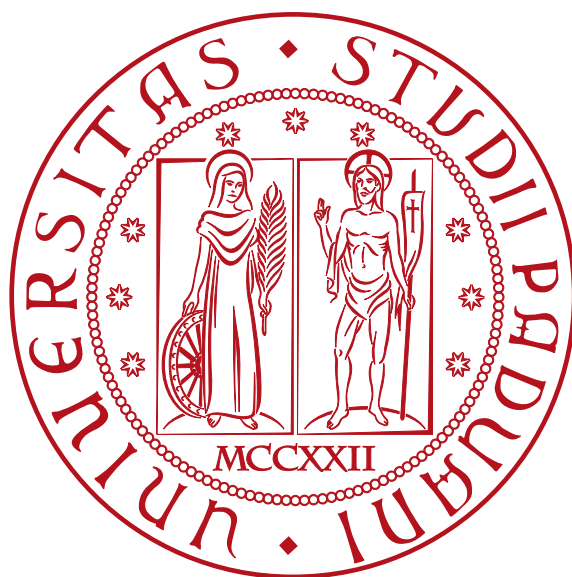


**Università degli studi di Padova**

DIPARTIMENTO DI MATEMATICA "TULLIO LEVI-CIVITA"

CORSO DI LAUREA IN INFORMATICA



## **Predizione della Profondità con Deep Learning da Immagini di Telecamera Monoculare**

*Tesi di laurea*

*Relatore*

Prof. Lamberto Ballan

*Laureando*

Riccardo Toniolo

*Matricola* 2042332



# Sommario

Il presente documento descrive il lavoro svolto durante il periodo di stage, della durata di trecentoventi ore, dal laureando Riccardo Toniolo, affiancante la dottoranda Elena Izzo, presso il gruppo di ricerca VIMP Group, Università degli studi di Padova.

Gli obbiettivi da raggiungere erano molteplici. In primo luogo era richiesto lo sviluppo di ... In secondo luogo era richiesta l'implementazione di un ... Tale framework permette di registrare gli eventi di un controllore programmabile, quali segnali applicati Terzo ed ultimo obbiettivo era l'integrazione ...

# Indice

<b>1. Introduzione</b>	<b>1.</b>
1.1. Stimare le profondità .....	1.
1.2. <i>Monocular Depth Estimation</i> .....	1.
1.3. Obiettivi .....	2.
1.4. Organizzazione del documento .....	2.
<b>2. PyDNet</b>	<b>3.</b>
2.1. Architettura del modello .....	3.
2.2. Funzionamento .....	4.
2.2.1. Funzioni di perdita .....	5.
2.2.2. Allenamento .....	5.
2.3. Configurazione dell'ambiente .....	6.
2.4. Validazione .....	7.
2.5. Migrazione da Tensorflow a PyTorch .....	8.
2.5.1. Il dataset .....	8.
2.5.2. I modelli .....	9.
2.5.3. La configurazione .....	9.
2.5.4. La procedura di <i>training</i> .....	9.
2.5.5. La procedura di utilizzo .....	10.
2.5.6. La procedura di valutazione .....	10.
2.5.7. Risultati della migrazione .....	11.
2.6. Iperparametri e PyDNetV2 .....	12.
2.6.1. Esplorazione degli iperparametri .....	12.
2.6.2. PyDNet V2 .....	14.
<b>3. <i>XiNet</i></b>	<b>15.</b>
3.1. Architettura .....	15.
3.2. Validazione .....	16.
<b>4. <i>Attention</i></b>	<b>18.</b>
4.1. <i>Self attention</i> .....	18.
4.2. <i>Convolutional Block Attention Module</i> .....	19.
<b>5. PyXiNet</b>	<b>22.</b>
5.1. PyXiNet $\alpha$ .....	22.
5.2. PyXiNet $\beta$ .....	23.
5.3. PyXiNet $\mathbb{M}$ .....	23.
5.4. PyXiNet $\beta$ CBAM .....	23.
<b>6. Conclusioni</b>	<b>24.</b>
<b>Glossario</b>	<b>25.</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>28.</b>

# Elenco delle Figure

Figura 1: Architettura del modello [1] .....	4.
Figura 2: Encoder del modello [1]. .....	4.
Figura 3: Decoder del modello [1]. .....	4.
Figura 4: <i>Image error loss</i> calcolata per l'immagine di sinistra. ....	5.
Figura 5: <i>Disparity smoothness loss</i> calcolata per l'immagine di sinistra. ....	5.
Figura 6: <i>Left-right consistency loss</i> calcolata per l'immagine di sinistra. ....	5.
Figura 7: Architettura del modello [2] .....	14.
Figura 8: Architettura blocco di elaborazione del <i>broadcasted input</i> in [3] .....	15.
Figura 9: Architettura dello <i>XiConv</i> proposto in [3] .....	16.
Figura 10: Architettura di [3], composta da $N$ <i>XiConv</i> .....	16.
Figura 11: Il <i>Non-local block</i> , presentato in [4] .....	19.
Figura 12: Il <i>Convolutional Block Attention Module</i> , presentato in [5] .....	20.
Figura 13: Il modulo di attenzione sui canali, presentato in [5] .....	20.
Figura 14: Il modulo di attenzione sulla spazialità, presentato in [5] .....	20.
Figura 15: Applicazione del blocco <i>CBAM</i> con approccio <i>ResNet</i> .....	21.
Figura 16: Architettura di PyXiNet $\alpha$ I .....	22.
Figura 17: Architettura di PyXiNet $\alpha$ II .....	22.

# Elenco delle Tabelle

Tabella 1: [1] vs. [1] ri-allenato .....	8.
Tabella 2: [1] vs. [1] riscritto in PyTorch ( <i>training</i> su <i>KITTI</i> , 50 epoche) .....	11.
Tabella 3: [1] vs. [1] riscritto in PyTorch ( <i>training</i> su <i>CityScapes+KITTI</i> , 50 epoche) .....	11.
Tabella 4: [1] vs. [1] riscritto in PyTorch ( <i>training</i> su <i>KITTI</i> , 200 epoche) .....	12.
Tabella 5: In PyTorch: [1] vs. [1] ( <i>Luminance</i> dataset) .....	12.
Tabella 6: In PyTorch: [1] vs. [1] ( <i>HSV</i> dataset) .....	12.
Tabella 7: In PyTorch: [1] vs. [1] (con <i>vertical flip</i> ) .....	13.
Tabella 8: In PyTorch: [1] vs. [1] (con <i>vertical flip</i> senza <i>horizontal flip</i> ) .....	13.
Tabella 9: In PyTorch: confronto tra varie risoluzioni di <i>input</i> .....	13.
Tabella 10: In PyTorch: [1] vs. [2] .....	14.

# Capitolo 1.

## Introduzione

### 1.1. Stimare le profondità

L'avere la possibilità di misurare la profondità di un'immagine e, quindi, potenzialmente la profondità di ciascun frame all'interno di uno streaming video, apre le porte alla risoluzione di una vasta gamma di problemi che richiedono una stima precisa delle distanze tra gli oggetti all'interno di un determinato campo visivo.

Alcuni problemi appartenenti a questa classe includono:

- Prevenzione delle collisioni: lo sviluppo di algoritmi che, controllando un oggetto fisico in movimento, cercano di evitare impatti con altre entità lungo il suo percorso;
- Percezione tridimensionale: una serie di algoritmi che analizzano dati di profondità per ricostruire una scena tridimensionale dell'ambiente circostante;
- Realtà aumentata: un settore che prevede, attraverso l'uso di visori e altri dispositivi, il posizionamento di elementi grafici virtuali nel campo visivo dell'utente in modo che si integrino naturalmente con la realtà presente.

Esistono soluzioni hardware per avere delle misurazioni di profondità con alta precisione. I sistemi hardware più famosi ed utilizzati sono:

- Sensori di profondità, come ad esempio il **LiDAR**;
- Sistemi di fotografia stereoscopica: come ad esempio la **stereocamera**.

Il problema con questi sistemi hardware risiede, tuttavia, in due aspetti principali:

- Nel caso dei sensori LiDAR, il costo elevato può rendere il prodotto finale meno competitivo sul mercato o ridurre i margini di profitto per l'azienda che lo fornisce. Ad esempio, se si volesse integrare un LiDAR in un robot da giardino, il costo aggiuntivo potrebbe influire negativamente sulla competitività del prodotto.
- D'altro canto, l'integrazione di un sistema basato su fotocamere stereoscopiche presenta altre sfide pratiche. Non è sempre semplice trovare spazio per le due fotocamere necessarie e gestire la loro calibrazione può essere complicato. Questi problemi possono limitare l'applicabilità della tecnologia in ambienti dove lo spazio è ristretto o dove la calibrazione precisa è difficile da ottenere.

### 1.2. *Monocular Depth Estimation*

Un'altra soluzione promettente è quella di sviluppare una rete neurale in grado di prevedere correttamente le profondità di un'immagine a partire da una singola immagine di input, un approccio noto come *Monocular Depth Estimation (MDE)*. Se riuscisse ad essere realizzata con successo, tale soluzione permetterebbe il vantaggio di utilizzare una sola fotocamera, con il potenziale di un sensore LiDAR.

Tuttavia, questo tipo di approccio, oltre alle tradizionali sfide del *machine learning*, come la ricerca di dataset adeguati e la costruzione di un modello adatto, presenta ulteriori difficoltà, in particolare nei sistemi **embedded**, che hanno vincoli significativi in termini di memoria, energia e di potenza computazionale.

Modello particolarmente interessante di *machine learning* è PyDNet [1], [2], in quanto fortemente leggero (meno di 2 milioni di parametri) e decentemente performante per la sua dimensione. Per questo motivo è stato scelto per essere il modello di riferimento da usare come punto di partenza del tirocinio.

### 1.3. Obbiettivi

Il tirocinio si è quindi strutturato su due macro obiettivi:

1. Studiare come il problema di **MDE** è stato affrontato da PyDNet V1 [1] e V2 [2]:
  - Studiarne i paper e i relativi codici;
  - Inserire nella procedura di allenamento un sistema di *logging* per analizzare i costi provenienti dalle varie *loss function*;
  - Riprodurre l'allenamento di [1] per verificare i risultati enunciati nel *paper*;
  - Migrare tutto il codice di [1] e il codice del modello di [2] da **Tensorflow** a **PyTorch**;
  - Riprodurre l'allenamento di [1] nella sua versione migrata per verificare che si ottengano gli stessi risultati e che quindi la versione migrata sia equivalente all'originale.
2. Esplorare soluzioni per ottenere modelli migliori in termini di efficacia e efficienza:
  - Verificare come variano le prestazioni di [1] al variare degli iperparametri;
  - Esplorare eventuali nuove tecniche e strategie al fine di creare un modello migliore nel compito di **MDE**.

