

变胞多指灵巧手手掌尺度综合

崔磊¹, 王德伦^{*1}, 戴建生²

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 伦敦大学 国王学院 机械工程系, 英国 伦敦 WC2R 2LS)

摘要: 分析新型的变胞多指灵巧手, 设计一个能完成3种指尖抓持姿态的手掌. 多指灵巧手变胞功能增强了机器手的灵巧度并增大了其工作空间, 当手掌杆件静止时, 每个手指都在一个平面内运动. 由此提出手指操作平面的概念, 从而将研究抓取姿态的问题转化为研究手指操作平面单位法向量的问题. 建立球面变胞手掌的全局坐标系, 得到3个手指平面的单位法向量在此全局坐标系下的表示, 将抓取姿态映射成为姿态直纹面. 分析3种常用指尖抓持姿态, 得到实现抓持姿态时手掌需要满足的条件, 并转化为非线性方程组的求解问题, 得到满意的数值解. 最后利用三维造型软件进行仿真, 验证了计算的正确性.

关键词: 多指灵巧手; 变胞; 手掌; 抓持

中图分类号: TH112.1 **文献标志码:** A

0 引言

机器人自出现以来极大地弥补了传统的末端执行器的不足. 典型的设计包括3个手指的Stanford/JPL手、4个手指的Utah/MIT手、5个手指的Belgrade/USC手, 以及4个手指的Karlsruhe手^[1~5]. 使用类人的手^[6~9]不但增加了不同工作环境中的可操作性, 而且加强了对于被抓物体完成细微调整的能力. Mason等^[10]的研究表明, 对一个具有刚性手指的机器人而言, 理论上的自由度至少是9才能具有灵巧性. 典型的灵巧手通常采用每个手指具有2或3个转动副的结构.

然而, 在以往的机器人设计中, 手掌通常是一个刚性体. 不同手指之间夹角是固定的, 这就限制了一些手的灵巧性. 特别地, 通常手指的机构采用3个相互平行的转动副以完成抓取动作. 每一个手指通常在一个平面内操作, 而刚性手掌使手指平面之间角度固定, 这就限制了手指之间相互协作的能力, 所以, 难以根据被抓物体所具有的不同几何形状作出相应的调整以实现不同的抓取策

略. 以往的典型的机器人和人手的主要区别之一是前者具有刚性的手掌, 而后者的手掌是可变的.

采用变胞机构作为手掌有效地解决了这一问题. 变胞机构^[11]是一类具有改变构型能力的机构. 当它从一种构型变化到另外一种构型时, 通常伴随着有效构件数目的变化或者自由度的变化. 这类机构起源于折纸, 可以衍生于折纸中变化的拓扑结构. 变胞机构拓扑结构的变化可以用一系列的矩阵表示^[12]. Da^[13]发明了一种新型的、手掌可以变胞运动的多指灵巧手. 这个灵巧手采用了3个相同结构的手指, 每个手指采用3个自由度的设计; 手掌是一个二自由度的球面五杆机构^[14], 3个手指安装在球面五杆机构的杆件上, 随着球面五杆的运动, 相互之间的位置关系发生变化. 这样就保留了传统机器人手的优点, 克服了传统机器人手手指之间相互位置不能变化的弱点. 本文在分析变胞手抓取姿态后, 设计实现一个具有3种抓取姿态的变胞手掌.

1 变胞机构和变胞机械手

变胞多指灵巧手的3个手指分别安装在球面

收稿日期: 2007-03-04; 修回日期: 2009-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475154).

作者简介: 崔磊(1971-), 男, 博士生, E-mail: leihqcui@yahoo. mail. com; 王德伦*(1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: dlunwang@dlut. edu. cn; 戴建生(1954-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: jian. dai@kcl. ac. uk.

五杆机构的机架和两个连杆上,每一个手指由3个相互平行的转动副组成.如图1所示.

