

Bir Yüzme Merkezi Desen Üretici için Basit Bir Kontrolör Mekanizmasının Nümerik Analizi

Yavuz Cura^{1*} and Nimet Korkmaz²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kayseri Üniversitesi, Kayseri, Türkiye (yavuzcura@gmail.com)

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kayseri Üniversitesi, Kayseri, Türkiye (nimetkorkmaz@kayseri.edu.tr)

Özet – Bu çalışma, en ilkel omurgalı canlılardan biri olan taşemen balığının yüzme deseninin oluşturulması amacıyla, bir sinüzoidal osilatör ve birkaç birinci dereceden alçak geçiren filtre ile oluşturulan basit bir merkezi desen üretici (Central Pattern Generator-CPG) algoritmasını ele almaktadır. Hopf sinüzoidal osilatörü ile üretilen desenin, canlının omuriliği modellenirken kullanılması planlanan segment sayısı ile orantılı bir faz gecikmesi sağlaması arzu edilmiş ve bu faz gecikmelerinin alçak geçiren filtre yapıları ile elde edilebileceği bir yapının tasarımı üzerinde durulmuştur.

Anahtar Kelimeler– Merkezi Desen Üretici, Taşemen balığı, Hopf Osilatörü, Faz gecikmesi

Numerical Analysis of a Simple Controller Mechanism for a Swimming Central Pattern Generator

Abstract – This study deals with a simple central pattern generator (CPG) algorithm created with a sinusoidal oscillator and several first-order low-pass filters to generate the swimming pattern of a lamprey, which is considered as the most primitive vertebrate. It is desired that the pattern generated with the Hopf sinusoidal oscillator would provide a phase delay proportional to the number of segments planned to be used when modeling the spinal cord of the living being, and the design of a structure in which these phase delays can be achieved with low-pass filter structures is emphasized.

Keywords – Central Pattern Generator, Lamprey, Hopf Oscillator, Phase Delay

I. GİRİŞ

Son yıllarda, canlıların merkezi sinir sistemlerindeki mekanizmayı kullanarak robotların hareketini kontrol etmek popüler hale gelmiştir. Canlı hareketlerinin, omurgalılar için omurilik, omurgasızlar için ganglion tarafından üretilen merkezi osilasyonlar serisi tarafından kontrol edildiği kaydedilmiştir; buna merkezi desen üreticileri adı verilmiştir [1-3]. CPG modeli ilk olarak Cohen tarafından 1980'lerde, bir taşemen balığının omuriliği üzerine yapılan araştırmalarla önerilmiştir [4]. Şimdilerde merkezi olarak üretilen bu ritimlerin duysal bir bilgiye ihtiyaç duymadan merkezden üretilmesine dair net kanıtlar vardır. "Merkezi" kelimesi de buradan gelmektedir.

Merkezi desen üretici yapısının ortaya konmasının ardından birçok araştırmacı bu algoritmayı biyolojik ilhamlı robot kontrolüne uygulamıştır. Örneğin, Kimura, iki nöronun birbirini karşılıklı olarak inhibe ettiği Matsuoka nöron modellerini [5] kullanarak bir dört bacaklı robotun yürümesini kontrol etmek için osilasyonlar üretmiştir [6-8]. Taga, kas-iskelet sistemine CPG uygulayarak iki ayaklı yürüyüş gerçekleştirmiştir [9]. Arena, bir altı bacaklı robotun hareketi için hücresel doğrusal olmayan ağlar (MTA-CNN) kullanarak çok şablonlu bir yaklaşım sunmuştur [16-18]. Inagaki, altı bacaklı robotunu kontrol etmek için bir dalga CPG modeli oluşturmuştur [11]. Dahası yüzen canlılarda merkezi desen üretici çalışmaları için özellikle Ijspeert ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar oldukça etkilidir [12]. Bu çalışmalarda nöral devre olarak doğrusal olmayan bir osilatör kullanmıştır ve bu osilatörler bir araya getirerek yüzme

amfibi bir canlının hem yüzme hem de yürüme desenini oluşturan bir CPG modeli tasarlanmıştır.

