

Un sistema di inferenza fuzzy applicato al controllo di qualità nell'industria della carta

Valentina Colla, Luigi Giori, Marco Vannucci, Gianluca Bioli

L'articolo presenta un sistema automatico per il controllo di qualità nell'industria della carta: i rotoli semilavorati sono esaminati uno per uno da un sistema di visione che effettua l'acquisizione e il preprocessing dell'immagine, mentre un sottosistema di inferenza fuzzy ha il compito di stabilire la qualità del prodotto. Il sistema è stato studiato per sostituire l'intervento umano poiché l'ispezione del prodotto al momento è effettuata da un operatore umano di cui l'utilizzo del sistema di inferenza fuzzy permette di riprodurre l'ambiguità e l'imprecisione naturale del ragionamento. Nell'articolo sono descritti l'hardware e il set-up sperimentale, infine sono presentati i risultati ottenuti.

La tecnologia e le competenze relative ai sistemi di visione attualmente sono stati consolidati al punto tale che essi possono avere un ruolo primario nei processi di produzione di molti settori industriali con lo scopo di incrementare la produzione, ridurre i costi e migliorare le condizioni e la qualità del lavoro del personale. Tipici utilizzi dei sistemi di visione sono, fra gli altri, il controllo di qualità [8], il posizionamento di oggetti e la teleguida [12], la selezione di oggetti e la classificazione.

Mentre in alcune industrie high-tech (come quelle operanti nel settore automobilistico, dei componenti elettronici, degli elettrodomestici ecc...) l'importanza dei sistemi di visione è stata riconosciuta e la loro presenza è stata accettata e continuamente incrementata, in altri settori industriali, importanti specialmente nel panorama italiano e toscano come l'industria del legno, della carta e della pelle, i sistemi di visione sono ancora visti con sospetto benché il livello tecnico dei macchinari utilizzati in tali industrie sia molto alto.

Esistono infatti degli ostacoli non trascurabili all'utilizzo dei sistemi di visione nei contesti sopraelencati, dovuti alle difficili condizioni dell'ambiente di lavoro: scarsa illuminazione, polvere, sostanze chimiche, umidità, alte temperature, collisioni frequenti sono infatti fattori che, sommati al basso livello di istruzione del personale tecnico impiegato normalmente nella produzione rendono l'uso dei sistemi di visione poco interessante poiché sono considerati poco robusti, inaffidabili e costosi; per queste ragioni molti compiti pericolosi e/o ripetitivi sono ancora svolti da operatori umani. L'unico modo per incoraggiare le aziende manifatturiere all'uso dei sistemi di visione è mostrare loro che tali sistemi possono far

eliminare alcuni turni di lavoro e/o incrementare la produzione evitando i "colli di bottiglia" in quelle linee di produzione che richiedono l'intervento umano.

L'articolo presenta un sistema automatico per la detezione di difetti e controllo qualità nell'industria della carta che dovrebbe sostituire la supervisione umana. Il sistema sviluppato esamina uno ad uno i rotoli di carta semi-lavorati ed è costituito da un sistema di visione che si occupa delle fasi di acquisizione immagine e *preprocessing*, e da un sistema di inferenza fuzzy che determina la qualità del prodotto e ne decide la destinazione commerciale. L'uso della logica fuzzy per l'*image processing* e per la classificazione di immagini non è nuovo [6], specialmente nel campo del controllo di qualità in cui spesso sistemi automatici basati sulla logica fuzzy sostituiscono o completano l'intervento umano in molte applicazioni industriali [5,10].

L'approccio basato sulla logica fuzzy è stato necessario al fine di tradurre in maniera efficiente le strategie comunemente adottate dal personale tecnico attualmente incaricato dell'ispezione dei rotoli semilavorati. La mancanza di modelli matematici, l'ambiguità e l'imprecisione naturali del ragionamento umano sono stati superati/affrontati attraverso la formulazione di un insieme di regole "if-then-else" che costituiscono la base di conoscenza del sistema per la decisione della qualità del rotolo semilavorato.

Descrizione del problema

Durante la produzione di rotoli di carta per uso domestico, in una fase intermedia, si ottiene un prodotto parzialmente lavorato consistente in un rotolo di carta la cui lunghezza è circa 1,10 m e il cui diametro è lo stesso del prodotto finale. Tale

V. Colla, L. Giori, M. Vannucci, G. Bioli - Scuola Superiore Sant'Anna, Pontedera (PI), ITALY

rotolo deve essere tagliato al fine di ottenere più rotoli di lunghezza standard da mettere in commercio.

Normalmente il taglio è effettuato da un macchinario equipaggiato con una lama circolare rotante ad alta velocità; tale strumento è chiamato *off-cutter* e l'operazione effettuata *cut on the fly*. Sfortunatamente, a causa dell'alto numero di tagli da operare e della resistenza della carta e del cilindro di cartone cui la carta setta è arrotolata, la lama tende a danneggiarsi cosicché la qualità del taglio diminuisce rapidamente. Quando tutto ciò accade, la superficie trasversale del rotolo su cui avviene il taglio evidenzia alcuni difetti dovuti al taglio. Nella figura 1 viene mostrato un esempio di tale difetto: la superficie del rotolo e i suoi contorni risultano irregolari. Questi difetti compromettono la qualità e il valore commerciale del prodotto finale, indipendentemente dalla qualità della stessa carta.

