

Merkezi Örüntü Üreteçlerinin Robotlarda Hareket Kontrolü için Çeşitli Uygulamaları: Bir Araştırma

Deniz KORKMAZ, Gonca ÖZMEN KOCA*, Cafer BAL

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23119, Türkiye

*gonca.ozmen@gmail.com

(Geliş/Received: 06.06.2018; Kabul/Accepted: 11.09.2018)

Özet

Bu çalışmada, hızla gelişen robotik uygulamalarında sıklıkla kullanılan Merkezi Örüntü Üreteci (MÖÜ) yapıları ve bu yapılar ile robotların akıllı hareket kontrolü üzerine son 20 yılda ortaya çıkan gelişmeler detaylı bir şekilde incelenmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar ile ilgili bir ön değerlendirme sunulmuştur. Literatürde yer alan MÖÜ kontrol modelleri ve buna bağlı farklı yapılar, tasarım ve uygulama kolaylığı dahil olmak üzere, modellerin göreceli avantajları ve dezavantajlarına odaklanarak gözden geçirilmiştir. Biyolojik bir sinir ağı görevi gören MÖÜ'ler, herhangi bir geri besleme veya giriş sinyaline ihtiyaç duymadan sürekli salınımlı, dayanıklı ve ritmik çıkışlar üretebilir. Robotik mühendisliği çalışmalarındaki temel fikir, çok eklemlili veya çok serbestlik dereceli robotların verimli ve dayanıklı bir şekilde hareketlerinin koordinasyonunu sağlamaktır. MÖÜ tabanlı kontrolör tasarımında ve uygulamasında olası alternatiflerden kaynaklanan temel konular, farklı hareket kontrol yöntemleri ve uygulamalarına ilişkin incelemeler sunulmuştur. Bu alanda kullanılan yöntemler uygulanan robot sınıflandırmaları ile birlikte özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Merkezi Örüntü Üreteci, Robot Uygulamaları, Akıllı Hareket Kontrolü, Biyomimetik Kontrol, Sinir Ağları

Various Applications of Central Pattern Generators for Locomotion Control in Robots: A Review

Abstract

In this study, Central Pattern Generator (CPG) structures which are frequently used in developing robotic applications and the developments occurred over the past 20 years on intelligent motion control of robots with these structures are examined in detail and a preliminary evaluation about the future works are presented. CPG control structures in the literature and different structures depended on these models are reviewed focusing on the notional advantages and disadvantages of these models with ease of design and application. CPGs acting as a biological neural network can generate continuous oscillatory, robust and rhythmic outputs without any feedback or input signal. The basic idea of robotic engineering studies are to provide efficient and robust locomotion coordination of multi-joint or multi-degrees-of-freedom robots. Fundamental issues arising from possible alternatives in CPG-based controller design and application, different locomotion control methods and their applications are presented. The methods used in this area are summarized together with the applied robot classifications.

Keywords: Central Pattern Generator, Robotic Applications, Intelligent Locomotion Control, Biomimetic Control, Neural Networks

1. Giriş

Biyomimetik tasarım ve uygulamaları, tabiattan esinlenerek geliştirilen teknolojiler ile oldukça popüler bir hale gelmiştir. Biyomimetik, canlı formların incelenmesi ve bu yapıların farklı mühendislik uygulamalarına aktarılması olarak adlandırılır. Biyomimetik tasarımın temel amacı, tabiattaki canlıları taklit ederek mühendislik problemlerine farklı ve yenilikçi çözümler

getirmek veya var olan sistemlerin performanslarını iyileştirmektir. Günümüzde; robotik sistemler, yapay zeka uygulamaları, eniyileme, nano teknoloji, mimari tasarımlar, savunma sistemleri ve sağlık gibi birçok farklı alanda bu yaklaşımdan faydalanılmaktadır [1-4].

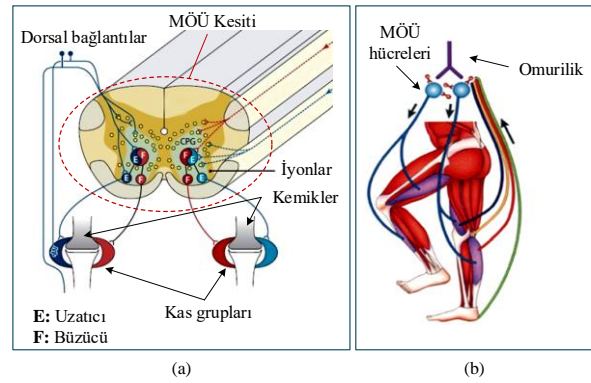
Özellikle biyomimetik tasarım yaklaşımının robotik sistemlere adapte edilmesi, son yıllarda araştırmacıları canlıların ritmik hareketlerinin nasıl ve nerede üretildiği ile ilgili araştırmalara

yönlendirmiştir. Canlıların hareketlerinin vücudun herhangi bir noktasının uyarılmasına tepki olarak omuriliğin refleks bağlarının verdiği cevaplar ile oluşturulduğu düşüncesi yaklaşık 1900'lü yıllara kadar sürmüştür. Yürüme eylemi gerçekleştiren bir canlının, ayağı yere basarken teması ile bir hareket döngüsünün başladığı ve aynı ayak tekrar yere temas ettiğinde ise yeni bir ardışık hareketin tekrar ettiği kabul edilmiştir. Böylece ayağın zemin ile teması sonucunda meydana gelen basıncın duyuşsal uyarıcıları tetiklediği ve bu hareketlerin uyarıcılara göre oluştuğu düşünülmüştür [5]. Ancak bu yaklaşım 1900'lü yılların başında bir köpeğin havada asılı durduğu anda bacaklarını yürümeyi andıran şekilde hareket ettirmesi deneyi ile değişmeye başlamıştır [5-7]. Ayrıca, Sherrington [5] tarafından köpek ve kedilerin tüm duyu sinirlerinin kopmasına rağmen yürüyebildikleri gözlemlenmiştir. Brown [5] ise bu hareketlerin derilerindeki uyarıcılara karşı bir tepki olmadığını ispatlamıştır. Bununla birlikte, Shik ve arkadaşları [7] bir kedinin yürüme hareketlerini gözlemlemiş ve bu hareketlerin devamlılığının beyin sapının elektriksel uyarıcılar ile tetiklenmesinden kaynaklandığını bulmuşlardır.

Tüm bu araştırmalar, canlılarda hareketlerin omurilik veya beyin sapı ile gerçekleştiğini ve beyin merkezinden yalnızca basit uyarıcıların geldiğini ispatlamıştır [5-9]. Bu durum diğer canlıların çoğu için de zamanla kabul görmüştür [10]. Lokomotor hareketlerin yüksek beyin merkezinden veya duyuşsal alıcılardan herhangi bir uyarı gelmeden omuriliğin literatürde Merkezi Örüntü Üretici (MÖÜ, Central Pattern Generator, CPG) olarak adlandırılan sinir hücreleri ile oluşturulabileceği gösterilmiştir. Bir MÖÜ devresi geri besleme bilgisine ihtiyaç duymadan canlının temel hareketlerini üretebilen, ritmik ve salınımlı sinyaller oluşturan biyolojik sinirsel bir yapıdır [5-14]. MÖÜ'yü oluşturan sinir hücreleri omurilik ile beraber beyin sapında da bulunabilir. Farklı türlerdeki canlılarda MÖÜ'lerin birbirleriyle olan bağlantıları farklılık gösterebilir [5,10,11].

MÖÜ devreleri motor korteksten gelen bağlantılar ile kontrol edilmektedir. Bu bağlantılar doğrudan veya beyin sapı aracılığı ile gerçekleşir [7]. Sinirsel bir MÖÜ devresi en basit haliyle birbirine bağlı iki adet ara sinir hücresinden oluşur. Sinaps adı verilen bu

bağlantılar elektriksel iletimler ile gerçekleşir. Sinapslar, sinir hücrelerinin aksiyon potansiyellerini değiştirerek elektriksel geçiş akımlarını oluşturur. Bu karşılıklı etkileşimler çıkışların genliğini ve çıkışlar arasındaki faz farkını belirler [5-7,9,15]. Sinirsel bir MÖÜ yapısının en önemli özelliği herhangi bir dış uyarıcı olmadan davranış tabanlı hareketleri içeren ritmik ve sürekli salınımlı çıkışlar üretebilmesidir. MÖÜ'lerin bir araya gelmesiyle hiyerarşik bir bütün oluşturularak canlının hareket etme fonksiyonları gerçekleştirilir. Aynı zamanda, uygun yapıya sahip bir MÖÜ devresi beyin merkezinden gelen sinyaller ile nöromodülasyon ve duyuşsal geri besleme özelliğine de sahip olabilir [5,6,9-11]. Şekil 1'de nörobiyolojik bir MÖÜ yapısının kesiti ve kaslarla olan ilişkisi sunulmuştur.



Şekil 1. Nörobiyolojik MÖÜ yapısının gösterimi: (a) Kesiti, (b) Kaslarla olan ilişkisi

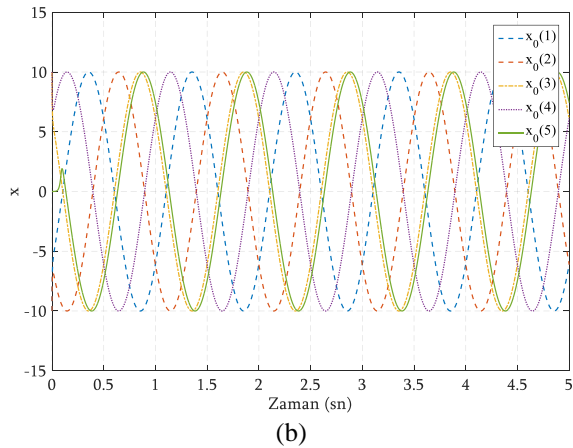
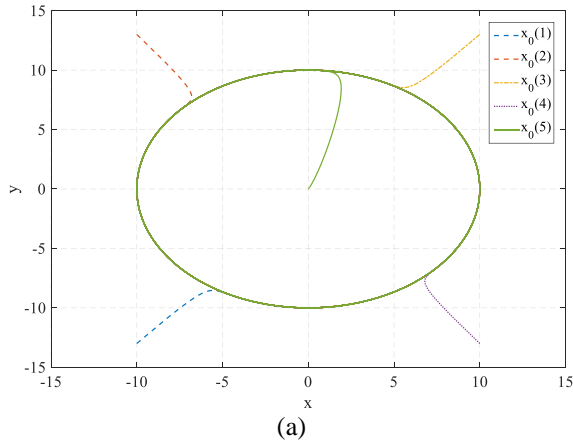
Bu çalışmada, son yıllarda gelişen teknoloji ile beraber robotik uygulamalarında sıklıkla kullanılan MÖÜ yapıları ve bu akıllı kontrol yapılarının robotlar üzerine uygulamaları detaylı bir şekilde incelenmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar ile ilgili bir ön değerlendirme sunulmuştur. Literatürde en çok kullanılan MÖÜ yapıları seviyelerine ayrılarak farklı kriterlere göre sınıflandırılmış ve buna bağlı yapılar ve uygulamaları avantajları ve dezavantajlarına odaklanarak gözden geçirilmiştir.

