高技术通讯 2022 年 第32 卷 第3 期:303-313

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2022.03.009

基于广义刚度的多指手抓持稳定性分析①

谢贤铨②　陈志培　陶志成　胥　芳　鲍官军③

(浙江工业大学机械工程学院　杭州 310023)

摘　要　近年来,仿人灵巧手成为热门的研究方向,大量学者对灵巧手抓持稳定性进行了研究。刚度是影响灵巧手抓持稳定的一个重要因素,本文基于旋量理论综合研究了灵巧手关节刚度和接触刚度与扰动力作用下的被抓持物体位姿变化的关系,在旋量空间中得出了广义刚度。并针对扰动力造成的软指与物体间的滚动情况,提出了一种等效接触切向刚度的方法。在广义刚度的基础上提出了扰动力椭球的概念,并以此定义了一种抓持稳定性指标。最后,设计了一个三指灵巧手对建立的理论模型进行了实验验证,证明了理论模型的有效性。

关键词　关节刚度;接触刚度;灵巧手;抓持稳定性;扰动力

0　引　言

近年来,多指灵巧手成为机器人领域热门的研究方向,稳定地抓持物体是多指手的一个基本功能,对抓持稳定性的分析可以提高灵巧手抓持的成功性[1]。抓持稳定性主要概括为物体稳定性和接触稳定性两方面,接触稳定性指物体受到外部扰动后仍能保持接触的能力,物体稳定性指物体受到扰动而偏离原平衡位姿后回到原平衡位置的能力[2]。本文在抓持系统处于准静态平衡的前提下去分析物体稳定性,而物体稳定性往往取决于抓持系统的刚度分布。

由于刚性灵巧手存在环境适应性差、交互安全性差等问题,目前灵巧手也逐渐由最初的刚性结构逐渐向柔性结构发展,主要体现在两方面:一是使用软材料作为指尖,二是在关节处使用弹性材料[3]。从本质上看这两方面都是抓持刚度的问题,前者减小了接触刚度,后者减小了关节刚度,从而能减少灵巧手对被抓持物体造成的损害。但是柔性的结构带来了建模的困难,目前对这类问题的分析主要还是在弹性部位布置线性弹簧和扭簧进行建模,由于是线性运算,故相对有限差分法和有限元法具有优势[4]。文献[5-8]对软指尖以及抓持刚度都进行了一定研究。文献[9]在弹性模型中引入了阻尼并用键合图对软指尖建模。文献[10]用微分的思想对硅胶软指尖的特性进行了分析。文献[11]设计了一种以弹簧为关节的机构,并分析了抓持刚度。文献[12]设计了一种适合深海探测的关节处加拉簧的机械手。文献[13]基于接触力学理论建立了抓持刚度模型。

抓持稳定性分析的核心是量化的抓持稳定性指标,稳定性指标在抓持任务中起着关键作用,如抓持规划和抓持操作[14]。其中常被使用的是基于抓持矩阵 $\boldsymbol{G}$ 的代数特性几种指标,包括力旋量椭球的体积最小值[15]、最小奇异值和各向同性指标[16]等。基于几何关系的稳定性指标也常被使用,包括抓持多边形的形状和面积[17]、接触多边形的质心与对象

① 国家自然科学基金(51775499),浙江省属高校基本科研业务费专项资金(RF-C2019004)和广东省机器人与智能系统重点实验室开放基金和浙江省重点研发计划(2021C04015)资助项目。

② 男,1995 年生,硕士生;研究方向:多指灵巧手;E-mail:253338960@qq.com。

③ 通信作者,E-mail:gjbao@zjut.edu.cn。

(收稿日期:2020-11-11)

质心之间的距离和手指位置的不确定度等。但是这类抓持稳定指标仅仅是考虑了抓持点的分布以及物体表面的内法向量,而最大最小抵抗力[18]则是考虑了抓持力的一种稳定性指标,计算抓持可以抵抗任意方向上的最大的扰动力,并且文献[19]提出了一种有效的求解方法。还有一类从灵巧手构型定义的稳定性指标,如灵巧手构型的可操作椭球体积[20],这个指标着重于灵巧手的操作。

但是目前少有文献对关节刚度和接触刚度同时建模并从刚度层面进行抓持稳定性分析,针对这种情况,本文采用弹性模型和旋量理论对抓持刚度进行建模,并针对软指尖与物体之间的滚动提出等效切向刚度对传统四维软指接触刚度进行了扩展。在旋量空间中推导了由关节刚度和接触刚度合成的广义刚度,分析了被抓持物体受小扰动力情况下的位姿变化。在广义刚度的基础上定义了扰动力椭球用以分析抓持稳定性,给出了综合稳定性指标和面向特定扰动力的稳定性指标的定义。最后设计了一个具备关节刚度和接触刚度的三指灵巧手对抓持稳定性进行了验证。

1 抓持建模

传统的 DH(Denavit-Hartenberg)参数建模在运动学分析上有出色的表现,但在速度和力的分析上不太直观。而旋量建模在力和速度的分析上更具优势,但是只有全局坐标一个基坐标。目前的灵巧手往往是基于手指的模块化设计,这种建模方式对于不同操作任务以及不同手指分布的灵巧手,往往面临着复杂的重建模过程。本节使用了基于旋量的模块化建模,避免了这种情况,比如全局坐标位置发生变化时,只需改变灵巧手手掌坐标到全局坐标的映射;当灵巧手手掌结构发生变化而手指结构不变时,只需改变建模过程的手掌坐标到手指坐标的映射。这种建模是符合灵巧手的模块化设计[21-23]的。在接触点以及关节处分别建立弹性模型,描述指尖坐标系和接触点坐标系的相对运动与摩擦力的关系,之后针对扰动造成的手指物体间滚动情况引入了等效切向刚度。

1.1 基于模块化的运动学建模

由于不同文献中各种旋量的主副部表示不统一,本文所述的速度旋量主部表示旋转运动,副部表示平移运动。力旋量主部表示作用力,副部表示作用力矩。

多指灵巧手本质上是一个复杂的多连杆机构,本文对抓持系统进行模块化的坐标建立。一个抓持系统由灵巧手和被抓持物体构成,其中灵巧手又由多个手指组成,手指又包括了各个关节以及指尖,如图 1 所示。基于系统的这种组合关系,可以先对手指建模,将手指通过齐次变换矩阵连接到手掌组成灵巧手,然后将灵巧手通过一个齐次变换矩阵关联到全局坐标上。手指上的坐标系均以手指坐标系为基坐标系,灵巧手以手掌坐标系为基坐标系。这样,就可以在局部对系统进行分析,并且能将结果方便转换到全局,各坐标系关系如图 2 所示。系统中还包含了手指关节运动旋量和指尖坐标系的信息,其中第 i 根手指的第 j 个关节以运动旋量 ξ_i^j 运动(相对手掌坐标系),第 i 根手指上的关节数为 m_i。第 i 个指尖坐标系 O_{fi} 相对手掌坐标系的齐次变换矩阵如式(1)所示。

