

文章编号: 1001-0920(2009)01-0049-06

基于状态空间的机械臂轨迹规划

谢文龙, 苏剑波

(上海交通大学 自动化系, 上海 200240)

摘 要: 提出一种基于状态空间的机械臂轨迹规划方法, 定义并构造了机械臂系统的状态空间, 根据内在机构约束与外部环境约束描述出系统状态的可达范围, 并给出了任务的可实现条件. 对于可实现任务, 在状态空间能搜索到任务完成的最优解. 如果任务无法完成, 则修改系统配置或约束, 在新的状态空间确定任务实现的转化条件, 并对任务的设计与规划给予指导. 研究了障碍约束下两连杆机械臂的点到点任务, 实验结果验证了该方法的有效性.

关键词: 轨迹规划; 构形空间; 状态空间; 状态变迁

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Trajectory planning for robot manipulators based on state space

XIE Wen-long, SU Jian-bo

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China. Correspondent: XIE Wen-long, E-mail: leonard_xie@sjtu.edu.cn)

Abstract: This paper proposes a trajectory planning approach for robot manipulators based on state space. The state space of manipulator system is defined and constructed, by which the reachable scope of the system state is traced out according to the internal physical constraints and external environment constraints. Conditions of performing the task successfully are given. For realizable task, the optimal strategy for task execution is obtained by searching in state space. If the task is unrealizable, it could be transformed to be achievable via adjusting system's configuration or constraint, and the transformation condition for task realization is determined in reconstructed state space. This contributes to the design and plan of the robotic tasks. Point-to-point tasks for 2-link manipulator are investigated and experiment results show the validity of the proposed method.

Key words: Trajectory planning; Configuration space; State space; State transition

1 引 言

机械臂轨迹规划是指, 在满足一定约束的条件下, 从起始位姿到目标位姿规划一条无碰撞的运动轨迹. Paul^[1] 首先利用齐次变换矩阵, 将手部在直角坐标下的位置、速度与加速度变换成各关节的位移、速度和加速度, 然后规划成二次平滑函数. 这种方法的计算量非常大. Lin^[2] 提出规划轨迹的 3 次样条函数方法, 能够得到优化的关节运动规律, 但是当轨迹中间路径点个数 n 较多时, 计算量也较大, 同时该方法也缺乏姿态插补的考虑. Dissanayake^[3] 以离散关节力矩或关节加速度为优化变量, 采用数学规划方法求解最优关节轨迹. Saramago^[4] 用 B 样条函数逼近关节轨迹, 用数学规划求解样条函数最优控制点序列, 得到近似最优解.

实际上, 根据规划空间的不同, 规划方法可分为构形空间规划与任务空间规划两种. 构形空间(又称关节空间)规划^[5,6] 为物理层规划, 具有较好的实时性, 因而被广泛采用. 其局限性为: 1) 任务表示不直观, 任务通常在笛卡儿空间描述, 应用该方法时, 需将笛卡儿参数转化到关节空间表示; 2) 缺乏统一性和灵活性, 需根据不同机械臂的自由度构造不同的关节空间; 3) 只能在任务的能力范围内进行规划, 机械臂本身的机构限制使其完成任务的能力有限, 能力范围外的任务无法在关节空间表示. 任务空间(又称笛卡儿空间)规划^[7,8] 为任务层规划, 具有直观、便捷的优点, 直接对机械臂的位姿进行规划, 但实现时需将笛卡儿空间的位姿转化为关节角, 涉及大量的逆运动学运算, 很难用于实时控制. 同样, 这

收稿日期: 2007-10-25; 修回日期: 2008-05-04.

基金项目: 国家自然科学基金海外杰出青年基金项目(60428303); 国家自然科学基金项目(60675041).

作者简介: 谢文龙(1977—), 男, 河北获鹿人, 博士生, 从事多机器人协调、机器人运动规划等研究; 苏剑波(1969—), 男, 江苏靖江人, 教授, 博士生导师, 从事网络机器人、多机器人协调等研究.

