

HAREKET VERİ TABANLARINDA
FİZİK TABANLI BENZERLİK ARAMA

PHYSICS BASED SIMILARITY SEARCHES
IN MOTION CAPTURE DATABASES

HACER İLHAN

PROF. DR. HAŞMET GÜRÇAY

Tez Danışmanı

PROF. DR. TOLGA ÇAPIN

İkinci Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Matematik Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

HACER İLHAN'ın hazırladığı “**Hareket Veri Tabanlarında Fizik Tabanlı Benzerlik Arama**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MATEMATİK ANABİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Emin ÖZÇAĞ

Başkan

Prof. Dr. Haşmet GÜRÇAY

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Selen PEHLİVAN TORT

Üye

Yrd. Doç. Dr. Serdar ARITAN

Üye

Yrd. Doç. Dr. Elif SÜRER

Üye

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun 01.10.2019 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

18 / 12 / 2017

HACER İLHAN

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

18/12/2017



HACER İLHAN

ÖZET

HAREKET VERİ TABANLARINDA FİZİK TABANLI BENZERLİK ARAMA

Hacer İLHAN

Doktora, Matematik Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Haşmet GÜRÇAY

İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tolga ÇAPIN

Aralık 2017, 72 Sayfa

İnsan hareket yakalama verileri, üç boyutlu insan hareketinin karmaşık uzaysal zamansal yapısının sayısal bir temsilidir. Hareket yakalama teknolojilerinin hızlı gelişimi ve bilgisayar grafiği ve animasyonu alanında sıkça kullanılması ile birlikte, bir veri tabanındaki kaydedilmiş hareketlerin yeniden kullanılmasına ilişkin yöntemler, hem verimlilik hem de maliyet nedenleriyle önem kazanmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, bir miktar veri kümesindeki benzer hareketlerin tanımlanması ve çıkarılması, veri güdümlü uygulamalar için merkezi önem taşımaktadır. Bu çalışma, hareket yakalama verisine erişim için fizik tabanlı bir benzerlik modeli kurmayı amaçlamaktadır.

Hareketin ifade ediliş biçimi, hareket yakalama verisinin etkin ve etkili organizasyonu, sınıflandırılması, analizi ve erişimi amacıyla hareket veri tabanlarının düzenlenmesinde önemli bir temel oluşturmaktadır. Bunun için, insan hareket özellikleri biçiminde hareket yakalama verilerinde bir soyutlama oluşturmak başlıca gereksinim olmaktadır. Bu yaklaşımda, eklem torklarından oluşan fizik tabanlı insan hareket özellikleri tanımlanmaktadır. Fizik tabanlı özellikler yer çekimi, yer tepki kuvvetleri ve kalan vücut parçalarının bir kısım bilgilerini kapalı bir şekilde içermektedir. Bu özellikler, bir insan

hareketinin ayırt edici ve düşük boyutlu temsilidir ve orijinal yüksek boyutlu verinin bilgisini korur. Hareket pozlarında benzerlik arama için, hareket verisinden elde edilen düşük boyutlu fizik tabanlı özelliklerle birlikte kd ağaç veri yapısından yararlanılmaktadır. Hareket verilerinin uzaysal ve zamansal hizalama yöntemleri kullanılarak, hareket pozlarında benzerlik arama işlemi hareket veri tabanında benzerlik arama işlemine genişletilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hareket yakalama, benzerlik, erişim, karakter animasyonu, veri güdümlü animasyon, fizik tabanlı animasyon.

ABSTRACT

PHYSICS BASED SIMILARITY SEARCHES IN MOTION CAPTURE DATABASES

Hacer İLHAN

Doctor of Philosophy, Department of Mathematics

Supervisor: Prof. Dr. Haşmet GÜRÇAY

Co-Supervisor: Prof. Dr. Tolga ÇAPIN

2017 December, 72 Pages

Human motion capture data is a digital representation of the complex spatio temporal structure of three dimensional human motion. With the rapid development of motion capturing technologies and the more common use of motion capture data in the field of computer graphics and animation, methods for the reuse of the recorded motions in a database are gaining in importance both for efficiency and cost reasons. As a result of this, the identification and extraction of similar motions within some data set are of central importance for data driven approaches. This work aims to propose a physics based similarity model for retrieval of motion capture data.

Motion expression is an important basis of constructing motion databases for purposes of efficient and effective motion capture data organization, classification, analysis and retrieval. For this, it is essential to create an abstraction over motion capture data in the form of human motion features. In this approach, we describe physics based human motion features consist of joint torques. Physics based features implicitly include the gravity, ground reaction forces and some knowledge of the remaining body parts. These features are discriminative and low dimensional representation of a human action

which preserves information of the original high dimensional data. We utilize these low dimensional physics based features extracted from motion data with kd tree data structure to search for similar motion poses. Using spatial and temporal alignment methods of motion data, we expand searching for similar motion poses to searching similarities in motion capture data.

Keywords: Motion capture, similarity, retrieval, character animation, data driven animation, physics based animation.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve doktora programım süresince sağladığı destek ve kolaylıklarla yol gösteren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Haşmet Gürçay'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora programım süresince bilgi ve tecrübeleriyle rehberlik eden değerli hocam ve ikinci tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Tolga Çapın'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman bilgi ve tecrübeleriyle yardımcı ve destek olan başta Sayın Prof. Dr. Emin Özçağ olmak üzere çok değerli hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

112E105 numaralı "Veri GÜdümlü Karakter Animasyonu" adlı TÜBİTAK projesi vesilesiyle 2012 - 2015 yıllarında beni maddi açıdan destekleyen TÜBİTAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Dostlukları ve fikirleri ile yanımda olup destek veren tüm çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan ve beni her konuda destekleyen kıymetli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İçindekiler

| | |
|---|-----------|
| Şekil Listesi | viii |
| Tablo Listesi | ix |
| 1 GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Amaç | 1 |
| 1.2 Konu ve Kapsam | 4 |
| 2 GENEL BİLGİLER | 6 |
| 2.1 Hareket Yakalama | 6 |
| 2.1.1 Hareket Yakalama Teknolojisi | 6 |
| 2.1.2 Hareket Yakalama Verisi | 8 |
| 2.2 Hareket Veri Tabanını Düzenleme ve İşleme Yöntemleri | 10 |
| 2.2.1 Hareket Veri Tabanlarında Benzer Hareketlere Erişim Yöntemleri | 11 |
| 2.2.2 Hareket Veri Tabanlarında Sınıflandırma ve Bölütleme Yöntemleri | 14 |
| 2.3 Hareket Veri Tabanını Düzenleme ve İşleme Yöntemlerinin Farklı Alanlardaki Uygulamaları | 15 |
| 2.4 Fizik Tabanlı İnsan Hareketi Modelleme | 17 |
| 3 HAREKET VERİLERİNİN BENZERLİĞİ | 19 |
| 3.1 İnsan Hareket Özellikleri | 21 |
| 3.2 Hareket Verisi Özellik Vektörü Uzayı Boyut İndirgeme | 23 |
| 3.3 İnsan Hareket Verilerinin Karşılaştırılması | 26 |
| 3.3.1 Zamansal Hizalama | 28 |
| 3.3.2 Uzaysal Hizalama | 31 |
| 3.3.3 Uzaklık Fonksiyonu | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 4 HAREKET VERİ TABANLARINDA BENZER HAREKETLERE | |
| ERİŞİM | 34 |
| 4.1 İnsan Hareket Veri Tabanında Ön İşleme | 35 |
| 4.2 Fizik Tabanlı ve Kinematik Tabanlı Hareket Özellikleri | 36 |
| 4.2.1 Fizik Tabanlı Hareket Özelliklerinin Çıkarımı | 37 |
| 4.3 Fizik Tabanlı Hareket Özellikleri ile Poz Temelli İnsan Hareket Veri Ta- banı İndeksleme Yapısı İnşası | 39 |
| 4.4 Poz Tabanlı Benzerlik Arama Kullanılarak Uzaysal ve Zamansal Hiza- lanma ile Hareket Tabanlı Benzerlik Aramaya Erişim | 40 |
| 4.5 Deneysel Çalışmalar ve Sonuçlar | 43 |
| 4.5.1 Hareket Yakalama Veri Tabanları | 43 |
| 4.5.2 Hareket Özelliklerinin Poz Tabanlı Karşılaştırılması ve Poz Eri- şim Sonuçları | 44 |
| 4.5.3 Hareket Özelliklerinin Hareket Tabanlı Karşılaştırılması ve Ha- reket Erişim Sonuçları | 45 |
| 5 TARTIŞMA VE SONUÇ | 57 |
| Kaynaklar | 59 |

Şekil Listesi

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Elektro fotoğrafçılık tekniği ile yakalanan iki boyutlu hareket dizileri [1, 2] | 2 |
| 2 | Hareket yakalama verisinin yedi ardışık video karesinde görselleştirilmesi. Her karede, hareket eden bir insan iskeleti, 17 eklemnin 3 boyutlu koordinatlarıyla gösterilmektedir. Kırmızı ve mavi çizgiler el ve ayak hareketlerinin yörüngelerini vurgulamaktadır. | 3 |
| 3 | Hareket yakalama verisinde kullanılan iskelet modeli | 9 |
| 4 | İki farklı tekme hareketi | 21 |
| 5 | Zaman hizalama sınır koşulunu sağlamalı, monoton ve sürekli olmalıdır. | 29 |
| 6 | Beyaz çizgi ile belirtilen en uygun bükme yolu ile uzaklık matrisi | 31 |
| 7 | Önerilen yaklaşımın genel akış yapısı | 35 |
| 8 | Eklemler Karakter Modeli | 38 |
| 9 | MIDAS veri tabanında "Capoeira - Au" hareketine ait poz sorgulaması | 46 |
| 10 | MIDAS veri tabanında "Capoeira - Ginga" hareketine ait poz sorgulaması | 46 |
| 11 | MIDAS veri tabanında "Karate - Yükselen Blok" hareketine ait poz sorgulaması | 46 |
| 12 | CMU, HDM05, MIDAS hareket yakalama veri tabanlarından alınan (1) Yürüme, (2) Koşma, (3) Yana zıplama, (4) El sallama, (5) Boks, (6) Öne eğilme (kalça), (7) Öne eğilme (diz), (8) İleri zıplama, (9) Oturma, (10) Yana takla hareketleri için \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} , \mathcal{J}^{15} , \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} , \mathcal{J}^{30} özellikleri kullanılarak oluşturulan karışıklık matrisleri | 56 |

Tablo Listesi

| | | |
|---|---|----|
| 1 | CMU (964231 poz), HDM05 (746046 poz), MIDAS (148538 poz) hareket veri tabanları üzerinde çeşitli hareket özellikleri kullanarak 16 ve 64 en yakın komşuyu aramak için gereken milisaniye cinsinden ortalama hesaplama süreleri | 45 |
| 2 | CMU veri tabanında \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} ve \mathcal{J}^{15} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "koşma", "öne eğilme", "yana zıplama", "öne zıplama", "yana takla" alt sınıfları için gösterimi | 50 |
| 3 | CMU veri tabanında \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} ve \mathcal{J}^{30} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "koşma", "öne eğilme", "yana zıplama", "öne zıplama", "yana takla" alt sınıfları için gösterimi | 51 |
| 4 | HDM05 veri tabanında \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} ve \mathcal{J}^{15} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "koşma", "yana takla", "yana koşma", "ip atlama", "diz dirseğe", "krikolar atlama", "el sallama", "zıplama" alt sınıfları için gösterimi | 52 |
| 5 | HDM05 veri tabanında \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} ve \mathcal{J}^{30} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "koşma", "yana takla", "yana koşma", "ip atlama", "diz dirseğe", "krikolar atlama", "el sallama", "zıplama" alt sınıfları için gösterimi | 53 |
| 6 | MIDAS veri tabanında \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} ve \mathcal{J}^{15} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "top yakalama", "yana takla", "au (capoeira)" "ginga (capoeira)", "yumruk atma", "tekme atma" alt sınıfları için gösterimi . | 54 |
| 7 | MIDAS veri tabanında \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} ve \mathcal{J}^{30} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "top yakalama", "yana takla", "au (capoeira)" "ginga (capoeira)", "yumruk atma", "tekme atma" alt sınıfları için gösterimi . | 55 |

1 GİRİŞ

1.1 Amaç

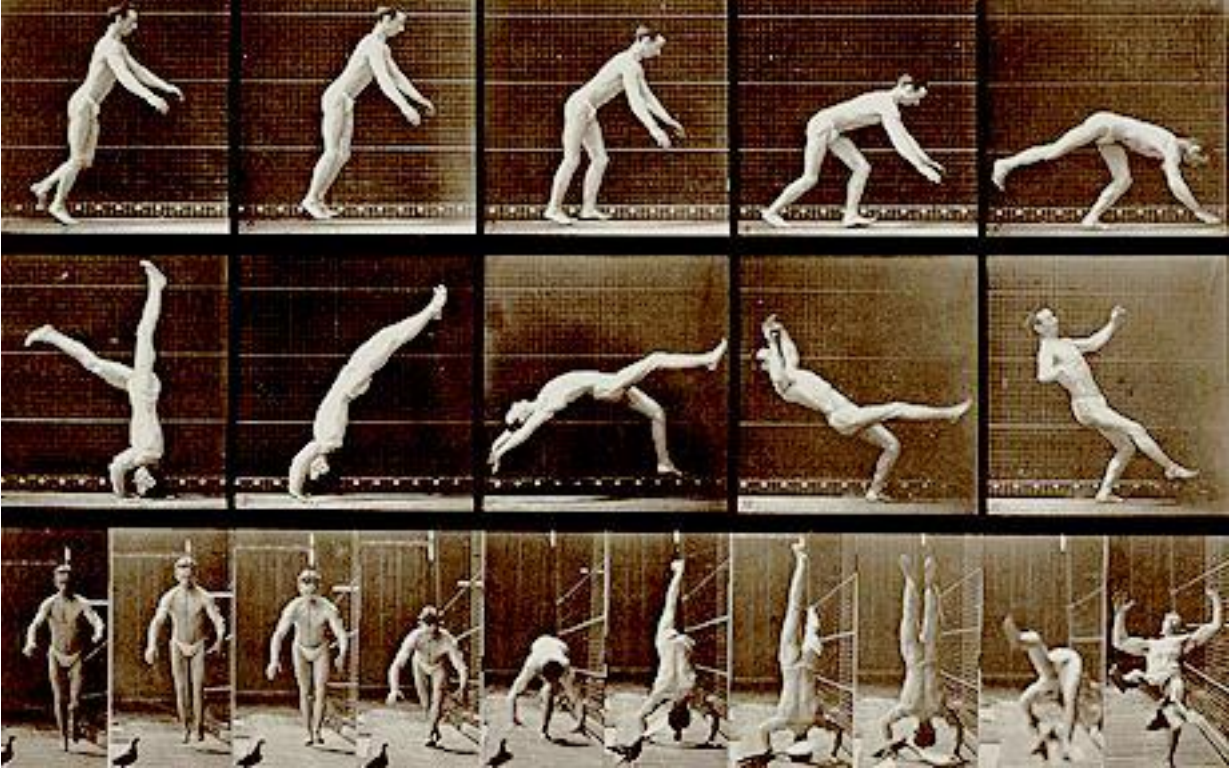
İnsan hareket verileri, bilgisayar animasyonu, spor bilimi ve tıp gibi birçok araştırma alanında kullanılır. Buna ek olarak, örneğin; film ve oyun yapımları ve tıbbi rehabilitasyon senaryoları, insan hareket verilerini işleyen algoritmalara dayanır.

İnsan hareketi, fizik açısından, bir vücudun pozisyonunun ve yerinin zamana göre değişimidir. Kaslar ve iskeletler insan hareketinin en temel unsurlarını oluştururken belli iç ve dış faktörler de hareketi etkiler. İnsan hareketini etkileyen iç faktörler kas ve iskelet yapısı, ağırlık, yaralanmalar, kazanılan hareket alışkanlıkları, ruh hali, zihinsel sağlık durumu, duygular ve benzeri unsurlardır. Dış faktörler ise kişiyi dışarıdan etkileyen kıyafet, yer çekimi, ortam, bulunulan yüzeyin yapısı ve eğimi gibi unsurlardır.

İnsan vücudu basit bir katı cisim değil, aksine esnekçe bağlı kol, bacaklar ve vücut bölümlerinin karmaşık bir birleşimidir. Buna bağlı olarak, insan hareketi çok karmaşık bir uzaysal zamansal yapıya sahip olabilir. Bu karmaşık hareket bilgisini incelemek, analiz etmek, anlamak veya kullanmak için, ilk olarak hareketi belirli verilerle kaydetmek yani hareketi yakalamak gerekir.

Özellikle kinematik ve biyomekanik hareket analizi amacıyla ilk olarak 19. yüzyılın sonlarında geliştirilen analog olarak hareketi yakalama işlemleri modern dijital hareket yakalama işlemlerine öncü olmuştur. Eadward Muybridge, elektro fotoğrafçılık olarak adlandırdığı teknik ile iki boyutlu görüntü dizileri yakalamıştır [1, 2]. Şekil 1'de bu resim dizilerinden bir örnek görülmektedir. Günümüzde hareket yakalama teknolojileri, hareket eden bir insanın üç boyutlu verilerini kaydetmeye izin vermektedir. İnsan hareket verilerininin sabit bir biçimi yoktur, bu veriler hareket boyunca sabit sıklıkta örneklenen hareketi temsil eder. İnsan hareket yakalama verisininin bir örneği Şekil 2'de eklem koordinatları ve iskelet kullanılarak birkaç karesi ile gösterilmiştir.

Bilgisayar animasyonunda, üç boyutlu karakter animasyonu oluşturmak için iki boyutlu çizgi filmlerde de kullanılan geleneksel animasyon kareleri yöntemi uzun süre kullanılmıştır. Animasyon kareleri yönteminde kesintisiz bir hareket elde etmek için önce hareketin belirli zaman aralıklarındaki pozları elle tasvir edilir ve daha sonra hareketin eksik pozları otomatik yöntemlerle doldurulur. Bu yöntem ile oluşturulan

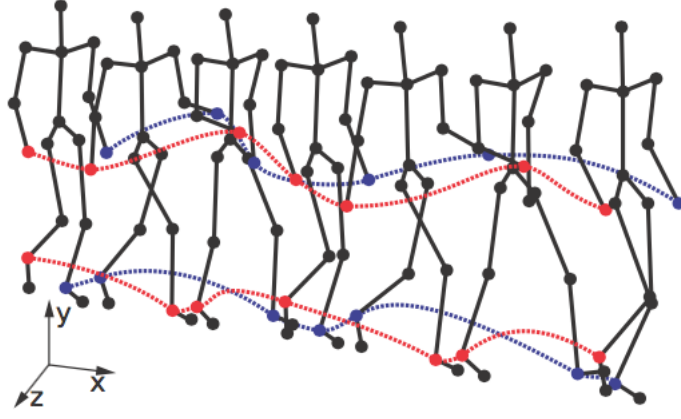


Şekil 1: Elektro fotoğrafçılık tekniği ile yakalanan iki boyutlu hareket dizileri [1, 2]

animasyonların gerçekçi görünmesi için çok fazla zamana ve deneyime ihtiyaç vardır. Hareket yakalama teknolojileri, son derece gerçekçi animasyonlar oluşturmakta kullanılarak animasyon kareleri yöntemine gereksinimi ortadan kaldırmıştır. Bunun yanı sıra, bilgisayar animasyonu alanında, örneğin; hareket düzenleme, hareket sentezleme, farklı uzuv hareketlerini birleştirme, insansı olmayan karakterlere hareket uyarlama gibi birçok farklı türde uygulamanın doğmasına sebep olmuştur.

Ayrıca, hareket yakalama teknolojileri ile kaydedilen hareket verileri, birçok farklı türde uygulamalar için de kullanılmaktadır. Örneğin; sporcuların performans durumlarını karşılaştırmak için spor bilimlerinde, rehabilite edici tedavilerin başarısını belirlemek için tıpta, belirli özelliklerdeki kişileri tespit etmek için güvenlik sektöründe kullanılmaktadır.

Bunun bir sonucu olarak, gittikçe artan ve büyüyen hareket veri tabanlarında benzer harekete erişim işlemi, tüm bu uygulamaların temelinde çözülmesi gerekli olan en önemli problemlerden biri olmuştur. İnsan hareket veri tabanlarında benzer harekete erişim işlemi, depolanan veriler arasından sorgulanan bir hareket parçasına mümkün olduğunca benzer ya da yakın hareketleri belirlemeyi amaçlar. Burada ilk önce benzer-



Şekil 2: Hareket yakalama verisinin yedi ardışık video karesinde görselleştirilmesi. Her karede, hareket eden bir insan iskeleti, 17 eklemnin 3 boyutlu koordinatlarıyla gösterilmektedir. Kırmızı ve mavi çizgiler el ve ayak hareketlerinin yörüngelerini vurgulamaktadır.

lik veya yakınlık kavramlarını tanımlamak gerekir. Sonuç olarak, insan hareket verileri arasındaki benzerliği ölçmek veya hareketleri anlamlı bir şekilde karşılaştırmak gerekli hale gelmektedir.

İnsan hareketlerinin animasyonunu, kinematik ve fizik tabanlı olmak üzere iki temel başlık altında çalışmalar içermektedir. Hareket yakalama teknolojisindeki gelişmelerle birlikte kinematik tabanlı yöntemlerle oldukça gerçekçi insan karakter animasyonu sağlanmaktadır. Diğer taraftan, kinematik tabanlı animasyon yöntemlerinde hareketler bulunduğu ortamdan bağımsız olarak davranarak etrafı algılayamaz, yani çevre ile iletişim yeteneğinden yoksundur. Fizik tabanlı animasyon yöntemleri, yer çekimi, yer temas noktaları ve çevre ile fiziksel etkileşimi algılayarak bu açığı kapatmaktadır. Bunu bir sonucu olarak da fizik tabanlı animasyon yöntemleri önem kazanmıştır.

Bu çerçevede, bu tez çalışmasının temel amacı, insan hareket yakalama veri tabanlarında benzer harekete ya da poza erişim işlemi için fizik tabanlı bir yöntem üzerine araştırma yapmaktır. Sunulan yöntemdeki ana unsur, hareketin fizik tabanlı özelliklerle bir gösteriminin kullanılmasıdır. Fizik tabanlı özellikler olarak kullanılan temel bileşen eklem torklarıdır, ayrıca kütle merkezlerinden de ek bileşen olarak yararlanılmıştır. Ayrıca eklem torklarından oluşan hareket özellikleri, kapalı olarak yer çekimi, yer tepki kuvvetleri ve kalan vücut parçalarının pozun bilgilerini kapsamaktadır. Burada insan iskeletinin tüm eklemlerindeki torkları kullanmak yerine eklemlerin iki farklı

alt kümesinden yararlanılmıştır. Birinci alt küme olarak bilek ve ayak bileği ile kafa eklemlerinin torkları, ikinci alt küme olarak da bilek ve ayak bileği ile kafa eklemlerinin torklarının yanı sıra diz, dirsek ve göğüs eklemlerinin torklarından oluşmaktadır. Fizik tabanlı özelliklerden faydalanmak belli kazançlar sağlamıştır. Öncelikli olarak, fizik tabanlı özellikler eklem pozisyonları ve eklem açıları gibi kinematik tabanlı özellik vektörleri ile karşılaştırıldığında, hareketin daha fazla ayırt edici özelliğini koruduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak, fizik tabanlı özellikler daha düşük boyutlu gösterimleri ile hareket bilgisini daha iyi korumuşlardır. Çünkü, eklem torklarının daha az sayıda eklem kullanılarak oluşturulan gösterimleri, eklem pozisyonlarının ve eklem açılarının daha fazla eklem kullanılarak oluşturulan gösterimlerine göre yeterli sonuçlar sağlamaktadır. Özellikle geniş veri tabanlarında düşük boyutlu veriler kullanmak hesaplama maliyeti bakımından daha fazla avantaj sağlamaktadır. Sonuç olarak, hareketlerin fizik tabanlı özelliklerinden yararlanmak, geniş hareket yakalama veri tabanlarında etkili ve verimli benzer harekete ya da poza erişim işlemi gerçekleştirmeye katkı sağlamıştır.

