

# 基于容错性能的冗余度机器人结构综合\*

赵京 魏珊珊

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100022)

**摘要:** 构造退化条件数和容错空间影响因子两个容错性能指标,前者反映了某一故障时刻退化机器人的操作能力,后者反映了该故障时刻退化机器人相对工作空间的大小,它们可分别用来衡量机器人在故障时刻和故障后的容错操作能力。基于这两个指标,提出冗余度机器人结构参数的最优设计方法,该方法可以用来确定使机器人具有最佳容错操作性能的臂长参数。给出平面 3R 和空间 4R 机器人的仿真实例,并就容错操作性能对各臂长的敏感度进行了分析。研究表明,机器人的容错操作性能对不与故障关节相连或只与一个故障关节相连的臂长具有较高的敏感度,在调节臂长时,应优先考虑这些臂长。另外,与平面机器人不同,空间机器人的这两个容错指标并不存在着很有规律的对应关系,相互的冲突也不那么明显,这说明使他们同步最优的可能性更大。

**关键词:** 冗余度机器人 容错性能 结构综合

**中图分类号:** TP242

## 0 前言

在 20 世纪 80 年代末期,MACIEJEWSKI<sup>[1]</sup>率先对冗余度机器人的容错操作进行了研究,基本思想是利用冗余度机械臂“多余”关节的运动去补偿故障关节的运动,从而保证机器人在发生故障后仍然能够完成预定的作业任务。与其他容错方案相比,利用冗余度机器人实现容错操作具有更大的优越性:在不发生故障时,冗余度机器人具有较高的灵活性;在发生故障时,它可实现容错操作。锁定故障关节(主动锁定或被动锁定)是冗余度机器人常采用的一种容错方案,具有简单、可靠等特点<sup>[2-3]</sup>。一般来说,常规的冗余度机器人是针对某一特定的工作环境和作业任务设计的,当面对变化的工作环境和作业任务时,它很难保持原有的操作性能<sup>[4-5]</sup>。为了使机器人在难以预知的环境中能够高效地完成随时可能变化的复杂作业,如外星探测和抢险救灾,人们已开始研究具有适应性强、成本低(便于批量生产)和维修方便等优点的模块化可重构机器人<sup>[6-9]</sup>。由于模块化可重构机器人能够根据不同的作业任务随时改变自己的结构、形状和自由度,所以它在容错操作方面也具有突出的优越性和广泛的应用前景<sup>[10]</sup>。例如,可以将移动模块和转动模块间隔配置组成冗余度机器人,其中移动模块用来调整结构参数实现变结构,以适应变化的工作环境和作业任务,而转动模块用来实现机器人的容错操作。这就向人们提出一个问题:如何根据不同的作业任务确定相

应的机器人结构参数,使其具有最优容错性能。

冗余度机器人实现容错的基本要求之一是:故障关节被锁定时刻和被锁定后,退化机器人仍具有较高的操作能力和较大的相对工作空间,即容错空间,并保证作业任务位于该空间之内。本文将围绕这一问题,对退化机器人的操作能力和容错空间的评价指标、容错规划算法和机器人结构参数的最优设计进行具体讨论。

## 1 冗余度机器人的容错指标

### 1.1 退化雅可比矩阵的条件数

冗余度机器人在某些关节发生故障并被锁定时刻的操作能力由其退化雅可比矩阵决定。所谓的退化雅可比矩阵就是把故障前雅可比矩阵  $J$  中故障关节  $i$  所对应的列除去后所得到的矩阵,可表示为  $J_i = (j_1, \dots, j_{i-1}, j_{i+1}, \dots, j_n)$ 。目前,常用基于退化雅可比矩阵的退化可操作度来评价机器人在该时刻的容错操作能力<sup>[2]</sup>。由于退化可操作度指标具有长度单位的相关量纲,其大小与机器人结构参数的绝对数值有关,所以它只适用于对具有固定结构参数的机器人在不同位形下容错操作能力的比较。本文将对具有可变结构参数机器人的容错操作能力进行评价,显然,退化可操作度指标是不适用的。根据 SALIBURY 等<sup>[11]</sup>提出的雅可比矩阵条件数,本文提出一种新量纲指标,它只与退化机器人结构参数的相对值有关,现称其为退化雅可比矩阵的条件数,以下简称为退化条件数,并用  $k_i$  表示

