

# CÔNG NGHỆ MẠNG NƠN TẾ BÀO - CNN VÀ ỨNG DỤNG

PHẠM ĐỨC LONG<sup>1</sup>, PHẠM THƯỢNG CÁT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Khoa Công nghệ thông tin - Đại học Thái Nguyên*

<sup>2</sup>*Viện Công nghệ thông tin - Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam*

**Abstract.** The CNN (Cellular Neural Networks) invented by American and Hungarian scientists in 1988, have processing speed of  $10^{12}$  OPS. They have been used in image processing tasks, which can process the images even at speed of 10 - 50000 frame per second (fps). This is an emerging technology structuralized by ten of thousand CPUs in a parallel on a chip. Thanh to CNN, many complex mission are solved in real-time, that can't be solved by normal digital computer. Many international conferences about CNN have been organized all over the World. With processing speed at  $10^{12}$  OPS and image processing at speed 10 - 50000 fps, there is not much difference between analog and digital signal processing.

This paper presents structure and basic characteristics, recent research achievement and development trend of CNN. Application of CNN in the field of industry, medical, security and military are also briefly reported. This is also the first Vietnamese article about CNN which starts to a serie of articles presenting the development research and application of CNN in Vietnam.

**Tóm tắt.** Công nghệ mạng nơon tế bào CNN (Cellular Neural Networks) đã được các nhà khoa học Mỹ và Hungary phát minh ra vào năm 1988 có tốc độ xử lý  $10^{12}$  phép tính/giây và được áp dụng cho các hệ thống xử lý ảnh nhanh 10 - 50000 ảnh/giây. Đây là bước đột phá về chất do cấu trúc của máy tính xử lý CNN là song song với hàng chục ngàn CPU được kết nối thành mạng trong một chip. Công nghệ này cho phép giải quyết nhiều bài toán xử lý phức tạp trong thời gian thực mà các máy tính thông thường chưa làm được. Do là một phát minh mới trên nền tảng mạng nơon, xử lý song song, nên hàng loạt các hội nghị quốc tế về CNN đã được tổ chức trên thế giới thời gian qua và đã tạo nền tảng khoa học cho công nghệ CNN. Với tốc độ xử lý  $10^{12}$  phép tính/giây và xử lý ảnh 10 - 50000 ảnh/giây, ranh giới giữa xử lý tín hiệu tương tự và số không còn nhiều khác biệt.

Báo cáo này nhằm giới thiệu cấu trúc, các tính chất cơ bản của công nghệ mạng nơon tế bào, các kết quả nghiên cứu đã đạt được và xu thế phát triển của CNN trong giai đoạn tới, đồng thời cũng điếm qua các khả năng ứng dụng của công nghệ CNN trong công nghiệp, trong các lĩnh vực y tế, an ninh và quốc phòng. Đây cũng là bài báo đầu tiên về công nghệ CNN bằng Việt ngữ, mở đầu cho các nghiên cứu phát triển và ứng dụng công nghệ CNN ở Việt Nam sau này.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Do tính chất xử lý tuần tự nên các máy tính hiện hành còn nhiều hạn chế về tốc độ xử lý cho các tính toán phức tạp. Để tăng tốc độ xử lý, đã có nhiều nghiên cứu nâng tần số hoạt động của CPU lên GHz và cải tiến nguyên lý hoạt động của các bộ vi xử lý như xử lý ống (pipeline), xử lý siêu luồng (hyper threading). Tuy vậy về cơ bản các hệ tính toán này vẫn

là các hệ tính toán xử lý tuần tự và chưa kể đến việc tăng tốc xử lý của CPU lên cao còn bị hạn chế về nhiều mặt.