1.2 Konu ve Kapsam

İnsan hareket yakalama verileri, insan hareketinin karmaşık uzaysal ve zamansal yapısının sayısal bir temsilidir. Bilgisayar animasyonunda çok farklı konu başlıkları altında insan hareket verisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem etkinlik hem de hesaplama maliyeti sebeplerinden dolayı, geniş hareket tabanlarındaki verilerin kullanımı yöntemleri veri güdümlü bilgisayar animasyonu için önem kazanmaktadır. Geniş hareket tabanlarındaki verilerin kullanımı için istenilen hareketin veri tabanında belirlenmesini ve çıkarılmasını gerektirir.

Bu doğrultuda bu tezin ana kapsamı, geniş hareket veri tabanlarında fizik tabanlı benzerlik arama yöntemi geliştirmeye yöneliktir. Uygulanan yöntemde en gerekli bileşen olan insan hareket verisinin ifade edilme biçimi için fizik tabanlı özelliklerden yararlanılmıştır. Bu özelliklerin yöntemde temel yere sahip olmasının nedeni, hareket verisinin ifade edilme biçiminin bir hareket parçasının ayırt edici ve özgün özelliklerini temsil etmesini gerektirmesinden kaynaklanmaktadır. Bunun yanı sıra, ilişkili hareketlerin belirlenmesini zorlaştıran aralarındaki uzaysal ve zamansal deformasyonların ortadan kaldırılması için iki boyutta da hareket hizalamaları yapılmıştır. Ek olarak geniş veri

tabanlarında arama işlemlerini hızlandırmak için ağaç yapısı kullanılarak poz temelli indeksleme yapılmıştır. Arama ağacı hizalamalar dikkate alınarak veri tabanındaki tüm hareket parçaları ile inşa edildiğinde etkinlik ve hesaplama maliyeti bakımından başarısız sonuçlar elde edilebileceğinden iki aşamalı bir arama yapısı kullanılmıştır. Bunun için arama ağacı hareket tabanındaki tüm pozlarla kurulmuştur. Daha sonra veri tabanında benzer poz arama işlemi zamansal ve uzaysal hizalamalar ile birleştirilerek hareket arama işlemine genişletilmiştir.

2 GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, bu tezde kullanılan temel kavramların yanı sıra bilgisayar grafiği ve animasyonu literatüründeki ilgili çalışmaların kapsamlı bir incelemesi sağlanmaktadır.

2.1 Hareket Yakalama

Hareket yakalama teknolojileri, insanların, hayvanların ve cansız nesnelerin hareketini örnekleyip kaydeder.

İnsan karakterlerinin gerçeğe uygun üç boyutlu animasyonları, hiçbir zaman güncelliğini kaybetmeyen ve gelişime oldukça açık bir konu olarak bilgisayar grafiği ve animasyonu, bilgisayarla görü ve biyomekanik gibi alanlarda önemli rol oynamaktadır. Bu konudaki en temel amaç, istenilen ortam ve koşullara uygun gerçekçi karakter animasyonlarını yüksek kalitede üretebilmektir.

Günümüzde, doğal görünümlü karakter animasyonu oluşturmak için kullanılan en yaygın ve başarılı yöntemlerden biri hareket yakalama teknolojisini kullanmaktır. Hareket yakalama yöntemlerinin temel çalışma prensibi, gerçek bir aktörün yaptığı tam vücut hareketlerinin sayısal bir yaklaşımını kaydetmektir. Hareket yakalama sistemleri, insanların yanı sıra hayvanların ve cansız nesnelerin hareketlerini örnekleyip kaydetmek için kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu sistemler eğitim, simülasyon, güvenlik, sanal gerçeklik, spor bilimleri ve tıp alanlarında da oldukça önem kazanmıştır.

2.1.1 Hareket Yakalama Teknolojisi

Hareket yakalama sistemleri son zamanlarda uzun bir yol katetmiştir. Hareketi yakalama işlemi, hareketi, sabit bir zaman aralığıyla art arda gelen birbirinden ayrı kareler şeklinde örnekler ve kaydeder. Yakalanan hareketin kareleri, görüntü tabanlı sistemlerde *silüet* ile temsil edilirken, model tabanlı sistemlerde ise *iskelet* ile temsil edilir. Akustik, manyetik, mekanik, optik ve bunların kombinasyonu şeklinde pek çok hareket yakalama sistemi bulunmaktadır [3].

Akustik Sistemler

Akustik hareket yakalama sistemlerinde, üç alıcı hareket yakalama mekanında konumlandırılmışken bir dizi ses vericisi aktörün ana eklemlerine yerleştirilir. Sonra vericiler arka arkaya aktive edilerek karakteristik bir frekans seti üretilir, böylece alıcılar üç boyutlu alanda yayıcıların konumlarını hesaplar ve kullanırlar.

Bu sistemde, aktörün perdelenmesi ya da dış cisimlerin parazit oluşturması gibi sorunlar yaşanmamakla birlikte, verilerin doğruluğu ve kalitesi diğer sistemler kadar yüksek değildir. Ayrıca, ses yansımalarına veya dış seslere duyarlıdırlar ve belli frekans aralığındaki diğer sesler veriyi bozabilir. Bu sistemin diğer bir olumsuz tarafı, kullanılan kabloların aktörün hareket özgürlüğünü kısıtlayarak mümkün olan hareket kapsamını azaltmasıdır.

Mekanik Sistemler

Mekanik hareket yakalama sistemleri, eklemlerin hareketlerini doğrudan ölçen vücuda bağlı sensörler kullanır.

Düşük fiyatlı olması, açık havada uygulanabilmeleri, ışık veya manyetik alandan etkilenmemesi mekanik sistemlerin avantajları arasındadır. Diğer yandan, her bir eklemi doğru bir şekilde ölçme ihtiyacı nedeniyle sensörlerin aktörü bir dış iskelet gibi sarması, kullanıcının hareketlerine ağırlık ve belirli bir kabalık katabilmektedir.

Manyetik Sistemler

Manyetik sistemler vücuda takılan işaretleyicilere dayalıdır, ancak ölçüm yöntemi manyetik alan kullanmaktadır. Manyetik alan içindeki işaretleyicilerin konumu ve yönü gerçek zamanlı olarak belirlenebilir. Manyetik sistemler ucuzdur ve açık alanda çalışabilir, ancak demirli malzemeler veya elektrikli cihazların neden olduğu manyetik alan bozulmalarına karşı çok hassastır.

Manyetik hareket yakalama sistemleri, düşük fiyatlı olup açık havada çalışır, fakat demir esaslı malzemelerin ve elektrikli aletlerin neden olduğu manyetik alan bozulmalarına karşı çok hassastırlar.

Optik Sistemler

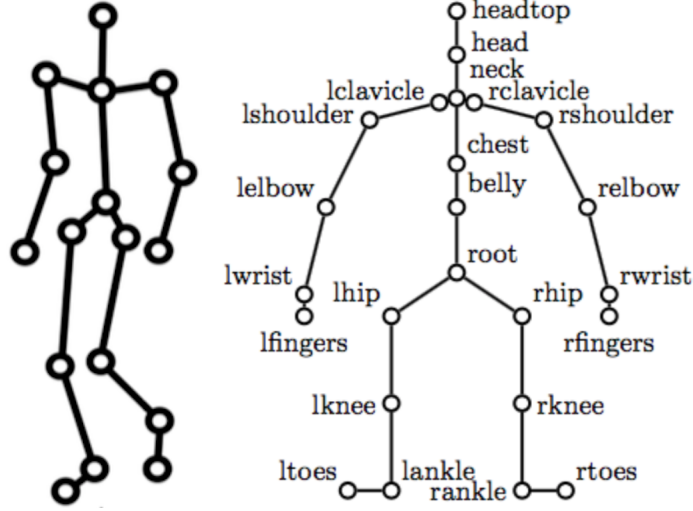
En yaygın hareket yakalama sistemleri işaretleyici tabanlı optik sistemlerdir. Bu sistemler, aktörün vücuduna takılan bir dizi ışık yayan veya ışık yansıtıcı işaretleyiciler ve ayrıca ışık yansıtıcıların takıldığı özel kıyafetler gerektirir. Bunun yanı sıra ortam ve aktör kalibrasyonuna ihtiyaç vardır. Yüksek çözünürlüklü kameralar, aktörün hareketi sırasında bu işaretçileri izlemek için stratejik olarak konumlandırılır. Her kamera, her bir işaretleyici için iki boyutlu koordinat verileri üretir ve özel yazılımlar ile tüm kameralar tarafından yakalanan veriler analiz edilerek işaretleyicilerin üç boyutlu koordinatları hesaplanır.

Optik sistemlerin en büyük avantajı, dövüş sanatları, akrobasi ve jimnastik gibi hızlı hareketlerin diğerlerine göre yakalanmasını sağlayan çok yüksek örnekleme hızına sahip olmasıdır. Optik sistemler, yüksek çözünürlüklü kameralar ve gelişmiş yazılımlar gibi son teknoloji ürünü nitelikleri nedeniyle en yüksek fiyatlı ürünlerdir. Hassaslığı artırmak ve çekim hacmini büyütmek için kamera sayısını arttırmak gerekebilir. Bunun yanında bu sistemler, parlak ışıkta problemler yaratacağı için açık hava çekimleri için uygun değildir.

2.1.2 Hareket Yakalama Verisi

İnsan hareket verisi, uzaysal yani üç boyutlu olmasının yanı sıra zamana da bağlıdır. İnsan vücudu, kemik denilen çubuklardan ve eklem denilen boğum noktalarından oluşan ve adına *iskelet* denilen bir soyutlama ile ifade edilir. Hareket verisinde kullanılan böyle bir iskelet gerçek insan iskeletinin çok basitleştirilmiş bir versiyonudur. Şekil 3'te insan hareket verisi için kullanılan iskeletin bir örneği görülmektedir.

Mekanik açıdan, katı cisimlerin çeşitli serbestlik derecelerine sahip eklemlerle bağlı olduğu hiyerarşik sistem *kinematik zincir* olarak tanımlanır ve dolayısıyla insan iskeletinin bir modellenmesi olarak kullanılabilir. İnsan iskeleti kinematik zincirle tanımlandığında, bağlantı hiyerarşisi ağaç yapısına sahiptir. Tüm iskelet; kenarları kemikler, düğümleri eklemler ve kök düğümü pelvisin merkezindeki eklem olan bir ağaç yapısı ile çizge olarak ifade edilebilir. İskelet eklemlerinin kümesi $J = \{1, 2, \dots, |J|\}$ olmak üzere köşelerin kümesi ve iskelet kemiklerinin kümesi $B = \{(i, j) : i, j \in J, i \neq j\}$ olmak üzere köşelerin oluşturduğu sıralı olamayan kenarların kümesi olsun. Bu durumda



Şekil 3: Hareket yakalama verisinde kullanılan iskelet modeli

iskelet $G = G(J, B)$ çizgesi ile ağaç yapısındadır. Bir kök nesnesinden başlayarak, alt nesnelere eklenir ve bu alt nesnelere sırayla daha fazla alt nesneye sahip olabilirler. Bir üst nesne sahip olduğu serbestlik derecesi ile hareket ederse, üst nesnenin altındaki tüm alt ağaç, tek bir katı nesne olarak ele alınır. Başka bir deyişle, bir alt nesnenin dönüşümleri, üst nesnede sabitlenmiş bir koordinat sistemine göre gerçekleştirilir. Kinematik zincirde eklem parametrelerinin belirli değerlerinden zincirin uç efektörlerinin pozisyonunu hesaplamak için *ileri kinematik* kullanılır [4]. Kinematik zincirin uç efektörlerinin her biri için istenen bir konumu sağlayan eklem parametrelerini *ters kinematik* belirlemektedir [4]. İleri kinematiklerin tek bir çözümü vardır ve uç efektörün konumu kinematik zincirdeki eklemlerin bilinen düzenlenişleriyle kesin olarak belirlenir. Aksine, ters kinematik, uç efektör sadece bir hedef konumdayken kinematik zincirin sonsuz eklem düzenlenişine erişebilir.

İnsan hareketi genellikle pozların dizisi veya eklemlerin yörünge kümesi olarak temsil edilir. Poz ise belirli bir animasyon karesinde her bir eklem atanmış üç boyutlu koordinat vektörlerinin kümesi olarak belirlenebilir. M bir insan hareket verisi olsun. M hareketinin iskeletindeki eklemlerinin kümesi J ile, uzunluğu T ile gösterilsin. Bu durumda, belli bir $t \in [1 : T]$ zamanı anındaki bir poz, $j \in J$ eklemının üç boyutlu

koordinatları $p_t^j = (p_{t1}^j p_{t2}^j p_{t3}^j) \in \mathbb{R}^3$ olmak üzere

$$p_t = \begin{pmatrix} p_t^1 \\ p_t^2 \\ \vdots \\ p_t^{|J|} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3|J| \times 1} \quad (2.1)$$

matrisi ile gösterilebilir. Bu durumda M hareketi ise, pozların bir dizisi olarak

$$M = (p_t)_{t=1}^T = [p_1 p_2 \dots p_T] \quad (2.2)$$

matrisi ile tanımlanabilir. Dolayısıyla, bir insan hareket verisi akışı, pozların zamana bağlı bir dizisidir.

2.2 Hareket Veri Tabanını Düzenleme ve İşleme Yöntemleri

Günümüzde hareket yakalama veri tabanları daha geniş boyutlu olup daha çok çeşitli veriler içermekle birlikte birçok farklı alandaki uygulamalar için daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde, bilgisayar grafiği alanında hareket yakalama veri tabanlarının düzenlenmesi ve işlenmesi için geliştirilen yararlı yöntemler ele alınmaktadır.

Hareket yakalama teknolojisine gitgide daha yaygın kullanılması ve daha çok veri tabanlarına erişim imkanının olması nedeni ile hareket yakalama verileri nadir bulunan pahalı bir ürün olmaktan çıkmıştır.

Bu nedenle, insan hareket verisine güvenilir, hızlı ve doğruluk değeri yüksek bir şekilde ulaşma konusu hala gelişmeye açık noktalar bulundursa da, halihazırdaki hareket veri tabanlarını kullanılabilir hale getirmek önemli bir problem haline gelmiştir. Bu problemin içerdiği başlıca konular hareket veri tabanında istenilen hareketlere hızlı bir şekilde erişim, veri tabanlarını sınıflandırma ve temiz hale getirme, hareketin temel özelliklerini daha iyi anlama, hareketleri karşılaştırma olarak sayılabilir.

Hareket yakalama veri tabanlarının düzenlenmesi ve işlenmesi konusu bilgisayar grafiği alanında çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu adımlar, örneğin, hareket düzenleme, hareket sentezleme, farklı uzuv hareketlerini birleştirme ve benzeri birçok hareket veri güdümlü uygulamalar için temel gereklilik olarak kabul edilebilir. Bu problemlere getirilen çözümler kullanılan uygulamaların çıktılarını doğrudan etkileyecektir.

2.2.1 Hareket Veri Tabanlarında Benzer Hareketlere Erişim Yöntemleri

Hareket veri tabanlarında benzer veya istenilen hareketlere erişim işlemi, doğruluk ve süre problemi ile göz önüne alındığında hareket verisi kullanan uygulamaları özellikle ilgilendirmektedir.

Bilgisayar grafiği alanında animasyon ve oyun üretimini daha verimli hale getirmek için veri tabanında halihazırda bulunan hareketleri tekrar kullanmak gerekmektedir. Bunun için, veri tabanındaki hareketler metinsel açıklamaları kullanılarak elle ya da otomatik olarak ifade edilebilir [5, 6, 7]. Hareket veri tabanlarında metin kullanılarak yapılan erişim işlemi çok hızlı gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, metinsel tanımlamalar istenen hareketleri her zaman yeterince ifade edemeyebilir ve arama işlemini yalnızca belirli hareket sınıflarına kısıtlanabilir. Bu sınırlandırmaların üstesinden gelebilmek için, içerik tabanlı arama teknikleri kullanılmaktadır.

Hareket veri tabanlarında erişim işlemi, örnek tabanlı erişim ve kontrol kümesi tabanlı erişim ve kullanıcı merkezli olmak üzere üçe ayrılabilir. Örnek tabanlı erişimde, bir bütün örnek hareket sorgu için sunulur ve tüm benzer hareketlerin veri tabanından çekilmesi amaçlanır. Bu tür sorgulama için, kullanıcı, örneğin istediği bir top sektirme hareketini kullanarak, hareket veri tabanında bulunan bir ya da daha kapsamlı top sektirme hareketlerine erişebilir. Bu tür bir sorgulama hareket veri tabanında bulunan hareket sınıflarını tanımlamak için de kullanılabilir. Diğer yandan, kontrol kümesi tabanlı erişimde, kolay veya etkileşimle elde edilen seyrek yani tam olmayan hareket verisi sorgu olarak kullanılır ve hareket tabanında karşılık gelen tam hareket verilerine erişmek hedeflenir. Burada sorgulama için, kontrol kümesi olarak, örneğin iki kameradan alınan veriler veya basit bir izleme cihazından elde edilen veriler kullanılabilir. Kullanıcı merkezli erişimde, kullanıcı istenen hareket için veri tabanına göz atmalı ve belli kıstaslar belirlemelidir. Bu kıstaslar, örneğin, hareket veri tabanında birkaç anahtar poz seçimi istenilen hareketi temsil edecek şekilde olabilir.

Hareket veri tabanlarında örnek tabanlı erişim için, Kovar ve Gleicher [8], hareket yakalama verilerinin yığınlarında sayısal ve mantıksal benzerlik aramışlardır. Veri tabanındaki tüm hareketler için yerel olarak en uygun zaman hizalanmalarını önceden hesaplarlar. Bunun için, yoğun uzaklık matrisleri üzerinde eşleşme ağları olarak adlandırılan yapıları oluşturmuşlardır. Bu ön işlem, hareket yakalama veri tabanlarının

boyutunun karesi kadar zaman gerektirir. Sadece pozun durağan özelliklerini değil aynı zamanda hareket dizisinin kinematik özelliklerini de pozun özellik kümesinde kodlamak için, önceki ve sonraki pozların normalleştirilmiş bir penceresinde nokta bulutu uzaklık ölçüsü tanımlamışlardır. Hareket veri kümesinin bir parçası sorgulamak için verildiğinde, sistemleri benzer hareket parçalarını, yani aynı hareketin varyasyonlarını temsil eden hareket parçalarını, otomatik olarak bulup çıkarmaktadır. Yöntemleri üç temel fikir içermektedir. İlk temel fikirleri, çok aşmalı arama işlemidir. Mantıksal olarak benzer hareketlerin çok farklı iskelet pozları olabilir. Öte yandan, büyük bir veri kümesinde, bazı mantıksal olarak benzer hareketlerin sayısal olarak benzer olması muhtemeldir. Bu nedenle, buldukları benzer hareketleri yeni sorgular olarak kullanarak daha fazla hareket bulurlar. İkinci temel fikirleri, benzerliği tanımlamak için zaman eşleşmesi kullanmış olmalarıdır. Son temel fikirleri, ön hesaplamayla etkileşim uygulamalarıdır. Etkileşimli hız sağlamak için, her taramayı sıfırdan başlatmazlar. Bunun yerine, tüm olası benzer hareket parçalarının verimli aranabilir bir gösterimi olan bir eşleşme ağını önceden hesaplarlar. Dolayısıyla, teknikleri büyük veri tabanları için çok fazla ön işleme zamanı gerektirmektedir.

Forbes ve Fiume [9], hareket veri tabanlarında örnek tabanlı erişim için, kümeleme ve boyut azalması işlemlerinin, dinamik zaman hizalaması temelli yöntemlerinde süreyi iyileştirdiğini göstermişlerdir.

Chiu ve arkadaşları [10], dinamik zaman hizalamasına dayanan örnek tabanlı hareket verisine erişim yöntemlerinde süre iyileştirmesi yapmak için kendi kendini düzenleyen bir harita kullanarak ve vücut bölümlerini (örneğin, kollar, bacaklar, gövde) ayrı ayrı indeksleyerek kümeleme yapmışlardır.

Müller ve arkadaşları [11, 12, 13], büyük hareket veri tabanlarında içerik temelli erişim için, pozları ikili geometrik özellikleri ile temsil ederek önemli ölçüde hızlı sonuçlar elde etmişlerdir. Pozların ikili geometrik özelliklerini, örneğin sol elin vücudun önünde ya da arkasında olması gibi belirli vücut noktaları arasındaki geometrik ilişkiler ile tanımlamışlardır. Esnek ve verimli erişim ve çok büyük boyutlu hareket yakalama veri tabanlarına göz atma olanağı sağlamak için, geometrik özelliklere uzaysal zamansal değişmezlik ekleyerek, etkili indeksleme yöntemlerini oluştururlar. Bunlara ek olarak, mantıksal olarak benzer hareketlerin zaman hizalanması için yoğun maliyetli klasik dinamik zaman bükme tekniklerini hızlandıran etkili bir ön işleme yöntemi uygulamış-

lardır.

Keogh ve arkadaşları [14], hareket veri tabanlarında örnek tabanlı erişim için uyguladıkları yöntemde genel dinamik zaman bükmenin gerekli olmadığı durumları gözlemlemişlerdir. Ayrıca, düzgün zaman ölçeklemesi kullanarak iyi hizalanabilen hareketler için hızlı bir erişim algoritması sunmuşlardır.

Kruger ve arkadaşları [15], hareket veri tabanlarında örnek tabanlı erişim için, geniş veri tabanları için geçerli olan etkin bir yaklaşım sunmuşlardır. Tekniklerini uygularken karmaşıklığı azaltmaya önem vermişlerdir, dolayısıyla yöntemlerini büyük veri tabanlarına uygulanabilir hale getirmişlerdir. Kd ağacına dayalı komşuluk sorgulamaları kullanarak, genel benzerlik araştırmaları için hızlı bir yöntem geliştirmişlerdir. Kd ağacına dayalı en yakın komşu aramaları için 15 ve 90 arasında değişen boyutlarda özellik kümeleri kullanmışlardır. Böylece insan hareket verilerinde yerel olarak benzer bölgelerin tanımlanmasını büyük veri tabanları için de pratik hale getirmişlerdir. Ayrıca, k en yakın komşu arama yöntemlerini geliştirerek, hem sayısal ve hem de mantıksal benzerlik aramaları problemleri için de verimli bir şekilde kullanmışlardır.

