

Tartu Ülikool
Arvutiteaduse instituut
Informaatika õppekava

Joonas Tiitson

PCB komponentide tuvastamine

Bakalaureusetöö (9 EAP)

Juhendaja:

Kristo Raun, PhD

Tartu 2025

PCB komponentide tuvastamine

Lühikokkuvõte:

Käesoleva töö eesmärgiks on luua masinõppe mudel trükkplaadi komponentide suundade tuvastamiseks. Selleks valmis töö käigus pildistatud ning märgendatud andmehulk erinevatest trükkplaatidest, YOLO ja ResNeXt selgrooga FasterRCNN mudelid ning testimisprogrammid, et määrata, kumb on selliseks rakenduseks sobivam, ning anda ülevaade kummagi meetodi plussidest ja miinustest. Loodud lahenduse leidmise käigus prooviti peamiselt kasutada vabavaralisi tööriistu, et loodud lahendus oleks tasuta kasutatav kõigile huvilistele. Lahendus võimaldab soovijatel ühendada oma märgendatud projekt mudelitega, et tegeleda soovitud suunatuvastusega.

Võtmesõnad: pildituvastus, YOLO, ResNeXt, FasterRCNN, suunatuvastus

CERCS: P176 Tehisintellekt

PCB component detection

Abstract:

The mission of this paper is to create machine learning based models for detecting the orientation of printed circuit board (PCB) components. To achieve the desired goal, during the course of this work it was necessary to create a photo-bank of different kinds of annotated PCB-s, two models, one based on Faster-RCNN with a ResNeXt backbone and the other based on YOLO. A few validation and testing programs were created to compare the upsides and downsides of each model. During the development process, it was a general rule to try use open-source solutions, so that the created programs and models would be free to use for anyone who is interested. The completed project allows anyone to connect their annotated project to model training files, to use them for directional object detection.

Võtmesõnad: Image detection, object detection, YOLO, ResNeXt, Faster-RCNN, orientation detection

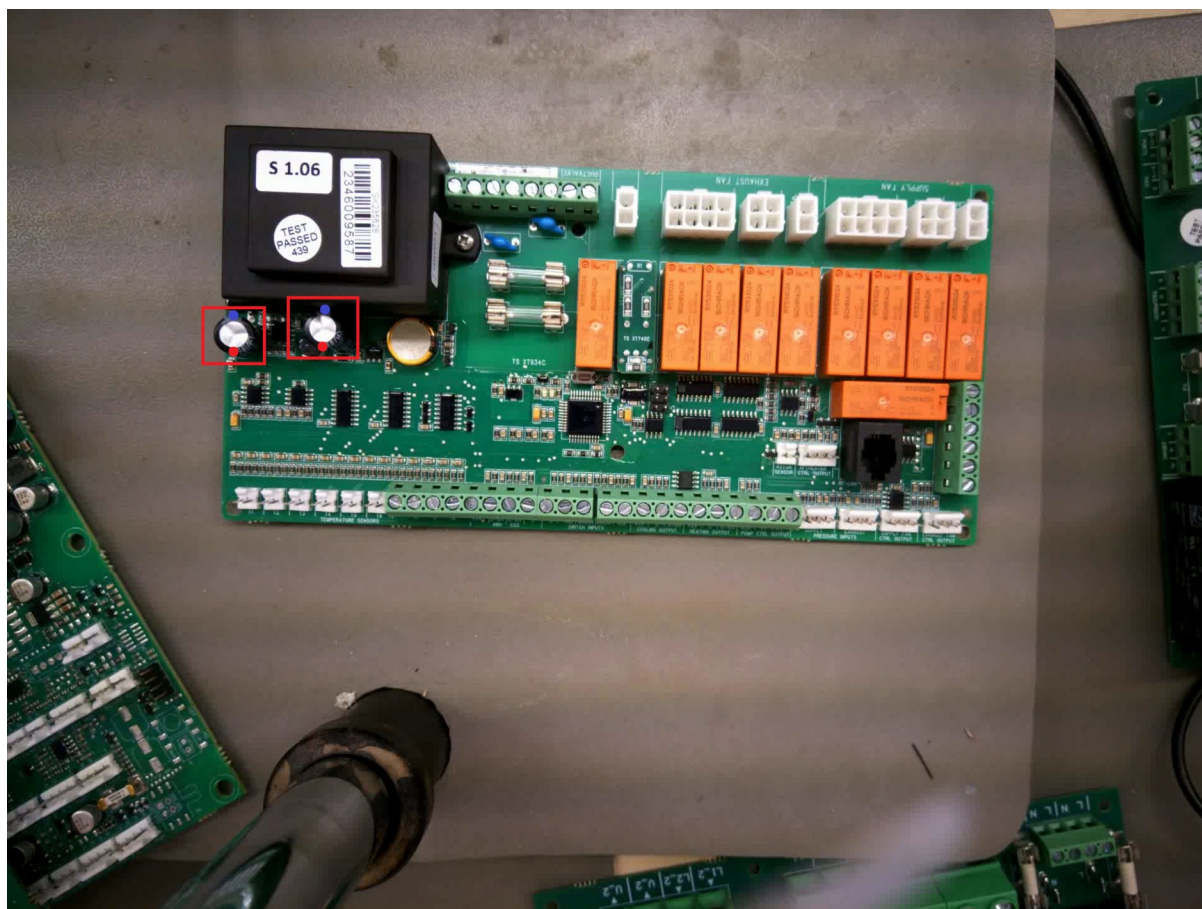
CERCS: P176 Artificial intelligence

Sisukord

| | |
|--|----|
| 1. Sissejuhatus..... | 5 |
| 2. Kirjanduse ülevaade..... | 7 |
| 2.1 Pildituvastuse mudelite ülevaade..... | 7 |
| 2.2 YOLO võrreldes teiste mudelitega..... | 9 |
| 2.3 Pooljuhendatud õpe..... | 11 |
| 2.4 <i>Zero-Shot</i> õpe..... | 12 |
| 2.5 Suuna tuvastus YOLO mudeliga..... | 12 |
| 3. Metoodika..... | 14 |
| 3.1 Andmekogumi loomine..... | 14 |
| 3.2 YOLO ja FasterRCNN tulemused..... | 15 |
| 3.3 Ülevaade praktilisest rakendusest..... | 16 |
| 4. Tulemuste analüüs..... | 17 |
| 4.1 Kaamerapõhine kontroll..... | 17 |
| 4.2 FasterRCNN võrreldes YOLO mudeliga..... | 17 |
| 4.3 Mudelite nõudlikkus..... | 18 |
| 5. Tulemuste arutelu..... | 19 |
| 5.1 Märgeandatud andmekogu..... | 19 |
| 5.2 Mudelite täpsus ning parandused, mida rakendada tulevikus..... | 19 |
| 6. Kokkuvõte..... | 21 |
| Viidatud kirjandus..... | 22 |
| Lisad..... | 24 |
| Lisa 1. Mõisted, terminid ja lühendid..... | 24 |
| Lisa 2. Lihtlitsents lõputöö elektroonseks avaldamiseks..... | 25 |

1. Sissejuhatus

Elektroonikatööstuses toodetakse trükkplaate, mille peal on erinevaid elektroonika-komponente, näiteks transistorid, takistid, pistikud, jne. Komponendid on üsna väikesed ja neid on iga trükkplaadi peal palju, sellepärast on nende montaaži kvaliteedi hindamine täpne ning rutiinne töö. Samuti võiks olla igale trükkplaadile kuluv aeg võimalikult väike, kuna siis on võimalik testimisel sammu pidada tootmisega ilma protsessi aeglustamata. Joonisel 1 on näide trükkplaadist.



