

文章编号:1006-7736(2009)03-0043-05

航向保持系统简捷非线性鲁棒控制*

关巍,张显库,王新屏

(大连海事大学 航海动态仿真与控制实验室,辽宁 大连 116026)

摘要:为克服船舶航向保持控制系统中传统 Backstepping 设计方法易产生静差及设计过程过于复杂等不足,提出一种把带积分项的 Backstepping 方法与闭环增益成形算法相结合的简捷非线性鲁棒控制器设计方案.理论分析和系统仿真结果均表明,通过该方案设计出的控制器可使船舶航向零误差渐近稳定,同时设计过程简捷,控制器结构简单且具有较强的鲁棒性.

关键词:船舶航向保持;简捷非线性鲁棒控制;积分 Backstepping;闭环增益成形

中图分类号:TP214.2;U666.153

文献标志码:A

Simple and direct nonlinear robust control of ship course-keeping

GUAN Wei, ZHANG Xian-ku, WANG Xin-ping

(Laboratory of Marine Simulation and Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: To overcome the disadvantages of the static error caused by the constant disturbance and the complexity of the controller design process with the traditional Backstepping method in the ship course-keeping systems, a simple and direct nonlinear robust control design scheme combining integral Backstepping with closed-loop gain shaping algorithm was developed. Theoretical analysis and simulations show that the proposed scheme can make systems asymptotically stable, which has a direct process, simple structure and strong robustness.

Key words: ship course-keeping; simple and direct nonlinear robust control; integral Backstepping; closed-loop gain shaping

0 引言

船舶航向保持系统控制是一个复杂而又十分重

要的船舶运动控制问题,其对船舶的安全性、经济性均有很大影响.实际的船舶运动过程具有大惯性、大滞后等特点,并且在航行过程中受风、浪、流等非线性因素的干扰,使船舶航向保持成为一个非线性控制问题. Backstepping 方法是近十几年发展的一种新型非线性控制器设计方案,并在解决非线性系统的控制问题中表现出很大的潜力^[1-4].文献[2]采用自适应 Backstepping 方法对船舶航向保持系统进行非线性控制器设计,取得了较好的控制效果.文献[3]加入积分项来改进控制器设计,改善了航向保持控制系统的性能.但上述方法设计过程较复杂,控制器参数较多且因缺乏物理意义使实际工程较难实现.文献[4]针对船舶航向保持系统设计了基于传统 Backstepping 方法的简捷非线性鲁棒控制器设计方案,简化了控制器的设计过程,增强了控制器的鲁棒性,但其未考虑海风扰动所引起的输入恒值干扰,致使系统出现静差而无法取得满意的控制效果.

针对船舶航向保持系统,本文提出一种把带积分项的 Backstepping 方法与闭环增益成形算法^[5]相结合的简捷非线性鲁棒控制策略,并从理论上证明该方法设计的控制器等同一个线性 PID 控制器级联一个可使被控系统的非线性部分对消的非线性补偿器,较传统 Backstepping 方法更为优越.

1 船舶运动非线性数学模型

在进行船舶航向保持控制器设计时,采用一阶线性 Nomoto 模型^[6]

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{K_0}{(1 + T_0 s)} \quad (1)$$

* 收稿日期:2009-03-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60504017);博士点基金资助项目(200801510002);国家重点基础研究发展计划(973计划)子资助项目(2009CB320805).

作者简介:关巍(1982-),男,辽宁鞍山人,博士研究生.E-mail:gwtxdy@163.com.

通信作者:张显库(1968-),男,辽宁辽阳人,教授,博士生导师.E-mail:zhangxk@dlmu.edu.cn.

