Sayısal Sinyal İşleme

Yapay Zekâ ve Veri Dersleri Rehberi · Kısım III: Sinyal, Görüntü ve Ses

Örnekleme | Doğrusal sistemler | Fourier ve FFT | Süzgeç tasarımı | Spektral analiz | Komşu dersler

Sercan KÜLCÜ · Giresun Üniversitesi · Bilgisayar Mühendisliği

© Sercan Külcü. Tüm hakları saklıdır. · Sunumun etkileşimli HTML sürümü: https://sercankulcu.github.io/files/ai_courses/sunumlar/Bolum_16_Sayisal_Sinyal_Isleme.html

GİRİŞ

Ders Hangi Soruyu Sorar?

Örneklenmiş sinyaller nasıl çözümlenir, süzülür ve dönüştürülür?

Sayısal sinyal işleme, belirli aralıklarla **örneklenmiş** ses, titreşim, EKG ya da radyo sinyallerini matematiksel dönüşümlerle çözümler, süzer ve dönüştürür. Ders öğrenmeye değil kesin matematiğe dayanır; ses, görüntü ve haberleşme derslerinin ortak temelidir.

Bir bakışta

YAKLAŞIM matematiksel dönüşüm ve süzgeç	**GİRDİ** örneklenmiş sinyal	**ÇIKTI** süzülmüş sinyal, spektrum
BAŞARI ÖLÇÜTÜ sinyal-gürültü oranı, frekans yanıtı	**MATEMATİK YÜKÜ** yüksek: karmaşık sayı, Fourier	**VERİ İHTİYACI** öğrenme yok; sinyal yeter

Kısa Tarihçe

1822
Fourier, ısı üzerine kitabında fonksiyonları sinüslerin toplamı olarak yazmayı önerir.

1949
Shannon örnekleme kuramını yayımlar: bant sınırlı sinyal, yeterli hızla örneklenirse tam geri kazanılır.

1965
Cooley ve Tukey hızlı Fourier dönüşümünü (FFT) yayımlar; spektrum hesabı pratik hâle gelir.

1974
Ahmed, Natarajan ve Rao ayrık kosinüs dönüşümünü (DCT) tanıtır; JPEG ve MP3 bunun üzerine kurulur.

1975
Oppenheim ve Schafer'in Digital Signal Processing kitabı çıkar; alan bir ders olarak yerleşir.

1978
Texas Instruments'ın Speak & Spell oyuncağı, tek yongada sayısal konuşma sentezini evlere taşır.

DERS

Temel Kavramlar

Örnekleme
Sürekli sinyali eşit aralıklarla ölçüp sayı dizisine çevirmek.

Nyquist ölçütü
En yüksek frekansın iki katından hızlı örnekle.

Örtüşme (aliasing)
Yetersiz örneklemede yüksek frekansın alçak görünmesi.

Nicemleme
Genliği sınırlı sayıda düzeye yuvarlamak; bit derinliği.

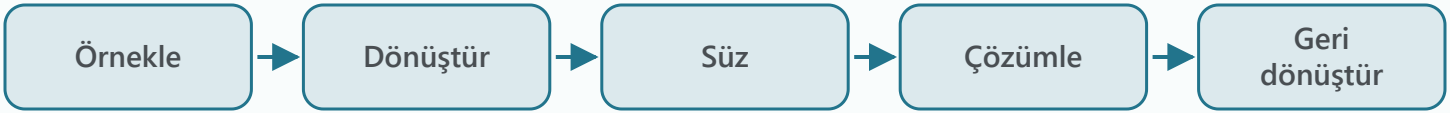
Evrişim
Doğrusal, zamanla değişmeyen sistemin girdiye yanıtı.

Fourier ve FFT
Sinyali frekans bileşenlerine ayırmanın hızlı yolu.

FIR ve IIR süzgeç
Alçak, yüksek ve bant geçiren sayısal süzgeçler.

z-dönüşümü
Süzgecin kutup ve sıfırları; kararlılık çözümlemesi.

