

### 4.2.1 人手骨骼结构和关节运动分析

人手是一个多关节运动系统，由 27 块骨骼和 17 个关节共同组成。相邻骨骼间由关节连接，关节运动决定人手姿态，不同关节的运动规律不同。

人手骨骼结构如图 4.2 所示。大拇指由拇指远指节、拇指近指节、拇指掌骨等三块骨骼组成，连接相邻骨骼的关节依次是拇指指端关节、拇指指掌关节、拇指掌腕关节(CMC)。食指、中指、无名指和小拇指骨骼结构相似，由远指节、中指节、近指节组成，对应的关节分别为指端关节(DIP)、指间关节(PIP)、指掌关节(MCP)。

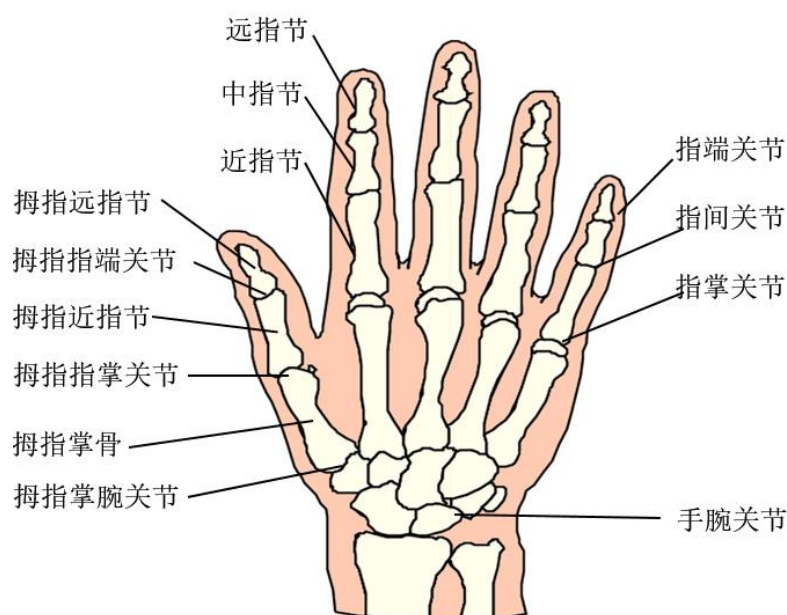


图 4-2 人手骨骼结构图

解剖学研究表明，骨骼、关节和肌肉共同决定人手运动。关节肌肉拉伸带动骨骼运动，人手主要关节运动包括：

(1)手指的屈伸运动，关节连接的两骨互相靠拢，两者之间夹角变小的运动为屈，夹角变大的运动为伸；

(2)手指的内收外展运动，将通过中指中轴的假想线作为基准线，手指向基准线靠拢的运动叫做内收，远离的运动叫做外展；

(3)手腕的俯仰角（pitch）、偏航角（yaw）、翻滚角（roll）运动。

根据人手运动规律，指端关节、指间关节仅有屈/伸运动，指掌关节和拇指掌腕关节既有屈伸运动又有内收外展运动。拇指掌腕关节有时候也被认为有三种运动[i]。

4.2.2 人手运动学模型和观测模型构建

人手运动学模型建模手部关节运动规律，观测模型建模手部外观，两者互相联系、互相影响，共同决定 3D 手势建模的准确性和复杂性。传统的 3D 手部模型要么过于复杂，如三角网格模型，导致难以设计高效的目标函数；要么过于简陋，如球模型，不能很好地近似人手外观。为克服这些问题，课题设计圆柱体-长方体人手几何模型，在复杂性与准确性之间取得很好的折衷。同时引入运动学约束，减少手势参数，降低优化难度。

(1)人手运动学模型构建

由于手部结构的复杂性，对手运动建模时需要视情况进行简化：(1)拇指较其余四指少一个指节，但拇指掌骨参与手势运动，导致拇指运动学结构复杂，作为简化，忽略拇指手腕关节的运动；(2)连接掌骨与腕骨的关节运动带动手掌发生弧度运动，但对手掌运动建模复杂性过高，得不偿失，因此简化整个手掌为刚体。这样，课题建立的人手运动学模型共有 25 个自由度，具体分布见表 4-1，同时表中给出了各自由度的取值范围。

