

五自由度农业采摘机器人轨迹规划*

卢君宜, 杨庆华*, 高峰, 鲍官军

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:为解决所设计的五自由度农业采摘机器人的轨迹规划问题,通过 DH 参数建模建立了其运动学模型,提出了一种基于代数法和几何法的综合应用的算法,成功推导了此类机器人的逆运动学解析解。在此基础上,采用一种加速度函数为组合正弦函数的轨迹规划方法对其进行关节空间的轨迹规划,并进行了仿真实验分析。研究表明,该规划方法不仅具有操作时间短的特点,而且使得机器人运动平稳,无振动和过冲现象,满足机器人准确、快速完成采摘任务的要求。

关键词:农业采摘机器人;逆运动学;组合正弦函数;轨迹规划

中图分类号:TH123;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2010)12-0001-06

Trajectory planning of a five DOF agricultural picking robot

LU Jun-yi, YANG Qing-hua, GAO Feng, BAO Guan-jun

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Zhejiang University of Technology, Ministry of Education, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problems of the five DOF joint agricultural picking robot's trajectory planning problem, the DH parameters were analyzed and the kinematics model was established, an algorithm was put forward based on the comprehensive application of analytic and geometric method, and the inverse kinematics analytical solution was gotten. On this work, a trajectory planning method was used whose acceleration functions are several sine functions. The simulation results indicate that, the trajectory planning method presents the shortest operating time, and also makes the robot move smoothly, without vibration and overshoot phenomenon. It can meet the robot's request of completing the task fast and accurately.

Key words: agricultural picking robots; inverse kinematics; combination of sine functions; trajectory planning

0 引 言

机器人的轨迹规划是根据作业任务的要求,计算出预期的运动的轨迹,根据此预期的轨迹,实时计算机器人运动的位移、速度、加速度,生成运动轨迹^[1]。机器人的轨迹规划在机器人的控制中具有重要的作用,直接影响着控制的准确性和快速性。尤其是农业采摘机器人,轨迹规划不准确,末端手爪有可能损伤果实或抓持不到目标果实,从而导致采摘作业失败。

国内外研究机器人轨迹规划的学者很多,不断提

出很多轨迹规划的算法,从规划的空间来说机器人的轨迹规划分为关节空间轨迹规划和笛卡儿空间轨迹规划两种。Paul^[2]等人在没有考虑机器人的动力学特性和驱动器的力矩约束的情况下对关节插值轨迹进行了研究;Hollerbach^[3]研究了一种时间比例法,在动力学和力矩约束范围内,可以确定规划出的轨迹是否可实现;Paul^[4]使用齐次变换矩阵表示手部运动要达到的目标位置,用关节空间的二次多项式插补程序保证相邻两段轨迹间的平滑过渡;Taylor^[5]用四元素法改进 Paul 的方法,以求更好、更均匀的运动;除此之外,还有三次^[6]、五次多项式,三次样条^[7],B 样条等轨迹规划法^[8]。

收稿日期:2010-07-19

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2007AA042222);浙江工业大学校基金资助项目(1001102005408)

作者简介:卢君宜(1985-),女,浙江杭州人,主要从事农业机器人技术及其应用方面的研究。E-mail:xiangshui5521@163.com

通信联系人:杨庆华,男,教授,E-mail:zjutme@163.com

对于采摘机器人这类拾取式的运动轨迹规划,限制了始末两个位置,对函数曲线没有强制性,所以应该在轨迹函数、速度函数、加速度函数连续的基础上,从加速度函数入手,选取适当的加速度曲线函数。本研究采用一种加速度函数为组合正弦函数的轨迹规划方法对其轨迹进行了过中间点的 PTP 规划,取得了理想的结果。

1 采摘机器人运动学模型

本实验室研究开发的采摘机械手本体采用关节型结构设计,主要有 5 个旋转关节,结构示意图如图 1 所示。该机械手样机体积小、重量轻、成本低,结构简单紧凑,布局合理,动作灵活平稳,具有足够的强度和承载能力。