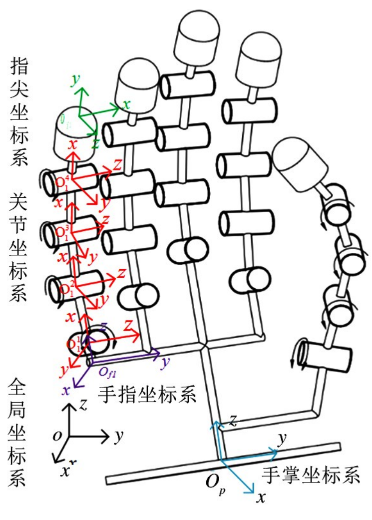


图 1 灵巧手坐标系模型

$$\boldsymbol{g}_{O_pO_{fi}}(\boldsymbol{\theta}_i) = e^{\hat{\xi}_i^1\theta_i^1} e^{\hat{\xi}_i^2\theta_i^2} \cdots e^{\hat{\xi}_i^{m_i}\theta_i^{m_i}} \boldsymbol{g}_{O_pO_{fi}}(\boldsymbol{0}) \tag{1}$$

在手掌位置固定的情况下,指尖坐标系相对手掌坐标系的速度旋量[24]如式(2)所示。

$$\boldsymbol{V}_{O_pO_{fi}}^s = (\dot{\boldsymbol{g}}_{O_pO_{fi}} \boldsymbol{g}_{O_pO_{fi}}^{-1})^{\vee} = \boldsymbol{J}_{O_pO_{fi}}^s \dot{\theta}_i \tag{2}$$

在被抓持物体中建立物体坐标系和接触点坐标

系,其中接触点坐标系的 z 轴为物体表面的内法线,$\boldsymbol{\omega}$ 为物体在外力扰动下的单位运动旋量,θ_{obj} 为旋量大小。则接触点坐标系相对于全局坐标系的速度旋量如式(3)所示,$\boldsymbol{Ad}$ 为李群 SE(3)的伴随形式运算。

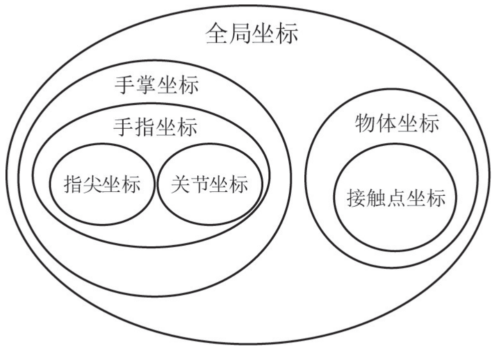


图 2　模块化各坐标关系

$$\boldsymbol{V}^{s}_{OO_{ci}} = \boldsymbol{Ad}_{g_{OO_{\mathrm{obj}}}}\boldsymbol{\omega}\theta_{\mathrm{obj}} \tag{3}$$

由式(2)、(3)结合相关的旋量运算可得手指坐标系相对接触点坐标系的速度旋量,如式(4)所示,前一项反映了物体的运动引起接触点相对当前时刻接触点坐标系的速度,后一项反映了关节的运动导致指尖相对当前接触点坐标系的速度。

$$\boldsymbol{V}^{s}_{O_{ci}O_{fi}} = -\boldsymbol{Ad}_{g_{O_{ci}O_{\mathrm{obj}}}}\boldsymbol{\omega}\theta_{\mathrm{obj}} + \boldsymbol{Ad}_{g_{O_{ci}O_{p}}}\boldsymbol{J}^{s}_{O_{p}O_{fi}}\dot{\boldsymbol{\theta}}_{i} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\delta u}_{i} &= \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{V}^{s}_{O_{ci}O_{fi}}\mathrm{d}t \\ &= -\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{Ad}_{g_{O_{ci}O_{\mathrm{obj}}}}\boldsymbol{D} + \boldsymbol{Ad}_{g_{O_{ci}O_{p}}}\boldsymbol{J}^{s}_{O_{p}O_{fi}}\boldsymbol{\delta\theta}_{i}\end{aligned} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\ \Delta = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{3\times3} & \boldsymbol{I}_{3\times3} \\ \boldsymbol{I}_{3\times3} & \boldsymbol{0}_{3\times3} \end{bmatrix}$$

速度旋量主部表示旋转角速度,副部表示平移速度,指尖在接触点各摩擦方向上的位移量如式(5)所示,其中 $\boldsymbol{\delta u}$ 为指尖相对物体表面接触点的位移向量,$\boldsymbol{B}$ 为摩擦类型矩阵,取软指接触类型,包括平行接触面的两个方向的摩擦力和垂直接触面的正压力以及摩擦力矩。Δ 为旋量对偶算子,起交换旋量主副部作用。因为速度旋量主部的旋转角速度会引起软指摩擦扭矩方向的位移,副部的平移速度导致摩擦力方向的位移。$\boldsymbol{D}$ 为物体的有限位移旋量,在 $\mathrm{d}t\to0$ 时,$\boldsymbol{V}^{s}_{O_{ci}O_{fi}}\mathrm{d}t\to\boldsymbol{D}$。

1.2　接触刚度及关节刚度建模

接触点以及关节处用弹性模型建模,将一个稳定的抓持系统等效为弹簧和扭簧的作用。本文考虑软指接触情况,软指与物体的接触属于面接触,进一步假设软指与物体的这个面是平面且物体是刚性的,由于接触面各处的摩擦力分布不均,会产生垂直接触面的摩擦力矩。如图 3 所示,对一个软指接触抓持系统,将关节刚度等效为扭簧,接触刚度等效为 3 个弹簧和 1 个扭簧,$\boldsymbol{\delta}$ 为预紧位移向量(图中只表示了法向的分量),保证了接触点处的摩擦力。

