

文章编号: 1002-0446(1999)05-0335-05

机器人力装配操作的顺应综合与实验验证^{*}

张卫平 熊有伦

(华中理工大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

尹朝万 王越超

(中国科学院机器人学开放研究实验室 沈阳 110015)

摘要: 本文提出并实现了一种机器人装配顺应综合方法. 装配操作过程可以表示为一列离散的几何接触状态的变化和转移. 通过对不确定性下所有机器人形位进行仿真, 得到每一接触形式对应的静态接触力特征. 由对基本接触元的分析, 求解实现接触状态转移的机器人运动方向, 构成顺应的力-错误修复运动方向映射, 为规划的装配运动实现提供顺应. 并在 PUMA 562 机器人上完成了一类简单装配实验对本文的方法进行了验证.

关键词: 机器人装配操作; 顺应综合; 力控制; 不确定性; 接触状态及接触元

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

1 引言

在机器人装配操作中, 由于装配任务的不确定性(包括产品公差、控制不确定性和传感误差等), 单纯的位置控制机器人不能胜任带有接触约束的装配任务^[1]. 即使是较小的位置误差都可能引起工件与环境之间较大的接触力而损坏机器人或装配体. 顺应(Compliance)的概念被引入来处理接触操作, 顺应依赖于不同的装配任务以及物体间不同的几何接触形式.

规划一系列顺应运动来完成具有相对大的不确定性的装配任务称为精运动规划(Fine motion planning). 在装配操作中, 顺应不仅可以避免较大的物体间接触力, 而且可以根据传感信息(主要是力/力矩信息)提供物体间的几何接触信息来引导装配操作. 在此意义下, 顺应可以看作是从接触力到引导机器人趋向装配目标的具有错误修正功能的映射.

Lozano, Mason 和 Taylor^[2], Erdmann^[3], Donald^[4]等建立了一套顺应构造方法, 通过为机器人选择某一固定顺应并根据传感器读数确定恰当的机器人运动来保证装配任务的成功执行. Gottschlich 和 Kak^[5], Laugier^[6]和 Peshkin^[7]通过两步法来合成顺应, 即先在不确定性情形下, 机器人将经由无碰路径来完成装配任务, 形成名义装配方向 v_0 ; 在名义路径给定后, 一个基于任务的、合成顺应 C 用来处理装配操作中的不确定性, 以避免工件间接触力 F 过大及沿修正后的运动方向 v 引导机器人达到最后的装配目标, 即 $v = v_0 + C(F)$.

而另一方面, 机器人装配过程可以表示成物体间接触状态的转移与改变. 不同的接触形式对应了不同的接触力. 由于不确定性, 初始接触状态也会具有不确定性, 顺应运动可以看作是从初始接触状态到中间目标状态以至最后目标状态的转变过程.

本文将通过对不确定性建模, 仿真不确定性下的机器人运动, 识别所有可能的装配体间的

^{*} 基金项目: 中国科学院机器人学开放研究实验室开放基金资助; 部分工作还受教委博士点基金(批准号: 96048727)和自然科学基金(批准号: 69775021)资助. 收稿日期: 1998-10-26

接触形式及接触力,并求解接触力所映射的误差修正运动,构造机器人装配操作顺应映射.

2 不确定性建模及接触状态采样

为了识别物体间所有可能的接触状态,需要对装配中的不确定性建模.本文中产品公差等表现为物体几何建模的不确定性.传感信息只考虑力/力矩信息,控制误差由机器人速度方向偏差来表示.

2.1 几何建模不确定性

对物体的实际位置 P_a , 实际姿态 O_a , 设其建模位置为 P_m , 建模姿态为 O_m , \mathcal{Y}_p 为物体的位置不确定性, iff $\exists \mathcal{Y}_p > 0, \forall P_a, \forall P_m, \|P_a - P_m\| < \mathcal{Y}_p$; \mathcal{Y}_o 为物体的姿态不确定性, iff $\exists \mathcal{Y}_o > 0, \forall O_a, \forall O_m, \|O_a - O_m\| < \mathcal{Y}_o$.

2.2 机器人控制不确定性

对机器人指令速度 v_c , 实际的机器人速度为 v_a , 机器人速度方向的不确定性 a_a , iff $\exists a_a > 0, \forall v_a, \forall v_c, \cos^{-1}(v_a v_c / (\|v_a\| \cdot \|v_c\|)) < a_a$.

