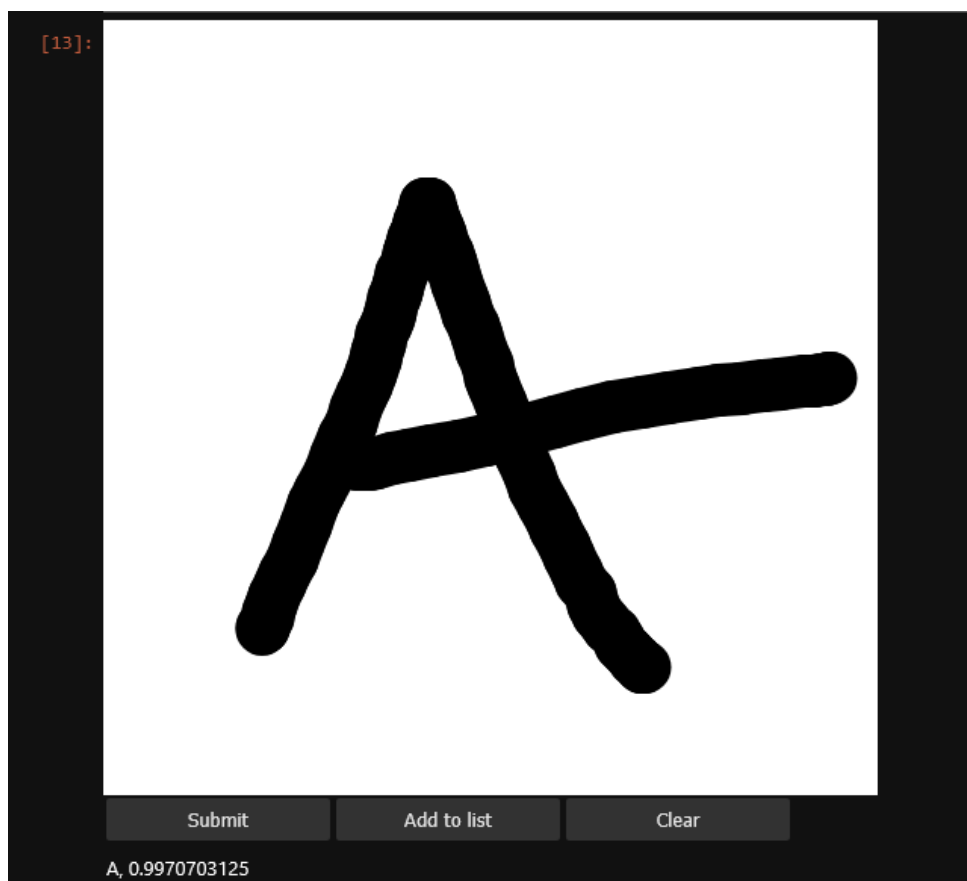


Riconoscimento di caratteri scritti a mano con rete neurale convoluzionale

Christian Pozzoli 29678A

Settembre 2025



Indice

1	Introduzione	3
1.1	Riconoscimento ottico dei caratteri	3
1.2	Obiettivo	3
1.3	Strumenti	3
2	Reti neurali convoluzionali	4
3	Implementazione	4
3.1	Dati	5
3.2	Livelli	6
3.2.1	Covoluzione	8
3.2.2	Pooling	8
3.3	Funzioni di attivazione	10
3.3.1	ReLU	10
3.3.2	Softmax	11
4	Risultati	12
4.1	Step intermedi	12
4.2	Limiti	16
4.2.1	Lettera I	16
4.2.2	Set critico	17
4.2.3	Disposizione spaziale	18

1 Introduzione

1.1 Riconoscimento ottico dei caratteri

Il concetto di riconoscimento dei caratteri, in particolare il riconoscimento ottico, è un campo di ricerca molto attivo nell'intelligenza artificiale, nella visione artificiale e nel riconoscimento dei pattern. Nonostante le sue numerose e diffuse applicazioni in sistemi moderni, il concetto di OCR (optical character recognition) si è sviluppato all'inizio del XX secolo, inizialmente come strumento di accessibilità, soprattutto per supportare le persone ipovedenti. Le prime tecniche di riconoscimento si basavano sull'analisi delle componenti chimiche della stampa, o sullo sfruttamento del contrasto luminoso tra il nero del carattere stampato e la carta di colore chiaro. Tuttavia, il riconoscimento dei caratteri ha sempre dovuto affrontare sfide significative: la varietà di font, la qualità della stampa, le deformazioni dei caratteri e la gestione del rumore rappresentavano ostacoli da superare per garantire una lettura accurata.

Nonostante queste difficoltà, la necessità di leggere e interpretare il testo ha continuato a crescere, portando allo sviluppo di tecniche più sofisticate. Con il tempo, con l'incremento dei contenuti digitali e la conseguente evoluzione delle esigenze, il riconoscimento digitale ha assunto la preminenza, diventando indipendente dalla fonte e sempre denominato OCR. Questo avanzamento ha permesso di digitalizzare documenti scansionati, di interpretare il testo presente in immagini e video, e di automatizzare processi che prima richiedevano l'intervento umano. Pur mantenendo la sigla OCR, la tecnologia è entrata in un ciclo continuo di miglioramento, sfruttando l'intelligenza artificiale e il deep learning per aumentare la precisione e l'affidabilità del riconoscimento.

1.2 Obiettivo

L'obiettivo del progetto è quella di costruire una rete neurale capace di riconoscere i caratteri scritti a mano. È quindi necessario strutturare una rete neurale capace di apprendere da una dataset le caratteristiche delle singole lettere con l'obiettivo di riconoscerle con alta attendibilità anche se di origine esterna all'insieme dei dati utilizzati per l'allenamento. Sarà, quindi, sviluppato anche un tool per permettere a un utente di disegnare un carattere da fare riconoscere alla rete neurale costruita.

1.3 Strumenti

Lo sviluppo della rete neurale è realizzato in Python, utilizzando Jupyter Notebook come ambiente di lavoro interattivo per gestire in modo ordinato le fasi di analisi, sperimentazione ed esecuzione del codice, oltre alla visualizzazione dei risultati.

Le librerie NumPy e Pandas sono impiegate per la gestione e l'elaborazione efficiente dei dati, mentre Matplotlib supporta la creazione di grafici e visualizzazioni utili all'analisi delle prestazioni del modello. La libreria OpenCV è utilizzata per il pre-processamento e la manipolazione delle immagini, operazioni fondamentali per l'addestramento. La costruzione e l'addestramento della rete neurale sono realizzati con TensorFlow e Keras come framework principali. Infine, Tkinter e ipycanvas permettono lo sviluppo di un'in-

terfaccia grafica semplice, attraverso cui l'utente può disegnare un carattere e sottoporlo direttamente al modello per il riconoscimento.

2 Reti neurali convoluzionali

Con l'obiettivo di sviluppare un agente capace di riconoscere caratteri scritti, ci si confronta con il problema dell'elaborazione di immagini, in quanto il dato da classificare si presenta come una matrice di pixel (in questo caso in scala di grigi). Una tipologia di rete neurale particolarmente adatta a riconoscere elementi a partire da una rappresentazione visiva è la rete neurale convoluzionale (CNN), la cui architettura si ispira alla corteccia visiva degli animali in cui i neuroni sono organizzati in modo da rispondere a regioni parzialmente sovrapposte che compongono l'intero campo visivo. Nel mondo biologico, il modo in cui i neuroni reagiscono e si dispongono lungo il campo visivo corrisponde, in termini matematici, all'operazione di convoluzione. Tale operazione, ampiamente utilizzata anche nella teoria dei segnali, consiste nel calcolare l'integrale del prodotto di due funzioni, dopo averne riflessa una rispetto all'asse y e traslata. Nel caso di un'immagine, la convoluzione viene applicata a ciascun pixel come prodotto scalare tra una matrice, chiamata filtro (o kernel), e la porzione dell'immagine su cui essa si sovrappone (nel deep learning si utilizza spesso una variante chiamata cross-correlation, che evita il passaggio di riflessione). Questa operazione permette alla rete neurale di estrarre delle *feature* dall'immagine, in modo da poter riconoscere i contenuti e categorizzare i dati. I filtri rappresentano quindi i pesi di un layer convoluzionale e vengono ottimizzati durante l'addestramento per catturare le caratteristiche più utili al compito. Solitamente i layer convoluzionali sono intervallati da layer di pooling che riducono la dimensione spaziale dell'immagine, aggregando regioni adiacenti (con, ad esempio, logice di media o di massimo). Questa riduzione abbassa il costo computazionale dei livelli successivi, riduce il rischio di overfitting e aumenta il campo recettivo della rete. Nei primi livelli vengono individuate *feature* locali e specifiche (bordi, texture), mentre con il pooling e la progressione degli strati la rete impara rappresentazioni sempre più astratte e globali, capaci di riconoscere le strutture e i componenti principali del soggetto nell'immagine.