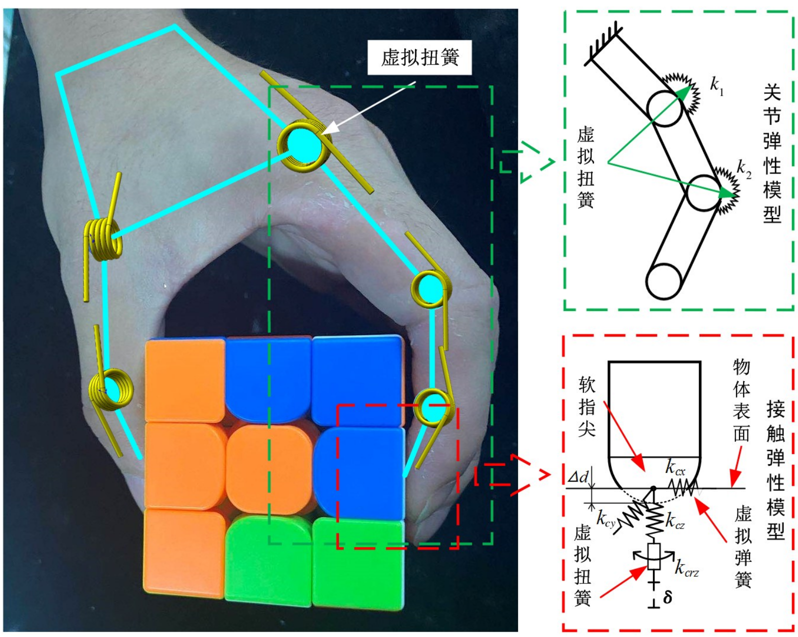


图 3　弹性模型

弹性模型中,假设所有的接触力都是由虚拟的线性弹簧和扭簧发生形变产生的,则物体受到指尖的接触力如式(6)所示。基于这个模型,一个稳定的抓持系统在扰动力的作用下从初始稳态到另一个稳态实际是各虚拟弹簧发生形变使弹性系统再平衡的过程。弹簧模型的优点是可以线性化抓持问题,大大降低分析的复杂程度,但是结果只具有系统局部特征。

$$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\delta}+\boldsymbol{u})=\boldsymbol{f} \tag{6}$$

实际在扰动力作用下系统从一个稳态到达另一个稳态的过程中,软指与物体之间往往是伴随着相对滚动的,目前对滚动接触还没有十分简便的建模。针对滚动接触情况,当扰动力不大的情况下,接触点位置的变化相对于物体可以忽略。在弹性模型的基础上通过在软指接触处引入平行接触面的线性扭簧来平衡扰动力矩,可以达到等效的瞬时滚动效果。在这些假设前提下,可以线性化地分析系统的局部特性。图 4 所示为二维情况下物体与软指存在的相对滚动现象,以及为了考虑这种情况引入的虚拟扭簧。在三维情况下将软指刚度从四维扩展到六维,扩展软指接触中缺失的二维,$\boldsymbol{B}$ 取单位矩阵 $\boldsymbol{I}_{6\times6}$。

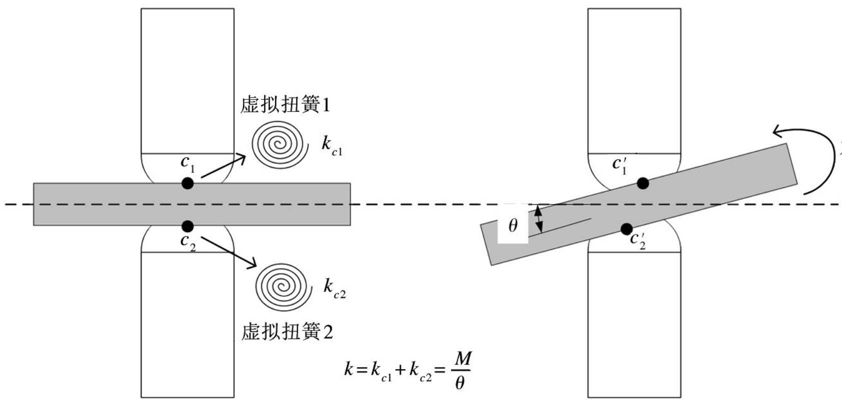


图 4 二维情况中指尖与物体的滚动情况

2 稳定性分析

本节基于上节提出的抓持建模,建立了抓持系统中的接触力平衡方程和关节力矩平衡方程,定义了抓持系统的广义刚度。根据广义刚度定义了扰动力椭圆,并提出了综合稳定性指标以及针对特定方向力的稳定性指标。

2.1 广义刚度

假设物体在受微小外力扰动后接触力向量变化为 $\boldsymbol{\delta f}$,第 i 个指尖对物体的接触力旋量变化量 $\boldsymbol{\delta\omega}$ 可以表示为式(7)。第 i 根手指第 j 个关节的力平衡方程如式(8)所示,其中 $\boldsymbol{\delta\omega}_j^i$ 为第 i 根手指第 j 个关节对第 j 个指节的作用力旋量变化量(基于该关节坐标系)。根据弹性模型的假设,关节处仅存在运动方向上的刚度,即关节坐标 z 轴方向的扭转刚度,这个方向上的扰动由虚拟扭簧的形变平衡,表示为式(9)。

$$\boldsymbol{B\delta f}_i=\boldsymbol{\delta\omega}_{ci} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{\delta\omega}_i^j-\boldsymbol{Ad}_{g_{O_i^jO_{ci}}}\boldsymbol{\delta\omega}_{ci}=\boldsymbol{0} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{v}_e\boldsymbol{\delta\omega}_i^j=-k_i^j\delta\theta_{fi}^j$$

其中,$\boldsymbol{v}_e=[0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 0\quad 1]$ (9)

由式(8)、(9)可推出第 i 根手指上接触力的变化与关节刚度以及关节角度之间的关系如式(10)所示,其中 $\boldsymbol{K}_i$ 为第 i 根手指上的关节刚度矩阵,矩阵 $\boldsymbol{C}_i$ 将接触力旋量空间映射到关节力旋量空间。

$$\boldsymbol{V}_i\boldsymbol{C}_i\boldsymbol{\delta\omega}_{ci}=-\boldsymbol{K}_i\boldsymbol{\delta\theta}_{fi}$$

其中,$\boldsymbol{V}_i=\begin{bmatrix}\boldsymbol{v}_e & & \\ & \ddots & \\ & & \boldsymbol{v}_e\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{m_i\times6m_i}$,$\boldsymbol{C}_i=$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{Ad}_{g_{O_i^1O_{ci}}}\\ \vdots \\ \boldsymbol{Ad}_{g_{O_i^{m_i}O_{ci}}}\end{bmatrix} \tag{10}$$

