第 17 卷 第 5 期　　自 动 化 学 报　　Vol. 17, No. 5
1991 年 9 月　　ACTA AUTOMATICA SINICA　　Sept., 1991

机械臂的位置与力的混合控制方法[1)]

程　勉
(北京航空航天大学第七研究室)

摘　　要

本文研究关于机械臂的位置与力的混合控制方法。为了实现混合控制，首先应用一对被称为"任务规范投影算子"建立了机械臂混合控制的动态方程．在此基础上，提出了两种控制器的设计方法，一种是计算力矩方法控制器，另一种是动态补偿变结构控制器．后者不但具有更好的鲁棒性，并且可以分别调整运动与约束力的跟踪精度．

关键词： 机械臂的控制，适从控制，位置与力的混合控制，变结构控制器．

一、引　　言

近年来，研究机械臂的控制方法从为了保证其终端在自由空间跟踪给定的运动，发展到研究机械臂的适从控制，即当其终端在运动时受到周围环境的作用(约束)时，不仅要控制它使其跟踪给定的运动，而且还要控制它与环境相互作用．适从控制的概念是 Mason 首先提出的[1]，这以后关于适从控制主要发展了两种方法，即混合控制方法[2]与阻抗控制方法[3]．

Raibet 与 Craig[2] 于 1981 年提出了混合控制方法，旨在保证同时控制机械臂终端的运动与约束力．文献 [2] 中给出的混合控制方法实质是一种静态控制，因其完全没有考虑机械臂的动态方程．

Yoshikawa[4] 在 1986 年给出了一种基于计算力矩法的混合控制方法，可以保证闭环系统的加速度跟踪期望的加速度．

Khatib[5] 在 1987 年研究了在任务空间和关节空间中机器人动态方程的关系，并且给出适从控制中"任务规范广义矩阵 (Generalizied task specification matrices)"，进一步说明了在动态混合控制方法中，力和运动是在空间的不同方向中分别完成的．

McClamroch[6] 于 1986 年在假定约束方程对于 n-m 个广义坐标是完全可解的条件下，推出了动态混合控制的反馈控制律，可以保证机械臂终端的运动与约束力跟踪期望值的稳定性．

本文应用"任务规范投影算子"的概念[7]，研究机器人适从运动的动态方程解耦．文中给出了一组非线性坐标变换，得到了解耦的动态方程的最后形式，从而给出了两种反馈

本文于 1990 年 5 月 3 日收到．
1) 本文曾得到教委博士点基金资助．本文曾在 1990 年全国控制理论及应用年会上宣读．

控制律，其一是基于计算力矩法，另一则是变结构控制律。两种控制律均能保证机械臂对期望的运动规律与期望的约束力的跟踪的稳定性。

二、机械臂的动态方程与几何约束条件

研究一个有约束的机械臂系统，其动态方程可表示为如下[6]形式：

$$D(q)\ddot{q}+c(q,\dot{q})=u+f, \tag{1}$$

式中 $q\in \boldsymbol{R}^n$ 表示机械臂的广义坐标向量，通常 q 为其关节空间中的关节转角。$D(q)$：$\boldsymbol{R}^n\to \boldsymbol{R}^{n\times n}$ 为一描述系统惯性的正定对称阵。u，f 分别表示作用于系统的广义控制力与广义约束力。$c(q,\dot{q})$：$\boldsymbol{R}^n\times \boldsymbol{R}^n\to \boldsymbol{R}^n$ 是一非线性项，表示除 $D(q)\ddot{q}$ 以外的所有广义惯性力与重力之和，其中包括离心力与哥氏力。