Hareket veri tabanlarında kontrol kümesi tabanlı erişim için, Chai ve Hodgins [16], komşuluk grafiği yapılarını hareket veri tabanı ön işleme için kullanarak hızlı bir en yakın komşu aramasını sağlamışlardır. Geliştirdikleri sistem ile, yalnızca birkaç işaretleyiciden elde ettikleri düşük boyutlu kontrol sinyallerini tam vücut animasyonuna dönüştürmüşlerdir. Bunun için, çalışma zamanında insan hareket yakalama veri tabanından bir dizi yerel model inşa etmişlerdir ve bu modelleri işaretçiler tarafından yakalanamayan hareketin olası bilgilerini doldurmak için kullanmışlardır. Sistemleri, çalışma zamanında bir insan hareket yakalama veri tabanından bir dizi yerel model oluşturarak ve kullanıcıların bilgileri için olası değerleri doldurmak için bu modelleri kullanarak, yalnızca birkaç işaretçiden elde edilen düşük boyutlu kontrol sinyallerini tam vücut animasyonuna dönüştürmüşlerdir. Bunun için işaretleyiciler tarafından yakalanmayan hareketleri çıkartırlar. Mevcut pozunu sentezlemek için önce hareket denetimi veri tabanında mevcut kontrol sinyallerine ve önceki karelerde sentezlenmiş pozlara yakın örnekler ararlar. Çalışma zamanı hesaplama maliyeti, en yakın komşu arama sürecinin verimliliğine bağlı olduğundan, bir veri yapısı, bir komşu grafiği ve kontrol sinyalinin zamansal tutarlılığını kullanarak en yakın komşu aramayı hızlandıran bir algoritma geliştirirler. Bununla birlikte, ön işleme aşamasının hesaplama maliyeti, geniş veri ta-

banlarında çok artmaktadır. Bu nedenle daha büyük hareket veri tabanları için iyi sonuçlar vermez. Mevcut pozu sentezlemek için önce hareket yakalama veri tabanında mevcut kontrol sinyallerine ve önceki animasyon karelerinde sentezlenen pozlara yakın örnekler aramışlardır. Çalışma zamanı hesaplama maliyeti, en yakın komşu arama sürecinin verimliliğine bağlı olduğu için, komşuluk grafiği veri yapısını tanımlayarak ve de kontrol sinyalinin zamansal tutarlılığını kullanarak en yakın komşu sorgusunu hızlandıran bir algoritma sunmuşlardır. Bununla birlikte, uyguladıkları ön işlem, hareket yakalama veri tabanlarının boyutunun karesi kadar zaman gerektirdiği için, geniş veri tabanlarında kullanışlı değildir.

Hsu ve arkadaşları [17], hareket veri tabanlarında kontrol kümesi tabanlı erişim için azaltılmış bir işaretleyici kümesini kullanarak en iyi hareketleri bir araya getiren dinamik bir programlama tekniği sunmuşlardır.

Hareket veri tabanlarında kontrol kümesi tabanlı erişim için, Liu ve arkadaşları [18, 19], seyrek bir işaretleyici kümesinde bir karakter pozuna hızlı bir şekilde erişmek için yerel doğrusal modellerin hiyerarşilerini kullanarak hareket veri tabanını ön işleme tabi tutmuşlardır. Ayrıca, doğru poz erişimi için en fazla bilgiyi sağlayan işaretleyicilerin belirli bir alt kümesini tanımlamaya çalışmışlardır.

Hareket veri tabanlarında kullanıcı merkezli erişim için, Sakamoto ve arkadaşları [20], istenilen hareketlere erişimi sağlamak adına görsel bir arayüz tasarlamışlardır. Bu arayüzde, kullanıcı pozların bir haritasını kullanarak erişmek istediği harekete göre anahtar pozları tanımlamaktadır.

Assa ve arkadaşları [21], kullanıcı merkezli erişim için, hareket veri tabanı gezintisine yardımcı olabilecek şekilde hareketlerin görsel bir özetini sunmuşlardır.

Kullanıcı merkezli erişim için, Ren [22], bir arayüzde hareketleri ve hareket sınıflarını görselleştirmeyi kolaylaştırmak için kullanılabilir gösterimleri araştırmışlardır.

2.2.2 Hareket Veri Tabanlarında Sınıflandırma ve Bölütleme Yöntemleri

Sınıflandırma ve bölütleme, hareket veri tabanlarını otomatik olarak etiketlemek için kullanılan yöntemlerdir.

Fod ve arkadaşları [23], bölütleme alanında, sıfır hız geçişlerine bakarak hareketi çok kısa ilkel kesimlere bölmüşlerdir.

Barbic ve arkadaşları [24], hareketleri koşma, yürüme, zıplama gibi yüksek seviyeli hareketlere bölmek için üç farklı yöntem geliştirmişlerdir. Temel fikir olarak, hareketin bölütleme pozunun, o pozdan önceki ve sonraki pencereler için oluşturulan yerel hareket modellerine uymaması esas alınmıştır. Yerel modellerin inşa edilmesi için olasılıklı Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis, PCA) kullanmışlardır.

Gong ve Medioni [25], hareket yakalama veri tabanını kullanarak insan hareket tanıma ve sınıflandırma yöntemi sunmuşlardır. Geliştirdikleri yöntem, hem tek bir kamera ile kaydedilmiş video dizinlerinde hem de hareket yakalama veri tabanında işe yararmaktadır. İnsan hareket yakalama verilerini ve video dizinindeki hareketleri sınıflandırmak için, düşük boyutlu bir model kullanmışlardır. Tanımladıkları düşük boyutlu modellerde zamansal ve uzaysal hizalamalar tanımlamışlardır. Sonuç olarak elde ettikleri benzerlik skorları ile sınıflandırma işlemini gerçekleştirmişlerdir.

Arıkan ve arkadaşları [26], hareket etiketleme yapmak için, destek vektör makinesi (Support Vector Machine) sınıflandırıcılarını kullanan bir yaklaşım sunmuşlardır ve hareketleri yürüme, zıplama, öne eğilme gibi açıklamalarla belirlemişlerdir.

Müller ve arkadaşları [11, 12, 13], hareket sınıf şablonlarını öğrenmek için ikili geometrik özellikleri kullanmışlardır. Daha sonra, yeni hareketleri uygun sınıflarla etiketlemek için bu hareket sınıflarından yararlanmışlardır.

2.3 Hareket Veri Tabanını Düzenleme ve İşleme Yöntemlerinin Farklı Alanlardaki Uygulamaları

Boyutları gittikçe genişleyen hareket yakalama veri tabanlarından birçok farklı alanda yaygın bir şekilde faydalanılmaktadır. Hareket yakalama verisi kullanan uygulamalar öncelikli olarak veri tabanlarının düzenlenmesine ve işlenmesine ihtiyaç duymaktadır. Spor bilimlerinde, güvenlik sektöründe, tıpta, bilgisayar animasyonunda insan hareket verisi analiz edilir. Bu bölümde, hareket veri tabanında istenilen hareketlere hızlı bir şekilde erişim, veri tabanlarını sınıflandırma ve temiz hale getirme, hareketin temel özelliklerini daha iyi anlama, hareketleri karşılaştırma gibi hareket yakalama veri tabanlarının düzenlenmesi ve işlenmesi için geliştirilen yöntemleri kullanan farklı alanlardaki çalışmalar ele alınmaktadır.

Hareket yakalama verisinin analizini yaygın olarak kullanan ve gerçek dünyadaki senaryolarda uygulamalara sahip alanlardan biri güvenlik sektörüdür. Belirli bir mesafeden belirli özelliklerdeki kişileri tespit etmek bu senaryolardan biridir. Bunun için genellikle yürüyüş modellerinden [27, 28, 29] yararlanılmaktadır. Yürüyüş biçimi tanımlama konusu, özellikle karmaşık ve geniş ortamlardaki kullanımıyla hala gelişime açıktır. Duygu ifadelerini, cinsiyeti, yaşı, hamilelik durumunu, sarhoşluğu tespit etmek için de yürüyüş modellerinden yararlanılmaktadır [30, 31, 32, 33]. Bir diğer senaryo ise şiddet, bir yere giriş veya çıkış olması, bir nesnenin sabit veya hareket halinde olması gibi olayları tespit etmektir [34, 35, 36, 37]. Olay tanımlama, şüpheli olayları belirlemek için yüzlerce video kamera iletiminin gözlemlenmesi gereken durumlarda belirli kamera iletimlerine dikkati çekerek süreci kolaylaştırmaya yardımcı olmaktadır. Ayrıca, kalabalığın anormal davranışı ve anormallik tespitinde faydalanılmaktadır. Örneğin huzur evlerinde, düşmeyi tespit ederek olası yaralanmalara hızlı bir şekilde müdahale edebilmek için de kullanılmaktadır [38, 39, 40].

Hareket yakalama verisinin kullanımı tıp alanında da oldukça yayılmış haldedir. Örneğin, rehabilite edici tedavilerin başarısını ölçmek ve hastanın ameliyat sonrası gelişimini belirlemek, hastalığı teşhis etmek ve tedavi biçimine karar vermek bu alandaki en başta gelen senaryolardır [41, 42, 43, 44].

Hareket yakalama verisi, ortopedik yaralanmalarda fizik tedavi ve rehabilitasyon için tıp alanının yanı sıra spor bilimleri alanında da analiz edilmektedir [41, 45, 46, 47]. Ayrıca, sporcuların hareketlerini kusursuz gerçekleştirebilmeleri için hareketlerinin karşılaştırılmasına ilişkin gerekli bilgileri sağlamakta kullanılmaktadır [48, 49, 50].

Bilgisayar grafiğinde, özellikle yüksek kaliteli bilgisayar oyunlarının, animasyonların ve filmlerin üretimi, hareket yakalama cihazlarının geliştirilmesinde ve hareket analizinde önemli ilerlemeler sağlamıştır. Veri tabanında istenilen hareketlere hızlı bir şekilde erişim ve hareket analizi işlemleri gerçekçi insan hareketleri sentezlemek ve üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [51, 52, 53, 54, 8, 55, 56, 57, 58]. Buna ek olarak, hareket tanıma teknikleri insan bilgisayar etkileşimi alanının genişlemesine olanak sağlamıştır [59, 60, 61, 62]. Böylece kullanıcılar bilgisayarları hareketleriyle daha iyi kontrol edebilmektedir.

2.4 Fizik Tabanlı İnsan Hareketi Modelleme

Fizik tabanlı insan hareket modelleri, insanların çevreyle etkileşim içerisinde hareketlerini modellemede önemli bir yere sahiptir. Bu tür dinamik modeller, insan hareketinin fiziksel olarak gerçekçi animasyonuna ve simülasyonuna izin verdiklerinden, bilgisayar grafiği ve animasyonu ve robotik alanlarında yaygın olarak görülür. Ayrıca benzer modeller, kas ve yer tepkime kuvvetlerine dayanarak insan hareketini anlamaya ve analiz etmeye olanak tanıdığı için biyomekanik alanında da yararlanılmaktadır.

İnsan hareketlerinin animasyonu, kinematik ve fizik tabanlı olarak iki temel başlık altında sınıflandırılabilir. Kinematik insan hareketlerinin animasyonu yöntemlerinde, karakterler, birbirlerine eklemlerle hiyerarşik olarak bağlı vücut parçalarından oluşan bir iskelet ile modellenir. Bu modeller genellikle iskeleti oluşturan tüm eklemlerin her karedeki açıları ve iskeletin merkez ekleminin her karedeki pozisyonu ile ifade edilmektedir. Fizik tabanlı insan hareketlerinin animasyonu yöntemlerinde, karakterlerin bulunduğu fiziksel ortamı algılayarak fiziksel olarak doğru etkileşimi sağlaması için, hem karakter hem de hareket fizik tabanlı olarak tanımlanır. Bu yöntemlerde, karakter, ağırlık ve sürtünme gibi fiziksel özelliklere sahip katı cisimlerden oluşan vücut parçalarının gerçek bir insandaki kadar hareket etme sınırlarına sahip eklemlerle birbirine bağlanması ile modellenir. Hareket ise, eklem torkları, yer çekimi, sürtünme gibi kuvvetlerin karakterin fiziksel modeline uygulanması sonucu elde edilir.

Doğal görünümlü karakter animasyonu oluşturmak için kullanılan en yaygın ve başarılı yöntemlerden biri hareket yakalama teknolojisini kullanmaktır. Hareket yakalama verileri, fiziksel olarak tanımlanmadığı için bulunduğu ortam ile fiziksel olarak etkileşmeye uygun değildir. Diğer bir deyişle, hareket verisi aktarıldığı ortamdan bağımsız olarak davranarak etrafı algılayamaz. Çarpışma, bir nesneye basma, engebeli bir zeminde geçme, ayakların yer ile tam olarak temas etmesi, zemin eğimi ve sürtünmesi, denge gibi fiziksel etkileşimleri doğru biçimde sağlayamaz. Çünkü çevreyle olan etkileşimler ve bağımlılıklar hareket yakalama yöntemlerinin bir parçası değildir. Elbette, bu çeşitlemeleri ve etkileşimleri hesaba katarak çok daha fazla veri toplama ve işleme hedeflenebilir. Çevresel bağımlılıkları hesaba katarak, çok miktarda veri toplamanın alternatifi, fizik tabanlı modelleri kullanmaktır. Fizik tabanlı modellerin kullanımının temel amacı, kinematik modellerle karşılaştırıldığında insan hareketinin kısmen daha

doğal olarak genellenebilir fiziksel ilkeler tarafından yönetilmesidir.

Bilgisayar animasyonunda, hem fizik tabanlı modeller, hem de hareket verisi güdümlü kinematik modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Gerçekçi insan hareketleri üretmede çok başarılı olan kinematik modeller bulunmaktadır [54]. Ayrıca, insan hareket verisini, örneğin gerçekte var olmadığından doğrudan yakalanamayan bir karaktere veya örneğin yer çekimi gibi farklı fiziksel özelliklere sahip yeni bir çevreye adapte eden yöntemler geliştirilmiştir [63]. Belirtilen birkaç ana kareye dayalı karmaşık gerçekçi hareketleri sentezlemek için fizik temelli yöntemler çok popüler olmuştur. Bu amaçla, geniş çapta incelenen iki temel yaklaşım uzay zaman animasyonunun kullanılması ve hareket kontrolcülerinin geliştirilmesidir [64]. Fizik tabanlı modeller, etkileşimli alanlarda karakterin uygulanan dış kuvvetlere uygun bir şekilde tepki vermesi arzu edilen durumlarla özellikle ilgilenir [65, 66, 67].

Robotik alanında, fiziksel simülasyon önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle insansı robotların insan hareketini gerçekleştirmesi veya taklit etmesi temel amaçtır [68]. Bunu yaparken, robot ile çevre arasındaki etkileşimleri modelleyerek robotun belirli bir hareketi veya görevi gerçekleştirmesini sağlamaya çalışılır. Temel olarak insansı robotik, insan hareketini modelleme ve kopyalama ile ilgilenirken [69, 70, 71], mekanik olarak robotun yapısının insanınkinden farklı olması bu görevi zorlaştırmaktadır.

Biyomekanik alanında, fiziksel modellerin karmaşıklığı araştırmanın amaçlarına büyük ölçüde bağlıdır. Bu alanda, karmaşık kas etkileşimlerini modellenmeye çalışan modeller de araştırılmaktadır. Fiziksel simülasyon ve gerçekçiliğin sınırlarını zorlayan modeller arasında vücudun karmaşık kas etkileşimlerini modellemeye çalışan kas iskelet modelleri bulunur [72, 73]. Kas ve iskelet modelleri, uzuvların sinirsel uyarılara istemsiz tepki verme gibi karmaşık davranışları modelleyebilir. Yüzlerce parametre içeren bu tür modelleri kontrol etmek ve çalıştırmak çok zordur.

3 HAREKET VERİLERİNİN BENZERLİĞİ

Hareket veri tabanlarında benzer harekete erişim ve sınıflandırma işlemleri için uygun benzerlik ölçüsü tanımlamak çok önemli bir yere sahiptir. Burada, farklı hareketleri karşılaştırmak için gerekli olan "benzerlik" kavramı geniş kapsamlı bir ifadedir ve tanımlanma biçimine göre çeşitlilik gösterir.

Her şeyden önce, iki farklı hareket verisi aynı eylemin zamansal veya uzaysal olarak farklı türlerini ifade edebilir. Örneğin, basit olarak iki yürüme hareketi karşılaştırılırken bile, yön, hız, stil, vücut boyutu gibi bir çok parametreye bağlı olarak çeşitlilikler ortaya çıkabilir. Bunun yanı sıra, örneğin, bir yürüme ve bir koşma hareketi, yüksek oranda gözlenebilecek zamansal olarak farklılıklarının yanında var olan uzaysal farklılıkları da göz ardı edilerek benzer olarak tanımlanabilir.

Hareketin doğrultusu, hızı veya stili gibi ayırıcı hareket parametrelerinin tümü soyut hareketin farklı yönleridir. Hareket yakalama verileri için benzerlik ölçüleri, genellikle hareketin belli yönlerine odaklanacak ve belli yönlerini de kasıtlı olarak gizleyecek şekilde tasarlanır. Bir yönün gizlendiği durumda, benzerlik ölçüsünün ilgili yönünden *bağımsız* olduğu söylenir. Örneğin hareket benzerlik ölçüsünün ölçekleme bağımsızlığı var ise, hareketlerin vücut boyutlarına bakılmaksızın ele alındığı anlamına gelir.

İnsanlar karmaşık hareketleri algılama, anlama ve karar verme konusunda uzmandırlar. Algılama alanı, psikolojinin önemli bir unsurudur ve insan hareketini gözlemleyerek hangi bilginin elde edilebileceğine dair ipuçları sağlayabilir. İnsan algılama yapısının kapasitesi ne kadar geniş olursa olsun, benzer hareket yakalama verilerine erişim ve sınıflandırma gibi uygulamalarda otomatik, bilgisayar tabanlı yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Hareketlerin İçeriği ve Stili

Hareketlerin karmaşıklığı farklı hareket stilleri ile çeşitlenmektedir. Örneğin, yürüme hareketi; performans olarak aksama, parmak uçlarını kullanma, uygun adım ilerleme gibi farklılıklar gösterebilir, duygusal ifade ve ruh hali göz önüne alındığında neşeli, üzgün, kızgın, utangaç gibi ayrılabilir ve ayrıca hareketi gerçekleştiren kişinin fiziksel ve karakteristik özellikleri ile değişime uğrayabilir. Şimdiye kadar olan çeşitli çalışmalarda genellikle, *hareketin stili* kavramı *hareketin içeriği* kavramı ile karşılaştırılarak ele

alınmıştır. Benzer hareketlere erişim ve hareketlerin sınıflandırılması uygulamalarında, genellikle hareketin stiline bakılmaksızın hareketin içeriğine göre tanımlamalar yapılmaktadır. Bunun yanında, belirlenen bazı stillere göre benzerliği ele alan uygulamalar da vardır.

Bu tezde benzerlik tanımı ele alınırken geliştirilen yöntemde hareketin stili göz ardı edilerek sadece hareketin içeriğinden yararlanılmaktadır.

Hareketlerin Mantıksal ve Sayısal Benzerliği

İki hareket, aynı eylemin çok farklı çeşitlerini gösterse bile benzer kabul edilebilir. Bu kavram *mantıksal benzerlik* olarak tanımlanır [8]. Burada hareketin çeşitlerinin kaynağı hem zamansal hem de uzaysal olabilir. Başka bir deyişle, mantıksal benzerlik, hareketin stili ve yapısı göz ardı edilerek sadece içeriği ile ilgilenir ve sayısal olarak benzer olmayabilir. Örneğin, yürüme hareketleri, hız ve stil olarak farklı olsa da, yürüme hareketidir. Şekil 4'te görülen iki hareketten ilkinde sola ters yuvarlak tekme atılırken, diğerinde sol geriye tekme atılmaktadır. Bu iki hareketin benzerliği, mantıksal olarak ele alındığında ikisi de tekme hareketi olarak düşünülebilir, sayısal olarak ele alındığında ise biri sola ters yuvarlak tekme ve diğeri de sol geriye tekme olarak değerlendirilebilir.

Diğer taraftan, sayısal olarak benzer olan hareketler mutlaka mantıksal olarak benzer olmak zorunda değildir. Örneğin, eğilerek yerden bir nesne alma hareketi ile eğilerek yere bir nesne bırakma hareketi sayısal olarak benzer olsa da mantıksal olarak farklı hareketler olarak ele alınabilir.

Özet olarak, mantıksal olarak benzer olan hareketler, kayda değer şekilde uzaysal ve zamansal olarak değişkenlik gösterebileceğinden sayısal olarak benzer olmak zorunda değildir. Tersine, mantıksal olarak benzer olmayan sayısal olarak benzer hareket örnekleri de vardır.

Bu tezde, uzaysal ve zaman farkları belli oranları aşmayacak şekilde maskelenerek benzer hareket tanımı verilmesi amaçlanmıştır. İki hareketin zamansal olarak farklılığı, örneğin koşu ve yürüme hareketleri arasındaki gibi ise bu hareketler ayırt edilir ve farklı olarak algılanır. Bunu yanında, iki farklı yürüme hareketi hız ve stil olarak farklı olsa da benzer olarak tanımlanır. Ek olarak, iki hareketin uzaysal olarak farklılığı, vücut



Şekil 4: İki farklı tekme hareketi

boyutları ve hareketin başlangıç yönü ve doğrultusu göz ardı edilerek değerlendirilmektedir.

3.1 İnsan Hareket Özellikleri

İnsan hareket verisi karmaşık ve geniş olmasının yanı sıra eklem pozisyonları dizisi, eklem açıları dizisi, silüet dizisi, RGB-D veri akışı gibi birçok farklı formatlarda temin edilebilir. Bu hareketler, hareket verisi erişimi ya da sınıflandırılması, veri organizasyonu gibi amaçlarla kullanılmadan önce bir soyutlama yapılarak farklı biçimlerde ifade edilir. Bu amaçla her bir hareket için *hareket özellikleri* çıkartılarak hareket temsil edilir. Hareketin ifade edilişi ya da hareket özellikleri çekimi kullanıldığı uygulamalar için en önemli adımlardan biridir, çünkü çıkarılan özelliğin hareket verisinin ayırt edici özelliğini temsil etmesi ve verimsiz bilgidan arınmış olması beklenir. Bununla birlikte, hareket verilerinin aşırı derecede soyutlanmış tanımlarının kullanıldığı uygulamalarda işlemleri hızlandırırken bilgi kaybına sebep olabilir.

Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, insan hareket özellikleri, kullanıldığı uy-

gulamannın amacına bağlı olarak hareketin belirli karakteristik yönlerine odaklanır ve ilgili olmayan diğer karakteristik yönlerini tamamen devre dışı bırakır veya geri plana iter.

İnsan hareket veri tabanında benzer hareket verisine erişim ile ilgili uygulamalarda şimdiye kadar yapılan çalışmalarda bir hareket pozu genellikle

- *eklem pozisyonları* [15],
- *eklem açıları* [8, 16],
- *kuaterniyonlar* [74],
- *özdeğerler* [75],
- vücudun belirli parçaları arasındaki ilişkiyi tanımlayan *geometrik (boolean) özellikler* [11],
- bir eklem çizdiği yayın parametrelerini veren *kinetik özellikler* [76]

ile ifade edilmiştir. Hareket özelliklerini, bu durumları da kapsayacak şekilde daha genel olarak, özneye bağlı özellikler, poz temelli özellikler, hareket temelli özellikler başlıkları altında inceleyebiliriz.

Özneye Bağlı Hareket Özellikleri

Özneye bağlı hareket özellikleri, diğer özellik türlerinden farklıdır, çünkü hareketin içerdii eyleme ait herhangi bir bilgi içermeyen ve tamamen hareketi gerçekleştiren kişiye odaklanır. Bu özelliklere boy, belirli kemiklerin uzunlukları, omuz genişliği örnek olarak verilebilir. Özneye bağlı hareket özellikleri genellikle başka türlü özelliklerle birlikte kullanılır [77].

Hareket verisinden insan vücudunun boyutları ile ilgili özellik vektörlerini çekmek, iskelet tabanlı çalışan hareket yakalama sistemlerinde bu bilgiler bulunduğu için kolaydır. İskelet kullanmayan ama vücuttaki belli parçaların yerlerini veren sistemlerde ise bu özellikler birkaç poz hesaba katılarak çıkartılabilir. Görüntü tabanlı hareket yakalama sistemlerinde ise, herhangi bir iskelet modeli olmadığından yalnızca silüet genişliği ya da yüksekliği hareketten çekilebilir. Fakat silüetin boyutları kamera açısından etkilendiği için bu özellikler kullanışsız olacaktır.

