

## 一种快速虚拟三维路径管道生成方法

### 技术领域

本发明属于机器人路径规划领域，特别涉及一种根据机器人三维可行路径生成三维安全管道的方法。可应用于机器人路径规划、机器人虚拟夹具、虚拟现实特殊管道生成、计算机辅助设计多形状管道设计。

### 背景技术

在计算机辅助设计 CAD 中，管道的生成一般是比较规则的管道，横截面边缘是可用方程表示的。

AUTO CAD 用的管道生成算法是 Sweep Surf，该算法通过给定一条路径和横截面的表示方程可以自动生成一条管道，该管道的横截面积是固定的，而且整个管道的形状是一致的，这种方法在机器人路径规划中不能生成自适应的管道。

在机器人估计规划领域中，需要生成的管道形状是不定的，而且不同管道之间需要拼接起来。当前的算法不能满足：1) 同一管道的横截面积大小不同。2) 不同管道不能进行光滑拼接。3) 管道不能用有限的单元进行表示并保存。

在机器人路径规划中，特别需要进行碰撞检测的机器人系统中，需要自适应灵活的分段规划管道，并对管道进行光滑拼接，而且管道可以被有限单元表示，以方便进行碰撞检测。这就需要设计一种高效灵活的管道生成方法。

### 发明内容

本发明的目的在于克服上述现有技术的缺点与不足，提供一种灵活而且容易实施的根据机器人三维可行路径生成三维安全管道的方法。

为达上述目的，本发明采用如下的技术方案：一种根据机器人三维可行路径生成三维安全管道的方法，包括如下步骤：

- S1、可行路径的离散化；
- S2、管道的离散化；
- S3、建立管道单元；
- S4、生成管道；
- S5、多元拼接；

所述步骤 S1 包括以下步骤:

S11、利用离散的方法对路径进行拟合,得到一系列的路径单元和离散点,路径单元长度  $\tau$  可以根据拟合的精确度进行定义。其中路径的形式是确定路径的起点和终点,路径形状可以动态调整。

所述步骤 S2 包括以下步骤:

S21、根据可行路径中的路径单元进行管道离散化,在每个路径单元中建立一个管道单元,该管道单元以路径单元为轴,包围路径单元。

所述步骤 S3 包括以下步骤:

S31、根据路径上的离散点、路径单元和管道半径,运用向量运算,得到管道横截面上的始点;

S32、对始点绕路径单元旋转,得到管道横截面上的其他点,构造正多边形;

S33、运用相邻两个管道横截面上的顶点生成三角片,构造成柱面,从而生成管道单元。

所述步骤 S4 包括以下步骤:

S41、根据路径起点和终点,利用生成的管道单元即可构造管道。因为步骤 S31 中需要用到路径上的离散点和路径单元,而路径单元是通过当前离散点和下一离散点确定的,所以最后一个路径单元不被使用。

所述步骤 S5 包括以下步骤:

S51、管道 pipe1 拼接管道 pipe2。首先根据 pipe1 对应的路径的终点和 pipe2 对应的路径的起点,得到一条路径,运用步骤 S4,生成管道 pipe3。

S52、根据管道 pipe1 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集和管道 pipe3 起点对应的管道横截面上的点集,无缝拼接管道 pipe1 和管道 pipe3。其中根据步骤 S41,最后一个路径单元不被使用,所以用管道 pipe1 终点前一个离散点。

S53、根据管道 pipe3 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集和管道 pipe2 起点对应的管道横截面上的点集,拼接管道 pipe3 和管道 pipe2。其中根据步骤 S41,最后一个路径单元不被使用,所以用管道 pipe3 终点前一个离散点。

本发明相对于现有技术具有如下的优点及效果:

1、设计生成的管道灵活,可以调节管道的光滑程度、管道口的形状、管道的半径和管道

的长度。

2、实现了复杂的三维空间中的不同管道口形状管道的拼接，符合机器人路径规划中开放环境下根据复杂三维路径生成三维安全管道的需求。

3、设计生成管道的算法高效易实施。

#### 附图说明

图 1 是可行路径离散化图；

图 2 是管道离散化图；

图 3 是生成管道横截面始点图；

图 4 是管道横截面相邻点夹角图；

图 5 是管道横截面上多边形顶点生产图；

图 6 是生成管道单元顶点编号图；

图 7 是管道单元生成效果图；

图 8 是利用管道单元生成管道图

图 9 是管道多元拼接顶点编号图；

图 10 是拼接效果图（未贴三角片）

图 11 是拼接效果图（已贴三角片）

#### 具体实施方式

下面结合实施例及附图对本发明作进一步详细的描述，但本发明的实施方式不限于此。

##### 实施例

本根据三维可行路径生成三维管道方法，包括如下步骤：

S1、可行路径的离散化；

S2、管道的离散化；

S3、建立管道单元；

S4、生成管道；

S5、多元拼接；

所述步骤 S1 包括以下步骤：

S11、如图 1 所示，利用离散的方法对路径进行拟合，得到一系列的路径单元和离散点，路径单元长度可以根据拟合的精确度进行定义。其中路径的形式是确定路径的起点和终点，路径形状可调整。

所述步骤 S2 包括以下步骤:

S21、如图 2 所示,根据可行路径中的路径单元进行管道离散化,在每个路径单元中建立一个管道单元,该管道单元以路径单元为轴,包围路径单元。

所述步骤 S3 包括以下步骤:

S31、根据路径上的离散点、路径单元和管道半径,运用向量运算,得到管道横截面上的始点。如图 3 所示,原点到路径单元起点 P 的向量为 $\vec{OP}$ ,当前路径单元的向量为 $\vec{L}$ ,利用向量 $\vec{OP}$ 和向量 $\vec{L}$ 的差乘,得到与向量 $\vec{OP}$ 和向量 $\vec{L}$ 都垂直的向量 $\vec{Q}$ :

$$\vec{Q} = \vec{OP} * \vec{L}$$

对向量 $\vec{Q}$ 单位化得到 $\vec{n_Q}$ ,管道横截面上的始点 S 的确定为从点 P 出发,沿着 $\vec{n_Q}$ 的方向取 r 长度:

$$\vec{S} = \vec{P} + \vec{n_Q} * r$$

S32、对始点绕路径单元旋转,得到管道横截面上的其他点,构造正多边形。多边形的构造在于多边形顶点的确定,如图 4 所示,假设需要构造 n 边形,那么两相邻顶点所对应的半径夹角为:

$$\theta = 2 * \pi / n$$

当确定了始点与中心轴后,第二个点的确定可以通过对始点绕中心轴旋转 $\theta$ 角度后得到。

下面给出绕任意轴单位方向旋转的变换矩阵。

给定任意单位轴  $q(q1,q2,q3)$ (向量),求向量  $p(x,y,z)$ (或点 p)绕 q 旋转 theta 角度的变换后的新向量  $p'$ (或点  $p'$ ): 构造旋转矩阵变换 T,则变换后的新向量  $p'$ (或点  $p'$ )为  $p' = p * T$ 。

其中,  $p' (x',y',z',1)$ 、 $p(x,y,z,1)$ 为向量  $p'$ 、 $p$  的 4D 齐次坐标表示,

$$T = \begin{bmatrix} t * q1 * q1 + c & t * q1 * q2 + s * q3 & t * q1 * q3 - s * q2 & 0 \\ t * q1 * q2 - s * q3 & t * q2 * q2 + c & t * q2 * q3 + s * q1 & 0 \\ t * q1 * q3 + s * q2 & t * q2 * q3 - s * q1 & t * q3 * q3 + c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中:  $c = \cos(\theta)$ ,  $s = \sin(\theta)$ ,  $t = 1 - c$ 。

上面给出的是绕任意轴旋转的变换矩阵推导:

设任意轴的始点为  $Q(Q_1, Q_2, Q_3)$ ，方向为  $q(q_1, q_2, q_3)$ ，则绕任意轴旋转的思想是先把需要旋转的点  $p$  平移到原点，然后在绕单位方向  $q(q_1, q_2, q_3)$  旋转  $\theta$ ，再进行反平移。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \cdot q_1 \cdot q_1 + c & t \cdot q_1 \cdot q_2 + s \cdot q_3 & t \cdot q_1 \cdot q_3 - s \cdot q_2 & 0 \\ t \cdot q_2 \cdot q_1 - s \cdot q_3 & t \cdot q_2 \cdot q_2 + c & t \cdot q_2 \cdot q_3 + s \cdot q_1 & 0 \\ t \cdot q_3 \cdot q_1 + s \cdot q_2 & t \cdot q_3 \cdot q_2 - s \cdot q_1 & t \cdot q_3 \cdot q_3 + c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Q_1 \\ -Q_2 \\ -Q_3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

如图 5 所示，对始点绕其所在的路径单元旋转，得到管道横截面上的其他点。按上述步骤进行了第二个顶点的计算后，后面的顶点只需要以前一个顶点为参考点绕中心轴旋转  $\theta$  角度后得到。

S33、运用相邻两个管道横截面上的顶点生成三角片，构造成柱面，从而生成管道单元。

运用步骤 S32 中得到的管道横截面上的点集，每相邻的两个管道横截面上的点集为一对，根据这些点生成三角片，从而生成管道。如图 6 所示，对于给定的两组顶点，我们按照规则进行编号。

每一组点按列进行排列，其中红色的代表该组点的始点。那么三角片的构造规则为相邻的三个点组成一个三角片： $\{1, 2, 3\} \{2, 3, 4\}, \dots, \{n-2, n-1, n\}$ 。

通过上面的构造规则可以得到的柱面效果如图 7 所示。

所述步骤 S4 包括以下步骤：

S41、如图 8 所示，根据路径起点和终点，利用生成的管道单元即可构造管道。因为步骤 S31 中需要用到路径上的离散点和路径单元，而路径单元是通过当前离散点和下一离散点确定的，所以最后一个路径单元不被使用。

步骤 S5 所述多元拼接，是指对不同管道口形状的管道进行拼接，使得一条管道可以由任意不同形状的管道根据需要进行自由组合形成。多元拼接的难点在于拼接口的过渡。如果采用一般的缝接，除了光滑度不够之外，有可能会影响到管道的使用，因为当两个管道的形状不同时，他们的横截面积也是不同的，缝接处就必须做好光滑的过渡。我们采用如下方法：

假设管道一的横截面形状为  $n_1$  边形，管道二的横截面形状为  $n_2$  边形，那么管道一与管道二的拼接处也需要一个多边形拼接管道，然后连接管道一和拼接管道，再连接拼接管道和管道二完成拼接。这里选择的拼接管道的多边形的边数是管道一与管道二多边形边数的最小公倍数：

$$n_3 = \text{gcd}(n_1, n_2)$$

其中  $\text{gcd}$  表示两个数的最小公倍数。

这样拼接的管道就可以做到无缝拼接，而且缝接处比较光滑。

当两个管道进行连接的时候，由于横截面的多边形形状不同，需要调整构造柱面三角片

的编号规则。由于拼接多边形的边数 $n_3$ 是管道一边数 $n_1$ 与管道二边数 $n_2$ 的公倍数，那么 $n_3$ 是可以整除 $n_1$ 与 $n_2$ 。在进行编号时，采取  $n$  对 1 的策略进行映射。其中 3 对 1 的编号示意图如图 9 所示。

同样三角片的构造规则为相邻的三个点组成一个三角片： $\{1, 2, 3\}$   $\{2, 3, 4\}$ , ...,  $\{n-2, n-1, n\}$ 。

具体实施包括以下步骤：

S51、管道 pipe1 拼接管道 pipe2。首先根据 pipe1 对应的路径的终点和 pipe2 对应的路径的起点，得到一条路径，运用步骤 S4，生成管道 pipe3。管道 pipe3 管道口的形状根据管道 pipe1 和管道 pipe2 的管道口形状确定，管道 pipe3 管道口的边数为管道 pipe1 和管道 pipe2 的管道口边数的最小公倍数。