\* 北京市自然科学基金资助项目(3042005)。20061010 收到初稿,20070722 收到修改稿

$$k_i = \frac{\sigma_{li}}{\sigma_{ri}} \quad (1)$$

式中  $\sigma_{li}, \sigma_{ri}$ ——关节*i*退化雅可比矩阵 $J_i$ 的最大和最小奇异值

显然  $1 \leq k_i < \infty$ 。  $k_i$  越小，关节*i* 锁定后退化机器人的操作能力越强，即机器人在故障时刻的操作能力越强。当  $k_i=1$  时，退化机器人处于各向同性的位形，具有最高的灵活性。因此退化条件数可以用来规划冗余度机器人的关节运动，使其在故障时刻具有较高的容错操作能力。

1.2 容错空间影响因子

冗余度机器人在某些关节发生故障并被锁定后能否较好地继续完成预定的操作任务，从运动学意义上讲，主要取决于容错空间的大小以及它与操作任务的相对位置。所谓的容错空间是指当机器人的某些关节在任何位置发生故障并被锁定后，对应的各退化机器人工作空间的交集。当机器人执行一项作业任务时，任意一个关节在任何时刻都可能发生故障，所以退化机器人结构参数随故障关节及其锁定位置的不同而变化，从而导致退化机器人的工作空间也随之变化。为确定容错空间，可以首先对每一个冗余关节求出其最大和最小工作空间的交集，然后再对所有关节求出交集，该交集就是机器人相对这一操作任务的容错空间。综上所述可以看出，容错空间实际上就是工作空间的一个子集。迄今为止，已有许多关于工作空间的研究成果<sup>[12-13]</sup>。LEE等<sup>[14]</sup>发现，机器人的工作空间与总臂长之和3次方(平面机器人为2次方)的比值只与机器人各臂长的相对值有关，也就是说，对于相同结构的机器人，这个比值为常量，其数学表达为

$$C = \frac{W}{\left(\sum_{i=1}^n l_i\right)^r} \quad (2)$$

式中  $W$ ——工作空间  
 $l_i$ ——臂长  
 $r$ ——结构指数，空间机器人  $r=3$ ；平面机器人  $r=2$

由式(2)可以看出， $C$  与机器人的关节运动无关， $C$  值越大，机器人臂长对工作空间的贡献越大，也就是说机器人的相对工作空间越大。

由于机器人关节在任何位置都有可能发生故障并被锁定，所以退化机器人的工作空间是时时变化的。同时，与该工作空间所对应的退化机器人的有效臂长也是变量。仿照式(2)可以构造一个指标用来衡量某一故障时刻退化机器人相对工作空间的大

小，现称之为容错空间影响因子。该指标可表示为

$$C_{fi} = \frac{W_i(\theta)}{\left(\sum_{i=1}^n l_i(\theta)\right)^r} \quad (3)$$

式中  $W_i(\theta)$ ——关节*i* 的退化机器人工作空间  
 $l_i(\theta)$ ——退化机器人的有效臂长

式(3)中， $W_i(\theta)$ 和  $l_i(\theta)$ 不仅与机器人的结构参数有关，还与故障关节以及锁定时刻的关节角有关。 $C_{fi}$ 越大，该退化机器人的相对工作空间越大。

接下来，讨论  $C_{fi}$  与机器人容错操作能力之间的关系。机器人容错操作能力主要包括故障时刻和故障后两个方面。①在整个操作过程中，机器人应时时保持尽可能小的退化条件数，以保证在锁定故障关节时刻机器人仍具有良好的操作能力。②在锁定故障关节后，机器人应具有尽可能大的容错空间，并保证作业任务始终位于该容错空间内。由于容错空间是退化机器人最大和最小工作空间的交集，所以一般来讲， $C_{fi}$  越大，容错空间也就越大。由此可以看出， $C_{fi}$  可以用来评价机器人故障后的容错操作能力。

2 机器人运动优化算法

由前面的分析可知，从运动学意义上讲，冗余度机器人的容错能力主要取决于退化条件数和容错空间影响因子的大小，而这两个指标与机器人的臂长和关节运动密切相关，可以通过对臂长与关节运动的最优化使机器人获得最佳的容错操作能力。因此这一最优化问题可以描述为：根据已知的操作任务，确定机器人的结构参数和关节运动轨迹(设计变量为机器人臂长和关节转角)，在机器人的退化条件数极小化的条件下，使机器人的容错空间影响因子极大化，其数学表达式为

$$\max \left( \sum_{i=1}^n (\lambda_i (\min_{0 \leq t \leq t'} C_{fi})) \right) \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \min \left( \sum_{i=1}^n (\alpha_i k_i) \right) \quad (5)$$

$$X - f(\theta) = 0 \quad (6)$$

$$R_u > P_u \quad P_l > R_l \quad (7)$$

式中， $X - f(\theta) = 0$  为机器人的位移方程； $P_l, P_u$  为机器人末端运动轨迹的内、外边界； $R_l, R_u$  为机器人容错空间的内、外边界； $\lambda_i$  和  $\alpha_i$  为各关节容错空间因子和退化雅可比条件数的权系数， $t'$  为运动