Bu çalışmada, yüzen bir canlının hareket kontrolü için taşemen balığı örnek alınmıştır. Bu canlının seçilme sebebi, sinir sistemlerinin oldukça ilkel ve dolayısıyla görece basit olmasıdır. Ele alınan canlının CPG kontrolü için limit döngü davranışı sergileyen bir dinamik sistem olan Hopf sinüzoidal osilatörü kullanılmıştır. Literatürde Ref.[13]'teki çalışmada çok bacaklı canlıların yürüyüş desenlerini ve bu yürüyüş desenleri arasında yumuşak bir geçiş sağlamak amacı ile Hopf osilatörü kullanılmış ve yürüyüş periyotları arasındaki faz gecikmelerinin sağlanması için alçak geçiren filtre yapılarından yararlanılmıştır. Ref. [13]'te kullanılan filtre yapıları merkezi osilasyonun bir uzantısı gibi düşünülmüş ve dalga yayılımının bir parçası işlevi görmüştür. Referans alınan çalışmadan yola çıkılarak, bu çalışmada da omurilik uzantısı on adet segmente bölünmüş ve her segmentte sağ ve sol tarafa yönelimi sağlayan bir kontrolörün bulunduğu taşemen balığının merkezi desen üretimi için Hopf osilatörünü kullanımını ele alınmıştır. Bu on adet segment arasındaki eşit aralıklı faz gecikmeleri de alçak geçiren filtreler üzerinde en uygun parametre ayarı yapılarak elde edilmiştir. Nihai hedefin önerilen sistemin donanım gerçekleştirmeleri ile robot kontrolünün sağlanacağı bir yapının elde edilmesi olan bu süreçte, sistemde kullanılan filtrelerin uygun faz gecikmelerinin sağlanması ve tasarlanan yapının işlevselliğinin gösterilmesi aşaması olan nümerik simülasyon sonuçlarının sunulması bu çalışmada kaydedilmiştir.

Bu makalenin organizasyonu şu şekildedir: Öncelikle taşemen balığı yüzme CPG'si incelenmiş ve yüzme mekanizması açıklanmıştır. Ardından faz gecikmesi için kullanılan filtrelerin parametre hesabı yapılarak nümerik simülasyon sonuçları kaydedilmiştir. Çalışmanın son kısmında sonuçlar, katkılar ve gelecek çalışması planları sunulmuştur.

II. TAŞEMEN BALIĞI YÜZME CPG'Sİ

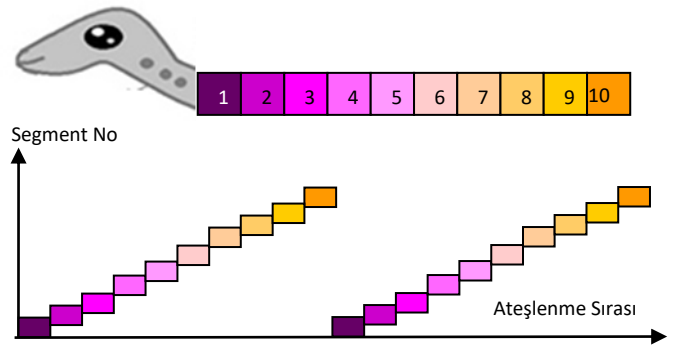
Ritmik desen üretici yapıları, omurgalılarda omurilikte bulunur. CPG'ler ritmik nöral cevaplar üretir ve canlı vücudundaki tepki organları bu çıkış sinyalleri tarafından kontrol edilir. Canlıların lokomasyon hareketleri yaşam alanı bulmaları, yiyecek arayışları ve yırtıcılardan kaçmaları gibi temel yaşam koşulları için elzemdir ve bu lokomasyon hareketleri genellikle merkezi desen üretici ağları tarafından kontrol edilir.

Bazı araştırmacılar doğada bulunan omurgalı ve omurgasız canlılardan esinlenen hareketlere sahip, biyo-esinli robotlara yönelmişlerdir. Bunlara örnek olarak taşemen balığı nörobiyologların dikkatlerini çekmiştir. Taşemen balığının yüzme CPG'inde bulunan ritmik desenlerin oluşumu ve modülasyon süreci, karakteristik frekansları ve faz gecikmeleri nörobiyologlarca açıkça tanımlanmıştır [14].