Hareket Temelli Hareket Özellikleri

Poz temelli hareket özellikleri, her bir hareket için pozdan bağımsız olarak çıkartılır. Kuaterniyonlar [74], özdeğerler [75], kinetik özellikler [76] hareket temelli özelliklere örnek olarak verilebilir.

Poz Temelli Hareket Özellikleri

Poz temelli hareket özellikleri, hareketin her bir pozuna karşılık bağımsız olarak çıkartılır. Eklem pozisyonları [15], eklem açıları [8, 16] en yaygın olarak kullanılan poz temelli özelliklerdir. Ayrıca vücudun belirli parçaları arasındaki ilişkiyi tanımlayan geometrik özellikler [11] de poz tabanlıdır.

Benzer hareket arama işlemini en çok etkileyen faktörlerden biri hareketin karakteristiğini ve biçimini en iyi tanımlayacak şekilde hareketi ifade etmektir. Bu çalışmada ise farklı olarak fizik tabanlı bileşenler esas alınmaktadır. Hareket yakalama verisini ifade etmek için, aşağıdaki farklı boyutlardaki fizik tabanlı özellikler kullanılmıştır:

- Kütle merkezleri (center of mass)
- Eklem tork büyüklükleri (magnitude of joint torques)
- Eklem torkları (joint torques)

Eklem tork büyüklükleri, eklem torkları ve kütle merkezleri hareketleri poz temelli olarak ifade eder, yani hareketlerin her pozuna karşılık gelecek şekilde tanımlanır.

3.2 Hareket Verisi Özellik Vektörü Uzayı Boyut İndirgeme

Bu bölümde, çeşitli yüksek boyutlu veri güdümlü uygulamalarda kullanılan lineer ve lineer olmayan boyut indirgeme yöntemleri incelenmektedir.

Orijinal çok boyutlu hareket yakalama verisini daha düşük boyuttaki bir ifadeye dönüştürmek hareket yakalama veri tabanının kullanılabilirliği için kullanılan bir adımdır. Bu aşama arama işlemini hızlandırır da, çoğu zaman hareket verisinde büyük bilgi kayıplarına yol açabilmektedir. Ayrıca, geniş heterojen veri tabanlarında daha yüksek

boyutlu özellik vektörlerini kullanmak gerekli olmaktadır. Bu kapsamda, kinematik vektörlerin boyut indirgemesi amacıyla kullanılmış olan

- *geometri tabanlı boyut indirgeme modelleri* (Isometric Mapping (IsoMap), Local Linear Embedding (LLE), Diffusion Maps, Laplacian Eigenmaps),
- *gizli değişkenli boyut indirgeme modelleri* (Principal Components Analysis (PCA), Probabilistic PCA (PPCA), Kernel PCA (KPCA), Gaussian Process Latent Variable Model (GPLVM), the Gaussian Process Dynamical Model (GPDM), Tensor Decomposition),
- *karma yaklaşımlı boyut indirgeme modelleri* LL-GPLVM (Local Linear GPLVM)

incelenmiştir.

Yüksek boyutlu veri tabanı kullanılan problemlerde hesaplama maliyeti yüksektir. Böyle durumlarda, veri dağılımındaki asıl bilgiyi koruyarak, daha etkili öğrenme ve çıkarım sağlayacak şekilde verinin boyutunu azaltmak sıkça başvurulan bir yöntemdir.

Boyut azaltma teknikleri, yüksek boyutlu bir hareket uzayını daha düşük boyutlu bir alt uzaya indirmek için insan hareket verisi güdümlü uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. İnsan hareket yakalama verisi, her bir karesi insan modelinin bir pozunu temsil eden zaman serisi şeklindedir. Bu tür bir veri hem zamansal hem de uzaysal olarak karmaşıktır. Bir yandan, hareket verisinin uzunluğu büyük ölçüde değişiklik gösterebilirken diğer yandan, tüm vücut hareketinin karakter modeli onlarca eklem içerebilir. Yani, hareket verisi kullanan uygulamalar sayısal olarak karmaşıktır. Bu nedenle, yüksek boyutlu hareket yakalama veri tabanlarını analiz etmek zordur.

Bu gibi nedenlerden dolayı, veri tabanlarının daha düşük boyutlu ve daha bilgi verici gösterimleriyle çalışmak gerekli hale gelebilmektedir.

Isometric Mapping (IsoMap) [78], Local Linear Embedding (LLE) [79], Diffusion Maps [80], Laplacian Eigenmaps [81] gibi yöntemleri kapsayan geometri tabanlı modeller, yüksek boyutlu uzaydaki geometrik bağlantıyı düşük boyutlu uzayda da korumayı amaçlamaktadır. IsoMap, geodezik metriği koruyacak şekilde yüksek boyutlu uzaydan düşük boyutlu uzaya bir dönüşüm bulmaktadır. LLE, yerel komşulukları koruyan düşük boyutlu izdüşüm sağlamaktadır. Diffusion maps ise, boyut indirgemeyi temel geometriyi

baştan düzenleyerek yapmaktadır. Bu yöntemler düşük boyutlu uzayı yüksek boyutlu uzaya götüren bir fonksiyon vermemektedirler ve homojen olmayan yüksek boyutlu veri tabanları için uygundur.

Principal Components Analysis (PCA), Probabilistic PCA (PPCA) [82], Kernel PCA (KPCA) [83], Gaussian Process Latent Variable Model (GPLVM) [84, 85], the Gaussian Process Dynamical Model (GPDM) [86] ve Tensor Decomposition gibi yöntemler ise gizli değişkenli modellerdir. PCA, en çok bilinen lineer boyut indirgeme tekniğidir ve veri noktalarının yüksek boyutlu uzayda ölçülen varyanslarını en iyi koruyan düşük boyutlu gömme bulmaktadır. PPCA, PCA yönteminin genişletilmiş halidir. Kernel PCA, PCA yönteminin lineer olmayan bir biçimidir. GPLVM, PPCA yönteminin lineer olmayan genelleştirilmesidir ve yüksek boyutlu verinin ve gizli uzaydaki belirsizliğin olasılıksal gösterimini vermektedir. Veri modellemenin etkinliğini arttırmak için ilgili önsel bilgiler bu modele eklenebilmektedir. Örneğin, insan hareket verisindeki zamansal devamlılığı yakalamak için GPDM gizli uzaya bir dinamik model eklemektedir. GPLVM, GPDM gibi uygulamalar hareket yakalama verisine odaklanarak insan hareketinin temel yapısını yakalamayı hedeflemektedir [86, 87, 88, 89].

Son günlerdeki çalışmalar, geometri tabanlı ve gizli değişkenli modelleri birleştirerek kullanmanın daha anlamlı sonuçlar verebildiğini göstermiştir. Örneğin Local Linear GPLVM (LL-GPLVM) [90], yürüme ve koşma gibi karma hareket modelleri için LLE tabanlı topoloji kısıtımını GPLVM ile birleştirmektedir. Böylece LL-GPVLM, LLE yönteminin geometrik önsezi avantajını alırken GPLVM yönteminin olasılıksal optimizasyon gücünden yararlanmaktadır. Fakat, hesaplama karmaşıklığı yüksek olduğu için yüksek boyutlu veri tabanlarında doğrudan kullanmak için uygun olmamaktadır.

Bu çalışmada boyut indirgeme için öncelikle, fizik tabanlı hareket özellik kümeleri iskeletteki tüm eklemler yerine sadece bilek, ayak bileği, kafa, diz, dirsek, göğüs eklemlerinin bir kümesi için oluşturulmaktadır. Bu işlemden sonra, hareket veri tabanındaki kare sayısı orijinalinin % 25 oranına indirgenerek daha düşük çözünürlüklü veri kümesi kullanılır.

3.3 İnsan Hareket Verilerinin Karşılaştırılması

İnsan hareket verilerinin karşılaştırılması işlemi, hareket veri tabanlarının sınıflandırılması ve hareket veri tabanlarında benzer hareketlere erişim işlemleri için temel adım oluşturur. Bu işlemler, öğrenme yöntemlerine dayalı ve benzerlik temelli olmak üzere ikiye ayrılabilir.

Öğrenme yöntemleri, genellikle hareket veri tabanlarının sınıflandırılması işlemleri için yararlıdır. Fakat bu yöntemler, verilen örnek bir hareket sorgu olarak kullanıldığı durumlar için yani hareket veri tabanlarında benzer hareketlere erişim işlemleri için çoğu zaman uygun değildir. Bunun yanında, benzerlik temelli yöntemlerin, herhangi bir öğrenme safhasına veya önceden tanımlanmış sınıfların herhangi bir listesine ihtiyacı yoktur.

Öğrenme yöntemleri, veri tabanlarını sınıflandırmak için, hedef kategori ile birlikte verilen eğitim verilerinden desenler öğrenir ve bu desenleri kullanarak sorgu hareketlerinin ait olduğu sınıfı bulur. Öğrenme yöntemlerinde, desen öğrenme kısmı en önemli yere sahip olduğundan, eğitim verilerinin kalitesi sonuçları doğrudan etkiler. Sinir Ağları (Neural Networks) [91, 92, 93, 94, 95, 96], Destekçi Vektör Makinesi (Support Vector Machine, SVM) [97, 39, 98, 99, 92], Naive Bayes Sınıflandırma (Naive Bayes Classification) [93, 100, 101, 102, 103, 104, 55], Saklı Markov Modeli (Hidden Markov Model, HMM) [102, 105, 106, 107, 55], Karar Ağacı (Decision Tree) [39, 100], Karar Ormanı (Decision Forest) [108], Rasgele Karar Ormanı (Randomized Decision Forest) [109] gibi öğrenme yöntemleri insan hareket veri tabanında kullanılmaktadır.

Benzerlik temelli yöntemlerin etkinliği ağırlıklı olarak hareket özellik vektör uzayı tanımına ve iki hareket verisinin arasındaki uzaklığı tanımlayan metriğe bağlıdır. Benzerliğin özünü ele almak ve matematiksel fonksiyona dönüştürmek çok farklı bakış açılarıyla algılanabilecek bir problemdir. Bununla birlikte, hareket özellik uzayının uygun bir tanımı ile birlikte uygun bir uzaklık fonksiyonu seçimi ile benzerliğin temeli oluşturulabilir. Uygun bir şekilde seçilmiş hareket özellikleri ve uzaklık fonksiyonu ile tüm hareket veri tabanı üzerinde Metriks İndeksi [110], D İndeksi [111] ve kd ağacı [112] gibi yapıları inşa etmek mümkündür. Böylece arama algoritmaları karşılaştırma yapmak için tüm verilere erişmek zorunda kalmaz. Ayrıca, bu indeksleme yapıları yaklaşık sorgularla daha hızlı işlem yapılmasına olanak vermektedir [113, 114].

İnsan hareket veri tabanında benzerlik sorguları için en yaygın olarak k en yakın komşu sorgusu (K Nearest Neighbor query, KNN query) ve aralık sorgusu (range query) kullanılmaktadır.

K En Yakın Komşu Sorgusu

K en yakın komşu sorgusu, hareket veri tabanında k adet en yakın komşuya erişir, yani sorgu hareketi ile en küçük uzaklığa sahip olan hareket veri tabanındaki k hareketi döndürür. Sorgu hareketi M^a , veri tabanındaki herhangi hareketler M^b ve M^c , hareket verileri arasındaki uzaklık metriği D^M olmak üzere, \mathcal{D} veri tabanı, \mathcal{K} sonuç hareketler kümesi olmak üzere,

$$\begin{aligned} kNN(M^a) &= \{\mathcal{K} \subseteq \mathcal{D} : |\mathcal{K}| = k, \\ \forall M^b \in \mathcal{K} \text{ ve } M^c \in \mathcal{D} - \mathcal{K} \ni D^M(M^a, M^b) \leq D^M(M^a, M^c)\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Aralık Sorgusu

Aralık sorgusu, sorgu hareketinden belirtilen aralıktaki uzaklığa sahip olan hareket veri tabanındaki tüm hareketleri döndürür. Sorgu hareketi M^a , veri tabanındaki herhangi bir hareket M^b , hareket verileri arasındaki uzaklık metriği D^M olmak üzere, \mathcal{D} veri tabanı, aralık r olmak üzere,

$$r(M^a) = \{M^a \in \mathcal{D} : D^M(M^a, M^b) \leq r\} \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bu çalışmada hesaplama maliyeti göz önüne alınarak, kd ağaç veri yapısı tabanlı k en yakın komşuluk arama yöntemi arama işlemini hızlandırmakta kullanılmıştır. Poz kullanılarak kd ağaç veri yapısı Öklid uzaklığı ile inşa edilir.

3.3.1 Zamansal Hizalama

İnsan hareket yakalama verileri, belli bir animasyon karesinde her bir ekleme atanan üç boyutlu koordinat vektörlerinin kümesi olarak tanımlanan pozların zamana bağlı dizisi olarak temsil edilir. Dolayısıyla insan hareket yakalama verileri zamansal olarak farklı uzunluklarda olabileceğinden, verileri karşılaştırmak için uzaklık fonksiyonlarının kullanılması gerektiği durumlarda problemler ortaya çıkmaktadır. Bu sorunun çözümü, zaman hizalama yöntemleri [115] ile sağlanabilir. Bu yöntemler, verilen her iki hareketin tüm pozlarını karşılıklı olarak eşleştirir. Karşılık gelen çiftlerin dizisi *bükme yolu* (*warping path*) olarak adlandırılır.

Şimdi, M^a ve M^b iki hareket verisi olsun. M^a ve M^b hareketlerinin iskeletindeki eklemelerinin kümesi sırasıyla J^a ve J^b , uzunlukları sırasıyla T^a ve T^b , belli pozlarının zamana sırasıyla $t^a \in [1 : T^a]$ ve $t^b \in [1 : T^b]$ olsun. Burada genelliği bozmadan $T^a \leq T^b$ olsun. M^a ve M^b hareketlerinin tüm pozlarını karşılıklı olarak eşleştiren bükme yolu

$$w = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_T] \in \mathbb{R}^2 \times T \quad (3.3)$$

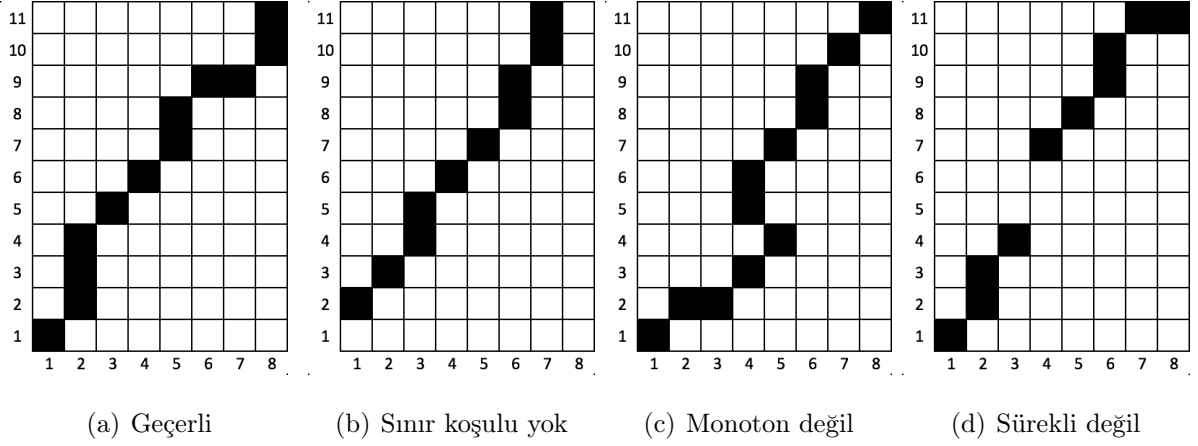
ile gösterilir. Burada, T bükme yolunun uzunluğu, yani hareketlerin poz eşleşmelerinin sayısıdır. Ayrıca, $t \in [1 : T]$ için

$$w_t = \begin{bmatrix} t^a \\ t^b \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

biçimindedir.

İki hareketin tüm pozlarının karşılıklı olarak düzgün bir şekilde eşleştirilmesini sağlayabilecek bükme yolu bir takım özelliklere sahip olmalıdır:

- **Sınır koşulu:** Bükme yolu, ilk olarak iki hareketin ilk pozlarını karşılıklı olarak eşleştirir, son olarak ise iki hareketin son pozlarını karşılıklı olarak eşleştirir. Yani, $w_1 = [1 \ 1]^T$ ve $w_T = [T^a \ T^b]^T$ sağlanır. Aksi halde, bir hareket diğer hareketin yalnızca bir kısmı ile eşleştirilmiş olabilir.
- **Monotonluk koşulu:** Bükme yolunda, her iki hareketin eşleşen pozları kendi içinde zamansal olarak artan olmalıdır. Kısaca, eşleştirme yapılırken, her bir ha-



Şekil 5: Zaman hizalama sınır koşulunu sağlamalı, monoton ve sürekli olmalıdır.

reket kendi içinde zamana göre kendinden önceki bir poza dönmemelidir. Yani, $w_{11} \leq w_{12} \leq \dots \leq w_{1T}$ ve $w_{21} \leq w_{22} \leq \dots \leq w_{2T}$ sağlanır.

- **Süreklilik koşulu:** Bükme yolunda, her iki hareketin eşleşen pozları kendi içinde zamansal olarak sürekli olmalıdır. Diğer bir deyişle, her bir hareket kendi içinde zamansal sıçramalarda bulunmamalıdır. Yani, $w_{1(t+1)} - w_{1t} \in \{0, 1\}$ ve $w_{2(t+1)} - w_{2t} \in \{0, 1\}$ sağlanır.

Şekil 5'te bu koşulları sağlayan ve sağlamayan örnekler görülmektedir. Şekil 5(a)'da görülen eşleştirilme sınır koşulunu sağlamaktadır ve monoton ve sürekli. Şekil 5(b)'de görülen eşleştirilmede bükme yolu $w_1 = [2 \ 1]^T$ ile başlayıp $w_1 = [11 \ 7]^T$ ile bittiğinden bu eşleştirilme sınır koşulu sağlanmamaktadır. Şekil 5(c)'deki eşleştirilmede $w_{25} = 5 \not\leq w_{26} = 4$ olduğundan bu eşleştirilme monotonluk koşulunu sağlamaz. Son olarak, Şekil 5(d)'de görülen eşleştirilmede $w_{15} - w_{14} = 3$ olduğundan bu eşleştirilme sürekli değildir.

M^a hareket verisinin belli bir $t^a \in [1 : T_a]$ zamanındaki pozu p_{t^a} , benzer şekilde M^b hareket verisinin belli bir $t^b \in [1 : T_b]$ zamanındaki pozu p_{t^b} olsun. Bu durumda, pozlar arasındaki uzaklık metriği D^p olmak üzere, hareket verileri arasındaki D^M uzaklık metriği en basit olarak

$$D^M(M^a, M^b) = \sum_{t \in [1:T]} D^p(p_{w_{1t}}^a, p_{w_{2t}}^b) \quad (3.5)$$

şeklinde tanımlanabilir.

İki hareketin tüm pozlarını karşılıklı olarak eşleştiren bükme yolunu bulmak için, düzgün ölçeklendirme (Uniform Scaling, US), dinamik zaman bükme (Dynamic Time Warping, DTW) gibi yöntemler bulunmaktadır.

Düzgün Zaman Bükme

Düzgün zaman bükme, en doğrudan ve basit olarak tasarlanan zaman hizalama yöntemidir [7]. Düzgün zaman bükmede, M^a ve M^b hareketlerinin tüm pozlarını karşılıklı olarak eşleştiren bükme yolu, $t \in [1 : T] = [1 : T_b]$ için

$$w_t = \begin{bmatrix} \lfloor (t-1) \cdot \frac{T^a}{T^b} \rfloor + 1 \\ t \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

denklemleri ile hesaplanır. Dolayısıyla, her iki hareket dizisinin pozları eşit olarak hizalanır.

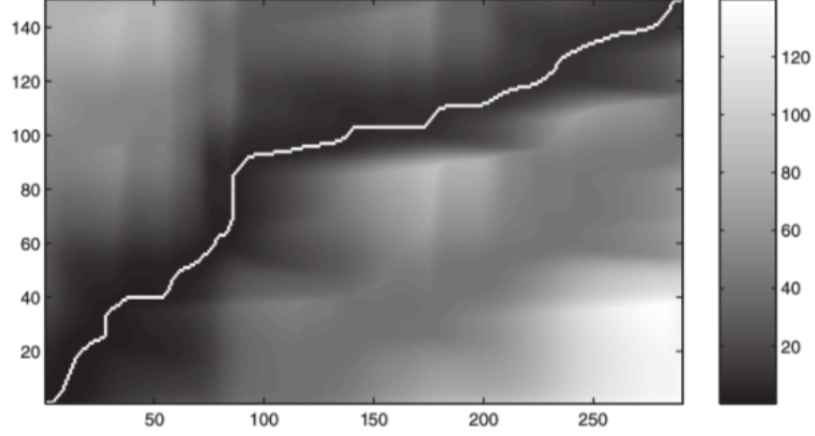
Düzgün Ölçeklendirme

Düzgün ölçeklendirme, zaman hizalamada sınır koşulunun ikinci kısmını sağlamaz, iki hareketin pozlarını eşleştirirken zamansal olarak uzun olan hareketin tüm pozlarını kullanmaz [116].

Dinamik Zaman Bükme

Dinamik zaman bükme, hareket veri tabanlarında benzer harekete erişim ve sınıflandırma işlemleri için en çok yararlanılan zaman hizalama yöntemidir [117]. Bu yöntem, zamansal olarak farklı uzunluklardaki insan hareket yakalama verilerinin tüm pozlarını karşılıklı olarak düzgün bir şekilde eşleştirmek için, eşleştirilen pozların uzaklıklarının toplamının olabilecek en küçük değerde olmasını sağlar.

Dinamik zaman bükme yöntemini kullanarak M^a ve M^b hareketlerini karşılaştırmak için öncelikle $T_a \times T_b$ boyutlarında bir $A = \{a_{t^a t^b}\}$ uzaklık matrisi oluşturulur. Bu uzaklık matrisinin $a_{t^a t^b}$ elemanı p_{t^a} ve p_{t^b} pozları arasındaki $D^p(p_{t^a}, p_{t^b})$ uzaklığıdır. Daha sonra, bükme yolu bu matris üzerinden en uygun benzerliği gösterecek şekilde seçilir. Şekil 6'te bir uzaklık matrisi ve bükme yolu örneği görülmektedir.



Şekil 6: Beyaz çizgi ile belirtilen en uygun bükme yolu ile uzaklık matrisi

İki hareketin uzaklık matrisinden çok fazla bükme yolu bulunabileceğinden kısıtlamalar için sınır koşulu, monotonluk koşulu, süreklilik koşulu uygulanır. Bu kısıtların yanı sıra, uzaklık matrisi üzerinde bükme yolu bulunurken, diyagonal çizgiden uzaklaşmamak amaçlanır. Sadece bu kısıtları sağlayan çok sayıda bükme yolu olabilir. Ancak uzaklık matrisinin üzerinde, uzaklıklar minimum olacak şekilde bükme yolu aranır. Bunun için, dinamik zaman bükme algoritması, uzaklık matrisinin üzerinde dinamik programlama kullanır.

3.3.2 Uzaysal Hizalama

Genellikle insan hareket yakalama veri tabanında istenilen hareketlere erişim, veri tabanlarını sınıflandırma ve temiz hale getirme, hareketin temel özelliklerini daha iyi anlama, hareketleri karşılaştırma gibi uygulamalarda ihtiyaca göre normalleştirme işlemleri gerekli olabilmektedir.