设 $p\in \boldsymbol{R}^n$ 表示适用于描述机械臂终端的约束方程的一组广义坐标，即描述其终端受限的约束方程为

$$\tilde{F}(p)=0, \tag{2}$$

式中 $\tilde{F}$：$\boldsymbol{R}^n\to \boldsymbol{R}^m$ 被设为是连续的，且具有至少二阶偏导数，广义坐标 p 与广义坐标 q 的关系为

$$p=H(q), \tag{3}$$

此处假设 $p\in \boldsymbol{R}^n$，并假设式（3）中 p 与 q 是一一对应的。这里考虑的是具有无冗杆的机械臂，在结构非奇异的条件下，上述假设总可以在局部成立。将式（3）代入式(2)，可得

$$F(q)=\tilde{F}(H(q))=0 \tag{4}$$

及

$$J(q)\dot{q}=0,\ J(q)=\frac{\partial F(q)}{\partial q}, \tag{5}$$

式中 $J(q)\in \boldsymbol{R}^{m\times n}$，并假设

$$\mathrm{rank}J(q)=m, \tag{6}$$

式（1）中的广义约束力在理想约束的条件下可表示为

$$f=J^T(q)\lambda, \tag{7}$$

式中 $\lambda\in \boldsymbol{R}^m$，通常称其为拉格朗日乘子。这表明 n 维的广义力仅依赖于 m 维向量 λ。

式（4）定义了向量空间 $\boldsymbol{R}^n$ 中的集合

$$S:=\{q\in \boldsymbol{R}^n|F(q)=0\}. \tag{8}$$

通常式（8）所定义的 S 是向量空间 $\boldsymbol{R}^n$ 中的一非线性流形，今后所考虑的运动是被限制于其上的。这就是有约束的机械臂与自由的机械臂运动之间的本质区别，前者是在状态空间的降维流形上，因而其动力学模型是奇异的。

三、非线性坐标变换及混合控制的动态方程

定义 $q\in \boldsymbol{R}^n$ 空间中的两个投影算子如下[7]：

$$\tilde{P}(q)\triangleq D^{-1}(q)J^T(q)[J(q)D^{-1}(q)J^T(q)]^{-1}J(q)$$

$$= D^{-1}(q)\left(\frac{\partial F}{\partial q}\right)^T\left[\frac{\partial F}{\partial q}D^{-1}(q)\left(\frac{\partial F}{\partial q}\right)^T\right]^{-1}\frac{\partial F}{\partial q},$$

$$P(q) \triangleq I_n - \tilde{P}(q), \tag{9}$$

因 $D^{-1}(q)$ 为正定阵,故上述定义显然是适定的.

从式(9),式(5)可得

$$\begin{aligned} &P(q)\dot{q} = \dot{q},\ \tilde{P}(q)\dot{q} = 0, \\ &P(q)(D^{-1}(q)J^T(q)\lambda) = 0,\ \tilde{P}(q)(D^{-1}(q)J^T(q)\lambda) = D^{-1}(q)J^T(q)\lambda. \end{aligned} \tag{10}$$

借助于算子 $P(q)$ 与 $\tilde{P}(q)$ 可从机械臂的动态方程(1)得到

$$P(q)\ddot{q} = P(q)\tilde{u}, \tag{11}$$

$$\tilde{P}(q)\ddot{q} = \tilde{P}(q)\tilde{u} + D^{-1}(q)f, \tag{12}$$

$$\tilde{u} \triangleq D^{-1}(q)(u - c(q,\dot{q})).$$

定义一对可逆矩阵 $Q(q)$ 与 $Q^{-1}(q)$,使其满足

$$Q^{-1}(q)P(q)Q(q) = \begin{bmatrix} I_{n-m} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

因此有

$$Q^{-1}(q)\tilde{P}(q)Q(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I_m \end{bmatrix}. \tag{13}$$

从式(13)可知,变换阵 $Q(q)$ 的实质是在任一点 q 的切空间取一组新的基,即取 $P(q)$ 中的 $n-m$ 个独立列与 $\tilde{P}(q)$ 中的 m 个独立列作为新的基. 因此 $Q(q)$ 可以通过对 $P(q)$ 与 $\tilde{P}(q)$ 的独立列的搜索而得到. 如,设

$$Q^{-1} \triangleq \begin{bmatrix} Q_{\mathrm{I}}^{-1} \\ Q_{\mathrm{II}}^{-1} \end{bmatrix},\ Q_{\mathrm{I}}^{-1}:\ \boldsymbol{R}^n \to \boldsymbol{R}^{(n-m)\times n},$$

$$Q \triangleq [Q_1, Q_2],\ Q_1:\ \boldsymbol{R}^n \to \boldsymbol{R}^{n\times(n-m)}. \tag{14}$$

