

# 畸变环境下的序列图像融合技术研究

杨 波 张文生 谢 源

(中国科学院自动化研究所 北京 100190)

**摘 要** 红外气动光学效应、大气扰动、湍流等会造成图像的畸变,为了对图像进行准确分析、识别,需要获取畸变校正后的图像。研究了在时变的畸变环境中,通过对拍摄到的序列图像进行处理,消除畸变影响来获取高质量图像。结合图像配准技术,充分考虑到配准后的各图像的质量指数,提出了一套新的畸变环境下的序列图像融合算法。通过在真实数据集上的系列实验,证实了算法的有效性。

**关键词** 图像融合,畸变校正,图像配准,质量指数

中图法分类号 TP391 文献标识码 A

## Research on Distortion-free Fusion of Sequence Images

YANG Bo ZHANG Wen-sheng XIE Yuan

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Aero-optical effects, atmospheric turbulence, water fluctuations and so on, can cause image distortion. To analyze image and recognize object precisely, we need to get an image free of distortion. In this paper, we made a research on getting a single image of high quality by fusing sequence images in an environment with time-varying distortion. With the help of non-rigid image registration technique, and taking into consideration of the image quality index value of images, we proposed a new algorithm on distortion-free fusion of sequence images. Experiments using real datasets show the efficiency of our method.

**Keywords** Image fusion, Distortion correction, Image registration, Quality index

## 1 引言

图像畸变是造成图像质量下降的重要原因之一。光线从不同的介质中穿过时,会发生一系列的光学反射、折射等现象,从而对拍摄到的图像造成畸变。大气湍流、水波扰动都是生活中经常见到的造成图像畸变的原因。图像畸变也广泛地存在于军事应用中,光波在高速流场的作用下,将会产生气动光学传输效应。导弹等高速飞行器因自身与大气的高速相对运动而使探测系统所拍摄到的图像受到气动光学效应的影响,从而产生严重的畸变现象<sup>[1]</sup>。为了对拍摄到的图像进行准确的分析、识别,研究如何在畸变环境中,对畸变进行校正获取高质量图像有着至关重要的作用。

图像融合技术,即是针对同一对象的多张图像,采用一定的算法将各图像的信息进行融合互补、有机结合而产生新的图像的一种信息处理技术。通过融合后的图像,同单一图像相比,能减少拍摄环境中的不确定性、多义性和误差,能够最大限度地利用各图像的信息。在时变畸变环境中,对目标拍摄多次,即使在没有参考图像的前提下,不同的图像受到的畸

变影响程度不同,同一张图像在不同局部受到的影响不同。本文研究如何通过融合这些原始图像,利用序列图像间的互补信息,来获取对畸变进行消除后的高质量图像。

图像配准在图像畸变校正中有着非常重要的作用,在医学图像处理等领域<sup>[2-4]</sup>有着广泛深入的研究。对拍摄到的图像进行配准,能在一定程度上有效地消解单幅图像的畸变,为进一步的融合奠定基础。其中,基于B样条的非刚性图像配准通过控制点的移动表示空间变换的对应关系,不需要计算图像特征点,具有计算复杂性小、配准效果好的优点<sup>[5]</sup>。在我们的研究中,选用了基于B样条的非刚性配准对图像进行融合前的处理。

经过非刚性配准处理的各图像,在不同部分质量上存在着差异,利用彼此进行互补并融合得到高质量图像,就需要对这些区域的图像质量进行量化。图像质量指数<sup>[6]</sup>将图像畸变看成是3种因子的综合效果:相关性丢失、亮度畸变、对比度畸变,并一一用数学进行量化,对畸变环境中的图像局部质量度量提供了一种有效的测度。

本文在对图像进行非刚性配准的基础上,将针对局部图

到稿日期:2012-12-14 返修日期:2013-03-12 本文受国家基础研究“十二五”规划项目(0101050302),国家自然科学基金重点项目(U1135005),国家自然科学基金面上项目(81071141)资助。