### 1.4. Organizzazione del documento

Relativamente al documento sono state adottate le seguenti convenzioni tipografiche:

- gli acronimi, le abbreviazioni e i termini ambigui o di uso non comune menzionati vengono definiti nel glossario, situato alla fine del presente documento;
- I termini riportati nel glossario utilizzano la seguente formattazione: **parola**;
- Dopo la prima citazione del soggetto di un articolo o di un testo di riferimento ritrovabile in bibliografia, questo verrà poi menzionato solo dal suo numero di riferimento (i.e. [1]) e non più dal suo nome;
- i termini in lingua straniera o facenti parti del gergo tecnico sono evidenziati con il carattere *corsivo*.

Relativamente ai capitoli:

## Capitolo 2.

# PyDNet

PyDNet(**Pyramidal Depth Network**) è una famiglia di modelli composta da due versioni [1], [2], che cercano di risolvere il problema della **MDE** mediante un approccio non supervisionato. con circa 2 milioni di parametri in [1] e circa 700.000 in [2].

Una peculiarità di questa famiglia di modelli è il numero di parametri estremamente basso, con circa 2 milioni di parametri in [1] e circa 700.000 in [2]. L'obiettivo di questi modelli infatti, è quello di essere abbastanza leggeri da poter essere direttamente eseguiti su un processore, senza il supporto di una scheda grafica, per poter essere integrati in sistemi **embedded**, come ad esempio nei cellulari [6].

Questa sua caratteristica li rende molto interessanti come punto di partenza per sperimentare con tecniche innovative o apportare modifiche ai loro blocchi, di modo da migliorarne le prestazioni.

Tuttavia, essendo modelli relativamente datati, sono stati scritti in una versione di **Tensorflow** ormai deprecata, il che li rende non più facilmente utilizzabili.

Di conseguenza seguiti sottocapitoli hanno la seguente funzione:

- Sezione 2.1: va a descrivere l'architettura del modello e dei suoi sotto-componenti;
- Sezione 2.2: va a descrivere come il modello cerca di risolvere il problema dell'**MDE**, analizzando funzioni di perdita e procedura di allenamento;
- Sezione 2.3: descrive tutta la procedura di configurazione di un ambiente di calcolo, al fine di poter eseguire il codice originale di [1];
- Sezione 2.4: descrive il processo di validazione del codice pubblicato, per verificare che effettivamente conduca a risultati simili a quelli del *paper*;
- Sezione 2.5: descrive il processo di migrazione da **Tensorflow** a **PyTorch** con la successiva validazione del modello migrato, su tutti gli scenari proposti dal *paper*;
- Sezione 2.6: descrive in primo luogo degli esperimenti condotti sugli iperparametri di [1] per analizzare poi le conseguenze che avranno sulle metriche di valutazione, e in secondo luogo PyDNetV2 [2], per verificare come questo modello si comporta rispetto alla sua versione precedente, a parità di modalità di addestramento.

### 2.1. Architettura del modello

[1] è una rete convoluzionale profonda strutturata su sei livelli, dove ogni livello riceve l' input dal livello superiore (fatta eccezione per il primo livello che riceve l'immagine di input), elabora l'input ricevuto mediante un **encoder**, che restituisce un output il quale farà da input al livello inferiore (fatta eccezione per l'ultimo livello).

L'output dell'**encoder** viene poi concatenato all'output del livello inferiore sulla dimensione dei canali, e passato ad un **decoder**, il cui output verrà:

- Passato attraverso la funzione di attivazione sigmoide, il cui output corrisponderà alla mappa di **disparità** del livello preso in analisi;
- Passato attraverso una convoluzione trasposta con **kernel** di dimensione  $2 \times 2$  e **stride** 2, per raddoppiare le dimensioni di altezza e larghezza del tensore in ingresso, il cui output verrà passato al livello superiore (eccezione fatta per il primo livello, che ha come unico output il risultato la mappa di **disparità** del livello).



L'architettura è quindi la seguente:

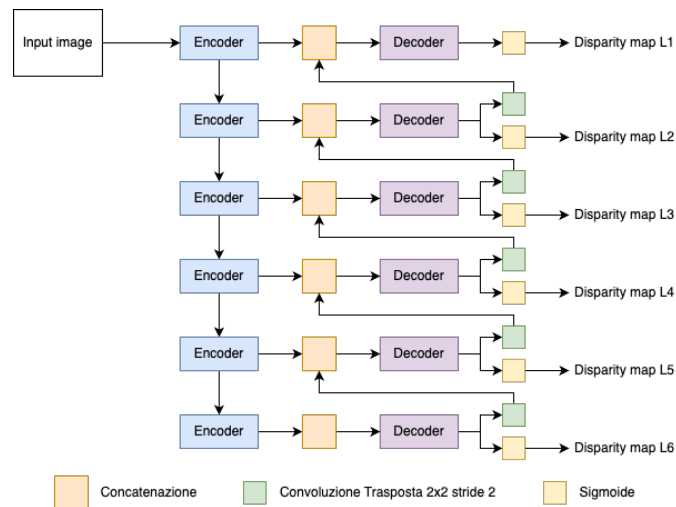


Figura 1: Architettura del modello [1]

L'**encoder** è composto da una convoluzione con **kernel** di dimensione  $3 \times 3$  e **stride** 2, che va quindi a ridurre l'altezza e la larghezza del tensore di ingresso della metà, seguita da una convoluzione con **kernel** di dimensione  $3 \times 3$ . L'**encoder** del livello  $i, \forall i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  avrà quindi come tensore in uscita un tensore con dimensioni di altezza e larghezza pari a  $\frac{1}{2^i}$  delle dimensioni dell'input iniziale. In più, andando dal primo al sesto livello, i canali di uscita prodotti dalla seconda convoluzione dell'encoder sono 16, 32, 64, 96, 128, 196.

L'architettura dell'encoder è quindi la seguente:

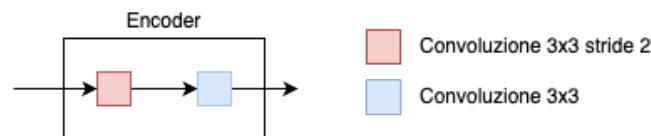


Figura 2: **Encoder** del modello [1].

Il **decoder** invece è composto da una successione di quattro convoluzioni con **kernel** di dimensione  $3 \times 3$  e **stride** 2, i quali rispettivamente producono delle **feature map** con un numero di canali pari a 96, 64, 32 e 8, mantenendo invece le dimensioni di altezza e larghezza dell'*input*.

L'architettura del **decoder** è quindi la seguente:

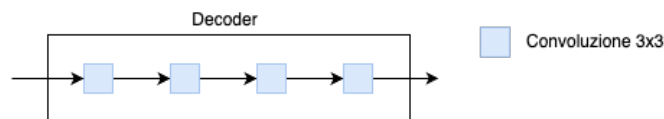


Figura 3: **Decoder** del modello [1].

Successivamente ad ogni convoluzione, tranne per l'ultima del decoder, viene applicata la funzione di attivazione *leaky ReLU* con coefficiente di crescita per la parte negativa di 0.2.

## 2.2. Funzionamento

Lo scopo di [1], [2] è quello di riuscire nel compito di **MDE**. Per farlo [1], [2] imparano, date due immagini stereo dello stesso scenario, ad applicare uno sfasamento a ogni pixel dell'immagine di sinistra, in modo da renderla quanto più simile possibile alla corrispondente immagine di destra, e uno sfasamento a ogni pixel dell'immagine di destra per renderla quanto più simile possibile alla corrispondente immagine di sinistra.

Quanto enunciato però viene fatto solamente durante l'addestramento del modello, poichè durante l'inferenza ogni immagine di *input* viene introdotta nel modello come immagine di sinistra. Si prende infatti come *output* del modello, solo il primo canale delle **feature map** uscenti dalla sigmoide del livello, che infatti corrisponde alla mappa di **disparità** per le immagini di sinistra. Questa strategia funziona perchè progressivamente, durante l'allenamento, viene forzato un allineamento tra le predizioni per le immagini di sinistra e quelle di destra, rendendo ambivalente l'*output* del modello sul canale di sinistra rispetto a quello di destra.

### 2.2.1. Funzioni di perdita

**Image error loss** ( $\mathcal{L}_{\text{ap}}$ ):

$$\mathcal{L}_{\text{ap}}^l = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \alpha \frac{1 - \text{SSIM}(I_{i,j}^l, \tilde{I}_{i,j}^l)}{2} + (1 - \alpha) \| (I_{i,j}^l, \tilde{I}_{i,j}^l) \|_1$$

Figura 4: *Image error loss* calcolata per l'immagine di sinistra.

Questa è la funzione di perdita che penalizza quanto più l'immagine originale di sinistra  $I^l$  è diversa dall'immagine di destra con lo sfasamento applicato  $\tilde{I}^l$  (appunto per diventare l'immagine di sinistra). La prima parte della sommatoria, utilizzando la funzione SSIM, serve per misurare la similarità strutturale tra le due immagini, mentre con la seconda parte, mediante la norma 1, serve per misurare la distanza tra i corrispondenti pixel delle due immagini. Il parametro  $\alpha$  viene usato per regolare il peso tra la prima e la seconda parte, il quale viene impostato a 0,85, andando quindi a dare molta più importanza alla prima.

**Disparity smoothness loss** ( $\mathcal{L}_{\text{ds}}$ ):

$$\mathcal{L}_{\text{ds}}^l = \frac{1}{N} \sum_{i,j} |\delta_x d_{i,j}^l| e^{-\|\delta_x I_{i,j}^l\|} + |\delta_y d_{i,j}^l| e^{-\|\delta_y I_{i,j}^l\|}$$

Figura 5: *Disparity smoothness loss* calcolata per l'immagine di sinistra.