Bu çalışma aşağıdaki gibi organize edilmiştir: 2. Bölümde en çok kullanılan MÖÜ osilatör yapıları tanıtılmıştır. 3. Bölümde bu MÖÜ yapılarının seviyelerine, hesaplama karmaşıklığına ve parametrelerinin belirlenmesine göre bir karşılaştırma yapılmıştır. Farklı kriterlere göre MÖÜ'ler ile ilgili robot

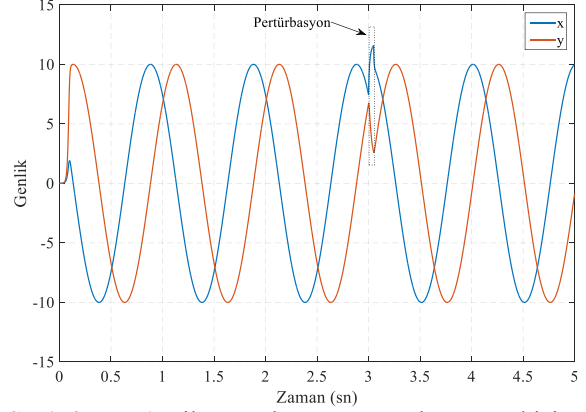
uygulamaları 4. Bölümde verilmiştir. 5. Bölümde sonuçlar değerlendirilmiş ve bazı öneriler sunulmuştur.

2. MÖÜ Osilatör Yapıları

Canlıların uçma, yüzme, atlama, yürüme, koşma, emekleme ve sürünme gibi temel hareketleri MÖÜ hücre yapıları ile sağlanmaktadır. Bununla birlikte; solunum, emme, yalama ve çiğneme gibi ritmik fonksiyonlar da MÖÜ hücreleri ile sağlanabilir [10,11,16]. MÖÜ'ler, bu temel görevleri yerine getirirken dış ortamdan gelen bozucu girişlere karşı belirgin tepkiler üreterek ritmik davranışların kaldığı yerden istenilen şekilde devam etmesini sağlayabilirler [10,13,17,18]. Böylece, hangi başlangıç noktasından başlarsa başlasın MÖÜ çıkış cevabı aynı limit çevrim içinde kalmaktadır. Şekil 2'de, Hopf MÖÜ yapısı için limit çevrim özelliği gösterilmiştir. Şekil 3'de ise dış ortamdan gelen bozucu girişe karşı Hopf osilatörün davranışı verilmiştir.



Şekil 2. Örnek Hopf MÖÜ davranışı: (a) Farklı başlangıç değerleri için limit çevrimler, (b) Farklı başlangıç değerlerine bağlı çıkışlar



Şekil 3. Hopf osilatörün bozucu pertürbasyon etkisine göre davranışı

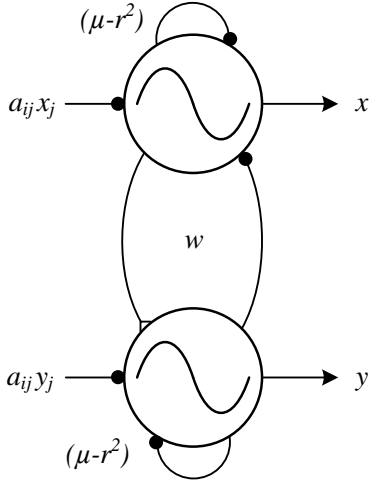
Çok eklemlü/uzuvlu robotların hareket kontrolü için geliştirilen MÖÜ yapıları nörobiyolojik ve tasarım şekilleri dikkate alınarak biyofiziksel, ilişkisel ve soyut model olmak üzere üç temel seviyede sınıflandırılabilir. Biyofiziksel modeller genel olarak iyon yüklerinin özelliklerini taşıyan ve hücre zar potansiyellerini taklit edebilen ritmik çıkışlar üretirler. İlişkisel modeller ise ara sinir hücreleri ve uyarıcı/engelleme sinaptik etkileşimler ile çıkış sinyalinin üretilmesini sağlarlar. Soyut modeller diğer MÖÜ yapılarına göre farklılık gösterir. Bu modeller temel osilatör yapılarının matematiksel ifadeleri ile tanımlanır ve bu yapıların kuplajlanması ile oluşturulur [8,10,11].

Bu bölümün devamında, literatürde en çok kullanılan MÖÜ yapıları; Hopf, Genlik Denetimli Faz (GDF), Matsuoka, Herrero-Carron ve Ekeberg osilatörleri incelenmiş temel özelliklerine göre genel bir karşılaştırma yapılmıştır.

2.1. Hopf osilatörü

Soyut model özelliklerine sahip Hopf osilatörleri limit çevrim özellikleri sayesinde dışarıdan gelen bozuculara karşı salınımlı ritmik çıkışlar üretebilirler [19]. Şekil 4'de, kartezyen koordinat düzleminde verilen Hopf osilatör yapısı iki adet yarım merkezli hücre ile temsil edilmiştir. Bu osilatörler sürekli salınımlı sinüzoidal çıkışlar

üretmek istenilen genlik ve frekans değerine kolayca ulaşabilirler.



Şekil 4. Hopf osilatör yapısı

Hopf türü bir osilatör kartezyen koordinat düzleminde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{x}_i = \gamma(\mu - r^2)x_i - w_i y_i - a_{ij} x_j \quad (1)$$

$$\dot{y}_i = \gamma(\mu - r^2)y_i + w_i x_i - a_{ij} y_j \quad (2)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

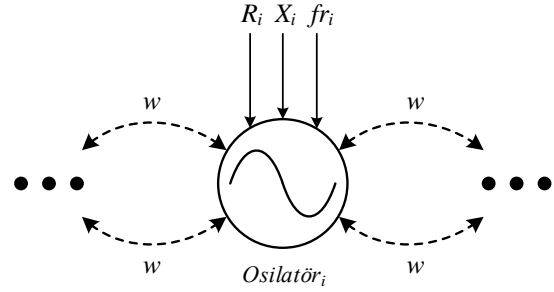
Burada i ve j osilatör indisleri olmak üzere, x_i ve y_i osilatörde bulunan hücre çıkışlarını, w_i çıkışın açıl frekansını, μ çıkış genliğini, r çıkışların vektörel büyüklüğünü, a_{ij} osilatörler arasındaki kuplajları ve γ ise yakınsama hız sabitini gösterir.

Osilatörler arasında yapılan kuplaj bağlantıları harici bozucu etkilere sebep olmaktadır. Bu durum osilatörün faz dinamiklerinin etkilenmesine ve osilatörler arasındaki faz farkının sabit kalmamasına sebep olur. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için pertürbasyon etkisi olarak tanımlanan öğrenme ifadeleri kullanılır. Bu pertürasyon ifadelerinden en çok tercih edileni Hebbian türü öğrenmedir [18].

2.2. GDF osilatörü

1975 yılında Yoshiki Kuramoto tarafından geliştirilen Kuramoto osilatörlerinden

esinlenerek, Şekil 5’de verilen GDF osilatörleri tasarlanmıştır [4].



Şekil 5. GDF osilatör yapısı

$\dot{\theta}_i = w_i^{osc}$ ile ifade edilirse, kuplajlar ile bağlanan istenilen faz farkında eş zamanlı sinüzoidal çıkışlar üretebilen GDF osilatörleri aşağıdaki gibi tanımlanır [20]:

$$\dot{\phi}_i = 2\pi f r_i + \sum_j w_{ij} \sin(\phi_j - \phi_i - \varphi_{ij}) \quad (4)$$

$$\dot{r}_i = a_r \left(\frac{a_r}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right) \quad (5)$$

$$\dot{x}_i = a_x \left(\frac{a_x}{4} (X_i - x_i) - \dot{x}_i \right) \quad (6)$$

$$\theta_i = x_i + r_i \cos(\phi_i) \quad (7)$$

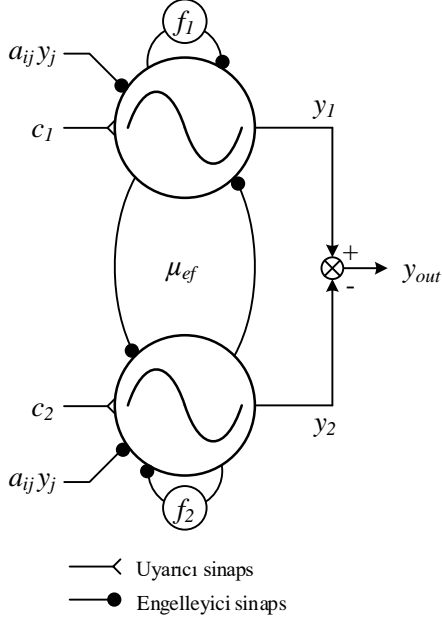
Burada i ve j osilatör indisleri olmak üzere, ϕ_i osilatör fazını, r_i genliği, x_i ofseti, θ_i çıkışı ve φ_{ij} osilatörler arasındaki faz farkını gösterir. R_i , X_i ve $f r_i$ osilatörün giriş parametreleri ise sırasıyla içsel genlik, ofset ve frekansdır. a_r ile a_x osilatör çıkışlarının istenen parametre değerlerine yakınsama hızını belirleyen sabitlerdir.

Soyut bir osilatör yapısına sahip GDF osilatörleri biyofiziksel özellikleri içermezler ve bu sebeple duyuşal geri beslemeli hücrelere sahip değildir.

2.3. Matsuoka osilatörü

İki adet yarım merkezli sinir hücresinden oluşan bu osilatör yapısı 1985 yılında Matsuoka tarafından geliştirilmiştir. Bu osilatör hücreleri birbirlerinin davranışını durdurmaya yönelik

etkileşimler içinde bulunmaktadır. Bu etkileşimler engelleyici sinapslar ile gerçekleşir ve sonucunda osilatör çıkışında salınımlı sinyaller oluşur [21]. Şekil 6'da bir Matsuoka osilatör modeli verilmiştir.



