

Telecamere Lineari, tecnologia e applicazioni

Adriano Fusco, Roberto Giansante

L'articolo descrive il principio di funzionamento della scansione lineare, le caratteristiche e le prestazioni offerte dalle telecamere lineari oggi presenti sul mercato, le problematiche relative ad ottiche, sistemi di illuminazione, posizionamenti meccanici e trattamento delle immagini acquisite.

Il concetto di scansione lineare consiste nel ricostruire l'immagine di un oggetto una linea alla volta, o perché questo passa sotto il raggio della telecamera lineare, oppure (molto più raramente) perché è questa a muoversi sull'oggetto.

sulla linea dell'arrivo.

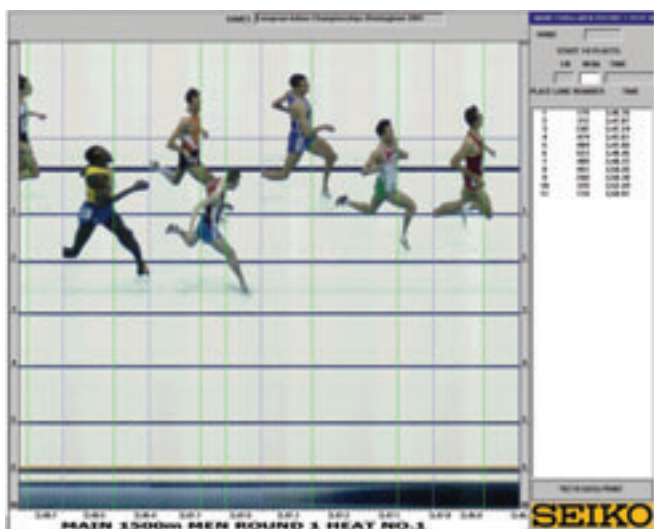
Il risultato è una immagine della linea di arrivo in funzione del tempo.

Questo esempio è anche utile per mostrare come l'immagine ottenuta con questa tecnica presenti delle deformazioni che dipendono dalla variazione di velocità del soggetto o di parti di questo come nel caso degli atleti.

Nella figura 2 si nota che le estremità delle gambe appaiono più sottili in quanto la loro velocità di scorrimento è maggiore della velocità media del resto del corpo.



Figura 1 - Principio di funzionamento della ricostruzione lineare



Questo principio è utilizzato da moltissimi anni in numerose applicazioni: generalmente gli esempi più citati per spiegarlo sono il fax, la fotocopiatrice, gli scanner.

Un altro esempio di applicazione di questa metodologia è il fotofinish, inventato negli anni '30 e costituito da un sistema fotografico in cui una pellicola veniva fatta scorrere a velocità costante in corrispondenza di una fessura verticale puntata

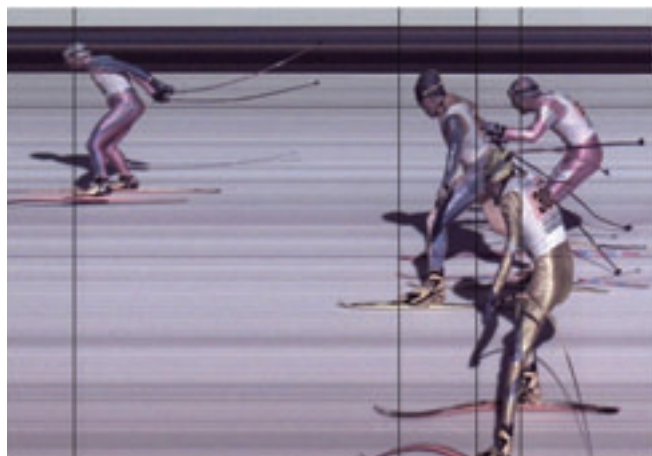


Figure 2 e 3 - Immagini di fotofinish (fonte Seiko)

Il fenomeno è ancora più evidente nella terza immagine, dove le racchette e gli sci dei fondisti appaiono curvi per effetto della componente di moto ortogonale alla linea di ripresa della telecamera.