3 Implementazione

Conoscendo il concetto di rete neurale convoluzionale, è possibile progettare e realizzare una rete profonda (deep network) capace di svolgere il compito di riconoscimento descritto in precedenza. La costruzione di una rete di questo tipo non si limita alla definizione della sua architettura generale, ma richiede anche una serie di decisioni riguardanti sia la scelta dei parametri e degli iperparametri, sia le modalità di implementazione e ottimizzazione del modello. Gli iperparametri comprendono, ad esempio, il numero di strati convoluzionali e completamente connessi, la dimensione dei filtri (kernel size), il passo di convoluzione (stride), la funzione di attivazione, la dimensione dei batch, la velocità di apprendimento (learning rate) e le tecniche di regolarizzazione. Ognuno di questi elementi può influenzare in maniera significativa non solo l'accuratezza finale del modello, ma anche il tempo di addestramento, l'uso delle risorse di calcolo e la capacità della rete di generalizzare su dati non visti. Nella fase di sviluppo è quindi fondamentale bilanciare

prestazioni ed efficienza, evitando di progettare un'architettura eccessivamente complessa che possa portare a problemi di overfitting, oppure troppo semplice da non riuscire a catturare le caratteristiche rilevanti dei dati. Nei paragrafi seguenti verranno illustrate le scelte progettuali adottate.

3.1 Dati

Per addestrare la rete neurale è necessario disporre di una grande quantità di dati; in questo caso si tratta di più di 370000 lettere maiuscole scritte a mano, con differenti tratti e stili, in modo da addestrare la rete a riconoscere i caratteri dalle forme, dalle curve e dai tratti che li compongono, piuttosto che dai singoli pixel occupati. Il dataset è in formato CSV ed è composto da 372450 righe (numero di lettere) e da 785 colonne. La prima colonna rappresenta l'etichetta (la posizione della lettera nell'alfabeto), con valori compresi tra 0 e 25; le successive colonne contengono l'elenco dei pixel, cioè un elenco di 784 valori da 0 a 255 che rappresentano un'immagine di dimensione 28×28 in scala di grigi. Per poter utilizzare questi dati è necessario modificare la loro struttura in memoria in base alle esigenze.

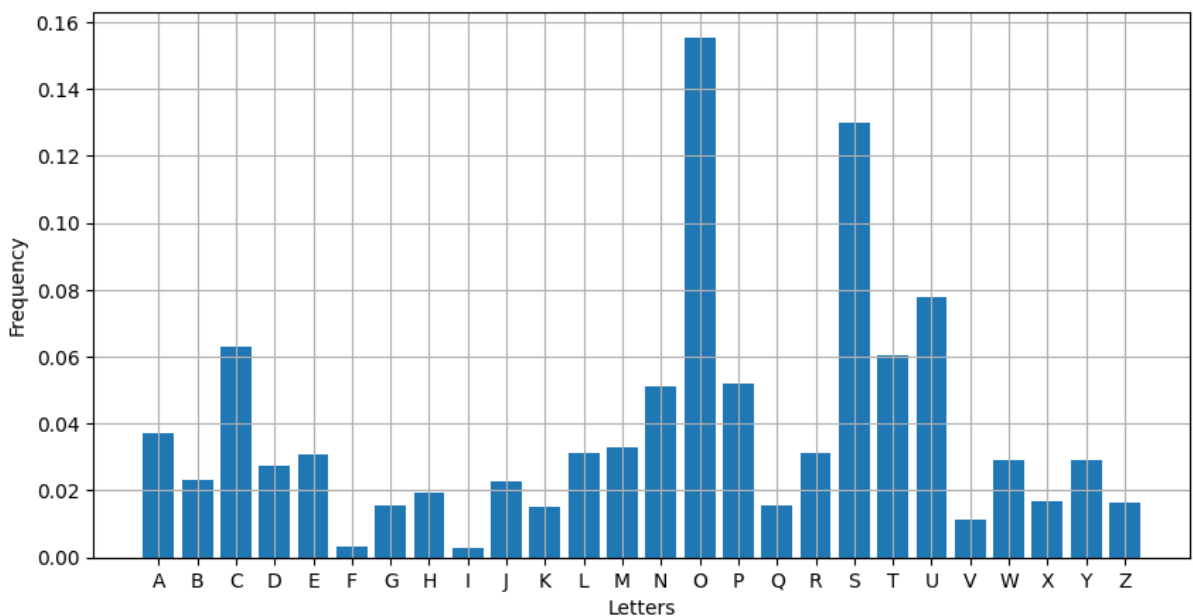


Figura 1: Frequenza delle lettere nel dataset

Come prima operazione è utile aggiungere una colonna iniziale che rappresenti il numero progressivo del dato, in modo da poterlo usare come `id` del singolo campione e risalire così all'immagine corrispondente. Questo risulta molto utile, ad esempio, quando si vuole individuare uno specifico dato critico che la rete non è riuscita a riconoscere. Questo passaggio è necessario in quanto la prossima trasformazione è la randomizzazione dell'intero dataset. Inizialmente i dati sono ordinati per etichetta dalla A alla Z; utilizzare i dati in questo ordine porterebbe la rete a:

- incorrere in overfitting sulle singole lettere anziché imparare pattern generali;

- apprendere più lentamente;
- avere difficoltà nella ricerca di un minimo globale;
- dimenticare le prime lettere apprese.

Pertanto, si randomizza prima l'ordine delle righe e successivamente si separano gli indici e le etichette dal dataset vero e proprio. Oltre a questa suddivisione in colonne, la fase di addestramento richiede anche una suddivisione in righe, con l'obiettivo di ottenere due insiemi di dati: i dati di training, utilizzati per l'addestramento, e i dati di test, utilizzati come controllo sull'andamento dell'errore per evitare overfitting. Una percentuale comune per questo tipo di suddivisione è 80% di dati training e 20% dati di test. Per la rappresentazione del dato e l'elaborazione da parte della rete, anziché un singolo vettore, è necessario disporre i dati secondo una matrice 28×28 .

Infine, l'output della rete sarà una probabilità, o meglio, un vettore in cui è contenuta la probabilità che il carattere da riconoscere sia quello con l'indice corrispondente alla posizione del dato. Questo tipo di rappresentazione è detta one-hot, il vettore contenente l'etichetta della lettera corrispondente sarà quindi trasformato in un vettore dove ogni elemento è un vettore di zeri con valore 1 all'indice dell'etichetta stessa. Con i dati organizzati in questo modo è possibile valutare la struttura della rete e le sue componenti.