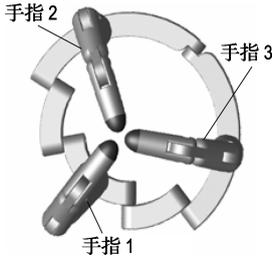


图1 变胞多指灵巧手

Fig. 1 A multifingered metamorphic dexterous hand

当其所安装的杆件静止时,手指在一个平面上运动,而且此平面垂直于杆件所在的圆平面,这个平面被称之为手指操作平面.定义变胞多指灵巧手的姿态为3个手指平面之间的角度关系.由于球面杆件的运动,手指操作平面也随之运动,这就增加了变胞多指灵巧手抓取姿态的变化.在变胞手掌上,机架AE固定.5个杆件由5个转动副连接,它们的轴线分别是OA、OB、OC、OD和OE,交于球心,如图2所示.

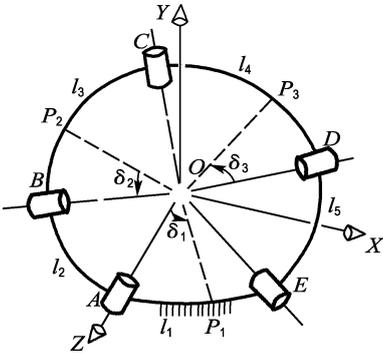


图2 手掌的结构参数

Fig. 2 The structure parameters of the palm

手掌各个连杆长度是 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 和 l_5 , 由两端的回转副张成的角度来度量. AE 是机架, 连架杆 AB 和 DE 是驱动件, BC 和 CD 是连杆. 变胞多指灵巧手的3个手指分别安装在机架 AE、连杆 BC 和连杆 CD 上. 3个手指的安装位置分别是 P_1 、 P_2 和 P_3 . OA 和 OP_1 、OB 和 OP_2 、OD 和 OP_3 张成的角度分别是 δ_1 、 δ_2 和 δ_3 . 手掌结构参数是 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 、 δ_1 、 δ_2 和 δ_3 .

球面五杆机构构件的运动是由分别对应于构件的5个圆弧之间相对运动的结果. 这些相对运动分别由输入角 θ_1 、 θ_2 和输出角 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 来表示, 见图3.

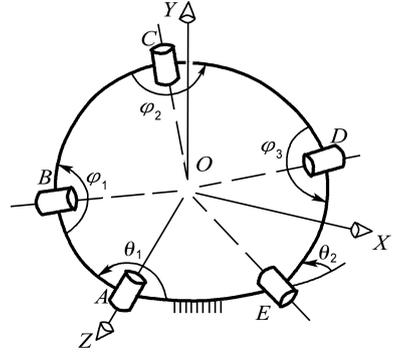


图3 手掌的输入和输出角度

Fig. 3 The input and output angles of the palm

2个输入角由机架和相邻的两个连架杆之间的二面角度量,3个输出角是相邻杆件之间的二面角. 当球面机构的杆件运动时,手指操作平面随之改变位置和方向. 在这个球面机构的手掌上,手指操作平面总是通过全局坐标系的原点. 一个通过固定点 r_0 、单位法向量为 n 的平面的向量方程为

$$\sum_i n \cdot (r - r_0) = 0 \quad (1)$$

式中: r 表示平面上任一点. 令 Σ_i 表示第 i 个手指操作平面, n_i 表示其单位法向量, 这3个手指操作平面的向量方程是

$$\Sigma_i n_i \cdot r = 0; i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

其中 n_i 由手掌的结构参数和输入角度完全决定.

假设手掌的杆件在单位球面上运动, 而且互相之间不发生干涉, 手掌的每一个杆件都可以看做是单位圆的一部分. 为了得到3个手指操作平面的向量方程, 需要得到3个平面的单位法向量. 为此, 分别在 AE、BC 和 CD 上建立局部坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 、 $Ox_2y_2z_2$ 和 $Ox_3y_3z_3$. 其中, O 为单位球的球心; z_i 轴线分别为沿着 OA、OB 和 OC 的方向; x_i 分别位于 AE、BC 和 CD 的构件圆平面; $x_iy_iz_i$ 为右手系的直角坐标系, 如图4所示. 每个手掌构件都是单位圆的一部分, 因而每个构件都唯一地确定一个平面, 称之为手掌构件圆平面. 由于各个手指操作平面垂直于所安装的各个杆件所在的手掌构件圆平面, 位于同一圆平面且垂直于 OP_i 的单位向量

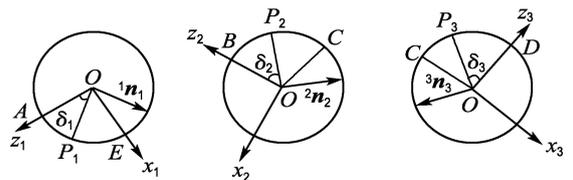


图4 三个局部坐标系

Fig. 4 Three local coordinate systems

必定是手指操作平面的单位法向量. 这样, 可以得到 3 个单位法向量 $\mathbf{n}_i (i = 1, 2, 3)$.