Trong nhiều lĩnh vực, yêu cầu về các máy tính có công suất tính toán cực mạnh là rất cấp thiết. Ta có thể thấy các yêu cầu đó trong xử lý ảnh thời gian thực; xử lý quan sát động theo không gian và thời gian như nhận dạng và định vị đa mục tiêu di động trong an ninh quốc phòng; kiểm tra chất lượng sản phẩm các sản phẩm chuyển động nhanh trên dây chuyền công nghiệp; chất lượng ảnh siêu âm trong y tế, chế tạo robot; kỹ thuật chế tạo các thiết bị không người lái... Việc giải các phương trình sóng phi tuyến (phụ thuộc cả không gian và thời gian) trong những khoảng thời gian rất ngắn (chẳng hạn một micro giây) vẫn còn là thách thức với các hệ tính toán xử lý nối tiếp.

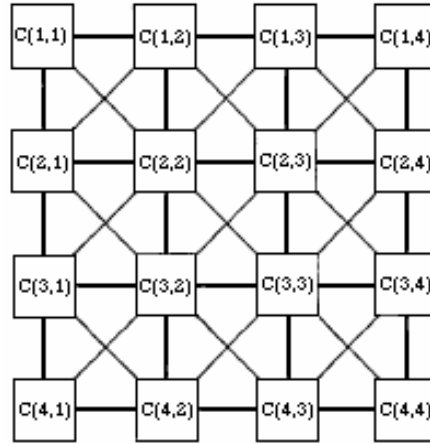
Gần đây phần lớn những nhà sản xuất bộ vi xử lý trên thế giới đã nhận thấy rằng một trong những thách thức lớn nhất trong thời gian sắp tới là tạo được những bộ xử lý song song có hiệu suất cao và một cơ sở hạ tầng để có thể biểu diễn được hình ảnh và video trong thời gian thực, hoặc xử lý những tín hiệu ở cùng một thời điểm nhưng thu được từ những nguồn khác nhau trong không gian. Do cả hai nhiệm vụ này đều liên quan đến tính toán đồng thời không gian và thời gian, việc sử dụng phương trình vi phân phi tuyến đạo hàm riêng (Nonlinear Partial difference Equation - PDE) giúp cho siêu máy tính có thể thực hiện được những tính toán không gian - thời gian đã có một ảnh hưởng rất lớn. Từ đó khả năng lợi dụng những tiềm năng tính toán tương tự theo dòng tín hiệu thay cho cách tính toán số truyền thống theo bit được tăng lên rõ rệt. Mô hình mạng nơron tế bào hay phi tuyến tế bào đã thể hiện đầy đủ khái niệm, giới thiệu một mô hình mới cho quá trình xử lý hỗn hợp số và tương tự [1]. Từ khía cạnh xử lý siêu đẳng kết hợp với khả năng lập trình cơ sở đã đưa tới khái niệm được gọi là máy tính vạn năng tương tự - logic dựa trên mạng nơron tế bào (CNN Universal Machine CNN-UM). Các CNN-UM thế hệ đầu đã tỏ rõ những ưu thế mà chưa bộ xử lý số nào đáp ứng được. Các CNN-UM trong những thế hệ sau được phát triển theo hướng mở rộng cấu trúc với đặc tính học (learning) và tự thích nghi (adaptive) sẽ cho chúng ta các máy tính tương tự - logic siêu mạnh và thông minh đủ đáp ứng nhiều đòi hỏi khắt khe về tính toán và xử lý trong thực tiễn.

## 2. CÔNG NGHỆ MẠNG NƠON TẾ BÀO CNN

Mạng nơron tế bào CNN (Cellular Nonlinear/neural Network) được Leon O. Chua và L. Yang giới thiệu năm 1988 ([2, 3]). Tư tưởng chung là sử dụng một mảng đơn giản các tế bào nối liền nhau cục bộ để xây dựng một hệ thống xử lý tín hiệu analog đồ sộ. Đặc điểm mấu chốt của mạng nơron là xử lý song song không đồng bộ, mô tả bằng hệ động lực liên tục và ảnh hưởng toàn cục của các phần tử mạng ([2]).