Caratteristiche e prestazioni delle telecamere lineari

Le caratteristiche di una telecamera lineare sono comune-

A. Fusco, Amministratore delegato di Accutech Srl; R. Giansante - Technical manager di Accutech Srl

mente riferite al numero di pixel del sensore, al tipo di sensore (colore o bianco/nero), alla frequenza di scansione, alla dinamica e all'interfaccia di comunicazione.

I sensori

Le telecamere lineari per utilizzi industriali oggi impiegano sensori che vanno nella maggior parte dei casi da 512 a 8.192 pixel, con punte che possono superare i 10.000 pixel, e con dimensioni dei singoli pixel che vanno progressivamente riducendosi.

Diminuendo l'area del singolo pixel, diminuisce anche la quantità di luce che va ad incidervi: la sfida progettuale consiste nel cercare di mantenere la stessa sensibilità senza peggiorare il rapporto segnale rumore.

Un sensore con più pixel è fisicamente più lungo: fino a 1000-2000 pixel si possono ancora utilizzare ottiche con passo C (quelle normalmente usate per le camere matriciali), ma incrementando il numero di pixel sono necessarie ottiche di passo maggiore come l'F o ancora superiori.

La frequenza di scansione indica il massimo numero di linee che si possono ottenere nell'unità di tempo e dipende oltre che dal livello tecnologico della telecamera, dal numero di pixel: se con un sensore da 512 pixel oggi si possono avere frequenze prossime ai 100 kHz, raramente si superano i 10 kHz con sensori da 8000 pixel.

All'aumentare della frequenza di scansione diminuisce il tempo massimo di esposizione possibile, (ad esempio con una frequenza di 100 kHz il tempo massimo di esposizione è di 10 microsecondi) quindi nelle applicazioni più critiche può essere necessario applicare livelli di illuminazione molto elevati.

La dinamica è data dal numero di livelli in cui viene quantizzata la luminosità catturata dal singolo pixel: normalmente in ambito industriale si utilizzano 8 bit per pixel (256 toni) lasciando dinamiche superiori (10-12 bit) ad impieghi in ambito scientifico e medicale.

Nelle applicazioni industriali l'utilizzo del colore è finora stato marginale: la scarsa disponibilità di algoritmi di elaborazione di immagine, i maggiori tempi di acquisizione delle immagini e di trasmissione e i maggiori tempi di elaborazione necessari, ne sono le principali ragioni.

I sensori a colori sono costituiti da tre linee di pixel che - attraverso l'uso di filtri - rispondono rispettivamente ai tre colori RGB, Rosso, Verde Blu.

I sensori possono essere disposti in due modi:

- Adiacenti e spazati di un certa distanza (si parla in questo caso di sensori trilinear). In questo modo ad ogni acquisizione, ognuno dei sensori va ad acquisire una zona di oggetto leggermente spaziata dall'altro (questa distanza dipende dalle ottiche utilizzate e dalla distanza di lavoro) questa differenza spazio/temporale può essere compensata direttamente dal firmware della telecamera oppure da un software di postprocess che risincronizza le varie componenti del colore.
- Utilizzando un prisma che scompone il raggio di luce focalizzato dall'obiettivo in tre fasci (come per le telecamere matriciali a 3 CCD). In questo modo si ottiene una conver-

genza perfetta delle linee ma una minore sensibilità (di un fattore 3) in quanto la luce proveniente da una singola linea viene ripartita sui tre diversi sensori che daranno l'RGB.

Gli standard di comunicazione

A livello di interfaccia sono stati codificati nel tempo vari standard, con capacità di trasferimento via via maggiori.

La tabella 1 riporta una breve sintesi dei principali standard presenti e in fase di introduzione (il 10 GigaE) e delle prestazioni offerte.