杨 波(1987—),男,硕士生,主要研究方向为图像处理、模式识别与智能系统, E-mail: bo\_yang@ia.ac.cn; 张文生(1966—),研究员,博士生导师,主要研究方向为模式识别与机器学习、精密感知与智能控制、人机交互与虚拟现实、嵌入式视频图像处理; 谢 源(1985—),博士生,主要研究方向为图像处理、计算机视觉。

像的质量指数测度应用到指导图像融合的过程,充分利用序列中不同图像之间的互补信息,提出了一种新的畸变环境下的序列图像融合方法。在本文的第2节详细介绍算法流程以及算法的两个主要部分:非刚性配准和基于质量指数的融合。第3节在真实数据集上进行对比实现,以验证本文算法的优势。最后总结全文以及下一步工作的计划。

## 2 畸变环境下的序列图像融合算法

图像畸变的主要原因有全局性畸变和局部性畸变,全局性畸变可以用线性、仿射等变换表示,局部性畸变可以用非刚性配准模型表示。可以通过对图像求均值来去除掉局部畸变,但这也导致局部细节信息丢失。以均值图像作为参考图像,对图像序列进行配准,则可以对每幅图像的局部畸变进行校正,同时保留图像细节信息<sup>[5]</sup>。对于校正后的图像序列,根据各自的质量进行融合,整个算法流程如图1所示。算法的各个部分将在如下的内容中给出。

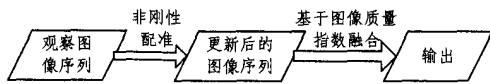


图1 畸变环境下的序列图像融合算法框架

### 2.1 非刚性图像配准

图像配准可以分为刚性配准和非刚性配准。刚性图像配准主要是一些全局性的变换,包括旋转、缩放、仿射等线性变换,不能对局部不同的畸变建模。非刚性配准则有更广泛的适用性,能够建模非线性的变换,有良好的局部控制性。其中,基于B样条的非刚性图像配准由于有较好的配准效果与较小的时间复杂性,广泛用于相关图像处理任务中<sup>[5,7-9]</sup>。用 $G$ 代表观察到的畸变图像, $R$ 代表参考图像(可以通过对观察图像序列求均值获得<sup>[5]</sup>),一个非刚性配准模型用来描述两幅图像间的几何畸变对应关系。在这一模型中,复杂的畸变过程通过一系列的控制点位置的移动来表示。这些控制点的初始位置 $X_{0i}=(x_{0i}, y_{0i}), i=1, \dots, m$ 均匀地分布在 $G$ 上,控制点在参考图像 $R$ 上的偏移记为偏移矩阵 $\vec{p}=[\Delta x_1, \dots, \Delta x_m, \Delta y_1, \dots, \Delta y_m]^T$ ,这里的 $\Delta x, \Delta y$ (也被称为偏移参数)是相对于初始位置在水平和竖直方向上的位置偏移。校正后位于 $G$ 上 $x=(x, y)^T$ 的像素可以表示为

$$W(x; \vec{p}) = x + A(x) \vec{p} \quad (1)$$

式中, $A(x)$ 为基函数矩阵

$$A(x) = \begin{bmatrix} c_1 & \dots & c_m & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & c_1 & \dots & c_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

$A(x) \vec{p}$ 是偏移向量,是控制点位置移动的线性组合。其元素 $c_i$ 为B样条基函数,通过如下表达式定义

$$c_i = \beta\left(\frac{x-x_{0i}}{\epsilon_x}\right)\beta\left(\frac{y-y_{0i}}{\epsilon_y}\right) \quad (3)$$

$$\beta(k) = \begin{cases} \frac{2}{3} - (1 - \frac{|k|}{2})k^2, & \text{if } 0 \leq |k| \leq 1 \\ \frac{(2 - |k|)^2}{6}, & \text{if } 1 < |k| < 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