为进一步简化，课题在人手运动建模中引入一项将运动学约束：手在不受外力干扰时，除大拇指外的四指，指端关节的弯曲角度是指间关节弯曲角度的 2/3。这样，25 个自由度的手模可以被 21 个手势参数所表示。最终构建的人手运动学模型如图 4-3(a)所示。

表 4-1 人手自由度分布

手指	关节名称	自由度数	运动方式	角度范围/°
拇指	指端关节	1	屈伸	0~90
	指掌关节	2	屈伸	0~90
			内收外展	-90~0
食指	指端关节	1	屈伸	0~80
	指间关节	1	屈伸	0~120
	指掌关节	2	屈伸	0~90
			内收外展	-30~0
中指	指端关节	1	屈伸	0~80
	指间关节	1	屈伸	0~120
	指掌关节	2	屈伸	0~95
			内收外展	-5~5
无名指	指端关节	1	屈伸	0~80
	指间关节	1	屈伸	0~120
	指掌关节	2	屈伸	0~95

			内收外展	0~25
小拇指	指端关节	1	屈伸	0~80
	指间关节	1	屈伸	0~120
	指掌关节	2	屈伸	0~95
			内收外展	0~30
手腕	\	3	全局移动( $x$ 、 $y$ 、 $z$ )	\
	\	3	全局转动 $yaw$	-90~90
			全局转动 $pitch$	0~180
			全局转动 $roll$	-45~180

## (2)人手观测模型构建

为近似人手外观，课题使用两种基本 3D 几何原体构建手部观测模型，如图 4-3(b)所示。由于对手运动建模时忽略大拇指掌腕关节的运动，因此大拇指可视为仅包含两个指节。除拇指外的其余四指各 3 个指节，这样人手共 14 个指节，对于每个指节，运动时仅发生微小形变，简化为刚体，建模为一个标准的圆柱体，圆柱体的半径和高分别拟合指节粗细和长度。人手运动建模时，大拇指简化为一个刚体，但分析手部骨骼结构发现，食指、中指、无名指的指掌关节近似地在同一高度，而小拇指的指掌关节较低，因此为尽可能地符合真实手掌外观特点，手掌用两个长方体被建模，两个长方体相对位置固定，之间无相对运动。

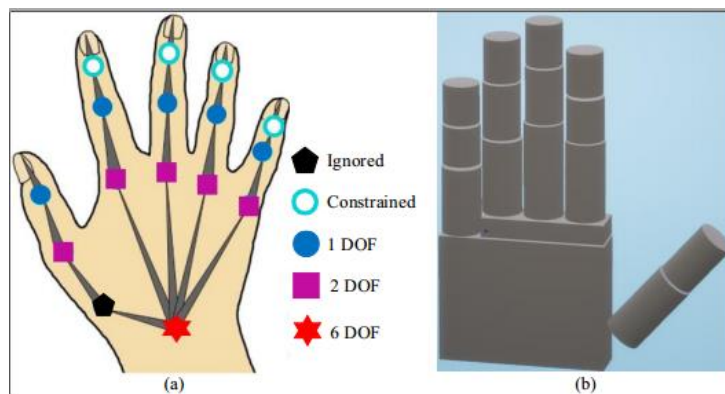


图 4-3 人手运动学模型和观测模型

### 4.2.3 手部运动变换

在建立的人手运动学模型和观测模型的基础上，执行手势对应为几何手模全局位置和关节角度的变化，手势跟踪的目标参数化为求解手势参数  $\theta$ 。为求解手势参数  $\theta$ ，需要建立层次坐标系，将手部运动变换分解为几何手模上各 3D 点的旋转、平移变换。

