

文章编号 1004-924X(2004) 05- 0510- 08

# 多关节欠驱动机器人手爪包络抓取稳定性分析与仿真

骆敏舟<sup>1,2</sup>, 梅 涛<sup>1</sup>, 卢朝洪<sup>1</sup>, 余 永<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 信息学院 自动化系, 安徽 合肥 230026; 3. 日本鹿儿岛大学工学部机械工学科, 日本鹿儿岛)

**摘要:** 研究了欠驱动手爪包络抓取稳定性。定义了抓取构形, 推导了关节数和抓取构形之间的关系, 采用抓取构形之间的转移难度作为表征抓取稳定性测度指标, 给出了抓取不稳的主要原因以及影响包络抓取稳定性的主要因素。通过仿真对抓取不同形状物体时的稳定性, 及影响稳定性的主要因素进行了对比分析和验证。结果表明: 理论分析和仿真研究结果是一致的, 欠驱动手爪包络抓取时存在多种抓取构形是影响抓取稳定性的直接原因, 稳定抓取取决于物体形状和初始的抓取姿态, 其中物体凸边的线接触的长度是决定抓取稳定的最重要的因素, 物体越是接近圆形稳定性越差, 当物体和抓取构形比较吻合时, 并且都是以线接触相互作用, 抓取稳定性最好。

**关键词:** 欠驱动手爪; 抓取稳定性; 抓取构形; 仿真

中图分类号: TP241.3 文献标识码: A

## Analysis and simulation of enveloping grasp stability of the multi-phalange underactuated robot hand

LUO Minzhou<sup>1,2</sup>, MEI Tao<sup>1</sup>, LU Chaohong<sup>1</sup>, YU Yong<sup>3</sup>

(1. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kagoshima University, Japan)

**Abstract:** The grasp stability of underactuated robot hand is discussed. The definition of grasp configuration is proposed, and the relationship between the numbers of phalanges and grasp configuration is deduced. The transition difficulty in grasp configuration is employed to evaluate the stability of enveloping grasp. The main factors which influence the grasp stability are investigated. Some cases of stimulation are given to validate the evaluation when the underactuated robot hand grasps different objects. The results show that the theory is in accordance with the simulation, and the multi-grasp-configurations are the primary reasons that lead to unstable grasp. Stable grasp is decided by object shape and initial posture, among which the length of the convex contact line is the most important factor for the grasp stability. The grasp is most unstable when the object shape resembles circle, while the grasp is the most stable when the object shape wholly conforms to the grasp configuration convex with long margin line. The longer the line is, the more stable the grasp is.

收稿日期: 2004-07-28; 修订日期: 2004-08-19.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50275141)和 863 国家高技术研究发展计划资助。

**Key words:** underactuated robot hand; grasp stability; grasp configuration; simulation

### 1 引言

目前机器人末端夹持器主要分为两大类: 一类是多用途手爪, 其中以多指灵巧手<sup>[1-3]</sup>居多; 另一类是满足特定任务的专用夹持器<sup>[4-6]</sup>。多指灵巧手形状适应能力强, 但是采用了大量的串联关节导致结构复杂、控制困难、负载能力差、可靠性低等缺点。而专用夹持器虽然结构简单、控制方便、负载能力强、可靠性高, 但是仅对少量特定形状的物体适用。

欠驱动手爪是一种新型的多用途手爪。这种类型的手爪的特点是驱动元件数少于手指关节的自由度数。每个手指只有一个驱动源, 整个手爪的驱动元件(电机)的数量少, 降低了结构和操作的复杂性, 具有控制方便, 抓取范围广泛等优点。既能以欠驱动方式实现强力包络抓取, 也可以用末关节捏取方式实现精确抓取。加拿大 MD ROBOTICS 公司和 Laval 大学合作研制出三指三关节欠驱动手爪 SARAH (Self Adapting Robotic Auxiliary Hand)<sup>[7-9]</sup>, 附加一个手指位置旋转自由度, 该手爪共有 10 个自由度, 只用 2 个电机驱动, 一个电机负责手指开合, 另一个负责调整位置。依靠被动柔顺, 手指对被抓取物体有形状自适应的作用, 能够对任意形状物体进行抓取。

