

一种能应付突发意外事件的装配 机器人运动规划研究¹⁾

李永成, 张 钹

(清华大学计算机系, 北京 100084)

摘 要

本文基于运动规划的拓扑方法, 针对机械手的装配环境, 提出了一种能应付突发意外事件——即能躲避突发障碍继续到达目标位置的运动规划方法。该方法主要包含三部分: 用已知信息进行运动规划; 遇到突发障碍后进行局部调整; 局部调整失败时进行全局重规划。本文给出一种运动规划器 ETTMP, 经实验测试, 该规划器具有较强的鲁棒性和实时性, 为智能机器人的实用化研究提供了一种方法。

关键词: 机器人运动规划, 自由状态空间, 突发障碍, 全局重规划, 局部调整。

一、引 言

所谓机器人运动规划指的是已知机器人工作环境中的障碍分布, 给出机器人的初始状态和目标状态, 规划一条路径使得机器人能够与障碍无碰地从初始状态运动到目标状态。

早期的运动规划研究一般都假设环境中的障碍全部精确已知, 且机器人的运动控制也不存在误差。由于实际环境中这样的条件很难得到满足, 且这些规划方法一般都耗时较长, 目前尚难于实用。本文所给出的规划方法, 其基本想法如下: 首先采用拓扑降维法^[2,3] 离线地划分机械手的状态空间 (Configuration Space), 根据已知的环境规划出一条可行的无碰路径。机械手按原始规划执行其操作。当它在运动过程中感知到突发障碍时, 能利用原先已知的信息实时、快速地躲避突发障碍而到达目标位置。基于这样一种规划方法的机器人系统具有较强的鲁棒性和实时性。由于装配机器人的环境一般相对已知, 且动态变化不大, 因而本文所提出的方法对机械手系统而言还是很实用的。

二、拓扑法的基本原理

拓扑方法首先由 Schwartz 和 Sharir 提出^[5,6], 差不多同时张钹和张铃也独立地提

1) 本文于1992年4月2日收到。本项目得到国家“863”计划的支持。

出了拓扑法的基本思想^[1]。而后张钹和张铃继续对拓扑方法进行研究,提出了拓扑的降维方法^[2],为机械手的运动规划研究打下了理论基础。80年代末,在清华大学国家智能技术实验室分别实现了移动机器人和机械手的基于拓扑法的运动规划系统^[7,3,4],经过多次试验效果都不错。

拓扑的运动规划方法非常典型地体现了分层的思想。设机器人的状态空间 $CS = \{\langle x, y, \theta \rangle | x, y \in R; \theta \in [0, 2\pi)\}$, 用 $Obs_i (i = 1, \dots, N)$ 表示状态空间中的障碍,令 $S_{xy\theta}$ 表示机器人位于 (x, y) , 其方向角为 θ 时的状态, 则机器人的自由状态空间为 $FCS = \{\langle x, y, \theta \rangle | x, y \in R; \theta \in [0, 2\pi), S_{xy\theta} \notin Obs_i, i = 1, \dots, N\}$ 。

用障碍的边界线、障碍的 r_- 增长线及消失线^[1] 把机器人的自由状态空间 FCS 划分为许多拓扑连通块 CB_1, CB_2, \dots, CB_k , 其中 $\forall \langle x_1, y_1, \theta_1 \rangle, \langle x_2, y_2, \theta_2 \rangle \in CB_i (1 \leq i \leq k)$, 在 CB_i 内存在连续的运动轨迹,使得机器人能够无碰地从 $\langle x_1, y_1, \theta_1 \rangle$ 运动到 $\langle x_2, y_2, \theta_2 \rangle$ 。 FCS 划分完毕后再判断各连通块之间的连通性,称 CB_i 和 CB_j 连通,如果存在某个自由状态 $S_{xy\theta}$, 使得 $S_{xy\theta} \in CB_i \cap CB_j$ 。把每个连通块看成一个节点,相互连通的连通块所对应的节点之间用一条弧来连接,则得到一个无向图(称之特征网),原物理空间中的路径规划问题就等效地转变为图的搜索问题。当得到一个代表一条道路的连通块序列 $CB_{i_1}, CB_{i_2}, \dots, CB_{i_r}$ 后,就可在每个连通块内分别规划连通的运动轨迹。