Tipik İş Akışı



Örnekle	Dönüştür	Süz	Çözümle	Geri dönüştür
ADC, örnekleme hızı	FFT, spektrum	FIR / IIR süzgeç	tepe, enerji, öznitelik	DAC ya da sonraki adım

Örnek: Bir EKG cihazı kalp sinyalini saniyede 360 kez örnekler. Spektrumda 50 Hz şebeke gürültüsü görülür; bir çentik süzgeci yalnız bu frekansı bastırır. Temizlenen sinyalde R tepeleri bulunur ve aralarındaki süreden kalp hızı hesaplanır. Hiçbir adımda öğrenme yoktur.

DERS

Derste Neler İşlenir?

1. Ayrık zamanlı sinyaller ve sistemler
2. Doğrusal zamanla değişmeyen sistemler ve evrişim
3. Örnekleme, örtüşme ve yeniden oluşturma
4. Ayrık zamanlı Fourier dönüşümü ve frekans yanıtı
5. z-dönüşümü: kutuplar, sıfırlar ve kararlılık
6. Ayrık Fourier dönüşümü (DFT) ve FFT
7. Pencereleme ve spektral sızıntı
8. FIR süzgeç tasarımı: pencere yöntemi
9. IIR süzgeç tasarımı: Butterworth, Chebyshev
10. Örnekleme hızı değiştirme: seyreltme, ara değerleme
11. Kısa zamanlı Fourier dönüşümü ve spektrogram
12. Nicemleme gürültüsü ve sabit noktalı gerçekleme

Kazandırdığı beceriler

scipy.signal ile süzgeç tasarlamak

MATLAB ya da Octave ile spektrum çizmek

kutup-sıfır diyagramı okumak

uygun örnekleme hızını seçmek

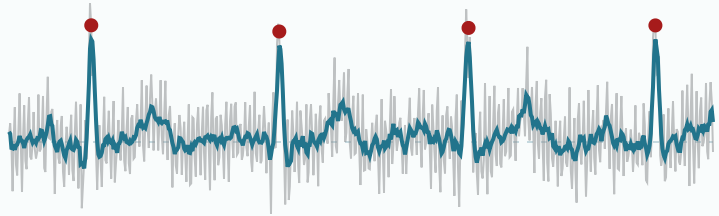
gerçek bir sinyali süzüp yorumlamak

Tipik bir dönemin akışıdır; sıra ve kapsam üniversiteden üniversiteye değişir.

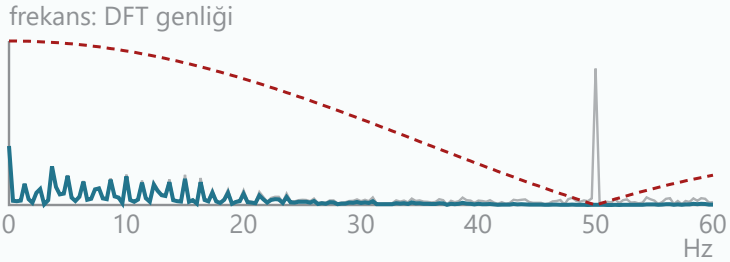
DENE

Gürültülü Nabzı Temizlemek

Göğüse takılan EKG bandı 200 Hz ile örnekliyor; kayda şebekenin 50 Hz uğultusu ve kas gürültüsü karışmış. Hareketli ortalamanın pencere boyunu değiştirin; sinyali hem zamanda hem frekansta izleyin.



zaman (3 s) →



Pencere M = **4** örnek (20 ms)

50 Hz uğultu **Kas gürültüsü**

Sinyal/gürültü: -2,8 dB → **9,1 dB**
R tepesi yüksekliği: **%91**
Bulunan vuruş: 4, nabız ≈ **75 atım/dk**

Kesik çizgi süzgecin frekans yanıtı: M = 4 iken sıfırı tam 50 Hz'e düşer. M büyüdükçe gürültü azalır ama sivri **R tepesi** de ezilir.

