间隔100mm划分网格，共测量216个网格点的误差值；小立方体在大立方体内部，顶点坐标为(500, 100, 500)，边长为100mm，间隔10mm划分网格，共测量1331个网格点误差值，如图3所示。

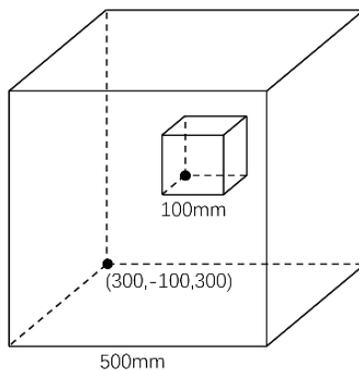


图3 大网格与小网格划分示意图

对步长为100mm的大网格点误差进行测量，在X轴、Y轴、Z轴方向上的误差如图4所示，X轴方向上的误差范围在-1mm~1.5mm，Y轴方向上的误差在0.5mm~2.5mm，Z轴方向上的误差在-3mm~-1mm。

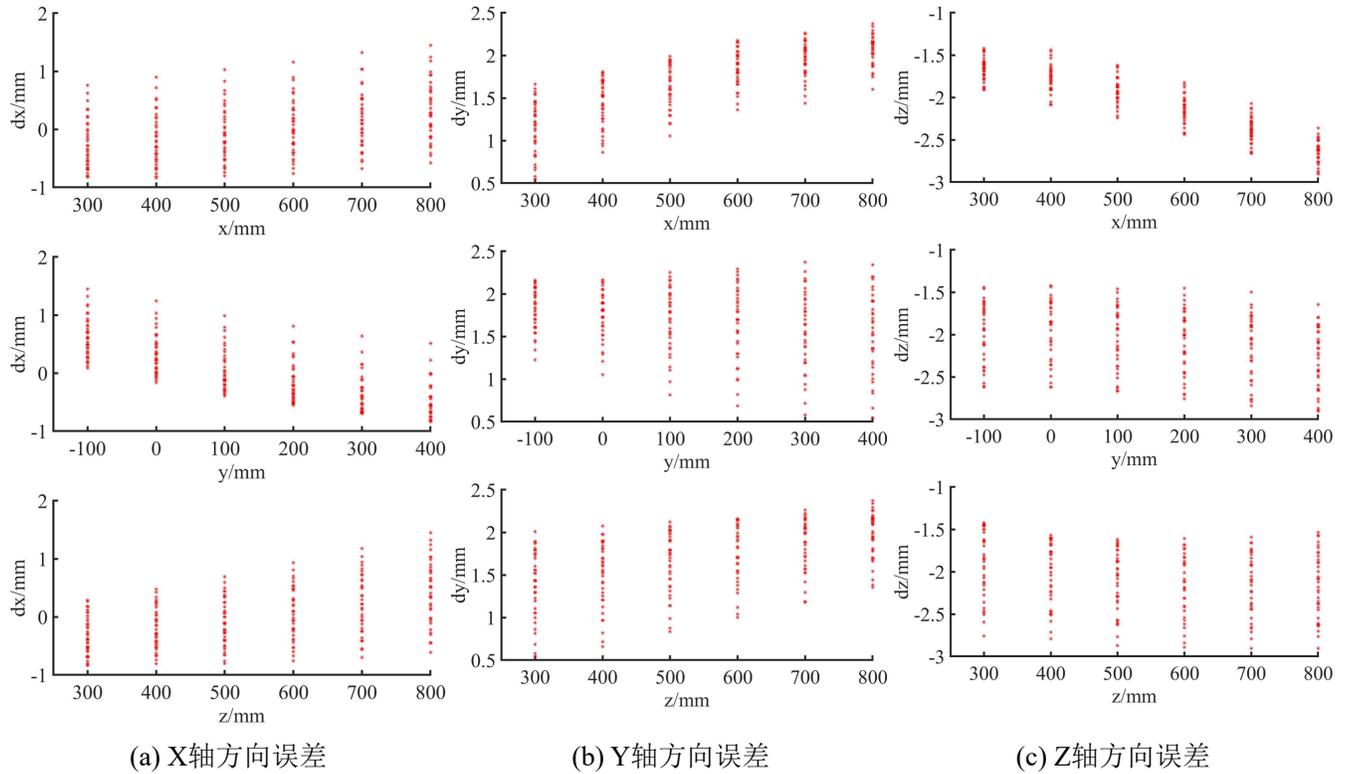


图4 大网格点误差随末端坐标变化

通过观察可以看出X轴方向上的误差与机械臂末端的y坐标值呈明显的线性映射关系；Y轴方向上的误差与机械臂末端的x坐标呈明显的线性映射关系；Z轴方向上的误差与机械臂末端的x坐标呈明显的线性映射关系。对这种线性关系进行拟合，就可以根据末端坐标对运动学参数进行修正，拟合曲线如图5所示。