拓扑方法具有两个优点,一是它对状态空间的划分达到了最优;一是从理论上讲拓扑法是精确完备的。

三、多关节机械手的 ETTMP

1. 机械手模型

所讨论的是类似 PUMA 560 的关节型机械手,用 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别表示其三个手臂的关节角参数,则机械手的状态空间为 $CS = \{\langle \theta_1, \theta_2, \theta_3 \rangle | \theta_1, \theta_2, \theta_3 \in [-\pi, \pi)\}$, 用 Obs_1, \dots, Obs_N 表示障碍, $S_{\theta_1\theta_2\theta_3}$ 表示机械手位于 $\langle \theta_1, \theta_2, \theta_3 \rangle$ 时的状态,则机械手的自由状态空间为 $FCS = \{\langle \theta_1, \theta_2, \theta_3 \rangle | \theta_1, \theta_2, \theta_3 \in [-\pi, \pi), S_{\theta_1\theta_2\theta_3} \notin Obs_i, i = 1, \dots, N\}$ 。

可以用障碍的边界、障碍的 r_- 增长线和消失面及机械手的运动死区,把机械手的自由状态空间划分为许多连通块 CB_1, \dots, CB_k , 并建立相应的特征网。该特征网中包含了上述的划分信息及连通块之间的连通信息^[3]。

2. ETTMP 的基本方法

用拓扑法进行运动规划后全局的有用信息全部保留下来,很适合于应付突发障碍。与拓扑的规划方法一样,突发障碍的躲避也采用一种分层思想,只是其过程相反。即先在连通块内作局部调整,然后再在全局作重规划。

1) 全局重规划

全局重规划的前提是局部调整失败。设机械手原先规划的路径为 $CB_i, \dots, CB_j, CB_k, CB_l, \dots, CB_m$, 设在连通块 CB_k 内遇到了突发障碍,且机械手无法从 CB_j 到达 CB_l , 则切断 CB_k 和 CB_l 之间的连通弧,如果可能的话让机械手以它所在的当前节点的前一个节点 CB_j 为新的起点,重新搜索一条到达目标节点 CB_m 的道路。

命题 1. 若机械手遇到突发障碍后无法通过某连通块 CB_i ，而此时全局重规划又失败，则根据原有信息不存在一条到达目标位置的道路。

由于状态空间中连通块个数是有限的，因而特征网中的连接弧也是有限的。因为机械手每遇到一次局部调整失败，就切断一条连接弧。所以全局重规划每进行一次之前连接弧就少一条，因而这种重规划最终总是能结束的。

命题 2. 全局重规划总能保证结束。

命题 2 保证了机械手不会无休止地运动，当有限次尝试失败后，机械手的运动会停止。

全局重规划的算法(其节点指的是特征网上的节点)。

(1) 若当前节点是目标节点，则宣告失败，退出；

(2) 切断当前节点与下一节点间的连接；

(3) 若当前节点不是初始节点，则以道路上当前节点的前一个节点作为重规划的起始节点，否则就以当前节点为新的起始节点；

(4) 在特征网上重新搜索一条路；

(5) 成功则继续执行，失败则退出。

在该算法中，若当前节点为目标节点即宣告失败。事实上这时候很可能还是有通路存在的，因而对(1)可作如下改进。

(1') 若当前节点是目标节点 G ，且在道路上存在 G 的前一个节点 C ，以 C 为起始节点，切断 C 与 G 的连接，转(4)。

如果初始节点与目标节点重合，且局部调整失败，这时的全局重规划就变得稍为困难些，此时可以人为地添加一个节点作为起始节点进行搜索。(1')可改为

(1'') 若当前节点是目标节点 G ，且初始节点不是 G ，则按(1')处理。否则寻找这样一个节点 I ，使得机械手能从其当前位置运动到 I 中。以 I 为起始节点，转(4)。