Attualmente il controllo di qualità è eseguito manualmente; in particolare un operatore umano ispeziona i rotoli prodotti uno

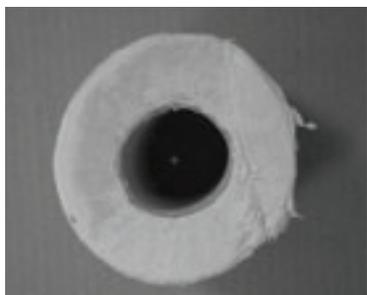


Figura 1 - Un esempio di rotolo difettoso: il difetto è costituito dalle strisce trasversali sulla destra

ad uno e ne valuta l'accettabilità in base alla quantità, intensità e tipo dei difetti presenti sulla superficie di taglio dei rotoli. L'operatore umano decide se scartare o meno un rotolo e il momento in cui fermare la produzione al fine di effettuare interventi di manutenzione sulla lama dell'*off-cutter*.

Il set-up sperimentale

Il sistema sviluppato per la detezione di difetti superficiali deve essere posto immediatamente dopo l'*off-cutter* al fine di esaminare i rotoli appena prodotti. Nel set-up sperimentale dove sono stati effettuati i test, il rotolo di carta è piazzato manualmente di fronte alla telecamera poiché lo scopo del presente lavoro è la detezione dei difetti. Nello scenario industriale reale, ogni volta che viene tagliato un nuovo rotolo, un nastro trasportatore o un robot si occuperanno di porre la sezione circolare del rotolo di fronte in tale posizione.

Il sistema di visione utilizza una singola fotocamera analogica, statica e in bianco e nero. L'immagine acquisita è digitalizzata e memorizzata nel PC tramite un *frame grabber* integrato nella scheda di acquisizione Matrox utilizzata. Sono state usate luci artificiali per prevenire la formazione di ombre sulla superficie da ispezionare; tali ombre altrimenti potrebbero mischiarsi con i difetti reali e degradare le prestazioni del sistema. La sorgente di luce (una normale lampadina a una frequenza di 50 Hz) è posizionata di fronte al rotolo e dietro la telecamera per ottenere un'illuminazione omogenea.

Per i test effettuati in laboratorio la luce fissa è stata preferita a una luce a *flash* poiché il rotolo esaminato non è in movimento, ma nella versione industriale del sistema l'uso del

flash sarà presumibilmente preferibile poiché i rotoli saranno in rapido movimento e il flash, sincronizzato con la fotocamera, permetterà tempi di esposizione più corti evitando così l'acquisizione di immagini fuori fuoco.

La struttura in cui viene posizionato il rotolo da ispezionare è stata disegnata per garantire le migliori condizioni di illuminazione possibili e consiste in una scatola rettangolare aperta su un lato e rivestita di carta nera per ridurre l'influenza dell'illuminazione ambientale e evitare la formazione di ombre.

Il sistema per il controllo di qualità

Il sistema per il controllo qualità che è stato sviluppato prende in input una immagine in scala di grigi del prodotto da ispezionare e fornisce come output la decisione sulla sua destinazione finale: la messa in commercio o lo scarto del rotolo in base ai difetti eventualmente riscontrati sulla sua superficie circolare. L'attenzione è stata posta sulle possibili strisce presenti nella parte interna della sezione interessata dal taglio piuttosto che sui contorni irregolari della stessa poiché tali contorni possono rivelarsi irregolari anche dopo alcune fasi della normale produzione.

Per esempio nella figura 1 l'irregolarità che si vede nella parte superiore destra non è dovuta a un reale difetto ma è soltanto una piccola parte di carta non perfettamente aderente al resto del rotolo; in questo caso il rotolo non sarebbe scartato. Al contrario l'irregolarità nella parte inferiore destra del bordo del rotolo è un vero difetto poiché è associato alla presenza di una striscia nella sezione causata da un taglio non ottimale.

L'elaborazione del sistema può essere suddivisa in tre fasi principali:

- una fase di image processing in cui l'immagine originale del rotolo catturata dalla telecamera è elaborata per evidenziare le zone probabilmente difettose.

- Questa fase produce un'immagine binaria (con soli pixel bianchi o neri) adatta alle successive elaborazioni.