Listing 1: Codice per la rappresentazione one-hot

```

1 train_label_OH = np.zeros(shape=(train_label.shape[0], 26))
2 test_label_OH = np.zeros(shape=(test_label.shape[0], 26))
3 for idx, n in enumerate(train_label):
4     train_label_OH[idx, int(n)] = 1
5 for idx, n in enumerate(test_label):
6     test_label_OH[idx, int(n)] = 1

```

3.2 Livelli

Le capacità di una rete neurale dipendono in gran parte dai tipi di livelli che la compongono, così come dal loro ordine e dalla loro interazione. Nel caso del riconoscimento di immagini, si utilizza una rete convoluzionale (Convolutional Neural Network, CNN), il cui livello principale è quello di convoluzione. Come già accennato nella sezione 2 (Reti neurali convoluzionali), la struttura base di una CNN è costituita dall'alternanza di livelli di convoluzione e livelli di pooling. Questi livelli rappresentano il fulcro della rete e le conferiscono capacità di "visione", ma non sono sufficienti per costituire una rete completa: i filtri sviluppati estraggono *feature* dalle immagini, che vengono poi elaborate da livelli completamente connessi, i quali calcolano le probabilità associate ai singoli caratteri. Per fare in modo che gli ultimi strati possano elaborare anch'essi le informazioni, è necessario linearizzare l'output dell'ultimo strato di pooling tramite un livello apposito, quindi passare da una rappresentazione matriciale a una vettoriale.

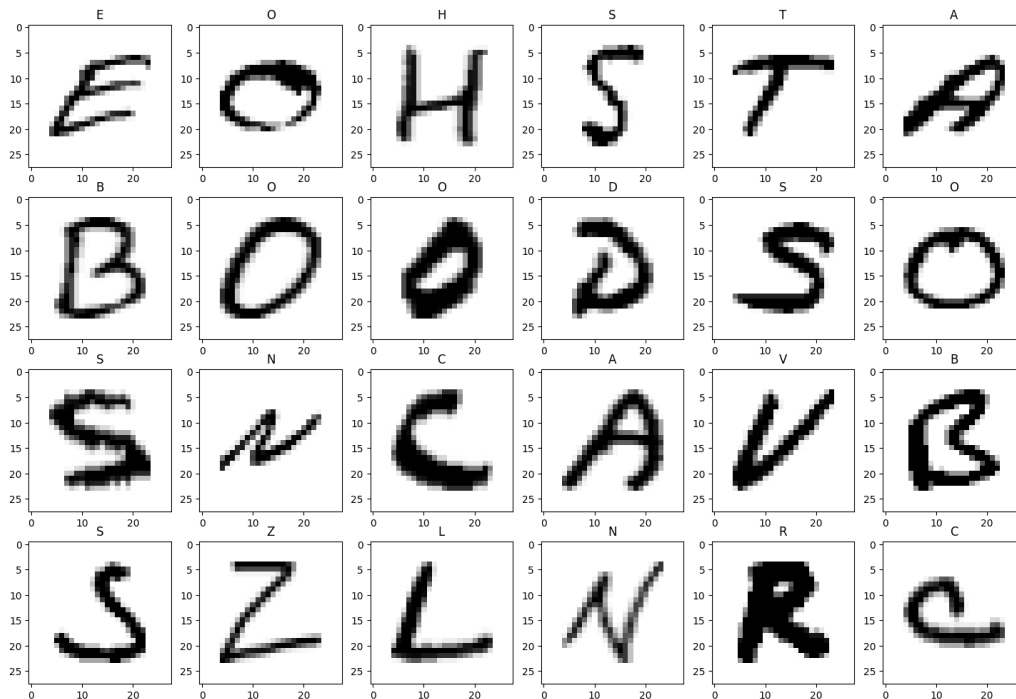
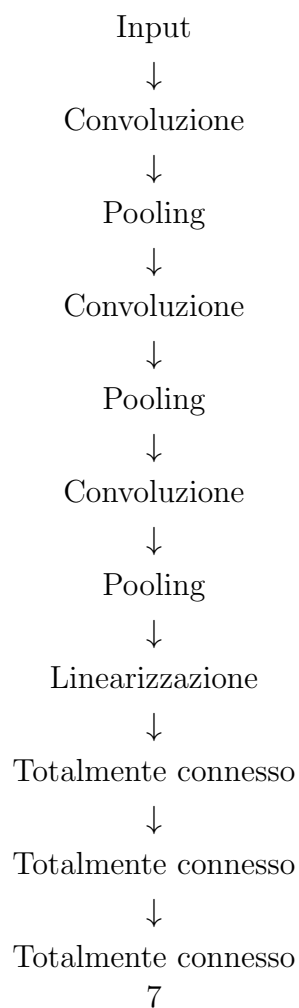


Figura 2: Visualizzazione di alcune lettere

La struttura della rete è quindi la seguente:



Anche intuitivamente è facile dire che un solo livello per tipo non sarebbe abbastanza per permettere alla rete di sviluppare le capacità di riconoscimento richieste. Ogni tipo di livello è, quindi, ripetuto tre volte, con convoluzione e pooling alternati e i livelli finali che elaborano le *feature* estratte.

3.2.1 Covoluzione

I tre livelli dichiarati nella struttura della rete non sono identici, ma si differenziano per numero di filtri e per ruolo nell'estrazione delle *feature*, contribuendo in maniera complementare alla capacità di riconoscimento e alla generalizzazione, anche grazie all'azione dei livelli di pooling.

Il primo livello convoluzionale elabora l'input con 32 filtri (kernel) alla piena risoluzione, rilevando pattern locali come bordi, linee e texture semplici. Il secondo livello, con 64 filtri, opera su un'immagine a risoluzione ridotta a causa del pooling precedente: ciò consente di rilevare combinazioni di *feature* e pattern più complessi, riducendo la dipendenza dalla loro posizione esatta nell'immagine. Infine, il terzo livello porta il numero di filtri a 128, operando su una rappresentazione ulteriormente ridotta e focalizzandosi su caratteristiche di alto livello, come forme, parti di oggetti o strutture astratte. Questa progressione è un principio chiave delle reti convoluzionali, poiché consente di mantenere un bilanciamento tra costo computazionale e capacità di rappresentazione.

3.2.2 Pooling

Come descritto in precedenza, il pooling è un'operazione che aggrega una regione di pixel in una regione più piccola ed equivale a un'operazione di sottocampionamento. Solitamente le regioni considerate hanno dimensioni 2×2 e vengono fatte scorrere sull'immagine con stride pari a 2, in modo da valutare ciascun pixel una sola volta. In questo modo, a ogni livello di pooling la risoluzione degli input viene dimezzata.

L'aggregazione delle regioni può avvenire secondo logiche diverse: i 4 pixel possono essere combinati prendendo il valore massimo (max pooling) oppure calcolandone la media (average pooling). I risultati differiscono leggermente: il max pooling tende a enfatizzare le *feature* più marcate e significative, mentre l'average pooling produce rappresentazioni più morbide e diffuse, utili per il riconoscimento di pattern meno netti. I due approcci possono anche essere combinati per sfruttarne i rispettivi vantaggi: in questo caso può risultare utile utilizzare un metodo nel primo livello di pooling e l'altro nei successivi.

In questo contesto è possibile evidenziare vantaggi e svantaggi dei singoli approcci, ma risulta meno immediato stabilire a livello teorico quale dei metodi garantisca le prestazioni migliori in termini di accuratezza del modello. Per questo è necessario procedere con una valutazione empirica. I modelli messi a confronto sono quattro:

- Modello con solo max pooling
- Modello con solo average pooling
- Modello con il primo livello di max pooling e i successivi di average pooling