或表示为

$$T_0 \dot{r} + r = K_0 \delta \quad (2)$$

其中: r 为艏摇角速率; δ 为船舶输入舵令角; K_0 为船舶的操纵性系数; T_0 为船舶的追随性时间指数. 船舶在实际运动过程中具有诸多非线性特点, 考虑船舶的大惯性和水动力等非线性因素, 式(2)中的 r 代之以 $K_0 H(r)$, 用以描述航向保持系统的非线性操纵特性, 其中

$$H(r) = ar + \beta r^3 \quad (3)$$

其中, a 和 β 为船舶非线性参数. 设 ψ 为艏向, 考虑到 $\dot{\psi} = r$, 则非线性船舶运动方程

$$\begin{cases} \dot{\psi} = r \\ \dot{r} = -\frac{K_0}{T_0}(ar + \beta r^3) + \frac{K_0}{T_0}\delta \end{cases} \quad (4)$$

设计船舶航向保持非线性控制律, 使船舶实际航向 ψ 跟随期望参考航向 ψ_r . 为设计需要, 系统航向跟踪误差定义为

$$e_r = \psi - \psi_r \quad (5)$$

令 $x_1 = \psi$, $x_2 = \dot{x}_1 = r = \dot{\psi}$, 则式(4)可转化为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_2) + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (6)$$

其中: $y \in R$ 为系统输出; $b = K_0/T_0$, $u = \delta$; $f(x_2) = -\frac{K_0}{T_0}(ax_2 + \beta x_2^3) = -b(ar + \beta r^3)$.

2 船舶航向保持简捷非线性鲁棒控制

2.1 带积分项的 Backstepping 设计

采用 Backstepping 方法对式(6)进行控制器设计, 使 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_r(t) = 0$.

第1步 定义系统跟踪误差变量 z_1 , 并设 σ 为虚拟控制量. 为在控制过程中改善系统的稳态性能, 在传统 Backstepping 控制器设计方法的基础上引入积分项 $\zeta^{[7]}$.

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = z_2 \\ z_1 = x_1 - \psi_r \\ z_2 = x_2 - \sigma \end{cases} \quad (7)$$

设第一个预选 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2$$

$$\dot{V}_1 = z_1(z_2 + \sigma - \dot{\psi}_r) \quad (8)$$

令虚拟控制量

$$\sigma = -c_1 z_1 + \dot{\psi}_r \quad (9)$$

其中, $c_1 > 0$ 为控制器设计参数. 将式(9)代入式(8)中可得

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (10)$$

第2步 设第2个预选 Lyapunov 函数

$$V_2 = V_1 + \frac{\lambda}{2} \zeta^2 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (11)$$

其中, λ 为大于0的常数.

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 + z_2(z_1 + \lambda \zeta + \dot{z}_2) \quad (12)$$

根据式(6)、(7)可推知

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 + z_2[z_1 + \lambda \zeta + f(x_2) + bu - \dot{\sigma}] \quad (13)$$

由式(13)可得系统状态反馈控制律为

$$u = \frac{1}{b}[-f(x_2) - \lambda \zeta + \dot{\sigma} - z_1 - c_2 z_2] \quad (14)$$

其中, $c_2 > 0$ 为控制器设计参数.

将式(14)代入式(13), 得

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 \leq 0$$

根据 Lyapunov 稳定性定理可知控制律式(14)可以使 z_2 子系统镇定. 同时由以上设计过程可知, 通过积分 Backstepping 方法设计控制器时, 系统的状态和控制变量是全局有界的, 各级子系统能够收敛原平衡点附近的一个小领域内, 所以通过适当调节 c_1, c_2, λ 可使系统(6)全局零状态渐近稳定^[8]. 联立式(6)、(7)、(9)和(14)可得船舶航向保持状态反馈控制律

$$u = -\frac{1}{b}f(x_2) + \frac{1}{b}[-(1 + c_1 c_2 + \lambda)z_1 - \lambda c_1 \int z_1 dt - (c_1 + c_2)z_2 + \dot{\psi}_r] \quad (15)$$

2.2 简捷非线性鲁棒控制

对 Backstepping 设计方法进行改进. 将式(7)进行变换, 令 $e_1 = \psi_r - \psi = -z_1$, 同时根据实际工程需要, 设 ψ_r 为阶跃函数, 可推出 $\dot{\psi}_r = 0$, 则式(15)可改写为

$$u = -\frac{1}{b}f(x_2) + \frac{1}{b}[(1 + c_1 c_2 + \lambda)e_1 + \lambda c_1 \int e_1 dt + (c_1 + c_2)e_2] \quad (16)$$

