

基于 CAD 模型的工件定位算法研究

刘 阳 李圣怡 戴一帆

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院 长沙 410073)

(E-mail: yliu@nudt.edu.cn)

摘 要 介绍了基于 CAD 模型的工件定位方法,利用代数学工具描述了三类工件定位问题,给出了求解算法;从收敛性、精度、效率等方面出发进一步分析了算法的性能,对定位算法进行了效率和收敛性方面的优化;给出了仿真实例.

关键词 工件定位,欧几里德变换,定位算法,算法优化.

RESEARCH ON WORKPIECE LOCALIZATION ALGORITHMS BASED ON CAD MODEL

LIU Yang LI Sheng-Yi DAI Yi-Fan

(School of Mechatronics Engineering and Automation, National University of
Defense Technology, Changsha 410073)

(E-mail: yliu@nudt.edu.cn)

Abstract We introduce the method of workpeice localization based on CAD model. Next, we formulate three types of workpeice localization problems, and present their solution algorithms. Then, we analyze the performance of the algorithms in terms of convergence, accuracy and computational efficiency, and optimize the algorithms in terms of computational efficiency and convergence. Finally, we give a simulation example of the algorithms.

Key words Workpeice localization, Euclidean transformation, localization algorithm, algorithm optimization.

1 引言

近年来,工件定位成为制造业自动化领域研究的热点技术之一.根据精度和工艺要求,传统的工件装夹通常需要设计和制造新的专用夹、量具,既耗时成本又高.对于表面复杂工件,如船舶螺旋桨、飞机喷气发动机的涡轮叶片等,参考点难以确定,即使采用专用夹具和量具,也需耗时数小时.另外,加工自动化在工件安装、尺寸检测、装配等过程也要求实现工件自动定位.

工件表面一般由标准面和包容面组成. 标准面是指精加工后的工件表面. 包容面是指未进行精加工的表面, 它包容工件标准面. 根据标准面的特征, 定位问题分为:

- 1) 一般问题 标准面上的测量点完全能够约束工件的刚性运动;
- 2) 对称问题 标准面是对称特征, 其上测量点不能完全约束工件的刚性运动;
- 3) 混合/包容问题 标准面上的测量点不能完全约束工件的刚性运动.

国外有很多关于定位问题的研究. 其中有代表性的有: Gunnarsson 和 Prinz 把工件定位问题抽象为最小平方问题^[1], 并且提出了基于工件线性模型的算法; Menq 等人采用迭代方法和非线性优化方法相结合来解决有复杂雕塑面的三维物体定位的最小平方问题^[2]; Besl 和 McKay 采用 Horn 公式和类似的迭代方法解决了模型形状是一系列线段或参数化曲面的一般定位问题, 通过极小化目标函数提出了 Tangent-Homing 算法, 用以解决三维工件的快速定位问题; Z. X. Li 等人提出了代数定位算法^[3~5], 用以解决有雕塑面的三维工件的快速定位问题, 并且提出了适于三种工件类型的统一几何理论.

2 基于 CAD 模型的工件定位

基于 CAD 模型的工件定位, 是指基于已知的工件 CAD 模型, 利用工件的表面测量数据和一套定位算法实现的, 确定任意固定在机床工作台上的工件的 CAD 模型坐标系相对于机床参考坐标系的位置和方位的过程. 实现方法如下: 首先, 将工件任意固定在机床工作台上, 用精密探测系统在工件表面采样一系列的点; 其次, 利用这些测量点、工件的 CAD 模型和一套定位算法, 计算出表示工件位置和方位的欧氏变换; 然后, 利用该变换来直接修正和补偿初始刀具路径, 或调整 CAD 模型坐标系重新生成数控程序, 或进行在线工件尺寸、形位公差等的检测. 该方法不需要专用夹具和精确的工件定位, 能够实现对非精确固定的工件的高精度切削, 大大简化了工件安装和检测过程.

一般刚体在欧氏空间中的刚性运动, 其变换可以看作是欧氏群 $SE(3)$ 的子群, 包括平移和旋转变换, 分别用 $p \in R^3$ 和 $R \in SO(3)$ 表示. 在工件定位中, 若采用欧氏群描述工件的空间位置变换 $g = (p, R) \in SE(3)$, 不仅使表达更简洁、更通用、便于符号推理, 而且计算效率更高. 尤其是对于对称特征的构造空间用一般的数学工具难以描述和求解, 用欧几里德群的齐次空间 $SE(3)/G_0$ 就可以很容易地进行描述和求解^[6~8].