Taşemen balıkları pulsuz bir deriye sahiptir ve bir ya da iki sırt yüzgeci bulunur. Gözleri derinin altına gizlenmiştir. Solunum ve beslenme işlevleri ağızdan giren ve solungaçlarından çıkan su ile sağlanır. Gövdesi, yanal bir dalgalanma meydana getirerek baştan kuyruğa doğru hareket eder. Taşemen balığının hareketi suda hareket eden bir yılan benzerdir [15].

Taşemen balığının yüzme merkezi desen üreticindeki nöronların birbirleri arasındaki uyarıcı ve bastırıcı bağlantılar ve nöronların dinamik sergileme sırası hakkında bazı temel kabuller yapılmıştır [16-18]: i) Taşemenin yüzme CPG'sinin sağında ve solunda karşılıklı etkileşimli nöral gruplar vardır. ii) Sağ ve sol nöron grupları birbirlerinden izole edilseler de kendi içlerinde ritmik desenler üretebilir. iii) Sağ ve sol tarafta bulunan çift taraflı nöron grupları taşemen balığının omuriliği boyunca (başından kuyruğuna kadar) sıralamıştır ve birbirleri ile etkileşimlidir. iv) Her iki tarafta da, bir uyarıcı (EIN) dâhili nöron, iki bastırıcı (LIN ve CIN) dâhili nöron ve bir de motor nöron (MN) içeren gruplar vardır. v) Bu gruplardaki nöronlardan motor nöronlar girişleri alır, fakat dâhili nöronlara çıkış vermez. Motor nöronlar pasif çıkış elemanları olarak kullanılırlar. vi) Diğer dâhili nöronların her biri kendi aralarında, karşı gruptaki nöronlarla ve komşu nöral bölümlerdeki nöronlarla etkileşim halindedir. vii) Sağ ve sol gruplardaki nöronlar birbirleri ile zıt fazlı ateşlenir. viii) Nöral bölümlerde nöron ateşlemeleri arasında bir zaman gecikmesi söz konusudur.

Bu çalışmada ağ yapısını oluşturan nöronların kendi aralarındaki etkileşim dikkate alınmaksızın yukarıda sıralanan maddelerden yedi ve sekizinci maddedeki durumların sağlanması amaçlanmıştır.



Şekil 1 Taşemen balığı omuriliğinde sıralı şekilde ateşlenmesi planlanan segmentleri temsil eden bir gösterim

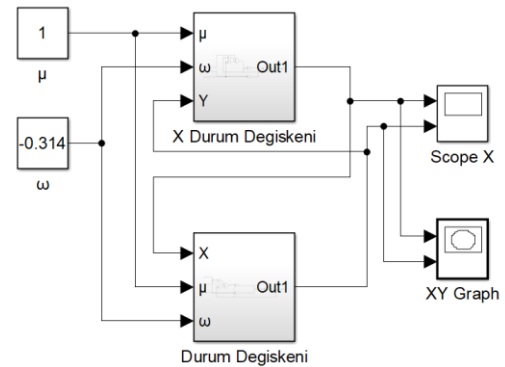
Canlının omurilik uzantısı Şekil 1'deki gibi on adet segmente bölünmüştür. Her segmente sağ ve sol tarafa yönelimi sağlayan bir kontrolör bulunmaktadır. Bu on adet segment arasındaki eşit aralıklı faz gecikmeleri de alçak geçiren filtreler üzerinde en uygun parametre ayarı yapılarak elde edilmiştir. Sonraki bölümde bu yapıda kullanılan Hopf osilatör modeli ve alçak geçiren filtre yapısında yapılan düzenlemeler ele alınacaktır.

