

Merkezi Desen Üreteçleri için Donanımsal Çözümler Hardware Solutions for Central Pattern Generators

Enis GÜNAY, Recai KILIÇ, Nimet DAHASERT, İsmail ÖZTÜRK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Erciyes Üniversitesi

egunay@erciyes.edu.tr, kilic@erciyes.edu.tr, nimetdahasert@erciyes.edu.tr

Özet

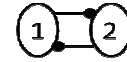
Canlılar yürüme, koşma ve emekleme gibi temel hareketlerin yanı sıra kalp atışı veya solunum gibi ritmik olayları gerçekleştirirken, şablon ya da desen hareket dizileri (pattern locomotion) kullanırlar. Bu hareketlerin üretilmesinden de merkezi desen üreteçleri-MDÜ (central pattern generators-CPG) sorumludur. Günümüzde MDÜ'ler başta robot kontrolü olmak üzere birçok alanda aktif şekilde kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada, bir MDÜ modeli olan Hindmarsh-Rose nöron modeli için hem ayrık hem de programlanabilir elektronik devre çözümleri sunulmaktadır. Ayrıca FPGA (Field Programmable Gate Arrays - Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri) ve FPAA (Field Programmable Analog Arrays - Alanda Programlanabilir Analog Diziler) kullanılarak gerçekleştirilen tasarımların performansları ayrık devre elemanları ile gerçekleştirilen tasarım ile karşılaştırılmaktadır.

Abstract

Living organisms use locomotion patterns while walking, running, crawling and even in breathing and cardiac beating. These movements are under the responsibility of central pattern generators-CPGs. Nowadays CPGs are used in various fields very efficiently, mainly in robotics. In this study, discrete electronic circuit solution and programmable ones are proposed for Hindmarsh-Rose neuron model, which is a CPG model. Also there is a performance comparison between FPGA, FPAA and discrete circuit implementation.

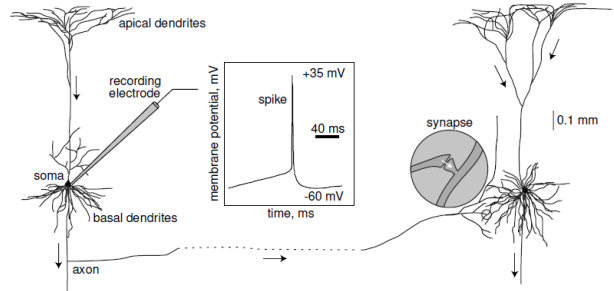
1. Giriş

Merkezi Desen Üreteçleri-MDÜ (Central Pattern Generators-CPG) canlıların temel hareketlerini, herhangi bir geri besleme işaretine ve karmaşık bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duymadan üretebilen nöron yapılarıdır [1]. Basit bir MDÜ yapısı için birbiriyle bağlantılı en az iki nöron hücrelerinin olması gereklidir. Bu iki nöron hücrelerinden oluşan ağ yapısı aralarındaki karşılıklı etkileşimler sayesinde sıralı bir işaret üretici haline gelmektedir. Tek başlarına hiçbir ritmik işaret üretme kabiliyetine sahip olmayan bu hücreler, birbirleriyle karşılıklı olarak etkileşim içerisine girdiklerinde sıralı ve ritmik işaretler üretmeye başlarlar. Yarım merkezli osilatör-YMO (half center oscillator-HCO) olarak da adlandırılan bu yapılar, karşılıklı olarak birbirlerinin hareketini durdurmaya çalışan (mutually inhibitory) bir bağlantı yapısı ile bağlıdırlar [2]. Şekil 1'de basit bir YMO yapısı görülmektedir.



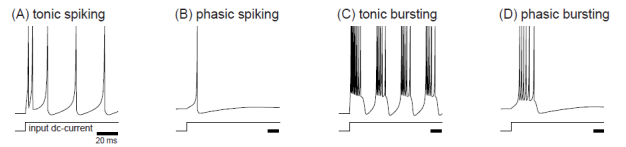
Şekil 1: Basit bir yarım merkezli osilatör-YMO (half center oscillator-HCO) .

Bir YMO nöron hücre, hücreler arası bağlantılar (synaps) sayesinde birçok ilettime maruz kalmaktadır. Bu iletimler sonucunda da nöron hücrelerinin potansiyelinde değişikliğe neden olan elektriksel geçiş akımları oluşmaktadır. Aksiyon potansiyeli (action potential - spike) olarak da adlandırılan bu durum için Şekil 2'de bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 2: Yarım merkezli osilatör YMO yapısını oluşturan iki nöron hücre, hücreler arası bağlantılar ve oluşan aksiyon potansiyeli [3].

