

Dalgalanma Hareketi ile Tahrik

Ahmet Kuzucu¹, Zeki Yağız Bayraktaroğlu¹, Burak Kürkcü², Volkan Meriç³

İstanbul Teknik Üniversitesi

¹Makina Fakültesi, Otomatik Kontrol Birimi

²Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

³Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü

Propulsion by Undulatory Motion

Abstract

Lateral undulation is one of the main locomotion types existing in the nature. Snakes and fish move by undulatory motion. Difference between axial and lateral friction forces, combined with the body motion may be used to develop a force component in a desired direction. Skating is one example from everyday's human life. Basic formulation for this mechanism is submitted and applied to multibody robotic systems in this work. Snake locomotion is investigated as an application example. Experimental results obtained with a 9-DOF snake-like robot prototype are presented and discussed.

Keywords: Lateral undulation, snake-like robot, biomimetics

Özet

Yanal dalgalanma, doğada bulunan temel yer değiştirme yöntemlerinden biridir. Yılanlar ve balıklar bu şekilde hareket ederler. Eksenel ve yanal sürtünme kuvvetleri arasındaki fark, cisim hareketi ile birlikte, istenen yönde bir kuvvet bileşeni oluşturmak için kullanılabilir. "Paten kayma" bu olaya güncel yaşamdan bir örnektir. Bu çalışmada yanal dalgalanma ile hareket mekanizmasının temelleri önerilmiş ve çok cisimli robotik sistemlere uygulanmıştır. Yanal dalgalanma ile yılanı ilerleme hareketi bir uygulama örneği olarak incelenmiştir. Dokuz eklemlili – on uzuvlu bir yılanı robot prototipi ile elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuş ve irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yanal dalgalanma, yılanı robot, biyomimetik

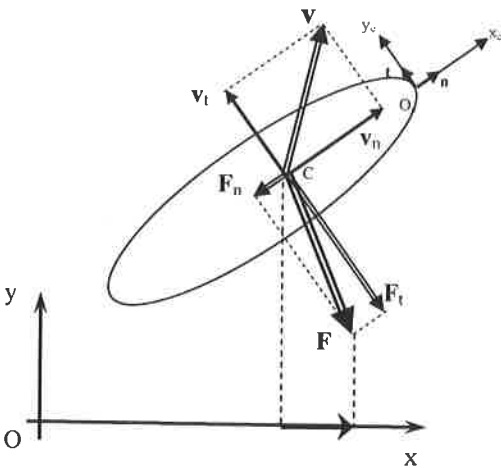
GİRİŞ

Dalgalanma hareketi ile tahrik, bir yandan yılan hareketlerinin, diğer yandan balık yüzmeye hareketlerinin incelenmesi kapsamında ilgi odağı olmuştur. Yılan hareketlerinde, sürekli hareketlerde başarılı olan Hirose [1] ve Miller [2] prototipleri yanında kesikli hareketlerde de etkin kontrol sağlayan “doğal engellere uygulanan yanal itki kuvvetleri ile ilerleme” önerilmiştir.[3], [4], [5]. Diğer yandan balık yüzmeye hareketlerinin incelenmesi sırasında dalgalanma hareketinin temel tahrik yöntemi olduğu gözlemlenmiştir. [6], [7]. Yunus yüzmeye hareketlerinin üç eklemlili – dört uzuvlu bir mekanizma ile modellenmesi, yunusların yalnızca kuyruk itme kuvveti ile değil, bunun yanında tüm gövdelerinin dalgalanma hareketi ile yüzdüklerini ve ancak bu şekilde gözlemlenen yüksek hızlara eriştiklerini göstermiştir.[8], [9].

Dalgalanma hareketi ile tahrik, bir cismin hareketi sırasında eksenel ve yanal sürtünme kuvvetlerinin farklı olmasını kullanmaktadır. Bu fark, katı ortam etkileşiminde yanal sürtünme katsayısının, eksenel sürtünme katsayısına göre çok büyük yapılması ile ortaya çıkmaktadır. Bu farkı yaratan örnekler, buz paten bıçağı, serbest paten tekerlekleri ve yönlendirilmiş yılan pullarıdır. Sıvı ortamda yüzmeye hareketinde ise, yüzen cismin türbülanslı ve/veya viskoz akış kayıp katsayıları yanal yönde, eksenel yöndeki değerinden daha büyük değerler almaktadır. Eksenel ve yanal sürtünme kuvvetleri arasındaki fark, cismin uygun biçimde hareketi ile sistemi istenen yönde sürebilecek bir kuvvet bileşenini oluşturmaktadır.

