1 Requisiti di progetto

1.1 Descrizione del problema

Si vuole realizzare un componente in grado di svolgere una versione semplificata del processo di equalizzazione dell’istogramma di un’immagine, ossia di ricalibrare il contrasto di quest’ultima, effettuando una ridistribuzione dei valori di intensità pixel per pixel.

Le immagini di cui è richiesta la manipolazione sono definite in scala di grigi a 256 livelli e hanno una dimensione massima di 128x128 pixel.

1.2 interfaccia del componente

Il componente realizzato ha un’interfaccia così definita:

\*code snippet e immagine tikz

In particolare:

· i\_clk è il segnale di CLOCK in ingresso generato dal TestBench;

· i\_rst è il segnale di RESET che inizializza la macchina, predisponendola alla ricezione del segnale di START; i\_rst è inoltro utilizzato per resettare il componente in modo asincrono.

· i\_start è il segnale di START generato dal Test Bench;

· i\_data è il segnale (vettore) che arriva dalla memoria in seguito ad una richiesta di lettura;

· o\_address è il segnale (vettore) di uscita che manda l’indirizzo alla memoria;

· o\_done è il segnale di uscita che comunica la fine dell’elaborazione e il dato di uscita scritto in memoria;

· o\_en è il segnale di ENABLE da mandare alla memoria per poter comunicare (sia in lettura che in scrittura);

· o\_we è il segnale di WRITE ENABLE da mandare alla memoria per comunicare quale operazione si vuole svolgere su di essa. Può assumere valori 0 e 1, rispettivamente per lettura e scrittura;

· o\_data è il segnale (vettore) di uscita dal componente verso la memoria.

1.3 descrizione della memoria e dell’interazione con il componente

Il modulo implementato dovrà dialogare in lettura e scrittura con una

RAM, indirizzata al byte.

In particolare, l’algoritmo di equalizzazione sarà applicato ad immagini pre-salvate in memoria, la cui grandezza effettiva (in pixel) sarà specificata dal prodotto del contenuto tra le celle ad indirizzo 0 ed 1 della RAM, contenenti rispettivamente il numero di colonne n\_col e di righe n\_row dell’immagine, entrambe di dimensione 8 bit.

Nei byte successivi, dall’indirizzo 2 all’indirizzo n\_col\*n\_row+1, sarà contenuta, pixel per pixel, sequenzialmente e in modo contiguo, l’immagine di cui è richiesta la trasformazione..

Infine, l’immagine ottenuta dal processo di equalizzazione svolto dal componente verrà salvata in memoria, a partire dall’indirizzo n\_col\*n\_row+2 all’indirizzo 2\* n\_col\*n\_row+1.

|  |  |
| --- | --- |
| N\_col | Indirizzo 0 |
| N\_row | Indirizzo 1 |
| Primo Pixel da elaborare | Indirizzo 2 |
| ….. |  |
| Ultimo pixel da elaborare | Indirizzo n\_col\*n\_row+1 |
| Primo Pixel elaborato | Indirizzo n\_col\*n\_row+2 |
| ….. |  |
| Ultimo pixel elaborato | Indirizzo 2\*n\_col\*n\_row+1 |

1.3 esempio di funzionamento

2 Design

Si è scelto di descrivere un modulo single-process tramite architettura behavioral (comportamentale) in linguaggio VHDL.

Questo ha determinato la necessità di sviluppare un algoritmo adeguato allo svolgimento dell’operazione richiesta al componente, che può essere schematizzato secondo i seguenti passaggi chiave:

1. lettura n\_col ed n\_rig
2. calcolo dimensione immagine
3. ciclo sui pixel dell’immagine sorgente per stabilire tra di essi i valori di massimo e minimo
4. calcolo di delta\_value e shift\_level
5. ciclo sui pixel dell’immagine sorgente per calcolare e salvare in memoria l’effettivo valore, pixel per pixel, dell’immagine processata

Il modulo prodotto opera quindi su di una macchina a stati finiti che si occupa nel dettaglio dell’attuazione dell’algoritmo sviluppato.

2.1 Macchina a stati finiti

L’FSM da noi prodotta è composta da 10 stati, suddivisibili in 3 gruppi principali descritti di seguito.

2.1.1 stati ausiliari

Gruppo di stati che realizzano: inizio, richiesta di lettura, attesa della memoria e fine del processo.

1. WT\_RST – wait reset: stato iniziale di attesa del segnale i\_rst, che può essere anche asincrono;

2. WT\_STR – wait start: stato di attesa del segnale di i\_start.   
In qualsiasi momento dell’elaborazione, se il segnale i\_rst è rilevato alto, anche non in corrispondenza di i\_clk, la macchina viene riportata in questo stato, tornando in attesa di un nuovo segnale di inizio elaborazione

NB: In caso di reset si è supposto che il segnale i\_start venga riportato basso per il periodo in cui il i\_rst è alto.

