

第七章 多指灵巧手

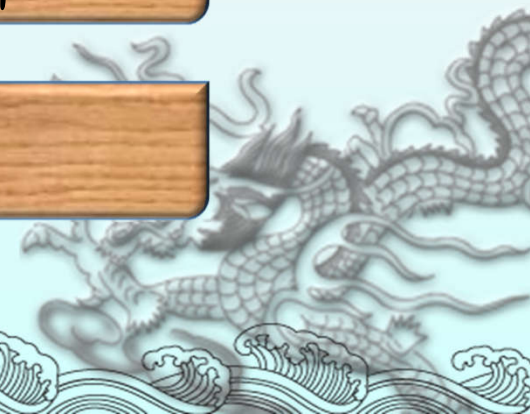
第一节 多指灵巧手的结构设计

第二节 单指机构的运动学模型

第三节 多手指协调运动学分析

第四节 三指位姿方程的逆向解

第五节 灵巧手的静力学分析



【案例导入】

据目前的残疾人数据调查表明，我国肢体残疾患者的数量高达2412万人，约占总人口数的1.83%。因此假肢手的研究对于残疾人能够进行正常的生活和更好地融入社会非常重要，得到了社会各界的高度重视。上海交大机器人研究所研发出一种新的仿人假肢手。如图7.1所示。

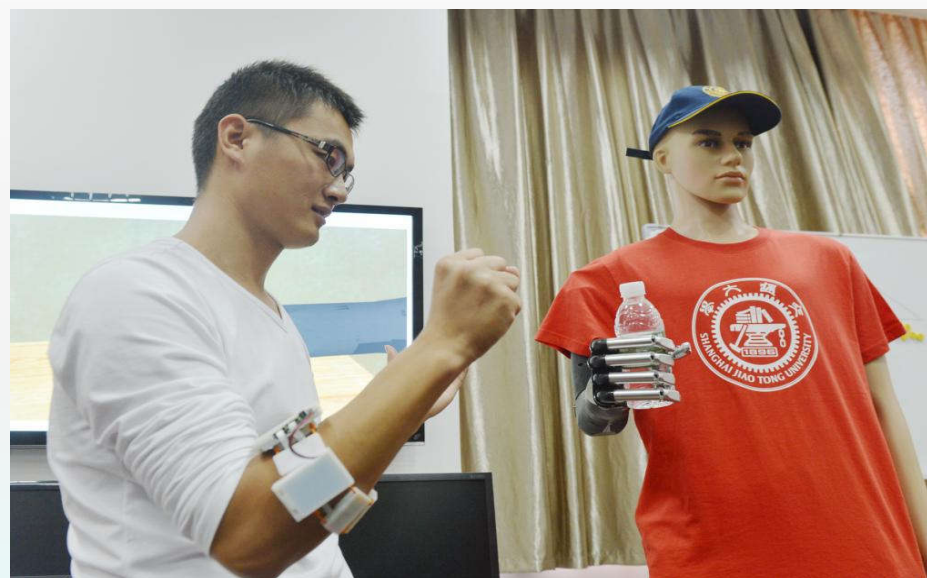
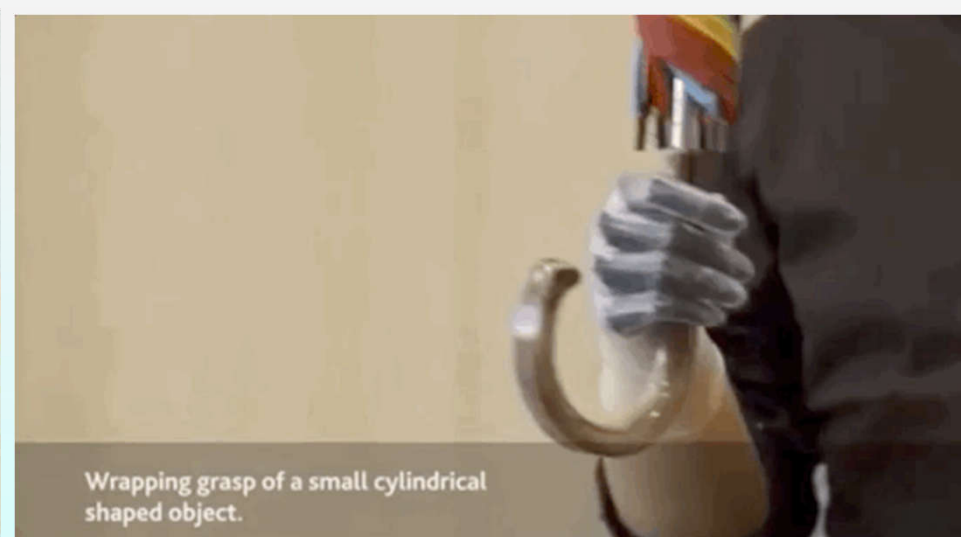


图7.1 仿人假肢手





Emg processing board

Flexion Extension wrist

Motor control board

DC motor

Magnetic plug
connector

sEMG sensors

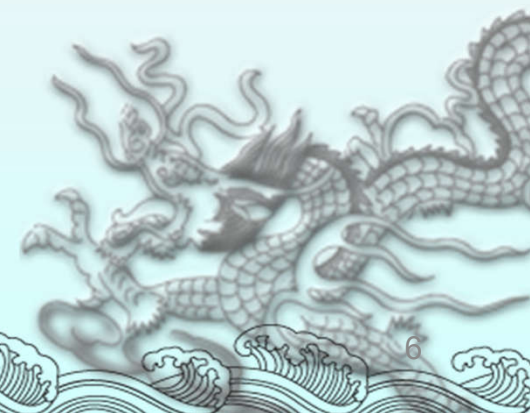
Battery pack

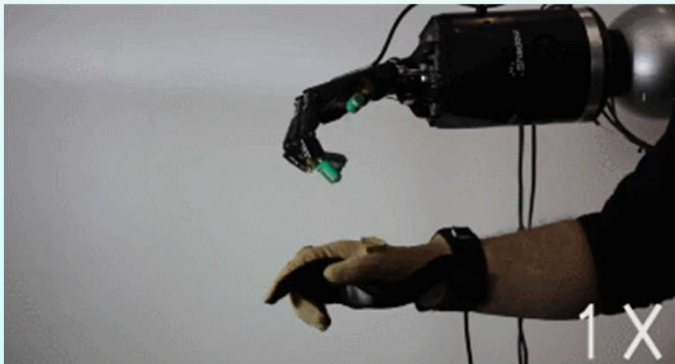
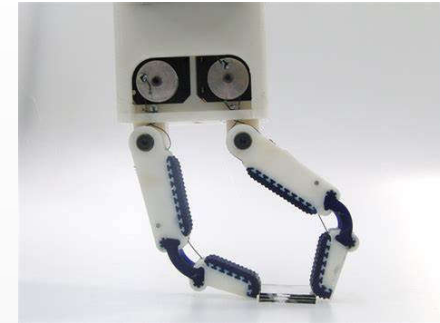
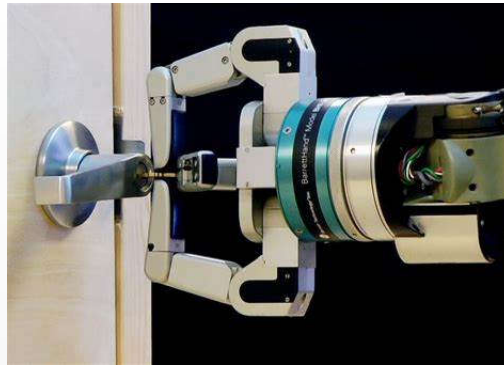
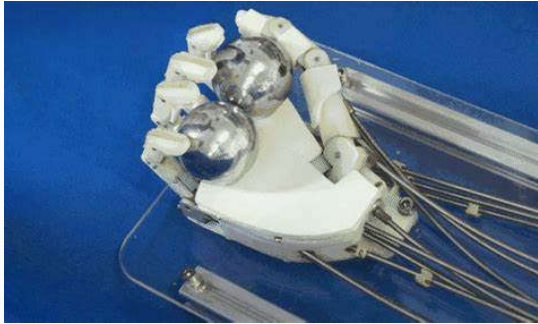
Battery Management System (BMS)



