

ROBOT, VISIONE, MATEMATICA APPLICATA E UTENSILE LASER:



QUATTRO INGREDIENTI PER UN SISTEMA DI TEXTURING SUPERFICIALE INTELLIGENTE E ADATTATIVO

di Angelo Petrogalli

IL SISTEMA DI LAVORAZIONE PRESENTATO IN QUESTO ARTICOLO È UN CASO ESEMPLARE DI COME, MESCOLANDO QUESTI QUATTRO INGREDIENTI FONDAMENTALI E DOSANDONE LE POTENZIALITÀ, IL RISULTATO FINALE SIA UN SISTEMA PER TEXTURING LASER, I CUI PRINCIPALI PUNTI DI FORZA SONO LA PRODUTTIVITÀ, LA FLESSIBILITÀ RISPETTO AL MIX DI CARICO E ALL'ISOLA DI LAVORO, CHE POI EFFETTUERÀ IL PROCESSO, E LA ROBUSTEZZA RISPETTO ALLA VARIABILITÀ DELL'AMBIENTE. IN UN'UNICA PAROLA UNA PLURALITÀ DI SISTEMI ADATTABILI ALLE CONDIZIONI VARIABILI DELLO SPAZIO IN CUI SI TROVANO A OPERARE.

Robot, visione artificiale, matematica applicata e fascio laser sono i quattro ingredienti fondamentali che consentono di costruire sistemi di lavorazione flessibili, autonomi (non presidiati dall'uomo) e adattativi.

Questi quattro ingredienti, da sempre, costituiscono i tasselli fondamentali (o KET, ovvero key enabling technologies come piace chiamarle in Europa) con cui DS4 Laser Technology realizza soluzioni speciali per rispondere alle domande di tecnologia sofisticata dei

suoi interlocutori industriali, tra i quali possiamo annoverare, per tipo di business, alcuni tra i più prestigiosi e importanti players mondiali, ognuno di loro leader di settore, quali BMW, Luxottica, SAFILO, Barilla e Denso. Nel contesto italiano DS4 Laser Technology



1. a) Esempio di bascula di fucile decorata con un motivo faunistico e floreale; b) esempio di marchio inciso sulla bascula; c) esempio di incisione su otturatore (cortesia Benelli).

rappresenta una realtà rara in quanto è un'azienda orientata all'innovazione tecnologica continua, che è esercitata da un team di competenze multidisciplinari (dalla meccanica di precisione all'intelligenza artificiale, dai processi laser all'informatica industriale, dall'uso sofisticato della progettazione mediante elementi finiti alla matematica e statistica applicata).

Il sistema di lavorazione presentato in questo articolo è un caso esemplare di come, mescolando questi quattro ingredienti fondamentali e dosandone le potenzialità, il risultato finale sia un sistema per texturing laser, i cui principali punti di forza sono la produttività, la flessibilità rispetto al mix di carico e all'isola di lavoro, che poi effettuerà il processo, e la robustezza rispetto alla variabilità dell'ambiente. In un'unica parola una pluralità di sistemi adattabili alle condizioni variabili dello spazio in cui si trovano a operare.

I tre obiettivi del processo

Tutto ha inizio dalla domanda di tecnologia del committente del sistema: Benelli, azienda italiana di eccellenza produttrice di fucili da caccia e sportivi facente parte di Beretta, il

gruppo di riferimento e di prestigio in questo settore. Benelli è solita affiancare all'innovazione tecnologica delle soluzioni proposte un design distintivo, reso visibile e unico anche dalle decorazioni e dai loghi che accompagnano le parti metalliche dei fucili, principalmente bascula, otturatore e canna (come mostrano gli esempi di Figura 1).