Kök eklemine pozisyonu ve yönelimine göre normalleştirme işlemi kullanılan en temel işlem olarak kullanılır [15, 8, 16]. Bunun için, ilk olarak, kök eklemine başlangıç pozisyonu orijin noktasına gelecek şekilde tüm hareket ötelenir. Daha sonra, kök eklemine başlangıç yönelimi z eksenine paralel ve y eksenine dik olacak şekilde tüm hareket döndürülür.

Bunun yanı sıra, insan hareket yakalama veri tabanını düzenleyen ve işleyen uygulamalarda, hareketi gerçekleştiren kişinin değişkenliğinin etkisini yani vücut ve iskelet ölçüleri çeşitliliğini ortadan kaldırmak gerekir. Bunun için, kanonik korelasyon analizi

(Canonical Component Analysis, CCA) [118], iki yüksek boyutlu özelliklerin arasındaki paylaşılan alt uzayı öğrenerek, videodan hareket tanımda uzaysal eşleştirme yapmak için kullanılmıştır [119]. Ayrıca, hareket veri tabanları kullanılarak ve video dizinlerinde hareket tanıma işlemi için uzaysal farklılıkları ortadan kaldırmakta kullanılmıştır [25].

3.3.3 Uzaklık Fonksiyonu

Benzerlik yöntemlerinde kullanılan bir poz uzaklık fonksiyonu, hareketten çekilen poz özellik vektörlerinin uzayı üzerindeki metrik fonksiyonudur. Örneğin eklem açıları, eklem pozisyonları, eklem hızları gibi çok farklı tiplerde olabilen bu özellikler üzerinde Öklid uzaklığı, Manhattan uzaklığı, Minkovski uzaklığı, Kosinüs uzaklığı gibi farklı metrikler uygulanabilir.

Öklid Uzaklığı (L_2 Uzaklığı)

Öklid uzaklığı en yaygın kullanılan metriktir. Hareketten çekilen poz özellik vektörleri n boyutlu vektör uzayında olmak üzere, iki p ve q poz özellik vektörleri arasındaki Öklid uzaklığı

$$L_2(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2} \quad (3.7)$$

ile hesaplanır. Öklid uzaklığı uygulamalarda genellikle daha düşük hesaplama maliyeti için karesi alınarak uygulanır ama bu durumda üçgen eşitsizliğini ihlal ettiği için metrik olmaz.

Manhattan Uzaklığı (L_1 Uzaklığı)

Manhattan uzaklığı kolay hesaplandığından dolayı tercih edilen metriktir. Hareketten çekilen poz özellik vektörleri n boyutlu vektör uzayında olmak üzere, iki p ve q poz özellik vektörleri arasındaki Manhattan uzaklığı

$$L_1(p, q) = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i| \quad (3.8)$$

ile hesaplanır.

Minkowski Uzaklığı

Minkowski uzaklığı, Öklid ve Manhattan uzaklıklarının genelleştirilmiş hali olan metriktir. Hareketten çekilen poz özellik vektörleri n boyutlu vektör uzayında olmak üzere, iki p ve q poz özellik vektörleri arasındaki Minkowski uzaklığı

$$L_p(p, q) = \left(\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^p \right)^{1/p} \quad (3.9)$$

ile hesaplanır.

Kosinüs Uzaklığı

Kosinüs uzaklığı, genellikle vektörel yön önemli olduğu zaman kullanılan metriktir. Hareketten çekilen poz özellik vektörleri n boyutlu vektör uzayında olmak üzere, iki p ve q poz özellik vektörleri arasındaki kosinüs uzaklığı

$$K(p, q) = \frac{p \cdot q}{\|p\| \cdot \|q\|} \quad (3.10)$$

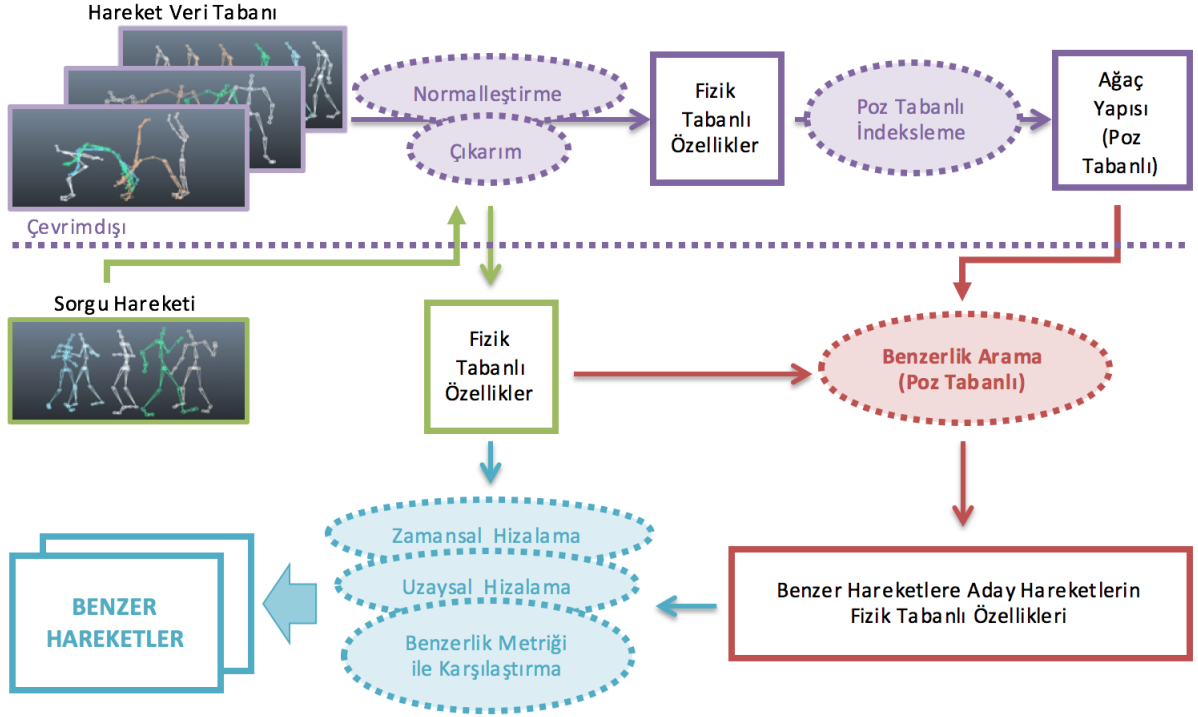
ile hesaplanır.

4 HAREKET VERİ TABANLARINDA BENZER HAREKETLERE ERİŞİM

Hareket yakalama teknolojilerindeki hızlı gelişim çok farklı alanlarda insan hareket verilerinin kullanılmasına yol açmıştır. Örneğin, sporcuların performans özelliklerini karşılaştırmak için spor bilimlerinde, belirli özelliklerdeki kişileri tespit etmek için güvenlik sektöründe, rehabilite edici tedavilerin başarısını belirlemek için tıpta, gerçekçi hareketleri sentezlemek için bilgisayar animasyonunda insan hareket verisi analiz edilir. Özellikle, yüksek kaliteli bilgisayar oyunlarının ve animasyonlarının üretimi, özel aktörlerin yaptığı hareketlerin pahalı ve zaman alıcı bir sentezini gerektirir. Animasyon ve oyun üretimini daha verimli hale getirmek için bir veri tabanındaki kaydedilen hareketleri tekrar kullanmak gerekir. Bunun için içerik tabanlı hareket arama teknikleri, verilen bir sorgu hareket örneğine benzer olan veri tabanındaki hareketlere erişim için kullanılır.

İnsan hareket veri tabanlarında, içerik tabanlı benzer harekete erişim için verimlilik ve doğruluk çok önemli olmaktadır. Bunlar için en önemli iki unsur, hareket verisinden çıkarılan özellikler ve uzaysal ve zamansal boyutlu iki hareketin bu özelliklerini karşılaştıran benzerlik metriğinin seçimidir. Ayrıca verimliliği arttırmak için, hareket verileri indeksleme yapılarıyla önceden işlenmelidir.

Bu tezin ana katkısı, veri tabanında verilen bir sorgu hareket örneğine benzer hareketlere erişim için hareketin fizik özelliklerinden yararlanan bir yöntem önerisidir. Bunun için iki aşamalı bir yöntem sunulmuştur. İlk olarak, hareket veri tabanındaki verilerden eklem torkları ve kütle merkezleri fizik tabanlı özellikler olarak çekilir. Bu fizik tabanlı özellikler hareketin her bir pozunu için tanımlıdır. Hareket veri tabanındaki tüm pozlar kullanılarak kd ağaç yapısı inşa edilir. Sorgulanan hareketten de fizik tabanlı özellikler yani eklem torkları ve kütle merkezleri çekilir. Sorgulanan harekete karşılık gelen tüm pozlar için oluşturulan kd ağacı yapısı kullanılarak k en yakın komşu sorgulaması yapılır. Sorgulanan hareketteki her bir poza karşılık bulunan en yakın pozların ait olduğu hareket parçaları, sorgulanan harekete benzer olabilecek hareket adayları olarak görülür. İkinci olarak, sorgulanan harekete benzer hareket adayları kümesindeki hareketlerle ve sorgulanan hareket arasında zamansal ve uzaysal hizalamalar ayrı ayrı yapılır. Sonuç olarak da aday hareketler ile sorgu hareketi arasında benzerlik metrikleri



Şekil 7: Önerilen yaklaşımın genel akış yapısı

kullanılarak en yakın hareketler elde edilir. Önerilen sistemin genel yaklaşımı Şekil 7'de genel hatlarıyla özetlenmektedir.

Bu bölümde, insan hareket veri tabanlarında fizik tabanlı benzer harekete erişim için önerilen yöntem detaylı olarak incelenmektedir. Sonuçlar, CMU [120], HDM05 [121] ve MIDAS [122] veri tabanlarında test edilmiştir. Ayrıca fizik tabanlı özellik vektörleri tork eklemleri ve kütle merkezleri ile pozisyon açıları ve pozisyon eklemleri karşılaştırılmıştır ve sonuçları detaylandırılmaktadır.

4.1 İnsan Hareket Veri Tabanında Ön İşleme

İnsan hareket yakalama veri tabanındaki tüm hareketlerin kümesi \mathcal{D} ile gösterilsin. Hareket veri tabanındaki tüm hareketler işlenmeden önce, poz tabanlı boyut azaltma işlemine ve kök eklem pozisyonuna ve yönelimine göre normalleştirme işlemine tabi tutulmuştur.

Başlangıç olarak, poz tabanlı boyut azaltma için, \mathcal{D} kümesindeki tüm hareketler, animasyon kare sayıları yani pozları % 25 oranına indirgenir. Yani halihazırdaki hareket yakalama veri tabanından düşük çözünürlüklü ve dolayısıyla daha düşük boyutlu ha-

reket yakalama veri tabanı oluşturulur. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse CMU, HDM05 ve MIDAS veri tabanlarındaki saniyedeki kare sayıları 120 Hz olan hareket verileri saniyedeki kare sayıları 30 Hz olan hareket verilerine dönüştürülerek kullanılmıştır. Yani Hareket yakalama veri tabanlarını daha düşük boyutlu ifade etmek kullanılabilirlik ve hız için önemli olsa da bu işlemin veri kaybına yol açmaması gerekir. Fizik tabanlı özellikler hareketin her bir pozunu göz önüne alınarak tanımlandığı için, veri tabanlarını daha düşük boyutlu hale getirmek gerekli olmuştur. Diğer yandan kullanılan veri tabanları heterojen yapıda olduğu için yüksek boyutlu boyut indirgemenin kaçınılmazıdır.

Daha sonra, kök eklem pozisyonuna ve yönelimine göre normalleştirme için, boyutu azaltılmış \mathcal{D} kümesindeki tüm hareketler, kök eklemının başlangıç pozisyonu orijin noktasına gelecek şekilde ötelenir ve kök eklemının başlangıç yönelimi z eksenine paralel ve y eksenine dik olacak şekilde döndürülür. Bu işlemdeki amaç, başlangıç pozisyonları veya yönelimleri farklı olan benzer hareketlerin algılanmasını sağlamaktır.

4.2 Fizik Tabanlı ve Kinematik Tabanlı Hareket Özellikleri

İnsan hareket yakalama veri tabanında, verilen bir sorgu hareket örneğine benzer hareketlere erişim için en temel adım hareket özelliklerinin ifade edilmiş biçimidir. Hareket özellikleri gereksiz bilgidir arınırken gerekli bilgilerin korunması gerekmektedir. Ayrıca, hareketlerin ayırt edici ve kendine özgü özelliklerini içermeleri gerekmektedir, aksi halde hareketleri sağlıklı bir şekilde kıyaslamak mümkün olmaz.

Bu tezde, hareket yakalama verisini ifade etmek için kullanılan fizik tabanlı özellikler

- \mathcal{C}^3 : Kütle merkezi (center of mass) - (3 boyutlu)
- \mathcal{T}^5 : El ve ayak uçları (bilek ve ayak bileği) ile kafa eklemlerinin tork büyüklükleri (magnitude of joint torques) - (5 boyutlu)
- \mathcal{T}^{10} : El ve ayak uçları (bilek ve ayak bileği) ile kafa eklemlerinin yanı sıra diz, dirsek ve göğüs eklemlerinin tork büyüklükleri (magnitude of joint torques) - (10 boyutlu)
- \mathcal{T}^{15} : El ve ayak uçları (bilek ve ayak bileği) ile kafa eklemlerinin torkları (joint torques) - (15 boyutlu)

- \mathcal{T}^{30} : El ve ayak uçları (bilek ve ayak bileği) ile kafa eklemlerinin yanı sıra diz, dirsek ve göğüs eklemlerinin torkları (joint torques) - (30 boyutlu)

olarak gösterilebilir. 3, 5, 10, 15 ve 30 boyutlu fizik tabanlı özellikleri, geniş hareket yakalama veri tabanlarında hızlı ve etkili benzerlik araması yapmak için Öklid uzaklık ölçümü ile birlikte kd ağacı veri yapısında kullanılabilir.

Ayrıca, fizik tabanlı özellikler ile karşılaştırmak için daha önceki çalışmalarda [15, 8, 16] kullanılan kinematik tabanlı

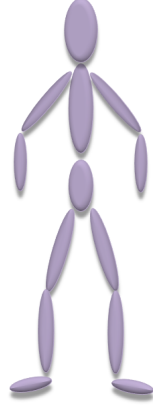
- \mathcal{P}^{15} : El ve ayak uçları (bilek ve ayak bileği) ile kafa eklemlerinin pozisyonları - (15 boyutlu)
- \mathcal{P}^{30} : El ve ayak uçları (bilek ve ayak bileği) ile kafa eklemlerinin yanı sıra diz, dirsek ve göğüs eklemlerinin pozisyonları - (30 boyutlu)
- \mathcal{J}^{15} : El ve ayak uçları (bilek ve ayak bileği) ile kafa eklemlerinin açıları - (15 boyutlu)
- \mathcal{J}^{30} : El ve ayak uçları (bilek ve ayak bileği) ile kafa eklemlerinin yanı sıra diz, dirsek ve göğüs eklemlerinin açıları - (30 boyutlu)

özelliklerinden yararlanılmıştır.

Uzunluğu T olan bir M hareket verisi, belli bir $t \in [1 : T]$ zamanındaki pozunu, hareket özelliğinin boyutu n ile temsil edilir, yani bir poz kütle merkezi için 3 boyutlu, eklem tork büyüklükleri için 5 ya da 10 boyutlu, eklem torkları için 15 ya da 30 boyutludur. Dolayısıyla bir M hareket verisi, T pozdan oluşmak üzere, n boyutlu hareket özelliği ile temsil edilirse $n \cdot T$ boyutlu olur.

4.2.1 Fizik Tabanlı Hareket Özelliklerinin Çıkarımı

Fizik tabanlı özellikleri elde etmek için, Brubaker ve arkadaşlarının sunduğu çalışma [123] ve MATLAB kodları esas alınmıştır.



| Eklem | Serbestlik derecesi |
|---------------|---------------------|
| Ayak Bileği | 2 |
| Diz | 1 |
| Kalça | 3 |
| Leğen - Gövde | 3 |
| Omuz | 3 |
| Dirsek | 1 |

Şekil 8: Eklemli Karakter Modeli

İnsan Karakter Modeli

Kullanılan üç boyutlu eklemli insan vücudu modeli, 12 vücut parçasından oluşur ve Şekil 8'de gösterildiği gibi toplam 26 serbestlik derecesine (degrees of freedom, DOFs) sahiptir. Vücut parçalarını üst vücut parçalarına bağlamak için menteşe (hinge) (serbestlik derecesi 1), eyer (saddle) (serbestlik derecesi 2) ve top ve yuva (ball and socket) (serbestlik derecesi 3) olmak üzere üç çeşit eklem kullanılır. Vücudun kök parçasının pozisyonu ve yönelimi, serbestlik derecesi 6 olan küresel eklem ile genel koordinat sisteminde verilir. Tüm vücut parçaları için uygun uzunlukta çubuklarla temsil edilir. Aktörler ve hareketler için gerekli olan vücut parçaları uzunlukları, kütle ve eylemsizlik parametreleri tüm aktörler ve hareketler için aynı alınmıştır [124].

Eklem Torkları Çıkarımı

Kütle ve ivme ölçüsü verildiğinde, bir parçacığa etki eden net kuvvet Newton'un ikinci hareket yasası ile belirlenebilir. Bu net kuvvet yer çekimi ve temastan doğan kuvvet olmak üzere iki bileşene sahiptir. Temas kuvvetleri ve eklem torklarını hesaplamak için tüm vücut bölümleri hesaba katılmalıdır. Ayrıca, çevreyle olan temas noktaları da göz önüne alınmalıdır.

Şimdi, P adet vücut parçasından oluşan ve serbestlik derecesi N olan eklemli bir insan vücudu göz önüne alınsın. Vücudun kökü, genel koordinatlarda üç adet öteleme, iki adet düzlem içi dönme olmak kaydıyla 6 adet serbestlik derecesine sahiptir. Kalan $(N - 6)$ adet eklem açıları, ait olduğu üst vücut parçasının koordinatlarına göre tanımlanır.

Daha sonra, Lagrange formülü kullanarak, vücudun yapısı $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^N$, N genelleştirilmiş koordinatlarla ve

$$\mathcal{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = \mathcal{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathcal{A}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (4.1)$$

şeklindeki N adet ikinci dereceden diferansiyel denklemlerle ifade edilir. Burada, $\dot{\mathbf{q}}$ ve $\ddot{\mathbf{q}}$, \mathbf{q} 'nun sırasıyla birinci ve ikinci dereceden türevleridir, \mathcal{M} genelleştirilmiş kütle matrisidir, \mathcal{F} , N adet serbestlik derecesine etki eden genelleştirilmiş kuvvetler vektörünü belirtir, \mathcal{A} ise eklem kısıtlamalarını zorlamak için gerekli koşulları içeren kalan şartlardır. Bu denklemler, TMT yöntemi [125, 126] kullanılarak oluşturulabilir. Amaç, N adet genelleştirilmiş ivme değerinden $(N-6)$ adet iç tork τ_i değerini elde etmektir. İlk önce,

$$\mathcal{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = A_i \tau_i + \tau_d(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (4.2)$$

denklemleri ile \mathcal{F} kuvvetleri gösterilir. Burada A_i matrisi eklem torklarını N adet genelleştirilmiş eklem vektörüne götürür. İç torklar dış kuvvetlere bağlı olduğundan, dış kuvvetler göz önüne alınmalıdır. Dış kuvvetler olarak yer çekimi ve yer temas kuvvetleri alınır.

4.3 Fizik Tabanlı Hareket Özellikleri ile Poz Temelli İnsan Hareket Veri Tabanı İndeksleme Yapısı İnşası

Kullanılan fizik tabanlı özellikler poz temelli olduğu için, her bir poza karşılık bir fizik tabanlı özellik elde edilir. Boyutu azaltılmış, kök eklem pozisyonuna ve yönelimine göre normalleştirilmiş \mathcal{D} kümesindeki insan hareket yakalama verilerindeki tüm pozlara karşılık gelen hareket özelliklerinin kümesini \mathcal{F} ile gösterelim. Bu durumda \mathcal{F} hareket veri tabanı özellik kümesi, \mathcal{C}^3 , \mathcal{T}^5 , \mathcal{T}^{10} , \mathcal{T}^{15} , \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{15} , \mathcal{P}^{30} , \mathcal{J}^{15} ve \mathcal{J}^{30} hareket özelliklerinden biri veya birkaçı ile tanımlanmış olabilir. Bu aşamada, \mathcal{F} kümesi üzerinde Öklid metriği kullanarak kd ağaç yapısı inşa edilir.

4.4 Poz Tabanlı Benzerlik Arama Kullanılarak Uzaysal ve Zamansal Hizalanma ile Hareket Tabanlı Benzerlik Aramaya Erişim

Boyutu azaltılmış, kök eklem pozisyonuna ve yönelimine göre normalleştirilmiş \mathcal{D} kümesindeki insan hareket yakalama verilerindeki tüm pozlara karşılık gelen hareket özelliklerinin kümesi \mathcal{F} olmak üzere, uzunluğu T olan M sorgu hareketindeki tüm pozlara karşılık gelen hareket özelliklerinin kümesi Q olsun. Bu durumda, \mathcal{F} kümesi üzerinde Öklid metriği kullanarak inşa edilen kd ağaç yapısında k en yakın komşu araması yapılarak, M sorgu hareketinin her bir $t \in [1 : T]$ pozunu için, yani Q kümesindeki her bir poz temelli özellik için, veri tabanında k adet benzer poza erişilir.

Sorgu hareketinin her bir pozunu için elde edilen k adet benzer pozunu içeren hareketlerin kümesini \mathcal{A} ile gösterelim. \mathcal{A} kümesinde her bir Y hareketi yine özellik vektörü ile temsil edilmektedir. M sorgu hareketinin tamamına karşılık gelen özellik vektörünü temsilini ise X ile gösterelim. Bu durumda, \mathcal{A} hareket kümesi, sorgulanan harekete benzer olabilecek aday hareketlerin özellik vektörlerinden oluşur.

Şimdi, sorgu hareketine karşılık gelen Y hareket özellik vektörünün uzunluğu $T = T^y$ ile, benzer hareketlere aday bir harekete karşılık gelen X hareket özellik vektörünün uzunluğu ise $T = T^x$ ile gösterilsin. Bu durumda, fizik tabanlı hareket özellikleri poz temelli olarak

$$X = X_{1:T^x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{T^x}] \quad (4.3)$$

ve

$$Y = Y_{1:T^y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_{T^y}] \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilebilir.

İlk olarak, bu hareket özellikleri, dinamik zaman bükme algoritması ile zamansal olarak hizalanır. Bunun için, $X_{1:T^x}$ ve $Y_{1:T^y}$ hareket özellikleri arasındaki en uygun

$$w = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_T] \in \mathbb{R}^2 \times T \quad (4.5)$$

bükme yolu

$$D(R_x, R_y) = L_2(X_{1:T^x} R_x^T, Y_{1:T^y} R_y^T) \quad (4.6)$$

uzaklık fonksiyonu minimum olacak şekilde hesaplanır. Burada T bükme yolunun uzunluğu olmak üzere $t \in [1 : T]$ için $w_t = \begin{bmatrix} t^x & t^y \end{bmatrix}^\top$ olur. Ayrıca,

$$R_x = \{r_{t,t^x}^x\} \in \{0, 1\}^T \times T^x \quad (4.7)$$

ve

$$R_y = \{r_{t,t^y}^y\} \in \{0, 1\}^T \times T^y \quad (4.8)$$

ikilli seçme matrisleridir. Bükme yolunda bir $w_t = \begin{bmatrix} t^x & t^y \end{bmatrix}^\top$ çifti, ikilli seçme matrisinde $r_{t,t^x}^x = r_{t,t^y}^y = 1$ olduğunda oluşturulur. Bunun anlamı $t \in [1 : T]$ adımında x_{t^x} ile x_{t^y} karşılıklı eşleşiyor demektir.

