

MISURA E CONTROLLO

La visione artificiale al servizio della meccanica

di Massimo Giussani

Un sistema di visione artificiale si occupa di acquisire ed elaborare immagini al fine di estrarne informazioni utili all'applicazione della quale fa parte

È da molto che la visione artificiale non è più fantascienza: il corpus di conoscenze alla base teorica dell'elaborazione delle immagini è ben consolidato e ha raggiunto la piena maturità da almeno una quindicina d'anni. La vertiginosa evoluzione dei sistemi di calcolo in termini di potenza, miniaturizzazione e riduzione dei costi ha recentemente portato questa disciplina fuori dalle Università e dai laboratori di ricerca e sviluppo e dentro il mondo dell'industria. La disponibilità di sensori ottici di qualità a basso costo e di computer potenti,

compatti e in grado di eseguire applicativi software di alto livello ha fatto sì che la visione artificiale, l'*imaging*, non sia più una tecnologia destinata solo ad applicazioni di nicchia ma possa essere applicata in maniera vantaggiosa anche a centri di lavorazione e linee di assemblaggio di fascia media e medio-bassa. Trattandosi pertanto di un settore a suo modo emergente, che richiede una conoscenza che non è tradizionale patrimonio dei produttori e utilizzatori di sistemi rivolti al mondo della meccanica, è naturale che vi sia un'offerta di

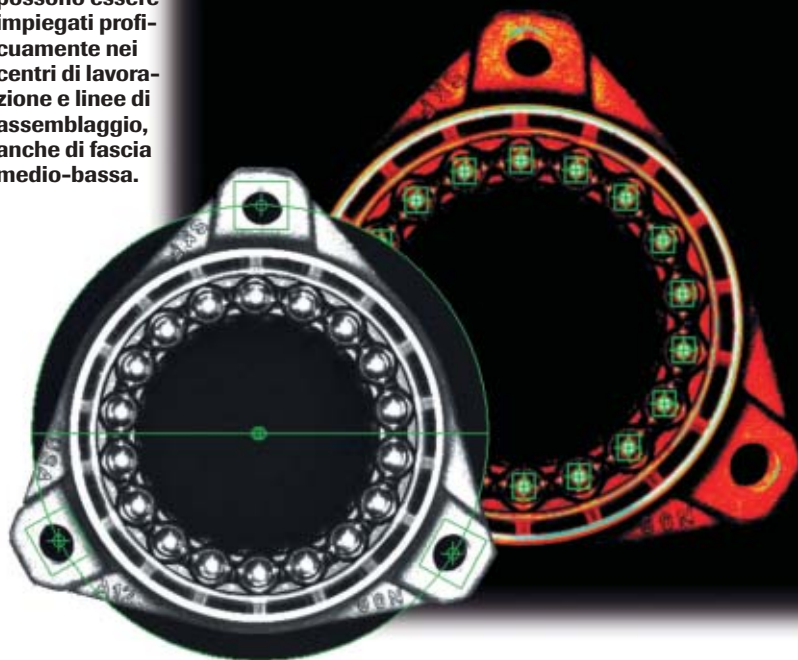
Cerchiamo di capire quali sono i vantaggi dei sistemi di acquisizione ed elaborazione delle immagini e in che modo i costruttori e gli utilizzatori di macchine utensili, impianti di produzione e sistemi di misura possono integrarli nei propri prodotti

consulenza qualificata da parte di aziende specializzate. Scopo del presente articolo è mostrare i vantaggi che un sistema di visione artificiale può apportare agli attori nel settore della meccanica, portando come esempi concreti alcune delle applicazioni realizzate da ImagingLab, società di consulenza con un saldo rapporto di collaborazione con National Instruments.