In questo caso invece, questa funzione di perdita disincentiva discontinuità di profondità calcolate mediante norma 1, a meno che non ci sia una discontinuità sul gradiente dell'immagine. La prima parte della sommatoria analizza le discontinuità sull'asse orizzontale, mentre la seconda parte sull'asse verticale.

**Left-right consistency loss** ( $\mathcal{L}_{\text{lr}}$ ):

$$\mathcal{L}_{\text{lr}}^l = \frac{1}{N} \sum_{i,j} |d_{i,j}^l - d_{i,j+d_{i,j}^l}^r|$$

Figura 6: *Left-right consistency loss* calcolata per l'immagine di sinistra.

Infine, l'ultima funzione di perdita, formula nota nel campo degli algoritmi stereo, serve per forzare coerenza tra le predizioni di **disparità** di destra  $d^r$  e di sinistra  $d^l$ .

**Funzione di perdita completa** ( $\mathcal{L}_{\text{lr}}$ ):

Le precedenti funzioni di perdita vengono calcolate anche per l'immagine di sinistra, per poi essere combinate nel seguente modo, creando la funzione di perdita completa  $\mathcal{L}_s$ :

$$\mathcal{L}_s = \alpha_{\text{ap}} (\mathcal{L}_{\text{ap}}^l + \mathcal{L}_{\text{ap}}^r) + \alpha_{\text{ds}} (\mathcal{L}_{\text{ds}}^l + \mathcal{L}_{\text{ds}}^r) + \alpha_{\text{lr}} (\mathcal{L}_{\text{lr}}^l + \mathcal{L}_{\text{lr}}^r)$$

I pesi per i vari termini della funzione completa sono impostati nel seguente modo:

- $\alpha_{\text{ap}} = 1$ ;
- $\alpha_{\text{lr}} = 1$ ;
- $\alpha_{\text{ds}} = \frac{1}{r}$  dove  $r$  è il fattore di scala a ciascun livello di risoluzione.

### 2.2.2. Allenamento

Per l'allenamento viene utilizzato l'ottimizzatore **Adam** con i seguenti parametri:  $\beta_1 = 0.9$ ,  $\beta_2 = 0.999$  e  $\varepsilon = 10^{-8}$ .

Il *learning rate* parte da  $10^{-4}$  per il primo 60% delle epoche, e viene dimezzato ogni 20% successivo.

Infine vengono applicate, con una probabilità del 50%, le seguenti *data augmentation*:

- Capovolgimento orizzontale delle immagini;
- Trasformazione delle immagini:
  - Correzione gamma;
  - Correzione luminosità;
  - Sfasamento dei colori.

Il dataset viene suddiviso in batch da 8 immagini, e verranno eseguite un totale di 50 epoche di allenamento.

## 2.3. Configurazione dell'ambiente

La versione di Tensorflow usata per l'ambiente di allenamento e per i modelli [1], [2] è la 1.8, ormai deprecata da anni e non più scaricabile dai package manager come **pip** o **Anaconda**.

Una versione retrocompatibile con la 1.8 e ancora scaricabile tramite **pip** è la 1.13.2, che però dipende da una versione del pacchetto **protobuf** non più disponibile. Fortunatamente, la versione 3.20 di **protobuf** è ancora scaricabile da **pip** e compatibile con Tensorflow 1.13.2. Il codice si basava anche su una versione deprecata del pacchetto **scipy**, facilmente sostituibile con la versione 1.2, ancora disponibile tramite **pip**. L'ultima configurazione necessaria per eseguire il codice è la corretta versione di **Python**, ancora scaricabile e che riesca ad essere compatibile con tutti i pacchetti sopra menzionati e con le relative dipendenze. Grazie ad **Anaconda** è possibile scaricare la versione 3.7 che è utilizzabile per questo scopo.

I comandi da terminale per ottenere la seguente configurazione, previa corretta installazione di **pip** e **Anaconda** sono:

```
# Creare l'ambiente Anaconda (usare il nome che si preferisce)
conda create -n <nomeAmbiente> python=3.7
# Attivare l'ambiente Anaconda creato
conda activate <nomeAmbiente>
# Installare i pacchetti richiesti
pip install protobuf==3.20 tensorflow_gpu=1.13.2 scipy=1.2 matplotlib wandb
```

Tra i pacchetti installati mediante **pip** è presente anche **Wandb**, un sistema che permette di registrare, gestire e catalogare il *plot* delle *loss function* per i vari esperimenti che verranno condotti.

Il codice è tecnicamente eseguibile, solo se si dispone di una scheda video all'interno della macchina. Tuttavia il cluster del dipartimento di matematica, ha versioni troppo aggiornate dei driver **CUDA** e della libreria **cuDNN**, per essere utilizzabili da **Tensorflow** 1.13.2. Ho quindi ritrovato le versioni adatte: per **CUDA**, la versione 10.0, scaricabile seguendo le istruzioni presenti nell'**archivio CUDA**, e per **cuDNN**, la versione 7.4.2, scaricabile seguendo le istruzioni presenti nell'**archivio cuDNN**.

Infine bisogna scaricare il dataset KITTI, dataset utilizzato per l'addestramento e valutazione del modello, utilizzando questo comando:

```
wget -i utils/kitti_archives_to_download.txt -P ~/my/output/folder/
```

Successivamente bisogna effettuare l'*unzip* di tutte le cartelle compresse e convertire tutte le immagini da .png a .jpg, mediante i seguenti comandi:

```
cd <pathCartellaDataset>
find <pathCartellaDataset> -name '*.zip' | parallel 'unzip -d {} {}'
find <pathCartellaDataset> -name '*.png' | parallel 'convert {}.png {}.jpg && rm {}'
```

Bash

Dove <pathCartellaDataset> è il path che conduce alle cartelle .zip precedentemente scaricate.

## 2.4. Validazione

Seguendo le istruzioni ritrovabili nella *repository* di [1] e [7], si possono recuperare le seguenti istruzioni per effettuare l'esecuzione dell'allenamento, il *testing* e la successiva valutazione di [1].

Quindi, una volta impostata una *codebase* come scritto nella documentazione di [1] possono essere utilizzati i seguenti comandi.

**Per l'allenamento:**

```
conda activate <nomeAmbiente>
python3 <pathFileEseguibile>/monodepth_main.py \
--mode train \
--model_name pydnet_v1 \
--data_path <datasetPath> \
--filenames_file <fileNamesDatasetPath>/eigen_train_files.txt \
--log_directory <outputFilesPath>
```

Bash

Dove:

- <nomeAmbiente>: è il nome dell'ambiente **Anaconda** da dover attivare;
- <pathFileEseguibile>: è il path che conduce al file `monodepth_main.py`, file che dovrà essere eseguito per eseguire l'allenamento;
- <datasetPath>: è il path che conduce alla cartella contenente il dataset;
- <fileNamesDatasetPath>: è il path che conduce al file `eigen_train_files.txt`;
- <outputFilesPath>: è il path che conduce alla cartella dove verranno salvati tutti i file di output prodotti dalla procedura di allenamento.

Questa procedura produrrà dei file di checkpoint, ritrovabili nella cartella <outputFilesPath>.

**Per il *testing*:**

```
conda activate <nomeAmbiente>
python3 <pathFileEseguibile>/experiments.py \
--datapath <datasetPath> \
--filenames <fileNamesDatasetPath>/eigen_test_files.txt \
--output_directory <outputFilesPath> \
--checkpoint_dir <checkpointPath>
```

Bash

Dove:

- <nomeAmbiente>: è il nome dell'ambiente **Anaconda** da dover attivare;
- <pathFileEseguibile>: è il path che conduce al file `experiments.py`, file che dovrà essere eseguito per calcolare e generare il file `disparities.npy`;
- <datasetPath>: è il path che conduce alla cartella contenente il dataset;
- <fileNamesDatasetPath>: è il path che conduce al file `eigen_test_files.txt`;
- <outputFilesPath>: è il path che conduce alla cartella dove verrà salvato il file `disparities.npy`;

- `<checkpointPath>`: è il path che conduce alla cartella dove è posizionato il checkpoint da usare per impostare i pesi del modello, precedentemente creato dalla fase di *training*.

Questa procedura produrrà un file `disparities.npy`, contenente tutte le **disparità** prodotte dal modello, avente avuto come input le immagini appartenenti al test set.

**Per la valutazione:**

```
conda activate <nomeAmbiente>
python3 <pathFileEseguibile>/evaluate_kitti.py \
--split eigen \
--gt_path <datasetPath> \
--filenames_path <fileNamesDatasetPath> \
--predicted_disp_path <disparitiesPath>/disparities.npy \
```

Bash

Dove:

- `<nomeAmbiente>`: è il nome dell'ambiente **Anaconda** da dover attivare;
- `<pathFileEseguibile>`: è il path che conduce al file `evaluate_kitti.py`, file che dovrà essere eseguito per valutare il file `disparities.npy`, precedentemente creato dalla fase di *testing*;
- `<datasetPath>`: è il path che conduce alla cartella contenente il dataset;
- `<fileNamesDatasetPath>`: è il path che conduce alla cartella al cui interno è posizionato `eigen_test_files.txt`;
- `<disparitiesPath>`: è il path che conduce alla cartella dove è posizionato il file `disparities.npy`.

Questa procedura mostrerà a terminale i valori calcolati per ciascuna metrica di valutazione del modello.

Una volta seguita questa procedura ho ottenuto i seguenti risultati:

Fonte	Minore è meglio				Maggiore è meglio		
	Abs Rel	Sq Rel	RMSE	RMSE log	d1	d2	d3
[1]	<u>0.163</u>	<u>1.399</u>	<u>6.253</u>	<u>0.262</u>	<u>0.759</u>	<u>0.911</u>	<u>0.961</u>
[1] ri-allenato	0.164	1.427	6.369	0.266	0.757	0.908	0.96

Tabella 1: [1] vs. [1] ri-allenato

Come si può notare i risultati sono estremamente vicini e di conseguenza [1] è stato dimostrato valido.

## 2.5. Migrazione da Tensorflow a PyTorch

Verificati i risultati ottenuti nel paper, si può quindi partire con la migrazione dell'intera *codebase* da **Tensorflow** a **PyTorch**, standard del mondo della ricerca nel campo del *machine learning*, che ci permetterà successivamente di integrare ad esso tecniche innovative, altrimenti impossibili da sperimentare.

### 2.5.1. Il dataset

La migrazione è cominciata con l'entità che governa l'approvvigionamento di immagini alla procedura di addestramento, per allenare il modello.

