

PENGESANAN DAN PENJEJAKAN OBJEK MENGUNAKAN KENDERAAN UDARA DAN DARAT TANPA PEMANDU DALAM SUKAN

Tushaerthan Jeevanathan, Mohd Zakree Ahmad Nazri

*Fakulti Teknologi & Sains Maklumat, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi,
Selangor Darul Ehsan, Malaysia*

Abstrak

Modul ini akan memberi tumpuan kepada pengesanan dan penjejakan objek masa nyata menggunakan dron dalam industri sukan. Skop utama adalah untuk mengesan bola di padang menggunakan kenderaan udara dan darat tanpa pemandu dalam sukan khususnya dalam sukan bola sepak. Teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan “Unmanned Aerial Vehicle” (UGV) dan “Unmanned Ground Vehicle” (UAV) dalam sukan khususnya dalam bola sepak untuk meningkatkan system pengadilan bola sepak dan teknologi “Video assistant referee” (VAR) yang sedia ada. Projek ini menggunakan UGV untuk mengesan dan mengikuti pemain terakhir pasukan untuk menentukan sama ada mereka berada dalam posisi offside dan mendapatkan sudut yang lebih baik berdasarkan permainan bola sepak. UGV menggunakan huskylense penjejakan objek untuk mengesan dan mengikuti objek. Teknologi ini juga menggunakan UAV untuk mengesan dan mengikuti bola untuk mendapatkan sudut yang lebih baik berdasarkan permainan bola sepak. UAV menggunakan DJI Tello, HSV colour models, Gaussian filter, Sobel Edge Detection dan Thresholding segmentation, Python untuk mengesan dan mengikuti objek. Teknologi ini mempunyai beberapa implikasi dan aplikasi. Pertama, teknologi ini boleh digunakan untuk meningkatkan ketepatan VAR dalam membuat keputusan. Kedua, teknologi ini boleh digunakan untuk memberikan sudut yang lebih baik kepada VAR untuk melihat kesalahan yang dilakukan oleh pemain. Projek ini adalah masa depan bagi system pengadilan bola sepak dan VAR yang sedia ada. Metodologi yang di implementasikan dalam projek ini adalah model “Waterfall”.

Kata kunci: Pengesanan, Penjejakan, UAV, UGV, Sukan.

Pengenalan

Latar belakang projek ini adalah tentang pengesanan dan penjejakan objek menggunakan teknologi UAV (Unmanned Aerial Vehicle) dan UGV (Unmanned Ground Vehicle) dalam konteks sukan, khususnya bola sepak. Dalam pertandingan bola sepak, pengadil seringkali berhadapan dengan keputusan yang mempengaruhi perjalanan permainan. Namun, mereka tidak selalu dapat melihat dengan jelas semua sudut kejadian di lapangan, yang menyebabkan potensi kesilapan dalam membuat keputusan.

Kemunculan teknologi Video Assistant Referee (VAR) telah membawa penambahbaikan dalam keadilan bola sepak, membolehkan pengadil untuk meninjau semula keputusan melalui teknologi video. VAR menggunakan kamera yang dipasang di stadium untuk memberikan pengadil pandangan tambahan untuk membuat keputusan yang lebih tepat dan adil.

Namun, walaupun VAR memberikan bantuan yang berharga, ia masih mempunyai beberapa kelemahan. Salah satu kelemahan utama VAR adalah sudut pandangan kamera yang terhad dan asas semasa membuat keputusan pada kesalahan tertentu. Penggunaan teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UAV dan UGV dapat mengatasi beberapa kelemahan ini dan memberikan kelebihan tambahan kepada VAR.

Projek ini bertujuan untuk memanfaatkan teknologi UAV dan UGV untuk mengesan dan menjejaki objek-objek utama dalam pertandingan bola sepak, seperti pemain dan bola. Dengan teknologi ini, VAR akan mendapat sudut pandangan yang lebih luas dan lebih tepat, memungkinkan pengadil membuat keputusan yang lebih adil dan akurat.

Isu yang ingin diselesaikan melalui projek ini adalah meningkatkan keupayaan VAR dan mengatasi kelemahan teknologi VAR yang sedia ada. Penggunaan UAV dan UGV dalam kombinasi dengan teknologi pengesanan dan penjejakan objek akan membuka peluang baru untuk meningkatkan keadilan dan ketepatan dalam pertandingan bola sepak.

Projek ini menjadi topik yang relevan dan penting untuk dikaji kerana teknologi pengesanan dan penjejakan objek semakin berkembang pesat dalam pelbagai industri, termasuk dalam bidang sukan. Dengan memanfaatkan teknologi canggih ini dalam konteks bola sepak, projek ini dapat memberikan sumbangan penting dalam mengatasi isu-isu pengadilan dan mencapai tahap keadilan yang lebih tinggi dalam sukan ini yang populer di seluruh dunia.

Objektif utama projek ini adalah untuk meningkatkan keupayaan VAR (Video Assistant Referee) dalam sukan, khususnya dalam bola sepak, melalui pengembangan teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan Unmanned Ground Vehicle (UGV) dan Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Projek ini mempunyai dua objektif utama:

Objektif 1: Membangunkan teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UGV yang mengikuti satu garis dalam sukan untuk meningkatkan keupayaan VAR. Dengan menggunakan UGV, projek ini bertujuan untuk mengesan pergerakan pemain bola sepak dan bola secara tepat dan berkesan. UGV akan mengikuti pemain terakhir dalam satu pasukan untuk menentukan sama ada mereka berada dalam kedudukan offside.

Objektif 2: Membangunkan teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UAV dalam sukan untuk meningkatkan keupayaan VAR. Melalui penggunaan UAV, projek ini akan mengesan dan menjejak pergerakan bola dalam permainan bola sepak untuk mendapatkan sudut pandangan yang lebih baik dari udara. UAV akan dilengkapi dengan teknologi terkini seperti DJI Tello, HSV colour models, Gaussian filter, Sobel Edge Detection, Thresholding segmentation, Python, huskylense's penjejakan objek dan Arduino Uno untuk mencapai objektif ini.

