International Journal of Neural Systems, Vol. [illegible], No. [illegible] [illegible]

A HYBRID NEURAL NETWORK OF ADDRESSABLE AND CONTENT-ADDRESSABLE MEMORY

[illegible]

Received [illegible]
Revised [illegible]
Accepted [illegible]

We investigate the memory structure and retrieval of the brain and propose a hybrid neural network of addressable and content-addressable memory which is a special database model and can memorize and retrieve any piece of information (a binary pattern) both addressably and content-addressably. The architecture of this hybrid neural network is hierarchical and takes the form of a tree of slabs which consist of binary neurons with the same array. Simplex memory neural networks are considered as the slabs of basic memory units, being distributed on the terminal vertexes of the tree. It is shown by theoretical analysis that the hybrid neural network is able to be constructed with Hebbian and competitive learning rules, and some other important characteristics of its learning and memory behavior are also consistent with those of the brain. Moreover, we demonstrate the hybrid neural network on a set of ten binary numeral patters.

Keywords: Forward neural network; addressable memory; content-addressable memory; associative memory; Hebbian learning; competitive learning.

[illegible]

[illegible]

[illegible]

on the of the ne ce ne on n y the e e the o the e M P ode the e c y de c e the f nc on o o of ne on[6] en e p opo ed e n n p po the e en of e c ency of the yn p e e een o ne on nc e e then ey o c e the e e the no no n e n e n n e[7] Ande on f e p opo ed p e ne ne o c n ene e n n e c e e o y[8] Mo e e e ne ne o ode of con en dd e e o oc e e o y e e e ed e ef pec y op e d p opo ed ec en ne ne o e efe ed o op e d ne o[12] nde e e n n e e of of o e p od c o p of p e p e n c n e o ed n e op e d ne o f nc on of oc e e o y een ecen y o n e y e c o en e zed op e d ne o o of oc e e o y op e d ne o[13–15]

B ed on e p y o o c f c e e o y o ed n e n y o p nd d y e o p opo ed o o c ne ne o c ed p e e o y ne ne o dMNN[16] c n e n nd e o ze o e n e n y p e n con en dd e e e o y f nc on Mo e e c n e con c ed n e n e n e n n e n ce n en e ne o c n e con de ed c n of e e o y n e n n e of de e no e e e of nfo on n y p e n o ed n dMNN n e n en e e o y of e n e con de ed dMNN n One dMNN y e connec on o e e ed dMNN n e dMNN n e e of one p e n y c e e of e o e e ed p e n e e o oc e e o y n y n e of dMNN y connec o e e n ce n o de o e n nd e o ze p o e po p e n eq ence Ce n y e nfo on oc on on e e dMNN e y po n o n n nfe ence dec on e c o e fo p c y e ne ec e e e e o oc e e o y connec on on e e dMNN n e c en p pe

A e p e n o ed n dMNN n con en dd e e y nd c n e e ed on y f o n dMNN e o e dMNN one p e e n of e e of p e n on e dMNN n o n e np p e n o e dMNN n f p e y Ce n y e co e pond n p e n c n e e ed f o o e dMNN f e n e ne on n e n o o e e en e ee o e o e n B ncon en e o o c nd n e ne on e c e on y n o e oc e on of e n en e ee o e o e n Mo e e o ncon en e e of p y o o c e pe en e e o y e ed o dd e y nd con en dd e y o doe e n e e p ece of nfo on p e n n e dMNN n dd e y e c c on y e of oo n y e c e e c n ne e nfo on e o zed n o c e c e e c n e n n f c en e e o e ne nfo on e y n o e e o e o e e o zed nfo on n y e ne nfo on e e o zed y c c e c e con en en e e e n e of nfo on f o e np e y e c c e c nd n y e e y ce n dMNN n e dMNN n e efo e e e e p of e c c e c of e nfo on y e e n dd e fo e nfo on n dd e e y e e e nfo on q c y nd co ec y n e of de e p opo e y d ne ne o of dd e e nd con en dd e e e o y on e dMNN n y e n e of nfo on n y p e n e o zed nd e e ed o dd e y nd con en dd e y Con eq en y y d ode e po e e con en dd e e e o y co p e e dd e e e o y

n eq e e p opo e e y d ne ne o of dd e e nd con en dd e e e o y n dec 2 e f e d c e e n n e of e y d ne ne o n dec n dec p e on e pe en cond c ed o de on e o p opo ed ne o n y e e ef conc on n dec

