

医用微型机器人的姿态可控性研究¹⁾

何斌¹ 陈鹰² 周银生³

¹(同济大学电信学院控制科学与工程系 上海 200092)

²(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 杭州 310027)

³(浙江大学机械设计研究所 杭州 310027)

(E-mail: bhee@yeah.net)

摘要 建立了新型医用微型机器人的系统动力学模型,利用有向图理论分析了医用微型机器人的姿态可控性,得到微型机器人的姿态可控的结论.同时,对机器人和环境参数的摄动对机器人的姿态的影响进行了研究,实验研究结果证明了上述理论.姿态可控性与微型机器人进入人体时人体的舒适性和安全性紧密相关.通过控制微型机器人的运行姿态,可以使人体得到良好的舒适程度.

关键词 医用微型机器人,姿态,可控性

中图分类号 TP273; TP13

Study on Pose Controllability of New Kind of Medical Micro Robot

HE Bin¹ CHEN Ying² ZHOU Yin-Sheng³

¹(Department of Control Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

²(State Key Laboratory of Fluid Power Control and Transmission, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

³(Institute of Mechanic Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(E-mail: bhee@yeah.net)

Abstract The dynamics models of the novel kind of medical micro robot for entering human body are studied. The pose controllability is analyzed with the directed graph method. Results show that the micro robot can be controlled completely when it runs in the human bodies. Affections of little changes of robot or running environment parameters to the pose controllability are studied with experiments. Relations between pose controllability and human comfort when the micro robot running into the human body are also discussed.

Key words Medical micro robot, pose, controllability

1) 国家自然科学基金(59805017)和国家“863”项目(863-512-9805-08)资助

Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China(59805017) and the National “863” Project(863-512-9805-08)

收稿日期 2002-07-02 收修改稿日期 2003-04-07

Received July 2, 2002; in revised form April 7, 2003

1 引言

微型机器人的致动原理是目前的研究热点^[1~3],周银生提出了一种新型的微型机器人驱动机构^[4],这种微型机器人特别适合进入人体.文献[5,6]对微型机器人的运行速度进行了研究.当机器人进入人体时,安全性、可靠性、人体的舒适性程度与机器人运行的姿态可控性有关.这种微型机器人进入人体时运行在一复杂的非结构化的流体环境中,这对控制微型机器人提出了较高的要求.微型机器人的动力学分析和姿态可控性研究十分必要.

此种微型机器人能够在充满液体的弯曲的微型管道内运行.当它在充满液体的微型管道内运行时,在它的周围会自动形成一层液体动压润滑膜,此润滑膜能避免它与管道壁发生直接接触,从而避免对人体的伤害.此种微型机器人能以较快速度在管内悬浮运行,特别适用于进入人体内腔和血管.

图 1 画出了微型机器人的驱动机构.它由一个带右螺旋槽的圆柱形微电机、一个带左螺旋槽的圆柱体和一个柔性联轴器构成.当正向接通微电机电源时,带左螺旋槽的圆柱体正转,带右螺旋槽的微电机外壳反转,和管道形成楔形油膜,从而产生轴向的摩擦驱动力,两者产生的轴向摩擦牵引力方向相同,带动微型机器人前进;当反向接通微电机电源时,则使微型机器人后退.微电机和圆柱体之间采用柔性联轴器联接可使微型机器人能在弯曲的管道内运行.