In **PyTorch** questa entità è chiamata `Dataset` e può essere implementata mediante l'omonima interfaccia.

L'interfaccia espone i seguenti due metodi astratti:

- `__len__(self)`: il quale deve restituire la lunghezza del dataset;
- `__getitem__(self, i: int)`: il quale dato un indice, deve restituire l'elemento o gli elementi del dataset corrispondenti ad esso.

Siccome i nomi dei vari file da recuperare per il dataset sono presenti all'interno di determinati file di testo (nello specifico `eigen_train_files.txt` per il training e `eigen_test_files.txt` per il testing, secondo lo split presentato in [8]), organizzati in un formato simile al `.csv`, nell'implementazione di questa entità ho scelto di appoggiarmi alla libreria *Pandas*, la quale solitamente viene utilizzata apposta per leggere grandi file `.csv` in modo efficiente. Inoltre, grazie alle *API* di *Pandas* è molto facile reperire la dimensione del dataset (ogni riga del file di testo corrisponde ai path della coppia di immagini stereo della stessa scena), ed è molto facile dato un indice reperire i path delle corrispondenti immagini stereo.

Appoggiandomi poi alla libreria *Pillow* (standard di lettura efficiente delle immagini nel mondo **Python**) e **PyTorch**, mi sono occupato della lettura delle immagini selezionate mediante *Pandas*, della successiva loro conversione in tensori e dell'applicazione di un eventuale *data augmentation* da applicare a questi, prima che vengano restituiti dal metodo `__getitem__`. Il Dataset è stato creato in modo da far restituire una tupla di tensori ( $T_{sx}, T_{dx}$ ) se questo è in modalità *training* altrimenti, se in modalità *testing*, restituirà solo il tensore di sinistra  $T_{sx}$ .

Ho implementato infine un metodo di utilità che a partire dal Dataset genera un `DataLoader`, il quale sarà il diretto usufruttore del Dataset per fornire alla procedura di addestramento i corretti batch di immagini.

### 2.5.2. I modelli

I modelli di [1], [2] sono stati ricreati con una corrispondenza 1:1 rispetto a quanto ritrovabile nella *codebase* originale (cambia solo la sintassi con la quale sono stati implementati, dovuta solo alla differenza di API tra **Tensorflow** e **PyTorch**), in quanto entrambe le parti devono rappresentare gli stessi modelli matematici.

Tuttavia, ho approfittato dei vari metodi, interfacce e classi che **PyTorch** offre per:

- Creare moduli, mediante l'implementazione dell'interfaccia `torch.nn.Module` per poter costruire l'**encoder** e il **decoder** come due moduli a se stanti, poi integrati come sotto-moduli dei modelli, per rendere il codice più leggibile e compartmentalizzato;
- Creare sequenze di blocchi o *layer*, mediante l'impiego di oggetti `torch.nn.Sequential`, per poter rendere il codice più semplice e sequenziale, migliorandone la leggibilità.

### 2.5.3. La configurazione

Il codice originale fa un forte uso degli argomenti da terminale per definire le varie impostazioni di esecuzione del programma, mentre il codice migrato invece fa uso di file di configurazione scritti in **Python**, così da poter specificare anche i tipi delle varie impostazioni inseribili e da poter sfruttare il **linter** di **Python** per avere suggerimenti riguardo alle impostazioni durante la scrittura del codice.

Nel mio caso ho scritto un file di configurazione `ConfigHomeLab.py` per la configurazione del programma di modo da poter eseguire sul mio computer di casa, e un file di configurazione `ConfigCluster.py` per poterlo invece eseguire sul cluster di dipartimento.

Le seguenti fasi di **training**, **utilizzo** e **valutazione** hanno tutte bisogno di due argomenti da terminale:

- `--mode`: che serve a specificare la modalità di esecuzione del codice (se per l'allenamento, utilizzo o valutazione);
- `--env`: che serve a specificare la configurazione da utilizzare (nel mio caso tra `ConfigHomeLab`, ovvero la scelta di default se non viene inserito niente e `ConfigCluster`).

### 2.5.4. La procedura di *training*

Tutto il codice per il *training* è stato realizzato dentro un file apposito `training.py`, il quale viene eventualmente richiamato dal file `main.py`.

Anche nel caso della procedura di *training* c'è una corrispondenza 1:1 rispetto a quanto ritrovabile nella *codebase* originale, poichè per ottenere gli stessi risultati è necessario che il modello segua lo stesso addestramento, tuttavia sono state applicate le seguenti scelte stilistiche e organizzative:

- Ogni funzione di perdita ha la propria funzione **Python**. Successivamente la funzione di perdita completa richiama tutte le altre la corrispondente formula matematica, così da rendere più comprensibile e compartimentalizzato il codice;
- Riguardo al salvataggio dei *checkpoint*, ho scelto di salvare sia l'ultimo *checkpoint* che quello della versione del modello con la valutazione migliore sul *test set*. Questo perchè dopo ogni epoca viene fatta una valutazione del modello sul *test set*.

Successivamente, come precedentemente fatto per la *codebase* originale, è stato aggiunto **Wandb** per effettuare la registrazione delle funzioni di perdita per ogni esperimento.

### 2.5.5. La procedura di utilizzo

Tutto il codice per l'utilizzo è stato realizzato dentro un file apposito `using.py`, il quale viene eventualmente richiamato dal file `main.py`.

Come per la repository originale ho fatto in modo che si possano utilizzare i modelli nei seguenti modi:

- Se si imposta `--mode=use` si può fornire un secondo argomento `--img_path` dove si specifica il path dell'immagine di cui si vuole ottenere la mappa delle **disparità**. In questo modo verrà generata una mappa delle disparità con nome omonimo al file inserito come input, che verrà posizionata nella medesima cartella del file di input;
- Se si desidera utilizzare il modello attraverso la *webcam* integrata del computer, si deve impostare `--mode=webcam`. Bisogna tuttavia assicurarsi di avere il comando `ffmpeg` disponibile mediante terminale;

Inoltre, nel caso in cui si voglia integrare il modello in un'altro programma, è stata creata la funzione `use()` la quale, una volta forniti come parametri: il modello da utilizzare, l'immagine sotto forma di immagine *Pillow* o tensore di **PyTorch**, le dimensioni delle immagini accettate dal modello, le dimensioni originali dell'immagine e il dispositivo sulla quale si vuole eseguire il modello (cuda o cpu), restituisce in output un tensore di **PyTorch**, rappresentante la mappa delle **disparità**.

### 2.5.6. La procedura di valutazione

Tutto il codice per la valutazione è stato realizzato dentro un file apposito `evaluating.py`, il quale viene eventualmente richiamato dal file `main.py`.

Tutto il codice per il *testing* è stato realizzato dentro un file apposito `testing.py`, il quale viene eventualmente richiamato dal file `main.py`.

La procedura di valutazione si divide in due parti:

- *testing*: la fase di *testing* si occupa di fornire le predizioni per tutte le immagini del *test set*, e di salvarle in un file chiamato `disparities.npy`;
- valutazione: la fase di valutazione si occupa di analizzare il file `disparities.npy`, al fine di produrre delle valutazioni sulle metriche presentate in [8].

La procedura di *testing* è stata riscritta completamente sempre con corrispondenza 1:1 con la *codebase* originale per poter sfruttare poi le stesse procedure di valutazione. Infatti le procedure di valutazione, essendo scritte in **Python** utilizzando solamente *Numpy*, non sono dipendenti da un framework di *machine learning* specifico e non sono quindi state migrate, ma tenute come sono.

### 2.5.7. Risultati della migrazione

Per eseguire il codice bisogna innanzitutto avere un ambiente **Anaconda** con tutte le dipendenze necessarie, e per farlo bisogna eseguire i seguenti comandi da terminale:

```
conda create -n <nomeAmbiente>
conda activate <nomeAmbiente>
conda install pytorch torchvision torchaudio pytorch-cuda=12.1 -c pytorch -c nvidia
pip install wandb pandas matplotlib Pillow
```

Bash

Dove <nomeAmbiente> è il nome che diamo all'ambiente **Anaconda** che poi utilizzeremo.

Successivamente bisogna impostare il file di configurazione che si decide di usare, fornendo tutte le impostazioni richieste (entrambi i file sono commentati al di sotto di ogni impostazione per spiegare che valori riporvi).

Fatto ciò possiamo allenare il modello tramite il seguente comando:

```
python3 main.py --mode=train --env=<configurazioneUsata>
```

Bash

Dove <configurazioneUsata> è il nome della configurazione che decidiamo di utilizzare.

Dopo averlo allenato avremo due file di *checkpoint* generati nella directory specificata all'interno del file di configurazione. Sempre nel file di configurazione dobbiamo ora specificare quale *checkpoint* dobbiamo utilizzare.

Una volta specificato il *checkpoint* da utilizzare testiamo il modello con il seguente comando:

```
python3 main.py --mode=test --env=<configurazioneUsata>
```

Bash

Dove <configurazioneUsata> è il nome della configurazione che decidiamo di utilizzare.

Questa procedura avrà generato un file *disparities.npy* nella directory specificata all'interno del file di configurazione.

