

飞机制孔爬行机器人的位姿调节研究*

Research on Pose Adjustment of Crawling Robot for Drilling Hole on Aircraft Surface

南京航空航天大学机电学院民用飞机装配工程研究中心 张得礼 陈文亮 王 珉

[摘要] 飞机制孔 8 足并联爬行机器人是由多个构件组成的一个复杂的多维运动系统,末端执行器姿态的调整不是通过设置独立的运动轴来实现,而是通过所有腿的复合运动(升/降)来实现。当进行制孔运动时,需要实时计算各腿的空间位置和调节量,实现刀具沿着加工点处法矢方向进行制孔。通过分析各构件的空间几何位置关系建立调姿计算局部坐标系,根据机器人的动作特点,建立末端执行器空间运动坐标系;利用机构在调姿过程中,各腿一直与动平台保持垂直这一特点,建立空间变换矩阵;根据测量系统给定的制孔处法矢,计算各腿的伸缩量和空间位置补偿量;把末端执行器看作一只虚拟的腿,可用同样的方法求得其 X 、 Y 、 Z 向的调整量。从而不需要设置独立的旋转轴就能实现机器人的位姿调节。

关键词: 爬行机器人 位姿调节 制孔 运动控制 空间变换

[ABSTRACT] The 8 feet parallel crawling robot for drilling holes on the aircraft surface is a complex multi-dimensional movement system which is composed of multiple components. Pose adjustment of the end effector is not achieved by independent motion axis, but by the compound movement (up/down) of all legs. Real-time calculation of the space location and adjustment of the legs is needed when drilling hole, to make the tool drill along the normal vector direction of the drilling point. Local coordinate system is established through the analysis of the space position relations of the components. According to the movement characteristics of the end effector, space moving coordinate system is established. The characteristic that the legs keep perpendicular to the movable platform in the process of posture adjustment is utilized to establish the space transformation matrix. According to the normal vector given by the measure system, the length of all legs

and spatial location compensation is calculated; Use the same method is used to get the adjustment value of X , Y , Z by taking the end effector as a virtual leg. Hence, it is not need to set independently rotary shaft to realize the pose regulation.

Keywords: Crawling robot Pose adjustment Drilling Motion control Space transformation

国外从 20 世纪 90 年代,就已经大规模开展飞机的自动化装配技术的研究。根据飞机自动化制孔的特点和要求,国外著名的飞机装配设备制造厂家生产了许多大型的面向飞机装配的自动化设备^[1-4]。目前,飞机制孔机器人仍采用市场上通用的工业机器人(臂)作为设备本体,配合相应的末端执行器组成自动化装配系统^[5-6]。此类设备需要预铺行走导轨^[7],使用场所固定,对环境要求较高,大空间多坐标系变换导致位姿误差大^[8-9];操作空间有限,往往需要多台设备联合作业,增大了使用和操作的难度。本项目拟采用 8 足并联爬行机器人实现飞机自动制孔,机器人的调姿运动不是通过设置独立的运动轴来实现,而是通过所有腿的复合运动(升/降)来实现。通过分析各构件的空间几何位置关系建立调姿计算局部坐标系,根据机器人的动作特点,建立末端执行器空间运动坐标系;利用机构在调姿过程中,各腿一直与动平台保持垂直这一特点,建立空间变换矩阵;根据测量系统给定的制孔处法矢,计算各腿的伸缩量和空间位置补偿量;把末端执行器看作一只虚拟的腿,可用同样的方法求得其 X 、 Y 、 Z 向的调整量。从而不需要设置独立的旋转轴就能实现机器人的位姿调节。系统减少了 2 个旋转轴,简化了末端执行器的结构,同时也减轻了机器人的自重,实现机器人的轻量化设计。

1 机器人的基本结构及动作

本文研究的飞机制孔爬行机器人结构如图 1 所示。它是由内框 4 只腿 $Z_1 \sim Z_4$ 、外框 4 只腿 $Z_5 \sim Z_8$,连接在内框上的实现末端执行器在内框内运动的 X_3 、 Y_1 轴,加工