【教学目标】

- ◆ 了解人手抓取的基本类型、手指结构形式、关节运动副类型、驱动方式
- ◆ 掌握多指灵巧手的结构设计方法
- ◆ 学会对灵巧手进行静力学和运动学分析





第一节 多指灵巧手的结构设计

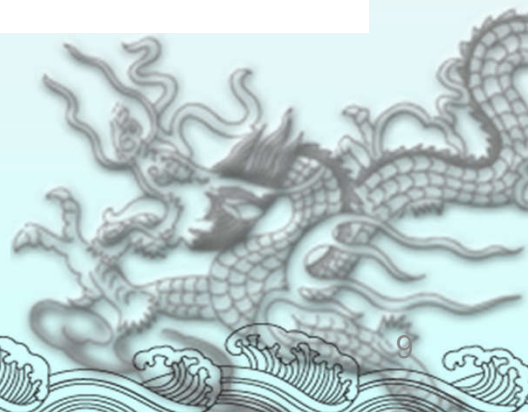
1. 手指关节运动副形式

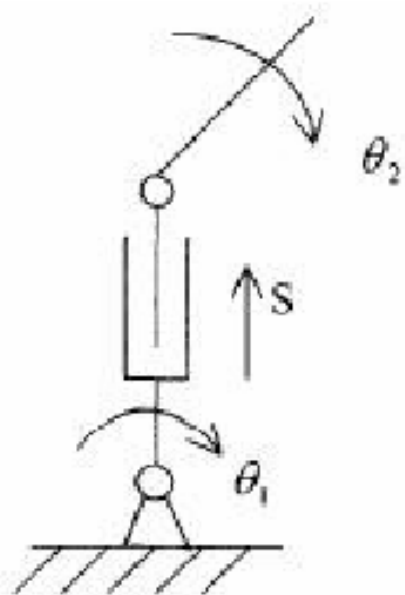


- 1、**单轴关节**：滑车关节和车轴关节两种；
- 2、**双轴关节**：椭圆关节和鞍状关节两种；
- 3、**三轴关节**：球窝关节。

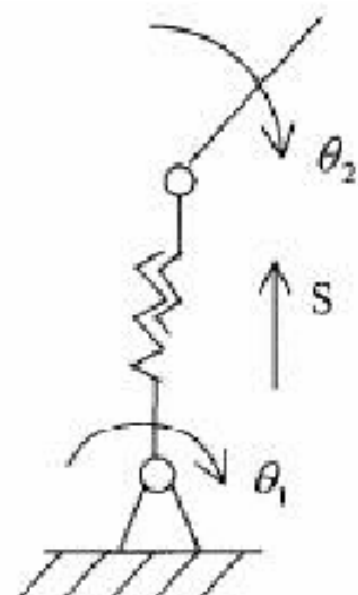
表 2-1 常见运动副形式

运动副名称	约束条件数	自由度数	级别
转动副	5	1	V
移动副	5	1	V
螺旋副	5	1	V
圆柱副	4	2	IV
球面低副	3	3	III

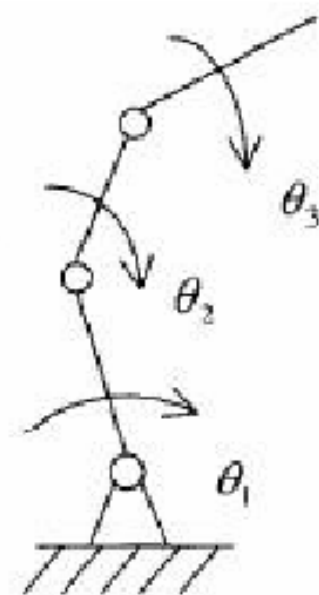




a) 移动副和转动副



b) 螺旋副和转动副

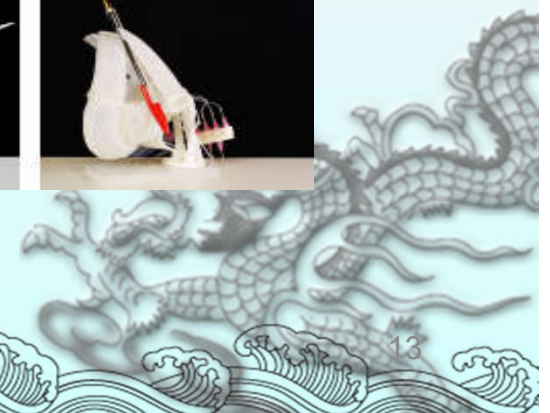


c) 只含转动副



2. 手指数目

- 根据力的平衡原理，抓取物体时至少有2个相对的力或力偶作用于物体上，或者说物体上必须产生大小相等、方向相反的两个力或力偶作用于手上。
- 手指大于二的手理论上都可以通过规划实现力封闭，从而实现稳定抓取。
- 人手有5个手指，为存在冗余自由度的手指，具有最好的抓取稳定性和灵巧性。
- 在现实中，手指越多，由于每个关节要独立驱动，再加上传感器，规划过程和控制过程都相当复杂，很难保证实时性。因此，手指的数目应在可以完成抓取和微细操作功能要求的情况下尽可能取小。



21: Tripod Variation



22: Parallel Extension



23: Adduction Grip



24: Tip Pinch



25: Lateral Tripod



26: Sphere 4 Finger



27: Quadpod



28: Sphere 3 Finger



29: Stick



30: Palmar



31: Ring



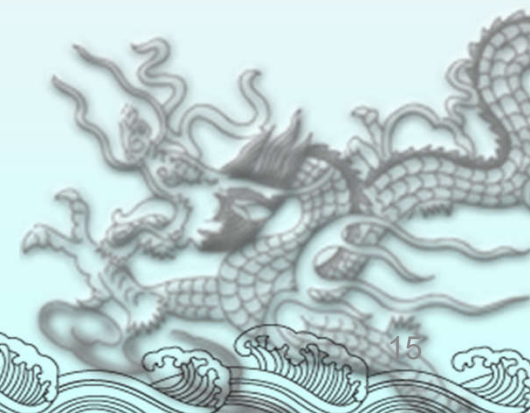
32: Ventral



33: Inferior Pincer



由图可知大部分的抓取任务可以用两个手指来完成，而对于一些诸如高精度的圆球、圆盘等抓取，可以引入第三个手指来提高其稳定。因此，有三个手指的手爪其抓取是绝对可靠的。一般灵巧手采用3—5个手指。



灵巧手关节的驱动方式

◆ 灵巧手的驱动方式有：**电驱动**、**气压驱动**和**液压驱动**的方式，少数的灵巧手采用**SMA**（形状记忆合金）驱动、**压电陶瓷驱动**和**PMA**（气动人工肌肉驱动）等新型驱动技术。

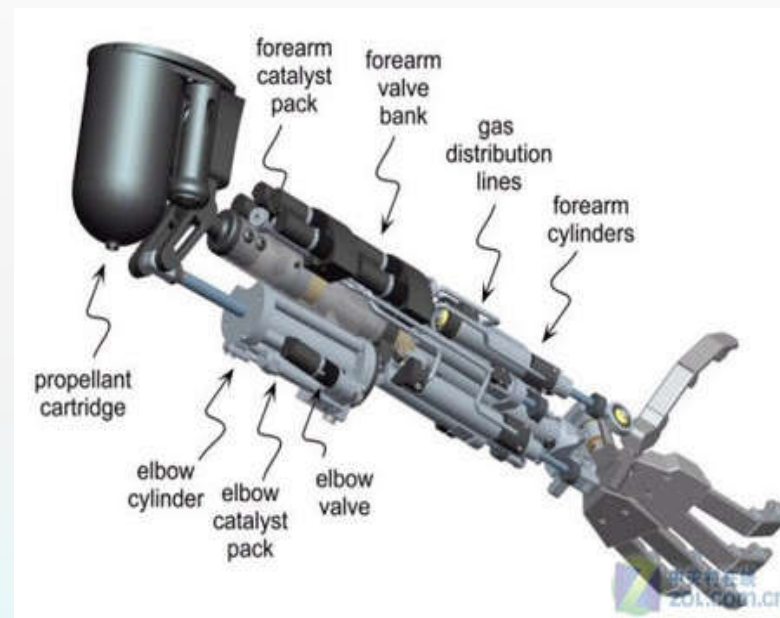


图7.2 液压驱动方式

灵巧手关节的传动方式

◆ 灵巧手的关节传动方式有：绳加滑轮传动、连杆机构传动、齿轮传动、带传动、链传动等传动方式。

1) 连杆传动机构。其优点在于连杆上点的运动轨迹多种多样，利用这些轨迹可以实现多种工作要求；缺点是设计复杂。

2) 齿轮传动机构。其优点是效率高，传动比恒定。但是将齿轮传动用于灵巧手的传动方式时，需要将电机布置于灵巧手手指内部才能驱动手指关节的运动，由于灵巧手的体积存在限制，不能够放进一般的电机，故齿轮传动不合适。

3) 带传动。其优点是带传动结构简单，传动平稳，造价低廉以及缓冲吸振等特点。但是带传动的缺点是容易老化，需要张紧轮的张紧作用来保持传动力。

4) 链传动。链轮上制有特殊齿形的齿，依靠链轮轮齿与链节的啮合来传动动力。链传动的优点是能保持准确的平均传动比，传动效率高、轴上所受径向力小；但两根平行轴只能同向回转，不能保持恒定的瞬时传递比。

