脑外科机器人视觉伺服研究

刘军传 张玉茹 李 振

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100083)

摘 要：定位精度是脑外科机器人系统一个最重要的指标.提出了利用视觉伺服提高脑外科机器人系统定位精度的方法.根据机器人辅助脑外科手术的特点，选择基于位置的末端点闭环的视觉伺服方式，提出了一种利用机器人运动信息对机器人的特征点进行视觉跟踪定位的稳定可靠的方法.针对病人体内病灶点在摄像机图像中不可见的问题，推导了脑外科机器人系统的视觉伺服控制律.采用视觉伺服的方法后，系统定位精度有了很大提高，系统定位误差主要由靶点映射误差引起，受机器人绝对定位误差的影响不大.手术过程模拟和定位精度测试验证了该方法的有效性.

关 键 词：脑外科；机器人；精度；视觉伺服

中图分类号：TP 242.3

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)03-0370-05

Visual servoing control in robot-assisted stereotactic neurosurgery

Liu Junchuan Zhang Yuru Li Zhen

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Positioning accuracy is one of the most important specifications in robot-assisted stereotactic neurosurgery. A visual servoing control method in robot-assisted stereotactic neurosurgery was presented to improve the overall positioning accuracy of the robot system. The position-based endpoint closed-loop visual servoing architecture was selected according to the characteristic of robot-assisted stereotactic neurosurgery. A visual tracking method utilizing the robot motion information was developed to locate the robot end-effector in the cameras images in real time. The visual servoing control law for the robot system was derived aiming at the problem that the tumor inside the patient′s head was unseen in the cameras images. With the visual servoing control method, the positioning error of the robot system was mainly caused by the target registration process. The effect of the robot absolute positioning error was eliminated and the overall positioning accuracy of the robot system was improved. Simulation of the clinical process and positioning accuracy test proved the validity of the method.

Key words: neurosurgery; robot; accuracy; visual servo

1 问题提出

传统的立体定向脑外科手术借助于医学图像和固定在病人头骨上的立体定向框架完成对病人脑部病灶点的定位[1]，对病人损伤大，医生操作不便.机器人辅助脑外科手术是借助于机器人对病人脑部病灶点进行定位，辅助医生进行手术操作的一种方法.脑外科机器人系统借助于病人头部的标记点，完成机器人空间与医学图像三维重构后的医学图像空间的映射，医生在医学图像中规划的病灶点和进针路径通过该映射关系可转换为机器人空间中的信息，引导机器人对病灶点进行

收稿日期：2006-04-28

基金项目：国家 863 基金资助项目(2001AA422110，2004AA421012)

作者简介：刘军传(1979—)，男，山东胶南人，博士生，buaaljc@gmail.com.

定位[2].脑外科机器人系统的定位精度是指医生规划的病灶点位置与机器人最终到达的位置之间的距离[3],它是临床应用的一个最重要的技术指标.目前世界上已经商业化的无框架脑外科机器人系统 NeuroMate 和 Pathfinder,其定位精度平均值分别为 1.95 mm 和 2.7 mm[4-5].

脑外科机器人系统的定位误差由 2 部分引起:一部分是病灶点映射误差,即通过病灶点在医学图像空间中的坐标求其在机器人空间中的坐标时的误差;另一部分是机器人绝对定位误差.文献[6]对病灶点映射误差进行了详细的分析.机器人绝对定位精度可以通过机器人标定加以改善,文献[7]对此进行了综述.但是,引起机器人绝对定位误差的不仅包括杆长、关节扭角等几何因素,还包括回差、间隙和杆件变形等非几何因素,这使得对机器人运动学的准确建模变得非常困难和复杂.视觉伺服是减小机器人绝对定位误差的一个有效方法,文献[8]对此进行了综述.本文的主要内容是研究在脑外科机器人系统中,如何通过视觉伺服的方法减小机器人绝对定位误差的影响,从而提高系统的定位精度.

