

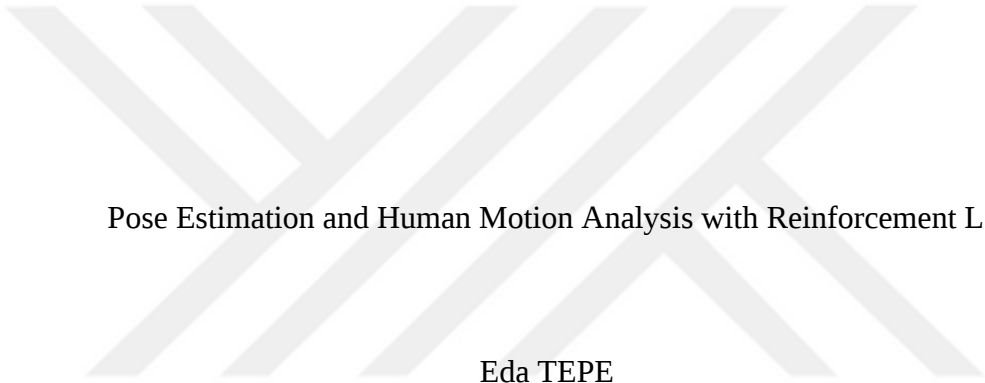
Pekiştirmeli Öğrenme Yöntemi ile Poz Tahmini ve İnsan Hareket Analizi

Eda TEPE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2024



Pose Estimation and Human Motion Analysis with Reinforcement Learning

Eda TEPE

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Computer Engineering

January 2024

Pekiştirmeli Öğrenme Yöntemi ile Poz Tahmini ve İnsan Hareket Analizi

Eda TEPE

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilgisayar Yazılımı Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Kemal ÖZKAN

Ocak 2024

ONAY

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı Yazılım Mühendisliği Bilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Eda TEPE**'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Pekiştirmeli Öğrenme Yöntemi ile Poz Tahmini ve İnsan Hareket Analizi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Kemal ÖZKAN

İkinci Danışman :

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Kemal ÖZKAN

Üye: Prof. Dr. Ahmet YAZICI

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Cahit PERKGÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Kemal ÖZKAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Pekiştirmeli Öğrenme Yöntemi ile Poz Tahmini ve İnsan Hareket Analizi” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 08/01/2024

Eda TEPE

İmza

ÖZET

Ev ortamında fizyoterapi ve sağlık uygulamaları, teknolojinin gelişmesi ve dijital iletişim araçlarının yaygınlaşmasıyla birlikte hayatımıza girmiştir. Bu uygulamalar, daha erişilebilir, etkili ve kişiselleştirilmiş sağlık hizmetleri sunma amacıyla gelişmiş teknolojilerin entegrasyonunu temsil etmektedir. Günümüzde, özellikle pandemik koşullardan sonra, hastaların konforlu bir şekilde kendi evlerinde tedavi görmelerine ve sağlık durumlarını takip etmeye olanak tanımak önemli bir araştırma konusu olmaktadır. Tez çalışması kapsamında, tüm bu ihtiyacı karşılamaya yönelik sağlık ve teknoloji bir araya getirilerek uzaktan fizik tedavi sağlayan kamera tabanlı bir yaklaşım ile kullanıcılara düşük maliyetli ve pratik bir tasarım sunmak hedeflenmektedir. Bu amaçla, kullanıcılara tekrar etmesi istenen hareketlere ait eğitmen videoları gösterilmekte ve en benzer şekilde bu hareketi gerçekleştirmeleri beklenmektedir. Sistemde, çalıştırılacak vücut fonksiyonuna göre seçilmiş 11 hareket bulunmakta ve bu hareketler kullanıcılara gruplandırılmış şekilde sunulmaktadır. Gerçekleştirilen hareketler, Mediapipe ile analiz edilmekte ve eğitmen/kullanıcı benzerliğinde hareket özelinde çıkarılan açılar kullanılmaktadır. Bu açılar, dinamik zaman bükme algoritması ile karşılaştırılmakta dolayısıyla yapılan hareketlerin benzerliği zamandan bağımsız olarak değerlendirilebilmektedir. Sistemdeki çevre tasarımına göre kullanıcıya gösterilecek hareketin kararı pekiştirmeli öğrenme algoritmalarından biri olan politika iterasyonu algoritması ile verilmektedir. Pekiştirmeli öğrenme aracılığıyla kullanıcıya oyunlaştırılmış bir tasarım sunulmakta ve ödül/ceza sistemi ile kullanıcının motivasyonunu yüksek tutmak amaçlanmaktadır. Sistem, kavramsal olarak ortaya konması sebebiyle alanında uzman kişilerin önerileri ile şekillendirmeye uygun ve esnek olarak tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında temel uygulama alanı fizik tedavi olarak belirlense de aynı mantık ile çalışan tüm alanlarda uygulanma imkânı bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fizik Tedavi, Pekiştirmeli Öğrenme, Politika İterasyonu Algoritması, Mediapipe, Hareket Analizi, Dinamik Zaman Bükme

SUMMARY

Physiotherapy and health practices at home have entered our lives with development of technology and the spread of digital communication tools. These applications, represent the integration of advanced technologies with the aim of providing more accessible, effective and personalized healthcare services. Nowadays, especially after pandemic conditions, allowing patients to receive treatment comfortably in their own homes and to monitor their health status is an important research topic. Within the scope of thesis study, it is aimed to offer users a low-cost and practical design with a camera-based approach that provides remote physical therapy by combining health and technology to provide all this need. For this purpose, instructor videos of the movements that users are expected to repeat are shown and they are expected to perform these movements in the most similar way. There are 11 movements selected according to the body function to be exercised in the system, and these movements are presented to the users in grouped formats. The movements performed are analyzed with Mediapipe and the angles extracted specific to the movement are used in the similarity of the instructor/user. These angles are compared with the dynamic time wrapping algorithm, so the similarity of the movements can be evaluated independently of time. The decision of the action to be shown to the user according to the environmental design in the system is made by the policy iteration algorithms, which is one of the reinforcement learning algorithms. A gamified design is presented to the user through reinforcement learning, and the aim is to keep the users's motivation high with the reward/punishment system. The system has been developed to be flexible and suitable for shaping with the suggestion of experts in the field. Although the main application area within the scope of the study is determined as physical therapy, it is possible to apply it in all areas that work with the same logic.

Keywords: Physical Therapy, Reinforcement Learning, Policy Iteration Algorithm, Mediapipe, Motion Analysis, Dynamic Time Wrapping

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez sürecimde desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, sabırla yol gösteren ve her daim yanımda olan değerli danışmanım Prof. Dr. Kemal Özkan’a, lisans ve yüksek lisans dönemlerim boyunca yola devam etmemi sağlayarak her seferinde güç veren sevgili dostum Sinem Şentepe Köse’ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamı YÖK öncelikli alanlardan Sağlıkta Dijital Teknolojiler kapsamında gerçekleştirmeme imkân sağlayan Eskişehir Osmangazi Üniversitesi ve Üniversite – Sanayi çerçevesinde desteklerinden ötürü İNOSENS Bilişim Teknolojileri San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasına ayrıca teşekkürü borç bilirim.

Her başarımda arkamda duran, hayatımın her anında en büyük destekçim olan ailem ve bu sürecin en güzel motivasyon kaynağı Atlas’a...

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. TEMEL KAVRAMLAR	15
3.1. Bilgisayarlı Görü.....	15
3.1.1. Bilgisayarlı görünün kullanım alanları.....	16
3.1.2. Bilgisayarlı görü tarihçesi	17
3.2. Hareket Analizi	18
3.3. Poz Tahmini.....	19
3.3.1. İnsan vücudu modelleri	22
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
4.1. Sistem Tasarımı	25
4.2. Poz Tahmini Yöntemleri.....	29
4.2.1. OpenPose	29

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
4.2.2. Movenet	31
4.2.3. PoseNet	32
4.2.4. AlphaPose	32
4.2.5. Mediapipe.....	33
4.3. Dinamik Zaman Bükme Algoritması (DTW).....	34
4.4. Pekiştirmeli Öğrenme	40
4.4.1. Pekiştirmeli öğrenmede kullanılan terimler	41
4.4.2. Pekiştirmeli öğrenmenin temel özellikleri	42
4.4.3. Pekiştirmeli öğrenmenin unsurları	42
4.4.4. Pekiştirmeli öğrenme türleri.....	44
4.4.5. Bellman denklemi	45
4.5. Politika İterasyonu	46
4.5.1. Politika değerlendirme.....	48
4.5.2. Politika iyileştirme	49
4.5.3. Politika yinelenmesi	50
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	54
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	62
EK AÇIKLAMALAR	68
Ek Açıklama-A: Tez Çalışmasından Üretilen Bilimsel Yayın.....	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Spor eğitmeni sistemi: (a) sistemin kurulumu, (b) hareket tanıma (Ding ve Chang, 2016).....	6
2.2. 7 farklı egzersiz (Ding ve Chang, 2016).....	7
2.3. Hareket aralığı ölçümü: (a) alt vücut, (b) üst vücut (Latreche vd., 2023)	9
2.4. Sistem tasarımı (Patil vd., 2022)	12
3.1. Bilgisayarlı görü örnekleri (Shenkman vd., 2021)	16
3.2. Bilgisayarlı görü zaman çizelgesi (Szeliski, 2022)	18
3.3. Poz tahmini (Gupta vd., 2021).....	20
3.4. Poz tahmin yöntemleri: (a) yukarıdan aşağıya, (b) aşağıdan yukarıya (Liu vd., 2021).....	21
3.5. Poz tahmini modelleri: (a) orijinal görüntü, (b) 2b poz tahmini, (c) 3b poz tahmini (Gupta vd., 2021).....	22
3.6. İnsan vücudu modelleri (Gupta vd., 2021).....	22
4.1. Egzersiz örnekleri.....	25
4.2. Uygulama tasarımı.....	26
4.3. Örnek kol egzersizi.....	27
4.4. Hareket analizi yapısı	28
4.5. OpenPose gösterimi (Namburi ve Hengsanunkul, 2022)	30
4.6. Sonuçlar: (a) openpose, (b) movenet (Ojha vd., 2022)	30
4.7. MoveNet kilit noktalar (Tensorflow, 2023)	31
4.8. AlphaPose örnek gösterim (Fang vd., 2022)	32

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.9. Mediapipe kilit noktala gösterimi (Mediapipe, 2023)	34
4.10. Grafik: (a) Öklid, (b) dinamik zaman bükme (Ahn vd., 2023)	36
4.11. Uygulamaya ait çevre tasarımı	50
4.12. Çevre tasarımında ödül sistemi gösterimi	52
5.1. Politika algoritması sonucu	54
5.2. Politika algoritması sonucunun çevre tasarımı üzerinde gösterimi	55
5.3. Eğitim videolarından kesitler: (a) kol grubu, (b) bacak grubu, (c) ayak bileği grubu, (d) omuz grubu (Physitrack,2023).....	56
5.4. Sağ kola ait açıların karşılaştırılması.....	59
5.5. Sağ kolun vücutla olan açılarının karşılaştırılması.....	59
5.6. Kol için elde edilen hizalama yolları	60

ÇİZELGELER DİZİNİ**Çizelge****Sayfa**

4.1. Dinamik zaman bükme örneği.....	35
4.2. Hareket grupları.....	51
4.3. Kullanıcı eylemleri	51
4.4. Ödül sistemi ¹	52
5.1. Gruplara göre kullanılan koordinatlar ve örnek video kesitleri.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

α	Açı değeri
ω	Kümülatif uzaklık
d	Öklid mesafesi
D	Toplam yol
$D_{min}(i_k, j_k)$	(i_k, j_k) 'ye giden optimal yol
A	Ajan
a	Eylem/Aksiyon
s	Durum
R	Ödül
V	Değer
π	Politika
$V(s)$	Durum s için en iyi değer
$R(s, a)$	Durum s ve aksiyon a ile elde edilen anlık ödül
γ	İndirim faktörü
$P(s' s, a)$	Durum s ve aksiyon a altında durum s' elde etme olasılığı

Kısaltmalar

Açıklama

DTW	Dinamik Zaman Bükme (Dynamic Time Wrapping)
PÖ	Pekiştirmeli Öğrenme (Reinforcement Learning, RL)
FPS	Saniye Başına Düşen Çerçeve (Frame per Second)
RGB	Renkli Kamera (Red Green Blue)

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Fizyoterapi olarak da bilinen fizik tedavi, yaralanma, hastalık ve rahatsızlıkların tedavisinde oldukça faydalı bir uzman tedavisidir. Fizik tedavinin amacı ağrıyı dindirmek, daha iyi hareket etmeye yardımcı olmak ve hareket alanını genişletmek veya zayıflamış kasları güçlendirmektir. Fiziksel yöntemlerle, etkilenen bölgedeki fonksiyon ve hareketin yeniden kazanılmasına yardımcı olur. Bir diğer önemli amaç ise hastalara kendi sağlıklarını iyileştirmek için kendilerinin neler yapabileceklerini göstermektir. Her yaştan insan, sağlığını korumak ve yönetmek, ayrıca hastalıkları önlemek için fizyoterapi tedavisine ihtiyaç duyabilir. Tedavi sadece muayenede veya hastanede yapılmaz; hastalar gerekli tedaviyi evde yapmaya devam edebilir, etmelidir (Fransen, 2004).

Teknolojik gelişmelerin hız kazandığı günümüzde, sağlık ve egzersiz alanlarında inovasyonlar giderek artmaktadır. Bu bağlamda, özellikle uzaktan eğitim ve takip sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, bireylerin sağlıklarını koruma ve geliştirme konusunda yeni perspektifler sunmaktadır. Bu perspektifler, özellikle sağlık hizmetlerinin daha geniş bir kesime ulaştırılması ve hastaların tedavi süreçlerinin iyileştirilmesi amacını taşımaktadır. Fizyoterapi alanındaki geleneksel uygulamalara alternatif olarak ortaya çıkan uzaktan fizyoterapi rehabilitasyonu, bireylere ev ortamında profesyonel destek sağlama potansiyeli ile dikkat çekmektedir.

Fizyoterapi, hareket sistemini inceleyen ve bireylerin yaşam kalitesini arttırmak için çeşitli rehabilitasyon tekniklerini kullanan bir sağlık disiplini. Geleneksel fizyoterapi genellikle bireylerin belirli bir merkeze gitmelerini gerektirir, bu da zaman ve maliyet açısından zorluklara neden olabilir. Uzaktan fizyoterapi, bu engelleri aşarak kişilerin tedavi hizmetlerine daha hızlı ve uygun bir şekilde ulaşmalarını sağlamaktadır. Evde yapılan tedavi, bireylerin günlük yaşamlarına daha iyi entegre olmalarına ve tedavi süreçlerini daha tutarlı bir şekilde sürdürmelerine olanak tanır (Nieuwboer vd., 2001).

Gerçekleştirilen tez çalışması, sağlık ve teknoloji entegrasyonunun avantajlarını bir araya getirerek, bilgisayar kamerası kullanımını içeren bir uzaktan fizyoterapi yaklaşımı üzerine odaklanır. Gerçek zamanlı fizyoterapi yöntemiyle sunulan teknolojik çözüm ile fizyoterapi uygulamalarının önemini vurgulamak amaçlanır. Bu çalışmanın temel amacı, kullanıcıların ev ortamında fizyoterapi hareketlerini gerçekleştirirken onlara rehberlik eden, performanslarını değerlendiren ve kullanıcıya öneri sunan bilgisayar tabanlı bir sistem geliştirmektir. Geliştirilen sistem, kullanıcılara gerçek bir eğitmen tarafından yapılmış örnek hareketleri izleme ve bu hareketleri benzer şekilde gerçekleştirme imkânı sağlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, kamera ile kullanıcının hareketlerini gerçek zamanlı olarak takip eden, dinamik zaman bükme algoritması kullanarak gerçekleştirilen hareketlerin benzerliğini analiz eden ve pekiştirmeli öğrenme teknikleri aracılığıyla kişinin yapması gereken fizyoterapi hareketlerini öneren bir altyapı geliştirilmiştir.

Uygulamanın temel avantajlarından biri, kullanıcıların ev ortamında, düşük maliyetle ve gerçek bir eğitmene ihtiyaç duymadan fizyoterapi hareketlerini öğrenebilmesidir. Ayrıca, uygulama kullanıcı deneyimini arttırmak ve kullanıcının motivasyonunu yükseltmek için oyunlaştırma öğelerini içermektedir. Her başarılı hareket, kullanıcının puan toplamaya ve bazı noktalarda bölüm atlanmasına olanak tanımaktadır. Bu çalışma, sağlık ve teknolojinin kesişim noktasında yeni bir uygulama örneği sunarak, uzaktan fizyoterapi ve egzersiz alanlarında daha erişilebilir ve etkili çözümler geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda, projenin literatüre hem pratik hem de teorik katkılar sağlaması ve bununla birlikte kullanıcıların sağlık ve yaşam kalitesini arttırmaya yönelik bir adım olması beklenmektedir.

Çalışmada kullanılan yöntem, kullanıcının gerçek zamanlı kaydedilen hareketlerini analiz etmek için vücut açılarını temel alır. Kişilerin hareketlerinden çıkarılan açılar, hareketin, PhysioTool kütüphanesinden alınan videolardan elde edilen, eğitmen tarafından gerçekleştirilen harekete benzerliğini belirlemede kritik bir rol oynar. Hesaplanan açılar, kullanıcının performansını objektif bir şekilde değerlendirmek ve geri bildirim sağlamak amacıyla kullanılır. Gerçek zamanlı hareket analizi için dinamik zaman bükme algoritması kullanılarak, kişilerin/kullanıcıların yaptığı hareket ile eğitmen tarafından yapılan hareket arasındaki benzerlik hesaplanır. Bu sayede, ekran boyutlarından, zaman kavramından ve

diğer çevresel faktörlerden bağımsız olarak, kullanıcı hareketleri doğru bir şekilde değerlendirilmiş olur.

Pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinden biri olan politika iterasyonu algoritması, uygulamada belirlenen oyun adımlarında hangi aksiyonun alınacağına ve kullanıcının başarıya ulaştıkça nasıl gelişeceğine karar vermek için kullanılır. Bu algoritma, kullanıcının performansına bağlı olarak zorluk seviyelerini ayarlar ve başarı sağladıkça ödüllendirme mekanizmalarını yönetir. Bu durum, kullanıcı motivasyonunu arttırarak uzun vadeli katılıma teşvik eder.

Uygulamada pekiştirmeli öğrenme için belirlenen çevre, kullanıcıya uygun olarak değiştirilmeye uygundur. Böylece uygulama, kullanıcının kişisel gelişimine uygun olarak özelleştirilebilir ve ihtiyaçlara uygun şekilde güncellemelere açık olduğu söylenebilir. Yapılan tez çalışmasında pekiştirmeli öğrenme teknikleri aracılığıyla sunulan e-mentor ile fizyoterapi süreci sadece profesyonel terapistlerin müdahalesi ile değil, aynı zamanda kullanıcının kendi deneyimlerinden de beslenerek daha etkili bir şekilde yönetilebilecektir. Uygulanan bu yenilikçi yaklaşım ile sağlık sektöründe teknoloji kullanımının önemini bir kez daha göstermek hedeflenmektedir.

Uygulama sonucunda Mediapipe kütüphanesinin verdiği stabil sonuçlar ile hareket analizine uygunluğu gözlenmiştir. Elde edilen grafikler ile dinamik zaman bükme algoritmasının benzerlik ölçümünde verileri eşleyebilmek için uygun bir yöntem olduğu görülmüş, pekiştirmeli öğrenme algoritmalarından olan politika algoritmasının ise oluşturulan bir Markov karar mekanizmasını çözmek için doğru tercih olduğuna ve geliştirmeye fazlasıyla açık bir alan olduğuna karar verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sağlık, rehabilitasyon ve spor uygulamaları, modern yaşam tarzlarının getirdiği birçok sağlık sorununa karşı önemli bir etkiye sahiptir. Bu uygulamalar, insanların fiziksel ve zihinsel sağlıklarını iyileştirmek, yaşam kalitelerini arttırmak ve uzun vadeli sağlık sonuçlarını olumlu yönde etkilemek amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar, uygulamaların insan hayatına olan katkılarının anlaşılmasında önemli yere sahiptir.

Rehabilitasyon uygulamaları, birçok farklı nedenle yaralanmış veya hasta olan bireylerin yaşam kalitesini artırmak ve bağımsızlıklarını geri kazandırmak amacıyla tasarlanmış tedavi ve iyileştirme programlarını içerir. Bu tür uygulamaların tercih edilmesinin birçok sebebi vardır:

Yaralanma sonrası iyileşme: Rehabilitasyon, spor yaralanmaları, kaza sonucu yaralanmalar, ameliyat sonrası dönemler gibi birçok farklı durumda vücudu yeniden eski sağlığına kavuşturmayı amaçlar. Bu nedenle yaralanma sonrası iyileştirme sürecinde rehabilitasyon uygulamaları tercih edilir.

Fiziksel fonksiyonların geri kazanılması: Felç ve/veya inme sonrası hareket yeteneğinin geri kazanılması veya bir eklem cerrahisi sonrası hareket aralığının arttırılması gibi durumlarda uygulamalar önemli yer almaktadır.

Ağrı yönetimi: Kronik ağrı durumlarında rehabilitasyon, ağrıyı azaltmaya yönelik teknikler ve egzersizler sunar. Bu, ilaç kullanımını azaltma ve ağrının kontrol altına alınmasına yardımcı olma amacı taşır.

Bağımsızlık ve yaşam kalitesinin iyileştirilmesi: Kişinin günlük aktivitelerini daha bağımsız bir şekilde yapabilmesini sağlar. Bu durum bireyin yaşam kalitesinin artırılmasına ve toplum içinde daha aktif olmasına yardımcı olur.

Özelleştirilmiş tedavi: Her hasta farklı ihtiyaçlara sahiptir. Rehabilitasyon programları, kişinin özgün durumunu dikkate alınarak özelleştirilebilir. Bu durum tedavi sonuçlarını iyileştirmeye yardımcı olur.

Spor performansı geliştirme: Sporcular, rehabilitasyonu spor performansını arttırmak ve sakatlanmaları önlemek için kullanabilirler. Böylece daha uzun süre rekabet edebilirler.