种方法也是在机械臂的能力范围内进行规划。

上述两种轨迹规划,都是在任务能够完成的情况下规划任务的轨迹,而没有考虑机械臂的能力范围及任务不可完成的情况。对于任意给定的任务,在轨迹规划前,首先需要考虑两个问题:1) 该任务是否可完成,只有当任务可完成时,轨迹规划才有意义;2) 如果任务无法完成,如何使任务变为可完成,即寻找一种策略,将不可实现的任务转化为可实现,并给出转化条件。这两个问题对于任务的设计与实现至关重要。

本文提出一种基于状态空间的机械臂轨迹规划方法,根据构造的机械臂系统状态空间,计算系统状态的可达范围,并给出了任务的可完成条件。对于可完成任务,在状态空间求解任务完成的最优解。若任务无法实现,则修改系统配置或约束将任务变为可完成,并在新的状态空间确定任务实现的转化条件。

2 基于状态空间的机械臂轨迹规划

机械臂在任务执行过程中,各自由度的位置、速度与加速度不断变化,因此需驱动机械臂的位姿变化以完成给定的任务。如果把与机械臂及任务相关的变量作为状态分量构造一个状态空间,则任意时刻机械臂所处状态都可用状态分量的一组确定值表示,对应于状态空间中的一个点。

机械臂在执行任务过程中可能具有以下3种约束:物理约束、障碍约束及任务约束。机械臂本身的机构限制使其运动能力及范围有限,这种约束称为物理约束,如连杆机构及形状使得某些关节只能在一定的范围内变化,机械臂只能在工作空间的某一区域内工作。工作空间可能存在障碍物,因此机械臂的某些位姿无法实现,这种约束称为障碍约束。机械臂要执行的任务可能也有一定的要求,如末端执行器按照特定的轨迹运动,这种约束为任务约束。

在初始时刻,机械臂状态可用状态空间中的起始点表示,对于给定的任务,如点到点(PTP)任务,要求机械臂运动到目标位姿,表示为状态空间中的目标点。机械臂运动过程中,系统状态不断变化,则任务的执行可以看作是系统状态在状态空间的轨迹变迁过程,系统约束描述为状态空间中的不可达区域,这样机械臂的轨迹规划问题便转化为状态空间中的约束求解问题。任务的执行过程对应着起止状态间的一条变迁轨迹,不同轨迹表示任务实现的不同方式。任务是否能完成取决于系统是否满足以下条件:1) 目标状态在可达区域内;2) 可达区域内存在起止状态间的连通路程。

2.1 状态空间模型

对于给定任务,与机械臂及任务相关的变量有

很多,如各自由度的位置,连杆的形状与长度,基坐标的位置,末端执行器的位置与姿态等。以这些变量构造状态空间将导致空间的维数很高,为降低维数,应选择与任务要求及特性直接相关的变量。

假定选择的变量数为 m , 这些变量构成了一个 m 维的状态空间 R^m , 设系统的状态为 $x = (x_1, \dots, x_m) \in R^m$, 各变量取值范围

$$x_i \in [x_i^{\min}, x_i^{\max}], \quad i = 1, \dots, m. \quad (1)$$

系统初始状态与任务完成所需到达的目标状态为

$$\begin{aligned} x^0 &= (x_1^0, \dots, x_m^0), \\ x^g &= (x_1^g, \dots, x_m^g). \end{aligned} \quad (2)$$

假设 S 表示整个状态空间区域, 系统约束引起的状态不可达区域为 \bar{A} , 即

$$\bar{A} = \bar{A}_p + \bar{A}_o + \bar{A}_t = \bigcup_i \bar{A}_{pi} + \bigcup_j \bar{A}_{oj} + \bigcup_k \bar{A}_{tk}, \quad (3)$$

其中 \bar{A}_p , \bar{A}_o 和 \bar{A}_t 分别表示物理约束、障碍约束和任务约束引起的不可达区域。若 A 表示状态可达区域, 则 $S = A \cup \bar{A}$ 。机器人完成任务的过程就是在可达集 A 中由 x^0 到 x^g 的一条变迁轨迹。

状态空间的可达区域可通过如下步骤确定:

- 1) 在无约束条件下确定各状态分量的取值范围。
- 2) 指定各状态分量采样间隔 $I_i (i = 1, \dots, m)$, 按照 x_1 到 x_m 的顺序, 取前 $m-1$ 个变量的最小值, 在 $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ 内以采样间隔 I_m 由小到大对 x_m 取值, 并判断每一状态点是否满足 $x \in A$ 。如果条件满足, 则该状态可达; 否则为不可达。

3) 以采样间隔 I_{m-1} 改变 x_{m-1} 的值, 计算此时 x_m 在各采样点的状态是否可达, 直到 x_{m-1} 取最大值为止。依此类推, 改变前 $m-2$ 个变量的值, 最终可计算出整个状态空间的可达区域。

在这种框架下, 任务空间与构形空间法均为状态空间法的特例, 前者考虑的是机械臂的位置与姿态变量, 后者则考虑关节变量。考虑到任务设计时, 机械臂位姿对任务描述的直接便捷性, 以末端执行器的位姿变量为基础定义状态空间模型

$$x = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma). \quad (4)$$

其中 x, y, z 表示末端执行器参考点在世界坐标系的位置; α, β, γ 表示末端执行器的姿态角。这样便构造了一个六维的状态空间。状态变量的选择不局限于位姿变量。当考察连杆长度对任务的影响时, 可将机械臂的连杆长度作为状态分量, 并与位姿变量共同构造状态空间。图1为二维空间两连杆机械臂, 状态空间维数为3, 而

$$x = (x, y, l). \quad (5)$$

其中： x, y 表示连杆 2 末端的位置； θ 为连杆 2 的方向与水平轴的夹角。

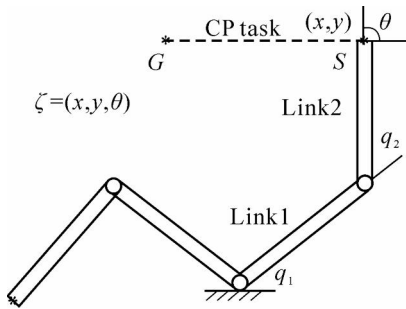


图 1 二维空间两连杆机械臂的状态空间模型

2.2 无障碍约束下的状态可达空间

机械臂具有物理约束,可完成任务的能力有限,以图 1 机械臂为例,分析其可实现任务的范围.状态空间模型如式(5),由前述方法可计算出系统状态的可达区域.由于末端执行器的位姿与各关节值具有一一对应的关系,为减少计算量,通过关节角计算可达空间.

以世界坐标系为参考系,基坐标位置 $B_x = 1, B_y = 1$,两个连杆长度 $L_1 = L_2 = 0.5$.由 q_1 和 q_2 可确定末端执行器的位姿

$$\begin{aligned} x &= B_x + L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2), \\ y &= B_y + L_1 \sin q_1 + L_2 \sin(q_1 + q_2), \\ \theta &= q_1 + q_2. \end{aligned} \tag{6}$$

关节角取值范围 $0 < q_i < 2 (i = 1, 2)$,采样间隔 $I_1 = 1^\circ, I_2 = 2^\circ$.则该机械臂无障碍约束下的状态可达空间如图 2(a) 灰色曲面所示.图 2(b) 为 $\theta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 时的可达区域,为 4 个圆,这是因为当姿态角为某一定值 c 时,由式(6)得

$$\begin{aligned} x &= C_1 + L_1 \cos q_1, \\ y &= C_2 + L_1 \sin q_1. \end{aligned} \tag{7}$$

其中： C_1, C_2 为常数,即

$$\begin{aligned} C_1 &= B_x + L_2 \cos(q_1 + q_2) = B_x + L_2 \cos c, \\ C_2 &= B_y + L_2 \sin(q_1 + q_2) = B_y + L_2 \sin c. \end{aligned} \tag{8}$$