Şekil 6. Matsuoka osilatör yapısı

Bu osilatör yapısında bulunan yarım merkezli sinir hücreleri uzatıcı ve büzücü kas hücrelerini temsil ederler ve her hücrenin zar potansiyeli yorgunluk etkisi olan adaptasyon derecesine bağlı olarak değişir. En temel haliyle bir Matsuoka osilatör yapısı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Tr \frac{dx_i}{dt} = -x_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} y_j - \mu_{ef} y_i - b_i f_i + c_i \quad (8)$$

$$Ta \frac{df_i}{dt} = -f_i + y_i^q \quad (9)$$

$$y_i = \max(0, x_i) \quad (10)$$

$$y_{out} = y_i - y_{i-1} \quad (11)$$

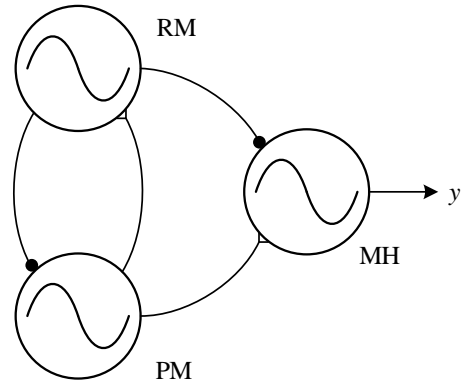
Burada i sinir hücresi indisi olmak üzere, x_i sinir hücresinin çıkışını, Tr ve Ta adaptasyon zaman sabitlerini, a_{ij} diğer osilatörler arasındaki bağlantıları, μ_{ef} sinir hücreleri arasındaki

sinapsları, b_i adaptasyon ateşleme hız oranını, f_i adaptasyon derecesini, c_i harici tonik oranını, j osilatör indisini ve q adaptasyon etkisini gösterir.

Bu osilatör yapısında değerinin bulunması gereken birçok parametre vardır. Tonik oranı her hücre için genellikle eşit olarak belirlenir. Tonik oranının artması sinir hücresinin çıkışının da adaptasyon zaman sabitlerine bağlı olarak büyük oranda artmasına neden olur. Osilatör çıkışının frekansı ise adaptasyon ateşleme hızı ile doğru ve adaptasyon zaman sabitleri ile ters orantılı olarak değişir. Osilatörler arasındaki faz farkları sinapslar ile saptanır. Çıkış sinyalinin saf bir sinüzoidal olarak benzememesi bu osilatör yapısının en önemli dezavantajlarından biridir [22].

2.4. Herrero-Carron osilatörü

Rulkov osilatör yapısı geliştirilerek robotik uygulamalarda daha kullanılabilir bir osilatör olan Herrero-Carron yapısı oluşturulmuştur. Bu osilatör yapısı Şekil 7'de verilen ProMotor (PM), ReMotor (RM) ve Motor Hücre'den (MH) meydana gelir ve bu sinir hücreleri sinapslar ile birbirine bağlanarak MÖÜ çıkışı ritmik sinüzoidal şekil alır. Herrero-Carron osilatörü biyofiziksel seviyenin özelliklerini taşır ve biyolojik sinirsel aktivite davranışı gösterir [8].



Şekil 7. Herrero-Carron osilatör yapısı

Hücreler arası iyon akışının özelliklerini içeren bu osilatör modelinde MH dışındaki diğer hücreler aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{\alpha}{1-x} + y & x \leq 0 \\ \alpha + y & 0 \leq x < \alpha + y \\ -1 & \text{diğer} \end{cases} \quad (12)$$

$$x_{n+1} = f(x_n, y_n) \quad (13)$$

$$y_{n+1} = y_n - \mu(x_n + 1) + \mu\sigma + \mu I_n \quad (14)$$

$$I = gr(X_p - E_{syn}) \quad (15)$$

$$\dot{r} = \begin{cases} \lambda[T](1-r) - \beta r & t_f < t < t_f + t_r \\ -\beta r & \text{diğer} \end{cases} \quad (16)$$

Burada n hücre indisi ve μ patlama sabiti olmak üzere x_n ve y_n sırasıyla μ 'ye bağlı hızlı ve yavaş zar gerilimlerini, I_n diğer hücrelerden gelen akım miktarını, α ve σ ise patlama süresi katsayısı ve periyodunu, gösterir. λ , β ve g hücreler arasındaki sinapsları, t_f ve t_r ateşleme ve durma zaman sabitlerini, $[T]$ kimyasal konsantrasyonu, X_p ve E_{syn} ise sırasıyla zar potansiyeli ile sinaptik sonrası hücre potansiyelini belirtir. MH hücre çıkışı için ise aşağıdaki eşik fonksiyonu kullanılır:

$$s(x, v) = \begin{cases} 1 & x > v \\ 0 & x \leq v \end{cases} \quad (17)$$

Burada s eşik fonksiyonu ve v eşik değerini tanımlar. Böylece, MH çıkışı;

$$\tau \dot{m} = -m + \gamma(s(x, v) - s(x, v)) \quad (18)$$

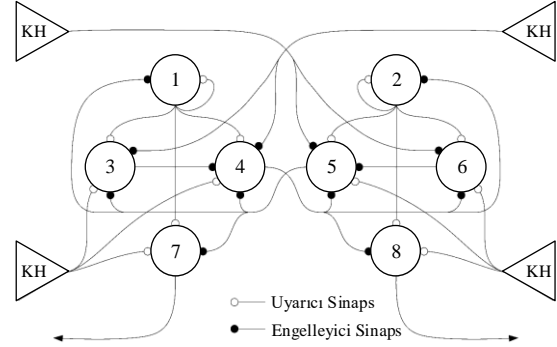
olarak tanımlanır. m MH'nin zar potansiyeli olmak üzere γ içsel genliği ve τ zar potansiyeli zaman sabitini gösterir.

Herrero-Carron osilatör yapısı zengin içsel dinamikler içerir ve biyolojik MÖÜ'lerin birçok özelliğine sahiptir. Bu MÖÜ'nün dezavantajı oldukça karmaşık yapısından dolayı osilatör tasarımının ve uygulanabilirliğinin zorlaşmasıdır.

2.5. Ekeberg osilatörü

Ekeberg osilatör yapısı Lamprey türü balıkların MÖÜ'lerinden esinlenerek

geliştirilmiştir ve ilişkisel model özelliklerine sahiptir. Şekil 8'de osilatör yapısına ait blok şema verilmiştir. Osilatör davranışı temel olarak sinir hücrelerinin uyarıcı ve engelleyici sinaptik bağlantılarına bağlıdır [23]. Bu yapıda geri beslemeli duyuusal sinir hücreleri olan Kenar Sinir hücreleri (KS) ve ara sinir hücreleri bulunmaktadır.



Şekil 8. Ekeberg osilatör yapısı

Her sinir hücresi bir Sızdıran Topla Ateşle (STA) hücre modeli ile aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{\zeta}_+ = \frac{1}{T_D} \left(\sum_{i \in \psi_+} u_i w_i - \zeta_+ \right) \quad (19)$$

$$\dot{\zeta}_- = \frac{1}{T_D} \left(\sum_{i \in \psi_-} u_i w_i - \zeta_- \right) \quad (20)$$

$$\dot{g} = \frac{1}{T_A} (u - g) \quad (21)$$

$$u = \begin{cases} 1 - e^{-(\theta - \zeta_+) \Gamma} - \zeta_- - \mu g & u > 0 \\ 0 & u \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

Burada i ara sinir hücresi indisini, ζ_+ ve ζ_- sırasıyla uyarıcı ve engelleyici gecikmiş sinapsları, T_D ve T_A zaman sabitlerini, u_i hücre çıkışını, w_i sinir hücreleri arasındaki sinapsları, ψ_+ ve ψ_- sırasıyla diğer osilatörlerden gelen uyarıcı ve engelleyici sinapsları, g ise osilatör çıkışını verir. θ , μ ve Γ ise osilatöre ait eşik, kazanç ve adaptasyon oranı sabitlerini temsil eder.

Bu yapıdaki her sinir hücresinin dinamik davranışını tanımlamak için kullanılan matematiksel ifadeler osilatör yapısını daha

karmaşık hale getirmektedir. Bu durum uygulamadaki kullanılabilirliğini azaltmaktadır.

3. Osilatör Yapılarının Karşılaştırılması

Yukarıda bahsedilen MÖÜ yapıları için hesaplama karmaşıklığı, parametrelerin belirlenmesi ve duysal geri besleme olmak üzere üç farklı kriter belirlenerek bu yapıların genel bir karşılaştırılması yapılmıştır ve bu karşılaştırma Tablo 1’de verilmiştir. Kriterler için hesaplama karmaşıklığında düşük, orta ve fazla; parametrelerin belirlenmesinde kolay, orta ve zor; duysal geri besleme özelliğinde ise zayıf, orta ve iyi seviyeleri belirlenmiştir.

Biyofiziksel MÖÜ yapıları yüksek hesaplama karmaşıklığı ve parametre değişimlerinin zor olması yanında bir canlının

biyolojik MÖÜ yapısının temel özelliklerini koruma ve sinirsel faaliyetlerin zengin dinamiğine sahip olma özelliğini barındırırlar. İlişkisel MÖÜ’ler biyofiziksel modellere göre bir alt seviyede bulunurlar. Bu yapıların sinirsel hücre aktiviteleri biyofiziksel MÖÜ yapıları kadar detaylı olmasa da canlıların sinirsel MÖÜ özelliklerine sahiptir. İlişkisel modellere duysal geri besleme özelliğini eklemek mümkündür. Ancak, bazı parametre değerlerinin ayarlanması oldukça zordur. Soyut seviyedeki MÖÜ yapılarında ise parametre değişiminin kolay olmasının yanında hesaplama karmaşıklığı düşüktür ve duysal geri besleme özelliğinin hücre bazında eklenmesi mümkün değildir. Bu yapılarda duysal sinir hücreleri yerine sabit parametreler veya fonksiyonlar tanımlanır [8].