周期。

式(4)~(7)是非线性约束最优化问题, 本文将利用约束变尺度法<sup>[15]</sup>对其进行求解。该最优化问题的求解步骤如下。

(1) 在最优解的可行域内任选机器人的各臂长, 并计算出具有最小退化条件数的机器人初始位形。

(2) 在满足机器人末端运动轨迹并使该轨迹始终位于容错空间内的约束条件下, 确定具有最小退化条件数的关节运动轨迹。

(3) 计算机器人运动过程中各时刻的容错空间指标, 并确定其最小值。

(4) 计算使最小容错空间极大化的机器人臂长。

### 3 机器人运动仿真算例与分析

#### 3.1 平面 3R 机器人

对图 1 所示的平面 3R 机器人, 如果只考虑末端的位置参数, 它具有一个冗余度。为了方便起见, 在此只讨论该机器人关节 2、3 的容错操作问题。

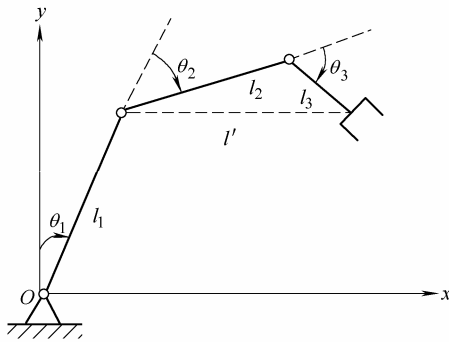


图 1 平面 3R 机器人

首先, 由图 1 得到机器人的位移方程, 由此推导出该机器人关节 2、3 的退化雅可比矩阵, 然后利用奇异值分解得到关节 2、3 的退化条件数  $k_2$  和  $k_3$ 。

当机器人关节 3 在某一位置发生故障并被锁定后, 退化机器人的有效臂长分别为  $l_1$  和  $l'$ , 如图 1 所示。该退化机器人的工作空间与臂长和可分别表示为

$$W_3(\theta) = 4\pi l_1 l' = 4\pi l_1 \sqrt{l_2^2 + l_3^2 + 2l_2 l_3 \cos \theta_3} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^2 l_i(\theta) = l_1 + \sqrt{l_2^2 + l_3^2 + 2l_2 l_3 \cos \theta_3} \quad (9)$$

机器人关节 3 的容错空间为一圆环, 其内外边界分别为

$$R_1 = \max((l'_{\max} - l_1), (l_1 - l'_{\min})) \quad (10)$$

$$R_u = l'_{\min} + l_1 \quad (11)$$

由图 1 可以看出,  $l'_{\max}$  和  $l'_{\min}$  取决于机器人  $l_2$ 、

$l_3$  和关节 3 的转角。

同理可以得到关节 2 发生故障并被锁定后, 退化机器人的工作空间与臂长和, 以及容错空间的内外边界。

假设机器人末端作平面圆周运动, 其运动轨迹为  $\mathbf{x} = (0.2 \sin(2\pi t), 0.2 \cos(2\pi t))^T$ , 起始点的坐标为  $(0.5, 0)^T$ , 则机器人末端运动轨迹的内外边界分别为,  $P_1 = 0.3 \text{ m}$  和  $P_u = 0.7 \text{ m}$ , 所有权系数均取 1, 仿真时间  $t = 1.0 \text{ s}$ 。

假设关节 2、3 中的任何一个都可能发生故障。将各关节的容错空间影响因子和退化条件数的加权和代入式(4)、(5), 将各关节容错空间的交集代入式(7)后, 利用式(4)~(7)的最优化算法, 可以得到该机器人三个臂长的最优值分别为 0.59、0.53 和 0.80, 对应的容错空间影响因子、退化条件数以及关节位形如图 2、3 所示。由于这两个容错指标均为关节 2、3 的加权和形式, 所以其理想值分别为 6.28 和 2.00。从这些计算结果可以看出, 容错空间影响因子和退化条件数的“最坏值”分别为 6.16 和 3.98, 说明机器人在故障后和故障时刻均具有良好的容错操作能力。并且对同一个机器人来讲, 容错空间影响因子和退化条件数这两个指标是相互冲突的, 即一个改善, 另一个就恶化。此外, 三个臂长的初值会对其最优值产生一定影响。为了得到更为可行的臂长参数(如关节速度不能过大等), 可以在可行域内多选几个不同的初值进行计算, 然后将结果相互比较并充分考虑两个指标之间的平衡, 最终确定出最佳臂长。