设 $k_p = 1 + c_1 c_2 + \lambda$, $k_d = c_1 + c_2$, $k_i = \lambda c_1$, 并将式(16)代入式(6). 用带积分项的 Backstepping 方法

进行非线性控制器设计的本质是一个使被控系统线性部分稳定的 PID 控制律 v 级联一个使被控系统的非线性部分对消的非线性补偿项 v_c , 即非线性控制律为

$$u = v + v_c \quad (17)$$

其中: $v = \frac{1}{b}(k_p e_1 + k_i \int e_1 dt + k_d \dot{e}_1)$;

$$v_c = -\frac{1}{b}f(x_2).$$

假设 1 存在非负有界函数 $\eta_q(x_2, t)$, 使得系统(6)中的非线性函数项 $f(x_2)$ 满足

$$\|f(x_2)\|_p \leq \eta_q(x_2, t)$$

其中, $\|\cdot\|_p$ 为函数的 p 范数.

假设 2 对于 n 阶非线性系统

$$\begin{cases} \dot{X}^{(n)} = f(X) + g(X)u \\ y = X \end{cases} \quad (18)$$

其中, $f(X)$ 和 $g(X)$ 均为连续可导函数, $f(X)$ 含有系统的非线性项. $u \in \mathbf{R}, y \in \mathbf{R}, X = (X, \dot{X}, \dots, X^{(n-1)})^T$ 为系统的状态向量. 对于给定的任意有界参考信号 y_m , 系统的跟踪误差为 $e = y_m - y$, 设 $e = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T$ 和 $k = (k_n, \dots, k_1)^T$, 则一定存在向量 k , 使得多项式 $s^n + k_1 s^{n-1} + \dots + k_n = 0$ 的所有根位于左半开平面上(根具有负实部). 即微分方程

$$e^{(n)} + k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n e = 0 \quad (19)$$

对应的特征方程的特征根的实部均为负, 因此有 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$.

引理 1 在充分满足假设 2 的条件下, 针对闭环系统(18)进行控制器设计, 取控制律为

$$u = g(X)^{-1}(-f(X) + ke + y_m^{(n)}) \quad (20)$$

可保证设计出的控制器能够使式(18)全局渐近稳定.

证明 将式(20)代入式(18), 得 $e^{(n)} = -k^T e$ 或可表示为

$$\dot{e} = \Lambda_c e \quad (21)$$

其中

$$\Lambda_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & -k_{n-2} & -k_{n-3} & \dots & k_2 & -k_1 \end{bmatrix}$$

由于 Λ_c 为稳定矩阵, 即 $|sI - \Lambda_c| = s^n + k_1 s^{(n-1)} + \dots + k_n$ 为稳定的, 因此一定存在一个唯一 $n \times n$ 阶的正定矩阵 P 满足 Lyapunov 方程

$$\Lambda_c^T P + P \Lambda_c = -Q \quad (22)$$

其中, Q 为任意的 $n \times n$ 阶的正定矩阵.

设 $V_c = \frac{1}{2} e^T P e$, 再利用式(21)和式(22), 可得

$$\dot{V}_c = \frac{1}{2} \dot{e}^T P e + \frac{1}{2} e^T P \dot{e} = -\frac{1}{2} e^T Q e < 0$$

因此, 利用控制律(20)可使式(18)全局渐近稳定.

针对式(6)进行控制器设计时, 根据式(17)的结果可取控制律为

$$u = u_l + u_c \quad (23)$$

其中, u_l 为系统的线性控制器部分, 充分满足假设 2 的条件; u_c 为系统的非线性补偿控制器, 其作用是抑制或消除系统的非线性项. 根据假设 1, 设

$$u_c = -\eta f(x_2) \quad (24)$$

定理 1 对于非线性船舶运动系统模型(6), 系统的跟踪误差定义为式(5), $f(x_2)$ 充分满足假设 1 的条件. 若航向保持系统非线性控制律定义为式(23), u_l 只要充分满足假设 2 中的条件, 当 $\eta = 1/b$ 时, 控制律(17)与控制律(23)等价且均可使式(6)全局渐近稳定.