En uygun $D(R_x, R_y) = L_2(X_{1:T^x} R_x^T, Y_{1:T^y} R_y^T)$ bükme yolunu bulmak için,

$$A = \{a_{t^a, t^b}\}^{T^x \times T^y} \quad (4.9)$$

uzaklık matris burada a_{t^a, t^b} elemanı x_{t^a} ve y_{t^b} pozları arasındaki $L_2(x_{t^a}, y_{t^b})$ uzaklığıdır.

Sonuç olarak, elde edilen $\bar{X}_{1:T} = X_{1:T^x} R_x^T$ ve $\bar{Y}_{1:T} = Y_{1:T^y} R_y^T$ hareket özellikleri zamansal olarak hizalıdır.

Zamansal hizalamadan sonra uzaysal hizalama uygulamak için, önce $t \in [1 : T]$ zamanındaki bir poz, $j \in J$ eklemine üç boyutlu koordinatları $p_t^j = (p_{t1}^j, p_{t2}^j, p_{t3}^j) \in \mathbb{R}^3$ olmak üzere

$$p_t = \begin{pmatrix} p_t^1 \\ p_t^2 \\ \vdots \\ p_t^{|J|} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3|J| \times 1} \quad (4.10)$$

matrisi ile gösterilen pozu

$$\mathbf{p}_t = \begin{pmatrix} p_{t1}^1 & p_{t1}^2 & \dots & p_{t1}^{|J|} \\ p_{t2}^1 & p_{t2}^2 & \dots & p_{t2}^{|J|} \\ p_{t3}^1 & p_{t3}^2 & \dots & p_{t3}^{|J|} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times |J|} \quad (4.11)$$

şeklinde düzenleyelim. Dolayısıyla karşılık gelen özellikler de bu şekilde ifade edilebilir. Bu durumda, uzaysal hizalama için

$$d_s(\bar{x}_t, \bar{y}_t) = L_2(\bar{x}_t^T v_x^T, \bar{y}_t^T v_y^T) \quad (4.12)$$

uzaklık fonksiyunu minimum olacak şekilde hesaplamak için kanonik korelasyon analizi ile v_x^T ve v_y^T uzaysal hizalama matrisleri bulunur.

Şimdi, zamansal olarak hizalanmış $\bar{X}_{1:T} = X_{1:T^x} R_x^T$ ve $\bar{Y}_{1:T} = Y_{1:T^y} R_y^T$ hareket özellikleri için

$$S_1 = \sum_{i=1}^T d_s(\bar{x}_t, \bar{y}_t) \quad (4.13)$$

ve

$$S_2 = \sum_{i=1}^{T-1} d_s(\bar{x}_t - \bar{x}_{t+1}, \bar{y}_t - \bar{y}_{t+1}) \quad (4.14)$$

olmak üzere, hareketler arasındaki uzaklığı ölçmek için

$$S(X_{1:T^x}, Y_{1:T^y}) = (S_1(X_{1:T^x}, Y_{1:T^y}) + S_2(X_{1:T^x}, Y_{1:T^y}))/2 \quad (4.15)$$

uzaklık fonksiyonu kullanılabilir.

Sorgu hareketi ve her bir pozu için elde edilen k adet benzer pozu içeren hareketlerin kümesini \mathcal{A} kümesindeki tüm hareketler bu uzaklık fonksiyonu ile karşılaştırılarak, sorgu hareketine en yakın k adet hareket bulunmuş olunur.

4.5 Deneysel Çalışmalar ve Sonuçlar

4.5.1 Hareket Yakalama Veri Tabanları

Bu tez çalışmasında, hareket veri tabanlarında benzer poza ya da harekete erişim işlemi için araştırılan fizik tabanlı yöntemin sonuçlarını test etmek için HDM05 [121], CMU [120] ve MIDAS [122] hareket yakalama veri tabanları kullanılmıştır.

HDM05 Hareket Yakalama Veri Tabanı

HDM05 veri tabanındaki hareketler, belirli bir senaryoya gerçekleştirildiğinden genelde birden fazla eylem türünü içermektedir. Bu hareketlerin uygun hareket parçalarına elle kesilerek [6] sunulan biçimleri kullanılmaktadır. Kesilmiş hareket parçaları 2343 adettir ve tamamı 5 aktöre aittir. Hareketlerin asıllarının saniyedeki kare sayıları 120 Hz olmak üzere toplam poz sayısı 746046'dır. Hareketler kare hızları 30 Hz olacak şekilde daha düşük çözünürlüklü veri kümelerine dönüştürülerek kullanıldığından, hareketlerin toplam poz sayısı 187527 olmaktadır. Genel hatları ile düşünüldüğünde, kesilmiş hareket parçaları yürüme, koşma, oturma, zıplama, dönme, tekmeleme, yumruklama, alkış, yanlamasına takla, fırlatma, kol döndürme, egzersiz şeklinde 12 farklı sınıf içermektedir. Örneğin, zıplama hareketi kendi içinde sağ ayakla, sol ayakla, çift ayakla, krikolar gibi alt sınıflar içermektedir. Benzer şekilde, yumruklama hareketi kendi içinde yana veya öne ve sağa ve sola gibi alt sınıflar içermektedir. Bu şekilde düşünüldüğünde, kesilmiş hareket parçaları yaklaşık olarak 130 farklı alt sınıfı içermektedir. Bu sınıflarının büyük bir çoğunluğu 10 ile 50 arasında değişen sayıda hareket içermektedir.

CMU Hareket Yakalama Veri Tabanı

CMU veri tabanındaki hareketlerin bir kısmı tek bir eylem türünü içerirken bir kısmı da birden fazla eylem türünü içermektedir. Birden fazla eylem türünü içeren hareketler kullanılmadan önce uygun hareket parçalarına elle kesilmiştir. Kullanılan tüm hareket parçaları 3 adettir ve tamamı 40 aktöre aittir. Hareketlerin asıllarının saniyedeki kare sayıları 120 Hz olmak üzere toplam poz sayısı 964231'dir. Hareketler kare hızları 30 Hz olacak şekilde daha düşük çözünürlüklü veri kümelerine dönüştürülerek kullanıldığından, hareketlerin toplam poz sayısı 244257 olmaktadır. Genel hatları ile

düşünüldüğünde, kesilmiş hareket parçaları yürüme, koşma, oturma, zıplama, tekmeleme, yumruklama, alkış, yanlamasına takla, tırmanma, basketbol, futbol, el sallama şeklinde 12 farklı sınıf içermektedir. Örneğin, basketbol hareketi kendi içinde ileri veya yana top sürme, şut gibi alt sınıflar içermektedir. Bu şekilde düşünüldüğünde, kesilmiş hareket parçaları yaklaşık olarak 140 farklı alt sınıfı içermektedir.

MIDAS Hareket Yakalama Veri Tabanı

MIDAS veri tabanındaki hareketler, genelde tek bir eylem türünü içermektedir. Bu hareketlerin T pozunu içeren başlangıç kısımları elle kesilip atılarak kullanılmaktadır. Kesilmiş hareket parçaları 209 adettir ve tamamı 15 aktöre aittir. Hareketlerin asıllarının saniyedeki kare sayıları 120 Hz olmak üzere toplam poz sayısı 148538'dir. Hareketler kare hızları 30 Hz olacak şekilde daha düşük çözünürlüklü veri kümelerine dönüştürülerek kullanıldığından, hareketlerin toplam poz sayısı 37211 olmaktadır. Genel hatları ile düşünüldüğünde, kesilmiş hareket parçaları yürüme, capoeira, karate, boks, top yakalama, el sallama, ip atlama şeklinde 7 farklı sınıf içermektedir. Örneğin, karate sınıfı tekmeleme, blok, yumruklama gibi alt sınıflar içermektedir. Bu alt sınıflar da sağa veya sola ters yuvarlak tekmeleme, sağa veya sola geri tekmeleme, yüksek blok, sağa veya sola baskılı blok, sağa veya sola ileri yumruk, sağa veya sola yuvarlak kanca yumruğu gibi birçok farklı alt sınıflar içermektedir. Bu şekilde düşünüldüğünde, hareket parçaları yaklaşık olarak 80 farklı alt sınıfı içermektedir.

4.5.2 Hareket Özelliklerinin Poz Tabanlı Karşılaştırılması ve Poz Erişim Sonuçları

Poz tabanlı erişim işlemini test etmek için ilk olarak tanımlanan hareket özellikleri karşılaştırılmıştır. Tablo 1'de tanımlanan fizik tabanlı \mathcal{C}^3 , \mathcal{T}^5 , \mathcal{T}^{10} , \mathcal{T}^{15} , \mathcal{T}^{30} özelliklerinin yanında \mathcal{P}^{15} , \mathcal{P}^{30} , \mathcal{J}^{15} ve \mathcal{J}^{30} özellikleri için de CMU (964231 poz), HDM05 (746046 poz), MIDAS (148538 poz) hareket veri tabanları üzerinde 16 en yakın komşu ve 64 en yakın komşuyu aramak için gereken ortalama hesaplama süreleri gösterilmiştir. Seçilen özellik vektörleri düşük boyutlu olduğundan hızlı sonuçlar elde edilmiştir. Tüm özellik vektörleri için verimli bir şekilde arama yapmak mümkündür. Sonuçlar tanımlanan özellik vektörlerinin geniş veri tabanları için uygun olduğunu göstermektedir.

| | | \mathcal{C}^3 | \mathcal{T}^5 | \mathcal{T}^{10} | \mathcal{T}^{15} | \mathcal{T}^{30} | \mathcal{P}^{15} | \mathcal{P}^{30} | \mathcal{J}^{15} | \mathcal{J}^{30} |
|-------|------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| CMU | 16NN | 0.13 | 0.15 | 0.25 | 2.12 | 6.24 | 2.23 | 6.36 | 2.08 | 6.18 |
| | 64NN | 0.23 | 0.25 | 0.49 | 4.11 | 23.82 | 4.13 | 24.12 | 4.03 | 23.56 |
| HDM05 | 16NN | 0.11 | 0.13 | 0.22 | 2.08 | 6.18 | 2.18 | 6.35 | 2.06 | 6.15 |
| | 64NN | 0.21 | 0.25 | 0.41 | 3.97 | 23.32 | 4.03 | 24.01 | 3.89 | 23.21 |
| MIDAS | 16NN | 0.08 | 0.09 | 0.18 | 1.33 | 3.76 | 1.48 | 3.78 | 1.28 | 3.74 |
| | 64NN | 0.15 | 0.17 | 0.34 | 2.16 | 16.23 | 2.32 | 16.41 | 2.11 | 16.14 |

Tablo 1: CMU (964231 poz), HDM05 (746046 poz), MIDAS (148538 poz) hareket veri tabanları üzerinde çeşitli hareket özellikleri kullanarak 16 ve 64 en yakın komşuyu aramak için gereken milisaniye cinsinden ortalama hesaplama süreleri

Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de ise, MIDAS (148538 poz) hareket veri tabanındaki harekete ait belli pozlar için 16 en yakın komşu ve 64 en yakın komşuyu aramasında elde edilen pozların belli bir kümeleri gösterilmektedir. Burada \mathcal{T}^{15} fizik tabanlı hareket özellikleri kullanılmıştır. Hareket yakalama veri tabanında benzer poza erişim için fiziksel özellikler karşılaştırıldığında, \mathcal{C}^3 , \mathcal{T}^5 ve \mathcal{T}^{10} fiziksel özelliklerine göre \mathcal{T}^{15} ve \mathcal{T}^{30} fiziksel özelliklerinde daha iyi sonuçlar gözlemlenmiştir. Ayrıca sonuçlar göstermiştir ki, verilen sorgu pozunu için erişilen k en yakın komşu kümesinde, aynı aktöre ait pozlar sorgu pozuna daha yakın iken, farklı aktöre ait pozlar sorgu pozuna daha uzaktır.

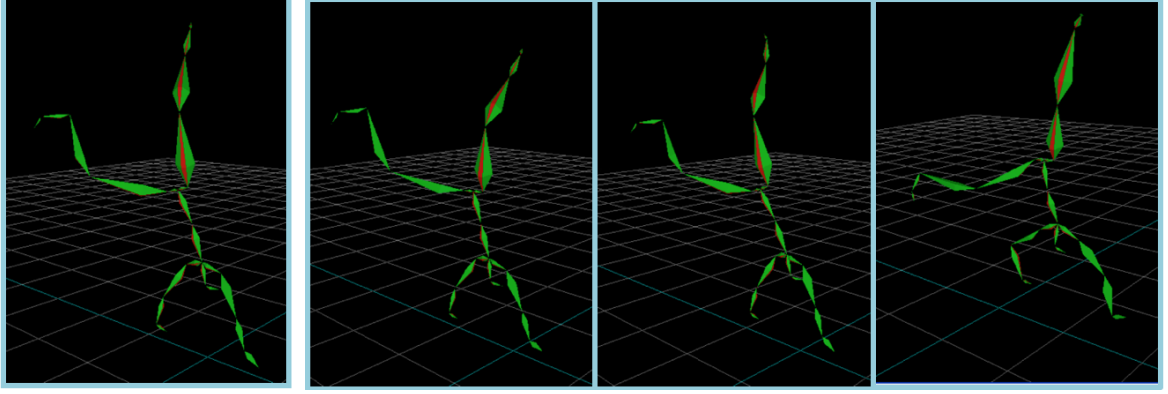
4.5.3 Hareket Özelliklerinin Hareket Tabanlı Karşılaştırılması ve Hareket Erişim Sonuçları

Veri tabanında erişim yönteminin verimliliğini ölçmek için sık kullanılan temel iki yöntem kesinlik ve duyarlılık (precision and recall) işlemidir [127]. Şimdi,

- kesinlik (P): erişilen (retrieved) verilerdeki alakalı (relevant) verilere oranı
- duyarlılık (R): alakalı (relevant) verilerdeki erişilen (retrieved) verilere oranı

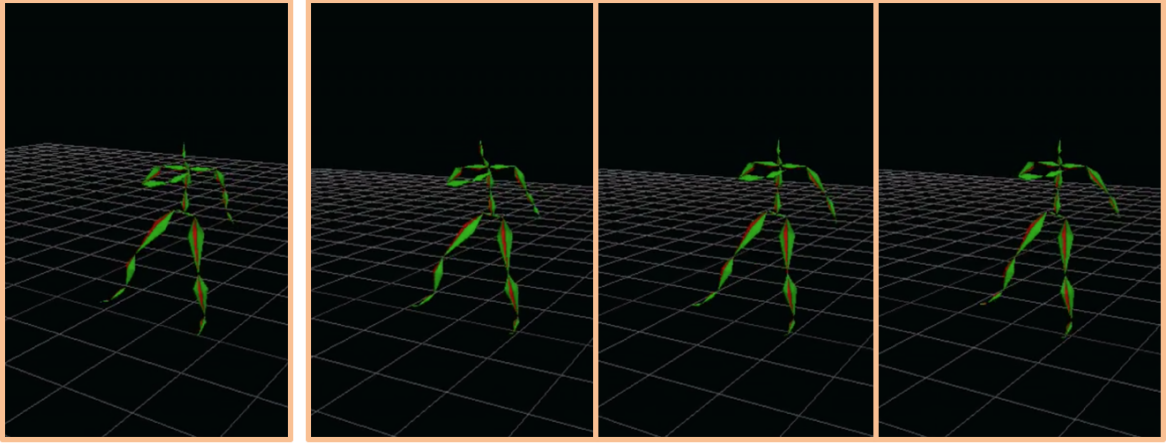
olsun. Ayrıca, bu kavramları daha açık ifade etmek için

ve ayrıca



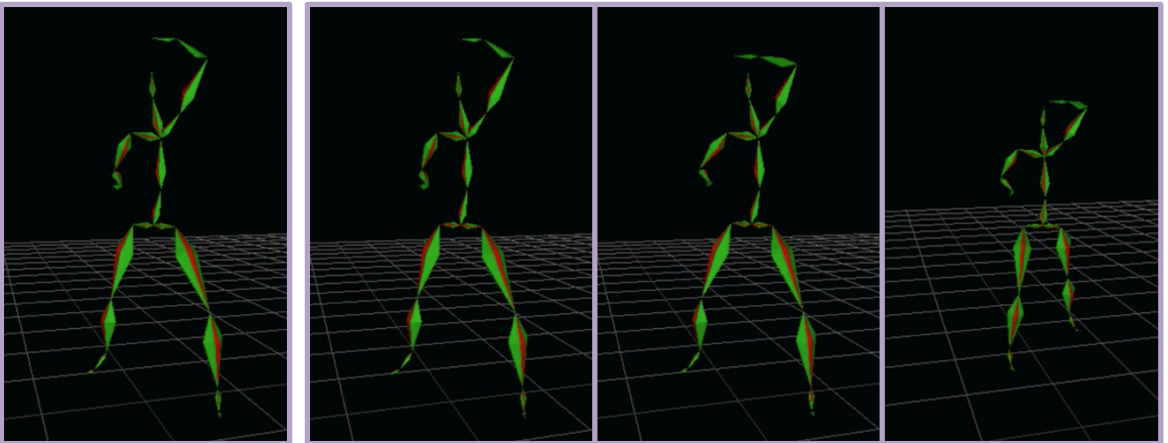
(a) Sorgu Hareketi (b) 64 ek yakın komşu sorgulaması ile erişilen 16., 32. ve 64. hareketler

Şekil 9: MIDAS veri tabanında "Capoeira - Au" hareketine ait poz sorgulaması



(a) Sorgu Hareketi (b) 16 - ek yakın komşu sorgulaması ile erişilen 1., 4. ve 16. hareketler

Şekil 10: MIDAS veri tabanında "Capoeira - Ginga" hareketine ait poz sorgulaması



(a) Sorgu Hareketi (b) 16 - ek yakın komşu sorgulaması ile erişilen 1., 4. ve 64. hareketler

Şekil 11: MIDAS veri tabanında "Karate - Yükselen Blok" hareketine ait poz sorgulaması

| | |
|----|-------------------------------------|
| tp | doğru pozitifler (true positives) |
| fp | yanlış pozitifler (false positives) |
| fn | doğru negatifler (false negatives) |
| tn | yanlış negatifler (true negatives) |

| | İlişkili | İlişkisiz |
|--------------|----------|-----------|
| Erişilen | tp | fp |
| Erişilemeyen | fn | tn |

ifadeleri tanımlanırsa, bu durumda

$$P = \frac{tp}{tp + fp} \quad (4.16)$$

$$R = \frac{tp}{tp + fn} \quad (4.17)$$

şeklinde ifade edilir. Bu işlemler, sırasıyla CMU, HDM05 ve MIDAS hareket veri tabanları için test edilmiştir.

Tablo 2'de, CMU hareket yakalama veri tabanında \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} , \mathcal{J}^{15} hareket özelliklerinin "yürüme", "koşma", "öne eğilme", "yana zıplama", "öne zıplama", "yana takla" alt sınıflarında elde edilen sonuçları gösterilmektedir. Örneğin, \mathcal{T}^{15} hareket özelliği kullanılarak, veri tabanında bulunan 17 adet "yürüme" hareketinden 14'üne erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 16'dır. \mathcal{P}^{15} hareket özelliği kullanılarak ise, 17 adet "yürüme" hareketinden 12'sine erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 16'dır. Diğer alt sınıflarda da benzer sonuçlar elde edildiğinden, \mathcal{T}^{15} fiziksel özelliği ile elde edilen sonuçların daha iyi olduğu açıktır.

Tablo 3'te ise, CMU hareket yakalama veri tabanında \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} , \mathcal{J}^{30} hareket özelliklerinin "yürüme", "koşma", "öne eğilme", "yana zıplama", "öne zıplama", "yana takla" alt sınıflarında elde edilen sonuçları gösterilmektedir. Örneğin, \mathcal{T}^{30} hareket özelliği kullanılarak, veri tabanında bulunan 17 adet "yürüme" hareketinden 16'sına erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 16'dır. \mathcal{P}^{30} hareket özelliği kullanılarak ise, 17 adet "yürüme" hareketinden 14'üne erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 16'dır. Diğer alt sınıflarda da benzer sonuçlar elde edildiğinden, \mathcal{T}^{30} fiziksel özelliği ile elde edilen sonuçların daha iyi olduğu açıktır.

Tablo 4'te, HDM05 hareket yakalama veri tabanında \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} , \mathcal{J}^{15} hareket özelliklerinin "yürüme", "koşma", "yana takla", "yana koşma", "ip atlama", "diz dirseğe", "krikolar atlama", "el sallama", "zıplama" alt sınıflarında elde edilen sonuçları gösterilmektedir. Örneğin, \mathcal{T}^{15} hareket özelliği kullanılarak, veri tabanında bulunan 20 adet "diz dirseğe" hareketinden 18'ine erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 21'dir. \mathcal{J}^{15} hareket özelliği kullanılarak ise, 20 adet "diz dirseğe" hareketinden 13'üne erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 16'dır. Diğer alt sınıflarda da benzer sonuçlar elde edildiğinden, \mathcal{T}^{15} fiziksel özelliği ile elde edilen sonuçların daha iyi olduğu açıktır.

Tablo 5'te ise, HDM05 hareket yakalama veri tabanında \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} , \mathcal{J}^{30} hareket özelliklerinin "yürüme", "koşma", "yana takla", "yana koşma", "ip atlama", "diz dirseğe", "krikolar atlama", "el sallama", "zıplama" alt sınıflarında elde edilen sonuçları gösterilmektedir. Örneğin, \mathcal{T}^{30} hareket özelliği kullanılarak, veri tabanında bulunan 20 adet "diz dirseğe" hareketinden 20'sine erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 21'dir. \mathcal{J}^{30} hareket özelliği kullanılarak ise, 20 adet "diz dirseğe" hareketinden 15'ine erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 16'dır. Diğer alt sınıflarda da benzer sonuçlar elde edildiğinden, \mathcal{T}^{30} fiziksel özelliği ile elde edilen sonuçların daha iyi olduğu açıktır.

Tablo 6'da, MIDAS hareket yakalama veri tabanında \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} , \mathcal{J}^{15} hareket özelliklerinin "yürüme", "top yakalama", "yana takla", "au (capoeira)", "ginga (capoeira)", "yumruk atma", "tekme atma" alt sınıflarında elde edilen sonuçları gösterilmektedir. Örneğin, \mathcal{T}^{15} hareket özelliği kullanılarak, veri tabanında bulunan 8 adet "top yakalama" hareketinden 6'sına erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 9'dur. \mathcal{P}^{15} hareket özelliği kullanılarak ise, 8 adet "top yakalama" hareketinden 5'ine erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 9'dur. Diğer alt sınıflarda da benzer sonuçlar elde edildiğinden, \mathcal{T}^{15} fiziksel özelliği ile elde edilen sonuçların daha iyi olduğu açıktır.

Tablo 7'de ise, MIDAS hareket yakalama veri tabanında \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} , \mathcal{J}^{30} hareket özelliklerinin "yürüme", "top yakalama", "yana takla", "au (capoeira)", "ginga (capoeira)", "yumruk atma", "tekme atma" alt sınıflarında elde edilen sonuçları gösterilmektedir. Örneğin, \mathcal{T}^{30} hareket özelliği kullanılarak, veri tabanında bulunan 8 adet "top yakalama" hareketinden 8'ine erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 9'dur. \mathcal{P}^{30} hareket özelliği kullanılarak ise, 8 adet "top yakalama" hareketinden 7'sine erişilmiştir ve toplam erişilen hareket sayısı 9'dur. Diğer alt sınıflarda da benzer sonuçlar elde edildiğinden, \mathcal{T}^{30} fiziksel özelliği ile elde edilen sonuçların daha iyi olduğu açıktır.