Tablo 1. MÖÜ osilatör yapılarının karşılaştırılması

MÖÜ Yapısı	Sınıfı	Hesaplama Karmaşıklığı	Parametrelerin Belirlenmesi	Duysal Geri Besleme Özelliği
Matsuoka	İlişkisel	Orta	Zor	Zayıf
GDF	Soyut	Düşük	Kolay	Zayıf
Hopf	Soyut	Orta	Orta	Zayıf
Ekeberg	İlişkisel	Orta	Orta	Orta
Herrero-Carron	Biyofiziksel	Fazla	Zor	İyi

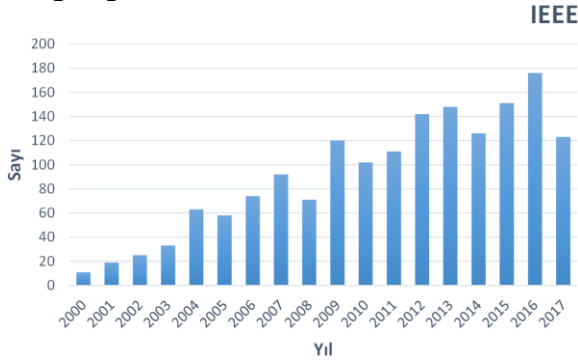
Düşük hesaplama karmaşıklığına, parametrelerin kolay belirlenmesine ve duysal geri besleme özelliğine sahip bir MÖÜ yapısının yukarıda yapılan karşılaştırma sonucunda tam olarak bulunmadığı görülmüştür. MÖÜ yapılarının farklı uygulamalar için avantajları arttırılmaya çalışıldıkça bazı dezavantajlar da beraberinde gelmektedir. Doğru bir MÖÜ yapısını belirlemek için en önemli etken uygulamadaki robot prototipinin nasıl bir yapıya ihtiyacı olduğuna karar verilmesidir. Bununla birlikte, uygulamadaki kullanılabilirliğin arttırılması da seçilecek MÖÜ yapısı için önemli bir etkidir.

4. Robotikte MÖÜ Yapıları

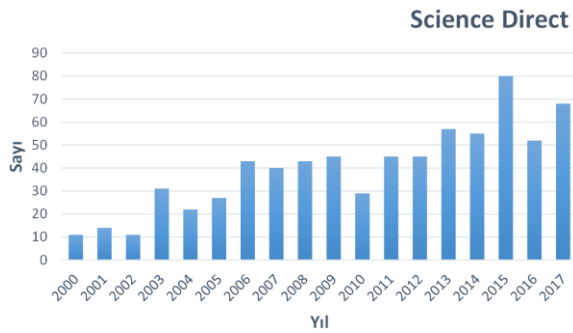
Literatürde, yapay MÖÜ modelleri geliştirerek doğadaki canlıların ritmik hareketlerini ve biyomimetik kontrol yapılarını mühendislik alanlarındaki uygulamalara aktaran

ve bu yapıların sürekli durumdaki performanslarını iyileştirmeye yönelik birçok çalışma yapılmaya başlanmıştır [1,15,24–29]. Özellikle, birden fazla ekleme sahip bir robotun her bir eklemine gerçek bir canlının kaslarındaki eşzamanlı ve doğrusal olmayan hareket özelliklerinin kazandırılması önemli bir konu haline gelmiştir [10]. Bu amaçla; MÖÜ yapısının konum, kuvvet, moment, kas uzunluğu, hareket hızı ve frekansı gibi farklı fiziksel özelliklere bağlı davranışları kolayca üretebilmesi ve bozucu girişlere karşı bu davranışları koruyabilmesi gerekmektedir. Böylece robotik sistemin etkin bir hareket kabiliyetine sahip olması sağlanabilir. Bu sebeple, MÖÜ tabanlı kontrol yöntemleri dinamiği değişen, salımlı ve lokomotor davranışlar için tek başına veya farklı kontrol yöntemleriyle beraber sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Sonuç olarak, yukarıda bahsedilen özellikler yeni nesil kontrol sistemleri için sinirsel bir MÖÜ devresini oldukça popüler hale

getirmiştir. Bu MÖÜ devreleri birçok farklı robot ve mühendislik sistemleri için kararlı, uygulanabilir, uyarlanabilir ve hiyerarşik kontrol çözümleri sunmaktadır [2,11,15,21,29–33]. Şekil 9’da, IEEE ve Science Direct veri tabanlarında “Central Pattern Generator” veya “CPG” ve “Robot” anahtar kelimeleri birlikte kullanılarak 2000 yılından günümüze kadar yapılan yayınların istatistiksel analizleri verilmiştir. Her iki analiz de son on yılda MÖÜ’lerin robotik uygulamalarında sıkça kullanıldığını ve bu kullanımların giderek arttığını göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 9. Veri tabanlarının istatistiksel analizleri:
a) IEEE, b) Science Direct

MÖÜ’lerin farklı robotik uygulamalarındaki çeşitliliği bu MÖÜ yapılarının incelenmesini kolaylaştırmak için belirli kriterlere göre sınıflandırılmasını gerektirmektedir. Bu sınıflandırma; tasarım ve modellemedeki seviyeleri, robot türleri ve kontrol yapıları olmak üzere üç farklı grupta gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de ise bu sınıflandırmalara göre verilen literatür araştırmasının genel bir özeti sunulmuştur.

4.1. Tasarım ve modelleme seviyelerine göre

MÖÜ’lerde farklı tasarım ve modelleme yapıları biyofiziksel, ilişkisel ve soyut model olmak üzere üç temel sınıfın ortaya çıkmasına neden olur [8,10,11]. Bunlar dışında, MÖÜ modellerinin bir canlı vücudunun biyomimetik benzetim veya deneysel modeli ile birleştirilmesinden nöromekanik adıyla başka bir tanımlama da yapılabilir [11]. Nöromekanik model biyofiziksel ve ilişkisel modeli içerir ve soyut modelin sinaptik bağlantılarına sahiptir [11,21,34,35]. Bu sebeple, MÖÜ modellerini daha önceki bölümde de bahsedildiği gibi biyofiziksel, ilişkisel ve soyut olmak üzere üç temel sınıf altında toplamak daha doğru olmaktadır [8,10,13].

4.1.1. Biyofiziksel modeller

Biyofiziksel modellerin çoğu temelde Hodgkin-Huxley (H-H) tipi sinir hücresi yapılarına dayanarak geliştirilmiştir [11,18,36]. Bazı çalışmalarda da sinir hücrelerinin zar potansiyellerine ait ateşleme hızları modellenmiştir [37,38]. Son yıllarda Rigatos [39] ve Wen’in [40] yaptığı çalışmalar biyofiziksel MÖÜ yapılarının robotik sistemlere uygulanmasına örnek teşkil eder. Rigatos, H-H türü FitzHugh-Nagumo yapısının dezavantajı olan gürültüleri azaltmak için Kalman filtresi kullanarak bu yapının robotik sistemlere uygulanabilirliğini göstermiştir [39]. Wen ve arkadaşları, H-H yapıları ile kurulan MÖÜ devresinin değişkenlerini Genetik Algoritma (GA) ile saptamışlar ve bu model ile benzetim ortamında yılanı robotun hareketlerini analiz etmişlerdir [40]. Herrero-Carron ve arkadaşları ise Rulkov MÖÜ yapısı ile bir solucansı robotun sinüzoidal hareketlerini üretmişlerdir [41,42].

4.1.2. İlişkisel modeller

İlişkisel MÖÜ devreleri genellikle Sızdıran Topla ve Ateşle (STA) hücrelerinden meydana gelir [11,15,23,30,43]. Bu yapıların temeli ritmik salınımlı hareketlerin ara sinir hücreleri ile nasıl üretildiği ve uygulandığı üzerine kurulmuştur [11,15,43–45]. Ekeberg, basitleştirilmiş ilişkisel bir MÖÜ yapısı geliştirmiş ve bu yapıdan 100 adet kullanarak Lamprey balıklarının

omuriliklerini modellenmiştir. Bu yapı ile Lamprey'lerin yüzüş hareketlerini gerçekleştirmiştir [23]. Li ve arkadaşları, Lamprey tabanlı MÖÜ yapısı kullanarak tırtıl

benzeri çok eklemli bir robotun engebeli ortamlarda hareketlerini üretmişler ve bu hareketleri hem deneysel hem de benzetim ortamında gerçekleştirmişlerdir [15].

Tablo 2. MÖÜ'lerin robotik uygulamalardaki kullanımını için genel bir özet

Hareket	Robot Türü	MÖÜ Yapısı	Yıl	Kaynak
	Tek Bacaklı	Matsuoka	2008	[10]
	İki Bacaklı	İki-Seviyeli	2012	[10]
		Matsuoka	2016	[21]
	İnsansı	Hopf	2015	[46]
		Matsuoka	2009	[47]
		Matsuoka	2016	[48]
Çok Eklemli Robotlar		Hopf	2015	[49,50]
	Dört Bacaklı	Hopf	2015	[51]
		Hopf	2011	[52]
		SO-2 MÖÜ	2008	[53,54]
	Altı Bacaklı	Matsuoka	2017	[55]
	Sekiz Bacaklı	SO-2 MÖÜ	2013	[56,57]
	Farklı Kombinasyonlu	Matsuoka	2005	[10]
Sürünge Robotlar	Yılsı	Lamprey	2014	[15]
		Doğrusal Olmayan	2015	[58]
	Semender/Kertenkele	GDF	2007	[59,60]
	Tırtıl	Lamprey	2014	[27]
Yüzen Robotlar	Anguilliform	Andronov-Hopf	2014	[61,62]
		Zhang	2006	[63]
	Carangiform	GDF	2014	[64]
		Hopf	2006	[65]
	Ostraciiform	GDF	2006	[3,4]
		Hopf	2014	[66]
	Thunniform	Hopf	2015	[67]
	Yunus	GDF	2014	[10]
	Vatoz	GDF	2016	[68]
Kaplumbağa	Hopf	2010	[69]	
Uçan Robotlar	Kuş/Yarasa	Hopf	2010	[70]
Diğer Ritmik Hareketliler	Endüstriyel	Matsuoka	2014	[71,72]

Chowdhury ve Panda ise Matsuoka tabanlı doğrusal olmayan osilatör yapısı kullanarak iki eklemli bir robot balığın yüzgeç fonksiyonlarına göre yüzüş hareketlerini deneysel olarak sağlamışlardır [73].