图 1 以例子说明了步骤(1'')。有了(1'')之后，全局重规划算法则比较完备。

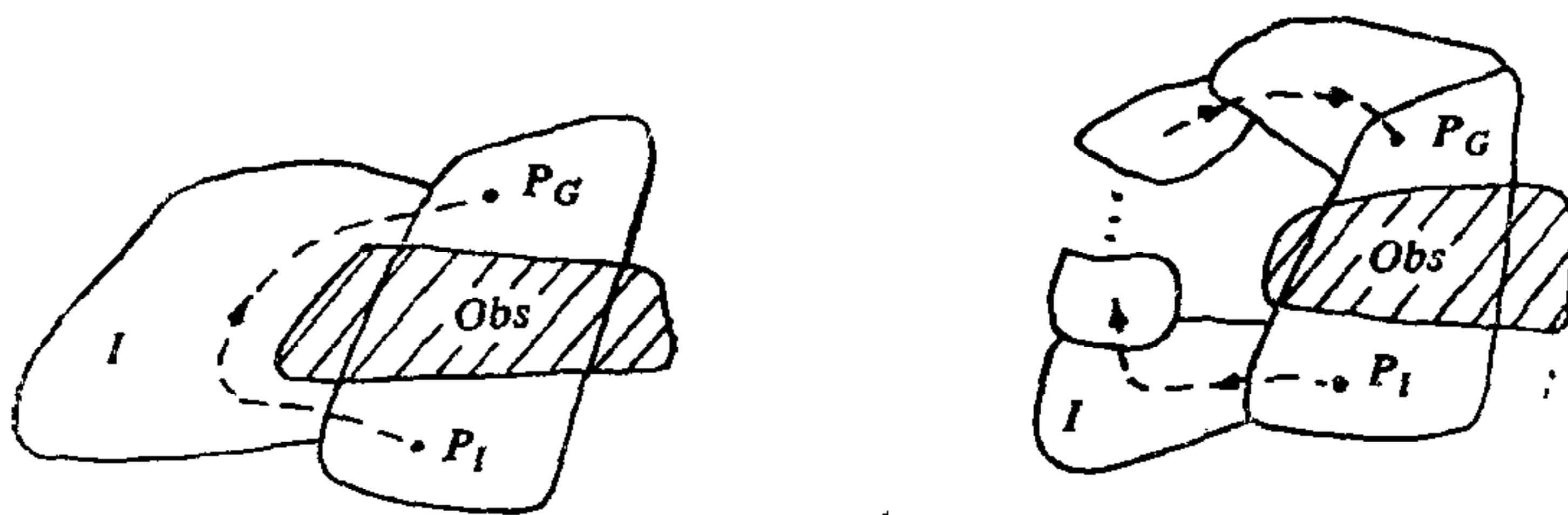


图 1 步骤(1'')的实例

2) 局部调整

由于机械手由多个关节组成，且它又在三维空间中运动，其行为非常复杂。它的连通块内的局部调整将更多地依赖于原有自由状态空间的信息，而不是依靠对障碍外形的感知。

连通块 CB_i 的各种边界。设在 CB_i 内关节 1 的活动区间为 $[\theta_s, \theta_e]$ ，则 $\forall \theta \in [\theta_s, \theta_e]$ ，关节 2 在 CB_i 内的活动范围可用 $[F_s(\theta), F_e(\theta)]$ 表示， $F(\theta)$ 为关节 1 位于

θ 时关节 2 的方向角。当机械手的前两个关节分别位于 θ 和 $F(\theta)$ 时, 用 $G(\theta, F(\theta))$ 表示第三个关节的方向角, 令此时关节 3 在 CB_i 内的自由区间为 $[G_s(\theta, F(\theta)), G_i(\theta, F(\theta))]$, 可分别定义 CB_i 的各种边界。

前边界: $\{(\theta_s, F(\theta_s), G(\theta_s, F(\theta_s))) | F(\theta_s) \in [F_s(\theta_s, F_s(\theta_s))],$
 $G(\theta_s, F(\theta_s)) \in [G_s(\theta_s, F(\theta_s)), G_i(\theta_s, F(\theta_s))]\}$ 。