2.3 力传感器不确定性

接触力 F 表示成广义力的形式, 即 $W = (f_1, f_2, f_3, m_1, m_2, m_3)$, 设力传感器读数为 W_s , 实际的接触力为 W_a . 记力传感器不确定性 ϵ_w 为, $\forall W_a, \forall W_s, \|W_s - W_a\| \leq \epsilon_w$. 为方便, 可以记为 $W_a \subset B(W_s)$. 由于 W 包括力和力矩, 在实际计算时, 力分量将被赋予一单位长度.

通过对不确定性分布采样, 每一次采样得到不同的机器人控制速度方向及不同的物体初始位姿, 通过仿真求交得到装配工件间的接触状态.

装配体间的接触状态由工件间的相对形位决定. 对固结于某一工件的局部坐标系 L , 记物体位姿为 L 相对于全局坐标系 W 的 6 维矢量 q . 考虑工件间的几何干涉等, 某些形位 q 是禁止的. 满足几何约束条件的所有形位记为允许形位空间 R , R 可以拓扑地划分成具有不同接触形式 N_i 的子空间, 即 N_i 对应了物体间所有具有相同的接触形式 N_i 的允许形位子空间 R_i . 显然有 $R_i \subseteq R$.

3 物体间接触状态转移与实现

三维空间的多面体可以由面(S)、边(E)和顶点(V)3种几何元素拓扑地表示. 由此共有 6 种基本接触形式, 即(S, S)、(S, E)、(S, V)、(E, E)、(E, V)、(V, V), 而这 6 种基本接触形式又可以分解为 2 种元接触形式, 即(S, V)和(E, E)^[8]. 对物体间任意可能的接触状态 N_i , 总可以表示成 6 种基本状态之一, 或多个基本接触状态的复合. 最终又可以化解为多个元接触形式.

装配过程的接触状态的变化可以表示成图网络(Graph network)的形式. 如图 1, 每一接触状态记为图的节点, 接触状态间的可能转变可以记为图中节点间的有向连接弧.

对两种元接触形式(S, V)和(E, E), 如图 2 所示, 物体 1 与物体 2 形成接触形式(S_i, V_j)和(E_k, E_l). 设 n_i 是物体 1 的面 S_i 的单位法矢, r_1 为全局坐标系原点到 V_j 的矢量, r_2 是原点到边 E_k 和 E_l 的交点的矢量. 为满足元基础形式(S_i, V_j), 物体 2 的可行运动 Δq 必须满足 $h_i^T \Delta q = 0$, 其中 $h_i^T = \begin{bmatrix} n_i \\ r_1 \times n_i \end{bmatrix}$. 物体 2 沿满足此条件的 Δq 局部地运动, 接触形式(S_i, V_j)将得以维持. 如果 Δq 满足 $h_i^T \Delta q > 0$, 则将会失去接触形式(S_i, V_j); 同样, 局部地, 如果(S_i, V_j)尚未形成, 满足 $h_i^T \Delta q < 0$ 的 Δq 将会使物体之间获得接触形式(S_i, V_j).

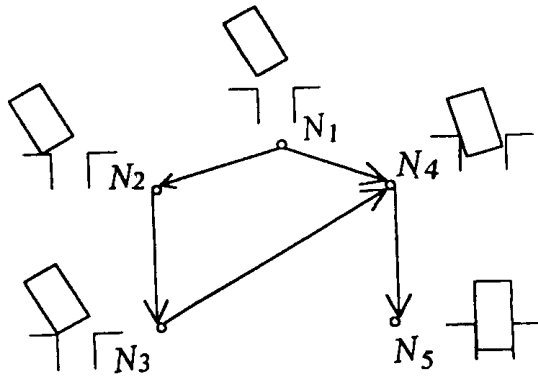


图 1 接触状态转移图

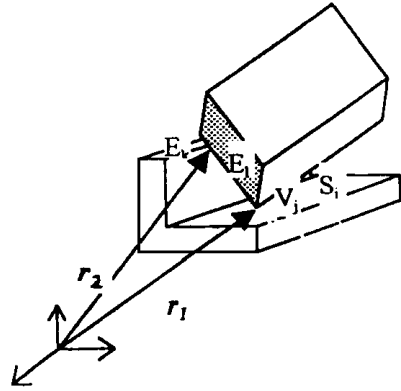


图 2 元接触形式

对 (E, E) , 如图 2, 设 E_k 和 E_l 的方向矢量分别为 e_k 和 e_l , E_k 和 E_l 的相交所形成的平面法矢为 $n = (e_k \times e_l) / \|e_k \times e_l\|$, 从而满足 (E, E) 接触元的可行运动与 (S, V) 接触元具有相同的形式.

