第7卷 第10期
1987年10月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 7, No 10
October, 1987

光计算中关联存储器的一种新模式

杨 世 宁
(中国科学院广州电子技术研究所)

提 要

本文提出了光计算中关联存储器的一种新的存储模式，称为自反关联存储器。在这种模式中，矢量是以矢量对的形式被贮存在存储矩阵中。用预先贮存的矢量对中的一个矢量的部分信息不但能取出这个矢量的完整矢量，而且能取出这个矢量对中的另一个矢量。文中并提出了自反关联存储器的光学实现方法。

关键词： 光计算机。

一、引 言

关联存储器(内容寻址存储器)是光计算中的重要部分。从理论上讲，人大脑中的信息就是以这种方式被贮存的。它对于光计算、信息识别、推论、联想、人工智能等都非常有用。

关联存储是存储信息集合的整体性质。它不是用存储器的地址，而是用存储器的部分内容来取出存储器的信息。从存储器的部分信息，可以取出这个存储器的全部信息。它可复原或改正输入信息，具有惊人的错误校正能力。光学处理的一个特点是对大量数据的并行计算，这正是关联处理所需要的。

J. Hopfield 在1982年提出了关联存储器的一种简单模式[1]。N. H. Farhat 和 D. Psaltis 等人在1985年用光学方法实现了这种模式[2]。在这种模式中，只能由一个已贮存的二元矢量的部分矢量取出这个矢量的完整矢量，而不能取出存储器所贮存的另一个矢量。

本文在文献[1]的基础上提出了一种新的存储模式，称为自反关联存储器。在这种模式中，矢量是以矢量对的形式被贮存在存储矩阵中。用预先贮存的矢量对中的一个矢量的部分矢量不但能够取出这个矢量的完整矢量，而且能取出这个矢量对中的另一个矢量。自反关联存储器这一新概念对人工智能和推论是特别有意义的。这相当于人们从以前所经历的一个事件而联想起另一事件。

二、数 学 模 式

在自反关联存储器中，信息以矢量对的形式被贮存在存储矩阵的互相联系的单元中。令 $U^{(m)}$ 和 $V^{(m)}$ 是第 m 对 N 比特长的二元矢量，$m=1, 2\cdots, M$。他们遵照下面的数学表达式被贮存在存储矩阵中。

收稿日期：1986年9月22日；收到修改稿日期：1986年12月1日

$$T_{ij}=\begin{cases}\sum_{m=1}^{M}\{[2U_i^{(m)}-1][2V_j^{(m)}-1]+[2V_i^{(m)}-1][2U_j^{(m)}-1]\} & (i\neq j),\\ 0 & (i=j)。\end{cases} \tag{1}$$

式中 $U^{(m)}$ 和 $V^{(m)}$ 是单极二元矢量。当 $U_i^{(m)}=0$ 时，$[2U_i^{(m)}-1]=-1$。当 $U_i^{(m)}=1$ 时，$[2U_i^{(m)}-1]=1$。因此，$[2U_i^{(m)}-1]$ 使一个单极二元矢量 $U_i^{(m)}(0,1)$ 变成了一个双极二元矢量$(-1,1)$。

令 $U^{(mp)}$、$V^{(mp)}$ 是预先贮存的矢量对的部分矢量。存储器的内容能利用这部分矢量与存储矩阵 T_{ij} 相乘、反馈迭代和阈值操作被取出。$V_i^{(m)}=\sum_j^N T_{ij}U_j^{(mp)}$，$U_i^{(m)}=\sum_j^N T_{ij}V_j^{(mp)}$。当一个部分矢量 $U^{(mp)}$ 被输入时，经数次反馈迭代，存储器的输出自然地收敛于所贮存的信息，$V^{(m)}$ 和 $U^{(m)}$ 能交替地被取出。自反关联存储器这种从一个预先贮存的部分矢量不但能取出该矢量的完整信息，而且能取出与它一起预先贮存的同一矢量时的另一矢量的特性，对于人工智能、联想和推论是很有意义的。