本文以北京航空航天大学机器人研究所和海军总医院神经外科中心合作开发的"黎元"脑外科机器人系统[9]为研究对象.系统由双目视觉定位系统、手术规划软件和机器人 3 部分构成,如图 1 所示.



图 1　"黎元"脑外科机器人系统

2　脑外科机器人视觉伺服

2.1　视觉伺服控制器

在脑外科机器人视觉伺服系统中,根据摄像机的摆放方式、视觉伺服控制器结构、闭环方式,以及采用基于位置还是基于图像的视觉伺服等因素的选择,视觉伺服控制器结构如图 2 所示.图中,$\Delta \boldsymbol{X}$ 是机器人目标位姿 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{d}}$ 与视觉系统测量的机器人当前位姿 $\hat{\boldsymbol{X}}$ 的差值;$\Delta \boldsymbol{\Theta}$ 是在一个视觉伺服控制周期内机器人目标关节角向量;$\Delta \boldsymbol{\theta}$ 是在一个关节伺服控制周期内机器人的目标关节角向量;$\boldsymbol{f}$ 是机器人上的某个特征在摄像机图像中的位置向量.

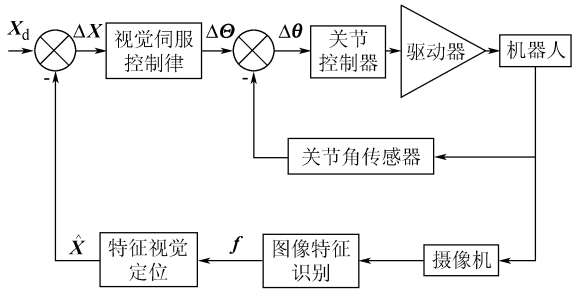

图 2　脑外科机器人视觉伺服控制器结构

2.2　目标跟踪定位

在脑外科手术中,病人头部一般被固定在手术床上保持不动,因此,本文只考虑对机器人末端执行器进行实时跟踪定位的情况.为了使图像识别简单方便,同时考虑尽量与实际手术时的手术器械(穿刺针)保持一致,执行器设计成圆柱形长杆,杆末端为直径 8 mm 的小球,取球心作为执行器的末端点,如图 3 所示.



图 3　脑外科机器人末端执行器

首先对摄像机进行标定.控制机器人末端执行器分别运动到图 4 所示的 12 个位置,对于每个位置,由机器人运动学可得图 3 中的球心在机器

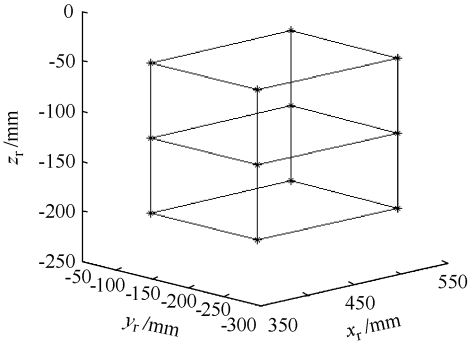

图 4　摄像机标定点

人坐标系 $O_r x_r y_r z_r$ 中的坐标(x_{ri},y_{ri},z_{ri});同时,球心图像在图像坐标系中的坐标(u_i,v_i)可通过Hough变换的方法求得.由上述数据可对摄像机进行标定,求得摄像机参数矩阵 $\boldsymbol{M}$,满足

$$z_i \cdot [u_i \quad v_i \quad 1]^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{M} \cdot [x_{ri} \quad y_{ri} \quad z_{ri} \quad 1]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

其中,z_i 是球心在摄像机坐标系中的坐标;$\boldsymbol{M}$ 是一个 3×4 矩阵:

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix}$$

摄像机标定完成后,对于机器人末端执行器的每一个确定的位置,通过机器人运动学求得球心在机器人坐标系中的坐标(x_r,y_r,z_r)后,球心图像在图像坐标系中的坐标(u,v)可由式(2)求出:

$$\left.\begin{aligned} u &= \frac{m_{11}x_r + m_{12}y_r + m_{13}z_r + m_{14}}{m_{31}x_r + m_{32}y_r + m_{33}z_r + m_{34}} \\ v &= \frac{m_{21}x_r + m_{22}y_r + m_{23}z_r + m_{24}}{m_{31}x_r + m_{32}y_r + m_{33}z_r + m_{34}} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

由于摄像机参数矩阵 $\boldsymbol{M}$ 由摄像机标定求得,故由式(2)求得的球心图像坐标(u,v)不准确,它给出了球心图像的大概位置.在图像中以(u,v)为中心,在一定大小的区域内用Hough变换的方法对图像进行圆的检测,可求得圆心即球心图像的准确位置.用该方法对机器人执行器末端球进行跟踪的结果如图5所示,结果验证了该方法的有效性.

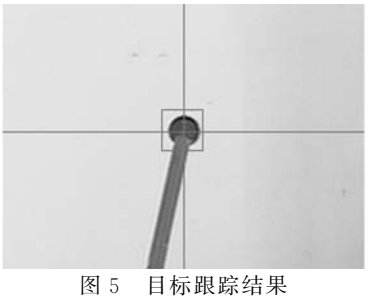

图5 目标跟踪结果

2.3 视觉伺服控制律

对于图4中的摄像机标定点,建立如图6所示的摄像机标定坐标系 $O_c x_c y_c z_c$,各标定点在坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 中的坐标可由三坐标测量仪精确测得.由于机器人重复定位精度较高,标定点在坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 中的坐标只需测量一次即可.在图6中,$O_r x_r y_r z_r$ 为机器人基坐标系,$O_m x_m y_m z_m$ 为医学图像坐标系.摄像机标定完成后,病人头部标记点在坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 中的坐标可由双目视觉定位求出,结合标记点在医学图像坐标系

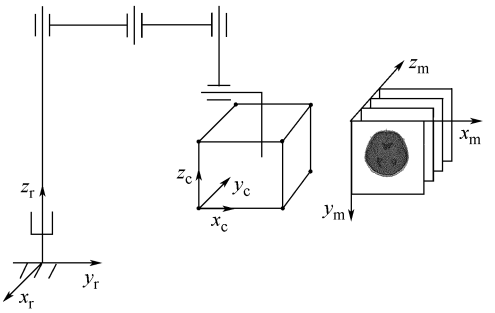

图6 脑外科机器人系统坐标系示意图

$O_m x_m y_m z_m$ 中的坐标,可求得坐标系 $O_m x_m y_m z_m$ 到坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 之间的映射矩阵 ${}^{c}\boldsymbol{T}_{m}$.同样,由标定点在坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 和坐标系 $O_r x_r y_r z_r$ 中的坐标,可求得坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 到坐标系 $O_r x_r y_r z_r$ 的映射矩阵 ${}^{r}\boldsymbol{T}_{c}$.

由病灶点在医学图像坐标系 $O_m x_m y_m z_m$ 中的坐标 ${}^{m}\boldsymbol{X}_{t}$,可求得该点在机器人坐标系 $O_r x_r y_r z_r$ 中的坐标:

$${}^{r}\boldsymbol{X}_{t} = {}^{r}\boldsymbol{T}_{c} \cdot {}^{c}\boldsymbol{T}_{m} \cdot {}^{m}\boldsymbol{X}_{t} \tag{3}$$

设通过双目视觉定位测得机器人末端执行器的球心在坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 中的坐标为 ${}^{c}\boldsymbol{X}_{t}$,则球心在机器人坐标系 $O_r x_r y_r z_r$ 中的坐标为

$${}^{r}\boldsymbol{X}_{r} = {}^{r}\boldsymbol{T}_{c} \cdot {}^{c}\boldsymbol{X}_{r} \tag{4}$$