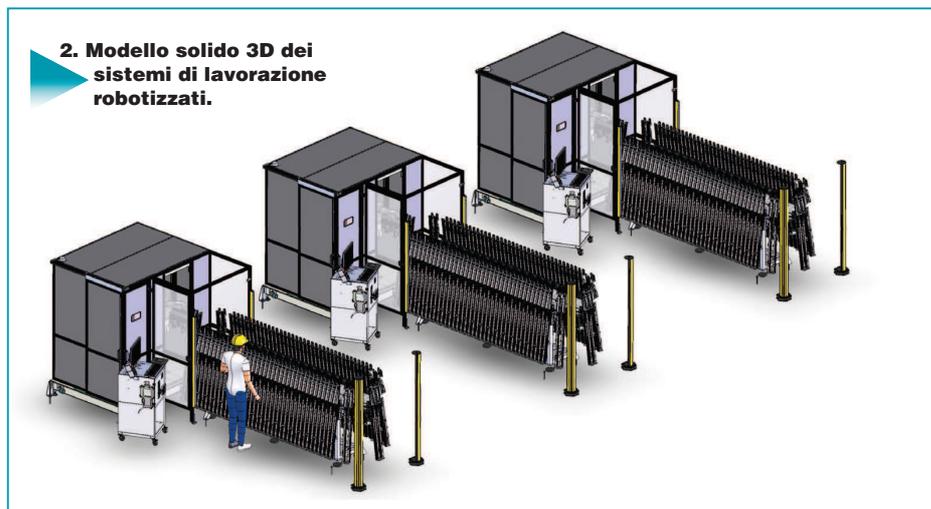
La lavorazione superficiale laser per ogni modello di fucile Benelli riguarda i tre suddetti componenti metallici fondamentali: otturato-

re, bascula e canna. La superficie in vista della bascula solitamente è decorata con motivi estetici e formali come quello in **Figura 1a** oppure con un marchio identificativo come l'esempio di **Figura 1b**. Otturatore e canna, invece, necessitano di essere marcati con codici identificativi delle tecnologie sviluppate e loghi aziendali (**Figura 1c**).

Tradizionalmente, in un'azienda a elevata intensità tecnologica come Benelli, le lavorazioni di decoro della superficie 3D della bascula o di scrittura della canna e otturatore avvengono per opera di un fascio laser pulsato opportunamente movimentato nello spazio da una testa di scansione.

A partire da questo contesto tecnologico, le richieste del committente riguardano un sistema automatico di lavorazione che gestisca: 1) il carico dei tre elementi da lavorare laser (la tripletta bascula, canna e otturatore che sarà poi assemblata in un modello di fucile), 2) l'esecuzione della lavorazione laser coerentemente con il disegno proposto dal designer, 3) lo scarico del componente per le lavorazioni successive. Il tutto in accordo

2. Modello solido 3D dei sistemi di lavorazione robotizzati.





3. Cella di texturing robotizzata con isola di movimentazione (sulla sinistra) e due dettagli della testa di scansione laser (a destra) e del sistema di visione (in basso)

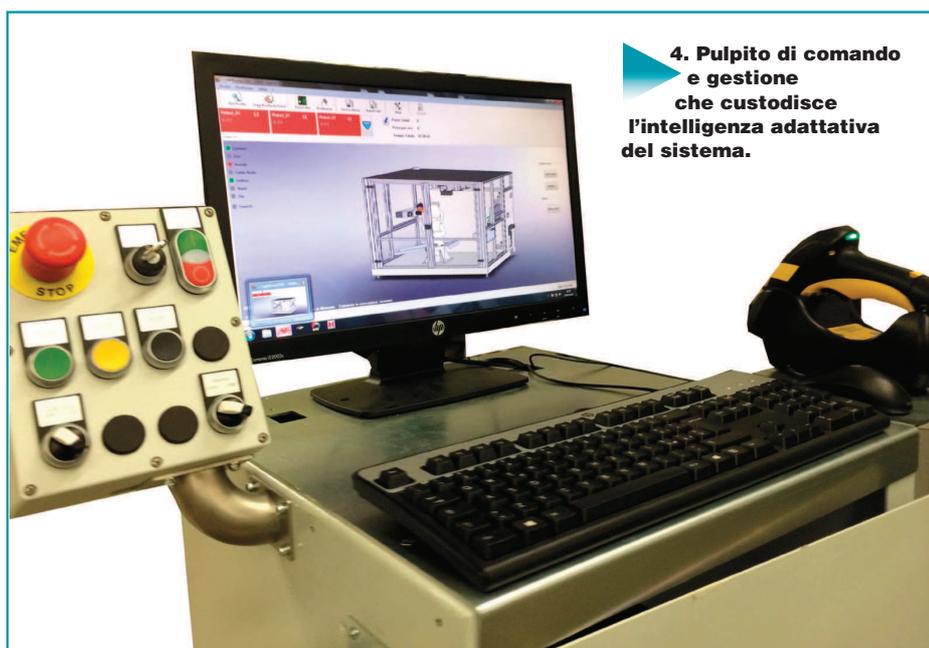
con il sistema di gestione della produzione, a oggi manuale, che lavora con lotti di piccola dimensione, variabili di volta in volta in funzione degli ordini.