- Modello con il primo livello di average pooling e i successivi di max pooling

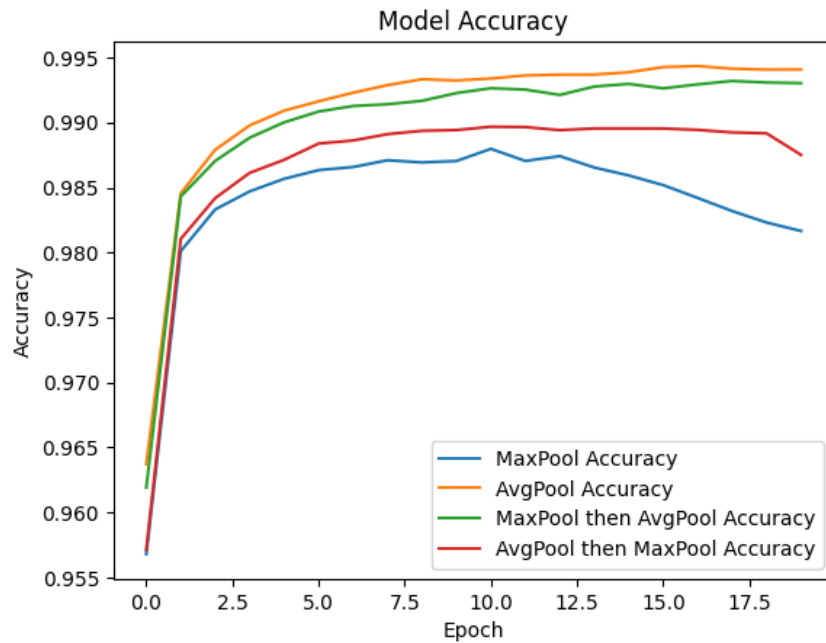


Figura 3: Confronto di accuratezza tra i metodi di pooling

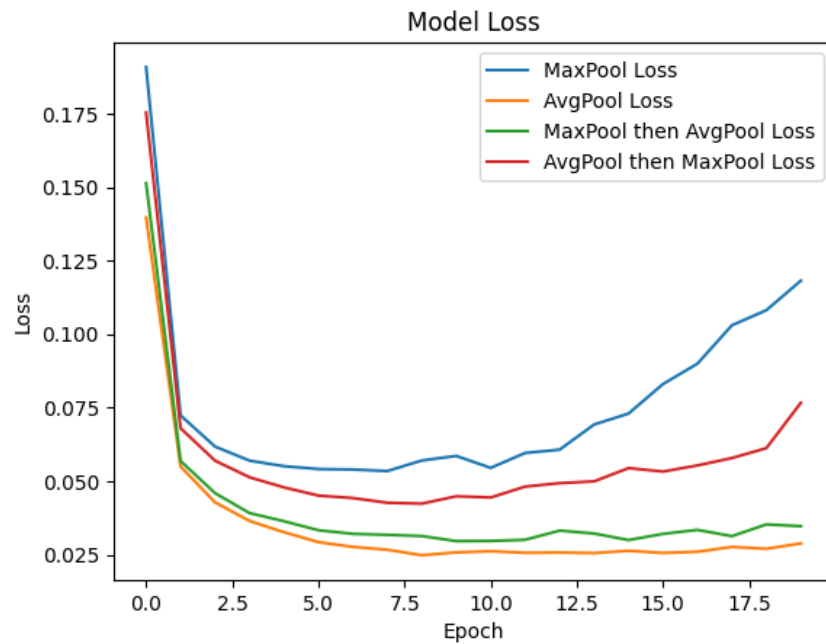


Figura 4: Confronto della loss tra i metodi di pooling

I risultati mostrati in figura 3 evidenziano come l'average pooling raggiunga un'accuratezza superiore rispetto agli altri metodi, mantenendosi stabile con l'aumentare delle epoche.

Applicare il max pooling al primo livello e l'average pooling ai successivi porta a prestazioni simili, seppur leggermente inferiori, rispetto all'uso esclusivo dell'average pooling. Si può quindi affermare sperimentalmente che l'average pooling abbia un impatto maggiore nei livelli intermedi e finali della rete. Al contrario, un modello basato esclusivamente su max pooling presenta non solo una perdita (*loss*) più elevata, ma anche una tendenza all'aumento di essa con l'avanzare delle epoche. Questa comparazione permette inoltre di identificare il numero di epoche più adeguato per l'addestramento del modello: si osserva infatti che, oltre la decima epoca, l'accuratezza tende generalmente a diminuire o stabilizzarsi, mentre la *loss* ad aumentare.

È bene precisare che i risultati ottenuti non sono assoluti e sono influenzati da diversi fattori: dipendono, infatti, oltre che dal dataset utilizzato, da come vengono inizializzati i pesi e da come sono distribuiti i dati di training e testing. Nel caso specifico, quindi, si preferisce utilizzare una CNN con livelli di average pool.

3.3 Funzioni di attivazione

Le funzioni di attivazione costituiscono una parte fondamentale delle reti neurali, poiché determinano l'uscita di ciascun neurone in base alla combinazione lineare degli ingressi pesati. La loro applicazione introduce non linearità nel modello, consentendo alla rete di apprendere e rappresentare in maniera più efficace relazioni complesse tra dati di input e corrispondenti output, migliorando così la capacità di generalizzazione del sistema. Al contrario, l'utilizzo di sole funzioni lineari ridurrebbe la rete a una semplice trasformazione lineare degli input, priva della possibilità di descrivere legami complessi e non linearmente descrivibili.

3.3.1 ReLU

La funzione di attivazione *ReLU* (Rectified Linear Unit) è ampiamente utilizzata per la sua semplicità ed efficienza.

Essa corrisponde matematicamente alla funzione:

$$\begin{aligned} \text{ReLU}(x) &= \max(0, x) \\ &\downarrow \\ \text{ReLU}(x) &= \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq 0 \\ x & \text{se } x > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

ReLU è quindi definita da due funzioni lineari ($y = 0$ e $y = x$), rispettivamente per valori negativi e positivi dell'input. Nonostante la sua semplicità, essa introduce non linearità nel modello e permette alla rete di mantenere solo valori positivi, scartando quelli nulli o negativi. Nel contesto delle reti convoluzionali, questa proprietà consente di filtrare i pattern non utili al riconoscimento di una specifica caratteristica.

ReLU viene utilizzata in tutti i livelli convoluzionali e completamente connessi, fatta eccezione per l'ultimo livello che svolge il ruolo di output.

3.3.2 Softmax

L'output della rete neurale, che è di classificazione, deve rappresentare una distribuzione di probabilità, così da poter identificare la classe predetta come quella con probabilità più alta. A questo scopo, l'ultimo livello della rete applica comunemente la funzione di attivazione *Softmax*.

In termini concettuali, Softmax calcola una frequenza relativa facendo uso della funzione esponenziale:

$$\text{Softmax}(x_i) = \frac{e^{x_i}}{\sum_j e^{x_j}}$$

L'uso della funzione esponenziale consente di:

- garantire che la somma delle probabilità sia pari a 1, realizzando una distribuzione valida;
- ottenere valori sempre positivi;
- amplificare le differenze tra i valori x_i , evitando probabilità troppo simili tra loro ed enfatizzando la classe più probabile, rendendo così la decisione più netta.

