

X-Loader 4.0

Fabio Poiesi¹, Carla Maria Modena¹, Dimitri Giordani¹, Stefano Messelodi¹, Emanuele Salandin²

¹Fondazione Bruno Kessler, ²Phox Industrial Plants – Cinetix S.r.l.

<poiesi, modena, dimi, messelod>@fbk.eu, emanuele.salandin@phox-eng.it

Abstract

X-Loader 4.0 è un progetto industriale che prevede l'utilizzo di due bracci antropomorfi collaborativi per la preparazione automatizzata di telai con articoli destinati a subire un trattamento galvanico. In X-Loader 4.0 è stato sviluppato un modulo di visione artificiale in grado di fornire al sistema robotico le coordinate degli articoli da movimentare e la posizione spaziale delle punte di montaggio del telaio. Il sistema di visione è in grado di gestire casi in cui i telai di caricamento risultino danneggiati a causa del loro uso ripetuto e di verificare che gli articoli siano posizionati correttamente sul telaio[†].

1 Introduzione

I trattamenti galvanici consistono nel deposito di un sottile strato metallico sulla superficie di manufatti in modo da migliorarne determinate caratteristiche estetiche e funzionali. L'industria galvanica è oggi una delle più importanti e più diffuse a livello nazionale, essendo i processi galvanotecnici impiegati in un gran numero di produzioni meccaniche industriali e artigianali. Infatti le lavorazioni galvaniche interessano numerosi settori produttivi, quali automotive, avionica, elettronica, arredo, edilizia, ed altri. Nel processo di lavorazione gli oggetti vengono appesi ad appositi telai, specifici per il trattamento superficiale, che possono alloggiare anche 200-300 pezzi. In un impianto di medie dimensioni sono caricati da 10 a 15 telai/ora. I pezzi trattati sono spesso destinati a prodotti di grande pregio, come ad esempio le auto di lusso, e pertanto devono presentare superfici prive di difetti: le operazioni di scarico necessitano di un'attenzione elevata nella manipolazione dei manufatti per evitare di produrre danni anche minimi, il che si ripercuote sui tempi di produzione. Queste argomentazioni fanno intuire l'interesse da parte dell'industria galvanica per l'automazione del processo di carico e scarico dei telai.

Il progetto X-Loader 4.0 mira ad automatizzare, tramite robot collaborativi, le operazioni di carico e scarico di telai porta pezzi per impianti di trattamento superficiale, in particolare impianti galvanici per cromatura di pezzi in plastica. Benché

[†]Il progetto X-Loader 4.0 è stato finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento (Italia) attraverso L.P. 6/99.

altamente ripetitiva, si tratta di un'operazione semplice da effettuare per un essere umano, ma complessa da emulare con un robot, a causa (i) dell'estrema variabilità delle forme e dimensioni dei pezzi che spaziano da pochi centimetri fino anche a due metri, (ii) dalle differenti modalità di fissaggio dei pezzi al telaio, e (iii) dalla finezza con cui va regolata la forza da applicare nell'esecuzione dell'azione di fissaggio.

Nell'ottimizzazione globale di processo vanno tenuti in considerazione i tempi e le modalità di adattamento e del cambio del manipolatore per adeguarlo alle tipologie dei pezzi via via da trattare. Infatti la tipologia del manipolatore (*end-effector*) posto all'estremità di un braccio robotico, dipende dal compito che esso deve attuare. Pertanto, per ottenere una soluzione complessivamente efficace, il sistema di manipolazione deve essere completamente integrato con i sistemi informatici aziendali, tenendo in considerazione sia la parte gestionale/logistica relativa alla sequenza di approvvigionamento dei pezzi, sia la parte del processo galvanico, che risulterebbe così completamente automatizzata.

Il problema dell'automazione del processo di carico e scarico di telai galvanici è già stato affrontato [Burgermeister, 2019; Asaishi *et al.*, 2021] ma le soluzioni proposte hanno prodotto risultati modesti, in quanto applicabili solamente in modalità semi-automatica per sistemi di produzioni ripetitive e di larga scala. Nel settore automobilistico, ad esempio, i pezzi di interesse sono molto differenti tra loro: tipicamente si tratta di maniglie, tasti, cornici decorative, stemmi, gruppo fari, calandre, ecc., praticamente qualsiasi componente dall'apparenza metallica che si osserva all'interno e all'esterno di una vettura. L'enorme varietà dei pezzi e la frequente produzione di nuove tipologie da sottoporre a trattamento non rende conveniente l'utilizzo di soluzioni preconfezionate che dipendono da forma, peso e dimensione del pezzo.