5) 绳加滑轮传动。这种传动方式的优点在于传动系统的柔性好，结构简单易于控制，并且体积小适用于灵巧手，这种小体积且需要灵活控制的原件。

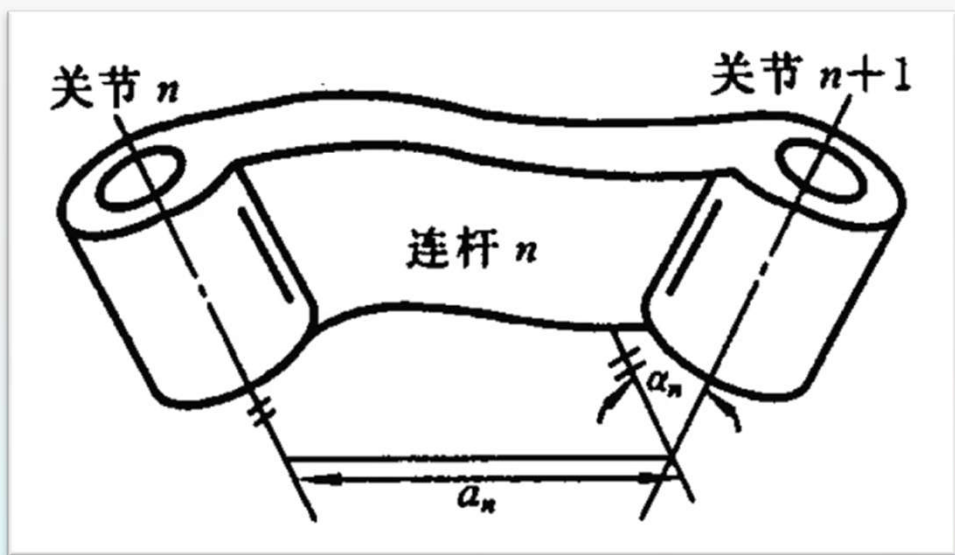


多指灵巧手的设计

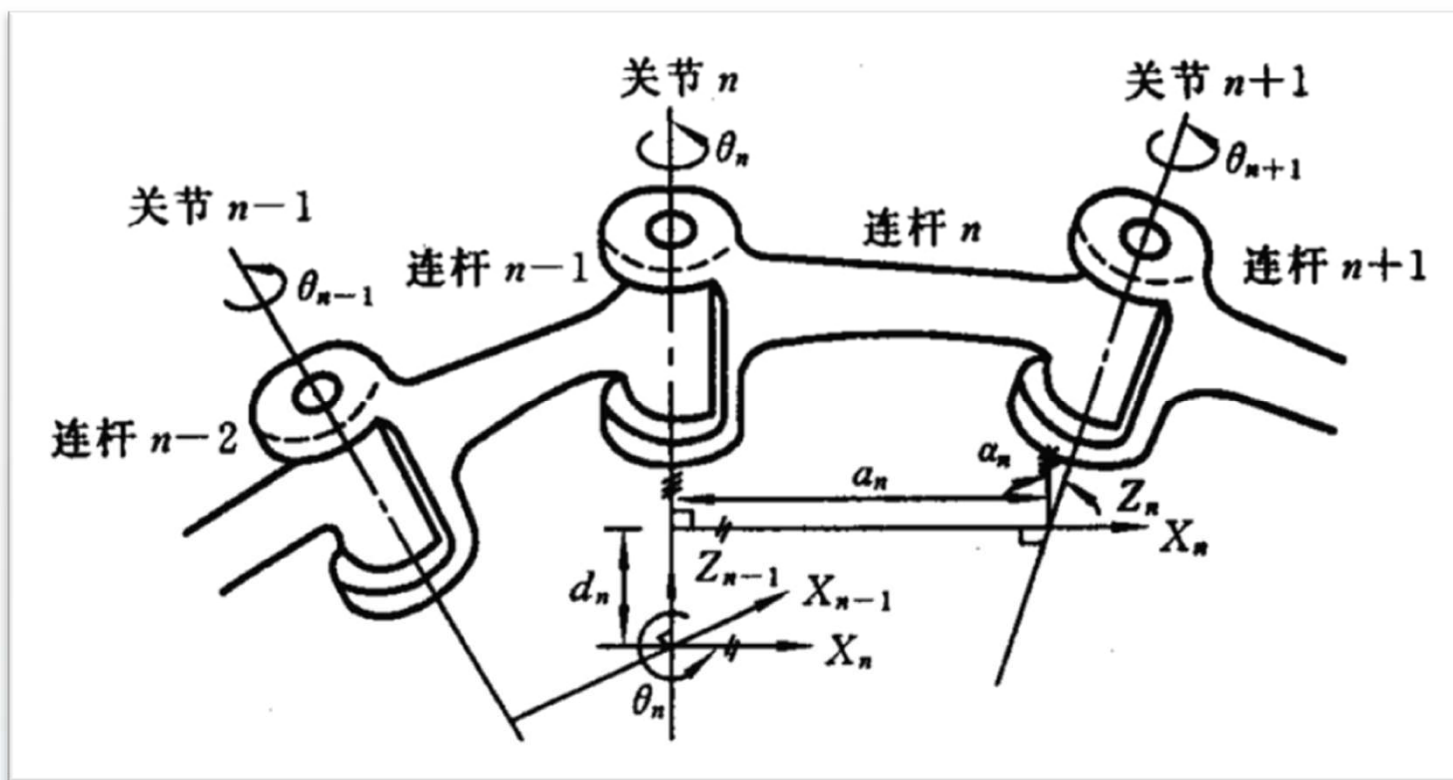
- (1) 手指各关节杆的截面型式和材料：截面形式主要有圆形、方形、椭圆形和复合形状。手指的结构材料一般选用铝合金。
- (2) 传感器的选用和布置：传感器主要有力觉、接触觉、压觉、温度觉等的传感器。传感器的布置应满足均匀分布、对灵巧手的正常操作影响最小、非测量部分尽量隐藏等条件。
- (3) 手指各关节的尺寸和回转角范围：灵巧手尺寸应根据分析和优化得出合适的关节长度比例，人手指根关节的屈伸角度极限一般是 90° ，中间关节的屈伸角度极限一般为 110° ，末关节的屈伸角度一般为 80° 。



第二节 单指机构的运动学模型



连杆两端有关节 n 和 $n+1$ 。该连杆尺寸可以用两个量来描述：一个是两个关节轴线沿公垂线的距离 a_n ，称为**连杆长度**；另一个是垂直于 a_n 的平面内两个轴线的夹角 α_n ，称为**连杆扭角**。这两个参数为连杆的尺寸参数。



考虑连杆 n 与相邻连杆 $n-1$ 的关系，若它们通过**关节**相连，其相对位置可用两个参数 d_n 和 θ_n 来确定，其中 d_n 是沿关节 n 轴线两个**公垂线**的**距离**。 θ_n 是垂直于关节 n 轴线的平面内两个公垂线的**夹角**。

连杆参数

对于转动关节， θ_i 为关节变量，其他三个连杆固定不变；
对于移动关节， d_i 为关节变量，其他三个连杆固定不变；

这种用连杆参数描述机构运动关系的规则称为Denavit-Hartenberg参数，所以对于一个6关节机器人，需要用18个参数就可以完全描述这些固定的运动学参数，可用6组 (a_i, α_i, d_i) 表示。



首先，根据**D-H规则**，建立单指机构的坐标系，如图7.3所示。

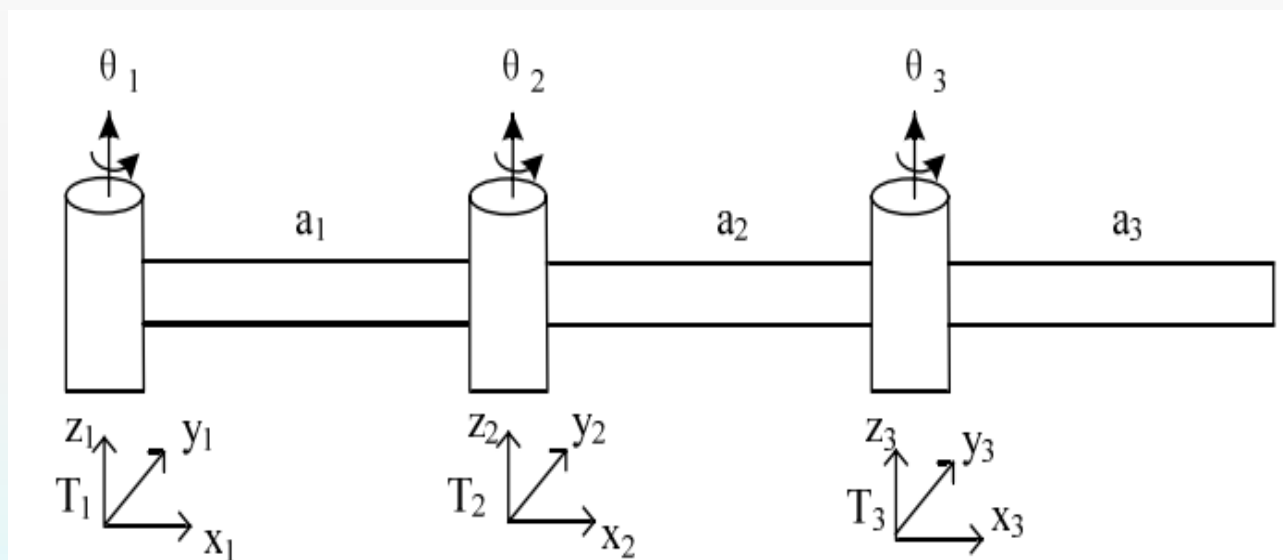
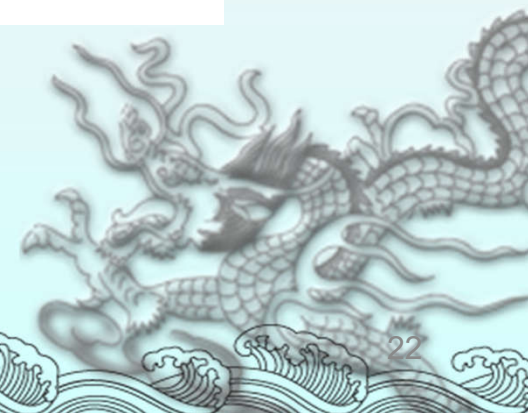


图7.3 食指坐标系



如图7.4所示，食指D-H参数表建立变换矩阵：

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	0	l_1	0
2	θ_2	0	l_2	0
3	θ_3	0	l_3	0

图7.4 食指D-H参数表

$${}^R T_H = A_1 A_2 A_3$$

$${}^R T_H = \begin{bmatrix} C_{123} & -S_{123} & 0 & l_3 C_{123} + l_2 C_{12} + l_1 C_1 \\ S_{123} & C_{123} & 0 & l_3 S_{123} + l_2 S_{12} + l_1 S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中： $C_1 = \cos\theta_1$ ； $S_1 = \sin\theta_1$ ； $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ ； $S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$ ；

$C_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ ； $S_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$

拇指的坐标系如图7.5所示。

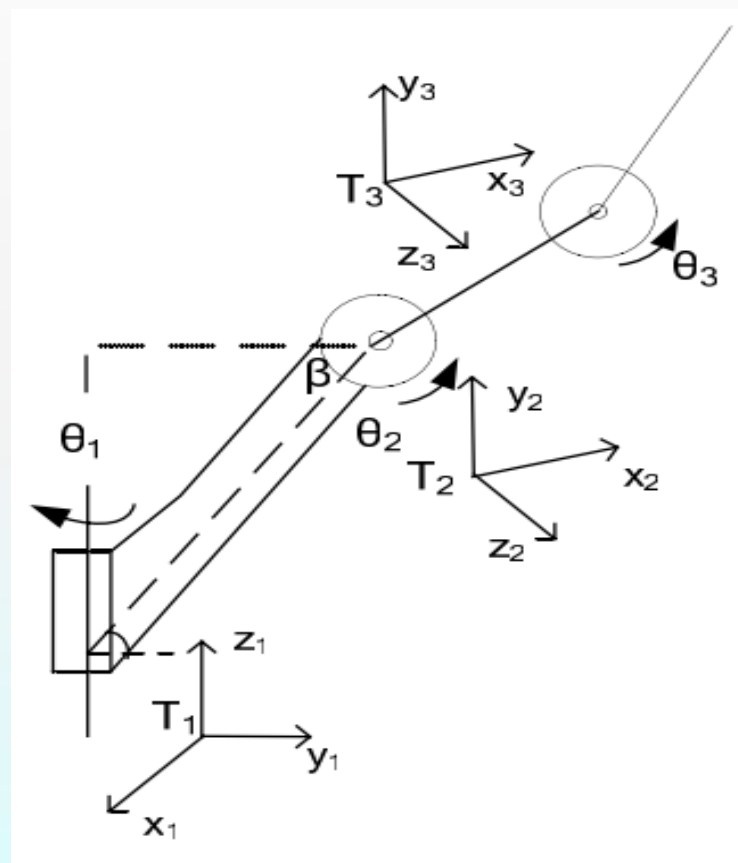


图7.5 拇指坐标系

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
2	θ_2	0	l_2	0
3	θ_3	0	l_3	0

拇指D-H参数表

$${}^R T_H = \begin{bmatrix} S_1 C_{\beta 23} & -S_1 S_{\beta 23} & C_1 & l_3 S_1 C_{\beta 23} + l_2 S_1 C_{\beta 2} + l_1 S_1 C_{\beta} \\ C_1 C_{\beta 23} & -C_1 S_{\beta 23} & -S_1 & l_3 C_1 C_{\beta 23} + l_2 C_1 C_{\beta 23} + l_1 C_1 C_{\beta} \\ S_{\beta 23} & C_{\beta 23} & 0 & l_3 S_{\beta 23} + l_2 S_{\beta 2} + l_1 S_{\beta} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第三节 多手指协调运动学分析