### 2 欠驱动手爪包络抓取特点

正如文献[9]中提及的: 欠驱动手爪在包络抓取的过程中, 会出现接触点脱离的现象, 这种现象不是一种偶然, 这正是由于欠驱动机构的特殊性引起的, 这种现象直接导致欠驱动手爪抓取稳定性受到影响, 文献[9]并未对此作进一步的研究。产生这种现象的根本原因在于欠驱动本身, 在完成图 1 的抓取行为并且达到初始平衡以后, 由于手指的每个关节仍然具有局部运动自由度的可能, 使得抓取物体时存在多种可能的抓取构形, 当手指对物体的约束不能抵抗外施加在物体上的力旋量扰动时, 物体的初始姿态会发生改变, 抓取构形会从一种构形转变为另一种构形, 影响了抓取的稳定性。以图 1 中两指欠驱动手爪抓取为例:

当手指对物体的约束不能抵抗外力矩  $\tau$  的作用时, 由于手指关节仍能够进行局部运动, 物体从会平衡状态 1 转变到平衡状态 2, 手指的构形发生了改变, 接触点会脱离, 造成抓取不稳, 并且这种改变不可逆。

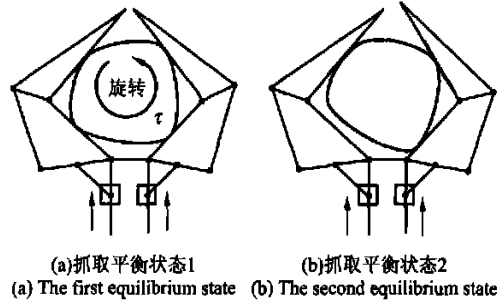


图 1 在外力旋量作用下抓取构形转移

Fig. 1 Under the act of rotating moment the grasp configuration changes from the first equilibrium state to another

在包络抓取模式下, 当每个关节指面按照顺序依次被约束以后, 如图 2 所示, 各关节指面的接

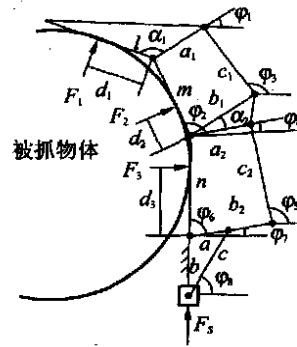


图 2 形状自适应欠驱动手指机构

Fig. 2 Shape self adapting underactuated finger mechanism

触力取决于外部的约束和手指的构形, 由于手指只能压不能拉, 忽略摩擦力, 所以 3 个法向接触力  $F_1 > 0, F_2 > 0, F_3 > 0$ , 根据虚功原理有:

$$\delta W = \sum_{i=1}^n F_i \times \delta r_i = 0$$

$$d_3 \Delta \theta_3 F_3 + d_2 \Delta \theta_2 F_2 + n \Delta \theta_3 F_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_6 - \pi) + d_3 \Delta \theta_1 F_1 + m \Delta \theta_2 F_1 \cos(\varphi_1 + \alpha_1 - \varphi_2 - \pi) + n \Delta \theta_3 F_1 \cos(\varphi_2 - \varphi_6 - \pi) + \delta_s F_s = 0, \quad (1)$$

式中:  $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 $\Delta\theta_3$ 、 $\delta$  是 3 个手指关节和推杆的虚位移。

抓取稳定必须具备静平衡、无滑动和阻止各项扰动的能力。常规的抓取稳定性分析是通过形封闭和力封闭的概念来表示的<sup>[10]</sup>, 力封闭则是依靠摩擦锥的作用来抵抗任意外力旋量。形封闭是依靠约束物体的自由度来抵抗任意外力旋量的作用。形封闭和力封闭理论分析的前提是每个作用点的作用力能够精确施加, 而由公式(1)可以看出, 3 个接触力取决于接触点的位置, 关节连杆尺寸, 关节连杆的角度等, 也即取决于外部约束, 并且 3 个接触力和驱动力之间呈现高度的非线性关系, 相互之间存在耦合, 因此每个关节不能施加精确的和独立的力控制, 无法采用常规的稳定性分析模型来分析欠驱动手爪的抓取问题, 这一点和多指灵巧手存在本质区别。

针对欠驱动手爪的特殊性, 本文通过研究欠驱动手指的包络抓取构形以及影响抓取构形的因素, 进一步研究包络抓取模式下抓取的稳定性问题, 对欠驱动手爪的包络抓取稳定性提出新的测度指标, 主要从以下 3 个方面进行讨论: 抓取构形分析, 影响抓取构形的因素以及外力旋量和抓取构形之间的关系。这里以平面抓取作为研究的基础, 立体环境下的分析和平面的类似。分析是建立在仿真的基础上, 并且分析基于以下两点假设:

(1) 由于摩擦的存在会使得抓取更加稳定, 所以本文考虑抓取在摩擦力很小或者没有摩擦的情况。

(2) 假设抓取物体和手爪都是刚性接触。

包络抓取从本质上是依靠接触对被抓取物体的全部或部分自由度进行约束, 因此接触的约束类型是影响抓取稳定性的重要因素。忽略摩擦的作用, 在平面抓取中抓取的约束类型可以看成是光滑的点接触和线接触两种基本的接触方式。线接触可以看成是很多点接触的叠加, 线接触的长度影响抓取的稳定性。

包络抓取接触具有以下的 2 个特点: (1) 在接触的法向作用力只能承受手指的压力, 不能承受拉力, 具有力的单向性, 即  $F_1 > 0, \dots, F_n > 0$ ; (2) 物体受到手指的约束在接触点的运动方向只能使物体保持接触或者脱离, 不可能嵌入手指因此运动约束, 具有运动单向性。

影响包络抓取稳定性主要因素有: 末关节平

衡, 物体的形状和初始姿态, 手指机构四边形机构尺寸以及施加的主动动力。这些因素对稳定性的影响是通过抓取构形来实现的, 抓取构形是欠驱动抓取的稳定性分析的基础。在接触约束作用下, 手指抵抗外力旋量时, 构形没有发生变化, 抓取就是稳定的。

### 3 抓取构形分析

定义: 抓取构形定义为 2 个相邻关节之间的转角和从转动点到接触点之间的距离的组合:

$$GC = [\theta, d]^T, \quad (2)$$

式中:  $\theta = (\theta_{i_1}, \theta_{i_2}, \dots, \theta_{i_n})^T$ , 表示第  $i$  手指从手掌关节开始的两个关节之间的夹角。  $d = (d_{i_1}, d_{i_2}, \dots, d_{i_n})^T$  表示第  $i$  个手指关节接触点的距离。抓取构形表示约束点的位置。

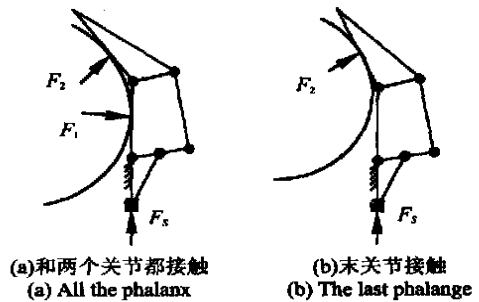


图 3 两关节欠驱动手指可能的抓取构形

Fig. 3 Possible grasp configurations for the two-phalanx finger

下面首先分析手指的抓取构形和手指的关节数之间关系。当手指只有一个关节时, 是完全可控的, 手指只存在一种抓取的构形。在图 3 中, 当存在两个关节时, 存在两种抓取构形的可能, 手指变成不可控。在图 4 中, 当有三个关节时, 存在四种可能的抓取构形, 手指不可控的程度更大。从欠驱动手指的抓取特性可以看出手指的末关节总是和物体接触的, 因此, 当存在  $n$  个关节时, 除去末关节以外的  $n-1$  个关节都存在和物体接触或脱离两种可能, 所以对于  $n$  个手指关节, 可能的抓取构形数  $GN$  为:

$$GN = 2^{n-1}, \quad (3)$$

通过分析, 可以看出当关节数越多, 欠驱动的程度越大, 存在可能的抓取构形越多, 抓取物体时抓取构形改变的可能性越大, 抓取可能越不稳定。

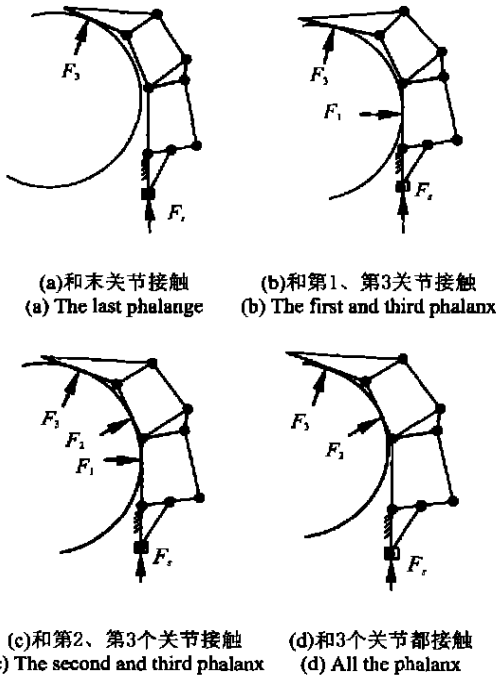


图 4 3 关节欠驱动手指可能的抓取构形  
Fig. 4 Possible grasp configurations for the three phalanx finger