- Una fase di detezione dei difetti in cui l'immagine binaria viene analizzata per

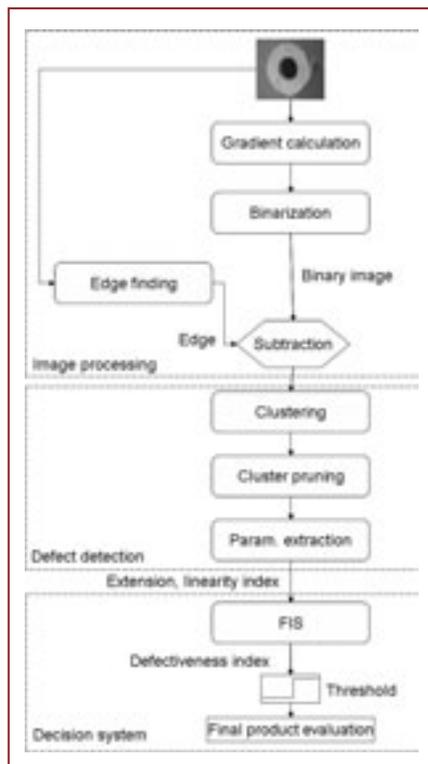


Figura 2 - Diagramma a blocchi dell'intero sistema per il controllo di qualità

mezzo di un algoritmo di clustering per mettere in evidenza i potenziali difetti; successivamente le aree corrispondenti a difetti particolarmente gravi vengono selezionate.

- Un sottosistema decisionale basato su logica fuzzy in cui due parametri scalari che caratterizzano forma ed estensione di ogni possibile difetto sono esaminati al fine di valutare tramite un indice la qualità del prodotto. La decisione finale è presa confrontando tale indice con una soglia predeterminata.

La figura 2 mostra uno schema del funzionamento dell'intero sistema. Nel paragrafo successivo sono descritte in maniera dettagliata le fasi dell'elaborazione appena elencate.

La fase di image processing

L'immagine del rotolo ed è successivamente trasferita al PC da esaminare è acquisita tramite un'interfaccia software appositamente sviluppata ed è memorizzata come un'immagine a 8-bit (256 livelli di grigio). Lo scopo di questa fase è mettere in evidenza quelle zone dell'immagine che presentano delle discontinuità nel colore che potrebbero essere dovute alla presenza di un difetto. Per questa operazione è stato usato un filtro che applica un gradiente all'immagine: il risultato di questa trasformazione è un'altra immagine nella quale il valore di ogni pixel è calcolato in base alle differenze di colore con i pixel circostanti. L'immagine così ottenuta rappresenta perciò l'intensità dei cambiamenti cromatici dell'immagine originaria. La trasformazione può essere descritta come segue:

$$\forall(x, y) \in \text{image} :$$

$$\nabla(x, y) = f((x, y), \text{neighbors}(x, y))$$

Nella fase di sperimentazione sono stati testati due differenti tipi di gradiente, diversi per l'insieme di pixel circostanti esaminati:

- *Gradiente semplice* - sono considerati come pixel contigui a quello esaminato quelli immediatamente superiore, inferiore, a destra e a sinistra; inoltre quelli in alto a destra, in alto a sinistra, in basso a destra, in basso a sinistra.

- *Gradiente radiale* - sono considerati contigui i pixel a destra, sinistra, sopra e sotto al pixel esaminato in riferimento all'arco di circonferenza cui il pixel esaminato appartiene. Il centro di tale cerchio coincide con il centro del rotolo.

L'uso del gradiente circolare è stato testato per sfruttare la conoscenza relativa alla forma circolare del rotolo ma non ha portato a risultati interessanti a causa della reale forma delle zone difettose. La forma di tali regioni (e la distribuzione dei pixel evidenziati) dipende principalmente dal taglio effettuato dalla lama: quest'ultima scende perpendicolarmente sulla

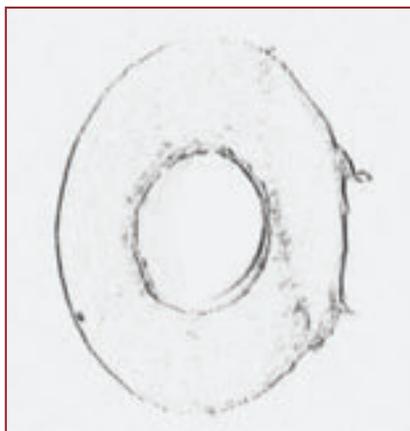


Figure 3 - Il risultato dell'applicazione del gradiente su un'immagine acquisita dalla fotocamera durante una sessione di lavoro.

carta e produce delle discontinuità sulla sezione del rotolo con una forma tipicamente lineare, dovuta alla traiettoria della lama sulla superficie. Per questa ragione il gradiente semplice è risultato nella pratica quello più efficiente ed è stato utilizzato all'interno del sistema sviluppato.

Il risultato dell'applicazione del gradiente su un'immagine è mostrato nella figura 3.

Nell'immagine preprocessata, le discontinuità presenti nell'immagine originaria vengono evidenziate. Sfortunatamente queste discontinuità non sono dovute solamente alla presenza di difetti causati dal taglio ma anche da altri fattori come, ad

esempio, ombre, ondulazioni e spazi fra gli strati di carta. Questi fattori devono essere presi in considerazione attentamente e distinti dai difetti reali; questa operazione è effettuata considerando il valore assoluto del gradiente.