3 一般定位问题

3.1 问题描述

设 C_M 是工件 CAD 模型的坐标系, C_W 是机床参考坐标系, $p \in R^3$ 和 $R \in SO(3)$ 分别是 C_M 相对于 C_W 的位置和方位, $g = (p, R) \in SE(3)$ 表示 C_M 相对于 C_W 的欧几里德变换 (以下简称欧氏变换). $y \in R^3$ 表示 C_W 中的点, $g^{-1}y = R^T(y - p)$ 是 y 在坐标系 C_M 中的表示. 已知 $Y = \{y_i \in R^3, i = 1, \dots, n\}$ 是工件标准面上的测量点集, S_i 是 y_i 的 CAD 模型上所在的原始面. 工件的 CAD 模型中 S_i 通过参数形式

$$S_i = \{x_i \in R^3 \mid x_i = \psi^i(u_i, v_i)\} \quad (1)$$

或隐函形式 $S_i = \{x_i \in R^3 \mid h_i(x_i) = 0\}$ 表示, $S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$, 且 $X = (x_1, \dots, x_n) \in S$.

一般定位问题可描述为:已知测量数据 Y 和工件的 CAD 模型,求出 $g \in SE(3)$ 和对应的原始面上的点 $x_i \in S$,使目标函数

$$\epsilon(g, x) = \sum_{i=1}^n \|g^{-1}y_i - x_i\|^2 \quad (2)$$

取极小值,其中变量组 $g \in SE(3)$,变量组 $X \in R^{3n}$ 的 n 个变量 $x_i \in R^3$ 受参数方程的约束.设 $Q = SE(3) \times R^{3n}$,该问题可视为定义在 Q 上的有约束多变量函数的最优化问题.

3.2 一般定位算法

目标函数(2)中 n 是测量点个数,求解有 $n+2$ 个变量,且有 n 个变量受等式约束的多变量函数的最优化问题属有约束多维搜索问题,若采用拉格朗日乘子法等常规方法,求解过程都相当繁琐,效率低下.考虑约束 $x_i = \psi_i(u_i, v_i)$, $u_i, v_i \in R$ 是独立变量,那么问题即转化为求解 $2n+2$ 个无约束多变量函数的最优化问题即多维搜索问题.再分析具体问题, n 个变量对 (u_i, v_i) 之间是独立的,在给定变量 g 的情况下可分别寻优.因此,考虑目标函数的特点,首先采用变量组轮换法,然后分别采用梯度法进行求解,该方法求解过程简单,计算效率较高,收敛效果良好.

采用拉格朗日乘子法寻优变量组 X ,计算式(1)中 $x_i \in R^3$ 在模型控制参数 u, v 的方向导数.当误差向量 $g^{-1}y_i - x_i$ 垂直于 S_i (即 $g^{-1}y_i - x_i = \lambda_i n_i$)时,点 $g^{-1}y_i$ 到 x_i 的距离最小,其中 $\lambda_i \in R$ 称为拉格朗日乘子, n_i 是 S_i 在 x_i 点的法矢量.设 $\psi_{u_i}^i = \partial\psi^i / \partial u_i$ 和 $\psi_{v_i}^i = \partial\psi^i / \partial v_i$ 是 S_i 在 x_i 的切矢.因此有如下命题.

命题 1. 目标函数(2)极小化的必要条件是

$$[(\psi_{u_i}^i) \quad (\psi_{v_i}^i)]^T (g^{-1}y_i - x_i) = 0, x_i = \psi^i(u_i, v_i) \quad (3)$$

极小值为 $\epsilon(g) = \sum_{i=1}^n \langle g^{-1}y_i - x_i, n_i \rangle^2$.

采用收敛速度最快的 Newton 法求解每一变量对 (u_i, v_i) 的非线性方程组(3).

算法 1. 一般定位算法.

输入:测量数据 $Y = \{y_i \in R^3, i=1, \dots, n\}$ 和 y_i 的原始面 S_i ;

输出:欧氏变换 g .

步骤:1)初始化 $k=0, g^0, x_i^0$;

2)计算 $y_i^0 = (g^0)^{-1}y_i, \epsilon^0 = \epsilon(g^0, x_i^0)$;

3)置 $k=k+1$,用 Newton 法解式(3),求 x_i^k ;

4)计算 $g^k = (x_i^k, g^{k-1})$;

5)计算 $y_i^k = (g^k)^{-1}y_i, \epsilon^k = \epsilon(g^k, x_i^k)$;

6)若 $(1 - \epsilon^k / \epsilon^{k-1}) < \delta$, 返回结果. 否则返回步骤 3)迭代.