Joonis 1. Näide trükkplaadist, millel on märgitud kondensaatorite poolsused.

Tänapäeval eksisteerivad mitmed tööstuslikud mitme sensorilised automaatsed lahendused, et vähendada manuaalset tööd trükkplaatide hindamisel. Enamik nendest on kahjuks üsnagi kallid - alates 10 000 eurost ning nende ülesseadmine ei ole lihtne, kuna sellised süsteemid võivad kaaluda üle tonni (Yamaha, 2025). Odavamalt lahendust pakub kaamerapõhine kontroll, mis ei pruugi olla nii täpne kui muud meetodid, kuid võimaldaks lahendada osa

probleemist automatiseerimisega. Sellist lahendust võimaldavad erinevad masinõppel põhinevad pildituvastusmeetodid.

Eesmärgiks on luua mudel, mis on täpne ning usaldusväärne trükkplaadi komponentide tuvastamisel. Andes ette trükkplaadil leiduvate komponentide kogumi ja trükkplaadi pildi, peaks lahendus ütlema, mis on puudu. Paljude komponentide puhul on oluline ka tuvastada selle orientatsiooni, näiteks on pildil 1 märgitud kondensaatorite asukoht kastiga ning nende poolused on märgitud punktidega. Tähtis on ka trükkplaatide kiire analüüsimine, müra eiramine ning väikeste komponentide märkimine, mis teeb lahenduste loomise keeruliseks. Ei saa kasutada pika analüüsimise ajaga meetodeid, mis aeglustaks kogu tootmist. Ei saa ka kasutada väga kiireid, kuid tihti vigu tegevaid mudeleid ega meetodeid. Selleks, et oleks mõõdetav eesmärk, on see subjektiivselt määratud, kuna puudus määratud mõõdupuu. Töös on oluliseks mõõdupuuks *precision* ja *recall*, ehk eesti keeles täpsus ning saagis. Loodud mudelid võiksid olla võimalikult kõrge täpsusega, ehk võimalikult paljud objektid märgitaks õigesti ära piltidelt. Saagis võiks olla võimalikult madal, ehk tuvastatud alad oleksid võimalikult tihti kooskõlas päris objekti asukohaga. Kuna ideaalis peaks olema loodud tarkvara vabalt ja tasuta kasutatav kõigile soovijatele, siis võiksid olla ka kõik lisarakendused ja masinõppe mudelid tasuta kasutatavad kõigile.

Järgnevalt on kirjeldatud töö struktuur. Peatükis 2 on kirjeldatud töö teoreetilist tausta, kus on uuritud masinõppimist ja objekti tuvastamist. Samuti erinevaid abistavaid protsesse ning ka andmete märgendamist. 3. peatükk räägib töö loomise metoodikast, selles peatükis on kirjeldatud lahenduse loomeprotsesse ning on välja toodud ka lahenduse käivituslikku ajakulu ning täpsus komponentide tuvastusel. 4. peatükis on tulemuste analüüs, kus tehakse järeldusi ning analüüsitakse saadud tulemusi. 5. peatükis võetakse kokku tulemused ning arutletakse, mis tulevikus peaks edasi arendama, mida peaks lahenduse juures muutma ning millise tulemuseni jõuti.

2. Kirjanduse ülevaade

Töö keskendub trükkplaatidelt (PCB) komponentide tüübi ning orientatsiooni tuvastusele masinõppe lahendustega. See on oluline tööstusliinide suurema automatiseerimise ning üldistusvõimsuse jaoks. Samuti on tähtis, et tuleviku jaoks oleks olemas ka meetodeid, et vähendada mudelite arenduses manuaalset tööd, kuna lahendus võiks olla võimalikult laialt rakendatav.

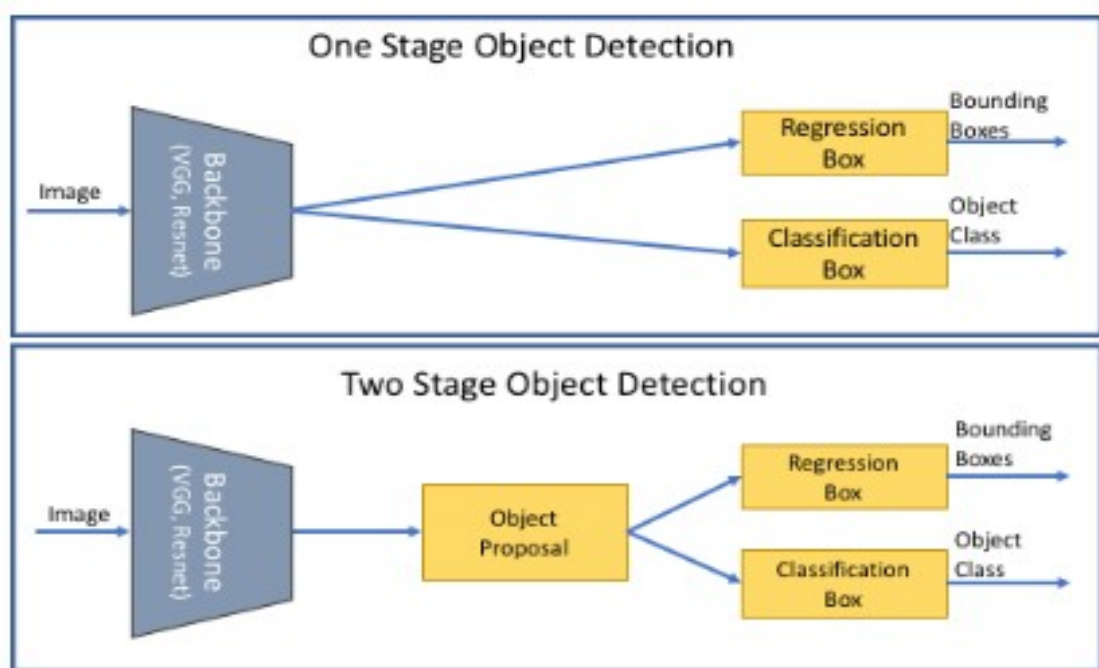
Nende eesmärkide täitmiseks on vajalik kirjeldada võimalikke meetodeid ning nende taustasid. Kirjanduse ülevaate esimeses alampeatükis on kirjeldatud erinevaid tuntud ning laialt kasutatud pildituvastusmudeleid ning nende töö põhimõtteid. Teises alampeatükis on juttu YOLO mudelist eraldi, kuna see on tänapäeval kujunenud eestvedajaks tööstuses pildituvastuse rakendamisel. Kolmandas peatükis tuuakse välja pooljuhendatud õppe võimalused, mida on varasemalt loodud, et edaspidisel arendusel oleks vaja vähem inimeste manuaalset tööd mudeli parandamisel. Neljandas alampeatükis on toodud välja ka *Zero-Shot* masinõppe võimalus, mis samuti aitaks tulevikus rakendades vähendada manuaalset tööd. Viimane alampeatükk kirjeldab, kuidas on võimalik kasutada masinõppe mudeleid, et määrata objektide suunda.