从(9),(13),(14)三式中不难得出

$$\begin{aligned} &Q_1Q_{\mathrm{I}}^{-1} = P(q),\ Q_2Q_{\mathrm{II}}^{-1} = \tilde{P}(q), \\ &Q_2 = D^{-1}(q)J^T(q)A^{-1},\ Q_{\mathrm{II}}^{-1} = J(q), \\ &A = J(q)D^{-1}(q)J^T(q). \end{aligned} \tag{15}$$

取一非线性变换

$$Q_{\mathrm{I}}^{-1}\dot{q} = \dot{z}_1,\ J\dot{q} = \dot{z}_2, \tag{16}$$

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{\mathrm{I}}^{-1} \\ J \end{bmatrix}\dot{q}, \tag{17}$$

不难证明变换阵(17)是可逆的,其逆变换为

$$\dot{q} = [Q_1, D^{-1}J^TA^{-1}]. \tag{18}$$

现在研究如何从式(17)得到的坐标变换. 式(17)给出了任一点 q 的切空间中的一组切向量基(基向量场). 但流形上任一组基向量场未必都是坐标基. 为此必须找到一个非线性变换将 $\dot{z}_1$ 变为坐标基. 从微分几何理论中可知,对于式(4)总能找到定义在原点的某一邻域 $\tilde{\Omega}$ 上的 $S_1(q)$: $\tilde{\Omega} \subset \boldsymbol{R}^n \to \boldsymbol{R}^{n-m}$,使得以下的非线性变换

$$z \triangleq \begin{bmatrix} s_1(q) \\ F(q) \end{bmatrix} \triangleq s(q)$$

的雅可比阵

$$\frac{\partial z}{\partial q}=\frac{\partial s}{\partial q}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial s_1}{\partial q}\\ J\end{bmatrix}$$

非奇异．比较上式与式 (17) 可知，$\dfrac{\partial s_1}{\partial q}\dot{q}$ 是流形 S (式 (8)) 上的一组坐标基．因此存在非奇异阵 $m(q):\Omega\subset\tilde{\Omega}\subset\boldsymbol{R}^n\to\boldsymbol{R}^{(n-m)\times(n-m)}$，使得

$$\frac{\partial s_1}{\partial q}=m(q)Q_1^{-1},\ (\text{当}\ n-m=1, m(q)=1).$$

于是得到了非线性变换的最后形式

$$z\triangleq\begin{bmatrix}z_1\\ z_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}s_1(q)\\ F(q)\end{bmatrix}=s(q),\tag{19}$$

$$\dot{z}=\begin{bmatrix}\dot{z}_1\\ \dot{z}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}m(q)\dot{\bar{z}}_1\\ \dot{z}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}m(q)Q_1^{-1}(q)\\ J(q)\end{bmatrix}\dot{q},\tag{20}$$

变换式 (19)，式 (20) 在原点的某一邻域 $\Omega\subset\boldsymbol{R}^n$ 中成立，可求出式 (20) 的逆变换为

$$\dot{q}=[Q_1m^{-1}, D^{-1}J^TA^{-1}]\dot{z}.\tag{21}$$

由式 (15)，式 (20) 有

$$P\dot{q}=Q_1m^{-1}\dot{z}_1,$$

$$P\ddot{q}+\dot{P}\dot{q}=Q_1m^{-1}\ddot{z}_1+\dot{Q}_1m^{-1}\dot{z}_1+Q_1\dot{m}^{-1}\dot{z}_1,\tag{22}$$

$$\dot{z}_2=J(P\dot{q}+\tilde{P}\dot{q})=JP\dot{q},\quad \ddot{z}_2=\dot{J}\tilde{P}\dot{q}+J\dot{\tilde{P}}\dot{q}+J\tilde{P}\ddot{q},\tag{23}$$

$$\left(\dot{m}^{-1}\triangleq\frac{d}{dt}(m^{-1}(q))\right).$$

又因为 $\tilde{u}=P\tilde{u}+\tilde{P}\tilde{u}$，如定义

$$\hat{u}\triangleq[\hat{u}_1^T, \hat{u}_2^T]^T=Q^{-1}\tilde{u},\ (\hat{u}_1\in\boldsymbol{R}^{n-m}),\tag{24}$$