式中, $\epsilon_x, \epsilon_y$ 分别表示相邻控制点的水平竖直间距。

在经典的B样条配准算法中,偏移参数可以通过最小化如下的目标函数<sup>[10]</sup>获得

$$E(p) = \sum_x |R(W(x; p)) - G(x)|^2 \quad (4)$$

为了提升算法的稳定性和收敛速度,研究人员根据变换的可逆性等特点,提出了一些正则化算子<sup>[5,7-9]</sup>。

在求目标函数、进行梯度化运算中,很重要的一个部分是图像距离。我们采用RC距离<sup>[11]</sup>代替传统的SSD等距离测度方式。RC距离考虑了像素之间的非独立性,相对于传统的全局度量测度SSD、MI等来说,能够更好地捕捉图像的局部信息。实验证明,RC距离测度在广泛的模拟数据和实际数据中,都有非常好的表现,其应用于畸变环境中的配准过程,能有效地提升畸变校正的效果。利用RC距离,相应的目标函数通过如下的公式进行计算

$$E(p) = \sum_{n=1}^N \log((q_n^T r)^2 + 1) \quad (5)$$

$$r = (R(W(x; p)) - G(x))$$

$$q_n(k) = \frac{w_n}{\sqrt{N}} \cos\left(\frac{\pi(2k-1)(n-1)}{2N}\right)$$

$$w_n = \begin{cases} 1, & n=1 \\ \sqrt{2}, & n=2, \dots, N \end{cases}$$

式中, $N$ 为总的像素数目, $r$ 为两图像在对应位置的像素差。RC距离具有实现容易(只需要几行matlab代码)、计算速度快的优点(计算复杂度为 $O(N \log(N))$ )。将其应用于本文的方法中,能提升最后融合图像的质量。

在实验中我们发现,每幅配准后的图像在某些情况下会产生比较锋利的边缘。我们对每次配准后的结果图像,采取了如下的修正方案:先标记出那些异常的像素(其值在实验中的结果为像素范围的最高值),然后计算出其它像素的均值,并将这一均值赋值给这些异常像素。经过这步处理,我们发现能有效地去除锋利的边缘,从而提升了单幅图像的配准质量,为接下来的图像融合奠定了基础。

### 2.2 基于质量指数的序列图像融合

图像融合是指将所采集到的关于同一目标的图像数据进行处理和计算,最大限度地融合各图像的信息,最后综合成高质量的图像,以提高图像信息的利用率,改善计算机解译精度和可靠性,提升图像的分辨率。绝大部分的图像融合研究都在做多源图像的融合,基于单源获取的多幅图像的融合受到的关注则相对较少<sup>[12-13]</sup>。本文基于图像质量指数,提出了一种对单源获取的序列图像进行融合的方法。通过该融合方法,对我们第一步获取的校正后的序列图像进行融合,得到了高质量的融合图像。

图像质量指数<sup>[6]</sup>通过对畸变进行形式化分析,将畸变描述为3个组成部分:相关性丢失、亮度畸变、对比度畸变,并通过数学给予定义。该度量对于畸变环境下的图像质量有非常好的描述作用,也得到了广泛的认可。

假设 $x = \{x_i | i=1, 2, \dots, N\}, y = \{y_i | i=1, 2, \dots, N\}$ 分别代表参考图像(在我们的应用中,参考图像通过对第一步校正后的序列图像求均值获取<sup>[5]</sup>)和畸变图像(校正后的畸变图像序列中的图像)的像素数据向量(用一维表示),则相对参考图像,畸变图像的质量指数 $Q$ 定义为

$$Q = \frac{4\sigma_{xy}\bar{x}\bar{y}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)[(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2]}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$Q$  的取值范围为  $[-1, 1]$ , 值越高, 则代表相对参考图像来说, 图像质量越好。当满足  $y_i = x_i, i=1, 2, \dots, N$  时,  $Q$  为 1, 得到最好的值; 当  $y_i = 2\bar{x} - x_i, i=1, 2, \dots, N$  时,  $Q$  为 -1。将  $Q$  进行变形, 则有

$$Q = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \cdot \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} \cdot \frac{2\sigma_x \sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (7)$$