2.1 Pildituvastuse mudelite ülevaade

See lõik tutvustab paari masinõppega seotud terminite. Masinõppega seoses on tarvis teada järgnevaid mõisteid: kadu, kaofunktsioon, närvivõrk (inglise keeles *neural network*), epohh (inglise keeles *epoch*) ning ennustuskindlus (*confidence*). Kadu kasutatakse masinõppe mudelite treenimisel, et määrata, kas mudel treenib hästi või halvasti, selleks võib olla ükskõik missugune arv, mida arvutatakse kaofunktsiooni abil, tüüpiliselt on see mittenegatiivne. Üldiselt, mida nulli lähedasem on kadu, seda täpsemini oskab mudel treeninghulga puhul ennustusi teha. Närvivõrgud kasutavad mitmeid neuroneid kihiliselt, et sisendist luua vajalik väljund. Selleks eksisteerivad närvivõrkudes kihiliselt asetsevad neuronid, mis omakorda on lihtsustatult avaldised. Iga neuron saab sisendi, mis koosneb eelnevate kihtide kaalutud väljunditest ja täidab kindlat operatsiooni (näiteks liitmise) nende sisenditega, seejärel edastab tulemuse järgmisele kihile, kuni lõpuks viimane kiht annab kogu närvivõrgu väljundi. Epohh tähendab treeningandmete ühekordset täielikku läbimist, seega, kui mudelit treenitakse 10 epohhi, siis mudelile anti ette sama andmestik 10 korda järjest, et parandada mudeli kadu selle andmestiku puhul. Ennustuskindlus on igale ennustatud

objektile antud arv nullist üheni, seda kasutatakse et võrrelda mudeli ennustust, alale pandakse kõige kõrgema kindlusega nimi.

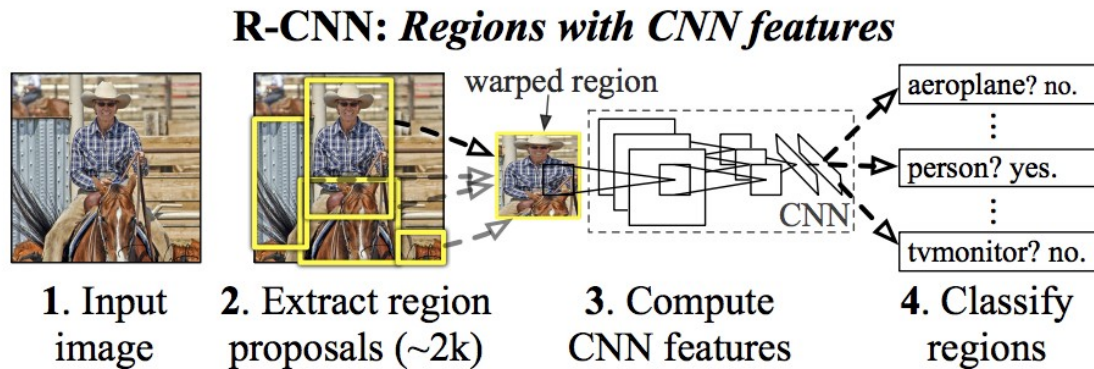
Laialdaselt on kasutuses tänapäeval kahe erineva struktuuriga pildituvastuse mudelit (Andreu, 2018). Nendeks on üheastmelised objekti tuvastuse mudelid, nagu näiteks YOLO (*you only look once*) ning kaheastmelised objekti tuvastuse mudelid, nagu näiteks R-CNN (*Region-based Convolutional Neural Network*) (Andreu, 2018). Nende peamine erinevus tuleneb sellest, et kaheastmelised mudelid kõigepealt valivad piirkonnad, millelt tuvastada, ja seejärel klassifitseerivad leitud ala, kuid üheastmelised mudelid teevad mõlemad sammud korraga (Joonis 2).



Joonis 2. Ühe- ja kaheastmelise mudeli üldine struktuur, Andreu, 2018.

Järgnevalt selgitus R-CNN tööpõhimõtted, toetub peamiselt „14.8. Region-based CNNs (R-CNNs)” peatükile, raamatust „Dive into deep learning” (Zhang, 2024). R-CNN mudelid töötavad mitmeastmeliselt, esimeseks sammuks on kasutada objekte esile toovat mudelit või niinimetatud *backbone-i* (eesti keeles selgroog), milleks sageli kasutatakse näiteks ResNeXt, mis valib välja regiooni soovitusi. Neid regioonide omakorda muudetakse, nii et need mõõtmed sobiksid närvivõrgus (*neural network*) töötlemiseks. Igat tüüpi objekti jaoks luuakse toetav

vektormasin (*Support vector machine*), mis määrab kas valitud alas on selle vektormasina tuvastatav objekt (Joonis 3).



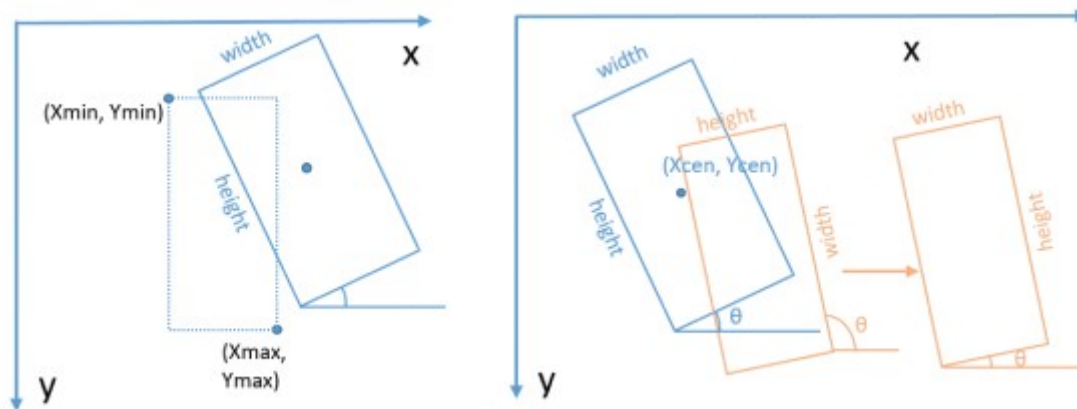
Joonis 3. RCNN mudeli ülesehitus, Girshick, 2014.