X-Loader 4.0 propone una soluzione innovativa sia sul versante robotico dei manipolatori specificatamente progettati sia su quello degli algoritmi di visione sviluppati per la guida alla movimentazione e collocazione degli oggetti.

In Figura 1 è mostrata una panoramica del sistema X-Loader 4.0 e alcuni dei componenti robotici, quali la coppia di bracci robotici collaborativi posizionati di fronte ai telai galvanici, due *end effector* progettati sia per l'interazione con i supporti che per la manipolazione dei pezzi da galvanizzare, e una telecamera lineare 3D con relativo supporto di movimentazione. Il sistema realizzato per il caricamento dei telai

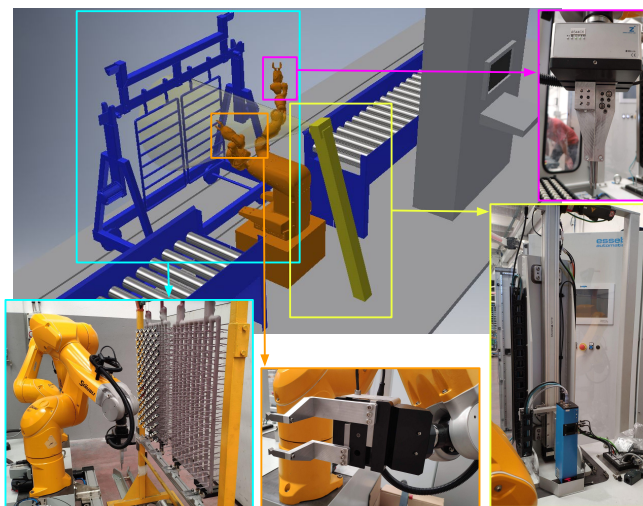


Figura 1: Sistema X-Loader 4.0 per il caricamento automatico di telai galvanici (riquadro azzurro) costituito da un modulo di visione artificiale (riquadro giallo) per l'analisi della scena 3D e da due bracci robotici per la manipolazione di pezzi da galvanizzare. I bracci robotici sono dotati di *end effector* (riquadri arancione e magenta) progettati per l'interazione con le punte di montaggio e con i pezzi da caricare sul telaio.

è completamente automatizzato e sfrutta tecniche di *computer vision* per l'analisi della scena tridimensionale. In Sezione 2 presentiamo una panoramica di questo sistema, mentre in Sezione 3 spieghiamo nel dettaglio come viene effettuata l'analisi visiva del telaio e la manipolazione robotica. La Sezione 4 conclude l'articolo.

2 Panoramica del sistema

La complessità del problema da risolvere è relativa alla difficoltà di emulare con un sistema robotico i seguenti movimenti che le mani di un operatore compiono per caricare il telaio: (i) raccolta di un piccolo pezzo da un contenitore compartimentato; (ii) avvicinamento, con pollice e indice della mano sinistra, delle punte di montaggio dei pezzi (come con una molletta da bucato); (iii) montaggio del pezzo con pollice e indice della mano destra; (iv) verifica del corretto serraggio. In fase di scarico dei pezzi, il processo procede in senso inverso ma richiede molta più cura in quanto la caduta o la non corretta manipolazione del pezzo lo può danneggiare e decretarne lo scarto.

Il sistema X-Loader 4.0 automatizza questa procedura per mezzo di due bracci robotici con *end effector* dedicati alla manipolazione dei supporti e dei pezzi da galvanizzare, che ricevono informazioni da un sistema di visione artificiale per l'analisi della scena. L'attuale versione di questo sistema prevede due azioni principali: il prelievo dei pezzi da un contenitore e il montaggio di questi sul telaio.