Rehabilitasyon uygulamaları, multidisipliner bir yaklaşım gerektiren ve genellikle fizyoterapistler, iş terapistleri, konuşma terapistleri ve diğer sağlık profesyonellerinin iş birliği içinde çalıştığı kapsamlı bir süreçtir. Bireyin ihtiyaçlarına ve durumuna göre özelleştirilmiş rehabilitasyon programları oluşturmak, programların başarısını artırır. Literatürde fizyoterapi ve spor uygulamaları ile kişilerin yaşam standardını arttırmaya yönelik birçok çalışma yer almaktadır. Özellikle Covid 19 hastalığının yayılmasıyla birlikte evde geçirilen vakit artmış, bu da çalışmaların sayısında önemli bir yükselişe sebep olmuştur.

İnsan aktivitesinin tanınması, bilgisayarlı görme alanında temel bir uygulamadır. İnsan aktivitesinin tanınması iki ana bölümden oluşur: vücut takibi ve eylem tanıma. İnsan vücudunun izlenmesi için sağlık, spor ve fizyoterapi gibi ev ortamında kullanım amacıyla oluşturulan uygulamalar, temel olarak tedavi sürecindeki hastaların hareketlerini analiz ederek hedefe uygun hareketin doğru şekilde gerçekleştirilip gerçekleştirilemediğini tespit edecek şekilde tasarlanır (Latreche vd., 2023). Bu sebeple, amaç aynı olsa da literatürde birçok farklı hareket analizi algoritması tercih edilmiş ve hedefe uygunlukları değerlendirilmiştir. Giyilebilen ve giyilemeyen sensörler, insanların aktivite takibinde önemli yer kaplamaktadır. Bu sensörler aracılığıyla bir egzersiz sırasında yapılan vücut hareketleri analiz edilebilmekte, eylemlerin doğruluğu değerlendirilebilmekte ve mevcut tanımlanmış plan ve sistemlerle karşılaştırma yapılabilmektedir (Farrokhi vd., 2021).

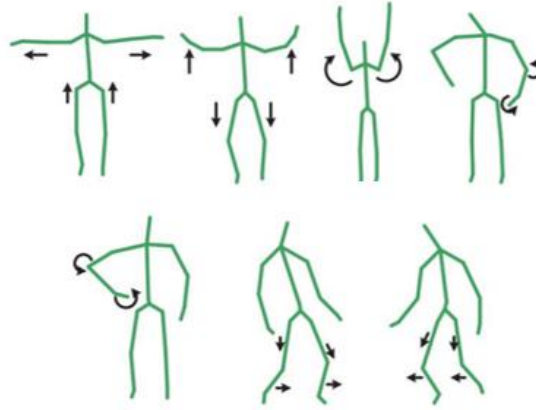
Schmidt vd. (2015) tarafından tasarlanan dijital koç, hedef belirleme sürecini desteklemekte, bir eğitim oluşturmakta, hedefi gerçekleştirmek için plan yapmakta, planı bireysel performansa uyarlamakta ve kişiyi motive etmektedir. Sanal asistan için ‘Kısmen Gözlenebilir Markov Süreçleri’ ve ‘Markov Karar Süreçleri (MDP)’ kullanılmıştır. Bir eğitim tavsiye edildiğinde sonraki duruma geçiş kişinin eylemlerine bağlı olarak dijital koç ile sağlanmaktadır. Çalışma, programı kullanacak kişilerin giyilebilir sensörler kullanmasını gerektirmektedir. Bir hareket analizcisi ile farklı aktivite türlerini tanımak için adım sayacı verilerine dayalı olarak ek veriler sağlanmaktadır. Kullanıcının dijital koç tarafından sağlanan tavsiyeleri yerine getirip getirmediği analiz edilip, antrenman planının sürdürülmesi, daha kolay veya daha zor bir antrenman planının seçilmesi gerektiğine karar verilmektedir. Kullanıcıların başarmasına yardımcı olmak için politika modülü, bir eğitim birimi olarak bir sonraki tavsiyenin ne olduğuna karar vermektedir. İletişim modülü aracılığıyla, sonraki eylemler kullanıcılara gösterilmektedir. Uygulama, kişinin aktivitelerine göre planı güncellediğinden kullanıcının eğitimi baştan planlamasına gerek duyulmaz. Dijital koç ile amaç, uygulamanın halihazırda sarf edilmiş çaba ve kazanımlar göz önünde bulundurularak doğru eğitim durumunu sağlamasıdır.

Ding ve Chang (2016), yaşlıların rehabilitasyon ve egzersiz eğitimi için bir spor eğitmeni robot sistemi geliştirmiştir. Şekil 2.1.’de gösterilen sistemde, bir insan tarafından yapılan hareketleri yakalamak ve tanımak için insansı bir robotun gözleri olarak görülen popüler bir kinect sensörü kullanılır. Kinect sensör tabanlı spor eğitmeni robot sisteminin tasarımı için öncelikle iki araştırma aşaması vardır: spor eğitmeni robotu için bir uzman sistemin kurulması ve kinect sensör tabanlı hareket tanımanın geliştirilmesi.



Şekil 2.1. Spor eğitmeni sistemi: (a) sistemin kurulumu, (b) hareket tanıma (Ding ve Chang, 2016)

Bu çalışmada spor eğitmeni olarak kullanılan robot, 18 yapay eklemi olan Type-A Bioloid insansı robottur. Kullanıcının hareketleriyle ilgili verileri almak için robotun yanına bir kinect cihazı yerleştirilmiş ve sunulan yaklaşımların performans değerlendirmesi için beş kişiye ait hareket verileri, veri tabanına kaydedilmiştir. Beş kullanıcı tarafından toplanan hareket veri tabanı, eğitim bölümü ve test bölümü olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır.



Şekil 2.2. 7 farklı egzersiz (Ding ve Chang, 2016)

Şekil 2.2.'de görülen “göğüs açma”, “iki eli uzatma ve çömelme”, “iki eli kaldırma”, “sağ sarkaç hareketi”, “sol sarkaç hareketi”, “sağ ayağın gerilmesi” ve “sol ayağın gerilmesi” olan yedi farklı aktif hareketin her birinin yer aldığı 210 hareketten oluşan eğitim jest verisi bölümü, beş kullanıcının her üçü tarafından 10'ar kez yapılmış ve veri uzayını oluşturmak için kullanılmıştır. Spor eğitmeninin insansı robot sistemi ve kinect sensör tabanlı jest tanıma sistemi, yaşlıların egzersiz eğitimini etkili bir şekilde gerçekleştirmek için bir durum makinesi şeması kullanılarak başarılı bir şekilde bir araya getirilmektedir. Bu çalışmada yaşlılar için yedi farklı jest hareketini içeren bazı rehabilitasyon egzersizleri uygulanmış ve spor eğitmeni için bunlara karşılık gelen uzman sistem geliştirilmiştir. Yedi farklı hareketin yürütülmesini düzenlemek için üç farklı tipte durum makinesi şeması oluşturulmuştur. Oluşturulan durum makineleri ile aktivitelere karar verilmiş ve düzenlenen durumlara göre kullanıcılara gerekli egzersizler sunulmuştur.

Giyilebilir cihazlar, egzersiz ve sağlık hizmetleri merkezine gitmek yerine uzaktan takip etmeye bir alternatif sunsa da finansal olarak herkesin erişebileceği bir durumda değildir. Samhitha vd. (2021), yayınladıkları makalede bu sorunu çözmek için yenilikçi bir çözüml önermiştir: her yaştan ve sağlık koşulundan bireylerin kullanabileceği bir yapay zekâ eğitmen modeli. Model, insan vücudunun konumunu ve yönünü doğru bir şekilde belirleyen, yaygın olarak benimsenen bir teknik olan insan poz tahmininin gücünden yararlanmıştır.

Adolf vd. (2022) tarafından ev ortamında rehabilitasyon kullanımı üzerine yapılan bir çalışmada ilk varsayım ve aynı zamanda sınırlama, tek bir basit kameranın (akıllı telefon, tablet vb.) kullanılmasıdır. İkinci varsayım, uygulamanın basit kontrol ve kurulum gereksinimiyle sonuçlanan teknik olmayan kullanıcılar tarafından kullanılmasıdır. OpenPose poz tahmin algoritmasının farklı koşullar altında anatomik yer işaretlerinin, anahtar nokta tespitini gerçekleştirme yeteneği değerlendirilmiş ve OpenPose tarafından bildirilen kilit nokta güven değerlerine dayalı olarak algılama kalitesi hakkında fikir sahibi olmak amaçlanmıştır. Çalışmada PhysioTools tarafından oluşturulan veri tabanı kullanılmıştır. Kamera tabanlı bir sistemin ev ortamında kullanılabilirliği incelendiğinde, kamera görüntüsünden bağımsız olarak en az algılanabilen pozisyonun yatma pozisyonu olduğu ve diz üstü pozisyonun bu pozisyonu takip ettiği sonucu çıkarılmıştır. Ayakta durma pozisyonu ise en verimli olanıdır. Bulgulara dayanılarak, OpenPose'un tespit için, ev ortamında yaygın olarak yapılan egzersizler sırasında insanları tespit edebilen yeterince sağlam bir algoritma olduğunu söylenebilir.

Hareket analizi; sağlık, spor ve eğlenceye yönelik birçok uygulamanın bulunduğu bir alandır. Sağlık alanında son teknolojiye sahip ekipmanların yüksek maliyeti, bu tekniğin klinik rutinlerinde uygulanmasını imkânsız kılmaktadır. Hareket yakalama ve analiz tekniklerinin uygulanması ise rehabilitasyon alanında hasta tedavisine çeşitli avantajlar getirebilmektedir. Bu doğrultuda, Lafayette vd. (2023) ortak izleme araçlarına sahip RGB-D ve RGB ekipmanlarını, hareket analizine olanak sağlayacak şekilde taşınabilir ve düşük maliyetli bir çözüml olarak sunmuştur. Google Mediapipe'in son sürümü, RGB kameralardan alınan düzlemsel görüntülerdeki derinlik koordinatlarını tahmin edebilme yeteneğinden dolayı bir dönüm noktası sayılabilir. Çalışma boyunca iç RGB-D ekipmanı ve RGB

görüntülerine dayalı Mediapipe tekniği kullanılmıştır. Bu çalışma ile eklem açılarını değerlendirme ve tahmin etme yeteneği analiz edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar biyomekanik değerlendirme amacıyla açısal ölçüm için Mediapipe'in uygulanmasının olumlu olduğunu göstermektedir.

Fiziksel egzersiz sırasında, video akışları kullanılarak önemli vücut noktalarının gözlemlenmesi ve tahmin edilmesiyle yaralanmalar en aza indirilebilir. Latreche vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada amaç, robotlar, giyilebilir sensörler olmadan mümkün olduğu kadar çok kişiye, daha düşük maliyetle ve daha yüksek verimlilikle sunulan ileri teknolojiye dayalı bir çözüm bulmaktır. Bu araştırmada, özellikle üst ve alt ekstremit eklemlerinin hareket aralığını ölçmek için tele rehabilitasyon alanında poz tahmin yaklaşımının kullanılmasına odaklanılır. Çalışmada diz ve kol ile yapılan esneme ve germe hareketleri sırasındaki açısal değerler, Şekil 2.3.'de gösterildiği üzere hem fizyoterapi sırasında ve hem de tasarlanan uygulama ile ölçülmüştür. Yapılan karşılaştırma sayesinde diz germe ve esnetme olan hareketlerle yapılan ölçümler sonucunda Mediapipe'in hareket aralıklarını ölçmek için ideal bir teknik olarak kullanılabileceği görülmüştür.



Şekil 2.3. Hareket aralığı ölçümü: (a) alt vücut, (b) üst vücut (Latreche vd., 2023)

Benzer şekilde Yi (2022) de kullanıcılara sanal fizik tedavi uygulaması ile rehabilitasyon egzersizlerine erişimi kolaylaştırmayı amaçlamıştır. Çalışmada, cihaz üzerinde gerçek zamanlı bir sanal fizyoterapist aracılığıyla egzersizler için düzeltme ve

talimatlar sağlanmış, kullanıcının egzersizleri doğru bir şekilde gerçekleştirebilmesi için rehberlik ve yüksek kaliteli bir insan vücudu algılama ve hareket takibi uygulanmıştır. Uygulamada vücut algılama ve hareket takibi için Mediapipe kullanımı tercih edilmiştir.

Küresel salgın sırasında sınırlı erişim sebebiyle pek çok kişinin egzersiz yapmakta zorlanması sebebiyle Irfan ve Abdul Muthalib (2022) sanal hareket sistemi tasarlayarak bireylerin hareketlerini uzaktan takip edebilmesine imkân sunmuştur. İnsan poz tahmini teknolojisi, bir kişinin hareketlerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesinde ve analiz edilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, insan poz tahmini kullanılarak kondisyon tekrarı sayısının hesaplanmasına ve egzersiz sırasında insan poz tahmininin kullanılmasıyla elde edilen verilerin analiz edilmesine odaklanmaktadır. Çalışma, kamera tabanlı uygulamalar için ideal mesafenin üç metre olduğunu ortaya çıkarmıştır. Kameralar, bir kişinin hareketlerini takip ederek poz tahmin etmede hassas izleme olanağı sağlamıştır. Uygulama, vücut iskeletini oluşturmak için insan vücudundaki önemli noktaları yardımcı hatlarla birleştirerek dirsek açısına dayalı olarak egzersiz tekrarlarını tahmin etmektedir. Araştırma, sanal hareket takibi ve kondisyon tekrarı hesaplaması için güvenilir bir araç sağlayan Mediapipe'ı algılama ve izleme için kullanmanın doğruluğunu ve etkinliğini vurgulamıştır. Bu yaklaşımın, bireylerin evlerinin rahatlığında etkili egzersiz rutinlerine katılmalarını sağladığı savunulmaktadır.

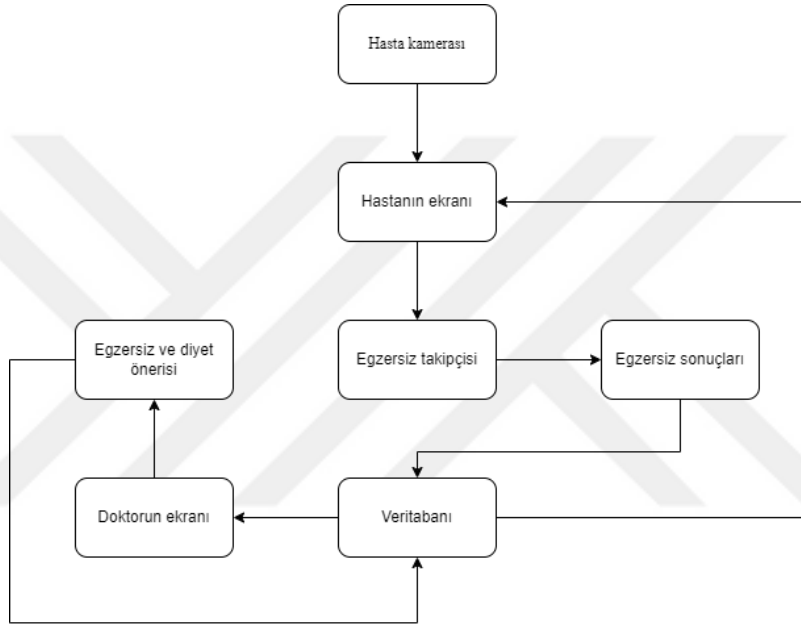
Openpose ve Mediapipe hareket analiz algoritmalarını karşılaştıran başka bir çalışma ise Nguyen Phan vd. (2023) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma, insan poz tahmininin, görüntülerden veya videolardan insan vücudunun parçalarını bulmak ve tanımlamak için derin öğrenme algoritmalarını kullanan bir teknoloji olduğunu öne sürmektedir. Son yıllarda popüler hale gelmiş ve insan-bilgisayar etkileşimi, hareket analizi ve sanal gerçeklik gibi çeşitli alanlarda uygulanmıştır. İnsan poz tahmini için öğrenmeye dayalı algoritmalar olmasına rağmen, yetersiz eğitim verileri, derinlik belirsizlikleri ve tıkanma gibi zorluklar hala mevcuttur. Doğru değerlendirme, fiziksel egzersizleri yapmanın doğru yolunun belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu çalışma, dirsek fleksiyon açısını ölçerek ve omuz, dirsek, el gibi önemli noktaları belirleyerek ön kol egzersizlerini analiz etmek için insan poz tahmininin kullanılmasını önermektedir. Önerilen yöntem, ölçülen açıyı standart açıyla

karşılaştırarak kullanıcının egzersizi doğru yapıp yapmadığının belirlenebilmesidir. Çalışmada, COCO veri kümesindeki ve oluşturulan veri kümesindeki performansları karşılaştırmak amacıyla OpenPose ve MediaPipe hareket analizi algoritmaları kullanılmaktadır. Yapılan testler, Mediapipe'in ön kol egzersizlerini değerlendirmede daha iyi sonuçlar sağladığını göstermiştir.

Palani vd. (2022) tarafından insan üst ekstremitte hareketlerini incelemek için biyomekanik, rehabilitasyon, hareket izleme ve artırılmış gerçeklik disiplinlerinde kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Esnekliği ve hareket aralığını ölçmek için eklem açılarını değerlendirmek, insan hareketini analiz etmek için yaygın bir tekniktir. Daha önce eylemsizlik ölçüm birimleri jiroskoplardan, ivme ölçerlerden ve diğer sensörlerden oluşmaktaydı ancak bu sistemlerin sensör kayması, yerçekimi ve dış müdahalelerden kaynaklanan hatalar gibi dezavantajları bulunmaktadır. Uzayan karantinalar, seyahat kısıtlamaları ve azalan sosyal destek, bu sonuçlara karşı daha savunmasız olan yaşlıları orantısız bir şekilde etkilemektedir. Bu sebeple çalışma, gerçek zamanlı eklem açısı tahmini ile rehabilitasyon egzersizleri sırasında eklem açılarının izlenmesi için güvenilir, taşınabilir bir seçenek sağlamaktadır.

Nörolojik bozuklukların tedavisinde de kullanılan video tabanlı rehabilitasyon programları, tedavi alamayan hastalar için faydalı bir tedavi seçeneği olabilmektedir. Türkmen vd. (2020) tarafından yapılan çalışmanın amacı, tedavide video temelli rehabilitasyon programının omuz hareket alanı, ağrı, fonksiyonellik ve yaşam kalitesi üzerindeki etkinliğini, fizyoterapist gözetiminde rehabilitasyon programıyla karşılaştırılmalı olarak değerlendirmektedir. Ölçüm sonuçları, video tabanlı ve fizyoterapist denetimindeki rehabilitasyon programlarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını ve video tabanlı bir rehabilitasyon programının da etkili bir tedavi yöntemi olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde Güney vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada Parkinson hastalarının el hareketlerinin video analizi üzerine odaklanılmıştır. Yüksek kare hızına sahip videolardan Mediapipe aracılığıyla hastaların ilaç öncesi ve sonrası el hareketlerindeki değişiklikler incelenmiştir. Çalışma, Mediapipe kullanımının el hareket analizine uygunluğunu ve Parkinson hastaları için evde tedavi sisteminde gelecek sunduğunu göstermiştir.

Ön kol, squat ve şınav egzersizlerinden oluşan, kullanıcıların öğrenmesine ve formlarını düzeltmesine imkân sağlayan bir egzersiz takip yazılımı Patil vd. (2022) tarafından Şekil 2.4.'te gösterildiği şekilde tasarlanmıştır. Yapılan çalışmada egzersizin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak amacıyla kırmızı bir x ve yeşil bir onay ifadesi aracılığıyla yönlendirmeler yapılmıştır. Kişilerin duruş bilgisi yazılım tabanlı bir uygulama aracılığıyla alınmakta ve Mediapipe ile analiz edilmektedir.



Şekil 2.4. Sistem tasarımı (Patil vd., 2022)

Nath vd. (2023) yapay zekalı kişisel antrenörler ile az masraf ve zaman kaybı ile fiziksel hedeflere ulaşmayı amaçlamışlardır. Çalışma boyunca ön kol egzersizi değerlendirmiş ve kullanıcının performansı olması gereken standartlarla karşılaştırılmıştır. Kullanıcının sisteme kaydolması beklenmiştir. Böylece yapılan çalışmalar kaydedilmiş ve 7/24 değerlendirme sağlanmıştır. Egzersiz kameradan alınan görüntüler, Mediapipe aracılığıyla analiz edilmesiyle değerlendirilmektedir. Yapay zekalı kişisel antrenör, kullanıcılara özel egzersiz planları, beslenme tavsiyeleri ve ilerleme takibi sunabilen, yapay zekayla desteklenen sanal bir antrenördür. Ev ortamındaki spor ve rehabilitasyon uygulamalarının en büyük problemi, kişide motivasyon sağlama zorluğudur. Bu sebeple oyunlaştırma kavramı egzersiz süreçlerini daha etkili, ilgi çekici ve motive edici hale

getirmek amacıyla kullanılan bir stratejidir. Bu sayede kullanıcılar, uygulamayı daha aktif ve düzenli olarak kullanmaya teşvik edilir. Günaydin vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, alt ekstreminde kas güçlendirici rehabilitasyon hareketleri için oyunlaştırılmış bir sistem ve fizyoterapistlerin kullanıcıları takip edebilmesini sağlayan bir tasarım sunulmuştur. Farklı alt ekstremitelerde kaslarını güçlendirmek için farklı ve yaygın olarak kullanılan 3 egzersiz seçilmiş ve hastaların performansını arttırmak için 3 farklı oyun tasarlanmıştır. Bu sistem EGM sinyalinin anlamak üzerine kurulmuştur.

Literatürde son yıllarda ciddi oyun kavramının yaygın olarak kullanıldığı söylenebilir. Bu alandaki çalışmalar hem teknolojik gelişmeleri hem de metodolojik ilerlemeleri içermektedir. Farklı uygulamaları kullanan ciddi oyun konseptlerine eğitim, rehabilitasyon, sağlığa yönelik teknik ve yöntemlere hem akademik hem de endüstriyel araştırmalarda rastlamak mümkündür. Susi vd. (2015) tarafından yayınlanan bir teknik rapora göre, ciddi oyun kavramı sektörde önemli bir ilgi kazanmıştır. Eğlenceyi bir araç olarak kullanarak etkili öğrenme ve tedavi yöntemi hedeflenmektedir. Bu rapora göre özellikle Kuzey Amerika ve Avrupa’da sağlıktan askeriye kadar yer alan geniş bir yelpazede kullanımı sağlanmaktadır. Kazi ve Patil (2022) tarafından yapılan bir derlemeye göre, bir sistemin bir uyarana tepkisinin ödülle arttığı ve cezayla azaldığı süreç pekiştirmeli öğrenme olarak adlandırılmaktadır. Bu ödül dağıtımını yeniden oluşturmak için makul bir dizi yöntem, makine öğrenimindeki gelişmelerin ardından deneyimlerden keşfedilmiştir. Beyin – makine arayüzünü kullanarak öğrenme rehabilitasyonunda dikkate değer bir öneme sahiptir.