Kui kõik vektormasina on oma tulemused saanud tuvastatava ala kohta, antakse need edasi lineaarregressiooni mudelile, mille abil on võimalik lõpuks leida, mis objekt asub vaatluse all oleval alal. Nii tehakse iga algselt huvi pakkunud alaga. Kuna töötlemine on mitmeastmeline, siis on see tihti väga aeglane ja ressursikulukas. YOLO mudel on uuem ning loodud kiireks pildituvastuseks. Selle struktuur on lihtsam kui R-CNN mudelitel, omades ainult ühte närvivõrku, mis töötleb pilti otse (Redmon, 2016). Mudel tuvastab samaaegselt piltidelt piirdekaste (*Bounding box*) ning ka ennustab, mis objektiga on tegu (Redmon, 2016). Seega on mudeli sisendiks pilt, millelt on vaja tuvastada objekte, ja tulemuseks on pildilt tuvastatud objektide piirdekastid ning klassid. Mudeli eelisteks on selle kiirus, kuid võrreldes R-CNN mudelitega on see vähem täpne.

2.2 YOLO võrreldes teiste mudelitega

Uurimistöös on kasutusel YOLO mudel, et tuvastada PCB pealt erinevaid komponente. Mõnel komponendil on oluline selle suund. Kuna YOLO mudelid ei saa mitu korda pilti läbida, siis tekib probleem selle ülesandega ja tuleb kasuks kaheastmeline mudel (Haryono, 2023). Algseks objekti tuvastamiseks võib ikka kasutada YOLO mudelit, aga suuna määramiseks saab lisada teise astme (Haryono, 2023). Kuid selline kaheastmeline tegevus on arvutustelt keeruline ja aeglasem kui üheastmeline meetod, kasutades muu arhitektuuri mudelit, näiteks ResNeXt101 põhist mudelit (Haryono, 2023). Objekti ja selle suuna tuvastamiseks on vaja kõigepealt märkida selle asukoht horisontaalse piirdekasti (*HBB*) ja

suund orienteeritud piirdekastiga (*OBB*) (Haryono, 2023). Piirdekastidest näide on olemas joonisel 4.



Joonis 4. Näide horisontaalsest ja suunatud piirdekastist. Wang, 2019.

YOLO mudel on aga väga kasulik, kui pildilt on vaja lihtsalt tuvastada kiirelt otsitavaid komponente (Yang, 2023). YOLO mudel on nii kiire, kuna kasutab väheseid kõrvalisi teekes ning on kirjutatud otse masinkeeles lähedastes C ja CUDA keeltes (Yang, 2023). C keel on tuntud kiire keelena, kuna erinevalt teistest levinud kõrge taseme programmeerimiskeeltest, nagu näiteks Python, on C keel suhteliselt väheste abstraktsioonikihtidega, seega on tegu masinkeeles lähedasema keelega, mis kiirendab selle tööd (C Standards Committee, 2025). Samuti jooksutatakse C programme kompileerituna, mis eemaldab jooksumise ajal keele kompileerimisele kuluva aja (C Standards Committee, 2025). CUDA on NVIDIA poolt loodud programmeerimisplatvorm, mis laseb koodi jooksutada graafikakaartidel ning on loodud paralleelprogrammeerimise lihtsustamiseks (NVIDIA, 2025). Kuna graafikakaardid on loodud tegelema mitmete lihtsate ja sarnaste ülesannetega korraga, siis pildituvastuse mudelite treenimise ja tuvastamise üleviimine graafikakaardile aitab kiirendada mainitud protsesse. ResNeXt põhised kaheastmelised mudelid ja YOLO lähenevad samale ülesandele eri nurkade alt. Nende struktuuriline ülesehitus on vägagi erinev, millega kaasnevad nii eelised kui ka omad puudused. Näiteks peaks YOLO olema küll kiirem kui ResNeXt põhised mudelid, kuid see-eest ka vähem täpne ning suunatuvastusel halvem.

YOLO mudeli eelisteks on veel andmete säilitamine treenimisprotsessi vältel. See aitab ära hoida valede seoste tekkimist mudelis. Samuti aitab andmete alleshoidmine tulevikus mudeli ümbertreenimisel, kui näiteks tahta lisada mingit objekti, mida see tuvastaks hiljem lisaks (Wang, 2024). Tänu GELAN ja PGI objekti tuvastuse koos kasutamisele saavutab YOLOv9

(üheksas versioon YOLO mudelist, mis on ka vabavara MIT litsentsiga) teistest reaalarajas tuvastavatest algoritmidest kõrgema täpsuse (Wang, 2024).

GELAN ja PGI on YOLO tiimi poolt arendatud pildandmete töötlemise metoodikad, nagu ka ResNet, mille eesmärk on pildil välja tuua tähtsad andmed, ehk tuua objekt esile (Wang, 2024). PGI ja GELANi loomise põhimõtteks oli vähendada pildituvastuse nõudlikkust tehismärgivõrkude sügavuse osas (Wang, 2024). GELAN suudab efektiivsemalt kasutada madalamaid märgivõrke, kui sellele eelnevalt eksisteerinud lahendused (Wang, 2024). PGI tööpõhimõtteks on kasutada eelnevalt töötlemata andmeid lisakihis koos juba töödeldud andmetega, et hoida ära ekstra töötlemisega, mille toob kaasa laiemate kihtide dubleerimine, samas aitab see ka hoida ära andmete liigset kadu, mis võib tihti juhtuda, kui märgivõrk järjest kitsamaks muutub (Wang, 2024).

2.3 Pooljuhendatud õpe

Pooljuhendatud õpe on oluline, et vähendada manuaalset tööd andmete märgendamisel. Põhimõtteks on kasutada koos nii eelnevalt märgendatud või klassifitseeritud andmeid, kui ka eelnevalt märgendamata andmeid, millel on siiski samad omadused märgendatud andmestikuga (Bergmann, 2025). See on kasulik tulevikus aja kokkuhoidmiseks ja mudelite täpsuse parandamiseks ilma suure inimtööta. Pooljuhendatud õpet on laialdasemalt kasutatud R-CNN mudelites, kuid YOLO mudelites pole see nii levinud. Peamiseks põhjuseks on R-CNN mudelite kaheastmeline ülesehitus, mis teeb pooljuhendatud õppe rakendamise lihtsamaks (Zhou, 2022). Kaheastmelistes mudelites saab kasutada algse mudeli esimese etapi regioonide soovitusi, mida saab hiljem kasutada modifitseeritud sisendite, näiteks hägustatud piltide puhul (Zhou, 2022). Edu on saavutatud YOLOv5-le õpetaja-õpilase mudeli loomisega. Õpetaja-õpilase mudeli põhimõtteks on treenida algselt üks masinõppe mudel ainult inimmärgendatud andmete põhjal, niinimetatud õpetaja mudel. Seda õpetaja mudelit kasutatakse omakorda enne tundmatute andmete märgendamisel. Kui on valminud masinõppe mudeli märgitud andmestik, ühendatakse see andmestik siis eelnevalt loodud inimmärgendatud andmestikuga. See ongi lõplik ehk õpilasmudeli andmestik, mida kasutatakse, et treenida välja uus ehk õpilasmudel.