Khối mạch cơ bản của CNN được gọi là tế bào (cell). Nó chứa các phần tử mạch tuyến tính và phi tuyến. Tiêu biểu là các tụ tuyến tính, các điện trở tuyến tính, các nguồn điều khiển tuyến tính và phi tuyến, và các nguồn độc lập. Mỗi một tế bào trong CNN chỉ nối tới các tế bào láng giềng của tế bào đó. Các tế bào liền kề có thể ảnh hưởng trực tiếp tới mỗi tế bào khác. Các tế bào không nối trực tiếp với nhau có thể tác động đến tế bào khác gián tiếp bởi sự tác động lan truyền của động học của CNN.

CNN có thể là lớp đơn hoặc nhiều lớp. Xét một lớp đơn chứa các cell  $C_{ij}$  trong đó  $ij$  là hàng cột như trong Hình 1.



Hình 1. Mạng nơon tế bào

Mỗi một tế bào  $C_{ij}$  có các tế bào láng giềng  $C_{kl}$  được định vị trong phạm vi hình cầu xác định ảnh hưởng  $S_{ij}(r) =$  bán kính  $r$ , tâm ở  $C_{ij}$ ,  $r$  là một số nguyên dương. Giả sử mỗi một cell là một bộ xử lý với các giá trị tín hiệu thực đầu vào  $u_{ij}(t)$ , (các) trạng thái  $x_{ij}(t)$ , và đầu ra  $y_{ij}(t)$ . Phương trình trạng thái đơn giản nhất của tế bào được gọi là phương trình CNN tiêu chuẩn (1):

$$\dot{x}_{ij} = -x_{ij} + z_{ij} + \sum_{C_{kl} \in S_{ij}(r)} A(ij; kl).y_{kl} + \sum_{C_{kl} \in S_{ij}(r)} B(ij; kl).u_{kl}, \quad (1)$$

trong đó  $z_{ij}$  được gọi là ngưỡng của tế bào  $C_{ij}$ ,  $A(ij, kl)$  và  $B(ij, kl)$  được gọi là các toán tử hồi tiếp và dẫn nhập (*feedback and feedforward*), trong trường hợp  $r = 1$  chúng là các ma trận  $3 \times 3$ . Tín hiệu trạng thái và tín hiệu đầu ra của mỗi tế bào quan hệ như sau

$$y_{ij} = f(x_{ij}) = \frac{1}{2}(|x_{ij} + 1| - |x_{ij} - 1|). \quad (2)$$

Khi đưa một mảng tín hiệu đầu vào  $u_{ij}$  với  $1 \leq i \leq M$  và  $1 \leq j \leq N$  được định nghĩa như một ảnh với giá trị pixel  $u_{ij}$ , tập hợp giá trị  $(A, B, z)$  quyết định kết quả xử lý của tế bào CNN.  $A$  và  $B$  được gọi là các mẫu vô tính hoặc gọi là gen. Trong không gian bất biến các mẫu là các ma trận  $3 \times 3, 5 \times 5$ , hoặc  $7 \times 7$ . Có nghĩa là mảng CNN có thể được định nghĩa bởi phương trình trạng thái tế bào (1) và ma trận mẫu  $A, B$  và  $z$ . Đầu vào ảnh có thể là tĩnh hoặc động, và lớp CNN đóng vai trò bộ xử lý ảnh.

CNN có thể được thực hiện trên các VLSI.  $A, B, z$  được thể hiện bằng các tham số kết cấu của mạch. Bộ  $(A, B, z)$  chính là trọng số của mạng nơon. Các ma trận trọng số này có thể xác định hoàn toàn cách hoạt động của CNN đối với đầu vào cho trước và điều kiện ban đầu của mỗi tế bào cũng như những điều kiện biên cho trước. Một CNN có thể được sử dụng như một bộ xử lý tương tự, thời gian thực cho chuỗi dữ liệu đầu vào với một bộ ma trận trọng số xác định, kết hợp với phép logic tại chỗ và xử lý toàn mạng. Thuật toán không gian - thời gian sẽ được định nghĩa cho bộ xử lý này bằng thay đổi các ma trận trọng