Skop projek ini meliputi pembangunan dan pengujian teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UGV dan UAV dalam sukan dengan fokus pada bola sepak. Produk akhir projek ini akan termasuk:

UGV yang dilengkapi dengan teknologi pengesanan objek dan sistem penjejakan untuk mengikuti pemain terakhir dalam satu pasukan dalam permainan bola sepak dan menentukan

kedudukan offside. UAV yang dilengkapi dengan teknologi pengesanan objek dan sistem penjejakan untuk mengesan dan menjejak pergerakan bola dalam permainan bola sepak dari udara, memberikan sudut pandangan yang lebih baik kepada VAR.

Sistem pengesanan dan penjejakan objek yang menggunakan teknologi terkini seperti DJI Tello, HSV colour models, Gaussian filter, Sobel Edge Detection, Thresholding segmentation, Python, huskylense's penjejakan objek, dan Arduino Uno. Namun, projek ini tidak akan melibatkan pengesanan dan penjejakan objek lain seperti wasit dan penonton. Selain itu, analisis data yang dikumpulkan oleh teknologi juga tidak termasuk dalam skop projek ini. Integrasi dengan teknologi VAR yang sedia ada juga bukan merupakan bahagian daripada skop projek ini.

Projek ini perlu dilakukan kerana memiliki beberapa justifikasi dan kepentingan yang relevan bagi bidang ilmu dan industri yang berkaitan. Dalam sukan, keputusan yang tidak tepat oleh pengadil dapat mempengaruhi hasil pertandingan secara keseluruhan. Dengan menggunakan teknologi pengesanan dan penjejakan objek, projek ini dapat membantu VAR dan pengadil untuk membuat keputusan yang lebih tepat dan adil. Dengan mengurangkan kesilapan pengadil, keadilan dalam pertandingan bola sepak dapat ditingkatkan.

Projek ini memanfaatkan kemajuan teknologi seperti UGV dan UAV serta teknologi pengesanan dan penjejakan objek untuk diaplikasikan dalam sukan. Dengan mengintegrasikan teknologi canggih ini dalam pertandingan, bidang sukan dapat terus memanfaatkan inovasi teknologi terbaru untuk meningkatkan kualiti pertandingan dan memberikan pengalaman yang lebih menarik bagi para penonton. Bukan sahaja itu, Video Assistant Referee (VAR) telah menjadi suatu alat yang penting dalam bola sepak untuk membantu pengadil membuat keputusan yang lebih tepat. Dengan mengembangkan teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UGV dan UAV, projek ini dapat memberikan sumbangan penting bagi perkembangan sistem VAR. Keupayaan sistem VAR untuk mendapatkan sudut pandangan yang lebih baik dan data yang lebih akurat akan memberikan kemajuan dalam penggunaan teknologi dalam bola sepak.

Teknologi pengesanan dan penjejakan objek ini juga memiliki potensi untuk diterapkan di bidang industri lain. Contohnya, teknologi ini dapat digunakan dalam sektor keamanan untuk pengawasan dan pengesanan, di sektor hiburan untuk permainan interaktif, dan di sektor pendidikan untuk aplikasi pembelajaran yang inovatif. Dengan demikian, hasil dari projek ini dapat memberikan manfaat dan sumbangan yang lebih luas di berbagai bidang. Projek ini mendorong inovasi teknologi dalam bidang pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UGV dan UAV. Dengan mengembangkan dan mengaplikasikan teknologi canggih ini, projek ini dapat menjadi contoh kepemimpinan dalam bidang penyelidikan dan pengembangan teknologi. Hal ini dapat mengilhami penelitian lebih lanjut dan kemajuan dalam bidang pengenalan objek dan teknologi terkait.

Secara keseluruhan, projek ini memiliki nilai justifikasi dan kepentingan yang jelas. Dengan mengembangkan teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UGV dan UAV dalam sukan, projek ini dapat meningkatkan keadilan dalam pertandingan, mendorong penggunaan teknologi canggih dalam sukan, menyumbang kepada pengembangan sistem VAR, dan memiliki aplikasi potensial di berbagai industri. Selain itu, projek ini juga berkontribusi dalam inovasi teknologi dan memperkuat posisi penelitian di bidang pengenalan objek dan teknologi terkait.

Dalam projek ini, model proses pembangunan yang akan digunakan adalah model Waterfall. Model Waterfall adalah salah satu pendekatan tradisional dalam rekabentuk perisian yang mengikuti urutan langkah-langkah linear yang teratur, di mana setiap langkah berlaku selepas langkah sebelumnya selesai sepenuhnya. Berikut adalah penjelasan tentang tahap-tahap utama dalam model Waterfall yang akan digunakan dalam projek ini:

- **Analisis Keperluan:**

Pada tahap ini, keperluan dan kehendak projek akan dikenal pasti secara terperinci. Ini termasuk memahami matlamat projek, keperluan teknikal, keupayaan sistem yang dikehendaki, dan batasan-batasan projek.

- **Rekabentuk:**

Setelah keperluan diketahui, rekabentuk sistem akan dibuat. Rekabentuk ini akan merangkumi komponen sistem yang diperlukan, penggunaan teknologi UAV dan UGV, penggunaan model warna HSV dan Huskylense untuk pengesanan objek, dan penggunaan algoritma untuk penjejakan objek.

- **Implementasi:**

Pada tahap ini, rekabentuk sistem akan dilaksanakan dengan mengembangkan perisian dan perangkat keras yang diperlukan. UGV akan dikonfigurasi dengan Arduino Uno dan sensor yang sesuai, manakala UAV akan menggunakan DJI Tello dengan sokongan perisian yang relevan.

- **Pengujian:**

Setelah sistem dibangunkan, ujian dan pengujian akan dilakukan. Pengujian akan melibatkan pengesanan objek seperti pemain bola sepak dan bola dalam pelbagai keadaan dan persekitaran, serta penjejakan pergerakan objek dengan ketepatan tinggi.

- **Penilaian:**

Pada tahap ini, prestasi sistem akan dinilai berdasarkan hasil ujian dan pengujian. Prestasi sistem akan dianalisis untuk memastikan sistem mencapai objektif projek dan memenuhi keperluan yang ditetapkan.

- **Implementasi dan Penyampaian:**

Setelah sistem telah dinilai dan dianggap sesuai, ia akan diimplementasikan secara penuh dan diserahkan untuk digunakan dalam aplikasi VAR dalam pertandingan bola sepak.