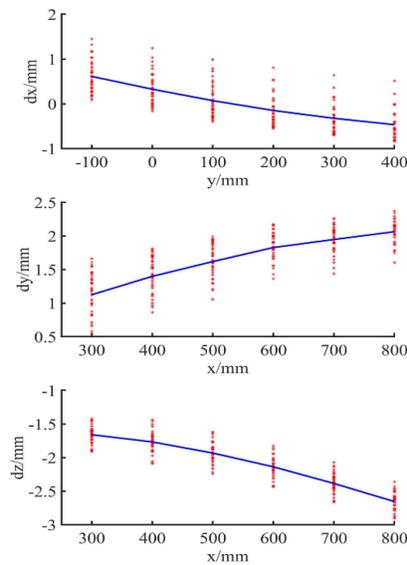


图5 大网格点定位误差与末端坐标拟合曲线

接着验证在小网格划分时映射关系是否成立。对步长为10mm的小网格点误差进行测量，在X轴、Y轴、Z轴方向上的误差如图6所示，X轴方向上的误差范围在-0.5mm~0.5mm，Y轴方向上的误差在1.3mm~2mm，Z轴方向上的误差在-2.5mm~-1.5mm。

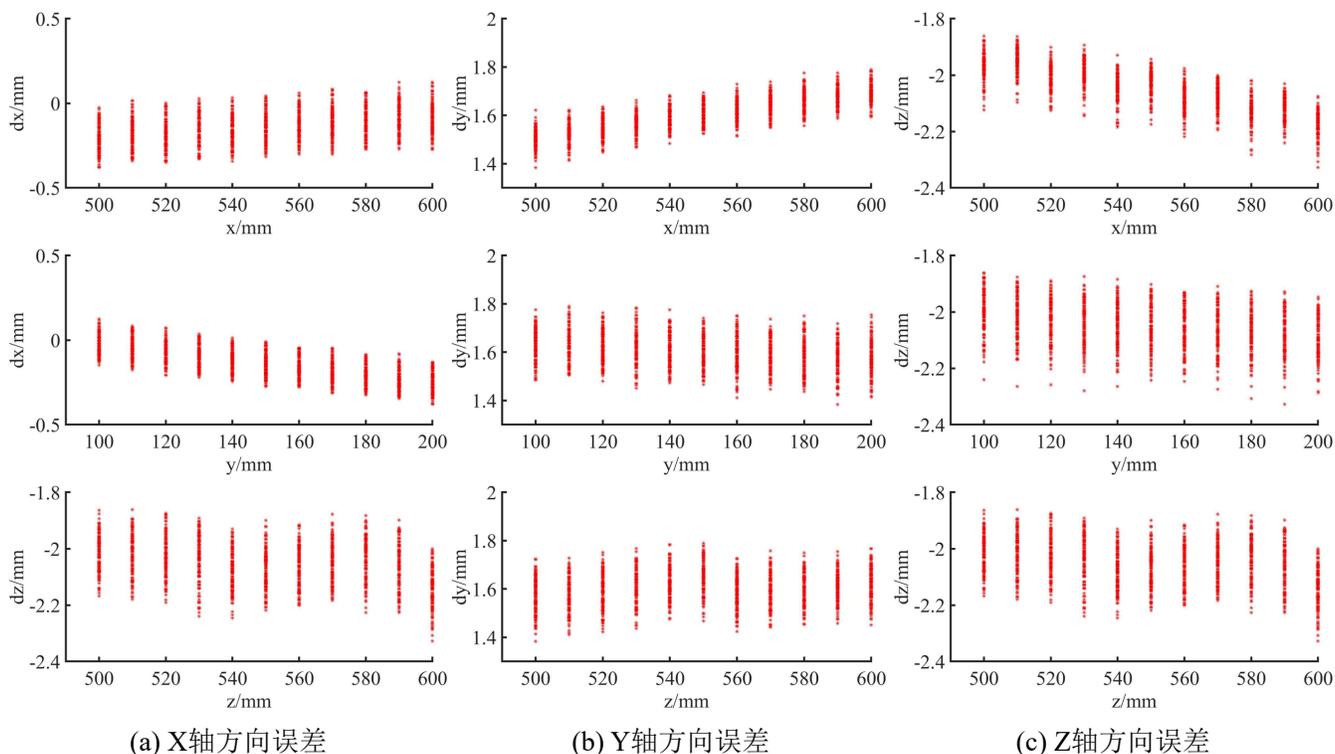


图6 小网格点误差随末端坐标变化

通过观察可以看出，在小网格划分时，X轴、Y轴、Z轴方向上的误差同样符合大网格划分时的映射关系，且拟合曲线与大网格的拟合曲线也相符合。根据末端坐标对运动学参数进行修正，拟合曲线如图7所示。

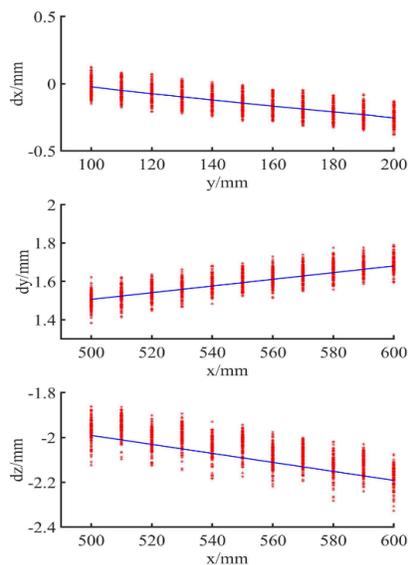


图7 小网格点定位误差与末端坐标拟合曲线

3. 精度补偿实验及分析

通过提前对网格点误差进行参数修正，可以进一步提高空间插值补偿的效果，使预测的误差更加接近实际误差，提高绝对定位精度。为了测量机械臂末端的坐标值，使用之前搭建的参数辨识平台进行测量，分别

记录对比未进行补偿时的误差值与使用参数修正后的误差值，验证参数修正方法的可行性；在不同大小网格划分下未进行补偿时的误差值与直接进行插值补偿的误差值，验证空间插值补偿的精度补偿效果，同时验证不同网格大小划分对空间插值补偿的影响；最后对比未进行补偿时的误差值与先进行参数修正后的插值补偿综合补偿后的误差值，验证提出的复合精度补偿方法的绝对定位精度提升效果。