số trong thời gian. Một bộ những ma trận trọng số cho trước sẽ được phép thực hiện trong một khung thời gian cho trước, và những bộ ma trận trọng khác được chuyển tới có thể tiếp tục xử lý dữ liệu được tạo ra bởi những mẫu trước đó. Nhờ tính ưu việt của việc tính toán thời gian thực quá trình xử lý dữ liệu ở những ma trận rất phức tạp có thể được thực hiện trong một khoảng thời gian rất nhỏ. Các thuật toán xử lý CNN với các bộ trọng số mẫu đã được nghiên cứu phát triển cho nhiều ứng dụng khác nhau đã được đúc kết trong các thư viện chương trình [4]. Nhưng hạn chế của các CNN đơn giản là ở chỗ chưa có một thuật toán hiệu quả nào cho mạng để có thể dạy cho mạng có được những giá trị trọng phù hợp đáp ứng được nhiệm vụ đặt ra. Vì vậy việc tìm ra các thuật toán, bằng kỹ thuật thử và phát hiện lỗi, để có được những trọng số phù hợp hoặc thiết kế được một CNN động là rất cần thiết. Việc mở rộng cấu trúc CNN-UM với các đặc tính học và tự thích nghi ([5, 6, 7]) đã làm tăng cường sức mạnh của chúng và mở rộng phạm vi ứng dụng của chúng.

### 3. NHỮNG KẾT QUẢ CỦA CNN ĐÃ ĐẠT ĐƯỢC THỜI GIAN QUA

Trong những năm gần đây (từ 1992) việc chế tạo các CNN-UM đã đạt được rất nhiều thành tựu: Các chip thế hệ đầu là ACE440 có kích thước mảng  $20 \times 22$  CPU chỉ có thể xử lý ảnh nhị phân, sau đó là ACE4k có kích thước mảng  $64 \times 64$  xử lý cả ảnh nhị phân và ảnh mức xám. Xử lý ảnh mức xám tốc độ đạt đến 1000 frame/giây (fps), còn với ảnh nhị phân có thể đạt 8000 fps. Điều này có nghĩa là chip thuộc loại xử lý TeraOPS [8].

Thế hệ chip CNN tiên tiến nhất hiện nay được tạo bởi một ma trận mạng, các bộ xử lý tương tự  $128 \times 128$  có khả năng lập trình được gọi là ACE16k. Bộ xử lý này được cấu thành từ một ma trận  $128 \times 128$  các tế bào xử lý. Trong ACE16k các tế bào CNN nhiều lớp kết hợp với các sensor có kiến trúc tương tự như cấu trúc sinh học của võng mạc mắt người. Bộ xử lý gồm 16384 bộ xử lý tế bào làm việc song song. Toàn bộ quá trình hoạt động tính toán của con chip cung cấp khả năng xử lý hình ảnh kích thước  $128 \times 128$  lên đến 10.000 fps bao gồm cả vào ra. Mỗi tế bào trong bộ xử lý ma trận tương ứng với một điểm ảnh trong một hình ảnh. Nếu hình ảnh rộng hơn kích cỡ  $128 \times 128$  thì nó được xử lý lần lượt kế tiếp nhau và sau đó hợp nhất với nhau. Con chip này được sử dụng trong hệ thống Bi-i V2. Đây là một thiết bị camera video thông minh được giải thưởng năm 2003 tại Stuttgart - Cộng hòa liên bang Đức, xử lý ảnh độc lập, thời gian thực, bền, tiêu thụ năng lượng thấp (5W - 15W), có thể tích và trọng lượng nhỏ ( $< 1000 \text{ cm}^3$  và  $< 1 \text{ kg}$ ).

Trong thời gian tới người ta sẽ tạo ra các vi hệ thống (System on Chip) tích hợp cả các bộ DSP, ứng dụng thực hiện CNN-UM trên các linh kiện quang điện tử [8], cho phép các ma trận trọng B thao tác ở tốc độ ánh sáng. Chúng thực sự là các máy tính tế bào analog-and-digital trên một chip đơn. Các sensor xúc giác, thính giác cũng sẽ được tích hợp vào các CNN-UM để sử dụng xây dựng các máy thông minh [8].