Kas ve sinir sisteminde oluşan hastalıkların tedavisinde kullanılacak bir yöntem sunmak için çalışan Alakus vd. (2021), tasarladıkları oyun ile hastanın başka fonksiyonlarına zarar vermeden tedavi olmasını sağlamayı amaçlamışlardır. Çalışmada, OpenGL ve Unity 3B oyun motoruyla hazırlanmış oyun tasarımı ile rehabilitasyon süreci kolaylaştırılmaya çalışılmıştır. Hastaların gerçekleştirdiği hareketlerden elde edilen açılar baz alınarak hareketin doğruluğu hakkında karar verilmekte ve karar verme mekanizması pekiştirmeli öğrenme kullanılarak oluşturulmaktadır. Benzer şekilde Tragos vd. (2023), evde sağlıklı ve aktif yaşamı teşvik etmek için kişiselleştirilmiş öneriler sunan sağlık ve spor için bir

pekiştirmeli öğrenme çerçevesi geliştirmişlerdir. Önerilen çerçeve, kullanıcılara tam bir antrenman oturumu sağlamak için pekiştirmeli öğrenmeyi kullanmakta ve hem antrenman sırasındaki eylemlerden hem de antrenman sonrasındaki geri bildirimlerden öğrenmektedir. Kullanıcı için profil oluşturulmakta ve kişi özelinde öneriler sunulmaktadır. Pekiştirmeli öğrenme modeli, yüksek kullanıcı memnuniyeti ve duyarlılık puanlarıyla önemli ölçüde iyi performans göstermektedir. Kullanıcı bir mobil uygulama aracılığıyla çevreyle iletişime girmekte, egzersiz önerilerini, geri bildirimlerini ve egzersiz geçmişini almaktadır. Pekiştirmeli öğrenme çerçevesi, bir spor salonu ve bir ajandan oluşur. Eylemler mobil uygulamada mevcut olan 161 egzersizi temsil eder. Egzersizler evde kolayca tanımlanabilen standart vücut ağırlığı egzersizleridir. Antrenman öneri probleminin genel modellenmesinde Markov karar süreci kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, pekiştirmeli öğrenmenin katılımcıların egzersiz yapma motivasyonunu arttırdığı görülmektedir.

Yapılan tez çalışmasında, literatürdeki birçok çalışmada güvenilirliği kanıtlanan Mediapipe algoritması kullanılarak hareket analizi gerçekleştirilmiştir. Ancak literatürün aksine, kullanıcıların yaptığı hareketleri standart değerlerle karşılaştırma yöntemi yerine dinamik zaman bükme algoritmasıyla benzerlik bulma yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede kullanıcıya sunulan ve yapması beklenen hareket ile kullanıcının yaptığı hareket karşılaştırılmakta, standart değerler yerine kullanıcıdan beklenen hareketin benzerliğine odaklanılmaktadır. Bu tez çalışmasında aşağıdaki kazanımlar elde edilmiştir:

- Pratik rehabilitasyon uygulanabilirliği sağlanmıştır.
- Kullanıcıya düşük maliyetli bir yaklaşım sunulmuştur.
- Ek cihaza ihtiyaç duyulmamıştır.
- Literatürdeki hareket analizi uygulamalarında seçilen yürüme, koşma hareketlerinin aksine, etkilediği vücut fonksiyonlarına göre farklı hareketler seçilmiştir.
- Dinamik zaman bükme algoritması, hareket analizini değerlendirirken kullanılmış böylece yapılan hareketin zamana bağımlılığı ortadan kaldırılmıştır.
- Hareket analizi yöntemi ile pekiştirmeli öğrenme bir araya getirilmiş, kullanıcının motivasyonunu yüksek tutabilmek adına oyunlaştırılmış bir sistem tasarlanmıştır
- Literatürde daha önce bu alanda kullanımıyla karşılaşılmamış olan politika iterasyonu algoritması karar mekanizması olarak kullanılmıştır.

3. TEMEL KAVRAMLAR

3.1. Bilgisayarlı Görü

Bilgisayar bilimcileri 1960’lardan bu yana görüntülere baktığında insan beyni gibi sonuçlar çıkarabilen makineler üzerine uğraşmaktadır. İnsan doğasına ait bu özelliği makinelerle kazandırabilmek oldukça zor bir durumdur. Ancak son 10 yılda bu alanda ciddi çalışmalar yapılmış ve önemli gelişmeler kaydedilmiştir.

Bilgisayarlı görü, insan beyninin görme ile ilgili yapabildiklerini makineye yaptırmaya çalışmaktır. Bu sebeple yapay görme olarak da adlandırılabilir. Bilgisayarlı görünün en temel görevi nesneleri tanımak ve gruplayabilmektir. Amaç ise dijital görüntülerin içeriğini anlamlandırabilmektir. Başka bir açıklamayla amaç, makineye görüntüden bir nesne, metin veya model çıkarımı yaptırmaktır. Dijital görüntüleri uygun formatlarda makinelerle verip karşılığında anlamlı bilgi ve sonuç alabilmek için uzun yıllardır süren büyük çabalar gösterilmektedir. Buna rağmen makinelerle insanlar gibi görme yetisi kazandırabilmek oldukça zordur. Bunun sebebi insanlardaki doğal görme işlevinin yapısının karmaşık olması ve görüntülerin renkli dünyası, üst üste gelmiş birkaç farklı objenin olabilmesi durumudur. Nesnelerin konumu, ışık derecesi önünde ya da yanında onu kapatan başka bir nesne olup olmaması gibi sonsuz durum vardır. Gören ve gördüğünü anlamlandırabilen makinelerin yeni kullanıma başlandığı söylenebilmektedir.

Bilgisayarlı görme çok fazla veri gerektirir. Farkı görene ve sonunda görüntüyü tanıyana kadar verileri analiz etmek için algoritmaları yinelemeli olarak çalıştırır. Görüntü verileri, çeşitli dönüşümler ve filtreler kullanılarak işlenir. İşlenen bu veriler nesnelerin tespit ve takip edilmesi, fark tespiti gibi çok farklı alanlarda kullanılmaktadır (Szeliski, 2022).

İnsanların dış dünyayı anlaması, görüntülerin algılanması ve analiz edilerek yorumlanmasıyla oluşur. Bilgisayarlarda insanın görsel algısını ve anlamasını sağlayan tüm teknik ve yöntemler bilgisayarlı görme alanına girer. Günümüzün en popüler alanı olan derin öğrenme ve yapay zekanın gelişmesinde, bilgisayarlı görme alanında çalışan bilim insanları önemli rol oynamıştır. Bilgisayarlı görme, her türlü iki boyutlu, üç boyutlu veya daha yüksek görsel dijital veriyi, akıllı algoritmalar aracılığıyla anlamayı amaçlamaktadır. Bilgisayarlı görme, son yıllarda doğrusal cebir, geometri, olasılık teorisi ve istatistik, diferansiyel denklemler ve makine öğrenmesi gibi hesaplamalı teorilerden yararlanan teknikler geliştirip uygulayarak bu sorunları ele almaktadır. Normal kamera görüntüleri dışında tıbbi görüntüler, uydu görüntüleri ve üç boyutlu nesnelerin modelleri de bilgisayarlı görme kapsamına girmektedir. Görsel verileri anlamlandırılması, insansız araçlar, robotlar, güvenlik sistemleri ve biyometrik doğrulama gibi sistemlerinin en önemli algoritma adımlarında kullanılmaktadır. Bu algoritmalarından alınan sonuçlar, yapay zekâ sistemlerine girdi olarak gelmekte ve bu sistemleri tamamlamaktadırlar (Freeman vd., 1998).

3.1.1. Bilgisayarlı görünün kullanım alanları

Bilgisayarlı görünün kullanım alanları nesne algılama, olay algılama, nesne tanıma, 3B poz tahmini, öğrenme, indeksleme, hareket tahmini, otomatik görsel oluşturma, 3B sahne modelleme ve görüntü onarımı gibi alanlardır. Bilgisayarlı görü günlük hayatta kullandığımız birçok teknolojinin içerisinde bulunmaktadır. Şekil 3.1.'de kullanım alanlarından bazı örnekler gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Bilgisayarlı görü örnekleri (Shenkman vd., 2021)

Google görseller ve otomatik metin düzenleyiciler temelde bu ağlar ile çalışmaktadır. Yüz tanıyarak açılan akıllı telefonlar, kişinin sesli komutuyla kullanılabilen akıllı ev aksesuarları kısaca ‘Biyometrik Tanıma’ günlük hayatta en sık karşılaştığımız örneklerdir. İmalat endüstrisinde üretilen ürün ve parçaların kalite kontrolünün yapılması ve mevcut cihazların durumunun takibinde toplanan verinin işlenip anlamlandırılması gibi ‘Kalite Kontrolü ve Öngörücü Bakım’ alanında bilgisayarlı görü ve yapay zekâ alanında çalışılmaktadır. Sürücüsüz araçlar, insansız otonom araç ve robot sistemleri, görsel navigasyon gibi ‘Otonom Sistemler ve Robotik’ alanı en popüler ve en heyecanlı kullanım alanlarından biridir. Bir diğer, belki de en kritik kullanım alanı ise ‘tıbbi görüntüleme’dir. Tıbbi cihazlardan alınan görüntüler ile anatomik ve hastalık bilgilerinin çıkartılıp işlenmesi, kişilerin hastalık tespiti ve takibi için kullanılmaktadır. Bilgisayarlı görünün sıkça ve yaygın olarak kullanıldığı başka bir alan ise ‘güvenliktir’. Otomatik plaka ve araç tanıyıcılar, araç takibi, bina, havaalanı gibi yerlerde şüpheli nesne tespiti ve anormal durum tespiti yapılması güvenlik alanlarındaki bilgisayarlı görü kullanımına örnektir. Günümüzde bilgisayarlı görünün askeriye, haritacılık, pazarlama, finans, görsel modelleme ve tasarım, animasyon gibi daha birçok farklı alandaki örnekleriyle karşılaşılmaktadır.

3.1.2. Bilgisayarlı görü tarihçesi

Birçok heyecan verici uygulamaya sahip bu teknolojinin kökleri, insanın görsel sistemini simüle etmek ve robotlara akıllı davranışlar kazandırmak amacıyla 1960’ların sonlarına dayanmaktadır. Onlarca yıl boyunca araştırmacılar, bu alanı ilerletmek ve bugün olduğu en ileri teknoloji haline getirmek için çeşitli matematiksel kavramları, optimizasyon çerçevelerini ve görüntü işleme tekniklerini araştırmışlardır. Bilgisayarlı görünün zaman çizelgesi Şekil 3.2’de gösterilmektedir:

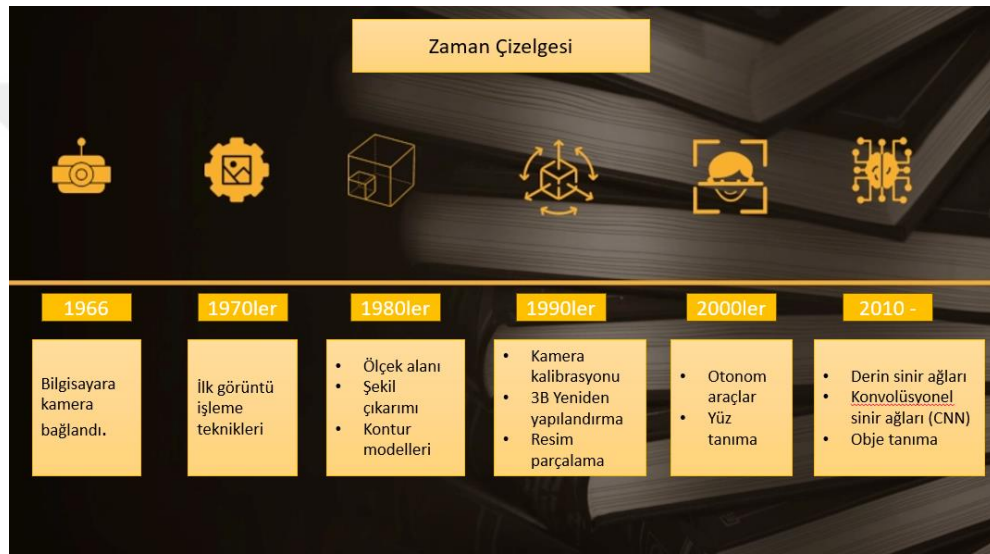
1966: Bir bilgisayara kamera bağlayıp” gördüklerini anlatması “fıkri,

1970’ler: Görüntülerden kenarların çıkarılması, çizgilerin etiketlenmesi, 3B modelleme, nesnelerin daha küçük yapıların ara bağlantıları olarak temsili, optik akış ve hareket tahmini,

1980’ler: Ölçek-uzay, gölgeleme, doku ve odak gibi ipuçlarından şekil çıkarımı, kontur modelleri,

1990’lar: Kamera kalibrasyonu, çoklu görüntü teknikleri, görüntü bölümleme,

2000’ler- günümüz: Otonom araçlar, yüz tanıma, sağlık hizmetleri ve daha birçok alanda bilgisayarlı görünün sürekli büyümesi (Szeliski, 2022).



Şekil 3.2. Bilgisayarlı görü zaman çizelgesi (Szeliski, 2022)

3.2. Hareket Analizi

Hareket analizi, videolarda veya görüntülerde insan eylemlerini tanımayı içeren bir bilgisayarlı görme görevidir. Amaç, video veya görüntüde gerçekleştirilen eylemleri önceden tanımlanmış bir dizi eylem sınıfına göre sınıflandırmak ve kategorize etmektir. Bu alandaki çalışmalarda; gerçek dünya uygulamalarının simülasyonları, görsel gözetleme, insan davranışını anlamak, güvenlik gibi konulardan ilham alınmıştır. Hareket aktiviteleri görüntülerden tahmin edilmesi zorlu ve sıkıcı bir problemdir. Özellikle vücut bölümlerinin görünümünü etkileyen giyim ve vücut şeklindeki değişiklikler, çeşitli aydınlatma efektleri, kişi kameraya doğru bakmıyorsa poz tahmininin zor olması, tanımlama ve daha birçok

çeşitlilik bu alandaki zorlukları arttırmaktadır. Bu sebeple eylem tanıma; son yıllarda fazlasıyla dikkat çeken, toplumda birçok kişinin üzerine çalıştığı ve zorluklara çözümler aradığı bir araştırma alanı olmuştur.

Günümüzde akıllı telefonlar aracılığıyla etkinlik tanıma ve giyilebilir algılayıcılar çokça yaygındır. Fakat bu sistemler, algılayıcılardan veri toplamaya ve bunların cihazlara yüklenmesine dayanır. Kullanıcıların pratikte bu algılayıcıları giymesi veya üzerinde taşıması rahatsız edici olabilir. Görme tabanlı sistemler, kullanıcının herhangi bir cihaz taşımasına veya takmasına gerek kalmaması nedeniyle bu tür problemler için daha iyi bir alternatiftir. Bunun yerine, veriyi yakalamak amacıyla çevredeki ortama kamera gibi araçlar kurulur (Gupta vd., 2021). Tez kapsamında yapılan çalışmada kamera ile oluşturulan görme tabanlı sistemler aracılığıyla kullanıcıdan veri alınıp hareketi analizi yapılmıştır.

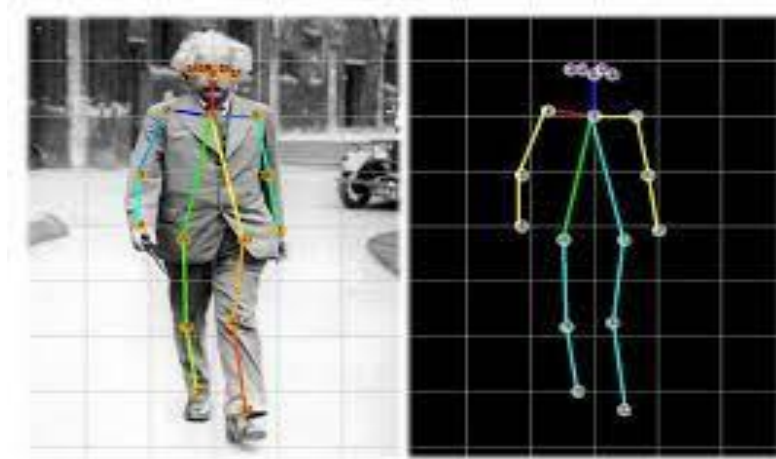
3.3. Poz Tahmini

Poz analizi, insanların aktivitelerini tanımada ve kişiler arası iletişimlerini anlamada önemli rol oynar. Bilgisayarlı görü alanında birçok çalışması bulunan ve araştırmaların devam edildiği geniş bir konudur. Genellikle insan vücudunun eller, dirsekler, dizler ve hatta göz, ağız gibi kilit noktalarını takip etmek ve tanımlamak üzerine çalışmalar yapılır.

İnsan poz tahmini, bilgisayarlı görü topluluğu açısından önemli bir araştırma konusudur. Araştırmacılar ağırlıklı olarak, insan bilgisayar etkileşimi, aksiyon tanıma, gözetim, resim anlama, tehdit öngörüsü gibi çeşitli alanlarda araştırma ve çalışma yapmışlardır. Uygulama alanlarının çeşitliliği nedeniyle bu alanın tüm yönlerini kapsamak zordur. Poz tahmini, insan vücudunun farklı yer ve konumlarına bakılarak algılanabilir. İnsan pozu tahmini sorunu insan eklemlerinin yerleştirilmesi sorunu olarak tanımlandığından, aynı temel kural bilgisayar ortamında da uygulanır ve kullanılan modellerin birçoğu insan vücudundaki eklemleri referans olarak alır (Ojha vd., 2022).

Poz tahmini, kamera aracılığıyla elde edilen görüntülerden insan iskeletindeki kilit noktaların piksel olarak konumlarını tespit etme amacı ile ortaya çıkmıştır. Poz tahmini yöntemlerinin çıktısı Şekil 3.3'te gösterildiği şekilde, görüntüde tespit edilen eklem noktalarının piksel değerlerini ilişkilendirdiği kişi doğrultusunda verilmektedir. Videolarda kişilerin hareketlerini tahmin edebilmek için birbirini takip eden görüntü kareleri boyunca takip edilmeleri gerekir. Bu sayede poz tahmini yapılacak kişilerin video süresince hangi zaman diliminde hangi hareketleri yaptığı tespit edilebilir. Bu probleme ilişkin yaygın eksiklikler arasında, video kareleri arasındaki zamansal bağımlılığı yakalayamamaktan kaynaklanan hareket bulanıklığı, video bulanıklığı veya poz tikanıklıklarının ele alınamaması yer alır (Halıcı & Demirhan, 2023).

Poz tahmini, insan iskeletinin anlamlandırılması, insan aktivitelerinin tanınması ve tahmini, insan-insan veya insan nesne arasındaki etkileşimini anlama, video veya görüntüde gerçekleştirilen eylemi yakalama ve elde edilen çıktılarından oluşturulan animasyonlar için oldukça önemlidir.



Şekil 3.3. Poz tahmini (Gupta vd., 2021)

Poz takibi tek kişi üzerinde yapılabileceği gibi çok kişili poz takibi de yapılabilir. Kameraların direkt olarak hareketi gerçekleştiren kişiyi çekmediği durumlarda elde edilen görüntülerde poz takibi oldukça zordur. Özellikle çok kişi içeren videolarda kişiler birbirinin

önünden geçer ise geçici olarak görüntü kaybı ve dolayısıyla poz takibinde ve analizinde kayıp yaşanabilir (Snower vd., 2019). Bu gibi durumların önüne geçebilmek ve takibi kaybetmemek amacıyla derin öğrenme poz tahmin yöntemleri Şekil 3.4'te gösterildiği şekilde iki ayrı yaklaşım sunar: yukarıdan aşağıya (top-down) ve aşağıdan yukarıya (bottom-top). Yukarıdan aşağıya yöntemler önce kişileri sınırlandıran bölgeyi bir dikdörtgen alan biçiminde tespit eder ve daha sonra bu dikdörtgen bölgenin içinde yer alan eklem noktalarını bulmaya çalışır. Bunun aksine aşağıdan yukarıya yöntemler görüntünün veya videonun tüm piksellerini analiz eder, kilit noktalar için bir çerçeve oluşturur. Bu noktaları bir araya toplayarak insan bedenine ulaşır. Her iki yöntemin de avantaj ve dezavantajları bulunması sebebiyle yapılacak çalışmanın amacına uygun yaklaşımın benimsenmesi önemlidir (Liu vd., 2021).



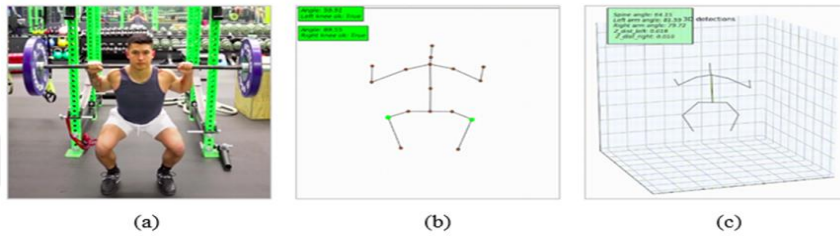
Şekil 3.4. Poz tahmin yöntemleri: (a) yukarıdan aşağıya, (b) aşağıdan yukarıya (Liu vd., 2021)

Poz tahmini teknikleri ile insan vücudundaki eklemleri tanımlanarak bir dizi koordinat yakalanır. Elde edilen koordinatlar ile tahminlemeler gerçekleştirilir. Poz tahmini için kullanılan modeller temelde iki teknik ile pozları algılayabilir. Bunlar 2B poz tahmini ve 3B poz tahminidir.

2B Poz Tahmini: Görüntüdeki poz tahmini yapılacak kişinin eklem noktaları, her bir eklem için x, y koordinatlarını içerir.

3B Poz Tahmini: 2B poz tahmininde elde edilen x ve y koordinatlarına ek olarak z boyutu da tahmine eklenir. Böylece iki boyutlu bir görüntü 3 boyutlu hale dönüştürülür. Yapılan bu işlem, analizi yapılacak olan objenin ya da kişinin uzaysal konumunun tahminini sağlar. 3B insan pozu tahmini, derinlik koordinatını dikkate aldığı ve bu sonuçları hesaplamaya getirdiği için uygulama ölçümlerine daha iyi doğruluk sağlar. Hareketlerin çoğu için derinlik önemlidir çünkü insan vücudu iki boyutta hareket etmez (Gupta vd., 2021).