Concept del sistema di lavorazione laser robotizzato

Il sistema di lavorazione robotizzato progettato per lo svolgimento delle tre funzioni elencate per la grande maggioranza dei modelli Benelli (54 modelli su 70 dell'attuale produzione) è illustrato dal concept di **Figura 2** e presentato in **Figura 3**. Nella

Figura 2 si distinguono tre celle di lavoro, ciascuna caratterizzata da: una stazione di carico costituita da un'isola rotante (un asse CNC controllato) che alloggia 282 diverse stazioni di carico (60 canne, 120 bascule e 102 otturatori), con gli otturatori disposti nella parte alta, le bascule prevalentemente nella parte centrale e le canne sul fondo della parete di carico; una cella di lavorazione

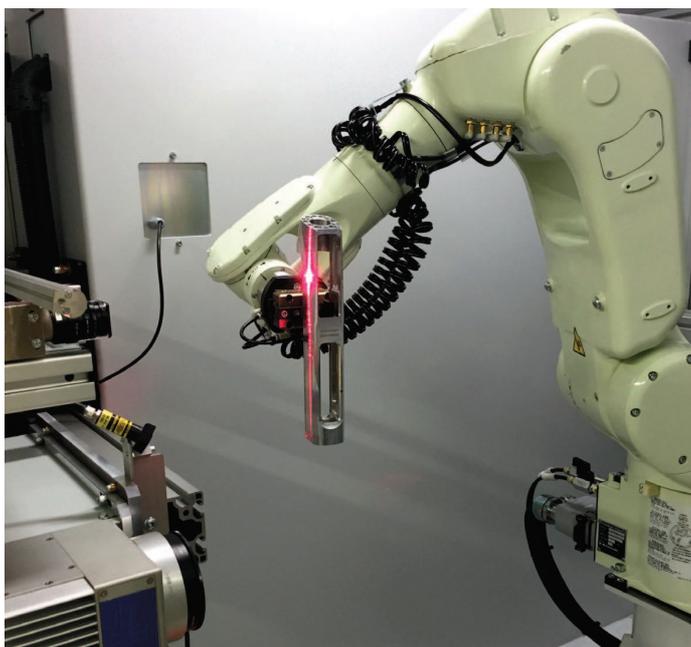
laser in cui il cerimoniere del protocollo di lavorazione è un robot antropomorfo a 6 assi che affacciandosi sull'isola di carico afferra il componente da lavorare, lo sottopone al sistema di visione, perché l'oggetto venga identificato e la sua forma rilevata, e lo sostiene affinché il fascio laser possa texturizzarlo. Completano la cella la testa di lavorazione laser, il sistema di visione 2D e 3D realizzato mediante telecamera con lama di luce e l'holder portapinzze per l'afferraggio del componente che deve essere lavorato.



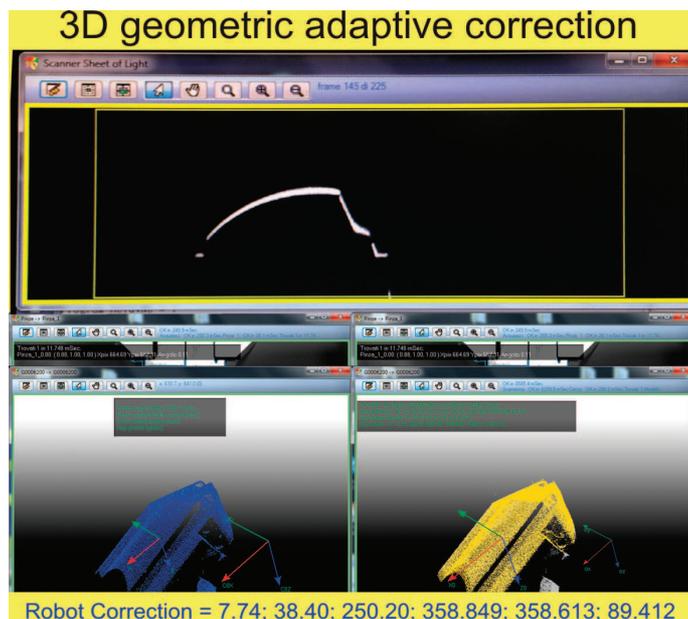
4. Pulpito di comando e gestione che custodisce l'intelligenza adattativa del sistema.