Gürültüyü ayırmak için önce **frekansına** bakmak gerekir. Ders, süzgeci rastgele değil, frekans yanıtına göre tasarlamayı ve korumak istediğimiz bileşeni bozmamayı öğretir.

KONUM

Ön Koşullar

Bu dersten önce bilinmesi yararlı olan dersler ve neden gerektikleri.

Ders	Neden gerekir
Analiz (Kalkülüs)	integral, seriler ve karmaşık sayılar: Fourier dönüşümünün dili
Diferansiyel Denklemler	doğrusal sistemlerin davranışı ve kararlılığı
C ile Programlama	gerçek zamanlı süzgeçleri gömülü cihazlarda yazmak için

KONUM

Bu Ders Sana Göre mi?

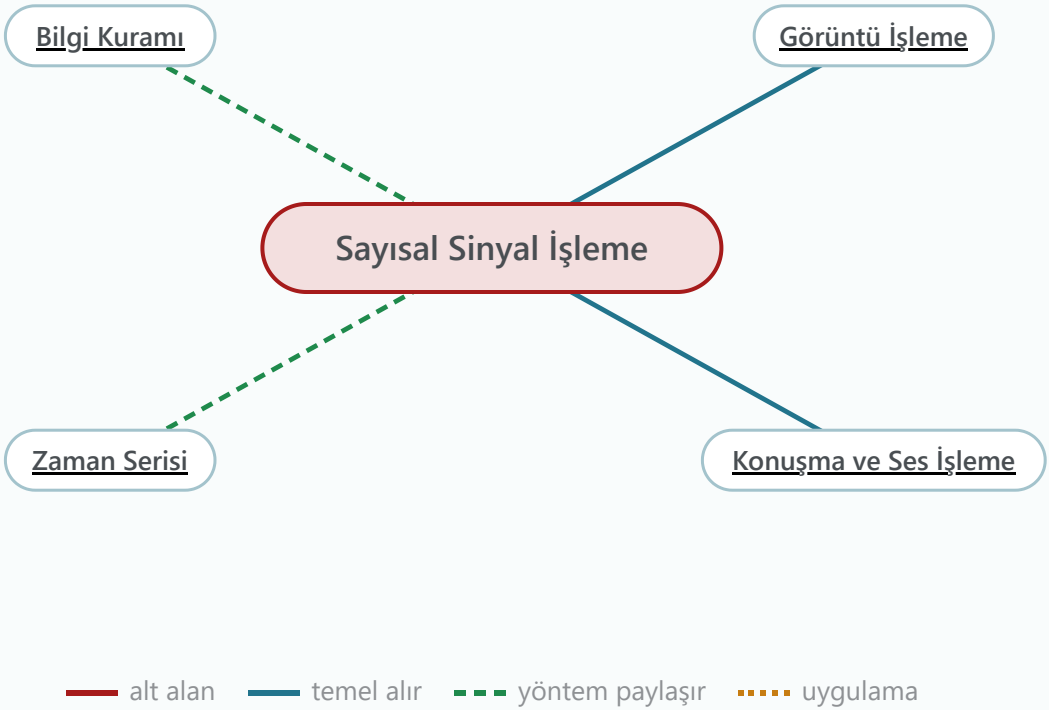
Kendine sor; "hayır" dediklerin için sağdaki sütun nereden başlayacağını gösterir.

Kendine sor	Hayırsa önce
Karmaşık sayıyı kutupsal biçimde yazıp Euler formülünü açıklayabiliyor musun?	Analiz dersindeki karmaşık sayılar ve Euler formülü
Bir sinüsün genlik, frekans ve fazını grafiğinden okuyabiliyor musun?	Trigonometri ve sinüs grafikleri üzerine kısa bir tekrar
Bir toplamı (Σ) ve basit bir integrali hesaplayabiliyor musun?	Analiz dersindeki seriler ve integral konuları
Python ya da MATLAB ile bir dizi üretip grafiğini çizebiliyor musun?	Programlamaya giriş, ardından NumPy ve Matplotlib'e kısa bir giriş

Çoğuna "evet" diyebiliyorsan derse hazırsın; bir ya da iki "hayır" dönem içinde kapanabilir.