Bu çalışmada önce düzlemsel dalgalanma hareketinin mekaniği incelenerek temel bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntıların, çok cisimli bir robotik sisteme nasıl uygulanacağı gösterilmiştir. Yılan hareketi ile ilgili önceki çalışma ve sonuçlarla bu çalışmada benimsenen yaklaşım karşılaştırılmış ve önemli katkılar vurgulanmıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Prof. Dr. Mehmet Nimet ÖZDAŞ Otomatik Kontrol Laboratuvarında gerçekleştirilen dokuz eklemlili – on uzuvlu yılan robot prototipinin özellikleri ve bu prototiple elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. Sonuçların irdelenmesi ile bu konudaki araştırmaların gelecek safhaları belirlenmiştir.

DÜZLEMSEL DALGALANMA HAREKETİNİN MEKANIĞI



Şekil 1: İtme kuvvet bileşeninin oluşması

Bir katı cismin yere bağlı O-xy eksen takımına göre hareketinde oluşan hızlar ve kuvvetler Şekil 1 de gösterilmiştir. $\vec{v}$ hız vektörünün cismin eksenine doğrultusundaki bileşeni $\vec{v}_n$, yanal bileşeni $\vec{v}_t$, bu hız bileşenlerine karşı cismin eksenine doğrultusunda oluşan sürtünme kuvveti $\vec{F}_n$, yanal sürtünme kuvveti $\vec{F}_t$ ile gösterilmiştir. Toplam sürtünme kuvveti $\vec{F}$ nin eksenel ve yanal bileşenlerin toplamı olduğu kabul edilmiştir. Eksenel ve yanal sürtünme katsayıları arasındaki büyük fark, şekilde O-x doğrultusunda, hızın aynı doğrultudaki bileşeni ile aynı yönde bir kuvvet bileşeni oluşturmaktadır.

Cisim O-x eksenine göre simetrik bir dalgalanma hareketi yaptığında dalgalanma hareketinin bir periyodu sonunda $\vec{F}$ nin O-y doğrultusundaki bileşenlerinin toplamı sıfır olmakta O-x doğrultusundaki itme bileşeni, genliği değişmekle birlikte, yönünü koruyarak O-x in pozitif yönünde ilerleme hareketini gerçekleştirmektedir.

Dalgalanma ile Yüzme [9]

Çok parçalı yüzen cismin “i” uzvu için toplam sürtünme kuvveti $\vec{F}_i$ şu şekilde ifade edilebilir:

$$\vec{F}_i = \vec{F}_n + \vec{F}_t \quad ; \quad \vec{F}_i = \|\vec{F}_n\| \vec{n} + \|\vec{F}_t\| \vec{t} = \begin{bmatrix} \vec{n} & \vec{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \|\vec{F}_n\| \\ \|\vec{F}_t\| \end{bmatrix} \quad (1)$$

Rotasyon matrisinin tanımından: $\begin{bmatrix} \vec{n} & \vec{t} \end{bmatrix} = \underline{\underline{R}}_i^0$

$$\vec{F}_i = \underline{\underline{R}}_i^0 \begin{bmatrix} \|\vec{F}_n\| \\ \|\vec{F}_t\| \end{bmatrix} \quad (2)$$

Laminer akışta viskoz sürtünme kuvvetleri

Akışkan içinde düşük hızda hareket halinde eksenel sürtünme kuvveti $\vec{F}_n$ 'in, sadece $\vec{v}_n$ 'in fonksiyonu olduğu ve yanal sürtünme kuvveti $\vec{F}_t$ 'nin, sadece $\vec{v}_t$ 'nin fonksiyonu olduğu varsayılırsa;

$$\vec{F}_n = -b_n \vec{v}_n \quad ; \quad \vec{F}_t = -b_t \vec{v}_t \quad (3)$$

ifadeleri elde edilir. Burada b_n uzvun eksenel, b_t ise yanal doğrultudaki sürtünme katsayısıdır.

Yanal ve eksenel kuvvetlerin ifadeleri $\vec{F}_i$ ifadesinde yerleştirilirse:

$$\vec{F}_i = -\underline{\underline{R}}_i^0 \begin{bmatrix} b_n & 0 \\ 0 & b_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \|\vec{v}_n\| \\ \|\vec{v}_t\| \end{bmatrix} \quad (4)$$

elde edilir. Hız vektörünün cisme bağlı eksen takımına göre bileşenleri

$$\vec{v}_b = \begin{bmatrix} \|\vec{v}_n\| \\ \|\vec{v}_t\| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_n \\ v_t \end{bmatrix} \text{ tanımıyla} \quad \vec{v}_t = (\underline{\underline{R}}_i^0) \vec{v}_b \quad \Rightarrow \quad \vec{v}_b = (\underline{\underline{R}}_i^0)^{-1} \vec{v}_t = (R_i^0)^T \vec{v}_t \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifade (4) denkleminde yerine yerleştirildiğinde laminer akış için viskoz sürtünme kuvveti ifadesi elde edilmiş olur:

$$\vec{F}_i = -\underline{\underline{R}}_i^0 \underline{\underline{B}} (R_i^0)^T \vec{v}_t \quad (6)$$

$$\text{Burada } \underline{\underline{B}} \text{ matrisi; } b_n \ll b_t \text{ olmak üzere} \quad \underline{\underline{B}} = \begin{bmatrix} b_n & 0 \\ 0 & b_t \end{bmatrix} \quad (7)$$

şeklinde dir.