3.1. 参数修正精度补偿实验

使用拟合出的误差与位置之间的映射关系对运动学参数进行修正，将修正后的网格点误差数据与未修正时的误差数据进行对比，验证参数修正方法对精度补偿的效果。

根据拟合曲线对运动学参数进行修正后，再次测量网格点误差，如图8所示，可以观察到误差得到一定程度的减小，X轴方向上的误差最大值由1.5mm减小到0.6mm，Y轴方向上的误差最大值由2.5mm减小到1mm，Z轴方向上的误差最大值由3mm减小到0.5mm。

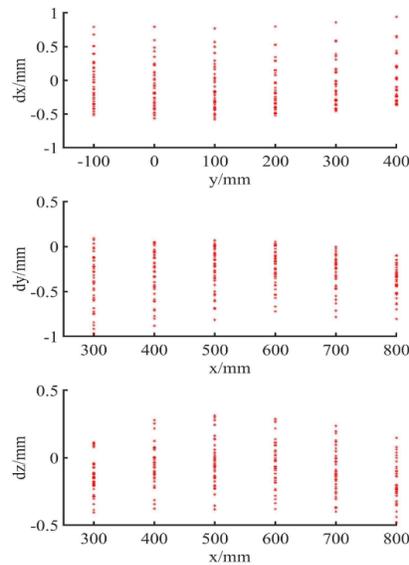


图8 参数修正后定位误差大小

3.2. 空间插值精度补偿实验

已知空间插值补偿的补偿效果与空间网格的大小划分密切相关，设计实验验证补偿效果与网格大小的关系。在机械臂的工作空间内部划分了两个空间立方体，大立方体边长500mm，间隔100mm划分网格；小立方体在大立方体内部，边长为100mm，间隔10mm划分网格。分别在两个网格内随机取40个点测量其补偿后与未补偿时的误差值，验证网格大小的划分对空间插值效果的影响。

以100mm步长划分大网格时，随机在大立方体(500500500)内部取40个点，分别测量未补偿时的误差，和使用空间插值补偿的误差，两种情况下的误差大小如图9所示。