* 中央高校基本科研业务费专项资金(NS2012101),国家高技术研究发展(863)计划(2011AA04A106)资助。

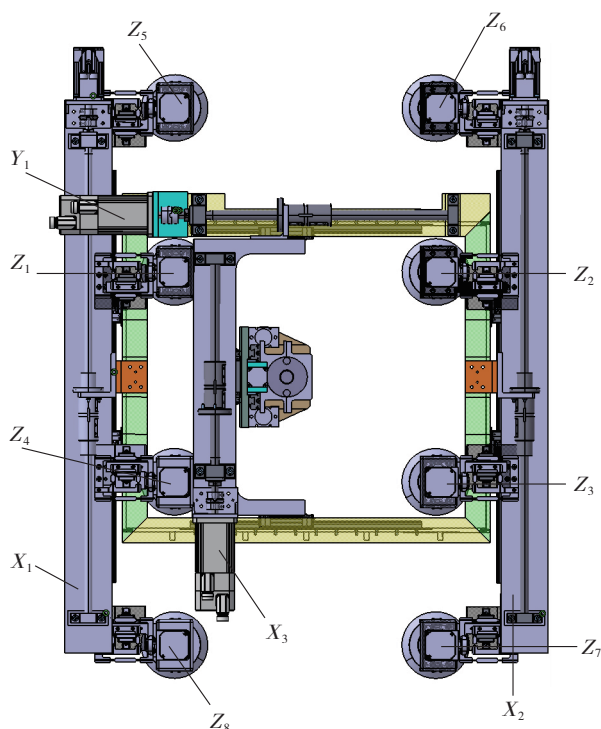


图1 机器人结构图
Fig.1 Robot structure diagram

进给 Z 轴及联接内外框实现爬行运动的同步轴 X_1 、 X_2 组成。机器人主要运动有:8 只腿的升/降联动、行走双轴同步运动以及末端执行器的 X 、 Y 向的调整及其法向调整运动(通过 8 只腿的升/降实现)。

对机器人的运动动作进行分解:

(a) 吸盘定位。每只吸盘的底部安装 3 个接触开关,当 8 只腿下降 3 个接触开关同时被合上时该腿停止运动,吸盘开始抽气吸紧定位。

(b) 法向调整。

根据检测的法向角度同时调整各腿的高度,同时调整末端执行器的 X 、 Y 坐标,因为法向调整后末端执行器的位置产生偏移,也必须调整,才能使加工工具对准加工点。

(c) 加工。

末端执行器的加工进给 Z 轴运动到给定位置,实现末端执行器的加工运动。

(d) 加工回程。

末端执行器的加工进给 Z 轴反向运动到给定位置,主轴关闭。

(e) 姿态反向调整。

各轴反向运动,回退到法向调整前的状态。

(f) 爬行。

外框 4 只腿吸盘释放并抬起到指定的位置,行走的两轴同步运动到给定位置后外框 4 只腿下降,吸盘吸紧

定位;内框 4 只腿吸盘释放并抬起到指定的位置,行走的两轴同步运动到给定位置后内框 4 只腿下降,吸盘吸紧定位,完成爬行。

2 末端执行器法矢调整时腿的伸缩量计算

机器人在制孔时首先需要调整末端执行器的姿态,使得钻头沿着飞机表面法矢方向,然后再实现制孔加工运动^[10-11]。末端执行器姿态的调整是通过腿的复合运动(调节腿的高度)来实现。但当所有腿与内外框之间都采用固定连接时,这一调节动作无法实现。因此需要在腿和框的连接处进行空间位置(X 、 Y 向)补偿。当进行制孔运动时,需要实时计算各腿的空间位置和调节量。

如图 2 所示,以内外框所在平面为动平台,建立右手正交坐标系 $O_m-X_m Y_m Z_m$,以机构所在工件机身筒形件为定平台,建立右手正交坐标系 $O_b-X_b Y_b Z_b$,原点 O_m 和 O_b 都为固定铰链 S_2 , Z_m 与腿的升降方向平行, X_m 与制孔单元行走方向平行,调姿前坐标系 $O_m-X_m Y_m Z_m$ 与坐标系 $O_b-X_b Y_b Z_b$ 各坐标轴重合。