Ayrıca, Tablo 2 ve 3'ün sonuçları, Tablo 4 ve 5'in sonuçları ve Tablo 6 ve 7'nin sonuçları kendi aralarında karşılaştırıldığında yüksek boyutlu hareket özellikleri ile daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

CMU, HDM05, MIDAS hareket yakalama veri tabanlarından 30 adet yürüme, 20 adet koşma, 20 adet yana zıplama, 30 adet el sallama, 30 adet boks, 30 adet öne eğilme (kalça ile), 30 adet öne eğilme (diz ile), 20 adet ileri zıplama, 30 adet oturma, 30 adet yana takla hareketi alınarak her bir \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} , \mathcal{J}^{15} , \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} , \mathcal{J}^{30} hareket özellikleri ile oluşturulan karışıklık matrisleri Şekil 12'de gösterilmektedir. Bu matrisler her bir hareket arasındaki uzaklıkların sınıflara göre ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Burada karışıklık matrisinin diyagonal alanının en küçük değerlere sahip olması, dolayısıyla en koyu renkle gösterilmesi beklenir. Burada, 15 boyutlu \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} , \mathcal{J}^{15} hareket özellikleri arasında en iyi sonucun \mathcal{T}^{15} fiziksel özelliği ile elde edildiği açıkça görülmektedir. Benzer şekilde, 30 boyutlu \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} , \mathcal{J}^{30} hareket özellikleri arasında en iyi sonuç \mathcal{T}^{30} fiziksel özelliği ile elde edilmiştir. Ayrıca, hareket özelliklerinin boyutu arttıkça daha iyi sonuçların elde edildiği görülmektedir.

| | | Yürüme | Koşma | Öne Eğilme |
|----------------------|-----------------|--------------|-------------|------------|
| \mathcal{T}^{15} : | Kesinlik (P): | 14/16 | 13/15 | 6/9 |
| | Duyarlılık (R): | 14/17 | 13/16 | 6/11 |
| \mathcal{P}^{15} : | Kesinlik (P): | 12/16 | 11/17 | 4/10 |
| | Duyarlılık (R): | 12/17 | 11/16 | 4/11 |
| \mathcal{J}^{15} : | Kesinlik (P): | 13/16 | 13/16 | 6/10 |
| | Duyarlılık (R): | 13/17 | 13/16 | 6/11 |
| | | Yana Zıplama | Öne Zıplama | Yana Takla |
| \mathcal{T}^{15} : | Kesinlik (P): | 12/12 | 6/9 | 9/9 |
| | Duyarlılık (R): | 12/13 | 6/10 | 9/9 |
| \mathcal{P}^{15} : | Kesinlik (P): | 11/12 | 5/9 | 8/9 |
| | Duyarlılık (R): | 11/13 | 5/10 | 8/9 |
| \mathcal{J}^{15} : | Kesinlik (P): | 11/12 | 6/9 | 8/9 |
| | Duyarlılık (R): | 11/13 | 6/10 | 8/9 |
| | | Oturma | Boks | El Sallama |
| \mathcal{T}^{15} : | Kesinlik (P): | 5/5 | 8/8 | 4/4 |
| | Duyarlılık (R): | 5/6 | 8/8 | 4/4 |
| \mathcal{P}^{15} : | Kesinlik (P): | 5/5 | 7/9 | 3/5 |
| | Duyarlılık (R): | 5/6 | 7/8 | 3/4 |
| \mathcal{J}^{15} : | Kesinlik (P): | 4/5 | 7/8 | 3/4 |
| | Duyarlılık (R): | 4/6 | 7/8 | 3/4 |

Tablo 2: CMU veri tabanında \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} ve \mathcal{J}^{15} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "koşma", "öne eğilme", "yana zıplama", "öne zıplama", "yana takla" alt sınıfları için gösterimi

| | | Yürüme | Koşma | Öne Eğilme |
|----------------------|-----------------|--------------|-------------|------------|
| \mathcal{T}^{30} : | Kesinlik (P): | 16/16 | 15/15 | 8/9 |
| | Duyarlılık (R): | 16/17 | 15/16 | 8/11 |
| \mathcal{P}^{30} : | Kesinlik (P): | 14/16 | 13/15 | 6/10 |
| | Duyarlılık (R): | 14/17 | 13/16 | 6/11 |
| \mathcal{J}^{30} : | Kesinlik (P): | 13/16 | 13/15 | 6/9 |
| | Duyarlılık (R): | 13/17 | 13/16 | 6/11 |
| | | Yana Zıplama | Öne Zıplama | Yana Takla |
| \mathcal{T}^{30} : | Kesinlik (P): | 13/12 | 8/8 | 9/9 |
| | Duyarlılık (R): | 13/13 | 8/10 | 9/9 |
| \mathcal{P}^{30} : | Kesinlik (P): | 12/12 | 6/14 | 9/11 |
| | Duyarlılık (R): | 12/13 | 6/10 | 9/9 |
| \mathcal{J}^{30} : | Kesinlik (P): | 11/12 | 6/12 | 9/9 |
| | Duyarlılık (R): | 11/13 | 6/10 | 9/9 |
| | | Oturma | Boks | El Sallama |
| \mathcal{T}^{30} : | Kesinlik (P): | 6/6 | 8/8 | 4/4 |
| | Duyarlılık (R): | 6/6 | 8/8 | 4/4 |
| \mathcal{P}^{30} : | Kesinlik (P): | 6/6 | 7/9 | 4/5 |
| | Duyarlılık (R): | 6/6 | 7/8 | 4/4 |
| \mathcal{J}^{30} : | Kesinlik (P): | 5/5 | 7/9 | 3/5 |
| | Duyarlılık (R): | 5/6 | 7/8 | 3/4 |

Tablo 3: CMU veri tabanında \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} ve \mathcal{J}^{30} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "koşma", "öne eğilme", "yana zıplama", "öne zıplama", "yana takla" alt sınıfları için gösterimi

| | | Yürüme | Koşma | Yana Takla |
|----------------------|-----------------|-----------------|------------|-------------|
| \mathcal{T}^{15} : | Kesinlik (P): | 7/10 | 5/7 | 10/11 |
| | Duyarlılık (R): | 7/8 | 5/6 | 10/12 |
| \mathcal{P}^{15} : | Kesinlik (P): | 6/11 | 4/5 | 9/10 |
| | Duyarlılık (R): | 6/8 | 4/6 | 9/12 |
| \mathcal{J}^{15} : | Kesinlik (P): | 5/11 | 4/5 | 8/10 |
| | Duyarlılık (R): | 5/8 | 4/6 | 8/12 |
| | | Yana Koşma | İp Atlama | Diz Dirseğe |
| \mathcal{T}^{15} : | Kesinlik (P): | 4/4 | 8/8 | 18/21 |
| | Duyarlılık (R): | 4/4 | 8/9 | 18/20 |
| \mathcal{P}^{15} : | Kesinlik (P): | 2/3 | 6/5 | 14/16 |
| | Duyarlılık (R): | 2/4 | 6/9 | 14/20 |
| \mathcal{J}^{15} : | Kesinlik (P): | 2/3 | 5/7 | 13/16 |
| | Duyarlılık (R): | 2/4 | 5/9 | 13/20 |
| | | Krikolar Atlama | El Sallama | Zıplama |
| \mathcal{T}^{15} : | Kesinlik (P): | 4/5 | 6/8 | 13/15 |
| | Duyarlılık (R): | 4/5 | 6/7 | 13/16 |
| \mathcal{P}^{15} : | Kesinlik (P): | 3/6 | 3/9 | 12/14 |
| | Duyarlılık (R): | 3/5 | 3/7 | 12/16 |
| \mathcal{J}^{15} : | Kesinlik (P): | 3/6 | 3/9 | 11/15 |
| | Duyarlılık (R): | 3/5 | 3/7 | 11/16 |

Tablo 4: HDM05 veri tabanında \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} ve \mathcal{J}^{15} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "koşma", "yana takla", "yana koşma", "ip atlama", "diz dirseğe", "krikolar atlama", "el sallama", "zıplama" alt sınıfları için gösterimi

| | | Yürüme | Koşma | Yana Takla |
|----------------------|-----------------|-----------------|------------|-------------|
| \mathcal{T}^{30} : | Kesinlik (P): | 8/10 | 5/7 | 11/11 |
| | Duyarlılık (R): | 8/8 | 5/6 | 11/12 |
| \mathcal{P}^{30} : | Kesinlik (P): | 7/11 | 5/7 | 10/11 |
| | Duyarlılık (R): | 7/8 | 5/6 | 10/12 |
| \mathcal{J}^{30} : | Kesinlik (P): | 6/11 | 5/5 | 9/10 |
| | Duyarlılık (R): | 6/8 | 5/6 | 9/12 |
| | | Yana Koşma | İp Atlama | Diz Dirseğe |
| \mathcal{T}^{30} : | Kesinlik (P): | 4/4 | 8/8 | 20/21 |
| | Duyarlılık (R): | 4/4 | 8/9 | 20/20 |
| \mathcal{P}^{30} : | Kesinlik (P): | 3/3 | 8/9 | 15/16 |
| | Duyarlılık (R): | 3/4 | 8/9 | 15/20 |
| \mathcal{J}^{30} : | Kesinlik (P): | 3/3 | 6/7 | 15/16 |
| | Duyarlılık (R): | 3/4 | 6/9 | 15/20 |
| | | Krikolar Atlama | El Sallama | Zıplama |
| \mathcal{T}^{30} : | Kesinlik (P): | 5/5 | 6/8 | 14/15 |
| | Duyarlılık (R): | 5/5 | 6/7 | 14/16 |
| \mathcal{P}^{30} : | Kesinlik (P): | 4/6 | 6/9 | 13/14 |
| | Duyarlılık (R): | 4/5 | 6/7 | 13/16 |
| \mathcal{J}^{30} : | Kesinlik (P): | 3/6 | 5/9 | 12/15 |
| | Duyarlılık (R): | 3/5 | 5/7 | 12/16 |

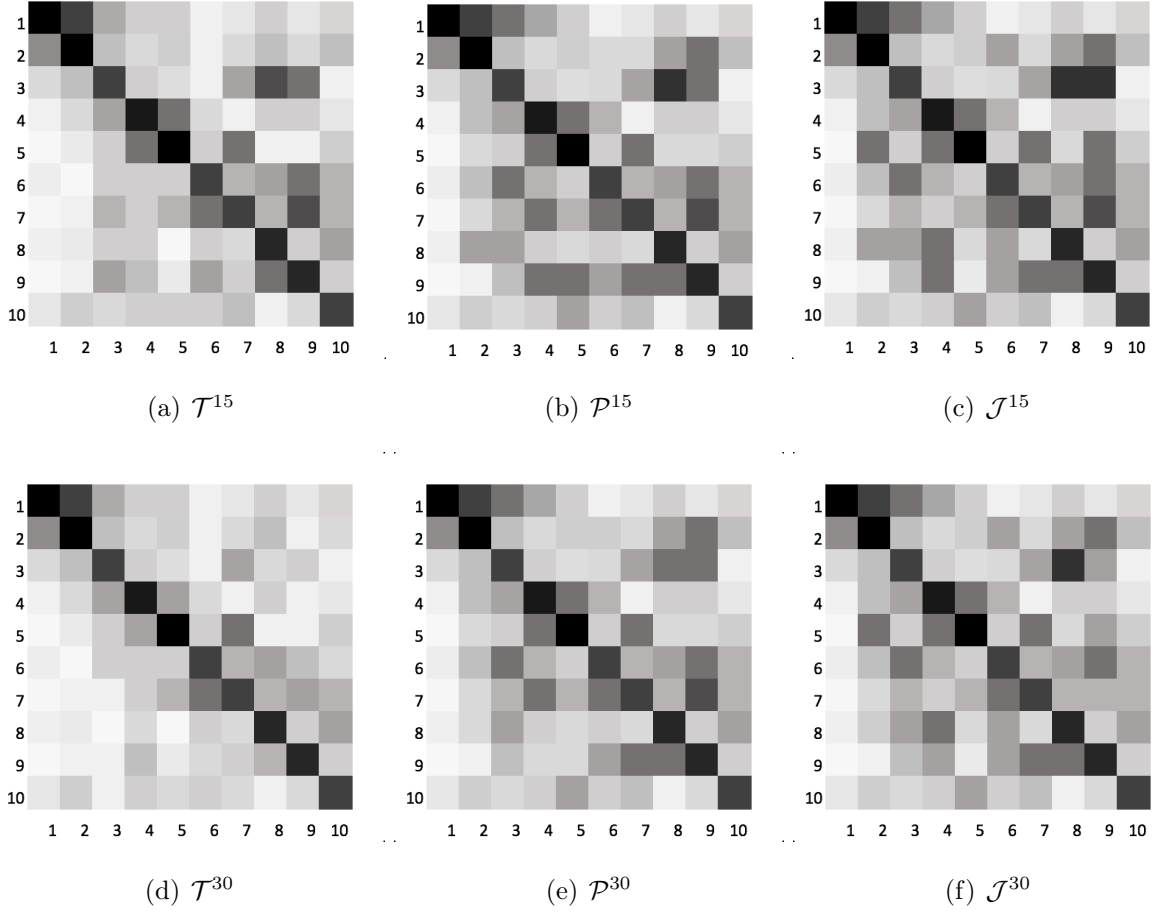
Tablo 5: HDM05 veri tabanında \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} ve \mathcal{J}^{30} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "koşma", "yana takla", "yana koşma", "ip atlama", "diz dirseğe", "krikolar atlama", "el sallama", "zıplama" alt sınıfları için gösterimi

| | | Yürüme | Top Yakalama |
|----------------------|-----------------|---------------|------------------|
| \mathcal{T}^{15} : | Kesinlik (P): | 9/11 | 6/9 |
| | Duyarlılık (R): | 9/10 | 6/8 |
| \mathcal{P}^{15} : | Kesinlik (P): | 8/12 | 5/9 |
| | Duyarlılık (R): | 8/10 | 5/8 |
| \mathcal{J}^{15} : | Kesinlik (P): | 8/11 | 3/6 |
| | Duyarlılık (R): | 8/10 | 3/8 |
| | | Au (Capoeira) | Ginga (Capoeira) |
| \mathcal{T}^{15} : | Kesinlik (P): | 2/3 | 3/5 |
| | Duyarlılık (R): | 2/4 | 3/4 |
| \mathcal{P}^{15} : | Kesinlik (P): | 2/5 | 3/6 |
| | Duyarlılık (R): | 2/4 | 3/4 |
| \mathcal{J}^{15} : | Kesinlik (P): | 2/6 | 2/6 |
| | Duyarlılık (R): | 2/4 | 2/4 |
| | | Yumruk Atma | Tekme Atma |
| \mathcal{T}^{15} : | Kesinlik (P): | 5/6 | 4/5 |
| | Duyarlılık (R): | 5/7 | 4/6 |
| \mathcal{P}^{15} : | Kesinlik (P): | 3/6 | 4/7 |
| | Duyarlılık (R): | 3/7 | 4/6 |
| \mathcal{J}^{15} : | Kesinlik (P): | 3/6 | 3/6 |
| | Duyarlılık (R): | 3/7 | 3/6 |

Tablo 6: MIDAS veri tabanında \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} ve \mathcal{J}^{15} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "top yakalama", "yana takla", "au (capoeira)", "ginga (capoeira)", "yumruk atma", "tekme atma" alt sınıfları için gösterimi

| | | Yürüme | Top Yakalama |
|----------------------|-----------------|---------------|------------------|
| \mathcal{T}^{30} : | Kesinlik (P): | 10/11 | 8/9 |
| | Duyarlılık (R): | 10/10 | 8/8 |
| \mathcal{P}^{30} : | Kesinlik (P): | 9/12 | 7/9 |
| | Duyarlılık (R): | 9/10 | 7/8 |
| \mathcal{J}^{30} : | Kesinlik (P): | 9/11 | 6/6 |
| | Duyarlılık (R): | 9/10 | 6/8 |
| | | Au (Capoeira) | Ginga (Capoeira) |
| \mathcal{T}^{30} : | Kesinlik (P): | 3/3 | 4/4 |
| | Duyarlılık (R): | 3/4 | 4/4 |
| \mathcal{P}^{30} : | Kesinlik (P): | 3/5 | 4/6 |
| | Duyarlılık (R): | 3/4 | 4/4 |
| \mathcal{J}^{30} : | Kesinlik (P): | 3/4 | 3/5 |
| | Duyarlılık (R): | 3/4 | 3/4 |
| | | Yumruk Atma | Tekme Atma |
| \mathcal{T}^{30} : | Kesinlik (P): | 7/6 | 5/5 |
| | Duyarlılık (R): | 7/7 | 5/6 |
| \mathcal{P}^{30} : | Kesinlik (P): | 6/7 | 5/7 |
| | Duyarlılık (R): | 6/7 | 5/6 |
| \mathcal{J}^{30} : | Kesinlik (P): | 5/6 | 3/6 |
| | Duyarlılık (R): | 5/7 | 3/6 |

Tablo 7: MIDAS veri tabanında \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} ve \mathcal{J}^{30} özelliklerinin karşılaştırılmasının "yürüme", "top yakalama", "yana takla", "au (capoeira)", "ginga (capoeira)", "yumruk atma", "tekme atma" alt sınıfları için gösterimi



Şekil 12: CMU, HDM05, MIDAS hareket yakalama veri tabanlarından alınan (1) Yürüme, (2) Koşma, (3) Yana zıplama, (4) El sallama, (5) Boks, (6) Öne eğilme (kalça), (7) Öne eğilme (diz), (8) İleri zıplama, (9) Oturma, (10) Yana takla hareketleri için \mathcal{T}^{15} , \mathcal{P}^{15} , \mathcal{J}^{15} , \mathcal{T}^{30} , \mathcal{P}^{30} , \mathcal{J}^{30} özellikleri kullanılarak oluşturulan karışıklık matrisleri

5 TARTIŞMA VE SONUÇ

Hareket yakalama veri tabanında benzer harekete erişim işlemi yöntemlerinde hareketin ifade edilişi, hareket verisinin boyutunun azaltılması, hareketlerin karşılaştırılması ve arama yapıları sonucun doğruluğunu ve verimliliğini etkileyen en önemli unsurlardır.

Bu tez çalışmasında, hareket yakalama veri tabanlarında benzerlik arama işlemi için hareketin fizik tabanlı bir ifadesi kullanılarak bir yöntem sunulmuştur. Fizik tabanlı hareket özellikleri olarak eklemlerin torqları kullanılmıştır ve bu özellikler mevcut yakalama hareket verisi ile insan vücudunun bilinen kütle ve ivme özelliklerinden hesaplanmıştır. Ayrıca kütle merkezleri de yardımcı fiziksel özellikler olarak tanımlanmıştır. Hareketler düşük boyutlu ve bilgi koruyan fizik özellikleri ile temsil ederek, hareket veri tabanının poz temelli olarak kd ağaç veri yapısı ile düzenlenmesi etkin bir şekilde sağlanmıştır. Veri tabanının oluşturulan kd ağaç veri yapısı poz temelli olduğu için, ilk aşamada veri tabanında oluşturulan yapı benzer poz aramayı gerçekleştirmektedir. Bu yapıyı veri tabanında hareket arama işlemine genişletmek için fizik özellikleri arasında zamansal ve uzaysal hizalanmalar tanımlanmıştır. Daha sonra, sorgu olarak verilen hareketin pozları veri tabanında aranarak, benzer hareketlere aday olabilecek bir hareketler sınıfı elde edilmiştir. Sorgu hareketi, benzer hareket adayları sınıfındaki hareketlerle zamansal ve uzaysal hizalanarak karşılaştırılmış ve sorgu hareketine benzer hareketlere erişilmiştir.

Araştırılan yöntemde hareketlerin düşük boyutlu fiziksel özelliklerinin kullanılması ve veri tabanı düzenlenme aşamasında zamansal ve uzaysal hizama yapılmayıp poz temelli bir yapı inşa edilmesi işlemlerin hızlı bir sonucunun elde edilmesini sağlamıştır. Bunun bir sonucu olarak, daha geniş veri tabanlarında benzer hareket ya da poz arama işlemine yöntemin uygunluğu sağlanmıştır.

Diğer yandan elde edilen sonuçlarda, fizik tabanlı özelliklerle hareket bilgisinin ve ayırt edici özelliğinin korunduğu gözlenmiştir. Fizik tabanlı özelliklerin bir diğer avantajı, özünde yer çekimi ve yer tepki kuvvetleri bilgilerini de dolaylı olarak içermesi olmuştur.

Ayrıca fizik tabanlı özelliklerin verimliliğini ve etkinliğini karşılaştırmak için hareketin belli kinematik özelliklerinden yararlanılmıştır. Bunun için eklem pozisyonları ve eklem açıları hareket yakalama verisinden çekilmiştir.

Sonuçlar CMU, HDM05 ve MIDAS hareket yakalama veri tabanlarında test edilmiştir. Hareket tabanlarındaki birden fazla eylem içeren hareketlerin elle parçalanmış halleri kullanılmıştır. Dolayısıyla kullanılan her bir hareket verisi sadece tek eylemden oluşmaktadır.

Araştırılan harekete erişim yöntemi içerik tabanlı ve sayısal benzerliği göz önünde bulundurmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, örneğin, zıplama hareketi kendi içinde sağ ayakla, sol ayakla, çift ayakla, krikolar gibi alt sınıflar ile farklı hareketler olarak algılanmıştır.

Karşılaştırmaların sonucunda, eklem torklarının daha az sayıda eklem kullanılarak oluşturulan gösterimlerinin eklem pozisyonlarının ve eklem açılarının daha fazla eklem kullanılarak oluşturulan gösterimlerine göre yeterli olduğu gözlemlenmiştir. Bunu bir sonucu olarak, fizik tabanlı özelliklerin daha düşük boyutlu gösteriminin yeterli olacağı söylenebilir.

Sonuç olarak, veri tabanında benzer hareket arama işlemi için sunulan fizik tabanlı yöntem geniş hareket yakalama veri tabanlarında etkili sonuçlar sağlamıştır.

Bunun yanında, bu çalışma için başlangıçta veri tabanındaki hareketler, bir bütün olarak değil de ayrı ayrı hareketler olarak işleme alınmıştır. Yani hareketlerin art arda gelen uzun bir kaydı yerine parçalanmış biçimleri kullanılmıştır. Ayrıca tüm hareketler yürüme, boks, zıplama gibi tek bir eylem içermektedir. Dolayısıyla sunulan benzer hareket arama sistemi, tüm hareketlerin ardışık olarak kaydedilmiş halini bulduran bir veri tabanında kullanmak için uygun değildir. Bunun için hareket veri tabanının kullanıcı tarafından ya da uygun bir bölüntü yöntemiyle tek hareketten oluşan parçalara ayrılması gerekecektir.

Kaynaklar

- [1] Muybridge, E., *The male and female figure in motion: 60 classic photographic sequences*, Courier Corporation, **1984**.
- [2] Muybridge, E., Muybridge, E., Muybridge, E., Photographe, A., Muybridge, E., *The human figure in motion: an electro-photographic investigation of consecutive phases of muscular actions*, Chapman and Hall, **1901**.
- [3] Nogueira, P., Motion capture fundamentals, *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, **2011**.
- [4] Paul, R.P., *Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot manipulators*, Richard Paul, **1981**.
- [5] Lan, R., Sun, H., Zhu, M., Text-like motion representation for human motion retrieval, *International Conference on Intelligent Science and Intelligent Data Engineering*, Springer, **2012**, 72–81.
- [6] Müller, M., Baak, A., Seidel, H.P., Efficient and robust annotation of motion capture data, *Proceedings of the 2009 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, ACM, **2009**, 17–26.
- [7] Park, J.P., Lee, K.H., Lee, J., Finding syntactic structures from human motion data, *Computer Graphics Forum*, Wiley Online Library, **2011**, volume 30, 2183–2193.
- [8] Kovar, L., Gleicher, M., Automated extraction and parameterization of motions in large data sets, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, ACM, **2004**, volume 23, 559–568.
- [9] Forbes, K., Fiume, E., An efficient search algorithm for motion data using weighted pca, *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, ACM, **2005**, 67–76.
- [10] Chiu, C.Y., Chao, S.P., Wu, M.Y., Yang, S.N., Lin, H.C., Content-based retrieval for human motion data, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 15(3), 446–466, **2004**.