- 灵巧手的抓取主要靠拇指、食指、中指三个手指来完成操作。
- 在抓取物体时，无名指和小指只是跟随中指作辅助性操作。



坐标系的标准命名

为了规范起见，有必要给灵巧手和操作空间专门命名和确定专门的“标准”坐标系。

基坐标系{B}：基坐标系位于灵巧手的基座上，它仅是赋予坐标系{O}的另一个名称。它固连在灵巧手上的静止部位，是其他坐标系的参考标准。

手指坐标系{W}：包括拇指、食指、中指的坐标系。

目标坐标系{G}：目标坐标系是对被抓取的物体的具体位置进行描述，灵巧手在抓取物体动作结束时，手指坐标系的末端关节应于目标坐标系重合。

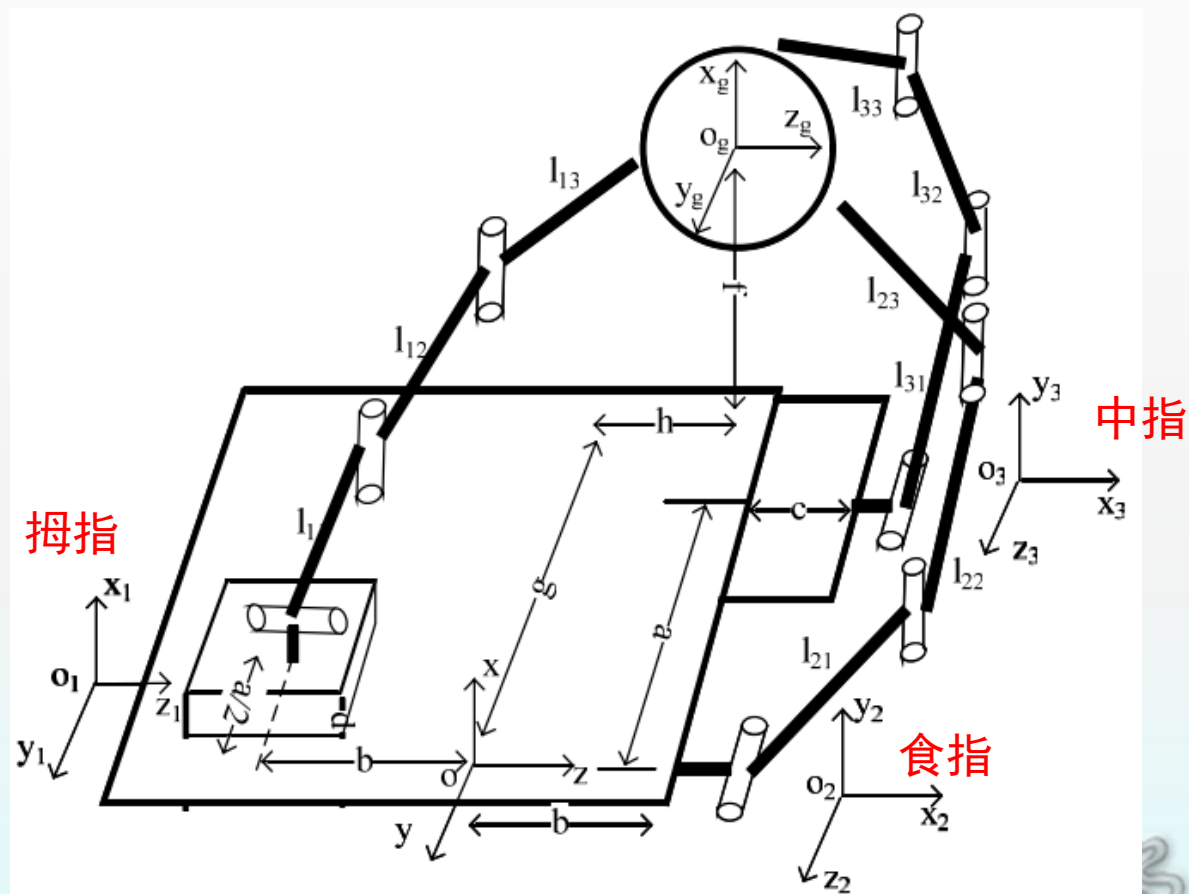
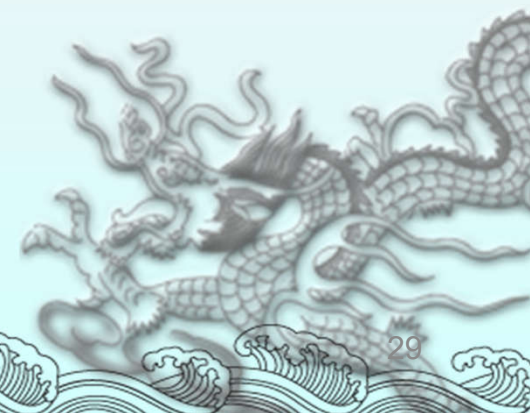


图7.6 手掌坐标系

拇指

由图7.6所示，根据拇指与基坐标的关系，从 $\{o\}$ 坐标系到 $\{o_1\}$ 坐标系，是将手掌坐标系沿 z 轴平移 $-b$ ，沿 x 轴平移 d 即可。所以齐次变换矩阵为：

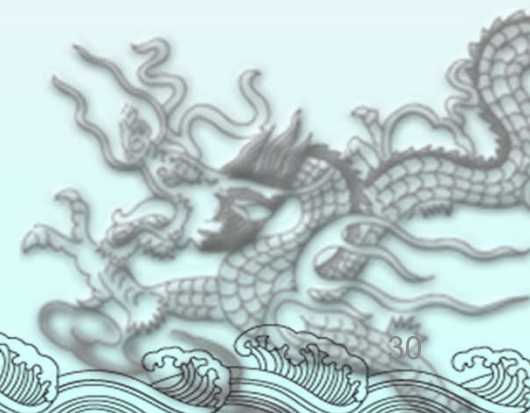
$${}_{o_1}^oT = \text{Trans}\left(d, -\frac{a}{2}, -b\right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{a}{2} \\ 0 & 0 & 1 & -b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



食指

根据食指与手掌坐标的关系，从 $\{o\}$ 坐标系到 $\{o_2\}$ 坐标系，即先沿 z 轴平移 b ，然后绕 n 轴旋转 -90° ，再绕轴 a 旋转 -90° 即可。所以

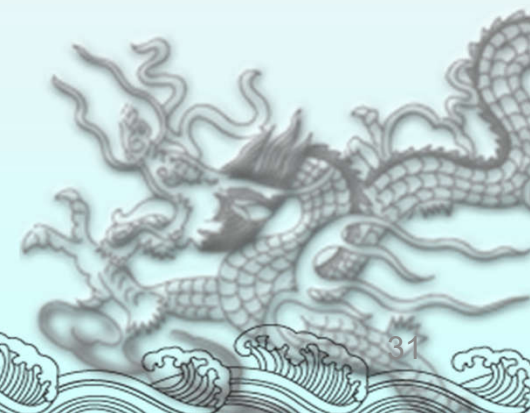
$${}_{o_2}^o T = \text{Trans}(0,0,b) \text{Rot}(n, -90^\circ) \text{Rot}(a, -90^\circ) =$$
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



中指

同理，由图7.10所示，根据中指与手掌坐标的关系，从 $\{o\}$ 坐标系到 $\{o_3\}$ 坐标系，即先沿 z 轴平移 $(b+c)$ ，沿 y 轴平移 $-a$ ，然后绕 n 轴旋转 -90° 。再绕轴 a 旋转 -90° 即可。所以齐次变换矩阵为：

$${}^o_3T = \text{Trans}(0, -a, b + c) \text{Rot}(n, -90^\circ) \text{Rot}(a, -90^\circ) =$$
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -a \\ 0 & 0 & 1 & b+c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -a \\ 1 & 0 & 0 & b+c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



根据被抓物接触位置，以及已知接触点处的法线方向和各指端球面半径，可求出指端球面中心的坐标表示，如图7.11所示。 p_1 、 p_2 、 p_3 分别是拇指、食指、中指的指端球面中心； r_1 、 r_2 、 r_3 分别是拇指、食指、中指的指端圆弧半径。

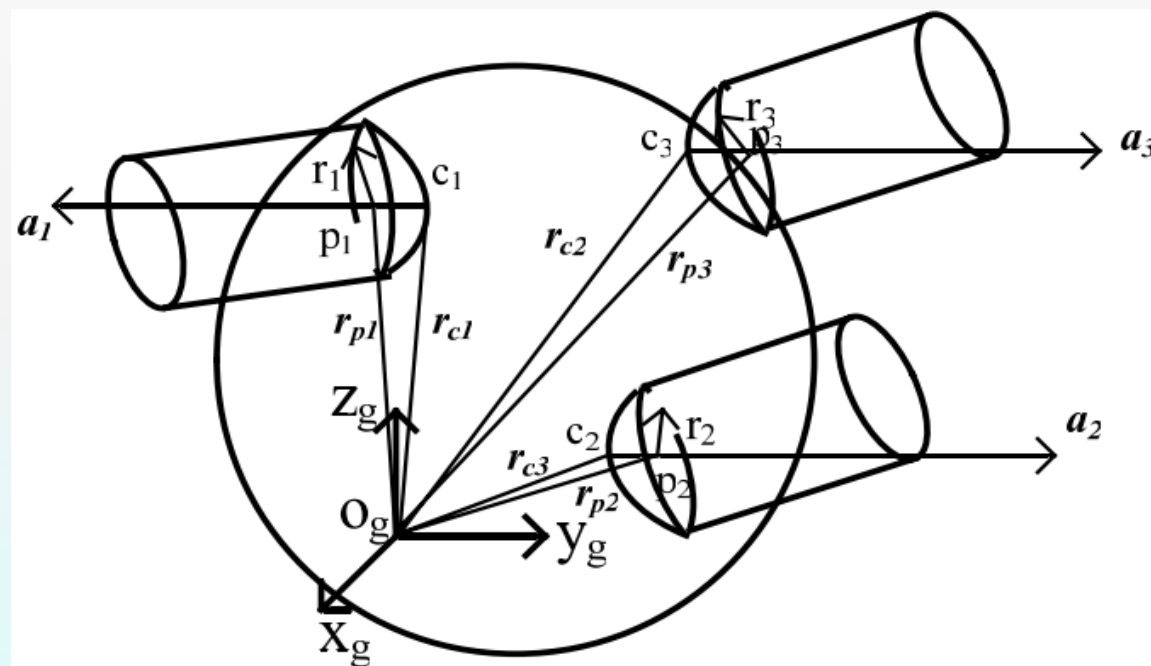


图7.7 被抓物与三指端关系坐标系

由图7.7可知，可由以下三式求出：

$$r_{p1} = r_{c1} + r_1 * a_1$$

$$r_{p2} = r_{c2} + r_1 * a_2$$

$$r_{p3} = r_{c3} + r_1 * a_3$$

为求出指端球面中心在手掌坐标系统的表示，必须明确被抓物坐标系与手掌坐标系间的坐标转化关系。从图7.7可看出，从被抓物坐标系到手掌坐标系的变化为：

$${}^o_E T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & f \\ 0 & 0 & 1 & g \\ 1 & 0 & 0 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