可得

$$Q_1^{-1}P\tilde{u}=\hat{u}_1,\tag{25}$$

$$J\tilde{P}\tilde{u}=JQ_2Q_{11}^{-1}\tilde{u}=\hat{u}_2.\tag{26}$$

将 (22)—(26) 式代入方程 (11)，(12)，并注意到

$$z_2=F(q)=0,\ \dot{z}_2=\ddot{z}_2=0,\tag{27}$$

可以得到满足约束方程 (4) 的机械臂混合控制的动态方程

$$\ddot{z}_1=mQ_1^{-1}[\dot{P}Q_1m^{-1}-Q_1\dot{m}^{-1}-\dot{Q}_1m^{-1})\dot{z}_1]+m\hat{u}_1,\tag{28}$$

$$J\tilde{P}Q_1m^{-1}\dot{z}_1+\hat{u}_2+A\lambda=0.\tag{29}$$

式 (28)，(29) 表明，经过非线性变换以后，机械臂的动力学方程 (1) 可解耦为两组方程 (28) 与 (29) 式．前者是在降维流形 S 上的机械臂的运动微分方程，后者则是其约束力的方程．并且在该两组方程中控制 $\hat{u}\in\boldsymbol{R}^n$ 解耦为 $\hat{u}_1\in\boldsymbol{R}^{n-m}$ 用来控制终端的运动与 $\hat{u}_2\in\boldsymbol{R}^m$ 用来控制终端受环境的约束力．很显然，利用这两组方程来研究机械臂的适从控制必然会带来很大的方便．

四、计算力矩法的动态混合控制

如果选取

$$\hat{u}_1 = m^{-1}[\ddot{z}_1^d - K_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_1^d) - K_2(z_1 - z_1^d)] - Q_1^{-1}(\dot{P}Q_1 m^{-1} - Q_1\dot{m}^{-1} - \dot{Q}_1 m^{-1})\dot{z}_1, \tag{30}$$

$$\hat{u}_2 = -Q_{11}^{-1}\dot{\tilde{P}}Q_1 m^{-1}\dot{z}_1^d - A\lambda^d, \tag{31}$$

式中 K_1，$K_2 \in \boldsymbol{R}^{(n-m)\times(n-m)}$ 为正定的常阵，

$$z_1^d = s_1(q^d), \tag{32}$$

q^d 为满足约束(4)的机械臂的期望运动，$J^T\lambda^d = f^d$ 为给定的期望约束力.

$$z_2^d = F(q^d) = 0, \tag{33}$$

将式(30)，(31)代入式(28)，(29)，可得闭环系统的方程为

$$(\ddot{z}_1 - \ddot{z}_1^d) + K_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_1^d) + K_2(z_1 - z_1^d) = 0, \tag{34}$$

$$J\dot{\tilde{P}}Q_1 m^{-1}(\dot{z}_1 - \dot{z}_1^d) + A(\lambda - \lambda^d) = 0. \tag{35}$$

因此有

$$\lim_{t\to\infty}(z_1 - z_1^d) = 0, \tag{36}$$

$$\lim_{t\to\infty}(\lambda - \lambda^d) = 0. \tag{37}$$

将上式代入式(32)，可得

$$\lim_{t\to\infty}(s_1(q) - s_1(q^d)) = 0.$$

又因为 $F(q) = F(q^d) = 0$，因此有

$$\lim_{t\to\infty}(q - q^d) = 0. \tag{38}$$

利用式(20)，(25)，(26)，(30)，(31)，可算出控制 u

$$u = c - D\tilde{u} = c - D[P\ddot{q}^d + \hat{K}_1(\dot{q}^d - \dot{q}) + \hat{K}_2(s_1(q^d) - s_1(q)) + Q_1 m^{-1}\dot{m}Q_1^{-1}(\dot{q}^d - \dot{q}) + Q_1\dot{Q}_1^{-1}(\dot{q}^d - \dot{q}) + \tilde{P}\dot{P}\dot{q}^d] - J^T\lambda^d, \tag{39}$$