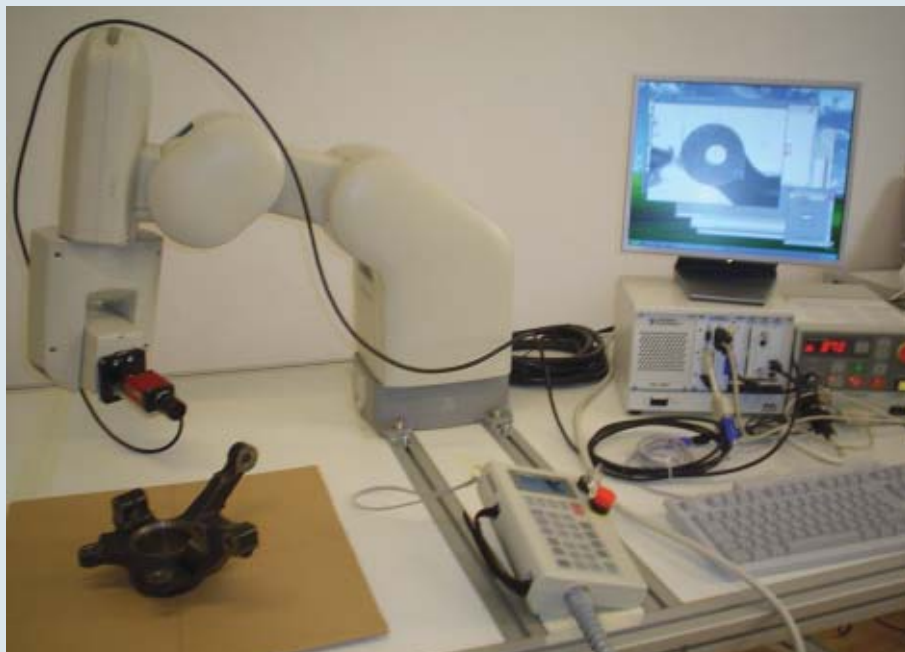
VISIONE ARTIFICIALE ED ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI

Un sistema di visione artificiale è essenzialmente un insieme di componenti hardware e software che acquisisce delle immagini in forma digitale e le elabora

I sistemi di visione artificiale possono essere impiegati proficuamente nei centri di lavorazione e linee di assemblaggio, anche di fascia medio-bassa.



opportunamente in modo da estrarre delle informazioni utili (ad esempio può delineare il profilo di un oggetto meccanico e verificarne le dimensioni). L'integrazione con il software di supervisione e controllo permette poi al sistema dotato di visione artificiale di prendere delle decisioni sulla base di quello che viene 'visto'. È chiaro che le potenziali applicazioni di una simile tecnologia sono infinite: nell'ambito della produzione industriale si va dai sistemi di rilevamento della presenza o dell'orientamento di un componente, all'ispezione visiva nel controllo di qualità, alla verifica di difformità nelle fasi intermedie di una catena di montaggio, fino alla manipolazione per il posizionamento o l'assemblaggio da parte di sistemi robotici.



L'impiego di robot antropomorfi permette di introdurre complessi sistemi di visione artificiale in impianti non predisposti a tale scopo.



Dettaglio del prototipo a guida robotica realizzato presso il laboratorio di ImagingLab con robot Mitsubishi e componenti di imaging National Instruments.

individuare le zone maggiormente sensibili alle deformazioni meccaniche; l'analisi spettrale consente di isolare solo le componenti di interesse nel mare di dati ottenuto dai sensori. Gli algoritmi per l'elaborazione delle immagini permettono di identificare gli oggetti all'interno del campo visivo, di contarli, verificarne le dimensioni e la disposizione spaziale, di segnalarne i difetti (a livello di dimensione, integrità o colore) e di riconoscere caratteri, scritte e codici a barre. Il fatto che tutto questo avvenga in tempi brevi e con un limitato margine di errore rende la visione artificiale più affidabile ed economica della tradizionale ispezione visiva umana.