可以发现,  $Q$  由 3 部分相乘组成, 第一部分为两向量的相关性度量, 度量两者的线性相关性, 取值范围是  $[-1, 1]$ 。最好的值 1 在两者有线性关系的时候存在, 即  $y_i = ax_i + b, i=1, 2, \dots, N$ , 其中  $a, b$  都为常数。即便  $x$  和  $y$  有线性关系, 两者之间仍然可能有畸变存在, 这通过第二部分和第三部分来度量。第二部分测度两图像在亮度方面的差异度量, 其取值范围为  $[0, 1]$ , 以判断两者的亮度平均值的距离, 当  $\bar{x} = \bar{y}$  时, 值为 1。 $\delta_x, \delta_y$  可以分别看成  $x$  和  $y$  的对比度, 因此第三部分表示两图像在对比度方面的相似度量, 其取值范围为  $[0, 1]$ , 其最好的值 1 发生在  $\delta_x = \delta_y$  时。

由于畸变是空间变化的, 因此在度量图像质量时, 对每一个局部像素计算一个度量值, 能更好地反映图像质量。在实施过程中, 从左上角到右下角, 以每个像素  $x = (i, j)^T$  为中心, 采用一个  $B \times B$  的滑动窗口, 边界补 0, 计算一个质量指数值  $Q_{ij}$ , 并将其做一个线性变换, 变换到  $[0, 1]$  空间。之后, 就可以得到质量指数, 融合后的图像位于  $(i, j)$  的像素值  $r_{ij}$  为

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^N x_{ijk} \cdot \frac{(Q_{ijk} + 1)/2}{\sum_{n=1}^N ((Q_{ijn} + 1)/2)} \quad (8)$$

式中,  $N$  表示序列中的图像数目,  $x_{ijk}$  表示第  $k$  幅图像中位于  $(i, j)$  的像素值,  $Q_{ijk}$  表示第  $k$  幅图像中位于  $(i, j)$  的局部质量指数值。

### 3 实验结果

为了测试算法的运行效果, 用 matlab 实现了该算法, 并用 Y. Tian<sup>[4]</sup> 的真实数据集 brick, small font, middle font, checkerboard 做了实验。这些数据集中的图像是在人工制造的水流湍流环境中拍摄的。由于湍流的影响, 拍摄到的图像序列发生了较为严重的图像畸变。每个数据集含有 61 幅畸变的序列图像。其中一些采样图像如图 2 所示。

在实验中, 选取滑动窗口的大小参数为  $B=8$ , 并将本文算法实验结果和对图像序列分别求均值、中值的结果进行了对比, 如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 本文算法能够在畸变环境下, 对图像序列进行有效的融合, 利用图像的互补信息对畸变进行校正, 同时又能较好地保留图像细节。对比试验结果可以发现, 对图像序列进行求均值, 或者中值融合, 因为不同图像的局部畸变不同, 会造成融合所得到的图像有严重的模糊。与其对比, 本