腿 Z_i ($i=1, \dots, 8$) 上的球副位置为 S_i ($i=1, \dots, 8$), 移动副位置为 P_i ($i=1, \dots, 8$)。各腿长为 L_i ($i=1, \dots, 8$)。

由该机构的结构特性可知,调姿过程中,各腿一直与动平台保持垂直。

所以 8 只腿中任取 2 只腿都保持平行。根据几何关系可得:

$$S_2 S_i + S_i P_i + P_i P_2 + P_2 S_2 = 0, \quad (1)$$

变换得: $S_2 S_i + P_i P_2 = S_2 P_2 - S_i P_i$

设点 S_i 在坐标系 $O_b-X_b Y_b Z_b$ 和 $O_m-X_m Y_m Z_m$ 中的坐标分别为 $S_{bi}=(x_{bsi}, y_{bsi}, z_{bsi})^T$ 和 $S_{mi}=(x_{msi}, y_{msi}, z_{msi})^T$, 根据坐标转换建立如下方程:

$$S_{bi}=[R_{bm}]S_{mi}+O_b O_m, \quad (2)$$

式中, $[R_{bm}]$ 为空间旋转变换矩阵。

所以在动平台坐标系 $O_m-X_m Y_m Z_m$ 中,式(1)可写为:

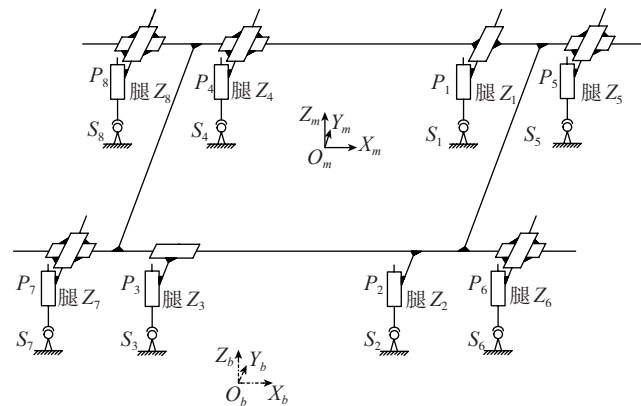


图2 机器人机构简图
Fig.2 Robot mechanism diagram

$$\begin{aligned} S_{m2}S_{mi}+P_{mi}P_{m2} &= S_{m2}P_{m2}-S_{mi}P_{mi} \\ S_{m2}S_{mi}+P_{mi}P_{m2} &= (0, 0, L_2)-(0, 0, L_i) \\ S_{m2}S_{mi}+P_{mi}P_{m2} &= (0, 0, L_2-L_i) \end{aligned} \quad (3)$$

因为 $S_{m2}P_{m2}$ 、 $S_{mi}P_{mi}$ 都始终垂直于动平台, 所以将方程 (3) 向 Z_m 轴投影得:

$$(S_{m2}S_{mi})z_m+0=L_2-L_i, \quad (4)$$

式中 $(S_{m2}S_{mi})z_m$ 为 $S_{m2}S_{mi}$ 在 Z_m 轴上的投影。

因为空间旋转矩阵为正交矩阵^[12], 故 $[R_{bm}]$ 存在逆矩阵, 且 $[R_{bm}]^{-1}=[R_{bm}]^T$

所以由式 (2) 得:

$$\begin{aligned} [R_{bm}]^{-1}S_{bi} &= [R_{bm}]^{-1}[R_{bm}]S_{mi}+[R_{bm}]^{-1}O_bO_m \\ [R_{bm}]^T S_{bi} &= S_{mi}+[R_{bm}]^T O_bO_m \\ S_{mi} &= [R_{bm}]^T S_{bi}-[R_{bm}]^T O_bO_m, \end{aligned} \quad (5)$$