Ora possiamo andare a valutare l'output del modello (ovvero l'output della fase precedente), utilizzando il seguente comando:

```
python3 main.py --mode=eval --env=<configurazioneUsata>
```

Bash

Seguendo questi passaggi ho ottenuto i seguenti risultati:

Fonte	Minore è meglio				Maggiore è meglio		
	Abs Rel	Sq Rel	RMSE	RMSE log	d1	d2	d3
[1]	<u>0.163</u>	<b>1.399</b>	<u>6.253</u>	<u>0.262</u>	<u>0.759</u>	<u>0.911</u>	<u>0.961</u>
[1] in <b>PyTorch</b>	<b>0.16</b>	1.52	<b>6.229</b>	<b>0.253</b>	<b>0.782</b>	<b>0.916</b>	<b>0.964</b>

Tabella 2: [1] vs. [1] riscritto in **PyTorch** (*training* su *KITTI*, 50 epoche)

Ho poi allenato il modello sul *dataset CityScapes* per poi fare *fine tuning* sul *dataset KITTI*, ottenendo i seguenti risultati:

Fonte	Minore è meglio				Maggiore è meglio		
	Abs Rel	Sq Rel	RMSE	RMSE log	d1	d2	d3
[1]	<u>0.148</u>	<b>1.318</b>	<u>5.932</u>	<u>0.244</u>	<u>0.8</u>	<u>0.925</u>	<b>0.967</b>
[1] in <b>PyTorch</b>	<b>0.147</b>	1.378	<b>5.91</b>	<b>0.242</b>	<b>0.804</b>	<b>0.927</b>	<b>0.967</b>

Tabella 3: [1] vs. [1] riscritto in **PyTorch** (*training* su *CityScapes*+*KITTI*, 50 epoche)



Infine ho allenato il modello per 200 epoche, ottenendo i seguenti risultati:

Fonte	Minore è meglio				Maggiore è meglio		
	Abs Rel	Sq Rel	RMSE	RMSE log	d1	d2	d3
[1]	<b><u>0.153</u></b>	<b><u>1.363</u></b>	<b><u>6.03</u></b>	<u>0.252</u>	<b><u>0.789</u></b>	<b><u>0.918</u></b>	<u>0.963</u>
[1] in <b>PyTorch</b>	<b>0.153</b>	1.473	6.23	<b>0.251</b>	<b>0.789</b>	<b>0.918</b>	<b>0.964</b>

Tabella 4: [1] vs. [1] riscritto in **PyTorch** (*training* su *KITTI*, 200 epoche)

Si può quindi constatare che la migrazione a **PyTorch** è stata un successo, permettendoci di arrivare nell'intorno dei risultati enunciati nel paper.

## 2.6. Iperparametri e PyDNetV2

### 2.6.1. Esplorazione degli iperparametri

È stata condotta una procedura investigativa relativa a come il cambiamento degli iperparametri influenzi le *performance* del modello, per poter capire poi come poter eventualmente migliorare la procedura di training al fine di avere un modello che a parità di parametri abbia una valutazione migliore.

Sono quindi state analizzate le seguenti situazioni date le seguenti ipotesi:

- **Cosa succede se il dataset è in bianco e nero?**: questa ipotesi va a verificare come la semplificazione del dataset impatti la prestazioni del modello. Uso il termine semplificare, in quanto la rappresentazione delle immagini passa dall'essere (secondo la norma  $\text{numCanali} \times \text{altezzaImmagine} \times \text{larghezzaImmagine}$ )  $3 \times H \times W$  a  $1 \times H \times W$ , andando a rappresentare con quell'unico canale, solamente la luminosità del *pixel*. I risultati sono i seguenti:

Fonte	Minore è meglio				Maggiore è meglio		
	Abs Rel	Sq Rel	RMSE	RMSE log	d1	d2	d3
[1]	<b><u>0.16</u></b>	<b><u>1.52</u></b>	<b><u>6.229</u></b>	<b><u>0.253</u></b>	<b><u>0.782</u></b>	<b><u>0.916</u></b>	<b><u>0.964</u></b>
[1] <i>Luminance</i> Dataset	0.164	1.553	6.423	0.263	0.763	0.906	0.959

Tabella 5: In **PyTorch**: [1] vs. [1] (*Luminance* dataset)

Come si può vedere, i risultati peggiorano, questo a significare che avere effettivamente i canali per i colori introducevano informazione significativa.

- **Cosa succede se il dataset è in formato HSV?**: il formato *HSV* è un formato di rappresentazione dei colori che si appoggia sempre su tre canali, ma rispetto alla rappresentazione *RGB*, i tre in questo caso sono usati per rappresentare tonalità, saturazione e luminosità. Si cerca quindi di capire se un'altra rappresentazione dei colori possa portare beneficio alle *performance* del modello. I risultati sono i seguenti:

Fonte	Minore è meglio				Maggiore è meglio		
	Abs Rel	Sq Rel	RMSE	RMSE log	d1	d2	d3
[1]	<b><u>0.16</u></b>	<b><u>1.52</u></b>	<b><u>6.229</u></b>	<b><u>0.253</u></b>	<b><u>0.782</u></b>	<b><u>0.916</u></b>	<b><u>0.964</u></b>
[1] <i>HSV</i> Dataset	0.237	2.451	8.259	0.377	0.605	0.798	0.899

Tabella 6: In **PyTorch**: [1] vs. [1] (*HSV* dataset)

Si può quindi evincere dai risultati che il miglior formato per la rappresentazione dei colori per il modello è l'*RGB*.

- **Cosa succede se si applica un ribaltamento verticale alle immagini?** In questo caso verificare come, aggiungendo il ribaltamento verticale alle immagini, vengano impattate le prestazioni del modello. Questo perchè alla base è presente l'ipotesi di una possibile migliore generalizzazione del modello, se addestrato anche su scenari poco probabili, poichè ad esempio, abituarsi al far sì che il cielo sia sempre nelle parti superiori delle immagini, creerà nel modello un'influenza forte. I risultati sono i seguenti:

Fonte	Minore è meglio				Maggiore è meglio		
	Abs Rel	Sq Rel	RMSE	RMSE log	d1	d2	d3
[1]	<u>0.16</u>	<u>1.52</u>	<u>6.229</u>	<u>0.253</u>	<u>0.782</u>	<u>0.916</u>	<u>0.964</u>
[1] <i>VFlip</i>	<b>0.159</b>	<b>1.403</b>	6.277	0.26	0.765	0.909	0.961

Tabella 7: In **PyTorch**: [1] vs. [1] (con *vertical flip*)

Si nota che, sebbene le prime due metriche di valutazione sono leggermente migliorate, nel resto le prestazioni degradano significativamente.

- **Cosa succede se si applica un ribaltamento verticale alle immagini rimuovendo il ribaltamento orizzontale?** Volendo provare a vedere che conseguenza avrebbero portato i soli ribaltamenti verticali, rimuovendo quindi quelli orizzontali, ho ottenuto i seguenti risultati:

Fonte	Minore è meglio				Maggiore è meglio		
	Abs Rel	Sq Rel	RMSE	RMSE log	d1	d2	d3
[1]	<u>0.16</u>	<u>1.52</u>	<u>6.229</u>	<u>0.253</u>	<u>0.782</u>	<u>0.916</u>	<u>0.964</u>
[1] <i>VFlip</i> no <i>HFlip</i>	0.173	1.636	6.536	0.269	0.746	0.9	0.957

Tabella 8: In **PyTorch**: [1] vs. [1] (con *vertical flip* senza *horizontal flip*)

Si può quindi notare che mettere il modello in condizioni poco probabili, non lo aiuta a generalizzare meglio, ma introduce solo più confusione.

- **Cosa succede al cambiare della dimensione delle immagini di *input*?** Si vuole in questo caso verificare come, gradualmente aumentando la dimensione delle immagini sulla quale il modello viene addestrato, si modificano le metriche di valutazione per il modello. Sono riportati in seguito i risultati per ciascuna risoluzione di *input* provata:

Fonte	Minore è meglio				Maggiore è meglio		
	Abs Rel	Sq Rel	RMSE	RMSE log	d1	d2	d3
[1] $512 \times 256$	<u>0.16</u>	<u>1.52</u>	<u>6.229</u>	<u>0.253</u>	<u>0.782</u>	<u>0.916</u>	<u>0.964</u>
[1] $640 \times 192$	0.163	1.525	6.203	0.251	0.778	0.916	0.963
[1] $1024 \times 320$	0.151	1.373	5.919	0.245	0.794	0.923	0.966
[1] $1280 \times 384$	<b>0.139</b>	<b>1.249</b>	<b>5.742</b>	<b>0.234</b>	<b>0.816</b>	<b>0.932</b>	<b>0.969</b>

Tabella 9: In **PyTorch**: confronto tra varie risoluzioni di *input*

Si può notare come aumentando la dimensione delle immagini di *input*, le metriche di valutazione migliorano notevolmente. È tuttavia da fare un'osservazione.

Avere immagini di *input* più grandi determina una *performance* in termini di tempo di inferenza e in termini di consumo di memoria molto peggiore, è quindi preferibile concentrarsi sulla costruzione di un modello migliore, che sull'uso di modelli leggeri ma che diventano costosi per la dimensione dell'input che elaborano.

### 2.6.2. PyDNet V2

PyDNetV2 è un modello ancor più leggero rispetto alla versione precedente, infatti si passa dai 2 milioni di parametri per [1] a circa 700.000 parametri per [2].

Questo è stato reso possibile rimuovendo solamente gli ultimi due livelli della piramide, senza cambiare ne gli **encoder** ne i **decoder**, andando quindi ad avere la seguente architettura:

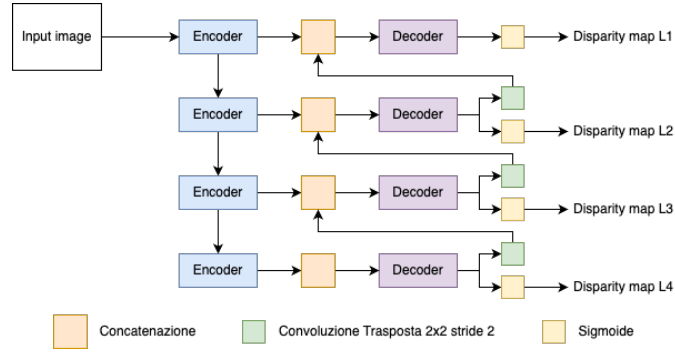


Figura 7: Architettura del modello [2]

Sebbene la procedura di allenamento di [2] differisce dalla procedura di [1], si è voluto verificare a parità di ambiente di addestramento, la performance del modello di [2] migrato anch'esso in **PyTorch** (come menzionato **precedentemente**), ottenendo quindi i seguenti risultati:

Fonte	Minore è meglio				Maggiore è meglio		
	Abs Rel	Sq Rel	RMSE	RMSE log	d1	d2	d3
[1]	<u>0.16</u>	<u>1.52</u>	<u>6.229</u>	<b><u>0.253</u></b>	<u>0.782</u>	<u>0.916</u>	<b><u>0.964</u></b>
[2]	<b>0.157</b>	<b>1.487</b>	<b>6.167</b>	0.254	<b>0.783</b>	<b>0.917</b>	<b>0.964</b>

Tabella 10: In **PyTorch**: [1] vs. [2]

Dai risultati si può dedurre che forse avere sei livelli invece che quattro, avendo di conseguenza circa 1.3 milioni di parametri in più, fa imparare al modello più rumore che informazione utile.