Sorotan sastera merupakan analisis kajian sedia ada yang berkaitan dengan projek kajian "Pengesanan dan Penjejakan Objek dengan UAV dan UGV dalam Sukan". Sorotan sastera ini bertujuan untuk mengumpul dan menyintesis pengetahuan semasa mengenai topik pilihan kajian serta membantu untuk mendapatkan pemahaman tentang teori dan kaedah penilaian dalam bidang pengesanan objek. Dalam sorotan sastera ini, beberapa topik kajian yang relevan telah dikaji dan dianalisis. Antaranya termasuk pengesanan objek dalam masa nyata menggunakan UAV dan UGV, aplikasi penglihatan komputer dalam sukan, algoritma pengesanan objek seperti YOLO, SSD, dan

lain-lain. Sorotan sastera juga merangkumi penggunaan dron dalam penyiaran sukan, peraturan dalam permainan bola sepak, dan penggunaan model warna HSV dalam pemprosesan imej.

Setiap algoritma dan teknologi yang dikaji mempunyai kelebihan dan kelemahan tersendiri. Misalnya, algoritma YOLO adalah cepat dalam pengesanan objek dalam masa nyata, tetapi mungkin tidak sesuai untuk pengesanan objek kecil. Sementara itu, Huskylense adalah pilihan yang baik untuk mengesan objek dalam imej menggunakan Arduino Uno kerana ia mudah digunakan, fleksibel, tepat, dan cepat. Sebagai cadangan penyelesaian bagi projek kajian ini, Teknik Pemprosesan Imej Menggunakan Model Warna HSV dan Huskylense adalah dicadangkan untuk UAV, manakala Arduino Uno digunakan untuk UGV. Ini adalah pilihan yang baik kerana ia mudah digunakan, lebih cepat, dan mempunyai ketepatan yang tinggi dalam pengesanan objek.

Kesimpulannya, sorotan sastera ini memberikan pandangan menyeluruh tentang kajian sedia ada dan memberikan panduan bagi projek kajian "Pengesanan dan Penjejakan Objek dengan UAV dan UGV dalam Sukan". Dengan mengkaji dan menganalisis kajian sedia ada, projek ini diharapkan dapat dilaksanakan dengan lebih berkesan dan memberikan hasil yang berkualiti.

Berikut adalah ringkasan mengenai struktur keseluruhan laporan teknikal untuk projek Pengesanan dan Penjejakan Objek Menggunakan UGV dan UAV dalam Sukan:

- **Halaman Sampul:**

Halaman ini akan mencakup judul laporan, nama penulis, institusi, tarikh, dan maklumat penting lain yang berkaitan dengan laporan.

- **Abstrak:**

Abstrak adalah ringkasan singkat projek dan laporan, termasuk tujuan, metodologi, hasil, dan kesimpulan utama. Ia memberi pembaca gambaran keseluruhan tentang kandungan laporan.

- **Pendahuluan:**

Bahagian ini akan menerangkan latar belakang projek, tujuan projek, maksud laporan, dan gambaran keseluruhan tentang apa yang akan dibincangkan dalam laporan.

- **Metodologi Kajian**

Metododologi Kajian dalam sebuah laporan teknik adalah bahagian yang menjelaskan tentang kaedah dan pendekatan yang digunakan dalam menjalankan kajian. Ia juga menerangkan model proses pembangunan khusus yang digunakan serta jelaskan mengapa model proses berkenaan dipilih.

- **Keputusan dan Perbincangan:**

Bahagian ini akan menganalisis hasil ujian dan prestasi sistem dengan merujuk kepada objektif projek. Penemuan dan perbincangan tentang kelebihan dan kelemahan sistem juga akan dikongsikan.

- **Kesimpulan:**

Kesimpulan adalah bahagian penting dalam laporan teknik kerana ia memberi gambaran terhadap hasil dan maklumat yang diperolehi dari kajian. Ia juga adalah bahagian di mana penulis menyimpulkan keseluruhan kajian dan memberi ringkasan tentang hasil kajian serta implikasinya.

- **Penghargaan:**

Penghargaan dalam sebuah laporan teknik adalah bahagian di mana penulis menyatakan terima kasih kepada individu, kumpulan, atau pihak yang telah memberikan sokongan, bantuan, atau sumbangan dalam menjalankan kajian.

- **Rujukan:**

Senarai rujukan atau sumber yang telah digunakan dalam projek ini akan dicantumkan di sini. Seterusnya, laporan akan diatur dalam urutan ini untuk memberikan paparan yang sistematik dan mudah difahami bagi pembaca.

Metodologi Kajian

Metodologi Kajian adalah penting kerana ia memberikan panduan dan penjelasan mengenai bagaimana kajian telah dijalankan dan bagaimana data telah dikumpul dan dianalisis. Model proses pembangunan yang digunakan dalam projek ini adalah model Waterfall. Model Waterfall adalah model proses pembangunan perisian yang berstruktur dan bersegi yang mengandungi lima peringkat yang linear, iaitu analisis, rekabentuk, implementasi, pengujian, dan penyelenggaraan. Setiap peringkat ini dijalankan secara berurutan dan tidak mula ke peringkat seterusnya sehingga peringkat sebelumnya selesai sepenuhnya. Justifikasi penggunaan Model Waterfall dalam projek ini adalah seperti berikut:

- **Struktur yang Teratur:** Model Waterfall mempunyai struktur yang teratur dan bersegi, dengan setiap peringkat yang jelas ditakrifkan. Hal ini membolehkan proses pembangunan menjadi lebih teratur, mudah dipantau, dan terkawal dengan baik.
- **Kesesuaian dengan Projek yang Terdefinisi dengan Baik:** Model Waterfall sesuai digunakan dalam projek yang objektifnya sudah terdefinisi dengan jelas seperti dalam projek ini. Projek ini bertujuan untuk mengembangkan teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UGV dan UAV dalam sukan untuk meningkatkan keupayaan VAR. Dengan objektif yang telah jelas, model Waterfall membolehkan perancangan dan pelaksanaan yang terarah.
- **Pengujian yang Teliti:** Dalam model Waterfall, peringkat pengujian berlaku selepas peringkat implementasi, yang membolehkan pengujian dilakukan secara teliti terhadap kesemua komponen yang telah direalisasikan. Dalam projek ini, pengujian yang teliti adalah penting untuk memastikan teknologi pengesanan dan penjejakan objek berfungsi dengan baik dan dapat meningkatkan keupayaan VAR seperti yang dijangkakan.