所以:

$$\begin{aligned} S_{m2}S_{mi} &= \{[R_{bm}]^T S_{bi}-[R_{bm}]^T O_bO_m\} - \{[R_{bm}]^T S_{b2} \\ &\quad -[R_{bm}]^T O_bO_m\} \\ &= [R_{bm}]^T S_{bi}-[R_{bm}]^T S_{b2} \\ &= [R_{bm}]^T (S_{bi}-S_{b2}) \\ &= [R_{bm}]^T S_{b2}S_{bi} \\ &= [R_{bm}]^T [(x_{bsi}, y_{bsi}, z_{bsi})^T - (x_{bs2}, y_{bs2}, z_{bs2})^T] \\ &= [R_{bm}]^T (x_{bsi}-x_{bs2}, y_{bsi}-y_{bs2}, z_{bsi}-z_{bs2})^T, \end{aligned} \quad (6)$$

$$[R_{bm}] = \begin{bmatrix} \cos(x_b x_m) & \cos(x_b y_m) & \cos(x_b z_m) \\ \cos(y_b x_m) & \cos(y_b y_m) & \cos(y_b z_m) \\ \cos(z_b x_m) & \cos(z_b y_m) & \cos(z_b z_m) \end{bmatrix}$$

$$\text{故 } [R_{bm}]^T = \begin{bmatrix} \cos(x_b x_m) & \cos(y_b x_m) & \cos(z_b x_m) \\ \cos(x_b y_m) & \cos(y_b y_m) & \cos(z_b y_m) \\ \cos(x_b z_m) & \cos(y_b z_m) & \cos(z_b z_m) \end{bmatrix} \quad (7)$$

矩阵内各项余弦值为动作表相应轴和定坐标相应轴的夹角余弦值, 由式 (6)、(7) 可得:

$$\begin{aligned} S_{m2}S_{mi} &= [\cos(x_b x_m) \cdot (x_{bsi}-x_{bs2}) + \cos(y_b x_m) \cdot (y_{bsi}-y_{bs2}) \\ &\quad + \cos(z_b x_m) \cdot (z_{bsi}-z_{bs2}), \\ \cos(x_b y_m) \cdot (x_{bsi}-x_{bs2}) + \cos(y_b y_m) \cdot (y_{bsi}-y_{bs2}) \\ &\quad + \cos(z_b y_m) \cdot (z_{bsi}-z_{bs2}), \\ \cos(x_b z_m) \cdot (x_{bsi}-x_{bs2}) + \cos(y_b z_m) \cdot (y_{bsi}-y_{bs2}) \\ &\quad + \cos(z_b z_m) \cdot (z_{bsi}-z_{bs2})]^T \end{aligned}$$

所以,

$$(S_{m2}S_{mi})z_m = \cos(x_{bzm}) \cdot (x_{bsi}-x_{bs2}) + \cos(y_{bzm}) \cdot (y_{bsi}-y_{bs2}) + \cos(z_{bzm}) \cdot (z_{bsi}-z_{bs2})$$

代入式 (4), 可得:

$$\begin{aligned} \cos(x_{bzm}) \cdot (x_{bsi}-x_{bs2}) + \cos(y_{bzm}) \cdot (y_{bsi}-y_{bs2}) \\ + \cos(z_{bzm}) \cdot (z_{bsi}-z_{bs2}) = L_2-L_i \end{aligned}$$

即:

$$\begin{aligned} L_i = L_2 - [\cos(x_{bzm}) \cdot (x_{bsi}-x_{bs2}) + \cos(y_{bzm}) \cdot (y_{bsi}-y_{bs2}) \\ + \cos(z_{bzm}) \cdot (z_{bsi}-z_{bs2})] \end{aligned} \quad (8)$$

3 调姿后末端执行器 Z 向伸缩量及 X、Y 向调整量计算

制孔单元的制孔过程: 移动到指定位置后, 八条腿真空吸盘吸住加工表面, 调姿前末端执行器借助光学检测系统移动到制孔点上方^[13-15], 然后寻法调姿, 调姿后保证刀具轴线与制孔点法线重合, 实现刀具的进给制孔。