La novità più recente ed interessante è costituita dalla comparsa sul mercato di vari modelli di telecamere con interfaccia Giga Ethernet, che, pur non raggiungendo le velocità del camera link, permette di interfacciare le telecamere direttamente ad un PC, senza quindi dover ricorrere ad un frame grabber.

Standard	Millions of 8 bit Pixel / sec
Firewire/USB	80 MegaPixel
GigE	100 Megapixel
Camera Link	800 Megapixel
10GigE	1 GigaPixel per canale, più canali disponibili sullo stesso cavo

Tabella 1 - Principali standard di comunicazione per immagini digitali

Modi di funzionamento

Nelle applicazioni con telecamere matriciali l'acquisizione dell'immagine viene comunemente comandata da un segnale di trigger attivato da una fotocellula al passaggio dell'oggetto.

Nelle telecamere lineari questo non è sufficiente, poiché ogni singola linea deve essere correlata a quelle adiacenti secondo una certa regola geometrica.

Le telecamere lineari hanno due tipici modi di funzionamento:

- Free run, nel quale l'acquisizione di ogni linea avviene con una frequenza programmabile e decisa in base alle caratteristiche di velocità dell'applicazione, per ottenere un'immagine dalle caratteristiche desiderate.
- Sincronizzazione esterna: nel quale l'acquisizione di ogni linea viene comandata da un trigger esterno, tipicamente il segnale di fase di un encoder asservito al movimento dell'oggetto da riprendere.

In entrambi i casi le scansioni devono rientrare nei limiti della massima frequenza possibile della telecamera.

La prima modalità è utilizzabile efficacemente solo nel caso in cui la velocità dell'oggetto sia costante, e può essere molto utile in fase di testing iniziale quando si inizia a studiare l'applicazione senza avere già a disposizione la meccanica definitiva.

Nel caso la velocità vari sensibilmente o addirittura il pezzo sia soggetto a fermate, questo sistema porterebbe a deformazioni del tutto inaccettabili dell'immagine ottenuta.

La figura 4 mostra l'immagine di un cuscinetto a sfera (circolare) che si muove in accelerazione: la parte in alto del cuscinetto, essendo transitata a velocità minore, risulta allungata

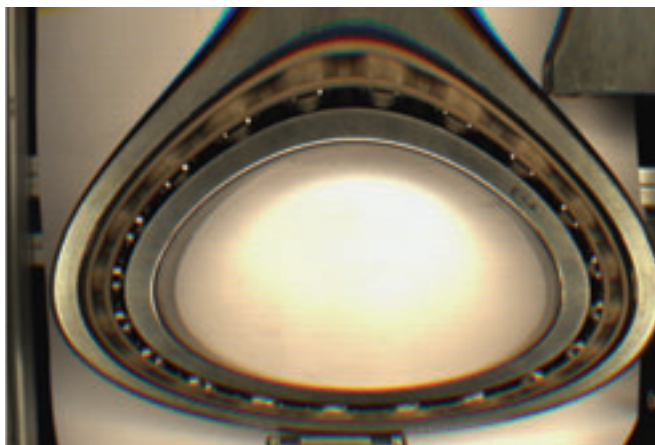


Figura 4 - Immagine di un cuscinetto a sfera in transito a velocità variabile ripresa da una telecamera lineare in modalità free run (senza sincronizzazione ad un encoder) - (fonte Accutech)

rispetto alla parte in basso che invece è transitata a velocità maggiore.

In questa immagine si intravede anche il problema dell'allineamento dei colori, che verrà descritto nel paragrafo successivo.

Poiché nelle normali applicazioni industriali molto spesso la velocità dei sistemi di movimentazione non è costante e possono verificarsi fermate e ripartenze, la sincronizzazione delle acquisizioni con un encoder è una prassi pressoché irrinunciabile.