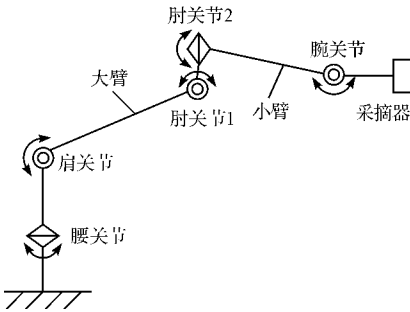


图 1 农业采摘机械手总体结构示意图

首先采用 D-H 法建立机器人坐标系^[9],得到机器人末端执行器的位姿:

$${}^0A_5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$n_x = (c_{23}c_1c_4 + s_1s_4)c_5 - c_1s_{23}s_5 \quad (2)$$

$$n_y = (c_{23}s_1c_4 - c_1s_4)c_5 - s_1s_{23}s_5 \quad (3)$$

$$n_z = s_{23}c_4c_5 + c_{23}s_5 \quad (4)$$

$$o_x = -c_{23}c_1s_4 + s_1c_4 \quad (5)$$

$$o_y = -s_1c_{23}s_4 - c_1c_4 \quad (6)$$

$$o_z = -s_{23}s_4 \quad (7)$$

$$a_x = (c_{23}c_1c_4 + s_1s_4)s_5 + c_1s_{23}c_5 \quad (8)$$

$$a_y = (c_{23}s_1c_4 - c_1s_4)s_5 + s_1s_{23}c_5 \quad (9)$$

$$a_z = s_{23}c_4s_5 - c_{23}c_5 \quad (10)$$

$$p_x = (c_1c_{23}c_4 + s_1s_4)l_5c_5 - l_5c_1s_{23}s_5 + l_4c_1s_{23} + l_3c_1c_{23} + l_2c_1c_2 \quad (11)$$

$$p_y = (s_1c_{23}c_4 - c_1s_4)l_5c_5 - l_5s_1s_{23}s_5 + l_4s_1s_{23} + l_3s_1c_{23} + l_2s_1c_2 \quad (12)$$

$$p_z = l_5s_{23}c_4c_5 + l_5c_{23}s_5 - l_4c_{23} + l_3s_{23} + l_2s_2 \quad (13)$$

其中, $c_i = \cos(\theta_i)$; $s_i = \sin(\theta_i)$; $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$; $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$; $i = 1, 2, 3, 4, 5$, 后文中均用此写法进行简写。

2 采摘机器人逆运动学求解

由于本研究的机器人不满足 Pieper 准则,在正运动学基础之上,单独采用矩阵变换或者几何图解法思想,无法求得机器人的逆运动学解析解,因此,笔者将此两种简单的方法加以综合求解,成功推导出了该类机器人的逆运动学解析解。其推导过程如下:

(1) 求解 θ_1 。

对式(1)变换可得:

$${}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \cdot {}^3A_4 \cdot {}^4A_5 = ({}^0A_1)^{-1} \cdot {}^0A_5 \quad (14)$$

根据式(14)中矩阵的(1,3)和(4,3)元素相等,得到:

$$\begin{cases} \theta_{11} = \arctan(p_y - l_5n_y, p_x - l_5n_x) \\ \theta_{12} = \arctan(l_5n_y - p_y, l_5n_x - p_x) \end{cases} \quad (15)$$

根据 (p_x, p_y) 及 (n_x, n_y) 所处的象限决定 θ_1 的值,显然,很容易求出其在 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 区间内的两个解。