Per le discontinuità che non sono dovute a difetti reali, infatti, il valore assoluto del gradiente è normalmente basso (poiché nell'immagine originaria sono caratterizzati da leggeri cambiamenti nella tonalità di grigio), quindi tramite una operazione di sogliatura è possibile scartare tutte quelle discontinuità che non sono significative per l'ispezione di qualità in oggetto. La sogliatura produce una nuova immagine binaria in cui ai pixel il cui gradiente in valore assoluto è minore della soglia viene assegnato il valore 0, mentre il valore 1 è assegnato agli altri. Nella figura 4 è possibile osservare un esempio di immagine binaria così ottenuta.

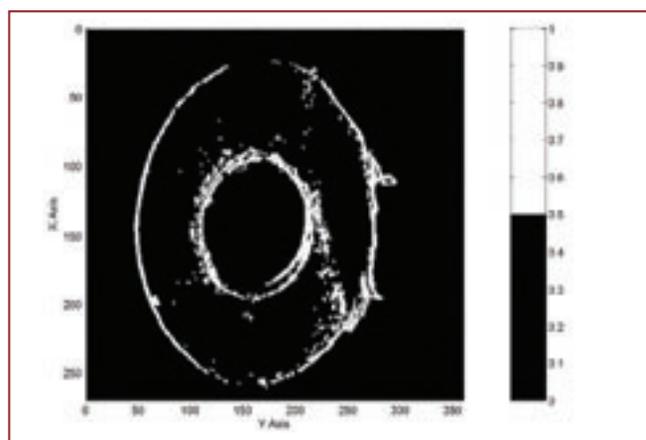


Figure 4 - Un'immagine binaria del rotolo esaminato. I pixel bianchi hanno valore 1 e indicano i bordi del rotolo e le aree con difetti

La binarizzazione dell'immagine mette in evidenza sia i bordi del rotolo che le zone potenzialmente difettose. Questo accade a causa del colore di sfondo usato per foderare l'alloggiamento in cui il rotolo è posto, il quale contrasta con il

bianco della superficie da esaminare. I pixel di valore unitario corrispondenti a tale bordo vengono eliminati attraverso l'uso di un algoritmo di edge finding.

L'edge finder è utilizzato per trovare all'interno di una immagine a toni di grigio i bordi degli oggetti presenti nella scena. La maggior parte di questi metodi sfrutta l'intensità della variazione del tono di grigio per ricavare i bordi degli oggetti sostanzialmente con due approcci: il primo è basato sulla derivata prima dell'intensità di grigio dell'immagine, in particolare un punto è considerato come parte del bordo di un oggetto se il suo gradiente è relativamente alto ed è un massimo locale del gradiente dell'immagine; l'altro approccio utilizza la derivata seconda, identificandone gli seri nell'immagine originaria (Wang91). In tali contesti è possibile inoltre specificare particolari forme da ricercare all'interno della scena come per esempio linee orizzontali, verticali o, come nel nostro caso, circonferenze.

Il metodo di ricerca dei contorni usato all'interno del sistema descritto si basa sul metodo di Canny [4] che utilizza due soglie distinte: la prima per individuare i bordi più marcati, la seconda per quelli meno evidenti che sono considerati solo nella parte finale dell'algoritmo e sono forniti come output dell'algoritmo solo se connessi ai più marcati. Questo metodo è molto usato e ottiene risultati molto buoni, inoltre non è affetto dalla presenza di rumore nell'immagine.

L'algoritmo fornisce in output un'immagine binaria contenente 1 per i pixel corrispondenti ai contorni individuati e 0 per gli altri. I risultati ottenuti dall'edge finder sul rotolo mostrato nella figura 1 sono visibili nella figura 5. Come si vede da tale figura l'algoritmo riesce a catturare sia i contorni del rotolo che alcune linee corrispondenti a difetti di taglio:

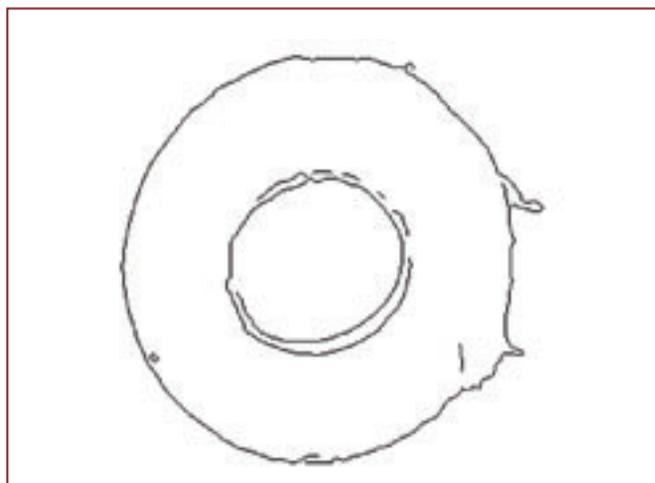


Figure 5 - I bordi del rotolo precedentemente mosato nella figura 1 ottenuti tramite l'algoritmo di individuazione contorni

questo comportamento non è auspicabile ma non degrada le performance del sistema poiché non modifica in maniera consistente la forma e l'intensità delle aree corrispondenti a difetti superficiali.