三、数字模拟的结果

在第一次迭代中，存储器由输入的部分矢量和存储矩阵 T_{ij} 相乘和阈值处理来实现。在

$U^{(1)}$ 1 1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0
$U^{(2)}$ 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0
$V^{(1)}$ 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 1
$V^{(2)}$ 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 0 1 0 1 1 0 1 0

Fig. 1 Stored four 32-bit vectors

0 1 0-1-1 0-1 0-1 0-1 0-1-1-1 0-1 1 1 1-1 0 1 1 1 1 0 0-1-1 0 0 1 0
1 0-1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 0-1-1-1 0 0 0-1 0 0 0-1-1-1 1 0-1 1-1 1
0-1 0 0-1 0 1 0 1 0 1-1-1 0 1 0-1 1-1-1 1 1 1-1-1 0 1 1 0 0 0 0
-1 1 0 0 1 0-1-1-1-1 1-1-1 0-1 0-1 1-1 0-1-1 1 1 0 1-1 1 1 0 0 0
-1 0-1 1 0 1 0-1 0-1 0 0 0-1 0-1 0 0 0 1-1-1 0 0 1 1 0 0 1 1-1 1
0 1 0 0 1 0-1 0-1 0-1 1 1 1 0-1 0 1-1 1 1-1-1-1 1 1 0-1-1 0 0 0 0
-1 1 1-1 0-1 0-1-1-1 0 0 0 1-1 1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1-1 0 1-1 1-1
0 1 0-1-1 0-1 0-1 0-1-1-1 0-1 1 1 1-1 0 1 1 1 1 0 0-1-1 0 0 1 0
-1 1 1-1 0-1-1-1 0-1 0 0 0 1-1 1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1-1 0 1-1 1-1
0 1 0-1-1 0-1 0-1 0-1-1-1 0-1 1 1 1-1 0 1 1 1 1 0 0-1-1 0 0 1 0
-1 0 1 1 0-1 0-1 0-1 0 0 0 1 0-1-1 0 0-1 0 0 0 0-1 1 0 1 1-1-1-1
-1 0-1-1 0 1 0-1 0-1 0 0-1-1 0 1 0 1-1-1 0 0 1 0-1 1 0 0 1 1 1 1
-1 0-1-1 0 1 0-1 0-1 0-1 0 1 0 1-1-1 0 0 1 0-1 1 0 0 1 1 1 1
0-1 0 0-1 0 1 0 1 0 1-1-1 0 1 0-1 1-1-1 1 1 1-1-1 0 1 1 0 0 0 0
-1 1 1-1 0-1-1-1-1-1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1-1 0 1-1 1-1
1-1 0 0-1 0 1 1 1 1-1 1 1 0 1 0 1-1 1 0 1 1-1-1 0-1 1-1-1 0 0 0
1 0-1-1 0 1 0 1 0 1-1 0 0-1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1-1 0-1-1 1 1 1
1 0 1 1 0-1 0 1 0 1 0 1 1-1 0-1 0 0 1 1 0 0-1 0 1-1 0 0-1-1-1-1
-1 0-1-1 0 1 0-1 0-1 0-1-1-1 0 1 0 1 0-1 0 0 1 0-1 1 0 0 1 1 1 1
0-1-1 0 1 1 1 0 1 0-1-1-1-1 1 0 1 1-1 0-1-1 1-1 0 0 1-1 0 1 0 1
1 0 1-1-1-1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0-1 0 1 0 0-1-1 0 0-1-1 1-1
1 0 1-1-1-1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0-1 1 0 0 0-1-1 0 0-1-1 1-1
1 0 1 1 0-1 0 1 0 1 0 1 1 1 0-1 0-1 1 1 0 0 0 0 1-1 0 0-1-1-1-1
1-1-1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0-1 1-1 0 0 0-1 0 0 0 0-1-1 1 0-1 1-1 1
0-1-1 0 1 1 1 0 1 0-1-1-1-1 1 0 1 1-1 0-1-1 1-1 0 0 1-1 0 1 0 1
0-1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 1 1 0 1-1-1-1 1 0-1-1-1-1 0 0 1 1 0 0-1 0
-1 1 1-1 0-1-1-1-1-1 0 0 0 1-1 1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1 0 0 1-1 1-1
-1 0 1 1 0-1 0-1 0-1 1 0 0 1 0-1-1 0 0-1 0 0 0 0-1 1 0 0 1-1-1-1
0-1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 1 1 0 1-1-1-1 1 0-1-1-1-1 0 0 1 1 0 0-1 0
0 1 0 0 1 0-1 0-1 0-1 1 1 0-1 0 1-1 1 1-1-1-1-1 1 1 0-1-1 0 0 0 0
1-1 0 0-1 0 1 1 1 1-1 1 1 0 1 0 1-1 1 0 1 1-1-1 0-1 1-1-1 0 0 0
0 1 0 0 1 0-1 0-1 0-1 1 1 0-1 0 1-1 1 1-1-1-1-1 1 1 0-1-1 0 0 0 0