类似地可定义 CB_i 的后边界、左边界、右边界、上边界和下边界。

根据上述定义, 可进一步定义 CB_i 的内 ε 边界。设 ε 是一个很小的正数, 则定义左边界的内 ε 边界为

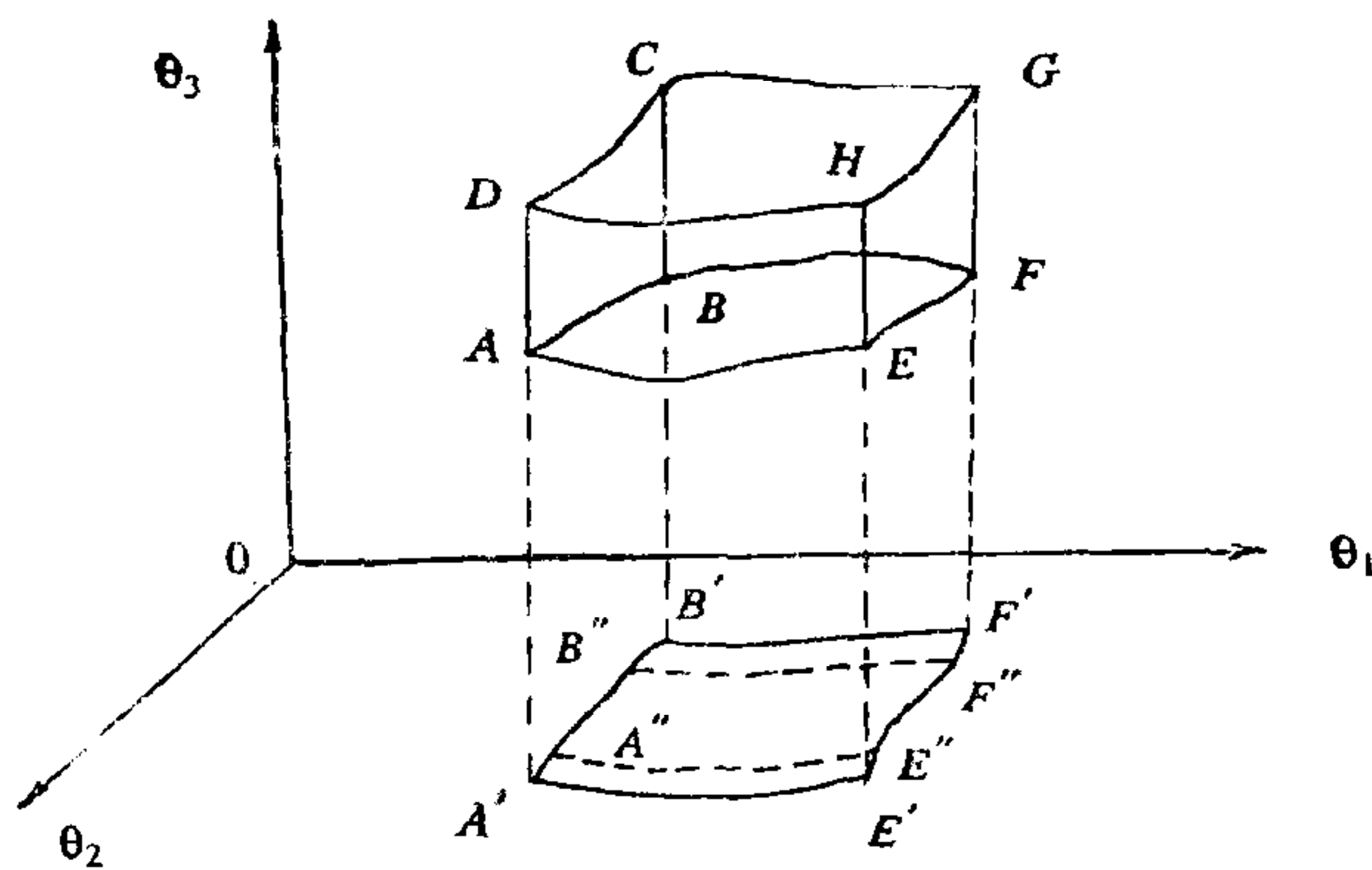
$$\{(\theta, F_s(\theta) + \varepsilon, G(\theta, F_s(\theta) + \varepsilon)) | \theta \in [\theta_s, \theta_i],$$