III. HOPF OSILATÖRÜ VE FİLTRE PARAMETRELERİNİN AYARLANMASI

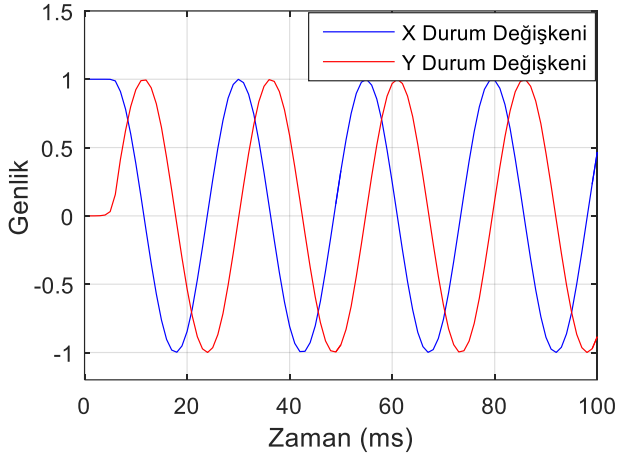
Desen üretici yapılarında merkezi osilasyonu üretmek için birçok model bulunmaktadır. Bu çalışmada faz ve genlik parametrelerinin ayrı ayrı kontrol edilebildiği Denklem 1'deki Hopf osilatörü kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (\mu - x^2 - y^2)x + \omega y \\ \dot{y} &= (\mu - x^2 - y^2)y + \omega x \end{aligned} \quad (1)$$

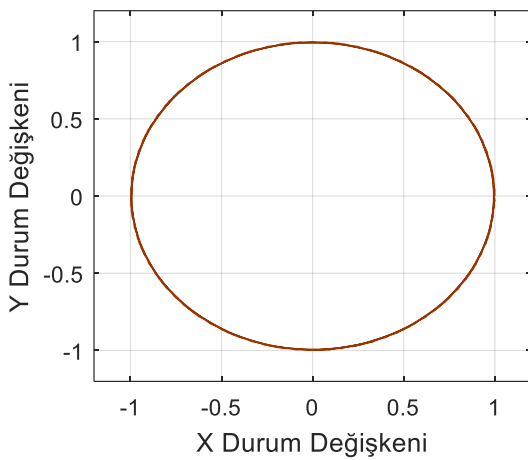
Şekil 2'de Denklem 1'deki sistemin nümerik simülasyonu için MATLAB&SIMULINK™'te oluşturulan bloklar sunulurken, Şekil 3a ve 3b'de sırasıyla limit döngüye doğru kararlı bir şekilde salınım yapan Hopf osilatörüne ait zaman domeni çıkışı ile faz çakeri görüntüsüne ait nümerik simülasyon sonucu sunulmaktadır.



Şekil 2 Hopf osilatörünün nümerik simülasyonu için MATLAB&SIMULINK™'te oluşturulan bloklar



(a)



(b)

Şekil 3 Hopf osilatörüne ait zaman domeni çıkışı ile faz çakeri görüntüsüne ait nümerik simülasyon sonucu

Yukarıdaki nümerik simülasyonlardan, modeldeki parametrelerin değişimi ile sinüzoidal osilatörün genlik ve frekansın bağımsız şekilde kontrol edilebileceği görülmektedir

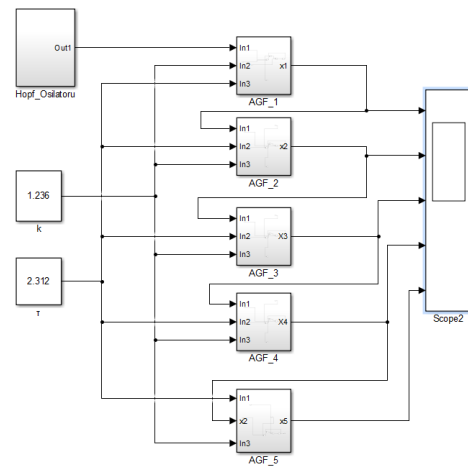
İlerleyen kısımda Ref. [13]'teki çalışmadan yola çıkılarak Şekil 1'de görülen on segment için faz gecikmesinin nasıl sağlanacağı üzerinde durulacaktır. Bu amaçla, birinci dereceden alçak geçiren filtreler kullanılmıştır. Birinci dereceden alçak geçiren filtrenin transfer fonksiyonu Denklem 2 ile verilir:

$$T(j\omega) = \frac{1}{j\omega\tau + 1} = \frac{1}{\sqrt{\tau^2\omega^2 + 1}} \arctan^{-1}(\omega\tau) \quad (2)$$