Näiteks YOLOv5 õpetaja-õpilase mudelis kasutati üle 1300 video, millest treenimiseks valiti välja 12 924 kaadrit 21-st koolist ühes rajoonis, kus käsitsi märgendati ära haigutavad inimesed (Zhou, 2022). Pärast treeniti mudelit nende piltide põhjal ning kasutati seda

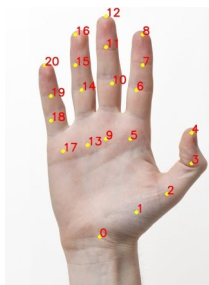
modelit, et ära märgistada ka teisest rajoonist pärit videod (Zhou, 2022). Tekkinud andmekogumit kasutati, et omakorda treenida veel üks uus YOLOv5 mudel, mis saavutas testhulgal parema tulemuse, kui algne mudel (Zhou, 2022). Pooljuhendatud õpe on kasulik, et luua täpsemaid mudeleid ning vähendada andmekogumi loomiseks kulutatavat aega.

2.4 Zero-Shot õpe

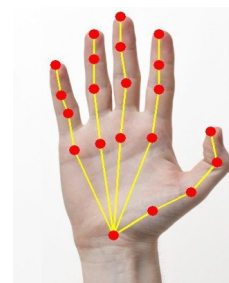
Zero-Shot õppe põhimõte võtab eeskujuks inimlaadse õppimise (Larochelle, 2008). Põhimõte sai ametlikult avaldatud 2008. aastal, kuid praktilisi lahendusi ning teste tehti juba varasemalt (Larochelle, 2008). Zero-Shot õppe peamine eesmärk on võimaldada info tuvastamist ja klassifitseerimist, mida eelnevas treeninghulgas ei leidunud. Selline lähenemine aitab vähendada manuaalse märgendamise hulka (Larochelle, 2008). Tuvastatavaid objekte on võimalik läbi üldisemate seletuste või abstraktsemate kujunditega lihtsustada ning selliste lihtsustuste abil on võimalik ka täiesti uut infot tuvastada. Artiklis Zero-data Learning of New Tasks on mainitud näiteks uute kirjamärkide tuvastamist, kui on antud abstraktsem märgi üldine struktuur, ja treeninghulgas on sarnaselt juba treenitud välja mudel teisi kirjamärke seondama sarnastele abstraktsetele kujutistele, tekib mudelil võimalus ka uusi varem nägemata objekte õigesti tuvastada.

2.5 Suuna tuvastus YOLO mudeliga

Yolo tuvastus kasutab üldiselt eelnevalt mainitud piirkaste (*bounding box*), kuid objektide suuna tuvastuseks on kasu võtmepunktidest (*Keypoints*) ning skelettidest (*Skeleton*). Võtmepunktid toimivad kui lihtsalt koordinaadid pildil, näiteks joonisel 5 märgitud punktid. Võtmepunktid on ka osa skelettidest, kus nendele on lisatud relatsioon mingi teise võtmepunktiga, nii on võimalik kujutada keerulisemaid struktuure näiteks inimese kätt, illustreeritud joonisel 6.



Joonis 5. Inimese käe peale märgitud võtmepunktid, Gupta, 2018.



Joonis 6. Inimese käe peal märgitud käe asetus skelett, Gupta, 2018.

Võtmepunktide ja skelettide abil saab tuvastada objekti servasid ning olenevalt nende asetsusest, saab määrata ka objektide suundi. Näiteks on võimalik teha vahet paremal ja vasakul asetsevatel munajuhadel ning tuvastada osalise peitumisega objekte (Boonkong, 2024). Suurim eelis oli osaliselt peituvate objektide tuvastamine, mis ei peaks selle projekti puhul probleemi tekitama, kuid nende lahendus kasutada võtmepunktidel baseeruvat tuvastust arvatavasti lihtsustaks ka objektide suuna tuvastust.

3. Metoodika

Selle peatüki eesmärk on anda lugejale ülevaade loomisprotsessist ning lõplikust valminud rakendusest. Rakenduse eesmärk on lahendada sissejuhatuses püstitatud probleem. Riistvaraliselt on tulemuste loomiseks kasutatud kaamerat, mille kaadrisagedus on 30 kaadrit sekundis ning arvutit, millel on protsessoriks i5-11400f ja graafikakaardiks RTX 3060. Lahenduse implementatsioon on vabavaraliselt kättesaadav GitHubis¹.

Kuigi kasutatavad meetodid on arvutuslikult väga nõudlikud, peab süsteem olema kergesti teisaldatav ja kopeeritav või siis kaugelt ligipääsetav. Kuna tooteid võidakse filmida hoones mitmes erinevas kohas, siis on mõistlik, kui kogu süsteem on lihtsalt ülesseatav või video saadetak스 ühte kesksesse arvutisse, et seal saaks kaugelt tuvastust kasutada. Miinusteks oleks muidugi suurenenud latentsus, kuid arvutuskiirus, mis nii oleks võimalik saavutada, korvaks selle ära.

3.1 Andmekogumi loomine

Andmekogumiks kasutatakse kombinatsiooni juba eksisteerivatest märgendatud PCB kogumitest, üksikkomponentide piltidest ja olemasolevate trükkplaatide piltidest. Märgenduse teostas töö autor käesoleva töö raames. Andmekogum ise koosneb piltidest ja nendelt vastavalt leitud komponentide loeteluga failidest, mille saab eraldada treeningkogumiks ja testkogumiks.

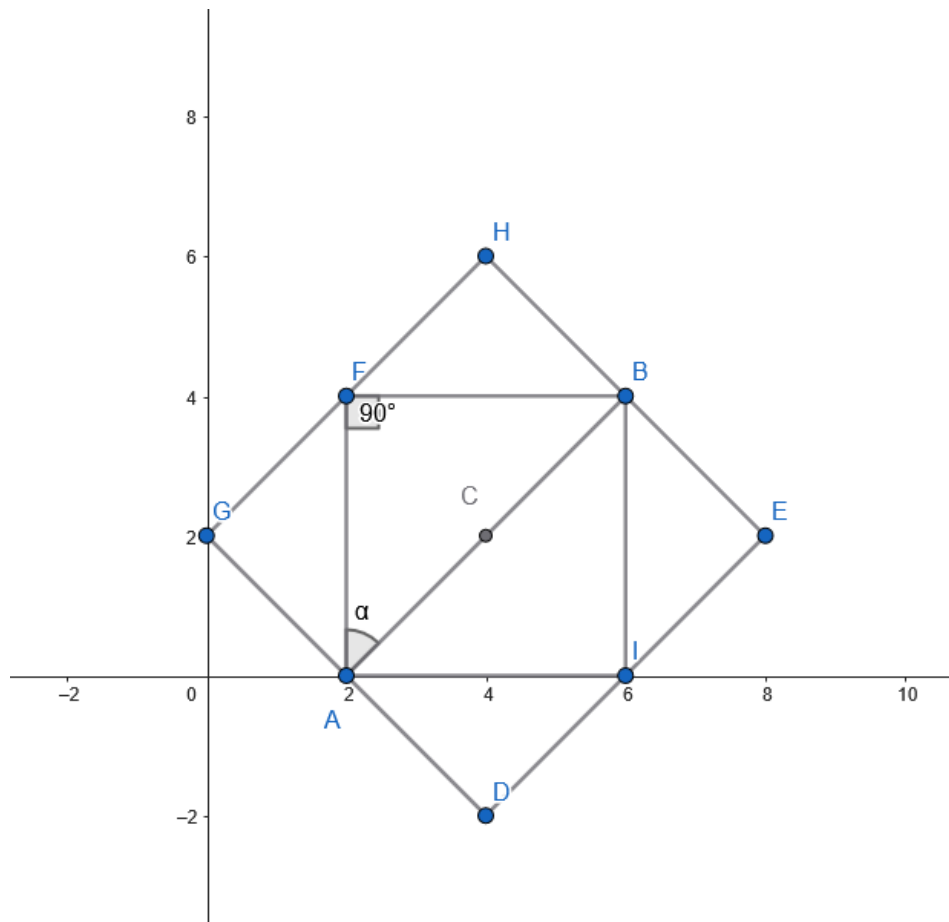
Andmehulk loodi kasutades Pythoni skripti, mis filmis käivitamisel ees olevat trükkplaati, iga kaader filmimisest salvestati eraldi pildina. Sellega pildistati erinevate suundade alt võimalikult palju erinevaid kättesaadavaid trükkplaate. Andmehulga märgendamiseks kasutati CVAT²-i. Peamiseks eeliseks CVAT-il oli selle lai märgenduse formaatide valik ning kergesti mõistetav UI. Lõplikuks andmehulgaks valmis 868 pilti, mille peal on märgitud skeleti põhiselt kondensaatorite polaarsus. Seda andmehulka kasutati ka *OBB* sünteesimiseks, mida oli vaja, et ResNeXt-i põhist R-CNN mudelit treenida.