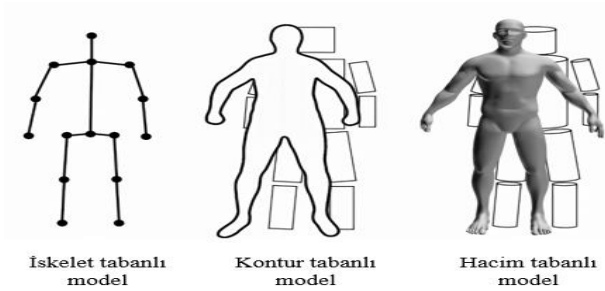
Poz tahmini modelleri Şekil 3.5'te örneklendirilmektedir.



Şekil 3.5. Poz tahmini modelleri: (a) orijinal görüntü, (b) 2b poz tahmini, (c) 3b poz tahmini (Gupta vd., 2021)

3.3.1. İnsan vücudu modelleri

İnsan vücudunun parçalarının pozisyonu-koordinatları, insandaki görsel girdi verilerinden bir insan vücudu temsili geliştirmek için gereklidir. Bu sebeple oluşturulmuş insan vücudu modellerinin 3 yaygın türü vardır. Şekil 3.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6. İnsan vücudu modelleri (Gupta vd., 2021)

İskelet tabanlı model: İskelet tabanlı model, esnekliği, uyarlanabilir ve anlaşılır olması nedeniyle insan poz tahmininde en çok kullanılan modeldir. Bunun nedeni, bir insan vücudunun iskelet yapısını oluşturan ayak bilekleri, dizler, omuzlar, dirsekler, bilekler ve uzuv yönelimleri gibi bir dizi eklemden oluşmasıdır. 2B ve 3B pozları tahmin etmek için iskelet tabanlı model kullanılır. Ancak genellikle 2B ve 3B yöntemler birlikte kullanılır. Kinematik model olarak da adlandırılır. Öte yandan kinematik model, doku ve şekil bilgilerinin yakalanması söz konusu olduğunda sınırlamalara sahiptir.

Kontur tabanlı model: Öncelikle 2B vücut hatlarını temsil etmek için kullanılır. Bu model, insan vücudunun görünüşünü ve şeklini göstermek için kullanılır. Genellikle vücut parçaları, insan vücudunun dış hatlarına yaklaşan çok sayıda dikdörtgenle temsil edilir.

Hacim tabanlı model: Vücut parçalarının insan vücudunun dış hatlarına yaklaşan çok sayıda dikdörtgenle temsili 3B olacak şekilde yapılır (Dubey & Dixit, 2023).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Literatürde yapılan birçok çalışma, Mediapipe ve benzeri kamera tabanlı sistemlerin uzaktan rehabilitasyonda nasıl kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak, pratik rehabilitasyon uygulanabilirliği ile ilgilenmemektedir. Hareket algılamanın doğruluğunu değerlendiren araştırmalar, tipik olarak yalnızca belirli bir egzersiz hareketini inceler ve sabit bir noktaya bakan sistemler kullanır. Genel olarak, yürüme ve koşma hareketi söz konusu olduğundan, sistem tasarımı ve kurulumu benzerlik göstermektedir.

Bu çalışmada ev ortamında, uzaktan rehabilitasyon sağlayan kamera tabanlı bir yaklaşım ile kullanıcılara düşük maliyetli ve pratik bir tasarım sunmak hedeflenmektedir. Kamera tabanlı yaklaşımın avantajı, herhangi bir RGB videodan hareket algılama yeteneğidir. Bu durum, anlık olarak görüntü alınmasına, mevcut kayıtların kullanılmasına ve büyük ölçekli bir değerlendirme yapılmasına izin verir. Oluşturulan sistemde, kullanıcının bilgisayar kamerası kullanması böylece ek bir cihaza ihtiyaç duymaması amaçlanmaktadır.

Çalışmada, PhysioTools ve Physitrack tarafından oluşturulan veri tabanlarına ait videolar kullanılmaktadır. Bu veri tabanları, dünyanın en kapsamlı egzersiz kitaplıklarıdır. PhysioTools ve Physitrack profesyonel eğitmenlerden oluşan veri tabanlarıdır ve ev ortamındaki egzersizler için bir video yardım görevi görürler. Bir videonun ortalama uzunluğu 20 saniyedir. Videolar, 25 fps ile 50 fps arasında değişen kare hızlarına, 0.1 – 0.6 Mpixel arasında değişen çözünürlüklere ve 200 kb/s'den yüksek bit hızlarına sahiptir (Adolf vd., 2022) .

Kullanıcıların uygulaması istenen hareketler bahsedilen veri tabanlarından, örnek olması açısından çalıştırılacak vücut fonksiyonuna göre seçilmiş ve videolar amaç doğrultusundan kesilerek bazı hareketlerin veya tekrarların belirli kısımları kullanılmıştır.

Oluşturulan yeni videolar, kullanıcıdan tekrarlamasını istenilen egzersizleri oluşturmaktadır. Kullanılacak videolarda, video uzunlukları ortalama 6 saniyeye düşürülmüş, bunun dışında video kalitesi üzerinde ek bir kısıtlama uygulanmamıştır. Gerçek rehabilitasyon uygulamalarında alanında uzman kişilerin önereceği hareketler ile sistemin temel yapısını değiştirmeden kullanabilmek mümkündür.

Uygulamada toplam 11 egzersiz bulunmaktadır. İlk grup 3 kol hareketinden, ikinci grup 3 bacak hareketinden, üçüncü grup 2 ayak bileği egzersizinden ve dördüncü grup 2 omuz hareketinden oluşmaktadır. Son hareket ise tüm vücudu çalıştıran bir egzersiz içermektedir. Egzersizlere ait videolardan bazı kesitler Şekil 4.1’de gösterilmektedir.

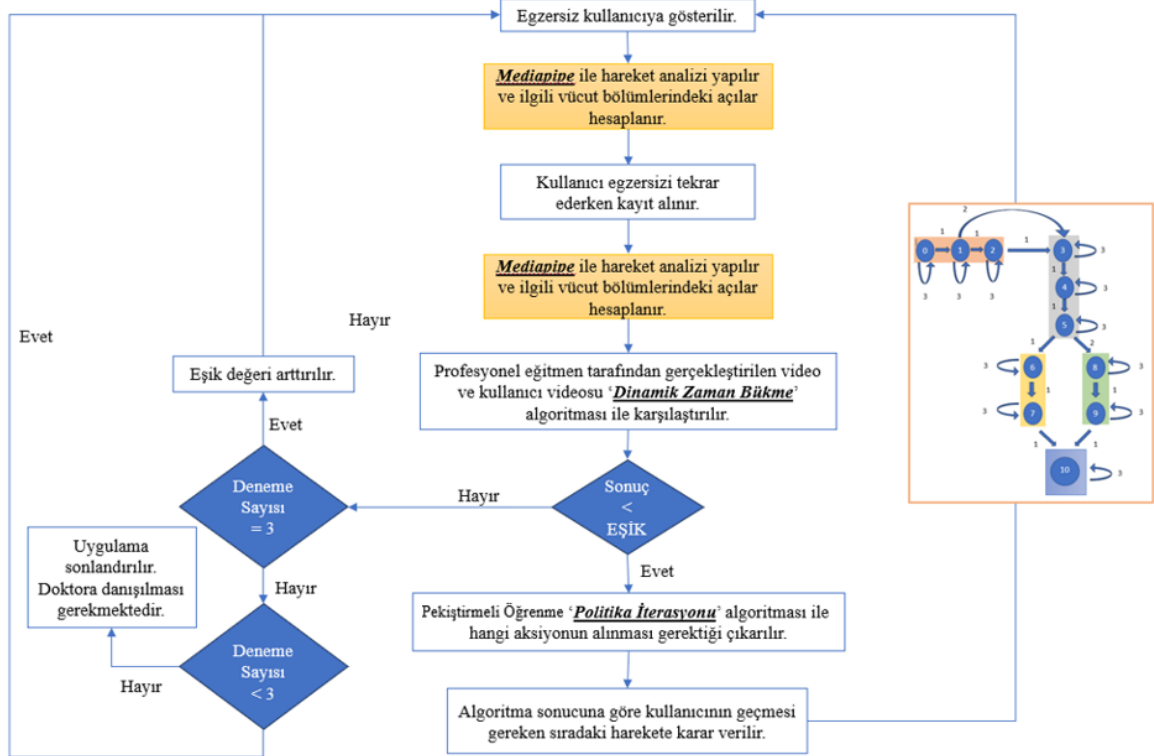


Şekil 4.1. Egzersiz örnekleri

4.1. Sistem Tasarımı

Bu çalışmada önerilen yöntem, fizyoterapi hareketlerinin önceden belirlenmiş bir çerçeve içerisinde oyunlaştırılmış bir sistem ile kullanıcılara sunulmasını hedeflemektedir. Bir dizi fizyoterapi hareketinin gerçekleştirileceği sistemde, ilk olarak kullanıcıya uygun olarak oluşturulmuş bir egzersiz tasarımı gerekmektedir. Yapılan tez çalışmasında PhysioTools kitaplığından alınan videolar analiz edilerek oluşturulacak sisteme uygun şekilde düzenlenmiştir. Bu kapsamda kullanıcının farklı vücut fonksiyonallitelerini

çalıştırmayı amaçlayan egzersizler gruplar halinde kullanıcıya sunulmaktadır. Çalışma kapsamında kişinin kol, bacak, ayak bileği, omuz ve tüm vücut hareketlerini içeren egzersizleri tamamlaması ya da tamamlamaya çalışması beklenmektedir. Temel olarak mevcut kayıtlar ile anlık kaydedilen egzersizlerin karşılaştırılmasına dayanan yapıda, hareket analizi yöntemlerinden Mediapipe kullanımı tercih edilmektedir. Sistemin genel çalışma mantığı Şekil 4.2. 'de görselleştirilmektedir.

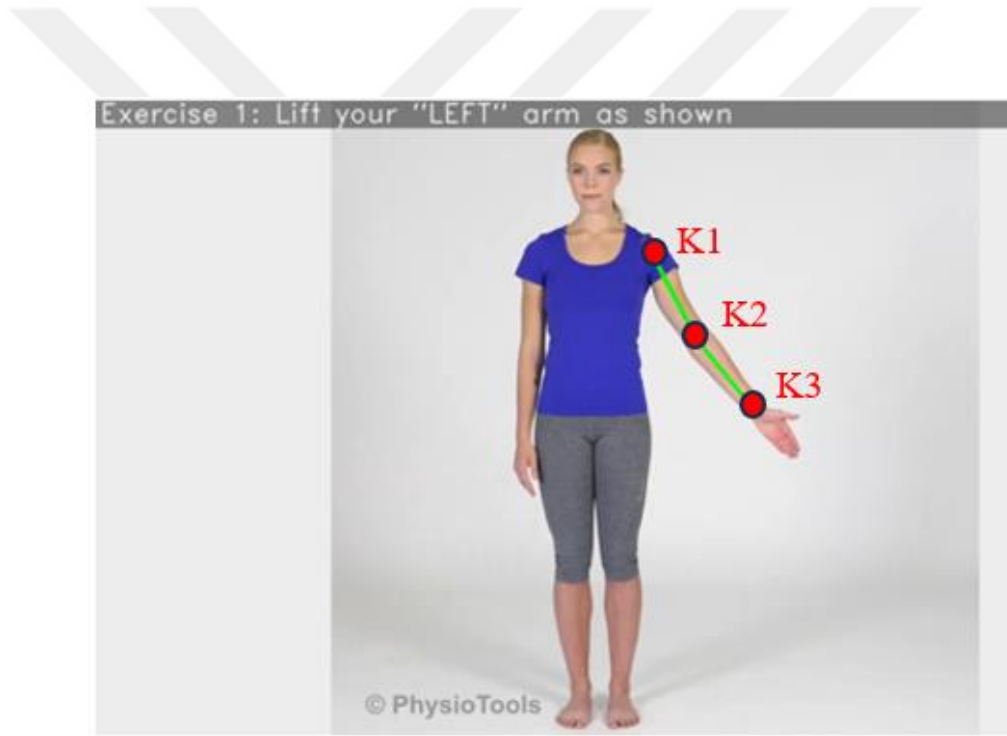


Şekil 4.2. Uygulama tasarımı

İlk egzersizin gösterilmesi ile sistem çalışmaya başlar. Egzersizle birlikte çalıştırılması istenen bölgedeki yönlendirici ve yazılı talimatlar ile kullanıcı harekete hazırlanır. Kamera çalıştırılıp kullanıcı kaydı alınmadan önce eğitmen tarafından gerçekleştirilen egzersize ait hareket analizi Mediapipe aracılığıyla yapılarak ilgili bölgeye ait açılar çıkarılır.

¹ KVKK ve kişisel mahremiyet kapsamında kişiyi belirtebilecek olan fiziksel / biyolojik veriler ile mahremiyet oluşturabilecek veriler kaydedilmemektedir.

Mediapipe modeli her bir eklem için x ve y koordinatlarını verir. Pozları karşılaştırmanın bir yolu, videonun/oyuncunun her karesi için oluşturulan (x,y) koordinatlarını doğrudan karşılaştırmaktır. Piksel konumları üç boyutlu uzaydaki gerçek mesafelere karşılık gelmediğinden bu doğru bir değerlendirme olmaz. Ayrıca, farklı insanlar farklı vücut boyutlarına ve farklı uzuv uzunluk oranlarına sahip olduğundan, gerçek mesafeleri elde edebilmek dahi eklemler arasındaki Öklid mesafesini karşılaştırmak mümkün değildir. Her kullanıcı aynı kameraya sahip olmayacağından kamera farklılıkları da doğru karşılaştırma yapmaya uygun olmamaktadır. Bu noktada çözüm, iki nokta arası açıyı hesaplamaktır. Şekil 4.3.'te gösterilen bir kol egzersizi için omuz, dirsek, el bileği ve kol ile vücut arasındaki açılar önemli olur.

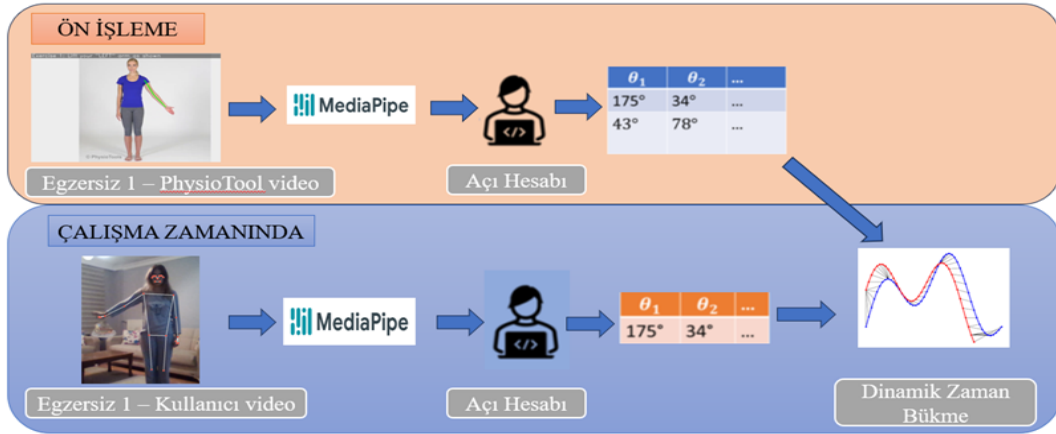


Şekil 4.3. Örnek kol egzersizi

Denklem 4.1' de K1, K2, K3 bir açının oluşması için gereken üç noktayı, α ise K1, K2 ve K3 olarak ifade edilen omuz, dirsek ve el bileği arasındaki açıyı temsil etmektedir.

$$\alpha = \text{atan2}(K3.y - K2.y, K3.x - K2.x) - \text{atan2}(K2.y - K1.y, K2.x - K1.x) \quad (4.1)$$

Hem eğitmen videosu hem de kullanıcının videosundan kolayca yakalanabilecek bir özellik olarak kullanılan açılar eğitmenin ve kullanıcının vücut büyüklüğüne göre değişmez. Bu sebeple karşılaştırma için doğruluğundan emin olunacak bir girdi oluşturur. Açı hesaplama işlemi eğitmenin videosu gösterildikten sonra ön işleme sürecinde çıkarılır. Ön işlemeyen sonra kamera, kullanıcının egzersiz sürecini kaydetmek üzere aktif hale getirilir. Böylece 10 saniye boyunca kullanıcının hareketleri sistem tarafından kaydedilir. Kafa karışıklığını önlemek amacıyla kullanıcı kendi videosunun ayna yansımısını ekranda görür. Bilgilendirme amacıyla ekranda bir zamanlayıcı aracılığıyla kullanıcıya kaç saniye kaldığı gösterilmektedir. Kullanıcının yaptığı egzersizden elde edilen kayıt, tıpkı eğitmenin egzersizinde olduğu gibi Mediapipe ile analiz edilir ve aynı bölgelere ait açılar hesaplanır. Açı hesabı için kullanılan formülasyonda hareketin kapsamına ve etkilediği vücut fonksiyonallitesine göre Mediapipe aracılığıyla elde edilen farklı kilit/eklem noktaları kullanılmaktadır. Bahsedilen yapı Şekil 4.4.'te görselleştirilmiştir.



Şekil 4.4. Hareket analizi yapısı

Eğitmenlerin video uzunlukları 4 -11 saniye aralığında değişiklik göstermektedir. Buna rağmen kullanıcılar egzersizi yaparken 10 saniyelik kayıt alınmaktadır. Her iki videodan çıkarılan açılar zaman bağımlı olarak karşılaştırmak doğru olmayacağından, dinamik zaman bükme algoritması kullanılmıştır. Böylece değerlerdeki zaman bağımlılığı ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan poz tahmin yöntemi, poz tahmini için kullanılabilecek diğer yöntemler ve dinamik zaman bükme algoritması alt başlıklarda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

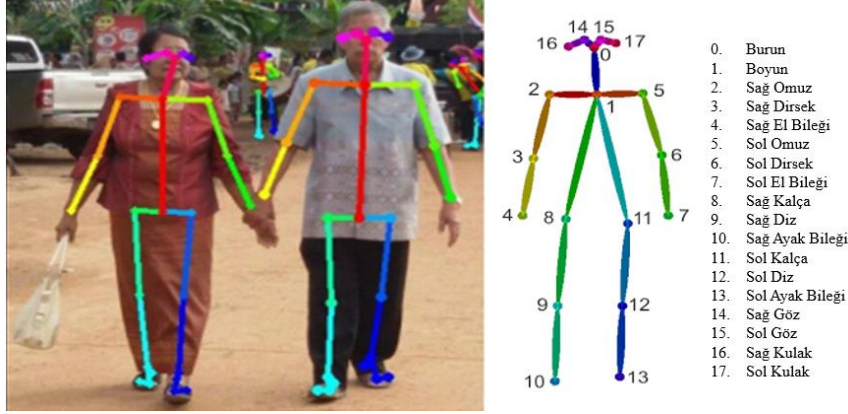
4.2. Poz Tahmini Yöntemleri

İnsan poz iskeleti, bir bireyin belirli bir formatta yönelimini ifade eder. Temel olarak, bir bireyin pozunu tanımlamak için bağlanabilen bir dizi veri noktasıdır. İskelettteki her veri noktasına bir parça veya koordinat denilebilir. İki koordinat arasındaki ilgili bir bağlantı, bir uzuv veya çift olarak bilinir. Ancak, veri noktalarının tüm kombinasyonlarının ilgili çiftlere yol açmadığına dikkat etmek önemlidir. Bahsedilen koordinatları elde edebilmek için bir takım poz tahmin yöntemleri kullanılır.

Yöntem, bir video kaydı çerçevesindeki her kişi için bir güven puanı ve bir dizi önemli nokta verir. Güven puanı, bir kişinin doğru tespit edilmiş olma olasılığını temsil eder. 0 ile 1 değer aralığındadır. Burada 1, kesin bir algılamayı temsil eder. Anahtar noktalar, her biri ayrı bir güven puanına ve bir konuma sahip vücut bölümlerini temsil eder. Bir kilit noktanın güven puanı, kilit noktanın doğru bir şekilde tespit edilmiş olma olasılığını temsil eder. Anahtar noktanın konumu, çerçevedeki noktanın koordinatlarını temsil eder ve x ve y değerleri olarak ifade edilir.

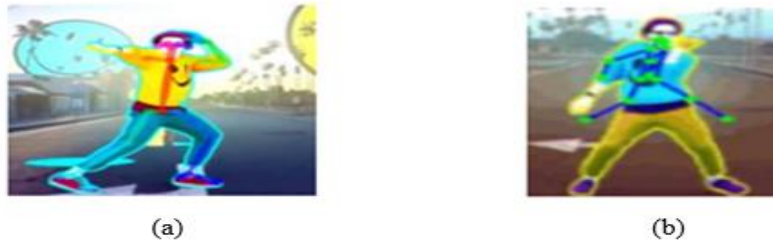
4.2.1. OpenPose

OpenPose, görüntülerde insan vücudu, el yüz ve ayak anahtar noktalarını birlikte algılayan ilk gerçek zamanlı çok kişili sistemdir. Toplam 135 anahtar noktayı tespit etme yeteneğine sahiptir. Yöntem, ‘COCO 2016 Keypoints Challenge’ yarışmasının galibidir. Makul kalitede olması ve çok kişili ortamlardaki tutarlılığı sebebiyle popülerdir. 2 boyutlu kilit nokta tespiti yapıldığında Şekil 4.5’te gösterildiği gibi 25 noktalı vücut/ayak tahmini yapmaktadır. En doğru ve net sonuçlar veren modellerden birisidir fakat yoğun işlemlerden dolayı güçlü hesaplama kaynakları gerektirir (Namburi ve Hengsanunkul, 2022).