La prima azione si avvale di un modulo costituito da una telecamera lineare Cognex per l'acquisizione della scena e da un algoritmo di analisi e riconoscimento per determinare la posizione di ciascun pezzo all'interno contenitore in cui i pezzi sono disposti a matrice (Fig. 2). L'algoritmo sfrutta questa

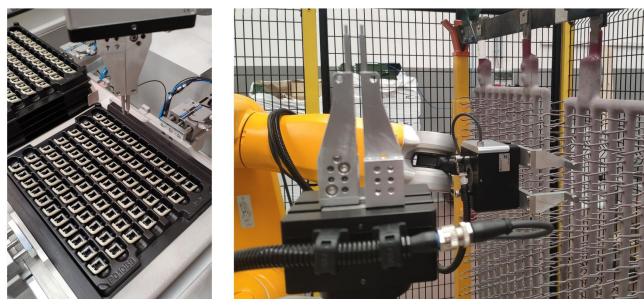


Figura 2: I pezzi da galvanizzare arrivano al robot tramite nastro trasportatore disposti all'interno di un contenitore organizzato a matrice (sinistra) per semplificare il prelievo tramite un *end effector* con due punte di presa (destra).

informazione per determinare la loro posizione e fornire al sistema robotico le coordinate spaziali del pezzo da prelevare. Un braccio robotico dotato di *end effector* con punte è incaricato del prelievo del pezzo.

La seconda azione impiega un modulo costituito da una telecamera lineare Sick per l'acquisizione 3D del telaio e un algoritmo che determina la posizione delle punte per il montaggio dei pezzi da galvanizzare. Un braccio robotico dotato di *end effector* con pinza è adibito a premere le punte di montaggio per avvicinarle tra loro, in modo da permettere l'inserimento del pezzo, e quindi a rilasciarle in modo da bloccare il pezzo dopo che questo è stato caricato dal braccio con cui collabora.

Mentre il primo modulo prevede l'analisi della scena in una configurazione controllata, il secondo modulo deve essere in grado di gestire telai potenzialmente diversi, che potrebbero non essere conformi ad un modello ideale, per esempio con punte di montaggio piegate o danneggiate a causa del loro ripetuto utilizzo. Tali punte vanno riconosciute in quanto non devono essere utilizzate per il caricamento.

Il modulo dedicato al montaggio dei pezzi su telaio è composto da un modulo di visione e da un modulo di manipolazione robotica. Il modulo di visione implementa un coordinatore per la gestione delle azioni di acquisizione, di elaborazione dei dati, e della comunicazione con il PLC del modulo robotico. Il diagramma a blocchi di questo modulo è illustrato in Fig. 3.

3 Analisi del telaio e manipolazione robotica

Definito un certo processo di galvanizzazione, vengono utilizzati telai adeguati di cui è noto il modello CAD. Essi sono pertanto identici tra loro e la collocazione delle punte idealmente sarebbe predeterminabile. Tuttavia, a causa del ripetuto utilizzo, telai dello stesso modello possono presentare differenze, tipicamente nell'orientamento delle punte di montaggio, che devono quindi essere localizzate dal sistema di visione. Siccome i pezzi che il robot deve manipolare possono avere dimensioni pari a qualche centimetro (~2-4cm), il sistema di rilevamento delle punte deve avere una accuratezza nell'ordine di qualche millimetro.

Acquisizione dati e pre-elaborazione. Il sistema di visione acquisisce il telaio tramite una telecamera lineare 3D, model-