Intelligenza del sistema di lavorazione

Il terzo macrosistema della cella di lavorazione di Figura 1 è quello più discreto, perché si nota meno, ma è anche quello fondamentale, ed è costituito dal sistema di supervisione, controllo e gestione dell'isola di carico e della cella di lavorazione stessa (tutto contenuto nel pulpito di gestione e comando della cella illustrato in **Figura 4**). La logica di programmazione del comportamento del sistema è una rete neurale che si basa su modelli matematici e statistici di intelligenza artificiale che rendono il sistema adattativo e pronto a reagire alla variazione degli input che vengono dall'esterno.



5. Rilievo della geometria 3D della bascula mediante sistema di visione con lama di luce.



6. Rilievo del profilo dell'otturatore che deve essere lavorato dalla lama di luce (in alto), confronto tra modello 3D di un otturatore (sinistra) e nuvola di punti misurata dal sistema di visione (destra) con la definizione del nuovo sistema di riferimento.



7. Alloggiamento delle cinque diverse pinze di afferraggio sostituibili in automatico.

L'intelligenza artificiale regola tutti i comportamenti del sistema di lavorazione e della cella di carico. Le fasi in cui è particolarmente interessante descriverne l'azione riguardano: 1) la gestione della geometria 3D reale del componente da lavorare, 2) la selezione delle pinze di afferraggio del pezzo, 3) la gestione dei codici a barre dell'isola di carico.

Modello 3D del componente e geometria 3D reale

Quando il robot afferra un componente perché venga lavorato, il sistema di gestione della produzione che supervisiona i flussi gli ha già comunicato il codice dell'elemento che deve prelevare. Tuttavia, appena il componente viene prelevato e portato dentro la cella di lavorazione laser dal ro-

bot, la sua geometria 3D viene misurata dal sistema di visione grazie alla lama di luce che, percorrendola, la descrive (si veda la bascula oggetto di misura in **Figura 5**).

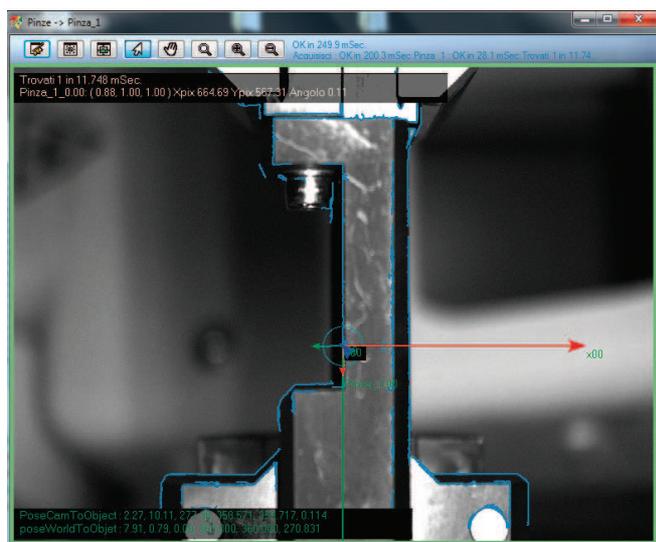
Il confronto tra il modello 3D del componente misurato e il suo rilievo eseguito dal sistema di visione consente al gestore di verificare innanzitutto la correttezza dell'operazione in corso e successivamente di modificare il sistema di riferimento secondo la posizione che l'oggetto occupa realmente nello spazio.

Tutto ciò a opera del sistema d'intelligenza neuronale che gestisce il rilievo della nuvola di punti trasmessa dalla telecamera.