当接触状态从 N_i 到 N_j 转变时, 设有 M 个要维持的接触元, A 个要获得的接触元, 以及 L 个要失去的接触元, 则物体的局部可行运动矢量 Δq 形成的集合 S 如下:

$$S = \{ \Delta q \mid h_i^T \Delta q = 0, h_j^T \Delta q < 0, h_k^T \Delta q > 0, i = 1 \dots M, j = 1 \dots A, k = 1 \dots L \}.$$

为了求得唯一的运动速度, 可以采用如下的优化指标:

$$J = \max_v [\min_{j=1 \dots A} (h_j^T v)], \text{ 其中 } v = \Delta q / \| \Delta q \|$$

约束条件为

$$\begin{aligned} h_i^T v &= 0, i = 1, \dots, M \\ h_j^T v &< 0, j = 1, \dots, A \\ h_k^T v &> 0, k = 1, \dots, L \end{aligned}$$

所选取的指标将获得一个最优的运动方向, 沿此方向, 可以使达到所有接触元的过程最快. 在实际操作中, 到达所有接触元的速度与实际选取的速度系数有关.

4 装配过程的力计算

在接触状态采样过程中, 考虑在不确定分布中采样整个接触区域的 k 个接触点 r_1, \dots, r_k , 记接触表面的单位法矢 n_i , 每一接触点所产生的约束力旋量 w_i 为: $w_i = \begin{bmatrix} n_i \\ r_i \times n_i \end{bmatrix}$, 所有的约束力旋量所张成的空间可以表示成 $W = [w_1, w_2, \dots, w_k]$. 在不考虑摩擦时, 作用在物体上的静态接触力可以表示成各约束力旋量的非负线性组合, 即 $w_c = Wx, x \geq 0$, x 的 k 个非负标量表示了各个接触力旋量的大小. w_c 表示了所有可能的作用力旋量.

在实际的机器人控制中, 仅考虑准静态(Quasi-static)情形, 反应力是施加力 w_e 反向后在 W 上的投影, 即 $x^* = \arg(\min [B(w_e) + Wx]^T D^{-1} [B(w_e) + Wx])$, $x \geq 0$. x^* 为使目标函数到达极小时 x 的值. D 为正定惯性矩阵, 用来平衡力旋量的量纲. 因此, 实际的接触力旋量 $w_c = Wx^*$.

5 顺应综合

对某一装配任务,可以规划出顺序改变的装配接触状态序列,以及装配状态转移图(如图1).后一接触状态比前一接触状态更接近装配目标接触状态.由上述方法,可以求解不同接触状态所对应的力特征,以及状态转移所需要的机器人运动方向.由于所给出的运动方向总是引导机器人趋向装配子目标或装配目标,因此满足了顺应运动的错误修复要求.

对每一接触状态 N_i 及其所对应的力特征 w_i ,在规划的接触状态转移图中,对下一接触状态 N_j ,可以求解其对应的机器人运动方向 v_i ,由此建立了接触力到机器人速度方向的映射对 (w_i, v_i) .对于仿真过程的所有接触情形,由此可以建立一系列的力-速度映射对.形成了一种表结构形式.

在实际机器人装配中,为了提高装配速度,以及满足实时性要求,需要提高对映射表的查询速度.在实际验证中,将映射表处理成哈希表(Hash table)的结构.尽管实际的映射对在哈希表中稀疏存储,哈希表有序化了力-误差修复运动映射表,因此提高了查询存取时间.

6 实验设计与验证

为验证本方法的有效性,设计了一个块跟踪实验.一个长方体形合金铝柱塞(peg)($3.0 \times 3.5 \times 10.0$ cm)由机器人空压夹持器夹持,并安装到装有腕力传感器的 PUMA562 机器人末端(如图3).实验的目标是,不论柱塞与块表面的初始接触状态如何,柱塞将转移到与被跟踪块的表面成线接触的形式,并保持此接触形式以恒力在块表面移动,直至找到自由空间.由于实时性要求,实验时对机器人控制系统进行了一些修改,一台装有 48 端口并行 I/O 板 AX5214 的 Intel486 微机用来读入从 JR³ 力传感传来的力信息,以及向机器人输出错误修复运动指令.如图4,图中的虚线框构成了机器人力控系统外环.机器人以指令周期(28ms)以中断方式从其并行输入端口读取误差修复运动指令.在离线构造顺应映射表时,由 Monte-Carlo 仿真,运行 100 次,得到 53 个映射表,并被重新处理为哈希表的形式.