Non è detto che la risoluzione nel senso della larghezza dell'oggetto (data dalla dimensione del sensore e dall'area inquadrata) e quella longitudinale (determinata invece dalla frequenza di acquisizione e dalla velocità di movimento dell'oggetto) debbano per forza coincidere, anche se per facilità di interpretazione e display delle immagini spesso si progetta il sistema in questo modo.

L'analisi di un oggetto di forma circolare evidenzia chiaramente i tre casi che possono verificarsi:

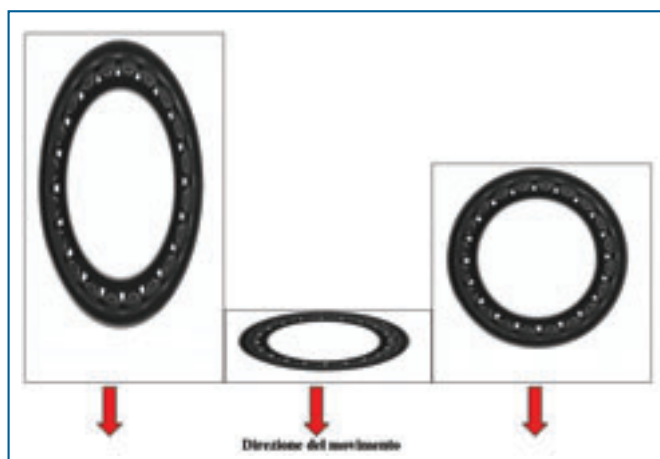


Figura 5 - Tre immagini di un cuscinetto a sfera riprese con risoluzioni verticale e orizzontale diverse e sincronizzazione con encoder (fonte Accutech)

Nell'immagine della figura 5 la risoluzione verticale è molto maggiore di quella orizzontale (sovracampionamento), nell'immagine centrale accade il contrario (sottocampionamento), nell'immagine di destra è stata ottenuta la stessa risoluzione in entrambe le direzioni sincronizzando opportunamente le acquisizioni con la velocità dello spostamento.

Applicazioni tipiche e vantaggi rispetto ai sistemi matriciali

I sistemi lineari vengono tradizionalmente applicati nella "web inspection" cioè nell'ispezione di oggetti continui (ad esempio rotoli di carta, tessuto, vetri, colate di metallo, produzione di estrusi, ecc.); oggetti cioè molto lunghi o che non hanno una lunghezza definita.

Possono altresì essere applicati per acquisire ed elaborare immagini ad alta risoluzione di oggetti con simmetria cilindrica che allo scopo vengono posti in rotazione anche veloce di fronte alla telecamera (ad esempio bottiglie, tubetti per prodotti farmaceutici ecc.).

Rispetto alle attuali telecamere matriciali per image processing, che hanno tipicamente aree di 1-2 Mega pixel con punte oggi di 4-5 megapixel, l'utilizzo di camere lineari permette di gestire immagini anche di 80-100 Megapixel.

L'elevata risoluzione ottenibile con una sola telecamera lineare, fa le veci di più telecamere matriciali ed evita le complicazioni architetturali legate alla combinazione di più immagini: difficoltà del posizionamento e puntamento delle telecamere, gestione delle sovrapposizioni e dei dati ridondanti, connessioni al sistema di elaborazione, ecc. A tutto vantaggio della semplicità architetturale e concettuale del sistema sia hardware che software.

Un esempio numerico può chiarire meglio questo concetto:

Supponiamo di dover controllare un oggetto di dimensioni 200 x 400 mm e che per le funzioni di controllo ci occorra una risoluzione di 0,1 mm. Occorre quindi disporre di un'inquadratura complessiva di almeno 2000x4000 pixel.

Soluzione con telecamere matriciali:

Supponendo di disporre di telecamere con risoluzione massima 1600x1200 pixel sarebbe necessario coprire la zona di analisi con almeno sei telecamere disposte su due file di tre.