把末端执行器看作一只虚拟的腿, 可用同样的方法求得其 X、Y、Z 向的调整量。设工件上某一制孔点 D_j 在定坐标系 $O_b-X_b Y_b Z_b$ 下的坐标值 $D_{bj}=(x_{bdj}, y_{bdj}, z_{bdj})^T$, 对应的调整前末端执行器在定平台上的位置为点 T_j , T_j 在定坐标系 $O_b-X_b Y_b Z_b$ 下的坐标值 $T_{bj}=(x_{bj}, y_{bj}, z_{bj})^T$ 。 D_j 到动平台的距离 H 同腿的计算相同, 即:

$$\begin{aligned} H = L_2 - [\cos(x_{bzm}) \cdot (x_{bdj}-x_{bs2}) + \cos(y_{bzm}) \cdot (y_{bdj}-y_{bs2}) \\ + \cos(z_{bzm}) \cdot (z_{bdj}-z_{bs2})] \end{aligned} \quad (9)$$

姿态调整后刀尖点的伸长量为 $H-z_{bj}$ 。

定平台上的点 T_j 在定坐标系 $O_b-X_b Y_b Z_b$ 下:

$$\begin{aligned} x_{mj} = x_{bj} = x_{bdj} \\ y_{mj} = y_{bj} = y_{bdj} \end{aligned} \quad (10)$$

设调整后末端执行器由定平台上的位置点 T_j 移动到 F_j 点, F_j 点在动坐标系 $O_m-X_m Y_m Z_m$ 下的 X、Y 向坐标为:

$$\begin{aligned} x_{mjf} = [\cos(x_b x_m) \cdot (x_{bdj}-x_{bs2}) + \cos(y_{bxm}) \cdot (y_{bdj}-y_{bs2}) \\ + \cos(z_{bxm}) \cdot (z_{bdj}-z_{bs2})], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} y_{mjf} = \cos(x_b y_m) \cdot (x_{bdj}-x_{bs2}) + \cos(y_{bym}) \cdot (y_{bdj}-y_{bs2}) \\ + \cos(z_{bym}) \cdot (z_{bdj}-z_{bs2}) \end{aligned} \quad (12)$$

根据式 9~12 可知, 末端执行器 X、Y 向的调整量为:

$$\Delta x = x_{mjf} - x_{mj}$$

$$\Delta y = y_{mjf} - y_{mj}$$

$$\Delta z = H - z_{bj} + z_{bdj}$$

设 A、B 为机器人绕坐标系 $O_b-X_b Y_b Z_b$ 的 X_b 和 Y_b 轴旋转转动的角度, 本机器人只通过调整 A、B 角来实现调姿, 即绕 Z_b 轴的旋转角度 $C=0$ 。

则:

$$[R_{bm}] = \begin{bmatrix} \cos C \cos B & & & \\ \sin C \cos A + \cos C \sin B \sin A & & & \\ \sin C \sin A - \cos C \sin B \cos A & & & \\ & -\sin C \cos B & \sin B & \\ \cos C \cos A - \sin C \sin B \sin A & & -\sin A \cos B & \\ \cos C \sin A + \sin C \sin B \cos A & & \cos A \cos B & \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(x_b x_m) & \cos(x_b y_m) & \cos(x_b z_m) \\ \cos(y_b x_m) & \cos(y_b y_m) & \cos(y_b z_m) \\ \cos(z_b x_m) & \cos(z_b y_m) & \cos(z_b z_m) \end{bmatrix} \quad (13)$$