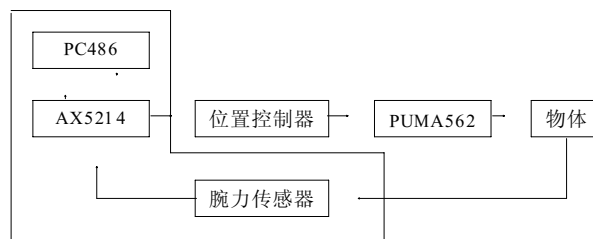


图4 实验装置连接图

实验在机器人工具坐标系(TOOL Coordinate)进行,即全局运动指令在实际计算时转化为机器人工具坐标系运动指令.工具坐标系的 z 轴向上, x 方向即为指向块棱边的方向,沿此方向跟踪,机器人可以到达自由空间.同时为达到柱塞与块表面的线接触状态, x 方向上的力矩要为 0.为维持 z 方向的恒定接触力,实际控制时,引入刚度系数,对机器人进行刚度控制.在上述实验环境下,进行了多次块跟踪实验,每次都成功达到自由位置.图5是其中一次的力传感器读数(实验时,传感器坐标系的 z 轴和 y 轴与工具坐标系的 z 轴和 y 轴反向,传感器读

数时力的单位为克, 力矩的单位为克·厘米)。从中可以看出, z 方向的接触力很快达到并保持恒定, x 方向的力在克服静摩擦力后保持为恒定值。同时, x 方向的力矩经过调整维持在 0 左右, 以保证柱塞与块表面成线接触状态。 y 方向上的力矩是 z 方向上的力形成的。

7 结论

本文提出了一种基于装配过程接触状态改变与转移的机器人装配顺应综合方法。通过对不确定性建模, 来仿真物体间可能的接触状态及其特征力旋量, 求解接触状态转移运动方向, 建立力-错误修复运动方向顺应映射表。同时基于力控制策略, 完成了一类简单装配任务。复杂的装配任务有赖于更强的规划系统和多传感器融合技术, 满足实时性要求的开放机器人控制结构。

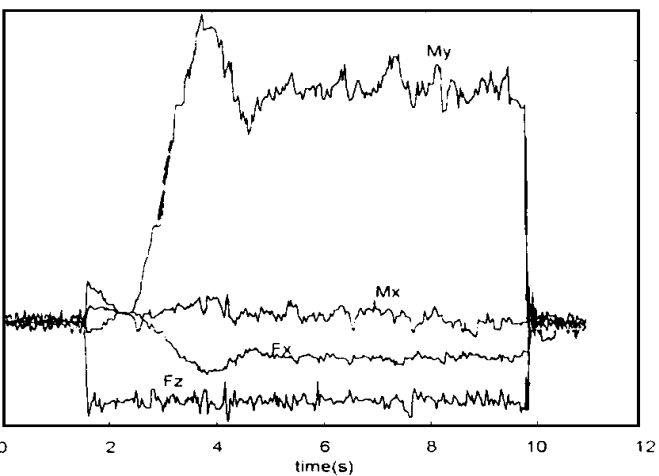


图 5 接触力与力矩

参 考 文 献

- 1 熊有伦. 机器人约束运动规划的空间推理. 第一届全球华人智能控制与智能自动化大会论文集(中卷), 1993: 1222-1228
- 2 Lozano-Perez T, Mason M, Taylor R. Automatic Synthesis of Fine Motion Planning Strategies for Robots. *Int J of Robotics Res*, 1985, 4: 3- 24
- 3 Donald B R. Planning Multistep Error Detection and Recovery Strategies. *Int J of Robotics Res*, 1990, 9: 3- 60
- 4 Erdmann M. Using Backprojections for Fine Motion Planning with Uncertainty. *Int J of Robotics Res*, 1986, 5: 19- 45
- 5 Gottschlich S, Kak A. AMP-CAD: Automatic Assembly Motion Planning Using CAD Models of Parts. *Robotics and Autonomous Systems*, 1994: 245- 289
- 6 Laugier C. Planning Fine Motion Strategies by Reasoning in the Contact Space. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1989: 653- 659
- 7 Peshkin M A. Programmed Compliance for Error Corrective Assembly. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1990, 6(4): 473- 482
- 8 McCarragher B J. Task Primitives for the Discrete Event Modeling and Control of 6-dof Assembly Tasks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12: 280- 289

COMPLIANCE SYNTHESIS AND VERIFICATION FOR FORCE CONTROLLED ROBOTIC ASSEMBLY

ZHANG Weiping XIONG You-lun

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology)

YIN Chao-wan WANG Yue-chao

(Shenyang Institute of Automation, the Chinese Academy of Sciences)

Abstract: A methodology is proposed and implemented for compliance synthesis in robotic assembly manipulation. The process of assembly operation can be represented as a sequence of discrete contact states
(下转第 356 页)