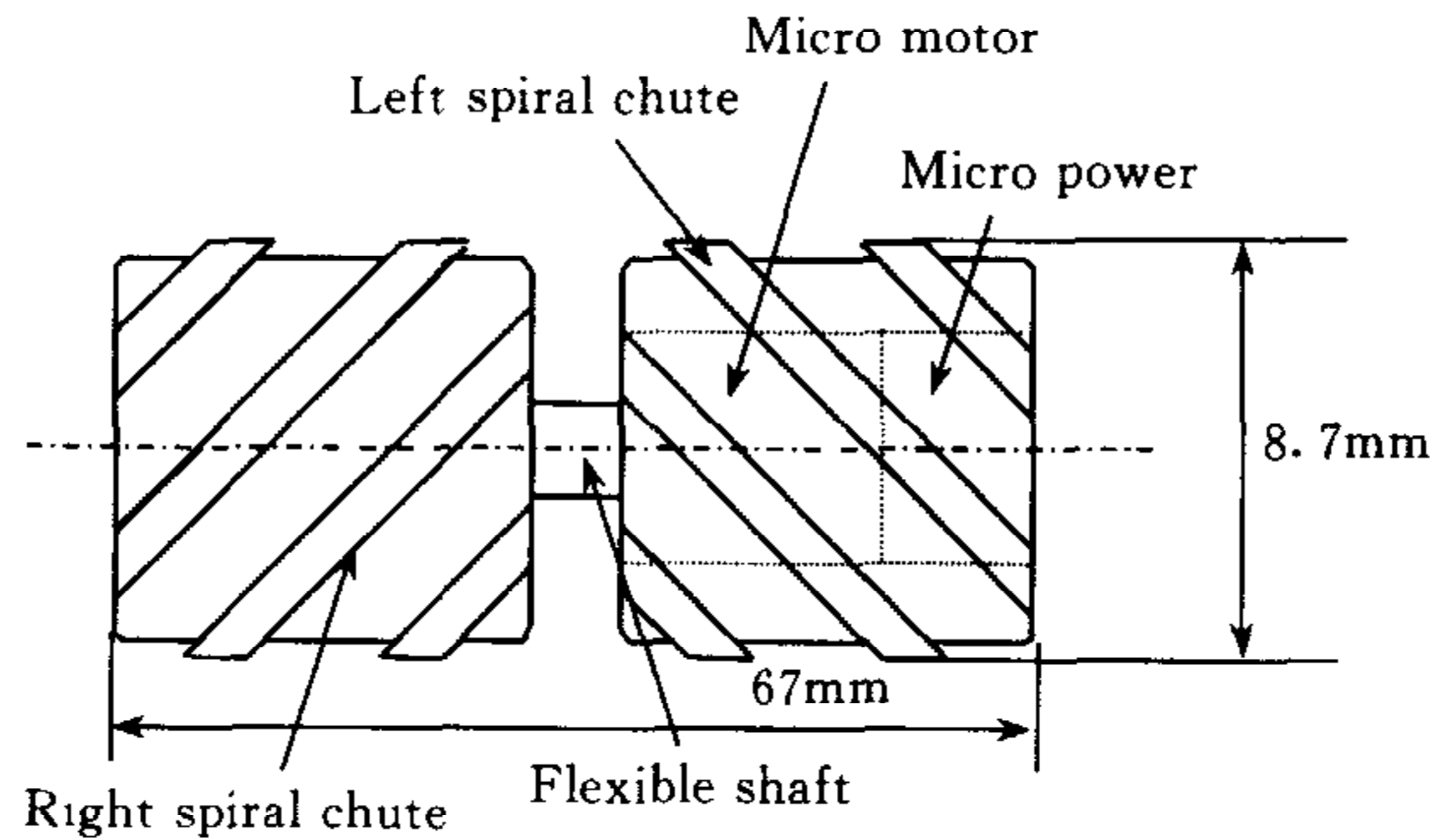


图 1 微型机器人的驱动机构
Fig. 1 Drive structure of micro robot

本文首先利用有限方法对微型机器人环境进行建模和求解的结果,建立微型机器人系统动力学模型;其次利用能控性理论和有向图理论对微型机器人的姿态可控性进行了研究,并研究了参数摄动条件下的姿态可控性问题,进行实验验证.论文最后对计算和实验结果进行了讨论.

2 微型机器人系统动力学模型

首先要建立微型机器人的受力模型,由于微型机器人工作在粘性液体的环境中,利用 ANSYS 有限元分析软件和 APDL 语言对整个流场进行建模,如图 2 所示,采用文献[6]中的边界条件,可得到整个流场的压力分布,如图 3 所示,即机器人的表面受力,具体的计算方法可参考文献[5].