Trong lĩnh vực thuật toán và phần mềm cũng có các thành tựu lớn: Các CNN-UM có thể được cấu hình, các ma trận trọng có thể được thay đổi từ ngôn ngữ bậc cao trên máy tính PC sử dụng các hệ điều hành quen thuộc như Windows 2000, XP. Thư viện các ma trận trọng, các hàm API liên kết với hệ thống CNN - UM ngày càng phong phú. Trong các thuật toán, các cấu trúc đa sóng hoặc đa luồng (*multi-wave or multi-thread structures*) đã được sử

dụng với mức độ phức tạp cao.

Các thuật toán với các CNN nhiều lớp đang được phát triển. Xuất hiện một kiểu mô tả thuật toán mới - *mô tả bằng đồ họa* được sử dụng trong máy tính CNN gọi là các biểu đồ luồng (*UMF-Universal Machine on Flows*). Rất nhiều trọng số của các sinh vật tự nhiên đã được ứng dụng trong mạng nơ ron CNN, chẳng hạn mẫu của võng mạc mắt người đã được ứng dụng trong ACE16k như đã nói ở trên.

Một số nguyên tắc xử lý CNN mới như *nguyên lý xử lý cặp sóng (twin-wave processing principle)*, *nguyên lý tự thích nghi động phụ thuộc cảm biến (adaptive dynamic content-(or context) dependent sensing)* đã được phát triển và ứng dụng ([9]).

Trên lý thuyết, đã đạt được các kết quả thuộc các vấn đề: ổn định cho các ma trận trọng và các thuật toán chương trình, các khám phá có quan hệ tới bài toán đa sóng không gian - thời gian mới và ứng dụng của chúng, các thuật toán nghiên cứu liên quan đến phương trình đạo hàm riêng PDE và các mẫu trọng số nhiều lớp...

#### 4. XU HƯỚNG NGHIÊN CỨU MẠNG CNN TRONG THỜI GIAN TỚI

Trong xu thế hiện nay, các ngành khoa học đều có sự đan xen, thừa kế lẫn nhau. Do tiềm năng về năng lực tính toán và khả năng ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực của cuộc sống, công nghệ CNN đã ngày càng thu hút được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu khoa học trên thế giới. Các hướng nghiên cứu trong thời gian tới về công nghệ CNN vẫn bao gồm cả lý thuyết và thực nghiệm, cả cơ bản và ứng dụng, ngoài các vấn đề đang thực hiện sẽ có thêm các hướng sau:

- Các thuật toán CNN phục vụ cho nghiên cứu miễn dịch.
- Các nguyên lý xử lý cặp sóng cho các ứng dụng dò tìm mục tiêu khó khăn.
- Camera võng mạc, có thể đảo mắt trơn tru (*saccade - smoothing*), lập trình được và hiển thị thời gian thực việc nhận biết mục tiêu.
- Công nghệ nano thực hiện các mảng sensor ứng dụng riêng và các nguyên tắc tính toán sóng tế bào (*cellular wave computing principles*), bao gồm các mảng transito nano từ, các mảng hóa...
- Mã hóa và đo nội dung thông tin trong các luồng không gian - thời gian và các bước xử lý.
- Khai thác nguyên tắc của sự tăng độ nhạy của cảm giác (*hyperacuity*) trong cả thời gian ([10]) và không gian ([11]).
- Các nguyên lý xử lý xúc giác tương tác và các hệ thống mô phỏng cho các tác vụ khó như cầm giữ các đối tượng mỏng mảnh, mở các trang của quyển sách,... thính giác động tìm nhận ra các hiệu ứng âm thanh bất thường cũng như các cảm nhận sự bùng nổ, gãy vỡ,...
- Quan sát mức độ rộng hoặc toàn cầu. Mạng sensor kích hoạt di động phân bố trong không gian.
- Trí khôn nhân tạo qua tổng hợp nhiều sensor (*multi-modal*), ví dụ nhận dạng viết bằng tay qua các mẫu hình thái ngôn ngữ (*morpho-language-patterns*).