Al verificarsi della condizione i\_start = 1 vengono inizializzati tutti i valori necessari al processo, prima di passare allo stato successivo. Di particolare importanza per l’algoritmo sviluppato è il segnale count (inizialmente 0), che indica l’indirizzo a cui sarà effettuata l’operazione di read alla successiva richiesta di lettura del componente.

3. RD\_REQ – read request: stato di abilitazione della memoria in lettura. Viene predisposto su o\_address l’indirizzo della RAM che deve essere letto

4. WT\_MEM – wait memory: stato di attesa della memoria che permette al valore richiesto in RD\_REQ di essere correttamente riportato sul segnale i\_data al ciclo di clock successivo

È uno stato decisivo per l’FSM: viene costantemente rivisitato nei cicli di lettura dei pixel dell’immagine ed è responsabile del corretto instradamento del processo, grazie a condizioni su count e shift\_value. Si occupa inoltre dell’aggiornamento della variabile count stessa, e quindi della corretta gestione del successivo dato letto in memoria

5. DONE: stato in cui o\_done viene posto ad ‘1’, per segnalare la fine dell’elaborazione. A questo punto, si attende un valore di i\_start basso per tornare in WT\_STR e poter ricominciare il processo con una nuova immagine

2.1.1 calcolo dimensioni

Gruppo di stati che permette il calcolo della dimensione effettiva dell’immagine da elaborare.

6. RD\_COL – read column: stato in cui il valore n\_col relativo all’immagine, pronto su i\_data, è salvato su una variabile temporanea per essere utilizzato in seguito

7. RD\_ROW – read row: stato in cui n\_row, pronto su i\_data, viene moltiplicato con il valore n\_col salvato precedentemente per calcolare la dimensione effettiva dell’immagine e determinare se essa è adatta (n\_col\*n\_row>0) o meno per il proseguimento dell’esecuzione

2.1.2 ricerca di valori di massimo e minimo dell’immagine

Gruppo di stati che permette di stabilire il valore minimo e massimo , tra i pixel dell’immagine sorgente e sono necessari per l’effettiva equalizzazione dell’immagine.

La ricerca è svolta tramite un ciclo sui nodi RD\_REQ, WT\_MEM e CMP\_DT dell’FSM. Come già citato precedentemente, è WT\_MEM ad occuparsi del corretto aggiornamento della variabile count, e quindi della lettura sequenziale di pixel durante il ciclo.

8. CMP\_DT – compare data: stato in cui il valore del pixel dell’immagine, pronto sul segnale i\_data, viene confrontato con le variabili min e max stabilite fino a questa iterazione del ciclo di ricerca, aggiornandole se necessario

Se la condizione di termine della ricerca (count <= n\_col\*n\_row+2) si verifica, si riporta count pari all’indirizzo del primo pixel dell’immagine sorgente, ovvero 2, per poi procedere alla fase di effettiva equalizzazione. Se invece non si è ancora scandagliata tutta l’immagine in memoria, si procede nel ciclo al pixel successivo2.1.3 elaborazione dell’immagine

Gruppo di stati che svolge l’effettiva elaborazione, pixel per pixel, dell’immagine da trasformare, tramite opportuni valori calcolati in PREP\_EL e un ciclo sui nodi RD\_REQ – WT\_MEM – EL\_DATA della macchina a stati.

9. PREP\_EL – prepare elaboration: stato in cui vengono stabiliti il delta\_value e lo shift\_level relativi all’immagine da elaborare, tramite i dati ottenuti negli stati precedenti. Si procede quindi ad effettuare un nuovo ciclo per il calcolo del valore dei pixel della relativa immagine equalizzata

10. EL\_DATA – elaborate data: stato in cui si svolge l’elaborazione di un pixel dell’immagine. In particolare:

a. Si abilita in scrittura la memoria, ponendo in o\_address il valore dell’indirizzo di destinazione per la scrittura: pixel\_address+n\_col\*n\_row

b. Il valore del pixel dell’immagine originale, disponibile su i\_data, è utilizzato per calcolare quello del rispettivo pixel nell’immagine trasformata, il quale viene posto in o\_data per essere scritto in memoria

c. se la condizione di termine dell’elaborazione dell’immagine corrente (count <= n\_col\*n\_row+2) si verifica, si passa a DONE, altrimenti si procede con l’equalizzazione del pixel successivo

\*immagine FSM

2.2 approfondimento sull’elaborazione

La manipolazione del contrasto dell’immagine è fondata su 4 espressioni fondamentali. Si noti che, le prime due sono valutate una sola volta per ogni immagine nello stato PREP\_EL, mentre le restanti sono determinate ad ogni iterazione del ciclo di elaborazione nello stato EL\_DATA.

· DELTA\_VALUE = MAX\_PIXEL\_VALUE – MIN\_PIXEL\_VALUE

delta\_value rappresenta il valore della differenza tra il pixel più chiaro (valore maggiore – max\_pixel\_value) e il più scuro (valore minore – min\_pixel\_value) dell’immagine.