平面 Σ_i 的单位法向量 $\mathbf{n}_i (i = 1, 2, 3)$ 在局部坐标系的表示分别是

$${}^1\mathbf{n}_1 = (c\delta_1 \quad 0 \quad -s\delta_1)^T \quad (3)$$

$${}^2\mathbf{n}_2 = (-c\delta_2 \quad 0 \quad -s\delta_2)^T \quad (4)$$

$${}^3\mathbf{n}_3 = (-c\delta_3 \quad 0 \quad s\delta_3)^T \quad (5)$$

其中前上角标 1, 2 和 3 分别表示单位法向量在局部坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 、 $Ox_2y_2z_2$ 和 $Ox_3y_3z_3$ 下的表示. 注意到局部坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 和全局坐标系重合, 所以有

$$\mathbf{n}_1 = (s\delta_1 \quad 0 \quad c\delta_1)^T \quad (6)$$

为了使单位法向量 ${}^2\mathbf{n}_2$ 从局部坐标系转化到全局坐标系, 坐标系 $Ox_2y_2z_2$ 需要绕 z_2 转动角度 $(-\varphi_1)$, 然后绕 y_2 转动角度 $(-l_1)$, 接着绕 z_2 转动角度 $(-\theta_1)$. 这样, 单位法向量 \mathbf{n}_2 在全局坐标系下是

$$\mathbf{n}_2 = \mathbf{R}(z_2, \theta_1)\mathbf{R}(y_2, l_1)\mathbf{R}(z_2, \varphi_1){}^2\mathbf{n}_2 = \begin{pmatrix} -(c\theta_1 c l_1 c \varphi_1 - s\theta_1 s \varphi_1) c \delta_2 - c\theta_1 s l_1 s \delta_2 \\ -(s\theta_1 c l_1 c \varphi_1 + c\theta_1 s \varphi_1) c \delta_2 - s\theta_1 s l_1 s \delta_2 \\ s l_1 c \varphi_1 c \delta_2 - c l_1 s \delta_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

类似地, ${}^3\mathbf{n}_3$ 也可以转换到全局坐标系下. 首先绕 z_3 转动角度 (φ_3) , 然后绕 y_3 转动角度 $(-l_4)$, 接下来绕 z_3 转动角度 $(-\theta_2)$, 随后绕 y_3 转动角度 $(-l_5)$. 这样, 可以得到下面的公式:

$$\mathbf{n}_3 = \mathbf{R}(y_3, l_5)\mathbf{R}(z_3, \theta_2)\mathbf{R}(y_3, l_4)\mathbf{R}(z_3, -\varphi_3){}^3\mathbf{n}_3 \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_3(x) &= -(c l_5 c \theta_2 c l_4 - s l_5 s l_4) c \varphi_3 + \\ &\quad c l_5 s \theta_2 s \varphi_3 c \delta_3 - (c l_5 c \theta_2 s l_4 + s l_5 c l_4) s \delta_3 \\ \mathbf{n}_3(y) &= -(s \theta_2 c l_4 c \varphi_3 - c \theta_2 s \varphi_3) c \delta_3 - s \theta_2 s l_4 s \delta_3 \\ \mathbf{n}_3(z) &= -(s l_5 c \theta_2 c l_4 - s l_5 s l_4) c \varphi_3 - s l_5 s \theta_2 s \varphi_3 c \delta_3 - \\ &\quad (-s l_5 c \theta_2 s l_4 + c l_5 c l_4) s \delta_3 \end{aligned}$$

手指 1 的操作平面安装在手掌的机架上, 所以其固定不动. 而另外的两个操作平面则随着输入角度的变化而运动.