Şekil 4.5. OpenPose gösterimi (Namburi ve Hengsanunkul, 2022)

Ojha vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada 2009 yılında çıkarılan ‘Just Dance’ isimli oyun uygulamaya geçirilmeye çalışılmıştır. Oyunda poz tahminlemesi kullanılırken sadece sağ el referans alınmaktadır. Bu sebeple çalışmada, bilgisayar kamerasını rahat kullanabilmek amacıyla poz tahmininde üst vücutun referans alınması amaçlanmıştır. Poz tahminlemede OpenPose ve MoveNet modelleri yöntem olarak kullanılmış ve veriler Youtube’den alınan Just Dance videolarından oluşturulmuştur. Ön hazırlık aşamasında videolardan OpenPose aracılığıyla elde edilen bilgilerle kilit noktalar arasındaki açılar bulunmuştur. Bilgisayar kamerasından alınan görüntüdeki kişiye ait anahtar noktalar MoveNet kullanılarak alınmış ve oluşturulan açılar ön hazırlık aşamasındaki açılarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.6. Sonuçlar: (a) openpose, (b) movenet (Ojha vd., 2022)

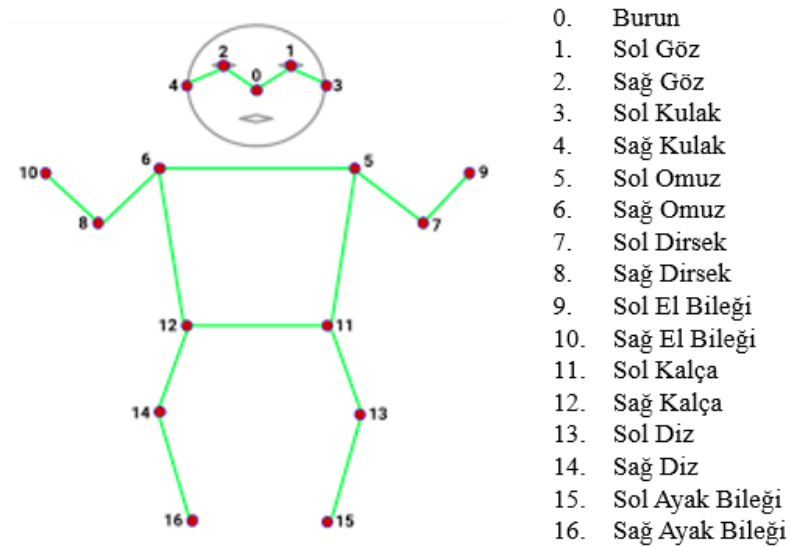
Şekil 4.6’den görüleceği üzere kullanılan modeller ile elde edilen sonuçlar poz tahminlemede yetersiz kalmıştır ve fazlasıyla hata payı içermektedir.

4.2.2. Movenet

MoveNet, Google tarafından 17 Mayıs 2021’de piyasaya sürülen bir poz tahmin modelidir. Geleneksel poz tahmin modellerine kıyasla yoğun hareket içeren videolarda algılama doğruluğunu artırır. Canlı spor uygulamaları için idealdir. 17 adet iki boyutlu kilit noktayı yüksek hız ve yüksek doğrulukla algılayabilir.

Lighting ve Thunder olmak üzere iki modeli mevcuttur. Birincisi hız gerektiren uygulamalar, ikincisi ise doğruluk gerektiren uygulamalar için kullanılabilir. Bilgisayarlarda ve akıllı telefonlarda 30 fps veya daha yüksek çerçeve hızlarında çalışabilir. (Tensorflow, 2023)

MoveNet, insan anahtar noktalarını doğru bir şekilde yerleştirmek için ısı haritalarını kullanır. Bu, aşağıdan yukarıya bir tahmin modelidir. Yani, önce tüm insanların eklemlerini tespit eder, sonra bu eklemleri her insan için pozlar halinde birleştirir (Chung vd., 2022). Modele ait kilit noktalar Şekil 4.7.’de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. MoveNet kilit noktalar (Tensorflow, 2023)

4.2.3. PoseNet

İnsan figürlerindeki temel noktaları tespit eder. Model, tek kişi veya çok kişi algılama algoritması ile çalışır. Tek kişilik algılayıcı daha hızlı ve basittir ancak ekranda sadece bir kişinin bulunmasını gerektirirken, çok kişilik algılayıcı birçok kişiyi tespit edebilir. Tek kişilik aloritmadan biraz daha yavaştır. Her poz 17 kilit nokta içerir ve MoveNet ile nokta yapısını kullanır (Chung vd., 2022).

4.2.4. AlphaPose

AlphaPose, hem PyTorch hem de MXNet temel alınarak geliştirilmiştir. PyTorch'un esnekliğinden yararlanan AlphaPose, Linux ve Windows işletim sistemlerinin ikisini de destekler. Şekil 4.8.'de örneği gösterilen çok kişili poz tahminleyicisidir. Aynı kişiye karşılık gelen pozları kareler arasında eşleyebilmek için etkili bir poz izleyici kullanır (Fang vd., 2022) .



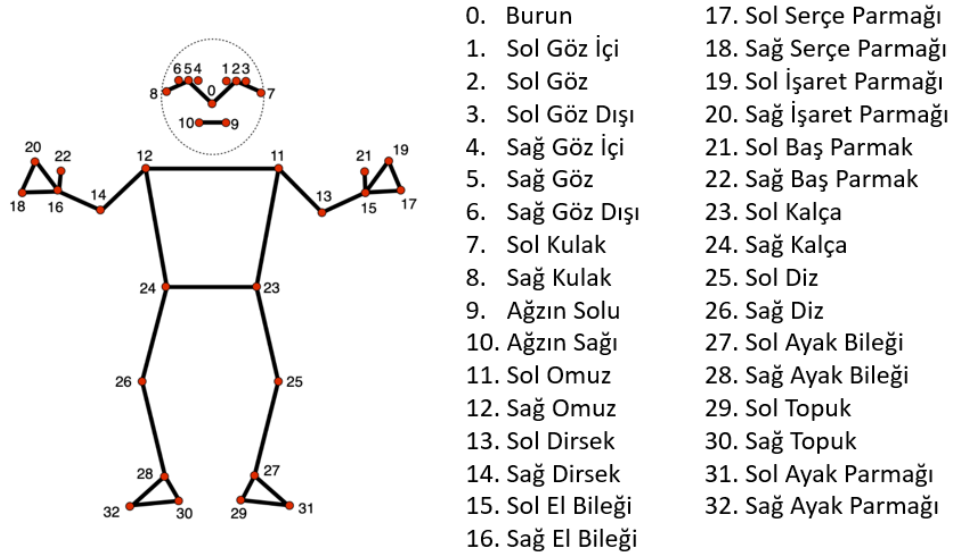
Şekil 4.8. AlphaPose örnek gösterim (Fang vd., 2022)

Bahsedilen modeller genellikle yoğun hesaplama gücü gerektirir. Bu sebeple gerçek zamanlı uygulamalarda çalıştırılmak istendiğinde performans sorunları ortaya çıkabilir. Sundukları vücut modelleri doğrultusunda insan vücut hareketlerini tahmin etmede yetersiz

kalabilir ve dış etmenlere (arka plan karmaşıklığı, düşük ışık vb.) hassasiyet gösterir. Bu modellerin aksine, Mediapipe daha düşük hesaplama gücüne ve bellek kullanımına ihtiyaç duyar. Bu durum, canlı video ve gerçek zamanlı uygulamalarda hızlı ve etkili bir şekilde çalışabilmesi anlamına gelir. Mediapipe, yüz, vücut, el ve diğer nesnelerin izlenmesi gibi çeşitli işlevsellikleri destekler. Mediapipe’ın sunduğu vücut modeli diğer modellerden daha fazla kilit nokta sağlar. Böylece model, karışık hareketlerin analizinde daha iyi sonuçlar sunmaya yardımcı olur. Fizyoterapi uygulamasında gerçek zamanlı hareket analizi yapılmaktadır ve asıl amaç kullanıcı için kullanım pratikliği sağlamaktır. Bu sebeple projede Mediapipe modeli tercih edilmekte ve hareket analizi amacıyla kullanılmaktadır.

4.2.5. Mediapipe

Google tarafından oluşturulan, makine öğrenmesi çözümleri oluşturmak için kullanılan açık kaynaklı bir çerçevedir. Mediapipe, modüler yapısı sayesinde kullanımı kolay ve hızlı uygulanabilir bir çözüm sunar. Birçok platformda kullanılabilmesi açısından avantajlıdır. Mediapipe yöntemi çoğu modern cep telefonunda, masaüstünde, web’de gerçek zamanlı performans elde edilmesini sağlamaktadır. Yüz tanıma, çoklu el takibi, nesne algılama ve izleme, saç bölütlemesi, poz tahmini gibi birçok alanda çalışma yapmaya imkân sağlamakta ve örneklerine ulaşılabilir (Kim vd., 2023). Videodan insan poz tahmini, işaret dili tanıma ve tüm vücut hareket kontrolü gibi çeşitli uygulamalarda Mediapipe kullanımı benimsenmiştir. Yoga, egzersiz, dans gibi fiziksel aktivitelerin hareket sıralaması sınıflandırılması ve vücut yer işaretleri tespiti yoluyla hareketlerin miktarının belirlenmesini sağlayan kullanımlar da ayrıca çalışma alanları içerisinde bulunmaktadır. Mediapipe poz işareti modeli, bir görüntü veya videodaki insan vücudunun yer işaretlerinin algılanmasına olanak tanır. Bu model, önemli vücut konumlarını belirlenmesi, duruşun analiz edilmesi ve hareketlerin kategorize edilmesi için kullanılabilir. Model, görüntü veya video ile çalışan makine öğrenmesi modellerini kullanır. Mediapipe poz yer işareti modeli, 33 yer işaretinin konumunu tahmin etmektedir. 33 insan vücudu anahtar noktasından oluşan bu topoloji, tek başına poz tahmininden vücut semantiğinin belirlenmesine olanak tanır. 3B poz algılamayı destekler. Modele ait kilit noktalar Şekil 4.9’da gösterilmektedir (Mediapipe, 2023).



Şekil 4.9. Mediapipe kilit noktala gösterimi (Mediapipe, 2023)

4.3. Dinamik Zaman Bükme Algoritması (DTW)

Dinamik zaman bükme (dynamic time wrapping, DTW), mükemmel şekilde senkronize olmayan iki, genellikle zamansal diziyi karşılaştırmanın bir yoludur. İki dizi arasındaki optimal eşleşmeyi hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Başka bir deyişle, zaman serilerinin benzerlik ölçümünde kullanılan bir eşleştirme yöntemidir. Dinamik zaman bükme, konuşma tanıma, veri madenciliği ve finansal piyasalar gibi birçok alanda kullanışlıdır. Veri madenciliğinde genellikle iki zaman serisi arasındaki mesafeyi ölçmek için kullanılır.

Finansal piyasalarda, tam olarak eşleşmeler bile, benzer zaman dilimlerinde hisse senedi alım satım verilerinin karşılaştırılmasında uygulanabilir. Şubat (28 gün) ve Temmuz (31 gün) için aylık ticaret verilerinin karşılaştırılması örnek olarak verilebilir. Giyilebilir kondisyon izleyicileri ise hızları değişse dahi yürüme hızı ve adım sayısını doğru şekilde hesaplar (Berndt ve Clifford, 1994). Dinamik zaman bükme yönteminin bundan farklı kullanıldığı alanlar da vardır. Bu yöntem kaynak olarak ses dalgaları ile 1970'lerden beri konuşma ve kelime tanıma için kullanılır. Konuşma esnasında çıkan seslerden kelimeleri

anlayan bir sistemde, seslerdeki vektörler karşılaştırılır. Köse ve Şen (2007) tarafından yapılan çalışmada konuşma ve konuşulan sözcükler gibi bir dilin temel özelliklerinden yararlanarak, konuşmacının konuştuğu dil belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmadaki ses verilerinin eşleşmesi safhasında çapraz korelasyon (cross correlation) ve dinamik zaman bükme yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, eğer kayma yoksa %99 oranında başarı elde edilebildiği görüşmüştür. Verilerde kayma veya gürültü varsa bu durumda eşleşme oranının %40'lara kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Böylece çalışmadaki %40 ile %98 arasındaki eşleşme oranları %50 eşik değeri belirlenerek, konuşma içindeki kelimelerin kullanılma sayısının tespiti bu ölçüte bağlı olarak yapılmıştır.

İki ayrı zamana sahip serilerin benzerliği genellikle verilerin vektörlere dönüştürülmesi ve bu vektörler arasındaki Öklid mesafesinin ölçülmesi yoluyla değerlendirilir. Benzerlik ölçümü için, iki serinin elemanları arasındaki Öklid uzaklıklarının toplamı hesaplanabilir. Hesaplanan değer ne kadar küçükse, seriler birbirine o kadar yakın kabul edilir.

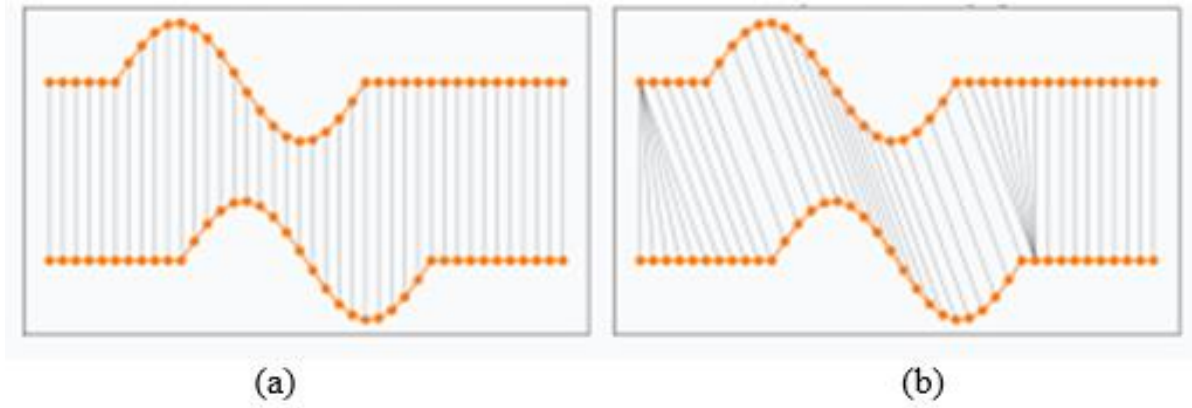
Çizelge 4.1. Dinamik zaman bükme örneği

Zaman(T)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Seri1	1	6	8	2	6	7	4	5	0	0
Seri2	1	0	6	8	2	6	7	4	5	0

Örneğin Çizelge 4.1’de gösterildiği şekilde, T zamanında örneklenmiş iki sinyalimiz olsun: Seri1 ve Seri2. Zamana göre değerlendirdiğimizde elemanlar genellikle birbirinden farklıdır, ancak $t = 0$ durumunda eşleşen elemanlar vardır. Öklid uzaklıklarının toplamını hesapladığımızda, sonuç Seri1 ve Seri2’nin benzemediği yönünde olabilir. Fakat, Seri2’deki elemanların Seri1’deki elemanları bir birim gecikmeli bir versiyonu olduğunu düşünersek, elemanların örtüştüğü görülebilir. Bu durumda, Öklid uzaklıkları toplamı hesabının seriler arasındaki gerçek benzerliği yansıtmayabilir. Zaman gecikmelerini ve örüntülerdeki eşleşmeleri dikkate almak, serilerin benzerlik durumunu değerlendirirken daha gerçekçi bir şekilde değerlendirmeye yardımcı olabilir. Serilere ait elemanların zaman bağımlılığını

kaldırdığımızda, her elemanın Öklid uzaklıklarına göre zamandan bağımsız en yakın elemanla eşleştirilmesiyle, tüm elemanlar için uygun bir örüntü çıkarılabilir. Örnekteki durum göz önüne alındığında Seri2'deki 3. eleman ile Seri1'deki 2. elemanı eşleştirdiği böylece $t = 2$ zamanının, $t = 1$ zamanına kaydığı görülecektir. Diğer bir tabirle zamanın bükülmüş olduğu gözlemlenecektir.

Şekil 4.10'daki grafikler incelendiğinde iki ayrı seriye ait Öklid mesafesiyle yapılan eşleme ve dinamik zaman bükme ile yapılan eşleme daha net bir şekilde anlaşılır. Öklid ile yapılan eşleşmelerde elemanlar zaman bağımlı olacak şekilde eşlenmiştir. Bu sebeple iki seri benzer olmasına rağmen yöntemin kısıtlayıcı olması sebebiyle doğru örüntüyü bulmak mümkün olmayacaktır. Diğer taraftan, dinamik zaman bükme yöntemi ile zaman senkronizasyon kısıtı olmaması sebebiyle serilerin benzerliği hakkında fikir sahibi olmak daha anlamlı görünmektedir.



Şekil 4.10. Grafik: (a) Öklid, (b) dinamik zaman bükme (Ahn vd., 2023)

Bahsedilen örnekten de görülebileceği gibi seriler arasındaki benzerlikleri çözümlemedeki en büyük sorun elemanların eşlemesinde zaman senkronizasyon-bağımlılık yaratılmasıdır. Bahsedilen yöntem zaman bağımlılığını ortadan kaldırmayı amaçlar. Böylece farklı büyüklüklerdeki vektörler için de karşılaştırma yapılabilir ve benzerliklerine dair fikir oluşturulabilir (Wang ve Gasser, 1997).

Dinamik zaman bükme algoritmasını matematiksel olarak inceleyebilmek için Denklem 4.2'deki gibi iki dizimiz olduğunu varsayalım:

$$\begin{aligned} u &= u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n \\ v &= v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_m \end{aligned} \quad (4.2)$$

u ve v dizileri, her bir (i,j) noktasının u_i ve v_j arasındaki eşleşme olduğu, n 'ye m 'lik bir ızgara oluşturulacak şekilde düzenlenebilir. Bir bükme yolu ω , u ve v elemanları aralarındaki mesafeyi en aza indirecek şekilde eşler. $\omega_{(i,j)}$ ızgara noktaları dizisidir. Vektörlere ait elemanların olası tüm eşleşmelerinin kümülatif uzaklıkları, kümülatif uzaklık tablosunu (ω), bu tabloda sadece eşleşen elemanların kümülatif uzaklıkları da bükme fonksiyonunu oluşturur. (i_k, j_k) 'ye giden optimal yol ($D_{min}(i_k, j_k)$), Denklem 4.3'teki şekilde hesaplanabilir.

$$D_{min}(i_k, j_k) = \min_{i_{k-1}, j_{k-1}} D_{min}(i_{k-1}, j_{k-1}) + d(i_k, j_k | i_{k-1}, j_{k-1}) \quad (4.3)$$

Burada d , Öklid mesafesidir. Daha sonra D ile ifade edilen toplam yol maliyesi Denklem 4.4'te gösterildiği şekilde hesaplanabilir:

$$D = \sum_k d(i_k, j_k) \quad (4.4)$$

Bükülmüş yol, iki diziye hizalamak için dinamik bir programlama yaklaşımı kullanılarak bulunur. Tüm yollardan geçmek verimli değildir. Verimlilik amacıyla olası bükülme yollarının sayısını sınırlamak önemlidir. Bu sebeple, aşağıda kısıtlamalar özetlenmiştir.

Sınır koşulu: bu kısıtlama, bükülme(eşleme) yolunun i ve j olarak ifade edilen her iki sinyalin başlangıç noktalarıyla (i_1, j_1) başlamasını ve bitiş noktalarıyla (i_k, j_k) bitmesini sağlar. Sınır koşulu Denklem 4.5'te gösterilmektedir.

$$i_1 = 1, i_k = n \text{ ve } j_1 = 1, j_k = m \quad (4.5)$$

Monotonluk durumu: bu kısıtlama Denklem 4.6'da gösterildiği şekilde, noktaların zaman sırasını korur, zamanda geriye gitmez.

$$i_{t-1} \leq i_t \text{ ve } j_{t-1} \leq j_t \quad (4.6)$$

Süreklilik koşulu: bu kısıtlama, zaman içindeki bitişik noktalara giden yol geçişlerini sınırlar, zamanda atlamayı engeller. Matematiksel gösterimi Denklem 4.7'de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$i_t - i_{t-1} \leq 1 \text{ ve } j_t - j_{t-1} \leq 1 \quad (4.7)$$

Yukarıdaki üç kısıtlamaya ek olarak, izin verilen bir bükülme yolu için daha az sıklıkta başka koşullar da vardır. Bükülme penceresi durumu: izin verilen noktalar, ω (pozitif bir tam sayı) genişliğindeki belirli bir bükülme penceresinin içine düşecek şekilde sınırlandırılabilir. Bu durum Denklem 4.8'de gösterilmektedir.

$$|i_t - j_t| \leq \omega \quad (4.8)$$

Eğim durumu: eğilim yolu, eğimin kısıtlanması ve dolayısıyla tek yönde aşırı hareketlerin önlenmesi yoluyla sınırlandırılabilir. Kabul edilebilir bir eşleme yolu aşağıdaki kombinasyonlara sahiptir (Yadav ve Alam, 2018)

- Yatay hareketler
- Dikey hareketler
- Diyagonal hareketler

Algoritma uygulanırken ilk olarak Öklid uzaklıkları hesaplanır. Öklid hesabı iki değerin farklarının karesinin karekökü hesabıyla bulunur. Kümülatif uzaklık, bir elemanın eşine olan uzaklığı ile kendisinden önce eşleşen elemanların tümünün eşlerine olan uzaklıklarının toplamıdır. Kümülatif mesafe Denklem 4.9’da gösterildiği şekilde hesaplanırken, eleman çiftleri için hesaplanan kümülatif mesafelerden, elemanların bir birim gerisinde olan en küçüğü, her eleman çifti arasında hesaplanan Öklid mesafesine eklenir. Böylece son eşleşen elemanlara ulaşıldığında son hesaplanan kümülatif mesafe değeri mümkün olan en küçük değerde olur.

$$Küm[i][j] = d[i][j] + \text{Min}(Küm[i-1][j], Küm[i][j-1], Küm[i-1][j-1]) \quad (4.9)$$

Burada $Küm[i][j]$, birinci vektörün i . elemanı ile ikinci vektörün j . elemanlarının kümülatif uzaklığı, $d[i][j]$ ise bu iki eleman arasındaki Öklid uzaklığıdır. Sırasıyla m ve n boyutlu u ve v vektörleri için $Küm[m][n]$ değeri, benzerlik hakkında yorum yapılabilmesini sağlar. Bu değer dinamik zaman bükme algoritmasının sonucudur. Referans vektörlerin benzerlikleri, sonucun sifıra yakınlığıyla doğru orantılıdır. Dinamik zaman bükme uygulamaları:

- Hareketlerdeki benzerlikleri tespit etmek. Örneğin bir kişi diğerinden daha hızlı yürüyorsa ve gözlem sırasında hızlanma ve yavaşlamalar varsa.