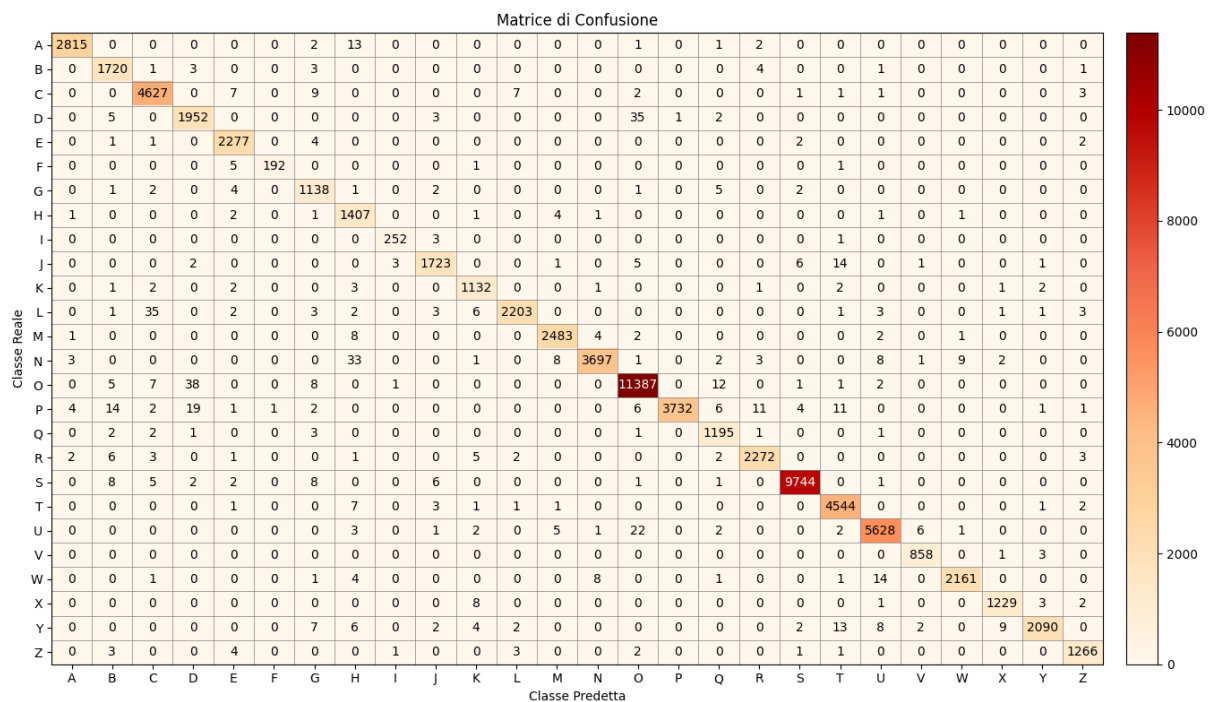


Figura 5: Matrice di confusione

4 Risultati

Una rete addestrata come descritto, utilizzando livelli di *average pooling*, raggiunge un'accuratezza del 99.16096% alla decima epoca, con una *loss* pari a 0.04025. Come è possibile vedere dalla matrice di confusione della figura 5, sull'intero insieme di test commette 625 errori su 74490 campioni (0.83904%) ed è inoltre in grado di riconoscere caratteri disegnati direttamente dall'utente. Attraverso l'utilizzo del mouse, è infatti possibile disegnare un carattere che viene successivamente ridimensionato a una risoluzione di 28×28 tramite sottocampionamento con interpolazione bilineare e fornito come input alla rete neurale per il riconoscimento. Grazie all'elevato numero e alla varietà dei dati di addestramento, la rete riesce a riconoscere caratteri scritti con diversi stili, gestendo anche ambiguità con un alto grado di accuratezza. Come si osserva in figura 6, la rete mantiene buone prestazioni anche su lettere decentrate, ambigue o con tratti aperti e non ben definiti.

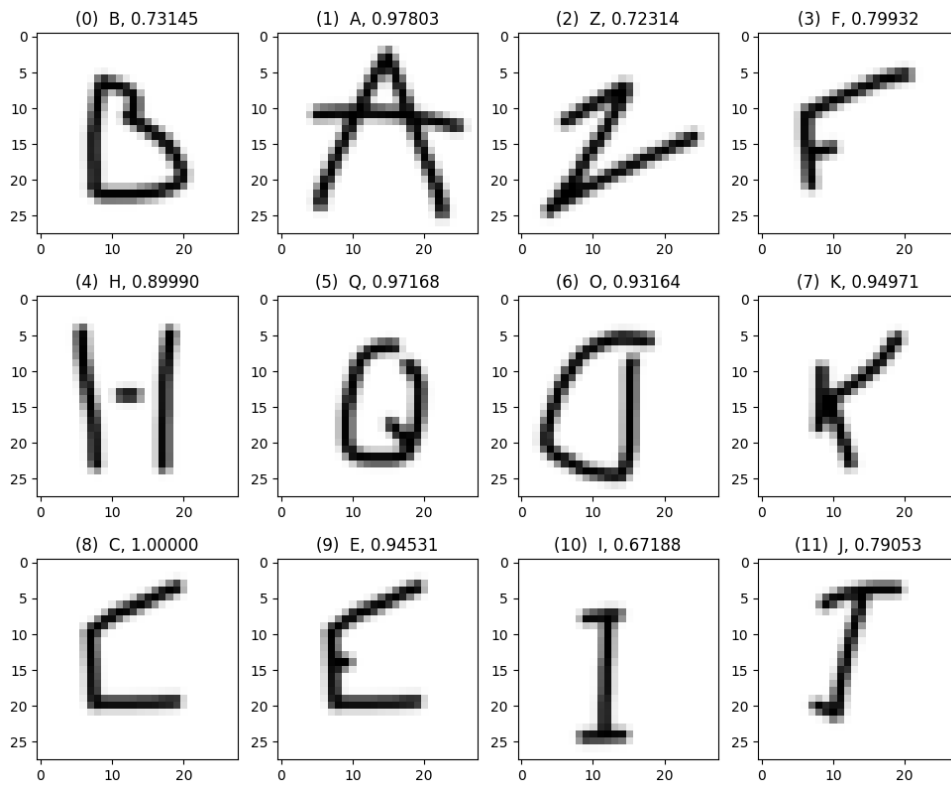


Figura 6: Alcune lettere disegnate a mano riconosciute dalla rete neurale

4.1 Step intermedi

È possibile visualizzare gli step intermedi del riconoscimento effettuato dalla rete, riuscendo a identificare i pattern estratti più importanti e comprendere meglio il "ragionamento" della rete durante il riconoscimento. Un caso particolare nella figura 6 è quello delle lettere 8 (C) e 9 (E) che hanno la stessa base a differenza del piccolo tratto orizzontale che distingue la C dalla E. Quel piccolo tratto è sufficiente a distinguere le due lettere, quindi durante l'addestramento la rete è riuscita a definire una buona scelta di estrazione di *feature* per determinare la differenza tra i due caratteri.