Le telecamere dovrebbero avere un'area di sovrapposizione che dovrebbe poi essere eliminata dal software.

La gestione di sei telecamere, sia con un'architettura PC based che con elaboratori di immagine dedicati presenterebbe una notevole complessità.

Soluzione con telecamera lineare:

È sufficiente un sensore da 2000 pixel in modo da inquadrare il lato minore dell'oggetto, movimentandolo poi lungo la direzione del lato maggiore ottenendo così un'immagine di 2000x4000 pixel e quindi ottenendo la precisione richiesta

Tabella 2 - esempio di dimensionamento di un sistema di controllo qualità

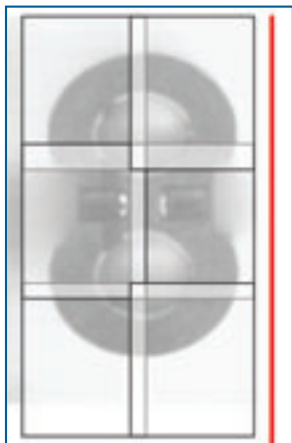


Figura 6 - Disposizione di telecamere matriciali per coprire l'area di analisi

Figura 7 - Comparazione di immagini di superfici lucide acquisite con un sistema lineare e uno matriciale (fonte Accutech)

Forse meno immediato come comprensione è il controllo dell'angolo di incidenza della ripresa (tutto l'oggetto viene ripreso esattamente da un angolo noto).

Un altro vantaggio non trascurabile è il miglior controllo dell'illuminazione e dei riflessi su tutto l'oggetto da controllare: è sufficiente illuminare una sottile striscia e quindi angolare l'incidenza della luce in modo da eliminare tutti i riflessi indesiderati (o accentuare quelli voluti).

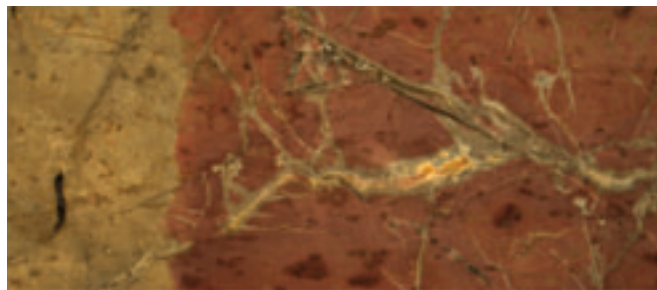


Figura 8 - Comparazione di immagini di superfici lucide acquisite con un sistema lineare e uno matriciale (fonte Accutech)

Per finire possiamo citare la possibilità di riprendere oggetti in rapido movimento senza necessità di complessi sistemi di illuminazione ad esempio strobati e l'occupazione di una zona ristretta (virtualmente una semplice linea) per il sistema di illuminazione e la zona di analisi.

Criticità

I principi fondamentali dell'ottica, le tecniche di illuminazione, gli algoritmi di elaborazione delle immagini, si applicano sostanzialmente allo stesso modo sia alle riprese con le tradizionali telecamere matriciali che alle lineari; queste ultime però presentano alcune caratteristiche e problematiche che fanno sì che esse vengano viste come sistemi più specialistici e siano

molto meno utilizzate sul mercato.

Mentre nel caso di una telecamera matriciale è sufficiente una buona messa a fuoco e un'illuminazione omogenea per ottenere facilmente delle immagini abbastanza fedeli al soggetto inquadrato, nel caso delle telecamere lineari è necessaria una grande precisione degli allineamenti meccanici e della sincronizzazione tra l'oggetto in movimento e le acquisizioni per ottenere lo stesso risultato.

Le criticità del line scanning sono quindi essenzialmente legate all'illuminazione, alle ottiche, all'installazione sul campo:

l'illuminazione deve essere assolutamente uniforme su tutto il campo visivo, pena la formazione di strisce di colore o luminosità leggermente diverse molto evidenti anche a fronte di piccole discontinuità. Questi problemi possono presentarsi ad esempio quando è necessario illuminare zone molto larghe e non sia possibile affiancare in modo continuo gli illuminatori a causa della loro conformazione meccanica.