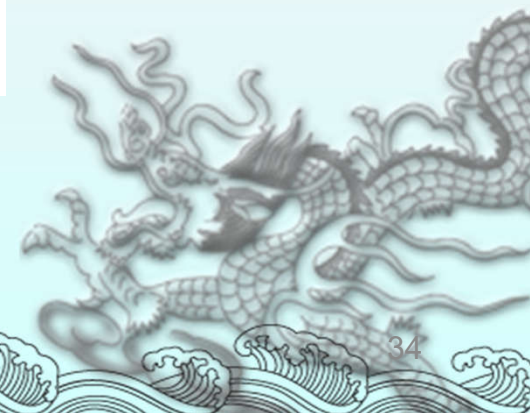
综合以上各式，可求得各指端球面中心在手掌坐标系中的表示。

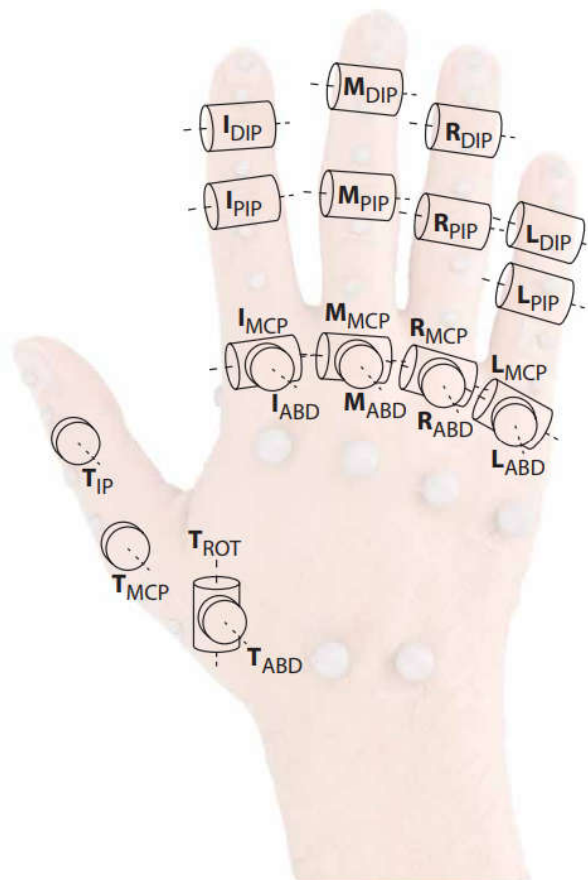
第四节 三指位姿的逆向解

运动学逆问题就是已知手指坐标系相对与手掌坐标系的期望位置和姿态，计算一系列满足期望要求的关节角。

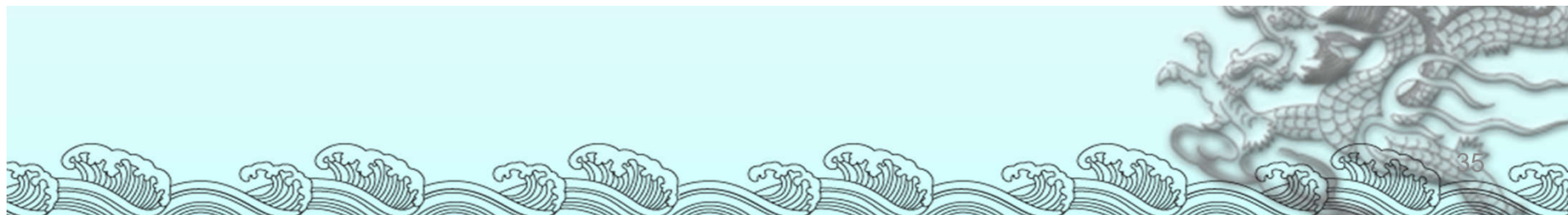
拇指末端的坐标为 (x, y, z) ，由于 β 角是在设计机构时就已经确定的，是已知值。根据前面对单指坐标的正向求解，由拇指的运动学方程式可将它改写为：

$${}^R T_H = \begin{bmatrix} S_1 S_{\beta_{23}} & S_1 S_{\beta_{23}} & -C_1 & x \\ C_{\beta_{23}} & -S_{\beta_{23}} & 0 & y \\ C_1 S_{\beta_{23}} & C_1 C_{\beta_{23}} & S_1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

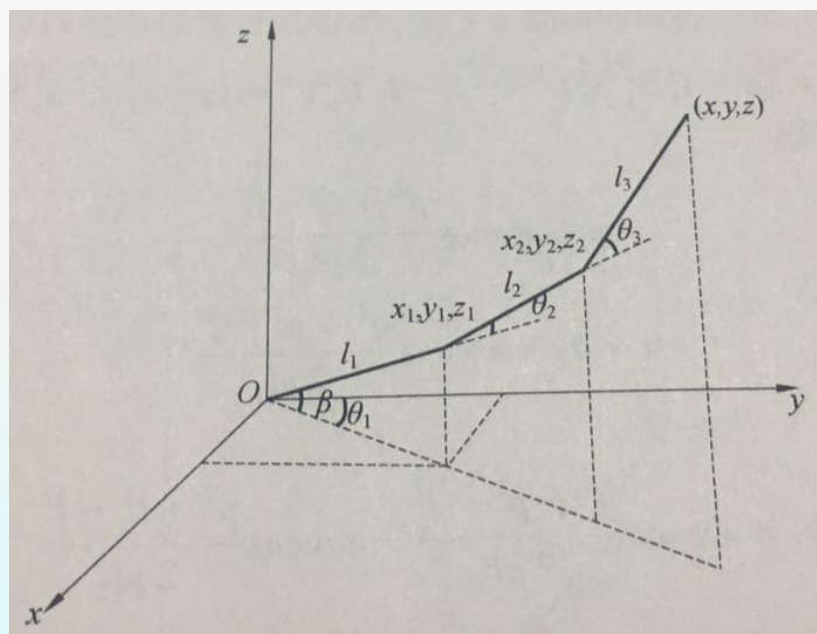




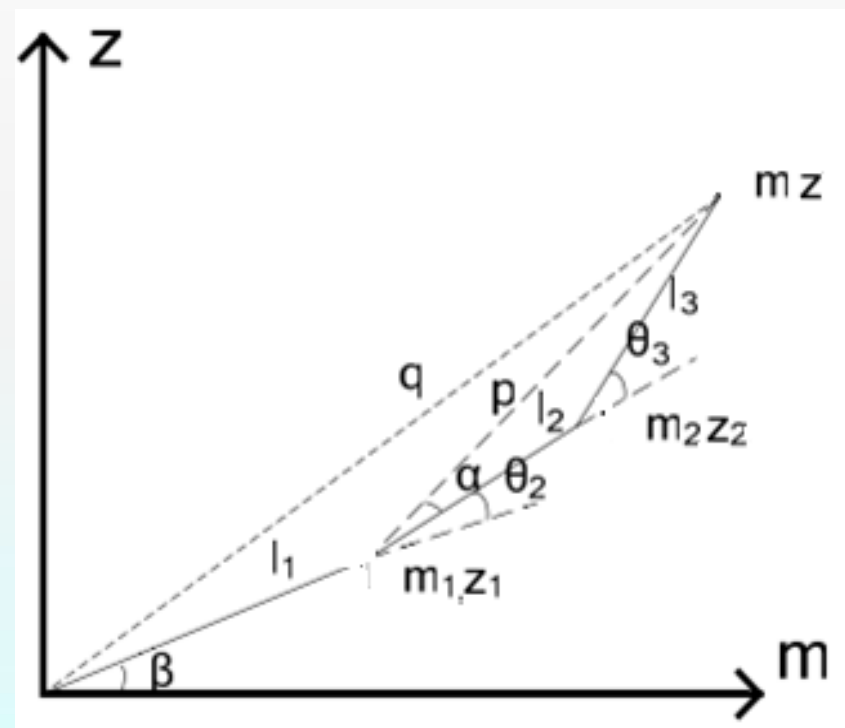
Joint	Description
T _{ABD}	Thumb Abduction
T _{ROT}	Thumb Rotation
T _{MCP}	Thumb Metacarpal
T _{IP}	Thumb Interphalangeal
I _{ABD}	Index Abduction
I _{MCP}	Index Metacarpal
I _{PIP}	Index Proximal
I _{DIP}	Index Distal
M _{ABD}	Middle Abduction
M _{MCP}	Middle Metacarpal
M _{PIP}	Middle Proximal
M _{DIP}	Middle Distal
R _{ABD}	Ring Abduction
R _{MCP}	Ring Metacarpal
R _{PIP}	Ring Proximal
R _{DIP}	Ring Distal
L _{ABD}	Little Abduction
L _{MCP}	Little Metacarpal
L _{PIP}	Little Proximal
L _{DIP}	Little Distal