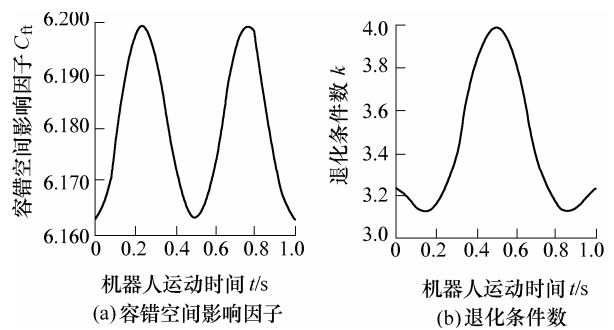


图 2 平面机器人取最优臂长时性能指标

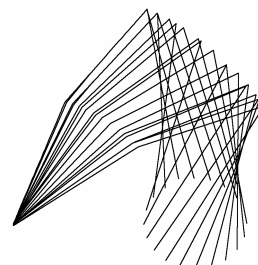


图 3 关节位形

### 3.2 空间4R机器人

对于图4的空间4R机器人来讲，如果只考虑关节2的容错问题，其退化机器人的工作空间的体积与臂长和<sup>[15]</sup>可分别表示为

$$W_2(\theta) = 4\pi^2(d_4^2 + d_t^2)\sqrt{d_3^2 + \sin^2\theta_2 + d_2^2} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^4 l_i(\theta) = [(d_1 \sin\theta_2 + d_3 \sin\theta_2)^2 + (d_4 + d_2 \cos\theta_2)^2 + (d_1 \cos\theta_2 + d_3 \cos\theta_2 + d_1)^2]^{1/2} \quad (13)$$

在这里，空间机器人的臂长之和可以理解为其末端到基坐标系原点的最大距离。将式(12)、(13)代入式(3)可得到该空间4R机器人的容错空间影响因子。

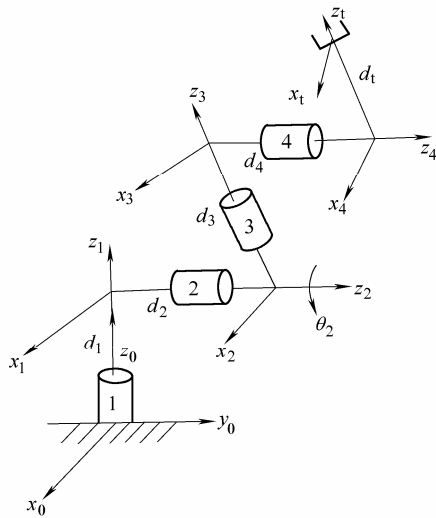


图4 空间4R机器人

假设该机器人末端起始点的坐标为 $[0, 0.1, 0.2]^T$  m，并在y-z平面内作圆周运动，其运动轨迹等其他仿真条件同平面机器人，有关容错空间内外边界 $R_1$ 和 $R_0$ 的计算可参见文献[16]。利用式(4)~(7)的最优化算法求得该机器人 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$ 和 $d_t$ 的最优值分别为0.200、0.120、0.420、0.385和0.285 m，对应的容错空间影响因子和退化条件数如图5所示。由此可以看出，空间机器人的这两个容错指标并不像平面机器人那样存在很有规律的对应关系，相互的冲突也不那么明显，这说明使它们同步最优的可能性更大。同时，由于优化变量增多，其取值范围的设定及初值的选取对优化结果的影响更为突出，使优化计算更为困难。为解决这一问题，可以采用下面介绍的敏感度分析方法最大限度地缩小优化变量的取值范围。另外，无论平面还是空间机器人，对于确定的操作任务，不同的末端起始点也对应着不同最优臂长。

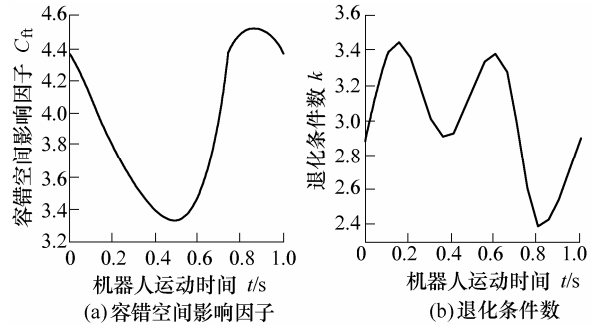


图5 空间机器人取最优臂长时性能指标

### 3.3 敏感度分析

最后，以平面3R机器人为例，分三种情况进行臂长的敏感度分析，一方面可以掌握各优化变量对容错指标的影响趋势和影响程度，另一方面也有利于确定各设计变量的取值范围使容错指标达到全局最优。假设机器人的任意两个臂长为0.5 m，剩余的臂长在0.3~0.8 m之间变化。