OBB sünteesimiseks kasutati iga skeleti kahte otspunkti. Järgneva *OBB* sünteesimise selgitusel on abiks joonis 7. Kahetipulise skeleti otspunktideks on joonisel A ja B. Nende kaugus üksteisest on võetud ruudukujulise *OBB* laiuseks ja kõrguseks. Otspunktide vahelise joone keskpunkt C võeti ruudu keskpunktiks. Nurk (joonisel 6 kui α) piirdkasti kalde

1 <https://github.com/bukyt/pcb-detector>

2 <https://www.cvat.ai/>

saamiseks loodi arktangensi abil, kasutades otspunkide A ja B vastavate koordinaatide vahesid, et saada lõikude AF ja BF pikkused. Kui arktangens tuli negatiivne, siis sellele summeeriti 360 kraadi, et tegu oleks alati positiivse nurgaga. Tehtud *OBB*-d läksid kirja kujul: keskpunkti X koordinaat, keskpunkti Y koordinaat, *OBB* kõrgus ehk A ja B kaugus y sihis, *OBB* laius ehk samuti A ja B kaugus x sihis, nurk α kraadidena.



Joonis 7. OBB sünteesimise illustreerimiseks abistav joonis.

3.2 YOLO ja FasterRCNN tulemused

Validatsiooni hulga puhul saavutas YOLO mudel kondensaatorite märkimisel 39% täpsuse. Tausta tuvastamisega sai mudel hakkama 100% ajast, mis tähendab, et mudel oli pigem konservatiivne oma tuvastusega ning selle täpsust aitaks madalam tuvastuslävend. Kasutades mitmekordset käivitust ühe trükkplaadi vaatamisel, on võimalik parandada tulemusi. Mudel on väga tundlik valgustingimuste muutustele, seega on mudeli täpsusele suureks abiks ühtlane valgustus. Jooksutades suudab mudel töötada reaajaliselt.

FasterRCNN mudel vajas palju rohkem ettevalmistust. FasterRCNN mudeli selgrooks kasutati ResNet50-t, kuna see võimaldas mõistliku ajaga treenida mudelit, et iteratiivselt parandada tekkivaid vigu. Mudeli väljundkiht oli vaja ümber teha, et see suudaks ennustada erikujul olevaid suunatud piirdkaste. Piirdkastid on määratud keskpunkti x ja y koordinaatidega, laiuse, pikkuse ja kraadidega. Käivitusel oli eelnevalt mainitud riistvara peal iga kaadri töötlemisaeg umbes sekund. Seega on tegu palju aeglasema käivitusega ning vähem võimsa riistvara puhul on see problemaatiline.

3.3 Ülevaade praktilisest rakendusest

Praktilise lahendusena eksisteerib praegu YOLO ja FasterRCNN treenimiseks andmehulgad vajalikes formaatides. Samuti mõlema mudeli treenimiseks on loodud eraldi skriptid, YOLO kasutab tuvastamiseks skelette ning FasterRCNN kasutab orienteeritud piirdkaste. Mõlema mudeli testimiseks on loodud funktsioonid kaamerapildilt objektide tuvastamiseks ning tuvastatud tulemused märgitakse kaamerapildile. YOLO mudeli puhul on võimalik muutuja abil määrata, mitme eelneva tuvastuse märgendust tuleb kuvada, et oleks võimalik stabiilsemalt jälgida tuvastusi, kuna muidu on iga pilt veidi erinev, nii et tuvastus võib lünklik olla.

Tulevikus saab luua praktiliseks lahenduseks GUI. Selle idee oleks kasutada etalonipõhist kontrolli, kus õigesti loodud trükkplaat antakse kaamerale ette, valitakse sobiv tuvastus, kus on ideaalis märgitud kõik vajalikud komponendid õigesti. Seejärel võrreldakse kõiki järgnevaid trükkplaate tuvastatud etaloniga. Kui järgneval plaadil on tuvastusel midagi väga erinev etalonist, siis rakendus annaks veast teada, ning seda saaks kontrollida töötaja.

4. Tulemuste analüüs

Järgnevas peatükis on FasterRCNN ja YOLO täpsuse ning riistvaralise koormuse tulemuste analüüs, samuti võrdlus kaamerapõhise kontrolli ja tööstuses eelnevalt levinumate lahendustega. Esimeses alampeatükis on välja toodud kaamerapõhise kontrolli plussid ja miinused käesoleva lahenduse kontekstis, seejärel võrreldakse FasterRCNN ja YOLO tulemusi ennustamisel ning arutletakse nende tuvastustäpsuse ja mudelite koostamise raskuse üle. Viimasena käsitletakse FasterRCNN-i ja YOLO kiirust ja riistvaralist koormust.

4.1 Kaamerapõhine kontroll

Üldiselt on levinud tööstuses mitmekesisemad lahendused, kus ei kasutata ainult kaamerapilti vigade tuvastuseks. Kuigi sellised süsteemid on palju laiemad ning kontrollivad trükkplaate kasutades mitmeid erinevaid meetodeid, on nad suures osas ikkagi manuaalselt vaja üles seada iga erineva trükkplaadi kohta (Rehman, 2019). Ühe kaamerapõhise kontrolli puhul on suurimateks eelisteks selle odavus ning lai üldistusvõimalus. Kuna komponendid, mida erinevatel trükkplaatidel tuvastada, on sageli samasugused, siis on võimalik kontrollida ka eelnevalt tundmatuid plaate. Suurimaks probleemiks jäi käesoleva töö lahenduse puhul vähene täpsus. Peamiselt on vähene tuvastustäpsus tingitud treeninghulga ja tuvastushulga suurest varieeruvusest. Ideeks oli luua valgustuselt ja positsiooniliselt varieeruvat treeninghulk, et treenitud mudelid oleks kasutatavad erinevate tingimuste puhul. Sellepärast jäi mudeli validatsiooni täpsus ka üsnagi kesiseks.