(2) 求 θ_5 。

对式(14)进一步变换可得:

$${}^2A_3A_4A_5 = ({}^1A_2)^{-1}({}^0A_1)^{-1}A_5 \quad (16)$$

同理,由式(16)中左右等式两边矩阵的(3,1)和(2,3)元素相等,得到:

$$\theta_5 = \text{atan2}(Na_x - a_y, Nn_x - n_y) \quad (17)$$

式中, $N = \tan(\theta_1) = \frac{p_y - l_5n_y}{p_x - l_5n_x}$, $\text{atan2}(y, x)$ 是一个在 $[-2\pi, 2\pi]$ 内的反余切函数,根据 (x, y) 所在的象限,准确求得角度值。

(3) 求 θ_4 。

根据式(16)中左右矩阵(3,1)和(3,2)项元素分别相等得到:

$$s_1o_x - c_1o_y = c_4 \quad (18)$$

$$s_4 = \frac{s_1n_x - c_1n_y}{c_5} \quad (19)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}(s_4, c_4) \quad (20)$$

(4) 采用几何法求解 θ_2 和 θ_3 。

在这里针对本研究的机器人,通过进一步的逆矩阵左乘方法无法求得其关节 2、3 的角度值。因此,提出将几何求解法与代数解法结合,由于 $\theta_1, \theta_4, \theta_5$ 上文中已经求解,在已知末端位姿的情况下,根据 θ_4, θ_5 可以确定关节 2 的位置,即图 2 中 Q 点的位置,将关节 2、3 可以简化为平面内的运动,在机器人操作的俯视

图(如图 3 所示)中,可以将关节 2,3 的运动简化为两条直线。而关节 1 的运动曲线是一个半径为 l_2 的圆。因此下文将在平面内研究推导关节 2,3 的角度求解方法。

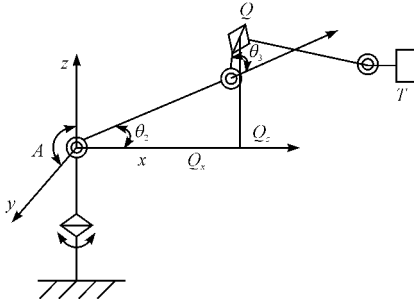


图 2 关节 4 与基座位置关系

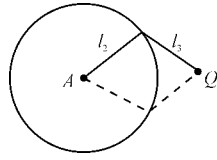


图 3 A 到 Q 点的俯视图

假设手爪位置 T 的坐标为 (p_x, p_y, p_z) , 旋转关节中心 Q 的坐标为 (Q_x, Q_y, Q_z) , 则有:

$${}^0A_3 = {}^0A_5 ({}^3A_4)^{-1} ({}^4A_5)^{-1} \quad (21)$$

$(Q_x, Q_y, Q_z, 1)^T$ 即为 0A_3 矩阵的第 4 列, 可通过上式计算出其解:

$$\begin{cases} Q_x = p_x - l_5 n_x - l_4 a_x \cos(\theta_5) + l_4 n_x \sin(\theta_5) \\ Q_y = p_y - l_5 n_y - l_4 a_y \cos(\theta_5) + l_4 n_y \sin(\theta_5) \\ Q_z = p_z - l_5 n_z - l_4 a_z \cos(\theta_5) + l_4 n_z \sin(\theta_5) \end{cases} \quad (22)$$

由根据图中几何关系可以得到:

$$\begin{cases} Q_x = l_2 \cos(\theta_2) + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ Q_z = l_2 \sin(\theta_2) + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{cases} \quad (23)$$

将式(23)代入式(22)即可得到:

$$\begin{cases} s_{23} = -\frac{Q_z}{s_4} \\ c_{23} = s_5 n_z - a_z c_5 \end{cases} \quad (24)$$

$$\theta_{23} = \text{atan2}(s_{23}, c_{23}) \quad (25)$$

$$\begin{cases} s_2 = \frac{p_x - l_5 c_{23} c_5 - l_5 s_{23} c_5 s_5 + l_4 c_{23} - l_3 s_{23}}{l_2} \\ c_2 = \frac{(c_1 p_x + s_1 p_y) - l_5 c_{23} c_4 c_5 + l_5 s_{23} s_5 - l_4 s_{23} - l_3 c_{23}}{l_2} \end{cases} \quad (26)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(s_2, c_2) \quad (27)$$