L'intensità luminosa deve essere molto elevata (se pure concentrata su piccole aree) per consentire frequenze di acquisizioni elevate (e quindi tempi di esposizione molto bassi) delle applicazioni più veloci.



Figura 9 - Una leggera differenza (inferiore del 5%) della temperatura del colore dei led impiegati per l'illuminazione, se non compensata, risulta molto evidente (fonte Accutech)

È necessario prestare una grande attenzione alla convergenza del percorso ottico della telecamera con quello dell'illuminatore (questa convergenza varia al variare dell'altezza dell'oggetto da riprendere).

Le ottiche devono garantire un elevato potere risolutivo per sfruttare realmente tutti i pixel messi a disposizione dal sensore. Normalmente quindi vengono impiegate ottiche di elevatissima qualità con costi molto superiori a quelli delle normali telecamere matriciali.

Nell'acquisizione di immagini a colori con sensori del tipo tri-linear lo sfasamento spaziale dei sensori può creare problemi di disallineamento dei colori, se la velocità dell'oggetto varia entro range troppo ampi o se l'oggetto ha dimensioni verticali troppo variabili (tali cioè da introdurre problemi di prospettiva).

Un ulteriore problema è che l'illuminazione deve essere costante non sullo spazio di una singola linea (che è infinitesimo e viene reso di qualche millimetro esclusivamente per facilitare l'allineamento della telecamera con la sorgente di illuminazione)

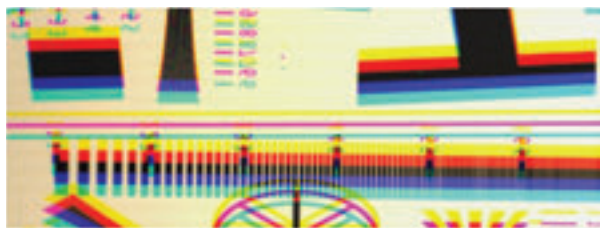


Figura 10 - Un'immagine di test acquisita con un offset errato rispetto alla velocità di traslazione (fonte Accutech)

ma sull'intervallo spaziale delle tre linee (che può arrivare a essere anche di qualche centimetro).

A livello di installazione, vale la pena di sottolineare che alcune operazioni del tutto banali operando con una telecamera matriciale come il puntamento, la regolazione della messa a fuoco e del diaframma, sono tutt'altro che scontate, soprattutto quando si va ad operare in ambienti industriali e su campi inquadrati di dimensioni considerevoli.

Occorre innanzitutto allineare il punto di vista della telecamera con l'oggetto e con il sistema di illuminazione: alcuni pattern campione possono aiutare poi nella messa a fuoco, nella eventuale compensazione di disuniformità dell'illuminazione, nella regolazione dei diaframmi.

Lo stesso posizionamento meccanico deve essere effettuato con una precisione e accuratezza superiore rispetto alle telecamere matriciali poiché anche piccoli disallineamenti influiscono negativamente sulla qualità delle immagini e sul risultato delle elaborazioni.

Se si aggiungono poi i classici problemi di installazione meccanica degli encoder o l'interfaccia elettrica con gli encoder già esistenti sulle linee di movimentazione, il risultato è che più tecnici specializzati possono impiegare alcune ore anche solo per arrivare a realizzare un corretto setup che consenta l'acquisizione di una buona immagine.

Conclusioni

Il principio della scansione lineare presenta caratteristiche ideali per molte applicazioni di controllo qualità in linea anche al di là della classica web inspection.

I vantaggi funzionali illustrati in questa relazione tuttavia, sono stati in parte oscurati dalle oggettive maggiori difficoltà di impiego e dai maggiori costi, per cui la propensione a sperimentare questa tecnologia da parte di molti operatori del settore è stata finora relativamente bassa.