## Capitolo 3.

# *XiNet*

Il seguente capitolo parla di *XiNet* [3], una rete neurale convoluzionale profonda parametrizzata orientata all'efficienza energetica per compiti relativi alla *computer vision*. Il *paper* tratta in primo luogo dello *XiConv*, ovvero un blocco convoluzionale parametrizzato che combina tecniche alternative per riuscire a migliorare l'efficienza di energia, rispetto ad una tradizionale convoluzione e in secondo luogo *XiNet*, ovvero come combinare gli *XiConv* nel miglior modo, al fine di creare ad una rete neurale profonda.

Di conseguenza nelle seguenti sezioni verranno trattati:

- Sezione 3.1: L'architettura del blocco *XiConv* e della rete *XiNet*;
- Sezione 3.2: La validazione dei risultati espressi nel paper;

### 3.1. Architettura

Il blocco convoluzionale *XiConv* è detto parametrico in quanto sono in esso impostabili due parametri:

- $\alpha$ : è il coefficiente di riduzione dei canali. Se per esempio si utilizza uno *XiConv* con  $C_{in} = 16$  e  $C_{out} = 32$  e l' $\alpha$  è impostato a 0.4, i veri canali di *input* e di *output* accettati saranno rispettivamente  $C_{in} = \lfloor \alpha 16 \rfloor = 6$  e  $C_{out} = \lfloor \alpha 32 \rfloor = 12$ ;
- $\gamma$ : è il coefficiente di compressione. Questo perchè la convoluzione principale, effettuata dal blocco *XiConv* è in realtà divisa in due passi:
  1. Comprimere il numero di canali dell'input da  $\alpha C_{in}$  a  $\frac{\alpha C_{in}}{\gamma}$  mediante una convoluzione *pointwise* (quindi con **kernel** di dimensione  $1 \times 1$ );
  2. Successivamente applicare la convoluzione principale, con **kernel**  $3 \times 3$ , che porta il numero di canali da  $\frac{\alpha C_{in}}{\gamma}$  a  $\alpha C_{out}$ .

Tra la convoluzione di compressione e quella principale è presente una somma tensoriale tra l'output della convoluzione di compressione e l'input originale passato alla rete, passato in *broadcasting* e propriamente ridimensionato nei canali (mediante una convoluzione *pointwise*) e nelle dimensioni (mediante un *pooling* medio adattivo) dal seguente blocco di elaborazione:

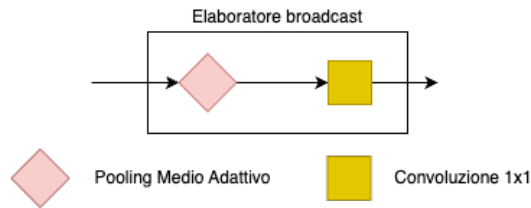


Figura 8: Architettura blocco di elaborazione del *broadcasted input* in [3]

Infine, successivamente alla convoluzione principale, viene applicato un blocco di attenzione mista, dove viene combinata l'attenzione sui canali a quella spaziale, il cui output moltiplicherà l'output della convoluzione principale mediante **prodotto di Hadamard** (per appunto applicare l'attenzione calcolata), restituendo quindi l'*output* finale dell'intero blocco.

L'architettura è la seguente:

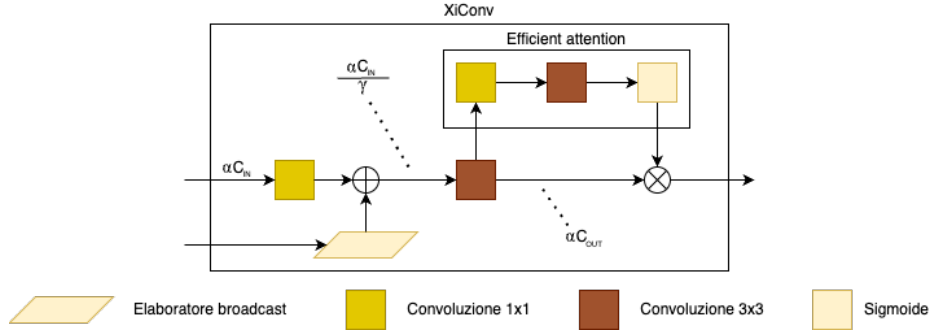


Figura 9: Architettura dello *XiConv* proposto in [3]

La rete *XiNet* è invece detta parametrica in quando sono in essa impostabili i seguenti parametri:

- $\beta$ : è il coefficiente che controlla il compromesso tra numero di parametri e operazioni. Questo perchè, fatta eccezione del primo blocco *XiConv* della rete, gli altri blocchi seguono la seguente formula per calcolare i propri canali di output (e di conseguenza i canali di input del blocco successivo):

$$C_{\text{out}}^i = 4 \left[ \alpha 2^{D_i-2} \left( 1 + \frac{(\beta-1)i}{N} \right) C_{\text{out}}^0 \right]$$

Dove:

- $C_{\text{out}}^i$ : rappresenta il numero dei canali di output che avrà il blocco  $i$ -esimo;
- $D_i$ : rappresenta il numero di volte che l'input è stato dimezzato nelle dimensioni, prima del blocco  $i$ -esimo;
  - Questo perchè per ogni coppia successiva di blocchi *XiConv*, il primo blocco va ad applicare la propria convoluzione principale con uno **stride 2** (dimezzando l'altezza e la larghezza del tensore di input);
  - Vengono sempre aggiunti due *XiConv* all'inizio della rete, a prescindere dal numero di *XiConv* specificati, quindi ci sarà sempre almeno un dimezzamento delle dimensioni.
- $N$ : il numero di *XiConv* utilizzati nella rete.

L'architettura è quindi la seguente:

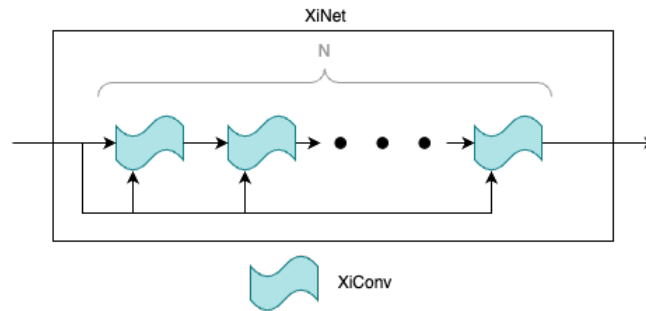


Figura 10: Architettura di [3], composta da  $N$  *XiConv*

Come si può osservare dalla figura e come precedentemente menzionato, l'input della rete viene poi passato in *broadcast* ad ogni *XiConv* che la compone.

### 3.2. Validazione

Purtroppo non viene menzionato alcun *benchmark* riguardo alle prestazioni sul dataset *CIFAR10*, si può tuttavia fare una comparazione con lo stato dell'arte per vedere quanto si discosta da esso. Si è voluto quindi verificare il risultato andando a svolgere i seguenti passi:

- Clonare la *repository* da **GitHub**, mediante il comando:

```
git clone https://github.com/micromind-toolkit/micromind.git
```

Bash

- Installare il pacchetto *micromind* (pacchetto nella quale è presente *XiNet*) in locale, mediante i seguenti comandi:

```
# Per entrare nella directory clonata
cd ./micromind/
# Per installare il pacchetto micromind
pip install -e .
# Per installare requisiti e dipendenze aggiuntive
pip install -r ./recipes/image_classification/extra_requirements.txt
```

Bash

- Effettuare l'allenamento con successiva valutazione mediante il seguente comando:

```
# Per entrare nella cartella corretta
cd ./recipes/image_classification/
# Per eseguire l'allenamento con successiva valutazione
python train.py cfg/xinet.py
```

Bash

Seguendo i precedenti comandi ho quindi ottenuto un' *accuracy* del 81.44% con ~7.8 milioni di parametri. Il modello presentato in [9] è in cima alle classifiche con un' *accuracy* del 99.61% con 11 milioni di parametri.

Possiamo quindi constatare come, seppur con ~3 milioni di parametri in meno, riesca ad avvicinarsi ai risultati dello stato dell'arte. Ovviamente *XiNet* non ha lo scopo di essere migliore in termini di *accuracy*, ma di minimizzare l'impatto energetico del modello, cercando di avere performance quanto più vicine.

I risultati sono quindi soddisfacenti al fine di provare ad esplorare, con questo modulo, eventuali soluzioni alternative per trovare una soluzione migliore nel campo del **MDE**.

## Capitolo 4.

# *Attention*

Le reti neurali convoluzionali, sebbene funzionino particolarmente bene per essere addestrate su immagini e video, hanno un problema alla base, ovvero non sono in grado di considerare delle dipendenze a lungo raggio tra i vari *pixel* o *patch* del contenuto in analisi. Alcuni delle conseguenze che questo comporta sono:

- Un campo ricettivo, limitato alla dimensione del **kernel**;
- Il campo ricettivo cresce linearmente con la profondità della rete, e quindi potrebbero essere necessarie reti estremamente profonde;
- I pesi che sono fissi dopo l'addestramento, non possono quindi adattarsi dinamicamente al contesto globale dell'immagine.

Tuttavia, negli anni precedenti una particolare tecnica (originariamente pensata per il **natural language processing**) è emersa anche nel campo della *computer vision*, l'attenzione. I meccanismi di attenzione cercano di captare dipendenze a lungo raggio al fine di migliorare, spesso significativamente, la qualità della predizione.

Il contenuto delle seguenti sezioni è riassumibile come segue:

- Sezione 4.1: descrive un potente ma computazionalmente costoso meccanismo di attenzione, il quale però permette miglioramenti significativi nelle predizioni, andando a trovare correlazioni tra ogni *pixel* o *patch* del contenuto analizzato;
- Sezione 4.2: descrive un meccanismo di attenzione più leggero, creato apposta per essere utilizzato in reti a collo di bottiglia, cercando di estrarre informazioni significative, prima della riduzione di dimensionalità, analizzando prima la dimensione dei canali, e poi la dimensione spaziale (altezza e larghezza).

### 4.1. *Self attention*

La *self attention* è sostanzialmente un meccanismo originariamente creato per riuscire a trovare correlazioni tra le parole di una frase, di modo da assegnare dei pesi a ciascuna di esse per fornire una migliore predizione [10].