下面从力在平面上分布的角度出发, 考察欠驱动抓取构形对稳定性的影响。如在图 5 所示, 虚线表示对称手指的作用, 当只有一个接触点时, 如图 5(a) 所示, 物体不能抵抗垂直方向的外力。图 5(b) (c) 则能抵抗水平和垂直方向的作用力。当手指的关节数越多, 手指在平面上分布的作用点越多, 在手指关节的指面张成的平面上各接触点的受力是沿着各个方向的, 手指抵抗任意方向的外力的能力就越强, 手指就越容易达到平衡。

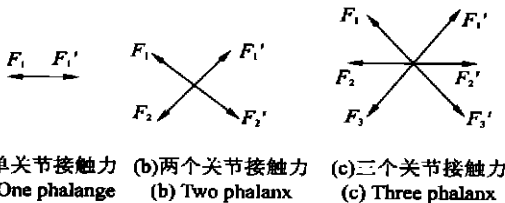


图 5 不同关节数的手指在平面上的力分布  
Fig. 5 Force span of grasp plan with different number of phalanx finger (the virtual lines denote the symmetric finger)

## 4 影响稳定抓取的因素

### 4.1 末关节平衡

文献中[6]讨论了末关节的平衡问题: 主要研究了在手指闭合以后末关节平衡的问题, 如图 6 所示。在第 1 个关节和物体没有接触点的情况下, 末关节的 3 个作用力在点  $O$  交汇时才有可能平衡; 当第 1 个关节和物体有接触点时, 如图中的虚线所示,  $F_1$  作用点向外滑动, 在点  $P$  以外的某一位置, 手指末关节才能达到平衡。

在受到外力旋量的扰动时, 末关节达不到平衡, 会使物体弹射(ejection)出去, 整个手指会完全脱离物体, 因此末关节平衡是实现稳定抓取的基本条件。

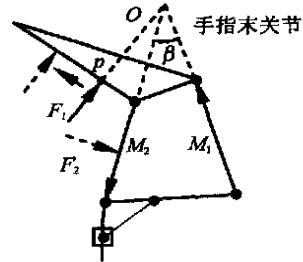


图 6 欠驱动手指末关节的平衡  
Fig. 6 Force equilibrium of the last phalange of underactuated finger

### 4.2 物体的形状和初始姿态

欠驱动手指包络抓取的稳定性和物体的形状密切相关。欠驱动手指抓取一个任意形状的物体时, 就相当于在以手指关节和手掌为凸边的凸包在包络一个任意形状的物体。手指的每条边和物体都是以线接触的方式接触时, 当物体受到扰动时, 物体和凸包之间的没有可行的运动的空间, 并且手指的构形不会发生改变, 由于物体是刚体, 要发生位移旋量的改变, 只有凸包发生破坏性的改变才有可能, 所以抓取是稳定的, 如图 7 中左边的图形所示。而当物体和手指的每条边都是以点接触方式时, 手指的构形很容易从一种构形改变为另一种构形, 引起抓取不稳。圆形物体则比较特殊, 无论在任何状态时都不可能克服旋转力矩的作用。因此欠驱动手爪抓取圆形物体是不稳定的, 图 7 中右图表示这一状态。

抓取稳定性除了和物体的形状相关, 而且和

物体的初始姿态(除了圆形物体之外)相关。对于同一个物体,初始姿态不同,稳定性会有很大的差别。如果初始姿态是点接触,那么它的接触点的曲率越大则抓取越稳,否则越不稳定。