Türbülanslı akışta sürtünme kuvvetleri

Türbülanslı akışta eksenel sürtünme kuvveti $\vec{F}_n$ 'nin, sadece v_n^2 'in fonksiyonu olduğu ve yanal sürtünme kuvveti $\vec{F}_t$ 'in, sadece v_t^2 'nin fonksiyonu olduğu varsayılırsa;

$$\|\vec{F}_n\| = -d_n \|\vec{v}_n\|^2 = -d_n v_n^2 \quad ; \quad \|\vec{F}_t\| = -d_t \|\vec{v}_t\|^2 = -d_t v_t^2 \quad (8)$$

ifadeleri elde edilir. Burada d_n türbülanslı akış için uzvun eksenel, d_t ise yanal sürtünme katsayısıdır. Toplam sürtünme kuvveti ifadesi bu ifadeler ışığında ve (2) denkleminde göre tekrar yazılırsa;

$$\vec{F}_t = -\underline{R}^O \begin{bmatrix} d_n v_n^2 \\ d_t v_t^2 \end{bmatrix} = -\underline{R}^O \begin{bmatrix} d_n & 0 \\ 0 & d_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n & 0 \\ 0 & v_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n \\ v_t \end{bmatrix} \quad (9)$$

elde edilir. Bu ifadede

$$\begin{bmatrix} v_n \\ v_t \end{bmatrix} = (\underline{R}^O)^T \vec{v}_i = \begin{bmatrix} \vec{n}^T \\ \vec{t}^T \end{bmatrix} \vec{v}_i = \begin{bmatrix} \vec{n}^T \vec{v}_i \\ \vec{t}^T \vec{v}_i \end{bmatrix}$$

biçiminde yazılıp toplam sürtünme kuvveti ifadesinde yerine koyulduğunda;

$$\vec{F}_t = -\underline{R}^O \underline{D} \begin{bmatrix} \vec{n}^T \vec{v}_i & 0 \\ 0 & \vec{t}^T \vec{v}_i \end{bmatrix} (\underline{R}^O)^T \vec{v}_i \quad (10)$$

elde edilir. Burada $\underline{D}$ matrisi; $d_n \ll d_t$ olmak üzere $\underline{D} = \begin{bmatrix} d_n & 0 \\ 0 & d_t \end{bmatrix}$ şeklindedir. (11)

Katı ortam etkileşiminde kuru sürtünme kuvvetleri

Kuru sürtünme halinde sürtünme kuvvetinin eksenel ve yanal bileşenleri

$$\vec{F}_n = -k_n \cdot \text{sign} \|\vec{v}_n\| \cdot \vec{n} \quad ; \quad \vec{F}_t = -k_t \cdot \text{sign} \|\vec{v}_t\| \cdot \vec{t} \quad (12)$$

olarak tanımlanabilir. Önceki (5) ifadesinde olduğu gibi hız vektörü ve sürtünme kuvveti cisme bağlı ve yere bağlı eksen takımlarına göre:

$$\vec{v}_b = \begin{bmatrix} \|\vec{v}_n\| \\ \|\vec{v}_t\| \end{bmatrix}; \quad \vec{F}_{ib} = \begin{bmatrix} \|\vec{F}_n\| \\ \|\vec{F}_t\| \end{bmatrix}; \quad \vec{F}_i = \underline{R}_i^O \cdot \vec{F}_{ib}; \quad \vec{v}_i = \underline{R}_i^O \cdot \vec{v}_b \Rightarrow \vec{v}_b = (\underline{R}_i^O)^{-1} \cdot \vec{v}_i = (\underline{R}_i^O)^T \vec{v}_i$$

biçiminde tanımlanarak

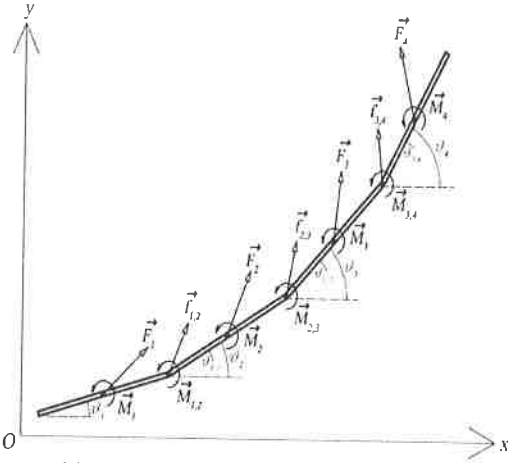
$$\vec{F}_i = -(\underline{R}_i^O) \cdot \underline{K} \cdot \text{sign}[(\underline{R}_i^O)^T \vec{v}_i] \quad (13)$$

ifadesi elde edilir. Burada $\underline{K} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix}$ matrisi, $k_n \ll k_t$ olmak üzere eksenel ve yanal kuru sürtünme katsayıları matrisidir.