由式(5)~(7)及式(10)可得外力扰动作用下

单根手指上关节角变化与物体位姿变化之间的关系,如式(11)所示,其中 $\boldsymbol{K}_{ci}$ 为第 i 个接触点的接触刚度矩阵。由物体受到外力旋量与所有指尖对其产生的力旋量相平衡还可得出物体所受外力旋量与物体有限位移旋量之间的关系,如式(12)所示。

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{V}_i\boldsymbol{C}_i\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}_{ci}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{Ad}_{g_{o_{ci}o_{\mathrm{obj}}}}\boldsymbol{D}\\&\quad=(\boldsymbol{V}_i\boldsymbol{C}_i\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}_{ci}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{Ad}_{g_{O_{ci}O_p}}\boldsymbol{J}^s_{O_pO_f}+\boldsymbol{K}_i)\boldsymbol{\delta\theta}_{fi}\end{aligned}\tag{11}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega}_{ext}=-\sum_{i=1}^{n}&\boldsymbol{Ad}_{g_{OO_{ci}}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}_{ci}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\Delta(-\boldsymbol{Ad}_{g_{O_{ci}O_{fi}}}\boldsymbol{D}\\&+\boldsymbol{Ad}_{g_{O_{ci}O_p}}\boldsymbol{J}^s_{O_pO_{fi}}\boldsymbol{\delta\theta}_{fi})\end{aligned}\tag{12}$$

为简化表达,将式(11)、(12)中有限位移旋量 $\boldsymbol{D}$ 的系数分别记作 $\boldsymbol{M}_i$、$\boldsymbol{P}$,$\boldsymbol{\delta\theta}_{fi}$ 的系数分别记作 $\boldsymbol{N}_i$、$\boldsymbol{Q}_i$,如式(13)~(16)所示。联立得到抓持平衡下微小外力对物体位姿的扰动方程如式(17)所示。将物体有限位移 $\boldsymbol{D}$ 的系数矩阵定义为广义刚度 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{total}}$,$\boldsymbol{K}_{\mathrm{total}}$ 反映了抓持系统在六维旋量空间中各方向的刚度情况。

$$\boldsymbol{M}_i=\boldsymbol{VCBK}_{ci}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{Ad}_{g_{o_{ci}o_{\mathrm{obj}}}}\tag{13}$$

$$\boldsymbol{P}_i=\boldsymbol{Ad}_{g_{OO_{ci}}}\boldsymbol{BK}_{ci}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{Ad}_{g_{O_{ci}O_{fi}}}\tag{14}$$

$$\boldsymbol{N}_i=\boldsymbol{M}_i\boldsymbol{Adg}_{o_{\mathrm{obj}}o_p}\boldsymbol{J}^s_{O_pO_{fi}}+\boldsymbol{K}_i\tag{15}$$

$$\boldsymbol{Q}_i=-\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{Ad}_{g_{O_{fi}O_p}}\boldsymbol{J}^s_{O_pO_{fi}}\tag{16}$$

$$\boldsymbol{\omega}_{ext}=\sum_i(\boldsymbol{P}_i+\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{N}_i^{-1}\boldsymbol{M}_i)\boldsymbol{D}\tag{17}$$

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{total}}=\sum_i(\boldsymbol{P}_i+\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{N}_i^{-1}\boldsymbol{M}_i)\tag{18}$$

2.2 稳定性指标

目前抓持稳定性指标没有统一的标准,大量的学者也提出了各种形式的稳定性指标[25-27]。接触稳定性分为物体稳定性和接触稳定性两个方面。物体稳定性指物体受到扰动偏离原平衡姿态后能回到原平衡位姿的能力;接触稳定性指物体受到外部扰动后仍能始终保持接触的能力。本文分析了物体稳定性,将其定义为外力对物体位姿的扰动。

$$\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}[(\boldsymbol{K}_{\mathrm{total}}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{PK}_{\mathrm{total}}^{-1}]\boldsymbol{\omega}=1\tag{19}$$

令 $\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PD}=1$,其中权重矩阵 $\boldsymbol{P}$ 为六维对角矩阵,对角元素为有限位移旋量 $\boldsymbol{D}$ 各分量的权重,是为了平衡 $\boldsymbol{D}$ 主副部单位不同以及物体坐标位置不同产生的影响,同时反映了物体各偏移量在稳定性中所占权重。则 $\boldsymbol{\omega}$ 满足式(19)的扰动力椭球方程,二次型矩阵的特征向量为该椭圆的轴方向,对应特征值开方的倒数为椭圆半轴长。特征值越小,对应轴的长度越长,说明物体在该方向上稳定性越强,于是可将抓持的综合稳定性指标 S 定义为各特征值的乘积的绝对值,如式(20)所示。另一方面,对于给定的扰动力 $\boldsymbol{\omega}$ 造成的物体有限位移旋量 $\boldsymbol{D}$,定义 $\sqrt{\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PD}}$ 为 $\boldsymbol{\omega}$ 的扰动半径,$\boldsymbol{\omega}$ 位于扰动半径为 $\sqrt{\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PD}}$ 的扰动力椭圆上,抓持对扰动力 $\boldsymbol{\omega}$ 的稳定指标定义为 $\boldsymbol{\omega}$ 扰动半径的倒数 S_ω,如式(21)所示。

$$S=\lambda_1\lambda_2\cdots\lambda_6\tag{20}$$

$$S_\omega=1/\sqrt{\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PD}}\tag{21}$$

特殊地,取 $\boldsymbol{P}$ 前 3 项为 0,后 3 项为 1 时,表示 S_ω 只考虑物体的位移,且各向位移所占权重一致,而不考虑物体的角度偏移,此时扰动力椭球表现为位移扰动力椭球,表示造成物体单位位移的力旋量集合。$\boldsymbol{P}$ 前 3 项取值为 1,后 3 项取 0 时,表示 S_ω 只考虑物体的角度偏移,且各向角度偏移所占权重一致,而不考虑物体的位移,此时扰动力椭球表现为角度扰动力椭球,表示造成物体单位角度偏移量的力旋量集合。