2 变胞多指灵巧手三指姿态直纹面

传统的机器手指通常采用 3 个相互平行的转动副, 并且手指操作平面之间的角度是固定的. 采用了变胞手掌后, 手指操作平面之间的角度随着输入角度 θ_1 和 θ_2 的变化而不同, 这非常有利于抓取不同形状的物体以及抓取后做细微的调整. 其中, 最重要的抓取方式是指尖抓取, 即 3 个手指尖的延

长线交于一点. 手掌的变胞特性使完成指尖抓取变得可行, 这就容易完成一个合适的抓取策略. 这个条件可以转化为要求 3 个手指操作平面交于一条通过球心的直线. 当 3 个手指操作平面共线时, 手指运动副的运动使指尖抓取成为可能, 见图 5.

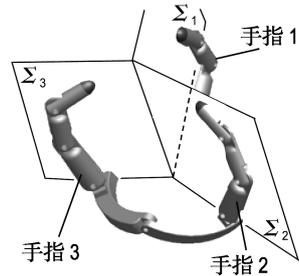


图 5 3 个手指操作平面共线

Fig. 5 The co-axial condition of three operation planes

当 3 个手指操作平面共线条件满足时, 式(2)中的向量 \mathbf{r} 对于 3 个等式取相同的值, 则可得到下面的等式:

$$(\mathbf{n}_1 \quad \mathbf{n}_2 \quad \mathbf{n}_3)\mathbf{r} = 0 \quad (9)$$

上式的非零解要求系数矩阵 \mathbf{N} 的行列式的值为 0, 即

$$|\mathbf{n}_1 \quad \mathbf{n}_2 \quad \mathbf{n}_3| = 0 \quad (10)$$

这就为变胞多指灵巧手的指尖抓取提供了一个数学表达式. 矩阵 \mathbf{N} 的行列式值完全由手指操作平面的单位法向量决定. 所以, 研究指尖抓取的问题转变成研究手指操作平面单位法向量的问题.

当两个驱动参数 θ_1, θ_2 给定后, 球面五杆机构的手指平面的单位法向量 $\mathbf{n}_i (i = 1, 2, 3)$ 是确定的. 变动驱动参数, 引起了手指平面法向量 \mathbf{n}_i 的变动. 图 6 给出了两个位置的法向量 $\mathbf{n}_{ij} (i = 1, 2, 3$ 为手指平面, $j = 1, 2$ 为空间的位置) 的高斯映射^[15].

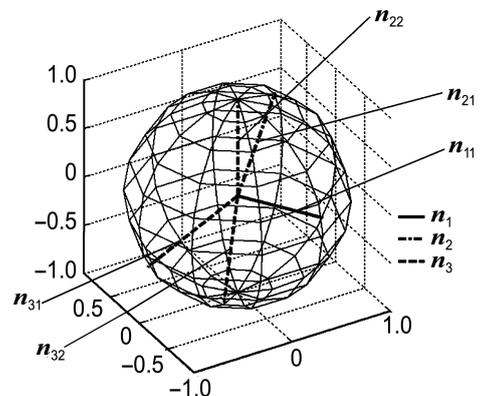


图 6 $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3$ 在两个位置的空间位置图

Fig. 6 The locations of $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3$ at two positions

图 6 中,由于平面 1 是固定在机架上的, n_{11} 和 n_{12} 重合.

为了能清楚地看出 3 个手指平面之间的相互关系,将球面五杆机构看做是变胞后形成的球面四杆机构的集合. 即当其中一个驱动构件到达某一位置后固结,球面五杆机构变胞演变为球面四杆机构. 这样另一个驱动构件成为此球面四杆机构的驱动件. 例如驱动杆件 DE 在到达某一位置后固结,形成了一个新的球面四杆机构 $ABCD$, 而 AB 是这个四杆机构的驱动件. 当 AB 转动时,机架手指平面法向量 n_1 不变,两手指平面法向量 n_2 和 n_3 随着变动.

每输出一驱动角 θ_1 的角度位移,对应于特定的机架手指法向量 n_1 , 即有对应的一对手指平面法向量 n_2 和 n_3 . 三法向量有着对应的关系,这一对应关系随着驱动角 θ_1 变化而变化. 引入第四维度为驱动角 θ_1 , 取 x 轴表示 θ_1 的度量,将这一对应关系展现在三维映射空间中,即展现出图 7.