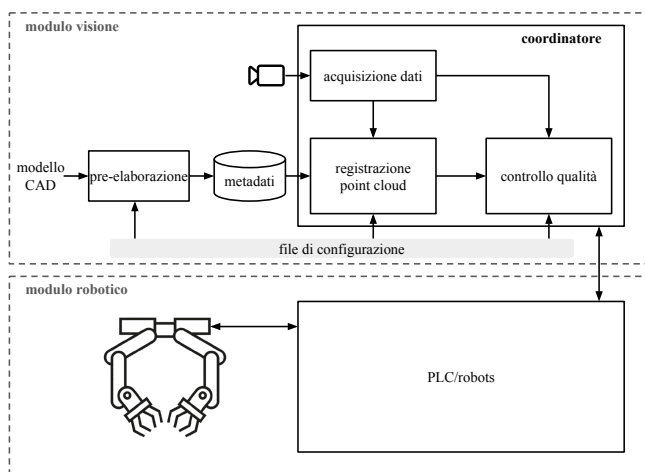


Figura 3: Il modulo di visione per il rilevamento della posizione delle punte di montaggio dei pezzi da galvanizzare utilizza il modello CAD del telaio come riferimento. Una telecamera lineare 3D acquisisce il telaio e produce una nuvola di punti. Il modello CAD e la nuvola di punti acquisita vengono registrati, e il modello CAD viene deformato per spiegare al meglio le misure del telaio acquisito. Il robot riceve le posizioni delle punte di montaggio organizzando così al caricamento del telaio. Una volta che il telaio è stato caricato, il modulo di visione viene utilizzato per verificare quanti pezzi sono stati caricati con successo.

lo Sick Trispector 1060 [SickTrispector, 2022]. La telecamera è montata su un binario motorizzato e movimentata automaticamente: un encoder misura il suo spostamento. Ad ogni passo, la telecamera acquisisce una linea/profilo di misure di profondità con una risoluzione di 0.43 mm/pixel. La scansione completa viene costruita andando a comporre la sequenza di linee acquisite sulla base dello spostamento misurato. Il rilevamento della posizione delle punte di montaggio è sfidante perché le punte sono di metallo e la loro dimensione ridotta. Abbiamo sperimentalmente osservato, infatti, che il segnale di profondità in corrispondenza delle punte è altamente rumoroso, in parte dovuto ad una riflettanza non Lambertiana del materiale e in parte alla dimensione che è di circa 1 mm. Abbiamo quindi sviluppato un algoritmo che sfrutta la disponibilità del modello CAD del telaio come informazione di riferimento per deformare la struttura geometrica locale delle punte in modo da spiegare al meglio le misure di profondità.

Per questioni di efficienza, il modello CAD viene pre-elaborato, quindi la procedura (i) segmenta ogni punta utilizzando la connettività della mesh del CAD, (ii) trova tutte le coppie di punte e (iii) genera una rappresentazione del modello in forma di nuvola di punti per semplificare il successivo processo di registrazione. Queste informazioni vengono salvate in memoria e utilizzate nelle fasi successive di elaborazione.

In Figura 4 è mostrato in (a), il modello CAD originale, in (b) la versione di questo nella forma di nuvola di punti e in (c) il risultato dell'acquisizione del telaio con la telecamera Sick. In (c) il telaio acquisito sembra essere diviso in due piani, ma il piano di sinistra è lo sfondo (*far-field*) registrato dal sensore Sick, che in fase di elaborazione verrà eliminato.

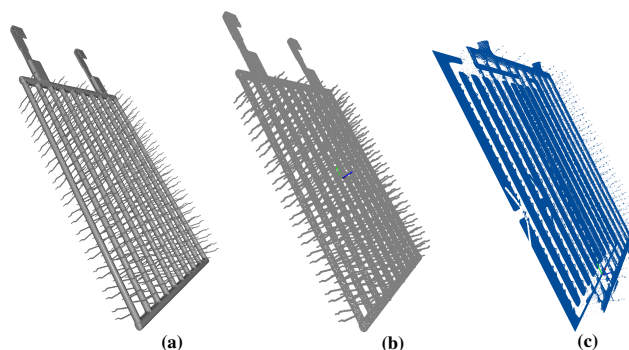


Figura 4: Rappresentazioni 3D del telaio: (a) modello CAD; (b) nuvola di punti generata dal modello CAD tramite campionamento uniforme dei punti; (c) nuvola di punti generata dall'acquisizione effettuata con il Trispector Sick.