- Sözlü kelime tanıma uygulamaları. Kişi önceden kaydedilmiş örnek sesten daha hızlı veya daha yavaş konuşsa bile, örnek bir ses komutunu başkalarının komutlarıyla eşleştirmek için kullanılır.
- Korelasyon gücü analizi (Atasoy, 2011).

Tez çalışmasında elde edilen dinamik zaman bükme mesafe değerleri için eşik değeri belirlenmiştir. Eşik değerinin altında elde edilen karşılaştırma sonuçları sonrası kullanıcının geçeceği yeni durum için karar mekanizması olarak pekiştirmeli öğrenme kullanılmaktadır. Pekiştirmeli öğrenme algoritmalarından olan ‘Politika Algoritması’ her durumda nasıl aksiyon alınması gerektiğine karar vermektedir. Böylece uygulama boyunca dinamik zaman bükme algoritması sonucuna göre belirlenen kural tabanlı sistem ve politika algoritması aksiyonları birlikte çalışmaktadır. Bu sayede kullanıcıya sunulacak yeni hareket belirlenmektedir.

4.4. Pekiştirmeli Öğrenme

Pekiştirmeli öğrenme (PÖ, Reinforcement Learning, RL), istenen davranışları ödüllendirmeye ve/veya istenmeyenleri cezalandırmaya dayalı bir makine öğrenimi eğitim yöntemidir. Genel olarak, bir ajan çevresini algılayabilir, yorumlayabilir, harekete geçebilir ve deneme yanılma yoluyla öğrenebilir. Pekiştirmeli öğrenmede geliştiriciler, istenen davranışları ödüllendirmek ve olumsuz davranışları cezalandırmak için bir yöntem geliştirir. Bu yöntem, ajanı teşvik etmek için istenen eylemlere pozitif değerler ve istenmeyen davranışlara negatif değerler atar. Bu durum, ajanı optimum bir çözüme ulaşmak için uzun vadeli ve maksimum genel aramaya programlar. PÖ, bir aracının eylemleri gerçekleştirerek ve eylemlerin sonuçlarını görerek bir ortamda davranmayı öğrendiği geri bildirim dayalı bir makine öğrenimi tekniğidir. Ajan her iyi eylem için olumlu geri bildirim alır ve her kötü eylem için olumsuz geri bildirim veya ceza alır. PÖ’de ajan, denetimli öğrenmenin aksine, herhangi bir etiketli veri olmadan geri bildirimleri kullanarak otomatik olarak öğrenir. Etiketli veri olmadığı için, ajanın yalnızca deneyimiyle öğrenmesi zorunludur. PÖ, karar vermenin sıralı olduğu ve amacın uzun vadeli olduğu, oyun oynama, robotik vb. belirli bir

sorun türünü çözer. Ajan çevre ile etkileşime girer ve onu kendi başına araştırır. PÖ'de bir ajanın birincil amacı, maksimum olumlu ödülleri alarak performansı iyileştirmektir. Ajan, isabet ve deneme süreciyle öğrenir ve deneyime dayanarak görevi daha iyi gerçekleştirmeyi öğrenir. Bu nedenle, PÖ, akıllı bir aracının (bilgisayar programının) çevre ile etkileşime girdiği ve bunun içinde hareket etmeyi öğrendiği bir tür makine öğrenme yöntemidir denilebilir. Burada ajan, etmeni herhangi bir insan müdahalesi olmadan kendi deneyimlerinden öğrendiği için önceden programlamaya gerek yoktur. Örnek olarak bir labirent ortamında bulunan bir yapay zekâ ajanı olduğu ve amacının elması bulmak olduğu varsayılın. Ajan, bazı eylemler gerçekleştirerek çevre ile etkileşime girer ve bu eylemlere bağlı olarak, aracının durumu değişir ve geri bildirim olarak bir ödül veya ceza da alır. Ajan bu üç aksiyonu yapmaya devam eder (harekete geçme, durum değiştirme/aynı durumda kalma ve geri bildirim alma) ve bu eylemleri yaparak çevreyi öğrenir ve keşfeder. Ajan hangi eylemlerin olumlu geri bildirim veya ödüllere yol açtığını ve hangi eylemlerin olumsuz geri bildirim cezasına yol açtığını öğrenir. Pozitif bir ödül olarak ajan pozitif bir puan alır ve ceza olarak negatif bir puan alır (Kaelbling vd., 1996).

4.4.1. Pekiştirmeli öğrenmede kullanılan terimler

Ajan(A): Çevreyi algılayabilen/keşfedebilen ve ona göre hareket edebilen bir varlıktır.

Ortam (): Bir ajanın bulunduğu veya çevrelendiği bir durumdur. PÖ'de, doğası gereği rastgele olduğu anlamına gelen stokastik ortam olduğu varsayılır.

Eylem (a): Bir ajanın ortam içinde gerçekleştirdiği hareketlerdir.

Durum(S): Ajan tarafından gerçekleştirilen her eylemden sonra çevre tarafından döndürülen bir durumdur.

Ödül(R): Ajanın eylemini değerlendirmek için ortamdan ajana döndürülen bir geri bildirimdir.

Politika(π): Ajan tarafından mevcut duruma göre bir sonraki eylem için uygulanan bir stratejidir.

Değer(V): Kısa vadeli ödülün tam tersi ve iskonto faktörü ile uzun vadeli fayda getirisini ifade eder.

4.4.2. Pekiştirmeli öğrenmenin temel özellikleri

- PÖ'de ajana çevre ve hangi eylemlerin yapılması gerektiği konusunda talimat verilmez.
- Deneme sürecine dayanmaktadır.
- Ajan bir sonraki eylemi gerçekleştirir ve önceki eylemin geri bildirimine göre durumları değiştirir.
- Ajan gecikmiş bir ödül alabilir.
- Ortam stokastiktir ve ajanın maksimum pozitif ödülleri elde etmek için onu keşfetmesi gerekir (Woergoetter ve Porr, 2008).

4.4.3. Pekiştirmeli öğrenmenin unsurları

PÖ'nin dört ana unsuru vardır: Politika, bir aracının belirli bir zamanda nasıl davrandığının bir yolu olarak tanımlanabilir. Çevrenin algılanan durumlarını, bu durumlar üzerinde gerçekleştirilen eylemlerle eşler. Politika, ajanın davranışını tek başına tanımlayabildiğinden, PÖ'nin temel ögesidir. Bazı durumlarda, basit bir işlev veya bir arama tablosu olabilirken, diğer durumlarda, bir arama süreci olarak genel hesaplamayı içerebilir. Deterministik veya stokastik bir politika olabilir. Deterministik politika Denklem 4.10'da gösterildiği şekilde, stokastik politika ise Denklem 4.11'de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$a = \pi(s) \quad (4.10)$$

Denklem 4.10'da:

- a , alınan aksiyonu ifade eder.
- $\pi(s)$ ise durum s için politika değerini belirtir.

$$\pi(a | s) = P [At = a | St = s] \quad (4.11)$$

Denklem 4.11’de:

- $\pi(a | s)$, durum s altında alınacak a aksiyonuna ait politikayı gösterir.
- $P [At = a | St = s]$, belirli bir t anında durum s iken a aksiyonu alınma olasılığıdır.

Ödül, PÖ’nin amacıdır. Her durumda çevresini öğrenen ajana anında bir sinyal gönderir ve bu sinyal ödül sinyali olarak bilinir. Bu ödüller, ajanın yaptığı iyi ve kötü eylemlere göre verilir. Ajanın ana hedefi, iyi eylemler için toplam ödül sayısını en üst düzeye çıkarmaktır. Ödül sinyali, politikayı değiştirebilir, örneğin ajan tarafından seçilen bir eylem düşük ödüle yol açıyorsa, politika gelecekte başka eylemler seçmek için değişebilir. Değer fonksiyonu, durumun ve eylemin ne kadar iyi olduğu ve bir ajanın ne kadar ödül bekleyebileceği hakkında bilgi verir. Bir ödül, her iyi ve kötü eylem için anlık sinyal gösterirken, bir değer işlevi, iyi durumu ve gelecek için eylemi belirtmektir. Değer fonksiyonu ödüle bağlıdır, çünkü ödül olmadan değer olamaz. Değerleri tahmin etmenin amacı daha fazla ödül elde etmektir.

PÖ’nin son unsuru, çevrenin davranışını taklit eden modeldir. Model yardımıyla çevrenin nasıl davranacağı hakkında çıkarımlarda bulunulabilir. Örneğin, bir durum ve bir eylem verilirse, o zaman model bir sonraki durumu ve ödülü tahmin edebilir. Model planlama için kullanılır, yani bu durumları fiilen deneyimlemeden önce gelecekteki tüm durumları göz önünde bulundurarak bir eylem planı almanın yolunu sağlar. PÖ problemlerinin model yardımıyla çözülmesine yönelik yaklaşımlara model tabanlı yaklaşım denir. Nispeten model kullanmadan çözümlemeye yönelik yaklaşımlara ise modelden bağımsız yaklaşım denir (Qiang ve Zhongli, 2011).

Model tabanlı algoritma, en uygun politikayı tahmin etmek için geçiş ve ödül işlevini kullanır. Çevre ve farklı eylemlere nasıl tepki verdiği hakkında tam bilgiye sahip olunan senaryolarda tercih edilir. Model tabanlı PÖ’de ajan, çevre modeline, yani bir durumdan

diğerine gitmek için yapılması gereken eyleme, iliştilirilmiş olasılıklara ve bunlara karşılık gelen ödüllere erişebilir. PÖ ajanının ileriye düşünerek önceden plan yapmasına izin verilir. Statik/sabit ortamlar için model tabanlı PÖ daha uygundur. Model tabanlı yaklaşımda, ortam için sanal bir model oluşturulur ve ajan, onu öğrenmek için o ortamı araştırır. Model temsili her ortam için farklı olduğundan, bu yaklaşım için özel bir çözüm veya algoritma yoktur. Modelden bağımsız algoritmalar, ortamın dinamikleri hakkında çok sınırlı bilgiyle en uygun politikayı bulur. Gerçek dünyada sabit bir ortam yoktur. Sürücüsüz arabalar, değişen trafik koşulları, rota sapmaları vb. ile dinamik bir ortama sahiptir. Bu tür senaryolarda, modelden bağımsız algoritmalar diğer tekniklerden daha iyi performans gösterir. Değer tabanlı yaklaşım, herhangi bir politika altında bir durumdaki maksimum değer olan optimal değer fonksiyonunu bulmayı amaçlar. Bu nedenle, ajan, π politikası altındaki herhangi bir durumda uzun vadeli getiri beklemektedir. Politika tabanlı yaklaşım amacı, değer işlevini kullanmadan gelecekteki maksimum ödüller için en uygun politikayı bulmaktır. Bu yaklaşımda ajan, öyle bir politika uygulamaya çalışır ki, her adımda gerçekleştirilen eylem, gelecekteki ödülü maksimize etmeye yardımcı olur. Politika temelli yaklaşımın temel olarak iki tür politikası vardır:

Deterministik: Aynı eylem, herhangi bir durumda politika (π) tarafından üretilir.

Stokastik: Bu politikada, üretilen eylemi olasılık belirler.

4.4.4. Pekiştirmeli öğrenme türleri

Temel olarak iki tür pekiştirmeli öğrenme vardır. Pozitif pekiştirmeli öğrenme, beklenen davranışın tekrar meydana gelme eğilimini artırmak için bir şeyler eklemek anlamına gelir. Ajanın davranışını olumlu yönde etkiler ve davranışın gücünü artırır. Bu tür bir pekiştirme, değişiklikleri uzun süre devam ettirebilir. Ancak, çok fazla olumlu pekiştirme sonuçları azaltabilecek durumların aşırı yüklenmesine neden olabilir. Olumsuz PÖ, olumsuz koşuldan kaçınarak belirli davranışın tekrar ortaya çıkma eğilimini arttırdığı için olumlu pekiştirmenin tersidir. Duruma ve davranışa bağlı olarak olumlu pekiştirmeden daha etkili olabilir ama sadece asgari davranışı karşılayacak kadar pekiştirme sağlar (Woergoetter ve Porr, 2008).

4.4.5. Bellman denklemi

Bellman denklemi dinamik programlamanın temel bir kavramıdır. Bu denklem, karar teorisi, optimizasyon ve yapay zekâ gibi birçok alanda kullanılan bir araçtır. Denklem, Amerikalı matematikçi ve bilgisayar bilimcisi Richard Ernest Bellman tarafından geliştirilmiştir. Bu sebeple Bellman denklemi olarak adlandırılır. Bellman denklemi, özellikle operasyon araştırması, kontrol teorisi ve yapay zekâ alanlarında kullanılmaktadır (Barron ve Ishii, 1989).

Denklem, hedefe ulaşıp ulaşılmadığını belirlemek için kullanılabilir çünkü PÖ'nin temel amacı uzun vadeli ödül en üst düzeye çıkarmaktır. Mevcut durumun değeri, optimal eylem planı seçildiğinde ortaya çıkar. Bellman denklemi, birçok problemin çözümünde kullanılan bir özyineli, tekrarlı, denklem olarak karşımıza çıkar. Temelde, bir sürecin en iyi (en optimal) değerini hesaplamak için kullanılır.

Mevcut adımda hesaplanan fonksiyonun bir önceki adımdan ziyade gelecek adımla ilgili olması çelişkili görülebilir. Çünkü eylemlerin değeri ancak son duruma ulaşıldığında hesaplanabilir. Bu aşamada ilk adıma ulaşana kadar her adımda indirim faktörünü uygulayarak ve ödül faktörünü ekleyerek süreç tersine çevrilir. Son bileşen genel ödüldür. Genel olarak, Bellman denklemi Denklem 4.12'de gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$V(s) = \max_a (R(s|a) + \gamma \sum_{s'} P(s'|s, a) V(s')) \quad (4.12)$$

Denklem 4.12'de:

- $V(s)$, durum s için tahmini en iyi değeri temsil eder.
- a , alınacak bir aksiyonu simgeler.
- $R(s, a)$, durum s ve aksiyon a ile elde edilen anlık ödül gösterir.

- γ gelecekteki ödülleri şu anki değere nasıl ağırlıklandırdığımızı kontrol eden bir indirim faktörüdür.
- $P(s'|s, a)$, durum s ve aksiyon a altında durum s' elde etme olasılığını belirtir.

Richard Bellman'ın çalışmaları ve Bellman denkleminin geliştirilmesi, birçok alanda optimizasyon ve karar verme problemlerinin çözümünde önemli bir rol oynamıştır. Bu denklem, pratik uygulamalardan yapay zekaya kadar geniş bir yelpaze kullanırken, dinamik programlamanın temel bir bileşeni olarak kabul edilir. Bellman'ın bu çalışmaları, matematik ve bilgisayar biliminin gelişimine büyük katkılarda bulunmuştur (Dolcetta & Ishii, 1984).

4.5. Politika İterasyonu

Politika iterasyonu, bir Markov karar süreci (Markov Decision Process, MDP) çözme yöntemidir. Politika, her durumda hangi eylemin gerçekleştirileceğine ilişkin talimatları ifade eder. Algoritma, bir ajanın belirli bir çevrede hangi aksiyonları seçeceğine yardımcı olan bir yöntemdir. Politika değerlendirme ve politika geliştirme olmak üzere iki aşamadan oluşur.

Politika değerlendirme aşaması, mevcut bir politikayı değerlendirmek ve bu politikanın her bir durum için ne kadar iyilik sağladığını tahmin etmekle ilgilidir. İlk önce rastgele bir politika gibi bazı optimum olmayan politikalarla başlar ve ardından söz konusu politikaya göre Markov karar sürecinin her durumunun değerini hesaplar. Bu işlem, durum değerlerini güncellemek için genellikle Bellman denkleminin çok benzer bir denklem kullanılarak yapılır. Politika geliştirme aşaması, politikayı geliştirmek için mevcut durum değerlerine dayalı olarak yeni bir politika oluşturma işlemidir. Genellikle en iyi aksiyonları seçmek için bir politika iyileştirme operatörünün kullanılmasıyla yapılır. Her durum için geçerli olan her bir eylemin beklenen ödülünü hesaplayarak politikayı günceller.

Politika iterasyonu bu iki aşamayı sırayla tekrarlar. Politika iyileştirme aşaması, politika daha fazla iyileşemiyorsa durur ve sonuç olarak en iyi politika ve bu politikaya ait durum değerlerini üretir.

Politika iterasyonu algoritması, Howard'ın 1960 yılında geliştirdiği ve dinamik programlama ilkelerine dayalı bir yaklaşımı temel alır. Bu algoritma, Markov karar modellerinin optimal politikalarını hesaplamak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve çeşitli uygulama alanlarında, özellikle yapay zekâ ve operasyonel araştırma gibi alanlarda başarıyla kullanılmıştır. En yaygın kullanım alanları şunlar olabilir:

1. Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi: Politika iterasyonu, özellikle PÖ problemlerinde, ajanların optimal kararlarını belirlemek için kullanılır. Bu, robotik, oyun teorisi ve otomasyon gibi birçok yapay zekâ alanında önemlidir.
2. Operasyonel Araştırma: Politika iterasyonu, kaynakların etkin bir şekilde kullanılmasını gerektiren operasyonel araştırma problemlerini çözmek için kullanılır. Örneğin, envanter yönetimi, üretim planlaması ve rotalama problemleri gibi alanlarda uygulanabilir.
3. Finansal Planlama: Portföy yönetimi ve risk yönetimi gibi finansal kararlar, politika iterasyonu yöntemleri kullanılarak optimize edilebilir.
4. Trafik ve Ulaşım Yönetimi: Trafik ışıklarının zamanlaması, toplu taşıma rotalarının belirlenmesi ve trafik akışının iyileştirilmesi gibi ulaşım yönetimi problemlerinde kullanılabilir.
5. Enerji Yönetimi: Enerji şirketleri, enerji üretimi ve dağıtımını optimize etmek için politika iterasyonu algoritmalarını kullanabilirler.
6. Sağlık Hizmetleri: Hastane kaynaklarının etkili bir şekilde yönetilmesi ve tedavi planlarının optimize edilmesi gibi sağlık hizmetlerinde kullanım potansiyeli vardır.
7. Oyunlar ve Simülasyonlar: Politika iterasyonu, video oyunları, simülasyonlar ve yapay zekâ tabanlı oyunlar gibi eğlence endüstrisindeki uygulamalarda da kullanılabilir.
8. Eğitim: Eğitim planlaması ve öğrenci başarısını arttırmak için özelleştirilmiş öğrenme yollarının belirlenmesi gibi eğitim alanında uygulanabilir (Sutton ve Barto, 2018)

Bir Markov karar modelinin birçok çözümü vardır. Dolayısıyla bir problemin çözümünde çok sayıda olası politika bulunabilir. Önemli olan optimum politikanın nasıl bulunacağıdır çünkü politikaların saf yollarından biri olan tüm ihtimalleri denemek pratik bir yol değildir. Bu sebeple uygun politikayı bulmak için politika yinelemesi kullanılabilir. Oluşturulan çevre modelinin çözümünde aynı ödüle sahip durumlar olmasına rağmen, bu durumlar finalde aynı avantajı sağlamıyor olabilir. Politika iterasyonu ile elde edilmek istenen asıl amaç, iyi sona daha iyi bir yolla ulaştıracak adımı seçebilmektir. Her durumun, gelecekteki iyi bir yola öncülük etme açısından ne kadar iyi olduğunu temsil eden bir faydası vardır. Ödül, bir şirketin o yılki karı olarak düşünülebilir. Buna karşılık fayda, her şirkete gelecekte ne kadar başarılı olacaklarını yansıtmak için verilen bir puandır. Denklem 4.13'te belirli bir durumun toplam beklenen getirisi yani fayda değeri gösterilir. $V(s_{t=0})$, $t = 0$ anında durum $s_{t=0}$ 'ın değerini ifade eder. $r(s_t)$, durum s_t 'de alınan anlık ödülü belirtir. γ , indirim faktörüdür ve gelecekteki getirilerin bugünkü getirilere göre ne kadar önemli olduğunu kontrol eder.

$$V(s_{t=0}) = r(s_{t=0}) + \gamma r(s_{t=1}) + \gamma^2 r(s_{t=2}) + \dots = \gamma^t \sum_t r(s_t) \quad (4.13)$$

0 ile 1 arasında bir indirim faktörü γ kullanıldığında, fayda değerinin sınırlanması garanti edilir. Stokastik ile, belirli bir politika kapsamında bir durumun faydası, elbette bir olasılık dağılımını takiben, anlık ödülünün ve sonraki durumunun faydasının toplamı olarak da temsil edilebilir (Zihan ve Huang, 2020).

4.5.1. Politika değerlendirmesi

Durumlara ait faydaları belirleyen bir dinamik programlama yaklaşımı kullanıldığında, ilk olarak her durumun faydası sıfır olarak başlatılır. Ardından durumlar arasında döngü yapılır ve Denklem 4.14 kullanılarak güncellenir. Denklem 4.14, Bellman denkleminin çok benzerlik gösterir ancak $V(s)$ Bellman denklemindeki gibi en iyi eylemin

değerini değil, s durumundaki π politikası tarafından karar verilen eylemi ifade eder. Başka bir ifadeyle, politikanın tanımladığı eylemin değerlendirildiği anlamına gelir. Politika değerlendirme denklemi olarak adlandırılır.

$$V(s) = \max_a (R(s|a) + \gamma \sum_{s'} P(s'|s, a = \pi(s)) V(s')) \quad (4.14)$$

4.5.2. Politika iyileştirme

Politikanın faydasını aldıktan sonra sıra politikayı iyileştirmeye gelir. Daha önce de belirtildiği gibi fayda, bir durumun ne kadar iyi olduğunu temsil eder. Bir durum için eylemleri seçerken, daha yüksek faydaya sahip ardıl durumları tercih edilmelidir. Markov karar modeli stokastik olduğundan, tercih edilen bir ardıl durumu seçmek ona ulaşılacağını garanti etmez. Birbirini takip eden durumlardan ziyade, karşılaştırılması gereken şey eylemlerdir. Denklem 4.15'te matematiksel formülasyonu gösterilmektedir.