S52、根据管道 pipe1 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集和管道 pipe3 起点对应的管道横截面上的点集，无缝连接管道 pipe1 和管道 pipe3。由步骤 S51 得知，管道 pipe3 起点对应的管道横截面上的点集个数是管道 pipe1 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集个数的整数倍，设为  $time$  倍。如图 9 所示，重用管道 pipe1 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集  $time$  倍，运用这些点，生成三角片，从而连接管道 pipe1 和管道 pipe3。

S53、根据管道 pipe3 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集和管道 pipe2 起点对应的管道横截面上的点集，拼接管道 pipe3 和管道 pipe2。由步骤 S41 得知，管道 pipe3 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集个数是管道 pipe2 起点对应的管道横截面上的点集个数的整数倍，设为  $time$  倍。如图 9 所示，重用管道 pipe2 起点对应的管道横截面上的点集  $time$  倍，运用这些点，生成三角片，从而拼接管道 pipe3 和管道 pipe2。

拼接效果如图 10、图 11 所示。

上述实施例为本发明较佳的实施方式，但本发明的实施方式并不受上述实施例的限制，其他的任何未背离本发明的精神实质与原理下所作的改变、修饰、替代、组合、简化，均应为等效的置换方式，都包含在本发明的保护范围之内。

1、一种根据三维可行路径生成三维管道方法，其特征在于，包括如下步骤：

S1、可行路径的离散化；

S2、管道的离散化；

S3、建立管道单元；

S4、生成管道；

S5、多元拼接；

2、根据权利要求 1 所述的根据三维可行路径生成三维管道方法，其特征在于，所述步骤 S1 包括以下步骤：

S11、利用离散的方法对路径进行拟合，得到一系列的路径单元和离散点，路径单元长度  $\tau$  可以根据拟合的精确度进行定义。其中路径的形式是确定路径的起点和终点，路径形状可以动态调整。如图 1 所示，经过可行路径离散化后，得到三维路径上的点集。

3、根据权利要求 1 所述的根据三维可行路径生成三维管道方法，其特征在于，所述步骤 S2 包括以下步骤：

S21、如图 2 所示，根据可行路径中的路径单元进行管道离散化,在每个路径单元中建立一个管道单元,该管道单元以路径单元为轴,包围路径单元。

4、根据权利要求 1 所述的根据三维可行路径生成三维管道方法，其特征在于，所述步骤 S3 包括以下步骤：

S31、根据路径上的离散点、路径单元和管道半径，运用向量运算，得到管道横截面上的始点。如图 3 所示，原点到路径单元起点 P 的向量为  $\vec{OP}$ ，当前路径单元的向量为  $\vec{L}$ ，利用向量  $\vec{OP}$  和向量  $\vec{L}$  的差乘，得到与向量  $\vec{OP}$  和向量  $\vec{L}$  都垂直的向量  $\vec{Q}$ ：

$$\vec{Q} = \vec{OP} * \vec{L}$$

对向量  $\vec{Q}$  单位化得到  $\vec{n_Q}$ ，管道横截面上的始点 S 的确定为从点 P 出发，沿着  $\vec{n_Q}$  的方向取 r 长度：



$$\vec{s} = \vec{p} + \vec{n}_Q * r$$

S32、对始点绕路径单元旋转，得到管道横截面上的其他点，构造正多边形。多边形的构造在于多边形顶点的确定，如图 4 所示，假设需要构造 n 边形，那么两相邻顶点所对应的半径夹角为：

$$\theta = 2 * \pi / n$$

当确定了始点与中心轴后，第二个点的确定可以通过对始点绕中心轴旋转 $\theta$ 角度后得到。

下面给出绕任意轴单位方向旋转的变换矩阵。

给定任意单位轴  $q(q_1, q_2, q_3)$ (向量), 求向量  $p(x, y, z)$ (或点  $p$ ) 绕  $q$  旋转  $\theta$  角度的变换后的新向量  $p'$ (或点  $p'$ )：构造旋转矩阵变换  $T$ , 则变换后的新向量  $p'$ (或点  $p'$ ) 为  $p' = p * T$ 。