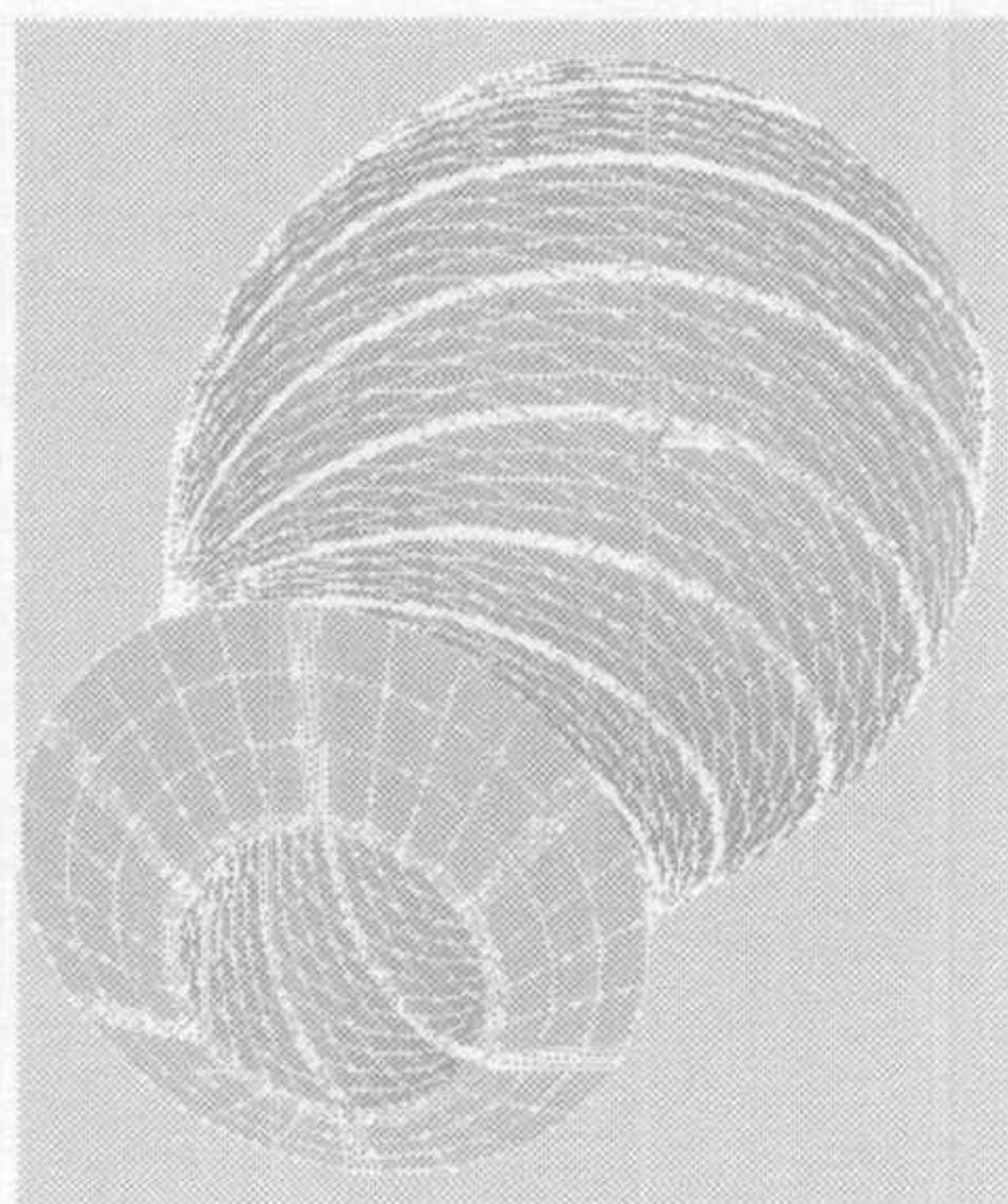


图 2 流体内的有限元

Fig. 2 Finite elements of fluid in intestinal

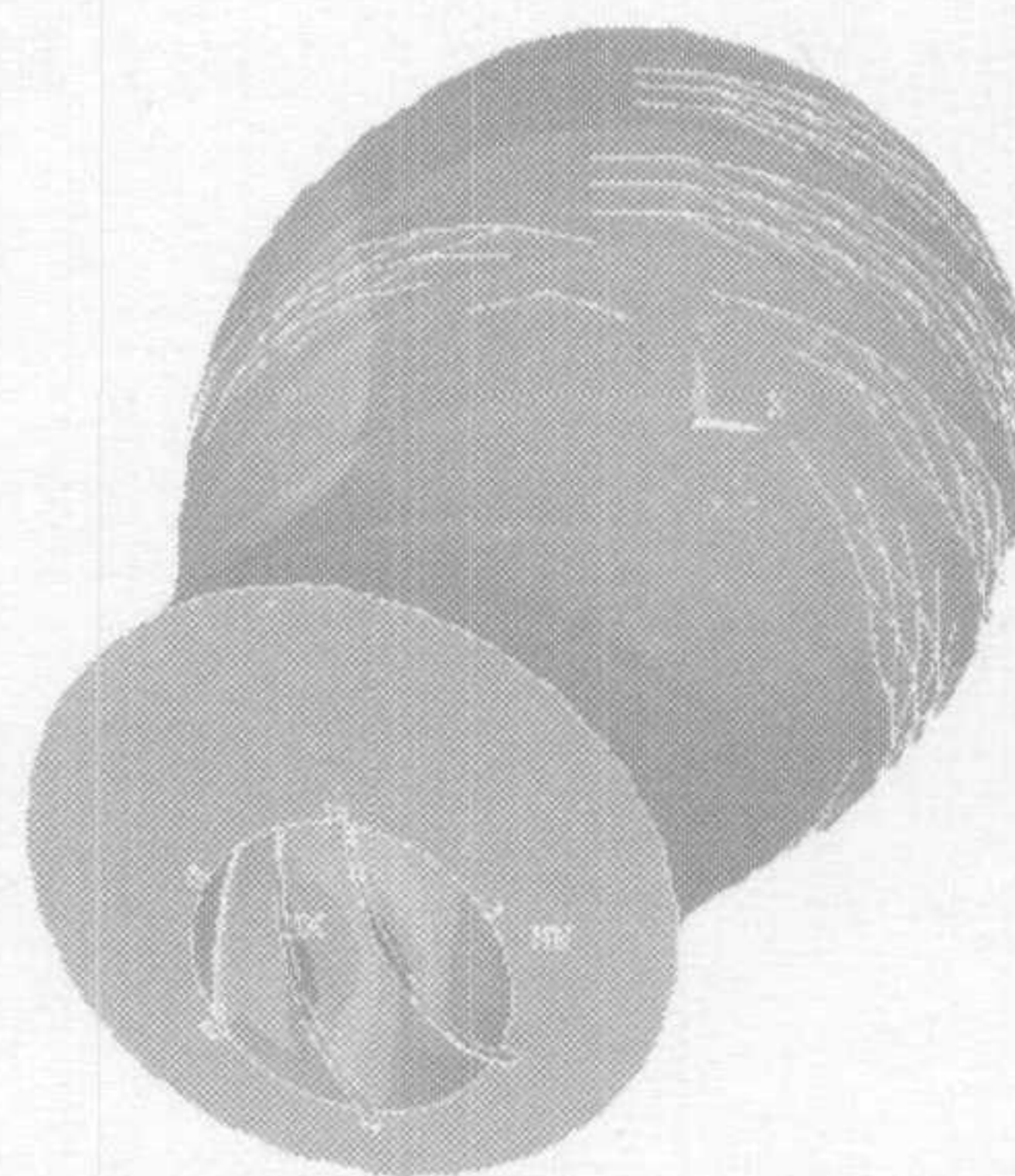


图 3 机器人表面的压力

Fig. 3 The pressure of fluid around robot

按照参考文献[5]的计算结果,在肠道中粘液的最大压力不超过 10^4 Pa,因此作用在机器人上的力很小,假设其不足引起机器人的变形,可以将机器人看成是刚体,利用有限元计算结果,可以建立机器人受力的分布参数模型.

假设机器人为轴对称结构,按 Newton-Eular 建模方法,将机器人分解如图 4 所示.