Mo o y o

e e n ef de c p on of p e e o y ne ne o dMNN[16] ene y n dMNN con of n connec ed n y o M P ne on de ned y e $(w_{ij})_{n\times n}$ nd e o dvec o θ ce n con en dd e e

e o y f nc on e dMNN fo n y p e n $U = (u_1, u_2, \ldots, u_n)^T \in \{ , \}^n$ n e o co ec n c p c y t c n e con c ed y

$$w_{ij} = \begin{cases} & \text{f } u_i \quad u_j \quad 2, i \,/\, j \\ - & \text{f } u_i \quad u_j \quad , i \,/\, j \\ & \text{f } u_i \quad u_j \quad , i \,/\, j \\ & \text{f } i \quad j \end{cases}, \quad \theta_i \quad d_H(U) - (t$$

fo $i, j = , 2, \ldots, n$ e e $d_H(U) = \sum_{i=1}^{n} u_i$ e n e of U C e y op ed ne o of n n y ne on o c y e e $d_H(X, U) = \sum_{i=1}^{n} |x_i - u_i|$ e e n d nce e een X nd U ndeed con c ed dMNN e e e c e c en e np p e n $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^T \in \{ , \}^n$ e $d_H(X, U) \le t$ e e n e of e o p pe n on e of e np p e n n con o U no o e n t e ne o e e U $(U$ e ed o e e e ne o e e $(U$ no e ed nd e ne o n q e cen e C e y e p e n U o ed n e dMNN n d e nd con en dd e e y o o n y eo e c n y n ef n dMNN fo p e n c n e con c ed e n e n n e

e no p opo e o y d ne ne o of dd e e nd con en dd e e e o y on e dMNN n d c y c n e de c ed e p of ee of e e e of e ee con of n n y ne on e e y e oo e e e n q e np of o ne o e e n e e e e of dMNN n e dMNN n e e dMNN e con de ed e of c e o y n e n d ed on e e n e e e of e ee e e e n e of n e ed e o d den e een e np nd e e dMNN e ed fo nfo on n on nd p oce n e ne on of ny n dMNN e no n e connec on ey e connec ed o e co e pond n ne on of e of connec ed o n e nfo on fo d nd o do n e e co n c on o n ce n y

Mo e p ec e y e ne o c n e f e de c ed ye fo d ne ne o o e e of c y e e e ne o

con of l ye nd e i ye m_i e ye n e np (o e oo e e n e ee e m_1 ecc e e n fo on e n y p e n f o e o de e on en nd n nfo on o e on e econd ye e m_2 on e ec ond ye d de e e o y n n o m_2 c e e e c y ep e en c of e e o y e m_3 on e d ye f e d de e e o y n n o m_3 c e e on n o m_2 c e A on e econd ye n e nfo on on y o e on e d ye e ep e en e c e e on n o e c of n y e e cep n dMNN o e np one o n on e p e ced n (ef ye nd n e of ene e on e ne (ye o n e nfo on on y o ene e o e e o d e n dd on do n n ne on con n e nfo on of e c ep e en en e nfo on n ed f o e o n o e do n n ne on o ecc e nfo on nd e e c nfo on f e np nfo on e on o e c e do n n ne on p e d po e n o e e nfo on p o o e ene e O e e e do n n ne on p e d n o y n (o no n o p en e nfo on f o p n o o e en e e e nfo on op nd d ppe nce e e o y n y e d e en n e of e c c on dMNN y ppe on e dden ye e e n e e e of e ee

A o n n e e ec e e of p e y d ne ne o en ee ye fo d ne ne o e O o y c n e con de ed e p of ee