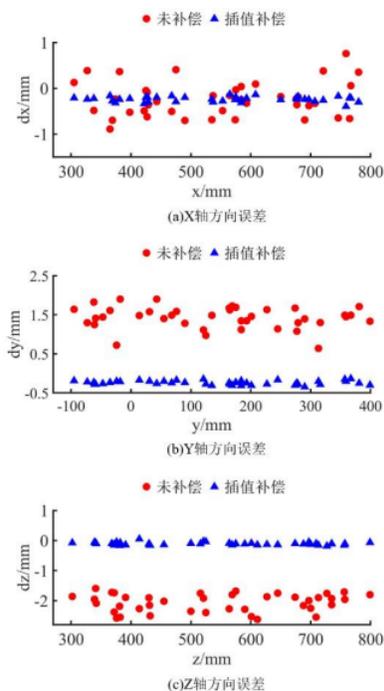


图9 大网格划分时的误差大小对比图

分别计算未补偿时和进行空间插值补偿时的平均误差大小，如表1所示，可以看出当网格划分过大时，X轴方向上的平均误差由-0.4mm左右降低到-0.2mm左右，Y轴方向上的误差由1.4mm左右降低到了-0.2mm左右，Z轴方向上的误差由-2mm左右降低到了-0.1mm左右。

表1 大网格划分时平均误差对比表

补偿方法	dx	dy	dz
未补偿	-0.4349	1.424	-2.064
空间插值	-0.2361	-0.2389	-0.1054

以10mm步长划分小网格时，随机在小立方体(100100100)内部取40个点，分别测量未补偿时的误差，和使用空间插值补偿的误差，两种情况下的误差大小如图10所示。

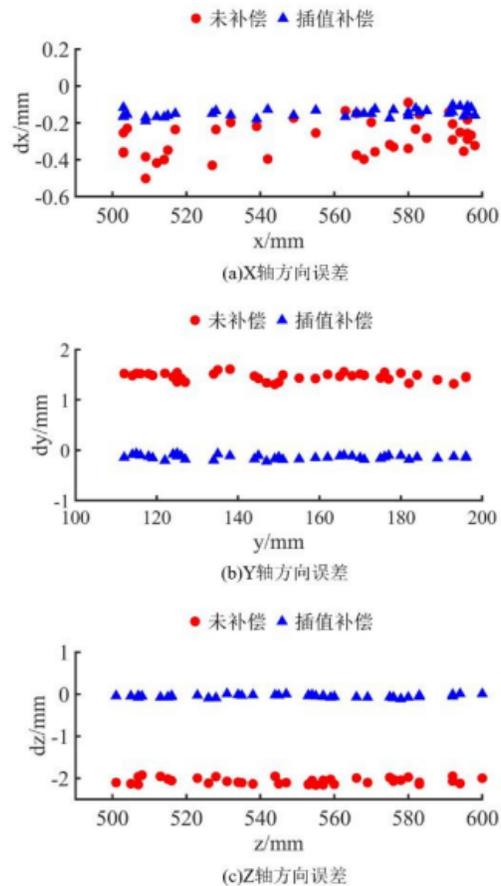


图10 小网格划分时的误差大小对比图

分别计算未补偿时和进行空间插值补偿时的平均误差大小，如表2所示，可以看出当网格划分较小时，精度补偿效果更好，X轴方向上的平均误差由-0.4mm左右降低到-0.15mm左右，Y轴方向上的误差由1.4mm左右降低到了-0.1mm左右，Z轴方向上的误差由-2mm左右降低到了-0.05mm左右。

表2 小网格划分时平均误差对比表

补偿方法	dx	dy	dz
未补偿	-0.3831	1.462	-2.061
空间插值	-0.1466	-0.1353	-0.04813

3.3. 精度复合补偿实验

为了达到最好的精度补偿效果，结合参数修正方法与空间插值方法。在小网格划分的情况下，对所有的网格点先进行参数修正补偿，再使用补偿后的网格点进行空间插值。以10mm步长划分网格，随机在小立方体(100100100)内部取40个点，分别测量未补偿时的误差，单独使用空间插值补偿的误差和先进行参数修正后再进行插值补偿的误差大小，三种情况下的误差大小如图11所示。