注意

$$P\dot{P}\dot{q} = P\tilde{P}\ddot{q} = 0,\quad P\dot{P}P = 0,$$

$$Q_1\dot{Q}_1^{-1} + \dot{Q}_1 Q_1^{-1} = \dot{P}, m^{-1}\dot{m} + \dot{m}^{-1}m = 0,$$

式中

$$\hat{K}_1 = Q_1 m^{-1}K_1 m Q_1^{-1}, \tag{40}$$

$$\hat{K}_2 = Q_1 m^{-1}K_2. \tag{41}$$

五、动态补偿变结构控制

变结构控制系统一般来说具有明显的优点，因为它不仅结构简单，而且具有较好的鲁棒性.

为了给机械臂动态方程(34)，(35)设计一个变结构控制器，首先选择动态切换函数如下:

$$s \triangleq \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = 0, \quad s_1 \in \boldsymbol{R}^{n-m}, \quad s_2 \in \boldsymbol{R}^m, \tag{42}$$

$$s_1 = m^{-1}\dot{z}_1 + y_1, \tag{43}$$

$$s_2 = -AK_3^{-1}\lambda + y_2, \tag{44}$$

式中 y_1，y_2 为动态补偿器的状态，并设计动态补偿器如下：

$$\dot{y}_1 = -m^{-1}\{K_2 z_1 + K_1\dot{z}_1 - \ddot{z}_1^d - K_1\dot{z}_1^d - K_2 z_1^d\}, \tag{45}$$

$$\dot{y}_2 = -A[(\lambda - \lambda^d) - K_3^{-1}\dot{\lambda}^d], \tag{46}$$

式中 K_1，$K_2 \in \boldsymbol{R}^{(n-m)\times(n-m)}$，$K_3 \in \boldsymbol{R}^{m\times m}$ 为任取的正定常阵．$z_1^d = z_1^d(t)$ 为给定的期望运动规律．$J^T\lambda^d = f^d$ 为给定的期望约束力．从式(42)—(46)可知系统进入滑动状态时有

$$\dot{s}_1 = m^{-1}\ddot{z}_1 + \dot{y}_1 = 0, \tag{47}$$

$$\dot{s}_2 = -AK_3^{-1}\dot{\lambda} + \dot{y}_2 = 0. \tag{48}$$

式(47)，式(48)便是在等效控制作用下，系统进入滑动模态时的运动规律．将(45)式，(46)式代入(47)式和(48)式，得到

$$\ddot{z}_1 - \ddot{z}_1^d + K_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_1^d) + K_2(z_1 - z_1^d) = 0, \tag{49}$$

$$(\dot{\lambda} - \dot{\lambda}^d) + K_3(\lambda - \lambda^d) = 0. \tag{50}$$

式(49)，(50)说明了滑动模态的运动规律保证了系统对期望的运动及约束力的跟踪，即

$$\lim_{t\to\infty}(q - q^d) = 0, \quad \lim_{t\to\infty}(\lambda - \lambda^d) = 0,$$

并且选择 K_1，K_2，K_3 可以使运动及约束力的跟踪精度达到给定要求．剩下的问题就是如何设计变结构控制律，使得系统满足到达条件．为此，选取切换函数的趋近率如下[8]：

$$\dot{s} = A_s s - K\operatorname{sgn}s, \tag{51}$$

式中

$$\begin{aligned} &A_s = \operatorname{diag}\{A_s^1, A_s^2\}, \quad K = \operatorname{diag}\{K^1, K^2\}, \\ &K^1 = \operatorname{diag}\{k_1^1, \cdots, k_{n-m}^1\}, K^2 = \operatorname{diag}\{k_1^2, \cdots, k_m^2\}, \ (k_i^j > 0, i \in \underline{n}, j \in \underline{2}), \\ &\operatorname{sgn}s \triangleq [\operatorname{sgn}s_1, \cdots, \operatorname{sgn}s_n]^T, \end{aligned} \tag{52}$$