在步骤 4)中,给定 y_i, g^{k-1} 和 x_i ,求解 g^k 有许多方法,定位算法即以之命名.比较有影响的算法有 VA 算法、ICP 算法、Tangent 算法、Menq 算法、Hong-Tan 算法等. g^k 计算方法不仅影响算法的收敛效果和计算效率,而且影响计算结果的精度和可靠性.

4 对称定位问题

一般定位算法用于对称工件时, Tangent 和 Hong-Tan 等算法中计算 g^k 的线性方程

系数矩阵 A 是奇异矩阵,无法求解,采用微分流形和李代数则可有效地解决这个问题^[2].

4.1 对称特征与构造空间

若 $SE(3)$ 对某特征的作用有一个对称子群 G_0 , G_0 中的变换不改变特征的位姿,那么称该特征为对称特征,其构造空间是商群 $SE(3)/G_0$. 常见对称特征及其构造空间见表 1. 对构造空间有下面的命题.

命题 2. 若在 $SE(3)/G_0$ 上定义正交微分结构, $se(3)$ 是 $SE(3)$ 的李代数, g_0 是 G_0 的李代数,可选择补子空间 M_0 使 $m_0 \oplus g_0 = se(3)$, 其中 m_0 是 M_0 的李代数.

表 1 常见对称特征及其构造空间

特征	G_0	描述	Q	Q 维数
2D 圆	$SO(2)$	绕圆心之旋转	$SE(2)/G_0 = T(2)$	2
2D 直线	$T(1)$	沿直线方向的平移	$SE(2)/G_0$	2
球面	$SO(3)$	绕球心的旋转	$SE(3)/G_0 = T(3)$	3
平面	$SE(2)$	绕平面法向的旋转与平面内的平移	$SE(3)/G_0$	3
3D 直线	$SO(2) \times T(1)$	绕直线的旋转与沿直线方向的平移	$SE(3)/G_0$	4
圆柱面	$SO(2) \times T(1)$	绕轴线的旋转与沿轴线方向的平移	$SE(3)/G_0$	4
圆锥面	$SO(2)$	绕轴线的旋转	$SE(3)/G_0$	5
直纹面	$T(1)$	沿扫描方向的平移	$SE(3)/G_0$	5
自由曲面	1	单位元	$SE(3)$	6

4.2 问题描述与定位算法

依命题 2, 可将对称定位问题描述为: 已知测量数据 $Y = \{y_i \in R^3, i=1, \dots, n\}$, 求出 $g \in SE(3)/G_0$ 和相应原始面上的点 $x \in S$, 使目标函数(2)取极小值. 设 $r = \dim(G_0)$, $\bar{r} = 6 - r = \dim(SE(3)/G_0)$, M_0 是 G_0 的李子代数的补子空间.

算法 2. 对称定位算法.

输入: 测量数据 Y , 对称特征 CAD 模型, M_0 的一组基 $\{\hat{\eta}_{r+1}, \dots, \hat{\eta}_6\}$.

输出: 欧氏变换 g .

步骤: 1) 初始化 $k=0$; g^0, x_i^0 , 选取 G_0 为 g^0 对应的对称子群;

2) 计算 $y_i^0 = (g^0)^{-1} y_i, \epsilon^0 = \epsilon(g^0, x^0)$;

3) 置 $k=k+1$, 用 Newton 法解式(3), 求 x_i^k ;

4) 求出 $m \in R^{\bar{r}}$, 再求 $g^k = g^{k-1} e^{(m_1 \hat{\eta}_{r+1} + \dots + m_{\bar{r}} \hat{\eta}_6)}$;

5) 计算 $y_i^k = (g^k)^{-1} y_i, \epsilon^k = \epsilon(g^k, x^k)$;

6) 若 $(1 - \epsilon^k / \epsilon^{k-1}) < \delta$, 返回结果. 否则返回步骤 3).

5 混合/包容定位问题

5.1 问题描述

该问题的实质是要找到变换 g , 既使变换后的标准面上的点到相应 CAD 模型表面的距离的平方和极小, 又使变换后的包容面上的点位于相应 CAD 模型表面外部, 并且保证包容面的切削余量. 此时标准面是对称特征, 其上测量点不能完全约束工件刚性运动, 将标准面与 CAD 模型上的相应表面对齐后, 剩余运动的集合是该标准面的对称子群 G_0 .