Tuttavia nel lavoro discusso in [4], viene descritta un'architettura che permette l'uso di principi simili, al fine di trovare correlazioni ad ampio raggio tra i vari *pixel* dei contenuti analizzati. Viene quindi enunciato il concetto di *operatore non locale* ovvero il blocco presentato in [4] che calcola la risposta in una posizione come una media ponderata delle caratteristiche di tutte le posizioni dell'input.

L'architettura del così chiamato *Non-local block* è la seguente:

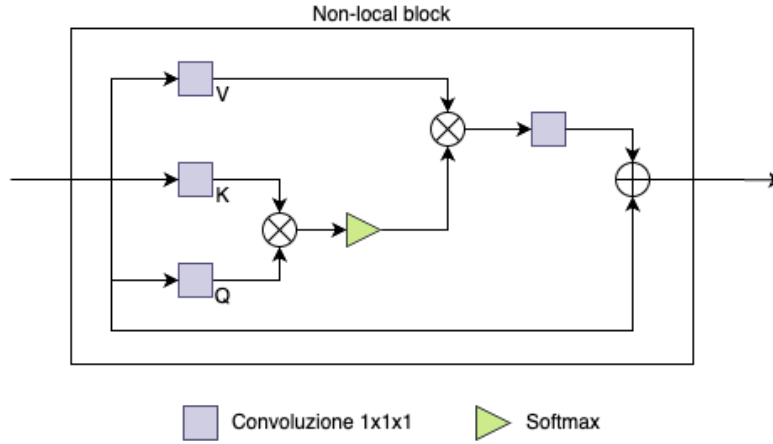


Figura 11: Il *Non-local block*, presentato in [4]

In questo caso “ $\otimes$ ” rappresenta la moltiplicazione tra matrici.

Come in [10], anche in questo blocco si identificano tre entità per riuscire ad ottenere l'attenzione:

- **Query (Q)**: rappresenta la posizione per la quale stiamo calcolando l'output non locale;
- **Key (K)**: rappresenta le posizioni con cui la query viene confrontata per determinare la somiglianza;
- **Value (V)**: rappresenta le informazioni che vengono aggregate per formare l'output finale.

Si vuole far notare che in questo caso le tre matrici sono matrici della dimensione di  $3 \times (\text{altezza} \cdot \text{larghezza})$ , questo per far sì che le moltiplicazioni matriciali combinino il valore di un *pixel* con tutti gli altri.

La prima moltiplicazione tra matrici  $Q \cdot K$  rappresenta il calcolo dell'affinità, ovvero calcolare i pesi di attenzione che determinano l'influenza di ogni *pixel* (la colonna di  $K$  presa in considerazione) sul *pixel* in analisi (la riga di  $Q$  presa in analisi). Successivamente le affinità calcolate vengono normalizzate tramite una funzione *softmax* per ottenere i veri pesi di attenzione  $A$ .

Il prodotto tensoriale  $A \cdot V$  invece va a creare un'aggregazione ponderata delle informazioni, dando quindi luogo alla matrice di attenzione  $Y$ .

Questa viene poi moltiplicata per un peso apprendibile (equivalente ad applicare una convoluzione  $1 \times 1 \times 1$ ), anche chiamato  $\gamma$ , che serve per apprendere quanto applicare dell'attenzione calcolata. Essendo in seguito fatta una somma tensoriale tra l'input e il risultato del calcolo dell'attenzione (anche detto *residual*, come menzionato in [11]), il  $\gamma$  può anche partire da 0, andando quindi inizialmente a non applicare attenzione, questo per stabilizzare inizialmente il *training* del modello.

## 4.2. Convolutional Block Attention Module

Il *Convolutional Block Attention Module (CBAM)*, presentato in [5] è un blocco fortemente basato sulle convoluzioni, che combina la *channel* e la *spacial attention*, per migliorare le predizioni del modello.

Elementi di particolare interesse per questo modello sono:

- La capacità di riuscire comunque, anche se non come per la *self attention*, nel catturare relazioni globali;
- Aumentare l'efficienza computazionale poichè aggiunge, rispetto ad altri meccanismi di attenzione, solo un discreto numero di parametri alla rete.

Il blocco *CBAM* è principalmente composto da due sotto-moduli, uno per calcolare l'attenzione sui canali, che una volta combinato mediante un **prodotto di Hadamard** con il *residual* dell'*input*, viene passato al modulo di attenzione spaziale. L'output di attenzione spaziale viene poi combinato con il *residual* dell'*output* del modulo di attenzione sui canali mediante un **prodotto di Hadamard**, generando quindi l'output con l'attenzione applicata.



L'architettura del blocco *CBAM* è quindi la seguente:

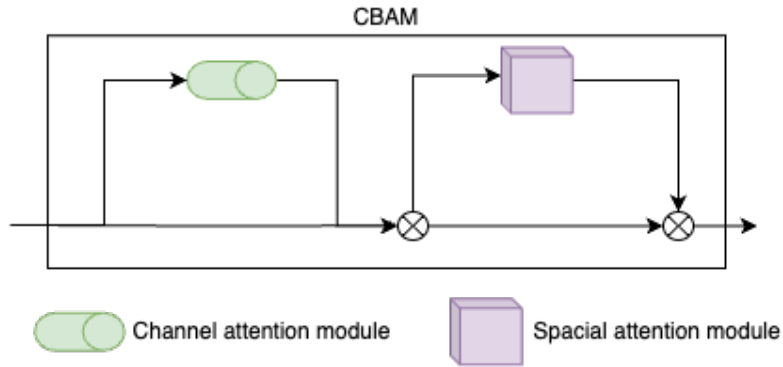


Figura 12: Il *Convolutional Block Attention Module*, presentato in [5]

Il modulo di attenzione sui canali, opera sulla spazialità del tensore (altezza e larghezza) mediante *pooling* massimo e *pooling* medio, andando quindi a creare due vettori, i quali rappresenteranno quindi il valore massimo e la media di ciascun canale del tensore di *input*.

Successivamente entrambi questi vettori vengono passati attraverso un *multi layer perceptron* da tre strati, con il primo e l'ultimo dalle medesime dimensioni dell'input, mentre quello centrale, essendo più piccolo, applica un fattore di compressione.

Entrambi i vettori risultanti vengono poi sommati tra loro e passati attraverso una sigmoide, la quale genererà il vettore di attenzione sui canali.

L'architettura è la seguente:

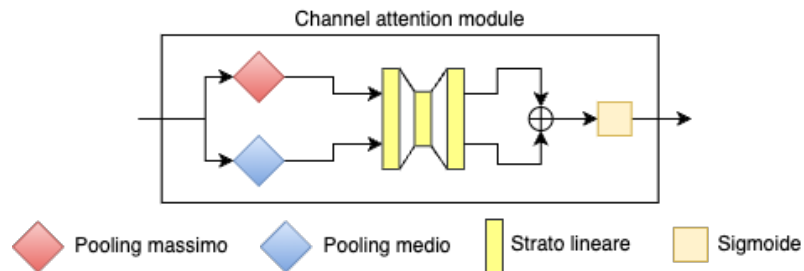


Figura 13: Il modulo di attenzione sui canali, presentato in [5]

Il modulo di attenzione spaziale invece, opera sulla profondità del tensore (i canali) mediante *pooling* massimo e *pooling* medio, andando quindi a generare due matrici, i quali rappresenteranno i valori massimi e i valori medi sui canali, per ciascun elemento nelle coordinate dell'altezza e della larghezza.

Queste matrici vengono concatenate sulla dimensione dei canali e successivamente passate attraverso una convoluzione con **kernel** di dimensione  $3 \times 3$ . Infine l'output di questa operazione viene passato attraverso una sigmoide che genererà quindi la matrice di attenzione sulla spazialità.

Questa è quindi l'architettura:

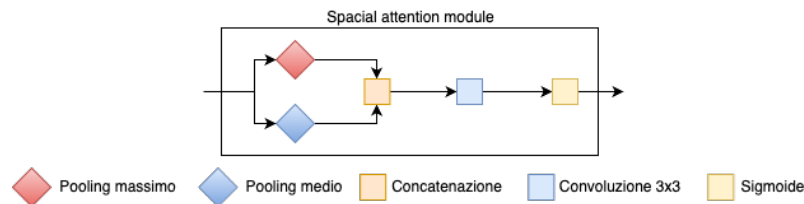


Figura 14: Il modulo di attenzione sulla spazialità, presentato in [5]

Come spesso viene fatto, in [5] viene anche citata la possibilità di aggiungere uno step dove all'attenzione calcolata viene poi sommato il *residual* dell'*input*, al fine di stabilizzare l'apprendimento. Questo lo rende particolarmente interessante per la famiglia delle reti convoluzionali ResNet [11], in quanto fortemente basata su questo meccanismo.

Si può quindi implementare un approccio ResNet, ponendo il blocco *CBAM* subito dopo una convoluzione, per poi sommare il suo *output* all'*output* della convoluzione iniziale.

L'architettura proposta è quindi la seguente:

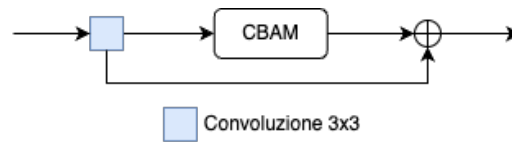


Figura 15: Applicazione del blocco *CBAM* con approccio *ResNet*

## Capitolo 5.

# PyXiNet

PyXiNet (**P**yramidal **Xi** **N**etwork) è una famiglia di modelli che tenta, esplorando le diverse soluzioni e combinazioni di soluzioni trattate fino ad ora, di massimizzare l'efficacia e l'efficienza nel portare a termine il compito di **MDE**.

Il nome suggerisce che sia una rete fortemente basata sia su **PyDNet** che su **XiNet**, infatti il primo modello, in particolare la seconda versione 2, visti le sue ottime performance di base, darà una direzione sullo stile dell'architettura generale di PyXiNet, mentre il secondo cercherà di migliorare l'**encoder** della rete.

Il seguente capitolo andrà quindi a mostrare l'approccio sperimentale e esplorativo condotto, nel testare ipotesi e progressivamente migliorare e raffinare le architetture proposte.

### 5.1. PyXiNet $\alpha$

PyXiNet  $\alpha$  rappresenta il primo approccio all'uso di [3] nell'**encoder** di [2]. In particolare sono stati realizzati due modelli, chiamati  $\alpha$  I e  $\alpha$  II.