证明 将控制律(23)代入式(6), 得

$$\dot{x}_2 = (1 - \eta b)f(x_2) + bu_l \quad (25)$$

当 $\eta = 1/b$ 时, 式(25)的非线性项 $f(x_2)$ 被对消, 则式(6)的控制问题转变为线性控制问题, 这时, 控制器相应的控制律为

$$u = u_l - \frac{1}{b}f(x_2) \quad (26)$$

若式(26)中的线性控制 u_l 充分满足假设 2 的条件, 在对式(6)进行控制器设计时, u_l 和 v 同为可使被控系统线性部分稳定的线性 PID 控制律, 则可推出控制律(26)与(17)等价, 根据引理 1 可知控制律(17)和(26)均可使式(6)全局渐近稳定.

根据定理 1 可知, 利用积分 Backstepping 方法设计非线性控制器时可直接使用控制律(26), 其中的线性化控制律 u_l 满足假设 2 的条件即可. 本文采用具有鲁棒性特点的一阶闭环增益成形算法进行设计, 利用 H_∞ 鲁棒控制混合灵敏度算法的结果, 根据已选灵敏度函数 S_c 和补灵敏度函数 T_c 的形状, 用构造的方法设计控制器, 保证了系统的稳定性和鲁棒性, 且具有结构简单、物理意义明确等优点. 当系统

闭环传递函数的频谱关门斜率(高频渐近线斜率)取 -20 dB/dec 时, T_c 的奇异值曲线可近似构造为最大奇异值为 1 的一阶惯性系统的频谱曲线,即

$$T_c = 1/(T_1 s + 1) \quad (27)$$

则由被控对象传递函数 $G(s)$ 和闭环系统的带宽频率 $1/T_1$ 推出基于闭环增益成形算法的线性控制器为

$$u_l = \frac{1}{GT_1 s} e_1 \quad (28)$$

定义 1 如果二阶严格真对象

$$G^*(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

的系数 $b_1 = 0$, 则称 $G^*(s)$ 为二阶深严格真对象^[9].

为方便控制器设计,通过模型降阶或 Bode 图近似等方法,在船舶运动模型的传递函数 $G(s)$ 的分母加上一个正的有界无穷小量常数 ϵ 以使被控对象转变为二阶深严格真对象,使其满足一阶闭环增益成形算法的设计需要,则 Nomoto 模型可扩展为

$$G(s) = \frac{K_0}{T_0 s^2 + s + \epsilon} \quad (29)$$

将式(29)代入式(28),根据闭环增益成形算法得到一个线性 PID 控制律,即

$$u_l = \frac{1}{GT_1 s} e_1 = \frac{T_0 s^2 + s + \epsilon}{K_0 T_1 s} e_1 = \left(\frac{1}{K_0 T_1} + \frac{\epsilon}{K_0 T_1 s} + \frac{T_0}{K_0 T_1} s \right) e_1 \quad (30)$$

将式(30)代入控制律式(26),得系统的非线性鲁棒控制律

$$u = \left(\frac{1}{K_0 T_1} + \frac{\epsilon}{K_0 T_1 s} + \frac{T_0}{K_0 T_1} s \right) e_1 - \frac{1}{b} f(x_2) \quad (31)$$

定理 2 对于式(6),定义系统的跟踪误差为式(5), $f(x_2)$ 充分满足假设 1 的条件.若航向保持系统非线性状态反馈控制律定义为式(31),则由此设计的非线性控制器可使式(6)全局渐近稳定.

证明 根据文献[9]可知,根据式(30)设计的线性化 PID 控制律可充分满足假设 2 的条件.再由定理 1 可推出控制律(31)可使式(6)全局渐近稳定.