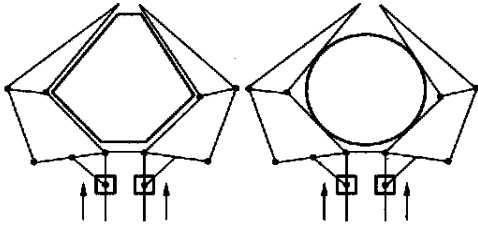


图 7 欠驱动手爪抓取稳定性的两种极限情况

Fig. 7 Two limit stable states of the underactuated hand grasp

### 4.3 四边形机构尺寸

欠驱动手指是由未关节的三角形和其余关节的四边形机构组成的。四边形机构可以看成是双摇杆机构,但是由于运动干涉的存在,手指构形的改变量被限定在一个较小范围,并且手指的连杆具有一定的宽度,手指关节在运动中存在更多的机械限位和干涉,因此手指局部运动的幅度更小。

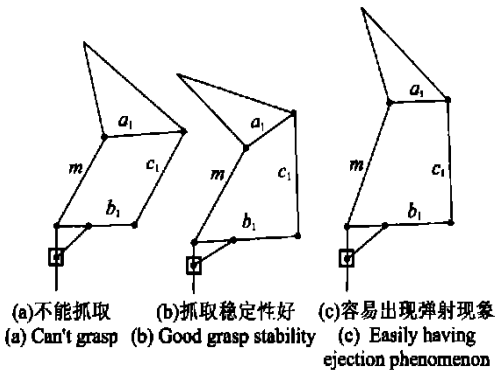


图 8 四边形对抓取效果的影响

Fig. 8 The contribution of quadrilateral size to grasp stability

四边形机构的设计尺寸对抓取的稳定性也有很大影响,当四边形机构的尺寸构成平行四边形时,如图 8(a)所示,  $m = c_1, a_1 = b_1$ , 显而易见,此种情况手指无法完成抓取。只有满足尺寸约束:  $0 < a_1 < b_1, 0 < m < c_1$  才能实现抓取。这里令  $\alpha_1 = a_1/b_1, m = \alpha_2 c_1$ ,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的范围在(0,1)以内,  $m$  值和手指的抓取范围有关,而  $a_1$  值决定未关

节的强度。 $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  取值不能太大或太小,太大时手指接近于平行四边形;太小则会出现奇异构形。但对于同样的物体,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  取不同值时,抓取同一物体时手指构形存在很大差别:例如图(c)中和图(b)中所有的尺寸相同,只是  $\alpha_2$  取值比(b)中的大,通过仿真可以得到看出,图(c)比图(b)更容易发生物体弹射现象,因此,图(c)的抓取稳定性比图(b)好,由此可见手指的四边形尺寸也是影响抓取稳定性的重要因素。

### 4.4 施加主动力

作用在物体上的外力旋量通过物体和手指发生作用。这里将能够使得手指的构形改变的力称为主动力,主动力是抓取构形的改变条件,从而影响抓取的稳定性。我们用两关节的手指进行仿真,在不同的主动力作用下,手指的构形改变的方式也不一样,主动力分别用图中的粗黑体表示,我们用仿真软件模拟了以下四种情况:

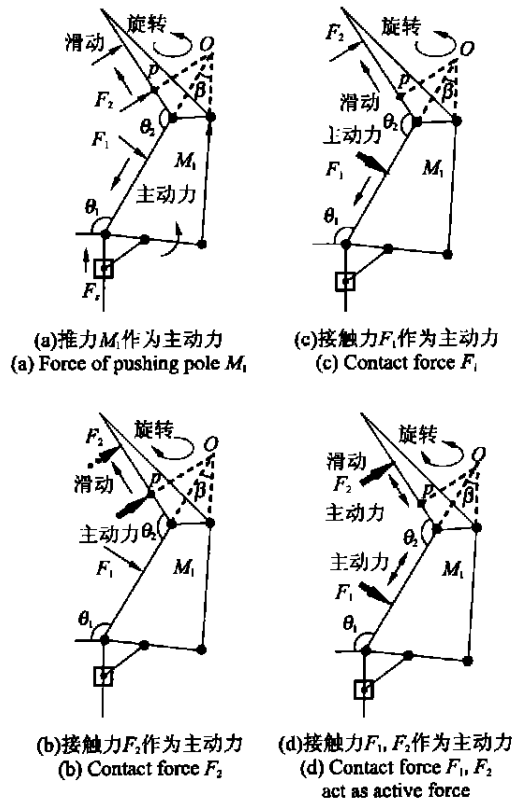


图 9 主动力对抓取构形的影响

Fig. 9 Contribution of active forces to grasp stability

图9中(a)表示两个关节和物体全部接触以后,连杆继续施加主动力  $M_1$  的作用,抓取的构形改变的趋势为  $GC(d_1 \downarrow \text{或} \vec{0}, d_2 \uparrow, \theta_1 \uparrow, \theta_2 \downarrow)$ ,  $\uparrow$  表示增大,  $\downarrow$  表示减小,末关节逆时针转动,  $\vec{0}$  表示  $F_1$  可能脱离,这时在点  $P$  处末关节三力交汇达到平衡。但在  $F_1$  脱离以后,通过驱动力  $F_s$  的作用,  $F_1$  可能重新接触,  $F_2$  从点  $P$  向图中所示的方向滑动,在某点处平衡,经过反复的振荡,最后手指在某个构形处平衡。图(b)表示在抓取达到平衡以后,在受到  $F_2$  的作用力时,可能的构形改变的趋势为  $GC(d_1 \vec{0}, d_2 \uparrow, \theta_1 \downarrow, \theta_2 \uparrow)$ ,末关节顺时针方向旋转,物体和第1个关节脱离,构形在  $x$  轴方向的宽度变小,此时也有两种可能:一是物体和手指只有末关节平衡,此时手指的三个力满足交汇平衡条件;另外一种情况,当宽度继续减小到一定程度,导致物体和手指可能重新接触,  $F_2$  接触点向外滑动,在点  $P$  以外的某点位置达到平衡。图(c)表示手指受到  $F_1$  主动力的作用,由于末关节总是和物体接触,作用在末关节上的  $F_2$  也总是存在,可能的构形改变的趋势为  $GC(d_1 \downarrow, d_2 \uparrow, \theta_1 \uparrow, \theta_2 \downarrow)$ ,所以力  $F_2$  一定在点  $P$  以外的某点处重新达到平衡。图(d)表示同时受到  $F_1$  和  $F_2$  主动力的作用时,构形改变的趋势是不确定的,作用点滑动的方向也是不确定的,相对来说不容易达到平衡状态。实际的抓取是通过驱动力来平衡外力旋量的作用,也即为外力旋量(b)(c)(d)其中的一种和驱动力(a)的叠加。(a)和(b)的叠加后使得末关节旋转的方向相反,因此很容易达到平衡状态;(a)和(c)的叠加使得末关节旋转的方向相同,因此叠加后物体容易弹射出去,不易达到平衡状态;而(a)和(d)的叠加使得末关节旋转的方向也不固定,平衡状态难以确定。

## 5 包络抓取的稳定性测度

由于抓取物体时手指的末关节总是和物体相接触,手指平衡的首要条件是末关节达到平衡。在接触状态转移的过程中,从初始的抓取构形到最终的抓取构形的转变时,如果物体之间的接触状态位点或线接触方式时,转移的难度加大,当所有的接触类型都变成面接触时,状态转移会停止,抓取的构形将不再发生改变,对于当抓取的物体

受到外力的作用时,如果构形越多,抓取构形会从一种状态转变到另一种状态,因此物体越不稳定。本文采用抓取构形状态转移难度来表征欠驱动抓取稳定性的测度指标。

从上面的分析可以看到,当抓取的初始状态  $GC_0$  确定时,外力的力旋量  $W$  的改变将唯一确定抓取状态的改变量  $\Delta GC$ ,即存在映射  $g: W \rightarrow \Delta GC$  满足

$$g: W \rightarrow \Delta GC, \quad (4)$$

$$\Delta GC = g(W). \quad (5)$$

定义测度指标  $S: W = \|g\|$  为映射  $g$  的范数,显然当  $W$  越小时,对同样大小的外力旋量,状态的改变量越小,抓取越稳定;反之,抓取越不稳定。即  $W$  可用于作为表征欠驱动抓取稳定性的测度指标。

从上面的定义还可以看到,测度指标  $W$  将唯一取决于抓取的初始状态  $GC_0$ ,即对不同的初始状态将具备不同的抓取稳定性,这使得对同一个物体,采用合适的抓取规划方案,从而使最终的抓取具备最优的稳定性具有现实的意义。