最后通过 $\theta_3 = \theta_{23} - \theta_2$ 得出 θ_3 的值。

3 组合正弦曲线轨迹规划

为使机器人能够快速平稳地从初始位姿到达终止位姿, 要求机器人在运行和停止时必须平缓, 不能猛然加速、骤然减速, 因此就需要最大速度、加速度、冲击非常小, 并且不能突变。轨迹规划曲线的特性指标主要有以下几点^[10-11]:

(1) 轨迹规划函数连续, 且其一阶、二阶导数(速度和加速度)在端点处的值为零, 从而保证机器人运行和停止时的平稳性。

(2) 最大速度、加速度及冲击曲线: 当工作中需要紧急停车时, 若动量过大, 会出现操控失灵、机构损坏等安全事故, 因此, 希望机器人系统速度的最大值在满足要求的情况下越小越好。加速度的大小会直接影响机器人系统的惯性力, 因此加速度也是越小越好。冲击曲线是否连续, 或者突变值的大小对机器人动力特性有很大的影响。连续的冲击曲线或者冲击突变值较小的轨迹规划曲线, 可以改善机器人系统的动力学特性, 减少系统的残余振动。

(3) 轨迹规划算法的实时性: 从工程应用的角度来看, 算法的计算量直接影响到机器人控制的实时性, 为了实现机器人的快速运动, 应尽量选择简单、易于实现的规划算法。

考虑到以上几个要求, 笔者对该机器人采用组合正弦曲线的轨迹规划方式, 在正则形式下, 组合正弦函数运动方程可描述为:

$$s(\tau) = \begin{cases} \frac{k}{4\pi} \left[\tau - \frac{\sin(4\pi\tau)}{4\pi} \right] & 0 \leq \tau < \frac{1}{8} \\ \frac{k}{4\pi} \left[\tau + \frac{2}{\pi} - \frac{9}{4\pi} \cos\left(\frac{4\pi\tau}{3} - \frac{\pi}{6}\right) \right] & \frac{1}{8} \leq \tau < \frac{7}{8} \\ \frac{k}{4\pi} \left[\tau + \frac{4}{\pi} - \frac{\sin(4\pi\tau - 2\pi)}{4\pi} \right] & \frac{7}{8} \leq \tau < 1 \end{cases} \quad (28)$$

对其进行微分可得到其一阶及二阶导数为:

$$s'(\tau) = \begin{cases} \frac{k}{4\pi} [1 - \cos(4\pi\tau)] & 0 \leq \tau < \frac{1}{8} \\ \frac{k}{4\pi} \left[1 + 3\sin\left(\frac{4\pi\tau}{3} - \frac{\pi}{6}\right) \right] & \frac{1}{8} \leq \tau < \frac{7}{8} \\ \frac{k}{4\pi} [1 - \cos(4\pi\tau - 2\pi)] & \frac{7}{8} \leq \tau < 1 \end{cases} \quad (29)$$

$$s''(\tau) = \begin{cases} k \sin(4\pi\tau) & 0 \leq \tau < \frac{1}{8} \\ k \cos\left(\frac{4\pi\tau}{3} - \frac{\pi}{6}\right) & \frac{1}{8} \leq \tau < \frac{7}{8} \\ k \sin(4\pi\tau - 2\pi) & \frac{7}{8} \leq \tau < 1 \end{cases} \quad (30)$$

其中, $k = \frac{4\pi^2}{\pi + 4}$, τ —归一化时间, $\tau = \frac{t}{T} = \frac{t}{t_f - t_0}$ 。

为了正确分析正弦组合曲线规划的优缺点, 下面将一些常用的轨迹规划方法进行对比。即将五次多项式、摆线运动、B 样条、抛物线和组合正弦函数规划进行对比。其位移、速度、加速度和冲击曲线对比图分别如图 4 ~ 图 7 所示。