Fig 2 Numerical expression of the memory matrix

第二次迭代中，第一次迭代的结果被反馈，并再次与存储矩阵 T_{ij} 相乘。经数次迭代（矩阵-矢量相乘、阈值处理和反馈）以后，这个输入的部分矢量的完整矢量和与这个部分矢量一起贮存的同一矢量对中的另一个矢量能交替地被取出。

这里给出了自反关联存储器的数字模拟结果。图 1 显示了被贮存在存储器中的四个 32 比特长的矢量。图 2 显示了图 1 的四个矢量按照公式 (1) 所形成的存储矩阵的数字表示。这存储矩阵有 32×32 个象元，是双极二元矩阵。

图 3 显示了使用一个有 12 比特错误的部分矢量 $V^{(1p)}$ 来取这个存储器信息的数字模拟结果。从图 3 可看出，在第四次迭代时，一个完整的矢量 $V^{(1)}$ 已被取出。在第五次迭代时，完整矢量 $U^{(1)}$ 被取出。以后，矢量 $V^{(1)}$ 和 $U^{(1)}$ 被交替取出。

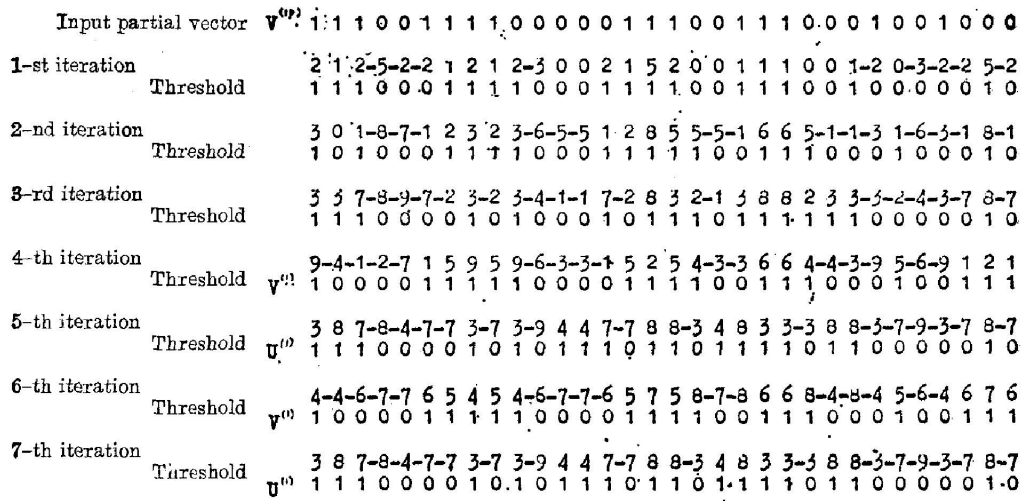
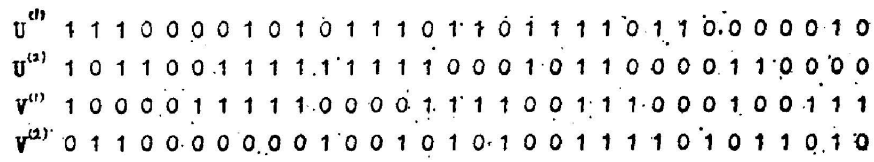