由于受到很多因素的影响,  $W$  无法明确的表示出来,只能通过仿真来求解,对稳定性进行评判。

假定初始的抓取构形为:  $GC_0$ ,对于任意力旋量  $W$ :

$$GC_0 \xrightarrow{\|W\|} GC_1, \quad (6)$$

$\|W\|$  表示抓取  $GC$  的改变难度。

定义抓取稳定性  $S$ :对于同样的外力旋量  $W$  如果同时满足条件:

$$S: \lim_{\|W\| \rightarrow 0} \|GC_0 - GC_1\| \rightarrow 0, \quad (7)$$

根据稳定性测度,通过仿真可以确定欠驱动手爪抓取稳定性:当每个手指和物体都是以线接触方式接触,这时抓取的稳定性最好;当手指的和物体全部以是点接触方式接触时,稳定性最差。当手指和物体同时存在点接触和线接触方式时,稳定性介于两者之间。

## 6 模拟与仿真

为了验证上述观点的正确性,用仿真软件对两关节两指欠驱动手爪抓取平面非规则形状物体进行了模拟,物体在抓取达到平衡以后,受到逆时

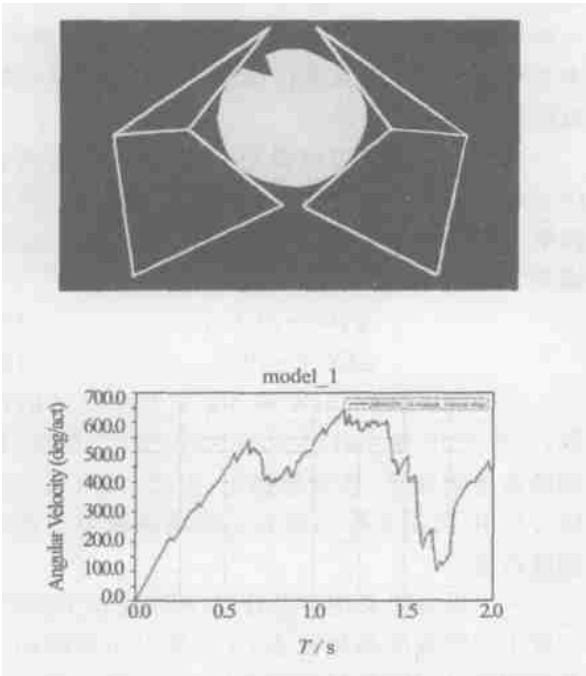


图 10 接近圆形的凸多面体以及受到旋转力矩扰动的角速度

Fig. 10 Angular velocity of conex object resembling cir- cle under rotation moment perturbation

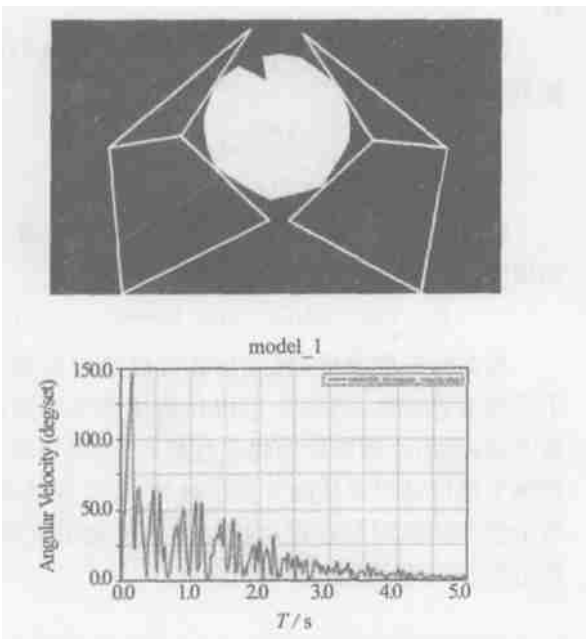


图 11 有两条较长凸边的凸多面体以及受到旋转力矩扰动的角速度

Fig. 11 Angular velocity of object having two long lines contact with the convex formed by the finger phalanges under rotation moment perturbation

针力矩的扰动。物体的形状分为 3 种, 图 10 为凸边是直线段的凸多边形物体, 但是长度较短而且比较均匀, 接近于圆形, 扰动后手指的抓取构形一直在变, 物体的角速度随着时间的变化如图 10 所示, 在初始阶段基本上是线性的, 在后面的阶段角速度有一个明显的下降过程, 这个过程表示物体受到手指的约束作用, 手指的抓取构形改变的难度在加大。图 11 和图 10 相比, 物体有 2 个比较长的直线凸边, 从上升到下降的过程, 角速度发生明显的变化, 最后由于 2 条直线边和手指的指面相互作用趋于零, 手指的构形不能够发生改变。在图 12 中这种情况更加明显, 图中的图变形都是线接触, 在转过一个微小的角度以后, 手指的构形不再发生改变, 如果连杆强度是理想的, 此时物体可以抵抗任意外力旋量的作用。