#### 4.2.3.1 层次坐标系建立

在层次结构模型中，上级对象的运动会被直到末端的所有下级对象复制，而下级对象的运动不影响上级对象。人手骨骼运动符合层次结构模型，对上级关节驱动下级关节运动，并一直向下传递，同时各关节也可独立运动。如手腕关节运动带动食指指掌关节运动，继而引起指间关节、指端关节运动；指端关节的自发性运动不会影响指间关节、指掌关节和手腕关节。

21 维的手势参数  $\theta$  即在层次坐标系中定义： $\theta = \{x, y, z, yaw, pitch, roll, mcp\_x_T, mcp\_z_T, dip_T, mcp\_x_I, mcp\_z_I, pip_I, mcp\_x_M, mcp\_z_M, pip_M, mcp\_x_R, mcp\_z_R, pip_R, mcp\_x_L, mcp\_z_L, pip_L\}$ 。其中， $\{x, y, z\}$  和  $\{yaw, pitch, roll\}$  分别为全局移动和全局转动；下标  $T$ 、 $I$ 、 $M$ 、 $R$ 、 $L$  分别代表大拇指、食指、中指、无名指和小拇指； $mcp$ 、 $pip$ 、 $dip$  分别代表指掌关节、指间关节和指端关节。层次坐标系的建立规则如下：

(1)全局绝对坐标系： $z$  轴指向与 Kinect 相机坐标系  $z$  轴指向相反，坐标原点、 $x$  轴指向、 $y$  轴指向与 Kinect 相机坐标系一致，是一个左手系。参数  $\{x, y, z\}$  为手腕在全局绝对坐标系中的坐标。

(2)初始手势状态：手腕位于坐标原点处，五指竖直并拢指向  $y$  轴正方向，掌心朝向  $z$  轴正方向。初始手势状态设置得合理有助于减小运动变换复杂度。手势参数  $\theta$  即当前手势相对于初始手势状态取值。

(3)局部坐标系：每个关节对应一个局部坐标系，局部坐标系也是左手坐标系，跟随对应关节的运动而运动。如图 4-4 所示，以食指指掌关节局部坐标系为例，坐标原点位于指掌关节处，向中指方向为  $x$  轴正方向，食指伸直状态下的指向为  $y$  轴正方向，根据左手定则确定  $z$  轴指向。

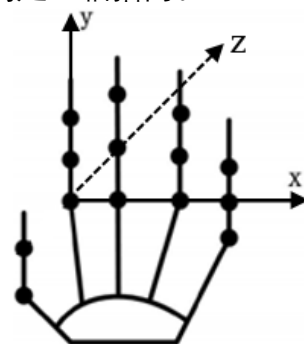


图 4-4 初始手势状态及局部坐标系

(4) $yaw, pitch, roll$ ；全局转动，采用静态欧拉角，“ $z$ - $x$ - $y$ ”顺规，分别表示绕手腕局部坐标系的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的旋转角度。

(5) $mcp\_x_I, mcp\_z_I$ ；食指指掌关节转动角度，采用静态欧拉角，“ $z$ - $x$ - $y$ ”顺规，分别表示绕食指指掌关节局部坐标系的  $x$  轴、 $z$  轴的旋转角度。

#### 4.2.3.2 运动变换的矩阵表示

##### (1) 旋转矩阵

旋转矩阵用于描述三维旋转运动：旋转矩阵  $R$  乘以点  $P$  的齐次坐标，得到旋转后的点  $P'$ ，即

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = R \bullet \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

绕  $x$  轴旋转  $\alpha$  对应的旋转矩阵  $R_x(\alpha)$  为：

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

绕  $y$  轴旋转  $\alpha$  对应的旋转矩阵  $R_y(\alpha)$  为：

$$R_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

绕  $z$  轴旋转  $\alpha$  对应的旋转矩阵  $R_z(\alpha)$  为：

$$R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

##### (2) 平移矩阵

平移矩阵用于描述三维平移运动：平移矩阵  $L$  乘以点  $P$  的齐次坐标，得到平移后的点  $P'$ ，即

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = L \bullet \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴正向分别平移  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ ，则对应的平移矩阵为：

$$L(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

### (3) 手部运动变换矩阵

手部运动变换矩阵描述手关节的旋转及平移运动：初始手势状态下几何手模上点  $P$ ，在手势参数  $\theta$  驱动下，运动到点  $P'$ ，变换矩阵  $T$  乘以点  $P$  的齐次坐标，得到变换后的点  $P'$ ，即