已知加工孔的法向量 $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)^T$, Z_m 与

法向量重合,所以有:

$$\cos(x_b z_m) = \cos\alpha$$

$$\cos(y_b z_m) = \cos\beta$$

$$\cos(z_b z_m) = \cos\gamma$$

根据矩阵相等原理,可得:

$$\sin B = \cos\alpha$$

$$\cos B = \sin\alpha$$

$$\sin A = -\cos\beta / \sin\alpha$$

$$\cos A = \cos\gamma / \sin\alpha \quad (13)$$

把式(13)带入矩阵 R_{bm} 各项就可得到 R_{bm} 矩阵的每一项具体的值。把 R_{bm} 矩阵的每一项具体的值代入式(8~9)和式(10~12)可进一步表示为:

$$\begin{aligned} L_i &= L_2 - [\cos(x_b z_m) \cdot (x_{bs1} - x_{bs2}) + \cos(y_b z_m) \cdot (y_{bs1} - y_{bs2}) + \cos(z_b z_m) \cdot (z_{bs1} - z_{bs2})] \\ &= L_2 - [\cos\alpha \cdot (x_{bs1} - x_{bs2}) + \cos\beta \cdot (y_{bs1} - y_{bs2}) \\ &\quad + \cos\gamma \cdot (z_{bs1} - z_{bs2})], \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} H &= L_2 - [\cos(x_b z_m) \cdot (x_{bdj} - x_{bs2}) + \cos(y_b z_m) \cdot (y_{bdj} - y_{bs2}) \\ &\quad + \cos(z_b z_m) \cdot (z_{bdj} - z_{bs2})] \\ &= L_2 - [\cos\alpha \cdot (x_{bdj} - x_{bs2}) + \cos\beta \cdot (y_{bdj} - y_{bs2}) \\ &\quad + \cos\gamma \cdot (z_{bdj} - z_{bs2})] \circ \end{aligned} \quad (15)$$

把 R_{bm} 矩阵的每一项具体的值代入式(10~12)可求得已知旋转角度 A 、 B 时,末端执行器的动坐标:

$$\begin{aligned} x_{mfi} &= \cos(x_b x_m) \cdot (x_{bdj} - x_{bs2}) + \cos(y_b x_m) \cdot (y_{bdj} - y_{bs2}) \\ &\quad - \cos(z_b x_m) \cdot (z_{bdj} - z_{bs2}) \\ &= \cos B \cdot (x_{bdj} - x_{bs2}) + \sin A \cdot \sin B \cdot (y_{bdj} - y_{bs2}) \\ &\quad - \cos A \cdot \sin B \cdot (z_{bdj} - z_{bs2}), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} y_{mfi} &= \cos(x_b y_m) \cdot (x_{bdj} - x_{bs2}) + \cos(y_b y_m) \cdot (y_{bdj} - y_{bs2}) \\ &\quad + \cos(z_b y_m) \cdot (z_{bdj} - z_{bs2}) \\ &= 0 \cdot (x_{bdj} - x_{bs2}) + \cos A \cdot (y_{bdj} - y_{bs2}) + \sin A \cdot (z_{bdj} - z_{bs2}) \\ &= \cos A \cdot (y_{bdj} - y_{bs2}) + \sin A \cdot (z_{bdj} - z_{bs2}) \circ \end{aligned} \quad (17)$$

机器人通过调整 A 、 B 角来实现调姿,即绕坐标系 $O_b - X_b Y_b Z_b$ 的 Z_b 轴旋转角度始终为 0,所以 x_b 轴和动坐标系的 y_m 轴始终垂直,因此式(17)中的 $\cos(x_b y_m) = 0$ 。

4 试验

机器人的结构尺寸如下:

内框长 $L_{in} = 300$;

内框宽 $W_{in} = 200$;

外框长 $L_{out} = 350$;