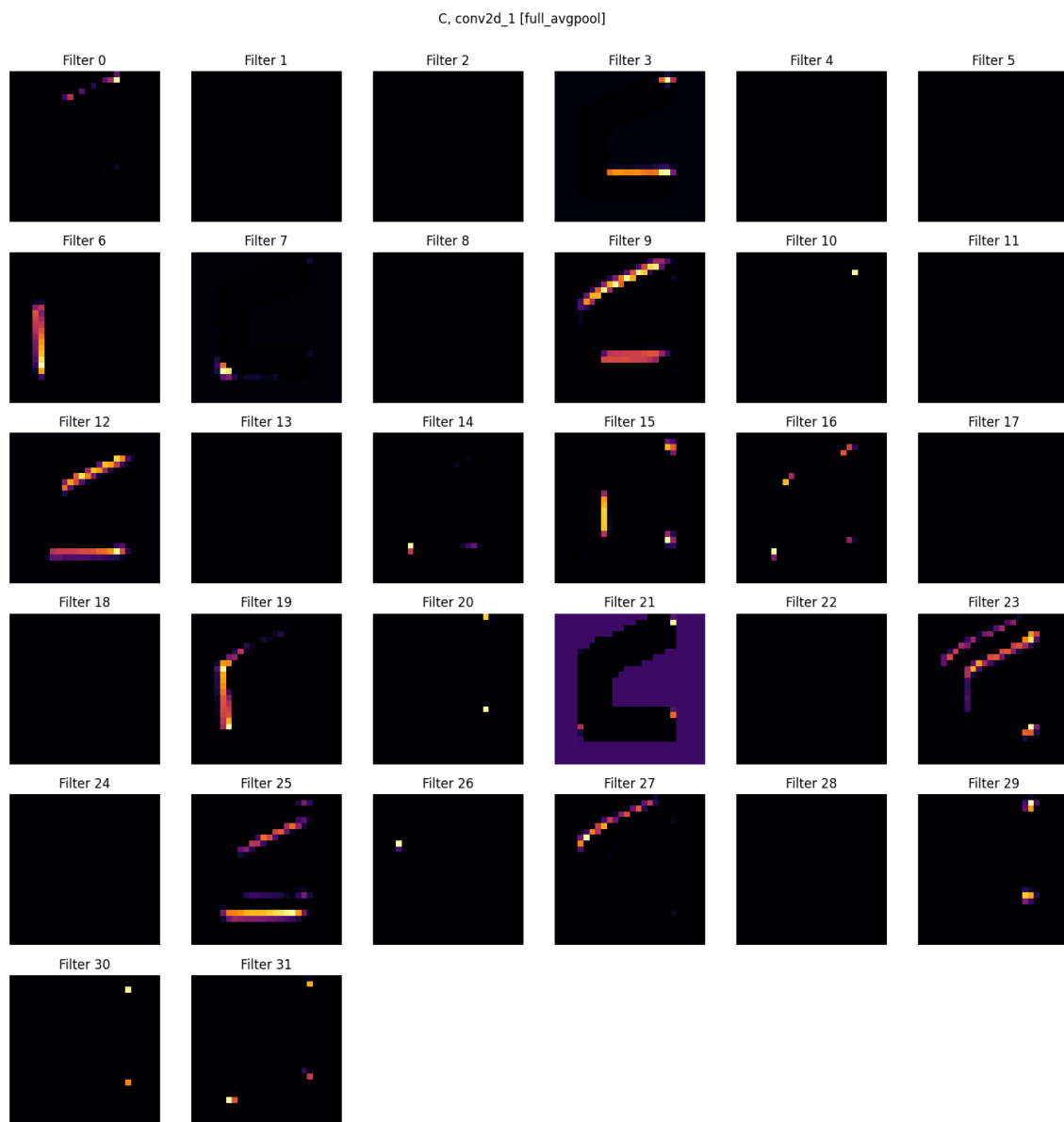


Figura 7: Risultati dei filtri applicati dal primo layer di convoluzione alla lettera C

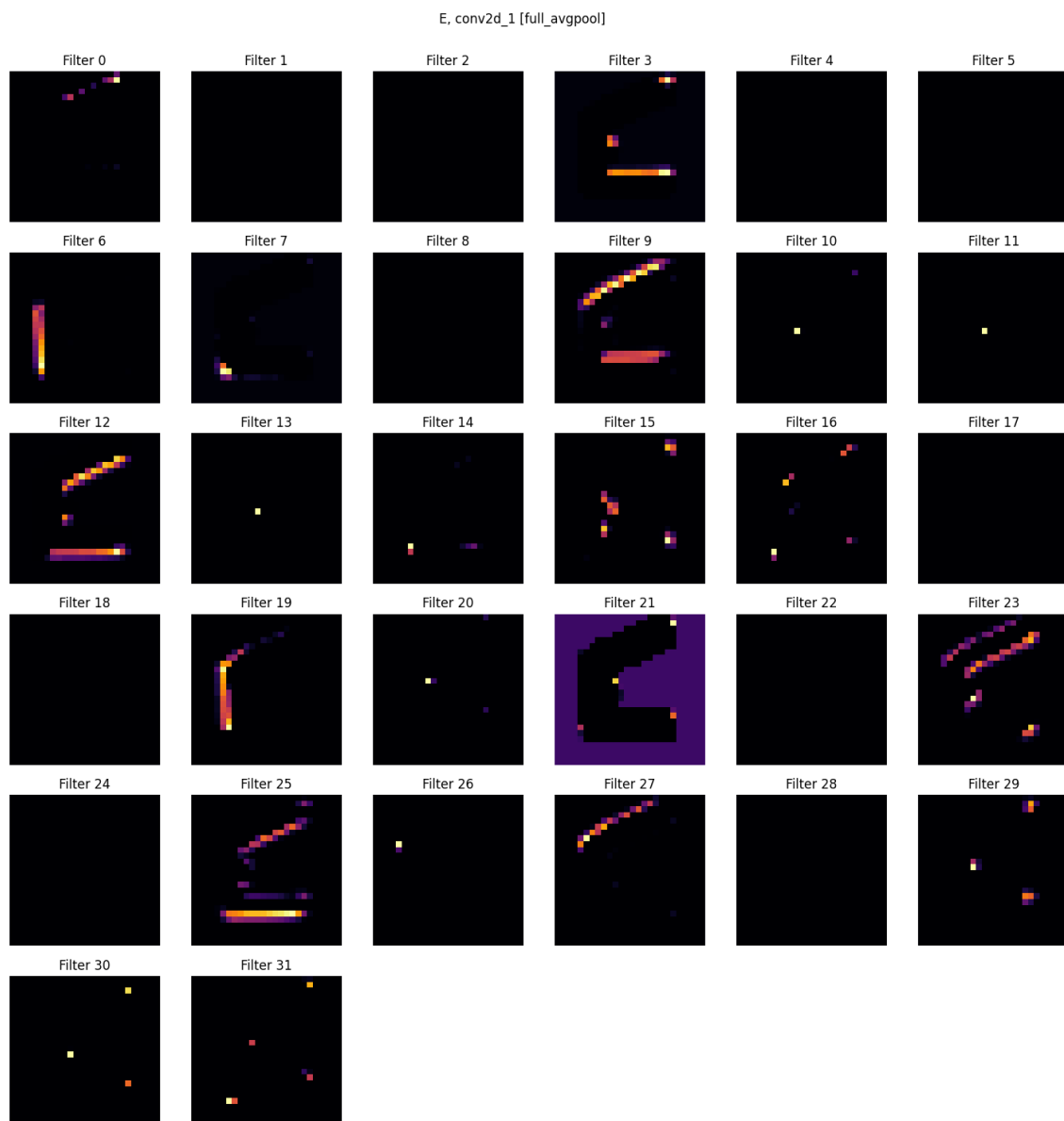


Figura 8: Risultati dei filtri applicati dal primo layer di convoluzione alla lettera E

Nelle figure 7 e 8 è possibile visualizzare i risultati delle applicazioni dei filtri che vengono usati nel primo livello di convoluzione. Come è possibile notare, anche se la differenza tra i due disegni è minima (approssimativamente la differenza è in una regione di 3×3 pixel), molti filtri estraggono quel tratto orizzontale rendendolo molto visibile e determinante per la scelta del carattere più probabile. Alcuni di questi filtri sono il numero 3, 12, 15 e 23 che evidenziano il tratto in discussione. Nei livelli successivi, con l'aumento del numero di filtri, le *feature* vengono ulteriormente elaborate e combinate per raffinare il processo di riconoscimento. Questi risultati intermedi mostrano anche come la rete riesca a individuare pattern orizzontali (es. filtri 3 e 25), verticali (es. 6, 15 e 19) e diagonali (es. 23 e 27), in linea con quanto discusso nei capitoli precedenti. Tali *feature* contribuiscono

a scomporre l'informazione visiva in elementi essenziali che, combinati, consentono il riconoscimento del carattere.

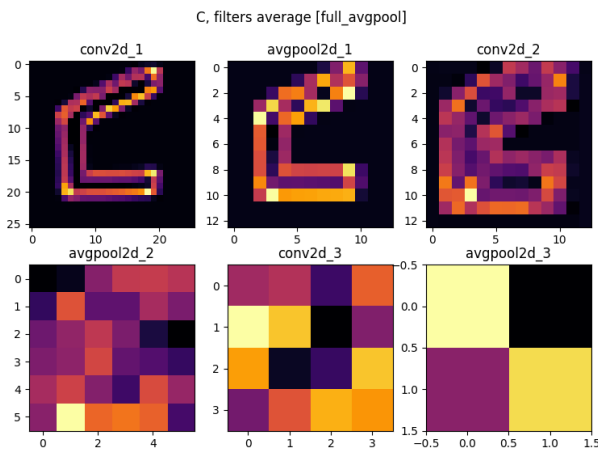


Figura 9: Media dei risultati dei filtri applicati dai layer alla lettera C

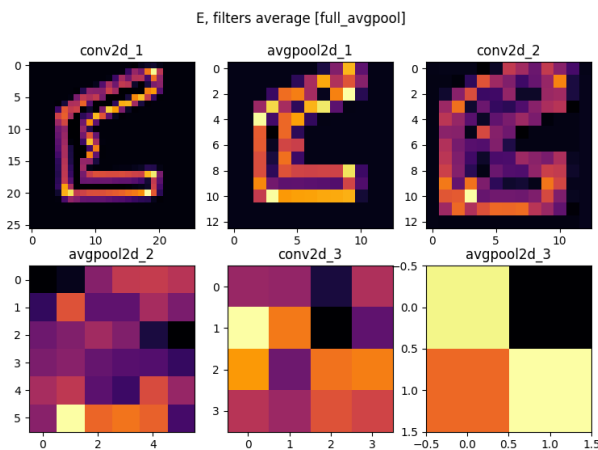


Figura 10: Media dei risultati dei filtri applicati dai layer alla lettera E

Un'ulteriore rappresentazione utile è data dalla media dei risultati dei vari filtri per ogni livello, come si può vedere nelle figure 9 e 10. I grafici offrono un'idea visiva di come si concentrano i filtri nei vari livelli e di come il pooling agisce sui risultati di convoluzione. Soprattutto nei primi livelli è evidente come la rete si focalizzi sui contorni della lettera per determinarne la forma, mentre dopo il secondo layer di convoluzione la visualizzazione perde di significato in quanto i filtri aumentano esponenzialmente di numero e la risoluzione diminuisce, ma è comunque interessante notare come la piccola differenza nel tratto orizzontale negli input porti a una grande differenza nell'ultimo layer. È bene ribadire che queste ultime figure non sono pienamente rappresentative, poiché i filtri hanno un significato in quanto pesati individualmente, non come media, tuttavia è comunque un utile strumento di intuizione visiva di come l'informazione viene elaborata lungo la rete.