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = T(\theta) \bullet \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

位于几何手模不同部位上的点  $P$ ，对应的变换矩阵  $T(\theta)$  不同，具体地，以点  $P$  位于手掌、食指近指节、中指节、远指节进行比较。记初始手势状态下，食指指掌关节在手腕局部坐标系中的坐标为  $(j_x, j_y, j_z)$ 、食指指间关节在手腕局部坐标系中的坐标为  $(m_x, m_y, m_z)$ 、食指指端关节在手腕局部坐标系中的坐标为  $(q_x, q_y, q_z)$ ，坐标取值由构建的人手观测模型决定。记食指近指节长度为  $Ln$ ，中指节长度为  $Lm$ ，其中  $Ln = m_y - j_y$ ， $Lm = q_y - m_y$ 。手势参数  $\theta = \{x, y, z, yaw, pitch, roll, mcp\_xT, mcp\_zT, dipT, mcp\_xI, mcp\_zI, pipI, mcp\_xM, mcp\_zM, pipM, mcp\_xR, mcp\_zR, pipR, mcp\_xL, mcp\_zL, pipL\}$ 。

①点  $P$  位于手掌时：  $T(\theta) = T_8 \bullet T_5 \bullet T_6 \bullet T_7$ ，其中

$$T_5 = \begin{pmatrix} \cos pitch & 0 & \sin pitch & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin pitch & 0 & \cos pitch & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T_6 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos yaw & -\sin yaw & 0 \\ 0 & \sin yaw & \cos yaw & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_7 = \begin{pmatrix} \cos roll & -\sin roll & 0 & 0 \\ \sin roll & \cos roll & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T_8 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

②点  $P$  位于食指近指节时：  $T(\theta) = T_8 \bullet T_5 \bullet T_6 \bullet T_7 \bullet T_4 \bullet T_2 \bullet T_3 \bullet T_1$ ，其中

$$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -j_x \\ 0 & 1 & 0 & -j_y \\ 0 & 0 & 1 & -j_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos mcp\_xI & -\sin mcp\_xI & 0 \\ 0 & \sin mcp\_xI & \cos mcp\_xI & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_3 = \begin{pmatrix} \cos mcp\_zI & -\sin mcp\_zI & 0 & 0 \\ \sin mcp\_zI & \cos mcp\_zI & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & j_x \\ 0 & 1 & 0 & j_y \\ 0 & 0 & 1 & j_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

③点  $P$  位于食指中指节时：  $T(\theta) = T_8 \bullet T_5 \bullet T_6 \bullet T_7 \bullet T_4 \bullet T_2 \bullet T_3 \bullet P_3 \bullet P_2 \bullet P_1$ ，其

中

$$P_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -m_x \\ 0 & 1 & 0 & -m_y \\ 0 & 0 & 1 & -m_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad P_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos pip_I & -\sin pip_I & 0 \\ 0 & \sin pip_I & \cos pip_I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$P_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Ln \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

④点  $P$  位于食指远指节时:  $T(\theta) = T_8 \bullet T_5 \bullet T_6 \bullet T_7 \bullet T_4 \bullet T_2 \bullet T_3 \bullet P_3 \bullet P_2 \bullet N_3 \bullet N_2 \bullet N_I$ , 其中

$$N_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -q_x \\ 0 & 1 & 0 & -q_y \\ 0 & 0 & 1 & -q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad N_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos dip_I & -\sin dip_I & 0 \\ 0 & \sin dip_I & \cos dip_I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$N_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Lm \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$