其中， $p' (x', y', z', 1)$ 、 $p(x, y, z, 1)$  为向量  $p'$ 、 $p$  的 4D 齐次坐标表示，

$$T = \begin{bmatrix} t * q_1 * q_1 + c & t * q_1 * q_2 + s * q_3 & t * q_1 * q_3 - s * q_2 & 0 \\ t * q_1 * q_2 - s * q_3 & t * q_2 * q_2 + c & t * q_2 * q_3 + s * q_1 & 0 \\ t * q_1 * q_3 + s * q_2 & t * q_2 * q_3 - s * q_1 & t * q_3 * q_3 + c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中： $c = \cos(\theta)$ ,  $s = \sin(\theta)$ ,  $t = 1 - c$ 。

上面给出的是绕任意轴旋转的变换矩阵推导：

设任意轴的始点为  $Q (Q_1, Q_2, Q_3)$ ，方向为  $q(q_1, q_2, q_3)$ ，则绕任意轴旋转的思想是先把需要旋转的点  $p$  平移到原点，然后在绕单位方向  $q(q_1, q_2, q_3)$  旋转 $\theta$ ，再进行反平移。

$$T' = \begin{bmatrix} 1 & & & Q_1 \\ & 1 & & Q_2 \\ & & 1 & Q_3 \\ & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t * q_1 * q_1 + c & t * q_1 * q_2 + s * q_3 & t * q_1 * q_3 - s * q_2 & 0 \\ t * q_1 * q_2 - s * q_3 & t * q_2 * q_2 + c & t * q_2 * q_3 + s * q_1 & 0 \\ t * q_1 * q_3 + s * q_2 & t * q_2 * q_3 - s * q_1 & t * q_3 * q_3 + c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & & -Q_1 \\ & 1 & -Q_2 \\ & & 1 & -Q_3 \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

如图 5 所示，对始点绕其所在的路径单元旋转，得到管道横截面上的其他点。按上述步骤进行了第二个顶点的计算后，后面的顶点只需要以前一个顶点为参考点绕中心轴旋转 $\theta$ 角度后得到。

S33、运用相邻两个管道横截面上的顶点生成三角片，构造成柱面，从而生成管道单元。

运用步骤 S32 中得到的管道横截面上的点集，每相邻的两个管道横截面上的点集为一对，根据这些点生成三角片，从而生成管道。如图 6 所示，对于给定的两组顶点，我们按照规则进行编号。

每一组点按列进行排列，其中红色的代表该组点的始点。那么三角片的构造规则为相邻的三个点组成一个三角片： $\{1, 2, 3\} \{2, 3, 4\}, \dots, \{n-2, n-1, n\}$ 。

通过上面的构造规则可以得到的柱面效果如图 7 所示。



5、根据权利要求 1 所述的根据三维可行路径生成三维管道方法，其特征在于，所述步骤 S4 包括以下步骤：

S41、如图 8 所示，根据路径起点和终点，利用生成的管道单元即可构造管道。因为步骤 S31 中需要用到路径上的离散点和路径单元，而路径单元是通过当前离散点和下一离散点确定的，所以最后一个路径单元不被使用。

6、根据权利要求 1 所述的根据三维可行路径生成三维管道方法，其特征在于，所述步骤 S5 包括以下步骤：

S51、管道 pipe1 拼接管道 pipe2。首先根据 pipe1 对应的路径的终点和 pipe2 对应的路径的起点，得到一条路径，运用步骤 S4，生成管道 pipe3。管道 pipe3 管道口的形状根据管道 pipe1 和管道 pipe2 的管道口形状确定，管道 pipe3 管道口的边数为管道 pipe1 和管道 pipe2 的管道口边数的最小公倍数。

S52、根据管道 pipe1 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集和管道 pipe3 起点对应的管道横截面上的点集，无缝连接管道 pipe1 和管道 pipe3。由步骤 S51 得知，管道 pipe3 起点对应的管道横截面上的点集个数是管道 pipe1 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集个数的整数倍，设为 time 倍。如图 9 所示，重用管道 pipe1 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集 time 倍，运用这些点，生成三角片，从而连接管道 pipe1 和管道 pipe3。