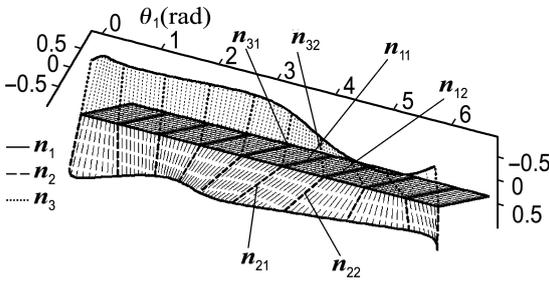


图 7 姿态直纹面

Fig. 7 Grasping pose ruled surfaces

在图 7 中,各个单位法向量的连续位置映射成为 3 个直纹面,称之为姿态直纹面. 如果 3 个手指操作平面的单位法向量满足式(10)所述的抓取几何条件,3 个手指操作平面的单位法向量必然共面. 在此姿态直纹面,可以判断哪些三法线共面以及 3 个手指操作平面之间的角度关系.

3 变胞手掌机构参数的尺度综合

多指灵巧手的抓持和物体的形状有直接的关系. 式(9)只是揭示了三指平面共线,并没有描述 3 个手指平面之间的相对位置关系. 3 个手指平面之间的关系基本上可以分为 3 类,可以用手指平面的单位法向量来表示,如图 8 所示.

这样,抓持的姿态可以用如下的数学公式表达:

$$\begin{cases} n_1 \cdot n_2 = \cos \gamma_1 \\ n_1 \cdot n_3 = \cos \gamma_2 \\ n_2 \cdot n_3 = \cos \gamma_3 \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\gamma_i (i = 1, 2, 3)$ 是 3 个手指平面之间的二面角.

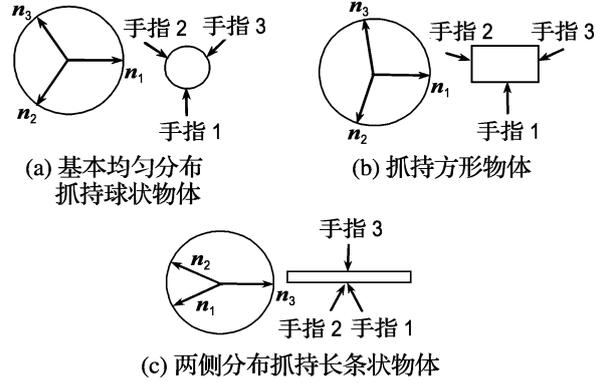


图 8 手指分布的 3 种情况

Fig. 8 The distribution of fingers in three common poses

根据前面的讨论,可知变胞手在指尖抓持的时候需要满足 3 个手指平面共线的条件和抓持姿态的条件. 假设在第 i 个位置,变胞手可以同时满足共线和姿态条件,则需满足如下方程组:

$$\begin{cases} |n_{1i} \ n_{2i} \ n_{3i}| = 0 \\ n_1 \cdot n_2 = \cos \gamma_1 \\ n_1 \cdot n_3 = \cos \gamma_2 \\ n_2 \cdot n_3 = \cos \gamma_3 \end{cases} \quad (12)$$

其中 n_{1i}, n_{2i}, n_{3i} 既和结构参数 $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, \delta_1, \delta_2, \delta_3$ 有关,也和 2 个驱动参数 θ_{1i}, θ_{2i} 有关. 可以清楚地看出,因为有 8 个结构参数和 $2i$ 个驱动参数,共有 $8 + 2i$ 个设计变量,有 $4i$ 个等式,所以最多能实现 4 个位置的共线和抓持姿态条件.

在图 8 所示的 3 种抓持姿态中,均布的抓持姿态最为常用,而且手掌越大所能抓持的物体的最大尺寸也就越大. 因此,令五杆长之和为 2π ,并且当五杆共大圆,也即 $\theta_{11} = \pi, \theta_{21} = 0$ 时,让 3 个手指平面均布而且共线,如图 9 所示.