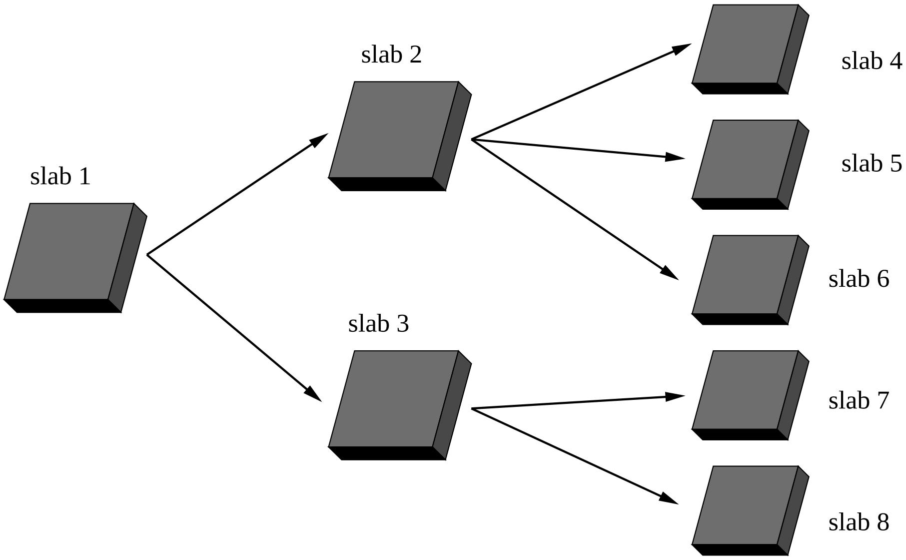

Fig. 1. The architecture sketch of a simple hybrid neural network.

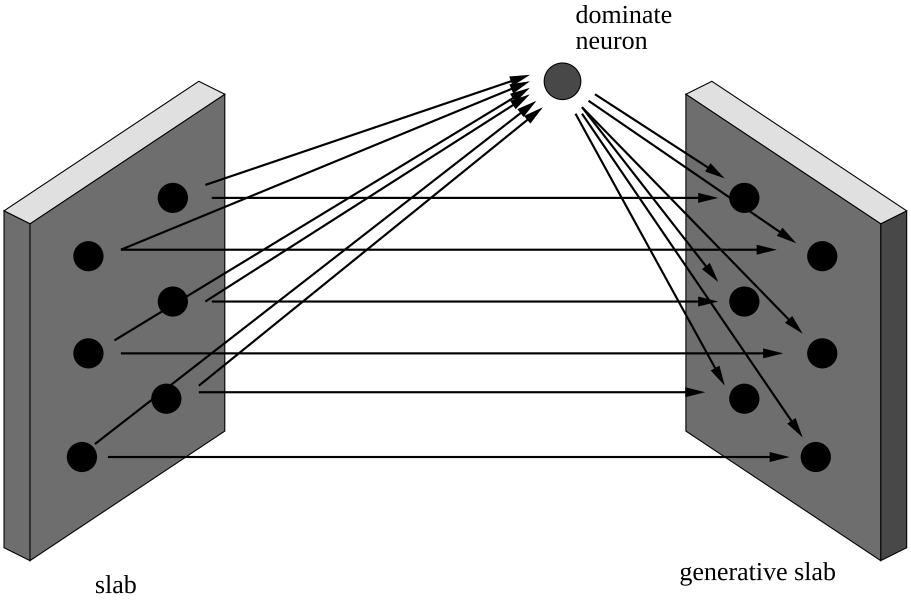

Fig. 2. The sketch of the connections from a slab to its generative slab.

e e e e e e n ye con of e e e e e dMNN fo e n y p e n C e y 2 ee ene e nd o ene e n p e c e e e n y p e n e on n o o c e e o ed dd e y nd con en dd e y e f e e p n o connec o en e e no n dMNN (A o n n 2 e y ne on n e y of e ef connec on y o e co e pond n ne on n e

y of e ene e (e o e e ne on n e ef connec o e do n n ne on of e ene e en connec o e ne on of e ene e Ce n y e o d e en e c n n of e ne on on e ef e n ed o e co e pond n ne on on e e do n n ne on p oce ed e np n f o e ef nd en e o p n o e e ne on on n e e e O o y e y

o de n e nd e connec on o e
y e d c o de n e do n n ne on
fo e e d c e con c on of
e do n n ne on n e ne ec on nce n
dMNN doe no need e do n n ne on e
nfo on n y p e n on o n
e n ed on y o nd en e
e e e o zed p e n o e o e ze o
e

ec e ne ne o c n
e e o e o e p ece of e o zed nfo on
p e n f o one of e dMNN n e e o y
e e dMNN n fo o en p e n
p ece of nfo on np ed on e np ye
o e n ed on y o c
c e c o e do n n ne on
po e n en e do n n ne on
of c ed nd end po e n o
e ne on of e e e o d e of e
ne on of e dec e e eno o e e n
p p e n p o e O e e e
e o d e e n eno o p en e
np p e n f o p n o e nd e
np p e n d ppe e n y
e n y n ed o n e of dMNN
dMNN n e p e y By e con en
dd e e e o y f nc on of e dMNN e p
e n e ce n y e ed o e o ed f o
dMNN en f e np p e n con n o e e
o n con o e e o zed p e n n e
c e e e e o e e o on e np p e n
e e e p e n n e of
e o e e c e p e n e f
y e dec on of e do n n ne on O o y
ne ne o y d ode of dd e e
nd con en dd e e e o y e nfo on
o p e n y n ed n p e
nd d ec ed y e do n n ne on e efo e
e e e p of e c c e c of p
e n d ec e np n o e e e
e e p e dd e n e dMNN n
e p e n n y e ed con en dd e y
n dMNN f o n e of dMNN