此时的可达区域是以 (C_1, C_2) 为圆心, L_1 为半径的圆.整个可达空间为一系列相同半径不同圆心的平

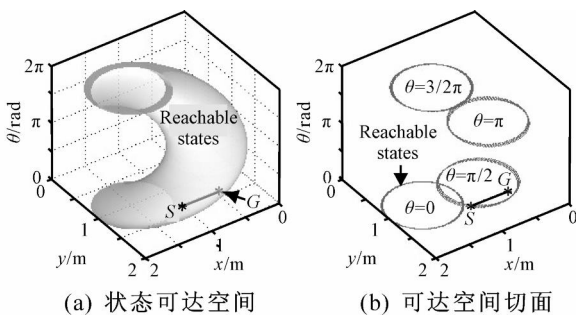


图 2 无障碍约束下机械臂状态可达空间

面圆组成的曲面,机械臂只能执行曲面所对应位姿的任务.

连续路径规划任务(CP),如弧焊接,对中间位姿有一定约束.图 1 中,假定任务要求机械臂以姿态角 $\theta/2$ 由初始点 S 沿直线运动到目标点 G ,初始状态 $S = (1.36, 1.86, \pi/2)$,目标状态 $G = (0.8, 1.86, \pi/2)$,该任务在状态空间的轨迹为 S 到 G 且 $\theta = \pi/2$ 的一段直线.由图 2 可知, S 在状态可达曲面上,而 G 位于曲面内部,因此机械臂无法完成该任务.

2.3 障碍约束下的状态可达空间

当工作空间存在障碍物时,机械臂的某些位姿无法实现,此时,状态空间以前的某些可达区域变为不可达.图 3(a) 中,假定工作空间有两个矩形障碍,一个圆形障碍,则该机械臂障碍约束下的状态可达空间如图 3(b) 所示.3 个障碍分别对应 3 个不可达区域:障碍物 1 使得关节角 q_1 在 0 附近取值时,连杆 1 进入障碍区域,此时无论 q_2 为何值,相应的状态点均为不可达,对应着图 3(b) 左边的空白区域(无障碍物 1 时,可达区域为闭合曲面,障碍物 1 导致曲面的左边部分变为不可达区域);障碍物 2 使得关节角在 $q_1 = \pi/2, q_2 = 0$ 附近取值时,连杆 2 进入障碍区域,系统状态 $\zeta = (1, 2, \pi/2)$ 的附近区域为不可达,对应着 Goal1 左边的空白区域(为曲面上的一个洞);同样,圆形障碍物 3 使得关节角在 $q_1 = 3\pi/4, q_2 = 0$ 附近取值时,连杆 2 进入障碍区域,系统状态 $\zeta = (0.29, 1.71, 3\pi/4)$ 的附近区域为不可达,对应着 Goal1 上方的空白区域.这些障碍约束使得系统状态的可达区域变小,机械臂完成任务的能力减弱.

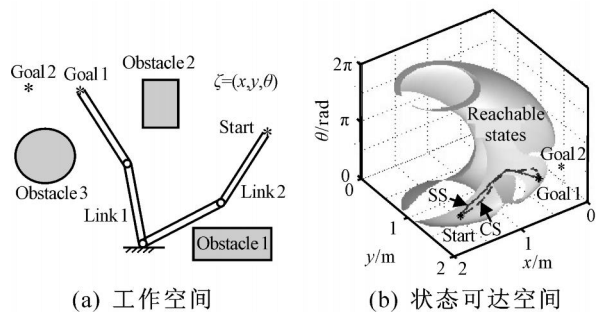


图 3 障碍约束下机械臂状态可达空间

2.4 状态空间搜索

计算出系统状态的可达区域后,为了得到任务的解,需要寻找一条由初始点 S 到目标点 G 的状态变迁轨迹,可通过搜索获得.状态轨迹可能不止一条,此时可定义一个性能指标函数以获得任务实现的最优解.