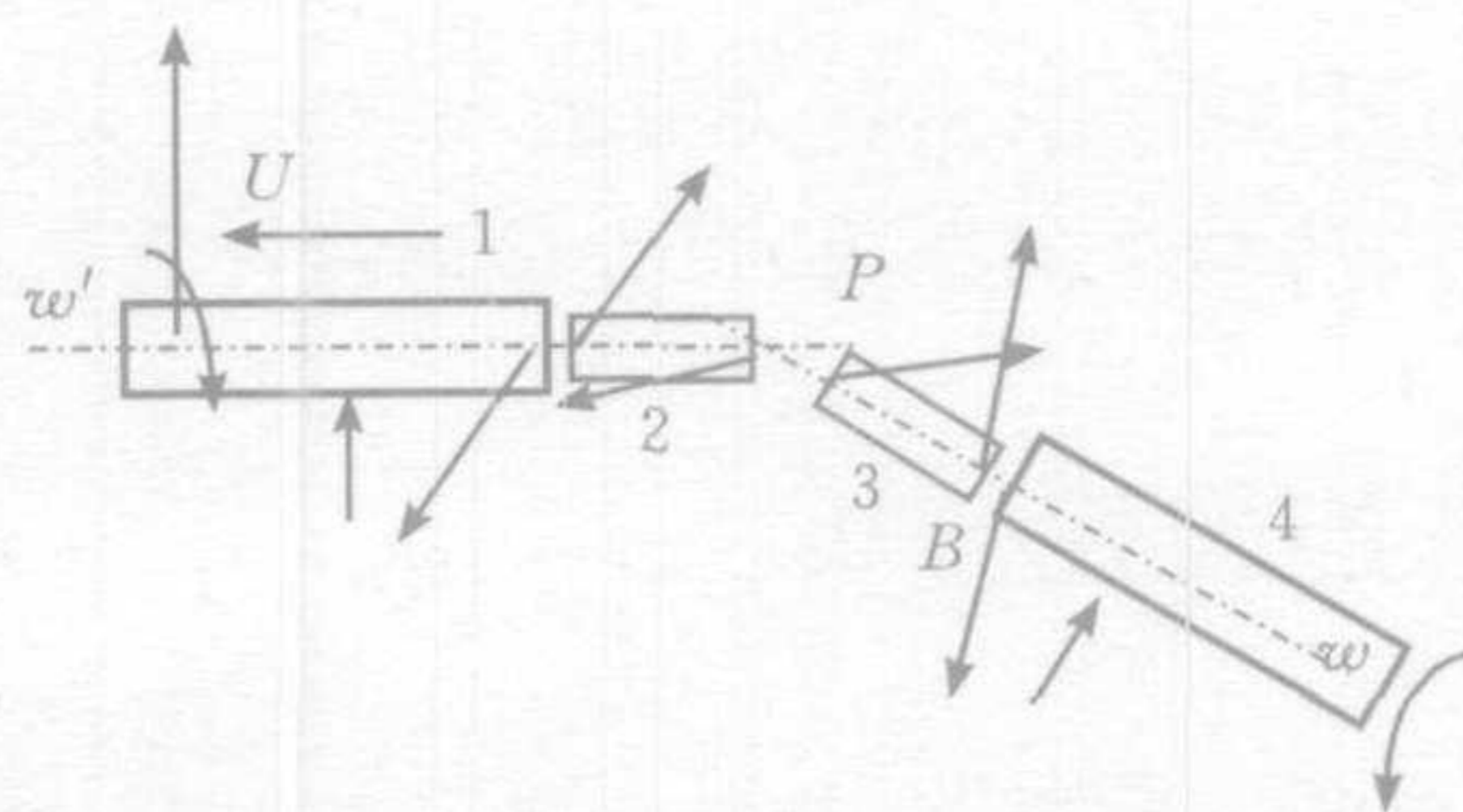


图 4 微型机器人上的动力学

Fig. 4 The dynamics of micro robot

考虑机器人分布受力模型,如图 5,取连杆 1 上微元 $d\xi_2 d\xi_1$,受到粘液的压力 p ,连体坐标系的中心 O' (可选择质心)到微元的矢径 r ,微元对机器人的受力的贡献为 $p d\xi_2 d\xi_1$,对力矩的贡献为 $p d\xi_2 d\xi_1 \times r$,在整个受压环面上积分得到