整体的分析流程如图 5 所示。对一个抓持进行稳定性分析,首先是对抓持系统中的各模块基于其

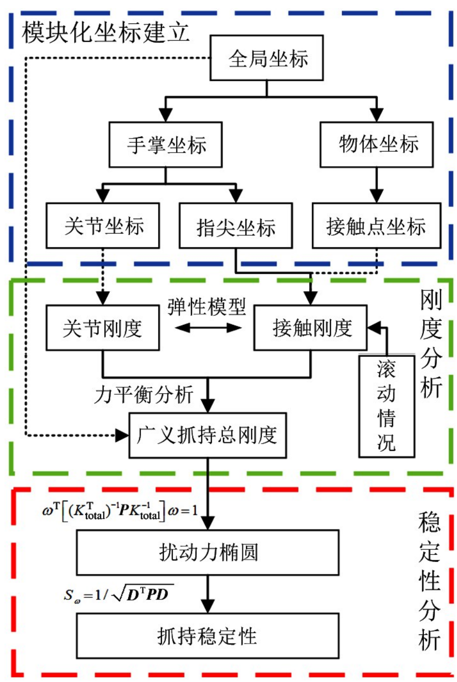


图 5 分析流程

上一层的依赖模块进行坐标建立。然后在关节处以及接触处应用弹性模型,在关节坐标上分析关节刚度,在接触点坐标上分析指尖坐标与其相对运动的关系并对接触刚度进行分析。分别在各关节处和接触点处建立全局坐标上的力平衡方程,得出抓持系统在旋量空间中的广义刚度。最后通过广义刚度构建相应的扰动力椭圆,进行抓持稳定性分析。

3　实验与结果分析

3.1　实验平台

实验平台如图 6 所示,实验采用了腱绳驱动的三指手对物体进行抓持。为了保证实验过程中指尖与物体不发生滑动,采用了黑胶带包裹的泡沫六面体作为被抓持物体,泡沫物体质量小,黑胶带能增大手指与物体之间的摩擦。在腱绳中间加装拉簧模拟关节处的刚度,三指手的位姿由关节处的角度传感器测得,物体的位姿由 Nokov 光学三维动作捕捉系统进行测量,整体的硬件连接如图 7 所示。该实验平台可以研究在某一刚度下、不同大小方向的扰动力对物体位姿的影响。

将实验装置放置在捕捉系统的合适位置,标定灵巧手相对视捕系统全局坐标系的位置。在未抓取物体时记录三指手初始的关节角度。拉动腱绳使物体处于稳定抓持状态,记录关节角度以及物体的初始位姿。分别放置 100 g 的砝码于定位盘的 1 ~ 12 号位上,记录各手指关节角度的变化以及物体的位姿变化。更换砝码重量重复上述过程。

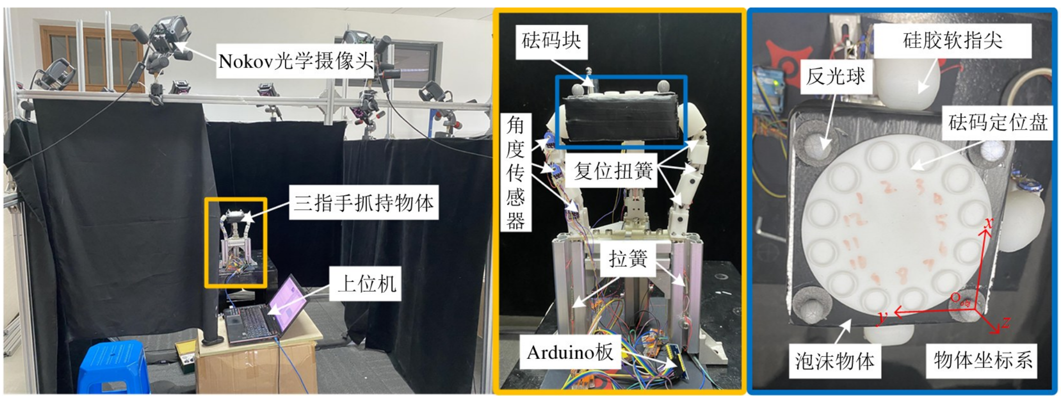


图 6　实验平台

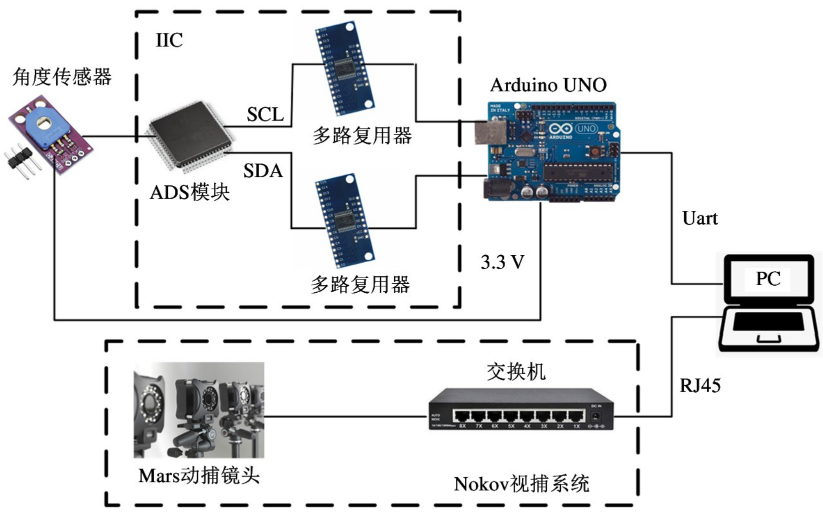
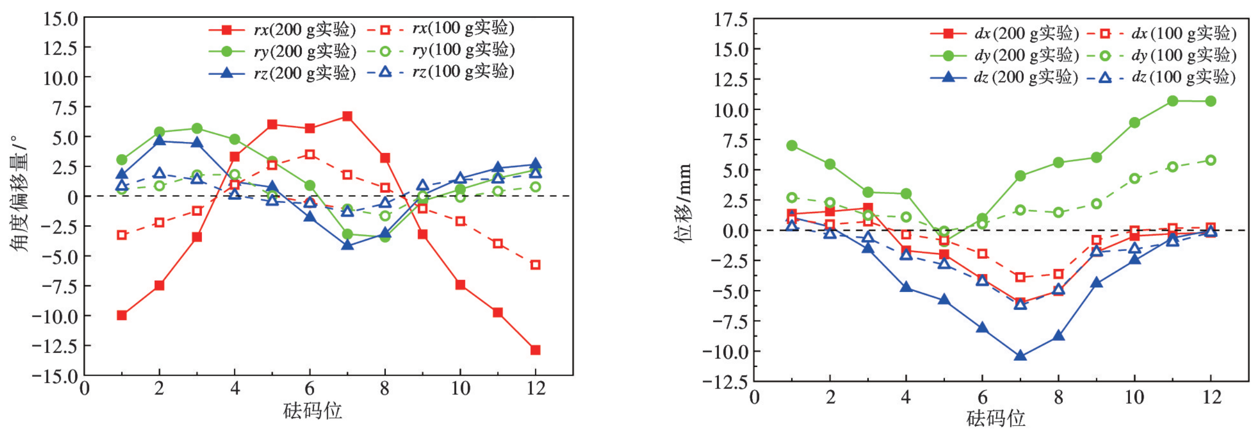