$$G(\theta, F_s(\theta) + \varepsilon) \in [G_s(\theta, F_s(\theta) + \varepsilon), G_i(\theta, F_s(\theta) + \varepsilon)]\}.$$

同理可得到 CB_i 的右内 ε 边界、下内 ε 边界和上内 ε 边界。

因为实际机械手的每个关节的活动范围均不是 2π , 而是存在一定的活动死区, 所以每个连通块的左、右、下、上四个边界均存在, 其相应的内 ε 边界也分别存在。图 2 为状态空间中连通块边界的一个说明, 图中 $A'E', E'F', F'B', B'A'$ 分别为曲垂直面 $AEHD, EFGH, FGCB$ 和 $ABCD$ 在 $\theta_1 \times \theta_2$ 平面上的投影。

定理 1. 设 CB_i 内只有一个在原物理空间中是凸的突发障碍 Obs , 如图 2 所示, 设 $A'E'', B''F''$ 分别为左、右内 ε 边界在 $\theta_1 \times \theta_2$ 平面上的投影, 如果关节 2 从 $A''(B'')$ 沿着 $A'E''(B''F'')$ 向 $E''(F'')$ 的运动过程中均与障碍相碰, 则在 CB_i 内不存在从其前边界到后边界的自由通路。



前边界: 平面区域 $ABCD$; 右边界: 曲面区域 $AEHD$; 后边界: 平面区域 $EFGH$;
 下边界: 曲面区域 $AEFB$; 左边界: 曲面区域 $BFGC$; 上边界: 曲面区域 $DHGC$

图 2 状态空间中连通块的边界说明

从定理 1 得知, 如果 CB_i 内只有一个在原物理空间中是凸的突发障碍, 当机械手在连通块 CB_i 的左、右两个内 ε 边界上关节 2 均碰到障碍时, 则在 CB_i 内不存在从前边界到后边界的通路。

当把第三个关节加进去共同考虑时, 问题就变得非常困难, 因为关节 3 的末端点在物理空间中的运动轨迹是很复杂的。所以应根据对机械手动作行为的分析设计一种算法, 使得机械手在多数情况下能寻找到一条躲避突发障碍的道路。

引理 1. 设连通块 CB_i 内只有一个在原物理空间中是凸的突发障碍, 且存在一条从初态到目标态的通路, 用 $\langle \theta, \bar{F}(\theta), \bar{G}(\theta, \bar{F}(\theta)) \rangle$ 表示路上的点, 则对应路上每一点, $\langle \theta, \bar{F}(\theta), G_s(\theta, \bar{F}(\theta)) + \varepsilon \rangle$ 和 $\langle \theta, \bar{F}(\theta), G_t(\theta, \bar{F}(\theta)) - \varepsilon \rangle$ 中至少有一个不在障碍中, 这里 ε 为小正数.

根据引理 1, 当 $G_t(\theta, \bar{F}(\theta)) < \bar{G}(\theta, \bar{F}(\theta)) < G_s(\theta, \bar{F}(\theta))$ 时, 相应 $\langle \theta, \bar{F}(\theta), G(\theta, \bar{F}(\theta)) \rangle$ 和 $\langle \theta, \bar{F}(\theta), G_2(\theta, \bar{F}(\theta)) \rangle$ 中至少有一个不是障碍点, 这里 $G_s < G_t < \bar{G} < G_2 < G_s$, 也就是说在 \bar{G} 的两侧至少有一侧是与障碍不交的.