4.1.3. Soyut modeller

Soyut modeller, birbirine sinapslar ile bağlanan sinirsel ağ yapıları oluştururlar. Doğrusal ve doğrusal olmayan osilatörlerin matematiksel modellerine dayanarak tasarlanan bu modeller sinirsel ağların içsel dinamiklerini içerir

[11,21,22,74,75]. Bu tasarımda, farklı sinaptik bağlantılar ile farklı topolojiler oluşturularak osilatör çıkışının frekansı, genliği ve faz farkı istenilen şekilde kolayca belirlenebilir [11,59]. Ijspeert ve arkadaşları, yılanı ve semender robotların hareket kontrolü için Kuramoto tabanlı Genlik Denetimli Faz (GDF) osilatörünü tasarlamışlardır [4,59,76]. Yu ve arkadaşları ise GDF osilatörlerini kullanarak çok eklemli robot balığın ileri, geri ve dönüş hareketlerini üretmişlerdir [2,10]. Ayrıca, Hopf osilatörler de literatürde sıklıkla kullanılmıştır [10,11,17,19,67,77,78]. Bu osilatör türünde içsel genlik ve faz değerleri bileşenlerine ayrılabilir. Yu ve arkadaşları, Hopf osilatörler ile çok eklemli bir robot balığın yüzüş hareketlerini irdelemişlerdir [1,2,24]. Wang ve arkadaşları, Hopf osilatör yapısı kullanarak Carangiform türü bir balığın enine hareket sinyalini elde etmişlerdir [79]. Hu ve arkadaşları ise Hopf osilatör ile Thunniform türü robot balığın ileri yön yüzme hızını kontrol etmişlerdir [5]. Bazı çalışmalarda da Wilson-Cowan MÖÜ yapılarının farklı kuplajlama türleri ve çıkışı üzerine etkileri incelenmiştir [10,80].

4.2. Robot türlerine göre

Günümüzde yüzen robotlarda, çok eklemli olarak bilinen birden fazla bacaklı veya uzuvlu robotlarda, emekleyen, sürünen ve tırmanan robotlarda, kanat çırparak uçan robotlarda ve diğer ritmik hareketler ile çalışan robotlarda birbirinden farklı MÖÜ yapıları sıklıkla kullanılmaktadır [10,11,13,19,29,67,81,82]. Bu bölümde, robot türlerine göre bir sınıflandırma yapılmış ve bu sınıflandırmaya göre robotların MÖÜ yapıları incelenmiştir.

4.2.1. Yüzen robotlar

Literatürde yüzen robotlar incelendiğinde Anguilliform, Carangiform, Ostraciiform, Thunniform, vatoz, kaplumbağa, yılan, tek yüzgeçli, tek eklemli ve yunus benzeri olmak üzere birbirinden farklı birçok robot türü görülmektedir. Bu robot türlerinde hareket şekline göre farklı MÖÜ yapıları tercih edilmektedir. Zhang ve arkadaşları, kendi adını taşıyan doğrusal olmayan yeni bir osilatör yapısı geliştirerek altı

eklemli bir robot balığın ileri, geri ve dönüş yüzme hareketlerini üretmişlerdir [63].

Wang ve arkadaşları, halka bağlı GDF osilatörleri ile üç eklemli robot balığın ileri ve dönüş yön hareketlerini gerçekleştirmişlerdir [83]. Ayrıca, aynı osilatör modeli ile Carangiform türü bir balığın enine hareket sinyalini oluşturmuşlardır [64]. MÖÜ osilatör tabanlı kontrolörlerin programlanması üzerine bazı çalışmaları bulunmaktadır [28,84]. Aynı zamanda, GDF osilatörlerine genlik, ofset ve frekans kontrol fonksiyonları eklemek koşuluyla Ostraciiform türü bir robot balığın yörünge takibini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın başarımını arttırmak için sapma, yunuslama ve yalpalanma açılarının kontrolü de sağlanmıştır [29,85]. Aynı osilatör yapısı ile frekans ve atak açısı değişimine göre kendi geliştirdikleri robot balığın ileri yön performanslarını incelemişlerdir [86]. Bu robotun istenilen hedefe en kısa yoldan gitmesini sağlayacak bir algoritma geliştirilmiş ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile MÖÜ değişkenlerinin en uygun değerleri elde edilmiştir [87].

Ijspeert, daha önceki bölümde bahsedildiği gibi Lamprey balıklarının osilatör modelini STA ile elde ederek semender türü bir robotun yüzüş hareketlerini geliştirmişdir [76]. Crespi ve Ijspeert, bir başka çalışmada GDF osilatörleri ile Ostraciiform türü robot balığın su içerisinde farklı yüzme hareketlerini, karada bulunan düzgün bir zemin üzerinde göğüs yüzgeçleri ile ilerlemesini ve hem karada hem de suda foto diyot ile ışığa yönelimini gerçekleştirmişlerdir [3,4]. Zhang ve arkadaşları, küçük boyutlu bir robot balık prototipi geliştirerek Hopf osilatörler ile farklı yüzüş türlerini incelemişlerdir. Ayrıca bu çalışmada robotun engellerden sakınarak üç boyutlu hareketlerinin kontrolü sağlanmıştır [88]. Hu ve arkadaşları, tek eklemli bir robot balığın Hopf osilatörü ile frekans değişimine bağlı ileri yön hız performanslarını irdelemişlerdir [66]. Zhu ve arkadaşları, 24 serbestlik dereceli bir robot vatozun yüzüş davranışlarını MÖÜ'ler ile kontrol etmişlerdir [89]. Hu ve arkadaşları ise Hopf osilatörlerinin istenilen genlik ve faz değerlerini üretmesini sağlamak için bir öğrenme algoritması geliştirmişlerdir ve robotun ileri yön yüzüş hareketleri için denenmiştir [17,90]. Niu ve arkadaşları, üç boyutlu halka bağlı Andronov-Hopf osilatörleri ile Anguilliform türü bir balığın

yüzüş performansını test etmişlerdir [61,91]. Zhou ve arkadaşları, kendi geliştirdikleri MÖÜ yapısı ile sekiz eklemlili bir robot vatoz balığının sinüzoidal hareketlerini elde etmişlerdir ve GA ile MÖÜ'nün uygun parametreleri saptanmıştır [92]. Bir başka çalışmada, Sfakiotakis ve arkadaşları oransal-integral-türev kontrol yapısı kullanarak GDF osilatörleri ile sekiz eklemlili bir robot vatozun Euler açılarının kontrolünü sağlamışlardır [68]. Wang ve arkadaşları, tek eklemlili bir robot balığın kuyruk hareketlerini üretmek için sinüzoidal eklem açılarının sinyal yapısı çok uygun olmamasına rağmen Matsuoka osilatörlerini kullanmışlar ve kuyruk üzerine etki eden kuvvetlerin analizini yapmışlardır [93]. Hu ve arkadaşları ise robotun farklı hareketlerini bu osilatörler yapısı ile sınımışlardır [94]. Matsuoka osilatörleri kullanılarak yapılan çalışmalar incelendiğinde, osilatör yapısının eşzamanlı çalışmasının oldukça karmaşık olduğu görülmektedir.

Yu ve arkadaşları, geliştirdikleri MÖÜ'ler ile farklı eklem sayılarına sahip robot balıklarda yüzme hareketlerinin gerçekleştirilmesi ve kontrolü üzerine birçok çalışma yapmışlardır [1,10,32,65]. İki ve dört eklemlili robotların enine hareket sinyallerini üretmek için doğrusal olmayan bir MÖÜ ve oransal-integral-türev yapısı kullanarak derinlik kontrolünü sağlamışlardır [65,77]. Ayrıca diğer çalışmalarında, farklı yüzgeç fonksiyonlarına göre yüzüş hareketlerini Hopf ve GDF osilatörleri ile farklı kuplajlı bağlantılar oluşturarak hem benzetim hem de deneysel ortamda sınımışlardır. Osilatörlerin çıkış frekansı, genliği ve faz farklarının değişimine bağlı yüzüş hızları ve dönüş performansları da ayrıca incelenmiştir [2,19,34,58,95–98]. Yu ve arkadaşları başka bir çalışmada ise PSO ile robot balığın maksimum hızı için gerekli osilatör parametrelerini araştırmışlardır [24,99]. Aynı zamanda robot balık sürüleri için GDF osilatörleri ile bir nesneyi istenilen bir noktaya taşıma algoritması önerilmiştir [32].

4.2.2. Çok eklemlili robotlar

İkili, dörtlü, altılı, sekizli veya daha farklı şekilde bacaklı/uzuvlu/eklemlili şeklinde sınıflandırılabilen robotlar literatürde çok eklemlili robotlar olarak yer alır. Araştırmacılar bu

robotların hareketlerinin MÖÜ modelleri ile daha etkin şekilde nasıl üretilebileceği ile ilgili çalışmalara da yoğunlaşmışlardır. Wörgötter ve Manoonpong sinirsel bir MÖÜ devresi ile eklem bacaklı canlıların lokomotor hareketlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu hareketleri taşlı, kumlu, karlı ve kaygan olmak üzere farklı ortamlarda sınamak için AMOS-WD06/08 isimli altı ve sekiz bacaklı iki robot geliştirmişlerdir [53,54,56,57,100]. Geliştirdikleri MÖÜ devresi; hız, filtre ve faz kontrolü gibi farklı alt katmandan meydana geldiği için oldukça karmaşık bir yapıdadır ve ilişkisel seviyede yer almaktadır [33,53]. Yu ve arkadaşları, Van der Pol osilatörü ile geliştirdikleri altı bacaklı bir robotun FPGA yoluyla ileri yön hız değişimini incelemişlerdir [100]. Zhong ve arkadaşları ise Matsuoka osilatörü kullanarak altı bacaklı örümcek robotun farklı hareket fonksiyonlarını elde etmişlerdir [55].

Literatürde eklem bacaklı robotlar dışında, dört bacaklı omurgalılarından esinlenerek geliştirilen farklı robot türleri bulunmaktadır. Ijspeert [49,50,101] ve Wang [51], adaptif Hopf osilatörü ile dört bacaklı bir robotun eklem hareket fazlarının değişimini incelemişlerdir. Ayrıca, Ijspeert, bu osilatörün hedeflenen genlik ve frekans bileşenlerine ulaşması amacıyla bir öğrenme algoritması önermiştir [50]. Wang geliştirdiği robot ile koşma, yürüme hareketlerini ve bunlar arasındaki geçişi kontrol etmiştir [102,103]. Zhang ve arkadaşları ise AIBO robotun hareketlerini Hopf osilatör ile elde etmişlerdir [52].