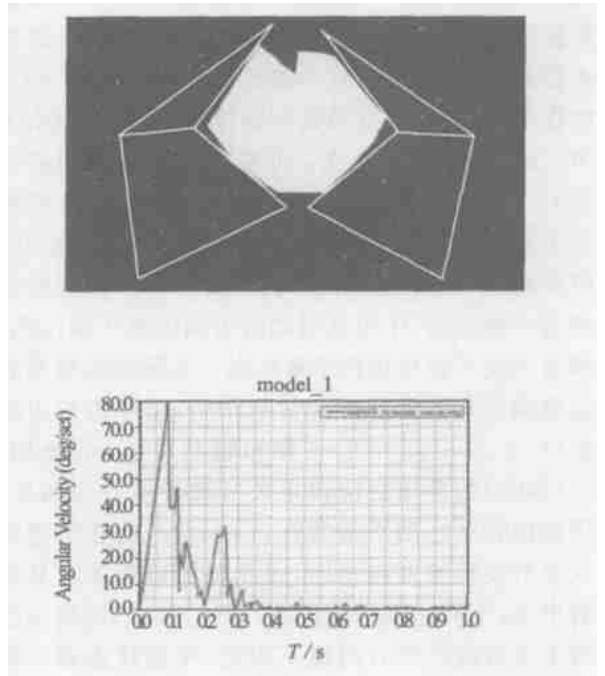


图 12 物体形状和关节形成的凸包吻合时以及受到旋转力矩扰动的角速度

Fig. 12 Angular velocity of object whose shape is in harmony with the convex formed by the finger phalanges under rotation moment perturbation

### 7 结 论

通过分析欠驱动手爪包络抓取稳定性的主要因素, 我们可以得出: 欠驱动手爪包络抓取时存在多种抓取构形是影响抓取稳定性的直接原因, 稳

定抓取取决于物体形状和初始的抓取姿态, 其中物体的凸边的线接触的长度是决定抓取稳定的最重要的因素, 物体越是接近圆形稳定性越差, 当物

体和抓取构形比较吻合时, 并且都是以线接触相互作用, 抓取稳定性最好。

#### 参考文献:

- [1] JACOBSEN S C, WOOD J E, KNUTTI D F, *et al.* The UTAH/M. I.T. dexterous hand: work in progress[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1984, 3(4): 21-50.
- [2] BUTTERFASS J, HIRZINGER G, KNOCH S, *et al.* LDR's Multisensory articulated part I: hard and software architecture[C]. *in Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, 1998: 2081-2086.
- [3] GAZEAU J P, ZEGHLOUL S, ARSICUALT M, *et al.* The LMS hand: force and position controls in the aim of fine manipulation of objects[C]. *in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001: 2642-2648.
- [4] SONG Y, ZHU G CH. Armr hand integration system for intelligent robot[J]. *The Journal of Robotics technology and application*, 1999, 2(3): 21-24.
- [5] 李绣峰, 刘桂雄, 邱泳聪. 用于机器人螺钉柔性装配的夹持器[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(1): 51-53.  
LI X F, LIU G X, KUANG Y C. Clip for robot screw assembly system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2): 11-15. (in Chinese)
- [6] TAO M, CHUANFEN X. A robot gripper with multi sensory abilities[C]. *International Symposium on Smart Structures and Microsystems, Hong Kong*: ISBN 962-85534-3-7, 2000.
- [7] LALIBERTE T, GOSSELIN C M. Simulation and design of underactuated mechanical hands[J]. *Mech. Mach. Theory*, 1998, 33(1/2): 39-57.
- [8] GOSSELIN C M, LALIBERE T: Underactuated mechanical finger with return actuation[P]. 1998, US Patent 5762390.
- [9] BIRGLEN L, GOSSELIN C M. On the force capability of underactuated fingers[C]. *In Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan*: 2003, 1139-1145.
- [10] NGUYEN V D. Constructing force closure grasps[J]. *The International Journal of Robotics Research*. 1988, 7(3): 3-16.

作者简介: 骆敏舟(1973-), 男, 安徽人, 博士研究生, 研究方向为机器人, 智能机械;

梅涛(1962-), 男, 江西人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为机器人, 微机电系统。