为了集中讨论逆运动学问题，我们先简单化考虑，求出单指坐标的逆向解。拇指坐标的平面坐标系如图所示：



简化

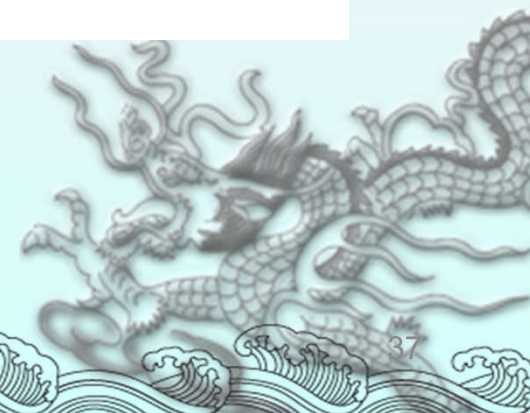


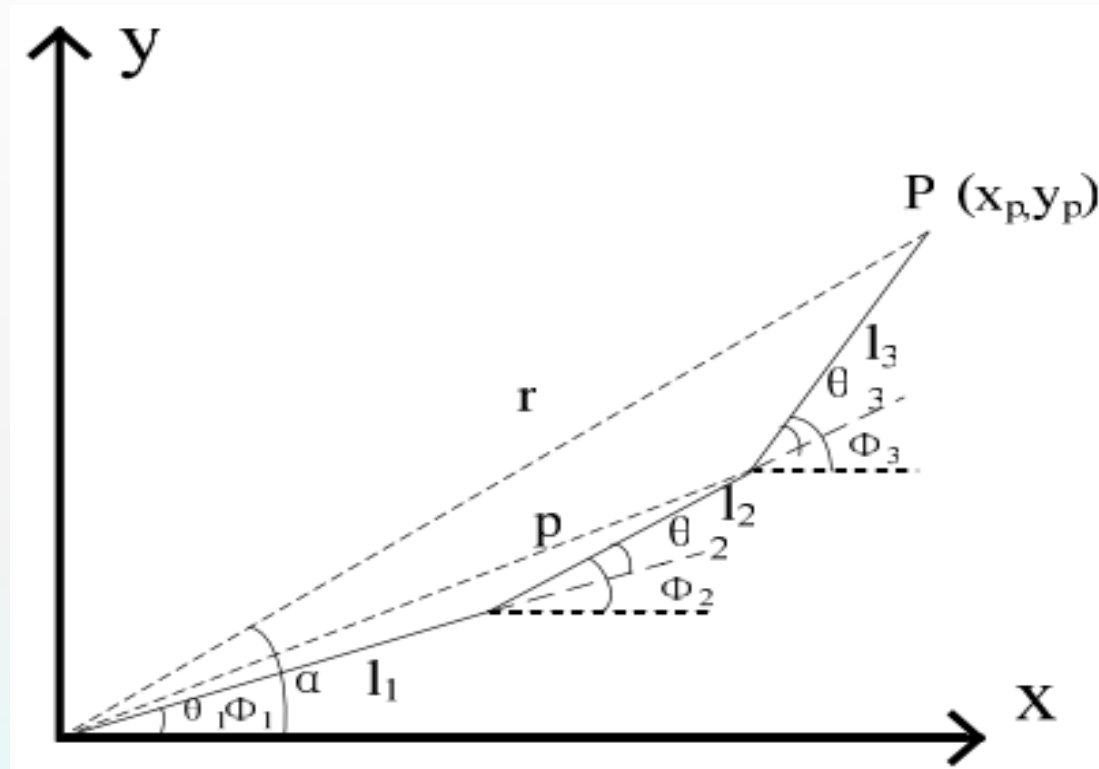
由拇指坐标系与手掌坐标系的变换关系，可得在手掌坐标系下的逆解。

$$\begin{cases} \theta_{11} = \arctan \frac{x-d}{y} \\ \theta_{12} = \arccos \frac{q^2 - p^2 - l_{11}^2}{2pl_{11}} - \arccos \frac{p^2 + l_{12}^2 - l_{13}^2}{2pl_{12}} \\ \theta_{13} = \arccos \frac{p^2 - l_{12}^2 - l_{13}^2}{2l_{12}l_{13}} \end{cases}$$

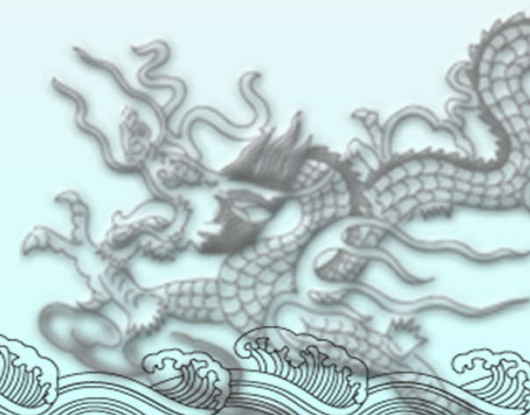
式中，

$$\begin{cases} p^2 = (x - d - l_{11}S_1S_\beta)^2 - \left(y + \frac{a}{2} - l_{11}C_\beta\right)^2 + (z + b - l_{11}C_1S_\beta)^2 \\ q^2 = (x - d)^2 + \left(y + \frac{a}{2}\right)^2 + (z + b)^2 \end{cases}$$



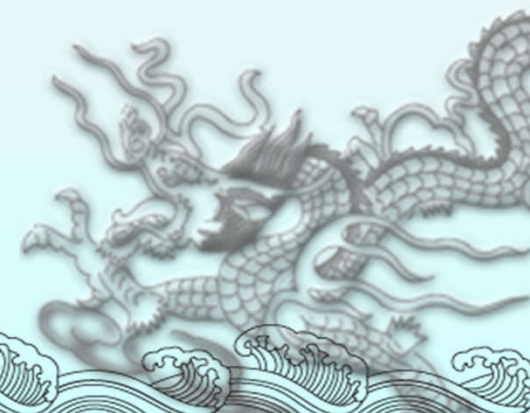
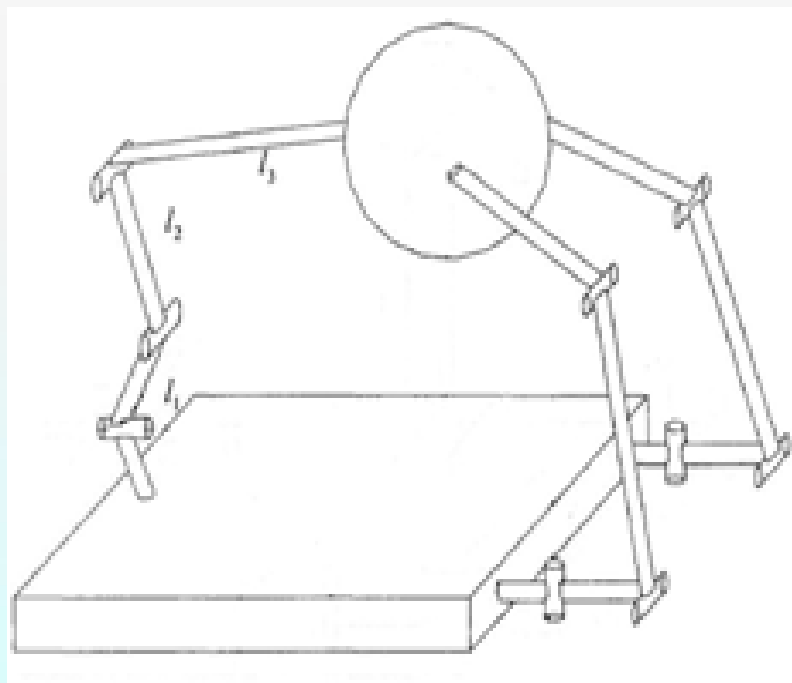


食指/中指简化坐标系



第五节 灵巧手的静力学分析

静力学分析就是假定各关节“锁住”力与手部所支持的载荷或受到外界环境作用的力达到静力学平衡。如图所示，抓取球体时，各个手指的弯曲情况简图。可求出拇指、食指和中指指端的受力，然后再通过静力学分析求出手指各关节上的受力情况。



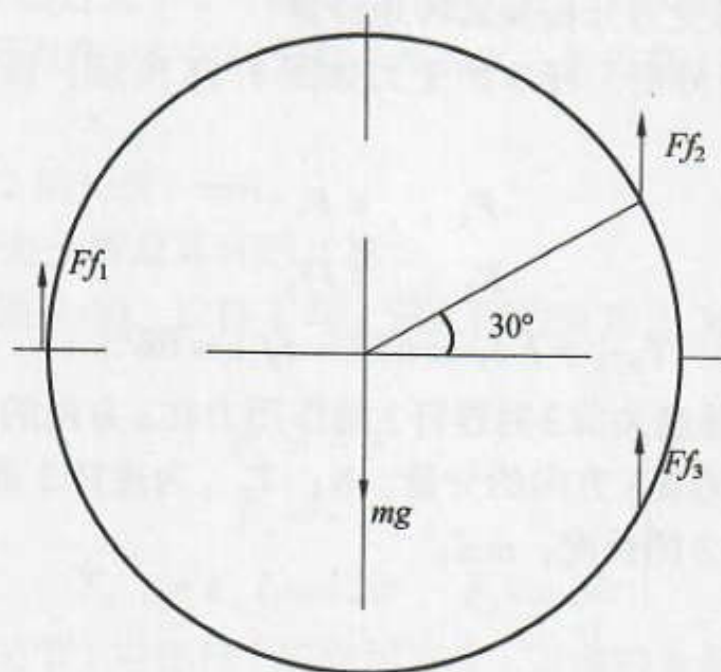


图 7.16 球体受力分析图

在抓取物体时，假设食指与球的中心夹角为 α ，并且食指与中指平行。认为抓取物体的重力与拇指、食指、中指产生的摩擦力和力矩达到平衡。力矩和力的平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} F_1 f_s + 2 F_2 f_s &= mg \\ 2 F_2 f_s r \cos \alpha - F_1 f_s r &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.60)$$

式中： f_s 为手指与球的摩擦因数； $F_2 f_s$ 为食指和中指对球的摩擦力； $F_1 f_s$ 为拇指对球的摩擦力； m 为球的质量； r 为被抓物体的矢径。

依据式 (7.60)，可以计算出拇指、食指和中指指端的受力，从而可以通过静力学分析求出手指各关节上的受力情况。

- 将手指的三个关节简化成为三根通过**铰链**连接的**刚性杆**，在二维平面内弯曲角度坐标，如图7.8所示，各关节弯曲的角度分别是： **θ_1** ， **θ_2** ， **θ_3** 。对其受力和转矩计算。

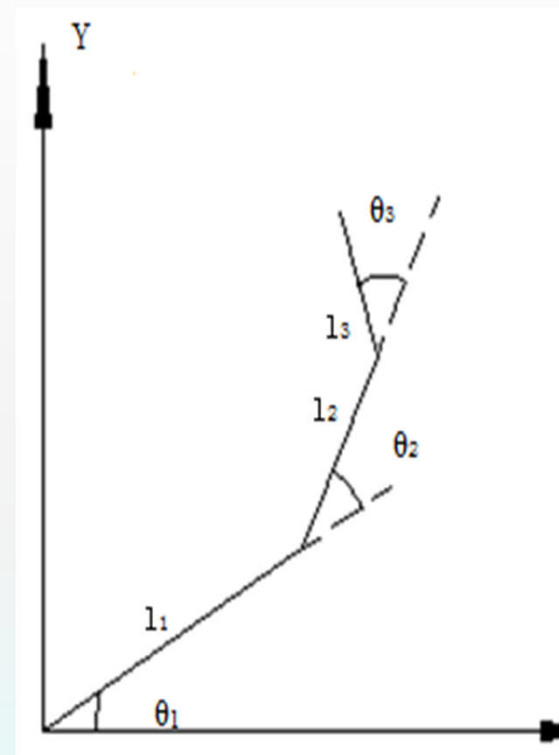


图7.8 手指坐标系图

(1) 手指关节3处轴的受力分析及其转矩计算

对杆3进行受力及力矩分析，杆3的受力如图7.9，设杆3与x轴之间的夹角为 68° ，由力的平衡条件可知：

连杆2通过关节3对连杆3的作用力在x方向的分量

$$\begin{cases} F_{2,3,x} = F \\ F_{2,3,y} = F f_s \\ T_{2,3} = F \times l_3 \times \sin 68^\circ - F f_s \times \cos 68^\circ \end{cases}$$