S53、根据管道 pipe3 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集和管道 pipe2 起点对应的管道横截面上的点集，拼接管道 pipe3 和管道 pipe2。由步骤 S41 得知，管道 pipe3 终点前一个离散点对应的管道横截面上的点集个数是管道 pipe2 起点对应的管道横截面上的点集个数的整数倍，设为 time 倍。如图 9 所示，重用管道 pipe2 起点对应的管道横截面上的点集 time 倍，运用这些点，生成三角片，从而拼接管道 pipe3 和管道 pipe2。

拼接效果如图 10、图 11 所示。

摘要：

本发明提供了一种根据三维可行路径生成三维管道的方法，包括步骤：（1）可行路径的离散化，得到一系列的路径单元；（2）管道的离散化，根据每个路径单元建立管道单元；（3）建立管道单元，根据路径上的离散点和路径单元，通过向量运算，得到一系列点集，生成三角片从而生成管道单元；（4）拼接不同管道口的管道，对各种管道口形状的管道进行拼接。本发明可生成管道光滑程度、管道口形状、管道半径和管道长度可调节的三维管道，具有设计生成的管道灵活、实现了三维空间中的不同管道口管道的无缝拼接、设计生成管道的算法高效易于实施等优点。

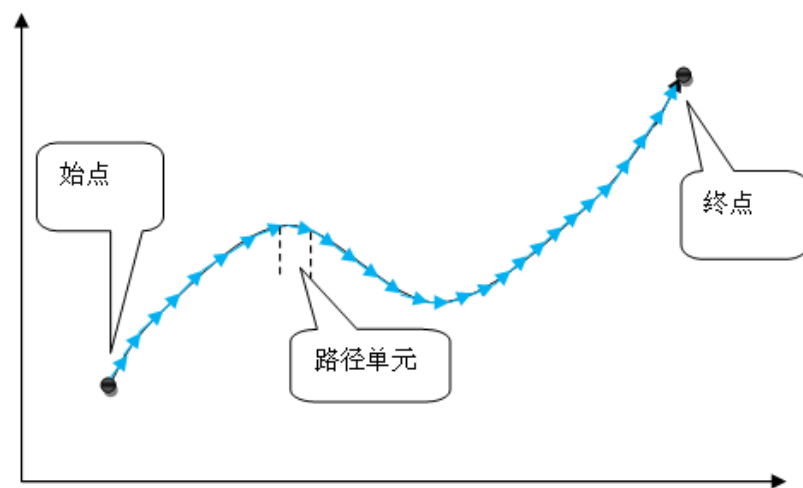


图 1

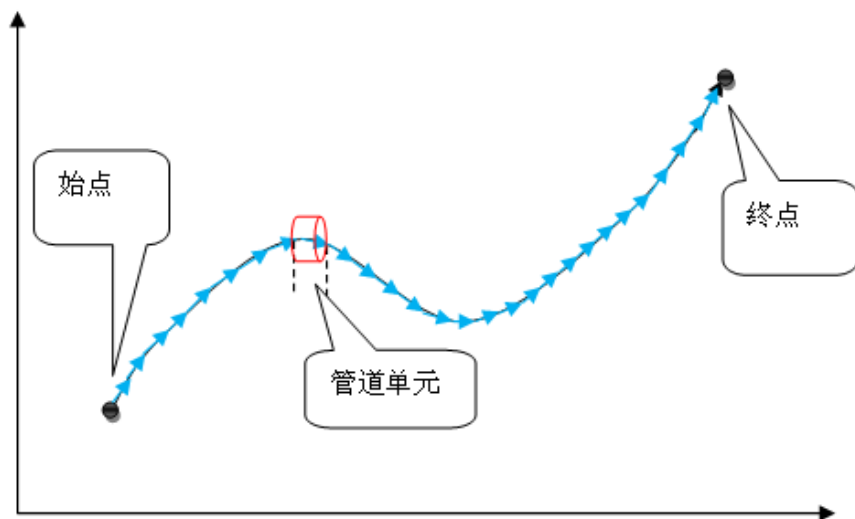


图 2

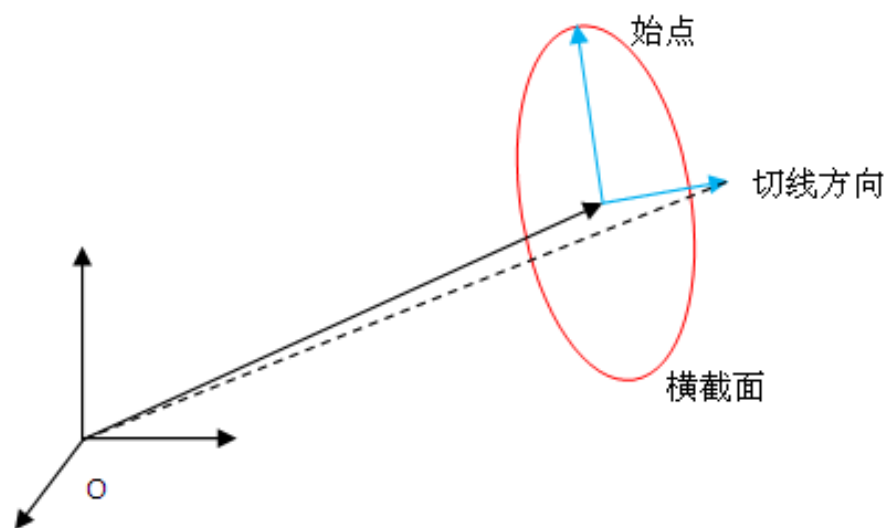


图 3