系统定位误差即球心点与病灶点之间的误差

$$\Delta^{r}\boldsymbol{X} = {}^{r}\boldsymbol{X}_{r} - {}^{r}\boldsymbol{X}_{t} \tag{5}$$

将式(3)和式(4)代入式(5)可得

$$\Delta^{r}\boldsymbol{X} = {}^{r}\boldsymbol{T}_{c} \cdot {}^{c}\boldsymbol{X}_{r} - {}^{r}\boldsymbol{T}_{c} \cdot {}^{c}\boldsymbol{T}_{m} \cdot {}^{m}\boldsymbol{X}_{t} = {}^{r}\boldsymbol{T}_{c}({}^{c}\boldsymbol{X}_{r} - {}^{c}\boldsymbol{T}_{m} \cdot {}^{m}\boldsymbol{X}_{t}) \tag{6}$$

在式(6)中,与机器人绝对定位精度有关的项 ${}^{r}\boldsymbol{T}_{c}$ 已经移到括弧外面,括弧里面的项仅与双目视觉定位精度和病灶点的空间映射精度有关.因此,采用基于位置的ECL(Endpoint Closed-Loop)方式的视觉伺服,可通过提高双目视觉定位精度和病灶点的空间映射精度来减小机器人绝对定位精度对系统定位精度的影响,从而提高系统定位精度.在对病灶点进行定位时,可先将空间映射求得的病灶点位置作为目标值,由关节控制器控制机器人运动到该位置.此时机器人末端执行器球心与病灶点之间的误差即为采用视觉伺服前的系统定位误差,因此 $\Delta^{r}\boldsymbol{X}$ 为微小变化量.由于脑外科机器人对于穿刺针的姿态精度要求不高,视觉伺服过程中穿刺针的姿态误差 $\Delta^{r}\boldsymbol{a}$ 可通过机器人运动学求出.由瞬时机器人运动学,可得

$$\begin{bmatrix} \Delta^{r}\boldsymbol{X} \\ \Delta^{r}\boldsymbol{a} \end{bmatrix} \approx \boldsymbol{J} \cdot \Delta\boldsymbol{\Theta} \tag{7}$$

其中,$\boldsymbol{J}$ 是机器人的雅可比矩阵,对于图1所示的

"黎元"系统,$\boldsymbol{J}$ 是 6×5 矩阵;$\Delta\boldsymbol{\Theta}$ 是在一个视觉伺服控制周期内机器人目标关节角向量.由式(7)可求得

$$\Delta\boldsymbol{\Theta} \approx \boldsymbol{J}^{+} \cdot \begin{bmatrix} \Delta^{\mathrm{r}}\boldsymbol{X} \\ \Delta^{\mathrm{r}}\boldsymbol{a} \end{bmatrix} \tag{8}$$

其中 $\boldsymbol{J}^{+}$ 为矩阵 $\boldsymbol{J}$ 的广义逆矩阵.对于每个视觉伺服控制周期,由式(3)、式(4)、式(6)和式(8)可求得机器人各关节运动的目标值,由关节控制器控制机器人各关节进行相应的运动,直到系统定位误差满足

$$\| {}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}} - {}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{m}} \cdot {}^{\mathrm{m}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{t}} \|_2 < e \tag{9}$$

其中,e 为预先设定的误差容限;$\| \cdot \|_2$ 为向量的 2-范数.

3　实验和结果

用自制的模型模拟病人头部,如图 7 所示,模型上的小球分别用来模拟病人头部的标记点和分布在不同位置的病灶点.