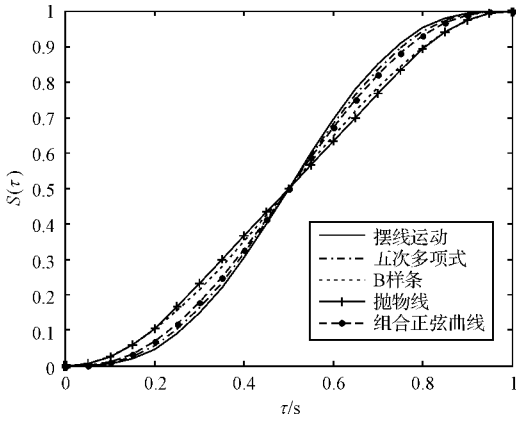


图 4 位移曲线对比

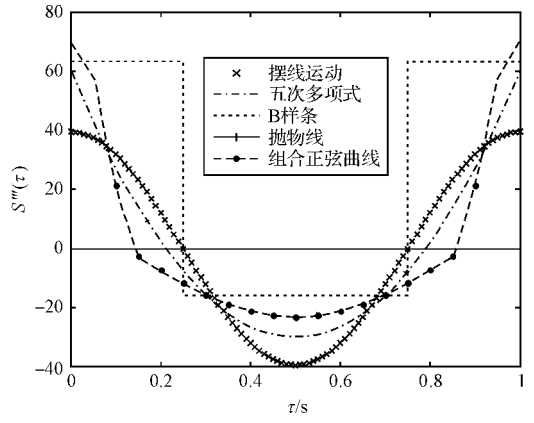


图 7 冲击曲线对比

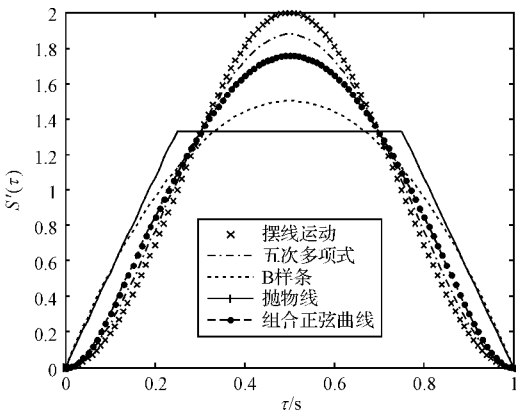


图 5 速度曲线对比

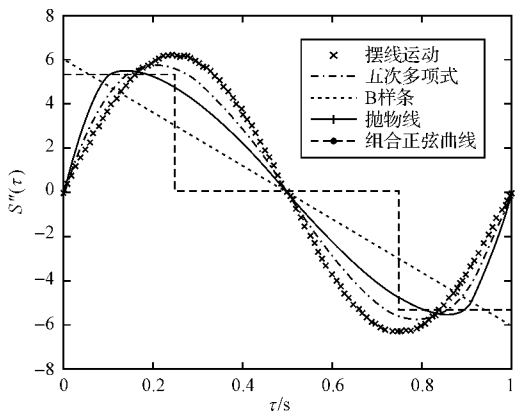


图 6 加速度曲线对比

从图 4 ~ 图 7 可知:各种规划算法都能生成从起始位置到终止位置的平滑轨迹,只是轨迹曲线的各种性能指标有所不同。

这 4 种函数的位移曲线几乎相同,差别不大。组合正弦函数的最大加速度和最大速度都是最小的,具有好的加速度曲线,但其冲击曲线高低不平,有较大的波动,峰值最大,不如摆线运动的冲击曲线平滑,如果限定电机的最大转速,则组合正弦函数完成给定的操