4.2.3. İnsansı robotlar

İnsansı robotlarda hareketin hassasiyetini arttıran bacaklardaki serbestlik derecesinin artması ile robotun kontrolü zorlaşmaktadır. Bunun için farklı MÖÜ yapıları ile birçok çalışma mevcuttur. Liu ve arkadaşları, bir NAO robotun eğimli ve düzensiz arazilerdeki yürüme hareketlerini sıfır moment noktası ile üretmek Matsuoka osilatörü yardımıyla kontrol etmişlerdir [21]. Zhang ve arkadaşları da bu robotun bacak hareket yörüngelerini oluşturarak Hopf osilatörü ile deneysel olarak test etmişlerdir [46]. Ryu ve arkadaşları, Matsuoka osilatörleri ile HOAP-3 insansı robotun alt ve üst bacaklarının eş zamanlı koordinasyonunu sağlamışlardır. Geri besleme

sinyali için robotun ayakların yere temas ettiği zaman değeri kullanılmıştır [47]. Avrin ve arkadaşları ise insansı bir robotun eş zamanlı bacak hareketini üreten Matsuoka osilatörün parametrelerini PSO ile belirlemişlerdir [48]. Liu ve arkadaşları, bu osilatörden 12 adet kullanarak bir insanın kalça merkezli hareketlerini gerçekleştirmişlerdir [74]. Yapılan bu çalışmalar özellikle Matsuoka osilatörler üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak, bu osilatörlerin oldukça karmaşık yapıları uygun parametre değerlerinin belirlenmesini zorlaştırır.

4.2.4. Sürünge robotlar

Yılan, semender, kertenkele, tırtıl, solucan ve benzeri robotlar literatürde sürünge robotlar olarak bilinir ve doğadaki bu sürünge robotların robotik alanında sıklıkla modellendiği ve prototiplerinin gerçekleştirildiği görülmektedir. Ijspeert ve arkadaşları, sürünge robotların hareketlerini taklit edebilen modüler yapıda çok eklemli birçok robot geliştirmişlerdir [104]. Yamor isimli bu eklemli robotların Bluetooth yoluyla haberleşerek yılanı bir robot modelini gerçekleştirebilirler. Bu robot, GDF osilatörleri ile yılan ve tırtıl hareket fonksiyonlarını oluşturabilmiştir [105]. Ijspeert ve arkadaşları, kendi geliştirdikleri Amphibot isimli robotun GDF osilatörleri ile hareketlerini üretmişlerdir [59,60]. Li ve arkadaşları, Lamprey türü MÖÜ yapısı kullanarak çok eklemli bir robotun yılan ve tırtıl hareketlerini taklit edebilmesini sağlamışlardır [15,27]. Zhang ve arkadaşları, yılan robotunun çeşitli hareketlerini Hopf osilatörlerinin farklı sinaptik bağlantıları ile analiz etmişlerdir ve frekans değişimine göre hız performanslarını incelemişlerdir [106]. Bing ve arkadaşları ise yılan robotunun hareketini bir nesneyi takip edebilmesi için gerekli hareket fonksiyonlarını doğrusal olmayan MÖÜ'ler ile gerçekleştirmişlerdir [58].

4.2.5. Diğer ritmik hareketli robotlar

Bazı çalışmalarda ise MÖÜ yapıları daha farklı robot türleri için kullanılmaktadır. Chung ve arkadaşları, yarası benzeri kanat çırparak uçan bir robotun hareketlerini Hopf osilatörü kullanarak oluşturmuşlardır ve kanat çırpma frekansının kontrolü de gerçekleştirmişlerdir [70].

Kwon ve arkadaşları da Matsuoka osilatörlerini çok eklemli bir robot kolun tutucu ucunun kontrolü için kullanmışlardır [71,72].

4.3. Kontrol yöntemlerine göre

Robot uygulamalarında kullanılan çeşitli MÖÜ yapıları kendi içerisinde duyuşal geri beslemeye sahip olmayan açık çevrim ve duyuşal geri beslemeli kapalı çevrim olmak üzere iki grupta incelenebilir. Bu bölüme kadar anlatılan MÖÜ çalışmalarının çoğu duyuşal geri beslemesiz açık çevrim kontrol yapısına sahiptir. Ancak duyuşal geri beslemeli kapalı çevrim bir MÖÜ yapısı hem canlının hareketlerinin daha uygun üretilmesi hem de robotun çevresel etkilere karşı dayanımının artırılması için oldukça önemlidir. Böylece bir canlının tam olarak taklit edilmesi için MÖÜ modeline eklenen duyuşal geri besleme yeteneği biyomimetik kontrolör tasarımının vazgeçilmezlerindenidir [10,11].

Literatürde, MÖÜ'lerin kullanıldığı robotik çalışmalar incelendiğinde bazı duyuşal geri beslemeli kapalı çevrim çalışmalarının bulunduğu görülmüştür. Wang ve arkadaşları, duyuşal işlemci merkezi olarak tanımladıkları geri beslemeli bir tasarım kullanarak geliştirdikleri robotun osilatör parametrelerini PSO algoritması ile en uygun yörünge ve hız değerleri için eşzamanlı olarak belirlemişlerdir [87]. Başka bir çalışmada, tek eklemli robotun sapma ve yalpalama açıları IMU sensörü ile geri besleme bilgisi alınıp PID ve GDF osilatör tabanlı kontrolöre aktarılmıştır ve robotun kapalı çevrim hareket kontrolü sağlanmıştır [29]. Ijspeert ve arkadaşları, engebeli bir arazide dört bacaklı bir robotun Hopf ile bu osilatör çıkışını belirleyen eşitliğe matematiksel bir geçiş fonksiyonu ekleyerek bacak hareketlerinin faz değişimlerini kontrol etmişlerdir [78,101].

Yu ve arkadaşları, iki eklemli bir robot balığın derinlik seviyesinin kontrolü için basınç sensörü kullanarak geri beslemeli kapalı çevrim bir sistem oluşturmuşlardır. Bulanık bir kontrolör ile robotun göğüs yüzgeçlerinin hareketini sağlayan osilatörlerin ofset değerleri belirlenmiştir [77]. Ayrıca başka bir çalışmada, dört eklemli bir robot balığın engellerden sakınarak iki boyutlu hareketinin gerçekleşmesini sağlamak Hopf osilatörü kullanılmıştır.

Osilatörün ofset ve genlik değerlerini elde etmek için basit bir geçiş fonksiyonundan yararlanılmıştır [34]. Wu ve arkadaşları, dört eklemlili bir robotun iki boyutlu hareketlerini Hopf osilatörleri elde etmişler ve bu osilatörün ofset değişkenini oransal kontrolör ile belirleyerek robotun sapma açısı kontrolünü sağlamışlardır [19]. Hu ve arkadaşları, dört kol mekanizması kullanarak tasarladıkları robot balığın kuyruk eklemlerini kontrol etmek için Hopf osilatörleri kullanmışlardır. Robotun yalpalanma ve yunuslama açıları IMU sensörü ile geri besleme bilgisi alınarak oransal-integral-türev kontrolör aracılığıyla kontrol edilmiştir. Ancak bu çalışmadaki geri besleme tasarımı osilatör modeli ile ilişkili değildir [67]. Kim ve arkadaşları ise geliştirdikleri robotun hareketlerini Matsuoka osilatörleri ile sağlamışlar ve oransal-türev kontrolör kullanarak osilatör ofset değerleri ile robotun sapma açısının kontrolünü sağlamışlardır [75].

Seo ve arkadaşları, yüzen bir robot kaplumbağa geliştirmişler ve robotun hareketlerini Hopf osilatörleri ile üretmişlerdir. Bu osilatörlerin çıkışında elde edilen sinüzoidal sinyaller oransal-türev kontrolöre aktararak robotun sapma, yunuslama ve yalpalanma hareketleri kontrol edilmiştir [69].

Li ve arkadaşları, tırtıl robotun Lamprey türü MÖÜ osilatörleri ile engellerden sakınarak ve engebeli ortamlarda hareket kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. MÖÜ yapısının en uygun parametreleri ise GA ile belirlenmiştir [15]. Wang ve arkadaşları, insansı bir robotun bacak faz geçişlerini Matsuoka osilatörler ve oransal-türev kontrolör kullanarak istenilen fazlarda kontrol etmişlerdir [107]. Benzer bir çalışmada, Liu ve arkadaşları tarafından insansı bir robotun yürüme hareketleri Matsuoka osilatörler ile üretilmiş ve bu osilatörlerin genlik değerleri oransal kontrolör yardımıyla elde edilmiştir [21]. Hong ve Lee ise insansı robotun bacaklarını benzetim ortamına aktararak Matsuoka osilatörler ve sıfır moment noktası kontrolü ile hareketini üretmişlerdir [108].

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, günümüzde oldukça popüler olan farklı robot türlerinin hareket koordinasyonunun sağlanması ve kontrolü için kullanılan farklı MÖÜ yapıları ve bu yapıların

robotlarda uygulama alanları detaylı bir şekilde incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

MÖÜ'ler canlıların davranış tabanlı ritmik hareketlerini sağlayan dayanıklı sinirsel yapılardır. Robotların akıllı hareket kontrolünün MÖÜ'ler ile sağlanması biyomimetik tasarımın temel ilkelerini içermektedir. Bu yönüyle MÖÜ yapıları bu çalışmada bahsi geçmeyen ve farklı canlılardan esinlenen daha birçok robotta kullanıma uygundur. Bu durum için robotun hareketlerinin eklemler ile sağlanması yeterlidir.

Literatürde yer alan MÖÜ yapılarının geliştirilmesi ve modifikasyonları ile farklı, yeni ve hibrit MÖÜ yapıları daha karmaşık robot hareketlerinin sağlanması için de kullanılabilir. Bu hareketleri en etkin şekilde sağlayacak MÖÜ yapısının ve bu yapının seviyesinin uygun şekilde belirlenmesi robot hareketlerinin esinlenen canlıların hareketleri ile büyük oranda örtüşmesini sağlar.

Literatürde yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde incelendiğinde, sinirsel MÖÜ yapıları çok eklemlili robot hareketlerinin üretilmesi için oldukça uygun bir yapıya sahip olmasına rağmen bu çalışmaların büyük çoğunluğu duyuşal geri beslemesiz açık çevrim veya oldukça temel seviyede geri beslemeli yapıya sahip MÖÜ modellerini içerir. Bu sebeple, akıllı kontrol algoritmalarına dayalı duyuşal geri beslemeli ve kapalı çevrim kontrol yapısına sahip MÖÜ modellerinin de hala gelişmeye açık bir konu olduğu görülmektedir.

6. Kaynaklar

1. Wang, M., Yu, J. and Tan, M. (2014). CPG-based sensory feedback control for bio-inspired multimodal swimming. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **11**: 1–11.
2. Yu, J., Wang, M., Su, Z., Tan, M. and Zhang, J. (2013). Dynamic modeling of a CPG-governed multijoint robotic fish. *Advanced Robotics*, **27(4)**: 275–285.
3. Lachat, D., Crespi, A. and Ijspeert, A.J. (2006). BoxyBot: a swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator. *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob 2006*, Pisa, Italy, 20-22 Feb., 643-648.
4. Crespi, A., Lachat, D., Pasquier, A. and Ijspeert, A.J. (2008). Controlling swimming and crawling in a fish robot using a central pattern generator. *Autonomous Robots*, **25(1–2)**: 3–13.