I vantaggi conseguenti alla introduzione di un sistema di acquisizione ed elaborazione delle immagini non si limitano solo all'aspetto funzionale ma si estendono anche alla flessibilità del suo impiego. Dato che il sistema viene messo in grado di 'vedere', può essere istruito ad

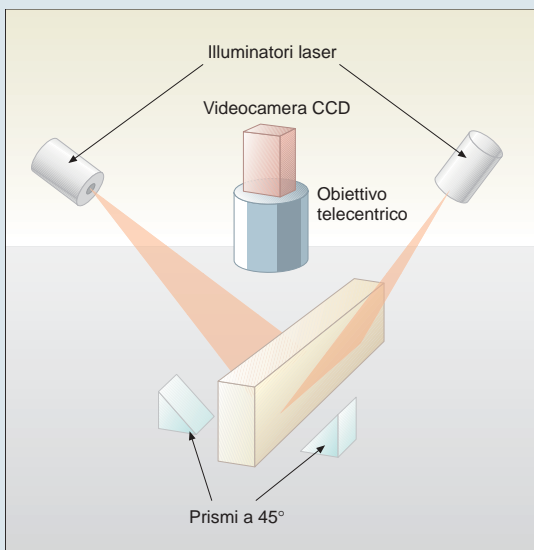
agire in maniera diversa a seconda di quello che vede. Adattare un sistema di *imaging* a lavorazioni differenti può richiedere una semplice riprogrammazione del software. Certe applicazioni possono addirittura adattarsi a lavorazioni completamente differenti sotto il profilo della disposizione spaziale del sistema di acquisizione delle immagini: si tratta dei sistemi che incorporano i sensori di acquisizione su bracci robotizzati che si posizionano correttamente in base alle necessità delle diverse fasi di lavorazione. In questo caso le modifiche al processo di lavorazione o il riciclo del sistema di visione su processi completamente differenti diventa una questione di mera riprogrammazione del robot; il maggior costo iniziale viene ammortizzato dalla riusabilità e dalla capacità di adattamento alle richieste di lavorazioni personalizzate e just-in-time.

CONSULENZA, PROGETTAZIONE E FORMAZIONE

La storia di ImagingLab ha inizio con l'istituzione nel 2000 di un laboratorio di *imaging* in seno a National Instruments, azienda che ha fatto della strumentazione virtuale la propria bandiera. Con il tempo le attività di ricerca e

Gli algoritmi di elaborazione delle immagini permettono di identificare oggetti, di contarli, verificarne le dimensioni e la disposizione spaziale e segnalare eventuali difetti a livello di dimensione, integrità o colore

Svariate tecniche permettono di estrarre tutta una serie di informazioni che sfuggirebbero all'operatore umano: l'analisi all'infrarosso può essere impiegata per verificare la presenza di punti caldi o di non uniformità; tecniche interferometriche permettono di



Schema di principio del sistema di misura dimensionale in linea di produzione di alette per radiatore.

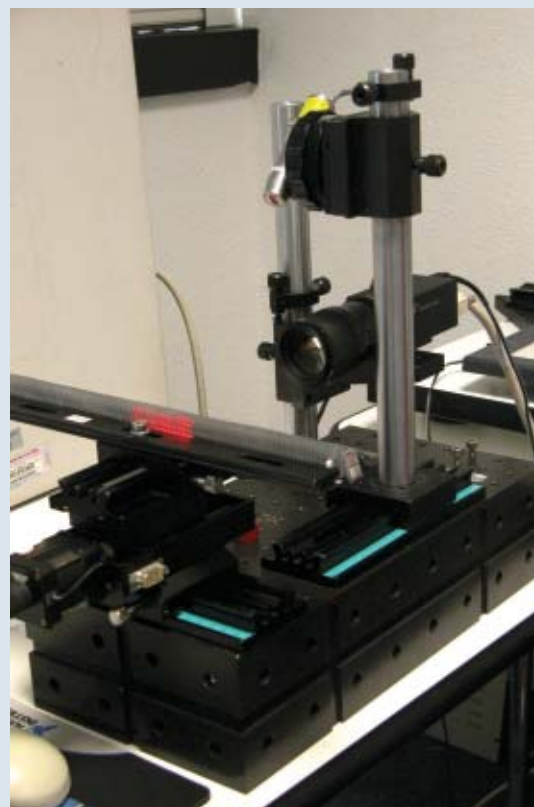
La visione artificiale è una tecnologia che può essere impiegata proficuamente anche dai piccoli e medi produttori di centri di lavorazione e linee di assemblaggio