状态空间搜索方法有多种,如深度优先,广度优先, $A^*, D^*, Best-First$ 及双向搜索等.通常状态空间的维数较高,计算复杂度较大,为提高搜索效率,可

采用启发式搜索,如 A* 算法^[9]. A* 的估价函数为

$$f(n) = g(n) + h(n). \quad (9)$$

其中 $g(n)$ 是起始节点到节点 n 的最小代价, $h(n)$ 是节点 n 到目标节点的代价估计, $f(n)$ 是起始节点经节点 n 到目标节点的代价估计. 取

$$g(n) = C(0, n) = \sum_{i=1}^n C(i-1, i), \quad (10)$$

$$h(n) = \sqrt{(x_i^n - x_i^g)^2 + \dots + (x_m^n - x_m^g)^2}, \quad (11)$$

其中 $C(i-1, i)$ 表示相邻状态 $i-1$ 到 i 的路径代价.

假定任务要求机械臂由起始位姿运动到目标位姿 Goal1, 初始状态 $s^0 = (1.68, 1.68, 1.05)$, 目标状态 $s^1 = (0.66, 1.92, 2.09)$, 如图 3(a). 考虑最短路径轨迹(同样也可考虑其他性能指标), 取

$$C(i-1, i) = \sqrt{(x^i - x^{i-1})^2 + (y^i - y^{i-1})^2}. \quad (12)$$

如果工作空间无障碍物, 则可达区域内起止状态间的直线表示该任务的最优解, 在工作空间表现为末端执行器沿直线运动到目标点(可达空间为三维曲面, 这里的直线指的是将曲面展开为二维平面后起止点间的直线, 在三维空间其形状为曲线). 因障碍物 2 的存在, 状态空间出现相应的不可达区域, 原来的直线将穿越此区域, 因此系统状态需绕过此不可达区域到达目标状态, 如图 3(b) 中实线所示.

图 4(a) 为该任务的构形空间规划, 与之对应的状态轨迹如图 4(b) 中虚线所示. 图 4(b) 为两种方法所得的机械臂轨迹在工作空间的比较. 由图可知, 虽然它们都能得到各自空间的最优解, 但状态空间法得到的轨迹更平滑, 路径更短. 这是因为构形空间考虑的是关节角, 而关节运动的最优轨迹不一定是末端执行器的最优轨迹. 构形空间规划中, 轨迹的初始阶段 q_1 不变, q_2 增大, 工作空间中机械臂末端轨迹是以连杆 1 末端 $(1.43, 1.25)$ 为圆心, 半径 $r = L_2 = 0.5$ 的一段逆时针圆弧; 中间阶段, q_1 增大, q_2 减小, 变化幅度近似相等, $\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = 3/4$, 末端执行器轨迹是以 $(0.65, 1.35)$ 为圆心, 半径 $r =$

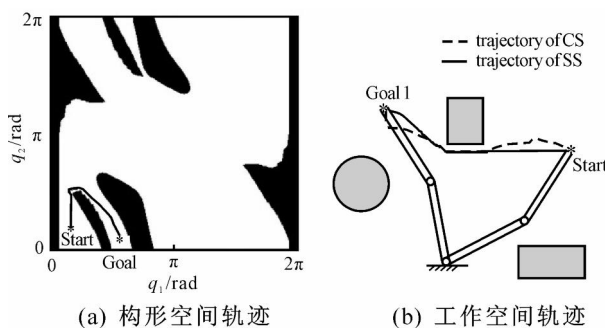


图4 构形空间轨迹规划

0.5, 姿态角为 $3/4$ 的一段顺时针圆弧; 最末阶段, q_1 增大 ($\dot{q}_1 = 1/2$), q_2 减小, 但 q_2 变化较大, 末端执行器轨迹为圆心及半径不断变化的一段顺时针圆弧.

3 任务无法完成时的解决方案

如果目标状态不在可达区域或可达区域内不存在起止状态间的连通路程, 则任务无法完成. 此时, 可根据任务特性与状态空间状况选择修改系统配置或约束, 增加新的状态变量, 重新构造系统的状态空间, 分析并确定在何种配置或约束下任务可完成.