设 Y 是标准面测量点集, S_i 是 y_i 的原始表面; $Z = \{z_i, i=1, \dots, m\}$ 是包容面上测量

点集, S_i^* 是 z_i 的原始表面; 设 $G_0(\lambda)$ ($\lambda \in R^r$ 是 G_0 的指数坐标) 是标准面的对称子群. 则混合定位问题可描述为: 首先求出 $g_0 \in SE(3)/G_0$ 和 $x_i \in S_i$, 使目标函数(2)取极小; 然后令 $g(\lambda) := g_0 G_0(\lambda)$, 求 $g(\lambda) \in SE(3)$, $t_i \in S_i^*$, 使目标函数 $\epsilon_e(g(\lambda)) = \sum_{i=1}^m \|g^{-1}(\lambda)z_i - t_i\|^2$ 取极小, 约束为 $\langle g^{-1}(\lambda)z_i - t_i, n_i \rangle \geq \delta_i, i=1, \dots, m$, 其中 δ_i 是非标准面 S_i^* 的切削余量, n_i 是 S_i^* 在点 t_i 处的法矢. 因此, 混合问题可分解为 $SE(3)/G_0$ 上的对称定位问题和 G_0 上的包容问题. 式(4)中的不等式约束确保工件非标准面的切削余量.

5.2 包容定位算法

在混合定位中, 对称问题的解是包容问题的初始条件. 包容问题中只包含包容算法, 在此只分析包容问题的求解, 得到包容定位算法.

算法 3. 包容定位算法.

输入: Z , 相关包容面 S_i^* 的 CAD 模型, 对称定位算法得到的 $g_0 \in SE(3)/G_0$.

输出: 混合问题的最优解 $g^* \in SE(3)$.

步骤: 1) 初始化 $k=0; g^0 = g_0$;

2) 计算 $t_i^0, i=1, \dots, m$; 计算 $\epsilon_e^0 = \epsilon_e(g^0, w^0)$;

3) 置 $k=k+1$, 用 Newton 法解 $[(\psi_{u_i}^i) (\psi_{v_i}^i)]^T (g^{-1}z_i - t_i) = 0$, 求 t_i^k, n_i^k ;

4) 首先解线性规划问题求 $m \in R^r$, 然后求出 $g^k = g^{k-1} e^{(\lambda_1 \eta_1 + \dots + \lambda_r \eta_r)}$;

5) 计算 $\epsilon^k = \epsilon(g^k, t^k)$;

6) 若 $(1 - \epsilon^k / \epsilon^{k-1}) < \delta$, 返回结果; 否则返回步骤 3) 继续迭代.

步骤 4) 中 $g^k = g^{k-1} e^{\hat{\lambda}}, \hat{\lambda} = \lambda_1 \hat{\eta}_1 + \dots + \lambda_r \hat{\eta}_r, (\hat{\eta}_1, \dots, \hat{\eta}_r)$ 是 g_0 的基. $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_r) \in R^r$ 是通过求解线性规划问题 $\min_{\lambda \in R^r} \left\{ \langle d\epsilon_e(g^{k-1}), \lambda \rangle \mid f(g^{k-1}) + Df(g^{k-1}) \cdot \lambda \leq 0 \right\}$ 得到.

6 算法性能分析

在实际应用中, 算法的精度要满足工件定位要求, 而且要求计算结果有相当高的可靠性, 另外计算处理时间也应明显地小于安装工件所需时间. 考虑定位算法的几个性能指标^[4]. 算法精度是指计算结果误差, 包括旋转和平移两类误差, 定义为: 设 $g_a = (p_a, R_a) \in SE(3)$, $g_e = (p_e, R_e) \in SE(3)$ 分别是真实和估计的欧氏变换, 那么 $\epsilon_R = |\theta|$ (其中 $e^{w\theta} = R_e^T R_a, \|w\| = 1$) 和 $\epsilon_p = \|p_e - p_a\|$ 分别表示旋转误差和平移误差. 算法可靠性是指计算结果的可信度, 算法的精度越高, 收敛性越好, 可靠性越高. 算法效率是指采用该算法的计算耗时, 耗时少, 效率就越高. 根据 Roth 的测量误差理论, 测量点数与误差存在关系式 $D = O((\log N)^{1/2} / N)^{[9]}$, 即 N 越大, 误差 D 越小, 可靠性越高. 为提高算法精度和可靠性, 往往测量几十甚至上百个点, 这样又存在计算效率低的问题.

对前述定位算法进行了反复仿真, 得出了如下结论:

- 1) 算法的性能决定于算法公式、测量点数、测量点位置、测量精度和收敛条件;
- 2) 测量精度越高, 算法计算结果精度也越高;
- 3) 测量位置均匀分布比非均匀分布所得结果精度高;

4) Menq' Tangent 和 Hong-Tan 等算法比较而言, Hong-Tan 算法效率和精度最理想, 其运算速度明显地比其它算法快一个数量级, 精度也比其它两种算法要高许多;

5) 收敛条件越苛刻, 其精度越高、效率越低;

6) 测量点数越多, 其计算精度越高, 计算效率越低.