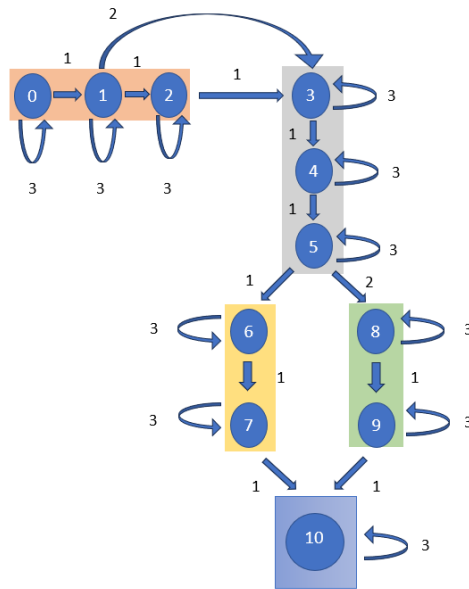
- $\pi(s)$, durum s için politikayı ifade etmektedir.
- argmax_a , verilen bir fonksiyonun en yüksek değere sahip argümanını (eylemi) bulmaya çalışır.
- $P(s'|s, a)$, s durumunda a eylemi alındığında s' 'e geçme olasılığını ifade eder.
- $V(s')$, s' durumunun değerini belirtir. Bu, bir sonraki durumun toplam beklenen getirisi yani fayda değerini temsil eder.

$$\pi(s) \leftarrow \operatorname{argmax}_a [\sum_{s'} P(s'|s, a) V(s')] \quad (4.15)$$

Bu işlem, politikanın güncellenmesini ve daha iyisini bulmasını sağlar. Böylece gelecekte daha büyük ödüller elde edilir.

4.5.3. Politika yinelemesi

Politika yinelemesi, tüm bu politika değerlendirme sürecini ve ardından politika iyileştirme sürecini tekrar tekrar tekrarlamaktır. Politika değerlendirmesini tekrar yapıldığında, yardımcı programı tamamen sıfırdan başlatmak gerekmez. Bunun yerine halihazırda sahip olunan fayda değerleriyle devam edilir. Bu durum, daha hızlı birleşmeye yardımcı olacaktır. Politika değerlendirmesinin yaptığı şey, politikayı sabit tutarken fayda değerlerini güncellemektir. Politika iyileştirmesinin yaptığı şey ise, fayda değerlerini sabit tutarken politikayı güncellemektir. $\pi[i]$, $\pi[i + 1]$ ile aynı olduğunda devam etmeye gerek yoktur ve bu duruma yakınsaklık denir (Sutton ve Barto, 2018). Rehabilitasyon, genellikle motor becerilerin ve hareket yeteneklerinin geliştirilmesini içerir. Politika iterasyonu benzeri yaklaşımlar, bireyin mevcut durumu ve hedeflerine uygun rehabilitasyon planlarını geliştirmek ve optimize etmek için kullanılabilir. Algoritma, bireyin yeteneklerine uygun zorluk seviyelerini artırma ve azaltma yeteneği sağlar. Böylece rehabilitasyon sürecinde bireyin motivasyonunu ve katılımını artırabilir. Yapılan tez çalışması kapsamında kullanıcıya sunulacak hareketleri, başka bir ifade şekliyle uygulamada geçilecek yeni durumu belirlemede kullanılan karar mekanizması politika iterasyonu algoritmasıdır. Algoritma kapsamında kullanılacak çevre tasarımı Şekil 4.11’de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Uygulamaya ait çevre tasarımı

Şekil 4.11.'de gösterilen tasarımda yuvarlak içerisinde 0-10 aralığında numaralandırılmış bölümler durumları yani uygulama boyunca kullanıcıya sunulacak fizyoterapi hareketlerini ifade etmektedir. Hareketler, etkilediği vücut fonksiyonuna göre gruplandırılmaktadır. Hareketlere ait bilgiler Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.2. Hareket grupları

Gruplar	Hareketler		
Kol	0	1	2
Bacak	3	4	5
Ayak Bileği	6	7	
Omuz	8	9	
Tüm Vücut	10		

Kullanıcının alabileceği 3 aksiyon 1,2 ve 3 aksiyonlarıdır. Algoritmaya ilk olarak hiçbir geçişin tanımlanmadığı 0 aksiyonu ile başlanır. Ayrıca, eğer bir durumdan herhangi bir aksiyon alınamıyorsa bu durum da 0 ile ifade edilir. Tasarımda aksiyonlar ok gösterimleri ile görselleştirilmektedir. Ayrıntılar Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

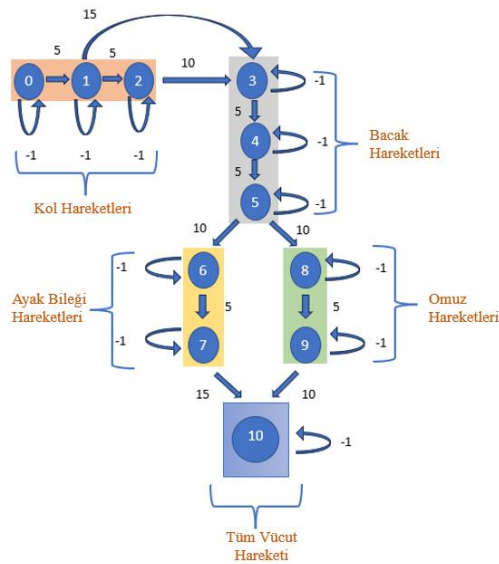
Çizelge 4.3. Kullanıcı eylemleri

Eylem	Anlamı
0	Gerçekleştirilebilecek hiçbir aksiyon olmaması durumunu ifade eder. (Algoritma en başta 0 ile başlar ve son harekette bu durumla karşılaşılır.)
1	O anki hareketi atlayıp sıradaki harekete geçiş yapmayı sağlar.
2	1 numaralı durum ya da hareket ile olması gerekenden fazla bir başarı ile grubu erken tamamlayıp diğer hareket grubuna erken geçişi sağlar. 5 numaralı harekette omuz hareketlerine geçişe sebep olur.
3	Her hareket için tekrarı ifade eder.

Fayda değerinden yola çıkarak sıradaki harekete karar vermede diğer bir gereklilik ise ödüllendirme sistemidir. Bu şekilde hem kullanıcıyı teşvik etmek ve motivasyonunu sağlamak hem de sisteme bir e-mentor misyonu yüklemek hedeflenir. Böylece kullanıcının tecrübelerinden ve gelecekteki hareketlerin getireceği ödüllerden yola çıkılarak hareketler kullanıcıya sunulur. Pozitif değerler ödül puanı, negatif değerler ise ceza puanı olarak adlandırılmaktadır. Ödüllendirme sistemi, Çizelge 4.4'te açıklanmakta ve Şekil 4.12'de çevre tasarımı üzerinde gösterilmektedir.

Çizelge 4.4. Ödül sistemi¹

Aksiyon	Ödül
Tekrar	-1 Puan
Grup içi geçiş	5 Puan
Grubu erken atlama/ ayak bileği hareket grubunu tamamlama	15 Puan
Grup tamamlama	10 Puan



Şekil 4.12. Çevre tasarımı ödül sistemi gösterimi

¹ Bu değerler sistemin çalışabilirliğini değerlendirmek üzere seçilmiştir. Gerçek uygulamalarda alanında uzman kişiler tarafından belirlmesi gerekir.

Sistem, dinamik zaman bükme algoritması sonucu eşik değerinin altındaysa eğitim videosu (kullanıcının yapması gereken hareketleri içeren video) ve kullanıcı videosunun benzerliğinin yeterli seviyede olduğunu algılamakta ve kullanıcıya Çizelge 4.4'te gösterilen şekilde bir puan ataması yapmaktadır.

Benzerliğin hareket için yeterli seviyede olması, kullanıcıya gösterilip tekrarlaması beklenecek yeni harekete geçiş yapılabileceğini göstermektedir. Yeni hareket kararı politika iterasyonu algoritması ile alınır. Algoritma, kullanıcının hangi aksiyonu alması gerektiğini söylemektedir. Bu durumda alınacak aksiyon ile hangi hareketin gösterileceğine karar verilir ve tüm süreçler yeni hareket için tekrarlanacak şekilde başa döner.

Eğer kullanıcı eşik değerini aşamaz ise, başka bir ifade ile gösterilen hareketi yeterince başarılı şekilde gerçekleştiremezse kullanıcıya ceza puanı verilmekte fakat bununla birlikte 2 kere daha aynı hareketi tekrarlaması için şans sunulmaktadır. Kullanıcı bu tekrarlar da hareketi başarılı şekilde tamamlayamaz ise 3. tekrarda eşik değeri arttırılmakta yani kullanıcının seviyesine göre yeni bir düzenleme yapılmaktadır. Hareket benzerliğinin, eşik altına düştüğü her durumda yeni hareket için politika iterasyonu algoritmasına danışılmaktadır. Kullanıcı 3 kez gerekli benzerlik oranını yakalamayı başaramazsa tasarlanan sistemin kullanıcıya uygun olmadığına karar verilmekte ve alanında uzman kişilere danışılması tavsiye edilmektedir.

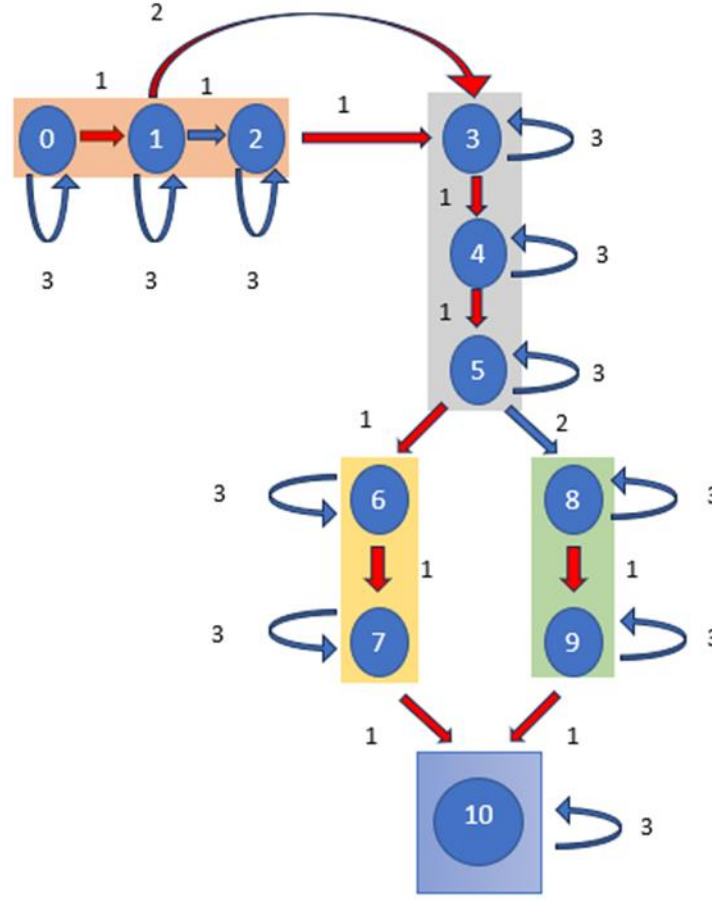
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez kapsamında tasarlanan evde fizik tedavi sistemi uygulamasında kullanılan algoritmada, öncelikle politika algoritması ile Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de gösterilen hareket gruplarına göre oluşturulan çevre/ortam tasarımı çözülür. Politika ile ilk olarak tüm durumlara ait aksiyonlar 0 olarak atanır ve çevre tasarımı çözüldükten sonra her durum/hareket için hangi aksiyonun alınması gerektiğine karar verilerek aksiyonlar güncellenir. Şekil 5.1.’de çevre tasarımının çözümü ile elde edilen politika algoritması sonuçları, başka bir ifade ile her hareketin tamamlanmasının ardından alınması gereken aksiyonlar gösterilmektedir. Sonuçlar, çizilecek yoldan bağımsız olarak her hareket/durum için alınacak aksiyonu gösterir. Bir duruma geçilmeyecek olsa dahi, geçilmiş olma ihtimalinde hangi aksiyonun alınması gerektiğine karar verilebilmenin önemli olması sebebiyle sonuç tüm durumlar için oluşturulur.

Durumlar	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
İlk Politika	[0	, 0	, 0	, 0	, 0	, 0	, 0	, 0	, 0	, 0	]
Son Politika	[1	, 2	, 1	, 1	, 1	, 1	, 1	, 1	, 1	, 1	, 0]

Şekil 5.1. Politika algoritması sonucu

Şekil 5.1.’de gösterilen her bir değer, alınacak aksiyonu ifade etmektedir. Örnek olarak, son politikadan 1 numaralı harekete ait aksiyonun 2 numaralı yoldan gitmek olduğu çıkarılabilir. Böylece uygulama 2. yolu takip edecek ve kullanıcıya göstermesi gereken sıradaki hareketi bulacaktır. Çevre tasarımında kullanıcı, hareketleri tamamlayıp ilerlerken çizilecek yola politika algoritması ve dinamik zaman bükme algoritmalarının her ikisi de kullanılarak karar verilir. Uygulama ilk olarak kol hareketleri ile başlar. Sistem ikinci kol hareketinin belirlenen eşik değerinin fazla üzerinde olması yani gerekenden çok daha başarılı olunması durumunda kol hareketlerine devam etmenin gerek olmadığı mantığıyla çalışır.



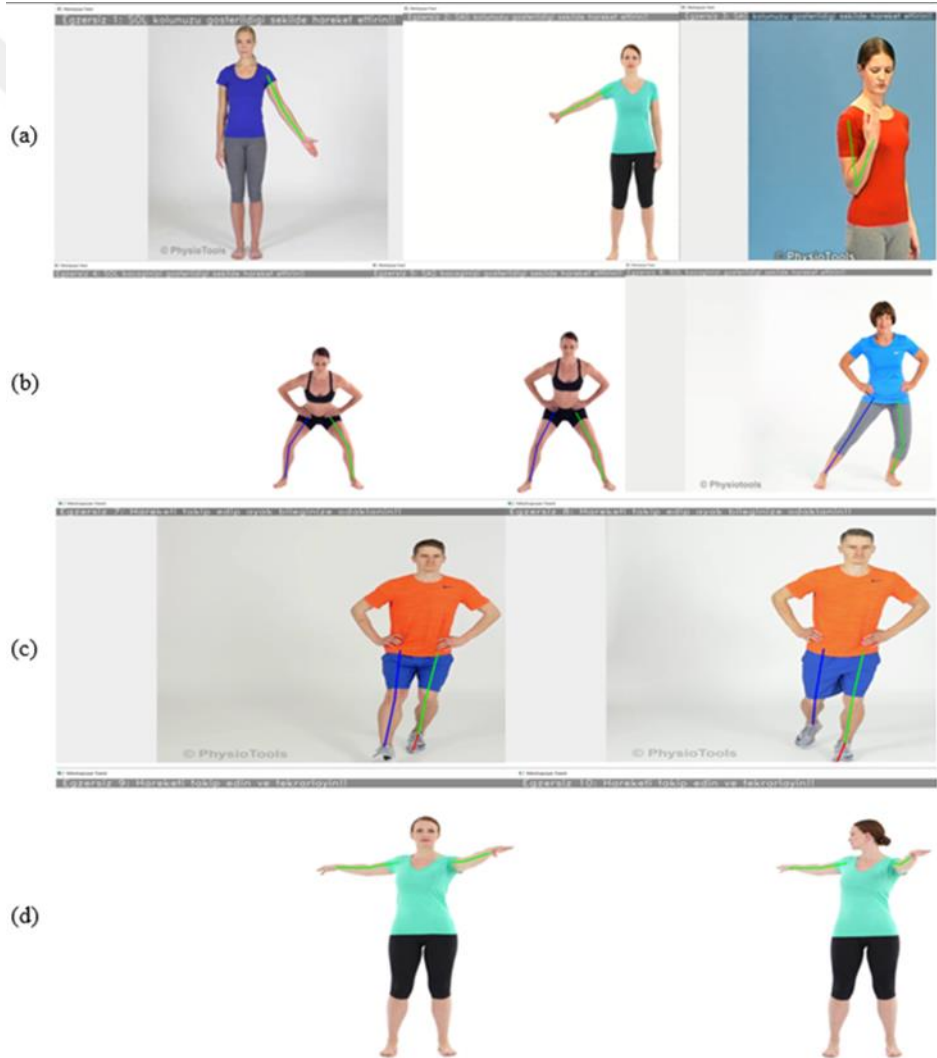
Şekil 5.2. Politika algoritması sonucunun çevre tasarımı üzerinde gösterimi

Şekil 5.2.'de politika algoritması sonucu elde edilen aksiyonlar çevre tasarımı üzerinde kırmızı oklarla gösterilmektedir. Algoritma her bir aksiyona ait ödüller doğrultusunda fayda kavramını göz önünde bulundurarak bir sonuç çıkarmaktadır. Burada karar verilen aksiyonlar takip edildiğinde 0-1-3-4-5-6-7-10 hareketleri kullanıcıya sunulmaktadır. Fakat, bu hareketler dışındaki hareketler için de hangi aksiyonun alınması gerektiği kararı oluşturulmuş ve bu sayede oluşturulabilecek yeni yollar için esneklik sağlanmıştır.

Geliştirilen tasarımda hangi hareketin kullanıcı için daha uygun olduğuna, hareketlerin doğruluğunu kontrol ederken vücudun tam olarak hangi bölgelerinin kontrol edilmesi gerektiğine ve dolayısıyla hangi hareketi başarmaya ait ödülün daha önemli ve yüksek olması gerektiğine bir uzman karar vermelidir. Önerilen yöntem, alanında uzman

kişiler tarafından hem çevre tasarımı hem ödüllendirme sistemi olarak şekillendirmeye uygundur ve esnek olarak geliştirilmiştir. Bununla beraber tez çalışması kapsamında temel uygulama alanı olarak fizyoterapi olarak belirlense de aynı mantalite ile çalışan tüm alanlarda uygulanma imkânı bulunmaktadır.

Şekil 5.3.'de uygulamada kullanılmış eğitmen videolarından örnek kesitler gösterilmektedir.



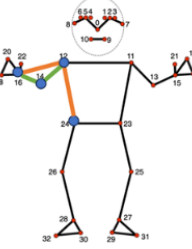
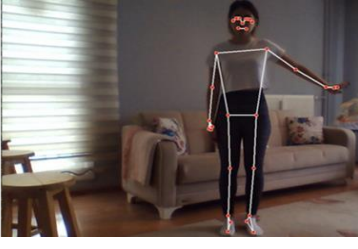
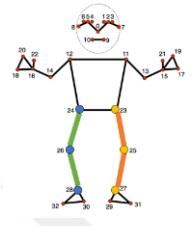
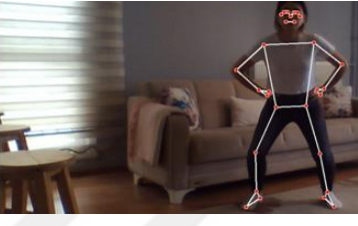
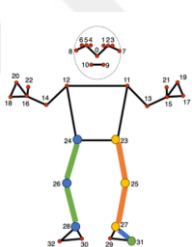
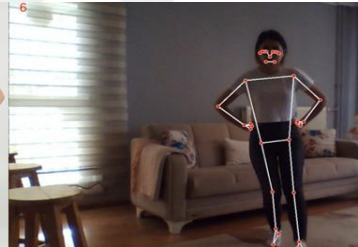
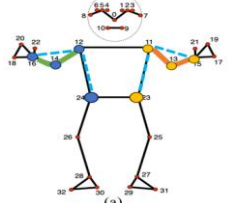
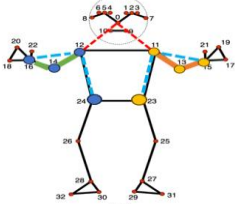
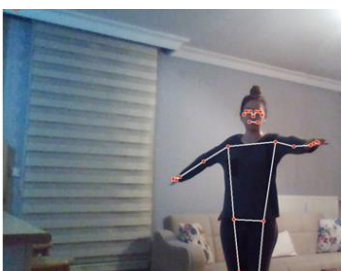
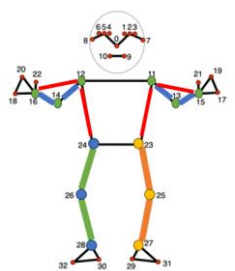
Şekil 5.3. Eğitmen videolarından kesitler: (a) kol grubu, (b) bacak grubu, (c) ayak bileği grubu, (d) omuz grubu (Physitrack,2023)

Videolar kullanıcıya izletilirken arka planda gösterilen videoya ait açılar hesaplanmaktadır. Hareketi doğru analiz edebilmek için, açı hesabında her grup, bazı durumlarda her hareket için farklı eklem koordinatlarının kullanılması gerekmektedir. Çizelge 5.1.'de proje kapsamında örnek olarak sunulan hareket gruplarına ait örnek kullanıcı videolarından kesitler ve gösterilen harekete ait açıların çıkarıldığı Mediapipe koordinatları verilmektedir.

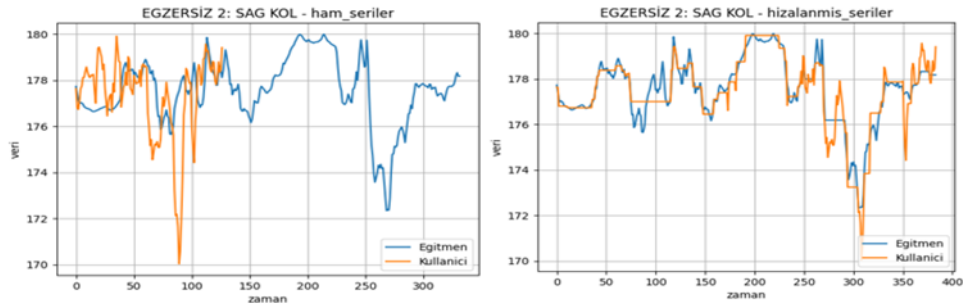
Kol grubu hareketleri için açı hesabında yeşil çizgilerle ifade edilen el bileği (16), dirsek (14), omuz (12) ve turuncu çizgilerle ifade edilen el bileği (16), omuz (12), kalça (24) olmak üzere 2 ayrı işlem yapılmıştır. Böylece hem kolun kendi içindeki hareketi hem de vücut ile arasındaki hareketi göz önünde bulundurulmuştur. Bacak grubu hareketleri için açı hesabında her iki bacak için de işlem yapılmıştır. Yeşil çizgilerle ifade edilen sağ kalça (24), sağ diz (26), sağ ayak bileği (28) ve turuncu çizgilerle ifade edilen sol kalça (23), sol diz (25) ve sol ayak bileği (27) için ayrı ayrı açı hesaplanmıştır. Ayak bileği hareketlerinde, temel olarak bacak hareketinde gerçekleştirilen işlemler gerçekleştirilmektedir. Mavi çizgi ile gösterilen ayak kısmı da bacak hareketlerinde belirtilen açılara ek olarak, sol diz (25), sol ayak bileği (27) ve sol ayak parmağı (31) açısı hesaplanmakta ve ayak bileği grubuna ait hareketlerin benzerlik hesabında kullanılmaktadır.

