

---

# SC-CNN(State-Controlled Cellular Neural Network)에서 선형과 비선형 결합 계수에 의한 동기화 기법

배영철\*

## Synchronization Method of Coupling Coefficient of Linear and Nonlinear in SC-CNN(State-Controlled Cellular Neural Network)

Young-Chul Bae\*

### 요 약

최근 보안 문제와 관련한 연구가 많은 관심을 받고 있으며 비밀 통신과 암호 통신에 적용하기 위한 방법 중 하나로 하이퍼카오스 시스템과 이에 대한 동기화에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 SC-CNN으로 구성되는 하이퍼카오스 시스템의 동기화를 이루기 위한 방법으로 선형과 비선형 결합계수에 의한 동기화 기법을 제안하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 송신부의 서브시스템과 수신부의 서브시스템 사이에 동기화가 이루어지고, 전체 시스템의 송신부와 수신부 사이에 동기화가 이루어졌음을 위상 공간과 시계열데이터의 차를 통하여 확인하고 검증하였다. 검증 결과 거의 완전한 동기화가 이루어졌음을 확인할 수 있다.

### ABSTRACT

Recently, the research of security and its related problems has been received great interested. The research for hyper-chaos systems and its synchronization are actively processing as one of method to apply to secure and cryptography communication.

In this paper, we propose the synchronization method by coupling coefficient of linear and nonlinear in order to accomplish the synchronization of hyper-chaos system that organized by SC-CNN(State-Controlled Cellular Neural Network). We also verify and confirm the result of synchronization between entire transmitter and receiver, and each subsystem in transmitter and receiver through the phase portrait and difference of time-series by the computer simulation.

### 키워드

Hyper-chaos, Nonlinear dynamics, Synchronization, Linear coupling, Nonlinear coupling  
하이퍼카오스, 비선형 동적 시스템, 동기화, 선형 결합, 비선형 결합

## I. 서 론

우리가 사는 사회는 점점 복잡해지고, 자연 현상도 이전에 경험해 보지 못한 많은 복잡한 현상들이 과학

자들에 의해 규명되고 있다. 이러한 복잡한 문제에 대한 학문 영역을 복잡계(complexity system)라고 한다. 최근에 이러한 사회 및 자연계에서 발생하는 복잡계 현상에 대한 관심이 물리학, 화학, 생물학, 공학 등에서

높아지고 있으며 이에 대한 응용이 활발하게 진행되고 있다. 이 복잡계라 불리는 범위에는 사회현상, 자연 현상, 신체 구조 등 많은 영역이 포함되고 있다. 특별히 물리, 공학, 수학 영역에서는 카오스(chaos) 현상, 하이퍼카오스(hyper-chaos) 현상 등을 여기에 포함시켜 연구를 진행하고 있다.

카오스(chaos)는 공학적으로 “결정론적 비선형 동적 시스템으로부터 생성되는 복잡하고 잡음과 같은 현상”이라고 말한다. 또한 물리와 공학 분야에서 말하는 카오스 또는 카오스 공학의 의미는 “불규칙 천이 현상”에 중점을 두고 이야기된다. 하이퍼카오스는 카오스 신호를 생성하는 카오스 회로를 여러 개 연결하여 더욱 복잡한 신호를 만들어 내는 시스템을 말하고, 카오스 시스템과 함께 주로 비밀 및 암호통신에 이용한다.

최근에는 암호 및 비밀통신에서 카오스 회로 대신에 복잡도가 더욱 높은 하이퍼카오스에 대한 관심이 높아지고 있으며 대표적인 하이퍼카오스 시스템으로는 SC-CNN(State-Controlled Cellular Neural Network) 회로가 있다. 이들 시스템을 이용하여 비밀 및 암호 통신을 위해서는 먼저 두 개의 시스템이 동일하게 동작하도록 하는 동기화 구현이 필수적이다.

카오스 신호와 하이퍼카오스 신호와 같은 복잡계 신호는 점근적으로 안정하지 않기 때문에 임의의 초기점에서 근접하게 시작한 궤적은 시간이 지남에 따라 지수적으로 멀어지는 초기 조건에 민감한 특성(sensitivity of initial condition)으로 인하여 카오스 시스템과 하이퍼카오스 시스템을 동기화하는 것은 매우 어려운 것으로 생각하고 있다.