L n n n B o o c
c on

e f e d c e e n n e nd o o
c c e c of o p opo ed y d ne

ne o of dd e e nd con en dd e e
e o y n on e y d ne ne
o con de ed o o c y e e on e
connec on e een o ne on e e c ency of
e yn p e e een e A e n e p e ed y
e dMNN ode e ne on n o e yn
ono y nd p e n e ed o e o ed
en dMNN e p e n
e dMNN c n n n e e p e n fo
pe od of e

e ppo e e e n n p oce
p oce of yn p e od c on e e e o d
e of ne on e no con on o e e n
n e o e f e ppo e e ne
on n oc e d o e e e e o d
e o e c n ne e e on en
e f c nd ppo e dy o n
n ef n dMNN c n e con c ed
e n e n n e C e y e connec on f o
one o ene e e p e nd c n e
o con c ed y e n e n n e en e
on y need o con de e e n n e o con c
do n n ne on fo

Acco d n o f nc on e do n n ne on
fo de ec e e e np p e n e on
o e c o e ep e en en e n
p p e n e on o e c e do n n ne
on end po e n o e of e ne on n
e o e e p e n p o O e e
en e np p e n doe no e on o e c
e do n n ne on end n o y n o
no n o e of e ne on n e o e
e p e n d ppe e en y e e
do n e ne on of e n one ye co pe e
e np p e n fo e c e o c e o
e c n ppy e nne e e[18] of co pe
e e n n o con c n e e do n e ne on
of e n e dden ye of e y d ne
ne o fo o

o c y e e $\mathcal{V}$ $\{V^0, V^1, \ldots, V^{N-1}\}$ e
e e of n y p e o nd d p e n o
e p oce ed e con de e do n e ne
on of e n e econd ye e c fy
e N n y p e p e n n o m_2 c e Ac
y e e m_2 do n e ne on fo co pe e
ye fo e np p e n e e p y deno e
e e e ec o of e do n e ne on of i
y W_i $w_{i1}, \ldots, w_{in}$ $^T, i$ $, 2, \ldots, m_2$ e o
e e e e ec o o e no zed e

$\|W_i\|$ e nne e (o c c co pe e e n n e fo e e do n e ne on o e ec o con of e fo o n o ep

ep ndo y e p e V f o $\mathcal{V}$ nd fo i $, \ldots, m_2$ e

$$u_i \begin{cases} , & \text{f } i \quad c \quad W_c^T V \quad {}_j W_j^T V, \\ , & \text{o e e.} \end{cases}$$ (2

e e u_i deno e e o p of e do n e ne on of i

ep 2 pd e e e ec o W_i y

$$W_i \quad \eta u_i(V - W_i \,, \qquad ($$

no z n

C e y fo e e p e n on y e nnn n W_c pd ed e p e e η $\leq \eta \leq$ e e n n e e e po e n e o f o e on e n e nd en ed ce o ze o cco d n o e o c ed o n Mon o o c pp o on p oced e [19]

A e e n n p oce co p e ed e e o ned e e ec o of e e do n e ne on do n e ne on ep e en c of e p e p e n n f e do n e ne on i n e p e p e n V^j n e co pe on o p u_i nd e o p of e o e do n e ne on e ze o Acco d n o e f nc on of e co pe e e n n e c c on e e do n e ne on ed on e y of e p e p e n con en e f nc on of o y d ne ne o pec y f e do n e ne on i on y n one p e p e n f e e co pe e e n n co p e ed e e e MNN of p e n n e d of o e do n e ne on of n e e q en dden ye e c n e e e od o n e ec o n on e n n e of p e p e n eco e e c of p e p e n e do n e ne on of o n ep e en nd e do n e ne on n e co pe on e o e of e ene e e o n e efo e e c n con c e do n n ne on e nne e e of co pe e e n n