L'introduzione di molti nuovi modelli a costi più contenuti e l'accumulo di esperienza nelle applicazioni tradizionali dovrebbe invogliare in futuro un maggior numero di integratori di sistema a sperimentare i confini di questa tecnologia.

Si tratta infatti di una metodologia non solo molto efficace ma anche molto stimolante per integratori di sistema e tecnici di alto livello alla ricerca continua di strade innovative e dell'eccellenza nelle soluzioni offerte. ■

INFORMATIVA AI SENSI DEL CODICE IN MATERIA DI PROTEZIONE DEI DATI PERSONALI Informativa art. 13, d. lgs 196/2003

I dati degli abbonati sono trattati, manualmente ed elettronicamente, da Edizioni Fiera Milano SpA – titolare del trattamento – Via Salvatore Rosa 14, Milano - per l'invio della rivista richiesta in abbonamento, attività amministrative ed altre operazioni a ciò strumentali, e per ottemperare a norme di legge o regolamento. Inoltre, solo se è stato espresso il proprio consenso all'atto della sottoscrizione dell'abbonamento, Edizioni Fiera Milano SpA potrà utilizzare i dati per finalità di marketing, attività promozionali, offerte commerciali, analisi statistiche e ricerche di mercato. Alle medesime condizioni, i dati potranno, altresì, essere comunicati ad aziende terze (elenco disponibile a richiesta a Edizioni Fiera Milano SpA) per loro autonomi utilizzi aventi le medesime finalità. Responsabile del trattamento è: Paola Chiesa.

Le categorie di soggetti incaricati del trattamento dei dati per le finalità suddette sono gli addetti alla gestione amministrativa degli abbonamenti ed alle transazioni e pagamenti connessi, alla confezione e spedizione del materiale editoriale, al servizio di call center, ai servizi informativi.

Ai sensi dell'art. 7, d. lgs 196/2003 si possono esercitare i relativi diritti, fra cui consultare, modificare, cancellare i dati od opporsi al loro utilizzo per fini di comunicazione commerciale interattiva rivolgendosi a Edizioni Fiera Milano SpA – Servizio Abbonamenti – all'indirizzo sopra indicato. Presso il titolare è disponibile elenco completo ed aggiornato dei responsabili.

Informativa resa ai sensi dell'art. 2, Codice Deontologico Giornalisti

Ai sensi dell'art. 13, d. lgs 196/2003 e dell'art. 2 del Codice Deontologico dei Giornalisti, Edizioni Fiera Milano SpA – titolare del trattamento - rende noto che presso i propri locali siti in Milano, Via Salvatore Rosa 14, vengono conservati gli archivi di dati personali e di immagini fotografiche cui i giornalisti, praticanti e pubblicisti che collaborano con le testate editate dal predetto titolare attingono nello svolgimento della propria attività giornalistica per le finalità di informazione connesse allo svolgimento della stessa. I soggetti che possono conoscere i predetti dati sono esclusivamente i predetti professionisti, nonché gli addetti preposti alla stampa ed alla realizzazione editoriale delle testate. I dati personali presenti negli articoli editoriali e tratti dai predetti archivi sono diffusi al pubblico. Ai sensi dell'art. 7, d. lgs 196/2003 si possono esercitare i relativi diritti, fra cui consultare, modificare, cancellare i dati od opporsi al loro utilizzo, rivolgendosi al titolare al predetto indirizzo. Si ricorda che, ai sensi dell'art. 138, d. lgs 196/2003, non è esercitabile il diritto di conoscere l'origine dei dati personali ai sensi dell'art. 7, comma 2, lettera a), d. lgs 196/2003, in virtù delle norme sul segreto professionale, limitatamente alla fonte della notizia. Presso il titolare è disponibile l'elenco completo ed aggiornato dei responsabili.