Registrazione della nuvola di punti. La nuvola di punti del modello ideale di telaio (CAD) e la nuvola di punti del telaio acquisita con il sensore Sick giacciono in sistemi di riferimento diversi (Fig. 5a). Le coordinate vengono trasformate utilizzando (i) il calcolo del piano del telaio acquisito per un passo di pre-allineamento e (ii) il calcolo dei parametri di rototraslazione per l'allineamento finale (Fig. 5b). I parametri di rototraslazione sono stimati con l'algoritmo Iterative Closest Points (ICP) [Besl e McKay, 1992]. Viene quindi effettuata una ricerca di rumore di acquisizione, per esempio causato da sorgenti di luce esterna non controllata, e l'eventuale rumore rilevato viene rimosso. Viene controllato che le punte siano libere da eventuali pezzi già caricati e, se vengono rilevati dei pezzi, le punte che li supportano non vengono tenute in considerazione nei passi successivi. L'associazione tra le punte del modello ideale e quelle acquisite con il sensore Sick viene realizzata utilizzando un algoritmo di ricerca dei punti appartenenti ad una sfera 3D con un certo raggio, basato su KDTree [Muja e Lowe, 2009]. Le misure di ciascuna punta che sono state associate alla punta del modello ideale vengono utilizzate per deformare rigidamente la punta ideale. La funzione obiettivo per l'operazione di deformazione tende a minimizzare l'errore di distanza tra i punti delle due rappresentazioni delle punte coinvolte, ovvero quella ideale e quella acquisita. Questa procedura viene eseguita per ciascuna punta del modello ideale. Se questa operazione fallisce, la punta coinvolta viene segnalata come non valida, per esempio nel caso in cui fosse piegata o molto diversa da quella ideale (Fig. 5c), mentre per ogni coppia di punte valide viene calcolato il punto medio e inviata l'informazione al coordinatore (Fig. 5d).

Controllo della qualità. Le nuvole di punti di input (telaio vuoto e telaio carico) vengono pre-elaborate per eliminare il rumore di fondo di acquisizione. Queste nuvole di punti dovrebbero essere già essere allineate, in quanto acquisite con lo stesso sensore, ma si applica comunque una verifica di allineamento con ICP per prevenire possibili disallineamenti introdotti durante la fase di caricamento. In Fig. 6a sono mostrate le due nuvole di punti prima dell'allineamento. La nuvola di punti rossa è quella del telaio vuoto, la nuvola di punti blu è quella del telaio carico. Nella nuvola di punti blu si possono osservare quattro pezzi caricati. Fig. 6b mostra la

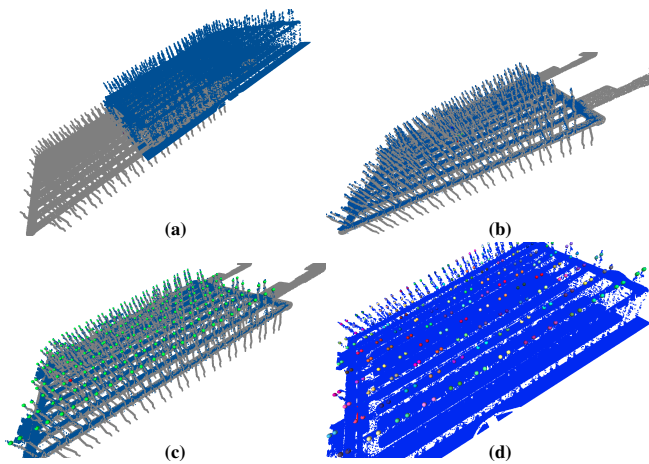


Figura 5: Nuvole di punti del modello ideale del telaio (grigio) e del telaio acquisito (blu) con sensore Trispector Sick (a) nei loro sistemi di riferimento iniziali e in (b) allineate utilizzando la stima del piano del telaio e ICP. In (c): punte rilevate correttamente (verde) e punta rilevata come di bassa qualità (rosso) in maniera automatica. In (d): coppie di punte rilevate automaticamente (rappresentate con lo stesso colore) visualizzate sulla nuvola di punti acquisita.

due nuvole di punti dopo l'allineamento. I punti visualizzati sono quelli sopravvissuti all'operazione di filtraggio di punti sparsi. Il punto medio di ciascuna coppia di punte viene utilizzato per la ricerca dei pezzi tramite sfere 3D con un certo raggio basato su KDTree. L'algoritmo verifica la presenza di punti all'interno di ciascuna sfera. La Figura 6c mostra queste sfere posizionate in corrispondenza di ciascun punto medio. All'interno di alcune sfere in primo piano si possono osservare i punti dei pezzi misurati. Per evitare di rilevare rumore, l'algoritmo conferma la presenza di un pezzo all'interno della sfera solo nel caso sia presente un numero di punti superiore ad una certa soglia. Il risultato di questa operazione viene registrato in un file a cui il coordinatore può successivamente attingere.