图 7　硬件连接图

3.2 实验结果分析

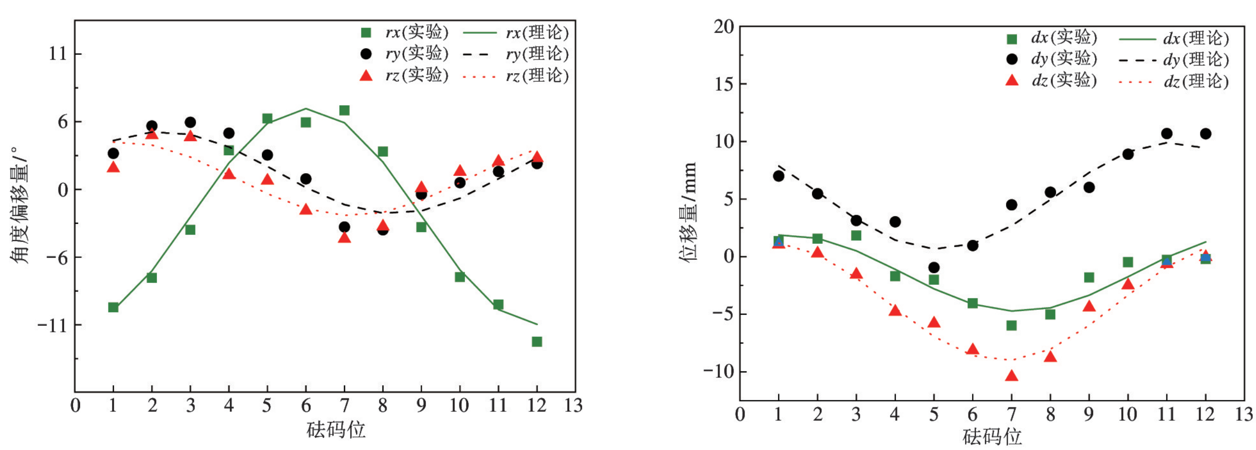
200 g 和 100 g 砝码扰动实验数据如图 8 所示,可以看出两组实验的数据如式(17)所示满足一定的线性关系,表明在小扰动力范围内,物体的姿态变化量与扰动力大小成正比。实验中,为了测量数据的精准,将物体坐标系直接建在靠近 7 号砝码位的 Mark 点处,从图 8(b)可以看出,将砝码放在 7 号砝码位时,物体在重力方向($-z$ 轴)上产生的位移最大。同理在砝码逐渐远离该 Mark 点时,物体在重力方向上的位移也逐渐变小,呈一个“V”形分布。1 号和 12 号砝码位由于离 Mark 点更远,物体在重力方向产生的位移最小,意味着物体在重力方向上对 1 号和 12 号砝码产生的力有着更好的位移稳定性。但是距离产生了更大的力矩使得物体在各方向上的角度偏移量相对其他位置更大,意味着物体在这些方向上对这两个力的角度稳定性较差。



(a) 角度偏移　　(b) 位移偏移

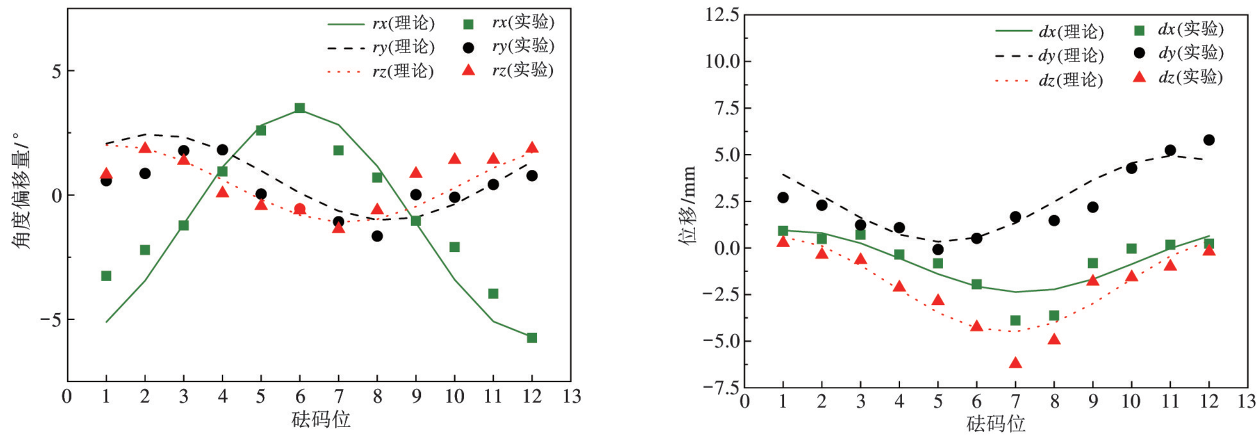
图 8　100 g 和 200 g 砝码进行实验的数据对比

两组实验的物体位姿变化与理论对比分别如图 9和图 10 所示,在 200 g 砝码扰动的实验中,各向角度偏移的平均误差为 0.95 °,各向位移平均误差在 0.8 mm。在 100 g 砝码扰动的实验中,各向角度偏移的平均误差在 0.65 °,各向位移平均偏差在 0.6 mm。图 11 为两组实验物体角度总偏移及总位移与理论的对比,200 g 实验中,角度总偏移平均误差为 1.18 °,总位移平均偏差在 1.0 mm。100 g 实验中,角度总偏移平均误差为 0.78 °,位移总偏差为 0.82 mm。总偏差由对应的各分量的平方和开方计算得到,误差是各分量的累积,对总偏差跟踪的效果不如各分量的跟踪效果,但总体的趋势是一致的。