这样在位置 $i = 1$ 实现了姿态为均布的抓持. 根据球面五杆机构的几何条件,可以得到

$$\sum_{j=1}^5 l_j = 2\pi \quad (13)$$

$$l_2 + \delta_1 + \delta_2 = 2\pi/3 \quad (14)$$

$$l_3 + l_4 - \delta_2 - \delta_3 = 2\pi/3 \quad (15)$$

手掌的结构参数有 8 个,分别是 $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, \delta_1,$

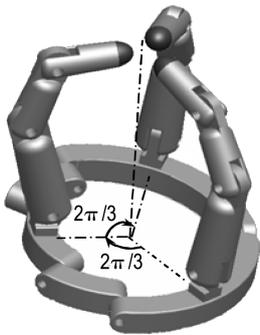


图 9 均布的抓持姿态

Fig. 9 Even distribution of three fingers

δ_2, δ_3 , 每个抓持位置的驱动参数有 2 个, θ_{1i}, θ_{2i} , 当满足上述均布的抓持后, 可以看出还可以实现另外 2 个特定姿态的抓持, 即 $i = 2, 3$ 时, 需要满足等式(12), 加上均布的抓持所要满足的等式(13)、(14) 和(15), 一共有 11 个方程, 12 个未知量. 方程组是

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^5 \alpha_j = 2\pi \\ \alpha_2 + \delta_1 + \delta_2 = 2\pi/3 \\ \alpha_3 + \alpha_4 - \delta_2 - \delta_3 = 2\pi/3 \\ |\mathbf{n}_{1i} \ \mathbf{n}_{2i} \ \mathbf{n}_{3i}| = 0 \\ \mathbf{n}_{1i} \cdot \mathbf{n}_{2i} = cr_{1i} \\ \mathbf{n}_{1i} \cdot \mathbf{n}_{3i} = cr_{2i} \\ \mathbf{n}_{2i} \cdot \mathbf{n}_{3i} = cr_{3i}; i = 2, 3 \end{cases} \quad (16)$$

这是一个解非线性方程组的问题. 根据实际机构的要求, 必须有 $0 < l_j < \pi, j = 1, 2, \dots, 5, 0 < \delta_1 < \alpha_1, 0 < \delta_2 < \alpha_2, 0 < \delta_3 < \alpha_4$, 而且为了易于控制, 两个驱动构件必须能够整周转动. 手掌的两个驱动参数是相互独立的, 当其中一个到达某一位置时固定, 球面五杆机构变胞成球面四杆机构, 这个球面四杆机构的曲柄条件必须满足. 根据 Chiang 的研究^[14], 一个球面四杆机构有 15 个互补机构, 这些机构在运动学上是完全相同的, 而且任何一个球面四杆机构都可以转化成为一个任意两杆之和都小于 π 的球面四杆机构. 令变胞后得到的球面四杆机构转化为满足上述条件的球面四杆机构, 杆长为 $l'_i (i = 1, 2, 3, 4)$, 其中 l'_1 是驱动件, l'_4 是机架, l'_2 是连杆, 球面四杆机构曲柄存在的 Grashof 条件是

$$\begin{cases} l'_1 + l'_3 \leq l'_2 + l'_4 \\ l'_1 + l'_2 \leq l'_3 + l'_4 \\ l'_1 + l'_4 \leq l'_2 + l'_3 \end{cases} \quad (17)$$

以上这些都是此方程组的解需要满足的约束. 将解非线性方程组的问题转化为非线性最小二乘法的优化问题, 建立如下优化模型:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) = & \left(\sum_{j=1}^5 l_j - 2\pi \right)^2 + \\ & (l_2 + \delta_1 + \delta_2 - 2\pi/3)^2 + \\ & (l_3 + l_4 - \delta_2 - \delta_3 - 2\pi/3)^2 + \\ & \sum_{i=2}^3 (|\mathbf{n}_{1i} \ \mathbf{n}_{2i} \ \mathbf{n}_{3i}|^2 + \\ & (\mathbf{n}_{1i} \cdot \mathbf{n}_{2i} - \cos r_{1i})^2 + \\ & (\mathbf{n}_{1i} \cdot \mathbf{n}_{3i} - \cos r_{2i})^2 + \\ & (\mathbf{n}_{2i} \cdot \mathbf{n}_{3i} - \cos r_{3i})^2) \\ \text{s. t.} \quad & 0 < l_j < \pi, j = 1, 2, 3, 4, 5 \\ & 0 < \delta_1 < l_1 \\ & 0 < \delta_2 < l_3 \\ & 0 < \delta_3 < l_4 \\ & l'_1 + l'_3 \leq l'_2 + l'_4 \\ & l'_1 + l'_2 \leq l'_3 + l'_4 \\ & l'_1 + l'_4 \leq l'_2 + l'_3 \\ & \mathbf{x} = (\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5 \ \delta_1 \ \delta_2 \\ & \quad \delta_3 \ \theta_{12} \ \theta_{13} \ \theta_{22} \ \theta_{23}) \end{aligned} \quad (18)$$