Yılan sürünme hareketinde aksel kuru sürtünme katsayısı, aksel hızın işaretine göre ayrıca farklı değerler almaktadır. İleri harekette çok düşük $k_{\min}$ sürtünme katsayısı varken geri harekette pullar ortama takılmakta ve yüksek $k_{\max}$ sürtünme katsayıları oluşmaktadır. Bu olay da aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\|\vec{v}_n\| > 0 \text{ ise } \underline{K} = \underline{K}_a = \begin{bmatrix} k_{\min} & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix} \quad \|\vec{v}_n\| < 0 \text{ ise } \underline{K} = \underline{K}_r = \begin{bmatrix} k_{\max} & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix} \quad (14)$$

4 Uzunlu 3 Eklemlı Mekanizma Dinamiğı



Şekil 2: 4 uzunlu 3 eklemlı mekanizma

Çok uzunlu robotik mekanizmalarda yukarıdaki sürtünme kuvvetleri her uzuvda, o uzvun hızına göre oluşacak, ayrıca uzuvlar arası etkileşimlerin de gözütılması ve istenen davranışı sağlayacak eklem tahrik momentlerinin belirlenmesi gerekecektir. Örnek olarak, Şekil 2 de gösterilen 4 uzunlu, üç eklemlı düzlemsel robotik mekanizma ele alınmıştır. Bu mekanizma, yunus yüzme hareketlerinin modellenmesinde birçok etkileşim özelliğinin etkin biçimde kullanılmasını sağlamıştır.[9]

Hareket ifadeleri için Newton-Euler yazımı mekanizma hareketine uygun şekilde düzenlenirse i uzvu için kuvvet ve moment dengesi ifadeleri genel olarak şu şekilde yazılabilir:

$$-\vec{f}_{i,j+1} + \vec{f}_{i-1,i} + \vec{F}_i - m_i \vec{v}_{c_i} = 0 \quad i=1, \dots, n; \quad n=4 \quad (15)$$

$$-\vec{M}_{i,j+1} + \vec{M}_{i-1,i} + (-\vec{r}_{i-1,c_i}) \times (\vec{f}_{i-1,i}) + (-\vec{r}_{i,c_i}) \times (-\vec{f}_{i,j+1}) + \vec{M}_i - I_i \ddot{\theta}_i = 0 \quad i=1, \dots, n; \quad n=4 \quad (16)$$

Bu denklemlerde, $\vec{f}_{i,i+1}$, i uzvu ile i+1 uzvu arasındaki etkileşim kuvvetini; $\vec{f}_{i-1,i}$, i-1 uzvu ile i uzvu arasındaki etkileşim kuvvetini; $\vec{F}_i$, i uzvuna etkiyen sürüklenme kuvvetini; $\vec{M}_{i,i+1}$, i uzvu ile i+1 uzvu arasındaki etkileşim momentini; $\vec{M}_{i-1,i}$, i-1 uzvu ile i uzvu arasındaki etkileşim momentini; $\vec{M}_i$, i uzvuna etki eden sürüklenme momentini; I_i , i uzvu için atalet momentini; $\ddot{\theta}_i$, i uzvunun açısal hızını; $\ddot{\omega}_i$, i uzvunun açısal ivmesini; m_i , i uzvunun kütesini; $\vec{r}_{i,c_i}$ O_i noktasından C_i ağırlık merkezine doğru olan konum vektörünü; $\vec{r}_{i,c_{i+1}}$, O_i noktasından C_{i+1} ağırlık merkezine doğru olan konum vektörünü; $\vec{v}_{c_i}$, i uzvunun ağırlık merkezinin öteleme hızını; $\ddot{v}_{c_i}$, i uzvunun ağırlık merkezinin öteleme ivmesini ifade etmektedir.

Kuvvet Denklemleri

1. uzuvdaki (gövde) etkileşim kuvveti $\vec{f}_{0,1}$ 'in ve 4. uzuvdaki (kuyruk) etkileşim kuvveti $\vec{f}_{4,5}$ 'in sıfır olduğu varsayılarak, (15) ifadesi her bir uzuv için ayrı ayrı yazılmıştır. Bu ifadeler ardışık biçimde düzenlenip, $\vec{v}_{c1}$ ivmesinin elde edileceği tek bir ifadeye varılmıştır:

$$m_1 \dot{\vec{v}}_{c1} = -(m_4 \dot{\vec{v}}_{c4} + m_3 \dot{\vec{v}}_{c3} + m_2 \dot{\vec{v}}_{c2}) + (\vec{F}_4 + \vec{F}_3 + \vec{F}_2 + \vec{F}_1) \quad (17)$$