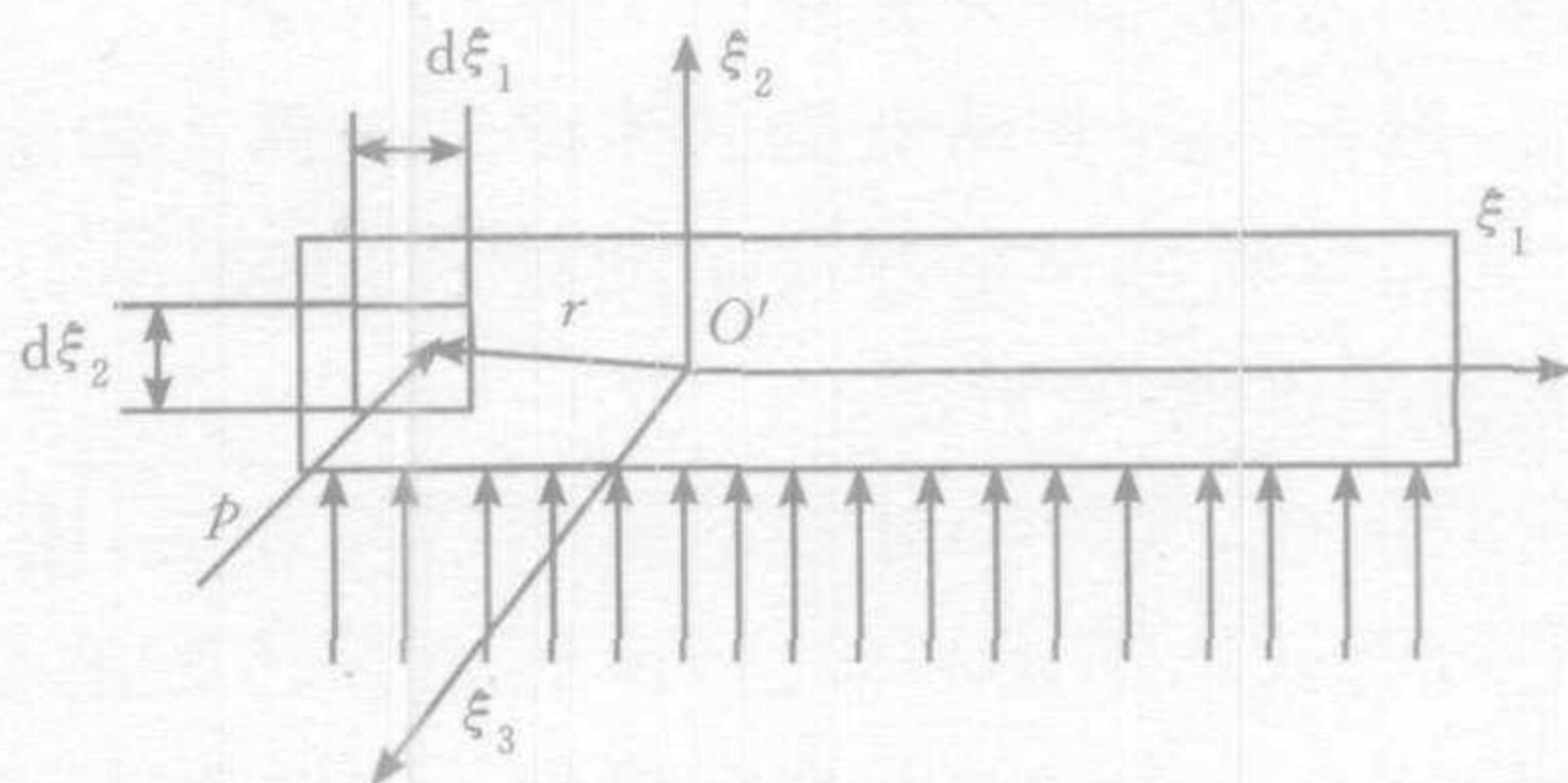


图 5 驱动机构上的力

Fig. 5 The forces on drive structure

$$M_{OL} = \oint \oint p d\xi_2 d\xi_1 \times r \tag{1}$$

$$F_{OL} = \oint \oint p d\xi_2 d\xi_1 \tag{2}$$

对微型机器人的地球引力产生的力和力矩,可以用同样的方法求得:

$$F_{OG} = \iiint \rho g d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 \quad (3)$$

$$M_{OG} = \iiint \rho g d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 \times r \quad (4)$$

若 O' 为质心, $M_G = 0$.

考虑连杆 1 和连杆 2, 设连杆 2 对连杆 1 作用有约束力 F_{21} 和约束力矩 M_{21} , 由于连杆 1 和连杆 2 之间存在绕 ξ_1 的自由度 ϕ , 故约束力矩 M_{21} 和 ξ_1 相互垂直:

$$\xi_1 \cdot M_{21} = 0 \quad (5)$$

根据刚体对质心的动量矩定理, 对于刚体 1, 可以写成(P_1 为驱动力矩):

$$\frac{d}{dt}(J_{O'1} \omega_{O'1}) = M_L + M_{21} + M_G + P_1 - M_1 a_{O'1} \quad (6)$$

同理, 由牛顿第二定律:

$$M_1 a_{O'1} = F_{21} + F_G + F_L \quad (7)$$

对式(7)两边点乘 ξ_1 有

$$\frac{d}{dt}(J_{O'1} \omega_{O'1}) \xi_1 = M_L \xi_1 + M_G \xi_1 + P_1 \xi_1 - M_1 a_{O'1} \quad (8)$$

同理, 可得到关节 2, 3, 4 的方程式, 由各关节的式(6), (7)和(8)组成方程组, 联系有限元程序计算的机器人各点受到的粘液的压力, 可直接通过计算机程序求解方程组.

3 微型机器人的姿态能控性分析

对于多参数复杂的微型机器人的控制, 被控参数和控制量之间的关系复杂, 对微型机器人的步态和姿态的控制关键在于找到各被控制量之间的约束关系.

由于我们微型机器人在肠道中依靠流体的摩擦牵引力带动其前进, 因而, 我们要研究在肠道中的各种力(摩擦牵引力、摩擦阻力矩和水平方向所产生的作用力)对机器人的作用. 这几种作用力可能使机器人在行进的过程中产生位置和形态的变化.