Uygulamada iki adet omuz hareketi bulunmaktadır. İlk harekette sadece kollar aracılığıyla omuzlar çalıştırılırken, ikinci hareket kollarla birlikte baş hareketini de gerektirir. İlk hareket için açı hesabında sağ kol (yeşil çizgiler), sol kol (turuncu çizgiler) için belirtilen koordinatlar kullanılmaktadır. İkinci hareket için ise ilk hareketteki hesaba sağ omuz (12), burun (0) ve sol omuz (11) arasındaki açı da katılarak baş ile yapılan hareket de benzerlikte kullanılmaktadır. Her iki modeldeki açık mavi ve kesikli çizgili gösterim ise kolların vücut ile yaptığı açıyı temsil etmektedir. Son hareket tüm vücut hareketidir. Bu harekette kollar ve bacaklar birlikte çalıştırılmaktadır. Mavi çizgiler ile kollara ait açılar, kırmızı çizgiler ile kollar ve vücut arasındaki açılar, yeşil çizgi ile sağ bacak ve turuncu çizgi ile sol bacağına ait açı çıkarımında kullanılan koordinatlar gösterilmektedir.

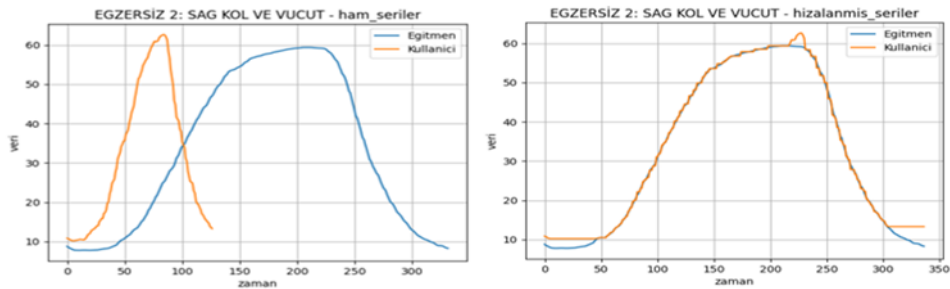
Çizelge 5.1. Gruplara göre kullanılan koordinatlar ve örnek video kesitleri

Grup	Mediapipe Koordinatları	Örnek Video Kesitleri
Kol		 
Bacak		 
Ayak Bileği		 
Omuz	 (a)  (b)	 
Tüm Vücut		 

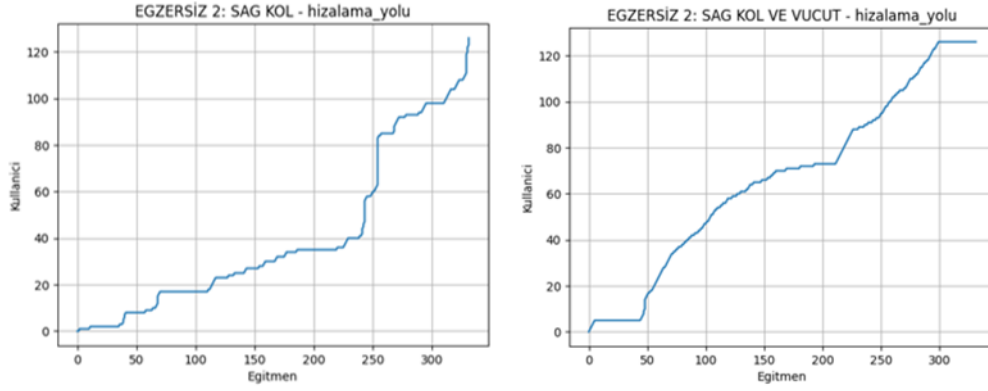
Uygulama boyunca dinamik zaman bükme algoritması ile yapılan benzerlik karşılaştırmaları grafikler ile görselleştirilmiştir. Grafiklerde, mavi çizgiler eğitmen videosu süresince çıkarılan açıları gösterir. Turuncu çizgiler ise kullanıcının aynı hareketi tekrar ederken çıkarılan açıların zaman içerisindeki değişimini ifade etmektedir. Aşağıdaki grafiklerde, Çizelge 5.1.'deki kol grubu hareketlerinden verilen örneğe dair sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 5.4'te eğitmen videosundaki kol hareketleri ve kullanıcının kol hareketleri karşılaştırılmıştır. Ham veriler, dinamik zaman bükme algoritmasıyla elde edilen açıları birbirine eşlemeden önceki verilerden oluşan grafiği gösterir. Turuncu çizgilerin daha kısa zamanda bitiyor olmasından, eğitmen videosunun kullanıcı için alınan kayıttan daha uzun olduğu çıkarılabilir. Hizalanmış serilerde ise, zamandan bağımsız olarak verilerin birbiriyle eşlenmesi sonucunda elde edilen grafikler gösterilmektedir. Şekil 5.5.'de kolun vücut ile oluşturduğu açılara ait grafikler, Şekil 5.6'da ise bu eşlemeler yapılırken oluşan yola ait grafikler verilmektedir. Şekil 5.5. farklı sürelerde aynı hareket yapıldığında benzerlik karşılaştırmasının zamandan bağımsız yapılması gerektiğini net bir şekilde göstermektedir.



Şekil 5.4. Sağ kola ait açıların karşılaştırılması



Şekil 5.5. Sağ kolun vücutla olan açılarının karşılaştırılması



Şekil 5.6. Kol için elde edilen hizalama yolları

Elde edilen karşılaştırma sonuçları ile politika algoritması uygulama boyunca birlikte çalışmaktadır. Şekil 5.2’de gösterilen politika algoritması sonucunda 1. duruma ait hareket örnek olarak alındığında, bu durumun başarımına göre iki aksiyon alınabileceği görülür. 2 numaralı aksiyon ile kol hareketleri tamamlanıp bacak hareketlerine geçilirken 1 numaralı aksiyon ile kullanıcının son kol hareketini de tamamlaması beklenir. Oluşturulan tasarıma göre algoritma en iyi faydaya 2. aksiyon alındığında ulaşmaktadır. Fakat kullanıcı 1. duruma ait hareketi kol hareketlerini atlamaya yetecek kadar başarılı gerçekleştirmez ise bu aksiyonun alınması doğru olmayacaktır. Bu sebeple elde edilen benzerlik sonuçları, alınacak aksiyonun kararına katkı sağlamaktadır.

Bu noktada, benzerlik için belirlenen eşığa bir uzman desteğiyle karar verilmelidir. Şekil 5.4., Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.’da verilen grafikler uygulamadaki 1. durumdaki kol hareketine ait örnek kullanıcı sonuçlarıdır. Uygulamada bu hareketin, politika algoritması 2 numaralı aksiyonu önerdiği halde 2. aksiyon ile kol hareketlerini tamamlayacak şekilde benzerlik başarımı elde edilememesi durumunda, 1 numaralı aksiyon ile 2.duruma ait harekete geçilmesi sağlanır. Politika algoritması böyle durumları öngörerek 2. durumdan da faydayı maksimize edecek şekilde hangi aksiyonu alması gerektiğini de sisteme sağlamaktadır. Böylece öncesinde tasarımda oluşturulan ve takip edilecek ‘fizyoterapi hareketleri’ rotası değişse dahi faydayı yükseltmeyi sağlayacak yeni bir yol oluşturulabilmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde, fizyoterapi uygulamaları sağlık alanında önemli bir yer tutmaktadır. Fizyoterapi, bireylerin doğal iyileşme süreçlerine odaklanarak, özellikle kronik rahatsızlıkların yönetimi ve spor yaralanmalarının rehabilitasyonu gibi alanlarda tercih edilmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte uzaktan fizik tedavi yöntemleri daha fazla talep görmekte ve bireylere daha az çaba ve maliyet ile e-mentor desteği sağlamaktadır. Bu amaçla uzaktan fizyoterapi alanında birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Literatürde bu alanda karşılaşılan çalışmalarda çeşitli pekiştirmeli öğrenme teknikleri görülebilmektedir. Fakat, tez uygulamasında gerçekleştirilen ve pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinden biri olan politika iterasyonu algoritmasına sağlık alanındaki çalışmalarda rastlanmamaktadır. Fonksiyonalite bazlı gruplamalar ile sunulan hareketlerden oluşan çevre/ortam tasarımı, pekiştirmeli öğrenme aracılığıyla gerçekleştirilen karar verme yöntemi, kullanıcıların yaptığı hareketlerin eğitmen hareketlerine benzerliği yaklaşımı ve yöntemin içerdiği esneklik ile özgünlük sağlanmaktadır. Çalışmada, hareketlerin doğruluğu değil sunulan eğitmen videosuyla benzerliği üzerine kıyaslama yapılmaktadır. Bu noktada hareketin durumuna göre benzerlik ölçümünde hangi koordinatların dikkate alınması gerektiği konusunda uzman görüşü önemlidir. Çalışma kapsamında sağlık ve fizyoterapi alanında önemli bir kütüphane olan PhysioTool'a ait videolar kullanılmış olup oluşturulan fizyoterapi programı ve kullanıcıya sunulan hareketler, yöntemi tasarlayabilmek amacıyla tercih edilmektedir. Gerçekleştirilen uygulama ve tasarım, uzman görüşüne uyarlanabilecek bir esneklik içermektedir. Çalışma sonucunda, Mediapipe'in gerçek zamanlı hareket analizi için uygun bir kütüphane olduğu, dinamik zaman bükme algoritmasının farklı uzunluktaki zaman serilerini kıyaslamada doğru bir tercih olduğu ve tasarlanan çevre ve bu çevreye ait politika iterasyonu algoritmasının gelecek çalışmalar için önemli bir katkı sağlayacağı söylenebilmektedir. Çalışmada ortaya sunulan sistem kavramsal olarak gösterilmiştir. Bu sebeple, gelecek çalışmalarda bir uzman görüşü ile farklı çevre tasarımları oluşturulabilir ve/veya kullanıcıların hareketleri daha doğru/benzer yapmasını sağlayacak yönlendiriciler eklenebilir ve daha fazla kullanıcı deneyimi ile pekiştirmeli öğrenme desteklenebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Adolf, J., Dolezal, J., Kutilek, P., Hejda, J., & Lhotska, L. (2022). *Single Camera-Based Remote Physical Therapy: Verification on a Large Video Dataset*. Applied Sciences, 12(2). <https://doi.org/10.3390/app12020799>
- Ahn, S., Choi, W., Jeong, H., Oh, S., & Jung, T.-D. (2023). *One-Step Gait Pattern Analysis of Hip Osteoarthritis Patients Based on Dynamic Time Warping through Ground Reaction Force*. Applied Sciences, 13(8), 4665. <https://doi.org/10.3390/app13084665>
- Alakus, F., Isık, A. H., & Eskicioğlu, Ö. C. (2021). *Hareket Yakalama ve Sanal Gerçeklik Teknolojileri Kullanarak Oyun Tabanlı Rehabilitasyon*. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(6), 269-279. <https://doi.org/10.29130/dubited.1015397>
- Atasoy, H. (2011, Mart). *Dinamik Zaman Bükme Algoritması*. Erişim: <https://www.atasoyweb.net/Dinamik-Zaman-Bukme-Algoritmasi>, Erişim tarihi: 19.12.2023.
- Barron, E. N., & Ishii, H. (1989). *The Bellman equation for minimizing the maximum cost. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 13(9), 1067-1090. [https://doi.org/10.1016/0362-546X\(89\)90096-5](https://doi.org/10.1016/0362-546X(89)90096-5)
- Berndt, D. J., & Clifford, J. (1994). *Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series*. Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 359-370.
- Chung, J.-L., Ong, L.-Y., & Leow, M.-C. (2022). *Comparative Analysis of Skeleton-Based Human Pose Estimation*. Future Internet, 14(12), 380. <https://doi.org/10.3390/fi14120380>
- Ding, I.-J., & Chang, Y.-J. (2016). *On the Use of Kinect Sensors to Design a Sport Instructor Robot for Rehabilitation and Exercise Training of the Elderly*. Sensors and Materials, 28, 463-476. <https://doi.org/10.18494/SAM.2016.1199>
- Ding Zihan and Huang, Y. and Y. H. and D. H. (2020). Introduction to Reinforcement Learning. İçinde Z. and Z. S. Dong Hao and Ding (Ed.), Deep Reinforcement Learning: Fundamentals, Research and Applications (ss. 47-123). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4095-0_2

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Dolcetta, I. C., & Ishii, H. (1984). Approximate solutions of the bellman equation of deterministic control theory. *Applied Mathematics & Optimization*, 11(1), 161-181. <https://doi.org/10.1007/BF01442176>
- Dubey, S., & Dixit, M. (2023). *A comprehensive survey on human pose estimation approaches*. *Multimedia Systems*, 29(1), 167-195. <https://doi.org/10.1007/s00530-022-00980-0>
- Fang, H.-S., Li, J., Tang, H., Xu, C., Zhu, H., Xiu, Y., Li, Y.-L., & Lu, C. (2022). *AlphaPose: Whole-Body Regional Multi-Person Pose Estimation and Tracking in Real-Time*.
- Farrokhi, A., Farahbakhsh, R., Rezazadeh, J., & Minerva, R. (2021). *Application of Internet of Things and artificial intelligence for smart fitness: A survey*. *Computer Networks*, 189, 107859. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.107859>
- Fatimah Kazi, & Deepali Patil. (2022). *A Mini review on Effectiveness of Reinforcement learning in Stroke Rehabilitation*. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 2902-2904. <https://doi.org/10.47750/pnr.2022.13.S06.377>
- Fransen, M. (2004). *When is physiotherapy appropriate?* *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, 18(4), 477-489. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.berh.2004.03.006>
- Freeman, W. T., Anderson, D. B., Beardsley, P., Dodge, C. N., Roth, M., Weissman, C. D., Yeramunis, W. S., Kage, H., Kyuma, I., Miyake, Y., & Tanaka, K. (1998). *Computer vision for interactive computer graphics*. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 18(3), 42-53. <https://doi.org/10.1109/38.674971>
- Gupta, A., Gupta, K., Gupta, K. N. M., & Gupta, K. O. (2021). *Human Activity Recognition Using Pose Estimation and Machine Learning Algorithm*. *International Symposium on Intelligent Control*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:232401456>
- Günaydin, T., Arslan, R. B., Birik, B., Çirak, Y., & Dürüstkan Elbasi, N. (2018). *A Surface Electromyography Based Serious Game for Increasing Patient Participation to Physiotherapy and Rehabilitation Treatment Following Anterior Cruciate and Medial Collateral Ligaments Operations*. *2018 IEEE 31st International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS)*, 438-439. <https://doi.org/10.1109/CBMS.2018.00084>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Güney, G., Jansen, T. S., Dill, S., Schulz, J. B., Dafotakis, M., Hoog Antink, C., & Braczynski, A. K. (2022). *Video-Based Hand Movement Analysis of Parkinson Patients before and after Medication Using High-Frame-Rate Videos and MediaPipe*. *Sensors*, 22(20). <https://doi.org/10.3390/s22207992>
- Halıcı, A. S., & Demirhan, A. (2023). *Kalman Filtresi ve Küresel En Yakın Komşu Yöntemi ile Çok Kişili Gerçek Zamanlı Poz Takibi*. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 889-899. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1049933>
- Irfan, I., & Abdul Muthalib, M. (2022). *Implementation of Human Pose Estimation Using Angle Calculation Logic on The Elder of The Hands as A Fitness Repetition*. *International Journal of Engineering, Science and Information Technology*, 2(4), 101-110. <https://doi.org/10.52088/ijesty.v2i4.346>
- Kaelbling, L. P., Littman, M. L., & Moore, A. W. (1996). *Reinforcement Learning: A Survey*. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 4, 237-285. <https://doi.org/10.1613/jair.301>
- Kim, J.-W., Choi, J.-Y., Ha, E.-J., & Choi, J.-H. (2023). *Human Pose Estimation Using MediaPipe Pose and Optimization Method Based on a Humanoid Model*. *Applied Sciences*, 13(4), 2700. <https://doi.org/10.3390/app13042700>
- Köse, C., & Şen, K. (2007, Aralık). *Konuşmacının Konuştuğu Dilin Belirlenmesi*. Elektrik Mühendisleri Odası.
- Lafayette, T. B. de G., Kunst, V. H. de L., Melo, P. V. de S., Guedes, P. de O., Teixeira, J. M. X. N., Vasconcelos, C. R. de, Teichrieb, V., & da Gama, A. E. F. (2023). *Validation of Angle Estimation Based on Body Tracking Data from RGB-D and RGB Cameras for Biomechanical Assessment*. *Sensors*, 23(1). <https://doi.org/10.3390/s23010003>
- Latreche, A., Kelaiaia, R., & Chemori, A. (2023, Mayıs). *AI-based Human Tracking for Remote Rehabilitation Progress Monitoring*. ICAECE 2023 - International Conference on Advances in Electrical and Computer Engineering. <https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-04107931>
- Liu, Z., Chen, H., Feng, R., Wu, S., Ji, S., Yang, B., & Wang, X. (2021). *Deep Dual Consecutive Network for Human Pose Estimation*. *CVPR 2021- Computer Vision and Pattern Recognition*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.07254>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Mediapipe. (2023, Kasım). *Pose landmark detection guide*. Erişim: https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/pose_landmarker, Erişim tarihi: 17.12.2023.
- Namburi, A., & Hengsanunkul, T. (2022). *Combining Svm And Human-Pose For A Vision-Based Fall Detection*. ICIC Express Letters, 13, 1177-1187. <https://doi.org/10.24507/icicelb.13.11.1177>
- Nath, I., Shaw, A., Bhadra, A., Bhowmick, D. D., Ghosh, S., & Chatterjee, S. (2023). *A Novel Personal Fitness Trainer and Tracker powered by Artificial Intelligence enabled by MEDIAPIPE and OpenCV*. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 11(3), 1085-1094. <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/3368>
- Nguyen Phan, K., Nguyen, A., Doan, T., Trung, P., & Thi, N. (2023). *Assessing Bicep Curl Exercises by Human Pose Application: A Preliminary Study* (ss. 581-589). https://doi.org/10.1007/978-3-031-27524-1_55
- Nieuwboer, A., De Weerd, W., Dom, R., Truyen, M., Janssens, L., & Kamsma, Y. (2001). *The effect of a home physiotherapy program for persons with Parkinson's disease*. Journal of Rehabilitation Medicine, 33(6), 266-272. <https://doi.org/10.1080/165019701753236455>
- Ojha, A., Wang, K., Liu, Y., & ZhaoMingxuan. (2022). *Just Dance Everywhere: Using Deep Pose Estimation to Get Your Groove On!* University of Texas at Austin.
- Palani, P., Panigrahi, S., Jammi, S. A., & Thondiyath, A. (2022). *Real-time Joint Angle Estimation using Mediapipe Framework and Inertial Sensors*. 2022 IEEE 22nd International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE), 128-133. <https://doi.org/10.1109/BIBE55377.2022.00035>
- Patil, A., Rao, D., Utturwar, K., Shelke, T., & Sarda, E. (2022). *Body Posture Detection and Motion Tracking using AI for Medical Exercises and Recommendation System*. ITM Web of Conferences, 44, 03043. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20224403043>
- Qiang, W., & Zhongli, Z. (2011). *Reinforcement learning model, algorithms and its application*. 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), 1143-1146. <https://doi.org/10.1109/MEC.2011.6025669>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Samhitha, G., Rao, D. S., Rupa, Ch., Ekshitha, Y., & Jaswanthi, R. (2021). *Vyayam: Artificial Intelligence based Bicep Curl Workout Tacking System*. 2021 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSES), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICSES52305.2021.9633841>
- Schmidt, B., Benchea, S., Eichin, R., & Meurisch, C. (2015). *Fitness Tracker or Digital Personal Coach: How to Personalize Training*. Adjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers, 1063-1067. <https://doi.org/10.1145/2800835.2800961>
- Shenkman, C., Thakur, D., & Llansó, E. (2021). *Do You See What I See? Capabilities and Limits of Automated Multimedia Content Analysis*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.11105>
- Snower, M., Kadav, A., Lai, F., & Graf, H. P. (2019). *15 Keypoints Is All You Need*. CVPR 2020 - Computer Vision and Pattern Recognition. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.02323>
- Susi, T., Johannesson, M., & Backlund, P. (2015). *Serious Games- An Overview*. School of Humanities and Informatics University of Skövde.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction*, 2nd ed. İçinde Reinforcement learning: An introduction, 2nd ed. The MIT Press.
- Szeliski, R. (2022). *Computer Vision*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-9>
- Tensorflow. (2023, Aralık). *MoveNet: Ultra fast and accurate pose detection model*. Erişim: <https://www.tensorflow.org/hub/tutorials/movenet>, Erişim tarihi: 19.12.2023.
- Tragos, E., O'Reilly-Morgan, D., Geraci, J., Shi, B., Smyth, B., Doherty, C., Lawlor, A., & Hurley, N. (2023). *Keeping People Active and Healthy at Home Using a Reinforcement Learning-based Fitness Recommendation Framework*. 6237-6245. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2023/692>

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Türkmen, E., Analay Akbaba, Y., & Altun, S. (2020). *Effectiveness of video-based rehabilitation program on pain, functionality, and quality of life in the treatment of rotator cuff tears: A randomized controlled trial*. Journal of Hand Therapy, 33(3), 288-295. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2019.08.004>
- Wang, K., & Gasser, T. (1997). *Alignment of curves by dynamic time warping*. The Annals of Statistics, 25(3). <https://doi.org/10.1214/aos/1069362747>
- Woergoetter, F., & Porr, B. (2008). *Reinforcement learning*. Scholarpedia, 3(3), 1448. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.1448>
- Yadav, M., & Alam, A. (2018). Dynamic Time Warping (Dtw) Algorithm In Speech: A Review. IJRECE, 6(1).
- Yi, C. J. (2022). Virtual Physical Therapist Application with Human Pose Detection. Universiti Tunku Abdul Rahman.

Ek Açıklama-A: Tez Çalışmasından Üretilen Bilimsel Yayın

Tepe, E., & Özkan, K. (2023, 22-24 Aralık), *Pekiştirmeli Öğrenme Yöntemi ile Ev Ortamında Fizik Tedavi Uygulaması*, VI. Ulusal Mühendislikte Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi (UMUH BILMES 2023) Bildiri Kitabı, s 4. İstanbul, Türkiye.