$\vec{v}_{c2}, \vec{v}_{c3}, \vec{v}_{c4}$ hızları $\vec{v}_{c1}$ 'den ardışık olarak elde edilebilir. Direkt kinematik çözümde konum ifadesi;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{c_{i+1}} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{c_i} + \begin{bmatrix} l_i \cos \theta_i + (l_{i+1} - l_{c,i}) \cos \theta_{i+1} \\ l_i \sin \theta_i + (l_{i+1} - l_{c,i}) \sin \theta_{i+1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

şeklinde yazılır. Burada l_i , i uzvunun uzunluğu; $l_{c,i}$, i uzvunun ağırlık merkezine kadar olan uzunluğudur. θ_i i uzvunun açısal yer değiştirmesi; θ_{i+1} , i+1 uzvunun açısal yer değiştirmesidir. Bu ifadenin türevi alınarak her bir uzvun doğrusal hızı kendinden bir önceki uzvun doğrusal hızı ve iki uzuv arasındaki doğrusal hız farkının toplamı şeklinde yazılabilir.

$$\vec{v}_{c_{i+1}} = \vec{v}_{c_i} + \Delta \vec{v}_{i,i+1} \quad (19)$$

Doğrusal hız ve ivme ifadeleri de $\vec{v}_{c1}$ ifadesinde yerine konulduğunda sistemin girişlerine bağlı olarak gövdenin (1.uzuv) öteleme ivmesini veren aşağıdaki ifadeye ulaşılır:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{v}}_{c1} = & \left(\frac{1}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \right) (\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4) \\ & - \mu_4 (J_{3,4} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + C_{3,4} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_3^2 \\ \dot{\theta}_4^2 \end{bmatrix}) - \mu_{3,4} (J_{2,3} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + C_{2,3} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix}) - \mu_{2,4} (J_{1,2} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + C_{1,2} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix}) \end{aligned} \quad (20)$$

(20) denklemindeki parametreler aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mu_{2,4} = \frac{m_2 + m_3 + m_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}; \quad \mu_{3,4} = \frac{m_3 + m_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}; \quad \mu_4 = \frac{m_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \quad (21)$$

$$J_{i,i+1} = \begin{bmatrix} -l_{c_i} \sin \theta_i & -l_{c_{i+1}} \sin \theta_{i+1} \\ l_{c_i} \cos \theta_i & l_{c_{i+1}} \cos \theta_{i+1} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$C_{i,i+1} = \begin{bmatrix} -l_{c_i} \cos \theta_i & -l_{c_{i+1}} \cos \theta_{i+1} \\ -l_{c_i} \sin \theta_i & -l_{c_{i+1}} \sin \theta_{i+1} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Burada, hesap ve gösterim kolaylığı için $l - l_{c1} = l_{c1} = l_1' Z$ alınmıştır.

Moment Denklemleri

1. uzuv (gövde) için $\vec{M}_{0,1}$ momentinin, 4. uzuv (kuyruk) için ise $\vec{M}_{4,5}$ momentinin sıfır olduğu varsayılarak, (16) ifadesi her bir uzuv için ayrı ayrı yazılmıştır. Bu ifadeler yazılırken tüm öteleme vektörleri ve dönmeler yere bağlı eksen takımına göre tanımlanmış, iteratif olarak düzenlenip, $\ddot{\theta}_1$ açısal ivmesinin elde edilebileceği tek bir ifade olarak yazılmıştır.

$$\ddot{\theta}_1 = \left[\frac{1}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \right] [(-\ddot{\theta}_{1,2}(I_2 + I_3 + I_4) - \ddot{\theta}_{2,3}(I_3 + I_4) - \ddot{\theta}_{3,4}(I_4)) + (M_1 + M_2 + M_3 + M_4) - (l_{c_4} \vec{f}_{3,4}^T \vec{t}_4 + l_{c_1} (\vec{f}_{2,3} + \vec{f}_{3,4})^T \vec{t}_3 + l_{c_2} (\vec{f}_{1,2} + \vec{f}_{2,3})^T \vec{t}_2 + l_{c_1} \vec{f}_{1,2}^T \vec{t}_1)] \quad (24)$$

Burada, $\vec{t}_i = \begin{bmatrix} -\sin \theta_i \\ \cos \theta_i \end{bmatrix}$ şeklinde ifade edilmektedir. M_1 , M_2 , M_3 ve M_4 momentleri, her bir uzva etki eden sürtünme momenti genliklerini göstermekte olup kuru sürtünme için kısaca $M_i = -k_m \cdot \text{sign} \|\vec{\omega}_i\|$, viskoz sürtünme için $M_i = -B \cdot \|\vec{\omega}_i\|$ olarak gösterilebilir. (25)

2., 3. ve 4. uzuvlar için açısal yer değiştirme ifadeleri 1. uzvun açısal yer değiştirmesi ile uzuvlar arasındaki açısal yer değiştirme farklarının toplamı olarak yazılabilir. Bu durumda hareket denklemleri uzuvlar arasındaki bağıl yer değiştirmeler cinsinden ifade edilmiş olur. Bu ifadelerin türevi alınarak açısal hız ifadeleri, açısal hız ifadelerinin türevi alınarak da açısal ivme ifadeleri benzer şekilde elde edilebilir.