PLC/robot. Il coordinatore comunica con il PLC e il robot interagisce con le punte di montaggio e di manipolazione dei pezzi sulla base delle informazioni elaborate dal modulo di visione. La prima procedura è quella che, a fronte dell'invio da parte del coordinatore delle coordinate del pezzo da prelevare dal contenitore, il PLC attiva il braccio con end effector dedicato al prelievo. La seconda procedura è quella che, a fronte dell'invio da parte del coordinatore della coppia di punte da usare, il PLC attiva il braccio con end effector dedicato a premere tali punte per agganciare il pezzo prelevato. Questa combinazione di azioni si ripete per tutti i pezzi disponibili nel contenitore, agganciandoli alle punte del telaio nell'ordine dal basso verso l'alto e da destra verso sinistra.

4 Conclusioni

Abbiamo presentato il sistema X-Loader 4.0 che prevede l'utilizzo di due bracci antropomorfi per la movimentazione di articoli che devono subire un trattamento galvanico. Questo sistema è stato completamente implementato ed è ora in fase di collaudo finale presso la struttura di Phox Industrial Plants

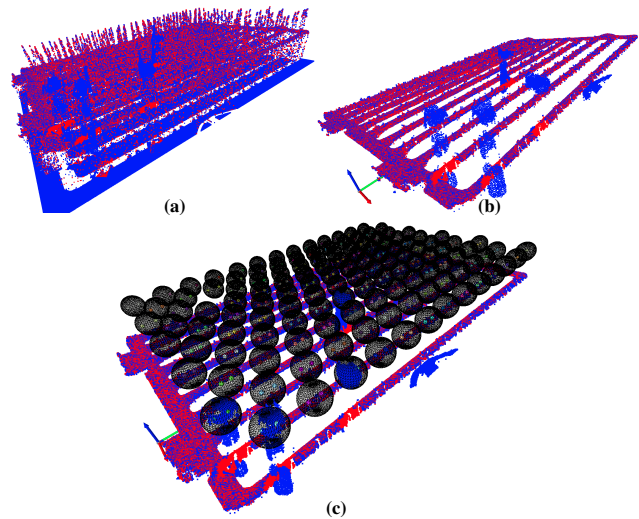


Figura 6: Visualizzazione delle nuvole di punti del telaio vuoto (rossa) e carico (blu) (a) prima dell'allineamento e (b) dopo l'allineamento calcolato con ICP. In (c): sfere utilizzate per la ricerca dei pezzi carichi e posizionate in corrispondenza del punto medio di ciascuna coppia di punte.

a Rovereto (TN). Le prime prove di collaudo hanno dato dei risultati incoraggianti in termini di robustezza e di ripetibilità delle operazioni di prelievo e montaggio pezzi.

All'indirizzo <https://youtu.be/S5x5Zr61by4> è disponibile un breve video che mostra i due bracci robotici collaborare nel caricamento del telaio con pezzi destinati al processo galvanico. I punti di destinazione sono calcolati dal sistema di visione. Si può osservare che una delle punte del telaio non viene utilizzata nella sequenza di caricamento in quanto è riconosciuta come danneggiata.

Il prossimo passo sarà quello di integrare il sistema in un impianto galvanico operativo nella catena di produzione.

Riferimenti bibliografici

- [Asaishi *et al.*, 2021] K. Asaishi, S. Miura, H. Chiba, e T. Miyoshi. Development of Rack Loading System for Plating Process. In *Proc. of IEEE International Symposium on System Integration*, Fukushima, JP, Jan 2021.
- [Besl e McKay, 1992] P.J. Besl e N.D. McKay. A method for registration of 3D shapes. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239–256, Feb 1992.
- [Burgermeister, 2019] D. Burgermeister. Automated Loading of Plating Racks. *IST International Surface Technology*, 12:42–43, Jul 2019.
- [Muja e Lowe, 2009] M. Muja e D.G. Lowe. Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration. In *Proc. of Vision Theory and Applications*, Lisboa, PT, Feb 2009.
- [SickTrispector, 2022] SickTrispector. <https://www.sick.com/it/it/visione-artificiale/3d-machine-vision/trispector1000/c/g389052>, 2022.