sviluppo del laboratorio si sono moltiplicate fino a quando, nel Gennaio 2004 nasce ImagingLab S.r.l, una struttura a sé stante che conserva saldi legami con l'azienda di origine e che opera sotto la direzione tecnica di Ignazio Piacentini che ha ricoperto in NI il ruolo di business development manager di *Imaging* per l'Europa e che mantiene con NI il ruolo di *imaging* corporate consultant. Piacentini si occupa di *imaging* fin dai primi anni ottanta, ed è stato co-fondatore e direttore tecnico di Graftek Italia, che nel 1996 ha partecipato con Graftek France alla cessione a National Instruments della libreria software di *imaging* nota come Concept Vi. Questa acquisizione ha gettato le basi per lo sviluppo dell'intera linea di prodotti hardware e software IMAQ per l'acquisizione e il trattamento di immagini. Oggi ImagingLab si rivolge a OEM, integratori di sistemi, utenti finali e alliance member di National Instruments che intendano includere nei propri sistemi le più recenti tecnologie di visione artificiale riducendo al minimo gli investimenti economici e i tempi di apprendimento. La missione del laboratorio è quella di 'aiutare chi fa sistemi, senza fare sistemi': l'attività di analisi e progettazione di sistemi di visione completi viene portata

avanti assieme al committente e culmina in genere con la realizzazione di un prototipo da utilizzare come base per la produzione industriale. L'attività tradizionale non contempla lo sviluppo di sistemi 'chiavi in mano' che viene invece delegato alla rete di integratori di sistema certificati da NI. ImagingLab copre tutti gli aspetti che vanno dalle dimostrazioni concettuali agli studi di fattibilità, dalla definizione dell'architettura di sistema, all'identificazione degli algoritmi e alla scelta dei componenti, fino all'ottimizzazione delle prestazioni globali e alla formazione del personale tecnico. Uno studio di fattibilità permette all'utente di verificare l'applicabilità delle più avanzate tecnologie di visione artificiale a problemi specifici, quantificando l'impegno in termini economici e tecnici con un rischio e un investimento minimo. L'attività di formazione tenuta presso il cliente o la sede di Lodi, ha lo scopo di mettere il cliente nella condizione di affrontare la progettazione dei sistemi di visione artificiale. Vengono così affrontati i problemi di selezione dei componenti di acquisizione, di identificazione degli algoritmi più adatti, di scrittura del codice, di integrazione tra componenti hardware e software, fino all'analisi e all'ottimizzazione delle prestazioni.

HARDWARE E SOFTWARE PER LA VISIONE ARTIFICIALE

Un sistema di acquisizione ed elaborazione delle immagini è costituito da svariati componenti hardware e software. Per poter acquisire tutte e sole le informazioni rilevanti di



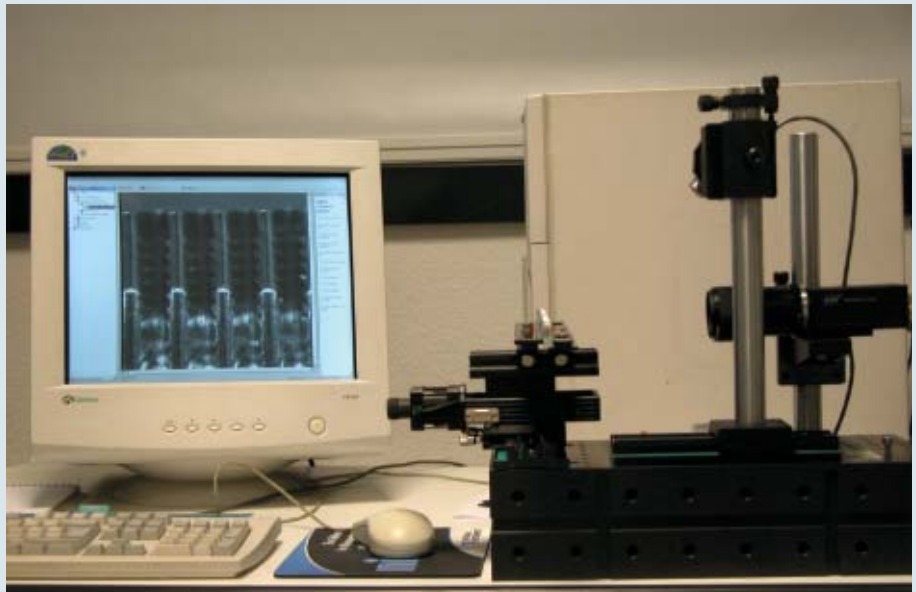
Prototipo realizzato da ImagingLab e dettaglio dell'illuminazione laser sulle alette in movimento.