Trong phần tiếp sau đây chúng tôi sẽ trình bày một số ứng dụng phổ biến hiện nay của

các thiết bị áp dụng công nghệ CNN.

## 5. ỨNG DỤNG CỦA CÔNG NGHỆ CNN

Các ứng dụng của công nghệ CNN có thể được chia thành các nhóm chính:

- Các ứng dụng xử lý ảnh. Đây là nhóm ứng dụng chủ yếu trong nhiều lĩnh vực của cuộc sống và sẽ được khảo sát kỹ dưới đây.

- Giải phương trình vi phân đạo hàm riêng (PDE).

- Các ứng dụng khác: tạo sóng, tối ưu hóa hệ thống truyền dữ liệu băng hẹp, điều khiển các hệ chuyển mạch ATM (*CAC in ATM switching*), xử lý tín hiệu video thời gian thực (*On-the-fly analog video signal processing*).

- Trong công nghiệp và giao thông vận tải - ô tô:

- Phân tích bề mặt nhân in, dệt, phân tích kết cấu (*Texture analysis*): Kiểm tra các lỗi và vị trí lỗi của các sản phẩm như bề mặt các nhân, rubăng, vải... ngay trong quá trình sản xuất ([15]).

- Kiểm tra bề mặt (*Surface inspection*): Trong công nghiệp giấy, nhôm, sắt, các chỗ rối (*knot*), các chỗ rách, hỏng, những chỗ nhăn, các vết đen của giấy có thể được nhận ra và xác định vị trí trong quá trình sản xuất. Cần nhấn mạnh rằng việc kiểm tra này là kiểm tra không tiếp xúc.

- Phát hiện ánh sáng có thời gian tồn tại ngắn (*light flicker detection*): Dùng khi cần kiểm tra độ cách điện cho sứ ở điện áp cao, cũng như kiểm tra xuất hiện tia lửa điện khi đóng điện (*Live spark plug inspection*). Trong những loại hình công việc này các camera CNN có thể phân loại tia lửa điện với tốc độ hơn 50.000fps ([12]).

- Phân tích hình dáng và kích thước (*shape and size analysis*): Kiểm tra, phân loại số lượng lớn các vật nhỏ, như các viên thuốc, hạt ngũ cốc, hoa quả, các đai ốc, đinh ốc,... Trong một mô hình phân tích kiểm tra các viên thuốc đã thử nghiệm tốc độ có thể đạt đến 15.000fps. Một ví dụ nữa có thể được đưa ra là tìm các mảnh vụn kim loại trong dầu bôi trơn nhất là trong các động cơ máy bay vận tải cỡ lớn. Trong quá trình làm việc, từ các chi tiết truyền động cơ khí có thể bong ra các mảnh vỡ kim loại, cần phân biệt các mảnh vỡ này với bọt của dầu chuyển động bôi trơn, xác định số lượng chúng, từ đó cho ra quyết định cảnh báo cho hệ thống và quyết định có nên thay dầu hay không (*mặc dù chưa đến kỳ hạn thay*).

- Đo tốc độ và giám sát kích thước những vật chuyển động nhanh không cần tiếp cận.

- Trong công nghệ ô tô: Dùng làm các sensor phân tích tình huống trong chế độ thời gian thực, làm sensor thông minh điều khiển các túi khí bảo vệ, các gương chiếu hậu thông minh.

- Trong y tế: Phân tích thời gian thực chuỗi DNA, điện tâm đồ 2D thời gian thực, điện tâm đồ 3D trực tuyến (on-line), chế tạo mắt nhân tạo (dự kiến 2015 sẽ làm ra mắt nhân tạo khi sử dụng công nghệ CNN).

- Trong quân sự:

- Sử dụng trong các thiết bị không người lái: (UAV - Unmanned Air Vehicles, UGV - Unmanned Ground Vehicles). Ứng dụng robotic thời gian thực.