I contorni della sezione del rotolo, una volta individuati, sono sottratti dall'immagine binaria (cfr figura 4) creando una nuova immagine in cui sono evidenziate le sole aree potenzialmente difettose: un esempio del risultato dell'intero processo è visibile nella figura 6.



Figura 6 - Il risultato finale della fase di image processing: l'immagine ottenuta contiene i difetti presenti sulla superficie di taglio del rotolo

Detezione di difetti tramite un algoritmo di clustering

L'immagine binaria ottenuta viene passata alla parte di sistema che si occupa di stabilire quali dei pixel individuati corrisponde a difetti reali tali da giustificare lo scarto del rotolo esaminato. A causa della dinamica del processo di taglio, i difetti che inficiano la qualità del prodotto sono zone caratterizzate da una notevole estensione e da una forma approssimativamente lineare. Nell'immagine binaria ogni punto (pixel) corrisponde a una piccola zona della superficie mentre un difetto è formato da un numero insieme di tali punti (normalmente fra 100 e 400) contigui. Per questa ragione si rende necessario raggruppare i punti fra loro vicini in base alla loro appartenenza a uno stesso difetto tramite un algoritmo di clustering.

Il problema del clustering consiste essenzialmente nel raccogliere punti o pattern in un numero di gruppi in base a un certo criterio di similarità che deve essere codificata tramite un criterio di similarità dipendente dal contesto dell'applicazione. Esistono vari indici di similarità che sono stati utilizzati per questo scopo [11]. Il clustering è un metodo ampiamente utilizzato per scoprire strutture nei data set e trova applicazione nel data mining [7], nella compressione dei dati, nella vector quantization [9] e nell'ottimizzazione [3].

Nel presente lavoro l'algoritmo di clustering utilizzato considera le posizioni dei punti attivi (con valore 1) sulla superficie esaminata per raggruppare i pixel in cluster. In particolare l'algoritmo di clustering può essere suddiviso in tre fasi iterate:

- viene creato un nuovo cluster inizialmente composto da un pixel;
- viene calcolata la distanza euclidea fra il nuovo cluster e i pixel non ancora associati a un cluster: se un pixel è "abbastanza vicino" a uno dei cluster esistenti viene associato ad esso. Se un punto è "abbastanza vicino" a più di un cluster allora viene associato al cluster più vicino;
- Se nessun punto può essere associato ai cluster esistenti viene formato un nuovo cluster con un nuovo punto fra quelli non assegnati e il secondo passo viene iterato fino all'esaurimento dei punti.

Il risultato del clustering (visibile nella figura 7) è un insieme

di gruppi di pixel, in cui ogni gruppo corrisponde a un potenziale difetto.

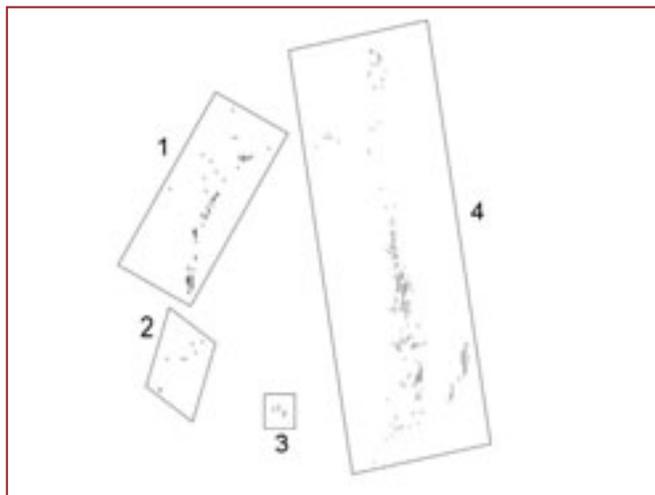


Figura 7 - Il risultato della clusterizzazione: i cluster individuati dall'algoritmo sono evidenziati

Come è evidente nella figura 7, l'algoritmo raggruppa correttamente i pixel appartenenti al medesimo difetto ma forma anche altri cluster che non corrispondono a difetti reali ma sono dovuti alla presenza di ombre o altri fattori. Per questa ragione è necessario usare un metodo per determinare quali fra i cluster individuati corrisponde realmente a un difetto e se c'è almeno uno fra questi difetti che determina lo scarto del rotolo.

Il primo passo in questa direzione consiste nell'esclusione dei cluster che non corrispondono a un difetto: sulla base dei numerosi test effettuati è emerso che questi sono formati da un basso numero di pixel, perciò tutti i cluster contenenti un numero di pixel inferiore a una certa soglia sono scartati. Per esempio, quando questa operazione è stata effettuata sul rotolo nella figura 7 i cluster 2 e 3 sono stati eliminati e non sono stati più considerati nelle successive fasi dell'elaborazione del sistema.

Valutazione dei difetti tramite un sistema di inferenza fuzzy

Nella valutazione finale della qualità del rotolo vengono presi in considerazione i cluster che non sono stati scartati nella fase precedente. È stata quindi sviluppata una metodologia in grado di stabilire se i difetti rimanenti portano o meno allo scarto del rotolo esaminato.