YMO yapısında üretilen tipik davranışlara Şekil 3'te örnekler verilmiştir.



Şekil 3: YMO'da hücreler arası oluşan aksiyon potansiyellerine örnekler [3].

Literatürde birçok MDÜ modeli hem anatomik hem matematiksel açıdan incelenmiştir. Bunların içerisinde en çok çalışma yapılanlardan birisi Hindmarsh-Rose nöron modelidir [4]. Bu çalışmada adı geçen nöron yapısını modellemek üzere için ayrık devre elemanları ve programlanabilir tümleşik devreler kullanılmaktadır. Yapılan elektronik devrelerin bilgisayar benzetim performansları, modellerin matematiksel çözümleri ile karşılaştırılmaktadır.

Buna göre bildiri özeti şu şekildedir: İkinci bölümde *Hindmarsh-Rose* nöron modelinin matematiksel alt yapısı ve nümerik çözümlerinin yanı sıra ayrık devre modeli ve bilgisayar benzetimleri sunulmaktadır. Üçüncü bölüm aynı model için programlanabilir *FPGA* ve *FPA* tabanlı devre önerilerini ve bilgisayar benzetim sonuçlarını vermektedir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlara bakılarak önerilen devre yapılarının karşılaştırmaları yapılmakta avantaj ve dezavantajları vurgulanmaktadır.

2. Hindmarsh-Rose Nöron Modeli

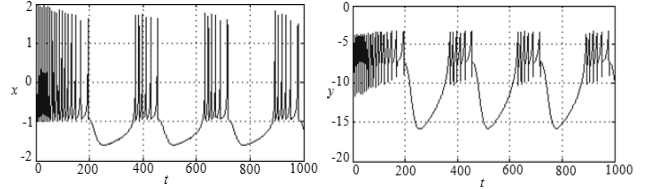
Merkezi desen üreteçleri arasında, patlamalı aksiyon potansiyellerin olduğu (*bursting*) hücre davranışıyla en çok incelenen nöron modellerinden birisi *Hindmarsh-Rose* modelidir. Hem kübik hem de kuadratik doğrusal olmayan bileşenlere sahip olan sistem Denklem 1'de görülmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y - ax^3 + bx^2 + I - z \\ \dot{y} &= c - dx^2 - y \\ \dot{z} &= \varepsilon [s(x - x_0) - z] \end{aligned} \quad (1)$$

Denklem 1'deki x hücrede oluşan aksiyon potansiyelinin büyüklüğünü temsil ederken y ve z ise başta hücre zarı boyunca iyon kanallarında oluşan sodyum ve potasyum iyon oranları olmak üzere diğer iyon gruplarının temsil etmekte ve patlama olayından sorumlu olmaktadır. Geri kalan bileşenler zamandan bağımsız bileşenlerdir.

Aşağıdaki parametre kabulleri için Şekil 4'te x ve y dinamiğinin zaman eksenindeki görünümü verilmektedir. Şekil 4'e dikkat edilirse hücre belirli zaman aralığında sık ve hızlı aksiyon potansiyelleri oluştururken belirli zaman aralıklarında ise sükûnette kalmaktadır.