#### 3.3.1 关节3发生故障

由图6可知，当 $l_1=0.8$  m时，容错空间影响因子和退化条件数的“最坏值”分别为3.04和1.90，非常接近它们的理想值3.14和1.00，这说明机器人在故障后和故障时刻均具有良好的容错操作能力。当 $l_1=0.3$  m时，容错空间影响因子和退化条件数的“最坏值”分别为2.42和5.84，远远劣于它们的理想值，此时，机器人已基本不具有容错操作能力。以上结果表明， $l_1$ 的变化对容错空间影响因子和退化条件数有很大影响，当 $l_1$ 小于其余臂长时，容错空间影响因子和退化条件数对其变化的敏感度较大；而当 $l_1$ 超过其余臂长一定程度时，容错空间影响因子和退化条件数对其变化的敏感度明显下降。由图7、8又可看出， $l_2$ 和 $l_3$ 的变化对容错空间影响因子和退化条件数几乎没有影响。

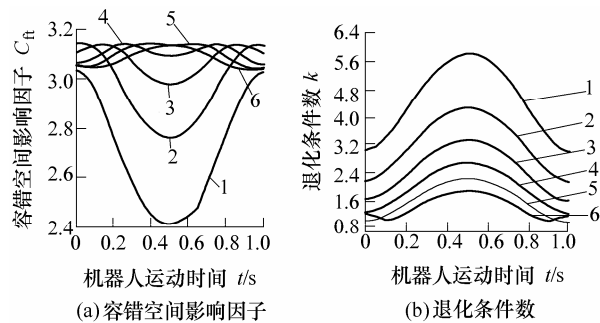


图6  $l_2=l_3=0.5$  m时机器人容错指标

- 1.  $l_1=0.3$  m 2.  $l_1=0.4$  m 3.  $l_1=0.5$  m
- 4.  $l_1=0.6$  m 5.  $l_1=0.7$  m 6.  $l_1=0.8$  m

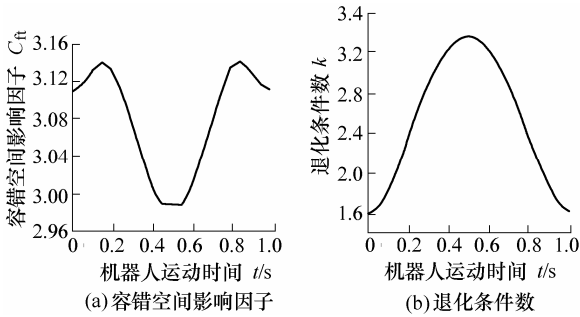


图 7  $l_1=l_3=0.5\text{ m}$  时机器人容错指标( $l_2=0.3\sim 0.8\text{ m}$ )

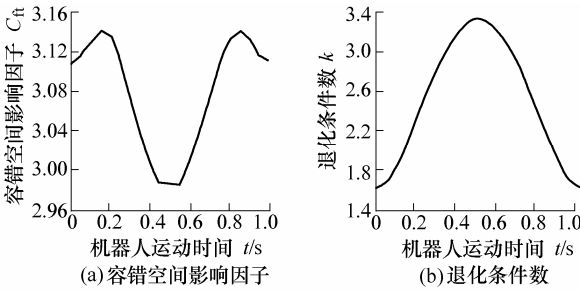


图 8  $l_1=l_2=0.5\text{ m}$  时机器人容错指标( $l_3=0.3\sim 0.8\text{ m}$ )

3.3.2 关节 2 发生故障

图 9~11 的仿真结果表明, 机器人三个臂长的变化均对容错空间影响因子和退化条件数产生影响。其中, 由图 11 可以看出  $l_3$  最为敏感, 当  $l_3=0.8\text{ m}$  时, 容错空间影响因子和退化条件数的“最坏值”同时达到最优值。而图 9、10 则说明, 随着  $l_1$  或  $l_2$  的增加, 容错空间影响因子减小, 退化条件数增大, 但当超过其余臂长时, 这两个指标均不发生变化, 即敏感度几乎为零。

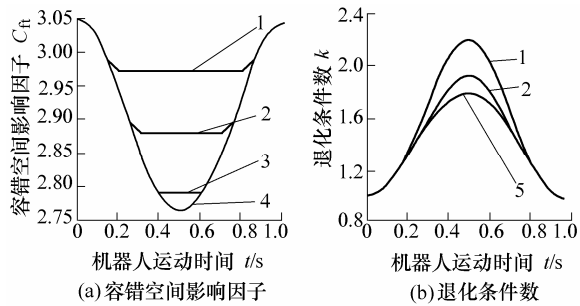


图 9  $l_2=l_3=0.5\text{ m}$  时机器人容错指标  
1.  $l_1=0.3\text{ m}$  2.  $l_1=0.4\text{ m}$  3.  $l_1=0.5\text{ m}$   
4.  $l_1=0.6\sim 0.8\text{ m}$  5.  $l_1=0.5\sim 0.8\text{ m}$