图 7　实验模型

用 CT 对模型进行扫描后,模拟实际的手术流程,用机器人对模型上的病灶点分别进行定位,在模拟过程中对双目视觉定位精度、病灶点空间映射精度和系统定位精度进行测量.实验中使用的测量工具是 FARO 三坐标测量臂,测球单点重复精度为 ±0.013 mm,测长度精度为 ±0.018 mm.实验过程如下:

1) 摄像机标定.用图 4 中的标定点在坐标系 $O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{c}}y_{\mathrm{c}}z_{\mathrm{c}}$ 中的坐标对 2 个摄像机进行标定,同时根据机器人的运动信息求得坐标系 $O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{c}}y_{\mathrm{c}}z_{\mathrm{c}}$ 到坐标系 $O_{\mathrm{r}}x_{\mathrm{r}}y_{\mathrm{r}}z_{\mathrm{r}}$ 的映射矩阵 ${}^{\mathrm{r}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{c}}$.标定完毕后,对标定点包围区域内的 10 个预先设定的点进行双目视觉定位,将定位结果与 FARO 测量臂的测量结果进行比较,可得双目视觉定位精度,如表 1 所示.

2) 病灶点空间映射.在 CT 图像中用 Hough 变换的方法对标记点和其中一个病灶点定位,同时用双目视觉对模型上的标记点进行定位,可求得坐标系 $O_{\mathrm{m}}x_{\mathrm{m}}y_{\mathrm{m}}z_{\mathrm{m}}$ 到坐标系 $O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{c}}y_{\mathrm{c}}z_{\mathrm{c}}$ 之间的映射矩阵 ${}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{m}}$,进而求得病灶点在坐标系 $O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{c}}y_{\mathrm{c}}z_{\mathrm{c}}$ 中的坐标 ${}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{t}}$ 和坐标系 $O_{\mathrm{r}}x_{\mathrm{r}}y_{\mathrm{r}}z_{\mathrm{r}}$ 中的坐标 ${}^{\mathrm{r}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{t}}$.模型上对应的病灶点在坐标系 $O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{c}}y_{\mathrm{c}}z_{\mathrm{c}}$ 中的坐标可由 FARO 测量臂测得.将 ${}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{t}}$ 与 FARO 测量臂的测量结果比较,可得该病灶点的空间映射精度.依次对各个病灶点进行定位,可测得各病灶点的空间映射精度,如表 2 所示.

表 1　双目视觉定位精度　　mm

被测点	误差	被测点	误差
1	0.33	7	0.34
2	0.31	8	0.33
3	0.19	9	0.38
4	0.27	10	0.35
5	0.21	最大值	0.38
6	0.26	平均值	0.30

表 2　病灶点定位精度　　mm

被测点	映射精度	视觉伺服前系统精度	视觉伺服后系统精度
1	0.73	1.19	0.76
2	1.76	2.29	1.67
3	0.88	1.45	0.68
4	1.37	1.25	1.39
5	1.49	1.49	1.25
6	1.67	1.77	1.61
7	0.94	0.93	0.97
8	1.12	1.67	0.97
9	0.96	0.99	0.53
10	0.98	1.72	0.91
11	0.79	1.27	0.78
12	0.61	2.41	0.59
13	1.25	1.89	1.41
14	1.39	1.47	1.35
15	0.74	0.96	0.60
16	0.23	0.91	0.58
最大值	1.76	2.41	1.67
平均值	1.06	1.47	1.00

3) 机器人定位.将 2)中求得的各病灶点的坐标 ${}^{\mathrm{r}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{t}}$ 作为机器人关节控制器的目标值,控制机器人运动.机器人每次运动完成后,用 FARO 测量臂测量机器人执行器末端球心点在坐标系 $O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{c}}y_{\mathrm{c}}z_{\mathrm{c}}$ 中的坐标,将其与 2)中的测量结果相比较,可得系统的定位精度,如表 2 所示.