7 算法效率优化

为提高算法效率, 我们提出了伪 Hammersly 优化算法. 工件表面一般按均匀分布采样, 得到的是 xoy 平面上被测量区域内均匀分布的坐标对 (x_i, y_i) 和对应的 z 轴坐标的组合 $(x_i, y_i, z_i)^{[10]}$. 为了提高定位算法的精度和可靠性, 首先按均匀分布采样较大数量的点, 然后利用伪 Hammersly 方法对测量数据进行二次采样. 若在单一表面上均匀采样 $M \times N$ (M 行 N 列分布, 且 $M \leq N$) 个数据, 其在 xoy 平面内的坐标分布 $X(i, j)$, $i=1, \dots, M$, $j=1, \dots, N$. 设二次采样选取测量点的坐标位置为 $X(s, t_{sj})$, 效率优化算法实现如下.

+ : uniform distribution * : Hammersley distribution

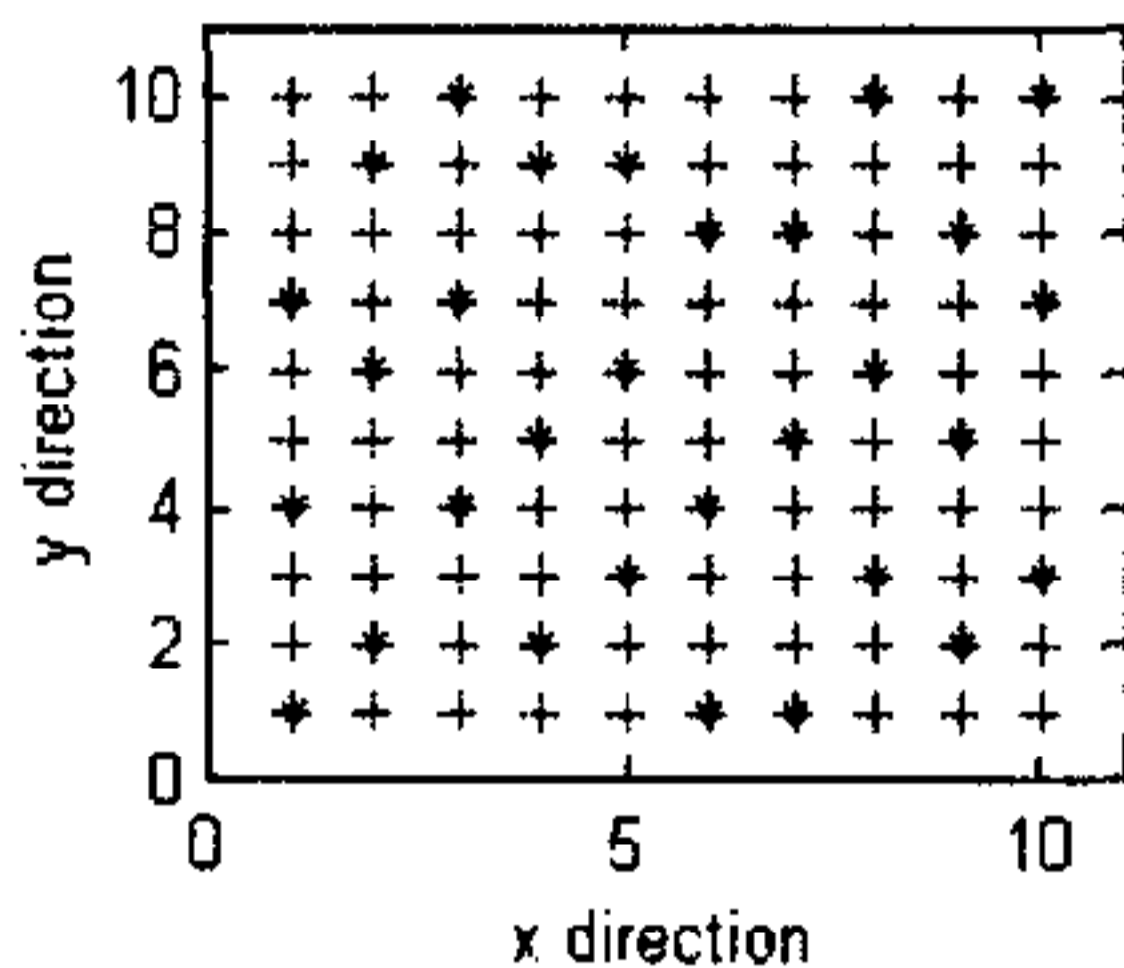


图 1 两种分布对比图

函数 floor、ceil、mod 分别为向 0 方向取整、向无穷大方向取整、除后取余. 对 10×10 点均匀分布数据进行处理后, 所得伪 Hammersley 分布如图 1 所示.