文算法所融合到的图像相对于采样图像、均值融合、中值融合来说, 有效地校正了畸变, 并且克服了融合得到的图像存在严重模糊的特点, 有很好的表现。

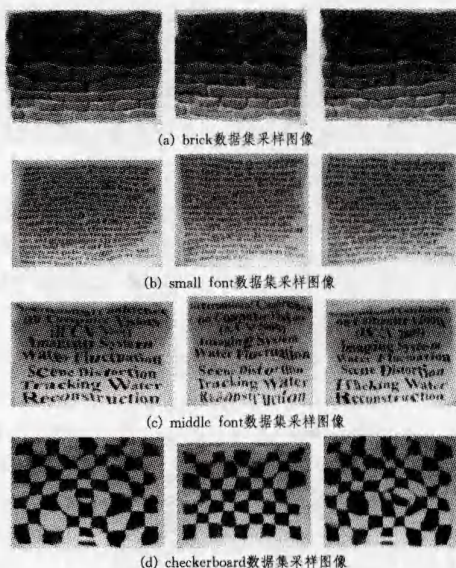


图 2 Y. Tian 数据集畸变序列中的采样图像

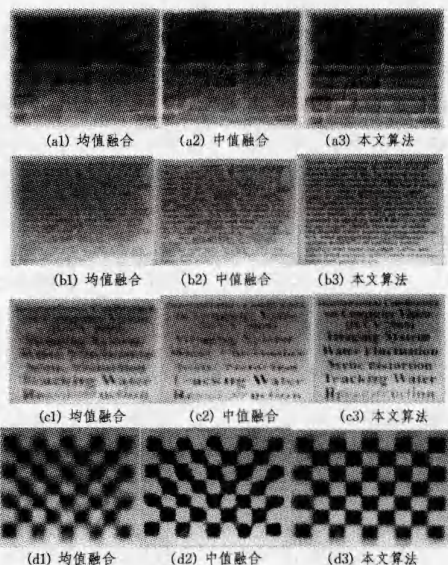


图 3 从上到下, 每一行分别为 Y. Tian 数据集中的 brick, small font, middle font, checkerboard 数据集, 在每一行中, 第一列为图像进行均值融合的结果, 第二列为中值融合的结果, 第三列为本文方法的结果

为了对实验结果进行客观的评价, 我们对有参考图像的数据集 brick, small font, middle font, 采用了在畸变环境下广泛采用的对图像进行质量评价的图像质量指数<sup>[6]</sup>进行度量, 结果如表 1 所列。

表 1 均值融合、中值融合、本文算法结果的图像质量指数对比

| 图像质量指数 $Q$  | 均值融合   | 中值融合   | 本文方法   |
|-------------|--------|--------|--------|
| brick       | 0.1604 | 0.2117 | 0.3742 |
| small font  | 0.2597 | 0.3018 | 0.5360 |
| middle font | 0.2592 | 0.2793 | 0.4306 |

表中的图像质量指数值的范围为  $[-1, 1]$ , 越高则代表对应的图像质量越好。从表中可以看出, 在 3 个真实数据集上,

本文方法相对于均值融合、中值融合来说,都有非常大的改进,这和直观的效果是一致的,证明了本文方法的有效性。

**结束语** 本文提出了一种在畸变环境中对图像序列进行融合的方法。该方法首先利用基于 B 样条的非刚性配准技术,对图像序列中每幅图像的局部畸变进行校正,之后,通过计算每幅校正后图像的质量指数,充分利用图像的互补信息进行融合。通过在真实数据集上的对比实验证明,该融合算法能有效地完成畸变环境中的图像序列校正。

在今后的研究中,将进一步研究提升图像融合质量的方法,提升对畸变的校正效果、消除环境的影响。同时进一步寻找在畸变环境中对图像质量进行判定的更客观的方法,对实验结果进行定性分析。