Fig. 3　Digital simulation of iterative process for recalling information of memory

表 1 和表 2 分别给出了 28 比特长和 32 比特长的贮存矢量形成的存储器取出信息的数字模拟结果。从表 1 中可看见，在 28 比特长的贮存矢量形成的存储器中，知道矢量的比特数的 68% 时，完整的贮存矢量能被取出。从表 2 中可看见，在贮存的矢量是 32 比特长时，只要知道矢量的比特数的 63%，完整的贮存矢量就能被取出。

Table 1　Digital simulation results for the memory composed of four 28-bit vectors stored binary vectors



Digital simulation results with different input rectors

input partial vector	$V^{(1)}$	$V^{(1)}$	$V^{(2)}$	$V^{(2)}$	$V^{(1)}$	$V^{(2)}$
number of bits known in the vector	24	22	21	19	22	26
iteration time for converging to stable state	2	1	1	2	2	1

Table 2 Digital simulation results for the memory composed of four 32-bit vectors stored binary vrectrs

$U^{(1)}$ 1 1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 0 0 0

$U^{(2)}$ 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 1 1

$V^{(1)}$ 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1 0 1 0

$V^{(2)}$ 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 0 1 0 1

Digital simulation results with different input vectors

input partial vector	$U^{(1)}$	$U^{(1)}$	$U^{(1)}$	$U^{(2)}$	$V^{(1)}$	$V^{(1)}$	$V^{(1)}$	$V^{(2)}$	$V^{(2)}$	$V^{(2)}$
number of bits known in the vector	31	28	27	30	28	26	20	28	25	26
iteration time for converging to stable state	1	1	1	2	1	1	4	1	2	2

利用公式(1)的数学模式形成的自反关联存储器，矢量的比特长度 N 越长，所能贮存的矢量数越多。当贮存的矢量的长度是 40 比特时，存储矩阵能贮存 6 个矢量。并且，当矢量的比特长度越长时，错误的矫正能力越强。

四、自反关联存储器的光学实现

为了用光学方法实现自反关联存储器，把双极二元矩阵 T_{ij} 分成二个子部分。一个是代表正值的掩膜，另一个是代表负值的掩膜。在代表正值的掩膜中，所有 $T_{(I,J)}=1$ 的象元是透明的，而其它象元是不透明的。在代表负值的掩膜中，所有 $T_{(I,J)}=-1$ 的象元是透明的，其它象元是不透明的。图 4 和图 5 分别是图 2 所示的存储矩阵的正掩膜和负掩膜的照片。

图 6 是用光学方法实现自反关联存储器的示意图。经准直的 He-Ne 激光束通过输入矢量 $V^{(mp)}$ 的透明片后，被分成二束，每一束光分别通过存储矩阵 T_{ij} 的正掩膜 T_P 和负掩膜 T_N，分别实现输入矢量 $V^{(mp)}$ 与存储矩阵的正掩膜和负掩膜相乘。