· SHIFT\_LEVEL = (8 – FLOOR(LOG2(DELTA\_VALUE +1)))

shift\_value determina il numero di shift a sinistra da applicare alla differenza tra il pixel considerato nell’iterazione corrente e il pixel di valore minore dell’immagine

La funzione FLOOR(X) svolte l’ arrotondamento per difetto del valore X fornitogli come argomento.

\* tabella di esempio, senza particolari spiegazioni. si può dire qualcosa nella descrizione

In particolare SHIFT\_LEVEL è un numero intero compreso tra 0 e 8, facilmente ricavabile tramite controlli di soglia e ciò ci permette di evitare di eseguire operazione pesanti come il LOG. Di seguito è riportato il blocco di IF/ELSE che in basa alla valutazione del delta\_value per il calcolo del valore richiesto.

\*code snippet

· TEMP\_PIXEL = (CURRENT\_PIXEL\_VALUE - MIN\_PIXEL\_ VALUE) << SHIFT\_LEVEL

temp\_pixel rappresenta il possibile valore da attribuire, nell’immagine finale, al pixel valutato in questa iterazione del ciclo di elaborazione . è necessario sottolineare che non è possibile utilizzarlo direttamente per formare il risultato finale in memoria, in quanto potrebbe superare il limite massimo di 255 imposto dalla codifica in scala di grigi a 256 livelli.

· NEW\_PIXEL\_VALUE = MIN( 255 , TEMP\_PIXEL)

NEW\_PIXEL\_VALUE rappresenta l’effettivo valore che verrà scritto sulla RAM per il pixel considerato in questa iterazione, individuato dal minimo tra 255 e temp\_pixel.

2.3 scelte progettuali e ottimizzazioni?

Si è scelto di progettare un componente sensibile al clock su rising\_edge.

Nell’implementazione dell’algoritmo è di fondamentale importanza la scelta di utilizzare l’operazione di moltiplicazione per il calcolo del numero di pixel dell’immagine da processare. Nonostante l’operazione di moltiplicazione sia più pesante rispetto ad operazioni come la semplice somma o differenza, abbiamo deciso di non utilizzare quest’ultima nella nostra implementazione poiché avendo valori a 8 bit il tool di sintesi è abbastanza ottimizzato e utilizza i DSP.

Facciamo inoltre notare che l’operazione di moltiplicazione viene utilizzata una sola volta nell’elaborazione di ogni immagine e quindi non è particolarmente rilevante rispetto all’intero processo.

Entrambe le versioni, sia quella che utilizza delle semplici somme, che quella che utilizza le moltiplicazioni, sono state implementate e testate con successo ma abbiamo preferito la seconda di quest’ultimi poiché si sono notati benefici poco significativi in termini di tempo ed area di sintesi, a scapito della leggibilità e comprensione del codice stesso.

3 Testing e Risultati sperimentali

3.1 casi di test

Il corretto comportamento del componente sviluppato è stato verificato tramite numerosi TestBench. In particolare, ci si è concentrati su diversi casi critici possibili durante l’esecuzione e sul corretto calcolo di tutti i valori utilizzati. Di seguito una breve lista di condizioni e test più significativi:

· Corretto utilizzo di tutti i possibili SHIFT\_VALUE

· Condizione particolare: N\_COL = N\_ROW = 0

· Casi limite di grandezza 1x1 e 128x128

· Caso di reset dell’elaborazione, anche in modo asincrono

· Caso di reset dell’elaborazione seguito da un cambio di immagine in memoria

· Corretto rapporto tra i segnali i\_rst, i\_start e o\_done durante l’esecuzione

Nel verificare la correttezza degli ultimi 3 casi citati, è risultata utile l'analisi grafica dei segnali di input/output del modulo.

\*immagine segnali significativi

Si è usufruito di TestBench con caratteristiche differenti e dimensioni variabili dalla singola alle 10000 immagini (TB10K), redatti manualmente (da colleghi e da noi) o auto-generati tramite uno script python appositamente creato.

\*immagine esempio 2x2 post synthesis

3.2 risultati sperimentali

il report di sintesi ha evidenziato l’utilizzo nell’area del modulo sintetizzato dei seguenti componenti:

* LUT
* FF
* DSP
* IO
* BUFG

aggiungi commento sul DSP dovuto alla moltiplicazione

3.3 risultati di simulazione

Per tutti i casi di test e TestBench utilizzati, sono state svolte con successo le simulazioni richieste dalle specifiche di progetto, di cui si riportano come rifermento di tempi di esecuzione del TestBench TB10K:

· simulazione behavioral: \*ris

· simulazione post-synthesis functional: \*ris

Si è inoltre appurato che il componente progettato supera le seguenti simulazioni non richieste:

· Simulazione post-synthesis timing

· Simulazione post-implementation functional

· Simulazione post-implementation timing

4 conclusioni

Si ritiene di aver realizzato un’architettura che rispecchi a pieno le specifiche di progetto assegnateci e di aver meglio compreso il processo di progettazione ed il funzionamento di un componente dalle caratteristiche simili a quello da noi proposto.