## 参 考 文 献

- [1] 刘纯胜,卢晓芬,洪汉玉,等. 基于特征点配准的气动光学图像校正方法研究[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(10):1468-1472
- [2] Rueckert D, Sonoda L, Hayes C, et al. Nonrigid registration using free-form deformations; application to breast mr images [J]. Medical Imaging, 1999, 18(18): 712-721
- [3] 李雄飞,张存利,李鸿鹏,等. 医学图像配准技术进展[J]. 计算机科学,2010,37(7):27-33
- [4] 王伟,苏志勋. 基于移动最小二乘法的医学图像配准[J]. 计算机科学,2010,37(9):270-272
- [5] Shimizu M, Yoshimura S, Tanaka M, et al. Super-resolution from image sequence under influence of hot-air optical turbulence [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, 2008:1-8
- [6] Wang Zhou, Sheikh H R, Bovik A C. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84
- [7] Zhu X, Milanfar P. Removing atmospheric turbulence via space-invariant deconvolution [J]. IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 35(1): 157-170
- [8] Zhu X, Milanfar P. Image reconstruction from videos distorted by atmospheric turbulence [C]//SPIE Electronic Imaging, Conference on Visual Information Processing and Communication, 2010
- [9] Oreifej O, Shu G, Pace T, et al. A two-stage reconstruction approach for seeing through water [C]// Computer Vision and Pattern Recognition, 2011:1153-1160
- [10] Szeliski R, Coughlan J. Spline-based image registration [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 22(3): 199-218
- [11] Myronenko A, Song X. Intensity-based image registration by minimizing residual complexity [J]. IEEE Trans. on Medical Imaging, 2010, 29(11): 1882-1891
- [12] Aubailly M, Vorontsov M A, Carhat G W, et al. Automated video enhancement from a stream of atmospherically-distorted images; the lucky-region fusion approach [C] // Proceedings of SPIE, 2009
- [13] Aubailly M, Vorontsov M A, Carhat G W, et al. Image enhancement by local information fusion with pre-processing and composed metric [C]//Proceedings of SPIE, 2008
- [14] Tian Y, Narasimhan S. Seeing through water; Image restoration using model-based tracking [C]// International Conference on Computer Vision, 2009:2303-2310
- (上接第 225 页)
- [6] Fader A, Soderland S, Etzioni O. Identifying relations for open information extraction [C]// Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, Edinburgh, UK, 2011: 1535-1545
- [7] Akbik A, Bross J. Wanderlust: Extracting semantic relations from natural language text using dependency grammar patterns [C]// Proceedings of The WWW 2009 workshop on semantic search, Madrid, Spain, 2009: 6-15
- [8] Akbik A, Löser A. KRAKEN: N-ary Facts in Open Information Extraction [C]// Knowledge Extraction Workshop at NAACL-HLT 2012, Montréal, Canada, 2012: 52-56
- [9] 吴平博,陈群秀,马亮. 基于事件框架的事件相关文档的智能检索研究[J]. 中文信息报, 2003, 17(6): 25-30
- [10] Wang W, Zhao D Y, Wang D. Chinese news event 5 w 1 h elements extraction using semantic role labeling [C]// Proceedings of the third International Symposium on Information Processing, China, Qingdao, 2010: 484-489
- [11] 刘耀华. 基于句法分析的中文事件抽取方法研究[D]. 上海: 上海大学, 2009
- [12] Westermann U, Jain R. Towards a Common Event Model for Multimedia Applications [J]. IEEE MultiMedia, 2007, 14(1): 19-29
- [13] Scherp A, Franz T, Saathoff C, et al. F—a model of events based on the foundational ontology dolce+ DnS ultralight [C]// Proceedings of the fifth international conference on Knowledge capture, Redondo Beach, California, 2009: 137-144
- [14] 王伟,赵东岩. 中文新闻事件本体建模与自动扩充[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(4): 171-175
- [15] <http://nlp.stanford.edu/software/lex-parser.shtml>
- [16] HtmlParser. <http://htmlparser.sourceforge.net/>
- [17] ICTCLAS. <http://www.ictcls.org/index.html>
- [18] 鲁川. 知识工程语言学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010
- [19] Minsky M. A Framework for Representing Knowledge [EB/OL]. <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/6089/AIM-306.pdf?sequence=2>
- [20] Chang P C, Tseng H, Jurafsky D, et al. Discriminative reordering with Chinese grammatical relations features [C]// Proceedings of the Third Workshop on Syntax and Structure in Statistical Translation, Boulder, Colorado, 2009: 51-59
- [21] Allen J F. Maintaining Knowledge About Temporal Intervals [J]. Communications of the ACM, 1983, 26: 832-843
- [22] Randell D A, Cui Z, Cohn A G. A Spatial Logic Based on Regions and Connection [C]// Proc. 3rd Int. Conf. on Knowledge Representation and Reasoning. Morgan Kaufmann, San Mateo, 1992: 165-176
- [23] Frank A. Qualitative Spatial Reasoning: Cardinal Directions as an Example [J]. In International Journal of Geographic Information Systems, 1996, 10(3): 269-290
- [24] Faber P, Mairal R. Constructing a Lexicon of English Verbs [M]. Berlin/New York: Mouton de Gruyter, 1999