un'immagine è in genere essenziale un'illuminazione appropriata; un'ampia gamma di illuminatori permette di soddisfare le diverse esigenze in termini di direzionalità, coerenza e frequenza della radiazione. La luce riflessa, trasmessa o bloccata dall'oggetto illuminato viene raccolta, previo il passaggio in opportuni sistemi ottici (specchi, prismi, lenti) dai sensori ottici che sono rappresentati dalle telecamere a colori o in bianco e nero in grado di scandire una regione lineare o un'area all'interno del proprio campo visivo. Le informazioni sono passate ai sistemi di visione vera e propria, *frame grabber* digitali e analogici, che provvedono ad

estrarre le caratteristiche di interesse dall'immagine e a passarle ai sistemi di elaborazione. Elaborazione che può avere luogo su una piattaforma di tipo PC, tradizionale o industriale, su un sistema modulare espressamente pensato per le applicazioni di strumentazione o su sistemi dedicati che racchiudono al loro interno tutte le funzionalità necessarie all'applicazione. I sistemi non PC possono essere dotati di sistemi operativi in tempo reale (RTOS, Real Time Operating System) che offrono maggiori garanzie in termini di determinismo e robustezza. Dato lo stretto legame con National Instruments, ImagingLab offre come scelte naturali per le ultime due piattaforme lo standard PXI (PCI eXtension for Instrumentation) e i sistemi di visione CVS (Compact Vision System). L'adozione di tecnologia NI presenta un ulteriore valore aggiunto: la disponibilità di un unico ambiente software in grado di gestire l'acquisizione e l'elaborazione delle immagini, il controllo assi, l'acquisizione dati da sensori di altro tipo e i compiti di automazione e controllo di processo. La possibilità di scrivere applicativi nel linguaggio di alto livello di LabVIEW consente ai costruttori di macchine di ridurre i tempi di sviluppo e la curva di apprendimento da parte dei progettisti. La facilità di programmazione e integrazione del sistema di visione nei sistemi complessi rappresenta il vero salto di qualità che questa tecnologia ha subito negli ultimi anni. Parallelamente a quanto avviene con i tradizionali sistemi di elaborazione, l'hardware si evolverà verso sistemi sempre più performanti a costi sempre più bassi, mentre la maggior parte delle risorse per lo sviluppo saranno impegnate nello sviluppo, il debug e l'integrazione del software.

APPLICAZIONI NEL SETTORE MECCANICO

Le applicazioni dei sistemi di visione artificiale interessano i settori più svariati. Abbiamo già



Alla fase di sviluppo su piattaforma PC, mostrata in figura, fa seguito l'implementazione su sistemi che meglio si adattano alle esigenze di impiego nella linea di produzione, come i componenti CVS.

accennato ad alcune possibilità di impiego, come l'ispezione visiva nel controllo di qualità e la retroazione nei sistemi di manipolazione e assemblaggio che rivestono un interesse particolare per chi si occupa direttamente o indirettamente di meccanica. Prima di analizzare due esempi concreti di questo tipo, vale la pena soffermarsi ancora sui motivi che possono spingere un costruttore o un utilizzatore di macchine a fare uso di questa tecnologia. La rapidità di ispezione dei pezzi gioca un ruolo fondamentale in una linea di assemblaggio: riuscire a identificare una parte difettosa prima che questa subisca ulteriori dispendiose lavorazioni o, peggio ancora, vada a inficiare il lavoro fatto a monte e a valle della catena di montaggio, può contribuire a migliorare significativamente la resa produttiva. Così se è impensabile che un operatore umano possa controllare in una frazione di secondo l'integrità di tutti i cuscinetti a sfera presenti su ciascun pezzo da assemblare, questa è invece ordinaria amministrazione per un sistema di visione artificiale. In certi casi il ricorso ai sistemi di *imaging* è imposto dalle esigenze di precisione della lavorazione: si pensi ad esempio ai sistemi di allineamento delle fibre ottiche. In altri casi ancora quello che