用 $PT(\alpha_1, \alpha_2)$ 表示 θ_1 在 $[\alpha_1, \alpha_2]$ 上的一段通路, 路上任一点用 $\langle \theta, \bar{F}(\theta), \bar{G}(\theta, \bar{F}(\theta)) \rangle$ 表示. $PT_s(\alpha_1, \alpha_2)$ 表示轨迹 $\langle \theta, \bar{F}(\theta), G_s(\theta, \bar{F}(\theta)) + \varepsilon \rangle$, $PT_t(\alpha_1, \alpha_2)$ 表示轨迹 $\langle \theta, \bar{F}(\theta), G_t(\theta, \bar{F}(\theta)) - \varepsilon \rangle$. 这里 $\theta \in [\alpha_1, \alpha_2]$, 即 PT_s 和 PT_t 分别表示通路上 θ_3 的左、右侧内 ε 边界. 用 $PT_{s,}(PT_{t,})$ 表示关节 3 从其左(右)侧内 ε 边界运动到右(左)侧内 ε 边界, 而其它两个关节保持不动.

定理 2. 设连通块 CB_i 内只有一个在原物理空间中是凸的突发障碍, 若从 CB_i 的前边界到后边界存在 CB_i 内的一条通路 $PT(\theta_s, \theta_t)$, 则相应地也存在由下列路段组成的自由通路:

$$PT_x(\alpha_1, \alpha_2), PT_{x\bar{x}}, PT_{\bar{x}}(\alpha_2, \alpha_3), PT_{\bar{x}x}, \dots, PT_r(\alpha_{n-1}, \alpha_n),$$

其中 $\theta_s = \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{n-1} < \alpha_n = \theta_t$, X 取 s 则 \bar{X} 取 t , X 取 t 则 \bar{X} 取 s , Y 取 s 或 t .

对机械手的局部调整来说不存在一种策略使得机械手一定能够找到存在的道路, 但可选择合适的策略, 使它能在多数情况下找到存在的路径, 同时又能在不存在通路的情况下不在该连通块内耗费很多的时间, 从而保持较高的效率.

以下为 ETTMP 在做局部调整时所采取的一些策略.

(1) 机械手局部调整的动作跟连通块的大小关系很大, 对于较小的连通块, 根据前面的讨论, 应把重点放在边界通路的试探上. 而对于较大的连通块, 一般说来有路的可能性很大, 如果一开始就测试边界往往会使机械手走很多弯路, 此时通路的探索应该从与障碍相碰点向边界扩散(这里连通块大小的评判可根据实际机械手的大小来定).

(2) 当道路的前两个关节的角度值确定后, 定理 2 提供了一种确定第三个关节角度值的方法, 即先沿着第三个关节角的某侧内 ε 边界运动, 遇到障碍后, 后退到最近一点, 从这点(折返点)转移到其另一侧的内 ε 边界, 继续向前运动. 如果又碰到障碍, 则后退到相应的折返点. 若最近两次折返点的 θ_1 角相同, 则表示不存在一条通路.

四、实验结果及讨论

本文所讨论的内容是建立在以前工作的基础之上的. 原机械手运动规划系统是在 SUN-3 工作站上实现的, 由于 SUN 工作站有较强的图形功能, 做仿真试验很方便. 实际机械手是 PUMA 560, 它通过 MASSCOMP 上的智能机器人控制系统来进行实时控制. 机械手的皮肤感知器采用近距离红外光电开关, 该红外光电开关只感知到一定距离内有无障碍而并不测试机械手到障碍的距离. 这些红外传感器并排散放在机械手的关节