Il punto di partenza è il rilievo del profilo 3D a opera della lama di luce (si veda la sezione del profilo bianco in **Figura 6**), seguito dal riconoscimento di features e dalla ricostruzione della geometria misurata e infine dal confronto con il modello (rispettivamente modello giallo e modello blu in **Figura 6**), che determina il reale sistema di riferimento nello spazio di lavorazione dell'oggetto.

APPLICAZIONI

8. Dettaglio della schermata del sistema di gestione delle pinze durante l'identificazione del sistema di riferimento.



9. Dettaglio dell'isola di carico che mostra esempi di otturatori, bascule e canne disposti nelle dime di carico con il corrispondente codice indicante la stazione di carico, la famiglia (tipo di otturatore, bascula e canna) e la singola posizione.

10. a) Dima per otturatore con codice a barre identificativo della stazione, del tipo di elemento e della posizione; b) dima con otturatore alloggiato.



Selezione della pinza di afferraggio

Anche nella gestione dell'end effector del robot, ovvero le pinze di afferraggio del componente, il contributo del sistema di gestione e dell'intelligenza artificiale è fondamentale. La cella di lavorazione laser alloggia cinque portapinze (mostrati nella **Figura 7**). Con cinque tipologie diverse (per interni ed esterni) il robot riesce ad afferrare in maniera concorde alla lavorazione che dovranno subire tutte le bascule, gli otturatori e le canne caricate sull'isola di carico. Il sistema neuronale guida la scelta della pinza (le cui regole riguardano sia la conoscenza delle aree che dovranno essere lavorate, per-



11. Esempi di bascula, otturatore e canna marcati con logo e codice identificativo.

Prestazione del sistema di lavorazione

Il risultato subito apprezzabile della cella di lavorazione è la qualità estetica della lavorazione superficiale 3D e delle marcature su superficie di geometria e curvatura variabili ottenibile con l'unità di lavorazione laser del sistema (si vedano gli esempi di **Figura 11**). La lavorazione è eseguita con un fascio laser impulsato (sorgente laser IPG pulsata, con impulsi programmabili da 4 a 256 nanosecondi) che viene movimentato a elevatissima velocità (fino a 4.000 mm/s) sulla superficie da lavorare, grazie a una testa di scansione 2D (ma predisposta per operare anche in 3D) interamente progettata e realizzata da DS4 Laser Technology, con diametro di spot pari a circa 50 micron.

ché l'afferraggio non le copra, ma anche gli ingombri per evitare le collisioni). La pinza inoltre viene a ogni cambio ri-misurata dallo stesso sistema di visione con lama di luce per verificarne la sua corretta selezione e identificare il sistema di riferimento reale (come mostra l'esempio di **Figura 8**). In questo modo, il sistema si adatta, scegliendo di volta in volta la pinza più opportuna e cautelandosi contro eventuali collisioni.

Gestione dei codici d'identificazione del componente

Il supervisore del sistema gestisce il flusso nel sistema dei diversi componenti che andranno a costituire il fucile: otturatore, bascula e canna. La gestione diviene completamente automatizzata, una volta che l'operatore ha caricato i singoli componenti sull'isola (in **Figura 9** una porzione dell'isola di carico). Durante l'operazione di carico l'operatore svolge pochissime funzioni. La postazione su cui caricare è libera, a sua scelta tra quelle disponibili per le varie classi. Tuttavia nel posizionare l'elemento sulla sua dima (una dima in Delrin®, lavorata con precisione, in grado di ospitare tutte le tipologie di componente per famiglia) l'operatore deve associare (mediante una pistola di lettura automatica) il codice a barre che identifica il componente (leggibile dalla cesta in cui è contenuto) alla