deve essere 'visto' non può essere apprezzato da un operatore umano: la radiazione infrarossa percepita dai sensori per termografia ne è un esempio. I sistemi di questo tipo sono di grande rilevanza per i produttori di parti meccaniche: vengono utilizzati per rilevare difetti del materiale, per effettuare analisi non distruttive di materiali compositi e per verificare l'uniformità della distribuzione di temperatura negli stampi termoplastici complessi.

UN SISTEMA FLESSIBILE CON BRACCIO ROBOTICO

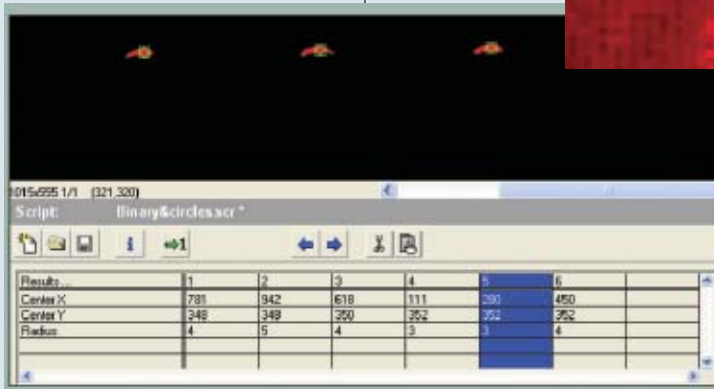
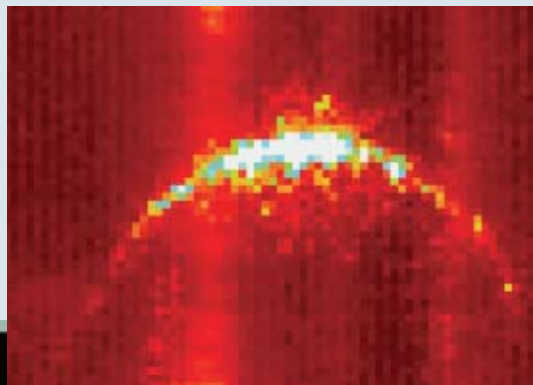
Un'applicazione significativa in termini di flessibilità messa a punto da ImagingLab prevede l'impiego di un robot antropomorfo a basso *payload* per posizionare una videocamera con coordinate e angoli di ripresa predeterminati. Un sistema di questo tipo trova applicazione nei sistemi di ispezione e assemblaggio di pezzi meccanici caratterizzati da una certa complessità che fanno parte di linee di produzione per lotti limitati (produzione *just-in-time*) dove il costo di re-tooling va mantenuto al minimo. Nel sistema messo a punto da ImagingLab è stato utilizzato un robot Mitsubishi Melfa RV-24 a sei assi, equipaggiato con una videocamera digitale a media e

I vantaggi di un sistema di acquisizione ed elaborazione delle immagini si estendono anche alla flessibilità e alla riusabilità dell'applicazione, specie quando il sistema fa uso di bracci robotici

Nell'ambito delle applicazioni di assemblaggio i sistemi di imaging possono essere impiegati per l'inserimento di contatti nei connettori, la verifica di ranelle e dadi, l'inserimento di coppiglie e moltissimi altri scopi

alta risoluzione, completa di ottica e illuminazione. L'unità di controllo che implementa il sistema di visione artificiale incorpora l'interfaccia di comunicazione con il robot ed è realizzata con un sistema configurabile di tipo CVS o con un sistema programmabile PXI, di National Instruments. Il

anteriore della ruota di un autoveicolo (pezzo che presenta un alloggiamento per il cuscinetto del semiasse, attacchi per la tiranteria dello