在机器人的动力学方程中机器人各运动参数(力、速度、加速度、位置等)和肠(管)道环境密切相关. 在以牵引力为驱动力的机器人其受力关系和运动方程受到各种条件的制约, 在机器人的几何参数固定以后, 机器人的驱动电机的速度和机器人的运动速度、产生的润滑油膜的厚度、产生的液体最大压力等满足一定的关系曲线, 轴向驱动力, 水平方向的偏移力和周向摩擦阻力矩也满足一定的关系曲线^[5,6].

任何控制系统都和信息的传递、变换和处理的过程密切相关; 要对严重非线性、复杂系统的功能结构和动态行为进行有效的描述和表达, 单纯依靠传统的分析数学和(或)统计数学方法是针对复杂系统不够的, 须将传统的常规控制理论方法和人工智能、计算智能技术有机的结合起来. 在线性系统理论, KalMan 等人提出并发展了能控性和能观性的判定方法, 得到了广泛的应用, 这种方法对于非线性系统和复杂系统效果不佳. 对于非线性系统和包含非线性系统的复杂系统, Lin, Shields 等人提出的应用图论和代数方法是有效果的^[7].

通过有向图的方法来研究各种受力和参数之间的关系和他们之间的信息传递规律, 从而来研究对于复杂环境下的机器人的受力和机器人的各运动参数和运动规律的可控性问题

对于机器人的运动分析和控制是必要的。

定义 1. 考虑一个控制系统, 在控制状态集合 Z 上, 若对于任何初始时刻 $t_0 \in T$, T 为系统的定义域, 有初始状态 $z(t_0) = z_0$, 若选状态 z_g 为目标状态解, 存在时刻 $t_f \in T$, 使得在 $[t_0, t_f]$ 上能够找到解法达到目标, 称此系统是一致弱能控的。

一般说来, 考虑下列方程:

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= F(X(t), U(t), t) \\ Y(t) &= G(X(t), U(t), t)\end{aligned}\quad (9)$$

其中 $X(t) \in R^n$ 是状态变量, $U(t) \in R^r$ 是控制变量, $Y(t) \in R^m$ 是输出变量。

一般地, 线性理论的做法是将上述方程在工作点上进行线性化, 得到线性化的状态方程:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \quad (10)$$

A, B 为线性化矩阵。人们在研究中发现, 这种线性化矩阵描述的动态系统, 其结构相对不变, 因此, 比如可以用信息传递矩阵来表示:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

定义 2. 在复杂的控制系统中对于状态变量 x_k , 若至少存在一条由控制集合中的某个变量 u_l 可达 x_k 的信息通道, 则称状态变量 x_k 是控制信息结构能达等。

将机器人系统分解, 考虑单个连杆的如下状态(这些状态决定了机器人的运行姿态):

$$X = \begin{bmatrix} \text{微电机转角 } \varphi \\ \text{微电机速度 } \dot{\varphi} \\ \text{机器人位移} \\ \text{机器人速度} \\ \text{机器人水平方向偏移 } l \\ \text{机器人水平方向速度 } v_k \\ \text{油膜最小厚度 } h \\ \text{油膜厚度变化率 } dh \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Y = [\text{油膜最大压力 } p] \quad (13)$$

$$U = [\text{微机电电压 } v] \quad (14)$$

利用上述关系, 可以得到下列的一些方程式, 由周向摩擦力矩平衡得到

$$f_1(x_1, x_2, \dot{x}_2, x_4, x_5, x_7, u_1) = 0 \quad (15)$$

线性化得到

$$J\dot{x}_2 = (F_1 + G_0)x_2 + K_1x_1 + G_1x_4 + G_2x_7 + G_3x_5 + K \quad (16)$$

G_0 表示周向摩擦力矩和电机转速之间的关系, G_1 表示周向摩擦力矩和运行速度之间的关系, G_2 表示周向摩擦力矩和油膜厚度之间的关系, G_3 表示周向摩擦力矩和机器人偏角之间的关系, 这些系数(在管道中)可由有限元程序求得。J 为转动惯量, F_1 为转速阻尼, K_1 为弹性系数。