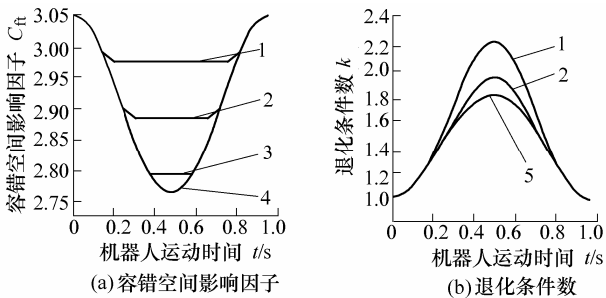


图 10  $l_1=l_3=0.5\text{ m}$  时机器人容错指标  
1.  $l_2=0.3\text{ m}$  2.  $l_2=0.4\text{ m}$  3.  $l_2=0.5\text{ m}$   
4.  $l_2=0.6\sim 0.8\text{ m}$  5.  $l_2=0.5\sim 0.8\text{ m}$

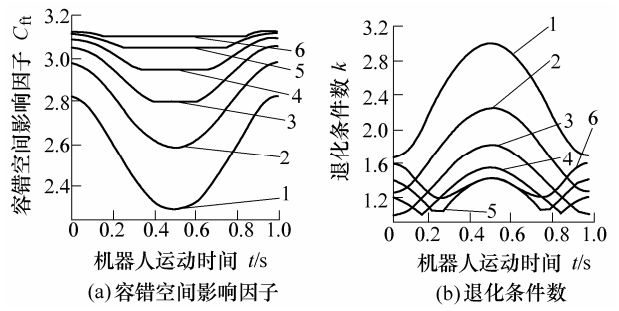


图 11  $l_1=l_2=0.5\text{ m}$  时机器人容错指标  
1.  $l_3=0.3\text{ m}$  2.  $l_3=0.4\text{ m}$  3.  $l_3=0.5\text{ m}$   
4.  $l_3=0.6\text{ m}$ , 5.  $l_3=0.7\text{ m}$  6.  $l_3=0.8\text{ m}$

3.3.3 关节 3 或 2 发生故障

同时考虑关节 2、3 的容错问题。由图 12、13 可知,  $l_1$  或  $l_3=0.8\text{ m}$  时, 容错空间影响因子和退化条件数的“最坏值”分别达到最优值, 其敏感度的规律与前两种情况相同。而图 14 的结果表明, 随  $l_2$  的增加, 容错空间影响因子减小, 退化条件数增大。这说明为了使这两个指标同时趋于最优, 应适当增加  $l_1$  或  $l_3$ , 而减小  $l_2$ 。不难看出, 前面得到的 3R 机器人的最优臂长即符合这一规律, 从而验证了优化结果的正确性。

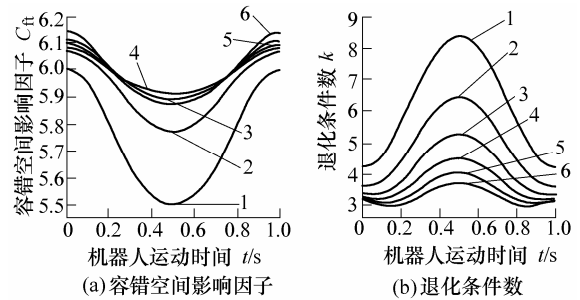


图 12  $l_2=l_3=0.5\text{ m}$  时机器人容错指标  
1.  $l_1=0.3\text{ m}$  2.  $l_1=0.4\text{ m}$  3.  $l_1=0.5\text{ m}$   
4.  $l_1=0.6\text{ m}$  5.  $l_1=0.7\text{ m}$  6.  $l_1=0.8\text{ m}$

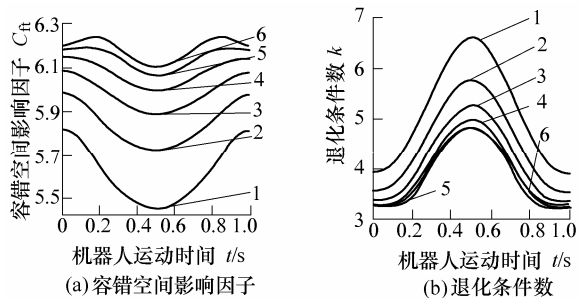


图 13  $l_1=l_2=0.5\text{ m}$  时机器人容错指标  
1.  $l_3=0.3\text{ m}$  2.  $l_3=0.4\text{ m}$  3.  $l_3=0.5\text{ m}$   
4.  $l_3=0.6\text{ m}$  5.  $l_3=0.7\text{ m}$  6.  $l_3=0.8\text{ m}$