$$a=1, b=3, c=-3, d=5, s=4, I=5, \varepsilon=0.002, x_0=-1.3$$

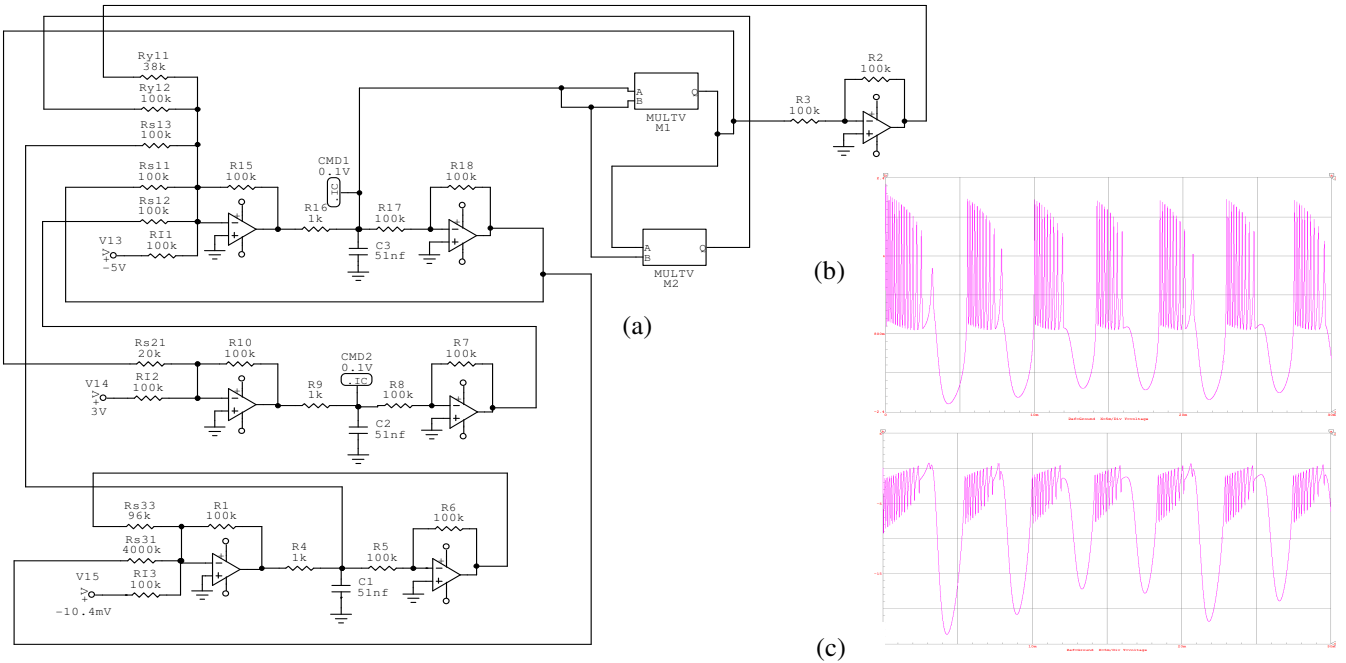


Şekil 4: Hindmarsh-Rose nöron modelinin x ve y dinamiklerinin zamana göre gösterimleri.

Hindmarsh-Rose modeli literatürde robot kontrolü amacıyla ele alınmış ve farklı devre yaklaşımlarıyla modellenmeye çalışılmıştır [5-7].

Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde *Hindmarsh-Rose* modeli için önerilen devrelerin ayrık devre elemanları kullanılarak gerçekleştirildikleri görülmektedir.

Bu çalışma için öne sürülen ayrık devre elemanı kullanılarak yapılmış tasarım Şekil 5(a)'te verilirken x ve y dinamikleri ise Şekil 5(b) ve (c)'de görülebilmektedir.



Şekil 5: (a) *Hindmarsh-Rose* sinir modeli için önerilen ayrık eleman devre tasarımı. Tasarımda *TL082* işlemsel kuvvetlendiriciler için $\pm 15V$ besleme kullanılmıştır. Ayrıca *AD633* çarpıcılar tasarımda yer almaktadır. (b) ve (c)'de ise x ve y dinamiklerinin zamana göre gösterimleri görülmektedir.

3. Programlanabilir Devre Önerileri

Günümüzde elektronik devrelerin donanımsal gerçeklenmeleri üzerine popüler yaklaşımlardan bazılarını da programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir yöntemler oluşturmaktadır. Bu yöntemler içerisinde *Alanda Programlanabilir Analog Diziler – Field Programmable Analog Arrays – FPAAs* ve *Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri -Field Programmable Gate Arrays – FPGAs* kullanımlarının gün geçtikçe arttığı gözlemlenmektedir. Programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir yapılar, bir ara yüz yazılımı sayesinde donanımın istenen işlemi gerçekleştirebilmesi amacıyla programlanmasını sağlamaktadır. *FPAAs*'ler daha çok analog işaretlerin işlenmesinde tercih edilirlerken, *FPGAs*'ler ise ayrık işaretlerin işlenmesinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Programlanabilir tümdevre yapısı olan *FPAAs* yeniden yapılandırma özelliği sayesinde analog fonksiyonları içeren sistemleri gerçekleştirebilmektedir [8]. *FPAAs* $\pm 2V$ saturasyon seviyesine sahip olduğundan, bir model ya da sistem *FPAAs*'lar kullanılarak tasarlanmak istendiğinde, sistem parametrelerinin bu sınırlar içerisinde yeniden ölçeklendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Nümerik açıdan yeni sistem parametrelerinin doğruluğu onaylandıktan sonra sistem içerisinde analog işlem blokları bulunan yeniden ayarlanabilir analog modüller (*configurable analog modules-CAMs*) bir yazılım sayesinde oluşturulur ve bir seri port aracılığıyla *FPAAs* uygulama kartına gönderilir. Uygulama kartından alınan deneysel sonuçlar ile nümerik analiz sonuçları karşılaştırılarak elde edilen sonuçların birbirine uyumluluğu sağlanır.