$A_s^1 \in \boldsymbol{R}^{(n-m)\times(n-m)}$，$A_s^2 \in \boldsymbol{R}^{m\times m}$ 均为稳定的常阵．利用式(47)，(48)，(28)，(29)，(51)可计算出满足趋近率(51)时，其控制为

$$\begin{aligned} \hat{u} = \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \end{bmatrix} &= A_s s + K\operatorname{sgn}s - \dot{y} - \begin{bmatrix} 0 \\ A\lambda + K_3^{-1}\dot{\lambda} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} Q_1^{-1}\dot{P}Q_1 - \dot{m}^{-1}m - Q_1^{-1}\dot{Q}_1 \\ J\tilde{P}Q_1 \end{bmatrix} m^{-1}\dot{z}_1, \end{aligned} \tag{53}$$

$$(\dot{y} = [\dot{y}_1^T, \dot{y}_2^T]^T).$$

将(12)式，(24)式代入(53)式，可得

$$\begin{aligned} u = c - DQA_s s - DQK\operatorname{sgn}s + DQ\dot{y} - D(Q_1\dot{Q}_1^{-1} + Q_1\dot{m}^{-1}mQ_1^{-1} \\ + J^TA^{-1}J\tilde{P})\dot{q} + J^T\lambda + J^TA^{-1}K_3^{-1}\dot{\lambda}, \end{aligned} \tag{54}$$

式(54)便是动态反馈变结构控制律．

式(51)表明，切换函数 s 的变化速度为两项之和，其一为线性速度项，另一则是等速项．A_s 与 K 分别是两种速度的加权系数．因此，可适当地加大 A_s，并减小 K，这样既可保证到达过程的快速性，同时又能减小系统的抖振[8]．

在实际应用中，由于各种因素的影响，如切换滞后等，满足到达条件的实际系统通常只能到达：$\|s\| < \Delta$（Δ 为某一小的正数），但 В. И. Уткин 证明了在任意有限时间内，满足到达条件的变结构控制系统的运动规律，是以理想的滑动模态（式(49)，(50)）为其极限（当 $\Delta\to 0$）的.

六、结　论

为了对机械臂实现力与运动的混合控制，首先利用一对投影算子(9)导出了机械臂混合控制的动态方程(33)，(34). 在此基础上建立了两种混合控制的控制律，即：计算力矩法与动态补偿器变结构控制. 上述两种控制律均能保证约束力与运动对期望值的跟踪. 后者不但具有较好的鲁棒性，而且可以独立地改变约束力的跟踪精度.

参 考 文 献

[1] Mason, M. T., Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, **102**(1981).

[2] Raibert, M. H., Craig, J. J., Hybrid Position/Force Control of Manipulators, *Trans. ASME J. DSMC*, **103** (1981), 126—133.

[3] Hogan, N., Impedance Control, An Approach to Manipulation, *Trans. ASME J. DSMC*, **107**(1985), 1—24.

[4] Yoshikawa, T., Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators Description of Hand Constraints and Calculation of Joint Driving Force, *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1986, 1393—1398.

[5] Khatib, O., Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators, the Operational Space Formulation, *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1987.

[6] McClamroch, N. H., Wang, D., Feedback Stabilization and Tracking of Constainted Robots, *IEEE Trans.* **AC-33**(1988), 419—426.

[7] Cheng, M., An Approach to Hybrid Position/Force Control of Manipulators, 控制理论与应用，**8**(1991), No. 1.

[8] 高为炳、程勉，变结构控制系统的品质控制，控制与决策，6(1989)，3，1—7.

ON HYBRID POSITION/FORCE CONTROL OF MANIPULAOTRS

CHENG MIAN

(The Seventh Research Division, Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

In this paper, the problem of compliance control of a robot manipulator is studied. To realize hybrid control, the dynamic equations of mamipulators are set up by a couple of what is called "task specification project operators", and two design methods of hybrid position/force controller are proposed to guarantee accurate tracking of the desired motion and force: one is given by means of the computed torque method and the other is variable structure control. It is shown that robustness has been improved in the latter case.

Key words: Control of manipulators; compliance control; hybrid position/force control; variable structure control.