12. Esempi di lavorazione texturing sulle superfici delle bascule con motivi faunistici (a) e floreali (b).

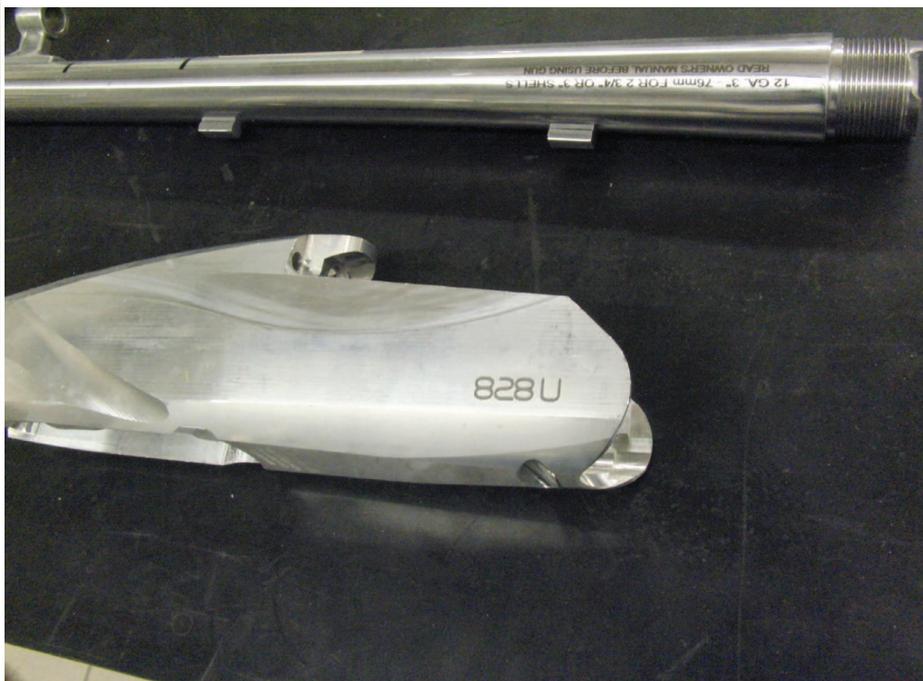
sua posizione sull'isola di carico (il codice a barre di **Figura 10**).

In questo modo, posizione sul caricatore e componente specifico sono univocamente accoppiati. Il resto viene regolato dal sistema di gestione della produzione (che stabilisce all'interno del lotto le famiglie da produrre e la sequenza di lavoro) e dal sistema di controllo della cella di lavorazione (che comanda il robot, la selezione delle pinze di afferraggio e la tipologia di lavorazione), il tutto presidiato dal sistema di visione artificiale che esegue gli opportuni controlli per verificare che l'oggetto "in mano" al robot sia quello previsto, per evitare la collisione e per riferire l'oggetto reale in presa.

Grazie al software di elaborazione CAD/CAM integrato con il sistema (sempre di produzione DS4 Laser Technology) si possono processare anche contemporaneamente file sia di tipo grafico che vettoriale.

Una qualsiasi bitmap disegnata dagli artisti e dai designer che collaborano con Benelli diventa un motivo estetico che ricopre la bascula (si veda la **Figura 12**) o l'incisione di scritte e loghi anche su superfici curvilinee (come la bascula di **Figura 13**).

Tuttavia le prestazioni maggiori del sistema di lavorazione sono quelle quantificabili da indicatori misurabili, quali il tempo di set-up macchina (completamente azzerato grazie alle informazioni digitali di processo, che poi



13. Dettagli della marcatura su superficie piana (bilancia in basso) e superficie circolare (canna in alto).

lati dal comportamento del sistema stesso. Questa ultima possibilità riveste notevole interesse perché permette di poter gestire l'intera produzione sulle tre isole di lavorazione in maniera indipendente da quale isola stia effettivamente realizzando la lavorazione. Grazie, infatti, all'intelligenza artificiale, che regola l'intera unità di lavorazione, e alla riferibilità reale del componente in lavorazione, i risultati ottenibili su una stazione sono riproducibili e ugualmente ottenibili sulle altre due. In questo modo il sistema software adattativo può, in tempo reale, commutare la lavorazione da una stazione all'altra, sia per esigenze ordinarie sia per rispondere a eventuali stop non previsti di una delle tre unità.

Per questa ragione la prestazione più importante del sistema rimane la sua capacità, grazie a un cervello regolato dall'intelligenza artificiale e a un hardware di qualità e avanzato, di adattarsi e rispondere alla variabilità; sia essa quella imposta dal supervisore che gestisce il flusso di lavorazione, sia essa quella imprevedibile e accidentale propria

vengono integralmente adattate in modo automatico) e il tempo complessivo di carico, lavorazione e scarico; che è inferiore ai tempi attualmente ottenibili con sistemi meno automatizzati.