- Theo dõi nhiều đối tượng - *Multiple Object Tracking*. Có thể thực hiện hợp nhất các ảnh từ nhiều nguồn camera khác nhau trong thời gian thực, phát hiện mục tiêu di động. Nhận

dạng đa mục tiêu (*MTT- Multi Target Tracking*) trong lĩnh vực giám sát và an ninh.

- Phân tích địa hình - *Terrain Analysis*.

## 6. KẾT LUẬN

Bài báo đã giới thiệu những vấn đề cơ bản nhất của mạng nơon tế bào, mô hình và cấu trúc của CNN như một máy tính vạn năng xử lý song song tương tự - logic, đồng thời bài viết cũng giới thiệu các kết quả đã đạt được trong những năm gần đây và hướng phát triển của công nghệ CNN trong thời gian tới.

Với một phạm vi ứng dụng lớn như đã liệt kê ở mục trên, cùng với khả năng xử lý ảnh thực theo không gian và thời gian của công nghệ CNN, cho thấy việc nghiên cứu và ứng dụng công nghệ này tại Việt Nam là rất cần thiết và có ý nghĩa rất lớn, đặc biệt trong lĩnh vực công nghiệp, quốc phòng và an ninh.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. O. Chua, T. Roska, The CNN paradigm, *IEEE Trans. Circuits Syst.* Vol. 40, No. 1 (1993).
- [2] Leon O. Chua and L. Yang, Cellular neural networks: Theory, *IEEE Trans. Circuits Syst.* **35** (1988).
- [3] Leon O. Chua and L. Yang, Cellular neural networks: Applications, *IEEE Trans. Circuits Syst.* **35** (1988).
- [4] T. Roska and Angel Rodríguez-Vazquez, Toward visual microprocessors, *Proceeding of the IEEE* **90** (7) (2002).
- [5] C. Rekeczky, T. Roska, and A. Ushida, CNN based difference-controlled adaptive nonlinear image filters, *Journal of Circuit Theory and Applications* **26** (1998).
- [6] B. Chandler, Cs. Rekeczky, Y. Nishio, and A. Ushida, “CNN Template Learning using Adaptive Simulated Annealing - Performance Comparison with a Genetic Algorithm”, Bulletin of Faculty of Engineering of University of Tokushima, 1999.
- [7] B. Chandler, Cs. Rekeczky, Y. Nishio, and A. Ushida, Adaptive simulated annealing in CNN template learning, *IEICE Transaction on Fundamentals and information Sciences* **E82A** (1999).
- [8] T. Roska, and L. O. Chua, The CNN universal machine 10 years later, *Journal of Circuits, Systems, and Computers* **12** (4) (2003).
- [9] T. Roska, Computational and computer complexity of analogic wave computers, *Proc. IEEE CNNA 02*, Frankfurt, (2002).
- [10] K. Lotz, L. Boloni, T. Roska, and J. Hámori, Hiper-acuity in time: A CNN model of a time-coding pathway of sound localization, *IEEE Trans. Circuits Syst.* **I 46** (8) (1999) 9994–1002.
- [11] P. Baldi, and W. Heiligenberg, How sensory maps could enhance resolution through ordered arrangements of broadly tuned receivers, *Biol. Cybern.* **59** (1988) 313–318.

- [12] Ákos Zarándy, and Csaba Rekeczky, Bi-i: standalone ultra high speed cellular visual system, *IEEE* (2005).
- [13] T. Roska, and L. O. Chua, The CNN universal machine, *IEEE Trans. on Circ. & Syst.* **40** (1993).
- [14] <http://www.analogic-computers.com>
- [15] L. Chua, and T. Roska, The CNN paradigm, *IEEE, Trans.* **40** (1993).
- [16] I. Szatmári, A. Schultz, Cs. Rekeczky, T. Roska, and Leon O. Chua, “Bubble-debris Classification via Binary Morphology and Autowave Metric on CNN”, ERL-UCB Memo 97/97 University of California at Berkeley, 1997.

*Nhận bài ngày 05 - 12 - 2005*