Il software per l'elaborazione delle immagini permette la massima flessibilità nell'identificazione dei parametri da misurare e delle azioni da intraprendere sulla base dei rilevamenti effettuati.

software applicativo si basa su LabVIEW e sulle librerie IMAQ e utilizza i comandi propri di programmazione del robot per gestirne l'asservimento. Risulta così possibile 'insegnare' al robot una sequenza di posizioni della videocamera, specificare le modalità di acquisizione per ciascuna posizione e stabilire quali siano le procedure da seguire e i criteri di pass/fail per ogni passo o sequenza di passi (come nel caso di una misura di interesse). Un sistema di questo tipo può essere utilizzato per verificare l'integrità di tutte le superfici lavorate per fresatura, effettuare misure relative e interassi delle forature o verificare la presenza o assenza di filetti e l'eventuale presenza di una punta di maschiatura in seguito alla rottura dell' utensile. L'accuratezza delle misure è ovviamente limitata dalla tolleranza di posizionamento del braccio robotizzato che nel caso in questione è di $\pm 0,04$ mm su un arco di sbarrico di 600 mm. La cadenza di produzione è compatibile con i tempi di movimentazione del robot, tipicamente superiore alla decina di secondi. Ad esempio, la lavorazione di un supporto

sterzo e ammortizzatore, vari fori, filettati e non, per il montaggio della pinza del freno) richiede meno di trenta secondi: l'ispezione di dieci-venti punti impiega tra i cinque e gli otto secondi in totale.

MISURE DIMENSIONALI DI PEZZI IN MOVIMENTO

L'efficienza dei sistemi di visione artificiale in linea di produzione è ancora meglio esemplificata dal controllo dimensionale delle alette di raffreddamento di un radiatore. L'oggetto da misurare è ottenuto per formatura su linea continua di una bandella di alluminio con una velocità di ingresso di 300 m/min. La piegatura a 'fisarmonica' presenta delle creste arrotondate con sezione circolare e dimensioni tipiche in altezza comprese tra 4,5 e 8 mm. La misura sul pezzo in rapido movimento è complicata dalla dimensione limitata del punto da misurare (idealmente è il punto di tangenza della cresta semicircolare), dalla riflettività del materiale e dalle oscillazioni delle creste delle alette. Il sistema sviluppato da ImagingLab risolve

questi problemi utilizzando un'illuminazione con lama laser inclinata su ambo le facce del manufatto in modo da eliminare gli errori di misura dovuti alle variazioni locali delle distanze picco-picco, e mediando le distanze tra più coppie di creste successive. Il software di elaborazione delle immagini impiegato permette di applicare i filtri necessari a ottimizzare le diverse misure (essenzialmente per evidenziare solo le creste e non il riflesso delle gole) e a estrarre dai dati raccolti il valore medio con la accuratezza prestabilita (nel caso in oggetto $\pm 0,05$ mm). Il prototipo realizzato nei laboratori di ImagingLab è una versione semplificata del sistema reale ed è composto da un traslatore meccanico motorizzato che supporta l'oggetto da misurare, una videocamera digitale con obiettivo telecentrico, e un proiettore di linea laser montato a 45 gradi rispetto all'asse della videocamera. L'interfacciamento all'impianto (per comunicare il risultato del test pass/fail) può avvenire mediante linee di I/O optoisolate, linea seriale, o collegamento Ethernet. Lo studio e lo sviluppo del prototipo sono stati effettuati su un PC desktop con sistema operativo Microsoft e software di configurazione e programmazione NI: Vision Assistant, Vision Builder AI, LabVIEW e librerie IMAQ. Per il sistema 'reale' da utilizzare in linea di produzione è stata scelta come piattaforma un sistema compatto CVS 1454, basato su microprocessore Intel e sistema operativo in tempo reale.

Si ringrazia l'ing. Ignazio Piacentini, direttore tecnico di ImagingLab Srl, per il contributo fornito nella stesura di questo articolo.

In certi casi il ricorso ai sistemi di imaging è imposto dalle esigenze di precisione della lavorazione o dall'insensibilità dell'occhio umano allo spettro della radiazione da rilevare