3.1 修改系统配置

图 3(a) 中, 如果任务要求机械臂运动到目标位姿 Goal2, 目标状态 $s^2 = (0.38, 1.94, 2.44)$, 而状态空间中 Goal2 位于可达区域外, 因此机械臂无法完成该任务. 考虑到目标状态在整个可达区域的外侧, 任务无法完成是因为机械臂的能力不足以到达该状态. 为此, 修改系统配置, 即改变机械臂结构, 在连杆 2 末端增加一个移动关节 q_3 , 如图 5(a), 并重新构造系统的状态空间

$$s = (x, y, \theta, q_3). \quad (13)$$

根据 q_3 的取值范围 $[q_{3min}, q_{3max}]$ 即可计算出系统状态的可达区域. 取 $q_{3min} = 0, q_{3max} = 1$ (在无法确定 q_{3max} 为多大能保证任务可实现时, 取足够大的值), 在新的状态空间重新计算系统的初始状态和任务的目标状态, $s^0 = (1.68, 1.68, 1.05, 0), s^2 = (0.38, 1.94, 2.44, 0.2)$. 此时目标状态位于可达区域, 通过搜索能够找到起止状态间的连通路程, 因此任务可完成.

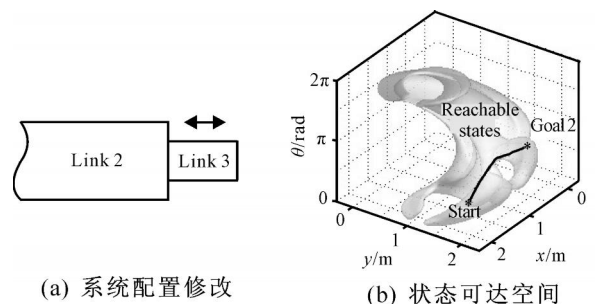


图5 修改系统配置后的状态可达空间

定义 Q 为任务可实现时 q_{3max} 的最小值, 即

$$Q = \arg \min (q_{3max}), \quad (14)$$

则任务的可实现条件为 $q_{3max} \geq Q$. 为确定 Q 值, 在搜索算法中取

$$C(i-1, i) = \sqrt{(x^i - x^{i-1})^2 + (y^i - y^{i-1})^2 + [10(q_3^i - q_3^{i-1})]^2}. \quad (15)$$

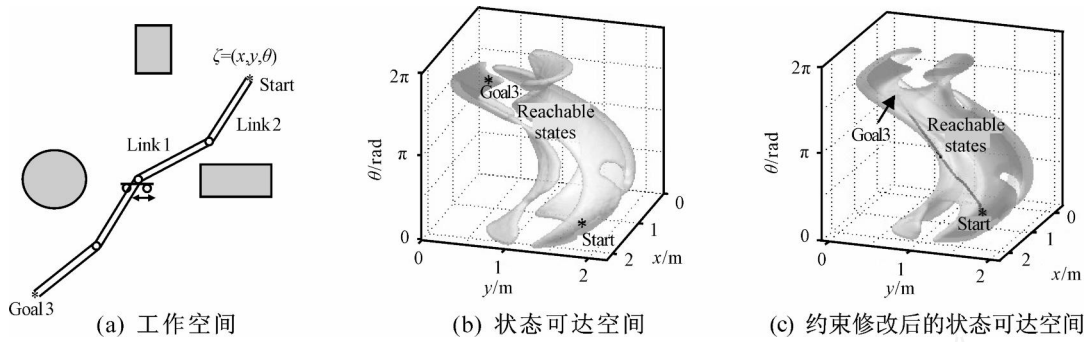


图 6 修改系统约束后的状态可达空间

即通过增大 q_3 变化的代价使其在状态轨迹中的变化范围最小,搜索结果中 q_3 的最大值即为 Q ,这里 $Q = 0.2$. 因此,通过增加一个移动关节 q_3 且使 q_{3max} 0.2 ,可将原来不可实现的任务转化为可实现.

为了评估修改系统配置对原状态可达区域的改善状况,对状态空间的新增变量进行投影. 假定 i 为点投影,表示 i 为定值时的状态空间

$$i() = (1, \dots, i-1, i+1, \dots, m); \quad (16)$$

$i_{[a_i, b_i]}()$ 为点集投影,表示 $a_i \sim b_i$ 区间内的状态空间

$$i_{[a_i, b_i]}() = \{i() \mid S \text{ and } i \in [a_i, b_i]\}. \quad (17)$$

图 5(b) 是对 q_3 进行投影 $i_{[0, 0.2]}()$ 后的状态空间. 由图可知,可达区域向外延伸,任务的可实现范围变大,目标状态 Goal2 位于可达区域,且起止状态间存在连通路径,因此任务可完成.