Come introdotto nella sezione "Descrizione del problema", attualmente questa operazione è eseguita da un operatore umano che ispeziona visivamente la superficie di ogni rotolo e decide se scartarlo o meno sulla base di due fattori fra loro interagenti: la forma e l'estensione dei difetti. In generale un rotolo viene scartato se presenta un difetto abbastanza esteso (composto da numerosi pixel) e/o la forma del difetto è più o meno lineare.

Il sistema sviluppato simula la valutazione umana della qualità del rotolo per mezzo di un sistema di inferenza fuzzy

(FIS) [1,2].

Questo tipo di approccio è stato preferito ad altri a causa della natura linguistica dell'inferenza fra variabili di input e output e della formulazione delle strategie decisionali estratte dall'esperienza umana in cui manca una vera e propria formulazione matematica del ragionamento applicato. Tale approccio permette infatti di codificare la conoscenza del personale tecnico riguardo ai criteri adottati per determinare l'accettazione o meno di un rotolo attraverso un insieme di regole "if...then-else".

Il sistema d'inferenza fuzzy adottato considera due variabili di input, l'estensione e la linearità del difetto, che costituiscono i fattori che influenzano la decisione finale. L'estensione del difetto è misurata in termini di numero di pixel da cui è formato mentre la linearità è misurata come la distanza quadratica media dei pixel del cluster dalla retta che meglio si adatta alla distribuzione dei punti del difetto e può essere formalizzata dall'equazione:

$$S = \sum_{i=1}^N \text{Distance}(P_i, R)$$

in cui N è il numero di pixel nel cluster, P_i è un punto arbitrario e R è la linea interpolante. Valori bassi di S corrispondono a un'alta linearità del difetto.

Il FIS restituisce come output una singola variabile che indica la decisione finale sulla qualità del rotolo.

Il valore di ciascuna delle variabili di input e output è compreso in determinati intervalli; tali intervalli sono detti "universo". All'interno di tale universo sono definiti gli insiemi fuzzy e per ciascuno di essi una funzione di "appartenenza" $\mu: R \rightarrow [0,1]$ che valuta numericamente il grado di appartenenza di un particolare valore di una variabile al corrispondente insieme fuzzy.

Nel caso descritto sono stati creati tre insiemi fuzzy per ciascuna delle variabili fuzzy utilizzate:

- numero di punti (estensione difetto / numPoints): low; medium; high.
- distanza dalla retta interpolante (distLine): low; medium; high.
- difettosità (defectiveness): not defective; uncertain; defective.

Le corrispondenti funzioni di appartenenza sono mostrate nella figura 8.

Sono state utilizzate funzioni di appartenenza Gaussiane: il loro dominio dipende dall'universo in cui la variabile fuzzy corrispondente è definita (per esempio 0-200 punti per la variabile estensione), mentre il codominio è nell'intervallo $[0;1]$ in cui le estremità rappresentano la completa non-appartenenza e appartenenza al concetto (in questo caso la difettosità).

Le regole di inferenza che mettono in relazione le due variabili di input con la variabile di output sono formulate tramite un insieme di 10 regole fuzzy derivanti direttamente dall'esperienza del personale tecnico che normalmente effettua questa operazione.

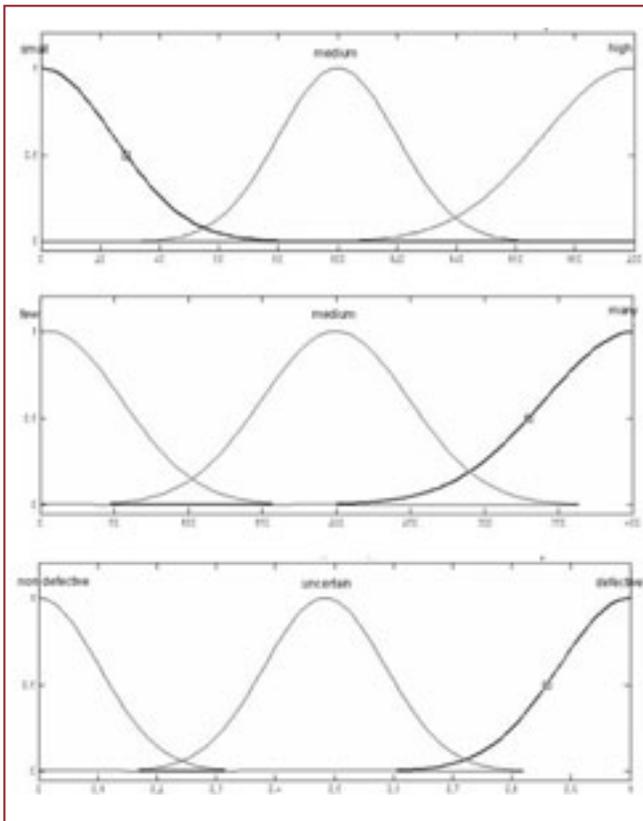


Figura 8 - Le funzioni di appartenenza adottate dal FIS descritto. Dall'alto in basso: estensione del difetto, linearità e difettosità