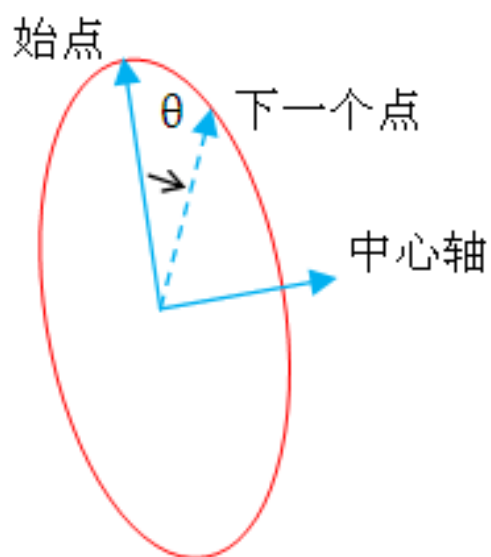


图 4

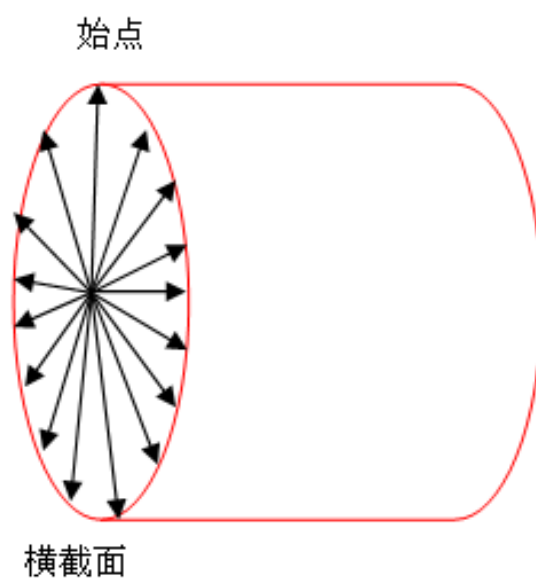


图 5

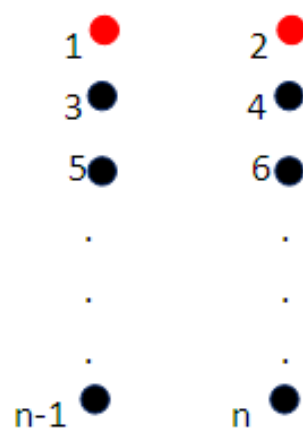


图 6

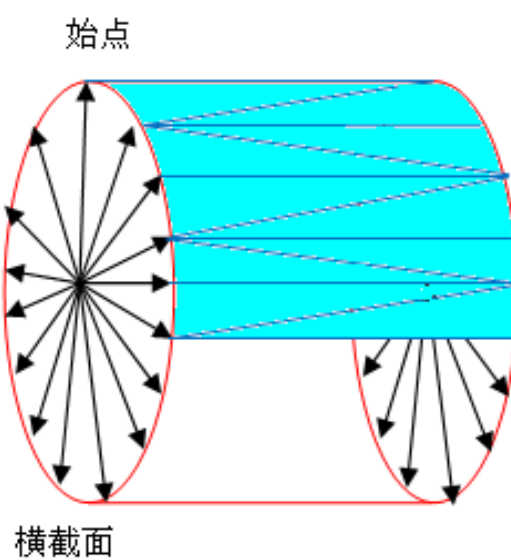


图 7

图 8

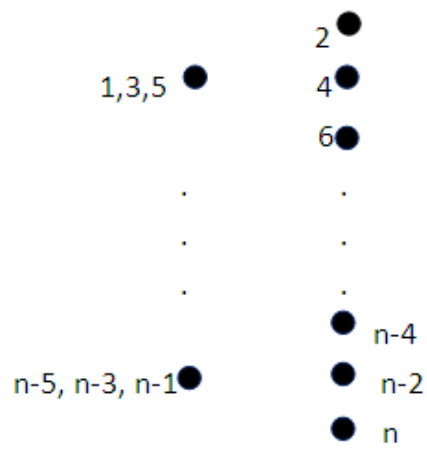


图 9

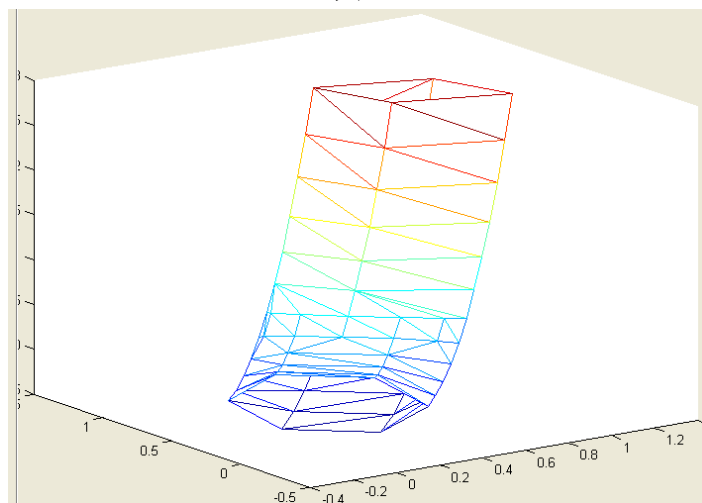


图 10

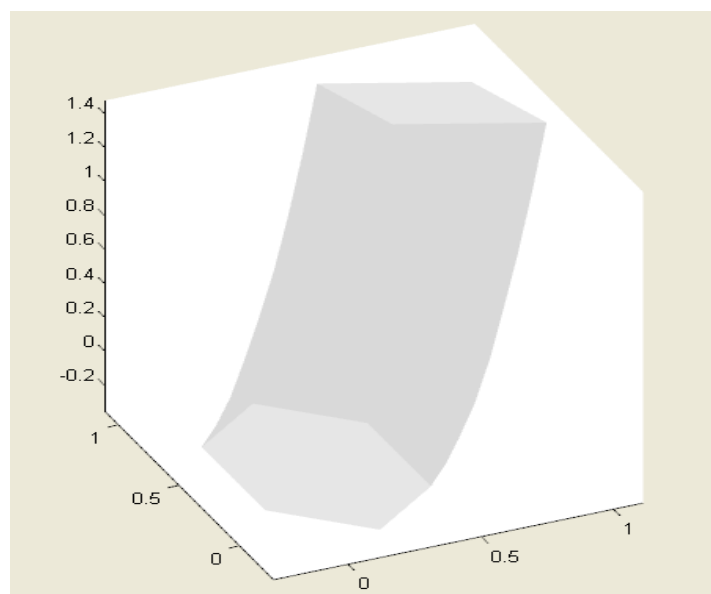


图 11

## 摘 要 附 图

---