3.2 修改系统约束

当任务无法完成时,同样也可修改系统约束并确定何种约束情况下任务可实现. 工作空间如图 6(a) 所示,系统初始状态 $^0 = (1.68, 1.68, 1.05)$, 目标状态 $^3 = (0.36, 0.24, 3.84)$. 状态空间如图 6(b) 所示,起止状态均位于可达区域,但它们之间无连通路径,因此任务无法完成.

考虑到目标状态位于可达区域,任务无法完成是由于工作空间两侧的障碍物将状态可达区域分为两部分. 为此,修改系统约束,即增加机械臂的移动能力. 假定基座可沿水平方向移动,以变量 B_x 作为状态分量,重新构造系统的状态空间

$$= (x, y, \theta, B_x). \quad (18)$$

根据 B_x 的取值范围 $[B_{xmin}, B_{xmax}]$ 可计算出系统状态的可达区域. 取 $B_{xmin} = 0.7, B_{xmax} = 1.3$ (为确保任务可完成,取 B_{xmin} 足够小, B_{xmax} 足够大),新的状态空间中 $^0 = (1.68, 1.68, 1.05, 1), ^3 = (0.36, 0.24, 3.84, 1)$,通过搜索可以找到起止状态间的连通路径.

定义 Q_{min} 和 Q_{max} 为任务可实现时 B_{xmin} 的最大

值与 B_{xmax} 的最小值,即

$$\begin{aligned} Q_{min} &= \arg \max(B_{xmin}), \\ Q_{max} &= \arg \min(B_{xmax}). \end{aligned} \quad (19)$$

则任务的可实现条件为 $B_{xmin} \geq Q_{min}$ 且 $B_{xmax} \leq Q_{max}$. 为确定 Q_{min} 与 Q_{max} 的值,取

$$C(i^{-1}, i) = \sqrt{(x^i - x^{i-1})^2 + (y^i - y^{i-1})^2 + [10(B_x^i - B_x^{i-1})]^2}. \quad (20)$$

状态轨迹搜索结果中 B_x 的最小值与最大值即为 Q_{min} 与 Q_{max} , $Q_{min} = 0.86, Q_{max} = 1$. 因此,增加机械臂的水平移动能力且使 B_x 至少能在 $[0.86, 1]$ 内变化时,可将原来不可实现的任务转化为可实现. 图 6(c) 是对 B_x 进行投影 $i_{[0.86, 1]}()$ 后的状态空间. 由图可知,修改系统约束后,可达区域沿 x 轴延伸,起止状态间产生连通路径,因此任务可完成.

4 状态轨迹跟踪

为了验证跟踪效果,在书法机器人系统上进行实验^[10]. 机械臂是 Adept 公司生产的 Adept One 系列机械臂,共有 4 个自由度(实际跟踪过程中,只应用了两个转动自由度). 为了清晰地描绘出执行器的轨迹,在机械臂末端安装了一支毛笔. 假定机械臂要跟踪图 3(b) 实线所示的状态轨迹,由于运动控制是在关节空间实现的,需将状态轨迹经逆运动学运算获得相应的关节轨迹,并通过式(6)计算得出,它是一组离散的关节角. 经 3 次样条函数拟和^[11]后,可得到期望的连续关节轨迹. 图 7 为轨迹跟踪结果,两

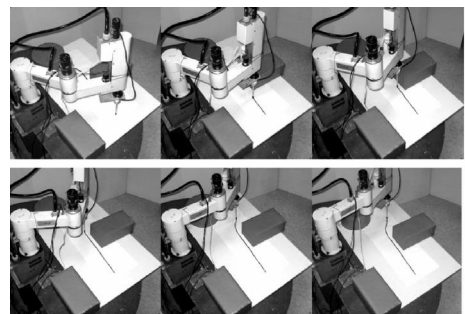


图 7 轨迹跟踪结果

个连杆均未进入障碍区域,机械臂能够平滑到达目标点,并以最短路径完成给定任务.