Le regole adottate sono riportate di seguito:

1. **if** numPoints=low & distline=low **then** defectiveness=uncertain
2. **if** numPoints=low & distline=medium **then** defectiveness=not defective
3. **if** numPoints=low & distline=high **then** defectiveness=defective
4. **if** numPoints=medium & distline=low **then** defectiveness=defective
5. **if** numPoints=medium & distline=medium **then** defectiveness=uncertain
6. **if** numPoints=medium & distline=high **then** defectiveness=not defective
7. **if** numPoints=high **then** defectiveness=defective

L'indice di difettosità è valutato per tutti i cluster individuati sulla superficie del rotolo: se almeno uno di essi ha un indice di difettosità più alto di una soglia fissata allora il rotolo viene scartato.

Risultati numerici

Il valore della soglia di difettosità è un punto critico del sistema poiché valori troppo alti portano alla mancata detezione di rotoli difettosi mentre valori troppo bassi portano a

dei "falsi allarmi" cioè allo scarto di rotoli che sono giudicati accettabili dal personale umano. Inoltre, nelle intenzioni della ditta produttrice di carta che ha supportato questa ricerca, il numero di rotoli reputati difettosi dovrebbe fornire anche un indice dello stato di usura della lama che effettua il taglio; ad esempio dopo l'individuazione di alcuni rotoli difettosi, la produzione dovrebbe essere fermata per permettere la manutenzione della lama. Occorre sottolineare che l'usura della lama si traduce velocemente nella produzione di un alto numero di rotoli difettosi. Di conseguenza, se un eccessivo numero di falsi allarmi potrebbe rallentare il processo produttivo dovuto a un eccessivo numero di pause nella produzione, dall'altro lato la mancata detezione di rotoli difettosi potrebbe tradursi in una considerevole perdita di valore del prodotto a causa dell'alto numero di rotoli difettosi messi sul mercato.

Occorre quindi trovare un compromesso fra queste due situazioni tenendo conto anche dell'opinione del personale tecnico; in particolare, secondo i loro suggerimenti, risulta di massima importanza evitare le mancate detezioni poiché la presenza di rotoli difettosi può compromettere la competitività commerciale del prodotto ed è quindi un problema più serio rispetto a un alto numero di rotoli scartati o a un numero eccessivo di pause nella produzione per la manutenzione. La tabella mostra i risultati ottenuti dal sistema in merito a 55 prove distinte comprendenti le stesse percentuali di rotoli difettosi e non. Sulla base dei risultati ottenuti e delle considerazioni sopra riportate, il valore di 0,7 è stato scelto come soglia ottimale per l'indice di difettosità.

Soglia	Err. %	FA %	MD %
0,50	12,1	11,6	0,5
0,55	9,0	8,2	0,8
0,60	7,2	5,1	2,1
0,65	5,0	3,8	1,2
0,70	4,6	3,7	0,9
0,75	4,6	3,4	1,2
0,80	5,8	3,2	2,6
0,85	7,4	2,9	4,5
0,90	14,0	1,9	12,1
0,95	20,6	0,4	20,2

Tabella - Le performance del sistema in termini di errori percentuali al variare della soglia dell'indice di difettosità; sono evidenziate la percentuale di falsi allarmi (FA), di mancate detezioni (MD) e l'errore percentuale globale

In qualità di esempio del processo effettuato dal FIS, la figura 9 mostra la valutazione del FIS dell'immagine già considerata in questo articolo: i soli cluster 1 e 4 della figura 7 sono stati elaborati dal FIS poiché gli altri erano stati scartati nelle fasi precedenti dell'elaborazione a causa della loro ridotta estensione. Fra i cluster 1 e 4 solo l'ultimo ha un indice di difettosità maggiore della soglia fissata a 0,7 e perciò il rotolo consi-

derato viene classificato come difettoso.

Altri esempi delle buone performance del sistema sviluppato sono visibili nella figura 10 in cui alcuni difetti sulla sezione dei rotoli sono stati individuati correttamente.

Conclusioni e sviluppi futuri

È stato presentato un sistema sviluppato per il controllo automatico di qualità nell'industria della carta. Tale sistema si avvale di un sistema di visione per l'acquisizione delle immagini e per il loro preprocessing al fine di estrarre due parametri relativi alla