KONUM

Dersin Komşuları



ÖRTÜŞME

Örtüştüğü Dersler

İlişki	Ders	Ortak konu
temel alır	Görüntü İşleme bu dersi temel alır	iki boyutlu sinyal, evrişim, Fourier dönüşümü
temel alır	Konuşma Tanıma ve Ses İşleme bu dersi temel alır	spektrogram, MFCC, süzgeçler
yöntem paylaşır	Zaman Serisi Analizi ve Tahmin ile yöntem paylaşır	frekans analizi, süzgeçleme
yöntem paylaşır	Bilgi Kuramı ile yöntem paylaşır	sıkıştırma, örnekleme, kanal

Ayrıştığı Noktalar (1/2)

Ölçüt	Sayısal Sinyal İşleme	Görüntü İşleme	Konuşma ve Ses İşleme
Temel soru	Örneklenmiş sinyaller nasıl çözümlenir, süzülür ve dönüştürülür?	Bir görüntü nasıl iyileştirilir, dönüştürülür ve parçalara ayrılır?	Ses dalgasından sözcükler, konuşmacı ve olaylar nasıl çıkarılır?
Yaklaşım	matematiksel dönüşüm ve süzgeç	piksel düzeyinde dönüşüm	akustik sinyal ve dil modeli
Girdi	örneklenmiş sinyal	görüntü	ses dalgası
Çıktı	süzülmüş sinyal, spektrum	işlenmiş görüntü ya da bölgeler	metin, konuşmacı, ses olayı
Başarı ölçütü	sinyal-gürültü oranı, frekans yanıtı	görsel kalite, PSNR	sözcük hata oranı (WER)
Matematik yükü	yüksek: karmaşık sayı, Fourier	orta: evrişim, Fourier	orta-yüksek
Veri ihtiyacı	öğrenme yok; sinyal yeter	az; öğrenme şart değil	çok saatlik kayıt

- **Görüntü İşleme:** Sinyal işleme bir boyutlu, zamana bağlı sinyalle çalışır; görüntü işleme aynı araçları iki boyutlu piksel ızgarasına taşır.
- **Konuşma ve Ses İşleme:** Sinyal işleme genel araçları verir; konuşma tanıma bunları dil modeli ve öğrenmeyle birleştirip sözcük çıkarır.

AYRIŞMA

Ayrıştığı Noktalar (2/2)

Ölçüt	Sayısal Sinyal İşleme	Zaman Serisi	Bilgi Kuramı
Temel soru	Örneklenmiş sinyaller nasıl çözümlenir, süzülür ve dönüştürülür?	Zamana bağlı ölçümlerden yapı nasıl çıkarılır ve gelecek nasıl tahmin edilir?	Bilgi nasıl ölçülür, en az kayıpla nasıl sıkıştırılır ve iletilir?
Yaklaşım	matematiksel dönüşüm ve süzgeç	zamana bağlı istatistiksel model	olasılıkla bilgi ölçümü
Girdi	örneklenmiş sinyal	zaman damgalı ölçümler	kaynak ve kanal modeli
Çıktı	süzülmüş sinyal, spektrum	tahmin, eğilim, mevsimsellik	sınır, kod, sıkıştırma oranı
Başarı ölçütü	sinyal-gürültü oranı, frekans yanıtı	tahmin hatası (MAE, RMSE)	bit, kanal kapasitesi
Matematik yükü	yüksek: karmaşık sayı, Fourier	orta-yüksek	yüksek: olasılık
Veri ihtiyacı	öğrenme yok; sinyal yeter	uzun geçmiş	gerekmez

- **Zaman Serisi:** İkisi de zamana bağlı veriye bakar; zaman serisi analizi tahmin ve istatistik, sinyal işleme frekans ve süzgeç ister.
- **Bilgi Kuramı:** Bilgi kuramı bilginin ölçüsünü ve sıkıştırmanın sınırını, sinyal işleme sinyali somut olarak işleyen algoritmaları verir.