综上所述, 就容错空间影响因子和退化条件数这两个指标而言, 机器人臂长的敏感度与其相连的故障关节数有关。当只考虑一个关节的容错问题时, 不与故障关节相连的臂长具有较高的敏感度, 如情况(1)中的  $l_1$  和情况(2)中的  $l_3$ ; 当考虑两个关节的容

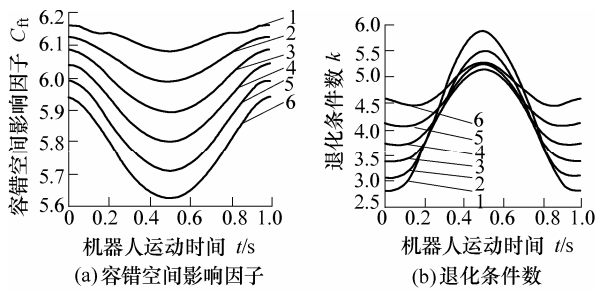


图 14  $l_1=l_3=0.5$  m 时机器人容错指标

1.  $l_2=0.3$  m 2.  $l_2=0.4$  m 3.  $l_2=0.5$  m  
4.  $l_2=0.6$  m 5.  $l_2=0.7$  m 6.  $l_2=0.8$  m

错问题时, 只与一个故障关节相连的臂长具有较高的敏感度, 如情况(3)的  $l_1$  和  $l_3$ 。另外, 臂长对这两个容错指标的对应关系产生一定影响, 并不是在所有情况下, 容错空间影响因子的最大值都与退化条件数的最小值相对应, 如图 7、8 所示的情况。

## 4 结论

(1) 机器人的容错操作性能对不与故障关节相连或只与一个故障关节相连的臂长具有较高的敏感度, 在调节臂长时, 应优先考虑这些臂长。

(2) 与平面机器人不同, 空间机器人的这两个容错指标并不存在着很有规律的对对应关系, 相互的冲突也不那么明显, 这说明使它们同步最优的可能性更大。

(3) 如果将本文的结构综合方法引入到模块化可重构机器人, 利用移动模块进行机器人臂长参数的调整, 则可实现对变化作业任务的容错操作。当然, 面对变化的作业任务, 必须在借助机器人的视觉系统获得作业任务的位置信息后, 才能利用该方法确定出机器人的最佳臂长, 并通过模块化机器人的自重构, 调整到该最佳结构。

## 参 考 文 献

- [1] MACIEJEWSKI A A. Fault tolerant properties of kinematically redundant manipulator[C]//Proceedings of the IEEE International conference, 13-18 May, 1990, West Lafayette, USA, 1990: 638-642.
- [2] ROBERTS R G, MACIEJEWSKI A A. A local measure of fault tolerance for kinematically redundant manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(4): 543-552.
- [3] LEWIS C L, MACIEJEWSKI A A. Fault tolerant operation of kinematically redundant manipulators for locked joint failures[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997, 13(4): 622-629.
- [4] 赵京, 缪萍, 荆红梅. 冗余度机械臂关节运动和末端运动的同步容错规划[J]. 机械工程学报, 2003, 39(3): 53-57.
- [5] 赵京, 荆红梅, 张雷. 两机械臂协调操作的容错运动规划[J]. 机械工程学报, 2004, 40(12): 172-176.
- [6] YOSHIDA E, MURATA. A self-reconfigurable modular robot: reconfiguration planning and experiments[J]. International Journal of Robotics Research, 2002, 21(10): 903-915.
- [7] YIM M, ROUFAS K, DUFF D, et al. Modular reconfiguration robots in space applications[J]. Autonomous Robots, 2003, 14(2): 225-237.
- [8] AKIHIKO, MATSUURA, YUJI I, et al. A preliminary study for reconfigurable robot system[C]// Proceedings of the 30th Annual Conference, Nov. 2-6, 2004, Busan, Korea, 2004: 1 052-1 057.
- [9] BOSKOYIC J D, MEHRA. A decentralized scheme for accommodation of multiple simultaneous actuator failures [C]//Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, USA, 2002: 5 098-5 103.
- [10] TOSUNOGLU S. Fault tolerance for modular robot[C]// Proceedings of the International Conference, Nov. 15-18, 1993, Maui, USA, 1993: 1 910-1 914.
- [11] SALIBURY J K, CRAIG J. A articulated hands: kinematic and force control[J]. Int. Journal of Robotics Research, 1982, 1(1): 4-17.
- [12] KUMAR A, WALDRON K J. The workspace of a mechanical manipulator[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1981,103(3): 665-672.
- [13] GUPTA K C, ROTH B. Design considerations for manipulator workspace[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1982, 104(4): 704-712.
- [14] LEE T W, YANG D C H. On the evaluation of manipulator workspace[J]. ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 1983, 105(3): 70-77.
- [15] 余俊, 周济. 优化方法程序库 OPB-1 原理及使用说明 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [16] ZHAO Jing, ZHANG Kauliang, YAO Xuebin. Study on fault tolerant workspace and fault tolerant planning algorithm based on optimal initial position for two spatial coordinating manipulators[J]. Mechanism and Machine