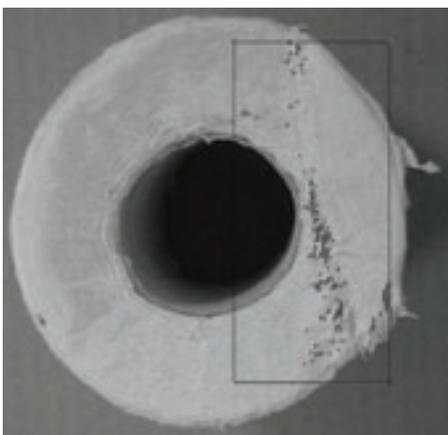


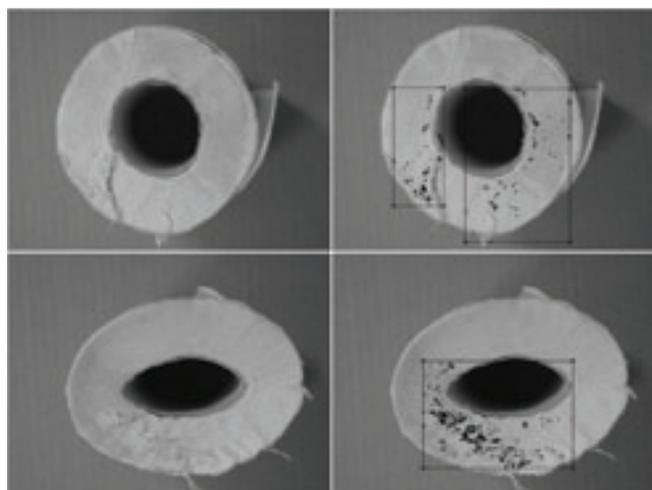
Figura 9 - Il risultato dell'uso del sistema di inferenza fuzzy: uno dei cluster (evidenziato dal rettangolo) ha ottenuto un alto indice di difettosità. Per questo motivo il rotolo è scartato

potrebbe migliorare la qualità dell'immagine ed evitare operazioni onerose dal punto di vista computazionale.

Infine, è in corso di studio l'integrazione del sistema con un sistema di posizionamento.

Bibliografia

- [1] J.F. Baldwin, "Fuzzy Logic and Fuzzy Reasoning", *International Journal of Man-Machine Studies*, 4, pp. 11, December 1979.
- [2] R.E. Bellman, L.A. Zadeh, "Local and fuzzy logics", in *Modern Uses of Multiple-Value Logic*, Eds. J.M. Dunn and G. Epstein, Dordrecht, Reidel Publ Netherlands, 1977.
- [3] P.S. Bradley, U.M. Fayyad, "Refining initial points for K-means clustering", in *Proc. of the 15th Int. Conference on Machine Learning (ICML'98)*, ed. J. Sharlik, San Francisco, Morgan Kaufmann 1998.
- [4] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 6, pp. 8, November 1986.
- [5] T.C. Du, P.M. Wolfe, "Implementation of fuzzy logic systems and neural networks in industry", *Computers in industry*, 3, pp. 32, March 1997.
- [6] R. Fageth, W.G. Allen, U. Tager, "Fuzzy Logic classification in image processing", *Fuzzy sets and systems*, 3, pp. 82, September 1996.
- [7] U.M. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, P. Smyth, R. Uthurusamy, *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Cambridge MIT Press, 1996.
- [8] M.L. Fravolini, A. Ficola, M. La Cava, F. Ghirelli, "Controllo qualità di prodotti industriali: un approccio sistematico", *Automazione e Strumentazione*, 3, March 1999.
- [9] A. Gersho, R.M. Gray, *Vector Quantization and Signal Compression*. Massachusetts Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [10] J. Jakopovic, J. Božičević, "Approximate knowledge in LEXIT and expert system for assessing marine lubricant quality and diagnosing engine failures", *Computers in industry*, 1, pp. 11, October 1991.
- [11] S.S. Khan, A. Ahmad, "Cluster centre initialization algorithm for K-means clustering", *Pattern Recognition Letters*, 11, pp. 25, August 2004.
- [12] L.A. Meeden L.A. "An incremental approach to developing intelligent neural network controllers for robots", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 3, pp. 26, June 1996.
- [13] Y. Wang, S. Mitra, "Edge detection based on orientation distribution of gradient images", In *Proc. SPIE Int. Conference on Visual Communications and Image Processing*, Boston MA (USA), November 1991. ■



sezione del rotolo esaminato. I parametri ottenuti vengono forniti in input a un sistema di inferenza fuzzy che opera la decisione finale sulla qualità del prodotto.

Il tempo richiesto dall'elaborazione è in linea con le esigenze dell'applicazione industriale; il tempo necessario al sistema per il controllo di un rotolo è largamente inferiore a quello utilizzato dall'operatore umano. Dall'altro lato, finora è stato ignorato il tempo necessario al posizionamento del rotolo nell'apposito alloggiamento poiché non era l'oggetto del presente studio. Ciononostante questo tempo deve essere considerato nella valutazione complessiva dell'efficienza del sistema se comparato all'intervento umano.

Il costo del sistema di visione è contenuto ma l'acquisizione del sistema di posizionamento rappresenta uno sforzo non indifferente per un'industria e deve essere giustificato sia dall'alleggerimento dell'intervento umano che da un aumento della velocità di produzione.

Per questa ragione gli sviluppi futuri riguardano l'ottimizzazione del software per decrementare il tempo di elaborazione e aumentare la performance. Inoltre un miglioramento dell'hardware e dell'alloggiamento in cui il rotolo è posizionato al momento dell'acquisizione dell'immagine