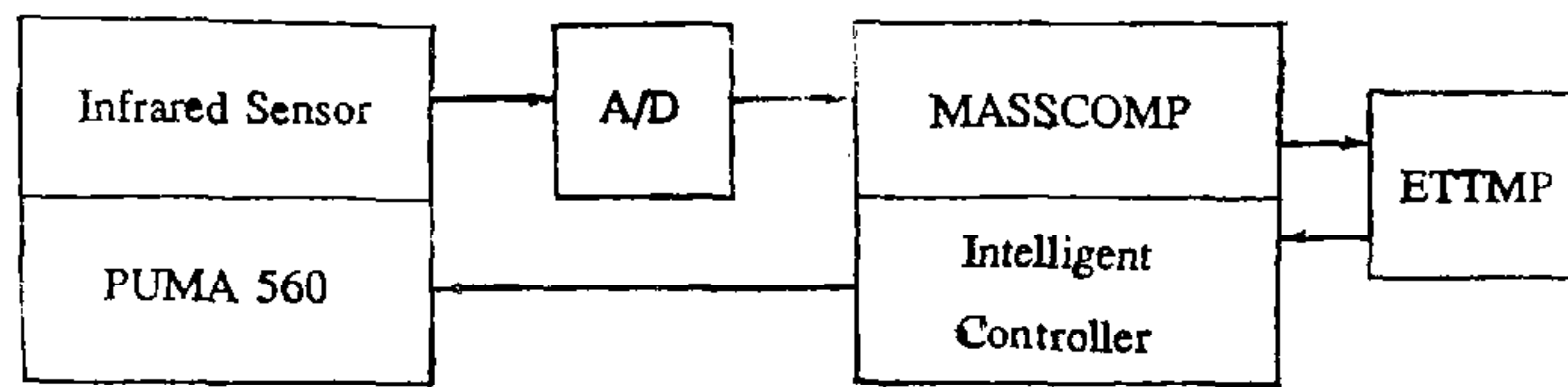


图3 体系结构图

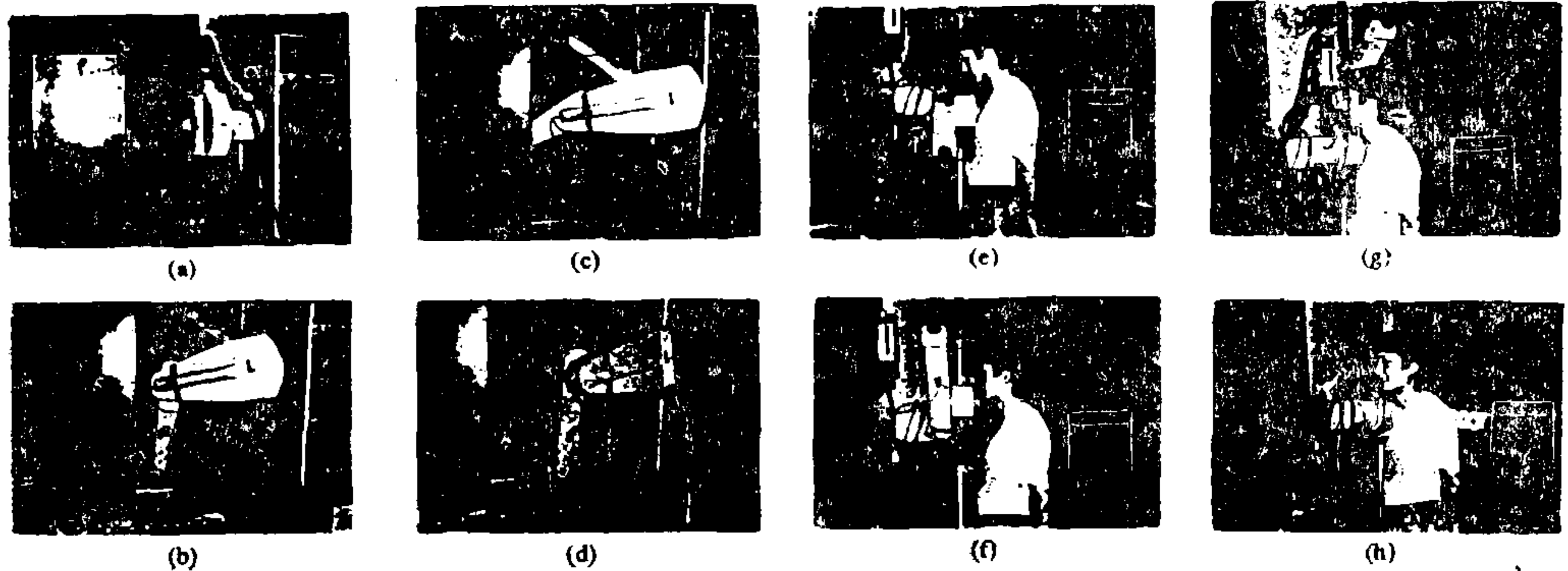


图4 一个实例

2 和 3 的各个侧面上,以感知各个方向的突发障碍。图 3 为运动规划系统的体系结构图。

在本文所讨论的方法基础上所实现的该运动规划器,经过一些实验的测试,显示出了较强的实时性和鲁棒性,且效率也很高。图 4 为一个实验的一组图片,其中桌上的两个大黑箱和桌旁的人均为机械手所不知的突发障碍。

由以上的讨论不难看出能应付意外事件的装配机器人运动规划系统有如下意义:

(1) 可以避免机械手伤人或损伤其它设备。

(2) 使机器人装配系统有更高的自动化程度,在发生意外的情况下机器人能独立地进行处理而无须停止工作再由人来干预。

学习功能以及手爪与传感器配合避障的操作规划问题将有待进一步讨论。

参 考 文 献

- [1] Chien, R.T., Zhang Ling and Zhang Bo, Planning Collision-free Paths for Robotic Arm Among Obstacle, *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell.*, **PAMI-6**(1984), 91—96.
- [2] Zhang Bo, Zhang Ling, et al, Motion Planning for Robots with Topological Dimension Reduction Method, *Journal of Comput. Sci. & Technol.*, **5**(1990), (1), 1—16.
- [3] Li Yongcheng, Zhang Bo, A Topological Implementation for Motion Planning of a Robotic Arm, *Journal of Comput. & Technol.*, **8**(1993),(1), 1—10.
- [4] Yongcheng Li, Weimin Du, Zesheng Tang, Bo Zhang, Computer Animation of Robot Motion with Collision Free Path Planning, *Creating and Animating the Virtual World* (Magnenat Thalmann N. and Thalmann D. Eds.), Springer-Verlag Tokyo, (1992), 149—161.
- [5] Schwartz, J.T. and Sharir, M., On the Piano Movers' Problem: I. The Special Case of Rigid Polygonal Body Moving Admist Polygonal Barriers, *Comm. Pure Appl. Math.*, **XXXVI**(1983), 345—398.