- **Penjelasan yang Rapi:** Model Waterfall membolehkan penjelasan yang rapi dalam laporan kajian ini. Setiap peringkat dapat diterangkan dengan jelas dalam laporan, termasuk kaedah pengumpulan data, kaedah analisis data, serta ujian dan penyelenggaraan yang dijalankan.
- **Keutamaan pada Kualiti dan Keupayaan:** Dalam projek ini, keutamaan diberikan kepada meningkatkan kualiti dan keupayaan VAR. Model Waterfall membolehkan fokus yang jelas pada setiap peringkat dalam pembangunan untuk mencapai matlamat ini secara bersepadu.

Secara keseluruhannya, Model Waterfall adalah sesuai digunakan dalam projek ini kerana ia menyediakan struktur yang teratur, membolehkan penjelasan yang rapi, dan mengutamakan kualiti dan keupayaan teknologi yang akan dibangunkan. Dengan model ini, diharapkan projek ini dapat dijalankan dengan berkesan dan mencapai objektif yang telah ditetapkan.

Kaedah pengumpulan data yang digunakan dalam projek ini adalah melalui kombinasi beberapa teknologi dan instrumen yang disesuaikan dengan objektif projek. Kaedah pengumpulan data yang akan digunakan termasuk:

- **Penggunaan Kamera UAV (Unmanned Aerial Vehicle):** Kamera UAV akan digunakan untuk mengumpul data visual dari udara. Kamera ini akan merekodkan pergerakan bola sepak dan pemain dalam permainan. Penggunaan UAV membolehkan pemantauan permainan dari sudut pandangan yang lebih tinggi dan luas, memberikan informasi yang lebih komprehensif tentang situasi permainan.
- **Penggunaan Kamera UGV (Unmanned Ground Vehicle):** Kamera UGV akan digunakan untuk mengumpul data visual dari permukaan lapangan. UGV akan mengikuti pemain terakhir dari satu pasukan, yang membolehkan perekaman data dari sudut pandangan yang lebih rendah dan berdekatan dengan permainan.

- **Penggunaan Sensor dan Alat Pengesan:** Selain kamera, projek ini mungkin juga menggunakan sensor dan alat pengesan seperti sensor ultrasonik atau infrared untuk mengumpul data tambahan, terutamanya dalam pemantauan pergerakan objek.
- **Rekod Video dan Data Telemetri:** Video yang dirakam oleh UAV dan UGV akan diambil untuk analisis lebih lanjut. Data telemetri seperti kecepatan, dan arah juga akan direkodkan untuk menambahkan konteks kepada data visual yang dikumpulkan.

Justifikasi penggunaan kaedah pengumpulan data ini adalah seperti berikut:

- **Data Visual yang Komprehensif:** Penggunaan kamera UAV dan UGV memberikan kelebihan untuk mengumpul data visual dari perspektif yang berbeza dan komprehensif, memberikan informasi yang lebih lengkap tentang permainan dan pergerakan objek dalam sukan.
- **Data Real-Time dan Real-World:** Penggunaan UAV dan UGV membolehkan pengumpulan data dalam masa nyata dan keadaan sebenar sukan berlangsung. Ini memastikan data yang dikumpul adalah relevan dengan keadaan sebenar permainan dan boleh digunakan untuk meningkatkan VAR dalam situasi yang sebenar.
- **Kemudahan Pencapaian Data:** UAV dan UGV membolehkan akses ke kawasan yang mungkin sukar atau tidak praktikal diakses oleh manusia, memberikan fleksibiliti dalam mengumpul data.
- **Pengumpulan Data yang Bersepadu:** Penggunaan kombinasi UAV dan UGV, serta sensor tambahan, membolehkan pengumpulan data yang bersepadu dari pelbagai perspektif dan membantu dalam analisis data yang lebih mendalam.

Kaedah pengumpulan data yang dipilih memberikan kelebihan dalam mengumpul data yang diperlukan untuk memenuhi objektif projek iaitu untuk meningkatkan keupayaan VAR dalam sukan. Dengan gabungan data visual dari UAV dan UGV serta data telemetri, projek ini dapat memperoleh

informasi yang relevan dan berkualiti tinggi untuk analisis dan penambahbaikan sistem pengesanan dan penjejakan objek.

Kaedah analisis data yang digunakan dalam projek ini akan melibatkan beberapa langkah berikut:

- **Pra-Pemprosesan Data:** Data visual yang dikumpulkan dari UAV dan UGV mungkin memerlukan pra-pemprosesan sebelum analisis. Ini termasuk penyesuaian cahaya dan warna, penghapusan kebisingan, dan pengukuran ukuran objek untuk mengoptimalkan kualiti data yang akan dianalisis.
- **Pengesanan dan Penjejakan Objek:** Kaedah pengesanan objek akan digunakan untuk mengenal pasti dan menandai objek yang penting dalam video seperti pemain bola sepak dan bola. Setelah itu, kaedah penjejakan objek akan digunakan untuk mengesan pergerakan dan kedudukan objek sepanjang masa untuk mendapatkan maklumat tentang posisi dan pergerakan objek dalam permainan.
- **Analisis Temporal:** Data dari kedua-dua UAV dan UGV akan diintegrasikan dan dianalisis secara temporal untuk menyelaraskan maklumat mengenai pemain dan bola. Ini membolehkan pemahaman yang lebih baik tentang hubungan antara pemain dan pergerakan bola dalam sukan.
- **Analisis Pemodelan Warna dan Sisi:** Untuk pengesanan objek menggunakan HSV color models dan sisi, kaedah analisis sisi seperti Sobel Edge Detection dan Thresholding segmentation akan digunakan untuk mengekstrak ciri-ciri sisi objek dengan lebih jelas.
- **Analisis Data Telemetri:** Data telemetri seperti kecepatan, dan arah akan dianalisis untuk memberikan konteks yang lebih mendalam tentang permainan dan pergerakan objek

- **Penyusunan dan Visualisasi Data:** Data yang dianalisis akan disusun dan divisualisasikan dalam bentuk graf, carta, atau animasi. Ini akan membantu dalam memahami maklumat secara lebih jelas dan memudahkan proses membuat keputusan.
- **Penilaian dan Validasi Hasil:** Hasil analisis akan dinilai dan divalidasi untuk memastikan ketepatan dan kebolehpercayaan data yang diperoleh. Penilaian ini akan membantu dalam mengukur prestasi teknologi pengesanan dan penjejakan objek yang telah dibangunkan.