(a) 角度偏移　　(b) 位移偏移

图 9　200 g 扰动实验物体位姿变化对比



（a）角度偏移　　　　（b）位移偏移

图10　100 g 扰动实验物体位姿变化对比

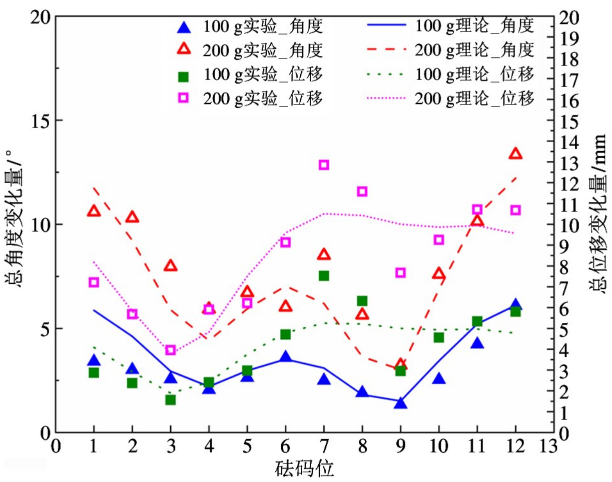


图11　总角度/位移变化量对比

实验表明,在关节刚度和接触刚度存在的小扰动力情况,本文理论能较准确地预测物体的位姿变化,从而判断该扰动力下的稳定性。

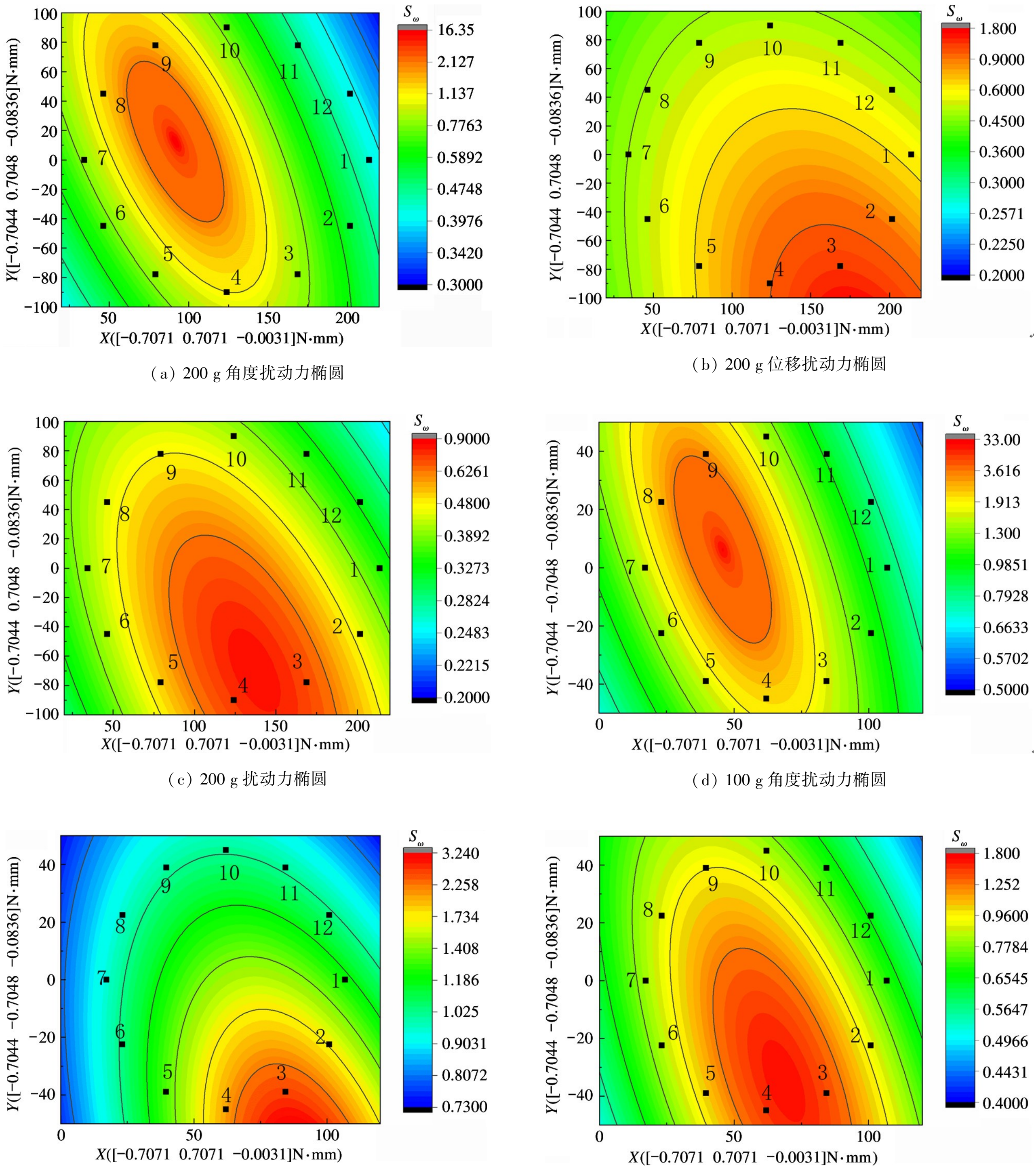
由于每组实验砝码提供的扰动力方向大小一致,均为恒定的砝码重力,对物体坐标系产生的力矩维度为2(不产生重力方向的力矩)。固定扰动力旋量的主部为砝码的重力,取力矩平面的2个单位正交向量为坐标轴可以将砝码所施加的一系列六维扰动力压缩到二维平面,并将稳定性指标以等高线形式绘制。根据之前分析,扰动力椭圆半径与稳定性成负相关关系,通过对比各砝码位力的稳定性指标,可判断该抓持位形下各点所表现的物体稳定性。图12所示为2组实验不同权重下的扰动力椭圆,不同扰动力椭圆的权重矩阵 $\boldsymbol{P}$ 取值如表1所示。从角度扰动云图预测出物体上的9号砝码位有更好的角度稳定性,而12号位的角度稳定性最差。对比图11的角度偏移实验数据,无论是100 g还是200 g砝码的实验,可以看到9号砝码对物体产生的角度偏移最小,12号砝码能产生更大的角度位移。从位移云图预测出3号位有更好的位移稳定性,7号位的位移稳定性最差,对比图11的位移偏移实验数据,两组实验均表现出一致的实验结果,其余位置除个别点因误差累计过大偏离了预测的椭圆,预测结果与实验数据基本上是一致的。