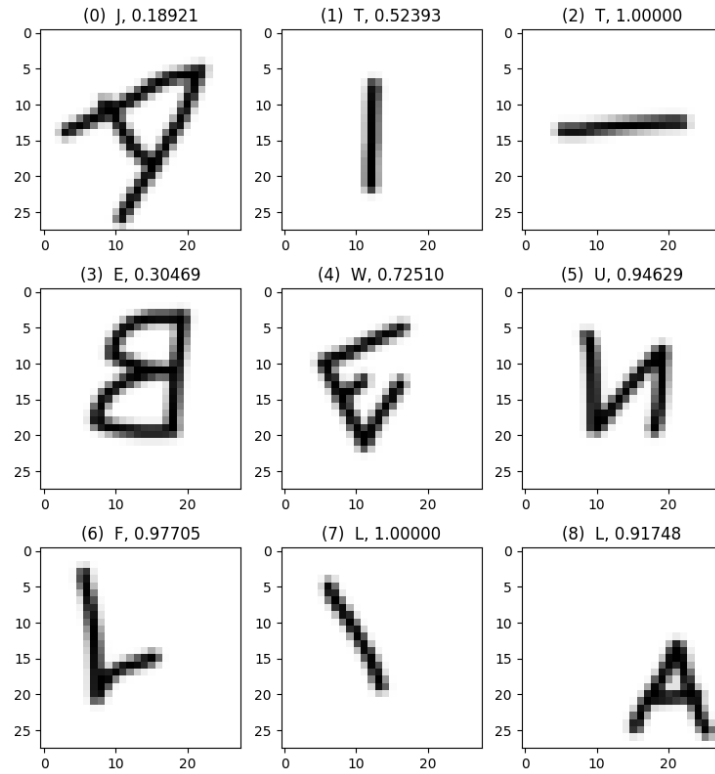


Figura 11: Alcune lettere disegnate a mano non riconosciute correttamente

4.2 Limiti

Come discusso, la rete risultante ha buone capacità di riconoscimento dei caratteri, ma presenta comunque delle criticità e dei limiti che sono legati alla struttura della rete o addirittura al bilanciamento del dataset. Come si può notare in figura 11, la rete sbaglia in situazione non ordinarie o non rappresentate dal dataset utilizzato.

4.2.1 Lettera I

Nel caso 1 e 7, è evidente che la rete è in difficoltà nel riconoscimento delle I. Questo è dato in parte dalla particolarità del carattere che è rappresentato (talvolta) da un singolo segno verticale, che è una feature estratta da molti altri caratteri, quindi la rete ha molte lettere con cui confrontare il pattern. Proprio in questo risiede il secondo problema, l'addestramento è effettuato su un piccolo numero di *sample* di I, come si può notare dal grafico di distribuzione delle lettere in figura 1. La rete, alla presenza di una feature di un pattern verticale, sarà quindi portata più probabilmente a riconoscere quella stessa feature appartenente a un carattere più frequente nel dataset. La scelta di mantenere un numero basso di I, però, è proprio giustificata dalla particolarità grafica della lettera che potrebbe penalizzare il riconoscimento di altri caratteri.

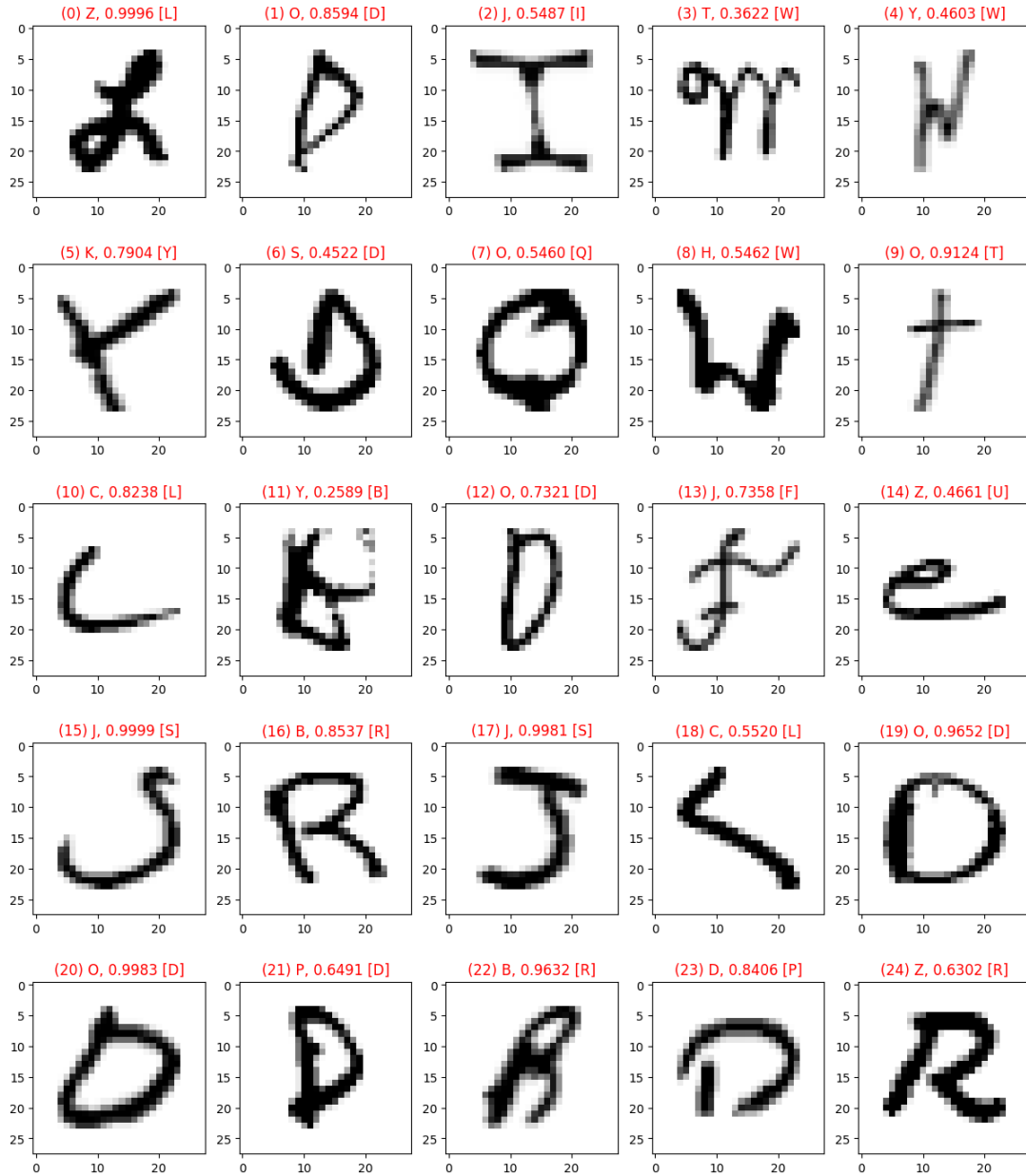


Figura 12: Alcuni riconoscimenti sbagliati dal modello solo average pooling sul set critico costruito. Tra parentesi quadre il carattere corretto