By e d c on e do n n ne on c n e con c ed ce n co pe e e n n e e e efo e e y d ne ne o c n e con c ed e n nd co pe e e n n e e e e e d c on of pe fo nce n e ne ec on e e o e d c on on o o c n c nce nce n e n n nd co pe e e n n e on y e ed o e n e n po e e e e o o c y d ne o n e n fo e nfo on o e (e o y nd e e f e e o en fo e e ence of e o o c y d ne o n e n fo o

- cco d n o e n o y of e n no n e e o y o nfo on d ed on e co e o e e np n f o e eye e e c e n ed o n e of ye of n e ed e ne on o e e co e nd e e e nfo on e e nce e co e e on e nfo on nne f o e en o y o n e ne ne o ec e f o e np ye of one en o y o n o e co e e e fo of ee f e do no con de e e e o oc e e o y n e co e con en o p opo ed y d ne o
- econd e do n n ne on c n e e e d d e of nfo on n p e nd n y By e d c on e do n n ne on de ec o of ce n y n e p e p e n nd e c n de n y e co pe e e n n f e y de ec ed e do n n ne on e e c o y nd end o e (e c nce o dec e e e e e o d e of e ne on on e (No e e ne on on e e e e o d e y o p po en e p e n p o e fo f e n on O e e f e y no de ec ed e do n n ne on e o y nd end o e o e nce (o no n o nc e e (o e n e e o d e o e ne on eep q e cen en f e p e n n ed e e efo e e p e n ce n y d ppe

n p e d c on e e fo nd y d ne ne o e on e ode o dec e e e o y c e o nfo on o e nd e e n n e n

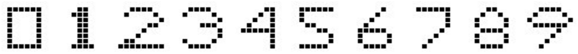

Fig. 3. The ten binary numeral patterns for the simulation experiment.

on

n ec on on e pe en on e en n y n e p e c ed o o de on e o p op

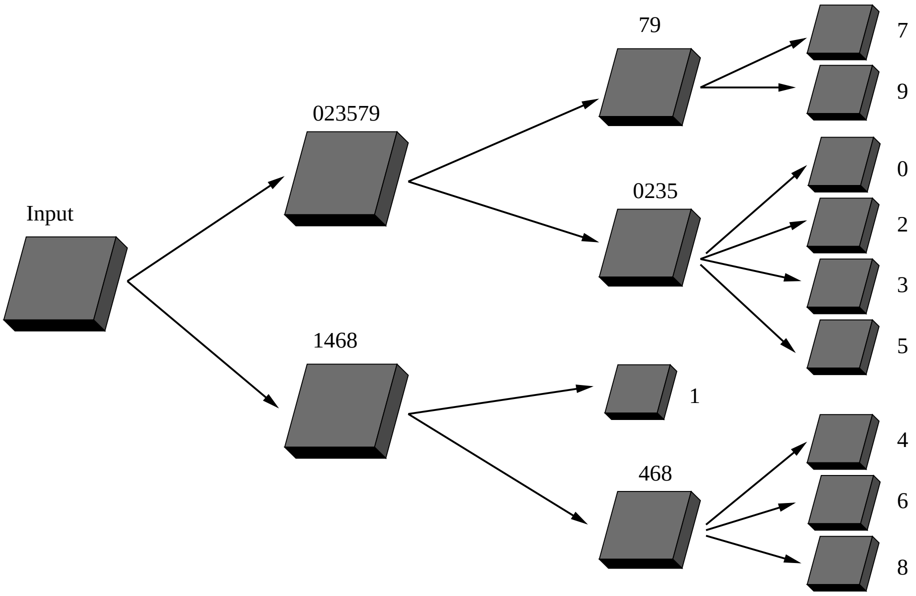

Fig. 4. The structure of the trained hybrid neural network for the ten binary numeral patterns. The numerals over each hidden slab represent the binary numeral patterns the slab wins. The slab with a single numeral is just the SMNN slab of this binary numeral pattern.

d t_k^* SMNN of V^k e n y c ed nd e V^k e o SMNN e y q e cen Acco d n o e f nc on of e con c ed SMNN $t_k^* \leq t_k^*$ o e t_k^* c nno e co p ed d ec y f o e p e of e y d ne ne o e no e e e f o e on e n e fo o n y

o e V^k nd n n e e n e $j (j \geq$ e ndo y e ec np n y p e n n d nce e n j f o V^k fo e y d ne ne o [a] e e np n y p e n c n e con de ed V^k po ed y j e o n o e j co ponen of e en ope e e y d ne ne o e np n y p e n nd ec e e n y c e SMNN of V^k nd e e o e SMNN e q e cen f e y d ne ne o doe o fo np n y p e n e e e j po e d of c on of V^k n y fo j f o $, 2, \ldots,$ e c n e t_k^* e e po e d of c on of V^k