连杆2通过关节3对连杆3的作用力矩

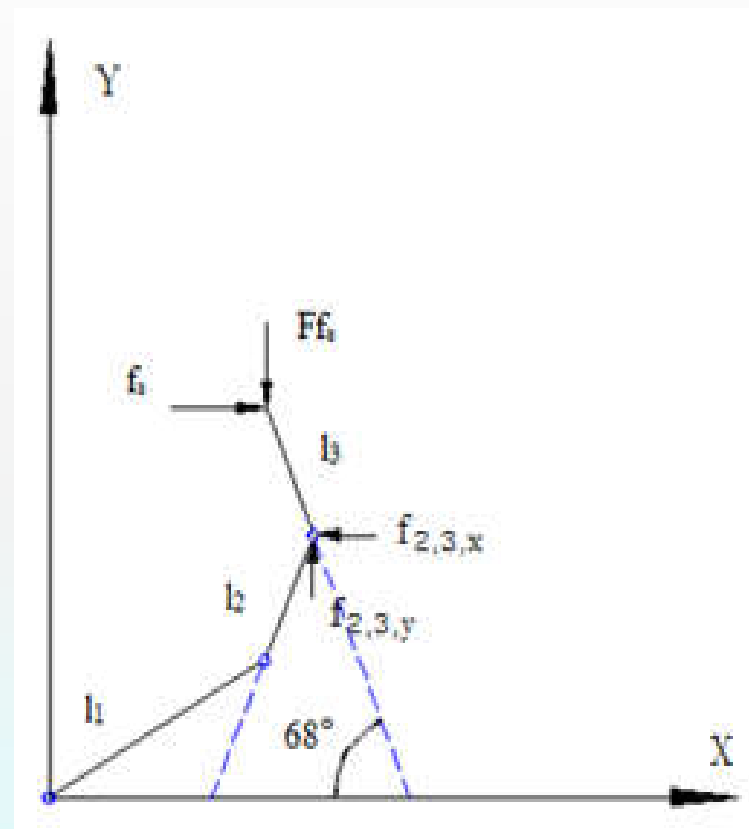


图7.9 末端指节受力分析

(2) 关节2处轴的受力分析及其转矩计算

中间直接连杆2的受力分析如图7.10，设杆2与x轴之间的夹角为 65° ，由平面中力的平衡条件可知：

$$\begin{cases} F_{1,2,x} = F_{2,3,x} \\ F_{1,2,y} = F_{2,3,y} \\ T_{1,2} = F_{1,2,x} \times l_2 \times \sin 65^\circ - F_{1,2,y} \times \cos 65^\circ \end{cases}$$

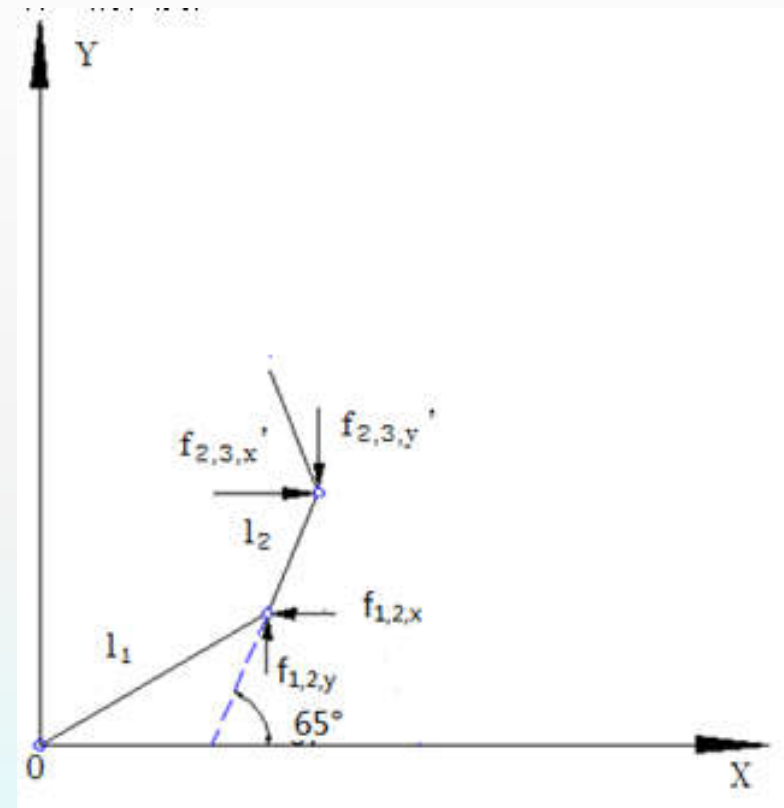


图7.10 中间指节受力分析

(3) 关节1处轴的受力分析及其转矩计算

连杆1的受力分析如图7.11，设杆1与x轴之间的夹角为 30° ，由平面中力的平衡条件可知：

$$\begin{cases} F_x = -F_{1,2,x} \\ F_y = -F_{1,2,y} \\ T_{0,1} = F_x \times l_1 \times \sin 30^\circ - F_y \times \cos 30^\circ \end{cases}$$

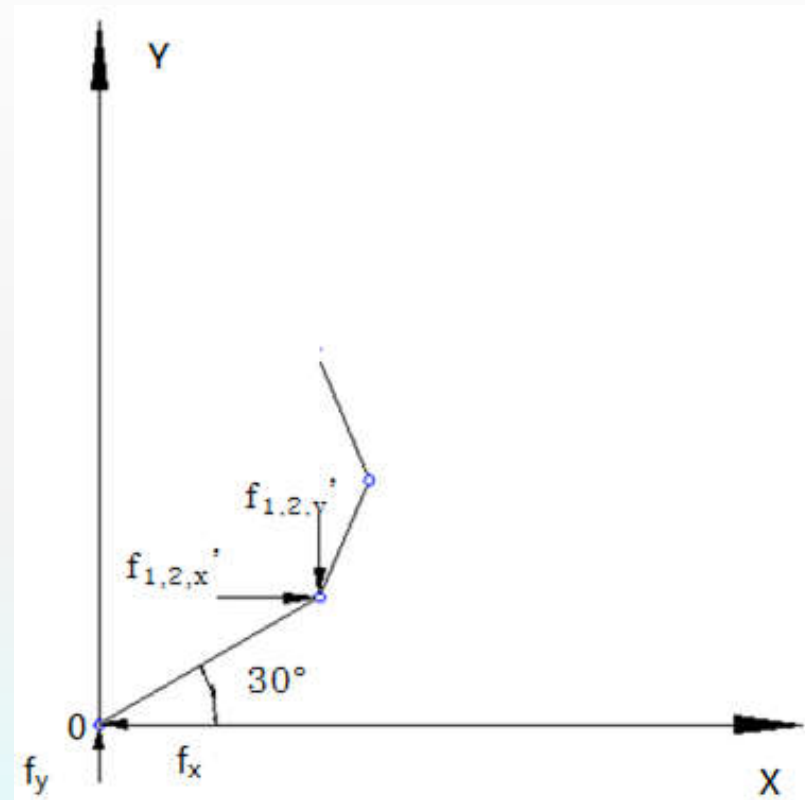


图7.11 近端指节受力分析

综合实例

多指灵巧手的设计

1. 多指灵巧手的功能与设计参数

(1) 多指灵巧手要实现的功能

设计一款系统灵活度高，重量轻、制作成本低的多功能灵巧手，应用于假肢手领域，帮助残疾人实现日常生活的自理。

(2) 多指灵巧手的设计参数

自由度：单个手指的自由度不少于 3 个，可实现高精度圆盘或圆球的抓取。

承载能力和工作范围：灵巧手可抓握重量为 1kg ，直径为 10cm 的球体和边长为 10cm 的立方体。

控制性能：手指末端阶跃响应时间 0.3s ，稳态误差 1.6% 。

2. 总体方案与布局

灵巧手的总体方案需要考虑几个主要因素，包括手型、自由度、驱动器种类等。在手型的选择上，采用仿人手型的设计策略。整个手由手掌、手指以及各个手指的驱动传动机构组成，该灵巧手有 5 个手指，每个手指有 3 个关节。由于随着自由度的增加，将会很大程度上加重对传感、控制方面的要求，使得灵巧手本身变得比较复杂，不仅增加了设计难度，也提高了制造成本，因此，灵巧手在保证灵巧性功能要求的前提下，舍去除拇指以外的四个手指的摆动自由度，即：拇指 4 个自由度，其中手腕关节 2 个自由度，另外两个指节各 1 个自由度，食指、中指、无名指与小指结构完全相同，各有 3 个独立自由度，掌指关节、中指关节、近指关节各 1 个自由度，5 个手指总共 16 个自由度。

3. 灵巧手驱动系统的设计

目前灵巧手的常见驱动器主要有液压驱动、气压驱动和电机驱动以及其他新型的驱动器。由于电机驱动具有噪声小、反应迅速、控制方便、可靠性高和成本合理，易于实现精确运动的优点，在负载小、操作力不大时，相对于液压和气压驱动有较大的优越性，故所设计的灵巧手采用步进电机驱动。若手指各关节独立驱动，势必增加手指的体积与重量，从而使得控制系统复杂，控制难度及控制要求增高。因此，在很多情况下，灵巧手都使用欠驱动机构。欠驱动机构是指独立驱动器的数目少于机构自由度数目的机构。欠驱动手的手指同样具有多个自由度，但由于手指机构中的可变约束使得手指在工作时只能释放出 1 个自由度，每个欠驱动手指采用一个驱动就可以实现对物体的自适应抓取。

4. 灵巧手各手指结构设计

人手的5个手指在抓取过程中的作用并不是相同的,其中拇指、食指、中指起主要作用,出力较大;无名指和小指多用于灵巧操作,出力较小,这也是很多假手可以仅有3~4个主动手指的原因。采用步进电机对拇指,食指和中指,无名指和小指分别驱动。拇指、食指、中指实现主要的抓取功能,无名指、小指用于实现仿人的手指运动规律,使灵巧手在抓握时手指的运动规律更接近真手。灵巧手各手指运动范围及尺寸见表7.1和表7.2。