根据控制律(31)对船舶航向保持系统进行非线性控制器设计,可保证其零静差,且设计过程简捷,需设计的参数仅为控制器工作带宽频率的倒数 T_1 ,相比式(15)需要设计 c_1, c_2, λ 3 个无实际物理意义的参数,减少了工作量.同时,控制器线性部分的设

计采用具有鲁棒性特点的闭环增益成形算法,提高了控制器的鲁棒性,在工程上非常实用.

3 仿真结果与分析

本文以大连海事大学实习船“育龙”号为例.船舶操作性指数和追随性时间指数分别为 $K_0 = 0.48 \text{ s}^{-1}, T_0 = 216.58 \text{ s}$;非线性参数 $\alpha = 9.16, \beta = 10814.30$.在船舶航向保持控制器设计中,式(29)中的 $\epsilon = 0.0001$.航向保持系统的工作带宽在 $1/3 \text{ rad/s}$ 左右,控制器设计参数 $T_1 = 3 \text{ s}$,可有效地使闭环控制系统将海浪干扰的频谱抑制在控制器工作带宽之外^[6].在实际船舶驾驶系统中,舵机伺服系统的非线性因素也不能忽视,虽然与船体相比很小,但其对航向保持系统的性能影响较大.采用单油路模拟控制变量的舵机系统与航向保持控制器构成的闭环系统进行仿真,其中舵机伺服系统的最大舵速设为 $\pm 2.3^\circ/\text{s}$,同时,为安全起见,舵角限制在 $\pm 25^\circ$ 以内.

海风输入干扰是引起船舶偏航的主要原因之一,其影响不能忽略,仿真时将其分为平均风和脉动风,其中脉动风采用 Astrom 和 Kallstrom 提出的白噪声替代法进行处理;平均风用船舶风压差角来等效表示,并将其转化为相应的压舵角 δ_{wind} ,

$$\delta_{\text{wind}} = K^0 \left(\frac{v_R}{v} \right)^2 \sin \gamma$$

其中: K^0 为风压差系数; v_R 和 v 分别为风速和船速; γ 为风舷角.

仿真时,采用白噪声驱动一个典型的 2 阶振荡环节来模拟海浪干扰^[10],在 6 级风作用下得到的海浪模型的传递函数为

$$h(s) = \frac{0.4198s}{s^2 + 0.3638s + 0.3675}$$

假设在船舶设定航向为 30° ,风力为 6 级,风向为 50° 时计算出的风压差角为 3° 的情况下做仿真

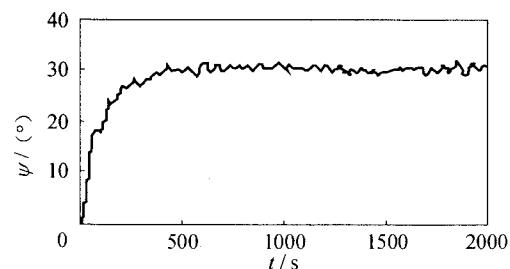


图 1 6 级风作用下的船舶输出航向

实验,其仿真曲线分别如图 1、2 所示.由图 1、2 可知,在 6 级风的情况下,船舶的输出航向在无超调情况下,400 s 以后稳定在 30° 左右,船舶的航向角误差大

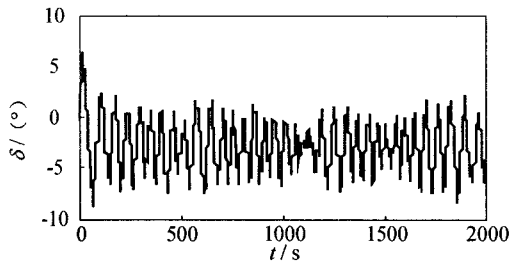


图2 6级风作用下的船舶控制舵角

约为 $\pm 1^\circ$, 取得了令人满意的控制效果. 同时, 为保持航向, 船舶也在 -3° 附近做 $\pm 3^\circ$ 小幅舵角操舵, 而且由于平均风的作用, 出现了明显的压舵现象, 符合实际航海中操舵惯例.