카오스 및 하이퍼카오스 시스템에서의 동기화 기법은 구동 동기 기법, 결합 동기 기법, 임베딩 동기 기법, 이외에도 다양한 동기 기법과 카오스 비밀 통신 기법이 제시되어 있으나[1-19] 이들 각 방법들이 완벽한 동기화 기법이라고는 보기 어려운 동기화 기법에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

본 논문에서는 하이퍼카오스 회로 중의 하나인 SC-CNN에 적용하기 위한 선형 및 비선형 결합계수에 의한 동기화 기법을 제시하고 이에 대한 결과를 확인한다.

## II. SC-CNN 회로

SC-CNN 회로를 구성하기 위하여 먼저 일반식 (1)과 같은 일반화된 셀(cell)을 정의한다[20,21]

$$\dot{x}_j = x_j + a_j y_j + G_o + G_s + i_j \quad (1)$$

여기서  $a_j$ 는 상수 파라미터,  $i_j$ 는 문턱값(threshold value),  $j$ 는 셀 지수(cell index),  $x_j$ 는 상태 변수(state variable),  $y_j$ 는 셀 출력으로서 식(2)와 같이 주어진다.

$$y_j = 0.5(|x_j + 1| - |x_j - 1|) \quad (2)$$

식(1)에서,  $G_o$ 는 출력의 선형 조합,  $G_s$ 는 연결된 셀들의 상태 변수이다.

식(2)의 일반화한 출력 비선형 특성을 만들기 위해 식(3)과 같은 출력 PWL을 고려한다.

$$y_j = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{2n-1} n_k (|x + b_k| - |x - b_k|) \quad (3)$$

여기서  $b_k$ 는 차단점(break point)이고 계수  $n_k$ 는 세먼트 기울기와 관련된다.

SC-CNN 셀들은 식(4)에 의해 주어지는 상태 방정식(1)과 출력 방정식(3)을 가지고 n-double scroll 생성하는 것이 요구되어 진다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + a_{11}y_1 + a_{12}y_2 + a_{13}y_3 + \sum_{k=1}^3 s_{1k}x_k + i_1 \\ \dot{x}_2 &= -x_2 + a_{21}y_1 + a_{22}y_2 + a_{23}y_3 + \sum_{k=1}^3 s_{2k}x_k + i_2 \\ \dot{x}_3 &= -x_3 + a_{31}y_1 + a_{32}y_2 + a_{33}y_3 + \sum_{k=1}^3 s_{3k}x_k + i_3 \end{aligned} \quad (4)$$

## III. 비선형 결합계수에 의한 동기화 기법

식(4)와 같은 SC-CNN에서 비선형 결합 계수에 의한 동기화 기법을 이루기 위한 송신부와 수신부의 블

록 다이어그램을 그림 1과 같이 나타내었다.

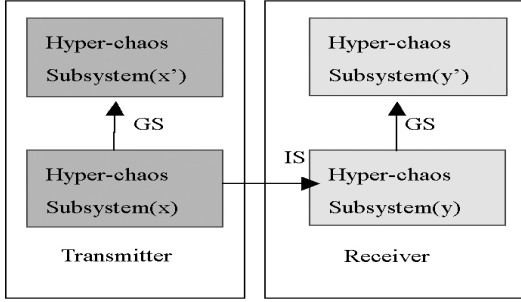


그림 1. SC-CNN 동기화를 위한 블록 다이어그램  
Fig. 1 Block diagram of SC-CNN synchronization

그림1의 블록 다이어그램은 왼쪽의 송신부와 오른쪽의 수신부에서는 두 개의 SC-CNN에서는 선형 계수와 비선형 계수에 의해 동기화 시키고 송신부와 수신부는 임베딩 동기화 기법[18]에 의해 동기화 시키는 방법을 적용하였다.

이를 위해 SC-CNN의 송신부와 수신부를 각각 식(5), 식(6)과 같이 차원이 없는 방정식으로 표현한다.

송신부의 상태 방정식

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \alpha(x_2 - g_1) \\ \dot{x}_2 &= -x_2 + x_1 + x_3 \\ \dot{x}_3 &= -\beta x_2 \\ g_1 &= m_3 x_i + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^2 (m_k + m_{k+1}) (|x_1 + c_k| - |x_1 - c_k|) \end{aligned} \quad (5)$$

수신부의 상태 방정식

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= \alpha(x_2 - g_2) \\ \dot{x}_5 &= -x_5 + x_4 + x_6 \\ \dot{x}_6 &= -\beta x_5 \end{aligned} \quad (6)$$

$$g_1 = m_3 x_i + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^2 (m_k + m_{k+1}) (|x_1 + c_k| - |x_1 - c_k|)$$

수신부의  $\dot{x}_4$ 의 전개 항을 보면  $x_2$ 가 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 미분방정식에서 오른쪽 항의 일부에만 전송신호를 임베딩 하여 동기화를 시도하는 방법을 사용하였다.