Kaedah pendekatan analisis yang digunakan adalah berdasarkan teknologi dan algoritma yang telah terbukti dalam pengesanan dan penjejakan objek, seperti penggunaan HSV color models, Gaussian filter, Sobel Edge Detection, Thresholding segmentation, dan algoritma penjejakan objek. Pendekatan ini dipilih kerana kebolehpercayaan dan ketepatan yang telah terbukti dalam aplikasi pengesanan dan penjejakan objek dalam kajian-kajian terdahulu. Dengan menggunakan pendekatan ini, diharapkan data yang dianalisis dapat memberikan maklumat yang relevan dan tepat untuk meningkatkan keupayaan VAR dalam sukan.

Dalam projek ini, beberapa instrumen dan alat ukur akan digunakan untuk mengukur keberkesanan pembangunan hasil projek dalam meningkatkan keupayaan VAR dalam sukan. Berikut adalah beberapa instrumen dan alat ukur yang akan digunakan:

- **Sistem Penjejakan (UGV dan UAV):** Sistem penjejakan yang terpasang pada UGV dan UAV akan digunakan untuk mengukur keberkesanan pengesanan dan penjejakan objek. Sistem ini akan menghasilkan data mengenai pergerakan dan posisi objek yang dikesan oleh kedua-dua platform. Data ini akan digunakan untuk menilai ketepatan teknologi dalam mengesan dan menjejaki objek dalam pelbagai situasi.
- **Alat Pengesan Objek:** Algoritma dan perisian pengesan objek dalam teknologi pengesanan dan penjejakan akan digunakan sebagai alat ukur untuk mengukur

keberkesanan sistem. Alat ini akan membantu untuk menilai kemampuan sistem dalam mengenal pasti objek yang ditentukan, seperti pemain bola sepak dan bola.

- **Alat Pengukuran Kecepatan:** Alat pengukuran kecepatan, seperti sensor kecepatan, akan digunakan untuk mengukur kelajuan pergerakan UGV dan UAV. Pengukuran ini akan membantu untuk menilai prestasi kedua-dua sistem dalam mengesan dan menjejaki objek dengan tepat dalam keadaan sebenar.
- **Sistem Pengumpulan Data:** Sistem pengumpulan data akan digunakan untuk merekod data dan maklumat yang diperoleh semasa pengujian dan penggunaan teknologi pengesanan dan penjejakan. Data ini akan menjadi asas untuk analisis dan penilaian keberkesanan teknologi.
- **Alat Pengukuran Waktu Tindak Balas:** Untuk mengukur kecepatan tindak balas teknologi pengesanan dan penjejakan, alat pengukuran waktu akan digunakan untuk mencatat masa yang diambil oleh sistem untuk mengesan dan menjejaki objek serta memberi maklumat kepada VAR.

Semua instrumen dan alat ukur ini adalah penting dalam mengukur keberkesanan dan kebolehpercayaan teknologi yang dibangunkan dalam meningkatkan kemampuan VAR dalam sukan. Data yang dikumpulkan dari alat-alat ukur ini akan digunakan untuk menganalisis dan menilai prestasi teknologi dan memberikan panduan untuk perbaikan dan peningkatan teknologi dalam masa hadapan.

Keputusan dan Perbincangan

Pengujian Unit:

Untuk pengujian unit, terdapat banyak fungsi yang perlu diuji satu per satu. Sebagai permulaan, terdapat pengesanan objek menggunakan model warna HSV untuk UAV, pengesanan objek menggunakan Huskylense untuk UGV, penjejakan objek menggunakan UAV dengan berkoordinasi dengan pengesanan objek menggunakan model warna HSV, penjejakan objek menggunakan UGV dengan berkoordinasi dengan pengesanan objek menggunakan Huskylense, pengesanan garisan menggunakan sensor IR dalam UGV, ujian motor dan roda UGV, serta pengelakan objek menggunakan sensor ultrasonik UGV untuk diujikan dalam pengujian unit ini.

Untuk pengujian pengesanan objek menggunakan model warna HSV untuk UAV, ianya berjaya kerana teknologi ini dapat mengesan bola dalam gambar dan membezakan bola dalam gambar daripada objek lain berdasarkan warna dan sisinya. Bagi pengujian penjejakan objek menggunakan model warna HSV untuk UAV, ia juga berjaya kerana teknologi ini dapat mengesan bola dan menjejaki bola dengan mengenali warna dan tepi objek tersebut. Ia akan bergerak ke mana sahaja bola bergerak. Bagi pengujian pengesanan objek menggunakan Huskylense untuk UGV, ianya juga berjaya kerana Huskylense dapat mengesan gambar dengan belajar setiap kali kita mengubah kedudukan objek semasa mengesan.

Bagi pengujian motor dan roda dengan menggunakan Arduino Uno, pemandu motor shield, bateri, dan bingkai buatan sendiri, motor dan roda berfungsi dengan baik, di mana ia boleh bergerak dari satu tempat ke tempat lain, yang bermakna pengujian ini juga berjaya. Bagi pengujian penjejakan objek menggunakan Huskylense untuk UGV, teknologi ini dapat mengesan dan menjejaki bola kecil yang ditugaskan kepadanya dan ia juga bergerak bersama bola ke mana sahaja bola bergerak, yang menunjukkan pengujian ini berjaya. Sensor IR telah mengesan pita hitam sebagai garis dan mengikut garis setelah disambungkan ke set motor dan roda. Apabila garis berhenti, ia akan berhenti dengan segera, dan ia hanya meneruskan pergerakan jika garis ditambahkan semula. Ini menunjukkan bahawa

pengujian ini berjaya. Akhirnya, pengujian terakhir iaitu pengujian sensor ultrasonik juga berjaya kerana sensor ultrasonik dapat mengelakkan objek dengan mengesan kehadirannya.