Hindmarsh-Rose nöron modeli için önerilen denklemler ve yeni parametre değerleri aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= v - v^3 + bv^2 + I - aw + cu \\ \dot{u} &= e - fv^2 \\ \dot{w} &= 0.9976w + (0.016 + 0.02v) \end{aligned} \quad (2)$$

$$a=2, b=2.6, c= 10, e=1, I=0.8, f= 0.055$$

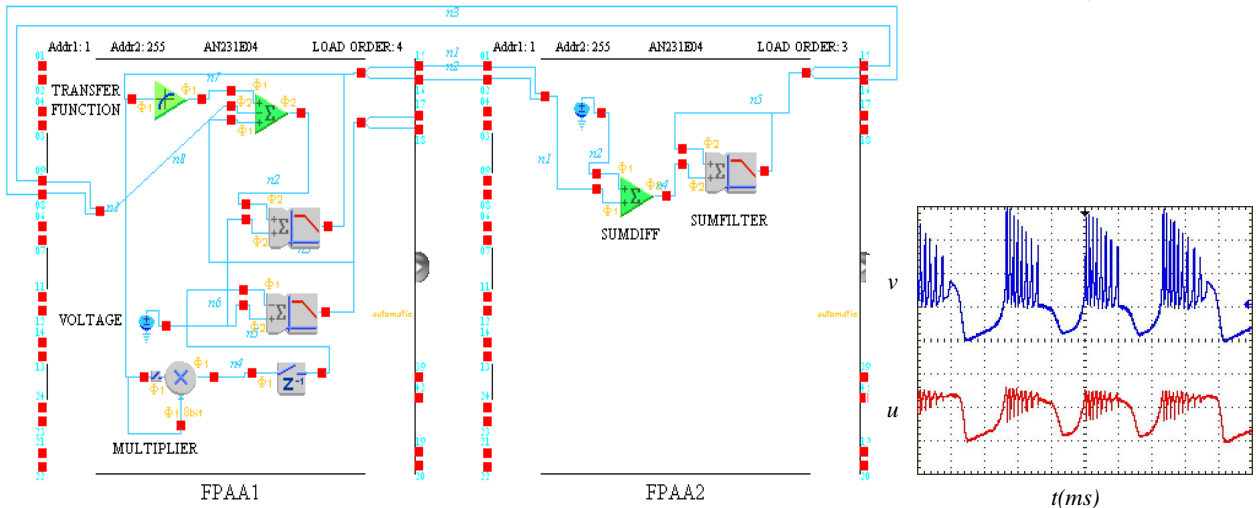
Denklemlerin gerçekleştirilmesinde *SUMFILTER*, *TRANSFER FUNCTION*, *MULTIPLIER* ve *VOLTAGE* blokları kullanılmıştır. Denklemlerdeki v , u ve w durum değişkenleri *SUMFILTER* blokları ile gerçekleştirilmiştir. v durum değişkeni içerisinde yer alan $(v-v^3+bv^2)$ ifadesi *TRANSFER FUNCTION* bloğu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. u durum değişkeni içerisindeki (fv^2) fonksiyonu *MULTIPLIER* bloğu ile gerçekleştirilmiştir. Bu blok iki adet girişe sahiptir ve bu girişe uygulanan işaretlerin çarpım sonuçlarını çıkışına yansıtmaktadır. Membran giriş akımını ifade eden I parametresini ve denklemin içerisindeki diğer sabit parametreleri gerçeklemek için çıkışında $\pm 2V$ dc işaret üretebilen *VOLTAGE* bloğu kullanılmıştır. v durum değişkeni üçten fazla toplama ifadesinden meydana geldiği için *SUMFILTER* bloğunun girişlerine bu ifadelerin hepsi aynı anda uygulanamamıştır. $[(v-v^3+bv^2)-aw+cu]$ girişlerini toplamak için *SUMDIFF* bloğu kullanılmıştır. Bu blok kazançlarının ve işaretlerinin ayarlanabildiği dört adet girişe sahiptir. Bu girişlerden ikisi *on/off* durumuna ayarlanabilmektedir. Bu blok *SUMFILTER* bloğuna benzenmektedir, fakat çıkışında filtre yoktur.