식(5)의 송신부의 상태방정식에서 SC-CNN의 각 서브시스템을 선형과 비선형 계수에 의해 동기화시키기 위하여 각 서브시스템을 식(7), 식(8), 식(9)과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{11} &= \alpha(x_{12} - g_{11}) \\ \dot{x}_{12} &= -x_{12} + x_{11} + x_{13} + D_y^*(x_{22} - x_{12}) \\ \dot{x}_{13} &= -\beta x_{12} + \sin(2 * \pi * 50 * (x_{21} - x_{11})) \end{aligned} \quad (7)$$

$$g_{11} = m_3 x_{ii} + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^2 (m_k + m_{k+1}) (|x_{11} + c_k| - |x_{11} - c_k|)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{21} &= L^* \alpha(x_{21} - g_{21}) \\ \dot{x}_{22} &= L^* (x_{21} - x_{22} + x_{23} + D_y^*(x_{12} - x_{21})) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{x}_{23} = L^* (-\beta x_{22} + \sin(2 * \pi * 50 * (x_{11} - x_{22})))$$

$$g_{21} = m_3 x_{ii} + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^2 (m_k + m_{k+1}) (|x_{22} + c_k| - |x_{22} - c_k|)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{31} &= L^* \alpha(x_{22} - g_{31}) \\ \dot{x}_{32} &= L^* (x_{21} - x_{32} + x_{33} + D_y^*(x_{42} - x_{32})) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{x}_{33} = L^* (-\beta x_{32})$$

$$g_{31} = m_3 x_{ii} + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^2 (m_k + m_{k+1}) (|x_{33} + c_k| - |x_{33} - c_k|)$$

여기서,  $D_y$ 는 선형계수,  $Sin$  항은 비선형 계수를 각

각 나타낸다.

식(6)의 수신부의 상태방정식에서 SC-CNN의 각 서브시스템을 선형과 비선형 계수에 의해 동기화시키기 위하여 각 서브시스템을 식(10), 식(11), 식(12)과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{41} &= \alpha(x_{12} - g_{44}) \\ \dot{x}_{42} &= x_{41} - x_{42} + x_{43} + D_y^*(x_{32} - x_{43}) \end{aligned} \quad (10)$$

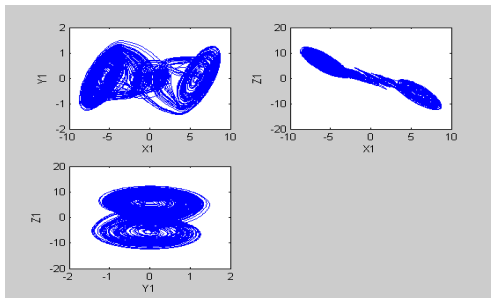
$$\dot{x}_{43} = -\beta x_{43}$$

$$\begin{aligned} g_{44} &= m_3 x_{ii} + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^2 (m_k + m_{k+1}) (|x_{41} + c_k| - |x_{41} - c_k|) \\ \dot{x}_{51} &= x_{44} - x_{51} + x_{52} \\ \dot{x}_{52} &= -\beta x_{51} \end{aligned} \quad (11)$$

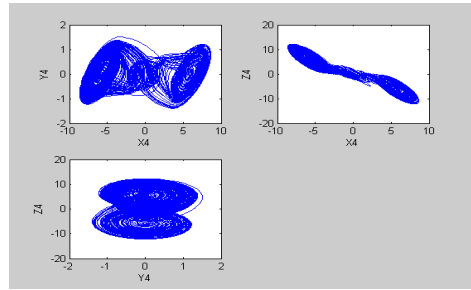
$$\begin{aligned} \dot{x}_{61} &= \alpha(x_{51} - g_{66}) \\ \dot{x}_{62} &= -\beta x_{51} \end{aligned} \quad (12)$$

$$g_{61} = m_3 x_{ii} + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^2 (m_k + m_{k+1}) (|x_{61} + c_k| - |x_{61} - c_k|)$$

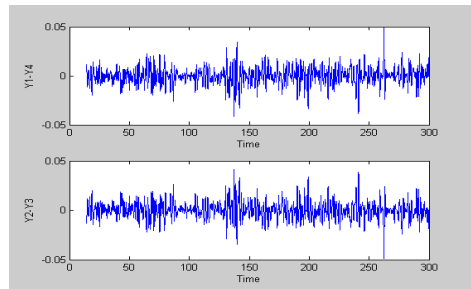
식(5)-식(12)를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)는 송신부의 위상공간, 그림 2(b)는 수신부의 위상공간, 그림 2(c)는 송신부의 시계열데이터, 그림 2(d)는 수신부의 시계열데이터를 각각 나타낸다.