5. Huss, M. (2007). Computational modeling of the lamprey cpg. PhD Thesis, Stockholm University.
6. Ijspeert, A.J. (1998). Design of artificial neural oscillatory circuits for the control of lamprey-and salamander-like locomotion using evolutionary algorithms. PhD Thesis, University of Edinburgh.
7. Marbach, D. (2005). Evolution and online optimization of central pattern generators for modular robot locomotion. Master Thesis, School of Computer and Communication Sciences, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne.
8. Li, G. (2013). Hierarchical control of limbless locomotion using a bio-inspired cpg model. PhD Thesis, University of Hamburg.
9. Crespi, A. (2007). Design and control of amphibious robots with multiple degrees of freedom. PhD Thesis, Lausanne, EPFL.
10. Yu, J., Tan, M., Chen, J., and Zhang, J. (2014). A survey on cpg-inspired control models and system implementation. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **25(3)**: 441–456.
11. Ijspeert, A.J. (2008). Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review. *Neural Networks*, **21(4)**: 642–653.
12. Dörfler, F. and Bullo, F. (2014). Synchronization in complex networks of phase oscillators: a survey. *Automatica*, **50(6)**: 1539–1564.
13. Wu, Q.D., Liu, C.J., Zhang, J.Q. and Chen, Q.J. (2009). Survey of locomotion control of legged robots inspired by biological concept. *Science in China, Series F: Information Sciences*, **52(10)**: 1715–1729.
14. Mackay-lyons, M. (2012). Central pattern generation of locomotion: a review of the evidence. *Physical Therapy*, **82(1)**: 69–83.
15. Li, G., Zhang, H., Zhang, J. and Bye, R.T. (2014). Development of adaptive locomotion of a caterpillar-like robot based on a sensory feedback cpg model. *Advanced Robotics*, **28(6)**: 389–401.
16. Adak, Ö.K. (2013). Quadruped locomotion reference synthesis with central pattern generators tuned by evolutionary algorithms. Master Thesis, Sabanci University.
17. Hu, Y., Liang, J. and Wang, T. (2014). Parameter synthesis of coupled nonlinear oscillators for cpg-based robotic locomotion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61(11)**: 6183–6193.
18. Righetti, L., Buchli, J. and Ijspeert, A.J. (2006). Dynamic hebbian learning in adaptive frequency oscillators. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **216(2)**: 269–281.
19. Wu, Z., Yu, J., Tan, M. and Zhang, J. (2014). Kinematic comparison of forward and backward swimming and maneuvering in a self-propelled sub-carangiform robotic fish. *Journal of Bionic Engineering*, **11(2)**: 199–212.
20. Jadbabaie, A., Motee, N., Barahona, M. (2004). On the stability of the kuramoto model of coupled nonlinear oscillators, *American Control Conference*, Boston, M.A, USA, 30 June-2 July, 4296-4301.
21. Chengju, L., Danwei, W., Erik, D., G., Qijun, C. (2016). Adaptive walking control of biped robots using online trajectory generation method based on neural oscillators. *Journal of Bionic Engineering*, **13(4)**: 572–584.
22. Taga, G. (1995). A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion - I. Emergence of basic gait. *Biological Cybernetics*, **73(2)**: 97–111.
23. Ekeberg, Ö. (1993). A combined neuronal and mechanical model of fish swimming. *Biological Cybernetics*, **69(5–6)**: 363–374.
24. Yu, J., Wu, Z., Wang, M. and Tan, M., (2016). CPG network optimization for a biomimetic robotic fish via pso. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **27(9)**: 1962–1968.
25. Li, G., Zhang, H., Herrero-Carron, F., Hildre, H.P. and Zhang, J. (2011). A novel mechanism for caterpillar-like locomotion using asymmetric oscillation. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, Budapest, Hungary, 3-7 July, 164–169.
26. Li, G., Deng, Y., Osen, O.L., Bi, S. and Zhang, H. (2016). A bio-inspired swimming robot for marine aquaculture applications: from concept-design to simulation. *OCEANS 2016*, Shanghai, China, 10-13 April, 1-7.
27. Li, G., Zhang, H., Zhang, J. and Hildre HP. (2014). An approach for adaptive limbless locomotion using a cpg-based reflex mechanism. *Journal of Bionic Engineering*, **11(3)**: 389–399.
28. Li, L., Wang, C. and Xie, G. (2015). A general cpg network and its implementation on the microcontroller. *Neurocomputing*, **167**: 299–305.
29. Wang, W. and Xie, G. (2014). CPG-based locomotion controller design for a boxfish-like robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **11(6)**: 87.
30. Li, G., Zhang, H., Li, W., Hildre, H.P. and Zhang, J. (2014). Design of neural circuit for sidewinding of snake-like robots. *IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2014*, Hailar, China, 28-30 July, 333–338.
31. Ding, R., Yu, J., Yang, Q. and Tan, M. (2013). Dynamic modelling of a cpg-controlled amphibious biomimetic swimming robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **10(4)**: 199.

32. Yu, J., Wang, C. and Xie, G. (2016). Coordination of multiple robotic fish with applications to underwater robot competition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **63(2)**: 1280–1288.
33. Goldschmidt, D., Wörgötter, F. and Manoonpong, P. (2014). Biologically-inspired adaptive obstacle negotiation behavior of hexapod robots. *Frontiers in Neurorobotics*, **8**: 1–16.
34. Yu, J., Wang, K., Tan, M. and Zhang, J. (2014). Design and control of an embedded vision guided robotic fish with multiple control surfaces. *The Scientific World Journal*, **2014**: 1-14
35. Mili, P., Cizek, P. and Faigl, J. (2016). On chaotic oscillator-based central pattern generator for motion control of hexapod walking robot. *CEUR Workshop Proceedings*, **1649**: 131–137.
36. Izhikevich, E.M. (2003). Simple model of spiking neurons. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **14(6)**: 1569–1572.
37. Lin K.K. (2006). Entrainment and chaos in a pulse-driven hodgkin–huxley oscillator. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, **5(2)**: 179–204.
38. Thurman, Z. (2013). Dynamics of the fitzhugh-nagumo neuron model, Senior Project, California Polytechnic State University.
39. Rigatos, G. (2014). Robust synchronization of coupled neural oscillators using the derivative-free nonlinear kalman filter. *Cognitive Neurodynamics*, **8(6)**: 465–478.
40. Wen, P., Linsen, X., Baolin, F. and Zhong, W. (2015). CPG control model of snake-like robot parameters of optimization based on ga. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE-ROBIO 2015*, Zhuhai, China, 6-9 Dec., 1944–1949.
41. Herrero-Carron, F. (2011). Novel central pattern generator elements for autonomous modular robots. PhD Thesis, Autonoma De Madrid University.
42. Herrero-Carron, F., Rodriguez, F.B. and Varona, P. (2011). Bio-inspired design strategies for central pattern generator control in modular robotics, *Bioinspiration and Biomimetics*, **6(1)**: 016006.
43. Ijspeert, A.J. (2001). A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander. *Biological Cybernetics*, **84(5)**: 331–348.
44. Patel, L.N., Murray, A. and Hallam, J. (2007). Super-lampreys and wave energy: optimised control of artificially-evolved, simulated swimming lamprey. *Neurocomputing*, **70(7–9)**: 1139–1154.
45. Donati, E., Corradi, F., Stefanini, C. and Indiveri G. (2014). A spiking implementation of the lamprey’s central pattern generator in neuromorphic vlsi. *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, Lausanne, Switzerland, 22-24 Oct., 1-4.
46. Zhang, X., Xiong, J., Weng, S., Li, H., Chen, M., Gan, Y., Zhao, Q., Xia, Z. (2015). A modified gait planning method for biped robot based on central pattern generators. *IEEE International Conference on Information and Automation*, Lijiang, China, 8-10 Aug., 1551–1555.
47. Ryu, J.K., Chong, N.Y., You, B.J. and Christensen, H. (2009). Adaptive cpg based coordinated control of healthy and robotic lower limb movements. *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Toyama, Japan, 27 Sept.-2 Oct., 122–127.
48. Avrin, G., Makarov, M., Rodriguez-Ayerbe, P. and Siegler, I.A. (2016). Particle swarm optimization of matsuoaka’s oscillator parameters in human-like control of rhythmic movements. *Proceedings of the American Control Conference*, Boston, MA, USA, 6-8 July, 342–347.
49. Heim, S.W., Ajallooeian, M., Eckert, P., Vespignani, M. and Ijspeert, A.J. (2015). On designing an active tail for body-pitch control in legged robots via decoupling of control objectives. *Assistive Robotics: Proceedings of the 18th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR)*, **43(3)**: 338–346.
50. Buchli, J., Iida, F. and Ijspeert A.J. (2006). Finding resonance: adaptive frequency oscillators for dynamic legged locomotion. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China. 9-15 Oct., 3903–3909.
51. Li, X., Wang, W. and Yi, J. (2015). Gait transition based on cpg modulation for quadruped locomotion. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, Busan, South Korea, 7-11 July, 500–505.
52. ZHANG, J. (2011). Dynamic walking of aibo with hopf oscillators. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **24(4)**: 612.
53. Manoonpong, P., Pasemann, F. and Wörgötter, F. (2008). Sensor-driven neural control for omnidirectional locomotion and versatile reactive behaviors of walking machines. *Robotics and Autonomous Systems*, **56(3)**: 265–288.
54. Steingrube, S., Timme, M., Wörgötter, F. and Manoonpong, P. (2010). Self-organized adaptation of a simple neural circuit enables