8 算法收敛性优化

为提高计算效率, 上述算法都采用迭代方法来交替修正原始面上点和欧氏变换. 采用迭代方法的代价是导致算法局部收敛, 需要对初始变换作充分准确的估计才能收敛到真解, 否则算法就会发散或收敛到局部极小值. 对算法的仿真研究得到以下结论:

1) 在初始方位误差 45° 范围内, 上述算法保证总收敛于真解;

2) 真解附近的目标函数值和欧氏变换的变化量都应相当小, 合适的附加扰动能使算法跳出局部极小;

3) 穷举均布的、覆盖整个 $SO(3)$ 的初始变换集合总会使算法全局收敛;

4) 复杂情况下, 初始值 x_i^0 或 t_i^0 的选择不当, 也会导致算法局部收敛或发散, 且在求解过程中, 初始值 $x_i^k(u_i, v_i)$ 越接近于真值, 算法收敛速度越快.

基于以上结论, 从下面几个方面对算法进行收敛性优化:

1) 准确选择 g^0 . 令 $p_0 = \bar{y}$, $R^0(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ 是从欧拉角计算的旋转矩阵, 算法保证收敛的方位误差是 45° , 基于欧拉角旋转矩阵的特性与工件定位的实际, 首先假定 β_0 的估计误差为 45° . 基于收敛效率考虑, 选择 α_0 和 γ_0 的变化粒度为 30° , 以覆盖整个旋转空间, 即

算法 4. 效率优化算法.

1) 计算 $n = \text{floor}(N/3)$, 取 $s=1, \dots, M, j=1, \dots, n$; 计算 $k = \text{ceil}(\log_2 N)$;

2) 计算 $t_{sj} = \begin{cases} z_{sj}, z_{sj} \leq N \\ z_{sj} \bmod N, z_{sj} > N \end{cases}, z_{sj} = \text{ceil}(N \cdot m_{s-1} / 2^k) + (j-1) \cdot n, \quad s=1, \dots, M, \quad j=1, \dots, n,$
 m_{s-1} 为 $s-1$ 的 k 位二进制镜像.

$\alpha_0, \beta_0 \in \{30^\circ, -30^\circ, 90^\circ, -90^\circ, 150^\circ, -150^\circ\}$, 可以给出 36 组 $g^0(p_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$.

2) 增加收敛判据. 根据目标函数是否小于某确定小数 δ_2 和欧氏变换变化 ξ 的模是否小于确定小数 δ_3 来判断计算结果是否为局部极小值.

3) 加入扰动. 在目标函数为局部极小值时, 加以扰动, 以跳出局部极小.

4) 选择 $x_i^0(u_i, v_i)$. 确定测量点 y_i 的 CAD 模型上对应点 $x_i^0(u_i, v_i)$, 选取距离最短的参考点, 其参数 (u_i, v_i) 即作为 x_i 迭代的初值. 综上所述, 得全局收敛优化算法.

算法 5. 全局收敛算法.

输入: 测量数据 $Y = \{y_i \in R^3, i=1, \dots, n\}$ 与相关标准面的 CAD 模型.

输出: 欧氏变换 $g \in SE(3)$.

步骤: 1) 初始化 $k=0$; 从初始变换表中取 $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$, 计算 $g^0(R^0, p^0)$;

2) 计算 $x_i^0, i=1, \dots, m$; 计算 $\epsilon^0 = \epsilon(g^0, x^0)$;

3) 置 $k=k+1$, 用 Newton 算法解式(5), 求 x_i^k ;

4) 计算 g^k ; 计算 $\epsilon^k = \epsilon(g^k, x^k)$;

5) 收敛判断. 若 $(1 - \epsilon^k / \epsilon^{k-1}) < \delta_1$ 继续判别, 否则转 3); 若 $\epsilon^k < \delta_2$ 继续判别, 否则转 6); 若 $\|\xi\| < \delta_3$ 退出程序, 否则转 3);

6) 增加扰动量 δ_b , 若扰动已足够大转步骤 1), 否则转 3).

其中, $\xi \in R^6$ 表征欧氏变换修正时的改变量 $e^{\xi} = g_{k+1}^{-1} g_k$.