外框宽 $W_{out} = 200$ 。

表 1 为调姿前各腿位置, $L1 \sim L8$ 为 8 只腿, H 为(作为虚拟腿处理)末端执行器。由末端执行器上安装的激光测距仪测得的制孔点的法向量为 $(0.0398, 0.080, 0.996)^T$,由式(13)计算得到绕 X 、 Y 轴旋转角度:

$$A = -4.574^\circ,$$

$$B = 2.283^\circ。$$

再由式(14~17)计算得到各腿的坐标如表 2 所示。

末端执行器的 X 、 Y 向调整需要通过内框内的 X 、 Y 向电机运动实现,调整量为:

$$\Delta x = -200.624 - (-200) = -0.624,$$

$$\Delta y = 98.752 - 100 = -0.248,$$

$$\Delta z = 200.06 - 200 = 0.06。$$

腿的 X 、 Y 向调整量,通过自动补偿装置实现, Z 向伸缩量为各腿的长度变化量,如表 3 所示。

表 1 调姿前各腿位置

腿	长度/mm	X	Y	Z
L2	200	0	0	200
L1	205	0	200	200
L3	195	-300	0	200
L4	205	-300	200	200
L5	203	25	200	200
L6	208	25	0	200
L7	198	-325	0	200
L8	203	-325	200	200
H	185	-200	100	200

表 2 调姿后各腿位置

腿	长度/mm	X	Y	Z
L2	200.000	0.000	0.000	200.000
L1	189.044	-0.171	199.762	184.004
L3	206.972	-299.961	0.000	211.972
L4	200.996	-299.933	200.161	195.996
L5	186.056	24.729	199.570	183.056
L6	206.972	24.928	0.604	198.972
L7	210.956	-324.821	0.604	212.956
L8	200.000	-324.794	200.433	197.000
H	185.060	-200.624	98.752	200.060

表 3 调姿时腿的伸缩量

腿	L1	L2	L3	L4
调整量/mm	-15.956	0	11.972	-4.04
腿	L5	L6	L7	L8
调整量/mm	-16.944	-1.028	12.956	-3

5 结论

(1) 飞机制孔爬行机器人制孔时的位姿调整可以通过腿的复合运动来实现。

(2) 基于腿的复合运动调姿后,末端执行器的 Z 向伸缩量及 X 、 Y 向调整量都需要重新计算。

(下转第 85 页)

件,使用户具有良好的 Windows 开发环境。

对数据采集卡编程使用的方式主要有以下 3 种:软件触发方式、中断方式、DMA (Direct Memory Access) 方式。软件触发方式采用系统提供的时钟,通过对寄存器的查询来实现数据采集,其采集速度较慢,多用于低速数据采集场合;

中断传输方式需要编写中断服务程序(ISR),将板卡上的数据传输到预先定义好的内存变量中,每次 A/D 转换结束后,产生一个硬件中断,然后由中断服务程序(ISR)完成数据传输;DMA 数据传输方式,应用比较复杂,但由于不需要 CPU 的参与,DMA 方式特别适合应用于大量数据的高速采集。由于检测设备处理的数据量巨大,故采用 DMA 数据采集方式。

系统首先初始化采集卡并分配系统内存用于数据的传输、存储。开始数据采集后系统不断查询板卡上的 FIFO (先入先出缓存),当 FIFO 数据半满或全满时一次性转移存储全部数据。其传输的流程图如图 6 所示。

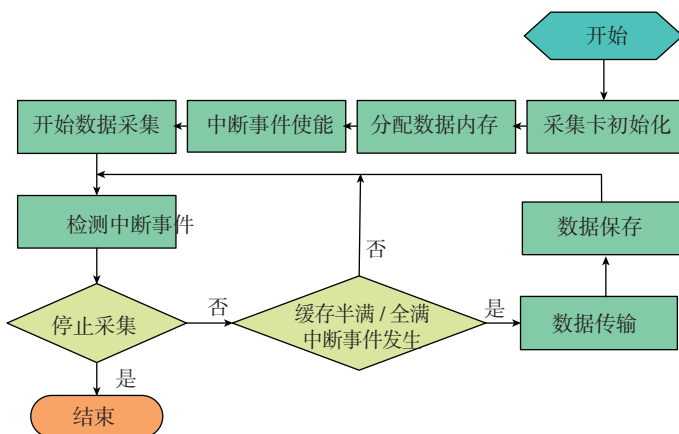


图6 DMA传输流程图
Fig.6 Flow chart of DMA

3 结论

通过 VC++ 开发的基于 PMAC 控制器的多轴联动数控检测系统,系统工作稳定,响应时间短,可移植性强。该程序具有良好的 Windows 应用程序风格,使用方便,操作简单,目前该数控系统已经在复合材料检测上得到了良好的应用。