假设其他仿真条件不变, 风力由原来的 6 级变为 8 级, 此时海浪模型的传递函数变为

$$h(s) = \frac{1.52436s}{s^2 + 0.40417s + 0.1634}$$

由此得到的仿真曲线分别如图 3、4 所示.

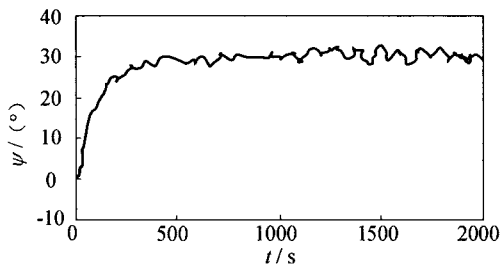


图3 8级风作用下的船舶输出航向

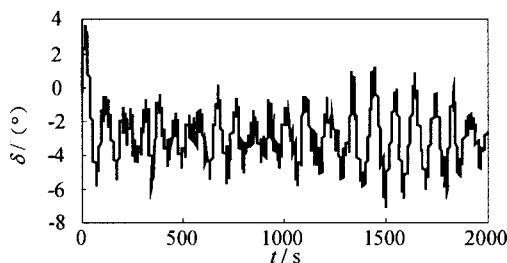


图4 8级风作用下的船舶控制舵角

从图 3、4 可知, 在 8 级风情况下, 船舶的航向角误差大约为 $\pm 2^\circ$, 由于外界海浪干扰, 船舶也在 -3° 附近做 $\pm 3^\circ$ 小幅舵角操舵. 随着舵角的变化, 船舶的输出航向也在 400 s 以后基本稳定在 30° 左右, 说明在外界干扰发生变化时, 船舶航向保持系统具有较强的鲁棒性.

4 结 论

针对非线性船舶航向保持系统, 在 Backstepping 控制方法的基础上, 提出一种简捷的非线性鲁棒控制器设计方案, 简化了控制器的设计过程, 增强了控制器的鲁棒性. 在考虑风、浪和舵机等非线性因素的

影响下, 分别在 6 级风和 8 级风作用下对船舶航向保持控制器进行仿真. 结果表明, 船舶航向保持性能良好, 具有较强的鲁棒性, 且设计过程简捷、可靠性高, 实际应用前景广阔.

参考文献 (References):

- [1] KANELLAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P V, MORSE A S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems[C]// Proceedings of the American Control Conference. Boston, MA: American Automatic Control Council, 1991: 649-654.
- [2] GODHAVN J M, FOSSEN T I, BERGE S P. Nonlinear and adaptive backstepping designs for tracking control of ships[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 1998, 12 (8): 649-670.
- [3] FOSSEN T I, STRAND J P. Tutorial on nonlinear backstepping: applications to ship control[J]. Modeling, Identification and Control, 1999, 20 (2): 83-134.
- [4] 张显库, 郭 晨, 杜佳璐. 船舶航向不对称信息理论与非线性逆推鲁棒控制算法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6 (2): 47-50.
- [5] ZHANG X K, JIA X L. Simplification of H_∞ mixed sensitivity algorithm and its application[J]. Automatic Control and Computer Sciences, 2002, 36 (3): 28-33.
- [6] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.
- [7] SKJETNE R, FOSSEN T I. On integral control in backstepping: analysis of different techniques[C]// Proceedings of American Control Conference. Boston, MA: IEEE Press, 2004, 1899-1904.
- [8] BENASKEUR A R, DESBIENS A. Backstepping-based adaptive PID control[J]. IEEE Control Theory and Applications, 2002, 149(1): 54-59.
- [9] 张显库, 贾欣乐. 求 PID 参数的新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22 (8): 4-5.
- [10] 杨承恩, 贾欣乐, 毕英君. 船舶舵阻横摇及其鲁棒控制[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2001.