- [6] Schwartz, J.T. and Sharir, M., On The Piano Movers' Problem: II. General Techniques for Computing Topological Properties of Real Algebraic Manifolds, *Advances in Applied Mathema.*

ics, 4(1983), 298—351.

[7] 艾海舟、张钹, 移动机器人路径规划的图形解法, 机器人, 12(1990), (5), 20—24.

RESEARCH OF EMERGENCY-TOLERANT MOTION PLANNING FOR ASSEMBLY ROBOTS

LI YONGCHENG ZHANG BO

(Dept. of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

ABSTRACT

Previous researches of robot motion planning are based on known and invariant environmental model. However, there are uncertainty and emergency in the real world. In this paper, an emergencytolerant motion planning method is presented based on topological method mainly for manipulator arms in an assembly workspace. The emergency-tolerant means that the robot can reach the goal by avoiding the unexpected obstacles. A robust and real-time emergency-tolerant topological motion planner ETTMP is thus constructed.

Key words: robot motion planning; free configuration space; unexpected obstacle. global replanning; local adjustment.



李永成 1989年毕业于清华大学计算机系, 1990年获清华大学计算机系硕士学位。现为清华大学计算机系博士生。主要感兴趣的领域为: 机器人运动规划、动作行为理论、不确定性信息处理等。



张钹 1958年毕业于清华大学自控系, 现为清华大学计算机系教授、博士生导师。“智能技术与系统”国家重点实验室主任。主要从事计算机应用、人工智能及人工神经网络等领域的研究工作。已发表论文80多篇及专著三本。现任国家“863”高技术计划智能机器人主题专家组专家。