Gövde olan 1. uzvun hareketini dikkate aldığımızda, mekanizma için bilinen girişler

$\ddot{\theta}_{3,4}(t); \dot{\theta}_{3,4}(t); \theta_{3,4}(t); \ddot{\theta}_{2,3}(t); \dot{\theta}_{2,3}(t); \theta_{2,3}(t)$ ve $\ddot{\theta}_{1,2}(t); \dot{\theta}_{1,2}(t); \theta_{1,2}(t)$ yörüngeleri olacaktır.

Bu girişlere karşılık mekanizma çıkışları $\theta_1, \dot{\theta}_1$ ve $\vec{v}_{c1}$ olacaktır.

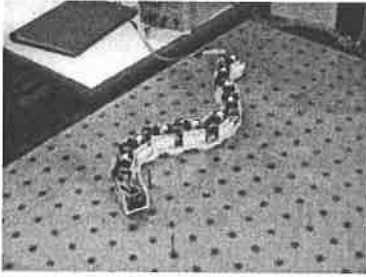
Ara hesapların sırası aşağıdaki gibidir:

- 1- $\theta_i(0); \dot{\theta}_i(0)$ $i = 1, \dots, 4$ başlangıç değerlerini belirle,
- 2- $\ddot{\theta}_{3,4}(t); \dot{\theta}_{3,4}(t); \theta_{3,4}(t); \ddot{\theta}_{2,3}(t); \dot{\theta}_{2,3}(t); \theta_{2,3}(t)$ ve $\ddot{\theta}_{1,2}(t); \dot{\theta}_{1,2}(t); \theta_{1,2}(t)$ yörüngelerini gir,
- 3- her t anı için $\theta_i(t); \dot{\theta}_i(t); \ddot{\theta}_i(t)$ yere bağlı eklem açısal konum, hız ve ivmelerini hesapla,
- 4- her t anı için $\vec{v}_{c_i}(t); \vec{\omega}_i(t)$ hızlarını ve açısal hızlarını hesapla,
- 5- her t anı için $\vec{F}_i(t)$ kuvvetlerini ve $\vec{M}_i(t)$ momentlerini ($i=1,4$) uygulamaya göre (6), (10), (13) ve (25) ifadeleriyle hesapla,
- 6- her t anı için $\vec{v}_{c_i}(t); \ddot{\theta}_i(t)$ öteleme ve açısal ivmelerini hesapla,
- 7- (15) ve (16) denklemleri ile eklem etkileşim kuvvet ve momentlerini hesapla,
- 8- (20) ifadesi ile gövde ivmesini, (24) ifadesi ile gövde açısal ivmesini bul,
- 9- 2. adıma geri dön, gözlem veya hesap süresi bitince dur.

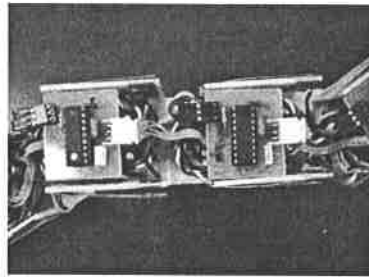
Bu hesap algoritması, yunus yüzme hareketlerinin benzetimi için Simulink® ortamında başarıyla kullanılmıştır [9].

YILANSI ROBOT PROTOTİPİ

İ. T. Ü. Makina Fakültesi, Prof. Dr. Mehmet Nimet ÖZDAŞ Otomatik Kontrol Laboratuvarında bulunan yılanı robot prototipi [5], pleksiglas malzeme ile gerçekleştirilmiş 9 eklemlili tekerleksiz 10 modülden (uzuvdan) oluşmaktadır. Düzlemsel mekanizmanın her bir ekleminde hareket düzlemine normal eksen etrafında dönme şeklinde bir serbestlik derecesi mevcuttur. Robotun eklemlerini hareket ettirmek için 9 adet HS-475HB servo motor kullanılmıştır. 5 adet mikro denetleyici devresi hem eklem motorlarını sürmekte, hem de merkezi kontrol bilgisayarı ile iletişimi sağlamaktadır. Kontrol algoritmaları ve bilgisayar programı Matlab®R13 ortamında hazırlanmıştır. Üretilen kodlar asenkron seri iletişimle (2400 baud rate) Atmel AT89C2051 mikro denetleyicisine iletilmekte ve bu denetleyici gerekli motor açılma değişimlerini sağlamaktadır. Prototipin genel görünümü ve modüllerin bağlanma biçimi Şekil 3 ve Şekil 4 te gösterilmiştir.