4.2 FasterRCNN võrreldes YOLO mudeliga

Mõlemad treenitud mudelid jäid 40% täpsuse piiridesse, seega 60% ajast ei suutnud mudelid õigesti märkida komponentide asukohtasid. Positiivsest küljest – enamus märgendatud komponente olid õigesuunaliselt tuvastatud. Samuti on suureks probleemiks mõlemal mudelil keskkonnas toimuvad muutused. Näiteks lambivalguse all tuvastab mudel hästi, kuid kohe, kui valgus pisut muutub, ei tuvasta mudelid enam midagi. Seda olukorda üritati vältida treeninghulka luues valgust, tuvastuskaugust ja nurka varieerides, kuid siiski jäi mudelite üldistusvõime väheseks. YOLO tulemused olid samuti paremad üldistamisel. Seega FasterRCNN mudel jäi oma täpsete tuvastustingimuste tõttu liiga kitsaks. Eeldatavasti on FasterRCNN mudelil vaja palju rohkem treeningandmeid, et saavutada aktsepteeritav tulemus.

ResNeXt põhiste kaheastmeliste mudelitega tegelemine on kordades keerulisem kui YOLO mudelitega tegelemine. Kui ei kasuta standardset tagastussüsteemi, mis näiteks FasterRCNN puhul on tavaline horisontaalne piirdkast, siis on vaja teha eri *ROI* – pea (*Region of Pooling* pea, mis on vajalik FasterRCNN treenimiseks, valib huvialasid, millelt objekte tuvastada), kaofunktsioon ning tagastuskiht. Loodud FasterRCNN lahenduses kasutati töös S. Ma 2024 aasta artiklis kasutatud FPDIoU sarnast kaofunktsiooni, kuna nende orienteeritud piirdkastid esinesid sarnasel kujul käesoleva töö omadele.

4.3 Mudelite nõudlikkus

Selle peatüki eesmärk on anda ülevaade YOLO ja FasterRCNN mudelite individuaalsest käivituskäigust ning arutleda, mis kontekstis on need kasutatavad ning mis kontekstis võib tekitada mudelite käivitamiskõrge probleeme.

YOLO tuvastus on kümnetes kordades kiirem kui FasterRCNN-i struktuuril põhinev mudel. YOLO saavutas 30 kaadrit sekundis ehk reaalajas tuvastuse, tegelikult tuvastusprotsessiks kulus mudelil vaid umbmääraselt 2 ms, mis tähendab et sellise riistvaraga oleks võimalik jooksutada tuvastust mitmete erinevate lindistusseadmete peal korraga. FasterRCNN mudeli tuvastus võttis kaadri kohta keskmiselt 2 sekundit. Seega, kui on vaja kiiresti tuvastada, on YOLO nendest kahest õigem. FasterRCNN ajaline kulu tekitab probleeme kui on olemas massiivselt paralleelne tootmine. Näiteks kui 2000 trükkplaadi testimine peab korraga toimuma, enne kui ükski toode saab liinil edasi liikuda, siis FasterRCNN mudeli puhul tekiks pudelikaal ning testimisele tekiks suur lisaaeg. Võimalik, et vähem võimsa riistvara puhul tekib FasterRCNN-il probleeme, aga praeguse eeldatud tootmisstruktuuri juures ei tekita 2 sekundiline kaadri töötusaeg probleeme, kuna testitud trükkplaatidega saab tegeleda enne, kui mudel on lõpetanud kogu hulga testimise. Kui tahta tuvastuseks kasutada lokaalseid vähe võimsaid arvuteid, siis jääb ainukeseks lahenduseks YOLO tuvastus.

Eelnevatele tulemustele toetuvalt võib väita, et suurel skaalal rakendamisel on FasterRCNN tuvastus kümnetes kordades kallim ning selle täpsus ei õigusta paljude testimisliinide eksistentsi puhul lisakulu, mida võimsam riistvara nõuaks. FasterRCNN-il põhinev lahendus nõuaks kas tsentraalset serverit, mis saaks mitme erineva tootmisliini tooteid ükshaaval tuvastada, kuna igale liinile luua oma arvuti, mis ainult töötaks selle liini objektide töötlemisel, oleks olenevalt liinide arvust väga kallis.

5. Tulemuste arutelu

Järgnevates peatükkides on arutus, mida saaks tulevikus edasi arendada. Samuti tuuakse välja mõningad probleemid, mille lahendamiseks oleks vaja erinevalt tulevikus läheneda, et edasised loodud lahendused oleksid täpsemad ja kasulikumad.

5.1 Märgendatud andmekogu

Manuaalse märgendamise hulka tuleks tulevikus vähendada kasutades pooljuhendatud õppimist. Selle kasutamine aitaks kaasa suure andmekogumi loomisel. Ideaalselt saaks suure osa andmekogumist nii valmis teha peale algse kogumi tegemist ning kasutada seda edaspidi, et saavutada paremat täpsust mudelis. Veel üheks võimaluseks on kasutada ka *Zero-Shot* õppimist, sellega saaks vähendada tulevikus manuaalse märgendamise vajadust, kuid eeldatavasti selline lähenemine tõstaks ka riistvaralisi nõudeid kogu süsteemile. Kuna selle töö maht ei jõudnud praeguste mudelite abiga *Zero-Shot* ja pooljuhendatud õppe rakendamiseni, jääb see tulevikku edasi arendamiseks. Selliste lahenduste rakendamiseks oleks vaja teha ka muudatus andmete märgenduskujule ja süsteemi struktuurile, et süsteemil oleks võimekus võrrelda etaloni ja tuvastatavat trükkplaati eraldiseisvalt objektituvastusele.

5.2 Mudelite täpsus ning parandused, mida rakendada tulevikus

Kuna tulemused jäid allapoole soovitud, oleks vaja muuta tuvastamistingimusi. Kui tulevikus edasi arendada treenitud mudeleid, siis tuleks kasutada kergesti ülesseatavat keskkonda, milles treenimise ning tegelikud andmed oleks võimalikult sarnastes tingimustes. Samuti tuleks tulevikus kasutamiseks märgendada veel rohkemaid andmeid ning ka teisi komponente märkida, kuna praegune lahendus määrab ainult trükkplaatide kondensaatorite asukohti ja suundi. Treeningandmete täiustamiseks sobiks manuaalse testimise ajal lasta testijal märkida iga erinevat mudeliga trükkplaadi puhul märgendada kõik tuvastust vajavad komponendid iga orientatsiooni puhul. Tulemusena valmiks suur kogus märgendatud pilte igasugu erinevatest toodetest, mis aitaks parandada kogu süsteemi.

FasterRCNN tulemused jäid kehvaks tänu halvale RoI muudatuste implementeerimisele, enamus ajast ei tuvastanud mudel midagi, kuna puudus kaofunktsioonis karistuskomponent märkimiseta jätmise jaoks. Kuid see probleem parandati hiljem ära. Siiski jäi kõikide ennustuste Samuti kõrgemate epohhide arv aitaks FasterRCNN-i tööd, kuna kõrgeim epohhide arv, mida treenimisel kasutati, oli vaid 10. Testimise jaoks oli tarvilik kasutada

väikest epohhide arvu, kuna muidu oleks treenimisaeg liiga suur olnud, et programmi iteratiivselt parandada. Samuti on võimalus, et mudel jäi kao poolest kinni lokaalsesse miinimumi, kuna testimiseks tehtud tuvastuse puhul andis mudel erinevate piltide puhul väga sarnaseid väljundeid.