9 算法仿真

9.1 仿真方法

算法仿真的步骤是: 首先利用 Euclid3 软件建立工件的 CAD 模型, 通过 IGES 格式的文件把工件模型传送到算法仿真系统用于仿真实验. 然后直接从工件的 CAD 模型表面上均匀采样 25~200 个点, 将不同的已知欧氏变换 g 作用于这些数据, 得到相对于机床坐标系的测量点; 将正态分布的自由噪声 $N(\mu, \sigma^2)$ 叠加于这些数据, 以仿真测量误差. 将工件 CAD 模型与测量数据输入算法仿真系统, 选取不同的算法, 不断改变初始条件和收敛条件进行仿真, 分别记录不同算法在不同条件下的计算结果和耗时. 最后把仿真结果与真解 g_0^* 比较, 研究不同算法的收敛性、计算精度、可靠性和效率.

9.2 仿真实例

本文给出两个算法仿真的实例. 图 2 和图 3 是两个在 euclid3 上设计的典型的模具工件的 CAD 模型. 工件 A 为半球体凸模, 是半球、模板和四个小圆柱的拓扑组合. 工件 B 为塑瓶凸模, 是模板和半个塑瓶模型的拓扑组合, 而塑瓶模型是十几片 Beizer 曲面组成的. 在工件 A 的半球面和另二相邻侧面上与工件 B 的塑瓶表面上分别均匀采样 150 个点. 对这些数据进行变换, 然后加以噪声 $N(0.002, 0.005)$, 分别采用优化前和优化后的定位算法计算欧氏变换, 仿真过程是在 Pentium 200 上进行的, 仿真结果见表 2.