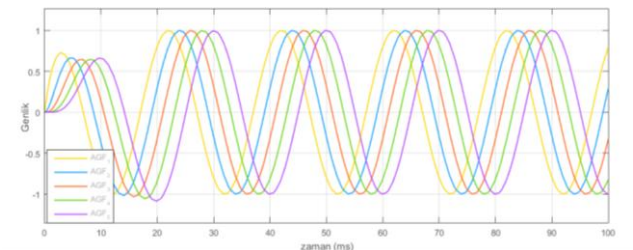
Buna göre on segmentli bir sistem için segmentler arasındaki faz gecikmesinin 36° olması gerekir. ' θ ' ile temsil edilen faz gecikmesi, ' ω ' ile temsil edilen frekans, ' τ ' ile temsil edilen zaman sabiti ve ' k ' ile temsil edilen kazanç katsayısı için yapılan hesaplamalar şu şekildedir:

$$\begin{aligned} \theta &= 36^\circ = \frac{36\pi}{180} = 0.6284 \text{ rad} \\ \omega &= \frac{-\pi}{10} = -0.3142 \text{ rad/s} \\ \tau &= \frac{\tan(\theta)}{\omega} = -2.312 \\ k &= \sqrt{\tau^2\omega^2 + 1} = 1.236 \end{aligned} \quad (3)$$

Denklem 1'deki Hopf osilatör, limit döngü özelliğine sahiptir ve bu osilatörün kutupsal koordinatta kontrol edilmesi kolaydır. Denklem 3'teki hesaplama ile arzu edilen faz gecikmeleri parametrelerin doğru şekilde ayarlanması ile kolaylıkla kontrol edilebilmektedir. Osilatör çıkışına parametre değerleri Denklem 3'te hesaplanan beş adet alçak geçiren filtre bağlanması durumunda (Şekil 4) elde edilen çıkış işaretleri Şekil 5'te görülmektedir.

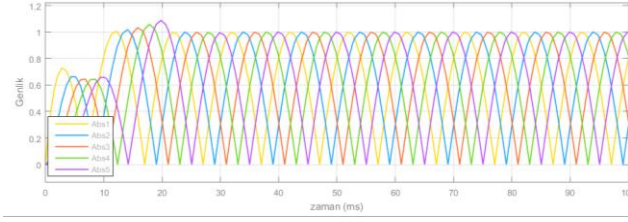


Şekil 4 Hopf osilatörü ardına bağlanan alçak geçiren filtreler ve yüzme CPG'si için önerilen sistemin nümerik simülasyonu için MATLAB&SIMULINK™'te oluşturulan bloklar



Şekil 5 Hopf osilatörü ardına bağlanan alçak geçiren filtreler ve yüzme CPG'si için önerilen sisteme ait nümerik simülasyon sonucu

Şekil 5'te görüldüğü gibi faz gecikmesinin elde edildiği beş adet çıkış mevcuttur. Bu çıkışlar ile omuriliği on segmente ayrılan bir taşemen balığının her segmentinin ayrı ayrı uyarılması için çıkış sayısı yetersiz görünmektedir. Bununla birlikte, Şekil 5'te elde edilen çıkış işaretlerinin mutlak değerleri alındığında işaretin minimum noktaları da maksimum değerlerine dönecektir. Böylece Şekil 6'da görüldüğü gibi maksimum noktada on adet işaret çıkışı elde edilecektir. Bu çıkışların her birinin maksimum noktası bir segmentin bir yönünü, minimum noktası ise zıt yönünü tetiklerse bir önceki bölümde madde yedide belirtilen aynı segmentteki sağ ve sol grupların zıt ateşlenmesi durumu elde edilir. Bununla birlikte, Şekil 6'daki faz gecikmeleri göz önünde bulundurularak madde sekizde belirtilen "Nöral



Şekil 6 Hopf osilatörü ardına bağlanan alçak geçiren filtreler ve yüzme CPG'si için önerilen sisteme ait nümerik simülasyon sonucu

bölgülerde nöron ateşlemeleri arasında bir zaman gecikmesi söz konusudur” maddesi elde edilmekte ve segmentler arasındaki gecikmenin de oldukça orantısız sağlandığı gözlemlenmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak; “Elde edilen çıkış işaretlerinin maksimum ve minimum noktalarını kullanarak on segmentten oluşan bir yüzen ya da sürüne robot üzerinde bulunan aktüatörler oldukça düzgün bir şekilde tetiklenebilir.” sonucunu çıkarmak mümkündür.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada en ilkel yüzen canlı olan taşemen balığının yüzme merkezi desen üretici mekanizmalarından ilham alınarak, bir robot için bir hareket kontrol algoritmasını tetikleyici bir mekanizmanın elde edilmesi üzerinde durulmuştur. Burada sunulan sistem tasarımı ile doğrusal olmayan osilatörlerin limit döngü davranışlarının kararlı yapısından ve alçak geçiren filtre yapılarının genlik ve faz kontrolünden yararlanılarak; ters kinematik hesaplamalarına ihtiyaç duymaksızın periyodik yörüngeler, adi diferansiyel denklemler aracılığıyla doğrudan oluşturulmuştur. Gelecekte önerilen bu sistemin tarafımızca donanım gerçekleştirmelerinin yapılması ve robot kontrolünün yapılacağı bir yapının elde edilmesi planlanmaktadır.