5 结 论

本文提出一种基于状态空间的机械臂轨迹规划方法,定义了机械臂系统的状态空间模型,给出了任务完成的一般理论与方法.任务是否可实现取决于系统是否满足以下条件:1)目标状态位于可达区域;2)可达区域内存在起止状态间的连通路程.当任务可完成时,通过搜索可在状态空间得到任务实现的最优解;如果任务无法完成,则分别修改系统配置与约束,在更高维的状态空间确定任务可实现的条件.因此,这种方法给出了任务由不可实现向可实现转化的解决方案,对于任务的设计与规划具有指导意义.

参考文献(References)

- [1] Paul R P. Manipulator cartesian path control[J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 702-711.
- [2] Lin C S, Chang P R, Luh J Y S. Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1983, 28(1): 1066-1073.
- [3] Dissanayake M W M, Goh C J, Phenthien N. Time optimal trajectories for robotic manipulators [J]. Robotica, 1991, 9(2): 131-138.
- [4] Saramago S F P, Junior V S. Optimal trajectory planning of robot manipulators in the presence of moving obstacles[J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(8): 1079-1094.
- [5] Perez T L. A simple motion-planning algorithm for general robot manipulators[J]. IEEE J of Robotics and Automation, 1987, 3(3): 224-238.
- [6] Sun K, Lumelsky V J. Motion planning for three-link robot arm manipulators operating in an unknown three-dimensional environment[C]. Proc of the 30th Conf on Decision and Control. Brighton, 1991: 1019-1026.
- [7] Antonelli G, Chiaverini S, Palladino M, et al. Cartesian space motion planning for robots: An industrial implementation[C]. The 4th Int Workshop on Robot Motion and Control. Puszczykowo, 2004: 279-284.
- [8] Xu X R, Chen Y B. A method for trajectory planning of robot manipulators in cartesian space[C]. Proc of the 3rd World Conf on Intelligent Control and Automation. Hefei, 2000: 1220-1225.
- [9] Nilsson N J. Artificial intelligence: A new synthesis [M]. San Francisco: Morgan Kauffmann, 1998.
- [10] Zhang K J, Su J B. RTOS-based software architecture for multisensor fusion system [C]. The 5th Asian Control Conf. Melbourne, 2004: 906-913.
- [11] Lin C S, Chang P R, Luh J Y S. Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for Industrial robots [J]. IEEE Tran on Automatic Control, 1983, 28(12): 1066-1073.
- [10] 丁义明, 范文涛. 离散系统的随机作用随机扰动[J]. 高校应用数学学报 A 辑, 2000, 15(3): 305-310. (Ding Y M, Fan W T. Discrete time systems with randomly applied stochastic perturbations [J]. Application Mathematics J of Chinese University Series A, 2000, 15(3): 305-310.)
- [11] 刘思峰, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2004: 12-20. (Liu S F, Dang Y G. Grey system theory and its application[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2004: 12-20.)
- [12] 谢乃明, 刘思峰. 一种新的弱化缓冲算子[J]. 中国管理科学, 2003, 11(增): 46-48. (Xie N M, Liu S F. A new applicative weakening buffer operator[J]. Chinese J of Management Science, 2003, 11(S): 46-48.)
- [13] 党耀国, 刘思峰, 刘斌, 等. 关于弱化缓冲算子的研究[J]. 中国管理科学, 2004, 12(2): 108-111. (Dang Y G, Liu S F, Liu B, et al. Study on the weakening buffer operators and researches[J]. Chinese J of Management Science, 2004, 12(2): 108-111.)
- [14] 党耀国, 刘斌, 关叶青. 关于强化缓冲算子的研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(12): 1332-1336. (Dang Y G, Liu B, Guan Y Q. Study on the strengthening buffer operators [J]. Control and Decision, 2005, 20(12): 1332-1336.)

(上接第48页)