式中 $l'_k (k = 1, 2, 3, 4)$ 是转化后球面四杆机构的杆长.

采用 Matlab 的 Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox 和 Optimization Toolbox 来进行优化运算. 使用遗传算法解决了初始值不易给出和全局最优解的问题. 计算结果表明, 该方法是有用的, 下面是得到的一个算例.

算例 1 取 $\gamma_{11} = 120^\circ, i = 1, 2, 3; \gamma_{12} = 160.0^\circ, \gamma_{22} = 100.0^\circ, \gamma_{32} = 100.0^\circ; \gamma_{13} = 155.0^\circ, \gamma_{23} = 50.0^\circ, \gamma_{33} = 155.0^\circ$, 分别对应于图 8 的抓持姿态(a)、(b)和(c). 表 1 是计算得到的变胞手掌的 8 个结构参数的数值. 表 2 为抓持时共面条件和姿态实现的情况, 以及两个驱动角的大小.

表 1 手掌的结构参数

Tab. 1 The structure parameters of the palm

参数	数值 / (°)	参数	数值 / (°)
l_1	79.1	l_5	39.8
l_2	40.2	δ_1	39.8
l_3	100.1	δ_2	50.1
l_4	99.9	δ_3	49.9

表2 抓持时理想参数和实现参数以及两个驱动角的大小

Tab.2 The ideal and realized parameters of the grasping and the corresponding joint variables

	目标的抓持姿态角度/(°)	实现的抓持姿态角度/(°)	$ n_{i1} \quad n_{i2} \quad n_{i3} $	$\theta_{1i}/(^{\circ})$	$\theta_{2i}/(^{\circ})$
抓持位置 1	120.0	120.0			
	120.0	120.0	0	180.0	0
	120.0	120.0			
抓持位置 2	160.0	159.3			
	100.0	100.4	0.45×10^{-3}	250.3	-68.7
	100.0	100.3			
抓持位置 3	155.0	154.6			
	50.0	51.2	0.22×10^{-3}	180.1	75.3
	155.0	154.2			

4 变胞多指灵巧手仿真

得到计算结果后,用三维造型软件按照优化的结果进行多指灵巧手的仿真,验证优化计算的正确性.图9、10和11的手掌的机构参数和两个输入角度均来自优化的结果.均布的抓取姿态见图9,其手掌的两个驱动构件的角度分别为 0° 和 180° .图10展现3个手指抓持方形物,对应于图8(b).手掌的两个驱动构件的输入角度为表2中抓持位置2的 250.3° 和 -68.7° .

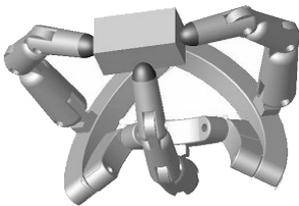


图10 3个手指抓持近似方形物体的姿态

Fig.10 The pose of three fingers of grasping a quasi-square object

图11表示3个手指两侧分布抓持长条状物体的姿态,对应于图8(c).手掌的两个驱动构件的输入角度为表2中抓持位置3的 180.1° 和 75.3° .



图11 3个手指两侧分布抓持长条状物体的姿态

Fig.11 The pose of three fingers of grasping a long shape object

5 结 语

分析了一新型机器人,变胞多指灵巧手.其与目前常用的机器人最大的不同在于它的手掌可以活动,并具有变胞功能.手掌的变胞增强了机器人的灵巧度并增大了其工作空间,但是使用变胞手掌也增加了机器人工作空间的复杂度.