表 7.1 假手各个手指运动范围

名 称	内收/外展关节/ (°)	近指节/ (°)	中指节/ (°)	远指节/ (°)
拇指	0~90	0~45	0~90	0~90
食指	无	0~90	0~90	0~90
中指		0~90	0~90	0~90
无名指		0~90	0~90	0~90
小指		0~90	0~90	0~90

表 7.2 各指节的尺寸

名 称	近指节/mm	中指节/mm	远指节/mm
拇指	60	45	33
食指	60	45	33
中指	60	45	33
无名指	60	45	33
小指	60	45	33

(1) 除拇指外其余各手指的结构

为减少零件的数量和种类,提高机构的可靠性,采用模块化设计。除拇指外的其余四个手指,近指节、中指节长度不同外,其余结构完全相同,90%以上的零件可以互换,手指结构如图 7.21 所示。手指的弯曲采用绳驱动方式。驱动电机输出端安装带轮,腱的一端通过固定块与带轮固连,从带轮引出后,穿过近指节和中指节,另一端与远指节固连。腱采用直径 0.5mm 的钢丝制成,由于腱的路径不通过各指节的旋转中心,因而腱的张力对各关节产生弯曲力矩,驱动各关节向安装有腱的一侧转动。手指在弯曲后还可以自动伸直,原因是:在各关节轴处都安装有扭簧,当指节弯曲带动扭簧发生形变时,扭簧产生与各指节弯曲方向相反的力矩,从而保证各指节在弯曲过程中腱绳一直处于张紧状态,当腱绳在失去张紧力而放松时,手指回到初始的伸直状态。3 个关节处的扭簧刚度不同,以此实现各指节按照特定的顺序及规律转动。

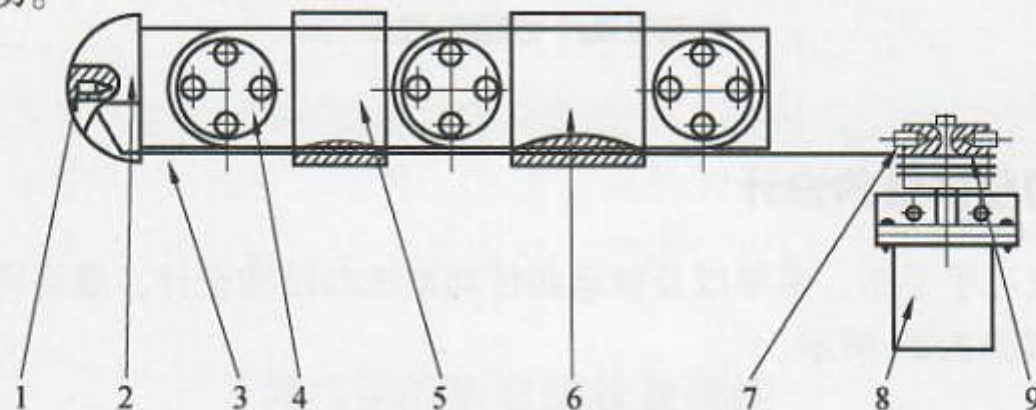
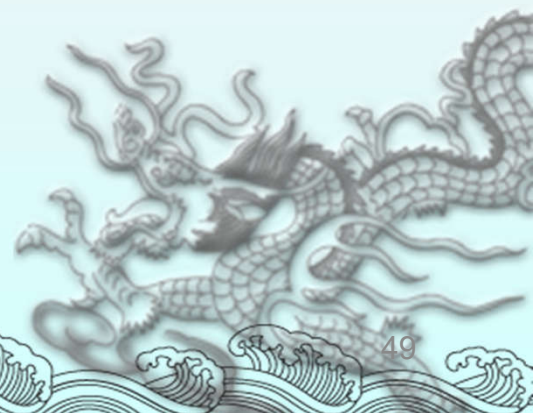


图 7.21 手指结构图

1—紧定螺钉；2—远指节；3—腱；4—端盖；5—中指节；6—近指节；7—紧定螺钉；8—电机；9—平头螺钉

(2) 灵巧手拇指结构的设计

人手拇指共有 3 个指节，5 个自由度，近指节包于掌中，具有屈曲、侧摆和绕自身轴线旋转 3 个自由度，中指节与远指节各有 1 个屈曲自由度。对灵巧手来说，拇指仅能弯曲或自由度过少会使拇指的运动规律与真实的人手运动差异较大，影响灵巧手的装饰和抓取效果；但如果在一个手指上配置过多的自由度，不仅会带来过大的体积和重量，还可能导致手指刚度过低而影响实际抓取效果。由于拇指与其余 4 指在结构上和运动形式上有较大差异，因此拇指采取单独设计。基于上述分析认识，结合实际操作需要，对拇指的结构与运动自由度加以取舍，将拇指运动分解成垂直于掌心的摆动和弯曲运动。弯曲运动由与四指类似的基、中、远 3 个关节实现，除指节尺寸外，结构与其余四指完全相同。为了协调垂直于掌心的摆动和弯曲运动，在近指关节采用一个“十”字形轴来传递两个方向上的运动和力。



5. 灵巧手的手掌结构设计

手掌部分的骨骼是由 5 根细长的掌骨和 8 块腕骨共同组成的，4 根掌骨在肌肉的驱动下，沿腕骨滑动，其中 4 根掌骨沿着腕骨滑动以及其与腕骨之间的滑动共同构成一个使手掌成弧度的自由度。为了便于控制与制作，在实际灵巧手的设计中，暂时不考虑这个手掌的自由度，主要是手指的传动与驱动在掌内部的空间设计，手指之间距离的确定，会涉及手掌的大小。较大尺寸的手掌，可以抓取相对较大的物体，而小的手掌，能较好抓取小的物体。在设计手掌尺寸时，可以和手指长度联系起来，现有典型灵巧手手指与手掌的比例为 $L_h : L_f = 0.4 : 0.6$ 。其中 L_h 为手指的距离， $L_f = 138\text{mm}$ 为手指食指的总长。计算可得，手掌尺寸及手指的距离 $L_h = 55 \sim 82\text{mm}$ ，这里取整数 80mm 。本设计将灵巧手除拇指之外的 4 个手指设计为相同长度，把手掌设计成阶梯形，如图 7.22 所示的形状。

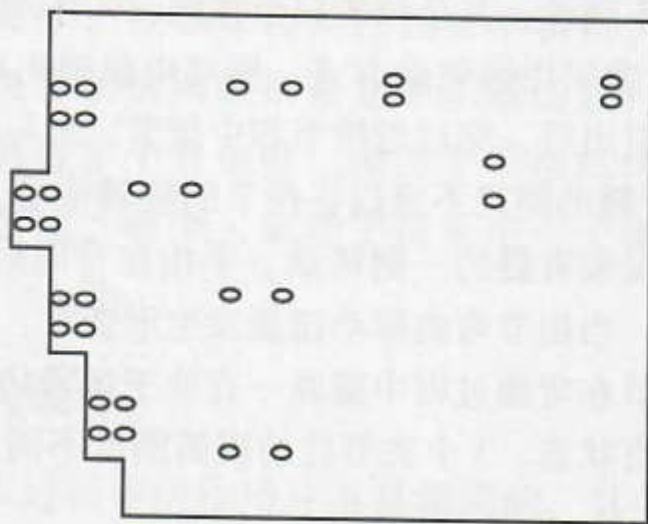


图 7.22 手掌外观图

6. 灵巧手的整体结构设计

通过对五指灵巧手手指、手掌以及驱动和传动系统的结构设计，最终可以得到五指灵巧手的整体结构，如图 7.23 所示。

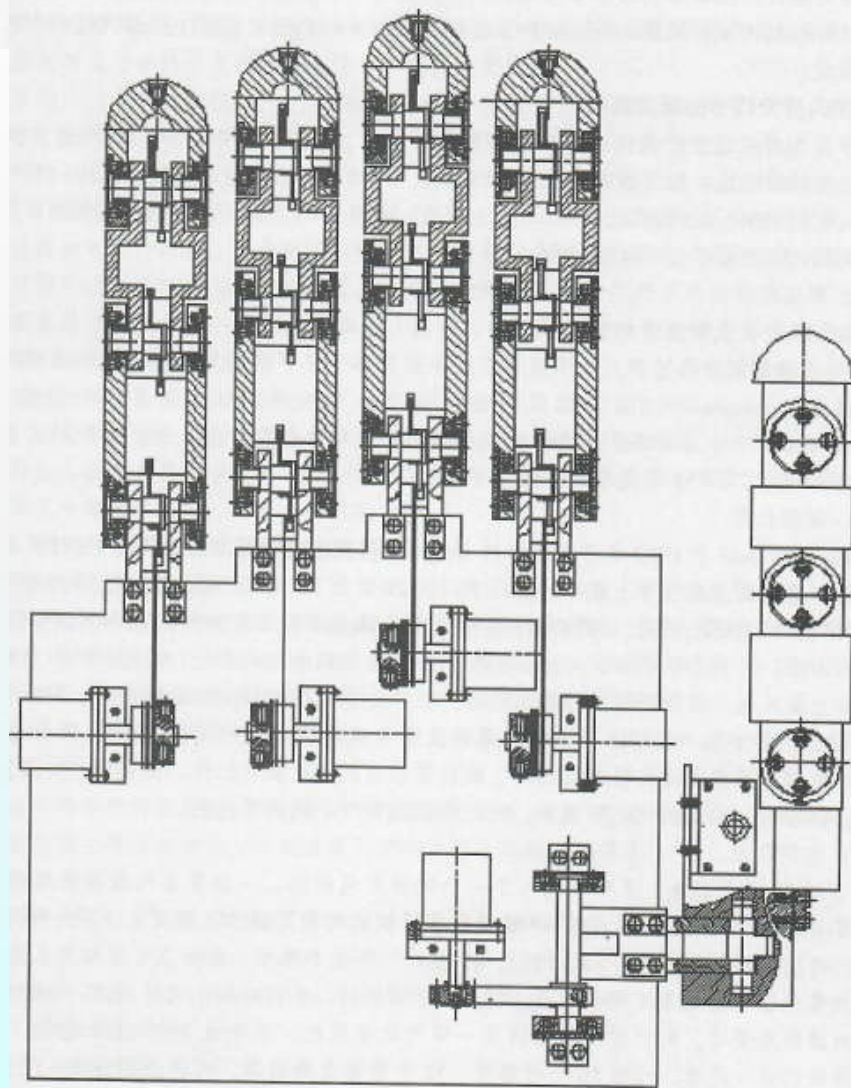


图 7.23 灵巧手的整体结构