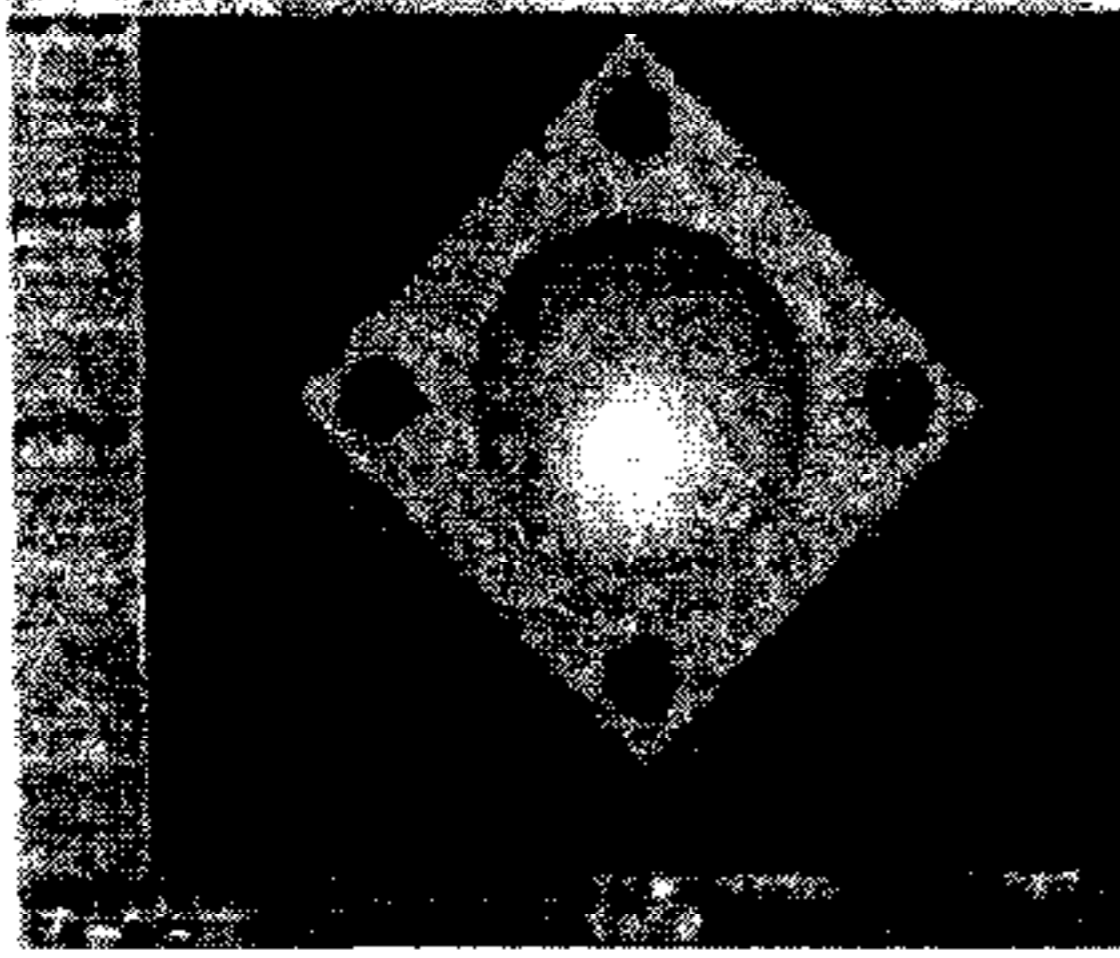


图 2 半球体凸模



图 3 塑瓶凸膜

表 2 算法优化前后仿真数据简表

类别	组别		优化前		优化后	
			误差	耗时	误差	耗时
工件 A	1	P	0.0089	1.7 秒	0.0097	0.7 秒
		R	0.0083		0.0089	
	2	P	0.0110	1.4 秒	0.0119	0.6 秒
		R	0.0096		0.0107	
工件 B	1	P	0.0129	9.8 秒	0.0132	3.5 秒
		R	0.0095		0.0103	
	2	P	0.0114	9.1 秒	0.0122	3.4 秒
		R	0.0099		0.0111	

对算法优化前后的多组仿真结果进行分析,得出结论:

1)若其它条件相同,均匀分布的测量数据经伪 Hammersly 处理后,计算精度仍可达原数据的 90%以上,计算耗时减小为原来的 30%~39%,即在计算精度基本保持不变的情况下,效率提高 3 倍左右;

2)对大范围的初始变换的仿真结果表明收敛优化后的定位算法全局收敛;

3)若其它条件相同,复杂形状与简单形状工件相比,计算精度降低、计算耗时长。

10 结束语

基于 CAD 模型的工件定位算法在计算效率和收敛性等方面已比较令人满意.但在计算精度和可靠性方面尚需要进一步深入研究才能将该算法应用到实际中去,另外,复杂工件的 CAD 模型的数学表示也是一个有待解决的难题。

致谢 在课题研究过程中得到李泽湘教授的热情指导,作者在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Gunnarsson K, Prinz F. CAD model-based localization of parts in manufacturing. *Computer*, 1987, **20**(8): 66~74
- 2 Menq C, Yau H, Lai G. Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, **8**(2): 268~278
- 3 Gou J B, Chu Y X, Li Z X. On the symmetric localization problem. *IEEE Transactions. On Robotics and Automation*, 1998, **14**(4): 533~540
- 4 Chu Y, Gou J, Li Z X. Performance analysis of location algorithms. In: IEEE Intl. Conf. on Robotics and

- Automation, 1997,1247~1252
- 5 Li X M, Yeung M, Li Z X. An algebraic algorithm for workpiece localization. In: IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, 1996,152~158
 - 6 Murray R, Li Z X, Sastry S. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1994. 19~80
 - 7 苏步青,华宣积,忻元龙. 实用微分几何引论. 北京:科学出版社,1998,29~121
 - 8 陈维桓. 微分流形初步. 北京:高等教育出版社,1998,46~92
 - 9 Caskey G, Hari Y, Hocken R. Sampling techniques for coordinate measuring machines. In: Proc. Of the 1991 NSF Design and Manufacturing Systems Conference, Austin, Texas, 1991,779~786
 - 10 Woo T C, Liang R. Dimensional measurement of surfaces and their sampling. *Computer Aided Design*, 1993,25(4): 233~239

刘 阳 男,1973 年生,博士生. 从事智能控制与制造、CAD/CAM 研究工作.

李圣怡 男,1946 年生,教授,博士生导师. 从事超精密加工、智能控制与制造、CIMS、机器人等领域的研究工作.

戴一帆 男,1965 年生,副教授,博士. 从事超精密加工、智能控制与制造、超精密测量仪器研究工作.

~~~~~

(上接第 8 页)

论文要求:

1. 会议语言是英语,提交的论文也必须用英语写作。
2. 第一作者必须是 45 岁以下。
3. 论文必须有题目、作者全名、单位全称、通信地址、电话传真、Email 及关键词。A4 幅面 5 页左右的全文或 2—3 页包含有主要结论的摘要均可接收。论文必须是没有公开发表过的。
4. 附相应的中文摘要(包括题目、作者、单位、通信地址),以便于联系。
5. 论文格式:用 PDF 格式或 MS word 格式输入排版,通过 Email 发送或拷入软盘邮寄到 ICYCS' 2001 组委会:

6. 提请注意:只接收电子稿。

关于征文的更详细情况以及会议的最新消息请访问会议网站:

<http://www.icycs2001.org>

重要日期:

接收论文截止日期: 2001 年 5 月 20 日

论文录用通知: 2001 年 6 月 25 日

正式打印稿 2001 年 8 月 15 日

论文请 Email 到: [icycs@cs.zju.edu.cn](mailto:icycs@cs.zju.edu.cn)

大会组委会:杭州玉泉浙江大学计算机系 张三元 魏宝刚 邮编 310027

联系电话:(0571)6951909—204,7951904—204 唐路 毛浙西