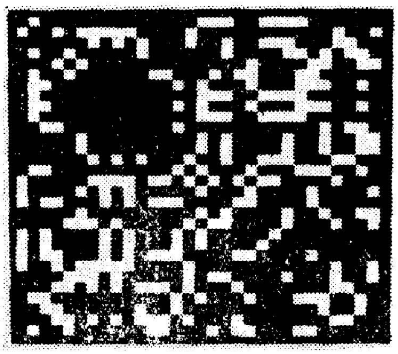


Fig. 4 Photo of positive mask of the memory matrix

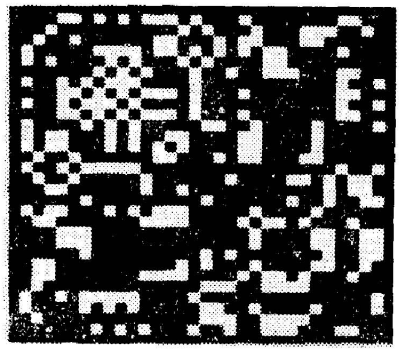


Fig. 5 Photo of negative mask of the memory matrix

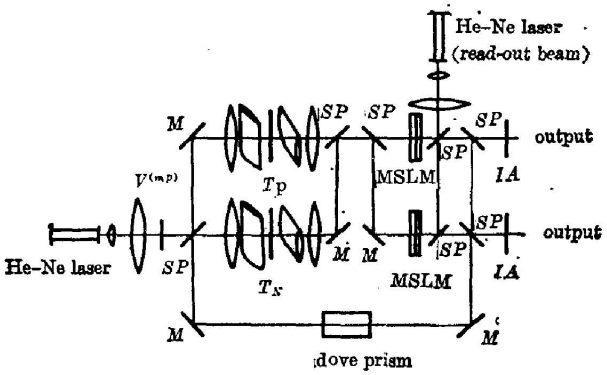


Fig. 6　Diagram for optical implementation of the reflexive associative memory

T_P—positive mask of memory matrix; T_N—negative mask of memory matrix; MSLM—micro-channel space light modulator; IA—intensity attenuator; M—mirror; SP—beam splitter.

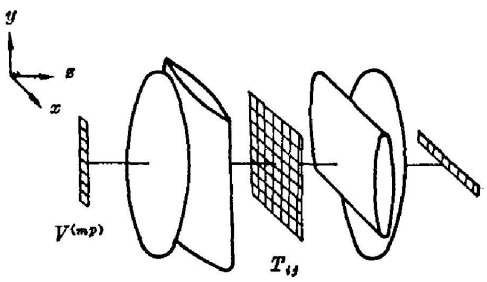


Fig. 7　multiplying matrix by vector

矢量与矩阵 T 相乘是由透镜和柱面透镜来实现(图 7)。矢量 $V^{(mp)}$ 被矩阵掩膜 T 前的光学元件沿 y 方向成象和沿 x 方向扩展后，通过矩阵掩膜 T。通过矩阵掩膜 T 后的光线沿 y 方向被聚集。

矢量与矩阵 T 的正掩膜 T_p 的乘积和矢量与负掩膜 T_N 的乘积的相减由微通道空间光调制器(MSLM)来实现。微通道空间光调制器能实现二象的相减，并记录相减的结果。因为矢量对的二个矢量在迭代过程中是交替地产生，因此，每一次迭代的结果交替记录在微通道空间光调制器中。使用准直 He-Ne 激光束作微通道空间光调制器的读出光束。输入矢量与存储矩阵相乘后所得的矢量相对于原输入矢量旋转了 90°（见图 7)。使用 Dove 棱镜使反馈象旋转 90°，与原输入矢量同方向，然后重新输入，进行下一次迭代。使用光强度衰减器 IA 实现阈值处理。

可编程的空间光调制器(例如：The Litton Lightmod)[4] 已经研制成功，它可为动态存储矩阵掩膜提供高的帧变化率，使这种模式的光学实时实现成为可能。

作者感谢 C. C. Guest 教授对本工作的帮助。

参 考 文 献

[1] J. J. Hopfield; *Proc. Natl. Acad. Scad. Sci. USA*, 1982, **79**, No. 8(Apr), 2554.
[2] D. Psaltis, N. Farhat; *Opt. Lett.*; 1985, **10**, No. 2 (Feb), 98.
[3] J. W. Goodman *et al.*; *Opt. Lett.*; 1987, **2**, No. 1 (Jan), 1.
[4] W. Ross, D. Psaltis *et al.*; *Opt. Eng.* 1983, **22**, No. 3 (May-Jun), 485.

A new model of associative memory in optical computing

YANG SHINING
(*Guangzhou Institute of Electric Technology, Academia Sinica*)

(Received 22 September 1986; revised 1 December 1986)

Abstract

A new memory model of associative memory called the reflexive associative memory in optical computing is presented in this paper. In this model the vectors are stored in a memory matrix in the form of vector pairs. Not only a full vector prestored in associative memory can be recalled from a partial information of the vector, but the other vector of the prestored vector pair can also be recalled. Optical implementation of the reflexive associative memory is also presented in this paper.

Key Words: optical computer.