Theory, 2006, 41(5): 584-595.

## STRUCTURE SYNTHESIS BASED ON FAULT TOLERANT PERFORMANCE FOR REDUNDANT ROBOTS

ZHAO Jing WEI Shanshan

(College of Mechanical Engineering and Applied  
Electronics Technology, Beijing University of  
Technology, Beijing 100022)

**Abstract:** Two fault tolerant performance indexes, reduced condition number and influence factor of fault tolerant workspace are introduced. The former indicates the manipulability of a reduced robot at the moment of a failure. The latter indicates the relative workspace of the reduced robot at this moment. These indexes can quantitatively evaluate the fault tolerant ability of a robot at the moment of a failure and after the failure respectively. Then based on these indexes an optimization method of structural parameters is proposed,

which can determine the link length with optimal fault tolerance for a robot. Finally, simulation examples are demonstrated and the sensitivity of fault tolerance of a robot to each link is analyzed with a planar 3R and a spatial 4R robot respectively. The results show that the fault tolerant ability of a robot is more sensitive to the link that is not directly connected with any failed joint or is connected with only one failed joint, which means that these links should be considered in the first place when adjusting link length. In addition, for spatial robots the corresponding relation between the two indexes is not as regular as planar robots, and the conflict between them is not obvious. This implies that it is more possible for spatial robots to simultaneously optimize these two indexes.

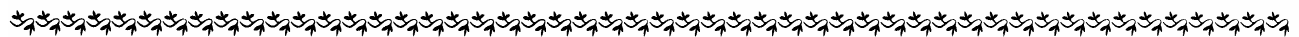
**Key words:** Redundant robots

Fault tolerant performance

Structure synthesis

作者简介: 赵京, 男, 1961 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机器人运动学和动力学。发表论文 40 余篇。

E-mail: zhaojing@bjpu.edu.cn



(上接第 81 页)

- [3] JOHN S, HUSTON J C. Estimating lateral stability Region of a nonlinear 2 degree-of-freedom vehicle [R]. SAE Paper 981172.
- [4] 毛振勇, 施树明. 基于协同学的车转向稳定性分析方法[J/OL]. [2005-3-28]. <http://www.paper.edu.cn>.
- [5] 毛振勇. 车辆转向稳定性的势能分析方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [6] KIENCKE U, NIELSEN L. Automotive control systems[M]. Berlin, New York: Springer, 2000.
- [7] PACEJKA H B, BESSELINK I J M. Magic formula tyre model with transient properties[C]//2nd International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, 1997, Berlin, Germany. Vehicle System Dynamics, 1997, 27: 234-249.
- [8] HAKEN H. 高等协同学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [9] 刘秉正, 彭建华. 非线性动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [10] 向辉, 施树明. 车辆运行自组织仿真平台开发[J/OL]. [2005-4-11]. <http://www.paper.edu.cn>.

## NONLINEAR ANALYSIS METHODS OF VEHICLE CORNERING STABILITY

SHI Shuming MAO Zhenyong

XIANG Hui WANG Xianbin

(Transportation and Traffic College,  
Jilin University, Changchun 130022)

**Abstract:** Based on the theory of the synergetic theory and nonlinear dynamics, the nonlinear model of vehicle-tire system and the one-rank Taylor expansion are analyzed, and the potential energy function of vehicle steering system is constructed. Through the analyse of potential energy function surface, the stable region of vehicle cornering system is a limit cycle expressed by the body slip angle and the yaw angular velocity, and the essential reasons of vehicle losing control is explained. Finally, the energy variation tendency of the potential energy function is validated by using the Lyapunov function. And the correctness and the validity of the potential energy function constructed are also proved.

**Key words:** Vehicle dynamics Cornering stability

Synergetic theory Vehicle simulation

Nonlinear dynamics

作者简介: 施树明, 男, 1965 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为车

辆运行仿真及控制。

E-mail: shishuming@jlu.edu.cn