作所用的时间最短,也是时间最优轨迹,可以提高机器人的工作效率。故本研究选用基于组合正弦函数的轨迹规划方法。

4 Matlab 仿真实验分析

在给定机器人末端位姿条件下,采用前面提出的逆运动学封闭算法,求出 8 组封闭逆解。通过比较相邻点间的最短距离对其进行最优处理得到一组最优解,然后用组合正弦曲线进行规划,对机器人运动涉及的关节角轨迹、角速度和角加速度时间曲线以及机器人末端位移进行仿真。

已知起始点 P_1 、途经点 P_2 和终点 P_3 的位姿矩阵,对空间曲线 P_1, P_2 和 P_3 进行运动仿真分析。

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.8052 & -0.7042 & 0.1291 & -206.7559 \\ -0.4694 & -0.4931 & 0.7964 & 123.7225 \\ 0.6245 & 0.5108 & -0.5908 & -291.4551 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1.0528 & -0.0320 & -0.0468 & 263.1950 \\ -0.0493 & -0.9706 & -0.2368 & 55.6331 \\ 0.0379 & 0.2384 & -0.9704 & -424.3796 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0.4888 & 0.8440 & 0.5283 & 98.3986 \\ 0.5430 & 0.5452 & 0.8491 & 481.8883 \\ 0.9942 & -0.1076 & -0.0019 & -485.0910 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

采用逆运动学解的封闭解法,求解末端位姿分别为 P_1, P_2 和 P_3 点的关节角度值 q_1, q_2 和 q_3 ,并通过相邻点的距离最短来选择最优解,得到:

$$q_1 = [-1.046, 1.52, -2.1, 1.2, -0.58];$$

$$q_2 = [0.5, 0.35, -0.8, 0.58, 0.345];$$

$$q_3 = [1.4, -0.5, 0.78, 0.4, 1.31];$$

仿真结果如图 8 ~ 图 15 所示。

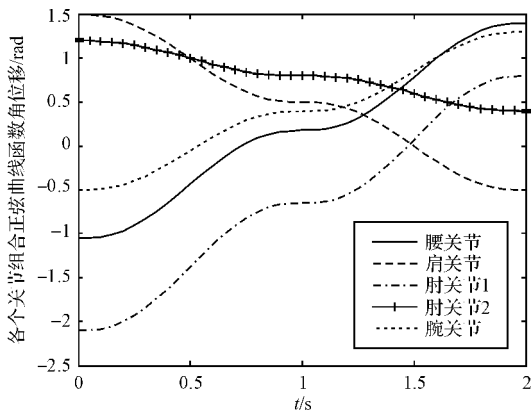


图8 各关节角位移

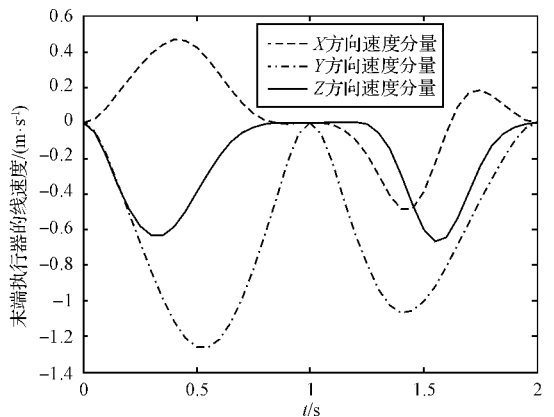


图12 末端执行器线速度

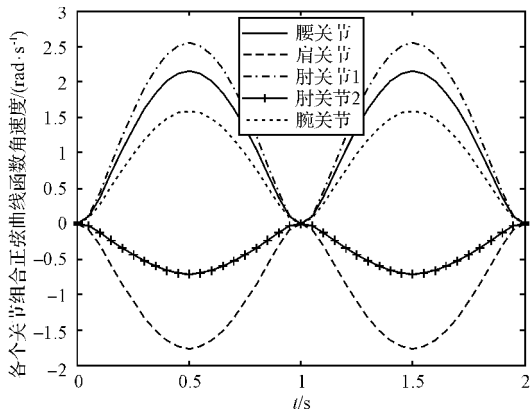


图9 各关节角速度

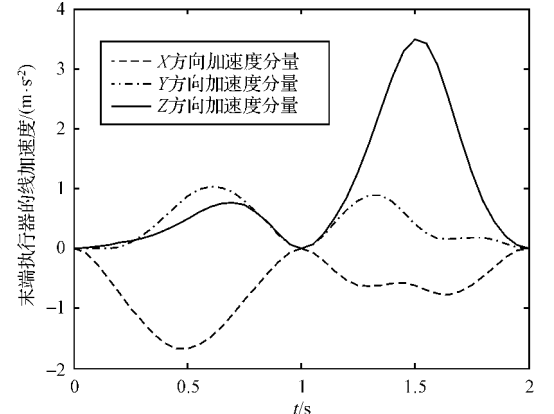


图13 末端执行器线加速度

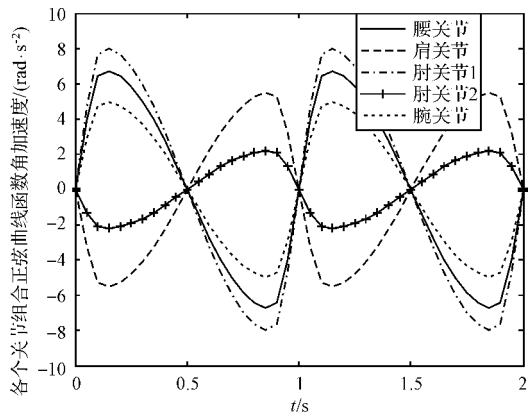


图10 各关节角加速度

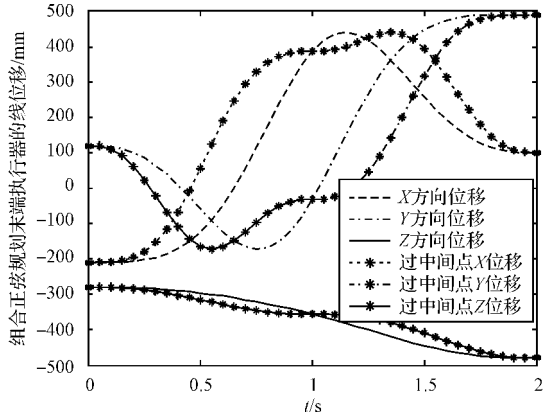


图14 过中间点与不过中间点组合正弦规划的末端位移对比

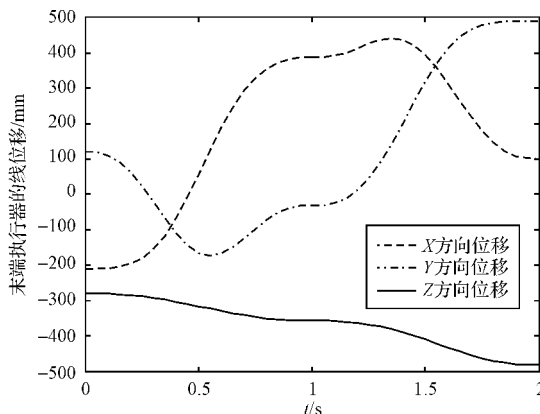


图11 末端执行器线位移

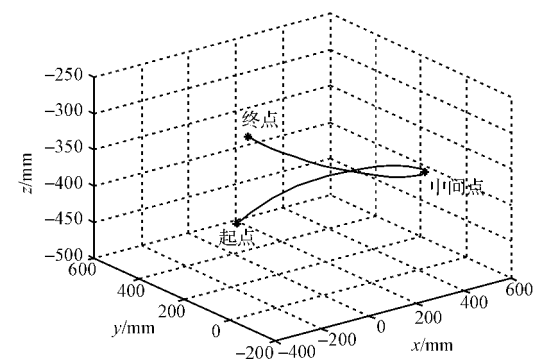


图15 组合正弦曲线规划末端综合位移