引入手指操作平面的概念后,复杂度得到了解决,问题被转化为研究手指操作平面的单位法向量以及它们的高斯映射,并且映射成为姿态直纹面.接着,分析了常用的3种指尖抓持姿态下手掌所需要满足的条件,并转化为非线性方程组的求解问题.采用Matlab的遗传算法工具箱和优化工具箱,得到了满意的解.最后,用三维造型软件进行了仿真,验证了计算的正确性.

参考文献:

- [1] OKAMURA A M, SMABY A, CUTKOSKY M R. An overview of dexterous manipulation [C] // *Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco: IEEE Press, 2000:255-262
- [2] SALISBURY J K, CRAIG J J. Articulated hands: Force control and kinematic issues [J]. *International Journal of Robotics Research*, 1982, 1(1):4-17
- [3] JACOBSEN S C, IVERSEN E K, KNUTTI D F. Design of the Utah/M. I. T. dexterous hand [C] // *Proceedings of 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco: IEEE Press, 1986:1520-1532
- [4] TOMOVIC R, BERKEY G A, KARPLUS W J. A strategy for grasp synthesis with multifingered robot hand [C] // *Proceedings of 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Raleigh: IEEE Press, 1987:83-89

- [5] OSSWALD D, WÖRN H. Mechanical system and control system of a dexterous robot hand [C] // **Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots**. Tokyo: IEEE Press, 2001
- [6] PONS J, ROCON L, CERES E, *et al.* The MANUS-HAND dexterous robotics upper limb prosthesis mechanical and manipulation aspects [J]. **Autonomous Robots**, 2004, **16**(2):143-163
- [7] LOTTI F, TIEZZI P, VASSURA G. UBH3: Investigating alternative design concepts for robotic hands [C] // **Robotics:Trends, Principles, and Applications — International Symposium on Robotics and Applications, ISORA — Sixth Biannual World Automation Congress, WAC 2004**. Spain:TSI Press, 2004
- [8] Shadow Robot Company. Developments in dexterous hands for advanced robotic applications [C] // **10th International Symposium on Robotics and Application**. Seville: TSI Press, 2004
- [9] GAO X, SHI S, ZHAO D, *et al.* HIT anthropomorphic robotic hand and finger motion control [J]. **Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)**, 2006, **13**(1):48-53
- [10] MASON M T, SALISBURY J K. **Robot Hands and the Mechanics of Manipulation** [M]. Cambridge: MIT Press, 1985
- [11] DAI J S, JONES J R. Mobility in metamorphic mechanism of foldable/erectable kinds [J]. **Journal of Mechanical Design, Transaction of the ASME**, 1999, **121**(3): 375-382
- [12] DAI J S, JONES J R. Matrix representation of topological changes in metamorphic mechanisms [J]. **Journal of Mechanical Design, Transaction of the ASME**, 2005, **127**(4):675-682
- [13] DAI J S. The metamorphic robotic hand: UK, GB04/09548.1 [P]. 2003-04-10
- [14] CHIANG C H. **Kinematics of Spherical Mechanisms** [M]. New York: Cambridge University Press, 1988
- [15] CARMO M P. **Differential Geometry of Curves and Surfaces** [M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1976

Dimensional synthesis of palm of multifingered metamorphic dexterous hand

CUI Lei¹, WANG De-lun^{*1}, DAI Jian S²

(1. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Mechanical Engineering, King's College London, University of London, London, WC2R 2LS, UK)

Abstract: A novel multifingered metamorphic hand is analyzed. This hand differs from the previous robotic hands in that the palm is moveable. The reconfiguration of the palm enhances the dexterities and the workspace of the hand. When the linkages of the palm stand still, each finger operates in a plane. Hence the finger-operation plane is introduced so that the orientation analysis of the hand can be explored by investigating the motion of the unit vectors of the three finger-operation planes. The three unit vectors can be obtained by coordinate transformation in a global coordinate system and are mapped to orientation ruled surfaces. Next, three common poses of grasping with finger-tips are analyzed and the conditions for the palm to realize these three poses are obtained. The design of the palm is converted into that of solving a nonlinear equation system with 11 equations and 12 variables. The satisfactory numerical solution of the nonlinear equation system is obtained. Finally three-dimensional simulations of the multifingered hand based on the above numerical solution are made to verify the correctness of the computation.

Key words: multifingered dexterous hand; metamorphic; palm; workspace