Risultato ancor meno tangibile, ma altrettanto significativo, infine, è la potenzialità offerta dall'automazione e dalla digitalizzazione di tutte le informazioni, che regolano il funzionamento della cella di lavoro e il suo attraversamento a opera dei componenti lavorati. La **Figura 14** mostra un esempio della schermata proposta dal sistema di gestione della cella di texturizzazione laser. Nel sistema di gestione tutte le informazioni relative al funzionamento e all'attraversamento dei prodotti sono registrate e modificate in presa diretta, così che vengano confrontate con la programmazione del flusso di lavorazione e siano a disposizione del gestore del sistema che in tempo reale li può modificare.

Inoltre, vengono registrate tutte le anomalie del sistema cosicché gli interventi ordinari e straordinari di manutenzione siano rego-

Lotto	Master	Data Inizio	Data Fine	Durata	Pezzi per ora	Pezzi totali
G0006200 2015-04-17 16-21	Robot_01	17/04/2015 16:21:45	17/04/2015 16:22:40	00:00:55	0	0
G0006200 2015-04-17 16-22	Robot_01	17/04/2015 16:22:44	17/04/2015 17:15:56	00:53:11	0	0
G0006200 2015-04-17 17-23	Robot_01	17/04/2015 17:23:11	17/04/2015 17:28:42	00:05:30	0	0
G0006200 2015-04-17 17-28	Robot_01	17/04/2015 17:34:14	17/04/2015 17:57:13	00:22:58	0	0
G0006200 2015-04-17 17-28	Robot_01	20/04/2015 09:25:58	20/04/2015 10:33:58	01:08:00	0	0
G0006200 2015-04-17 17-28	Totale	17/04/2015 17:34:14	20/04/2015 10:33:58	01:30:59	0	0
G0560800 2015-04-17 17-15	Robot_01	17/04/2015 17:17:07	17/04/2015 17:23:08	00:06:00	0	0
G0541201 2015-04-20 10-33	Robot_01	20/04/2015 10:34:25	20/04/2015 11:48:50	01:14:25	0	0
G0541201 2015-04-20 11-48	Robot_01	20/04/2015 11:48:54	20/04/2015 14:38:42	02:49:47	0	0
MD029600 2015-04-20 14-38	Robot_01	20/04/2015 14:38:57	20/04/2015 15:01:38	00:22:41	0	0
MD029600 2015-04-20 15-01	Robot_01	20/04/2015 15:02:04	20/04/2015 15:02:28	00:00:24	0	0
MD029600 2015-04-20 15-02	Robot_01	20/04/2015 15:05:52	20/04/2015 15:14:59	00:09:07	0	0
MD029600 2015-04-20 15-14	Robot_01	20/04/2015 15:16:19	20/04/2015 18:56:32	03:40:13	0	0
MD029600 2015-04-20 15-14	Robot_01	21/04/2015 09:48:08	21/04/2015 09:56:41	00:08:33	0	0
MD029600 2015-04-20 15-14	Robot_01	21/04/2015 10:01:45	21/04/2015 10:08:53	00:07:07	0	0
MD029600 2015-04-20 15-14	Robot_01	21/04/2015 10:09:39	21/04/2015 12:35:59	02:26:19	0	0
MD029600 2015-04-20 15-14	Totale	20/04/2015 15:16:19	21/04/2015 12:35:59	06:22:13	0	0
G0006200 2015-04-21 12-35	Robot_01	21/04/2015 12:36:03	21/04/2015 12:42:12	00:06:09	0	0
G0253800 2015-04-21 14-28	Robot_01	21/04/2015 14:29:04	21/04/2015 15:14:09	00:45:04	0	0
G0253800 2015-04-21 14-28	Robot_01	21/04/2015 15:17:49	21/04/2015 15:18:36	00:00:47	0	0
G0253800 2015-04-21 14-28	Robot_01	21/04/2015 15:18:47	21/04/2015 16:28:54	01:10:06	0	0
G0253800 2015-04-21 14-28	Totale	21/04/2015 14:29:04	21/04/2015 16:28:54	01:55:58	0	0

14. Esempio dell'informazioni disponibili al supervisore del sistema riguardanti la gestione della cella di lavorazione.

degli ambienti di lavorazione reali, garantendo lo stesso risultato indipendentemente della unità laser che sta in quel momento processando il job.