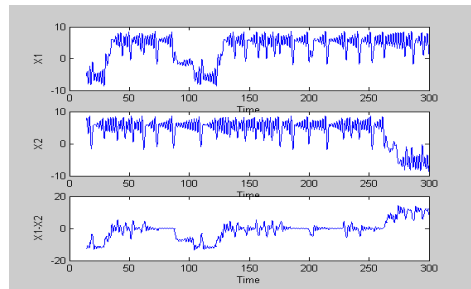
(a) 서브송신부의 위상공간  
(a) Phase portrait of sub-transmitter



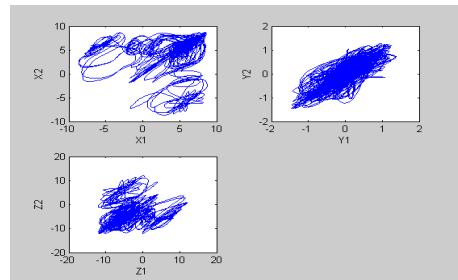
(b) 서브수신부의 위상공간  
(b) Phase portrait of sub-receiver



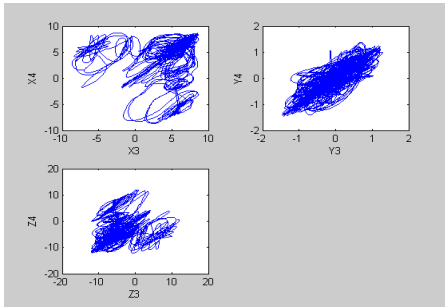
(c) 송신부 서브시스템의 시계열 차  
(c) Time-series difference of sub-transmitter



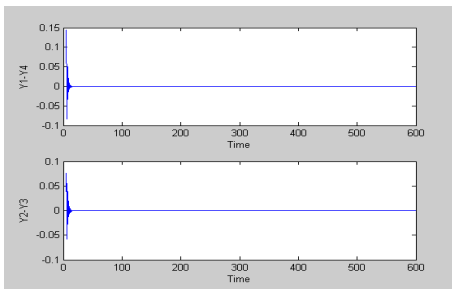
(d) 수신부 서브시스템의 시계열 차  
(d) Time-series difference of sub-receiver



(e) 송신부의 위상공간  
(e) Phase portrait of transmitter



(f) 수신부의 위상공간  
(f) Phase portrait of receiver



(g) 서브송신부와 서브수신부의 시계열 차이  
(g) Time-series difference of sub-transmitter and sub-receiver

그림 2. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 동기화 결과  
Fig. 2. Result of Synchronization by computer synchronization

그림 2에서 보는 바와 같이 SC-CNN의 송신부 서브 시스템과 수신부 서브시스템, 그리고 전체 시스템의 송신부와 수신부에서의 동기화 결과를 확인할 수 있다. 서브시스템에서 동기화가 완벽하지 않을 수 있으나 전체 시스템에서는 임베딩 구동 동기화 기법을 적용하여 서브시스템에서 완전하게 동기화되지 않은 문제를 극복하여 거의 완전한 동기화가 이루어짐을 확인할 수 있다.

#### IV. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 SC-CNN으로 구성하는 하이퍼카오스 회로에서의 동기화 시스템을 구현하기 위하여 몇 개의 서브시스템으로 송신부와 수신부로 구성하며, 각

송신부와 수신부의 서브시스템 사이의 동기화를 위해 선형 결합과 비선형 결합에 따른 계수를 적용하여 동기화를 이루고, 전체 시스템의 송신부와 수신부는 임베딩 구동 동기화에 의한 동기화를 이루는 방법을 제시하였다.

제시된 방법의 동기화 결과를 검증하기 위하여 위상 공간과 시계열데이터의 차에 의한 결과를 제시하였으며 전체 시스템과 송신부와 수신부의 서브시스템 모두에 동기화가 이루어졌음을 확인하였다.

앞으로 이 방법을 적용한 비밀 통신 및 암호 통신 기법의 개발과 시계열데이터와 위상 공간 이외의 다른 검증 방법을 통하여 본 논문에서 제시한 동기화 결과를 더 검증하는 것이 과제로 남는다.