4) 对于每个病灶点,3)中机器人运动完成后,对机器人系统进行视觉伺服.由于在 1)中测得的双目视觉定位误差最大值为 0.38 mm,故设视觉伺服中误差容限 e 为 0.4 mm,当满足式(9)时,机器人停止运动.用 FARO 测量臂测量机器人执行器末端球心点在坐标系 $O_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{c}}y_{\mathrm{c}}z_{\mathrm{c}}$ 中的坐标,将其与 2)中的测量结果相比较,可得视觉伺

服后系统的定位精度,如表2所示.

由实验结果可以看出,采用视觉伺服后,脑外科机器人系统的定位精度最大值为1.67 mm,平均值为1.00 mm,较视觉伺服以前有了明显的提高;采用视觉伺服后,系统定位误差与病灶点的空间映射误差相差不大,说明此时系统定位误差主要由病灶点空间映射误差引起,机器人绝对定位误差对系统定位误差的影响已经不大.

4 结束语

本文用视觉伺服的方法提高了脑外科机器人的系统定位精度.用自制的模型模拟病人头部,对整个手术过程进行了模拟;用高精度的FARO三坐标测量臂分别对双目视觉定位精度、病灶点空间映射精度、视觉伺服前和视觉伺服后的系统定位精度进行了测量.结果表明,采用视觉伺服的方法后,系统的定位精度最大值为1.67 mm,平均值为1.00 mm,较视觉伺服前的系统定位精度有了明显的提高;采用视觉伺服后,系统定位误差主要由病灶点映射误差引起,机器人绝对定位误差对系统定位误差影响不大.

参考文献(References)

[1] Kwoh Y S, Hou J, Jonckheere E A, et al. Robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1988, 35(2): 153-160

[2] Shen Weimin, Gu J, Milios E. Robotic neurosurgery and clinical applications[C]//Proceedings of 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation. New York: IEEE, 2004: 114-119

[3] Maciunas R J, Galloway R L Jr, Latimar J W. The application accuracy of stereotactic frames[J]. Neurosurgery, 1994, 35(4): 682-695

[4] Li Q H, Zamorano L, Pandya A, et al. The application accuracy of the neuromate robot: a quantitative comparison with frameless and frame-based surgical localization systems [J]. Computer Aided Surgery, 2002, 7: 90-98

[5] Morgan P S, Carter T, Davis S, et al. The application accuracy of the pathfinder neurosurgical robot [EB/OL]. London: Armstrong Heathcare Ltd, 2003. http://www.armstrong-healthcare.com

[6] Fitzpatrick J M, West J B, Maurer C R Jr. Predicting error in rigid-body point-based registration[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1998, 17(5): 694-702

[7] Ziegert J, Datseris P. Basic considerations for robot calibration[C]//Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 1988: 932-938

[8] Hutchinson S, Hager G D, Corke P I. A tutorial on visual servo control[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(5): 651-670

[9] Liu Junchuan, Zhang Yuru, Wang Tianmiao, et al. Neuromaster: a robot system for neurosurgery[C]//Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2004: 824-828

(责任编辑:文丽芳)

(上接第369页)

[4] 曹斌,谭建荣,伊国栋. 管线布局设计的约束因素分析及建模方法研究[J]. 中国机械工程,2002,13(15):1318-1323
Cao Bin, Tan Jianrong, Yi Guodong. Analysis of constraint factors and research on modeling method of pipeline packing design[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(15): 1318-1323(in Chinese)

[5] 王金敏,王玉新,查建中. 布局问题约束的分类及表达[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000,12(5):349-354
Wang Jinmin, Wang Yuxin, Cha Jianzhong. Classification and representation of constraints in packing problem [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2000, 12(5): 349-354(in Chinese)

[6] 云庆夏. 进化算法[M]. 北京:冶金工业出版社,2000
Yun Qingxia. Evolutionary algorithms[M]. Metallurgical Industry Press, 2000(in Chinese)

[7] Fogel D B. Asymptotic convergency properties of genetic algorithms and evolutionary programming: analysis and experiments[J]. Cybernetic and Systems: An Int J, 1994, 25(3): 389-407

(责任编辑:文丽芳)