6. Kokkuvõte

Töö käigus valmis mitu programmi. Treenimisprogrammid, mis treenisid välja kaks masinõppe mudelit, üks YOLO põhine ja teine FasterRCNN põhine. Samuti valmisid testimisprogrammid, et katsetada mainitud mudelite töökiirust, täpsust ning üldistamisvõimekust. Abitööriistana valmis ka *OB*B-sid genereeriv programm, mis suudab YOLO stiilis skeletid muuta orienteeritud piirdkastideks.

Tulemused jätsid soovida, eriti FasterRCNN mudeli puhul. YOLO mudeli puhul jäi tuvastustäpsus 40% juurde ning saagis jäi nulli lähedaseks, mis tähendab, et mudelit aitaks suurema andmehulga ette andmine või märgendatud andmete tingimuste ühtlustamine. FasterRCNN mudeli tulemused olid kehvemad, suures osas tänu programmi tuvastusformaadi valesti tõlgendamisele, kehvale treeninghulgale ning vähesele epohhide arvule treenimise ajal. Mudel suutis pilti töödelda keskmiselt 2 sekundi jooksul, seega on tegu kümneid kordi aeglasema meetodiga, kuid kui reaajas tuvastus pole vajalik, siis on mudel rakendatav.

Kuna tulemused ei ole veel rakendamiseks piisavad, on töö arutelus pakutud paar edasiarendust ja muudatust, mis tulevikus saab teha, et mudelite ennustusi parandada. Tulevikus saab suurendada treeningandmete hulka, näiteks testimise ajal osade trükkplaatide manuaalse märgendamisega. Parandada Faster-RCNN mudelit, katsetades erinevaid kaofunktsioone ning regiooni pakkujaid.

Viidatud kirjandus

1. Andreu O. C; Smeraldi F; Semantic Image Cropping, Queen Mary University of London, Arxiv 2018
2. Boonkong A; Khampitak K; Kaewfoongrunsi; Namkhun S; Hormdee D; Applying Deep Learning for Occluded Uterus and Fallopian Tube Detection for Laparoscopic Tubal Sterilization. IEEE 2024
3. C Standards Committe, „The C programming language”, <https://www.c-language.org/> , 01.05.2025
4. D. Bergmann, „What is semi-supervised learning?”, <https://www.ibm.com/think/topics/semi-supervised-learning> , 01.05.2025
5. Girshick, R; Donahue, J; Darrell, T; Malik, J; Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. Arxiv 2014
6. Haryono, A.; Jati, G.; Jatmiko, W. Oriented object detection in satellite images using convolutional neural network based on ResNeXt. ETRI J. 2023.
7. Larochelle, H; Erhan, D; Bengio Y; Zero-data Learning of New Tasks. Université de Montréal. IEEE 2008
8. NVIDIA, „What is CUDA?”, <https://blogs.nvidia.com/blog/what-is-cuda-2/> , (01.05.2025)
9. Redmon, J; Divvala S; Girshick R; Farhadi A; You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. Arxiv 2016
10. Rehman, S; Fei, K; Lai N S; Automated PCB identification and defect detection system (APIDS). IJECE 2019
11. S. Ma, Y. Xu, „FPDIoU Loss: A Loss Function for Efficient Bounding Box Regression of Rotated Object Detection”, Arxiv 16.04.2024
12. Zhang, A; Lipton, Z; Li, M; Smola, A J; Dive into deep learning. Cambridge New York Port Melbourne New Delhi Singapore: Cambridge University Press. 2024
13. Zhou, H; Jiang, F; Lu, H; SSDA-YOLO: Semi-supervised Domain Adaptive YOLO for Cross-Domain Object Detection. Arxiv 2022

14. V. Gupta, „Hand Keypoint Detection using Deep Learning and OpenCV”,
<https://learnopencv.com/hand-keypoint-detection-using-deep-learning-and-opencv/> ,
08.10.2018, (külastatud 09.05.2025)
15. Wang C-Y; Yeh I-H; Liao, H-Y. YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information. Arxiv 2024
16. Y. Wang, Y. Zhang, Y. Zhang, L. Zhao, X. Sun and Z. Guo, SARD: Towards Scale-Aware Rotated Object Detection in Aerial Imagery, IEEE 2019
17. Yamaha, 3D Hybrid Optical Inspection System Yri-V,
<https://www.europe-smt.com/product/inspection-system/yri-v/> , külastatud 15.05.2025
18. Yamaha, YAMAHA Automatic Optical Vision Aoi Machine Inspection System for LED and PCBA Industry Production Line Ysi-V,
https://htgdmachine.en.made-in-china.com/product/MdqAFSXDLa/cm/China-YAMAHA-Automatic-Optical-Vision-Aoi-Machine-Inspection-System-for-LED-and-PCBA-Industry-Production-Line-Ysi-V.html?pv_id=1ir9decb9119&fav_id=1ir9degnof3d , külastatud 15.05.2025
19. Yang, C-H; Lin, Y-N; Wang S-K; Shen, V.R.L; Tung, Y-C; Lin J-F. An Edge Computing System for Fast Image Recognition Based on Convolutional Neural Network and Petri Net Model. Springer Nature. 2023

Lisad

Lisa 1. Mõisted, terminid ja lühendid

Zero-Shot learning – masinõppes kasutatav meetod, kus mudel kasutab enne olemasolevaid seoseid, et klassifitseerida uut infot.

Printed circuit board – trükkplaat, elektroonikas kasutatav montaažiplaat, millele on võimalik paigaldada elektroonikakomponendid ja need elektriliselt ühendada.

Neural network – eesti keeles närvivõrk, arvutisüsteem, mis on modelleeritud inimaju ja bioloogilise närvivõrgu järgi.

Support vector machine – vektormasin, mis on loodud andmete analüüsimiseks ning klassifitseerimiseks, kasutades suurima erinevuse leidmist.

Bounding box – piirkast, kasutatakse mingi ala märkimiseks.

UI – user interface, eesti keeles kasutajaliides, visuaalne element rakendusel, et võimaldada seda kasutada.

Convolutional neural network – (lühendatult CNN) närvivõrk mis kasutab tunnuste õppimiseks filtrite optimeerimist. Proovib filtreerida välja ebavajalikke andmeid, et jõuda ennustuseni. Sageli kasutuses pildituvastus ülesannete jaoks.

Skeleton – eesti keeles skelett, üks märgendustüüp, mida kasutatakse pildidel olevate objektide märkimiseks.

Lisa 2. Lihtlitsents lõputöö elektroonseks avaldamiseks

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Joonas Tiitson

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

PCB komponentide tuvastamine

mille juhendaja on Kristo Raun

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi

DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks

Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative

Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost

reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja

kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega

isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Joonas Tiitson

15.05.2025