- [11] Müller, M., Röder, T., Clausen, M., Efficient content-based retrieval of motion capture data, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, ACM, **2005**, volume 24, 677–685.
- [12] Müller, M., Röder, T., Motion templates for automatic classification and retrieval of motion capture data, *Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, Eurographics Association, **2006**, 137–146.
- [13] Demuth, B., Röder, T., Müller, M., Eberhardt, B., An information retrieval system for motion capture data, *ECIR*, Springer, **2006**, 373–384.
- [14] Keogh, E., Palpanas, T., Zordan, V.B., Gunopulos, D., Cardle, M., Indexing large human-motion databases, *Proceedings of the Thirtieth international conference on Very large data bases-Volume 30*, VLDB Endowment, **2004**, 780–791.
- [15] Krüger, B., Tautges, J., Weber, A., Zinke, A., Fast local and global similarity searches in large motion capture databases, *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, Eurographics Association, **2010**, 1–10.
- [16] Chai, J., Hodgins, J.K., Performance animation from low-dimensional control signals, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, ACM, **2005**, volume 24, 686–696.
- [17] Hsu, E., Gentry, S., Popović, J., Example-based control of human motion, *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, Eurographics Association, **2004**, 69–77.
- [18] Liu, G., Zhang, J., Wang, W., McMillan, L., A system for analyzing and indexing human-motion databases, *Proceedings of the 2005 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, ACM, **2005**, 924–926.
- [19] Liu, G., Zhang, J., Wang, W., McMillan, L., Human motion estimation from a reduced marker set, *Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games*, ACM, **2006**, 35–42.

- [20] Sakamoto, Y., Kuriyama, S., Kaneko, T., Motion map: image-based retrieval and segmentation of motion data, *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, Eurographics Association, **2004**, 259–266.
- [21] Assa, J., Caspi, Y., Cohen-Or, D., Action synopsis: pose selection and illustration, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 24(3), 667–676, **2005**.
- [22] Ren, L., Statistical analysis of natural human motion for animation, *PhD diss*, **2006**.
- [23] Fod, A., Matarić, M.J., Jenkins, O.C., Automated derivation of primitives for movement classification, *Autonomous robots*, 12(1), 39–54, **2002**.
- [24] Barbič, J., Safonova, A., Pan, J.Y., Faloutsos, C., Hodgins, J.K., Pollard, N.S., Segmenting motion capture data into distinct behaviors, *Proceedings of Graphics Interface 2004*, Canadian Human-Computer Communications Society, **2004**, 185–194.
- [25] Gong, D., Medioni, G., Dynamic manifold warping for view invariant action recognition, *Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on*, IEEE, **2011**, 571–578.
- [26] Arikan, O., Forsyth, D.A., O’Brien, J.F., Motion synthesis from annotations, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, ACM, **2003**, volume 22, 402–408.
- [27] JOSIŃSKI¹², H., ŚWITOŃSKI¹², A., Michalczuk, A., WOJCIECHOWSKI¹², K., Motion capture as data source for gait-based human identification, **2012**.
- [28] Sedmidubsky, J., Valcik, J., Balazia, M., Zezula, P., Gait recognition based on normalized walk cycles, *Advances in Visual Computing*, 11–20, **2012**.
- [29] Milovanović, M., Minović, M., Starcević, D., New gait recognition method using kinect stick figure and cbir, *Telecommunications Forum (TELFOR), 2012 20th*, IEEE, **2012**, 1323–1326.
- [30] Hu, M., Wang, Y., Zhang, Z., Wang, Y., Combining spatial and temporal information for gait based gender classification, *Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on*, IEEE, **2010**, 3679–3682.

- [31] Martin-Felez, R., Mollineda, R.A., Sanchez, J.S., Towards a more realistic appearance-based gait representation for gender recognition, *Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on*, IEEE, **2010**, 3810–3813.
- [32] Shukla, R., Shukla, R., Shukla, A., Sharma, S., Tiwari, N., Gender identification in human gait using neural network, *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 4(11), 70, **2012**.
- [33] Zhang, D., Wang, Y., Bhanu, B., Age classification base on gait using hmm, *Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on*, IEEE, **2010**, 3834–3837.
- [34] Courtney, J.D., Motion based event detection system and method, **1999**, uS Patent 5,969,755.
- [35] Nieves, E.B., Suarez, O.D., García, G.B., Sukthankar, R., Violence detection in video using computer vision techniques, *International conference on Computer analysis of images and patterns*, Springer, **2011**, 332–339.
- [36] Deniz, O., Serrano, I., Bueno, G., Kim, T.K., Fast violence detection in video, *Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), 2014 International Conference on*, IEEE, **2014**, volume 2, 478–485.
- [37] Gracia, I.S., Suarez, O.D., Garcia, G.B., Kim, T.K., Fast fight detection, *PloS one*, 10(4), e0120448, **2015**.
- [38] Bian, Z.P., Chau, L.P., Magnenat-Thalmann, N., Fall detection based on skeleton extraction, *Proceedings of the 11th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry*, ACM, **2012**, 91–94.
- [39] Luštrek, M., Kaluža, B., Fall detection and activity recognition with machine learning, *Informatika*, 33(2), **2009**.
- [40] Ni, B., Nguyen, C.D., Moulin, P., Rgb-d-camera based get-up event detection for hospital fall prevention, *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2012 IEEE International Conference on*, IEEE, **2012**, 1405–1408.

- [41] Fern'ndez-Baena, A., Sus'ın, A., Lligadas, X., Biomechanical validation of upper-body and lower-body joint movements of kinect motion capture data for rehabilitation treatments, *Intelligent networking and collaborative systems (INCoS), 2012 4th international conference on*, IEEE, **2012**, 656–661.
- [42] Dobson, F., Morris, M.E., Baker, R., Graham, H.K., Unilateral cerebral palsy: a population-based study of gait and motor function, *Developmental Medicine & Child Neurology*, 53(5), 429–435, **2011**.
- [43] Cedervall, Y., Halvorsen, K., Åberg, A.C., A longitudinal study of gait function and characteristics of gait disturbance in individuals with alzheimer's disease, *Gait & posture*, 39(4), 1022–1027, **2014**.
- [44] Simon, S.R., Quantification of human motion: gait analysis—benefits and limitations to its application to clinical problems, *Journal of biomechanics*, 37(12), 1869–1880, **2004**.
- [45] Chang, C.Y., Lange, B., Zhang, M., Koenig, S., Requejo, P., Somboon, N., Sawchuk, A.A., Rizzo, A.A., Towards pervasive physical rehabilitation using microsoft kinect, *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), 2012 6th International Conference on*, IEEE, **2012**, 159–162.
- [46] Obdr'z'alek, Š., Kurillo, G., Ofli, F., Bajcsy, R., Seto, E., Jimison, H., Pavel, M., Accuracy and robustness of kinect pose estimation in the context of coaching of elderly population, *Engineering in medicine and biology society (EMBC), 2012 annual international conference of the IEEE*, IEEE, **2012**, 1188–1193.
- [47] Zhao, W., Lun, R., Espy, D.D., Reinthal, M.A., Rule based realtime motion assessment for rehabilitation exercises, *Computational Intelligence in Healthcare and e-health (CICARE), 2014 IEEE Symposium on*, IEEE, **2014**, 133–140.
- [48] Brodie, M., Walmsley, A., Page, W., Fusion motion capture: a prototype system using inertial measurement units and gps for the biomechanical analysis of ski racing, *Sports Technology*, 1(1), 17–28, **2008**.
- [49] Supej, M., 3d measurements of alpine skiing with an inertial sensor motion capture suit and gnss rtk system, *Journal of sports sciences*, 28(7), 759–769, **2010**.

- [50] Tamir, M., Oz, G., Real-time objects tracking and motion capture in sports events, **2008**, uS Patent App. 11/909,080.
- [51] Kang, J., Badi, B., Zhao, Y., Wright, D., Human motion modeling and simulation, *6th International Conference on Robotics, Control and Manufacturing Technology (ROCOM 2006)*, **2006**, 62–67.
- [52] Tautges, J., Zinke, A., Krüger, B., Baumann, J., Weber, A., Helten, T., Müller, M., Seidel, H.P., Eberhardt, B., Motion reconstruction using sparse accelerometer data, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 30(3), 18, **2011**.
- [53] Krüger, B., Tautges, J., Müller, M., Weber, A., Multi-mode tensor representation of motion data, *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 5(5), 9, **2008**.
- [54] Kovar, L., Gleicher, M., Pighin, F., Motion graphs, *ACM transactions on graphics (TOG)*, ACM, **2002**, volume 21, 473–482.
- [55] Ren, L., Patrick, A., Efros, A.A., Hodgins, J.K., Rehg, J.M., A data-driven approach to quantifying natural human motion, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, ACM, **2005**, volume 24, 1090–1097.
- [56] Lau, M., Bar-Joseph, Z., Kuffner, J., Modeling spatial and temporal variation in motion data, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, ACM, **2009**, volume 28, 171.
- [57] Reitsma, P.S., Pollard, N.S., Perceptual metrics for character animation: sensitivity to errors in ballistic motion, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 22(3), 537–542, **2003**.
- [58] Reitsma, P.S., Pollard, N.S., Evaluating motion graphs for character animation, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 26(4), 18, **2007**.
- [59] Davis, J.W., Bobick, A.F., The representation and recognition of human movement using temporal templates, *Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference on*, IEEE, **1997**, 928–934.
- [60] Farhadi-Niaki, F., GhasemAghaei, R., Arya, A., Empirical study of a vision-based depth-sensitive human-computer interaction system, *Proceedings of the 10th asia pacific conference on Computer human interaction*, ACM, **2012**, 101–108.

- [61] Raj, M., Creem-Regehr, S.H., Rand, K.M., Stefanucci, J.K., Thompson, W.B., Kinect based 3d object manipulation on a desktop display, *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, ACM, **2012**, 99–102.
- [62] Xu, D., Chen, Y.L., Lin, C., Kong, X., Wu, X., Real-time dynamic gesture recognition system based on depth perception for robot navigation, *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012 IEEE International Conference on*, IEEE, **2012**, 689–694.
- [63] Popović, Z., Witkin, A., Physically based motion transformation, *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., **1999**, 11–20.
- [64] Liu, C.K., Popović, Z., Synthesis of complex dynamic character motion from simple animations, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 21(3), 408–416, **2002**.
- [65] Coros, S., Beaudoin, P., Van de Panne, M., Robust task-based control policies for physics-based characters, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, ACM, **2009**, volume 28, 170.
- [66] Macchietto, A., Zordan, V., Shelton, C.R., Momentum control for balance, *ACM Transactions on graphics (TOG)*, 28(3), 80, **2009**.
- [67] Yin, K., Loken, K., Van de Panne, M., Simbicon: Simple biped locomotion control, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, ACM, **2007**, volume 26, 105.
- [68] Nakaoka, S., Nakazawa, A., Kanehiro, F., Kaneko, K., Morisawa, M., Hirukawa, H., Ikeuchi, K., Learning from observation paradigm: Leg task models for enabling a biped humanoid robot to imitate human dances, *The International Journal of Robotics Research*, 26(8), 829–844, **2007**.
- [69] Kuffner, J., Nishiwaki, K., Kagami, S., Inaba, M., Inoue, H., Motion planning for humanoid robots under obstacle and dynamic balance constraints, *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, IEEE, **2001**, volume 1, 692–698.

- [70] Kulis, D., Lee, D., Ott, C., Nakamura, Y., Incremental learning of full body motion primitives for humanoid robots, *Humanoid Robots, 2008. Humanoids 2008. 8th IEEE-RAS International Conference on*, IEEE, **2008**, 326–332.
- [71] Mataric, M.J., Jenkins, O.C., Fod, A., Zordan, V., Control and imitation in humanoids, *AAAI Fall Symposium on Simulating Human Agents, North Falmouth, MA*, **2000**.
- [72] Lloyd, D.G., Besier, T.F., An emg-driven musculoskeletal model to estimate muscle forces and knee joint moments in vivo, *Journal of biomechanics*, 36(6), 765–776, **2003**.
- [73] Yamane, K., Fujita, Y., Nakamura, Y., Estimation of physically and physiologically valid somatosensory information, *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, IEEE, **2005**, 2624–2630.
- [74] Zhu, M., Sun, H., Deng, Z., Quaternion space sparse decomposition for motion compression and retrieval, *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, Eurographics Association, **2012**, 183–192.
- [75] Wang, P., Lau, R.W., Zhang, M., Wang, J., Song, H., Pan, Z., A real-time database architecture for motion capture data, *Proceedings of the 19th ACM international conference on Multimedia*, ACM, **2011**, 1337–1340.
- [76] Huang, T., Liu, H., Ding, G., Motion retrieval based on kinetic features in large motion database, *Proceedings of the 14th ACM international conference on Multimodal interaction*, ACM, **2012**, 209–216.
- [77] Bobick, A.F., Johnson, A.Y., Gait recognition using static, activity-specific parameters, *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on*, IEEE, **2001**, volume 1, I–I.
- [78] Tenenbaum, J.B., De Silva, V., Langford, J.C., A global geometric framework for nonlinear dimensionality reduction, *science*, 290(5500), 2319–2323, **2000**.

- [79] Roweis, S.T., Saul, L.K., Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding, *science*, 290(5500), 2323–2326, **2000**.
- [80] Coifman, R.R., Lafon, S., Diffusion maps, *Applied and computational harmonic analysis*, 21(1), 5–30, **2006**.
- [81] Belkin, M., Niyogi, P., Laplacian eigenmaps for dimensionality reduction and data representation, *Neural computation*, 15(6), 1373–1396, **2003**.
- [82] Tipping, M.E., Bishop, C.M., Probabilistic principal component analysis, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 61(3), 611–622, **1999**.
- [83] Schölkopf, B., Smola, A., Müller, K.R., Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem, *Neural computation*, 10(5), 1299–1319, **1998**.
- [84] Lawrence, N., Probabilistic non-linear principal component analysis with gaussian process latent variable models, *Journal of machine learning research*, 6(Nov), 1783–1816, **2005**.
- [85] Lawrence, N.D., *Large scale learning with the Gaussian process latent variable model*, Technical report, Technical Report CS-06-05, University of Sheffield, 2006. 3, 4, 7, **2008**.
- [86] Wang, J.M., Fleet, D.J., Hertzmann, A., Gaussian process dynamical models for human motion, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 30(2), 283–298, **2008**.
- [87] Lawrence, N.D., Quiñonero-Candela, J., Local distance preservation in the gp-lvm through back constraints, *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning*, ACM, **2006**, 513–520.
- [88] Grochow, K., Martin, S.L., Hertzmann, A., Popović, Z., Style-based inverse kinematics, *ACM transactions on graphics (TOG)*, ACM, **2004**, volume 23, 522–531.
- [89] Urtasun, R., Fleet, D.J., Fua, P., 3d people tracking with gaussian process dynamical models, *Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on*, IEEE, **2006**, volume 1, 238–245.

- [90] Urtasun, R., Fleet, D.J., Geiger, A., Popović, J., Darrell, T.J., Lawrence, N.D., Topologically-constrained latent variable models, *Proceedings of the 25th international conference on Machine learning*, ACM, **2008**, 1080–1087.
- [91] Sinha, A., Chakravarty, K., Bhowmick, B., Person identification using skeleton information from kinect, *Proc. Intl. Conf. on Advances in Computer-Human Interactions*, **2013**, 101–108.
- [92] Andersson, V., Dutra, R., Araújo, R., Anthropometric and human gait identification using skeleton data from kinect sensor, *Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, ACM, **2014**, 60–61.
- [93] Behara, A., Raghunadh, M., Person recognition system using model based gait-face fusion technique, *International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS 2013)*, **2013**, 65–70.
- [94] Velardo, C., Dugelay, J.L., Real time extraction of body soft biometric from 3d videos, *Proceedings of the 19th ACM international conference on Multimedia*, ACM, **2011**, 781–782.
- [95] Elias, P., Sedmidubsky, J., Zezula, P., Motion images: an effective representation of motion capture data for similarity search, *International Conference on Similarity Search and Applications*, Springer, **2015**, 250–255.
- [96] Ijjina, E.P., Mohan, C.K., Human action recognition based on mocap information using convolution neural networks, *Machine Learning and Applications (ICMLA), 2014 13th International Conference on*, IEEE, **2014**, 159–164.
- [97] Bengalur, M.D., Human activity recognition using body pose features and support vector machine, *Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2013 International Conference on*, IEEE, **2013**, 1970–1975.
- [98] Gong, W., Bagdanov, A.D., Roca, F.X., González, J., Automatic key pose selection for 3d human action recognition., *AMDO*, Springer, **2010**, 290–299.
- [99] Varkey, J.P., Pompili, D., Walls, T.A., Human motion recognition using a wireless sensor-based wearable system, *Personal and Ubiquitous Computing*, 16(7), 897–910, **2012**.

- [100] Preis, J., Kessel, M., Werner, M., Linnhoff-Popien, C., Gait recognition with kinect, *1st international workshop on kinect in pervasive computing*, New Castle, UK, **2012**, P1–P4.
- [101] Tapia, E.M., Intille, S.S., Haskell, W., Larson, K., Wright, J., King, A., Friedman, R., Real-time recognition of physical activities and their intensities using wireless accelerometers and a heart rate monitor, *Wearable Computers, 2007 11th IEEE International Symposium on*, IEEE, **2007**, 37–40.
- [102] Lv, F., Nevatia, R., Recognition and segmentation of 3-d human action using hmm and multi-class adaboost, *Computer Vision–ECCV 2006*, 359–372, **2006**.
- [103] Thi, T.H., Zhang, J., Cheng, L., Wang, L., Satoh, S., Human action recognition and localization in video using structured learning of local space-time features, *Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), 2010 Seventh IEEE International Conference on*, IEEE, **2010**, 204–211.
- [104] Yang, X., Tian, Y., Effective 3d action recognition using eigenjoints, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 25(1), 2–11, **2014**.
- [105] Kale, A., Rajagopalan, A., Cuntoor, N., Kruger, V., Gait-based recognition of humans using continuous hmms, *Automatic Face and Gesture Recognition, 2002. Proceedings. Fifth IEEE International Conference on*, IEEE, **2002**, 336–341.
- [106] Sundaresan, A., RoyChowdhury, A., Chellappa, R., A hidden markov model based framework for recognition of humans from gait sequences, *Image Processing, 2003. ICIP 2003. Proceedings. 2003 International Conference on*, IEEE, **2003**, volume 2, II–93.
- [107] Liang, Y., Lu, W., Liang, W., Wang, Y., Action recognition using local joints structure and histograms of 3d joints, *Computational Intelligence and Security (CIS), 2014 Tenth International Conference on*, IEEE, **2014**, 185–188.
- [108] Miranda, L., Vieira, T., Martinez, D., Lewiner, T., Vieira, A.W., Campos, M.F., Real-time gesture recognition from depth data through key poses learning and decision forests, *Graphics, patterns and images (SIBGRAPI), 2012 25th SIBGRAPI conference on*, IEEE, **2012**, 268–275.

- [109] Kataoka, H., Hashimoto, K., Aoki, Y., Feature integration with random forests for real-time human activity recognition, *Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2014)*, International Society for Optics and Photonics, **2015**, 944506–944506.
- [110] Novak, D., Batko, M., Metric index: An efficient and scalable solution for similarity search, *Similarity Search and Applications, 2009. SISAP'09. Second International Workshop on*, IEEE, **2009**, 65–73.
- [111] Dohnal, V., Gennaro, C., Savino, P., Zezula, P., D-index: Distance searching index for metric data sets, *Multimedia Tools and Applications*, 21(1), 9–33, **2003**.
- [112] Friedman, J.H., Bentley, J.L., Finkel, R.A., An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time, *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 3(3), 209–226, **1977**.
- [113] Patella, M., Ciaccia, P., Approximate similarity search: A multi-faceted problem, *Journal of Discrete Algorithms*, 7(1), 36–48, **2009**.
- [114] Zezula, P., Savino, P., Amato, G., Rabitti, F., Approximate similarity retrieval with m-trees, *The VLDB Journal—The International Journal on Very Large Data Bases*, 7(4), 275–293, **1998**.
- [115] Müller, M., *Information retrieval for music and motion*, volume 2, Springer, **2007**.
- [116] Keogh, E., Efficiently finding arbitrarily scaled patterns in massive time series databases, *European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*, Springer, **2003**, 253–265.
- [117] Berndt, D.J., Clifford, J., Using dynamic time warping to find patterns in time series., *KDD workshop*, Seattle, WA, **1994**, volume 10, 359–370.
- [118] Bach, F.R., Jordan, M.I., Kernel independent component analysis, *Journal of machine learning research*, 3(Jul), 1–48, **2002**.
- [119] Kim, T.K., Cipolla, R., Canonical correlation analysis of video volume tensors for action categorization and detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(8), 1415–1428, **2009**.

- [120] Gross, R., Shi, J., The cmu motion of body (mobo) database, **2001**.
- [121] Müller, M., Röder, T., Clausen, M., Eberhardt, B., Krüger, B., Weber, A., Documentation mocap database hdm05, **2007**.
- [122] Midas human motion database.
- [123] Brubaker, M.A., Sigal, L., Fleet, D.J., Estimating contact dynamics, *Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on*, IEEE, **2009**, 2389–2396.
- [124] De Leva, P., Adjustments to zatsiorsky-seluyanov’s segment inertia parameters, *Journal of biomechanics*, 29(9), 1223–1230, **1996**.
- [125] Wisse, M., Schwab, A.L., et al., A 3d passive dynamic biped with yaw and roll compensation, *Robotica*, 19(3), 275–284, **2001**.
- [126] Witkin, A., Kass, M., Spacetime constraints, *ACM Siggraph Computer Graphics*, 22(4), 159–168, **1988**.
- [127] Christopher, D.M., Prabhakar, R., Hinrich, S., Introduction to information retrieval, *An Introduction To Information Retrieval*, 151, 177, **2008**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Hacer İlhan
Doğum Yeri : İzmit
Medeni Hali : Bekar
E-posta : hacertilhan@hacettepe.edu.tr
Adresi : Hacettepe Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü
06800 Beytepe Çankaya Ankara TÜRKİYE

Eğitim

Lisans : 2002 - 2007, Hacettepe Üniversitesi, Matematik Bölümü
Yüksek Lisans : 2008 - 2011, Hacettepe Üniversitesi, Matematik Bölümü
Doktora : 2011 - 2017, Hacettepe Üniversitesi, Matematik Bölümü

Yabancı Dil

İngilizce

İş Deneyimi

2009 - ..., Hacettepe Üniversitesi, Matematik Bölümü, Araştırma Görevlisi

Deneyim Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler

2012 - 2015, Veri GÜdümlü Karakter Animasyonu, 112E105, TÜBİTAK 1001 Projesi

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MATEMATİK ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 15/01/2018

Tez Başlığı: Hareket Veri Tabanlarında Fizik Tabanlı Benzerlik Arama

Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 81 sayfalık kısmına ilişkin, 15/01/2018 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Hacer İLHAN
Öğrenci No: N10244110
Anabilim Dalı: Matematik
Programı: Matematik
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

15.01.2018

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Haşmet Gürçay