#### 참고 문헌

- [1] L. O. Chua "Chua's circuit 10 Years Later", Int. J. Circuit Theory and Application, Vol. 22, pp 79-305, 1994
- [2] M. Itoh, H. Murakami and L. O. Chua, "Communication System Via Chaotic Modulations" IEICE. Trans. Fundamenrtals. Vol. E77-A, No. 6, pp. 1000-1005, 1994.
- [3] L. O. Chua, M. Itoh, L. Kocarev, and K. Eckert, "Chaos Synchronization in Chua's Circuit" J. Circuit. Systems and computers, Vol. 3, No. 1, pp. 93-108, 1993.
- [4] M. Itoh, K. Komeyama, A.Ikeda and L. O. Chua, "Chaos Synchronization in Coupled Chua Circuits", IEICE. NLP. 92-51. pp. 33-40. 1992.
- [5] K. M. Short, "Unmasking a modulated chaotic communications scheme", Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol. 6, No. 2, pp. 367-375, 1996.
- [6] K. M. Cuomo, "Synthesizing Self - Synchronizing Chaotic Arrays", Int. J.Bifurcation and Chaos, Vol. 4, No. 3, pp. 727-736, 1993.
- [7] L. Kocarev, "Chaos-based cryptography: A brief overview", IEEE, Vol. pp. 7-21. 2001.
- [8] J.A.K.Suykens, "n-Double Scroll Hypercubes in 1-D CNNs" Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol. 7, No. 8, pp. 1873-1885, 1997.
- [9] L. M. Pecora and T. L. Carroll "Synchronization in Chaotic System" Phy. Rev. Lett.,

Vol. 64, No. 8, pp. 821-824, 1990.

- [10] L. Kocarev, K. S. Halle, K. Eckert and L. O. Chua, "Experimental Demonstration of Secure Communication via Chaotic Synchronization" Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol. 2, No. 3, pp. 709-713, 1992.
- [11] K. S. Halle, C. W. Wu, M. Itoh and L. O. Chua, "Spread Spectrum communication through modulation of chaos" Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol. 3, No. 2, pp. 469-477, 1993.
- [12] 손영우, 배영철, "하드웨어 구현에 의한 카오스 어트랙터 생성용 Chua 회로에 관한 연구", 한국전자통신학회논문지, 5권, 2호, pp. 158-163, 2010.
- [13] 손영우, 배영철, "L 성분이 없는 간략화 CHUA 회로 구현에 관한 연구", 한국전자통신학회논문지, 5권, 1호, pp. 17-22, 2010.
- [14] L. Kocavav, L & U. Parlitz, "Generalized synchronization, predictability and equivalence of unidirectionally coupled dynamical systems", Phys. Rev. Lett, Vol. 76, No.11, pp. 1816-1819, 1996.
- [15] J.A.k. Suyken, P.F. Curran & L.O. Chua, "Master-slave synchronization using dynamic output feedback", Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol. 7, No. 3, 671-679, 1997.
- [16] 배영철, 김이곤, 김천석, 구영덕, "복잡계에서의 임베딩 구동 동기화 기법", 한국지능정보시스템학회 논문지, 16권, 1호, pp. 18-23, 2006.
- [17] Youngchul Bae, Y ogon Kim, "A study on Generalized Synchronization in the State-Controlled Cellular Neural Network(SC-CNN), International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems", Vol. 5, No. 4, pp. 291-296. 2005.
- [18] 배영철, 김이곤, 김주완, 손영우, "임베딩 구동 동기화를 이용한 비밀통신", 한국퍼지 및 지능시스템학회논문지, 13권, 3호, pp.310-315, 2003.
- [19] J.J. Slotine & W.Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall, NJ, 1991. S. G.
- [20] P.Arena, P.Baglio, F.Fortuna & G.Manganaro, "Generation of n-double scrolls via cellular neural networks", Int. J. Circuit Theory Appl, 24, 241-252, 1996.
- [21] P. Arena, S. Baglio, L. Fortuna and G. Manganaro, "Chua's circuit can be generated by CNN cell", IEEE Trans. Circuit and Systems I, CAS-42, pp. 123-125. 1995.

저자 소개



**배영철(Young-Chul Bae)**

1984년 광운대학교 전기공학과 (공학사)

1986년 광운대학교대학원 전기공학과 (공학석사)

1997년 광운대학교대학원 전기공학과(공학박사)

1986년~1991년 한국전력공사

1991년~1997년 산업기술정보원 책임연구원

1997년~2006년 여수대학교 전자통신전기공학부 부교수

2002년~2002년 Brigham Young University 방문교수

2006년~현재 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부 교수

2011년~2011년 University of Utah 방문교수

※ 관심분야 : Chaos Control and Chaos Robot, Robot control etc.