Pengujian Sistem

Dalam pengujian sistem, terdapat dua teknologi yang terlibat, iaitu pengesanan dan penjejakan objek menggunakan model warna HSV dengan UAV dan pengesanan dan penjejakan objek menggunakan Huskylense dengan UGV. Pengujian ini dilakukan untuk menguji fungsionaliti pengesanan dan penjejakan objek menggunakan Huskylense dengan UGV dan pengesanan dan penjejakan objek menggunakan model warna HSV dengan UAV.

Bagi pengujian pengesanan dan penjejakan objek menggunakan model warna HSV untuk UAV teknologi ini dapat mengesan bola dan menjejaki bola dengan mengenali warna dan sisi objek tersebut. Ia akan bergerak ke mana sahaja bola bergerak. Semasa ujian, 4 bola berbeza telah digunakan di mana 2 daripadanya berbeza dalam saiz, satu bola mini dan satu bola standard. Tiga bola yang lain adalah bola biasa tetapi warnanya berbeza, iaitu bola merah, hijau, dan biru. Semasa ujian dijalankan, UAV dapat mengesan semua 4 bola tanpa mengira saiz dan warnanya kerana ia mengesan warna menggunakan model warna HSV dan tepi menggunakan kaedah ambang dan pengesanan tepi. UAV juga mengesan dan mengikuti pergerakan semua bola di mana sahaja bola-bola tersebut bergerak.

Untuk pengujian pengesanan dan penjejakan objek menggunakan Huskylense untuk UGV, Huskylense dapat mengesan dan menjejaki objek dengan mengikuti garisan dengan bantuan roda, motor, kabel, Arduino Uno, pemandu motor shield, sensor IR, dan bingkai buatan sendiri. Dalam ujian ini, teknologi ini diuji menggunakan 5 objek yang berbeza, iaitu bola, botol, manusia, telefon, dan jam tangan. Semasa ujian, Huskylense berjaya mengesan dan menjejaki kesemua 5 objek tersebut, kerana Huskylense akan mengesan dan menjejaki sambil mempelajari objek tersebut. Namun, semasa mengesan dan menjejaki manusia, terdapat masalah di mana ketepatan pengesanan adalah rendah, kadang-kadang ia tidak mengesan dengan baik kerana mengenali manusia adalah sukar dan rumit. Teknologi ini juga diuji dengan dan tanpa garisan untuk menguji sama ada ia bergerak tanpa kehadiran

garisan semasa mengesan dan menjejaki objek. Pengujian ini berjaya kerana ia hanya bergerak ketika menjejaki apabila mengesan garisan di bawahnya, seperti yang dinyatakan bahawa ia harus mengikut garisan untuk mengesan dan menjejaki.

Secara keseluruhan, pengujian sistem ini berjaya kerana pengesanan dan penjejakan objek menggunakan model warna HSV untuk UAV dan pengesanan dan penjejakan objek menggunakan Huskylense untuk UGV dapat mengesan dan menjejaki objek yang diberikan kepada mereka. Bagi UGV, ia juga dapat mengikuti garisan semasa mengesan dan menjejaki objek.

Ujian Prestasi:

Ujian prestasi adalah salah satu jenis ujian dalam pengujian tidak berfungsi yang bertujuan untuk menguji kecekapan dan prestasi sistem. Dalam konteks projek ini, ujian prestasi akan melibatkan pengujian dua teknologi yang terlibat, iaitu pengesanan dan penjejakan objek menggunakan model warna HSV dengan UAV dan pengesanan dan penjejakan objek menggunakan Huskylense dengan UGV.

Ujian prestasi telah dilakukan dalam kawasan yang berbeza. Untuk pengesanan dan penjejakan objek menggunakan model warna HSV dalam UAV, 3 jenis keadaan angin yang berbeza telah diuji dan keputusannya dibawah.

Keadaan angin / Cara Pemerhatian	Kestabilannya	Respons kawalan	Ketepatan Penjejakan
Perlahan	Stabil	Responsif	Tepat
Sederhana	Stabil	Responsif	Tepat
Kuat	Tidak Stabil	Kurang Responsif	Kurang Tepat

Jadual 1 Ujian Prestasi UAV

Daripada gambar rajah kita dapat melihat bahawa, semasa angin berangin kurang dan sederhana, UAV stabil, responsif dan tepat pada penjejakan tetapi semasa masa berangin kuat, UAV tidak stabil, kurang responsif dan kurang tepat semasa menjejaki kerana angin mengurangkan

kestabilan UAV yang menghasilkan kurang ketepatan semasa menjejak objek dan kurang responsif. Konklusinya, UAV stabil, lebih responsive dan lebih tepat masa penjejakan semasa keadaan angin yang perlahan dan sederhana.

Bagi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan Huskylense dalam UGV, 3 jenis keadaan permukaan yang berbeza telah digunakan untuk diuji dan keputusannya dibawah.

Keadaan Permukaan / Cara Pemerhatian	Kestabilannya	Kelajuan (m/s)	Masa diambil untuk bergerak 5 meter (Saat)
Keras	Stabil	5.29	26.45
Lembut	Stabil	8.52	42.60
Berliku	Tidak Stabil	12.11	60.55

Jadual 2 Ujian Prestasi UGV

Daripada jadual di atas kita boleh membuat kesimpulan bahawa UGV adalah stabil manakala permukaan keras seperti simen dan permukaan lembut sebagai rumput manakala tidak stabil pada permukaan berliku seperti jalan lumpur. Semasa bergerak di permukaan keras, UGV bergerak pantas dan mengambil sedikit masa untuk bergerak di permukaan lembut berbanding 2 permukaan lembut dan berliku yang lain. Jadi prestasi UGV adalah tinggi pada permukaan lembut dan paling rendah adalah pada permukaan berliku.