参考文献

- [1] 孟淑娟,高世一,刘建伟.基于 PMAC 开放式数控系统软件开发.机械设计与制造,2006(11):49-51.
- [2] 苏敏,石世宏,胡进.基于 PMAC 的三维激光加工自动编程系统的研究.激光与红外,2006(6):433-435.
- [3] 田会峰,刘文杰,董里.PMAC 运动控制器在光刻机控制系统中的应用,自动化与仪器,2008(2):55-56,59.

(责编 深蓝)

(上接第 77 页)

(3) 机器人末端执行器调姿不需要设置专门的旋转轴,结构简单,自重轻,可实现机器人的轻量化设计。

参考文献

- [1] 邹方.飞机装配迎来机器人时代.航空制造技术 2009(24):1-4.
- [2] 郭恩明.国外飞机柔性装配技术.航空制造技术,2009(24):1-4.
- [3] Russ D V, Sitton K, Feikert E, et al. ONCE(One Sided Cell End Effector) Robotic Drilling System,2002 01 2626. . St. Louis: Society of Automotive Engineers Inc., 2002.
- [4] Aero Space Robotic End Effectors and Systems[EB/OL] . Carrolltor, US: EOA System Inc. , (2007) [2009-8-20] . http://www.eoa.com.
- [5] 姚艳彬,毕树生,员俊峰.飞机部件机器人自动制孔控制系统设计与分析.中国机械工程,2010,21(17):2021-2024.
- [6] 杜宝瑞,冯子明,姚艳彬,等.用于飞机部件自动制孔的机器人制孔系统.航空制造技术,2010(2):47-50.
- [7] 侯志霞,刘建东,薛贵军,等.柔性导轨自动制孔设备控制技术.航空制造技术,2009(24):58-60.
- [8] 曲巍巍,董辉跃,柯映林.机器人辅助飞机装配制孔中位姿精度补偿技术.航空学报,2011,32(10):1-11.
- [9] 丁希仑,周乐来,周军.机器人的空间位姿误差分析方法.北京航空航天大学学报,2009,35(2):242-245.
- [10] 应高明,王仲奇,康永刚.飞机壁板自动钻铆法向量测量方法研究.机床与液压,2010,12,v38(23):1-4.
- [11] 秦现生,汪文旦,楼阿莉,等.大型壁板数控钻铆的三点快速调平算法.航空学报,2007(11):55-60.
- [12] 张春林,余跃庆.高等机构学,北京:北京理工大学出版社,2006.
- [13] 卢惠民.自主移动机器人全向视觉系统研究[D].北京:国防科学技术大学,2010.
- [14] 李剑.基于激光测量的自由曲面数字制造基础技术研究[D].杭州:浙江大学,2002.
- [15] 施进发,孙建华,宗思生,等.大型曲面形状激光自动测量技术研究.中国机械工程,2001,12(08):868-872.

(责编 小城)

(上接第 81 页)

- [6] 苏多,张建国.数字样机技术在柔性机构可靠性设计分析中的应用.中国机械工程,2006,17:266-269.
- [7] 《飞机设计手册》总编委员会.飞机设计手册(第 14 册).北京:航空工业出版社,2003.
- [8] 朱林,孔凡让,尹成龙,等.基于仿真计算的某型飞机起落架收放机构的仿真研究.中国机械工程,2007,18(1):26-29.
- [9] 《飞机设计手册》总编委员会.飞机设计手册(第 12 册).北京:航空工业出版社,2003.
- [10] Wu Y T, Sitakanta M. Variable screening and ranking using sampling-based sensitivity measures. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(6):634-647.
- [11] Zhao Y G, Lu Z H. Applicable range of the fourth-moment method for structural reliability. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2007, 6(1):151-158.

(责编 亿霖)