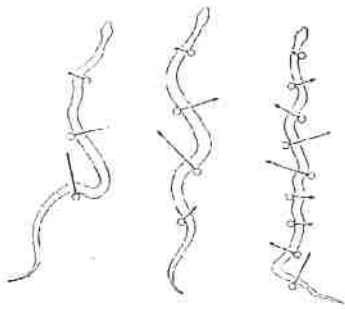
Şekil 3: Yılanı Robot Prototipi



Şekil 4: Prototip yapısı

YILAN HAREKETİNİN KONTROLU

Yılan yanal dalgalanma hareketinin kontrolü ile ilgili olarak laboratuvarımızda yapılan ilk çalışmalarda [5] “algılayıcılarla algılanan doğal engellere yanal itme kuvvetlerinin uygulanması” benimsenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5: Yanal İtme ile Hareket

Hareket kontrolü için uygulanan açık çevrim kontrol algoritması doğadaki yılanlarda gözlemlenen dalgalanma hareketinden esinlenmektedir. Yanal dalgalanma hareketi gerçekleştiren yılanlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar [3],[4],[5], şu çarpıcı sonucu ortaya çıkarmıştır: İlerleme hareketi esnasında yılan vücudunun her bir kesiti, kafa tarafından izlenen yörüngeyi oldukça hassas bir biçimde takip etmekte ve vücudun tamamı kafadan kuyruğa doğru hareketli bir dalga ile ilerlemektedir. Yılan, ağırlık merkezini ötelerken, eşzamanlı temas edilen dayanaklara göre olan genel geometrik biçimini koruyabilmektedir.

Böylelikle ilerleme hareketi mevcut dayanaklar üzerinden devam etmektedir. Oldukça karmaşık bir iskelet-kas yapısı sergileyen yılan vücudunda gözlemlenen “doğal” kontrol, yapay mekanizmamız üzerinde “modüllerin bağıl açılma konumlarının kontrolü” problemine

indirgenmektedir. Yılan yörüngesi belirlendikten sonra hareket kontrolü için benimsenen bu yöntem aşağıda Tablo 1 de gösterilmiştir.

İteratif motor açısı değişim tablosu

t	t_0	t_1	t_2	t_3
θ_1	$\theta_{1,0}$	$\theta_{1,1}$	$\theta_{1,2}$	$\theta_{1,3}$
θ_2	$\theta_{2,0}$	$\theta_{2,1}$	$\theta_{2,2}$	$\theta_{2,3}$
θ_3	$\theta_{3,0}$	$\theta_{3,1}$	$\theta_{3,2}$	$\theta_{3,3}$
θ_4	$\theta_{4,0}$	$\theta_{4,1}$	$\theta_{4,2}$	$\theta_{4,3}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
θ_{n-1}	$\theta_{n-1,0}$	$\theta_{n-1,1}$	$\theta_{n-1,2}$	$\theta_{n-1,3}$
θ_n	$\theta_{n,0}$	$\theta_{n,1}$	$\theta_{n,2}$	$\theta_{n,3}$

Tablo 1: Eklem açılarının yayılımı

Bu yöntem, doğal dayanakların algılanmasını, bu dayanak noktalarından geçen ve istenen yönde etkin ilerlemeyi sağlayacak bir geometrik iskelet eğrisinin belirlenmesini gerektirmektedir. Bu eğri belirlendikten sonra bu eğri üzerinde Tablo 1 deki eklem açıları yayılımı ile ilerleme sağlanmaktadır. Dayanak noktaları takımı değiştiği zaman iskelet eğrisi de yeniden belirlenmektedir. Eklem momentlerinin itme kuvvetlerine dönüştürülmesinde en etkin yaklaşım olmasına rağmen bu yöntem dayanak noktalarının konumlarına bağımlıdır.

Yeni yaklaşım



Şekil 6: Sanal dayanak noktaları

Yılan uzuvlarının herhangi birinde, (12) ifadesindeki yanal kuru sürtünme katsayısı k_t nin eksenel sürtünme katsayısı k_n ye göre çok büyük yapılması, bu modülün bir dayanak noktasına dayanması ile eşdeğerdir. Bu yaklaşımla yılan iskelet eğrisinin, doğru dışında herhangi bir biçimi için modüllerden uygun bir kaçı, “sanal dayanak noktalarına dayanmış” varsayılabilir. Yeni bir iskelet eğrisi belirlemeye gerek kalmaz, olan yörünge üzerinde sürme kuvvetini sağlayacak eklem momentlerini veya açısal değişimlerini belirlemek yeter.

Yılansı robotun bu şekilde de, dayanak noktaları olmadan ilerleyebileceğini görmek için modüllere kalemtırş bıçakları takılmıştır. Kalemtırş bıçağının temas yüzeyinin inceliği sebebiyle ileri yönde çok az sürtünme oluşmakta ve yanal doğrultuda elde edilen tepki kuvveti yeterince büyük olmaktadır.