Şekil 6'da *Hindmarsh-Rose* nöron modeli için önerilen *FPAAs* tasarımı, v ve u dalga şekilleri ile birlikte verilmektedir.

Hindmarsh-Rose nöron modelinin *FPGA* tabanlı gerçekleştirilmesinde ise nümerik benzetim çalışmasının ardından, sürekli zamanda tanımlanan model ayrık zamanlı hale dönüştürülür. *FPGA*'lar programlanabilen mantık bloklarından ve ara bağlantılardan oluşan sayısal tümleşik devrelerdir [9]. Denklem 1'de verilen eşitliklerin ayrık zamanlı karşılıkları Denklem 3'te verilmektedir.

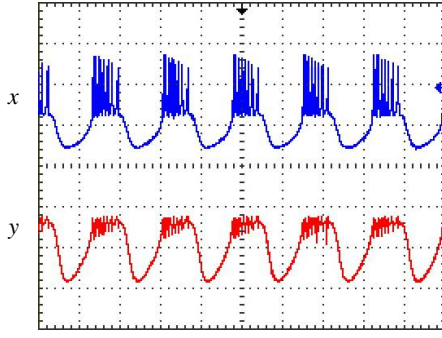
$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + \Delta h(y_n - x_n^3 + bx_n^2 + I - z_n) \\ y_{n+1} &= y_n + \Delta h(1 - 5x_n^2 - y_n) \\ z_{n+1} &= z_n + \Delta h(\epsilon (s(x_n - x_0) - z_n)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$b=2.6, I=3.15, s=4, \epsilon=0.01, x_0= -1.6$$



Şekil 6: *Hindmarsh-Rose* nöron modeli için *FPAAs* tasarım şablonu, v ve u dalga şekilleri

Ayrıklaştırılan denklemdeki kübik ve kuadratik ifadeler çarpma blokları kullanılarak gerçekleştirilmiş kalan kısımlar ise programlanabilir lojik bloklar ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7: Hindmarsh-Rose nöron modeli için FPGA tasarım sonuçları

Programlanabilir elemanların parametre ayarlamadaki etkinliğini görmek açısından nöron modeli üzerindeki parametre ayarları elemanın ara yüz programında yapılmıştır. Modellenen sistem programlanabilir elemana yollanarak FPGA çıkışından alınan işaretler DAC'e gönderilmiş ve gerekli ölçümler kaydedilmiştir. Şekil 7'de Hindmarsh-Rose nöron modeli için FPGA tasarım sonuçları gösterilmektedir.

4. Sonuçlar ve Karşılaştırma

Bu çalışmada merkezi desen üreticileri arasında üzerinde en çok çalışılan nöron modellerinden Hindmarsh-Rose nöron modeli için üç farklı elektronik devre tasarımı sunulmuştur.

Elde edilen bilgisayar benzetimi ve deneysel sonuçların nümerik benzetimlerle uyumlu olduğu görülmektedir.

Önerilen devre modellerinden de anlaşılacağı üzere, programlanabilir yapılar ayrı modelleri göre:

- esnek yapıları,
- bir yazılım ile yeniden programlanabilme özellikleri,
- farklı doğrusal olmayan fonksiyonların kolaylıkla tasarlanabilmesi

gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar.

5. Kaynaklar

- [1] Skinner, F. Kopell, N. and Marder, E., "Mechanisms for oscillation and frequency control in reciprocally inhibitory model neural Networks", *Journal of Computational Neuroscience*, 1, 69-87, 1994.
- [2] Hooper, Scott L., Central Pattern Generators, *Encyclopedia of Life Sciences*, John Wiley & Sons, 1999-2010.
- [3] Izhikevich E. M., *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting*, The MIT press, 2007.
- [4] Hindmarsh J. L., and Rose R. M., "A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations" *Proceedings of the Royal Society*, B, 221,87-102, 1984.
- [5] Steur, E., On Synchronization of Electromechanical Hindmarsh-Rose Oscillators, Master's Thesis, Eindhoven University of Technology Department of Mechanical Engineering Dynamics and Control Group Eindhoven, September, 2007.
- [6] DeBolt D. T., Application of the Hindmarsh-Rose neural model in electronic circuits, Electrical and Computer Engineering Master's Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Northeastern University, January, 2011.
- [7] Arena, P., Fortuna L., Frasca M., "Extended SC-CNN Implementation of the Hindmarsh-Rose Neuron", *IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and neur Applications Proceedings*, 2006.
- [8] <http://www.anadigm.com/>
- [9] <http://www.xilinx.com/>
- [10] <http://www.altera.com/>