- complex robot behaviour. *Nature Physics*, **6(3)**: 224–230.
55. Zhong, G., Chen, L., Jiao, Z., Li, J. and Deng, H. (2017). Locomotion control and gait planning of a novel hexapod robot using biomimetic neurons. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1–13.
 56. Xiong, X., Wörgötter, F. and Manoonpong P. (2014). Neuromechanical control for hexapedal robot walking on challenging surfaces and surface classification. *Robotics and Autonomous Systems*, **62(12)**: 1777–1789.
 57. Manoonpong, P., Parlitz, U. and Wörgötter, F. (2013). Neural control and adaptive neural forward models for insect-like, energy-efficient, and adaptable locomotion of walking machines. *Frontiers in Neural Circuits*, **7**: 1–28.
 58. Wu, Z.X., Yu, J.Z., Su, Z.S., Tan, M. and Li, Z.L. (2015). Towards an esox lucius inspired multimodal robotic fish. *Science China Information Sciences*, **58(5)**: 1–13.
 59. Ijspeert, A.J. and Crespi, A. (2007). Online trajectory generation in an amphibious snake robot using a lamprey-like central pattern generator model. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 10-14 April, 262–268.
 60. Crespi, A. and Ijspeert, A.J. (2006). AmphiBot II: an amphibious snake robot that crawls and swims using a central pattern generator. *9th International Conference on Climbing and Walking Robots*, Brussels, Belgium, September, 19-27
 61. Niu, X., Xu, J., Ren, Q. and Wang, Q. (2014). Locomotion learning for an anguilliform robotic fish using central pattern generator approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61(9)**: 4780–4787.
 62. Niu, X. and Xu, J. (2014). Modeling, control and locomotion planning of an anguilliform robotic fish, *Unmanned Systems*, **2(4)**: 295-321.
 63. Zhang, D., Hu, D., Shen, L. and Xie, H. (2006). A bionic neural network for fish-robot locomotion. *Journal of Bionic Engineering*, **3(4)**: 187–194.
 64. Li, L., Wang, C. and Xie, G. (2014). Modeling of a carangiform-like robotic fish for both forward and backward swimming: based on the fixed point. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Hong Kong, China, 31 May-7 June, 800–805.
 65. Zhao, W., Yu, J., Fang, Y. and Wang, L. (2006). Development of multi-mode biomimetic robotic fish based on central pattern generator. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 9-15 Oct., 3891–3896.
 66. Hu, Y., Zhang, S., Liang, J. and Wang, T. (2014). Development and cpg-based control of a biomimetic robotic fish with advanced underwater mobility. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Hong Kong, China, 31 May-7 June, 813–818.
 67. Hu, Y., Liang, J., and Wang, T. (2015). Mechatronic design and locomotion control of a robotic thunniform swimmer for fast cruising. *Bioinspiration & biomimetics*, **10(2)**: 026006.
 68. Sfakiotakis, M., Gliva, R. and Mountoufaris, M. (2016). Steering-plane motion control for an underwater robot with a pair of undulatory fin propulsors. *24th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2016*, Athens, Greece, 21-24 June, 496–503.
 69. Seo, K., Chung, S.J. and Slotine, J.J.E. (2010). CPG-based control of a turtle-like underwater vehicle. *Autonomous Robots*, **28(3)**: 247–269.
 70. Chung, S-J. and Dorothy, M. (2010). Neurobiologically inspired control of engineered flapping flight. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **33(2)**: 440–453.
 71. Kwon, J., Yang, W., Lee, H., Bae, J.H. and Oh, Y. (2014). Biologically inspired control algorithm for an unified motion of whole robotic arm-hand system. *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Edinburgh, UK, 25-29 Aug., 398–404.
 72. Kwon, J. and Kim, H. (2016). The enhanced performance of a robotic arm control based on neural oscillator networks. *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 23-26 Oct., 803-808.
 73. Chowdhury, A.R. and Panda, S.K. (2015). Finding answers to biological control methods using modulated patterns: an application to bio-inspired robotic fish. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seattle, WA, USA, 26-30 May., 3146–3153.
 74. Liu, G.L., Habib, M.K., Watanabe, K. and Izumi, K. (2008). Central pattern generators based on matsuoka oscillators for the locomotion of biped robots. *Artificial Life and Robotics*, **12(1–2)**: 264–269.
 75. Kim, D.H., Leei S. and Park, J. (2008). Design of central pattern generators (cpgs) for trajectory tracking of fish-mimetic robots. *7th WSEAS international conference on computational intelligence, man-machine systems and cybernetics, (WSEAS)*, 191–196.
 76. Ijspeert, A.J., Crespi, A. and Cabelguen, J.M. (2005). Simulation and robotics studies of salamander locomotion: applying

- neurobiological principles to the control of locomotion in robots. *Neuroinformatics*, **3(3)**: 171–196.
77. Yu, J., Chen, S., Wu, Z. and Wang, W. (2016). On a miniature free-swimming robotic fish with multiple sensors. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **13(2)**: 62.
 78. Righetti, L. and Ijspeert, A.J. (2008). Pattern generators with sensory feedback for the control of quadruped locomotion. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 19–23 May, 819–824.
 79. Wang, T., Hu, Y. and Liang, J. (2013). Learning to swim: a dynamical systems approach to mimicking fish swimming with cpg. *Robotica*, **31(3)**: 361–369.
 80. Ahmadizadeh, S., Netic, D., Grayden, D.B. and Freestone, D.R. (2015). Analytic synchronization conditions for a network of wilson and cowan oscillators. *IEEE Conference on Decision and Control*, Osaka, Japan, 15–18 Dec., 3104–3109.
 81. Wright, J. and Jordanov, I. (2015). Intelligent approaches in locomotion - a review. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, **80(2)**: 255–277.
 82. Fang, Y., Hu, J., Liu, W., Chen, B., Qi, J. and Ye, X. (2016). A cpg-based online trajectory planning method for industrial manipulators. *Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems, ACIRS 2016*, Tokyo, Japan, 20–22 July, 41–46.
 83. Wang, C., Xie, G., Wang, L. and Cao, M. (2011). CPG-based locomotion control of a robotic fish: using linear oscillators and reducing control parameters via pso. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, **7(7 B)**: 4237–4249.
 84. Li, L., Wang, C., Xie, G. and Shi, H. (2014). Digital implementation of cpg controller in avr system. *33rd Chinese Control Conference, CCC 2014*, Nanjing, China, 28–30 July, 8293–8298.
 85. Wang, W., Guo, J., Wang, Z. and Xie, G. (2013). Neural controller for swimming modes and gait transition on an ostraciiform fish robot. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Wellbeing, AIM 2013*, Wollongong, NSW, Australia, 9–12 July, 1564–1569.
 86. Wang, W., Xie, G. and Shi, H. (2014). Dynamic modeling of an ostraciiform robotic fish based on angle of attack theory. *International Joint Conference on Neural Networks*, Beijing, China, 6–11 July, 3944–3949.
 87. Wang, W., Gu, D. and Xie, G. (2017). Autonomous optimization of swimming gait in a fish robot with multiple onboard sensors. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 1–13.
 88. Zhang, S., Qian, Y., Liao, P., Qin, F. and Yang, J. (2016). Design and control of an agile robotic fish with integrative biomimetic mechanisms. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **21(4)**: 1846–1857.
 89. Zhu, M., Xu, W. and Cheng, L.K. (2017). Esophageal peristaltic control of a soft-bodied swallowing robot by the central pattern generator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **22(1)**: 91–98.
 90. Hu, Y., Tian, W., Liang, J. and Wang, T. (2011). Learning fish-like swimming with a cpg-based locomotion controller. *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, 25–30 Sept., 1863–1868.
 91. Niu, X. (2013). Modeling, control and locomotion planning of an anguilliform fish robot. PhD Thesis, Harbin Institute of Technology, China.
 92. Zhou, C. and Low, K.H. (2014). On-line optimization of biomimetic undulatory swimming by an experiment-based approach. *Journal of Bionic Engineering*, **11(2)**: 213–225.
 93. Wang, L., Wang, S., Cao, Z., Tan, M., Zhou, C., Sang, H. and Shen Z. (2005). Motion control of a robot fish based on cpg. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, Hong Kong, China, 14–17 Dec., 1263–1268.
 94. Hu, Y., Zhao, W., Wang, L. and Jia, Y. (2008). Neural-based control of modular robotic fish with multiple propulsors. *IEEE Conference on Decision and Control*, Cancun, Mexico, 9–11 Dec., 5232–5237.
 95. Yu, J., Wang, M., Su Z., Tan, M. and Zhang, J. (2011). Dynamic modeling and its application for a cpg-coupled robotic fish. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, 9–13 May, 159–164.
 96. Wu, Z., Yu, J., Su, Z. and Tan, M. (2013). An improved multimodal robotic fish modelled after esox lucius. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2013*, Shenzhen, China, 12–14 December, 516–521.
 97. Wu, Z., Yu, J., Su, Z. and Tan, M. (2014). Implementing 3-d high maneuvers with a novel biomimetic robotic fish, *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, **47(3)**: 4861–4866.
 98. Wang, M., Yu, J.Z., Tan, M. and Zhang, J.W. (2012). Multimodal swimming control of a robotic fish with pectoral fins using a cpg network. *Chinese Science Bulletin*, **57(10)**: 1209–1216.

99. Wu, Z., Yu, J. and Tan, M. (2012). CPG parameter search for a biomimetic robotic fish based on particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2012*, Guangzhou, China, 11-14 Dec., 563–568.
100. Haitao, Y., Haibo, G., Liang D., Mantian Li, Z., and Liu G. (2016). Gait generation with smooth transition using cpg-based locomotion control for hexapod walking robot, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **63(9)**: 5488–5500.
101. Gay, S., Santos-Victor, J. and Ijspeert, A.J. (2013). Learning robot gait stability using neural networks as sensory feedback function for central pattern generators. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, 3-7 Nov., 1–8.
102. Huang, Z. and Wang, W. (2016). Controller-switching based gait transition for a quadruped robot, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2016*, Harbin, China, 7-10 Aug., 653–658.
103. Li, X., Wang, W. and Yi, J. (2016). Foot contact force of walk gait for a quadruped robot, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2016*, Harbin, China, 7-10 Aug., 659–664.
104. Marbach, D. and Ijspeert, A.J. (2005). Online optimization of modular robot locomotion. *IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, Niagara Falls, Ont., Canada, 29 July-1 Aug., 248–253.
105. Sproewitz, A., Moeckel, R., Maye, J. and Ijspeert, A.J. (2008). Learning to move in modular robots using central pattern generators and online optimization. *International Journal of Robotics Research*, **27(3–4)**: 423–443.
106. Wang, Z., Gao, Q. and Zhao, H. (2017). CPG-inspired locomotion control for a snake robot basing on nonlinear oscillators. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, **85(2)**: 209–227.
107. Wang, Z., He, B., Shen, R. and Meng, W. (2015). Contact impact inhibition strategy for biped robot walking based on central pattern generator. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE-ROBIO 2015*, Zhuhai, China, 6-9 Dec., 733–738.
108. Hong, Y-D. and Lee, B. (2017). Evolutionary optimization approach for optimal hopping of humanoid robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **64(2)**: 1279–1283.