DENEYSEL İNCELEME

Dalga Boyu	Genlik (cm)	Hız (cm/sn)
1,5 L	11,5	6,0
1,5 L	9,5	5,7
1,5 L	7,5	5,4
1,5 L	6,0	4,2
1,5 L	4,0	3,7
1 L	16,0	12,8
1 L	10,0	7,4
1 L	6,0	6,1

Tablo 2: Deney sonuçları

Mevcut prototip modüllerine kalemtırş bıçakları takıldıktan sonra eklem açısal değişimleri, dalga boyu prototip uzunluğu ve prototip uzunluğunun 1,5 katı olan çeşitli genliklerde hareketli dalgaları sağlayacak şekilde kontrol edilmiştir. Bu deneylerin sonuçları Tablo 2 de özetlenmiştir. Gözlem süresi 10 saniyedir. Sürtünmeli ortam olarak halı kullanıldığında prototipin 15° eğimi tırmanabildiği gözlemlenmiştir.

Herhangi bir iskelet yörüngesinde sanal dayanak kabul edilecek modüllerin belirlenmesi için çalışmalar sürdürülmektedir.

İRDELEME VE SONUÇ

Yunus yüzme hareketlerinin benzetiminde eklem yer değişimi yörüngeleri verilerek gövde hız ve açısal salınımları incelenmiştir. Sistem, gövde açısal ivmesini minimum tutacak şekilde kontrol edilmiş, 2. uzuv hareketlerinin diğer uzuvlardan gelen etkileşim momentlerini dengeleyebileceği görülmüştür. Diğer yandan benzetim sırasında elde edilen eklem etkileşim momentleri, deneysel bir prototip için eyleyici seçimine ışık tutmuştur. Aynı yaklaşım, işlevsel bir yılanlı robotun tasarımı için de kullanılabilir.

Dayanaklara yanal kuvvet uygulanması, uluslararası diğer çalışmalara kıyasla özellikle küçük ve yavaş hareketlerde çok başarılı olmuş, ayrıca yılan hareket yörüngesinin bozulmalara karşı duyarsız olduğu, dışarıdan etkiyen bozucu kuvvet/moment girişlerine karşılık yılanlı robotun dayanak noktaları ile belirlenen yörüngesine hızla geri döndüğü gözlemlenmiştir. Sanal dayanak noktalarının belirlenmesi, yeni iskelet eğrisinin belirlenmesinden daha basit olup, yılanlı robotun ilerlemeden önce geometrik durumunu bu iskelet eğrisine uydurmasına da gerek kalmamaktadır. Bu yöntem, yılanlı robotlar için geliştirilmiş en etkin hareket yöntemi olabilir. Yalnız yanal sürtünme kuvvetlerini artırmakla yetinmemeli, (14) ifadesinde belirtildiği gibi ilerleme doğrultusundaki ileri ve geri yönler arasında da sürtünme farkı yaratılmalıdır. Bunun için yılan karın pulları ile aynı işlevi görececek bir katı-katı ara yüzü tasarlanmalıdır.

Dalgalanma hareketi ile tahrik, doğaya en uyumlu, en verimli ve en az iz bırakan tahrik yöntemlerinden biridir. Bu yönleri ile çok geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir.

KAYNAKÇA

- [1] **S. Hirose**, “Biologically inspired robots / Snake-like locomotors and Manipulators”, Oxford University Press, 1993.
- [2] **G. Miller**, “Snake Robots for Search and Rescue,” in “Neurotechnology for Biomimetic Robots”, J. Ayers, J.L. Davis and A. Rudolph, Eds, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp.271-284, 2002.
- [3] **Z.Y. Bayraktaroglu, F. Butel, V. Pasqui and P. Blazevic**, “Snake-like Locomotion: Integration of Geometry and Kineto-statics”, Advanced Robotics, 14(6), 447-458, 2000.
- [4] **Z.Y. Bayraktaroglu, P. Blazevic**, “A controllability criterion based on a physical analogy: Limbless locomotion and Object grasping in robotics”, Robotica, 22(5), 493-503, 2004.
- [5] **Z.Y. Bayraktaroglu, A. Kılıçarslan, A. Kuzucu, et al...** “Design and Control of Biologically Inspired Wheel-less Snake-like Robot”, BIOROB 2006 (International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics), Pisa, İtalya, 2006
- [6] **F. E. Fish, J. J. Rohr**, “Review of Dolphin Hydrodynamics and Swimming Performance”, Technical Report 1801, SSC, San Diego, 1999
- [7] **E. Dalyan, T. Görüney, A. Kuzucu, S. Tüfekçi, K. Uludağ**, “Yunus Türü Sualtı Gözlem ve Keşif Robotu”, SAVTEK 2004 Savunma Teknolojileri Kongresi, sf :297 – 305, O. D. T. Ü., Ankara, 2004
- [8] **B. Karaca**, “Yunus Yüzme Hareketlerinin Modellenmesi ve Optimizasyonu”, Yüksek Lisans tezi, İ. T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006
- [9] **B. Karaca, A. Kuzucu**, “Modeling and Optimization of Dolphin Swimming Movements”, The 5th IFAC Intl. WS DECOM-TT 2007, May 17-20, Çeşme, Turkey, 2007