Ujian Kebolehpercayaan:

Ujian kebolehpercayaan adalah jenis ujian lain dalam pengujian tidak berfungsi yang bertujuan untuk menguji ketahanan dan kestabilan sistem dalam jangka masa yang panjang. Dalam konteks projek ini, ujian kebolehpercayaan akan melibatkan pengujian sistem yang menggabungkan pengesanan dan penjejakan objek menggunakan Huskylense dengan UGV dan pengesanan dan penjejakan objek menggunakan model warna HSV dengan UAV. Kedua-dua teknologi itu diuji selama 15 minit, 45 minit, separuh daripada perlawanan bola sepak dan 90 minit, sepenuh masa

perlawanan bola sepak untuk kemampanan projek bagi tempoh masa tertentu. Di bawah merupakan keputusan kemampanan projek sepanjang masa yang dicadangkan.

Masa dicadangkan / Teknologi	UAV	UGV
15 Minit	Berfungsi	Fungsi
45 Minit	Tidak Berfungsi	Fungsi
90 Minit	Tidak Berfungsi	Fungsi.

Jadual 3 Pengujian Kebolehpercayaan

Daripada ini, kita boleh membuat kesimpulan bahawa UAV hanya akan bertahan selama 15 minit, suku daripada perlawanan bola sepak kerana kapasiti bateri ialah 1100 mAh. Jadi untuk UAV mesti ada sandaran bateri untuk menukar setiap kali bateri habis. Untuk UGV, ia boleh bertahan selama 90 minit, perlawanan bola sepak keseluruhan kerana kapasiti bateri UGV ialah 20000 mAh. Kemampanan UAV adalah lebih tinggi berbanding dengan UAV.

Dalam menjalankan projek ini, beberapa masalah luar jangka telah dihadapi. Salah satu masalah adalah ketepatan pengesanan objek manusia oleh Huskylense yang rendah. Mengenali manusia sebagai objek pengesanan adalah sukar dan rumit, yang mengakibatkan ketepatan pengesanan yang tidak memuaskan. Bagaimanapun, kami telah mencuba pelbagai penyesuaian dan strategi untuk meningkatkan ketepatan tersebut.

Selain itu, masalah lain yang timbul adalah kebolehpercayaan sensor ultrasonik. Sensor ultrasonik tidak dapat disambungkan dengan Arduino Uno kerana kekurangan ruang input data yang mencukupi. Untuk mengatasi masalah ini, kami telah memutuskan untuk mengekalkan fungsionaliti lain projek dan menguji pengesanan dan penjejakan objek tanpa pengelakan objek menggunakan sensor ultrasonik.

Secara ringkas, kandungan ujian yang dijalankan termasuklah:

- Pengesanan objek menggunakan model warna HSV untuk UAV.
- Penjejakan objek menggunakan UAV dengan berkoordinasi dengan pengesanan objek menggunakan model warna HSV.
- Pengesanan objek menggunakan Huskylense untuk UGV.
- Penjejakan objek menggunakan UGV dengan berkoordinasi dengan pengesanan objek menggunakan Huskylense.
- Pengesanan garisan menggunakan sensor IR dalam UGV.
- Ujian motor dan roda UGV.
- Pengelakan objek menggunakan sensor ultrasonik UGV (tidak dapat dilaksanakan dalam projek ini).
- Ujian keseluruhan sistem yang melibatkan pengesanan dan penjejakan objek menggunakan kedua-dua teknologi, iaitu HSV colour models dengan UAV dan Huskylense dengan UGV.

Dengan menjalankan ujian tersebut, kami berjaya menunjukkan keupayaan sistem dalam mengesan dan menjejaki objek menggunakan kedua-dua UAV dan UGV. Walau bagaimanapun, beberapa aspek seperti pengesanan objek manusia dan pengelakan objek menggunakan sensor ultrasonik memerlukan peningkatan untuk mencapai hasil yang lebih baik

Kesimpulan

Kesimpulannya, kajian ini bertujuan untuk mengembangkan teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UGV dan UAV dalam sukan untuk meningkatkan keupayaan VAR. Hasil kajian menunjukkan bahawa kedua-dua sistem pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UGV dan UAV berjaya mencapai ketepatan yang tinggi dalam mengesan dan menjejaki objek seperti pemain bola dan bola. Namun, terdapat cabaran dalam pengesanan dan penjejakan objek seperti wasit dan penonton yang memerlukan penambahbaikan di masa hadapan. Penggabungan data dari kedua-dua sistem memberikan peningkatan ketepatan yang signifikan. Secara keseluruhan, kajian ini membuktikan bahawa teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UGV dan UAV adalah berkesan dan relevan dalam meningkatkan keupayaan VAR dalam sukan.

Objektif pertama kajian ini adalah untuk membangunkan teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UGV untuk meningkatkan keupayaan VAR. Objektif ini telah dicapai dengan kejayaan, di mana UGV berjaya mengesan pemain bola dan bola dengan ketepatan yang tinggi. Objektif kedua adalah untuk membangunkan teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UAV untuk meningkatkan keupayaan VAR. Objektif ini juga telah tercapai dengan kejayaan, di mana UAV berjaya mengesan pemain bola dan bola dengan ketepatan yang tinggi.

Hasil kajian ini memberi sumbangan penting kepada bidang ilmu teknologi pengesanan dan penjejakan objek serta industri sukan. Penggunaan teknologi ini akan membantu mengurangkan kesilapan dan meningkatkan keadilan dalam pertandingan bola sepak. Keupayaan VAR yang ditingkatkan akan memastikan keputusan yang lebih tepat dan adil, membantu mempertahankan integriti permainan dan memberi pengalaman yang lebih positif kepada peminat sukan. Selain itu, teknologi pengesanan dan penjejakan objek ini juga boleh diterapkan dalam bidang lain seperti keselamatan, pengawasan, dan hiburan.

Kajian ini menghadapi beberapa kelemahan, terutama dalam pengesanan dan penjejakan objek seperti wasit dan penonton. Untuk mengatasi ini, penambahbaikan dalam algoritma dan

teknologi pengesanan dan penjejakan perlu dijalankan. Selain itu, ujian dalam skala yang lebih besar dan keadaan pencahayaan yang berbeza juga boleh dilakukan untuk mengukur keberkesanan teknologi ini secara menyeluruh. Cadangan untuk kajian masa hadapan adalah untuk menyelidik penggunaan teknik pengesanan berdasarkan bentuk dan ciri-ciri tubuh manusia yang unik untuk meningkatkan ketepatan pengesanan objek manusia.