由轴向受力平衡得到

$$f_2(x_2, x_3, \dot{x}_4, x_4, x_5, x_7) = 0 \quad (17)$$

我们要计算信息矩阵的各幂次包含的信息. 根据能控性理论和有向图理论, 邻接矩阵 P 和可达矩阵 M 之间的关系为(矩阵相乘为 BOOL 运算):

$$M_k = (1 + P)^k \quad (2 \leq k \leq m + n + r - 1) \quad (26)$$

事实上, 存在最小的整数($k < n$)使得

$$M_k = M_{k+1} = M_{k+2} = \dots \quad (27)$$

经过计算, 得到机器人的能控(可达)性矩阵如下

$$M_2 = \begin{matrix} & y_1 & \begin{bmatrix} 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & & 1 & 1 & 1 & & 1 & & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & & 1 & & 1 & 1 & 1 & & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & & 1 & & 1 & & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & & 1 & & 1 & & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (28)$$

$$M_3 = \begin{matrix} & y_1 & \begin{bmatrix} 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (29)$$

从 M_3 中得知, 从系统的控制输入到系统的其他状态变量都能找到一条信息通道, 系统各状态变量是完全可控的.

4 参数摄动对机器人能控性的影响

我们对式(29)作一分析, 从文献[5]中的结论得到机器人的运行速度, 转速和油膜厚度对机器人的偏角的变化影响较小. G_8, G_9, G_{11} 分别为一很小接近于零的数, 在机器人运行过程中, 在零点附近变化. 若(假设)这三项参数均为零, 结构的邻接矩阵为 P , 计算的得到的可达矩阵 M_3 表明从控制量到状态 x_5, x_6 找不到一条信息可达的通道, 即水平方向的偏移是不可控制的.

6 结束语

通过建立系统动力学模型,分析机器人的受力特性,进行线性化处理,利用有向图理论可以对各种机器人的运动参数的能控性进行分析,这种分析方法是可行的.从式(29)中可以得知一般状况下,提出的医用微型机器人的姿态是可以控制的.对机器人的运动速度进行了控制实验,结果表明,可以通过控制机器人的电机速度来控制机器人的运动速度^[6].

理论分析和实验研究表明,参数摄动条件下,机器人有可能发生震颤现象,姿态出现不可控制的情况,这在医用机器人的运行过程中是十分危险的,必须加以解决,由于影响姿态可控性的因素很多,而且和环境的复杂性有关,要解决这个问题,还有许多工作要做.

机器人的转速,运行速度和油膜厚度等机器人的运动特性或参数在机器人运行中十分关键,是有向图的“核”.油膜厚度可以保证机器人进入人体时人体的舒适性,而机器人运动的水平偏向则表示机器人的转向,当机器人运行的管道有分叉时(比如在血管中),要设计机器人的运动转向机构,通过本文的分析,通过设计一定的转向机构,在能够保证机器人姿态的可控性的前提下,就能够实现机器人转向的控制.

References

- 1 de Ambroggi F. PLIF: Piezo light intelligent flea new micro robot controlled by self-learning techniques. In: Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1997. 1767~1772
- 2 Hayashi I. Micro moving robots. In: Proceedings of the 1998 International Symposium on Micromechatronics and Human Science, Piscataway, NJ, USA: MHS, 1998. 41~45
- 3 Reynaerts D, JanPeirs, Hendrik. Shape memory micro-actuation for a gastro-intestinal intervention system. *Sensors and Actuators*, 1999, **77**:157~166
- 4 Zhou Yin-Sheng, Huo Hui-Nong, Gu Da-Qiang. A novel kind of micro robot. *Bulletin of Science*, 1999, **44**(20): 2210~2213
- 5 He Bin. Modelling of dynamics of a novel kind of micro robot and its behaviors control[Ph. D. dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University, Library of Zhejiang University, 2001
- 6 Zhou Yin-Sheng. A novel kind of micro robot. *Journal of Mechanic Engineering*, 2001, **19**(1):10~13
- 7 Luo Gong-Liang, Qing Shi-Ying. Intelligent Control. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Publication Press, 1997. 312~316

何 斌 工学博士,同济大学电信学院控制科学与工程系副研究员.主要研究方向为智能控制、机器人控制等.

(**HE Bin** Ph. D., associate professor at Tongji University. His research interests include intelligence control and robot control.)

陈 鹰 工学博士,浙江大学流体传动及控制国家重点实验室教授、博士生导师.研究方向为机电控制集成、流体传动及控制.

(**CHEN Ying** Ph. D., professor in the State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control. His research interests include mechatronic control integration and fluid power.)

周银生 工学博士,浙江大学机械设计研究所教授、博士生导师.

(**ZHOU Yin-Sheng** Ph. D., professor in Institute of the mechanic design at Zhejiang University.)