表1　各扰动力椭圆 *P* 取值

	角度扰动力椭圆	位移扰动力椭圆	扰动力椭圆
权重矩阵 $\boldsymbol{P}$	diag(1,1,1,0,0,0)	diag(0,0,0,1,1,1)	diag(1,1,1,1,1,1)

4　结　论

本文以关节刚度和接触刚度同时存在的抓持作为研究对象,通过旋量理论建立了小扰动力作用下物体位姿变化模型。针对受扰动作用时物体与指尖的相对滚动情况,引入了二维虚拟扭簧将传统的软指建模由四维扩展成六维。在旋量空间中分析了广义刚度,基于广义刚度提出了扰动力椭球的概念,并



(a) 200 g 角度扰动力椭圆

(b) 200 g 位移扰动力椭圆

(c) 200 g 扰动力椭圆

(d) 100 g 角度扰动力椭圆

(e) 100 g 位移扰动力椭圆

(f) 100 g 扰动力椭圆

图 12　200 g/100 g 实验扰动力椭圆

阐述了扰动力椭球与物体稳定性之间的关系。此外,进行了三指抓持的实验验证,表明本文提出的理论模型与实际情况吻合良好,利用该模型能准确判断抓持物体在各点上表现出的物体稳定性。

参考文献

[1] QIN J, LIU H, ZHANG G, et al. Grasp stability prediction using tactile information[C]//2017 2nd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), Hefei and Tai'an, China, 2017: 498-503

[2] 宋蕴璞, 李立群. 多指手接触稳定性分析[J]. 机电一体化, 2016, 22(1): 3-5
[3] ZHANG N, GE L, XU H, et al. 3D printed, modularized rigid-flexible integrated soft finger actuators for anthropomorphic hands[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 312: 112090
[4] 戴建生. 机构学与机器人学的几何基础与旋量代数[M]. 北京:高等教育出版社, 2014: 315-325
[5] KAO I, NGO C. Properties of the grasp stiffness matrix and conservative control strategies[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1999, 18(2): 159-167
[6] KAO I, YANG F. Stiffness and contact mechanics for soft fingers in grasping and manipulation[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, 20(1): 132-135
[7] GHAFOOR A, DAI J S, DUFFY J. Stiffness modeling of the soft-finger contact in robotic grasping[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(4): 646-656
[8] GHAFOOR A, DAI J S, DUFFY J. Fine motion control based on constraint criteria under pre-loading configurations[J]. *Journal of Robotic Systems*, 2000, 17(4): 171-185
[9] JASWAL I T, MAHMOOD A. Robotic gripping using soft finger tips[C]//2017 International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT), Karachi, Pakistan, 2017: 1-5
[10] 陈凌峰, 张亚琪, 马小龙, 等. 面向软体多指手的指尖接触力学建模 [J]. 高技术通讯, 2020, 30(4): 391-401
[11] CHA H J, KOH K C, YI B J. Stiffness modeling of a soft finger[J]. *International Journal of Control Automation & Systems*, 2014, 12(1): 111-117
[12] STUART H, WANG S, KHATIB O, et al. The ocean one hands: an adaptive design for robust marine manipulation[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2017, 36(2): 150-166
[13] DONG H X, QIU C, PRASAD D K, et al. Enabling grasp action: generalized quality evaluation of grasp stability via contact stiffness from contact mechanics insight [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 134: 625-644
[14] ROA M, SUÁREZ R. Grasp quality measures: review and performance[J]. *Autonomous Robots*, 2014, 38(1): 65-88
[15] LI Z, SASTRY S. Task-oriented optimal grasping by multifingered robotic hands[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation, Raleigh, USA, 1987: 389-394
[16] KIM B H, OH S R, YI B J, et al. Optimal grasping based on non-dimensionalized performance indices[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems, Maui, USA, 2001: 949-956
[17] CHINELLATO E, FISCHER R B, MORALES A, et al. Ranking planar grasp configurations for a three-finger hand[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation, Taibei, China, 2003: 1133-1138
[18] PARK W, SEO S, OH J, et al. A sensorized hybrid gripper to evaluate a grasping quality based on a largest minimum wrench[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 3243-3250
[19] ZHENG Y. An efficient algorithm for a grasp quality measure[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 29(2): 579-585
[20] MILLER A T, ALLEN P K. Examples of 3D grasp quality computations[C]//Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, USA, 1999: 1240-1246
[21] JIANG L, ZENG B, FAN S, et al. A modular multisensory prosthetic hand[C]//IEEE International Conference on Information & Automation, Hailar, China, 2014: 648-653
[22] WANG T, LI H, MENG C. Collective grasping for noncooperative objects using modular self-reconfigurable robots[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems, Hamburg, Germany, 2015: 3296-3301
[23] LIU H, MEUSEL P, HIRZINGER G, et al. The modular multisensory DLR-HIT-hand: hardware and software architecture[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2008, 13(4): 461-469
[24] MURRAY R M, LI Z, SASTRY S S. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017
[25] SAHBANI A, EL-KHOURY S, BIDAUD P. An overview of 3D object grasp synthesis algorithms[J]. *Robotics and*

Autonomous Systems, 2012, 60(3): 326-336

[26] HAAS-HEGERM, IYENGAR G, CIOCARLIE M. Passive reaction analysis for grasp stability[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(3): 955-966

[27] COCKBUM D, ROBERGE J, LE T, et al. Grasp stability assessment through unsupervised feature learning of tactile images[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Singapore, 2017: 2238-2244

Multi-finger hand grasping stability analysis based on generalized stiffness

XIE Xianquan, CHEN Zhipei, TAO Zhicheng, XU Fang, BAO Guanjun

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

In recent years, humanoid dexterous hands have become a popular research direction, and many scholars have studied the grasp stability of dexterous hand. Stiffness is an important factor that affects the grasp stability of dexterous hand. In this paper, the relationship between the joint stiffness and contact stiffness of dexterous hands and the change of the location of the grasped object under the action of disturbance force is comprehensively studied based on the screw theory. The generalized stiffness is obtained in the screw space. A method of equivalent tangential contact stiffness is proposed for the rolling between the soft fingertip and the object caused by disturbance force. This paper also put forward a concept of disturbance ellipsoid based on generalized total stiffness and defined a grasping stability index based on this. Finally, a three-finger dexterous hand is designed to verify the theory and prove the validity of the theoretical model.

Key words: joint stiffness, contact stiffness, dexterous hand, grasp stability, disturbance