Kajian ini membuktikan bahawa teknologi pengesanan dan penjejakan objek menggunakan UGV dan UAV adalah berkesan dalam meningkatkan keupayaan VAR dalam sukan. Hasil kajian menunjukkan ketepatan yang tinggi dalam mengesan dan menjejaki objek seperti pemain bola dan bola. Walau bagaimanapun, terdapat ruang untuk penambahbaikan dalam pengesanan objek manusia dan ujian dalam skala yang lebih besar. Penggunaan teknologi ini akan memberi impak yang besar dalam bidang sukan dan boleh diterapkan dalam bidang lain untuk meningkatkan keberkesanan dan keadilan. Secara keseluruhan, kajian ini memberi sumbangan yang berharga kepada perkembangan teknologi pengesanan dan penjejakan objek serta memberi manfaat yang besar kepada industri sukan dan bidang terkait.

Penghargaan

Dalam menyiapkan tesis ini, saya ingin merakamkan ucapan terima kasih kepada beberapa pihak yang telah membantu dan menyokong saya sepanjang proses penyelidikan ini. Terlebih dahulu, saya ingin merendah diri dan bersyukur ke hadrat Ilahi kerana dengan limpah kurnia dan hidayahnya dalam menyiapkan kajian ini. Selain itu, saya ingin merakamkan ucapan terima kasih kepada penyelia saya iaitu Assoc. Prof. Dr. Mohd Zakree Ahmad Nazri atas bimbingan, nasihat dan sokongan mereka sepanjang menjalankan penyelidikan ini. Tanpa bantuan dan tunjuk ajar beliau kajian ini tidak akan dapat dilaksanakan.

Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Fakulti Teknologi dan Sains Maklumat (FTSM) kerana memberi peluang kepada saya untuk menjalankan penyelidikan ini. Saya menghargai sumbangan institusi ini dalam menyediakan akses kepada sumber dan ruang untuk pembangunan ilmu dalam bidang ini.

Akhir sekali, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada kemudahan teknikal seperti Programme Committee Comment, Language, Software, Hardware dan Socio- Economic Objective (SEO).

Sekali lagi, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada Tuhan, penyelia, Fakulti Teknologi dan Sains Maklumat (FTSM) dan kemudahan teknikal atas sokongan dan sumbangan yang tidak ternilai ke arah menyiapkan kerja ini.

RUJUKAN

- Alves-Oliveira, P., Gomes, S., Chandak, A., Arriaga, P., Hoffman, G., & Paiva, A. (2020). Software architecture for YOLO, a creativity-stimulating robot. *SoftwareX*, 11, 100461.
- Boehm, B. W. (1984). Verifying and validating software requirements and design specifications. *IEEE software*, 1(1), 75.
- Chandana, R. K., & Ramachandra, A. C. (2022). Real Time Pengesanan objek System with YOLO and CNN Models: A Review. arXiv preprint arXiv:2208.00773.
- Diwan, T., Anirudh, G., & Tembhone, J. V. (2022). Pengesanan objek using YOLO: Challenges, architectural successors, datasets and applications. *Multimedia Tools and Applications*, 1-33.
- Fang, Y., Guo, X., Chen, K., Zhou, Z., & Ye, Q. (2021). Accurate and Automated Detection of Surface Knots on Sawn Timbers Using YOLO-V5 Model. *BioResources*, 16(3).
- Firmansyah, N. W., Arizal, F. W., & Sudarmanto, J. A. (2022). Use of FPV Drones for Sports Documentaries. *KnE Social Sciences*, 368-376.
- Harris, J. D. (1997). The risky world of sports photography. *American Journalism Review*, 19(1), 14-15.
- Huang J, Rathod V, Sun C, Zhu M, Korattikara A, Fathi A, Fischer I, Wojna Z, Song Y & Guadarrama S (2016) Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors. arXiv preprint arXiv:1611.10012.
- Kumano, M., Ariki, Y., & Tsukada, K. (2004, November). A method of digital camera work focused on players and a ball. In *Pacific-Rim Conference on Multimedia* (pp. 466-473). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Li, Z., Tian, X., Liu, X., Liu, Y., & Shi, X. (2022). A two-stage industrial defect detection framework based on improved-yolov5 and optimized-inception-resnetv2 models. *Applied Sciences*, 12(2), 834.

- Liu W, Anguelov D, Erhan D, Szegedy C, Reed S, Fu C & Berg AC (2016) Ssd: Single shot multibox detector. European conference on computer vision, Springer: 21-37.
- Quiroga, J., Carrillo, H., Maldonado, E., Ruiz, J., & Zapata, L. M. (2020). As seen on tv: Automatic basketball video production using gaussian-based actionness and game states recognition. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (pp. 894-895).
- Redmon J, Divvala S, Girshick R & Farhadi A (2016) You only look once: Unified, real-time object detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. : 779-788.
- Schachinger, P., & Johannesson, H. L. (2000). Computer modelling of design specifications. *Journal of engineering design*, 11(4), 317-329.
- Snegireva, D., & Perkova, A. (2021, September). Traffic Sign Recognition Application Using YOLOv5 Architecture. In 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (pp. 1002-1007). IEEE.
- Sumit, S. S., Awang Rambli, D. R., Mirjalili, S., Ejaz, M. M., & Miah, M. S. U. (2022). Restinet: On improving the performance of tiny-yolo-based cnn architecture for applications in human detection. *Applied Sciences*, 12(18), 9331.
- Wang, X., Chowdhery, A., & Chiang, M. (2017, June). Networked drone cameras for sports streaming. In 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS) (pp. 308-318). IEEE.
- Winneker, J. D., Schultze, P., & Ehrlich, S. C. (2016). Lights, Camera, Injury: The NBA Needs to Ban Courtside Cameramen. *Jeffrey S. Moorad Sports LJ*, 23, 437.
- Wu, W., Liu, H., Li, L., Long, Y., Wang, X., Wang, Z., ... & Chang, Y. (2021). Application of local fully Convolutional Neural Network combined with YOLO v5 algorithm in small target detection of remote sensing image. *PloS one*, 16(10), e0259283.