L'architetture che è state realizzate sono le seguenti:

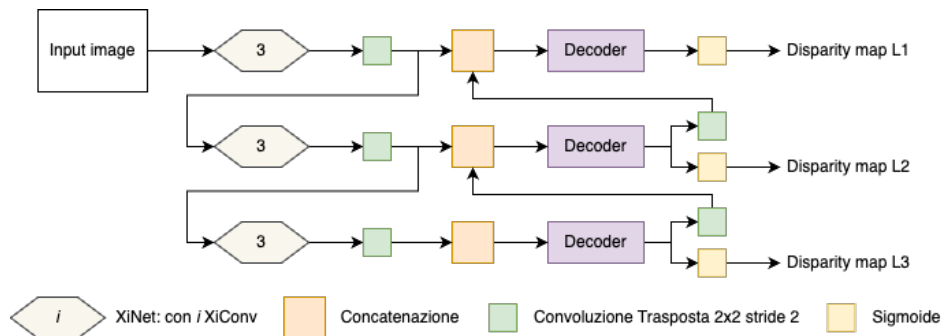


Figura 16: Architettura di PyXiNet  $\alpha$  I

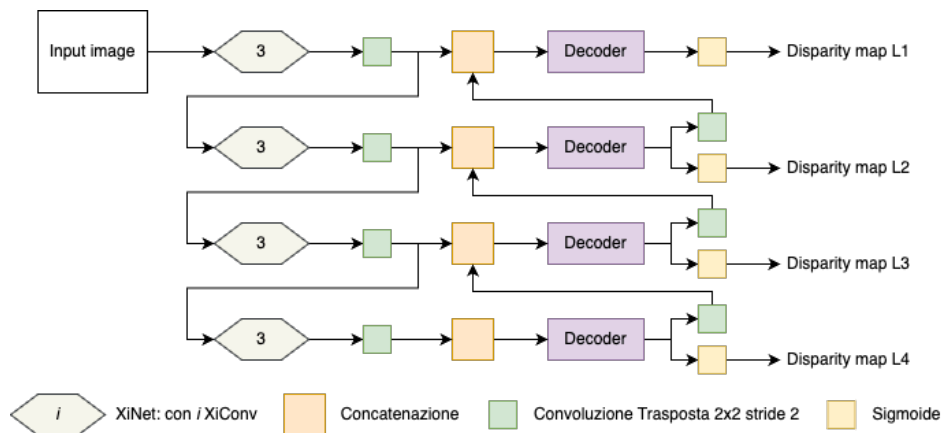


Figura 17: Architettura di PyXiNet  $\alpha$  II

Essendo state allenate assieme, con ciascuna si voleva fornire una risposta a diverse domande:

- [3] se usato come **encoder** porta a buoni risultati?
- A parità di livelli nella piramide, si riesce ad avere una performance migliore o uguale a quella di [2]?
- Se si rimuove un livello alla piramide, come vengono impattate le performance?
- L'uso di [3] come impatta il numero di parametri e il tempo di inferenza?
  - Si vuole far notare che per rispondere a questa domanda, rispetto alle tabelle di valutazione precedenti, sono stati introdotti due nuovi campi: *#parametri*, e *inference time* (il quale viene calcolato su una media del tempo di inferenza su 10 immagini, passate in successione al modello e non in batch).

L'allenamento dei due modelli ha portato ai seguenti risultati:

## 5.2. PyXiNet $\beta$

## 5.3. PyXiNet M

## 5.4. PyXiNet $\beta$ CBAM

Capitolo 6.

# Conclusioni

# Glossario

**Anaconda:** Distribuzione del linguaggio di programmazione Python per la computazione scientifica, che cerca di semplificare la gestione dei pacchetti e la messa in produzione del software. [6.](#), [7.](#), [8.](#), [11.](#)

**CUDA:** Compute Unified Device Architecture è un'architettura hardware per l'elaborazione parallela creata da NVIDIA. [6.](#)

**stereocamera:** Particolari tipi di fotocamere dotate di due obbiettivi paralleli. Questo tipo di fotocamera viene utilizzata per ottenere due immagini della stessa scena a una distanza nota. Queste immagini vengono successivamente introdotte in un algoritmo che, cercando di trovare la corrispondenza dei vari pixel tra le due immagini e conoscendo la distanza tra i due obbiettivi, triangola la profondità di tali pixel. [1.](#)

**LiDAR:** Strumento di telerilevamento che permette di determinare la distanza di una superficie utilizzando un impulso laser. [1.](#)

**MDE:** Monocular depth estimation, è il campo che si occupa di trovare soluzioni in grado di stimare le profondità a partire da una sola immagine in input. [1.](#), [2.](#), [4.](#)

**PyTorch:** Libreria *open source* per l'apprendimento automatico sviluppata da Meta AI. [iii](#), [2.](#), [3.](#), [8.](#), [9.](#), [10.](#), [11.](#), [12.](#), [13.](#), [14.](#)

**Python:** Linguaggio di programmazione interpretato con tipizzazione dinamica e forte, diventato standard per la scrittura di codice orientato al *machine learning* e alla *data science*. [6.](#), [9.](#), [10.](#)

**Tensorflow:** Libreria *open source* per l'apprendimento automatico sviluppata da Google Brain. [2.](#), [3.](#), [9.](#)

**Wandb:** Sistema online per il logging e la gestione dei log mediante *report*, per registrare l'andamento di variabili di interesse, specialmente utilizzato nel campo del *machine learning*. [6.](#), [10.](#)

**Adam:** L'Adaptive Moment Estimation è un ottimizzatore che utilizzando stime adattive del momento di primo e secondo ordine (media e varianza dei gradienti) aggiorna i pesi, migliorando la velocità e stabilità della convergenza durante l'addestramento dei modelli di apprendimento profondo. [5.](#)

**cuDNN:** **cuda** Deep Neural Network è una libreria sviluppata da NVIDIA, che espone una serie di primitive per permettere l'esecuzione di codice accelerata su schede video NVIDIA, specialmente utile per reti neurali profonde. [6.](#)

**decoder:** Rete neurale che ha lo scopo di analizzare un input compresso da un **encoder**, per generare la predizione. [3.](#), [4.](#), [9.](#), [14.](#)

**disparità:** Nel contesto delle fotocamere stereoscopiche, la disparità è la differenza nella posizione orizzontale di un pixel tra due immagini catturate da due fotocamere posizionate ad una certa distanza l'una dall'altra. Questa differenza è causata dalla variazione di angolo con cui ogni fotocamera vede gli oggetti nella scena. [3.](#), [5.](#), [8.](#), [10.](#)

**embedded:** Un dispositivo si dice *embedded* quanto, è progettato per eseguire operazioni di elaborazione e analisi dei dati localmente, vicino alla fonte dei dati stessi, piuttosto che inviarli a un server centrale o al cloud. [1.](#), [3.](#)

**encoder:** Rete neurale che comprime un input in una rappresentazione di dimensioni ridotte, estraendo le caratteristiche essenziali. [3.](#), [4.](#), [9.](#), [14.](#), [22.](#), [23.](#)

**fine tuning:** Processo di adattamento di un modello pre-addestrato su un nuovo dataset specifico per migliorare le sue prestazioni su un compito particolare. [11.](#)

**feature map:** Il risultato delle operazioni del kernel sull'immagine, rappresentando le caratteristiche rilevate come bordi e texture. [4.](#), [5.](#)

**GitHub:** Piattaforma di hosting per il controllo di versione e la collaborazione, basata su Git. [17.](#)

**prodotto di Hadamard:** Date due matrici dalle stesse dimensioni, la matrice risultato dell'operazione avrà le medesime dimensioni dell'input, e il valore di ogni sua cella corrisponderà al prodotto tra i valori delle celle corrispondenti nelle due matrici di input. **15., 19.**

**kernel:** Matrice di pesi utilizzata per filtrare l'immagine, eseguendo operazioni di somma e prodotto su sotto-regioni dell'immagine per estrarre caratteristiche come bordi, texture e dettagli. **3., 4., 15., 18., 20., 26.**

**linter:** Strumento che analizza il codice sorgente per individuare errori, bug, stile non conforme e altri problemi di qualità. **9.**

**natural language processing:** Il Natural Language Processing è un campo dell'intelligenza artificiale che si occupa dell'integrazione tra computer e linguaggio umano. **18.**

**pip:** *Package-management system* scritto in *Python* e usato per installare e gestire pacchetti software. **6.**

**stride:** Il passo con cui il **kernel** si sposta sull'immagine, determinando la distanza tra le posizioni successive del **kernel**. **3., 4., 16.**





# Bibliografia

- [1] M. Poggi, F. Aleotti, F. Tosi, e S. Mattoccia, «Towards real-time unsupervised monocular depth estimation on CPU». IEEE/JRS Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018.
- [2] M. Poggi, F. Tosi, F. Aleotti, e S. Mattoccia, «Real-time Self-Supervised Monocular Depth Estimation Without GPU». IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022.
- [3] A. Alberto, P. Francesco, e F. Elisabetta, «XiNet: Efficient Neural Networks for tinyML». ICCV, 2023.
- [4] Xiaolong Wang, Ross Girshick, Abhinav Gupta, e Kaiming He, «Non-local Neural Networks». CVPR, 2018.
- [5] Sanghyun Woo, Jongchan Park, Joon-Young Lee, e In So Kweon, «CBAM: Convolutional Block Attention Module». ECCV, 2018.
- [6] F. Aleotti, G. Zaccaroni, L. Bartolomei, M. Poggi, F. Tosi, e S. Mattoccia, «Real-time single image depth perception in the wild with handheld devices», vol. 21. 2021.
- [7] Clément Godard, Oisín Mac Aodha, Michael Firman, e Gabriel J. Brostow, «Real-time Self-Supervised Monocular Depth Estimation Without GPU». CVPR, 2017.
- [8] E. David, P. Christian, e F. Rob, «Depth Map Prediction from a Single Image using a Multi-Scale Deep Network». Advances in neural information processing systems, 2014.
- [9] B. Antonio, M. Davide, e M. Massimo, «Efficient Adaptive Ensembling for Image Classification». Expert Systems, Wiley, 2023.
- [10] V. Ashish *et al.*, «Attention Is All You Need». NeurIPS, 2017.
- [11] H. Kaiming, Z. Xiangyu, R. Shaoqing, e S. Jian, «Deep Residual Learning for Image Recognition». CVPR, 2016.