UYGULAMA

Uygulama Alanları

Ses ve müzik
Ekolayzer, gürültü bastırma, MP3 sıkıştırma.

Haberleşme
Modem, Wi-Fi, 4G/5G modülasyonu.

Biyomedikal
EKG, EEG süzme ve tepe bulma.

Radar ve sonar
Yankıdan mesafe ve hız ölçmek.

Titreşim izleme
Makinelerde arızayı spektrumdan sezmek.

Görüntü ve video
JPEG ve video kodlamadaki dönüşümler.

UYGULAMA

Riskler ve Etik

Örtüşme

Örneklemeden önce alçak geçiren süzgeç konmazsa yüksek frekanslar sahte alçak frekans olarak görünür ve geri alınamaz.

Kararsız IIR süzgeç

Kutup birim çemberin dışına çıkarsa çıktı büyüyerek patlar; sabit noktada katsayı yuvarlaması bunu tetikleyebilir.

Spektral sızıntı

Uygun pencere seçilmeden alınan FFT, var olmayan frekans bileşenleri gösterir ve yanlış teşhise götürür.

Faz bozulması

IIR süzgecin doğrusal olmayan fazı EKG gibi sinyallerde dalga biçimini bozar; bu tanıyı etkileyebilir.

Ayrıntılı tartışma: Açıklanabilir Yapay Zekâ ve Yapay Zekâ Etiği.

UYGULAMA

Araçlar ve Örnek Veriler

Araçlar ve kütüphaneler

MATLAB | GNU Octave | NumPy | SciPy (scipy.signal) | librosa | GNU Radio

Örnek sinyaller ve veri setleri

MIT-BIH Aritmi (EKG) | PhysioNet | TIMIT (konuşma) | CWRU yatak titreşim verisi | Sentetik sinüs ve gürültü

Derste çoğu zaman **sentetik sinyal** yeterlidir: bilinen frekansları toplayıp gürültü eklemek, süzgecin ne yaptığını açıkça gösterir.

UYGULAMA

Sık Karıştırılanlar

Yaygın düşünce	Doğrusu
Örnekleme hızı arttıkça hep daha iyi olur.	Nyquist sınırını aşınca bilgi artmaz; yalnız veri ve hesap yükü artar.
FFT, Fourier dönüşümünden farklı bir dönüşümdür.	FFT, ayrık Fourier dönüşümünü (DFT) hızlı hesaplayan bir algoritmadır; sonuç aynıdır.
Süzgeç gürültüyü sinyalden ayırt edip siler.	Süzgeç frekansa göre ayırır; gürültü sinyalle aynı bantta ise süzgeç onu ayıramaz.
Derin öğrenme geldi, sinyal işleme eskidi.	Ses ve sensör modellerinin girdisi çoğu zaman spektrogram ya da süzülmüş sinyaldir.

SONRASI

Bu Dersten Sonra

Bu dersi temel alan ya da genişleten dersler

Görüntü İşleme | Konuşma Tanıma ve Ses İşleme

İlgili meslekler

- DSP mühendisi
- Ses yazılım mühendisi
- Haberleşme mühendisi
- Gömülü sistem mühendisi
- Biyomedikal mühendisi

Sayısal sinyal işleme üçüncü kısmın kapısıdır: iki boyuta genişleyince görüntü işleme, dil modeliyle birleşince konuşma tanıma olur. Zaman serisi analizi ve bilgi kuramı da onun araçlarını kullanır. Donanım tarafında gömülü yapay zekâ ve haberleşmeye geçilebilir.

SONRASI

Kaynaklar

- Oppenheim ve Schafer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3. baskı, Pearson, 2010.
- Proakis ve Manolakis, *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*, 4. baskı, Pearson, 2007.
- Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, 1997.
- Cooley ve Tukey, "An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series", *Mathematics of Computation* 19(90), 1965.

Son

Bölüm 16: Sayısal Sinyal İşleme

← Önceki bölüm · Alanın haritası · Sonraki bölüm →