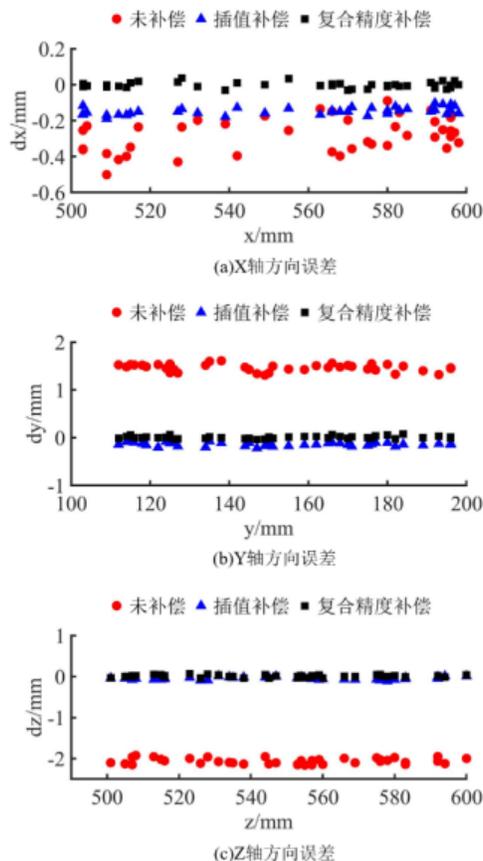


图11 两种补偿方法下的误差大小对比图

分别计算不同补偿算法下的平均误差大小如表3所示，可以看出当网格划分较小时，精度补偿效果更好，X轴方向上的平均误差由-0.4mm左右降低到-0.003mm左右，Y轴方向上的误差由1.4mm左右降低到了-0.009mm左右，Z轴方向上的误差由-2mm左右降低到了-0.008mm左右。

表3 两者补偿方法下的平均误差对比表

补偿方法	dx	dy	dz
未补偿	-0.3831	1.462	-2.061
空间插值	-0.1466	-0.1353	-0.04813
复合补偿	-0.002851	-0.008719	-0.007675

4. 结论

(1) 基于实验数据得出的定位误差与机械臂末端坐标映射关系具有普遍性，运用这种映射关系对机械臂进行参数修正能够显著提高空间插值补偿的效果，进一步提高机械臂的定位精度。

(2) 单独使用间接D-H参数修正时，误差虽然得到了减小，但是仍然不满足0.1mm的精度要求，因此单独的参数修正无法满足设计指标，需要与空间插值补偿方法结合补充。

(3) 在空间插值补偿时对网格划分的越小，精度补偿效果越好，在网格划分较大时，单独进行插值补偿可能无法达到预期的精度，在网格划分较小时，直接进行插值补偿就能达到0.1mm的目标精度，但是测量数据点较多，计算量大。

(4) 在小网格划分时，先进行参数修正再进行空间插值补偿，能将精度提高一个量级，做到基本消除误差，证明了提出的精度复合补偿方法的有效性。

(5) 在实际应用中可以根据使用场景的精度要求与数据量采集的难度大小来决定网格的大小划分与是否先进行参数修正, 达到两者的平衡, 提高精度补偿算法的效率。

参考文献

- [1] 陶永, 王田苗, 刘辉, 等. 智能机器人研究现状及发展趋势的思考与建议 [J]. 高技术通讯, 2019, 29(2): 149-163
- [2] LIGHTVAP C, HAMNER S, SCHMITZ T, BANKS S. Improved positioning accuracy of the PA10-6CE robot with geometric and flexibility calibration [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(2): 452-6.
- [3] 田威, 焦嘉琛, 李波, 等. 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述 [J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 341-352.
- [4] 廖文和, 田威, 李波, 等. 机器人精度补偿技术与应用进展 [J]. 航空学报, 2022, 43(5), 9-30+2.
- [5] DENAVIT, JACQUES, RICHARD S. HARTENBERG. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices [J]. Journal of Applied Mechanics, 1955, 22(2): 215-221.
- [6] 王蕾. 柔性机械臂运动学参数标定与精度补偿技术研究 [D]. 北京邮电大学, 2019.
- [7] WANG D, BAI Y. Improving position accuracy of robot manipulators using neural networks [C]. 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2005: 1524-1526.
- [8] 周炜. 飞机自动化装配工业机器人精度补偿方法与实验研究 [D]. 南京航空航天大学, 2012.
- [9] 龚星如, 沈建新, 田威, 等. 工业机器人的绝对定位误差模型及其补偿算法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(S1): 60-64.
- [10] 薛军旗. 视觉引导机器人制孔位姿控制及精度补偿技术研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2020.