4.2.2 Set critico

Nel corso di vari addestramenti e nella comparazione dei metodi di pooling (capitolo 3.2.2) è stato possibile raccogliere dal dataset un insieme di 3847 campioni critici, cioè caratteri che mettono in difficoltà il modello e che lo inducono all'errore, soprattutto se addestrato con un basso numero di epoche. Il set critico è stato costruito raccogliendo empiricamente gli indici dei caratteri non riconosciuti correttamente da almeno un modello in una delle fasi di addestramento nel tentativo di analizzare i motivi di eventuali errori della rete e testarne il miglioramento nel corso dello sviluppo. Dunque, gli errori commessi variano da addestramento ad addestramento e dipendono anche dalla divisione del set di train e

di test (effettuata casualmente). Tra i modelli di pooling, quelli che commettono meno errori sul set critico sono il modello solo average pooling e il modello average poi max pooling, rispettivamente 31 e 42 errori su tutto il dataset critico, mentre per il modello solo max pooling e il modello max poi average rispettivamente 44 e 56, a conferma di quanto discusso nel capitolo 3.2.2. I risultati specifici riportati, quindi, delineano un buon comportamento della rete, indipendentemente dalla tecnica di pooling utilizzata, con una percentuale di errore tra 0.81% e 1.46%. È comunque interessante analizzare i motivi delle difficoltà della rete nel riconoscimento di questi caratteri.

Molti degli errori commessi dai modelli sono in comune e delineano delle difficoltà della rete a riconoscere alcuni pattern incerti e meno definiti. Nella figura 12 è rappresentata una buona parte del set critico ed è possibile identificare chiaramente alcuni caratteri che sono difficili da interpretare anche per un umano, come ad esempio la figura 14 (lettera U) che potrebbe essere confusa da un occhio umano con una lettera E minuscola (nonostante le lettere minuscole non facciano parte dello studio in questione, quindi non possono venire riconosciute dalla rete). Lo stile di scrittura, diverso dal maiuscolo, è infatti un fattore importante di errore, come si può vedere negli esempi 0, 3, 9 e 13 che rappresentano delle lettere in corsivo o in minuscolo e che, quindi, possono essere considerati elementi di eccezione rispetto al dataset di addestramento, da considerarsi come un rumore sui dati. L'esempio 11 (lettera B riconosciuta come Y) è, invece, da considerarsi un errore dovuto alla poca chiarezza e leggibilità del carattere, in quanto la porzione superiore della lettera è tratteggiata e accennata, e induce la rete neurale a perdere l'informazione relativa a quel tratto. Più in generale gli altri errori sono dovuti a tratti poco omogenei che definiscono un carattere con alcuni tratti lunghi e altri corti nel corso della scrittura dello stesso carattere, che possono indurre la rete a confonderli con il pattern di altre lettere (esempio 10 e 15) e disposizioni spaziali particolari come i caratteri 5 e 18 come si discute nel capitolo 4.2.3.

Nonostante questi caratteri singolarmente mettano in difficoltà la rete neurale, rappresentano comunque una componente importante nell'apprendimento della stessa, in quanto permettono un addestramento più variegato e dinamico, e (se presenti nel set di addestramento) contribuiscono, come il resto del dataset, alla definizione dei pesi che permettono alla rete di riconoscere i pattern anche se non definiti in maniera precisa o convenzionale. La presenza di questi caratteri, seppur apparentemente trascurabili a livello individuale, è positiva e contribuisce al perfezionamento del riconoscimento dei caratteri scritti a mano.

4.2.3 Disposizione spaziale

La disposizione nello spazio è importante per definire il carattere che si sta riconoscendo, perché è fondamentale per la rete neurale che i caratteri non siano ribaltati, ruotati o specchiati. I casi presi in considerazione per l'addestramento della rete non prendono in considerazione questo tipo di problematica, se non per i singoli tratti che compongono un simbolo che, spesso, sono incerti, non lineari, spessi o sottili. Quest'ultima è un'ottima caratteristica del dataset, in quanto simula la scrittura manuale. Il problema, infatti, è che la rete neurale non riesce ad indentificare l'orientamento del carattere, ma parte dal presupposto che il carattere sia già orientato nella maniera corretta. Per estendere le sue capacità, si potrebbe agire direttamente sul dataset, aggiungendo un modulo di elaborazio-

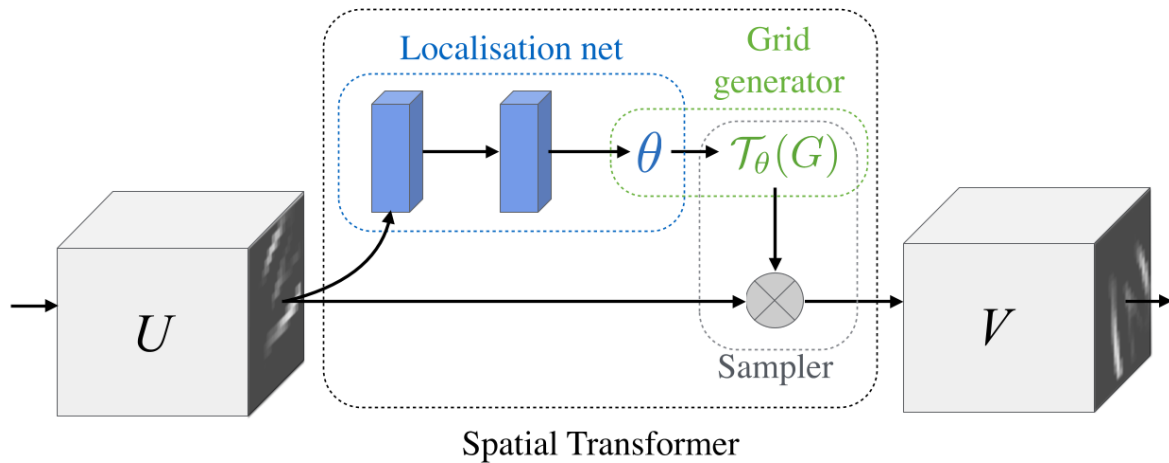


Figura 13: Struttura di una STN

ne delle immagini appena prima dell'input di addestramento della rete: un modulo prende in input l'immagine originale e la distorce in maniera casuale applicando effetti come traslazione, *shear* o scala. Questo tipo di approccio sarebbe efficace su minime distorsioni e alcuni casi particolari, renderebbe la rete più robusta, ma senza ampliare di troppo le abilità attuali e senza aggiungere abilità di rotazione. Infatti, per ottenere un ulteriore potenziamento nelle capacità della rete è necessario modificarne la struttura e renderla abile nel riconoscimento dell'orientamento dell'immagine: la rete non deve, quindi, imparare a riconoscere i caratteri distorti, ma a distorcerli lei stessa per riconoscerli. È possibile aggiungere degli ulteriori livelli iniziali pensati per effettuare trasformazioni come scala, *shear* e rotazione, che non agiscono sul dataset, ma su come la rete lo elabora, aggiungendo capacità di ruotare, specchiare o scalare un carattere durante il riconoscimento. Questi livelli agiscono, quindi, come rete neurale a sè stante che prende il nome di STN (*Spatial Transform Network*), e che ha l'obiettivo di definire dei parametri affini da utilizzare nelle trasformazioni sull'input che sarà successivamente elaborato dalla struttura convoluzionale discussa fino ad ora. La struttura, come mostrato in figura 13, utilizza dei livelli convolutivi o completamente connessi con una successiva operazione di regressione, per determinare i parametri affini necessari per trasformare l'input, questi parametri vengono poi utilizzati dal *sampler* per recuperare il valore di un pixel dall'immagine originale e applicare la trasformazione affine.

Con questa soluzione la rete ottiene una struttura più complessa, ma più evoluta, risolvendo il problema della distorsione, rotazione o scala applicato all'input.