REFERENCES

- [1] F. Delcomyn, “Walking robots and the central and peripheral control of locomotion in insects,” *Auton. Robots*, vol. 7, no. 3, pp. 259–270, 1999.
- [2] S. L. Hooper, “Central pattern generators,” *Curr. Biol.*, vol. 10, no. 5, pp. R176–R179, 2000.
- [3] S. Rossignol, “Locomotion and its recovery after spinal injury,” *Curr. Opin. Neurobiol.*, vol. 10, no. 6, pp. 708–716, 2000.
- [4] A. H. Cohen, P. H. Holmes, R. H. Rand, “The nature of the coupling between segmental oscillators of the lamprey spinal generator for locomotion: a mathematic model,” *J. Math. Biol.*, vol. 13, pp. 345–369, 1982.
- [5] K. Matsuoka, “Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythms generators,” *Biol. Cybern.*, vol. 56, pp. 345–353, 1987.
- [6] Y. Fukuoka, H. Kimura, A. H. Cohen, “Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 22, no. 3–4, pp. 187–202, 2003.
- [7] H. Kimura, Y. Fukuoka, K. Konaga, Y. Hada, K. Takase, “Towards 3D adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain by using neural system model,” *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS)*, vol. , pp. 2312–2317, 2001.
- [8] H. Kimura, Y. Fukuoka, A. H. Cohen, “Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts,” *Int. J. Rob. Res.*, vol. 26, no. 5, pp. 475–490, 2007.
- [9] G. Taga, Y. Yamaguchi, H. Shimizu, “Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment,” *Biol. Cybern.*, vol. 65, pp. 147–159, 1991.
- [10] P. Arena, L. Fortuna, M. Frasca, “Multi-template approach to realize central pattern generators for artificial locomotion control,” *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 30, no. 4, pp. 441–458, 2002.
- [11] S. Inagaki, H. Yuasa, T. Arai, “CPG model for autonomous decentralized multi-legged robot system generation and transition of

- oscillation patterns and dynamics of oscillators,” *Robot. Auton. Syst.*, vol. 44, pp. 171–179, 2003.
- [12] A. J. Ijspeert, A. Crespi, D. Ryczko, J. M. Cabelguen, “From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model,” *Science*, vol. 315, no. 5817, pp. 1416–1420, 2007.
- [13] W. Chen, G. Ren, J. Zhang, J. Wang, “Smooth transition between different gaits of a hexapod robot via a central pattern generators algorithm,” *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 67, no. 3, pp. 255–270, 2012.
- [14] N. Korkmaz, “A Digital Emulator Design for the Swimming Rhythmic Pattern Generator of a Lamprey,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 43849–43861, 2024.
- [15] S. Grillner, P. Wallén, “How does the lamprey central nervous system make the lamprey swim?,” *J. Experim. Biol.*, vol. 112, no. 1, pp. 337–357, 1984.
- [16] S. Grillner, P. Wallén, N. Dale, L. Brodin, J. Buchanan, R. Hill, “Transmitters, membrane properties and network circuitry in the control of locomotion in lamprey,” *Trends Neurosci.*, vol. 10, no. 1, pp. 34–41, 1987.
- [17] J. T. Buchanan, “Neural network simulations of coupled locomotor oscillators in the lamprey spinal cord,” *Biol. Cybern.*, vol. 66, no. 4, pp. 367–374, 1992.
- [18] J. T. Buchanan, “Contributions of identifiable neurons and neuron classes to lamprey vertebrate neurobiology,” *Prog. Neurobiol.*, vol. 63, no. 4, pp. 441–466, 2001.