B ed on e on e e e e ed e e t_i^* fo o

$$(t_0^*, t_1^*, t_2^*, t_3^*, t_4^*, t_5^*, t_6^*, t_7^*, t_8^*, t_9^*$$

By co p n t_k^* t_k^* e nd e en n y n e p e n c n e e on y e ed f o e y d ne ne o en ey e n no y e on en nce $t_k^* - t_k^* \leq$ e t_k^* c o e o t_k^* f e o n e e ec o of e do n e ne on o ned f o e co pe e e n n e on e nd o fo e n e p e n o een ned on y f o e p c n e p e n n e y pec on e np n y p e n V doe no e on o ny $N_{t_k^*}(V^k$ e y d ne ne o y e on e e o e q e cen e SMNN e no n e p e n e ed

onc on

e e e ed e e o y c e nd e n e n n e n e d n e SMNN e e o y n n e n e e p opo ed y d ne ne o of dd e e nd con en dd e e e o y By y d ode

[a] If the nu er of ll the input in ry p tterns with H ing dist nce eing j fro V^k is less th n we will use ll the possi le input in ry p tterns

n y p e n e o zed nd e ed o dd e y nd con en dd e y By e n y e e fo nd e y d ne ne o c n e con c ed e n nd co pe e e n n e Mo e e ce n po n f nc on n cco d e e o y o of e n n y e de on ed e y d ne ne o on e of en n y n e p e n

Ac no [illegible] n

o ppo ed y e N C [illegible] 22 nd e N [illegible]ence o nd on of n don P nce [illegible]

[illegible]nc[illegible]

1. J. R. Anderson 1983, [illegible] (Cambridge, Mass.: Harvard University Press).
2. B. B. Murdock 1982, "A theory for the storage and retrieval of item and associative information," [illegible] **89**, pp. 609–626.
3. G. Gillund and R. M. Shiffrin 1984, "A retrieval model for both recognition and recall," [illegible] **91**, pp. 1–67.
4. K. S. Lashley 1951, "The problem of serial order in behavior," In L. A. Jeffress (ed.), [illegible] (New York: Wiley).
5. N. Burgess and G. J. Hitch 1999, "Memory for serial order: A network model of the phonological loop and its timing," [illegible] **106**, pp. 551–581.
6. W. S. McCulloch and W. Pitts 1942, "A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity," [illegible] **5**, pp. 115–133.
7. D. Hebb 1949, [illegible] (New York: Wiley).
8. J. A. Anderson 1972, "A simple neural network generating an interactive memory," [illegible] **14**, pp. 197–220.
9. W. A. Little 1974, "The existence of persistent states in the brain," [illegible] **19**, pp. 101–120.
10. T. Kohonen 1978, [illegible] (Berlin, Federal Republic of Germany: Springer-Verlag).
11. J. A. Anderson and G. E. Hinton 1981, "Models of information processing in the brain," In G. E. Hinton and J. A. Anderson (eds.), [illegible] (Hillsdale, NJ: Erlbaum).
12. J. J. Hopfield 1982, "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities," [illegible] **79**, pp. 2245–2558.
13. J. Ma 1997, "The stability of the generalized Hopfield networks in randomly asynchronous mode," [illegible] **10**, pp. 1109–1116.
14. J. Ma 1999, "The object perceptron learning algorithm on generalised Hopfield net works for associative memory," [illegible] **8**, pp. 25–32.
15. J. Ma 1999, "The asymptotic memory capacity of the generalized Hopfield networks," [illegible] **12**, pp. 1207–1212.
16. J. Ma 1997, "Simplex memory neural networks," [illegible] **10**, pp. 25–29.
17. J. Ma 2001, "A neural network approach to real-time pattern recognition," [illegible] **15**, pp. 937–47.
18. R. Hecht-Nielsen 1990, [illegible] (Reading, MA: Addison-Wesley).
19. H. Robbins and S. Monro 1951, "A stochastic approximation method," *Ann* [illegible] **22**, pp. 400–407.